Počítačové sítě

Jan Outrata

KATEDRA INFORMATIKY
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

přednášky

Tyto slajdy byly jako výukové a studijní materiály vytvořeny za podpory grantu FRVŠ 1358/2010/F1a.

Fragmentace

- linkové rámce mají omezenou velikost (jeden až dva, max. jednotky kB), maximální velikost dat v rámci = **MTU (Maximum Transfer Unit)**, např. u Ethernetu II 1500 B
- IP paket může být ale dlouhý až 64 kB → **fragmentace paketu**
- pokud je fragmentace zakázána (bitem DF v záhlaví IP paketu):
  - paket je zahozen (pokud nejde jinou linkou) a odesilateli je to signalizováno pomocí ICMP typu 3, kód 4 – využití v algoritmu zjištění nejmenší MTU na cestě k uzlu (**Path MTU Discovery, PMTUD**)
  - později byla tato signalizace doplněna o možnost informace o MTU linky (2 B proměnné části záhlaví ICMP paketu)
- zvyšuje režii přenosu dat → OS se snaží vytvářet pakety délky $\leq$ MTU, aby nebylo fragmentace potřeba

CVIČENÍ: zjištění nejmenší MTU k uzlu pomocí programu `ping` se zakázáním fragmentace a nastavením velikosti paketu (algoritmus PMTUD)

Fragmentace

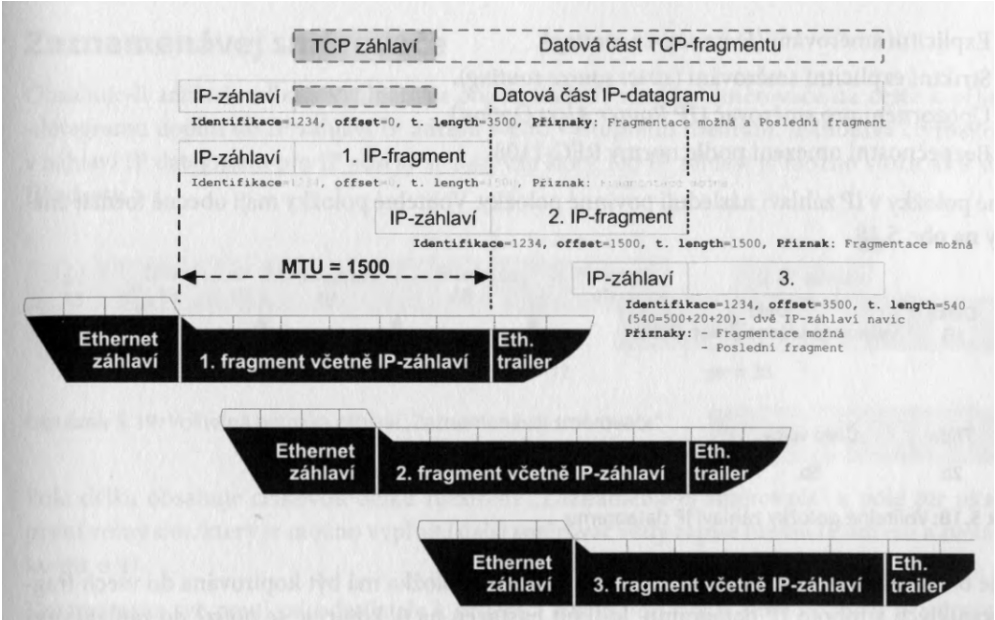
= dělení IP paketu na fragmenty o celkové délce $\leq$ MTU linky, RFC 791

– **fragment** = samostatný **IP paket** se stejnou hlavičkou jako původní paket (s **identifikací fragmentu**), až na položky:

- celková délka = délka fragmentu ($\leq$ MTU)
- **posunutí fragmentu** – offset dat fragmentu v datové části původního paketu, tj. kolik dat původního paketu je v předchozích fragmentech, v jednotkách 8B
- **indikaci dalších fragmentů** (bit MF příznaků) – poslední fragment nemá nastavenu

Obrázek: Obrázek průvodce 145

Fragmentace



Fragmentace

- **skládání fragmentů** (se stejnou identifikací fragmentu a protokolem vyšší vrstvy) do původního paketu provádí **pouze příjemce paketu**! – nikdo jiný nemusí mít všechny fragmenty
- pokud příjemce nemůže paket sestavit, protože v určené době nemá všechny fragmenty (protože např. první byl na cestě odfiltrován, např. podle adresy vyššího protokolu), signalizuje to příjemci pomocí ICMP typu 11, kód 1
- mechanizmus umožňuje dále fragmentovat i fragmenty, směrovači na cestě

