

PA159, přednáška 3

9. 10. 2009

Co jsme dělali minule...

- Popis AP notace + příklady
- Elementární složky protokolů pro zajištěný přenos
 - typy potvrzování
 - řízení toku (dle příjemce, dle kapacity sítě)
- TCP
 - základní chování
 - problémy na tlustých dlouhých linkách

... a co nás dnes čeká

- Verifikace protokolů v AP notaci
- Směrování
 - elementy směrovacích protokolů
 - distance vector protokoly
 - link state protokoly
- Běžné směrovací protokoly
 - OSPF, BGP

Verifikace protokolů

Verifikace protokolu

- Chceme dokázat žádané chování protokolu
- Minimalistická verifikace programů
 - anotace
 - kdykoli program dosáhne nějaké definované místo v kódu, hodnoty proměnných splňují nějaký predikát
 - ukončení
 - obecně nerozhodnutelné
- Minimalistická verifikace protokolů
 - uzávěra (closure)
 - opakování (recurrence)

Uzávěra (closure)

- stavový predikát r
 - vrací *true* nebo *false*
- r -stav
 - stav, v němž je hodnota predikátu r rovna *true*
- uzávěra
 - stavový predikát r je uzávěra iff
 - alespoň jeden stav protokolu P je r -stav
 - každý běh protokolu P začínající v r -stavu je **nekonečný** a všechny jeho stavy jsou r -stavy

Uzávěra (2)

- uzávěra r
 - definuje neprázdnou uzavřenou doménu běhu protokolu P
 - doména má alespoň jeden stav vyskytující se v protokolu nekonečněkrát

Opakování (recurrence)

- přechod (b,t)
 - b ... predikát obsahující pouze lokální proměnné procesu P
 - t ... akce téhož procesu P
 - (b,t) je **povoleno** ve stavu r iff $(b \text{ ■■■ } \text{tráž}(t)) = \text{true}$
- redukovaná množina přechodů
 - každý pár různých přechodů má různé akce
 - redukce: $(b_1,t), (b_2,t) \text{ ■■■ }_1 \text{ ■■■ }_2, t)$

Opakování (2)

- T ... redukovaná množina přechodů v P
 r ... uzávěra v P
- T se opakuje v P iff \exists řehy $(stav_1; akce_1; \dots)$ kde $stav_1$ je r -stav splňující podmínku:
 $\exists (b, t) \in T$ $\exists i$.
 (b, t) je povoleno ve stavu $stav_i$ a akce t je t
- pokud se T opakuje uvnitř r v P a vykonávání P začíná v r -stavu, pak alespoň jeden přechod z T bude vykonáván nekonečněkrát

Verifikace

- Vlastnosti protokolu jsou popsány
 - r je uzávěra v P
 - T_1 se opakuje uvnitř P
 - ...
 - T_n se opakuje uvnitř P
- r definuje uzavřenou doménu běhu protokolu a T_i definují přechody, z nichž se alespoň jeden vyskytuje nekonečně často
- Tyto 2 vlastnosti potřebujeme ověřit.

Verifikace uzávěry

- Postup důkazu
 1. svědek (witness):
ukázat, že protokol P má r -stav
 2. živost (liveness):
dokázat, že pro ■■■ stavy existuje alespoň jedna povolená akce
(což garantuje, že r -stav nemůže být koncovým stavem konečného běhu protokolu)
 3. stabilita (stability):
dokázat, že pokud je v r -stavu povolená nějaká akce, pak tato akce vede do r -stavu

Verifikace opakování

- Komplement $T \dashv T$
 - pro redukovanou množinu přechodů T
 - $\sim T = \{ (\sim b, t) \mid \text{přechod } (b, t) \text{ v } T \} \cup \{ (\text{true}, t) \mid \text{pro něž není přechod v } T \}$
- Ohodnocovací funkce f pro r -stavy
 - f pro stavy
 - $f(s) = k$; $s, s' \dots r$ -stavy
 - přechod snižuje f iff $f(s') < k$
 - přechod zvyšuje f iff $f(s') > k$

Verifikace opakování (2)

- Postup důkazu:

1. žádný návrat (no-retreat):

je-li v $\sim T$ povolen přechod v r -stavu procesu P ,
potom jeho provedení nezvýší f

2. postup (progress):


pro $k > 0$:

■ přechod v T , který je povolen v každém r -stavu
kde $f=k$

nebo

■ přechod v $\sim T$, který je povolen v každém r -stavu
kde $f=k$ a jeho vykonání snižuje f

Verifikace opakování (2)

