PA159, přednáška 2

21. a 28. 9. 2007

Co nás dnes čeká...

- Úvaha o tom, jak zapisovat protokoly
- Úvod do abstraktní protokolové notace
- Zajištěné přenosové protokoly
- TCP

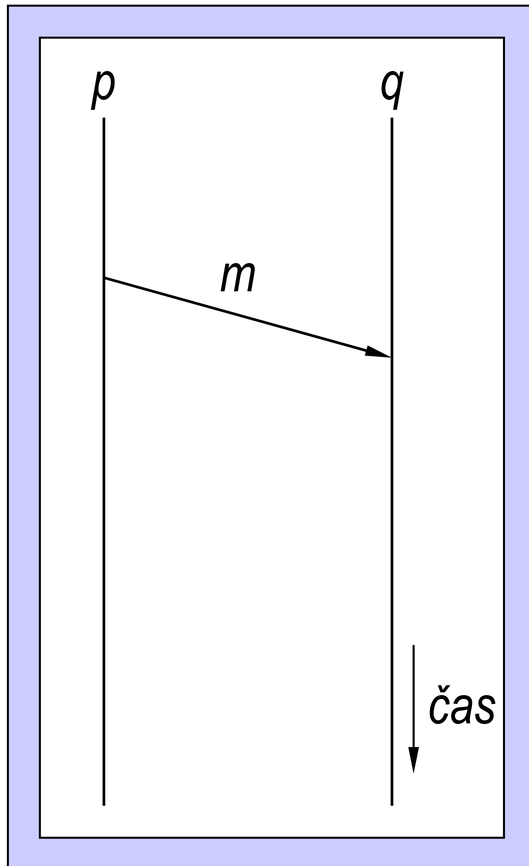
Abstraktní protokolová notace

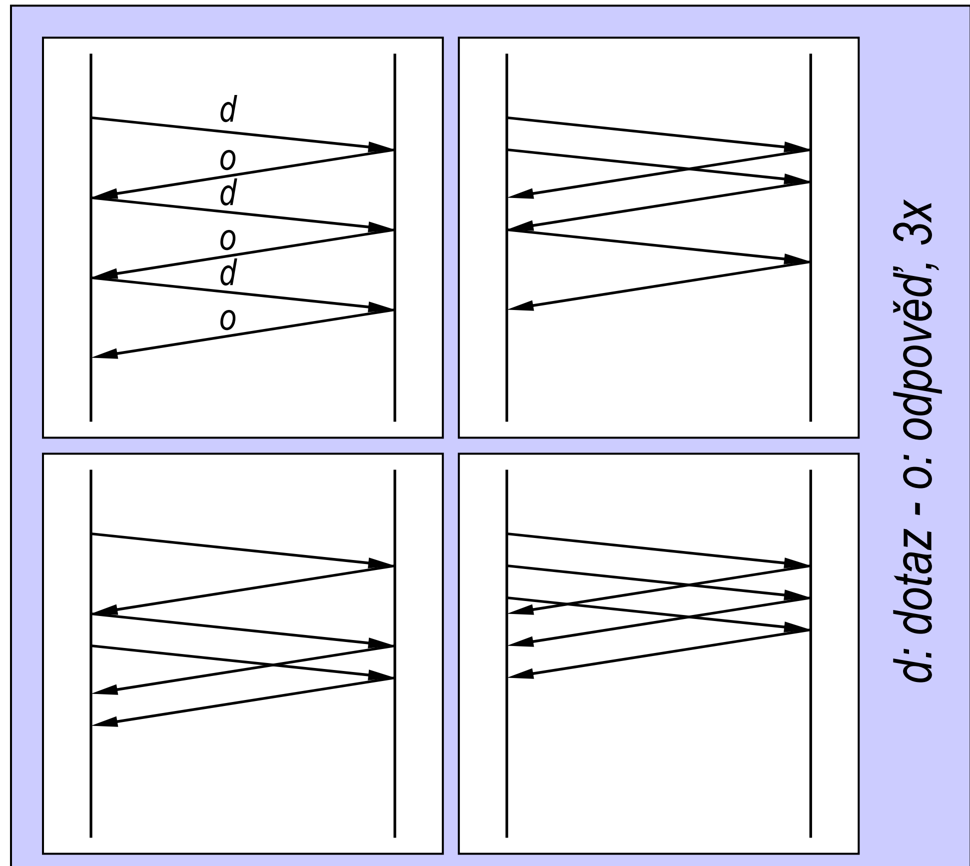
Specifikace protokolů

- Jak vůbec formálně protokol specifikovat?
- Popis v přirozeném jazyce
  - problém s exaktností, jednoznačností
- Popis v programovacím jazyce
  - typicky v C
  - neohrabané, matematicky nepraktické a neelegantní
  - hůře čitelné (na druhé straně notaci zná dost lidí)
  - problém s verifikací
- Diagramy

Specifikace protokolů (2)

- Časové osy





Specifikace protokolů (3)

- Časové osy
  - přehledné pro jednoduché případy, obtížně použitelné pro složitější
- Problém s dokazováním/verifikací
- => Potřeba formální notace
  - Abstraktní protokolová (AP) notace
    - M. Gouda, *Protocol verification made simple: a tutorial.* Computer Networks and ISDN Systems 25 (1993), 969 - 980
    - M. Gouda, *Elements of Network Protocol Design*, 1998

Ukázka AP

- Prodejní automat ;o)

```
process client

var      ready_client : boolean

begin
         ready_client ->   send money to vending_machine;
                           send selection to vending_machine;
                           ready_client := false
         rcv item from vending_machine ->   ready_client := true;
end
```

```
process vending_machine

var      ready_to_sell : boolean

begin
         rcv money from client ->  ready_to_sell := true;
         rcv selection from client ->      if ready_to_sell ->
                                                   send item to client
                                             ~ready_to_sell -> skip
                                           fi; ready_to_sell := false;
end
```

Elementy AP

- Základní struktura specifikace

```
process <process name>

const   <const name>, ... , <const name>
inp     <inp name>:<inp type>, ... , <inp name>:<inp type>
var     <var name>:<var type>, ... , <var name>:<var type>

begin
        <action>   ...   <action>
end
```

- Typy konstant
  - positive integer
  - sdílení konstant se stejným jménem přes procesy

Elementy AP (2)

- Typy vstupů
  - boolean, range, integer, set, enumerated, array
  - nesdílí se

```
inp     <inp name> : boolean
inp     <inp name> : <lower bound> .. <upper bound>
inp     <inp name> : integer
inp     <inp name> : set {<member>|<condition>}
inp     <inp name> : <name of an input of type set>
inp     <inp name> : array [<index range>] of <type>
```