CVIČENÍ: zachytávání a inspekce IP fragmentů generovaných např. programem `ping` s nastavením velikosti paketu

Volitelné položky IP záhlaví

– max. 40 B za povinnými položkami IP paketu

Obrázek: Obrázek průvodce 146

– bit kopírovat znamená kopírování položek do všech fragmentů, jinak jen prvního
– číslo volby specifikuje typ volitelné položky, 0 pro poslední položku, 1 pro výplň záhlaví na násobek 4 B

- **zaznamenávej směrovače** (číslo 7): každý směrovač na cestě k příjemci zapíše IP adresu svého výstupního rozhraní (max. 9), příjemce je může zopakovat v odpovědi s touto volbou
- **zaznamenávej čas** (68): každý směrovač na cestě k příjemci zapíše čas (v ms od poslední půlnoci UTC, 4B) nebo čas a IP adresu svého výstupního rozhraní (8B, max. 4)

Volitelné položky IP záhlaví

Volitelné položky IP záhlaví

- **explicitní směrování** (131, 137): explicitní zadání směrovačů, přes které má paket jít, **striktní** = zadání všech, směrovače upravují adresu příjemce paketu na adresu následujícího směrovače, z bezpečnostních důvodů (průnik do privátní sítě) bývají pakety s touto položkou na směrovačích **filtrovány**
- **upozornění pro směrovač** (148): informace pro směrovače na cestě k cílovému směrovači, že v paketu mohou být informace (ohledně směrování) užitečné i ně
- – některé volby jsou implementované v programu `ping`

CVIČENÍ: zachytávání a inspekce IP paketů s volitelnými položkami v záhlaví generovaných např. programem `ping`

Protokoly ARP a RARP

ARP (Address Resolution Protocol)

- odchozí IP paket se vkládá do linkového rámce (např. Ethernet), jak se zjistí linková adresa příjemce? → **protokol ARP** (RFC 826)

= **zjištění linkové adresy** příjemce ze znalosti jeho IP adresy

- uzel vyšle **ARP paket žádosti** obsahující IP adresu příjemce na všesměrovou linkovou adresu a příjemce odpoví **ARP paketem odpovědi** (přímo odesilateli)
- ARP paket se vkládá přímo do linkového rámce, NE do IP paketu – **ARP** je protokol **nezávislý na IP**

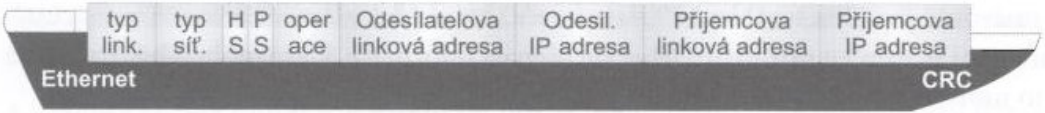
Protokoly ARP a RARP

ARP (Address Resolution Protocol)

Obrázek: Obrázek průvodce 154

- **ARP paket**:
  - typ linkového protokolu: číslo použitého linkového protokolu, např. 1 pro Ethernet II, 6 pro Ethernet podle IEEE 802.3 (viz IANA)
  - typ síťového protokolu: stejná čísla jako v poli Protokol u linkového rámce, např. 0x800 pro IP
  - HS a PS: délka linkové a síťové adresy
  - operace: 1 pro ARP žádost, 2 pro ARP odpověď
  - linková adresa příjemce je v ARP žádosti nulová
  - v ARP odpovědi jsou oproti žádosti adresy prohozeny

Protokoly ARP a RARP



Protokoly ARP a RARP

ARP (Address Resolution Protocol)

- **ARP cache**
  - = **tabulka síťová adresa – linková adresa**, naplněná staticky (manuálně) nebo dynamicky z příchozích linkových rámců se síťovými pakety a ARP odpovědí
  - – použita při zjišťování linkové adresy k síťové adrese
  - – omezená doba uchování dynamických položek (nepoužitých např. 2 minuty, maximální např. 10 minut), parametr OS
  - – pro manipulaci slouží program `arp`
- **proxy ARP**
  - ARP pakety se nesměrují (přísně vzato ARP není síťový protokol), **ARP** funguje **v rámci lokální sítě** (v dosahu linkového protokolu)
  - = **konfigurace směrovače**, kdy v odpovědi na ARP dotaz se síťovou adresou za směrovačem uvede směrovač jako linkovou adresu příjemce svoji linkovou adresu
  - ⇒ automatické nastavení směrování pro uzly v lokální síti přes směrovač

CVIČENÍ: zobrazení a manipulace s ARP cache, zachytávání a inspekce ARP paketů (po vymazání ARP cache)