- 3. závěr (conclusion)
dokázat, že pro každý r -stav $f=0$,  přechod v T , který je povolen
- kombinace 1. a 2. říká, že v r -stavu $f>0$ buď bude vykonán nějaký přechod v T , nebo bude sníženo f
- kombinace 1. a 3. říká, že pro r -stav $f=0$ bude vykonán přechod v T
- ohodnocovací funkci je možné rozšířit i na vektor přirozených čísel

Verifikace v případě výskytu chyb

- Typy chyb: přeuspořádání, poškození nebo ztráta dat
 - chyby jsou definované jako akce
- Verifikace zůstává stejná
- Přibývá verifikovat stabilitu pro výskyt chyb
 - pokud je v r -stavu definována akce nebo chyba, tak jak pod akcí tak i pod chybou musí protokol P přejít do r -stavu

Příklad

- Převrácené kódování Manchester

```
process p

inp data : array [0..1] of integer

var i : integer

begin
    true -> if data[i] = 0 ->      send 0 to r;
                                     send 1 to r
          □ data[i] = 1 ->      send 1 to r;
                                     send 0 to r;

          fi;
          i := i + 1;
end
```


Příklad (2)

```
process q

var rcvd : array [0..1] of integer
    j : integer,
    first : boolean,      {first := true}
    b : 0..1

begin
    rcv b from p ->
        if first ->
            rcvd[j], j, first := b, j+1, false;
        □ ~first ->
            first := true;
        fi;
end
```

Příklad (3)

- Stavový predikát

$r =$

$(\text{first} \blacksquare \text{bl.c} \blacksquare \text{eq.}(\text{data}, i-1) = \text{seq.}(\text{rcvd}, j-1); \text{even.c})$

\blacksquare

$(\sim \text{first} \blacksquare \text{dbl.c} \blacksquare \text{eq.}(\text{data}, i-1) = \text{seq.}(\text{rcvd}, j-1); \text{odd.c})$

- c ... obsah ch.p.q

$\text{dbl.c} = \text{true}$ iff $\#\text{ch.p.q} = 0 \blacksquare \text{ch.p.q} \bmod 2 = 0$

$\text{dbl.c} = \text{false}$ iff $\#\text{ch.p.q} \bmod 2 = 1$

Příklad (3)

- Stavový predikát

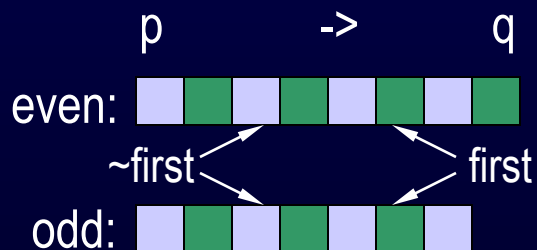
$r =$

$(\text{first} \blacksquare \text{bl.c} \blacksquare \text{eq.}(\text{data}, i-1) = \text{seq.}(\text{rcvd}, j-1); \text{even.c})$

\blacksquare

$(\sim\text{first} \blacksquare \text{dbl.c} \blacksquare \text{eq.}(\text{data}, i-1) = \text{seq.}(\text{rcvd}, j-1); \text{odd.c})$

ch.p.q čteno zprava doleva (<-):



odd: ... nemůže nastat, protože odesílání je **atomické**

	c	\emptyset	b2	x;b2;b1
even.c		\emptyset	-	even.x;b1
odd.c		-	b2	odd.x;b2

Příklad (3)

- Stavový predikát

$r =$

$(\text{first } \blacksquare \text{ bl.c } \blacksquare \text{ eq.}(\text{data}, i-1) = \text{seq.}(\text{rcvd}, j-1); \text{even.c})$

\blacksquare

$(\sim \text{first } \blacksquare \text{ dbl.c } \blacksquare \text{ eq.}(\text{data}, i-1) = \text{seq.}(\text{rcvd}, j-1); \text{odd.c})$

- $\text{seq.}(y, k-1) = \text{empty}$

pro $k=0$

$\text{seq.}(y, k-1) = y[0]; \dots; y[k-1]$

pro $k>0$

Příklad (4)

- Podmínka svědka (tj. existuje r -stav):
první stav:
($i = 0$ \blacksquare ch.p.q = 0 \blacksquare = 0 \blacksquare rst)
... splňuje
- Podmínka živosti:
akce v procesu p je vždy aktivována
- Podmínka stability
proces p má akci, která nemůže negovat r
proces q vždy splňuje jeden ze dvou termů

Příklad (5)

