



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA
TECHNICKÉ INFORMAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ



7

Multicast

IPK 2023/2024 L

Agenda

1) ÚVODNÍ MOTIVACE

- Use-case
- Adresování

2) POHLED NA SKUPINOVÉ SMĚROVÁNÍ:

- Klienti
- Switche/Přepínače
- Routery/Směrovače

3) ZÁVĚR

- Ukázka a realita
- VoD

Co je multicast?

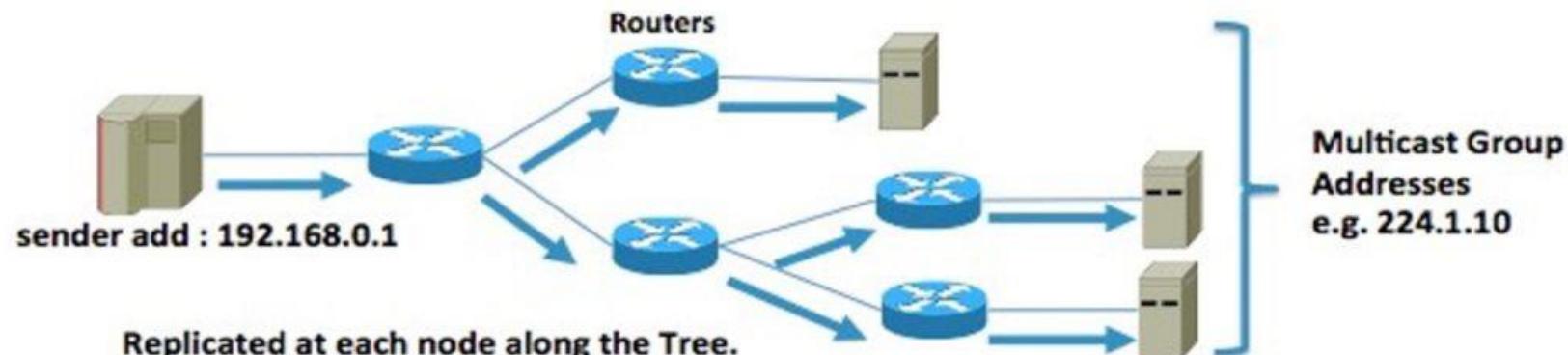
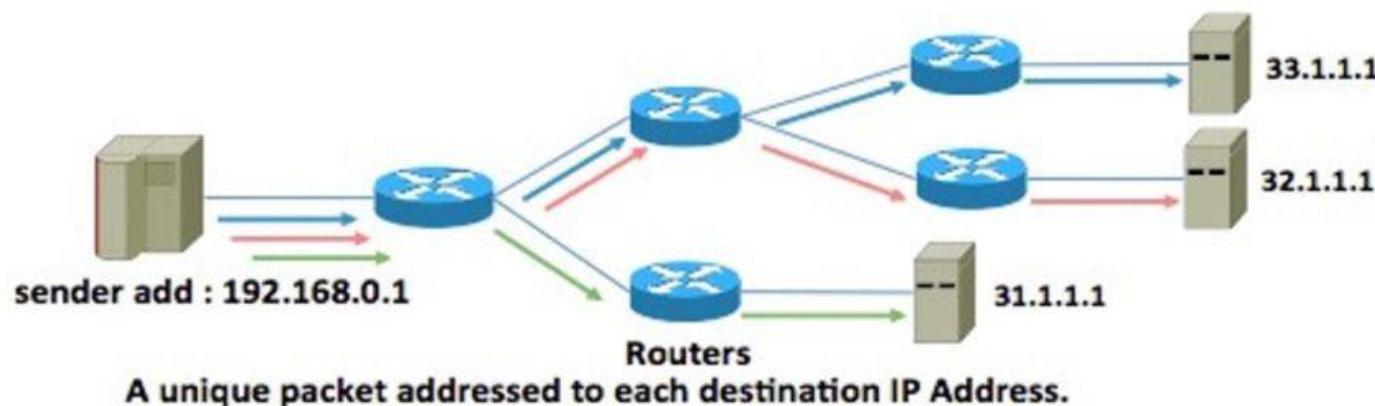
- Sedláčká definice ↪ komunikace mezi více než dvěma subjekty
 - 1:N
- Multicast na úrovni:
 - Aplikační
 - Unicastové
 - Nativní

Aplikační multicast

- Zcela v režii aplikací
- L7 vrstva
- Podle směru komunikace:
 - **One-to-Many:** 1 zdroj, >1 cíl (VoD, VoIP)
 - **Many-to-Many:** >1 zdroj, >1 cíl (distribuované výpočty)
 - **Many-to-One:** >1 zdroj, 1 cíl (aplikace ve finančnictví/pojišťovnictví hromadný sběr dat)

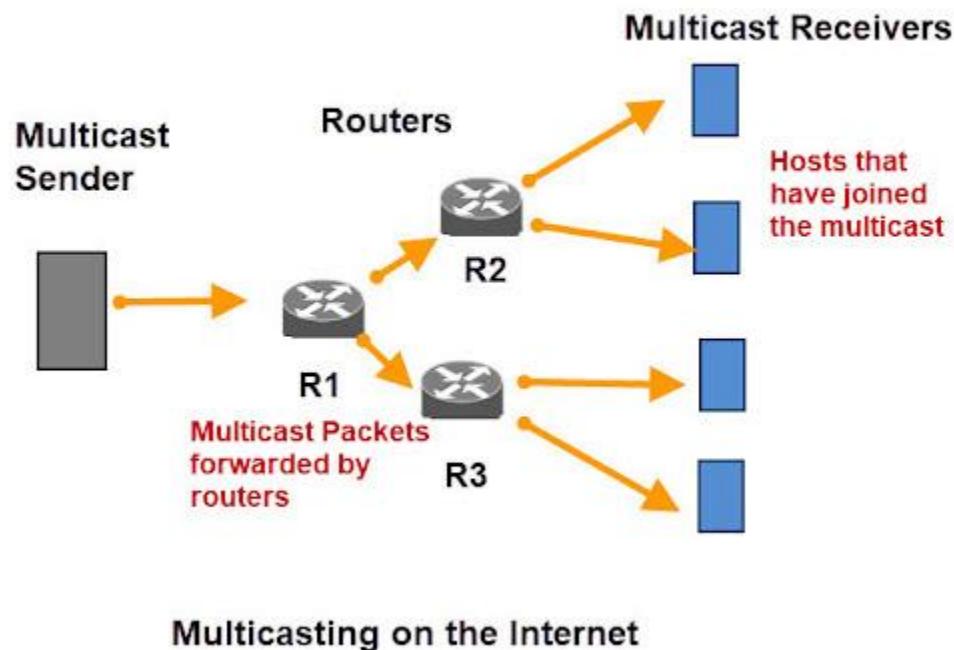
Unicast vs. Multicast

Unicast and Multicast Addressing



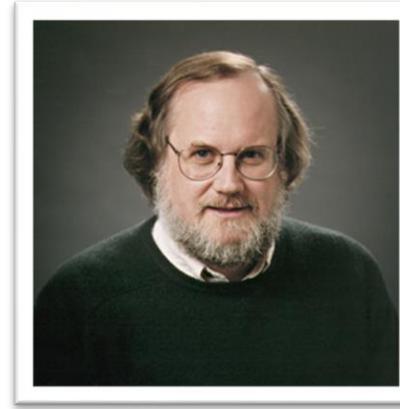
Nativní multicast

- Podpora ze strany aktivních sítových zařízení
- L3 a L2 vrstva
- *To, pod čím pojem multicast vnímáme dnes*



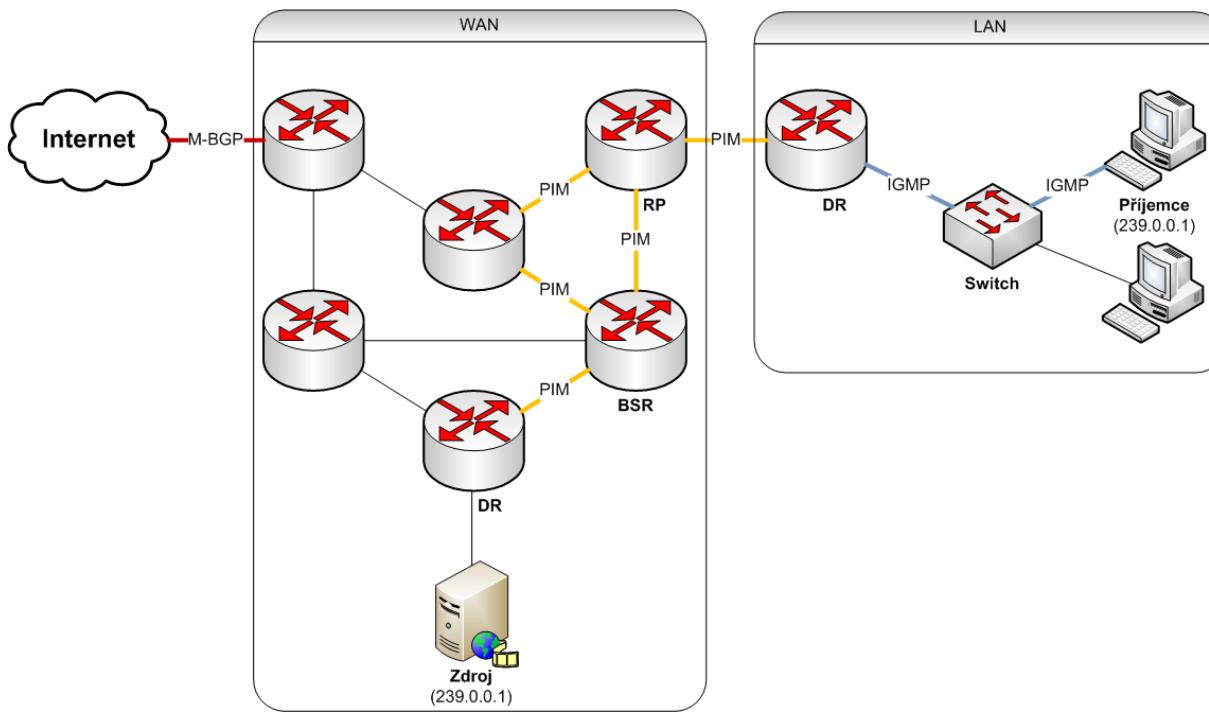
Historie

- Steve Deering – PhD výzkum 1987 až 1991
- Protokoly
 - 1986 – IGMP
 - 1988 – DVMRP
 - 1994 – MOSPF
 - 1997 – PIM
- **Systém MBONE**
 - 1992 – první aplikační multicastová páteř (DVMRP + tunel)
 - 1994 – první velký multicastový přes Internet streamovaný koncert (Rolling Stones v Cotton Bowl v Dallasu)
 - 1998 – kolem 10 000 uživatelů MBONE
- **Nativní multicast**
 - 1996 – Virgin Radio první evropské kontinuální streamování
 - 1999 – University of Oregon multimediální řešení výuky
 - 2005 – FIT VUT zavádí streaming svých přednášek v rámci celouniverzitní sítě



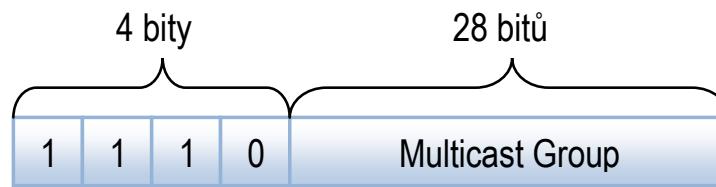
Adresování

- Multicastová adresa = Multicastová skupina
- Zdroje na multicastovou adresu vysílají data
- Příjemci z ní data odebírají



Adresování – L3 IPv4

- Adresy třídy D (rozsah 224.0.0.0 – 239.255.255.255)



- Dělení podle dosahu:

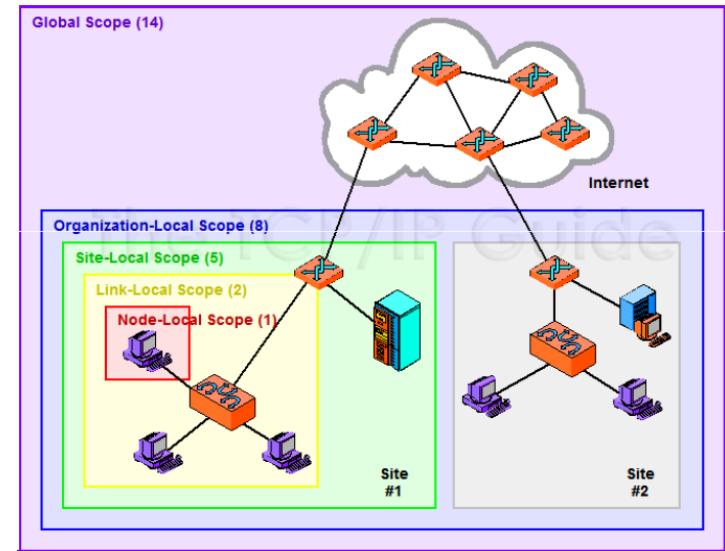
Dosah	Adresy	Příklady
Lokální	224.0.0.0 – 224.0.0.255	OSPF, RIP, EIGRP, PIM, IGMP, mDNS
Globální	224.0.1.0 – 224.0.1.255 224.0.2.0 – 238.255.255.255	NTP, RSVP, Nokia, Cisco-RP, NQDS*
Administrativní	239.0.0.0 – 239.255.255.255	Interní použití

- <http://www.iana.org/assignments/multicast-addresses>

Adresování – L3 IPv6

- Adresy s prefixem FF**, kde ** určuje dosah:

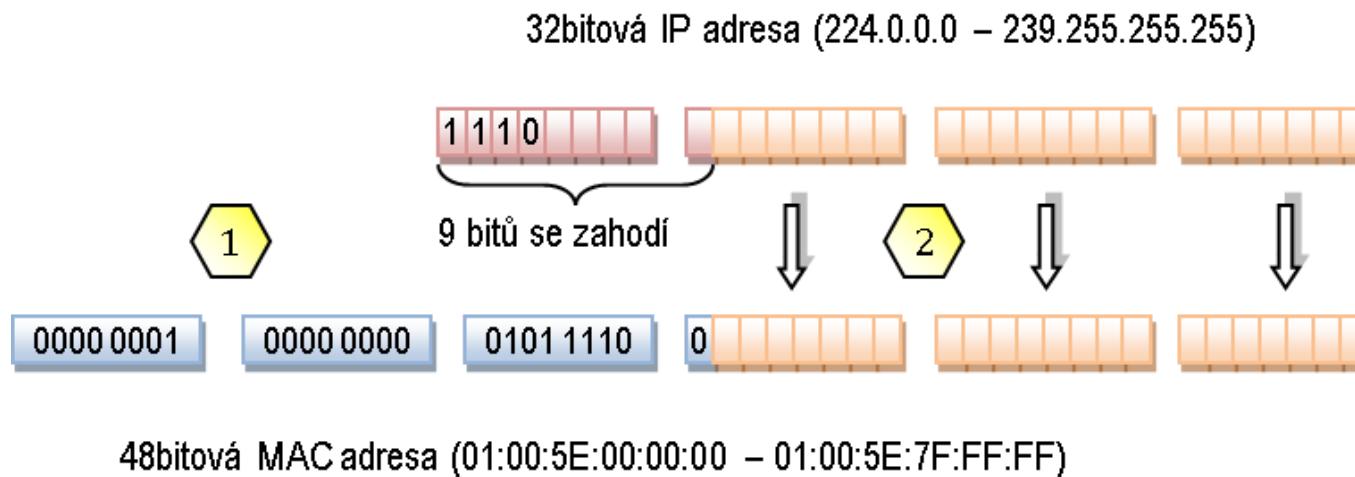
Dosah	Adresy	TTL
Rozhraní	FF01:/8	0
Linka	FF02:/8	1
Lokalita	FF05:/8	<32
Organizace	FF08:/8	≤ 255
Globální	FF0E:/8	≤ 255
Rezervováno	FF0F:/8	



- <http://www.iana.org/assignments/ipv6-multicast-addresses/>

Adresování – L2 Ethernet (1)

