Pavel Satrapa

Čtvrté vydání

IPv6

Internetový protokol verze 6

Edice CZ.NIC

IPv6
Pavel Satrapa

Vydavatel:
CZ.NIC, z. s. p. o.
Milešovská 5, 130 00 Praha 3
Edice CZ.NIC
www.nic.cz

4. aktualizované a rozšířené vydání, Praha 2019
Kniha vyšla jako 22. publikace v Edici CZ.NIC.
ISBN 978-80-88168-46-1

CZ.NIC | SPRÁVCE DOMÉNY CZ

ISBN 978-80-88168-46-1

— Pavel Satrapa

IPv6

Internetový protokol verze 6

— Edice CZ.NIC

Předmluva vydavatele

Vážení čtenáři,

dostává se vám do rukou v pořadí již čtvrté aktualizované vydání knihy o internetovém protokolu IPv6 a jeho širším využití. Aktualizace knihy se nemohl chopit nikdo povolanější než Pavel Satrapa, který svým nenapodobitelným vysoce čtivým způsobem informace o IPv6 protokolu občerstvuje po 8 letech.

První vydání této knihy spatřilo světlo světa již v roce 2002 a od té doby se nasazení protokolu IPv6 v počítačových sítích neustále rozšiřuje. Bohužel ne tak rychle, jak se očekávalo. Sdružení CZ.NIC se již od roku 2010 snaží, ve spolupráci s registrátory a provozovateli webhostingu, o rozšiřování podpory IPv6 protokolu u vybraných internetových služeb. Nasazení IPv6 protokolu tak v rámci české národní domény v roce 2018 překročilo u webových serverů hranici 31 %, u e-mailových serverů 19 % a v případě DNS serverů dokonce 75 %. Současně se sdružení CZ.NIC podílí na prosazování IPv6 ve státní správě, a to jak v rámci evropského projektu GEN6, tak i v úzké spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu. Otázkou zůstává, jak moc přispívá k zavádění IPv6 ve veřejné správě usnesení vlády přijaté na konci roku 2013, které vyžaduje zahrnout požadavek na podporu IPv6 do všech relevantních výběrových řízení i jako nedílnou součást požadavků na všechny nově podpořené projekty.

Na kurzu IPv6 pro pokročilé, který pořádá Akademie CZ.NIC a jehož jsem lektorem, se vždy na začátku ptám uchazečů, jaké mají s IPv6 protokolem zkušenosti. Většina z nich přichází na tento pokračovací kurz s tím, že IPv6 již nasadili a používají. Chtějí se dozvědět, jaké jsou další možnosti použití nejen v lokálních sítích a jak co nejvíce přesvědčit uživatele o výhodách nastupujícího protokolu. Právě edukace běžných uživatelů je při jeho rozšiřování nejsložitější disciplínou. Většina z nich v tom nevidí zásadní přínos a neuvědomuje si, že se změny týkají i jich.

Věřím, že při čtení této výborné knihy strávíte příjemné chvíle, získáte nové informace a podaří se vám zase o kousek posunout rozšíření IPv6 protokolu v České republice.

Václav Steiner
Praha, duben 2019

Předmluva

Předmluva

Síťové protokoly se dělí na dvě kategorie: ty, které byly za standard oficiálně prohlášeny, a ty, které se jím doopravdy staly. IP, nosný protokol Internetu, nepochybně patří do druhé skupiny. Jednoznačně ovládl pole a představuje dnes standardní cestu ke vzájemné komunikaci počítačů.

Své popularitě však vděčí i za určité problémy, které se objevily při masovém nasazení. Tím nejpalčivějším je nedostatek adres, který pociťují především noví uživatelé (staří mazáci mají nahrabáno). Proto se od první poloviny devadesátých let vyvíjí jeho nástupce – IP verze 6.

Nový protokol si klade za cíl nejen zvětšit adresní prostor, ale i přidat některé pokročilé vlastnosti, které posunou možnosti Internetu zase o kus dál. Ovšem nelze zamlčovat, že se prosazuje mnohem pomaleji a bolestněji, než se původně očekávalo. Poslední dobou se situace konečně obrací k lepšímu – po nasazení velkými hráči (Google, Facebook a další) začal podíl IPv6 na celkovém provozu konečně růst. Současná zhruba čtvrtina má sice ke 100,% daleko, ale protokol už hraje významnou roli.

Cílem této knihy je popsat, jak IPv6 vypadá a jak funguje. Snažil jsem se velmi zevrubně vysvětlit principy a mechanismy, na kterých stojí. Najdete zde formát datagramu, adresování, automatickou konfiguraci, směrování i pokročilé prvky, jako je IPsec či podpora mobilních zařízení. Nemalý prostor jsem věnoval také metodám, které mají umožnit hladký přechod od staré verze protokolu k nové a které tak dlouho drhly.

Tyto teoretické pasáže jsou shromážděny v první části knihy. Druhá se věnuje praxi – jak nakonfigurovat IPv6 ve vybraných operačních systémech či směrovačích a jak používat některé programy s jeho podporou.

Přestože byl základ IPv6 položen v polovině 90. let, protokol se stále vyvíjí. Přesněji řečeno jeho jádro je stabilní, ale váže se k němu celá řada doprovodných mechanismů vytvářejících košatý strom vzájemně souvisejících protokolů, na němž stále raší nové listy a nahrazují své předchůdce. V posledních letech už se spíše pilují detaily, odstraňují objevené problémy a upřesňují nejasná místa.

Nesnažil jsem se popsat vše do posledního detailu. U složitějších protokolů (jako je OSPFv3) by takový přístup vydal na samostatnou knihu. V těchto případech jsem dal přednost popisu základních prvků a principů, na kterých daný mechanismus stojí, abyste pochopili jeho funkci. Zajímají-li vás detaily, jako jsou přesné formáty zpráv, podmínky pro jejich odesílání, přesná definice chování účastníků komunikace a podobně, budete se muset obrátit na RFC a další dokumenty.

Přesto si troufám tvrdit, že zejména u komplikovanějších témat, jako je IPsec, mobilita či některé směrovací protokoly, jde kniha do výrazně větší hloubky, než je v kraji zvykem. Dostupné publikace

o IPv6 tyto oblasti zpravidla jen naznačují. Nevím o tom, že by byl (a to v celosvětovém měřítku) k dispozici text s takto uceleným a aktuálním popisem problematiky IPv6.

První vydání této knihy vyšlo v roce 2002 u společnosti Neocortex, s. r. o., druhé vydal o šest let později CZ.NIC jako první publikaci své nově zahájené *Edice CZ.NIC*. Od třetího vydání z roku 2011 uplynulo osm let, během nichž se protokol konečně začal prosazovat a používat v praxi.

Vyčerpání IPv4 adres se stalo realitou, jejich nedostatek omezuje poskytovatele připojení i služeb a vynucuje si komplikovaná a křehká řešení. V porovnání s tím pak nasazení IPv6 zhusta vychází jako jednodušší a levnější varianta. Datová centra či páteřní sítě postavené důsledně na IPv6 se z teoretických studií přesouvají do reality.

Nejvýznamnější změnou od minulého vydání je revize základní specifikace IPv6 v RFC 8200. Pro uživatele je viditelnou novinkou algoritmus Happy Eyeballs, který se snaží, aby problémy jednoho protokolu měly minimální dopad. Podstatně se také změnila scéna přechodových mechanismů – od snahy propojovat ojedinělé ostrůvky IPv6 v IPv4 Internetu jsme se přesunuli k odstraňování IPv4 z částí sítě a hledání řešení, jak je dopravit zákazníkům, když páteř podporuje jen IPv6. Celý text jsem důkladně aktualizoval a doplnil.

Text předpokládá, že čtenář má jisté základní znalosti o IPv4 a fungování Internetu. Pravděpodobně byste se obešli i bez nich, ale pochopení některých pasáží by se tak o poznání ztížilo.

Děkuji všem, kteří přispěli ke vzniku tohoto textu. V první řadě své ženě Marcele a celé rodině, která mi jako vždy poskytla zázemí pro práci a měla se mnou trpělivost. Dále si speciální poděkování zaslouží kolegové, jejichž poznámky a rady pomohly dovést text do konečné podoby. Ke čtvrtému vydání významně přispěli Ondřej Caletka a Radek Zajíc, k těm přechozím zejména Luboš Pavlíček, Pavel Moravec, Petr Adamec, Stanislav Petr a Emanuel Petr.

Pavel Satrapa
Liberec, březen 2019

Obsah

Úvod

1 Úvod

Internet Protocol verze 6 (IPv6) se má stát následníkem nosného protokolu současného Internetu, kterým je Internet Protocol verze 4 (IPv4). V historické literatuře bývá označován též jako *IP Next Generation (IPng)*.

1.1 Vlastnosti a vývoj

Jeho kořeny sahají do začátku devadesátých let, kdy začalo být zřejmé, že se adresní prostor dostupný v rámci IPv4 rychle tenčí. Tehdy vypracované studie ukazovaly, že s perspektivou přibližně deseti let dojde k jeho úplnému vyčerpání. Jelikož na řešení problému bylo k dispozici poměrně dost času, rozhodlo se IETF navrhnout zásadnější změnu, která by kromě rozšířeného adresního prostoru přinesla i další nové vlastnosti.

U kolébky IPv6 proto stály následující požadavky:

- rozsáhlý adresní prostor, který vystačí pokud možno navždy,
- tři druhy adres: individuální (unicast), skupinové (multicast) a výběrové (anycast),
- jednotné adresní schéma pro Internet i vnitřní sítě,
- hierarchické směrování v souladu s hierarchickou adresací,
- zvýšení bezpečnosti (zahrnout do IPv6 mechanismy pro šifrování, autentizaci a sledování cesty k odesilateli),
- podpora pro služby se zajištěnou kvalitou,
- optimalizace pro vysokorychlostní směrování,
- automatická konfigurace (pokud možno plug and play),
- podpora mobility (přenosné počítače apod.),
- hladký a plynulý přechod z IPv4 na IPv6.

Jak je vidět, cíle nebyly skromné. Chopili se jich především Steven Deering a Robert Hinden, kteří mají největší podíl na vzniku nového protokolu. Jejich snaha vyústila koncem roku 1995 ve vydání sady RFC definujících základ IPv6. Jedná se o RFC 1883: *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification* a jeho příbuzné.

Oficiální specifikace protokolu tedy byla na stole a mohlo se začít s implementováním a uváděním do života. Jenže nezačalo. IPv6 bylo příliš ožehavou a nejistou půdou, zatímco na poli IPv4 čekaly zisky *teď hned*. Většina firem se proto věnovala raději snaze o rozvoj IPv4, než aby se angažovala v IPv6, protože návratnost investic byla v prvním případě rychlejší.

Mimo jiné se podařilo otupit ostří největšího nože na krku IPv4 – nedostatku adres. Začalo se používat beztřídní adresování CIDR, zpřísnila se kritéria pro přidělování síťových adres a byly zavedeny mechanismy pro překlad adres (NAT, viz níže).

Tím IPv6 přišlo o svou hlavní hnací sílu a jeho nasazení se začalo odkládat. Aby se dokázalo prosadit do praxe, musí nabídnout nějaké zásadní výhody. Ovšem všechny jeho lákavé vlastnosti byly mezitím implementovány i pro IPv4. Pravda, ne vždy tak elegantně a zdaleka ne každá implementace je podporuje, ale principiálně jsou k dispozici. A jak již bylo řečeno, většina hráčů na tomto poli preferuje rychlé a velké zisky před vzdálenými a nejistými.

To neznamená, že by se vývoj IPv6 zastavil. Koncem roku 1998 vyšla *revidovaná sada RFC* dokumentů s definicemi základních protokolů a služeb v čele s RFC 2460. Postupně jsou aktualizovány či doplňovány další kousky této velké mozaiky – poslední verze adresní architektury pochází z roku 2006, podpora mobility byla dokončena v roce 2004 (a revidována v roce 2011), o rok později došlo k revizi bezpečnostních prvků … V roce 2017 už bylo různých změn a doplňků tolik, že v RFC 8200 vyšla nová základní definice IPv6.

Navíc – a to je nejdůležitější – se začaly množit a zlepšovat implementace v nejrůznějších operačních systémech. Také řada aplikací dnes již podporuje nový protokol.

Na vývoji IPv6 a jeho komponent se podílela a podílí celá řada pracovních skupin IETF. Přehled těch, které se přímo zabývají IPv6 a jeho součástmi, uvádí tabulka 1.1. Kromě nich ovšem protokol prosakuje i do činnosti celé řady dalších. Přehled pracovních skupin a veškeré jejich dokumenty najdete na adrese:

🔗 https://datatracker.ietf.org/wg/

Priority pro nasazení se časem měnily. Tlak nedostatku adres na určitou dobu polevil a do popředí se začaly drát jiné přednosti IPv6, zejména podpora mobility. Při rychle rostoucím zájmu o nejrůznější přenosná zařízení a jejich zapojení do Internetu se právě jejich podpora, která je v IPv6 výrazně lepší než u jeho předchůdce, zdála být rozhodujícím argumentem.

Ovšem nelze nepřiznat, že trvalo bezmála deset let, než se podařilo dokončit specifikaci mobilního IPv6 – RFC 3775: *Mobility Support in IPv6* vyšlo v roce 2004. Po celou tu dobu byla podpora mobility všude vyhlašována za povinnou součást IPv6 a jeden z důvodů, proč přejít na nový protokol. Právě rozpor mezi slibnými vlastnostmi na papíře a tristním stavem implementací, v nichž pokročilé prvky často chyběly, odvedl IPv6 medvědí službu.

Jenže rok se s rokem sešel a adresní prostor vrátil úder, a to rovnou KO. Internet si sice našel způsob, jak zpomalit jeho konzumaci, ale i ten má své meze. Obrázek 1.1 ukazuje historický vývoj počtu osmibitových prefixů přidělených jejich centrálním správcem IANA. Je v něm pěkně vidět,

aktivní	
6man	údržba a aktualizace specifikací
v6ops	provoz IPv6 sítí
lpwan	IPv6 v nízkonapěťových dálkových sítích
6lo	IPv6 v sítích s omezenými zdroji
6tisch	IPv6 v režimu TCSH sítí IEEE 802.15.4e
uzavřené	
ipv6	(původně *ipng*) vytvořila většinu základních specifikací
mip6	mobilita
mext	rozšíření mobility
multi6	multihoming
shim6	multihoming
6renum	přeadresování IPv6 sítí
6bone	vytvoření sítě *6bone*
6LoWPAN	IPv6 v nízkonapěťových osobních sítích

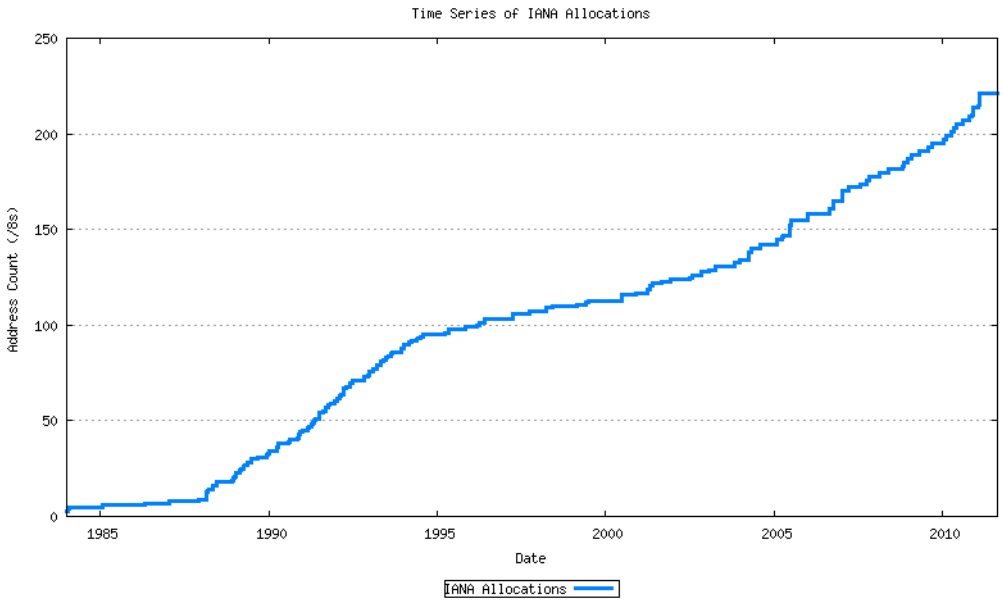
Tabulka 1.1: Pracovní skupiny IETF zapojené do vývoje IPv6

jak opatření z poloviny 90. let razantně snížila tempo spotřeby, proč prognózy kolem roku 2000 ukazovaly dostatek adres na 20 let a jak později začala křivka zase ošklivě stoupat.

Počátkem roku 2019 se nacházíme v situaci, kdy je vyčerpána centrální zásoba IANA. Regionální registry (RIR) dnes fungují v úsporném režimu, kdy zbývající hrstku adres alokují po velmi malých kouscích. Tabulka 1.2 obsahuje data, kdy jednotlivé registry začaly rozdělovat poslední osmibitový prefix a vstoupily tak do úsporného režimu.

Vyčerpání registru neznamená, že v dané oblasti nelze získat IPv4 adresu, ale místní poskytovatelé Internetu (v roli lokálních registrů, LIR) už nedostanou žádný větší blok. V režimu po vyčerpání regionální registry přidělují jen velmi omezené množství adres, například v Evropě lze od RIPE NCC získat maximálně 1024 IPv4 adres. Oficiálně jsou určeny pro přechodové mechanismy.

Jak rychle lokální registry vyčerpají své zásoby IPv4 adres závisí na tom, kolik si jich stačily nashromáždit, jakým tempem roste jejich zákaznictvo a která úsporná opatření nasadí. Zároveň se



Obrázek 1.1: Spotřeba IPv4 adres (zdroj: *ipv4.potaroo.net*)

IANA	3. února 2011
APNIC	19. dubna 2011
RIPE NCC	14. září 2012
LACNIC	10. června 2014
ARIN	24. září 2015
AFRINIC	16. ledna 2017

Tabulka 1.2: Vyčerpání IPv4 adres

všeobecně rozmáhá obchodování s adresami, jehož některé případy již proběhly s nemalou mediální pozorností[1]. IPv4 adresy z pohledu provozovatelů sítí a zákazníků nejsou a hned tak nebudou zcela nedostupné, ale přístup k nim se postupně komplikuje a prodražuje.

Opatření k úspoře adres navíc porušují nejzákladnější principy Internetu – možnost přímé komunikace libovolných dvou zařízení. Začaly se totiž masivně šířit nástroje pro překlad adres – *Network Address Translation, NAT*. Fungují tak, že přístupový směrovač sítě mění IP adresy paketů, které jím procházejí ze sítě do Internetu a naopak. Díky tomu celá koncová síť vystačí s jednou jedinou veřejnou IP adresou, ale počítače uvnitř nejsou z vnějšího Internetu adresovatelné. To znamená, že komunikace se dá zahájit jen směrem zevnitř sítě ven.

Zavedením NAT se ztrácí přímočarost komunikace. Vstupuje do ní nový prostředník, který představuje citelnou překážku. Zcela protichůdnou tendencí je rostoucí popularita služeb pro přímou komunikaci mezi uživateli (Skype a podobné komunikátory, videokonference, síťové hry, peer-to-peer sítě a další). Potřebují vytvářet přímá spojení mezi komunikujícími zařízeními. Leží-li každý v jiné NATované síti, není jak je navázat. Vymýšlejí se tedy různé berličky, kontaktní servery s veřejnými adresami, na nichž se mohou neveřejně adresovaní klienti spojit, komunikace přes prostředníky a podobně. Tunelovací mechanismus Teredo popsaný na straně 286 je pěknou ukázkou, jakou lahůdkou je život v síti protkané NATy.

Jako lék nabízí IPv6 svůj olbřímí adresní prostor. Již nikdy nedostatek adres, již nikdy více NAT. Každý počítač, hodinky, lednička či další zařízení může mít svou vlastní, celosvětově jednoznačnou IP adresu.

V předchozím textu jsem opakovaně naznačil, že IPv6 nepřináší jen samá pozitiva a sociální jistoty. Podívejme se na nejvýznamnější pihy jeho krásy. Tou největší nepochybně je, že je příliš jiný a především zpětně nekompatibilní s IPv4. To podstatným způsobem komplikuje jeho nasazení – uživatelé s počítači hovořícími pouze novým protokolem se nedostanou ke službám poskytovaným pouze po IPv4. Byla sice vymyšlena celá řada protokolů a mechanismů pro přechod od starého protokolu k novému, včetně překladu datagramů mezi nimi, v praxi ale toto úsilí není moc efektivní.

Své nepochybně vykonal i pomalý vývoj některých specifikací. O nejkřiklavějším případu mobility jsem se již zmínil. Bohužel není jediný, DHCPv6 bylo definováno jen o rok dříve, přestože se jedná o protokol ve světě IPv4 dobře známý a hojně používaný. Standardizace jednotlivých součástí světa IPv6 stále probíhá, i když nyní už se spíše jen doladují detaily. Nejisté výnosy v kombinaci s nestabilními specifikacemi jsou silně odrazující pro všechny, kteří zvažují implementaci nového protokolu. Proto jim to šlo jako psovi pastva, počáteční implementace byly značně nedokonalé a zlepšovaly se jen velmi zvolna.

1: Na jaře 2011 koupil Microsoft od bankrotujícího Nortelu blok přesahující 600 tisíc IPv4 adres za 7,5 milionu USD.

IPv6 se dlouho potácelo v bludném kruhu slepice versus vejce. Uživatelé o něj neměli zájem, protože v něm nebyly dostupné služby. A kdo by převáděl služby pod IPv6, když tam nebyli žádní uživatelé? Svého času byla zřetelná snaha přispět k rozetnutí tohoto kruhu politicky. Vlády vydávaly prohlášení a výzvy podporující přechod na IPv6, financovaly se projekty rozvíjející infrastrukturu a služby.

Nejvýznamnějším zlomem byl *Světový den spuštění IPv6 (World IPv6 Launch Day)* 6. června 2012, kdy IPv6 nativně nasadilo několik velkých poskytovatelů služeb – Google, Facebook, Yahoo, Akamai Technologies a další. Tím vznikl tlak na poskytovatele připojení, aby své případné experimenty s IPv6 dotáhli do funkční podoby, a zároveň se otevřela příležitost využívat nový protokol v širším měřítku. Objem IPv6 provozu začal konečně významněji stoupat.

1.2 Současný stav

IPv6 je zajímavý a nadějný protokol, který je ze strany IETF rozvíjen jako jediná možnost pro budoucnost Internetu. RFC 6540: *IPv6 Support Required for All IP-Capable Nodes* požaduje jeho všeobecnou podporu. Konkrétně:

- Nové implementace IP musí podporovat IPv6.
- Aktualizace stávajících implementací IP by je měly podporovat.
- Kvalita podpory IPv6 musí být přinejmenším srovnatelná s IPv4.
- Implementace by měly podporovat koexistenci obou verzí, ale jejich úplná funkčnost nesmí záviset na IPv4.
- Vyzývá implementátory, aby podporu nového protokolu přidali co nejdříve.

V roce 2016 vydal Internet Architecture Board, který koordinuje technický rozvoj Internetu, *Prohlášení IAB o IPv6* [11]. V něm vyzývá IETF, aby v nových internetových standardech a aktualizacích těch stávajících nepředpokládal existenci IPv4. Měly by být navrženy tak, aby fungovaly v IPv6 síti, tento protokol by měl být považován za výchozí a měl by být používán i v příkladech. Rozhodně by neměly záviset na IPv4. V prohlášení zároveň IAB vyzývá celý obor, aby připravoval strategie pro provoz sítí, kde jediným síťovým protokolem bude IPv6.

Přesto míra jeho nasazení dlouhodobě pokulhává za vizemi a plány. V předchozím vydání jsem na tomto místě psal, že se stále ještě nedá vyloučit, že skončí jako slepá vývojová větev. To už dnes vyloučit můžeme, statistiky nasazení se definitivně odlepily od nuly a pohybují se dnes v řádu desítek procent.

Podle původních očekávání jsme ale už měli být mnohem dál. Touto dobou už měl být Internet dávno kompletně převeden na nový protokol a pouze kdesi na okraji měly vyhasínat poslední zbytky rustikálního IPv4. Místo toho představuje IPv6 podle těch optimističtějších statistik zhru-

ba čtvrtinu provozu. Pravda, už to nejsou desetiny procenta jako před deseti lety, ale k ovládnutí hřiště stále zbývá pořádný kus cesty.

Jak na tom tedy počátkem roku 2019 jsme? Na jednoduchou otázku je složitá odpověď. Existuje řada různých měření a statistik, jejichž výsledky se rozcházejí v závislosti na uživatelské komunitě i metodice měření. Za relevantní bych považoval výsledky APNIC, kde se měření různých veličin pod vedením Geoffa Hustona věnují dlouhodobě a systematicky, vše publikují a konzultují. Jejich statistika na adrese:

🔗 https://stats.labs.apnic.net/ipv6

zobrazuje, jaké procento koncových zařízení v jednotlivých zemích dokáže komunikovat po IPv6. Celosvětově se blížíme ke 20 %. Z velkých států si hodně dobře vedou USA a Indie (skoro 50 %), Evropě vévodí Belgie (52 %), následovaná Německem (38 %) a Řeckem (34 %). Česká republika si s necelými deseti procenty nestojí nijak oslnivě. Zatím bohužel výrazně zaostává Čína, země s největší uživatelskou populací a notorickým nedostatkem IPv4 adres. Tento stav ale nejspíš nepotrvá dlouho, protože Čína začala podnikat razantní kroky k nasazení IPv6. Podle měření APNIC od září 2018 do března 2019 vzrostl počet čínských uživatelů s IPv6 patnáctinásobně a stále stoupá …

Jedním z velmi viditelných subjektů na poli IPv6 je Google. Protokolu se soustavně věnuje od roku 2008, přispívá k vývoji specifikací a podílel se na řadě aktivit, směřujících k jeho prosazení. Vede si i své statistiky podle počtu přístupů k jeho službám. Počátkem roku 2019 jich přibližně čtvrtina přichází novým protokolem. Aktuální stav najdete na adrese:

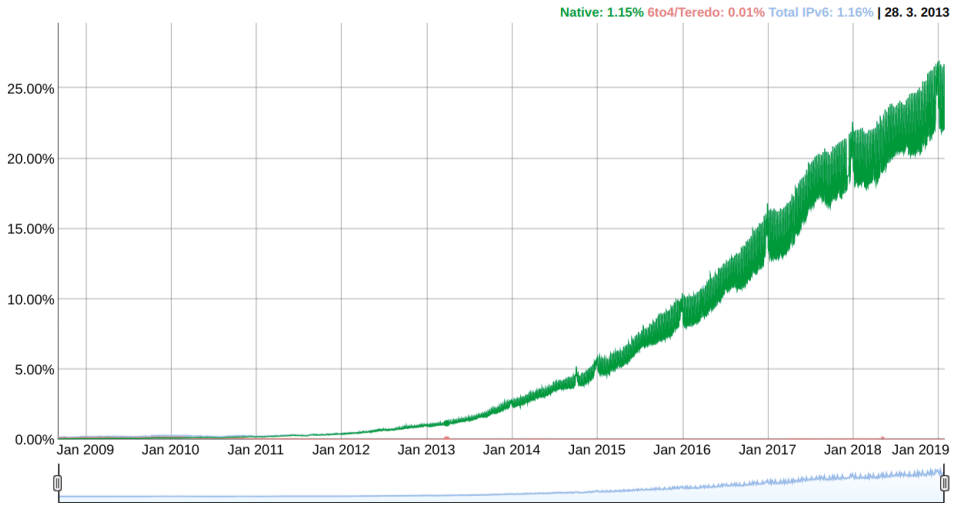
🔗 https://www.google.com/intl/en/ipv6/

Zajímavostí je, že během víkendů podíl IPv6 pravidelně stoupá o několik procent. Je vidět, že domácí sítě jsou v jeho nasazení dál, než konzervativnější sítě firemní.

Ani Facebook nespí na vavřínech. Je vidět, že nedostatek IPv4 adres velké poskytovatele služeb pálí a snaží se jej řešit systémově. Jeho statistiky jsou k vidění na:

🔗 https://www.facebook.com/ipv6/

a dost se podobají těm od Google, včetně nárůstů ve volných dnech. Také podíl uživatelů přistupujících na Facebook po IPv6 se blíží čtvrtině. Kromě globálních čísel dává Facebook k dispozici i statistiky pro jednotlivé země, které jsou vesměs o něco optimističtější než výše zmiňovaná měření APNIC. Například od nás přichází na Facebook po IPv6 zhruba 11 % uživatelů.



Obrázek 1.2: Podíl IPv6 na přístupech ke službám Google

Velcí hráči nasazují IPv6 nejen vůči koncovým uživatelům, ale i uvnitř svých sítí. Například datová centra Facebooku interně používají pouze IPv6. Pakety přicházející od uživatelů protokolem IPv4 končí na prvcích pro rozkládání zátěže, dále pokračují k vlastním serverům po IPv6. Podobně mají své firemní sítě a datová centra uspořádány i další firmy, jako je Google či Akamai.

Dobrým zdrojem informací o aktuálním stavu IPv6 jsou studie *State of IPv6 Deployment* vydávané Internet Society. V době vzniku této knihy je poslední z roku 2018:

https://www.internetsociety.org/resources/2018/state-of-ipv6-deployment-2018/

Podle ní se protokol dostává z pionýrských a nadšeneckých dob do fáze rutinního nasazení a má našlápnuto stát se většinovým. Studie uvádí řadu velkých operátorů, kteří IPv6 provozují ve velkém měřítku. Unikátní je indický Reliance Jio, který spouštěl svou mobilní síť v roce 2016 s nedostatkem IPv4 adres. Během 9 měsíců nasadil IPv6 u více než 200 milionů uživatelů, kteří mu generují přes 80 % provozu. Zejména díky němu patří Indie k zemím s nejvyšším podílem IPv6 na světě.

Ani USA ale nestojí stranou, přestože u nich Internet vznikl a jejich firmy často disponují značnými zásobami IPv4 adres z raných dob, kdy pravidla pro jejich přidělování bývala mírná. Řada zdejších velkých operátorů (Comcast, T-Mobile USA, Verizon Wireless) má rozsáhlé IPv6 sítě s desítkami milionů uživatelů. T-Mobile USA už dokonce zahájil proces směřující k odstranění IPv4 z jeho mobilní sítě. Podobné ambice pro svou firemní síť ohlásil Microsoft.

Motivace je u všech zmiňovaných podobná. Nedostatek IPv4 adres vede k masivnímu používání neveřejných adres a NATů. Výsledkem je složitá síťová architektura, křehká a obtížně spravovatelná. IPv6 je pro ně provozně jednodušší a v důsledku i levnější. Navíc z měření Facebooku začíná IPv6 vycházet i jako rychlejší, zjevně z podobných příčin.

Více než čtvrtina z tisíce nejnavštěvovanějších webů podle Alexa je přístupná po IPv6. Protokol podporují všechny kořenové DNS servery a je po něm dostupných více než 98 % domén nejvyšší úrovně. Více než čtvrtina autonomních systémů ohlašuje směrovacím protokolem BGP IPv6 prefixy. Mobilní sítě se stávají segmentem, kde IPv6 převažuje nad svým předchůdcem.

Ve světle těchto čísel už není udržitelná teze, že IPv6 je nepodařený akademický[2] experiment, v praxi nepoužitelný. Protokol zjevně používá významná část internetové populace a je třeba se jím zabývat.

1.3 Základní principy

Na začátku kapitoly jsem popsal úkoly, které mělo IPv6 vyřešit. Zde se budu ve stručnosti zabývat některými nosnými principy, na kterých je postaveno.

Požadavek na větší rozsah *adresního prostoru* vedl k nemalým debatám o optimální délce adresy. Nakonec byla stanovena na 128 bitů, tedy čtyřnásobek délky použité v IPv4. To znamená, že k dispozici je $3{,}4 \cdot 10^{38}$ adres. To je jen těžko představitelné číslo, zkusme je uvést do souvislostí. Povrch zeměkoule činí přibližně půl miliardy kilometrů čtverečních. To znamená, že na jeden čtvereční milimetr zemského povrchu připadá $667 \cdot 10^{15}$ adres. Ano, řeč je o milionech miliard. V kapitole o adresování uvidíte, že IPv6 velmi plýtvá. Celých 64 bitů věnuje na identifikátor rozhraní, což znamená, že v jedné podsíti lze rozlišit miliardy miliard počítačů. Síť standardní velikosti má prostor na adresaci 65 tisíc podsítí. A takovýchto sítí je k dispozici bezmála 30 tisíc na každého obyvatele zeměkoule[3]. IPv6 adres je v každém ohledu dost a dost, jak se přesvědčíte v kapitole 3 na straně 65.

Formát datagramu byl podroben zásadní revizi. Stručně řečeno: počet položek byl minimalizován a jejich složení upraveno tak, aby základní hlavička datagramu měla konstantní délku. Dřívější volitelné položky byly přesunuty do samostatných hlaviček, které mohou být přidávány k pevnému základu. Pořadí přidávaných hlaviček je zvoleno tak, aby směrovač co nejrychleji mohl zpracovat ty, které jsou určeny pro něj, a zbývající ignorovat.

2: Oba autoři RFC 1883 sice pracovali pro komerční firmy, ale kdo by si nechal kazit pěkný příběh nějakými fakty.
3: Počítáno pro deset miliard pozemšťanů.

Popsané změny v záhlaví datagramu mají za cíl usnadnit jeho zpracování a umožnit tak směrování paketů vysokou rychlostí. Dalším aspektem z téže oblasti je zavedení koncepce toku (proud souvisejících datagramů se společnými parametry), který má opět usnadnit vysokorychlostní zpracování a směrování. Formát datagramu popisuje kapitola 2 na straně 43.

Z hlediska *automatické konfigurace* se autoři IPv6 snažili, aby byla pokud možno zcela bezpracná. Zavedli dvě alternativy: Stavová konfigurace je staré známé DHCP, ovšem upravené pro IPv6. Bezstavová konfigurace představuje nový princip, kdy si počítač dokáže sám stanovit svou adresu a naučí se směrovat, aniž by jeho správce kdekoli cokoli konfiguroval. Podpora bezstavové konfigurace je v implementacích povinná a masivně se využívá. Automatickou konfigurací se zabývá kapitola 6 na straně 135.

S bezstavovou konfigurací je poměrně těsně svázáno i *objevování sousedů*. Jeho primárním cílem je nahradit dřívější protokol ARP při hledání fyzických adres sousedních počítačů. Ovšem objevování sousedů má poněkud širší záběr a zahrnuje i mechanismy pro automatickou konfiguraci (objevování směrovačů a parametrů sítě) či testování jednoznačnosti adresy. Vše se dočtete v kapitole 5 na straně 119.

Požadavek na *služby se zaručenou kvalitou* se projevil zavedením tříd provozu a služeb s diferencovanou kvalitou, jejichž prostřednictvím lze zavést různé priority a režimy zpracování datagramů.

Pro zajištění *bezpečnosti* slouží dvě rozšiřující hlavičky: autentizační a šifrovací. Autentizační umožňuje ověřit, zda odesilatelem dat je skutečně ten, kdo to o sobě tvrdí, a zda během přepravy nedošlo ke změně dat. Hlavička pro šifrování dokáže totéž a navíc lze její pomocí zašifrovat celý obsah datagramu. Způsob zabezpečení IPv6 popisuje kapitola 10 na straně 225.

Podpora *mobilních uzlů* staví na domácích agentech. Jedná se o směrovač, který je umístěn v domácí síti mobilního uzlu a „zastupuje jej" v době nepřítomnosti. Mobilní uzel svému agentovi hlásí aktuální polohu a pokud mu do domácí sítě dorazí nějaká data, domácí agent je přepošle. Následně mobilní uzel oznámí odesilateli, že dočasně změnil svou IP adresu a další komunikace s ním již bude probíhat přímo. Více najdete v kapitole 11 na straně 247.

Pro usnadnění *společné existence IPv6 a IPv4* byla vymyšlena řada nástrojů. Nejjednodušší možností je klasické tunelování, které ponechává oba světy víceméně oddělené a pouze využívá infrastrukturu jednoho k přenosu dat druhého. Kromě něj jsou však k dispozici i rafinovanější metody nabízející překlad datagramů a podobné věci. Zabývá se jimi kapitola 12 na straně 277.

1.4 Implementace

Podpora IPv6 ve směrovačích, operačních systémech a aplikacích se začala objevovat poměrně záhy po vydání první sady RFC. V listopadu 1996 se objevilo IPv6 jako experimentální vlastnost jádra Linuxu verze 2.1.8, další systémy na sebe nenechaly dlouho čekat.

Druhou polovinu 90. let lze označit jako experimentální období plné velkých nadějí, většinou nenaplněných. Zavedení producenti operačních systémů a síťových krabic pozorovali novinku s odstupem, jen tu a tam lehce ochutnali. Několik mladých firem a startupů zkusilo rychlou implementací nového protokolu získat dobrou pozici na trhu „Internetu budoucnosti". Podobně se asijské firmy snažily touto cestou prosadit proti tradičním výrobcům.

Zřejmě i v reakci na tyto snahy začala kolem roku 2000 implementační vlna, kterou bych označil jako marketingovou. Bylo třeba mít v produktovém letáku zaškrtnutou kolonku „podpora IPv6", na kvalitě skutečné podpory příliš nezáleželo. Typická implementace IPv6 z počátku nového tisíciletí měla jen ty nejzákladnější schopnosti a také výkonem často zaostávala za svým předchůdcem[4].

Postupem času se ale situace lepšila. Pozitivní roli rozhodně sehrálo *IPv6 Forum* a jeho program *IPv6 Ready*, k nimž se co nevidět dostanu podrobněji. Už nestačilo napsat „podporujeme IPv6". Bylo třeba opatřit si certifikát, čili projít příslušnými testy. Výsledkem je, že nejvýznamnější platformy – operační systémy i hardwarové směrovače – se v současnosti mohou pochlubit podporou IPv6 na velmi slušné úrovni. Chcete-li experimentovat či uvažovat o seriózním nasazení nového protokolu, nemělo by vám z této strany nic zásadního stát v cestě.

Pravda, některé pokročilé prvky – jako je mobilita či zabezpečení – stále mají své mouchy, obecně ale implementace za posledních několik let udělaly velký krok dopředu a dále se zlepšují. Testy kompatibility a schopností vzájemné spolupráce přispívají k tomu, aby vznikalo reálně použitelné prostředí.

Postupem času se z podpory nového protokolu stala v podstatě samozřejmost. Většina výrobců již zrušila na svých webech sekce věnované IPv6, přesunula informace do standardní produktové dokumentace a považuje IPv6 za běžnou záležitost.

1.5 IPv6 Forum a program IPv6 Ready

Stalo se již zvykem, že na podporu nových síťových technologií vznikají společenství organizací a osob usilujících o prosazení novinky do reálného života. Jistě nejznámějším příkladem je *Wi-Fi*

4: V počáteční fázi hadwarové směrovače často implementovaly IPv6 softwarově, tedy s výkonem řádově nižším proti IPv4.

Alliance, jejíž pozice na poli bezdrátových lokálních sítí je taková, že oficiální název těchto technologií IEEE 802.11 znají jen lidé zasvěcení, zatímco pojem Wi-Fi zlidověl.

Analogickým sdružením pro podporu nové verze IP je *IPv6 Forum* založené v roce 1999. Jeho cíle sahají od propagace nového protokolu přes sdílení a šíření znalostí a zkušeností až po vývoj technických specifikací a řešení problémů při praktickém nasazení. *IPv6 Forum* původně vzniklo jako centralistická organizace, později ovšem začalo zakládat své národní a regionální pobočky. Informace o něm najdete na webu:

http://www.ipv6forum.com/

Ten se bohužel nachází ve velmi neutěšeném stavu a s výjimkou titulní stránky nestojí za návštěvu. Jednotlivé sekce jsou buď prázdné, nebo nebyly několik let aktualizovány. Na titulní stránce ovšem najdete odkazy na významné konference s tematikou IPv6 a další zajímavé zdroje.

Nejvýznamnější aktivitou fóra jsou rozhodně certifikační programy, mezi nimiž má prominentní roli nejstarší *IPv6 Ready*. Motivací jeho vzniku byly rané implementace IPv6, jež vykazovaly celou řadu více či méně závažných problémů.

Již v roce 1998 vznikl japonský program *TAHI*, který testoval dodržování specifikací v implementacích IPv6 a jejich vzájemnou interoperabilitu. Rychle získal technické znalosti a zkušenosti i dobré jméno mezi implementátory, neměl však žádný oficiální statut. Po založení IPv6 Fóra se nabízelo spojit síly a vytvořit certifikační program, za nímž budou stát jak odborné kompetence, tak oficiálně respektované jméno. Výsledkem je *IPv6 Ready*:

http://www.ipv6ready.org/

V jeho rámci si každý autor programu či zařízení podporujícího IPv6 může nechat otestovat jeho kompatibilitu se standardy. Pokud uspěje, získá oficiální certifikát a může používat stříbrné či zlaté logo *IPv6 Ready*. Míra kompatibility má totiž různé úrovně, v oficiální terminologii nazývané fáze.

Fáze 1 (stříbrné logo) ověřovala nejzákladnější kompatibilitu se specifikacemi IPv6. Konkrétně se testovalo, zda zařízení podporuje:

- IPv6 adresy,
- ICMPv6,
- objevování sousedů,
- bezstavovou automatickou konfiguraci.

Obrázek 1.3: Logo *IPv6 Ready*: vlevo fáze 1, vpravo fáze 2

Testovalo se pouze povinné chování (v RFC označené jako „must“). Od roku 2003 bylo vydáno bezmála 500 certifikátů. Fáze 1 byla určena především pro rané období implementací a byla již ukončena, v současné době lze požádat jen o certifikaci fáze 2.

Fáze 2 (zlaté logo) je všeobecně komplikovanější. Kromě povinných ověřuje i prvky důrazně doporučené (v RFC označené jako „should“). Především se ale rozpadá do různých kategorií. Povinný je základní test, který představuje rozvinutou fázi 1 doplněnou navíc o objevování MTU cesty. Při testech se zároveň rozlišuje, zda je produkt certifikován jako koncový stroj (hostitel) nebo jako směrovač. K povinné základní certifikaci může získat ještě specializovaný certifikát v některé z následujících kategorií:

- bezpečnost (IPsec),
- DHCPv6,
- SNMP,
- domácí směrovač (CE Router).

Počátkem roku 2019 bylo vydáno přibližně 1850 certifikátů, z toho valná většina v základní kategorii. Vybrané držitele shrnuje tabulka 1.3. Uvádí celkové počty certifikátů a data získání prvního v jednotlivých kategoriích. Aktuální přehled i podrobné informace o testovacích procedurách najdete samozřejmě na stránkách programu *IPv6 Ready*.

platforma/výrobce	*počet*	*hostitel*	*směrovač*	*IPsec konec*	*IPsec brána*	*domácí směrovač*
Cisco	165	2/2011	4/2006		8/2011	
D-Link	178	6/2006	5/2006	11/2007	11/2007	12/2017
Zyxel	21	7/2005	7/2005	11/2007	11/2007	10/2016
Hewlett-Packard	82	5/2005	7/2008	11/2006		
Dell	51	8/2008	11/2006	11/2012		
MS Windows	10	10/2007		1/2008		
MacOS a iOS	5	12/2010				
Linux	36	5/2006	9/2007	5/2006	10/2007	
FreeBSD	2	3/2006	3/2006			

Tabulka 1.3: Vybraní držitelé certifikátů *IPv6 Ready* fáze 2

Postupem času začalo *IPv6 Forum* svůj certifikační program rozšiřovat. Vzhledem k tomu, že v posledních letech již není pes nejhlouběji zakopán v technice, ale spíše v ochotě nový protokol nasadit, nabízí se myšlenka certifikovat služby. Jejím ztělesněním je program *IPv6 Enabled* zahrnující dva podprogramy – pro WWW servery a poskytovatele Internetu:

🔗 https://www.ipv6forum.com/ipv6_enabled/

Webový certifikát *IPv6 Enabled WWW* je dost jednoduchý. Garantuje, že dotyčný web server má v DNS registrovánu IPv6 adresu a je tímto protokolem dosažitelný. Čili klientovi používajícímu IPv6 nebude stát nic v cestě k jeho využívání. Ve veřejně dostupné databázi držitelů certifikátu najdete více než 2500 položek. Do domény *cz* patří 25 z nich, za nejvýznamnější lze považovat *www.vlada.cz* a *www.nic.cz*.

Poskytovatel Internetu získá certifikát *IPv6 Enabled ISP*, jestliže disponuje IPv6 adresami a přiděluje je svým zákazníkům, je dosažitelný z hlediska směrování a trvale nabízí IPv6 služby zákazníkům. Počátkem roku 2019 počet certifikovaných subjektů převyšoval dvě stovky. Z České republiky se v seznamu nachází osm regionálních poskytovatelů Internetu a jedna housingová firma. Velká jména byste mezi nimi hledali marně.

Vedle techniky a nabídky služeb jsou důležité také znalosti. *IPv6 Forum* se proto pustilo i do této oblasti a zahájilo certifikační program *IPv6 Education*. Opět se člení do několika větví, v nichž lze ověřit vzdělávací kursy nebo osoby, a to jak pro pozici IPv6 odborníků (Engineer), tak jeho šiřitelů

(Trainer). Asi nejkurióznější složkou programu jsou metacertifikáty, kdy *IPv6 Forum* certifikuje jiné certifikační programy, jimiž vydávané certifikáty tak získávají na váze.

1.6 6bone

Když se začalo experimentovat s prvními implementacemi, vznikla potřeba rozlehlé IPv6 sítě, která by posloužila k testování a získávání praktických zkušeností. Tak v roce 1996 vznikla síť *6bone*. Původně propojila jen tři instituce – G6 ve Francii, UNI-C v Dánsku a WIDE v Japonsku. Svého maxima dosáhla v roce 2003, kdy bylo do *6bone* zapojeno kolem tisíce institucí z 50 zemí.

6bone byla takzvanou virtuální sítí. To znamená, že neměla vlastní vyhrazenou infrastrukturu, ale využívala existující sítě. Skládala se z lokálních IPv6 sítí, navzájem propojených tunely. To znamená, že IPv6 datagramy se balily jako data do běžného IPv4 a přenášely se standardním Internetem až do cílové sítě. Bylo to jednoduché, levné a dala se vytvořit topologie, jaká byla potřeba.

Hlavním cílem *6bone* bylo „hrát si na opravdický IPv6 Internet" a získat tak praktické zkušenosti s jeho provozem. Proto byla v rámci sítě definována směrovací politika, vypracovány procedury na přidělování adres a další potřebné operace. Řadu let byla jedinou IPv6 sítí s globálním dosahem.

Síť měla vyhrazeny vlastní adresy, jež začínaly čtveřicí 3ffe (čili prefixem 3ffe::/16, jak se dočtete později). Organizace, které poskytovaly připojení k *6bone*, dostaly k dispozici určitý rozsah adres, vyjádřený společným prefixem (označovaným jako pTLA). Z něj pak poskytovatel přiděloval části připojeným sítím. Směrovače poskytovatelů disponujících pTLA zároveň tvořily páteř *6bone*.

Když po roce 2000 začaly být IPv6 adresy přidělovány standardní cestou a IPv6 začalo postupně pronikat do Internetu, začal klesat i zájem o *6bone*. Svůj účel síť splnila, pomohla získat praktické zkušenosti s provozem IPv6 a doladit řadu jeho prvků. Od samotného počátku byla deklarována jako síť dočasná, což se naplnilo po deseti letech existence.

Síť *6bone* skončila stylově 6. 6. 2006 a její prefix 3ffe se vrátil k pozdějšímu využití pro běžné adresy. Odvedla cenné služby a má zajištěno čestné místo v historii IPv6.

1.7 Politická podpora a projekty

IPv6 se během své existence dočkalo oficiální podpory z řady míst, včetně těch nejvyšších. Velmi aktivní je Asie, která do kolotoče Internetu vstoupila pozdě. V důsledku toho zdejší výrobci hrají spíše druhé housle a některé země (v první řadě Čína) mají citelný nedostatek IPv4 adres.

Nepřekvapí, že japonská vláda již v roce 2000 vyhlásila oficiální podporu IPv6 a následně ji uplatňovala v podobě různých projektů, ale i daňových úlev. V roce 2005 vyhlásila směr IPv6 vláda

USA – nejprve ministerstvo obrany, později se přidala celá federální administrativa. V roce 2008 měly všechny vládní sítě v USA podporovat IPv6, následovat měl postupný přechod aplikací.

Nepodařilo se, nicméně vláda USA to nevzdává. V září 2010 vydala memorandum, které požadovalo po vedoucích IT oddělení všech orgánů vlády:

- Do konce září 2012 zpřístupnit všechny služby po IPv6.
- Do konce září 2014 plošně nasadit nativní IPv6 ve svých sítích.
- Jmenovat všude manažery pro přechod k IPv6.
- Pořizovat pouze IT vybavení s kvalitní podporou IPv6.

Ke splnění posledního bodu vytvořil NIST testovací program označovaný jako *USGv6*, který definuje požadavky a způsoby jejich ověřování. Jeho web rozhodně stojí za návštěvu:

https://www.nist.gov/programs-projects/usgv6-program

Aktivní je také Evropská komise. Z února 2002 pochází její *Next Generation Internet – priorities for action in migrating to the new Internet protocol IPv6*. Tento dokument stál v pozadí financování několika velkých projektů orientovaných na IPv6 z prostředků evropských rámcových programů. Výzvy ke členským státům v něm obsažené však na příliš úrodnou půdu nepadly.

Z května 2008 pochází akční plán Evropské komise k nasazení IPv6 – *Action Plan for the deployment of Internet Protocol version 6 (IPv6) in Europe*. Jedná se o dokument místy rozumný, místy bezzubý a místy zcela neuvěřitelný[5]. Mimo jiné požaduje, aby projekty financované ze 7. rámcového programu používaly ke komunikaci IPv6, pokud to je možné. Také ohlašuje, že při inovaci technického vybavení evropských struktur bude požadována podpora IPv6 a k podobnému kroku vyzývá i vlády členských států.

Evropská komise už v rámci 6. rámcového programu podpořila několik významných projektů rozvíjejících novou verzi IP. Některé z nich byly zaměřeny na vytvoření reálných IPv6 sítí, získání a dokumentaci zkušeností s jejich provozem. Sem patří například *6NET* či *Euro6IX*. Další mířily do oblasti vzdělávání a šíření informací, jako například *6DISS* a jeho nástupce *6DEPLOY*. Mezi podporovanými projekty najdete i tematicky úzce zaměřené výzkumy dílčích oblastí souvisejících s IPv6, třeba projekt *ENABLE* zabývající se mobilitou ve velkých heterogenních IP sítích.

Ani Vláda České republiky nezůstala k IPv6 lhostejná. 8. června 2009 přijala usnesení číslo 727, ve kterém uložila ministrům a vedoucím ústředních orgánů státní správy, aby od poloviny roku 2009

5: Obávám se, že zpřístupnění webů „Europa“ a „CORDIS“ po IPv6 v roce 2010 (které se navíc podařilo jen napůl, *cordis.europa.eu* není ani v roce 2019 dostupný po IPv6!) nebyla taková bomba, jak se domnívají autoři dokumentu, když tento bod zařadili jako první akci stimulující dostupnost obsahu a služeb po IPv6.

při obnově síťových prvků požadovali podporu IPv6 a do konce roku 2010 zajistili přístup ke službám eGovernmentu novým protokolem. Usnesení zároveň doporučuje hejtmanům a pražskému primátorovi postupovat obdobně.

Jak už to s usneseními bývá, v plnění jsou značné rezervy. Na podzim 2011 byla dostupná po IPv6 necelá polovina ministerských webů. V usnesení číslo 695 z 26. srpna 2015 pak vláda nařídila, že lajdáci mají IPv6 už ale doopravdy nasadit do 1. ledna 2016. Možná vás proto překvapí, že počátkem roku 2019 stále ještě pět ministerstev (vnitra, zahraničí, dopravy, zemědělství a pro místní rozvoj) nemá weby přístupné po IPv6. Nejsmutnější je jeho absence na ministerstvu vnitra, které má v gesci informatiku. eGovernment a jeho Portál veřejné správy jsou k mání stále jen po IPv4.

Mnohé státy se zkrátka snaží různými metodami posouvat rozvoj IPv6 vpřed, protože vnímají blížící se vyčerpání IPv4 adres a další problémy stávajícího protokolu jako ohrožení svého dalšího rozvoje. Vládní aktivity ovšem nejsou samospásné. Příkladem budiž Čína, která sice v roce 2003 přijala pětiletý strategický plán *China Next Generation Internet* a v jeho rámci skutečně vybudovala IPv6 páteř, ovšem ještě v roce 2018 se podpora IPv6 v jejích sítích pohybovala v jednotkách procent a představovala největší brzdu mezi velkými zeměmi.

Vypadá to nicméně, že druhý pokus uspěje. V roce 2017 Čína vyhlásila plán masivního nasazení IPv6, který by měl do roku 2020 zpřístupnit nový protokol 500 milionům uživatelů. Na přelomu let 2018 a 2019 začal počet čínských uživatelů IPv6 dramaticky růst a vše nasvědčuje tomu, že nejvýznamnější temné místo na mapě IPv6 zmizí.

IPv6 podle všeho konečně dosáhlo kritického množství a začíná se prosazovat samospádem. Díky tomu vládní aktivity klesají na významu a protokol se nasazuje nikoli kvůli nařízení XY, ale protože to je normální.

1.8 Webové zdroje

Na webu pochopitelně najdete nepřeberné množství stránek věnovaných IPv6. Podívejme se na ty, které stojí za pozornost. Internet Society nabízí „základní informační balíček“ na adrese:

https://www.internetsociety.org/deploy360/ipv6/

Najdete tu základní informace o protokolu a jeho součástech, odpovědi na často kladené dotazy i provozní doporučení postupů, které se v praxi osvědčily. Zajímavý je přehled různých statistik souvisejících s IPv6:

https://www.internetsociety.org/deploy360/ipv6/statistics/

Pokud se týče doporučených postupů, cenným zdrojem je i stránka APNIC, která se zabývá adresováním, přechodovými mechanismy, datovými centry i firemními sítěmi:

https://www.apnic.net/community/ipv6-program/ipv6-bcp/

Trudnomyslným mohu doporučit *IPv4 Address Report*, kde Geoff Huston zkoumá postupné vyčerpání adres a stav IPv4 Internetu:

https://ipv4.potaroo.net/

A za pozornost rozhodně stojí dokumenty o IPv6 evropského správce adresního prostoru RIPE NCC:

https://www.ripe.net/publications/docs/ripe-documents/ipv6-documents

Na domácí půdě to s relevantními informacemi není nijak oslňující. Pravděpodobně nejlepším informačním zdrojem je web:

https://www.ipv6.cz/

O jeho obsah se stará několik autorů, pocházejících zejména z pracovní skupiny IPv6 při sdružení CESNET. Pokud máte k dané problematice co říci, rádi vás uvítáme mezi autory.

Část I

Jak funguje IPv6

2 Formát datagramu

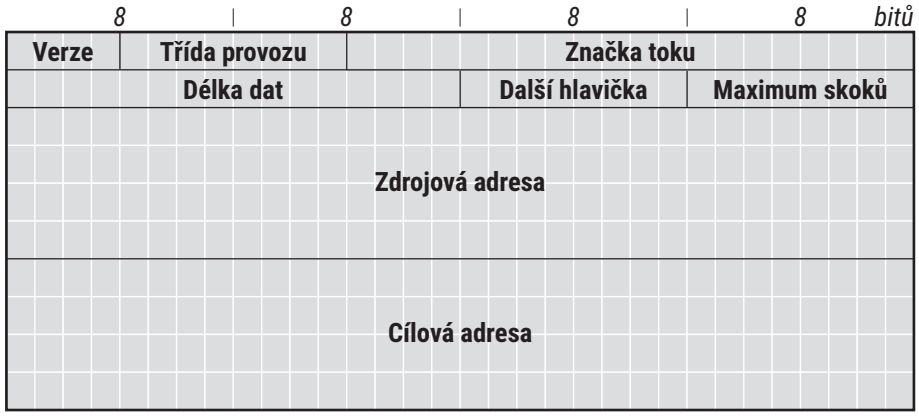
Základním kamenem IPv6 je dokument RFC 8200: *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*, který obsahuje především základní principy a formát datagramu. Ostatním mechanismům a datovým formátům, které souvisejí s IPv6, jsou věnovány další RFC specifikace.

2.1 Datagram

Datagram má v IPv6 obvyklý základní tvar: začíná hlavičkami, za kterými pak následují nesená data. V porovnání s IPv4 však došlo v hlavičkách ke koncepční změně. Dříve byla jejich délka proměnlivá a jednotliví účastníci komunikace mohli připojovat další nepovinné volby podle potřeby. Hlavička obsahovala kontrolní součet, který bylo třeba znovu vypočítat na každém směrovači, jímž datagram prošel (protože se změnila přinejmenším položka TTL).

IPv6 naproti tomu standardní hlavičku minimalizovalo a omezilo její prvky jen na ty nejnutnější. Tato základní hlavička má konstantní velikost. Veškeré doplňující, nepovinné či příležitostně užívané údaje byly přesunuty do rozšiřujících hlaviček, které v datagramu mohou a nemusí být přítomny. Jejich podobu a zpracování popíši v části 2.2 na straně 46.

Tvar základní hlavičky vidíte na obrázku 2.1. Přestože se adresy odesilatele a příjemce prodloužily čtyřikrát, celková délka základní hlavičky datagramu vzrostla ve srovnání s IPv4 jen dvojnásobně (z 20 B na 40 B, z toho 32 B zabírají adresy). Minimalismus je patrný na první pohled.



Obrázek 2.1: Základní hlavička datagramu

Položka *Verze (Version)* je obvyklým zahájením IP datagramu, které identifikuje verzi protokolu. Zde obsahuje hodnotu 6.

Za ní následuje osmibitová *Třída provozu (Traffic class)*, která vyjadřuje prioritu datagramu či jeho zařazení do určité přepravní třídy. Cílem je, aby tato položka umožnila IP poskytovat služby se zaručenou kvalitou. V praxi ale tak daleko nejsme a v nejbližší době ani nebudeme. IP, a to ani ve verzi 6, neumí zaručit dopravní parametry, jako jsou přenosová rychlost, zpoždění či jeho rozptyl. Dovede však poskytovat tak zvané *diferencované služby (differentiated services, diffserv)*. Jejich prostřednictvím mohou mít datagramy různé priority a odlišné způsoby zacházení, které vedou k jejich přednostnímu zpracování či naopak odkládání až po ostatních. Právě diferencované služby využívají pro přenos svých informací položku *Třída provozu*. Ve vlastní definici IPv6 není nijak blíže upřesněna, pouze se zde požaduje, aby implicitní hodnotou byla nula.

Dalších 20 bitů je věnováno *Značce toku (Flow label)*. Koncepce toku je novinkou v IPv6 a stále ještě se trochu tápe, k čemu a jak ji využívat. V zásadě by jako tok měl být označován proud datagramů se společnými vlastnostmi (odesilatel, adresát, požadavky na vlastnosti spojení). Prostřednictvím identifikátoru (značky) a dvojice adres směrovač rychle rozpozná, že datagram je součástí určitého toku, což mu usnadní rozhodování o jeho dalším osudu (bude s ním naloženo stejně, jako s předchozími členy téhož toku). Jak již bylo řečeno, jedná se stále o experimentální půdu a pokusy o konkrétní využití teprve vznikají. K tématu se vrátím v části 2.9 na straně 61.

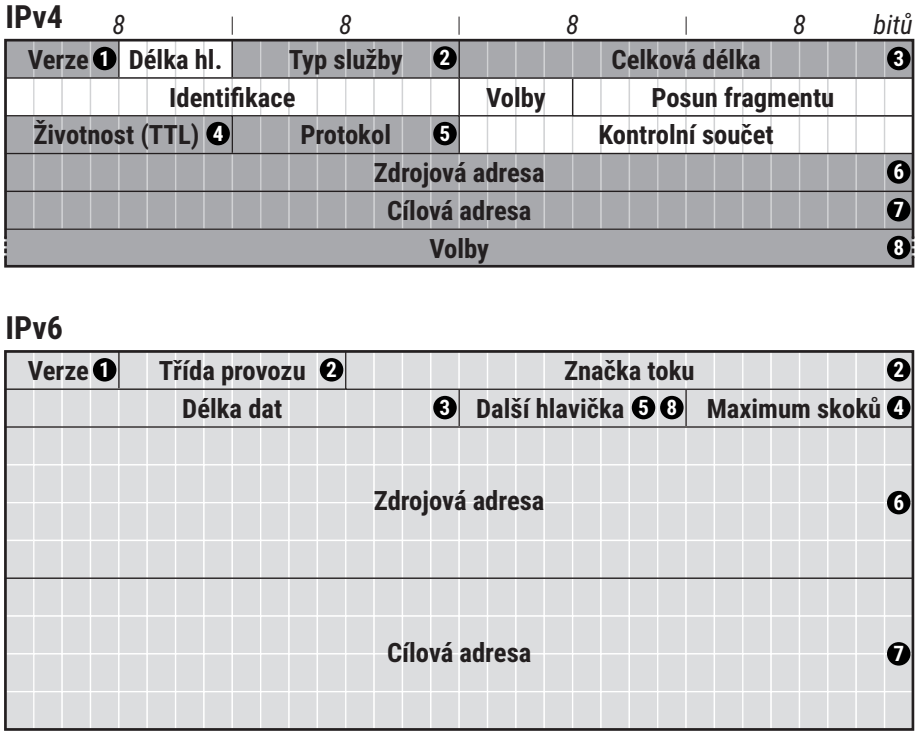
Délka dat (Payload length) nese údaj o délce datagramu. Přesně řečeno počet bajtů následujících za standardní hlavičkou. Z toho plyne, že základní hlavička se do této délky nepočítá, zatímco případné rozšiřující hlavičky ano. Jelikož je položka dvoubajtová, je maximální délkou 64 KB. Pomocí rozšiřující hlavičky *Jumbo obsah* popsané v části 2.7 na straně 60 lze teoreticky vytvářet ještě delší datagramy, reálně je ale nikdo nikdy neviděl.

Další hlavička (Next header) obsahuje identifikaci, jaká hlavička či jaký druh dat následuje za standardní hlavičkou. Podrobněji se jí budu věnovat zanedlouho v části 2.2.

Maximální počet skoků (Hop limit) je náhradníkem dřívější životnosti datagramu (TTL). Průchod datagramu jedním směrovačem je považován za jeden skok. Odesilatel v této položce uvede, kolik takových skoků smí datagram maximálně absolvovat. Každý směrovač po cestě pak sníží hodnotu o jedničku. Dojde-li tím k vynulování položky, datagram bude zlikvidován a odesilateli se pošle ICMP zpráva o vypršení maximálního počtu skoků. Smyslem omezení je ochrana proti cyklům při směrování (zacyklený datagram nebude v síti strašit do nekonečna).

Závěrečnými dvěma položkami je dvojice IPv6 adres: *Zdrojová adresa (Source address)* a *Cílová adresa (Destination address)*. Vzhledem k délce adresy v IPv6 zabírají tyto dvě položky 80 % rozsahu celé hlavičky. Podrobnosti o adresování se dočtete v kapitole 3 na straně 65.

Při srovnání s IPv4 je nejnápadnější absence tří informací: rozšiřujících voleb, kontrolního součtu a fragmentace. Rozšiřující volby byly nahrazeny obecnějším principem zřetězení doplňkových hlaviček. Obdobně údaje související s fragmentací byly přesunuty do těchto rozšiřujících hlaviček.



Obrázek 2.2: Porovnání hlaviček IPv4 a IPv6

Zdaleka ne každý paket je totiž fragmentován a lze očekávat, že v IPv6 bude fragmentace ještě vzácnější než v současnosti. IPv6 totiž požaduje, aby infrastruktura pro jeho přenos dovedla přenášet pakety minimálně o délce 1280 B (MTU). Vzhledem k tomu, že drtivá většina koncových zařízení je dnes připojena prostřednictvím různých variant Ethernetu nebo Wi-Fi s MTU alespoň 1500 B, lze očekávat, že tato hodnota se usídlí téměř všude a fragmentace prakticky zmizí ze světa.

Kontrolní součet zmizel bez náhrady. Tuto službu typicky vykonává nižší vrstva síťové architektury (např. zmiňovaný Ethernet) a pokud došlo ke zkomolení při přenosu, datagram rovnou zahodí. Na úrovni IP by se jen duplikovala úspěšná kontrola. Vzhledem k tomu, že hlavička se mění v každém směrovači (klesá dosah datagramu), znamenalo by to zbytečné zpomalování.

Porovnání hlaviček IPv4 a IPv6 názorně představuje obrázek 2.2. V IPv4 datagramu jsou vybarveny položky, které byly (zpravidla v poněkud pozměněné podobě) převzaty do IPv6. Stejná čísla označují položky, které si navzájem odpovídají.

2.2 Zřetězení hlaviček

IP verze 6 používá odlišný způsob reprezentace rozšiřujících hlaviček než jeho předchůdce. Každá hlavička je nyní samostatným blokem a k jejich vzájemnému propojení slouží položka *Další hlavička (Next header)*. Kód v ní obsažený identifikuje, jakého typu je hlavička, která následuje za tou stávající. Každá rozšiřující hlavička začíná položkou *Další hlavička*. Prostřednictvím těchto hodnot lze za sebe zřetězit hlaviček, co hrdlo ráčí.

Poslední z nich obsahuje v položce *Další hlavička* typ dat, která datagram nese. Zastupuje tak zároveň dřívější položku *Protokol*. Nejvýznamnější hodnoty shrnuje tabulka 2.1. První skupina v ní obsahuje hlavičky, jejichž implementace je podle RFC 8200 povinná. Ve druhé skupině jsou hlavičky nepovinné, následují kódy přiřazené přenášeným protokolům. Aktuální a kompletní seznam hodnot pro typy přenášených dat najdete na adrese:

http://www.iana.org/assignments/protocol-numbers

Pokud tedy datagram neobsahuje žádné rozšiřující hlavičky, bude přímo jeho základní IPv6 hlavička obsahovat jako *Další hlavičku* identifikátor typu nesených dat. Tuto situaci ilustruje obrázek 2.3a. Na obrázcích 2.3b a 2.3c můžete sledovat, jak se změní obsah položek *Další hlavička*, když datagramu přidáme rozšiřující hlavičky *Směrování* a *Fragmentace*.

a) bez rozšiřujících hlaviček

hlavička **IPv6** další=6 (TCP)	**TCP segment**

b) s hlavičkou *Směrování*

hlavička **IPv6** další=43 (směr.)	hlavička **Směrování** další=6 (TCP)	**TCP segment**

c) s hlavičkami *Směrování* a *Fragmentace*

hlavička **IPv6** další=43 (směr.)	hlavička **Směrování** další=44 (frag.)	hlavička **Fragmentace** další=6 (TCP)	**TCP segment**

Obrázek 2.3: Zřetězení hlaviček datagramu

Rozšiřující hlavičky – povinné	
0	volby pro všechny (hop-by-hop options), str. 51
43	směrování (routing), str. 54
44	fragmentace (fragment), str. 55
50	šifrování obsahu (ESP), str. 232
51	autentizace (AH), str. 231
60	volby pro cíl (destination options), str. 51
Rozšiřující hlavičky – volitelné	
135	mobilita (mobility), str. 249
139	identita (Host Identity Protocol), experimentální
140	Shim6, str. 107
253	pro experimenty a testování
254	pro experimenty a testování
Typ nesených dat (protokol)	
6	TCP
8	EGP
9	IGP
17	UDP
46	RSVP
47	GRE
58	ICMP
59	poslední hlavička (no next header)

Tabulka 2.1: Vybrané hodnoty položky *Další hlavička*

Hlavními devizami koncepce hlaviček v IPv6 je pružnost a úspornost. Součástí datagramu jsou jen ty průvodní informace, které skutečně potřebuje. Rubem mince je, že zpracování kompletních hlaviček může ve složitějších případech představovat průchod relativně dlouhým řetězcem. Pokud by se mělo odehrávat v každém směrovači na cestě mezi odesilatelem a příjemcem, mohlo by to vést k nezanedbatelné degradaci výkonu.

Tento problém řeší IPv6 velmi jednoduše – doporučuje pro rozšiřující hlavičky následující pořadí:

1. základní hlavička IPv6,
2. volby pro všechny (hop-by-hop opions),
3. volby pro cíl (destination options) – pro první cílovou adresu datagramu a případné další uvedené v hlavičce *Směrování*,
4. směrování (routing),
5. fragmentace (fragment),
6. autentizace (authentication),
7. šifrování obsahu (encapsulating security payload),
8. volby pro cíl (destination options) – pro konečného příjemce datagramu,
9. mobilita (mobility).

Jeho cílem je, aby se informace zajímavé pro uzly, kterými datagram prochází, ocitly vpředu a hlavičky určené až pro koncového příjemce následovaly teprve za nimi. Pro průchozí směrovač jsou potenciálně zajímavé jen *Volby pro všechny*, které se smí vyskytnout jen bezprostředně za základní hlavičkou. Ničeho jiného si nemusí všímat. Jakmile vidí v *Další hlavičce* jiný kód než 0 (*Volby pro všechny*), ví, že může s analýzou datagramu skončit.

Ostatní rozšiřující hlavičky jsou zajímavé jen pro adresáta datagramu – ať už průběžného (pocházejícího z hlavičky *Směrování*) či koncového. Průběžného adresáta zajímají jen první tři (volby pro všechny, volby pro cíl a směrování), zatímco koncového se týkají všechny.

Každá z rozšiřujících hlaviček by se měla objevit nanejvýš jednou. Výjimkou jsou volby pro cíl, které se mohou vyskytnout dvakrát – jednou před *Směrováním* a podruhé před *Mobilitou*.

RFC 8200 důrazně doporučuje dodržovat výše uvedená omezení, zároveň ale požaduje, aby byl adresát schopen se vyrovnat s libovolným pořadím hlaviček i jejich případným opakováním. Výjimkou z této benevolence jsou *Volby pro všechny* – pokud jsou přítomny, musí být hned na začátku řetězce.

Druhým striktním omezením je, že dojde-li k fragmentaci datagramu, musí být všechny rozšiřující hlavičky obsaženy v prvním fragmentu. Velmi dlouhé řetězce hlaviček komplikovaly situaci firewallům a objevily se i snahy o jejich zneužití. Podrobnější zdůvodnění najdete v RFC 7112: *Implications of Oversized IPv6 Header Chains*.

Speciální význam má, pokud položka *Další hlavička* obsahuje hodnotu 59 (no next header). Ta signalizuje, že se jedná o poslední hlavičku, za kterou již nenásleduje vůbec nic. Takový datagram nenese žádná data. Pokud podle své délky obsahuje ještě nějaká data, musí být ignorována. Je-li datagram přeposílán dále, musí do něj předávající tato data zkopírovat beze změny.

Kromě *Voleb pro všechny* zpracovává hlavičky až adresát datagramu. Mezilehlá zařízení rozšiřující hlavičky nezpracovávají a nesmí je měnit. Výjimku představují *Volby pro všechny*, jimiž se naopak zabývá každé zařízení, jímž datagram prochází[1].

Při zpracování se hlavičky procházejí v tom pořadí, ve kterém jsou vloženy do datagramu. Zpracovávající stroj nesmí přeskakovat nebo si vybírat některé přednostně. Tím je zajištěna konzistence v případech, kdy by některá hlavička ovlivňovala ty následující.

Koncept zřetězení rozšiřujících hlaviček se výrazně liší od přístupu IPv4. Bylo s ním proto méně zkušeností a v praktickém provozu se projevily různé problémy. Týkají se například příliš přísně nastavených firewallů, které zahazovaly datagramy s neznámými typy rozšiřujících hlaviček a bohužel neznaly zdaleka všechny. Objevily se také útoky postavené na rozšiřujících hlavičkách, které vedly například k odmítnutí některých variant hlavičky *Směrování*.

IETF se snaží praktické zkušenosti promítat do specifikací a vyjasňovat problematická místa. Zde mám na mysli především RFC 7045: *Transmission and Processing of IPv6 Extension Headers*, které se zabývá zejména přepravou a zpracováním rozšiřujících hlaviček v mezilehlých strojích – směrovačích, firewallech a dalších zařízeních, která nejsou odesilatelem ani adresátem datagramu.

Obecně pro ně platí, že by složení rozšiřujících hlaviček nemělo ovlivňovat přepravu datagramu[2]. Od přepravujících strojů se neočekává, že budou analyzovat celý datagram včetně všech hlaviček. Měly by přezkoumat nezbytné minimum a paket odeslat.

Speciálním případem jsou firewally a další prvky, které naopak datagramy analyzují podrobně, často využívají i informace z protokolu transportní vrstvy, takže musí projít celým řetězcem až k neseným datům. V jejich případě RFC 7045 stanoví následující požadavky:

- Musí podporovat a korektně zpracovávat všechny standardní typy rozšiřujících hlaviček a měly by i typy experimentální.
- Pro standardní typy rozšiřujících hlaviček musí nabídnout individuálně konfigurovatelná pravidla, jak mají být zpracovány. V nich lze stanovit, že datagram lze zahodit na základě přítomnosti konkrétní hlavičky, případně s určitou hodnotou. Implicitně by měly být všechny standardní hlavičky propouštěny.

1: RFC 8200 požaduje, aby zpracování *Voleb pro všechny* bylo možné zapnout/vypnout v konfiguraci.
2: Samozřejmě s výjimkou hlaviček určených pro každý stroj po cestě, které jsou naopak k tomuto účelu určeny.

- Pro experimentální typy rozšiřujících hlaviček jsou požadavky slabší – opět se požadují individuálně nastavitelná pravidla, tentokrát však specifikace připouští jejich zahazování v implicitní konfiguraci.

Firewall samozřejmě může datagram zahodit, pokud vyhodnotí určité jeho rozšiřující hlavičky a hodnoty v nich jako nebezpečné, ale nesmí to v případě standardních hlaviček udělat jen na základě toho, že daný typ nezná.

Pokud se týká hlaviček pro každého, ty by naopak měly být zpracovávány každým zařízením, jímž datagram projde. RFC 7045 ale upozorňuje, že vysokorychlostní směrovače a přepínače to často nedělají a vývojáři by s tím měli počítat.

K usnadnění zpracování rozšiřujících hlaviček přispívá i RFC 6564: *A Uniform Format for IPv6 Extension Headers*, které požaduje, aby nově definované rozšiřující hlavičky dodržovaly jednotný formát: v prvním bajtu *Další hlavička*, ve druhém délka této hlavičky v osmicích bajtů (bez úvodní osmice) a za ní následuje vlastní hodnota, jejíž strukturu a položky stanoví konkrétní specifikace. Jednotné zahájení usnadní a zrychlí zpracování a umožní zařízení jednoduše přeskočit hlavičku, která zde není podporována.

Zároveň je RFC 6564 velmi konzervativní ohledně přidávání typů rozšiřujících hlaviček. Jednoznačně dává přednost předávání doplňkových informací pomocí *Voleb pro cíl*. Vytváření nových typů rozšiřujících hlaviček a nových typů *Voleb pro každého* připouští jen v případě, kdy potřebné informace nelze předávat jiným způsobem. Jejich návrh to musí doložit. Bez výjimky pak zakazuje vytváření nových typů hlaviček, které by vyžadovaly zpracování všemi průchozími zařízeními.

Zajímavá a dost depresivní jsou měření průchodnosti datagramů s rozšiřujícími hlavičkami, která najdete v RFC 7872: *Observations on the Dropping of Packets with IPv6 Extension Headers in the Real World*. Výsledky pocházejí z let 2014 a 2015 a vůbec nejsou lichotivé – přítomnost některé z rozšiřujících hlaviček zvýší pravděpodobnost zahození daného datagramu řádově o desítky procent. Například pakety obsahující fragmentační hlavičku nebyly doručeny zhruba ve třetině případů.

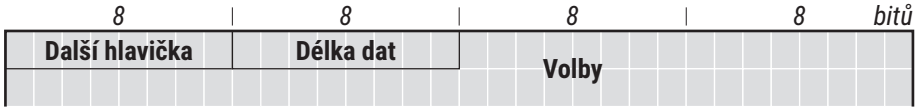
Tyto hodnoty jsou alarmující a je třeba se smířit s tím, že pokud odesilatel vloží do datagramu rozšiřující hlavičku, výrazně tím sníží jeho šanci na úspěšné doručení současným Internetem. Autoři RFC 7872 apelují na zlepšení situace, ale výsledkem může být i to, že programátoři se budou snažit posílání těchto hlaviček vyhýbat.

Podívejme se nyní podrobněji na tvar a význam existujících rozšiřujících hlaviček.

2.3 Volby

IPv6 zavádí dvě hlavičky obsahující volby: *Volby pro všechny* (*hop-by-hop options*, *Další hlavička* před nimi má hodnotu 0) a *Volby pro cíl* (*destination options*, předcházející *Další hlavička* má hodnotu 60).

Obě hlavičky mají společný tvar, který najdete na obrázku 2.4. Význam položky *Další hlavička* jsem již vysvětlil. *Délka dat* obsahuje délku hlavičky v osmicích bajtů. Do délky se nepočítá prvních 8 bajtů, takže pokud má hodnotu 1, znamená to, že celá hlavička s volbami měří 16 B.



Obrázek 2.4: Rozšiřující hlavičky *volby pro všechny* a *volby pro cíl*

Položka *Volby (Options)* pak obsahuje vlastní volby. Ty mohou být zavedeny jako součást jednotlivých konkrétních mechanismů. Například v rámci podpory mobilních počítačů se objevila volba *Domácí adresa*. Přehled doposud definovaných voleb najdete v tabulkách 2.2 a 2.3. Samotná definice IPv6 obsahuje jen dvě: *Pad1* a *PadN*. Slouží ke vkládání „vaty" – volného místa, které má sloužit k lepšímu zarovnání ostatních prvků s přihlédnutím k hranicím čtyřbajtových slov. Jedná se o vycpávky, které nenesou žádnou aktivní informaci.

Typ	*Význam*	*Popis*
0	Pad1	str. 51
1	PadN	str. 52
5	Upozornění směrovače	str. 53
7	CALIPSO	RFC 5570
8	SMF	RFC 6621
38	Rychlý start	str. 61
99	RPL	RFC 6553
109	MPL	RFC 7731
194	Jumbo obsah	str. 60
238	DFF	RFC 6971

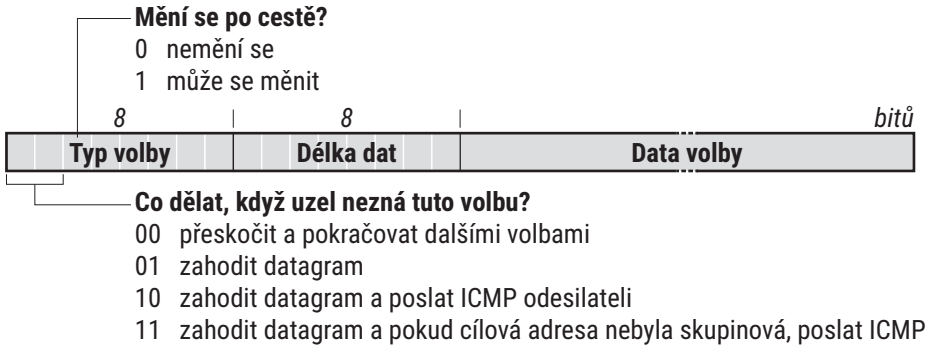
Tabulka 2.2: Volby pro všechny

Typ	*Význam*	*Popis*
0	Pad1	str. 51
1	PadN	str. 52
4	maximální vnoření tunelů	RFC 2473
15	PDM (měření)	str. 54
139	náhodná hodnota pro ILNPv6	RFC 6744
140	LIO (identifikátor linky)	RFC 6788
201	Domácí adresa	str. 263

Tabulka 2.3: Volby pro příjemce

Pad1 vynechává 1 bajt. Tvar této volby je triviální: jedná se o jeden bajt s hodnotou 0, která identifikuje typ volby a zároveň říká, že to je vše.

PadN umožňuje vynechat dva a více bajtů. První bajt opět určuje typ volby a má hodnotu 1. Za ním následuje jeden bajt obsahující délku volby, do níž se první dva bajty nepočítají. Následují data uvedené délky, jejichž hodnoty jsou nulové. Chcete-li tedy vynechat celkem 6 bajtů, bude mít *Délka dat* hodnotu 4 a za ní budou následovat čtyři nulové bajty „dat“.



Obrázek 2.5: Tvar voleb pro rozšiřující hlavičky

Všechny volby musí dodržovat jednotný tvar. Odpovídá tomu, který jste viděli u volby *PadN*. První bajt identifikuje, o jakou volbu se jedná. Za ním pak následuje *Délka dat* (do níž se nepočítají první dva bajty) a po ní data. Jejich strukturu musí definovat dokument, který zavede danou volbu.

V rámci *Typu volby* byl pevně předepsán význam nejvyšších tří bitů. První dva určují, co se stane s datagramem, pokud zpracovávající uzel dotyčnou volbu nezná. Za nimi následuje bit, který indikuje, zda se volba může měnit během průchodu sítí. Konkrétní hodnoty najdete v obrázku 2.5.

Jednou z „opravdových" voleb pro všechny je tak zvané *Upozornění směrovače (router alert)* definované v RFC 2711. Má za cíl upozornit každý směrovač po cestě, že tento paket nese data, která by jej mohla zajímat.

Volba najde uplatnění například v rezervačním protokolu RSVP, který posílá řídicí pakety pro alokaci kapacit po cestě. Tyto pakety jsou určeny všem směrovačům. Právě *Upozornění směrovače* může napovědět, že paket nese zajímavou informaci. Bez něj by směrovač musel prohlížet všechny datagramy a zkoumat, jakému protokolu vyšší vrstvy patří. Když by narazil na paket RSVP, zabýval by se jím podrobněji. V opačném případě by jej poslal dále po cestě k cíli.

Díky *Upozornění směrovače* lze rychle odlišit datagramy potenciálně zajímavé od těch, které se mají prostě předávat dál. Formát volby najdete na obrázku 2.6. Obsahuje vlastně jedinou položku, která slouží k identifikaci protokolu, jehož data nese. Dosud definované hodnoty shrnuje tabulka 2.4.

Obrázek 2.6: Volba *Upozornění směrovače*

Hodnota	*Význam*
0	obsahuje MLD zprávu
1	obsahuje RSVP zprávu
2	obsahuje zprávu *Aktivní sítě*
3	rezervováno
4–35	úroveň vnoření agregovaných rezervací (RFC 3175)
36–67	úroveň agregací QoS NSLP (RFC 5974)
68	NSIS NATFW NSLP (RFC 5973)
69	MPLS OAM (RFC 7506)

Tabulka 2.4: Definované *Hodnoty* pro volbu *Upozornění směrovače*

Aby tato volba přinášela nějaký efekt, musí odpovídající protokol nařizovat její použití. Směrovač má právo ignorovat obsah všech datagramů, které nejsou adresovány jemu a neobsahují *Upozornění směrovače*. Chce-li určitý protokol získat jeho pozornost, musí k datagramu přihodit tuto volbu.

Upozornění směrovače s sebou nese i určitá bezpečnostní rizika. Jejich rozbor, ale zejména doporučení pro operátory sítí, jak s datagramy nesoucími tuto volbu zacházet, najdete v RFC 6398: *IP Router Alert Considerations and Usage*.

V RFC 8250: *IPv6 Performance and Diagnostic Metrics (PDM) Destination Option* byla zavedena volba pro příjemce označovaná zkratkou PDM, která je určena pro měření zpoždění a spolehlivosti přenosů. Obsahuje pořadová čísla paketů a časové rozdíly mezi odeslanými a přijatými pakety.

2.4 Směrování

Standardně je datagram směrován podle své cílové adresy. Hlavička *Směrování (Routing)* umožňuje do tohoto procesu zasáhnout a předepsat jeden či několik bodů (IPv6 adres), jimiž musí datagram projít před doručením adresátovi. Motivace pro takové chování jsou různé, jak zanedlouho uvidíte.

IPv6 ponechává prostor pro zavedení různých typů směrovacích hlaviček. K jejich rozlišení slouží hodnota položky *Typ směrování*. Zatím byly definovány dva přesně popsané typy (0 a 2) a dva volné typy (hodnoty 253 a 254) určené pro experimentování se směrovacími mechanismy. Další informace o experimentálních typech najdete v RFC 4727, zde si jimi nebudu zabývat.

Typ 0 je starší, byl zaveden přímo v RFC 2460 jako součást definice jádra IPv6. Umožňuje předepsat datagramu určité body, kterými musí v daném pořadí projít. Zároveň slouží jako záznam, kterými z nich již prošel. Tyto „průchozí body“ nemusí následovat bezprostředně za sebou, mezi každými dvěma může datagram projít libovolným počtem směrovačů. Podobnou rozšiřující volbu nabízí i IPv4.

Funguje to tak, že se jako cílová adresa do datagramu vloží první průchozí bod. Když do něj datagram dorazí, přesune se jeho adresa do hlavičky *Směrování* jako hotová a cílem se stane další z průchozích bodů – a tak dál až do skutečného cíle.

Tento mechanismus je bohužel zneužitelný k útokům usilujícím o zahlcení přenosových tras. Útočník může nechat přepravovat datagramy sítí sem a tam a když navíc použije několik směrovacích hlaviček napěchovaných po okraj, může se datagram potulovat sítí velmi dlouho. Série takových datagramů dokáže v síti vytvořit datové toky s objemem mnohonásobně převyšujícím kapacitu útočníkova připojení[3], navíc i na velmi dlouhé trase.

3: Prakticky byl předveden 88násobek.

Důsledkem bylo zrušení směrovací hlavičky typu 0 v RFC 5095: *Deprecation of Type 0 Routing Headers in IPv6*. Podle něj je cílový IPv6 uzel, který obdržel datagram s hlavičkou *Směrování* typu 0, povinen ji ignorovat, pokud je konečným cílem celého řetězce. V opačném případě musí datagram zahodit a ohlásit jej odesilateli jako chybný. Kromě toho se zde doporučuje datagramy s tímto typem hlavičky *Směrování* filtrovat na aktivních prvcích.

Typ 2 byl definován speciálně pro mobilitu. De facto se jedná o silné zjednodušení obecnějšího typu 0 s jedinou adresou. Když je mobilní uzel na cestách, má kromě své původní pevné adresy i adresu dočasnou, jež se mění podle sítě, ve které se právě nachází. Pokud přechází mezi buňkami, může se dočasná adresa během komunikace měnit. Aby nebyla narušena komunikace běžících programů, používá pro ni svou trvalou, tak zvanou domácí adresu.

Jeho partner pomocí směrovací hlavičky typu 2 stanoví, že koncovou adresou je pevná adresa mobilního uzlu, ale má se nejprve dopravit na jeho dočasnou adresu. Čili datagram je dopraven na aktuální dočasnou adresu, tam se nahradí cílová adresa hodnotou ze směrovací hlavičky a vyšším komunikačním vrstvám se data doručí, jako by přišla na trvalou adresu.

Směrovací hlavička typu 2 proto umožňuje uložit jen jedinou adresu (domácí adresu mobilního uzlu, jemuž je datagram určen). To výrazně omezuje její zneužitelnost. Formát této směrovací hlavičky najdete na obrázku 11.16 na straně 263 v kapitole o mobilitě, kde se dočtete i podrobnější informace o jejím fungování.

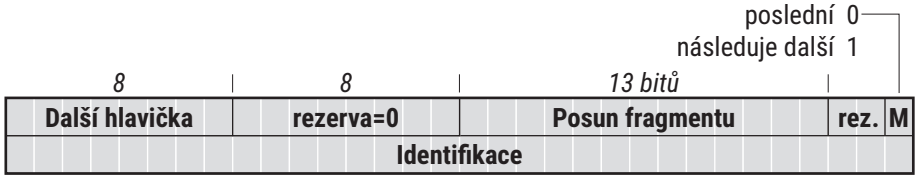
2.5 Fragmentace

Každá z podřízených technologií, které IPv6 používá pro přepravu svých datagramů, má jistou maximální velikost paketů, které dokáže přenášet. Tato konstanta se označuje zkratkou MTU (Maximum Transmission Unit). Například nejpopulárnější Ethernet má MTU = 1500 B.

Cílem fragmentace je umožnit IPv6 přepravovat datagramy větší, než je MTU používaných technologií. Základní myšlenka je prostá: odesilatel rozloží datagram do několika dostatečně malých částí a příjemce z nich poskládá původní datagram.

Analogickou techniku používá i protokol IPv4, liší se však v několika důležitých detailech. Zatímco v IPv4 může datagram fragmentovat libovolný směrovač po cestě (kdykoli má být odeslán linkou, jejíž MTU je menší než velikost datagramu), *v IPv6 fragmentuje výlučně odesilatel*. Pokud má některý ze směrovačů odeslat datagram linkou s nedostačujícím MTU, zahodí jej a pošle odesilateli ICMP zprávu „příliš velký paket“, jejíž součástí je i MTU, které tento stav způsobilo. Druhou odlišností je, že zatímco IPv4 má všechny podklady pro fragmentaci zařazeny již do standardní hlavičky, IPv6 pro ni používá hlavičku rozšiřující a spíše se snaží, aby k fragmentaci vůbec nedocházelo.

Rozšiřující hlavička *Fragmentace (Fragment)* je identifikována kódem 44 v položce *Další hlavička* svého bezprostředního předchůdce. Její tvar vidíte na obrázku 2.7. Velikost je konstantní a kromě obvyklé *Další hlavičky* obsahuje tři informační položky.



Obrázek 2.7: Rozšiřující hlavička *Fragmentace*

Identifikace (Identification) slouží k rozpoznání, které fragmenty patří k sobě. Jedná se o 32bitové celé číslo, které je v rámci dané dvojice odesilatel–příjemce pokud možno jednoznačné. Původně se používalo prosté zvětšování jeho hodnoty, jenže se objevily různé druhy útoků, které zneužívaly předvídatelné identifikátory. Proto řada současných implementací dává přednost pseudonáhodným či kryptografickým metodám. Podrobněji se problematice věnuje RFC 7739: *Security Implications of Predictable Fragment Identification Values*.

Posun fragmentu (Fragment offset) říká, kam tento fragment patří. Jednotkou jsou osmice bajtů od začátku fragmentovatelné části původního datagramu (viz níže). A konečně příznak *M (More fragments)* signalizuje, zda je tento fragment poslední (hodnota 0) nebo za ním následuje další (hodnota 1).

Hlavičky pro všechny fragmenty	Rozšiřující hlavičky a hlavička vyšší vrstvy	Fragmentovatelná část

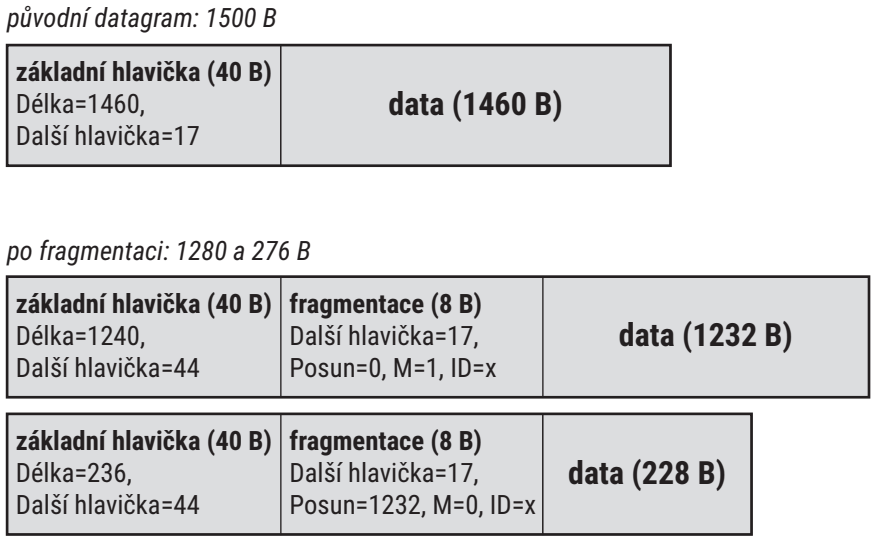
Obrázek 2.8: Části datagramu při fragmentaci

Má-li dojít k fragmentaci, vymezí se v původním datagramu tři části:

- Začátek tvoří hlavičky, které je třeba zopakovat (byť s drobnými změnami) ve všech fragmentech. Patří sem základní hlavička a všechny po ní následující rozšiřující hlavičky až po *Směrování* (včetně).
- Do druhé části patří zbývající rozšiřující hlavičky a hlavička transportní vrstvy, kterou začínají data. Tato část se musí vejít do prvního fragmentu.
- Zbytek datagramu je považován za *fragmentovatelnou část*. Rozdělí se na části tak, aby se výsledné fragmenty vešly do příslušného MTU a délka každého z nich (kromě posledního) byla násobkem osmi.

Datagramy obsahující jednotlivé fragmenty jsou sestaveny následovně:

- Převezmou se hlavičky pro všechny fragmenty z původního datagramu. Jedinými změnami, které se v nich pro jednotlivé fragmenty provedou, je úprava *Délky* v základní hlavičce, aby odpovídala skutečné délce fragmentu, a změna hodnoty poslední *Další hlavičky* na 44.
- Za ně se přidá rozšiřující hlavička *Fragmentace*, jejíž hodnoty se naplní následovně:
  - Vygeneruje se nový *Identifikátor* paketu a tato hodnota se přidělí všem jeho fragmentům.
  - Hodnota *Další hlavičky* se převezme z původní poslední *Další hlavičky* společné části hlaviček, která byla přepsána hodnotou 44.
  - *Posun* každého fragmentu se určí jako počet osmic bajtů, o které je jeho začátek vzdálen od začátku fragmentovatelné části původního datagramu. První fragment bude mít *Posun* nulový, u následujících je tvořen součtem délek fragmentů nesených předchozími pakety. Fragmenty se nesmí překrývat.
  - Poslednímu fragmentu se příznak *M* nastaví na 0, ostatním na 1.
- Na konec se připojí dotyčný fragment (úsek fragmentovatelné části původního datagramu).



Obrázek 2.9: Fragmentace datagramu

Příklad celého postupu vidíte na obrázku 2.9. Odeslání datagramu o velikosti 1500 B skončilo příchodem ICMP zprávy ohlašující překročení MTU s hodnotou 1280 B. Dojde tedy k rozdělení původního paketu do dvou fragmentů, hodnoty podstatných položek v hlavičkách jsou v obrázku uvedeny.

Vzniklé fragmenty jsou jako samostatné datagramy odeslány adresátovi. Ten je posbírá a z údajů ve fragmentační hlavičce dokáže složit původní datagram: podle *Identifikátoru* pozná, které frag-

menty patří k sobě, pomocí *Posunutí* určí správné pořadí a v kombinaci s *Délkou dat* zjistí případné chybějící části a konečně příznak *M* mu prozradí, zda má k dispozici všechny kousky.

Na základě těchto údajů příjemce poskládá původní datagram do podoby, kterou měl před fragmentací (tím zaniknou hlavičky *Fragmentace* jednotlivých částí) a ten pak dále zpracovává bez ohledu na to, že mu přišel po kouskách.

Fragmentace bohužel způsobuje řadu potíží a významně snižuje pravděpodobnost úspěšného doručení datagramu. Například firewally běžně zkoumají údaje transportního protokolu TCP nebo UDP, protože propouštějí jen povolené porty. Některé jsou nastaveny tak, že pokud datagram neobsahuje hlavičku transportního protokolu, zahodí jej. Ta je ovšem jen v prvním fragmentu. Popsaným typem firewallu projde vždy jen první fragment, zbývající jsou zahozeny a příjemce si původní datagram nikdy nesloží[4].

Další problém způsobuje zahazování ICMP zpráv, které se v Internetu stalo celkem běžným. Odesilatel se díky němu nemusí dozvědět, že paket neprošel a měl by jej rozdělit na menší.

A aby toho nebylo málo, fragmentaci lze zneužít k různým útokům. Řekněme, že v cestě je rozumný firewall, který sice kontroluje hlavičku transportní vrstvy, ale pokud propustí první fragment, povolí i jeho pokračování. Pak lze provozovat různé ošklivé triky, kdy útočník prvnímu fragmentu vloží do transportní hlavičky spořádané údaje, aby jej firewall propustil. Druhý fragment ponese ovšem nulový nebo velmi malý *Posun* a při skládání přepíše transportní hlavičku svého předchůdce nebo její část. Takto lze změnit porty, příznaky TCP, ledacos.

V reakci na triky s překrýváním fragmentů vzniklo RFC 5722: *Handling of Overlapping IPv6 Fragments*, které překrývání zakázalo. Odesilatel musí zajistit, že se fragmenty vzájemně nepřekrývají. A na druhé straně pokud příjemce zjistí, že se fragmenty přicházejícího datagramu překrývají, musí jej celý potichu zahodit.

Obecně je nejlepší se fragmentaci pokud možno vyhnout. Tím se dostáváme k velikosti datagramů.

2.6 Velikost datagramů

Zvolit optimální velikost datagramů je docela tvrdý oříšek. Každý datagram navíc přináší určitou (byť malou) zátěž – musí mít své hlavičky, směrovače po cestě se musí rozhodovat, kudy jej poslat, a podobně. Ideálem je, aby datagramy byly pokud možno co největší, aby jich bylo co nejméně

4: Situace je o to lepší, že testovací *ping* projde, protože posílá jen krátké pakety. Spojení se tedy při letmém testu jeví jako funkční, ovšem aplikace, která posílá dlouhé datagramy, po něm nic nepřenese.

a snižovala se tak nadbytečná zátěž. Na druhé straně však musí být natolik malé, aby nikde po své cestě nepřekročily MTU a nedocházelo k fragmentaci.

O dosažení tohoto kompromisu se snaží algoritmus nazvaný objevování MTU cesty. Definuje jej RFC 8201: *Path MTU Discovery for IP version 6*.

Z pohledu teoretika nemá vůbec smysl mluvit o nějakých cestách v souvislosti s protokolem IP. Nabízí službu bez spojení, kdy je každý datagram směrován samostatně a nezávisle na ostatních. To znamená, že každý ze skupiny datagramů tvořících jeden soubor může dorazit k cíli jinou cestou. V praxi se však směrovací tabulky nemění příliš rychle a je vysoce pravděpodobné, že datagramy odeslané v krátkém časovém intervalu ke stejnému cíli budou putovat stejnou trasou. Na tomto pozorování ostatně stojí již letitý program *traceroute*.

Objevování MTU cesty má za cíl najít maximální velikost paketu, který lze poslat danému cíli. Postupuje jednoduše: nejprve pošle datagram, jehož velikost je rovna MTU rozhraní, kterým datagram odesílá. Celkové MTU jistě nemůže být větší. Pokud datagram úspěšně dojde, máme nalezeno MTU cesty.

Jestliže někde narazí na úsek s menším MTU, směrovač na jeho začátku datagram zahodí a pošle odesilateli ICMP zprávu „příliš velký datagram“. Její součástí je i hodnota MTU dotyčné linky. Odesilatel si příslušně zmenší svůj odhad MTU cesty a zkusí štěstí znovu s datagramem této velikosti. Celý proces se opakuje tak dlouho, dokud se datagramy nedostanou až k cíli.

Informace o MTU cesty bývá využívána například v protokolu TCP, který jí přizpůsobí velikost odesílaných segmentů a snaží se tak předcházet jejich fragmentaci.

Pokud komunikace trvá delší dobu, může dojít ke změně cesty, případně i několikanásobné. Hledání MTU se snaží s touto skutečností vyrovnat. Pokud MTU cesty poklesne, odesilatel na to přijde hned – obdrží ICMP zprávu o příliš velkém datagramu. O případném zvětšení se však touto cestou nedozví. Proto by měl čas od času zopakovat celý algoritmus hledání MTU, aby zjistil, zda aktuální hodnota není vyšší, než se domnívá. V RFC se požaduje, aby interval mezi těmito zkouškami byl minimálně 5 minut, doporučená hodnota je 10 minut.

Ostatně vzhledem k tomu, že MTU na linkách podporujících IPv6 má být alespoň 1280 B a doporučuje se používat 1500 B nebo více, lze očekávat, že MTU cesty bude zpravidla 1500 B a prakticky se nebude měnit. Klient nesmí zmenšit MTU cesty pod 1280 B. Pokud by některá technologie nedokázala přepravovat datagramy této velikosti, musí na úrovni linkové vrstvy zajistit kouskování a skládání paketů tak, aby pro IPv6 nabídla alespoň 1280 B.

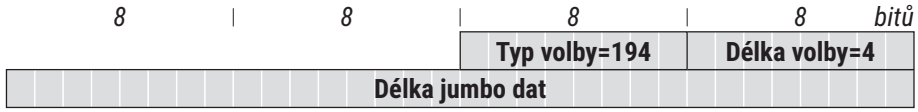
Objevování MTU cesty lze používat i pro skupinové adresy. V tomto případě může dostat na jeden datagram celou řadu ICMP zpráv. Bude se chovat podle očekávání – použije nejmenší ohlášenou hodnotu.

Implementace popsaného algoritmu je autory IPv6 důrazně doporučena, není však povinná. Jedná-li se o minimalistickou implementaci IPv6 (např. v ROM přenosného zařízení), může používat hodnotu 1280 B, aniž by se pokoušela zjistit, zda skutečné MTU cesty není vyšší.

2.7 Jumbogramy

Jelikož je délka nesených dat v IPv6 datagramu ukládána do 16bitové položky, je maximální dosažitelnou hodnotou 65 535 bajtů. Jumbogramy poskytují nástroj, jak přepravovat ještě delší pakety. Nesetkaly se ovšem s reálným nasazením, proto byly z poslední verze požadavků na IPv6 uzel (RFC 8504) odstraněny a lze je považovat za opuštěné.

Jumbogramy zavedlo RFC 2675: *IPv6 Jumbograms*. Jejich základem je volba *Jumbo obsah (Jumbo payload)*, která umožňuje vytvářet datagramy o délce 65 536 až 4 294 967 295 B. Patří mezi *Volby pro všechny*, takže se jí bude zabývat každý směrovač po trase. Použití je prosté: *Délka dat* v základní hlavičce se vynuluje a přidá se rozšiřující hlavička s volbami pro všechny obsahující *Jumbo obsah*. Nese položku *Délka jumbo dat (Jumbo payload length)*, která měří 32 bitů a umožňuje proto výše uvedený rozsah přípustných hodnot. Takto velké datagramy jsou označovány jako jumbogramy.



Obrázek 2.10: Volba *Jumbo obsah*

Použití jumbogramů má pochopitelně smysl jen v případě, kdy linková technologie umožňuje přenos takto velkých paketů. Jinými slovy, pokud MTU dotyčné linky přesahuje 65 575 (maximální velikost nesených dat plus IPv6 hlavička). Jumbogramy totiž nesmí být fragmentovány. Uzly, které nemají tak velké MTU, nemusí jumbogramy podporovat a ani této volbě rozumět.

Příliš velké datagramy ale vadí i protokolům vyšší vrstvy. Jak UDP, tak TCP počítá s maximální délkou paketu 65 535 bajtů. RFC 2675 obsahuje návrhy na úpravy kódu transportní vrstvy, které by se s těmito omezeními vypořádaly. Vzhledem k tomu, že jumbogramy byly odsunuty do pozice zajímavé kuriozity, nemá cenu se jim více věnovat.

2.8 Rychlý start

Rozšiřující hlavička *Rychlý start (Quickstart)* byla přidána experimentálním RFC 4782: *Quick-Start for TCP and IP*. Jeho cílem je zvýšit propustnost transportních protokolů, především TCP. Stroj zahajující komunikaci přidá do žádosti o navázání TCP spojení tuto hlavičku, v níž vyznačí přenosovou rychlost, jakou by rád používal.

Jedná se o volbu pro všechny, hlavičkou se tedy zabývají všechny směrovače po cestě a pokud některý z nich považuje navrženou přenosovou rychlost za příliš vysokou, sníží hodnotu na akceptovatelnou úroveň. Při příchodu do cílového stroje tedy hlavička obsahuje rychlost přijatelnou pro všechna zařízení na cestě mezi odesilatelem a příjemcem. Během komunikace je pochopitelně tato informace čas od času aktualizována.

Vzhledem k tomu, že dotyčný protokol je experimentální a s vlastním IPv6 souvisí jen volně, nebudu mu zde věnovat větší pozornost.

2.9 Toky

Jedním z nových prvků IPv6 je koncepce toku. Idea je jasná: tok je proud datagramů, které spolu „nějak souvisí". Často tok odpovídá transportnímu spojení (například TCP spojení mezi WWW klientem a serverem či IP telefonní hovor mohou být dobrými kandidáty pro tok), ale nemusí tomu tak nutně být.

Přestože se termín ve světě IPv4 nepoužívá, analogie toků zde existuje. Obvykle bývají identifikovány pěticí údajů:

- zdrojová IP adresa,
- zdrojový port,
- cílová IP adresa,
- cílový port,
- transportní protokol.

Pokud jste někdy konfigurovali firewall, jistě vám tahle pětka je důvěrně známá. Typickým příkladem uplatnění de facto toku je stavový firewall, který povolí otevřít TCP spojení jen v jednom směru. Jakmile se tak stane, uloží si pětici uvedených údajů do paměti a po určitou dobu obousměrně propouští datagramy s příslušnými hodnotami, protože je považuje za součást otevřeného spojení (čili toku).

Problém je, že tři z pěti údajů patří do transportní vrstvy a nemusí být snadno dostupné. Dojde-li k fragmentaci datagramu, jsou transportní údaje obsaženy jen v prvním fragmentu. Při utajení pomocí hlavičky ESP se k nim prvky po cestě nedostanou vůbec, protože jsou zašifrovány a z prin-

cipu věci je dešifrovat umí jen příjemce. Nebo sice jsou dostupné, ale cesta k nim vede dlouhou sekvencí rozšiřujících hlaviček a zbytečně zpracující zařízení zdržuje.

Proto se objevil koncept toků, který má pomoci identifikovat související datagramy snadno a rychle, jen pomocí údajů ze základní IP hlavičky. Výše zmíněnou pětici má nahradit trojice:

- zdrojová IPv6 adresa,
- cílová IPv6 adresa,
- značka toku.

Problematika toků je dosud živá. Původní RFC 2460 ji neřešilo vůbec, odložilo definici na později. První krok na cestě k funkčním tokům učinilo RFC 3697: *IPv6 Flow Label Specification*, které definovalo pravidla pro zacházení se značkami toků v datagramech. Postupem času se objevila řada návrhů, k čemu všemu a jak by se dala *Značka toku* ze základní hlavičky využít. Jejich přehled najdete v RFC 6294: *Survey of Proposed Use Cases for the IPv6 Flow Label*. Obvykle však odporují některým pravidlům zavedeným v RFC 3697.

Na podzim 2011 pak vyšla nová generace dokumentů, které se snaží postrčit definici toků zase o něco dál. Zahrnuje RFC 6436: *Rationale for Update to the IPv6 Flow Label Specification* shrnující dosavadní zkušenosti a motivaci nové specifikace. Ta je obsažena v RFC 6437: *IPv6 Flow Label Specification*, jež nahrazuje RFC 3697.

Hodnota značky podle RFC 6437 nemá žádnou strukturu ani význam. Slouží čistě jako identifikátor. Pokud odesilatel nechce své datagramy značkovat, vloží do položky *Značka toku* nulu, která signalizuje, že paket není zařazen do žádného toku. Nula je jedinou hodnotou, pro niž specifikace zavádí speciální význam.

Přidělení značky toku má na starosti odesilatel datagramu. Svou vlastní značku typicky dostane každý datový tok se stejnou pěticí základních identifikačních údajů, již jsem zmínil výše. Nicméně není to předepsáno pevně, rozhodnutí je na odesilateli.

Specifikace požaduje, aby hodnoty značek byly rovnoměrně rozděleny v celém dostupném prostoru a aby se nedaly předem odhadnout. Důvodem těchto požadavků je snaha o jejich snadnou použitelnost při hašování a omezení bezpečnostních rizik. Jako vhodné generátory značek dokument zmiňuje hašovací funkci nebo generátor pseudonáhodných čísel. Naopak výslovně nedoporučuje sekvenční přiřazování, kdy každá další značka je o jedničku větší než poslední použitá.

Během přepravy sítí se značka nesmí měnit a musí být příjemci doručena se stejnou hodnotou, jakou jí přidělil odesilatel. Z tohoto obecného pravidla ovšem existují dvě výjimky. První je motivována bezpečností: Pokud by některý ze směrujících strojů dospěl k závěru, že se někdo snaží zneužít značky k vytvoření tajného informačního kanálu, smí do nich zasáhnout. Druhou výjim-

kou je nulová značka. Jestliže se odesilatel rozhodl datagram neznačkovat, může to za něj udělat některý ze směrovačů[5]. Jakmile došlo ke vložení nenulové hodnoty, musí už dále zůstat neměnná.

Způsob využití při přepravě není pevně definován. Existují v zásadě dvě cesty: může být bezstavový, kdy si přepravující prvky neukládají žádné informace, jež by při doručování značkovaných datagramů využívaly, či stavový, který se právě o takové informace opírá. Návrh dává přednost bezstavové variantě, zatímco o stavové se zmiňuje jen okrajově.

Podpora toků není povinná[6]. Průchozí zařízení může brát na tok zřetel, nebo nemusí. V tom případě však musí informace související s tokem ignorovat a nijak do nich nezasahovat. Tím je zajištěno, že nic nepokazí strojům, které jsou za ním a věci rozumějí.

Na novou specifikaci toků navazuje RFC 6438: *Using the IPv6 Flow Label for Equal Cost Multipath Routing and Link Aggregation in Tunnels* s příkladem možného využití *Značky toku* k rozkládání zátěže mezi několik alternativních cest vedoucích ke stejnému cíli. RFC 7098: *Using the IPv6 Flow Label for Load Balancing in Server Farms* později přišlo s návrhem využít značky toků k distribuci paketů v rámci serverové farmy.

V praxi se zatím lze se značkováním toků setkat jen zcela ojediněle, valná většina datagramů v Internetu nese nulovou značku. Nová generace dokumentů představuje určitý posun vpřed, ale na reálné používání značek si nepochybně ještě dost dlouho počkáme.

5: Typickými kandidáty pro takové chování jsou přístupový směrovač koncové sítě nebo vstupní směrovač poskytovatele Internetu.

6: Ale podle RFC 8504 by toky měly být podporovány v každém zařízení implementujícím IPv6.

3 Adresy v IPv6

Rychle se tenčící adresní prostor byl jedním z hlavních hnacích motorů vzniku IPv6. Přestože navržený protokol má i řadu jiných zajímavých vlastností, dodnes je košatost jeho adresního prostoru považována za klíčovou přednost a s krátící se zásobou IPv4 adres nabývá na naléhavosti. Podívejme se na ni podrobněji.

Základním dokumentem pro definici adres je RFC 4291: *IP Version 6 Addressing Architecture* určující jejich délku a podobu, typy adres a další koncepční prvky. Je doplněn několika dalšími dokumenty popisujícími podrobněji vybrané části adresního prostoru.

3.1 Jak se adresuje

V IPv6 – stejně jako u jeho předchůdce – jsou adresy přiřazovány síťovým rozhraním, nikoli zařízením. Má-li váš počítač dvě síťové karty, bude mít každá z nich svou adresu. Přesněji řečeno své adresy. Později uvidíte, že IPv6 s adresami pro rozhraní nikterak neskrblí.

Existují tři druhy adres s odlišným chováním:

- **Individuální (unicast)** jsou staré známé krotké adresy. Každá z nich identifikuje jedno síťové rozhraní a data mají být dopravena právě jemu.
- **Skupinové (multicast)** slouží pro adresování skupin počítačů či jiných zařízení. Pokud někdo odešle data na tuto adresu, musí být doručena všem členům skupiny.
- **Výběrové (anycast)** představují novinku a nejzajímavější přírůstek v IPv6. Také výběrové adresy označují skupinu, data se však doručí jen jedinému jejímu členovi – tomu, který je nejblíže.

Porovnání s IPv4 ukazuje, že zmizely všesměrové (broadcast) adresy. Nejsou potřeba, protože jejich funkce přebírají obecnější adresy skupinové. Jsou definovány speciální skupiny, např. pro všechny uzly na dané lince, které umožňují plošnou distribuci zpráv.

IPv6 umožňuje, aby rozhraní mělo libovolný počet adres různých druhů. Ba dokonce přikazuje několik povinných adres, které musí být přiděleny (viz část 3.10 na straně 92). Stejně jako v IPv4 se předpokládá, že všechny počítače v jedné fyzické síti (např. na jednom Ethernetu) budou náležet do stejné podsítě a budou tudíž mít společný prefix podsítě.

3.2 Podoba a zápis adresy

Při rozhodování o velikosti adresy pro IPv6 se autoři řídili heslem „aby nám už nikdy nedošly“. Frustrace způsobená nedostatkem IPv4 adres byla velmi silná. Proto se rozhodli délku prodloužit na čtyřnásobek, adresa v IPv6 tedy měří 128 bitů.

Standardním způsobem jejího zápisu je osm skupin po čtyřech číslicích šestnáctkové soustavy, které vyjadřují hodnoty 16 bitů dlouhých částí adresy. Navzájem se oddělují dvojtečkami. Příkladem IPv6 adresy je:

fedc:ba98:7654:3210:fedc:ba98:7654:3210

Upřímně řečeno se očekává, že uživatelé budou striktně používat DNS a ručního psaní uvedených hrůz budou ušetřeni. Černý Petr zbude v rukou správců sítí, kteří se jim při sebevětším úsilí nevyhnou…

Jelikož je poměrně častou hodnotou nula, nabízí se dvě možnosti pro zkrácení zápisu. Jednak v každé čtveřici můžete vynechat počáteční nuly. Místo „0000“ tedy lze psát jen „0“. Někdy se dokonce vyskytuje několik nulových skupin za sebou. Ty můžete nahradit zápisem „::“ (dvě dvojtečky). Například adresu:

0123:0000:0000:0000:fedc:ba98:7654:3210

můžete zkrátit na:

123:0:0:0:fedc:ba98:7654:3210

nebo dokonce jen na:

123::fedc:ba98:7654:3210

Koncovou nulu (v poslední čtveřici) pochopitelně vynechat nelze. Kdybyste napsali jen „321“, znamenalo by to „0321“, nikoli „3210“. Úplný extrém představuje nedefinovaná adresa:

0000:0000:0000:0000:0000:0000:0000:0000

kterou lze zkrátit až na samotné:

::

Konstrukci „::“ můžete v každé adrese použít jen jednou. Jinak by nebylo jednoznačné, jak se má adresa rozvinout do původní podoby. Například adresu:

0123:0000:0000:0000:4567:0000:0000:0000

můžete psát jako:

123::4567:0:0:0 nebo 123:0:0:0:4567::

nikoli však:

123::4567::

Velká variabilita v zápisu adres komplikuje jejich porovnávání. Výše vidíte několik příkladů výrazně odlišných zápisů stejné adresy, navíc mohou situaci ještě komplikovat malá/velká písmena a pro lidského čtenáře v některých písmech potenciálně zaměnitelné znaky „B“ a „8“ či „D“ a „0“.

RFC 5952: *A Recommendation for IPv6 Address Text Representation* proto definovalo *kanonický zápis*, jehož cílem je učinit psanou podobu adresy jednoznačnou. Dokument zdůrazňuje, že aplikace musí podporovat všechny přípustné podoby adresy, ale ve svých výstupech, jako jsou výpisy či hodnoty v konfiguračních dialozích, by měly používat kanonický tvar. Pravidla pro jeho vytvoření jsou následující:

- Šestnáctkové číslice reprezentované písmeny se píší vždy malými znaky.
- Vynechání počátečních nul ve čtveřici je povinné.
- Konstrukce „::“ musí být použita tak, aby měla největší možný efekt. Musí pohltit všechny vzájemně sousedící nulové skupiny (není povoleno „:0::“ ani „::0:“) a musí být použita pro nejdelší sekvenci nulových skupin v adrese. Má-li shodnou maximální délku několik skupin, použije se „::“ pro první z nich. Není povoleno ji použít pro jedinou nulovou skupinu, ta vždy zůstane jako jednoduchá nula.

Kanonický tvar výše uvedené adresy je 123::4567:0:0:0 a software by ji vždy měl vypisovat v této podobě.

Při *zápisu adresy do URL* bohužel nelze použít stejně přímočarý přístup jako v případě IPv4, kdy se jednoduše místo doménového jména uvede číselná adresa. Dvojtečky jsou v URL používány k oddělení čísla portu od jména či adresy a jejich přítomnost by byla pro interpretující software matoucí. Má-li se v URL vyskytnout IPv6 adresa, musíte ji uzavřít do hranatých závorek. Takže například URL s IPv6 adresou *www.nic.cz* by vypadalo takto:

```
http://[2001:1488:0:3::2]/
```

Podrobně je vše popsáno v RFC 3986: *Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax*.

Příslušnost k určité síti nebo podsíti se vyjadřuje prefixem – všechna rozhraní v jedné síti mají stejný prefix (začátek adresy). Jeho délka může být různá, záleží na tom, s jakou podrobností se na adresy díváte. Může vás zajímat jen prefix poskytovatele Internetu (který bude poměrně krátký) nebo o poznání delší prefix určité konkrétní podsítě.

Tento přístup se používá již v současném Internetu pod názvem *Classless Inter-Domain Routing (CIDR)*. Z něj je také převzat způsob, kterým se prefixy zapisují:

IPv6_adresa/délka_prefixu

Délka_prefixu určuje, kolik bitů od začátku adresy je považováno za prefix. Například 60 bitů dlouhý prefix 12ab:0000:0000:cd3 lze zapsat několika možnými způsoby:

12ab:0:0:cd30:0:0:0:0/60
12ab::cd30:0:0:0:0/60
12ab:0:0:cd30::/60

Nejvhodnější je poslední z nich, protože odpovídá kanonickému tvaru a navíc konstrukcí „::“ logicky nahrazuje závěrečnou část adresy, která je z pohledu prefixu nezajímavá. Povšimněte si, že do prefixu nepatří ani závěrečná nula ve skupině cd30, protože při délce 60 bitů do prefixu z této skupiny patří jen 12 bitů, čili první tři šestnáctkové číslice. Tuto nulu však nelze vynechat. Kdybychom to udělali, byla by příslušná skupina interpretována jako 0cd3 a zápisem 12ab:0:0:cd3::/60 bychom ve skutečnosti vyjádřili prefix 12ab 0000 0000 0cd, což je krajně matoucí.

Prefix pochopitelně nemusí končit na hranici šestnáctkových číslic. Například prefix 2000::/3 požaduje, aby první tři bity adresy obsahovaly hodnotu 001 (binárně). Tomu vyhoví všechny IPv6 adresy, jejichž první číslicí je 2 nebo 3.

Ve zkratce lze použít i zápis, který současně oznamuje jak konkrétní adresu rozhraní, tak délku prefixu (a tudíž adresu podsítě):

12ab:0:0:cd30:123:4567:89ab:cdef/64

3.3 Rozdělení aneb typy adres

Obrovský adresní prostor, který má IPv6 k dispozici, rozpoutal hotové orgie kreativity. Vzniklo několik typů sdružujících adresy se společnou charakteristikou. Příslušnost k jednotlivým typům určuje prefix adresy. Dříve se pro tyto určující počáteční bity používal termín *prefix formátu (format prefix, FP)*, novější dokumenty však od tohoto pojmu upouští.

Základní rozdělení uvádí tabulka 3.1, v níž najdete i odkazy na stránky, kde jednotlivé třídy rozebírám podrobněji. Jak je vidět, drtivou většinu zabírají globální (celosvětově jednoznačné) individuální adresy. Z jejich prostoru je navíc většina prefixů dosud nepřiřazena, zatím se využívá pouze výše zmiňovaný prefix 2000::/3. Ostatní se ponechávají jako rezerva a očekává se, že budoucí RFC jim přiřknou určitý význam a vnitřní strukturu. Aktuální stav jejich přidělení najdete na adrese

prefix	*význam*
::/128	nedefinovaná adresa
::1/128	smyčka (loopback)
fc00::/7	unikátní individuální lokální (strana 78)
fe80::/10	individuální lokální linkové (strana 76)
ff00::/8	skupinové adresy (strana 82)
ostatní	individuální globální (strana 70)
známé prefixy	
64:ff9b::/96	adresy s vloženým IPv4
64:ff9b:1::/48	lokální adresy pro přechodové mechanismy
2001::/32	Teredo
2001:db8::/32	adresy pro příklady v dokumentech
2002::/16	6to4

Tabulka 3.1: Základní rozvržení adres a vybrané prefixy

https://www.iana.org/assignments/ipv6-address-space

Skupinové adresy jsou snadno identifikovatelné, protože jejich první bajt má v šestnáctkovém zápisu hodnotu ff. Naproti tomu výběrové adresy nemají přiřazeno žádné speciální rozmezí a přidělují se ze stejného prostoru, jako adresy individuální.

Několika menším oblastem adresního prostoru byl přidělen specifický význam. Celý prefix ::/8 byl původně rezervován pro speciální účely. Nyní je deklarován jako nepřiřazený, některé adresy v jeho rámci však přiřazeny byly. Jedná se zejména o individuální adresy :: a ::1. První se používá pro nedefinovanou adresu. Říká, že dotyčnému rozhraní dosud nebyla přidělena IPv6 adresa. ::1 je pak adresou lokální smyčky (loopback), kterou počítač-schizofrenik může komunikovat sám se sebou. Spadají sem také prefixy přidělené pro IPv6 adresy obsahující v sobě IPv4 (viz strana 79).

Skupinka prefixů identifikuje adresy s omezeným dosahem. Nejčastěji se setkáte s lokálními linkovými adresami, které jsou jednoznačné vždy jen v rámci jedné linky (jednoho Ethernetu, jedné Wi-Fi buňky, …). Poznáte je podle prefixu fe80::/10 a najdete je u každého rozhraní se zapnutým IPv6. Vedle nich dříve existovaly místní individuální lokální adresy s prefixem fec0::/10 jednoznač-

né v místní síti. Později však byly zrušeny, proto se jejich prefix v tabulce nevyskytuje. Nahradily je unikátní individuální lokální adresy s prefixem fc00::/7.

Podívejme se nyní podrobněji na jednotlivé kategorie.

3.4 Globální individuální adresy

Tento typ adres je nejdůležitější, protože se jedná o „normální" adresy – protipól adres současného IPv4. Slůvko globální naznačuje, že identifikují svého nositele v rámci celého Internetu a musí tudíž být celosvětově jednoznačné. Zatím byla definována jen část z nich (prefix 001 binárně), jejíž strukturu definuje RFC 3587: *IPv6 Global Unicast Address Format*.

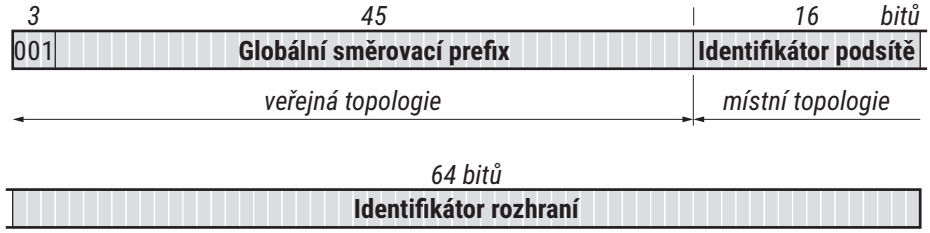
Globální adresy jsou přidělovány hierarchicky podle pravidel podobných CIDR ze světa IPv4. To znamená, že poskytovatel Internetu (neboli lokální registr, LIR) obdrží určitý prefix, jehož části v podobě delších prefixů se shodným začátkem pak přiděluje svým zákazníkům. Cílem tohoto přístupu je agregace směrovacích údajů – aby bylo možné při pohledu zvenčí celou poskytovatelovu síť i se všemi zákazníky popsat jediným záznamem ve směrovacích tabulkách, obsahujícím onen společný prefix.

Toto shlukování je velmi důležité, protože významným způsobem zmenšuje velikost směrovacích tabulek. Jemnost členění směrovacích informací přirozeně klesá se vzdáleností od místa určení. Původně se koncept agregace promítal i do struktury adresy, která byla složena z identifikátorů několika úrovní. K praktickému naplnění této vize však nedošlo a reálně používané adresy původní koncept nedodržovaly.

Proto byl opuštěn a RFC 3587 zavedlo maximálně zjednodušený model, v podstatě odpovídající struktuře adresy pro IPv4. Ta má tři části: adresu sítě, podsítě a rozhraní v podsíti. Analogické části má i IPv6 adresa, jen adresa sítě byla přejmenována na globální směrovací prefix. Jejich délky jsou definovány zcela obecně, podle současných pravidel přidělování však globální směrovací prefix měří nejčastěji 48 bitů, adresa podsítě 16 bitů a adresa rozhraní v podsíti 64 bitů. Strukturu globální individuální adresy s nejobvyklejšími délkami jednotlivých částí znázorňuje obrázek 3.1.

Globální směrovací prefix identifikuje koncovou síť. Je síti přidělen „zvenčí" lokálním internetovým registrem, čili zpravidla poskytovatelem Internetu. Proto bývá tato část adresy označována jako „veřejná topologie". Podrobněji se k problematice přidělování globálního směrovacího prefixu vrátím v části 3.14 na straně 109. Kromě nejběžnější délky 48 bitů se u malých koncových sítí lze setkat i s prefixy délky 56 či 64 b.

Identifikátor podsítě slouží k rozlišení jednotlivých podsítí v rámci dané sítě. Tato část adresy je, společně s identifikátorem rozhraní, záležitostí správy koncové sítě a používá se pro ni označení



Obrázek 3.1: Obvyklá struktura globální individuální adresy

„místní topologie“. Délka identifikátoru rozhraní závisí na délce globálního směrovacího prefixu – dohromady musí měřit 64 bitů. Obvyklými hodnotami jsou 16 a 8 bitů, pokud je ovšem globální směrovací prefix 64bitový, na identifikátor podsítě už nezbývá žádné místo a příslušná síť není dělena na podsítě. Identifikátor rozhraní má totiž konstantní délku 64 bitů.

Pouze v ojedinělých případech, jako jsou například propojovací podsítě na linkách spojujících pouhá dvě zařízení, má smysl uvažovat o dlouhých adresách podsítě a ponechání jen minimálního prostoru pro identifikátor rozhraní. Podrobněji se této problematice věnuji na straně 334, kde jsou rozebrány různé varianty adresování dvoubodových sítí, jejich přednosti a nevýhody.

Nejběžnější délkou identifikátoru podsítě je 16 b, což umožňuje rozlišit 65 536 podsítí. To stačí i pro opravdu velké sítě. Obecně mívá správce sítě k dispozici nebývalé množství adresního prostoru[1] a díky tomu volné ruce při strukturování koncové sítě a návrhu jejího adresního plánu. Problematice se budu věnovat v části 13.5 na straně 331.

Závěrečný *identifikátor rozhraní* zabírá celou polovinu adresy, což umožňuje v jedné podsíti rozlišit něco přes $18 \cdot 10^{18}$ různých rozhraní (tedy miliardy miliard). Motivací k takto velkorysému dimenzování podsítě byla snaha o maximální zjednodušení automatické konfigurace počítačů. Nicméně nelze přehlížet, že AppleTalk zvládal automatickou konfiguraci s jediným bajtem[2] a IPv4 stačí čtyři bajty pro celosvětově jednoznačné adresy. Investovat osm bajtů na dosažení jednoznačnosti v jediné podsíti je zkrátka plýtvání. Důvody, které k tomu vedly, a diskusi o výhodách a nevýhodách najdete v RFC 7421: *Analysis of the 64-bit Boundary in IPv6 Addressing*.

Ať už si o tom myslíme, co chceme, RFC 4291 jednoznačně stanoví, že pro všechny individuální adresy (s výjimkou adres s prefixem 0::/3) je vyžadována délka identifikátoru rozhraní 64 bitů. Závěrečná část adresy prodělala poměrně zajímavý historický vývoj.

1: Pokud je jeho poskytovatel Internetu skrblík, dostane „jen“ 8 bitů pro 256 podsítí.
2: Pravda, omezovalo to počet rozhraní v podsíti na 256, což by pro IPv6 jistě nebylo akceptovatelné.

3.5 Identifikátory rozhraní

Cílem identifikátoru rozhraní je rozlišit jednotlivá síťová rozhraní v rámci podsítě. IPv6 pro něj vyhradilo celou polovinu adresy, což se jeví jako značně velkorysé. Občas se kolem jeho velikosti vedou vzrušené debaty, ale zatím není patrná významnější snaha ji změnit.

Identifikátor rozhraní může samozřejmě přidělit správce sítě a nastavit jej buď manuálně, nebo prostřednictvím DHCP (budu se mu věnovat v části 6.5 na straně 147). Ovšem IPv6 se snaží maximálně usnadnit automatickou konfiguraci, aby si zařízení dokázalo nastavit adresu samo a potřebovalo jen minimum informací ze svého okolí. Jedná se o tak zvanou bezstavovou autokonfiguraci, jejíž popis najdete na začátku kapitoly 6 na straně 135.

Podle původní specifikace měl identifikátor rozhraní obsahovat modifikované EUI-64, které vychází z linkové adresy (podrobnosti viz níže). Měl být snadno odvoditelný a stejný pro všechny podsítě, do nichž se dané zařízení připojilo. Tento přístup ovšem znamená, že identifikátor rozhraní v sobě obsahuje globální identifikátor. To s sebou bohužel nese několik bezpečnostních problémů:

- Lze sledovat pohyby zařízení v celém Internetu a korelovat jeho komunikaci.
- Lze z něj odvodit MAC adresu, podle ní poznat výrobce či dokonce typ zařízení a zaměřit se na jeho známé slabiny.
- Při plošném skenování podsítě lze omezit výběr zkoušených adres.

Proto se modifikované EUI-64 postupně opouštělo. Nejprve se objevily adresy zachovávající soukromí – náhodné krátkodobé identifikátory rozhraní, které si zařízení vytvoří, nějakou dobu používá pro odchozí spojení, následně zahodí a vygeneruje si nový. Vedle nich ovšem zařízení stále má svou stabilní adresu s EUI-64. Už je obtížné je sledovat, protože samo navazuje spojení z náhodných adres, ale ostatní problémy zůstávají. Navíc dočasné adresy způsobují vrásky na čele správců sítě, například při nastavování firewallů nebo dohledávání bezpečnostních incidentů.

S EUI-64 to pak šlo celkem rychle z kopce. RFC 7136 zrušilo speciální význam jakýchkoli bitů v identifikátoru rozhraní individuálních adres a prohlásilo jej za prostý řetězec bitů bez struktury. Poté RFC 7217 definovalo nový způsob generování identifikátoru rozhraní, který je náhodný, ale zároveň stálý pro danou podsíť. A konečně RFC 8064 doporučilo tento způsob používat při bezstavové konfiguraci jako výchozí.

Čili podle aktuálních pravidel by pro každý prefix mělo zařízení mít tyto identifikátory rozhraní:

- Stabilní, typicky náhodný podle RFC 7217, ale lze použít i jiné varianty, jako je explicitní přiřazení nebo CGA (dočtete se o něm v části 5.4 na straně 127).
- Navíc může používat náhodné krátkodobé podle RFC 4941.

Podívejme se nyní podrobněji na jednotlivé alternativy pro konstrukci identifikátoru rozhraní.

Stabilní náhodné identifikátory rozhraní by měly představovat nejběžněji se vyskytující odrůdu. Při jejich návrhu se IETF snažilo, aby vytvářené identifikátory o zařízení nic neprozrazovaly, v různých podsítích se lišily, ale ve stejné podsíti zůstávaly neměnné, tudíž snadněji uchopitelné pro její správce.

Výsledkem je RFC 7217: *A Method for Generating Semantically Opaque Interface Identifiers with IPv6 Stateless Address Autoconfiguration (SLAAC)*, podle nějž si počítač vytvoří identifikátor rozhraní s požadovanými vlastnostmi. Jeho základem je náhodný identifikátor RID vypočtený takto:

RID = *F*(*prefix*, *rozhraní*, *IDsítě*, *čítač*, *klíč*)

F je hašovací funkce, doporučují například SHA-1 nebo SHA-256. Jako parametr se jí předloží zřetězení prefixu dané podsítě, identifikátoru rozhraní, identifikátoru sítě (např. SSID, toto je jediný nepovinný údaj), čítače (začíná vždy od 0) a tajného klíče, který si zařízení jednou vygeneruje a uloží. Klíč je jedinou informací, kterou je třeba si pamatovat, aby adresa zůstala stabilní.

Jelikož do výpočtu RID vstupují informace o prefixu, bude výsledná hodnota v každé podsíti jiná. Při opakovaném připojení ke stejné podsíti ovšem proběhne stejný výpočet se stejnými hodnotami, takže si zařízení vytvoří shodný identifikátor.

Z RID se pak vezme konec potřebné délky, typicky posledních 64 bitů, spojí s prefixem podsítě a vznikne adresa. Následně se ověří, zda již není obsazena (podrobnosti se dočtete na straně 140). Pravděpodobnost je sice minimální, ale teoreticky se to stát může. V takovém případě se čítač zvětší o jedničku a celý postup se opakuje. Zařízení si může zapamatovat hodnotu čítače, pro kterou v dané síti uspělo, a příště zde začít rovnou od ní.

RFC 7943: *A Method for Generating Semantically Opaque Interface Identifiers (IIDs) with the Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6)* zavádí podobnou metodu i pro výběr adres, které klientům poskytuje DHCPv6 server.

Dočasné adresy zachovávající soukromí vznikly jako reakce na nedostatky původně plánovaného používání EUI-64. Jejich cílem byla ochrana soukromí, tedy ztížení sledování aktivit daného uživatele. Proto jsou náhodné a jejich životnost je omezena na několik hodin až dnů, poté se změní. Jejich definici původně přineslo RFC 3041, později bylo nahrazeno RFC 4941: *Privacy Extensions for Stateless Address Autoconfiguration in IPv6*.

V současnosti se chystá další aktualizace dokumentu (draft-ietf-6man-rfc4941bis), která doporučuje používat pro generování dočasných adres podobný algoritmus jako RFC 7217 a do parametrů hašovací funkce přidat čas.

Tyto adresy zařízení používá, pokud je iniciátorem komunikace. Jestliže například brouzdáte po webu z počítače používajícího dočasné adresy, váš WWW prohlížeč navazuje spojení s WWW servery z těchto adres. Zítra bude adresa jiná, takže ze zachyceného síťového provozu nebude viditelné, že se serverem komunikuje stejný stroj.

Ovšem je potřeba i nějaký pevný bod, aby se s takovýmto počítačem dalo vůbec navázat spojení. Proto RFC 4941 navrhuje, aby počítač měl jeden pevný identifikátor rozhraní (např generovaný výše popsanou metodou nebo podle EUI-64), pod nímž bude zaveden v DNS. Hlavním smyslem této adresy je sloužit jako cílový bod pro komunikaci navazovanou zvenčí. Vedle ní si navíc počítač generuje náhodné dočasné identifikátory. Adresám z nich odvozeným bude dávat přednost, když sám navazuje spojení s někým jiným. Tyto identifikátory nebudou zavedeny v DNS (jinak by se celý efekt znehodnotil – počítač by sice střídal adresy, ale dal by se poznat podle shodného jména v DNS).

RFC 4291 původně předpokládalo, že předposlední bit v nejvyšším bajtu bude nadále odlišovat globálně platné identifikátory (hodnota 1) od lokálních (hodnota 0). Náhodně generované adresy ovšem tento význam nerespektují a zacházejí se všemi 64 bity stejně. Jejich rozšíření vedlo k opuštění původní představy a k vydání RFC 7136, jež zrušilo speciální význam předposledního bitu a oficiálně prohlásilo identifikátor rozhraní za 64bitovou hodnotu bez jakékoli vnitřní struktury.