- Definice T:

$$T = \{ (\text{first}, t.q) \}$$

t.q ... je jediný přechod v q

- Komplement: $\sim T = \{ (\sim\text{first}, t.q) , (\text{true}, t.p) \}$

- Ohodnocovací funkce

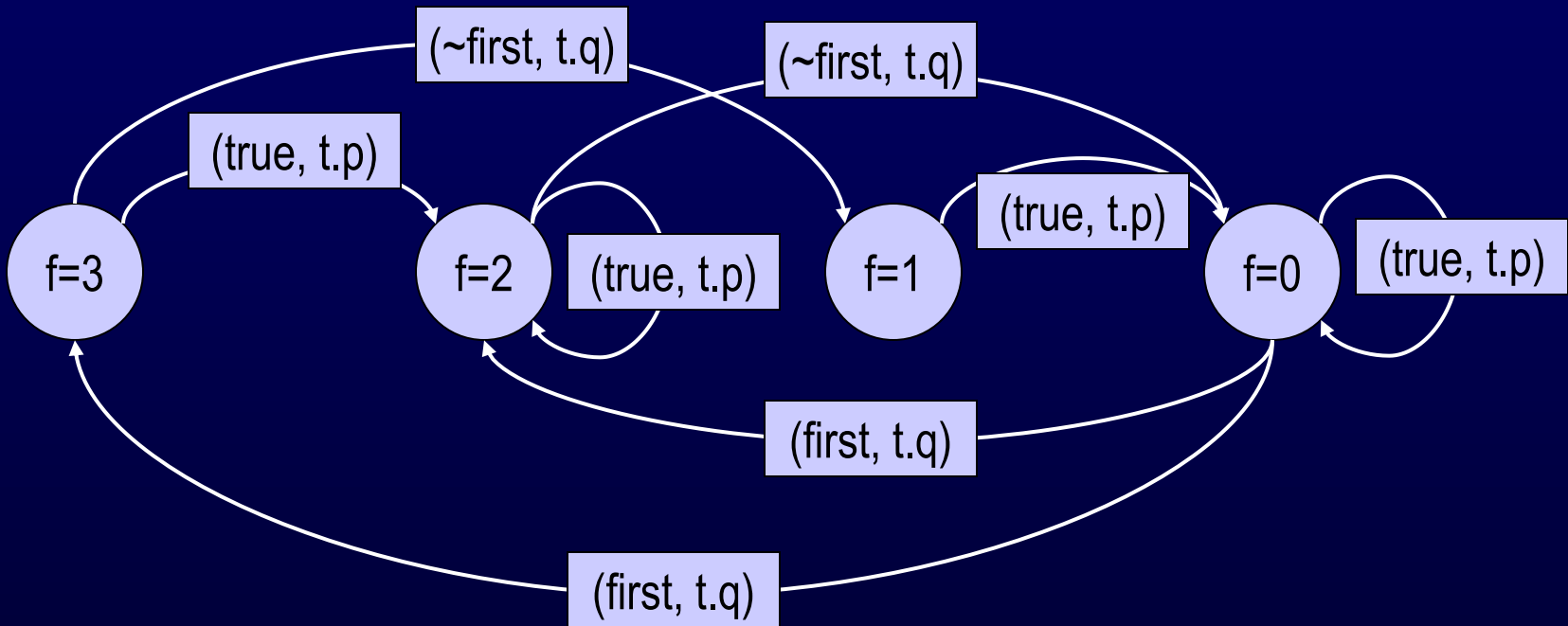
$$f = 0 \text{ if } r \text{ first } \text{ch.p.q} > 0$$

$$1 \text{ if } r \text{ first } \text{ch.p.q} = 0$$

$$2 \text{ if } r \text{ first } \text{ch.p.q} > 1$$

$$3 \text{ if } r \text{ first } \text{ch.p.q} = 1$$

Příklad (6)



Příklad (6)

- Podmínka žádného návratu:
splněna - pouze přechody z T zvětšují f
- Podmínka postupu:
splněna - čtyři přechody nahoře
- Podmínka závěru:
splněna, dva přechody dole

Elementy směrování

Hierarchické směrování

- Dělení adres:
oblasti (region) - obvody (district) - procesy
- $\text{rgn}[x]$ definuje souseda, přes nějž se dostanu do regionu x
- $\text{dstr}[y]$ definuje souseda, přes nějž se dostanu do obvodu y
- $\text{prs}[z]$ definuje souseda, přes nějž se dostanu do procesu z
 - každý proces jednoznačně definován trojicí (region, obvod, proces)
- $\text{up}[k]$ definuje, jestli je soused k naživu

