4. Síťová vrstva – Směrování

PB156: Počítačové sítě

Eva Hladká

Slidy připravil: Tomáš Rebok

Fakulta informatiky Masarykovy univerzity

jaro 2011

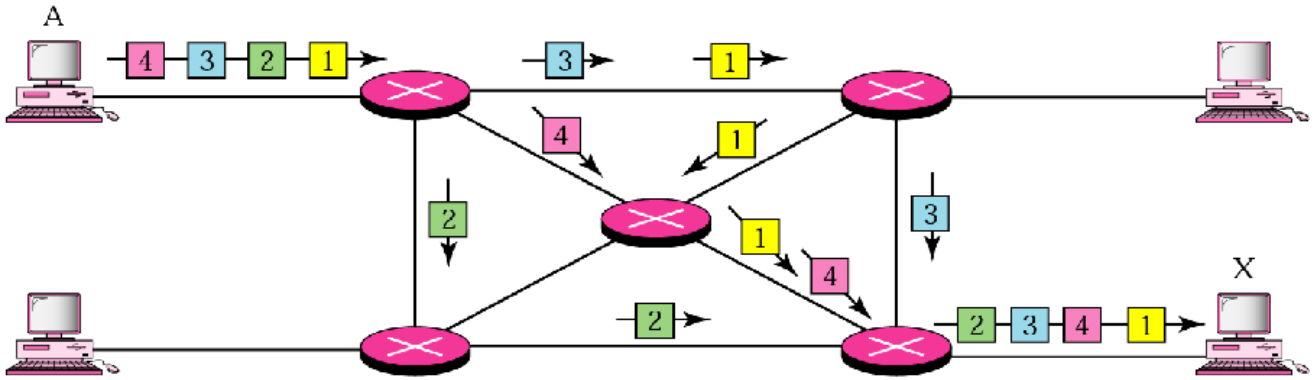
Struktura přednášky

1. Směrování obecně
2. Směrování
   - Základní přístupy
3. Směrovací algoritmy
4. Distribuované směrování
   - Distance Vector
   - Link State
   - Link State vs. Distance Vector
5. Hierarchie směrování
   - Původní představy
   - Autonomní systémy
   - Autonomní systémy – směrování
6. Multicastové směrování – IP Multicast
   - Motivace
   - IP Multicast
   - Protokoly
7. Rekapitulace

Struktura přednášky

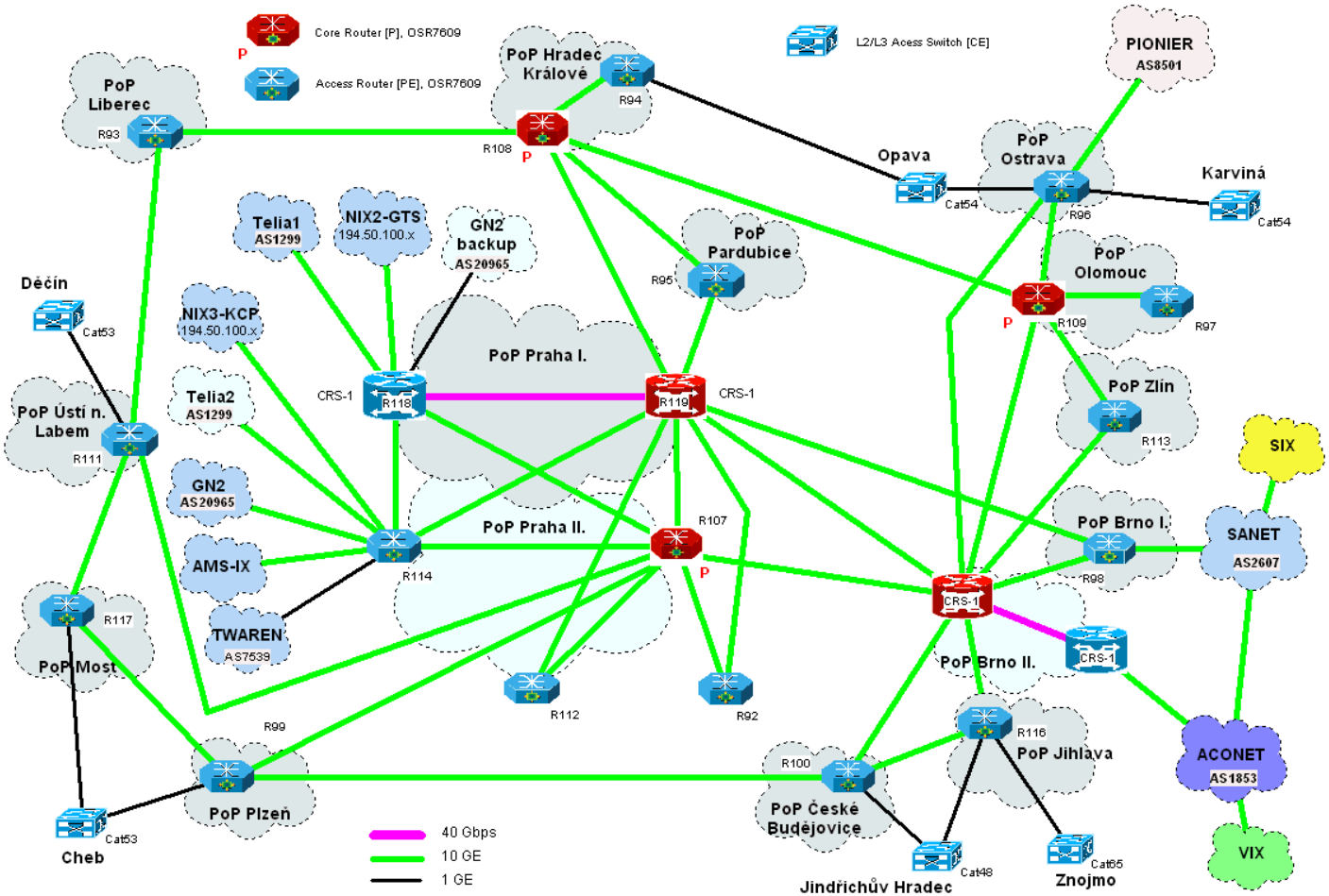
Směrování obecně

- Internet na L3 – datagramový přístup k přepínání paketů
  - data vyšších vrstev umísťována do datagramů
  - datagramy (fragmenty) putují sítí nezávisle



- **směrování (Routing)** = proces nalezení cesty mezi dvěma komunikujícími uzly
  - cesta musí splňovat určité omezující podmínky
  - ovlivňující faktory:
    - *statické:* topologie sítě
    - *dynamické:* zátěž sítě

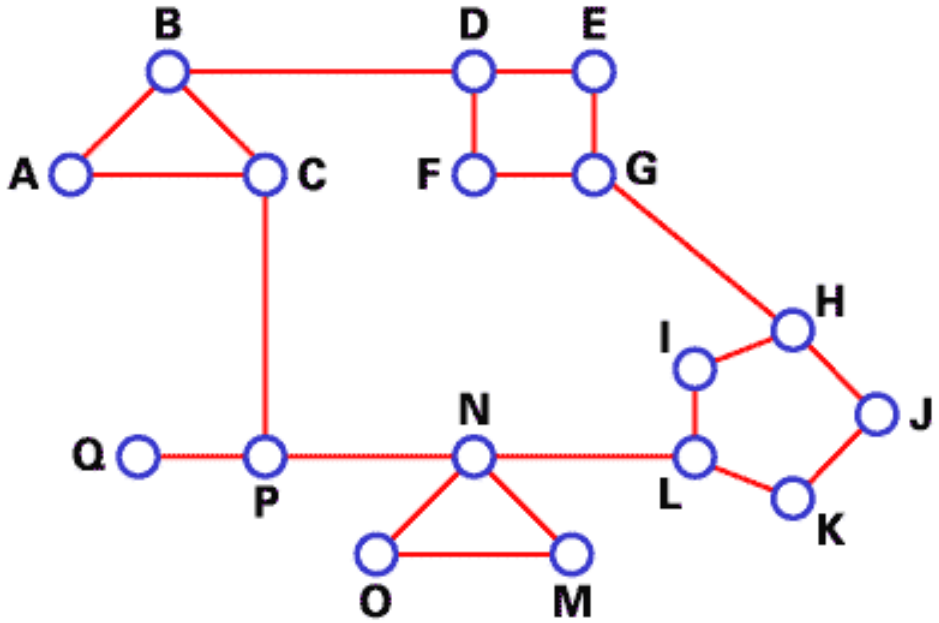
Příklad reálné sítě



Obrázek: Logická topologie IP/MPLS vrstvy sítě CESNET2.

Matematický pohled

- na směrování lze nahlížet jako na problém teorie grafů
- síť reprezentována grafem, kde:
  - uzly reprezentují směrovače (identifikovány svými IP adresami)
  - hrany reprezentují vzájemné propojení směrovačů (linku)
  - ohodnocení hran = cena komunikace
  - *cíl:* nalezení minimální cesty v grafu mezi libovolnými dvěma uzly



Cena komunikace

Určení ceny (ohodnocení) linky – *metrika*:

- všechny linky mají stejnou cenu (např. 1)
  - minimalizace ceny = minimalizace počtu skoků
  - nejjednodušší, nejčastěji využívané
- cena linky = převrácená hodnota kapacity ($1/prenosova\_kapacita$)
  - 10Mb linka má 100x vyšší cenu než 1Gb linka
- cena linky = zpoždění linky
  - 250ms satelitní spojení má 10x vyšší cenu než 25ms pozemní linka
- cena linky = využití linky
  - linka s 90% využitím má 10x vyšší cenu než linka s 9% využitím
  - může způsobit oscilace (nezbytné tlumení)
- cena linky = reálná cena (platba) za využití linky
  - staticky přiřazeno administrátorem
- atd.

Struktura přednášky

Směrování

- úkolem směrování je:
  - vyhledávat optimální směrovací trasy
    - kriteriem optimality je metrika
  - dopravit datový paket určenému adresátovi
- zpravidla se nezabývá celou cestou paketu
  - směrovač řeší jen jeden krok – komu paket předat jako dalšímu
    - někomu „blíže“ cíli
    - tzv. *hop-by-hop*
  - ten pak rozhoduje, co s paketem udělat dál

Směrování (Routing) vs. zasílání (Forwarding)

- *směrování*
  - společná činnost směrovačů (globální)
  - proces nalezení/vytváření a údržby směrovacích tabulek
- *zasílání*
  - lokální proces – každý směrovač samostatně
  - představuje proces průchodu paketů směrovačem
    - zaslání paketu na vybrané rozhraní směrovače (dle cílové adresy)
    - vyžaduje přístup ke směrovací tabulce

Směrovací tabulky

- základní datovou strukturou je *směrovací tabulka (routing table)*
  - sada ukazatelů, podle kterých se rozhoduje, co udělat s kterým paketem
  - obsahují cesty k „prefixům“
    - počáteční IP adresa a blok
  - agregace záznamů – hledá se nejdelší prefix, který vyhovuje požadavku
    - existence více vyhovujících prefixů $\Rightarrow$ použije se nejdelší
    - tzv. *Longest-prefix Match Algorithm*

	Mask	Destination address	Next-hop address	Interface
	/8	14.0.0.0	118.45.23.8	m1
Host-specific →	/32	192.16.7.1	202.45.9.3	m0
	/22	193.14.4.0	84.12.6.20	m1
	/24	193.14.5.0	84.78.4.12	m2
Default →	/0	/0	145.11.10.6	m0

Problém globálního pohledu

- globální znalost topologie celé sítě je problematické
  - je složité ji získat
  - když už se to podaří, není aktuální
  - musí být lokálně relevantní
- lokální představu o topologii reprezentuje směrovací tabulka
- rozpor mezi lokální a globální znalostí může způsobit
  - cykly (černé díry)
  - oscilace (adaptace na zátěž)

Směrování – základní přístupy

Členění dle způsobu vytvoření/udržování směrovací tabulky:

- *statické (neadaptivní)*
  - administrátorem ručně editované záznamy
  - směrovač nemůže vytvářet alternativní cesty, pokud se nastavená cesta přeruší
  - jednodušší, málo flexibilní
  - vhodné pro statickou topologii
  - *Otázka:* Používá se v Internetu?
- *dynamické (adaptivní)* – reagují na změny v síti
  - složité (většinou distribuované) algoritmy
  - (většinou) nutnost pravidelné aktualizace směrovacích tabulek
    - nutnost existence protokolu pro aktualizaci směrovacích tabulek
    - možnost dočasné nekonzistence
  - nezaručuje pořadí doručení
  - např.
    - *centralizované* – vše řídí centrum
    - *izolované* – každý sám za sebe
    - *distribuované* – kooperace uzlů

Dynamické směrování – centralizované směrování

- v síti je *Routing Control Center (RCC)*
  - každý směrovač mu posílá zprávy o své situaci (stavu)
  - RCC informace sbírá, vypočte optimální cesty a rozešle směrovačům jejich tabulky
- výhody:
  - globální informace ($\Rightarrow$ optimální řešení)
  - ulehčení práce směrovačů
- nevýhody:
  - špatně škáluje – nelze využít pro velké sítě (nemožnost získání globální informace)
  - pomalé
  - při výpadku centra se přestane aktualizovat

Dynamické směrování – izolované směrování

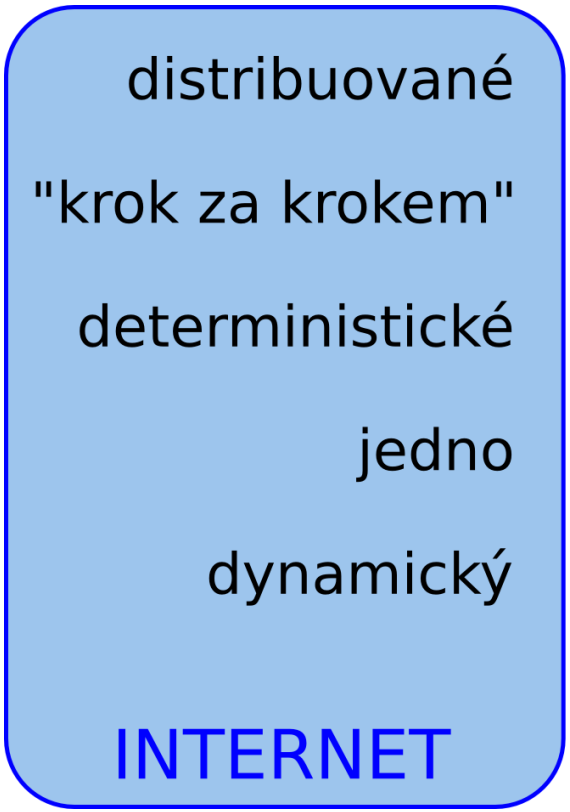
- neposílají se žádné informace o stavu sítě, každý se rozhoduje sám za sebe
- příklady:
  - *náhodná procházka* – paket pošle do náhodně vybrané linky
    - vysoká robustnost
  - *„horký brambor“ (hot potatoe)* – paket pošle do linky s nejkratší frontou
    - forma náhodné procházky ($\Rightarrow$ vysoká robustnost)
  - *záplava (flooding)* – paket pošle do všech linek kromě té, po níž přišel
    - enormní zátěž sítě – obrovská režie, nutno řešit cykly
    - mimořádně robustní – pokud cesta existuje, vždy ji najde
    - dokonce tu nejlepší možnou (zkouší totiž všechny)
  - *zpětné učení (backward learning)* – učí se z procházejících paketů
    - do paketu se zapisuje vzdálenost, kterou urazil
    - směrovač se dozví, že příchozí linkou vede cesta k odesílateli nanejvýš dané délky

Dynamické směrování – distribuované směrování

- směrovací informace si vyměňují sousedé či malé skupiny směrovačů
- na základě periodicky šířených informací se (podle určitého algoritmu) vypočítávají mapy sítě
- mezi směrovači musí být dohoda o implementaci určitého *směrovacího algoritmu*

- dostatečně pružné a robustní, vhodné i pro rozlehlé sítě
- standardní přístup ke směrování v síti Internet

Směrování – další možná členění



distribuované	vs.	centralizované
"krok za krokem"	vs.	zdrojové
deterministické	vs.	stochastické
jedno	vs.	více cestné
dynamický	vs.	statický výběr cest

Struktura přednášky

Směrovací algoritmy – funkce

- zprostředkovávají funkcionalitu směrování
  - proces vytvoření a údržby směrovacích tabulek
    - zahrnuje výběr komunikační cesty
  - vlastní doručení dat
- rozdělení dle *okamžiku* rozhodování:
  - při uzavírání spojení (= vytváření okruhu)
    - spojované služby, virtuální kanály
  - při příchodu paketu
    - nespojované služby, datagramy
- rozdělení dle *místa* rozhodování:
  - jediný uzel $\Rightarrow$ centralizované algoritmy
  - každý uzel $\Rightarrow$ distribuované algoritmy

- definice přesných pravidel komunikace a formátu zpráv nesoucích směrovací informace (pro určitý algoritmus) $\Rightarrow$ *směrovací protokol*

Směrovací algoritmy – požadované vlastnosti

Žádané vlastnosti směrovacího algoritmu:

- správnost
- jednoduchost
- efektivita a škálovatelnost
  - minimalizace množství řídících informací ($\approx 5\%$ provozu!)
  - minimalizace velikosti směrovacích tabulek
- robustnost a stabilita
  - nezbytný je distribuovaný algoritmus
- spravedlivost (fairness)
- optimálnost
  - *„Co je to nejlepší cesta?“*

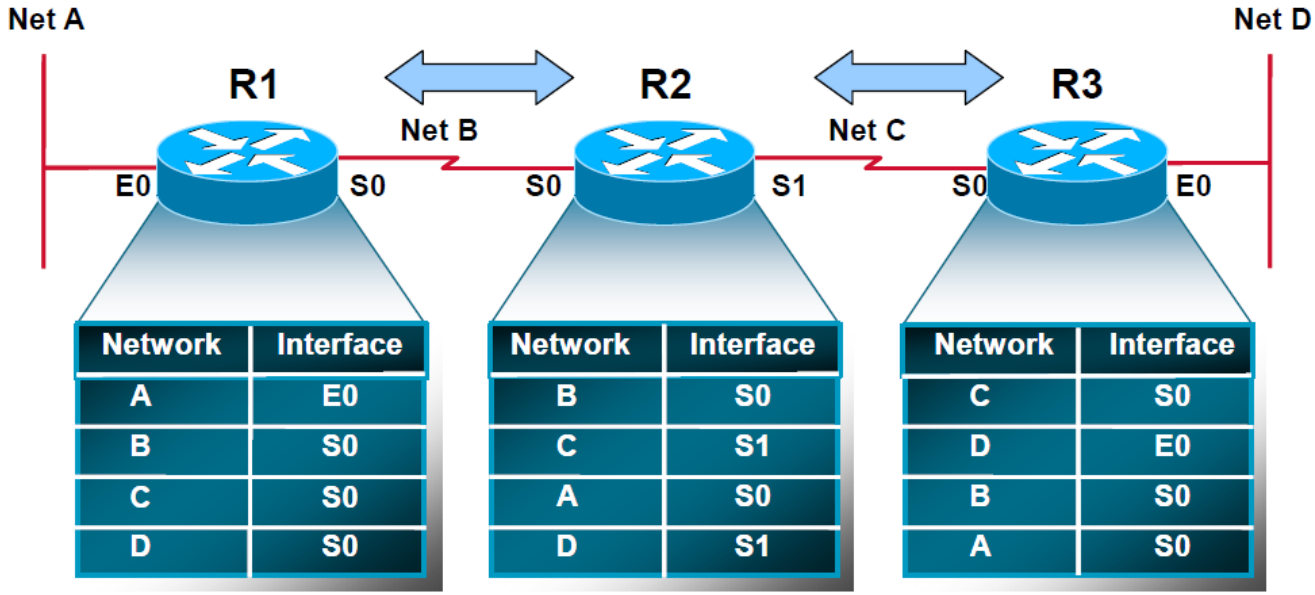
Struktura přednášky

Distribuované směrování – základní přístupy

Třídy distribuovaných směrovacích protokolů (dle charakteru směrovací informace):

- *Distance Vector (DV)* – Bellman-Fordův algoritmus
  - sousední směrovače si v pravidelných intervalech či při topologické změně (např. výpadek zařízení) vyměňují kompletní kopie svých směrovacích tabulek
  - na základe obsahu přijatých updatů si pak doplňují nové informace a inkrementují své *distance vektor číslo*
    - metrika udávající počet hopů k dané síti
  - čili *„všechny informace jen svým sousedům“*
- *Link State (LS)*
  - jednotlivé směrovače si zasílají pouze informace o stavu linek, na něž jsou bezprostředně připojeny
  - udržují si tak kompletní informace o topologii dané sítě – zařízení jsou si vědoma všech ostatních zařízení na síti
  - pak se počítá nejkratší cesta
  - čili *„informace o svých sousedech všem“*

Distance Vector I.



