



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA
TECHNICKÉ INFORMAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ



6

IPv6 síťová vrstva

IPK 2020/2021 L

Obsah

1) ÚVODNÍ INFORMACE

- Motivace
- Nové vlastnosti

2) IPv6 PAKET

3) ADRESOVÁNÍ

- Administrativní platnost adres
- Unicast, Multicast a Anycast adresy

4) PODPŮRNÉ PROTOKOLY PRO IPv6

- ICMPv6
 - NDP, MLDv1, MLDv2

5) KOEXISTENCE IPv4 A IPv6

6) SMĚROVÁNÍ IPv6

- RIPng, OSPFv3, Multiprocol BGP

7) PROBLÉMY, ZHODNOCENÍ

Motivace

1. Larger IP address space
2. Better end-to-end connectivity
3. Ability for autoconfiguring devices
4. Simplified header structures
5. Better security (IPSEC – ESP, AH)
6. Better quality of services
7. Better multicast and anycast abilities
8. Mobility features
9. Ease of administration
10. Smooth transition from IPv4

Vlastnosti

- Jedno rozraní **má více než jednu** IPv6 adresu
- Fragmentace a znovusestavení IP paketu pouze na koncových systémech, nikoliv na směrovačích
 - Zvýšena minimální MTU na 1280
 - Path MTU Discovery for IP version 6 (RFC 1981)
- Zpracování hlavičky nevyžaduje přepočet kontrolního součtu
- Pevná velikost základní hlavičky – 40 bytů
- Není podporován broadcast ani neexistují bcast adresy
 - Substituce multicastem

Obsah

1) ÚVODNÍ INFORMACE

- Motivace
- Nové vlastnosti

2) IPv6 PAKET

3) ADRESOVÁNÍ

- Administrativní platnost adres
- Unicast, Multicast a Anycast adresy

4) PODPŮRNÉ PROTOKOLY PRO IPv6

- ICMPv6
 - NDP, MLDv1, MLDv2

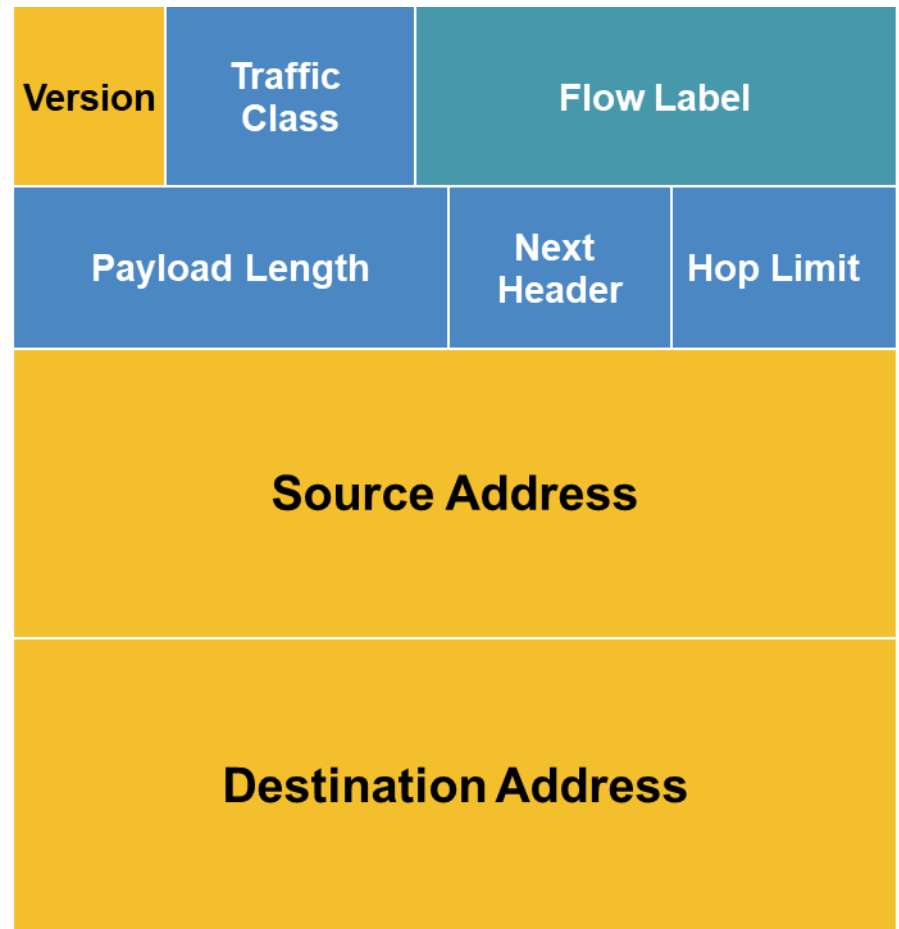
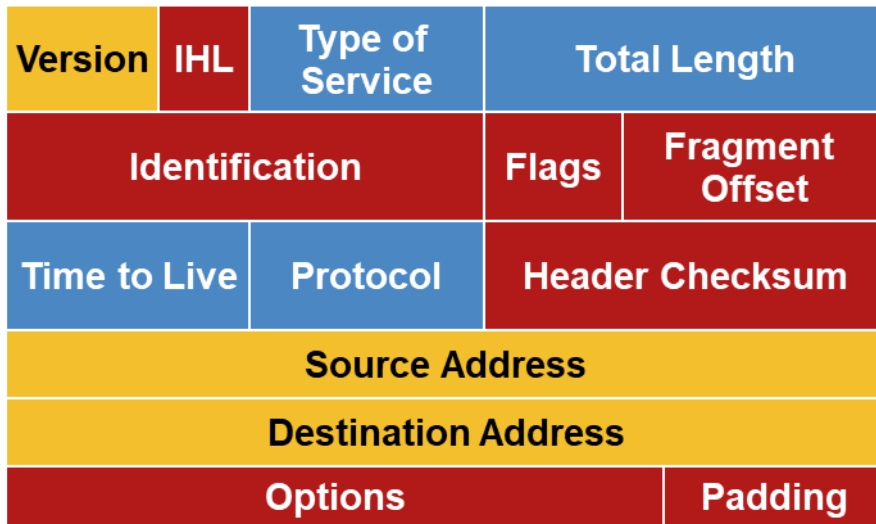
5) KOEXISTENCE IPv4 A IPv6

- přechodové mechanismy
- routing

6) PROBLÉMY, ZHODNOCENÍ

Porovnání IPv4 a IPv6

- Pevná velikost hlavičky 40 bajtů zjednodušuje manipulaci s paketem



IPv6 příklad hlavičky

```
Internet Protocol Version 6, Src: fe80::e98c:aac:5b07:6d60, Dst: ff02::c
  0110 .... = Version: 6
  ▸ .... 0000 0000 .... .... .... .... = Traffic class: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
    .... .... .... 0000 0000 0000 0000 0000 = Flowlabel: 0x00000000
  Payload length: 154
  Next header: UDP (17)
  Hop limit: 1
  Source: fe80::e98c:aac:5b07:6d60
  Destination: ff02::c
```

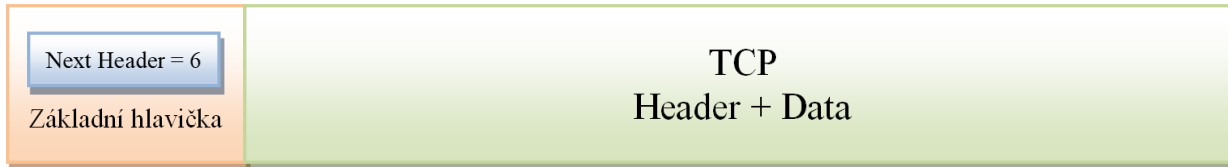
IPv6 paket

- **Verze (Version)** – 4 bity, obsahuje hodnotu 6
- **Třída provozu (Traffic class)** – 8 bitů, pro potřeby služeb se zajištěnou kvalitou
- **Značka toku (Flow label)** – 20 bitů, identifikuje tok (proud souvisejících paketů) (RFC 2460), umožňuje nestandardní prioritizaci přenosu, vysokorychlostní směrování
- **Délka dat (Payload length)** – 16 bitů, velikost dat následující hlavičku
- **Další hlavička (Next header)** – 16 bitů, určuje typ případné další volitelné/rozšiřující hlavičky (řetězení hlaviček) nebo identifikuje protokol vyšší vrstvy
- **Limit skoků (Hop count)** – počet možných přeposlání směrovači, snižována o 1 na každém směrovači, při vypšení zrušení paketu, stejně jako TTL u IPv4
- **Zdrojová a cílová adresa (Source and destination address)** – adresa odesílatele a zdroje IP paketu, dostatečně velká ?

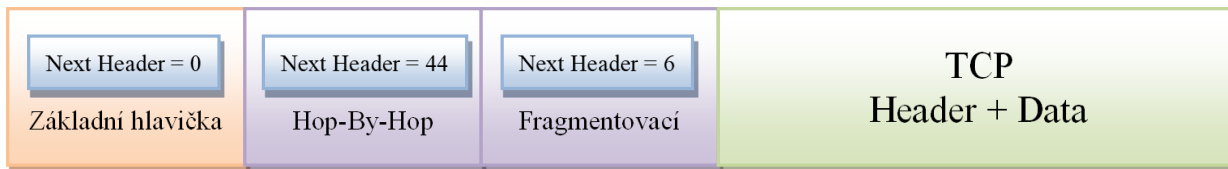
Řetězení hlaviček

- **Rozšiřující hlavičky (Extension headers)** se připojují za základní hlavičku paketu, důležité je i pořadí těchto hlaviček [RFC 1883]
 - Hop-by-hop (Next header=0), Destination options (Next header=60), Routing (Next header=43), Fragment (Next header=44) [RFC 2460]
 - Authentication (AH) (Next header=51), Encapsulating Security Payload (ESP) (Next header=50) [RFC-2402],[RFC-2406]
 - No next header (Next header=59)
 - TCP/IP protokoly (TCP=6; UDP=17; OSPF=89 atd.)
- Rozšiřující hlavička obsahuje obvykle položky (**Type-Length-Value**)
 - další hlavička
 - délka hlavičky
 - data hlavičky
- 2 nejvyšší bity hlavičky určují co s paketem, pokud směrovač typu rozšiřující hlavičky nerozumí (přejít na další hlavičku, zahodit paket, zahodit s upozorněním podle typu adresy příjemce)

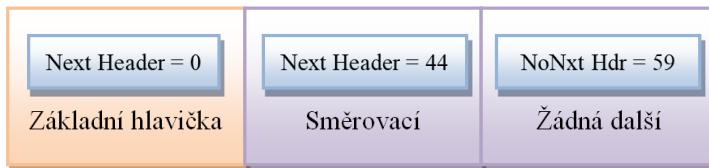
Zřetězení hlaviček



Jen IPv6 Základní hlavička, za kterou následuje protokol a data vyšší vrstvy.



Základní hlavička se zřetězenými rozšiřujícími hlavičkami *Hop-By-Hop* a *Hlavičkou fragmentace*, za kterými následují fragmentovaná data.



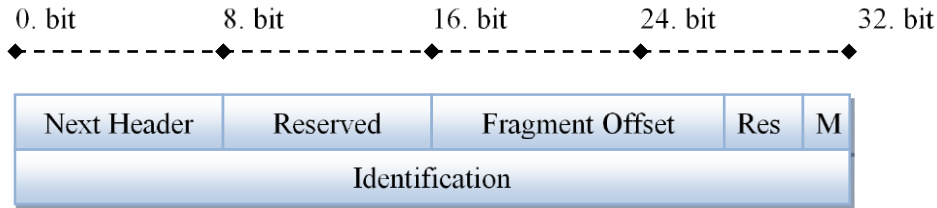
Základní hlavička se zřetězenými rozšiřujícími *Směrovací hlavičkou* a *Žádnou další* (*No Next Header*) bez jakýchkoli dat.

Pořadí hlaviček

Pořadí	Next Header	Název + Popis
1.	-	<i>Základní hlavička</i> , tak jak je uvedena v předchozí podkapitole.
2.	0	<i>IPv6 Hop-by-Hop Option</i> obsahuje volby, které vykoná každý hop po cestě ke koncovému příjemci
3.	60	<i>IPv6-Opts</i> pro první cílovou adresu nebo adresy uvedené v hlavičce <i>IPv6-Route</i> .
4.	43	<i>IPv6-Route</i> obsahuje směrovací informace.
5.	44	<i>IPv6-Frag</i> značí, že datagram byl fragmentován na vícero kousků, podrobnější informace o procesu fragmentace jsou v další podkapitole.
6.	51	<i>AH</i> jako autentizace odesílatele, prokázání jeho totožnosti.
7.	50	<i>ESP</i> jako šifrování celého následujícího obsahu paketu za touto hlavičkou a zároveň i autentizace odesílatele.
8.	60	<i>IPv6-Opts</i> v něm jsou obsaženy informace pro konečného příjemce paketu.
9.	135	<i>Mobility</i> a její podpora pomocí této speciální Rozšiřující hlavičky je nad rámec obsahu této technické zprávy.
10. – 11.	41	<i>IPv6 Encapsulation</i> sdělující, že paket byl odeslán tunelem 6to4.
10. – 11.	140	<i>Shim6</i> jiný tunelovací mechanismus místo 6to4, detaily k němu jsou k nalezení v [7].
12.	59	<i>IPv6-NoNxt</i> značí, že za kocem této hlavičky nenásleduje nic dalšího (žádný relevantní protokol ani vyšší vrstvy), veškerá za tím parsovaná data pomocí políčka Payload Length jsou ignorována.
13.	jiné	Všechny ostatní protokoly

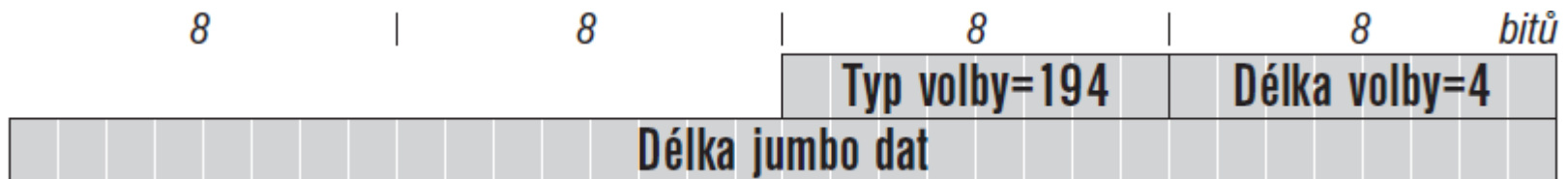
Fragmenty + Jumbogramy

- **Fragmenty**

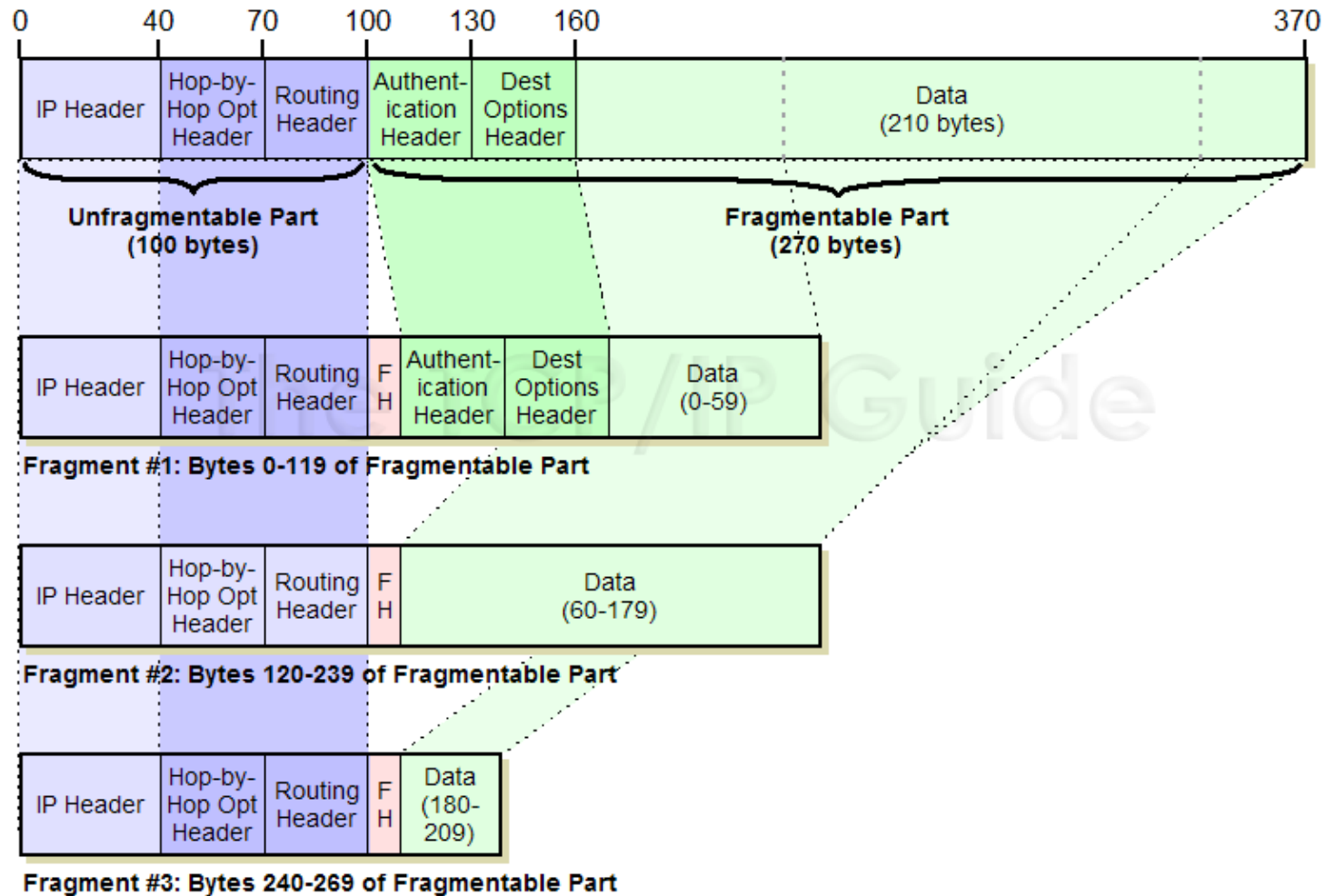


- minimální velikost MTU v IPv6 je 1280B (v IPv4 je to 576B)
- v IPv6 fragmentuje výhradně odesílatel
- směrovač s MTU menším než potřebné zahodí paket a odešle ICMPv6 zprávu
- nefragmentovatelná část – všechny hlavičky
- fragmentovatelná část – obsah paketu
- objevování MTU cesty (RFC1981) je periodické, doporučeno každých 10 minut, používá se ICMPv6
- algoritmus objevování MTU cesty je volitelný, jinak používat 1280B