Hierarchické směrování (2)

```
process p [i: 0..m-1, {i is the process region}
           j: 0..n-1, {j is the process district}
           k: 0..r-1 {k is the process}
        ]

inp N      : set {[i',j',k'] | p[i',j',k'] is a neighbor of p[i,j,k]},
    up      : array [N] of boolean,
    rgn     : array [0..m-1] of N,
    dstr    : array [0..n-1] of N,
    prs     : array [0..r-1] of N
var x : 0..m-1,
    y : 0..n-1,
    z : 0..r-1
par q : N

begin
    true -> {generate a data(x, y, z) msg and route it}
            x, y, z := any, any, any;
            RTMSG

    □      rcv data(x,y,z) from p[g] ->
            {route the received data(x, y, z) msg}
            RTMSG

end
```

RTMSG

```
if x/=i  $\wedge$ 
    up[rgn[x]] ->
        send data(x, y, z) to p[rgn[x]]
 $\square$  x/=i  $\wedge$ 
    ~up[rgn[x]] ->
        {nonreachable dest.} skip
 $\square$  x=i  $\wedge$  y/=j  $\wedge$ 
    up[dstr[y]] ->
        send data(x, y, z) to p[dstr[y]]
 $\square$  x=i  $\wedge$  y/=j  $\wedge$ 
    ~up[dstr[y]] ->
        {nonreachable dest.} skip
 $\square$  x=i  $\wedge$  y=j  $\wedge$  z/=k  $\wedge$  up[prs[z]] ->
        send data(x, y, z) to p[prs[z]]
 $\square$  x=i  $\wedge$  y=j  $\wedge$  z/=k  $\wedge$  ~up[prs[z]] ->
        {nonreachable dest.} skip
 $\square$  x=i  $\wedge$  y=j  $\wedge$  z=k
    ->
        {arrived at dest.} skip
fi
```

Použití implicitní brány

```
if gtwy = k -> RTMSG
□ gtwy /= k ->
    if (x/=i ∨ y/=j) ∧ up[prs[gtwy]] ->
        send data(x, y, z) to p[prs[gtwy]]
    □ (x/=i ∨ y/=j) ∧ ~up[prs[gtwy]] ->
        {nonreachable} skip
    □ (x=i ∧ y=j) ∧ z=k -> {arrived} skip
    □ (x=i ∧ y=j) ∧ z/=k ∧ up[prs[z]] ->
        send data(x, y, z) to p[prs[z]]
    □ (x=i ∧ y=j) ∧ z/=k ∧ ~up[prs[z]] ->
        {nonreachable} skip
fi
fi
```

Náhodné směrování

- Příklad se směrovací tabulkou, kde pro každý cíl máme 2 možné uzly, přes něž se bude posílat
rtb[d, 0] = nejaky_soused1
rtb[d, 1] = nejaky_soused2

Náhodné směrování (2)

```
process p [i: 0..n-1]

const hmax

inp N      : set { g | p[g] is a neighbor of p[i] },
    up     : array [N] of boolean,
    rtb    : array [0..n-1, 0..1] of N
var x : 0..1,           {random choice}
    d  : 0..n-1,        {ultimate destination}
    h  : 0..hmax        {# hops remaining = TTL}
par q : N

begin
    true                                -> d, h := any, any;
                                         RTMSG
□    rcv data(d, h) from p[g]          -> RTMSG
end
```

RTMSG

```
if d=i          -> {arrived at dest.} skip
□ d/=i ∧ h=0    -> {nonreachable dest.} skip
□ d/=i ∧ h>0 ∧ (d in N ∧ up[d])    ->
                                send data(d, h-1) to p[d]
□ d/=i ∧ h=1 ∧ ~(d in N ∧ up[d])    ->
                                {nonreachable dest.} skip
□ d/=i ∧ h>1 ∧ ~(d in N ∧ up[d])    ->
  x := random;
  if up[rtb[d, x]]    ->
                                send data(d, h-1) to p[rtb[d, x]]
    □ ~up[rtb[d, x]] ∧ up[rtb[d, 1-x]] ->
                                send data(d, h-1) to p[rtb[d, 1-x]]
    □ ~up[rtb[d, x]] ∧ ~up[rtb[d, 1-x]] ->
                                {nonreachable dest.} skip
  fi
fi
fi
```


Distribuované směrování

- $rtb[d]$ nejlepší soused pro směrování zprávy do $p[d]$
 $cost[d]$ počet skoků při poslání zprávy přes $p[rtb[d]]$
- počet procesů v síti je n , číslováno $0..n-1 \Rightarrow$ nekonečno
můžeme definovat jako n
- demonstrujeme na síti se všemi hranami
ohodnocenými 1
- = distance vector směrování (např. RIP, BGP)