- Proměnné
  - boolean, range, integer, enumerated, array
  - nesdílí se

Elementy AP (3)

- Akce

```
<guard of p> -> <statement of p>
```

- Stráže
  - operátory
    - porovnání: =, /=, <, >, <=, >=
    - logické operace: $\wedge$, $\vee$, ~
    - aritmetické operace: +, –, *, $+_n$, $-_n$, min, max
  - příjem dat

```
recv <message of p> from <process name q>
```

  - timeout

```
timeout <protocol predicate>
```

Elementy AP (4)

- Výrazy
  - dolce far niente

```
skip
```

  - přiřazení

```
x.0, ... , x.k := E.0, ... , E.k
```

    - *napřed se vyhodnotí, pak se přiřadí!*
  - odeslání zprávy/dat

```
send <message p> to <process name q>
```

Elementy AP (5)

- sekvence výrazů

```
<statement>; <statement>
```

- podmíněný výběr ($\vee_k$ local_guard.k = true)

```
if <local_guard.0> -> <statement_0>    ...
         <local_guard.k> -> <statement.k> fi
```

- opakování

```
do <local_guard> -> <statement> od
```

- Kanál p $\rightarrow$ q: ch.p.q
  - #ch.p.q - počet zpráv v kanálu ch.p.q
  - m#ch.p.q - počet zpráv *m* v kanálu ch.p.q

Elementy AP (6)

- Vykonávání specifikace protokolu
  - *nedeterministický výběr*
    - výběr z více povolených možností ve výrazu **if**
    - výběr z více povolených akcí
  - *atomicita akce*
  - *férové vykonávání protokolu*
    - je-li akce neustále povolena, bude určitě vykonána
    - definice přes nekonečné běhy

A nyní trochu praxe...

- Kódování Manchester
  - odesílající proces

```
process s

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

var x : integer

begin
        true -> if data[x] = 0 ->     send one to r;
                                      send zero to r
                   data[x] = 1 ->     send zero to r;
                                      send one to r;
                 fi;
                 x := x + 1;
end
```

– přijímající proces

```
process r

var rcvd : array [0..1] of integer
    y : integer,
    store : boolean,        {store := false}
    lastb : 0..1

begin
      rcvd zero from s ->
            if store ∧ lastb = 1 ->
                  rcvd[y], y, store := 0, y+1, false
              ~store ∨ lastb = 0 ->
                  store := true;
            fi; lastb = 0
      rcv one from s ->
            if store ∧ lastb = 0 ->
                  rcvd[y], y, str := 1, y+1, false
              ~store ∨ lastb = 1 ->
                  store := true;
            fi; lastb = 1
      rcv error from s ->    store := ~store;
end
```

Elementy AP (7)

- zprávy s poli

```
<message name> ( <field.0>, ..., <field.n )
send m(x.0,..., x.n) to q
recv m (x.0,..., x.n)  from p
```

- nedeterministické přiřazování

```
x := any
x := random
```

- pole procesů

```
process <process array> [<index> : <type>, ..., <index> : <type>]
process p[i: 0..n-1]
send mesg to p[i+1]
recv mesg from p[i-1]
```

Elementy AP (8)

- parametrizované akce
  - v deklarační části přibude

```
par <parameter declaration list>
```

  - použití

```
par j : 0..2, r : 0..1
...
requested[j,r] -> requested[j,r] := false; send grant(r) to p[j]
```

```
requested[0,0] -> requested[0,0] := false; send grant(0) to p[0]
requested[1,0] -> requested[1,0] := false; send grant(0) to p[1]
requested[2,0] -> requested[2,0] := false; send grant(0) to p[2]
requested[0,1] -> requested[0,1] := false; send grant(1) to p[0]
requested[1,1] -> requested[1,1] := false; send grant(1) to p[1]
requested[2,1] -> requested[2,1] := false; send grant(1) to p[2]
```

A opět trochu praxe...

- protokol pro alokaci zdrojů
  - uživatel

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

const   s {# of resources}
var     wait : boolean,
        r : 0..s-1

begin
        ~wait ->        wait, r := true, any;
                        send request(r) to controller;
        rcv grant(r) from c -> wait := false;
                               send release(r) to controller
end
```

– hlídač

```
process controller

const   s {# of resources}, n
var     avail : array [0..s-1] of boolean,
        requested : array [0..n-1, 0..s-1] of boolean
par     j : 0..n-1,
        r : 0..s-1

begin
        rcv request(r) from u[j] -> requested[j,r] := true
        rcv release(r) from u[j] -> avail[r] := true
        avail[r] ∧ requested[j,r] ->  avail[r], requested[j,r] :=
                                                false, false;
                                      send grant(r) to user[j];
end
```

- protokol není férový - hlídač může stále ignorovat jeden proces (pozor, podmínka férového výkonu protokolu sice platí, ale potíže je v tom, že díky nastavení avail[r] := false je příslušná akce na vypnuta!)

- řešení: a) determinismus (klientům přiděluji v definovaném pořadí)
  b) randomizace:

```
process controller

const    s {# of resources}, n
var      avail : array [0..s-1] of boolean,
         requested : array [0..n-1, 0..s-1] of boolean
         k : 0..n-1,
         x : 0..n-1 {random user}
par      j : 0..n-1,
         r : 0..s-1

begin
         rcv request(r) from u[j] ->
                  if avail[r] ->   avail[r] := false;
                                   send grant(r) to user[j]
                    ~avail[r] ->   requested[j,r] := true

         rcv release(r) from u[j] ->
                  x := random;
                  k := x +n 1;
                  do k /= x ∧ ~requested[k,r] -> k := k +n 1 od;
                  if requested[k,r] ->      requested[k,r] := false;
                                            send grant(r) to user[k]
                    ~requested[k,r] -> avail[r] := true
                  fi
end
```

Chyby při přenosu sítí

- 3 základní typy
  - ztráta dat
  - poškození dat
    - zahozením se dá převést na ztrátu
  - přeuspořádání zpráv/paketů
- pro snazší práci se zavádí 2 pravidla
  - atomičnost chyb
  - chyby se vyskytují zřídka (pouze konečný počet chyb v potenciálně nekonečném běhu protokolu)

Ošetření chyb

- příjem poškozených dat
  - převedeme na ztrátu