- **Jumbogramy**



Ukázka fragmentace



Obsah

1) ÚVODNÍ INFORMACE

- Motivace
- Nové vlastnosti

2) IPv6 PAKET

3) ADRESOVÁNÍ

- Administrativní platnost adres
- Unicast, Multicast a Anycast adresy

4) PODPŮRNÉ PROTOKOLY PRO IPv6

- ICMPv6
 - NDP, MLDv1, MLDv2

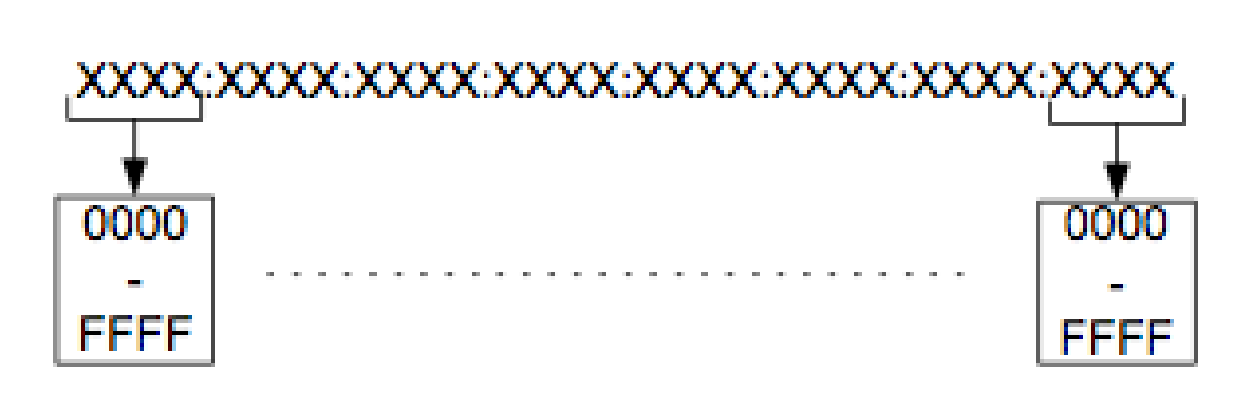
5) KOEXISTENCE IPv4 A IPv6

- přechodové mechanismy
- routing

6) PROBLÉMY, ZHODNOCENÍ

IPv6 adresa

- Délka 128 bitů (16 bajtů)
- Zápis v šestnáctkové soustavě, čtveřice číslic odděleny dvojtečkou



IPv6 adresa

- Původně značná flexibilita zápisu

2001:db8:0:0:1:0:0:1

2001:db8::0:1:0:0:1

2001:0db8:0:0:1:0:0:1

2001:db8::1:0:0:1

2001:db8:0000:0:1::1

2001:DB8:0:0:1::1

2001:0db8::1:0:0:1

2001:db8:0:0:1::1

- Způsoby zápisu upravuje RFC 5952

2001:db8::1:0:0:1

- Úvodní nuly ve čtveřici lze vynechat 0db8 → db8
- Nejdelší souvislou skupinu nulových čtveřic lze vynechat a nahradit dvěma dvojtečkami 0000:0000 → ::
- Hexadecimální znaky se píší malým
- 0000 se zkrátí na 0

Administrativní platnost

- Název síť nebo podsíť je v IPv6 nahrazen pojmem „linka“ (link)
- IPv6 uzel má na rozhraní více IPv6 adres
- Adresy mají dosah (scope) a dobu platnosti (lifetime)



IPv6 adresový prostor

- **Individuální (Unicast) adresy**
 - Adresa nakonfigurována na rozhraní
 - Více různých typů (Link-local, Unique Local, Globální)
- **Skupinové (Multicast) adresy**
 - Adresace skupiny - komunikace one-to-many
 - Efektivní způsob komunikace, pokud je multicast na síti podporován
- **Výběrové (Anycast) adresy**
 - Identifikují službu nacházející se na více zařízeních než konkrétního hosta

Významné adresy a prefixy

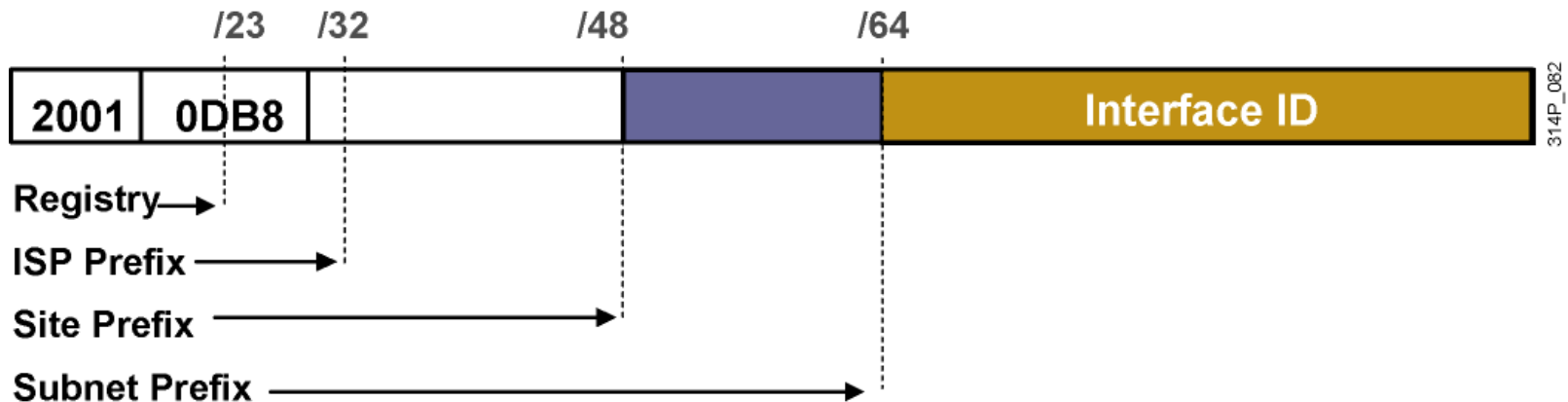
- Nespecifikovaná adresa `::/128` ~ 0.0.0.0
- Loopback `::1/128` ~ 127.0.0.1
- Link-local `FE80::/10` ~ 169.254.*.*
- Multicast adresy `FF00::/8` ~ třída D
- IPv4 mapované adresy `::ffff:A.B.C.D`
- Unique local `FC00::/7` ~ 192.168.**
- Všechny ostatní jsou globální unicast adresy
 - až na pár výjimek v podobě rezervovaných prefixů pro technologie jako 6to4, Teredo, ISATAP

Rezervované adresy

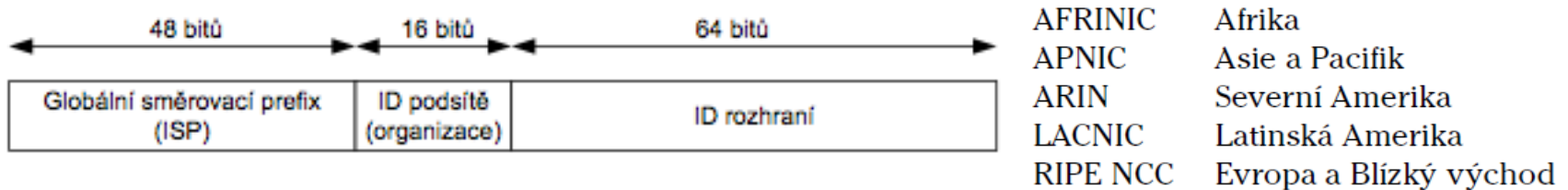
Address block (CIDR)	First address	Last address	Number of addresses	Usage	Purpose
::/0	::	ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff	2^{128}	Routing	Default route (no specific route)
::/128	::	::	1	Software	Unspecified address
::1/128	::1	::1	1	Host	Loopback address —a virtual interface that loops all traffic back to itself, the <i>local host</i>
::ffff:0:0/96	::ffff:0:0:0:0	::ffff:255.255.255.255	$2^{128-96} = 2^{32} = 4\,294\,967\,296$	Software	IPv4-mapped addresses
::ffff:0:0:0/96	::ffff:0:0:0:0:0	::ffff:0:255.255.255.255	2^{32}	Software	IPv4 translated addresses
64:ff9b::/96	64:ff9b::0:0:0:0	64:ff9b::255.255.255.255	2^{32}	Global Internet	IPv4/IPv6 translation ^[16]
100::/64	100::	100::ffff:ffff:ffff:ffff	2^{64}	Routing	Discard prefix ^[17]
2001::/32	2001::	2001::ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff	2^{96}	Global Internet	Teredo tunneling
2001:20::/28	2001:20::	2001:2f:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff	2^{100}	Software	ORCHIDv2 ^[18]
2001:db8::/32	2001:db8::	2001:db8:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff	2^{96}	Documentation	Addresses used in documentation and example source code ^[19]
2002::/16	2002::	2002:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff	2^{112}	Global Internet	The 6to4 addressing scheme (deprecated) ^[9]
fc00::/7	fc00::	fdff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff	2^{121}	Private internets	Unique local address ^[20]
fe80::/10	fe80::	fe80::ffff:ffff:ffff:ffff	2^{64}	Link	Link-local address
ff00::/8	ff00::	ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff:ffff	2^{120}	Global Internet	Multicast address

Global Unicast and Anycast Addresses

- Global Unicast a Anycast adresa se nedají rozlišit
 - Global Routing Prefix
 - Subnet Prefix
 - Interface ID
- GRP and Subnet Prefix nemají pevně danou strukturu

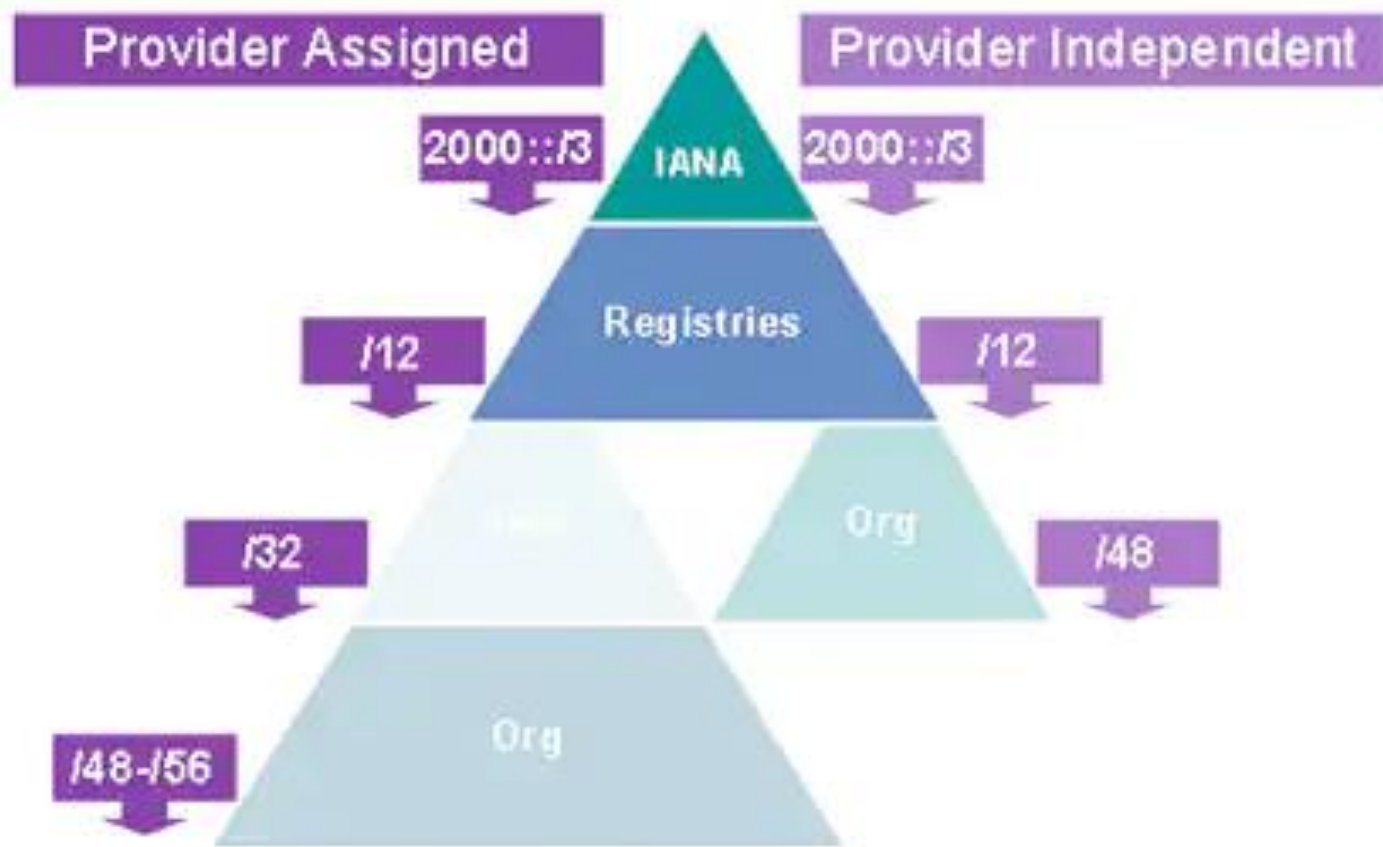


Přidělování adres

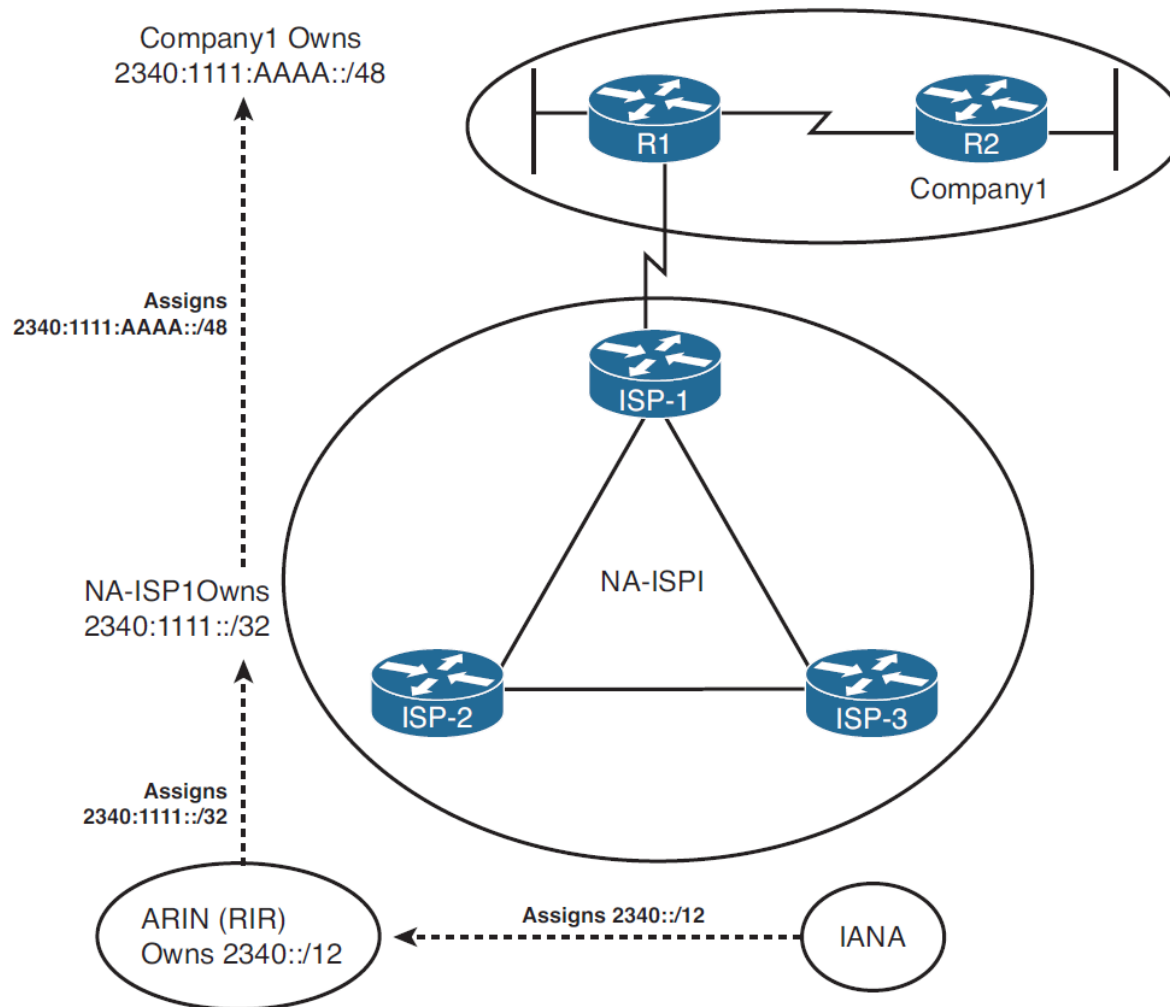


- IANA přiděluje prefix Regionálním registrátorům délky /12 bitů
- RIPE NCC přiděluje lokálním registrům prefixy délky /32 bitů
- Lokální registr má k dispozici 16 bitů pro rozlišení svých zákazníků (65536 zákazníků)
- Délka zákaznického prefixu je standardně /48
 - přidělován většině připojených sítí (malé i velké instituce, domácí sítě a podobně).
 - Prefix délky 64 bitů přidělovat v případech, kdy je zcela jisté, že dotyčná instalace nebude vyžadovat podsítě.
 - Pokud bude zcela jisté, že se připojuje jen jediné zařízení, lze přidělit prefix délky 128 bitů, tedy jedinou adresu.
- <http://www.iana.org/assignments/ipv6-unicast-address-assignments>

