

Přenos dat, počítačové sítě a protokoly

Architektura směrovačů

Ing. Petr Matoušek, Ph.D., M.A.



Fakulta informačních technologií VUT v Brně

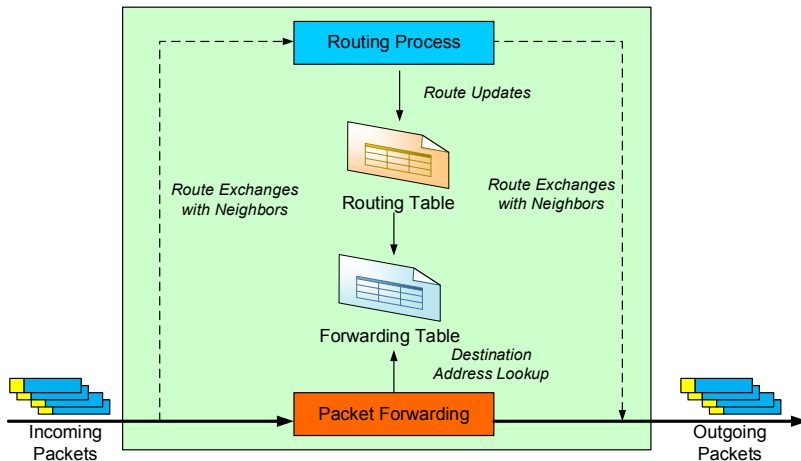
matousp@fit.vutbr.cz

- 1 Základní popis směrovače
 - Činnost
 - Rozdělení směrovačů
 - Architektura
 - Zpracování paketu
- 2 Přepínání paketů ve směrovači
 - Softwarové přepínání
 - Rychlé přepínání
 - Expresní přepínání
- 3 Přehled architektur směrovačů
- 4 Otázky a úkoly
- 5 Literatura

Činnost směrovače

Základní operace ve směrovači:

- Směrování (routing)
- Přepínání paketů (packet forwarding)



Činnost směrovače

Směrovací tabulka (routing table)

- IP prefix cílové sítě × sousední uzel (next hop)
- Optimalizovaná pro výpočet dynamických změn v topologii

Přepínací tabulka (forwarding table)

- IP prefix × výstupní rozhraní × L2 adresy (výstupní rozhraní + sousední uzel)
- Optimalizovaná pro vyhledání cílové adresy

Routing Table

IP prefix	Next hop
10.5.0.0/16	192.168.2.254
10.15.0.0/16	104.17.2.1
88.0.0.0/8	129.1.1.1

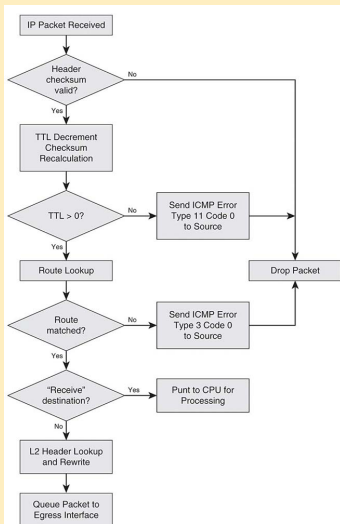
Forwarding Table

IP prefix	Interface	dst MAC address	src MAC address
10.5.0.0/16	eth0	00:0F:1F:CC:F3:06	B8:6B:23:EA:FC:20
10.15.0.0/16	eth1	01:12:11:A0:17:A0	00:16:17:E1:28:5F
88.0.0.0/8	eth2	01:3F:04:10:03:15	00:1B:63:8A:DB:1A

- Jak se vytvoří směrovací tabulka?
- Jak je implementována?
- Jak se vytvoří přepínací tabulka?
- Proč obsahuje dvě MAC adresy?

Činnost směrovače

Zpracování IP datagramu ve směrovači (viz RFC 1812 [1])

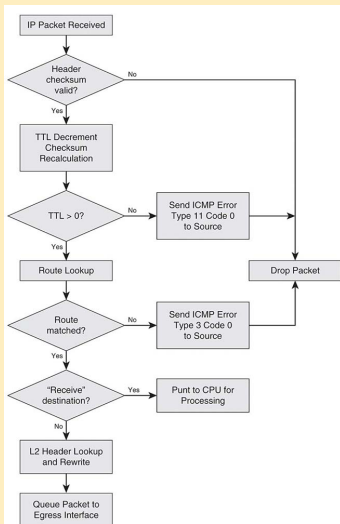


Co patří mezi základní operace?

- *Validace hlavičky L3*
 - Formát, verze, délka
- *Kontrola hodnoty TTL a její dekrementace*
- *Přepočítání kontrolního součtu*
- *Zpracování rozšířených voleb IP protokolu*
 - Timestamp, record route, strict source route
- *Vyhledání cesty (next-hop) na základě adresy*
 - Lokální doručení, unicast, multicast
- *Fragmentace a defragmentace IP datagramů*
 - Pokud $MTU_{in} < MTU_{out}$
- *Zpracování zpráv ICMP a IGMP*

Činnost směrovače

Zpracování IP datagramu ve směrovači (viz RFC 1812 [1])



Co patří mezi pokročilé operace?

- *Dynamické směrování*
 - Implementace směrovacích protokolů
 - Udržování sousedství (keep-alive)
 - Aktualizace směrovací a přepínací tabulky
- *Filtrování paketů (ACL)*
- *Překlad NAT*
 - Přepisování položek v hlavičce paketu
 - Udržování tabulky spojení
- *Tunelování provozu*
 - Zapouzdřování a vypouzdřování dat
 - GRE, IPSec, apod.
- *Klasifikace dat, prioritizace provozu*
- *Správa zařízení*
 - Konfigurace (např. DHCP, TFTP)
 - Monitorování zařízení (např. SNMP)

Rozdělení směrovačů podle použití

Páteční směrovač (Core Router)

- Součást páteřních sítí poskytovatelů internetového připojení (ISP)
- Vysoce agregovaný přenos
 - Propojení tisíců menších sítí
- Vyžadována vysoká rychlost přepínání
 - Rychlost přepínání závisí na době vyhledání ve FIB
 - Využití technik typu CEF (Cisco Express Forwarding)
 - Optimalizace vyhledávání cesty: algoritmy LPM (Longest Prefix Match)
 - Hardwarová akcelerace zpracování dat (ASIC, FPGA)
- Důraz na spolehlivost
 - Redundance zařízení (high-availability)
 - Zálohování napájení, přepínacího pole, modulů pro zpracování

Příklady směrovačů

- Řada Cisco CRS (Carrier Routing System), přepínání 1,12 – 12,8 Tb/s
- Juniper, T Series, přepínání 800 Gb/s – 3.84 Tb/s