```
recv error from p -> skip
```

- ztráta paketu => timeout

```
timeout
        ~ready
        ∧ (sendmoney#ch.client.machine +
               getselection#ch.machine.client = 0)
```

Normální timeouty

- Forma normálního timeoutu

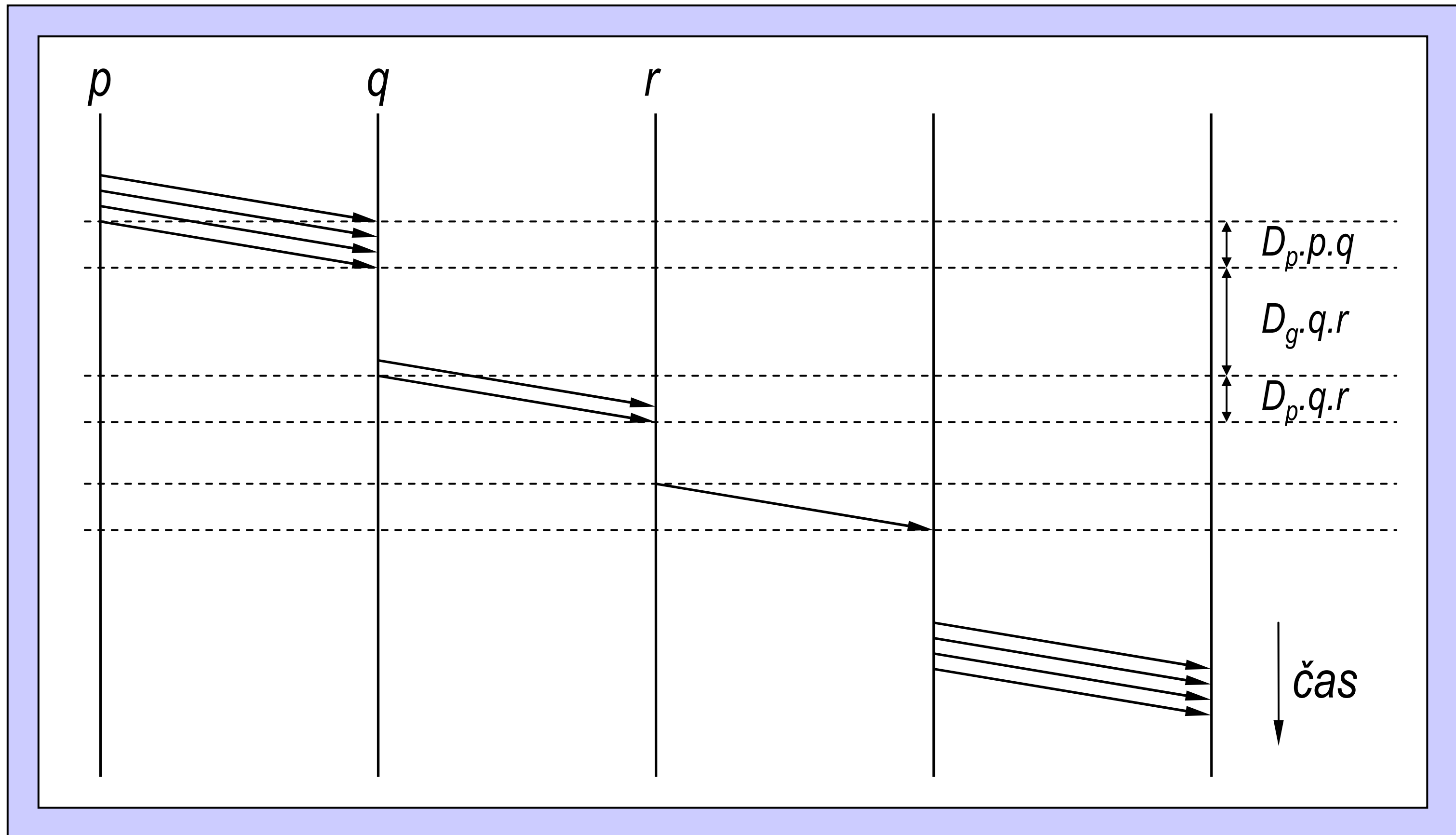
```
timeout
        (local predicate of process p)
        ∧ (mp#ch.p.q <= kp)
        ∧ (mq#ch.q.r <= kq)
        ...
        ∧ (my#ch.y.z <= ky)
```

  – po každý pár (ms#ch.s.t <= ks) ∧ (mt#ch.t.u <= kt) platí, že stráž akce posílající zprávy mt má tvar recv ms from s

```
timeout
        ~ready
        ∧ (sendmoney#ch.client.machine <= 0)
        ∧ (getselection#ch.client.machine <= 0)
```

Normální timeouty (2)

- Implementace pomocí hodin s reálným časem



Zajištěný protokol pro transportní vrstvu

Požadavky na protokol

- Odolnost vůči chybám
  - kontrola integrity dat
  - detekce výpadků pomocí timeoutů
  - vypořádání se s přeuspořádáním (nějak)
- Obrana proti zahlcení přijímajícího uzlu
  - informace od přijímající strany
- Obrana proti zahlcení sítě
  - není-li spolehlivá odezva ze sítě, odhad

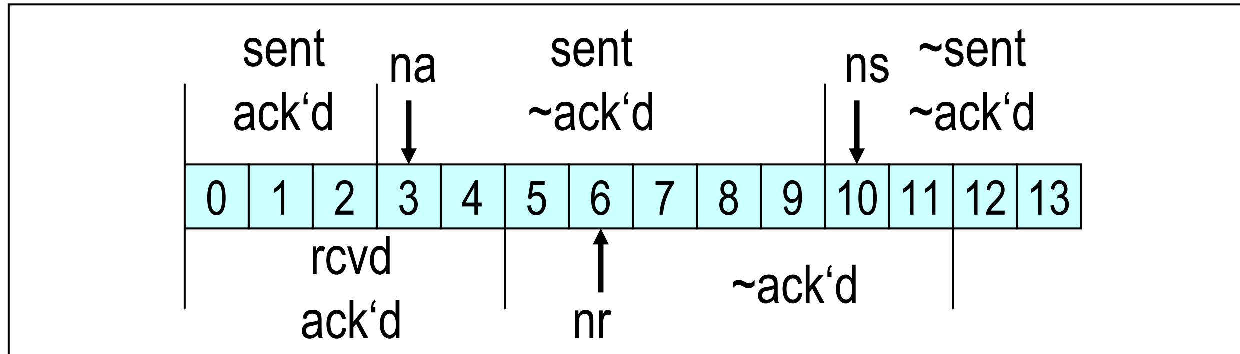
Odolnost proti chybám

- Detekce poškození dat
  - Backward Error Recovery
    - ověření integrity
      - kontrolní součty
    - v případě selhání data skartována
    - vyžádá se nová kopie
  - Forward Error Recovery
    - data jsou posílána redundantně tak, že se omezené výpadky dají rekonstruovat
      - n-ohraničené poškození, ztráty a přeuspořádání

Odolnost proti chybám (2)

- Detekce výpadku => potvrzování
  - vlastně také Backward Error Recovery
  - určité množství dat může být odesláno bez potvrzení
- Typy potvrzení
  - individuální potvrzování
  - kumulativní potvrzování
  - blokové potvrzování
  - negativní potvrzování (přímo informace o výpadku)

Kumulativní potvrzování