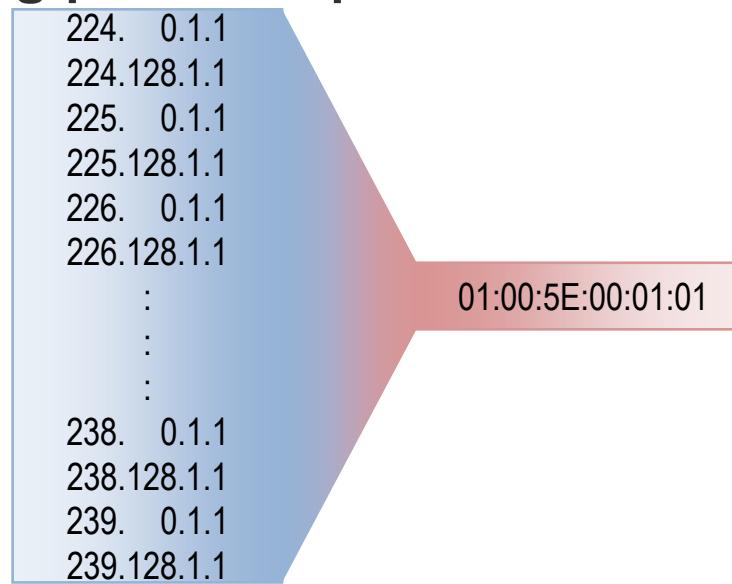
- I přepínače musejí vědět, jak směrovat IPv4 multicastové rámce
- První tři oktety 01:00:5E
- Mapování IP adresy na MAC:



- Historický problém

Adresování – L2 Ethernet (2)

- *Co nám takový způsob mapování přinesl?*
- 32-to-1 overlapping problem pro IPv4 multicast



- Pro IPv6 jsou první dva oktety **33:33**
- Posledních 32 bitů IPv6 multicastové adresy **OR**
- Přemapovávání z IPv4 na IPv6 je díky tomu úplné

Agenda

1) ÚVODNÍ MOTIVACE

- Use-case
- Adresování

2) POHLED NA SKUPINOVÉ SMĚROVÁNÍ:

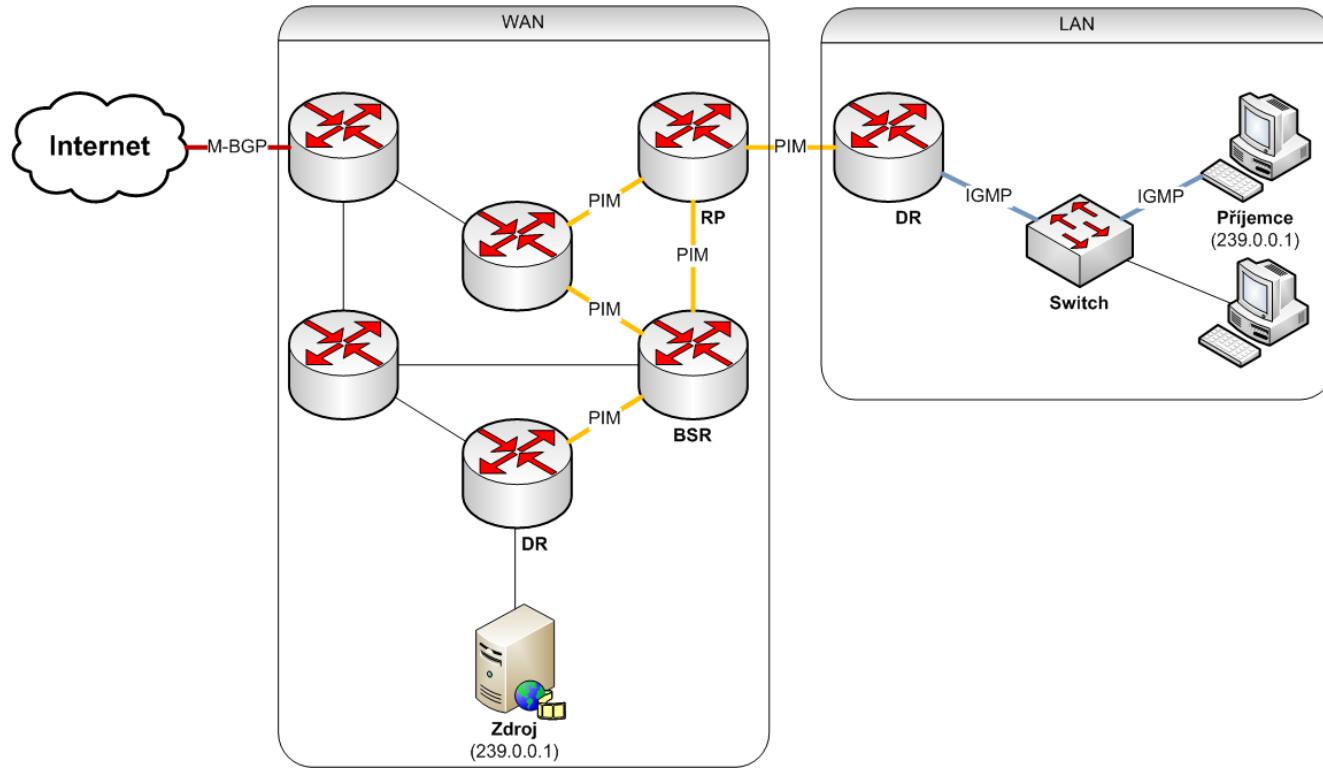
- Klienti
- Switche/Přepínače
- Routery/Směrovače

3) ZÁVĚR

- Ukázka a realita
- VoD

Motivace

- Jakým způsobem dávají klientské stanice (příjemci multicastu) vědět, že mají zájem o multicastová data?



IGMP

- Čím je ICMP pro unicast, tím je IGMP pro multicast
- IGMP protokol mezi stanicí a směrovačem/přepínačem umožňující:
 - stanicím se přihlašovat/odhlašovat k multicastové skupině
 - směrovačům/přepínačům vyzvídat, jestli má někdo na daném síťovém segmentu zájem o odběr dat z multicastové skupiny
- L3 vrstva - zapouzdřen do IPv4
- Pozor, určen jen pro IPv4, pro IPv6 protokol MLD!!!

IGMP – Hierarchie

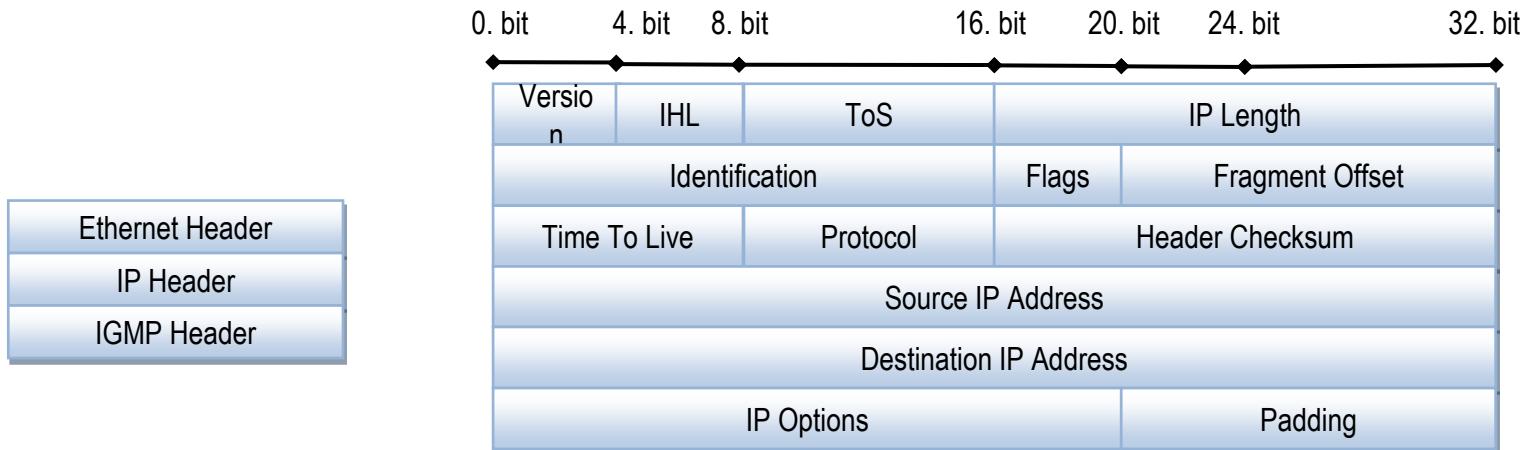
- Směrovače/Přepínače se dotazují na adresu
224.0.0.1 = all multicast nodes address
- Klienti jím odpovídají na adresu
224.0.0.2 = all routers address
- *Co když je na segmentu více IGMP směrovačů?*
- Autoritativním mluvčím (**designated routerem DR**) je ten s nejnižší IP adresou

IGMP – Historie vývoje

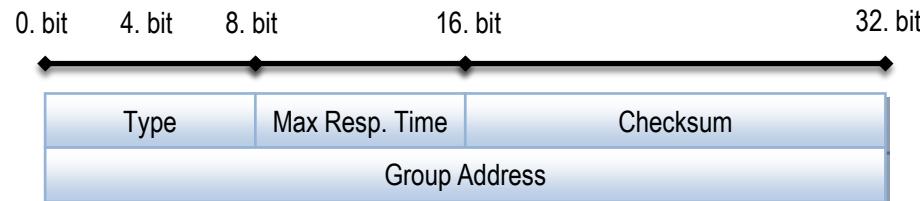
- **IGMPv1**
 - Směrovač: *Má někdo zájem o jakýkoli multicast?*
 - Klient: *Já mám zájem o tento multicast!*
- **IGMPv2**
 - Směrovač: *Má někdo zájem o tento multicast?*
 - Klient: *Já už nemám zájem o tento multicast!*
- **IGMPv3**
 - Směrovač: *Má někdo zájem o tento multicast od právě tohoto zdroje?*
 - Klient: *Já mám zájem o tento multicast přičemž ho chci od tohoto zdroje!*

IGMP – Hlavička

- Zapouzdřování paketu a IP hlavička:



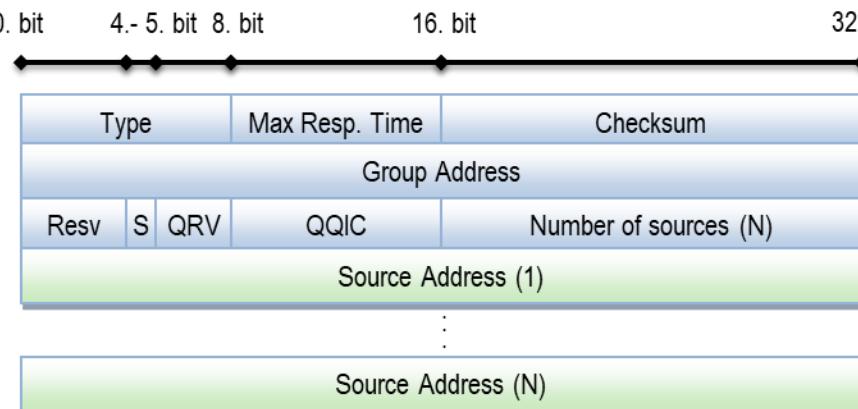
- Struktura zprávy typu IGMPv2:



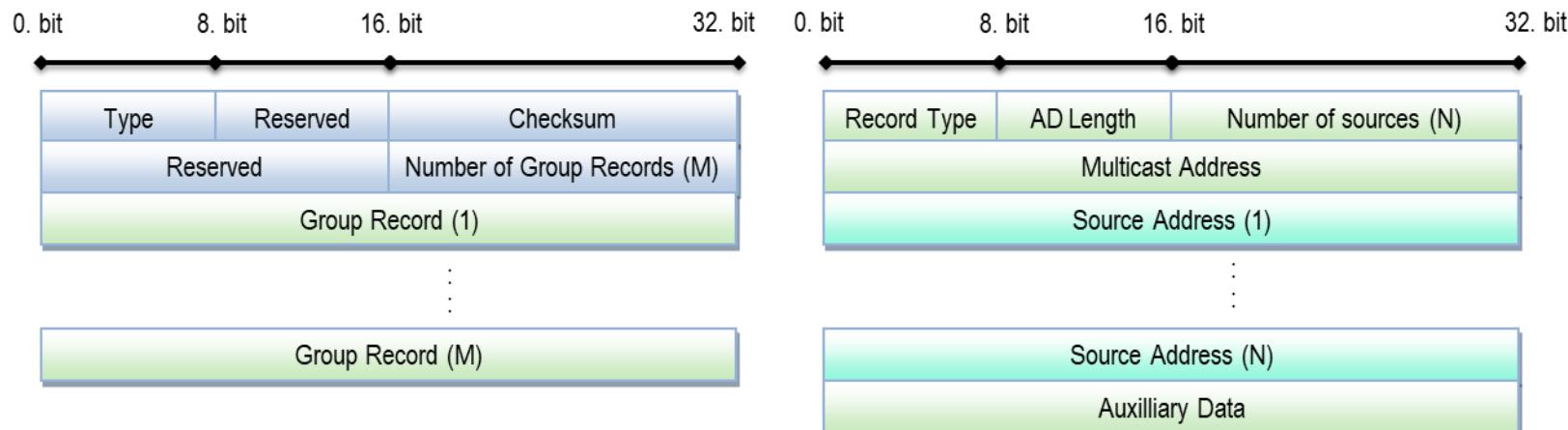
IGMP – Hlavíčka

- **IGMPv3 (RFC3376)**

- Membership Query rozšířen o variantu **Group-And-Source-Specific Query**, jehož struktura je:



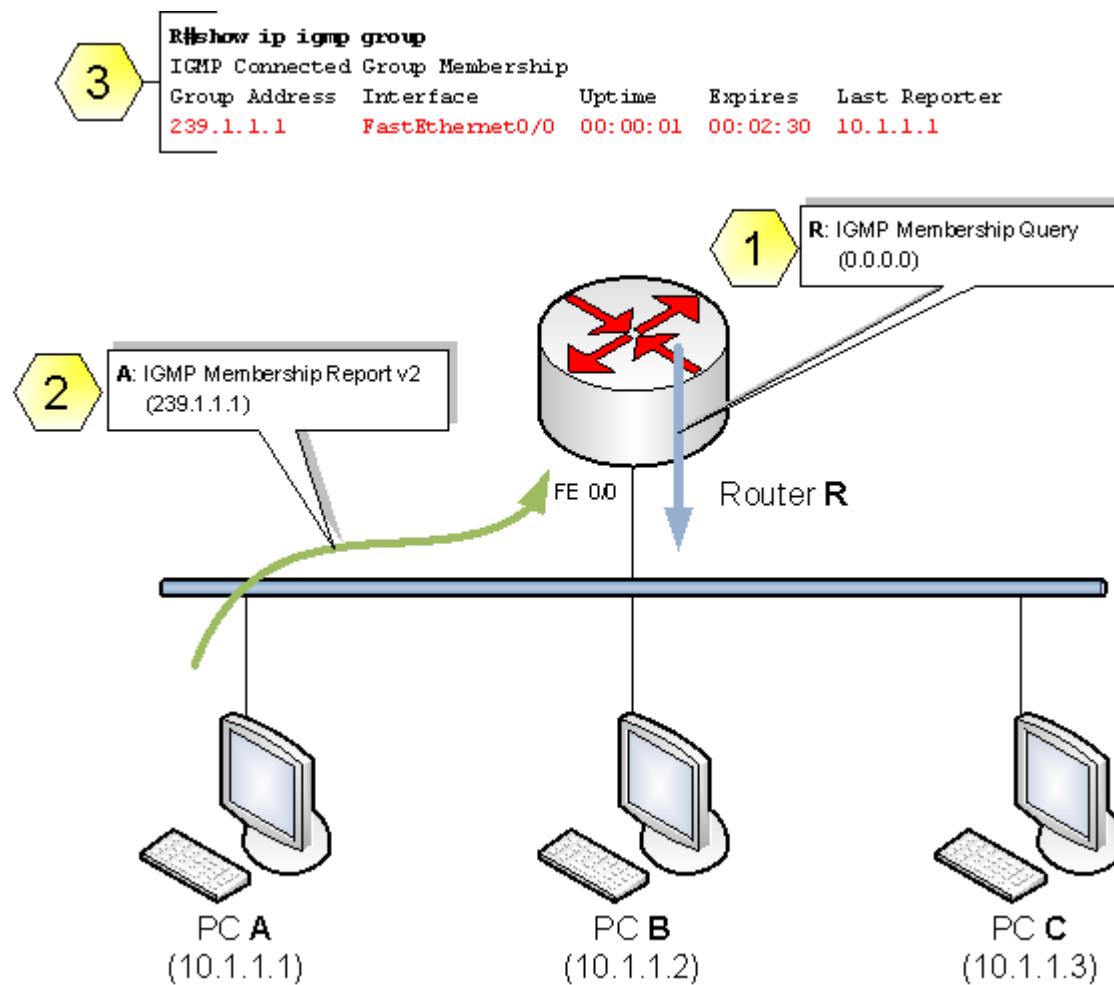
- **Membership Report v3 (0x22) struktura:**