Protokoly ARP a RARP

RARP (Reverse ARP)

= **zjištění síťové adresy** odesílatele ze znalosti své linkové adresy

– dříve použití u bezdiskových stanic bootovaných po síti, které žádají o svoji síťovou adresu na základě linkové, tu přidělí a v odpovědi sdělí **RARP server**

– stejný paket jako u ARP, pole operace: 3 pro RARP žádost, 4 pro RARP odpověď

– dnes překonán aplikačním protokolem **DHCP**

Protokol IGMP (IP multicast)

= služební protokol IP k **šíření IP paketů na skupinové adresy** (**IP multicast**) s více příjemci **v rámci lokální sítě** (TTL=1)

– IP multicast výrazně snižuje síťový provoz a zátěž odesílatele

– několik verzí, zde verze 2 (RFC 2236)

– pro každou skupinovou adresu udržuje směrovač lokální sítě **skupinu členů** (uzlů) a pokud je nějaká skupina neprázdná, směrovač šíří multicast pakety s adresou skupiny zvenku dovnitř lokální sítě

– uzel (aplikace na něm) požadující příjem multicast paketů vyšle **IGMP paket** s požadavkem na členství ve skupině dané skupinovou adresou

Obrázek: Obrázek průvodce 158

Protokol IGMP (IP multicast)

Protokol IGMP (IP multicast)

– **IGMP paket** obsažen v IP paketu:
  - typ: dotaz směrovače na členství ve skupině (11), požadavek na členství ve skupině (16), opuštění skupiny (17)
  - **MRT (Maximum Response Time)**: pouze u typu 11, čas (v desetinách s), do kterého se musí uzly znovu přihlásit do skupiny, jinak jsou vyřazeni
  - **skupinová IP adresa**: nula u dotazu typu 11 (adresuje všechny skupiny), jinak z **třídy D**, rozsah **224.0.0.0/24** je pro vyhrazené účely (např. 224.0.0.1 je všeobecná pro všechny uzly, 224.0.0.2 pro všechny směrovače atd.)

– více směrovačů na lokální síti: dva režimy směrovače – **dotazovač** (posílá dotazy) a **posluchač** (dotazovač, který se přepnul, pokud detekoval v lokální síti dotazy směrovače s vyšší adresou, jen poslouchá)

Protokol IGMP (IP multicast)

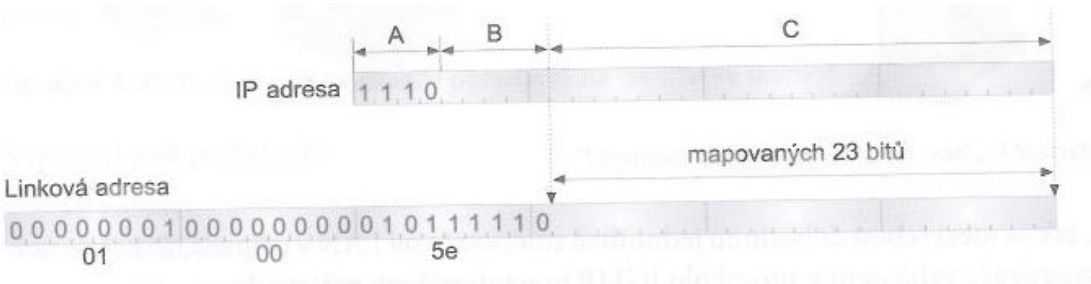
Mapování síťových na skupinové linkové adresy

- „mapování“ jednoznačných IP adres (unicast) → ARP, mapování všesměrové → všesměrová linková adresa
- síťová karta zpracovává (v normálním, ne promiskuitním, režimu) pouze jí adresované a všesměrové rámce, navíc pak **skupinové rámce**, o které **zažádá síťová vrstva**
- Ethernet:
  - skupinová MAC adresa: nejnižší bit prvního bytu = 1
  - první tři byty MAC adresy pro výrobce – IANA má 00:00:5E, polovina jejího rozsahu pro **skupinové adresy**, prefix **01:00:5E**
  - = **nejednoznačné mapování** 28 bitů skupinové IP adresy do 23 bitů skupinové MAC adresy: IP adresy lišící se pouze v nevyšších 5 bitech (po prefixu skupinových adres), např. 224.0.1.1 a 225.0.1.1, mapovány na stejné linkové adresy

Obrázek: Obrázek průvodce 162

⇒ pakety s nechtěnou IP adresou musí odfiltrovat síťová vrstva

Protokol IGMP (IP multicast)



IP multicast

IP multicast mimo lokální síť (v Internetu)