```
process sender

const    w   {ns - na <= w}
var      na, ns, i : integer

begin
         na + w > ns ->    send data(ns) to receiver;
                           ns := ns + 1
         rcv ack(i) from receiver ->      na := max(na, i)
         timeout t-guard ->        send data(na) to receiver
         rcv error from receiver ->       skip
end

t-guard = na < ns ∧ (#ch.q.p = 0)
```

Kumulativní potvrzování (2)

```
process receiver

const     w
inp       wr : integer   {receiver window}
var       nr, j : integer,
          rcvd : array [0..wr-1] of boolean,
          akn : boolean  {true if receiver hasn't acked last received message}

begin
          rcv data(j) from p ->
                    if true ->        {busy receiver} skip
                      j < nr ->       akn := true
                      nr <= j < nr + wr ->
                              rcvd[j mod wr] := true;
                              do rcvd[nr mod wr] ->
                                      {deliver data(nr)}
                                       rcvd[nr mod wr], nr, akn :=
                                               false, nr+1, true
                              od;
                    fi
          akn -> send ack(nr) to sender; akn := false;
          rcv error from sender -> skip
end
```

Kumulativní potvrzování (3)

- Je nutné použít neohraničená sekvenční čísla
  - příklad problému s ohraničenými čísly:
    1. odesílatel pošle data(3), data(4)
    2. příjemce pošle ack(4), ack(5)
    3. ack(5) se zadrhne na lince a je předběhnut následnými acky
    4. dojde k přetočení ohraničených sekvenčních č.
    5. přijde ack(5)
    6. neštěstí je hotovo ;-)

Další typy potvrzování

- Individuální
  - potvrzování každé zprávy zvlášť
    - neefektivní
  - použití cirkulárního bufferu o velikosti nejméně $2w$
  - možnost použití ohraničených sekvenčních čísel
- Blokové
  - potvrzování přijatých spojitých bloků
  - cirkulární buffer o velikosti nejméně $2w$
  - možnost použití ohraničených sekvenčních čísel

Řízení velikosti okna

- modifikace odesílatele u kumulativního potvrzování
  - stačí modifikace odesílatele
  - povede-li se bez ztráty zprávy odeslat více než *cmax* zpráv, je okno *w* inkrementováno o 1
  - dojde-li k timeoutu a zmenšení velikosti okna, je třeba počítat s tím, že mohlo dojít ke ztrátě dat v dosud nepotvrzeném okně a zmenšovat proto dál okno (condition DNR)

```
process sender

const    wmin, wmax                    {window limits, wmin < wmax}
inp      cmax : integer                {cmax > 0}
var      na, ns, i : integer,
         w : wmin..wmax,               {ns - na <= w}
         c : integer,                  {counter for consecutive data ack'd
                                       without being resent}
         ra, rs : integer              {auxiliary variables assigned to na+1, ns
                                       when packet loss occurs}