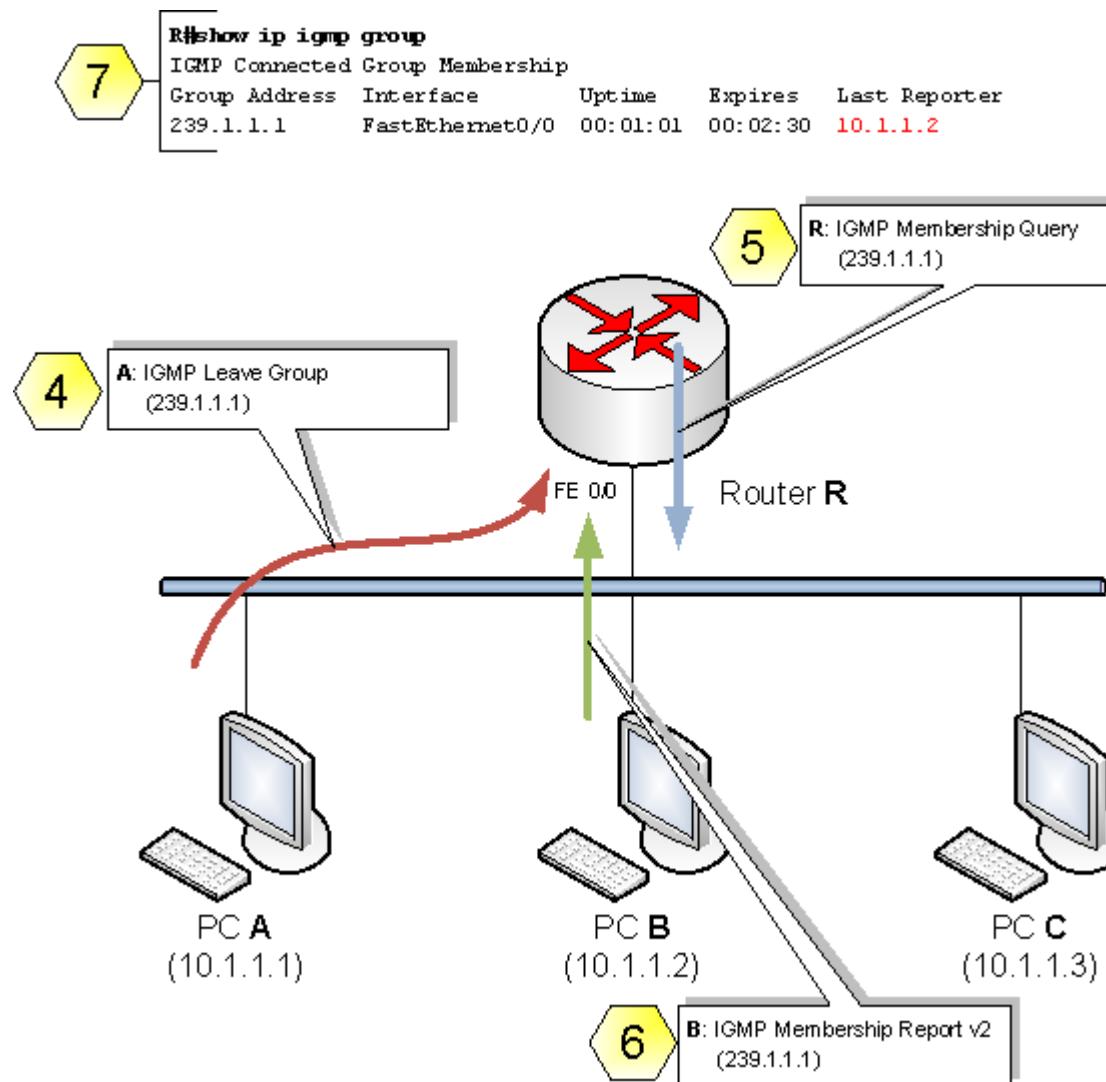
IGMP – Zprávy

Zpráva	Posílá	Cíl	GA
Membership Query Group-Specific Group-and-Source-Specific	Směrovač Přepínač	224.0.0.1 GA GA	0.0.0.0 GA GA
Membership Report v1	Host	GA	GA
Membership Report v2	Host	GA	GA
Membership Report v3	Host	GA	GA
Leave Group	Host	224.0.0.2	GA

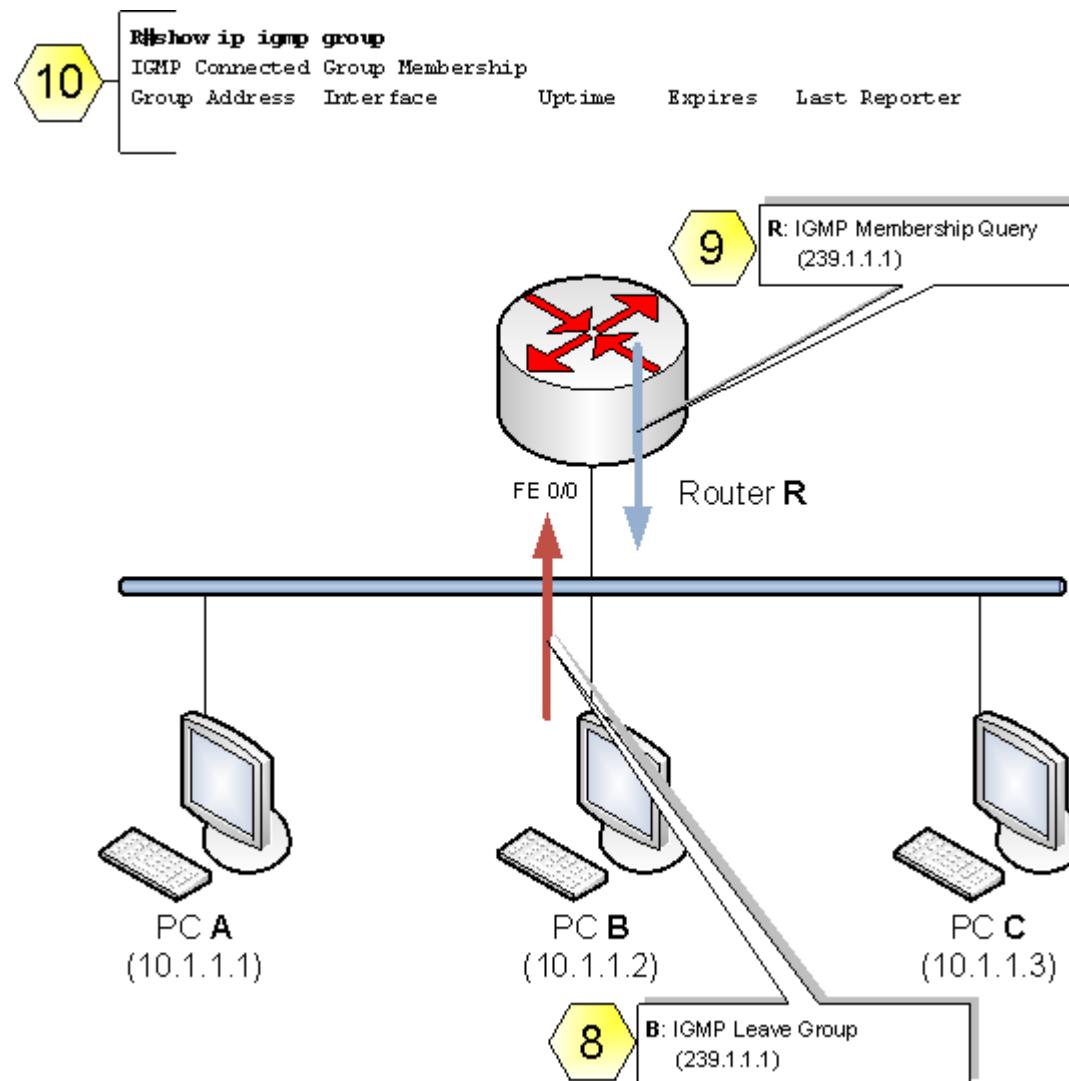
IGMP – Příklad (1)



IGMP – Příklad (2)



IGMP – Příklad (3)



IGMPv2 ve Wireshark'u

The screenshot shows the Wireshark interface with the following details:

Panels:

- Packet List:** Shows 12 captured packets (No. 21 to 492).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
21	134.712141	172.1.3.10	224.0.0.2	IGMPv2	46	Membership Report group 224.0.0.2
22	134.712187	172.1.3.10	224.0.0.22	IGMPv2	46	Membership Report group 224.0.0.22
23	134.712212	172.1.3.10	224.0.0.1	IGMPv2	46	Membership Query, general
24	134.816082	172.1.3.10	224.0.0.1	IGMPv2	46	Membership Query, general
25	136.833935	172.1.3.10	224.0.0.1	IGMPv2	46	Membership Query, general
26	139.435356	172.1.3.12	239.69.69.69	IGMPv2	60	Membership Report group 239.69.69.69
176	261.843939	172.1.3.10	224.0.0.1	IGMPv2	46	Membership Query, general
187	270.778005	172.1.3.12	239.69.69.69	IGMPv2	60	Membership Report group 239.69.69.69
333	386.862577	172.1.3.10	224.0.0.1	IGMPv2	46	Membership Query, general
347	397.729734	172.1.3.12	239.69.69.69	IGMPv2	60	Membership Report group 239.69.69.69
489	511.873545	172.1.3.10	224.0.0.1	IGMPv2	46	Membership Query, general
492	513.403443	172.1.3.12	239.69.69.69	IGMPv2	60	Membership Report group 239.69.69.69
- Details:** Shows the structure of the selected IGMPv2 frame.
 - Frame 492: 60 bytes on wire (480 bits), 60 bytes captured (480 bits) on interface 0
 - Ethernet II, Src: c2:12:0c:a0:00:00 (c2:12:0c:a0:00:00), Dst: IPv4mcast_45:45:45 (01:00:5e:45:45:45)
 - Internet Protocol Version 4, Src: 172.1.3.12, Dst: 239.69.69.69
 - Internet Group Management Protocol
 - [IGMP Version: 2]
 - Type: Membership Report (0x16)
 - Max Resp Time: 0.0 sec (0x00)
 - Checksum: 0xb574 [correct]
 - [Checksum Status: Good]
 - Multicast Address: 239.69.69.69
- Bytes:** Shows the raw hex and ASCII representation of the selected frame.

0000 01 00 5e 45 45 45 c2 12 0c a0 00 00 08 00 45 c0 ..^EEE..E.
0010 00 1c 00 04 00 00 01 02 d5 84 ac 01 03 0c ef 45E

IGMPv3 ve Wireshark'u

Filter: igmp Expression... Clear Apply

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1652577	17344.182616	192.168.0.20	224.0.0.22	IGMP	V3 Membership Report / Leave group 239.13.13.13
1652578	17344.902576	192.168.0.20	224.0.0.22	IGMP	V3 Membership Report / Join group 239.13.13.13 for any
1652588	17350.161616	192.168.0.20	224.0.0.22	IGMP	V3 Membership Report / Join group 239.13.13.13 for any

► Frame 1652588 (54 bytes on wire, 54 bytes captured)
► Ethernet II, Src: Inventec_3b:5a:94 (00:1e:33:3b:5a:94), Dst: IPv4mcast_00:00:16 (01:00:5e:00:00:16)
▼ Internet Protocol, Src: 192.168.0.20 (192.168.0.20), Dst: 224.0.0.22 (224.0.0.22)
 Version: 4
 Header length: 24 bytes
 Differentiated Services Field: 0xc0 (DSCP 0x30: Class Selector 6; ECN: 0x00)
 Total Length: 40
 Identification: 0x0000 (0)
 Flags: 0x02 (Don't Fragment)
 Fragment offset: 0
 Time to live: 1
 Protocol: IGMP (0x02)
 Header checksum: 0x433d [correct]
 Source: 192.168.0.20 (192.168.0.20)
 Destination: 224.0.0.22 (224.0.0.22)
▼ Options: (4 bytes)
 Router Alert: Every router examines packet
▼ Internet Group Management Protocol
 [IGMP Version: 3]
 Type: Membership Report (0x22)
 Header checksum: 0xdde3 [correct]
 Num Group Records: 1
▼ Group Record : 239.13.13.13 Change To Exclude Mode
 Record Type: Change To Exclude Mode (4)
 Aux Data Len: 0
 Num Src: 0
 Multicast Address: 239.13.13.13 (239.13.13.13)

Agenda

1) ÚVODNÍ MOTIVACE

- Use-case
- Adresování

2) POHLED NA SKUPINOVÉ SMĚROVÁNÍ:

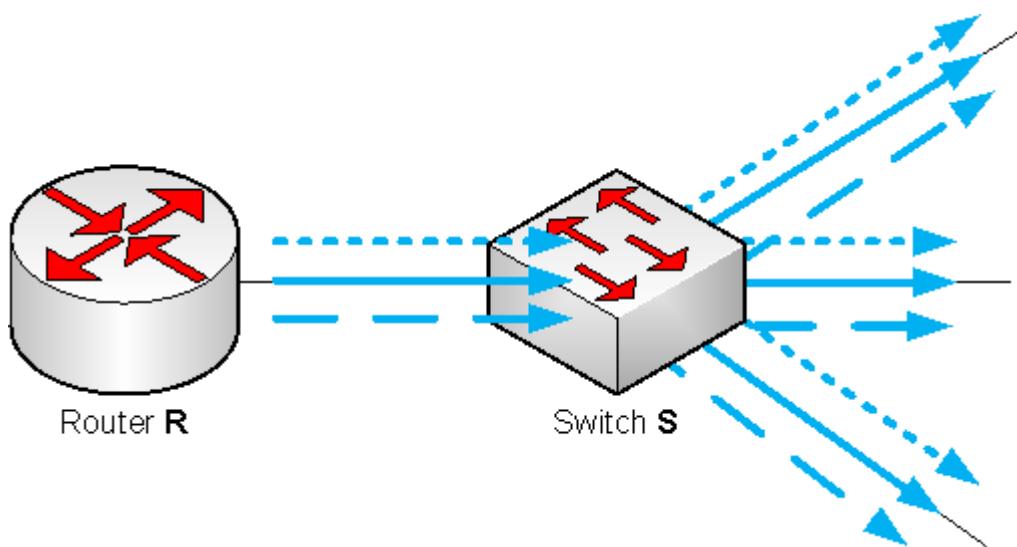
- Klienti
- [Switche/Přepínače](#)
- Routery/Směrovače

3) ZÁVĚR

- Ukázka a realita
- VoD

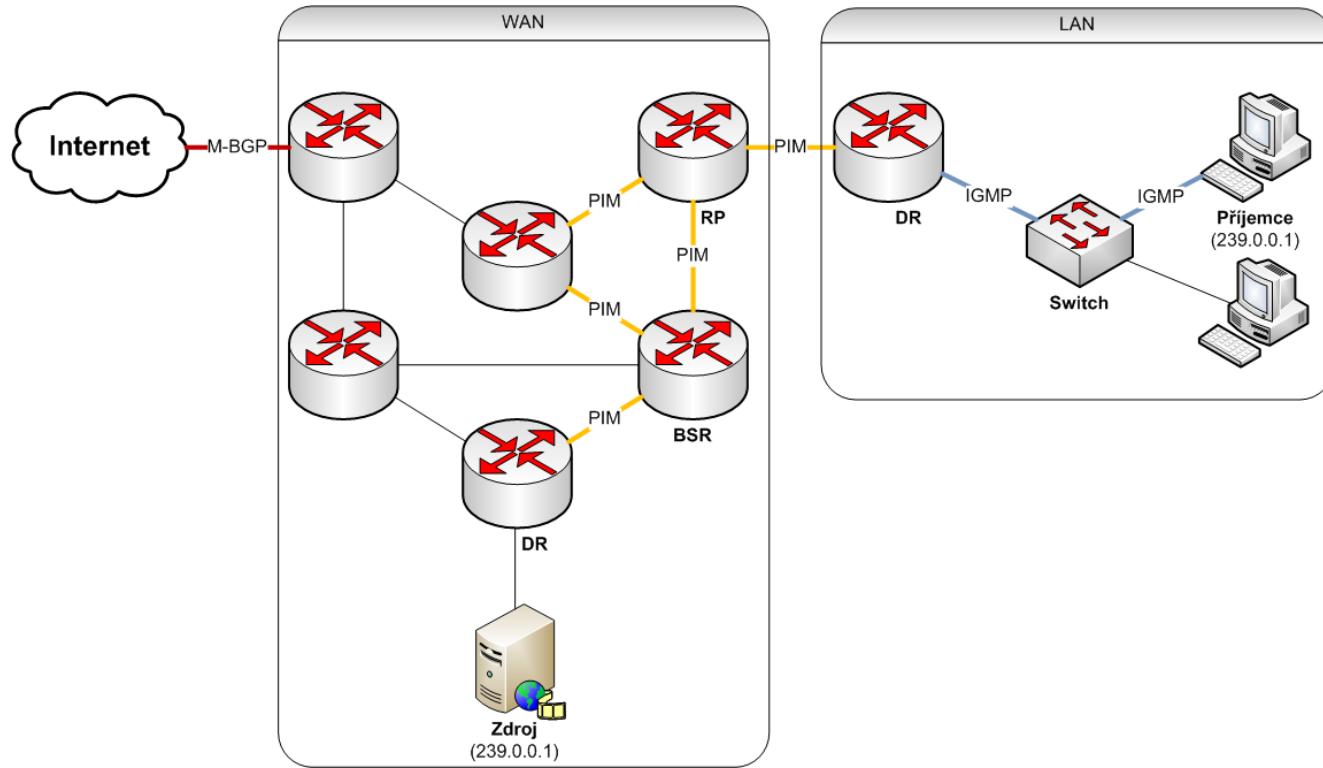
Motivace

- Jak se chová přepínač, který dostane rámec, o jehož cílové adrese neví, na kterém rozhraní mu leží?