Nepředvídatelnost krátkodobých adres a jejich časté střídání komplikují život správcům sítí. Mají-li být případné incidenty později dohledatelné, je třeba ukládat si historii vazeb mezi aktuálně používanými IPv6 adresami a nějakými trvalými identifikátory (např. MAC adresa nebo autentizovaný uživatel). Adresy také přestávají být použitelné pro přístupová oprávnění či nastavování přenosových parametrů.

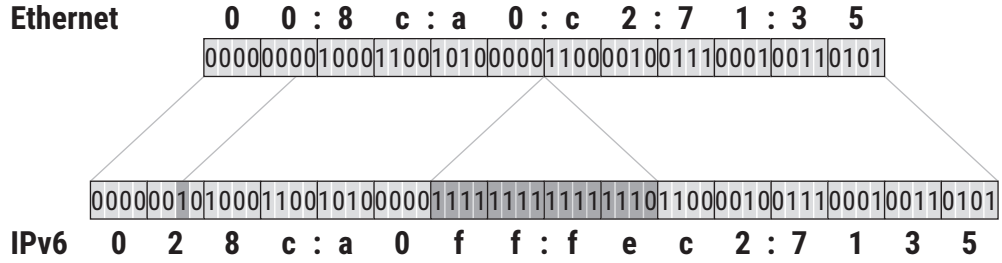
Jako jedno z možných řešení této situace vzniklo RFC 8273: *Unique IPv6 Prefix per Host*, které doporučuje vyhradit každému připojenému zařízení prefix délky 64 bitů. V jeho spodní polovině si může střídat adresy podle libosti a mít jich spoustu zároveň, z pohledu správce je stále jednoznačně identifikováno první polovinou adresy. Je to samozřejmě plýtvání, ale řadu věcí usnadní.

Identifikátor rozhraní s modifikovaným z IEEE EUI-64 je z dnešního pohledu již překonaný. Nicméně původní specifikace jej požadovaly a řada zařízení tyto identifikátory stále používá. Proto považuji za užitečné se o nich zmínit. IEEE EUI-64 je standard zaměřený na přidělování globálních (celosvětově jednoznačných) identifikátorů pro rozhraní v počítačových sítích. Jejich délka je 64 bitů a odpovídá tedy délce místa vyhrazeného v IPv6 adrese.

Pokud rozhraní již má přidělen identifikátor EUI-64, do IPv6 adresy se prostě převezme, ale s jednou změnou. Předposlední (druhý nejméně významný) bit v nejvyšším bajtu identifikátoru EUI-64 slouží jako příznak globality. Ve standardním EUI-64 zde hodnota 0 signalizuje celosvětově jedno-

značnou adresu, zatímco 1 označuje adresu lokální. IPv6 používá *modifikované EUI-64* a hodnotu tohoto bitu invertuje.

Jestliže EUI-64 není k dispozici, snadno se vytvoří. Asi nejčastějším případem budou sítě založené na některé z variant Ethernetu či bezdrátové sítě Wi-Fi. V takovém případě mají jednotlivá rozhraní výrobcem přidělené celosvětově jednoznačné 48bitové MAC adresy. Jejich transformace na modifikované EUI-64 je jednoduchá a standardní: mezi třetí a čtvrtý bajt MAC adresy se vloží 16 bitů s hodnotou fffe. Kromě toho se obrátí příznak globality. Takže z MAC adresy 00:8c:a0:c2:71:35 se v IPv6 adrese stane identifikátor rozhraní 028c:a0ff:fec2:7135.



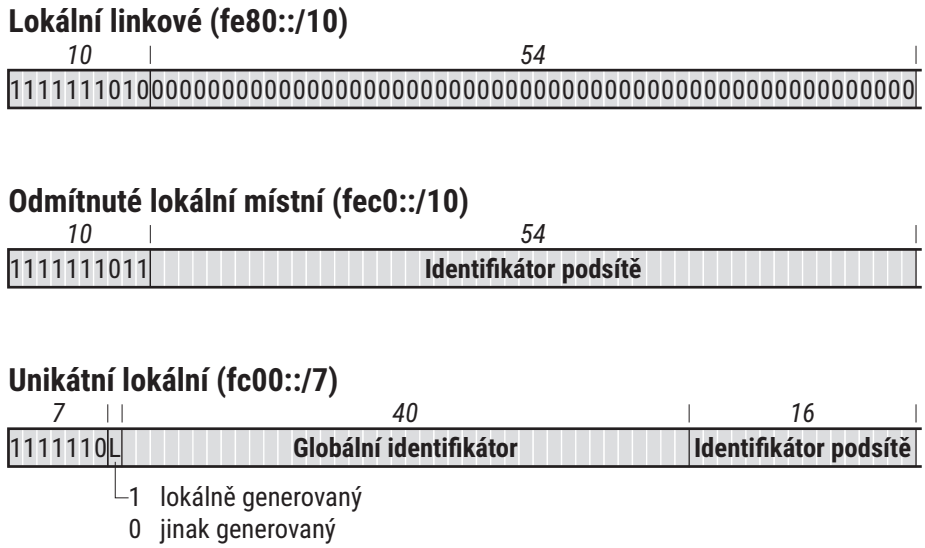
Obrázek 3.2: Vytvoření modifikovaného EUI-64 z ethernetové adresy

RFC 3972 zavedlo další odrůdu – *kryptograficky generované identifikátory rozhraní*, jež umožňují zabezpečit objevování sousedů. Vycházejí z veřejného klíče svého vlastníka a znemožňují nepřátelské stanici vydávat se za někoho jiného. Podrobněji se jim budu věnovat na straně 127 v souvislosti s mechanismy, pro jejichž ochranu jsou určeny.

3.6 Lokální adresy

Koncept adres, které neplatí v celém Internetu, ale pouze v jeho malé části, zavedlo RFC 1918: *Address Allocation for Private Internets*. Malou část adresního prostoru IPv4 vyhradilo pro neveřejné adresy, které lze používat v koncových sítích, ale nejsou podporovány za jejich hranicemi. Tyto adresy nejsou celosvětově jednoznačné, každá koncová síť si s nimi může nakládat, jak se jí zlíbí. Původně byly určeny především pro experimenty či pro sítě, které neměly ambice připojit se k Internetu. V současnosti se používají masově v kombinaci s NATem, který jim přístup k Internetu dokáže zprostředkovat, byť s řadou omezení.

IPv6 posouvá tuto myšlenku ještě o krok dál. Zavádí koncept dosahu adres, k němuž se dostaneme později (viz část 3.11 na straně 93). Ten je přínosný především pro skupinové adresy, jejichž součástí je přímo informace o dosahu. Pro individuální adresy jsou možnosti omezené, nicméně i zde existuje několik typů adres s omezeným dosahem. Jejich přehled uvádí obrázek 3.3. Jsou na něm



Obrázek 3.3: Typy lokálních adres

zobrazeny pouze první poloviny adres, protože druhá polovina ve všech třech případech obsahuje standardní identifikátor rozhraní.

Největší význam mají *lokální linkové adresy (link local)*. V adresní architektuře mají svou vyhrazenou část – začínají prefixem fe80::/10. Následujících 54 bitů je nulových, za nimi najdete 64bitový identifikátor rozhraní. Například pokud si počítač výše popsaným algoritmem vygeneroval identifikátor rozhraní 89ae:b3a5:c8df:fb2a, přidělí mu lokální linkovou adresu:

fe80::89ae:b3a5:c8df:fb2a

Vytvoří si ji sám a pomocí nástrojů automatické konfigurace ověří, že je pro danou linku skutečně jednoznačná (podrobnosti se dočtete v kapitole 6 na straně 135).

Počátečních 64 bitů je v ní oficiálně interpretováno jako adresa sítě a podsítě, neslouží však ke směrování. Ani nemohou, protože hodnota těchto bitů je pevně dána a je u všech stejná. Nijak to nevadí, protože dosah lokálních linkových adres je omezen na jedinou linku. Tedy na skupinu počítačů vzájemně komunikujících na linkové úrovni, například propojených Ethernetem či bezdrátovou sítí Wi-Fi. Datagramy nesoucí lokální linkovou adresu jako cíl neprojdou žádným směrovačem, protože za ním již leží jiné linky.

Ze samotné lokální linkové adresy se nedá ani poznat, ke které lince se vlastně vztahuje. Proto se poměrně často vyskytují v kombinaci s *identifikátorem rozhraní*, díky němuž lze určit, která konkrétní linka je obsahuje. Od adresy se odděluje znakem procento, takže zápis

```
fe80::2a4:3bff:fee3:35e8%1
```

představuje lokální linkovou adresu fe80::2a4:3bff:fee3:35e8 nacházející se na lince připojené k rozhraní 1. Podrobněji se budu těmto otázkám věnovat v části 3.11 na straně 93.

Jejich hlavní výhodou je, že počítač si takovou adresu dokáže vygenerovat sám a nepotřebuje k tomu žádnou infrastrukturu. Díky tomu je lokální linková adresa k dispozici vždy. Stačí propojit počítače ethernetovým přepínačem, nemusíte mít žádný směrovač ani server, a přesto mohou rovnou komunikovat prostřednictvím lokálních linkových adres, které si samy vytvoří. V takovéto provizorní síti nebude DNS server, takže uživatelé budou muset zadávat nepříliš přítulné adresy ručně, nicméně mají k dispozici alespoň nějaké spojení.

Všudypřítomnost lokálních linkových adres využívají i některé interní mechanismy související s IPv6. Například automatická konfigurace pomocí DHCP používá pro výměnu zpráv mezi klientem a serverem tyto adresy, najdete je i ve směrovacích tabulkách pro IPv6.

V principu je možné některým částem sítě nepřiřazovat žádné adresy většího dosahu a veškerou komunikaci realizovat jen prostřednictvím lokálních linkových. Typicky se jedná o infrastrukturní spoje, například páteřní linky propojující jednotlivé budovy ve firemní síti. Existuje dokonce specializované RFC, které takovou situaci analyzuje – RFC 7404: *Using Only Link-Local Addressing inside an IPv6 Network*. Stručně řečeno: zjednodušíte si tím konfiguraci a zvýšíte bezpečnost[3], ovšem zkomplikujete správu dané části sítě. V praxi se takto adresované páteřní trasy vyskytují jen ojediněle.

Roli velmi podobnou adresám z RFC 1918 hrály ve starších definicích adresního prostoru pro IPv6 *lokální místní adresy (site local)*. Byl jim přidělen prefix fec0::/10 a jejich platnost byla omezena na jedno „místo“. Typickým místem je koncová síť organizace připojené k Internetu.

Jenže existují také organizace připojené k Internetu v několika lokalitách téhož města či dokonce v různých městech a státech. Mají být areály MFF UK v na Karlově, v Karlíně, v Tróji a na Malé Straně považovány za čtyři různá místa nebo za jedno místo? Praxe ukázala, že definice místa je vágní a její výklad se velmi liší. Navíc se připojily problémy s konfiguracemi směrovačů a další obtíže při pokusech o reálné použití místních adres.

3: Lokální linkové adresy nejsou směrovatelné, takže se na ně dá útočit jen z příslušné linky.

Výsledkem bylo RFC 3879: *Deprecating Site Local Addresses*, které místní lokální adresy zamítlo a dokonce zakazuje novým implementacím podporovat speciální zpracování adres s prefixem fec0::/10.

Jejich nástupcem se staly *unikátní lokální adresy (unique local addresses, ULA)* definované v RFC 4193: *Unique Local IPv6 Unicast Addresses*. Poznají se podle prefixu fc00::/7. Za ním následuje jednobitový příznak *L*, zda byl prefix adresy přiřazen lokálně (L=1) nebo jinak[4]. Vzhledem k tomu, že všechny v současnosti používané adresy tohoto typu jsou generovány lokálně, mají nastaven příznak L na jedničku a začínají proto prefixem fd00::/8.

Dalších 40 bitů obsahuje globální identifikátor, kterým je náhodně vygenerované číslo[5]. RFC 4193 výslovně zakazuje jeho sekvenční či jinak předvídatelné určení a v části 3.2.2 doporučuje postup vycházející z aktuálního času, adresy generující stanice a algoritmu SHA-1. Čtyřicetibitová položka může nabývat více než bilionu různých hodnot. Pravděpodobnost, že dvojice sítí zvolí stejný globální identifikátor je tedy zhruba 10^{-12}. Při milionu koncových sítí je pořád ještě pravděpodobnost, že si alespoň dvě vygenerují stejný globální identifikátor, méně než poloviční.

Prefix společně s globálním identifikátorem dohromady vytvoří obvyklý síťový prefix délky 48 bitů. Za ním následuje v adrese vše podle vyježděných kolejí: 16bitový identifikátor podsítě a 64bitový identifikátor rozhraní.

Proč se globální jednoznačnost těchto adres považuje za tak podstatnou, když se beztak předpokládá jejich lokální využití a stejně jako v případě místních adres nejsou směrovány v internetové páteři? Vyjděme z výše uvedeného příkladu se čtyřmi pražskými lokalitami MFF UK. Řekněme, že správci sítě je považují za jedno místo a kromě veřejných adres chtějí používat také lokální adresy. Vygenerují si tedy prefix, řekněme fdd6:c246:22a9::/48, který ponesou všechny lokální adresy ve spravované síti. Adresami podsítí pak rozliší jednotlivé lokality a podsítě v nich. To vše by se snadno dalo zajistit i místními lokálními adresami.

Jednotlivé lokality jsou ale poměrně vzdáleny a k jejich propojení bude využita některá páteřní síť, v daném případě nepochybně PASNET. Po ní budou zároveň směrovány analogické lokální adresy ostatních fakult a univerzit. Unikátní lokální adresy nezpůsobí problém – různé sítě si vygenerovaly odlišné prefixy a budou mít proto jiné adresy.

V případě místních lokálních adres, které obsahují jen konstantní prefix, identifikátor podsítě a rozhraní je naproti tomu značná pravděpodobnost kolize. Například lze očekávat, že podsíť 1

4: V RFC 4193 se píše o „jiné“ metodě přiřazení bez bližšího určení. V pozadí zjevně čeká myšlenka jakési centrální autority, která by u adres s L=0 ručila za celosvětovou jednoznačnost jejich prefixu. Myšlenka globálně koordinovaných lokálních adres má své urputné zastánce i kritiky.

5: Generátor prefixů je k dispozici na adrese *https://cd34.com/rfc4193/*

si vytvoří více institucí. Jejich propojení sdílenou páteřní sítí by vyžadovalo tunely, virtuální privátní síť či podobnou nadstandardní konfiguraci. Navíc by případné „prosáknutí" směrovacích informací mohlo způsobit zmatek v jiných částech sítě, zatímco unikátní lokální adresy tímto problémem netrpí.

Ve světě IPv4 se lokální adresy vyskytují obvykle v kombinaci s NATem, který je mění na veřejné a umožní jim tak přístup do Internetu. Nabízí se otázka, jak je na tom IPv6 s překladem adres.

Především je třeba říci, že hlavní motivací pro nasazení NATu v IPv4 je nedostatek adres. Obvykle kromě adres mapuje i porty transportní vrstvy[6] a umožňuje skrýt celou lokální síť za jednu IPv4 adresu. Tahle potřeba v IPv6 odpadá a pro zdůvodnění použití NATu zbývají jen výškrabečky, jako je třeba nezávislost adres koncové sítě na poskytovateli připojení.

Čili překládat adresy v IPv6 nijak zvlášť nepotřebujeme a jelikož to má řadu nevýhod, oficiálně se používání NATu v IPv6 nedoporučuje. Pro ty, kteří mají pocit, že pro jejich síť bude NAT to pravé, je tu RFC 6296: *IPv6-to-IPv6 Network Prefix Translation* aneb NPTv6.

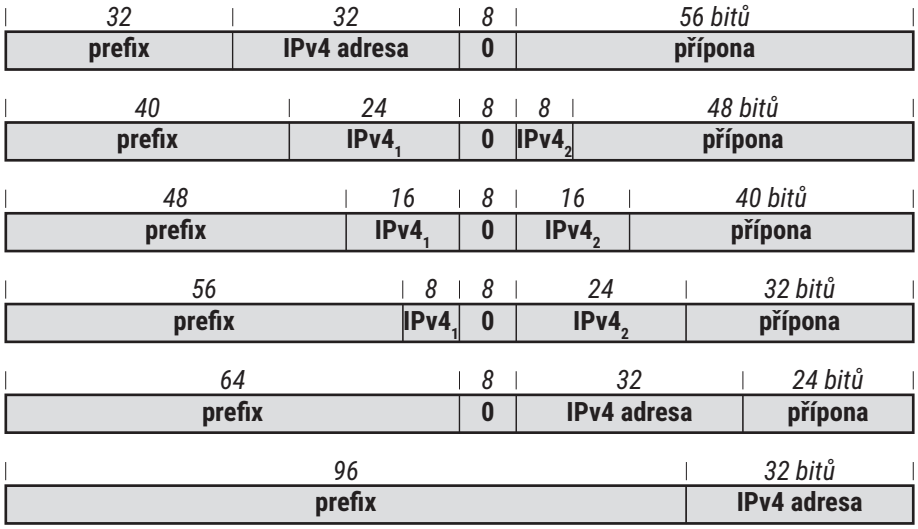
Jak vidíte z názvu, nepřekládá jednotlivé adresy, ale celé prefixy sítí. Překlad je bezstavový a obousměrný, dá se navázat i spojení zvenčí do NATované sítě. Na porty nesahá, omezuje se na změnu prefixu. Má dokonce i vypečený mechanismus, kterým upraví část adresy za prefixem tak, aby se nezměnil kontrolní součet pseudohlavičky v TCP a UDP. Díky své oboustrannosti stroje v koncové síti nijak nechrání před případnými útoky zvenčí. Proto je součástí specifikace i doporučení, aby překladač zároveň fungoval jako firewall. Zkrátka jedná se o docela elegantní a velmi zbytečný mechanismus.

3.7 Adresy obsahující IPv4

Některé přechodové mechanismy potřebují vyjádřit adresy, které pocházejí ze světa IPv4. Aktuálně se k tomuto účelu používá formát zavedený v RFC 6052: *IPv6 Addressing of IPv4/IPv6 Translators* a nazvaný *adresy s vloženým IPv4 (IPv4-embedded)*. Využívají skutečnosti, že adresní prostor IPv4 je mnohem menší, proto lze vyčlenit část IPv6 prostoru a použít ji pro reprezentaci IPv4. Tato část je identifikována určitým prefixem a mapovaná adresa vznikne jednoduše tak, že se za prefix připojí IPv4 adresa.

Možné varianty struktury IPv6 adres s vloženými IPv4 adresami znázorňuje obrázek 3.4. Začíná prefixem o délce 32, 40, 48, 56, 64 nebo 96 bitů (jiné délky nejsou přípustné), za nímž následuje IPv4 adresa a případně přípona. Pomocí přípony lze v rámci jedné mapované adresy identifiko-

6: Formálně správné, ale nepříliš používané označení je NAPT – Network Address and Port Translator.



Obrázek 3.4: Obecná struktura IPv6 adres s vloženou IPv4 adresou

vat jednotlivé části. RFC 6052 však zároveň doporučuje přípony vypustit a používat jen prefixy délky 96 b.

Prefix může být dvou typů – buď se jedná o místní prefix, který přidělí správce sítě ze svého adresního prostoru. Může například vyčlenit pro tento účel jednu podsíť nebo její část. Vzhledem k dřívější interpretaci některých bitů v identifikátoru rozhraní musí bity číslo 64 až 71 (začátek identifikátoru rozhraní) obsahovat samé nuly. Autoři doporučují vytvořit prefix tak, že vyjdete z prefixu délky 64 b a doplníte jej na délku 96 b nulami.

Druhou variantou bude použití univerzálního prefixu (well known prefix):

64:ff9b::/96

definovaného pro tyto účely přímo v RFC 6052. Pokud se IPv4 adresa nachází až na konci, lze ji zapsat ve standardním tvaru – v desítkové soustavě s bajty oddělenými tečkami. Adresu s univerzálním prefixem obsahující 147.230.1.2 lze tedy zapsat ve tvaru 64:ff9b::147.230.1.2 nebo 64:ff9b::93e6:102.

Prefix byl zvolen tak, aby byl neutrální vůči kontrolním součtům protokolů UDP a TCP, které kromě údajů z transportní hlavičky zahrnují i IP adresy. Dojde-li k překladu datagramu mezi IPv4 a IPv6, kontrolní součet v transportní hlavičce se nezmění. I univerzální prefix má ale svá

Obrázek 3.5: IPv6 adresa s vloženou IPv4 s univerzálním prefixem

omezení – nelze jej používat ve spojení s neveřejnými IPv4 adresami podle RFC 1918. Jestliže ve své síti používáte, byť jen částečně, neveřejné adresy, musíte si definovat vlastní prefix pro jejich vkládání.

Adresy podle RFC 6052 jsou součástí skupiny mechanismů pro překlad mezi IPv4 a IPv6, jehož rámec definuje RFC 6144: *Framework for IPv4/IPv6 Translation*. Existují a stále vznikají ovšem i jiné překladové mechanismy, které často také vyžadují svůj adresní prostor. Proto RFC 8215 vyčlenilo další prefix:

64:ff9b:1::/48

a přidělilo jej pro lokální adresy využívané různými překladovými mechanismy. Opět se jedná o univerzální prefix, který se nesmí používat ve spojení s neveřejnými IPv4 adresami.

Kromě adres s vloženým IPv4 existují ještě tak zvané *IPv4-mapované (IPv4-mapped) adresy*, jejichž počátečních 80 bitů obsahuje samé nuly, následuje 16 bitů jedničkových a v posledních 32 bitech je zapsána IPv4 adresa. Například adresu 147.230.49.73 bychom tímto způsobem vyjádřili jako:

::ffff:93e6:3149

Opět je přípustné psát IPv4 adresu v obvyklé podobě, takže tutéž adresu lze psát i komfortněji:

::ffff:147.230.49.73

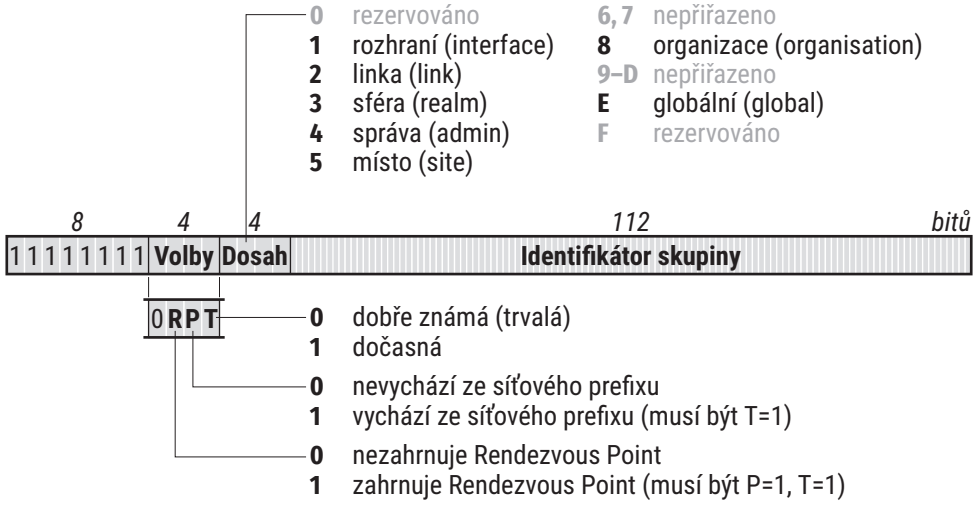
Ještě starší specifikace definovaly také IPv4-kompatibilní adresy, které měly počátečních 96 bitů nulových a za nimi následovalo 32 bitů s IPv4 adresou. Už v nich byl k dispozici pohodlný zápis, takže adresa 147.230.49.73 zapsaná jako IPv4-kompatibilní IPv6 adresa má podobu:

::147.230.49.73

IPv4-kompatibilní adresy však byly v RFC 4291 odmítnuty a v současnosti se nepoužívají.

3.8 Skupinové adresy

Princip skupin a skupinových adres není žádnou výjimkou již v současném Internetu. Slouží především k distribuci zvukového a obrazového signálu v reálném čase (videokonference, rozhlasové či televizní vysílání a podobně).



Obrázek 3.6: Struktura skupinové adresy

Ve skupinách podle IPv6 by nemělo dojít k žádné zásadní revoluci. Strukturu adresy představuje obrázek 3.6. Její největší část slouží k identifikaci skupiny, které mají být data dopravena. K tomu se přidružují dvě krátké podpůrné položky: příznaky a dosah skupiny.

První ze čtyř příznaků je rezervován pro pozdější použití a zatím musí být nulový. Za ním následuje trojice příznaků *R* (rendezvous point), *P* (prefix) a *T* (transient). Vlastní adresní architektura definuje pouze přínzak *T*. Ostatní dva jsou zavedeny v samostatných dokumentech a jejich popis o chvilku odložím, protože využívají některé další koncepty.

Čtvrtý bit je označován písmenem *T* (transient) a signalizuje, zda je daný identifikátor skupiny přidělen trvale a jedná se tedy o „dobře známou" adresu (hodnota 0) nebo zda je přidělen pouze dočasně (*T* má hodnotu 1). Dobře známé adresy přiděluje IANA, zatímco dočasné si mohou generovat aplikace podle potřeby. Právě jimi se zabývá většina dalších specifikací a návrhů. Zanedlouho se k nim vrátím.

Dosah skupiny sděluje, jak daleko od sebe mohou jednotliví členové být. Jedná se opět o čtyřbitovou položku se šestnácti možnými hodnotami. Nějaký význam byl zatím přidělen zhruba deseti

z nich. Podrobnější komentář k dosahům najdete v samostatné části 3.11 na straně 93. Zejména doporučuji vaší pozornosti tabulku 3.6 na straně 95 obsahující stručnou charakteristiku doposud definovaných dosahů.

Nepřiřazené dosahy jsou volně k použití. Určitý význam jim může přidělit například poskytovatel Internetu či správce části sítě. Mělo by přitom zůstat zachováno, že větší hodnota dosahu v adrese bude znamenat doručování paketů do větší[7] části Internetu, než dosahy menší. Například v síti CESNET2, stejně jako v dalších evropských národních akademických sítích, je definován dosah A pokrývající danou národní síť. Skupinové pakety s dosahem A budou proto u nás doručovány všem zájemcům v rámci sítě CESNET2. Lze očekávat, že podobný přístup zavedou i komerční poskytovatelé Internetu a dosah A bude všeobecně znamenat „poskytovatel a jeho zákazníci".

Jedná-li se o permanentní skupinu (příznak *T* má hodnotu 0), je její identifikátor stále platný a nezávisí na dosahu. Například skupina adres ff0*x*::101 (kde *x* představuje různé dosahy) byla přidělena NTP serverům. Důsledkem jsou následující významy adres:

ff01::101	NTP servery na tomtéž rozhraní (čili on sám)
ff02::101	NTP servery na stejné lince (např. Ethernetu)
ff05::101	NTP servery v daném místě (lokalitě)
ff0e::101	NTP servery v celém Internetu

Naproti tomu dočasná skupina má význam jen v rámci svého dosahu. Takže například skupina s adresou ff15::101 nemá žádný vztah ke skupině, která má stejnou adresu, ale je vytvořena na jiném místě. Dokonce nemá žádný vztah ani k dočasné skupině se stejným identifikátorem, ale jiným dosahem (např. ff1e::101) ani k trvalým skupinám se stejným identifikátorem. Nemá tedy nic společného s žádnou z výše uvedených skupin NTP serverů.

Pravidla pro přidělování identifikátorů skupinových adres definuje RFC 3307: *Allocation Guidelines for IPv6 Multicast Addresses*. Teoreticky je pro identifikátor skupiny k dispozici 112 bitů. Za chvilku ale uvidíme, že některé formáty definují určitou strukturu i v této části adresy a pro skutečný identifikátor skupiny ponechávají jen posledních 32 bitů. RFC 3307 toto omezení kodifikuje a navíc rozděluje skupinové identifikátory do tří oblastí, které najdete v tabulce 3.2.

Rozdíl mezi prvními dvěma skupinami se zdá být poněkud esoterický. Do první patří případy, kdy IANA definuje celé skupinové adresy, jako například výše zmíněnou adresu ff0*x*::101 pro NTP servery. Ve druhé skupině jsou identifikátory, kde IANA definuje pouze samotný skupinový identifikátor, zatímco prefix před ním může být libovolný. Předpokládá se jejich použití především pro adresy odvozené z individuálních, k nimž se hned dostanu. Zatím byl definován jediný,

7: případně stejné, ale rozhodně ne menší

0 – 3fff:ffff	skupiny přidělené IANA
4000:0000 – 7fff:ffff	identifikátory přidělené IANA
8000:0000 – ffff:ffff	dynamické, volně k použití

Tabulka 3.2: Rozdělení skupinových identifikátorů podle RFC 3307

4000:0000 pro proxy sítě, většina definic IANA spadá do první skupiny. Vybrané adresy a identifikátory přidělené IANA najdete v příloze A na straně 439.

Do třetí skupiny spadají identifikátory, které si mohou přidělovat podle potřeby jednotlivé aplikace a služby. Existují dva základní přístupy ke správě tohoto typu identifikátorů. Jedním je alokační server, u nějž si aplikace požádají o přidělení skupinového identifikátoru[8]. Podle druhého si berou identifikátory samostatně prostřednictvím vhodného autokonfiguračního protokolu. V každém případě se však jedná o adresy dočasné, jejich příznak *T* proto musí mít hodnotu 1. Ostatně rozdělení skupinových identifikátorů v tabulce 3.2 je navrženo tak, aby první bit v čísle skupiny kopíroval hodnotu příznaku *T*.

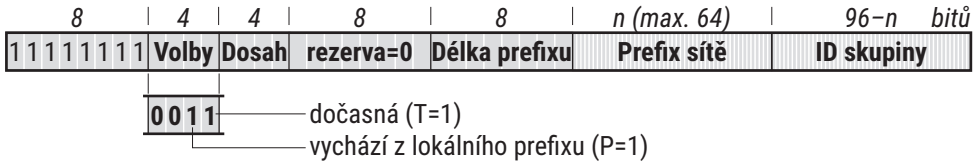
3.8.1 Skupinové adresy vycházející z individuálních

Příznak *P* byl definován v RFC 3306: *Unicast-Prefix-based IPv6 Multicast Addresses*, které zavedlo *skupinové adresy vycházející z individuálních*. Vznikly s cílem usnadnit generování jednoznačných skupinových adres, aniž by generující stroj musel komplikovaně zjišťovat, zda adresa již někde neexistuje. Proto je jako součást adresy zařazen prefix individuálních adres zdejší sítě. Ten je celosvětově jednoznačný, takže stačí zajistit jednoznačnost identifikátoru v rámci sítě a máme vystaráno.

Jedná se vlastně o jeden možný konkrétní formát pro identifikátor skupiny. Jeho uspořádání najdete na obrázku 3.7. Začíná osmibitovou rezervovanou položkou, jejíž hodnotou jsou povinně samé nuly. Následuje délka použitého prefixu, tedy počet významných bitů v něm. Nejčastěji bude obsahovat hodnoty 48 či 64. V dalších bitech je uložen prefix odpovídající části sítě, z níž tato skupinová adresa pochází. Jejich počet odpovídá délce z předchozí položky, nanejvýš jich však může být 64. A konečně závěrečných minimálně 32 bitů obsahuje vlastní identifikátor skupiny.

Příznak *P* s hodnotou 1 oznamuje, že identifikátor skupiny ve skupinové adrese byl vytvořen tímto způsobem. Je-li *P*=1, musí se jednat o dočasnou adresu, a proto musí mít i příznak *T* hodnotu 1. Zároveň RFC 3306 požaduje, aby dosah takové adresy nepřesahoval dosah prefixu použitého při jejím vytvoření.

8: Například protokolem Multicast Address Dynamic Client Allocation Protocol (MADCAP) podle RFC 2730.

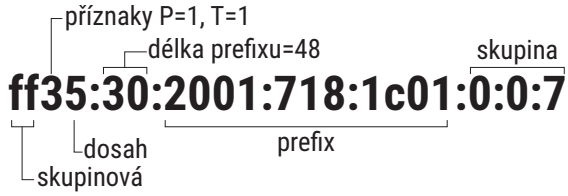


Obrázek 3.7: Skupinová adresa založená na individuální

Například Technická univerzita v Liberci má pro své individuální IPv6 adresy přidělen prefix 2001:718:1c01::/48. Řekněme, že z tohoto prefixu chceme odvodit skupinovou adresu s dosahem pro místo (dosah 5) se skupinovým identifikátorem 7. Výsledkem bude skupinová adresa:

ff35:30:2001:718:1c01:0:0:7

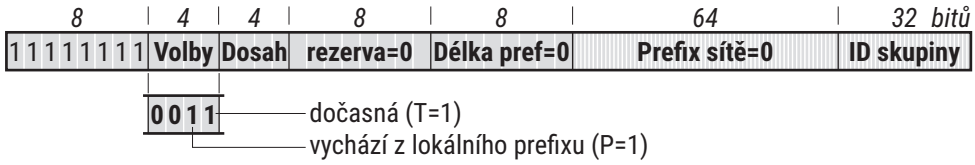
Její strukturu rozebírá obrázek 3.8.



Obrázek 3.8: Příklad skupinové adresy vycházející z individuální

3.8.2 Skupinové adresy pro SSM

Speciálním případem skupinově adresovaného vysílání je tak zvaný *Source Specific Multicast (SSM)*. Slouží pro přenosy dat z jednoho zdroje skupině příjemců, například pro internetové rádio či televizi. Pro něj byla vyčleněna samostatná část skupinových adres založených na individuálních. Pozná se podle toho, že délka prefixu i prefix sítě jsou nulové. Skupinové adresy pro SSM tedy mají prefix ff3*x*::/96, za nímž následuje 32b identifikátor skupiny. Jejich strukturu představuje obrázek 3.9.

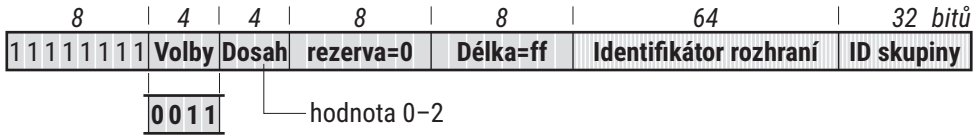


Obrázek 3.9: Skupinová adresa pro SSM

Jednoznačnosti zde není těžké dosáhnout, protože skupiny mají vždy jen jediného odesilatele. Stačí, aby on sám si udržel pořádek v jejich identifikátorech. Skupina je jednoznačně určena dvojicí zdrojové adresy svého jediného odesilatele a skupinové adresy.

3.8.3 Skupinové adresy vycházející z rozhraní

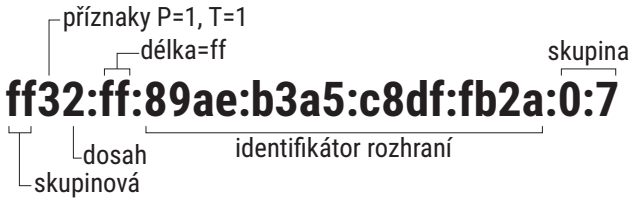
Konkurenci adresám založeným na prefixu sítě tvoří *skupinové adresy vycházející z rozhraní* definované v RFC 4489: *A Method for Generating Link-Scoped IPv6 Multicast Addresses*. Jejich dosah nesmí být větší než jediná linka, za to si je ale každý stroj může generovat sám bez rizika konfliktu s adresami generovanými jeho sousedy. Adresa tohoto typu totiž obsahuje jeho identifikátor rozhraní, který je na lince vždy jednoznačný. Stačí tedy, aby si udržoval přehled o přidělených identifikátorech skupin, a může si být jist, že všechny používané adresy tohoto typu jsou jednoznačné.



Obrázek 3.10: Skupinová adresa založená na identifikátoru rozhraní

Strukturu adresy vycházející z identifikátoru rozhraní znázorňuje obrázek 3.10. Volby má nastaveny stejně jako v předchozím případě (*P*=1, *T*=1), od adresy vycházející z prefixu sítě se pozná podle hodnoty pole *Délka prefixu*, jejíž všechny bity obsahují jedničky. Následujících 64 bitů je tvořeno identifikátorem rozhraní, tedy spodní polovinou jeho lokální linkové adresy. Závěrečných 32 bitů nese identifikátor skupiny.

Například si počítač přidělí lokální linkovou adresu fe80::89ae:b3a5:c8df:fb2a, ověří si její jednoznačnost a pokud uspěje, může adresu rozhraní z ní začít používat pro vytváření skupinových adres. Jejich prefix bude ff32:ff:89ae:b3a5:c8df:fb2a::/96.



Obrázek 3.11: Příklad adresy založené na identifikátoru rozhraní

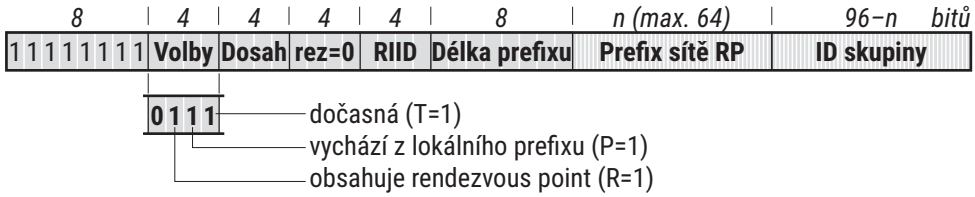
3.8.4 Skupinové adresy obsahující RP

Další možný formát skupinového identifikátoru zavádí RFC 3956: *Embedding the Rendezvous Point (RP) Address in an IPv6 Multicast Address*. Jedná se o skupiny používané ve spojitosti se

směrovacím protokolem PIM-SM, o kterém se dočtete v části 8.3.1 na straně 204. Klíčovou roli v něm hraje tak zvané shromaždiště (rendezvous point, RP), v němž koření distribuční strom skupiny. Tento typ skupinových adres v sobě obsahuje adresu shromaždiště, což přináší dva významné klady. Jednak to usnadňuje vytváření jednoznačných adres – stačí udržet v nich přehled v rámci shromaždiště. Především ale kdokoli v celém Internetu si ze skupinové adresy odvodí adresu jejího shromaždiště a ví, kde se do ní přihlásit.

Skupinové adresy obsahující RP nadále rozvíjejí skupinové adresy s individuálním prefixem definované v RFC 3306 (viz obrázek 3.7). Přidávají k nim další příznak *R*, podle nějž je poznáte. Skupinová adresa obsahující RP musí mít všechny tři příznaky nastaveny na jedničku, začíná tedy prefixem ff70::/12.

Zabudování adresy RP do skupinové adresy je o něco komplikovanější než v předchozích případech. Adresa RP je rozdělena na dvě části: prefix sítě a identifikátor rozhraní. Prefix sítě je do adresy vložen stejně jako v předchozích případech, zatímco identifikátor rozhraní (označen jako RIID) nahradí spodní čtyři bity v původně rezervované osmibitové položce před délkou prefixu. Výsledek vidíte na obrázku 3.12.



Obrázek 3.12: Skupinová adresa obsahující RP

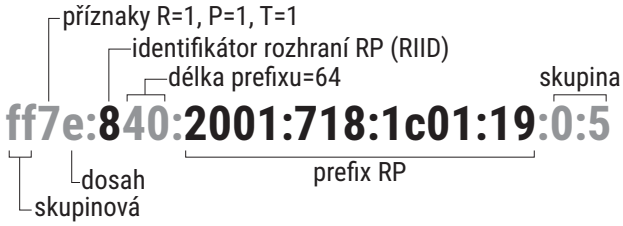
Z takto vytvořené skupinové adresy lze odvodit adresu jejího RP tak, že síťový prefix použijeme jako její začátek, RIID jako konec a bity mezi nimi vynulujeme. Například skupina globálního dosahu s identifikátorem 5 odvozená od shromaždiště s adresou 2001:718:1c01:19::8 bude mít adresu:

ff7e:840:2001:718:1c01:19:0:5

Vysvětlení její podoby najdete na obrázku 3.13, části obsahující adresu shromaždiště jsou v ní zvýrazněny.

3.8.5 Speciální skupinové adresy

RFC 4291 přiděluje několika skupinovým adresám speciální významy. Jedná se o adresu pro všechny uzly (tedy všechna fungující IPv6 rozhraní) v rámci jednoho rozhraní (ff01::1) či v rámci dané linky (ff02::1). Tyto skupiny nahrazují dřívější všesměrové adresy (broadcast).



Obrázek 3.13: Příklad skupinové adresy obsahující RP

Do další speciální skupiny patří všechny směrovače. Opět je k dispozici v několika dosazích: v rámci rozhraní (ff01::2), linky (ff02::2) či místa (ff05::2).

Poslední ze speciálních skupinových adres je adresa vyzývaného uzlu. Těchto skupin je celá řada a jejich adresy mají jednotný tvar ff02::1:ff*xx*:*xxxx*. Hodnota závěrečné trojice bajtů (zde nahrazená písmeny „*x*“) se vždy převezme z hledané MAC adresy. Využití najde při objevování sousedů, podrobnosti se dozvíte v části 5.1 na straně 119.

Celou přehršel permanentních (dobře známých) skupinových adres definuje RFC 2375: *IPv6 Multicast Address Assignments*. Zavádí přes 70 adres pro nejrůznější kategorie počítačů a především typy síťových protokolů a služeb. Např. výše zmiňovaná skupina všech NTP serverů (101) pochází právě odtud. Přehled nejvýznamnějších skupinových adres najdete v příloze A na straně 439.

Skupinová adresa se nesmí vyskytnout na místě odesilatele IPv6 datagramu a nesmí být obsažena ani v jeho hlavičce *Směrování*. Kromě toho nelze přidělovat adresy ff0*x*:0:0:0:0:0:0:0, které jsou rezervovány.

3.9 Výběrové adresy

Jak již bylo řečeno, výběrové adresy představují asi nejzajímavější novinku v oboru adresování a zároveň velkou výzvu, protože jsou dosud ne zcela probádaným územím. Poskytují velmi zajímavé možnosti. Jejich prostřednictvím lze řešit třeba zdvojování počítačů, směřující ke zvýšení výkonu či spolehlivosti. Mohou se také využít k vyhledání nejbližšího stroje poskytujícího určitou službu.

Například současné nejzatíženější servery bývají ve skutečnosti realizovány skupinou spolupracujících počítačů. Prostřednictvím triků s DNS se dosahuje rozkládání dotazů na jednotlivé členy skupiny. Zbývá však celá řada obtíží (jak rovnoměrně rozkládat zátěž, připojení k Internetu musí mít odpovídající kapacitu apod.).

S výběrovými adresami lze daný problém řešit daleko elegantněji: servery ze skupiny rozmístíte ve vhodných místech Internetu a přidělíte všem stejnou výběrovou adresu. Klient bude posílat pakety na tuto adresu a standardní směrovací mechanismy zajistí, že dorazí vždy k nejbližšímu ze skupiny serverů. Navíc lze složení skupiny průběžně měnit podle potřeby.

Výkladní skříní výběrových adres se staly kořenové DNS servery. Těch by na jedné straně mělo být mnoho, aby docházelo k rozkládání zátěže, služba byla rychle dostupná z libovolné části Internetu a lépe odolávala útokům usilujícím o její zahlcení (DoS, DDoS). Na druhé straně by jich ale mělo být málo, protože jejich adresy musí znát skoro všechny ostatní DNS servery. Seznam adres by proto měl být krátký a velmi konzervativní.

Výběrové adresy právě pro tento případ nabízejí ideální řešení: adres kořenových serverů je třináct, ovšem postupně všechny přešly na výběrové. Počátkem roku 2019 se za jejich třinácti adresami skrývalo celkem přes tisíc serverů. Jejich složení lze navíc průběžně měnit, aniž by se to projevilo na seznamu adres kořenových serverů.

Vzhledem ke své zjevné užitečnosti byl koncept výběrových adres později převzat i pro v IPv4. Základní vlastnosti jsou pochopitelně společné, ovšem rozlehlý adresní prostor IPv6 jejich použití poněkud usnadňuje. Nejčastěji se nasazením výběrové adresy sleduje některý z následujících cílů:

- Přibližné rozkládání zátěže – dotazy z určité části sítě se sejdou vždy na jednom z uzlů poskytujících výběrově adresovanou službu. Dochází k rozdělení sítě na spádové oblasti.
- Zrychlení doby odezvy díky kratší cestě mezi klientem a serverem.
- Lepší odolnost proti útokům typu DoS a DDoS – útočníci jsou schopni „dosáhnout“ jen na servery, v jejichž spádových oblastech se sami nacházejí.
- Zmenšení počtu adres, na nichž je služba poskytována. Představte si, že seznam adres kořenových DNS serverů by měl tisíc položek a měnil se několikrát za měsíc…

Všude je samozřejmě chléb o dvou kůrkách a některé další vlastnosti výběrových adres nejsou až tak zářivé. Ale než se k nim dostanu, podívejme se, jak jsou vlastně realizovány.

Výběrovým adresám nebyla rezervována samostatná část adresního prostoru. Pocházejí ze stejných oblastí jako adresy individuální a mohou se s nimi libovolně míchat. Syntakticky je od sebe nelze rozlišit a ze samotné adresy se nedozvíte, zda je individuální či výběrová. Pokud přidělujete některému rozhraní výběrovou adresu, musí se to příslušným způsobem odrazit v konfiguraci.

Vezmete-li všechna rozhraní, která nesou určitou výběrovou adresu, jistě dokážete najít jistou (co nejmenší) obalovou síť či skupinu sítí, v níž jsou obsažena. Tuto síť lze charakterizovat prefixem *P*. Například pokud se budou všichni členové výběrové skupiny nacházet ve stejné podsíti, bude *P* prefix (adresa) této podsítě.

Uvnitř sítě dané prefixem *P* musí mít výběrová adresa svůj vlastní směrovací záznam, který v jednotlivých směrovačích ukazuje vždy na nejbližšího člena skupiny. Podle těchto záznamů jsou doručovány pakety adresované výběrové skupině. Mimo oblast danou prefixem *P* pak již není třeba s výběrovou adresou zacházet nijak speciálně a může být zahrnuta do agregovaného bloku adres.

Skutečnost, že výběrové adresy lze směrovat obvyklými metodami (de facto se jedná o cesty k individuálním počítačům, které dnešní směrovací algoritmy a protokoly podporují), je rozhodně dobrou zprávou. Stačí, aby počítač, který se zapojil do výběrové skupiny, ohlásil tuto skutečnost některému směrovači. Ten pak zajistí její distribuci ostatním.

V nejhorším případě jsou příslušníci skupiny natolik rozptýleni, že společný prefix má nulovou nebo zanedbatelnou délku (např. tříbitový prefix 001 příliš nepomůže). V takovém případě by se výběrová adresa přidala mezi globální směrovací informace, což potenciálně představuje obrovský nárůst velikosti směrovacích tabulek páteřních směrovačů. Proto je existence globálních výběrových adres velmi silně omezena a ani do budoucna se neočekává, že by si je snadno mohl zřizovat kdokoli.

Vazba na směrování představuje lesk a bídu tohoto způsobu adresování. Na jedné straně poskytuje pohodlí – aplikace adresuje datagram výběrově a směrování se postará o doručení. Na straně druhé představuje omezení, jimž se musí výběrově poskytované služby přizpůsobit.

Za základní problém lze považovat dynamičnost směrování, které se přizpůsobuje změnám v síti. Pošlete-li sérii datagramů na stejnou výběrovou adresu, mohou být dopraveny různým počítačům. To způsobuje problémy stavovým protokolům, jako je TCP, ale i službám uchovávajícím stav na straně serveru. Možným řešením je rozdělit komunikaci na dvě fáze. V úvodní, která používá výběrové adresy, klient zjistí od serveru jeho individuální adresu a tu pak použije pro vlastní, stavovou fázi přenosu dat.

Ideálem výběrového adresování je však služba, která stavové informace nevyžaduje. Typickým příkladem je právě DNS, kdy dotaz a odpověď představují po jednom datagramu přenášeném protokolem UDP. Čili není co uchovávat, jestliže každý klientův dotaz přistane na jiném serveru, nijak to nevadí. Jen je samozřejmě třeba zajistit konzistenci dat poskytovaných členy výběrové skupiny.

Tím jsme ovšem s problémy způsobovanými směrováním neskončili. Klacky pod nohy výběrového směrování může házet celá řada mechanismů. Směrovací politiky, kdy páteřní internetové směrovače odmítají příliš dlouhé prefixy, a tedy záznamy pro výběrové adresy. Agregace prefixů, která může napáchat na směrování výběrových adres nepěkné škody. Změny ve skupině mohou být vyhodnoceny jako kolísání (flapping) a následně blokovány. Mohou mít také problémy s bezpečnostními testy RPF, které mohou v jejich případě neprávem vyhodnotit zdrojovou adresu jako falšovanou.

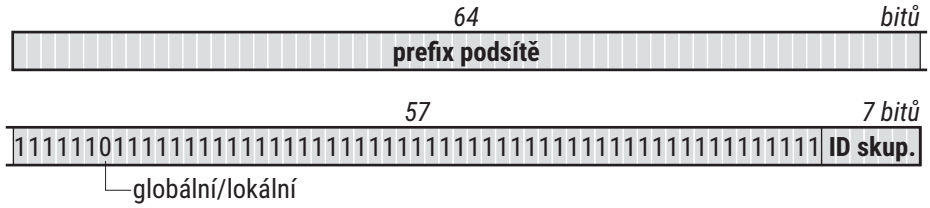
Všechny popsané problémy jsou nejožehavější mezi páteřními směrovači Internetu, kde se vyměňují největší objemy směrovacích informací, a proto zde panuje největší přísnost na jejich obsah. Navíc jsou různé části páteře řízeny různými subjekty, jejichž směrovací politiku lze jen těžko ovlivnit. To všechno vede k závěru, že výběrové adresování je v globálním měřítku použitelné jen velmi omezeně pro úzký sortiment vybraných služeb (třeba ony kořenové DNS servery).

Naopak uvnitř menší části sítě (v jednom autonomním systému či v koncové zákaznické síti), kde směrování má zcela pod kontrolou jeden provozovatel, může výběrové adresování představovat rozumně a celkem široce použitelný mechanismus. Výše popsané problémy jsou zde řešitelné bez většího úsilí a lze očekávat i řídké změny topologie, takže datagramy budou zpravidla doručovány témuž stroji.

Určitý extrém představují výběrové adresy v rámci jediné podsítě. U nich pochopitelně nemá smysl mluvit o nejbližším členovi, z pohledu směrování jsou všichni členové stejně daleko. Slouží jako obecné adresy, kdy počítač chce komunikovat se strojem poskytujícím určitý typ služby a nezáleží mu na tom, s kým konkrétně.

Tyto výběrové adresy mají podobu pevně definovaných identifikátorů rozhraní, před nějž se přidá prefix příslušné podsítě. Zatím byly definovány dvě takové adresy: samé nuly v identifikátoru rozhraní znamenají výběrovou adresu pro směrovače v podsíti a adresa *prefix*:fdff:ffff:ffff:fffe identifikuje domácí agenty v podsíti (více se dočtete v kapitole o mobilitě na straně 247). Kromě toho RFC 2526: *Reserved IPv6 Subnet Anycast Addresses* rezervuje horních 128 identifikátorů rozhraní pro různé speciální účely.

Jak konkrétně bude oněch horních 128 adres vypadat závisí na konstrukci adresy (a tedy na prefixu). Specifikace počítá především s identifikátory rozhraní podle EUI-64, v nichž musí bit označující globální/lokální identifikátor obsahovat hodnotu 0 (lokální), protože dotyčná adresa není globálně jednoznačná. Naopak se opakuje v každé podsíti. Strukturu takové adresy vidíte na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14: Rezervovaná výběrová adresa podle EUI-64

Význam těchto adres je jednotný a postupně je přiděluje IANA. Zatím jedinou přidělenou adresou z tohoto balíku je výše zmíněná adresa pro domácí agenty. Tabulka 3.3 poskytuje přehled pevně definovaných výběrových adres pro podsíť.

adresa	*význam*
prefix:0:0:0:0	směrovače v podsíti
prefix:fdff:ffff:ffff:ff80 až *prefix*:fdff:ffff:ffff:fffd	rezervováno
prefix::fdff:ffff:ffff:fffe	domácí agenti
prefix::fdff:ffff:ffff:ffff	rezervováno

Tabulka 3.3: Definované lokální výběrové adresy

Dřívější definice adresní architektury IPv6 zavedla – vzhledem k nedostatku zkušeností – pro výběrové adresy značná omezení. Směly být přiřazeny jen směrovačům a bylo zakázáno uvádět je do zdrojové adresy IPv6 datagramu. V současnosti (počínaje RFC 4291) již tato omezení neplatí.

Pokud by vás zajímal podrobnější rozbor problematiky výběrových adres, určitě si přečtěte RFC 4786: *Operation of Anycast Services*.

3.10 Povinné adresy uzlu

V IPv4 mívalo rozhraní zpravidla právě jednu adresu. Existovaly sice výjimky (např. virtuální WWW servery bývaly svého času realizovány tak, že počítač slyšel na několik IP adres pro totéž rozhraní), ale valná většina uzlů toto pravidlo dodržovala.

IPv6 naproti tomu adresami přímo hýří a nejen umožňuje, že rozhraní bude mít více adres, ale dokonce mu to nařizuje. Existuje totiž jasně definovaná minimální množina adres, ke kterým se každý uzel IPv6 sítě *musí* hlásit.

Pro koncový počítač se jedná o následující adresy:

- lokální linková adresa pro každé rozhraní,
- všechny individuální a výběrové adresy, které mu byly přiděleny,
- lokální smyčka (loopback),
- skupinové adresy pro všechny uzly,
- skupinová adresa pro vyzývaný uzel pro všechny přidělené individuální a výběrové adresy,
- všechny skupinové adresy, jejichž je členem.

Nejlépe si to demonstrujeme na příkladu. Vezměme počítač s jednou síťovou kartou, která má dvě individuální adresy – je zapojena do dvou podsítí v rámci organizace. Jedna má prefix 2001:db8:a319:15::/64 a druhá 2001:db8:a319:3::/64. Kromě toho je členem skupiny ff15::ac07.

Seznam všech adres, na kterých je povinen přijímat data, shrnuje tabulka 3.4. Identifikátory rozhraní si generuje podle RFC 7217, proto se v jednotlivých podsítích liší. Pro každý z nich musí vstoupit do odpovídající skupiny pro vyzývaný uzel.

lokální linková	fe80::287c:7fb2:48a5:f4a3
individuální	2001:db8:a319:15:acc7:b8a8:fbe9:0b2c
individuální	2001:db8:a319:3:1fa:4dc4:78c:b9e5
lokální smyčka	::1
všechny uzly v rámci rozhraní	ff01::1
všechny uzly v rámci linky	ff02::1
vyzývaný uzel	ff02::1:ffa5:f4a3
vyzývaný uzel	ff02::1:ffe9:0b2c
vyzývaný uzel	ff02::1:ff8c:b9e5
přidělená skupinová	ff15::ac07

Tabulka 3.4: Příklad povinných adres pro počítač

Směrovač se povinně musí hlásit ke všem adresám jako počítač a navíc k následujícím:

- výběrová adresa pro směrovače v podsíti (pro každé rozhraní, kde funguje jako směrovač),
- skupinové adresy pro všechny směrovače.

Kdyby výše zmiňovaný počítač byl směrovačem, musel by na rozhraní, které popisujeme, vedle adres uvedených v tabulce 3.4 poslouchat navíc na adresách, jež shrnuje tabulka 3.5. Předpokládám v ní, že směrovač působí jako domácí agent. Proto mu byla přidělena výběrová adresa domácích agentů pro obě podsítě.

3.11 Dosahy adres

IPv4 původně počítalo výlučně s celosvětově jednoznačnými adresami. Později bylo doplněno několik lokálních rozsahů (10.0.0.0/8, 192.168.0.0/16 a spol.), které mají platnost omezenu na místní síť a nesmí být předávány do Internetu. Se zavedením skupinových adres se objevila otázka dosahu skupin. Ve světě IPv4 je řešena prostřednictvím životnosti datagramů (TTL). Pro jednotlivé linky lze definovat určitý limit a pokud má datagram TTL nižší než uvedená hodnota, nebude dotyčnou linkou odeslán.

směrovače v podsíti	2001:db8:a319:15::
směrovače v podsíti	2001:db8:a319:3::
přidělená výběrová	2001:db8:a319:15:fdff:ffff:ffff:fffe
přidělená výběrová	2001:db8:a319:3:fdff:ffff:ffff:fffe
vyzývaný uzel	ff02::1:ff00:0
vyzývaný uzel	ff02::1:ffff:fffe
všechny směrovače na rozhraní	ff01::2
všechny směrovače na lince	ff02::2
všechny směrovače v místě	ff05::2

Tabulka 3.5: Rozšíření povinných adres pro směrovač

Je celkem zřetelné, že adresy s omezeným dosahem byly do IPv4 doplňovány dodatečně a v podstatě se hledalo, jak využít existující mechanismy pro jejich implementaci. Autoři IPv6 naproti tomu popadli příležitost za pačesy a rozhodli se zapracovat koncept dosahu adres jako jeden ze standardních prvků adresace. Věnuje se mu RFC 4007: *IPv6 Scoped Address Architecture*.

Intuitivně je pojem dosahu celkem jasný. Formálně je definován jako vymezení topologické oblasti sítě, v níž je daná adresa jednoznačná.

Dostupné dosahy se liší podle druhu adresy. Nejjemnější členění mají skupinové, pro které je podle RFC 7346: *IPv6 Multicast Address Scopes* definováno sedm stupňů lokality. Najdete je v tabulce 3.6, kde jsou uvedeny číselné hodnoty jednotlivých dosahů a jejich významy. V případě individuálních adres se rozlišují jen dva stupně: lokální pro linku a globální. Výběrové adresy spadají mezi individuální, takže mají i stejné dosahy.

V popsané hierarchii nemusí nutně platit, že větší dosah pokrývá ostře větší část sítě než dosah menší. V řadě případů mohou být dosahy na několika úrovních totožné – například linka bude v drtivé většině případů shodná se sférou a správní oblastí (podsítí). Zmíněné dosahy budou v reálu platit ve stejné části sítě. Pochopitelně však při postupu hierarchií směrem k většímu dosahu nesmí dojít ke zmenšení odpovídající části sítě.

V souvislosti s dosahy se též objevuje pojem *zóna*. Jedná se právě o tu část síťové topologie, která odpovídá danému dosahu (adresa je v zóně jednoznačná). Hranice zón procházejí počítači, nikoli linkami. Pochopitelně platí, že celá zóna je vždy zahrnuta do „nadřízené“ zóny většího dosahu. naopak zóny stejného dosahu se nemohou překrývat (jsou buď totožné nebo zcela oddělené). Z hle-

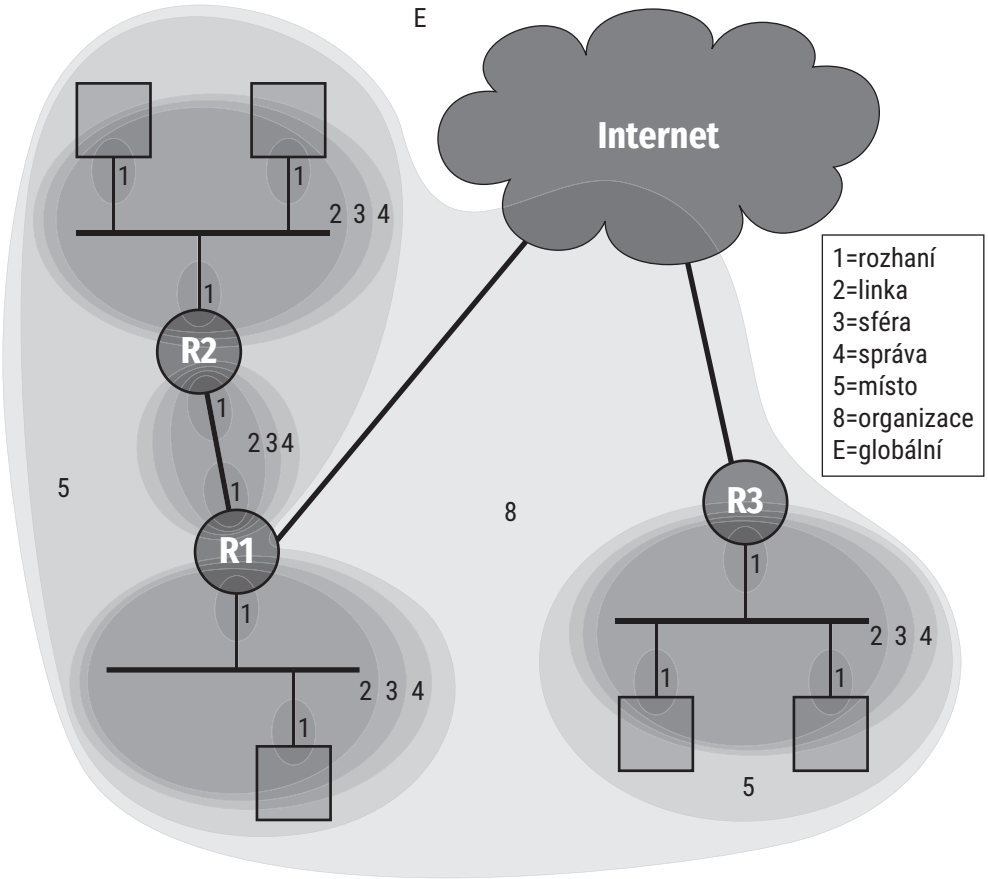
dosah	*význam*
1=rozhraní	nepřekročí jediné rozhraní; používá se pro skupinové vysílání do rozhraní pro lokální smyčku (loopback, adresa ::1)
2=linka	dosah je omezen na jednu fyzickou síť (např. Ethernet či pouhou sériovou linku se dvěma účastníky)
3=sféra	(realm) pokrývá homogenní skupinu linek, které tvoří jeden celek; musí být definována v RFC, typicky v dokumentu typu „přenos IPv6 po XY“
4=správa	nejmenší dosah, který musí být konfigurován správcem (čili nelze jej automaticky odvodit z fyzické topologie či dalších informací); obvykle se jedná o podsíť
5=místo	část síťové topologie, která patří jedné organizaci a nachází se v jedné geografické lokalitě, prostě koncová zákaznická síť
8=organizace	pokrývá několik míst náležejících téže organizaci, například pobočky jedné firmy v různých městech
E=globální	celosvětový dosah

Tabulka 3.6: Dosah skupinových adres

diska směrování musí být zóna souvislá – pokud by datagram během přepravy opustil zónu, mohlo by dojít k dezinterpretaci jeho adresy.

Rozložení zón (čili dosahů) ilustruje obrázek 3.15 na příkladu jakési sítě zasahující do dvou lokalit. Síť v levé lokalitě zahrnuje tři podsítě, propojené směrovači R1 a R2, síť v pravé lokalitě má jen jednu podsíť. Všimněte si, jak jsou konstruovány zóny odpovídající oběma místům. Nejzapeklitější problém představuje zóna organizace, která má být souvislá. Nabízejí se pro ni dvě základní řešení: Buď bude ve spolupráci s poskytovatelem Internetu tažena jeho páteřní sítí (např. v podobě virtuální sítě), nebo zůstane poskytovatel zcela mimo, organizace si vytvoří tunel propojující směrovače R1 a R3 a použije jej pro přenos skupinových dat mezi oběma pobočkami. Pak by rozhraní směrovačů R1 a R3 zajišťující připojení k Internetu zůstala mimo zónu připojené organizace. Místo nich by do této zóny patřila rozhraní reprezentující propojující tunel. Obrázek 3.15 znázorňuje první variantu, i když pravděpodobnější je druhá.

Hranice některých zón jsou jasně dány z logiky věci – například pro linku. U jiných (jako je třeba místo či organizace) je třeba hranici určit konfigurací odpovídajících zařízení. Například na směrovači *R1* je třeba nastavit, že obě rozhraní vnitřní sítě patří do zóny místo, zatímco rozhraní k poskytovateli nikoli.



Obrázek 3.15: Zóny (dosahy) v připojené síti

Jelikož je adresa jednoznačná jen v rámci zóny a počítač může být členem několika zón stejného dosahu (například *R1* patří do tří různých linkových zón), může dojít k situaci, že se stejná adresa objeví v několika zónách. Aby se tyto adresy daly navzájem rozlišit, zavádí RFC 4007 identifikátory zón. Přestože pracovní verze dokumentu i některé implementace používají identifikátory kombinující dosah a pořadové číslo (např. *link1*), RFC dává přednost jednoduchosti a doporučuje používat přirozená čísla. Dosah zóny se odvodí z vlastní adresy.

Kompletní zápis adresy pak má tvar *adresa%zóna*. Například pokud bude spodní Ethernet připojený ke směrovači R1 reprezentován identifikátorem linkové zóny 1, bude mít skupinová adresa pro všechny uzly na této lince plný tvar ff02::1%1.

Identifikátory se přidělují interně v rámci každého počítače a nejsou navzájem synchronizovány se sousedy v téže zóně. Jejich jediným cílem je nabídnout prostředek pro identifikaci zón v rámci jednoho stroje, aby mohly figurovat ve směrovacích tabulkách a podobných strukturách.

RFC 4007 také počítá s konceptem implicitní zóny (s identifikátorem 0), která se dosadí, pokud adresa neobsahuje identifikátor zóny. Příkladem použití mohou být globální adresy, kde existuje jediná zóna a tudíž nemá smysl ji explicitně uvádět.

Drobný komentář si zaslouží změny, jimiž postupně prochází sortiment definovaných dosahů. Zatím směřují spíše ke zjednodušení. Individuální adresy původně obsahovaly ještě dosah lokální pro místo, který odpovídal dosahu 5 u skupinových adres. Ovšem dlouhodobě se nedařilo najít uspokojivou definici „místa“ a projevilo se několik dalších neduhů, proto je RFC 3879 v roce 2004 zrušilo.

Pro skupinové adresy zůstal dosah pro místo zachován, zato zmizela z nabídky podsíť. Dřívější specifikace definovala trojici po sobě jdoucích dosahů (2 pro linku, 3 pro podsíť a 4 pro správu), které v praxi obvykle představovaly tutéž zónu. Každá linka obvykle bývá z hlediska IP podsítí a správcem nastavená hranice přirozeně odpovídá podsíti. Pocit určité nadbytečnosti vyústil ve vypuštění prostředního z těchto tří dosahů.

U některých technologií ale dochází ke spojování linek do celků, proto se v RFC 7346 dosah 3 vrátil, ovšem pod názvem sféra (realm). Význam pro konkrétní technologii musí být definován v příslušném RFC.

3.12 Výběr adresy

Přiřazení několika různých adres témuž rozhraní vyvolává nový problém: kterou z nich si vybrat. Představte si modelovou situaci: do svého WWW klienta napíšete *www.kdesi.cz*, počítač si prostřednictvím DNS zjistí cílovou adresu a dostane řekněme pět odpovědí. Rozhraní, kterým se

chystá odeslat data, má přiděleno šest adres. V obou množinách mohou být adresy IPv6 i IPv4. Jaký protokol tedy použít a co vyplnit do hlavičky datagramu? Jakou adresu pro cíl a odesilatele zvolit?

Odpověď poskytuje RFC 6724: *Default Address Selection for Internet Protocol version 6 (IPv6)*, jež stanoví přesný postup pro výběr adres v odesílaném datagramu. Jeho cílem je, aby se všechny implementace IPv6 chovaly konzistentně a předvídatelně. Na druhé straně ovšem ponechává správci stroje možnost ovlivňovat výběr adres nastavením určitých priorit.

Základem algoritmu je výběr z několika kandidátek, případně jejich seřazení podle vhodnosti. Aplikace, která chce komunikovat, někdy má k dispozici cílovou IP adresu. Pak je kandidátka jen jedna a výběr cílové adresy odpadá. Většinou je ale cíl zadán doménovým jménem. Aplikace v tom případě nejprve zavolá systémovou službu *getaddrinfo( )*, kterou požádá o převod DNS jména na IP adresu. Z DNS dotazu vzejde *seznam kandidátek na cílovou adresu* a ten je následně podle níže uvedených pravidel uspořádán od nejvhodnější adresy po nejméně vhodnou. Seřazený seznam tvoří výsledek volání *getaddrinfo( )*, který dostane aplikace.

Ta z něj vybere jednu adresu (slušná aplikace tu první) a požádá o odeslání dat na ni. Nyní je cílová adresa jednoznačně dána a je třeba k ní vybrat nejvhodnější zdrojovou adresu. *Kandidátkami na zdrojovou adresu* se obvykle stanou všechny individuální adresy přiřazené rozhraní, kterým budou odesílána data k danému cíli. To znamená, že různé cílové adresy mohou mít různé kandidátské sady pro odesilatele. Pokud data odesílá směrovač, může mezi kandidátky zařadit individuální adresy ze všech rozhraní, na kterých předává data. Uplatněním sady pravidel se z kandidátek vybere Miss Odesilatel a ta bude použita v datagramu.

Jestliže se komunikace nezdaří, může aplikace později zkusit další ze seznamu cílových adres a výběr odesilatele se bude opakovat. Přesněji řečeno to může zkoušet i dříve a cíleně volit jiný protokol, viz algoritmus Happy Eyeballs popsaný na straně 223.

K vyjádření místních preferencí slouží tak zvaná *tabulka politik (policy table)*. Její záznamy obsahují po třech položkách: adresní prefix, prioritu (precedence) a značku (label). Vyhledává se v ní podobně jako ve směrovací tabulce – bude použita ta položka, která má nejdelší shodný prefix s posuzovanou adresou. Určí prioritu a značku posuzované adresy.

Priorita obecně vyjadřuje výhodnost dané adresy jako cílové. Vyšší priorita znamená, že této adrese by se měla dát přednost. Prostřednictvím značek pak lze sdělit, že určitý pár adres spolu mimořádně dobře ladí. V jejich případě se posuzuje jen rovnost či nerovnost. Mají-li dvě adresy shodnou značku, dobře se k sobě hodí a bude jim dána přednost.

prefix	*priorita*	*značka*
::1/128	50	0
::/0	40	1
::ffff:0:0/96	35	4
2002::/16	30	2
2001::/32	5	5
fc00::/7	3	13
::/96	1	3
fec0::/10	1	11
3ffe::/16	1	12

Obrázek 3.16: Implicitní tabulka politik

Vhodným nastavením tabulky politik může správce systému přizpůsobit chování výběru adres svým potřebám[9]. Jestliže tuto možnost nevyužije, použije se implicitní tabulka podle obrázku 3.16. Za pozornost v ní stojí vysoká priorita implicitní položky (druhý řádek), které vyhoví jakákoli adresa. Díky ní budou mít například globální IPv6 adresy přednost před adresami 6to4 (viz kapitola 12.3.1 na straně 284) s prefixem 2002::/16. Za chvilku bude jasné proč.

Algoritmus pro volbu adresy definuje dvě sady pravidel. Jedna se vztahuje na zdrojovou adresu a druhá na cílovou. Podívejme se nejprve na výběr odesilatele.

Příslušná pravidla shrnuje obrázek 3.17. Vycházejí ze situace, že máme porovnat vhodnost dvou potenciálních zdrojových adres SA a SB pro daný cíl. Řada pravidel je symetrických a měla by obsahovat ještě jednou tutéž větu, v níž si SA a SB prohodí role. Pro zjednodušení toto opakování vynechávám a ponechám je na inteligenci čtenáře. Pravidla se aplikují postupně v uvedeném pořadí. Jakmile některé rozhodne, neberou se další v potaz. Jestliže nerozhodne žádné z pravidel, ponechává se volba mezi SA a SB na implementaci.

Porovnáním jednotlivých dvojic z odpovídající kandidátské množiny se určí nejvhodnější zdrojová adresa pro daný cíl. Budeme ji dále označovat *odesilatel*(*cíl*).

9: Několik příkladů najdete v 10. kapitole RFC 6724.

1. **Preferovat totožné adresy.**
   Pokud je některá z adres totožná s cílovou, vybere ji.
2. **Preferovat odpovídající dosah.**
   Jestliže mají zdrojové adresy rozdílný dosah, seřadí si je tak, aby *dosah*(*SA*) < *dosah*(*SB*). Pak pokud je *dosah*(*SA*) < *dosah*(*cíl*) vybere SB, jinak vybere SA.
3. **Vyhýbat se odmítaným adresám.**
   Je-li jedna adresa preferována a druhá odmítána (jedná se o fáze automaticky konfigurované adresy, viz strana 140), vybere preferovanou.
4. **Preferovat domácí adresy.**
   Pokud je jedna z adres zároveň domácí i dočasnou adresou (mobilní počítač je doma – viz kapitola 11 na straně 247) a druhá ne, vybere ji. Jinak je-li SA domácí a SB dočasná, vybere SA. Po implementacích IPv6 je zároveň požadováno, aby poskytly aplikaci způsob, jak toto pravidlo obrátit a preferovat dočasné adresy před domácími.
5. **Preferovat odchozí rozhraní.**
   Je-li SA přidělena rozhraní, kterým budou odeslána data k danému cíli, a SB nikoli, vybere SA.

5.5 **Preferovat prefix ohlášený směrovačem na cestě.**
Pokud byl prefix SA ohlášen směrovačem (viz část 6.1 na straně 135), který bude podle směrovací tabulky použit pro odeslání datagramu k danému cíli, zatímco prefix SB byl ohlášen jiným směrovačem, vybere SA.

6. **Preferovat shodné značky.**
   Pokud platí *značka*(*SA*) = *značka*(*cíl*) a *značka*(*SB*) ≠ *značka*(*cíl*), vybere SA.
7. **Preferovat dočasné adresy.**
   Když je SA dočasná adresa chránící soukromí a SB veřejná, vybere SA. Implementace je povinna umožnit aplikaci, aby (s účinností jen pro sebe) nastavila preferenci veřejných adres. Je také doporučeno umožnit správci změnit pravidlo s globální účinností pomocí volby označované *Privacy Preference flag*.
8. **Použít nejdelší shodný prefix.**
   Nerozhodlo-li žádné z předchozích pravidel, použije tu z dvojice zdrojových adres, která má delší shodný prefix s cílem. Do délky prefixu se nepočítá identifikátor rozhraní, jen adresa sítě a podsítě.

Obrázek 3.17: Výběr zdrojové adresy

Podívejme se na příklad. Řekněme, že počítač má jediné síťové rozhraní, jemuž byly přiděleny následující tři IPv6 adresy:

1. fe80::abcd (lokální linková)
2. 2002:93e6:3149:1::abcd (6to4)
3. 2001:db8:1:1::abcd (globální individuální)

Nyní má odeslat datagram na adresu 2002:95aa:37fe:5::4321 a potřebuje z výše uvedené trojice adres vybrat nejvhodnější. Předpokládejme, že používá standardní tabulku politik podle obrázku 3.16.

První adresa skončí na pravidle číslo 2, protože její lokální linkový dosah je menší než globální dosah cíle. Mezi druhou a třetí adresou rozhodne až pravidlo číslo 6, z hlediska pravidel 1 až 5.5 mezi nimi není rozdíl. Tabulka politik přiřadí cílové adrese značku 2, stejně tak jako druhé adrese. Naproti tomu třetí adresa obdrží značku 1. Adresa 2002:93e6:3149:1::abcd má stejnou značku jako cílová, dostane proto přednost a bude použita jako zdrojová adresa.

Seřazení kandidátů na cílové adresy je složitější. Při porovnávání vhodnosti cílových adres se mimo jiné zvažuje, jak dobře se k sobě hodí se zdrojovou adresou. Proto se pro každou z kandidátek nejprve výše uvedeným postupem určí nejvhodnější odesilatel. Seznam kandidátek se pak uspořádá podle pravidel obsažených na obrázku 3.18. Tentokrát se porovnává vhodnost dvou potenciálních cílových adres DA a DB. Opět je řada pravidel symetrických, opět rozhoduje první použitelné. Postupným porovnáním jednotlivých dvojic se seznam kandidátek na cíl uspořádá od nejvhodnějších po ty nejméně vhodné.

Jako příklad použijme opět počítač z příkladu pro výběr zdrojové adresy. Řekněme, že DNS dotaz pro určité jméno vydal následující trojici adres:

1. 2002:95aa:37fe:5::4321 (odesilatel 2002:93e6:3149:1::abcd)
2. 2001:db8:cccc:5::4321 (odesilatel 2001:db8:1:1::abcd)
3. 2001:8800:b1a:5::4321 (odesilatel 2001:db8:1:1::abcd)

V jejich seznamu jsem rovnou uvedl preferované zdrojové adresy, jež jednotlivým kandidátkám vybere výše popsaný algoritmus. Tentokrát při výběru nepomohou ani značky, protože všechny tři kandidátky mají značku shodnou se svou zdrojovou adresou. První rozhodnutí přinese až pravidlo 6, protože priorita první adresy je 30, zatímco priorita zbývajících dvou je o deset vyšší. První adresa je tedy nejhorší. Mezi druhou a třetí pak rozhodne až pravidlo 9. Kandidátka číslo 2 má se svým odesilatelem shodný prefix 2001:db8::/32, zatímco kandidátka číslo 3 jen 2001::/16. Ve výsledku budou proto kandidátky na cílovou adresu seřazeny následovně:

1. **Vyhýbat se nepoužitelným cílům.**
   Pokud se o DB ví, že je nedosažitelná, nebo pro ni neexistuje žádná použitelná zdrojová adresa, dá přednost DA.
2. **Preferovat odpovídající dosah.**
   Je-li *dosah*(*DA*) = *dosah*(*odesilatel*(*DA*)) a *dosah*(*DB*) ≠ *dosah*(*odesilatel*(*DB*)), dá přednost DA.
3. **Vyhýbat se odmítaným adresám.**
   Pokud je *odesilatel*(*DB*) odmítaná adresa a *odesilatel*(*DA*) preferovaná, dá přednost DA.
4. **Preferovat domácí adresy.**
   Je-li odesilatel pro některou z cílových adres zároveň domácí i dočasnou adresou, dá přednost této cílové adrese. Jinak pokud je *odesilatel*(*DA*) domácí adresa a *odesilatel*(*DB*) dočasná, dá přednost DA.
5. **Preferovat shodné značky.**
   Když je *značka*(*odesilatel*(*DA*)) = *značka*(*DA*)
   a *značka*(*odesilatel*(*DB*)) ≠ *značka*(*DB*), dá přednost DA.
6. **Preferovat vyšší prioritu.**
   Je-li *priorita*(*DA*) > *priorita*(DB), dá přednost DA.
7. **Preferovat nativní přenos.**
   Pokud je DB dosažitelná zapouzdřeným přenosem (např. tunelem), zatímco DA přímo po IPv6, dá přednost DA.
8. **Preferovat malý dosah.**
   Je-li *dosah*(*DA*) < *dosah*(*DB*), dá přednost DA.
9. **Použít nejdelší shodný prefix.**
   Pokud jsou obě adresy DA a DB stejného typu (obě IPv6 nebo obě IPv4), dá přednost té z nich, která má delší společný prefix se sobě odpovídající zdrojovou adresou. Délka společného prefixu je shora omezena délkou prefixu zdrojové adresy, aby případná shoda počátečních bitů v identifikátoru rozhraní neovlivňovala výsledky.
10. **Neměnit pořadí.**
    Pokud DA bylo v původním seznamu před DB, dá přednost DA.

Obrázek 3.18: Výběr cílové adresy

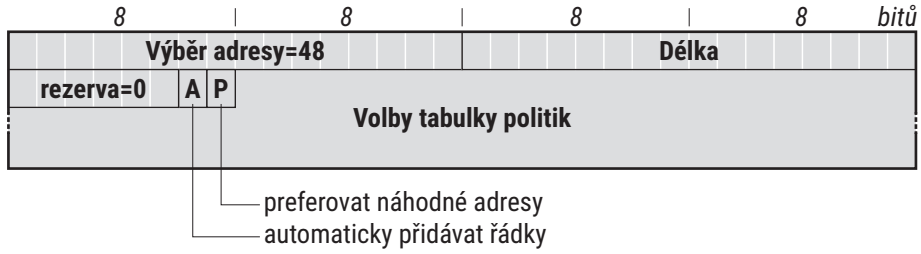
1. 2001:db8:cccc:5::4321
2. 2001:8800:b1a:5::4321
3. 2002:95aa:37fe:5::4321

Jako ideální vychází cílová adresa 2001:db8:cccc:5::4321 a jí odpovídající zdrojová adresa 2001:db8:1:1::abcd, což odpovídá logice – použije se globální individuální adresa ze sítě adresně bližší. Prefix délky 32 bitů patří lokálnímu registru – obvykle poskytovateli Internetu. Lze proto očekávat, že přeprava paketů proběhne v rámci jeho sítě, a tedy velmi efektivně.

RFC 6724 představuje druhou generaci algoritmu pro výběr adres. Tu první najdete v RFC 3484, které vyšlo o devět let dříve a dočkalo se dost široké implementace. Zkušenosti s ním získané popisuje RFC 5220: *Problem Statement for Default Address Selection in Multi-Prefix Environments: Operational Issues of RFC 3484 Default Rules* a odrazily se i ve změnách provedených ve druhé generaci. Za zmínku stojí především rozšíření výchozí tabulky politik, přidání pravidla 5.5 do výběru zdrojové adresy a otočení pravidla 7 (původně byly preferovány veřejné adresy).

Doposud popsané mechanismy pro volbu adres jsou univerzální a platné pro všechna zařízení podporující IPv6. Tabulka politik dává správci možnost ji ovlivnit a přizpůsobit místní situaci. Problémem ale je, jak do tabulky zasáhnout.

Ruční editace je samozřejmě možná, ovšem krajně nepohodlná. A představa okružní cesty po místních počítačích, pokud by bylo třeba v tabulce něco změnit, vyděsí i otrlé správce sítí netriviální velikosti. RFC 7078: *Distributing Address Selection Policy Using DHCPv6* proto přišlo s možností použít pro tento účel univerzální konfigurační protokol DHCPv6[10]. Definovalo pro ně volbu *Výběr adresy (Address Selection)*, jejíž formát vidíte na obrázku 3.19.



Obrázek 3.19: Volba DHCPv6 pro nastavení tabulky politik

Její hlavní náplň tvoří *Volby tabulky politik (Policy Table Options)*, jimiž jsou jednotlivé položky tabulky. Jejich přesný formát najdete v RFC 7078, nicméně obsahují očekávatelné údaje: prefix,

10: Bohužel musím trochu předbíhat. O DHCPv6 se dočtete v části 6.5 na straně 147.

značku a prioritu pro každou z nich. Koncový stroj by standardně měl nahradit svou implicitní tabulku politik tou, kterou získal protokolem DHCPv6. Specifikace ale požaduje, aby bylo možné toto chování vypnout a zachovat si implicitní nastavení.

Volba *Výběr adresy* pro vás může být zajímavá i v případě, kdy tabulku vlastně ovlivňovat nechcete. Obsahuje totiž příznak *P (Privacy Preference)*, jímž lze řídit, zda počítač má preferovat náhodné adresy zachovávající soukromí (hodnota 1) nebo veřejné globální adresy (hodnota 0). Pokud má volba sloužit k tomuto účelu, ponechte její *Volby tabulky politik* prázdné a nastavte jen příznaky A a P.

3.13 Vícedomovci čili multihoming

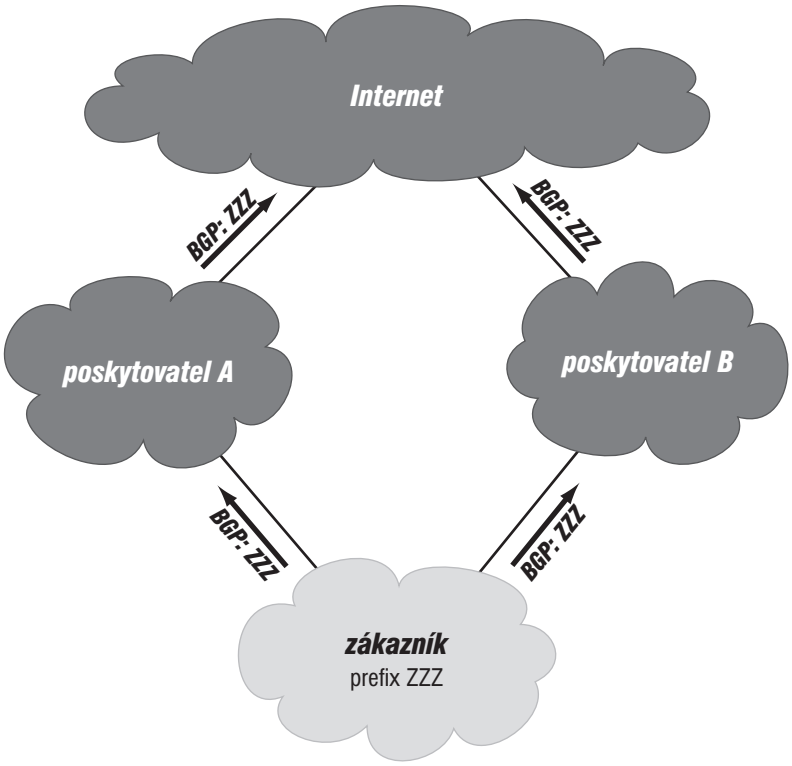
Vícedomovci jsou opakem bezdomovců. Příklady známých vícedomovců[11] jasně naznačují, že být vícedomovcem je výhodné. V síťové praxi se tímto pojmem označují zákaznické sítě, které jsou připojeny k několika poskytovatelům připojení. Anglicky se tomuto způsobu připojení říká multihoming.

Jeho hlavním cílem je zajistit zákaznické síti spojení s Internetem i v případě, že u některého z poskytovatelů dojde k výpadku a cesta vedoucí přes něj se přeruší. Vícedomovci se proto stávají především poskytovatelé služeb, jejichž výpadek by byl kritický a znamenal ztrátu, ať už přímou finanční či poškození jména. Například Seznam by jistě nepotěšilo, kdyby byly jeho servery několik hodin nedostupné. Podobně by kterákoli banka špatně nesla ztrátu spojení svého platebního systému.

Podrobněji cíle vícedomovectví pitvá RFC 3582: *Goals for IPv6 Site-Multihoming Architectures*. Vedle redundance a odolávání výpadkům tu najdete i rozkládání zátěže a zvyšování výkonu díky paralelním přenosům různými sítěmi. Důležitým požadavkem, který zároveň eliminuje některá řešení, je transparentnost vůči vyšším vrstvám. Jestliže dojde k výpadku a provoz je převeden na jiného poskytovatele, měla by navázaná spojení normálně pokračovat a nemělo by to ani omezit možnost navazovat nová v obou směrech.

Dlužno přiznat, že vícedomovectví je problém, především z hlediska směrování. Současná běžná praxe je taková, že síť, která chce být připojena k několika poskytovatelům Internetu, si založí svůj vlastní autonomní systém (AS), opatří si adresy nezávislé na poskytovateli (Provider Independent, PI) a vstoupí do globálních směrovacích tabulek. To znamená, že má svůj záznam na nejvyšší úrovni směrování v páteřních směrovačích Internetu. Ten šíří všichni poskytovatelé, k nimž je připojena. Standardní směrovací mechanismy se postarají o nalezení optimální cesty k ní i o její aktualizace při změnách v síti. Stejné řešení se používá i ve světě IPv4.

11: úspěšní podnikatelé, filmové a hudební hvězdy, …



Obrázek 3.20: Multihoming prostřednictvím směrování

Z pohledu IPv6 je tento přístup jasné fuj. Jedním ze základních východisek při návrhu adresní struktury IPv6 bylo, aby umožňovala masivní slučování (agregaci) prefixů a snižovala tak počet záznamů ve směrovacích tabulkách páteřních směrovačů. Dosavadní praxe je ve zřejmém rozporu s tímto cílem.

Na druhé straně je třeba přiznat, že tento přístup zatím jako jediný skutečně funguje a až na škálovatelnost splňuje všechny ostatní požadavky. Navíc nevyžaduje žádné změny v používaných protokolech a systémech, jen opatření administrativního charakteru. Takže zvolejme „Hanba! Hanba! Hanba, že nám nic jiného nezbývá!“

Pro IPv4 se používá ještě jedno řešení, jehož základem je NAT. V tomto případě koncová síť obvykle používá adresy přidělené jedním z poskytovatelů[12] a pokud potřebuje odeslat datagram sítí jiného, přepíše je na adresy z jeho rozsahu. Ovšem NAT v IPv6 nechceme a kromě toho se takové uspořádání hodí zejména pro konzumentskou síť, která služby spíše využívá než nabízí. Zpřístupňovat služby zpoza NATu není zrovna příjemné.

V IPv6 lze vícedomovectví teoreticky zařídit velmi snadno. Protokol připouští vícenásobné adresy rozhraní, čili stroje v koncové síti mohou mít zároveň adresy z několika rozsahů přidělených různými poskytovateli. Problémy, které se za tímto na první pohled jednoduchým přístupem skrývají, analyzuje RFC 7157: *IPv6 Multihoming without Network Address Translation*.

Stručně řečeno je třeba spojit směrování s volbou zdrojové adresy, aby do sítě každého z poskytovatelů odcházely datagramy se zdrojovou adresou z jím přiděleného rozsahu. V opačném případě se jednak vystavujeme riziku jejich zahození, pokud poskytovatel filtruje příchozí provoz podle BCP 38, jednak budou odpovědi doručeny jinou cestou, což také není ideální. A pokud se čaruje s DNS, může být potřeba také ptát se DNS serveru poskytovatele, jehož sítí odešleme datagram[13].

Návrh na řešení popsaných problémů dává RFC 8028: *First-Hop Router Selection by Hosts in a Multi-Prefix Network*. Rozšiřuje objevování sousedů (což je mechanismus pro automatickou konfiguraci směrování koncových strojů, budu se mu věnovat v kapitole 5 na straně 119) tak, aby si koncový počítač pamatoval, odkud dostal kterou ze svých adres. Když pak odesílá datagram, předá jej směrovači, který mu ohlásil prefix použité zdrojové adresy.

S tímto doplňkem se jednoduchá varianta vícedomovectví stává celkem použitelnou. Není ovšem bez poskvrnky – při výpadku jednoho z připojení nedochází k převedení probíhající komunikace na funkční trasu. Navázaná TCP spojení s adresami, které přestaly fungovat, se rozpadnou.

Některé další teoretické cesty naznačuje RFC 4177: *Architectural Approaches to Multi-homing for IPv6*. Jednou z nich je využití podpory mobilních zařízení v IPv6. Podrobněji se jí budu věnovat v kapitole 11 na straně 247. Dopředu jen naznačím, že mobilní zařízení je někde doma a pokud se zrovna toulá, poskytuje ostatním informaci „momentálně jsem k zastižení na adrese X“. Doma jej mezitím zastupuje domácí agent, který mu přeposílá datagramy přicházející na jeho domácí adresu.

Vícedomovecká síť by v tomto případě dostala dva prefixy – *PA* od prvního poskytovatele a *PB* od druhého. Jestliže stroj v ní komunikuje na adrese *PA:X* a cesta přes prvního poskytovatele padne, může využít mobilní mechanismy a sdělit svým partnerům „momentálně jsem k zastižení na adrese *PB:X*“.

12: Případně neveřejné adresy podle RFC 1918.
13: Což je trochu Hlava XXII, protože použitá síť často vyplyne z adresy, kterou DNS dodá.

To je velmi hezká myšlenka, ovšem naráží na několik ošklivých problémů. Za prvé mobilita stále není v implementacích příliš dobře podporována. Za druhé se koncový počítač musí dozvědět, že používané spojení bylo přerušeno a že by měl partnerům oznámit změnu adresy. A třetí hřebíček do rakve představuje zabezpečení. Aby se kdokoli nemohl prohlásit za jiný uzel na cestách, následuje po přijetí zprávy „mám adresu *X* a momentálně jsem k zastižení na adrese *Y*“ test, zda její odesilatel skutečně přijímá data na obou uvedených adresách. Teď jsme ovšem v situaci, kdy jedna z adres nefunguje a test proto nemůže proběhnout úspěšně.

Mobilita svým konceptem domácí a aktuální adresy ovšem naznačuje cestu, kterou se současné úvahy o vícedomovectví ubírají. Směřují k oddělení dvou rolí, které IP adresa hraje. Slouží jako *identifikátor*, jehož cílem je jednoznačně určit totožnost počítače, respektive jeho rozhraní. Zároveň ale hraje úlohu *lokátoru* oznamujícího polohu zařízení v síti a používaného pro směrování datagramů k němu.

Značné úsilí je v současnosti věnováno vývoji mechanismů, které by vedly k rozdělení těchto dvou úloh. Aby každý stroj měl svůj neměnný identifikátor, který by používaly protokoly vyšších vrstev a který by nezávisel na aktuální síťové situaci. Kromě toho by ovšem měl přiřazen jeden či několik dočasných lokátorů využívaných při směrování, které by pružně měnil v závislosti na stavu sítě – při svém pohybu Internetem, při výpadcích a startech linek. Lokátory by sloužily nižším vrstvám komunikační architektury k zajištění vlastních přenosových služeb.

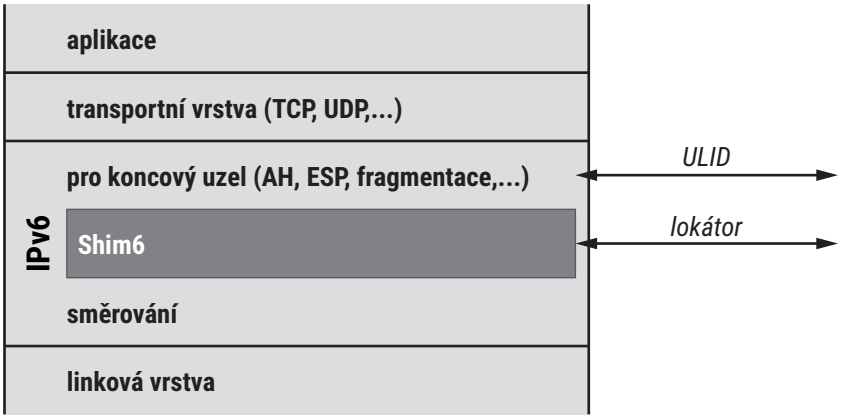
Tento přístup ale znamená významný zásah do významu adresy a vyžaduje úpravu síťové architektury. Některá její část musí provádět mapování mezi identifikátorem a jeho lokátory, vybírat aktuálně nejvhodnější a podobně. Mohla by posloužit distribuovaná databáze podobná DNS, nicméně navržené řešení se neomezuje na jeden konkrétní způsob mapování.

Problematice se věnuje pracovní skupina IETF nazvaná *lisp (Locator/ID Separation Protocol)*. Základní specifikaci protokolu najdete v RFC 6830: *The Locator/ID Separation Protocol (LISP)*, na který pak navazuje řada dalších specifikací. Celý koncept LISP se ovšem zatím nachází v experimentálním stádiu.

O určitý kompromis se snaží koncept nazvaný *Shim6* definovaný v RFC 5533: *Shim6: Level 3 Multihoming Shim Protocol for IPv6*. Slovo „shim“ znamená podložku a mezi programátory se používá pro jednoduchou knihovnu, která převádí jedno aplikační rozhraní na jiné. Docela pěkně to vystihuje jeho funkci.

Shim6 nezavádí samostatný prostor pro identifikátory a neodděluje důsledně identifikátor (ve zdejší terminologii nazývaný ULID, Upper-Layer Identifier) od lokátoru. Místo toho pragmaticky používá v roli identifikátoru první lokátor, s nímž komunikace začala. Počáteční výběr adres proběhne tak jak bylo popsáno v předchozí části a teprve když se komunikace zadrhne, přijde ke slovu

Shim6 a pokusí se vybrat nové funkční lokátory. Pro vyšší vrstvy (transportní počínaje) zůstávají nadále v platnosti původní adresy.



Obrázek 3.21: Začlenění Shim6 do architektury TCP/IP

Obrázek 3.21 znázorňuje umístění Shim6 v komunikační architektuře. Je zařazen do síťové (IP) vrstvy tak, že ji rozděluje na dvě části. Nad ním se nacházejí komponenty síťové vrstvy určené koncovému uzlu – zabezpečení, fragmentace a volby pro příjemce. K případnému přepisování adres dochází až po jejich aplikaci na straně odesilatele, resp. před ní na straně příjemce. Tyto složky se o existenci Shim6 vůbec nedozvědí. Z jejich pohledu (a všech vrstev nad nimi) je Shim6 zcela transparentní. Pod ním se pak nachází ta část IP vrstvy, která zajišťuje směrování.

Shim6 se chová podle známého hesla všech tchýní „Já tady také nemusím být." Na začátku komunikace se vůbec neprojeví, ta je zahájena obvyklým způsobem. Spouští se teprve když výměna dat trvá určitou dobu, aby zbytečně nezatěžoval krátkodobou komunikaci (například DNS). Poté proběhne mezi oběma partnery výměna čtyř zpráv, kterými se navzájem informují o svých lokátorech a vytvoří tak zvaný Shim6 kontext. Vše je připraveno pro případ nouze. Jestliže z druhé strany nedorazí odpověď na zprávu vyzývající k vytvoření kontextu, protějšek nepodporuje Shim6 a komunikace bude pokračovat bez něj.

Pokud došlo k vytvoření Shim6 kontextu, protokol se odmlčí a nijak se neprojevuje až do vzniku problému. Jestliže se komunikace zadrhne (což může zjistit Shim6 sám nebo problém ohlásí vyšší vrstva), pokusí se oba partneři najít ze známých lokátorů pár, který funguje. Když se podaří, začne Shim6 přepisovat adresy v odesílaných datagramech a zároveň k nim přidává rozšiřující hlavičku identifikující kontext. Podle ní příjemce pozná datagram upravený Shim6 a přepíše adresy v něm zpět do původní podoby, kterou měly v době zahájení komunikace a která hraje roli identifikátorů. Případné bezpečnostní prvky a další služby jsou uplatněny až na restaurovaný datagram.

Protokol je dost košatý a zahrnuje celou řadu doplňujících prvků. Jimi se například partneři informují o změnách ve složení dostupných lokátorů, umožňuje aplikacím využívat různé kontexty nebo si vyměňovat různé provozní informace.

3.14 Přidělování adres

IPv6 se do praxe prosazuje sice pomalu, ale z hlediska administrativního je dnes se svým předchůdcem srovnatelný. Procedura přidělování adres je dnes totožná pro oba protokoly: centrální autoritou je *IANA (Internet Assigned Numbers Authority)*, která přiděluje velké bloky adres *regionálním registrům (Regional Internet Registry, RIR)*. Těch je pět a na jejich počtu se nejspíš hned tak něco nezmění. Zeměkouli mají rozdělenu následovně:

AFRINIC	Afrika,
APNIC	Asie a Pacifik,
ARIN	Severní Amerika,
LACNIC	Latinská Amerika,
RIPE NCC	Evropa a Blízký východ.

Jednotlivé regionální registry rozdělují menší bloky *registrům lokálním (Local Internet Registry, LIR)*. Roli lokálních registrů zpravidla zastávají poskytovatelé Internetu. Od nich získávají adresy koncové instituce – zákazníci. Vzhledem k hierarchickému uspořádání přidělovaných rozsahů je zajištěna agregovatelnost.

Pravidla v jednotlivých oblastech oficiálně stanoví vždy příslušný RIR. Tyto organizace však své kroky vzájemně koordinují, navíc jim určitá omezení klade IANA. V praxi jsou proto pravidla všude dost podobná.

Konkrétně v Evropě je aktuálně stanoví dokument ripe-707: *IPv6 Address Allocation and Assignment Policy* z července roku 2018. Podle něj RIPE NCC alokuje lokálním registrům prefixy délky 29 až 32 bitů (v odůvodněných případech i kratší). Aby jej LIR mohl získat, musí splnit podmínky uvedené v tabulce 3.7. Stručně řečeno: pokud jste LIR a plánujete do dvou let poskytovat IPv6 služby, máte nárok až na 29bitový prefix.

1.	Žadatel musí být lokálním registrem.
2.	Žadatel musí mít plán alokovat části přiděleného IPv6 prostoru dalším organizacím a sítím do dvou let.

Tabulka 3.7: Podmínky RIPE NCC pro získání oficiálního /32 prefixu

Délku prefixu přidělovaného koncovým sítím ripe-707 konkrétně nepředepisuje, ponechává ji na uvážení poskytovatele (LIR). Zakazuje však přidělování prefixů delších než 64 bitů a v případě prefixů kratších než 48 bitů požaduje zdůvodnění. Nejobvyklejší délkou prefixů pro koncové sítě je 48 bitů, malé sítě (např. domácí) mohou mít prostor omezenější, tedy delší prefix.

Lokální registr má k dispozici alespoň 16 bitů pro rozlišení svých zákazníků. To mu dává prostor přinejmenším pro 65 536 zákaznických prefixů, i když bude přidělovat prefixy délky 48 bitů. Pokud by to bylo málo, politika RIR připouští v odůvodněných případech alokovat lokálnímu registru prefix kratší nebo skupinu prefixů.

Kromě přidělení od LIR může zákazník získat přímo od RIPE NCC i tak zvané *adresy nezávislé na poskytovateli (provider independent, PI)*. Hodí se například pro vícedomovce, o nichž jsem psal v části 3.13 na straně 104. Standardně RIPE NCC přiděluje koncovým sítím PI prefixy délky 48 bitů, požadavek na kratší je nutno zdůvodnit. Aby je však organizace mohla získat, musí se buď stát členem RIPE NCC (a platit nemalý členský poplatek), nebo se dohodnout s některým poskytovatelem, aby se pro ni stal tak zvaným sponzorujícím LIRem (sponsoring LIR) a zprostředkovával styk s RIPE NCC.

Pokud se týče délky zákaznických prefixů, základním dokumentem je RFC 6177: *IPv6 Address Assignment to End Sites*. Jedná se o poměrně obecný text, který definuje jen základní principy:

- Pro délku prefixů přidělovaných zákazníkům je rozhodující operativa. Čili pravidla, která si vytvořily regionální internetové registry (RIR), v případě Evropy tedy RIPE NCC.
- Koncová síť by měla obdržet vždy dostatečný adresní prostor na to, aby nebyla nedostatkem adres nucena k jejich mapování a překladům, tedy k nasazení IPv6 NAT. Mělo by pro ni být snadné získat dostatečný prostor k vytvoření podsítí.
- Rozhodnutí o délce přiděleného prefixu by mělo vzít v úvahu i snadnost delegace reverzního DNS (viz kapitola 9 na straně 215). V praxi toto doporučení znamená delegovat prefixy, jejichž délka je pokud možno dělitelná čtyřmi, aby zahrnovala vždy všechny bity šestnáctkových číslic tvořících poddomény v reverzním DNS.
- Dokument se staví proti přidělování adres jednotlivým zařízením, tedy 128 bitů dlouhým prefixům.

RFC 6177 nahradilo dlouhá léta platné (a ne vždy dodržované) RFC 3177. Tato starší verze požadovala, aby se koncovým sítím přidělovaly prefixy jen tří různých délek: 128 bitů pro jednotlivá zařízení, 64 bitů pro sítě, kde jistě nikdy nebude třeba vytvářet podsítě, a 48 bitů pro všechny ostatní, tedy v drtivé většině případů.

Použití unifikované délky prefixů 48 bitů pro valnou většinu koncových sítí má řadu výhod. Usnadňuje změnu poskytovatele či multihoming, protože všichni poskytovatelé přidělují stejně dlouhé prefixy. Vnitřní struktura sítě proto může zůstat stejná u všech prefixů. Odpovídá prefixům již zave-

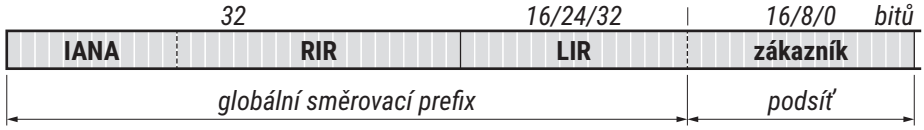
dených služeb a protokolů. Usnadňuje vytváření a stěhování reverzních domén pro DNS, protože lokální část adresy je stále stejně dlouhá.

Zároveň je takových prefixů dost – podle analýzy obsažené v RFC 3177 lze na každého obyvatele země přidělit bezmála dvacet 48bitových prefixů, než se začnou objevovat problémy s nedostatkem adres.

Přesto neustále sílily hlasy, že 48bitový prefix je pro některé účely zbytečně velký, že by se mělo šetřit hned od začátku a že by bylo účelné přidělovat malým sítím prefix délky 56 bitů. Ten umožní definovat 256 podsítí (na identifikátor podsítě v něm zbývá 8 bitů), což je pořád ještě pěkná hromádka. Typickým kandidátem pro takovou alokaci je třeba domácí síť připojená ADSL, Wi-Fi nebo jinou technologií. Ta dnes má typicky jednu až žádnou veřejnou IPv4 adresu, ADSL modem v roli NATu a uvnitř jednu síť s počítači adresovanými z neveřejného prostoru. 256 podsítí touto optikou vypadá jako pohádka.

Tomu se postupně přizpůsobila i pravidla jednotlivých regionálních a lokálních poskytovatelů Internetu. Důsledkem je, že lokální síť dnes v závislosti na svých aktuálních a potenciálních potřebách získá prefix délky 48 (běžné sítě), 56 (malé sítě) nebo 64 bitů (velmi malé sítě bez podsítí). Praktické rozšíření IPv6 je však zatím natolik mladé, že reálná pravidla pro jeho poskytování teprve vznikají.

V knize se dále budu držet především 48bitových prefixů, které jsou nejběžnější, nicméně mějte na paměti, že nejsou pravidlem.



Obrázek 3.22: Struktura adresy – kdo přiděluje jednotlivé části

Když si současnou praxi přidělování promítneme do struktury adresy, dostaneme v její první polovině hezky uspořádanou kompozici podle obrázku 3.22. První část adresy přiděluje IANA regionálním registrům. Její délka kolísá, zpočátku IANA šetřila a přidělovala prefixy délky 23 bitů, v říjnu 2006 ale každý RIR dostal po jednom dvanáctibitovém prefixu. Následuje část přidělovaná regionálním registrem. Zde je hranice poměrně pevná a dohromady s počátkem od IANA tvoří nejčastěji 32bitový prefix přidělovaný lokálním registrům. Ty mají pod kontrolou následujících 16–32 bitů, jimiž definují 48 až 64bitový prefix zákaznické sítě. Zbývající místo do standardní délky prefixu podsítě zaplní identifikátor podsítě o maximální délce 16 bitů.

Podle těchto pravidel bylo do konce roku 2018 přiděleno bezmála čtvrt milionu prefixů délky 32 bitů, z toho zhruba polovina v oblasti spravované RIPE NCC. Celkem v nich byl prostor na

téměř šestnáct miliard zákaznických 48bitových prefixů. Aktuální čísla si můžete prohlédnout na adrese:

https://www.nro.net/statistics

Přehled prefixů přidělených IANA najdete na stránce:

https://www.iana.org/assignments/ipv6-unicast-address-assignments

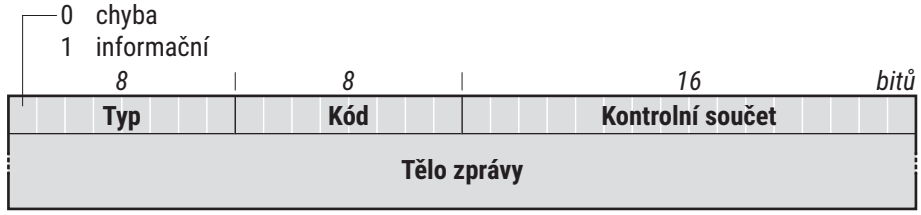
Jak je vidět, o IPv6 adresy je zájem, i když řada přidělených prefixů zatím slouží jen pro strýčka Příhodu. Reálně byla počátkem roku 2019 ve směrovacích tabulkách ohlašována zhruba polovina přidělených adres. Statistiky vycházející z globálních směrovacích tabulek předávaných pomocí BGP mezi páteřními směrovači Internetu jsou k dispozici na adrese:

http://bgp.potaroo.net/index-v6.html

4 ICMPv6

Internet Control Message Protocol (ICMP) je režijním protokolem Internetu. Slouží k ohlašování chybových stavů, testování dosažitelnosti a všeobecně k výměně některých provozních informací. Jeho implementace je povinná v každém zařízení podporujícím IP.

Verze pro IPv6 je definována v RFC 4443: *Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification*. Tento dokument však definuje jen základy – formát paketu a základní druhy zpráv. Další typy ICMP zpráv a pravidla pro jejich generování pak doplňují různé komponenty IPv6, jako je objevování sousedů, podpora skupinových adres a podobně. Důsledkem je, že definice ICMPv6 je rozložena do několika RFC.



Obrázek 4.1: Formát ICMP zprávy

Skutečnost, že IP datagram nese ICMP zprávu, signalizuje hodnota 58 v položce *Další hlavička*. Všechny ICMP zprávy mají jednotný základ, který vidíte na obrázku 4.1. *Typ (Type)* určuje základní druh zprávy. V jeho rámci se může vyskytovat několik podtypů, které jsou identifikovány *Kódem (Code)*. Formát *Těla zprávy (Message body)* pak pochopitelně závisí na jejím typu. Zpravidla obsahuje čtyřbajtovou položku, která buď nese užitečnou informaci, nebo je nevyužita. Za ní pak následuje co největší část datagramu, který vyvolal odeslání dané ICMP zprávy.

Zprávy jsou rozděleny do dvou tříd: na chybové (jejichž *Typ* leží v intervalu od 0 do 127) a informační (*Typ* 128 až 255). Přehled definovaných typů uvádí tabulka 4.1. Kromě hodnot v ní uvedených jsou typy 100, 101, 200 a 201 určeny pro soukromé experimenty a poslední hodnoty obou částí 127 a 255 rezervovány pro případné budoucí rozšiřování ICMP. Aktuální přehled definovaných typů najdete na adrese:

https://www.iana.org/assignments/icmpv6-parameters

Formát ICMP zprávy je velice jednoduchý. Ostatně Internet představuje jednu dlouhou řadu vítězství jednoduchých, byť nedokonalých přístupů nad hypersuperdokonalými vzdušnými zámky. Přesto to lidem nedá a červíček „ještě by to mohlo umět …“ pořád hlodá. V případě ICMP vyhlodal RFC 4884: *Extended ICMP to Support Multi-Part Messages*. Definuje rozšíření, kterými lze do těla zprávy přidávat další informace. Zároveň drobně upravuje některé existující zprávy (konkrétně

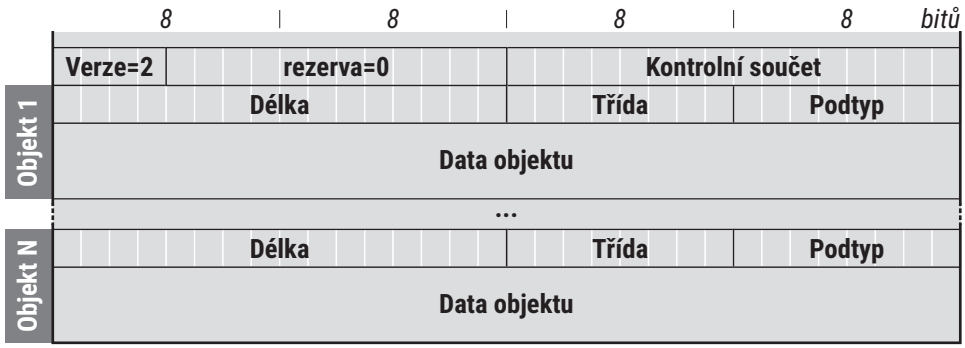
Chyby	
1	cíl je nedosažitelný
2	příliš velký paket
3	vypršela životnost paketu
4	problém s parametry
Echo	
128	požadavek na echo
129	odpověď na echo
MLD (skupinové adresování)	
130	dotaz na členství ve skupině
131	ohlášení členství ve skupině
132	ukončení členství ve skupině
143	ohlášení členství ve skupině (MLDv2)
Objevování sousedů	
133	výzva směrovači
134	ohlášení směrovače
135	výzva sousedovi
136	ohlášení souseda
137	přesměrování
148	žádost o certifikační cestu
149	ohlášení certifikační cesty

Informace o uzlu	
139	dotaz na informace
140	odpověď s informacemi
Inverzní objevování sousedů	
141	IND výzva
142	IND ohlášení
Mobilita	
144	žádost o adresy domácích agentů
145	odpověď s adresami domácích agentů
146	žádost o mobilní prefix
147	ohlášení mobilního prefixu
154	rychlé předání
Objevování skupinových směrovačů	
151	ohlášení skupinového směrovače
152	výzva skupinovému směrovači
153	ukončení skupinového směrovače

Tabulka 4.1: Typy ICMP zpráv

o nedosažitelnosti cíle a vypršení času), kde prvnímu bajtu původně nevyužité čtyřbajtové položky za základní ICMP hlavičkou přiřazuje význam délky vloženého datagramu.

Rozšíření, jehož formát vidíte na obrázku 4.2, se přidává na konec těla ICMP zprávy. Za úvodní hlavičkou poskytující jen číslo verze a kontrolní součet se nachází libovolný počet rozšiřujících objektů. Každý z nich má svou vlastní hlavičku, obsahující jeho *Délku (Length)*, *Třídu (Class-Num)* a *Podtyp (C-Type)*. Za ní pak následují vlastní data rozšiřujícího objektu.



Obrázek 4.2: Rozšíření ICMP zprávy

V době vzniku tohoto textu existoval jediný rozšiřující objekt, jehož prostřednictvím mohou směrovače přepravující paket přidávat do ICMP zprávy informace související s MPLS. Jeho definici najdete v RFC 4950: *ICMP Extensions for Multiprotocol Label Switching*. Zejména v případě nedoručitelnosti datagramu mohou být tyto údaje velmi podstatné.

4.1 Chybové zprávy

Současná verze ICMP definuje čtyři typy chybových zpráv. Má-li položka *Typ* hodnotu 1, oznamuje nedosažitelnost cíle. Posílá ji směrovač, pokud dostal ke zpracování datagram s takovou cílovou adresou, která neumožňuje doručení. *Kód* v ICMP zprávě pak podrobněji specifikuje důvod nedoručitelnosti. Přehled definovaných kódů uvádí tabulka 4.2.

Kód 0 je evidentní. Kód 1 ohlašuje, že datagram porušil nějaká pravidla ve firewallu a jeho odeslání bylo tedy zakázáno správcem. Pokud chce filtrující zařízení poskytnout podrobnější informace, může místo jedničky použít jeden z později přidaných kódů 5 a 6. Pokud je nepřípustná zdrojová adresa, sáhne po kódu 5. Jestliže se na černé listině nachází cílová adresa, pošle kód 6.

Kód 2 se použije, pokud by směrovač měl předat datagram do rozhraní, které leží mimo dosah zdrojové adresy. To znamená, že příjemce datagramu by neměl jak poslat zpět odpověď. Kódy 3

0	neznám žádnou cestu k cíli
1	správce zakázal komunikaci
2	mimo dosah zdrojové adresy
3	nedosažitelná adresa (cíl neodpovídá)
4	nedosažitelný port (cíl neodpovídá)
5	zdrojová adresa odporuje vstupně/výstupní politice
6	cesta k cíli je zakázána
7	chyba v hlavičce se zdrojovou cestou

Tabulka 4.2: Kódy pro nedosažitelnost cíle

a 4 signalizují, že z hlediska směrování je vše v pořádku, ale směrovač nebyl schopen datagram předat, protože následující prvek v cestě se nechová korektně (nepodařilo se zjistit jeho linkovou adresu, na příslušném portu nikdo nenaslouchá a podobně). Kód 7 byl definován pro směrování v nízkonapěťových a ztrátových sítích (RPL, RFC 6550).

Typ s hodnotou 2 ohlašuje příliš velký datagram. IPv6 má ve srovnání se svým předchůdcem podstatně omezený model fragmentace, popsal jsem jej v části 2.5 na straně 55. Pokud má být paket odeslán linkou, jejíž MTU je menší než velikost paketu, směrovač jej nesmí fragmentovat. Místo toho datagram zahodí a pošle odesilateli ICMP zprávu typu 2. Čtyřbajtová položka následující za kontrolním součtem obsahuje hodnotu MTU linky, jež problém způsobila. Tyto zprávy se používají například při objevování MTU cesty, které je popsáno v části 2.6 na straně 58.

Když datagramu vyprší doba platnosti (hodnota položky *Maximum skoků* klesne na nulu), směrovač jej zahodí a pošle odesilateli ICMP zprávu s *Typem* 3 a *Kódem* 0. Druhou možnou příčinou pro odeslání zprávy *Typu* 3 je, pokud se příjemce nedočká v daném časovém limitu všech fragmentů skládaného datagramu. V tom případě má *Kód* hodnotu 1.

0	chybná položka v hlavičce
1	neznámý typ v poli *Další hlavička*
2	neznámá volba
3	hlavičky přesahují první fragment

Tabulka 4.3: Kódy pro chyby v parametrech

Zpráva *Typu* 4 signalizuje, že příjemce obdržel datagram, s jehož parametry se nebyl schopen vypořádat. Konkrétní problém je identifikován *Kódem* – viz tabulka 4.3. Čtyřbajtová položka za kontrolním součtem identifikuje problematický údaj. Udává počet bajtů od začátku datagramu, kde začíná položka, které příjemce nerozuměl.

4.2 Informační zprávy

RFC 2463 definuje pouhé dvě informační zprávy: výzva a odpověď na echo. Používá je dobře známý program *ping* (resp. *ping6*) k testování, zda je určitý stroj dostupný.

Výzva i odpověď mají stejný formát. Za kontrolním součtem následují dvě šestnáctibitové položky: *Identifikátor* a *Pořadové číslo*. Typické volání *pingu* vyvolá sekvenci žádostí se stejným identifikátorem a postupně narůstajícím pořadovým číslem. Navíc lze do těla vložit data podle potřeby.

Každý IPv6 uzel je povinen na výzvu reagovat odpovědí. V ní zopakuje identifikátor, pořadové číslo a data z výzvy, aby příjemce poznal, ke které z jeho výzev se odpověď vztahuje.

Zatímco služba echo poskytuje spíše informace o síti (zda funguje a jak dlouho trvá obrátka k cílovému stroji a zpět), RFC 4620: *IPv6 Node Information Queries* zavádí experimentální protokol, kterým se dají získávat jednoduché informace o uzlech. Konkrétně umožňuje zeptat se uzlu na jméno nebo jeho IPv6 či IPv4 adresu. Tyto zprávy se nesnaží konkurovat DNS, ale poskytnout základní informace v případě, že DNS není k dispozici. Protokol má sloužit spíše pro správu sítě, nikoli jako běžná služba koncových počítačů.

Pro své účely zavádí dva typy ICMP zpráv. Dotaz nese *Typ* 139 a jeho *Kód* podrobněji informuje, jaký druh informací požaduje. V těle pak obsahuje vlastní data dotazu – jméno či adresu, k nimž shání protějšek. Odpověď je konstruována podobně a nese ji ICMP zpráva typu 140.

Jako možné využití zmiňuje RFC 4620 mimo jiné i objevování počítačů v síti. Samozřejmě pro ty dobré účely. Určitý problém vidím v tom, že počítače v síti bývají daleko častěji objevovány pro ty špatné účely – aby bylo na co útočit. Na masivní podporu informačního protokolu bych proto příliš nesázel.

Další informační zprávy jsou definovány v jiných RFC dokumentech, protože jsou součástí komplexnějších mechanismů IPv6. Konkrétně zprávy související se členstvím ve skupinách jsou prvkem skupinového adresování IPv6 (viz kapitola 8 na straně 189). Výzva a ohlášení směrovače či souseda stejně jako přesměrování patří do automatické konfigurace a objevování sousedů (kapitola 5 na straně 119). Také návrh podpory mobilních zařízení (kapitola 11 na straně 247) přišel se svými zprávami.

4.3 Bezpečnostní aspekty ICMP

ICMP ze světa IPv4 má ve své skvělé historii několik šrámů, kdy bylo zneužito k omezení funkčnosti sítě. Princip těchto útoků byl celkem jednoduchý: cílový stroj se zahltil haldou ICMP zpráv a skoro nic jiného nemělo šanci projít. Důsledkem bylo, že správci některých serverů či lokálních sítí zablokovali příjem ICMP, což je jednak proti RFC (implementace ICMP je povinná), jednak to omezuje diagnostiku chyb či parametrů sítě.

Aby se správci nemuseli uchylovat k takto drastickým metodám, má ICMPv6 implementována bezpečnostní opatření. Ta by měla zabránit jeho zneužití pro výše uvedené účely.

První z nich spočívá v tom, že implementace by měla umožnit svému správci nastavit některé kvantitativní parametry – průměrný počet ICMP zpráv za jednotku času či jejich maximální podíl na celkové šířce pásma, které daný stroj generuje. Tato omezení zaručují, že v odesílaných datech zbude dost prostoru na reálný provoz.

Druhá skupina opatření se týká spolupráce s bezpečnostními mechanismy IPv6. Zprávy lze opatřit autentizační či šifrovací hlavičkou a uzel by to měl dělat, pokud pro cíl dané ICMP zprávy existuje bezpečnostní asociace. Pokud má přijatá zpráva bezpečnostní hlavičku, musí být prověřena a pokud neodpovídá, zahodí se. Dále by správce měl mít možnost konfigurovat uzel tak, že přijímá jen zabezpečené ICMP zprávy. Ostatní ignoruje.

Problém s filtrováním ICMPv6 spočívá i v tom, že některé mechanismy IPv6 je pro svou činnost potřebují. RFC 4890 proto přineslo konkrétní doporučení, jak by mělo vypadat kvalifikované filtrování ICMPv6, které zadrží škodlivé zprávy, ale propustí ty potřebné. Konkrétní sadu pravidel obsahuje tabulka 13.1 na straně 339.

5 Objevování sousedů (Neighbor Discovery)

Jedním z dobře známých problémů počítačových sítí je zjištění linkové adresy partnera. Počítač potřebuje poslat někomu data, zná jeho IP adresu a ví, že spolu sídlí v jedné lokální síti (řekněme Ethernetu). Aby mu však mohl odeslat paket, potřebuje znát právě cílovou ethernetovou adresu.

IPv4 k tomuto účelu používá samostatný protokol nazvaný Address Resolution Protokol (ARP). V zásadě funguje tak, že odesílající rozešle na všesměrovou IP adresu 255.255.255.255 (všechny stroje v lokální síti) ARP dotaz „Kdo z vás má IP adresu XY?“ Šťastný vlastník mu pak odpoví „To jsem já a moje ethernetová adresa je HyChyKyRyDyTyNy.“

U IPv6 se rozhodli dotyčný mechanismus definovat přímo jako jednu ze základních součástí IP. A když už byli v té revoluci, rovnou vytvořili obecnější nástroj, který kromě hledání linkových adres řeší ještě celou řadu dalších problémů. Výsledek nazvali *objevování sousedů (Neighbor Discovery, ND)*. Slouží k následujícím účelům:

- zjišťování linkových adres uzlů ve stejné lokální síti,
- rychlé aktualizace neplatných položek a zjišťování změn v linkových adresách,
- hledání směrovačů,
- přesměrování,
- zjišťování prefixů, parametrů sítě a dalších údajů pro automatickou konfiguraci adresy,
- ověřování dosažitelnosti sousedů,
- detekce duplicitních adres.

Vše je definováno v RFC 4861: *Neighbor Discovery for IP version 6*. Pro svou činnost využívá pěti typů ICMP zpráv, dvě další k nim přidává zabezpečení nazvané SEND. Jejich přehled najdete v tabulce 5.1. V této kapitole popíši jen aspekty související se zjišťováním linkových adres a testováním dosažitelnosti. Automatické konfiguraci (do níž spadá většina ostatních součástí objevování sousedů) věnuji samostatnou kapitolu.

5.1 Hledání linkových adres

Zjišťování linkové adresy na základě IP se velmi podobá klasickému ARP. Změnily se vlastně jen názvy a především adresa, na kterou tazatel zasílá svůj dotaz.

Pro potřeby objevování sousedů byl definován hlouček skupinových adres, na něž se rozesílají dotazy. Všechny mají společný prefix:

```
ff02::1:ff00:0/104
```

Objevování sousedů	
výzva směrovači	router solicitation
ohlášení směrovače	router advertisement
výzva sousedovi	neighbor solicitation
ohlášení souseda	neighbor advertisement
přesměrování	redirect
SEND	
žádost o certifikační cestu	certification path solicitation
ohlášení certifikační cesty	certification path advertisement

Tabulka 5.1: Typy ICMP zpráv pro objevování sousedů

Uzel, který hledá linkovou adresu pro určitou IPv6 adresu, vezme posledních 24 bitů z hledané IP adresy a připojí je za výše uvedený prefix. Tím získá skupinovou adresu, na kterou zašle svůj dotaz. Takže pokud například hledá linkovou adresu pro:

2001:db8:1:1:022a:fff:fe32:5ed1

bude se ptát na skupinové adrese:

ff02::1:ff32:5ed1

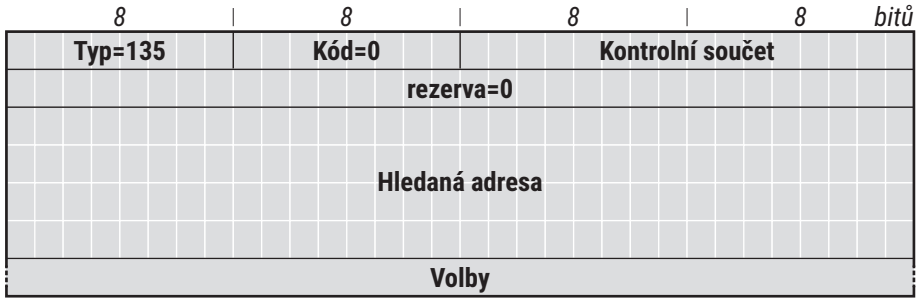
V terminologii IPv6 se takové adrese říká *adresa pro vyzývaný uzel (solicited node address)*. Skutečnost, že z hledané adresy se přebírá jen spodních 24 bitů, původně zmenšovala počet skupin, v nichž každý počítač musí být členem. Dokud se pro identifikátor rozhraní používalo modifikované EUI-64, býval stejný pro více různých prefixů. Pro všechny pak stačilo členství v jedné skupině. Moderní identifikátory rozhraní (viz část 3.5 na straně 72) různých adres stejného stroje jsou ovšem odlišné, takže je nutno vstoupit do několika skupin.

Aby objevování sousedů fungovalo, musí počítač při inicializaci IP pro síťové rozhraní vstoupit do všech skupin odpovídajících adresám vyzývaného uzlu pro všechny adresy přidělené rozhraní. Závěrečné tři bajty jsou ovšem dostatečně dlouhé na to, aby ve skupině pro vyzývaný uzel byl zpravidla každý sám. I ve velmi velkých sítích najdete jen vzácně dvojice karet se shodnou hodnotou poslední trojice bajtů. To v praxi znamená, že při hledání linkové adresy nejsou zbytečně obtěžováni ostatní a zpravidla se osloví jen samotný její vlastník.

Pokud tedy počítač (dále mu budeme říkat „vyzyvatel“) shání linkovou adresu jiného, u nějž zná pouze IP adresu, postupuje následovně:

1. Z cílové IP adresy vytvoří výše popsaným postupem skupinovou adresu vyzývaného uzlu.
2. Na ni pošle speciální typ ICMP zprávy nazvaný *Výzva sousedovi*.
3. Pokud je počítač s danou IP adresou aktivní, bude zapojen do příslušné skupiny a výzvu obdrží. Reaguje na ni *Ohlášením souseda*, které pošle vyzyvateli a vloží do něj informace o své linkové adrese.

Každý uzel by si měl udržovat interní datovou strukturu nazvanou *cache sousedů (neighbor cache)*, ve které má uloženy jejich linkové adresy. Na základě příchodu ohlášení souseda si do této cache zanese novou položku s jeho IP adresou a odpovídající linkovou adresou.

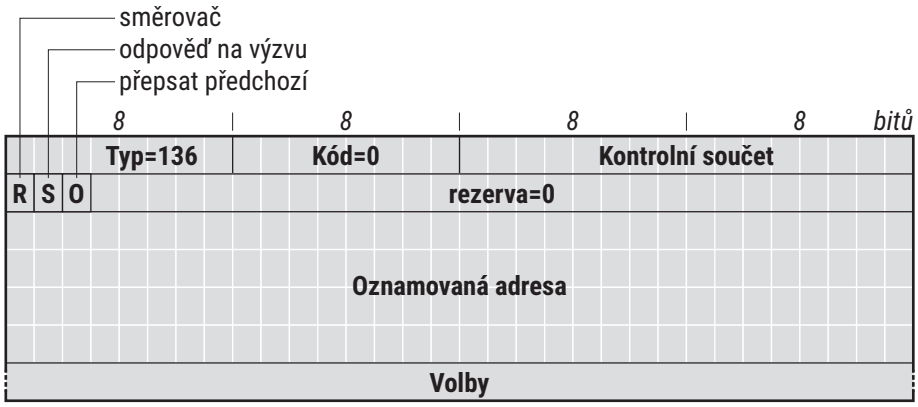


Obrázek 5.1: Výzva sousedovi

Formát *Výzvy sousedovi* znázorňuje obrázek 5.1. V podstatě obsahuje jedinou informaci – *Hledanou adresu (Target address)*, k níž odesilatel výzvy shání linkovou. K datagramu může připojit volbu, která ohlašuje jeho vlastní linkovou adresu, aby adresát výzvy rovnou věděl, kam má odpovědět.

Obrázek 5.2: Volba *Linková adresa odesilatele*

Na obrázku 5.3 najdete formát ohlášení souseda. Opět nese především IP adresu, které se dotyčné ohlášení týká (ať už bylo vyžádané nebo ne – viz níže). K datagramu se připojuje volba sdělující linkovou adresu, jež k ní náleží. Kromě toho obsahuje tři příznaky: *R* (Router) signalizuje, že odesilatel ohlášení je směrovač. *S* (Solicited) nese informaci, zda ohlášení bylo vyžádáno výzvou sousedovi či nikoli. A konečně *O* (Override) určuje, zda tato informace má přepsat případné dosavadní informace spojené s danou adresou.



Obrázek 5.3: Ohlášení souseda

Uzel může zaslat i nevyžádané ohlášení souseda. Tento přístup se používá v situacích, kdy uzel ví, že došlo ke změně jeho linkové adresy a že by bylo záhodno tuto informaci sdělit ostatním. V takovém případě zašle na skupinovou adresu pro všechny uzly na lince (ff02::1) několik ohlášení souseda, v nichž sdělí svou novou linkovou adresu.

Pokud některý z uzlů má ve své cache sousedů položku s danou IP adresou, aktualizuje si ji. Ostatní nevyžádané ohlášení souseda ignorují (jelikož nemají tuto IP adresu v cache sousedů, s odesilatelem v poslední době nekomunikovali, proto je jeho linková adresa nezajímá). Dlužno podotknout, že tento mechanismus aktualizace není zaručený a je chápán pouze jako nástroj pro zvýšení efektivity a rychlosti šíření změn. Základním nástrojem pro ověřování platnosti linkových adres je:

5.2 Detekce dosažitelnosti souseda

Heslo „důvěřuj, ale prověřuj“ je notoricky známé. IPv6 se jím řídí také. V případě práce se sousedy se konkrétně projevuje v tom, že uzel neustále aktivně sleduje stav dosažitelnosti sousedů, se kterými komunikuje.

K potvrzení, že soused je dosažitelný, poslouží dva základní mechanismy. Buď IP dostává zprávy od vyšší vrstvy (např. TCP), že komunikace zdárně pokračuje, a tudíž soused funguje. Pokud takovéto potvrzení nemá, zbývá ještě druhá možnost – ověřit si dosažitelnost vlastními silami. Zašle výzvu sousedovi a pokud dorazí jeho ohlášení, je vše v pořádku.

Základem pro zjišťování nedosažitelnosti sousedů jsou různé stavy, které se přidělují položkám v cache sousedů. Jejich shrnutí se stručnými popisy obsahuje tabulka 5.2. Obrázek 5.4 pak zná-

nekompletní (incomplete)	linková adresa zatím není známa
dosažitelná (reachable)	cíl je považován za dosažitelný
prošlá (stale)	prošla platnost, ale pro cíl nemáme nic k odeslání
odložená (delay)	prošla platnost, čekáme, zda vyšší vrstva potvrdí dosažitelnost
testovaná (probe)	právě se testuje

Tabulka 5.2: Stavy položek v cache sousedů

zorňuje události, které vedou ke změně stavu položky. Tento algoritmus popíši v následujících odstavcích.

Obrázek 5.4: Změny stavu položky v cache sousedů

Stav *nekompletní* je velmi dočasný a položka jím projde pouze po krátkou dobu v samém začátku své existence. Znamená, že počítači byla odeslána výzva sousedovi s cílem zjistit jeho linkovou adresu a dosud nedorazila odpověď. Jakmile dojde, přejde položka do stavu *dosažitelná*. Pokud by snad ohlášení souseda nedorazilo, znamená to, že dotyčný soused momentálně není funkční a položka bude z cache sousedů odstraněna.

Optimálním stavem je, je-li položka považována za *dosažitelnou*. To znamená, že dosažitelnost souseda byla nedávno potvrzena a nemusíme si s ní dělat těžkou hlavu. Trvanlivost tohoto stavu je časově omezena. Doba, po kterou lze položku považovat za dosažitelnou, je jedním z parametrů sítě a připojeným uzlům ji oznamuje směrovač ve svém ohlášení (viz část 6.1 na straně 135).

Pokud od posledního potvrzení dosažitelnosti uplyne tato doba, položka bude převedena do stavu *prošlá*, ovšem jinak se nic neděje. Uzel se začne starat až v okamžiku, kdy je třeba na danou IP adresu odeslat nějaká data. Provede to stejně, jako by položka byla normálně dosažitelná, ale její stav nyní změní na *odložená*. Tento stav v podstatě říká: „Dosažitelností tohoto souseda si nejsem jist. Před chvilkou jsem mu ale odeslal data a než se pustím do vlastního ověřování, chvilku počkám, jestli mi ji nepotvrdí vyšší vrstva."

Ve stavu *odložená* položka nikdy nezůstane dlouho. Buď vyšší vrstva potvrdí, že dostala odpověď a cíl je tudíž dosažitelný (položka se vrátí do stavu *dosažitelná*). Druhou možností je, že během daného intervalu toto potvrzení nepřijde. V takovém případě musí IP vrstva dosažitelnost ověřit sama. Odešle danému cíli výzvu sousedovi a stav položky změní na *testovaná*. Odpoví-li, je vše v pořádku a položka se může vrátit do stavu *dosažitelná*.

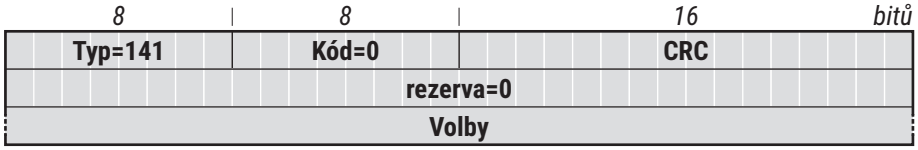
Jestliže se odpovědi nedočká, výzvu několikrát zopakuje. Pokud soused neodpoví, je považován za nedosažitelného a jeho položka bude odstraněna z cache sousedů.

