PA159
Počítačové sítě a jejich aplikace I

Luděk Matyska

FI MU, podzim 2009

Organizace předmětu

- Přednášky nejsou povinné
- Předpokládájí se vstupní znalosti z předmětu PB156
- Přednášky budou nahrávány, slidy budou na webu
- Zkouška pouze písemná
  - plánovány cca 3 řádné termíny a 2 opravné
  - prototypové písemky budou k dispozici
- Studijní literatura
  - RFC a další, bude uvedeno u příslušných pasáží
  - RFCs: http://www.zvon.org, ftp://ftp.fi.muni.cz/pub/rfc

Cíle předmětu

- Poskytnout pokročilý pohled na oblast počítačových sítí a jejich aplikací
- Probírané oblasti
  - Architektura sítí - rekapitulace
    - využití formalismů pro specifikaci protokolů
  - Správa sítí
  - Bezpečnost
  - Kvalita služeb
  - Sítě a multimédia
  - Virtuální spolupráce s využitím sítí

Rekapitulace předpokládaných znalostí

Model ideální sítě

- Transparentní pro uživatele/aplikace
  - pouze end-to-end vlastnosti
- Neomezená propustnost
- Nulové výpadky
- Nulový rozptyl zpoždění (jitter)
- Dodržení pořadí paketů
- Nemůže dojít k poškození dat

- Slouží pro klasifikaci vlastností skutečných sítí

Reálné sítě

- Mají vnitřní strukturu, která ovlivňuje přenos dat
- Omezená kapacita (šířka pásma)
- Některé sítě
  - Variabilní zpoždění
  - Výpadky, poškození dat
  - Přeuspořádání paketů
  - …

Požadované vlastnosti

- Účinnost
  - maximální využití kapacity
- Férovost (fairness)
  - stejný přístup ke všem tokům dat (v rámci dané třídy kvality služby)
- Decentralizovaná správa
- Rychlá konvergence při reakci na změnu stavu
- Multiplexing/demultiplexing
- Spolehlivost – alespoň obvykle

Požadované vlastnosti (2)

- Řízení toku dat – alespoň obvykle
  - ochrana proti zahlcení přijímající stanice
  - ochrana proti zahlcení sítě (ochrana síťových prvků před vyčerpáním kapacity a bufferů)
  - *de facto* globální optimalizační problém
  - odpovídá systému se zpožděnou zpětnou vazbou

Zábrana nebo řízení zahlcení

- Zábrana zahlcení
  - nikdy nedojde k zahlcení
- Řízení zahlcení
  - včas detekováno
  - rychlá reakce vedoucí k jeho odstranění

Implementace funkcionality

- End-to-End
  - požadovanou funkcionalitu je možné zajistit pouze se znalostí a prostřednictvím koncové aplikace
  - např. bezpečnost
- Hop-by-Hop
  - opakováním určité funkcionality uvnitř sítě je možné dosáhnout výrazného zvýšení výkonu na úrovni každého dvoubodového přenosu (např. kontrolní součty)
- E2E lze aplikovat rekurzivně
  - jak pro uzly sítě tak i pro jednotlivé vrstvy
- E2E vs. HbH - záleží na úhlu pohledu (HbH v jednom pohledu je E2E v druhém)