Distribučované směrování (2)

```
process p [i: 0..n-1]

inp N      : set { g | p[g] is a neighbor of p[i] },
    up     : array [N] of boolean
var rtb    : array [0..n-1] of N,
    cost, c : array [0..n-1] of 0..n,
    d       : 0..n-1,
    f, h    : N,
    finish  : boolean
par q : N

begin
    true                                -> d := any, any;
                                         RTMSG
□    rcv data(d) from p[g]              -> RTMSG
□    true                                -> SNDCOST
□    rcv upd(c) from p[g]              -> UPDRTB

end
```

RTMSG

```
if d=i                                     -> {arrived} skip  
  
□ d/=i ^ (cost[d]<n ^ up[rtb[d]])         ->  
      send data(d) to p[rtb[d]]  
  
□ d/=i ^ ~(cost[d]<n ^ up[rtb[d]])        ->  
      {nonreachable} skip  
  
fi
```

SNDCOST

- funkce NEXT(N, h) vrací následující prvek z množiny N po prvku h (umí množinou cyklit)
- h je libovolný prvek z N

```
f := NEXT(N, h);  
  
do f/=h ->  
    if up[f]          -> send upd(cost) to p[f]  
    □ ~up[f]         -> skip  
    fi; f := NEXT(N, f)  
od;  
  
if up[h]             -> send upd(cost) to p[h]  
□ ~up[h]            -> skip  
fi
```

UPDRTB

- Aktualizace `rtb[]` a `cost[]`

```
d, finish := 0, false;

do ~finish ->
    if (d=i) -> cost[d] := 0
    □ (d/=i) ∧
      (rtb[d]=g ∨ cost[d]>c[d]+1 ∨ ~up[rtb[d]]) ->
      rtb[d], cost[d] := g, min(n, c[d]+1)
    □ (d/=i) ∧
      ~(rtb[d]=g ∨ cost[d]>c[d]+1 ∨ ~up[rtb[d]]) ->
      skip
    fi;

    if d < n-1 -> d := d+1;
    □ d = n-1 -> finish := true
    fi
od
```

Backward learning routing

```
process p [i: 0..n-1]

const hmax, vmax

inp N      : set { g | p[g] is a neighbor of p[i] },
    up      : array [N] of boolean
var rtb    : array [0..n-1] of N,
    cost    : array [0..n-1] of 0..n-1,
    valid   : array [0..n-1] of 0..vmax,
    src, dst : 0..n-1,
    h       : 0..hmax,      {#hops travelled}
    x, y    : N,            {random neighbors}
    flag    : boolean
par q : N

begin
    true          -> src, h, dst := i, 0, any; RTMSG
    □ rcv data(src, h, dst) from p[g]      -> RTMSG; UPDRTB
    □ true          -> UPDRTB'
end
```

RTMSG

```
if dst=i                                -> {arrived} skip
□ dst/=i ^ h=hmax                        -> {nonreachable} skip
□ dst/=i ^ h<hmax ^ (dst in N ^ up[dst]) ->
    send data(src, h+1, dst) to p[dst]
□ dst/=i ^ h=hmax-1 ^ ~(dst in N ^ up[dst]) ->
    {nonreachable} skip
□ dst/=i ^ h<hmax-1 ^ ~(dst in N ^ up[dst]) ->
    if up[rtb[dst]]                        ->
        send data(src, h+1, dst) to p[rtb[dst]]
    □ ~up[rtb[dst]]                        ->
        x := random;
        y := NEXT(N, x);
        do ~up[y] ^ y/=x -> y := NEXT(N, y) od;
        if up[y]                            ->
            send data(src, h+1, dst) to p[y];
            rtb[dst], cost[dst], valid[dst] := y, n-1, 0
        □ ~up[y]                            -> {nonreachable} skip
    fi
fi
fi
```

UPDRTB

```
if cost[src]>=h      ->  
    rtb[src], cost[src], valid[src] := g, h, vmax  
  
□ cost[src]<h       -> skip  
  
fi
```


UPDRTB'

```
flag, dst := true, 0;

do flag ->
    valid[dst] := max(0, valid[dst]-1);

    if valid[dst]=0      -> cost[dst] := n-1
    □ valid[dst]≠0      -> skip
    fi;

    if dst < n-1    ->    dst := dst+1
    □ dst = n-1    ->    flag := false
    fi
od
```