5.3 Inverzní objevování sousedů

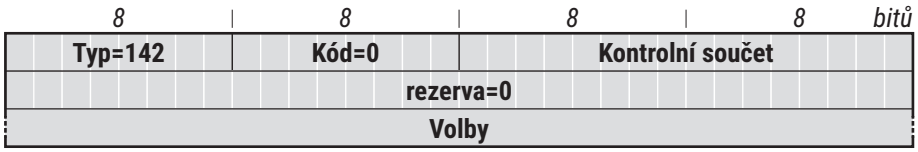
Inverzní objevování sousedů (Inverse Neighbor Discovery, IND) má přesně opačný cíl než to klasické. Řeší situaci, kdy počítač sice zná linkovou adresu svého souseda, ale nezná jeho IPv6 adresu. Původně bylo vyvinuto především pro Frame Relay sítě, kde k takovým stavům dochází, nicméně autoři nevylučují jeho použití i v jiném prostředí s podobnými vlastnostmi. Jeho definici najdete v RFC 3122: *Extensions to IPv6 Neighbor Discovery for Inverse Discovery Specification*.

Funguje velmi jednoduše. Stroj, který se chce dozvědět sousedovu adresu, mu prostřednictvím ICMP pošle *Výzvu* (viz obrázek 5.5). Z pohledu IP ji sice posílá na skupinovou adresu pro všechny uzly na lince ff02::1, ale na linkové úrovni ji adresuje pouze na linkovou adresu cílového stroje (kterou zná). Odesilatel k výzvě povinně musí přiložit volby s oběma linkovými adresami (zdrojovou i cílovou) a může přidat volby se svými IPv6 adresami pro dané rozhraní a MTU linky.

Vyzvaný počítač reaguje *Ohlášením*, jehož základní formát se (až na typ zprávy) velmi podobá výzvě. Tentokrát je povinné přibalit volbu se zdrojovou linkovou adresou ohlášení a také seznam IPv6 adres pro odpovídající rozhraní. Navíc může přidat i volbu s MTU linky. Své *Ohlášení* posílá dotázaný protokolem ICMP na adresu vyzyvatele. Ten si obdržené informace zanese do cache sousedů a může je dále používat.

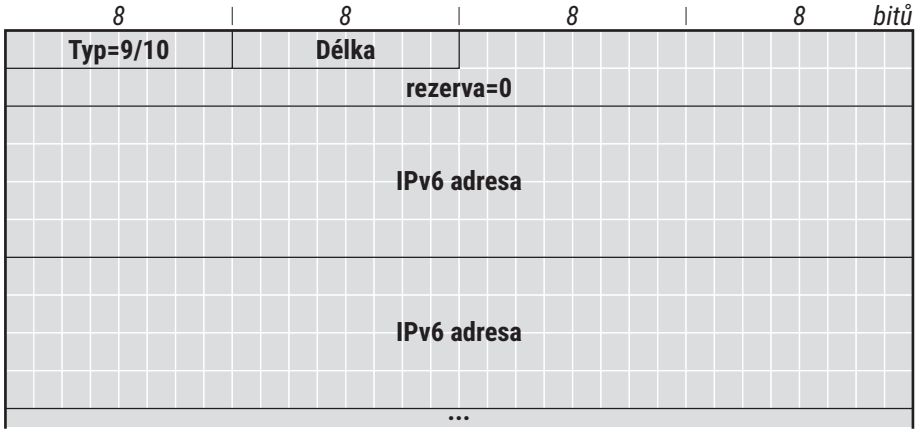


Obrázek 5.5: *Výzva* inverzního objevování sousedů



Obrázek 5.6: *Ohlášení* inverzního objevování sousedů

Volba *Seznam adres* je jedním z nových prvků zavedených ve specifikaci inverzního objevování sousedů. Její formát představuje obrázek 5.7. Položka *Typ* má hodnotu 9, pokud se jedná o adresy vyzývajícího, a 10, jestliže je volba součástí *Ohlášení*. Kromě *Typu* obsahuje volba již jen obvyklou *Délku* v osmicích bajtů, zarovnání právě na násobky osmi a vlastní adresy.



Obrázek 5.7: Volba *Seznam adres* pro inverzní objevování sousedů

Zbývající volby (pro linkové adresy a MTU) jsou převzaty z klasického objevování sousedů.

Asymetrická kryptografie

Pojmem asymetrická kryptografie se obecně označují takové kryptografické metody, které k zašifrování a dešifrování zprávy používají odlišné klíče. V praxi nejčastěji používanou variantou je kryptografie s veřejným klíčem.

Jejím základem je dvojice klíčů – soukromý a veřejný. Ty jsou spolu svázány takovými matematickými vztahy, aby zpráva zašifrovaná jedním z nich šla dešifrovat pouze tím druhým. Zároveň musí platit, že z veřejného klíče se nedá odvodit soukromý.

Jak název napovídá, soukromý klíč si jeho držitel uchová v tajnosti a nikdy jej nedá z ruky. Naopak veřejný klíč je volně distribuován a může jej získat každý zájemce.

Dvěma nejčastějšími aplikacemi kryptografie s veřejným klíčem jsou šifrování zpráv a digitální podpis. Jestliže odesilatel A posílá příjemci B zprávu, která má být utajena, zašifruje ji veřejným klíčem B. Tím je zaručeno, že jedině B ji může svým soukromým klíčem dešifrovat.

Pokud chce A zprávu digitálně podepsat, vypočte z ní vhodným vzorcem určitou hodnotu (která se i při drobné změně zprávy divoce mění), říkejme jí pečeť. Tu odesilatel A zašifruje svým soukromým klíčem a přiloží ke zprávě. Kdokoli ji pak může ověřit – spočítá z příchozí zprávy stejným vzorcem pečeť a dešifruje přiloženou pečeť veřejným klíčem A. Pokud se obě shodují, je zpráva autentická, poslal ji skutečně A a nebyla změněna.

Algoritmů realizujících asymetrickou kryptografii je pochopitelně celá řada. Největšího rozšíření se dočkal RSA, který v roce 1977 publikovali pánové Rivest, Shamir a Adleman.

5.4 Bezpečnostní prvky objevování sousedů – SEND

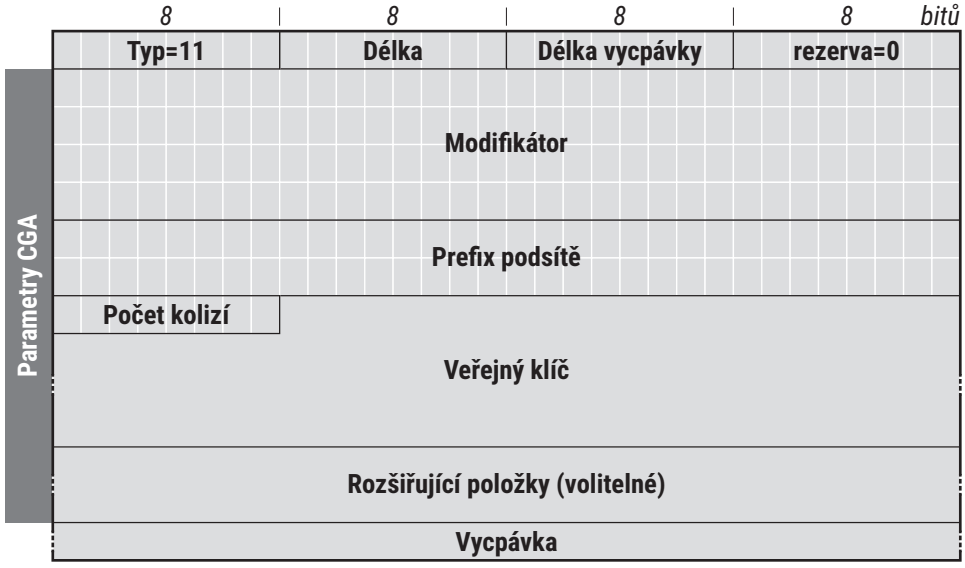
Pokud se zajímáte o bezpečnost počítačových systémů, pravděpodobně vás při čtení o mechanismech pro objevování sousedů napadlo, že dává těm zlým mezi námi několik nových možností, jak škodit. Bubák může odpovědět na výzvu sousedovi určenou jinému stroji a snažit se tak stáhnout na sebe jeho datový provoz. Může také předstírat, že stroj je nadále dosažitelný, přestože to již není pravda.

V následující kapitole pak uvidíte, že sortiment možných útoků je mnohem bohatší, protože do objevování sousedů patří i některé prvky automatické konfigurace. Útočník tedy může docílit toho, že si místní počítače přidělí nesmyslné adresy, může se tvářit jako implicitní směrovač pro datový provoz směřující mimo síť a může také automatickou konfiguraci adres zcela zablokovat, když bude ostatním o libovolné jimi zvolené adrese tvrdit, že už je obsazena. Podrobnou analýzu bezpečnostních problémů objevování sousedů najdete v RFC 3756: *IPv6 Neighbor Discovery (ND) Trust Models and Threats*.

Jako reakce na tyto problémy vzniklo *bezpečné objevování sousedů (SEcure Neighbor Discovery, SEND)*, jehož cílem je poskytnout dostatečnou úroveň zabezpečení vyměňovaných zpráv. Původní návrh počítal s uplatněním standardních bezpečnostních prvků IPsec. To se ale ukázalo jako nereálné, protože by stanice pro inicializaci bezpečnostních mechanismů potřebovala příliš mnoho informací. SEND se snaží minimalizovat nároky na zúčastněné.

Než se ale pustíme do vlastního SEND, podívejme se na jeho souputníky, kterými jsou *kryptograficky generované adresy* definované v RFC 3972: *Cryptographically Generated Addresses (CGA)*. Jejich cílem je, aby se za vlastníka adresy nemohl prohlásit každý. Vycházejí z asymetrických kryptografických metod. Pokud vám tento pojem nic neříká, najdete jeho stručný popis v přiložené poznámce. Ovšem toto není kniha o kryptografii. Zajímají-li vás podrobnosti, zkuste si přečíst knihu Williama Stallingse [20] nebo českou, praktičtěji orientovanou [5] od Libora Dostálka.

Východiskem koncepce CGA je dvojice soukromého a veřejného klíče, kterou počítač vlastní. Veřejný klíč pak použije pro generování CGA adresy – spojí jej s několika dalšími položkami, zpracuje hašovací funkcí SHA-1 a počátečních 64 bitů výsledku použije po drobných úpravách jako identifikátor rozhraní, čili adresu. Průvodcem CGA adres je datová struktura nesená volbou *CGA* doplněnou do objevování sousedů. Najdete ji na obrázku 5.8, vlastní datová struktura obsahující informace o doplňujících položkách je v něm vyznačena. Poslouží k ověření, zda je CGA adresa pravá.



Obrázek 5.8: Volba CGA s parametry pro ověření adresy

Aby se zkomplikoval život potenciálním útočníkům, vstupuje do výpočtu 128bitový náhodný modifikátor. Výpočet proto začíná stanovením tohoto náhodného modifikátoru. V této fázi lze navíc uplatnit omezující koeficient označovaný jako *Sec*, který požaduje, aby v určité haš hodnotě bylo 16×*Sec* bitů zleva nulových. Je-li *Sec* nenulový (jeho maximální hodnotou je 7), hledání vyhovujícího modifikátoru se může dost protáhnout. Postup pro výpočet CGA adresy je následující:

1. Uložit do modifikátoru (pseudo)náhodnou 128bitovou hodnotu.
2. Vypočíst haš algoritmem SHA-1 ze zřetězení modifikátoru, 9 nulových bajtů, veřejného klíče a případných rozšiřujících položek. Dokud nejlevějších 16×*Sec* bitů obsahuje nenulovou hodnotu, zvětšit modifikátor o jedničku a opakovat. Pokud je *Sec*=0, tento krok se vynechává.
3. Nastavit počítadlo kolizí na nulu.
4. Zřetězit modifikátor, prefix podsítě, počítadlo kolizí, veřejný klíč a případné rozšiřující položky a vypočítat z této hodnoty SHA-1 haš. Nejlevějších 64 bitů výsledku je označováno jako *Hash1* a tvoří základ adresy.
5. Vytvořit z *Hash1* identifikátor rozhraní tak, že tři jeho nejlevější bity jsou nahrazeny hodnotou *Sec* a také do 6. a 7. bitu se uloží hodnoty podle původních pravidel pro identifikátory rozhraní v IPv6 (příznaky globální/lokální a individuální/skupinový).
6. Zřetězením prefixu podsítě a identifikátoru rozhraní vznikne IPv6 adresa.
7. Pokud je požadována, provést detekci duplicit (podrobněji se o ní dočtete v následující kapitole). Při neúspěchu zvýšit počítadlo kolizí a opakovat postup od kroku 4. Po třetí kolizi zastavit a ohlásit chybu.
8. Vytvořit datovou strukturu podle obrázku 5.8 a uložit do ní výsledné hodnoty.

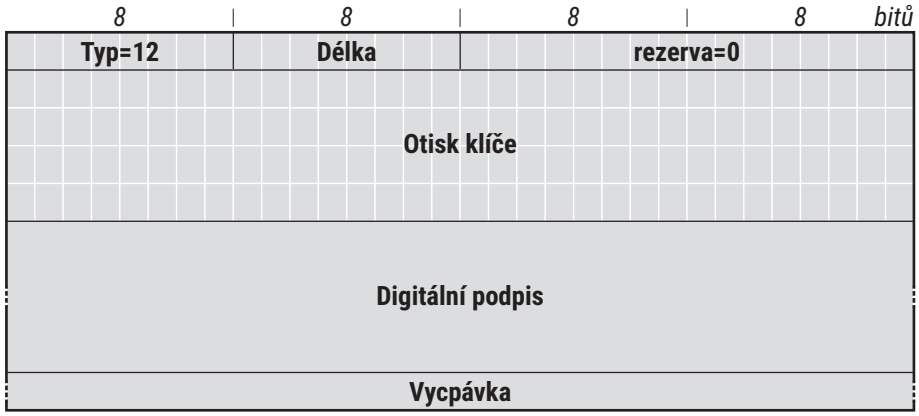
CGA je navrženo tak, aby pravost adresy šla snadno ověřit, když máte k dispozici doprovodnou datovou strukturu. Vzhledem k jednosměrnosti hašovacích funkcí[1] je ale vyloučeno, aby si útočník k již existující adrese vytvořil vyhovující datovou strukturu s vlastními klíči. Může pouze zkopírovat informace, které poskytl její skutečný vlastník. K nim ovšem nemá soukromý klíč, takže nedokáže zprávy digitálně podepsat a jeho případné falsifikáty odesílané z této adresy budou snadno odhaleny. CGA tedy poskytuje důvěryhodné propojení mezi adresou a veřejným klíčem.

Nyní se můžeme pustit do bezpečného objevování sousedů, jak je definováno v RFC 3971: *SEcure Neighbor Discovery (SEND)*. Jeho jádrem je definice několika nových voleb pro objevování sousedů a popis chování jednotlivých účastníků.

Klíčovou volbou je *RSA podpis (RSA Signature)*, jejíž formát vidíte na obrázku 5.9. Jejím prostřednictvím lze každou zprávu související s objevováním sousedů digitálně podepsat a prokázat tak její autentičnost. Dvě nejdůležitější položky volby představují *Otisk klíče (Key hash)*, jehož prostřednictvím lze identifikovat veřejný klíč pro ověření podpisu, a vlastní *Digitální podpis (Digital signature)*.

1: Znáte-li vstupní hodnoty, snadno spočítáte výsledek. Z výsledku se ale nedají odvodit vstupní hodnoty, zbývá jen jejich hledání hrubou silou systémem pokus-omyl.

Algoritmem RSA jsou podepsány zdrojová i cílová adresa a celá zpráva ležící před podpisem (jmenovitě první řádek ICMP zprávy udávající *Typ* a *Kód*, celá základní hlavička objevování sousedů a všechny volby ležící před podpisem).



Obrázek 5.9: Volba *RSA podpis*

Při příchodu se podepsaná zpráva ověří. Poslouží k tomu veřejný klíč identifikovaný svým otiskem. Může dorazit ve volbě *CGA* této zprávy, nebo jej přijímající stroj mohl získat již dříve. Pokud digitální podpis odpovídá, je zpráva považována za bezpečnou. V opačném případě zpráva není bezpečná a její další osud závisí na konfiguraci příjemce. Jestliže přijímá pouze bezpečné zprávy, bude zahozena. V opačném případě ji přijme, ale zachází s ní stejně jako se zprávami, které bezpečnostní prvky vůbec nemají.

RFC 3971 požaduje, aby ve výchozím nastavení počítač přijímal bezpečné i nebezpečné zprávy. To je nutné zejména pro přechodné období, kdy SEND zdaleka není implementováno všude a je nutno zajistit vzájemnou spolupráci zařízení s ním a bez něj. Pochopitelně bezpečné zprávy mají přednost. Správce navíc musí mít k dispozici konfigurační nástroje, jak zakázat příjem nebezpečných zpráv. Potom jsou nepodepsané zprávy ohlašování sousedů, stejně jako zprávy s neplatným podpisem, zcela ignorovány.

Hlavní výhoda SEND proti standardním bezpečnostním mechanismům IPv6 označovaným jako IPsec (viz kapitola 10 na straně 225) spočívá v jednoduchosti a minimální režii. Zatímco IPsec vytváří bezpečnostní asociace a rafinovanými protokoly si vyměňuje použité klíče a algoritmy, zde stačí jedna zpráva obsahující rozšíření *CGA*, aby si protistrana ověřila, že odesilatel skutečně disponuje uvedenou adresou a párem klíčů, které se k ní váží.

Nevýhodou SEND je jeho těsná vazba na CGA adresy. Protokol je schopen poskytnout ochranu jen pro ně, nedokáže zabezpečit obecné IPv6 adresy. Definuje celkem čtyři volby rozšiřující sortiment voleb pro zprávy objevování sousedů:

- *CGA* – viz obrázek 5.8,
- *RSA podpis* – viz obrázek 5.9,
- *Časová značka (Timestamp)* – aktuální čas,
- *Unikát (Nonce)* – náhodná data.

Poslední dvě poskytují ochranu proti opakování, aby si vetřelec nemohl ukládat starší platné zprávy a později je znovu odesílat. Tyto prostředky v kombinaci s CGA adresami dokáží zabránit většině neplech při objevování sousedů. Nechrání ale před lžisměrovači.

Automatická konfigurace popsaná v následující kapitole zahrnuje i nástroje pro vytvoření použitelné směrovací tabulky. Zlý stroj si může vytvořit CGA adresu a posílat podepsané korektní zprávy, v nichž se ovšem prohlásí za směrovač a protlačí do směrovacích tabulek místních počítačů záznamy, jimiž na sebe stáhne jejich datový provoz. Řešením tohoto problému je certifikace směrovačů a jimi ohlašovaných údajů prostřednictvím tak zvané *certifikační cesty (certification path)*.

Autorita, které koncový počítač důvěřuje, udělí směrovači certifikát. Může být buď obecný ve stylu „potvrzuji, že stroj s adresou X je směrovač“, nebo může udělit směrovači oprávnění ohlašovat jen určité prefixy. Tedy „potvrzuji, že stroj s adresou X je směrovač a může ohlašovat prefixy M, N a Q“. Obecný certifikát činí směrovač důvěryhodným pro všechny prefixy, konkrétní jen pro ty v něm obsažené.

Uzly, které chtějí ověřovat oprávněnost směrovačů, musí předem znát veřejný klíč autority, protože v době, kdy jej potřebují použít, ještě nemají směrovací tabulku a nemohou tedy získávat informace ze sítě. Předpokládá se, že klíč do nich uloží správce systému. Klíčů pochopitelně může být víc a navíc směrovač nemusí nutně být potvrzen přímo autoritou známou klientovi. Stejně jako v jakémkoli jiném certifikačním systému lze budovat cesty důvěry. Jestliže klient důvěřuje autoritě A (má její veřejný klíč), ta certifikuje autoritu B a autorita B certifikuje směrovač X, je z pohledu klienta směrovač X důvěryhodný, protože k němu dokáže vybudovat certifikační cestu od známého zdroje. Ten je v terminologii SEND pojmenován *kotva důvěry (trust anchor)*.

Například si lze představit, že certifikační autoritu pro směrování bude provozovat CESNET jako operátor národní akademické sítě. Tato centrální autorita bude certifikovat autority na jednotlivých univerzitách a ústavech AV ČR a ty pak budou vydávat certifikáty konkrétním směrovačům, případně budou certifikaci dále delegovat na fakulty či jiné části mateřských organizací. Libovolný připojený počítač vlastnící veřejný klíč certifikační autority CESNETu pak bude schopen ověřit jakýkoli směrovač v síti. A to i v případě, kdy se momentálně ocitne v jiné z připojených sítí, například během služební cesty.

Certifikáty nejsou vkládány přímo do zpráv ohlašujících jednotlivé prefixy. Znamenalo by to zbytečnou zátěž, protože klientovi stačí směrovač ověřit jednou a pak mu může důvěřovat až do vypršení platnosti některého z certifikátů. Proto SEND zavedl novou dvojici zpráv – *Žádost o certifikační cestu (Certification path solicitation)*, ICMP typ 148, a *Ohlášení certifikační cesty (Certification path advertisement)*, ICMP typ 149.

Když klient dostane ohlášení od směrovače, kterému zatím nemůže důvěřovat, pošle *Žádost o certifikační cestu*. Může ji poslat všem směrovačům na lince (ff02::2), na adresu pro vyzývaný uzel nebo na adresu svého implicitního směrovače. Identifikuje v ní kotvy důvěry – certifikační autority, jimž důvěřuje.

Směrovač na přijetí výzvy k certifikaci odpoví *Ohlášením certifikační cesty*. Zahrne do ní sadu certifikátů, které klientovi umožní ověřit jeho důvěryhodnost. Posloupnost certifikátů musí začínat některou z klientem uvedených autorit a pokračovat vzájemnými návaznostmi až k odesilateli ohlášení. Kdyby tedy v síti TU v Liberci některý z počítačů požádal o ověření zdejší směrovač a oznámil, že důvěřuje autoritě CESNETu, obsahovalo by ohlášení dva certifikáty. Prvním by autorita CESNETu potvrdila důvěryhodnost autority TUL, druhým by autorita TUL potvrdila důvěryhodnost směrovače.

Kombinace CGA adres, digitálních podpisů a certifikace směrovačů by měla ochránit ohlašování sousedů proti všem známým útokům. RFC 3971 obsahuje i několik implementačních opatření, jejichž cílem je obrana proti zahlcení (DoS).

5.5 Lehčí verze ochrany

SEND je sice bezpečnostně velmi silný, ale trpí některými neduhy. Je poměrně náročný, což může dělat těžkosti zařízením s omezenými zdroji. Například požární čidlo připojené k síti jistě nebude mít procesorového výkonu či paměti na rozdávání. K ověřování certifikátů je třeba klientům distribuovat veřejné klíče příslušných autorit, nemluvě o tom, že stav podpory SEND v operačních systémech má k ideálu daleko. Existuje několik experimentálních implementací, běžně používané systémy jej ale bez pomoci neumí.

Zatím se tedy o použití SEND v původně zamýšlené podobě k přímé ochraně koncových stanic nedá ani uvažovat. Hledají se proto jiné, praktičtější cesty. Jednu popsalo RFC 6105: *IPv6 Router Advertisement Guard* – jestliže se koncové stroje nedokáží chránit samy, může to za ně udělat aktivní prvek, jehož prostřednictvím jsou připojeny. Nutno poznamenat, že *RA-Guard* není protokol či pevně definovaný algoritmus. Jedná se spíše o obecný popis ochranných mechanismů, které se pod různými názvy a v různých konkrétních podobách objevily v produktech jednotlivých výrobců.

Výchozí podmínkou je, že stroje nejsou v linkové vrstvě propojeny přímo a jejich komunikace prochází přes prostředníka. Typickým příkladem takové sítě je Ethernet na kroucené dvojlince, kde se kabely vedoucí od připojených strojů scházejí v centrálním přepínači, jímž prochází veškerá komunikace. RA-Guard je implementován právě v tomto centrálním prvku. Zkoumá jednotlivá ohlášení a rozhoduje, zda je propustí k příjemcům či zastaví.

RFC 6105 předpokládá dva možné režimy hlídačovy práce. Může být bezstavový, což znamená, že každé ohlášení posuzuje samostatně, jen na základě informací v něm obsažených. Při rozhodování, zda paket propustit či nikoli, může bezstavový hlídač vycházet z příchozího rozhraní, linkové či IPv6 adresy odesilatele, ohlašovaných prefixů, priority směrovače nebo životnosti ohlášení.

Sofistikovanější je stavový režim práce, kdy hlídač k posuzování využívá dříve shromážděné informace. RA-Guard může příkazem správce přejít do režimu učení, kdy po omezenou dobu přijímá ohlášení a ukládá si jejich zdroje. Po ukončení této fáze bude propouštět ohlášení jen od směrovačů, které zná z fáze učení.

Zajímavější variantou stavového hlídače je využití SEND. RA-Guard v takovém případě propouští jen ohlášení ověřená pomocí SEND – odeslaná z korektních CGA adres a opatřená platnými podpisy. Jelikož je aktivních prvků řádově méně než koncových zařízení a jsou přímo řízeny správcem sítě, je takovéto nasazení „zprostředkovaného SEND“ výrazně jednodušší, než jeho plošná podpora na všech stanicích. RA-Guard představuje rozumný kompromis mezi úplným SEND a zcela nechráněnou sítí.

Ani on však nemusí být dosažitelný. Vyžaduje chytré (čtěte dražší) aktivní prvky. Ty ale nemusí být k dispozici v celé síti – z ekonomických důvodů je poměrně běžné kombinovat chytré prvky v klíčových bodech infrastruktury s jednoduchými přepínači připojujícími koncové stroje uživatelů. V takové síti může zdroj falešných ohlášení stále ještě ovlivnit řadu svých sousedů.

Nic ale není ztraceno. Jestliže nedokážete zabránit šíření pirátských ohlášení, lze je alespoň sledovat a zpětně eliminovat. K tomu slouží specializované programy, jež sledují příchozí ohlášení a zkoumají, zda jsou v pořádku. Pokud zjistí nesrovnalost, pošlou do sítě vzápětí stejné ohlášení, ovšem s nulovou životností, takže odvolají účinek předchozího. Příkladem takového programu je *ramond*, jemuž se budu věnovat v části 19.2 na straně 410.

Postupem času se objevily metody pro obcházení RA-Guard. Jejich popisu a doporučení pro autory implementací se věnuje RFC 7113: *Implementation Advice for IPv6 Router Advertisement Guard (RA-Guard)*. Základním principem těchto triků je ukrývání skutečnosti, že datagram nese ohlášení směrovače.

Jednodušší implementace RA-Guard vycházejí z faktu, že nemá smysl, aby ohlášení směrovače obsahovalo rozšiřující hlavičky. Proto kontrolují jen položku *Další hlavička* v základní hlavičce datagramu. Stačí vložit rozšiřující hlavičku a datagram propustí.

Složitější útok je založen na fragmentaci – do falešného ohlášení směrovače vloží útočník tolik rozšiřujících hlaviček, aby způsobil fragmentaci a odsunutí vlastního ohlášení až do druhého fragmentu. Při testování prováděném počátkem roku 2014 takto upravený paket propustily všechny známé implementace RA-Guard.

RFC 7113 proto doporučuje, aby RA-Guard vždy zpracoval celý řetězec hlaviček a pokud snad pokračuje za hranici prvního fragmentu, paket zahodil. Požadavek, že při fragmentaci se musí všechny hlavičky vejít do prvního fragmentu, stanovilo RFC 7112 v reakci na různé ošklivé triky s přebujelými řetězci rozšiřujících hlaviček.

Nemluvě o tom, že k fragmentaci datagramů nesoucích zprávy pro objevování sousedů by vůbec nemělo dojít. RFC 6980: *Security Implications of IPv6 Fragmentation with IPv6 Neighbor Discovery* ji výslovně zakazuje pro všechny základní typy zpráv spadajících pod objevování sousedů. Přijímající stroj je povinen je potichu zahodit, pokud obsahují rozšiřující hlavičku *Fragmentace*. Jedinou výjimkou je *Ohlášení certifikační cesty* ze SEND, které inklinuje k velkým objemům dat a fragmentace může být nezbytná. V jeho případě se dokument omezuje na mírnější „neměla by" být fragmentována a příjemce by ji měl normálně zpracovat.

6 Automatická konfigurace

Plug and play cloumá světem. Všichni by chtěli, aby vše fungovalo pokud možno automaticky, nic se nemuselo nastavovat, konfigurovat či zapínat. IPv6 vychází tomuto trendu vstříc a jako jedno ze svých lákadel nabízí možnost automatické konfigurace počítačů.

Správce sítě má na výběr dokonce dva typy automatické konfigurace: stavovou a bezstavovou. *Stavová konfigurace* je stará vesta. Jejím základem je server spravující konfigurační parametry, které pak klientům na požádání sděluje. Podobné mechanismy se používají již hezkou řádku let – od RARP přes BOOTP až k dnešnímu DHCP. Pro účely stavové konfigurace IPv6 byl navržen protokol DHCPv6. V novějších textech o IPv6 se přestává termín „stavová konfigurace" používat (prý byl matoucí) a píše se jednoduše o DHCPv6.

Princip všech zmíněných mechanismů je podobný – počítač rozešle na obecnou adresu dotaz ohledně svých komunikačních parametrů a server mu je ve své odpovědi sdělí. Obvykle zahrnují vše potřebné pro rozumné zapojení do sítě – IP adresu, prefix podsítě, implicitní záznam do směrovací tabulky, adresu DNS serveru a případné další informace.

Naproti tomu *bezstavová konfigurace (StateLess Address Autoconfiguration, SLAAC)* představuje zcela nový způsob. Je založena na tom, že v síti sídlí ctnostní mudrcové (směrovače), kteří vědí vše potřebné. Proto čas od času všem sdělí, jaká je zdejší situace. Používají k tomu ohlášení směrovače. Nově přišedšímu počítači stačí jen chvíli poslouchat, případně o tyto informace aktivně požádat. Hlavním cílem bezstavové konfigurace je automatické určení vlastní adresy uzlu. Jako taková je popsána v RFC 4862: *IPv6 Stateless Address Autoconfiguration*.

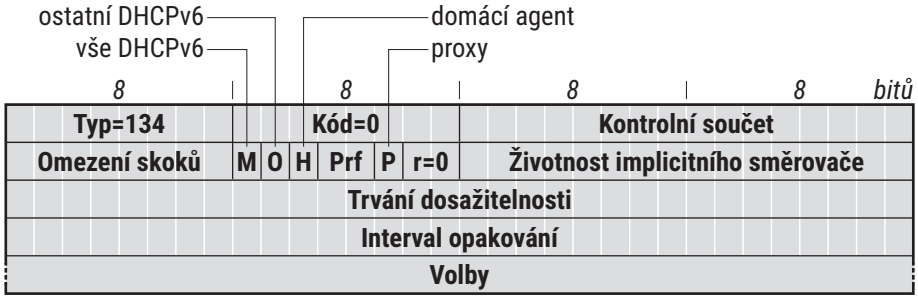
Skupinku doplňuje automatická konfigurace směrování, která stroje v síti seznámí s implicitními směrovači. Je oficiálně řazena do objevování sousedů, ale tematicky patří spíše sem. Také staví na ohlášení směrovače, proto bývá v praxi často propojena s bezstavovou konfigurací. Koncepčně jsou ale odděleny – svou adresu může zařízení získat různými způsoby, automatická konfgurace směrování je však jen jedna.

6.1 Ohlášení směrovače

Nosným pilířem bezstavové konfigurace je *Ohlášení směrovače (Router advertisement)*. Posílá je v náhodných intervalech každý směrovač, a to do všech sítí, k nimž je připojen. Náhodnost přestávky mezi ohlášeními má za cíl omezit dopady případných nešťastných časových souběhů, kdy dvě ohlášení dorazivší v určitém nevhodném intervalu po sobě způsobí zmatení.

Ohlášení směrovače připomíná hlášení, která jsme zvyklí slýchat na nádraží. „Na …tou kolej přijel prask škvrk z Prahy, pravidelný příjezd 14:30. Vlak dále pokr… Brno a New York." Po jeho absol-

vování vědí všichni zúčastnění – cestující ve vlaku, v ostatních vlacích i na nádraží – co se děje a jak to bude pokračovat. Stejně tak po obdržení ohlášení směrovače vědí připojené počítače, v jaké síti se to octly, jak se zde komunikuje a kdo je implicitní směrovač.



Obrázek 6.1: Ohlášení směrovače

Na obrázku 6.1 vidíte, jak vypadá příslušný paket. Posílá se prostřednictvím ICMP. Jedna ze stěžejních informací – adresy zdejších sítí – však není na první pohled patrná, protože je umístěna mezi *Volbami*. Z informací, které jsou obsaženy přímo v základu ohlášení, je nejdůležitější *Životnost implicitního směrovače (Router Lifetime)*. Jedná se o čas (v sekundách), jak dlouho ještě tento směrovač hodlá sloužit jako implicitní pro uzly z této sítě. Je-li hodnota nulová, směrovač nemá být používán jako implicitní. K problematice směrování se vrátíme zanedlouho.

Údaj o *Omezení skoků (Cur Hop Limit)* oznamuje zdejším uzlům, jak mají omezovat životnost odesílaných datagramů – jakou hodnotu vkládat do položky s maximálním počtem skoků.

Za ním následuje v ohlášení směrovače osmice *příznaků (flags)*, z nichž je zatím definováno šest. První dva se týkají DHCPv6. Příznak *M (Managed address configuration, stavová konfigurace adres)* oznamuje, že adresy i další komunikační parametry přidělí DHCPv6. Další je příznak *O (Other stateful configuration, stavová konfigurace ostatních parametrů)*, který rozhoduje o použití DHCPv6 pro ostatní parametry sítě, jako jsou například adresy lokálních DNS serverů. Významy možných kombinací příznaků M a O shrnuje tabulka 6.1.

Příznak *H (Home agent, domácí agent)* slouží pro podporu mobility a byl doplněn v RFC 3775. Směrovač jeho nastavením sděluje, že je ochoten pro místní síť pracovat jako domácí agent. Co to znamená se dočtete v kapitole 11 na straně 247.

Následující dvojice bitů je definována v RFC 4191: *Default Router Preferences and More-Specific Routes* jako rozšíření původního ohlášení, jež umožňuje rozlišit preference implicitních směrovačů. Pokud směrovač ohlašuje nenulovou *Životnost implicitního směrovače*, zde si může přiřadit *Prefe-*

M	*O*	*význam*
1	—	DHCPv6 poskytne vše
0	1	kombinovat bezstavovou konfiguraci (pro adresu, prefix a směrování) s DHCPv6 (pro ostatní parametry)
0	0	DHCPv6 není k dispozici

Tabulka 6.1: Význam příznaků při bezstavové konfiguraci

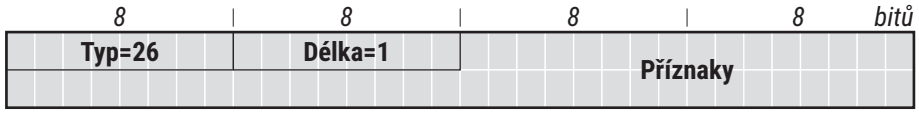
renci (Prf). Na výběr má tři úrovně, jež shrnuje tabulka 6.2 (hodnoty *Prf* jsou uvedeny v binární podobě).

Prf	*význam*
01	vysoká
00	střední
11	nízká
10	rezervováno (nesmí se používat)

Tabulka 6.2: Preference implicitního směrovače

Zatím poslední definovaný příznak je *P (Proxy)*, který signalizuje, že objevování sousedů prochází přes prostředníka. Závěrečné dva bity jsou rezervovány a musí obsahovat nuly. Existuje návrh (*draft-ietf-6man-ipv6only-flag*) využít následující bit pro příznak *S*, že linka podporuje jen IPv6 a žádné IPv4.

Vzhledem k tomu, že mnoho dostupných příznaků již nezbývá a ve vývoji je několik specifikací, které pošilhávají po dalších, umožnilo RFC 5175 jejich rozšíření pomocí volby. Její formát vidíte na obrázku 6.2 – jednoduše přidává dalších 48 bitů. Příznaky v pevné hlavičce jsou označeny jako bity 0 až 7, ve volbě pak číslování pokračuje od 8 do 55. Poslední dva jsou určeny pro neveřejné experimenty, zbytek zatím nemá přiřazen žádný význam.



Obrázek 6.2: Volba *Příznaky* pro ohlášení směrovače

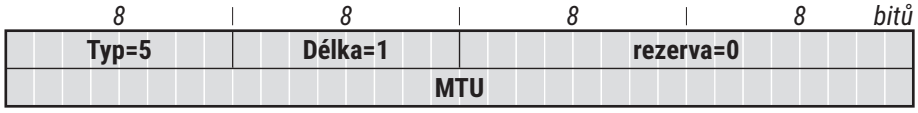
Použití volby je výrazně omezeno a v reálných datagramech ji často neuvidíte. Smí se přidávat jen k oznámení směrovače, smí se vyskytnout nanejvýš jednou a musí být vložena před všechny volby využívající některý z jejích příznaků. Především však nesmí být vložena, pokud alespoň jeden její příznak není nastaven. A jelikož žádné nebyly dosud definovány, prakticky se nevyskytuje.

Poslední dva údaje pevné části ohlášení ovlivňují detekci dosažitelnosti sousedů (viz část 5.2 na straně 122). Oba jsou časové a jejich hodnota je uvedena v milisekundách. *Trvání dosažitelnosti (Reachable Time)* říká, jak dlouho má být uzel považován za dosažitelný poté, co byla ověřena jeho momentální dosažitelnost. *Interval opakování (Retrans Timer)* je interval mezi dvěma výzvami sousedovi.

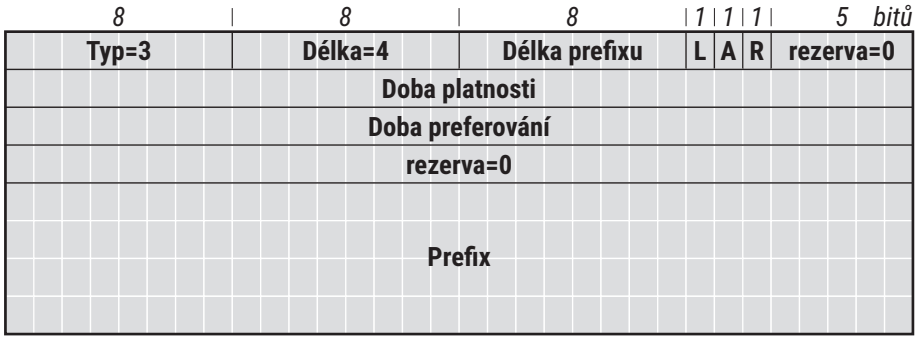
Typ	*Význam*
3	prefix adres
5	doporučené MTU paketů
8	domácí agent (str. 247)
24	informace o cestě (str. 247)
25	rekurzivní DNS servery (str. 145)
26	rozšířené *Příznaky*
31	domény k prohledávání (str. 145)
37	captive portál (RFC 7710)

Tabulka 6.3: Vybrané volby pro ohlášení směrovače

Ve své základní podobě slouží ohlášení směrovače jen k ohlašování implicitních směrovačů pro základní směrování zdejších strojů. Pomocí *Voleb (Options)* k němu lze přidat další informace. V původní specifikaci jich bylo jen pár – směrovač mohl ohlásit svou linkovou adresu (viz obrázek 5.2 na straně 121), MTU této sítě (obrázek 6.3) a především připojit po jedné volbě pro každý prefix IP adres, který se v dané síti používá. Postupem času přibylo několik dalších, přehled těch zajímavých najdete v tabulce 6.3. Nepochybně největší praktický význam mělo doplnění konfigurace DNS, které v původním návrhu citelně chybělo.



Obrázek 6.3: Volba *MTU*



Obrázek 6.4: Volba *Informace o prefixu*

Formát volby obsahující *Informace o prefixu (Prefix Information)* najdete na obrázku 6.4. Klíčový je pochopitelně vlastní *Prefix* a s ním spojená *Délka prefixu (Prefix Length)*, která udává, kolik bitů z něj je platných. Obvyklou hodnotou by mělo být 64. Dva časové údaje jsou uvedeny v sekundách. *Doba platnosti (Valid Lifetime)* udává jak dlouho prefix platí a *Doba preferování (Preferred Lifetime)* jak dlouho mají být preferovány adresy vzniklé automatickou konfigurací z tohoto prefixu. V obou případech hodnota 0xffffffff znamená nekonečnou trvanlivost.

Příznak *L (on-Link, na lince)* znamená, že adresy začínající tímto prefixem jsou považovány za lokální, tedy přímo dosažitelné linkovou vrstvou bez směrování přes jakékoli prostředníky. Je-li nastaven příznak *A (Autonomous address-configuration, autonomní konfigurace adres)*, prefix lze použít k automatické konfiguraci vlastní adresy. Zde se skrývá možnost vypnout (zakázat) bezstavovou konfiguraci. Pokud všechny směrovače u všech prefixů ve svých ohlášeních vynulují příznak *A*, počítače nemají k dispozici žádné adresy, které by si mohly přidělit. Zůstanou odkázány na DHCPv6 a pochopitelně lokální linkové adresy, které si přidělují automaticky. Naopak pokud některé prefixy mají nastaven příznak A a kromě toho je v ohlášení směrovače zapnut i příznak M, může počítač použít obě cesty k získání adresy – stavovou i bezstavovou – a pokud povedou k odlišným adresám, může rozhraní přidělit všechny.

Příznak *R (Router address, adresa směrovače)* byl opět doplněn pro potřeby podpory mobilních zařízení. Je-li nastaven, obsahuje položka *Prefix* kompletní globální adresu směrovače. Pro potřeby automatické konfigurace si z ní místní stroje vezmou jen prefix sítě a identifikátor rozhraní budou ignorovat. Ovšem domácí agenti spolupracující s mobilními uzly zde najdou kompletní adresy svých kolegů. Ty pak mohou poslat uzlu na cestách, když bude dynamicky hledat domácího agenta.

RFC 8425 zavedlo pro příznaky spojené s prefixem samostatný registr nazvaný *IPv6 Neighbor Discovery Prefix Information Option Flags*. Najdete jej společně s ostatními parametry ICMPv6 na stránce:

https://www.iana.org/assignments/icmpv6-parameters/

Dvojice časových údajů stanoví dobu trvání jednotlivých fází v životě adresy vytvořené bezstavovou autokonfigurací. Po svém vzniku je adresa *preferována (preferred)*. To znamená, že ji počítač může používat podle libosti.

Po vypršení *Doby preferování* se adresa stává *odmítanou (deprecated)*. Tato adresa je sice nadále platná, ale počítač by se jí měl pokud možno vyhýbat. Může ji použít například při pokračování již probíhající komunikace, pokud by přechod na jinou (preferovanou) působil potíže.

Konečně po uplynutí *Doby platnosti* se adresa stává *neplatnou*. Počítač ji nesmí používat a měl by odstranit její přiřazení odpovídajícímu rozhraní. Neplatná adresa jako by vůbec nebyla.

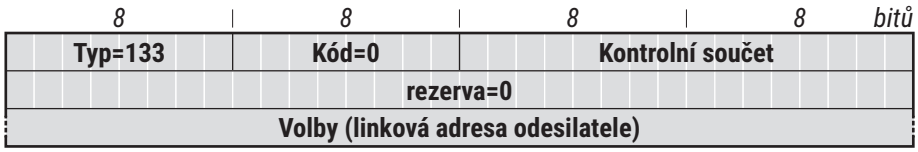
6.2 Určení vlastní adresy

Má-li prvek sítě komunikovat, musí především znát svou vlastní IP adresu. Její automatické stanovení vypadá následovně.

Uzel zahájí svou činnost tím, že si vytvoří svou lokální linkovou adresu. Udělá to tak, že ke standardnímu prefixu lokálních linkových adres fe80::/10 připojí identifikátor svého rozhraní, jehož vygenerování nepředstavuje žádný problém.

Je velmi málo pravděpodobné, že by stejnou lokální linkovou adresu mělo více uzlů, ale je vhodné se o tom přesvědčit. Řešení tohoto úkolu je snadné: použije se standardní objevování sousedů. Uzel rozešle výzvu sousedovi, v níž hledá vlastníka adresy, kterou sám sobě vygeneroval. Pokud dorazí ohlášení souseda, vznikne potíž. Znamená to, že někdo má stejný identifikátor rozhraní a automatická konfigurace nemůže pokračovat dál. Popsaný postup se nazývá *detekce duplicitních adres*.

V normálním případě však bude odezva negativní a uzel si vytvořenou lokální linkovou adresu přidělí. Pro pokračování v automatické konfiguraci bude potřebovat znalosti o svém okolí. Proto počká na ohlášení směrovače, případně o ně sám aktivně požádá prostřednictvím *Výzvy směrovači*.



Obrázek 6.5: Výzva směrovači

Z příznaků v *Ohlášení směrovače* se dozví, zda má použít stavovou konfiguraci pro svou adresu a další parametry sítě. Dále pak je u každého ze zdejších prefixů uveden příznak *A*, zda se pro tento prefix má použít bezstavová konfigurace adres. Pokud ano, vytvoří si k prefixu svůj identifikátor rozhraní[1], ověří, že adresa není duplicitní a přidělí si ji.

Jednoznačnost se testuje také u adres konfigurovaných manuálně nebo získaných prostřednictvím stavové konfigurace. Použije se výše popsaný postup – uzel pošle výzvu sousedovi se svou vlastní adresou.

6.3 Konfigurace směrování

V IP verze 6 se jednotlivé uzly dovedou naučit i směrování ve své síti. Návrh předpokládá, že si uzel bude udržovat následující datové struktury:

Cache cílů (Destination Cache) obsahuje směrovací informace pro konkrétní cílové adresy. Ke každému cíli je v této tabulce umístěna první adresa po cestě k němu (next hop). Datagramy směřující k uvedenému cíli se mají předat na tuto adresu.

Seznam prefixů (Prefix List) zahrnuje prefixy, které jsou považovány za přímo dosažitelné linkovou vrstvou. Vkládají se do něj prefixy z ohlášení zdejších směrovačů, které mají nastaven příznak *L*.

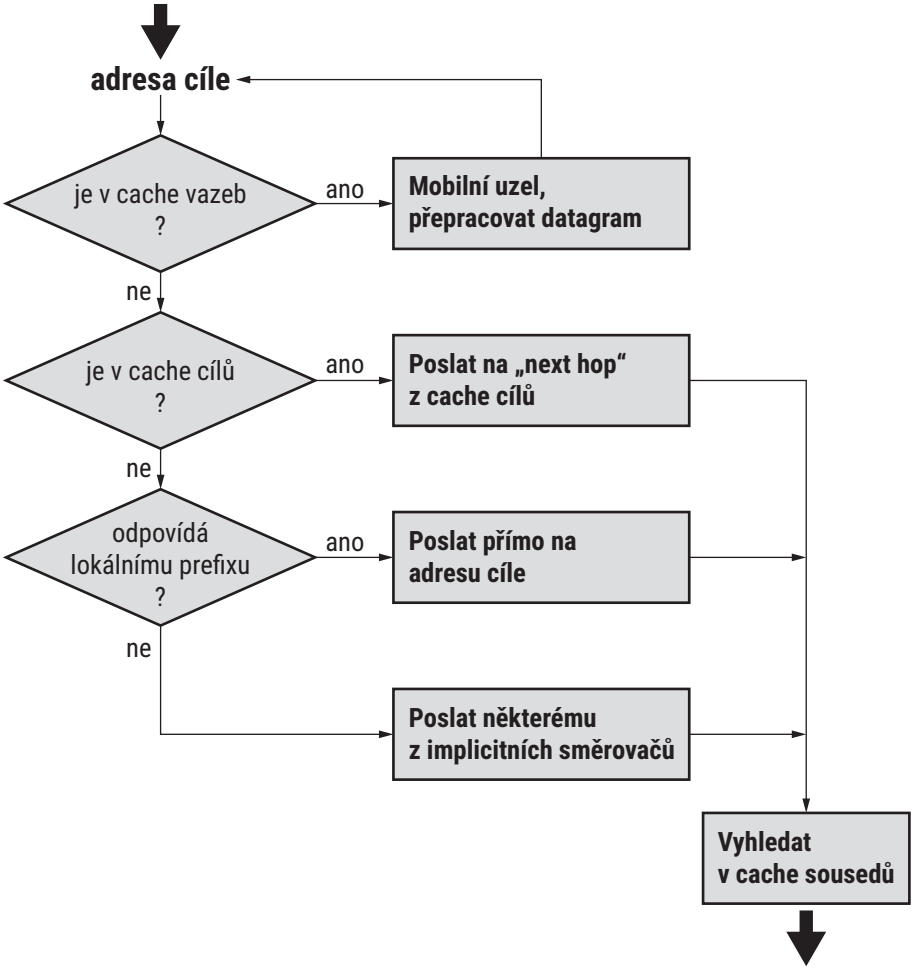
Seznam implicitních směrovačů (Default Router List) obsahuje informace o všech směrovačích, které ve svém ohlášení nastavily nenulovou *Životnost implicitního směrovače* (ty s nulovou se naopak vymažou).

Dá se říci, že seznam prefixů a seznam implicitních směrovačů představují obecný mechanismus, zatímco cache cílů ztělesňuje výjimky z něj. Datové struktury jsou ideové, lze je realizovat také všechny v jednom – například směrovací tabulkou.

Podpora mobility pak přidává ještě cache vazeb, která říká, že dotyčný počítač momentálně pobývá na úplně jiné adrese. Tato skutečnost znamená, že datagram bude zcela přepracován (změní se cílová adresa a přibyde hlavička *Směrování*), jak je popsáno v části 11.5 na straně 262.

Když má uzel odeslat datagram, musí nejprve určit IP adresu, na kterou jej má předat. Své úsilí zahájí pohledem do cache cílů, zda tato adresa není explicitně definována. Pokud ano, použije ji. Jestliže se daný cíl nevyskytuje v cache cílů, srovná jeho adresu s jednotlivými položkami v seznamu prefixů. Podle nich určí, zda se jedná o adresu lokální či vzdálenou. U lokální adresy se datagram posílá rovnou adresátovi. Pro vzdálenou použije jeden z implicitních směrovačů.

1: Do výpočtu podle RFC 7217 vstupuje prefix sítě, identifikátor rozhraní proto bude jiný.

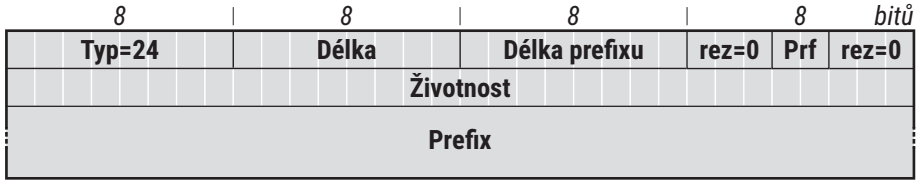


Obrázek 6.6: Postup při odesílání datagramu

Koncept přímo dosažitelných adres byl proti předchůdci změněn. IPv4 si tuto informaci odvozuje automaticky pomocí masky podsítě – jestliže je vlastní adresa stroje ve stejné podsíti jako cílová adresa datagramu, je adresát považován za přímo dosažitelného a datagram se mu odešle rovnou. V IPv6 žádné takové automatismy nejsou. Adresy jsou přímo dosažitelné, jestliže to o nich řekl směrovač příznakem *L* v příslušném ohlášení. Tečka. Podrobný rozbor najdete v RFC 5942: *IPv6 Subnet Model: The Relationship between Links and Subnet Prefixes*.

Když je rozhodnuto o příjemci datagramu, přijde ke slovu cache sousedů, v níž se bude hledat jeho fyzická (linková) adresa. Té jsem se podrobně věnoval v kapitole 5 na straně 119. Celý postup při odesílání datagramu je znázorněn na obrázku 6.6.

RFC 4191: *Default Router Preferences and More-Specific Routes* původní návrh poněkud rozšířilo. Zavedlo tři úrovně preferencí implicitních směrovačů (nízká, střední, vysoká) a volbu *Informace o cestě (Route Information)*, jež umožňuje přidat k ohlášení směrovače konkrétní cestu. Její formát vidíte na obrázku 6.7. Obsahuje cílový prefix, preferenci a životnost a měla by sloužit k aktualizaci směrovací tabulky.

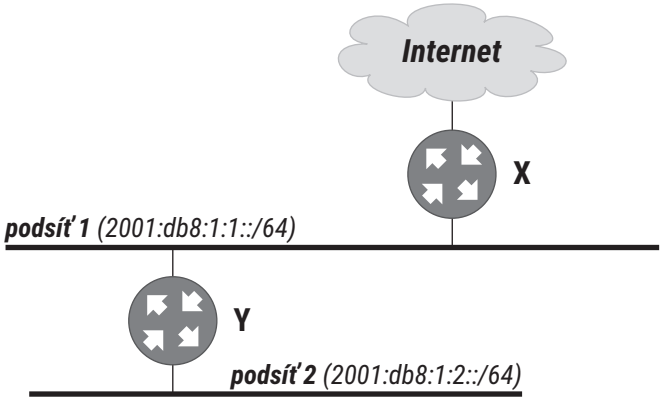


Obrázek 6.7: Volba *Informace o cestě*

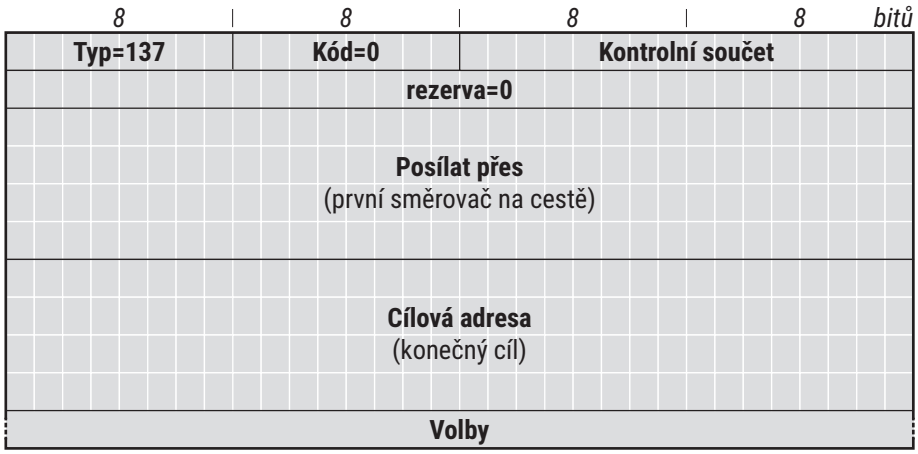
Autoři dokumentu zdůrazňují, že ohlášení směrovače s doplněnými cestami v žádném případě nemá zastupovat směrovací protokoly. Jejich cílem bylo informovat o výjimkách či přímo připojených sítích. Vezměme si například síť z obrázku 6.8. Podle původního modelu by se směrovač X ohlašoval jako implicitní pro podsíť 1 a směrovač Y pro podsíť 2. To by ale znamenalo, že datagramy směřující z první do druhé podsítě, budou předávány směrovači X a ten je přepošle Y.

RFC 4191 umožňuje, aby směrovač Y posílal do podsítě 1 ohlášení, v němž si nastaví nulovou *Životnost implicitního směrovače* a přidá k němu volbu s informací o cestě 2001:db8:1:2::/64 s vysokou prioritou. Čili ohlásí zdejším strojům, že pro ně sice není vhodným implicitním směrovačem, ale vede přes něj nejvhodnější cesta do podsítě 2.

Zvolí-li nevhodný směrovač nebo je daný cíl ve skutečnosti lokální, pošle směrovač odesilateli paketu ICMP zprávu *Přesměrování*. Údaje v ní obsažené by si odesilatel měl poznamenat do cache cílů, aby příště posílal datagramy určené tomuto cíli vhodnější cestou.



Obrázek 6.8: *Y* ohlašuje do podsítě 1 informace o cestě do podsítě 2



Obrázek 6.9: Přesměrování

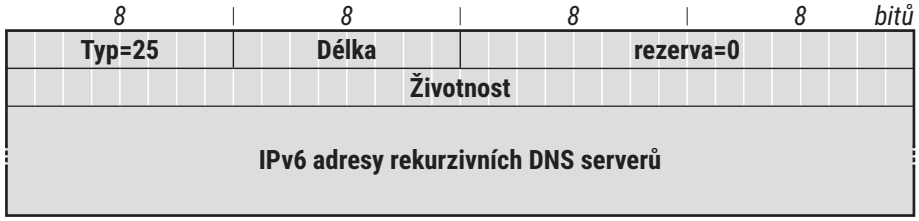
Formát přesměrování najdete na obrázku 6.9. Obsahuje jen nejzákladnější informace: *Cílovou adresu (Destination Address)* a *Posílat přes (Target Address)*, což je adresa směrovače (nebo cíle samotného), na kterou se mají posílat datagramy určené pro tento cíl. Do voleb lze zařadit fyzickou adresu směrovače, pokud ji odesilatel přesměrování zná. Měl by také přidat hlavičku datagramu, který přesměrování vyvolal. Její velikost je omezena tak, aby celkově datagram s přesměrováním nepřekročil délku 1280 B.

6.4 Konfigurace DNS

Bezstavová automatická konfigurace dokáže nastavit adresu rozhraní i jednoduchou směrovací tabulku. K rozumnému zapojení počítače do sítě zbývá jediná věc: adresa místního DNS serveru, na nějž se má obracet se svými dotazy. Dlouhá léta se ovšem DNS nacházelo mimo dosah bezstavové konfigurace, jež pro ně nenabízela žádné možnosti. Při rozkošné podobě IPv6 adres je ale počítač bez funkčního DNS téměř nepoužitelný, proto bylo třeba problém nějak řešit.

Jedinou standardní možností bylo nechat bezstavovou konfiguraci být a informace o DNS (i případné další) do ní doplnit stavovou cestou. K tomu slouží příznak O v ohlášení směrovače, jak se podrobněji dočtete v části 6.6 na straně 154. Nevýhoda tohoto přístupu je zjevná: musíte provozovat další server a v konfiguraci spojovat informace získané různými cestami. Ne každá implementace IPv6 se s tím dokázala vyrovnat.

V roce 2010 proto vyšlo RFC 6106: *IPv6 Router Advertisement Options for DNS Configuration*, jež do automatické bezstavové konfigurace doplnilo volby pro DNS. Jsou dvě, RDNSS poskytuje seznam místních rekurzivních DNS serverů, na něž se klient má obracet se svými dotazy, zatímco DNSSL obsahuje seznam přípon, které může při hledání přidávat na konec relativních doménových jmen. Aktuální specifikaci najdete v RFC 8106 z roku 2017, změny jsou jen drobné.

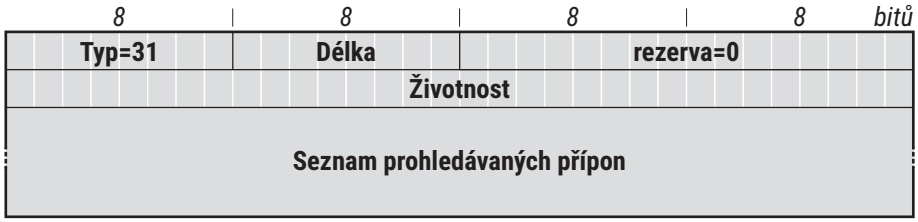


Obrázek 6.10: Volba *Rekurzivní DNS server*

Formát volby *Rekurzivní DNS server (Recursive DNS Server, RDNSS)* vidíte na obrázku 6.10. Poskytuje IPv6 adresy místních serverů v libovolném počtu (je odvozen z *Délky*) a počet sekund jejich *Životnosti (Lifetime)*. Ta je společná pro všechny uvedené adresy. Ovšem jedno ohlášení může obsahovat více exemplářů této volby s odlišnými životnostmi.

Specifikace doporučuje, aby životnost byla alespoň trojnásobkem maximálního intervalu mezi ohlášeními směrovače. Dá se očekávat, že během doby životnosti dorazí další ohlášení směrovače, které ji prodlouží. Speciální význam má životnost 0, která zakazuje příslušný server nadále používat. Naopak životnost 0xffffffff je nekonečná.

Klient si udržuje seznam používaných serverů. Kdykoli dorazí nové ohlášení s volbou *Rekurzivní DNS server*, seznam si aktualizuje – servery s nulovou životností vyřadí, u existujících si aktualizuje její hodnotu a nové přidá. RFC 6106 původně doporučovalo, aby si klient udržoval nanejvýš tři servery a při překročení zahazoval ty s nejkratší životností. V RFC 8106 bylo toto doporučení odstraněno a počet serverů ponechán na místních pravidlech.



Obrázek 6.11: Volba *Prohledávací seznam DNS*

Volba *Prohledávací seznam DNS (DNS Search List, DNSSL)* vypadá velmi podobě a prakticky stejně s ní klient také pracuje. Liší se jen formát a význam její datové části. Tentokrát neobsahuje seznam IPv6 adres, ale doménových jmen ve standardním přenosovém formátu. Když klient neuspěje při hledání údajů k určitému jménu a dané jméno nebylo zadáno absolutně (nekončí tečkou), může za ně postupně připojovat jednotlivá jména z prohledávacího seznamu.

Pokud například prohledávací seznam mého stroje obsahuje *tul.cz*, mohu se na web naší univerzity dostat prostým zadáním *www*. Klient se pokusí nejprve najít v DNS adresu pro jméno *www* a když neuspěje, bude opakovat pokus s příponou podle seznamu. Bude tedy hledat adresu pro jméno *www.tul.cz*.

Aktualizace prohledávacího seznamu podle přicházejících ohlášení probíhají stejným způsobem jako v případě seznamu místních DNS serverů.

RFC 8106 počítá i se situací, kdy klient dostává relevantní DNS informace jak pomocí ohlášení směrovače, tak protokolem DHCPv6. V tom případě by je měl kombinovat tak, aby si v seznamu zanechal alespoň jednu hodnotu z každého aktivního mechanismu. Pokud by se některý pomátl (nebo byl napaden), zůstanou mu díky tomu k dispozici alespoň nějaké použitelné hodnoty.

Při vzájemném kombinování hodnot do společného seznamu by klient měl dodržovat následující pořadí priorit:

1. autentizované DHCPv6,
2. ohlášení směrovače chráněné SEND,
3. DHCPv6 bez autentizace,
4. ohlášení směrovače bez SEND.

6.5 DHCPv6

Automatická konfigurace s dopomocí je ve světě IPv4 celkem běžnou záležitostí. Zajišťuje ji *Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)*, jehož prostřednictvím může startující počítač získat všechny údaje potřebné pro plnohodnotný síťový život (IP adresu, masku podsítě, adresu DNS serveru a implicitní směrovač pro odchozí provoz). DHCP je dnes všudypřítomné – typický operační systém bývá čerstvě po instalaci nastaven na jeho použití, pomocí DHCP se konfigurují síťové tiskárny, najdete je v podnikových sítích i v domácnostech (protože ADSL modem obvykle funguje jako DHCP server pro počítače připojené k němu Ethernetem či Wi-Fi).

Získání síťových parametrů prostřednictvím DHCP má čtyři fáze:

1. **Objevování (discover):** Klient pošle všesměrově (čili na IP adresu 255.255.255.255) dotaz obsahující jeho ethernetovou adresu.
2. **Nabídka (offer):** Servery, k nimž se dotaz dostane (často bývá jeden, ale obecně jich může být libovolné množství), nahlédnou do svých tabulek, zda pro tohoto klienta mají nějaké použitelné parametry. Pokud ano, pošlou mu nabídku „Ode mne bys mohl mít tohle …“
3. **Požadavek (request):** Klient posbírá nabídky, vybere si tu, která je jeho srdci nejbližší a příslušnému serveru pošle požadavek, v němž žádá o přidělení nabídnutých parametrů.
4. **Potvrzení (acknowledge):** Server mu potvrdí, že jeho žádosti vyhověl. Tím okamžikem může klient začít příslušné parametry používat. Jejich přidělení je však pouze dočasné (v terminologii DHCP se jedná o pronájem, lease), po vypršení platnosti musí klient požádat o prodloužení nebo získat zcela nové parametry.

Ve světě IPv6 se tento přístup nazývá stavovou konfigurací a zajišťuje jej nová verze DHCP. Protokol pochopitelně doznal jistých změn – IPv6 nezná všesměrové (broadcast) adresy, na druhé straně si však každá stanice umí sama nastavit lokální linkovou adresu, takže odpadá vazba na adresy nižších komunikačních vrstev (Ethernet apod.).

Vzhledem k všeobecnému rozšíření DHCP a spoustě zkušeností s jeho provozem je překvapující, že definice nové verze protokolu vznikala neskutečně dlouho. Od prvního návrhu *draft-ietf-dhc-dhcpv6-00* do výsledného RFC uběhlo osm a půl roku! V roce 2003 jsme se konečně dočkali RFC 3315: *Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6)*. Po patnácti letech byla specifikace aktualizována v RFC 8415, které představuje aktuální definici protokolu.

Na DHCPv6 se podle něj podílejí tři kategorie zařízení: *klient* je stroj, který chce získat informace; *server* je ten, kdo mu je poskytne; *zprostředkovatel (relay)* pak zprostředkovává styk mezi nimi, pokud se klient a server nacházejí na různých linkách. Pod společný pojem *agent* pak bývají zahrnovány servery a zprostředkovatelé. Agent je zkrátka někdo, kdo poskytne DHCP odpověď (ať už svou vlastní či zprostředkovanou) a sídlí na lokální lince.

Významnou roli v DHCP hraje otázka identifikace – jak serverů, tak především klientů. Dříve se k tomuto účelu používala MAC adresa, DHCPv6 však zavádí pojem *DHCP Unique Identifier (DUID)*. Jedná se o jednoznačný identifikátor účastníka DHCP života, právě jeden DUID má každý klient i server. Měl by být stálý a neměnit se ani při výměně síťové karty počítače.

Autoři protokolu vzdali snahu o vytvoření univerzálního identifikátoru, který by vyhověl ve všech případech. Místo toho definovali několik způsobů, jak jej lze vytvořit. Navíc připustili do budoucna rozšiřování sortimentu typů DUID.

Výše uvedenou podmínku stálosti snadno splňuje identifikátor přidělený výrobcem. Předpokládá, že výrobce přidělí zařízení jednoznačnou identifikační hodnotu (výrobní číslo). DUID je pak tvořen touto hodnotou a doménou výrobce a zařízení si jej ponese po celý svůj život. Další dva definované typy využívají linkovou adresu. První ji kombinuje s časem vytvoření a předpokládá, že zařízení má k dispozici trvanlivou zapisovatelnou paměť. Čili že si DUID jednou vygeneruje, uloží do této paměti a pak bude trvale používat tutéž uloženou hodnotu. Konečně poslední ze základní trojice typů používá jen samotnou linkovou adresu a tedy odpovídá praxi ze světa IPv4. Na rozdíl od něj by ale měl stejný DUID používat pro všechna síťová rozhraní, jež chce pomocí DHCPv6 konfigurovat. Výměnou síťové karty se tento typ DUID pochopitelně změní. RFC 6355 později doplnilo DUID postavený na univerzálním identifikátoru UUID.

Druhou identifikační konstrukcí je tak zvaná *identifikační asociace (identity association, IA)*. Jedná se typicky o shluk konfiguračních informací přidělených jednomu rozhraní, opatřený jednoznačným identifikátorem (IAID). Tyto identifikátory přiděluje klientský počítač každému rozhraní, pro něž chce použít DHCPv6. Opět by měly být konzistentní a neměnit se v čase. Čili by si je buď měl ukládat do trvalé paměti, nebo používat takový algoritmus pro jejich vytváření, který zajistí pokaždé stejné hodnoty.

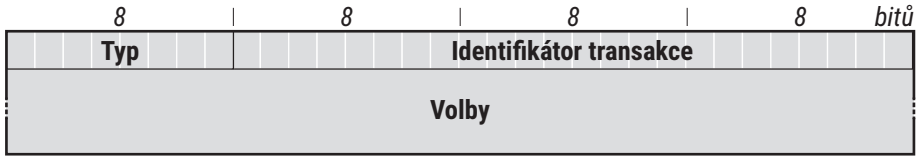
Otázky identifikace jsou tedy v DHCPv6 narýsovány takto: klient je jednoznačně identifikován svým DUID, rozhraní v rámci klienta jsou rozlišována prostřednictvím IA. S IA jsou také spojeny přidělované parametry (některé mohou stát i mimo IA, pokud jsou obecné pro celého klienta).

Základní fáze DHCPv6 dialogu se proti předchůdci nijak významně nezměnily. Klient se poptá po dostupných parametrech, dostane nabídky, jednu si vybere a dohodne si její přidělení. Konfigurace začíná hledáním vstřícných serverů. Jelikož na začátku klient neví nic o síti, ve které se

nachází, posílá své počáteční zprávy na standardní skupinové adresy. Pro DHCPv6 byly definovány následující:

všichni DHCP agenti	ff02::1:2
všechny DHCP servery	ff05::1:3

Klient zahájí svou činnost tím, že vytvoří IA pro svá rozhraní a opatří je jednoznačnými identifikátory. Na adresu všech DHCP agentů (ff02::1:2, všimněte si, že má dosah jen v rámci linky) pak pošle tak zvanou *výzvu (solicit)*, ke které přibalí svůj DUID i všechny IA. Významem výzvy je „hledám všechny DHCP servery, které jsou ochotny mi poskytnout adresu". Aby systém fungoval, musí být v každé lokální síti umístěn alespoň jeden agent. Součástí výzvy je i *lokální linková adresa* (s prefixem fe80::), kterou si klient přidělil.



Obrázek 6.12: Formát zprávy DHCPv6

Formát DHCP zprávy najdete na obrázku 6.12. Ve srovnání se staršími verzemi návrhu byl naprosto minimalizován. Skoro všechny informace byly přesunuty do voleb, zůstaly jediné dvě společné položky: *Typ (Msg-type)* identifikující, o jakou zprávu se vlastně jedná, a *Identifikátor transakce (Transaction-id)*, který umožňuje párovat dotazy a odpovědi.

Voleb je k dispozici habaděj, jejich počet už překročil stovku. Situaci ještě o něco komplikuje, že některé volby v sobě obsahují další volby. Příkladem jsou právě identifikační asociace (volby IA_TA pro dočasné parametry a IA_NA pro trvalé), které v sobě zahrnují volby s jednotlivými přidělenými parametry (například s adresami). Kompletní přehled dostupných voleb najdete na adrese:

https://www.iana.org/assignments/dhcpv6-parameters/

Pokud výzvu obdrží server, rovnou klientovi odpoví. Znamená to, že sídlí společně s klientem na téže lince a pro doručení odpovědi proto použije jeho lokální linkovou adresu. Odpovědí na výzvu je *ohlášení serveru (advertise)*. Jeho součástí bývá *preference*, která udává ochotu serveru poskytnout své služby danému klientovi. Zároveň server přibalí konfigurační parametry, které by přidělil jednotlivým IA. V podstatě říká „Kdybych já dostal tento požadavek, nabídl bych toto…"

Zprostředkovatel naproti tomu má konfigurován seznam serverů, kterým má předávat dotazy (součástí tohoto seznamu může být i obecná skupinová adresa všech DHCP serverů daného místa ff05::1:3). Dorazí-li k němu výzva, předá ji na všechny adresy ze seznamu. Dotaz přitom zabalí

1	výzva (solicit)
2	ohlášení serveru (advertise)
3	žádost (request)
4	potvrzení (confirm)
5	obnovení (renew)
6	převázání (rebind)
7	odpověď (reply)
8	uvolnění (release)
9	odmítnutí (decline)
10	rekonfigurace (reconfigure)
11	žádost o informace (information request)
12	předání (relay forward)
13	odpověď k předání (relay reply)

Tabulka 6.4: Typy zpráv DHCPv6

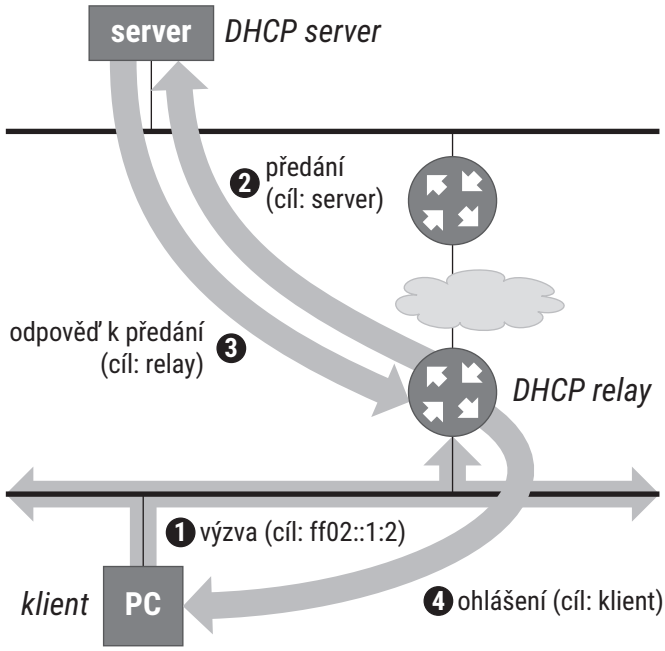
do nové zprávy typu *předání (relay forward)*, v níž uvede svou vlastní adresu. Server svou odpověď zabalí do podobné zprávy (*odpověď k předání, relay reply*) a pošle zpět zprostředkovateli. Ten vybalí data a předá je opět na lokální linkovou adresu klienta. Druhý případ je znázorněn na obrázku 6.13.

Klient posbírá doraziv ší ohlášení a vytvoří si tak seznam DHCP serverů, které má k dispozici. Měl by dát přednost tomu, kdo má nejvyšší preferenci. Pokud se hodnoty shodují, může se rozhodnout podle dalších poskytnutých informací (např. nabídnutých adres a podobně).

Když si klient vybral server, nastává druhá fáze: získání komunikačních parametrů. Odešle tedy novou zprávu, tentokrát se jedná o DHCP *žádost (request)*. V ní uvede DUID serveru, kterému je určena (identifikátor získal z jeho ohlášení). Zprávu opět pošle na obecnou adresu všech DHCP agentů. Stále ještě nezná zdejší síť, takže neví, jak doručit konkrétně adresovaný datagram. Servery, kterých se netýká, žádost ignorují.

Cílový server žádost vyhodnotí a pošle zpět *odpověď (reply)*. Při přidělování adresy server bere v úvahu především linku (fyzickou síť), ke které je klient připojen, a DUID klienta. Zejména podle těchto dvou informací vybere adresu (či adresy), které oznámí klientovi. Součástí odpovědi je i stav, kterým sděluje, zda žádosti vyhověl nebo ne (a z jakého důvodu). Vzhledem k tomu, že

klient vybíral z pozitivních ohlášení na svou výzvu, mělo by být odmítnutí velmi nepravděpodobné. Komunikace opět může proběhnout přímo nebo přes zprostředkovatele.



Obrázek 6.13: Zprostředkovaná žádost a odpověď v DHCPv6

Klient si přidělené adresy ověří (standardním postupem pro detekci duplicitních adres) a pokud zjistí, že je někdo již používá, může je odmítnout. Slouží k tomu DHCP zpráva *odmítnutí (decline)*. Adresy získané z DHCPv6 se nastavují s prefixem délky 128 b. Přímo připojené sítě se poznávají nikoli podle nich, ale podle příznaku *L* v ohlášení směrovače (více v části 6.3 na straně 141).

Stejně jako v IPv4 jsou adresy přidělovány na omezenou dobu. Po jejím uplynutí musí klient požádat o prodloužení. Nejprve žádá server, který adresu přidělil (zpráva *obnovení, renew*). Pokud neodpovídá, obrátí se později na všechny dostupné servery, zda některý z nich není ochoten adresu prodloužit (*převázání, rebind*). Když naopak klient končí svou síťovou existenci, měl by o tom server informovat zprávou *uvolnění (release)*, aby mohla být jeho adresa přidělena případnému novému zájemci.

Další situací, jejímž řešením se DHCPv6 zabývá, je návrat klienta do sítě. Může k němu dojít například po restartu, usnutí a probuzení počítače či jeho dočasném fyzickém odpojení. V takovéto situaci si klient musí ověřit, jestli jeho stávající síťové parametry jsou správné. Proto pošle na adresu

všech DHCP agentů zprávu *potvrzení* (*confirm*), v níž sdělí aktuální parametry svých IA. Příslušný server reaguje *odpovědí*, ve které platnost přiřazení potvrdí nebo naopak odmítne.

Aktivita v DHCP typicky vychází od klienta. Návrh však pamatuje i na případy, kdy vyvolání konfiguračního dialogu požaduje server. Zpravidla se jedná o situace, kdy došlo ke změně síťových parametrů a server chce, aby se klienti přizpůsobili nové situaci.

V tom případě rozešle zprávu *rekonfigurace* (*reconfigure*). Posílá se individuálně každému z klientů, kterých se týká. Jelikož si server vede přehled o přidělených parametrech, bez problémů si v něm najde potřebné adresy. Klient pak reaguje odesláním požadavku na *obnovení* svých parametrů a server ve své *odpovědi* sdělí vše potřebné.

Důležitou schopností DHCPv6 je, že dokáže přidělovat nejen individuální adresy, ale celé prefixy, které pak lze využít pro další přidělování v místní síti. Tento způsob zacházení s adresami je typický pro domácí sítě – domácí krabička typu „vše v jednom“ si pomocí DHCPv6 řekne poskytovateli připojení o prefix a z něj pak přiděluje adresy místním strojům, ať už stavově či bezstavově.

Toto rozšíření definovalo samostatné RFC 3633: *IPv6 Prefix Options for Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) version 6*, později bylo zahrnuto do jádra DHCPv6 v RFC 8415. Jeho základem je volba *Asociace identity pro delegaci prefixu (Identity Association for Prefix Delegation, IA_PD)*. Používá se v obou směrech – klient se jejím prostřednictvím představí (prostřednictvím identifikátoru IAID) a může i požádat o určitou délku prefixu, server pak touto volbou předává informace o poskytovaných prefixech.

V RFC 6603 byla doplněna možnost určitou část z delegovaného prefixu vyjmout. Určité nejasnosti původní specifikace ohledně požadovaných a poskytovaných délek řeší RFC 8168: *DHCPv6 Prefix-Length Hint Issues*.

Dalším zajímavým rozšířením je možnost využít DHCPv6 jako přepravní kanál pro DHCPv4. Definuje ji RFC 7341: *DHCPv4-over-DHCPv6 (DHCP 4o6) Transport* a využijí ji zejména přechodové mechanismy (bude o nich řeč v kapitole 12 na straně 277) poskytující IPv4 jako službu nad čistou IPv6 sítí. RFC 8539 doplnilo některé volby speciálně pro ně. DHCPv6 zde slouží čistě jako dopravní prostředek, do informací nesených DHCPv4 nijak nezasahuje. Jen jednoduše balí zprávy DHCPv4 do svých (byly pro ně zavedeny dva nové typy, jeden pro požadavky, druhý pro odpovědi) a přenáší je mezi klientem a serverem.

Na závěr jako tradičně vystupují bezpečnostní otázky DHCPv6. Aneb jak se bránit proti partyzánským serverům poskytujícím nesmyslné údaje či proti změnám DHCP zpráv při přenosu. Původní návrh autentizačního protokolu z RFC 3315 byl opuštěn, RFC 8415 rozlišuje dvě odlišné situace:

Výrazně jednodušší je zabezpečení komunikace mezi agenty a servery, kterou popisuje RFC 8213: *Security of Messages Exchanged between Servers and Relay Agents*. K ní dochází v době, kdy oba účastníci již mají nastaveny síťové parametry a normálně komunikují. Díky tomu není třeba vyrábět kompromisy a lze použít IPsec (viz kapitola 10 na straně 225). Navíc agentů i serverů bývá v síti málo, takže i související konfigurace bude poměrně jednoduchá. Pro vzájemnou komunikaci se jednoznačně doporučuje použití IPsec v kombinovaném režimu, kdy je veškerá komunikace šifrována a zároveň je ověřována autentičnost zpráv.

Výměna zpráv mezi klientem a serverem je tvrdší oříšek a DHCPv6 zde nabízí jen velmi omezenou ochranu – umožňuje odhalit falešné výzvy ke změně síťových parametrů. Slouží k tomu volba *Autentizace*, ve které server při zahajovací výměně zpráv pošle klientovi klíč a pozdější výzvy k rekonfiguraci doprovodí autentizační hodnotou vypočtenou s tímto klíčem, aby si klient mohl ověřit jejich pravost.

Dlouhou dobu vzniku RFC 3315, na niž jsem si stěžoval, lze vnímat i jako předzvěst problémů, jimiž je DHCPv6 zatíženo a které výrazně omezují jeho používání.

První z problematických míst představují identifikátory. Generuje a ukládá si je operační systém, takže i když daný systém používá konzistentní DUID, jiné systémy na tomtéž počítači budou mít jiný. Přechod na novou verzi Windows, více systémů na jednom stroji či prostá přeinstalace systému typicky znamenají, že jeden a tentýž počítač vystupuje pod různými DUID. Chcete-li pomocí DHCPv6 přidělovat pevné síťové parametry, znamená každá z výše uvedených změn nutnost upravit konfiguraci DHCP serveru. A naopak klonování systému způsobí stejný DUID na různých počítačích.

Obtížné může být už samotné jeho zjištění, které může pro uživatele představovat dobrodružný výlet do končin, o jejichž existenci dosud neměl tušení. Podrobnosti se dočtete v části 21.3 na straně 435.

Druhým významným odpuzovačem zájemců je rozhodnutí autorů nezařadit do DHCPv6 volbu pro implicitní cestu. Oficiálním důvodem je, že směrovací tabulky se v IPv6 plní lokálními linkovými adresami, které platí jen v rámci linky, a je proto nesystémové poskytovat je zvenčí. Dopadem tohoto rozhodnutí je, že směrovače musí posílat svá ohlášení, která jsou jediným zdrojem informací o implicitních směrovačích. A – světe, div se – řada správců si řekla, že když už v síti mají základ bezstavové konfigurace, budou její pomocí konfigurovat vše.

Situaci neprospívá ani to, že Google důsledně odmítá implementovat DHCPv6 v operačním systému Android. Pokud byste ve Wi-Fi síti chtěli konfigurovat adresy touto cestou, zůstanou mobilní telefony, teelfony a další zařízení s Androidem mimo.

Důsledkem je, že plnohodnotného DHCPv6 je v sítích jako šafránu. A pravděpodobně se na tom ani do budoucna mnoho nezmění. Výjimkou potvrzující pravidlo je přidělování prefixů. DHCPv6 je jediným široce podporovaným mechanismem, jak dynamicky přidělovat prefixy zákaznickým sítím. Proto se s ním běžně setkáme v sítích poskytovatelů připojení, kde mívá na starosti především přidělování prefixů pro zákazníky.

6.6 Bezstavové DHCPv6

Hlavní nevýhodou bezstavové automatické konfigurace je velmi omezený sortiment informací, které lze jejím prostřednictvím získat. Nejpalčivější byla absence adres místních DNS serverů, jež byla později doplněna. Nicméně občas by se klientům hodily i jiné údaje. Proto obsahuje bezstavová konfigurace možnost, jak doplnit další informace jiným (stavovým) způsobem.

Připomenu, že k tomuto účelu slouží kombinace voleb *M*=0 a *O*=1 (viz tabulka 6.1 na straně 137) v *Ohlášení směrovače*. Znamená, že počítač si má adresu a směrování nastavit bezstavově a doplnit k nim další informace získané stavovým protokolem. A právě k tomuto účelu slouží bezstavové DHCPv6 definované v RFC 3736: *Stateless Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) Service for IPv6* a později zařazené do RFC 8415.

Jedná se o *velmi* zjednodušenou verzi DHCPv6. Z něj přebírá formáty zpráv i pravidla chování všech účastníků, ovšem snaží se o maximální jednoduchost a díky tomu snadnou implementovatelnost. Používá jen dva typy DHCP zpráv: žádost o informace a odpověď[2]. Také sortiment dostupných voleb je značně omezen.

Celá transakce začíná odesláním zprávy *Žádost o informace (Information request)* ze strany klienta. Její součástí je volba identifikující parametry, které požaduje. Server podle nich sestaví *Odpověď (Reply)* a pošle ji klientovi, který informace v ní obsažené využije. Toť vše. Vzájemná komunikace je jednodušší, protože na rozdíl od klasického DHCPv6 klient již má (bezstavově) nastavenu adresu a směrování.

Bezstavové DHCPv6 je jednodušší nejen pro implementátory, ale také pro správce. Zpravidla bude třeba poskytovat klientům v místní síti jen adresy lokálních DNS serverů, které bývají pro všechny stejné a příliš se nemění. Lze očekávat, že konfigurace bezstavového DHCPv6 serveru bude obsahovat pár řádků a vydrží roky.

2: Dobře, lhát se nemá. Ve skutečnosti jsou čtyři. Aby se daly zprávy bezstavového DHCP předávat dál, potřebuje ještě předání a odpověď k předání pro komunikaci mezi serverem a zprostředkovatelem, pokud server není na lokální lince.

6.7 Jak tedy konfigurovat?

Když projdete možnosti automatické konfigurace, jako obvykle zjistíte, že každá z dostupných variant má své klady a zápory a těžko se najde univerzální odpověď na otázku v názvu této části.

Bezstavová konfigurace láká svou jednoduchostí. Nikdo nemusí nic nastavovat (všude je podporována, v implicitní konfiguraci operačních systémů a zařízení bývá zapnutá), stroj se prostě zapojí do sítě a funguje. Tedy funguje za předpokladu, že nějak získá informace o DNS. Poté, co Microsoft implementoval RFC 8106 ve Windows 10, padla tato významná překážka.

Problémem bezstavové konfigurace je, že některým správcům sítí při slovech „nikdo nemusí nic nastavovat, zařízení se prostě zapojí do sítě a funguje" vyráží studený pot na čele. Chaos v síti. Divocí uživatelé zapojující bez jakékoli kontroly a evidence nejrůznější aparáty. Jak v takové situaci řešit problémy, které způsobí? Jak odpovídat na dopisy „Tehdy a tehdy byl na počítači s adresou X z Vaší sítě nabízen P2P službou Y film „Zachraňte vojína Ryana". Zbylo nám tu z natáčení pár tanků, tak s tím koukejte rychle něco udělat, nebo s nimi přijedeme!"

Protipólem je regulérní DHCPv6, doplněné automatickou konfigurací směrování. Umožňuje udržovat v síti jakýs takýs pořádek[3], ale pokud se chcete vyhnout náhodně přidělovaným adresám, musíte si udržovat databáze počítačů v síti a trápit se s DUID. Správa takového systému je pracná, navíc vývoj kvalitních implementací DHCPv6 trval dlouho a správci tak neměli k dispozici potřebné nástroje. Kromě toho beztak musíte provozovat automatickou konfiguraci směrování.

Kdybych si měl zavěštit do budoucna, očekával bych spíše příklon k plug-and-play přístupu. Tedy buď bezstavovou konfiguraci nebo plnohodnotné DHCPv6 v liberálním nastavení typu „přidělím nějakou volnou adresu každému, kdo si o ni řekne". O pořádek v síti se pak postará autentizace uživatelů protokolem IEEE 802.1X nebo podobným – počítač sice dostane síťové parametry volně, ale jeho komunikace bude zablokována, dokud *uživatel* neprokáže svou totožnost.

6.8 SAVI – ochrana proti padělání lokálních adres

Jedním z notorických problémů internetové komunikace je falšování zdrojových adres v odesílaných datagramech. Používá se k lumpárnám všeho druhu – od obcházení bezpečnostních mechanismů přes zmatení různých automatických procesů až po zahlcující útoky.

Tento problém se řeší tím lépe, čím blíže se nacházíte k jeho zdroji. Přepínač propojující koncové stroje dokáže snadno posoudit, zda adresy, které používají, jsou ze zdejší podsítě či dokonce zda se jedná o adresy získané pomocí zde používaného mechanismu pro automatickou konfiguraci (to je

3: Zejména pokud v aktivních prvcích zakážete komunikaci počítačů, které svou adresu nedostaly pomocí DHCP.

právě úkol pro SAVI). Směrovač poskytovatele Internetu může hlídat, zda adresy odesilatele v paketech přicházejících od určitého zákazníka byly zákazníkovi přiděleny (viz BCP 38). A naopak jestliže vám dorazí do sítě paket, jehož odesilatel údajně leží v síti kdesi v Japonsku, nemáte šanci zjistit, zda ve skutečnosti nepřišel třeba z Austrálie.

Mechanismus *Sender Address Validation Improvement (SAVI)* cílí na počáteční kroky síťové komunikace. Hlídá, zda místní stroje v datagramech, které odesílají, používají své skutečné adresy. Vzhledem k tomu, že existuje několik způsobů, jak může rozhraní získat své IPv6 adresy, existuje více variant SAVI. Jeho základní principy najdete v RFC 7039: *Source Address Validation Improvement (SAVI) Framework*, konkrétní varianty jsou pak definovány v samostatných dokumentech.

Důležité je zdůraznit, že SAVI se týká jen lokálního provozu. Tedy datagramů, jejichž odesilatel pochází z dané podsítě. O tranzitní provoz přicházející zvenčí se prakticky nestará. S jednou výjimkou – takový provoz může do sítě vstoupit jen prostřednictvím některého ze směrovačů. Pokud by některý z místních strojů odeslal datagram s externí zdrojovou adresou, bude považován za padělaný.

SAVI může být implementováno v různých místech, ale jako zdaleka nejvhodnější se pro tuto úlohu jeví L2 přepínač propojující koncová zařízení. Činnost SAVI prvku podle oficiální definice zahrnuje tři kroky:

1. Zjistí, jaké adresy je posuzované zařízení oprávněno používat. K tomu obvykle stačí analyzovat jeho provoz.
2. Sváže IP adresy s vhodnými parametry linkové vrstvy. Mohou být různé, ale typicky se jedná o číslo portu, k němuž je dotyčné zařízení připojeno, kombinaci čísla portu a MAC adresy nebo podobné údaje. Pro tyto parametry se v oficiální terminologii SAVI používá pojem „kotevní bod“ (binding anchor). Vazby mezi nimi a IP adresami si ukládá do tabulky vazeb (Binding State Table, BST).
3. Následně pak dohlíží, aby datagramy odesílané daným zařízením dodržovaly uložené parametry – tedy aby zařízení s uloženými L2 parametry odesílalo jen datagramy s korektními zdrojovými IPv6 adresami.

Prvek implementující SAVI si musí uchovávat informace o vazbách mezi IPv6 adresami a příslušnými parametry linkové vrstvy. Zároveň je třeba pamatovat na situace, kdy dojde k jejich regulérní změně (počítač byl přepojen do jiného portu, mobilní telefon byl přenesen do jiné Wi-Fi buňky a podobně) a na problémové případy, kdy SAVI prvek příslušnou vazbu ve svých datech nemá, přestože by ji mít měl. Ty může způsobit například ztráta důležitého paketu nebo restart zařízení. Proto SAVI počítá i s reaktivním vytvořením vazby na základě běžného provozu daného koncového stroje.

Aby data o vazbách mezi IPv6 adresami a linkovými parametry nebyla příliš objemná a nezatěžovala zbytečně příslušný prvek, SAVI počítá s konceptem obranného perimetru. Stručně řečeno to znamená, že SAVI prvky vzájemně spolupracují, důvěřují si a ukládají si informace jen o „svých" ovečkách.

V praxi to znamená, že porty prvku implementujícího SAVI jsou rozděleny do dvou kategorií:

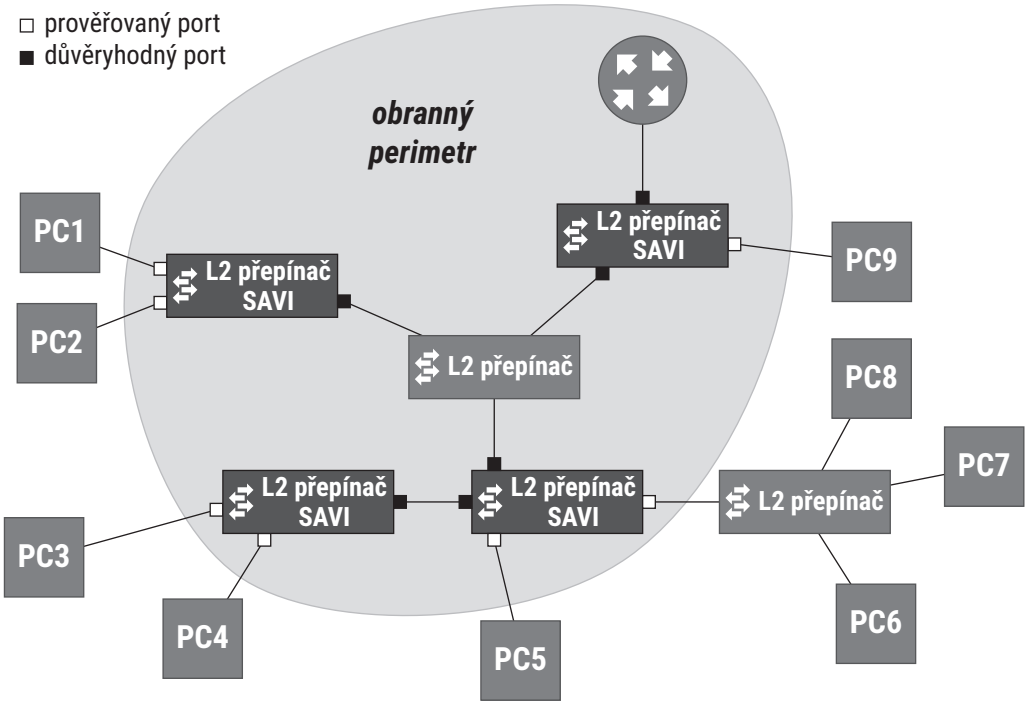
- **Důvěryhodný port** je takový, který vede k jinému SAVI prvku, směrovači nebo obyčejnému prvku, jehož všechny porty vedou k zařízením uvnitř obranného perimetru. Datagramy přicházející důvěryhodným portem se neprověřují a prvek si neukládá informace o jejich odesilatelích.
- **Prověřovaný port** vede mimo perimetr – ke koncovému zařízení nebo jednoduchému přepínači připojujícímu koncová zařízení. Jím přicházející provoz je prověřován a případně zahazován, pokud je považován za padělaný. Prověřovaným portem může přicházet jen lokální provoz[4], takže SAVI prvek například zahazuje zdejší datagramy, jejichž odesilatel neleží v některém z místních prefixů.

Koncept obranného perimetru ilustruje obrázek 6.14. Vidíte v něm, že prověřovány jsou jen ty porty, které vedou mimo obranný perimetr a za nimiž se nacházejí zařízení, kterým nelze důvěřovat. Přepínač vlevo nahoře si bude udržovat jen informace o zařízeních, jejichž provoz do obranného perimetru vstupuje přes něj, v tomto případě o strojích PC 1 a PC 2. Zároveň si všimněte, že u centrálního L2 přepínače je jedno, zda SAVI podporuje nebo ne. Všechny jeho porty jsou důvěryhodné, takže i kdyby SAVI implementoval, beztak by žádné pakety neprověřoval.

SAVI existuje v několika variantách pro různé mechanismy přidělování adres. Začněme tou nejstarší, nejméně náročnou a nejslabší, definovanou v RFC 6620: *FCFS SAVI: First-Come, First-Served Source Address Validation Improvement for Locally Assigned IPv6 Addresses*. Její základní myšlenkou je, že když se poprvé objeví IPv6 adresa, sváže se s číslem portu[5], ze kterého paket přišel, a následně SAVI prvek nepřipustí, aby adresy s tímto odesilatelem přicházely odjinud.

Z pohledu FCFS SAVI adresa náleží tomu, kdo ji poprvé použil, a brání jejímu pozdějšímu „zcizení". Slabinou je, že pokud by útočník předběhl legitimního vlastníka adresy, FCFS SAVI mu sedne na lep a bude potlačovat vlastníka. Výhodou je jednoduchost mechanismu. Odpadá analýza zpráv autokonfiguračních mechanismů, SAVI prvek se jednoduše učí z běžného provozu. Jedinou výjimkou je *Ohlášení směrovače*, které může použít ke zjištění platných prefixů pro zdejší adresy. Alternativou je jejich ruční nastavení.

4: Tranzitní provoz může korektně dorazit jen prostřednictvím směrovače a porty ke směrovačům jsou považovány za důvěryhodné.
5: FCFS SAVI připouští číslo portu (nebo jeho ekvivalent) jako jediný možný linkový parametr, s nímž bude IPv6 adresa svázána.



Obrázek 6.14: Obranný perimetr SAVI

Samozřejmě existují komplikace. První z nich je přesun prvku – může se stát, že je koncové zařízení přepojeno a jeho pakety zcela legitimně změní port. To je v FCFS SAVI ošetřeno pomocí detekce dosažitelnosti. Dorazí-li paket z jiného portu, SAVI prvek si ověří standardním způsobem, zda je původní odesilatel stále dosažitelný. Pokud ano, paket zahodí jako falešný. V opačném případě neplatnou vazbu smaže a poznamená si nové číslo portu.

Druhý problém do celé koncepce vnáší princip obranného perimetru a s ním spojené rozložení vazeb na jednotlivé SAVI prvky. Je třeba zabránit tomu, aby stejná IPv6 adresa byla uložena v několika SAVI prvcích s různými L2 vazbami. Proto když SAVI prvek poprvé uvidí IPv6 adresu, ověří si výzvou sousedovi, zda již někde v rámci obranného perimetru neexistuje. Dorazí-li ohlášení souseda, považuje příslušný datagram za padělaný a zahodí jej. V opačném případě si pro ni vytvoří a uloží příslušnou vazbu, protože adresa se v rámci perimetru skutečně objevuje poprvé.

Pokud se v lokální síti používá zabezpečené objevování sousedů (je popsáno v části 5.4 na straně 126, přichází ke slovu SEND SAVI. Velmi se podobá předchozí variantě, hlavním rozdílem je,

že bere v úvahu jen ty zprávy objevování sousedů, které jsou ověřeny pomocí SEND. Je definováno v RFC 7219: *SEcure Neighbor Discovery (SEND) Source Address Validation Improvement (SAVI)*.

Také SEND SAVI si udržuje tabulku vazeb mezi IPv6 adresami (v tomto případě CGA) a čísly portů, jimiž přichází provoz z nich. Pakety jejichž parametry nemá v tabulce, zahazuje. Může pro ně ovšem zahájit vytvoření nové položky, protože takový paket může znamenat, že se legitimní odesilatel přestěhoval jinam. V takovém případě provede test jeho dosažitelnosti na příslušném portu (pokud byl přímo připojen) a u sousedních SAVI prvků. Pokud oslovený stroj odpoví ze svého původního portu, vyhodnotí paket jako pokus podvrhnout adresu a zachová si původní obsah tabulky vazeb. Jestliže se odpovědi nedočká, tabulku si aktualizuje podle nového umístění stroje. Podobně se chová, pokud se objeví nová IPv6 adresa, jejíž dostupnost si některý z připojených strojů ověřuje pomocí detekce duplicit.

Také SEND SAVI umožňuje vybudovat obranný perimetr na stejných principech jako FCFS SAVI. Jako důvěryhodné jsou nastaveny porty vedoucí k ostatním SAVI prvkům a směrovačům, jako ověřované porty vedoucí ke koncovým strojům. Každý SAVI prvek se pak stará jen o stroje připojené přímo k sobě.

Pro sítě přidělující adresy prostřednictvím stavového DHCPv6[6] slouží varianta SAVI označovaná jako SAVI-DHCP. Její definici najdete v RFC 7513: *Source Address Validation Improvement (SAVI) Solution for DHCP*. Při jejím použití SAVI prvek poslouchá DHCP komunikaci a vazby mezi IP adresami a kotevními body vytváří podle ní. Pokud z určitého portu a určité MAC adresy dorazil DHCP požadavek a důvěryhodný DHCP server potvrdil žadateli přidělení adresy, zanese si SAVI-DHCP prvek tuto vazbu do své tabulky a začne propouštět IPv6 provoz od daného odesilatele.

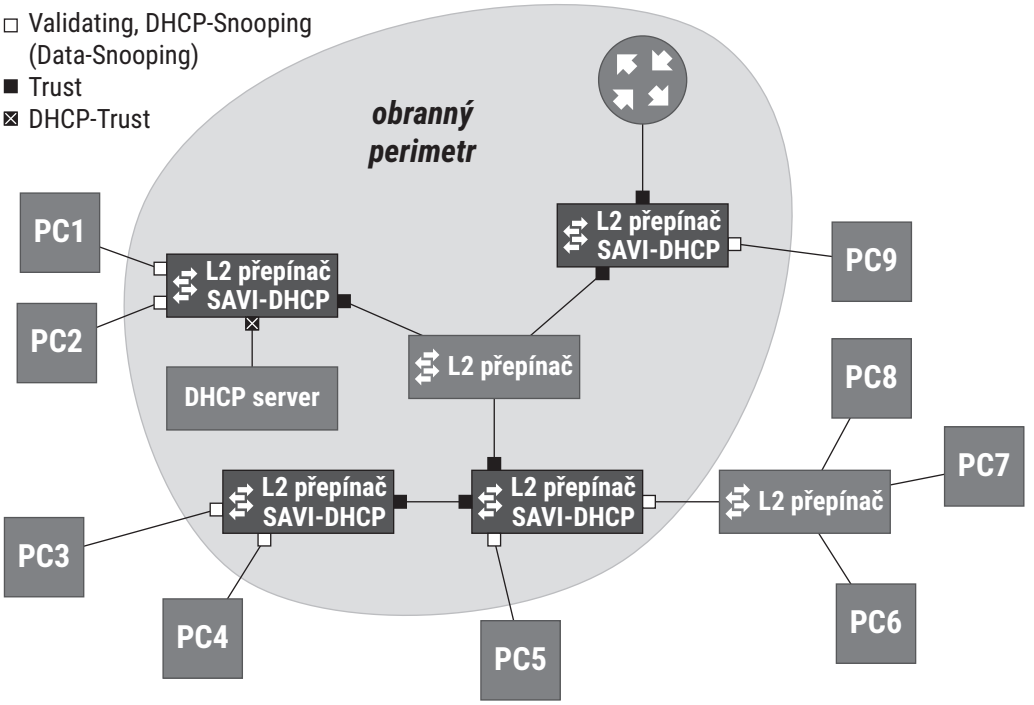
Portům, kterými jsou připojena různá zařízení, přiřazuje SAVI-DHCP prvek různé atributy. Z nich pak vyplývá, jak má zacházet s přicházejícími datagramy. Jsou definovány tyto atributy:

- *Trust (důvěryhodný)* je port vedoucí k jinému SAVI prvku, směrovači a podobně. Zdrojové adresy se zde neověřují, nevytvářejí se SAVI vazby, ale poslouchají se DHCP zprávy.
- *DHCP-Trust (důvěryhodné DHCP)* označuje port, k němuž je připojen důvěryhodný DHCP server. SAVI-DHCP prvek při vytváření vazeb bere v úvahu jen ty DHCP zprávy směřující od serveru ke klientovi, které dorazily portem s atributem Trust nebo DHCP-Trust.
- *DHCP-Snooping (odposlech DHCP)* se přiřazuje portům, kde se nacházejí klienti. Atribut znamená, že SAVI-DHCP prvek má poslouchat DHCP zprávy směřující od klienta k serveru a využívat je pro vytváření vazeb IP adres a L2 parametrů jednotlivých klientů.
- *Data-Snooping (odposlech dat)* představuje záložní variantu pro případ, že komunikace mezi DHCP klientem a serverem proběhla mimo SAVI-DHCP prvek. Je-li atribut nastaven, může vazba vzniknout i na základě běžného provozu.

6: Nebo DHCPv4, specifikace je společná pro obě verze IP.

- *Validating (ověřování)* se opět přiřazuje portům vedoucím ke klientům. Nařizuje kontrolovat zdrojové IP adresy datagramů přicházejících z daného portu a pokud pro ně neexistuje vazba, zahazovat je.

Opět se používá koncept obranného perimetru, v němž si jednotlivé SAVI prvky vzájemně důvěřují. RFC 7513 doporučuje nastavit portům vedoucím přímo či nepřímo ke klientům atributy Validating a DHCP-Snooping (případně Data-Snooping), portům propojujícím SAVI prvky mezi sebou atribut Trust a portům vedoucím k důvěryhodným DHCP serverům DHCP-Trust. Příklad takového uspořádání vidíte na obrázku 6.15.



Obrázek 6.15: Obranný perimetr SAVI-DHCP

Základ fungování SAVI-DHCP je formálně opsán v podobě stavových automatů. Při překladu do lidštiny znamená, že pokud klient prostřednictvím DHCP požádá o IPv6 adresu a důvěryhodný server mu ji potvrdí, vytvoří si SAVI-DHCP prvek, k němuž je připojen, vazby mezi jeho IP adresou a linkovými parametry. Následně pak bude propouštět datagramy, jejichž odesilatel odpovídá dané vazbě. Respektuje se i to, že v DHCP se adresy propůjčují na omezenou dobu, čili vazby mají omezenou trvanlivost.

Specifikace počítá i s tím, že SAVI prvek nemusel DHCP provoz slyšet. To přichází v úvahu u složitějších topologií, kdy se mezi DHCP klientem a serverem nachází více cest nebo se dynamicky mění. Má-li SAVI prvek pro určitý port nastaven atribut Data-Snooping a dorazí-li jím datagram s odesilatelem, který neodpovídá žádné platné vazbě, standardně jej zahodí, ale může zároveň zahájit proces vytvoření nové vazby. Během něj si nejprve detekcí duplicit ověří, zda zdrojovou adresu nepoužívá někdy jiný. Následuje dotaz DHCP serveru (zprávou LEASEQUERY), jestli inkriminovanou adresu skutečně přidělil. Dopadnou-li oba testy úspěšně, vytvoří si v tabulce novou vazbu a další datagramy z tohoto zdroje již bude posílat dál.

Autoři opakovaně zdůrazňují, že odposlech dat zařízení významně zatěžuje. Proto doporučují jej implicitně vypnout a zapínat jen v situacích, kdy je topologie složitá nebo dynamická a DHCP zprávy by mohly SAVI prvek minout. Také zavedli minimální interval (implicitně 60 s) mezi datagramy na jednom portu, které tento proces spustí.

Jak jste viděli, existuje několik variant SAVI pro různé způsoby přiřazování IPv6 adres. Ty lze ovšem v jedné síti kombinovat a tomu odpovídá i nutnost kombinovat několik variant SAVI. Například lokální linkové adresy si zařízení vždy přidělují sama bezstavovou konfigurací. Pro ně tedy přichází v úvahu jen FCFS SAVI. Jestliže ale regulérní adresy přidělujete pomocí DHCP, bude pro ně třeba nasadit DHCP-SAVI.

Kombinováním několika variant SAVI se zabývá RFC 8074: *Source Address Validation Improvement (SAVI) for Mixed Address Assignment Methods Scenario*. Jedná se o celkem minimalistický dokument, který ve stručnosti říká:

- Pokud je to jen trochu možné, přidělte různým metodám přiřazování adres různé prefixy, aby si vzájemně nelezly do zelí. Každou pak řešte příslušnou variantou SAVI.
- Tabulka vazeb je společná pro všechny varianty SAVI na jednom zařízení. Filtrování paketů pracuje s touto společnou tabulkou.
- Pokud se adresní prostory různých metod překrývají a dojde ke konfliktu (stejná IPv6 adresa na různých portech), má obecně přednost první položka. Výjimkou jsou CGA, kde má přednost ten, kdo pomocí SEND doložil, že daná kryptografická adresa je skutečně jeho.
- Lze konfigurovat výjimky v podobě trojic (prefix, kotevní bod, metoda), kdy omezíte, že určité záznamy mohou být do tabulky vloženy, jen pokud odpovídají těmto trojicím.

6.9 Jednoduchá detekce připojení

Výše popsané konfigurační mechanismy potřebují ke své práci určitý čas. Většina z nás si pravděpodobně nebude dělat těžkou hlavu ze „zpoždění až 3,5 s“, jímž je zatížena bezstavová konfigurace, nicméně existují snahy o rychlejší nastavení síťových parametrů. Jejich výsledkem je algorit-

mus *jednoduché detekce síťového připojení* (v originále též zkracovaný jako *simple DNA*) definovaný v RFC 6059: *Simple Procedures for Detecting Network Attachment in IPv6*.

Nejedná se o nic fundamentálního, dá se žít docela dobře bez něj (a žije se, protože zatím to s implementacemi nevypadá nijak slavně). Na druhé straně ale nepotřebuje žádné úpravy okolního prostředí, celý postup staví na standardních konfiguračních zprávách a odehrává se výlučně v koncovém zařízení. Pokud detekci implementuje, nakonfiguruje se v řadě případů rychleji. V opačném případě se nic neděje a vše probíhá konvenčními postupy.

Jednoduchá detekce připojení prospívá zejména uzlům, které střídají malý počet sítí. Typickým příkladem je notebook, který náhodně zapojujete v práci a doma. V důsledku toho střídá dvě sady síťových parametrů. Díky jednoduché detekci může rychle zjistit, že se nachází v jedné z těchto známých sítí a nastavit si parametry, které v ní používal minule.

Základní datovou strukturou jednoduché detekce připojení je tabulka adres zvaná *Simple DNA Address Table (SDAT)*. Je indexována identifikátory lokálních směrovačů, s nimiž se stroj během své nedávné síťové historie setkal. Jako identifikátor se používá kombinace lokální linkové IPv6 adresy a linkové (MAC) adresy daného směrovače. Obsahuje adresu (či adresy), již stroj ve spojitosti s tímto směrovačem používal, doprovodné informace k ní (jakým mechanismem byla získána a informace specifické pro použitý mechanismus) a zda je použitelná.

Když stroj dostane informaci od linkové vrstvy, že se právě podařilo připojit k lince, provede paralelně několik kroků:

- Všechny právě nastavené IPv6 adresy označí jako nepoužitelné. V cache sousedů označí položky všech směrovačů jako prošlé.
- Na skupinovou adresu všech směrovačů na lince (ff02::2) zašle výzvu směrovači (čili zahájí bezstavovou automatickou konfiguraci).
- Pokud adresy získal protokolem DHCPv6, zahájí DHCPv6 výměnu k jejich obnovení.
- Projde SDAT a každému směrovači, pro který existuje v tabulce alespoň jedna platná adresa, pošle výzvu sousedovi.

Dostane-li jako odpověď ohlášení směrovače nebo DHCP zprávu, postupuje dál obvyklým způsobem, odpovídajícím bezstavové či stavové konfiguraci. Jedinou specialitou je, že nastavené adresy zároveň ukládá do SDAT ve spojení s příslušným směrovačem. To se samozřejmě týká i všech pozdějších změn v automaticky nastavených adresách, ať už k nim dojde z jakýchkoli důvodů.

Nad rámec obvyklých mechanismů jde zmíněné oslovování směrovačů s platnými adresami v SDAT. Pokud odpoví některý z nich, zařízení aktivuje s ním spojené adresy z SDAT a nastaví je příslušnému rozhraní. Pokud by snad došlo ke konfliktu mezi informacemi získanými touto cestou

a některým ze standardních mechanismů automatické konfigurace, mají vždy přednost standardní mechanismy.

RFC 6059 předpokládá, že si zařízení bude v SDAT uchovávat vždy jen údaje z několika naposledy navštívených sítí a starší bude průběžně mazat.

Významným omezením jednoduché detekce připojení je, že se zabývá výlučně adresami. Nestará se o směrování, DNS servery ani jiné konfigurační parametry. To do značné míry omezuje její užitečnost – stroj s platnou adresou, který nesměruje, si svou adresu příliš neužije. Jednoduchá detekce může být drobným přínosem, ale základ bude vždy spočívat na bezstavové či stavové automatické konfiguraci.

7 Směrování a směrovací protokoly

Ve všech možných nadstavbách a podpůrných mechanismech by člověk skoro mohl zapomenout, že základním úkolem IP je směrování. Tedy hledání cest, kudy odeslat datagram k danému cíli. Teď se podíváme, jak to IPv6 dělá.

7.1 Elementární směrování

Přestože profesionály v oboru směrování jsou – jak jinak – směrovače, směrovat musí každé zařízení podporující IPv6. Ten nejjednodušší přístup ke směrování lze realizovat na bázi automatické konfigurace (viz část 6.3 na straně 141). Pokud si to však zařízení může kapacitně dovolit, je vhodnější použít jemnější přístup. Stejný dnes používá valná většina zařízení pro IPv4.

Jeho výchozí datovou strukturou je *směrovací tabulka*. Ta obsahuje informace „k cíli A se chodí tudy, k cíli B tamtudy, k cíli C támhletudy a všechno ostatní předáváme semhle“. Jednotlivé cíle jsou identifikovány prostřednictvím IPv6 prefixů (ukládá se jak vlastní prefix, tak jeho délka).

Pro každý cíl směrovací tabulka obsahuje první krok cesty k němu – buď informaci, že cíl je přímo připojen a paket se má předat rovnou adresátovi, nebo adresu některého ze sousedních zařízení, kterému se datagramy směřující k tomuto cíli mají přeposílat.

Poněkud speciální roli hraje *implicitní cesta (default route)*, která slouží jako „krabička poslední záchrany“ pro ty adresy, ke kterým v tabulce neexistuje specifický záznam. Implicitní cesta je dána prefixem s nulovou délkou. Prefix by v principu mohl být libovolný – vzhledem k nulové délce na něm nezáleží. Doporučuje se však používat samé nuly, což je běžně zažitá konvence. Implicitní cesta je tudíž dána prefixem ::/0.

Tabulka může obsahovat i individuální záznamy pro jednotlivé adresy. V takovém případě je prefixem celá adresa a má délku 128. Tím se de facto implementuje cache cílů. Přidáním lokálních prefixů pak směrovací tabulka plně nahradí rozhodování popsané na obrázku 6.6 na straně 142 a nabídne mnohem více.

Jednoduchý příklad směrovací tabulky vidíte na obrázku 7.1. Pochází z běžného uživatelského počítače s jedinou ethernetovou kartou (rozhraní *eth0*), který je zapojen do lokální sítě. Z ní vede jediná cesta ven, a sice přes směrovač s adresou fe80::1. V podobné situaci se nachází drtivá většina strojů v Internetu. Jejich tabulka proto bude, až na konkrétní hodnoty adres, velice podobná.

První záznam najdete v každém zařízení podporujícím IPv6 – jedná se o lokální smyčku (loopback), tedy možnost hovořit sám se sebou. U počítačů je to normální, na rozdíl od lidí. Záznam 2 řeší směrování datagramů posílaných na lokální linkové adresy. Sděluje, že lokální linkové adresy

	cíl	*předat na adresu*	*rozhraní*
1	::1/128	::	lo
2	fe80::/64	::	eth0
3	2001:db8:1:3::/64	::	eth0
4	ff00::/8	::	eth0
5	::/0	fe80::1	eth0

Obrázek 7.1: Příklad směrovací tabulky koncového počítače

(prefix fe80::/64) se doručují přímo rozhraním *eth0*. Záznam 3 řeší totéž pro globální individuální adresu počítače, která se nachází v podsíti 2001:db8:1:3::/64. Skupinově adresované datagramy mají prefix ff00::/8 a podle záznamu 4 jsou opět doručovány přímo do rozhraní *eth0*, podrobněji se jim budu věnovat v kapitole 8 na straně 189. A konečně pátý záznam oznamuje, že všechny ostatní adresy mají být předávány implicitnímu směrovači s adresou fe80::1 (všimněte si, že je použita jeho lokální linková adresa).

Když má daný stroj předat datagram, vyhledá ve své směrovací tabulce všechny záznamy, jejichž cíl odpovídá cílové adrese datagramu. Může jich být několik s různou délkou prefixů (například prefix ::/0 odpovídá libovolné adrese, implicitní směrovací záznam bude proto pokaždé zařazen mezi kandidáty). Z nich vybere ten, jehož prefix je nejdelší, a datagram odešle podle údajů v něm obsažených.

Toto je základní směrovací algoritmus, podle kterého se řídí každé zařízení používající IPv6. Ve srovnání s IPv4 se elementární směrování nezměnilo ani o chlup.

7.2 Směrovací protokoly

Otázkou je, jak je směrovací tabulka rozsáhlá a jakým způsobem vzniká. Ve většině případů (koncové počítače) je velmi jednoduchá, jak jste viděli na obrázku 7.1. Nic složitého není potřeba – zdejším počítačům se data odesílají přímo, o vše ostatní se postará implicitní směrovač. Takováto tabulka bývá statická a může vzniknout na základě bezstavové automatické konfigurace nebo být pevně nakonfigurována.

Směrovače často bývají v komplikovanější pozici. Propojují větší či menší množství sítí a tomu odpovídá i rozsah jejich směrovacích tabulek. Měly by reagovat na změny v topologii sítě a směrování jí dynamicky přizpůsobovat. Proto používají *směrovací protokoly*, kterými se navzájem informují o situaci a na základě těchto údajů pak upravují své tabulky. Směrovací protokol je tedy

nástroj, který slouží k výměně informací o topologii sítě a k adaptaci směrovacích tabulek podle ní. V tomto případě hovoříme o dynamickém směrování.

Nejhorší je pochopitelně role těch směrovačů, které mají zvládat celý Internet. Jejich tabulky jsou skutečně monumentální. Aby se daný objem vůbec dal zvládnout, používá se hierarchické přidělování adres a odpovídající směrování. Síť (ať už koncová, regionální či rozlehlá síť poskytovatele připojení) dostane přidělen určitý prefix a veškeré její adresy z něj vycházejí. Mimo danou síť pak směrovačům stačí znát tento společný prefix a podle něj dopraví data do cílové sítě. Teprve v ní se začne posuzovat podle podrobnějších (delších) prefixů, do které konkrétní části sítě má datagram směřovat[1].

Praktický příklad: Můj počítač s adresou 2001:718:1c01:20:21c:32ff:fe5c:b5e1 se nachází v budově A sítě Technické univerzity v Liberci, která je připojena do akademické sítě CESNET2. Když mi odesílá datagram server řekněme z Japonska, je zdejším směrovačům srdečně jedno, v jaké je budově a k jaké univerzitě patří. Mají jediný prefix pro celou síť CESNET2 (konkrétně 2001:718::/32) a podle něj datagram dopraví až do ní. Jakmile dorazí do CESNET2, zdejší směrovače už mají v tabulkách delší prefixy pro sítě jednotlivých univerzit. Budova (tedy podsíť) je z jejich pohledu stále ještě nezajímavá, bude se směrovat nejprve podle prefixu libereckého uzlu (2001:718:1c00::/40) a po příchodu do něj podle prefixu TU v Liberci 2001:718:1c01::/48. Až když dorazí do univerzitní sítě, začne se při směrování posuzovat prefix sahající až po adresu podsítě (2001:718:1c01:20::/64), datagram bude dopraven do patřičné podsítě v budově A a v ní pak mému oblíbenému počítači. Stejný přístup se dnes používá i v IPv4 pod názvem CIDR.

Toto shlukování prefixů provádějí směrovače. Například směrovač, jehož prostřednictvím je připojena síť naší univerzity, sice zná topologii zdejších podsítí, ale směrem ven (tedy ostatním směrovačům sítě CESNET2) ohlašuje jen jedinou položku: prefix celé naší sítě 2001:718:1c01::/48.

Aby se vše dalo organizačně zvládnout, je Internet rozdělen na tak zvané *autonomní systémy (AS)*. Autonomní systém je tvořen skupinou sítí, které mají jednotnou správu a směrovací politiku. Například běžný poskytovatel Internetu má přidělen svůj autonomní systém, do nějž patří jeho vlastní páteřní síť a sítě zákazníků k ní připojené.

Existence autonomních systémů rozděluje směrovací protokoly do dvou skupin. Jako *Internal Gateway Protocol (IGP)* jsou označovány ty protokoly, které slouží ke správě směrovacích tabulek uvnitř jednoho autonomního systému. Zde bývá situace relativně jednoduchá a dotyčné protokoly se snaží především o to, aby rychle reagovaly na změny v síti. V současné době existují tři IGP protokoly použitelné pro IPv6: RIPng, IS-IS a OSPFv3.

1: Trochu zjednodušuji, ale v zásadě je to tak.

External Gateway Protocol (EGP) naproti tomu slouží k výměně směrovacích informací mezi různými autonomními systémy. Protokoly této kategorie drží Internet pohromadě – jejich prostřednictvím se směrovače dozvídají, kudy do kterého autonomního systému a jaké prefixy jsou v něm dostupné. Vstupní směrovač autonomního systému tudíž má ve svých tabulkách prefixy do celého Internetu a musí mít adekvátní kapacitu.

Protokoly ze skupiny EGP usilují především o to, aby vůbec zvládly obrovské objemy informací, které musí přenášet. Proto jsou ve srovnání s IGP konzervativnější a reagují pomaleji. V současné době se používá jediný protokol této třídy – BGP4. Pro IPv6 slouží jeho upravená verze BGP4+.

7.3 RIPng

Routing Information Protocol (RIP) patří mezi internetové veterány. Byl navržen a implementován již ve velmi raných dobách a dodnes nachází využití především v koncových sítích.

Protokol má několik závažných omezení (především velmi malou maximální délku cesty a pomalejší reakci na změny), je však velmi jednoduchý. Díky tomu jeho implementaci najdete prakticky v každém systému. Máte-li nepříliš rozsáhlou síť, kterou chcete dynamicky směrovat, je RIP nejjednodušší cestou.

RIPng představuje reinkarnaci starého dobrého protokolu. Vychází z druhé verze RIPu, která byla definována v první polovině devadesátých let ve snaze odstranit některé nedostatky původního protokolu. Ve srovnání s RIPv2 se RIPng liší prakticky jen v tom, že používá adresy ve formátu IPv6. Je definován v RFC 2080: *RIPng for IPv6*.

Jedná se o protokol založený na vektoru vzdáleností. Linky a sítě, propojující jednotlivé směrovače, mají přiřazenu určitou cenu. Má-li datagram projít jistou cestou, určí se její celková cena (vzdálenost, metrika) součtem cen linek, z nichž se skládá. RIPng se snaží, aby datagramy k danému cíli vždy dorazily cestou s nejmenší celkovou cenou.

Daný ideál je realizován tak, že stroj používající RIP si k jednotlivým cílům ve směrovací tabulce poznamenává i údaj o tom, jak dlouhá je cesta k nim. V půlminutových intervalech údaje ze své tabulky pošle všem sousedům. Když sám obdrží tabulku od některého ze sousedů, přičte si k ní cenu linky, kterou ohlášení dorazilo, a porovná s údaji ze své tabulky. Pokud se dozví o novém cíli, lepší cestě nebo se cesta vedoucí přes tento sousední směrovač zhoršila, upraví svou tabulku.

RIPng je určen pro menší sítě, čemuž odpovídá zvolená metrika pro oceňování cest. Povolenými hodnotami jsou celá čísla v rozsahu 1–15, hodnota 16 už představuje nekonečno, tedy nedosažitelný cíl. Důsledkem je, že správce sítě nemá prakticky žádný prostor k tomu, aby vhodně zvolenou

cenou vyjádřil průchodnost. Ve valné většině případů se všechny linky oceňují hodnotou 1 a cena cesty pak vyjadřuje, kolika linkami datagram po své cestě projde (anglicky se tomu říká hop count).

Směrovací tabulka musí pro potřeby RIPng ke každému cíli obsahovat následující údaje:

- prefix cíle (jeho hodnotu a délku),
- metriku odpovídající celkové ceně cesty,
- adresu dalšího směrovače na cestě (komu má předávat datagramy směřující k tomuto cíli),
- příznak změny (zda se v poslední době změnila),
- časovače: dobu platnosti a likvidační interval.

Pokud se týče sítí, ke kterým je dotyčný stroj přímo připojen, tam adresa dalšího směrovače chybí a metrika je rovna ceně této linky (zpravidla 1).

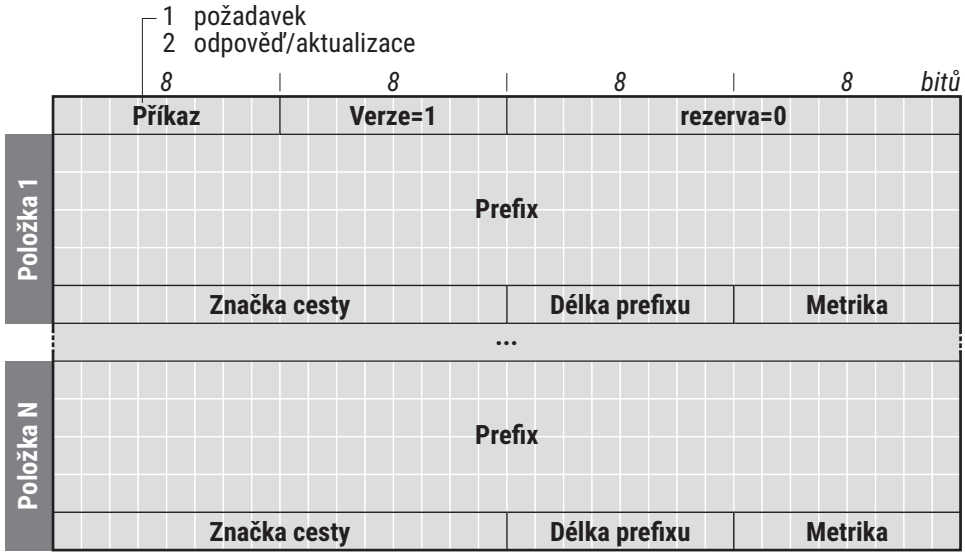
Údaje ze své tabulky posílá v následujících případech:

- *pravidelná aktualizace* zasílaná každých 30 s; aby nedocházelo k nežádoucí synchronizaci mezi zprávami jednotlivých směrovačů, je tento interval vždy posunut o náhodný čas z intervalu od –15 s do 15 s,
- *aktualizace vyvolaná změnou (triggered update)*, kterou zasílá, když došlo ke změně jeho směrovacích tabulek,
- *odpověď na požadavek*, když některý ze sousedů požádá o informace.

V prvních dvou případech se aktualizace posílá všem sousedům. Konkrétně ji stroj zašle do všech sítí, k nimž je přímo připojen, na skupinovou adresu pro všechny RIPng směrovače ff02::9. Odpověď se pak posílá jen tomu, kdo zaslal požadavek.

Formát zprávy protokolu RIPng vidíte na obrázku 7.2. Je poměrně jednoduchý – v prvních dvou bajtech je identifikována *Verze (Version)* protokolu (v současnosti 1) a *Příkaz (Command)*. Ty jsou k dispozici jen dva. Hodnota 1 signalizuje požadavek, hodnota 2 odpověď či aktualizaci. Zbytek zprávy tvoří záznamy odpovídající položkám ze směrovací tabulky.

Položky popisující jednotlivé cíle obsahují v první řadě *Prefix* a jeho *Délku (Prefix len)*, které určují cíl této položky. Dále je v něm uvedena *Metrika (Metric)*, tedy vzdálenost k cíli ze směrovače, jenž položku odeslal. *Značka cesty (Route tag)* pak může obsahovat atribut, který je cestě přiřazen, musí s ní být uchován a dále redistribuován. Slouží k tomu, aby se jeho prostřednictvím mohly předávat informace získané z jiných směrovacích protokolů, které v RIPng nemají žádný význam, ale při konverzi do jiného směrovacího protokolu na dalším směrovači by jej opět mohly nabýt. Tyto informace se tedy mechanicky předávají, protože možná někomu dalšímu k něčemu budou.



Obrázek 7.2: Formát zprávy pro RIPng

Výše uvedené tři případy rozesílání tabulky se liší především tím, jaké informace bude obsahovat. Při *pravidelné aktualizaci* se odešle kompletní směrovací tabulka[2].

Aktualizace vyvolaná změnou bude obsahovat jen ty položky, které mají nastaven příznak změny. Následně se příznak vynuluje, protože změny byly právě ohlášeny. Tuto aktualizaci stroj odešle, když dojde ke změně jeho směrovacích tabulek (například po obdržení informací od souseda nebo změní-li se stav některé z přímo připojených sítí). Cílem je, aby se sousedé o této změně dozvěděli pokud možno co nejdříve. Lze očekávat, že u nich také vyvolá změnu směrovací tabulky a následně i oni zašlou vyvolanou aktualizaci svým sousedům a tak dále. Informace se díky tomu celkem rychle rozšíří po celé síti.

Potenciální problém spočívá v tom, aby ke změnám nedocházelo až příliš často. Proto se vždy po odeslání zprávy s vyvolanou aktualizací nastaví čítač na náhodnou dobu z rozsahu 1–5 s. Po tuto dobu je zablokováno zasílání vyvolaných aktualizací. Všechny změněné údaje budou odeslány až po jeho vypršení v jedné společné aktualizaci.

Odpověď se váže na požadavek a obsahuje ta data, o která si vyzyvatel řekl. Požadavek je konstruován stejně jako aktualizace, až na to, že obsahuje kód příkazu 1. Jeho položky stanoví, o které cesty

2: Některé cesty mohou být vynechány – viz algoritmus rozděleného horizontu, který je popsán dále.

má tazatel zájem. Existuje speciální případ, kdy dotazovaný má zaslat svou kompletní směrovací tabulku. Takový požadavek musí obsahovat právě jednu položku, v níž má *Prefix* i *Délka prefixu* hodnotu 0 a *Metrika* je rovna 16.

Jako odpověď na tento speciální požadavek pošle dotázaný směrovač celou svou tabulku, jako při pravidelné aktualizaci. V opačném případě projde položky v požadavku a sestaví z nich odpověď. Pokud má daný cíl ve své směrovací tabulce, vloží odpovídající informace. Jestliže cíl ve směrovací tabulce nemá, zařadí pro něj do odpovědi metriku 16. Sestavenou odpověď pak zašle žadateli.

Sekvenci požadavků a odpovědí lze využít například ke sledování stavu a činnosti směrovače. Nejčastější využití však najde při startu směrovače. Aby se co nejrychleji naučil směrovat, rozešle všem sousedům žádost o jejich kompletní tabulky a na jejich základě sestaví své.

Je-li směrovací tabulka rozsáhlejší, může vzniknout problém s velikostí zprávy. Ta nesmí překročit MTU linky, do které je zasílána. Pokud by měla být větší, musí se rozdělit do několika datagramů.

Při příchodu aktualizace či odpovědi od některého ze sousedů ji příjemce porovná se svými záznamy. Prochází jeden záznam z aktualizace za druhým a zpracovává jej. Nejprve k metrice přičte cenu linky, kterou zpráva dorazila. Pokud je výsledná hodnota větší než 16, upraví ji na 16 (nekonečno).

Následně pak záznam porovná se svou tabulkou. Jestliže v ní daný cíl ještě nemá a metrika je menší než 16, přidá si cíl do směrovací tabulky, nastaví mu příznak změny cesty a signalizuje odesílací části, že je třeba vyslat aktualizaci vyvolanou změnou.

Pokud daný cíl už má v tabulce, zajímá se o adresu dalšího směrovače pro něj. Pokud se liší od odesilatele aktualizace a metrika v aktualizaci je kratší, přepíše si záznam ve směrovací tabulce. Nastaví v ní metriku a další směrovač podle aktualizace, nastaví příznak změny a požádá o zaslání vyvolané aktualizace.

Jestliže má ve směrovací tabulce jako další směrovač pro daný cíl uvedeného odesilatele aktualizace, postupuje poněkud odlišně. Pokud se metrika v aktualizaci liší od směrovací tabulky, uloží si ji[3], nastaví příznak změny a také tentokrát požádá o odeslání vyvolané aktualizace. Je-li metrika stejná, jen si poznamená, že dotyčná cesta je stále platná.

Každá položka má totiž přidělen časovač, udávající její platnost. Při jejím založení, změně či potvrzení platnosti se nastaví na 180 s. Pokud potvrzení nepřichází, doba platnosti klesá až k nule. Dojde-li do této hodnoty, znamená to, že položka je neplatná a bude odstraněna.

3: I v případě, že je větší než stávající hodnota ve směrovací tabulce. Cesta vede přes tento směrovač a pokud se zhoršila, je třeba to akceptovat. Třeba to dá šanci cestě vedoucí jinudy, která se teď prosadí.

Likvidace položky může být vyvolána dvěma událostmi: když vyprší její doba platnosti nebo když směrovač, přes nějž vedla, ohlásí metriku 16. V obou případech je inicializován likvidační interval na hodnotu 120 s. Kromě toho se položce nastaví metrika 16 a příznak změny. Výstupní části se předá požadavek na odeslání vyvolané aktualizace.

Během likvidačního intervalu je položka zařazována do všech odpovědí a aktualizací. Pokud v této době dorazí nová položka pro daný cíl, zapíší se odpovídající údaje a likvidační interval bude zrušen. V opačném případě interval vyprší a položka bude odstraněna ze směrovací tabulky.

Chování RIPng v konkrétní situaci ilustruje obrázek 7.3. Jeho část a) znázorňuje výchozí situaci pro cílovou síť X. U každého směrovače je uvedena metrika, kterou danému cíli přiřadil, a šipka znázorňuje směrovač, přes nějž vede cesta s touto metrikou.

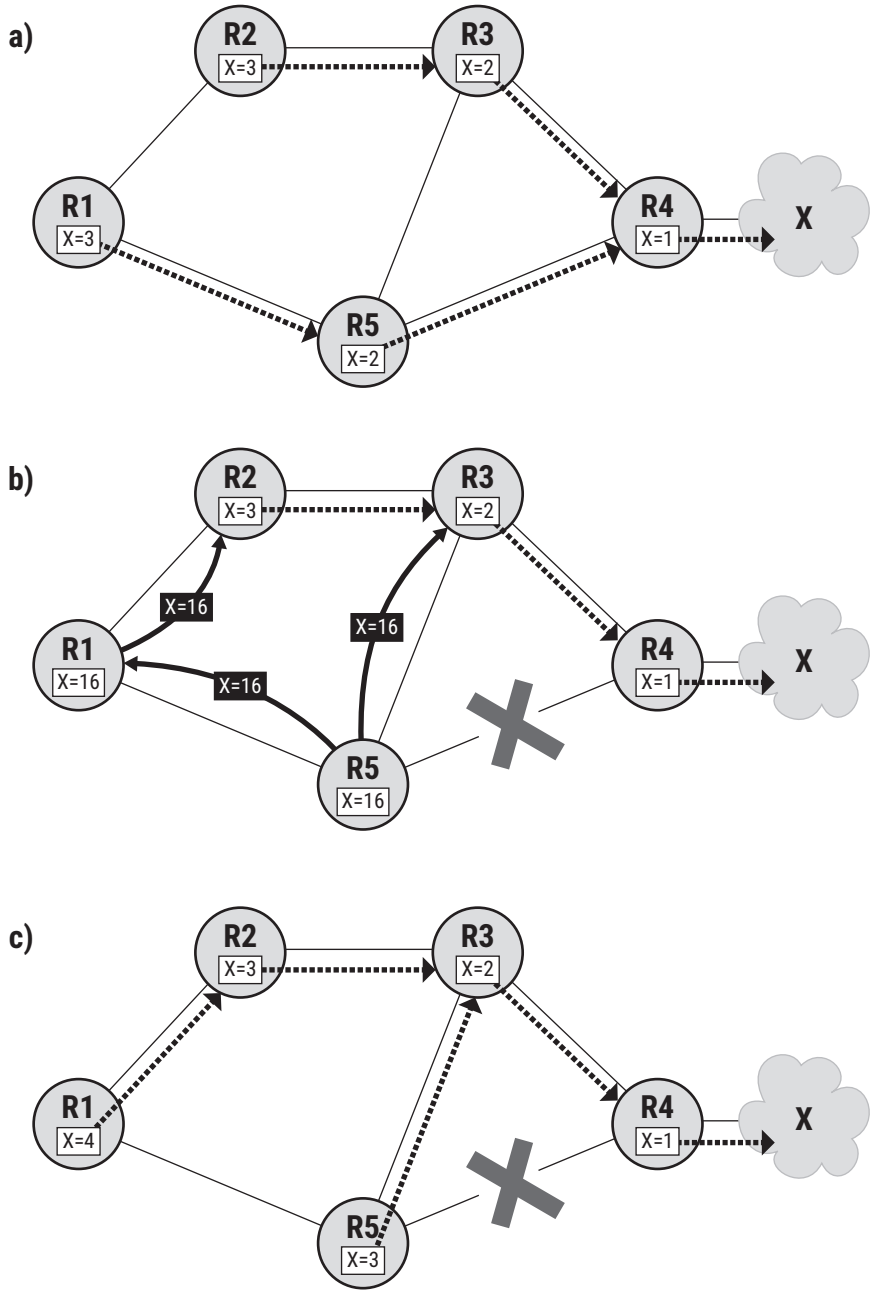
Na obrázku 7.3b došlo k přerušení spoje mezi směrovači R4 a R5. Pro směrovač R5 to znamená, že cíl X se pro něj stal nedosažitelným (směrovač, přes nějž vedla cesta, je nyní nedostupný). Musí si změnit metriku na 16 a informuje o tom své sousedy vyvolanou aktualizací. Směrovač R3 tuto zprávu ignoruje, protože zná lepší cestu k X. Naproti tomu nejlepší cesta ze směrovače R1 vedla přes R5. Proto si musí poznamenat novou metriku do své tabulky a informovat o této změně svého souseda R2. Ten však opět zná lepší cestu, takže svou tabulku nezmění.