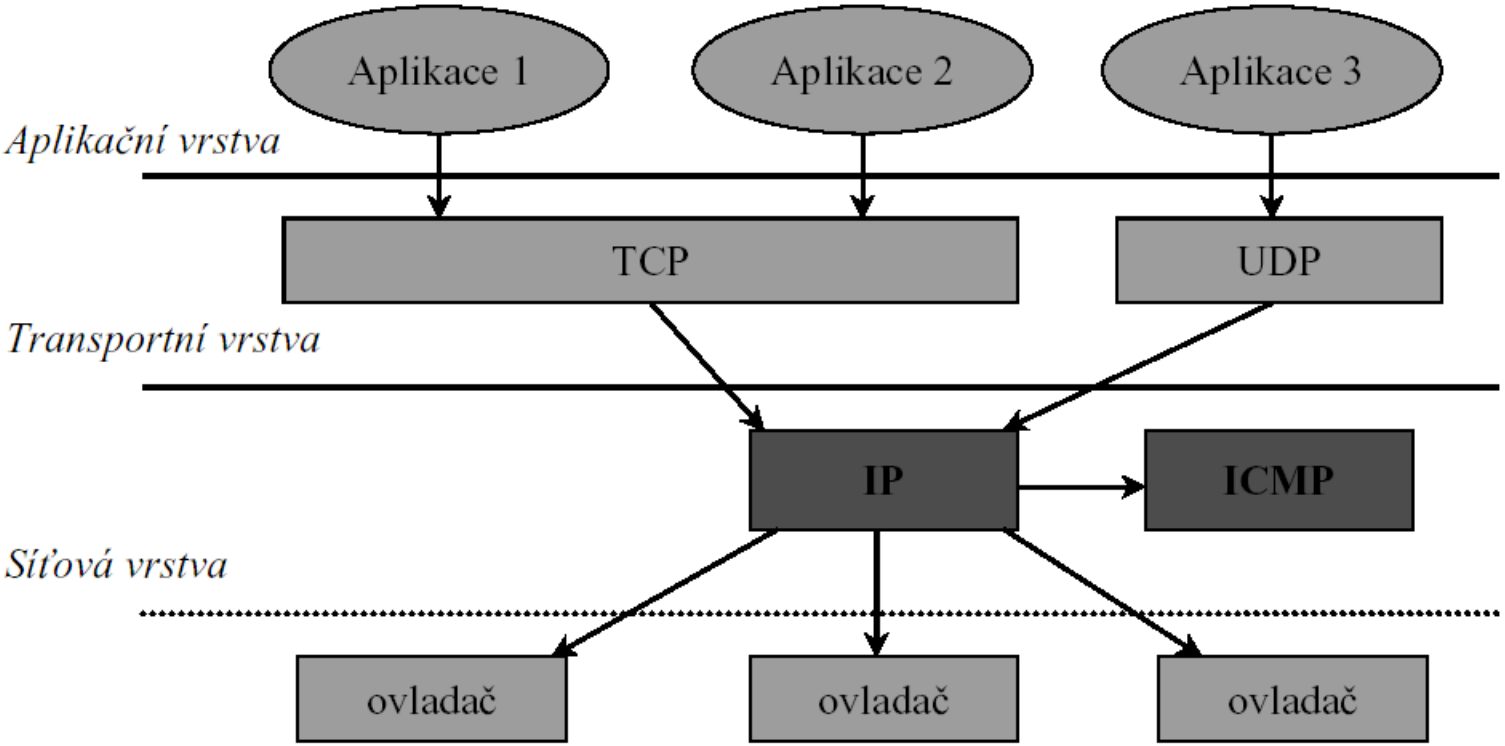
Přístupy k budování sítí

- Telefonní
  - přenos signálu o přesně definovaných parametrech (z pohledu přenosu dat)
  - connection-oriented, stavová (=>okruhy)
  - automatická kvalita služby (QoS)
- Počítačové
  - variabilní data
  - connectionless (bezestavové)
  - dělení dat na segmenty => pakety, buňky...
  - problém s realizací kvality služby (QoS)
    - není definováno spojení, každý paket může putovat jinou cestou, …
  - best-effort

Kvalita přenosových služeb

- Platí pro spojované služby
- Dohodne se při navázání spojení
- Parametry
  - zpoždění při navazování a rušení spojení
  - pravděpodobnost neúspěchu požadavku na spojení
  - chybovost přenosu dat
  - propustnost (minimální, průměrná, špičková)
  - zpoždění (minimální, průměrné, špičkové)
  - rozptyl zpoždění (jitter)