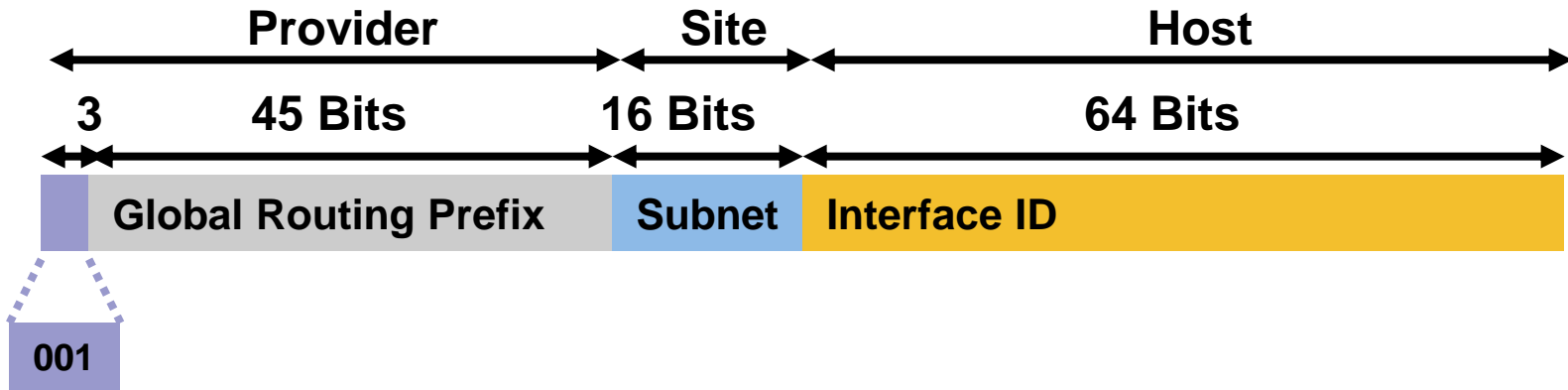
Ukázka alokace



Ukázka alokace



IPv6 Global Unicast Address



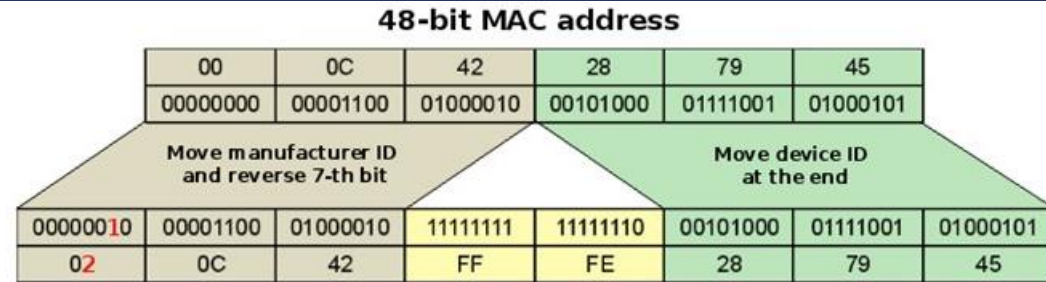
- **Globální směrovací prefix (GRP)** identifikuje globální směrovací koncovou síť. Je síti přidělen lokálním internetovým registrem.
- **Identifikátor podsítě (Subnet ID)** slouží k rozlišení jednotlivých podsítí v rámci dané sítě. Spravuje administrátor sítě.
- **Identifikátor rozhraní (Interface ID)** umožňuje v jedné podsíti rozlišit $18e10$ různých rozhraní.

Interface ID

- EUI-64

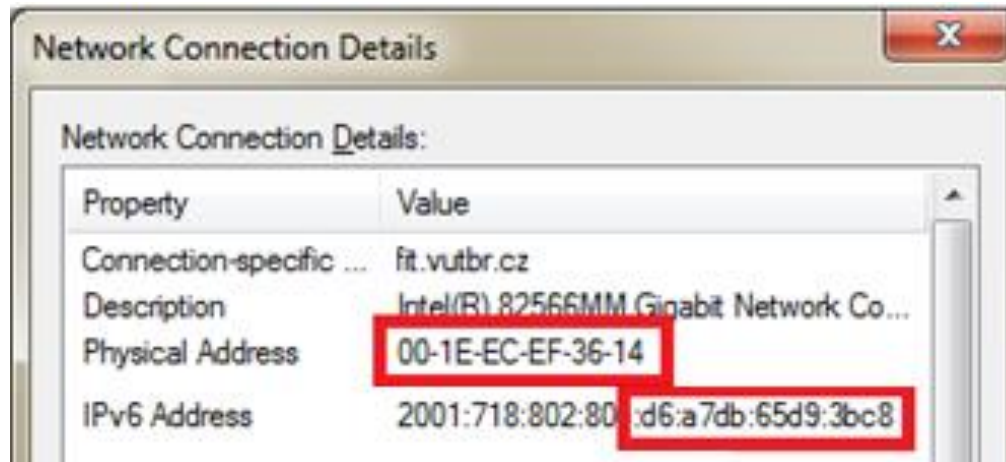
Ethernet adapter Local Area Connection:

```
Connection-specific DNS Suffix . : 
Description . . . . . : Intel(R) P
Physical Address. . . . . : 08-00-27-0F-96-C0
DHCP Enabled. . . . . : Yes
Autoconfiguration Enabled . . . : Yes
IPv6 Address. . . . . : 2001:db8:affe::1
Link-local IPv6 Address . . . . : fe80::a00:27ff:fe0f:96c0%10
```



64-bit EUI-64 address

- Privacy Extension



- CGA

Adresní stavy

- **Tentative**

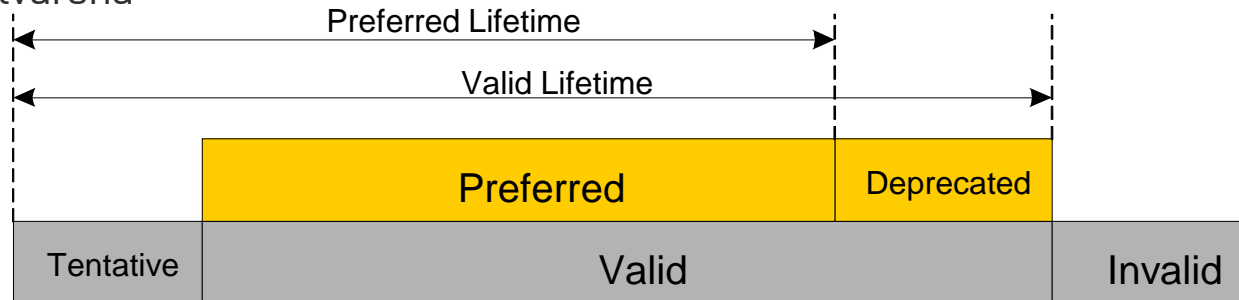
- fáze DAD
- unicast komunikace je zakázaná
- z multicastu je povolen jen NA

- **Valid**

- adresa je unikátní a může být používána
- validní adresa je ve dvou stavech **Preferred** and **Deprecated**
 - Preferred – adresa je používána
 - Deprecated – adresa je používána v rámci stávajících spojení, ale žádná nová na tuto adresu nesmí být vytvářena

- **Invalid**

- po uplynutí Valid Lifetime
- adresa nemůže být používána



Příklad

```
C:\Users\Wrathion>netsh interface ipv6 show addresses
```

```
Interface 3: Ethernet
```

Addr Type	DAD State	Valid Life	Pref. Life	Address
Dhcp	Preferred	1h4m42s	30m57s	2001:67c:1220:80e:4a:2148:aa92:da50
Temporary	Deprecated	3d26m48s	0s	2001:67c:1220:80e:20ef:9b34:690e:7999
Temporary	Deprecated	5d21m44s	0s	2001:67c:1220:80e:28b7:4f72:c62e:1dce
Public	Preferred	29d23h59m49s	6d23h59m49s	2001:67c:1220:80e:3574:1271:1faf:6c48
Temporary	Preferred	6d19m12s	16m45s	2001:67c:1220:80e:d872:9eed:c14:bd76
Temporary	Deprecated	4d24m16s	0s	2001:67c:1220:80e:fd62:a061:c1c7:cfee
Other	Preferred	infinite	infinite	fe80::3574:1271:1faf:6c48%3

```
C:\Users\Wrathion>netsh interface ipv6 show dnsservers
```

```
Configuration for interface "Ethernet"
```

```
DNS servers configured through DHCP: 2001:67c:1220:809::93e5:92b  
2001:67c:1220:808::93e5:92b
```

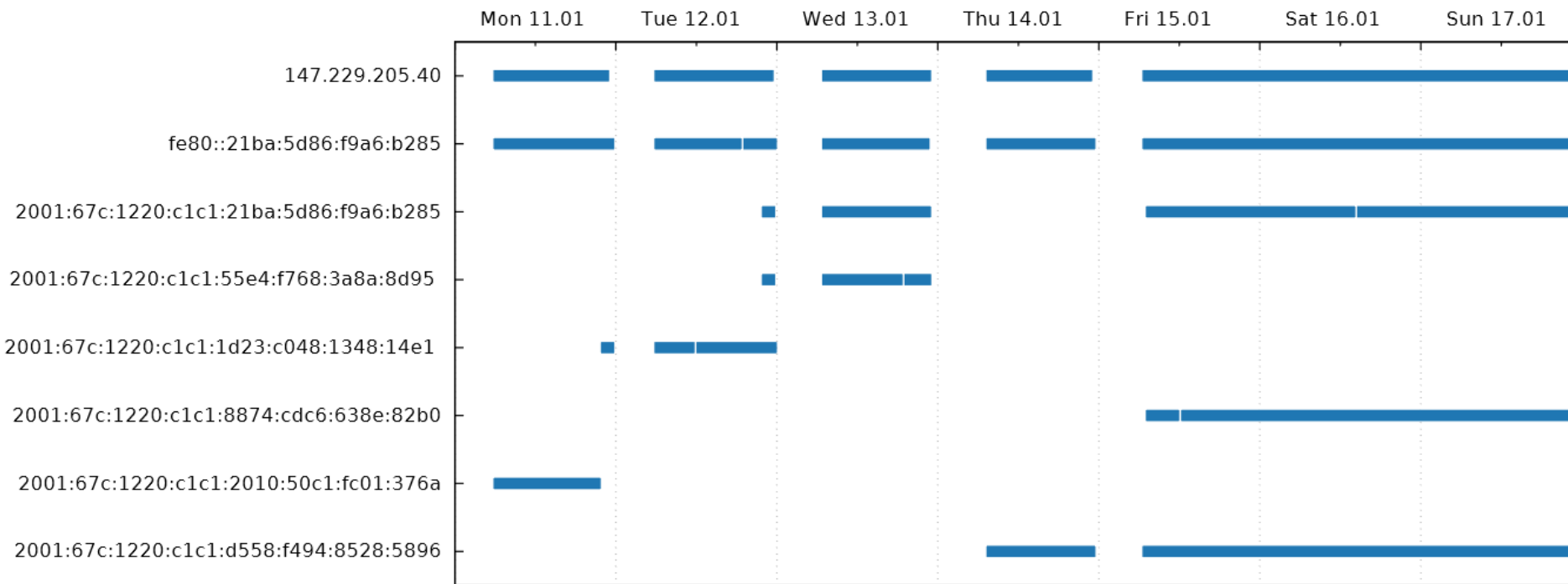
```
Register with which suffix: Primary only
```

```
C:\Users\Wrathion>netsh interface ipv6 show joins
```

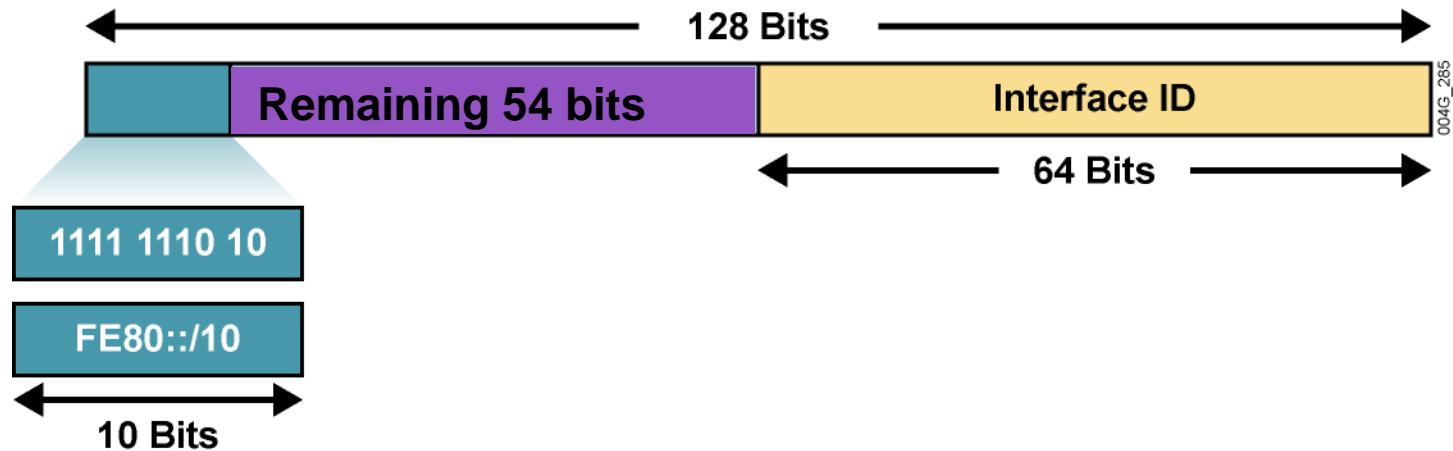
```
Interface 3: Ethernet
```

Scope	References	Last	Address
0	0	Yes	ff01::1
0	0	Yes	ff02::1
0	1	Yes	ff02::c
0	1	Yes	ff02::fb
0	1	Yes	ff02::1:3
0	1	Yes	ff02::1:ff0e:7999
0	1	Yes	ff02::1:ff14:bd76
0	1	Yes	ff02::1:ff2e:1dce
0	1	Yes	ff02::1:ff92:da50
0	2	Yes	ff02::1:ffaf:6c48
0	1	Yes	ff02::1:ffc7:cfee

Realita s počtem adres



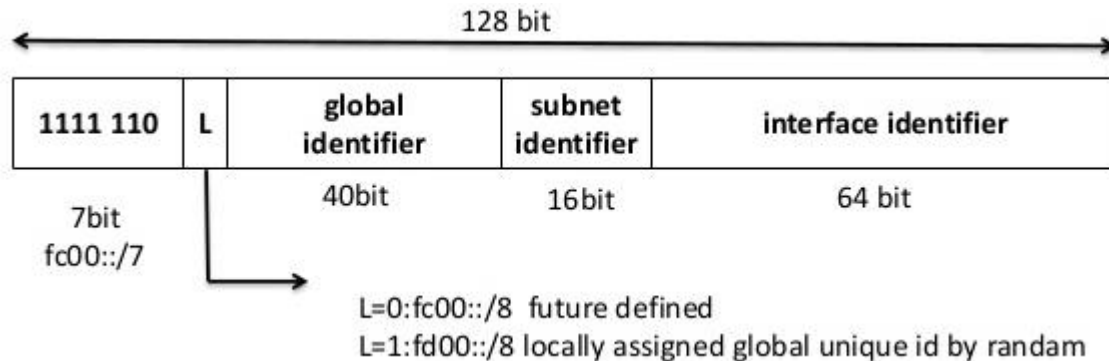
Link-Local Address



- **Link-local address** has specific FE80::/10
 - random 54 bits (usually zero) and Interface ID in EUI-64 format or created by Privacy extensions
- Mandatory address for communication between two IPv6 devices
- **Automatically assigned as soon as IPv6 is enabled**
- Also used for next-hop calculation in routing protocols
- Unique and valid only in one broadcast domain
 - Usage of **zone** to differentiate interface --> fe80::9abc%10/64

ULA adresa

- a.k.a. „privátní“ a.k.a **Unique Local IPv6 unicast Address**



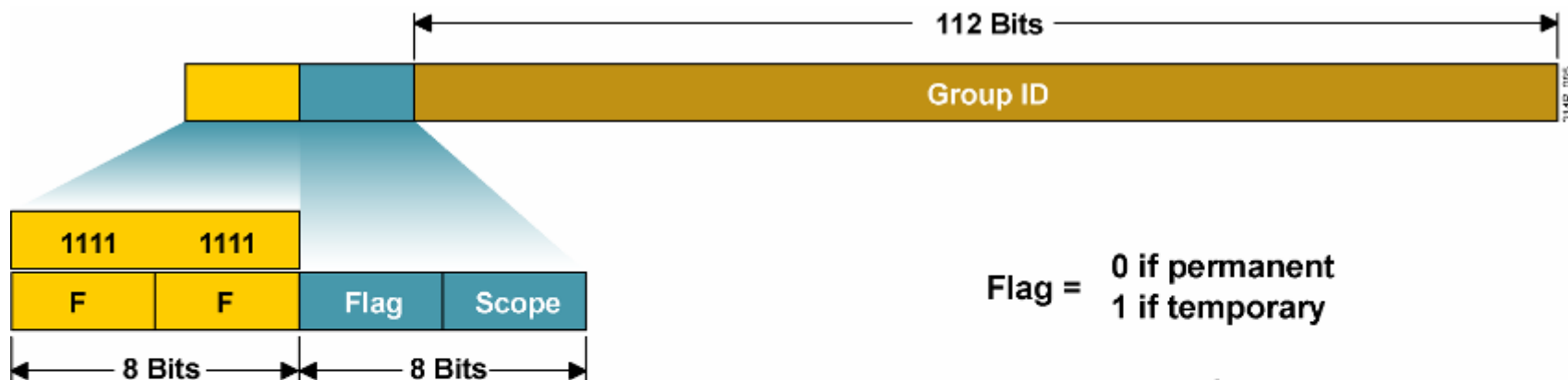
- ULA address generator

Pseudo-Random Global ID Algorithm:

- 1) Obtain the current time of day in 64-bit NTP format
- 2) Obtain EUI-64 identifier (from MAC for example) or any suitably unique ID
- 3) Concatenate the time (1) with the system ID (2)
- 4) Compute SHA-1 digest of (3) and use the least significant 40 bits as Global ID

- <https://www.sixxs.net/tools/grh/ula/>

Skupinové adresy

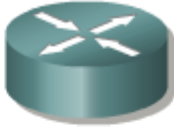






- Příznaky – první 3 bity rezervovány = 0, poslední = 0 (permanentní adresa, well-known), = 1 (adresa je určena pro privátní použití)
- Rozsah – určuje topologické hranice skupinového přenosu

Flag =
0 if permanent
1 if temporary

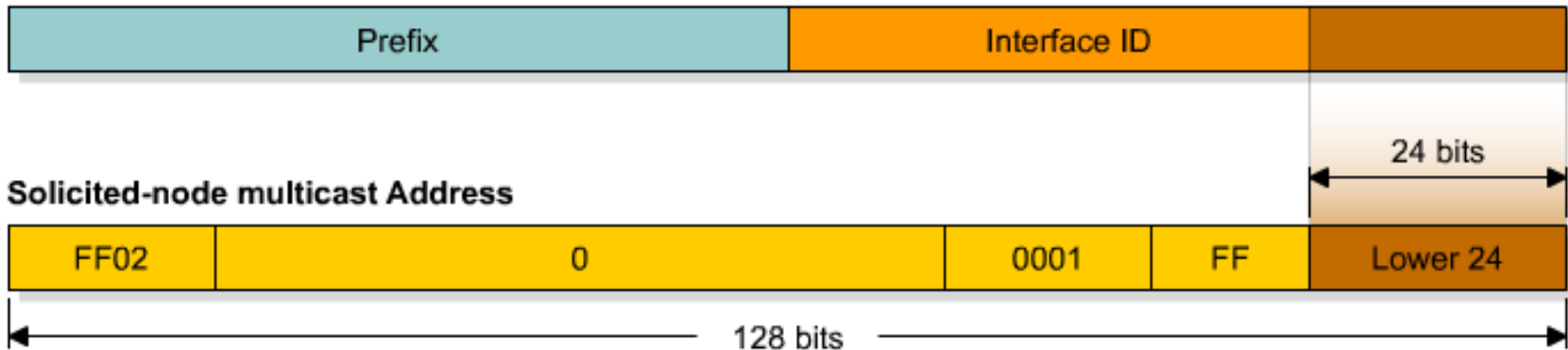
Scope =
1 Interface-Local
2 Link-Local
3 Subnet-Local
4 Admin-Local
5 Site-Local
8 Organization
E Global

Příklady MA

	Meaning		Scope
FF02::1	All nodes		Link-local
FF02::2	All routers		Link-local
FF02::9	All RIP routers		Link-local
FF02::1:FFXX:XXXX	Solicited-node		Link-local
FF05::101	All NTP servers		Site-local

Solicited-Node MA

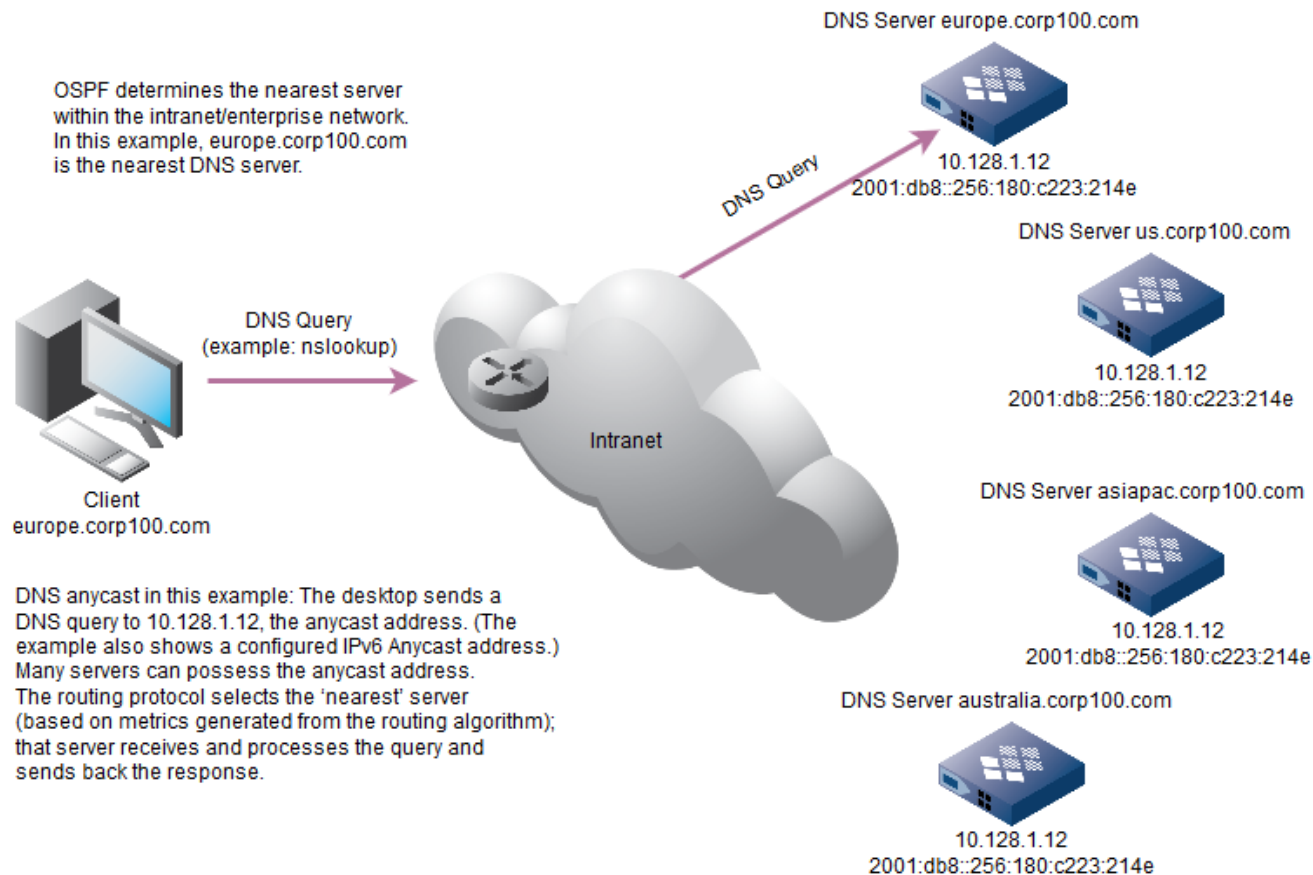
IPv6 Address



- **Solicited-node multicast address** consists of prefix FF02::1:FF:/104 + lower 24 bits corresponding unicast or anycast address of the node
- Used by ICMPv6
 - ICMPv6 is encapsulated in IPv6 packet, Solicited-Node address is used as destination IPv6 address
- Address with link-local scope

Princip anycast

- Formát pro rezervované výběrové adresy definuje RFC 2526, teoreticky může být i individuální adresa.



Reálný příklad anycastu

- DNS kořenové servery <https://www.iana.org/domains/root/servers>

Domain Names

Overview

Root Zone Management

Overview

Root Database

Hint and Zone Files

Change Requests

Instructions & Guides

Root Servers

.INT Registry

.ARPA Registry

IDN Practices Repository

Root Key Signing Key (DNSSEC)

Reserved Domains

Root Servers

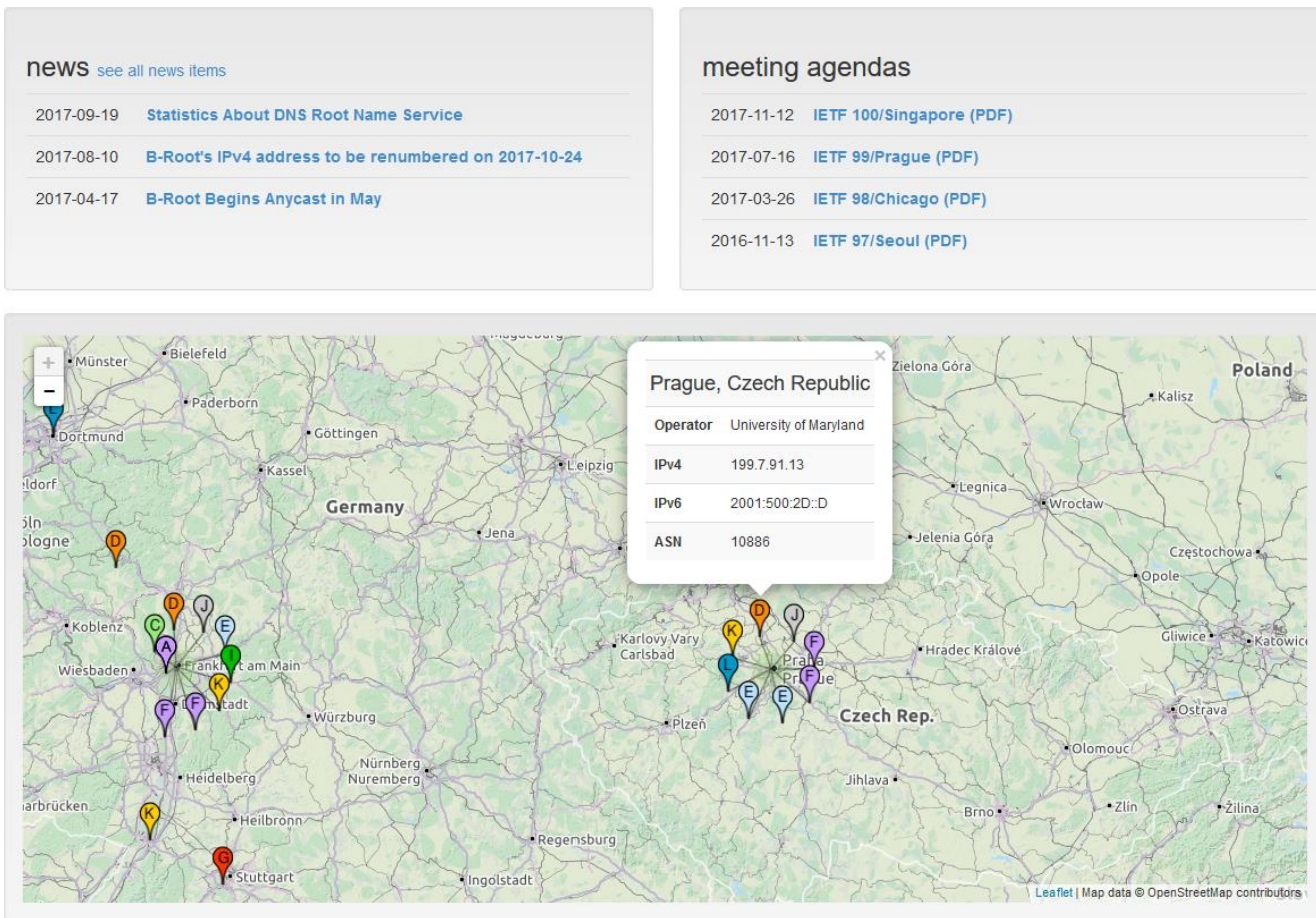
The authoritative name servers that serve the DNS root zone, commonly known as the “root servers”, are a network of hundreds of servers in many countries around the world. They are configured in the DNS root zone as 13 named authorities, as follows.

List of Root Servers

HOSTNAME	IP ADDRESSES	MANAGER
a.root-servers.net	198.41.0.4, 2001:503:ba3e::2:30	VeriSign, Inc.
b.root-servers.net	199.9.14.201, 2001:500:200::b	University of Southern California (ISI)
c.root-servers.net	192.33.4.12, 2001:500:2::c	Cogent Communications
d.root-servers.net	199.7.91.13, 2001:500:2d::d	University of Maryland
e.root-servers.net	192.203.230.10, 2001:500:a8::e	NASA (Ames Research Center)
f.root-servers.net	192.5.5.241, 2001:500:2f::f	Internet Systems Consortium, Inc.
g.root-servers.net	192.112.36.4, 2001:500:12::d0d	US Department of Defense (NIC)
h.root-servers.net	198.97.190.53, 2001:500:1::53	US Army (Research Lab)
i.root-servers.net	192.36.148.17, 2001:7fe::53	Netnod
j.root-servers.net	192.58.128.30, 2001:503:c27::2:30	VeriSign, Inc.
k.root-servers.net	193.0.14.129, 2001:7fd::1	RIPE NCC
l.root-servers.net	199.7.83.42, 2001:500:9f::42	ICANN
m.root-servers.net	202.12.27.33, 2001:dc3::35	WIDE Project

Reálný příklad anycastu

- DNS kořenové servery <http://www.root-servers.org/>



Poznámky k anycastu

Motivace k zavedení

- 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.

Problémy

- výběrová adresa je z rozsahu globální unikátních adres
- směrování
 - v rámci sítě
 - v rámci Internetu
- stavové informace služeb

Obsah

1) ÚVODNÍ INFORMACE

- Motivace
- Nové vlastnosti

2) IPv6 PAKET

3) ADRESOVÁNÍ

- Administrativní platnost adres
- Unicast, Multicast a Anycast adresy

4) PODPŮRNÉ PROTOKOLY PRO IPv6

- ICMPv6
 - NDP, MLDv1, MLDv2

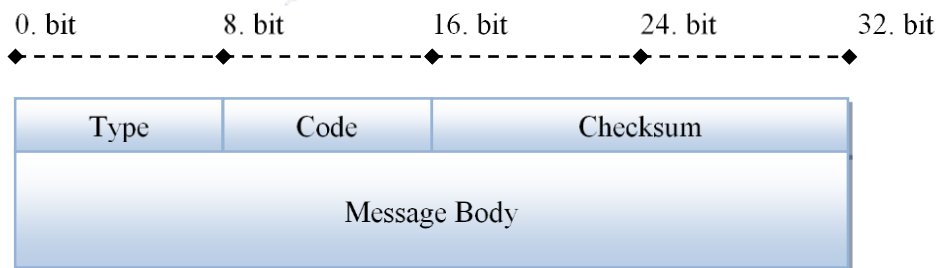
5) KOEXISTENCE IPv4 A IPv6

- přechodové mechanismy
- routing

6) PROBLÉMY, ZHODNOCENÍ

ICMPv6

- IPv6 vyžaduje podobně jako IPv4 řídicí protokol pro zasílání informačních a chybových zpráv [RFC 2463]
- Součástí jsou i podpůrné protokoly
 - ICMP
 - IGMP
 - ARP



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

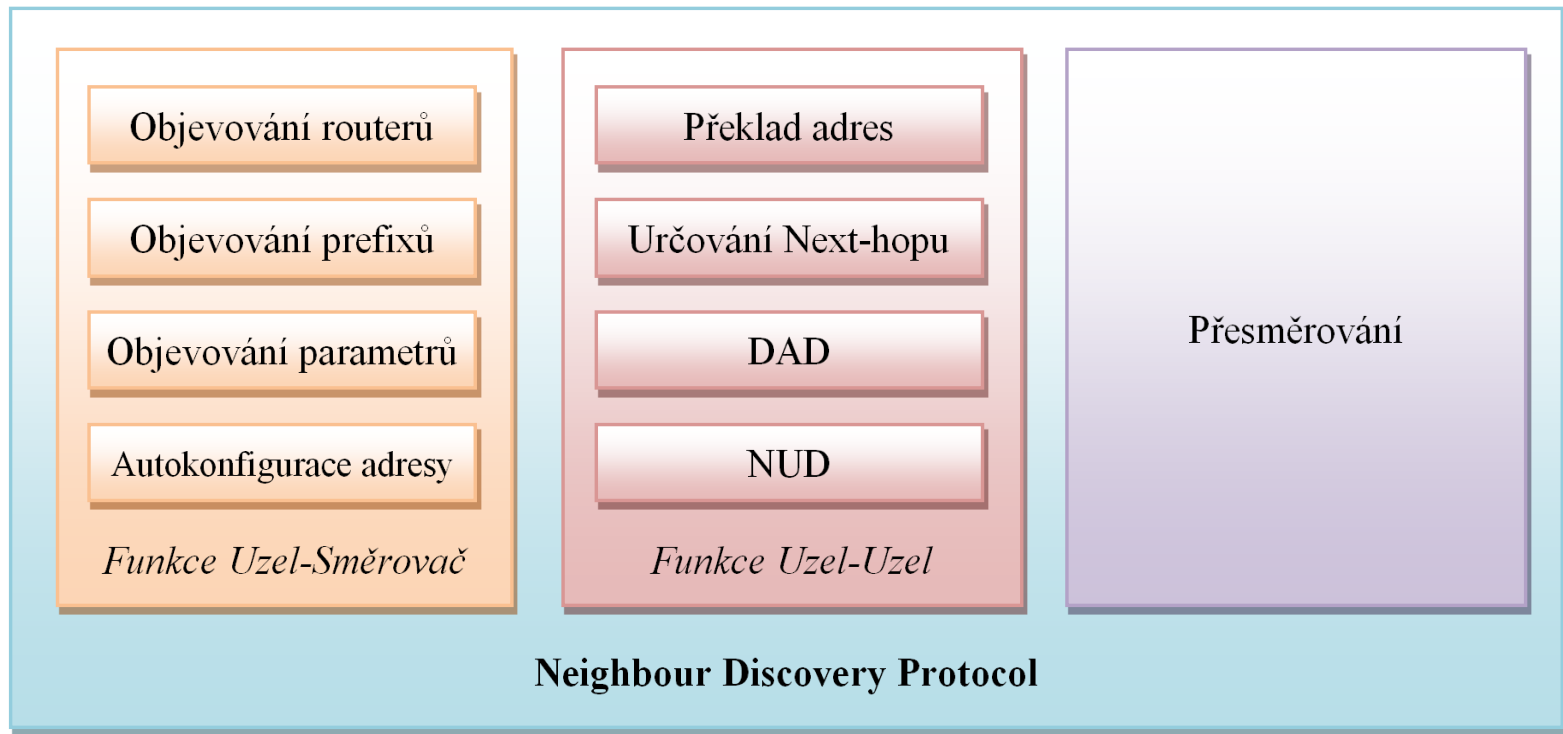
ICMP Informace o uzlu

- RFC4620: IPv6 Node Information Queries
- získání informací o uzlech v síti:
 - jméno uzlu (plně kvalifikované doménové jméno)
 - seznam IPv6 adres
 - seznam IPv4 adres
- Možné použití při objevování počítačů v síti
 - Bezpečnost (ping sweeping)?

```
informace o uzlu
139  dotaz na informace
140  odpověď s informacemi
```