Motivace

- A stejně tak se chová i „hloupý“ přepínač v případě libovolného multicastového rámce...
- Jak to tedy dělá „chytrý“ přepínač?



Řešení

- Naivním je statická konfigurace
 - Ve spojení s dynamicky připojujícími se klienty = špaténka
 - Příkaz:

```
Switch(config)#mac-address-table static mac_address vlan vlan-id  
{interface {type slot/port} | port-channel number}
```

- Automatizované
 - IGMP snooping
 - CGMP

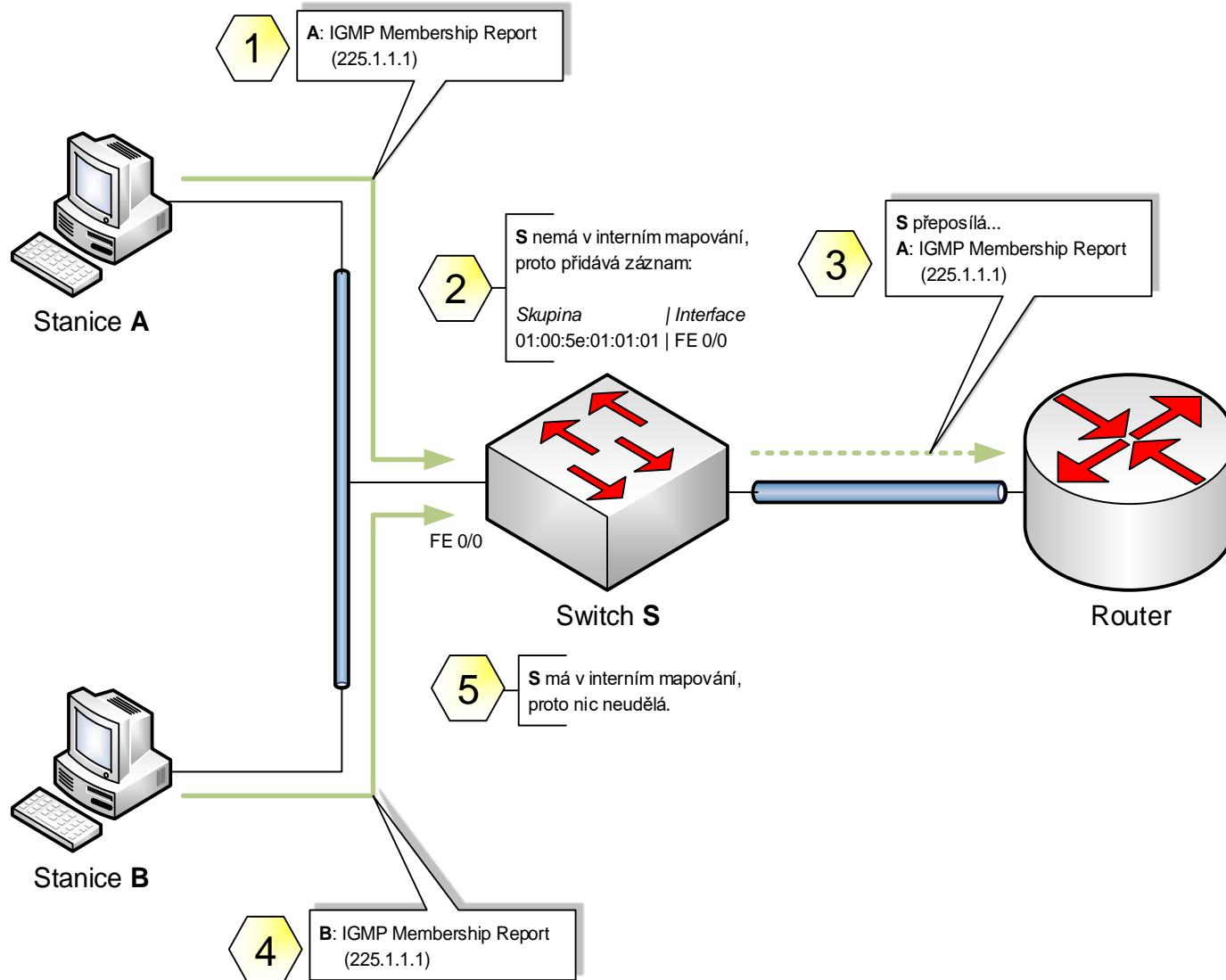
IGMP Snooping – Idea

- Původní idea: *Aby přepínač zjistil, na kterých rozhraních má multicastová zařízení, tak bude zkoumat každý paket a podívá se, jestli nemá co dočinění s multicastem...*
- Rozpor: *Ale vždyť takhle musíme zkoumat každý paket, což přepínač zbytečně zdržuje! Nehledě na to, že má být přepínač jen L2 zařízení!*
- Současné řešení: *Dobře, dobře... budeme tedy zkoumat jen „některé“ pakety.*

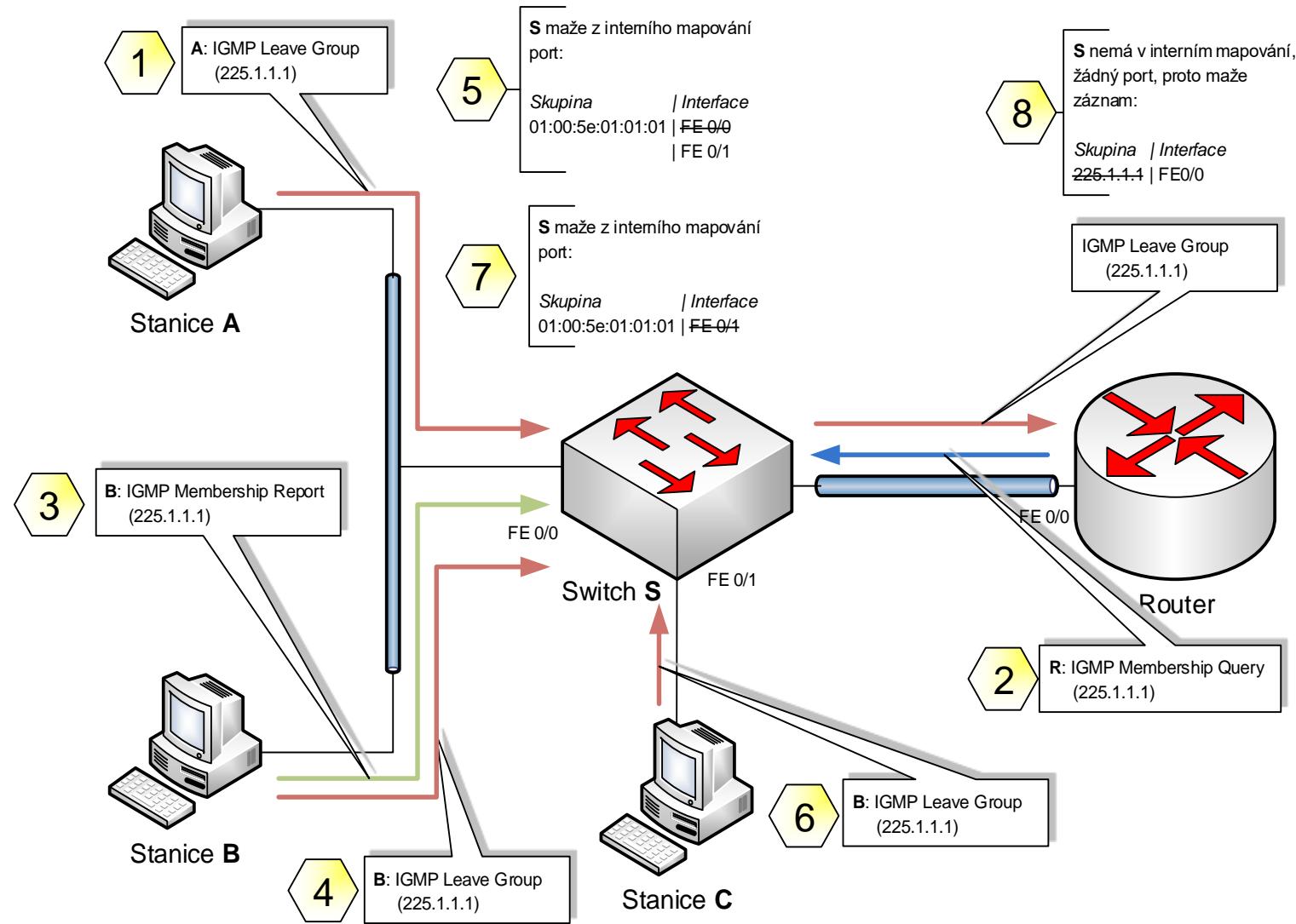
IGMP Snooping

- Každý přepínač si vytváří tabulku mapování multicastových skupin na svá rozhraní
- CISCO přepínače kontrolují každý paket a slídí po:
 - IGMP Membership Query (01:00:5E:00:00:01)
 - PIMv1 Hello (01:00:5E:00:00:02)
 - PIMv2 Hello (01:00:5E:00:00:0D)
 - DVMRP probes (01:00:5E:00:00:04)
 - MOSPF Group-Membership-LSA (01:00:5E:00:05 nebo 01:00:5E:00:06)

IGMP Snooping – Příklad (1)



IGMP Snooping – Příklad (2)



Agenda

1) ÚVODNÍ MOTIVACE

- Use-case
- Adresování

2) POHLED NA SKUPINOVÉ SMĚROVÁNÍ:

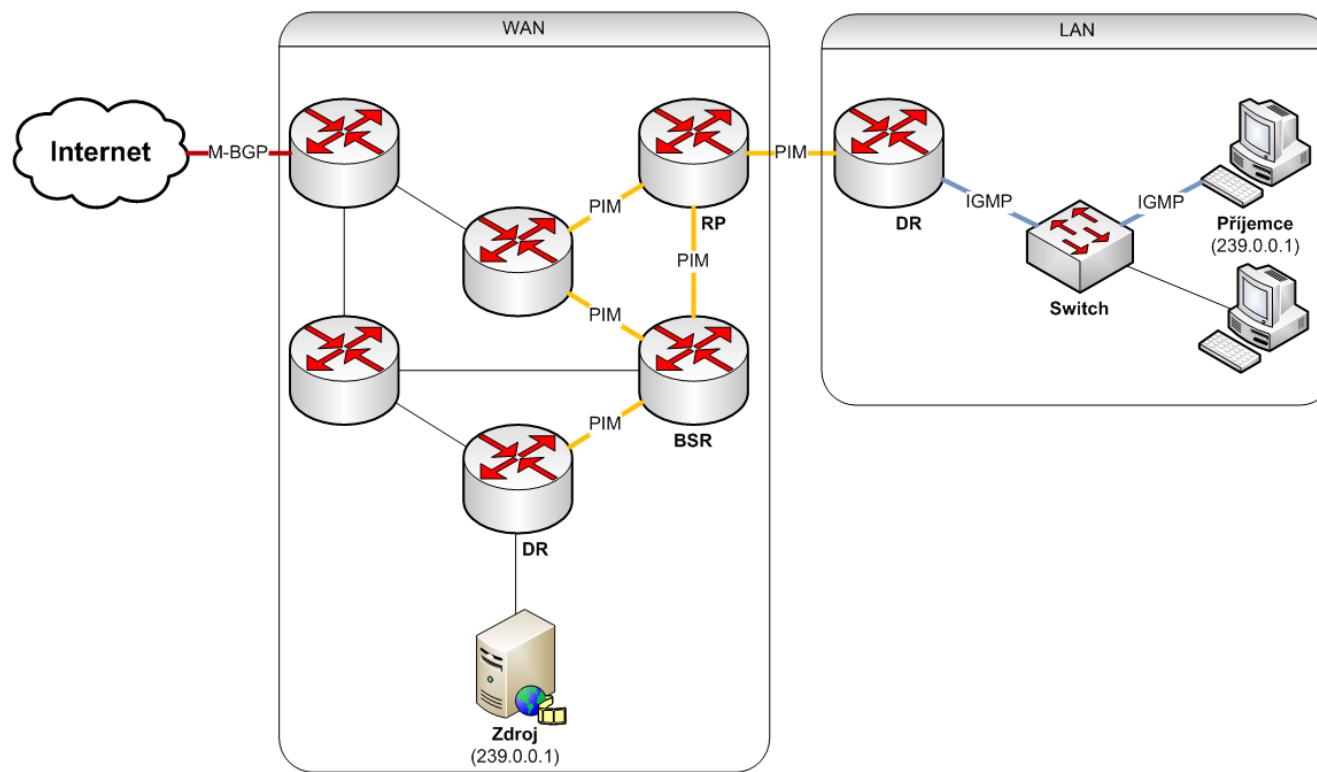
- Klienti
- Switche/Přepínače
- Routery/Směrovače

3) ZÁVĚR

- Ukázka a realita
- VoD

Motivace

- Stále nevíme, jak přenášet multicastová data mezi síťovými segmenty potažmo různými autonomními systémy...