- směrovač si udržuje všechny známé routy v tabulce ve formě uspořádaných trojic (N, G, D), kde:
  - N ... cílová síť
  - G ... adresa následujícího směrovače
  - D ... vzdálenost do cílové síťě (metrika)
- tabulky se upravují tak, aby se směrovalo nejkratší cestou
- problémy: pomalá konvergence, příliš mnoho režijních dat

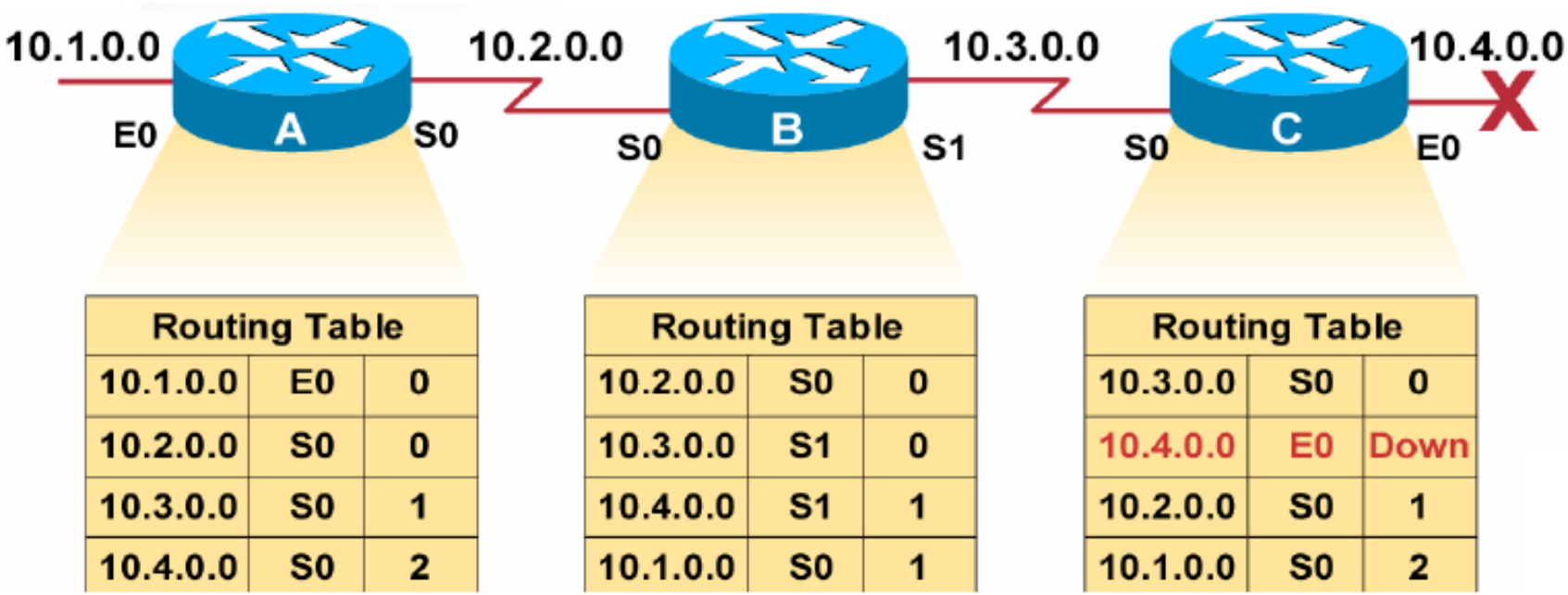
Distance Vector II.

Algoritmus

- Předpoklad:
  - každý směrovač zná pouze cestu a cenu ke svým sousedům
- Cíl:
  - v každém směrovači směrovací tabulka pro každý cíl
- Idea:
  - řekni sousedům svou představu směrovací tabulky
- Inicializace:
  - sousedé: známá cena
    - Distance Vector $= < cil, cena >$
  - ostatní: nekonečno
    - resp. hodnota definovaná jako nekonečno (pro RIP např. 16)
- Aktualizace:
  - pokud je cesta v získaném DV zvětšená o cenu cesty k danému sousedovi lepší než stávající uložená, aktualizuj tabulku

Distance Vector III.

Ilustrace problému pomalé konvergence



Routing Table		
10.1.0.0	E0	0
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S0	1
10.4.0.0	S0	2

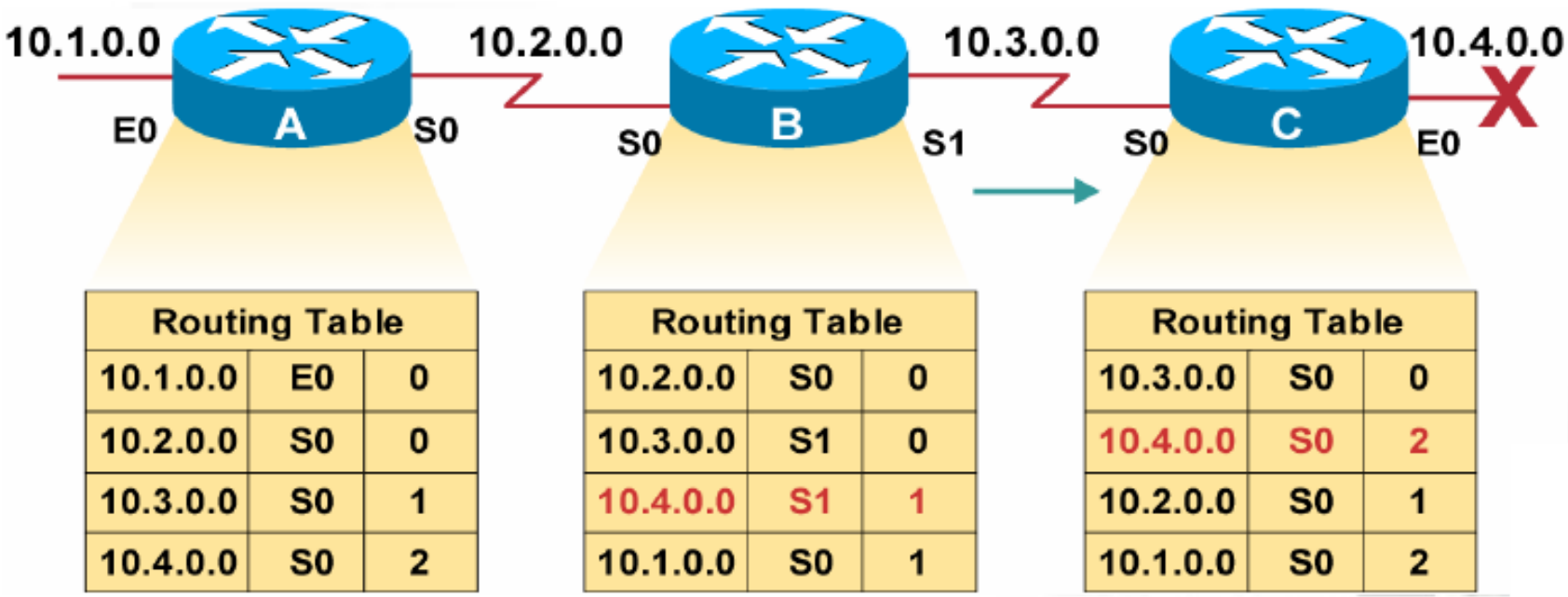
Routing Table		
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S1	0
10.4.0.0	S1	1
10.1.0.0	S0	1

Routing Table		
10.3.0.0	S0	0
10.4.0.0	E0	Down
10.2.0.0	S0	1
10.1.0.0	S0	2

- pomalá konvergence zapříčiní vznik nesprávných údajů ve směrovacích tabulkách

Distance Vector III.

Ilustrace problému pomalé konvergence



Routing Table		
10.1.0.0	E0	0
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S0	1
10.4.0.0	S0	2

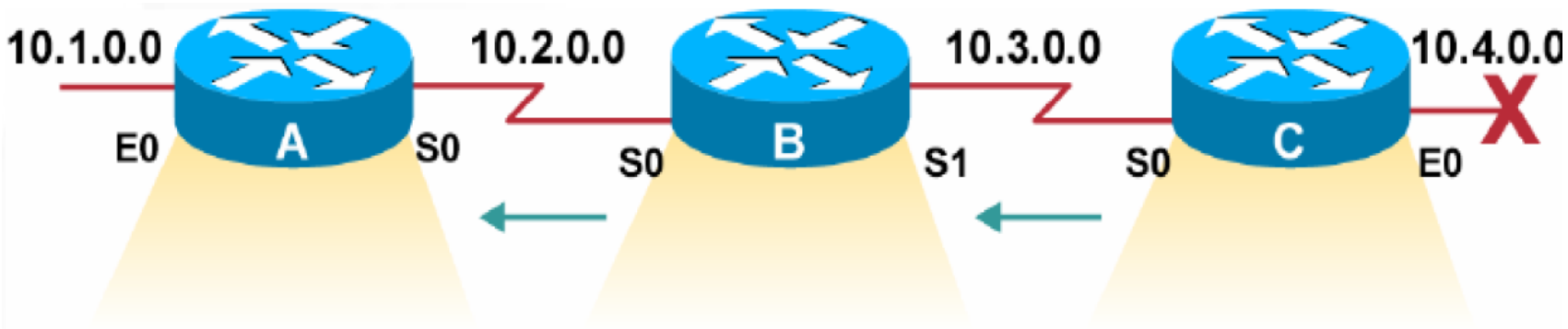
Routing Table		
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S1	0
10.4.0.0	S1	1
10.1.0.0	S0	1

Routing Table		
10.3.0.0	S0	0
10.4.0.0	S0	2
10.2.0.0	S0	1
10.1.0.0	S0	2

- směrovač C usoudí, že nejlepší cesta do sítě 10.4.0.0 je přes směrovač B

Distance Vector III.

Ilustrace problému pomalé konvergence



Routing Table		
10.1.0.0	E0	0
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S0	1
10.4.0.0	S0	4

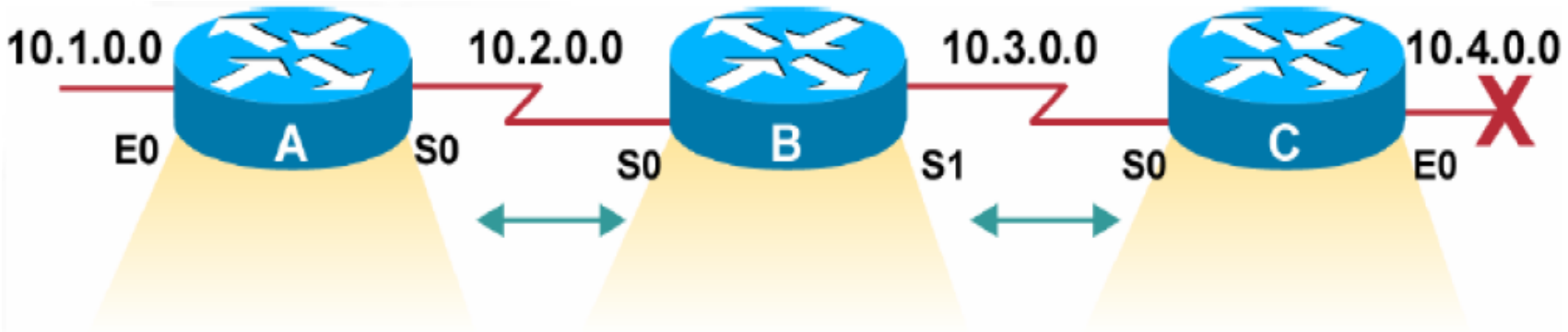
Routing Table		
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S1	0
10.4.0.0	S1	3
10.1.0.0	S0	1

Routing Table		
10.3.0.0	S0	0
10.4.0.0	S0	2
10.2.0.0	S0	1
10.1.0.0	S0	2

- směrovače B a A si opraví svojí směrovací tabulku – chybně

Distance Vector III.

Ilustrace problému pomalé konvergence



Routing Table		
10.1.0.0	E0	0
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S0	1
10.4.0.0	S0	6

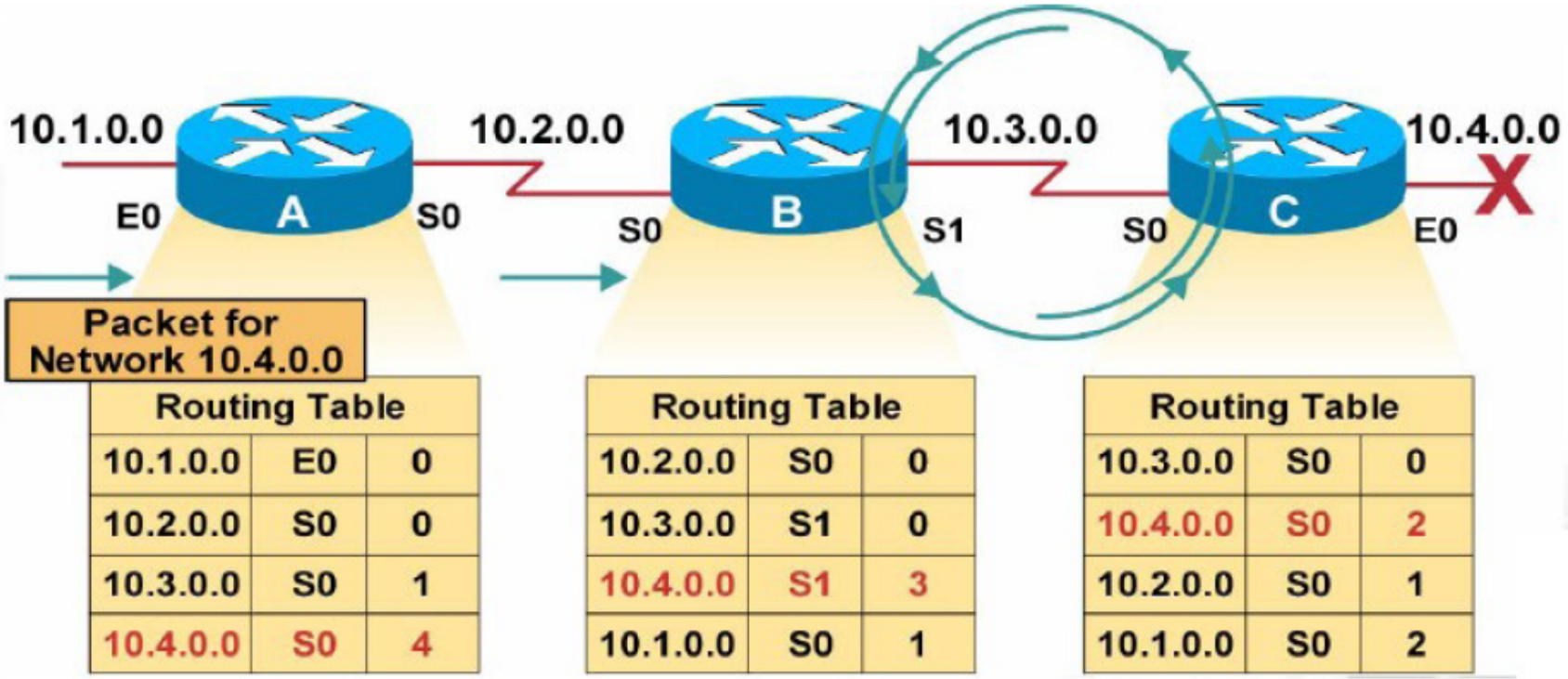
Routing Table		
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S1	0
10.4.0.0	S1	5
10.1.0.0	S0	1

Routing Table		
10.3.0.0	S0	0
10.4.0.0	S0	4
10.2.0.0	S0	1
10.1.0.0	S0	2

- metrika pro síť 10.4.0.0 roste do nekonečna (v rámci RIP do 16)

Distance Vector III.