Pro směrovače R1 a R5 je nyní síť X nedostupná. Teprve až jim dorazí aktualizace od směrovačů R2 a R3 (mohou věci urychlit zasláním požadavku na cestu k *X*), dozvědí se o existenci alternativní cesty. Výsledné cesty v daném případě závisí na tom, v jakém pořadí budou aktualizace odeslány, protože se směrovači R1 nabízejí dvě stejně dlouhé cesty.

Obrázek 7.3c vznikl takto: Nejprve odeslal svou aktualizaci směrovač R2. Směrovač R1 se tak dozvěděl o cestě k cíli X, která vede přes R2 a má délku 4. Zanesl si ji do směrovací tabulky a ihned odeslal vyvolanou aktualizaci. Díky ní si směrovač R5 poznamenal cestu k X vedoucí přes R1 s metrikou 5 a také on odeslal vyvolanou aktualizaci, která však žádnou senzaci nezpůsobila. Když k němu za chvilku dorazila aktualizace od směrovače R3, dozvěděl se o lepší cestě s délkou 3. Tu si hbitě poznamenal a vyvolanou aktualizací o tom informoval směrovač R1.

Ten se nyní ocitl v situaci „osel a dvě kupky sena“. Byla mu ohlášena jiná cesta k cíli X, jejíž délka se shoduje s cestou v jeho směrovacích tabulkách. RIPng v takovém případě doporučuje být konzervativní a zůstat věrný cestě, která je obsažena ve směrovací tabulce, aby se nezasílalo zbytečně mnoho vyvolaných aktualizací. Jedinou výjimkou je, pokud se dotyčné položce ve směrovací tabulce krátí životnost. Hrozí-li její brzké vypršení, je doporučeno přejít na novou stejně dlouhou cestu a předejít tak hrozící krátkodobé nedostupnosti daného cíle.

Námět k zamyšlení: Jak by se vyvíjely metriky a cesty, kdyby směrovač R3 poslal svou pravidelnou aktualizaci dříve než směrovač R2?



Obrázek 7.3: Reakce RIPng na změnu v síti

Jeden z problémů původního RIPu byl způsobován ohlašováním cest těm směrovačům, přes něž vedly. Například směrovače R3 a R5 z obrázku 7.3a by ohlašovaly směrovači R4, že znají cestu k síti X s metrikou 2, která vede právě přes směrovač R4, což ale ze zprávy RIP není patrné, v ní je jen cíl a vzdálenost.

Kdyby ten ztratil spojení se sítí X a vzápětí dostal toto ohlášení, zaznamenal by si do směrovací tabulky, že k cíli X zná cestu například přes směrovač R5 s metrikou 3. Tím se však směrování zacyklí – datagramy směřující do sítě X si směrovače R4 a R5 budou předávat mezi sebou, dokud nevyprší jejich životnost. S dalšími aktualizacemi se metrika pro síť X bude zvětšovat (směrovač R4 nyní ohlásí metriku 3, takže R3 a R5 si svou metriku zvětší na 4 atd.), ale potrvá určitý čas, než dospěje k hodnotě 16, která podle pravdy vyjadřuje, že síť X je nedostupná.

Vyvolané aktualizace (které původní RIP neměl) podstatným způsobem zkracují dobu, kterou toto poznání pravdy trvá. Nicméně je lepší, aby podobné situace byly z principu vyloučeny. O to se stará mechanismus nazvaný *rozdělený horizont (split horizon)*. Jeho myšlenka je prostá: cíle se neohlašují tomu, od koho je máme. Exaktně řečeno se z ohlášení zasílaného do určité sítě vynechají všechny cíle, pro které leží první krok cesty v dané síti.

Existuje ještě jiná varianta tohoto algoritmu nazvaná *otrávený návrat (poisoned reverse)*. V ní se dotyčné cíle do aktualizace sice zařazují, avšak přiřadí se jim metrika 16. Je doporučeno, aby směrovač používal některou z těchto dvou variant.

7.4 OSPF

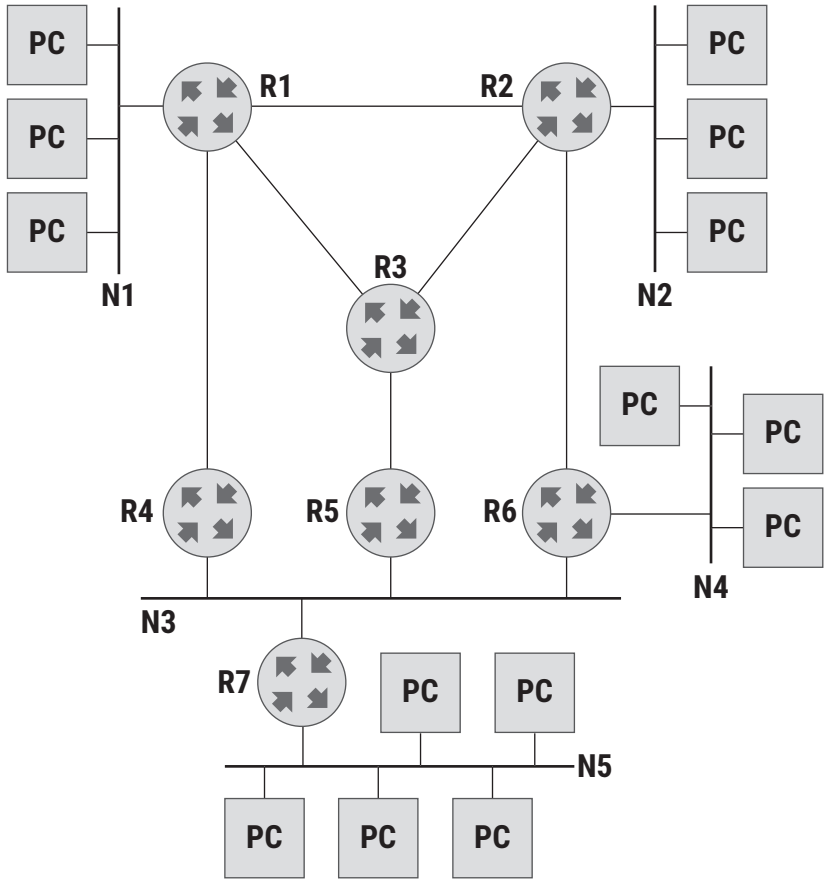
Open Shortest Path First (OSPF) je podstatně mladší, složitější a rafinovanější protokol než starý dobrý RIP. Není založen na vektoru vzdáleností, ale na stavu linek. To znamená, že každý směrovač v síti používající OSPF si udržuje aktuální mapu této sítě. Obsahuje informace o tom, kdo je s kým jak propojen, jaké jsou prefixy jednotlivých podsítí, ceny linek a podobně.

OSPF dbá na to, aby všechny směrovače v síti měly stejnou mapu. Kdykoli u některého z nich dojde ke změně, okamžitě o tom informuje všechny ostatní směrovače, aby si aktualizovaly svou mapu. Z ní si každý spočítá strom nejkratších vzdáleností ke všem známým cílům, jehož kořenem je on sám. Tak zjistí, kudy od něj vede nejkratší cesta ke každému cíli a zanese si ji do směrovací tabulky.

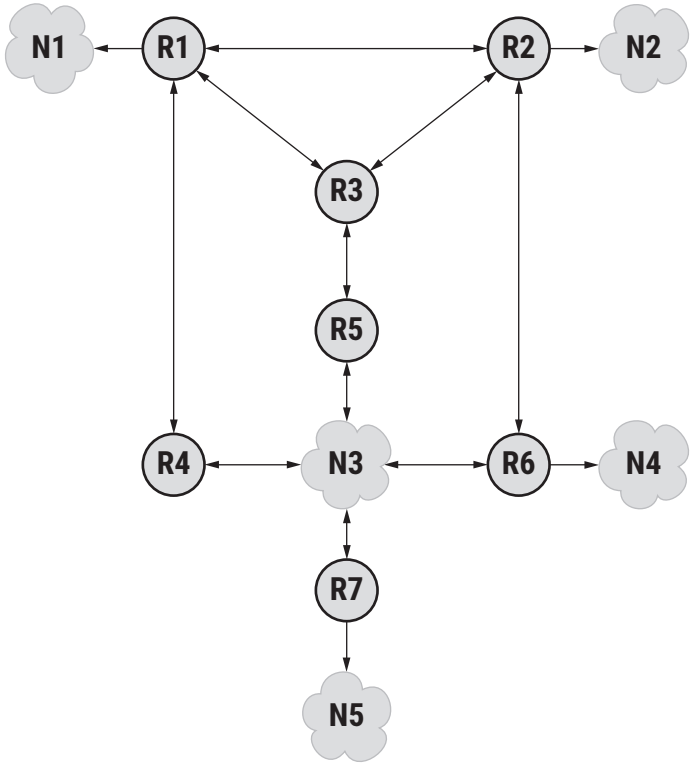
Základními výhodami OSPF je velmi rychlá reakce na změny a schopnost zajistit směrování i v poměrně rozsáhlých sítích. V současnosti je pro IPv4 široce používána jeho druhá verze, jejíž definici najdete v RFC 2328: *OSPF Version 2*. Úpravy OSPF pro směrování IPv6 určuje RFC 5340: *OSPF for IPv6*. Nová verze protokolu je označována jako OSPFv3. Vedle podpory IPv6 by měla zahrnovat i různá rozšíření, navržená pro IPv4, jako je využití OSPF pro směrování skupinově adresovaných datagramů (RFC 1584) a další.

Mapa sítě (též databáze linek) je vlastně orientovaný graf. Jeho vrcholy představují směrovače a skupinové sítě. Pro zjednodušení budu brát v úvahu jen dva druhy linek: dvoubodové, které navzájem spojují dvojici směrovačů, a skupinové, k nimž může být připojeno směrovačů několik a podporují skupinové adresování. Typickou dvoubodovou linkou je ADSL připojení domácí sítě k Internetu, typickou skupinovou Ethernet.

Pokud jsou dva směrovače propojeny dvoubodovou linkou, vede mezi nimi v síťovém grafu obousměrná cesta. Jestliže cesta propojuje směrovač a skupinovou síť, znamená to, že dotyčný směrovač má rozhraní vedoucí do této sítě. Takže například síť z obrázku 7.4 bude z pohledu OSPF reprezentována grafem 7.5.



Obrázek 7.4: Příklad sítě



Obrázek 7.5: OSPF reprezentace sítě z obrázku 7.4

Všimněte si, že do sítí N1, N2, N4 a N5 vede pouze jednosměrná šipka. Je to proto, že se jedná o tak zvané *koncové sítě* (anglicky stub networks, čili pahýly). Jejich charakteristickou vlastností je, že nevedou nikam dál. Veškeré datagramy, které se v nich objeví, byly buď odeslány některým ze zdejších strojů nebo jsou mu určeny. Naproti tomu N3 je typickým příkladem *tranzitní sítě*, kterou může procházet i provoz, který tu ani nevznikl, ani nekončí. Hrany, které ji spojují s připojenými směrovači, jsou obousměrné.

Hrany v grafu sítě jsou ohodnoceny celými čísly v rozmezí 0–65 535. Číslo představuje „délku" příslušné cesty (oficiálně se v OSPF mluví o ceně cesty). Vzhledem ke značnému rozpětí dostupných hodnot se v ocenění hrany projevuje i rychlost linky. OSPF při hledání optimálních cest sčítá ceny linek a hledá ty, které mají nejnižší součet. Snadno tak třeba odhalí, že do daného místa bude výhodnější přepravit datagram po třech gigabitových Ethernetech než jednou ADSL linkou s rychlostí 8 Mb/s.

Životně důležitým prvkem OSPF je výměna informací o změnách v topologii. Vychází ze sítě sousedů, kterou si protokol vytvoří. Vznikne tak, že každý směrovač si automaticky zjišťuje, které další směrovače se nacházejí v jeho okolí. Zařadí si je do jedné ze dvou kategorií:

- *Okolní směrovače (neighbors)* jsou takové, se kterými má přímé spojení. To znamená, že je s nimi spojen dvoubodovou linkou nebo mají připojení k téže skupinové lince.
- *Sousedé (adjacent routers)* se vybírají z okolních směrovačů (ne každý okolní směrovač se stane sousedem, viz níže). Se sousedy si vyměňuje informace o mapě sítě.

Jak si směrovač vybírá sousedy? Pro dvoubodové spoje zcela jednoduše. Tam se navzájem propojená dvojice směrovačů vždy stane sousedy. Složitější situace vzniká u skupinových linek. Směrovače připojené k téže skupinové lince si ze svého středu zvolí *pověřený směrovač (designated router)*. Ten se stane sousedem pro všechny zdejší stroje. Ostatní mezi sebou sousedské vztahy nenavazují[4].

Informace o svém okolí směrovač získá tak, že opakovaně posílá na všechna svá rozhraní zprávu oznamující jeho přítomnost – tak zvaný *Hello* paket. Do něj uvede identifikaci pověřeného směrovače pro danou síť a také identifikátory všech směrovačů, o nichž ví (nedávno od nich obdržel Hello paket). Nováček se z těchto paketů dozví, kdo všechno je na dané lince přítomen a kdo je pověřeným směrovačem (pokud je).

Mapa sítě, alias databáze linek, je vlastně kolekce jednotlivých oznámení o stavu v určitém místě. Toto oznámení se v OSPF jmenuje *Link State Advertisement (LSA)* a posílá je vždy ten, u nějž informace vzniká. Existuje několik typů LSA, které shrnuje tabulka 7.1.

kód	*název*	*význam*
1	směrovač	stav rozhraní daného směrovače, posílá každý směrovač
2	síť	seznam směrovačů připojených k síti, posílá pověřený směrovač sítě
3, 4	souhrn	cesta k cíli, jenž leží mimo danou oblast (ale uvnitř AS), posílají hraniční směrovače oblasti
5	externí	cesta k cíli z jiného AS, posílají hraniční směrovače AS

Tabulka 7.1: Typy LSA zpráv

Když dva směrovače nově naváží sousedský vztah, musí si nejprve synchronizovat své mapy sítě. Dělají to tak, že pošlou svému protějšku sadu OSPF zpráv *Popis databáze (Database description)*, ve kterých vyjmenují identifikátory a verze LSA, tvořících jejich databázi. Protějšek si poznamená ta

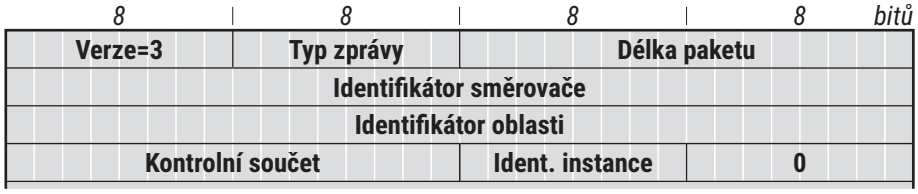
4: Mám-li být upřímný, ještě si zvolí záložní pověřený směrovač, který je připraven kdykoli nahradit pověřence, pokud by zanikl. Také on se stane sousedem pro všechny ostatní na téže lince, ale už nikdo další, vážně.

LSA, která dosud neznal nebo má jejich starší verzi. Následně o ně požádá pomocí *Žádosti o stav linky (Link state request)* a očekává, že mu soused pošle *Aktualizaci stavu linky (Link state update)* pro všechny požadované. Jakmile se tak stane, jsou databáze synchronní a oba sousedi vědí, že jejich pohled na síť je totožný.

Kdykoli později dojde ke změně (například se k některému směrovači připojí nová síť), odpovídající směrovač o tom neprodleně informuje všechny své sousedy prostřednictvím *Aktualizace stavu linky*. Ta obsahuje příslušné LSA, které si sousedé poznamenají do mapy a okamžitě předají dále všem svým sousedům a ti zase svým… Informace se tak velmi rychle dostane do všech směrovačů v síti a mapy se opět stanou synchronními.

Tento postup, kdy se doraziví novinka okamžitě předá všem ostatním sousedům, se nazývá záplavový algoritmus (flooding). Má tu příjemnou vlastnost, že nevyžaduje žádné velké přemýšlení a přitom se dostane všude, a to nejkratší cestou (protože použije všechny). Aby nedocházelo k cyklům a opakování aktualizací, předávají se dále jen ta LSA, která dotyčný dosud neznal nebo měl jejich starší verzi. Doručení aktualizace se potvrzuje (zprávou *Potvrzení stavu linky, Link state acknowledgment*), aby soused věděl, že jeho oznámení dorazilo v pořádku.

Synchronizace map je tedy velmi rychlá, je garantována a navíc se posílají jen novinky, takže OSPF má jen velmi malou režii. Kromě toho se pro jistotu stavová informace pošle ještě čas od času, i když se nezměnila. Jistota je jistota.



Obrázek 7.6: Hlavička OSPF zprávy

Tím jsme ovšem se schopnostmi OSPF neskončili. Protokol byl navržen s cílem zvládnout i opravdu velké sítě, v nichž by se synchronizace map mohla stát velmi náročnou. Proto byl do OSPF zařazen koncept oblastí, které rozdělují autonomní systém na části a omezují objem přenášených směrovacích informací.

Za *oblast (area)* je v OSPF označována skupina souvislých sítí a strojů v nich a také všechny směrovače, které mají rozhraní do některé z těchto sítí. Každá oblast provozuje svůj nezávislý exemplář směrovacího algoritmu a udržuje si mapy, které pokrývají pouze její vlastní síť. Všechny operace, které jsem popsal výše, tedy probíhají jen v rámci jedné oblasti. Díky tomu významně klesá režie spojená s aktualizací map.

typ	*název*	*význam*
1	Hello	zjištění okolních směrovačů
2	Popis databáze	shrnuje obsah databáze
3	Žádost o stav linky	požaduje LSA
4	Aktualizace stavu linky	aktualizace databáze (posílá LSA)
5	Potvrzení stavu linky	potvrzuje aktualizaci

Tabulka 7.2: Typy OSPF zpráv

Směrovač, který má rozhraní do více než jedné oblasti, se nazývá *hraniční směrovač (border router)*. Musí provozovat nezávislou kopii směrovacího algoritmu a samostatnou mapu sítě pro každou z oblastí, do nichž je zapojen. V podstatě se tváří jako několik různých směrovačů – pro každou oblast jeden.

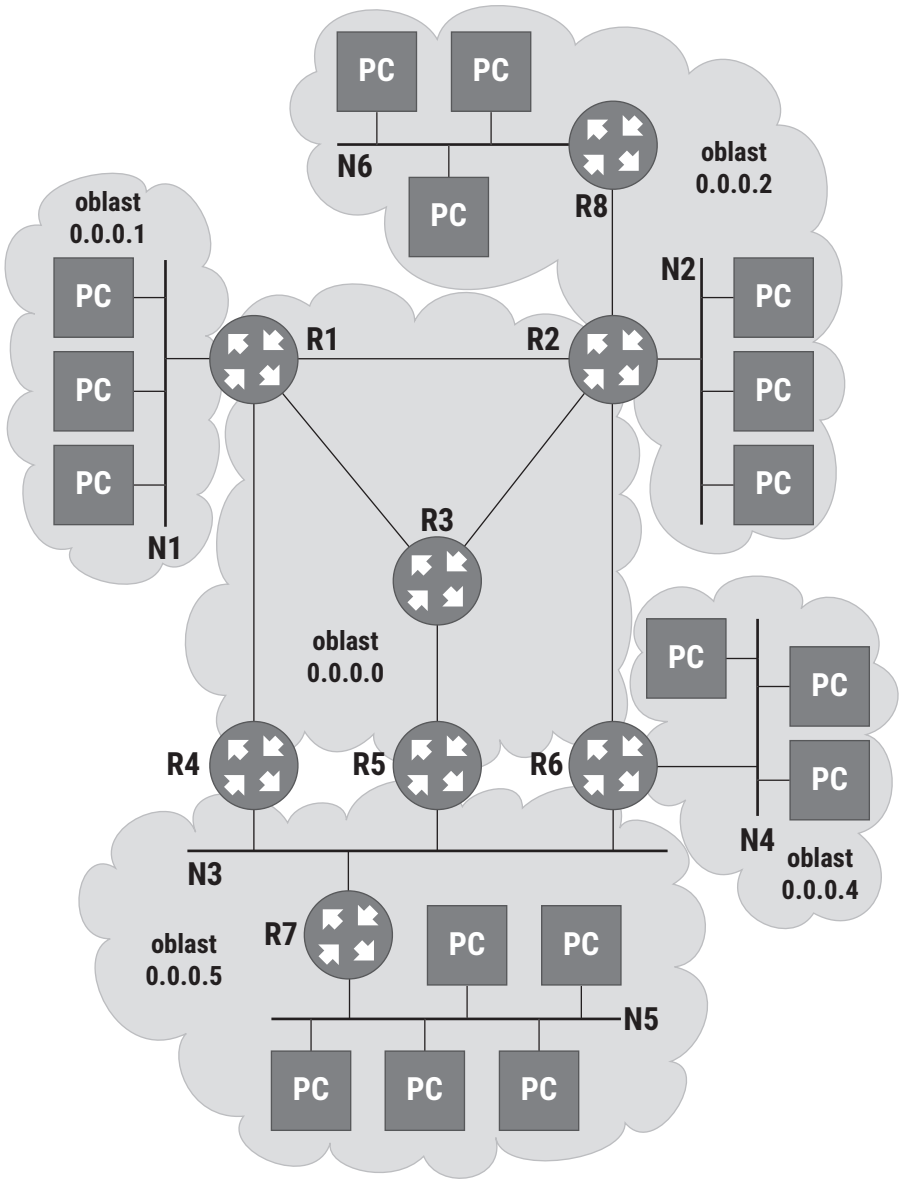
Celý autonomní systém drží pohromadě *páteřní oblast* s identifikačním číslem 0.0.0.0 (identifikátory oblastí jsou 32bitové a pro jejich zápis se vžila stejná konvence jako pro IPv4 adresy). Aby bylo směrování jednoduché, požaduje OSPF, aby všechny hraniční směrovače patřily do páteřní oblasti.

To znamená, že cestu mezi libovolnou dvojicí počítačů v různých oblastech lze rozdělit na tři části: První prochází oblastí s odesilatelem a končí na některém jejím hraničním směrovači. Druhá vede páteřní oblastí k hraničnímu směrovači, který spojuje páteřní a cílovou oblast. A na ni navazuje závěrečná část cesty, která vede cílovou oblastí od jejího hraničního směrovače k cíli.

Příklad rozdělení naší známé sítě na oblasti uvádí obrázek 7.7. Lehce jsem ji rozšířil přidáním směrovače R8 a sítě N6 vpravo nahoru, aby byla zajímavější. Všimněte si, že například směrovač R1 má jedno rozhraní v oblasti 0.0.0.1 a tři rozhraní v páteřní oblasti 0.0.0.0. Většina směrovačů na obrázku je hraničních. Vnitřní jsou jen R3, R7 a R8, jejichž všechna rozhraní leží vždy v jediné oblasti.

Směrovače v oblasti nemusí znát detailně situaci za jejími hranicemi, ale musí mít alespoň rámcový přehled o tom, jaké sítě se tam nacházejí. Vlastně jim stačí vědět, že k cíli *X* vede nejvýhodnější cesta přes zdejší hraniční směrovač *Y*.

Proto hraniční směrovače předávají do okolí informace o situaci v oblasti. Neposílají však její kompletní mapu, ale pouze jakýsi souhrn. V ideálním případě shrnou celou připojenou oblast do jediného LSA záznamu, který říká třeba „za mnou leží síť s prefixem 2001:db8:abcd::/48“. Míra agregace je nastavitelná, takže si správce sítě může řídit, jak detailní informace se budou přenášet.



Obrázek 7.7: Rozdělení sítě na oblasti

Tyto souhrnné LSA záznamy jsou v ostatních oblastech šířeny stejně jako všechny ostatní. Díky nim se zdejší stroje dozvědí, jak mají směrovat datagramy určené počítačům z jiných oblastí. Například v oblasti 0.0.0.5 na obrázku 7.7 se díky nim všichni dozvědí, že nejlepší cesta do sítě N1 vede přes hraniční směrovač R4, zatímco do N2 a N4 to bude nejkratší přes R6.

Podobně se řeší i distribuce cest k cílům z jiných autonomních systémů. Hraniční směrovač AS, který je spojen s okolním světem, se je dozvídá prostřednictvím externího směrovacího protokolu (typicky BGP) a předává je v podobě externích LSA do páteřní oblasti. Hraniční směrovače je pak předávají dále do ostatních oblastí.

Tedy, pokud je to třeba. Oblast totiž lze definovat jako *koncovou (stub area)*[5] a v takovém případě se do ní externí LSA nepředávají. Směrování za hranice AS je zde prováděno pomocí implicitní cesty. Hraniční směrovač (nebo směrovače) propaguje do koncové oblasti implicitní cestu a říká „všechno ostatní posílejte přese mne". Žhavými kandidáty na koncové oblasti v naší ukázkové síti budou 0.0.0.1, 0.0.0.2 a 0.0.0.4. Všechny mají jen jediný hraniční směrovač, takže nemají o čem přemýšlet.

Všechny výše popsané mechanismy jsou společné pro obě verze OSPF. Podpora IPv6 znamenala jen malé úpravy protokolu a paradoxně přinesla jeho jisté zjednodušení. OSPFv2 totiž definuje bezpečnostní prvky, kterými se chrání před záškodnickými směrovači. V OSPFv3 tento prvek mizí a je nahrazen standardním IPsec přímo na úrovni IP.

Došlo samozřejmě k úpravě LSA pro dlouhé adresy. Ze všech ostatních míst (jako např. identifikace směrovače či sítě) byly odstraněny IP adresy a lišácky nahrazeny 32bitovými identifikátory. Čili je tam totéž, ale jmenuje se to jinak. Terminologie se změnila také u podsítí, které byly nahrazeny linkami. Sečteno a podtrženo: došlo k mírnému pokroku v mezích zákona a OSPFv3 se hodně podobá svému předchůdci.

Zajímavé rozšíření přineslo RFC 5838: *Support of Address Families in OSPFv3*, které umožnilo směrovat několik různých síťových protokolů zároveň. IPv4 i IPv6 tak mohou sdílet společný směrovací protokol.

7.5 IS-IS

Protokol nazvaný *Intermediate system to intermediate system (IS-IS)* má v internetovém světě zcela zvláštní pozici, jedná se totiž o vetřelce zvenčí. Původně byl vyvinut firmou Digital Equipment Corporation pro její síťovou architekturu DECnet Phase V, budiž jim země lehká. Následně jej

5: Zase ty pahýly.

převzala mezinárodní standardizační organizace ISO jako směrovací protokol pro svůj referenční model OSI, budiž mu země lehká.

Protokoly kolem OSI bývaly něco jako švýcarský kapesní nožík s 287 nástroji. Nabízí sice úplně všechno, ale váží 5 kg a po hodinové námaze s ním možná ukrojíte krajíc chleba. Všeobecný neúspěch rodiny OSI s sebou strhl i IS-IS, který dlouhá léta zůstával zcela na okraji zájmu internetové komunity, přestože se jedná o docela povedený protokol. Přesněji řečeno, internetová komunita si jej všimla, uznala jej za zdařilý a vyvinula si vlastní variaci na stejné téma – OSPF. Ta potom v míře nasazení nechala svůj vzor daleko za sebou.

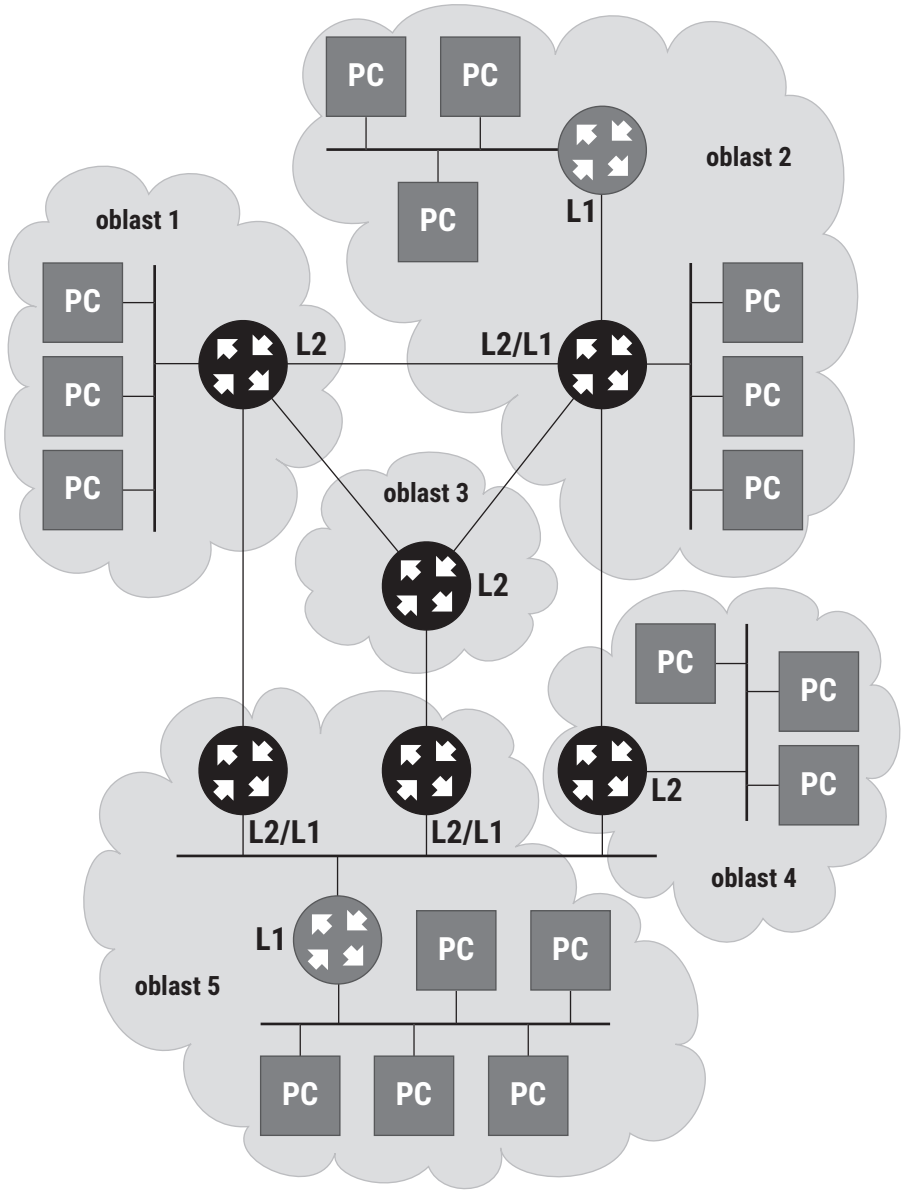
Přesto ale IS-IS nelze odbýt jako historickou kuriozitu, protože zejména v poslední době začíná zvolna získávat na popularitě. A to zejména v souvislosti s IPv6.

Základní koncept IS-IS je totožný s OSPF. Jedná se o protokol založený na stavu linek, v němž si všechny směrovače udržují aktuální mapu sítě a z ní vypočítávají algoritmem pro hledání nejkratších cest svou směrovací tabulku. Pokud dojde ke změně, informace o ní se okamžitě šíří záplavovým algoritmem, aby byly mapy sítí všech směrovačů co nejrychleji aktualizovány. Technické detaily se liší (terminologie, formáty zpráv, postupy pro jejich zpracování), ale principiálně jsou si OSPF a IS-IS velmi blízko.

Významnější rozdíly mezi oběma protokoly panují v oblasti hierarchického směrování. IS-IS také dělí síť na oblasti a udržuje kompletní mapu topologie jen v rámci jedné oblasti. Zde ovšem celý směrovač patří vždy do jedné oblasti a hranice mezi oblastmi procházejí linkami. Naproti tomu v OSPF jsou do oblastí zařazována jednotlivá rozhraní a hranice procházejí uvnitř směrovačů. V IS-IS proto nelze sestavit přímou analogii obrázku 7.7. Původní hraniční směrovače R1, R2, R4, R5 a R6 je třeba zařadit jen do jedné oblasti a tomu přizpůsobit hranice. Aby v IS-IS vznikla oblast, musí obsahovat alespoň jeden směrovač. V OSPF lze vytvořit oblast jediným rozhraním na směrovači, jako třeba oblast 0.0.0.1 na obrázku 7.7. Nechme stranou úvahy, zda je taková oblast smysluplná, když z hlediska OSPF nemá vlastně žádný obsah.

Směrovače jsou v IS-IS rozděleny do dvou úrovní. Jako směrovače úrovně 1 jsou označeny ty, které se nacházejí uvnitř oblasti a starají se především o její vnitřní topologii. Směrovače úrovně 2 pak zajišťují komunikaci a výměnu informací mezi oblastmi. Na obrázku 7.8 znázorňujícím možné oblasti v naší síti jsou tyto směrovače zvýrazněny černě. Spolu se baví vždy jen směrovače stejné úrovně. Aby byla možná vzájemná komunikace mezi vnitřním životem oblasti a jejím okolím, může mít směrovač obě úrovně. Je pak označován jako L1/L2 směrovač. Pokud je oblast triviální, jako například oblast 1 na obrázku 7.8, může obsahovat jen jediný směrovač úrovně L2.

Na rozdíl od OSPF nemá IS-IS žádnou páteřní oblast. Zde je páteř tvořena souvislou topologií L2 směrovačů, která může oblastmi procházet celkem libovolně. Směrování mezi oblastmi zde tedy vypadá tak, že po odeslání je datagram doručen L1 směrovači odesilatelovy oblasti do vhodného



Obrázek 7.8: Oblasti podle protokolu IS-IS

L2 směrovače, dále putuje L2 infrastrukturou do cílové oblasti, kde je místními L1 směrovači doručen adresátovi. Zatímco hierarchie v OSPF je stavěna hvězdicově, kdy se koncové oblasti nabalují na oblast páteřní, IS-IS umožňuje téměř libovolné kompozice.

Základní definici IS-IS najdete v RFC 1142: *OSI IS-IS Intra-domain Routing Protocol*, které je převzatým standardem ISO 10589. Jeho adaptaci pro použití v Internetu obsahuje RFC 1195: *Use of OSI IS-IS for routing in TCP/IP and dual environments*. Oba dokumenty pocházejí z roku 1990, v žádném případě se tedy nejedná o horkou novinku.

S nástupem IPv6 začalo IS-IS těžit ze své švýcarské nožíkovitosti. Zatímco OSPF vzniklo adaptací jeho myšlenek do světa IPv4 a pro nový protokol se muselo upravovat, IS-IS bylo od počátku koncipováno jako obecné pro libovolný síťový protokol a nezávislé na jeho adresách. Díky tomu bylo jeho použití pro IPv6 jednodušší a rychleji implementovatelné.

Příjemnou vlastností je i to, že v sítích podporujících oba protokoly spravuje informace o nich pod jednou střechou. V posledních letech proto některé sítě přecházejí z jiných protokolů na IS-IS. Jedním z významných příkladů je evropská akademická páteř GÉANT.

7.6 BGP4+

Bez velkého přehánění lze prohlásit, že *Border Gateway Protocol (BGP)* drží pohromadě celý současný Internet. Patří mezi externí směrovací protokoly, jejichž prostřednictvím se vyměňují směrovací informace mezi různými autonomními systémy (nicméně jej lze použít i uvnitř jednoho AS, pak bývá označováno jako interní BGP, iBGP). Čtvrtá verze je v současné době standardem a kdokoli chce mít svůj AS a komunikovat s okolím, musí tak činit prostřednictvím BGP4.

Jeho původní definice z RFC 1771 byla v roce 2006 revidována v RFC 4271: *A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)*. RFC 1772: *Application of the Border Gateway Protocol in the Internet* pak popisuje jeho nasazení v Internetu. Klasická verze BGP4 se zabývala výlučně směrováním IPv4. Později byla rozšířena prostřednictvím RFC 4760: *Multiprotocol Extensions for BGP-4* tak, že umožňuje směrování prakticky libovolného protokolu síťové vrstvy – včetně IPv6. Tato verze bývá označována jako *BGP4+*.

Výchozím bodem celého procesu je, že směrovač shrne do jedné „cesty" všechny prefixy ze svého autonomního systému a ohlásí je svým sousedům v jiných AS. Ti je předají dál a tak se postupně šíří informace, co je kudy dosažitelné. Z nich si pak jednotlivé směrovače musí spočítat, která cesta je pro ně nejlepší.

Ve srovnání s předchozí dvojicí je BGP velmi konzervativní. Nesnaží se aktivně vyhledávat sousední směrovače, ale staví na statické konfiguraci. Správce mu zadá, kdo jsou jeho sousedé.

S každým ze sousedů si směrovač udržuje trvale navázané TCP spojení. Na začátku si jeho prostřednictvím vymění kompletní směrovací informace a později zasílají jejich aktualizace. Dojde-li k ukončení spojení, směrovače na obou jeho koncích považují příslušného souseda za nedosažitelného a odstraní si z tabulek všechny cesty, které od něj pocházely.

Z pohledu BGP se směrovací informace ukládají do tak zvaných bází směrovacích informací (*Routing Information Base, RIB*). Jsou tři:

- **Vstupní báze** obsahuje informace, které směrovači zaslal některý z jeho sousedů. Tyto informace se posuzují a na jejich základě je modifikována lokální báze.
- **Lokální báze** představuje zdejší směrovací tabulku. Toto jsou pravidla, podle kterých směrovač posílá jednotlivé datagramy.
- **Výstupní báze** pak zahrnuje informace, které se směrovač rozhodl ohlásit svým sousedům.

BGP definuje několik typů zpráv. Mají shodný začátek, který obsahuje *Znamení*, *Délku* a *Typ* zprávy. Počáteční *Znamení (Marker)* podle nové definice obsahuje samé jedničky. Dále pak následuje celková *Délka (Length)* BGP zprávy a její *Typ (Type)*. Sortiment a účel jednotlivých typů zpráv uvádí tabulka 7.3. Formát zbytku zprávy se liší v závislosti na typu.

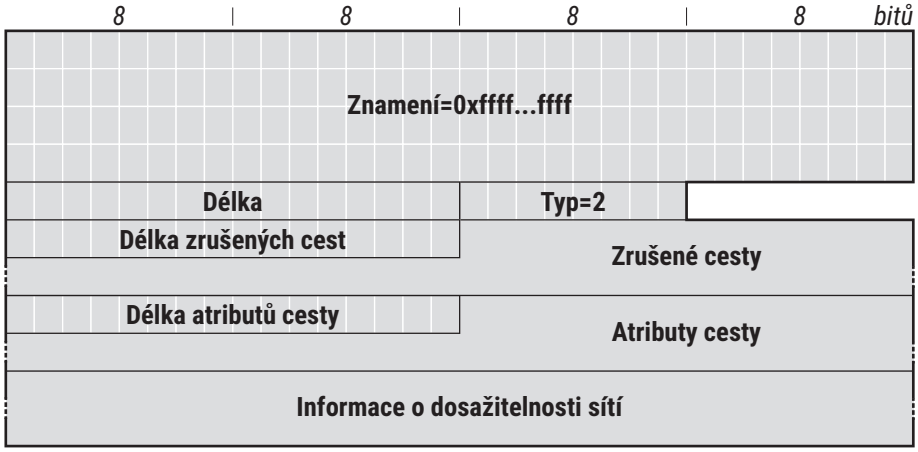
typ	*název*	*určení*
1	OPEN	zahájení vzájemné komunikace
2	UPDATE	zprávy o změnách ve směrování
3	NOTIFICATION	chybové hlášení
4	KEEPALIVE	udržování komunikace, když není o čem mluvit

Tabulka 7.3: Typy zpráv BGP

Nejdůležitějším typem je UPDATE, jehož prostřednictvím se ohlašují změny ve směrovacích tabulkách. Řada jeho položek má proměnlivou délku, jak vidíte z obrázku 7.9.

Za společnými položkami následují informace o *Zrušených cestách (Withdrawn routes)*. Například když směrovač ztratí kontakt s některým ze svých BGP sousedů, považuje všechny cesty od něj za nefunkční, a tudíž je ostatním ohlásí jako zrušené. Lze zrušit několik cest v jediné zprávě. Jsou identifikovány svými prefixy.

Zbytek zprávy je věnován ohlašované cestě (jedna zpráva může ohlašovat nanejvýš jednu cestu). Nejprve jsou uvedeny *Atributy cesty (Path attributes)*, které poskytují doplňkové informace. Jejich



Obrázek 7.9: BGP – formát zprávy UPDATE

přehled najdete v tabulce 7.4. Dále pak následuje seznam cílů (prefixů), které do dané cesty spadají[6]. Tato informace se skrývá pod lehce tajuplným názvem *Informace o dosažitelnosti sítí (Network layer reachability information)*.

Když směrovači dorazí od některého ze sousedů zpráva s aktualizací, upraví podle jejího obsahu příslušnou vstupní bázi. Následně pak spustí rozhodovací proces, jehož cílem je:

- vybrat cesty pro lokální bázi (a tedy lokální směrovací tabulku),
- vybrat cesty, které ohlásí sousedům ve stejném AS,
- vybrat cesty, které ohlásí sousedům v jiných AS,
- agregovat (spojit) cesty a redukovat objem směrovacích informací.

Rozhodování probíhá ve třech fázích. V první spočítá preferenci ke všem cestám z každé vstupní báze. Jedná se o matematickou funkci, která ke každé cestě přiřadí míru její výhodnosti. Na rozdíl od interních směrovacích protokolů není jednoduché takovou funkci stanovit, protože různé AS mohou používat různé metriky. Je proto záležitostí lokální konfigurace a může brát v potaz celou řadu faktorů (počet AS po cestě, zvýhodňovat či znevýhodňovat určité konkrétní AS, upřednostňovat stabilní cesty a podobně).

Ve druhé fázi podle vypočtených preferencí určí nejvýhodnější cestu pro každý ze známých cílů a zavede ji do lokální báze. A konečně třetí fáze vyjde ze změněné lokální báze a naplní výstupní

6: Typicky seznam prefixů z cílového AS.

atribut	*význam*
ORIGIN	odkud pochází informace (IGP, EGP, odjinud)
AS_PATH	seznam AS, kterými prošla směrovací informace o této cestě
NEXT_HOP	adresa směrovače, který je první na cestě k danému cíli
MULTI_EXIT_DISC	používá se pro rozhodování mezi několika cestami do téhož sousedního AS – pokud jsou ostatní kritéria shodná, použije se cesta s nejmenší hodnotou tohoto atributu
LOCAL_PREF	posílá jen směrovačům ve svém vlastním AS, informuje o preferenci, kterou dával odesilatel této cestě
ATOMIC_AGGREGATE	informuje, že spojil několik cest do jedné obecnější (s kratším prefixem)
AGGREGATOR	adresa a číslo AS směrovače, který spojil cesty

Tabulka 7.4: Atributy cesty v BGP

báze pro jednotlivé sousedy. Důležité je, že posílá jen ty cesty, které sám používá (jsou z jeho pohledu nejvýhodnější). Navíc zde může uplatnit směrovací politiku a například ohlášení určitých cest potlačit. Dojde-li v nich ke změnám, je třeba informovat ostatní zasláním odpovídajících aktualizací.

8 Skupinové radovánky čili multicast

Práce s datagramy směřujícími na skupinovou adresu se do značné míry liší od zpracování běžných individuálních paketů. Proto jsem se rozhodl vyčlenit pro ně samostatnou kapitolu.

Hlavní problém pochopitelně představuje směrování. V případě skupinového vysílání se jedná o vybudování distribučního stromu, kterým budou data šířena co nejefektivněji ke všem příjemcům.

8.1 Doprava po Ethernetu a Wi-Fi

Nejprve se ale podívejme, jak se skupinové datagramy dopravují po linkové vrstvě. Nejzajímavější je kombinace s Ethernetem, který má své vlastní mechanismy pro skupinové vysílání a IPv6 je využívá. Stejně je na tom i Wi-Fi, které sice používá odlišný způsob fyzického přenosu dat, ale jeho struktura adres a podpora skupinového vysílání se shodují s Ethernetem. Pro zjednodušení budu nadále psát pouze o Ethernetu, pro Wi-Fi jednoduše platí totéž. Ostatní technologie jsou buď celkem jasné, protože používají jen dvoubodové spoje, nebo natolik málo rozšířené, že nemá valný smysl se o nich zmiňovat.

Ethernet podporuje skupinovou komunikaci. Jeho skupinové adresy jsou charakteristické tím, že mají v nejméně významném bitu prvního bajtu jedničku, zatímco u individuálních tu najdete nulu.

Skupinové adresy z IPv6 se do Ethernetu mapují celkem přímočaře: vezmou se poslední čtyři bajty z cílové (skupinové) IPv6 adresy a před ně se přidá předpona 3333 (hexadecimálně). Ze skupinové IPv6 adresy pro vyzývaný uzel ff02::1:ff32:5ed1 tak vznikne ethernetová adresa:

```
33:33:ff:32:5e:d1
```

Samozřejmě se může stát, že několik skupinových IPv6 adres splyne do jedné ethernetové – například adresy, které se liší jen dosahem. Teoreticky jich je velmi mnoho, v praxi bude k těmto případům docházet jen zřídka, protože jednotlivé adresy se zpravidla liší především v závěrečném identifikátoru skupiny. Tomuto splývání se nedá zabránit. Na úrovni Ethernetu stroj prostě přijme všechny rámce přicházející na danou adresu a je úkolem IPv6 vrstvy rozlišit, které z nich skutečně přijme a které sem dorazily jen shodou okolností.

Kdykoli začne počítač přijímat některou skupinu, musí nastavit své ethernetové rozhraní tak, aby přijímalo data přicházející na odpovídající ethernetovou adresu. Došlé datagramy dostává IPv6 vrstva a ta standardním způsobem vyřadí všechny, které dorazily na nesprávnou IPv6 adresu.

Definice přenosu skupinových IPv6 datagramů po Ethernetu je součástí RFC 2464: *Transmission of IPv6 Packets over Ethernet Networks*. Pro IEEE 802.11 alias Wi-Fi žádné RFC neexistuje,

vzhledem k podobnosti logických prvků s Ethernetem však ani není potřeba. Specifikace přenosu IPv6 po několika dalších, méně častých linkových technologiích shrnuje příloha B na straně 441.

8.2 Multicast Listener Discovery (MLD)

Jednou ze základních informací, které potřebuje znát každý směrovač zapojený do skupinového života, je seznam skupin, jež má vysílat do daného rozhraní. V podstatě se jedná o ty skupiny, které zde mají alespoň jednoho příjemce.

Ke zjišťování příjemců sloužil ve světě IPv4 Internet Group Management Protocol (IGMP). IPv6 pro něj změnilo název na MLD, základní principy však zůstaly podobné. Ostatně samotní jeho autoři prohlašují MLD za „překlad IGMP pro IPv6".

MLD se momentálně vyskytuje ve dvou verzích. MLDv1 (RFC 2710) je protipólem IGMPv2. Novější MLDv2 pak odpovídá IGMPv3. Jeho definici obsahuje v RFC 3810: *Multicast Listener Discovery Version 2 (MLDv2) for IPv6*. Hlavním rozdílem je, že novější verze protokolu umožňuje filtrovat zdroje. Zatímco v MLDv1 lze pouze ohlásit zájem o příjem skupiny G, v MLDv2 může počítač požadovat data pro skupinu G vysílaná konkrétním strojem nebo naopak příjem skupiny z určitých adres odmítnout. Obě verze spolu mohou spolupracovat, ovšem formáty jejich zpráv i používané postupy se poněkud liší.

MLD je podprotokolem ICMPv6 a jeho zprávy jsou tedy jen jedním typem zpráv ICMPv6. Jejich tvar vychází ze základního formátu ICMP (viz obrázek 4.1 na straně 113), který však konkretizuje. Posílají se vždy z lokální linkové adresy příslušného rozhraní, jejich maximální počet skoků je nastaven na jedničku a musí nést rozšiřující hlavičku *Upozornění směrovače*, aby si jich všímaly i směrovače, které samy neposlouchají cílovou skupinu příslušného datagramu.

zpráva	*MLDv1*	*MLDv2*
dotaz (query)	130	130
hlášení (report)	131	143
ukončení (done)	132	–

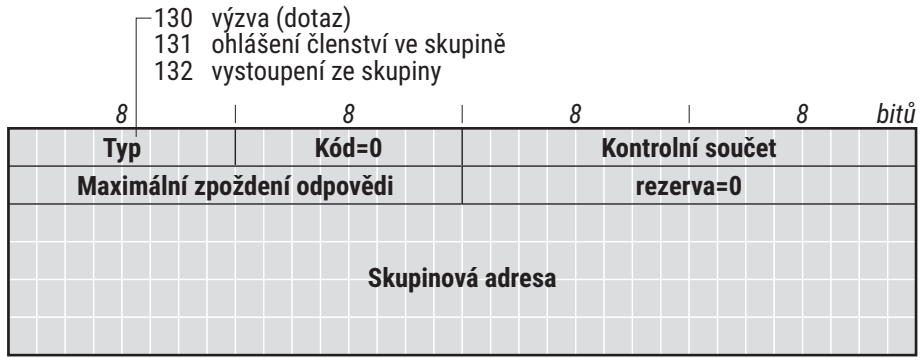
Tabulka 8.1: Typy MLD zpráv pro obě verze protokolu

V prvním poli zprávy je v souladu s pravidly ICMPv6 vždy uveden typ. Typy i formáty zpráv se poněkud liší v závislosti na verzi protokolu. V tabulce 8.1 najdete jejich přehled. Vzhledem k nezanedbatelným odlišnostem popíši obě verze protokolu samostatně.

8.2.1 MLD verze 1

Jak již bylo řečeno, MLDv1 se nestará o odesilatele. Zajímá jej pouze informace, zda pro danou skupinu existuje někdo, kdo ji přijímá. Směrovač si pro každé rozhraní udržuje seznam skupinových adres, pro které se zde nachází alespoň jeden posluchač. Z těchto informací se pak vychází při stanovení distribučních stromů pro jednotlivé skupiny a směrování skupinově adresovaných datagramů. Na rozhraní, které podporuje skupinový provoz, je směrovač povinen přijímat data adresovaná kterékoli skupině – včetně těch, které sám nezná.

Absence informací o odesilatelích se odráží i v jednodušším formátu zpráv protokolu. Ten je pro všechny tři jejich typy společný a vidíte jej na obrázku 8.1.



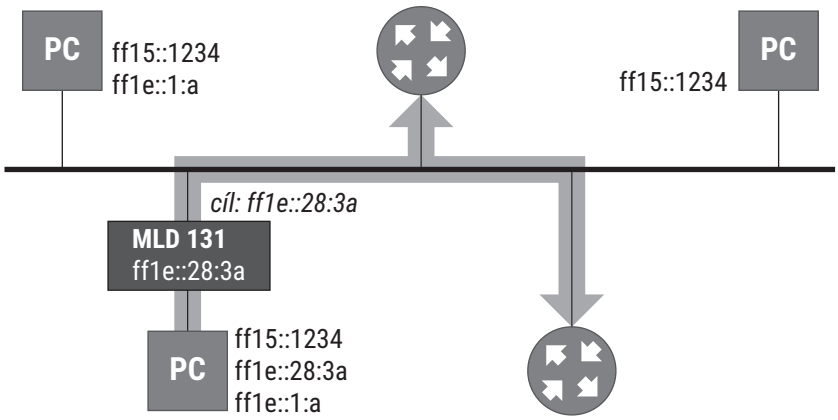
Obrázek 8.1: Formát zprávy protokolu MLD verze 1

Pro *Typ (Type)* přicházejí v úvahu tři hodnoty: 130 slouží k výzvě (dotazu) směrovače, prostřednictvím 131 ohlašují stanice své členství ve skupinách a číslem 132 sdělují ukončení příjmu dané skupiny.

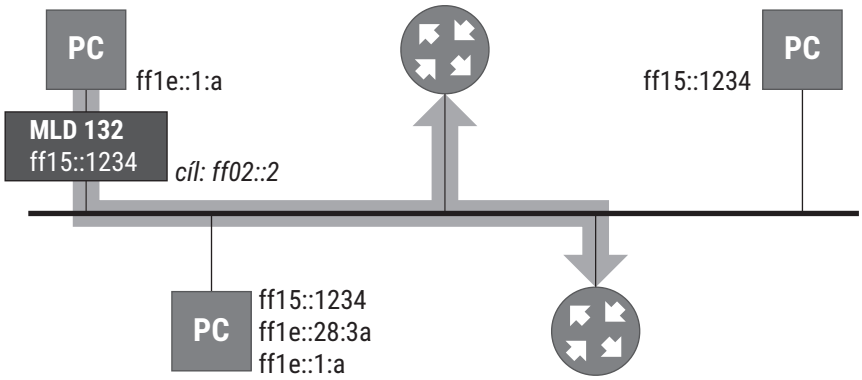
Když počítač vstoupí do nové skupiny, pošle na její adresu MLD zprávu typu 131 ohlašující členství v této skupině. Směrovače si u příslušného rozhraní přidají skupinovou adresu do seznamu vysílaných (pokud ji tam ještě nemají). Doporučuje se poslat toto ohlášení opakovaně, aby se eliminovala případná ztráta datagramu.

Pokud počítač naopak ukončuje svou účast ve skupině, pošle MLD zprávu typu 132, tedy ukončení členství. Tato zpráva se neposílá na adresu skupiny, ale na ff02::2, což je skupinová adresa pro všechny směrovače na dané lince.

Směrovače, které zprávu obdržely, musí posoudit, zda skupina má ještě nějakého posluchače. Pokud své členství v ní naposledy ohlašoval jiný počítač než ten, který se právě odhlásil, je rozhodování snadné – zjevně existuje i jiný posluchač, a proto si skupinu ponechá v seznamu.



Obrázek 8.2: Počítač vstupuje do skupiny



Obrázek 8.3: Počítač opouští skupinu

V opačném případě (příjem skupiny naposledy ohlašoval právě ten počítač, který se odhlašuje) si směrovač musí udělat jasno. Pošle proto na adresu skupiny dotaz – MLD zprávu typu 130, v níž je jako *Skupinová adresa (Multicast address)* uvedena adresa zjišťované skupiny. Aby se vzápětí nesesypala hromada ohlášení od všech přijímajících, je reakce na dotaz definována následovně:

Každý počítač, který dostane dotaz[1], si nastaví časovač na náhodný interval. Jeho horní hranici udává položka *Maximální zpoždění odpovědi (Maximum response delay)* v dotazu. Po vypršení intervalu pošle na adresu skupiny ohlášení svého členství. Jakmile dostane ohlášení od jiného člena, časovač zruší a sám své ohlášení už posílat nebude. To znamená, že ze skupiny odpoví vždy jen jeden náhodně vybraný stroj.

typ	*zpráva*	*adresa*
130	obecný dotaz	ff02::1
130	konkrétní dotaz	adresa skupiny
131	ohlášení členství	adresa skupiny
132	ukončení členství	ff02::2

Tabulka 8.2: MLD zprávy a jejich cílové adresy

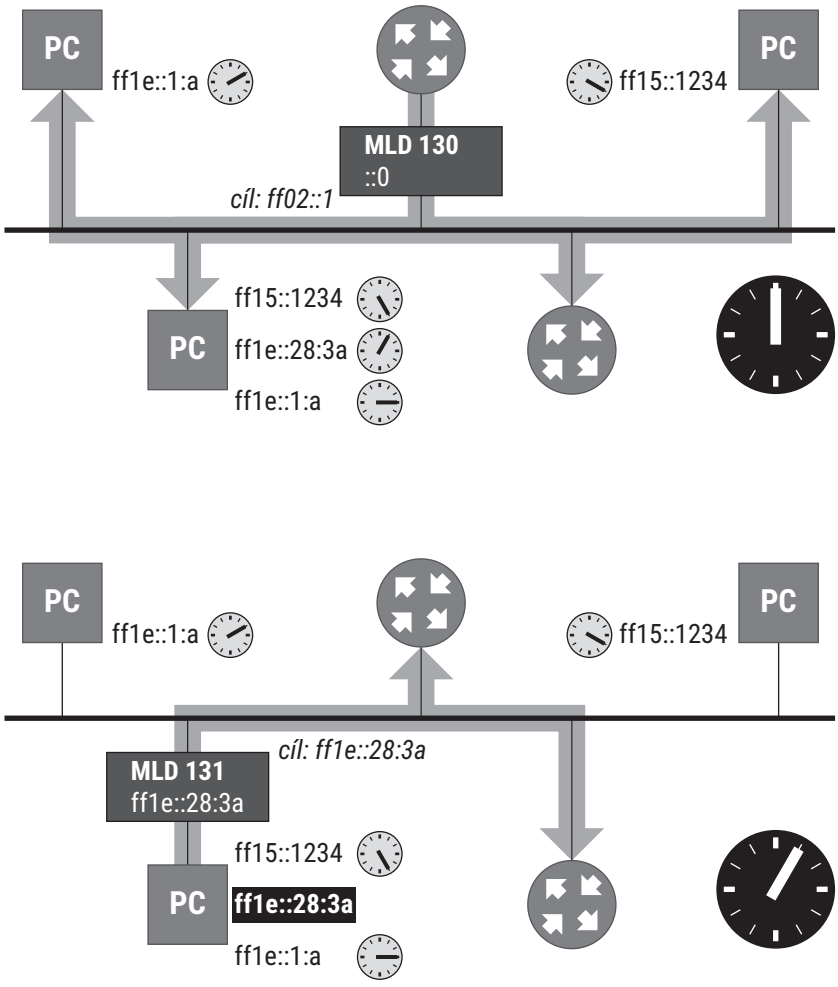
Ovšem život není dokonalý a je třeba počítat s tím, že občas některý počítač přestane poslouchat skupinu, aniž by to korektně ohlásil. Proto směrovače opakovaně posílají do připojených sítí obecné dotazy. Jedná se o MLD zprávu typu 130, kde *Skupinová adresa* je nulová. Směrovač tím říká „chtěl bych vědět, které všechny skupiny zde mají posluchače“. Dotaz zašle na adresu ff02::1 (všechny uzly na lince).

Počítač se chová stejně, jako kdyby naráz dostal konkrétní výzvu pro všechny své skupiny. Pro každou skupinu, jejímž je členem, (kromě ff02::1 a skupin s dosahem 0 nebo 1), si nastaví samostatný časovač. Každý dostane jinou náhodnou hodnotu. Když vyprší a nedorazilo ještě ohlášení od jiného člena, pošle své ohlášení.

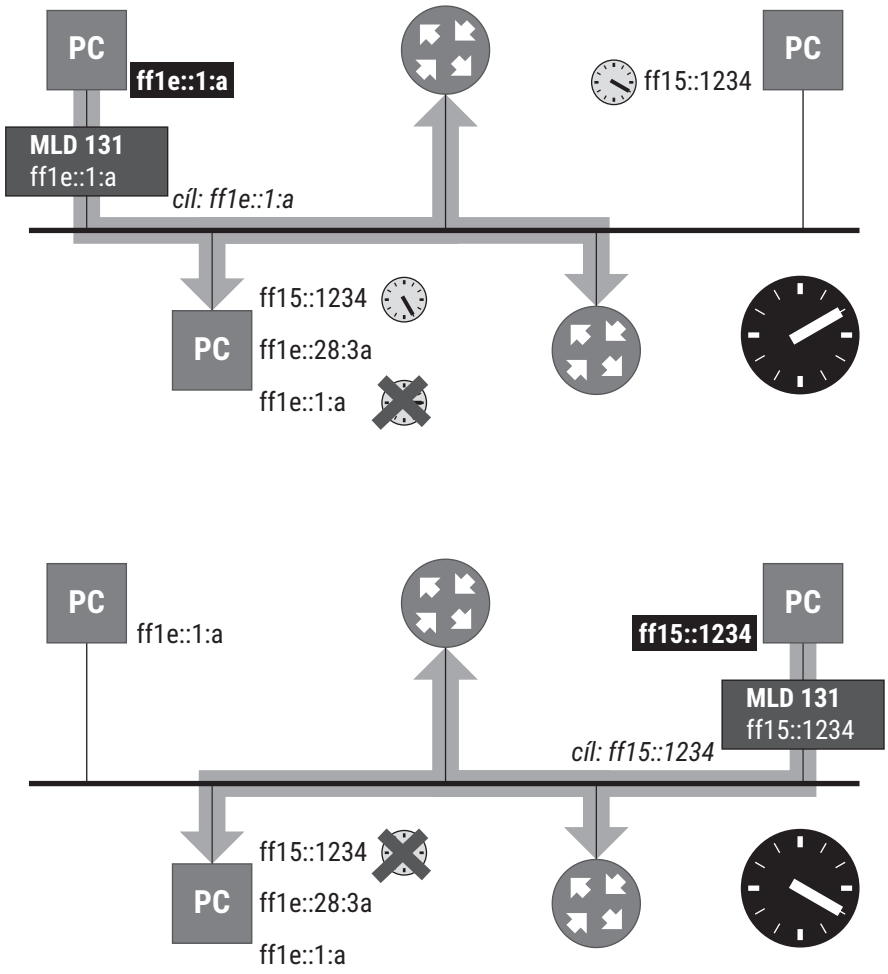
Aby se počet dotazů udržoval v rozumných mezích, posílá je vždy jen jeden ze směrovačů připojených k dané lince – ten, který má nejmenší IP adresu. Implementace jeho výběru je velmi jednoduchá. Každý směrovač poslouchá a pokud příliš dlouho nedorazí obecný dotaz od někoho s menší adresou než je jeho vlastní, pošle jej sám.

Dotazy tedy posílá jen jeden směrovač, ale odpovědi dostávají a zpracovávají všechny. Díky tomu si všechny směrovače připojené k dané lince udržují konzistentní informace o zdejších skupinách.

1: To znamená, že je členem dotyčné skupiny.



Obrázek 8.4: Směrovač zjišťuje aktivní skupiny



Obrázek 8.4 (pokračování): Směrovač zjišťuje aktivní skupiny

8.2.2 MLD verze 2

Druhá verze protokolu přináší možnost omezit příjem skupinových dat v závislosti na jejich zdroji. Přesněji řečeno dává na výběr dvě varianty, jak skupinově adresované datagramy filtrovat. Buď je možné požadovat doručování skupinových dat jen od vybraných stanic. Takový režim je označován jako INCLUDE(L), kde L představuje seznam přijímaných adres. Druhou možností je příjem dat od všech kromě několika uvedených zdrojů, který se označuje jako EXCLUDE(L).

Toto filtrování je důsledně promítnuto do celého systému. Začíná už v aplikačním rozhraní, kde si program může poručit, od koho chce či nechce dostávat skupinová data. Síťová vrstva počítače si musí vést evidenci o požadavcích aplikací pro jednotlivé sokety a podle nich pak vytvářet stav příjmu skupinových dat na každém ze svých síťových rozhraní. Podobně směrovač musí kombinovat zprávy od různých klientů a dát z nich dohromady přehled o tom, jaké skupinové datagramy předávat do sítí, k nimž je připojen.

INCLUDE(X) + INCLUDE(Y)	→	INCLUDE(X ∪ Y)
EXCLUDE(X) + INCLUDE(Y)	→	EXCLUDE(X – Y)
EXCLUDE(X) + EXCLUDE(Y)	→	EXCLUDE(X ∩ Y)
příklady		
INCLUDE(a, b, c) + INCLUDE(c, d, e)	→	INCLUDE(a, b, c, d, e)
EXCLUDE(a, b, c) + INCLUDE(c, d, e)	→	EXCLUDE(a, b)
EXCLUDE(a, b, c) + EXCLUDE(c, d, e)	→	EXCLUDE(c)

Tabulka 8.3: Pravidla pro kombinování filtrů

Je proto potřeba stanovit pravidla, jak kombinovat jednotlivé požadavky. Ty přitom mohou obsahovat nejen různé adresy zdrojů, ale mohou používat i různé režimy filtrování. Základní pravidla shrnuje tabulka 8.3. Jestliže se spojují dva filtry typu INCLUDE, vznikne filtr stejného typu zahrnující sjednocení adres původních dvou – je třeba přijímat data ze zdrojů, o něž projevil zájem alespoň jeden z posluchačů. Při kombinaci EXCLUDE s INCLUDE dostane přednost první z nich, protože požaduje data od všech kromě několika uvedených. Z nich budou vyloučeny ty adresy, o které žádá filtr typu INCLUDE. A konečně spojením dvou filtrů typu EXCLUDE vznikne filtr stejného typu vylučující jen ty adresy, které nechce ani jeden z původních filtrů.

Toto spojování probíhá v několika místech. Provádí je každý příjemce, když dává dohromady požadavky jednotlivých aplikací, které pak souhrnně ohlašuje jako požadavky pro své síťové rozhraní. Podobně pak postupuje i směrovač, který slučuje požadavky jednotlivých klientů.

Za zmínku stojí dva speciální případy, které odpovídají situacím podle MLDv1 a jsou v praxi asi nejčastější. Prvním je příjem skupinové adresy ze všech zdrojů, tedy bez jakéhokoli filtrování. Tato situace je v MLDv2 vyjádřena jako EXCLUDE( ), tedy EXCLUDE s prázdným seznamem odmítaných adres. Jakmile se objeví při kombinování požadavků, je jasné, že i výsledkem bude EXCLUDE( ). Druhým případem je vystoupení ze skupiny, tedy ukončení jejího příjmu. Z pohledu MLDv2 příslušný filtr přejde do režimu INCLUDE( ).

MLDv1 rozlišuje na straně příjemce skupinových dat dvě základní situace: vstup do skupiny a její opuštění. Naproti tomu MLDv2 má jen jednu událost tohoto typu – změnu v příjmu skupin. Zahájení či ukončení příjmu skupiny představují její speciální případy, kromě nich může změna zahrnovat i rozšíření nebo zúžení počtu přijímaných zdrojů nebo změnu režimu filtrování příslušné skupiny. Pokud dojde k jakékoli z těchto událostí, příjemce pošle MLD zprávu typu *Hlášení (Report)* na adresu ff02::16 pro všechny MLDv2 směrovače na lince[2].

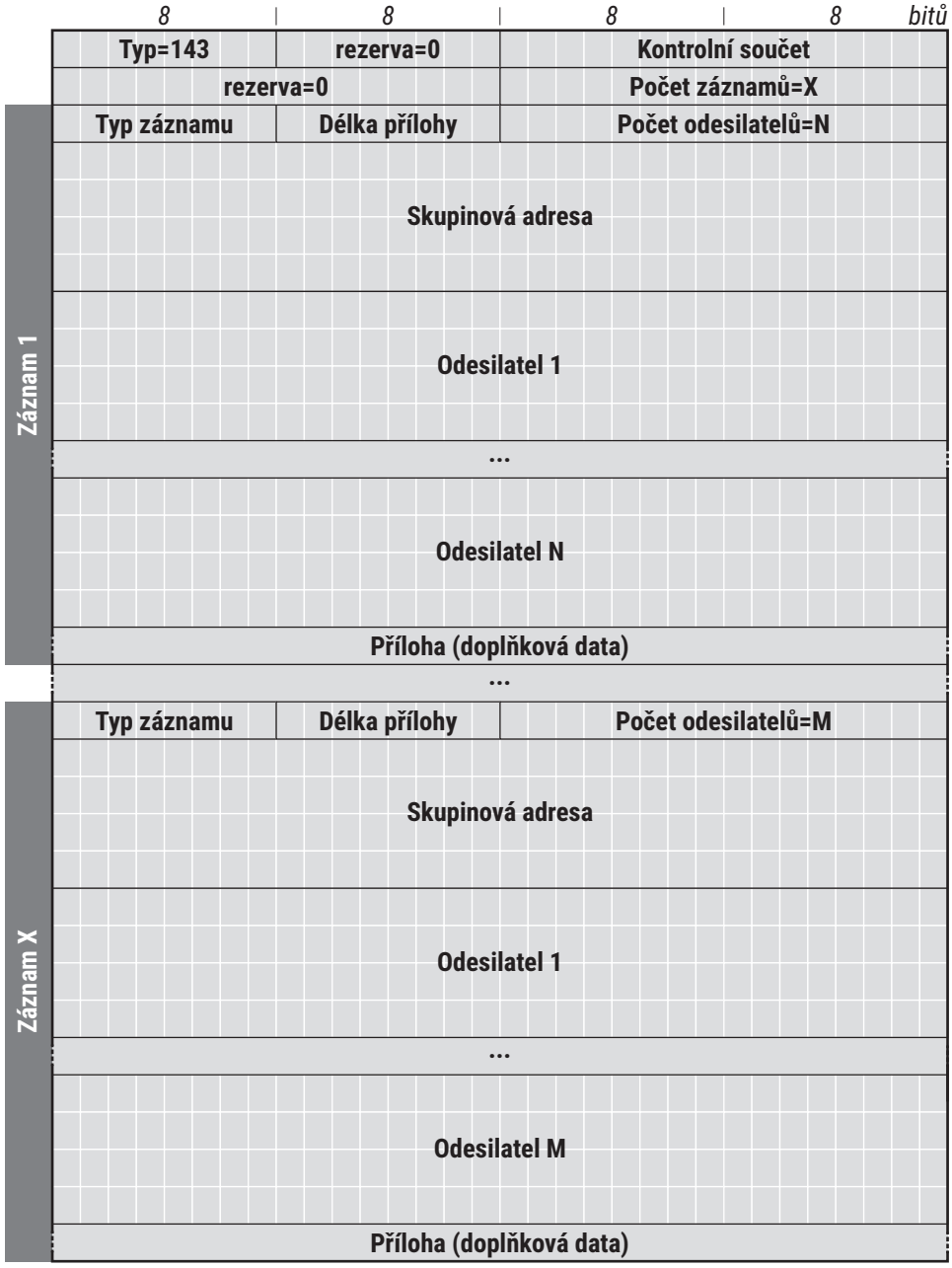
Formát hlášení MLDv2 vidíte na obrázku 8.5. Srovnejte si jej s formátem zprávy první verze z obrázku 8.1 na straně 191. Verze 1 používala velmi jednoduchou logiku. Zpráva se týkala vždy jedné skupiny, jejíž adresa v ní byla uvedena. Typ zprávy rozhodoval o tom, zda odesilatel zahájil či ukončil příjem skupiny, nebo se na ni ptá.

Do jednoho hlášení lze v MLDv2 vložit celou řadu informací. Ty jsou obsaženy v tak zvaných záznamech a úvodní hlavička hlášení obsahuje především údaj o tom, kolik záznamů se nachází uvnitř. Záznamy mají různý význam, který je určen položkou *Typ záznamu (Record type)*. Jejich souhrn najdete v tabulce 8.4 a hned se k nim dostaneme podrobněji. Záznam nese také skupinovou adresu, jíž se týká, a případně seznam odesilatelů (zdrojů) skupinových dat.

typ	*význam*
1	MODE_IS_INCLUDE
2	MODE_IS_EXCLUDE
3	CHANGE_TO_INCLUDE
4	CHANGE_TO_EXCLUDE
5	ALLOW_NEW_SOURCES
6	BLOCK_OLD_SOURCES

Tabulka 8.4: Typy záznamů v MLDv2 hlášení

2: V cílové adrese je změna, MLDv1 posílá zprávy tohoto typu na adresu skupiny, jíž se zpráva týká. Ovšem hlášení v MLDv2 se může týkat více skupin zároveň.



Obrázek 8.5: Hlášení (report) protokolu MLD verze 2

Pokud se u stanice něco změní na příjmu skupiny (či několika skupin), okamžitě odešle MLD hlášení s popisem změn. Došlo-li ke změně režimu filtrování skupiny, pošle pro ni záznam typu 3 (při změně z EXCLUDE na INCLUDE) nebo 4 (naopak). Vloží do něj i adresy zdrojů, které nový filtr obsahuje.

Pokud režim zůstal zachován, ale došlo ke změně filtrovaných adres, posílá stanice záznamy typu 5 (chce přijímat nové adresy) a 6 (končí příjem dříve přijímaných). Může poslat i oba záznamy současně, pokud některé zdroje přidal a jiné odebral. Záznam typu ALLOW_NEW_SOURCES znamená, že odesilatel chce přijímat data od daného zdroje. Pokud například má filtr typu EXCLUDE a jeho obsah se změní z EXCLUDE(X,Y) na EXCLUDE(X), pošle záznam ALLOW_NEW_SOURCES(Y), protože zdroj Y byl dříve blokován a nyní již není.

Tabulka 8.5 shrnuje, jaké záznamy se posílají pro ohlášení změny filtru ze stavu „před“ do stavu „po“. A a B v ní reprezentují seznamy adres. Zbytečné záznamy se samozřejmě neposílají – dojde-li k rozšíření filtru z INCLUDE(X) na INCLUDE(X,Y), pošle se pouze ALLOW_NEW_SOURCES(Y). Pokud pro danou skupinu žádný stav neexistuje, chápe se, jako by měla stav INCLUDE( ).

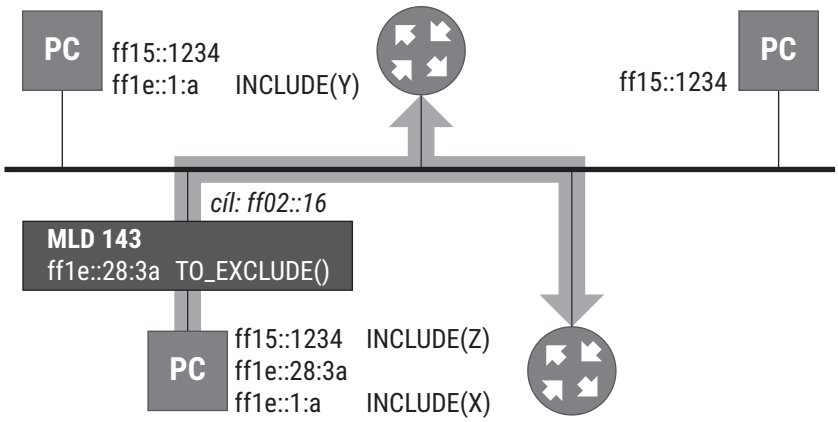
před	*po*	*odeslané záznamy*
INCLUDE(A)	INCLUDE(B)	ALLOW(B–A), BLOCK(A–B)
INCLUDE(A)	EXCLUDE(B)	TO_EXCLUDE(B)
EXCLUDE(A)	EXCLUDE(B)	ALLOW(A–B), BLOCK(B–A)
EXCLUDE(A)	INCLUDE(B)	TO_INCLUDE(B)

Tabulka 8.5: Záznamy posílané při změnách filtru pro skupinu

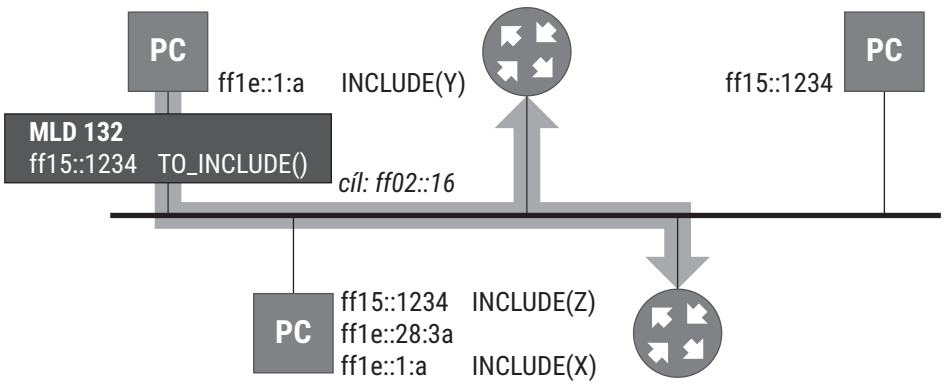
Podívejme se na dvě nejčastější situace. Jestliže stanice vstoupí do skupiny X, ve které předtím nebyla, a přijímá pro ni data ze všech zdrojů, oznámí tuto skutečnost podle druhého řádku tabulky 8.5 MLD hlášením obsahujícím pro skupinu X záznam CHANGE_TO_EXCLUDE( ). Příklad vidíte na obrázku 8.6, kdy dolní stanice vstupuje do skupiny ff1e::28:3a.

Pokud stanice opouští skupinu, přechází z pohledu MLD do režimu INCLUDE( ). Jestliže ji předtím přijímala bez omezení, tedy byla ve stavu EXCLUDE( ), pošle podle posledního řádku tabulky 8.5 hlášení se záznamem CHANGE_TO_INCLUDE( ). Na obrázku 8.7 levá stanice vystupuje ze skupiny ff15::1234.

Hlášení o změnách či jiné události mohou vést k situaci, kdy si směrovač není jist, jaký je vlastně aktuální stav příjmu skupinových dat na lince. K jeho zjištění slouží MLD dotaz (query). Velmi se podobá dotazu z MLDv1, pouze přibyla možnost přidat do něj adresy zdrojů.

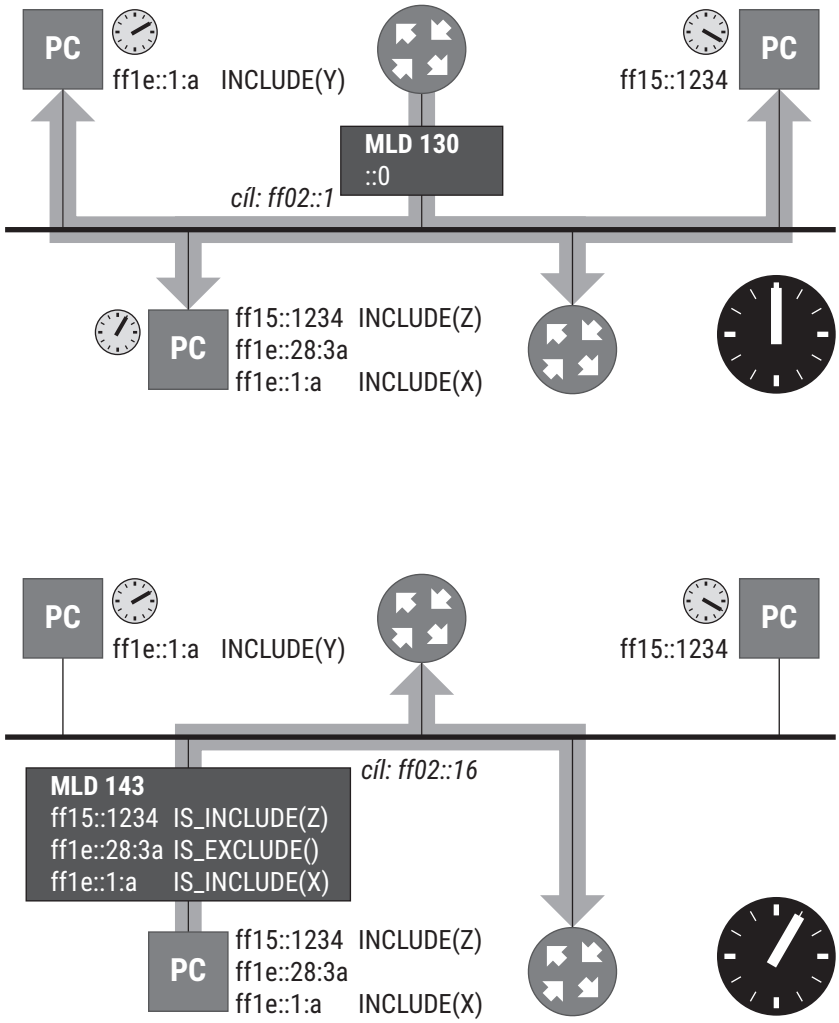


Obrázek 8.6: MLDv2 – počítač vstupuje do skupiny

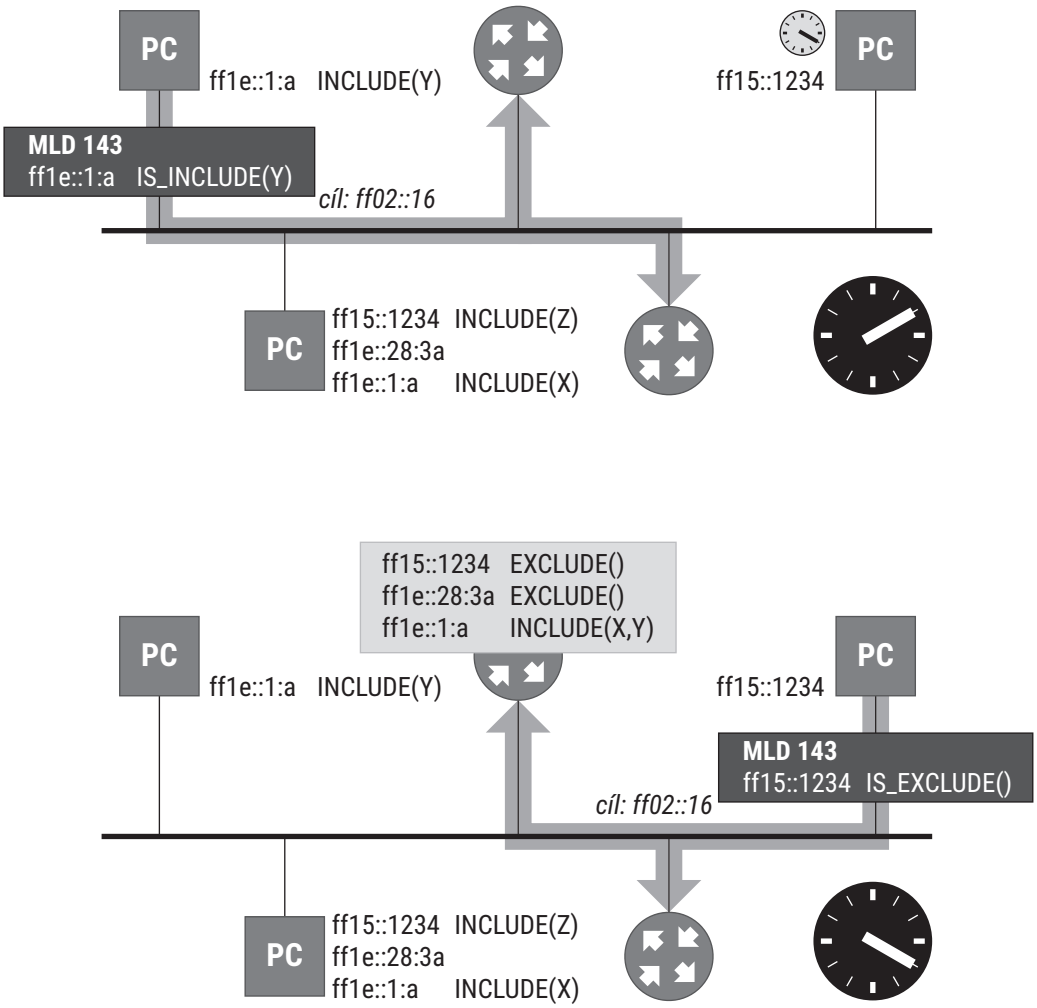


Obrázek 8.7: MLDv2 – počítač opouští skupinu

V MLDv2 může směrovač podle potřeby položit jeden ze tří typů dotazů: Obecný dotaz s nulovou adresou skupiny znamená „Sháním všechny posluchače skupinových dat“. Pokud uvede adresu skupiny, zajímají jej jen příjemci této skupiny. Jestliže navíc přidá i adresy zdrojů, ptá se „Poslouchá někdo tuto skupinu z uvedených zdrojů?“ Obecný dotaz se posílá všem (na adresu ff02::1), konkrétní na adresu skupiny.



Obrázek 8.8: MLDv2 – směrovač zjišťuje aktivní skupiny



Obrázek 8.8 (pokračování): MLDv2 – směrovač zjišťuje aktivní skupiny

Obecný dotaz a reakce na něj představuje obrázek 8.8 a jeho pokračování. Stejně jako v MLDv1 počítače své odpovědi náhodně zpozdí, existují tu však dvě významné změny: Počítač do jednoho hlášení zařadí všechny své skupiny[3] a posílá je MLDv2 směrovačům, nikoli na adresu skupiny. Koncové stanice svá hlášení neslyší a nereagují na ně. Jestliže v MLDv1 je přeneseno jedno hlášení pro každou skupinu, kterou někdo na lince přijímá, v MLDv2 se posílá jedno hlášení za každý počítač zapojený do skupinového příjmu[4].

Pro odpověď na dotaz slouží speciální typy záznamů 1 a 2 (viz tabulka 8.4 na straně 197), jimiž počítač ohlásí „pro skupinu X mám filtr daného typu a obsahuje následující adresy zdrojů". Směrovače přicházející odpovědi shromažďují a podle nich sestaví filtr pro příslušné rozhraní. Výsledek vidíte na konci obrázku 8.8.

Praxe ukázala, že příjem skupiny od kohokoli s výjimkou vyjmenovaných adres je koncept ryze teoretický a v reálném provozu se neobjevuje. Režim EXCLUDE se v praktickém provozu vyskytuje jen s prázdným seznamem odesilatelů, pokud je skupina přijímána odkudkoli.

Tuto skutečnost kodifikuje RFC 5970: *Lightweight Internet Group Management Protocol Version 3 (IGMPv3) and Multicast Listener Discovery Version 2 (MLDv2) Protocols* zavedením odlehčené verze *Lightweight MLDv2 (LW-MLDv2)*. Jedná se o zpětně kompatibilní podmnožinu plného MLDv2, která výrazně omezuje režim EXCLUDE a připouští jej pouze s prázdným seznamem zdrojů. Chování protokolu se nemění, ale do lehké verze jsou zařazeny jen jeho části. Vzhledem k tomu, že odstraněny byly části reálně nepoužívané, neměla by koexistence prvků podporujících MLDv2 a LW-MLDv2 působit problémy.

8.3 Směrování skupinových datagramů

Protokol MLD umožňuje klientům vstoupit do skupiny a přihlásit se k odběru datagramů, směřujících na její adresu. Zbývá už jen to nejtěžší: koordinovat tyto informace, zjistit rozložení příjemců jednotlivých skupin v síti a vytvořit co nejefektivnější cesty, jak jim doručovat data. Tuto činnost mají na starosti skupinové směrovací protokoly.

Prodělaly určitý vývoj, v němž poměrně významnou roli hrál *Distance Vector Multicast Routing Protocol (DVMRP)*, který ale není příliš efektivní a nehodí se pro rutinní nasazení. V současné době před ním dostává přednost skupina protokolů s názvem *Protocol Independent Multicast (PIM)*. Toto společné označení skrývá čtyři dost odlišné protokoly:

3: V MLDv1 obsahuje hlášení jen jednu skupinu, každá skupina má svůj vlastní zpožďovací časovač.
4: Za předpokladu, že neposílá příliš mnoho záznamů a vejdou se vždy do jednoho hlášení.

- **PIM – Dense Mode (PIM-DM)** je vhodný pro situace s vysokou hustotou příjemců, kdy je třeba datagramy distribuovat skoro do všech částí sítě. Jeho použitelnost je prakticky omezena na lokální sítě a v současné době je považován za překonaný.
- **PIM – Sparse Mode (PIM-SM)** naopak předpokládá, že příjemci jsou v síti roztroušeni jen zřídka. Vytváří pro ně distribuční stromy na základě žádostí o příjem skupinových dat. To jej činí vhodným pro rozlehlé sítě a široko daleko nejpoužívanějším protokolem současnosti.
- **Bidirectional PIM (BIDIR-PIM)** představuje variantu PIM-SM. Jeho distribuční stromy jsou ovšem obousměrné, zatímco PIM-SM používá skupinu jednosměrných stromů.
- **PIM Source Specific Multicast (PIM-SSM)** rozlišuje při doručování nejen skupinovou adresu, ale i adresu zdroje. Je určen především pro komunikaci, kdy vysílá jediný zdroj, jehož data přijímá řada klientů (něco jako internetová televize či rádio).

K některým svým činnostem skupinové směrování využívá i směrovací informace pro individuální (unicastové) pakety. Nestará se však o to, jak individuální směrovací tabulka vznikla a není vázáno na konkrétní směrovací protokol. Odtud pochází ono „Protocol Independent" v názvu PIM.

Podíváme-li se na individuální směrování, najdeme Internet rozdělený na části (autonomní systémy), které provozují určitý interní směrovací protokol (OSPF, IS-IS, RIP a podobně) a vzájemně si vyměňují informace externím protokolem BGP. Při skupinovém směrování je situace obdobná. V Internetu najdeme oblasti, uvnitř nichž běží vnitřní směrovací protokol (zpravidla PIM-SM). Říká se jim PIM domény, mají svá shromaždiště (RP) a organizují si doručování skupinových dat po svém. Představují určitou analogii autonomních systémů.

Většina skupinového provozu probíhá uvnitř PIM domény, ovšem je třeba umožnit jí i komunikaci s okolním světem. V IPv4 si proto jednotlivé PIM domény vzájemně vyměňují informace o svých skupinových zdrojích. To umožňuje, aby vznikaly skupiny s příjemci a zdroji roztroušenými v několika PIM doménách. Pro vzájemnou výměnu informací o existujících skupinách a zdrojích slouží *Multicast Source Discovery Protocol (MSDP)*, který má úlohu podobnou BGP ve světě individuálního směrování.

IPv6 díky svým dlouhým adresám může k problému přistoupit jinak a zařadit adresu shromaždiště přímo do skupinové adresy. Žádná výměna informací o dění uvnitř PIM domén pak není potřeba, kdokoli v celém Internetu se přímo z adresy skupiny dozví, kde je její shromaždiště a kam má tedy poslat žádost o příjem dat. Práce na adaptaci protokolu MSDP pro IPv6 byly proto zastaveny a nahrazeny konceptem vložených adres. Jak taková skupinová adresa vypadá jsem popsal na straně 86.

8.3.1 PIM Sparse Mode (PIM-SM)

Začněme nejpoužívanějším a bohužel i nejsložitějším z celé skupiny. V různých situacích jsou nároky na co nejefektivnější distribuci skupinových dat odlišné, proto v sobě PIM-SM kombinuje několik odlišných mechanismů. Díky nim může nabídnout adekvátní prostředky pro jednotlivé

případy, ale jeho celková složitost tím nepříjemně narůstá. Jeho definici najdete v RFC 7761: *Protocol Independent Multicast – Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification*.

Základní myšlenkou PIM-SM je, že skupinově adresovaná data se doručují jen tam, kde si o ně někdo řekl. Používá k tomu speciální typ zpráv *Připojení (PIM Join)*, jejichž prostřednictvím ohlašuje zájem o odběr skupiny směrovač, kterému se ohlásil alespoň jeden její příjemce.

Jinou otázkou je, kam žádosti o příjem skupiny adresovat. PIM-SM pro tento účel zavádí speciální směrovač, označovaný jako *shromaždiště (rendezvous point, RP)*. Jak název napovídá, představuje místo v síti, kde si dávají dostaveníčko odesilatelé dat určité skupiny s jejich příjemci. Teoreticky může mít každá skupina své vlastní shromaždiště, v praxi ale bývá v každé části jeden či několik málo strojů vyhrazených jako RP pro všechny zdejší skupiny.

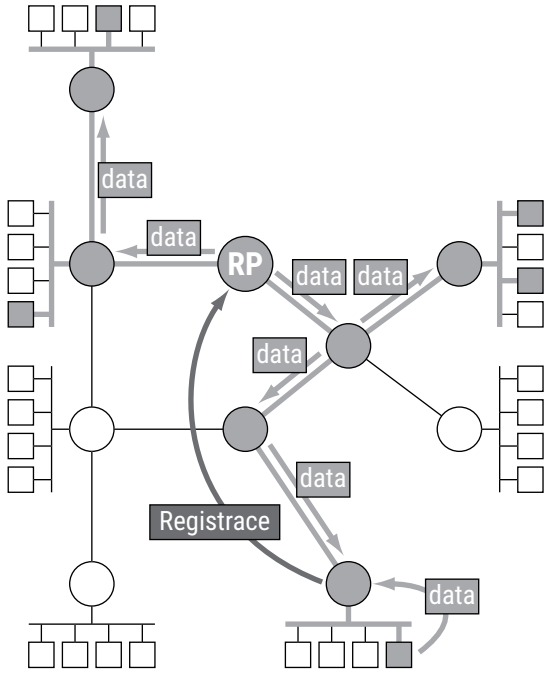
PIM-SM vytváří pro skupinu tak zvaný *sdílený strom (shared tree)*, jehož kořenem je shromaždiště a větve dosahují do všech směrovačů, které se přihlásily k odběru skupiny. Základní distribuce dat vypadá tak, že odesilatel skupinových dat pošle datagram, jeho přilehlý směrovač jej zabalí do PIM zprávy nazývané z nevyzpytatelných důvodů *Registrace (Register)* a pošle na individuální adresu shromaždiště. Zde se příchozí datagram vybalí a rozešle sdíleným stromem příjemcům. Sdílený strom je podle této představy jednosměrný a slouží k distribuci dat od RP k příjemcům, příklad vidíte na obrázku 8.9.

Když se směrovači protokolem MLD ozve zájemce o novou, zde dosud nepřijímanou skupinu, směrovač pošle shromaždišti dané skupiny zprávu *Připojení*, kterou žádá o zapojení do jejího sdíleného stromu. Skupina, do níž se hlásí, bývá označována jako (*,G). Tento zápis znamená, že odesilatel má zájem o pakety ze všech zdrojů (hvězdička) zaslané na skupinovou adresu G.

Připojení se posílá na individuální adresu RP. Směrovače po cestě si poznamenají, že do rozhraní, ze kterého přišla, mají do budoucna posílat danou skupinu. Jakmile zpráva dorazí ke směrovači, který již je součástí jejího sdíleného stromu, žádost o vstup se zahodí, protože právě byla naplněna. Celá posloupnost směrovačů, jimiž na své cestě prošla, se přidá do sdíleného stromu skupiny a bude se do budoucna účastnit předávání jejích dat.

Proces zapojení do sdíleného stromu ilustrují obrázky 8.10 (zaslání požadavku o příjem skupiny) a 8.11 (rozšíření stromu na základě této žádosti). Dokud směrovač má přímé či nepřímé posluchače skupiny, posílá v určitých intervalech *Připojení*, aby u nadřízených občerstvil své členství ve sdíleném stromu. Jestliže z určité větve dlouho nepřicházejí připojovací zprávy, odřízne se.

Při vstupu do sdíleného stromu i rozesílání dat hrají důležitou roli směrovače poblíž příjemců a zdrojů dat. Ty lze určit snadno, pokud je dotyčný stroj připojen dvoubodovou linkou. Většina počítačů je dnes ale připojena sítěmi s mnoha účastníky, jako jsou Ethernet či Wi-Fi. Do nich může být zapojeno i několik směrovačů a je třeba vyjasnit, který z nich má mít tuto úlohu. PIM-SM pro



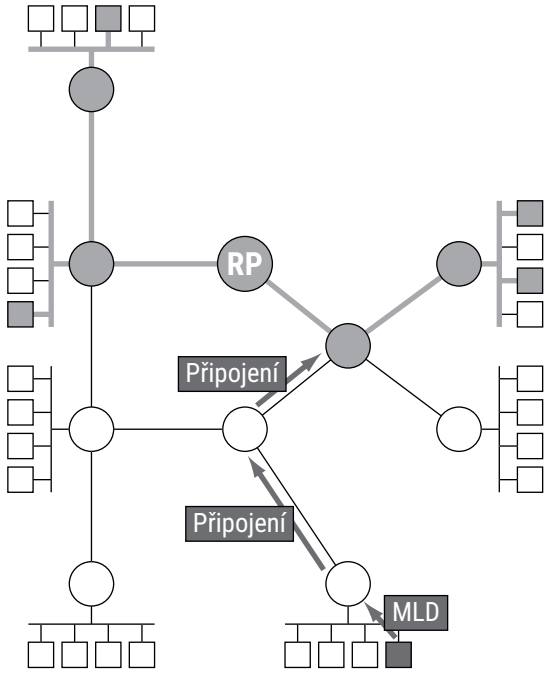
Obrázek 8.9: Distribuce dat sdíleným stromem PIM-SM

tento účel definuje jednoduchý mechanismus, kterým si skupina směrovačů připojených ke stejné lince vybere mezi sebou tak zvaný *zodpovědný směrovač (designated router, DR)*, který zastupuje tuto síť a počítače k ní připojené. Zodpovědný směrovač příjemce posílá *Připojení*, zodpovědný směrovač odesilatele posílá *Registraci*.

Už z jednoduchého příkladu na obrázku 8.9 je patrné, že rozesílání dat sdíleným stromem je neefektivní. Do míst ležících poblíž zdroje se dostávají přes RP, takže z Olomouce do Ostravy se jezdí přes Prahu. PIM proto obsahuje několik optimalizačních mechanismů.

Prvním z nich je *Konec registrace (Register-Stop)*. Vychází z toho, že odesilatel skupinových dat bývá zároveň příjemcem dané skupiny. Jedna větev sdíleného stromu proto vede směrem k němu a data po ní proudí dvakrát – nejprve registrovaná směrem k RP, později rozbalená směrem k příjemcům. To by se dalo odstranit.

Shromaždiště proto po obdržení registrovaného datagramu ze zdroje S pro skupinu G pošle zodpovědnému směrovači, který odeslal *Registraci*, žádost o vstup do stromu (S,G). Jedná se o nový distribuční strom pro datagramy směřující na skupinovou adresu G odeslané ze zdroje S. Použije

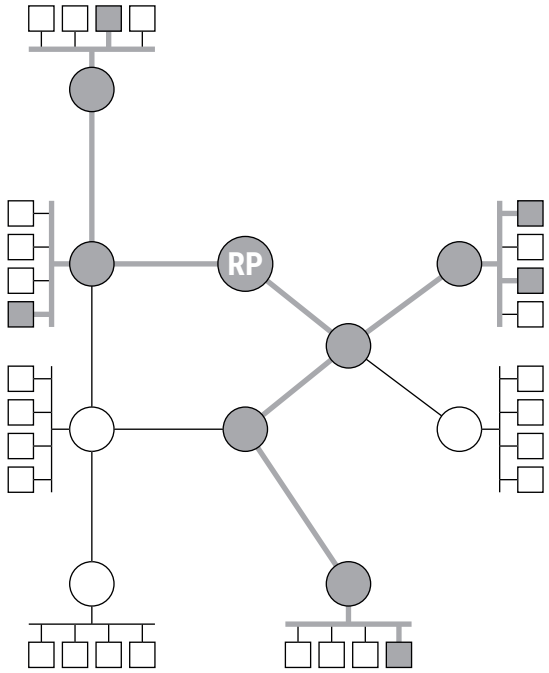


Obrázek 8.10: PIM-SM – žádost o zapojení do sdíleného stromu

k tomu zprávu *Připojení* a stejně jako ve výše popsaném případě sdíleného stromu pro (*,G) se nyní vytvoří větev stromu pro (S,G). Směrovače na ní budou zpravidla také součástí sdíleného stromu (*,G) a budou datagramy přicházející stromem (S,G) předávat do stromu (*,G). Jakmile shromažďišti dorazí první datagram ze stromu (S,G), pošle zodpovědnému směrovači pro S zprávu *Konec registrace*, kterou říká „už mi neposílej registrované datagramy, dostávám je přímo“. Distribuci dat po provedení Register-Stop najdete na obrázku 8.12.

Efektivita šíření dat se tak výrazně zlepší, ale k ideálu mívá stále daleko. Pro některé příjemce může být cesta přes RP slušnou oklikou. Směrovač zapojený do sdíleného stromu skupiny G se může rozhodnout[5] zapojit se přímo do stromu (S,G), jehož kořenem je zodpovědný směrovač zdroje S. Pošle tedy PIM zprávu *Připojení* pro vstup do stromu (S,G) směrem ke zdroji S. Stejně jako dříve to znamená, že se někde (možná až v kořeni) napojí na tento strom.

5: Pravidla, kdy tak má udělat, nejsou oficiálně definována. Záleží na místní politice, například může takový krok udělat, když objem provozu překročí určitou mez.



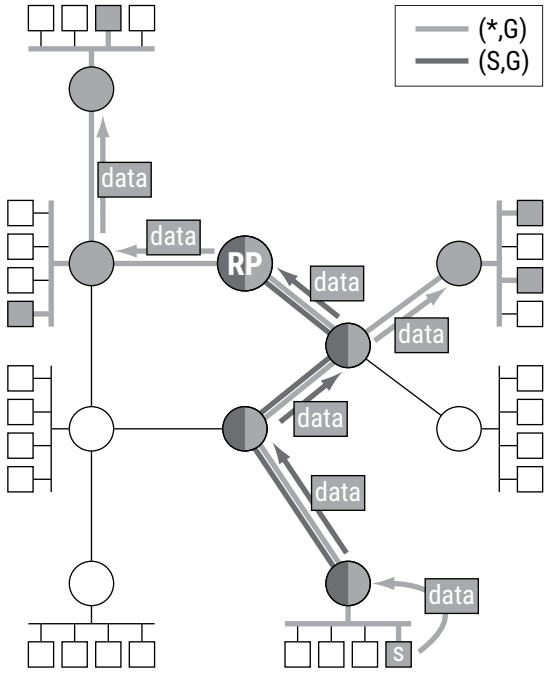
Obrázek 8.11: PIM-SM – sdílený strom po zpracování žádosti z obrázku 8.10

V terminologii PIM je strom (S,G) označován jako *strom nejkratších cest (Shortest-Path Tree, SPT)*. Po rozšíření začne některý směrovač v něm dostávat datagramy dvojmo – jednou přímo od zdroje stromem nejkratších cest, podruhé se zpožděním od RP sdíleným stromem. Na to reaguje odříznutím ze sdíleného stromu pro tento konkrétní zdroj. Pošle svému nadřazenému uzlu ve sdíleném stromě zprávu *Odříznutí (Prune)* pro (S,G), kterou říká „data do skupiny G pocházející od S už mi neposílej". Pokud nadřízený nemá jiného odběratele, předá zprávu dál nahoru – ze sdíleného stromu se tak pro zdroj S odřízne celá nepotřebná větev[6]. Situaci naší ukázkové skupiny poté co směrovač vlevo nahoře vstoupil do stromu nejkratších cest znázorňuje obrázek 8.13.

K podobnému kroku, tedy k přihlášení pouze do stromu (S,G), může sáhnout směrovač, kterému se protokolem MLD přihlásil odběratel pouze pro data z tohoto konkrétního zdroje.

Pokud směrovač zjistí, že pro určitou skupinu už nemá žádné zájemce, pošle ke kořeni příslušného stromu[7] žádost o likvidaci své větve, zprávu *Odříznutí*. Ta cestuje stromem vzhůru tak dlouho,

6: Pro konkrétní zdroj. Dat pocházejících z jiných zdrojů se toto odříznutí netýká.
7: Tedy na adresu RP pro strom sdílený, na adresu zdroje pro strom nejkratších cest.



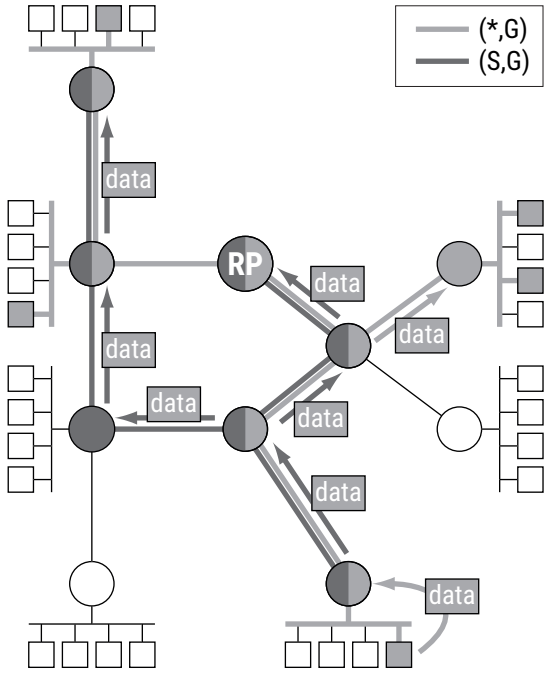
Obrázek 8.12: PIM-SM – distribuce dat po Register-Stop

dokud nedorazí na směrovač s jiným odběratelem, který nadále má zájem o příjem skupiny. Celá větev distribučního stromu, jíž zpráva *Odříznutí* prošla, bude odstraněna.

Situaci, kdy počítač vpravo dole odhlásí příjem skupiny, ilustruje obrázek 8.14. Čárkovaně jsou v něm zobrazeny větve sdíleného stromu, které budou v důsledku této akce zrušeny.

PIM-SM je poměrně minimalistický ohledně počtu různých typů zpráv. Vystačí s pouhými šesti základními typy, jejich přehled uvádí tabulka 8.6. Dost složitá jsou však pravidla pro jejich vysílání a zpracování – kdo komu a za jakých podmínek posílá kterou z nich a jak se má chovat její příjemce.

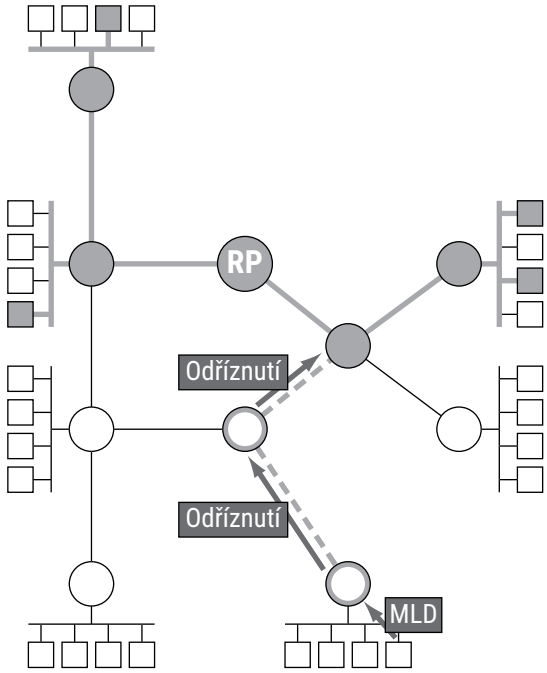
Aby PIM-SM dobře fungoval, musí umět najít adresu shromaždiště pro každou skupinu. Navíc musí být tato adresa v rámci dosahu skupiny jednoznačná, jinak by vznikaly oddělené sdílené stromy. Tento problém vůbec není jednoduchý a PIM-SM pro něj nabízí několik alternativních řešení. V první řadě je možná statická konfigurace RP pro jednotlivé skupiny, kterou podle RFC 7761 musí podporovat každý směrovač implementující PIM-SM. Druhou alternativou je vložit adresu RP přímo do skupinové adresy (tzv. embedded RP, viz strana 86). Na rozdíl od ostatních je tato možnost dostupná jen pro IPv6, protože v IPv4 adrese na něco takového prostě není dost místa.



Obrázek 8.13: PIM-SM – strom nejkratších cest

Haló	*Hello*	oznámení existence směrovače
Registrace	*Register*	zabalený skupinový datagram odeslaný RP k distribuci
Konec registrace	*Register-Stop*	ukončit odesílání registrovaných datagramů
Připojení	*Join*	vstup do stromu
Odříznutí	*Prune*	odpojení od stromu
Prohlášení	*Assert*	řešení problémů s několika směrovači v jedné LAN

Tabulka 8.6: Typy zpráv protokolu PIM-SM



Obrázek 8.14: PIM-SM – opuštění sdíleného stromu

Má příjemné vlastnosti, protože je na jedné straně dost pružná – umožňuje vytvářet RP podle potřeby – a zároveň jednoduchá. Z adresy skupiny se snadno sestaví adresa jejího RP a může se komunikovat.

Třetí varianta je nejsložitější. Definuje postup pro dynamické určování shromaždišť jednotlivých skupin. Jeho definici najdete v RFC 5059: *Bootstrap Router (BSR) Mechanism for Protocol Independent Multicast (PIM)*. Spočívá v tom, že směrovače v jedné PIM doméně si mezi sebou vyberou jednoho „rozhodčího", označovaného jako *bootstrap router (BSR)*. U něj se pak ostatní směrovače ucházejí o roli RP. BSR vybere shromaždiště pro jednotlivé skupiny a tuto informaci pak rozšíří všem směrovačům v PIM doméně.

RP je pro skupinu unikátní a představuje tak zároveň její slabé místo. Pokud přestane pracovat, zastaví se činnost sdíleného stromu (data do něj posílá jen RP) a skupina bude mít vážné potíže. Jednou z možností, jak tento problém obejít, je realizovat shromaždiště skupinou směrovačů se společnou výběrovou adresou (anycast RP). Ze stromu se pak vlastně stane les, příjemci i vysílající jsou napojeni vždy na nejbližšího zástupce RP, který pak datové pakety předává i dalším dílčím RP

k odeslání do jejich stromů. Podrobněji toto uspořádání popisuje RFC 4610: *Anycast-RP Using Protocol Independent Multicast (PIM)*.

8.3.2 PIM Dense Mode (PIM-DM)

Tato odrůda PIM předpokládá, že příjemci skupinového vysílání jsou téměř všude. Není-li řečeno jinak, rozesílá skupinová data do všech rozhraní kromě toho, ze kterého dorazila[8]. Tento způsob distribuce ovšem vede k tomu, že data mouhou přicházet z nečekaných směrů a pokud síť obsahuje cyklus, mohla by po ní kroužit i věčně. Aby předávání probíhalo alespoň trochu rozumně, používá PIM-DM tak zvanou *RPF kontrolu (Reverse Path Forwarding check)*. Pokud dorazí skupinově adresovaný datagram, podívá se do individuální směrovací tabulky, kudy vede cesta k jeho odesilateli. Jestliže vede rozhraním, jímž datagram dorazil, přijme jej a rozešle do všech ostatních rozhraní. V opačném případě jej ignoruje, protože přišel jakousi oklikou.

Pokud některý ze směrovačů nechce určitou skupinu přijímat, pošle ve směru jejího zdroje PIM zprávu typu *Odříznutí*. Stejně jako v případě PIM-SM znamená požadavek o odpojení z distribuce. Odříznutí se provádí vždy pro konkrétní dvojici zdroje a skupiny (S,G) a posílá se směrem k S. Směrovač se musí postupně odpojit ze skupiny G pro všechny zdroje, jež do ní vysílají. Ve stavových informacích pro distribuci si PIM-DM ukládá informace o odříznutých směrovačích. Datagram ze zdroje S pro skupinu G pak pošle do všech rozhraní kromě těch, kde sousední směrovač odhlásil příjem (S,G).

Odhlášení je dočasné. Po vypršení doby platnosti se zruší (pokud je soused neobnoví) a data opět začnou být zasílána. Ovšem zájem o ně může vzniknout dříve – pokud se odříznutému směrovači ohlásí příjemce dané skupiny. Pro tento případ je definován nový typ PIM zprávy nazvaný *Roubování (Graft)*, která zhruba znamená „rozmyslel jsem si to, o skupinu (S,G) mám zase zájem“. Směrovač jej pošle všem sousedům, u nichž se dříve odřízl.

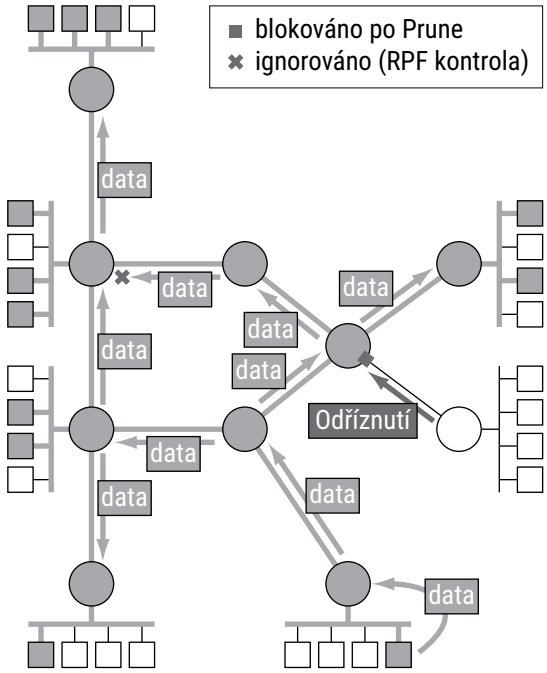
Podrobný popis protokolu najdete v RFC 3973: *Protocol Independent Multicast – Dense Mode (PIM-DM): Protocol Specification*.

8.3.3 Bidirectional PIM (BIDIR-PIM)

Protokol PIM-SM staví dva druhy stromů: jednosměrný sdílený strom, do nějž data posílá pouze RP a paket se mu musí poslat zprávou *Registrace*, a opět jednosměrné stromy nejkratších cest z jednotlivých zdrojů. Znamená to, že pro jednu skupinově adresovanou videokonferenci s deseti účastníky bude v PIM-SM existovat 11 stromů (po jednom pro každý zdroj plus sdílený). Pro zúčastněné směrovače je to dost zatěžující.

BIDIR-PIM naproti tomu staví pro skupinu jediný strom, který je sdílený a zároveň obousměrný. Datagram do něj může zaslat libovolný ze zapojených směrovačů a ten se pak rozšíří do všech

8: Opět záplavový algoritmus, roztékání aneb flooding.



Obrázek 8.15: Distruce datových paketů podle PIM-DM

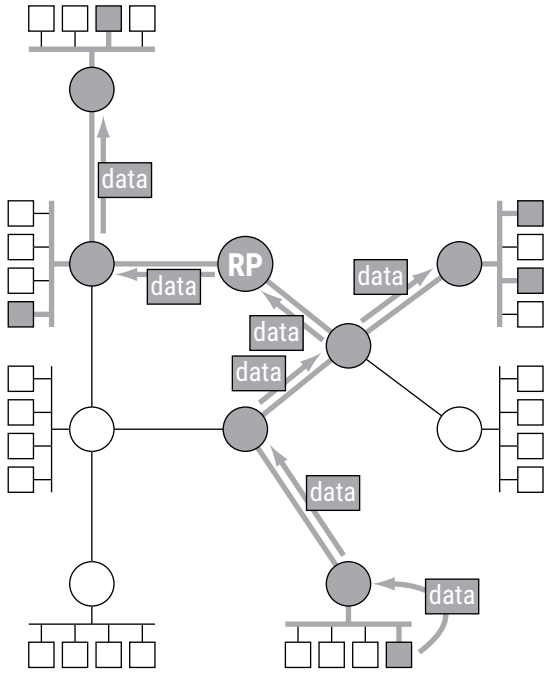
ostatních větví, jak vidíte na obrázku 8.16. Protokol i jeho implementace je díky tomu podstatně jednodušší, než v případě PIM-SM. Cenou za jednoduchost je nižší efektivita směrování dat – distribuce sdíleným stromem může vést cestami, které zdaleka nejsou optimální a které nesnesou srovnání se stromem nejkratších cest.

Definice BIDIR-PIM je ze všech zúčastněných nejmladší. Je obsažena v RFC 5015: *Bidirectional Protocol Independent Multicast (BIDIR-PIM)*.

8.3.4 Source-Specific Multicast (PIM-SSM)

Zjednodušeně řečeno: SSM vznikne, když z PIM-SM použijeme jen stromy nejkratších cest. SSM řeší doručování datagramů odeslaných vždy konkrétním zdrojem S na skupinovou adresu G. Bohužel používá poněkud odlišnou terminologii, dvojici (S,G) se zde říká *kanál (channel)*.

SSM nepotřebuje shromaždiště, žádosti o vstup do distribučního stromu (přihlášení se k odběru kanálu) se posílají na individuální adresu zdroje S. Stejně jako v případě stromu nejkratších cest u PIM-SM se zastaví, jakmile dorazí ke směrovači, který již je součástí kanálu, případně až ke směrovači, k němuž je připojen zdroj S.



Obrázek 8.16: Obousměrný sdílený strom v BIDIR-PIM

Příjemnou vlastností SSM je, že nevyžaduje koordinaci přidělování skupinových adres. Jestliže si stroje X a Y zvolí pro odesílání skupinových dat stejnou cílovou adresu G, jedná se z pohledu SSM o dva různé kanály (X,G) a (Y,G), které nemají nic společného a jsou zpracovávány zcela odděleně. Vysílajícímu tedy stačí, aby si sám udržel pořádek ve skupinových adresách, na něž posílá data, a nemusí brát ohled na adresy používané jinými zdroji.

Adresy pro skupiny SSM mají svůj vlastní prostor, jejich formát jste viděli na obrázku 3.9 na straně 85. RFC 3307 navíc klade omezení na skupinové identifikátory (viz tabulka 3.2 na straně 84). V praxi pro jejich dynamické přidělování podle potřeb aplikací slouží rozmezí ff3*x*::8000:0 až ff3*x*::ffff:ffff.

PIM-SSM je popsán v RFC 4607: *Source-Specific Multicast for IP*.

9 Domain Name System

Domain Name System (DNS) slouží pro pohodlí uživatelů. Umožňuje používat místo IP adres symbolická jména počítačů, uspořádaná do hierarchické struktury. Jeho dvě nejzákladnější funkce jsou: převod jména na IP adresu a naopak převod IP adresy na odpovídající jméno.

V případě IPv6 je role DNS velmi významná, protože zdejší adresy jsou nechutně dlouhé a obtížně se pamatují i zapisují. Příběh IPv6 a DNS má sice za sebou dost klopotnou historii zahrnující převraty, návraty i slepé uličky, nicméně po bouřlivých začátcích se situace stabilizovala a dnes už běží podpora IPv6 v DNS hladce.

Symbióza má dvě stránky: za prvé je třeba ukládat IPv6 adresy do DNS, aby bylo možné získávat ke jménům adresy obou protokolů a naopak, za druhé se pak musí DNS servery zpřístupnit po IPv6, aby se jich klienti hovořící novým protokolem vůbec měli jak zeptat. Tyto dva problémy – IPv6 obsažené v DNS záznamech a IPv6 jako transport pro DNS – jsou do značné míry nezávislé. Klidně je možné hovořit se serverem protokolem IPv4 a vyměňovat si přitom informace o IPv6 a naopak. Ten první vyžaduje standardizaci ze strany IETF, ten druhý je spíše otázkou implementací DNS serverů a úsilí jejich správců. Bohužel v obou se objevily problémy, jejichž odstranění trvalo dlouhé roky.

V roce 1995 vyšlo RFC 1886: *DNS Extensions to support IP version 6*, které definovalo jednoduché, ale nepříliš silné konstrukce pro ukládání IPv6 informací do DNS. Po pěti letech následovalo RFC 2874: *DNS Extensions to Support IPv6 Address Aggregation and Renumbering*, které zavedlo jiné (podstatně vypečenější) mechanismy. Zároveň prohlásilo předchozí specifikaci za zastaralou.

A začala zuřivá debata. Objevily se pochybovačné hlasy, které kritizovaly některé problémy RFC 2874. Zároveň vázla jeho implementace a správci řady sítí odmítali nově definované DNS záznamy používat. Schizma se prohloubilo v létě 2001, kdy setkání IETF vyhlásilo novější specifikaci za experimentální a pro produkční sítě doporučilo vrátit se k RFC 1886. Potěšilo zejména ty, kteří se od původních mechanismů nikdy neodklonili. Tento názor o rok později potvrdilo RFC 3363: *Representing Internet Protocol version 6 (IPv6) Addresses in the Domain Name System (DNS)*.

Rozhodující slovo do několikaletého sporu vneslo v roce 2003 RFC 3596: *DNS Extensions to Support IP Version 6*. Představuje návrat na původní pozice (s velmi drobnými změnami), o RFC 2874 se vůbec nezmiňuje. To získalo statut experimentálního protokolu, stejně jako jeho souputník RFC 2673 pro zápis binárních prefixů v reverzních adresách. Později byly tyto specifikace definitivně opuštěny a prohlášeny za historické – v RFC 6563 a RFC 6891.

Kromě ukládání IPv6 dat do DNS je také třeba zajistit jeho přenos novým protokolem. To vypadá jako banalita, nicméně trvalo řadu let, než se dostupnost po IPv6 stala samozřejmostí u autori-

tativních serverů v horních patrech doménové hierarchie. Dnes už je situace kořenové domény a domén první úrovně velmi dobrá, níže podpora dosud slábne. Například v doméně *cz* počátkem roku 2019 podporují IPv6 autoritativní servery jen asi 30 % domén druhé úrovně.

9.1 IPv6 adresy v DNS

Jak již bylo řečeno, ukládání IPv6 informací do DNS řeší RFC 3596. Je jednoduché a drží se celkem přímočaře řešení, které se používá pro IPv4.

Pro dopředné dotazy (tedy zjišťování adresy k danému jménu) zavedlo nový typ záznamů nazvaný *AAAA*. V IPv4 k tomuto účelu slouží záznamy *A* a jelikož je délka IPv6 adresy čtyřnásobná, odrazila se tato skutečnost v názvu nového záznamu.

Má-li počítač *pc.kdesi.cz* adresu 2001:db8:89ab:1:123:45ff:fe67:89ab, bude v zónovém souboru[1] pro doménu *kdesi.cz* obsažen záznam:

```
pc        AAAA  2001:db8:89ab:1:123:45ff:fe67:89ab
```

Celá definice domény *kdesi.cz*, v níž se nacházejí dva autoritativní DNS servery ve dvou různých podsítích a jeden počítač, by mohla vypadat následovně:

```
$ORIGIN kdesi.cz.
@         SOA ns1.kdesi.cz. root.ns1.kdesi.cz. (
          2019013000 ; serial
          28800      ; refresh
          14400      ; retry
          3600000    ; expire
          86400      ; default_ttl
          )

;DNS servery
          NS  ns1
          NS  ns2

;adresy počítačů
ns1       AAAA  2001:db8:89ab:1::1
ns2       AAAA  2001:db8:89ab:2::2
pc        AAAA  2001:db8:89ab:1:123:45ff:fe67:89ab
```

1: Zónový soubor obsahuje definici dané domény. Tento pojem má původ v programu BIND, nejpoužívanějším DNS serveru.

Nepříjemnou vlastností tohoto přístupu je, že pokud síť používá několik prefixů a počítače tedy mají několik adres, musí mít i odpovídající počet AAAA záznamů. Kdyby například síť z předchozího příkladu kromě prefixu 2001:db8:89ab::/48 používala navíc třeba prefix 2002:a00:1::/48 pro automatické tunelování 6to4 (dočtete se o něm na straně 284), zónový soubor by rázem nabobtnal:

```
$ORIGIN kdesi.cz.
@         SOA ns1.kdesi.cz. root.ns1.kdesi.cz. (
          2019013000 ; serial
          28800      ; refresh
          14400      ; retry
          3600000    ; expire
          86400      ; default_ttl
          )

;DNS servery
          NS  ns1
          NS  ns2

;adresy počítačů
ns1       AAAA  2001:db8:89ab:1::1
          AAAA  2002:a00:1:1::1
ns2       AAAA  2001:db8:89ab:2::2
          AAAA  2002:a00:1:2::2
pc        AAAA  2001:db8:89ab:1:123:45ff:fe67:89ab
          AAAA  2002:a00:1:1:2a0:ecff:fe12:3456
```

Zpětný dotaz vychází ze známé IPv6 adresy a snaží se k ní získat jméno. Stejně jako ve světě IPv4 se používají záznamy typu PTR. Dotaz je položen prostřednictvím doménového jména sestaveného tak, že se obrátí pořadí šestnáctkových číslic v adrese a na konec se připojí doména *ip6.arpa*[2]. Nuly se pochopitelně nesmí vynechávat, adresa musí být kompletní. Takže pro výše zmiňovanou adresu 2001:db8:89ab:1:123:45ff:fe67:89ab by reverzní dotaz měl tvar:

b.a.9.8.7.6.e.f.f.f.5.4.3.2.1.0.1.0.0.0.b.a.9.8.8.b.d.0.1.0.0.2.ip6.arpa

Díky obrácenému pořadí číslic se obecná část adresy (prefix) dostává na konec a lze tedy realizovat distribuovanou správu reverzních domén. Například síť instituce vlastnící doménu *kdesi.cz* má pre-

2: Původně byla v RFC 1886 pro tento účel použita doména *ip6.int*. Pozdější RFC 2874 použilo pro tento účel *ip6.arpa*, což navíc odpovídá praxi z IPv4. Aby se domény uvedly do souladu, prohlásilo RFC 3152: *Delegation of IP6.ARPA* doménu *ip6.int* za zavrženou a předepsalo použití *ip6.arpa* pro veškeré reverzní domény IPv6. Na tom trvá i RFC 3596.

fix 2001:db8:89ab::/48 a tudíž dostane do správy reverzní doménu *b.a.9.8.8.b.d.0.1.0.0.2.ip6.arpa*. Pro počítač *pc.kdesi.cz* by její zónový soubor obsahoval záznam:

```
b.a.9.8.7.6.e.f.f.f.5.4.3.2.1.0.1.0.0.0  PTR  pc.kdesi.cz.
```

Celá reverzní zóna odpovídající výše uvedené doméně *kdesi.cz* by musela obsahovat:

```
$ORIGIN b.a.9.8.8.b.d.0.1.0.0.2.ip6.arpa.
@         SOA ns1.kdesi.cz. root.ns1.kdesi.cz. (
          2019013000 ; serial
          28800      ; refresh
          14400      ; retry
          3600000    ; expire
          86400      ; default_ttl
          )

;DNS servery
          NS  ns1.kdesi.cz.
          NS  ns2.kdesi.cz.

;reverzní záznamy
1.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.1.0.0.0  PTR  ns1.kdesi.cz.
2.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.0.2.0.0.0  PTR  ns2.kdesi.cz.
b.a.9.8.7.6.e.f.f.f.5.4.3.2.1.0.1.0.0.0  PTR  pc.kdesi.cz.
```

Reverzní domény jsou samozřejmě obludně dlouhé, což je důsledkem dlouhých IPv6 adres. Není třeba psát je úplně celé (díky $ORIGIN), ale i tak zbyde v zónovém souboru 16 až 20 číslic.

Pracné, ale robustní. Tak by se stručně dalo shrnout krédo, v jehož duchu je postaveno RFC 3596 (a jeho předchůdce RFC 1886). Varianta, se kterou přišlo RFC 2874, umožňovala, aby se při dopředném i zpětném hledání část informace doplnila z jiného záznamu. To umožňovalo velmi elegantně přidávat, odebírat či měnit prefixy v adresách. Bohužel ale zároveň zvyšovalo zátěž DNS systému dotazy na další části a zároveň i riziko, že se řetězec navazujících záznamů někde přetrhne a výsledek se stane nedobytným. Věnujme mu tichou vzpomínku.

Rozsah IPv6 záznamů si de facto vynucuje strojové generování zónových souborů. Pokud není cílová síť opravdu malá a adresy a jména v ní se mění obvyklou rychlostí, je ruční editace zónových souborů nepříjemná a riziko zanesení chyb vysoké. Vřele doporučuji poohlédnout se po vhodném programu, který povede databázi počítačů a zónové soubory podle ní na přání vygeneruje.

9.2 Obsah domén

Technické řešení pro poskytování IPv6 informací v DNS je celkem jednoduché, přesto však zbývá pár témat k přemýšlení. Patří mezi ně především rozhodnutí, jaké IPv6 adresy vlastně do DNS ukládat. Kromě toho je třeba si ujasnit, jak koncipovat vztah jmen a adres obou protokolů[3].

Z kapitoly 3.10 na straně 92 víte, že rozhraní počítače nese několik IPv6 adres s různým dosahem i životností. Které z nich patří do DNS a které nikoli? Začněme pozitivně. Do DNS rozhodně zařaďte:

- Všechny globální individuální adresy stroje s dlouhodobější platností.
- Dlouhodobě platné adresy přechodových mechanismů, jako je třeba 6rd.

Do DNS naopak nepatří:

- Lokální linkové adresy – mají platnost jen pro místní linku, DNS klient pochází odkudkoli a nemá žádnou šanci zjistit, která linka je ta pravá a zda se jej adresa týká či nikoli. Obecně se dá říci, že adresy omezeného dosahu nemají v DNS co dělat.
- Náhodně generované krátkodobé adresy pro zachování soukromí (psal jsem o nich na straně 73) – jednak by bylo třeba obsah zóny neustále aktualizovat, ale především by se vazbou na stejné jméno zcela zabil jejich účel zamezit sledování pohybu stroje v Internetu.

Otevřenou otázkou zůstávají adresy, které správce sítě nemá pod přímou kontrolou. Mám na mysli adresy získané bezstavovou automatickou konfigurací či přidělované liberálním DHCP serverem nastaveným ve stylu „dám nějakou adresu každému, kdo si o ni řekne“. Vznikají víceméně náhodně a navíc mívají krátkodobý charakter. Pro ně neexistuje univerzální doporučení. Svět se asi nezboří, když v DNS nebudou. Pokud je tam chcete mít, bude zřejmě třeba nasadit dynamické aktualizace DNS, jejichž pomocí si klient se serverem dohodne doménové jméno a server je následně zařadí do DNS. Toto rozhodnutí je čistě na vás.

Pokud má počítač jen IPv4 nebo IPv6 adresu, je jeho zařazení do DNS jednoznačně dáno. Jak se ale zachovat, když komunikuje oběma protokoly a má samozřejmě jejich adresy? Nabízejí se dva základní přístupy.

Podle prvního přidělíte IPv4 i IPv6 adresu stejnému jménu. Pokud naše experimentální *pc.kdesi.cz* bude mít IPv4 adresu 10.1.2.3, budou jeho dopředné záznamy následující (v IPv6 jsem zachoval dvojici prefixů):

3: Dovolím si předpokládat, že nejste natolik progresivní, že byste provozovali čistě IPv6 síť. Většina současných sítí funguje „pod obojí“ a odtud pak plynou zde naznačená dilemata.

```
pc          A     10.1.2.3
            AAAA  2001:db8:89ab:1:123:45ff:fe67:89ab
            AAAA  2002:a00:1:1:2a0:ecff:fe12:3456
```

Ano, tak je to správné, tak je to čisté, tak to má být. Pokud někdo projeví touhu komunikovat s *pc.kdesi.cz*, dodá mu DNS všechny tři adresy a jeho stroj si podle svého připojení vybere. Komunikace novým protokolem proběhne zcela transparentně, aniž by se kdo co dozvěděl.

Až na případy, kdy upadne na ústa. Současné operační systémy totiž při dostupnosti obou protokolů dávají většinou přednost IPv6. Pokud tedy stroj navazující spojení bude také mít IPv6 adresu, dá pravděpodobně přednost novému protokolu a použije některý ze záznamů AAAA (z nich vybere podle pravidel popsaných v části 3.12 na straně 97). Jenže když nebude dobře fungovat IPv6 spojení mezi oběma stroji, dopadne to špatně. Taková situace bohužel v současnosti není až tak vzácná. IPv6 se vyskytuje pořád poněkud ostrůvkovitě, někde má experimentální charakter. Různé dohledové programy a systémy upozorňující na nefunkčnosti v síti si často hledí jen IPv4.

Pokud nastane takový problém, spojení se nepodaří navázat. To ovšem musí zjistit až transportní protokol TCP, protože IP si doručování dat nijak nepotvrzuje. Čeká se tedy na vypršení trpělivosti TCP, což trvá desítky vteřin až minuty, teprve pak vzdálený počítač zkusí jinou alternativu a nakonec se snad dostane k něčemu fungujícímu. Jenže tou dobou už nejspíš uživateli došla trpělivost a komunikaci přerušil. Tento problém se snaží řešit algoritmus Happy Eyeballs popsaný v části 9.4 na straně 223, je ale podporován jen některými aplikacemi.

Kromě toho se mohou objevit větší či menší zádrhele na aplikační úrovni. Mohu posloužit ilustračním příkladem: Pro vzdálený přístup k serveru používám SSH. Nezadávám heslo, mám vygenerován soukromý a veřejný klíč, jejichž prostřednictvím se můj klient autentizuje. Jednoho rána se ovšem znenadání začal dožadovat hesla. Důvodem bylo, že jsme serveru výše popsaným způsobem přiřadili IPv6 adresu. Můj stroj také disponuje IPv6 adresou, SSH tedy automaticky přešlo na nový protokol, ale já jsem u svého veřejného klíče na serveru měl nastaveno, že platí jen z IPv4 adresy mého počítače. Musel jsem přidat také jeho IPv6 adresu, abych mohl klíč nadále používat. Občas se zkrátka IPv4 skrývá i pod kameny, kde byste je nečekali.

Druhou možnou strategií je používat pro IPv6 adresy odlišná jména. Bývá obvyklé zavést speciální poddoménu (často nazvanou *ip6* nebo *ipv6*) a do ní je zařadit. V našem experimentálním případě by tedy staré adresy zůstaly v doméně *kdesi.cz*, jména přiřazená IPv6 by končila *ip6.kdesi.cz*. Konkrétně pro stroj *pc* by definice vypadala následovně:

```
pc          A     10.1.2.3

pc.ip6      AAAA  2001:db8:89ab:1:123:45ff:fe67:89ab
            AAAA  2002:a00:1:1:2a0:ecff:fe12:3456
```

V tomto uspořádání z použitého jména přímo vyplývá komunikační protokol. Zadá-li někdo DNS k řešení jméno *pc.kdesi.cz*, dostane pouze IPv4 adresu. Jestliže použije *pc.ip6.kdesi.cz*, získá dvojici IPv6 adres.

Tahle cesta představuje sázku na jistotu. Použil ji například *Google*, v první fázi poskytování svého slavného vyhledávače po IPv6. Případné prodlevy při problémech se síťovým protokolem, které jsem popsal výše, zde byly zcela neakceptovatelné. Proto *www.google.com* vedl pouze na IPv4 adresy, zatímco za jménem *ipv6.google.com* se skrývaly IPv6 adresy téže služby. Později přešli na plnohodnotnou variantu a zavedli záznamy typu A i AAAA pro stejné jméno *www.google.com*.

Oddělení adres samozřejmě znamená útlum IPv6 provozu – většina uživatelů bude používat stará známá jména, která mohou být i vestavěna v aplikacích, a IPv6 zůstane na ocet. Může vám také vadit (nebo vyhovovat), že z údajů poskytnutých DNS se nedá nijak zjistit, že *pc.kdesi.cz* a *pc.ip6.kdesi.cz* mají něco společného. Jsou to dvě zcela oddělená jména se svými reverzními záznamy. Byl *www.google.com* a *ipv6.google.com* stejný stroj? To vědí jen u Google.

Samozřejmě nikde není řečeno, že všechna jména v doméně musí používat stejnou koncepci. V síti TU v Liberci kombinujeme oba postupy: Pro běžné uživatelské počítače používáme oddělená jména, protože na jedné straně chceme umožnit experimenty s IPv6, ale na straně druhé se u nich na kvalitní podporu IPv6 nelze spolehnout. Pouze u vybraných serverů, u kterých za dostupnost IPv6 ručíme a chceme transparentně používat nový protokol, kdykoli to je možné, používáme společné jméno pro záznamy A i AAAA.

Variantu s oddělenými jmény lze také vnímat jako dočasné řešení. Až si budete jisti, že IPv6 služba je dostatečně robustní a dostupná, opustíte její samostatné jméno a přejdete na první variantu. Nicméně s jednotkou dočasnosti 1 furt máme v naší zemi nemalé zkušenosti.