Multicastové směrování

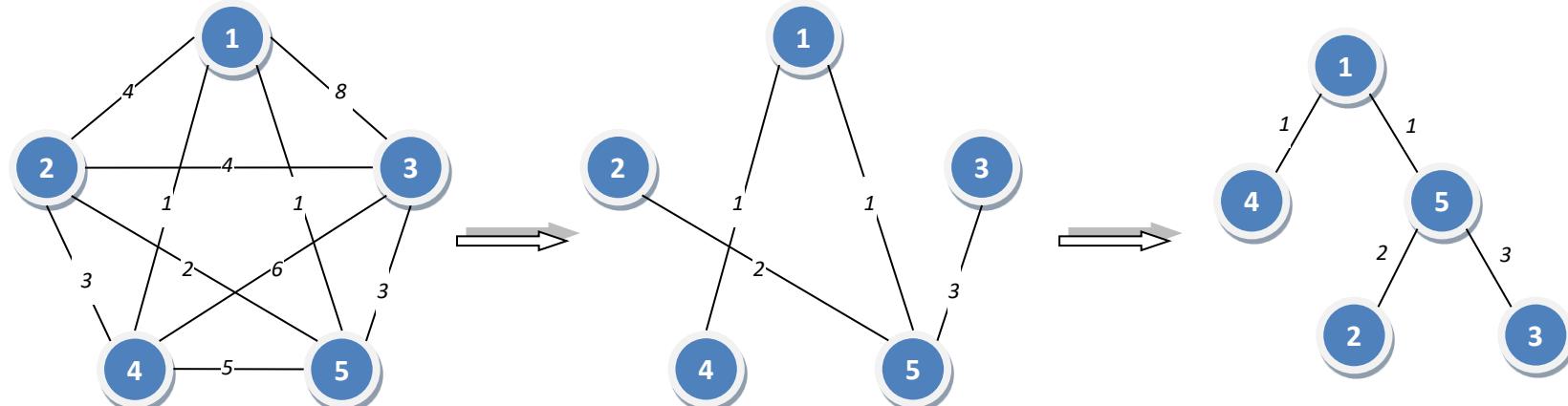
- Unicast
 - *směrování na základě toho, kam mají být data doručena*
 - zajišťují unicastové směrovací protokoly jako OSPF, EIGRP či IS-IS
- Multicast
 - *směrování na základě toho, kdo je zdrojem dat*
 - distribuční stromy

Multicastové protokoly

- Směrovací protokoly:
 - **MOSPF** – rozšíření OSPF, ale neujalo se
 - **DVMRP** – základ MBONE inspirovaný RIPem
 - **PIM** – nejpoužívanější IGP
 - **M-BGP** – nádstavba nad BGP pro podporu multicastového směrování
- Podpůrné protokoly:
 - **MSDP** – šíření zdrojů multicastu mezi autonomními systémy
 - **RGMP** – CGMP pro routery v páteřní vrstvě

Distribuční stromy (1)

- Shortest path tree (SPT)
 - $\stackrel{\text{def}}{=}$ acyklický spojitý faktor grafu s nezáporně ohodnocenými hranami, kde cesta mezi kořenovým uzlem a všemi ostatními uzly je nejmenší možná
 - \rightsquigarrow abstraktní stromová struktura, kde mezi dvěma body existuje jediná, a to nejkratší cesta
 - Dijkstrův algoritmus, Floyd-Warshallův algoritmus

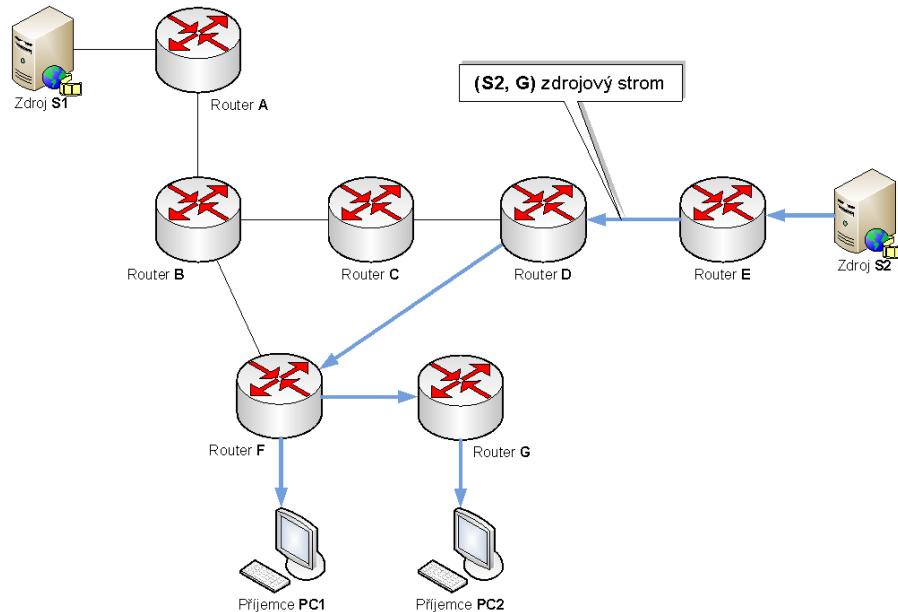
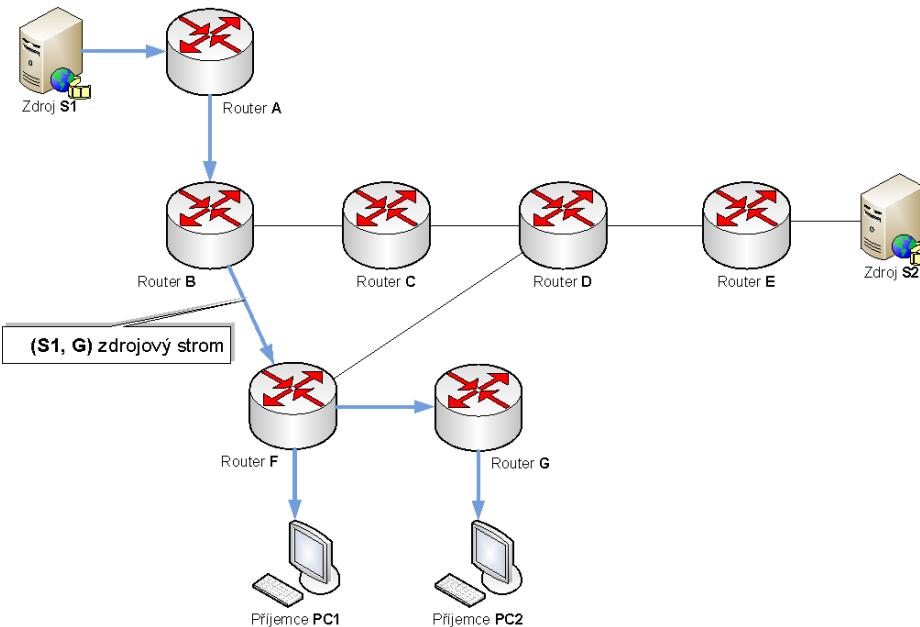


Distribuční stromy (2)

- Směrovače znají celou topologii sítě pomocí stromů a na základě této znalosti si budují směrovací tabulky
- Multicastové distribuční stromy vychází z SPT
- **(S, G) – source trees/zdrojové stromy**
 - pro každý zdroj multicastového provozu je vybudováván SPT ke všem jeho příjemcům se zdrojem jakožto kořenem stromu
- **(*, G) shared trees (sdílené stromy)**
 - existence nějakého společného bodu (tzv. **rendezvous pointu RP**) v topologii sdružujícího provoz od zdrojů multicastu, od kterého (jakožto kořene) je pak vybudován SPT k příjemcům

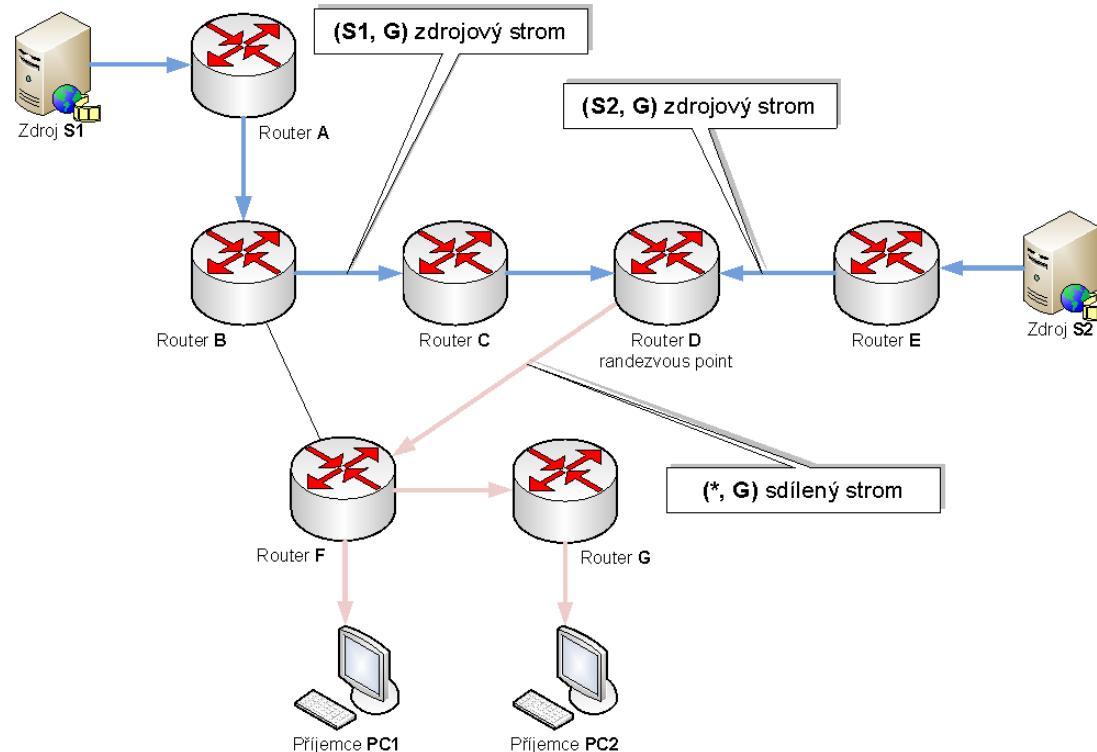
Distribuční stromy – (S, G)

- Nejkratší cesta = nejmenší zpoždění
- Paměťově náročné – pro každý zdroj vlastní strom



Distribuční stromy – $(*, G)$

- Suboptimální cesta může být příčinou zpoždění
- Lépe škálují provoz od více stejných zdrojů
- Paměťově méně náročné



PIM

- PIM neboli Protocol Independent Multicast je IGP
- [RFC3973](#) a [RFC4601](#)
- PIM kooperuje s unicastovým směrovacím protokolem = získává z něj informace o topologii, na základě které si buduje své distribuční stromy, jež jsou využívány pro multicast
- Všechny PIM směrovače si povídají na adrese:
 - 224.0.0.13 u IPv4
 - FF02::D u IPv6

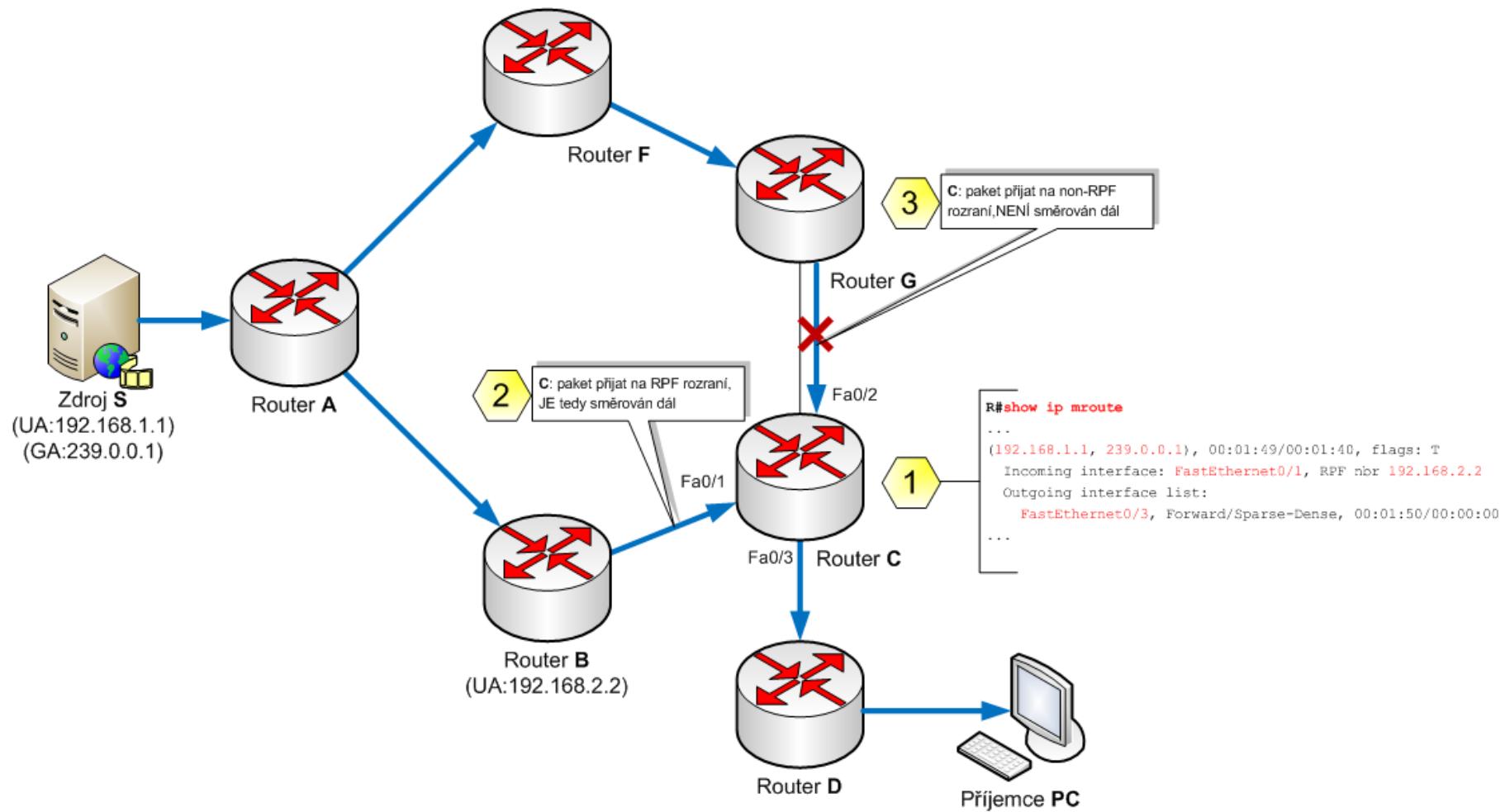
PIM – RPF (1)

- *V multicastové topologii obvykle dochází k replikaci dat, musíme tedy nějak filtrovat stejné pakety, které na směrovač dorazily různými cestami*
- **RPF = Reverse Path Forwarding**
- Princip zajišťující, že se při směrování multicastu eliminují smyčky
- Idea: *Za platný prohlásíme jen ten paket, který přichází z rozhraní ležícího nejblíže zdroji*

PIM – RPF (2)

- Algoritmus při přijetí multicastového paketu:
 - 1) Zdroj dat multicastové skupiny je ověřen vůči unicastové směrovací tabulce
 - 2) Zjistí se, jestli rozhraní leží ve směru zdroje dané multicastové skupiny, jestli:
 - a) ANO – rozhraní je označeno jako „*Incoming*“ nebo „*RPF*“
 - b) NE – rozhraní není nijak označeno nebo jako „*non-RPF*“
 - 3) Směrování multicastového paketu je pak rozhodnuto podle označení rozhraní, ze kterého přišel, jestli:
 - a) „*RPF*“ rozhraní – paket je směrován dál
 - b) „*non-RPF*“ rozhraní – paket je zahoven

PIM – RPF (3)