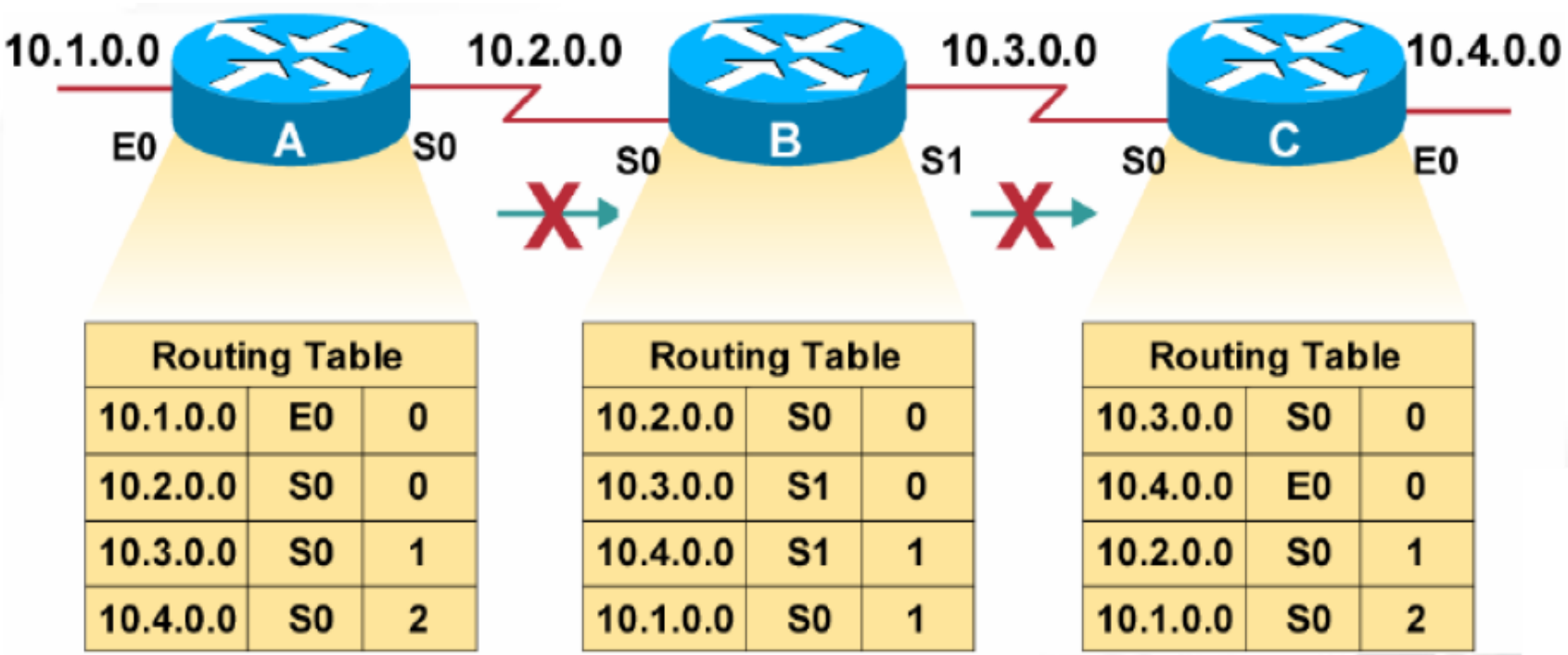
Ilustrace problému pomalé konvergence



- Důsledek: vznik směrovací smyčky
  - paket pro síť 10.4.0.0 skáče mezi routery B a C

Distance Vector III.

Ilustrace problému pomalé konvergence



Routing Table		
10.1.0.0	E0	0
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S0	1
10.4.0.0	S0	2

Routing Table		
10.2.0.0	S0	0
10.3.0.0	S1	0
10.4.0.0	S1	1
10.1.0.0	S0	1

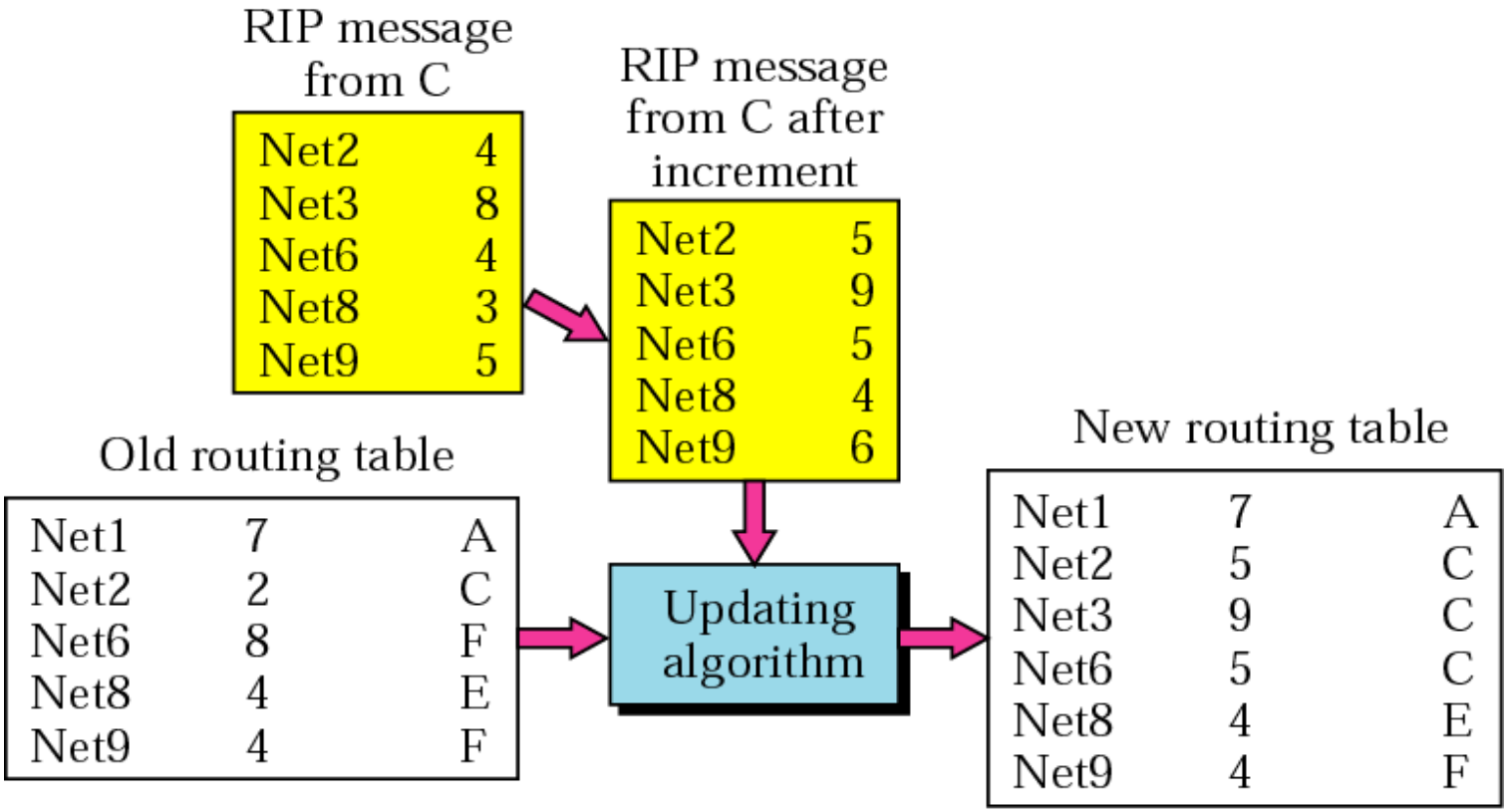
Routing Table		
10.3.0.0	S0	0
10.4.0.0	E0	0
10.2.0.0	S0	1
10.1.0.0	S0	2

- Řešení: *dělení horizontu*
  - směrovač nesděluje cestu zpět uzlu, od kterého se o ní dozvěděl
  - problém zůstává ve složitějších topologiích (navržena řada rozšíření)

Distance Vector IV. – protokol RIP I.

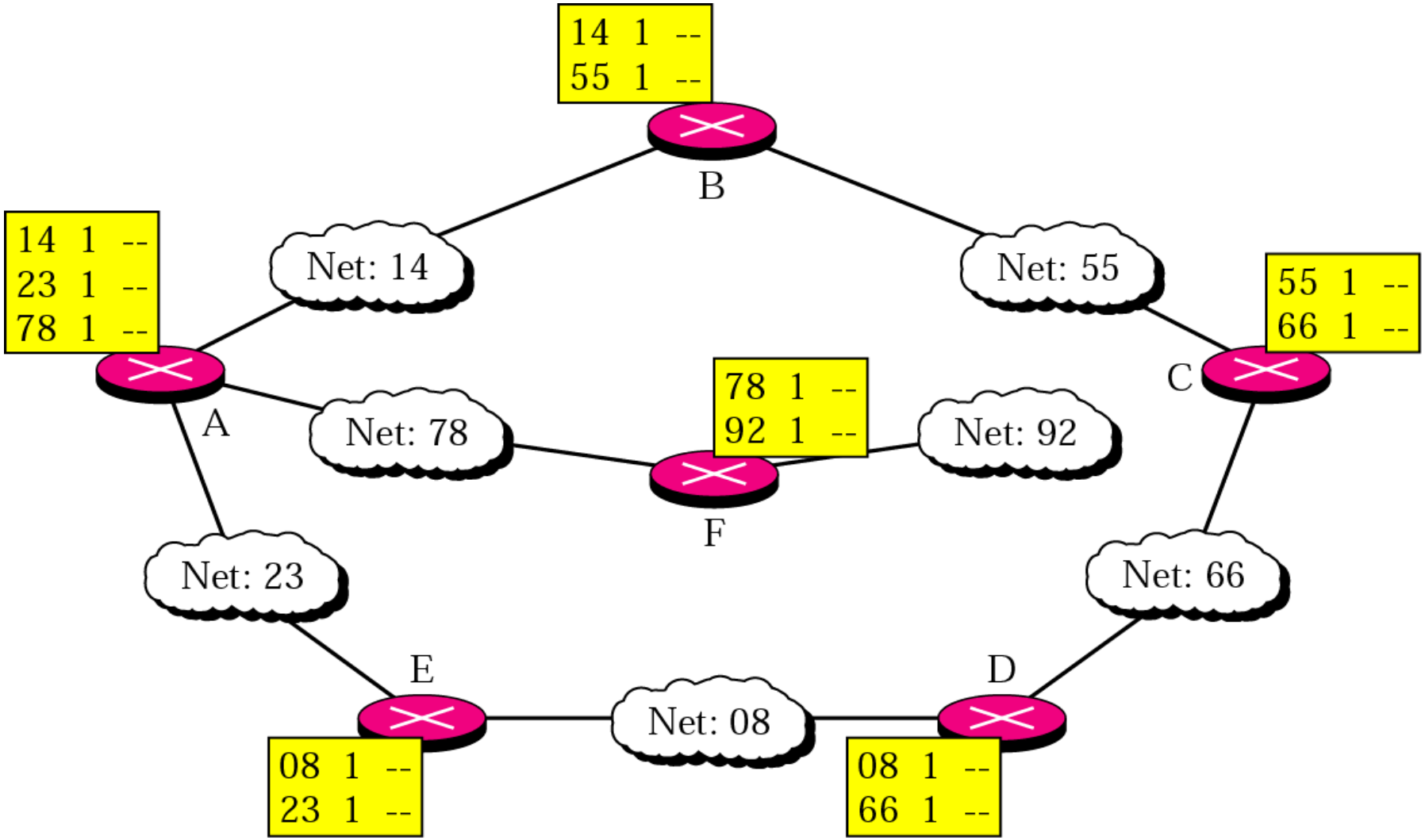
- hlavní představitel DV směrování
  - RIPv1 (RFC 1058)
  - RIPv2 (RFC 1723) – přidává např. autentizaci směrovacích informací
- sítě identifikovány s využitím mechanismu CIDR
- jako metrika se využívá počet hopů
  - přenos paketu mezi 2 sousedními směrovači má délku 1
  - nekonečno $= 16$
    - $\Rightarrow$ nelze použít pro sítě s minimálním počtem hopů mezi libovolnými dvěma směrovači > 15
- směrovače zasílají informaci každých 30 sekund
  - triggered update při změně stavu hrany
  - časový limit 180s (detekce chyb spojení)
- použití:
  - vhodné pro malé sítě a stabilní linky
  - není příliš vhodný pro redundantní sítě

Distance Vector IV. – protokol RIP II.



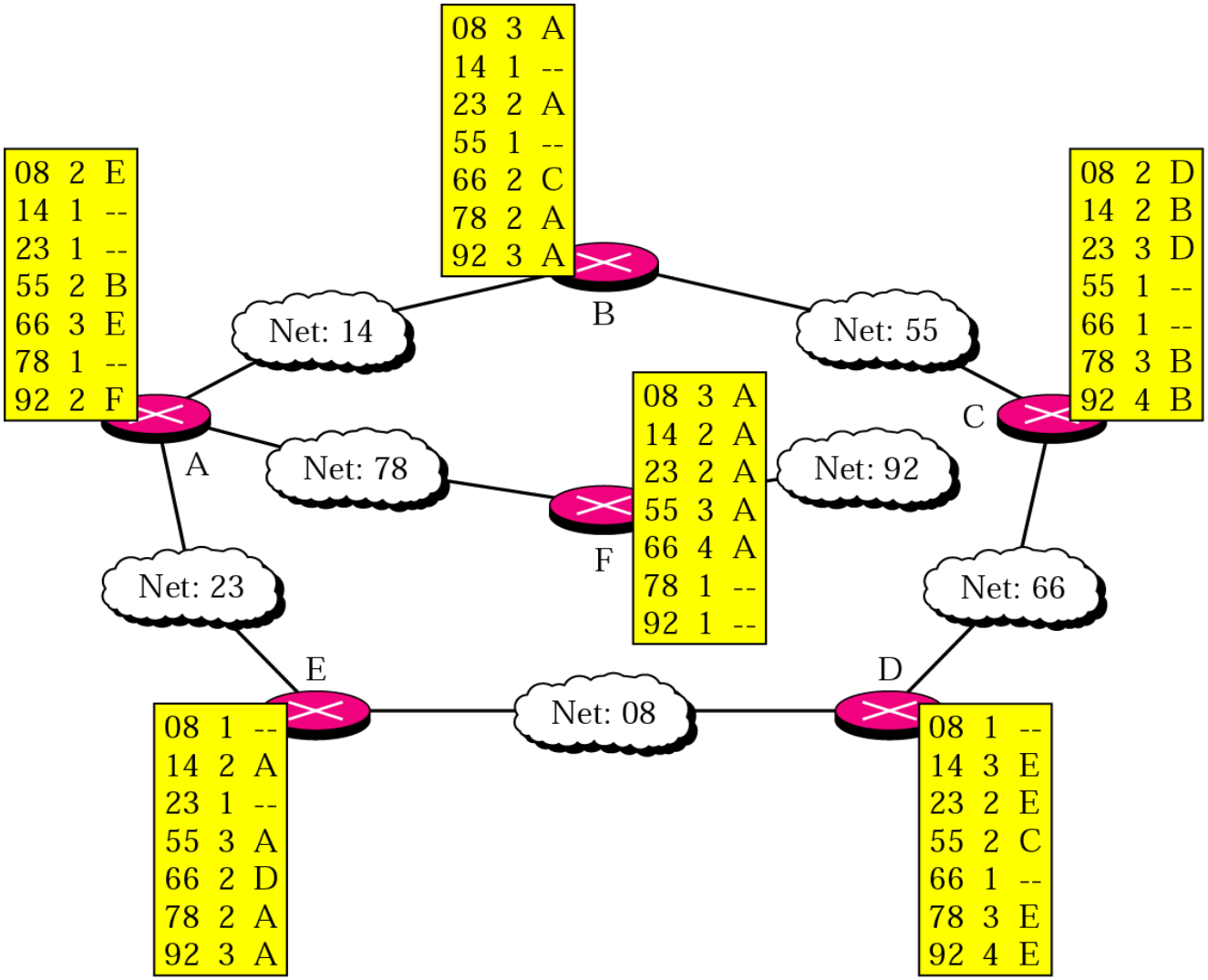
Net1: No news, do not change
Net2: Same next hop, replace
Net3: A new router, add
Net6: Different next hop, new hop count smaller, replace
Net8: Different next hop, new hop count the same, do not change
Net9: Different next hop, new hop count larger, do not change

Distance Vector IV. – protokol RIP III.



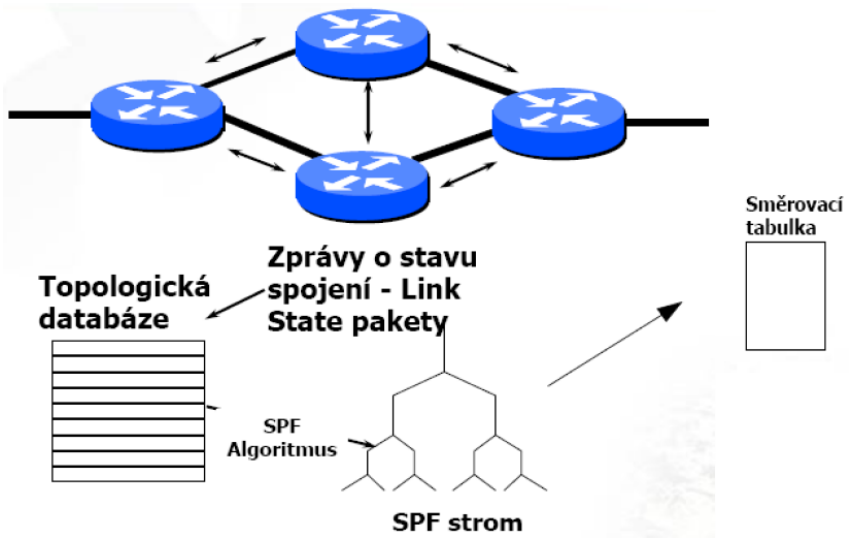
Obrázek: RIP – příklad: iniciální stav tabulek.

Distance Vector IV. – protokol RIP IV.