Objevování sousedů

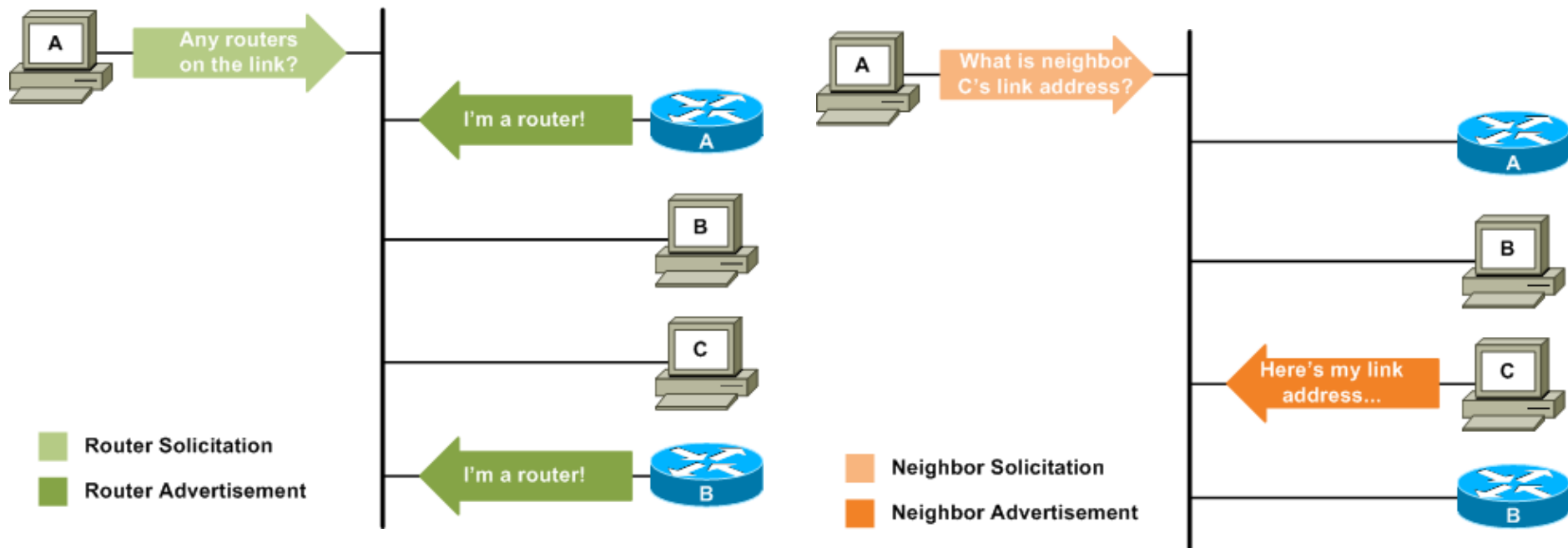
- Tento protokol řeší spoustu provozních otázek souvisejících s vrstvami L2 a L3



NDP zprávy

- **Router Advertisement (RA)**
 - periodické zprávy směrovače oznamující jeho existenci, specifické parametry jako prefix linky, MTU
 - vysílány také jako odpovědi na SA
- **Router Solicitation (RS)**
 - požadavek hosta na zaslání RA
- **Neighbor Solicitation (NS)**
 - požadavek na získání linkové adresy, pro detekci duplikované adresy
- **Neighbor Advertisement**
 - odpověď na NS
 - při změně linkové adresy vyšle unsolicited NA
- Redirect – přesměrování na jiný směrovač
- Inverzní objevování sousedů

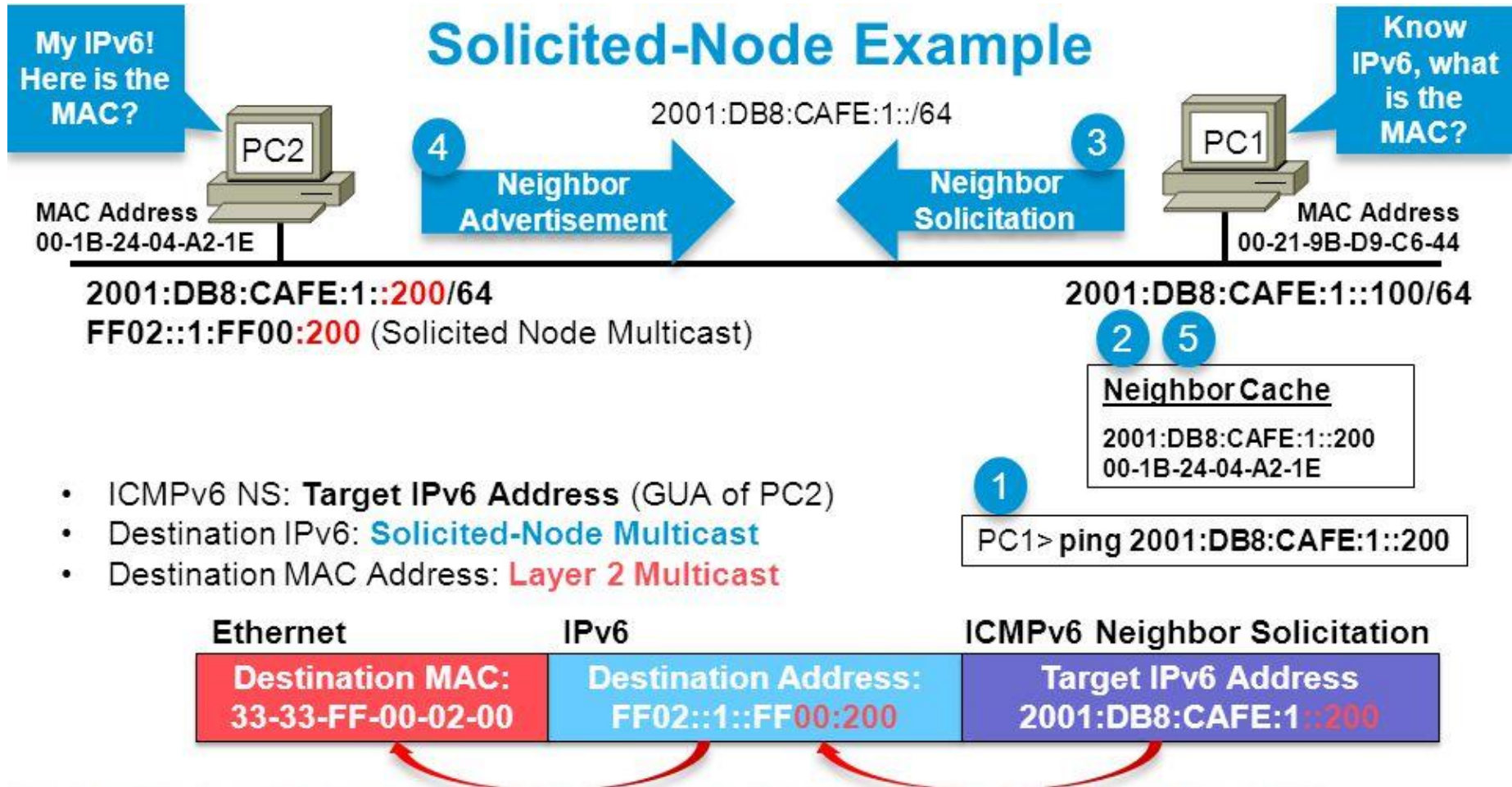
NDP Illustrace



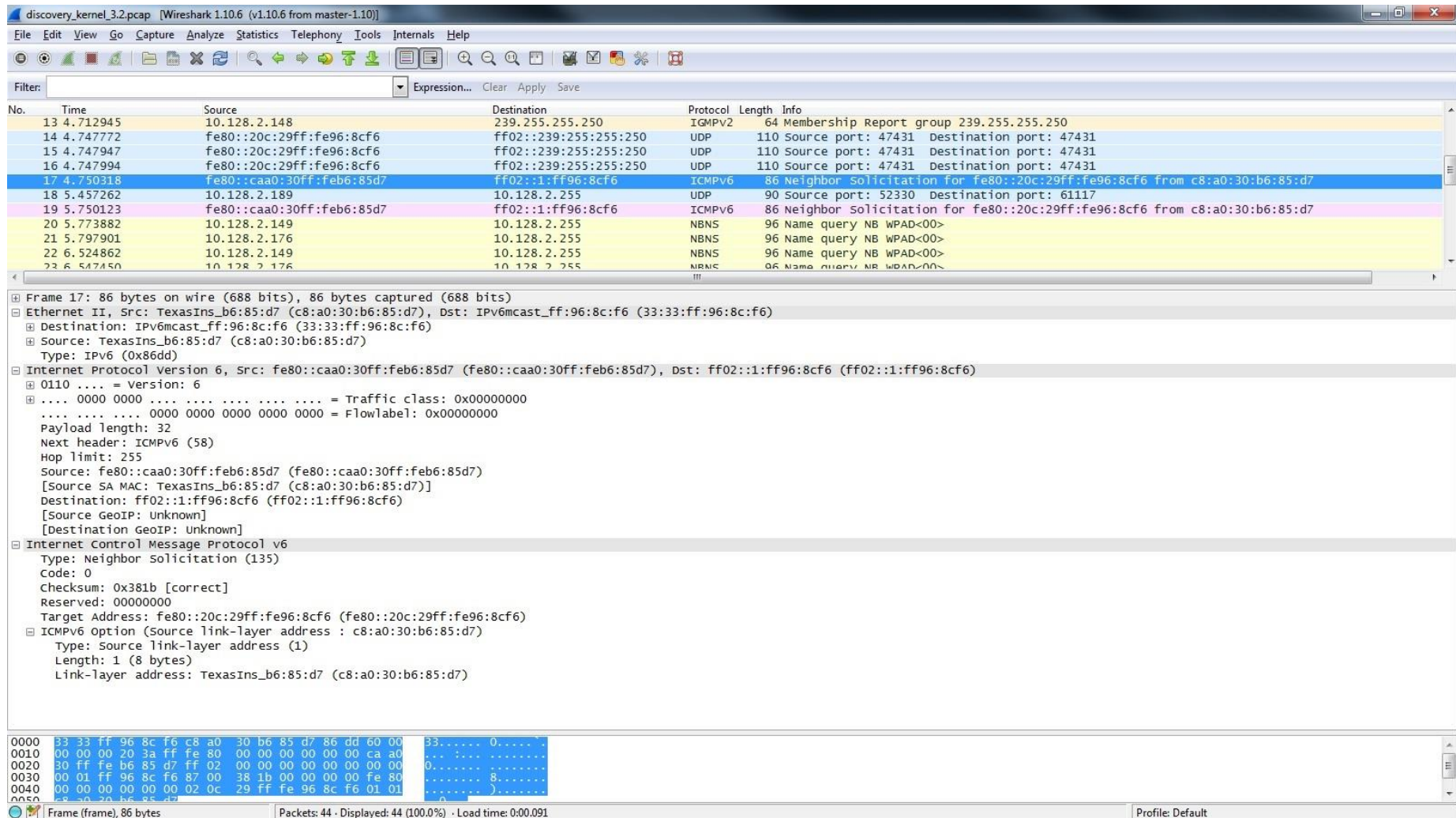
RA ve Wireshark

No.	Source	Destination	Protocol	Info
9	fe80::c000:11ff:fe50:0	ff02::1	ICMPv6	Router Advertisement from c2:00:11:50:00:00
Frame 9: 118 bytes on wire (944 bits), 118 bytes captured (944 bits) on interface 0				
Ethernet II, Src: c2:00:11:50:00:00 (c2:00:11:50:00:00), Dst: IPv6mcast_00:00:00:01 (33:33:00:00:00:01)				
Internet Protocol Version 6, Src: fe80::c000:11ff:fe50:0 (fe80::c000:11ff:fe50:0), Dst: ff02::1 (ff02::1)				
Internet Control Message Protocol v6				
Type: Router Advertisement (134)				
Code: 0				
Checksum: 0x809b [correct]				
Cur hop limit: 64				
Flags: 0x00				
0... .. = Managed address configuration: Not set				
.0.. = Other configuration: Not set				
..0. = Home Agent: Not set				
...0 0... = Prf (Default Router Preference): Medium (0)				
.... .0.. = Proxy: Not set				
.... ..0. = Reserved: 0				
Router lifetime (s): 1800				
Reachable time (ms): 0				
Retrans timer (ms): 0				
ICMPv6 Option (Source link-layer address : c2:00:11:50:00:00)				
Type: Source link-layer address (1)				
Length: 1 (8 bytes)				
Link-layer address: c2:00:11:50:00:00 (c2:00:11:50:00:00)				
ICMPv6 Option (MTU : 1500)				
Type: MTU (5)				
Length: 1 (8 bytes)				
Reserved				
MTU: 1500				
ICMPv6 Option (Prefix information : 2001:db8:cafe:b0::/64)				
Type: Prefix information (3)				
Length: 4 (32 bytes)				
Prefix Length: 64				
Flag: 0xc0				
1... = On-link flag(L): Set				
.1.. = Autonomous address-configuration flag(A): Set				
..0. = Router address flag(R): Not set				
...0 0000 = Reserved: 0				
Valid Lifetime: 2592000				
Preferred Lifetime: 604800				
Reserved				
Prefix: 2001:db8:cafe:b0:: (2001:db8:cafe:b0::)				

NDP a Solicited-Node adresy



NDP ve Wiresharku



The image shows a Wireshark capture of network traffic. The top pane displays a list of packets. Packet 17 is selected, showing details of an ICMPv6 Neighbor Solicitation message. The bottom pane shows the raw packet data in hexadecimal and ASCII.