PIM – Módy činnosti

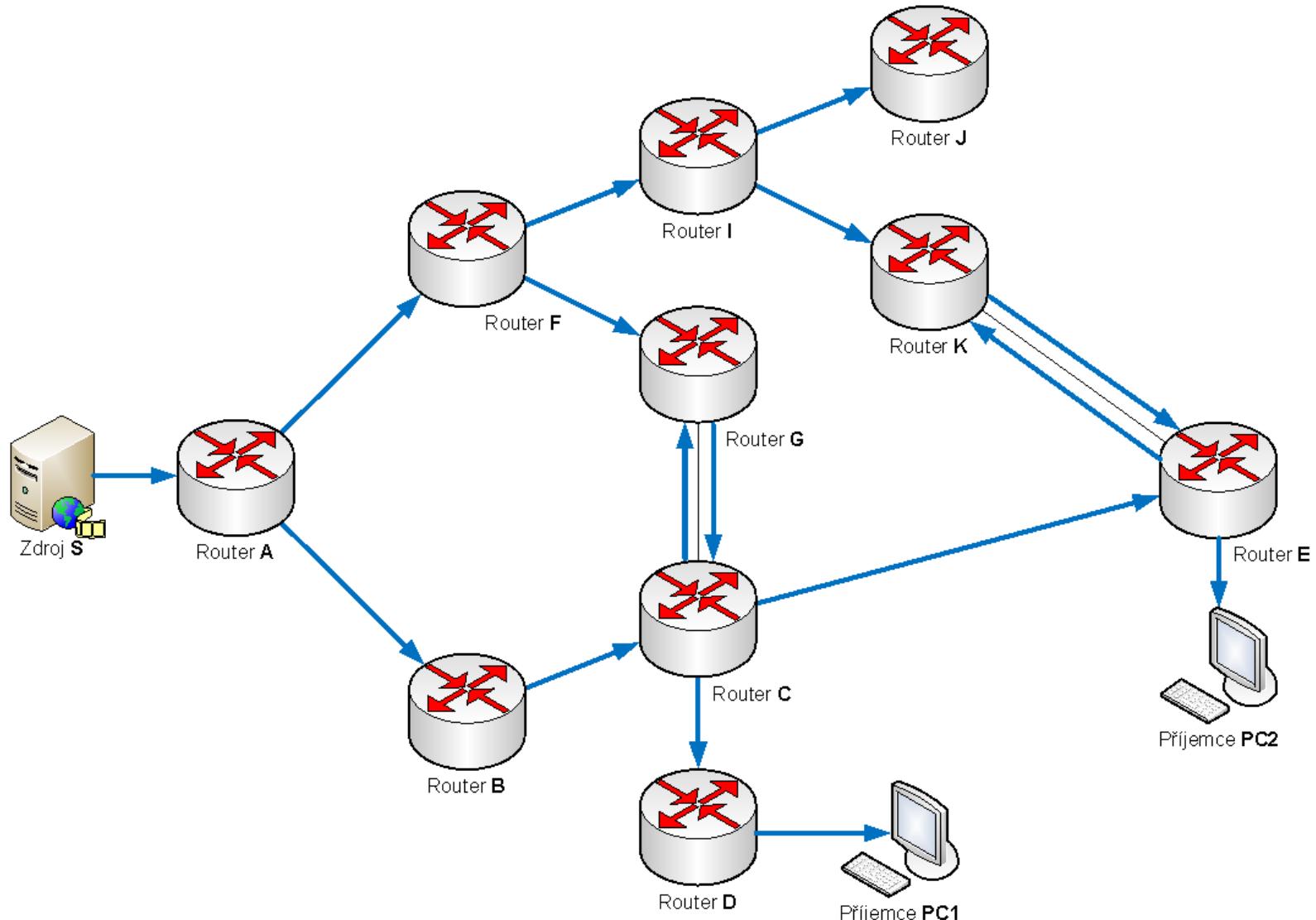
- **Dense (hustý) mód**
 - pracuje inkluzívním přístupem
 - pravidelně zaplavuje celou síť multicastovým provozem, přičemž ty části stromu, na kterých nejsou žádní odběratelé, explicitně kořen upozorňují, aby jím nic nezasílal
 - každé 3 minuty
- **Sparse (řídký) mód**
 - pracuje exkluzivním přístupem
 - strom je budován podle poptávky příjemců, kteří kořen explicitně upozorňují, že mají zájem odebírat data z nějaké multicastové skupiny

PIM-DM

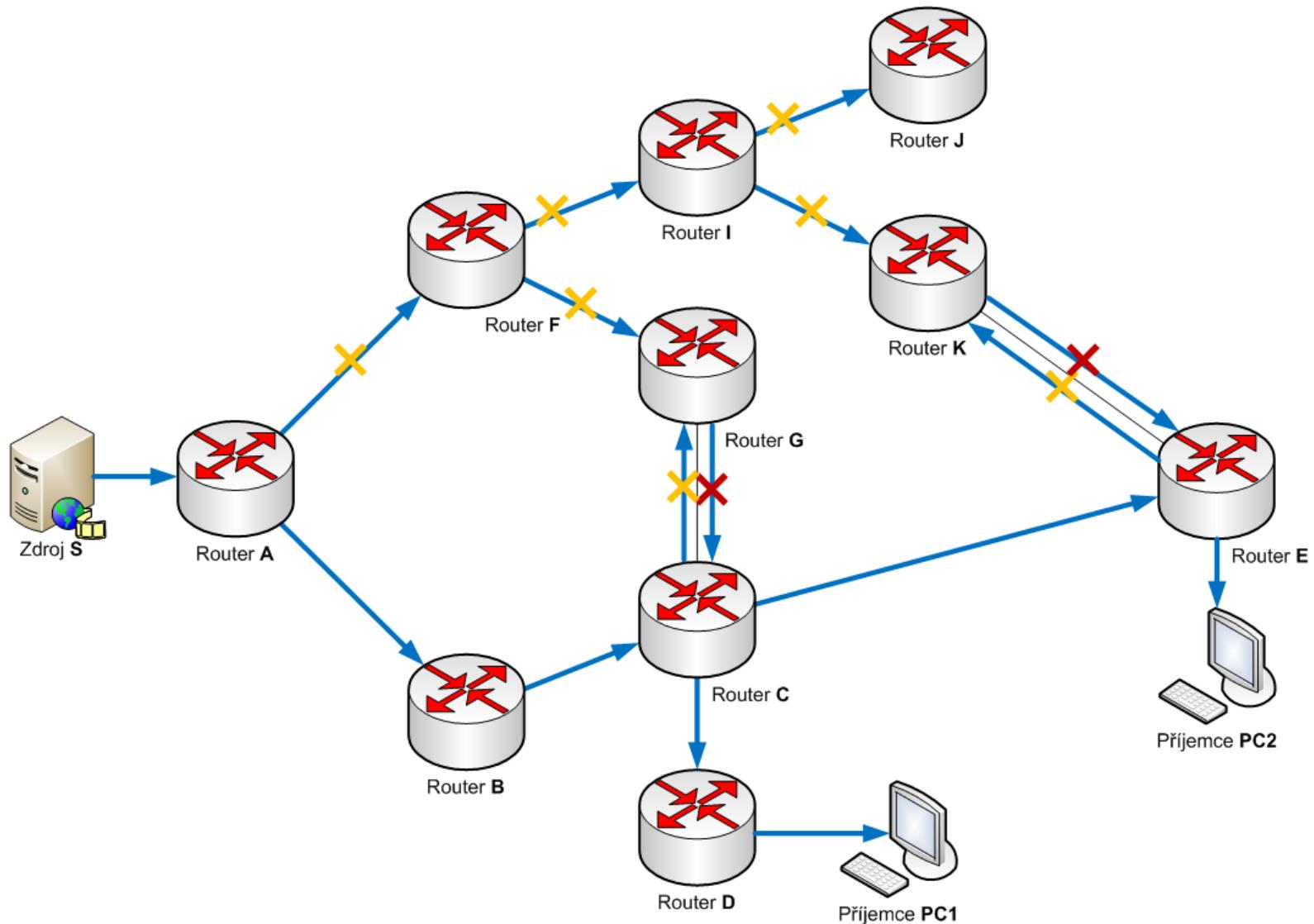
- Používá jen (S, G) stromy, které jsou budovány od zdroje až k příjemcům
- Vhodný do topologií s jedním zdrojem multicastu
- Zasílá zprávy:

Zpráva	Cílová adresa
Hello	224.0.0.13
Prune	224.0.0.13
Assert	224.0.0.13
Graft	Připojovaný směrovač
Graft-Ack	Připojující se směrovač

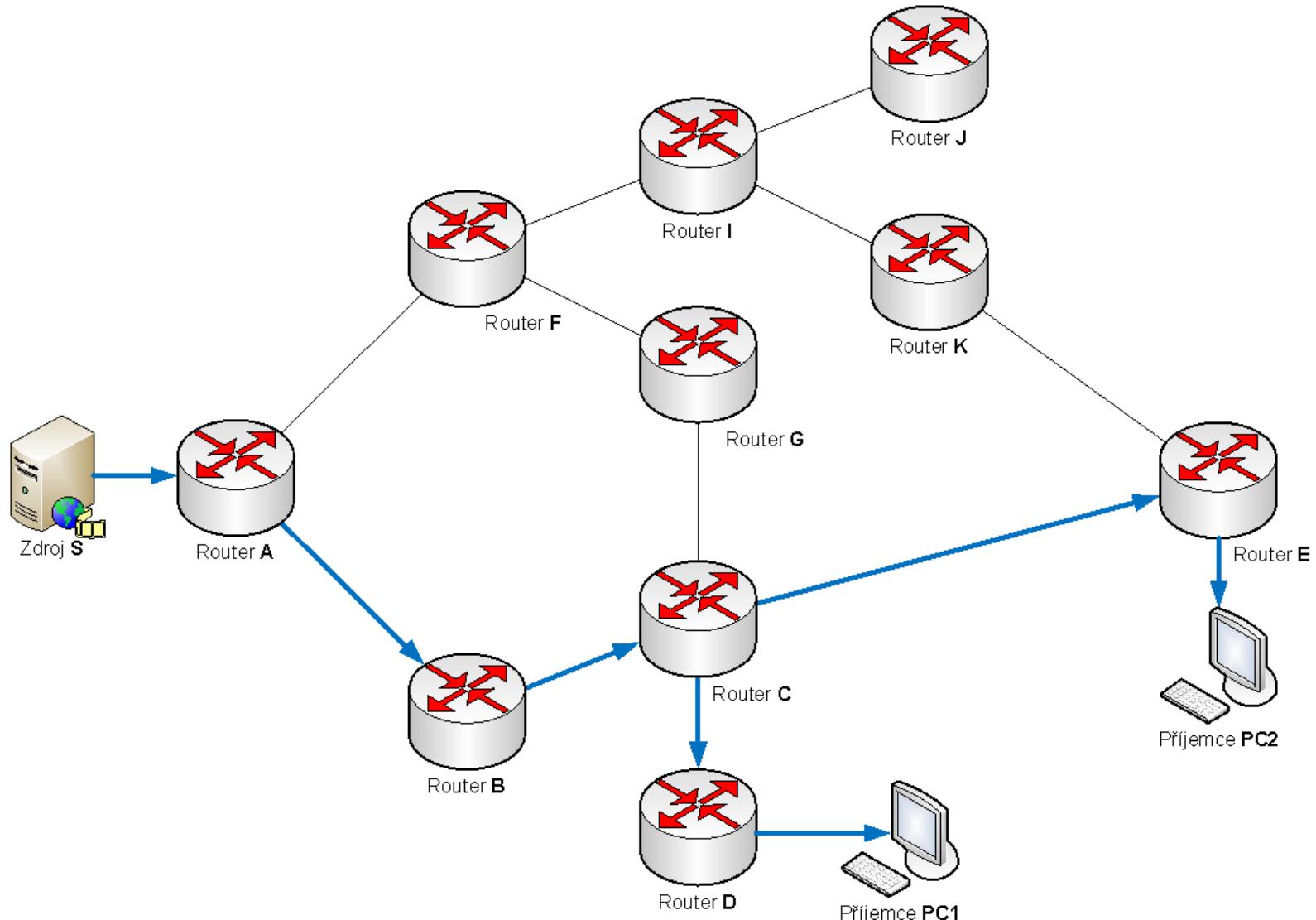
PIM-DM – Příklad (1)



PIM-DM – Příklad (2)



PIM-DM – Příklad (3)



PIM-SM

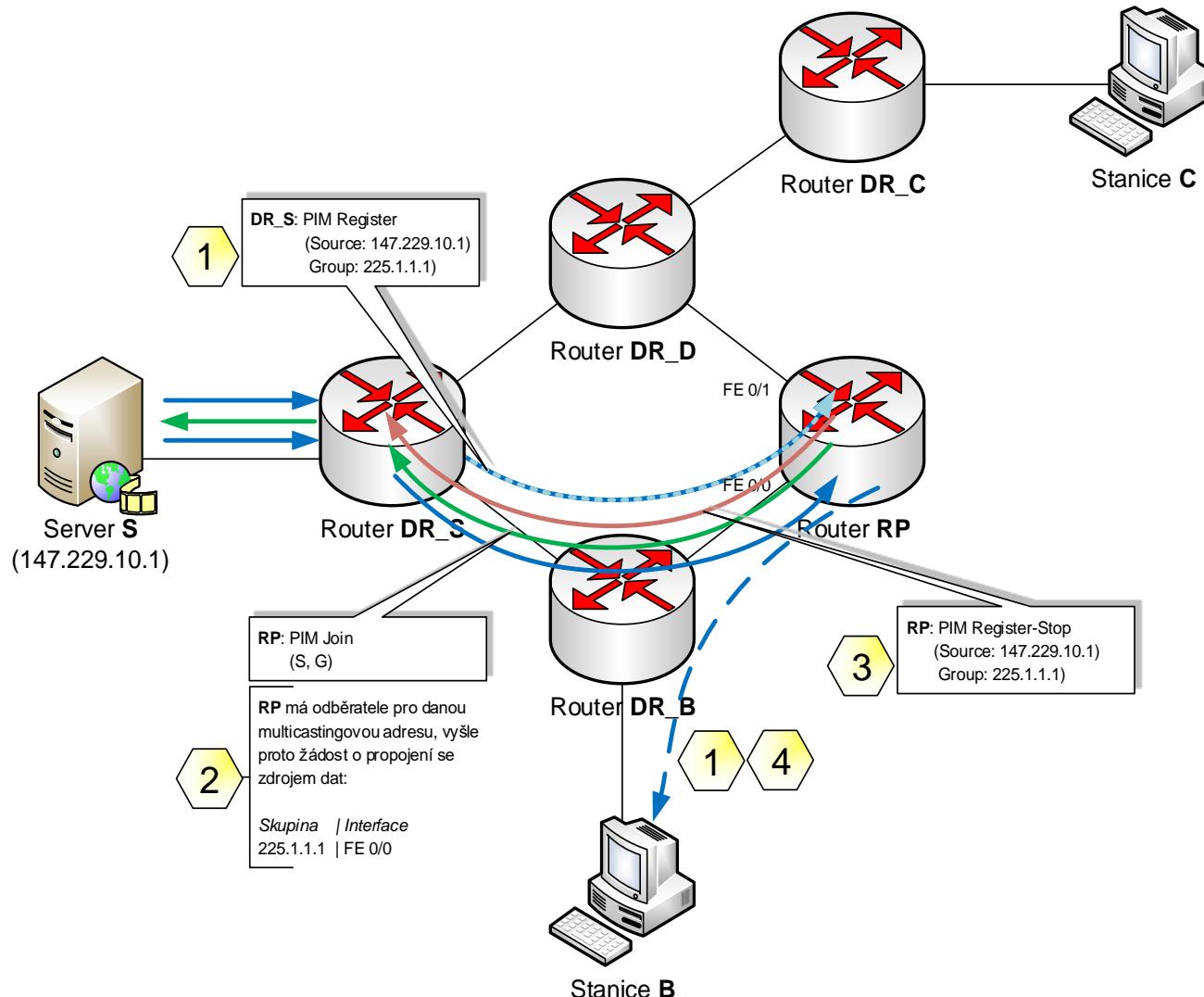
- Pracuje s oběma typy distribučních stromů:
 - Zdrojové stromy jsou budovány od zdrojů k RP
 - Sdílené stromy pak od RP k příjemcům
- Používáme v topologiích s více zdroji multicastu
- PIM-SM nefunguje, pokud všichni neznají RP!!!
- Zasílá zprávy:

Zpráva	Cílová adresa
Hello	224.0.0.13
Register	RP
Register-Stop	Registrující
Join/Prune	224.0.0.13