9.3 Provozní záležitosti

Několik informativních RFC se zabývá pragmatickými otázkami soužití IPv6 s DNS. Příjemně minimalistické je RFC 3901: *DNS IPv6 Transport Operational Guidelines*, jehož hlavní myšlenka by se dala shrnout do věty „Nebuďte nadměrně progresivní, nedělejte DNS závislé na IPv6."

Obsahuje dvě doporučení. První se týká rekurzivních serverů v koncových sítích, které řeší dotazy místních klientů. Podle RFC 3901 by měly mít možnost komunikovat oběma protokoly, aby nezůstaly bezmocné, pokud pro některou doménu dostanou jen IPv4 adresy autoritativních serverů. Například ještě počátkem roku 2019 nemá žádný z autoritativních serverů domény *wikipedia.org* IPv6 adresu. Vlastní Wikipedie IPv6 podporuje a pro její servery jsou v DNS záznamy typu AAAA. Ale pokud by váš server hovořil jen IPv6, nedostal by se k nim a Wikipedie by pro vás byla nedostupná.

Dostupnost IPv4 pro místní rekurzivní server lze zařídit i zprostředkovaně. Pokud se jedná o čistou IPv6 síť, mohlo by být přivedení IPv4 k jejímu serveru zbytečně komplikované. Naštěstí implementace DNS serverů obvykle počítají s alternativou, že dotyčný počítač nemá přímý přístup k Internetu. V takovém případě k němu přistupují přes prostředníka (forwarder). Koncový DNS server pak spravuje pouze svou vyrovnávací paměť a jakékoli dotazy, které její pomocí není schopen zodpovědět, předává prostředníkovi. V našem případě by komunikace mezi koncovým serverem a jeho prostředníkem probíhala protokolem IPv6, zatímco prostředník by hovořil oběma protokoly a dokázal se domluvit s kterýmkoli DNS serverem potřebným k vyřešení dotazu.

Druhým konkrétním doporučením obsaženým v RFC 3901 je nedělat opačnou věc. Tedy nevytvářet domény, jejichž všechny autoritativní servery hovoří pouze IPv6. V Internetu existuje řada klientů a serverů podporujících pouze IPv4. Není rozumné házet je přes palubu. Alespoň jeden ze serverů každé domény by měl podporovat starší verzi IP. Ideální samozřejmě je poskytnout dostatečný počet autoritativních serverů jak pro IPv4 tak pro IPv6, aby nikdo neměl problém domluvit se s nimi svým nativním protokolem.

Pokud v novinách nejprve obracíte na černou kroniku, určitě si nenechte ujít RFC 4074: *Common Misbehavior Against DNS Queries for IPv6 Addresses*. Dočtete se v něm, co všechno jsou schopny udělat DNS servery, když jim pošlete dotaz na záznam typu AAAA. Některé omdlí (vůbec neodpoví). Jiné lžou – zatloukají existenci jména, i když pro ně existují záznamy typu A, tváří se jako neautoritativní či pošlou zkomolenou odpověď. Další ten dotaz natolik zmate, že odpoví chybovým kódem. A pak se zkuste na něco spolehnout …

Nejrozsáhlejší a nejčerstvější soubor doporučení a úvah ohledně provozování IPv6 DNS najdete v RFC 4472: *Operational Considerations and Issues with IPv6 DNS*. Probírá komplexně celou problematiku, mimo jiné i otázky adres vhodných pro zařazení do DNS či strategii pojmenování, kterým jsem se věnoval v předchozí části.

Zdůrazňuje se zde, že záznam AAAA je vhodné ke jménu přiřadit, až když IPv6 na daném stroji skutečně funguje. Tedy má nakonfigurovánu příslušnou adresu, je připojen do dosažitelné sítě s fungujícím IPv6 a nový protokol podporují i provozované služby. Toto doporučení platí dvojnásob, pokud používáte strategii společného jména pro oba protokoly.

Dozvíte se také, co se stane, když v DNS nastavíte různou dobu životnosti (TTL) záznamům typu A a AAAA. Prozradím rovnou ponaučení celé bajky: nedělejte to. Dost zevrubně jsou diskutovány otázky dynamické aktualizace DNS při stavové či bezstavové konfiguraci klientů. A pokud byste měli ambice napsat DNS klienta, najdete zde kapitolu s doporučeními, jak by se měl vůči IPv6 chovat.

9.4 Happy Eyeballs

S DNS úzce souvisí i algoritmus pro rychlejší navazování spojení nazvaný Happy Eyeballs. Jeho první definici najdete v RFC 6555, později byla upřesněna v RFC 8305: *Happy Eyeballs Version 2: Better Connectivity Using Concurrency*. Verze 2 vysvětlila některá nejasná místa a doplnila popis řešení problémových situací v sítích, kde je podporováno jen IPv6 a starší protokol je zpřístupněn pomocí překladače NAT64 (budu se mu věnovat v části 12.11 na straně 308).

Řeší především situaci strojů připojených oběma protokoly a snaží se minimalizovat počáteční zpoždění, pokud jeden z nich nefunguje dobře. Většina služeb dnes identifikuje své cíle doménovými jmény. Pokud uživatel požaduje určitou službu (např. zvolí odkaz na webové stránce), typicky se nejprve v DNS vyhledají příslušné adresy (záznamy typu A a AAAA) a následně se klient snaží na některou z nich navázat TCP spojení.

Tradičně klient adresy uspořádal způsobem popsaným v části 3.12 na straně 97 a pokusil se navázat spojení na první z nich. Nebyl-li úspěšný, postupně zkoušel další adresy ze seznamu. Problém spočívá v tom, že TCP trvá velmi dlouho, než vzdá pokus o navázání spojení. Pokud například seznam začínal IPv6 adresou a přeprava IPv6 nebyla v dané síti v pořádku, uživatel čekal desítky sekund, přestože po IPv4 se dalo spojení navázat hned.

Happy Eyeballs se snaží tento problém odstranit. Velmi stručně se jeho základní principy dají shrnout do tří bodů:

- Nečekat na definitivní neúspěch a rozpracovat více pokusů o navázání spojení na různé adresy.
- V pokusech střídat obě rodiny protokolů.
- Jakmile některý z pokusů uspěje, ostatní zrušit a používat první navázané spojení.

Celá akce začíná dotazováním DNS. Klient by měl pro dané jméno poptat záznamy typu AAAA a ihned po nich dalším dotazem záznamy typu A. Jakmile dostane odpověď s AAAA, okamžitě by měl přikročit k další fázi. Dorazí-li jako první odpověď typu A, doporučuje se krátce počkat (50 ms) na AAAA a pustit se do řazení adres.

Dostupné adresy se nejprve seřadí podle standardních pravidel pro výběr cílové adresy popsaných v části 3.12 na straně 97. Pokud si klient pamatuje údaje o své předchozí komunikaci s kandidátskými adresami, doporučuje se vložit mezi pravidla 8 a 9 nové pravidlo, které dává přednost adrese s kratší dobou odezvy (RTT) a po něm ještě jedno, které dává přednost adresám dříve použitým před nepoužitými.

Po standardním seřazení je seznam cílových adres upraven tak, aby se v něm střídaly adresy obou protokolů. Začíná-li IPv6 adresou, měla by na druhém místě být IPv4 adresa atd.

Poté začne postupně zkoušet navazovat spojení na jednotlivé adresy podle seznamu. Neměl by zahajovat komunikaci paralelně na všechny zároveň, ale začít první a postupně s malým zpožděním zkoušet další. Odstup mezi pokusy může být konstantní (doporučeno je 250 ms) nebo lze využívat uložené informace o době odezvy či interval pro opakování zahajovacího paketu v TCP.

Během této fáze se seznam cílových adres může měnit, například když dorazí další odpověď z DNS. Klient by měl vždy aktualizovat pořadí a pokračovat v pokusech o navázání spojení.

Jakmile se některý podaří, žádné další zahajovat nebude a ty již zahájené přeruší. Výše popsaná situace s nefunkčním IPv6 by při implementaci Happy Eyeballs dopadla tak, že klient by zahájil navazování spojení na první IPv6 adresu, o čtvrt sekundy později by se pokusil navázat spojení na první IPv4 adresu, tento pokus by uspěl, ukončil by tedy pokus o IPv6 spojení a komunikace by proběhla po IPv4 s nepozorovatelným zpožděním na začátku.

Algoritmus je sice úzce spojen s DNS, ale implementovat jej musí především aplikace. Například nejpoužívanější webové prohlížeče jej typicky obsahují, aby uživatelé netrpěli případnými neduhy přenosových sítí. Naproti tomu současný Thunderbird Happy Eyeballs zatím neumí. Pokud tedy dojde k výpadku IPv6, může odesílání dopisu trvat desítky vteřin, zatímco budete nerušeně brouzdat po webu. Druhou stranou mince je, že když si uživatel nevšimne, že v síti něco nefunguje, nepostěžuje si správci a pokud ten nemá monitorovací mechanismus, který by problém odhalil, může nefunkčnost v síti přetrvat velmi dlouho…

10 IPsec čili bezpečné IP

Klasické IP neobsahovalo vůbec žádné bezpečnostní mechanismy. Je to překvapující, protože se jednalo o technologii vyvíjenou původně pro armádu, nicméně je to tak. Postupem času se ukázalo, že svět umí být i ošklivý a začaly se hledat cesty, jak komunikaci v Internetu zabezpečit.

Přístupy jsou různé – od hardwarových (utajovače na linkách) až po aplikační (jako je S/MIME v elektronické poště). Z pohledu této knihy jsou nejzajímavější snahy o poskytnutí bezpečnostních prvků přímo na úrovni IP, pro které se vžilo označení IPsec. Existuje jak pro IPv4, tak pro IPv6. Pro IPv6 byla jeho implementace původně povinná, což bývalo uváděno jako jedna z výhod novějšího protokolu. Reálně však podpora často chyběla a RFC 6434 později oslabilo požadavek z „musí" na „mělo by být podporováno".

Pro uživatele či aplikace nabízí IPsec dvě základní služby: autentizaci a šifrování. Cílem autentizace je ověřit, že data odeslal skutečně ten, kdo to o sobě tvrdí. Zamezí se tak například útokům, kdy odesilatel falšuje svou IP adresu a vydává se za počítač z lokální sítě cílového stroje. Autentizace také zaručí, že obsah datagramu je původní a nebyl během průchodu sítí změněn. Šifrování navíc umožňuje utajit obsah korespondence. Data nesená v zašifrovaných datagramech dokáže rozluštit jen jejich příjemce.

Současná definice bezpečnostní architektury IP je již třetí generací. První byla soustředěna kolem RFC 1825 vydaného v roce 1995. O tři roky později ji nahradila generace kolem RFC 2401. Zatím poslední specifikaci představuje RFC 4301: *Security Architecture for the Internet Protocol* vydané koncem roku 2005. Během vývoje nedocházelo k žádným radikálním změnám, kroky jsou spíše evoluční a reagují na zkušenosti získané s implementacemi IPsec a reálnými požadavky na ně kladenými.

10.1 Základní principy

Vlastní realizace bezpečnostních služeb spočívá na dvou rozšiřujících hlavičkách: *AH (Authentication Header)* a *ESP (Encapsulating Security Payload)*. První má na starosti autentizaci datagramu, tedy především ověření pravosti jeho adres a obsahu. Druhá umí zajistit podobné služby, navíc k nim přidává možnost zašifrovat obsah. Datagram může být opatřen jednou či oběma bezpečnostními hlavičkami v závislosti na požadovaném zabezpečení.

V současné době jsme svědky zřetelného odklonu od hlavičky AH. Důvodem je, že ESP dokáže nabídnout stejné služby a ještě něco navíc. Proto je podle RFC 4301 implementace ESP u strojů podporujících IPsec povinná, zatímco AH pouze dobrovolná. Dá se očekávat, že postupem času se AH ocitne zcela na vedlejší koleji a zmizí.

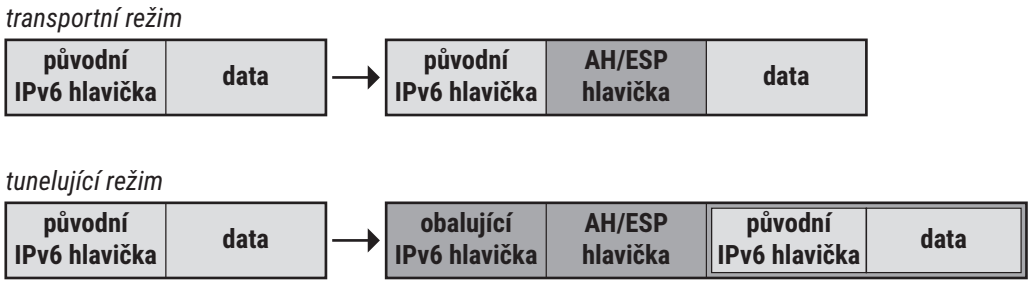
Aby se usnadnila aktualizace celého systému podle aktuálních kryptografických poznatků, byly odděleny základní prvky protokolu od implementačních požadavků na používané algoritmy. Ty jsou definovány v samostatném RFC 8221: *Cryptographic Algorithm Implementation Requirements and Usage Guidance for Encapsulating Security Payload (ESP) and Authentication Header (AH)* a mohou tak být častěji aktualizovány, aniž by se měnily například formáty hlaviček.

Tento dokument zakazuje používat šifrování bez autentizace. Pokud se šifruje, musí být zároveň ověřena autentičnost protější strany a obsahu datagramu. K tomu jsou k dispozici tři alternativy (v pořadí od nejvhodnější):

1. ESP s protokolem zajišťujícím zároveň šifrování i autentizaci (např. ENCR_AES_GCM_16),
2. ESP se dvěma protokoly, jedním šifrovacím a druhým autentizačním nebo
3. ESP pouze se šifrováním a AH pro autentizaci; tato varianta je nejméně efektivní a má největší režii, proto ji RFC 8221 nedoporučuje.

Má-li IPsec poskytnout jen autentizaci, doporučuje se použít hlavičku ESP s autentizačním protokolem raději než hlavičku AH.

Bezpečnostní hlavičky lze doplňovat ve dvou režimech. V *transportním režimu* se vkládají přímo jako součást datagramu mezi jeho rozšiřující hlavičky. Naproti tomu *tunelující režim* pracuje tak, že celý stávající datagram zabalí jako data do nového datagramu, který opatří novými hlavičkami, včetně bezpečnostních. Rozdíl mezi oběma režimy ilustruje obrázek 10.1.

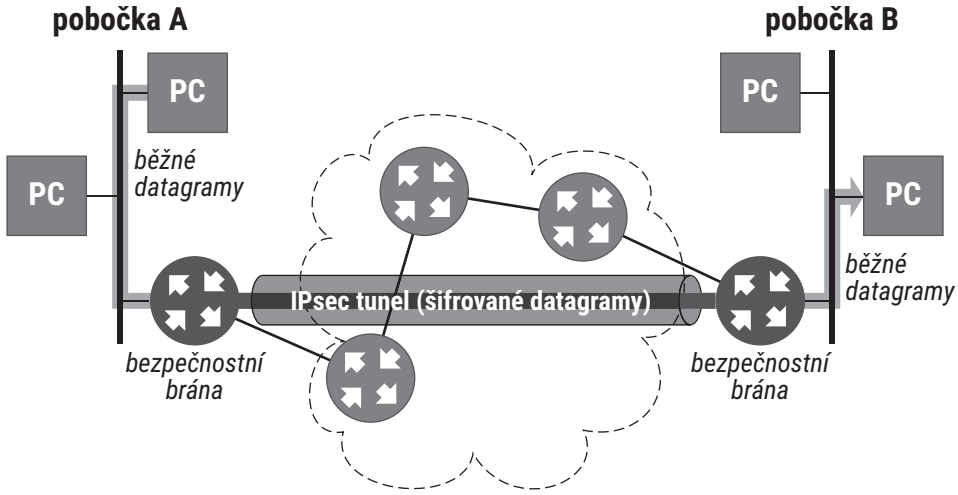


Obrázek 10.1: Režimy IPsec

Aby to bylo ještě komplikovanější, nemusí být datagramy chráněny po celé své cestě. Vezměme si jako příklad firmu, která bude mít dvě filiálky v různých městech, propojené běžným Internetem. Aby chránila svá interní data, vytvoří mezi těmito pobočkami šifrovaný tunel.

Pokud počítač v pobočce A posílá data svému kolegovi v pobočce B, odesílá je v otevřené formě. Když datagramy dorazí na hraniční směrovač lokální sítě, který zajišťuje přechod do Internetu, ten z cílové adresy pozná, že jsou určena pro pobočku B. Odešle je tedy šifrovaným tunelem – zabalí je

do nových datagramů, určených hraničnímu směrovači lokální sítě B a opatřených hlavičkou ESP. Hraniční směrovač pak dešifruje původní datagramy a předává je opět v otevřené formě cílovému počítači ve zdejší síti. Takto fungující směrovač bývá označován jako *bezpečnostní brána (security gateway)*. Koncové počítače se vůbec nemusí dozvědět, že při jejich komunikaci bylo použito šifrování.



Obrázek 10.2: Zabezpečení po cestě (bezpečnostní brány)

Tunelující režim je z hlediska bezpečnosti o něco silnější, zejména při šifrování. V transportním režimu je šifrována celá část datagramu za hlavičkou ESP. To ovšem znamená, že jeho základní hlavička a případně část rozšiřujících hlaviček zůstávají v otevřeném tvaru. Špion sice nerozumí obsahu, ale má k dispozici IP adresy obou partnerů a může například analyzovat charakter jejich komunikace, zpracovávat si statistiky a podobně. Ostatně už samotná informace o tom, že proběhla libovolná komunikace mezi určitými adresami může být zneužitelná. Lze z ní odvozovat, že uživatel určitého počítače u něj nejspíš zrovna sedí a vyrazit mu vykrást byt. Jestliže z počítače pana vedoucího proběhla čilá výměna paketů se serverem zaměřeným na perverzní sex, není až tak podstatné, že jejich obsah zůstal utajen…

Naproti tomu v tunelovacím režimu je zašifrován celý původní datagram včetně všech hlaviček a opatřen hlavičkami novými. Jen ty jsou otevřené. Když tedy například bude někdo odposlouchávat šifrovaný tunel z obrázku 10.2, nedozví se, které konkrétní počítače z koncových sítí spolu hovoří. Má k dispozici jen obalující hlavičku a tedy informaci, že datagram posílá jedna bezpečnostní brána druhé.

Důležitou roli v IPsec hraje tak zvaná *bezpečnostní asociace (Security Association, SA)*. Jedná se o jakési virtuální spojení dvou počítačů, které zajišťuje zabezpečený přenos dat. Součástí bezpečnostní asociace jsou všechny potřebné informace – použitý bezpečnostní protokol (AH nebo ESP, nikoli oba) a jeho režim, šifrovací algoritmus a klíče platné pro toto spojení, čítače, doba životnosti, ochranné prvky proti opakování a podobně.

Bezpečnostní asociace jsou jednosměrné. Při komunikaci je nutno navazovat je vždy po dvojicích – jednu pro vysílání, druhou pro příjem. Praktickým dopadem tohoto opatření je, že se v každém směru používají jiné klíče. Navíc jsou asociace jednoúčelové. Chcete-li opatřit datagramy jak AH, tak ESP hlavičkou, budete potřebovat samostatnou asociaci pro každou z těchto služeb. RFC 2401 zavedlo pro tuto situaci pojem *svazek bezpečnostních asociací (security association bundle)* a RFC 4301 jej zase opustilo. Bezpečnostní architektura v jeho podání sice použití několika bezpečnostních asociací pro jeden datagram připouští, ale nijak konkrétně nedefinuje a ponechává řešení na implementaci.

K úplnému štěstí už schází jediné – řízení. Tuto činnost má na starosti tak zvaná *databáze bezpečnostní politiky (Security Policy Database, SPD)*. Jedná se vlastně o sadu pravidel, podle kterých jsou posuzovány *všechny* přicházející či odesílané datagramy. Uplatnění pravidel vede k jednomu z následujících tří rozhodnutí:

- zahodit datagram,
- zpracovat datagram – přijmout či odeslat, žádné IPsec služby se na něj nevztahují,
- podrobit datagram IPsec – v tom případě databáze vydá i odkaz na bezpečnostní asociaci, která na něj má být uplatněna.

Každé pravidlo obsahuje selektor určující pakety, pro něž je použitelné. Selektorem může být rozsah adres odesilatele a/nebo příjemce, protokol vyšší vrstvy a jeho porty a podobně. Systém postupně prochází pravidla v databázi a použije první, jehož selektoru posuzovaný datagram vyhovuje. Poněkud to připomíná posuzování datagramu ve firewallu. RFC 4301 požaduje, aby implicitní politikou každé SPD bylo „zahodit“. Pokud se tedy nenajde žádné specifické pravidlo použitelné pro daný datagram, bude bez milosti zlikvidován.

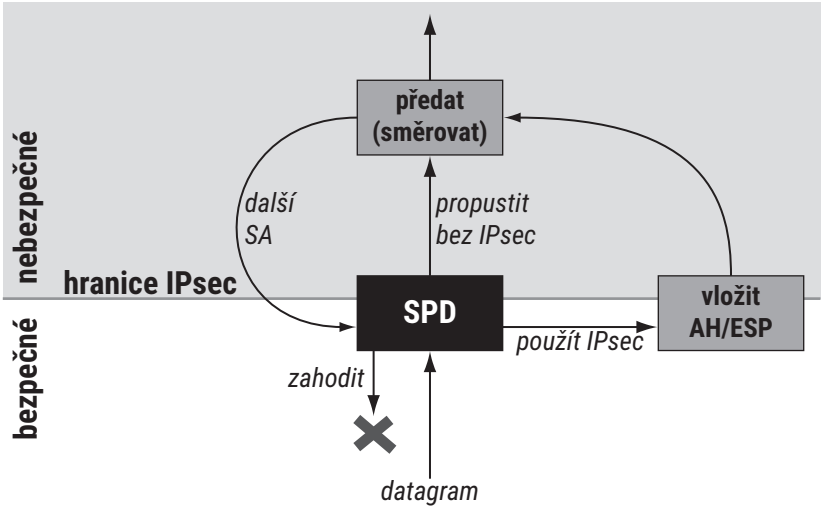
Například hraniční směrovač výše zmiňované pobočky A by mohl mít ve své databázi bezpečnostní politiky následující pravidla pro datagramy odcházející do Internetu:

1. Datagramy směřující na adresu X zahodit (známý phishingový server).
2. Datagramy směřující do sítě pobočky B podrobit IPsec; pravidlo odkazuje na odpovídající bezpečnostní asociaci, která předepisuje použití ESP v tunelovém režimu, kde cílem tunelu je hraniční směrovač sítě B, používá se algoritmus AES-CBC s klíčem K1.
3. Všechny ostatní datagramy jsou propouštěny bez použití IPsec.

Jak je vidět, je databáze bezpečnostní politiky velmi těsně svázána s bezpečnostními asociacemi. Vznikne-li v ní nové pravidlo, často to znamená, že současně musí vzniknout i odpovídající asociace, na kterou/které se pravidlo bude odkazovat. Asociace jsou ukládány do *databáze bezpečnostních asociací (Security Association Database, SAD)*. Jsou v ní identifikovány pomocí *indexu bezpečnostních parametrů (Security Parameters Index, SPI)*, případně v kombinaci s adresami. SAD obsahuje pro každou asociaci kompletní informace – režim, kryptografické algoritmy, klíče, čítače, životnost a další.

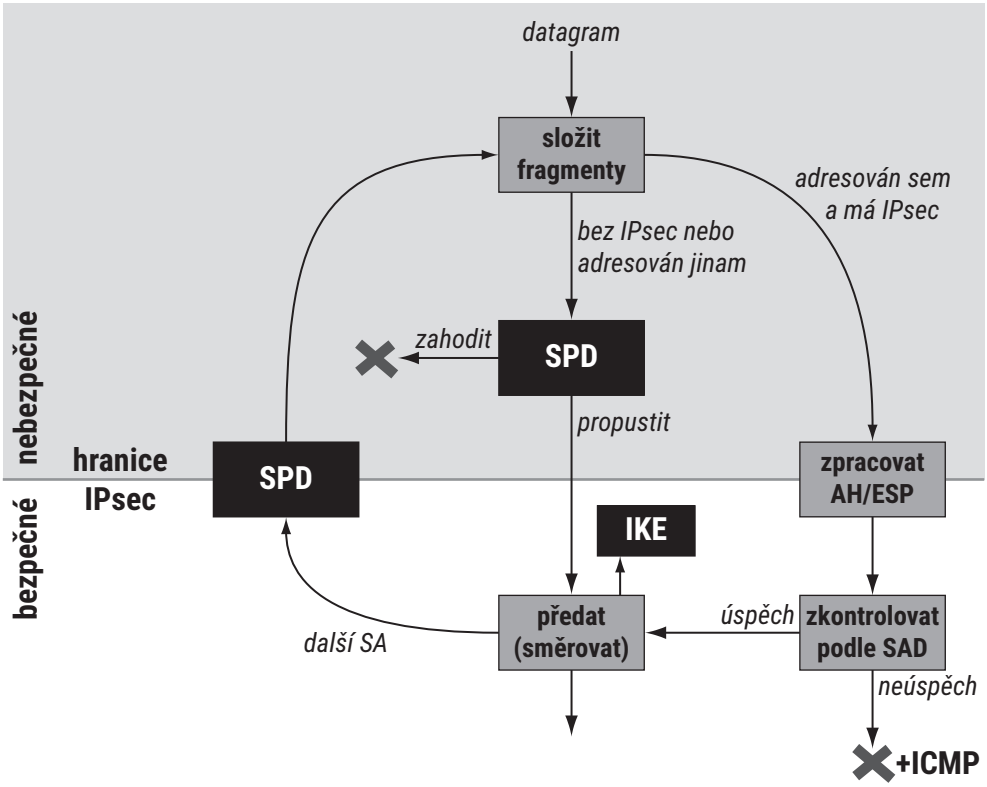
Bezpečnostní architektura popsaná v RFC 4301 koncepčně rozděluje stroj na část bezpečnou (například interní porty zdejších aplikací) a nebezpečnou (rozhraní vedoucí do veřejného Internetu). Mezi nimi vede hranice IPsec a každý datagram, který ji překračuje, musí být posouzen podle databáze bezpečnostní politiky a podle výsledku s ním naloženo.

Jako odchozí jsou označeny ty datagramy, které opouštějí bezpečnou část a vstupují do nebezpečné. Typickým příkladem je datagram odeslaný zdejší aplikací kamsi do Internetu. Jejich zpracování je celkem přímočaré, jak naznačuje obrázek 10.3. Databáze bezpečnostní politiky rozhodne, zda bude zahozen, volně propuštěn nebo podroben IPsec operacím. V posledním případě vydá odkaz do databáze bezpečnostních asociací, která poskytne parametry pro úpravu datagramu – doplnění bezpečnostní hlavičky v transportním či tunelujícím režimu. Následně je datagram předán k odeslání. Pokud má mít několik bezpečnostních hlaviček, může to znamenat opakování celého postupu.



Obrázek 10.3: Zpracování odchozího datagramu podle IPsec

Datagramy směřující opačným směrem přicházejí z nebezpečné části sítě a mají projít IPsec hranicí do bezpečné části. Může se jednat o data určená místním aplikacím, ale také o data předávaná dál. Například když bezpečnostní brána přijme tunelovaný datagram určený pro některý z místních počítačů – po uplatnění IPsec bude původní datagram vybalen a předán do vnitřní sítě svému koncovému adresátovi.



Obrázek 10.4: Zpracování příchozího datagramu podle IPsec

Z obrázku 10.4 vidíte, že situace je tentokrát složitější. Zpracování začíná složením datagramu, pokud dorazil ve fragmentech. O použití IPsec hlaviček rozhodl jeho odesilatel, proto se databáze bezpečnostní politiky uplatní jen pokud datagram nemá bezpečnostní hlavičky nebo je adresován jinam a daný stroj pro něj hraje roli běžného směrovače. V takovém případě bude v souladu s bezpečnostní politikou zahozen nebo propuštěn k doručení.

Pokud obsahuje hlavičku AH a/nebo ESP a jako příjemce je uveden zdejší stroj, bude zpracován mechanismem IPsec. Na základě údajů z datagramu se vyhledá odpovídající bezpečnostní aso-

ciace a podle ní se provedou bezpečnostní operace. Jestliže nedopadnou dobře nebo se nepodaří najít použitelnou asociaci, datagram bude zahozen[1]. Dopadne-li vše dobře, datagram je předán k doručení.

Klíčovým problémem pro použití IPsec je samozřejmě správa bezpečnostních asociací mezi komunikujícími partnery. Jejím nejjednodušším, ale nejméně praktickým modelem je manuální konfigurace. Správce systému ručně nastavuje, co a jak se bude dít v oblasti bezpečnosti. To je ovšem použitelné jen v malém a stabilním prostředí, s některými kryptografickými algoritmy pak vůbec. Proto by podle RFC 8221 manuální konfigurace neměla být používána. Vhodnější je použít protokol, jimiž se komunikující partneři domlouvají na dynamickém vytváření bezpečnostních asociací. Tomuto účelu slouží protokol IKEv2, k němuž se dostanu v části 10.4.1 na straně 236.

Pokud se vám to celé zdá poněkud krkolomné, máte naprostou pravdu. IPsec není zrovna procházka růžovou zahradou. Že v tom neplavete sami, dokazuje jen pomalu se zlepšující stav implementací IPsec v současných systémech (a to jak v IPv4, tak v IPv6).

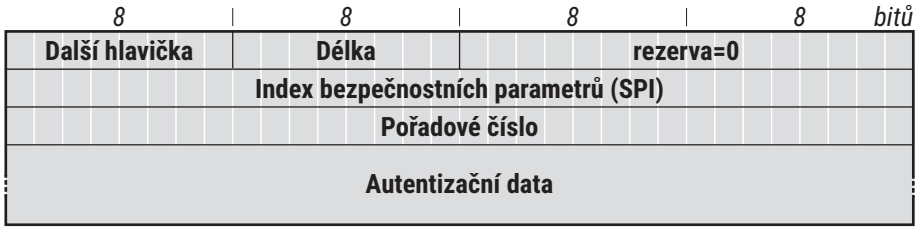
10.2 Authentication Header, AH

Základním cílem této hlavičky je autentizovat odesilatele a obsah datagramu. Čili ověřit, že datagram odeslal skutečně ten počítač, jehož adresa je uvedena v hlavičkách, a že jej odeslal v té podobě, ve které dorazil k cíli. Kromě toho zajišťuje nepovinně (ale doporučeně) ochranu proti opakování.

Stroj, který opatřuje datagram hlavičkou AH, se chová zhruba následovně:

1. Vloží do datagramu hlavičku AH. Její formát a obsah najdete na obrázku 10.5.
2. Vyplní její položky – typ *Další hlavičky*, svou vlastní *Délku (Payload len)*, odpovídající *Index bezpečnostních parametrů (Security parameters index, SPI)* a *Pořadové číslo (Sequence number)*, to zvětšuje o jedničku pro každý následující datagram. *Autentizační data (Integrity check value, ICV)* prozatím vynuluje.
3. Následuje výpočet autentizačních dat. Pro jeho potřeby je však třeba datagram poněkud upravit, aby jej příjemce mohl ověřit. Některé hlavičky upraví na hodnoty, které budou mít při příchodu datagramu (např. cílovou adresu, pokud se používá hlavička *Směrování*). Ty, které předvídat nelze (třída, značka toku, počet skoků), vynuluje. Pro takto změněný datagram vypočítá *Autentizační data* a uloží je do odpovídající položky AH.

1: Pokud vám vrtalo hlavou, že příchozí datagram opatřený IPsec hlavičkou obchází databázi bezpečnostní politiky, zde je řešení. Když se s jeho odesilatelem nechceme bavit, odmítneme jeho snahu o vytvoření bezpečnostní asociace a příchozí pakety pak zahazujeme, protože pro ně není v SAD žádná použitelná asociace.



Obrázek 10.5: Hlavička *Authentication Header*

Pro výpočet autentizačních dat se nejčastěji používají jednosměrné hašovací funkce, jako je MD5 či SHA-1. Jejich funkce se poněkud podobá elektronickému podpisu, ale na rozdíl od něj se pracuje se sdíleným klíčem. Obě strany mají stejný tajný klíč (je součástí dat bezpečnostní asociace) a obě provádějí stejný výpočet. Algoritmy se sdíleným klíčem jsou totiž o poznání rychlejší než algoritmy s klíčem veřejným, používané u klasického elektronického podpisu.

Implementace IPsec povinně musí pro výpočet AH podporovat kombinaci algoritmů HMAC a SHA-1 (HMAC-SHA1-96 podle RFC 2404). Kromě toho by měla podporovat AES v CBC režimu kombinovaný s MAC (AES-XCBC-MAC-96 podle RFC 3566). Naproti tomu původně povinná implementace MD5 je dnes už jen dobrovolná (HMAC-MD5-96 podle RFC 2403).

Příjemce vynuluje výše zmíněné položky s nepředvídatelnou hodnotou a *Autentizační data* z hlavičky AH. Na základě identifikátoru SPI získá klíč a algoritmus a s upraveným datagramem provede stejný výpočet, jako odesilatel. Výslednou hodnotu pak porovná s tou, která byla uvedena v hlavičce AH. Pokud se liší, znamená to, že datagram byl změněn a autentizace selhala. Takový datagram IPsec zahodí, aniž by o tom informoval jeho odesilatele (aby případný útočník neměl zpětnou vazbu).

Je-li zapnuta ochrana proti opakování, ještě předtím zkontroluje *Pořadové číslo* datagramu. Opakuje-li se číslo již použité, datagram zahodí a vůbec se jím nezabývá.

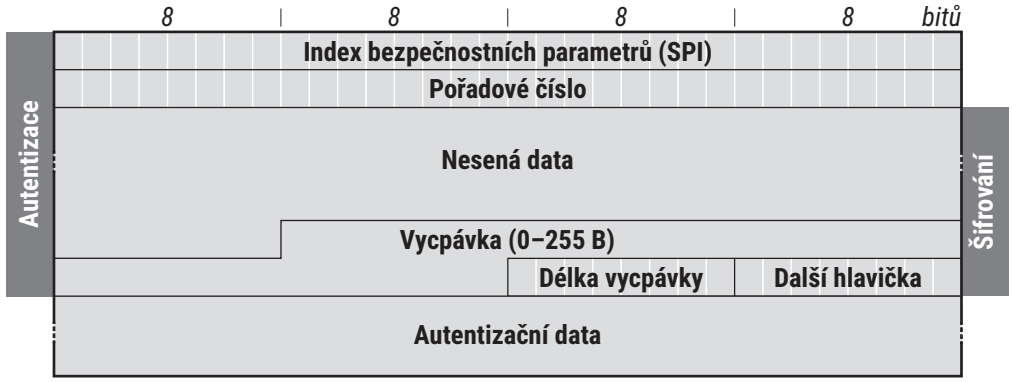
Podrobnou definici AH najdete v RFC 4302: *IP Authentication Header*. Popisuje formát hlavičky a způsob jejího zpracování, zatímco použité kryptografické algoritmy jsou definovány samostatným dokumentem RFC 8221.

10.3 Encapsulating Security Payload (ESP)

Základní službou hlavičky ESP je šifrování. Kromě něj však nabízí i služby odpovídající AH – autentizaci odesilatele, kontrolu původnosti dat a ochranu proti opakování. Její dvě základní služby – šifrování a autentizace – si oba komunikující partneři dohodnou během vytváření bezpečnostní

asociace. ESP může poskytnou jen jednu z nich nebo obě současně. Nicméně nedoporučuje se používat jen samotné šifrování bez autentizace. Důvodem je, že sice chrání proti odposlechu, ale nikoli proti padělání obsahu datagramů. Proto je po implementacích IPsec požadováno, aby povinně pro ESP podporovaly jak samotnou autentizaci, tak kombinaci šifrování s autentizací. Naproti tomu podpora samotného šifrování je volitelná a jejímu využívání je rozumné se vyhnout.

ESP je hlavička dosti nezvyklá, protože „spolkne" skoro celý datagram do sebe. Bere se jako hlavička typu end-to-end, a proto se umisťuje za hlavičky určené pro každého po cestě, směrování a fragmentaci[2]. Celý zbytek původního datagramu (včetně případných dalších rozšiřujících hlaviček) je zašifrován a vložen jako *Nesená data (Payload data)* do ESP hlavičky, jejíž podobu vidíte na obrázku 10.6. Za hlavičkou již tedy nenásleduje nic dalšího, vše je uvnitř. Obrázek zároveň znázorňuje, které části datagramu jsou chráněny šifrováním a které autentizací.



Obrázek 10.6: Hlavička *Encapsulating Security Payload*

Hlavička pochopitelně obsahuje *Index bezpečnostních parametrů (Security parameters index, SPI)*, podle kterého si příjemce vyhledá bezpečnostní asociaci pro zpracování datagramu. *Pořadové číslo (Sequence number)* slouží k ochraně proti opakování a *Autentizační data (Integrity check value, ICV)* k ověření odesilatelovy totožnosti a autentičnosti datagramu (jsou-li tyto služby zapnuty).

Zašifrovaný datagram a případné další pomocné údaje vyžadované šifrovacím algoritmem tvoří vlastní *Nesená data (Payload data)*. Některé algoritmy vyžadují, aby celková délka zpracovávaných dat byla násobkem určité hodnoty. V takovém případě se k datům připojí *Vycpávka (Padding)* vhodné délky, aby se dosáhlo požadované hodnoty. Za šifrovaná data se připojí ještě údaj o *Délce vycpávky (Pad length)*.

2: Toto platí v případě, kdy je ESP používáno v transportním režimu. V tunelovém režimu se prostě datagram obalí novým, jehož je ESP poslední hlavičkou.

Další hlavička pak identifikuje první hlavičku v zašifrovaných datech. Může se jednat o identifikaci protokolu vyšší vrstvy, jehož data datagram nese, nebo o některou z rozšiřujících hlaviček určených koncovému příjemci. To závisí na původním datagramu.

Odesílání datagramu opatřeného ESP hlavičkou vypadá následovně:

1. Odesilatel najde vhodnou pozici pro vložení ESP hlavičky. Zbytek datagramu případně doplní vycpávkou a zašifruje podle parametrů daných bezpečnostní asociací.
2. Vygeneruje *Pořadové číslo* (zvětšuje vždy o jedničku).
3. Pokud je požadována autentizace a kontrola integrity, vypočítá kontrolní hodnotu pro nesená data a uloží ji do ESP jako *Autentizační data*.

IPsec operace se provádějí vždy pro celý datagram. Případná fragmentace probíhá až po šifrování. Naopak příjemce si nejprve datagram poskládá a teprve pak jej bude dešifrovat.

Opět lze použít několik různých kryptografických algoritmů. Jejich výběr je složitější, protože autentizace a šifrování vyžadují odlišné algoritmy a navíc jsou k dispozici postupy, které zajistí obě služby pod jednou střechou. Podle RFC 8221 je pro šifrování povinná podpora AES v CBC režimu (ENCR_AES_CBC) nebo o něco výkonnějšího AES v režimu Galois/Counter (ENCR_AES_GCM_16), které společně se šifrováním zajišťuje i autentizaci a nevyžaduje další protokol. Velké naděje jsou vkládány do šifry ChaCha20 (ENCR_CHACHA20_POLY1305), ale zatím s ní nejsou dostatečné zkušenosti. Proto zatím není povinná, ale měla by být implementacemi podporována.

Pro autentizaci je povinná podpora HMAC+SHA-1 a HMAC+SHA-2. Implementace také musí podporovat prázdný šifrovací a autentizační algoritmus označovaný jako NULL, kterým lze vyjádřit, že jedna ze dvou služeb hlavičky není poskytována. Tuto hodnotu ale nesmí nést šifrovací a autentizační algoritmus současně. Prázdná autentizace by se měla vyskytnout jen při použití šifrovacího algoritmu, který zároveň autentizuje[3].

Příjem datagramu vypadá takto:

1. Nejprve si příjemce vyhledá odpovídající bezpečnostní asociaci. Pokud neexistuje, datagram zahodí.
2. Následuje kontrola *Pořadového čísla* (je-li zapnuta ochrana proti opakování). Jestliže datagram nese číslo již použité, opět bude zahozen.
3. Dalším krokem je autentizace – příjemce vypočte *Autentizační data* a porovná je s obdrženou hodnotou. Pokud se liší, pryč s datagramem.

3: RFC 8221 zakazuje samotné šifrování bez autentizace a nedoporučuje používat hlavičky ESP a AH zároveň.

4. Teprve když všechny předchozí kroky byly úspěšné, dešifruje paket, odstraní z něj ESP hlavičku a výsledek předá k dalšímu zpracování.

Chcete-li znát podrobnosti o ESP, nahlédněte do RFC 4303: *IP Encapsulating Security Payload (ESP)*. Kryptografické algoritmy jsou definovány společně s AH v RFC 8221: *Cryptographic Algorithm Implementation Requirements and Usage Guidance for Encapsulating Security Payload (ESP) and Authentication Header (AH)*.

10.4 Správa bezpečnostních asociací

Nosným pilířem celého IPsec jsou bezpečnostní asociace. Ty určují, jaké algoritmy mají být nasazeny, s jakými parametry a s jakými klíči. Pokud neexistuje rozumný mechanismus pro jejich správu, je praktická použitelnost IPsec velmi problematická.

Pochopitelně vždy je k dispozici primitivní možnost ruční konfigurace. Prostě si jednotlivé asociace nakonfigurujete odpovídajícími příkazy operačního systému. Takové schéma je zaručeně funkční, ale velmi omezeně použitelné. Má dvě významné nevýhody:

- Špatně škáluje. Ručně lze bez problémů nakonfigurovat šifrované tunely mezi několika filiálkami firmy, jak byly popsány výše. Na druhé straně je nemyslitelné postavit třeba šifrovaný přístup klientů k bankovnímu serveru na IPsec s manuální konfigurací. Klientských počítačů jsou haldy a neustále se mění. Udržovat ručně tohle klubko bezpečnostních asociací by pro správce serveru představovalo volňáska do Bohnic.
- Neumožňuje často měnit parametry (především klíče). Jedna z cest ke zvýšení bezpečnosti komunikace je častá změna klíčů. Pokud se vetřelci podaří některý z nich uhodnout či ukrást, poslouží mu jen pro malou část komunikace. Obě strany za chvíli přejdou na jiný klíč a komunikace se stane opět bezpečnou[4].

Čili je silně žádoucí, aby existovaly automatické mechanismy pro správu bezpečnostních asociací, které by byly schopny asociace vytvářet a rušit podle potřeby. Předchozí generace IPsec používala pro tento účel dvojici protokolů: *Internet Security Association and Key Management Protocol (ISAKMP)* definovaný v RFC 2408 vytvořil obecný rámec vzájemné dohody o parametrech bezpečnostních asociací, zatímco *Internet Key Exchange (IKE)* verze 1 (RFC 2409) zajišťoval výměnu klíčů pro kryptografické algoritmy.

Současná generace vše nahradila jedním společným protokolem nazvaným IKEv2, který obsahuje kompletní funkce potřebné pro správu bezpečnostních asociací a nastavení jejich parametrů

4: Extrémní příklad krátkodobého používání klíčů představuje protokol TKIP pro šifrování ve Wi-Fi sítích, jenž mění klíč po každém paketu.

i používaných klíčů. Jeho definici najdete v RFC 7296: *Internet Key Exchange Protocol Version 2 (IKEv2)*.

10.4.1 IKEv2

Bezpečnostní asociace vyžaduje vzájemnou koordinaci obou stran – musí se dohodnout na používaných kryptografických algoritmech, jejich parametrech a na klíčích, které budou využívat. IKEv2 jim k tomu poskytuje prostředky.

Jeho komunikace probíhá v tak zvaných *výměnách (exchange)* zahrnujících vždy dvě zprávy – požadavek a odpověď. Pro přenos dat IKEv2 používá nezaručený protokol UDP, konkrétně porty 500 a 4500, a případné ztráty paketů si řeší sám. Jednoduchost výměn mu umožňuje dělat to zcela triviálně: pokud na dotaz nepřijde včas odpověď, tazatel jej prostě zopakuje. RFC 7296 definuje čtyři základní výměny. Dvě se používají při zahájení, jedna ke správě asociací a jedna pro vzájemnou výměnu informací.

Dohoda o kryptografických algoritmech pro nově vytvářenou bezpečnostní asociaci využívá osvědčené schéma, kdy jedna strana navrhne možné alternativy a protějšek si z nich vybere. Jeden z partnerů pošle svému protějšku požadavek na vytvoření nové bezpečnostní asociace[5] obsahující sadu návrhů pro její zabezpečení, které jsou podle něj pro tento případ myslitelné. Teď to bude trochu složité, takže si to rozeberme:

- *Návrh (proposal)* je kompletní popis bezpečnostních mechanismů pro asociaci. Obsahuje jeden či několik protokolů (zpravidla ale jen jeden).
- *Protokol (protocol)* je IPsec protokol použitý pro zabezpečení. Tedy AH nebo ESP. Obsahuje jednu či několik transformací.
- *Transformace (transform)* definuje použitý kryptografický algoritmus. Skupina transformací dává protější straně na výběr, kterému dává přednost. Parametry transformace lze případně doplnit prostřednictvím atributů.
- *Atribut (attribute)* je nepovinný. Přidává se k transformaci jen v případě, kdy je třeba upřesnit některé její vlastnosti.

Řekněme, že iniciátor chce založit bezpečnostní asociaci chráněnou jak autentizací, tak šifrováním. Navrhne tedy dvě varianty: buď použití ESP s oběma funkcemi, nebo nasazení obou hlaviček AH a ESP, kde první se postará o autentizaci a druhá o šifrování. Jeho požadavek na vytvoření bezpečnostní asociace by obsahoval následující návrhy:

Návrh 1:
- protokol ESP
  - transformace AES_GCM_16 a CHACHA20_POLY1305 pro šifrování i autentizaci

5: Nebo změnu stávající, IKEv2 umožňuje například změnit používané klíče.

Návrh 2:
- protokol AH
  - transformace HMAC_SHA2_512_256 a HMAC_SHA2_256_128
- protokol ESP
  - transformace AES_CBC

Protější strana si z návrhů vybere podle svých schopností a priorit ten, který považuje za optimální. Zvolí právě jeden návrh, který zašle ve své odpovědi. Do něj zařadí všechny jeho protokoly (protokoly v návrhu se mají použít současně, nejsou to alternativy) a pro každý vždy vybranou transformaci. Kdyby stroj oslovený předchozí žádostí považoval za ideální zajistit obě služby společnou hlavičkou ESP s použitím protokolu AES_GCM_16, zařadil by do své odpovědi návrh:

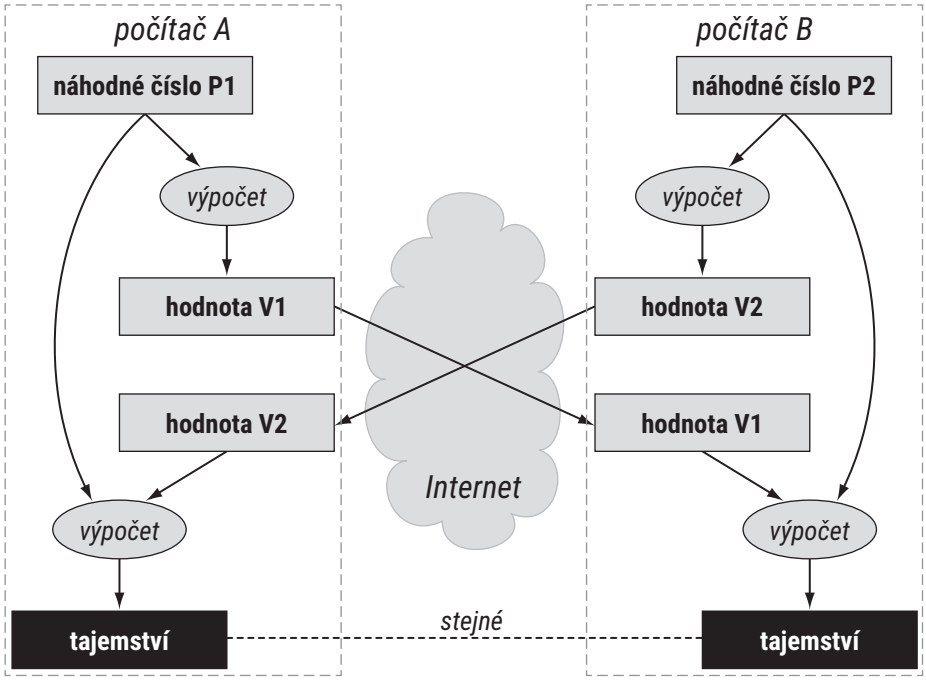
Návrh 1:
- protokol ESP
  - transformace AES_GCM_16

Tím je vybráno, jakými mechanismy bude asociace chráněna. Složitější problém ale představují klíče. Pro ochranu datagramů využívá IPsec symetrické kryptografické algoritmy. Jsou mnohem rychlejší, ale vyžadují, aby obě strany používaly stejný klíč. Právě synchronizace klíčů v prostředí, kdy komunikační kanál může být odposloucháván, představuje tvrdý oříšek.

Louskáček použitý v IKEv2 nese název Diffieho-Hellmanův algoritmus. Je postaven na ošklivém triku: žádné klíče se Internetem nepřenášejí, generuje si je každý sám. Procedura začíná tím, že si každý z účastníků vygeneruje náhodné číslo, které se stane jeho tajnou hodnotou. Z něj pak vypočítá druhou hodnotu, která je veřejná a kterou pošle svému protějšku. Na oplátku od něj dostane jeho veřejné číslo.

Vybrané matematické vztahy zajišťují, že když oba dva účastníci zkombinují svou tajnou hodnotu s veřejnou hodnotou od svého protějšku, dostanou stejný výsledek. Ten se však nedá odvodit z dvojice veřejných hodnot (které někdo mohl odposlouchat). Oba tedy získali shodné tajné číslo, ze kterého následně odvozují klíče pro použité šifrovací algoritmy.

Do správy bezpečnostních asociací mezi dvojicí IPsec strojů nikomu nic není, proto IKEv2 své zprávy šifruje. Svou činnost zahajuje vytvořením jedné bezpečnostní asociace pro vlastní potřebu. Ta je v dokumentaci označována jako IKE_SA a slouží k šifrování a autentizaci zpráv samotného protokolu IKEv2. Pro asociace sloužící vlastnímu přenosu dat mezi IPsec partnery se používá termín potomci (child SA).

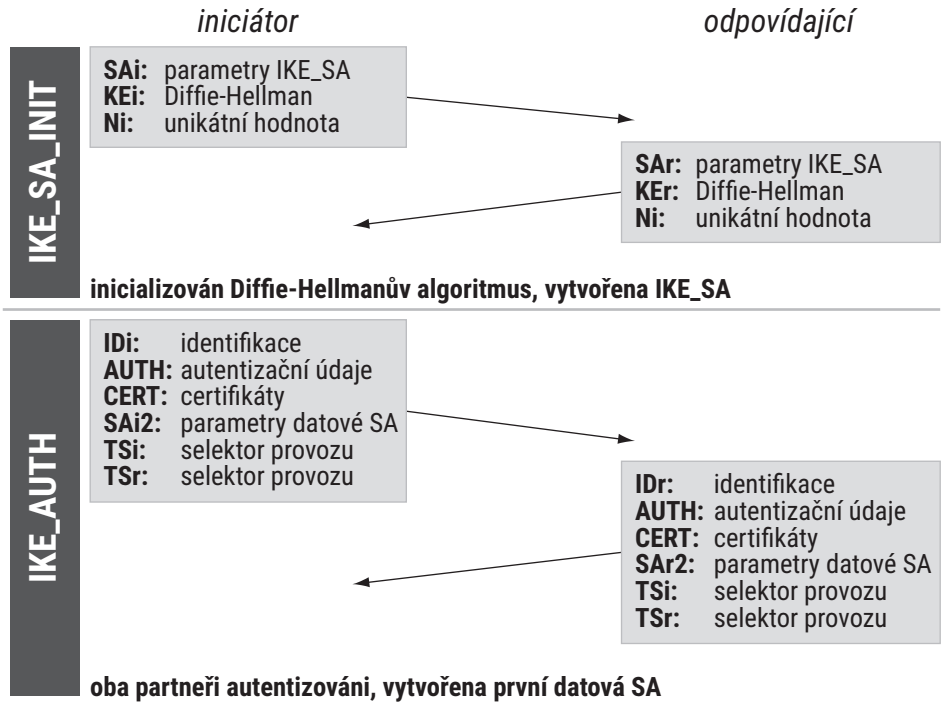


Obrázek 10.7: Diffieho-Hellmanův algoritmus

Když IKEv2 zahajuje svou činnost, musí nejprve vytvořit režijní IKE_SA. Úvodní fáze protokolu zahrnuje dvě výměny (tedy celkem čtyři zprávy), jejichž úkolem je:

1. vyměnit si veřejné hodnoty Diffieho-Hellmanova algoritmu,
2. vytvořit IKE_SA,
3. ověřit vzájemně svou totožnost,
4. vytvořit prvního SA potomka.

Proces, který tyto činnosti obstará, je znázorněn na obrázku 10.8 (pro součásti zpráv používá zkratky podle tabulky 10.1). Zahajující výměna nese název IKE_SA_INIT a má na starosti první dva body. Iniciátor IKEv2 komunikace pošle protějšku svůj návrh parametrů pro režijní asociaci IKE_SA, svou veřejnou hodnotu pro Diffieho-Hellmanův algoritmus a unikátní hodnotu, jež zabraňuje opakovanému vysílání dříve zachycených paketů.



Obrázek 10.8: Zahajovací fáze protokolu IKEv2

Protějšek – pokud je ochoten s iniciátorem mluvit – vybere ideální z navržených parametrů a pošle zpět odpověď obsahující vybraný návrh parametrů IKE_SA, svou veřejnou hodnotu pro Diffieho-Hellmanův algoritmus a opět unikátní hodnotu proti opakování.

V tomto okamžiku mají oba partneři dohodnuté parametry IKE_SA a znají vzájemně veřejné hodnoty Diffieho-Hellmanova algoritmu. Mohou tedy vypočíst sdílené tajemství a z něj pak definovaným způsobem odvozují jednotlivé klíče pro kryptografické algoritmy. Stojí za zmínku, že pro každý směr komunikace používají odlišné klíče. Ostatně, IKE_SA jsou ve skutečnosti dvě bezpečnostní asociace – pro každý směr jedna, se stejnými parametry, ale odlišnými klíči. Od tohoto okamžiku jsou všechny další zprávy IKEv2 opatřeny IPsec ochranou podle IKE_SA.

Zahajovací úkoly jsou po první výměně splněny z poloviny. Zbývá ověřit totožnost zúčastněných (zatím se za protějšek mohl vydávat kdekdo) a vytvořit první asociaci pro data. To má za úkol výměna IKE_AUTH, jež následuje bezprostředně po IKE_SA_INIT. Tentokrát iniciátor ve svém požadavku pošle informaci o vlastní identitě a autentizační data, jimiž prokáže znalost tajného klíče pro danou identitu. Může přibalit i sadu certifikátů, umožňujících jejich ověření. Zároveň zařadí

i návrh parametrů pro prvního SA potomka a může pomocí tak zvaných selektorů provozu (traffic selector) popsat pakety, na něž se má vztahovat. Selektory (například rozsahy adres odesilatele či příjemce) pak budou převzaty do databáze bezpečnostní politiky pro tuto asociaci.

Příjemce ověří autentizační údaje. Tento okruh problémů stojí poněkud stranou vlastního jádra IKEv2, proto se k němu vrátím až později. Dopadne-li autentizace úspěšně, pošle zpět odpověď, do níž zahrne analogické údaje o sobě (identitu, autentizační data, případně certifikáty) a vybere nejvhodnější návrh parametrů datové SA. Iniciátor opět ověří identitu svého partnera a v případě úspěchu považuje IKEv2 komunikaci za navázanou. Oba si vygenerují klíče pro datovou SA, kterou si přidají do databáze bezpečnostních asociací a začnou používat.

IKEv2 proti svému předchůdci znatelně zlepšil svou efektivitu. Po výměně pouhých čtyř zpráv je komunikace navázána, inicializován generátor klíčů, ověřena identita obou partnerů a založeny dvě bezpečnostní asociace – jedna režijní pro IKEv2, druhá pro běžná data.

Kdykoli později je třeba navázat další bezpečnostní asociaci nebo změnit klíče u stávající, poslouží k tomu výměna typu CREATE_CHILD_SA. Může ji zahájit každý z partnerů, jejich práva jsou zcela rovnocenná. Do svého požadavku zařadí návrhy jejího zabezpečení, unikátní hodnotu proti opakování a případné selektory provozu. Protějšek odpoví vybraným návrhem, doplněným o unikátní hodnotu. Výsledkem je založení dvojice SA (po jedné v každém směru) s dohodnutými parametry a klíči vygenerovanými na základě Diffieho-Hellmanova algoritmu.

CREATE_CHILD_SA poslouží i pro změnu klíčů již existující asociace. Formát je podobný, jen se do požadavku přidá identifikace asociace, jíž se změna týká.

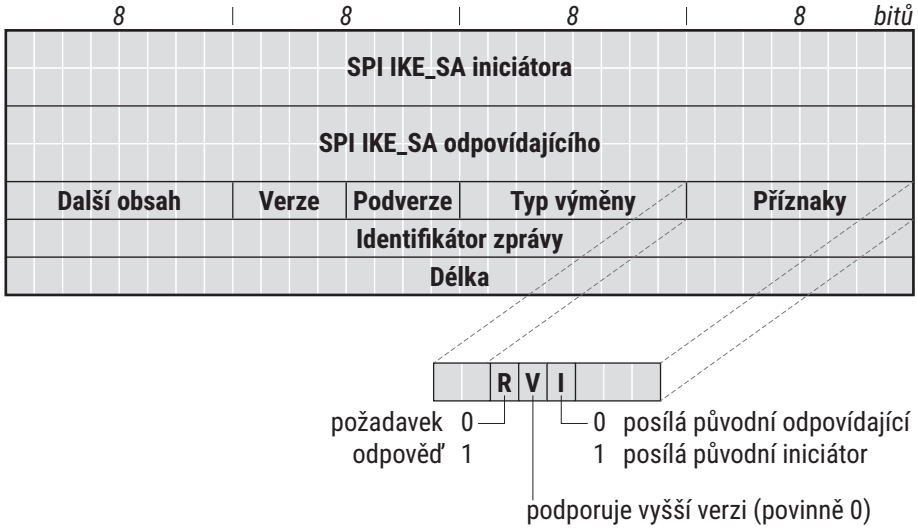
IKEv2 zprávy nemají pevný tvar. Protokol pouze definuje základní stavební bloky, tak zvané *obsahy (payloads)*, které nesou jednotlivé části informace. Z nich si pak odesilatel poskládá zprávu tak, jak potřebuje. Přehled definovaných obsahů uvádí tabulka 10.1. O jejich složení rozhoduje typ výměny a okolnosti, za nichž probíhá. Příklady si můžete prohlédnout na obrázku 10.8.

Jediným společným jmenovatelem všech zpráv IKEv2 je jednotná základní hlavička, kterou je zahájena každá z nich. Její formát vidíte na obrázku 10.9. Začíná dvojicí identifikátorů, které oba partneři přiřadili IKE_SA a podle nichž rozpoznají, ke kterému probíhajícímu IKEv2 dialogu zpráva patří. Důležitou roli hraje *Typ výměny (Exchange type)*, kterým se řídí jak možné složení obsahů, tak reakce příjemce při obdržení zprávy. Přehled dostupných typů uvádí tabulka 10.2.

Identifikátor zprávy (Message ID) má několik úloh. Především umožňuje párovat dotazy a odpovědi – odpověď vždy nese stejný identifikátor zprávy jako dotaz, který ji vyvolal. Dále lze podle něj rozpoznat opakované pakety při výpadcích a navíc slouží jako ochrana proti přehrávání dříve zachycené komunikace. Pokud dorazí zpráva se zcela nesmyslným identifikátorem, bude zahozena.

Kód	*Význam*	
0		nic
1–32		rezervováno (používaly starší verze)
33	SA	bezpečnostní asociace (popisuje situaci, ve které se bude používat)
34	KE	výměna klíčů (Diffie-Hellman)
35	IDi	identifikace iniciátora
36	IDr	identifikace odpovídajícího
37	CERT	certifikát
38	CERTREQ	žádost o certifikát
39	AUTH	autentizační data
40	Ni, Nr	unikátní data (nonce)
41	N	oznámení (chyby, informace)
42	D	vymazání (oznamuje vymazání SA z databáze)
43	V	identifikace výrobce nebo implementace (umožňuje experimentovat s rozšířeními)
44	TSi	selektor provozu – iniciátor (identifikuje datový tok, pro který má být SA použita)
45	TSr	selektor provozu – odpovídající
46	E	zašifrováno (zašifrované ostatní obsahy)
47	CP	konfigurace
48	EAP	autentizační data EAP
49–127		rezervováno
128–255		pro privátní využití

Tabulka 10.1: Typy obsahů definované v IKEv2



Obrázek 10.9: Hlavička IKEv2 zprávy

0–33	rezervováno
34	IKE_SA_INIT
35	IKE_AUTH
36	CREATE_CHILD_SA
37	INFORMATIONAL
38–239	rezervováno
240–255	pro privátní využití

Tabulka 10.2: Typy výměn IKEv2

Nesené obsahy jsou seskupeny za základní hlavičkou podle potřeby. Pro jejich identifikaci se používá podobné řetězení jako u rozšiřujících hlaviček: každý obsahuje typ obsahu, který následuje za ním.

10.4.2 Autentizace

Autentizace, čili ověření totožnosti je posledním otevřeným problémem. Řekněme, že se mi ohlásil počítač s adresou 1.2.3.4 a chce se mnou prostřednictvím IKEv2 navázat zabezpečenou komunikaci. Jak se dozvím, že se jedná skutečně o „ten pravý počítač 1.2.3.4"? Někdo si mohl nečistým trikem opatřit jeho IP adresu (např. využil jeho vypnutí, odpojil mu síť a připojil ji k sobě, sedí v síti mezi námi a procházející datagramy si mění podle libosti a podobně) a teď se snaží vystupovat jeho jménem.

Obecným řešením je opatřit data digitálním podpisem, který příjemce považuje za důvěryhodný. To znamená, že data byla podepsána soukromým klíčem, k němuž má příjemce klíč veřejný (a může si tudíž podpis ověřit) a věří, že skutečně patří počítači 1.2.3.4. Existují dvě základní cesty, jak získat důvěryhodný veřejný klíč: manuální konfigurace a certifikát.

Při manuální konfiguraci byl klíč přenesen nějakou jinou cestou (např. doručen osobně) a správce přijímajícího počítače jej uložil do konfigurace. Obvyklým problémem je škálovatelnost takového řešení. Můžete je použít ve firmě, kdy zaměstnaneckým počítačům instalujete veřejný klíč svého účetního serveru. Pokud byste však chtěli tímto způsobem řešit zabezpečení veřejného serveru, jehož klienti pocházejí odkudkoli, narazíte.

Certifikáty jsou daleko zajímavější. Certifikát je v podstatě zpráva sdělující „Přísahám na holý pupek, že počítač s IP adresou 1.2.3.4 má veřejný klíč HyChyKyRyDyTyNy." a případné další údaje. Tato zpráva je opatřena digitálním podpisem instituce či osoby, která ji vydala. Instituce vydávající certifikáty jsou označovány jako *certifikační autority (CA)*.

Odesilatel tedy přibalí ke svým datům certifikát (oznamující jeho veřejný klíč) a opatří je digitálním podpisem vycházejícím z jeho soukromého klíče. Příjemce se podívá na certifikát a na autoritu, která jej vydala. Pokud dotyčné autoritě důvěřuje[6], ověří certifikát jejím veřejným klíčem. Vyhovuje-li, má k dispozici důvěryhodnou informaci o odesilatelově veřejném klíči. Jeho pomocí pak ověří digitální podpis ve zprávě. Jestliže je správný, pak zprávu skutečně poslal ten jedině pravý počítač 1.2.3.4.

Tento postup je docela dobře použitelný v omezeném dosahu. Například poskytovatel Internetu si vybuduje certifikační autoritu, které budou důvěřovat všichni jeho zákazníci a mohou tedy mezi

6: To znamená: důvěřuje způsobu vydávání certifikátů, který dotyčná autorita používá, a má k dispozici její veřejný klíč, aby je mohl ověřovat.

sebou používat její certifikáty. Problém vznikne, když potřebujete komunikovat s někým, jehož certifikát pochází od jiné autority.

Jeho řešení by měla nabídnout tak zvaná *infrastruktura veřejných klíčů (Public Key Infrastructure, PKI)*. Předpokládá, že z certifikačních autorit se vybuduje stromová hierarchie. Autority na vyšší úrovni pak certifikují ty, které jsou pod nimi. Například mi pošle data počítač a doprovodí je certifikátem vydaným CA podniku, kterému náleží. Tato certifikační autorita se prokáže certifikátem od CA jejího poskytovatele Internetu, která se prokáže certifikátem centrální autority pro Českou republiku. Této CA důvěřuji a mám její veřejný klíč, takže následně mohu postupně ověřit veřejné klíče v celém řetězci certifikátů a dojít k závěru, že zpráva je autentická. Sekvence certifikátů, která umožňuje postupně ověřit autentičnost požadovaného klíče, bývá označována jako *řetězec důvěry (chain of trust)*. Stejný princip využívá i bezpečné objevování sousedů (SEND), jež navazující řetězec certifikátů pojmenovalo certifikační cesta.

Z uživatelského hlediska by bylo ideální, kdyby existovala jedna velká PKI s centrální autoritou. Její veřejný klíč by měl předinstalován každý operační systém a umožňoval by postupně ověřit cokoli. Bohužel „centrální certifikační autorita" se v americké výslovnosti čte jako „velké peníze" a v evropských jazycích jako „politický vliv". Výsledkem je, že existuje celá řada certifikačních autorit[7] s omezenou působností.

Zajímavá alternativa vznikla v rámci pracovní skupiny *DNS-based Authentication of Named Entities (Dane)*, která řešila ukládání kryptografického materiálu do DNS. Definovala příslušné typy záznamů (konkrétně typ TLSA), teď ještě aby se začaly v co nejširším měřítku používat. Trochu je brzdí v rozletu, že potřebují, aby příslušná doména byla chráněna DNSSEC.

Do IKEv2 se tyto skutečnosti pochopitelně také promítají, konkrétně do obsahů výměny IKE_AUTH. Jejím cílem je ověřit vzájemně identitu komunikujících partnerů. Odesilatel požadavku či odpovědi vloží do zprávy jednak informaci o své identitě, jednak autentizační údaje (digitální podpis), které prokazují, že zná tajný klíč této identity. K ověření podpisu druhá strana potřebuje získat z důvěryhodného zdroje veřejný klíč příslušející identitě. Odesilatel proto může do zprávy přibalit i sekvenci certifikátů, jejichž prostřednictvím lze ověřit veřejný klíč podle některé z dobře známých autorit. Odesilatel požadavku navíc může informovat partnera, které CA považuje za důvěryhodné, a tím ovlivnit sekvenci certifikátů v odpovědi.

Špatná škálovatelnost certifikátů motivuje k využití alternativního autentizačního mechanismu. Přímo v definici IKEv2 je proto otevřena možnost použít k autentizaci *Extensible Authentication Protocol (EAP)*. Jedná se o obecnou skořápku definující základní formát zpráv, jejichž konkrétní obsah pak naplňují různé autentizační protokoly použité v kombinaci s EAP. V současnosti se EAP běžně používá v bezdrátových sítích k ověření totožnosti uživatelů.

7: Podívejte se do svého webového prohlížeče, kolik jich má přednastavených. Já jsem napočítal něco přes stovku.

Výměna IKE_AUTH podle RFC 7296 může místo certifikátů použít EAP, ovšem pouze ve směru od iniciátora spojení k odpovídajícímu. Počet vyměněných zpráv pak narůstá, protože zájem o použití EAP iniciátor projeví tím, že do své zprávy zahajující IKE_AUTH nevloží autentizační data. Druhá strana ve své odpovědi pošle svá obvyklá autentizační data (a případné certifikáty) a pokud je schopna a ochotna použít k autentizaci EAP, indikuje to ve své odpovědi. Naopak zatím neposílá vybrané parametry SA a selektory provozu. Následuje výměna přinejmenším dvojice zpráv, kdy iniciátor pošle EAP data zabalená do IKEv2 a protějšek mu odpoví výsledkem EAP operace. Byla-li úspěšná, iniciátor se následně autentizuje, dostane kýžené parametry pro první datovou bezpečnostní asociaci a zahajovací fáze IKEv2 je tím dokončena.

Tento přístup ovšem zdaleka nevyužívá všech možností, které EAP dokáže nabídnout – například lze jeho prostřednictvím autentizovat obě komunikující strany. RFC 5998: *An Extension for EAP-Only Authentication in IKEv2* proto popsalo výraznější zapojení EAP, kdy mu IKEv2 svěřuje vzájemnou autentizaci a výměnu klíčů.

11 Mobilita

Mobilní telefony, mobilní počítače a přenosná či pojízdná zařízení všeho druhu cloumají naší přítomností. Rychle se šíří a nabývají na kvalitě i schopnostech, možnost komunikovat je pro ně životně důležitá. Je třeba uživatelům umožnit, aby si během cesty do Prahy vyřídili elektronickou poštu, přečetli svůj oblíbený WWW magazín či se podívali na aktuální kurzy akcií.

Podpora mobilních zařízení – označovaná *Mobile IPv6 (MIPv6)* – je v IPv6 velmi promyšlená a měla by hrát roli jednoho z významných trumfů při prosazování tohoto protokolu do praxe. Plány mobilních operátorů jdou do miliard připojených zařízení, což se s adresním prostorem IPv4 rozumně zvládnout nedá. Mechanismy pro podporu mobility byly sice vymyšleny i pro starší protokol, ale z hlediska efektivity a nabízených možností za IPv6 zřetelně zaostávají.

Bohužel však mobilita zároveň představuje jedno z bolavých míst IPv6. Je krásná, úžasná, blýskavá a najdete ji v každém propagačním letáku nového protokolu. V praxi už daleko méně. Jednou z příčin je i mimořádně dlouhý vznik její specifikace. Když se po několika letech práce v roce 2001 konečně zdálo být RFC na spadnutí, shodila IETF se stolu navržený způsob zabezpečení a začínalo se znovu.

Dočkali jsme se v polovině roku 2004, kdy vyšlo RFC 3775: *Mobility Support in IPv6* a společně s ním i doprovodné RFC 3776: *Using IPsec to Protect Mobile IPv6 Signaling Between Mobile Nodes and Home Agents*. V roce 2011 byla základní specifikace aktualizována v RFC 6275, došlo ale jen ke kosmetickým změnám, které vyjasňovaly některé pasáže a reagovaly na změny, k nimž od roku 2004 v IPv6 došlo. Dodnes je bohužel stav podpory mobilního IPv6 dost neutěšený a zlepšuje se jen ppoommaalluu.

Příslušné dokumenty měla na starosti pracovní skupina IETF *Mobility EXTensions for IPv6 (mext)* založená v roce 2007 a uzavřená v roce 2012. Vedle nových standardů připravila i několik textů provozního charakteru.

11.1 Základní princip

Podpora mobility se opírá o základní myšlenku, že i pohyblivé zařízení je někde doma. Existuje pro ně tak zvaná domácí síť a v ní má registrovánu svou domácí adresu. Například notebook, na kterém píši tento text, je „doma“ v síti naší univerzity a z jejího adresního prostoru pochází i jeho domácí adresa.

Domácí adresa (home address, HA) je neměnná a pod ní je stroj zaveden v DNS. Jejím prostřednictvím je také trvale dostupný – i když se zrovna nenachází v domácí síti. Když počítač vyrazí na cesty, bude dostávat další, *dočasné adresy (care-of address, CoA)*.

Například když se posadíte do vlaku a připojíte se k Internetu prostřednictvím mobilního telefonu, notebooku bude přidělena adresa v rámci sítě daného mobilního operátora. Jak pojedete, bude váš mobil postupně přecházet od jedné BTS ke druhé. To může znamenat i přechod mezi jednotlivými podsítěmi mobilního operátora (a pokud vyjedete do zahraničí a změníte tak operátora, změní se adresa vašeho počítače od základu).

Aby byl mobilní stroj dosažitelný, ustaví si doma tak zvaného *domácího agenta (home agent)*. Jedná se o jeden ze směrovačů v domácí síti, který na sebe stahuje datagramy směřující k mobilnímu uzlu a předává mu je tunelem. Jakmile mobilnímu uzlu dorazí tunelovaný datagram od domácího agenta, dozví se z něj, že se jej někdo pokoušel kontaktovat na domácí adrese.

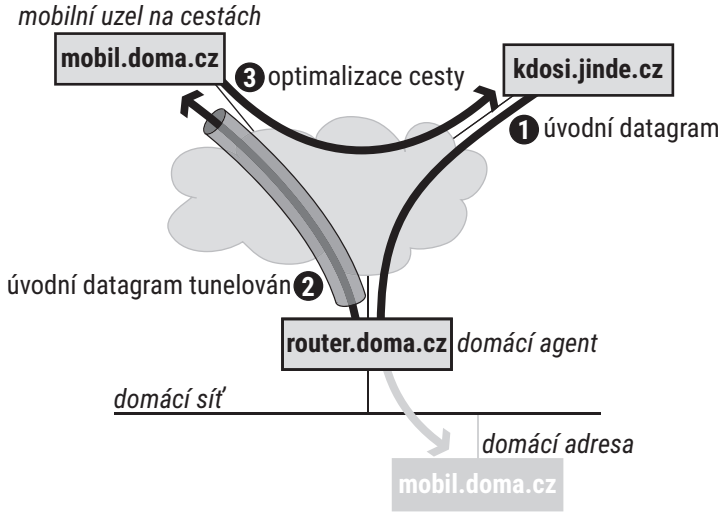
Mobilní IPv6 připouští i režim, kdy tímto způsobem probíhá veškerá komunikace s mobilním uzlem. Jeho partner, v terminologii mobilního IPv6 nazývaný korespondent, posílá data na domácí adresu, kde je sbírá domácí agent a předává tunelem mobilnímu uzlu. Ten ve svých odpovědích používá jako odesilatele svou domácí adresu, předává je tunelem domácímu agentovi, jenž je z domácí sítě odesílá korespondentovi. Cesta datagramů v tomto případě má samozřejmě k ideálu daleko, navíc hrozí přetížení připojení domácí sítě a domácího agenta. Tento režim se proto používá jen v případech, kdy korespondent nepodporuje mobilitu a nic lepšího nedovede.

V normálních případech přichází ke slovu optimalizace cesty. Mobilní uzel ji zahájí okamžitě při příchodu prvního datagramu od nového korespondenta. Cílem optimalizace je seznámit korespondenta s aktuální dočasnou adresou mobilního uzlu, aby bylo možné další data posílat přímo. K ohlášení dočasné adresy slouží *Aktualizace vazby*. Než ji však může odeslat, musí si nejprve se svým novým partnerem vyřídit oficiality a prokázat, že je skutečně ten, za koho se vydává.

Když je vše hotovo a protější stroj přijme aktualizaci vazby, poznamená si informaci v ní obsaženou. Své další datagramy směřující k mobilnímu uzlu opatřuje rozšiřující hlavičkou *Směrování*. Jsou tedy finálně určeny pro domácí adresu mobilního uzlu, ale posílají se na adresu dočasnou. Díky tomu další komunikace mezi oběma stroji probíhá přímo, bez účasti domácího agenta. Navázání spojení s mobilním uzlem znázorňuje obrázek 11.1.

Domácí adresa je pevným bodem, za který můžete mobilní uzel kdykoli uchopit. Ji také používají protokoly vyšších vrstev. Z jejich pohledu je mobilita zcela transparentní a o nějakých dočasných adresách se nikdy nedozvědí.

Vztah mezi domácí a aktuální adresou mobilního uzlu se nazývá *vazba (binding)*. Jsou definovány metody, které se snaží, aby všichni zúčastnění znali aktuální vazbu pro mobilní uzel, s nímž komunikují.



Obrázek 11.1: Navázání spojení s mobilním uzlem

11.2 Hlavičky a volby

Než se pustím do podrobnějšího popisu jednotlivých mechanismů, představím vám formát zpráv, kterými se domlouvají jednotliví účastníci. Je to poněkud komplikované, protože zasahují do různých částí IPv6. RFC 3775 zavedlo novou hlavičku *Mobilita*, jejímž prostřednictvím především spravuje vazby a ověřuje důvěryhodnost mobilního uzlu při optimalizaci cesty. Dále definuje nový typ hlavičky *Směrování* a novou volbu pro příjemce *Domácí adresa*. K některým dalším účelům využívá protokol ICMP, jemuž doplňuje čtyři nové typy zpráv. Jako třešničku na dortu pak lehce rozšiřuje ohlášení směrovače. Pokusil jsem se vám trochu usnadnit orientaci tabulkou 11.1, kde najdete přehled základních zpráv využívaných při komunikaci s mobilními zařízeními.

Klíčovým prvkem je správa vazeb, kde všechnu práci zastane nová rozšiřující IPv6 hlavička *Mobilita (Mobility)*. Je identifikována hodnotou 135 v položce *Další hlavička* své předchůdkyně. Její formát představuje obrázek 11.2.

Protokol obsahu (Payload protocol) identifikuje obsah následující za touto hlavičkou – typ následující hlavičky nebo protokol, kterému patří data. Není mi jasné, proč se autoři odchýlili od standardního názvu „další hlavička“, ale znamená de facto totéž.

Nejvýznamnější položkou je *Typ zprávy (MH type)*, který určuje, jaká zpráva je touto hlavičkou přenášena. Na její hodnotě závisí struktura nesených *Dat (Message data)*. Definované typy zpráv shrnuje tabulka 11.2, do níž jsem zařadil i typy definované pozdějšími specifikacemi. Jejich formáty

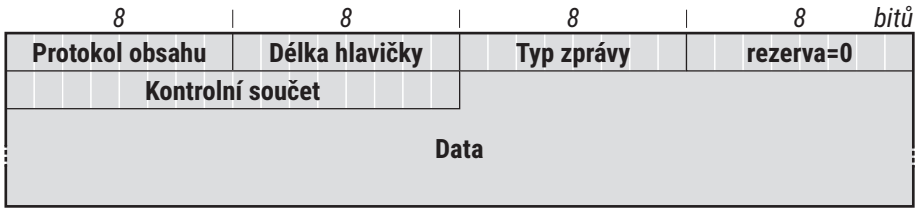
Hlavička Mobilita
- test domácí adresy
- test dočasné adresy
- správa vazeb

Volby pro příjemce
- domácí adresa

Hlavička Směrování typu 2
- doručování dat mobilnímu uzlu

ICMPv6
- objevování adresy domácí agenta
- objevování mobilních prefixů

Tabulka 11.1: Přehled zpráv pro podporu mobility



Obrázek 11.2: Rozšiřující hlavička *Mobilita*

začínají vždy určitou pevnou částí, za níž pak následují volby. Každá volba má svůj vlastní formát, platný pro všechny zprávy, v nichž se může vyskytnout. *Typ zprávy* společně se situací odesilatele rozhoduje, které volby budou do zprávy zařazeny. V obrázcích znázorňujících formát jednotlivých typů zpráv vždy uvedu přípustné volby. Nenechte se zaskočit „zubatým" horním okrajem zpráv. Tvoří obsah hlavičky *Mobilita* a pokračují tedy za jejím *Kontrolním součtem*.

Klíčovou roli hraje *Aktualizace vazby* (obrázek 11.3). Její základní funkcí je oznámit aktuální adresu mobilního uzlu – buď partnerskému počítači nebo domácímu agentovi.

V pevné části svého formátu obsahuje dvojici položek *Pořadové číslo (Sequence #)*, *Životnost (Lifetime)* a sadu příznaků. Obě položky představují reakci na skutečnost, že dočasné adresy se postupem času mění. Proto musí být každá aktualizace vazby opatřena pořadovým číslem, které musí být větší

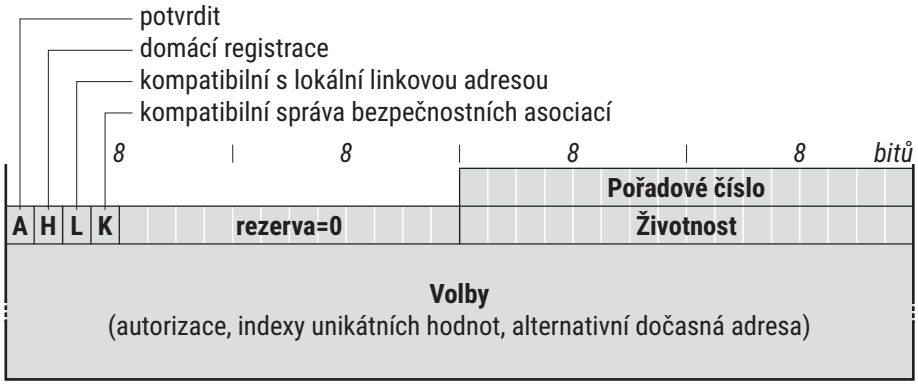
Typ	*Význam*
0	žádost o obnovení vazby (binding refresh request)
1	zahájení testu domácí adresy (home test init)
2	zahájení testu dočasné adresy (care-of test init)
3	test domácí adresy (home test)
4	test dočasné adresy (care-of test)
5	aktualizace vazby (binding update)
6	potvrzení vazby (binding acknowledgement)
7	chyba vazby (binding error)
8	rychlá aktualizace vazby (fast binding update), RFC 5568
9	rychlé potvrzení vazby (fast binding acknowledgement)
10	rychlé ohlášení souseda, zavrženo
11	experimentální hlavička, RFC 5096
12	změna domácího agenta (home agent switch), RFC 5142
13	kontrola spojení (heartbeat), RFC 5847
14	zahájení předávky (handover initiate), RFC 5568
15	potvrzení předávky (handover acknowledge), RFC 5568
16	zrušení vazby (binding revocation), RFC 5846

Tabulka 11.2: Typy zpráv pro hlavičku *Mobilita*

než číslo poslední aktualizace směřující ke stejnému cíli[1]. Díky tomu se nestane, že by se cílový počítač díky zpoždění datagramu vrátil k předchozí (teď již neplatné) dočasné adrese. *Životnost* pak stanoví dobu platnosti dočasné adresy v sekundách. Vyprší-li, musí být vazba považována za neplatnou.

Možná vás překvapuje, že aktualizace v sobě neobsahuje žádné adresy[2]. Ty se doplní z ostatních částí datagramu. *Aktualizaci vazby* mobilní uzel posílá ze své dočasné adresy. Příjemce si ji proto

1: Modulo 65 536 – položka má omezenou kapacitu.
2: Alternativní dočasná adresa ve volbách je nepovinná.



Obrázek 11.3: Zpráva *Aktualizace vazby*

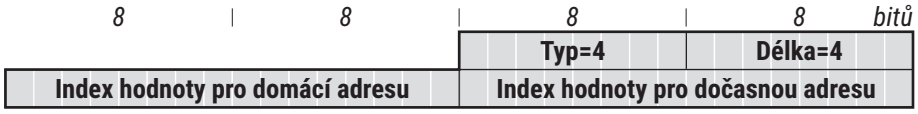
vyzvedne ze *Zdrojové adresy* v základní IPv6 hlavičce. Domácí adresu, ke které se vazba vztahuje, pak oznámí volbou pro příjemce *Domácí adresa*.

Čtveřice příznaků na začátku druhého řádku ovlivňuje příjemcovo chování. Příznak *A* (acknowledge) znamená, že mobilní uzel požaduje od svého protějšku potvrzení vazby. Je-li nastaven příznak *H* (home registration), představuje hlavička žádost, aby se její příjemce stal domácím agentem mobilního uzlu. V tom případě se jedná o datagram sloužící k ustanovení domácího agenta. Adresátem musí být směrovač sídlící v domácí síti mobilního uzlu.

Pokud má domácí adresa mobilního uzlu stejný identifikátor rozhraní jako jeho lokální linková adresa, nastaví v aktualizaci vazby příznak *L* (link-local address compatibility). Je to signál pro domácího agenta, zda se má starat o obě adresy, nebo jen o jednu.

Příznak *K* (key management mobility capability) má smysl jen u aktualizací posílaných domácímu agentovi. Sděluje mu, že mobilní uzel podporuje protokol pro dynamickou správu bezpečnostních asociací pro IPsec, kterému nevadí přesuny uzlu v síti (čili IKEv2). Při manuální konfiguraci bezpečnostních prvků musí být vynulován. Problematiku použití protokolu IKEv2 pro správu bezpečnostních asociací v mobilitě řeší RFC 4877: *Mobile IPv6 Operation with IKEv2 and the Revised IPsec Architecture*.

Volby umožňují připojit k aktualizaci doplňující informace, které nejsou potřeba vždy. Například když mobilní uzel posílá aktualizaci běžnému stroji, musí prokázat svou identitu. Proto připojí *Autorizační data (Authorization Data)*. V takovém případě je třeba připojit i *Indexy unikátních hodnot (Nonce Indices)*. Pomocí *Alternativní dočasné adresy (Alternate Care-of Address)* lze předepsat, že ve vazbě se nemá použít zdrojová adresa ze základní IPv6 hlavičky, ale adresa zde uvedená.



Obrázek 11.4: Volba *Indexy unikátních hodnot*

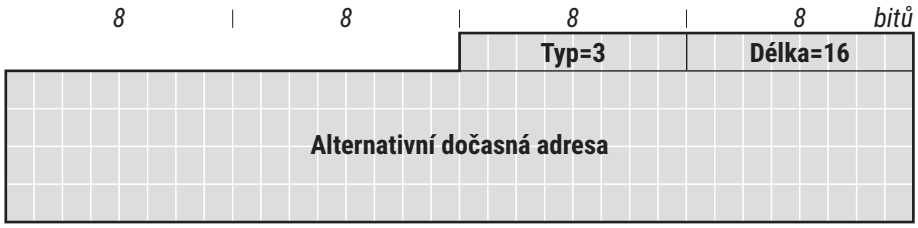
Obrázek 11.5: Volba *Autorizační data*

Jako reakce na aktualizaci vazby slouží *Potvrzení vazby* (viz obrázek 11.7). Jeho odeslání je povinné, pokud aktualizace obsahovala příznak *A* (žádost o potvrzení) nebo *H* (žádost o domácí registraci) a zpravidla také při odmítnutí, kdy poskytuje odesilateli aktualizace informaci o důvodech jeho neúspěchu.

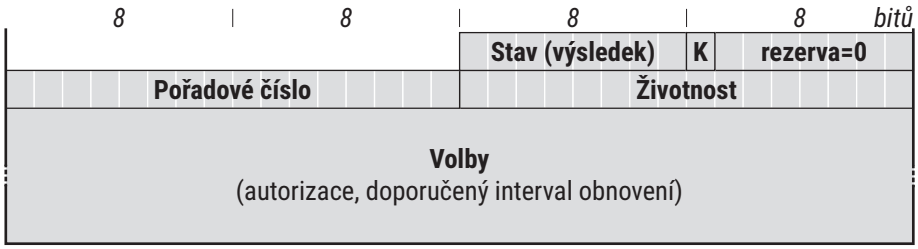
Nejvýznamnější položkou je *Stav (Status)*. Obsahuje informaci o tom, zda aktualizace byla akceptována či nikoli. Konkrétní kódy najdete v tabulce 11.3. Obecně platí, že hodnota menší než 128 znamená, že aktualizace byla přijata, zatímco hodnoty od 128 výše představují odmítnutí. Díky *Pořadovému číslu (Sequence #)* mobilní uzel pozná, ke které aktualizaci se toto potvrzení vztahuje.

Položka *Životnost (Lifetime)* udává dobu v sekundách, po kterou si příjemce zaručeně podrží aktualizaci vazby ve svých datových strukturách. Pokud potvrzuje žádost o domácího agenta, znamená to současně, že minimálně po tuto dobu bude mobilnímu uzlu dělat domácího agenta. Zároveň může volbou *Doporučený interval obnovení (Binding refresh advice)* doporučit kratší interval, po jehož uplynutí má mobilní uzel znovu aktualizovat vazbu a prodloužit tak služby svého domácího agenta. Příznakem *K* sdělí, zda se bude používat dynamický protokol pro správu bezpečnostních asociací. Potvrzení vazby od komunikačního partnera musí být provázeno volbou *Autorizační data*, která umožní ověřit jeho platnost a autentičnost.

Aktualizaci vazby si lze vyžádat prostřednictvím zprávy *Žádost o obnovení vazby*. Po této možnosti sáhne partner mobilního uzlu, když se platnost vazby blíží svému konci, ale komunikace dosud probíhá. Může samozřejmě nechat vazbu projít, začít posílat data na domácí adresu bez optimalizace a sjet si s mobilním uzlem znovu stejnou proceduru jako na začátku. Je ale výhodnější raději požádat o obnovení vazby předem a vyhnout se tak zbytečnému předávání několika datagramů přes domácího agenta.



Obrázek 11.6: Volba *Alternativní dočasná adresa*



Obrázek 11.7: Zpráva *Potvrzení vazby*

Žádost o obnovení vazby sama o sobě neobsahuje žádná data. Mobilní uzel má po jejím příchodu na výběr tři alternativy: Chce-li vazbu zachovat, zahájí proces optimalizace cesty (a svého ověření), který vyústí její aktualizací. Pokud vazbu nehodlá dále udržovat, může buď poslat zpět ohlášení vazby s nulovou životností a tak ji explicitně zrušit, nebo si žádosti jednoduše nevšímat a nechat vazbu propadnout. Mimochodem, zrušit vazbu odesláním aktualizace s nulovou životností může mobilní uzel kdykoli během komunikace, pokud to z nějakého důvodu uzná za žádoucí.

11.3 Získání domácího agenta

Když mobilní uzel vyrazí na cesty, musí ve své domácí síti získat domácího agenta, aby jej zastupoval. Tuto roli může hrát libovolný ze zdejších směrovačů, pokud je k tomu konfigurován a má dostatek volných prostředků. Jelikož se situace může průběhem času měnit, byl navržen postup, kterým si mobilní uzel svého agenta dynamicky vyhledá. Odpadá tak nutnost statické konfigurace domácích agentů a její údržby ve všech mobilních strojích.

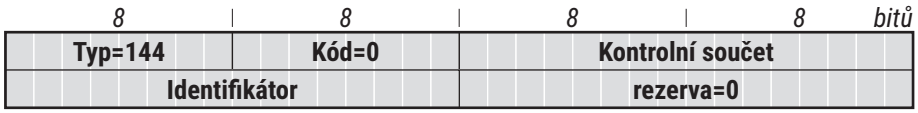
Získání domácího agenta tudíž probíhá ve dvou fázích. V první se mobilní uzel dozví adresy všech potenciálních domácích agentů a ve druhé se domluví s jedním z nich, že pro něj bude tuto funkci skutečně vykonávat. Plné znění algoritmu, jehož cílem je nalezení vhodného domácího agenta, zní

0	akceptováno
1	akceptováno, ale je třeba objevit prefix
128	odmítnuto bez uvedení příčiny
129	zakázáno správcem
130	nedostačující zdroje
131	domácí registrace není podporována
132	není domácí podsíť
133	není domácí agent pro tento uzel
134	selhala detekce duplicitní adresy
135	chybné pořadové číslo
136	prošlý index hodnoty pro domácí adresu
137	prošlý index hodnoty pro dočasnou adresu
138	prošlé unikátní hodnoty
139	nedovolená změna typu registrace
174	neplatná dočasná adresa

Tabulka 11.3: Hodnoty položky *Stav*

dynamické objevování adresy domácího agenta (dynamic home agent address discovery). Mobilní uzel jej může, ale nemusí používat.

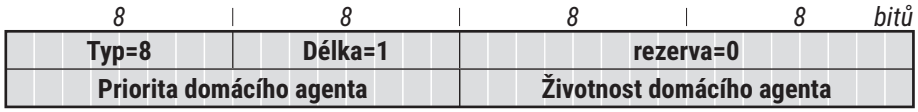
Začíná odesláním ICMP zprávy *Žádost o adresy domácích agentů*, jejíž tvar vidíte na obrázku 11.8. Tuto zprávu zašle na výběrovou (anycast) adresu domácích agentů v síti. Definuje ji RFC 2526: *Reserved IPv6 Subnet Anycast Addresses*. Vypadá tak, že v horní polovině obsahuje prefix domácí sítě mobilního uzlu, zatímco spodních 64 bitů obsahuje hodnotu fdff:ffff:ffff:fffe.



Obrázek 11.8: ICMP zpráva *Žádost o adresy domácích agentů*

Žádost dodržuje standardní tvar ICMP zpráv. Jako data obsahuje jen *Identifikátor (Identifier)*, jehož prostřednictvím lze rozpoznat příslušnou odpověď. Jelikož se jedná o výběrovou adresu, bude doručena jednomu z domácích agentů dotyčné sítě.

Každý ze směrovačů, které pracují jako domácí agenti, zná své kolegy. Mobilita rozšiřuje *Ohlášení směrovače* o několik prvků, sloužících tomuto účelu. V první řadě se jedná o příznak *H*, kterým směrovač sděluje „Jsem ochoten být domácím agentem pro stroje na této lince." Kromě toho pak přidává ke svému ohlášení volbu *Informace o domácím agentovi (Home Agent Information)*, jejímž prostřednictvím ohlásí *Prioritu (Home Agent Preference)* nastavenou správcem a *Životnost (Home Agent Lifetime)*, tedy jak dlouho je ochoten tuto činnost vykonávat. Formát volby s informacemi o domácím agentovi vidíte na obrázku 11.9.



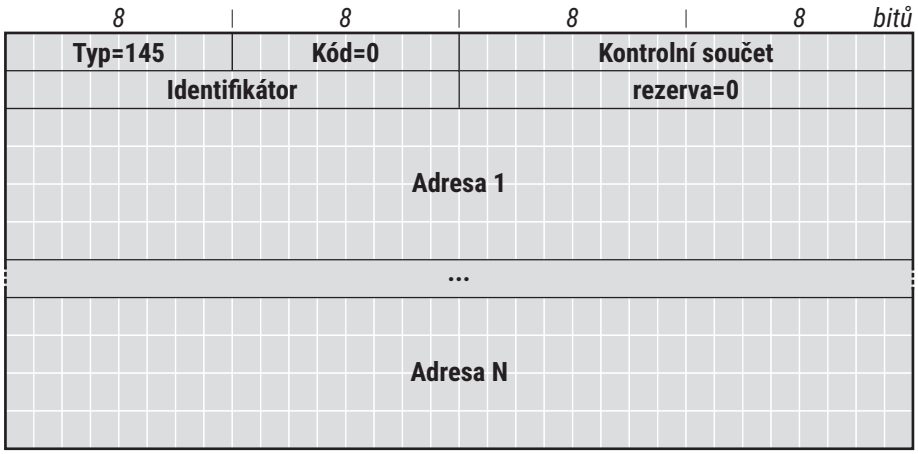
Obrázek 11.9: Volba *Informace o domácím agentovi* v *Ohlášení směrovače*

Každý domácí agent je povinen si udržovat datovou strukturu nazvanou *seznam domácích agentů*. V ní si na základě ohlášení ostatních udržuje přehled o všech domácích agentech na dané lince.

Z těchto dat sestaví ICMP zprávu *Odpověď na objevování adresy domácího agenta (Home Agent Address Discovery Reply)*, kterou pošle odesilateli žádosti. Seznam by měl uspořádat sestupně podle priority jednotlivých agentů. Pokud se u některých priorita shoduje, uvádí je v náhodném pořadí, aby se zátěž rozkládala rovnoměrně. Zároveň jejich seznam zkrátí tak, aby se vešel do jedné zprávy. V reálném životě ale lze očekávat, že na lince bude jeden, nanejvýš několik málo domácích agentů.

Mobilní uzel tedy získal seznam potenciálních domácích agentů a zbývá se s jedním dohodnout. Vybere uchazeče s nejvyšší prioritou a zašle mu *Aktualizaci vazby* s nastaveným příznakem *H* – buď mým domácím agentem! Tento krok se nazývá registrace primární (momentálně používané) dočasné adresy.

Pokud dotyčný domácí agent nemá nic proti, zkontroluje pomocí detekce duplicit (je popsána na straně 140), zda domácí adresu někdo místní nepoužívá. Má-li aktualizace vazby nastaven příznak *L*, provede totéž s lokální linkovou adresou odvozenou z identifikátoru rozhraní domácí adresy. Když testy dopadnou dobře, zanese si mobilní uzel do svých datových struktur a pošle mu kladné *Potvrzení vazby*. Od tohoto okamžiku pracuje jako domácí agent mobilního uzlu, a to minimálně po dobu uvedenou v potvrzení.



Obrázek 11.10: ICMP zpráva *Odpověď s adresami domácích agentů*

Jakmile se stane domácím agentem, rozešle do domácí sítě několik nevyžádaných *Ohlášení souseda*, v nichž uvádí domácí IP adresu mobilního uzlu a svou vlastní linkovou adresu[3]. Také bude od tohoto okamžiku odpovídat na výzvy sousedovi s IP adresou mobilního uzlu. Díky tomu budou datagramy adresované na domácí adresu mobilního uzlu předávány jemu.

Blíží-li se vypršení doby, po kterou domácí agent potvrdil své fungování, je na mobilním uzlu, aby zaslal další žádost o registraci primární adresy a pokusil se tak prodloužit svůj vztah s domácím agentem. Pokud by byl neúspěšný, může spolupráci rozvázat (viz níže), zopakovat dynamické hledání domácího agenta a dohodnout se s jiným strojem.

Jedním z nebezpečí mobility je, že se ošklivý počítač zaregistruje u domácího agenta a bude předstírat, že je některý ze zdejších strojů na cestách. Tím by na sebe přesměroval provoz určený pro dotyčný stroj a získal by neoprávněný přístup k cizím datům.

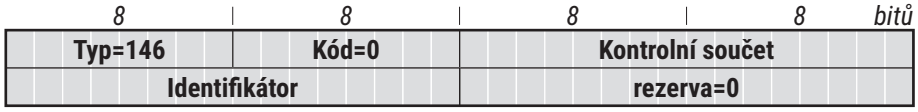
Proto je třeba domácí registraci chránit. Jelikož lze předpokládat, že domácí agent a počítače z jeho sítě se znají, není problém použít zde klasické IPsec, konkrétně ESP se zapnutou autentizací. Distribuce klíčů (přinejhorším statických) je v lokální síti jistě vyřešena a proto by neměl být s nasazením těchto prostředků problém.

„Během mé přítomnosti se nic zvláštního nestalo“ zní standardní vojenské hlášení a něco podobného ohledně adres ohlašuje domácí agent. Pokud se snad náhodou stalo a v domácí síti došlo

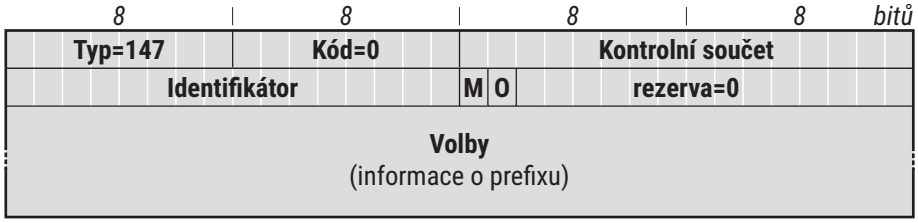
3: Pokud byl v aktualizaci vazby nastaven příznak *L*, provede totéž i s lokální linkovou adresou mobilního uzlu.

k mimořádce, tedy ke změně adres, mobilní mechanismy pamatují i na to. Když došlo ke změně ještě dříve, než se ozval mobilní agent z cest, zařadí do své domácí registrace neplatnou adresu[4]. Domácí agent registraci sice potvrdí, ale použije v *Potvrzení vazby* stavový kód 1. Jím žádá mobilní uzel, aby si vyhledal prefixy.

Mobilní uzel reaguje ICMP zprávou *Žádost o mobilní prefix (Mobile Prefix Solicitation)*, kterou domácího agenta žádá „Řekni mi, jak to tedy s prefixy mé milené domácí sítě vypadá." Odměnou mu bude *Ohlášení mobilního prefixu (Mobile Prefix Advertisement)*. Formát obou zpráv vidíte na obrázcích 11.11 a 11.12. Mají společný *Identifikátor (Identifier)*, podle nějž si mobilní uzel přiřadí agentovu odpověď ke své výzvě.



Obrázek 11.11: ICMP zpráva *Žádost o mobilní prefix*



Obrázek 11.12: ICMP zpráva *Ohlášení mobilního prefixu*

Klíčová informace v odpovědi – platné globální prefixy domácí sítě – je vysunuta do voleb. Musí obsahovat alespoň jednu volbu *Informace o prefixu (Prefix information)*. Jedná se o stejnou volbu, která se používá v ohlášení směrovače. Její formát jste mohli vidět na obrázku 6.4 na straně 139. K prefixům přidá domácí agent ještě dva příznaky informující o metodách automatické konfigurace v domácí síti. Příznak *M (Managed)* znamená, že zdejší stroje používají kromě bezstavové také stavovou konfiguraci (DHCPv6) a příznak *O (Other)*, že si stavově konfigurují ostatní informace, nikoli adresy.

Domácí agent posílá *Ohlášení mobilního prefixu* i bez výzvy. Opakuje je v určitých intervalech a navíc je zašle pokaždé, když v domácí síti dojde k významnější změně. Mobilní agent je tedy průběžně informován o tom, jaké adresy se doma používají.

4: Předpokládám, že směrování pro původní prefix sítě zůstalo zachováno. V opačném případě nemá mobilní uzel jak se se svým domácím agentem spojit a stává se z něj bezdomovec.

Připomínám, že veškerá komunikace mezi mobilním uzlem a jeho domácím agentem je chráněna IPsec, konkrétně hlavičkou ESP. Na informace z tohoto zdroje tedy je spolehnutí.

11.4 Optimalizace cesty

Bezpečnostní problém (možnost prohlásit se za jiný uzel na cestách a zcizit jeho provoz) provází i vytvoření vazby u komunikačního partnera (korespondenta). Tentokrát je však situace složitější, protože partnerem mobilního uzlu se může stát libovolný počítač. To činí IPsec v podstatě nepoužitelným, protože celosvětová důvěryhodná distribuční síť klíčů se zatím vyskytuje jen v divokých snech bezpečnostních expertů.

Autoři mobilního IPv6 proto museli připravit vlastní návrh ověření totožnosti mobilního uzlu. Zahrnuje i ověření dočasné adresy, aby někdo nemohl delegovat svá data jinému počítači, když by prohlásil, že teď vlastně cestuje a má cizí adresu. Tato odrůda falšování by se dala využít k distribuovaným zahlcujícím útokům (DDoS).

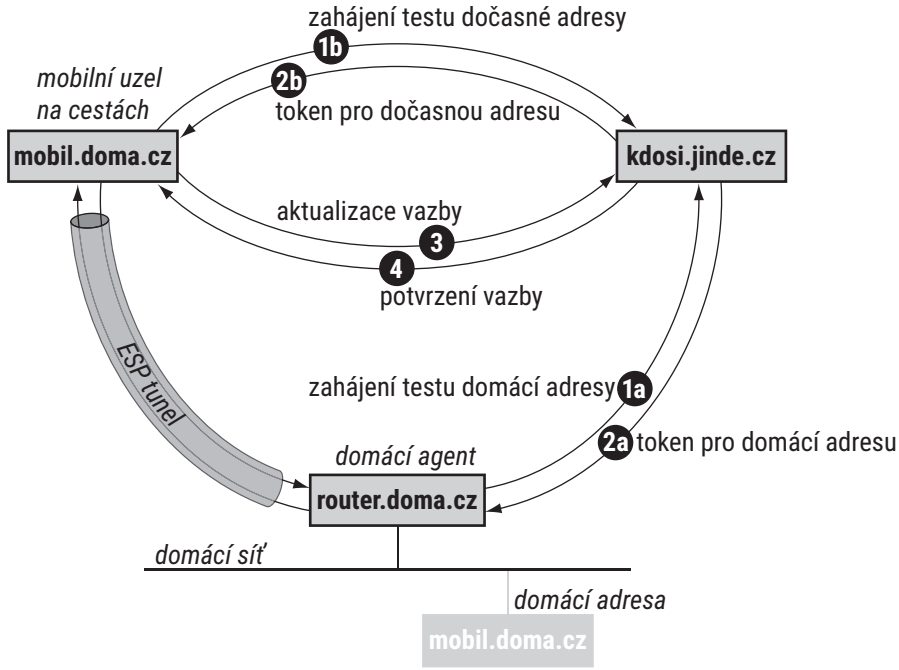
IPv6 přichází s metodou, jak ověřit, že mobilní uzel skutečně poslouchá na domácí i dočasné adrese, které uvedl ve své *Aktualizaci vazby*. Nazývá se *zpětná směrovatelnost (return routability, RR)*. Nejprve se však podívejme, co jí předchází.

Když někdo odesílá data počítači, o jehož mobilitě zatím nemá tušení, přijde ke slovu výše naznačený proces. Datagram je zaslán na domácí adresu, a tudíž dorazí do domácí sítě mobilního uzlu. Směrovač, který jej přijme, se začne prostřednictvím objevování sousedů shánět po fyzické adrese cílového stroje. Místo něj však odpoví jeho domácí agent a datagram se tak dostane k němu.

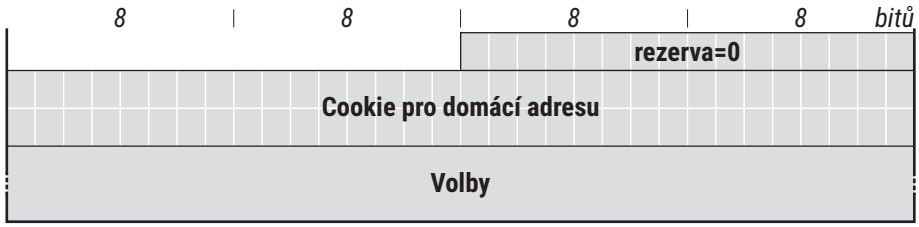
Následuje doprava tunelem chráněným ESP od domácího agenta k mobilnímu uzlu. Domácí agent tedy vytvoří nový IPv6 datagram, do nějž zabalí ten původní jako nesená data. Odesilatelem obalujícího datagramu bude domácí agent, cílem bude dočasná adresa mobilního uzlu.

Když mobilní uzel obdrží takto tunelovaný datagram, ví, že odesilatel netuší o jeho aktuální adrese. Proto se jej pokusí informovat. Nejprve však musí prokázat, že je skutečně ten pravý. Pošle dva navzájem nezávislé datagramy: *Zahájení testu domácí adresy (Home Test Init)* a *Zahájení testu dočasné adresy (Care-of Test Init)*. Jedná se o zprávy přenášené v hlavičce *Mobilita*, jejichž formát je prakticky totožný (vidíte jej na obrázku 11.14. Každá z nich obsahuje jinou náhodnou hodnotu, pojmenovanou *Cookie*. Korespondent ji zkopíruje do své odpovědi, aby prokázal, že skutečně reaguje na zahájení testu vyvolané mobilním uzlem.

Zahájení testu domácí adresy mobilní uzel odešle v datagramu, kde jako odesilatele uvede svou domácí adresu. Pošle je tunelem domácímu agentovi, který je rozbalí a přepošle korespondentovi. Tunelování je nutné, protože dnes řada sítí používá filtrování a nedovolí ze sítě odeslat datagramy,



Obrázek 11.13: Autentizace mobilního uzlu při aktualizaci vazby



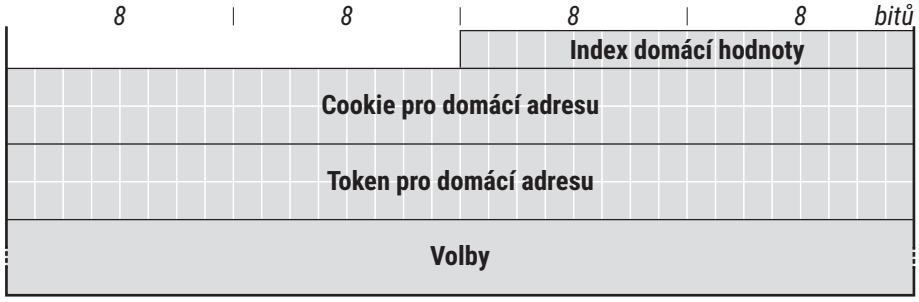
Obrázek 11.14: Zpráva *Zahájení testu domácí adresy*

jejichž zdrojová adresa neleží v dané síti. *Zahájení testu dočasné adresy* naproti tomu obsahuje jako odesilatele dočasnou adresu mobilního uzlu a posílá se rovnou komunikačnímu partnerovi.

Ten na příchod obou zpráv reaguje odesláním speciální hodnoty, označované pro změnu *Token*. K jejímu výpočtu využívá několik hodnot. Především si každý IPv6 uzel podporující mobilitu musí udržovat soukromý klíč *K*. Ten se nikam nezasílá, takže není třeba zajišťovat distribuci. Může se také v čase měnit.

Vedle něj si řádově v několikaminutových intervalech generuje náhodné unikátní hodnoty, označované v angličtině jako *nonce*. Jelikož se tyto hodnoty poměrně rychle mění, jsou opatřeny pořadovými čísly (indexy). Unikátní hodnota s pořadovým číslem *i* se označuje jako *N(i)*. Uzel je povinen uchovávat si několik posledních unikátních hodnot, jejichž platnost dosud nevypršela[5].

Když dorazí *Zahájení testu domácí adresy*, vybere z něj domácí adresu, připojí k ní aktuální hodnotu *N(i)* a konstantu 0 a to celé předloží hašovací funkci HMAC SHA1 se soukromým klíčem *K*. Prvních 64 bitů jejího výsledku tvoří *Token pro domácí adresu (Home Keygen Token)*. Počítač je zabalí do zprávy *Test domácí adresy*, přidá index použité unikátní hodnoty *i* v položce *Index domácí hodnoty (Home nonce index)* a odešle na domácí adresu mobilního uzlu. Formát testu domácí adresy vidíte na obrázku 11.15. Domácí agent předá zprávu mobilnímu uzlu (je povinen ji šifrovat pomocí ESP), který tak získá první token.



Obrázek 11.15: Zpráva *Test domácí adresy*

Druhý token počítá korespondent úplně stejně, jen k výpočtu použije dočasnou adresu, kterou dostal v *Zahájení testu dočasné adresy*. Jelikož tato zpráva cestuje jinudy, dorazí o chvilku dříve či později než výzva k testu domácí adresy. Proto může teoreticky použít jinou unikátní hodnotu *N(j)*, pokud došlo k její změně. Token vzniklý z dočasné adresy, *N(j)* a konstanty 1 pošle společně s *j* ve zprávě *Test dočasné adresy* na dočasnou adresu mobilního uzlu.

5: Maximální doba platnosti nonce je dána konstantou MAX_NONCE_LIFETIME, jejíž hodnotu RFC 6275 stanoví na 240 sekund.

Do tohoto okamžiku si korespondent pro daný mobilní uzel nic specifického neukládá. Má jen několik málo svých uložených unikátních hodnot, které jsou pro všechny stejné a spotřebují jen minimum prostředků.

Jestliže mobilní uzel nelhal a uvedl své skutečné adresy, dostal oba tokeny. Z nich definovaným způsobem vypočítá klíč pro *Aktualizaci vazby* a konečně ji může poslat. Pomocí HMAC SHA1 s tímto klíčem vypočítá autentizační hodnotu (určitou formu digitálního podpisu) pro aktualizaci vazby a přidá ji do volby *Autorizační data*[6] (obrázek 11.5 na straně 253). Zároveň přibalí volbu *Indexy unikátních hodnot*, aby protější uzel věděl, jaké náhodné hodnoty použít.

Aktualizaci vazby již posílá přímo. Protější stroj si podle indexů vyzvedne ze své paměti odpovídající hodnoty *N(i)*, *N(j)* a zopakuje celý výpočet – spočítá si oba tokeny, z nich klíč pro aktualizaci a s jeho pomocí pak autentizační data. Výsledek porovná s hodnotou obsaženou v aktualizaci a pokud se shodnou, zajásá, protože mobilní uzel prokázal znalost obou tokenů. To dokazuje, že skutečně sídlí na obou adresách, které uvedl. Protější uzel teď může otřít pot z čela a zaznamenat si, že daný mobilní uzel má takovou a makovou dočasnou adresu.

O co by byl ten svět jednodušší, kdybychom si mohli důvěřovat…

Popsaný test není stoprocentní. Dokáže jej padělat stroj, jímž procházejí datagramy mezi korespondentem a domácí i dočasnou adresou mobilního uzlu. Ovšem vytvořením vazby dokáže jen získat provoz směřující k mobilnímu uzlu, ke kterému se beztak dostane. Žádné nové bezpečnostní riziko se tedy neotvírá.

Mobilní uzel si musí udržovat přehled o tom, komu všemu zaslal *Aktualizace vazby*. Pokud totiž změní svou dočasnou adresu, měl by je o tom informovat. K ukládání potřebných údajů slouží *seznam aktualizací vazby*. Ten si musí udržovat každý mobilní uzel a ukládá do něj informace o aktualizacích, které odeslal a jejich životnost dosud nevypršela.

11.5 Přenosy dat

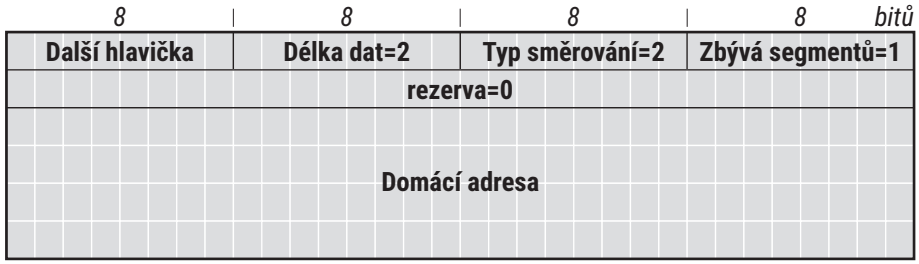
Klíčovou datovou strukturou pro běžný provoz v síti je *cache vazeb*. Do ní se ukládají informace o tom, že některý uzel je momentálně dosažitelný na určité dočasné adrese. Cache vazeb by měl mít každý stroj v IPv6 síti a při odesílání datagramu ji musí konzultovat ještě před cache cílů[7]. Každý záznam v ní by měl obsahovat mimo jiné:

6: Pokud se touto dobou ptáte, proč se autentizační informace posílají v hlavičce *Autorizační data*, když autentizace a autorizace nejsou totéž, neptejte se.

7: Což je logické – než se začne shánět po směrování, bylo by záhodno se podívat, zda se data pro tento uzel nemají posílat na úplně jinou IPv6 adresu.

- domácí adresu (podle ní se hledá),
- odpovídající dočasnou adresu,
- dobu životnosti (po vypršení musí záznam odstranit),
- příznak, zda se jedná o domácí registraci (zda pro dotyčný mobilní uzel vykonává funkci domácího agenta),
- dosud nejvyšší pořadové číslo z aktualizace vazby.

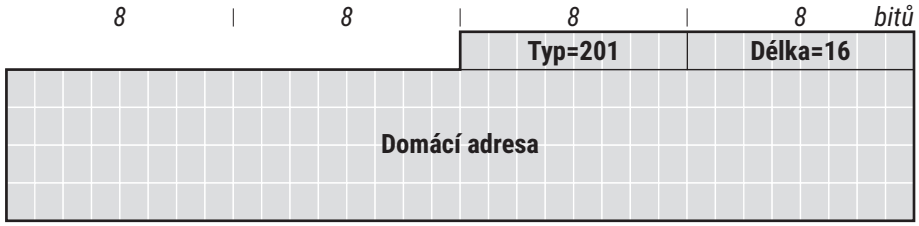
Má-li odeslat datagram, nejprve prohlédne cache vazeb. Pokud obsahuje položku pro daný cíl, připojí k datagramu rozšiřující hlavičku *Směrování*, jejímž prostřednictvím odešle datagram na dočasnou adresu mobilního uzlu. Jako cílovou adresu tedy použije aktuální dočasnou adresu a do hlavičky *Směrování* uloží jedinou adresu, kterou bude domácí adresa mobilního uzlu. Mobilita pro tento účel definuje nový, jednoduchý typ *Směrování*.



Obrázek 11.16: Hlavička *Směrování* typu 2

Když datagram dorazí k cíli, bude hlavička *Směrování* v mobilním uzlu zpracována standardním způsobem a do adresáta v základní IPv6 hlavičce paketu se tak vrátí domácí adresa mobilního uzlu.

Naproti tomu když data odesílá mobilní uzel, používá jako zdrojovou adresu svou dočasnou adresu. Ke každému datagramu však připojuje volbu *Domácí adresa*, kterou adresáta informuje o své domácí adrese. Posílá ji v rámci hlavičky *Volby pro příjemce*.



Obrázek 11.17: Volba pro příjemce *Domácí adresa*

Příjemce datagramu *musí* obsah volby *Domácí adresa* zkopírovat do zdrojové adresy datagramu. Transportní vrstva a její nadřízení tak o mobilitě nemají tušení a vytrvale používají domácí adresu.

Přijetím *Aktualizace vazby* se protějšek mobilního uzlu dozvěděl, že jeho partner má aktuální adresu jinou než domácí. Tato informace je však časově omezená. Její životnost vyjadřuje příslušná položka v aktualizaci, kterou si příjemce zanese do cache vazeb a postupně ji zmenšuje.

Když životnost záznamu v cache vazeb klesne na nulu, měl by být odstraněn. To znamená, že další datagram bude směřovat na domácí adresu a klasickým koloběhem domácí agent–tunel–mobilní uzel vznikne nová aktualizace, díky které bude pro mobilní uzel opět založen záznam v cache vazeb. Pokud však s dotyčným uzlem probíhá čilá komunikace, lze očekávat, že se nic nezměnilo a popsané operace jsou zbytečné. Proto lze na blížící se vypršení platnosti reagovat umírněněji a zaslat *Žádost o vazbu*, jak jsem popsal výše.

11.6 Změny a návrat domů

Prostředí mobilních komunikací je vysoce dynamické. Mobilní uzel může svou adresu změnit během několika minut, což by zúčastněné nemělo vyvést z míry.

Prvním problémem je, aby mobilní uzel vůbec poznal, že se změnila jeho síť. Specifikace mu povoluje používat k tomuto účelu jakékoli dostupné prostředky. Ten základní, který je k dispozici pro všechny počítače bez rozdílu, vychází z objevování sousedů, především jeho části o automatické konfiguraci směrování.

Mobilní uzel naslouchá ohlášení směrovačů, která k němu přicházejí. Z nich se dozví prefixy sítě, v níž se právě nachází, i seznam možných implicitních směrovačů. Vybere si jeden z nich za svůj implicitní směrovač a jeden z jím ohlašovaných prefixů přijme za svůj primární prefix. Na jeho základě si vytvoří primární dočasnou adresu a tu zaregistruje u domácího agenta. Kromě ní může používat i další dočasné adresy s odlišnými prefixy, avšak jako primární může zaregistrovat vždy jen jednu.

Následně mobilní uzel standardním způsobem kontroluje dosažitelnost implicitního směrovače (detekce dosažitelnosti v objevování sousedů). Jako potvrzení dosažitelnosti přitom bere přijetí libovolného IPv6 datagramu od implicitního směrovače – například ohlášení směrovače, která by měl v určitých intervalech vysílat. Pokud delší dobu nedorazí žádný paket, měl by dosažitelnost implicitního směrovače prověřit výzvou sousedovi.

Jakmile vyjde na povrch, že implicitní směrovač je nedosažitelný, mobilní uzel si z toho odvodí, že změnil aktuální síť. Opět tedy zváží informace dostupné v ohlášeních směrovačů (případně o ně aktivně požádá) a vybere si nový implicitní směrovač a novou primární adresu.

Tuto změnu však musí ohlásit – jednak svému domácímu agentovi, jednak všem strojům, se kterými v poslední době komunikoval. Domácímu agentovi zašle klasickou domácí registraci (aktualizaci vazby s nastaveným příznakem *H*). Své ostatní partnery najde v seznamu aktualizací. Ten obsahuje údaje o všech dosud platných (jejich životnost nevypršela) aktualizacích, jež odeslal. Počítačům, které v něm najde, pošle aktualizaci s novou adresou, aby si mohly upravit cache vazeb a uvést ji do souladu se současným stavem.

Kromě toho může poslat žádost o domácí registraci některému z domácích agentů v dočasné síti, kterou právě opustil. Zde jako domácí adresu použije dočasnou adresu z této sítě (která již přestala platit). Pokud ji domácí agent přijme, bude mu tunelem předávat datagramy, které dorazí na jeho předchozí dočasnou adresu (byly odeslány dříve, než dorazila aktualizace vazby ohlašující novou dočasnou adresu).

Návrat do domácí sítě je vlastně speciálním případem přesunu. Mobilní počítač jej objeví stejnou metodou, jako běžnou změnu aktuální adresy. Tentokrát však posílá žádost o zrušení vazby. Ta má podobu běžné *Aktualizace vazby* s nulovou životností. Podle toho příjemce pozná, že záznam pro dotyčnou domácí adresu má odstranit z cache vazeb. Tato informace se posílá domácímu agentovi (s příznakem *H*), aby zrušil domácí registraci, i ostatním uzlům uvedeným v seznamu aktualizací.

Kromě toho musí rozeslat několik ohlášení souseda, aby se opět chopil svých datagramů. Zruší tak účinek předchozích ohlášení svého bývalého domácího agenta.

Zatím jsem se zabýval případem, kdy rozhodující aktivity vycházejí od mobilního uzlu. RFC 5846: *Binding Revocation for IPv6 Mobility* doplnilo i opačný případ, kdy službu chce ukončit domácí agent. Slouží k tomu zpráva *Zrušení vazby (Binding revocation)*, jejímž zasláním domácí agent sdělí mobilnímu uzlu, že jeho vazba už není platná. Ten zprávu potvrdí a následně se pokusí obvyklým způsobem vytvořit novou, případně u jiného domácího agenta.

11.7 Rychlé předání

Výše jsem popsal standardní přístup k přesunu mobilního uzlu z jedné sítě do druhé. Jeho nepříjemnou vlastností je, že způsobí krátkodobý výpadek spojení mobilního uzlu, který začne pracovat na změně až po zjištění nedosažitelnosti aktuálně používaného směrovače. Tento výpadek uživatel často vůbec nezaznamená, ale pokud zrovna provozuje aplikaci komunikující v reálném čase (třeba telefonuje po síti nebo hraje on-line hru), může pro něj být velmi citelný.

RFC 5568: *Mobile IPv6 Fast Handovers* proto přišlo s protokolem podporujícím rychlé předání. Jeho základní myšlenkou je, že si mobilní uzel připraví vše předem, aby změna síťových parametrů proběhla rychle a hladce. Za jednoduchým principem se bohužel skrývá nezanedbatelná mašinérie, zahrnující několik nově definovaných zpráv.

Spouštěcí mechanismus celé procedury není pevně definován. Typicky bude vycházet z podnětu linkové vrstvy, která ohlásí přítomnost nové potenciální sítě – například když Wi-Fi karta zaznamená signál nového AP slibné úrovně. V této situaci mobilní uzel osloví přístupový směrovač, který právě používá. Dále mu budu říkat starý směrovač. Prostřednictvím ICMPv6 mu pošle *Výzvu směrovači k proxy ohlášení (Router Solicitation for Proxy Advertisement, RtSolPr)* s cílem dozvědět se něco o potenciální síti. Její součástí je linková adresa prostředku, k němuž zvažuje přechod[8].

Odpovědí bude *Proxy ohlášení směrovače (Proxy Router Advertisement, PrRtAdv)*, v němž oslovený směrovač sdělí mobilnímu uzlu informace o poptávaném zařízení. Předpokládá se, že směrovač zná síťovou situaci svých sousedů. RFC 5568 však nijak neřeší, jak ji získá a případně udržuje. Existují tři základní alternativy odpovědi:

- Směrovač dotazovanou linkovou adresu nezná. V takovém případě rychlé předání končí a mobilní uzel bude muset případně přejít na novou linku obvyklým postupem.
- Směrovač adresu zná a je připojena ke stejnému rozhraní jako linkový prvek, k němuž je uzel aktuálně připojen. V tomto případě algoritmus také končí, protože z hlediska síťové vrstvy se přechodem na novou linku nic nezmění – adresy, prefixy i implicitní směrovač zůstávají v platnosti.
- Směrovač adresu zná a je připojena k jinému jeho rozhraní. V tomto případě by se situace přechodem uzlu změnila. Oslovený směrovač proto v ohlášení poskytne informace o směrovači v cílové síti (nový směrovač): jeho linkovou a IP adresu a prefix(y) příslušné sítě. Žolíkový dotaz je speciálním případem této varianty, v odpovědi směrovač uvede všechny známé sousedy.

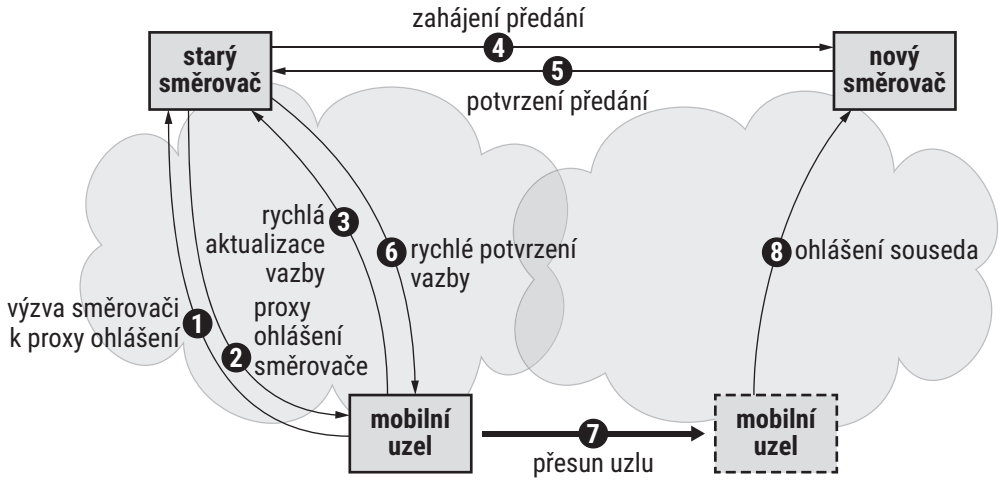
Až do tohoto okamžiku je veškerá komunikace ryze informativní. Mobilní uzel se zeptal, co může v potenciální nové síti čekat, a směrovač mu to sdělil. Jestliže se mobilní uzel k přesunu neodhodlá, může vše zase zapomenout a nic se nestane.

Pokud se ale mobilní uzel rozhodne přejít do sítě, o níž získal informace, bude protokol pokračovat. Připraví si novou dočasnou adresu odpovídající prefixu nové sítě a pošle svému stávajícímu přístupovému směrovači *Rychlou aktualizaci vazby (Fast binding update, FBU)*, jejímž smyslem je oznámit mu „hodlám přejít na tuto adresu“. K aktualizaci jsou přiloženy autentizační údaje, aby směrovač mohl ověřit, že o změnu žádá skutečně mobilní uzel.

Přípustnost nové adresy si starý směrovač ověří u nového – pošle mu *Zahájení předání (Handover initiate, HI)* s linkovou, starou IPv6 a novou IPv6 adresou mobilního uzlu[9]. Může také požádat,

8: Alternativou tohoto přístupu je, že pošle výzvu se „žolíkovou“ adresou a požádá tak o informace o všech směrovači známých sousedech.

9: Protokol pamatuje i na variantu, že adresu direktivně přidělí nový směrovač. V tom případě *Zahájení předání* představuje žádost o ni a oslovený směrovač ji sdělí v příslušném potvrzení.



Obrázek 11.18: Rychlé předání

aby nový směrovač ukládal pakety přicházející na novou dočasnou adresu do doby, než se mobilní uzel do nové sítě skutečně přepojí.

Nový směrovač vše prověří a pošle zpět *Potvrzení předání (Handover Acknowledge, HAck)*, kde sdělí, zda je ochoten mobilní uzel přijmout, a případně změní jeho novou přechodnou adresu – například pokud uzlem zvolená je již používána. Od tohoto okamžiku začne starý směrovač předávat tunelem datagramy přicházející na starou dočasnou adresu mobilního uzlu novému směrovači. Zároveň pošle mobilnímu uzlu *Rychlé potvrzení vazby (Fast Binding Acknowledgment, FBAck)*, kterým jej informuje, že je pro přechod vše připraveno.

Uzel se následně přesune do nové sítě a okamžitě pošle nevyžádané *Ohlášení souseda*, aby se nový směrovač dozvěděl o jeho přítomnosti a doručil mu případné uložené datagramy. Následuje pak aktualizace vazeb u domácího agenta i strojů, s nimiž mobilní uzel komunikuje. Díky popsanému postupu je přerušení komunikace omezeno na minimum. Navíc mobilní uzel o nic nepřijde, protože pakety přicházející v době přechodu či krátce po něm na jeho starou adresu předává starý směrovač novému a ten je doručuje.

RFC 5568 pamatuje i na méně obvyklé situace, jako je odeslání *Rychlé aktualizace vazby* až z nové sítě, pokud to mobilní uzel nestihne ze sítě předchozí, nebo přechod iniciovaný sítí, kdy starý směrovač pošle mobilnímu uzlu *Proxy ohlášení směrovače* z vlastní iniciativy a vyzve jej tak k přestupu do nové sítě.

Sympatická je zpětná kompatibilita rychlého předání. Funguje, jen pokud je podporují obě strany – mobilní uzel i směrovač, který jej obsluhuje. Jestliže jedna strana tento optimalizační mechanismus nezná, nic se neděje a případný přechod uzlu do jiné sítě proběhne klasicky.

11.8 Hierarchická mobilita

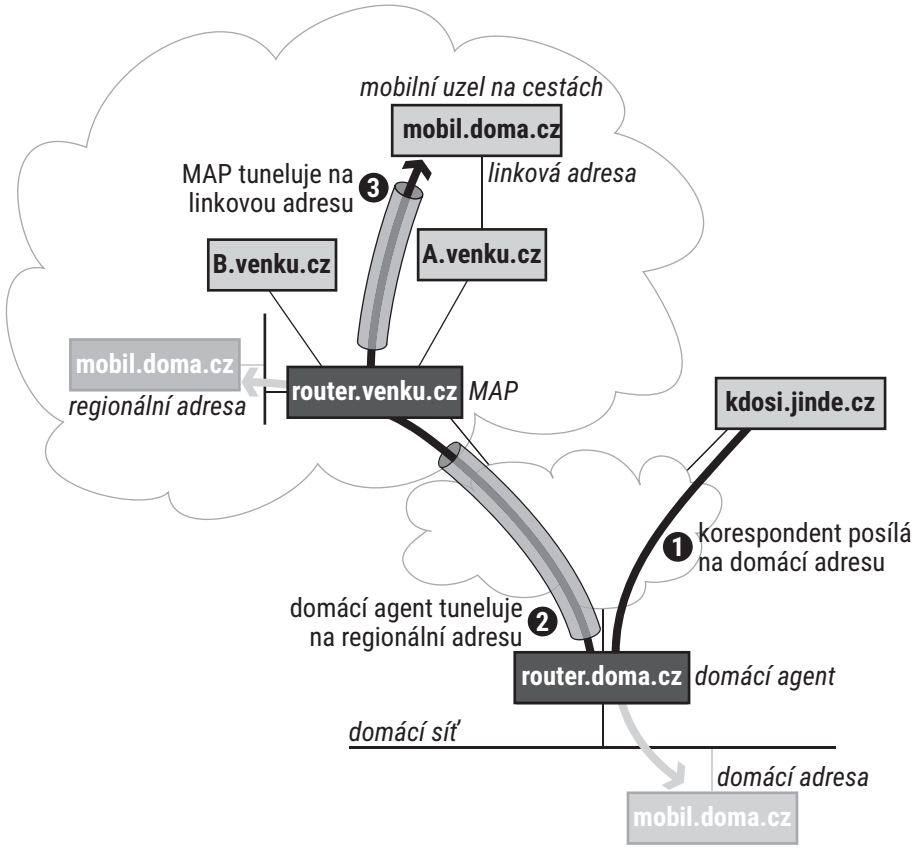
Celkem snadno si lze představit následující scénář: vyrazíte si na víkend k babičce a cestu si budete krátit surfováním po Internetu. Jak se budete pohybovat po republice, bude váš mobilní počítač postupně přecházet z jedné podsítě mobilního operátora do jiné. Každý přechod vyvolá změnu adresy, váš počítač tudíž musí rozeslat aktualizace vazby domácímu agentovi a strojům, se kterými komunikuje. Přitom však stále zůstává v síti jednoho operátora a značná část cesty, kterou jeho pakety procházejí, se nemění. Bylo by příjemné, kdyby se tato skutečnost dala nějak využít ke snížení počtu zasílaných aktualizací.

Právě tohle je cílem hierarchické mobility definované v RFC 5380: *Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (HMIPv6)*. Pro velký úspěch se zde opakuje princip domácího agenta, ovšem na druhé straně. Mobilní uzel získal dalšího zástupce, tentokrát v síti mobilního operátora. Nazývá se *kotevní bod mobility (Mobility Anchor Point, MAP)*. Cílem je, aby mobilní uzel po celou dobu svého pobytu v určité síti (např. v síti jednoho mobilního operátora) používal stále stejnou dočasnou adresu a nezasílal tedy aktualizace vazby. Tato adresa je označována jako *regionální dočasná adresa (Regional care-of address, RCoA)*.

Mobilní uzel se při použití hierarchické mobility registruje dvakrát. Nejprve si u kotevního bodu MAP zaregistruje předávání datagramů z regionální adresy na aktuální dočasnou. Následně pak u domácího agenta a všech korespondentů registruje vazbu mezi svou domácí adresou a regionální dočasnou adresou.

Funkce kotevního bodu velmi připomíná domácího agenta. Mobilní uzel se u něj zaregistruje a místo své domácí adresy použije vypočtenou regionální adresu. Kotevní bod se pak chová zcela jako domácí agent – zachytává pakety směřující na regionální adresu mobilního uzlu a předává je na jeho aktuální dočasnou adresu, pro niž se v hierarchické mobilitě používá označení *linková dočasná adresa (On-link care-of address, LCoA)*.

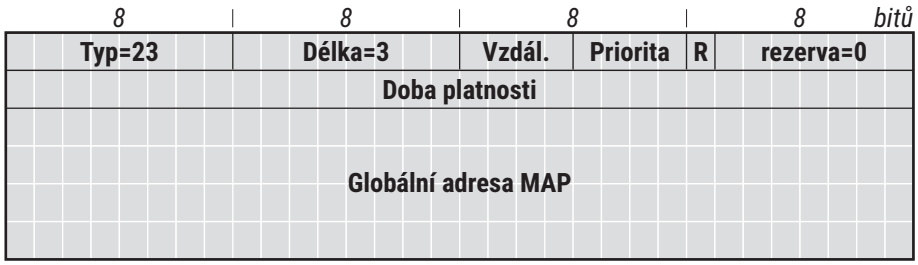
Základní neoptimalizovanou komunikaci s mobilním uzlem podporujícím hierarchickou mobilitu znázorňuje obrázek 11.19. Korespondent pošle datagram na jeho domácí adresu. Domácí agent jej zachytí a podle běžných pravidel pro mobilitu pošle tunelem na adresu, jejíž vazbu má pro danou domácí adresu registrovánu. Tedy na regionální dočasnou adresu. Tuto adresu zachytává kotevní bod a přepošle datagram tunelem na aktuální linkovou dočasnou adresu mobilního uzlu.



Obrázek 11.19: Hierarchická mobilita

Vzniká pochopitelně otázka, jak mobilní uzel najde svůj kotevní bod. Jako obvykle přichází ke slovu *Ohlášení směrovače*, do něhož směrovač přidá informace o kotevních bodech pomocí nové volby *Mobility anchor point (MAP)* znázorněné na obrázku 11.20.