Model přesýpacích hodin



Fyzická vrstva a vrstva datových spojů

- Typy transportních médií
  - optické, metalické, bezdrátové
- Přístup k přenosovému médiu
  - Ethernet, Token-Ring
- Kódování dat
  - limituje využití šířky pásma, může zvyšovat robustnost
- Multiplexování
  - Wave Division Multiplexing (WDM, optické spoje)
  - Time Division Multiplexing (TDM, SDH/SONET)

Pakety

- Dělení dat kvůli multiplexování
- Délka paketů ovlivňuje celkové chování sítě
  - dlouhé pakety => vyšší výkon jednotlivých spojení
  - krátké pakety => lepší férovost

  - pakety s variabilní délkou => lepší přizpůsobení se charakteru přenášených dat
  - pakety s fixní délkou => zajištění kvality služby

Pakety (2)

- Rozklad příliš dlouhých zpráv na menší části = fragmentace
  - číslování fragmentů kvůli opětovnému skládání
  - možno provádět rekurzivně
- Typické velikosti paketů/buněk
  - ATM: 53B (z toho 5B režie!)
  - Ethernet: 1500B
  - Gigabit Ethernet: až 9kB resp. 16kB

ATM

- „Cesta do pekel je dlážděna dobrými úmysly“
- Zaměřeno na QoS
- Okruhy + krátké buňky = velká režie
  - udržování stavové informace
    - páteřní směrovače běžně zajišťují >10.000 spojení
  - fragmentace dat
    - cca 10% režie (5B/53B)
- Hranice běžné aplikovatelnosti: 622 Mbps – 1.2 Gbps
- Dnes už neperspektivní
- MPLS trochu navazuje

Přepínání

- Přepínání okruhů (spojované sítě)
  - vytvoření okruhu
  - přepínání dle vytvořených cest
  - např. telefonní sítě
- Přepínání paketů (nespojované sítě)
  - store and forward
  - cut through

Přepínání u nespojovaných sítích

- Backward learning algorithm
  - přepínač/můstek se učí naslouchánímm na sdíleném médiu a sleduje zdrojové adresy
  - zasílá podle cílové adresy
  - informace stárne (zapomenutí v řádu desítek sekund)
- V případě vytvoření cyklů => hledání (nejmenší) kostry ((minimum) spanning tree)
  - distribuovaný algoritmus
  - robustnost proti výpadkům
  - nevyžaduje centrální organizaci

Spanning Tree

- Cílem je některé porty můstků nepoužívat
- Volba kořenového vrcholu stromu (nejnižší adresa)
- Postupný růst stromu – nejkratší vzdálenost od kořene (preference mají uzly s nižší adresou, pokud více možností)
- Nalezené „nejlepší“ cesty (definují aktivní porty můstku)
- Vypnout všechny ostatní porty

Spanning Tree (2)

- Každý můstek posílá periodické zprávy
  - vlastní adresa, adresa kořenového můstku, vzdálenost od kořene
- Když dostane zprávu od souseda, upraví definici „nejlepší“ cesty
  - preferuje kořen s menší adresou
  - preferuje menší vzdálenosti
  - při stejných vzdálenostech preferuje nižší adresu

Spanning Tree (3)

- Inicializace
  - Na začátku si každý můstek myslí, že je kořenem
    - pošle konfigurační informaci na všechny porty
  - Následně můstky posílají jen“nejlepší“ konfigurace (cesty)
    - přičti 1 k vzdálenosti, pošli na porty kde je stále „nejlepší“ cesta
    - vypni zasílání dat na všech ostatních portech

Spanning Tree (4)

- Formát zprávy:
  - <kořen, vzdálenost ke kořeni, můstek>
- Informace „stárne“
  - selhání kořene vede eventuálně k volbě nového kořene
- Rekonfigurace neprobíhá okamžitě (je tlumena)
  - prevence vzniku dočasných cyklů