Rozdělení směrovačů podle použití

Hraniční směrovač (Edge Router)

- Připojuje zákaznické sítě směrem k ISP
- Vyžaduje velké přenosové pásmo pro připojení k ISP
 - Agregace zákaznického provozu z různých přístupových technologií
 - WAN technologie: Ethernet, optika, kabelový modem, xDSL, FTTH
- Podpora přístupových technologií
 - PPTP, PPPoE, L2TP, IPSEC VPN
 - IP/MPLS, ATM/Frame Relay, OC-48, SONET
 - Velký počet přístupových portů (modulů) pro různé L2 technologie

Příklady směrovačů

- Cisco 7000, 12000, Cisco ASR (Aggregation Services Routers) 9000, 12000
přepínání 2,5 – 200 Gb/s
- Juniper, MX Series (Universal Edge Routers), přepínání 20 – 160 Gb/s

Rozdělení směrovačů podle použití

Podnikový směrovač (Enterprise Router)

- Lze využít také páteřní a distribuční L3 přepínače (Core and Distribution Switches)
- Propojuje koncové systémy v podnikových sítích
- Vyžaduje velké množství portů na rychlostech 1 až 10 GbE
- Modulární a rozšiřitelné řešení
- Podpora QoS
- Efektivní přenos multicastu a broadcastu
- Bezpečnost
 - Filtrování
 - VPN sítě
 - VLAN sítě

Příklady směrovačů

- Cisco Catalyst 6800 přepínání 720 Gb/s – 11.4 Tb/s
- Juniper, EX Series, přepínání 40 Gb/s – 12.4 Tb/s

Rozdělení směrovačů podle použití

Domácí směrovač (SOHO Router)

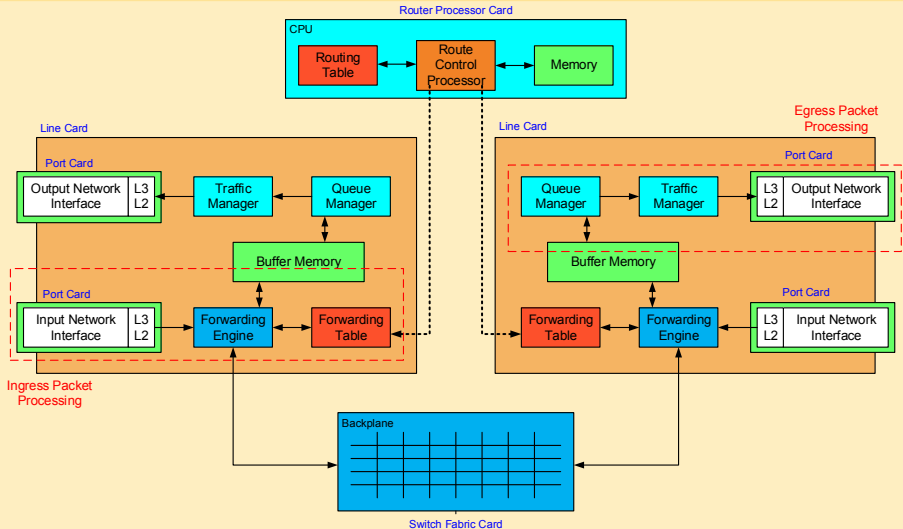
- Zařízení pro připojení uživatele či domácnosti
- Menší počet portů (8, 12, 16), rychlost 1 Gb/s
- Připojení do WAN sítě: Ethernet, kabelový modem, xDSL, ISDN
- Připojení do LAN sítě: Ethernet, WiFi 802.11a/b/g/n, RJ-11, USB
- Důraz na cenu, proprietární řešení
- Softwarová implementace, linuxové jádro, nízká propustnost
- Omezené možnosti konfigurace
 - Přístup k zařízení, filtrovací pravidla
 - Podpora DHCP, NAT, směrování RIP
 - Malá podpora vzdálené správy (SNMP, NetFlow)

Příklady směrovačů

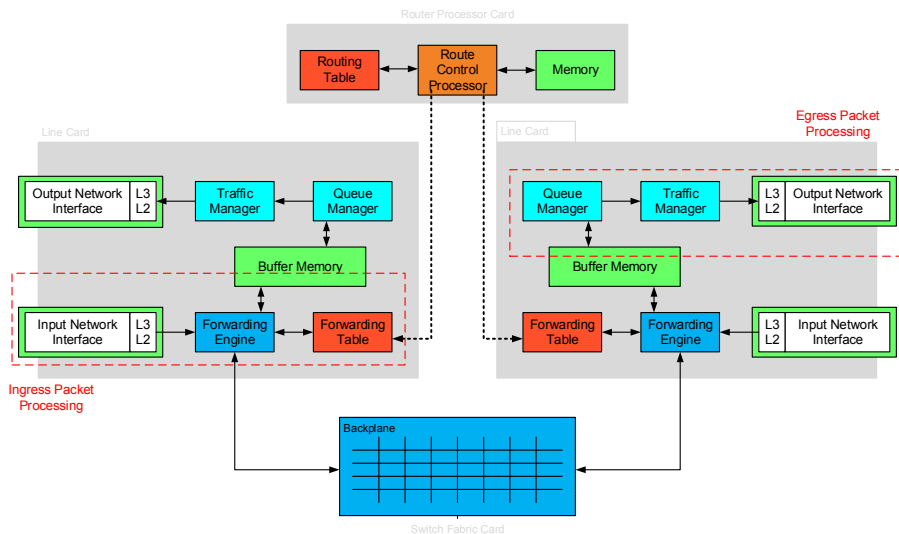
- Asus, Linksys, Belkin
- Mikrotic, Turris

Architektura směrovače

Obecné schéma směrovače: funkční části a fyzické části



Funkční části směrovače



Funkční části směrovače

- *Síťové rozhraní (Network Interface)*

- Obsahuje více vstupních/výstupních portů
- Odstraní zapouzdření L2
- Předá hlavičku L3 přepínacímu modulu
- Uloží paket do paměti
- Zapouzdří odchozí pakety

- *Řízení přepínání (Forwarding Engine, FE)*

- Dostane hlavičku L3 ze síťového rozhraní
- Určí výstupní rozhraní podle informace ve FIB
- Provádí klasifikace paketů pro podporu QoS na výstupu