Obrázek: RIP – příklad: finální stav tabulek.

Link State I.



- směrovače si zasílají pouze informaci o stavu linek, na něž jsou bezprostředně připojeny
- získají tím kompletní mapu sítě
  - pak si počítají nejkratší cesty (např. s využitím Dijkstrova algoritmu)
    - při každé změně stavu linek
- směrovače testují pouze dosažitelnost svých bezprostředních sousedů
- výhoda: zaručená a rychlá konvergence, vhodné i pro rozsáhlé sítě
- nevýhoda: složitější algoritmus $\Rightarrow$ větší nároky na CPU a paměť směrovače

Link State II.

Algoritmus

- Předpoklad:
  - každý směrovač zná pouze cestu a cenu ke svým sousedům
- Cíl:
  - v každém směrovači směrovací tabulka pro každý cíl
- Idea:
  - šíří se topologie, cesty si počítají směrovače samy
    - fáze 1: šíření topologie (broadcast)
    - fáze 2: výpočet nejkratší cesty – (Dijkstra)
  - směrovače si udržují databázi stavů linek a periodicky posílají LS pakety svým sousedům
    - obsah LS paketu: identifikátor uzlu, cena spojů k sousedům, pořadové číslo, doba platnosti
    - každý směrovač přeposílá LS pakety dále (kromě toho, od nějž informaci dostal)

Link State III. – Výpočet nejkratších cest

Dijkstrův algoritmus

„klasický“ algoritmus hledaní nejkratší cesty

- hledá nejkratší cesty z jednoho vrcholu do všech ostatních

Nechť

- N je množina všech uzlů v grafu (síti)
- $l(i, j)$ označuje nezápornou cenu hrany (spoje (i, j))
- s je aktuální (zdrojový) uzel
- M množina uzlů, které již byly navštíveny
- $C(n)$ cena cesty z s do n; ∞ pokud cesta neexistuje

Link State III. – Výpočet nejkratších cest

Dijkstrův algoritmus – pseudokód

```
for each vertex v in Graph:          # Initializations
    dist[v] := infinity ;            # Unknown distance function from source to v
    previous[v] := undefined ;       # Previous node in optimal path from source
end for ;

dist[source] := 0 ;                  # Distance from source to source
Q := the set of all the nodes in Graph ;   # All nodes in the graph are unoptimized - thus are in Q

while Q is not empty:
    u := vertex in Q with the smallest dist[] ;
    if dist[u] = infinity:
       break ;                       # all remaining vertices are inaccessible from source
    fi ;
    remove u from Q ;
    for each neighbor v of u:        # where v has not yet been removed from Q
        alt := dist[u] + dist_between(u,v) ;
        if alt < dist[v]:            # Relax (u,v,a)
           dist[v] := alt ;
           previous[v] := u ;
        fi ;
    end for ;
end while ;
```

- ilustrace výpočtu:
  http://www.unf.edu/~wkloster/foundations/DijkstraApplet/DijkstraApplet.htm
- animace: **http://www.cse.yorku.ca/~aaw/HFHuang/DijkstraStart.html**
- více viz *PA165: Grafy a sítě*

Link State IV. – protokol OSPF

- *Open Shortest Path First*
- nejpoužívanější LS protokol současnosti
- metrika: *cena (cost)*
  - číslo (v rozsahu 1 až 65535) přiřazené ke každému rozhraní směrovače
  - čím menší číslo, tím má cesta lepší metriku (bude tedy preferována)
  - standardně je ke každému rozhraní přiřazena cena automaticky odvozená z šířky pásma daného rozhraní
    - $cost = 100000000/bandwidth$ (bw v bps)
    - možno ručně měnit
- rozšíření:
  - autentizace zpráv
  - směrovací oblasti – další úroveň hierarchie
  - load-balancing – více cest se stejnou cenou

Link State vs. Distance Vector

Link State

- *Složitost:*
  - každý uzel musí znát cenu každé linky v sítí $\Rightarrow$ $O(nE)$ zpráv
  - změnu ceny některé z linek potřeba vypropagovat na *všechny* uzly
- *Rychlost konvergence:*
  - $O(n^2)$ alg., zasílá $O(nE)$ zpráv
  - trpí na oscilace
- *Robustnost:*
  - špatně fungující/kompromitovaný směrovač může šířit nesprávné informace jen o k němu přímo připojených linkách
  - každý směrovač si přepočítává směrovací tabulky sám za sebe $\Rightarrow$ odděleno od vlastního šíření informací $\Rightarrow$ forma robustnosti
- *Použití:*
  - vhodné i pro rozsáhlé sítě

Distance Vector

- *Složitost:*
  - po změně ceny některé z linek je toto zapotřebí vypropagovat jen *nejbližšímu sousedovi*; dále se propaguje jen tehdy, pokud daná změna znamená změnu stromu nejkratších cest
- *Rychlost konvergence:*
  - může konvergovat pomaleji než LS
  - problémy se směrovacími cykly, *count-to-infinity* problém
- *Robustnost:*
  - nesprávný výpočet je postupně šířen sítí $\Rightarrow$ může znamenat „zmatení“ ostatních směrovačů a nesprávně vypočtené směrovací tabulky
- *Použití:*
  - vhodné jen pro menší sítě

Struktura přednášky

Kde se nyní nacházíme?

- máme vybudovaný Internet
  - složený z mnoha internetů
- umíme identifikovat jednotlivé sítě/uzly
  - s využitím notace CIDR
  - cesty ve směrovacích tabulkách agregovány
- umíme směrovat data mezi sítěmi
  - libovolné dva uzly mohou komunikovat
  - pro směrování využit LS nebo DV algoritmus

- *Kde je problém?*
  - obrovský rozsah Internetu $\Rightarrow$ nutnost správy obrovských směrovacích tabulek
  - problém se správou – „Kdo je zodpovědný za který kus sítě?“

Původní představy aneb Jak běžel „směrovací“ čas I.

- v počátcích velmi malé sítě
  - každý počítač na síti zná cestu ke všem ostatním
    - aneb „každý uzel zná celý Internet“
  - pro rozsáhlejší sítě neúnosné (rozsah tabulek, udržování vzájemné konzistence)
- přesun směrovací znalosti na hraniční uzly sítí (brány/směrovače)
  - aneb „každá brána zná celý Internet“
  - pro rozsáhlejší sítě stále neúnosné (rozsah tabulek, udržování vzájemné konzistence)
- $\Rightarrow$ *hierarchické členění Internetu*
  - každá brána zná cesty jen do k ní přidružených podsítí (bezprostřední okolí); pro ostatní využita implicitní (default) brána
  - lokální působnost směrovacích informací (menší rozsah tabulek, jen lokální udržování vzájemné konzistence)
  - na nejvyšší úrovni (jediná) páteřní síť
  - páteřní brány musí mít „úplnou“ znalost celého Internetu

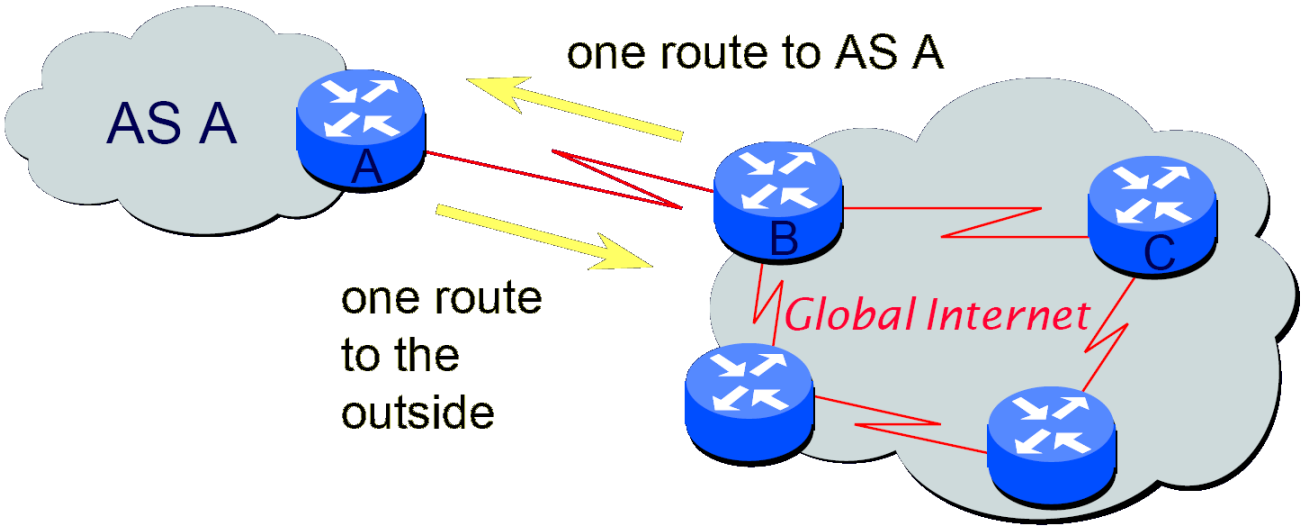
Původní představy aneb Jak běžel „směrovací“ čas II.

- nedostatky prvotního návrhu hierarchického členění:
  - organizace předávání směrovacích informací páteřním branám
    - „Jak je propagovat ze „zanořených“ sítí obecně náležejících různým organizacím?“
  - nutnost využívání jednotných mechanismů směrování v rámci celé sítě
    - včetně stejné metriky
- $\Rightarrow$ rozšíření hierarchického členění na koncepci tzv. **autonomních systémů (AS)**
  - *základní myšlenka:* vzájemně propojené sítě, které spadají pod společnou správu, budou tvořit jediný autonomní systém, za který plně odpovídá jeho provozovatel
  - zůstává nutnost jednotného způsobu vzájemného předávání směrovacích informací mezi jednotlivými autonomními systémy
  - $\Rightarrow$ v rámci svého AS má každý možnost zajistit si přenos a aktualizaci směrovacích údajů podle svého, ale navenek musí všichni postupovat jednotně

Autonomní systémy

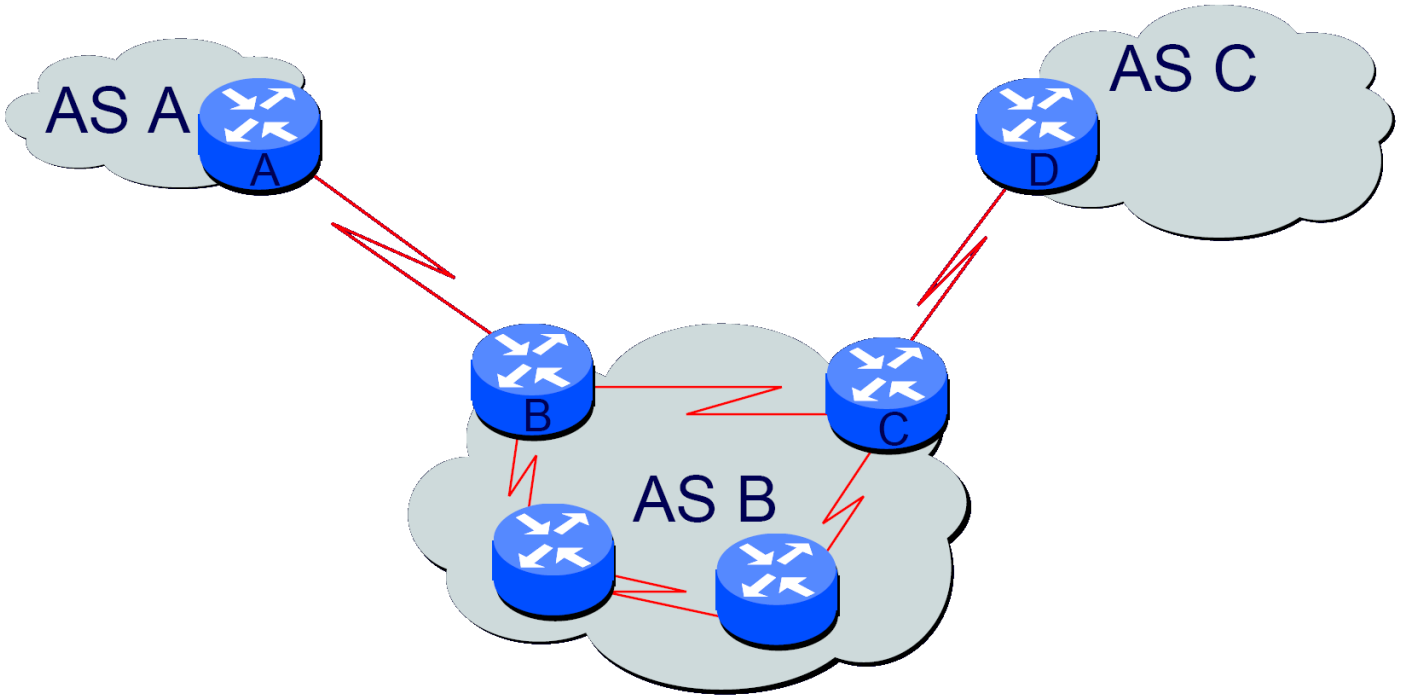
- cílem rozdělení Internetu na *autonomní systémy* je
  - snížení směrovací režie
    - jednodušší směrovací tabulky, snížení množství vyměňovaných směrovacích informací, atp.
  - zjednodušení správy celé sítě
    - správa jednotlivých internetů různými organizacemi
- autonomní systémy = domény
  - každému AS/doméně přiřazen 16bitový identifikátor
    - *Autonomous System Number (ASN)* – RFC 1930
    - přiřazuje organizace *ICANN (Internet Corporation For Assigned Names and Numbers)*
  - odpovídají administrativním doménám
    - sítě a směrovače uvnitř jednoho AS spravovány jednou organizací
    - např. CESNET, PASNET, ...
  - dělení v závislosti na způsobu připojení AS do sítě:
    - *Stub AS*
    - *Multihomed AS*
    - *Transit AS*

Autonomní systémy – *Stub AS*



- autonomní systém A je tzv. *stub AS*
  - je připojen pouze k jednomu dalšímu AS
- směrovač A (tzv. *hraniční směrovač*) je v rámci AS A výchozí směrovač pro všechny sítě ležící mimo AS A

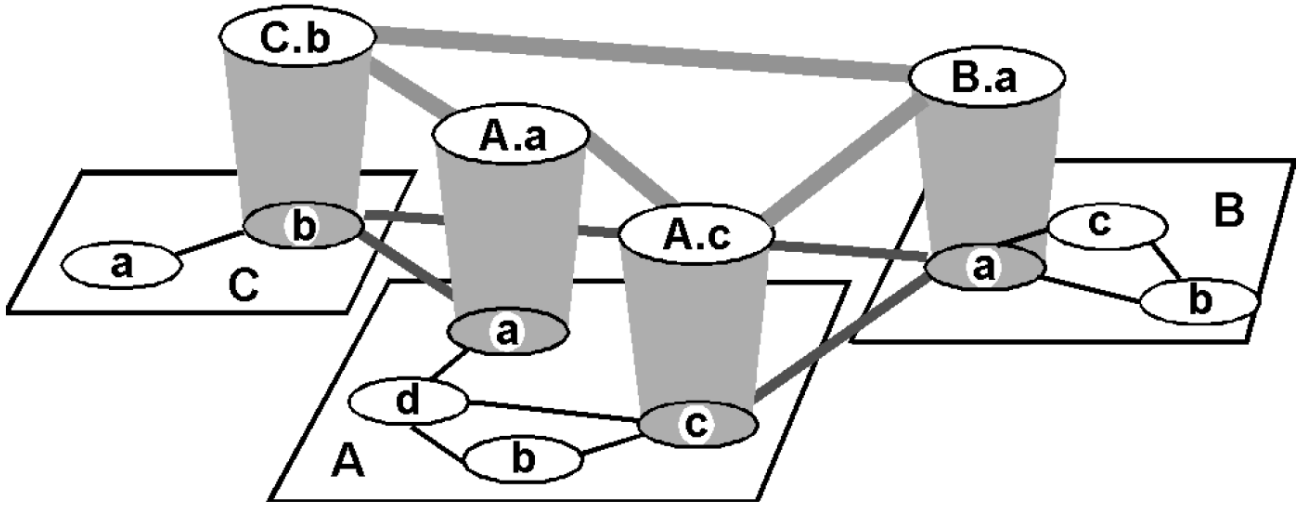
Autonomní systémy – *Multihomed* a *Transit AS*



- autonomní systém B je
  - *multihomed AS*, pokud je připojen k nejméně dvěma dalším AS, mezi kterými však neumožňuje přenášení provozu
  - *transit AS*, pokud je připojen k nejméně dvěma dalším AS, mezi kterými umožňuje přenášení provozu (skrze své LANs)

Autonomní systémy – směrování I.