begin
         na + w > ns ->   send data(ns) to receiver;
                          ns := ns + 1
         rcv ack(i) from receiver ->
                 na, c := max(na, i), c + max(i-na, 0)
                 if c >= cmax -> w, c := min(w+1, wmax), c-cmax
                   c < cmax -> skip
                 fi
         timeout t-guard ∧ ~akn ->
                 if (ra <= na ∧ na < rs) -> skip {condition DNR}
                   ~(ra <= na ∧ na < rs) ->
                          w, rs := max(w/2, wmin), ns
                 fi; ra, c := na + 1, 0;
                 send data(na) to receiver
         rcv error from receiver ->        skip
end
```

Kvalita protokolu

- Agresivita
  - schopnost využít dostupnou volnou kapacitu
- Responsivnost
  - schopnost přizpůsobení se menší kapacitě
- Férovost
  - férové (případně jinak definované) dělení šířky pásma mezi klienty při požadavcích převyšujících možnosti sítě

TCP

Z historie

- Poprvé formálně specifikován r. 1974: Vint Cerf, Yogen Dalal a Carl Sunshine
- Zajišťuje
  - spolehlivost
  - ochranu proti zahlcení (různé algoritmy)
  - uspořádání paketů

Mechanismy potvrzování

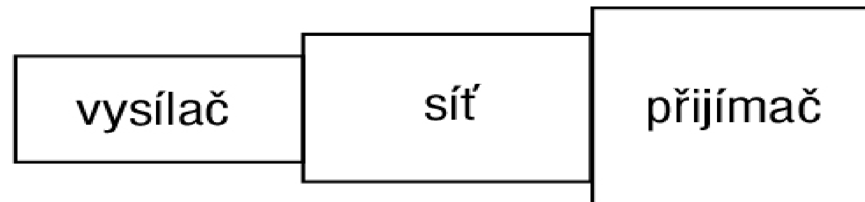