= šíření multicast paketů Internetem od odesílatele k příjemcům ve více lokálních sítích – poměrně **složitá záležitost**, cíl **zamezit nekontrolovanému lavinovitému duplikování paketů** v Internetu

– **úpravy směrovacích protokolů** pro výměnu směrovacích informací mezi směrovači – protokoly např. **DVMRP, MOSPF, MBGP**

– problémy se škálovatelností (počty příjemců v milionech), **aktivní výzkum**

- dříve experiment s **MBONE (Multicast Backbone)** = vybrané směrovače („jádro Internetu“) zabezpečující šíření multicast paketů pomocí tunelů
- dnes protokoly **PIM (Protocol Independent Multicast)** konstruující **distribuční strom multicastu** (pro každou skupinovou adresu), varianty Sparse Mode (SM), Source Specific Mode (SSM), Bidirectional Mode

– využití v **distribuci multimediálního obsahu (streaming)**, ne obecně jako způsob přenosu libovolných dat v Internetu

Protokol IP verze 6 (IPv6)

∼ **“IP nové generace”, IPng**, vyvíjen od roku 1991, 1995 RFC-1883, dnes RFC-2460 (základ + přidružená RFC)

– odstraňuje **nedostatky IPv4**: řešení problému adresace, dynamické konfigurace, podpory bezpečnosti, mobility uzlů, multimédií aj.

= nejen **zvětšení IP adresy, nový pohled na IP paket a protokol** (revize):

- zjednodušení záhlaví – přesun málo využívaných základních položek do (zřetězených) volitelných: pro směrování, fragmentaci, autentizaci aj.
- (bezstavová) **automatická konfigurace uzlů**
- bezpečnost – **autentizace a šifrování** na úrovni síťové vrstvy
- podpora **mobility uzlů** – se snahou o zachování TCP spojení při přechodu uzlu ze sítě do sítě (!)
- podpora multimédií – třídy dat (včetně real-time komunikace), směrování toku a ne jednotlivých paketů
- ...

Protokol IP verze 6 (IPv6)

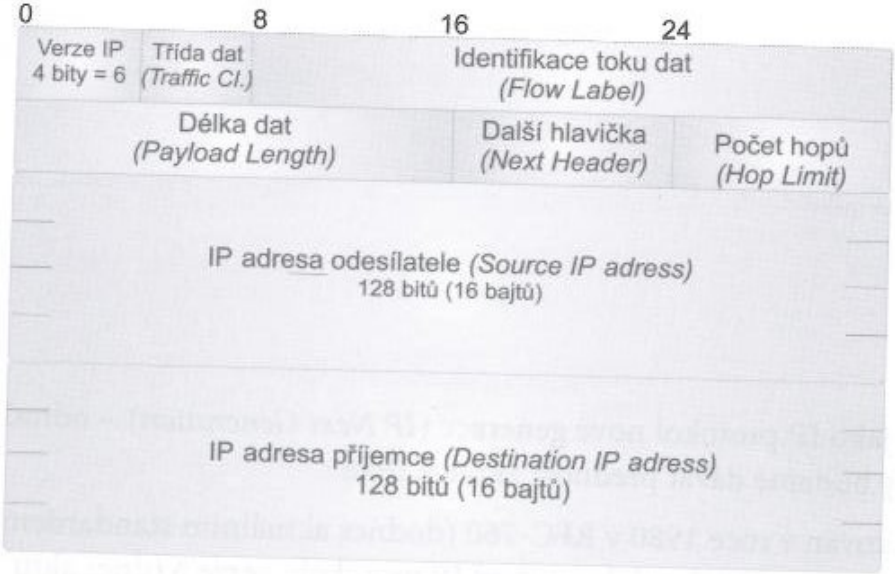
IPv6 paket

Obrázek: Obrázek průvodce 208

= 40 B základní záhlaví + nepovinná rozšíření různé délky, data, max. 64 kB, ale možnost rozsáhlého paketu v rozšířeních

- **třída dat**: specifikace priority dat pro rozhodování o zahození paketu při zahlcení sítě, hodnoty 0 až 7 pro klasický provoz (datové přenosy, pošta, interaktivní atd.), 8 až 15 pro přenosy v reálném čase (multimédia)

Protokol IP verze 6 (IPv6)



Protokol IP verze 6 (IPv6)