Packet List:

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
13	4.712945	10.128.2.148	239.255.255.250	IGMPv2	64	Membership Report group 239.255.255.250
14	4.747772	fe80::20c:29ff:fe96:8cf6	ff02::239:255:255:250	UDP	110	Source port: 47431 Destination port: 47431
15	4.747947	fe80::20c:29ff:fe96:8cf6	ff02::239:255:255:250	UDP	110	Source port: 47431 Destination port: 47431
16	4.747994	fe80::20c:29ff:fe96:8cf6	ff02::239:255:255:250	UDP	110	Source port: 47431 Destination port: 47431
17	4.750318	fe80::caa0:30ff:feb6:85d7	ff02::1:ff96:8cf6	ICMPv6	86	Neighbor Solicitation for fe80::20c:29ff:fe96:8cf6 from c8:a0:30:b6:85:d7
18	5.457262	10.128.2.189	10.128.2.255	UDP	90	Source port: 52330 Destination port: 61117
19	5.750123	fe80::caa0:30ff:feb6:85d7	ff02::1:ff96:8cf6	ICMPv6	86	Neighbor Solicitation for fe80::20c:29ff:fe96:8cf6 from c8:a0:30:b6:85:d7
20	5.773882	10.128.2.149	10.128.2.255	NBNS	96	Name query NB WPAD<00>
21	5.797901	10.128.2.176	10.128.2.255	NBNS	96	Name query NB WPAD<00>
22	6.524862	10.128.2.149	10.128.2.255	NBNS	96	Name query NB WPAD<00>
23	6.547450	10.128.2.176	10.128.2.255	NBNS	96	Name query NB WPAD<00>

Packet 17 Details:

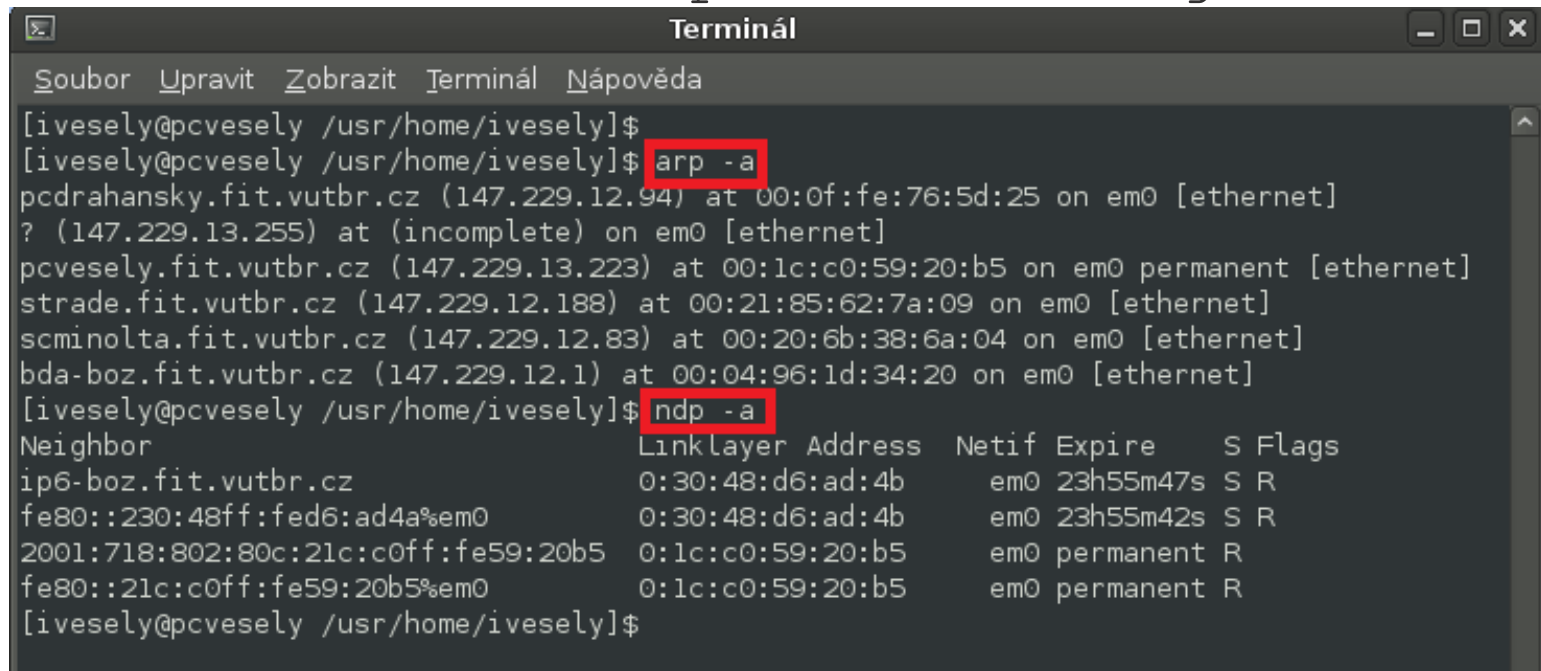
- Frame 17: 86 bytes on wire (688 bits), 86 bytes captured (688 bits)
- Ethernet II, Src: TexasIns_b6:85:d7 (c8:a0:30:b6:85:d7), Dst: IPv6mcast_ff:96:8c:f6 (33:33:ff:96:8c:f6)
- Destination: IPv6mcast_ff:96:8c:f6 (33:33:ff:96:8c:f6)
- Source: TexasIns_b6:85:d7 (c8:a0:30:b6:85:d7)
- Type: IPv6 (0x86dd)
- Internet Protocol Version 6, Src: fe80::caa0:30ff:feb6:85d7 (fe80::caa0:30ff:feb6:85d7), Dst: ff02::1:ff96:8cf6 (ff02::1:ff96:8cf6)
- 0110 = Version: 6
- 0000 0000 = Traffic class: 0x00000000
- 0000 0000 0000 0000 = Flowlabel: 0x00000000
- Payload length: 32
- Next header: ICMPv6 (58)
- Hop limit: 255
- Source: fe80::caa0:30ff:feb6:85d7 (fe80::caa0:30ff:feb6:85d7)
- [Source SA MAC: TexasIns_b6:85:d7 (c8:a0:30:b6:85:d7)]
- Destination: ff02::1:ff96:8cf6 (ff02::1:ff96:8cf6)
- [Source GeoIP: Unknown]
- [Destination GeoIP: Unknown]
- Internet Control Message Protocol v6
- Type: Neighbor Solicitation (135)
- code: 0
- Checksum: 0x381b [correct]
- Reserved: 00000000
- Target Address: fe80::20c:29ff:fe96:8cf6 (fe80::20c:29ff:fe96:8cf6)
- ICMPv6 option (Source link-layer address : c8:a0:30:b6:85:d7)
- Type: Source link-layer address (1)
- Length: 1 (8 bytes)
- Link-layer address: TexasIns_b6:85:d7 (c8:a0:30:b6:85:d7)

Raw Data:

```
0000 33 33 ff 96 8c f6 c8 a0 30 b6 85 d7 86 dd 60 00 33 ..... 0 .....
0010 00 00 00 20 3a ff fe 80 00 00 00 00 00 00 ca a0 .. 20 3a ff fe 80 .. 00 00 00 00 ca a0
0020 30 ff fe b6 85 d7 ff 02 00 00 00 00 00 00 00 00 30 ff fe b6 85 d7 ff 02 00 00 00 00 00 00 00
0030 00 01 ff 96 8c f6 87 00 38 1b 00 00 00 00 fe 80 00 01 ff 96 8c f6 87 00 38 1b 00 00 00 fe 80
0040 00 00 00 00 00 00 02 0c 29 ff fe 96 8c f6 01 01 00 00 00 00 00 02 0c 29 ff fe 96 8c f6 01 01
0050 c8 a0 30 b6 85 d7 .. .. .. .. .. .. .. .. c8 a0 30 b6 85 d7 .. .. .. .. .. .. .. ..
```

Neighbor Cache

- Instead of ARP table, there is **Neighbor Cache** for IPv6 hosts
- Command
 - `ndp -a` on unix
 - `netsh interface ipv6 show neighbors`



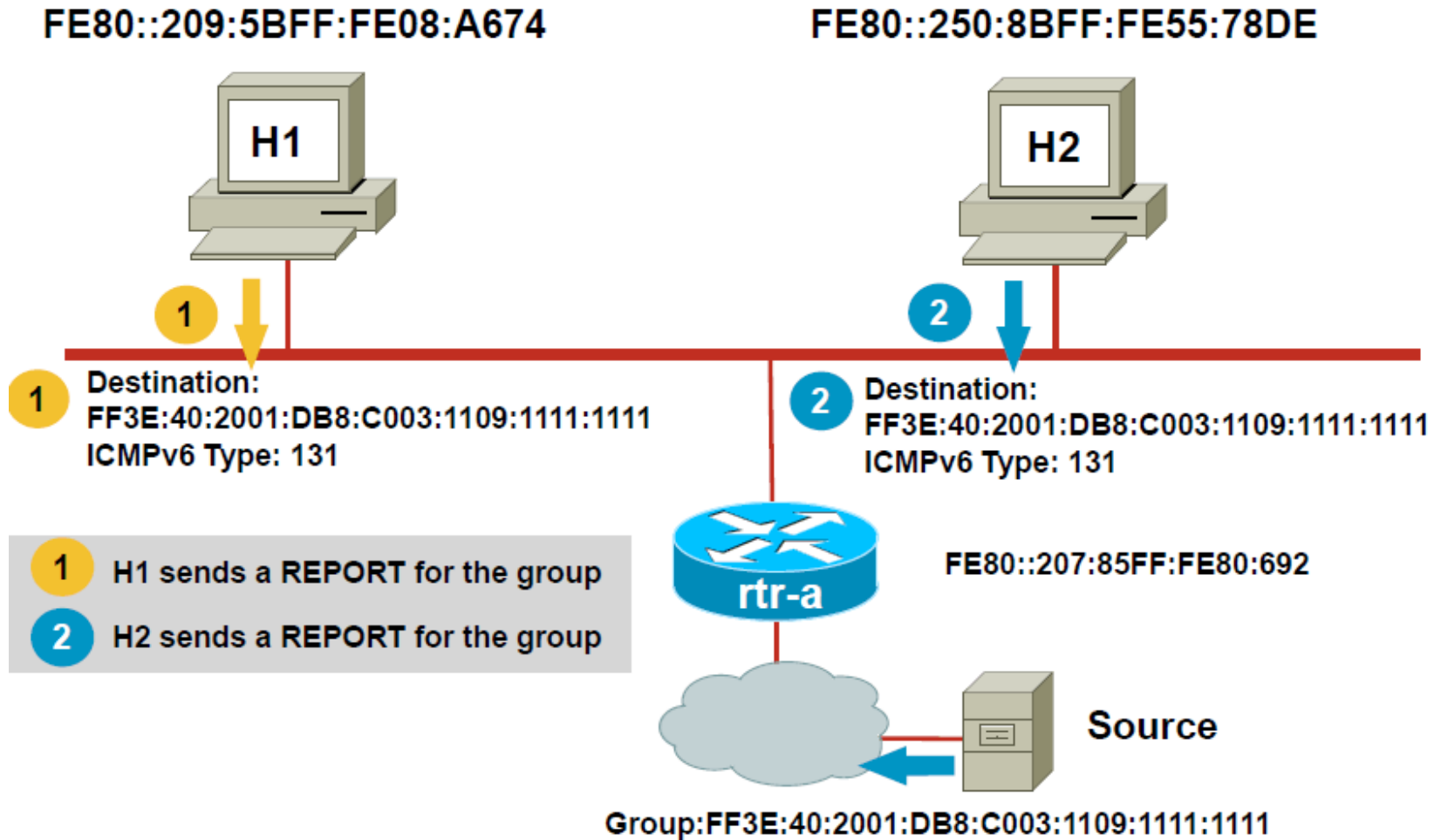
The screenshot shows a terminal window titled "Terminál" with a menu bar containing "Soubor", "Upravit", "Zobrazit", "Terminál", and "Nápověda". The user is at the prompt `[ivesely@pcvesely /usr/home/ivesely]$`. The first command entered is `arp -a`, which is highlighted with a red box. The output lists several IPv4 addresses and their corresponding MAC addresses on the `em0` interface. The second command entered is `ndp -a`, also highlighted with a red box. The output shows the Neighbor Cache entries for IPv6, including the link layer address, Netif, expire time, and flags.

```
[ivesely@pcvesely /usr/home/ivesely]$ arp -a
pcdrahansky.fit.vutbr.cz (147.229.12.94) at 00:0f:fe:76:5d:25 on em0 [ethernet]
? (147.229.13.255) at (incomplete) on em0 [ethernet]
pcvesely.fit.vutbr.cz (147.229.13.223) at 00:1c:c0:59:20:b5 on em0 permanent [ethernet]
strade.fit.vutbr.cz (147.229.12.188) at 00:21:85:62:7a:09 on em0 [ethernet]
scminolta.fit.vutbr.cz (147.229.12.83) at 00:20:6b:38:6a:04 on em0 [ethernet]
bda-boz.fit.vutbr.cz (147.229.12.1) at 00:04:96:1d:34:20 on em0 [ethernet]
[ivesely@pcvesely /usr/home/ivesely]$ ndp -a
Neighbor                               Linklayer Address  Netif  Expire      S Flags
ip6-boz.fit.vutbr.cz                  0:30:48:d6:ad:4b   em0    23h55m47s  S R
fe80::230:48ff:fed6:ad4a%em0          0:30:48:d6:ad:4b   em0    23h55m42s  S R
2001:718:802:80c:21c:c0ff:fe59:20b5   0:1c:c0:59:20:b5   em0    permanent  R
fe80::21c:c0ff:fe59:20b5%em0          0:1c:c0:59:20:b5   em0    permanent  R
[ivesely@pcvesely /usr/home/ivesely]$
```

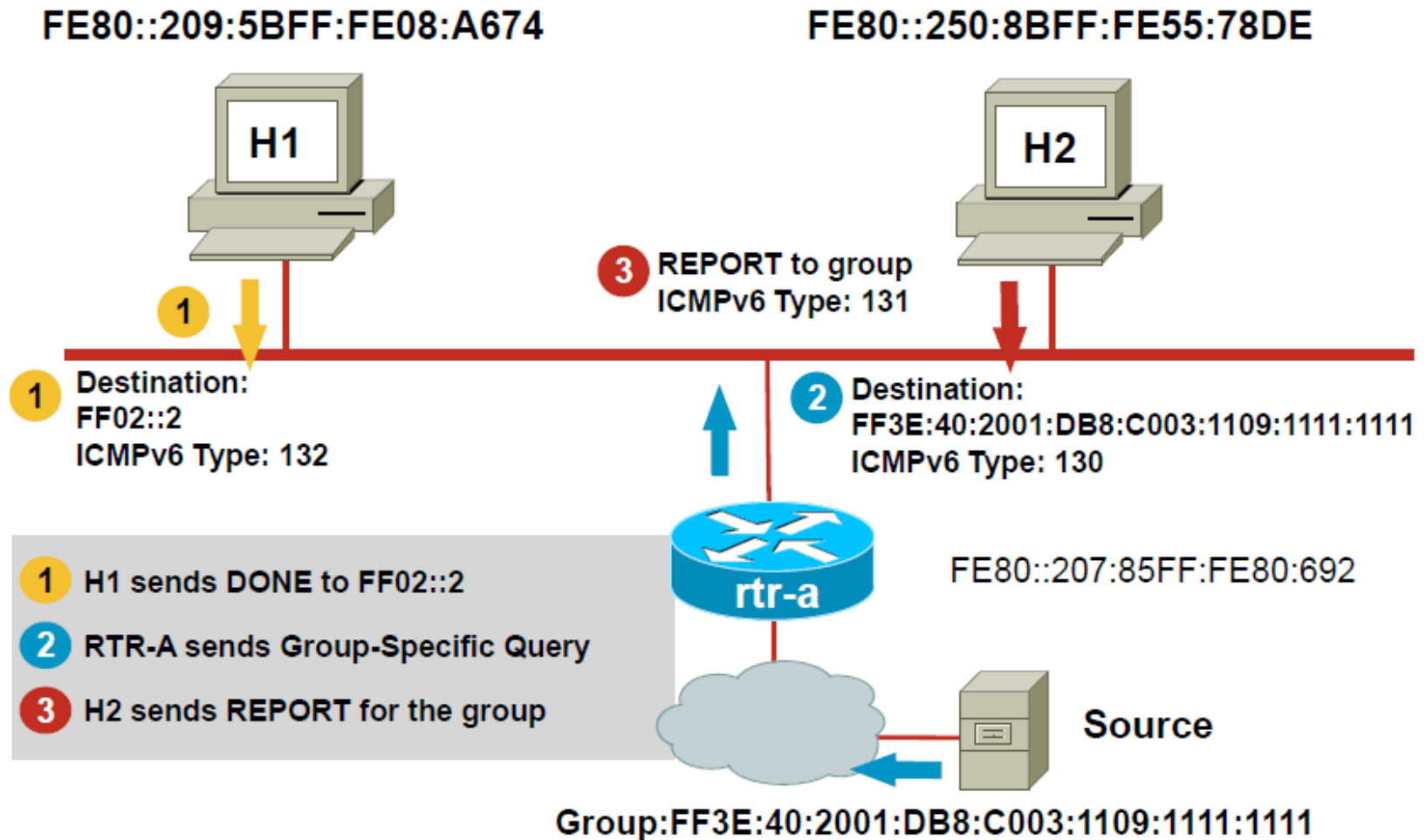

Správa skupin pro multicast v IPv6

- Využívá ICMPv6
- Protokoly MLDv1 a MLDv2 (Multicast Listener Discovery)
- Typy oznamovacích zpráv:
 - **Membership Query**
 - **Membership Report**
 - **Done Report**
- Protokoly odvozeny od IGMPv2
- Směrovač posílá periodicky dotazy na zjištění MC skupin, které chce host přijímat.

Multicast Listener Discovery



Multicast Listener Discovery



MLDv1 ve Wiresharku

The image shows a Wireshark capture of network traffic. The main pane displays a list of packets, with packet 968998 selected. The packet list shows a series of ICMPv6 Multicast Listener Reports from source fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe to destination ff02::1:ff83:b659. Packet 968998 is a Type: Multicast Listener Report (131) with Code: 0, Checksum: 0x866e, Maximum Response Delay [ms]: 0, Reserved: 0000, and Multicast Address: ff02::1:ff83:b659.