Udržování topologie

- procesy si posílají zprávy $st(\text{cislo_procesu}, \text{up_pole}, \text{casova_znacka})$
- pro proces i
 - $\text{net}[k,l] = \text{true}$ iff $k-l$ jsou sousedi a spoj $k-l$ obousměrně funguje
 - $\text{vp}[j] = \text{true}$ iff $i-j$ jsou sousedi a $\text{up}[j] = \text{true}$
 - $\text{ts}[j] = \text{maximální časová značka zprávy } st(j, \dots)$

Udržování topologie (2)

```
process p [i: 0..n-1]

inp N      : set { j | p[j] is a neighbor of p[i] },
    up     : array [N] of boolean
var net    : array [0..n-1, 0..n-1] of boolean,
    vp     : array [0..n-1] of boolean,
    ts     : array [0..n-1] of integer,
    f, h : N,
    m      : 0..n,
    k      : 0..n-1,
    t      : integer
par q : N

begin
    true ->
    ts[i], m := ts[i]+1, 0;
    do m<n ->
        if (m in N  $\wedge$  up[m]) ->
            net[m,i], net[i, m], vp[m] :=
                true, true, true
         $\square$   $\sim$ (m in N  $\wedge$  up[m]) ->
            net[m,i], net[i, m], vp[m] :=
                false, false, false
        if; m := m+1
    od
```

Udržování topologie (3)

```
h := NEXT(N, f);
do h/=f ->
    if up[h] -> send st(i, vp, ts[i]) to p[h]
    □ ~up[h] -> skip
    fi; h := NEXT(N, h)
od
if up[f] -> send st(i, vp, ts[i]) to p[f]
□ ~up[f] -> skip
fi;
□ rcv st(k, vp, t) from p[g] ->
    if ts[k] >= t -> skip
    □ ts[k] < t ->
        ts[k], m := t, 0;
        do m<n -> net[m,k], net[k,m], m := vp[m], vp[m], m+1 od
        h := NEXT(N, g);
        do h/=g ->
            if up[h] -> send st(k, vp, t) to p[h]
            □ ~up[h] -> skip
            fi; h := NEXT(N, h)
        od
    fi
□ rcv error from p[g] -> skip
end
```

Směrování v Internetu

Základní úrovně směrování v Internetu

- Směrování v podsítích/lokálních sítích
- Směrování v autonomních systémech
- Směrování mezi autonomními systémy
- Páteřní směrování
 - páteř (backbone) je soubor speciálních směrovačů, které znají cestu do každé podsítě na Internetu (v rámci agregace adres)

Směrování v lokální síti

- IP.s - adresa odesílatele
M.s - maska sítě odesílatele
IP.d - adresa cíle

```
if (IP.s and M.s) = (IP.d and M.s) ->
    {local delivery}
□ (IP.s and M.s) /= (IP.d and M.s) ->
    {use routing table with longest prefix match
    or default gateway}
```

- hledání nejdelšího prefixu ve směrovací tabulce
 - např. hledám 192.168.1.140 v:
192.168.0.0/16, 192.168.1.0/24, 192.168.1.128/25

Exkurze - rozborka adres sítí

```
-bash-2.05b$ ipcalc 192.168.1.0/25
```

```
Address: 192.168.1.0      11000000.10101000.00000001.0 0000000
Netmask: 255.255.255.128 = 25 11111111.11111111.11111111.1 00000000
wildcard: 0.0.0.127      00000000.00000000.00000000.0 11111111
=>
Network: 192.168.1.0/25  11000000.10101000.00000001.0 00000000 (class C)
Broadcast: 192.168.1.127 11000000.10101000.00000001.0 11111111
HostMin: 192.168.1.1     11000000.10101000.00000001.0 00000001
HostMax: 192.168.1.126  11000000.10101000.00000001.0 11111110
Hosts/Net: 126          (Private Internet RFC 1918)
```

```
-bash-2.05b$ ipcalc 147.251.51.0/24
```

```
Address: 147.251.51.0     10010011.11111011.00110011 .00000000
Netmask: 255.255.255.0 = 24 11111111.11111111.11111111 .00000000
wildcard: 0.0.0.255      00000000.00000000.00000000 .11111111
=>
Network: 147.251.51.0/24 10010011.11111011.00110011 .00000000 (class B)
Broadcast: 147.251.51.255 10010011.11111011.00110011 .11111111
HostMin: 147.251.51.1    10010011.11111011.00110011 .00000001
HostMax: 147.251.51.254  10010011.11111011.00110011 .11111110
Hosts/Net: 254
```