Jejími nejvýznamnějšími položkami jsou pochopitelně *Globální adresa MAP (Global IP Address for MAP)* a *Doba platnosti (Valid Lifetime)*. Operátor sítě může provozovat několik kotevních bodů v různých místech a různých hierarchických úrovních sítě. Je otázkou konfigurace směrovačů, které z nich budou svým klientům ohlašovat. Představte si třeba, že v mobilní síti na obrázku 11.19 budou směrovače označené jako *A.venku.cz*, *B.venku.cz* a *router.venku.cz* zároveň pracovat jako kotevní body. První z nich proto bude do sítí připojených k sobě ohlašovat existenci dvou kotevních



Obrázek 11.20: Volba *MAP* pro *Ohlášení směrovače*

bodů – sám sebe a hierarchicky vyšší *router.venku.cz*. Ohlašovat zde *B.venku.cz* nemá valný smysl, protože případné doručování datagramů do zdejší sítě přes *B.venku.cz* je přes ruku.

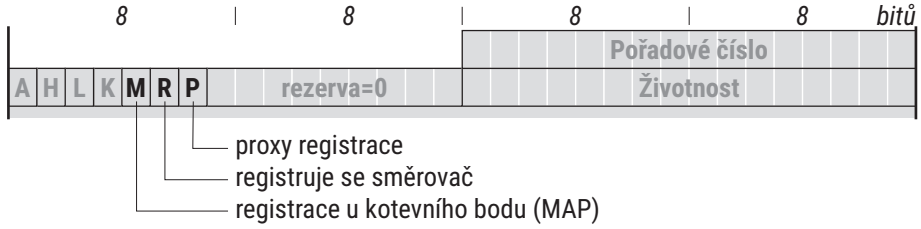
Mobilní uzel tedy může dostat nabídku několika kotevních bodů. Pro výběr nejvhodnějšího slouží položky *Priorita (Pref)* a *Vzdálenost (Dist)* ve volbě *MAP*. První představuje obecnou míru dostupnosti daného kotevního bodu. Čím vyšší hodnota, tím lépe. Je-li priorita nulová, měl by se mobilní uzel tomuto kotevnímu bodu vyhnout. *Vzdálenost* pak obsahuje počet síťových skoků z dané sítě k tomuto kotevnímu bodu. Vzdálenosti se tedy měří podobně jako v protokolu RIP. Na rozdíl od směrování zde ale neplatí, že nejlepší je nejbližší hodnota. Spíše naopak, vzdálenější kotevní bod leží ve vyšší úrovni hierarchie sítě a pravděpodobně jej bude možné využívat po delší dobu.

RFC 5380 popisuje dva možné přístupy k volbě MAP ze strany mobilního uzlu. Jedním je vybrat kotevní bod s nejvyšší *Prioritou*, druhým zvolit nejvzdálenější, který má nenulovou *Prioritu*. Dokument také připouští registraci uzlu u několika kotevních bodů. Pokud je *Priorita* nulová, uzel se nesmí k tomuto kotevnímu bodu nově registrovat, ale smí u něj prodloužit svou stávající registraci. Zcela fatální je nulová *Doba platnosti*, jež signalizuje selhání MAP. Takový kotevní bod si mobilní uzel nesmí zvolit a všechny existující vazby k němu může považovat za ztracené.

Když má mobilní uzel vybrán kotevní bod, vypočte si svou regionální dočasnou adresu. Udělá to velmi jednoduše – spojí prefix (počátečních 64 b) z globální adresy kotevního bodu se svým identifikátorem rozhraní. Jelikož se regionální adresa nachází ve stejné podsíti jako kotevní bod, je zaručeno, že pakety na ni směřující dorazí do podsítě přímo připojené ke kotevnímu bodu a ten je dokáže obvyklým trikem s objevováním sousedů stáhnout na sebe.

Pro účely registrace u kotevního bodu byla lehce rozšířena *Aktualizace vazby*, konkrétně do ní přibyl příznak *M (registrace MAP, MAP registration)*. Na obrázku 11.21 jej vidíte společně s příznaky *R* a *P*, které do aktualizace vazby přidávají proxy mobilita a podpora mobilních sítí popsané v následujících částech. Mobilní uzel jej nastaví, když se registruje u kotevního bodu. Aktualizaci vazby

mu pošle ze své aktuální linkové dočasné adresy a ve volbě *Domácí adresa* uvede svou regionální adresu. Tím kotevní bod informuje o svých adresách ve venkovní síti.



Obrázek 11.21: Rozšíření příznaků v *Aktualizaci vazby*

Jakmile kotevní bod potvrdí registraci, vytvoří si s mobilním uzlem obousměrný tunel, kterým si budou předávat datagramy směřující na regionální adresu a přicházející z ní. Mobilní uzel následně registruje u svého domácího agenta regionální adresu jako svou dočasnou. Tím je nastaveno vše, aby data pro něj mohla být doručována podle obrázku 11.19. Také při optimalizaci cesty bude svým korespondentům ohlašovat regionální adresu jako svou dočasnou.

Jestliže se mobilní uzel přesune a změní aktuální linkovou adresu, ale zůstane v působnosti svého kotevního bodu, stačí mu změnit svou registraci u kotevního bodu. Všechno ostatní zůstává beze změny a datagramy nadále najdou svého adresáta. Teprve když dorazí do části sítě, v níž není jím používaný kotevní bod ohlašován, musí přejít na jiný a odpovídajícím způsobem změnit i svou registraci u domácího agenta a vazby u všech korespondentů.

Nabízí se otázka, zda se zavedením hierarchické mobility neotevírají nové možnosti pro kradení datagramů či jiné neplechy. Není tomu tak při výměně dat mezi mobilním uzlem a domácím agentem (ta je chráněna ESP stejně jako předtím), ani mezi mobilním uzlem a jeho komunikačními partnery (mobilní uzel stále musí prokázat, že dokáže přijímat data i na své domácí adrese).

Zbývá nový prvek, komunikace mezi mobilním uzlem a kotevním bodem. Oba účastníci mohou chtít ověřit totožnost svého protějšku – zda je mobilní uzel oprávněn využívat tuto službu a zda je kotevní bod skutečně ten, za koho se vydává. Budou jím procházet data směřující na domácí i regionální adresu mobilního uzlu, takže má příležitost páchat různé neplechy. Kromě toho by se kdokoli mohl snažit prohlásit se za novou lokální adresu pro registrovanou regionální a ukrást tak data určená mobilnímu uzlu.

K ověření totožnosti účastníků lze použít například certifikáty ověřené autoritou, jíž účastníci důvěřují. Vzájemná komunikace by pak měla být chráněna IPsec. Jak mobilní uzel, tak kotevní bod musí podporovat IKEv2, aby mohli navázat bezpečnostní asociaci a chránit data, jež si vyměňují.

Nejpříjemnější vlastností hierarchizace je, že se jedná o nepovinné rozšíření mobilního IPv6. Domácí agent i korespondent zůstávají beze změny. Pokud mobilní operátor nebo mobilní uzel nepodporují hierarchickou mobilitu, nic se neděje a mobilní uzel bude používat klasické mobilní IPv6. Jen při té šťastné kombinaci, kdy mobilní uzel umí hierarchickou mobilitu a z ohlášení směrovače zjistí, že je k dispozici kotevní bod, může (ale nemusí) se u něj zaregistrovat a chovat se podle hierarchických pravidel.

11.9 Proxy mobilita

Další variantou podpory mobilních zařízení v IPv6 síti je proxy mobilita definovaná v RFC 5213: *Proxy Mobile IPv6*. Jejím cílem je umožnit pohyb v síti i strojům, které nepodporují mobilní IPv6. Vše za ně obstará síťová infrastruktura, jež udržuje mobilní uzel v iluzi, že neopustil svou domácí síť. Jeho domácí síť totiž cestuje společně s ním – vzdálené aktivní prvky ji založí vždy tam, kde se cestující uzel připojí k infrastruktuře.

Vlastní mobilní uzel není účastníkem signalizace a nekladou se na něj žádné požadavky. Komunikuje úplně normálně a ani se nedozví, že se v infrastruktuře někam posunul. Veškeré mobilní záležitosti za něj vyřizuje aktivní prvek, k němuž je na cestách momentálně připojen – ve zdejší terminologii *mobilní přístupová brána (Mobile Access Gateway, MAG)*.

Jakmile MAG zjistí, že do jí obsluhované sítě vstoupil mobilní uzel, obrátí se na jeho domácí prvek a zaregistruje u něj vazbu. Úmyslně jsem nenapsal domácího agenta, protože činnost tohoto prvku je při proxy mobilitě poněkud rozšířena. Oficiálně se jmenuje *lokální kotva mobility (Local Mobility Anchor, LMA)* a dokáže fungovat jako obyčejný domácí agent pro standardní mobilní uzly i rozšířený agent pro uzly využívající proxy mobilitu.

Vzniká samozřejmě otázka, jak MAG zjistí LMA spravující mobilní uzel, který se právě objevil. K tomu slouží tak zvaný *přístupový profil (policy profile)* mobilního uzlu. Obsahuje jeho základní komunikační parametry – povinně adresu jeho LMA, volitelně prefix domácí sítě či způsob automatické konfigurace.

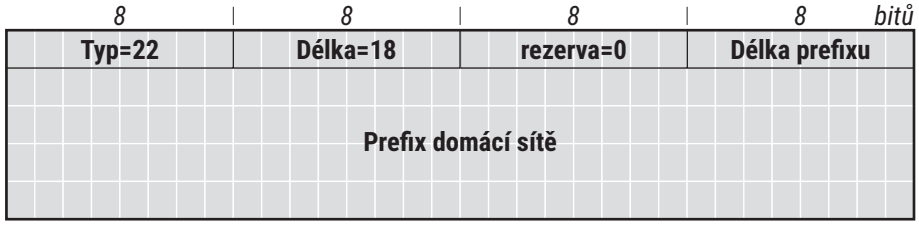
Klíčem k údajům je identifikátor mobilního uzlu, podle nějž jej všechny složky jednoznačně rozpoznají. V této roli nelze použít domácí IPv6 adresu. Jak již bylo řečeno, mobilní uzel netuší, že se pohybuje, svou adresu nezná a teprve ji bude chtít získat vhodným autokonfiguračním mechanismem. Jako jeho identifikátor může sloužit síťový přístupový identifikátor (Network Access Identifier, NAI) podle RFC 4282, MAC adresa, případně i identifikátor uživatele, pokud je jednoznačně spojen s daným uzlem.

MAG zjistí identifikátor uzlu obvykle během autentizační procedury a následně jej použije k získání odpovídajícího přístupového profilu. Specifikace předpokládá, že bude k dispozici úložiště

síťových profilů, na něž se mohou obracet MAG a LMA. Nijak podrobněji ovšem tuto složku nedefinuje.

Z přístupového profilu se MAG dozví adresu příslušné LMA a pošle jí žádost o registraci. Proxy mobilita sdílí s běžnou podporou mobility formát zpráv, jen k nim přidává některá rozšíření. MAG tedy pošle *Aktualizaci vazby* se zapnutým příznakem *P*, jenž signalizuje proxy aktualizaci. Její součástí je několik voleb definovaných většinou v RFC 5213:

- *Identifikátor mobilního uzlu (Mobile node identifier)* jednoznačně určující zastupovaný uzel. Formát volby definuje jednoúčelové RFC 4283.
- *Prefix domácí sítě (Home Network Prefix)* může být nulový, pokud jej má přidělit LMA, nebo konkrétní, například když je prefix součástí přístupové politiky, takže jej MAG zná.
- *Typ přístupové technologie (Access technology type)* oznamuje, jakým způsobem je uzel připojen.
- *Indikátor předání (Handoff indicator)* sděluje, zda se jedná o nové připojení, nebo předání mezi dvěma MAG při pohybu uzlu v síti.

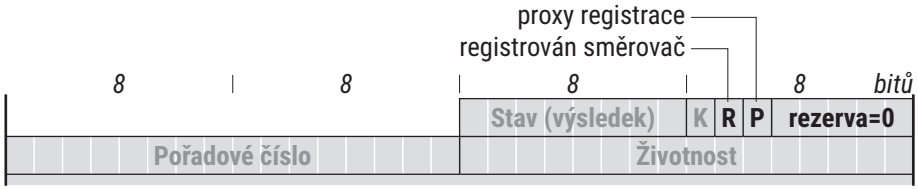


Obrázek 11.22: Volba *Prefix domácí sítě*

Dalšími volbami lze oznámit lokální linkovou adresu uzlu, jeho linkový identifikátor či časovou značku pro řazení zpráv. Informace z *Aktualizace vazby* LMA využije k posouzení, jestli je žádost daného mobilního uzlu v pořádku. Je-li nakloněna jí vyhovět, přidělí (nebo potvrdí) uzlu prefix jeho domácí sítě a pošle MAG zpět *Potvrzení vazby*, v němž oznámí příslušný prefix domácí sítě. Také do potvrzení přibyl příznak *P*, jímž LMA signalizuje, že se jedná o proxy registraci. Na obrázku 11.22 jej vidíte společně s příznakem *R* definovaným pro mobilní sítě (viz následující část).

RFC 5213 počítá s tím, že prefix sítě je pro každý mobilní uzel jednoznačný a že se v dané síti nacházejí jen dva stroje – mobilní uzel a MAG. Pokud linka, k níž se mobilní uzel připojí, není dvoubodová, musí takové chování alespoň emulovat.

Současně s přenosem *Potvrzení vazby* dojde i k vytvoření tunelu mezi LMA a MAG, jímž bude následně procházet provoz mobilního uzlu. Zatímco pro vzájemnou signalizaci je ochrana IPsec povinná, datový tunel být chráněn může, ale nemusí. Pro aktualizace a potvrzování vazeb však musí



Obrázek 11.23: Rozšířené příznaky v *Potvrzení vazby*

mezi MAG a LMA existovat bezpečnostní asociace. K jejímu vytvoření je doporučován protokol IKEv2, jehož podpora je u obou prvků povinná.

MAG následně zařadí obdržený prefix do *Ohlášení směrovače* zaslaného mobilnímu uzlu a zároveň se v něm označí jako implicitní směrovač. Díky tomu si mobilní uzel vytvoří adresu s odpovídajícím prefixem a své pakety bude následně odesílat do světa prostřednictvím MAG. Ten je tunelem předává LMA, protože adresa odesilatele patří do adresního prostoru LMA a při přímém odeslání do Internetu by pakety nemusely projít filtry střežícími korektnost zdrojové adresy.

Klíčovým bodem komunikace mobilního uzlu je proto LMA, která odesílá i přijímá jeho pakety. Pro příjem tentokrát není třeba švindlovat s ohlašováním sousedů. Stačí, když LMA standardními směrovacími protokoly ohlašuje, že jeho prostřednictvím je připojena domácí síť mobilního uzlu. Směrování je samozřejmě neefektivní – pakety dělají odbočku přes LMA – a na rozdíl od běžné mobility tentokrát neexistuje žádný optimalizační mechanismus. Jedinou výjimkou je, že pokud MAG pozná, že mobilní uzel posílá datagram do některé ze sítí přímo připojených k MAG, může jej předat přímo.

Nelze očekávat, že by tato služba byla poskytována globálně. Spíše ji najdete v části sítě provozované jedním operátorem (nebo skupinou několika spolupracujících operátorů). Mluví se o ní jako o *doméně proxy mobility* a pouze v rámci této domény bude pohyb mobilního uzlu transparentní.

K základní definici proxy mobility v RFC 5213 existuje několik rozšiřujících doplňků. Umožňují zapojit do hry IPv4, a to jak na straně domácí adresy mobilního uzlu, tak při signalizaci (RFC 5844), autentizační protokol Diameter k poskytování přístupových profilů (RFC 5779), kontrolu spojení mezi MAG a LMA (RFC 5847), rychlé předávání mobilního uzlu (RFC 5949) nebo vyhrazený identifikátor rozhraní (RFC 6543).

11.10 Mobilní sítě (NEMO)

Klasická podpora mobility počítá s jedním pohybujícím se uzlem, například bezdrátově komunikujícím notebookem. Z představ vizionářů se však postupně přesouvají do reality celé mobilní

sítě. Pěkným aktuálním příkladem je poskytování Internetu ve veřejném dopravním prostředku – letadle, vlaku či autobusu. Ve vozidle je vnitřní síť, do níž jsou zapojeny počítače pasažérů. Celá tato síť má nějaké adresy, určitou formu automatické konfigurace a implicitní směrovač, který jí zprostředkovává spojení s Internetem. Budeme mu říkat mobilní směrovač. Situace ve vnitřní síti je stálá, zdejší prefixy se nemění.

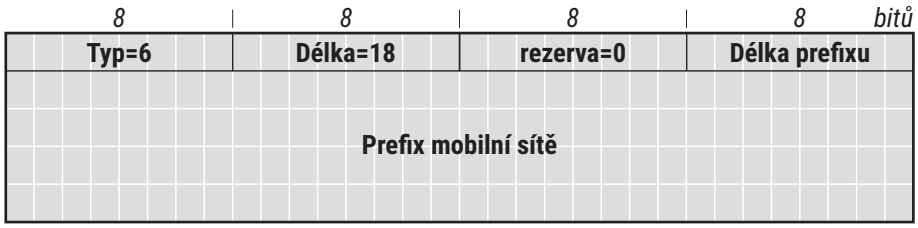
Ovšem celá tato síť se pohybuje, což se projevuje změnou připojení mezi jejím mobilním směrovačem a okolím. Mění se adresa vnějšího rozhraní mobilního směrovače a s ní i cesta mezi vnitřní sítí a Internetem. Jiným, v současnosti dosud vizionářským příkladem jsou osobní sítě, které nás prý dříve či později čekají. Mobil se stane přístupovým směrovačem, který bude poskytovat připojení ostatním komunikujícím zařízením – diáři, hodinkám, hudebnímu přehrávači, kardiostimulátoru … Člověk se bude pohybovat i se svými hračkami a zase platí totéž co v předchozím případě. Situace uvnitř osobní sítě zůstává poklidná, zatímco její poloha a s ní připojení k Internetu prodělává změny.

Síťová mobilita (NEMO, NEtwork MObility) poskytuje prostředky, jimiž lze tuto situaci ošetřit. Mobilita sítě se díky ní stává zcela transparentní, zařízení v mobilní síti dokonce sama ani nemusí mobilitu podporovat. Definici její základní podoby najdete v RFC 3963: *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol*.

Základní myšlenka je velmi prostá: mobilní směrovač nebude do aktuální sítě, do níž je právě připojen, šířit směrovacími protokoly informace o síti, kterou připojuje. Pravděpodobně by to stejně nemělo smysl, její adresy neodpovídají zdejším, takže by propagace o jejich dostupnosti dříve či později narazila na filtr směrovacích informací. Místo toho mobilní směrovač udržuje obousměrný tunel se svým domácím agentem. Veškerá komunikace se stroji v mobilní síti prochází tímto tunelem (a tedy domácím agentem).

Mobilní směrovač se podle NEMO chová podobně jako běžný mobilní uzel, ovšem ve své registraci dočasné adresy u domácího agenta nastaví v *Aktualizaci vazby* nově definovaný příznak *R (Router)*. Jím domácímu agentovi sděluje, že se ve skutečnosti jedná o směrovač a za ním je připojena mobilní síť. Příznak *R* byl doplněn i do *Potvrzení vazby*. Domácí agent jím sděluje mobilnímu směrovači, že podporuje NEMO a že z jeho strany je vše připraveno pro spolupráci s mobilní sítí. Následně spolu vytvoří tunel, do nějž bude domácí agent předávat datagramy směřující do mobilní sítě a naopak vybalovat pakety přicházející z ní a předávat je dál do Internetu.

K této činnosti ovšem domácí agent potřebuje znát prefix(y) adres používané v lokální síti. Mobilní směrovač mu je může předat hned na začátku v aktualizaci vazby pomocí nově definované volby *Prefix mobilní sítě (Mobile Network Prefix)*. Její formát vidíte na obrázku 11.24, klíčovými položkami jsou *Prefix mobilní sítě (Mobile Network Prefix)* a jeho *Délka (Prefix length)*.



Obrázek 11.24: Volba *Prefix mobilní sítě* pro hlavičku *Mobilita*

Alternativní možností je během registrace u domácího agenta neřešit prefix a nastavit jej jinými prostředky. Nabízí se třeba manuální konfigurace na straně domácího agenta nebo směrovací protokol mezi mobilním směrovačem a jeho agentem. Podobně se RFC 3963 nezabývá otázkou, jakým způsobem mobilní směrovač zjistí prefixy, jež jsou mobilní síti přiřazeny (tady lze nejspíše očekávat manuální konfiguraci, podobně jako u běžných nepohyblivých směrovačů).

Pro domácího agenta se nabízejí dvě možné cesty, jak na sebe stáhnout datagramy směřující do mobilní sítě, aby je mohl předávat tunelem jejímu směrovači. Může to udělat čistě a prostřednictvím směrovacích protokolů začít ohlašovat, že cesta do mobilní sítě nyní vede přes něj. Druhou možností je, že ponechá směrování v původním stavu, kdy cesta do mobilní sítě vede přes domácí adresu mobilního směrovače. Ovšem pro ni hraje roli domácího agenta, takže prostřednictvím objevování sousedů získá datagramy předávané mobilnímu směrovači a může mu je tunelem předat.

V každém případě z hlediska směrování se mobilní síť tváří, jako by stále zůstávala doma. To je dobré pro agregaci prefixů (je možné ji zahrnout do globálního prefixu pro domácí síť), nikoli však pro vlastní směrování. To bude mít k ideálu daleko, protože všechna data do a z mobilní sítě protékají domácím agentem. Zde platíme daň za jednoduchost. Stroje v mobilní síti ani jejich komunikační partneři nemusí nic dělat, dokonce se ani nedozvědí o tom, že síť je zrovna na cestách. Na druhé straně ale cesta mezi nimi může být dost krkolomná.

RFC 3963 ve svém názvu nese slovo „základní“. Je možné, že se časem objeví nějaká pokročilá podpora mobilních sítí, která poskytne i optimalizaci směrování. Zatím však žádná taková specifikace nevznikla.

12 Kudy tam

Od samého začátku počítali autoři IPv6 s velmi důležitým problémem: jak přejít ze stávajícího IPv4 na nový protokol. Je zřejmé, že při současné velikosti a stavu Internetu nelze prostě prohlásit „Dámy a pánové do konce roku X používáme IPv4 a počínaje 1. lednem X+1 Internet přechází na IPv6." Jsou potřeba prostředky, které umožní současný provoz obou protokolů, spolupráci mezi nimi a postupný přechod od jednoho k druhému.

Obecná představa tedy zní, že podíl IPv6 na Internetu, který je v současnosti stále dost malý, se bude postupně zvětšovat a IPv4 bude naopak mizet, až možná zmizí docela. Ale třeba také ne a některé ostrůvky zůstanou starší verzi věrny.

Pro koexistenci a vzájemnou spolupráci obou protokolů existuje celá řada návrhů. Lze je rozdělit do tří základních skupin:

Dvojí zásobník znamená, že příslušné zařízení podporuje jak IPv4, tak IPv6. To mu umožňuje bavit se s partnery z obou světů. Tento princip sám o sobě není nijak zvlášť lákavý, protože vyžaduje zachování IPv4, ke kterému se jen přidá IPv6. Nicméně slouží jako východisko pro zbývající dvě skupiny. Všechny další způsoby totiž vyžadují, aby alespoň některá zařízení podporovala oba protokoly.

Tunelování je ověřená metoda, jak „protlačit" informaci infrastrukturou, která nemá potřebné vlastnosti. Datagram se prostě zabalí jako data do jiného datagramu, který daná síť dokáže přepravit. V případě spolupráce IPv4 a IPv6 se používají dva režimy tunelování. Konfigurované (manuální) tunely jsou explicitně nastaveny správcem, zatímco automatické se navazují samočinně na základě informací obsažených v adresách. Obecně se tunely používají ke spojení dvou počítačů hovořících stejným protokolem (řekněme IPv6), které ovšem musí procházet sítí vyžadující protokol opačný (IPv4).

Překladače čili translátory se snaží o zprostředkování styku oněch dvou světů. Například pokud váš počítač hovoří pouze IPv6 a jste nuceni získat data od serveru, který podporuje výlučně IPv4, žádný tunel vám nepomůže. Potřebujete zařízení, které by přeložilo vaše datagramy do IPv4 a odpovědi serveru naopak do IPv6. V této oblasti se celkem jednoznačně prosadil NAT64, který obvykle doprovází koncové sítě podporující jen IPv6 a umožňuje jejich strojům hovořit s IPv4 Internetem.

Přechodových mechanismů vzniklo větší než malé množství a leckteré už stačily i zaniknout. Podle postaršího bonmotu Randyho Bushe máme víc přechodových mechanismů než IPv6 paketů. Nebudu se proto snažit o úplný výčet, ale představím alespoň ty nejvýznamnější.

tunelování		
tunel server/broker	RFC 3053	strana 281
6to4	RFC 3056	strana 284
6rd	RFC 5969	strana 290
6over4	RFC 2529	strana 287
ISATAP	RFC 5214	strana 288
Teredo	RFC 4380	strana 286
Dual-Stack Lite	RFC 6333	strana 293
Lightweight 4over6	RFC 7596	strana 295
MAP-E	RFC 7597	strana 298
překladače		
SIIT	RFC 7915	strana 301
NAT64	RFC 6146	strana 308
464XLAT	RFC 6877	strana 311
MAP-T	RFC 7599	strana 298
TRT	RFC 3142	strana 314
BIH	RFC 6535	strana 315
SOCKS64	RFC 3089	

Tabulka 12.1: Metody pro přechod k IPv6

Stručné shrnutí metod, jejichž podrobnější popis najdete dále v textu, uvádí tabulka 12.1. Vyznat se v nich nemusí být zrovna snadné a ne všechny pro vás budou relevantní. Dovolím si pár tipů, na co se podívat pro určité typické síťové situace.

- Provozujete koncovou síť, ve které chcete mít IPv6, ovšem váš poskytovatel Internetu jej nepodporuje: Asi nejschůdnější je přivést protokol konfigurovaným tunelem.
- Chystáte se složit bobříka odvahy a provozovat svou koncovou síť jen na IPv6: Pro přístup do IPv4 Internetu použijte NAT64.
- Jste poskytovatel Internetu a chcete svým zázkazníkům nabídnout IPv6, aniž byste příliš zasahovali do páteřní infrastruktury: V tomto případě se podívejte na 6rd.
- Jste poskytovatel Internetu a nedostatek IPv4 adres už vás vážně omezuje, takže přemýšlíte o odstranění IPv4 z páteřní sítě: K zákazníkům jej můžete doručit tunely pomocí DS-Lite nebo dvojím překladem 464XLAT.

Jakousi základní sadu nástrojů pro přechod k nové verzi IP tvoří dvojí zásobník a princip tunelování, protože tyto prvky v té či oné podobě využívá řada ostatních mechanismů. Podrobně je rozebírá RFC 4213: *Basic Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers*.

12.1 Dvojí zásobník

Název dvojí zásobník (v originále dual stack) je poněkud zavádějící. Vnucuje člověku představu, že dotyčné zařízení má dva zcela oddělené zásobníky protokolů – jeden pro IPv4 a druhý pro IPv6. Ve skutečnosti se často jedná o jeden hybridní zásobník. Klíčové však je, že zařízení musí podporovat oba dva protokoly a mít jak IPv4, tak IPv6 adresu.

K jejich získání se používají obvyklé postupy. Pro IPv4 ruční konfigurace nebo DHCP, pro IPv6 připadá v úvahu vedle ruční konfigurace některá z automatických forem – buď bezstavová nebo DHCPv6. Také zdejší DNS klient musí znát oba světy. Konkrétně při získávání adres to znamená, že se musí vyznat jak v A záznamech pro IPv4, tak v AAAA záznamech pro IPv6.

Kooperace mezi oběma protokoly se odehrává (pokud je potřebná) zpravidla až v aplikační vrstvě. Odpovídající aplikace si vyzvedne data, která dorazila jedním protokolem, a v závislosti na svých vlastnostech a případné konfiguraci je upraví a odešle druhým protokolem danému příjemci.

Zařízení podporující oba protokoly bývají označována jako IPv4/IPv6 uzly.

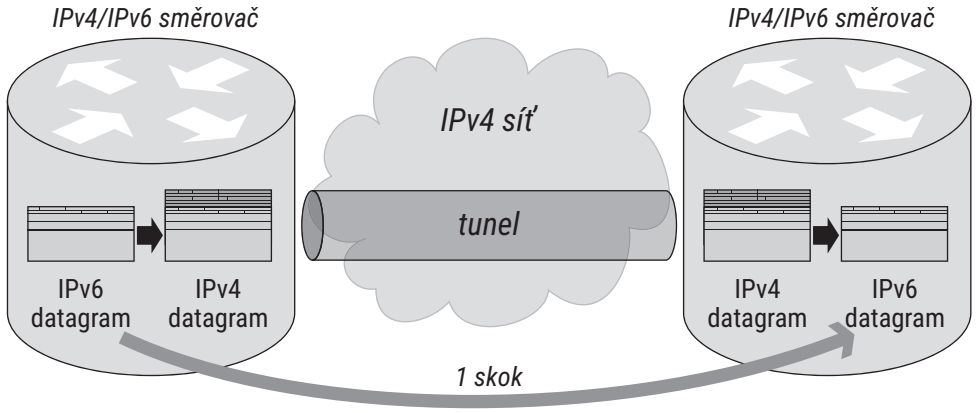
12.2 Obecně o tunelování

Princip tunelování, tedy balení jednoho protokolu do druhého, není žádnou novinkou. V počítačových sítích se s ním setkáte celkem běžně. V době, kdy vznikala většina tunelovacích mechanismů,

bylo především třeba tunelovat IPv6 datagramy pro průchod IPv4 sítí, takže se podíváme především na tento případ. Nicméně myslitelný a poslední dobou stále více populární je i opak – bude o něm řeč v části 12.6 na straně 293.

Tunel má dva konce, z nichž každý má svou IPv4 adresu. Když se zařízení na jednom konci rozhodne[1], že daný IPv6 datagram musí odeslat tunelem, vezme jej a vloží jako data do nově vytvořeného IPv4 datagramu. Jeho cílovou adresou bude IPv4 adresa druhého konce tunelu a jako odesilatel bude figurovat zdejší IPv4 adresa tunelu. Skutečnost, že se jedná o tunelovaný IPv6 datagram vyznačí hodnotou 41 v položce *Protokol* obalujícího IPv4 datagramu. Tento způsob přepravy bývá také označován jako *6in4*, nejedná se však o oficiální název.

Datagram se pak odešle běžnou IPv4 sítí. Když dorazí do cíle (na druhý konec tunelu), příjemce podle protokolu 41 pozná, že obdržel tunelovaný paket. Vybalí z něj původní IPv6 datagram a ten pak dále zpracuje podle jeho cílové adresy a svých směrovacích tabulek pro IPv6. Například jej může přijmout, pokud je určen jemu, nebo jej třeba odeslat dalším tunelem někam dál.



Obrázek 12.1: Mechanismus tunelování

Během průchodu tunelem hraje původní IPv6 datagram roli nesených dat a nijak se nemění. Jeho hlavičkami se zabývá až druhý konec tunelu po vybalení. Mimo jiné to znamená, že z hlediska IPv6 je celý průchod tunelem počítán za jeden skok a vybalující směrovač zmenší položku *Max skoků* v IPv6 hlavičce o jedničku.

Existují dva základní režimy tunelování: konfigurovaný a automatický. Konfigurovaný režim znamená, že na dotyčném zařízení byly provedeny příkazy, kterými vznikl tunel vedoucí kamsi. Vlast-

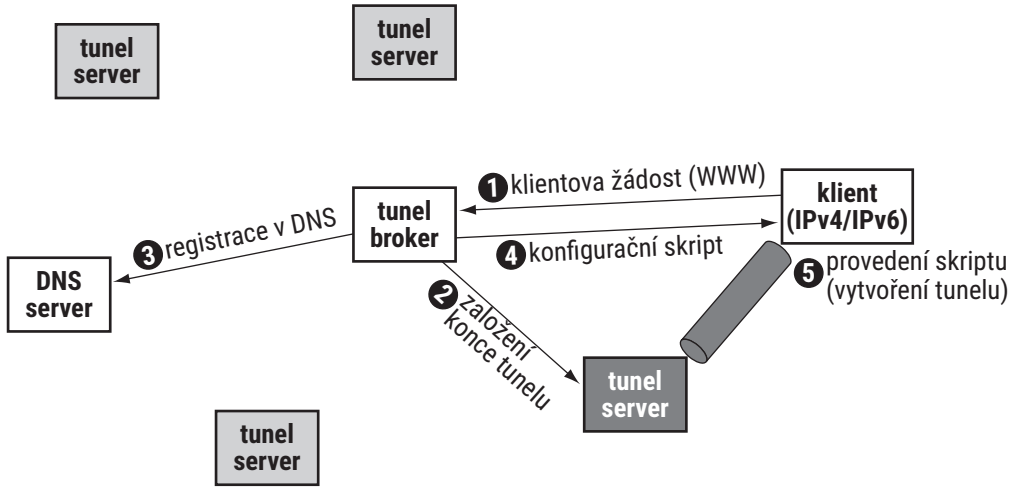
1: K tomuto rozhodnutí může dospět buď na základě směrovací tabulky nebo podle speciální adresy příjemce, kterou IPv6 datagram nese.

ně tak vzniklo nové síťové rozhraní (byť virtuální), se kterým se zachází podobně, jako s ostatními. Mimo jiné to znamená, že o odesílání datagramů tímto rozhraním rozhoduje směrovací tabulka. V ní je řečeno, do kterých IPv6 sítí vede cesta daným tunelem. Má-li být paket odeslán tímto rozhraním, zabalí se do IPv4 datagramu s cílovou adresou druhého konce a následuje zpracování podle směrovací tabulky pro IPv4.

Konfigurované tunely se nejčastěji používají k trvalému propojování sítí nebo ke vzdálenému zapojení počítače do IPv6 sítě. Výborně poslouží pro experimenty, když si chce někdo relativně bezbolestně osahat IPv6. Tyto tunely nejsou nijak svázány s fyzickou topologií IPv4 sítě, kterou procházejí. Z hlediska praktického je však velmi záhodno k ní přihlédnout. Jinak hrozí případy, kdy stejnou linkou projde tentýž paket několikrát prostě proto, že tunely, kterými je přepravován, tudy vedou tam a zase zpátky. Pokud se budete připojovat tunelem k nějaké IPv6 síti, vyberte si ten z jejích bodů přítomnosti, který je pro vás nejvhodnější z hlediska topologie IPv4 sítě.

Přestože se to může na první pohled zdát podivné, do kategorie konfigurovaných tunelů spadají i tak zvané tunel servery. Jedná se vlastně o automatickou nadstavbu nad explicitní konfigurací. Tunel server je zařízení, které je zapojeno do IPv4 Internetu i do IPv6 sítě a je ochotno posloužit jako protější konec tunelu pro kohokoli, kdo má zájem.

Uživatel se musí nejprve zaregistrovat (zpravidla vyplněním údajů ve formuláři přístupném prostřednictvím WWW). Robot na základě registrace vytvoří protější konec tunelu a pošle vám konfigurační skript, který musíte spustit. Když to provedete, založíte tak vlastní konec tunelu a připojíte se k IPv6 síti.



Obrázek 12.2: Tunel server a tunel broker

Postupem času došlo k dalšímu rozdělení funkcí. Vlastní *tunel server* zpravidla bývá směrovač, kterému nečiní problémy akceptovat značné množství tunelů. Naproti tomu proces registrace a generování konfiguračních skriptů vyžaduje WWW server spolupracující s databází a nejsnadněji se realizuje na běžném počítači. Proto byl zaveden *tunel broker*, který zprostředkovává styk mezi tunel servery a uživateli. Jeden tunel broker může obsluhovat několik tunel serverů. V takovém případě ještě vybere ten z nich, který vzhledem k vámi zadaným údajům považuje za nejvhodnější.

Výměna informací mezi klientem a tunel serverem či brokerem představuje zajímavý problém. Může být postavena na existujících mechanismech (WWW, E-mail), jak bylo popsáno výše. Jejich nevýhodou je, že vyžadují poměrně kvalifikovaného uživatele, který navíc může být na pochybách, zda zaslaný konfigurační skript dělá skutečně to, co slibuje.

Proto se někteří autoři snaží vymyslet specializované nástroje, které by zajistily výměnu konfiguračních informací a vytvoření tunelu. Asi nejzajímavější je *Tunnel Setup Protocol (TSP)*. Podle něj komunikace probíhá následovně:

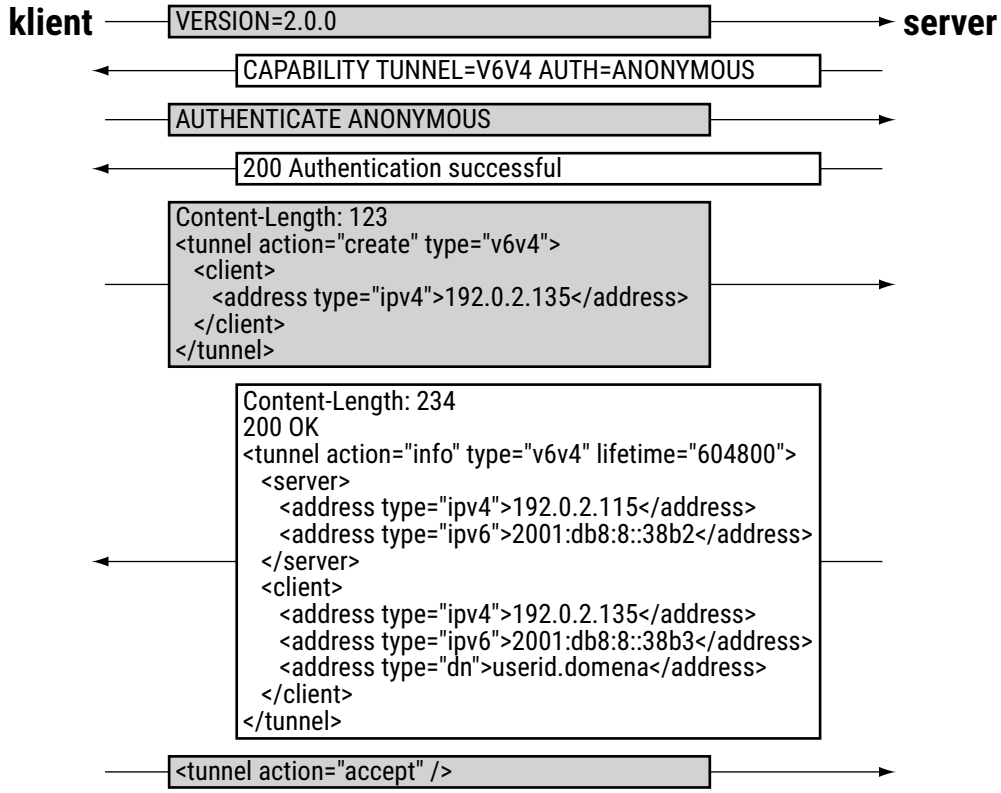
1. Klient naváže s tunel brokerem (nebo serverem, TSP lze použít pro oba) TCP spojení.
2. Broker mu sdělí sortiment nabízených služeb.
3. Pokud si klient vybere, musí se autentizovat. K prokazování totožnosti bude použit SASL (RFC 4422).
4. Po úspěšné autentizaci klient zašle informace o sobě a o svých požadavcích na tunel.
5. Broker buď zajistí založení tunelu a pošle klientovi odpovídající parametry, nebo požadavek odmítne (a případně doporučí klientovi jiné servery, u nichž by mohl uspět).

Výměna informací probíhá ve formátu XML. Použitý jazyk je velmi jednoduchý, používá asi deset prvků (tunnel, client, server, broker, address apod.) a jeho DTD zabere půl stránky. Popis TSP najdete v RFC 5572: *IPv6 Tunnel Broker with the Tunnel Setup Protocol (TSP)*.

Základní definice tunelování v RFC 4213 popisuje pouze explicitně konfigurované tunely. V jeho předchůdci, jímž bylo RFC 2893, najdete i automatické tunely využívající speciální IPv6 adresy vytvořené z IPv4. Trpěly však řadou omezení, takže je novější dokument opustil ve prospěch propracovanějších způsobů automatického tunelování, konkrétně 6to4, který byl později opuštěn ve prospěch 6rd. Život tunelovacích protokolů není snadný.

Princip tunelování přináší několik víceméně nevyhnutelných problémů, které komplikují jeho nasazení. Prvním z nich je velikost paketů. Jestliže datagram vezmeme jako data a zabalíme jej do jiného datagramu, celková velikost paketu naroste, protože přibyla hlavička obalujícího datagramu. Konkrétně balíme-li do IPv4, zvětší se datagram o 20 B.

Tím ale můžeme narazit na omezení linkové vrstvy a bude třeba rozložit vytvořený datagram na fragmenty, aby se vešel. Ve výsledku klesá efektivita a dostavují se různé problémy. Například fi-



Obrázek 12.3: Výměna informací o tunelu pomocí TSP

rewally fragmentovaným datagramům příliš neholdují, protože se často rozhodují také podle portů transportní vrstvy, ovšem transportní hlavička je obsažena jen v prvním fragmentu a zbývající není jak posoudit. Přísně nastavené firewally také často blokují protokol 41 signalizující tunelovaný datagram.

Další okruh problémů plyne z nedokonalé topologie. Tunely často nevedou nejkratší cestou k cíli, ale zanesou datagramy stranou, někdy i dost drasticky. Tímto neduhem trpí zejména statické tunely, jejichž druhý konec je pevně dán, bez ohledu na cílovou adresu datagramu. Lépe se chovají automatické tunely (jako např. 6rd) využívající pro druhý konec různé cílové IPv4 adresy, obvykle automaticky odvozené z IPv6 adres.

Aby svět nebyl tak jednoduchý, obě základní varianty tunelování se z hlediska popsaných problémů doplňují. Zatímco statické tunely jsou předvídatelnější a dají se vyladit tak, aby pokud možno ne-

trpěly problémy s firewally a velikostí paketů, topologicky jsou na tom špatně. Automatické tunely se naopak lépe chovají vzhledem k topologii, ovšem díky své proměnlivosti a nepředvídatelnosti více trpí různými formami zakazování a zahazování paketů.

Obecně platí a bylo opakovaně potvrzeno různými měřeními, že tunelované datagramy častěji nedorazí k cíli. Služby, jejichž zprávy procházejí tunelem, pak vykazují nižší spolehlivost. Porovnání vlastností několika různých variant tunelování IPv6 po IPv4 najdete v RFC 7059: *A Comparison of IPv6-over-IPv4 Tunnel Mechanisms*.

12.3 Staří a opuštění

Exkurzi po pokročilejších tunelovacích mechanismech zahájíme skupinou přechodových mechanismů první generace, které svého času prošlapávaly cestu. Svého času se hřály na výsluní přízně, byly do nich vkládány značné naděje a posloužily k získání prvních praktických zkušeností.

Postupem času se ovšem ukázala řada různých praktických problémů a omezení, kterými trpěly. Na jejich ramenou pak vyrostla mladší generace, která řešila zjištěné nedostatky a odeslala své předchůdce na zasloužený odpočinek. Ať už pro notorickou nespolehlivost (6to4, Teredo), nebo prostě proto, že přestaly být potřebné (6over4, ISATAP).

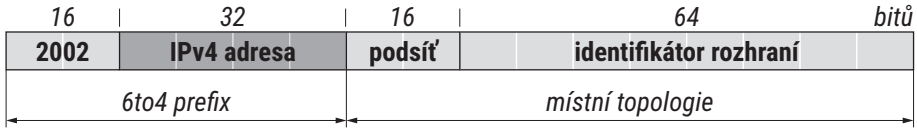
12.3.1 6to4

První ze zmíněné dvojice je protokol označovaný jako *6to4*. Oficiálně se jmenuje „propojování IPv6 domén IPv4 sítěmi“ a jeho definici najdete v RFC 3056: *Connection of IPv6 Domains via IPv4 Clouds*. Jeho hlavním cílem je umožnit koncovým IPv6 sítím vzájemnou komunikaci procházející IPv4 Internetem s minimální konfigurací.

Požaduje, aby připojená síť měla k dispozici alespoň jednu veřejnou IPv4 adresu. Tu má přiřazenu 6to4 směrovač, který musí být připojen jak k IPv4 Internetu, tak ke koncové IPv6 síti a procházejí jím veškerá data přepravovaná 6to4. Typické uspořádání vypadá tak, že 6to4 realizuje přístupový směrovač sítě a dotyčnou IPv4 adresou je adresa tohoto směrovače.

6to4 na základě dané IPv4 adresy vytvoří *IPv6 prefix* délky 48 b pro celou síť. Začíná hodnotou 2002::/16, podle níž lze poznat, že se jedná o prefix pro 6to4. Dalších 32 bitů tvoří IPv4 adresa přístupového směrovače. Vznikne tak prefix standardní délky 48 bitů, který umožňuje adresovat počítače v síti obvyklým způsobem. Strukturu adres používajících 6to4 znázorňuje obrázek 12.4. Kdyby například 6to4 směrovač měl IPv4 adresu 147.230.7.23, vytvořil by pro svou IPv6 síť prefix 2002:93e6:717::/48.

Směrovač implementující 6to4 pak do vnitřní sítě ohlašuje směrovací informaci, že přes něj vede cesta k síti 2002::/16. Datagramy adresované do jiné 6to4 sítě budou proto předány k doručení jemu. Když se tak stane, vezme si z cílové IPv6 adresy IPv4 adresu 6to4 směrovače vzdálené sítě



Obrázek 12.4: Struktura 6to4 adresy

a datagram mu automaticky tuneluje. Jako zdrojovou adresu použije IPv4 adresu svého odchozího rozhraní (tedy adresu, ze které vychází zdejší 6to4 prefix). Tunel není zakládán trvale, IPv6 paket se podle tunelovacích pravidel jednoduše zabalí do IPv4 datagramu a odešle do Internetu, 6to4 směrovač si pro něj nemusí ukládat žádné stavové informace.

Největší problém vzniká při styku s přirozeným IPv6 světem – když spolu potřebují komunikovat stroje, z nichž jeden má pouze 6to4 adresu a druhý jen nativní IPv6 adresu. V takovém případě musí v Internetu existovat alespoň jeden *zprostředkovatel (relay router)*. Potřebuje alespoň jedno 6to4 rozhraní a alespoň jedno nativní IPv6 rozhraní s plnohodnotným připojením.

Do nativní IPv6 sítě obvyklými směrovacími mechanismy ohlašuje, že jeho prostřednictvím je dosažitelná síť s prefixem 2002::/16. Je-li takových směrovačů více, standardním způsobem se posoudí, který z nich je pro daný IPv6 uzel nejvýhodnější. Pro směrování ze 6to4 sítí do světa nativního IPv6 byla definována pevná výběrová adresa IPv4 pro zprostředkovatele 192.88.99.1. 6to4 směrovač si podle ní nastavil implicitní cestu pro IPv6 na adresu 2002:c058:6301:: a tuneloval datagramy na IPv4 adresu zprostředkovatele, která je v ní obsažena.

Výměna dat mezi 6to4 a nativním IPv6 má bohužel silný sklon k asymetrii. Datagramy směřující do IPv6 sítě bude předávat držitel výběrové adresy 192.88.99.1 nejbližší 6to4 odesilateli, zatímco datagramy v protisměru budou předány zprostředkovateli, který je nejblíže protějšímu stroji.

6to4 se svého času slušně rozšířilo, některé aktivní prvky a operační systémy je dokonce aktivovaly automaticky, pokud neměly k dispozici nativní IPv6 a disponovaly veřejnou IPv4 adresou. Provozní zkušenosti bohužel odhalily, že tento mechanismus trpí řadou problémů. Alarmující je jeho špatná spolehlivost – podle měření, která prováděl Geoff Huston či RIPE NCC, se kolem 10 až 15 % požadavků přicházejících na servery po 6to4 nedočká odpovědi.

6to4 získalo pověst jednoho z nejvýznamnějších zdrojů nespolehlivosti IPv6. Špatné provozní zkušenosti nakonec vedly k vydání RFC 7526: *Deprecating the Anycast Prefix for 6to4 Relay Routers*, které formálně zamítá používání výběrového prefixu 192.88.99.0/24 pro 6to4 relay, doporučuje do nových implementací IPv6 vůbec nezařazovat 6to4 a těm, které jej obsahují, nařizuje jej implicitně vypnout a zapínat pouze na žádost.

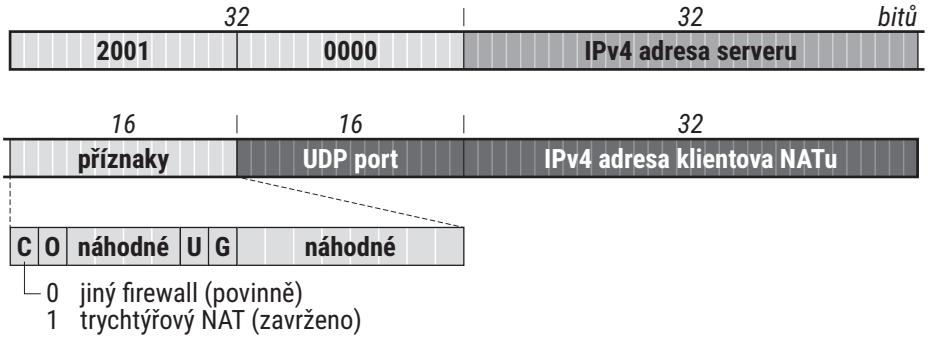
12.3.2 Teredo

Druhým z opuštěných protokolů je *Teredo*. Jeho cílem bylo obejít jednu z největších překážek současného Internetu, kterou je NAT. Mění adresy a čísla portů, je problém adresovat počítače za ním (zvenčí viditelná adresa se vytvoří, až když vnitřní počítač odesílá data) a navíc mnohdy z bezpečnostních důvodů propouští dovnitř jen data z adresy, na kterou dotyčný stroj nedávno něco odeslal.

Základní myšlenka vychází z prostého faktu, že komunikaci je třeba zahajovat zevnitř NATované sítě, aby se v NATu vytvořila odpovídající vazba. Teredo totiž neřeší celé koncové sítě jako 6to4, ale jednotlivá koncová zařízení. Každý počítač v síti si řeší své Teredo připojení sám. Pro vlastní přenos dat se používá protokol UDP, který je NATům dobře znám a dovedou s ním zacházet.

Teredo používá dost komplikovaný formát IPv6 adres, které obsahují hned několik kontaktních informací ze světa IPv4. Strukturu adresy vidíte na obrázku 12.5. Začíná pevně daným Teredo prefixem 2001::/32. Za ním následuje IPv4 adresa serveru, který adresu přidělil. Tím je vyčerpáno úvodních 64 bitů, obvyklých pro prefix podsítě. Tato polovina pochází od serveru.

Druhá polovina je ve světě IPv6 interpretována jako identifikátor rozhraní a dává si ji dohromady klient sám. Vloží do ní údaje o venkovním konci NATu, kterým prošla zpráva od klienta. Obsahuje použité číslo UDP portu a veřejnou IPv4 adresu NATu. Vzhledem k tomu, že hrozí určité nebezpečí, že NAT tyto hodnoty v datagramu vyhledá a přepíše, jsou všechny jejich bity invertovány (což naznačuje invertovanými barvami i obrázek 12.5).



Obrázek 12.5: Struktura adresy pro Teredo

Získání IPv6 adresy probíhalo tak, že Teredo klient na koncovém stroji oslovil Teredo server, který mu ve své odpovědi poslal jak prefix, tak informace o IPv4 adrese a portu NATu, ze kterého klientova žádost dorazila. Z údajů v odpovědi si klient sestaví svou adresu. Protokol definoval i dost složité namlouvací rituály, kterými si dva stroje připojené pomocí Teredo snažily otevřít

cestu ve svých NATech, aby mohly dále komunikovat přímo. Styk s nativním IPv6 opět zajišťoval zprostředkovatel (relay).

Autoři návrhu si byli vědomi značné režie a je těžkopádnosti protokolu. Od počátku proto Teredo prohlašovali za „krabičku poslední záchrany", která se použije jen v případě, kdy nic lepšího není k mání. Specifikaci obsahuje RFC 4380: *Teredo: Tunneling IPv6 over UDP through Network Address Translations (NATs)*.

Neefektvita byla všeobecně známá. Měření, jež provedl Geoff Huston [8], navíc ukázala neuvěřitelnou nespolehlivost – bezmála 40 % pokusů o navázání TCP spojení z Teredo klientů skončilo neúspěšně. Teredo by skutečně mělo být bráno jako nástroj lehkého experimentování a úplně poslední možnost, jak se snažit o seriózní připojení k IPv6.

12.3.3 6over4

Technologie nazvaná *6over4* má skromnější ambice než ty výše zmiňované. Je zaměřena na izolované počítače podporující IPv6, které se nacházejí uvnitř lokální IPv4 infrastruktury. Cílem 6over4 je umožnit jim plnohodnotnou komunikaci s okolním IPv6 světem, a to opět při co nejmenší míře ruční práce a explicitního konfigurování. Mechanismus je definován v RFC 2529: *Transmission of IPv6 over IPv4 Domains without Explicit Tunnels*. De facto se zde IPv4 používá jako virtuální Ethernet.

Dotyčné počítače musí podporovat jak IPv6, tak IPv4, protože tunelují své IPv6 datagramy do IPv4. Tunelem je posílají směrovači podporujícímu 6over4, který je pak předává dál do IPv6 sítě. Každý počítač využívající 6over4 má svou IPv4 adresu. Jeho IPv6 adresa vznikne tak, že se k prefixu podsítě[2] připojí identifikátor rozhraní, jehož první čtyři bajty jsou nulové a následující čtveřice bajtů obsahuje IPv4 adresu příslušného rozhraní.

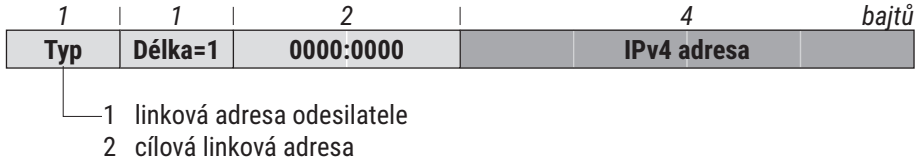
Ke své činnosti počítač používá běžné mechanismy IPv6, jako je například objevování sousedů či automatická konfigurace. Řada z nich využívá skupinově adresované datagramy a 6over4 proto musí zajistit, aby fungovalo skupinové adresování.

Provádí to velmi jednoduše – prostřednictvím skupinových adres IPv4. Skupinovou IPv6 adresu přímočaře mapuje na IPv4 adresu 239.192.*X*.*Y*, kde *X* a *Y* jsou poslední dva bajty mapované IPv6 adresy. Řada IPv6 skupin tak pochopitelně splyne do jedné IPv4 skupiny a přijímající počítače si musí přebrat, zda jim daný datagram skutečně patří nebo ne. To je však zcela obvyklé a při přenosu skupinově adresovaných datagramů běžným Ethernetem k tomu dochází také.

2: Prefix musí být 64 bitů dlouhý a počítač se jej může dozvědět například z ohlášení směrovače pro bezstavovou automatickou konfiguraci.

Důsledkem je, že 6over4 ke své činnosti potřebuje, aby daná IPv4 síť podporovala skupinově adresované datagramy (IPv4 multicast). To v současné době není samozřejmostí, a proto je tento požadavek považován za jednu z nevýhod 6over4.

Pro mapování individuálních IPv6 adres na IPv4 (počítač se nachází v čisté IPv4 infrastruktuře, každý odesílaný IPv6 datagram musí tunelovat, proto potřebuje mapovat cílovou IPv6 adresu na vhodnou IPv4) se používá běžné objevování sousedů. Jedinou specialitou je formát volby pro lokální linkovou adresu, která se přibaluje k výzvě sousedovi a ohlášení souseda. Její podobu vidíte na obrázku 12.6.



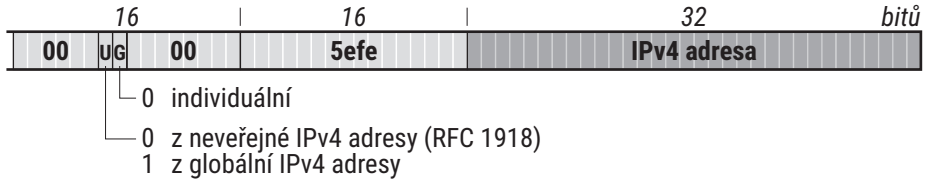
Obrázek 12.6: Volba *Linková adresa* pro objevování sousedů při 6over4

12.4 ISATAP

Vzhledem k požadavku na fungující skupinové adresování v IPv4 jsou výskyty 6over4 dost vzácné. Schůdnější cestu k připojení izolovaných IPv6 strojů uvnitř IPv4 infrastruktury představuje mechanismus nazvaný *Intra-Site Automatic Tunnel Addressing Protocol (ISATAP)*. Cíl je zde stejný jako u 6over4: umožnit vzájemnou komunikaci IPv6 uzlů, které se nacházejí uvnitř lokální IPv4 sítě, a použít k tomu IPv4 v roli linkového protokolu.

Již samotný název intra-site naznačuje, že protokol má sloužit uvnitř zákaznické sítě, zatímco komunikaci mezi jednotlivými sítěmi ponechává na jiných. Na rozdíl od 6over4 neklade na IPv4 žádné speciální nároky. Jejich základní princip je ale podobný – IPv6 adresa v sobě obsahuje IPv4 adresu a zařízení podporující ISATAP zabalí datagram podle standardní tunelovací procedury do IPv4 a odešle jej na adresu získanou z cílové ISATAP adresy. Styk s nativním světem zajišťuje ISATAP směrovač, který by měl mít jak IPv4 tak IPv6 připojení.

ISATAP zavádí speciální formát pro adresu rozhraní, která je vytvořena na základě IPv4 adresy dotyčného stroje. V počátečních 32 bitech obsahuje konstantu 0000:5efe, za níž pak následuje 32 bitů s IPv4 adresou. Přesněji řečeno počátečních 16 b nemusí být nulových, protože sedmý bit rozlišuje globálně/lokálně jednoznačný identifikátor (bit *U*). Pokud je IPv4 adresa v identifikátoru rozhraní lokální podle RFC 1918, třeba 10.1.2.3, je identifikátor jednoznačný pouze lokálně, bit U má hodnotu 0 a identifikátor rozhraní tvar 0:5efe:10.1.2.3. Jestliže je ale adresa rozhraní odvozena od globální IPv4 adresy, řekněme 147.230.7.5, je bit U nastaven na jedničku, což vede k identifikátoru 200:5efe:147.230.7.5. Celou strukturu identifikátoru rozhraní představuje obrázek 12.7.



Obrázek 12.7: Identifikátor rozhraní pro ISATAP

Identifikátor rozhraní se připojí k prefixu IPv6 podsítě, který může být nastaven pevně, nebo jej lze získat bezstavovou automatickou konfigurací (hnedle toto téma rozpitvám). Navíc si ISATAP uzel přiřadí obvyklým způsobem lokální linkovou adresu – připojí vytvořený identifikátor rozhraní za prefix fe80::/10. Předpokládejme, že dotyčná síť je připojena pomocí 6rd a má jen jednu podsíť s prefixem 2001:db8:1707:345::/64. Uvnitř sítě se používají lokální IPv4 adresy. ISATAP rozhraní našeho počítače by pak mělo adresy:

- 2001:db8:1707:345:0:5efe:10.1.2.3 a
- fe80::5efe:10.1.2.3.

Určitý problém představuje objevování sousedů. Jelikož na IPv4 nemají být kladeny žádné speciální nároky, znamená to, že po něm nemůžeme chtít doručování skupinově adresovaných datagramů. Objevování sousedů proto nemůže využívat obvyklé skupinové adresy.

V případě hledání linkové adresy některého ze sousedů se tento požadavek odstraní triviálně. Jeho „linkovou adresou" je odpovídající IPv4 adresa, kterou si odesilatel vyzvedne z posledních čtyř bajtů cílové adresy. K tomu nepotřebuje s nikým komunikovat.

Horší je situace s automatickou konfigurací adres a směrovačů. Zde není jak posílat obecné výzvy směrovači a jeho ohlášení. ISATAP proto zavádí novou datovou strukturu – *seznam potenciálních směrovačů (potential router list, PRL)*. Obsahuje IPv4 adresy směrovačů podporujících ISATAP a časovače. Uzel pak periodicky posílá *Výzvu směrovači* cíleně na adresy uvedené v seznamu potenciálních směrovačů. Také jejich ohlášení jsou posílána individuálně na adresu klienta, který se zeptal. Z příchozích ohlášení se ISATAP uzel dozví platné prefixy, nastaví si adresy a implicitní směrování.

Otázku naplnění seznamu potenciálních směrovačů ponechává definice ISATAP lišácky stranou. Zmiňuje se o možnostech využít manuální konfiguraci, DHCPv4 nebo DNS. Většina implementací sází právě na DNS, kterého se ISATAP klient zkusí dotázat na záznam typu A pro jméno

isatap ve své doméně[3]. Kdyby v síti z našeho příkladu fungovaly dva ISATAP směrovače na adresách 10.1.2.100 a 10.1.2.200, vložil by správce do DNS zóny pro svou doménu záznamy:

```
isatap    A  10.1.2.100
          A  10.1.2.200
```

a informoval tak zdejší ISATAP uzly o jejich existenci.

Všední den ISATAP pak probíhá celkem normálně. Když dostane k doručení datagram směřující na adresu s ISATAP prefixem ze stejné podsítě, tuneluje jej po IPv4 přímo adresátovi. Pro ostatní použije běžnou směrovací tabulku – čili zpravidla je předá (opět ISATAP tunelem) některému z implicitních směrovačů. Aby se udržoval v obraze, musí proces se zjišťováním prefixu a implicitních směrovačů pravidelně opakovat a případně se přizpůsobit změněné situaci.

Veškeré detaily najdete v RFC 5214: *Intra-Site Automatic Tunnel Addressing Protocol (ISATAP)*. Citelným omezením protokolu je, že nedokáže přepravovat skupinově adresované datagramy.

Vzhledem k široké podpoře IPv6 v aktivních prvcích se ovšem užitečnost mechanismů pro zpřístupnění IPv6 v lokální IPv4 síti stává více a více nadbytečnou. Chcete-li mít v lokální síti IPv6, je nejrozumnější spustit je nativně a nepřidělávat si vrásky provozováním 6over4 nebo ISATAP.

12.5 IPv6 Rapid Deployment (6rd)

6to4 sice neuspělo, ale jeho základní myšlenka – vložit do IPv6 adresy IPv4 adresu a na ni datagramy automaticky tunelovat – je ovšem zajímavá. Převzalo ji 6rd popsané v RFC 5569: *IPv6 Rapid Deployment on IPv4 Infrastructures (6rd)* a následně upřesněné v RFC 5969. Stojí na stejných principech jako 6to4, ale odstraňuje jeho provozní nedostatky, protože veškeré klíčové prvky spravuje jeden subjekt. Jeho cílem je, aby poskytovatel Internetu mohl svým zákazníkům nabídnout IPv6, přestože jeho páteřní síť podporuje pouze IPv4.

6rd také používá speciální adresy, jež v sobě obsahují IPv4 adresy pro tunelování. Místo 6to4 prefixu ale začínají prefixem, který definuje poskytovatel Internetu a pochází z jeho adresního prostoru. Tento prefix je společný pro celou 6rd síť daného poskytovatele. Za ním následuje IPv4 adresa zákazníkova domácího směrovače, na kterou se mají tunelovat data, a případný identifikátor podsítě.

Vzhledem k tomu, že IPv4 adresy zákaznických zařízení mívají společný prefix, nemusí být jejich adresa celá. Stačí ta část, ve které se liší. Pokud například poskytovatel použije pro zákaznická

3: Předpokládá se u něj fungující IPv4, takže může řešit DNS a má nějaké své jméno. Z něj odtrhne úvodní část, nahradí ji řetězcem „isatap“ a v této podobě předloží dotaz DNS.

zařízení neveřejné adresy z rozsahu 10.0.0.0/8, stačí do prefixu vložit jejich koncových 24 bitů. Konfigurace 6rd směrovače musí samozřejmě obsahovat IPv4 prefix, který se má k částem adres přidávat. Kdyby byl úvodní 6rd prefix 32bitový, zbude po přidání 24 bitů z IPv4 adresy ještě 8 bitů na rozlišení podsítí.

Obrázek 12.8: Struktura 6rd adresy

Směrovač připojující zákaznickou koncovou síť k síti poskytovatele funguje jako 6rd směrovač. Dostane-li k doručení datagram, jehož cílová adresa začíná 6rd prefixem, získá z ní vloženou IPv4 adresu a tuneluje na ni datagram zabalený do IPv4.

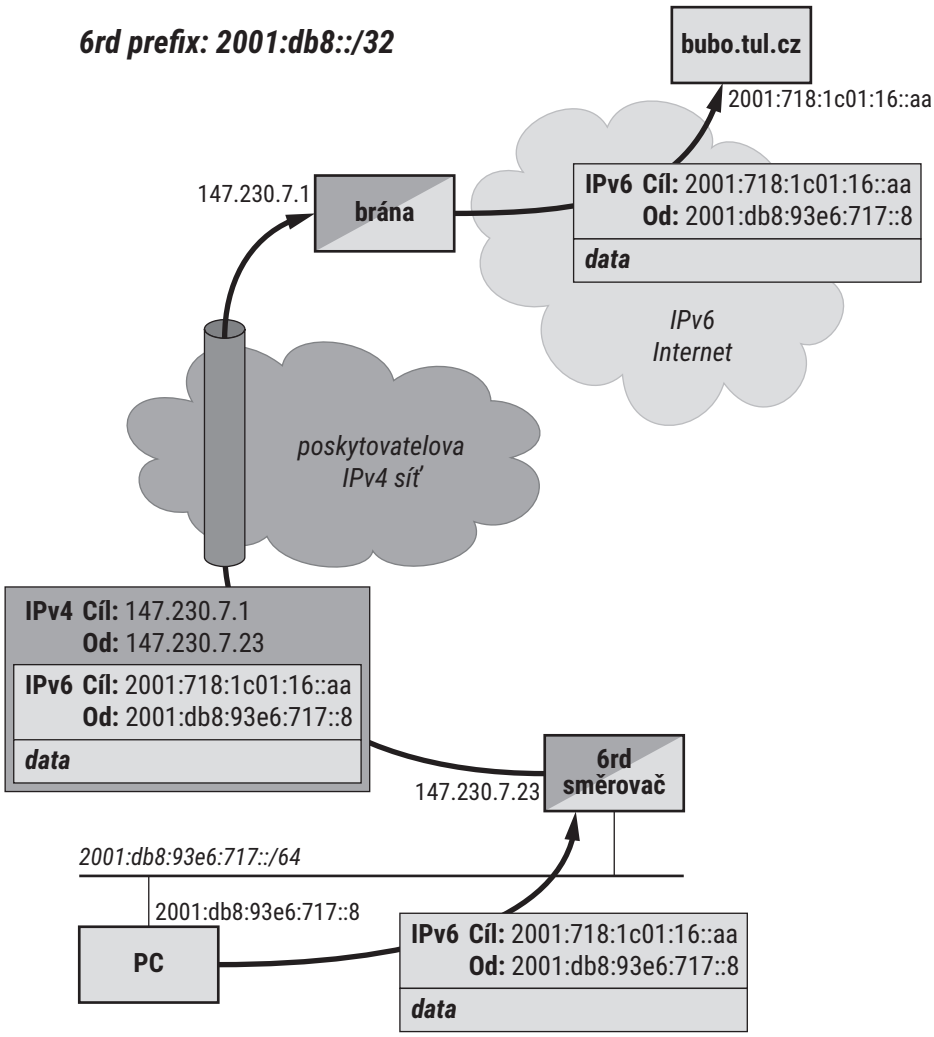
Komunikaci s nativním IPv6[4] zprostředkovávají brány, které mají rozhraní do obou světů. Jednu či několik jich provozuje poskytovatel. Do nativního IPv6 ohlašují standardními směrovacími mechanismy, že přes ně vede cesta do sítě se 6rd prefixem.

Zákaznické směrovače musí podporovat 6rd. Jsou konfigurovány tak, aby IPv6 datagramy směřující na adresy začínající 6rd prefixem poslaly tunelem na IPv4 adresu v nich obsaženou, zatímco datagramy adresované kamkoli jinam předávaly – opět tunelem – na některou z bran. Brány tedy vůči nim vystupují jako implicitní směrovače. Odeslání IPv6 datagramu do IPv6 sítě ilustruje obrázek 12.9. Do adresy zákaznické sítě se v něm vkládá celá IPv4 adresa 6rd směrovače (147.230.7.23 je šestnáctkově 93e6:0717). Pokud by například všechny 6rd směrovače sdílely společný prefix 147.230.0.0/16, stačilo by do IPv6 adresy vložit jen spodní dva bajty, zákaznická síť by obdržela prefix 2001:db8:717::/48 a měla by 16 bitů na adresy podsítí.

6rd používá principy 6to4 s odlišným organizačním obalem. Jeho hlavní výhodou je, že vše má pod kontrolou poskytovatel, dokáže tudíž zaručit kvalitu služby pro své zákazníky. Veškerá komunikace mezi jeho 6rd sítí a nativním IPv6 prochází jeho branou (branami). Díky tomu je chování sítě daleko konzistentnější. Nasazení je zároveň velmi snadné, RFC 5569 popisuje příklad francouzského operátora Free, který implementoval 6rd během měsíce. Technologie je v současné době dost populární a nasadila ji řada poskytovatelů.

Zákazník je ovšem na svém poskytovateli závislý. U 6to4 žádnou jeho podporu nepotřeboval, vše si mohl nastavit zcela nezávisle – prefix 2002::/16 i výběrová adresa pro brány byly globální. To

4: Do nativního IPv6 patří i 6rd sítě jiných poskytovatelů. 6rd se chová speciálně jen uvnitř poskytovatelovy sítě. Je adresováno z jeho adresního rozsahu, v okolním Internetu proto není nijak rozlišitelné.



Obrázek 12.9: Odeslání IPv6 datagramu podle 6rd

v případě 6rd není možné. Pokud poskytovatel nedefinoval svůj 6rd prefix a neprovozuje příslušnou bránu, nemůže je zákazník nasadit.

Má také k dispozici menší počet adres. 6to4 mu dá k dispozici standardní 48b adresu sítě se 16 b pro adresaci podsítí. U 6rd je takový adresní prostor krajně nepravděpodobný. Poskytovatelé obvykle používají 6rd prefix délky 32 b a na adresu podsítě málokdy zbývá více než 8 b. V případě domácích uživatelů omezení počtu podsítí nejspíš nebude vadit, u firemních už by to mohl být problém. Možnost nevkládat do 6rd celé IPv4 adresy, ale jen jejich konce, situaci výrazně zlepšuje.

12.6 Dual-Stack Lite

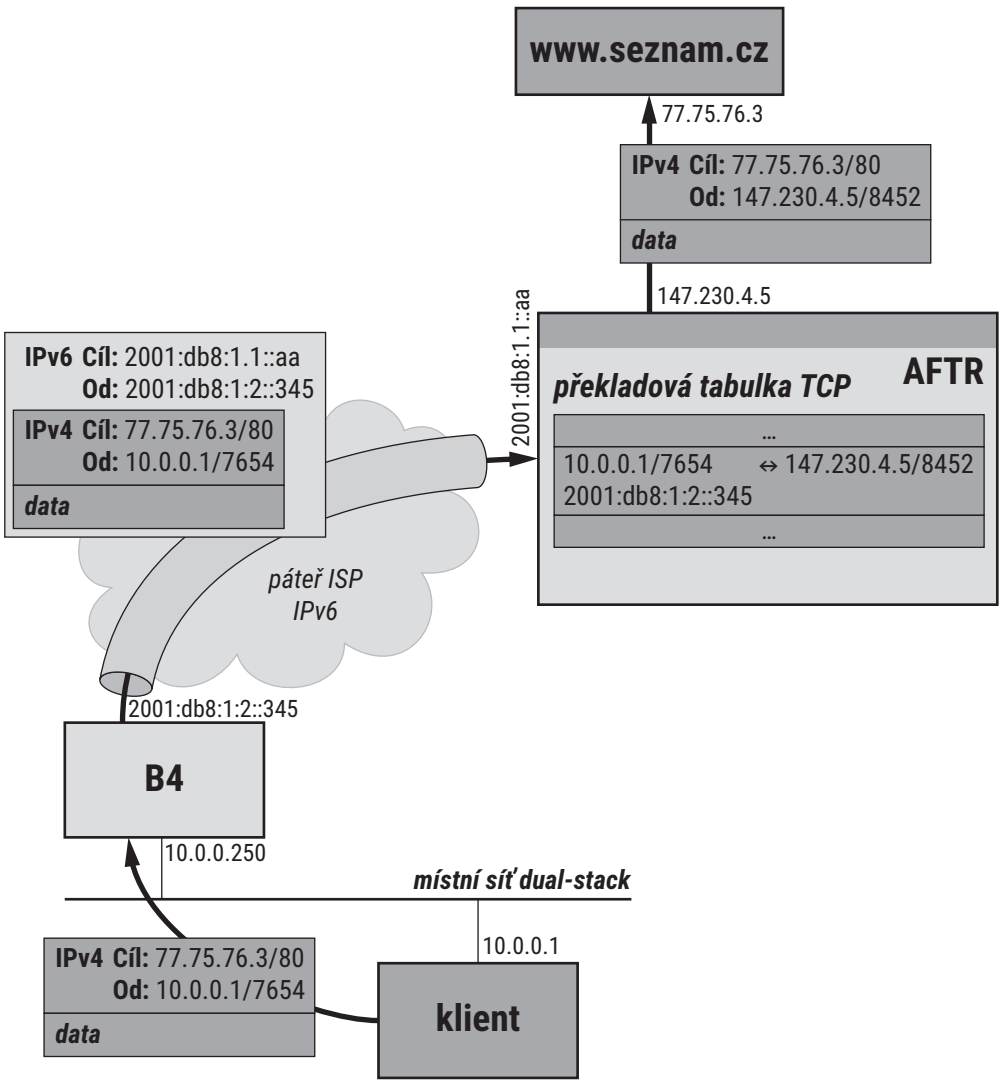
Dual-Stack Lite (též DS Lite) patří mezi novější přechodové mechanismy. Reaguje na nedostatek IPv4 adres a připravuje půdu pro situaci, kdy poskytovatel Internetu vyhodnotí jako jednodušší provozovat svou páteřní síť výlučně protokolem IPv6. Dual-Stack Lite umožní i v takovémto uspořádání poskytovat zákazníkům oba protokoly. Proto se v jeho názvu objevuje spojení dual-stack, přestože se jedná o ryzí tunelovací mechanismus. Tentokrát ovšem funguje obráceně – tuneluje IPv4 páteřní sítí podporující jen IPv6. Definici dual-stack lite najdete v RFC 6333: *Dual-Stack Lite Broadband Deployments Following IPv4 Exhaustion*.

Základní koncept staví na IPv6 síti, která je provozována nativně a přímočaře. Zákazníci mají veřejné IPv6 adresy, jejich domácí směrovače nic nemění, pouze směrují. S IPv4 je situace složitější. Koncové sítě zákazníků pracují v režimu s dvojím zásobníkem. Je málo IPv4 adres, takže samozřejmě používají privátní adresy podle RFC 1918. Při odchodu z domácí sítě jsou zabaleny do IPv6 a doručeny tunelem na poskytovatelův centrální NAT. Ten je jediným prvkem sítě disponujícím veřejnými IPv4 adresami. Rozbaluje IPv4 datagramy, překládá jejich adresy na své vlastní a odesílá je do veřejného IPv4 Internetu. V opačném směru pak provádí analogický postup.

Zákaznický prvek dual-stack lite sítě autoři pojmenovali *Basic Bridging BroadBand (B4)*. Nabízí obvyklou sadu služeb pro IPv4, neprovádí však NAT. IPv4 datagramy směřující mimo zákaznickou síť jen zabalí do IPv6 a doručí tunelem centrálnímu NATu. Jeho IPv6 adresu (či doménové jméno) může mít pevně nastavenu v konfiguraci, nebo se ji dozví od poskytovatele prostřednictvím DHCPv6. Pro tento účel byla definována nová volba – viz RFC 6334: *Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6) Option for Dual-Stack Lite*.

Vůči zákaznickým počítačům vystupuje jako implicitní brána z jejich sítě. Provozuje DHCPv4 server, jehož prostřednictvím jim dodává IPv4 adresy (obvykle z rozsahu podle RFC 1918) i konfigurační parametry. Domácí prvek by také měl provozovat DNS proxy, aby případné klientské dotazy přicházející po IPv4 převedl do IPv6[5].

5: Tím je míněn jen transportní protokol. Typy dotazovaných záznamů nijak nemění, jen přepošle totožný DNS dotaz protokolem IPv6 serveru nabídnutému poskytovatelem.



Obrázek 12.10: Odeslání IPv4 datagramu podle Dual-Stack Lite

Centrální NAT nese název *Address Family Transition Router (AFTR)*. Vytváří druhý konec tunelů vedoucích od zákaznických B4 a implementuje IPv4 NAT (přesněji NAPT), kdy zákaznické privátní adresy a porty překládá na své vlastní veřejné IPv4 adresy a vhodné porty. Proti běžným IPv4 NATům má ovšem jednu významnou odlišnost: k identifikaci zákaznického stroje přidává IPv6 adresu jeho B4. Díky tomu ví, kam poslat tunelem příchozí odpověď, a zároveň mu nevadí, když zákazníci používají konfliktní adresy. Rozsah 10.0.0.0/8 dnes najdete bezmála v každé domácnosti, takže adresu 10.0.0.1 uvidí velmi často. Díky kombinaci s (veřejnou, tedy unikátní) IPv6 adresou B4 daného zákazníka ovšem dokáže rozlišit, o které rozhraní se jedná.

Pokud aplikační protokol používá IP adresy, musí AFTR implementovat příslušný algoritmus pro jeho změnu. RFC 6333 připouští, že z kapacitních důvodů pravděpodobně nebude možné podporovat všechny možné aplikační protokoly a jejich sortiment proto bude více či méně omezený.

Jako každý tunelovací mechanismus, i dual-stack lite má problémy s velikostí datagramů a fragmentací. Autoři doporučují, aby MTU páteřní sítě bylo alespoň o 40 B větší než MTU koncových sítí a k fragmentaci pokud možno nedocházelo. Není-li vyhnutí, musí fragmentace proběhnout na úrovni obalujícího IPv6, tunelované IPv4 datagramy musí zůstat v původní podobě.

Pro přímou komunikaci AFTR s B4 po IPv4 vyhradila IANA adresní rozsah 192.0.0.0/29, přičemž standardní adresou AFTR je 192.0.0.1 a B4 rozhraní 192.0.0.2. Mají všichni stejnou, protože IPv4 provoz je beztak tunelován, takže k rozlišení jednotlivých B4 poslouží jejich IPv6 adresy.

Základní definice DS-Lite se zabývá pouze individuálně adresovanými IPv4 datagramy. RFC 8114: *Delivery of IPv4 Multicast Services to IPv4 Clients over an IPv6 Multicast Network* doplňuje přepravu skupinově adresovaných paketů. Specifikace není omezena výlučně na DS-Lite, ale vznikala především s cílem doplnit do něj tuto možnost. Vyhrazuje další IPv6 prefix pro reprezentaci skupinových IPv4 adres a převádí mezi sebou protokoly IGMP a MLD pro správu skupin a distribučních stromů. Volbu pro DHCPv6, která umožňuje doručit zařízením příslušné prefixy, definuje RFC 8115.

12.7 Lightweight 4over6 (lw4o6)

Dual-stack lite popsaný v předchozí části je silně centralizovaný. Prvky B4, které se nacházejí v zákaznických sítích, nedělají téměř nic, jen předávají IPv4 datagramy mezi lokální sítí a AFTR. Veškerá inteligence je koncentrována do centrálního AFTR, které realizuje IPv4 NAT pro všechny stroje v síti.

Využití dostupných IPv4 adres je maximální, ale špatně škáluje. S rostoucím počtem a velikostí zákaznických sítí rostou i nároky na centrální AFTR a s nimi i náklady na jejich uspokojení. Proto vznikla odlehčená varianta, nazvaná *Lightweight 4over6 (lw4o6)*, která k problému přistupuje

decentralizovaně. Její definici najdete v RFC 7596: *Lightweight 4over6: An Extension to the Dual-Stack Lite Architecture*.

Ve stručnosti se dá popsat jako dual-stack lite s NATem přesunutým z centrálního AFTR do B4 v zákaznických sítích. Abych se vyhnul nejasnostem, budu v dalším textu AFTR a B4 pracující podle pravidel lw4o6 označovat jako lwAFTR a lwB4.

Základní princip je stejný: poskytovatelova páteřní síť podporuje jen IPv6, v koncových sítích se vyskytují oba protokoly a IPv4 datagramy z nich jsou předávány tunelem vedoucím IPv6 páteří do centrálního lwAFTR, který je předává do IPv4 Internetu.

Lokální sítě typicky používají neveřejné IPv4 adresy podle RFC 1918, tentokrát ovšem jejich překlad na veřejné (NAPT, zjednodušeně NAT) provádí lokálně lwB4. Může být implementován v koncových počítačích, častěji se ale bude jednat o směrovač, kterým je lokální síť připojena k Internetu. Jeho chování bude velmi podobné tomu, co je dnes de facto standardem: provádí NAT mezi místními neveřejnými adresami a adresou přidělenou poskytovatelem. lwB4 ovšem nemá připojení k IPv4 Internetu, takže IPv4 datagramy po průchodu NATem posílá tunelem do lwAFTR.

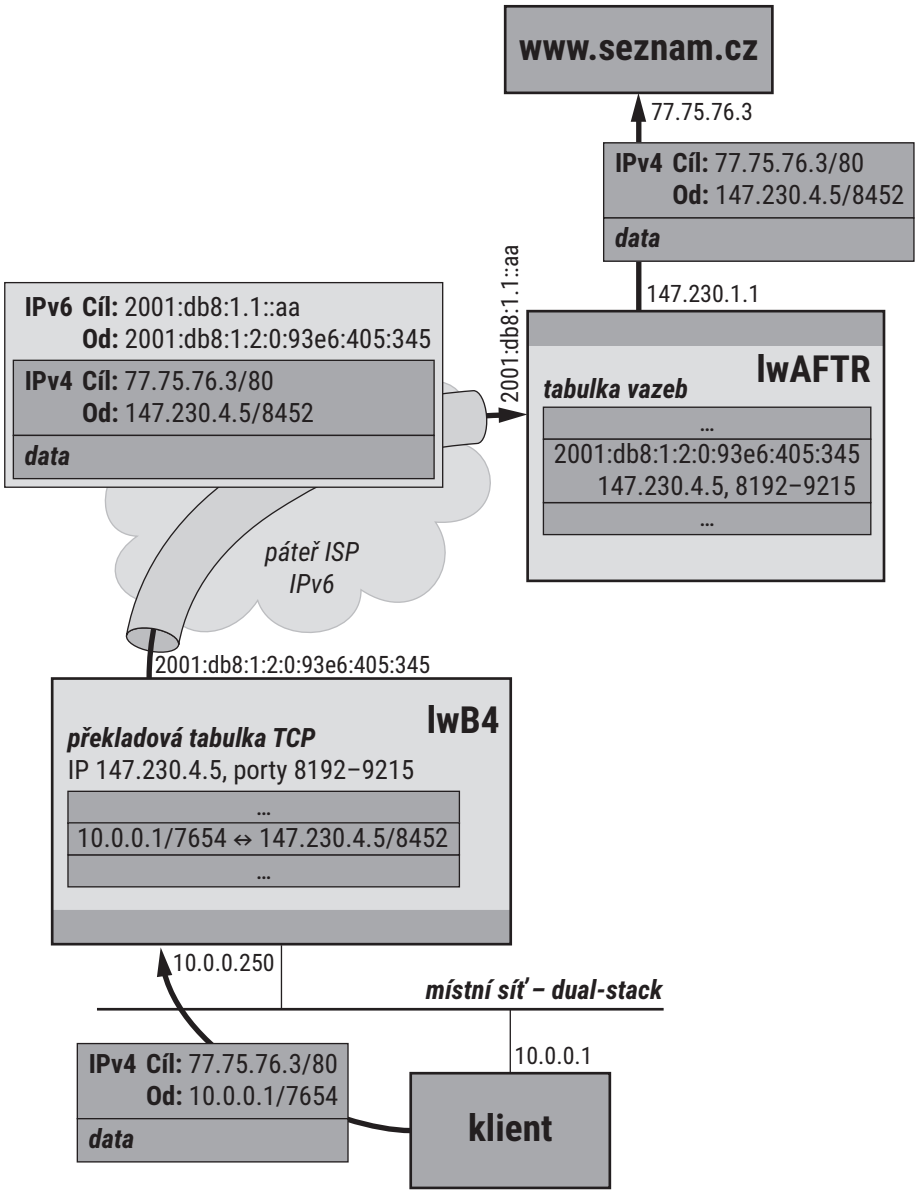
lw4o6 umožňuje, aby několik koncových sítí sdílelo stejnou veřejnou IPv4 adresu. Řeší to přidělením různých rozsahů portů, které ve svých NATech smí používat. Konfigurace lwB4 je tudíž o něco složitější než v případě B4 (jemu stačila IPv6 adresa AFTR). Ke své činnosti potřebuje:

- IPv6 adresu lwAFTR,
- veřejnou IPv4 adresu pro vnější stranu svého NATu a
- rozsah portů, které jeho NAT může využívat (platí pro všechny transportní protokoly).

Způsob, kterým lwB4 získá své konfigurační parametry, není pevně dán. RFC 7596 podrobněji rozebírá použití DHCPv6, připouští ale i jiné varianty, například PCP nebo TR-69. Klíčové však je, aby konfigurace distribuovaná jednotlivým lwB4 byla synchronizována s lwAFTR.

Úloha lwAFTR je v lw4o6 omezena na zakončení tunelů. Udržuje si tabulku vazeb, která pro každé lwB4 obsahuje jeho IPv6 adresu, veřejnou IPv4 adresu a identifikátor přidělené sady portů. Při příchodu IPv4 datagramu některým z tunelů jen zkontroluje, zda obsahuje korektní adresu a port, a předá jej do IPv4 Internetu. V opačném směru podle IPv4 adresy a portu vyhledá v tabulce příslušný záznam a předá datagram tunelem na adresu jeho lwB4.

Objem stavových informací, které si musí lwAFTR ukládat, se proti AFTR významně zmenšil. Zde stačí jeden záznam v tabulce pro každé lwB4, který v principu může být i statický. Naproti tomu AFTR si musí udržovat dynamické záznamy pro všechny právě probíhající IPv4 přenosy v celé síti.



Obrázek 12.11: Odeslání IPv4 datagramu podle Lightweight 4over6

Je zřejmé, že lw4o6 bude škálovat lépe než DS-Lite. Cenou je nižší efektivita využití IPv4 adres – zákazník typicky nebude mít otevřené všechny přidělené porty zároveň a jejich část zůstane vždy nevyužita. Změny v přidělených portech (přesuny mezi zákazníky, přidělování dalších při vyčerpání, vracení nevyužívaných a podobně) totiž lw4o6 neřeší.

12.8 MAP-E a MAP-T

Blízkým příbuzným lw4o6 je mechanismus nazvaný MAP-E. Stojí na stejných principech: páteřní síť (zde označovaná jako *doména MAP*) podporuje pouze IPv6, IPv4 je do zákaznických sítí doručováno automatickými tunely. Styk s IPv4 světem zajišťuje centrální *Border Relay (BR)*, kde se scházejí tunelované IPv4 datagramy od zákazníků, vybalují a posílají do nativního IPv4. IPv4 NAT implementují zákaznické směrovače (CE), které obsluhují vždy jednu koncovou síť.

Rozdíl proti lw4o6 je především v terminologii, organizaci a adresování. MAP-E používá poměrně krkolomnou, ale strojově snadno implementovatelnou metodu pro přidělování adres a portů. Cílem je především dobrá škálovatelnost, které MAP-E dosahuje minimalizací konfiguračních údajů na zákaznické straně a co nejjednodušší úlohou centrálního BR.

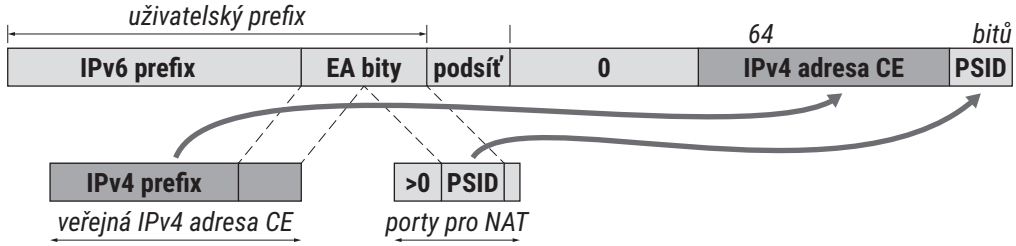
I zde se počítá s tím, že stejnou IPv4 adresu může sdílet několik zákazníků, kterým jsou přiděleny různé sady portů, aby se vzájemně neovlivňovali. To je realizováno pomocí *identifikátoru sady portů (Port Set IDentifier, PSID*, který vzájemně odlišuje zákazníky se stejnou IPv4 adresou a zaručuje, že při překladu používají jiné porty.

Klíčovým konfiguračním parametrem je *základní mapovací pravidlo (Basic Mapping Rule, BMR)*. Je společné pro všechny stroje v dané doméně MAP a obsahuje:

- IPv6 prefix pro mapování IPv4,
- IPv4 prefix pro veřejné adresy CE,
- délku EA-bitů (Embedded Address, bity s vloženou adresou).

Kromě základního mapovacího pravidla potřebuje CE ještě adresu BR, kterému bude předávat tunelem IPv4 datagramy. RFC 7598 definuje volby pro DHCPv6, kterými lze tyto údaje poskytovat. Vzhledem k tomu, že jsou pro všechny CE v doméně MAP společné a velmi konzervativní, dalo by se asi žít i s jejich ruční konfigurací.

Všechny specifické údaje se CE předají prostřednictvím uživatelského prefixu pro jeho síť. Algoritmus ilustruje obrázek 12.12. Uživatelský prefix CE získá obvyklým způsobem, například z DHCPv6 pomocí delegace prefixů. Začíná mapovacím prefixem pro IPv6, za nímž následují EA-bity. Jejich počet určuje základní mapovací pravidlo.



Obrázek 12.12: Konstrukce adresy CE v MAP-E

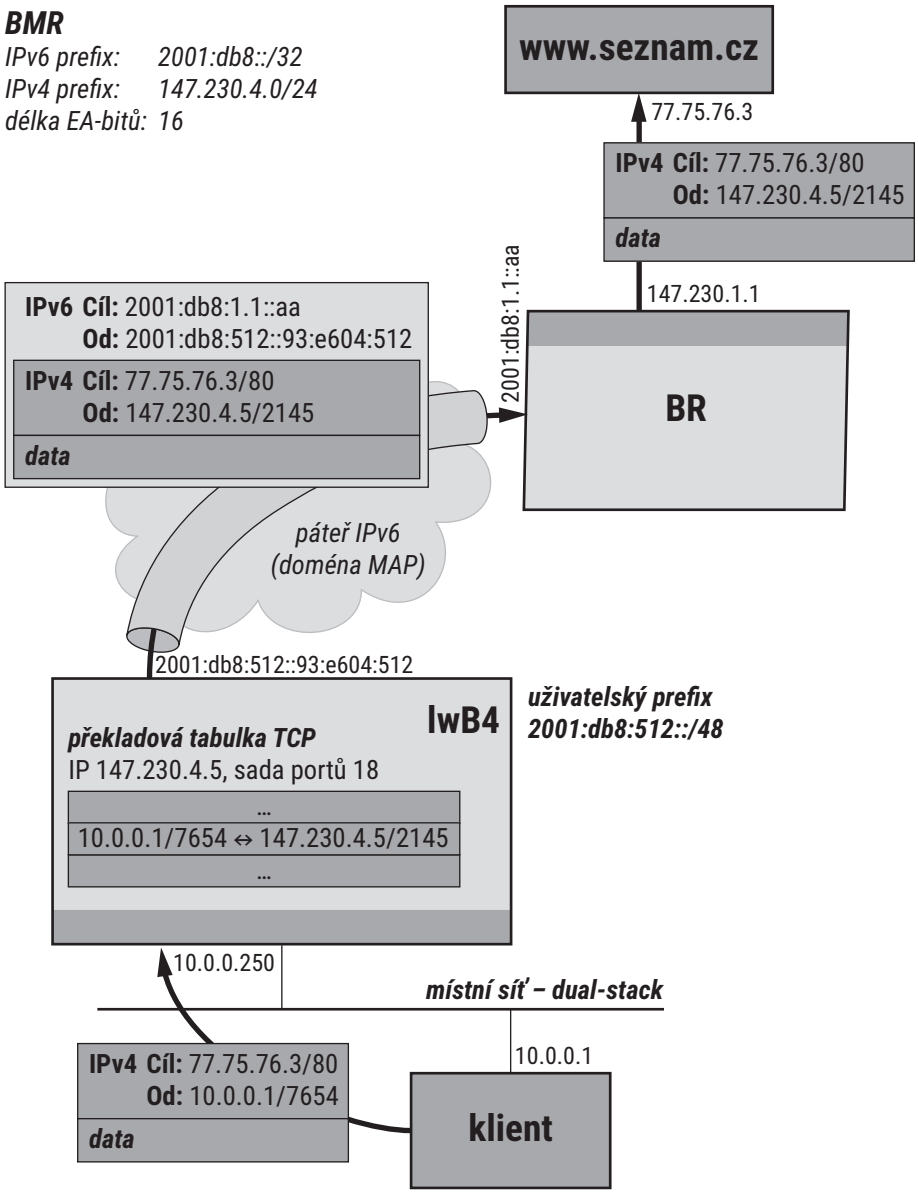
Z BMR také vezme prefix IPv4 adresy a doplní na délku 32 b příslušným počtem bitů ze začátku EA-bitů. Zbytek EA-bitů tvoří identifikátor sady portů (PSID). Svou IPv4 adresu a PSID doplní zleva nulami a vytvoří tak svůj identifikátor rozhraní. Připojí jej k uživatelskému prefixu a získá tak svou IPv6 adresu, kterou bude používat jako odesilatele při tunelování IPv4 datagramů směrem k BR.

IPv4 adresu pro NAT si CE již vytvořil, zbývá určit porty. Ty jsou zde rafinovaně rozprostřeny ve skupinkách po celém dostupném prostoru 65 536 možných hodnot. Pro jejich konstrukci je důležitý posun PSID (PSID offset). Může jej opět získat pomocí DHCPv6, ale často se zřejmě bude používat výchozí hodnota 6. Číslo portu obsahuje PSID posunuté o daný počet bitů od levého okraje doprava. Za ním může následovat libovolná hodnota, před ním libovolná nenulová hodnota. Požadavek na nenulovou první část způsobuje, že NAT nesmí používat porty s nejnižšími čísly. Při posunu o 6 b lze používat porty od 1024, tedy obvyklé neprivilegované hodnoty.

Podívejme se na příklad. Řekněme, že základní mapovací pravidlo definovalo pro danou doménu MAP IPv6 prefix 2001:db8::/32, IPv4 prefix 147.230.4.0/24 a délku EA-bitů 16. CE prvek obdržel uživatelský prefix 2001:db8:512::/48. 16 bitů za mapovacím prefixem (zde 0512 v šestnáctkové soustavě) jsou EA-bity. K doplnění IPv4 prefixu na celou adresu zbývá 8 b. První polovina EA-bitů (zde 5) proto tvoří konec IPv4 adresy CE, která tedy je 147.230.4.5.

Druhá polovina EA-bitů s hodnotou 12 (v desítkové soustavě 18) tvoří PSID. Jeho posun není definován, proto se použije výchozích 6 b. Dostupná čísla portů jsou tvořena nenulovou šestibitovou hodnotou, za kterou následuje 8b PSID s pevnou hodnotou 18 a za ním ještě libovolné dva bity. NAT má proto k dispozici rozsahy portů 1120–1123, 2144–2147, 3168–3171 a tak dále, vždy čtyřčlenné skupiny s odstupem 1024 až po 64 608–64 611. Celkem 252 portů. Situaci ilustruje obrázek 12.13.

Vlastní adresa CE pro tunelování vznikne spojením uživatelského prefixu a identifikátoru rozhraní obsahujícího IPv4 adresu (šestnáctkově 93e60405) a PSID (12). Výsledkem je adresa 2001:db8:512::93:e604:512, kterou bude používat jako zdrojovou při tunelování IPv4 datagramů směrem k BR.



Obrázek 12.13: Odeslání IPv4 datagramu podle MAP-E

Činnost BR je ještě jednodušší než lwAFTR. Při příchodu vybalí IPv4 datagram a zkonroluje, zda jsou korektní adresy a porty. Jelikož jsou posun PSID a délka EA-bitů společné pro celou doménu MAP, stačí na číslo zdrojového portu z transportní hlavičky přiložit jednotnou bitovou masku a zbylou hodnotu porovnat s PSID získaným z IPv6 adresy.

Také v opačném směru je situace jednoduchá. Z cílové IPv4 adresy a portu transportního protokolu vytvoří podle údajů ze základního mapovacího pravidla cílovou IPv6 adresu a tuneluje datagram páteřní sítí příslušnému CE. BR si nepotřebuje ukládat žádné stavové informace, vše s dokáže spočítat z údajů v přicházejících datagramech a základním mapovacím pravidle.

Mechanismus MAP-E je ve skutečnosti o něco složitější. Kromě základního pravidla může CE pracovat i s předávacími pravidly (Forwarding Mapping Rule, FMR), která optimalizují vzájemné přenosy IPv4 mezi CE ve stejné doméně. Podrobnosti se dočtete v RFC 7597: *Mapping of Address and Port with Encapsulation (MAP-E)*. Mechanismus MAP-E je poměrně populární a je nasazen v řadě sítí.

Vedle MAP-E existuje i velmi podobný přechodový mechanismus MAP-T definovaný v RFC 7599: *Mapping of Address and Port using Translation (MAP-T)*. Základní pojmy, organizace a práce s adresami je v něm totožná. Prakticky jediným rozdílem je způsob přepravy datagramů IPv6 páteří. MAP-T místo tunelování používá dvojí překlad – zákaznické CE přeloží odesílaný IPv4 datagram na IPv6 a BR jej z IPv6 přeloží na IPv4 a odešle do IPv4 Internetu. Opačným směrem probíhá analogický postup. Což nás oslím můstkem přivádí k překladu datagramů:

12.9 Stateless IP/ICMP Translation Algorithm (SIIT)

Dost už tunelování, pusťme se do překladu paketů mezi IPv4 a IPv6. I pro něj existuje celá řada alternativ. V jejich jádru se ale typicky skrývá stejný mechanismus – obecná sada pravidel, jak překládat kterou položku v hlavičkách. Je žádoucí, aby vlastní překlad probíhal ve všech případech stejně a lišil se jen jeho kontext. Proto vzniklo RFC 2765: *Stateless IP/ICMP Translation Algorithm (SIIT)*, které tyto společné principy definovalo.

Později je nahradilo RFC 6145 a RFC 7915: *IP/ICMP Translation Algorithm*, které věcný obsah příliš nezměnily. Základní překlad zůstává bezstavový a nevyžaduje uchovávání datových struktur s informacemi o historii či aktuálním stavu probíhající komunikace. Každý paket je překládán samostatně, bez vazeb na datagramy předešlé.

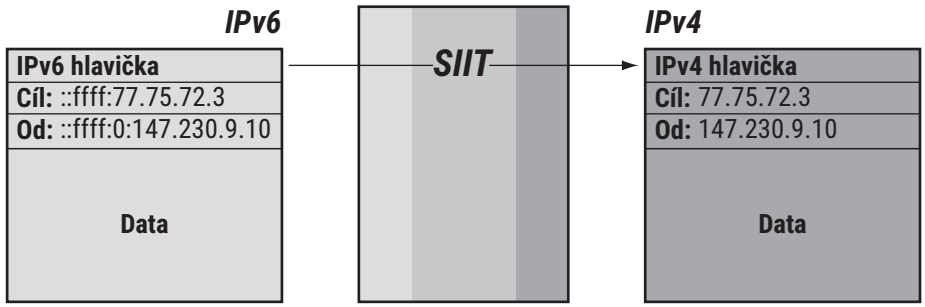
Nezbytnou součástí překladu je i mapování adres – pokud se má IPv4 datagram převést na IPv6, je třeba původní IPv4 adresy odesilatele a příjemce převést na vhodné IPv6 adresy. Při převodu opačným směrem je převod adres ještě mnohem těžší, protože adresy z mnohem většího prostoru IPv6 musí být vyjádřeny pomocí IPv4.

Původní SIIT pro tento účel zaváděl dva speciální formáty IPv6 adres, jež v sobě obsahovaly IPv4 adresy: *IPv4-mapované adresy (IPv4-mapped address)* měly tvar ::ffff:a.b.c.d, kde a.b.c.d je IPv4 adresa, a používaly se pro uzly nepodporující IPv6, s nimiž lze komunikovat jen po IPv4. *IPv4-překládané adresy (IPv4-translated address)* byly ve tvaru ::ffff:0:a.b.c.d a obsahovaly dočasnou IPv4 adresu IPv6 uzlů.

Aktuální překladový algoritmus je nahradil *adresami s vloženými IPv4 (IPv4-embedded)*, jež mají vyhrazen prefix – obvykle 96bitový – a za něj přidávají IPv4 adresu. Může se jednat buď o univerzální prefix 64:ff9b::/96, nebo lokální prefix přidělený místním správcem. Jejich podrobný popis najdete na straně 79. Vzhledem k mnohem delším adresám je převod IPv4 na IPv6 velmi snadný a lze jej provádět bezstavově – jednoduše se za daný IPv6 prefix připojí IPv4 adresa.

Opačný směr tak snadný není, protože IPv6 adres je mnohonásobně více. K jejich převedení na IPv4 se proto obvykle používá dynamické mapování podobné převodu privátních IPv4 adres na veřejné v současných NATech. Problematikou dynamického mapování se ale SIIT nezabývá, ponechává ji na ostatních přechodových mechanismech, jako je například NAT64.

V principu jsou myslitelné i jiné přístupy. Příkladem oboustranného bezstavového mapování je algoritmus IVI používaný v čínské akademické síti CERNET a zdokumentovaný v RFC 6219. Vlastní překlad podle SIIT je na způsobu mapování nezávislý. Jednoduše využívá mapovač jako černou skříňku, které předá IPv4 adresu a dostane odpovídající IPv6 či naopak.



Obrázek 12.14: Průchod datagramu SIIT překladačem

Hlavní devizou SIIT jsou jeho přesná pravidla pro vzájemný překlad jednotlivých hlaviček mezi oběma protokoly. Jsou samozřejmě velmi omezená, nepodporují žádná rozšíření – volby ze strany IPv4 a rozšiřující hlavičky ze strany IPv6 SIIT zahazuje. Zapomeňte na mobilitu či IPsec mezi oběma světy, jejichž řešení by byl opravdový oříšek. Na druhé straně je lepší alespoň omezená služba než nic.

Základní pravidla pro převod IPv4 datagramu na IPv6 vidíte v tabulce 12.2. Nesená data zůstávají beze změny, jedinou výjimkou je případný výpočet nových kontrolních součtů v transportních hlavičkách, protože do nich jsou zařazeny i IP adresy. Původní IPv4 hlavička je však nahrazena IPv6 hlavičkou. Naplnění jejích jednotlivých položek je dost přímočaré, nejsložitější je vypořádat se s fragmentací, jejíž chování se mezi oběma protokoly liší. Je-li zakázáno fragmentovat IPv4 datagram (má nastaven příznak DF), jednoduše se přeloží a nic dalšího není třeba řešit. Případná pozdější ICMPv6 chyba oznamující překročení MTU bude přeložena do ICMPv4 a předána odesilateli. Pokud by se vytvořený IPv6 datagram nevešel hned do odchozího rozhraní, pošle ICMPv4 chybu rovnou sám překladač.

Verze	:	6
Třída povozu	:	*Typ služby*
Značka toku	:	0
Délka dat	:	*Celková délka* – délka IPv4 hlavičky
Další hlavička	:	*Protokol*, hodnotu 1=ICMPv4 změnit na 58=ICMPv6
Max. skoků	:	*TTL* – 1
Adresy	:	podle mapování

Tabulka 12.2: SIIT – naplnění IPv6 hlaviček při překladu

Při povolené fragmentaci by překladač měl vytvářené IPv6 datagramy fragmentovat tak, aby jejich velikost nepřesáhla 1280 B – minimální velikost, již musí podporovat každá IPv6 linka. Rozšiřující hlavičku *Fragmentace* by měl připojit i v případě, kdy výsledný paket nepřekročí 1280 B, aby zdůraznil, že odesilatel povolil fragmentaci. Takové chování není zrovna optimální, proto autoři doporučují poskytnutí konfiguračních parametrů pro nastavení maximální velikosti vytvářených IPv6 datagramů a vypnutí vkládání nepotřebných fragmentačních hlaviček.

Převod opačným směrem probíhá podobně. Pravidla pro naplnění vytvářených IPv4 hlaviček obsahuje tabulka 12.3. Platí pro případ, kdy překládaný IPv6 datagram neobsahuje hlavičku *Fragmentace*. Pokud se jedná o fragment, budou související hlavičky naplněny mírně odlišně: *Celková délka* se proti tabulce zmenší o 8, protože *Délka dat* zahrnuje i osmibajtovou fragmentační hlavičku. *Identifikace* převezme spodních 16 b položky *Identifikace* z rozšiřující hlavičky *Fragmentace*. Do příznaku *MF* se zkopíruje hodnota příznaku *M*, příznak *DF* je vynulován. *Posun fragmentu* se převezme z hlavičky *Fragmentace*.

Jelikož je přístup IPv4 k fragmentaci benevolentnější, není třeba se jí tolik zabývat. Je-li zakázána a vytvořený IPv4 datagram je větší než MTU odchozího rozhraní, odešle překladač odesilateli pomocí ICMPv6 chybovou zprávu o překročení přípustné velikosti.

Verze	:	4
Délka hlavičky	:	5
Typ služby	:	*Třída provozu*
Celková délka	:	*Délka dat* + 20
Identifikace	:	0 nebo vygenerované číslo
Příznaky	:	0
Posun fragmentu	:	0
TTL	:	*Max. skoků* – 1
Protokol	:	transportní protokol z IPv6, 58=ICMPv6 změnit na 1=ICMPv4
Kontrolní součet	:	vypočítat standardním algoritmem
Adresy	:	podle mapování

Tabulka 12.3: SIIT – naplnění IPv4 hlaviček při překladu

Pravidla pro překlad ICMP jsou poněkud složitější, protože ne všechny typy zpráv jsou ve druhém protokolu podporovány (v takovém případě jsou překladačem potichu zahozeny). Jádro je ale stejně přímočaré jako při překladu datagramů. Některé ICMP zprávy obsahují ve svém těle datagram (či jeho část), který zprávu vyvolal. Musí být přeložen stejně jako běžné datagramy.

Koulí na noze SIIT je, že neřeší důležité problémy: vazbu mezi IPv6 a IPv4 adresami a její odraz v DNS. To z něj činí spíše jakýsi polotovar (díky precizně definovaným pravidlům pro překlad datagramů), který využívají jiné překladové mechanismy. Na samotný SIIT však v síti prakticky nenarazíte.

12.10 Network Address Translation – Protocol Translation (NAT-PT)

Z mechanismů, které staví na SIIT a doplňují k němu chybějící součásti, začnu dnes již odmítnutým NAT-PT. Byl sice opuštěn, ale s jeho implementacemi se dosud můžete setkat a za pozornost stojí i jeho snaha o komplexní řešení problému. Snažil se v jednom zařízení kompletně vyřešit problém překladu mezi IPv4 a IPv6 a využít při tom zkušenosti s provozem překladačů adres, jež jsou dnes běžným prvkem IPv4 sítí.

Byl dlouho považován za jeden z klíčových přechodových mechanismů. Velká očekávání však nenaplnil, spíše se v praxi projevily různé jeho nedostatky. Většina z nich plyne ze švindlování s DNS, jež NAT-PT musí provádět, aby se dalo navázat také spojení dovnitř překládané IPv6 sítě. Vý-

sledkem byla jeho poprava v RFC 4966: *Reasons to Move the Network Address Translator – Protocol Translator (NAT-PT) to Historic Status*, které NAT-PT prohlásilo za odmítnutý a historický.

Toto rozhodnutí však vyvolalo ostré kritiky, podle nichž vypovídá spíše o kvalitách IETF než o kvalitách NAT-PT. Faktem je, že za něj dlouho neexistovala rovnocenná náhrada – zařízení, které posadíte mezi koncovou IPv6 síť a IPv4 Internet a ono zajistí transparentní (byť v ledasčem problematickou) komunikaci mezi nimi. Teprve čtyři roky po odmítnutí NAT-PT vyšlo RFC 6146: *Stateful NAT64: Network Address and Protocol Translation from IPv6 Clients to IPv4 Servers* standardizující jeho nástupce. Vzhledem k historickým kořenům a některým zajímavým myšlenkám popíši nejprve NAT-PT a NAT64 se budu věnovat v části 12.11 na straně 308.

Základním stavebním kamenem je směrovač podporující NAT-PT (bývá označován jako NAT-PT překladač, translator). Všechny datagramy tvořící souvislé spojení (například jedna TCP seance) musí procházet stejným NAT-PT překladačem. Proto je pro tuto roli ideální přístupový směrovač jednoduché IPv6 sítě, který je jejím jediným spojením s okolním světem. Ostatně valná většina koncových sítí má takto jednoduchou topologii a poskytuje tudíž vhodné prostředí pro nasazení NAT-PT.

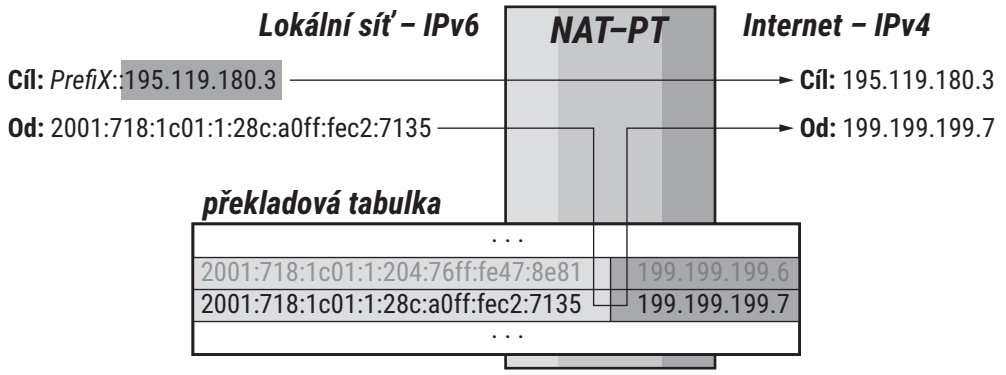
NAT-PT překladač musí mít k dispozici určitý prostor IPv4 adres, které přiděluje jednotlivým IPv6 strojům ze „své“ sítě. Toto přidělování může být statické (danému IPv6 stroji se přiděluje vždy stejná adresa) či dynamické (adresy se přidělují náhodně podle okamžité potřeby). V obou případech si NAT-PT překladač musí udržovat *stavovou informaci* o přidělených adresách, aby se choval konzistentně. Musí zajistit, aby se mapovaná adresa během komunikace nezměnila.

Kromě sady IPv4 adres potřebuje NAT-PT překladač ještě IPv6 prefix, který bude přidělovat IPv4 adresám z vnějšího světa při překladu do IPv6. Ten může být celkem libovolný, ale musí být v dané síti vyhrazen pro účely NAT-PT. Dále jej budu označovat jako *PrefiX*. NAT-PT překladač inzeruje do lokální IPv6 sítě směrovací informaci, že jeho prostřednictvím je dostupná síť s tímto *PrefiXem*.

Popíši nejprve základní chování NAT-PT. Když překladači dorazí IPv6 datagram, jehož cílová adresa začíná *PrefiXem*, provede následující kroky:

1. Pokud datagram zahajuje spojení, přidělí jeho odesilateli IPv4 adresu ze sady, kterou má k dispozici. Informaci o přidělení adresy si uloží. Jestliže datagram není první v daném spojení, má uloženy údaje o mapování jeho adres a pouze je použije.
2. Převede IPv6 datagram na IPv4. Cílovou adresu získá z posledních čtyř bajtů cíle původního datagramu, jako odesilatele dosadí IPv4 adresu získanou v předchozím kroku. Pro převod použije pravidla SIIT.

V opačném směru – když z IPv4 sítě dorazí datagram směřující na jednu z mapovaných IPv4 adres – postupuje analogicky. Převede jej na IPv6 datagram, kde cíl je stanoven podle uložených údajů o mapování a odesilatel je ve tvaru *PrefiX*::*odesilatel_IPv4*, a předá do „své“ IPv6 sítě.



Obrázek 12.15: Mapování adres v NAT-PT

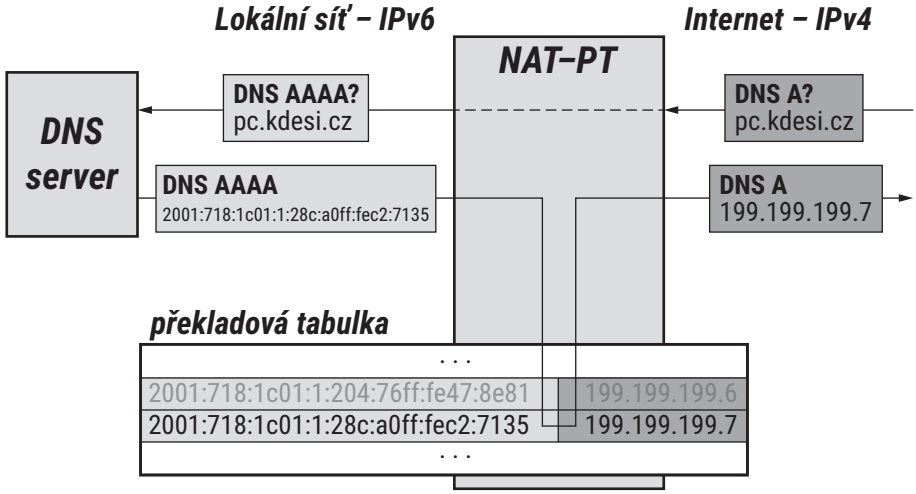
Klasický model NAT má jednu zásadní nevýhodu – umožňuje navazovat spojení jen ve směru z IPv6 sítě ven. Důvodem je, že vnitřní počítače nemají vůči IPv4 světu pevné adresy. Když by přišel datagram na některou z dosud nepřidělených mapovaných IPv4 adres, nevědělo by se, kterému počítači vlastně patří.

Má-li NAT-PT umožnit navazování spojení v obou směrech, musí zasahovat i do DNS. V takovém případě je třeba, aby autoritativní DNS servery pro NATovanou síť byly samy umístěny v této síti a aby tedy všechny dotazy a odpovědi musely procházet stejným NAT-PT překladačem jako provoz z/do dané sítě.

Když NAT-PT překladač obdrží DNS dotaz směřující na některý ze zdejších serverů, změní v něm typ požadavku z A na AAAA. Jakmile dorazí odpověď, provede mapování IPv6 adresy v ní obsažené na IPv4. Původnímu tazateli pak odešle odpověď s A záznamem obsahujícím právě namapovanou IPv4 adresu. Sám si zapamatuje provedené mapování, aby věděl, komu má předávat datagramy na ni přicházející.

Součástí úpravy DNS odpovědi je i změna její životnosti na nulu, aby se neukládala ve vyrovnávacích pamětech a při příštím dotazu se tazatel opět musel obrátit na autoritativní server. To umožňuje, aby se mapování dynamicky měnilo.

Změna DNS v opačném směru je poněkud komplikovanější. Když kdosi z vnitřní sítě posílá do vnějšího světa DNS dotaz na adresu k určitému jménu, nelze předem říci, zda odpovědí bude IPv6 nebo IPv4 adresa. Proto NAT-PT předá původní dotaz beze změny a navíc vytvoří jeho



Obrázek 12.16: Úprava DNS v NAT-PT zařízení

kopii, ovšem s dotazem na záznam typu A místo původního AAAA. Odpovědi obsahující AAAA propouští beze změny. Dorazí-li odpověď se záznamem A, změní ji na AAAA a adresu v ní upraví na tvar *PrefiX*::*původní_IPv4_adresa*.

Tradiční NAT-PT se zabývá pouze překladem adres. To znamená, že ke každé momentálně komunikující IPv6 adrese musí mít jednu IPv4 adresu, na kterou ji mapuje. O krok dál jde *NAPT-PT (Network Address Port Translation + Protocol Translation)*, který mapuje i čísla portů, ICMP identifikátory a další transportní identifikátory. To umožňuje, aby se například celá IPv6 síť mapovala na jedinou IPv4 adresu. NAPT-PT překladač si pochopitelně musí udržovat o něco více stavových informací (mapují se dvojice adresa+port, nikoli jen adresy). Pojem NAPT-PT se však používá jen výjimečně, obvykle jsou i tato zařízení označována jako NAT-PT a překlad portů se považuje za samozřejmost.

Nemalou komplikaci pro NAT-PT představují aplikační protokoly, které přenášejí IP adresy jako součást svých dat. Naštěstí jich není mnoho, ale existují. Jako konkrétní příklad je v RFC 2766 rozebíráno FTP, jehož příkazy PORT a PASV obsahují IPv4 adresu a TCP port. Pro FTP existuje dokonce samostatné RFC 2428: *FTP Extensions for IPv6 and NATs*, které se zabývá řešením tohoto problému. Doporučuje nahradit původní příkazy jejich rozšířenými variantami EPRT a EPSV.

Pokud IPv4 stroj zahajující spojení nepoužívá tyto nové příkazy, musí je NAT-PT překladač nahrazovat. Bohužel toto mapování na aplikační úrovni zpravidla znamená, že se změní délka přenášených dat. NAT-PT překladač tudíž musí upravovat pořadová čísla a potvrzení pro TCP, přepo-

čítávat kontrolní součty a dělat další dost náročné operace, které dále zvyšují počet uchovávaných stavových informací.

Obecně platí, že pokud aplikační protokol přenáší údaje ze síťové vrstvy jako součást svých dat, představuje pro něj NAT-PT překážku. Do překladače je nutno doplnit podporu daného protokolu a měnit data aplikační vrstvy. Pokud NAT-PT překladač nebude provádět tyto úpravy, bude pro danou aplikaci neprůchodný. Přehled o tom, kde všude jsou v různých internetových protokolech a službách zavrtány IPv4 adresy, poskytuje sada RFC 3789–3796: *Survey of IPv4 Addresses in Currently Deployed IETF Standards Track and Experimental Documents*.

12.11 NAT64 a DNS64

Nejvážnější problémy NAT-PT způsobovaly jeho hrátky s DNS, a to především pro dotazy směřující z IPv4 do IPv6 sítě. Ty na jedné straně umožňovaly navázat spojení i zvenčí, ovšem cenou za ně byla řada omezení a hrozících nekonzistencí. Mnoho důvodů pro odmítnutí NAT-PT v RFC 4966 má kořeny v manipulaci s DNS.

Vzhledem ke zjevným výhodám zařízení typu „konvertor mezi IPv4 a IPv6 pro celou síť v jedné krabici" začal záhy vznikat jeho nástupce nazvaný *NAT64*. Trvalo bohužel čtyři roky, než vyšlo RFC 6146: *Stateful NAT64: Network Address and Protocol Translation from IPv6 Clients to IPv4 Servers* a jeho doprovodné RFC 6147: *DNS64: DNS Extensions for Network Address Translation from IPv6 Clients to IPv4 Servers*.

Jeho jádro je prakticky shodné s NAT-PT, drobné změny směřují k odstranění problémů, jež se staly osudnými jeho předchůdci. Staví na překladači, který má alespoň po jednom rozhraní do IPv6 i do IPv4 sítě. Překládá datagramy podle pravidel SIIT a mapuje adresy mezi oběma světy. Překladač je určen k tomu, aby koncové IPv6 síti zprostředkoval přístup k IPv4 službám v Internetu. Na rozdíl od NAT-PT je asymetrický – umožňuje volně zahájit komunikaci jen z obsluhované sítě směrem ven.

Pro reprezentaci IPv4 adres v koncové IPv6 síti používá vyhrazený prefix délky 96 bitů[6]. Jedná se o část zdejšího adresního prostoru, vyčleněnou správcem pro potřeby NAT64. V dokumentaci je označován jako *Prefix64*::/96. Pokud by snad síť používala několik NAT64 překladačů, bude mít každý z nich svůj samostatný prefix. IPv4 adresa se jednoduše připojí za prefix. Pokud například správce pro NAT64 přidělí prefix 2001:db8:a:b:c:d::/96, bude v lokální síti vnější IPv4 adresa 1.2.3.4 reprezentována jako 2001:db8:a:b:c:d:102:304. Mapování IPv4 adres do IPv6 je statické a bezstavové. *Prefix64* a IPv4 adresa se spojí do jednoznačného a stále stejného výsledku.

6: RFC 6052 připouští i jiné délky, reálně se ale nepoužívají.

Odesílání datagramů do IPv4 světa zajistí běžné směrovací tabulky – *Prefix64* se podle nich doručí překladači, který provede konverzi a předá datagram ven. Pokud se jedná o první datagram daného odesilatele[7], provede překladač zároveň jeho mapování na IPv4 adresu. To je dynamické, záznamy jsou vytvářeny podle potřeby a uchovávány, dokud se používají. Překladač mívá k dispozici jen omezené množství IPv4 adres (často jen jednu), musí tedy šetřit.

Jakmile jednou překladač namapoval místní IPv6 adresu a port na kombinaci své IPv4 adresy a portu, může být tento záznam využíván v obou směrech. NAT64 se v tomto směru chová stejně jako běžný současný IPv4 NAT.

Překladač by si měl udržovat dvě tabulky: Jedna obsahuje vzájemně si odpovídající dvojice adres a portů (její oficiální název zní Binding Information Base, BIB) a slouží pro vlastní mapování. Ve druhé jsou uloženy aktivní relace a překladač z ní vyvozuje, které položky v BIB jsou dosud potřebné. Kdykoli projde překladačem paket náležející některé z relací, občerství si její záznam v tabulce relací. Jestliže ale relace není delší dobu využívána, bude odstraněna. Zároveň se zkontroluje, zda pro příslušnou položku mapovací tabulky zbyla alespoň jedna aktivní relace. Pokud ne, bude položka z BIB odstraněna a použitý port může být použit pro jiný účel.

Návrh počítá i s možností vkládat do tabulek trvalé položky. Mají zpřístupnit vybrané stroje či služby z vnitřní sítě a učinit je dosažitelnými z Internetu. Na jiné místní stroje se dostat nedá, dokud samy nezahájí komunikaci. Také v tomto směru se chování NAT64 podobá současným IPv4 NATům.

Celkově je tabulek dokonce šest, protože NAT64 by měl informace ukládat odděleně pro tři podporované protokoly: TCP, UDP a ICMP. Samozřejmě není povinné implementovat překladač přesně takto. Datové struktury jsou pouze konceptuální a popisují požadované chování, jak ho implementace dosáhne, je její věc.

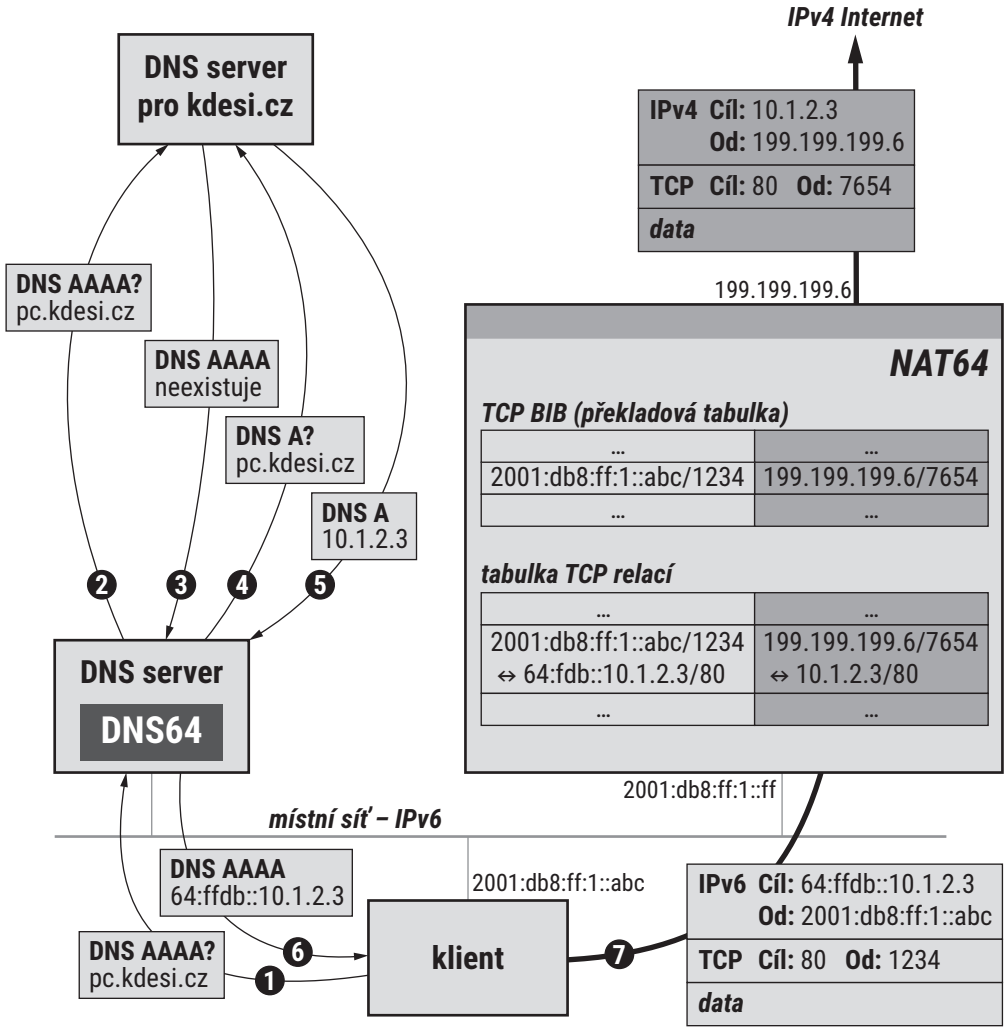
Také NAT64 se neobejde bez machinací s DNS. Proti NAT-PT jsou ovšem výrazně jednodušší – omezují se na dodávání uměle vytvořených záznamů typu AAAA místním strojům, pokud je pro poptávané jméno v DNS jen IPv4 adresa. Algoritmus je označován jako *DNS64* a slouží k tomu, aby IPv6 počítače v místní síti mohly navázat spojení se stroji v IPv4 Internetu.

Vše začíná dotazem typu AAAA zaslaným lokálním strojem místnímu DNS serveru. Ten nejprve dotaz předá v původní podobě a pokud uspěje, není co řešit, komunikace může proběhnout přímo po IPv6. Jestliže je ale odpověď na AAAA dotaz záporná, zkusí DNS server implementující DNS64 poslat dotaz na záznam typu A pro stejné jméno[8]. Příchozí odpověď s IPv4 adresou

7: Pro danou kombinaci odesilatelovy IPv6 adresy a transportního portu.
8: V zájmu urychlení může dotazy položit paralelně.

pak převede na záznam typu AAAA a adresu upraví výše uvedeným způsobem (připojí za *Prefix64*::/96).

Klient tak dostane odpověď na svůj DNS dotaz, datagram odeslaný na adresu z ní bude doručen NAT64 překladači, ten provede mapování klientovy adresy na IPv4, datagram přeloží a odešle. Celý proces ilustruje obrázek 12.17.



Obrázek 12.17: Zahájení komunikace s použitím NAT64

DNS64 zasahuje do obsahu DNS, proto nutně představuje překážku pro DNSSEC. Jestliže si klienti sami údaje neověřují a spoléhají na kontrolu v místním rekurzivním serveru, bude vše fungovat. DNS server ověří odpověď standardním postupem v její původní podobě (záznam typu A) a klientovi pak pošle v odpovědi syntetizovaný záznam typu AAAA, který ovšem vychází z ověřených údajů.

Problém vznikne, pokud si klient chce ověřovat DNSSEC sám, a proto ve svém dotazu nastaví příznak CD. Server s DNS64 nedokáže doprovodit vytvořený AAAA záznam bezpečnostními údaji. V tomto případě předá klientovi původní záznam typu A s doprovodným DNSSEC materiálem. DNS64 pak musí být implementováno na straně klienta.

K tomu ovšem klient potřebuje znát *Prefix64::/n*. Lze jej samozřejmě konfigurovat staticky, ovšem RFC 7050: *Discovery of the IPv6 Prefix Used for IPv6 Address Synthesis* přišlo s metodou pro jeho automatické zjištění přímo koncovými uzly.

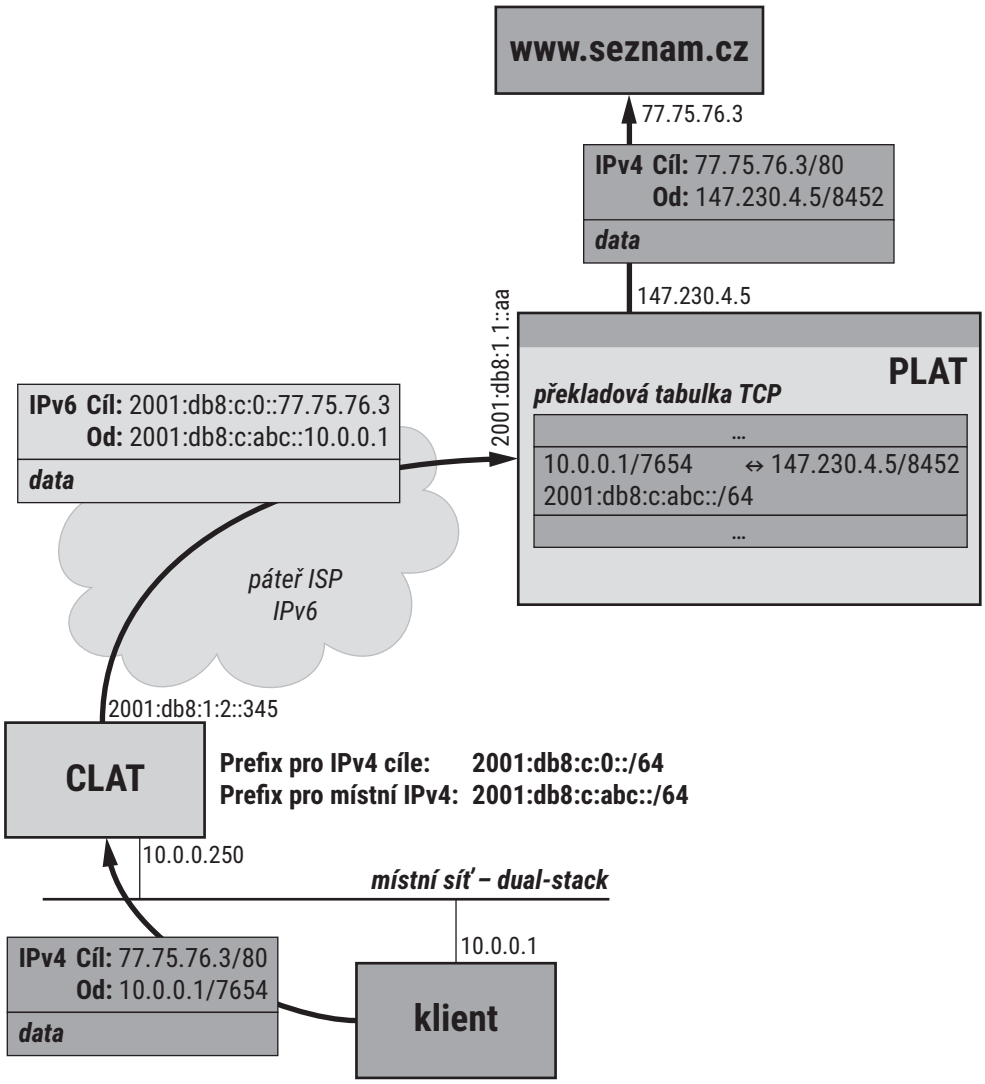
Zavedlo doménové jméno *ipv4only.arpa*, pro něž v DNS neexistují žádné záznamy typu AAAA, jen typ A s pevně přidělenými adresami 192.0.0.170 a 192.0.0.171. Uzel, který chce zjistit *Prefix64::/n* používaný v aktuální síti vznese DNS dotaz poptávající AAAA pro *ipv4only.arpa*. Pokud dostane úspěšnou odpověď, nutně byla syntetizována DNS64, protože záznamy AAAA pro toto jméno neexistují. V IPv6 adresách z ní vyhledá výše uvedené IPv4 adresy a odvodí tak prefix používaný pro syntézu.

Proti NAT-PT je vazba mezi DNS64 a NAT64 daleko volnější. V DNS se provádí jen bezstavové mapování IPv4 adres do vyhrazené části IPv6 prostoru. To může být prováděno kdekoli (a klidně i na více místech zároveň, jako při ověřování DNSSEC na straně klientů). Jediným požadavkem je, aby se používal stejný *Prefix64*, který zajistí datagramům odeslaným na mapované adresy doručení do prvku implementujícího NAT64.

Výsledkem je uspořádání, které má sice větší viditelná omezení než NAT-PT, ovšem výrazně méně vnitřních problémů.

12.12 464XLAT

Tento přechodový mechanismus má podobné cíle jako DS-Lite (viz 12.6 na straně 293): zpřístupnit IPv4 koncovým zákazníkům, zatímco páteřní síť podporuje pouze IPv6. DS-Lite k tomu využívá tunelování, 464XLAT sází na dvojí překlad – při vstupu do páteřní sítě jsou IPv4 datagramy přeloženy do IPv6 a při výstupu naopak. Životaschopnost mechanismu nejlépe dokazuje, že jej používá několik velkých operátorů ve svých mobilních sítích, například americký T-Mobile (cca 70 mil. zákazníků).



Obrázek 12.18: Odeslání IPv4 datagramu podle 464XLAT

Celý mechanismus je koncipován asymetricky, aby umožňoval klientům využívat služby nabízené ve veřejném IPv4 Internetu. Nesnaží se řešit navazování komunikace směrem z veřejné IPv4 sítě ke koncovým klientům. V tomto směru se chová podobně jakou současný NAT v IPv4.

Komunikace protokolem IPv6 probíhá nativně, zcela mimo 464XLAT. Pokud aplikace na koncovém zařízení odešle IPv4 datagram, přijde nejprve ke slovu překladač na zákaznické straně – *customer-side translator (CLAT)*. Ten má k dispozici překladový prefix a standardním způsobem bezstavově podle RFC 6052 převede IPv4 adresy na IPv6. Předpokládá se, že klient využívá neveřejné IPv4 adresy, zatímco server veřejné. Následuje překlad celého datagramu podle pravidel SIIT (RFC 7915) a jeho odeslání páteřní IPv6 sítí.

V ní je použitý překladový prefix směrován na centrální poskytovatelův překladač[9] – *provider-side translator (PLAT)*. V něm proběhne stavový překlad datagramu zpět do IPv4 podle RFC 6146, během nějž je neveřejná klientova IPv4 adresa mapována na IPv4 adresu přidělenou PLAT. V podstatě je zde implementován centrální IPv4 NAPT. Svou funkcí PLAT silně připomíná NAT64, ovšem místo jedné koncové sítě obsluhuje hromadně sítě všech zákazníků.