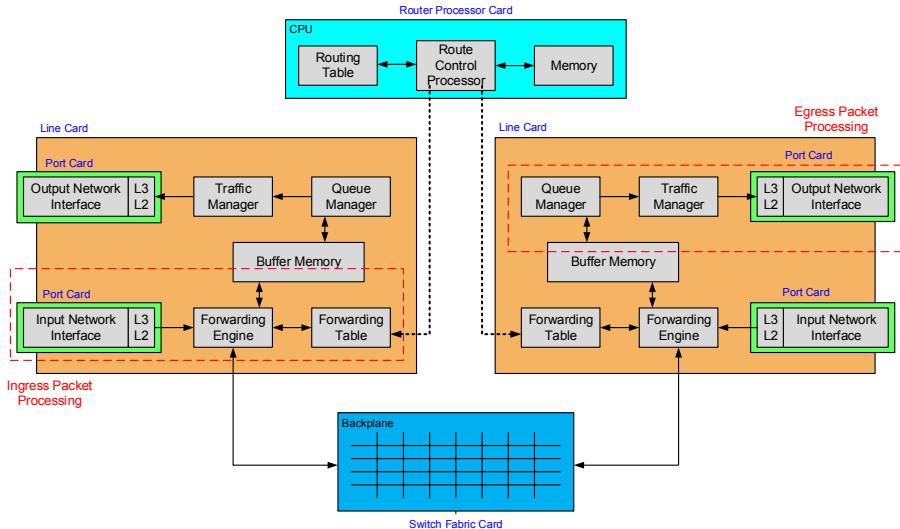
- *Správce front (Queue Manager)*

- Ukládá pakety do vyrovnávací paměti, pokud je výstupní port obsazen
- Spravuje výstupní frontu → různé typy výstupních front
- Při zaplnění fronty vybírá a zahazuje pakety podle definované politiky

Funkční části směrovače

- *Správce provozu (Traffic Manager)*
 - Prioritizuje a reguluje výstupní provoz podle požadavků QoS
 - Omezuje či ořezává výstupní provoz (shaping, policing)
- *Propojovací deska, sběrnice (Backplane)*
 - Propojuje síťové rozhraní
 - Vytváří sdílené (shared) či přepínané (switched) propojení
 - Rychlost přepínání odpovídá přenosovému pásmu všech rozhraní
- *Řídící procesor pro směrování (Route Control Processor)*
 - Implementuje směrování na obecném CPU
 - Zpracovává směrovací informace: aktualizace, udržuje sousedství
 - Obsluhuje směrovací tabulku
 - Přenáší data do přepínací tabulky
 - Zpracovává pakety, které nelze směrovat pomocí FIB
 - Vytváří chybové zprávy ICMP

Fyzické části směrovače

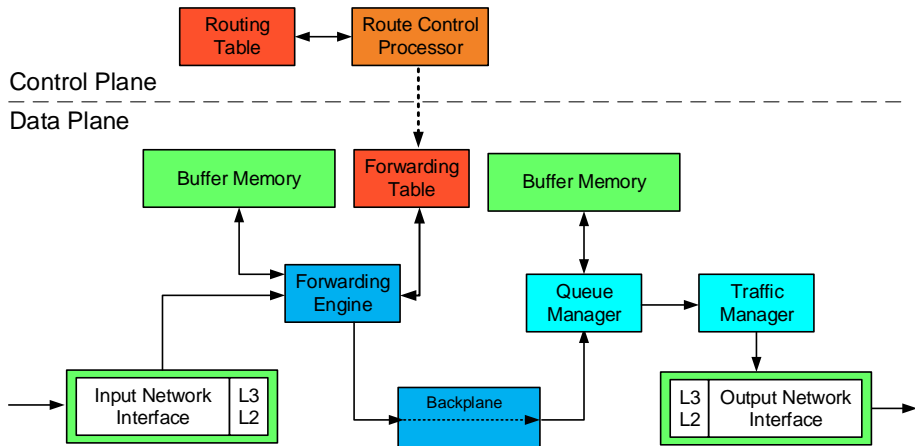


Fyzické části směrovače

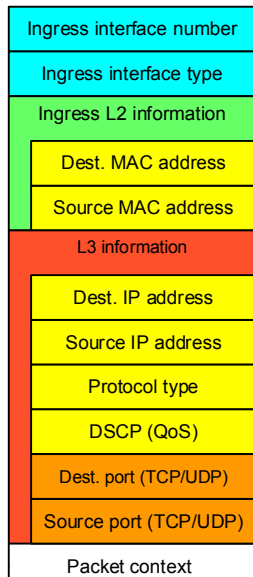
- *Modul fyzického rozhraní (Port Card)*
 - Implementuje síťové rozhraní: Ethernet, SONET, xDSL
 - Provádí operace nad L2: zapouzdřování, vypouzdřování
 - Udržuje statistiky o odchozím a příchozím provozu
- *Síťový modul (Line Card)*
 - Obsahuje přepínání, správu front a správu provozu
 - Obsahuje paměť pro uložení zpracovaných paketů
 - Analyzuje hlavičku IP, vyhledává výstupní rozhraní
 - Připojen k základní desce (backplane)
- *Přepínací pole (Switching Fabrics)*
 - Přenáší pakety ze vstupního rozhraní na výstupní
 - Pátevní směrovače obsahující více modulů přepínacího pole
- *Modul pro směrování (Route Processor Card)*
 - Implementace funkcí směrování a správy zařízení
 - Běžící procesy pro směrování a správu
 - Obsahuje obecný proces se specializovaným OS a velkou pamětí

Zpracování paketu ve směrovači

Control Plane and Data Plane



Zpracování paketu ve směrovači

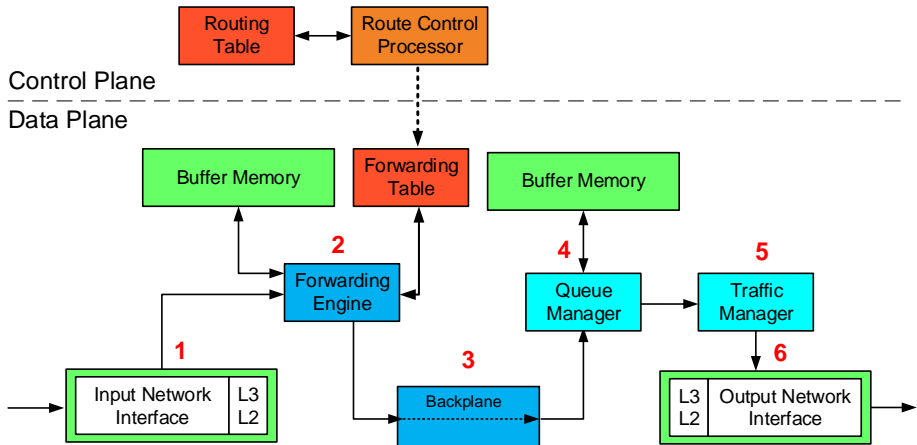


Kontext paketu

- Datová struktura obsahující informace o zpracovávaném paketu
- Vybrané hlavičky L2-L4, informace o rozhraních, ukazatel do paměti
- Kontext se vytvoří při vstupu paketu do zařízení
- Během zpracování paketu na směrovači se doplňují další položky
- Kontext se předává mezi moduly směrovače
- Po doplnění směrovacích informací je paket přenesen ze vstupního bufferu na výstupní síťové rozhraní