IPv6 paket

- **identifikace toku dat**: spolu s adresou odesilatele jednoznačně identifikuje datový tok, pro potřeby **směrování** – řešení směrování jen u prvního paketu toku, ne u každého (na základě jen adresy příjemce u IPv4), nebo k **zajištění šířky pásma** – prioritní FIFO paketů na směrovači místo obyčejné (jako u IPv4), protokol RSVP
- **další záhlaví**: typ následujícího záhlaví **nepovinného rozšíření** IPv6 (včetně typu 59 pro žádné) nebo protokolu vyšší vrstvy, např. TCP (6), UDP (17), IP (v IP, 4)
- **počet hopů**: $\sim$ TTL u IPv4, k zahazování zatoulaných paketů nebo k nalezení nejkratší cesty (zvyšování TTL, obdoba traceroute)

Protokol IP verze 6 (IPv6)

IP adresa

– délka 16 B (128 b), tři typy:

- jednoznačná síťového rozhraní (unicast)
- skupinová (multicast) – zvláštní případ všeobecná (broadcast)
- skupinová **anycast** = paket doručen jen nejbližšímu z adresátů skupiny, adresy z rozsahu unicast adres, např. subnet-router, DNS query anycast

- notace zápisu s až čtveřicemi šestnáctkových číslic oddělenými dvojtečkou, např. **2001:718:1401:50:0:0:0:0d**, nebo častěji zkrácená pomocí zdvojené dvojtečky (pouze jednou, nahrazuje sekvenci 0), např. **2001:718:1401:50::0d**, nebo i s posledními čtyřmi byty v notaci adresy IPv4 (tzv. kompatibilní adresy), např. **FE80::158.194.80.13**
- notace sítě spolu s maskou (**prefix**): prefix adresy pro síť/počet 1 v (binární) masce

Protokol IP verze 6 (IPv6)

IP adresa

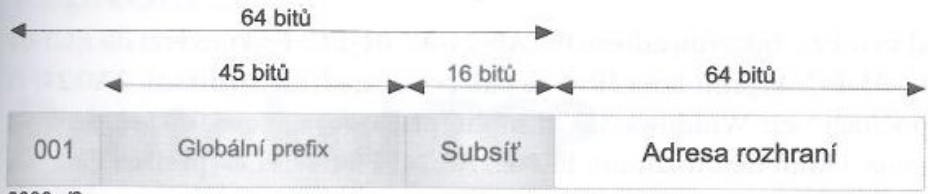
- **rozdělení na poloviny** (RFC 2373, 2450): adresa sítě (64 b) a adresa uzlu (rozhraní, 64 b)
- **adresa sítě**: obdobně jako u IPv4, **globální prefix** (45 b za prvními třemi bity) pro Internet Registry a autonomní systémy, např. pro RIPE 2001:0600::/29 až 2001:07F8::/29, dále poskytovatele (supersítě) a organizace (sítě), pak pro subsítě (16 b)

Obrázek: Obrázek průvodce 227

- globálně jednoznačné (unicast) adresy pro Internet: (zatím) **2000::/3**, bloky /23 až /12 pro Internet Registry

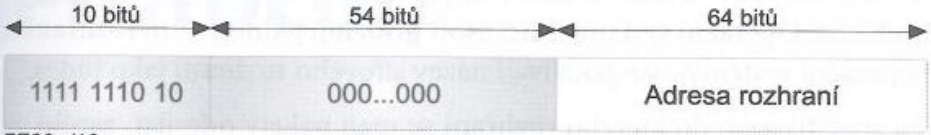
Protokol IP verze 6 (IPv6)

Jednoznačné adresy *(Global Unicast)*:



2000::/3

Jednoznačné adresy v rámci LAN *(Link-Local Addresses)*:



FE80::/10

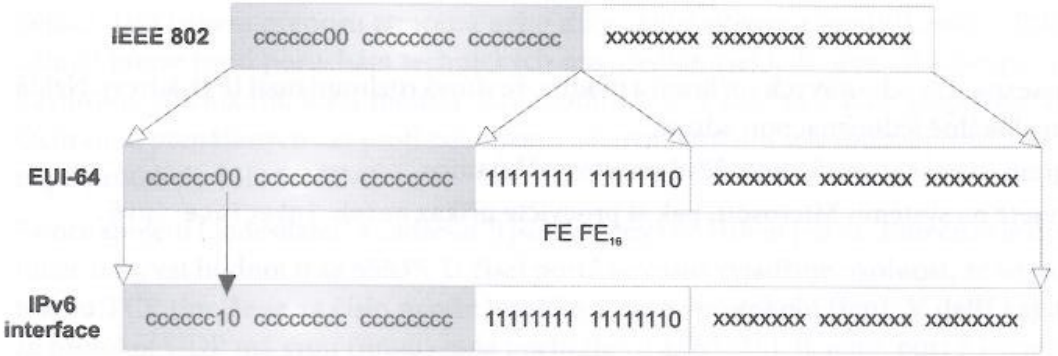
Protokol IP verze 6 (IPv6)