- kumulativní potvrzování
- piggybacking (duplexní protokol)
  - potvrzení je součástí zprávy jdoucí opačným směrem
- jedno potvrzení na 2 segmenty
  - je-li přenos dost rychlý (timeout 500ms)
- duplikované potvrzení
  - indikuje ztracený (poškozený) paket

Zpracování malých zpráv

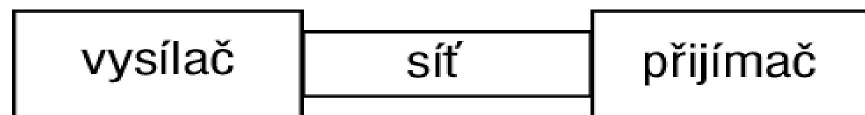
- Nagleův algoritmus
  1. Pokud proces *p* obdržel potvrzení pro všechna data dříve odeslaná *q*, potom proces *p* posílá zprávu ihned
  2. Pokud proces *p* neobdržel potvrzení pro všechna data dříve odeslaná *q*, potom proces *p* uloží zprávu pro pozdější odeslání
  3. Pokud velikost uložených zpráv přesáhne maximální velikost segmentu (MSS), tak se začne odesílat

Řízení toku

- řízení velikosti okna

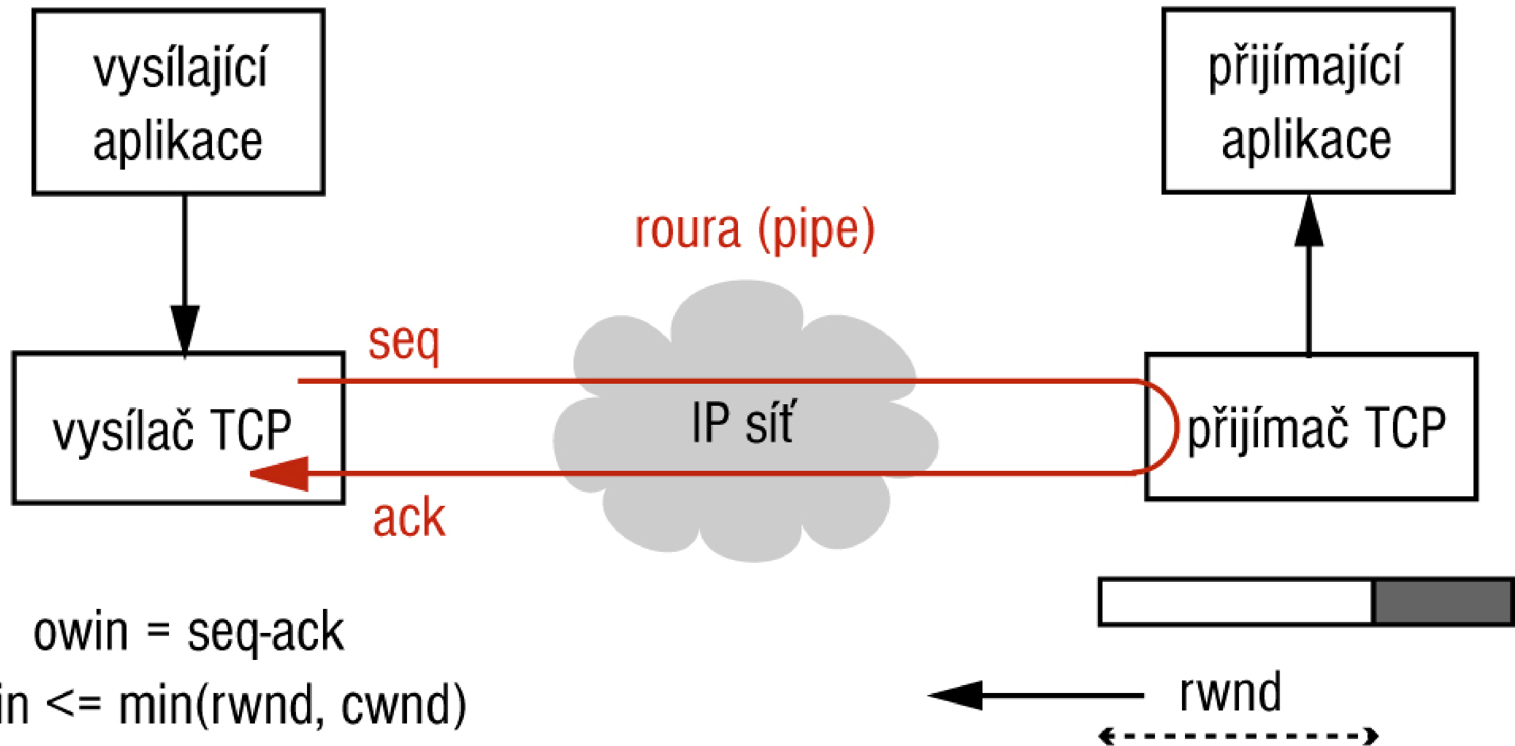


řízení toku (flow control)



řízení zahlcení
(congestion control)

Okno TCP

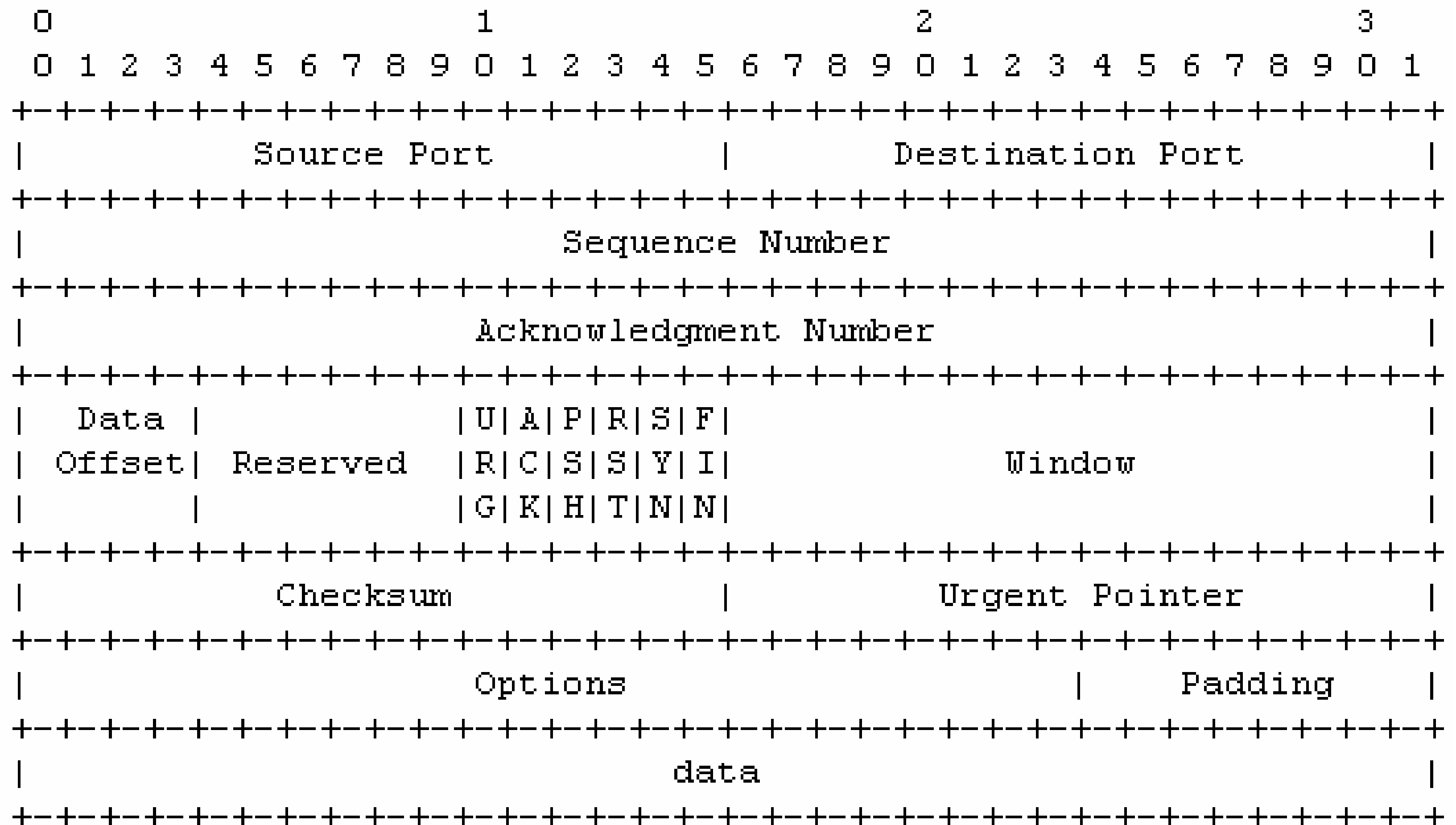


- outstanding window (ownd)
- receiver window (rwnd)
  - flow control, self-clocking
- congestion window (cwnd)

Řízení zahlcení

- aproximativní
- detekce zahlcení pomocí výpadků
  - následná detekce
  - existují i preventivní mechanismy
  - závislost na informacích ze sítě
- congestion window (cwnd)