- oddělené směrování z důvodů škálovatelnosti
  - intradoménové – *interior routing*
    - směrování uvnitř AS
    - plně pod kontrolou správce AS
    - tzv. *Interior Gateway Protocols (IGP)* (např. RIP, OSPF)
  - interdoménové/mezidoménové – *exterior routing*
    - směrování mezi AS
    - tzv. *Exterior Gateway Protocols (EGP)* (např. EGP, BGP-4)
  - nutná spolupráce interior a exterior směrovacích protokolů

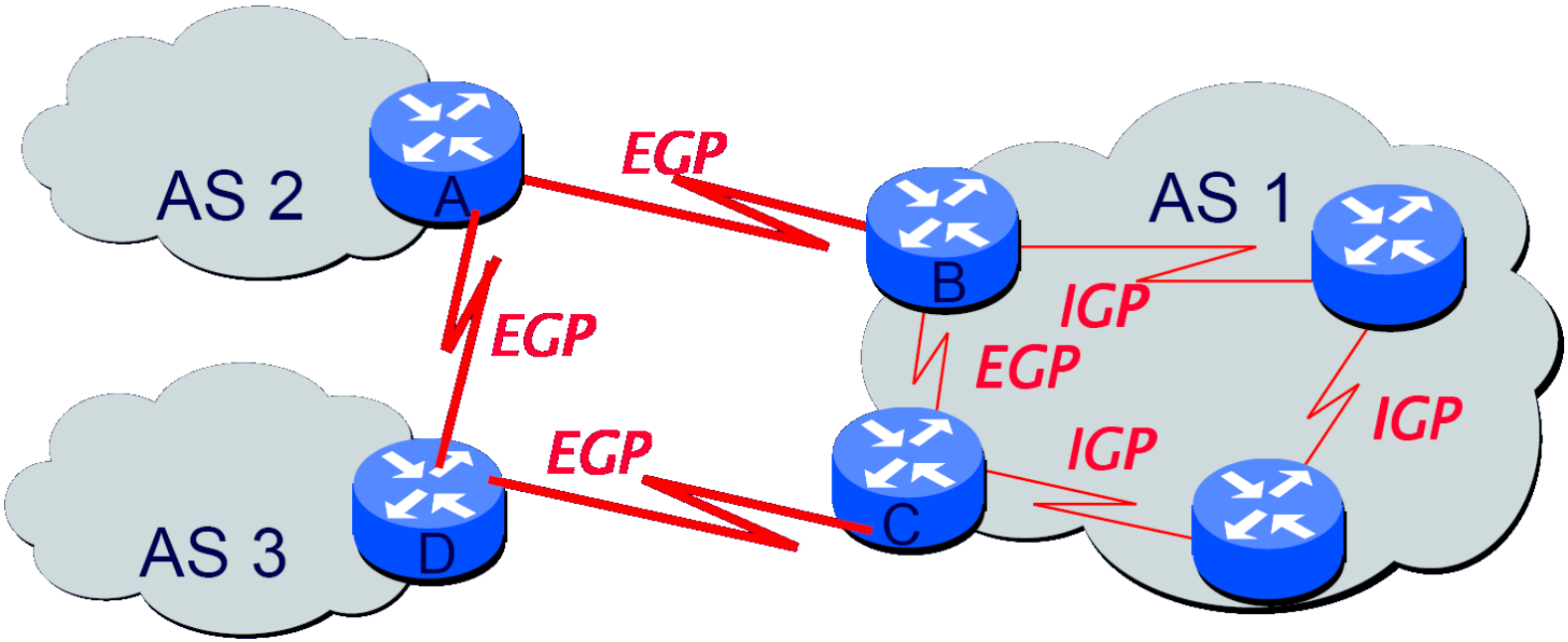


Autonomní systémy – směrování II.

- interní směrovače (směrovače uvnitř AS)
  - znají cestu do všech podsítí uvnitř AS
  - mohou využít implicitní (default) cesty
    - skrze hraniční směrovače
- *hraniční směrovače (Border Routers)*
  - sumarizují a zveřejňují interní cesty
  - aplikují směrovací „pravidla“ (*policy*)
- jádro sítě nepoužívá implicitní cesty
  - $\Rightarrow$ směrovače musí znát cesty ke **všem** sítím

- Proč rozlišovat mezi směrováním uvnitř AS a mezi AS?
  - uvnitř AS hraje hlavní roli výkon
  - mezi AS hrají hlavní roli politiky (typicky jde o peníze) a škálovatelnost (velikosti tabulek)

Autonomní systémy – mezidoménové směrování



- AS1 propojen s AS2 a AS3
- směrovací „pravidla“ (*policies*) AS1 mohou zakazovat, aby se v případě výpadku linky mezi AS2 a AS3 směrovalo mezi AS2 a AS3 skrze AS1

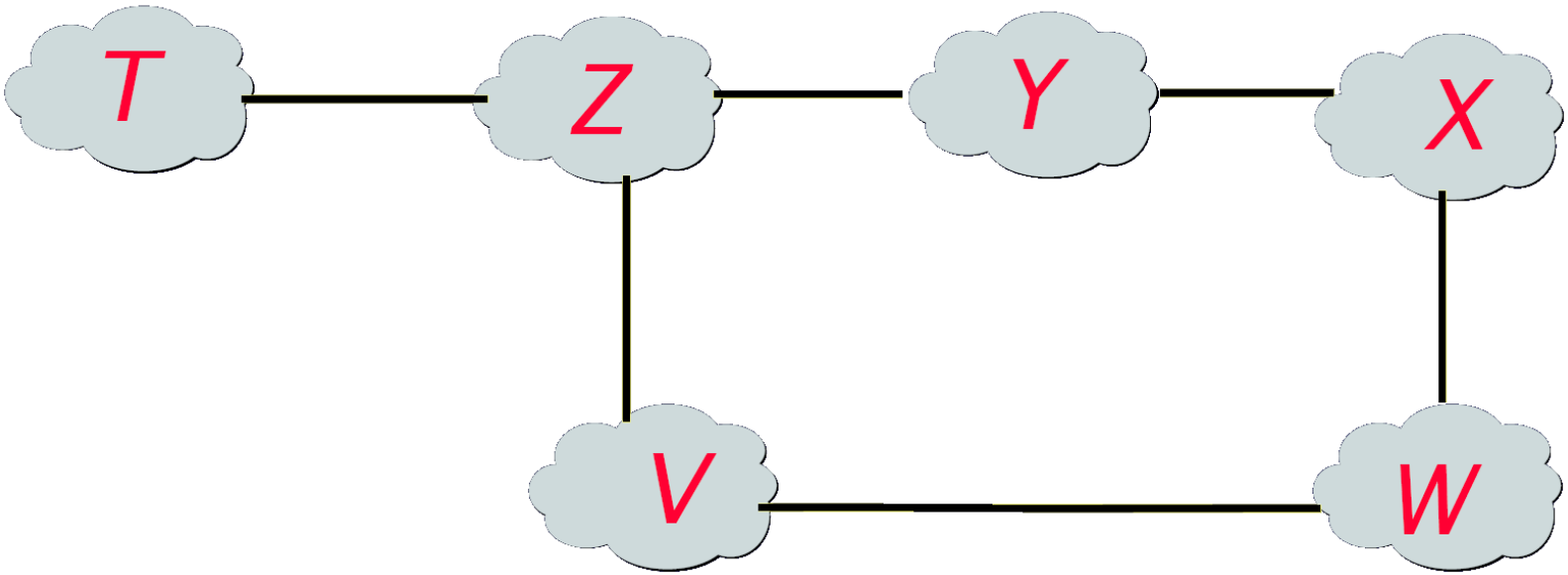
Autonomní systémy – mezidoménové směrování

Směrovací pravidla

- volba cesty není nezávislá na lokálních požadavcích
  - obchodní rozhodnutí
- lokální rozhodnutí definují
  - výběr cesty
  - zveřejnění interních podsítí
- *důsledky:*
  - kombinace nejlepších lokálních pravidel nemusí představovat globální optimum
  - asymetrie cest

Autonomní systémy – mezidoménové směrování

Směrovací pravidla – ilustrace I.

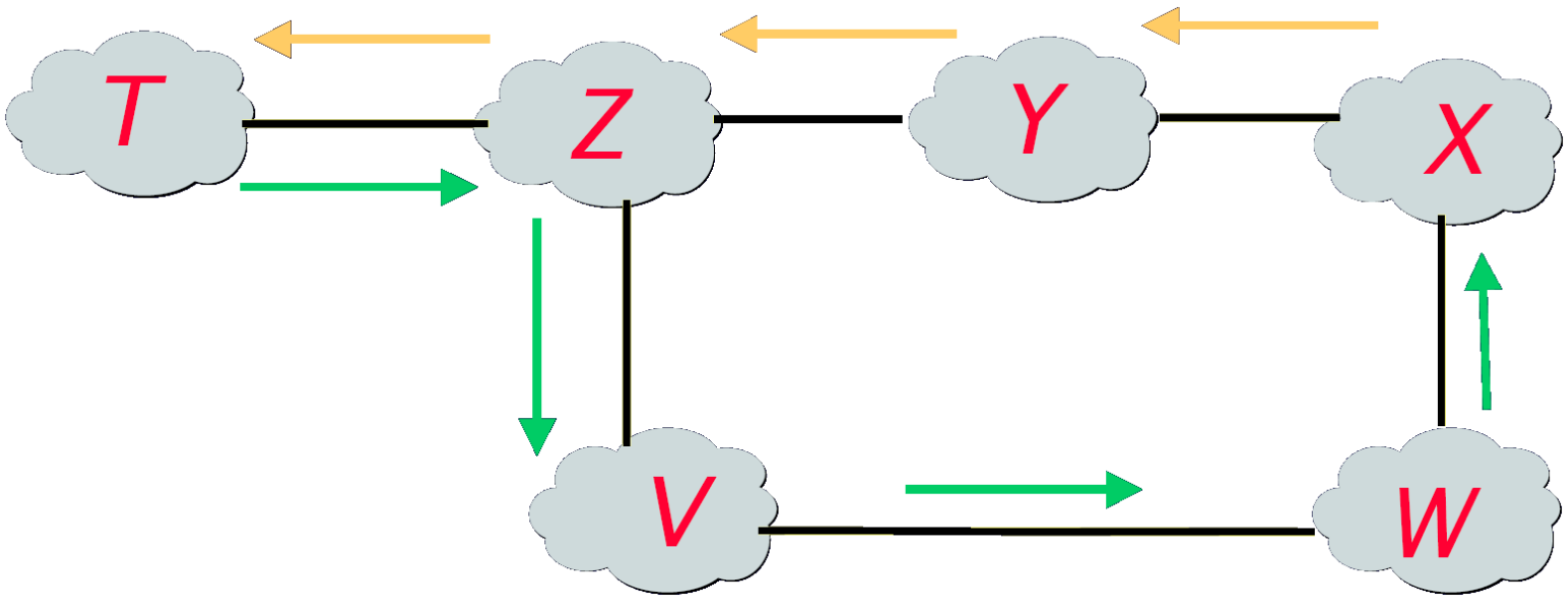


Předpokládejme, že AS Z chce oznámit AS T cestu $Z \rightarrow Y \rightarrow X$

- tato cesta může být AS T akceptována jen tehdy, pokud AS Y umožňuje přenos jeho provozu

Autonomní systémy – mezidoménové směrování

Směrovací pravidla – ilustrace II.

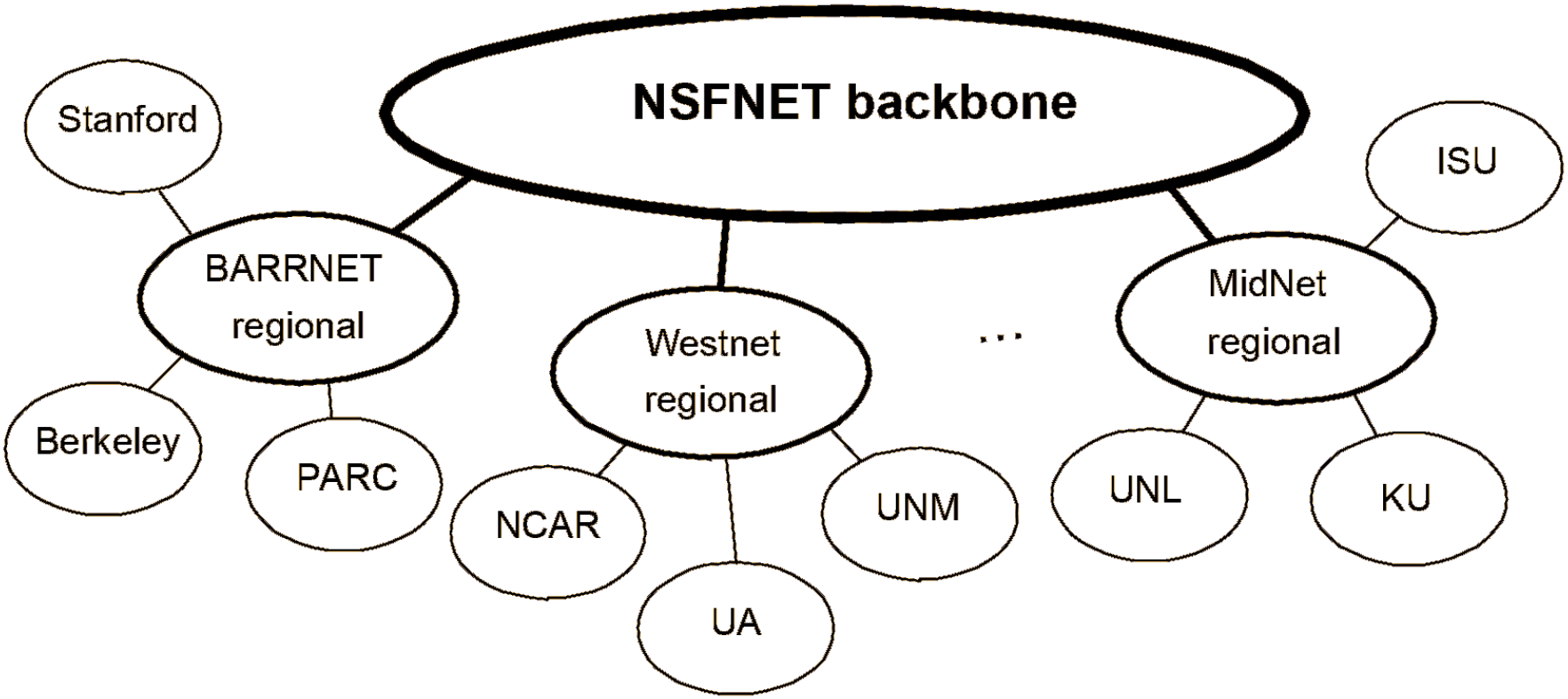


- jestliže AS Y neumožní přenos provozu AS T, ale umožní přenos provozu AS X, budou data mezi AS T a AS X přenášena asymetricky

Mezidoménové směrování – protokol EGP I.

- *Exterior Routing Protocol*
- první protokol mezidoménového směrování (navržen v roce 1983)
- využívá DV přístup
  - distance vektory kombinují cesty a pravidla
- cílem dosažitelnost, nikoliv efektivita
- navržen pro stromovou strukturu Internetu
  - přílišné zjednodušení
    - nepodporuje redundanci, neumí se vypořádat s cykly
  - $\Rightarrow$ již se nepoužívá

Mezidoménové směrování – protokol EGP II.

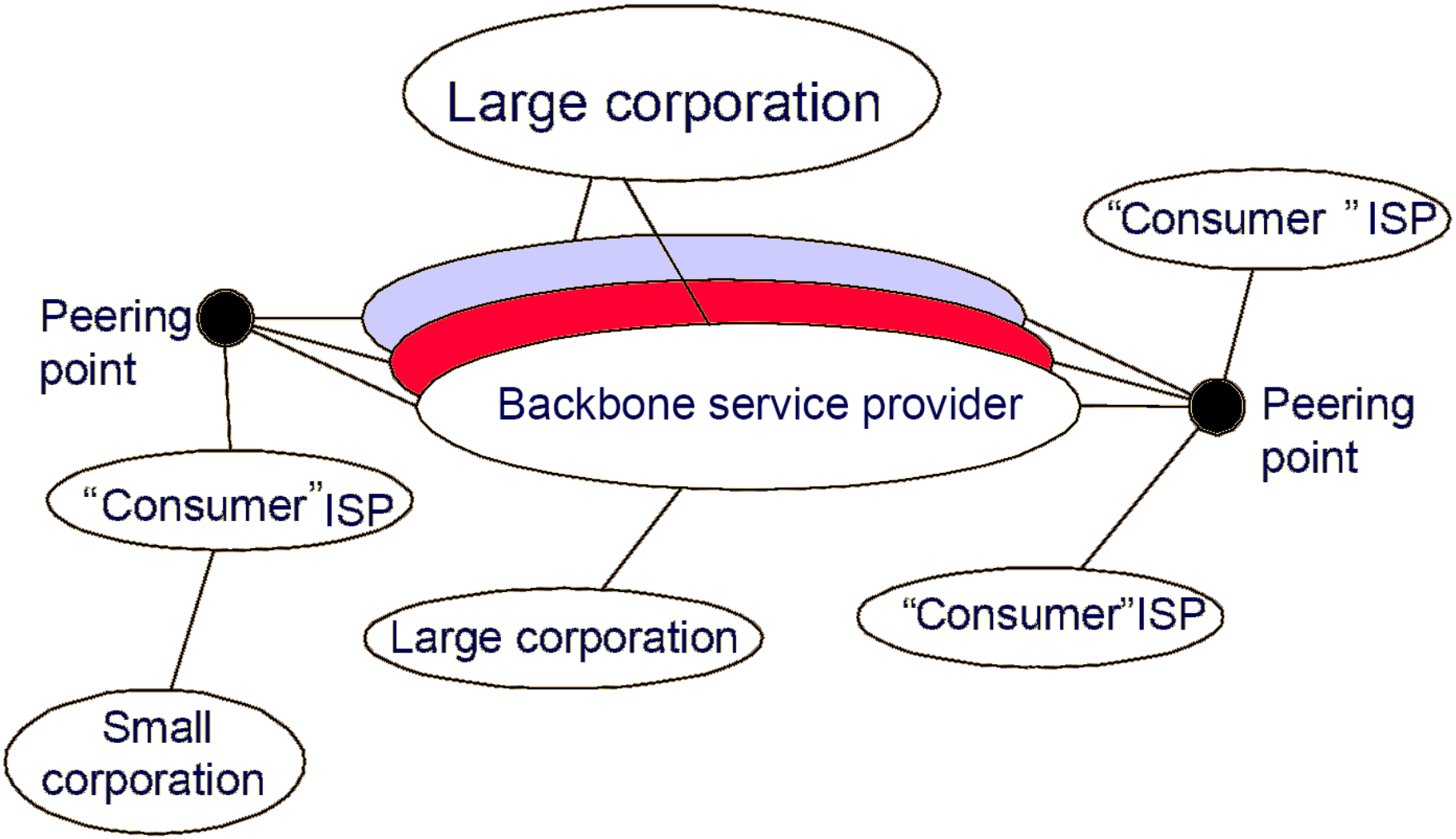


Obrázek: Představa Internetu podle EGP.

Mezidoménové směrování – BGP I.

- *Border Gateway Protocol*
  - aktuálně verze 4 (BGP-4)
- navržen v důsledku růstu Internetu a požadavků na podporu komplexnějších topologií
  - podporuje redundantní topologie, vypořádá se s cykly
- využívá *Path Vector* směrování
  - nevyměňují se ceny cest, ale popis celých cest zahrnující všechny skoky
- umožňuje definici pravidel směrování
- pracuje nad spolehlivým protokolem (TCP)
- používá CIDR pro agregaci cest

Mezidoménové směrování – BGP II.