Zpracování paketu ve směrovači

Fáze zpracování



Zpracování paketu ve směrovači

❶ *Paket přijde na síťové rozhraní*

- Síťové karta zpracuje L2 rámec, zkontroluje FCS
- Vytvoří kontext paketu: vloží L2 zdrojovou a cílovou adresu
- Zpracování hlavičky L3: typ protokolu, kontrolní součet, TTL
- Doplnění kontextu o informace L3: IP adresy, typ protokolu, DSCP + porty

❷ *Zpracování v přepínacím modulu*

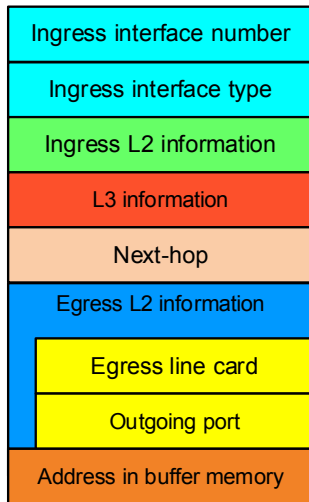
- Vyhledání cesty v přepínací tabulce: next hop + výstupní rozhraní
- Doplnění dalších informací do kontextu paketu
- Paket ulože do vyrovnávací paměti → adresa vložena do kontextu

❸ *Přeposlání kontextu propojovací deskou*

- Paket i kontext přeneseny na výstupní rozhraní

- Co se stane, když některá z výše uvedených fází skončí neúspěšně?
- Co může být příčinou neúspěšného zpracování?
- Předpokládejme, že fáze 1 až 3 proběhly úspěšně ...

Zpracování paketu ve směrovači



Full Packet Context

Plný kontext

- Kontext doplněn o výstupní informace
- Základní deska přenese paket i kontext na výstupní rozhraní
- Kontext obsahuje adresu uložení paketu v paměti
- Zpracování paketu předáno správci front

⇒ Další zpracování probíhá už na výstupní síťové kartě

Zpracování paketu ve směrovači

4 *Zpracování správcem front*

- Podle priority v kontextu paketu je paket vložen do příslušné výstupní fronty
- Obsluha fronty podle daného plánovacího algoritmu

5 *Předání kontextu správci provozu*

- Kontrola omezení rychlosti (shaping) dle kontextu
- Překročení rychlost: zahození či zpomalení

6 *Výstupní síťové rozhraní*

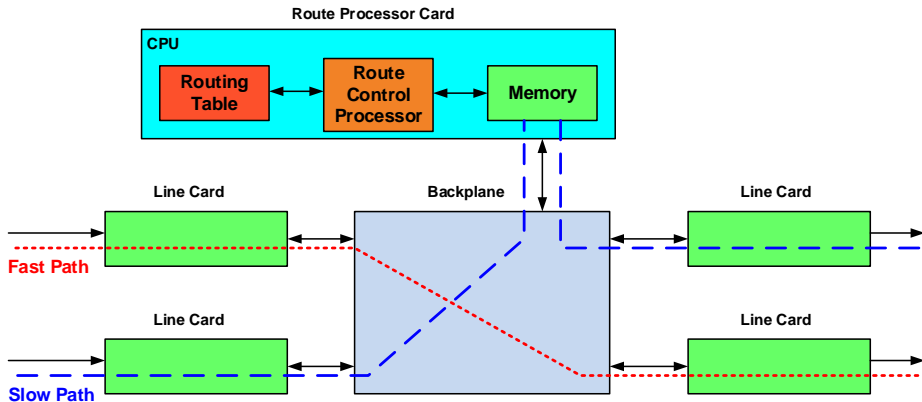
- L3: aktualizace TTL, přepočítání kontrolního součtu
- L2: přidání hlavičky, výpočet CRC
- Odeslání paketu (zapsání na výstupní médium)

- Jaké mohou být příčiny zahození paketu ve fázích 4 – 6?

Rychlá cesta a pomalá cesta

Rychlá cesta a pomalá cesta (Fast Path and Slow Path)

- Dva způsoby zpracování paketů ve směrovači
- Rychlá cesta (data plane) vs. pomalá cesta (control plane)



Rychlá cesta

Časově kritické operace

- Zpracování v hardware v síťové modulu (data plane)
- Toto zpracování se týká většiny paketů
 - Potřeba optimalizovat a urychlit průchod paketu zařízením
 - Využití obvodů ASIC na síťovém modulu
- Zpracování hlavičky IP
 - Kontrola verze, délky paketu, TTL, přepočítání kontrolního součtu
- Přeposlání paketu
 - Lokální uložení, přeposlání na jeden port (unicast) či více portů (multicast)
- Klasifikace paketu na základě informací z hlavičky
 - Optimalizované datové struktury pro rychlé uložení a vyhledání
- Uložení do front, plánování
 - Různé typy front, různé typy obsluhy

Pomalá cesta

Časově nekritické operace

- Pakety částečně zpracovány v hardwaru
- Většina zpracování probíhá v softwaru (control plane)
- Zpracování ARP
 - Zjištění výstupní adresy L2: první paket, ostatní pakety
 - Je možné implementovat i na kartě či v procesoru
- Fragmentace a defragmentace
 - Procházející fragmentované pakety nejsou sestaveny
 - Sestavení vyžaduje přeskládání a detekci ztracených fragmentů (drahé)
- Pokročilé zpracování IP datagramu
 - Zdrojové směrování, zaznamenávní cesty
 - Generování zpráv ICMP
- Správa a monitorování sítě (např. SNMP)
- Zpracování směrovacích informací

Přepínání paketů (Packet Forwarding)

Přepínání paketů z jednoho rozhraní na druhé na základě směrovacích informací je jedna z nejdůležitějších funkcí směrovače.

Proces přepínání paketů zahrnuje:

- 1) zjištění, zda cíl cesty paketu je dosažitelný,
- 2) vyhledání nejbližšího uzlu na cestě (next-hop) a určení výstupního rozhraní,
- 3) vyhledání informací pro vytvoření L2 hlavičky paketu na výstupu.