  - bw = 8*MSS*cwin/RTT
    v případě že *owin* je limitováno *cwin*

Hlavička TCP



Ustavení spojení

- Entity (programy) A a B, sekvenční čísla SEQ(A) a SEQ(B)
- A: SYN, RAND(SEQ(A)) -> B
- B: SYN/ACK, RAND(SEQ(B)), SEQ(A)+1 -> A
- A: ACK, SEQ(B)+1 -> B
- => three-way handshake

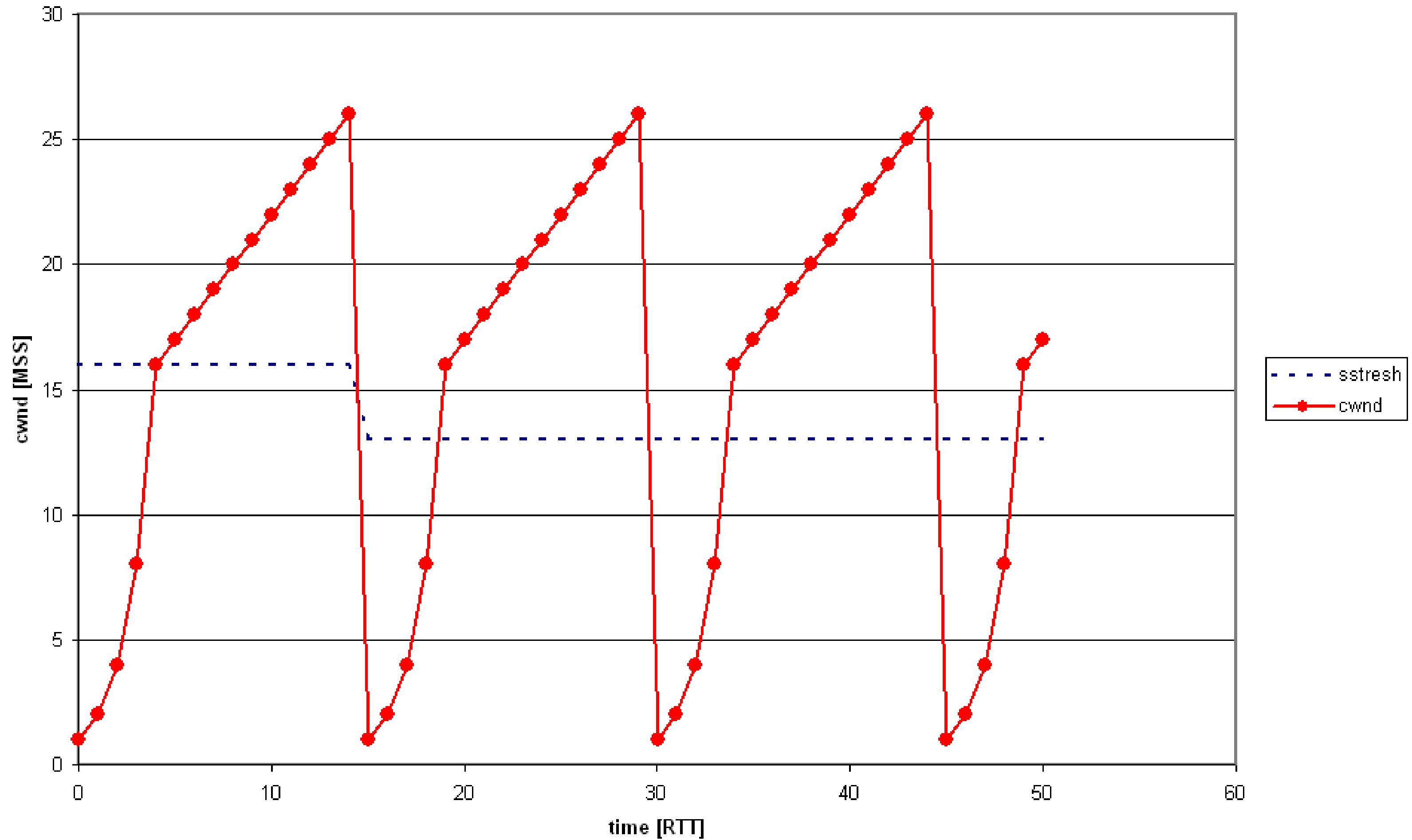
Fáze Slow Start

- *cwnd* += *MSS*
  pro každý ACK
- exponenciální nárůst cwnd
- limitováno *sstresh*
- přechod do congestion avoidance fáze

Fáze Congestion Avoidance (Tahoe)

- AIMD (Tahoe)
  - additive increase, multiplicative decrease
  - *cwnd* += *1 MSS*
    během každého RTT bez výpadku
  - *cwnd* = *cwnd / 2*
    při výpadku
- Detekce výpadku
  - timeout
  - duplikované ACKy při výpadku
- *sstresh* = *max{0.5*cwnd, 2*MSS}*
  - návrat k slow start fázi

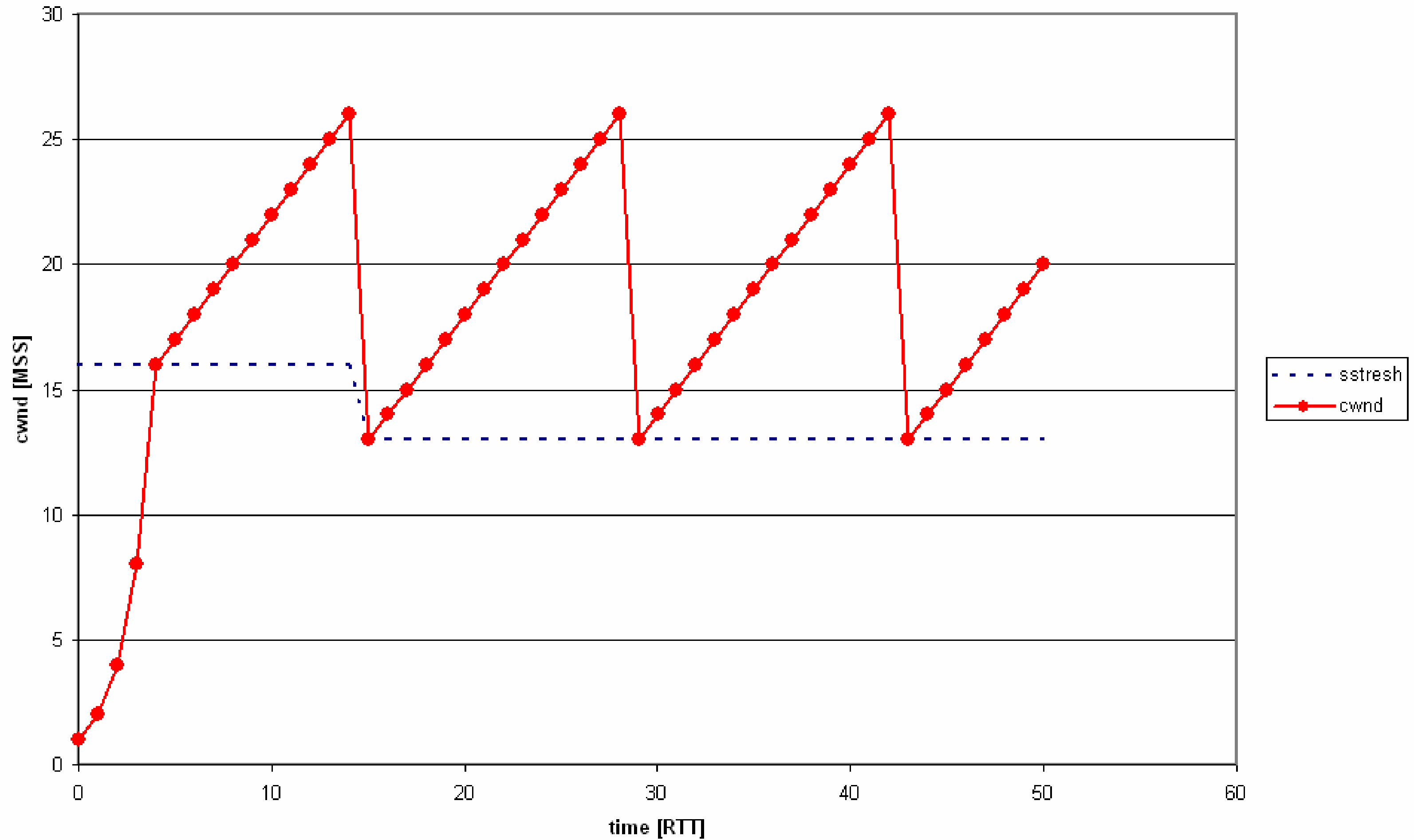
Chování velikosti okna – Tahoe



Vylepšené chování – Reno

- fast retransmission
  - detekce výpadku 3 duplikovanými ACKy
- fast recovery
  - neprovádí se fáze slowstart
- *sstresh = max{0.5*cwnd, 2*MSS}*
  - *(stejný jako TAHOE)*
- *cwnd = sstresh + 3*MSS*

Chování velikosti okna – Reno



Reakce na zahlcení

- celé aktuální okénko (owin) – TCP Tahoe