L2 prvky

- Můstky (Bridges)
  - přemostění sdíleného média (oddělení provozu dvou segmentů sítě)
- Přepínače (Switches)
  - víceportové můstky
  - používají L2 adresování => L2 směrování
  - v současnosti nejpoužívanější forma propojení lokálních sítí
  - možnost kaskádování
- Z pohledu vyšších vrstev (např. IP) vytvářejí uniformní transparentní prostředí

L2 prvky (2)

- Problematika budování rozsáhlejších sítí na L2
  - přepínací tabulky rostou s počtem uzlů sítě (tedy počtem stanic, nikoli jen přepínačů/můstků)
  - neumožňuje logické oddělení lokálních sítí
  - netvoří hranice pro broadcastový provoz
  - pomalá konvergence - limitovaná hledáním (minimální) kostry

Síťová vrstva (L3)

- Doprava dat mezi uzly (obecně umístěných v různých sítích)
- Connectionless vs. connection-oriented
- Internetové protokoly pro síťovou vrstvu
  - IP - IPv4 a IPv6
  - ICMP (pro IPv4 i IPv6)
- Směrování (routing)
  - přehazování paketů pro dosažení cíle
  - získávání informace o topologii sítě

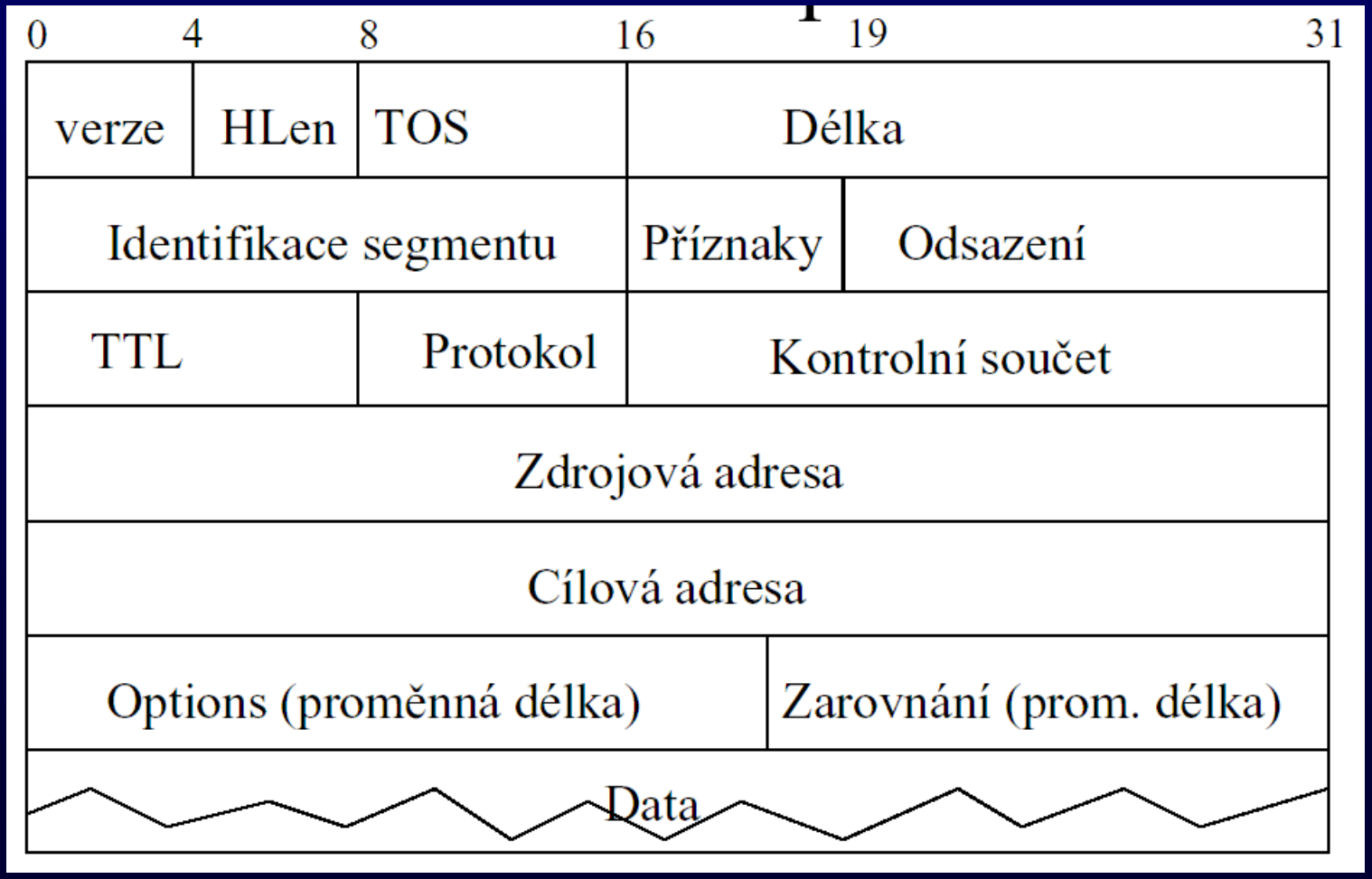
Modely síťové vrstvy

- Doručení datagramů
  - connectionless přístup, best-effort, nespolehlivé
  - není zaručeno doručení paketu
  - pakety se pohybují sítí nezávisle
    - může se využívat více cest kvůli vyvažování zátěže => problém s přeuspořádáváním paketů
- Virtuální kanály
  - connection-oriented přístup, dohodnutá kvalita služby
  - signalizace pro vytváření a řízení kanálů
  - pakety jedné relace prochází jednou cestou