IP adresa

Obrázek: Obrázek průvodce 227

- **adresa rozhraní**: vlastní, podle **IEEE EUI-64** = **MAC adresa** podle IEEE 802, kde doprostřed se vloží **0xFFFE** a nastavení druhého bitu prvního byte, např. pro 00:02:B3:BF:30:EA je 202:B3FF:FEBF:30EA, náhodně dynamicky generovaná (**Privacy Extensions**)
- **bezstavová autokonfigurace, SLAAC**: adresa rozhraní podle IEEE EUI-64 nebo náhodná „samopřidělená“ na základě **oznámení směrovače (router advertisement, RA)** s adresou sítě (prefixem), obdoba 169.254.0.0/16 u IPv4, zabezpečení RA Guard, SEND (aymetrická kryptografie, šifrovaná adresa), SAVI?, access listy na přepínači
- **DHCPv6**: bezstavové – SLAAC + další info (DNS servery na LAN, domény apod.) z DHCP serveru, stavové – jako DHCP pro IPv4, ale ne výchozí brána LAN (sic!), identifikace uzlu pomocí DUID místo MAC rozhraní – pro uzel, nezávislost na MAC, 3 typy

Protokol IP verze 6 (IPv6)



Protokol IP verze 6 (IPv6)

IP adresa – speciální adresy:

- celá 0: nespecifikovaná, rozhraní ještě nebyla přidělena adresa
- ::1/128: **loopback**
- FE80::/10: automatické v rámci lokální sítě nebo linkově propojených sousedů (**link-local** unicast), nesměrují se, adresa rozhraní automaticky „samopřidělená“ podle IEEE EUI-64, pro objevování sousedů (viz dále), oznámení směrovače, směrovací protokoly aj.
- FC00::/7: unikátní (síťová adresa, prefix, z data a MAC rozhraní) v rámci organizace (**unique-local** unicast), použití u intranetu, nesměrují se, dříve FEC0::/10 – privátní v rámci organizace (**site-local** unicast), obdoba vyhrazených rozsahů u IPv4 (10.0.0.0/8 atd.)
- FF00::/8: skupinové adresy (**multicast**), první 4 bity z druhého byte specifikují rozsah skupiny, např. 1 v rámci uzlu, 2 lokální sítě, 5,8 organizace, E globální, vyhrazené adresy, např. FF02::1 pro všechny uzly = **broadcast**
- 2001:db8::/32: pro dokumentace (obdobné i u IPv4)
- ...

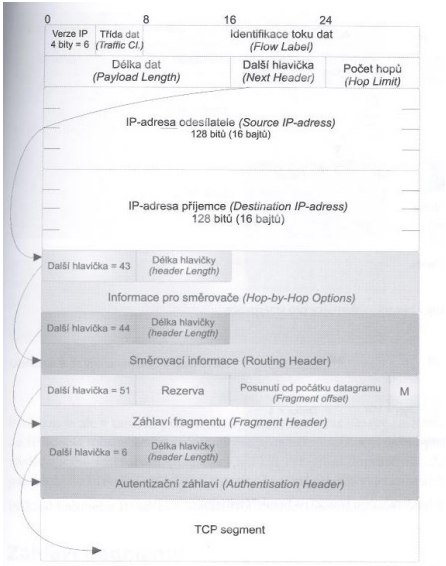
Protokol IP verze 6 (IPv6)

Nepovinná rozšíření

Obrázek: Obrázek průvodce 211

- **záhlaví rozšíření**: typ následujícího záhlaví (tvoří řetězec použitých položek na rozdíl od všech u IPv4), délka záhlaví, data
- **informace pro směrovače** (typ 0): informace = volby (pole typ, délka, hodnota, např. rozsáhlý paket délky až 4 GB, typ 194)
- **směrovací informace** (43): **explicitní směrování, hop-by-hop** – pole počet směrovačů, maska striktního směrování (bit = 1 = sousední směrovač), adresy směrovačů a příjemce, 2007 zrušeno

Protokol IP verze 6 (IPv6)



Protokol IP verze 6 (IPv6)

Nepovinná rozšíření

- **záhlaví fragmentu** (44): fragmentovat může pouze odesílatel (na rozdíl od IPv4, algoritmus PMTUD), pole posunutí fragmentu (hodnota v jednotkách 8B), indikace dalších fragmentů, identifikace fragmentu
- **autentizace** (51, protokol AH) a **bezpečnost/šifrování** (50, ESP): integrita a autentizace (místo kontrolního součtu, MD5 ze sdíleného tajemství a paketu), šifrování odesílatelem nebo směrovači, použití v IPSec, poslední záhlaví