Obrázek: Představa Internetu podle BGP.

Mezidoménové směrování – BGP III.

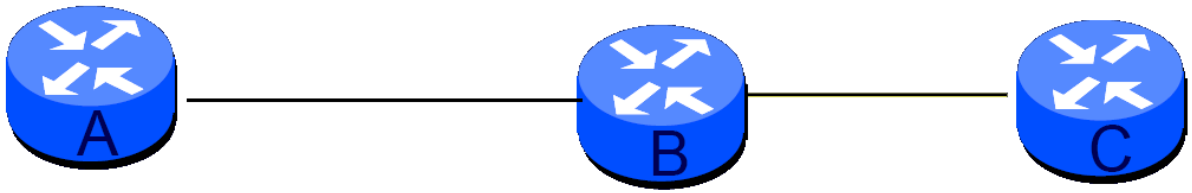
Path Vector I.

- *Path Vector (PV)*
  - obdoba DV
  - posílají se celé cesty (ne jen koncové uzly)
    - snadná detekce cyklů
    - umožňuje definici pravidel (přátelské vs. nepřátelské AS)
  - kratší cesty preferovány (pokud „policy“ nerozhodne jinak)
  - nepoužívá žádnou metriku, řeší se pouze dostupnost
    - důsledek: není nutné, aby všechny AS využívaly stejnou metriku

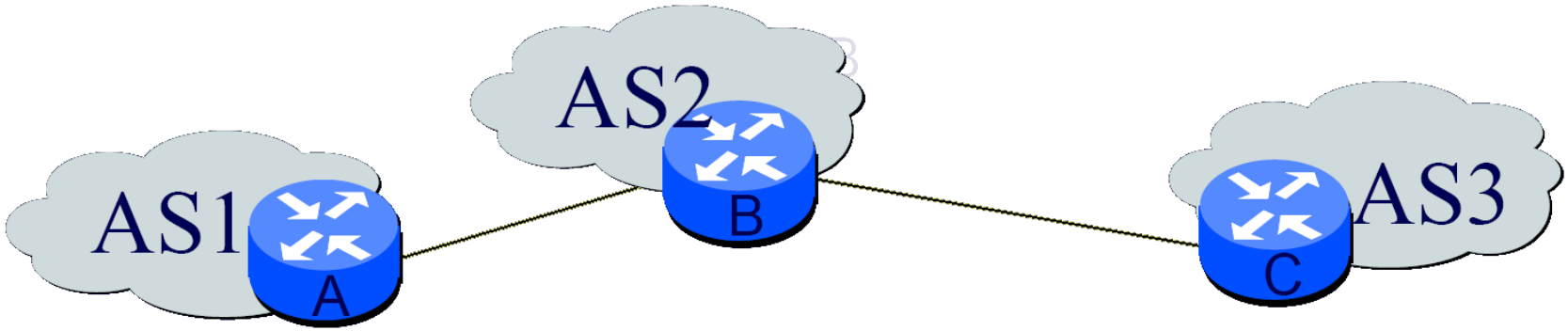
Mezidoménové směrování – BGP III.

Path Vector II.

Distance Vector přístup: *C* je vzdáleno 2 hopy od *A*



Path Vector přístup: cesta z AS1 do AS3 vede skrze AS2



Struktura přednášky

Skupinová komunikace

Výzva: *způsob zasílání stejných zpráv skupině koncových stanic*

Příklady reálného světa:

- Televize či rozhlas, informace od zdroje k dynamické skupině
- Přednášející x auditorium, informace od zdroje ke skupině příjemců
  - s ojedinělou zpětnou vazbou
- Pracovní porada, informace od více zdrojů k více příjemcům
- Moderovaná diskuze, existence rolí ve skupině
- ...

Skupina se liší počtem členů, dynamikou, vzdáleností, aktivitou členů ...

Skupinová komunikace v síti

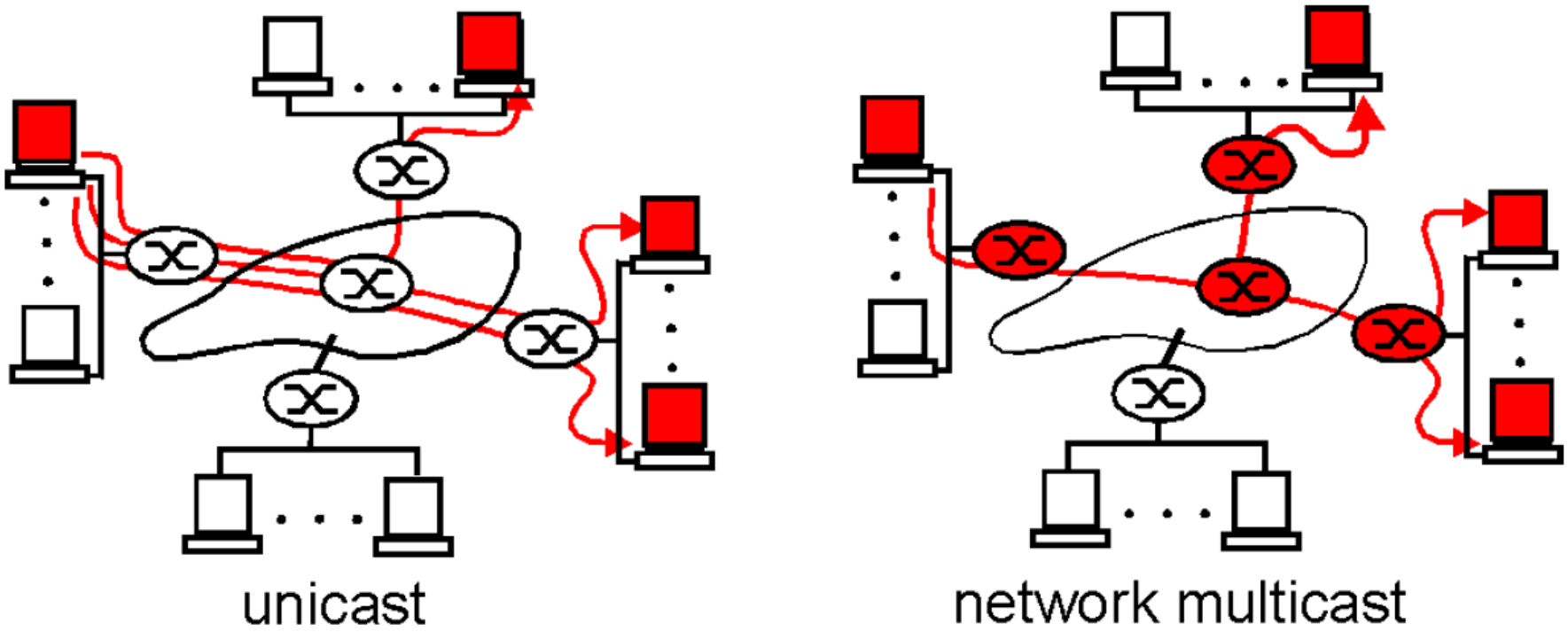
Obdoba předchozího.

- Data jsou od zdroje přenášena ke skupině příjemců
- Původní dvoubodová komunikace $\longrightarrow$ vícebodová komunikace
- Nutno zajistit replikaci dat a jejich doručení

Pokud by replikace byla součástí aplikace, musela by každá aplikace obsahovat replikační modul. Proto je lepší řešit replikaci a směrování dat ve skupině odděleně od aplikace.

- IP Multicast
- Virtuální sítě

Skupinová komunikace v síti – Unicast vs. Multicast



Obrázek: Doručení dat skupině příjemců – Unicast vs. Multicast

Příklady skupinové komunikace v síti

- Streamované video vysílané ve smyčce
  - Nedefinovaně mnoho příjemců
  - Šířka pásma: jednotky Kb/s až Mb/s
  - Kvalita přenosu
- Data produkovaná přístrojem (např. LHC)
  - Definovaně mnoho příjemců
  - Velké objemy dat po dlouhou dobu
  - Spolehlivé doručení
- Videokonference (např. nekomprimovaná HD videokonference)
  - Omezeny počet příjemců
  - Komunikace každý s každým
  - Šířka pásma: stovky Kb/s až Gb/s
  - Nízká latence (reálný čas)

IP Multicast – úvod

Klasické řešení skupinové komunikace v síti.

- Každým spojem nejvýše jedna kopie dat
- Vlastnost sítě (hop by hop, nikoliv end-to-end služba)
- Doručení nezaručené (best effort, UDP, skupinová adresa)
- Rozsah šíření omezen TTL (Time To Live) paketů

Jak identifikovat skupinu?

- $\Rightarrow$ multicastová IP adresa
  - *IPv4:* třída D (`224.0.0.0` – `239.255.255.255`)
  - *IPv6:* prefix `ff00::/8`

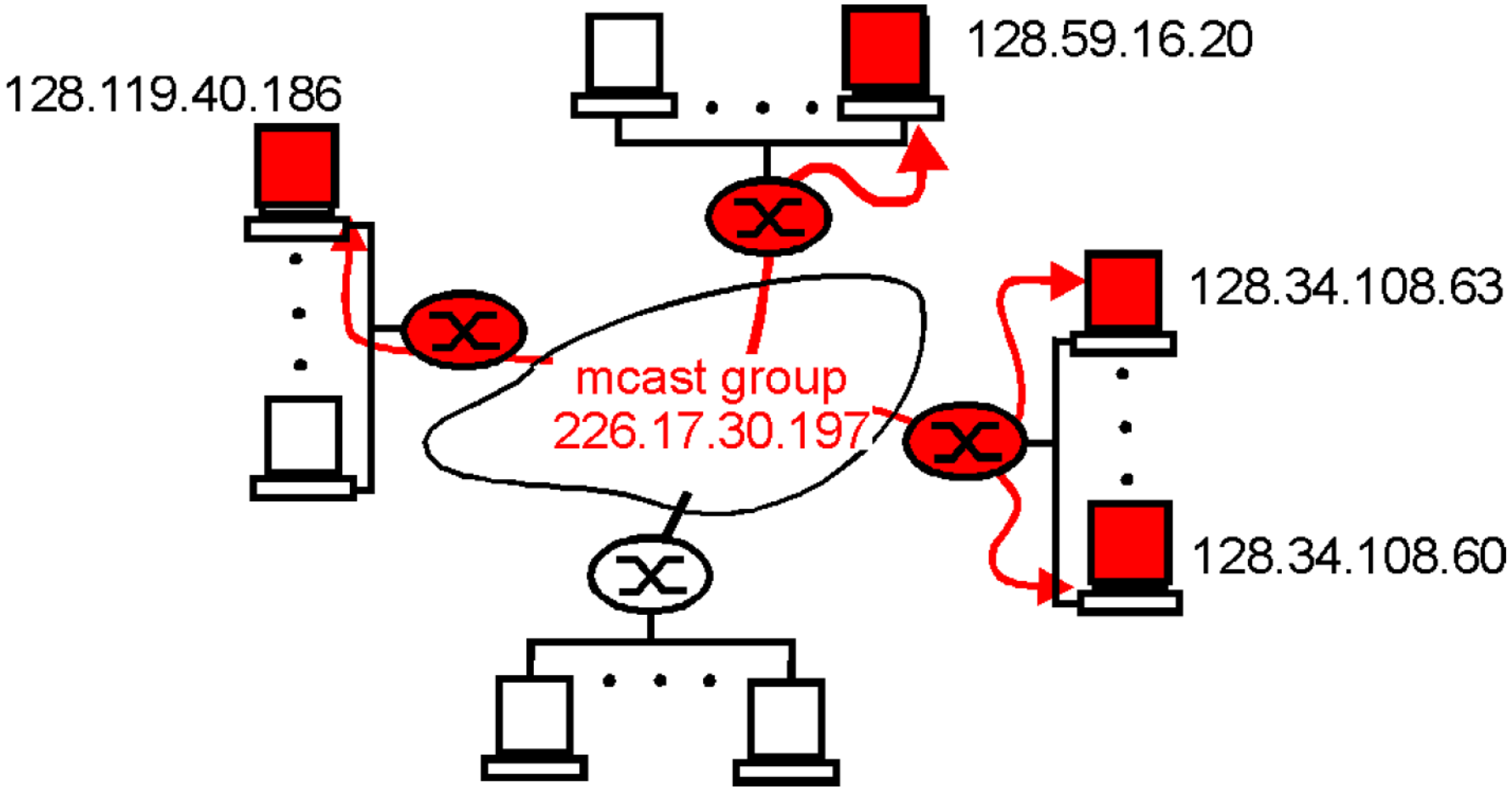
Dva základní přístupy k multicastovému směrování:

- *Source Based Tree*
- *Shared Tree (Core Based Tree)*

IP Multicast – komunikující strany

- *Vysílající:*
  - každý může vysílat (pokud zná multicastovou/skupinovou adresu)
    - stačí zasílat pakety na skupinovou adresu
  - vysílajících je proměnný počet
  - může, ale nemusí být členem skupiny
- *Přijímající:*
  - žádný, jeden, více
  - kdokoliv se může přidat či může opustit skupinu
  - může patřit do více skupin současně

IP Multicast – identifikace skupiny příjemců



Obrázek: Identifikace příjemců – datagram zaslaný do multicastové skupiny je doručen všem členům skupiny.

Source Based Tree vs. Core Based Tree

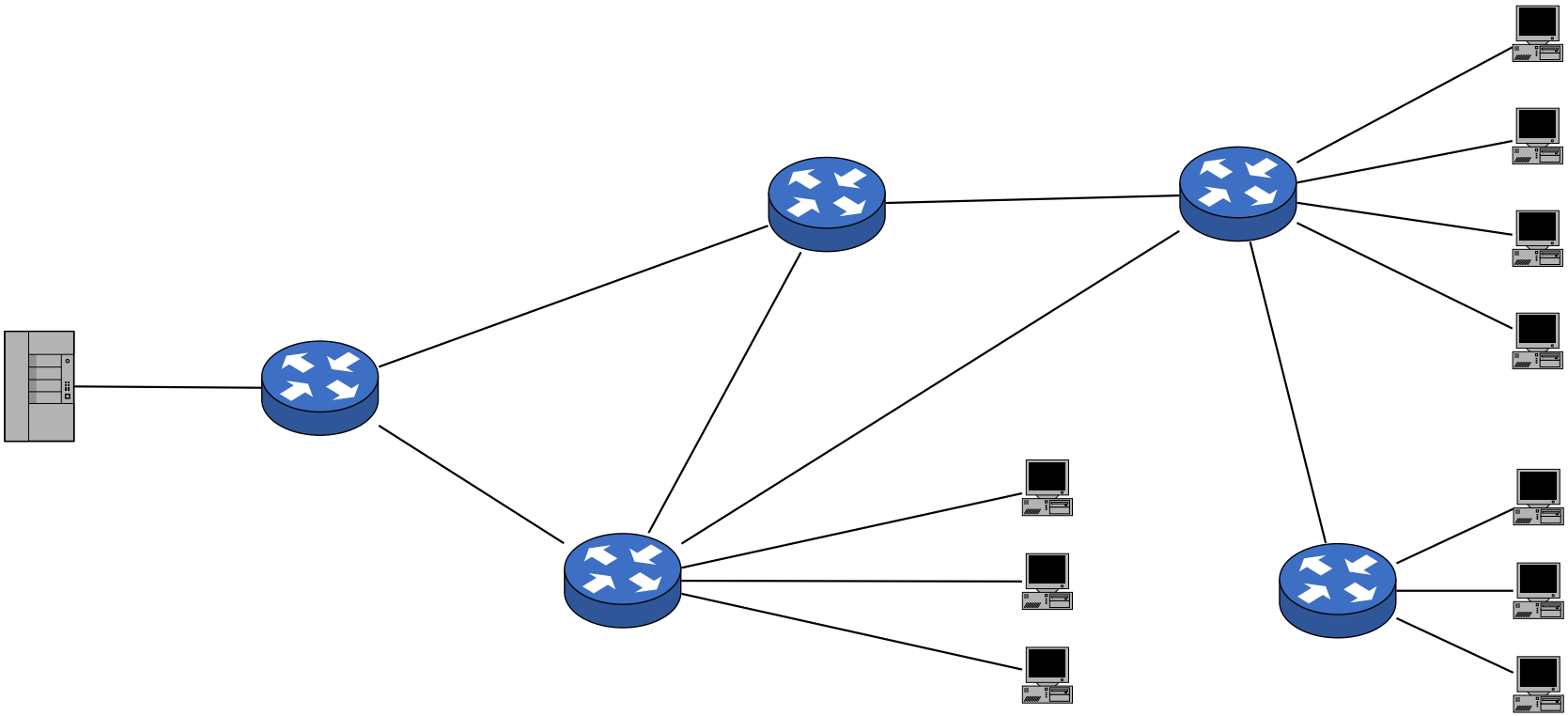
Source Based Tree

- Aktivita shora od zakládajícího
- Periodický broadcast
- Ořezávání větví bez členů
- Omezení šířky – TTL
- Pro úzce lokalizované skupiny
- Nevýhoda: režie, záplava broadcasty
- Protokoly: DVMRP (RIP), MOSPF (OSPF), PIM–DM