IP

- Internet Protocol
- Definován ve dvou verzích:
  - IPv4 (RFC 791)
  - IPv6 (RFC 2460)
- Globální hierarchické adresní schéma
  - 32 bit pro IPv4, 128 bit pro IPv6
  - mapování na adresy nižší vrstvy (ARP, RARP)
- Přenos sítí – směrování

Formát IPv4 paketu



Formát IPv4 paketu (2)

- Legenda
  - HLen = počet 32-bitových slov
  - TOS = Type of Service (nepoužíván)
  - Délka = délka paketu ve slabikách
  - Protocol = protokol vyšší vrstvy
  - CRC = detekce poškození
  - TTL = Time to Live
- Práce s TTL
  - každý směrovač sníží hodnotu o 1
  - TTL=0 => paket zahozen
  - ochrana před nekonečnými cykly a zbloudilými pakety

IPv6

- 128-bitové adresy
  - 340282366920938463463374607431768211456 (3.10^{38}) jedinečných adres
- jednodušší a flexibilnější hlavička se 64-bitovým zarovnáváním
- podpora real-time provozu (značkování toků (*flow label*))
- směrovače nesmí fragmentovat
- podpora autokonfigurace (vylepšená obdoba DHCP, přímo součást protokolu)
- rozšíření hlaviček
  - bezpečnost (AH + ESP, povinná součást implementace ;o))
  - mobilita

Fragmentace na IP vrstvě

- IPv4
  - umožňuje (i rekurzivně) fragmentovat
- IPv6
  - vrátí chybu, v níž oznamuje max. přípustnou délku
  - fragmentace se musí odehrávat pouze na vysílači
- Problémy s fragmentací:
  - ztráta fragmentu = ztráta paketu
  - zpomaluje přenos
- Detekce nejmenšího maximálního fragmentu
  - algoritmus Path MTU Discovery
  - problém dynamických cest