– uspořádání od těch pro směrovače po ty pro koncový uzel

Protokol IP verze 6 (IPv6)

Protokol ICMP verze 6

= nepovinné rozšíření IP záhlaví, typ 58, RFC 2463

– stejně jako u IPv4 pro **signalizaci** chybových stavů a **diagnostiku**

– pole typ, kód, kontrolní součet a tělo

- např. echo (žádost, odpoveď), čas vypršel, nedoručitelný paket (není směr, adresa, administrativně), změň směrování, žádost+odpověď o směrování apod.
- **Neighbor discovery protokol, NDP**: objevování sousedů $\sim$ překlad IPv6 adresy na linkovou adresu (místo ARP a RARP u IPv4) = žádost a oznámení o linkové adrese (neighbor solicitation a advertisement), žádost o a oznámení směrovače (router solicitation a advertisement) – adresa sítě (prefix) a výchozí brány LAN (nově i DNS serverů), povolení SLAAC, aj., zasílaná na skupinovou adresu LAN (speciální FF02::1:FF00:0/104)

CVIČENÍ: zachytávání a inspekce IPv6 paketů, zjištění IPv6 adresy síťového rozhraní

Protokol IP verze 6 (IPv6)

Přechod z IPv4 – IPv6 v lokální síti a v Internetu, u poskytovatele připojení jen IPv4

- **dual stack**: podpora obou protokolů, IPv4/IPv6 uzel
- **tunelování (IPv6 v IPv4)**:
  - konfigurované (statické) tunely – **tunel server** (IPv4 do IPv6 sítě) a **tunel broker** (registrace na tunel serveru), např. Freenet6, SixXS aj.
  - dynamické (automatické) tunely: **6to4** – v lokální síti prefix 2002:AB:CD::/48 pro (veřejnou) IPv4 adresu $(A.B.C.D)_{16}$, 6to4 relay (do nativní IPv6 sítě) na anycast adrese 192.88.99.1 (např. NIC.cz), **6over4** a **ISATAP** – IPv4 adresa součást IPv6 adresy rozhraní (s globálním prefixem, u ISATAP i lokálním FE80::/10) v lokální síti, relay ve firemní síti (u ISATAP i v DNS), **Teredo** – adresa s prefixem 2001::/32 pro uzly v lokální síti příp. za NAT skládající se z IPv4 adresy veřejného serveru (např. u Microsoftu), adresy NATujícího směrovače a UDP portu, UDP zapouzdření IPv6, veřejný Teredo relay
- **mapování (IPv6 na IPv4)**: **SIIT** (Stateless IP/ICMP Translation) – (mapovaná) ::FFFF:a.b.c.d pro IPv4 a.b.c.d a dočasná IPv4 w.x.y.z pro (překládané) ::FFFF:0:w.x.y.z, **NAT-PT** (Protocol Translation), **NAT64 & DNS64** – NAT IPv6 na IPv4 včetně mapování v DNS dotazech (u NAP-PT i pro spojení z IPv4), prefix::a.b.c.d pro IPv4 a.b.c.d, **TRT** (Transport Relay Translator) – transportní proxy z IPv6 do IPv4, **BIS** (Bump-in-the-Stack), **SOCKS64** – „NAT“ IPv4 na IPv6 v OS

Bezpečnost protokolu IP

IPv4

- **neřeší**, naopak např. některé volitelné položky (explicitní směrování) mohou být nebezpečné
- pouze kontrolní součet záhlaví – snadné přepočítat po modifikaci paketu
- útoky: podvržení IP adresy odesílatele a příjemce (**IP spoofing**), zahlcení sítě (např. flood ping) a odepření služby (**Denial of Service**, **DoS**)

→ řešení: **filtrace** (některých ICMP paketů, paketů s volitelnými položkami atd.), **šifrování** – privátní sítě (intranet, s překladem adres), DHCP Snooping aj.

IPv6 – útoky + řešení jako u IPv4

- autentizace (protokol AH) a šifrování (protokol ESP) v dalších záhlavích → **IPSec**
- zabezpečení autokonfigurace – RA Guard, SEND, SAVI?