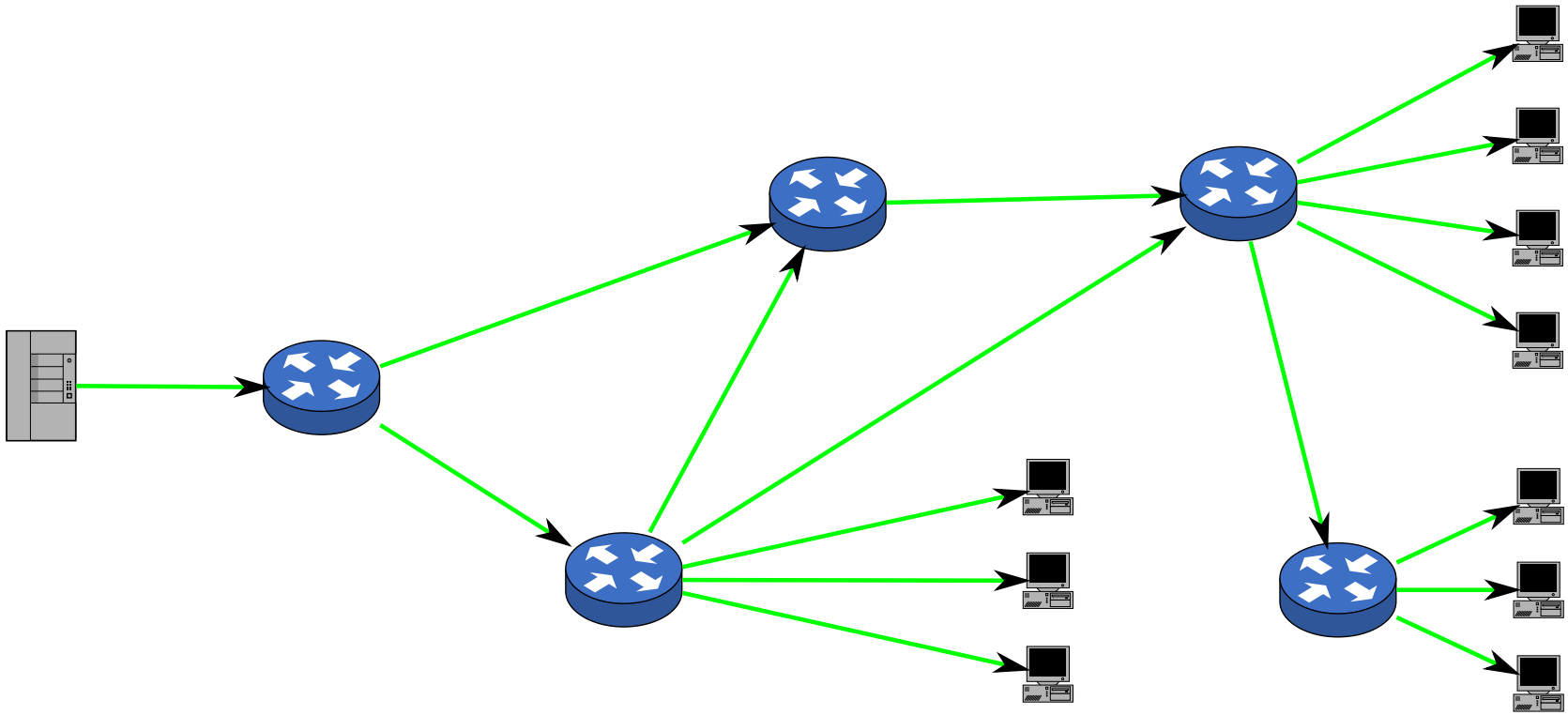
Core Based Tree

- Ustaveno jádro – body setkání (MP)
- Zájemce o skupinu kontaktuje MP
- Aktivita zdola od příjemce
- Redukce broadcastu $\longrightarrow$ lépe škáluje
- Nevýhoda: závislost na dostupnosti jádra
- Protokoly: CBT, PIM–SM (protokolově nezávislé)

