

# Reti di calcolatori: Livello Trasporto

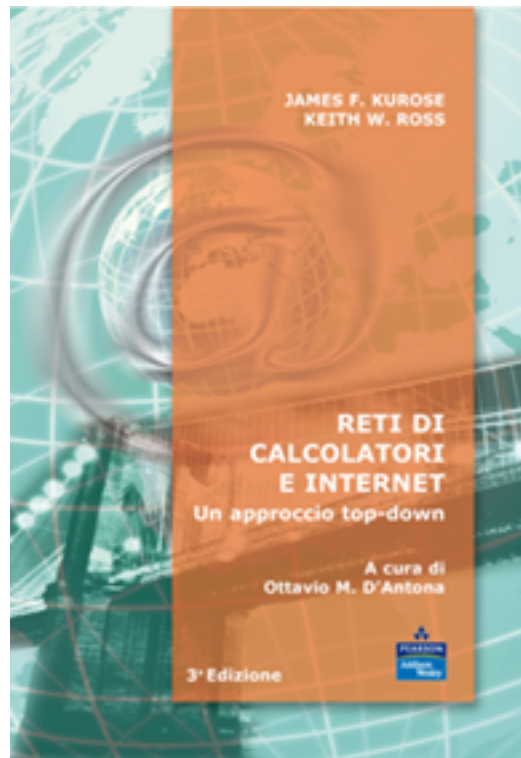
(Capitolo 3 Kurose-Ross)

Marco Roccetti

22 Marzo/3 Aprile 2023

# (Capitolo 3 Kurose-Ross)

## seconda parte



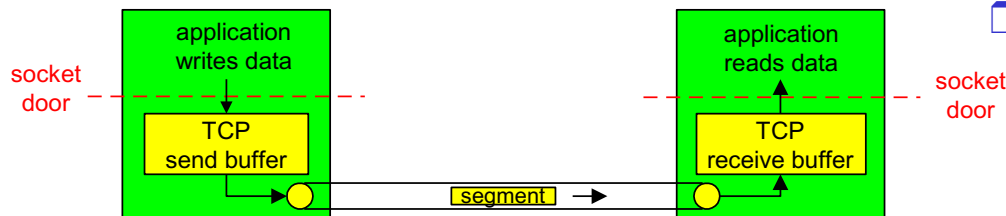
*Reti di calcolatori e Internet:  
Un approccio top-down*