Výsledný IPv4 datagram je odeslán do IPv4 Internetu a příchozí odpověď je analogickou cestou doručena klientovi. Celou proceduru ilustruje obrázek 12.12. Zákaznický CLAT může být implementován v přístupovém směrovači a sloužit pro celou zákaznickou síť, nebo přímo v koncovém zařízení a obsluhovat jen jeho aplikace. Tato druhá varianta se využívá v mobilních sítích, CLAT pracuje přímo v mobilu. Jeho implementace existují pro Android i Windows Phone. Nativní implementace pro iOS není k dispozici, protože je zbytečná – Apple požaduje, aby všechny aplikace v App Store fungovaly v čisté IPv6 síti.

Oříškem může být konfigurace CLAT, který se kromě obvyklých síťových parametrů potřebuje dozvědět, jaký prefix má používat pro překlad IPv4 adres. Kromě manuální konfigurace ji lze doručit volbou DHCPv6. Jednoduchou (a v praxi používanou) možností je zjistit používaný prefix podle RFC 7050 DNS dotazem na jméno, pro se které zaručeně syntetizuje odpověď. Mechanismus je popsán na straně 311.

Definici se všemi podrobnostmi najdete v RFC 6877: *464XLAT: Combination of Stateful and Stateless Translation*.

9: Nemusí být samozřejmě jen jeden.

12.13 Transport Relay Translator (TRT)

O podobný úkol jako NAT64, ale v transportní vrstvě, se snaží TRT. Jedná se o směrovač (či jiné zařízení), který hovoří oběma protokoly a předává data mezi oběma komunikujícími partnery. Inspirace TRT pochází ze světa firewallů, kde se využívá podobných myšlenek.

Opět se ocitáme v situaci, kdy počítač v lokální IPv6 síti chce komunikovat s partnerem připojeným pouze po IPv4. Správce lokální sítě vyhradí jeden z jejích prefixů pro reprezentaci IPv4 adres. Požaduje se, aby měl obvyklou délku 64 bitů, a v následujícím textu jej budu opět označovat jako *PrefiX*. IPv4 adresa *a.b.c.d* má ve vnitřní IPv6 síti podobu *PrefiX*::*a.b.c.d*.

TRT zařízení šíří v IPv6 síti směrovací informaci, že jeho prostřednictvím je dostupná síť s *PrefiX*em. Když zdejší počítač *X* pošle paket zahajující TCP spojení s cílem *Q*, bude díky obvyklým směrovacím pravidlům doručen na TRT stroj. Ten odpoví, naváže s *X* TCP spojení a bude mu nadále předstírat, že je *Q*. Toto spojení používá IPv6.

Zároveň však TRT stroj sám naváže TCP spojení s cílem *Q*. Jeho IPv4 adresu si vyzvedne z posledních čtyř bajtů cílové adresy původního IPv6 datagramu a jako zdrojovou adresu použije svou vlastní IPv4 adresu. Pro spojení mezi TRT a *Q* se používá IPv4 a TRT zde pro změnu předstírá, že je odesilatel původní žádosti *X*.

Místo jednoho spojení mezi *X* a *Q* tedy vzniknou spojení dvě: *X*–TRT (IPv6) a TRT–*Q* (IPv4). Následně už TRT pouze vyzvedává data, která mu dorazí jedním z těchto spojení, a promptně je odesílá druhým. Pro UDP se chová analogicky, jen odpadá úvodní navazování spojení.

RFC 3142: *An IPv6-to-IPv4 Transport Relay Translator*, které definuje mechanismy TRT, popisuje jen navázání spojení směrem z IPv6 do IPv4. Stejně by fungovalo i ve směru opačném, tam však vzniká problém s reprezentací IPv6 adres, který TRT samo neřeší. Staví se do pozice, že až někdo přijde s dobrým řešením tohoto problému, TRT je s radostí využije. Pravděpodobně se ale neobejde bez švindlování DNS podobného tomu, za který se sesypala kritika na hlavu NAT-PT.

Zrovna tak se návrh nezabývá otázkou, kde a jak dojde k transformaci IPv4 adres na IPv6 tvar *PrefiX*::*adresa*. Naznačuje tři možné alternativy: statickou tabulku na straně IPv6 uzlu[10], upravený DNS server v lokální síti, který řeší zdejší dotazy, či upravený DNS klient u koncových IPv6 počítačů. Celkově TRT připomíná SIIT – také ponechává některé klíčové problémy stranou.

10: Ta bude použitelná jen ve velmi jednoduchých situacích.

12.14 Bump-in-the-Host (BIH)

Bump-in-the-Host je soukromý překladač, ukrytý v implementaci síťových protokolů jednoho stroje. Jeho cílem je umožnit aplikacím podporujícím pouze IPv4 komunikovat s IPv6 servery. Předpokládá, že dotyčný stroj je připojen buď oběma protokoly, nebo pouze po IPv6.

Původně existovaly dvě samostatné specifikace: Bump-in-the-Stack (BIS) podle RFC 2767, kde byl překladač součástí síťové vrstvy, a Bump-in-the-API (BIA) podle RFC 3338 s překladačem vloženým do API. BIH nahrazuje obě, protože základní principy jsou podobné. Popisuje tyto dvě alternativy (překlad v síťové vrstvě, nebo v API) jako dvě základní implementační možnosti. V textu autoři spíše doporučují jít cestou API, která je jednodušší a má méně omezení.

Výchozím bodem obou variant je zásah do DNS. Jestliže aplikace poptává IPv4 adresy, tedy záznamy typu A, BIH vytvoří paralelní dotaz na stejnojmenné záznamy typu AAAA. Dorazí-li odpověď typu A, BIH se zdrží dalších akcí a komunikace proběhne po IPv4. Jestliže ale získá odpověď jen se záznamy typu AAAA, začne aplikaci předstírat existenci IPv4 adres.

Pro tento účel disponuje konfigurací daným rozsahem privátních adres[11] podle RFC 1918 a mapovací tabulkou obsahující vazby mezi IPv6 a těmito adresami. Protože má BIH k dispozici dostatek IPv4 adres, mapují se jen vlastní adresy a není třeba kouzlit s TCP či UDP porty.

Výše uvedený dotaz povede k přidání nových položek do mapovací tabulky pro všechny v ní dosud neobsažené IPv6 adresy z DNS odpovědi. Jim odpovídající privátní IPv4 adresy budou aplikaci vráceny jako výsledek jejího DNS dotazu. Až následně odešle data na některou z těchto IPv4 adres, budou přeložena na IPv6 a odeslána na odpovídající IPv6 adresu. Analogicky pak probíhá i transformace dat přicházejících v protisměru. Aplikace je udržována v iluzi, že komunikuje po IPv4.

BIH funguje i v opačném směru – pokud se někdo pokusí protokolem IPv6 obrátit na zdejší IPv4 aplikaci. V tom případě zůstává DNS stranou, mapování a překlad vyvolá příchozí IPv6 datagram.

BIH zahrnuje tyto základní součásti:

- *Rozšíření DNS* má na starosti kouzlení s DNS dotazy – vytvoření doplňkového dotazu na AAAA a případné generování umělé odpovědi, pokud se podařilo získat jen IPv6 adresy.
- *Mapovač adres* spravuje mapovací tabulku a zajišťuje vzájemné mapování IPv6 adres a privátních IPv4 adres z rozsahu, který má k dispozici.

11: Musí se samozřejmě jednat o adresy, které v dané síti nejsou využívány k jiným účelům. Je-li místní síť adresována z rozsahu 10.0.0.0/8, nabízí se použít pro BIH například 172.16.0.0/12.

- *Překladač protokolů* je součástí varianty BIH implementované v síťové vrstvě. Provádí překlad datagramů mezi oběma protokoly podle principů SIIT (RFC 7915).
- *Mapovač funkcí* je zařazen do varianty BIH umístěné v API. Převádí volané funkce API pro IPv4 na odpovídající univerzální či IPv6 funkce a ze získaných informací sestavuje výsledky.

BIH ukryté v API se chopí funkcí soketového API pro IPv4, jako například *gethostbyname*, a změní jejich implementaci tak, aby v případě nutnosti docházelo k mapování adres a volání příslušných funkcí API pro IPv6. Vzhledem k tomu, že k překladu zde dochází mezi aplikační a transportní vrstvou, má tato varianta lepší podmínky pro korektní komunikaci. Může například využívat DNSSEC (protože využívá funkce DNS resolveru), IPsec a různá další rozšíření.

BIH implementované v síťové vrstvě má podstatně menší možnosti. Pracuje s již vytvořenými datagramy, které překládá mezi IPv4 a IPv6 podle pravidel SIIT se všemi jejich omezeními. Také DNSSEC na daném stroji nepřipadá v úvahu, protože místní DNS resolver od síťové vrstvy dostává upravené datagramy.

Obě varianty způsobí problém protokolům, které přenášejí IP adresy v aplikační vrstvě. BIH tuto situaci neřeší, pokud mají dotyčné služby pracovat, je třeba jejich aplikační protokol ošetřit jinde.

Specifikaci BIH najdete v RFC 6535: *Dual-Stack Hosts Using "Bump-in-the-Host" (BIH)*. Podle zkušeností s BIS, jehož implementace aby člověk hledal s lucernou v poledne, očekávám, že velkou díru do světa zřejmě neudělá.

12.15 Přechodové nástroje v praxi

V předchozím textu jsem popsal sadu nástrojů, které lze v síti nasadit. Je jich požehnaně a člověka může rozbolet hlava, když si má některý vybrat. Podívejme se na jejich nasazení z pohledu zákaznické (domácí či podnikové) sítě.

Obecným požadavkem je, aby stroje z místní sítě měly přístup ke službám poskytovaným oběma protokoly. To se dá zařídit dvěma základními způsoby: buď koncové stroje provozovat v režimu dvojího zásobníku a přivést jim IPv4 i IPv6, nebo na nich provozovat jen jednu verzi IP a komunikaci s druhou zajistit překladačem.

Vhodnější je nepochybně první přístup, který trpí menším množstvím omezení a problémů. Připojit počítač oběma protokoly je asi to nejlepší, co pro něj v současné době můžete udělat. V ideálním případě bude připojení nativní, kdy jak koncová síť, tak poskytovatel Internetu podporují IPv4 i IPv6. Takový stav ale pořád nelze považovat za standardní, i když jeho dostupnost utěšeně roste.

Leckdy bude nutné sáhnout k tunelování a IPv6 přivést do koncové sítě[12] buď statickým tunelem vedeným k vhodnému poskytovateli, nebo některým z automatických tunelovacích mechanismů. Měl-li bych doporučit konkrétní tunelovací mechanismus, seřadil bych je zhruba následovně:

1. Mechanismus podporovaný poskytovatelem. Pokud jej váš poskytovatel nasadil 6rd, DS Lite, 464XLAT nebo podobný protokol, jděte do toho. Dostanete IPv4 i IPv6 konektivitu z jednoho zdroje i s podporou a nebudete závislí na dalších subjektech.
2. Manuální tunel – nabídne konzistentní chování za cenu topologických zacházek. Stabilita a předvídatelnost mi připadají přednější, nicméně budete závislí na provozovateli tunelového serveru.
3. Teoreticky ještě připadá v úvahu 6to4 nebo Teredo, ale pokud se máte jen trochu rádi, těmto variantám se vyhněte.

O překladu má smysl uvažovat jen v čisté IPv6 síti, jejíž účastníci potřebují přístup ke službám poskytovaným po IPv4. Takové uspořádání lze považovat za výrazně menšinové, nicméně s ubývajícími IPv4 adresami představitelné. V tom případě je jasnou volbou NAT64 v kombinaci s DNS64.

S tenčící se zásobou IPv4 adres se zákazníci pravděpodobně stále častěji ocitnou v situaci, kdy páteřní síť bude podporovat jen IPv6 a starší protokol bude doručován pomocí tunelů (softwire). Tento přístup existuje v několika variantách. Lze očekávat, že domácí směrovač bude podporovat několik z nich a také přístupová síť mu může nabídnout více než jeden[13]. Bylo by záhodno, aby poskytovatel připojení zároveň mohl ovlivňovat, který bude použit.

Toto řeší RFC 8206: *Unified IPv4-in-IPv6 Softwire Customer Premises Equipment (CPE): A DHCPv6-Based Prioritization Mechanism*. Definuje pro tento účel volbu *Priorita S46* pro DHCPv6, jejímž prostřednictvím lze klientskému zařízení ohlásit priority jednotlivých mechanismů z okruhu tunelování IPv4 v IPv6 (zde označovány jako mechanismy S46). Volba je velmi jednoduchá, obsahuje seznam kódů přechodových mechanismů v pořadí od nejvyšší priority po nejnižší.

Uživatelské zařízení pomocí DHCPv6 poptá konfiguraci všech přechodových mechanismů skupiny S46, které podporuje, a volbu *Priorita S64*. Následně pak prochází jednotlivé mechanismy v pořadí podle priority a musí použít první, pro který dostal z DHCPv6 konfiguraci. Poskytovatel tak může jednoduše řídit, co budou klientská zařízení používat, aniž by musel zasahovat do jejich nastavení.

Pravděpodobné scénáře nasazení přechodových nástrojů rozebírá podrobněji RFC 6180: *Guidelines for Using IPv6 Transition Mechanisms during IPv6 Deployment*.

12: Případně i konkrétnímu počítači, ale takové uspořádání představuje spíše experimentální mezistupeň než koncový stav.
13: Poskytovatel například právě přechází na jiný mechanismus nebo se snaží podporovat zařízení s širokou škálou schopností.

Část II

IPv6 v praxi

13 IPv6 na vlastní kůži

Snad ve vás předchozí část vzbudila alespoň částečný zájem IPv6 vyzkoušet. Pokud ne, možná jste jen nečetli dostatečně pozorně. Zopakuji proto to nejpodstatnější: Adresy stávajícího IPv4 docházejí. Centrální zásoba IANA byla vyčerpána v únoru 2011, regionální registry už většinou své zásoby také vyčerpaly, fungují ve zbytkovém režimu. Existuje řada prognóz dalšího vývoje Internetu, většinou dost depresivních – nakupování adres, masivní používání neveřejných adres s NATem na každém rohu a podobně. IPv6 představuje jediné v současnosti rozvíjené koncepční řešení. Proto se určitě vyplatí věnovat mu nějaký čas a seznámit se intimně.

Nic zásadního tomu nebrání. Protokol je dnes implementován ve valné většině používaných systémů či hardwarových zařízení a také možností pro (alespoň experimentální) připojení k IPv6 Internetu je všude dost. Pokud máte přístup k Internetu a váš systém není příliš exotický, můžete si IPv6 vyzkoušet.

13.1 Lehké oťukávání

Dá se předpokládat, že pro úvodní vyzkoušení nejspíš začnete zprovozněním IPv6 na svém počítači. V zásadě je třeba vyřešit dva problémy:

1. Zda váš operační systém podporuje IPv6, případně jak mu k tomu pomoci. Řešení najdete v následujících kapitolách, kde popisuji stav implementace na různých platformách a související konfigurační příkazy. Stručně řečeno: je skoro jisté, že váš operační systém IPv6 podporuje, případně jej k tomu lze snadno postrčit.
2. Jak se připojit k IPv6 Internetu. Zde se budu věnovat především této otázce, která je pochopitelně pro všechny systémy stejná.

V dnešní době už je možné, že váš poskytovatel připojení podporuje IPv6. V tom případě máte prakticky hotovo, stačí stroje nakonfigurovat (pokud se tak nestalo automaticky) a pokročit k testování, kterému se věnuji v části 13.3 na straně 326.

Jestliže přímý přístup k IPv6 zatím nemáte, bude nejjednodušší připojit se tunelem vedoucím IPv4 infrastrukturou. V minulém vydání jsem zde doporučoval Teredo, které nepotřebuje prakticky nic. Trpí ovšem řadou problémů a všeobecně se od něj ustupuje. V současnosti bych doporučil použít raději seriózní tunelovací službu.

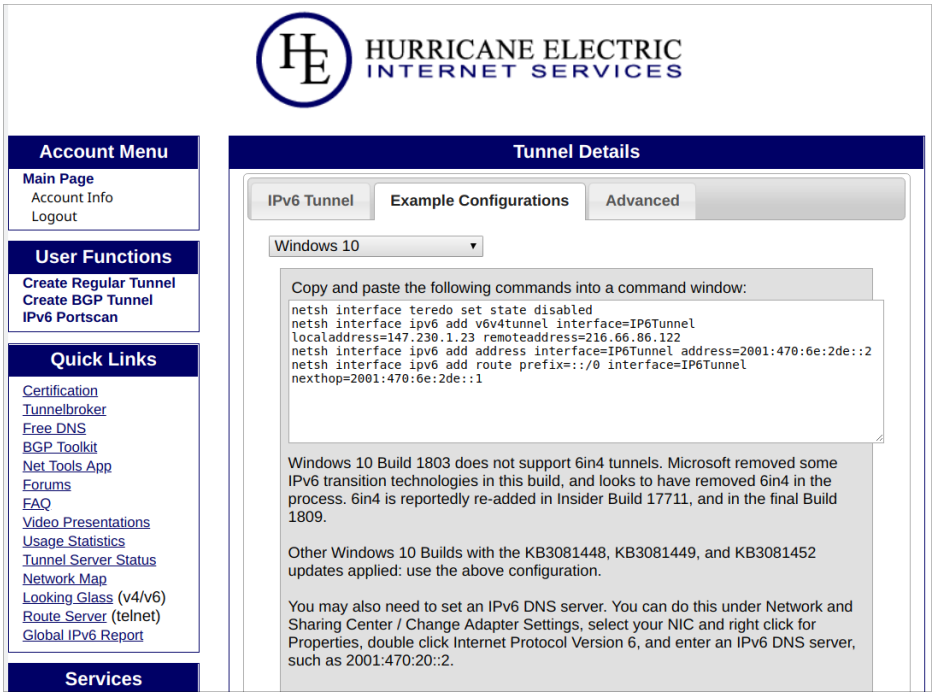
V této oblasti se situace dost zjednodušila, protože několik projektů ukončilo svou činnost. Počátkem roku 2019 jsou reálně na výběr dvě možnosti – *Tunnelbroker* firmy *Hurricane Electric* nebo služba provozovaná *vpsFree.cz*.

Firma *Hurricane Electric* je globálním poskytovatelem konektivity a housingových služeb. Provozuje svou vlastní páteřní infrastrukturu pokrývající celou zeměkouli. V roce 2002 spustila a od té doby rozvíjí *Tunnelbroker* – volné poskytování tunelů pro IPv6:

https://www.tunnelbroker.net/

Její tunely mají mezi uživateli velmi dobrou pověst z hlediska spolehlivosti i výkonu. Pro náš rybníček je významnou výhodou, že jeden z tunelových serverů je umístěn v Praze a připojen do peeringového centra NIX.CZ, takže je dostupný opravdu rychle.

Chcete-li službu využívat, musíte si vytvořit účet na *Tunnelbrokeru*. Je to zdarma, stejně jako vlastní tunely. Nepotřebujete nic než adresu pro elektronickou poštu. Po vytvoření účtu můžete požádat o založení tunelu (*Create Regular Tunnel*). Žádost nepodléhá žádnému schvalování, musíte ale splnit technické požadavky. Přesněji řečeno jeden – mít veřejnou IPv4 adresu, která odpovídá na *ping*. Bez toho nelze tunel vytvořit.



Obrázek 13.1: Tunel založený u Hurricane Electric

Pokud je váš stroj za NATem, je třeba při vytváření tunelu uvést vnější IPv4 adresu NATu – *Tunnelbroker* potřebuje veřejnou adresu. Aby vše fungovalo, musí NAT propouštět protokol 41, který označuje zabalené IPv6 datagramy. Víc nepotřebujete. Komunikaci obvykle bude zahajovat váš stroj, který začne posílat datagramy na tunelový server a otevře tak v NATu cestu pro následné odpovědi na ně.

Po úspěšném založení tunelu obdržíte základní informace o něm. Překliknutím na kartu *Example Configurations* (viz obrázek 13.1) získáte konfigurační příkazy, kterými můžete založit svůj konec tunelu na různých platformách. Příkazy obsahují adresy a parametry pro váš konkrétní tunel, stačí je jen provést. Budu se jim věnovat v následujících kapitolách, zatím je můžete brát jako černou skříňku, stačí vybrat si svůj operační systém nebo platformu, zkopírovat je a provést, případně permanentně uložit, aby se prováděly automaticky při každém startu.

Ve výchozím stavu je do tunelu směrována síť s prefixem /64. Můžete jej povýšit na /48, ovšem je třeba o to požádat – slouží k tomu odkaz *Assign /48* na kartě s parametry tunelu. Opět se nic neschvaluje, stačí kliknout a chvilku počkat na přidělení prefixu. Pokud jej nebudete potřebovat, lze jej uvolnit kliknutím na „X“ napravo od něj.

Jestliže pro vás veřejná IPv4 adresa, kterou vyžaduje *Tunnelbroker*, představuje zásadní překážku, můžete sáhnout po alternativě nabízené *vpsFree.cz*. Charakter služby je totožný – volné poskytování tunelů pro připojení k IPv4. Nemá ze sebou sice silnou firmu a infrastrukturu, zato nepotřebuje veřejnou IPv4 adresu a její IPv6 adresy jsou při geolokaci hodnoceny jako české, takže se dostanete i ke službám jako iVysílání, které jsou dostupné jen z tuzemských sítí.

Pro získání tunelu se nemusíte nikam registrovat, stačí poslat žádost na ipv6tun@vpsfree.cz. V odpovědi dostanete konfiguraci pro *OpenVPN*, jehož prostřednictvím je služba realizována. Koncovým sítím se standardně přidělují prefixy délky 48 bitů. Vše podstatné se dočtete na stránce:

https://kb.vpsfree.cz/informace/projekty/ipv6tunel

13.2 Trvalé připojení

Hodláte-li se v IPv6 Internetu pohybovat soustavněji, mělo by vaše připojení k němu mít trvalejší charakter. Ideální je vybrat si poskytovatele připojení, který IPv6 rutinně podporuje a nabízí. Bohužel nevím o tom, že by existoval průběžně aktualizovaný přehled domácích poskytovatelů IPv6. Z velkých poskytovatelů mají IPv6 nasazeno O2, T-Mobile a UPC, u ostatních budete muset hledat, případně se dotazovat[1]. Určité indicie poskytuje seznam připojených sítí z NIX.CZ:

1: To lze jedině doporučit, aby poskytovatelé měli zpětnou vazbu, že je o nový protokol zájem.

https://www.nix.cz/cs/networks

Pokud v ní najdete svého poskytovatele s vyznačenou podporou IPv6, zjevně už v oblasti IPv6 není panic a přinejmenším ve své páteřní síti protokol přenáší. Bohužel to automaticky neznamená, že jej nabízí i zákazníkům, ale rozhodně má smysl se u něj informovat, zda a za jakých podmínek protokol nabízí. Šance na úspěch je v současnosti již nemalá – počátkem roku 2019 měla drtivá většina subjektů připojených do NIX.CZ (konkrétně kolem tří čtvrtin) alespoň jedno IPv6 propojení. U poskytovatelů, kteří nemají IPv6 peering, je pravděpodobnost poskytování služeb novým protokolem mizivá.

Bohužel ani podpora na straně poskytovatele neznamená, že máte vyhráno. Dnes obvykle nebývá připojen přímo koncový počítač, daleko častěji najdeme na konci lokální síť. Linka od poskytovatele vede do zákazníkovy kouzelné krabičky (ADSL modemu, kabelového modemu, Wi-Fi stanice apod.), jež funguje zároveň jako směrovač, NAT, DHCP server, firewall a automat na zmrzlinu a zprostředkovává místním počítačům spojení prostřednictvím Ethernetu a/nebo Wi-Fi.

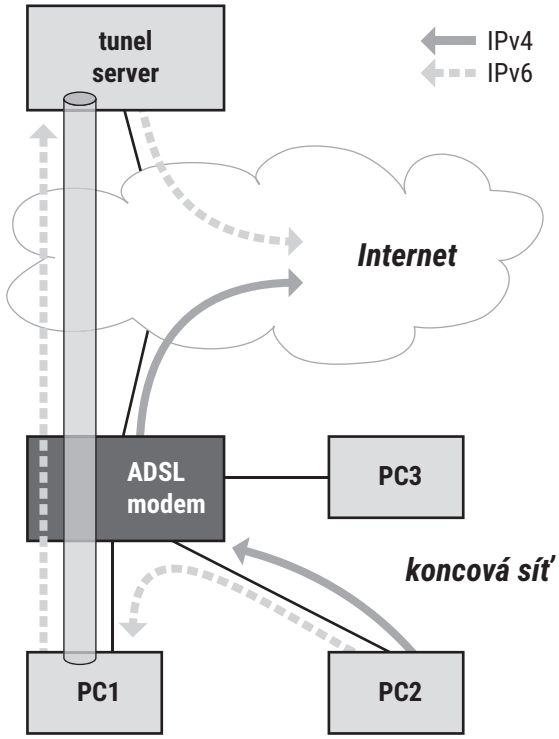
Právě běžně používané levné zákaznické krabičky až příliš často představují výjimku z mého tvrzení, že IPv6 je dnes víceméně samozřejmostí. Situace se postupně zlepšuje a prvek podporující IPv6 dnes bez větších potíží seženete. Je ale třeba mít se na pozoru, kontrolovat si produktovou dokumentaci, případně konzultovat výběr konkrétního produktu. Někteří prodejci spotřební elektroniky umožňují zobrazované zboží filtrovat podle podpory IPv6, na výsledky ale bohužel není vždy spolehnutí.

Když se u vás sejde ta šťastná konstelace, že IPv6 podporuje jak váš poskytovatel, tak zařízení k němu připojené, můžete se připojit nativně. Tedy přenášet přímo IPv6 datagramy a používat individuální globální adresy z rozsahu, jímž disponuje váš poskytovatel.

Pokud tato idyla nenastane, asi nezbude nic jiného, než zůstat u připojení tunelem. *Tunnelbroker* firmy Hurricane Electric, který jsem zmiňoval v předchozí části, je dost stabilní, takže se toto řešení dá používat i dlouhodobě. Jedním z jeho nedostatků je ovšem potenciální nekonzistence mezi směrováním IPv4 a IPv6 v koncové síti.

Jestliže tunelem obcházíte omezení svého přístupového prvku (řekněme ADSL modemu), budou datagramy obou protokolů směrovány odlišně. Zatímco pro IPv4 zůstane implicitním směrovačem přístupový prvek, pro IPv6 bude tuto roli hrát stroj, ze kterého vychází tunel. Situaci znázorňuje obrázek 13.2. Samozřejmě na ní není nic zásadně špatného, jedná se o různé protokoly a jejich směrování se proto může lišit. Jen to může být poněkud matoucí a svádět k chybným závěrům při řešení problémů s připojením.

Jakmile bude mít vaše IPv6 připojení trvalejší charakter, možná začnete uvažovat o poskytování služeb tímto protokolem. Ruku v ruce s ním kráčí otázka ukládání příslušných informací do



Obrázek 13.2: Nekonzistence směrování IPv4 a IPv6

DNS a jejich dostupnost. Jestliže si alespoň některé autoritativní DNS servery spravujete sami, pravděpodobně nebude problém naučit je IPv6 a uložit na ně odpovídající záznamy AAAA.

Ani v opačném případě ale nemusíte zoufat. Nabídka hostování autoritativních DNS serverů s podporou IPv6 je až překvapivě široká. Můžete třeba zůstat v náruči Hurricane Electric a použít jejich volný DNS hosting:

- https://dns.he.net/

Případně zkusit nějaké alternativy:

- https://www.cloudns.net/
- https://ns1.com/

Pokud byste chtěli zůstat v domácích luzích a hájích, najdete podporu IPv6 například u:

- http://www.hosting90.cz/
- https://www.tele3.cz/
- https://hosting.wedos.com/cs/dns.html

Po správě reverzních domén sítí připojených statickými tunely je třeba se poohlédnout u poskytovatele připojení nebo tunelů, protože on spravuje reverzní doménu prefixu, z nějž jsou odvozeny jejich adresy. Máte-li regulérní globální prefix, znamená to, že váš poskytovatel zřejmě podporuje IPv6 a s reverzní doménou by proto neměl být problém, deleguje (či spravuje) vám ji stejně jako v případě IPv4.

13.3 Testování a měření

Když zprovozníte IPv6 připojení svého stroje či celé sítě, pravděpodobně vás bude zajímat, zda a jak dobře funguje. Pochopitelně jsou k dispozici základní diagnostické nástroje *ping* (*ping6*) a *traceroute* (*tracert*, *traceroute6*), jimiž lze cíleně ověřovat dostupnost určité konkrétní adresy.

Kromě nich ovšem stojí za doporučení některé weby, jež umožňují ověřit si, jak se vaše připojení chová v reálném provozu. Pro úvodní jednoduché ověření, zda IPv6 na vašem stroji vůbec rozumně funguje, lze doporučit například:

- https://www.nebezi.cz/

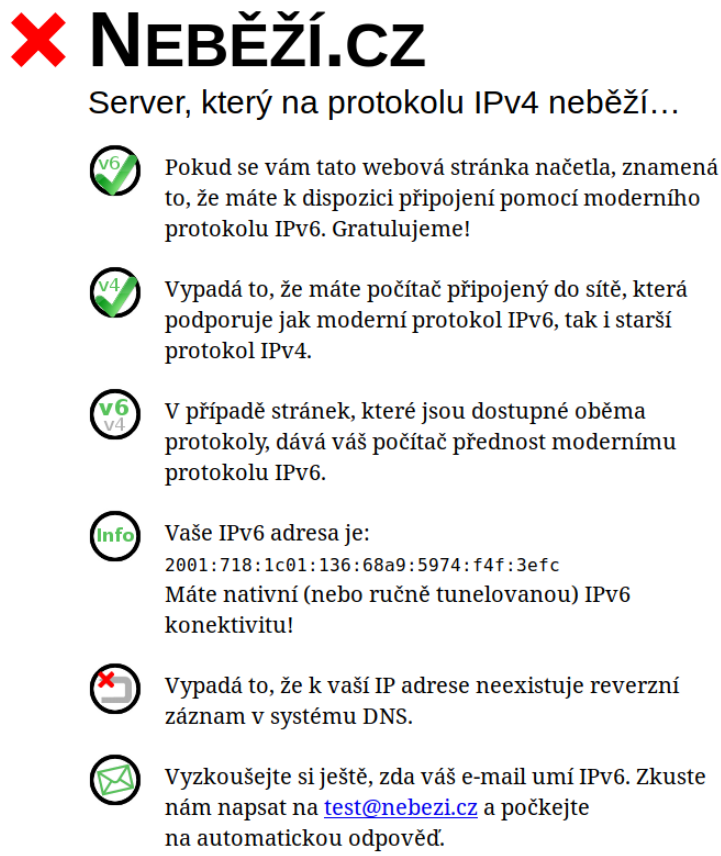
Tento server, provozovaný Petrem Krčmářem a Ondřejem Caletkou, je přístupný jen protokolem IPv6. Po IPv4 neběží, jak sugestivně naznačuje název. Je zdrojem řady roztomilých dotazů ve stylu „Běží Neběží?“. Pokud se stránka načte, znamená to, že váš stroj v zásadě dokáže komunikovat novým protokolem. Zároveň se dozvíte, zda preferuje IPv6 a můžete vyzkoušet, jestli váš poštovní systém dokáže doručovat dopisy i serverům hovořícím pouze novým protokolem.

Solidní diagnostické informace poskytuje stránka:

- https://www.test-ipv6.cz/

Provádí sadu testů, kterými se snaží zjistit vlastnosti vaše spojení. Jak vidíte na obrázku 13.4, u domácího spojení rozpoznala poskytovatele i pravděpodobné připojení pomocí 6rd. Zároveň upozorňuje, že DNS server nehovoří IPv6, což může způsobit problémy. Na kartě *Spuštěné testy* se dá dozvědět více o tom, jak jednotlivé testy pracují (odkaz *Technické informace*). Karta *Pro help desk* vpravo poskytuje stručný přehled, který se může hodit při komunikaci se zákaznickou podporou.

Po úspěšném ověření, že IPv6 skutečně běží, vám možná začne vrtat hlavou, jestli je dostatečně rychlé a jak si stojí proti IPv4. Pro hledání odpovědí lze doporučit server:

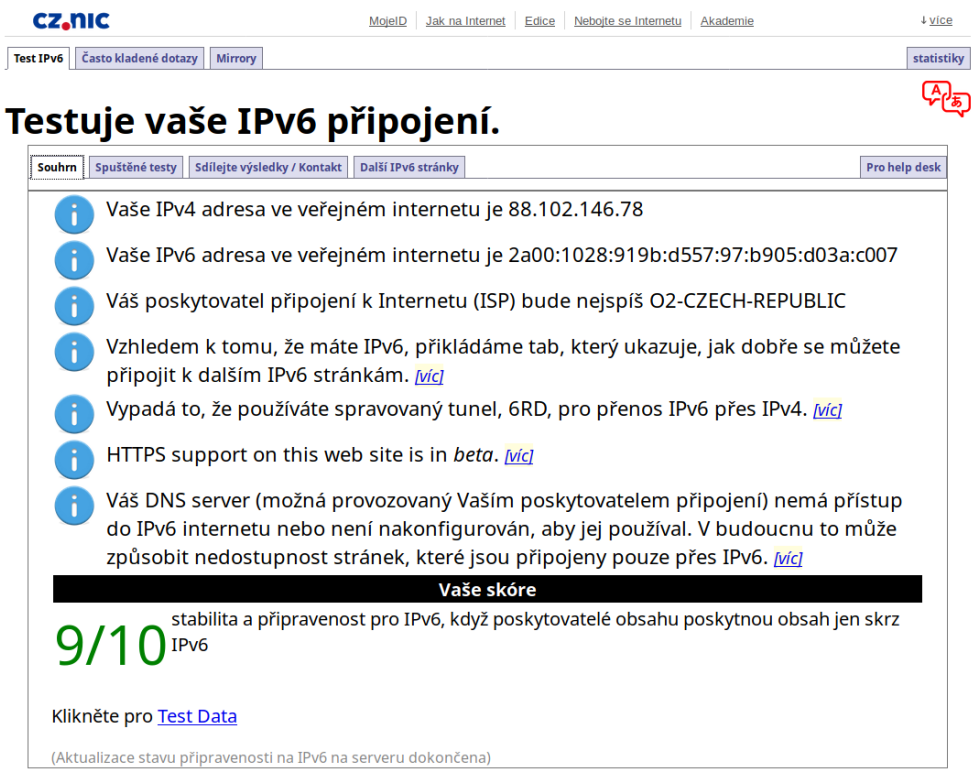


Obrázek 13.3: Stránka *www.nebezi.cz*

http://ipv6-test.com/

V horním menu se můžete přepínat mezi různými typy testů. Úvodní obecný poskytne opět informace o dostupnosti IPv6 a jeho vlastnostech. Měření rychlosti najdete v sekci *Speed*. Vyberte si jeden ze serverů a spusťte test. Chvilku bude přenášet data jedním a druhým protokolem, výsledek pak zobrazí jak číselně, tak v podobě velmi názorného grafu, ze kterého si snadno uděláte představu, jak si oba protokoly stojí.

Používáte-li tunelované připojení, bude samozřejmě velmi záležet na poloze druhého konce tunelu. Aneb jak velkou oklikou proti ideální trase musí datagramy putovat. K mému překvapení

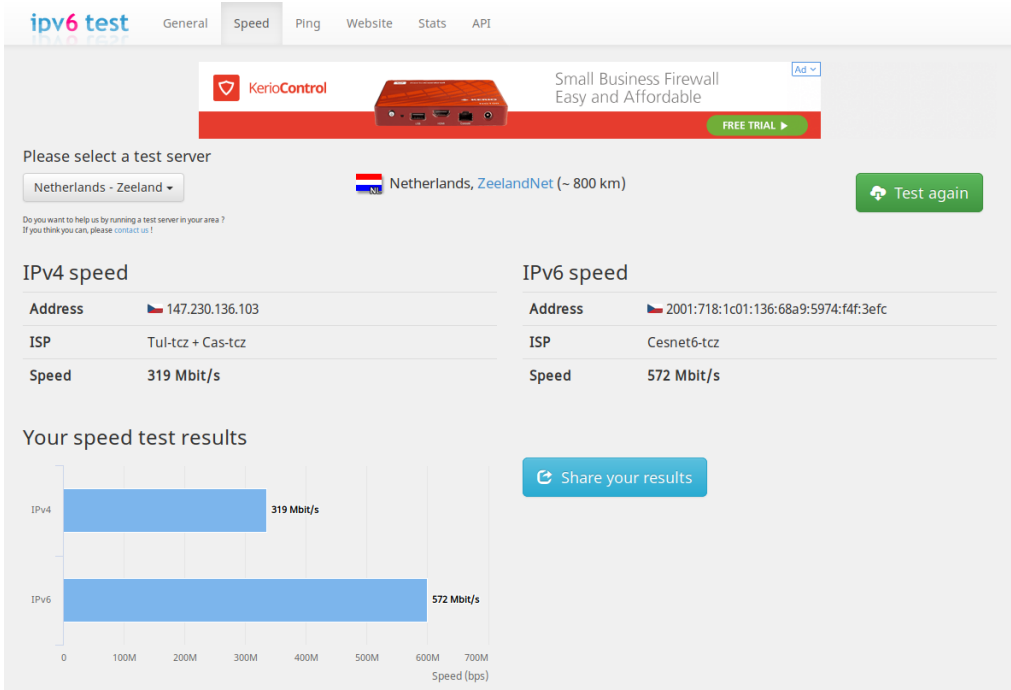


Obrázek 13.4: Stránka *test-ipv6.cz*

ovšem měření často vykazuje dramatické rozdíly i při nativním připojení. Výsledky se liší pro různé servery, ovšem při opakovaných měřeních stejného serveru jsou celkem konzistentní.

Všechny nabízené servery jsou zahraniční, ale pro vás bude pravděpodobně zajímavější spíše komunikace s domácími zdroji. Proto bych doporučil sáhnout také po testovacích serverech CESNETu. Tentokrát měření není integrováno, musíte testovat IPv4 odděleně od IPv6 a výsledky si dát do souvislosti sami. Dozvíte se ale kromě přenosové rychlosti navíc i zpoždění paketů a jeho rozptyl. K provedení testů se obraťte na adresy:

- http://speedtest.cesnet.cz/
- http://speedtest6.cesnet.cz/



Obrázek 13.5: Výsledky měření na *ipv6-test.com*

Pokud jste si pod pojmem „testování“ představili spíše pravidelné ověřování funkčnosti či výkonu síťových prvků a služeb, tedy monitoring, mám pro vás samé dobré zprávy. Nejběžněji používané monitorovací systémy – *Nagios*, *Icinga*, *Zabbix* i *Cacti* – IPv6 podporují. Stačí si jen vybrat, případně upravit konfiguraci svého oblíbence. Přehled existujících programů pro sledování sítě včetně informace o podpoře IPv6 najdete na Wikipedii:

http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_network_monitoring_systems

13.4 IPv6 v lokální síti

V předchozí části jsem představil možnosti, jimiž můžete svou koncovou síť připojit k IPv6 Internetu. Pro její adresování tím získáte prefix délky 64 až 48 bitů. Otázka je, jak jej využít. Jedná-li se o malou domácí síť s jednou podsítí a prefixem /64, není příliš o čem přemýšlet. Složitější je situace ve větších sítích organizací, pro které by neměl být problém získat prefix standardní délky /48.

Zabývá se jí například RFC 4057: *IPv6 Enterprise Network Scenarios*. Definuje tři základní scénáře pro uspořádání koncové sítě:

- plošná podpora obou protokolů v celé síti,
- IPv4 síť s ostrůvky IPv6,
- IPv6 síť s ojedinělými uzly podporujícími IPv4.

Ovšem neočekávejte od něj návrh řešení. Poslouží spíše jako kontrolní seznam s výčtem možných problémů a otázek, na něž je záhodno znát odpovědi. Ty už ovšem musíte najít sami. Za nejčastější a nejméně problémové lze považovat první řešení, tedy plošnou podporu obou protokolů.

Ideální variantou, jak rozvést IPv6 v koncové síti zahrnující několik podsítí, samozřejmě je nasadit aktivní prvky podporující nový protokol. Můžete pak celou síť či její vybrané části podle potřeby konfigurovat jako IPv4, IPv6 nebo smíšené. Nejobvyklejší bude nepochybně poslední případ, poskytující koncovým zařízením oba protokoly. Konfigurace bývá snadná – jednoduše přidělíte příslušnému rozhraní adresy pro IPv4 i IPv6.

Jestliže se ale vaše stávající prvky k IPv6 nehlásí a nákup nových je v nedohlednu, možná vám pomohou virtuální lokální sítě, VLAN. Jejich prostřednictvím lze jednotlivé IPv6 podsítě protáhnout až ke směrovačům, které jim rozumějí a dovedou jejich datagramy správně zpracovat. S využitím značkování podle IEEE 802.1Q můžete přenášet spoustu VLAN jedním rozhraním a vytvořit si takové uspořádání, jaké budete potřebovat.

Topologie obou protokolů se může významně lišit. Máte-li L2/L3 přepínač nepodporující IPv6, může se vůči IPv4 chovat jako směrovač a datagramy přicházející z určité VLAN směrovat mimo její hranice. Kromě toho ovšem příslušnou VLAN zavedete pomocí IEEE 802.1Q infrastrukturou dál k (třeba jedinému) IPv6 směrovači, jenž se postará o dopravu IPv6 datagramů.

Dokud bude objem IPv6 provozu malý, můžete pro celou síť vystačit s jediným softwarovým směrovačem na Linuxu či některé variantě BSD, který se postará o směrování IPv6 datagramů z celé sítě a třeba i o její tunelové připojení k vnějšímu Internetu. Vzhledem k dostupnosti velkých služeb (Google, Facebook a spol.) po IPv6 ale takovému řešení nejspíš brzy dojde dech. Není-li síť jen na hraní, rozhodně se snažte o hardwarové směrování.

Využití VLAN pro přepravu IPv6 datagramů v místní síti rozebírá RFC 4554: *Use of VLANs for IPv4-IPv6 Coexistence in Enterprise Networks*.

Když ani virtuální sítě neposkytují pro vaši konkrétní síť řešení, vždy lze sáhnout po starém špatném tunelování a přivést IPv6 ke koncovým strojům pomocí tunelů. Buď staticky (což ale z hlediska správy představuje noční můru), nebo nějakou automatickou formou jako je ISATAP či 6over4. Obecně je ale rozumné a zpravidla i možné se tunelování v místní síti raději vyhnout.

Za ideál považuji první variantu, která ovšem vyžaduje podporu IPv6 v aktivních prvcích. To je obecně čím dál tím menší problém, protože výrobci již vzali IPv6 na vědomí a ve valné většině je už implementovali. Problém chybějící podpory IPv6 v aktivních prvcích se postupně vyřeší samospádem v rámci standardního cyklu inovace síťového vybavení, pokud se tak již nestalo.

V konkrétních případech je ale na místě špetka ostražitosti, protože prospekt snese všechno a pod obecnou deklarací „podpora IPv6" se může skrývat ledacos. Případný certifikát *IPv6 Ready* samozřejmě hodně napoví, nicméně vždy je záhodno si ještě před koupí vyžádat podrobnější dokumentaci (nejlépe konfigurační manuál) a prolustrovat, zda vyhlédnutý prvek umí vše, co potřebujete.

Jestliže techniku pořizujete na základě formálního výběrového řízení, doporučuji místo obecného požadavku na podporu IPv6 požadovat zcela konkrétní schopnosti. Pomůže vám dokument ripe-554: *Requirements For IPv6 in ICT Equipment*[2], který byl pro tyto účely vytvořen. Obsahuje velmi podrobný výčet toho, co byste měli/mohli chtít, včetně odkazů na příslušné specifikace.

13.5 Adresování místní sítě

Pokud jste od poskytovatele dostali prefix délky 64 bitů, tedy jedinou podsíť, máte adresování hotové. V opačném případě se musíte zamyslet, jak navrhnout topologii jednotlivých podsítí a jaké adresy jim přidělit. Pokud chcete být v této disciplíně opravdu dobří, doporučím vám knihu [4]. Zde se pokusím nastínit alespoň základy.

Adresace lokální sítě se dá navrhnout řadou různých způsobů a nijak se nevázat na IPv4. Existuje celý dokument věnovaný této problematice [18], který propaguje poměrně nezvyklý přístup vytváření podsítí podle charakteru připojených zařízení (ale rozebírá i jiné). Za jeho hlavní výhodu autoři považují snadnější vytváření síťových politik pomocí pravidel ve firewallech a podobných zařízeních.

Valná většina správců ovšem dává přednost topologii totožné s IPv4. Podsítě obou protokolů si odpovídají 1:1 a směrují je stejné aktivní prvky, jejichž příslušná rozhraní mají vždy přiděleny odpovídající IPv4 i IPv6 adresy. Troufám si prohlásit, že z hlediska správy sítě je takové uspořádání nejjednodušší a pokud se máte jen trochu rádi, snažte se k němu dopracovat. Narazíte-li na technická omezení, bude třeba improvizovat, nicméně doporučuji směřovat ke konzistentní topologii IPv4 a IPv6 jako k cílovému, slovníkem Horsta Fuchse ultimátnímu řešení.

Otázkou zůstává, jakou strategii zvolit pro přidělování identifikátorů podsítí. Jestliže máte vyhovující strukturu adres pro IPv4 podsítě, můžete ji do IPv6 jednoduše převzít. Podsíť ponese stejný identifikátor, řekněme 33, v obou verzích protokolu. Na TU v Liberci máme prefixy

2: https://www.ripe.net/publications/docs/ripe-554

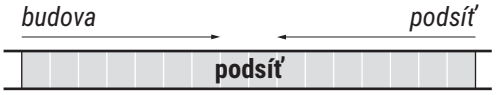
147.230.0.0/16 a 2001:718:1c01::/48 a k nim připojujeme shodné identifikátory podsítí. Podsíť 33 má tedy prefixy 147.230.33.0/24 a 2001:718:1c01:33::/64, což velmi usnadňuje orientaci[3].

Často je však adresace IPv4 podsítí poznamenána nedostatkem adres a z něj plynoucí řadou kompromisů. Nejste-li s ní spokojeni, bude lepší pro IPv6 začít na čistém stole a navrhnout adresaci nezávisle na starším protokolu. Sice nebude existovat jednoduchá vazba mezi IPv4 a IPv6 adresou topologicky shodných podsítí, ale zato získáte alespoň v jednom protokolu adresní schéma, které má hlavu a patu.

U jednoduchých sítí lze adresy přidělovat plošně systémem „kdo dřív přijde, ten dřív mele". Tedy číslovat postupně od jedničky, tak jak se objevují požadavky na nové podsítě. Tento systém je velmi snadný, ale vede k větším směrovacím tabulkám směrovačů v koncové síti, protože podsítě jsou rozloženy náhodně a každá z nich musí mít v tabulce svůj vlastní záznam.

Zejména u větších sítí je rozumné zvážit strukturu vlastní sítě a promítnout ji do hierarchie adres podsítí. Například prvním bajtem adresy podsítě identifikovat areál či budovu a druhým pak rozlišit podsítě v ní. Dá to více práce a vyplýtváte některé adresy, protože ne všechny areály bývají stejně velké. Ovšem směrovací tabulky budou menší, protože celé skupiny podsítí lze agregovat do jedné položky.

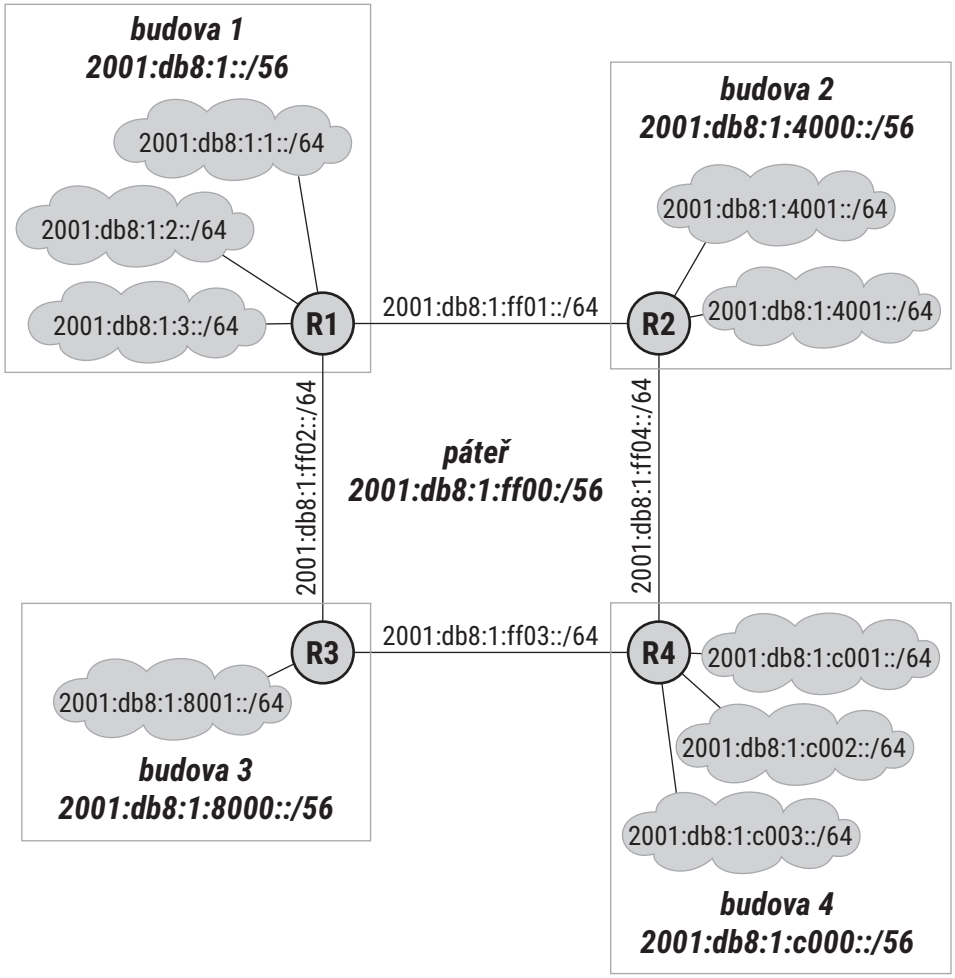
Strategie adresace podsítí závisí především na velikosti sítě, a to včetně výhledu na její rozvoj v nejbližších letech. V malé síti nemá smysl usilovat o budování hierarchie. Pokud však počet vašich podsítí půjde do desítek či stovek, vyplatí se vážně uvažovat o zavedení hierarchie jejich identifikátorů.



Obrázek 13.6: Protiběžné identifikátory v hierarchické adrese podsítě

Při hierarchickém přístupu, lze doporučit použití protiběžných identifikátorů. Tedy aby adresy hierarchicky vyšších celků (např. budov) narůstaly od levého okraje identifikátoru podsítě, zatímco adresy hierarchicky nižších celků (podsítí v budovách) od pravého okraje. Tento přístup ilustruje obrázek 13.6 a jeho podrobný podpis najdete v RFC 3531: *A Flexible Method for Managing the Assignment of Bits of an IPv6 Address Block*. Jeho hlavní výhodou je, že hranici mezi úrovněmi hierarchie lze později posunout doleva nebo doprava, pokud se některá část ukáže jako příliš krátká.

3: Identifikátory jsou vlastně odlišné, protože 33 v IPv6 adrese je v šestnáctkové soustavě, takže ve skutečnosti představuje desítkovou hodnotu 51. Pokud bychom chtěli stejnou hodnotu identifikátoru, museli bychom 33 převést v IPv6 adrese na 21. Připadá nám přehlednější dát přednost shodnému zápisu před totožnou hodnotou.



Obrázek 13.7: Příklad hierarchicky uspořádaných identifikátorů podsítí

Konkrétní příklad pro čtyři budovy sítě s prefixem 2001:db8:1::/48 představuje obrázek 13.7. Adresy budov se liší v nejvyšších bitech identifikátorů podsítí, které začínají binárními hodnotami 00, 01, 10 a 11. Převedeno do šestnáctkové soustavy 0000, 4000, 8000 a c000. Podsítě v jednotlivých budovách jsou naopak rozlišeny nejnižšími bity identifikátoru podsítě. Ve čtvrté z budov tedy nesou identifikátory c001, c002, atd.

Zatím stačily k rozlišení na obou stranách dva bity. Hranice mezi identifikátorem budovy a podsítě v ní může proto ležet kdekoli mezi druhým a předposledním bitem. V obrázku jsem ji zvolil v polovině, což poskytuje dostatek místa pro růst obou částí. Tomu odpovídají prefixy budov v obrázku, které by figurovaly v páteřních směrovacích tabulkách. Pokud by ale časem některá budova potřebovala více než 256 podsítí a budov by stále bylo jen pár, dá se část identifikující budovu zkrátit (třeba na 4 bity) a nižší hierarchická úroveň adekvátně prodloužit.

Je také třeba nějak adresovat páteřní spoje, pokud možno tak, aby se nepletly do ostatních adres. V tomto případě jsem pro ně zvolil prefix 2001:db8:1:ff00::/56 – poslední možnou „budovu“. Vzhledem k jejich omezenému počtu by asi stačil i menší prostor, například 2001:db8:1:fff0::/60. Není to zdaleka jediná alternativa, za chvilku se jim budu věnovat podrobněji.

Celá správa podsítí vychází ze základní myšlenky, že směrovače se o nějakou vnitřní strukturu adres vůbec nestarají. Ta slouží pouze pro jejich přidělování a správu. Z hlediska směrovače je situace zcela prostá: porovná adresu se svými směrovacími tabulkami a najde v nich položku s nejdelším prefixem, který odpovídá adrese. Tu použije. Rozhodují jen prefixy.

Specifickou oblast z hlediska adresování představují *podsítě zahrnující jen dvojici vzájemně propojených směrovačů*. Typicky se vyskytují v páteřích, mezi budovami, areály, či jinými částmi sítě. Ve světě IPv4 bývá zvykem používat pro ně prefix délky /30 či dokonce /31 (viz RFC 3021), který poskytuje jen nezbytné minimum adres a zbytečně neplýtvá. V IPv6 máte na výběr hned čtyři alternativy, jak adresovat dvoubodové podsítě:

- *Použít jen lokální linkové adresy* a globální vůbec nepřidělovat. Pro samotné směrování nejsou globální adresy potřeba – každé rozhraní má svou lokální linkovou adresu a tyto adresy vystupují ve směrovacích tabulkách. Jádro fungování sítě si s nimi vystačí. Drhnout mohou „nadstavbové“ funkce, protože lokální linková adresa je smysluplná a dosažitelná jen v rámci své linky. Může vám vadit, že *traceroute* vypíše nepoužitelnou adresu, že je rozhraní nedosažitelné pro vzdálenou správu (*ping*, dohledový software a podobně), že adresy nemáte pod kontrolou. V důsledku toho všeho jsou takto adresované páteřní spoje obtížněji spravovatelné a osobně bych touto cestou nešel.
- *Použít místní lokální adresy (ULA)* odpovídá použití privátních adres podle RFC 1918 v IPv4. Adresy jsou směrovány v místní síti, ale nejsou dosažitelné z Internetu. To lze vnímat jako výhodu (obtížněji se na ně zvenčí útočí) i nevýhodu (nedá se zvenčí testovat jejich dosažitelnost). V každém případě budou bez problémů dostupné pro dohledové a správcovské systémy

pracující ve vnitřní síti. Jejich použití vás nebude stát ani jednu veřejnou adresu, máte jich k dispozici habaděj (prefix /48), takže si směle můžete dovolit použít prefix podsítě o standardní délce /64. Identifikátor rozhraní lze přiřadit explicitně, takže nebudete odkázáni na šifry generované podle RFC 7217, jako v případě lokálních linkových adres. Z řady pohledů se ULA jeví pro daný účel jako nejvhodnější řešení, jež kombinuje přednosti ostatních alternativ.

- *Použít veřejný prefix standardní délky /64* znamená samozřejmě brutální plýtvání, ovšem při velikosti adresního prostoru si je snadno můžeme dovolit. Připravíte se o jednu z 65 tisíc podsítí (v horším případě z 256), nicméně budete používat nejobvyklejší délku prefixu, se kterou by žádné nástroje neměly mít problém.
- *Použít dlouhý veřejný prefix /127* je varianta, která byla dlouho nedoporučována. Konkrétně se proti němu postavilo RFC 3627: *Use of /127 Prefix Length Between Routers Considered Harmful*, jehož hlavním důvodem bylo, že prefix této délky připouští jen dva identifikátory rozhraní, 0 a 1. První z nich ovšem koliduje s výběrovou adresou pro všechny směrovače v podsíti. Později byl tento postoj revidován v RFC 6164: *Using 127-Bit IPv6 Prefixes on Inter-Router Links*, který bere prefix /127 na milost a směřuje spíše k opačnému postoji – nepoužívat kratší prefixy. Zmiňuje se o jejich potenciálních bezpečnostních rizicích. Zmiňované útoky, vesměs usilující o různé druhy zahlcení, ovšem nejsou nijak specifické pro dvoubodové linky. Dlouhé prefixy jsou méně obvyklé, ale pokud nepředstavují technický problém[4], lze je označit za variantu mírně lepší proti předchozí. Šetří adresy a omezují prostor pro vznik problémů.

Doporučil bych vybrat si podle osobních preferencí cokoli kromě první varianty. Na TU v Liberci adresujeme páteř veřejnými adresami s prefixem /64, ovšem naše adresní schéma vznikalo v době, kdy ULA ještě nebyly na světě a síťový gentleman by se nezahodil s prefixem /127. Osobně mi na ULA vadí nesouvislost adresního prostoru[5], takže pokud bychom adresy předělávali, asi bychom sáhli po poslední z uvedených alternativ. Nicméně zatím k tomu není důvod.

V každém případě je rozumné vyhnout se u páteřních spojů automatické konfiguraci a používat explicitně přiřazené, jednoduché adresy. Budete je muset poměrně často psát, tak ať se vám píší dobře.

Naopak v koncových podsítích připojujících uživatelská zařízení bývá automatická konfigurace standardem. Vzhledem k řadě pragmatických problémů spojených s DHCPv6 je rozumnější (a rozhodně častější) použít bezstavovou automatickou konfiguraci. Chcete-li udržet své uživatele na uzdě a zabránit chaotickému zapojování všeho, co si zrovna přinesli, nasaďte IEEE 802.1X.

4: Existují aktivní prvky, které nepřipouštějí prefixy podsítí delší než 64 b.
5: Což samozřejmě neomezuje funkčnost, je to čistě estetická záležitost.

13.6 Aplikace

Jakmile máte IPv6 připojení, můžete provozovat aplikace. Těch existuje nepřeberné množství a jejich přístup k novému protokolu kolísá od naprostého ignorování po bezproblémovou transparentní podporu. Příkladem druhého extrému je třeba WWW server *Apache*. Nemusíte nic konfigurovat, při startu se porozhlédne po vašem počítači a pokud na něm běží IPv6, bude jím automaticky hovořit.

Jindy musíte IPv6 zapnout v konfiguraci. Třeba poštovní doručovatel *Postfix* vyžaduje ve svém souboru *main.cf* příkaz:

```
inet_protocols = all
```

Určitou kuriozitu představují programy, které sice podporují oba protokoly, ale běžící instance zvládá jen jeden. Musíte spustit dva exempláře, z nichž jeden bude komunikovat po IPv4 a druhý po IPv6. Takové chování vykazuje například *ISC DHCP* (o něm podrobněji v kapitole 21 na straně 425).

Uvedené příklady slouží jen jako ilustrace přístupů k IPv6, s nimiž se můžete setkat. Není v mých silách rozebírat zde podporu IPv6 v široké nabídce aplikací. Snaží se o to stránka:

http://www.ipv6-to-standard.org/

Bohužel nezobrazuje žádné časové údaje, aktuálnost poskytovaných informací je ve hvězdách. Nicméně s Googlem v ruce, s ohněm v srdci by neměl být problém vyhledat si pro jakoukoli konkrétní aplikaci aktuální stav podpory IPv6 a zkušenosti uživatelů.

13.7 Život bez NATu

Jedním z přínosů, které se všeobecně očekávají od zavedení IPv6, je masivní opouštění NATů a obnovení přímočaré vzájemné komunikace koncových zařízení. Z toho bude těžit řada aplikací a jejich protokolů, které se obejdou bez komplikovaných obezliček obcházejících nemožnost navazování spojení do NATované sítě.

Na druhé straně ale nelze přehlížet, že NAT má i některé kladné stránky. Jednostranné navazování spojení komplikuje pirátům útok na počítače v koncové síti. NAT sice *není bezpečnostní prvek* a úspěšnému útoku nedokáže zabránit, nicméně komplikuje jej a lokální počítače alespoň částečně chrání.

Kromě toho díky NATu vznikla jednoduchá zařízení typu plug-and-play zajišťující vše potřebné pro připojení domácích sítí k Internetu. Jejich základní složkou bývá přístupový modem, kombi-

novaný se směrovačem, NATem, firewallem a DHCP serverem. Zařízení zpravidla funguje zcela automaticky – připojí se k poskytovateli a protokolem DHCP získá svou adresu. Pro lokální počítače pak používá neveřejné adresy podle RFC 1918, které jim přiděluje také protokolem DHCP. Vůči venkovnímu světu je NATuje na svou vlastní jedinou adresu. Pokud uživatel nemá nadstandardní požadavky, krabičku jednoduše zapojí, spustí a může surfovat.

Je velmi žádoucí, aby se pro IPv6 nabízelo něco podobného, ovšem bez NATu a s globálními adresami v koncové síti. Touto problematikou se zabývá RFC 4864: *Local Network Protection for IPv6*. Jeho název je poněkud zavádějící, protože se nevěnuje pouze bezpečnosti lokální sítě, ale spíše v něm najdete analýzu předností NATu, jak jsou současným trhem vnímány, a popis prvků IPv6, jimiž lze dosáhnout podobného účinku. Až na malé výjimky to je možné.

Lákavé samočinnosti koncového zařízení a jeho automatické funkce lze dosáhnout poměrně snadno, IPv6 má v tomto směru ledacos připraveno. Svou vlastní adresu může koncový modem/směrovač získat bezstavovou konfigurací či pomocí DHCPv6. Jeho prostřednictvím lze obstarat i globální prefix pro koncovou síť. Slouží k tomu rozšíření označované jako DHCP-PD (DHCP Prefix Delegation) zavedené v RFC 3633: *IPv6 Prefix Options for Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) version 6* a později převzaté do jádra DHCPv6 (RFC 8415). Koncové počítače pak opět mohou použít bezstavovou automatickou konfiguraci či DHCPv6.

O základní zabezpečení lokální sítě by se měl postarat firewall integrovaný v koncovém prvku. Autoři dokumentu považují za optimální, aby zařízení tohoto typu obsahovala stavový firewall, který ve výchozím nastavení vpustí dovnitř jen datagramy z adres, na něž nedávno odešel datagram z koncové sítě. Jinými slovy, jejich chování se má velmi podobat dnešnímu NATu – neumožní navázat komunikaci směrem dovnitř, iniciativa vždy musí vzejít z vnitřní sítě. Na rozdíl od NATu bude ale dosaženo jinými prostředky a mělo by být snadné dělat z něj výjimky pro vybrané typy komunikace (IP telefonie, různé komunikátory, síťové hry). Díky nim bude umožněna ona vytoužená přímá komunikace.

Třetím okruhem, kde NAT může být prospěšný, je ochrana soukromí. Neprozradí nic o struktuře sítě za ním, ani o tom, ze kterého konkrétního počítače přišel určitý datagram. Zde IPv6 poslouží jen napůl. Strukturu koncové sítě neskryje, identitu koncových počítačů ano. K tomu poslouží náhodně generované adresy pro ochranu soukromí podle RFC 4941. Navíc díky monumentálnímu rozsahu podsítí je téměř nemyslitelné vyhledávat v nich existující stroje skenováním, jak je běžné ve světě IPv4. Soukromí koncových počítačů je chráněno solidně, zato adresy podsítí zůstávají otevřené a beze změny. To ale nebude nijak palčivý problém, protože struktura lokální sítě bývá triviální. Za zákaznickým modemem dnes skoro vždy bývá jedna, nanejvýš dvě podsítě (Ethernet a Wi-Fi), složitější topologie je zcela výjimečná.

Kýžené vlastnosti koncového zařízení jsou jasně narýsovány, prostředky k jejich dosažení existují. Teď ještě aby se IPv6 krabičky objevily na trhu za stejně atraktivní ceny, na jaké jsme zvyklí…

13.8 Bezpečnost koncových strojů a sítí

Dost často dnes mívají snahy o nasazení IPv6 charakter experimentu. Pokud se podaří uvést je do provozu, zúčastnění propadnou euforii a příliš se nestarají o důsledky. Těmi mohou být nové cesty pro útočníky, když IPv4 je pečlivě lustrováno firewallem, zatímco IPv6 se nadšeně poskytuje zcela otevřeně.

Je velmi záhodno hlídat si při testování a nasazování IPv6 záda. Zatím se sice žádné útoky provedené po IPv6 nedočkaly široké publicity, je ale jen otázkou času, kdy se tak stane. Nezapomínejte ve svých firewallech na pravidla pro IPv6. Měla by být v zásadě analogická těm pro IPv4, až na použité adresy, pochopitelně.

Netriviální problém představuje filtrování ICMPv6. Zkušenost ze světa IPv4 ukazuje, že ICMP bývalo zneužíváno, proto je někteří správci zcela zakázali. V IPv6 ale takto radikální krok není možný, protože ICMPv6 využívají pro přenos svých zpráv různé doprovodné mechanismy, jako je objevování sousedů či podpora mobility. Totálním zákazem by ledacos přestalo fungovat.

Situaci podrobně analyzuje RFC 4890: *Recommendations for Filtering ICMPv6 Messages in Firewalls*. Popisuje čtyři základní typy útoků, k nimž je ICMPv6 zneužíváno – zahlcení, falšování zpráv, sondování sítě a pašování informací zevnitř ven. Následně pak podle využití a důležitosti jednotlivých typů zpráv definuje velmi konkrétní sadu doporučení, jak s nimi zacházet. Jejich souhrn obsahuje tabulka 13.1, která každému typu zprávy přiděluje jedno z pěti opatření:

- **propustit!** – zpráva musí firewallem projít, jinak bude narušena funkce některých složek IPv6,
- **propustit** – pokud správce nemá vážný důvod k opačnému rozhodnutí, firewall by měl zprávu propustit,
- **rozhodnout** – zpráva není kritická, její osud závisí na místní policitce,
- **zahodit** – zpráva by neměla firewallem projít,
- **netřeba** – zpráva bude podle specifikací zpracována či zahozena a není předávána dál, není proto nutné definovat pro ni speciální pravidlo.

Zprávy jsou v tabulce uspořádány podle svých typů a kódů. Doporučení navíc rozlišuje, zda je zpráva tranzitní, tedy je určena jinému adresátovi, nebo koncová, čili adresátem je některé z rozhraní stroje implementujícího firewall. Pokud používáte Linux, najdete v RFC 4890 (konkrétně v příloze B) hotový skript, jímž můžete tato pravidla nastavit.

Život firewallů ve světě IPv6 bude obecně těžší. Situaci jim komplikují dvě skutečnosti: řetězení hlaviček a předpokládané masivnější používání IPsec. Obvyklá pravidla současných firewallů pracují s IP adresami a transportními porty, podle nichž identifikují aplikace. Ovšem pokud IPv6 datagram používá rozšiřující hlavičky, odsouvá se informace o použitém transportním protokolu a jeho hlavička dál a dál. Firewall musí projít řetězec hlaviček až úplně na konec, aby se k této in-

Zpráva	*Typ/Kód*	*Tranzitní*	*Koncová*
Destination Unreachable	1	propustit!	propustit!
Packet Too Big	2	propustit!	propustit!
Time Exceeded	3/0	propustit!	propustit!
	3/1	propustit	propustit
Parameter Problem	4/0	propustit	propustit
	4/1	propustit!	propustit!
	4/2	propustit!	propustit!
nepřiřazené chybové zprávy	5–99	rozhodnout	rozhodnout
experimentální	100–101	zahodit	zahodit
nepřiřazené chybové zprávy	102–126	rozhodnout	rozhodnout
rozšiřující	127	zahodit	zahodit
Echo Request	128	propustit!	propustit!
Echo Response	129	propustit!	propustit!
Listener Query	130	netřeba	propustit!
Listener Report	131	netřeba	propustit!
Listener Done	132	netřeba	propustit!
Router Solicitation	133	netřeba	propustit!
Router Advertisement	134	netřeba	propustit!
Neighbor Solicitation	135	netřeba	propustit!
Neighbor Advertisement	136	netřeba	propustit!
Redirect	137	netřeba	rozhodnout
Router Renumbering	138	zahodit	netřeba
Node Information Query	139	zahodit	rozhodnout
Node Information Response	140	zahodit	rozhodnout
Inverse Neighbor Discovery Solicitation	141	netřeba	propustit!
Inverse Neighbor Discovery Advertisemen	142	netřeba	propustit!

Tabulka 13.1: Filtrovací pravidla pro ICMPv6

Zpráva	*Typ/Kód*	*Tranzitní*	*Koncová*
Listener Report v2	143	netřeba	propustit!
Home Agent Address Discovery Reques	144	propustit	netřeba
Home Agent Address Discovery Reply	145	propustit	netřeba
Mobile Prefix Solicitation	146	propustit	netřeba
Mobile Prefix Advertisement	147	propustit	netřeba
Certificate Path Solicitation	148	netřeba	propustit!
Certificate Path Advertisement	149	netřeba	propustit!
Seamoby Experimental	150	rozhodnout	netřeba
Multicast Router Advertisement	151	netřeba	propustit!
Multicast Router Solicitation	152	netřeba	propustit!
Multicast Router Termination	153	netřeba	propustit!
nepřiřazené informační zprávy	154–199	rozhodnout	zahodit
experimentální	200–201	zahodit	zahodit
nepřiřazené informační zprávy	202–254	rozhodnout	zahodit
rozšiřující	255	zahodit	zahodit

Tabulka 13.1 (pokračování): Filtrovací pravidla pro ICMPv6

formaci dostal. Teoreticky mohla u fragmentovaného datagramu vypadnout z prvního fragmentu a být zcela nedostupná. Takové datagramy se skutečně objevily a v reakci na ně RFC 7112 nařídilo, že se celý řetězec hlaviček musí vejít do prvního fragmentu.

Ještě horší je hlavička ESP, která celý zbytek datagramu zašifruje. V tom případě o něm firewall neví vůbec nic, pokud zrovna není místem, kde končí příslušná bezpečnostní asociace a dochází k dešifrování. Nedozví se ani protokol transportní vrstvy, natož jeho porty či další informace. V podobné, i když méně extrémní situaci se ocitne, pokud bude datagram obsahovat neznámou rozšiřující hlavičku. Firewall pak bude muset volit mezi dvěma zly – paket zahodit (a možná zařízet nové služby) nebo propustit (a riskovat ohrožení chráněné části sítě). Rozhodnutí, zda se přiklonit ke konzervativní či adrenalinové variantě, spočine na jeho správci.

Posílení přímé komunikace mezi koncovými stroji (a jejího případného šifrování) si zřejmě vynutí posun v celkovém pojetí bezpečnosti. Dnes není výjimkou spoléhání na společné firewally mezi

koncovou sítí a Internetem, které chrání celou lokální síť. Tento přístup bývá označován „tvrdá slupka, měkké jádro“ a jeho problémem je, že pokud se podaří prorazit tvrdou slupku, další ochrany uvnitř sítě bývají slabé. Pro IPv6 bude zřejmě nutné posílit ochranu na koncových strojích, více ji decentralizovat.

Šifrování bude také házet klacky pod nohy všem stávajícím bezpečnostním nástrojům, jež vycházejí z analýzy obsahu datagramů. Již v současnosti ale vznikají jiné, které zkoumají datový provoz „zvenčí“. Sledují, kdo s kým a jak často komunikuje a vyhledávají v přehledu datagramových přenosů známé vzorce nebezpečných aktivit. Tento přístup je samozřejmě univerzální a bude nepochybně do budoucna dále rozvíjen.

Nelze přehlížet, že některé problémy přináší sám nový protokol. Možnost zneužití rozšiřujících hlaviček či podpůrných mechanismů je reálná a některé části knihy se jí zabývaly. Zevrubnou analýzu rizik souvisejících s IPv6 najdete v RFC 4942: *IPv6 Transition/Coexistence Security Considerations*.

Předchozí odstavce této sekce byly psány s okem upřeným na sítě netriviální velikosti obhospodařované profesionálními správci. Velmi odlišné jsou z pohledu bezpečnosti domácí sítě či malé firmy spravované laickými uživateli. Typicky jsou provozovány v režimu „koupili jsme si krabici, zapojili ji a dokud vše funguje, je to dobré“. U zařízení určených pro tento segment trhu je proto velmi důležité tovární nastavení, protože často představuje nastavení celoživotní.

IETF proto ve svých textech formulovalo doporučení výrobcům, jak by se všemocné domácí připojovací krabičky měly chovat a jak by měly být zabezpečeny. RFC 7084: *Basic Requirements for IPv6 Customer Edge Routers* shrnuje obecné požadavky na jejich schopnosti a chování. Speciálně bezpečnosti je věnováno RFC 6092: *Recommended Simple Security Capabilities in Customer Premises Equipment (CPE) for Providing Residential IPv6 Internet Service*. Jejich požadavky by se daly stručně shrnout do věty „udělejte to co nejpodobnější současnému stavu v IPv4“. Tedy automatická konfigurace zařízení i koncové sítě, již připojuje. Pro zabezpečení RFC 6092 požaduje stavový firewall, který umožní navázat spojení jen směrem ze sítě do Internetu a připomíná tak asymetrické chování současných domácích prvků, u nich ovšem způsobené NATem.

13.9 IPv6 v páteřní síti

Páteřní sítě poskytovatelů Internetu jsou dlouhodobě v nasazování IPv6 napřed. Příčin je několik – jednak chtějí být připraveni, jednak se nasazení v páteřní síti snazší než plošné rozvedení všem zákazníkům, jednak to patří k dobrému jménu. V každém případě je dnes již velmi záhodno IPv6 páteřní sítí přepravovat.

Možností pro implementaci v tomto případě není mnoho. Automatické tunelování nepřipadá v úvahu, je třeba volit mezi konfigurovanými tunely a nějakým typem nativní podpory. První varianta se ovšem zpravidla používá jen jako provizorní řešení, tunely komplikují správu sítě a přinášejí pestrou paletu různých problémů. Pro rutinní nasazení je výrazně vhodnější sáhnout po nativním řešení. Nepříjemným důsledkem může být nutnost povýšit páteřní zařízení či alespoň jejich software.

Rozumným kompromisem pro sítě založené na MPLS může být technologie, kterou vyvinula firma Cisco Systems pod názvem 6PE. Základním principem MPLS je, že datagram se při vstupu do jádra sítě opatří značkou (MPLS label) a následně je přepravován podle této značky předem připravenými trasami, nejedná se o klasické směrování. Zúčastněné směrovače se dělí do dvou kategorií: Provider Edge (PE) jsou na okrajích sítě, jejich prostřednictvím datagramy vstupují do MPLS jádra a zase je opouštějí. Vyměňují si vzájemně informace o dostupných sítích, podle nich značkují datagramy a rozhodují tak o jejich přepravě. Směrovače kategorie Provider (P) se nacházejí uvnitř MPLS sítě. Ve skutečnosti nesměrují, jen předávají pakety sem a tam podle značek. Jednoduše a strašně rychle.

6PE přichází s myšlenkou, že přidání IPv6 do tohoto schématu nemusí znamenat zásadní změny. Jádro sítě (P směrovače) zůstane netknuto, bude nadále předávat datagramy podle značek, aniž by se staralo o jejich obsah. Přizpůsobit se musí jen hraniční PE směrovače, které se kromě IPv4 budou informovat také o dostupnosti IPv6 sítí. Jelikož znají situaci obou protokolů, využívají značky a trasy vytvořené pro IPv4 k přepravě IPv6. Jednoduše opatří datagramy takovou značkou, aby byly MPLS jádrem doručeny příslušnému PE směrovači.

Nové směrovače/software pak stačí pořídit jen na hranice páteřní sítě, a to ještě ne na všechny. Jestliže je IPv6 potřeba jen ve třech uzlech, jinde může zůstat vše v původním stavu. Pouze inkriminované tři hraniční směrovače se naučí IPv6 a budou se vzájemně informovat, v ostatních částech sítě bude k dispozici jen starý protokol. Investice lze díky tomu rozložit v čase podle potřeby. V místech podporujících nový protokol je přitom jeho podpora plnohodnotná, plně srovnatelná (i výkonnostně) s IPv4. Tímto způsobem je od roku 2004 implementováno IPv6 v páteřní síti CESNET2 k naprosté spokojenosti všech zúčastněných.

Specifikaci 6PE najdete v RFC 4798: *Connecting IPv6 Islands over IPv4 MPLS Using IPv6 Provider Edge Routers (6PE)*. Je dnes implementována v řadě hardwarových směrovačů (Cisco Systems, Juniper Networks a další).

Páteřní síť zpravidla potřebuje obcovat se svým okolím, obvykle externím protokolem BGP. I zde platí, co jsem napsal v části o bezpečnosti. Radost ze zprovoznění IPv6 občas přezáří skutečnosti, že směrovače do celého světa oznamují nesmysly. Výměna směrovacích informací v IPv4 bývá omezena řadou filtrů a politik, na něž se pro IPv6 občas zapomíná.

Gert Döring pravidelně sleduje dění v globálních směrovacích tabulkách a tepe ve svých prezentacích nejvýznamnější prohřešky. Základní jednoduchá doporučení pro filtrování směrovacích informací najdete na jeho stránce:

https://www.space.net/~gert/RIPE/ipv6-filters.html

Projekt Cymru pak udržuje seznam nesmyslných prefixů, které byste měli v BGP filtrovat, protože v globálním Internet nemají co dělat. Seznam je udržován pro oba protokoly, IPv6 najdete v sekci nazvané „fullbogons“:

https://www.team-cymru.com/bogon-reference.html

13.10 Síť bez IPv6

Je dobré mít na paměti, že IPv6 má tendenci pronikat i do částí sítě, které protokol oficiálně nepodporují a nepřenášejí. Současné operační systémy mají IPv6 implementováno a implicitně zapnuto. Přinejmenším lokální linkové adresy si předělí samy pomocí bezstavové autokonfigurace a díky nim mohou mezi sebou v lokální síti komunikovat. Navíc se mohou snažit pomocí různých tunelovacích mechanismů připojit k IPv6 Internetu.

To může mít negativní bezpečnostní dopady. Pokud správce sítě existenci IPv6 ignoruje, může být nepříjemně překvapen.

Asi nejpalčivější je toto chování v podnikových sítích, což se odráží v RFC 7123: *Security Implications of IPv6 on IPv4 Networks*. Jsou zde stručně popsána bezpečnostní rizika, která s sebou přináší zavírání očí před existencí IPv6. Pro ty případy, kdy je cílem skutečně provozovat síť čistě protokolem IPv4, doporučuje, jak IPv6 blokovat.

Většinu práce zastane blokování paketů typu 0x86dd pomocí prvků druhé vrstvy (ethernetová či Wi-Fi infrastruktura), které zablokuje nativní přenos IPv6, v kombinaci s blokováním IPv4 paketů obsahujících protokol 41, které se postará o tunelovací mechanismy. Nicméně některé mechanismy i takto restriktivními filtry projdou a budou vyžadovat další filtry.

Upřímně řečeno, nejkoncepčnější je IPv6 do sítě vpustit a příslušným způsobem konfigurovat její prvky. S rostoucím podílem IPv6 na celkovém provozu stejně jiná cesta nezbývá.

13.11 Síť bez IPv4

A když už jsem se věnoval zpátečnické variantě, podívejme se i na síť vizionářskou, která IPv4 vůbec nepodporuje a přenáší jen IPv6. Zatím se s takovými sítěmi setkáte jen ojediněle, například

na konferencích, kde umožňují účastníkům vyzkoušet si, jak se taková síť chová a zda v ní dokážou rozumně existovat. Některé velké firmy už ale začaly vymýtat IPv4 z částí svých sítí, nebo alespoň ohlásily záměr to v dohledné době udělat.

V takto koncipované síti se s IPv4 vůbec nepracuje. Nejsou alokovány adresy ani přidělovány síťové parametry pomocí DHCPv4, není konfigurováno směrování, koncové aplikace používají IPv6. Zkrátka jako by IPv4 vůbec neexistovalo.

Hlavní komplikací života v takto koncipované síti jsou služby poskytované výlučně starým protokolem – DNS v některých doménách, weby, pošta, … Na řešení přístupu k nim existují dva základní recepty: překlad protokolů pomocí NAT64 a DNS64 nebo zachování IPv4 na koncových strojích a jeho doručování IPv6 sítí, nejspíš pomocí 464XLAT.

Pokud si chcete takové uspořádání jen lehce vyzkoušet, dá se to zařídit skoro bezpracně. Slovinský *Go6Lab* totiž provozuje skupinu implementací NAT64 a DNS64 k veřejnému testování. Informace najdete na stránce:

https://go6lab.si/current-ipv6-tests/nat64dns64-public-test/

V podstatě stačí vypnout ve své síti IPv4 a nasměrovat DNS na jednu z adres uvedených na této stránce. Příslušný server pak pro vás bude provádět DNS64 s IPv6 prefixem vedoucím na přidružený NAT64. Volbou DNS serveru si můžete vybrat mezi různými implementacemi. Směrování bude mít k ideálu daleko, pakety pro překlad do IPv4 budou cestovat na Slovinsko, na vyzkoušení to ale rozhodně stačí.

Chcete-li čistou IPv6 síť provozovat dlouhodobě, je záhodno zajistit si služby NAT64 a DNS64 svépomocí. Toto řešení sice má své chyby, ale běžné služby (například ty výše zmiňované) vyřeší. Popis, jak to funguje, najdete v části 12.11 na straně 308. Z praktického hlediska je třeba provést následující kroky:

1. Vyhradit prefix pro překlad adres. Můžete použít standardní 64:ff9b::/96, nebo přidělit pro tento účel některý z vlastních prefixů.
2. Konfigurovat NAT64 s tímto prefixem.
3. Nastavit směrování tohoto prefixu na adresu stroje implementujícího NAT64. Pokud je NAT64 implementován na přístupovém směrovači, přes který vede implicitní cesta ven z místní sítě, je tento krok zbytečný.
4. Konfigurovat DNS64 s vyhrazeným prefixem.
5. Nastavit zdejším strojům jako lokální rekurzivní server adresu stroje s DNS64. Tento krok odpadá, jestliže je DNS64 implementováno rekurzivním serverem, který již místní stroje používají. V opačném případě je třeba, aby se koncové stroje obracely na DNS64 a ten se následně může se svými dotazy obracet na původní rekurzivní DNS server.

Pokud použijete standardní prefix, můžete krok 4 vynechat a využít některou z volně dostupných služeb, které poskytují DNS64. Například:

https://developers.google.com/speed/public-dns/docs/dns64
https://developers.cloudflare.com/1.1.1.1/support-nat64/

Pamatujte, že stroje s NAT64 a DNS64 potřebují (jako jediné) přístup k IPv4 Internetu. Může být samozřejmě tunelovaný, pokud ani infrastruktura vašeho poskytovatele nepodporuje IPv4. To už jsme ale v nepříliš blízké budoucnosti.

Praktické zkušenosti ukazují, že běžné síťové služby v čistých IPv6 sítích fungují docela dobře. U těch méně obvyklých ale člověk často narazí. Dva nejčastější zdroje problémů jsou:

- Aplikace, které hovoří pouze IPv4. Tady pomůže jen čas, až si jejich autoři všimnou, že máme 21. století, a podporu IPv6 doplní.
- Zatahování údajů z IPv4 (nejčastěji adres) do aplikační vrstvy. Tohle je celkem oříšek, protože nestačí opravit jednu aplikaci. Měl by se změnit protokol, což ovšem znamená nekompatibilitu s předchozí verzí. V některých případech lze tento problém řešit vhodným algoritmem v NAT64, který kromě úpravy hlaviček IP zasahuje i do obsahu zpráv aplikačního protokolu. Vzhledem k tendenci všeobecného šifrování ovšem budou možnosti překladačů vždy jen velmi omezené, protože aplikační protokol bude čím dál častěji zašifrován.

Mezi standardními internetovými protokoly naštěstí není obliba údajů z IPv4 ve vyšších vrstvách příliš častá. Známým hříšníkem je FTP, pro které překladový algoritmus existuje. Problém ale mohou představovat různé firemní neveřejné protokoly, ve kterých se občas dějí divoké věci.

Alternativní řešení, kdy na koncových strojích zachováte IPv4 a doručujete jim je například pomocí 464XLAT, není tak čisté. Navíc selský rozum napovídá, že s dvojitým překladem (IPv4 se převede na IPv6, přepraví IPv6 sítí a převede zpět na IPv4) bude více trablů než s jednoduchým.

V praxi ovšem 464XLAT vykazuje překvapivě dobré výsledky. Navíc díky tomu, že je nasazen v opravdu velkých sítích, může čerpat z rozsáhlých provozních zkušeností a dále se rozvíjet. Nemusíte si dělat těžkou hlavu s podporou IPv6 v aplikacích – i ty staré budou fungovat. IPv4 adresy datagramů se sice změní, ovšem na to jsou současné protokoly zvyklé z IPv4 Internetu zamořeného NATy na každém rohu.

Mechanismus 464XLAT jsem popsal v části 12.12 na straně 311. Jeho nevýhodou je náročnější uvedení do provozu, protože nestačí nastavit centrální prvek (PLAT), ale i koncové stanice (CLAT). Konfigurace samozřejmě závisí na použité platformě, dobrým výchozím bodem může být návod *464XLAT – A Solution for Providing IPv4 Services Over and IPv6-only Network* dostupný na adrese:

https://sites.google.com/site/tmoipv6/464xlat

14 BSD

Možná vás překvapí, že procházku po existujících implementacích IPv6 začínám systémem, o kterém se až tak často nepíše a nemluví. Důvod je prostý: operační systémy řady BSD sehrály v historii IPv6 velmi významnou roli. Kvalita jejich implementace nového protokolu dlouhá léta převyšovala všechny ostatní minimálně o hlavu a stále patří k naprosté špičce, i když se konkurenti hodně zlepšili. Nepřekvapí, že BSD brzy získalo certifikát *IPv6 Ready* fáze 2.

V raných dobách existovaly hned tři alternativní implementace IPv6 pro tento systém. Poměrně záhy se mezi nimi prosadil japonský projekt *KAME*, jehož kód dnes najdete jako standardní součást jádra. Setkáte se s ním ve FreeBSD od verze 4.0, OpenBSD 2.7 či NetBSD 1.5. Projekt *KAME* skončil v roce 2006 a zanechal po sobě výraznou stopu.

V této kapitole budu vycházet především z NetBSD. Nejsem odborníkem na svět BSD, takže netuším, jak moc či málo se od sebe liší konfigurační mechanismy a soubory jednotlivých variant. Základní příkazy by pochopitelně měly být totožné. Pěkný popis zprovoznění IPv6 v NetBSD najdete ve FAQ na adrese:

http://www.netbsd.org/docs/network/ipv6/

14.1 IPv6 v jádře

Je celkem pravděpodobné, že váš systém podporuje IPv6 hned po instalaci. Nejsnadněji to ověříte, když si příkazem:

```
ifconfig -a
```

necháte vypsat parametry jednotlivých rozhraní. Pokud vaše jádro podporuje IPv6, objeví se ve výpisu IPv6 adresy (přinejmenším u smyčky, rozhraní `lo0`). Chybí-li, musíte přeložit nové jádro. Jak na to se dočtete v dokumentaci svého systému. Obecně řečeno je třeba opatřit si zdrojové texty jádra, upravit konfiguraci jeho vlastností, přeložit a nainstalovat.

Klíčová volba nese jméno `INET6`. Vedle ní by vás mohly zajímat i volby `IPSEC` a `IPSEC_ESP`, které zapínají podporu IPsec. Chcete-li mít IPv6 s plnou parádou, měl by konfigurační soubor vašeho jádra obsahovat:

```
options   INET6
options   IPSEC
options   IPSEC_ESP
```

14.2 Konfigurace rozhraní

BSD samozřejmě podporuje automatickou konfiguraci. Přinejmenším NetBSD ji však neprovádí samo od sebe. Má-li váš stroj být samohybně konfigurovanou stanicí, musíte sáhnout do konfiguračního souboru */etc/rc.conf* a přidat do něj:

```
ip6mode="autohost"
rtsol="YES" rtsol_flags="rozhraní"
```

Uveďte identifikátor *rozhraní*, na němž má automatická konfigurace probíhat. Může jich být i více, oddělujte jejich jména mezerami. Dopadne-li vše dobře, měl by příkaz *ifconfig* zobrazit odpovídající adresy, například:

```
fxp0: flags=8843<UP,BROADCAST,RUNNING,SIMPLEX,MULTICAST> mtu 1500
        address: 00:c0:9f:04:84L8f
        media: Ethernet autoselect (100baseTX full-duplex)
        status: active
        inet 147.230.16.88 netmask 0xffffff00 broadcast 147.230.16.255
        inet6 fe80::2c0:9fff:fe04:848f%fxp0 prefixlen 64 scopeid 0x1
        inet6 2001:db8:1:1:2c0:9fff:fe04:848f prefixlen 64
```

Také směrovací tabulka (viz níže) bude obsahovat implicitní směrovače, které se váš stroj naučil.

Pokud má počítač sloužit jako směrovač, musíte rozhraní konfigurovat ručně. Navíc je třeba, aby sám posílal ohlášení směrovače a ostatní se mohli automaticky konfigurovat podle jeho informací. Do */etc/rc.conf* je proto třeba zapsat:

```
ip6mode="router"
rtsol="NO"
rtadvd="YES" rtadvd_flags="rozhraní"
```

Volby `rtsol` a `rtadvd` zde způsobí, že nebude posílat výzvy směrovači a naopak bude posílat ohlášení směrovače do všech *rozhraní*, která uvedete.

O nastavení adresy rozhraní se postará:

```
ifconfig rozhraní inet6 adresa prefixlen délka
```

Například poslední z adres obsažených v předchozím výpisu by nastavil příkaz:

```
ifconfig fxp0 inet6 2001:db8:1:1:2c0:9fff:fe04:848f prefixlen 64
```

Parametrem `anycast` můžete adresu prohlásit za výběrovou. Konfiguraci rozhraní při startu systému zajistíte úpravou souboru */etc/ifconfig.rozhraní*, do nějž opíšete parametry, avšak bez úvodního *ifconfig*.

Tunel se v BSD chová jako další síťové rozhraní s názvem `gif`*`číslo`*. V některých verzích je musíte nejprve vytvořit příkazem:

```
ifconfig gif číslo create
```

Poté je, opět prostřednictvím *ifconfig*, prohlásíte za tunel:

```
ifconfig gif0 tunnel zdejší_IPv4 protější_IPv4
```

V některých verzích obě funkce zajišťuje příkaz *gifconfig*. Jakmile je tunel založen, zacházíte s ním jako s kterýmkoli jiným rozhraním. Například chcete-li vytvořit tunel ke směrovači s IPv4 adresou 1.2.3.4 a přidělit jeho zdejšímu konci IPv6 adresu 2001:db8:1:ff::1, postupujte následovně:

```
ifconfig gif0 tunnel 147.230.16.88 1.2.3.4
ifconfig gif0 inet6 2001:db8:1:ff::1 prefixlen 64
```

14.3 Konfigurace směrování

Jestliže je váš počítač v roli automaticky konfigurované koncové stanice, nemusíte se o směrování vůbec starat, nastaví se samo. Jen tak ze zvědavosti si můžete prohlédnout směrovací tabulku příkazem:

```
route show
```

Výstup má zahuštěnou podobu a bohužel neobsahuje délku prefixu. Chcete-li rozmáchlejší formát s kompletními informacemi, sáhněte po příkazu:

```
netstat -rn
```

Hodláte-li tabulku ručně upravovat, poslouží vám obvyklý příkaz *route*, konkrétně v podobě:

```
route add -inet6 cíl kudy%rozhraní
```

Vzhledem k tomu, že nejbližší směrovač po cestě (*kudy*) se zadává lokální linkovou adresou, je třeba určit odpovídající rozhraní. Například pokud má vést implicitní cesta rozhraním `fxp0` na směrovač s adresou fe80::201:96ff:fe94:4ee0 vypadá příkaz takto:

```
route add -inet6 default fe80::201:96ff:fe94:4ee0%fxp0
```

O odstranění položky ze směrovací tabulky se postará tentýž příkaz, pokud `add` zaměníte za `delete`.

Dáváte-li přednost dynamickému směrování, můžete nasadit například BIRD (viz část 18.1 na straně 389) nebo jednoduchý *route6d*.

Konfigurace DNS vychází standardně ze souboru */etc/resolv.conf*. Stačí v něm jako *nameserver* uvést IPv6 adresu, například:

```
nameserver  2001:db8:1:16::aa
```

Jestli IPv6 komunikace funguje si můžete ověřit pomocí programů *ping6* a *traceroute6*. Jedná se o přímé analogie známých programů pro IPv4, upravené pro nový protokol a rozšířené o některé speciality. Pro testování DNS poslouží obvyklý *dig*. Chcete-li mu explicitně nařídit dotaz u některého IPv6 serveru, zadejte mu parametr ve tvaru *@adresa*:

```
dig @2001:db8:1:16::aa www.tul.cz
```

14.4 Přechodové mechanismy

Konfigurovaným tunelům jsem se věnoval již v části o rozhraních a směrování. Zde se podívám na automatické tunelování a možnosti pro překlad datagramů.

Z NetBSD lze vytvořit *6rd směrovač* pro koncovou síť pomocí programu *u6rd*. Je k dispozici ve formě standardního balíčku, případně je můžete překládat ručně. Zdrojové kódy najdete na adrese:

https://github.com/kamadak/u6rd

Řekněme, že platí údaje z obrázku 12.9 na straně 292 – poskytovatel vyhradil pro 6rd prefix 2001:db8::/32, veřejná adresa 6rd směrovače je 147.230.7.23, z toho plyne, že 6rd prefix vaší sítě je 2001:db8:93e6:717::/64. Nejprve je třeba vytvořit rozhraní pro tunelování a neposílat do něj ohlášení směrovače:

```
ifconfig tun0 create
ifconfig tun0 inet6 2001:db8:93e6:717::1/32
ndp -i tun0 -- -nud
```

Následně přijde ke slovu vlastní *u6rd*. Očekává čtyři parametry: název rozhraní pro tunelování, 6rd prefix, IPv4 adresu brány pro komunikaci s IPv6 (v našem příkladu 147.230.7.1) a svou vlastní IPv4 adresu. Ve volbě `-u` můžete přidat jméno uživatele, jehož přístupová práva má obdržet:

```
u6rd -u 6rdaemon tun0 2001:db8::/32 147.230.7.1 147.230.7.23
```

Víc by obvykle nemělo být potřeba. Podrobnosti se dočtete v manuálové stránce.

Problematice přechodových mechanismů se dlouhodobě věnuje kanadská firma Viagénie a z její dílny pochází implementace *NAT64* nazvaná *Ecdysis*:

http://ecdysis.viagenie.ca/

Je to NAT64 se vším všudy, doplněný DNS64 v několika podobách – jako samostatný program v Perlu nebo jako modifikace serverů BIND (který ale od verze 9.8 DNS64 umí i bez úprav) či Unbound. NAT64 je realizován úpravou jádra a paketového filtru. Instalujete-li z binární distribuce, stačí spustit přiložený *install.sh*, který přepíše příslušné systémové soubory. Při instalaci ze zdrojových kódů se pomocí *pf_nat64.patch* upraví jejich zdrojové soubory, následuje překlad.

Konfigurace je součástí paketového filtru, do souboru */etc/pf.conf* je třeba přidat řádek, který zařídí mapování mezi NAT64 prefixem (standardně 64:ff9b::/96) a vlastní adresou NATujícího stroje, řekněme 10.1.2.3:

```
nat64 from any to 64:ff9b::/96 -> 10.1.2.3
```

Pro zásahy do DNS můžete použít buď některý z programů nabízených společně s *Ecdysis*, nebo specializovaný *totd*, jehož popis najdete níže.

Pro *překlad mezi IPv4 a IPv6* je k dispozici i *TRT konvertor*. Je realizován pseudorozhraním `faith` a démonem *faithd*. Rozhraní je třeba povolit v konfiguraci jádra:

```
pseudo-device  faith  1
```

Jelikož je tento mechanismus poměrně nebezpečný, je jeho aktivace komplikovaná. Nejprve musíte TRT povolit jako takové příkazem *sysctl*. Následuje spuštění pseudorozhraní a zásah do směrovacích tabulek, který všechny datagramy mířící na prefix přidělený TRT předá do rozhraní `faith0`.

Závěrečným krokem je spuštění démona *faithd*. Je třeba jej spustit pro každou ze služeb, které má překládat. Pokud se má starat jen o překlad, stačí spustit:

```
faithd služba
```

Jestliže ale démon pro tutéž službu běží i na zdejším počítači, je třeba přidat na příkazový řádek cestu ke zdejšímu démonovi a podobu jeho „příkazového řádku“. *faithd* pak částečně nahrazuje *inetd*: Pokud paket míří na zdejší počítač, spustí démona. V opačném případě jej předá tunelovacímu rozhraní k doručení.

Kdybych se rozhodl přidělit TRT prefix 2001:db8:1:eeee::/64 a zapnout překlad pro protokol FTP (které ale má běžet i na tomto počítači), použil bych následující sekvenci příkazů:

```
sysctl -w net.inet6.ip6.keepfaith=1
ifconfig faith0 up
route add -inet6 2001:db8:1:eeee:: -prefixlen 64 ::1 -ifp faith0
faithd ftp /usr/libexec/ftpd ftpd -l
```

Aby počítače z místní IPv6 sítě mohly rozumně spolupracovat se světem IPv4, je třeba *upravovat DNS* a převádět jejich AAAA dotazy na typ A a v odpovědích příslušně upravovat adresy (viz strana 306). K tomu lze buď přemluvit novější verze DNS serveru BIND (viz kapitola 20 na straně 415), nebo použít specializovaný program. Jednoduchým příkladem takového programu je *Trick-or-treat daemon* aneb *totd*. Implementuje jednosměrnou změnu DNS – z místní sítě do IPv4 Internetu.

Nejedná se o plnohodnotný DNS server, proto ke své činnosti potřebuje adresu nejlépe místního serveru, jemuž bude předávat dotazy. Kromě toho je třeba vyčlenit mu jeden prefix, na nějž budou převáděny IPv4 adresy. Směrování pak musí zajistit, že datagramy směřující do této sítě budou posílány na stroj s TRT[1]. Konfigurační soubor *totd.conf* si vystačí s touto dvojicí informací:

```
forwarder 2001:db8:1:1::aa
prefix 2001:db8:1:eeee::
```

Klienti jsou konfigurováni tak, aby své dotazy předávali stroji s *totd*. Když je osloven, předá *totd* dotaz serveru uvedenému jako `forwarder`. Pokud ale nedostane odpověď na dotaz typu AAAA, dotáže se na existenci záznamu typu A pro stejné jméno. Odpověď pak změní na AAAA a IPv4 adresu v ní uvedenou připojí za `prefix`, takže například odpověď:

```
A  147.230.16.1
```

předá klientovi ve tvaru:

```
AAAA  2001:db8:1:eeee::147.230.16.1.
```

1: TRT a *totd* mohou, ale nemusí nutně běžet na stejném stroji.

— 14 BSD

Domácí stránka programu má adresu:

https://github.com/fwdillema/totd

15 Linux

Linux svým způsobem orámoval vývoj implementací IPv6. Nejprve v roce 1996 přišel jako první s experimentální podporou nového protokolu v jádře verze 2.1.8. A jako poslední přestal svou implementaci prohlašovat za experimentální. Stalo se tak až v polovině roku 2005 u jádra 2.6.12. Po počátečním nadšení totiž následovalo několik let stagnace, kdy se IPv6 kód v jádře nevyvíjel a začal zaostávat za specifikacemi.

V roce 2000 proto v Japonsku vznikl projekt *USAGI*, jehož cílem bylo vyvinout novou, kvalitní implementaci IPv6 pro Linux. Po několika letech dvoukolejnosti, kdy standardní jádro zůstávalo při starém a v rámci USAGI pro ně vznikaly opravy a alternativní verze, se podařilo USAGI kód začlenit do základního jádra.

V současnosti se tedy jádro Linuxu může pochlubit implementací IPv6, která snese srovnání s těmi nejkvalitnějšími. Dokládají to i certifikáty *IPv6 Ready* fáze 2 pro koncový stroj i směrovač, které získal jak v základní kategorii, tak v rozšiřující pro IPsec.

15.1 Distribuce

Pokud jste pohodlní, mám pro vás dobrou zprávu. Váš systém nejspíš podporuje IPv6 rovnou po instalaci. Drtivá většina současných distribucí má ve výchozím nastavení IPv6 zapnuto a pokud jste je aktivně nevypnuli, máte je tam společně se základními nástroji pro práci s ním.

O jednoduchou kontrolu se postará příkaz *ifconfig* – pokud systém podporuje nový protokol, objeví se v jeho výstupu IPv6 adresy jednotlivých rozhraní. O podpoře IPv6 se dokonce můžete přesvědčit i bez síťového připojení, protože lokální smyčka je vždy k mání. Pokud tedy ve výstupu *ifconfig* vidíte zhruba toto

```
lo        Link encap:Místní smyčka
          inet adr:127.0.0.1 Maska:255.0.0.0
          inet6-adr: ::1/128 Rozsah:Počítač
```

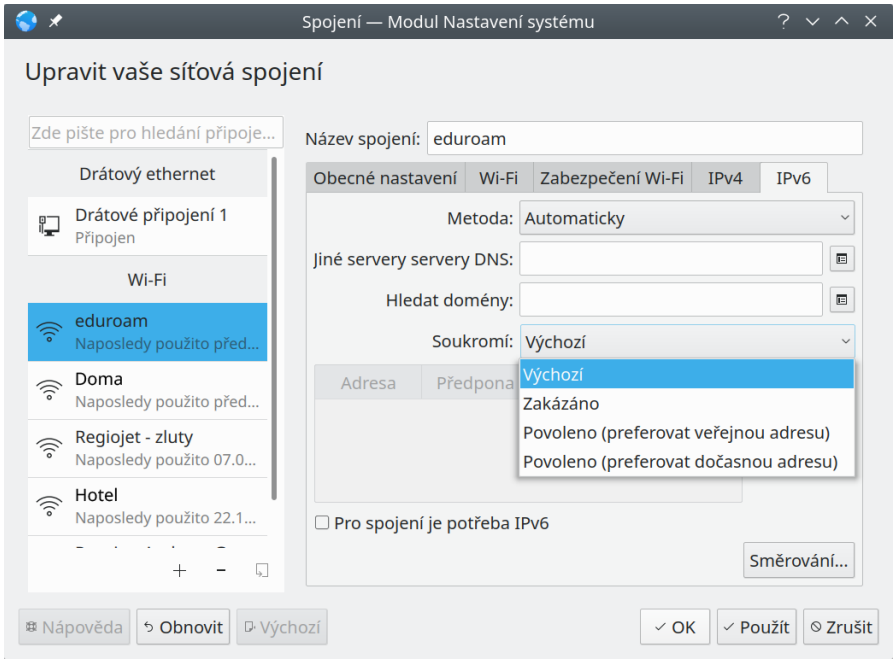
váš stroj je IPv6 potentní. Jestliže výpis neobsahuje IPv6 adresu (*inet6*), možná stačí jen vložit modul. Vyzkoušejte

```
modprobe ipv6
```

Skončíte-li s chybovým hlášením, stávající jádro není pro IPv6 připraveno. Budete muset přeložit nové.

Pokud váš systém disponuje grafickým prostředím, lze očekávat, že IPv6 bude v jeho konfiguračních nástrojích podporováno. Aktuální verze GNOME, KDE i dalších populárních prostředí se k IPv6 hlásí a umožní vám nastavit základní parametry. U běžného uživatelského počítače pravděpodobně nebudete víc potřebovat.

Příklad nastavení IPv6 pro síťové rozhraní v prostředí KDE 5 vidíte na obrázku 15.1. Kromě obvyklých parametrů lze nastavit i používání a preferenci náhodných adres zachovávajících soukromí.

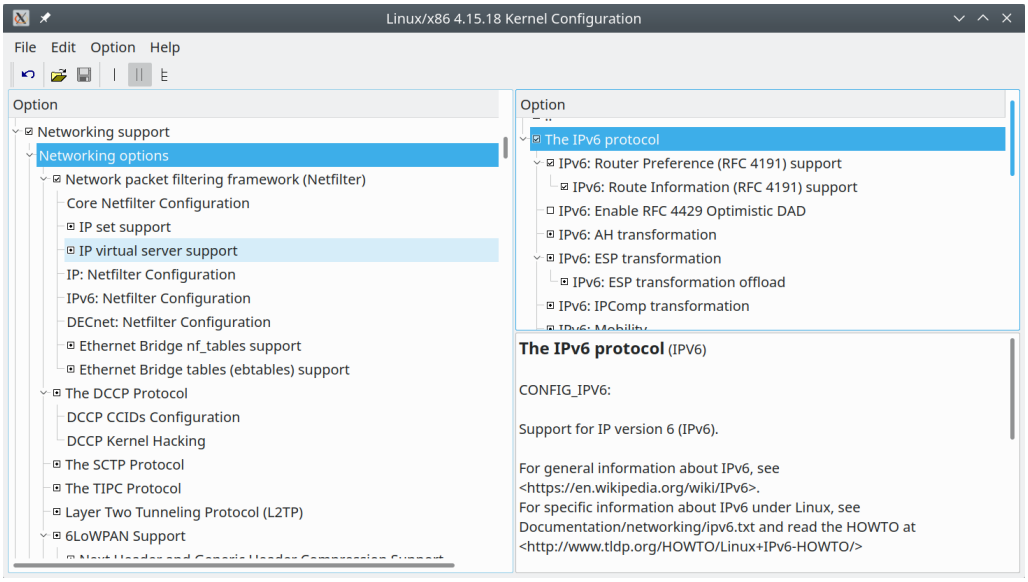


Obrázek 15.1: Konfigurace IPv6 pro síťové rozhraní v KDE 5

Ve zbytku této kapitoly se budu věnovat konfiguraci IPv6 z příkazového řádku, kterou byste mohli potřebovat, jestliže chcete provozovat server nebo obecně máte na daný stroj vyšší nároky.

15.2 Překlad jádra

Pokud si chcete nebo musíte překládat jádro systému sami, neměli byste mít s IPv6 vážnější problémy. Současné verze obsahují kvalitní kód, který je navíc implicitně zapnutý, takže byste k IPv6 měli přijít bez většího úsilí. Na obrázku 15.2 vidíte výchozí nastavení IPv6 a jeho komponent v jádře verze 3.0.4. Vše je zapnuté, stačí přeložit.



Obrázek 15.2: Konfigurace IPv6 v jádře Linuxu verze 4.15.18

Pokud se chcete sami přesvědčit nebo používáte zdrojové kódy jádra upravené pro určitou distribuci (jejichž výchozí nastavení může být odlišné), nahlédněte při konfiguraci do části *Networking support / Networking options / TCP/IP networking / The IPv6 protocol*. Klíčové je zapnutí vlastní položky *The IPv6 protocol*, která pak zpřístupní dílčí parametry. Nemusí být dostupné všechny – to závisí na nastavení ostatních voleb jádra. Po přečtení předchozích kapitol byste s pochopením významu jednotlivých položek neměli mít problémy.

Hodláte-li filtrovat datagramy (a to byste rozhodně měli), zapněte a navštivte ještě sekci *IPv6: Netfilter Configuration*. Najdete ji v sekci *Networking support / Network packet filtering framework (Netfilter)*.

15.3 Konfigurace síťových parametrů

Pro nastavování síťových parametrů lze použít dvě alternativní cesty: tradiční dvojici *ifconfig* & *route* nebo novější a vše obalující *ip*. Osobně dávám přednost prvním dvěma, bohužel však u tunelů otevírají některá bezpečnostní rizika a je doporučeno se jim vyhýbat. Proto se budu držet spíše příkazu *ip*. V HOWTO, jehož adresu uvádím v závěru kapitoly, najdete obě varianty.

Pokud má Linux sloužit jako běžná stanice v IPv6 síti, zpravidla není třeba pro konfiguraci rozhraní dělat vůbec nic. Stačí jen počkat a nechat pracovat automatickou konfiguraci.

Chcete-li IPv6 adresu přidělit ručně, použijte příkaz:

```
ip -6 addr add IPv6_adresa/délka_prefixu dev rozhraní
```

případně:

```
ifconfig rozhraní add IPv6_adresa/délka_prefixu
```

Vezměme si jako příklad adresu 2001:db8:1:1:204:76ff:fe47:c se standardním prefixem podsítě o délce 64 bitů, kterou bych rád přidělil svému počítači. Použiji příkaz:

```
ip -6 addr add 2001:db8:1:1:204:76ff:fe47:c/64 dev eth0
```

Stejně jako u IPv4 se do směrovací tabulky automaticky přidá cesta do (pod)sítě nově přidané adresy. K prohlížení a úpravám směrovací tabulky používejte buď `ip -6 route` nebo `route -6`.

Čili zobrazení aktuální směrovací tabulky obstará příkaz:

```
ip -6 route show
```

případně:

```
route -6
```

A nastavení implicitní cesty na směrovač 2001:db8:1:1::1 zajistí:

```
ip -6 route add default via 2001:db8:1:1::1
```

nebo:

```
route -6 add default gw 2001:db8:1:1::1
```

Směrovat lze samozřejmě i dynamicky. Postará se o to například program *BIRD* nebo *FRRouting* popsaný v kapitole 18 na straně 389.

Má-li rozhraní nebo cíl několik adres, přichází ke slovu algoritmus pro výběr adresy (viz 3.12 na straně 97). Jeho tabulku politik můžete nastavit v souboru */etc/gai.conf* (počínaje *glibc* verze 2.4). Obsahuje samostatné příkazy pro stanovení priorit a značek:

```
precedence prefix/délka priorita
label prefix/délka značka
```

V jeho manuálové stránce najdete příklad, jak se prostřednictvím těchto příkazů zapíše implicitní tabulka politik uvedená na obrázku 3.16 na straně 99. Nebuďte překvapeni, pokud soubor ve vašem systému chybí. Znamená to jen, že se používá implicitní politika.

U serverů správci někdy dávají přednost statické konfiguraci adresy i směrování. Příkazy uvedené výše je pak vhodné doplnit vypnutím automatické konfigurace adres, aby do statického nastavení nezasahovaly automatické mechanismy. K tomu slouží buď konfigurační soubory, jejichž struktura a obsah závisí na konkrétní distribuci, nebo lze zasáhnout přímo do parametrů jádra v souboru */etc/sysctl.conf*. Pro vypnutí automatické konfigurace adres na všech rozhraních do něj přidejte:

```
net.ipv6.conf.all.autoconf=0
```

O úplné potlačení příjmu ohlášení směrovačů, které kromě automatické konfigurace adres vypne i automatickou konfiguraci směrování, se postará:

```
net.ipv6.conf.all.accept_ra=0
```

Omezení lze vztáhnout i na konkrétní rozhraní. Pak ve jménu parametru místo `all` uveďte identifikátor rozhraní, například:

```
net.ipv6.conf.eth0.autoconf=0
```

Pro tunely se v Linuxu zřizuje speciální rozhraní s názvem `sit`*číslo* (podle Simple Interface Transition)[1]. Vytvoříte je příkazem:

```
ip tunnel add sit1 mode sit remote protější_IPv4
```

kde *protější_IPv4* je IPv4 adresa protějšího konce tunelu. Můžete parametrem `local` omezit místní IPv4 adresu (jinak akceptuje jakoukoli), pomocí `dev` určit rozhraní, z nějž vede, a parametrem `ttl` omezit životnost obalujících IPv4 datagramů. Tunelové rozhraní musíte ručně aktivovat:

```
ip link set sit1 up
```

Pak už s ním můžete zacházet jako s kterýmkoli jiným – přidělit mu IPv6 adresu, zařadit do směrování a podobně. Například tunel s lokální adresou 2001:db8:1:1::baac vedoucí ke vzdálenému

1: Při použití příkazu *ip* může být jméno libovolné, ale je rozumné držet se konvencí.

stroji s IPv4 adresou 1.2.3.4, který budeme využívat jsko implicitní směrovač pro IPv6, by vznikl příkazy:

```
ip tunnel add sit2 mode sit remote 1.2.3.4
ip link set sit2 up
ip -6 address add 2001:db8:1:1::baac/64 dev sit2
ip -6 route add default dev sit2
```

Přehled o existujících tunelech vám poskytne:

```
ip tunnel show
```

a pomůže i starý dobrý *ifconfig*, z jehož výstupu je mimo jiné na první pohled patrné, které tunely jste zapomněli aktivovat.

Nastavení DNS nevyžaduje nic speciálního. Jednoduše v */etc/resolv.conf* uvedete v položce *nameserver* IPv6 adresu, například:

```
nameserver  2001:db8:1:16::aa
```

Pro testování, zda vše funguje jak má, slouží příkazy *ping6* a *traceroute6*. Dělají totéž co jejich starší bratříčci bez šestky na konci, jen pro protokol IPv6. V novějších distribucích už *ping* a *traceroute* umí oba protokoly, použití konkrétní verze IP si můžete vynutit volbami `-4` a `-6`.

Program *dig* pro zkoumání DNS by měl fungovat bez cavyků podle obsahu *resolv.conf*. Pokud chcete jeho prostřednictvím explicitně otestovat nějaký IPv6 server, můžete použít parametr *@adresa*, třeba takto:

```
dig @2001:db8:1:16::aa www.tul.cz
```

15.4 Firewall

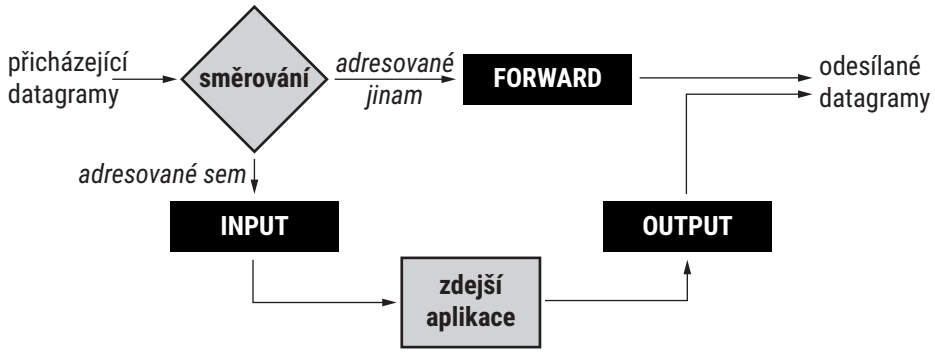
Bezpečnosti není nikdy moc a je záhodno – zejména na serveru – omezovat, co se přenášet může a co nikoli. V Linuxu k tomuto účelu slouží *iptables*. Síťové protokoly jsou v nich odděleny, pravidla pro IPv6 má na starosti příkaz *ip6tables*. Filtrování vyžaduje spolupráci jádra. Zda je k dispozici se snadno přesvědčíte příkazem:

```
modprobe ip6_tables
```

Koncept *iptables* je postaven na řetězcích (chains) pravidel. Datagram je podroben řetězci pravidel, která se na něj uplatňují v daném pořadí. Každé pravidlo má podmínku (na které datagramy se vztahuje) a akci (co se s nimi má udělat). První pravidlo v řetězci, jehož podmínku datagram splní, bude použito a rozhodne o jeho osudu.

Mám zde prostor jen na letmé nahlédnutí, proto se omezím na základní dvě akce: ACCEPT znamená, že paket má být přijat – doručen zdejší aplikaci nebo odeslán do světa. DROP naopak způsobí tiché zahození paketu, aniž by byl odesilatel jakkoli informován.

Řetězců si můžete vytvořit, co hrdlo ráčí. Nejdůležitější jsou ale tři standardní, které zajišťují základní filtrování datagramů. Jejich úlohu znázorňuje obrázek 15.3. Řetězec INPUT se používá na pakety přicházející zvenčí a směřující ke zdejším aplikacím. Z hlediska ochrany daného stroje je nepochybně nejdůležitější. Další dva řetězce slouží pro datagramy odcházející: OUTPUT pro ty, které byly odeslány zdejšími aplikacemi, a FORWARD pro datagramy procházející k jiným cílům.



Obrázek 15.3: Základní řetězce v iptables

Pro práci s řetězci pravidel slouží příkaz *ip6tables*. Typický tvar jeho použití je:

```
ip6tables operace řetězec podmínky akce
```

Operace řídí, co se má s řetězcem stát. Nejčastěji používané operace shrnuje tabulka 15.1. Můžete je zadávat v plném tvaru nebo zkratkou, účinek je stejný. Začněme zobrazením aktuálního stavu. Obsah všech řetězců vypíše:

```
ip6tables -L
```

Standardním řetězcům je třeba kromě pravidel definovat i výchozí politiku. Nastavuje se pomocí `-P` a uplatní se na datagramy, které nevyhověly žádnému z pravidel. Bývá jedním ze dvou příkazů, jimiž se obvykle zahajuje definice řetězce. Tím druhým je vymazání všeho, co aktuálně obsahuje,

operace	*zkratka*	*význam*
`--list`	`-L`	vypsat
`--policy`	`-P`	nastavit základní politiku
`--append`	`-A`	přidat na konec
`--insert`	`-I`	přidat na začátek
`--delete`	`-D`	smazat pravidlo
`--flush`	`-F`	smazat všechna pravidla
`--replac`	`-R`	nahradit pravidlo

Tabulka 15.1: Nejčastější operace ip6tables

abyste začínali s čistým stolem. Přísné nastavení vstupu ve stylu „co není dovoleno, je zakázáno“, by začínalo příkazy:

```
ip6tables -F INPUT
ip6tables -P INPUT DROP
```

Následně můžete přidávat jednotlivá pravidla. Na pořadí záleží, proto lze přidávat na konec (`-A`) nebo na začátek (`-I`). V *podmínkách* pravidel lze používat obvyklé síťové parametry – protokoly, adresy (lze připojit lomítko a zadat tak celý rozsah), čísla portů a podobně. Nejvýznamnější možnosti najdete v tabulce 15.2.

podmínka	*zkratka*	*význam*
`--protocol`	`-p`	protokol vyšší vrstvy
`--source`	`-s`	adresa odesilatele
`--destination`	`-d`	cílová adresa
`--sport`		port odesilatele
`--dport`		cílový port
`--in-interface`	`-i`	vstupní rozhraní
`--out-interfac`	`-o`	odchozí rozhraní

Tabulka 15.2: Podmínky pravidel iptables

Budeme pokračovat v definici restriktivního nastavení pro řetězec INPUT. Poté, co jsme vše zakázali, povolíme web (cílové porty 80 a 443), ICMPv6 a SSH (TCP na port 22) ze správcovské podsítě s prefixem 2001:db8:1:1::/64:

```
ip6tables -A INPUT --dport 80 -j ACCEPT
ip6tables -A INPUT --dport 443 -j ACCEPT
ip6tables -A INPUT -p icmpv6 -j ACCEPT
ip6tables -A INPUT -p tcp --dport 22 -s 2001:db8:1:1::/64 -j ACCEPT
```

Pamatujte, že veškeré změny prováděné příkazem *ip6tables* ovlivňují aktuální obsah řetězců, ale nemají trvalý účinek. Po restartu zaniknou. Má-li se jednat o trvalé nastavení, je třeba příkazy vložit do vhodného skriptu prováděného automaticky při startu systému. Při volbě pravidel můžete vyjít třeba ze základní serverové šablony Jakuba Jirutky:

https://gist.github.com/jirutka/3742890

15.5 Přechodové mechanismy

Pokud má Linux sloužit jako *6rd směrovač* a zprostředkovat IPv6 připojení pro místní síť, dá se to zařídit celkem snadno. Konfigurace se příliš neliší od běžného tunelu, je ovšem třeba nastavit některé specifické údaje. Tunel například nemá pevný vzdálený konec – ten se odvozuje automaticky z cílové IPv6 adresy, pokud má odpovídající prefix.

V zásadě je potřeba vytvořit tunel, nastavit mu 6rd prefix a místní adresy a nastavit bránu do IPv6 jako výchozí směrovač. Jediným nestandardním údajem je zde 6rd prefix, k jehož definici slouží:

```
ip tunnel 6rd dev rozhraní 6rd-prefix prefix
```

Řekněme, že platí situace z obrázku 12.9 na straně 292: poskytovatel přidělil 6rd prefix 2001:db8::/64, váš stroj má IPv4 adresu 147.230.7.23, z toho odvozený místní prefix 2001:db8:93e6:717::/64 a brána do nativního IPv6 má adresu 147.230.7.1. Konfigurační příkazy by vypadaly nějak takto:

```
ip tunnel add 6rd mode sit local 147.230.7.23 ttl 64
ip tunnel 6rd dev 6rd 6rd-prefix 2001:db8::/32
ip -6 addr add 2001:db8:93e6:717::1/32 dev 6rd
ip link set 6rd up
ip -6 route add ::/0 via ::147.230.7.1 dev 6rd
```

Pro překlad mezi IPv4 a IPv6 pomocí *NAT64* se tradičně používal program *TAYGA*. Jeho nevýhodou je, že umí jen bezstavový překlad, kdy pro každou překládanou IPv6 adresu používá jednu IPv4 adresu. Pokud vám toto omezení nevadí, základní informace a stručný popis konfigurace najdete v předchozím vydání.

Novou hvězdou na překladatelském nebi je mexický *Jool*. Potřebuje sice spolupráci jádra systému, zato ovšem umí bezstavový (zde označovaný jako Jool_SIIT) i stavový (Jool) překlad. Jeho domovskou adresou je:

https://www.jool.mx/

Najdete zde distribuční soubory i dokumentaci popisující jak instalaci v různých distribucích, tak použití. Pravidla pro překládání datagramů se zadávají prostřednictvím *ip6tables*. Nejprve je ovšem třeba přidat do jádra modul a aktivovat jednu instanci:

```
modprobe jool
jool instance add "nat64" --iptables --pool6 64:ff9b::/96
```

Hodnota za `add` udává jméno této instance (může jich běžet více) a následně se používá ve filtrovacích pravidlech. Hlavním parametrem při spouštění instance je rozsah IPv6 adres (`--pool`), které má překladač používat pro mapování IPv4. Zde je použit standardní prefix 64::ff9b::/96.

Popis firewallu v předchozí části jsem dost zjednodušil. Je na čase doplnit, že řetězce lze organizovat do tabulek. Tabulka *mangle* slouží pro úpravy datagramů. Pravidla pro NAT64 se v ní vkládají do řetězce PREROUTING, kterým datagramy proházejí ještě před směrováním. Překlad IPv6 datagramů směřujících na adresu s překládaným prefixem (tedy ve skutečnosti na IPv4 adresu) zajistí pravidlo:

```
ip6tables -t mangle -A PREROUTING -d 64:ff9b::/96 -j JOOL --instance "nat64"
```

S překladem v opačném směru je to trochu komplikovanější. Jool standardně využívá IPv4 adresy přiřazené zdejšímu stroji a na nich porty nad 61 000. Má-li stroj provozující NAT64 adresu 147.230.7.23 a používá se tento výchozí režim, překlad příslušných IPv4 datagramů by zajistila sada pravidel[2]:

```
iptables -t mangle -A PREROUTING -d 147.230.7.23 -p tcp --dport 61001:65535
   -j JOOL --instance "nat64"
iptables -t mangle -A PREROUTING -d 147.230.7.23 -p udp --dport 61001:65535
   -j JOOL --instance "nat64"
```

2: Zadávají se do filtrovacích tabulek pro IPv4.

```
iptables -t mangle -A PREROUTING -d 147.230.7.23 -p icmp
   -j JOOL --instance "nat64"
```

Jestliže vám výchozí chování nevyhovuje, můžete si poručit, jaké IPv4 adresy má Jool používat. Slouží k tomu příkaz:

`jool pool4 add` *protokol IPv4_prefix rozsah_portů*

Používání 16 adres s prefixem 147.230.7.0/28 by zajistila sada příkazů:

```
jool pool4 add --tcp 147.230.7.0/28 1-65535
jool pool4 add --udp 147.230.7.0/28 1-65535
jool pool4 add --icmp 147.230.7.0/28 1-65535
```

Jelikož v tomto případě není třeba rozlišovat mezi obyčejnými a překládanými porty u těchto adres, stačí pro překlad z IPv4 do IPv6 jedno pravidlo:

```
iptables -t mangle -A PREROUTING -d 147.230.7.0/28 -j JOOL --instance "nat64"
```

Zejména pro experimenty je možné kromě `add` používat i další instrukce pro úpravy sady překládaných adres a portů: `display` pro zobrazení, `remove` pro odstranění a `flush` pro kompletní vymazání.

Druhou složkou je DNS64 upravující DNS dotazy. Tuto činnost zajistí DNS server (kaitola 20 na straně 415) nebo *totd* popsaný v kapitole o BSD na straně 352. Lze využít i veřejné DNS64 servery, o kterých jsem psal na straně 345. Možností je celá řada.

15.6 Další informace

Podrobnější informace ohledně použití IPv6 v prostředí Linuxu najdete v *Linux IPv6 HOWTO* na adrese:

http://tldp.org/HOWTO/Linux+IPv6-HOWTO/

Části věnované konfiguraci obsahuje ve dvou variantách – jak pro příkaz *ip*, tak pro mou oblíbenou tradiční dvojici *ifconfig&route*[3]. Správcem dokumentu je Peter Bieringer, na jehož stránkách:

3: Já vím, že je to nemoderní, ale starého psa novým kouskům až naprší a uschne. A kromě toho *ifconfig* a *route* jsou k mání v každé odrůdě Unixu.

http://www.bieringer.de/linux/IPv6/

najdete i mnohé další užitečné informace, i když v poněkud nepřehledném uspořádání.

16 Microsoft Windows 10

O pozici operačních systémů firmy Microsoft na osobních počítačích se jistě netřeba rozepisovat. Proto je velmi potěšující zprávou, že podpora IPv6 v nich je k dispozici již dlouho a soustavně se zlepšuje. Po několika vývojářských edicích se produkční IPv6 objevilo neprve v Service Packu 1 pro Windows XP v září 2002. O půl roku později následoval v serverové řadě systém Windows Server 2003, opět s oficiálně deklarovanou produkční podporou IPv6.

Nicméně implementace nového protokolu v těchto systémech byla dost nezvyklá. Bylo nutné ji explicitně zapnout a konfigurovat textovými příkazy, zcela odděleně od obvyklých grafických nástrojů. Pokud jste se o IPv6 aktivně nezajímali, neměli jste šanci na ně narazit.

U další generace svých operačních systémů (Windows Vista a Windows Server 2008) Microsoft představil zcela novou implementaci IP. Ta je nyní koncipována jako duální s rovnocennou podporou obou protokolů. Že se IPv6 síťování ve Windows skutečně zlepšilo dokládají i certifikace *IPv6 Ready*, které Microsoft získal. Podpora nového protokolu je v operačních systémech firmy Microsoft na velmi slušné úrovni.

Budu se věnovat aktuální verzi Windows 10. Pokud vás zajímají starší systémy, najdete je v předchozím vydání. Rozdíly jsou ovšem minimální. Operační systém Windows 10 navazuje na svého předchůdce a z pohledu IPv6 nedošlo k žádné dramatické změně. Tu a tam se něco jmenuje trochu jinak, základ však zůstává stejný.

Ve výchozím stavu je IPv6 zapnuto a nastaveno na automatickou konfiguraci. Pokud se váš stroj připojí do sítě, v níž je k dispozici IPv6 a směrovače zasílají své ohlášení pro bezstavovou konfiguraci, můžete nový protokol hned začít používat, aniž by bylo třeba cokoli řešit.

16.1 Síťový interpret aneb netsh

Jasně, řeč je o Windows, takže je k dispozici grafické uživatelské rozhraní a základní nastavení se dá obstarat v něm. Nicméně na pokročilejší věci bývá krátké, tam je potřeba sáhnout k textovému režimu[1] a příkazu *netsh*.

V dokumentaci novějších systémů Microsoft naznačuje, že do budoucna zvažuje odstranění *netsh*. Už dnes jsou v PowerShellu k dispozici příkazy, kterými lze jeho funkce nahradit. Bohužel jsou poměrně upovídané a používání *netsh* mi připadá lepší. Dokud to půjde, budu se jej držet.

1: *Příkazový řádek* nebo raději silnější *PowerShell*.

Obstará většinu speciálních konfiguračních požadavků. Můžete jej používat ve dvou režimech – interaktivním a řádkovém. V interaktivním režimu jednoduše spustíte *netsh* a následně zadáváte pokyny. Příkaz si uchovává informaci o vašem kontextu. Zadáte-li mu například `interface ipv6`, přepnete se do tohoto kontextu a nemusíte jej už ve svých pokynech opakovat. Zobrazit třeba rozhraní pak lze samotným `show interface`. Veškeré instrukce související s IPv6 patří do kontextu:

```
netsh interface ipv6
```

Příjemnou vlastností interaktivního režimu je nápověda, kterou zobrazíte zadáním otazníku. Lze jej kombinovat i s názvy jednotlivých příkazů. Pokud by vás například zajímalo, co všechno si lze v IPv6 kontextu zobrazit, zadejte `show ?`. Máte také k dispozici historii zadávaných příkazů. Kurzorovými klávesami se můžete vracet k dřívějším příkazům a opakovat je nebo upravovat.

V řádkovém režimu lze pokyny pro *netsh* psát přímo na příkazový řádek ve formě parametrů. V tom případě je třeba vždy uvést kompletní kontext, takže třeba zmiňovaný přehled IPv6 rozhraní zajistí:

```
netsh interface ipv6 show interface
```

V této podobě budu konfigurační příkazy uvádět zde, při reálném použití je pochopitelně jedno, zda zvolíte interaktivní nebo řádkový přístup. Nemusíte vždy uvádět kompletní instrukce. Stačí začátky jednotlivých slov, pokud jsou jednoznačné. Zobrazení seznamu rozhraní se dá zkrátit na:

```
netsh i ipv6 sh i
```

Ve své základní podobě jsou konfigurační zásahy provedené pomocí *netsh* dočasné a jejich efekt skončí při restartu systému. Mají-li být změny trvalé, připojte na konec `store=persistent` či jen zkráceně `persistent`. V takovém případě se jejich účinek uloží trvale.

Bohužel stále zůstává zachována nepříjemná nekonzistence v číslování. Síťová rozhraní jsou opatřena číselnými indexy, které se zadávají u některých příkazů *netsh*. Kromě toho mají i popisná jména ve stylu *Připojení k místní síti* 2*. Čísla v popisných jménech bohužel neodpovídají indexům, což je docela matoucí. Například zmiňované *Připojení k místní síti* 2* má na mém počítači index 9. Dá se na to zvyknout, ale není to ideální. Pokud by vám to opravdu vadilo, fyzická rozhraní se dají přejmenovat v ovládacím panelu síťových připojení.

Přehled síťových rozhraní pro IPv6 a jejich indexů vám poskytne již několikrát zmiňovaný příkaz:

```
netsh interface ipv6 show interface
```

16.2 Konfigurace rozhraní

S největší pravděpodobností se o ni nebudete muset vůbec starat. Systém podporuje bezstavovou automatickou konfiguraci i DHCPv6 a řídí se příznaky v ohlášení směrovače, všechno jak má být. Stačí si jen prohlédnout výsledky příkazem:

```
ipconfig
```

(případně s volbou `/all`) nebo:

```
netsh interface ipv6 show addresses
```

Při bezstavové automatické konfiguraci systém nevytváří identifikátory rozhraní podle EUI-64, ale používá náhodné hodnoty. Pokud by vám toto chování nevyhovovalo, lze je vypnout příkazem:

```
netsh interface ipv6 set global randomizeidentifiers=disabled
```

Kromě toho ještě vytváří dočasné náhodné identifikátory pro ochranu soukromí podle RFC 4941. Ve výpisech bývají označovány jako dočasné (temporary). I jejich používání lze vypnout:

```
netsh interface ipv6 set privacy state=disabled
```

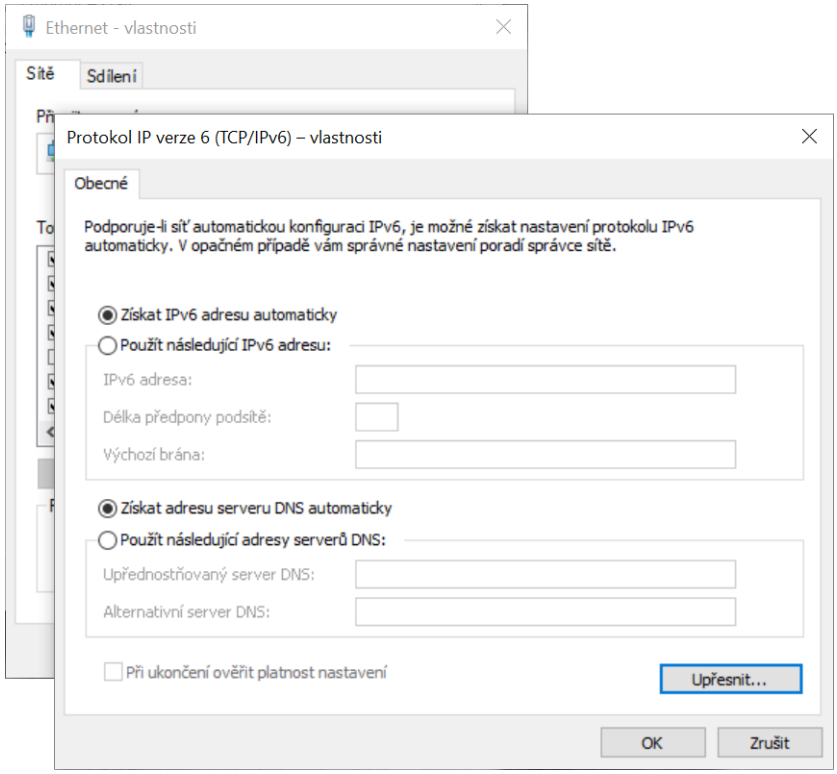
Kdybyste chtěli zcela zrušit automatickou konfiguraci a přejít k manuální, dá se to zvládnout v grafickém uživatelském rozhraní. V *Ovládacích panelech* si vyberte *Síť a Internet / Centrum síťových připojení a sdílení / Změnit nastavení adaptéru*. Zvolte odpovídající připojení a otevřete jeho *Vlastnosti*. V nich vyberte *Protokol IP verze 6 (TCP/IPv6)* a opět klepněte na tlačítko *Vlastnosti*. Zde můžete zapnout či vypnout automatickou konfiguraci adres a DNS serverů. Tlačítkem *Upřesnit* pak lze mluvit i do směrování a domén automaticky připojovaných k DNS dotazům.

Alternativně můžete konfigurovat vlastnosti rozhraní i z příkazového řádku. O nastavení (resp. přidání) IPv6 adresy se postará příkaz:

```
netsh interface ipv6 add address rozhraní adresa
```

K *adrese* můžete připojit tradiční lomítkem oddělenou délku prefixu podsítě. Implicitní hodnotou je 64, takže ji lze většinou vynechat. Dalšími parametry můžete adresu prohlásit za výběrovou (`type=anycast`), omezit její životnost a podobně. Například ethernetovému připojení (rozhraní číslo 9) by se přiřadila adresa 2001:db8:1:5::abc příkazem:

```
netsh interface ipv6 add address 9 2001:db8:1:5::abc
```



Obrázek 16.1: Konfigurace IPv6 vlastností síťového rozhraní

Windows 10 implementují algoritmus pro výběr adresy popsaný v části 3.12 na straně 97. Jeho tabulku politik vám zobrazí:

```
netsh interface ipv6 show prefixpolicy
```

Pro manipulaci s ní slouží `add policy` a `delete policy`. Výchozí nastavení odpovídá standardní tabulce z obrázku 3.16 na straně 99.