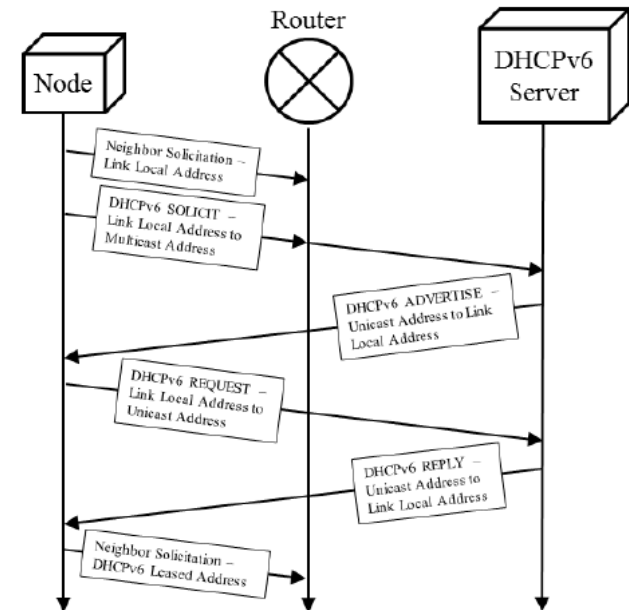
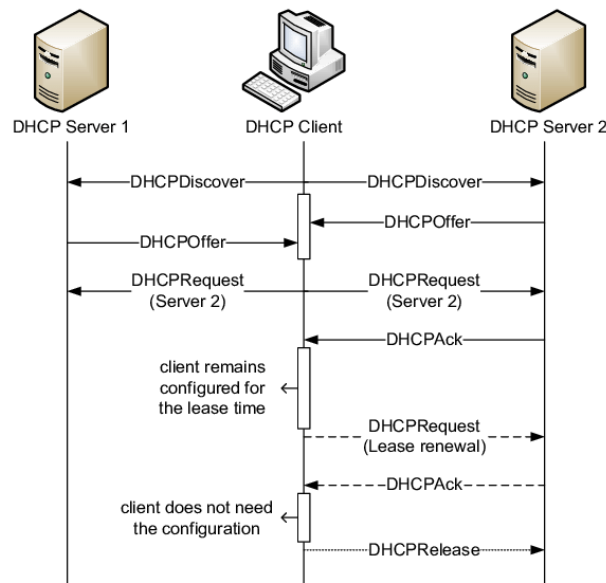
No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
968976	00:36:09.508562000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968977	00:36:09.508563000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968978	00:36:09.508565000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968979	00:36:09.508566000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968980	00:36:09.508568000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968981	00:36:09.508570000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968982	00:36:09.508571000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968983	00:36:09.508851000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968984	00:36:09.508852000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968985	00:36:09.508854000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968986	00:36:09.508855000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968987	00:36:09.508857000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968988	00:36:09.508858000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968989	00:36:09.508860000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968990	00:36:09.508861000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968991	00:36:09.508863000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968992	00:36:09.508865000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968993	00:36:09.509404000	00:23:68:59:bb:0d	00:15:70:9b:85:d1	MINT	204	Type 0x4fe0
968994	00:36:09.509406000	00:23:68:59:c0:63	00:15:70:9b:85:d1	MINT	204	Type 0x500f
968995	00:36:09.509409000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968996	00:36:09.509410000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968997	00:36:09.509806000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report
968998	00:36:09.509808000	fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe	ff02::1:ff83:b659	ICMPv6	86	Multicast Listener Report

Frame 968998: 86 bytes on wire (688 bits), 86 bytes captured (688 bits) on interface 0
Ethernet II, Src: a0:d3:c1:28:2a:fe (a0:d3:c1:28:2a:fe), Dst: IPv6mcast_ff:83:b6:59 (33:33:ff:83:b6:59)
Internet Protocol Version 6, Src: fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe (fe80::a2d3:c1ff:fe28:2afe), Dst: ff02::1:ff83:b659
Internet Control Message Protocol v6
Type: Multicast Listener Report (131)
Code: 0
Checksum: 0x866e [correct]
Maximum Response Delay [ms]: 0
Reserved: 0000
Multicast Address: ff02::1:ff83:b659 (ff02::1:ff83:b659)

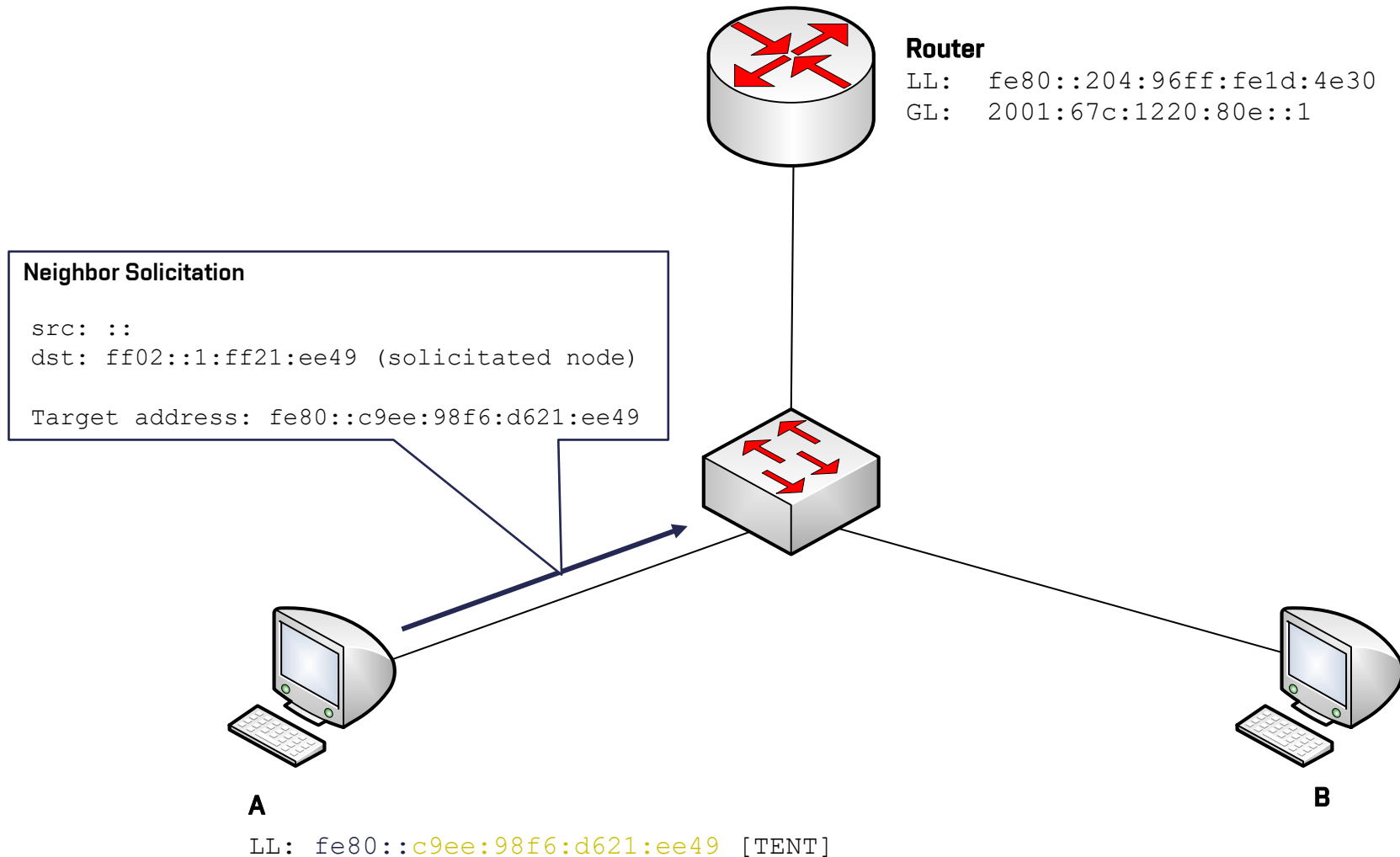
0000 33 33 ff 83 b6 59 a0 d3 c1 28 2a fe 86 dd 60 00 33...Y... .(*...`
0010 00 00 00 20 00 01 fe 80 00 00 00 00 00 a2 d3
0020 c1 ff fe 28 2a fe ff 02 00 00 00 00 00 00 00 ... (*...
0030 00 01 ff 83 b6 59 3a 00 05 02 00 00 01 00 83 00 ...Y...
0040 86 6e 00 00 00 00 ff 02 00 00 00 00 00 00 00 ...n...
0050 00 01 ff 83 b6 59Y

Připojení IP zařízení

- IPv4
 - DHCP
- IPv6
 - LL
 - DAD
 - RS - RA
 - GL
 - DAD



Link local adresa



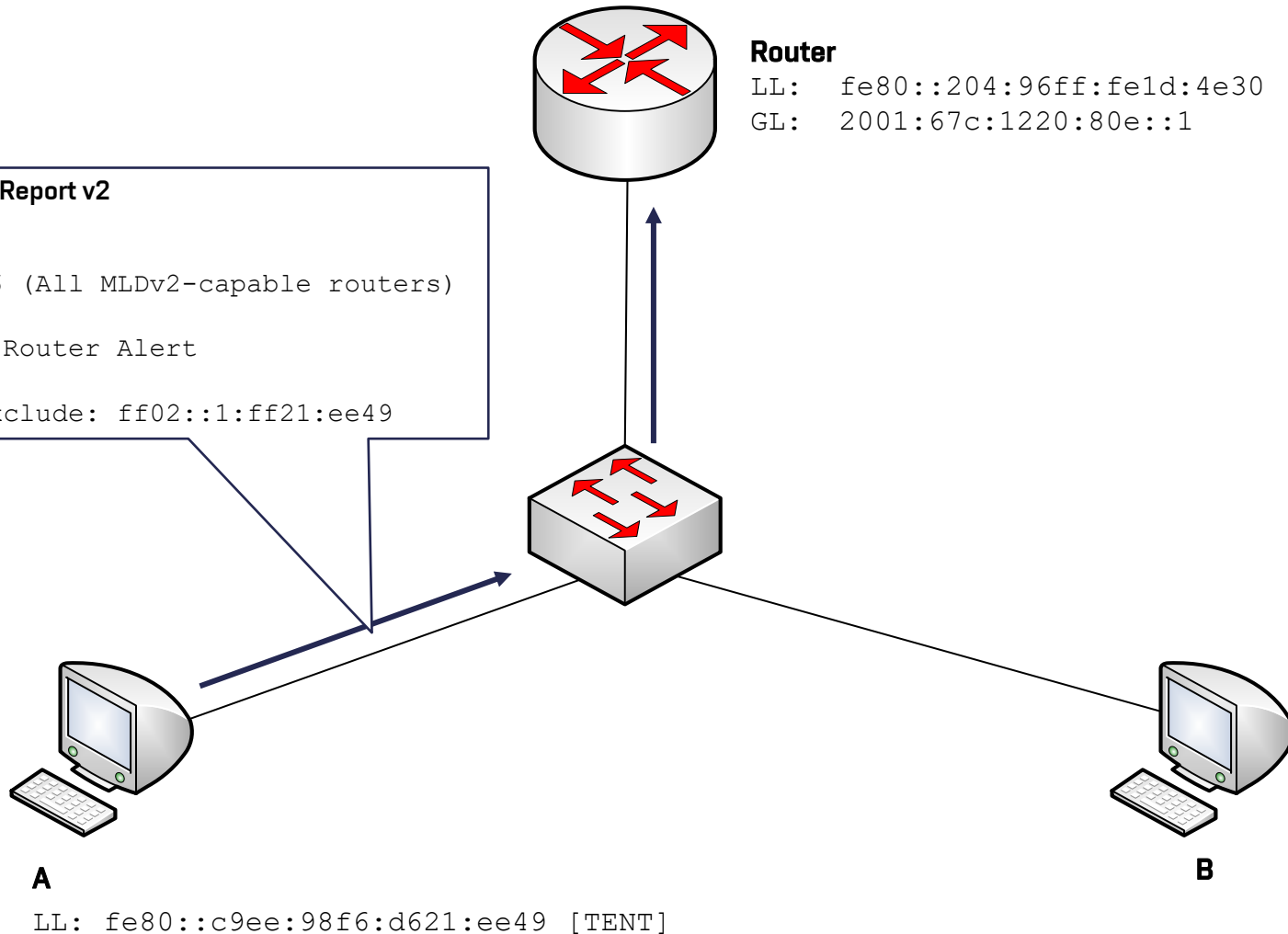
MLD Report

Multicast Listener Report v2

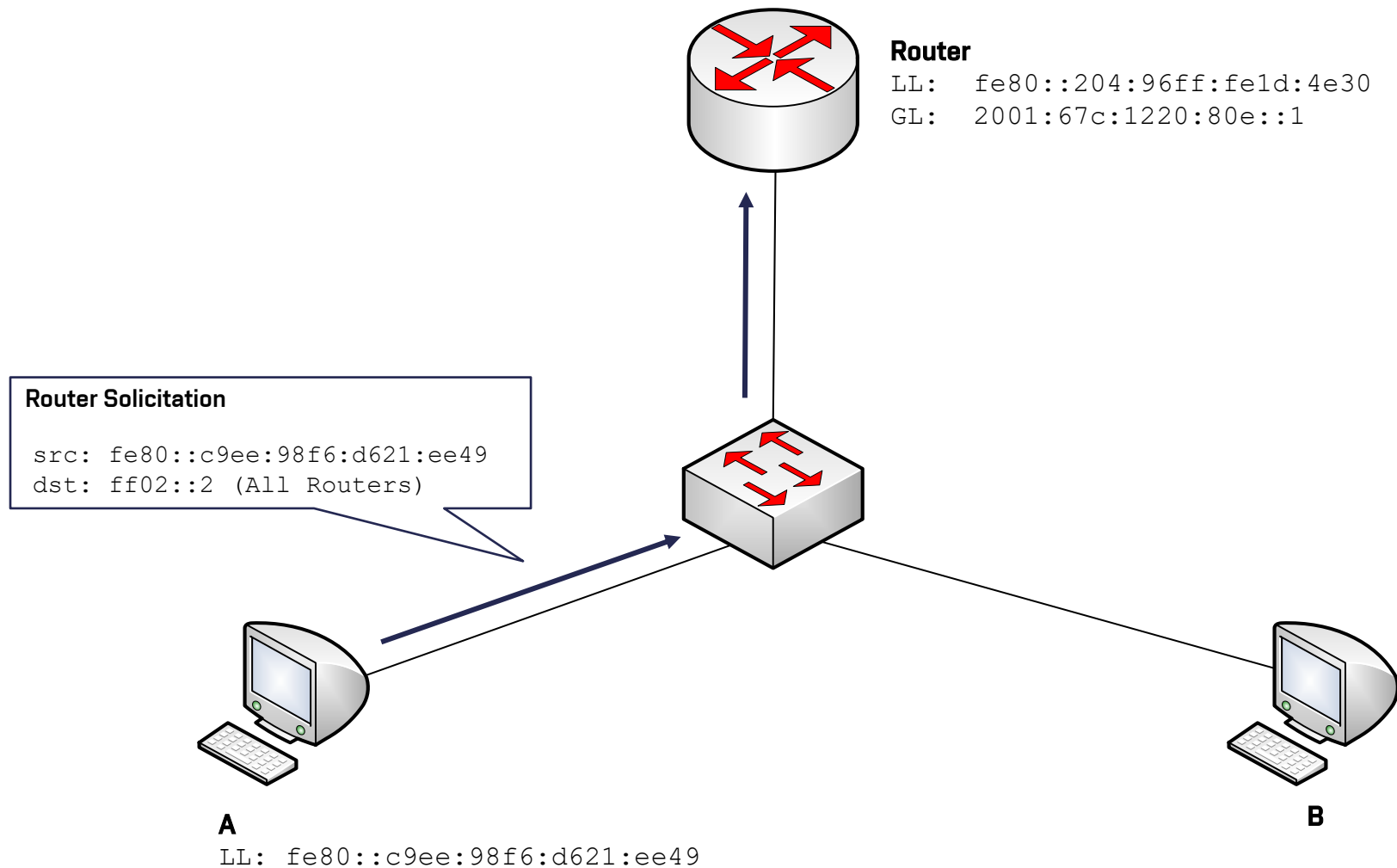
src: ::
dst: ff02::16 (All MLDv2-capable routers)

Hop-by-hop - Router Alert

Changed to exclude: ff02::1:ff21:ee49



Globální adresa



Globální adresa

Router Advertisement

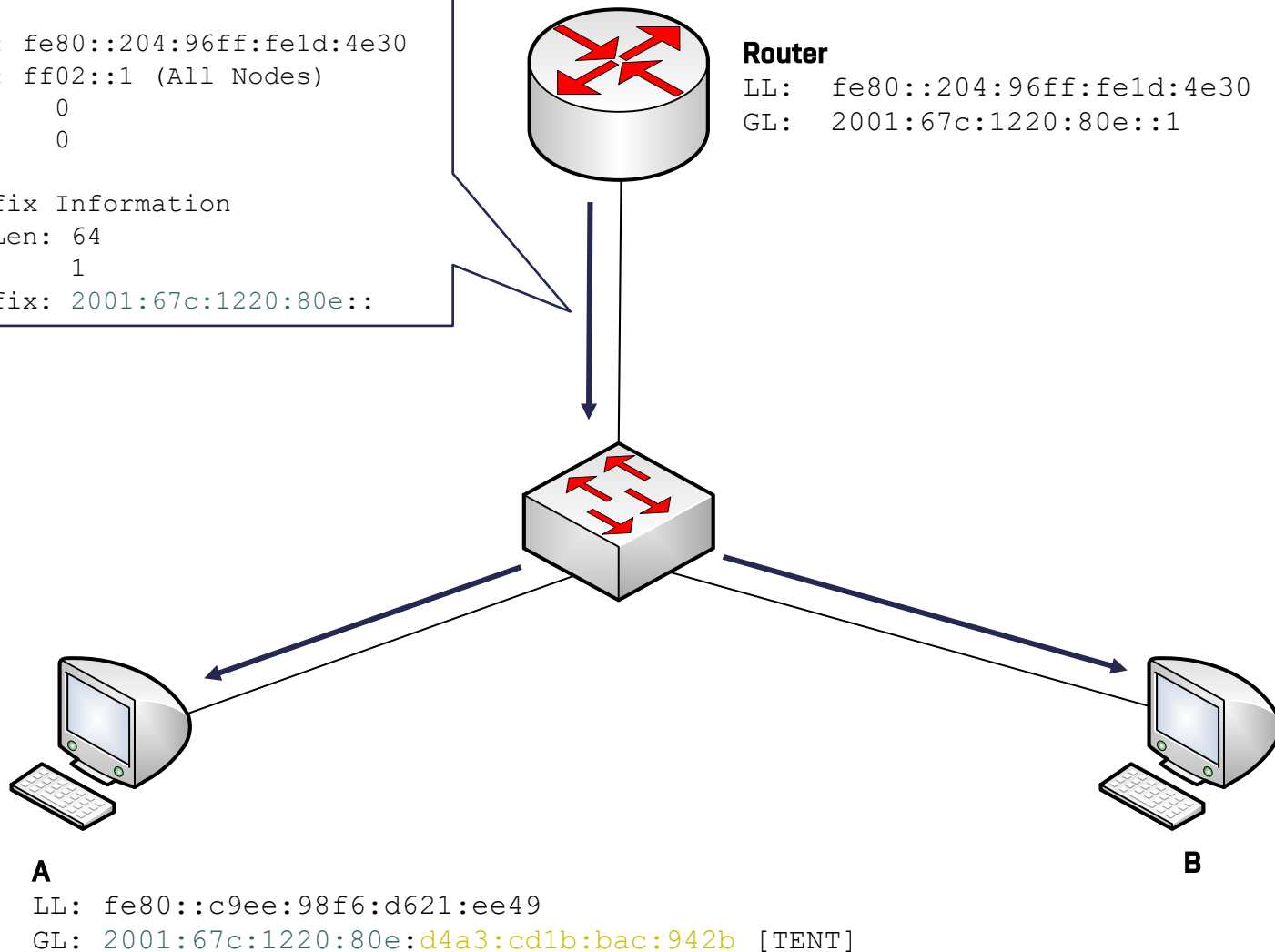
```
src: fe80::204:96ff:fe1d:4e30  
dst: ff02::1 (All Nodes)  
M:    0  
O:    0
```