3ª edizione  
Jim Kurose, Keith Ross  
Pearson Education Italia  
©2005

# TCP: rassegna

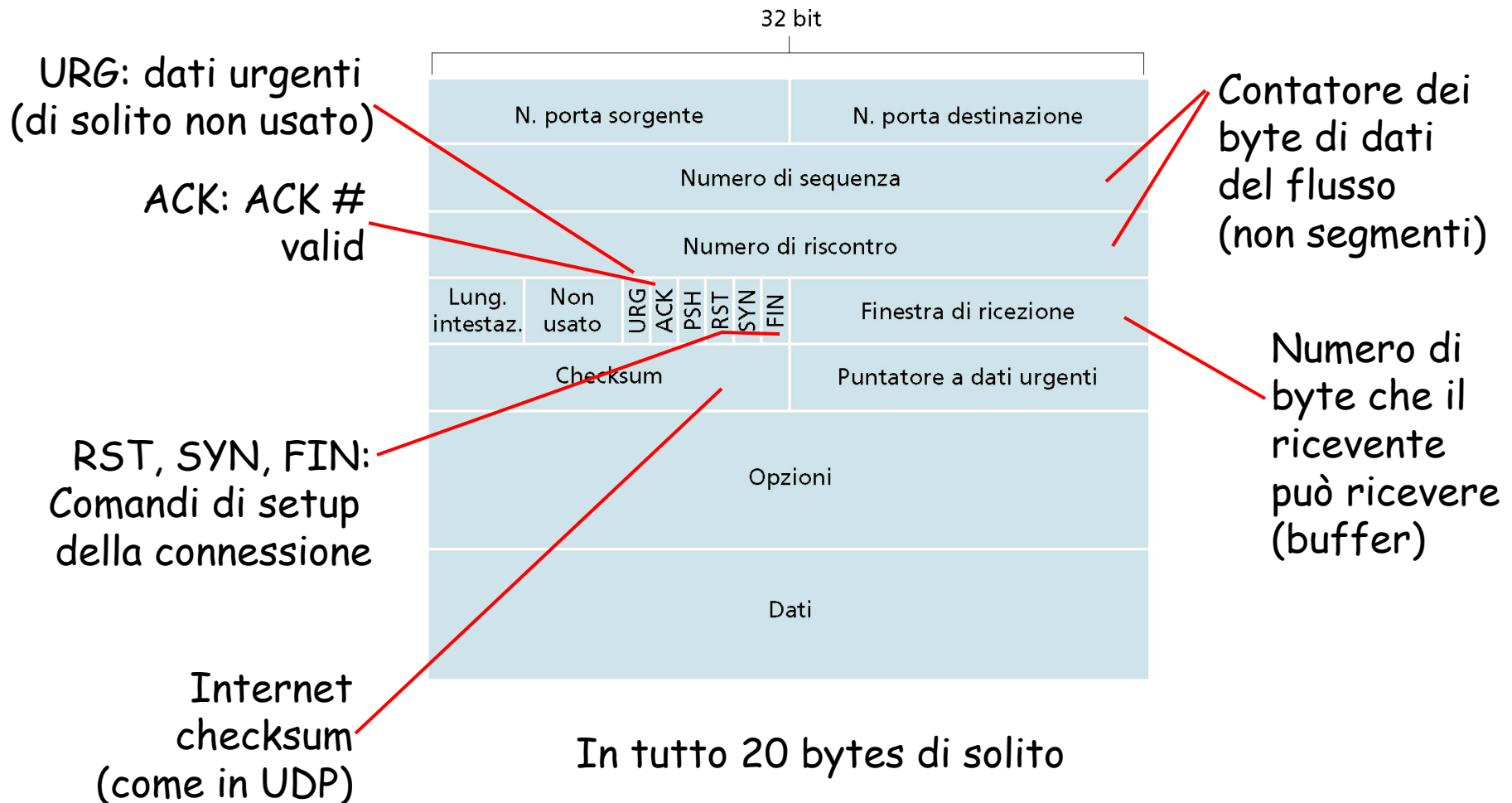
RFCs: 793, 1122, 1323, 2018, 2581

- ❑ **Protocollo uno-a-uno:**
  - Un sender, un receiver
- ❑ **Flusso di Byte ordinato e affidabile**
- ❑ **Protocollo pipelined:**
  - TCP ha controllo di flusso e di congestione basato su finestra scorrevole
  - Il protocollo è eseguito solo sui nodi terminali
- ❑ *Buffers su sender e receiver*



- ❑ **Connessioni full-duplex:**
  - Dati viaggiano nelle due direzioni
  - MSS: maximum segment size, 1460, 536, 512 bytes pari al MTU della rete sotto
- ❑ **Orientato alla connessione:**
  - Messaggi di controllo iniziali definiscono lo stato di sender e receiver prima di inviare i dati
- ❑ **Controllo di flusso**
  - Sender segue il ritmo del receiver
- ❑ **Controllo di congestione**
  - Sender segue il ritmo del router più lento

# Struttura del segmento TCP



# TCP: numeri di sequenza e ACKs

Il **numero di sequenza** per un segmento e' il numero nel flusso di byte del primo byte del segmento:

Es. Se ho un flusso da 500.000 byte e un MSS di 1000, ottengo 500 segmenti con il primo numerato 0, il secondo 1000, il terzo 2000 ....

Il **numero di riscontro** che l'host A scrive nei propri segmenti e' il numero di sequenza del byte successivo che A attende dall'host B:

Es. Se A ha ricevuto da B segmento di un flusso con dati da 0 a 535, A scrive 536 come numero di riscontro del segmento che manda a B