Statický konfigurovaný tunel přepravující IPv6 v IPv4 datagramech je realizován dalším rozhraním, jež založíte příkazem:

```
netsh interface ipv6 add v6v4tunnel jméno zdejší_IPv4 protější_IPv4
```

Jako parametry mu zadáváte *jméno* vytvářeného rozhraní a IPv4 adresy zdejšího a protějšího konce tunelu. Následně mu přidělíte IPv6 adresu stejně jako kterémukoli jinému rozhraní a můžete jej začít využívat. Pokud má zdejší počítač adresu 10.1.2.3 a chci vytvořit tunel vedoucí na 10.9.8.7, jehož zdejší IPv6 adresa bude 2001:db8:1:a::22, použiji příkazy:

```
netsh interface ipv6 add v6v4tunnel sit1 10.1.2.3 10.9.8.7
netsh interface ipv6 add address sit1 2001:db8:1:a::22
```

Informaci o místním DNS serveru může systém získat pomocí DHCPv6. Aktuální nastavení vám sdělí příkaz:

```
netsh interface ipv6 show dnsservers
```

Ručně mu lze jeho (jejich) adresy nastavit pomocí:

```
netsh interface ipv6 add dnsservers rozhraní adresa_serveru
```

Jako záložní variantu, pokud systém nemá k dispozici ani DHCP ani ručně konfigurované servery, má pevně nastaveny adresy fec0:0:0:ffff::1 až 3. Jedná se o dnes již zavržené adresy lokální pro místo, jež by neměly být podporovány. Je proto záhodno systému raději poskytnout použitelné informace.

K ověření, zda IPv6 komunikace funguje jak má, poslouží klasické programy *ping* a *tracert*, které bez problémů akceptují i IPv6 adresy. Při problémech vyzkoušejte raději oba. Situace, kdy uspěje jen jeden z nich nejsou vzácné.

Také *nslookup* pro testování DNS obsahuje vše potřebné. Zná typ záznamů AAAA a nechá si líbit IPv6 adresy dotazovaných serverů. Ty uveďte buď jako druhý parametr příkazového řádku:

```
nslookup dotaz dotazovaný_server
```

nebo v interaktivním režimu příkazem `server` *IPv6_adresa*.

Dost devastující může být pro koncovou síť služba *Sdílení připojení k Internetu*. Jedná se o brontosaura z doby, kdy v domácí síti byl obvykle připojen jediný počítač, jehož prostřednictvím se pak mohly napojovat další. V současnosti, kdy připojení obvykle zajišťuje domácí směrovač a zprostředkovává je libovolně velké domácí síti, nemá tato služba valného využití.

Ovšem pokud ji někde zapnete, začne příslušný počítač rázem zasílat ohlášení směrovače a nabízet adresy protokolem DHCP. Výsledkem bude zmatek v síti, jehož důsledkem může být i citelné zpomalení komunikace pro všechny. *Sdílení připojení k Internetu* lze zapnout či vypnout na kartě *Sdílení* ve vlastnostech příslušného síťového rozhraní. Stroje se zapnutým sdílením najdete

sledováním ohlášení směrovačů, například programem *Wireshark* (*www.wireshark.org* – použijte filtr pro zachytávání `icmp6 and ((ip6[40+0] == 133) or (ip6[40+0] == 134))`) nebo *ramond* (viz část 19.2 na straně 410).

16.3 Konfigurace směrování

Pro ruční zásahy do směrovací tabulky lze ve Windows 10 použít dva alternativní programy: *netsh* nebo *route* s parametrem *–6*. Směrovací tabulka je samozřejmě společná, takže je jedno, po kterém z nich sáhnete, výsledek bude tentýž. *route* je kratší, ale zůstanu věrný *netsh*, kterým se konfiguruje všechno ostatní. Aktuální směrovací tabulku vám předvede:

```
netsh interface ipv6 show route
```

Novou položku do ní přidáte příkazem:

```
netsh interface ipv6 add route cíl rozhraní
```

Pokud není *cíl* přímo připojen, přidejte na konec ještě adresu sousedního směrovače, kterému se mají předávat data. *Cíl* se zadává v obvyklé podobě prefixu, tedy ve tvaru *adresa/délka_prefixu*. Například implicitní cestu vedoucí přes směrovač 2001:db8:1:5::1 rozhraním 9 vložíte do tabulky pomocí:

```
netsh interface ipv6 add route ::/0 9 2001:db8:1:5::1
```

Odstranění cesty vypadá stejně, místo `add route` však použijte instrukci `delete route`.

Má-li se stroj chovat jako směrovač, je třeba povolit předávání paketů mezi rozhraními a také rozesílání ohlášení směrovače. Postará se o to příkaz:

```
netsh interface ipv6 set interface rozhraní enabled enabled
```

První ze dvojice `enabled` se týká předávání datagramů (v plném tvaru `forwarding=enabled`), druhé pravidelného odesílání ohlášení směrovače (`advertise=enabled`). Tento příkaz je třeba provést pro každé *rozhraní*, pro které má dotyčný stroj působit jako směrovač.

Vzhledem k tomu, že již starší systém Windows XP obsahoval podporu dynamického směrování protokolem RIPng, očekával bych i u jeho nástupců podobné schopnosti. Ovšem v nápovědě ani na webu se mi nepodařilo najít nic o dynamickém směrování IPv6 ve Windows 10.

16.4 Přechodové mechanismy

Stroj s operačním systémem Windows 10 nebývá v pozici serveru, který by zpřístupňoval připojení nebo služby dalším zařízením. Případné přechodové mechanismy se budou týkat především jej samotného.

Ve verzích Vista a 7 jim byla věnována značná pozornost. V duchu celkové koncepce systému pracovaly tak, aby si všechno zařídily automaticky samy a uživatel o nich pokud možno nevěděl. Pokud stroj neměl nativní IPv6 připojení, automaticky se vytvářel tunel pomocí Teredo, jestliže disponoval veřejnou IPv4 adresou, zakládalo se rozhraní pro 6to4. Podporován byl i ISATAP pro případné tunelování IPv6 lokální IPv4 sítí.

Zmíněné mechanismy ovšem vývoj odsunul na vedlejší kolej, některé navíc způsobovaly notorické problémy. Proto byla i jejich podpora ve Windows 10 utlumena či zcela odstraněna. Pokud byste některý potřebovali použít nebo se o něj zajímali, najdete popis v předchozím vydání knihy. V současné době ale hrají roli už jen historickou a nemá smysl se jimi zabývat.

16.5 Další informace

Veškeré informace o podpoře IPv6 v produktech Microsoftu najdete pochopitelně na Webu. Dobrou výchozí adresou pro pokročilejší nastavení je *Guidance for configuring IPv6 in Windows for advanced users*:

https://support.microsoft.com/en-us/help/929852

Popisuje méně obvyklé konfigurační postupy a obsahuje i odkazy na další materiály.

17 Cisco

Cisco Systems dlouhodobě dominuje mezi výrobci síťových prvků, podpora IPv6 z jeho strany je proto mimořádně důležitá. Naštěstí je na velmi slušné úrovni. Doby, kdy jste si kvůli IPv6 museli kupovat vyšší verzi softwaru, už jsou naštěstí dávno za námi. Dnes v základní verzi systému dostanete základní schopnosti a protokoly pro IPv4 i IPv6, zatímco pokročilá verze vás zahrne kompletní nabídkou dovedností.

Sortiment implementovaných vlastností se mezi jednotlivými produkty a verzemi poněkud liší. Jak je tomu v případě vašich prvků se dozvíte v dokumentaci, případně od prodejce. Dobrým pomocníkem při orientaci ve vlastnostech a schopnostech jednotlivých systémů a zařízení je *Cisco Feature Navigator* na adrese:

http://tools.cisco.com/ITDIT/CFN/jsp/index.jsp

Tuto kapitolu chápejte jako stručný úvod do konfigurace IPv6 v IOSu pro počáteční seznámení, doporučení na detailnější literaturu najdete v jejím závěru. Nebudu zde uvádět obecné informace o konfiguraci Cisco směrovačů. Dovolím si předpokládat, že pokud máte některý produkt tohoto výrobce, umíte s ním zacházet. Proto se soustředím jen na ty prvky konfigurace, které bezprostředně souvisí s IPv6.

Implicitně je směrování IPv6 vypnuto. Takže než se vůbec můžete do něčeho pustit, zahajte konfiguraci příkazem:

```
ipv6 unicast-routing
```

17.1 Konfigurace rozhraní

Cisco vyrábí směrovače, takže automatická konfigurace nepřipadá v úvahu. Naopak, směrovač musí poskytovat informace ostatním. K tomu je třeba přidělit adresy jeho rozhraním. Přejděte v konfiguračním dialogu na příslušné rozhraní a zadejte příkaz:

```
ipv6 address adresa/délka_prefixu
```

Tímto příkazem zapnete na daném rozhraní IPv6 a zároveň mu přidělíte adresu a definujete zdejší (pod)síť. Přidáte-li na konec `link-local`, deklarujete adresu jako lokální linkovou. Směrovačům bývá zvykem přidělovat hezké adresy. Řekněme, že bych chtěl přidělit Ethernetu identifikátor rozhraní „defa“ a zařadit jej do podsítě s prefixem 2001:db8:1:1::/64. Použil bych příkazy (vezměme to od podlahy):

```
config term
interface ethernet 0/1
  ipv6 address 2001:db8:1:1::defa/64
  ipv6 address fe80::defa/64 link-local
```

Připojíte-li na konec slovo `anycast`, deklarujete adresu jako výběrovou. Opakováním `ipv6 address` můžete rozhraní přidělit několik adres[1]. Pro kontrolu poslouží:

```
show ipv6 interface
```

Chcete-li některou z adres odstranit, použijte příkaz pro její definici s předřazeným `no`.

Tunely jsou v IOS představovány speciálními rozhraními `tunnel` *číslo*. Pro každý tunel existuje jedno. Chcete-li je vytvořit, přepněte se na ně jako na kterékoli jiné rozhraní a obvyklým způsobem mu přidělte IPv6 adresu (`ipv6 address`). Poté musíte definovat oba konce tunelu. Poslouží k tomu příkazy:

`tunnel source` *rozhraní* nebo *IPv4 adresa*
`tunnel destination` *IPv4 adresa*

Zdejší konec můžete definovat buď IPv4 adresou tohoto směrovače, nebo typem a číslem rozhraní. Určuje adresu, kterou bude směrovač používat při tunelování jako zdrojovou. U protějšího konce musíte uvést IPv4 adresu. Na závěr ještě definujte, že se jedná o tunelování IPv6 paketů v IPv4:

```
tunnel mode ipv6ip
```

Řekněme, že chci vytvořit tunel ke směrovači 1.2.3.4, který pro zdejší konec bude využívat IPv4 adresu přidělenou jednomu z ethernetových rozhraní. Definice bude vypadat takto:

```
interface tunnel 0
  ipv6 address 2001:db8:1:ffff::1/64
  tunnel source ethernet 0/3
  tunnel destination 1.2.3.4
  tunnel mode ipv6ip
```

Tím je zdejší konec tunelu založen.

Směrovač musí okolním počítačům poskytovat informace pro bezstavovou automatickou konfiguraci – zasílat ohlášení směrovače. Cisco IOS tuto činnost zajišťuje, aniž byste se museli o něco

1: Na rozdíl od IPv4 nemusíte přidávat `secondary`, v IPv6 je několik adres pro jedno rozhraní normální stav.

starat. Do každého rozhraní se implicitně posílá ohlášení směrovače se všemi prefixy, které jste mu přiřadili. Jako doba platnosti se jim přiděluje 30 dnů a doba preferování týden.

Pokud chcete upravit chování směrovače při objevování sousedů, použijte příkazy ze skupiny `ipv6 nd`. Nejzajímavější bude nepochybně možnost nastavit seznam a parametry prefixů, které bude do daného rozhraní ohlašovat. Zajistí to příkaz:

```
ipv6 nd prefix prefix/délka
```

Lze přidat řadu různých parametrů, jimiž ovlivníte vlastnosti prefixu. Patří mezi ně životnost, doba preferování, či zákaz používání bezstavové automatické konfigurace (`no-autoconfig`). Jakmile použijete `ipv6 nd prefix` v konfiguraci rozhraní, zruší se implicitní chování a budou ohlašovány jen prefixy, které jste explicitně uvedli.

Můžete přidat i informace pro nastavení DNS – adresy zdejších rekurzivních serverů a přípony, které se mají přidávat k vyhledávaným jménům. Slouží k tomu:

```
ipv6 nd ra dns server IPv6_adresa
ipv6 nd ra dns search-list doména
```

Opakujte je tolikrát, kolik serverů nebo přípon mají zdejší stroje používat. Dodatečnými parametry lze stanovit životnosti, priority a podobně. Automatickou konfiguraci lze dále ovlivňovat pomocí:

```
ipv6 nd managed-config-flag
ipv6 nd other-config-flag
```

První do ohlášení směrovače posílané tímto rozhraním zařadí příznak k použití DHCPv6, druhý slouží pro bezstavové DHCPv6.

Zajímavý může být i příkaz:

```
ipv6 nd ra lifetime sekundy
```

který definuje, jak dlouho si může klient ponechat tento směrovač v seznamu implicitních směrovačů. Implicitní hodnotou je půl hodiny, což nejspíš vyhoví ve většině případů. Jestliže ale nechcete, aby přes tento směrovač vedly implicitní cesty zdejších klientů, nastavte `ra lifetime` na nulu.

Jestliže do některého rozhraní nemá být ohlášení směrovače zasíláno, použijte:

```
ipv6 ns ra suppress all
```

Závěrečné `all` je významné. Bez něj směrovač sice svá ohlášení aktivně neposílá, ale odpovídá na výzvy. Připojení nového zařízení proto typicky vyvolá ohlášení směrovače, informace z něj si zdejší stroje uloží a používají až do vypršení jejich životnosti. Po připojení dalšího nováčka se situace opakuje, zkrátka síť se chová nestabilně.

Lehce rozvinu předchozí příklady a předvedu konfiguraci rozhraní pro dva Ethernety do lokální sítě a tunel kamsi ven. V místní síti (0/1) se používá bezstavová automatická konfigurace s DNS servery 2001:db8::d1 a 2001:db8::d2 a příponou *nic.cz*, v síti připojené k 0/2 probíhá automatická konfigurace výlučně pomocí DHCPv6 (bezstavová je zakázána). Do tunelu se ohlášení směrovače neposílá:

```
interface ethernet 0/1
  description Hlavni segment
  ipv6 address 2001:db8:1:1::aaaa/64
  ipv6 nd prefix 2001:db8:1:1::/64
  ipv6 nd ra dns server 2001:db8::d1
  ipv6 nd ra dns server 2001:db8::d2
  ipv6 nd ra dns search-list nic.cz

interface ethernet 0/2
  description Uctarna
  ipv6 address 2001:db8:1:2::bbbb/64
  ipv6 nd managed-config-flag
  ipv6 nd prefix 2001:db8:1:2::/64 no-autoconfig

interface tunnel 0
  description Externi pripojeni
  ipv6 address 2001:a:b:c::2/64
  tunnel source ethernet 0/3
  tunnel destination 1.2.3.4
  tunnel mode ipv6ip
  ipv6 nd ra suppress all
```

Poslední konfigurační příkaz je ve skutečnosti zbytečný, protože do tunelů se ohlášení směrovače implicitně neposílá. Naopak pokud je žádoucí, je třeba je zapnout.

Kromě zasílání umí přepínače Cisco ohlášení směrovače i hlídat – implementují RA-Guard, který jsem popsal v části 5.5 na straně 131. Chcete-li jej nasadit, musíte pro něj nejprve definovat politiky. Slouží k tomu příkazy (zadávané na úrovni globální konfigurace):

```
ipv6 nd raguard policy jméno
```

Klíčovým a jediným povinným příkazem uvnitř politiky je `device-role`, kterým určíte roli připojeného zařízení. Povolenými hodnotami jsou `router` pro směrovač a `host` pro koncové zařízení. Kromě toho lze omezovat jednotlivé parametry přicházejících ohlášení – adresu jejich odesilatele, ohlašované prefixy, dosah datagramů a podobně. Většinou ovšem postačí jen prosté určení role připojeného prvku. Konkrétnímu rozhraní pak přiřadíte politiku v konfiguraci rozhraní pomocí:

```
ipv6 nd raguard attach-policy jméno
```

Řekněme, že k Ethernetu 1/1 je připojen směrovač, zatímco k portům 1/2 a 1/3 uživatelské počítače. Směrovači navíc chceme povolit ohlašovat jen prefix 2001:db8:1:1::/64. Konfigurace by vypadala zhruba takto:

```
ipv6 prefix-list hlavni-segment permit 2001:db8:1:1::/64

ipv6 nd raguard policy smerovac
    device-role router
    match ra prefix-list hlavni-segment

ipv6 nd raguard policy klient
    device-role host

interface fastethernet 1/1
    ipv6 nd raguard attach-policy smerovac

interface fastethernet 1/2
    ipv6 nd raguard attach-policy klient

interface fastethernet 1/2
    ipv6 nd raguard attach-policy klient
```

17.2 Směrování

Statické směrování se konfiguruje zcela standardně, jen místo příkazu `ip route` používáte `ipv6 route`. Jeho tvar je:

```
ipv6 route prefix/délka kudy
```

Jako parametr *kudy* poslouží buď IPv6 adresa směrovače, kterému mají být datagramy pro daný *prefix* předány, nebo typ a číslo rozhraní, kterým je má směrovač odeslat (pro dvoubodové spoje). Kdybych tedy chtěl použít výše uvedený tunel jako implicitní cestu ven, zařídil by to příkaz:

```
ipv6 route ::/0 tunnel 0
```

17.2.1 RIPng

Nastavení RIPu obsahuje dva nejdůležitější kroky: musíte spustit vlastní proces pro RIPng a následně jej musíte aktivovat na jednotlivých rozhraních. Proces má svůj identifikátor, jehož prostřednictvím se na něj později odkazujete. Spuštění RIPng jako takového zajistí:

```
ipv6 router rip identifikátor
```

Tím se zároveň ocitnete v konfiguraci procesu RIPng. Můžete zde třeba nastavit, které cesty z jiných zdrojů se mají předávat do RIPu. Například šíření statických cest zajistí:

```
redistribute static
```

Pro každé rozhraní, na kterém chcete zapnout RIP (čili vysílat a přijímat aktualizace směrovací tabulky), musíte v konfiguraci rozhraní uvést příkaz:

```
ipv6 rip identifikátor enable
```

Chcete-li, aby se šířila a přijímala i informace o implicitní cestě na některém rozhraní, použijte v jeho konfiguraci:

```
ipv6 rip identifikátor default-information
```

Pro kontrolu nastavení RIPng slouží:

```
show ipv6 rip
```

Uveďme si příklad konfigurace, který navazuje na výše definovaná rozhraní a tunely. Jako identifikátor pro RIPng proces použijeme „nic“:

```
ipv6 router rip nic
  redistribute static

interface ethernet 0/1
  ipv6 rip nic enable
  ipv6 rip nic default-information

interface ethernet 0/2
  ipv6 rip nic enable
  ipv6 rip nic default-information
```

```
interface tunnel 0
  ipv6 rip nic enable
```

17.2.2 OSPFv3

Podobně jako v případě RIPu je třeba i pro OSPF spustit směrovací proces a následně do něj zahrnout jednotlivá rozhraní. O základní spuštění OSPFv3 a vstup do jeho globální konfigurace se postará:

```
ipv6 router ospf identifikátor_procesu
```

Místo jména používá OSPF číselný *identifikátor_procesu*. V jednom směrovači může běžet několik nezávislých OSPF procesů a prostřednictvím identifikátorů pak určujete, ke kterému z nich se jednotlivé příkazy vztahují.

Pro svůj vnitřní život OSPF potřebuje přidělit identifikátory také směrovačům. Často si s nimi nemusíte lámat hlavu, pokud některé rozhraní má přiřazenu IPv4 adresu, směrovač ji automaticky použije jako identifikátor (preferuje adresu lokální smyčky). Jestliže ale nikde žádná IPv4 adresa není, vložte do konfigurace OSPF procesu:

```
router-id identifikátor
```

Identifikátor se zapisuje ve stejném formátu jako IPv4 adresa. Stanovte si vhodná pravidla pro identifikaci směrovačů a označte je.

Na úrovni OSPF procesu se také nastavuje agregace směrování. Standardně protokol šíří informace o prefixech jednotlivých podsítí, k nimž je směrovač přímo připojen. Můžete však předepsat, že celá oblast má být vůči zbytku světa reprezentována jen jediným prefixem, který obaluje všechny konkrétnější prefixy uvnitř ní. Slouží k tomu příkaz:

```
area identifikátor_oblasti range prefix/délka
```

Příkazem `redistribute` lze nařídit předávání informací získaných jinou cestou do OSPF.

Na rozdíl od OSPFv2 musíte OSPFv3 explicitně povolit v konfiguraci rozhraní, jež se má účastnit výměny směrovacích informací. Pro každé zapojené rozhraní zadejte příkaz:

```
ipv6 ospf identifikátor_procesu area identifikátor_oblasti
```

Na našem příkladném směrovači budou oba Ethernety náležet do oblasti 0.0.0.100 přidělené zdejší lokální síti. Celou oblast zahrneme do jednoho agregovaného prefixu. Tunel pak zařadíme do páteřní oblasti:

```
ipv6 router ospf 777
  router-id 11.22.33.44
  area 0.0.0.100 range 2001:db8:1::/48
  redistribute static rip connected

interface ethernet 0/1
  ipv6 ospf 777 area 0.0.0.100

interface ethernet 0/2
  ipv6 ospf 777 area 0.0.0.100

interface tunnel 0
  ipv6 ospf 777 area 0.0.0.0
```

Aktuální stav OSPF lze opět zjišťovat pomocí:

```
show ipv6 ospf
```

17.3 Mobilita

Směrovače Cisco dovedou pracovat jako domácí agenti. Základní konfigurace je navíc poměrně jednoduchá, stačí v konfiguraci každého rozhraní, pro něž má směrovač tuto úlohu vykonávat, uvést příkaz:

```
ipv6 mobile home-agent
```

Lehce matoucí je, že stejnojmenným příkazem, ovšem na globální úrovni, vstupujete do konfigurace domácího agenta. Slouží k nastavení základních parametrů poskytované služby. Asi nejčastějšími příkazy v této sekci budou:

`binding` *počet_klientů*

omezující maximální počet mobilních uzlů, které je směrovač ochoten podporovat.

`binding access` *jméno_acl*

odkazuje na přístupový seznam oddělující zrno od plev. Tedy klienty, jimž je povoleno domácího agenta využívat. A konečně:

```
authentication spi číslo key ascii klíč
```

určuje parametry pro jejich autentizaci. Příkaz je ve skutečnosti košatější, nicméně základní tvar často postačí. Implicitním autentizačním algoritmem je HMAC-SHA1.

Například domácího agenta, který poskytuje své služby na Ethernetech 0/1 a 0/2 a je ochoten přijmout až 100 klientů s autentizací by definovaly následující příkazy:

```
ipv6 mobile home-agent
  binding 100
  authentication spi 100 key ascii topsecret

interface ethernet 0/1
  ipv6 mobile home-agent

interface ethernet 0/2
  ipv6 mobile home-agent
```

17.4 Přechodové mechanismy

17.4.1 6rd

6rd je v Cisco IOS implementováno jako speciální typ tunelu. Jeho konfigurace se proto podobá konfiguraci běžného tunelu, neuvádí se však adresa protějšího konce, protože je pro každý datagram jiná a 6rd ji určuje automaticky z cílové adresy. A pochopitelně se liší i režim práce tunelu – zde `ipv6ip 6rd`.

Konfigurační příkazy specifické pro 6rd začínají `tunnel 6rd`. Nejdůležitější jsou ty, které řídí práci s adresami: IPv6 prefix pro 6rd adresy (`tunnel 6rd prefix`) a jak dlouhý je společný IPv4 prefix dané 6rd domény (`tunnel 6rd ipv4 prefix-len`) – do adres se přebírají jen bity následující za společným prefixem. Kromě toho je třeba zadat IPv4 adresu brány do nativního IPv6 (`tunnel 6rd br`)

Jako příklad uvedu relevantní část konfigurace 6rd směrovače z obrázku 12.9 na straně 292 se zkrácením vkládaných IPv4 adres na spodních 16 bitů, jak je popsáno v textu. Zákaznická síť proto bude mít prefix 2001:db8:717::/48. Konfigurace jeho konce 6rd tunelu by vypadala nějak takto:

```
interface tunnel 10
  tunnel mode ipv6ip 6rd
  tunnel source ethernet 0/3
  tunnel 6rd prefix 2001:db8::/32
  tunnel 6rd ipv4 prefix-len 16
  tunnel 6rd br 147.230.7.1
```

Zbývá ještě směrování – adresy začínající 6rd prefixem je třeba poslat do tunelu a nastavit IPv6 adresu brány jako implicitní:

```
ipv6 route 2001:db8::/32 tunnel 10
ipv6 route ::/0 tunnel 10 2001:db8:701:1::1
```

17.4.2 NAT64

V předchozím vydání jsem se podivoval, že směrovače Cisco podporují jen bezstavový NAT64, který je významně omezený. To už dnes není pravda, můžete už nasadit stavový NAT64, který dovede mezi sebou mapovat IPv4 a IPv6 adresy, pamatuje si mapované dvojice a chová se tak, jak by člověk očekával.

V konfiguraci je třeba stanovit tři složky: jaký IPv6 prefix má používat po mapování IPv4 adres, jaké IPv4 adresy má k dispozici pro mapování opačným směrem a které IPv6 adresy má mapovat do IPv4.

Konfigurace IPv6 prefixu je velmi snadná, slouží k tomu `nat64 prefix stateful`. Pokud použijete standardní, bude příkaz vypadat:

```
nat64 prefix stateful 64:ff9b::/96
```

Zásobu IPv4 adres (v originále pool), které může používat pro mapování IPv6, určí:

```
nat64 v4 pool název první_adresa poslední_adresa
```

Nejsložitější je určení pravidel, které IPv6 adresy překládat. Popíšete je standardním přístupovým seznamem (access list) a následně pomocí `nat64 v6v4` propojíte se zásobou IPv4 adres. Zajistí, že všechny IPv6 adresy vyhovující přístupovému seznamu budou překládány do IPv4. IPv4 adres obvykle nebývá dost, proto bude třeba na konec přidat klíčové slovo `overload`, aby kromě adres mapoval i porty transportních protokolů.

Řekněme, že pro mapování máme k dispozici IPv4 adresy 10.6.4.0 až 10.6.4.15. Pojmenujeme je „ProNAT64“. Překládat budeme datagramy odcházející ze zdejší sítě s prefixem 2001:db8:abc::/48

a příslušný přístupový seznam pojmenujeme „PrelozitNAT64“. Vše nastavíme konfiguračními příkazy:

```
nat64 prefix stateful 64:ff9b::/96
nat64 v4 pool ProNAT64 10.6.4.0 10.6.4.15
ipv6 access-list PrelozitNAT64
   permit ipv6 2001:db8:abc::/48 any
nat64 v6v4 list PrelozitNAT64 pool ProNAT64 overload
```

A to je skoro všechno. Pak už stačí jen do konfigurace každého IPv6 rozhraní, kde má být uplatňován NAT64, přidat:

```
nat64 enable
```

17.5 Skupinové adresování

Směrovače Cisco se mohou pochlubit dostatečně kvalitní a spolehlivou podporou pro přepravu skupinově adresovaných datagramů. Stejně jako samotné IPv6 vyžaduje zapnutí, tentokrát příkazem:

```
ipv6 multicast-routing
```

Aktivuje vše potřebné, především protokoly MLD a PIM pro všechna rozhraní, na nichž je zapnuto IPv6. Pomocí MLD se směrovač dozvídá o členech jednotlivých skupin. Aktuální verze IOS podporují MLD verze 2. Protokol PIM pak používá k vlastní distribuci skupinově adresovaných dat. Podporovány jsou všechny jeho odrůdy.

Klíčovou informací pro něj jsou adresy shromaždišť jednotlivých skupin, tedy kořenů jejich sdílených stromů. Mohou být obsaženy přímo v adresách (embedded RP, strana 86), pak není co řešit. Tento typ adres je v IOS podporován a automaticky rozpoznáván podle příznaků v adrese. Totéž platí o adresách pro SSM. U ostatních bude třeba napovědět příkazem:

```
ipv6 pim rp-address adresa_shromaždiště
```

Celá PIM doména mívá často jediné shromaždiště, takže vystačíte se základním tvarem příkazu, který se vztahuje na všechny skupiny. Ve složitějších případech můžete na konec přidat jméno přístupového seznamu. Pak bude uvedené shromaždiště platit jen pro skupiny, které mu vyhovují. Například chcete-li pro skupiny s prefixem ff05::/64 používat shromaždiště 2001:db8:1::aa, zatímco pro všechny ostatní 2001:db8:a::11, zajistí to následující sada příkazů:

```
ipv6 access-list skupina1
  permit ipv6 any ff05::/64
ipv6 pim rp-address 2001:db8:1::aa skupina1
ipv6 access-list ostatni-skupiny
  deny ipv6 any ff05::/64
  permit ipv6 any any
ipv6 pim rp-address 2001:db8:a::11 ostatni-skupiny
```

Pokud přidáte na konec příkazu `ipv6 pim rp-address` slůvko `bidir`, prohlásíte sdílený strom za obousměrný, tedy BIDIR-PIM.

Ve výchozím stavu je skupinové směrování liberální a je ochotno distribuovat data od kohokoli. K omezení možných zdrojů slouží:

```
ipv6 pim accept-register list přístupový_seznam
```

který povolí registrované datagramy, čili předávání skupinových datagramů do distribučního stromu, jen pro stroje vyhovující zadanému *přístupovému seznamu*.

Ke zjišťování informací o aktuálním stavu MLD a PIM poslouží především příkazy:

```
show ipv6 mld interface
show ipv6 mld groups
show ipv6 pim
```

Pokud máte v síti L2 nebo L3 přepínače firmy Cisco, měli byste podniknout příslušné konfigurační úpravy i na nich. Prvním krokem je nastavit prostřednictvím *Switch Database Management (SDM)* šablonu pro společný IPv4 a IPv6 provoz:

```
sdm prefer dual-ipv4-and-ipv6 šablona
```

Přípustnými hodnotami *šablony* jsou `default` (vyrovnané vlastnosti pro L2 přepínání a L3 směrování), `routing` (rozšířené možnosti směrování) a `vlan` (bez směrování, jen L2 funkce).

Následně zapnete podporu MLD příkazem:

```
ipv6 mld snooping
```

17.6 Další informace

Pro detailní studium vlastností a konfigurace skvěle poslouží *Cisco IOS IPv6 Configuration Guide* – kniha o rozsahu tisíc stran, která s tradiční Cisco důkladností popisuje teoretické základy a pitvá detaily konfiguračních příkazů. Adresa závisí na verzi systému, ale Googlem ji snadno najdete. Užitečným doplňkem je pak *Cisco IOS IPv6 Command Reference*:

https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios-xml/ios/ipv6/command/ipv6-cr-book.html

Dáváte-li přednost tištěné literatuře, za pozornost určitě stojí kniha [15], která se věnuje nasazení IPv6 v sítích různých typů na platformě Cisco.

18 Směrovací programy

Dokud nejsou datové objemy přenášené ve vaší síti příliš velké, můžete uvažovat o softwarovém směrovači realizovaném na PC. V jednoduchém případě vystačíte se statickým nastavením doplněným o ohlašování směrovače. Vše je popsáno v předchozích kapitolách věnovaných jednotlivým operačním systémům a v kapitole 19.1 na straně 407. Pokud ale má váš směrovač podporovat dynamické směrování a hovořit některým ze směrovacích protokolů, potřebujete specializovaný program.

Volně dostupných produktů je k dispozici hned několik. Psí kusy se směrovanými datagramy dokáže dělat vysoce modulární *Click* (*https://github.com/kohler/click*). Zajímavým projektem je *XORP (eXtensible Open Router Platform, www.xorp.org)*, který podporuje i skupinové směrovací protokoly. Jeho konfigurační jazyk, částečně inspirovaný směrovači Juniper, je bohužel dost krkolomný. Psát adresy v podobě:

```
address 2001:db8:1:33::22:11 {
    prefix-length: 64
}
```

je zkrátka proti přírodě.

V této kapitole se přidržím dvou nejznámějších a nejrozšířenějších zástupců této kategorie – programů *BIRD* a *FRRouting*. Díky nim může počítač s operačním systémem typu Unix pracovat jako plnohodnotný směrovač a vyměňovat si s okolím směrovací informace prostřednictvím různých směrovacích protokolů.

Schopnosti obou programů jsou srovnatelné, byly portovány na podobné platformy, hovoří podobnými protokoly: RIPv2, RIPng, OSPFv2, OSPFv3 a BGP4+. *FRRouting* může nabídnout především delší tradici, protože navazuje na dost populární programy *Zebra* a *Quagga*. BIRD naproti tomu vychází lépe ze srovnávacích testů (nižší zátěž systému, vyšší stabilita), práce s ním je jednodušší a má za sebou řadu úspěšných nasazení v peeringových centrech. Pokud nejste zatíženi minulostí, představuje BIRD asi lepší volbu.

18.1 BIRD Internet Routing Daemon

Směrovací démon BIRD potěší vlastence, protože se jedná o výlučně domácí produkt. Původně vznikl jako ročníkový projekt na MFF UK, později upadl do hibernace, ovšem v posledních letech se v péči CZ.NIC opět čile rozvíjí, prosazuje (i mezinárodně) a získává výbornou pověst. Používá se v největších evropských peeringových centrech (AMS-IX, DE-CIX, LINX), což by jako důkaz kvality mělo stačit.

Program je k mání na adrese:

http://bird.network.cz/

s licencí GNU GPL. V některých systémech jej lze instalovat v podobě balíčku, jinde budete muset překládat ze zdrojového kódu. Kromě Linuxu, na němž je vyvíjen, byl portován i na systémy NetBSD, FreeBSD a OpenBSD. Překlad ze zdrojového kódu probíhá standardním způsobem:

```
./configure
make
make install
```

BIRD podporuje obě verze IP. Ve verzi 1 to neuměl najednou, museli jste provozovat jednoho démona pro IPv4 a druhého pro IPv6. Od verze 2 už je vše pod jednou střechou, proto se jí zde budu držet.

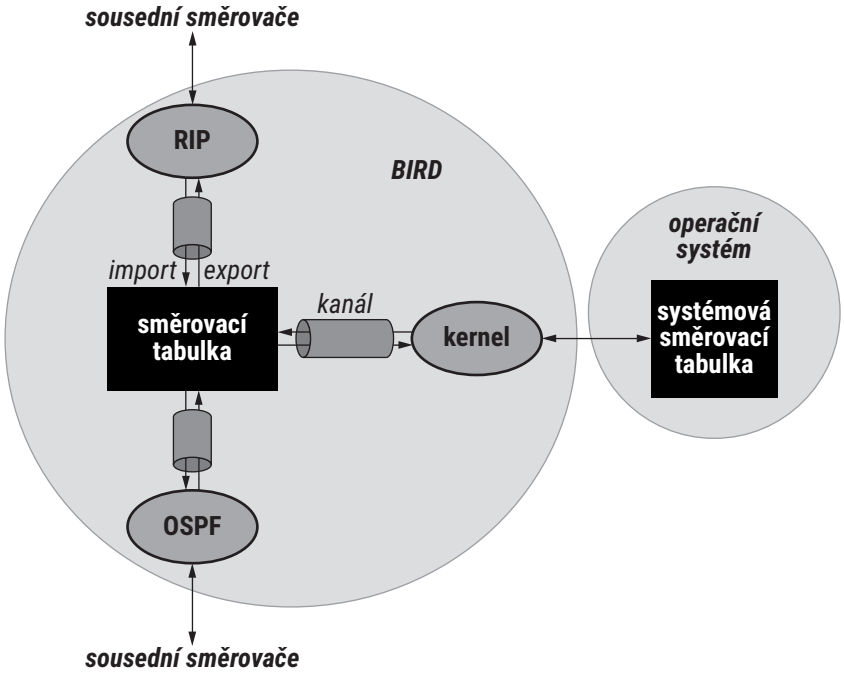
BIRD má svou vlastní směrovací tabulku, která může a nemusí být synchronizována se systémovou. Jeho prostřednictvím tedy lze vytvořit směrovač, který si vyměňuje směrovací informace s ostatními, ale nemá vliv na směrování stroje, na němž sídlí. Vnitřních tabulek může být dokonce i víc, včetně pravidel pro přenos informací mezi nimi. BIRD se pak chová jako několik směrovačů v jednom.

Tyto schopnosti, stejně jako velmi silný jazyk pro definici pravidel omezujících výměnu směrovacích informací, jsou určeny pro náročnější uživatele, jako jsou poskytovatelé Internetu či peeringová centra. Zde zůstanu jen u velmi základního modelu činnosti, kdy BIRD má zajistit dynamické směrování stroje, na němž je provozován.

18.1.1 Základy konfigurace

Základní koncept činnosti programu je takový, že si udržuje svou směrovací tabulku. Přesněji řečeno tabulky, protože už v základu obsahuje dvě: `master4` pro IPv4 a `master6` pro IPv6, které se zde budu věnovat. Kromě nich si můžete vytvářet vlastní. O aktualizaci tabulek se starají směrovací protokoly, přičemž několik protokolů může pracovat se společnou tabulkou. Informace získané jedním z nich jsou uloženy do tabulky a ostatními směrovacími protokoly pak předávány dál.

Protokoly jsou s tabulkami propojeny pomocí kanálů (channel), jimiž si vyměňují informace o cestách. S každým kanálem jsou spojeny dva filtry – *import* řídí přebírání směrovacích informací z protokolu do tabulky, `export` určuje, jaké informace se budou z tabulky daným kanálem předávat protokolu. Stejným způsobem je řešena i spolupráce se systémovou směrovací tabulkou, která se chová jako směrovací protokol `kernel`.



Obrázek 18.1: Architektura programu BIRD

Celá konfigurace programu je uložena v souboru *bird.conf*. Jeho výchozím umístěním je adresář */usr/local/etc*, ovšem při instalaci z balíčku bude pravděpodobně umístěn rovnou v */etc*. V nekomplikovaných situacích bude jeho obsah dost jednoduchý. BIRD se totiž nesnaží obsáhnout celé síťování svého stroje, ale stará se pouze o směrování. Například konfigurace adres jednotlivých rozhraní jde zcela mimo něj, tu je třeba zajistit odpovídajícími příkazy operačního systému, popsanými v předchozích kapitolách.

Konfigurační soubor obsahuje typicky nastavení globálních vlastností, jako je například úroveň ladicích informací, záznam o činnosti směrovače či jeho identifikátor. Za nimi pak následují popisy parametrů jednotlivých směrovacích protokolů v jednotném tvaru:

```
protocol typ_protokolu {
    parametry
}
```

Z globálních voleb stojí za zmínku v první řadě identifikátor směrovače. Je jím IPv4 adresa (i v případě IPv6 směrovače, identifikátory jsou čtyřbajtové). Doporučuji stanovit jej explicitně:

```
router id IPv4_adresa;
```

Pokud byste to neudělali, použije se nejnižší z IPv4 adres přiřazených skutečným síťovým rozhraním[1]. Globálně se nastavuje také vedení záznamů o činnosti směrovače příkazem:

```
log kam co;
```

Parametr *kam* určuje, kam mají být příslušné informace zaznamenávány. Můžete použít klíčová slova `syslog` pro záznam systémovým programem *syslog*, `stderr` pro jejich odesílání do standardního chybového výstupu nebo uvést jméno cílového souboru uzavřené do uvozovek. *Co* rozhoduje o tom, kterých informací se dané nastavení týká. Klíčové slovo `all` se vztahuje na všechny typy událostí. Nebo můžete ve složených závorkách uvést čárkami oddělovaný seznam tříd událostí. Definovány jsou třídy `info`, `warning`, `error`, `fatal`, `debug`, `trace`, `remote` (chyby sousedů), `auth` (problémy s autentizací) a `bug` (vnitřní chyby BIRDu). Ve výchozím nastavení se vše zaznamenává přes *syslog*. Chcete-li například vše zapisovat do souboru */var/log/bird.log*, použijte:

```
log "/var/log/bird.log" all;
```

Na globální úrovni lze také nastavit implicitní úroveň ladicích informací. Asi nejčastěji vás budou zajímat události spojené s činností směrovacích protokolů (`debug protocols`). Nastavení lze pak přepsat ve vlastnostech každého jednotlivého protokolu. Hodnotou může být `all`, `off`, nebo ve složených závorkách uzavřený čárkami oddělovaný seznam ladicích událostí `states` (zahájení/ukončení protokolu), `routes` (změny ve směrování), `filters` (záznamy o filtrování), `interfaces` (události vyvolané rozhraními), `events` (interní události protokolu) a `packets` (odeslané a přijaté pakety daného protokolu). Pokud by měl BIRD zaznamenávat změny stavu, směrování a rozhraní používaných protokolů, vypadalo by globální nastavení následovně:

```
debug protocols { states, routes, interfaces };
```

18.1.2 Protokoly

Interakce směrovací tabulky BIRDu s okolím probíhá prostřednictvím protokolů. V jejich nastavení se skrývá jádro celé konfigurace. Podívejme se na ně podrobněji.

Začnu pseudoprotokolem `kernel`, který zprostředkovává styk se systémovou směrovací tabulkou. Má-li BIRD řídit směrování daného stroje, bude se exportovat vše. Podobně by informace měly téci i v protisměru, což znamená instrukcí `learn` vydat BIRDu pokyn, aby se učil cesty ze systé-

1: kromě smyčky (loopback)

mových tabulek, a případně filtrem `import` přitékající informace omezit. Volbou `scan time` určíte, po kolika sekundách je má procházet. Tato pravidelná kontrola se provádí jen pro jistotu, moderní systémy informují o změně systémové tabulky okamžitě.

Při ukončení může BIRD „své“ cesty ze systémové tabulky vymazat, nebo je v ní ponechat. Ve druhém případě použijte instrukci `persist`. Konfigurace protokolu `kernel` by mohla obsahovat:

```
protocol kernel {
    learn yes;
    scan time 10;
    persist yes;
    import all;
    export all;
}
```

Má-li systém více směrovacích tabulek, může se sekce `kernel` vyskytovat v konfiguračním souboru opakovaně. Instrukcí `kernel table` *číslo* u každé z nich určíte, které systémové tabulky se týká.

`device` je minimalistický „protokol“, který nemá nic společného se směrováním. Díky němu BIRD získává informace o síťových rozhraních v systému a jejich stavu. Opět dostává informace přímo od systému a lze předepsat, jak často si je má pro jistotu projít sám.

Pomocí `interface "`*název*`"` lze stanovit parametry konkrétního rozhraní. Má-li více adres, bude vás zajímat instrukce `primary`, jíž určíte jeho primární adresu. Konfigurace zařízení by mohla vypadat třeba následovně:

```
protocol device {
    scan time 15;
    interface "eth0" {
        preferred 10.1.2.3;
        preferred 2001:db8:1:1::1;
    };
}
```

Blížíme se ke směrování, ale pořád ještě jsme se nedopracovali k opravdovým protokolům. Pomocí protokolu `static` lze do směrovací tabulky BIRDu vkládat statické položky. Instrukce tohoto protokolu mají tvar:

`route` *prefix* `via` *kudy*`;`

Jako parametr *kudy* může vystupovat buď adresa sousedního směrovače, nebo v uvozovkách uzavřený název rozhraní. Ve druhém případě statická položka oznamuje, že stroje s daným prefixem jsou přímo dosažitelné tímto rozhraním. Statické přiřazení prefixu 2001:db8:1:2::/64 rozhraní *eth1* a implicitní cestu vedoucí ke směrovači fe80::abcd dostupnému rozhraním *eth0* by zajistily tyto příkazy:

```
protocol static {
    route 2001:db8:1:1/64 via "eth1";
    route ::/0 via fe80::abcd%eth0;
}
```

Statické cesty se hodí také k odmítání některých cílových adres. Jako hodnotu parametru *kudy* můžete použít `drop` (datagram potichu zahodit), `reject` (zahodit a poslat odesilateli ICMP zprávu o nedosažitelnosti cíle) nebo `prohibit` (zahodit se zprávou, že cíl byl správcem zakázán). Má-li váš směrovač potichu ignorovat pakety směřující na dokumentační prefix 2001:db8::/32, zatímco odesilatelům paketů zaslaných na adresy lokální pro místo vracet chybové zprávy, zadejte do konfigurace:

```
protocol static {
    route 2001:db8::/32 drop;
    route fec0::/10 prohibit;
}
```

Konfigurace protokolu RIP je velmi jednoduchá. Můžete sice nastavovat různé parametry a přepisovat tak standardní hodnoty pro RIP jak celek i pro jednotlivá rozhraní, taková potřeba bude ale dost vzácná. O adresy přímo připojených sítí se starat nemusíte, BIRD se je naučí ze systémové směrovací tabulky. Takže většinou vystačíte s výčtem rozhraní, na nichž má protokol běžet.

BIRD podporuje několik verzí protokolu, pro IPv6 je určena instance pojmenovaná `rip ng`. Musí obsahovat právě jeden kanál `ipv6`, v němž nastavíte pravidla pro výměnu informací o cestách. Kompletní konfigurace BIRDu, který má provozovat RIP na všech Ethernetech s metrikou 1 a řídit jím systémové směrování může vypadat takto:

```
router id 10.1.2.3;

protocol kernel {
    learn yes;
    import all;
    export all;
}
```

```
protocol device {
    scan time 15;
}

protocol rip ng {
    ipv6 {
        import all;
        export all;
    };
    interface "eth*" {
        metric 1;
    };
}
```

V případě protokolu OSPF je konfigurace složitější – musíte definovat oblasti a zařadit do nich rozhraní. Slouží k tomu příkaz:

```
area identifikátor {
    parametry
};
```

Mezi *parametry* nemůže chybět `interface` určující rozhraní patřící do dané oblasti a definující vlastnosti tohoto rozhraní. Z nejčastějších lze uvést cenu (`cost`) či případný seznam sousedů (`neighbors`). Koncovou oblast vyznačíte parametrem `stub`.

Poměrně běžnou potřebou je agregovat směrovací informace z oblasti a za její hranice posílat místo detailů jen kratší prefixy obsahující všechny místní sítě. Toho lze dosáhnout instrukcí:

```
networks { prefix1; prefix2; ... };
```

Za prefix lze připojit `hidden`, pokud nemá být propagován do ostatních oblastí.

Ještě je třeba zmínit požadavky na zahájení sekce pro OSPF. Pro IPv6 musíte za název protokolu `ospf` přidat `v3`, protože je třeba použít verzi 3. Následuje povinné jméno – instancí OSPF může být více. Chcete-li jím směrovat IPv4 i IPv6, bude jich více protože každý protokol vyžaduje svou instanci. Komu má sloužit určuje kanál `ipv6` nebo `ipv4` v ní.

Nastal čas na příklad, tentokrát lehce složitější – vytvoříme hraniční směrovač propojující dvě OSPF oblasti. Rozhraní *eth0* patří do páteřní oblasti 0.0.0.0, zatímco rozhraní *eth1* a *eth2* do koncové oblasti 9.8.7.6. Všechny její směrovací informace chceme agregovat do společného prefixu

2001:db8:33::/48. Kromě něj se zde vyskytuje ještě prefix 2001:db8:44::/48, který ovšem má být utajen:

```
protocol ospf v3 HlavniOSPF {
    ipv6 {
        import all;
        export all;
    };
    area 0.0.0.0 {
        interface "eth0" { cost 1; };
    };
    area 9.8.7.6 {
        stub yes;
        networks {
            2001:db8:33::/48;
            2001:db8:44::/48 hidden;
        };
        interface "eth1" { cost 1; };
        interface "eth2" { cost 1; };
    };
}
```

A opět se dostáváme k části, jež nemá se směrováním mnoho společného a je označována jako protokol jen proto, že v BIRDu je protokolem všechno. `radv` řídí vysílání ohlášení směrovače do připojených rozhraní, což je činnost, která se od směrovače očekává. Jelikož ohlašování směrovače existuje jen pro IPv6, jediným možným kanálem uvnitř `radv` je `ipv6`.

Nejvýznamnějším příkazem bude nepochybně `interface`, který pro dané rozhraní zapne ohlašování a umožňuje nastavit jeho parametry. Nejzajímavější jsou parametry ovlivňující automatickou konfiguraci síťového nastavení. Uvnitř `interface` se jedná o přepínače `managed` (použít DHCPv6 pro nastavení adresy) a `other conf` (použít DHCPv6 pro získání ostatních konfiguračních parametrů). Oba jsou implicitně vypnuty.

Příkazem `prefix` lze ovlivňovat, jaké prefixy má směrovač ohlašovat a s jakými parametry. Může se vyskytnout jak uvnitř `radv` a platí globálně, tak uvnitř `interface` s platností omezenou na dané rozhraní. Vztahuje se na všechny ohlašované prefixy vyhovující jeho adrese a použije se vždy první vyhovující. Do konfigurace proto nejprve zapisujte specifické prefixy, obecnější až po nich.

Moc často jej nebudete potřebovat, protože výchozí parametry jsou nastaveny rozumně: BIRD ohlašuje do rozhraní prefixy podle IPv6 adres, které mu byly přiřazeny. Také výchozí hodnoty

jejich parametrů obvykle nevyžadují úpravu. Díky tomu velmi často stačí jen v protokolu `radv` vyjmenovat rozhraní, do nichž mají být ohlášení posílána.

Pokud byste měli ambice zasahovat do parametrů, v první řadě vás určitě budou zajímat ty, které mají dopad na automatickou konfiguraci adres. `autonomous` povoluje či zakazuje bezstavovou autokonfiguraci adres. Implicitně je zapnutý. Kromě něj lze ovlivnit i dobu platnosti prefixu (`valid lifetime`) a preferování z něj odvozených adres (`preferred lifetime`). Hodnoty se zadávají v sekundách, implicitně prefix platí jeden den a adresy jsou preferovány 4 hodiny.

Důležitou složkou automatické konfigurace je nastavení DNS. Obvykle vystačíte se zjednodušeným tvarem příkazů:

```
rdnss IPv6_adresa;
dnssl doména;
```

První nastaví adresu místního rekurzivního DNS serveru, druhý jméno domény, která se má automaticky připojovat na konec poptávaných jmen, pokud je hledání původního jména neúspěšné. Oba lze použít opakovaně, hodnoty se pak přidávají k předchozím.

Jednoduchá konfigurace s rozesíláním ohlášení do všech Ethernetů, dvěma DNS servery (2001:db8::d1 a 2001:db8::d2) a prohledávanou doménou *nic.cz* by vypadala zhruba takto:

```
protocol radv {
    ipv6 { export all; };
    interface "eth*";
    rdnss 2001:db8::d1;
    rdnss 2001:db8::d2;
    dnssl "nic.cz";
}
```

Abych to trochu zkomplikoval, přepnu rozhraní *eth0* na konfiguraci pomocí DHCPv6 a adresy s prefixem 2001:db8:1:f00::/56 odvrhnu vynulováním doby jejich preference:

```
protocol radv {
    ipv6 { export all; };

    interface "eth0" {
        managed yes;
        prefix ::/0 { autonomous no; };
    };
```

```
    interface "eth*";

    rdnss 2001:db8::d1;
    rdnss 2001:db8::d2;
    dnssl "nic.cz";

    prefix 2001:db8:1::/56 {
        preferred lifetime 0;
    };
}
```

18.1.3 Řízení běžícího BIRDu

Činnost démona vychází z konfiguračního souboru *bird.conf*. Pokud se jeho obsah za běhu změnil, musíte běžící program vyzvat, aby si načetl aktuální verzi a přizpůsobil jí své chování. K tomu slouží obvyklý signál HUP, takže použijte:

```
kill -s HUP číslo_procesu
```

Stejného efektu a mnoha dalších navíc se ale dá dosáhnout příjemnější cestou – interaktivním programem *birdc*. Jedná se o specializovaného klienta, který komunikuje se směrovacím démonem a umožňuje z něj získávat informace a ovlivňovat jeho činnost. Na rozdíl od směrovačů Cisco či dále popsaného programu *FRR* ale interaktivní rozhraní neumožňuje ručně zasahovat do konfigurace. Chcete-li změnit chování BIRDu, musíte upravit konfigurační soubor a načíst jej.

Spusťte *birdc*, ohlásí se váš démon a můžete mu interaktivně zadávat příkazy. Kdykoli během práce je vám k dispozici nápovědná klávesa `?`, která zobrazí vaše možnosti – seznam příkazů či možná pokračování již rozepsaného příkazu.

K zobrazování aktuálního stavu slouží `show` s dost pestrou paletou možností. Základní informace poskytne `show status`, přehled směrovacích protokolů dodá `show protocols`, rozhraní zobrazí `show interfaces` a směrovací tabulku umožní zkoumat `show route` s možnostmi dalšího upřesnění, jaké cesty vás zajímají. Za `show` může následovat i jméno protokolu k zobrazení informací specifických pro daný protokol.

Z akčních příkazů budete asi nejčastěji používat `configure`, který pobídne běžícího démona, aby si načetl aktuální verzi konfiguračního souboru a upravil své chování podle ní. Má tedy stejný účinek jako výše zmíněný signál HUP. Můžete také zakazovat, povolovat či restartovat jednotlivé protokoly. Slouží k tomu trojice:

```
disable protokol
enable protokol
restart protokol
```

Na místě *protokolu* může stát i klíčové slovo `all`, má-li mít příkaz plošný účinek. Pozor na příkaz `reload`, jehož název by mohl svádět k domněnce, že znovu načte konfiguraci (což dělá `configure`). `reload` se týká směrovacího protokolu, jehož jméno uvedete v argumentu, a způsobí nový export a import cest mezi ním a směrovací tabulkou. Přidáním `in` nebo `out` za `reload` omezíte obnovení jen na import, resp. export.

A pokud byste chtěli démona zcela ukončit, použijte příkaz `down`. Skončí jak BIRD, tak *birdc*, který už si nemá s kým povídat.

18.2 FRRouting

Free Range Routing aneb *FRRouting* aneb *FRR* je mladý program s dlouhou tradicí. Kdysi dávno vznikl softwarový směrovač jménem *Zebra*. Byl docela populární a dočkal se nemalého rozšíření, ovšem pak začal vývoj zpomalovat. Proto se z něj odštěpil mladý a dynamický projekt *Quagga* a začal šlapat do pedálů. Postupem času Zebru nahradil, ovšem pak začal jeho vývoj zpomalovat. Proto se z něj v roce 2017 odštěpil mladý a dynamický projekt FRR a začal šlapat do pedálů. Jeho web má adresu:

https://frrouting.org/

Licence je opět GNU GPL. Také podporované systémy jsou podobné: Linux, FreeBSD, NetBSD a OpenBSD, omezeně i Solaris a MacOS, pro některé je k dispozici v podobě předem připravených balíčků.

Klíčové vlastnosti, mezi něž patří například neobvyklá struktura programu, zdědil FRR po svých předchůdcích. Včetně toho, že centrální démon se jmenuje *zebra*. Podobně jako BIRD, i FRR má modulární strukturu. Tady je ovšem míra samostatnosti jednotlivých komponent podstatně větší. FRR působí spíše jako skupina spolupracujících oddělených programů než jako jeden program s moduly.

Středobodem všeho dění je démon *zebra*. Ten v sobě shromažďuje směrovací informace, spolupracuje s jádrem systému a upravuje jeho směrovací tabulky. Ostatní démoni, jako jsou *ripd*, *ripngd*, *ospfd* či *bgpd*, slouží jako rozhraní centrálního démona pro daný směrovací protokol.

Tato koncepce je nepochybně zajímavá a stylově čistá. Přináší nové možnosti – můžete například rozprostřít démony jednoho FRR po několika počítačích. Má však i své negativní rysy. Tím nej-

významnějším je roztříštěnost ovládání. Tradičně míval každý z démonů svůj vlastní konfigurační soubor a své vlastní interaktivní rozhraní pro řízení. Autoři FRR jsou si vědomi, že tento režim fungování je pro uživatele nepohodlný. FRR jej sice nadále podporuje[2], ale nabízí i integrovaný přístup, kdy je veškerá konfigurace v jednom souboru a se všemi démony komunikujete pomocí *vtysh* (viz níže).

18.2.1 Základy konfigurace

FRR můžete řídit prostřednictvím konfiguračních souborů nebo se k němu připojit, zadávat příkazy interaktivně a následně je případně uložit. Konfigurační soubory jsou i v integrované podobě tři, obvykle je najdete v adresáři */etc/frr/*, ale v konkrétní distribuci se umístění samozřejmě může lišit:

- *daemons* určuje, kteří démoni mají být spuštěni,
- *vtysh.conf* řídí chování interaktivního rozhraní *vtysh*,
- *frr.conf* obsahuje vše ostatní.

Pokud byste preferovali samostatné konfigurační soubory, jejich názvy dodržují jednotné schéma *jméno_démona.conf*.

Konfigurace vždy začíná souborem *daemons*, který je třeba editovat ručně. Implicitně se nespouští žádný z démonů. Každého, který má být součástí vašeho FRR, je zde třeba uvést a pomocí `yes` zajistit jeho start. Povinně se musí spouštět démon `zebra`, vše ostatní je na vás. Pokud například hodláte používat OSPFv3 a statické cesty, měl by soubor *daemons* obsahovat:

```
zebra=yes
ospf6d=yes
static=yes
```

Chcete-li činnost FRR sledovat a ovlivňovat v přímém přenosu, můžete použít jeho interaktivní rozhraní (v dokumentaci označované jako VTY, Virtual Terminal Ynterface). Ideální je použít k tomu *vtysh*, čili *VTY shell*.

Jedná se o nástroj pro interaktivní řízení celého FRR, který kontaktuje a řídí všechny běžící démony. Konfigurační příkazy *vtysh* zahrnují příkazy jádra i jednotlivých démonů, takže můžete vše ovládat pod jednou střechou. Přístup k němu se řídí pomocí skupiny *frrvty* – program mohou spustit jen uživatelé, kteří jsou jejími členy.

Činnost *vtysh* řídí konfigurační soubor *vtysh.conf*, který je třeba vždy upravovat ručně. Naštěstí to není nijak pracné, protože typicky bude obsahovat jediný konfigurační příkaz:

2: Dá se zapnout příkazem `no service integrated-vtysh-config`.

```
service integrated-vtysh-config
```

jestliže chcete mít konfiguraci integrovánu v jednom souboru, nebo:

```
no service integrated-vtysh-config
```

pokud dáváte přednost odděleným konfiguracím. Pokud *vtysh.conf* neobsahuje ani jeden z nich, zařídí se *vtysh* podle aktuální situace: existuje-li *frr.conf*, bude pracovat s integrovanou konfigurací, jinak bude zapisovat do oddělených souborů.

Jednotliví démoni při startu nejprve hledají společný *frr.conf* a pokud jej nenajdou, načtou konfiguraci ze svého specifického souboru. Je velmi záhodno zvolit si jeden režim konfigurace a ten důsledně využívat, jinak snadno oklamete sami sebe.

Dokumentace doporučuje režim se samostatnými soubory pro každého démona, protože jedna chyba v syntaxi společného konfiguračního souboru může postihnout všechny. Na druhé straně si ovšem takové chyby rychle všimnete a opravíte ji.

Autoři se snažili, aby příkazy a ovládání FRR co nejvíce připomínaly směrovače firmy Cisco Systems. Pokud znáte tuto platformu, měli byste být jako doma[3]. Při interaktivní práci oceníte především dva pomocníky: tabulátor a otazník.

Tabulátor automaticky doplňuje příkazy. Napište prvních pár znaků, stiskněte **Tab** a program si sám doplní zbytek příkazu. Pokud je začátek jednoznačný. V opačném případě nabídne možná pokračování.

Otazník je ještě lepší, protože poskytuje nápovědu. Stiskněte jej kdykoli a dostanete informace o tom, jaké jsou vaše aktuální možnosti. Máte-li prázdný příkazový řádek, **?** zobrazí seznam hlavních příkazů. Vyberete si řekněme `show`. Napište příkaz a znovu **?**. Tentokrát je odpovědí seznam parametrů, kterými lze pokračovat po `show`. A tak dále a tak podobně.

Zajímat by vás mohl i příkaz `list` který vypíše seznam všech příkazů (včetně parametrů) použitelných v dané situaci. Přehled těch nejčastějších uvádí tabulka 18.1. Příkazy nemusíte vypisovat celé, stačí jen začátky slov, pokud jsou jednoznačné. Místo `show interface` stačí jen `sh in`, ulevíte svému tabulátoru. Ostatně i v tabulce některé zkracuji.

Interaktivní zásahy do konfigurace vám umožní příkaz:

3: A zjistíte, že v obývacím pokoji chybí dvě stěny, zatímco uprostřed kuchyně roste strom. Narazíte totiž na řadu odlišností. FRR jednak neimplementuje zdaleka vše, navíc se příkazy směrovačů Cisco postupem času vyvíjejí, ale FRR se drží těch původních.

`show interface`	zobrazí stav rozhraní
`show ip route`	aktuální směrovací tabulka IPv4
`show ipv6 route`	aktuální směrovací tabulka IPv6
`config term`	přechod do konfiguračního režimu
`show running`	zobrazení aktuální konfigurace
`write file`	uložení aktuální konfigurace do souboru
`reload`	restart démona
`exit`	opuštění konfiguračního režimu či celého démona

Tabulka 18.1: Nejběžnější interaktivní příkazy

```
config term
```

jímž vstoupíte do konfiguračního režimu. Pokud si nebudete jisti, jaký je vlastně aktuální stav programu, použijte `show run` (nebo `write term`), který vám vypíše celou momentálně platnou konfiguraci.

Nezapomínejte, že interaktivně provedené konfigurační kroky ovlivňují aktuální činnost programu, ale s jeho prvním restartem zmizí. Má-li být účinek trvalý, musíte je uložit do konfiguračního souboru. Slouží k tomu příkaz:

```
write file
```

vtysh se chová kontextově. To znamená, že některými příkazy změníte kontext a příkazy následující budou vyhodnocovány v něm. Aktuální kontext je zobrazován ve výzvě k zadávání příkazů. Za příklad poslouží výše zmíněný `config term`, který přepne do konfiguračního kontextu. Výzva se změní na:

```
host (config)# _
```

Když následně přejdete na určité rozhraní, změníte tím kontext na konfiguraci rozhraní, což se opět promítne do výzvy:

```
host (config)# interface eth0
host (config-if)# _
```

Ve zbytku kapitoly popíši konfiguraci vybraných démonů.

18.2.2 zebra

Centrální démon slouží především k práci s jednotlivými rozhraními. Logika práce s nimi odpovídá směrovačům Cisco. Chcete-li upravovat vlastnosti rozhraní, musíte se po vstupu do konfiguračního režimu přepnout na vybrané rozhraní příkazem:

```
interface jméno
```

Skutečnost, že konfigurujete rozhraní, se projeví přítomností nápisu `config-if` ve výzvě příkazového řádku. Následně pak můžete nastavovat jednotlivé parametry, jako třeba stručný popis (příkaz `description`) nebo adresu:

```
ipv6 address adresa/délka_prefixu
```

Toto nastavení se okamžitě promítne do operačního systému, jak si můžete ověřit pomocí *ifconfig*. Existující adresu můžete rozhraní odebrat tak, že příkazu pro její nastavení předřadíte slovo `no`. Toto je obecný princip, `no` na začátku umožňuje negovat libovolný konfigurační příkaz.

Pro řízení ohlášení směrovače slouží příkazy skupiny `ipv6 nd`. Implicitně je vypnuto, musíte je pro příslušná rozhraní aktivovat příkazem:

```
no ipv6 nd suppress-ra
```

K dispozici je celá řada parametrů ohlášení. Klíčové jsou samozřejmě prefixy které bude obsahovat:

```
ipv6 nd prefix prefix/délka
```

Za adresu prefixu lze ještě připojit informaci o životnosti, zakázat automatickou konfiguraci či posílat kompletní adresu směrovače pro hledání domácích agentů.

Důležité jsou také údaje pro nastavení DNS. Zajišťují je příkazy:

```
ipv6 nd rdnss IPv6_adresa_DNS_serveru
ipv6 nd dnssl konec_domény
```

Lze je používat kombinovaně a ohlašovat tak několik místních DNS serverů, resp. několik přípon přidávaných při hledání jmen.

FRR sám o sobě nedovede vytvářet nová rozhraní (například tunely). Musíte je založit na úrovni operačního systému a ve směrovacím programu je pak jen využíváte jako kterékoli jiné rozhraní.

Uvedu příklad konfigurace rozhraní pro počítač, který má dva Ethernety do lokální sítě a je připojen tunelem (rozhraní `sit0`) kamsi ven. V místní síti `eth0` se používá bezstavová automatická konfigurace s DNS servery 2001:db8::d1 a 2001:db8::d2 a při hledání se přidává přípona *nic.cz*, v síti `eth1` probíhá automatická konfigurace výlučně pomocí DHCPv6 (bezstavová je zakázána). Do tunelu se ohlášení směrovače neposílá. Mohla by vypadat třeba takto:

```
interface lo
    ipv6 nd suppress-ra

interface eth0
    description Hlavni segment
    ipv6 address 2001:db8:1:1::aaaa/64
    no ipv6 nd suppress-ra
    ipv6 nd prefix 2001:db8:1:1::/64
    ipv6 nd rdnss 2001:db8::d1
    ipv6 nd rdnss 2001:db8::d2
    ipv6 nd dnssl nic.cz

interface eth0
    description Uctarna
    ipv6 address 2001:db8:1:2::bbbb/64
    no ipv6 nd suppress-ra
    ipv6 nd prefix 2001:db8:1:2::/64 no-autoconfig
    ipv6 nd managed-config-flag

interface sit0
    description Externi pripojeni
    ipv6 address 2001:a:b:c::2/64
    ipv6 nd suppress-ra
```

18.2.3 static

U předchůdců byla konfigurace statických cest obsažena v jádře, do FRR pro ni přibyl samostatný démon pojmenovaný `static`. Základním příkazem je:

`ipv6 route` *prefix/délka kudy*

Jako parametr *kudy* můžete uvést buď adresu směrovače, kterému se mají příslušné datagramy předávat, nebo název rozhraní, kterým je má FRR odesílat ven. Speciální rozhraní `null0` způsobí, že vyhovující datagramy budou potichu zahazovány. Na konec příkazu `ipv6 route` lze ještě připojit údaj o vzdálenosti.

Řekněme, že datagramy směřující do lokální sítě (2001:db8:1::/48) chceme předávat směrovači 2001:db8:1:1::abcd a jako implicitní cestu budeme používat zmíněný tunel `sit0`. Zařídí to příkazy:

```
ipv6 route 2001:db8:1::/48 2001:db8:1:1::abcd
ipv6 route ::/0 sit0
```

18.2.4 ripngd

Konfigurace RIPng je velmi jednoduchá. Zahájíte ji příkazem:

```
router ripng
```

Hlavní částí konfigurace RIPng je definice rozhraní či sítí, na kterých má běžet. Slouží k tomu:

```
network rozhraní
```

Místo *rozhraní* můžete také uvést síť (v obvyklém tvaru *prefix/délka*), avšak rozhraní jsou podstatně častější.

Existuje několik příkazů, kterými se dá ovlivnit obsah ohlašovaných informací. Prvním z nich je `redistribute`, jenž řídí předávání informací získaných z jiných zdrojů do RIPng. Jako parametr může sloužit název jiného směrovacího protokolu – například:

```
redistribute bgp
```

předává do RIPng cesty, které se dozvěděl z BGP. Častými hodnotami jsou též `static` (předává statické cesty z démona *static*) a `connected` (ohlašuje přímo připojené sítě).

Druhý příkaz z této skupiny přikazuje směrovači, aby do RIPu zahrnul i implicitní cestu:

```
default-information originate
```

Na závěr opět uvedu příklad pro náš fiktivní směrovač se dvěma Ethernety a jedním tunelem. Spustím RIPng na všech rozhraních a nechám šířit informace o implicitní cestě:

```
router ripng
    network eth0
    network eth1
    network sit0
    redistribute static
    redistribute connected
    default-information originate
```

18.2.5 ospf6d

Počátkem roku 2019, kdy vychází toto vydání, implementace OSPFv3 ve FRR za sebou táhne velkou kouli na noze – nepodporuje oblasti. Můžete směrovací protokol nasadit, ale jen na vnitřní směrovač, jehož všechna rozhraní leží ve stejné oblasti. Konfiguraci zahajuje deklarace protokolu a přiřazení identifikátoru směrovači:

```
router ospf6
router-id identifikátor
```

Identifikátor se zapisuje ve stejném formátu jako IPv4 adresa a pokud váš směrovač nějakou má, je nejlepší použít jako identifikátor právě ji. Nemají-li vaše směrovače IPv4 adresy, je třeba stanovit si pravidla pro jejich rozlišení – můžete například použít IP adresy z některé z neveřejných sítí (třeba 10.0.0.0, ať netroškaříme).

Až se jednou naučí oblasti, pravděpodobně se vrátí příkazy, které pro ně měla *Quagga*. Jedním se přidělovalo rozhraní do oblasti:

```
interface název_rozhraní area identifikátor_oblasti
```

Pro každou oblast pak bylo možné stanovit prefix, který obaluje všechny její adresy. Při předávání informací do jiných oblastí se pak celá oblast agregovala do tohoto jediného prefixu. Odpovídající příkaz zněl:

```
area identifikátor_oblasti range prefix/délka
```

Vzhledem k nepřítomnosti oblastí bude ukázková konfigurace OSPFv3 velmi jednoduchá – přidělíme jen identifikátor a nastavíme redistribuci cest z ostatních zdrojů:

```
router ospf6d
    router-id 11.22.33.44
    redistribute static rip connected
    interface eth0 area 0.0.0.0
    interface eth1 area 9.8.7.6
```

19 Ohlašování směrovače

V této kapitole se zaměříme na ohlašování směrovačů, které je klíčovou součástí bezstavové automatické konfigurace. Podíváme se jak na pozitivní stránku věci (tedy jak ohlášení posílat), ale navštívíme i temnou stranu síly, čili obranu před nechtěnými ohlášeními, jež občas zasílají zmatené stroje.

19.1 Ohlašování – radvd

U hardwarových směrovačů je rozesílání *Ohlášení směrovače* a jeho obsah součástí konfigurace daného zařízení. Chcete-li si postavit směrovač z počítače s operačním systémem typu Unix, musíte jej naučit se ohlašovat. Směrovací programy jako *BIRD* či *FRR* to dovedou zajistit a nabízejí ve své konfiguraci příslušné příkazy.

Když vám tato cesta nevyhovuje[1], musíte svůj stroj naučit ohlašování jinak. K tomuto účelu poslouží specializovaný program *Router ADVertisement Daemon (radvd)*.

Ve stávajících distribucích jej často nenajdete a pokud by byl problém opatřit si jej v podobě balíčku, poslouží web:

http://www.litech.org/radvd/

Konfigurace programu je uložena zpravidla v souboru */etc/radvd.conf*. Obsahuje definice chování *radvd* pro jednotlivá rozhraní. Každé z nich má tvar

```
interface jméno {
    volby_rozhraní
    prefix prefix/délka {
        volby_prefixu
    };
    případné další prefixy
};
```

Nejdůležitější volby rozhraní shrnuje tabulka 19.1. Vedle nich existuje i řada dalších, například pro nastavení všech potřebných časových intervalů. V běžných případech však zpravidla vystačíte s implicitními hodnotami.

1: Například když usoudíte, že si vystačíte se statickým směrováním.

`AdvSendAdvert`	Má se do daného rozhraní posílat ohlášení směrovače? Přípustnými hodnotami jsou `on` a `off`.
`AdvManagedFlag`	Má se použít také stavová automatická konfigurace?
`AdvOtherConfigFlag`	Má se stavová konfigurace použít pro zbývající prvky konfigurace (tedy jiné než adresy)?
`RDNSS`	Adresy rekurzivních DNS serverů oddělené mezerami.
`DNSSL`	Přípony doménových jmen oddělené mezerami.
`AdvDefaultLifetime`	Doba životnosti oznámení o implicitním směrovači v sekundách.
`AdvDefaultPreference`	Priorita oznámení o implicitním směrovači. Hodnoty `low`, `medium` a `high`.
`AdvHomeAgentFlag`	Je směrovač ochoten vykonávat roli domácího agenta?
`AdvHomeAgentInfo`	Má do ohlášení směrovače přidávat volbu s informacemi o domácím agentovi?
`HomeAgentPreference`	Udává preferenci domácího agenta.

Tabulka 19.1: Volby rozhraní v konfiguraci *radvd*

Sortiment voleb prefixu je podstatně užší a až na výjimky vystačíte s jejich implicitním nastavením. Mezi nejvýznamnější patří `AdvOnLink`, která v podstatě říká, že všechny stroje s tímto prefixem jsou dosažitelné na této lince. Druhá důležitá volba je `AdvAutonomous`. Povoluje použití tohoto prefixu pro bezstavovou automatickou konfiguraci adres. Implicitně jsou obě nastaveny na `on`.

Pro nasazení mobilního IPv6 je důležitá volba `AdvRouterAddr`. Nastavíte-li ji na `on` (implicitně je vypnuta), bude *radvd* posílat v ohlášení celou adresu, ne jen prefix. Zasílání celé adresy požaduje mobilní IPv6.

radvd podporuje i ohlašování informací pro DNS. V konfiguraci jsou pro ně určeny sekce `RDNSS` (místní rekurzivní servery) a `DNSSL` (přípony jmen), zařazené k jednotlivým rozhraním. Mají tento obecný tvar:

```
RDNSS IPv6_adresy {
    volby_pro_DNS_servery
};
```

Adresy jednoho až tří serverů jsou oddělovány mezerami. Volby umožňují nastavit životnost ohlášených informací (`AdvRDNSSLifetime` s hodnotou v sekundách, případně `infinity`) a zda mají být při ukončení programu vymazány zasláním ohlášení s nulovou životností (`FlushRDNSS`).

Starší verze *radvd* uměly jen adresy DNS serverů, do novějších byly doplněny i prohledávané přípony. Formát je podobný, stejně tak jako volby:

```
DNSSL přípony {
    volby_pro_přípony
};
```

Velmi jednoduchý *radvd.conf* může vypadat následovně:

```
interface eth0
{
    AdvSendAdvert on;
    AdvDefaultPreference high;
    prefix 2001:db8:1:35::/64 {};
    RDNSS 2001:db8::d1 2001:db8::d2 {};
    DNSSL nic.cz {};
};
```

Složitější konfigurace se dvěma prefixy, podporou mobility a dvěma rozhraními, z nichž `eth0` používá bezstavovou konfiguraci, zatímco `eth1` povoluje jen stavovou konfiguraci protokolem DHCPv6, by mohla obsahovat:

```
interface eth0
{
    AdvSendAdvert on;
    AdvHomeAgentFlag on;
    AdvHomeAgentInfo on;
    HomeAgentPreference 1;

    prefix 2001:db8:1:35::/64
    {
        AdvRouterAddr on;
    }

    prefix fdd6:c246:22a9:35::/64
    {
        AdvRouterAddr on;
    };
```

```
    RDNSS 2001:db8::d1 2001:db8::d2 {};
    DNSSL nic.cz {};
};

interface eth1
{
    AdvSendAdvert on;
    AdvManagedFlag on;
    AdvHomeAgentFlag on;
    AdvHomeAgentInfo on;
    HomeAgentPreference 1;

    prefix 2001:db8:1:99::/64
    {
        AdvRouterAddr on;
        AdvAutonomous off;
    }

    prefix fdd6:c246:22a9:99::/64
    {
        AdvRouterAddr on;
        AdvAutonomous off;
    };

    RDNSS 2001:db8::d1 2001:db8::d2 {};
    DNSSL nic.cz {};
};
```

Máte-li připraven konfigurační soubor, stačí spustit *radvd* a ohlašování směrovače začne fungovat. Až na výjimky nebudete potřebovat žádnou z jeho voleb. Snad jedině `-C` *soubor*, kterou lze předepsat jméno konfiguračního souboru.

19.2 Likvidace „pirátských“ ohlášení – ramond

Stanice, která se chopí iniciativy a začne do sítě rozesílat svá vlastní ohlášení směrovače, může v konfiguraci ostatních napáchat pěknou paseku. Je záhodno takové aktivity přinejmenším sledovat a pokud možno potírat, aby jejich devastující účinky měly co nejmenší dopad.

Tuto službu dovedou zajistit hardwarové směrovače (viz kapitola 17 na straně 375), ale existuje pro ni i softwarové řešení. Nejpoužívanější je program *Router Advert MONitoring Daemon (ramond)*, který sleduje ohlášení směrovačů a podle svého konfiguračního souboru podniká příslušné akce. Najdete jej na adrese:

http://ramond.sourceforge.net/

Pokud pro váš systém neexistuje balíček a budete instalovat ze zdrojových kódů, připravte se na poněkud strohý přístup. Chybí obvyklý konfigurační skript, případnou adaptaci pro vlastní systém musíte provést editací souboru *Makefile*. O překlad se postará obvyklý příkaz:

```
make all
```

Instalovat výsledný *ramond* pak musíte ručně. Manuálové stránky nejsou součástí distribuce, nicméně dají se dohledat na manpages.ubuntu.com.

Základem konfigurace je soubor *ramond.conf*. Implicitně jej program hledá v */etc*, ale parametrem `-c` *soubor* si lze poručit libovolnou cestu k němu. Soubor je ve formátu XML a v distribuci najdete jeho ukázkovou verzi i s vysvětlujícími komentáři.

Celá konfigurace je zabalena do prvku `<ramond>`, jehož obsahem mohou být jen prvky `<mac-list>` definující seznamy MAC adres a `<rule>` s jednotlivými pravidly chování programu.

`<mac-list>` obsahuje seznam MAC adres používaných později k povolení či potlačení ohlášení z nich zasílaných. Má přiděleno jednoznačné jméno v atributu `name`, jednotlivé adresy jsou zabaleny do prvků `<entry>`. Jeho tvar je tedy následující:

```
<mac-list name="jméno">
  <entry>adresa1</entry>
  <entry>adresa2</entry>
  ...
</mac-list>
```

Každé pravidlo má svůj vlastní prvek `<rule>`. Při příchodu jakéhokoli ohlášení směrovače jsou pravidla procházena v pořadí podle konfigurace a první, jemuž ohlášení vyhoví, bude použito. V konfiguraci je proto třeba nejprve uvést výjimky a teprve po nich obecná pravidla.

Podmínky kladené na ohlášení jsou vyjádřeny pomocí atributů prvku `<rule>`. Můžete použít libovolnou kombinaci následujících atributů (každý se ale smí vyskytnout nanejvýš jednou a nese jen jedinou hodnotu):

- `mac` určuje MAC adresu ohlašujícího směrovače. Hodnotou atributu není vlastní adresa, ale jméno prvku `<mac-list>`, který adresy definuje.
- `prefix` omezuje ohlašovaný prefix. Hodnota atributu je interpretována jako začátek ohlášeného prefixu. Pokud prefix v ohlášení začíná uvedeným prefixem, pravidlo se použije. Hodnota `prefix="::/0"` se tedy vztahuje na libovolný ohlášený prefix.
- `interface` definuje rozhraní, z nějž ohlášení přišlo.
- `lifetime` se týká životnosti. Jedinou podporovanou hodnotou je 0, která způsobí aktivaci pravidla při ohlášení ukončujícím životnost prefixu.

Tělo pravidla definuje akci, která se má provést. Na výběr jsou tři základní možnosti:

- Prázdné tělo znamená, že ohlášení je v pořádku a *ramond* nemá nic podnikat.
- `<clear/>` požaduje likvidaci daného ohlášení. *ramond* proto vzápětí pošle stejné ohlášení, ovšem s nulovou životností, aby si všichni nežádoucí údaje vymazali.
- `<execute>`*cesta*`</execute>` požaduje spuštění skriptu s danou (absolutní) cestou. Pro spouštěný program nastaví několik proměnných prostředí, v nichž mu předá základní informace o ohlášení, jež jeho spuštění vyvolalo. Jejich přehled najdete v tabulce 19.2. Součástí distribuce je jednoduchý skript *demo.pl*, který údaje vypíše (a skončí tedy v logu).

`$PREFIX`	ohlášený prefix
`$PREFIX_LEN`	délka ohlášeného prefixu
`$SOURCE_ADDR`	zdrojová IPv6 adresa paketu
`$SOURCE_MAC`	zdrojová MAC adresa paketu
`$INTERFACE`	rozhraní, z nějž ohlášení dorazilo

Tabulka 19.2: Proměnné prostředí pro skripty spouštěné *ramond*

Každé pravidlo může obsahovat libovolný počet prvků `<execute>`, za nimiž případně může následovat `<clear/>`. Pokud je přítomen, musí být vždy až na konci pravidla.

Jednoduchá konfigurace pro koncovou síť s prefixem 2001:db8:1::/48 a dvěma směrovači s MAC adresami 0a:c3:21:5e:32:a7 a 00:4a:d7:f4:85:d1 oprávněnými ohlašovat prefixy z tohoto prostoru by mohla vypadat takto:

```
<ramond>
  <!-- seznam oprávněných směrovačů -->
  <mac-list name="smerovace">
    <entry>0a:c3:21:5e:32:a7</entry>
    <entry>00:4a:d7:f4:85:d1</entry>
  </mac-list>

  <!-- logovat zrušení od oprávněných směrovačů -->
  <rule mac="smerovace" lifetime="0">
    <execute>/etc/ramond/log cancelled</execute>
  </rule>

  <!-- povolit korektní ohlášení -->
  <rule mac="smerovace" prefix="2001:db8:1::/48">
  </rule>

  <!-- logovat a zrušit vše ostatní -->
  <rule>
    <execute>/etc/ramond/log bogus-advert</execute>
    <clear/>
  </rule>
</ramond>
```

Druhé a třetí pravidlo je myslím jasné. První se stará o případy, kdy některý z oprávněných směrovačů cosi zruší – tedy pošle ohlášení s nulovou životností. Taková událost je zajímavá, proto stojí za zaznamenání do logu.

20 DNS servery

Má-li být IPv6 rozumně použitelné, potřebuje DNS. A potřebuje obě jeho složky – tedy aby servery komunikovaly protokolem IPv6 a aby poskytovaná data mohla obsahovat relevantní záznamy. Dobrou zprávou je, že v DNS vše funguje, a to už docela dlouho.

Programům pro implementaci DNS serverů dlouhá léta dominoval BIND, který dodnes pohání většinu DNS operací. Postupem času mu ovšem vyrostla konkurence – objevily se programy jako PowerDNS, NSD či Knot DNS, které se snaží narušit monokulturu a učinit ji tak odolnější. Celkem se jim to daří, protože dokáží nabídnout stabilitu a především výkon při velké zátěži, se kterým BIND nedokáže držet krok.

Z pohledu IPv6 je potěšující, že všechny zmiňované programy bezproblémově a dlouhodobě podporují nový protokol. Můžete směle vybírat podle ostatních vlastností, z hlediska podpory IPv6 mezi nimi nepanují žádné zásadní rozdíly. Podívám se podrobněji na zoubek dvěma z nich: tradičnímu BINDu a programu Knot DNS, který vyvíjí CZ.NIC.

20.1 BIND

Berkeley Internet Name Domain (BIND) je stále nejrozšířenější implementací DNS serveru. Program vyvíjí *Internet Software Consortium (ISC)* a dává jej k dispozici zdarma v podobě zdrojového kódu. Producenti jednotlivých operačních systémů či distribucí připravují binární verze pro své miláčky. BIND již dlouhou dobu najdete snad v každém Unixu podobném operačním systému a k mání je i portace pro MS Windows.

Jedinou v současnosti podporovanou verzí je *BIND 9* (projekt verze 10 skončil neúspěchem). Čím dál tím vzácněji se jako s žijící zkamenělinou můžete dodnes setkat s některým z jeho předchůdců, jejich použitelnost pro IPv6 je však velmi omezená. *BIND 4* je nepodporuje vůbec, *BIND 8* sice umí záznamy pro IPv6, ale sám hovoří pouze IPv4. Vzhledem k tomu, že ISC prohlašuje verze 4 a 8 za zastaralé a dále je nepodporuje, postupně z Internetu mizí.

Počátkem roku 2019 nese aktuální verze číslo 9.12 a najdete v ní vše, co je potřeba. Zvládá záznamy typu AAAA i PTR, podporuje dokonce i opuštěné A6 a DNAME, hovoří plynně oběma protokoly, IPv6 adresy se mohou vyskytovat v celé řadě konfiguračních příkazů. Zkrátka mazlíček. Je sice pomalejší než verze 4 a 8, ovšem stále zvládá několik tisíc dotazů za sekundu, což většině z nás jistě vystačí.

BIND má četné automatické mechanismy, které zatím vždy fungovaly k mé spokojenosti. Když jej překládáte, sám si zjistí, zda váš systém obsahuje IPv6 knihovny. Pokud ano, přeloží se s podporou IPv6. Distribuční balíčky tuto podporu mívají také.

Dříve se obdobně choval i při startu. Ověřil si podporu IPv6 v systému a když ji nalezl, připojil se k IPv6 portu a byl připraven naslouchat. Bohužel se ukázalo, že v některých systémech se IPv4 a IPv6 porty prapodivně ovlivňují navzájem. Proto autoři programu vsadili na bezpečnější kartu a program se nyní sám od sebe nepřipojí k IPv6. Musíte mu to poručit v konfiguračním souboru *named.conf* v sekci `options` volbou:

```
listen-on-v6 { any; };
```

Místo `any` můžete samozřejmě vyjmenovat konkrétní rozhraní, na nichž chcete provozovat DNS po IPv6. Obvykle však vystačíte s globálním povolením.

Nejvýznamnější složkou konfigurace *BINDu* jsou zónové soubory jednotlivých domén. Ty jsem dost podrobně (včetně příkladů) popsal v kapitole 9 na straně 215. Základní konfigurační soubor *named.conf* by pro každou doménu měl obsahovat:

```
zone "doména" {
    type master;
    file "jméno_souboru";
};
```

Kdyby například konfigurace domény *kdesi.cz*, kterou jsem propíral v kapitole 9, byla uložena v souboru *kdesi.domena*, obsahovala by odpovídající položka *named.conf*:

```
zone "kdesi.cz" {
    type master;
    file "kdesi.domena";
};
```

Zatím jsem se věnoval BINDu v roli autoritativního serveru poskytujícího záznamy z domén, které spravuje. BIND je ovšem univerzálem a může hrát i roli rekurzivního serveru, řešícího dotazy místních klientů. A může hrát i obě tyto role zároveň – obsluhovat místní klienty a do světa zasílat autoritativní odpovědi na dotazy týkající se místní domény.

Zejména pro roli rekurzivního serveru je důležité zabezpečení, které sice přímo nesouvisí s poskytováním DNS pro nebo po IPv6, ale je tak důležité, že mu věnuji pár řádků. Stále se totiž objevují ošklivé útoky, jimiž vám mohou podstrčit do vyrovnávací paměti DNS serveru falešné údaje. Klíčem jsou rekurzivně řešené dotazy, kdy server převezme dotaz od klienta, najde na něj odpověď, pošle ji klientovi a zároveň si ji uloží do vyrovnávací paměti.

Základem útoků je položit serveru dotaz a vzápětí mu podstrčit falešnou odpověď. Je proto velmi žádoucí dovolit klást dotazy jen místním strojům. Lze použít volbu `allow-query`, která řídí, od

koho server přijímá dotazy. O něco měkčí je `allow-recursion`. Pro tazatele, kteří jí vyhoví, je BIND ochoten rekurzivně řešit jejich dotazy. A do třetice `allow-query-cache` určuje, komu je ochoten odpovídat ze své vyrovnávací paměti. Hodnotami jsou přístupové seznamy.

Doporučené nastavení je připustit dotazy od kohokoli, ale rekurzivní řešení a vyrovnávací paměť poskytovat jen místním. Pokud má například zdejší síť IPv4 prefix 10.1.2.0/24 a IPv6 prefix 2001:db8:1::/48, vypadaly by konfigurační příkazy následovně:

```
acl mistni { 10.1.2.0/24; 2001:db8:1::/48; };
options {
    allow-query { any; };
    allow-recursion { mistni; };
    allow-query-cache { mistni; };
};
```

Cizincům pak server poskytuje jen odpovědi pro domény, pro něž je autoritativní (pokud takové jsou). Místním pak poskytuje kompletní služby.

Vzpomínáte si na doporučení, že místní rekurzivní server řešící klientské dotazy by měl mít k dispozici oba protokoly? I když je umístěn v čisté IPv6 síti, která není připojena k IPv4 Internetu, měli byste mu umožnit řešit dotazy prostřednictvím IPv4. Dá se toho dosáhnout konfigurovaným tunelem mezi DNS serverem a vhodným IPv4/IPv6 směrovačem. Tentokrát se bude tunelovat obráceně – IPv4 datagramy budete balit do IPv6.

Podstatně jednodušším a vhodnějším řešením je však nastavit BINDu zprostředkovatele (forwarder). Musí to být server podporující oba protokoly, jehož konfigurace připustí rekurzivní dotazy od koncového serveru. Spolu budou hovořit IPv6, zprostředkovatel bude v Internetu pátrat oběma protokoly podle potřeby.

U koncového serveru potřebné chování zajistí příkaz `forwarders` v úvodní části `options`. Jeho hodnotou je seznam adres zprostředkovatelů, například veřejné servery Google:

```
options {
    forwarders {
        2001:4860:4860::8888;
        2001:4860:4860::8844;
    };
};
```

Má-li BIND nastaveny zprostředkovatele, zkusí dotaz nejprve řešit jejich prostřednictvím. Když se nedočká odpovědi, pokusí se najít odpověď sám. Toto chování lze změnit příkazem:

```
    forward only;
```

v `options`. Zakážete jím samostatnou aktivitu BINDu a ponecháte zprostředkovatele jako jedinou možnost, jak hledat odpovědi na dotazy. Na straně zprostředkovatele je samozřejmě třeba vhodným nastavením `allow-query` povolit dotazy ze serverů, jimž zprostředkovává přístup ke globálnímu DNS.

Od verze 9.8 má BIND implementován překladový mechanismus DNS64, jímž vytváří ze záznamů typu A s IPv4 adresami záznamy typu AAAA s IPv6 adresami složenými z pevně daného prefixu a původních IPv4. Příslušný příkaz v konfiguračním souboru *named.conf* má tvar:

```
dns64 prefix {
    volby
};
```

Můžete jej použít jak v globální sekci `options`, tak v jednotlivých pohledech (view), kterými lze definovat speciální chování[1]. Pomocí *voleb* lze řídit jeho chování – komu a pro jaké adresy se má DNS64 provádět. Neomezíte-li seznam obsluhovaných klientů volbou `clients`, bude DNS64 prováděno pro všechny tazatele. Hodnota volby obvykle vychází z přístupového seznamu určujícího adresy klientů. Volba `mapped` umožňuje ovlivnit, pro které IPv4 adresy má být mapování prováděno.

Standardně k mapování a generování záznamů AAAA dojde, když pro poptávané jméno neexistují žádné záznamy tohoto typu, jen A. Existuje-li alespoň jeden záznam typu AAAA, nebude se nic generovat. Volbou `exclude` lze dosáhnout toho, že některé adresy v záznamech typu AAAA budou v odpovědi ignorovány a server bude generovat DNS64 záznamy, i když odpověď obsahovala některé z ignorovaných IPv6 adres. DNS64 také neprovádí, pokud by tím došlo k narušení DNSSEC. Volbou `break-dnssec yes` mu napřídíte, aby mapoval i v těchto případech.

Výřez z *named.conf*, který by zajistil, aby server pro místní stroje s adresami začínajícími prefixem 2001:db8:1::/48 poskytoval DNS64 vycházející z prefixu 2001:db8:1:eeee::/96, a to bez ohledu na DNSSEC, by vypadal takto:

```
acl mistniv6 { 2001:db8:1::/48; };
...
options {
    dns64 2001:db8:1:eeee::/96 {
        clients { mistniv6; };
        break-dnssec yes;
    };
```

1: Například aby se pro dotazy přicházející z místní sitě choval jinak, než pro dotazy zvenčí.

```
    ...
};
```

20.2 Knot DNS

Jestliže BIND je nejstarší z dosud používaných implementací DNS serverů, program *Knot DNS* je naopak nejmladší mezi těmi, kterým se podařilo prosadit ve větší míře a pohánějí domény v horních patrech doménové hierarchie. Oficiálně byl představen ve verzi 0.8 na podzim roku 2011, zhruba 25 let po startu BINDu. Verze 1.0 byla vydána 29. února 2012 a zajistila mu věčné mládí, protože slaví narozeniny jen každé čtyři roky.

Knot DNS je vyvíjen sdružením CZ.NIC a používán pro doménu *cz*. Na rozdíl od BINDu je koncipován jako čistě autoritativní server, nepodporuje rekurzivní řešení dotazů. Od toho má mladšího bratra jménem *Knot Resolver*. Distribuční adresou je:

https://www.knot-dns.cz/

Překládat ze zdrojového kódu ale nejspíš nebude nutné, pro řadu distribucí už existují instalační balíčky. Je distribuován s licencí GNU GPL 3 a portován pro Linux, různé verze BSD a macOS.

S konfigurací je to u něj trochu složitější, protože kromě obvyklého textového souboru podporuje i konfigurační databázi v binárním formátu. Ta je určena pro velmi rozsáhlé konfigurační soubory, například pro zmiňovanou doménu *cz*, která má 1,3 milionu poddomén. Pro běžné použití ji rozhodně nebudete potřebovat, proto zůstanu u textového konfiguračního souboru[2]. Jeho standardním umístěním je */etc/knot/knot.conf*.

Jeho formát vychází z YAML. Sekce jsou zahájeny nadpisy s dvojtečkami, vnořování je implementováno pomocí odsazení od levého okraje. Opakující se části jsou formátovány jako pole, kde každá položka začíná předsazenou pomlčkou.

Pro komunikaci po IPv6 je klíčová sekce `server`, kde je třeba volbou `listen` určit IP adresy a porty, na nichž má přijímat dotazy. Nulová adresa znamená, že bude poslouchat na všech, které má daný stroj přiřazeny. Stejná volba se používá pro IPv4 i IPv6, držte však obě rodiny adres odděleně. Obvykle bude server poslouchat na portu 53 všech adres, což zajistí:

```
server:
    listen: 0.0.0.0@53
    listen: ::@53
```

2: Pozor, pokud konfigurační databáze existuje, má přednost před textovým souborem.

Domény, pro něž má poskytovat autoritativní odpovědi, tvoří pole v sekci `zone`. Pro každou z nich je třeba definovat jméno (`domain`) a adresář (`storage`), kde jsou uložena data. Minimalistická definice domény by vypadala zhruba takto:

```
zone:
  - domain: kdesi.cz
    storage: /var/lib/knot/zones/
```

Pokud má vše běžet hladce a efektivně, budete muset pár příkazů přidat. Autoritativní server může pro danou doménu sloužit jako primární (master), kde její data vznikají, nebo sekundární (slave), který automaticky přebírá data z primárního.

Původně si sekundární servery zjišťovaly změny a opatřovaly aktuální záznamy pro doménu pomocí běžných dotazů. Ve 21. století primární server pošle sekundárnímu upozornění[3], že došlo ke změně, a sekundární si přenese aktuální obsah celé domény (tzv. zónový přenos). *Knot DNS* neaktivuje tyto mechanismy automaticky, musíte je nastavit.

Příslušná oprávnění se týkají konkrétních serverů. *Knot DNS* pro ně používá nepřímé adresování, tak zvané odkazy (reference). Serveru přidělíte jméno (`id`) a spojíte je s adresou (`address`), případně několika adresami (budou se zkoušet v daném pořadí). K tomu slouží sekce `remote`. Definujme si dva servery – primární se jménem *prim* a sekundární *sek*:

```
remote:
  - id: prim
    address: 2001:db8:1::1

  - id: sek
    address: 2001:db8:ff::2
```

Dále už v konfiguračním souboru vystupují pod přiřazenými jmény. Výhodou je, že pokud se změní adresa serveru, stačí na jednom místě upravit jeho definici a změna se promítne do celého konfiguračního souboru.

Má-li server pro určitou doménu fungovat jako primární, musíte povolit sekundárním serverům zónové přenosy a nastavit, aby se jim zasílala upozornění na změny. Pro povolování obecně slouží přístupové seznamy (access list) v sekci `acl`. Každý má své jméno (`id`), adresy, kterých se týká (`address`), a akci (`action`). V případě zónových přenosů se jedná o akci `transfer`. Přístupový seznam, který výše zmíněnému sekundárnímu serveru *sek* povolí zónové přenosy, by obsahoval:

3: Prostřednictvím dotazu typu NOTIFY.

```
acl:
  - id: povolit_prenos
    address: 2001:db8:ff::2
    action: transfer
```

Do definice domény je pak třeba přidat odkaz na přístupový seznam (`acl`) a instrukci, aby se sekundárnímu serveru posílala upozornění (`notify`). Definice domény *kdesi.cz* by se tak poněkud rozrostla:

```
zone:
  - domain: kdesi.cz
    storage: /var/lib/knot/zones/
    notify: sek
    acl: povolit_prenos
```

V případě sekundárního serveru je třeba (opět pomocí přístupového seznamu) povolit příjem upozornění a v definici domény uvést primární server (`master`), ze kterého si má aktualizovat data. Řekněme, že náš server má zároveň sloužit jako sekundární pro doménu *cosi.cz*, jejímž primárním serverem je *prim*:

```
acl:
  - id: povolit_NOTIFY
    address: 2001:db8:1::1
    action: notify

zone:
  - domain: cosi.cz
    storage: /var/lib/knot/zones/
    master: prim
    acl: povolit_NOTIFY
```

V konfiguraci se běžně vyskytuje několik domén se stejným nastavením, které se liší jen doménovými jmény. Abyste se neopakovali, můžete používat šablony (`template`). Jedna bude výchozí (s pevným názvem `default`) a použije se na domény, kde se neodkážete na žádnou jinou. V konfiguraci zón pak uvádíte jen ty volby, které se liší od šablony.

Celá konfigurace by vypadala zhruba takto (jako výchozí definuji šablonu, podle které je tento server primární):

```
remote:
  - id: prim
    address: 2001:db8:1::1

  - id: sek
    address: 2001:db8:ff::2

acl:
  - id: povolit_prenos
    address: 2001:db8:ff::2
    action: transfer

  - id: povolit_NOTIFY
    address: 2001:db8:1::1
    action: notify

template:
  - id: default
    storage: /var/lib/knot/zones/
    notify: sek
    acl: povolit_prenos

  - id: sekundarni
    storage: /var/lib/knot/zones/
    master: prim
    acl: povolit_NOTIFY

zone:
  - domain: kdesi.cz

  - domain: cosi.cz
    template: sekundarni
```

20.3 Unbound

Když jsem zmínil alternativu BINDu v oboru autoritativních serverů, přidám ještě konkurenta pro rekurzivní server, který řeší dotazy místních klientů, ukládá si odpovědi do vyrovnávací paměti a zrychluje tak odezvy DNS. Velmi dobrou pověst a zároveň jednoduchou konfiguraci nabízí program *Unbound* nizozemské společnosti NLnet Labs:

https://nlnetlabs.nl/projects/unbound/

Tentokrát se jedná pro změnu o čistě rekurzivní server, který se nehodí pro autoritativní poskytování doménových dat. Podporuje oba síťové protokoly i všechny potřebné typy záznamů. Jeho kód je k dispozici s otevřenou licencí BSD. K dispozici je pro Linux, různé varianty BSD, MacOS i MS Windows. Nejedná se o žádného zelenáče, proto bývá k dispozici v repozitářích jednotlivých platforem.

Konfigurační soubor *unbound.conf* je standardně umístěn v */usr/local/etc/unbound*, ovšem instalační balíčky jej někdy přesouvají do systémového */etc*. Přiřazují se v něm hodnoty atributům, které ovlivňují činnost programu. Základní syntaxe je jednoduchá – atribut je určen jménem, za kterým následuje dvojtečka a hodnota nebo několik hodnot. Hierarchie mezi atributy se vyjadřuje odsazením od levého okraje.

Atributů nejvyšší úrovně je jen pár, u jednoduché konfigurace vystačíte s jediným – `server`. Zahajuje sekci se základními atributy pro celý server. Adresy, na nichž má přijímat dotazy, zadejte pomocí atributu `server`. Může se vyskytovat opakovaně, hodnoty se skládají.

K řízení přístupu slouží atributy `access-control`. Mají tvar:

`access-control:` *adresa/prefix akce*

Vyhodnocují se postupně. První, jehož *adrese* vyhovuje adresa tazatele, bude použit a rozhodne o osudu dotazu. Dostupné *akce* shrnuje tabulka 20.1.

`allow`	zodpovídat rekurzivní dotazy
`allow_snoop`	zodpovídat všechny dotazy
`deny`	zahazovat dotazy
`refuse`	zahazovat dotazy a poslat odpověď Refused

Tabulka 20.1: Akce pro řízení přístupu

Základ konfigurace, která zajistí, aby *Unbound* poslouchal oběma protokoly a zodpovídal dotazy místních strojů (z adres 10.1.2.0/24 a 2001:db8:1::/48), by vypadal zhruba takto:

```
server:
  # poslouchat na všech rozhraních
    interface: 0.0.0.0
    interface: ::0
```

```
# lokální počítače mohou rekurzivní dotazy
  access-control: 10.1.2.0/24 allow
  access-control: 2001:db8:1::/48 allow
# ostatní odmítáme
  access-control: 0.0.0.0/0 refuse
  access-control: ::/0 refuse
```

Unbound dovede syntetizovat záznamy typu AAAA podle pravidel DNS64. Přesněji řečeno obsahuje modul, který to dovede. Prefix pro mapování IPv4 adres mu sdělíte atributem `dns64-prefix`. Do sekce `server` konfiguračního souboru pak musí přibýt:

```
  module-config: "dns64 validator iterator"
  dns64-prefix: 64:ff9b::/96
```

21 Server pro DHCPv6

Pomalému vývoji specifikace DHCPv6, o němž jsem psal v části 6.5 na straně 147, odpovídá i velmi vláčné tempo jeho implementací. Dlouhá léta byl jediným univerzálně použitelným a rozumně fungujícím klientem i serverem polský *Dibbler*. Teprve v prosinci 2007 vydalo Internet Systems Consortium (pachatelé BINDu) čtvrtou verzi svého *DHCP* s podporou nového protokolu a v následné verzi 4.1 doplnilo chybějící prvky, například zprostředkovatele (relay).

Poslední dobou se na nebi DHCP objevila nová hvězda – program *Kea*, který vyvíjí také Internet Systems Consortium. Vznikl původně jako vedlejší větev projektu BIND 10, jako jeden z mála přežil jeho zhroucení a nadále se vyvíjí. ISC je teď v kuriózní situaci, kdy vyvíjí dva navzájem konkurenční projekty. Troufnu si zavěštit, že tuto činnost nebude provozovat dlouhodobě, svůj předchozí projekt ISC DHCP utlumí a nadále bude rozvíjet *Kea*. Částečně už se tak děje, server ISC DHCP je spíše udržován než aktivně vyvíjen.

Tyto dva programy nejsou jediné, ale považuji je za nejvýznamnější, proto se jim zde budu věnovat. Kromě nich dokáží poskytovat DHCPv6 služby i směrovače Cisco Systems, na nichž lze zprovoznit jak server, tak zprostředkovatele. Pokud ale konfiguraci DHCP serveru vytváříte strojově, bude pravděpodobně snazší provozovat jej na počítači, kde je k dispozici řada doprovodných užitečných programů, než na hardwarovém směrovači.

21.1 Kea

Program *Kea* je mladý a dynamický, verze 1.0 byla vydána koncem roku 2015. Proti zavedenému ISC DHCP nabízí především efektivnější kód, REST API pro vzdálenou správu a snadnou rozšiřitelnost. Najdete jej na webu:

https://kea.isc.org/

Program je k dispozici pro obvyklé podezřelé – Linux, FreeBSD, MacOS. Drobnou odlišností je licence, místo obvyklé GNU GPL autoři sáhli po ještě otevřenější Mozilla Public License verze 2.0.

Program už se stačil rozšířit, pro mnohé distribuce už jsou k dispozici instalační balíčky v obvyklých repozitářích. Pokud byste překládali ze zdrojových kódů, získáte je na výše odkazovaných stránkách a nainstalujete standardní trojicí:

```
./configure
make
make install
```

Startovat se pak může ručně spuštěním programu *kea-dhcp6*, kterému lze volbou `-c` předat cestu ke konfiguračnímu souboru. Systémovější je použít přibalený ovládací program *keactrl*:

```
keactrl start
```

spustí vše podle konfigurace z *kea-ctrl-agent.conf*, zatímco:

```
keactrl start -s dhcp6
```

jen server pro DHCPv6. *Kea* má samostatné programy pro implementaci serverů DHCP (*kea-dhcp4*), DHCPv6 (*kea-dhcp6*) a dynamických aktualizací DNS podle parametrů přidělených přes DHCP (*kea-dhcp-ddns*). Jejich konfigurace bývají odděleny, zde se budu zabývat jen DHCPv6.

Konfigurační soubor se standardně nachází v adresáři */usr/local/etc/kea* pod jménem *kea-dhcp6.conf*. Je ve formátu JSON a názvy jednotlivých voleb jsou zpracovávány jako řetězce, připravte se proto na spoustu uvozovek. Celou konfiguraci tvoří jediný objekt, který je podle syntaktických pravidel JSON uzavřen do složených závorek. Uvnitř může obsahovat několik dalších objektů, definujících chování jednotlivých komponent. Pro DHCPv6 je relevantní objekt `Dhcp6`. Základem konfiguračního souboru je konstrukce:

```
{
    "Dhcp6": {
        volby_pro_DHCPv6
    }
    další_části_konfigurace
}
```

Ve *volbách* lze nastavovat různé časové konstanty, například dobu životnosti pronajímaných síťových parametrů (`valid-lifetime`). Podstatná je definice úložiště, které má *Kea* používat, aby se informace o pronajatých parametrech mohly uchovat i přes ukončení a nové spuštění programu.

Slouží k tomu objekt `lease-database`. Jeho nejpodstatnější položkou je typ úložiště (`type`). Aktuálně podporované typy shrnuje tabulka 21.1. Nejjednodušší a nejomezenější je `memfile`, kdy se informace ukládají do textového souboru ve formátu CSV. Další položkou je třeba určit jméno souboru (`name`). Kromě toho je podporováno i několik rozšířených databází, kde položka `name` obsahuje jméno databáze a případně přístupové informace k ní. Pomocí `host` lze nastavit, že databáze se nachází na jiném stroji.

`memfile`	soubor ve formátu CSV
`mysql`	databáze MySQL
`postgresql`	databáze PostgreSQL
`cql`	databáze Cassandra

Tabulka 21.1: *Kea* – podporované typy úložišť

Následně bude třeba určit, pro která rozhraní má server odpovídat. Slouží k tomu objekt `interfaces-config` a v něm položka `interfaces`. Její hodnotou je pole[1] s názvy rozhraní. Má-li poslouchat na všech, vložte do pole jen jednu položku, jejímž názvem bude hvězdička:

```
"interfaces-config": {
    "interfaces": [ "*" ]
}
```

Kromě rozhraní je klíčovou součástí konfigurace definice podsítí, pro něž má *Kea* přidělovat konfigurační parametry. Slouží k tomu pole `subnet6`. Každá podsíť v něm má svůj objekt a v jeho položce `subnet` určen prefix. Pokud je podsíť přímo připojena k některému rozhraní tohoto stroje, přidejte položku `interface` s jeho názvem.

Má-li *Kea* pro podsíť přidělovat adresy z určitého rozsahu je třeba přidat položku `pools`. Obsahuje pole, v němž je každý dostupný rozsah adres reprezentován objektem s položkou `pool`. Její hodnotou je buď rozsah *první_adresa–poslední_adresa*, nebo prefix, pokud jsou k dispozici všechny jeho adresy.

Například konfigurace pro jednu podsíť s prefixem 2001:db8:1:1::/64, která je přímo připojena k rozhraní eth0 a *Kea* v ní má přidělovat identifikátory rozhraní 1 až ffff, by vypadala zhruba takto:

```
"subnet6": [
    {
        "subnet": "2001:db8:1:1::/64",
        "interface": "eth0",
        "pools": [
            { "pool": "2001:db8:1:1::1 - 2001:db8:1:1::ffff" }
        ]
```

1: Podle pravidel JSON uzavřené do hranatých závorek, jednotlivé položky jsou oddělovány čárkami.

```
        }
]
```

Pevné přidělení síťových parametrů[2] se v terminologii *Kea* označuje jako rezervace a slouží k němu pole `reservations` uvnitř podsítě. Každá rezervace je v něm uložena jako objekt. Jedna jeho položka identifikuje klienta buď pomocí DUID (`duid`), nebo MAC adresy (`hw-address`). Dalšími položkami jsou parametry, které se mají klientovi přidělit. Patří mezi ně především adresy obsažené v poli `ip-addresses`. Rozšiřme naši podsíť o dvě ukázkové rezervace:

```
"subnet6": [
    {
        ...
        "reservations": [
            {
                "duid": "01:02:03:04:05:06:07:08:09:0A",
                "ip-addresses": [ "2001:db8:1:1::123" ]
            }
            {
                "hw-address": "01:02:03:04:05:06",
                "ip-addresses": [ "2001:db8:1:1::456" ]
            }
        ]
    }
]
```

Ze základních ingrediencí DHCPv6 zbývají ještě volby. Jsou představovány polem `option-data`, které se může vyskytnout na různých místech: v objektu `Dhcp6` platí pro všechny podsítě, uvnitř `subnet6` platí pro danou podsíť a uvnitř rezervace se vztahuje jen na danou rezervaci. Jedná se o pole, jehož prvky jsou objekty představující jednotlivé volby. Mají dvě základní položky – `name` stanoví jméno volby a `data` její obsah.

Nejpoužívanějšími volbami jistě bude nastavení DNS. Pod jménem `dns-servers` lze zadat pole adres místních rekurzivních serverů a pod jménem `domain-search` řetězec znaků s příponou, kterou mají stroje přidávat za hledaná doménová jména. V ukázce nastavíme dva servery s adresami 2001:db8::d1 a 2001:db8::d2 a příponu *nic.cz*. Tyto informace bývají společné pro všechny, proto je nastavíme pro celé DHCPv6. Celý konfgurační soubor pro *Kea* by vypadal:

2: Nejčastěji se týká adres, ale může se jednat i o specifické konfigurační parametry pro tiskárnu nebo pro počítač, který si má při startu stáhnout operační systém ze sítě.

```
{
    "Dhcp6": {
        "valid-lifetime": 7200,
        "lease-database": {
            "type": "memfile",
            "name": "/var/kea/leases6.csv"
        }
        "interfaces-config": {
            "interfaces": [ "*" ]
        }
        "option-data": [
            {
                "name": "dns-servers",
                "data": [ "2001:db8::d1", "2001:db8::d2" ]
            },
            {
                "name": "domain-search",
                "data": "nic.cz"
            }
        ]
        "subnet6": [
            {
                "subnet": "2001:db8:1:1::/64",
                "interface": "eth0",
                "pools": [
                    { "pool": "2001:db8:1:1::1 - 2001:db8:1:1::ffff" }
                ]
                "reservations": [
                    {
                        "duid": "01:02:03:04:05:06:07:08:09:0A",
                        "ip-addresses": [ "2001:db8:1:1::123" ]
                    }
                    {
                        "hw-address": "01:02:03:04:05:06",
                        "ip-addresses": [ "2001:db8:1:1::456" ]
                    }
                ]
            }
        ]
    }
}
```

Kea dovede i bezstavový DHCPv6 server, pokud by to bylo potřeba. Stačí jednoduše z konfigurace vypustit `subnet6` a ponechat jen definice parametrů, rozhraní, úložiště typu `memfile` (i když se nepoužívá, v konfiguraci je vyžadováno) a voleb se zasílanými parametry.

Další schopností programu je delegace prefixů pro různé podsítě. Do `subnet6` lze pro tento účel přidat pole `pd-pools` s informacemi o balících adres, ktré lze k tomuto účelu používat. Každý balík má svůj vlastní prefix (`prefix` a `prefix-len`) a z něj alokuje prefixy o délce určené položkou `delegated-len`, které přiděluje žadatelům. Přidělované prefixy nemusí odpovídat prefixu podsítě.

Například bychom v rámci podsítě 2001:db8:1:1::/64 chtěli žadatelům přidělovat prefixy délky 64 bitů z adresního prostoru 2001:db8:de1e::/48. Zajistí to následující konfigurace:

```
"subnet6": [
    {
        "subnet": "2001:db8:1:1::/64",
        ...
        "pd-pools": [
            {
                "prefix": "2001:db8:de1e::",
                "prefix-len": 48,
                "delegated-len": 64
            }
        ]
    }
]
```

Je třeba zdůraznit, že se jedná skutečně jen o přidělení prefixu pro adresy. Aby byl příslušný prefix také směrován, je třeba zajistit jinak.

21.2 ISC DHCP

Název této části poněkud připomíná písničku Zkratky od Ivana Mládka, ale ten program se skutečně takto krkolomně jmenuje. Jedná se o veterána, který je ve službě už od poloviny devadesátých let. Naučit starého psa novým kouskům asi dalo dost práce, takže s podporou DHCPv6 přišel teprve ve verzi 4.0 koncem roku 2007. Bydlí na adrese:

https://www.isc.org/downloads/dhcp/

Existuje pouze pro systémy typu Unix (Linux, BSD, Solaris, AIX, …), z nichž většina jej rovnou obsahuje. Pro ty ostatní si můžete stáhnout a přeložit zdrojové kódy.

ISC DHCP podporuje jak DHCPv4, tak DHCPv6, ale nikoli oba najednou. Pokud chcete provozovat na jednom stroji DHCP server pro oba protokoly, musíte spustit dva exempláře *dhcpd* a odlišit je parametrem `-4` a `-6` na příkazovém řádku. Neuvedete-li ani jeden z nich, bude se implicitně chovat jako DHCPv4 server.

Obvyklým umístěním konfiguračního souboru je */etc/dhcpd.conf*. Pokud budete provozovat dva servery na jednom stroji, můžete každému z nich předepsat na příkazovém řádku jinou konfiguraci volbou `-cf` *soubor*. Nabízí se použít pro ně jména *dhcpd4.conf* a *dhcpd6.conf*. Podívejme se, jak vypadá konfigurace pro DHCPv6.

Konfigurační soubor se skládá z příkazů dvou typů: parametrů a deklarací. Parametry ovlivňují chování programu – nastavují časové konstanty, zapínají či vypínají různé prvky. Mohou se vyskytovat v různých kontextech, které pak omezují jejich působnost. Lze definovat parametry globální, které změníte pro jednu konkrétní podsíť a ještě jiné hodnoty použijete pro konkrétního klienta. Deklarace popisují klienty a jejich uspořádání.

Podobně jako v případě programu *Kea*, i zde je základní organizační jednotkou podsíť. Pro každou podsíť, kterou má obsluhovat (přímo či přes zprostředkovatele), musí konfigurační soubor obsahovat jednu deklaraci:

```
subnet6 prefix/délka {
    parametry
    deklarace
}
```

Ještě před podsítěmi můžete uvést globální parametry. Pravděpodobně mezi ně bude patřit definice lokálních DNS serverů a implicitní domény, kterou mohou klienti automaticky připojovat ke svým dotazům. Postarají se o to:

```
option dhcp6.name-servers adresy;
option dhcp6.domain-search doména;
```

Hodnoty, má-li jich parametr víc, oddělujte čárkami. Celou definici pak vždy zakončete středníkem. Mohou být samozřejmě umístěny i uvnitř podsítě, pokud jí chcete definovat odlišné parametry DNS.

Konfiguračně nejsnazší variantou je dynamické přidělování adres z určitého rozsahu. Zajistí je příkaz `range6`, jemuž dostupný rozsah adres sdělíte buď uvedením první a poslední adresy oddělených mezerou, nebo zadáním první adresy, lomítka a délky prefixu. Dejte pozor, aby byly v souladu s prefixem své podsítě. Chcete-li v podsíti 2001:db8:1:cc::/64 dynamicky přidělovat adresy od 2001:db8:1:cc:: do 2001:db8:1:cc::ffff, použijte deklaraci:

```
subnet6 2001:db8:1:cc::/64 {
    range6 2001:db8:1:cc:: 2001:db8:1:cc::ffff;
}
```

nebo ekvivalentní:

```
subnet6 2001:db8:1:cc::/64 {
    range6 2001:db8:1:cc::/112;
}
```

Deklaracemi `pool` můžete v jedné podsíti vytvořit několik rozsahů s různou politikou, například různě dlouhými dobami zápůjčky nebo s různými omezeními na firewallech. Příkazy `allow` a `deny` pak řídíte, kteří klienti mohou získat adresu z daného rozsahu.

Jednou z používaných variant je `deny unknown-clients`, jímž zakážete přidělování adres strojům, které váš DHCP server nezná. Tedy neobsahuje pro ně deklaraci `host`. Jejím prostřednictvím můžete klientům nastavovat specifické parametry. Má tvar:

```
host jméno {
    parametry
    deklarace
}
```

Jméno musí být v rámci konfiguračního souboru jednoznačné, obvyklou hodnotou je doménové jméno příslušného počítače. Klíčovou otázkou je identifikace příslušného klienta, jež probíhá prostřednictvím DUID. Stanoví ji parametr `host-identifier` ve tvaru:

```
host-identifier option dhcp6.client-id DUID;
```

Například přidělování výše uvedených adres pouze známým klientům by zajistila skupina příkazů (pro ilustraci uvádím záznam pro jeden známý počítač):

```
subnet6 2001:db8:1:cc::/64 {
    deny unknown-clients;
    range6 2001:db8:1:cc::/112;
}

host pc1.kdesi.cz {
    host-identifier option dhcp6.client-id
        00:01:00:01:0c:00:a0:37:00:06:5b:3c:27:5a;
}
```

Pokud by neznámí klienti měli dostávat adresy z odlišného rozsahu 2001:db8:1:cc:ee::/112, úvodní konfigurace podsítě by se poněkud rozkošatila:

```
subnet6 2001:db8:1:cc::/64 {
  pool {
    deny unknown-clients;
    range6 2001:db8:1:cc::/112;
  }
  pool {
    allow unknown-clients;
    range6 2001:db8:1:cc:ee::/112;
  }
}
host ...
```

Deklarace `host` je také cestou k definování pevné adresy pro daného klienta. V takovém případě je vhodnější zařadit ji do podsítě, protože má smysl jen v jejím kontextu. Adresu definujete pomocí

```
fixed-address6 adresa;
```

Následující ukázkový konfigurační soubor zajistí přidělování adres v podsíti cc komukoli, zatímco v podsíti 1 přiděluje jen dvě pevně definované adresy. Všichni klienti obdrží shodné informace o DNS serverech a zdejší doméně:

```
option dhcp6.name-servers 2001:db8:1:1::aa, 2001:db8:1:1::bb;
option dhcp6.domain-search "kdesi.cz";

subnet6 2001:db8:1:cc::/64 {
    range6 2001:db8:1:cc::/112;
}

subnet6 2001:db8:1:1::/64 {

    host pc1.kdesi.cz {
        host-identifier option dhcp6.client-id
            00:01:00:01:0c:00:a0:37:00:06:5b:3c:27:5a;
        fixed-address6 2001:db8:1:1::33:44;
    }
```

```
    host pc2.kdesi.cz {
        host-identifier option dhcp6.client-id
            00:01:00:01:0c:00:a3:c2:00:06:5b:a0:3c:19;
        fixed-address6 2001:db8:1:1::55:66;
    }
}
```

Hodláte-li pomocí ISC DHCP realizovat bezstavový DHCPv6 server pro nastavení doprovodných síťových parametrů, půjde to docela snadno – stačí jednoduše vynechat údaje ohledně adres. Výše uvedený příklad by se v bezstavové variantě scvrkl na minimum:

```
option dhcp6.name-servers 2001:db8:1:1::aa, 2001:db8:1:1::bb;
option dhcp6.domain-search "kdesi.cz";

subnet6 2001:db8:1:cc::/64 {
}

subnet6 2001:db8:1:1::/64 {
}
```

Podobně jednoduchá je delegace prefixů pro koncové sítě. Stačí do příslušné podsítě vložit:

```
prefix6 první poslední /délka;
```

První a *poslední* jsou IPv6 adresy vymezující rozsah, ze kterého smí přidělované prefixy pocházet. *Délka* určuje, jak dlouhé mají být. Pokud bychom například pro delegace koncovým sítím strojů z podsítě 2001:db8:1:1::/64 prefix 2001:db8:de1e::/48 a přidělovali z něj 64bitové prefixy, vypadala by konfigurace zhruba takto:

```
subnet6 2001:db8:1:1::/64 {
    ...
    prefix6 2001:db8:de1e:: 2001:db8:de1e:ffff:: /64;
}
```

ISC DHCP bohužel své uživatele nerozmazluje přívětivou dokumentací (*Kea* je v tomto směru o třídu lepší). Podrobnosti je třeba vyčíst z manuálových stránek *dhcpd*, *dhcpd.conf* a *dhcp-options*.

21.3 Určení DUID

Zjištění DUID může představovat tvrdý oříšek. Kde jsou ty časy, kdy se počítače identifikovaly podle své snadno zjistitelné MAC adresy. DUID z ní sice může být odvozen, ale nejasností pro něj zbývá dost a dost. Existují tři základní možnosti, jak jej určit:

- Načíst dokumentaci klienta a vyhledat jej v jeho datech. Klienti si zpravidla DUID někam zapisují, stačí jen zjistit kam. Například ve Windows 10 se jedná o registr *HKEY_LOCAL_MACHINE\SYSTEM\CurrentControlSet\Services\Tcpip6\Parameters\Dhcpv6DUID*[3], v Linuxu o soubor */var/lib/dhcpv6/dhcp6c_duid* a podobně. Toto je čistá cesta.
- Odchytit klientovu žádost programem typu *tcpdump* či *Wireshark* a DUID v ní najít. To nemusí být úplně jednoduché, navíc některé programy vypisují obsah paketů v jiném formátu, než vyžaduje konfigurační soubor DHCP. Tuto cestu jistě zvolí každý správný haxxxor.
- Máte-li povoleno přidělování adres komukoli, můžete si klienta a jeho DUID vyhledat v protokolu o činnosti DHCPv6 serveru. Osobně mi tato varianta připadá jako nejpragmatičtější – vyhradit skupinu adres pro neznámé klienty a v záznamech o jejich přidělení vyhledat toho, který vás zajímá.

3: DUID se zobrazuje také ve výpisu příkazu `ipconfig /all`.

Část III

Přílohy

A Rezervované adresy a identifikátory

Zde uvádím přehled nejvýznamnějších adres rezervovaných IANA pro specifické účely.

A.1 Skupinové adresy

Aktuální hodnoty najdete na adrese:

http://www.iana.org/assignments/ipv6-multicast-addresses

Lokální na rozhraní

ff01::1	všechny uzly
ff01::2	všechny směrovače

Lokální na lince

ff02::1	všechny uzly
ff02::2	všechny směrovače
ff02::4	DVMRP směrovače
ff02::5	všechny OSPF směrovače
ff02::6	všechny pověřené OSPF směrovače
ff02::9	RIP směrovače
ff02::a	EIGRP směrovače
ff02::b	mobilní agenti
ff02::c	SSDP (Simple Service Discovery Protocol)
ff02::d	všechny PIM směrovače
ff02::e	RSVP zapouzdření
ff02::16	všechny MLDv2 směrovače
ff02::6a	objevování skupinových směrovačů
ff02::1:1	jméno linky
ff02::1:2	všichni DHCP agenti
ff02::1:3	lokální jmenná služba
ff02::1:ff*xx*:*xxxx*	vyzývaný uzel
ff02::2:ff*xx*:*xxxx*	informace o uzlu

Lokální v místě (site)

ff05::2	všechny směrovače
ff05::1:3	všechny DHCP servery
ff0*x*::1:1000 až 13ff	hledání síťových služeb (SLP verze 2)

Dosah podle potřeby

ff0*x*::	rezervovaná
ff0*x*::101	NTP (Network Time Protocol)

A.2 Skupinové identifikátory

Aktuální hodnoty najdete na adrese:

🔗 http://www.iana.org/assignments/perm-mcast-groupids

4000:0000	proxy sítě

A.3 Výběrové adresy

Přehled aktuálních hodnot je k dispozici na adrese:

🔗 http://www.iana.org/assignments/ipv6-anycast-addresses/

prefix:0:0:0:0	směrovače v podsíti
prefix:fdff:ffff:ffff:ff80–fffd	rezervováno
prefix::fdff:ffff:ffff:fffe	domácí agenti
prefix::fdff:ffff:ffff:ffff	rezervováno

B Specifikace IPv6

V textu jsou porůznu roztroušeny odkazy na dokumenty a definice jednotlivých komponent rozlehlého světa IPv6. Ovšem vyhledávat v textu, které RFC definuje třeba objevování sousedů, nemusí být zrovna jednoduché. Pro usnadnění orientace zde uvádím jejich tematicky uspořádaný přehled.

B.1 Jádro protokolu

základní definice IPv6
RFC 8200

volba *Upozornění směrovače*
RFC 2711, RFC 6398

jumbogramy
RFC 2675

ICMPv6
RFC 4443, RFC 4884

toky
RFC 6436, RFC 6437

požadavky na IPv6 uzel
RFC 8504

B.2 Přenos po linkových technologiích

Ethernet
RFC 2464, RFC 6085

Frame Relay
RFC 2590

Firewire (IEEE 1394)
RFC 3146

Fibre Channel
RFC 4338

Bluetooth
RFC 7668

osobní bezdrátové sítě IEEE 802.15.4
RFC 4944, RFC 6282, RFC 6775, RFC 8025, RFC 8066, RFC 8180, RFC 8480

ITU-T G.9959
RFC 7428

DECT ULE
RFC 8105

MS/TP (RS-485)
RFC 8163

FDDI
RFC 2467

Token Ring
RFC 2470

NBMA sítě (více účastníků, ale bez všesměrového adresování, např. ATM)
RFC 2491

ATM
RFC 2492

PPP
RFC 5072

B.3 Adresy

architektura adres
RFC 4291, RFC 7217, RFC 8064

zápis adres
RFC 5952

globální individuální agregovatelné adresy
RFC 3587

skupinové adresy pro IPv6
RFC 2375, RFC 7346, RFC 7371

skupinové adresy odvozené z rozhraní
RFC 4489

adresy chránící uživatelovo soukromí
RFC 4941

kryptograficky generované adresy
RFC 3972

výběrové adresy
RFC 2526, RFC 4786, RFC 7094

adresy pro překlad IPv4/IPv6
RFC 6052, RFC 8215

doporučení pro přidělování adres
RFC 6177

multihoming
RFC 3178, RFC 3582, RFC 4218, RFC 4219, RFC 7157

B.4 Směrování

RIPng
RFC 2080

OSPF pro IPv6
RFC 5340, RFC 6845, RFC 6860, RFC 7503, RFC 8362

IS-IS
ISO/IEC 10589:2002, RFC 1195, RFC 5302, RFC 5304

BGP4+
RFC 4271, RFC 4760, RFC 2545

6PE
RFC 4798

B.5 Skupinově adresovaná data

Multicast Listener Discovery (MLD)
RFC 2710, RFC 3590

Multicast Listener Discovery verze 2 (MLDv2)
RFC 3810

PIM-SM
RFC 7761, RFC 5059, RFC 5796, RFC 6226

PIM-DM
RFC 3973

BIDIR-PIM
RFC 5015

PIM-SSM
RFC 4607

B.6 DNS

IPv6 obsah v DNS
RFC 3596

doporučení pro přenos DNS po IPv6
RFC 3901

provozní otázky a problémy IPv6 DNS
RFC 4472

řešení zákaznických reverzních domén pro ISP
RFC 8501

B.7 Automatická konfigurace

objevování sousedů
RFC 4861

inverzní objevování sousedů
RFC 3122

bezstavová automatická konfigurace adres
RFC 4862, RFC 4941, RFC 7527

automatická konfigurace DNS
RFC 8106

SEND
RFC 3971, RFC 3972, RFC 6494, RFC 6495

RA Guard
RFC 6105, RFC 7113

SAVI
RFC 7039, RFC 6620, RFC 7219, RFC 7513, RFC 8074

proxy objevování sousedů
RFC 4389

DHCPv6
RFC 8415, RFC 7341, RFC 6221

přeadresování sítě
RFC 2894, RFC 4076, RFC 4192

objevování síťových služeb (SLPv2)
RFC 2608, RFC 3111, RFC 3224

B.8 IPsec

základní architektura bezpečnostních mechanismů
RFC 4301

Hlavička AH
RFC 4302

Hlavička ESP
RFC 4303

kryptografické algoritmy
RFC 8221

IKEv2
RFC 7296, RFC 8247, RFC 5998

B.9 Mobilita

podpora mobility v IPv6
RFC 6275, RFC 3776

mobilní sítě (NEMO)
RFC 3963

hierarchická mobilita
RFC 5380

proxy mobilita
RFC 5213, RFC 7864

mobilní IPv6 a IKEv2
RFC 4877

B.10 Přechodové mechanismy

obecný mechanismus tunelování IPv6
RFC 2473

dvojí zásobník a konfigurované tunely
RFC 4213

tunnel broker
RFC 3053

Tunnel Setup Protocol
RFC 5572

6rd
RFC 5569

6over4
RFC 2529

ISATAP
RFC 5214

DS-Lite
RFC 6333, RFC 6334

SIIT
RFC 7915

NAT64 a DNS64
RFC 6146, RFC 6147, RFC 7050

TRT
RFC 3142

BIH
RFC 6535

IPv4/IPv6 přechod založený na SOCKS (SOCKS64)
RFC 3089

6to4
RFC 3056, RFC 5158, RFC 6343, RFC 7526

Teredo
RFC 4380, RFC 5991, RFC 6081

NAT–PT
RFC 2766, RFC 4966

B.11 Aplikace

Happy Eyeballs
RFC 8305

Literatura

[1] Amoss J. J., Minoli D.: *Handbook of IPv4 to IPv6 Transition*
CRC Press, 2007, ISBN 0-8493-8516-4

[2] Beijnum I.: *Running IPv6*
Apres, 2006, ISBN 1-59059-527-0

[3] Blanchet M.: *Migrating to IPv6: A Practical Guide to Implementing IPv6 in Mobile and Fixed Networks*
Wiley, 2006, ISBN 978-0471498926

[4] Coffeen T.: *IPv6 Address Planning*
O'Reilly Media, 2014, ISBN 9781491908211

[5] Dostálek L. a kolektiv: *Velký průvodce protokoly TCP/IP: Bezpečnost*
2. vydání, Computer Press, 2003, ISBN 80-7226-849-X

[6] Hagen S.: *IPv6 Essentials*
O'Reilly, 2006, ISBN 978-0596100582

[7] Hughes L. E.: *The Second Internet*
InfoWeapons, 2010, ISBN 978-0-9828463-0-8
http://ipv6forum.com/dl/books/the_second_internet.pdf

[8] Huston G.: *Testing Teredo*
The ISP Column, 2011
http://www.potaroo.net/ispcol/2011-04/teredo.html

[9] kolektiv autorů (editor Dunmore M.): *An IPv6 Deployment Guide*
projekt 6NET, 2005
http://www.6net.org/book/deployment-guide.pdf

[10] kolektiv autorů: *Enabling efficient and operational mobility in large heterogeneous IP networks*
projekt ENABLE, 2008, ISBN 978-8469106471
http://www.ipv6tf.org/pdf/enablebook.pdf

[11] kolektiv autorů: *IAB Statement on IPv6*
Internet Architecture Board, 2016
https://www.iab.org/2016/11/07/iab-statement-on-ipv6/

[12] Koodli R. S., Perkins C. E.: *Mobile Inter-networking with IPv6: Concepts, Principles and Practices*
Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0471681656

[13] Li Q., Tatuya J., Shima K.: *IPv6 Core Protocols Implementation*
Morgan Kaufmann, 2006, ISBN 978-0124477513

[14] Li Q., Tatuya J., Shima K.: *IPv6 Advanced Protocols Implementation*
Morgan Kaufmann, 2007, ISBN 978-0123704795

[15] McFarland S., Sambi M., Sharma N., Hooda S.: *IPv6 for Enterprise Networks*
Cisco Press, 2011, ISBN 978-1-58714-227-7

[16] Murphy N. R., Malone D.: *IPv6 Network Administration*
O'Reilly, 2005, ISBN 978-0596009342

[17] Hagino J.: *IPv6 Network Programming*
Digital Press, 2004, ISBN 978-1555583187

[18] Sander S. a kol.: *Preparing an IPv6 Addressing Plan*
SURFnet, 2010
http://labs.ripe.net/Members/steffann/preparing-an-ipv6-addressing-plan

[19] Siil K. A.: *IPv6 Mandates: Choosing a Transition Strategy, Preparing Transition Plans, and Executing the Migration of a Network to IPv6*
Wiley, 2008, ISBN 978-0470191194

[20] Stallings W.: *Cryptography and Network Security*
4. vydání, Prentice Hall, 2006, ISBN 978-0131873162

[21] York D.: *Migrating Applications to IPv6*
O'Reilly, 2011, ISBN 978-1-449-30787-5

Publikací o IPv6 stále přibývá. Některé z nich jsou volně ke stažení z webu, do jiných můžete alespoň nahlédnout na *books.google.com*.

Rejstřík

IPV6
Pavel Satrapa

Vydavatel:
CZ.NIC, z. s. p. o.
Milešovská 5, 130 00 Praha 3
Edice CZ.NIC
www.nic.cz

4. aktualizované a rozšířené vydání, Praha 2019
Kniha vyšla jako 22. publikace v Edici CZ.NIC.

ISBN 978-80-88168-43-0 (tištěná verze)
ISBN 978-80-88168-44-7 (ve formátu EPUB)
ISBN 978-80-88168-45-4 (ve formátu MOBI)
ISBN 978-80-88168-46-1 (ve formátu PDF)

CZ.NIC | SPRÁVCE DOMÉNY CZ

Edice CZ.NIC

O knize IPv6 je novou generací základního protokolu sítě Internet. Řeší především akutní nedostatek adres, ovšem přináší i řadu dalších zajímavých vlastností. V knize se podrobně seznámíte se základními principy IPv6 i jeho podpůrných a doprovodných prvků. Kromě obecného seznámení se schopnostmi protokolu se věnuje i jeho implementacím na vybraných platformách a obsahuje některá doporučení pro praktické použití. Čtvrté vydání odráží aktuální stav příslušných specifikací – včetně nové základní definice v RFC 8200 – a především skutečnost, že po letech nesmělého přešlapování se IPv6 konečně začíná prosazovat v praxi.

O autorovi Pavel Satrapa vyučuje na Technické univerzitě v Liberci. Specializuje se zejména na počítačové sítě a programování a v těchto oblastech i často publikuje. Toto vydání IPv6 je šestnáctou z řady knih, vinoucí se až do roku 1996 k World-Wide Web pro čtenáře, autory a misionáře, první české knize o webu. Jeho články najdete zejména na serverech Root.cz a Lupa.cz.

O edici Edice CZ.NIC je jednou z osvětových aktivit správce české národní domény. Ediční program je zaměřen na vydávání odborných, ale i populárně naučných publikací spojených s Internetem a jeho technologiemi. Kromě tištěných verzí vychází v této edici současně i elektronická podoba knih. Ty je možné najít na stránkách knihy.nic.cz.

knihy.nic.cz

ISBN 978-80-88168-46-1

9 788088 168461