ICMP

- Internet Control Message Protocol
  - RFC 792
  - řídící informace pro IP protokol, který doprovází
- Použití
  - odhalení chyb při přenosu paketů
    - obsahují část IP paketu, který chybu způsobil
  - zjišťování stavu sítě
  - většinou se zpracovává jinak, než IP
    - např. omezení rychlosti posílání ICMP paketů
- Ochrana proti rekurzivnímu generování
  - na ztrátu ICMP paketu se nereaguje

ICMP zprávy

- *Destination unreachable*
  - destinace může být: podsíť, uzel, protokol, port
- *Redirect*
  - oznámení o kratší cestě
- *TTL expired*
  - odpovídající IP paket dosáhl stavu TTL=0
- *Echo request/reply*
  - ping
  - traceroute (vlastně ping s proměnným TTL)

Směrování (routing)

- Problém:
  Nalezení cesty mezi dvěma uzly, která splňuje zadané omezující podmínky.
- Ovlivňující faktory
  - statické: topologie
  - dynamické: zátěž a chování sítě v daném okamžiku
- Pakety prochází řadou směrovačů mezi vysílačem a přijímačem

Směrování (2)

- Statické směrování
  - předem nadefinované, vhodné pro statickou topologii
  - jednodušší, méně flexibilní
- Dynamické cesty
  - složité (distribuované) algoritmy
  - nutná aktualizace směrovacích tabulek
    - protokol pro aktualizaci tabulek
  - adaptabilní na výpadky a další dynamické změny prostředí
  - nezaručuje pořadí doručení

Směrovací schémata

- *Distribuované* nebo centralizované
- *„Krok za krokem“* nebo zdrojové (source-based)
- *Jedno* nebo vícecestné
- *Deterministické* nebo stochastické
- *Dynamický* nebo statický výběr cest

- Metody použité v Internetu jsou psány kurzívou

Požadované vlastnosti směrovacího algoritmu

- Správnost
- Jednoduchost
- Efektivita a škálovatelnost
  - minimalizace množství řídících informací (~5% provozu!)
  - minimalizace velikosti směrovacích tabulek
- Robustnost a stabilita
  - nezbytný je distribuovaný algoritmus
- Spravedlivost
- Optimálnost
  - „Co je to nejlepší cesta?“

Problém globálního pohledu

- Globální znalost je problematická
  - je složité ji získat
  - když už se to povede, tak není aktuální
  - musí být lokálně relevantní
- Rozpor mezi lokální a globální znalostí může způsobit
  - cykly (černé díry)
  - oscilace (adaptace na zátěž)

Reprezentace sítě pro směrování

- Síť reprezentována jako (typicky orientovaný) graf
- Uzly
  - adresy
- Hrany
  - ohodnocení = cena komunikace
    - cena = délka fronty
    - cena = 1/přenosová_kapacita
- Výkonnostní charakteristiky směrovacích algoritmů
  - minimalizace počtu skoků (jednotná cena)
  - minimalizace ceny

Rozhodování směrovacích algoritmů

- Okamžik
  - při uzavírání spojení (= vytváření okruhu)
    - spojované služby, virtuální kanály (ATM ev. i MPLS)
  - při příchodu dat (paketu)
    - nespojované služby, datagramy
- Místo
  - jediný uzel => centralizované algoritmy
  - každý uzel => distribuované algoritmy

Dynamické směrovací algoritmy

- Centralizované
  - stav se posílá do centra
  - centrum posílá tabulky uzlům
- Izolované
  - každý uzel sám za sebe (bez informací od okolních uzlů)
- Distribuované
  - kooperace uzlů

Izolované směrování

- Náhodná procházka
  - vysoká robustnost
- Extrakce informací z procházejících paketů
- Záplava (broadcast)
  - kopie všem kromě zdroje
  - mimořádně robustní
  - optimální
  - enormní zátěž sítě
- Vyžaduje zpětnou vazbu