  - klasický cummulative ACK
- jeden segment v rámci „Fast Retransmit” – TCP Reno
- více segmentů v rámci “Fast Retransmit” – TCP NewReno
- právě ztracené segmenty – TCP SACK
  - blokové potvrzení

Alternativní přístup k řízení zahlcení – Vegas

- monitoruje RTT
- zahlcení detekuje pomocí prodlužování RTT
- na zahlcení reaguje lineárním poklesem *cwnd*

TCP Response Function

- Vztah mezi rychlostí výpadků a propustností (owin/bw)
  - owin ~ 1.2/sqrt(p)
  - bw = 8*MSS*owin/RTT
  - bw = (8*MSS/RTT)*1.2/sqrt(p)
- p... packet loss rate [packet/s]

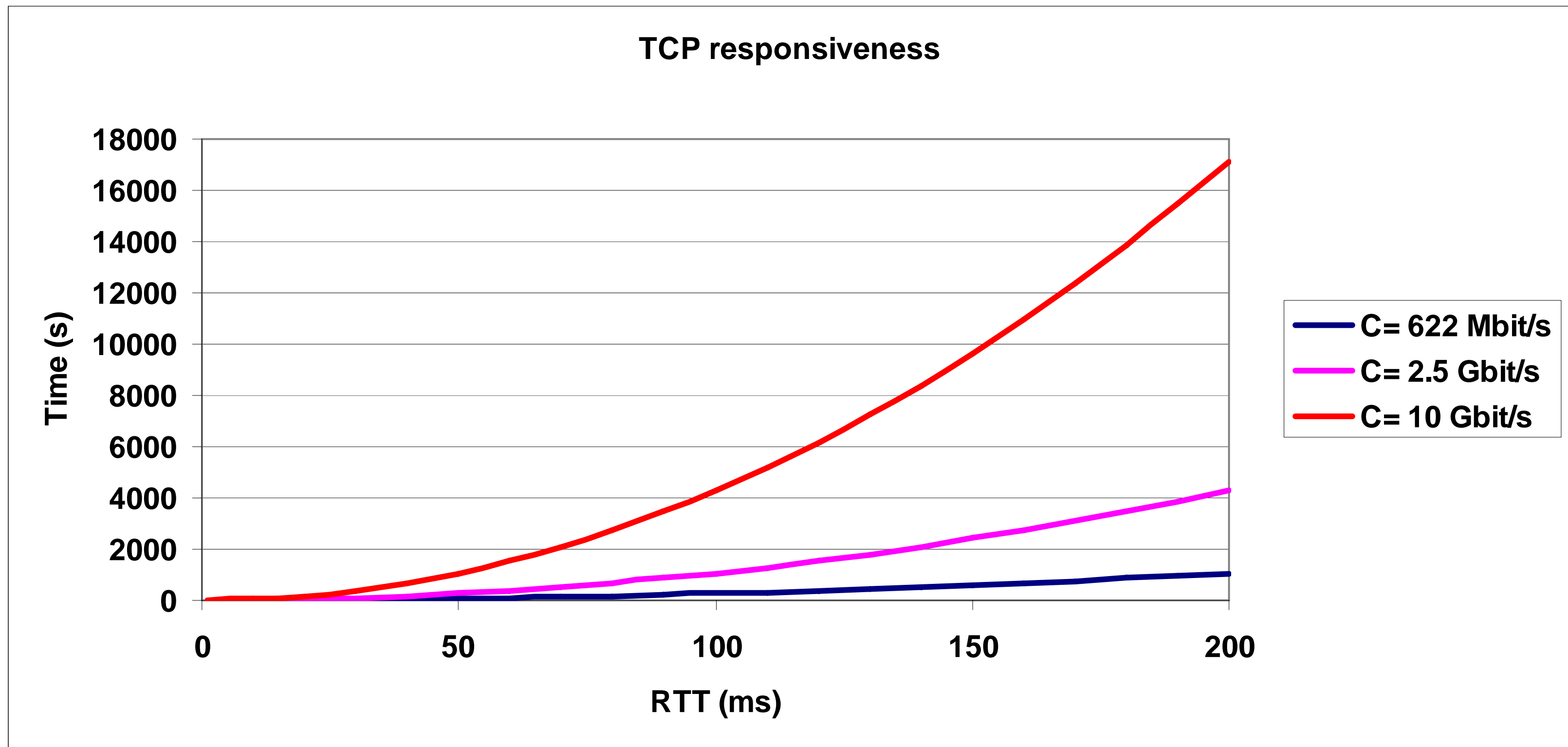
Responsivnost TCP

- Schopnost návratu na plnou přenosovou rychlost po výpadku
- Přepokládejme výpadek v okamžiku, kdy *cwnd = bw*RTT*

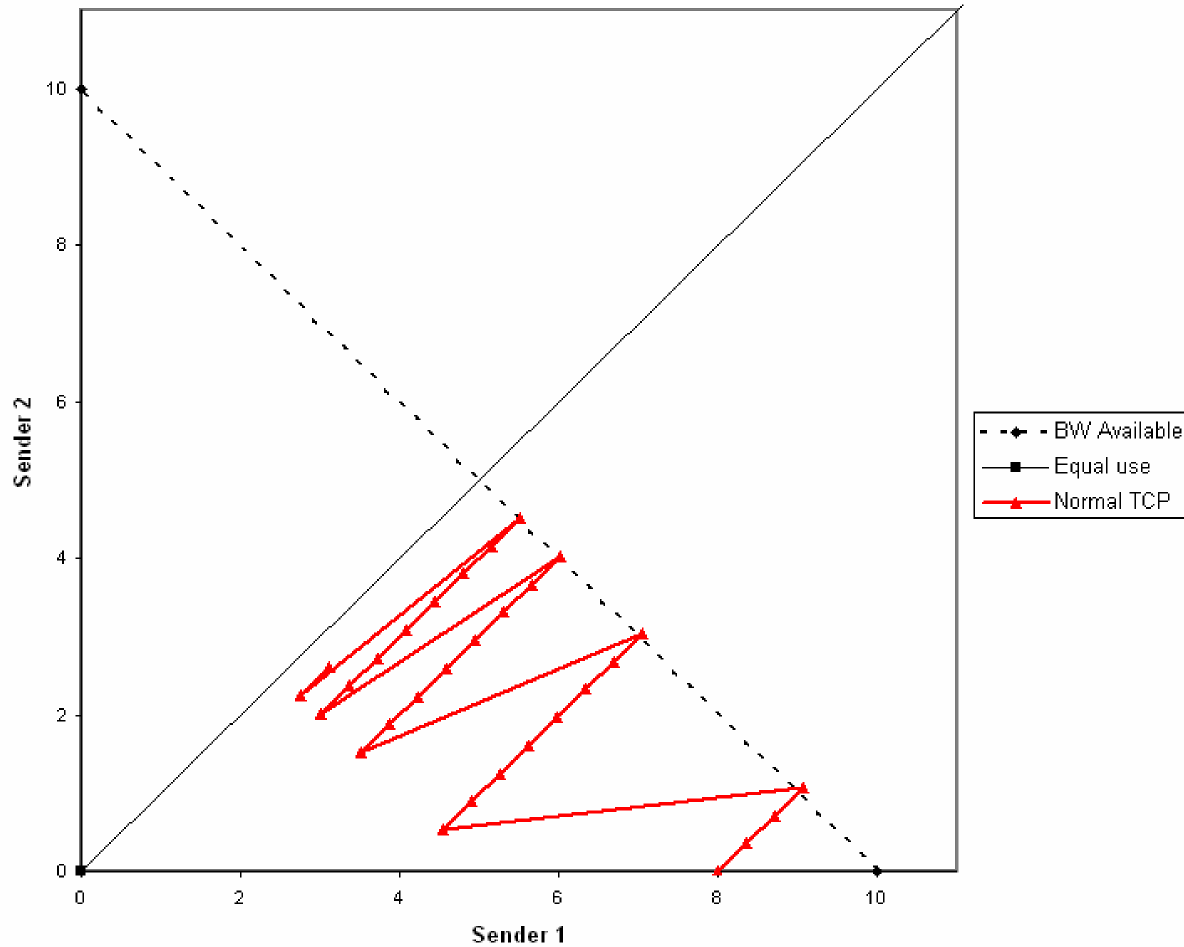
$$\rho = \frac{bw \,.\, RTT^2}{2 \,.\, MSS}$$

- závislost na RTT a MSS/MTU

Responsivnost TCP (2)



Férovost TCP



Vylepšování implementace TCP

- checksum offloading
  - jak při vysílání, tak při příjmu
- zero copy
  - uživatelský prostor <-> jádro <-> karta
  - page flipping
  - Linux, FreeBSD, Solaris

Povídání o současném dění kolem zajištěných protokolů pro přenosovou vrstvu na PSaA II.