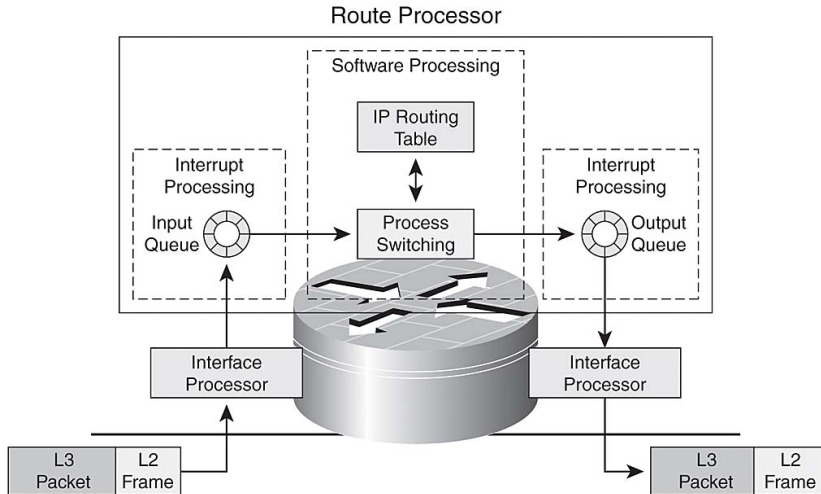
⇒ Každý z těchto kroků je kritický pro úspěšné odeslání paketu.

Způsoby přepínání paketu

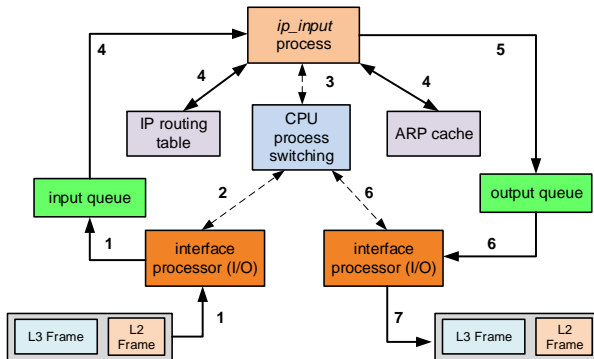
- 1) Softwarové přepínání (Process Switching)
- 2) Rychlé přepínání (Fast Switching)
- 3) Expresní přepínání CEF (Cisco Express Forwarding)

Softwarové přepínání (Process Switching)

- Pro každý paket se hledá cesta ve směrovací tabulce a určuje se MAC adresa cíle.
- Směrovač využívá standardní mechanismus přepíná procesů v OS.

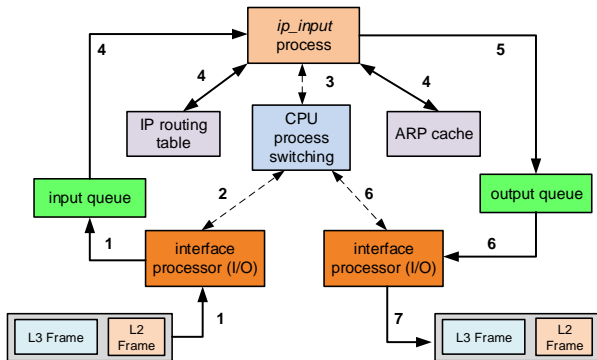


Softwarové přepínání (Process Switching)



- ❶ I/O procesor detekuje paket na vstupním médiu. Přenese ho do vstupního bufferu.
- ❷ I/O procesor vygeneruje přerušení. Během přerušení určí centrální procesor typ paketu a zkopíruje ho do centrální paměti.
- ❸ Centrální plánovač zjistí, že ve vstupní frontě je paket. Naplánuje jeho další zpracování procesem `ip_input`.

Softwarové přepínání (Process Switching)



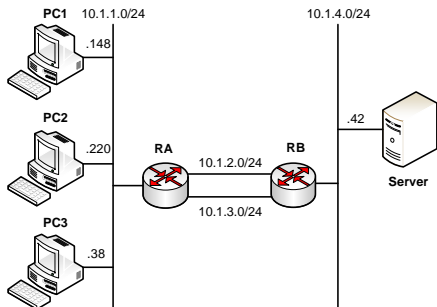
- ④ Proces pro zpracování vyhledá ve směrovací tabulce další uzel (next hop) a výstupní rozhraní. V paměti ARP cache vyhledá MAC adresu dalšího uzlu.
- ⑤ Přepíše L2 hlavičku paketu a umístí paket do výstupní fronty na výstupním portu.
- ⑥ Paket vložen do fronty na výstupním portu.
- ⑦ I/O procesor detekuje paket ve vysílací frontě. Zapiše ho na síťové médium.

Softwarové přepínání (Process Switching)

Vyvažování zátěže (load balancing) při softwarovém přepínání

- Vyvažování v případě více cest ve směrovací tabulce probíhá po paketech.
- Pakety jsou automaticky rozděleny podle metriky (ceny) každé cesty.

Příklad: klienti ze sítě 10.1.1.0/24 přistupují na server 10.1.4.42.

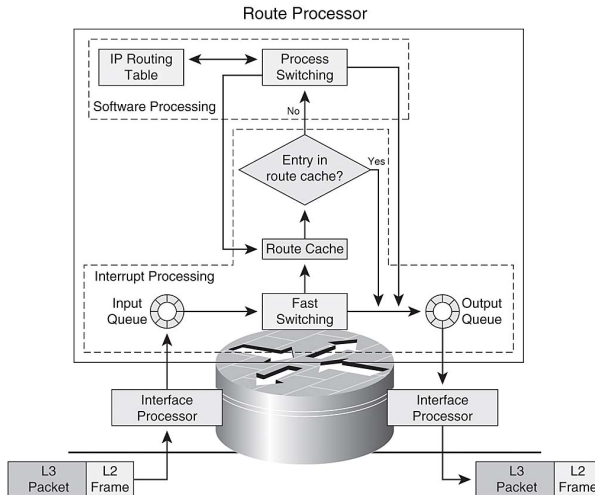


Příklad komunikace:

- 1 Počítač PC1 pošle paket na router RA.
- 2 RA vybere cestu podle metriky (ceny).
- 3 RA pošle paket z PC1 na RB.
- 4 RA přijme další paket.
- 5 RA vybere cestu podle metriky.
- 6 RA pošle paket na RB.

- Dle ceny linky se vypočítá čítač sdílení zátěže (load share counter).
- Cesta se vybírá podle poměru čítače.

Rychlé přepínání (Fast Switching)

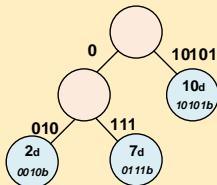


- Využívá vyrovnávací paměť route cache s předpočítanou L2 hlavičkou.
- První paket toku se přepíná softwarově. Další pakety toku jdou rychlou cestou.