Dynamické směrování

- Periodická výměna směrovacích informací
- Dynamická výměna tabulek
  - možnost dočasné nekonzistence
- Hierarchie směrování
  - sítě sítí
  - implicitní (default) cesta k neznámým cílům
  - hierarchie směrovačů
    - směrování k sítím (inter-AS)
    - směrování uvnitř sítí (intra-AS)

Metriky pro dynamické směrování

- Definice optimality
- Výměna informace o vzdálenosti
- Hledání minimální kostry
- Distance Vector (DV)
  - počet přechodů do cíle
  - možnost zavádění politik (inter-AS - např. BGP)
- Link State (LS)
  - dostupnost sousedů

Metriky pro dynamické směrování (2)

- Způsob výběru ceny
  - propustnost, zpoždění, ztráty
- Statické metriky
  - hop-count
  - optimalizace ruční editací cen
- Dynamické
  - závisí na zátěži, zabraňují přetížení
  - mohou oscilovat (nezbytné tlumení!)
- Např. ARPANET
  - původně počet paketů ve frontě, nověji průměrné zpoždění

Směrování Distance Vector

- Předpoklad
  - každý směrovač zná pouze cestu a cenu k sousedům
- Cíl
  - směrovací tabulka pro každý cíl v každém směrovači
- Idea
  - řekni sousedům svoji představu tabulky
- Inicializace
  - Distance Vector = <Cíl; Cena>
  - sousedé: známá cena
  - ostatní: nekonečno (resp. hodnota definovaná jako nekonečno, pro RIP např. 16)

Aktualizace Distance Vector

- Periodicky posílá svou tabulku sousedům
- Pokud je cesta v získaném DV zvětšená o cenu cesty k danému sousedovi lepší než stávající uložená, tak se nahradí ve vlastní tabulce
- Konverguje pro statickou topologii
- Nebezpečí zacyklení
  - A (<Internet;2;B>) —— B (<Internet;1>) —— Internet
  - vypadne spoj: B —— Internet
  - B získá tabulku (<Internet;3;A>)
  - => dělení horizontu – směrovač nesděluje cestu zpět uzlu, od něhož se o ní dozvěděl (problém zůstává pro složitější topologie)

RIP

- DV vektor používá jako hodnotu vzdálenosti počet uzlů
- Nekonečno = 16
  - nelze použít pro sítě s minimálním počtem hopů mezi libovolnými dvěma uzly >16
- Aktualizace každých 30s
  - trigger – změna stavu hrany
  - timeout – 180s
- RIPv1 definován v RFC 1058
- RIPv2 (přidána autentizace) v RFC 1388

Směrování Link State

- Předpoklad
  - každý směrovač zná pouze cestu a cenu k sousedům
- Cíl
  - směrovací tabulka pro každý cíl v každém směrovači
- Idea
  - šíří se topologie, cesty si počítají směrovače samy
  - fáze 1:
    šíření topologie (broadcast)
  - fáze 2:
    výpočet nekratší cesty (Dijkstra)
- Rychlejší konvergence a složitější algoritmus než DV

Algoritmus Link State

- Směrovač udržuje databázi LS a periodicky posílá LS pakety (LSP) sousedům
  - Obsah LSP:
    - Identifikátor uzlu
    - Cena spojů k sousedům
    - Pořadové číslo (SEQNO)
    - Doba platnosti (TTL)
- Každý směrovač posílá pakety dále kromě toho, od nějž informaci dostal
- Spolehlivost zajištěna potvrzením

Zvláštní stavy Link State

- Výpadek spoje nebo směrovače => odstranění starých údajů
  - SEQNO definuje nová data
  - Nové LSP s cenou rovnou nekonečnu
- Restart směrovače
  - SEQNO=0 a nové LSP s TTL=0
- Obnova spojení po rozpadu sítě
  - Synchronizace LS databází

OSPF

- Open Shortest Path First
- Nejpoužívanější LS protokol současnosti
- Rozšíření
  - autentizace zpráv
  - směrovací oblasti: další úroveň hierarchie
  - load balancing: více cest se stejnou cenou