Prefix Information

```
PrfLen: 64  
A:      1  
Prefix: 2001:67c:1220:80e::
```

Router

```
LL: fe80::204:96ff:fe1d:4e30  
GL: 2001:67c:1220:80e::1
```



Obsah

1) ÚVODNÍ INFORMACE

- Motivace
- Nové vlastnosti

2) IPv6 PAKET

3) ADRESOVÁNÍ

- Administrativní platnost adres
- Unicast, Multicast a Anycast adresy

4) PODPŮRNÉ PROTOKOLY PRO IPv6

- ICMPv6
 - NDP, MLDv1, MLDv2

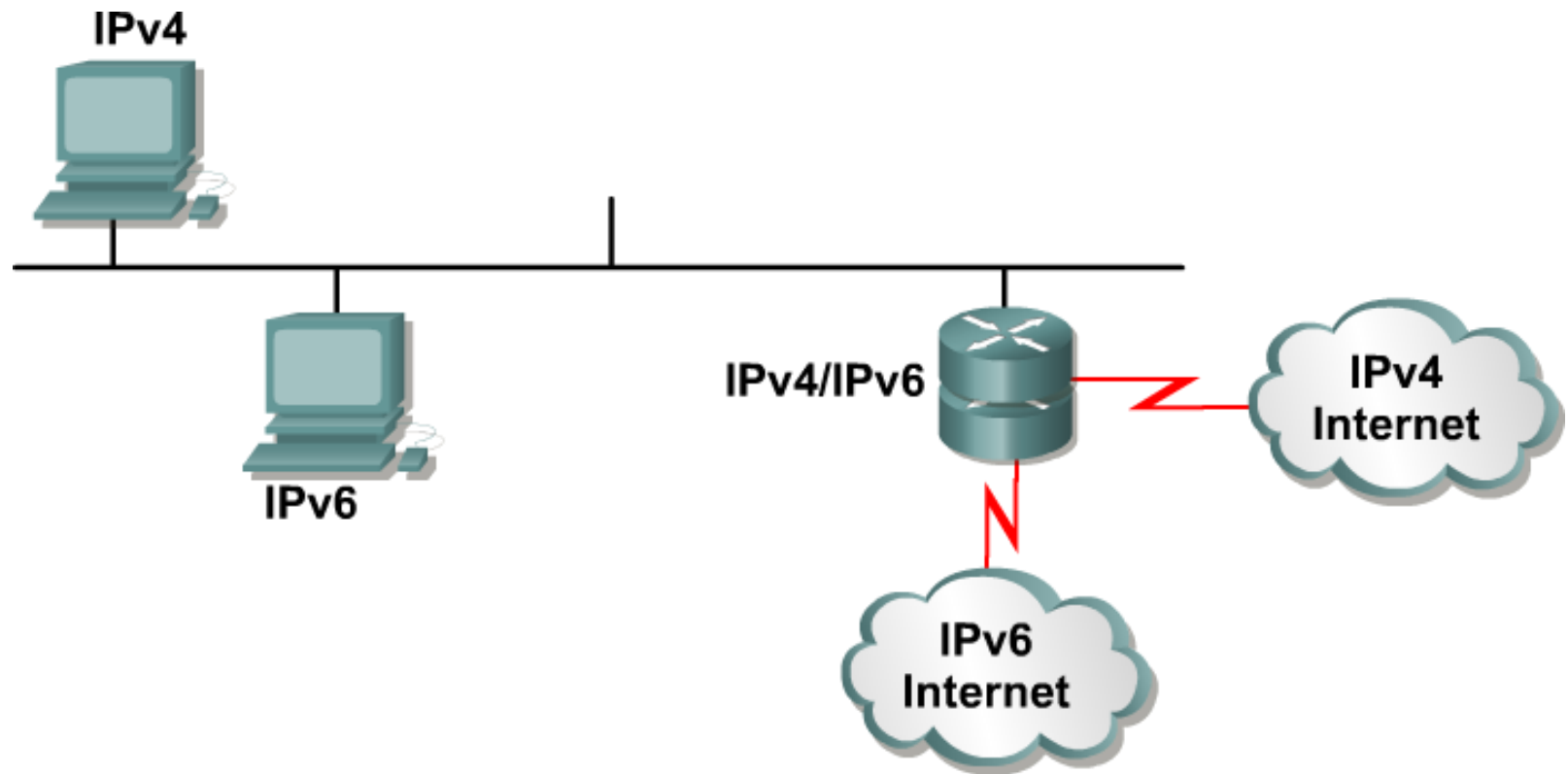
5) KOEXISTENCE IPv4 A IPv6

- přechodové mechanismy
- routing

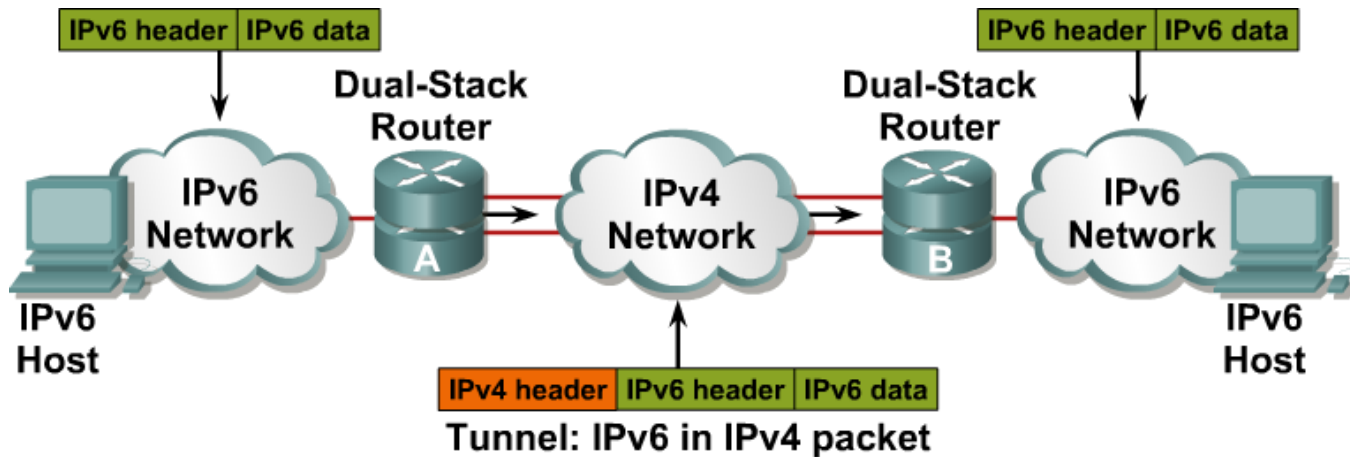
6) PROBLÉMY, ZHODNOCENÍ

Dual Stack

- **Dual stack** is an integration method where a node has “implementation and connectivity” to both an IPv4 and IPv6 network.

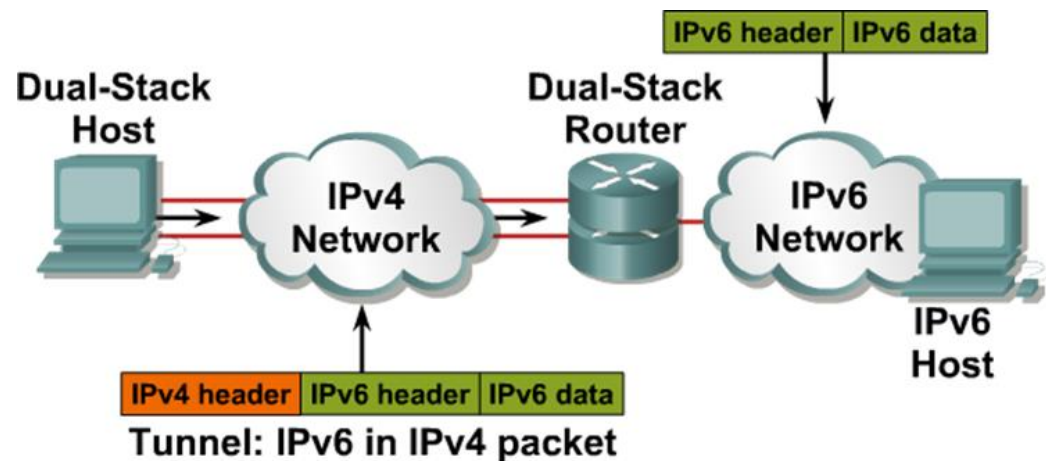


Tunneling IPv6 in IPv4 ①



- Tunneling is an integration method where an IPv6 packet is encapsulated within another protocol, such as IPv4. This method of encapsulation is IPv6-in-IPv4 protocol 41:

- This includes a 20-byte IPv4 header with no options and an IPv6 header and payload
- Dual stack routers are necessary



IPv6 směrovací protokoly

- Adaptace existujících protokolů pro IPv4
- **RIPng**
 - funkčně shodný s RIPv2 s malými odlišnostmi, podporuje jen IPv6, multicast FF02::9, UDP port 521, do směrovací tabulky se jako next-hop ukládá link-local adresa [RFC 2080]
- **OSPFv3**
 - funkčně shodný s OSPFv2, směrovače mají pořad identifikačtor 32-bitový. Jiný formát OSPF paketů. Multicast na FF02::5 a FF02::6, podpora jen IPv6 [RFC 2740]
- **Multiprotocol BGP**
 - [RFC 2528, RFC 2545], nové atributy

Obsah

1) ÚVODNÍ INFORMACE

- Motivace
- Nové vlastnosti

2) IPv6 PAKET

3) ADRESOVÁNÍ

- Administrativní platnost adres
- Unicast, Multicast a Anycast adresy

4) PODPŮRNÉ PROTOKOLY PRO IPv6

- ICMPv6
 - NDP, MLDv1, MLDv2

5) KOEXISTENCE IPv4 A IPv6

- přechodové mechanismy
- routing

6) PROBLÉMY, ZHODNOCENÍ

Zhodnocení

- Oddelovač v adrese : byla vhodná volba?
 - V URL [http://\[2001::8:800:200C:4713\]:8080/index.html](http://[2001::8:800:200C:4713]:8080/index.html)
- NDP se dá (nedá) zabezpečit pomocí IPSec
- Možnost zneužití ICMPv6 pro přenos „jiných“ dat – viry ...
- Odolnost vůči reconnaissance útokům – útoky téměř nemožné, velký rozsah adres.
- Zpracování IPv6 adresy: regulární výraz?

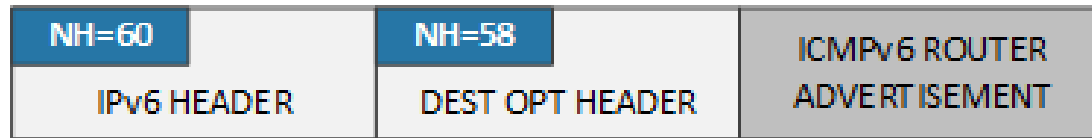
```
/^\\s*((([0-9A-Fa-f]{1,4}:){7}([0-9A-Fa-f]{1,4})|:)|((([0-9A-Fa-f]{1,4}:){6}(:|((25[0-5]|2[0-4]
\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3})|(:[0-9A-Fa-f]{1,4})))|((([0-9A-Fa-f]
{1,4}:){5}((:|((25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3})?)|((: [0-9A-Fa-f]
{1,4}){1,2})))|((([0-9A-Fa-f]{1,4}:){4}(:[0-9A-Fa-f]{1,4}){0,1}((:|((25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]
|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3})?)|((: [0-9A-Fa-f]{1,4}){1,2})))|((([0-9A-Fa-f]{1,4}:){3}(:[0-9A-Fa-f]
{1,4}){0,2}((:|((25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3})?)|((: [0-9A-Fa-f]
{1,4}){1,2})))|((([0-9A-Fa-f]{1,4}:){2}(:[0-9A-Fa-f]{1,4}){0,3}((:|((25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]
|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3})?)|((: [0-9A-Fa-f]{1,4}){1,2})))|((([0-9A-Fa-f]{1,4}:)(: [0-9A-Fa-f]
{1,4}){0,4}((:|((25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3})?)|((: [0-9A-Fa-f]
{1,4}){1,2})))|((: [0-9A-Fa-f]{1,4}){0,5}((:|((25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]|2[0-4]
\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3})?)|((: [0-9A-Fa-f]{1,4}){1,2})))|((([25[0-5]|2[0-4]\\d|[01]?\\d{1,2}))\\. (25[0-5]|2[0-4]
\\d|[01]?\\d{1,2}))) {3}))) (%.+)?\\s*$/
```

Router Advertisement flood

- Posílání velkého množství RA paketů
- thc-toolkit (<http://thc.org/thc-ipv6/>):
- Windows Vista/7/8, MAC zamrznout/spadnou
- Linux útok ustojí
- O problému se ví cca 3 roky
- <http://6lab.cz/article/ipv6-ra-flood-dos-attack-in-windows-8/>

Bypassing RA guard

- Rozšířené hlavičky!













- <http://6lab.cz/article/rogue-router-advertisement-attack/>

Objective Design of IPv6

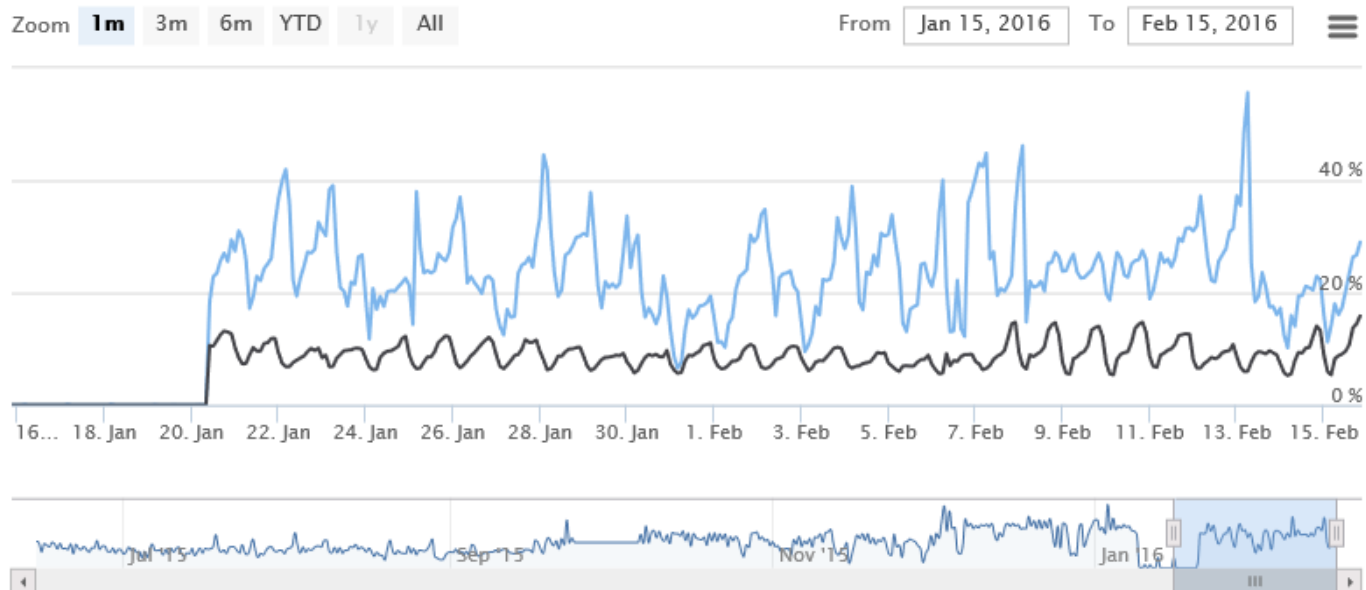
1. Larger IP address space
2. Better end-to-end connectivity
3. Ability for autoconfiguring devices
4. Simplified header structures
5. Better security (IPSEC – ESP, AH)
6. Better quality of services
7. Better multicast and anycast abilities
8. Mobility features
9. Ease of administration
10. Smooth transition from IPv4

After Several Years

1. Larger IP address space 
2. Better end-to-end connectivity 
3. Ability for autoconfiguring devices 
4. Simplified header structures 
5. Better security (IPSEC – ESP, AH) 
6. Better quality of services 
7. Better multicast and anycast abilities 
8. Mobility features 
9. Ease of administration 
10. Smooth transition from IPv4 

Statistiky

- Brno University of Technology is leading IPv6 in CZ
 - <http://www.zive.cz/clanky/pet-internetovych-zebricku-ze-kterych-cechum-naroste-ego/sc-3-a-172279/default.aspx>
 - <http://6lab.cz/live-statistics/ipv6-brno-university-of-technology/>



Studijní materiály

- M. Grégr: [USER ACCOUNTING IN NEXT GENERATION NETWORKS](#), <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/PD.php?id=448&file=t>
- Kurose J.F., Ross K.W.: [Computer Networking, A Top-Down Approach Featuring the Internet](#). Addison-Wesley, 2003.
- Puzmanova, R.: [Routing and Switching, Time of Convergence?](#) Addison-Wesley, 2003.
- Jeff Doyle, Jennifer De Haven-Carroll: [Routing TCP/IP](#). Cisco Press 2006.
- Pavel Satrapa: [IPv6](#), cz.nic, 2008, http://knihy.nic.cz/files/nic/edice/pavel_satrapa_ipv6_2008.pdf