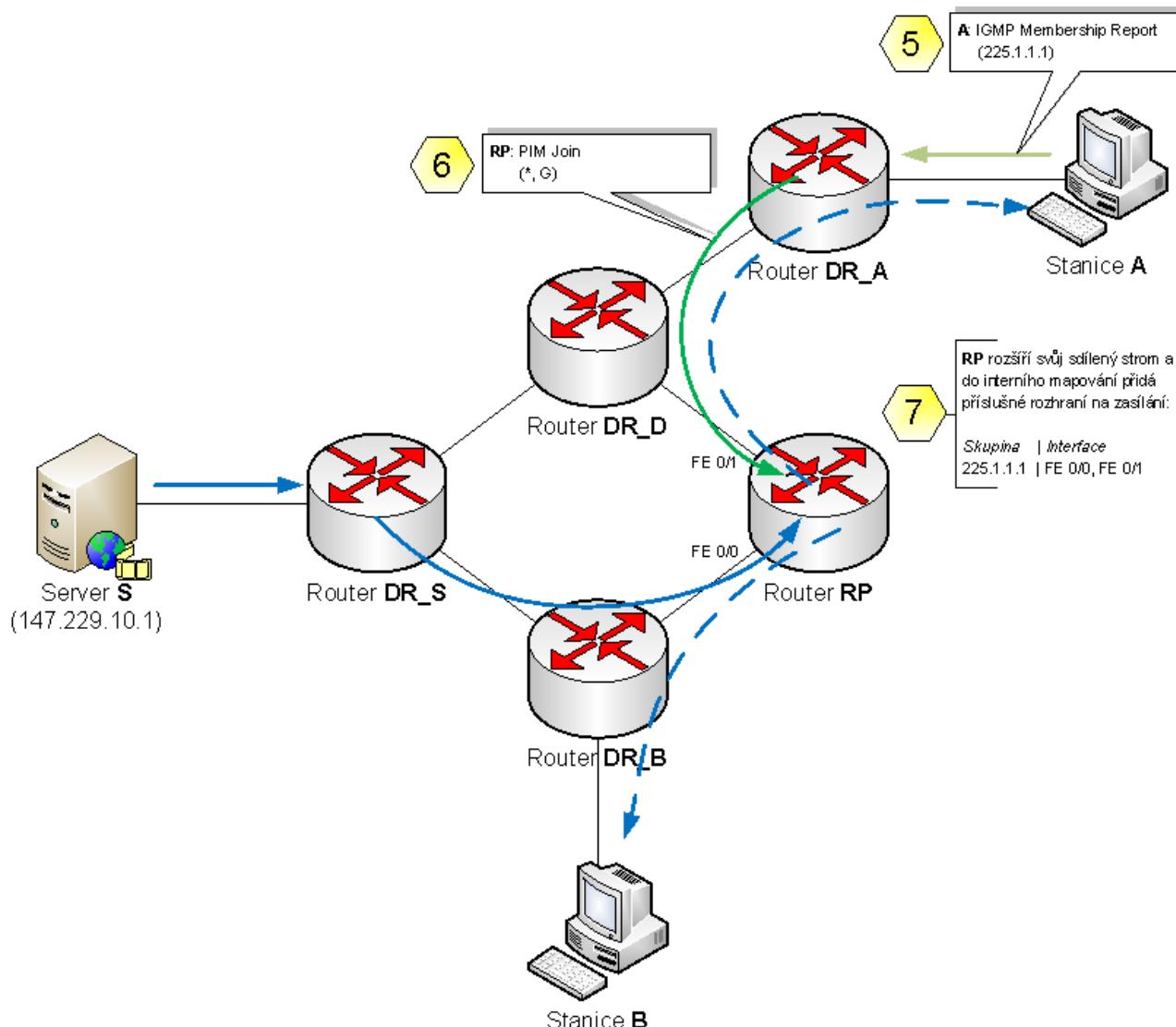
PIM-SM – Hierarchie

- Rendezvous Point (RP)
 - volen tak, aby ležel co nejblíže jak ke zdrojům, tak k příjemcům
- Designated Router (DR)
 - ten s nejvyšší IP adresou – kontrola pomocí PIM Hello
 - stará se v daném segmentu o registraci zdrojů a o napojování se a odpojování k distribučnímu stromu

PIM-SM – Příklad (1)



PIM-SM – Příklad (2)



PIM ve Wireshark'u

Agenda

1) ÚVODNÍ MOTIVACE

- Use-case
- Adresování

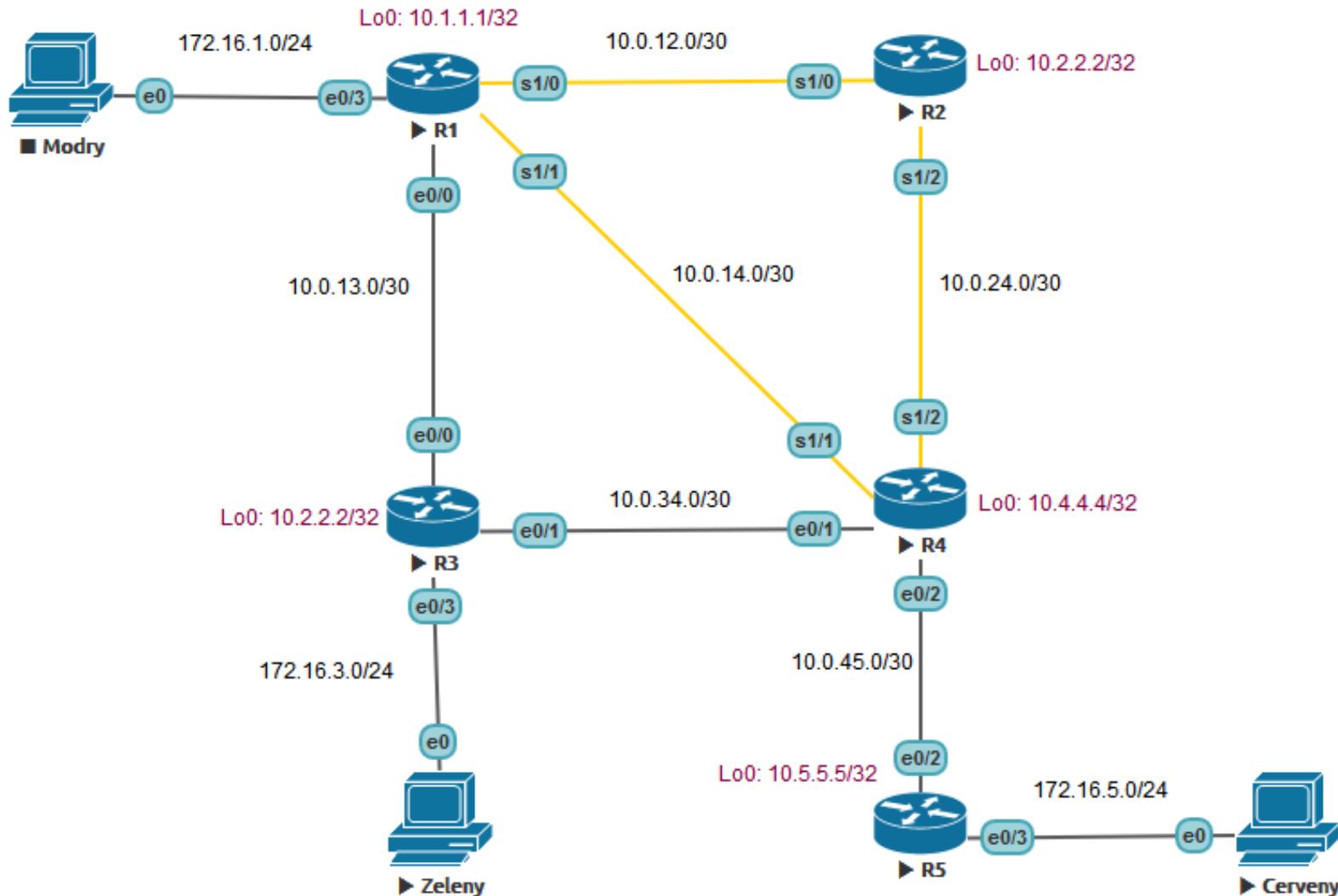
2) POHLED NA SKUPINOVÉ SMĚROVÁNÍ:

- Klienti
- Switche/Přepínače
- Routery/Směrovače

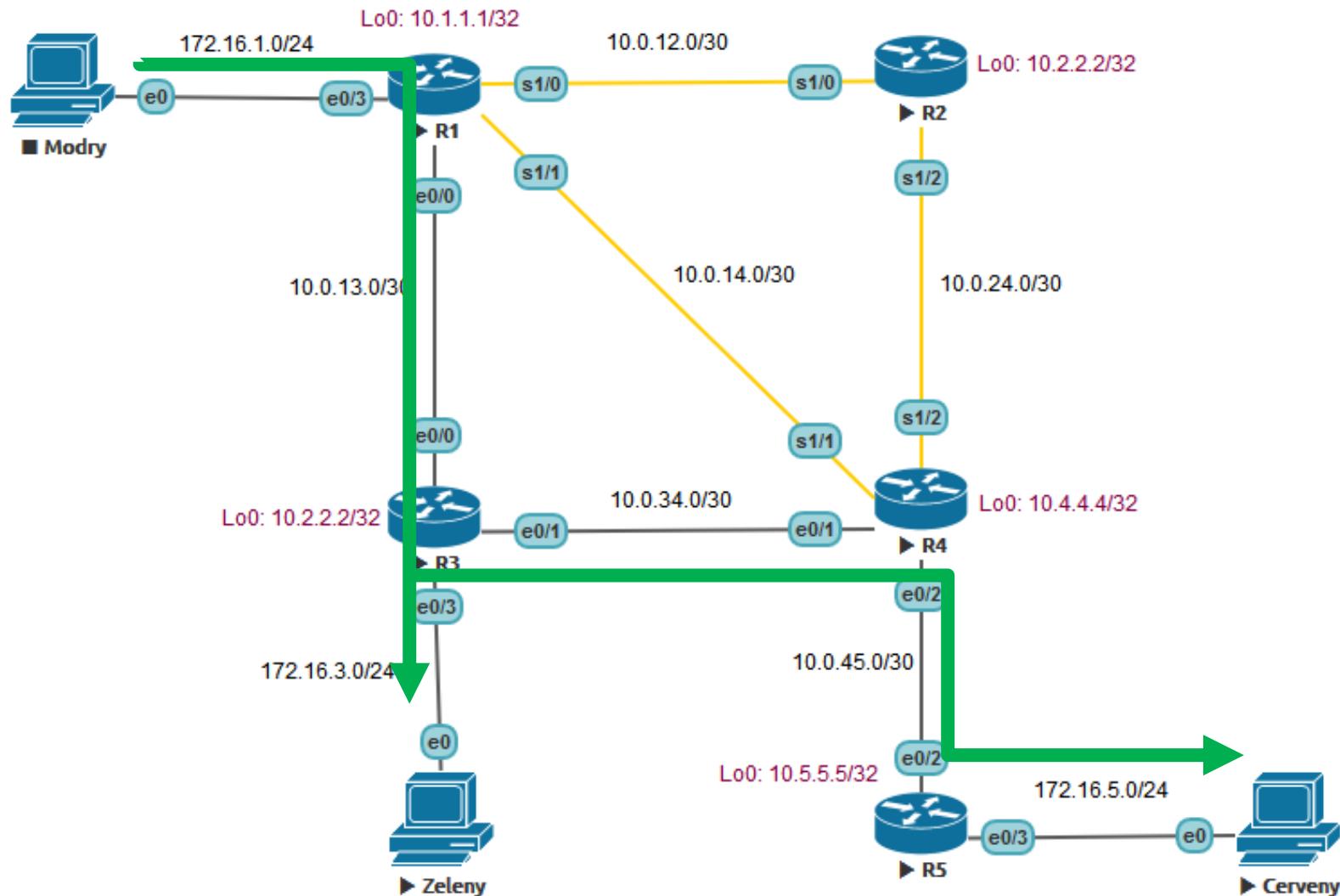
3) ZÁVĚR

- Ukázka a realita
- VoD

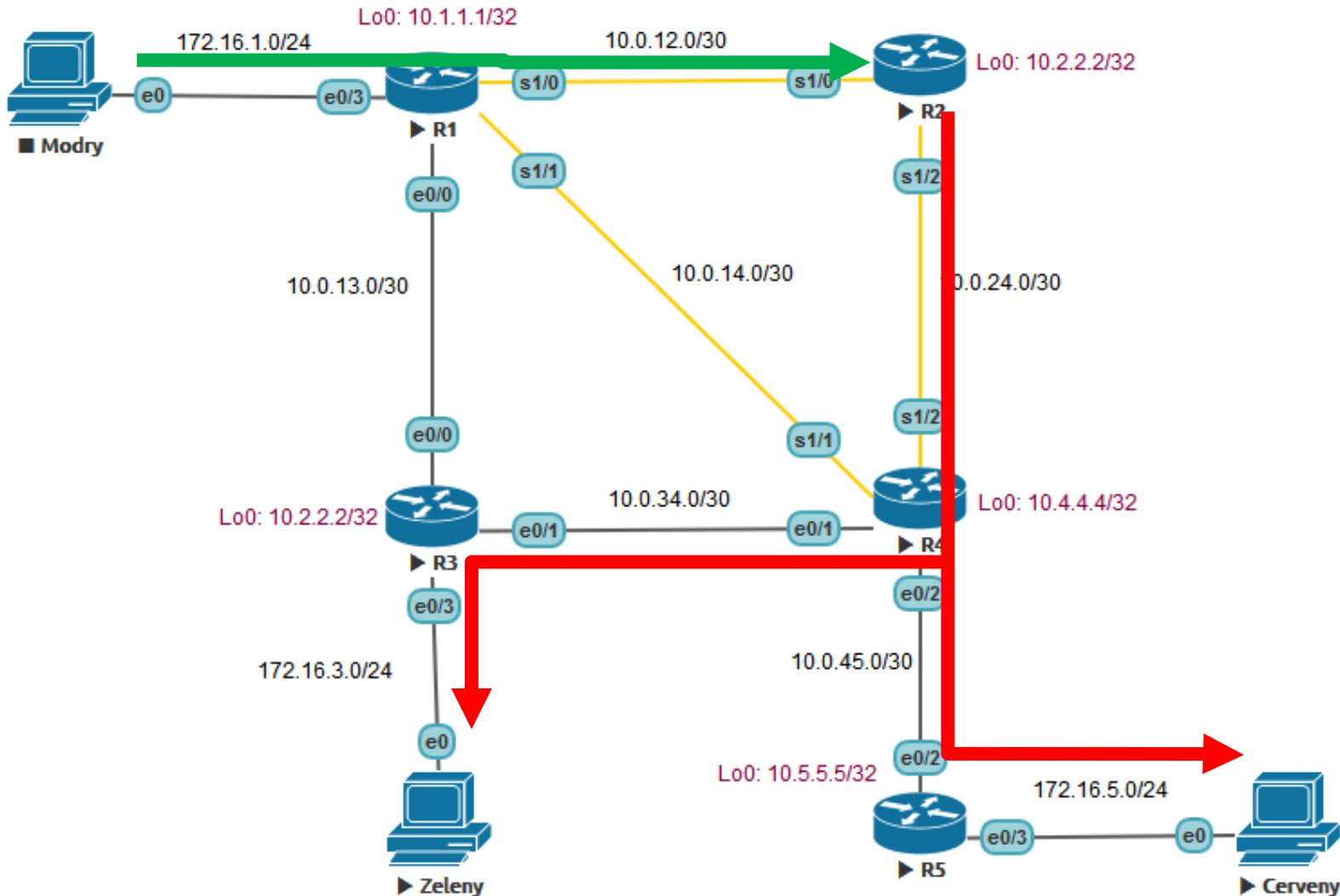
Ukázka



Ukázka: PIM-DM



Ukázka: PIM-SM



Příkazy IOSu

- Globální povolení multicastového směrování:

```
(config)#ip multicast-routing
```

- Povolení protokolu PIM na rozhraní:

```
(config-if)#ip pim dense-mode
```

```
(config-if)#ip pim sparse-mode
```

```
(config-if)#ip pim sparse-dense-mode
```

- Explicitní přihlášení daného rozhraní do skupiny:

```
(config-if)#ip igmp join-group IP
```

- Nastavení bootstrap elekce RP:

```
(config)#ip pim bsr-candidate interface hash priorita
```

- Nastavení kandidáta na RP:

```
(config)#ip pim rp-candidate interface group-list ACL
```

- Přístupové pravidlo ACL:

```
(config)#access-list ID permit IP wildcard
```

- Ověřování výsledků:

```
#show ip mroute
```

```
#show ip pim neighbour
```

```
#show ip pim bsr-router
```

```
#show ip rp
```

Kde se multicast reálně používá?