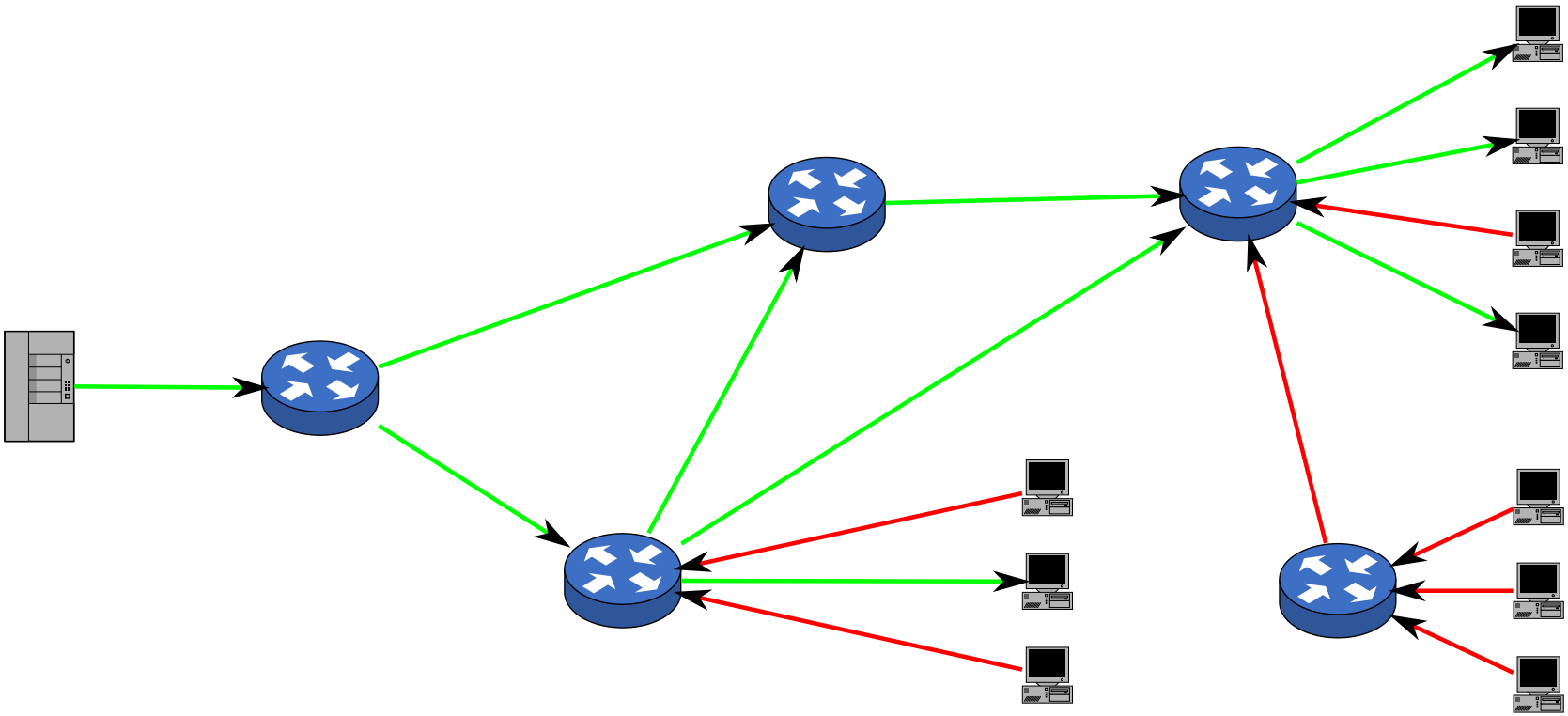
Source Based Tree



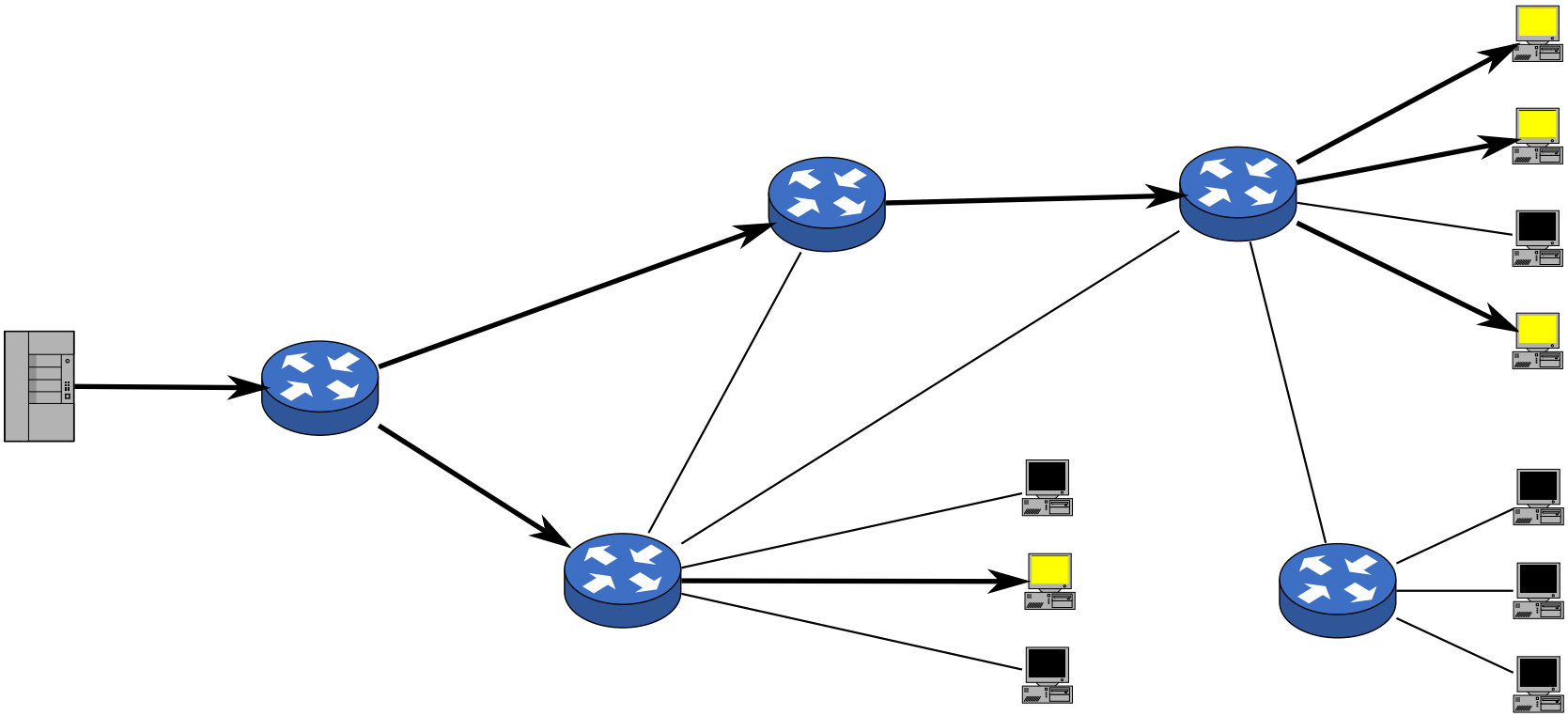
Source Based Tree



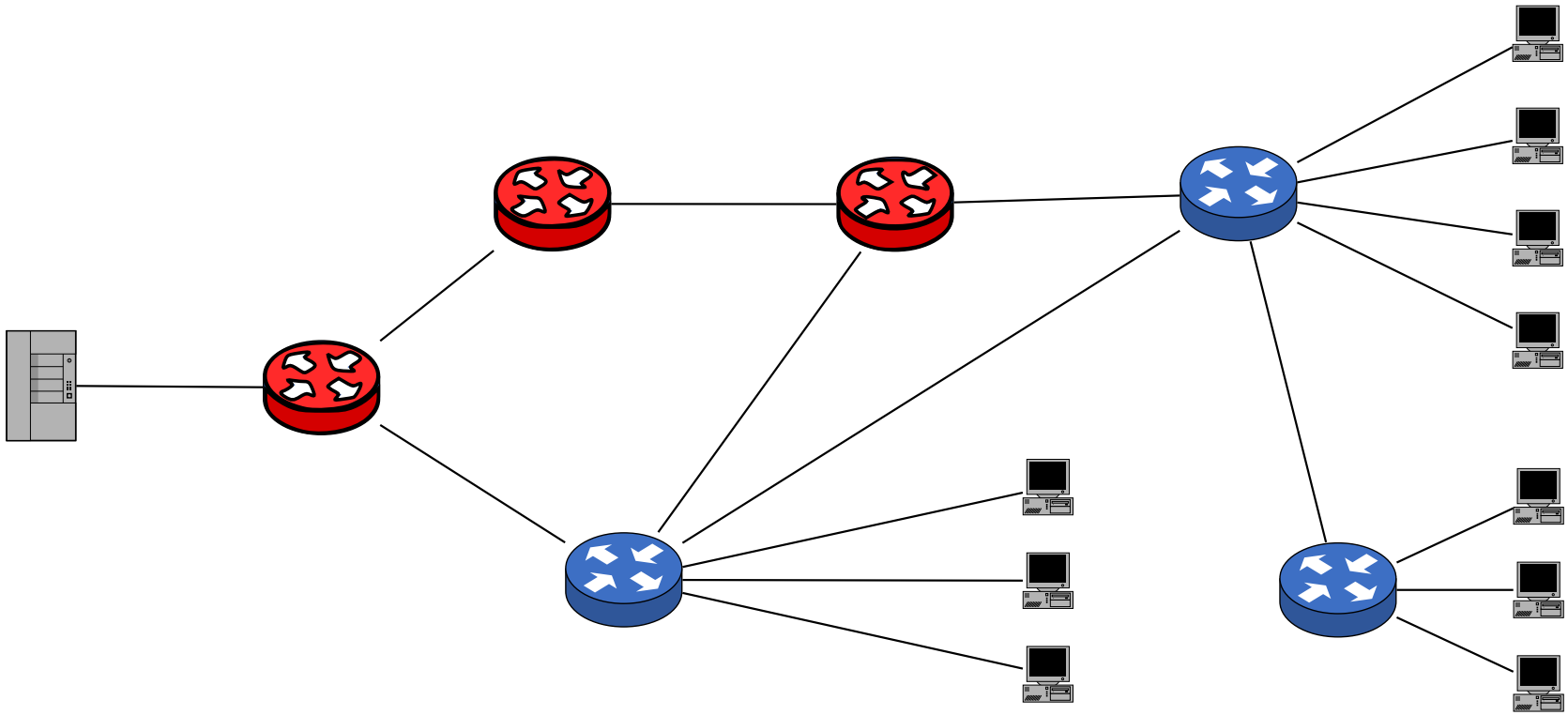
Source Based Tree



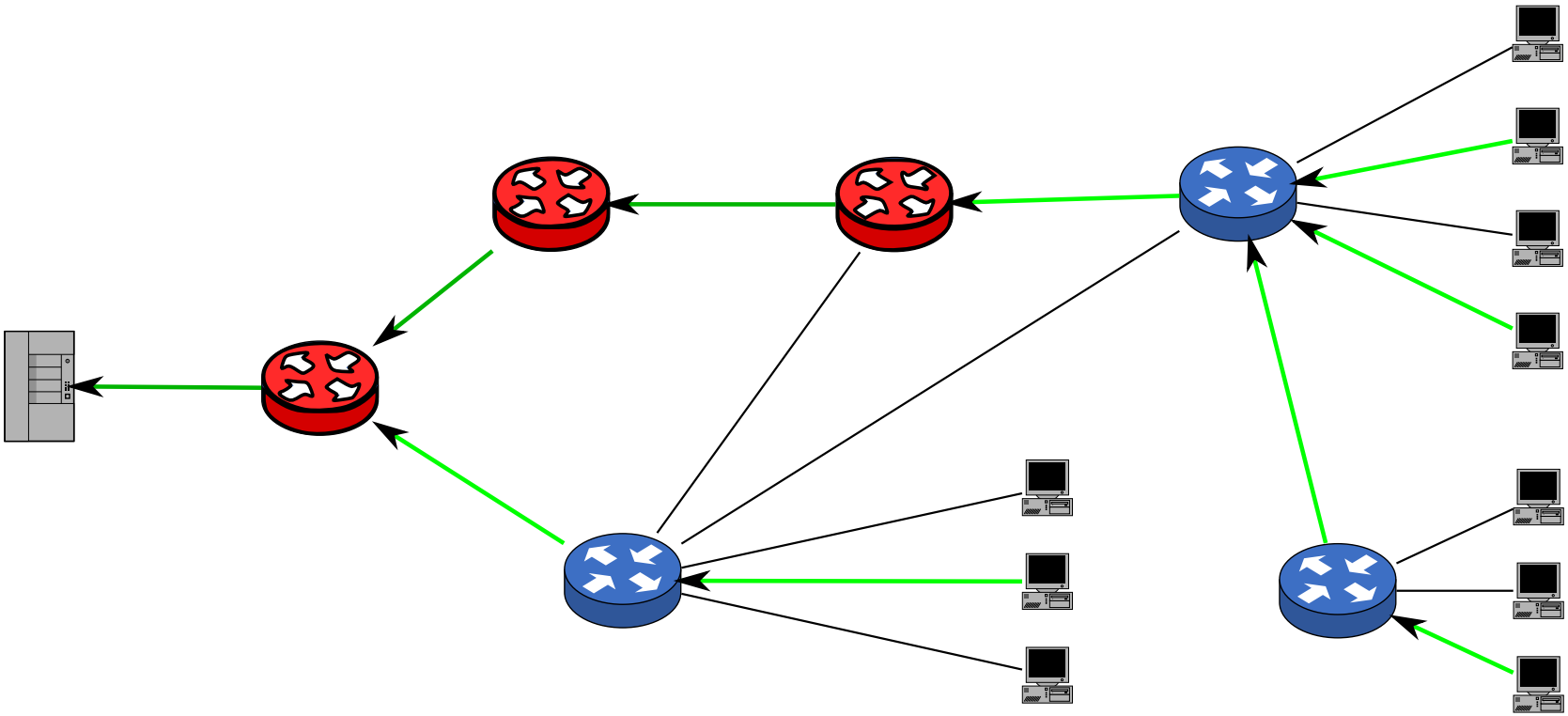
Source Based Tree



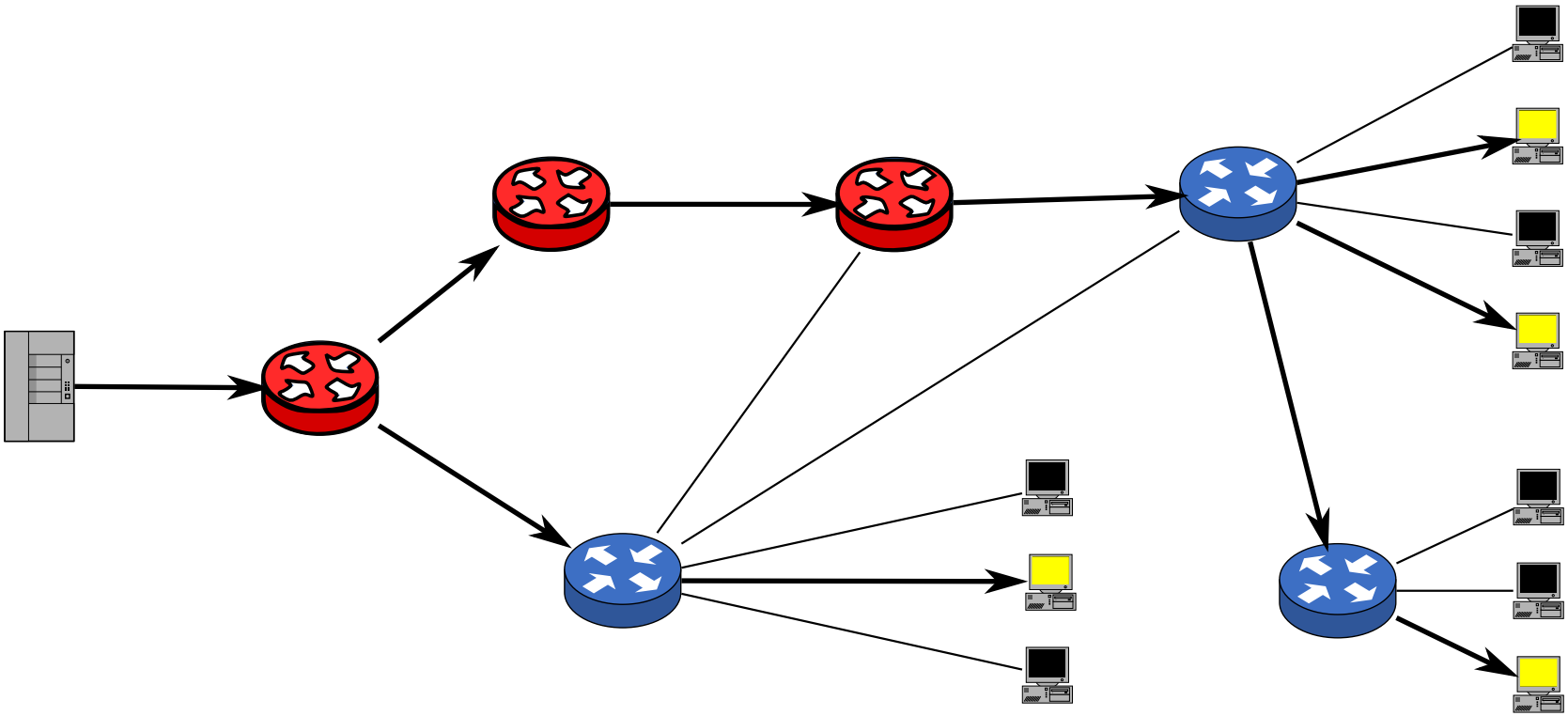
Core Based Tree



Core Based Tree



Core Based Tree

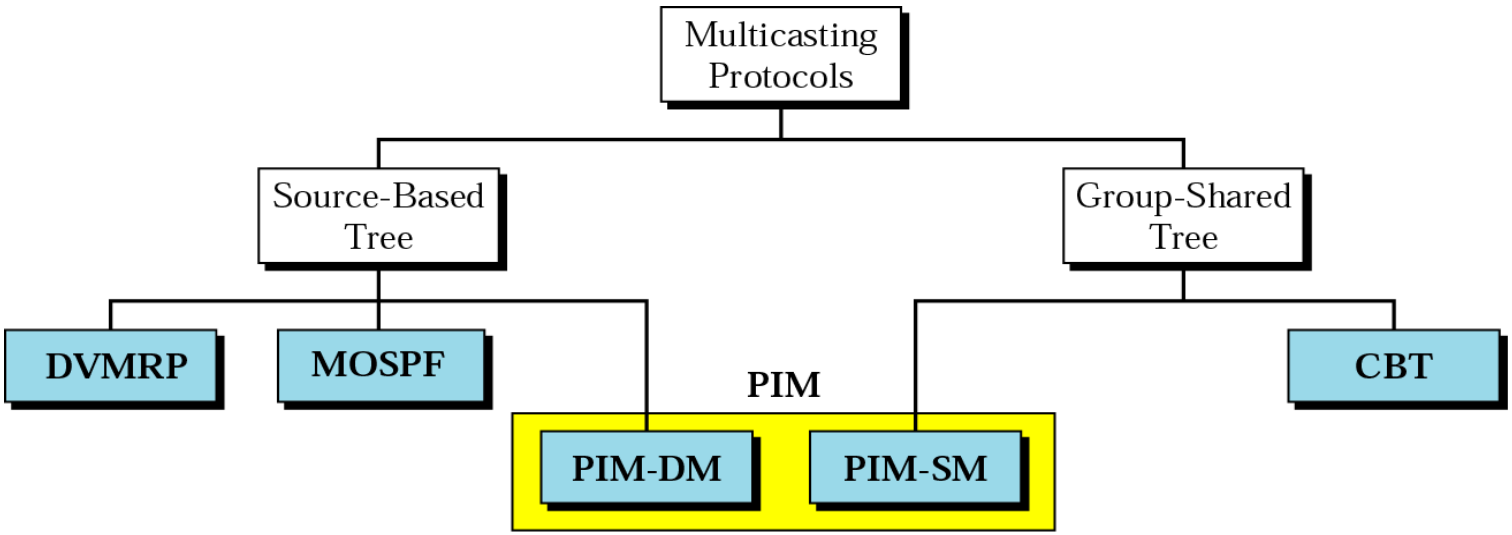


IP Multicast – vlastnosti

- Pozitivní:
  - „Nekonečná“ škálovatelnost
  - Nezatěžuje síť násobnými kopiemi
- Negativní:
  - Problematické účtování
  - Problém se zajištěným doručením
  - Snadný terč útoku (DoS, DDoS)
  - Absence kontroly členství (nelze zjistit přijímající)

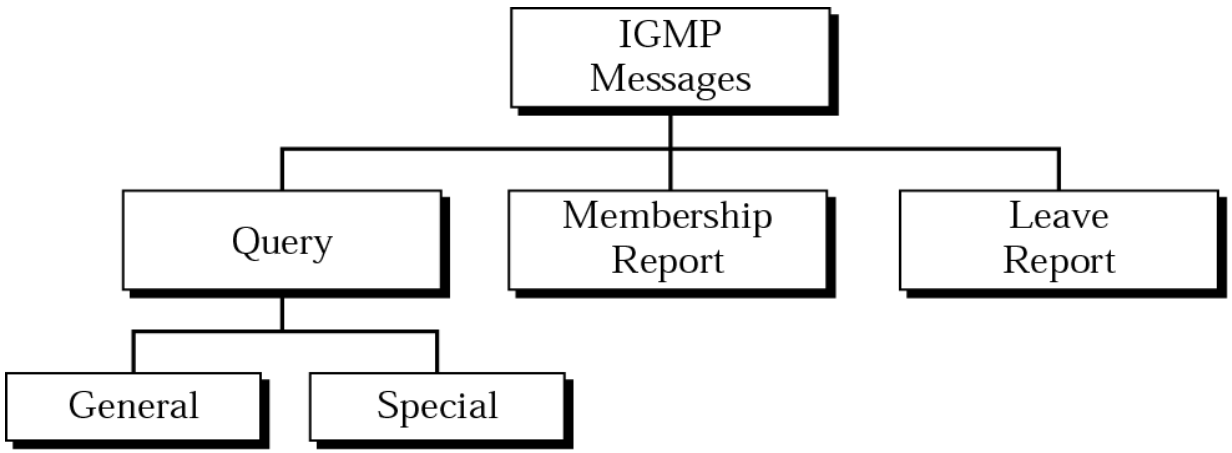
IP Multicast – protokoly

- Správa skupiny:
  - pouze v rámci LAN
  - *Internet Group Management Protocol (IGMP)*
- Směrování:
  - mezi multicastovými směrovači
  - Source Based Tree – DVMRP (RIP), MOSPF (OSPF), PIM–DM
  - Core Based Tree – CBT, PIM–SM

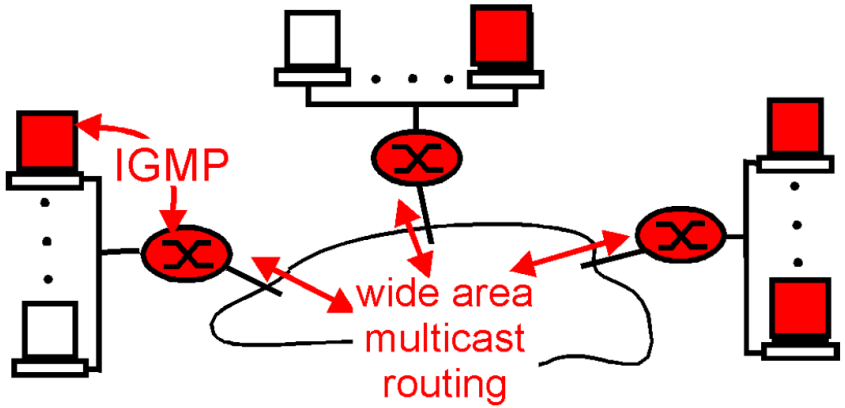


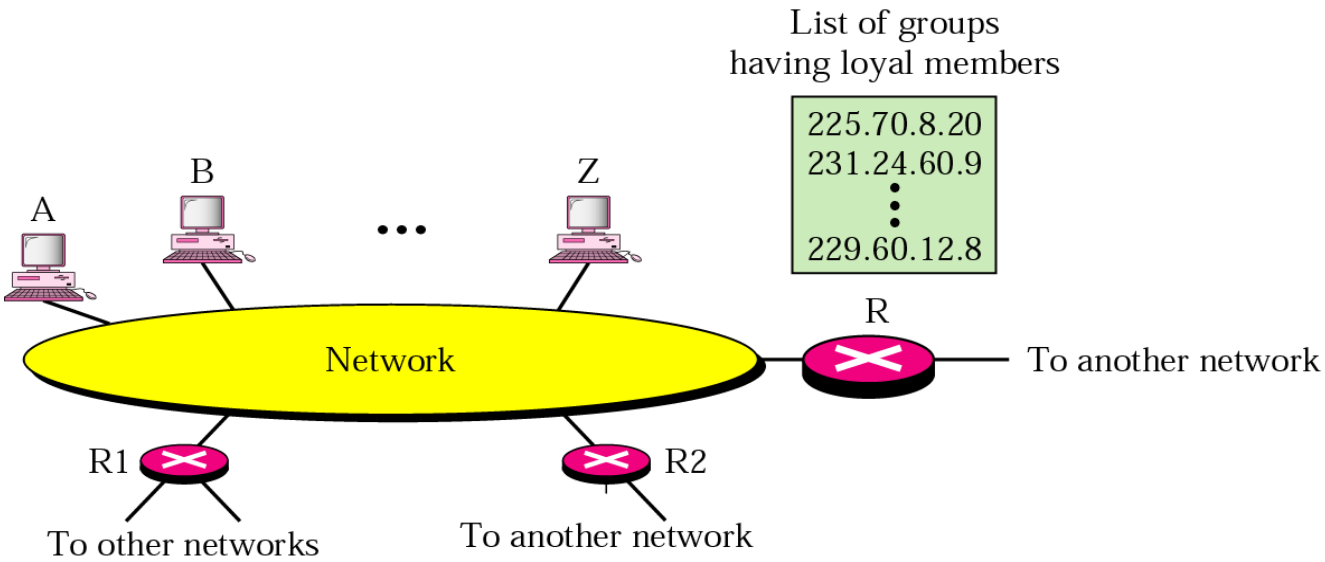
IP Multicast – správa skupiny – IGMP

- IGMP (RFC 1112), IGMPv2 (RFC 2236)
- správa členství ve skupině
  - spravuje informace o členech skupiny (pouze v rámci LAN)
  - pouze lokální působnost
    - síť a k ní přidružený multicastový směrovač
- typy zpráv:
  - přihlášení ke skupině (*Membership Report*)
  - odhlášení ze skupiny (*Leave Report*)
  - monitoring skupiny (*Query*)
    - např. dotazy směrovače na zájem uzlů setrvat ve skupině (řeší odstranění náhle vypadlých uzlů)



IP Multicast – správa skupiny – IGMP II.





Obrázek: Ilustrace lokální působnosti IGMP protokolu.

IP Multicast – Source Based Tree – protokoly

Distance Vector Multicast Routing Protocol (DVMRP)

- rozšíření unicastového DV směrování, využívá informací získaných RIP protokolem
- 3 přístupy pro budování stromu:
  - *Reverse Path Forwarding (RPF)*
  - *Reverse Path Broadcasting (RPB)*
  - *Reverse Path Multicasting (RPM)*

Multicast Open Shortest Path First (MOSPF)

- rozšíření unicatového OSPF protokolu
- využívá vytvořené znalosti topologie OSPF protokolem
  - všechny uzly počítají strom cest z kořene, kterým je zdroj multicastového vysílání

Protocol Independent Multicast – Dense Mode (PIM-DM)

- využit v prostředí, kdy je pravděpodobné, že většina směrovačů bude participovat na multicastování
- podobný DVMRP protokolu
  - využívá RPF přístup
  - rozdíl: ke své činnosti nevyžaduje unicastový protokol (tj. RIP)

IP Multicast – Core Based Tree – protokoly

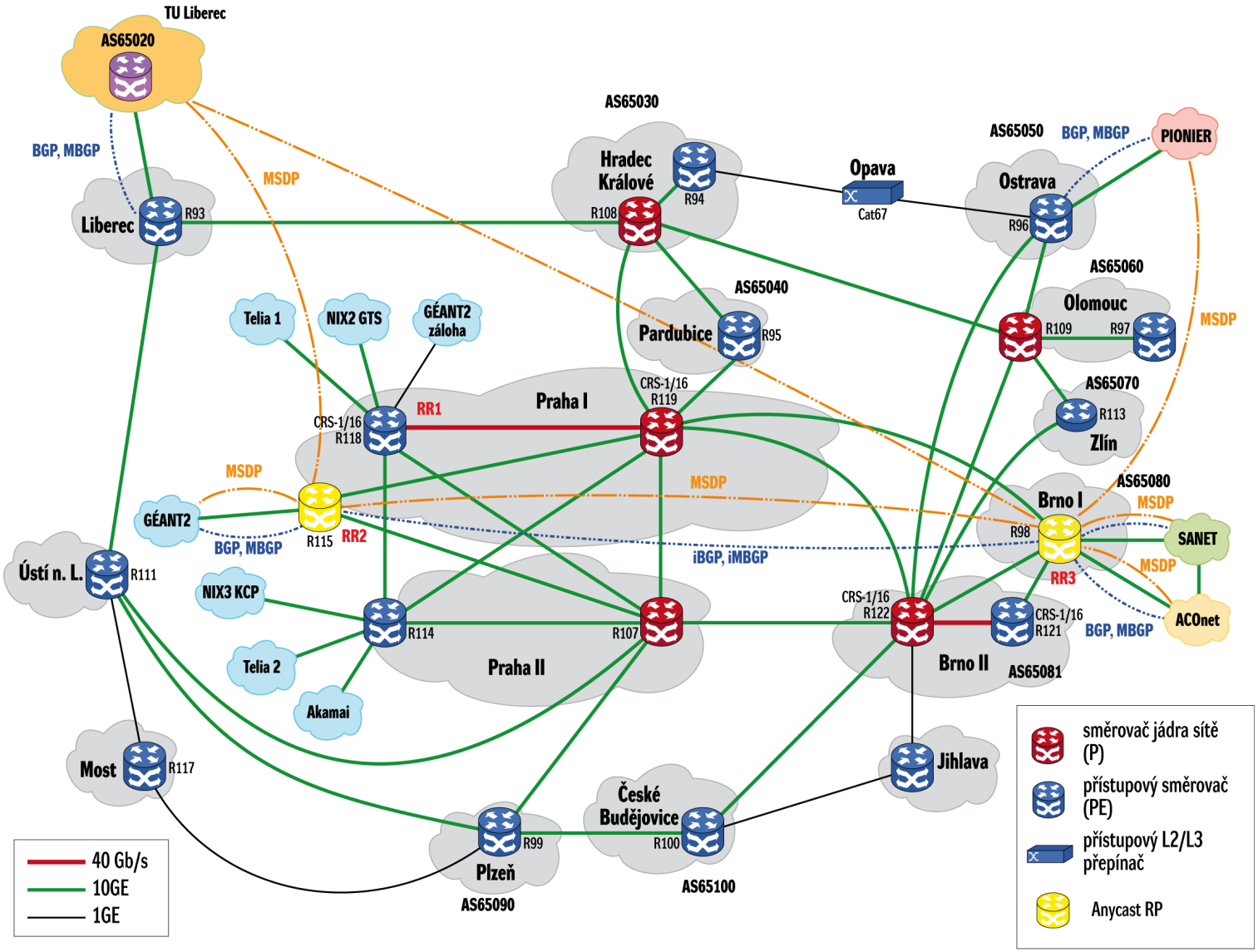
Core-Based Tree (CBT)

- zdroj jako kořen budovaného stromu
- AS rozdělen na regiony, pro každý region zvolen „bod setkání“ (tzv. *Rendezvous Router*)
  - $\Rightarrow$ vytvoření jádra
- uzly (v případě zájmu) kontaktují „body setkání“
  - budování stromu od listů

Protocol Independent Multicast – Sparse Mode (PIM-SM)

- využit v prostředí, kdy je malá pravděpodobnost, že většina směrovačů bude participovat na multicastování
- podobný CBT protokolu
  - také využívá *Rendezvous Points (RPs)*
  - oproti CBT si buduje záložní RPs pro účely jejich výpadků
  - v případě potřeby (= mnoho příjemců vzdálených od RP) je schopen přepnout do strategie *Source-based Tree*

IP Multicast – příklad reálné sítě (Cesnet2)



Struktura přednášky

Rekapitulace – síťová vrstva

- logicky propojuje samostatné heterogenní LAN sítě
  - vyšším vrstvám poskytuje iluzi uniformního prostředí jediné WAN sítě
  - internet vs. Internet
- poskytuje možnost jednoznačné identifikace (adresace) každého PC/zařízení v síti (např. Internetu)
- zajišťuje (hierarchické) směrování procházejících paketů
  - Distance Vector přístup vs. Link State přístup
  - unicast vs. multicast
- hlavní protokol síťové vrstvy: *IP protokol (IPv4, IPv6)*
- *další informace:*
  - PA159: Počítačové sítě a jejich aplikace I. (doc. Hladká)
  - PV233: Počítačové sítě a směrovací protokoly (dr. Pelikán et al.)
  - grafové algoritmy – PB165: Grafy a sítě (prof. Matyska, doc. Hladká, doc. Rudová)