Rychlé přepínání (Fast Switching)

Vlastnosti rychlé paměti cache (Fast Cache)

- Paměť původně implementována pomocí hešovací tabulky → problém kolizí.
- Novější implementace využívají prefixového binárního stromu *2-way radix tree*



Inserting 2, 7 and 10

- Kompaktní varianta stromu prefixů *trie*
- Počet potomků vnitřních uzlů \leq základ (radix) r .
- Pokud uzel má pouze jeden list, připojí se list k předchozímu uzlu (redukce prostoru).
- Hrany mohou obsahovat posloupnost bitů.

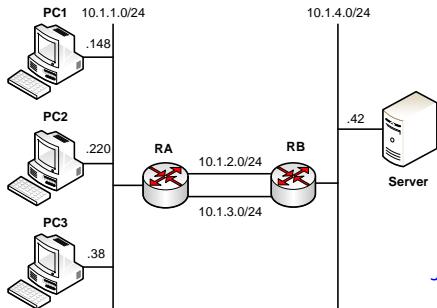
- Záznamy vkládány do paměti cache při přepínání paketu.
- Rekurzivní odkazy se vyhodnotí před vložením záznamu do tabulky.
- Neexistuje synchronizace mezi směrovací tabulkou, ARP cache a Fast cache.
- Záznam se zneplatní při změně ARP cache či směrovací tabulky.
- Při zaplnění paměti nad určitou mez se začnou záznamy náhodně zahazovat.

Rychlé přepínání (Fast Switching)

Vyvažování zátěže (load balancing) při přepínání pomocí paměti Fast cache

- Vyvažování zátěže není po paketech, protože směrování je odděleno od přepínání.

Příklad: klienti ze sítě 10.1.1.0/24 přistupují na server 10.1.4.42.



Příklad komunikace:

- 1 Počítač PC1 pošle požadavek na router RA.
- 2 RA vybere cestu a vloží záznam do Fast cache.
- 3 Počítač PC2 chce komunikovat se serverem.
- 4 RA vyhledá záznam ve Fast Cache.
- 5 RA přepošle paket podle daného záznamu.

Jak dlouho se bude používat tato cesta?

- Dochází k vyvažování zátěže podle adresy cíle (destination-based).
- Vyvažování je nedeterministické. ⇒ Lze řešit pomocí expresního přepínání CEF.

Expresní přepínání CEF (Cisco Express Forwarding)

Omezení rychlého přepínání (Fast Switching)

- Fast cache neumožňuje vložit masku → problém u překrývajících se záznamů.
- Změny v ARP tabulce způsobují zneplatnění záznamů ve Fast cache.
- První paket se vždy zpracovává softwarově.
- Nedostatečné vyvažování zátěže.

Nevadí u běžných podnikových směrovačů ⇒ kritické pro pátevní směrovače.

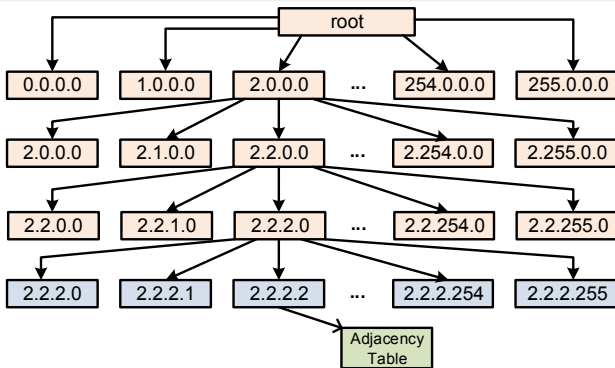
Požadavky na pátevní směrovače

- Extrémně velké směrovací tabulky (sta tisíce záznamů)
→ *Potřebujeme efektivní datovou strukturu pro uložení směrovací tabulky.*
- Dochází k častým změnám ve směrovacích tabulkách, což vede k zneplatnění záznamů ve Fast cache a výpadkům ve vyhledávání.
→ *Potřebujeme oddělit směrování a přepínání.*
- Velká režie softwarového přepínání
→ *Zkusme předpočítat tabulku pro přepínání předtím, než přijdou pakety.*

Expresní přepínání CEF (Cisco Express Forwarding)

Tabulka CEF

- Vytváří se dynamicky na základě směrovací tabulky.
- Optimalizována pro vyhledávání pomocí 256-ární struktury *trie* (256-way mtrie).
- Každý uzel může mít až 256 potomků reprezentující další byte adresy IPv4.
- List obsahuje ukazatel do tabulky sousedů (Adjacency Table).



Expresní přepínání CEF (Cisco Express Forwarding)

Tabulka sousedů (Adjacency Table)

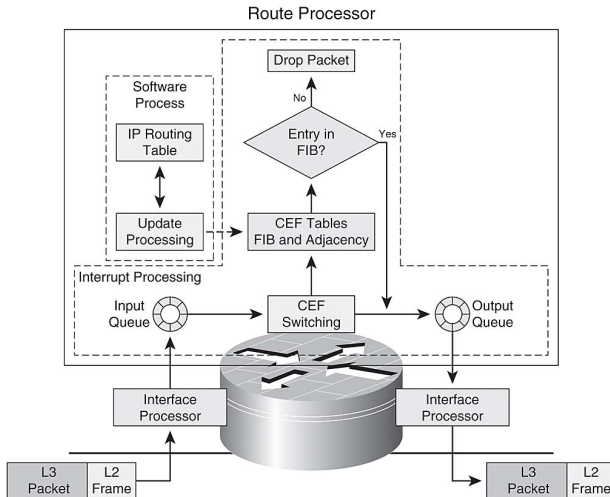
- Obsahuje data pro vytváření L2 hlaviček pro přímo připojené sousedy:
 - MAC adresu cíle (next-hop), MAC adresu zdroje, číslo IP protokolu a další
- Vytváří se na základě ARP tabulky, mapovací tabulky Frame Relay, apod.
- *Typy záznamů v tabulce sousedů:*
 - Předpočítané hlavičky přímo připojených sousedů.
 - Nekompletní L2 hlavičky → vyžadují dotaz ARP.
 - Pakety určené pro softwarové zpracování.

Příklad: MAC DST = 0008 A37F CB7C, MAC SRC = 0008 A378 BDFF, IP Proto = 0800

```
Router-2# show adjacency internal
Protocol Interface      Address
IP          Ethernet0/0        172.18.114.1 (23)
                280 packets, 20738 bytes
                0008A3FCB7C00503EFA37800800
                ARP          04:02:58
                Epoch: 0
                Fast adjacency disabled
                IP direct enabled
                IP mtu 1500 (0x0)
                Adjacency pointer 0x816BFC20, refCount 23
                Connection ID 0x000000
                Bucket 205
```

Expresní přepínání CEF (Cisco Express Forwarding)

Průběh expresního přepínání CEF



- 1 Podle směrovací tabulky se předpočítá tabulka CEF a tabulka sousedů.
- 2 V tabulce CEF se vyhledá pro daný cíl ukazatel na záznam v tabulce sousedů.
- 3 V tabulce sousedů se vyhledá předkompilovaná hlavička L2.
- 4 Paket se předá na výstupní rozhraní.