Bezpečnost protokolu IP

Firewall

= oddělení vnitřní sítě (intranetu) od vnější (Internetu), ochrana systému uzlu před sítí

– služby: **filtrace provozu**, kontrola adres, překlad adres (NAT) – na základě IP záhlaví (a dále záhlaví vyšších protokolů), aplikační brána (proxy, protokol SOCKS), logování a detekce útoků (IDS, IPS)

– provozován na hraničních směrovačích (bráně) mezi sítěmi nebo na klientských počítačích

– nastavení pravidel (filtračních aj.) OS nebo pomocí aplikačního programu

- **demilitarizovaná zóna (DMZ)** – část sítě s počítači dostupnými z vnitřní (chráněné) i vnější sítě, např. aplikační (proxy) servery

Bezpečnost protokolu IP

Překlad adres (Network Address Translation, NAT) (RFC 1631)

= překlad IP adres paketů z vnitřní sítě (intranetu) na IP adresy vnější sítě (Internetu) a naopak

- **SNAT (Source NAT)** = překlad IP adresy odesílatele, **DNAT (Destination NAT)** = překlad IP adresy příjemce
  - poskytuje skrytí vnitřní sítě, využití také při spojení více intranetů se stejným rozsahem adres
  - provozován na hraničních směrovačích (bráně) mezi sítěmi, typicky v rámci firewallu
- **maškaráda** = SNAT na IP adresu hraničního směrovače ve vnější síti, překlad i (zdrojového) portu transportní vrstvy (**NAPT (Network Address and Port Translation)**)
  - zasahuje i do vyšších vrstev, transportní (překlad portů) i aplikační (porozumění aplikačnímu protokolu)

Bezpečnost protokolu IP

IPSec (Internet Protocol Security) (RFC 2401 – 2412)

- – původně v rámci prací na IPv6 (jeho povinná součást), backportován i pro IPv4
- = zabezpečení komunikace mezi koncovými uzly nebo směrovači na úrovní síťové vrstvy ⇒ **bezpečná síť**
- = **autentizace** komunikujících rozhraní a **šifrování** IP paketů
- – poměrně komplikovaný protokol, závislý na architektuře TCP/IP
- – funkce: správa šifrovacích klíčů (certifikační autority), autentizace (digitální podpis), šifrování (asym., sym.)
- záhlaví IPSec mezi záhlavím IP a daty paketu, položky pro autentizaci (AH) a šifrování (ESP), viz IPv6, dále protokoly pro výměnu klíčů **ISAKMP** a **IKEY**
- – režimy:
  - transportní – šifrování datové části IP paketu, mezi koncovými uzly
  - tunelovací – tunelování IP sítě v IP síti, zapouzdření šifrovaných IP paketů do nových IP paketů (IPSec over IP), tunel mezi směrovači nebo vzdáleným uzlem a hraničním směrovačem sítě

Sítě WAN na bázi IP

– původní představa WAN jako propojení LAN pomocí směrovačů a pronajatých okruhů ATM nebo Frame Relay přestala stačit

→ páteřní sítě s **optickými technologiemi přenosu IP paketů** (IP over Fiber):

- **SONET/SDH** – synchronní, pakety v PPP rámcích v kontejneru SONET/SDH, také s využitím ATM (pakety v buňkách)
- **DWDM** – přímo přenos paketů (bez linkového protokolu), případně ještě se SONET/SDH, kombinace s MPLS (MPλS)

- **virtuální privátní sítě (VPN)**: virtuální IP síť v rozlehlé IP síti
- **MPLS**: přepínané IP sítě místo hop-by-hop sítí (se směrovači), na základě tzv. návěští po definované cestě (zaručení atributy spojení, QoS, VPN atd.)
- **QoS**: zabezpečení kvality přenosu pomocí rezervace zdrojů/upřednostnění paketů (InetServ/DiffServ), protokol RSVP

Virtuální privátní sítě (VPN)

= privátní sítě virtuálně v rozlehlé transportní síti (Internetu), často jako propojení (privátních) sítí nebo uzlu a (privátní) sítě, nahrazuje pronajaté telekomunikační okruhy

- privátní adresace – oddělení privátních sítí např. pomocí filtrace a NAT nebo přepínaní (MPLS)

→ **tunelování**

  = zapouzdření paketů nebo celých rámců vnitřní sítě do paketů transportní sítě
  - vytváření **tunelů** = (dvoubodových) logických spojení mezi uzly virtuální sítě, propojení do transportní sítě = **VPN gateway**
  - zabezpečení tunelů a oddělení sítí: autentizace, šifrování

- tunelování linkové vrstvy (zapouzdřovány rámce): protokoly **PPTP**, **L2TP** (PPP rámce v IP, Frame Relay, ATM, autentizace, šifrování, komprese, vícebodové tunely)
- tunelování síťové vrstvy (zapouzdřování paketů): **IP over IP**, protokoly **GRE** (původní, dvoubodové tunely) a **IPSec**