Směrování uvnitř AS

- S ... autonomní systém
r ... směrovač
- směrovač zná
 - IP adresu a masku každé podsítě v S
 - pro každou podsít' s v S definuje nejlepší sousední směrovač pro předání
 - pro sítě t mimo S
 - explicitní záznamy pro sítě blízké S
 - implicitní záznam pro ostatní

Směrování uvnitř AS (2)

- Rozhodnutí, jestli IP.d leží v S v síti IP.s s maskou M.s

```
if  $\exists$  IP.s = (IP.d and M.s) ->
    {inside S}
 $\square$  not ( $\exists$  IP.s = (IP.d and M.s)) ->
    {outside S}
```

- Směrovací algoritmy:
 - distance vector - např. RIP
 - distribuovaný směrovací protokol
 - link state - např. OSPF
 - protokol pro udržování topologie

OSPF verze 2

- Definováno v RFC 2328
- Používá vysílání LS informací a Dijkstrův algoritmus
- Každý směrovač získá kompletní mapu topologie AS (jako orientovaný graf!) a strom cest s nejmenší cenou
- Nastavení ceny spoje (pokud všechny 1, tak je to i strom nejkratších cest)
- Vysílání LS informací
 - číslo vyšší vrstvy v IP hlavičce: 89
 - při změně stavu spoje
 - periodicky minimálně 1x za 30 min.

OSPF verze 2 (2)

- Zabezpečení zpráv mezi OSPF směrovači
- Více cest se stejnou váhou
 - vyvažování zátěže
 - problém s přeuspořádáním paketů
- Směrování multicastu
 - MOSPF (RFC1584)
 - využití znalostí topologie z OSPF pro konstrukci multicastových stromů

OSPF verze 2 (3)

- Hierarchizace jednoho AS
 - oblasti (areas)
 - vysílání LS informací je omezeno na oblast
 - pro směrovače v jiné oblasti AS je oblast black-box
- Hraniční směrovače oblastí
 - jedna oblast uvnitř AS je označena jako páteřní
 - hraniční směrovače náleží do páteřní oblasti a do nejméně jedné další oblasti

OSPF verze 2 (4)

- Informace o ceně mezi oblastmi není přenášena jako informace o ceně spoje, ale jako kumulativní cena cesty
- Páteřní směrovače v AS
 - náleží pouze do páteřní oblasti
- Hraniční směrovače AS
 - používají OSPF (příp. I-BGP) dovnitř AS a BGP-4 na směrování mezi AS

Směrování mezi AS

- Typy autonomních systémů
 - koncové (stub) AS
 - multihomed AS
 - transit AS
- Autonomous system number (ASN) (RFC1930)
 - 16-bitový identifikátor
 - koncové AS jej nemusí mít přiřazené
 - přiřazuje ICANN (www.icann.org)
Internet Corporation For Assigned Names and Numbers

BGP-4

- Path-vector protocol
 - nevyměňují se pouze ceny cest, ale celé cesty zahrnující všechny skoky
- Pracuje na úrovni sítí, nikoli jednotlivých uzlů/směrovačů
- Základem jsou oznamy (advertisements)
 - zasílají se přes point-to-point spoje
 - oznam obsahuje:
adresu cílové sítě (CIDR) + atributy cesty (např. atribut path (seznam všech AS na cestě) a identita next-hop směrovače

BGP-4 (2)

- 3 základní operace
 - příjem a filtrování oznamů
 - výběr cesty
 - zasílání oznamů
- Příjem a filtrování oznamů
 - peer směrovač hlásí, do jakých AS je schopen doručovat
 - předpokládá se, že peerové nelžou!
 - možnost filtrovat (např. takové cesty, kde AS-PATH je ASN vlastního AS - problém cyklů)

BGP-4 (3)

- Výběr cesty
 - z více možných cest z různých oznamů pro daný AS vybrat jeden, a jeho next-hop směrovač zapsat do směrovacích tabulek
 - způsob výběru definuje směrovací politika (SP)
 - když pro daný AS není nastavena SP, použije se nejkratší cesta
 - www.cisco.com/warp/public/459/25.shtml

BGP-4 (4)

- Zasílání oznamů
 - administrátor definuje politiku oznamů
 - umožňuje kontrolu nad tím, do jakých AS potečou data přes adminův AS
- Politiky peerování
 - neexistují psané standardy
 - u typických komerčních ISP: přes AS tečou pouze ta data, která mají zdroj nebo cíl v daném AS
 - peerovací smlouvy jsou velký business ;-)

BGP-4 (5)