Expresní přepínání CEF (Cisco Express Forwarding)

Výhody mechanismu CEF

- Tabulka CEF předpočítána na základě směrovací tabulky a tabulky sousedů ještě před příchodem paketu → nedochází k softwarovému přepínání.
- Oddělení směrovacích informací od L2 dat → nedochází ke stárnutí záznamů při expiraci záznamu v tabulce ARP.
- Změny ve směrovací tabulce či tabulce ARP se okamžitě propagují do tabulky CEF.
- ARP tabulka se synchronizuje se záznamy v tabulce sousedů.

Vyvažování zátěže

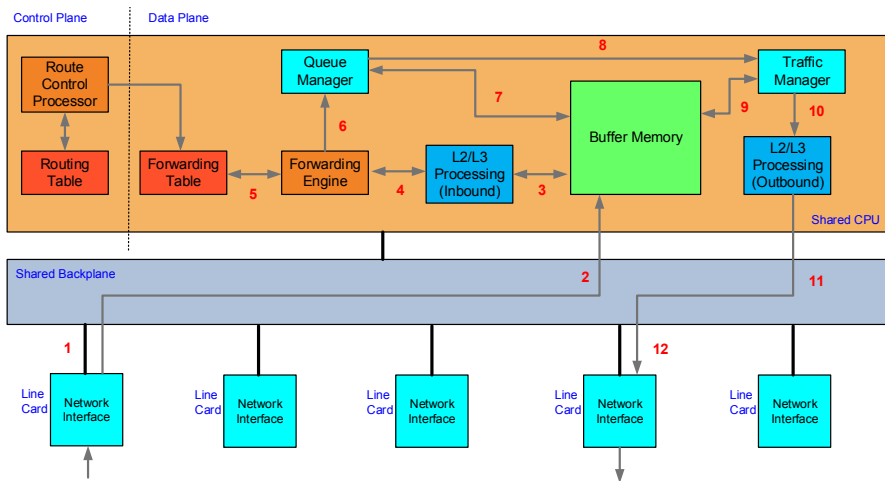
- Vyvažování lze provádět podle paketu nebo podle dvojice zdroj/cíl.
- Vyvažování podle dvojice zdrojová/cílová adresa:
 - Příslušný záznam v tabulce CEF ukazuje na tabulku Load Share.
 - Implementována jako hešovací tabulka podle cílové a zdrojové adresy.
 - Obsahuje ukazatele na paralelní cesty v tabulce sousedů.

Přehled architektur směrovačů

Architektury směrovačů podle způsobu přepínání paketů [2]

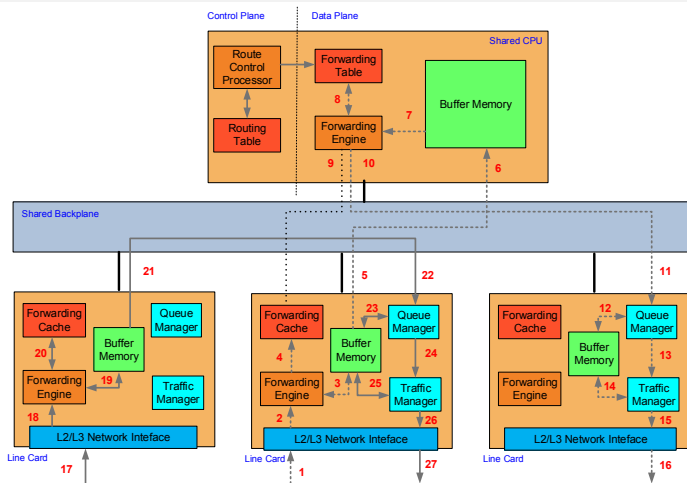
- ❶ Architektura se sdíleným procesorem (Shared CPU)
 - Varianta s vyrovnávací pamětí na kartě
- ❷ Architektura s nezávislými moduly FE (Shared Forwarding Engine)
 - Varianta s přepínací směrnicí
- ❸ Distribuovaná architektura (Shared Nothing)
- ❹ Modulární architektura (Clustered Architecture)

1. Architektura se sdíleným procesorem



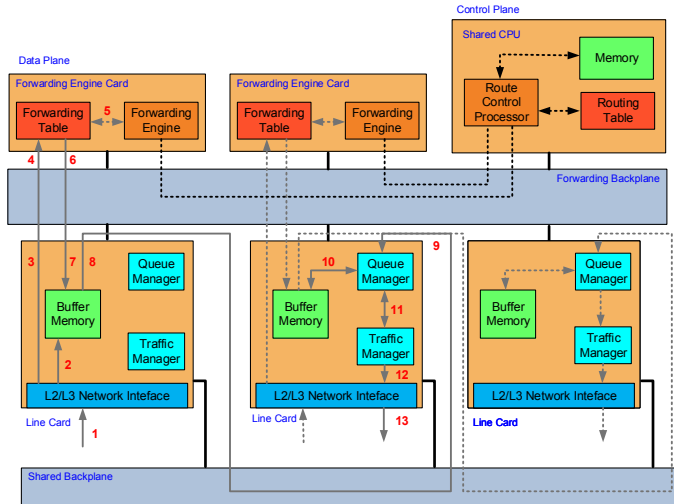
- Využívá softwarové přepínání → každý paket zpracován na CPU.
- Cykly CPU rozděleny mezi přeposílání, směrování a další operace.
- Sdílená sběrnice i procesor ⇒ levné, ale pomalé.

1. Architektura se sdíleným procesorem



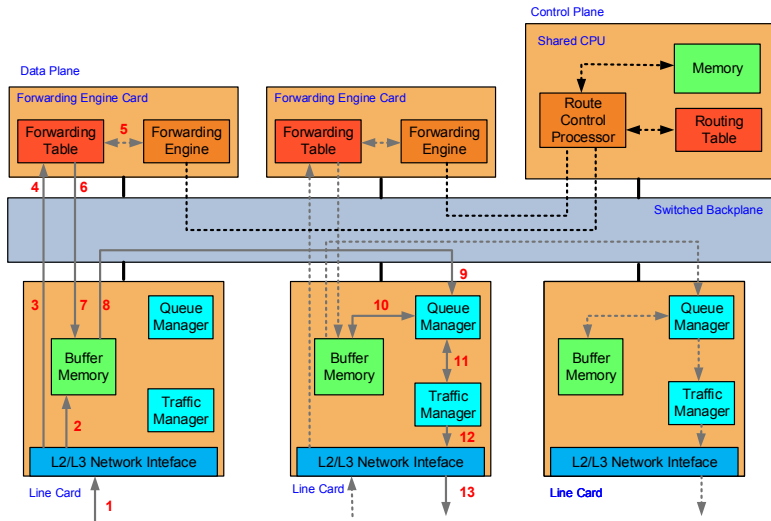
- Varianta s pamětí cache na kartě → synchronizace přepínacích tabulek.
- Síťová karta obsahuje FE pro zpracování hlaviček, paměť a přepínací tabulku.
- Rychlé přepínání (Fast Switching): první paket vs. další pakety.