Hierarchie směrování

- Subnetting
  - místo síť:uzel je síť:podsíť:uzel
  - řeší problém nedostatku adres
- Masky sítí/podsítí
  - S := source; D := destination; M := netmask;
    if (D & M) = (S & M) then
      local_net;
    else
      next_hop_or_default_gw;
    end if;

Hierarchie routování (2)

- Hierarchické členění Internetu => autonomní systémy (AS)
  - odpovídají administrativním doménám
  - 16-bitový identifikátor
  - škálovatelnost routování
    - Inter-AS (EGP, BGP-4)
    - Intra-AS (RIP, OSPF)
- Typy AS:
  - koncové (stub) AS
  - multihomed AS
  - transit AS

Inter-AS směrování

- hraniční směrovače
  - sumarizují a zveřejňují vnitřní adresy
  - aplikují politiky směrování
- interní směrovače mohou využít implicitní (default) cesty
- jádro sítě nepoužívá implicitní cesty
  - směrovač musí znát cestu ke všem AS (dnes cca 150 MB tabulek)
- EGP – DV přístup
- BGP – Path Vector + CIDR

CIDR

- Classless Inter-Domain Routing
- Agregace souvislých bloků s délkou 2^n
  - např. 191.11.16.0 – 191.11.31.255 = 191.11.16/20
  - redukce velikosti směrovacích tabulek
- Směrovací tabulky obsahují cesty k prefixům
  - v případě vícenásobné shody se použije nejdelší prefix

BGP

- Základní vlastnosti
  - Path Vector směrování
  - možnost definic politik směrování
  - šíření informací pracuje nad TCP (ostatní protokoly UDP!)
  - používá CIDR
- Path Vectors - podobné DV
  - posílá celé cesty (nejen koncové uzly)
  - lepší detekce cyklů
  - implicitně preferovány kratší cesty (mohou zasáhnout politiky)
  - pouze dostupnost, žádná další metrika

BGP (2)

- Politiky
  - kombinace nejlepších lokálních pravidel nemusí představovat globální optimum
  - asymetrie cest
  - obchodní rozhodnutí
  - lokální rozhodnutí definují
    - výběr cesty
    - zveřejnění interních podsítí
- „Kdo má prioritu: řídící nebo uživatelská data?“

TCP

- Transmission Control Protocol
  - teď jen stručně, podrobněji (přes)příště
- Služba s definovanými parametry
  - pokud je spojení, tak žádné ztráty, přeuspořádání či poškození dat
- Dělení na segmenty (MSS = Maximum Segment Size)
- Potvrzování
  - kumulativní příp. selektivní (SACKs)
  - piggybacking
  - duplikované potvrzení

TCP (2)

- Jedno potvrzení na 2 segmenty
  - pokud je přenos dost rychlý
  - timeout 500 ms
- Řízení toku pomocí okna
  - řídí pouze odesílající, informace jsou také od přijímajícího (rwnd)

TCP (3)

- 4 algoritmy:
  - Pomalý start (Slow Start)
    - exponenciální nárůst
  - Zábrana zahlcení (Congestion Avoidance)
    - lineární nárůst – exponenciální pokles
  - Rychlá retransmise (Fast Retransmit)
    - detekce výpadku pomocí duplikátních potvrzení
  - Rychlé obnovení (Fast Recovery)
    - přeskočení SS po FR

UDP

- Nespojovaná služba
- Prostý přenos paketů s kontrolním součtem
- Nezajištěná
  - odpovědnost na aplikaci
- Hlavička
  - porty odesílatele a příjemce
  - délka
  - kontrolní součet

Výhled na (přes)příště

- Úvod do abstraktní protokolové (AP) notace
  - M. Gouda: Elements of Network Protocol Designs, 1998
- IP a směrování
  - AP notace
  - praktická implementace
- TCP a UDP
  - AP notace
  - praktická implementace