- Komunikace mezi BGP peery
 - potřeba spolehlivé komunikace (na rozdíl od OSPF, které si spolehlivost nad IP řeší samo)
 - TCP port 179
 - 4 typy zpráv: OPEN, UPDATE, KEEPALIVE, NOTIFICATION
- OPEN
 - ustavení spojení mezi BGP peery
 - obsahuje typicky autentizační informace
 - pozitivní odpověď na OPEN je KEEPALIVE

BGP-4 (6)

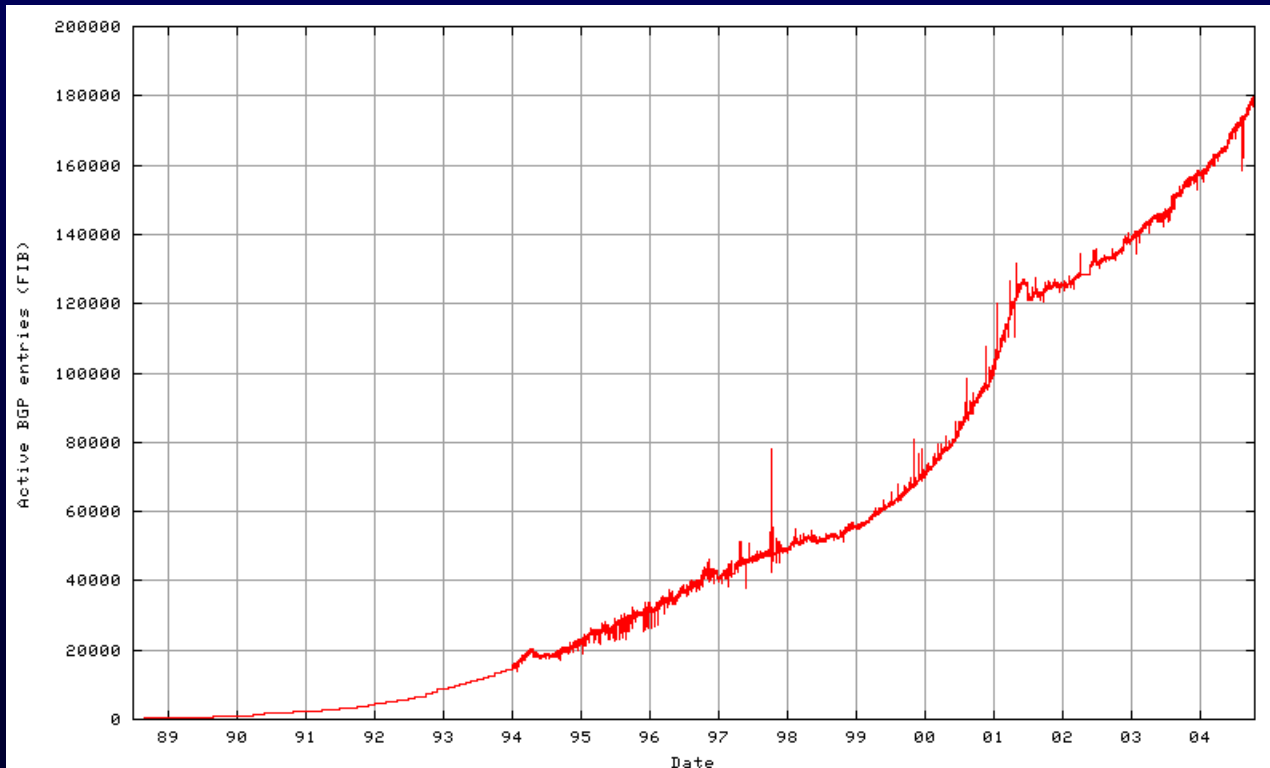
- UPDATE
 - šíření oznamů o cestách
 - oznámení, že lze přeze mne směřovat do daného AS
 - stažení takového oznamu (oznam je platný až do jeho explicitního stažení!)
- KEEPALIVE
 - pozitivní odpověď na OPEN
 - udržování spojení
- NOTIFICATION
 - oznámení o chybě nebo o ukončení spojení

I-BGP

- Distribuce informací o přilehlých AS mezi směrovači uvnitř AS
 - všechny směrovače uvnitř AS se považují za peery z pohledu I-BGP
 - I-BGP směrovače mohou oznamovat pouze cesty, které se dozvěděly přímo od jiného I-BGP směrovače

Velkosti BGP tabulek

- Ukázka velikosti BGP tabulek:
<http://bgp.potaroo.net/>



Proč rozlišovat mezi směrováním uvnitř AS a mezi AS?

- Mezi AS hrají roli mnohem více následující faktory
 - politiky (protože typicky jde o peníze)
 - škálovatelnost (velikosti BGP tabulek)
- Uvnitř AS hraje spíše roli výkon