2. Architektura s nezávislými moduly FE



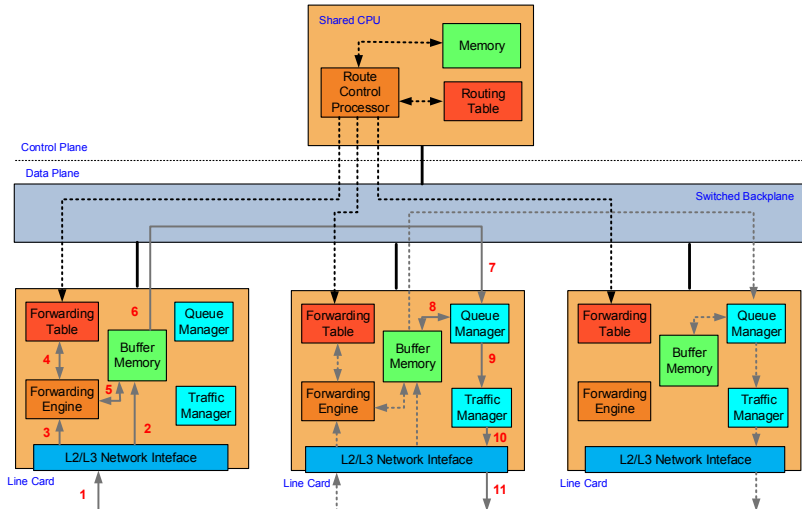
- Přepínací moduly FE implementovány na speciálních kartách.
- Paralelní zpracování paketů, dvě sběrnice (sdílená a přepínaná).

2. Architektura s nezávislými moduly FE



- Varianta s jednou přepínanou sběrnici \Rightarrow vyšší propustnost.

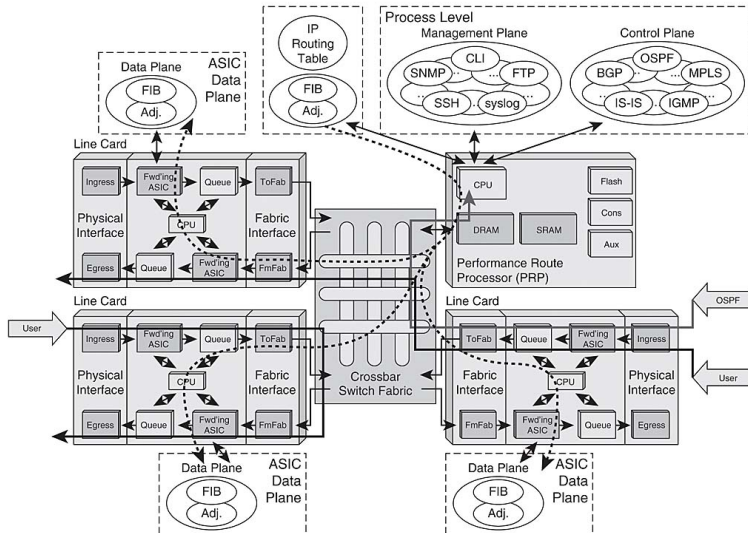
3. Distribuovaná architektura (Shared Nothing)



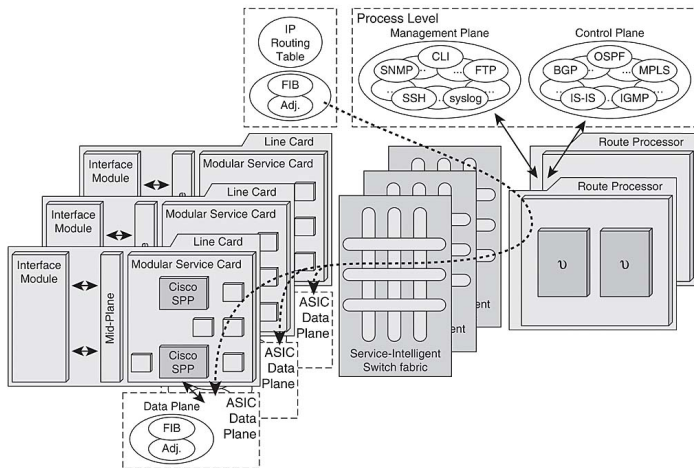
- Veškeré zpracování paketu přeneseno do síťového modulu.
- Oddělení procesu směrování a přepínání → využití technologie CEF.

3. Distribuovaná architektura (Shared Nothing)

- Příklad: Cisco 7500, Cisco 12000 (GSR, Gigabit Switch Router)



4. Modulární architektura (Clustered Architecture)



- Nezávislé moduly připojené k centrálnímu přepínači.
- Více přepínacích modulů, více směrovacích procesorů.
- Distribuované zpracování → dCEF (distributed CEF).

Otázky k opakování

- Vyjmenujte a stručně popište základní a pokročilé funkce směrovače?
- Popište základní stavební prvky (funkční moduly) směrovače?
- Co je to kontext paketu a k čemu se používá?
- Co je rychlá a pomalá cesta při zpracování paketů ve směrovači? Popište průchod paketu pomalou a rychlou cestou a příklad zpracování.
- Popište softwarové přepínání na směrovači.
- Čím se liší rychlé přepínání (fast switching) a expresní přepínání (CEF) na směrovači?
- Popište průběh expresní přepínání paketů CEF ve směrovači. Jaké tabulky se používají, co obsahují a jak se aktualizují?
- Popište průchod paketu směrovačem u architektury se sdíleným procesorem, s nezávislými jednotkami FE a u distribuované architektury.

Literatura

- [1] F. Baker.
Requirements for IP Version 4 Routers.
IETF RFC 1812, June 1995.
- [2] D. Medhi and K. Ramasamy.
Network Routing. Algorithms, Protocols, and Architectures.
Elsevier, Inc., 2007.
- [3] George Varghese.
Network Algorithmics.
Elsevier, Inc., 2005.
- [4] Vijay Bollapragada, Curtis Murphy, and Russ White.
Inside Cisco IOS Software Architecture.
Cisco Press, 2000.