- V lokálních sítích pro servisní protokoly
 - OSPF (224.0.0.5, 224.0.0.6)
 - RIP, EIGRP
- V IPv6 všude tam, kde by nám jinak stačil broadcast ☺
- V sítích ISP pro řešení IPTV
 - O2, NETBOX
 - <https://www.xbmc-kodi.cz/prispevek-navod-jak-sledovat-plnou-o2-tv-na-siti>

Agenda

1) ÚVODNÍ MOTIVACE

- Use-case
- Adresování

2) POHLED NA SKUPINOVÉ SMĚROVÁNÍ:

- Klienti
- Switche/Přepínače
- Routery/Směrovače

3) ZÁVĚR

- Ukázka a realita
- VoD

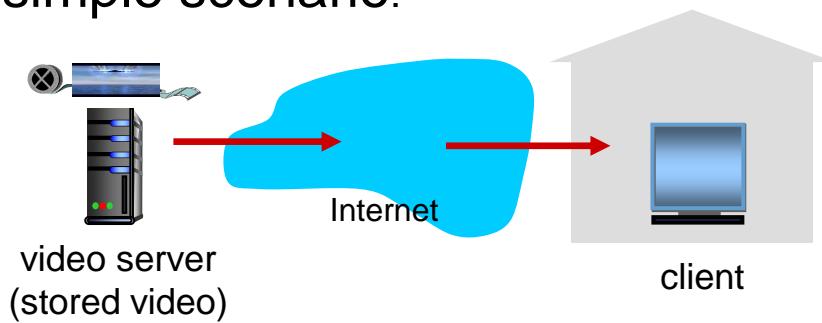
Video Streaming and CDNs

- stream video traffic: major consumer of Internet bandwidth
 - Netflix, YouTube, Amazon Prime: 80% of residential ISP traffic (2020)
- *challenge:* scale - how to reach ~1B users?
- *challenge:* heterogeneity
 - different users have different capabilities (e.g., wired versus mobile; bandwidth rich versus bandwidth poor)
- *solution:* distributed, application-level infrastructure



Streaming stored video (1)

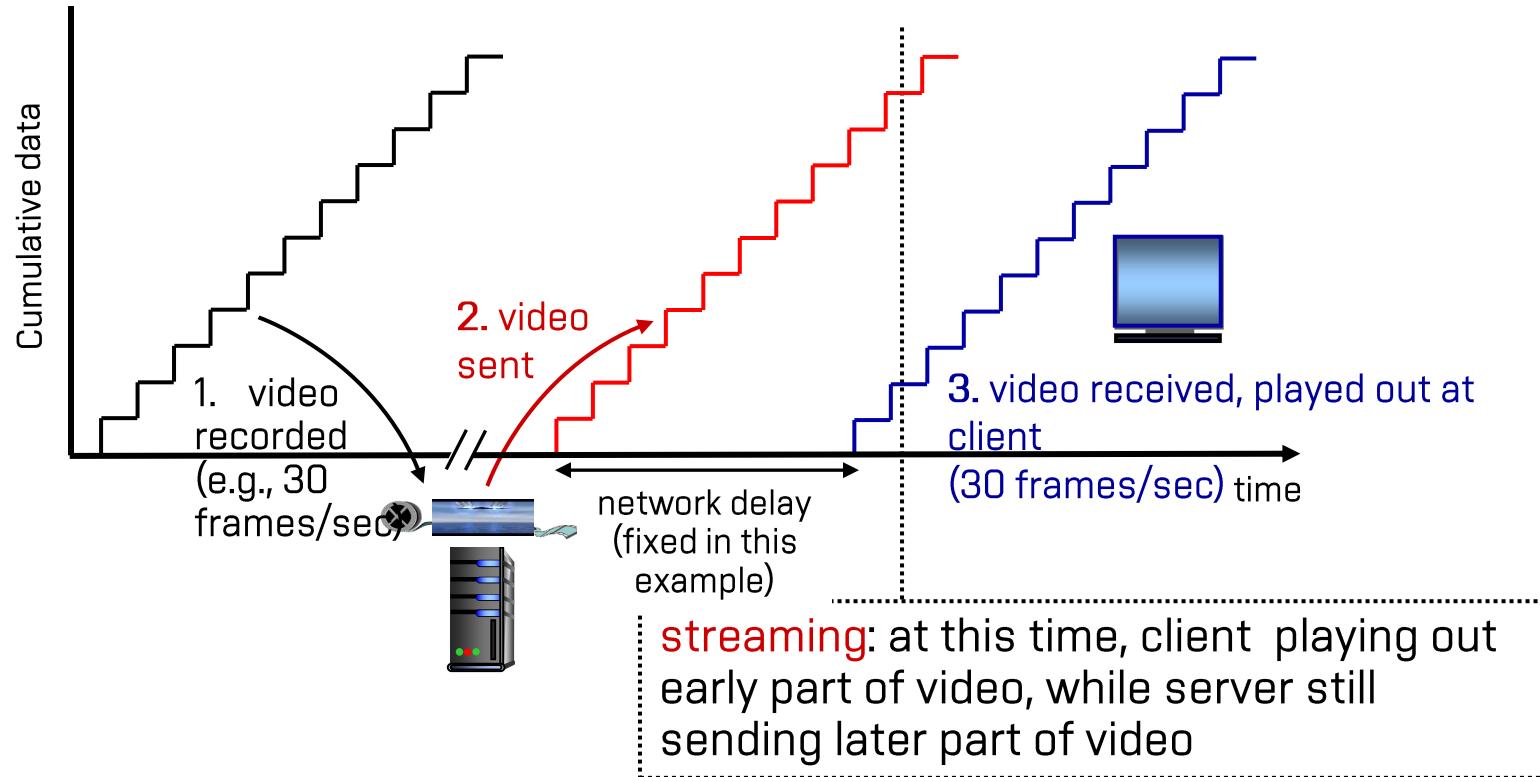
simple scenario:



Main challenges:

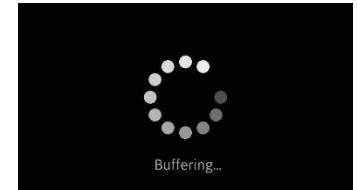
- server-to-client bandwidth will *vary* over time, with changing network congestion levels (in house, access network, network core, video server)
- packet loss, delay due to congestion will delay playout, or result in poor video quality

Streaming stored video (2)

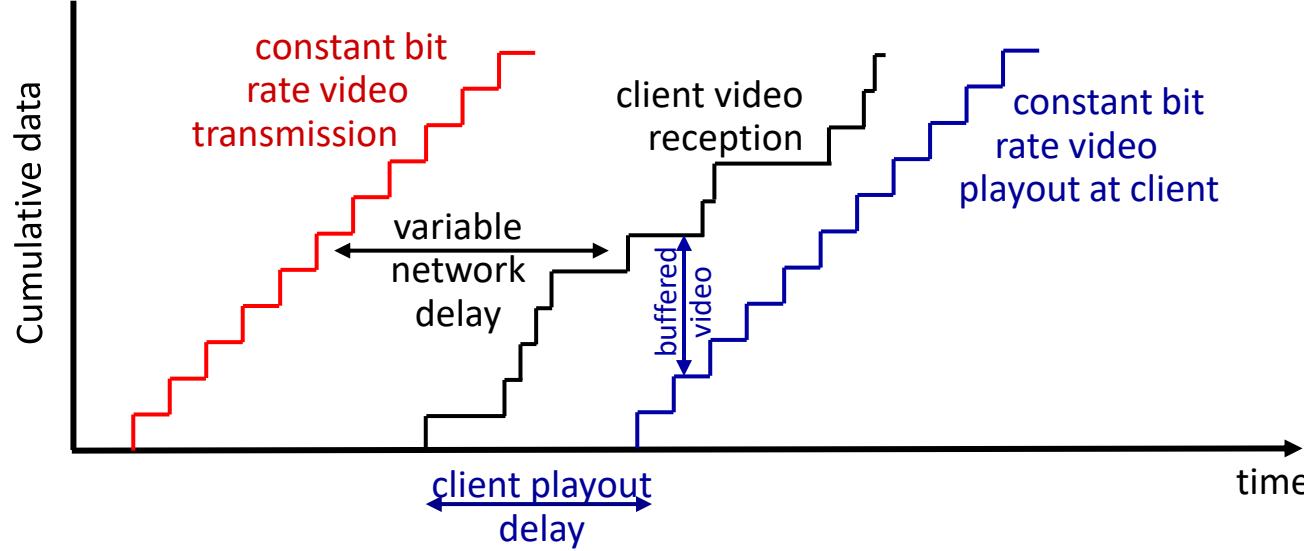


Challenge

- **continuous playout constraint:** during client video playout, playout timing must match original timing
 - ... but **network delays are variable** (jitter), so will need **client-side buffer** to match continuous playout constraint
- other challenges:
 - client interactivity: pause, fast-forward, rewind, jump through video
 - video packets may be lost, retransmitted



Playout buffering

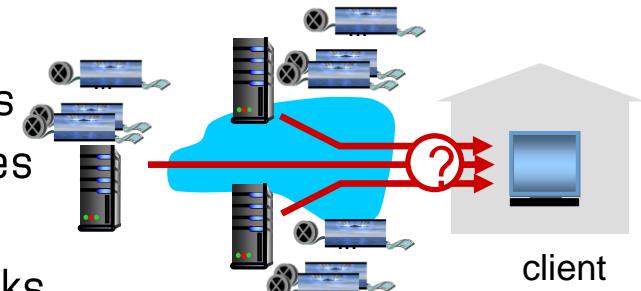


- *client-side buffering and playout delay:* compensate for network-added delay, delay jitter

Dynamic Adaptive Streaming over HTTP: DASH (1)

server:

- divides video file into multiple chunks
- each chunk encoded at multiple different rates
- different rate encodings stored in different files
- files replicated in various CDN nodes
- *manifest file*: provides URLs for different chunks

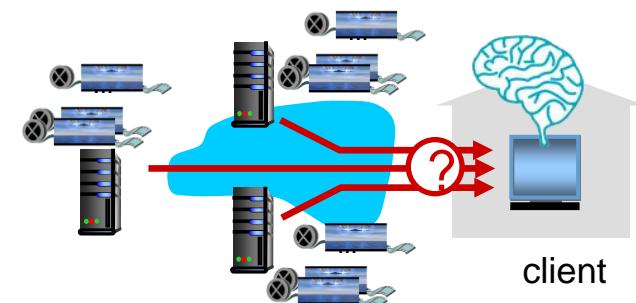


client:

- periodically estimates server-to-client bandwidth
- consulting manifest, requests one chunk at a time
 - chooses maximum coding rate sustainable given current bandwidth
 - can choose different coding rates at different points in time (depending on available bandwidth at time), and from different servers

DASH (2)

- “*intelligence*” at client: client determines
 - *when* to request chunk (so that buffer starvation, or overflow does not occur)
 - *what encoding rate* to request (higher quality when more bandwidth available)
 - *where* to request chunk (can request from URL server that is “close” to client or has high available bandwidth)



Streaming video = encoding + DASH + playout buffering

Content distribution networks (CDNs)

challenge: how to stream content (selected from millions of videos) to hundreds of thousands of *simultaneous* users?

- *option 1:* single, large “mega-server”
 - single point of failure
 - point of network congestion
 - long (and possibly congested) path to distant clients

....quite simply: this solution *doesn't scale*

CDN (2)

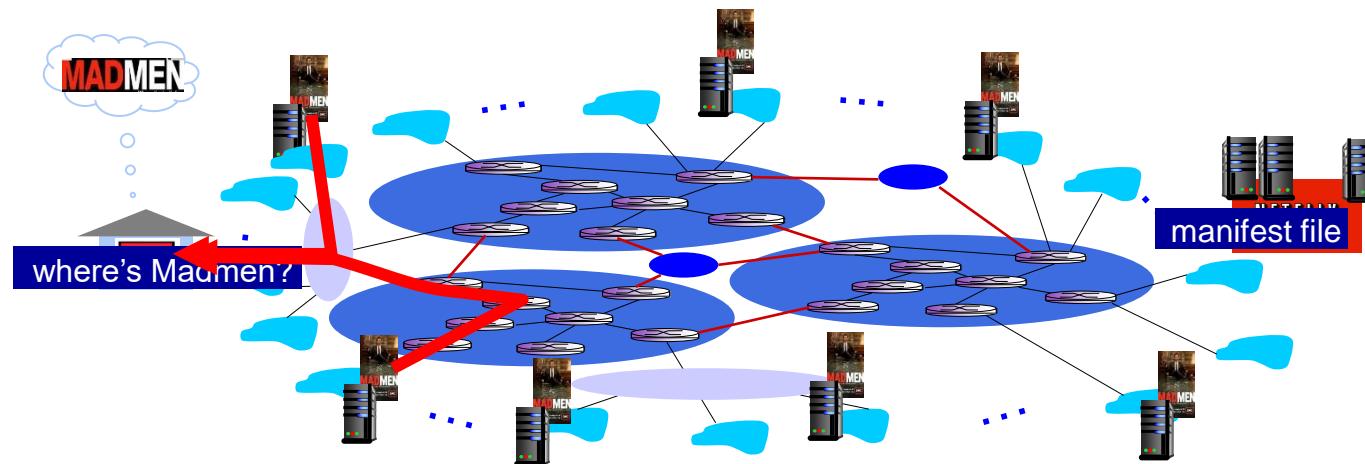
challenge: how to stream content (selected from millions of videos) to hundreds of thousands of *simultaneous* users?

- *option 2:* store/serve multiple copies of videos at multiple geographically distributed sites (**CDN**)
 - *enter deep:* push CDN servers deep into many access networks
 - close to users
 - Akamai: 240,000 servers deployed in > 120 countries (2015)
 - *bring home:* smaller number (10's) of larger clusters in POPs near access nets
 - used by Limelight



CDN (3)

- subscriber requests content, service provider returns manifest
 - CDN: stores copies of content (e.g. MADMEN) at CDN nodes
 - using manifest, client retrieves content at highest supportable rate
 - may choose different rate or copy if network path congested



CDN (4)



OTT challenges: coping with a congested Internet from the “edge”

- what content to place in which CDN node?
- from which CDN node to retrieve content? At which rate?

Kvíz pozornosti

- Jaké známe typy aplikačního multicastu podle směru komunikace?
- Jaký je ROZSAH multicastových adres v IPv4?
- Jaké známe tři typy DOSAHu multicastových adres v IPv4?
- Jak poznáme multicastovou MAC adresu?
- Co je problém 32-to-1 overlapping?
- Jaký port má na L4 vrstvě vyčleněn protokol IGMP?
- Jak se liší v IGMP Membership Query varianta General Query od varianty Group-Specific Query?
- Jak se zachová směrovač, pokud dostane zprávu IGMP Leave Group?
- Jak nakládá s multicastovým rámcem „hloupý“ přepínač?
- Z výrazu „snooping“ odvod'te funkci IGMP Snoopingu?

Kvíz pozornosti

- Jmenujte tři unicastové a tři multicastové směrovací protokoly!
- Co je to SPT a jak ho lze v daném grafu vybudovat?
- Vymenujte oba druhy distribučních stromů a k nim výhody a nevýhody, jež s nimi souvisí!
- Co je RPF a proč je tak důležitý?
- Popište směrování příchozího multicastového paketu na směrovači s přihlédnutím k RPF!
- Vyberte si tři libovolné zprávy PIM a popište je!
- Jmenujte dva módy činnosti PIM, čím se od sebe liší a v jakých topologiích byste ten který nasadili?
- Jakou informaci musí směrovač mít, pokud chce používat PIM-SM?

Kam dál?

- <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/rpfile.php?id=1995>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/IGMP>
- http://en.wikipedia.org/wiki/IP_Multicast
- <http://www.commsdesign.com/article/printableArticle.jhtml?articleID=52200253>
- <http://www.networksorcery.com/enp/protocol/igmp.htm>
- <http://www.ciscosystems.com/en/US/docs/switches/datacenter/nexus5000/sw/configuration/guide/cli/MACAddress.pdf>
- http://www.cisco.com/en/US/products/hw/switches/ps708/products_tech_note09186a00800b0871.shtml#cgmp
- <http://www.netcraftsmen.net/resources/archived-articles/376-pim-dense-mode.html>
- <http://www.netcraftsmen.net/resources/archived-articles/424-pim-sparse-mode.html>
- http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12_2/ip/configuration/guide/1cfmulti.html
- <http://www.netcraftsmen.net/resources/archived-articles/375-ip-multicast-and-pim-rendezvous-points.html>
- <http://tools.ietf.org/html/rfc1112>
- <http://tools.ietf.org/html/rfc2236>
- <http://tools.ietf.org/html/rfc3376>
- <http://tools.ietf.org/html/rfc4541>
- <http://tools.ietf.org/html/rfc1075>
- <http://tools.ietf.org/html/rfc1584>