# TCP: numeri di sequenza e ACKs

## Num. Seq. (#seq):

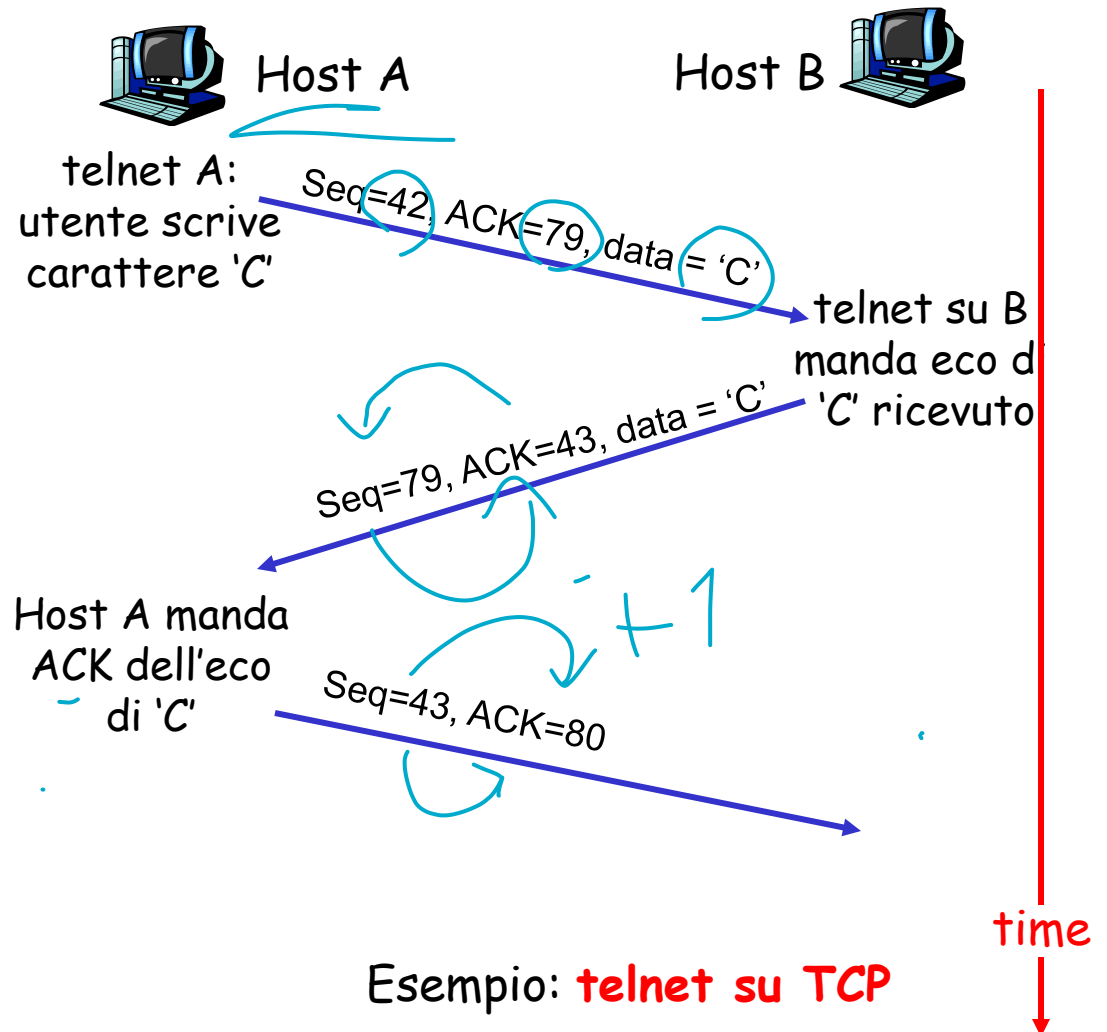
- Numero d'ordine del byte nella sequenza

## ACKs:

- Numero d'ordine del prossimo byte atteso
- ACK cumulativo

??: come si gestiscono segmenti fuori ordine?

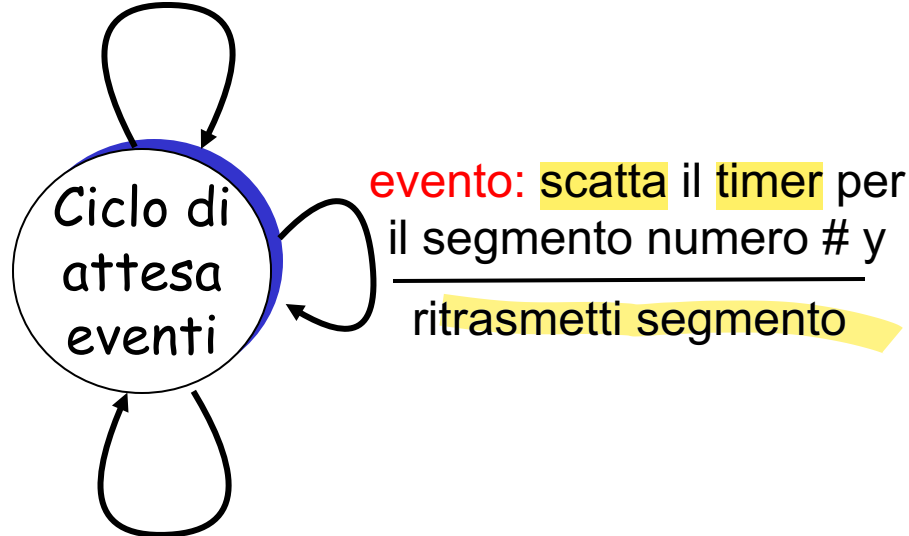
- TCP non lo specifica!  
Dipende...



# TCP: reliable data transfer: 3 eventi principali

evento: dati ricevuti  
dall'applicazione sopra TCP  
Crea e spedisce segmento

Assumiamo per semplicità che  
il Sender



- Spedisca dati solo in un senso

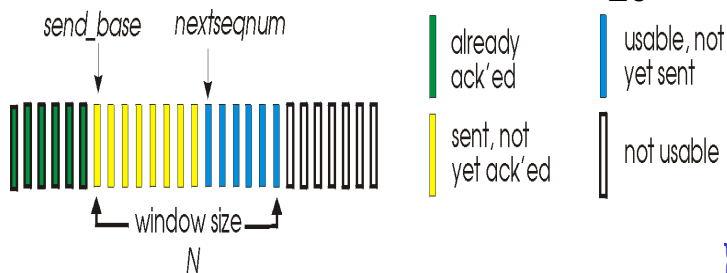
- Non abbia per ora controllo di flusso e congestione

evento: ricevuto ACK  
per segmento # y

Elabora ACK

# TCP: trasferimento dati affidabile

## Es. Sender TCP semplificato



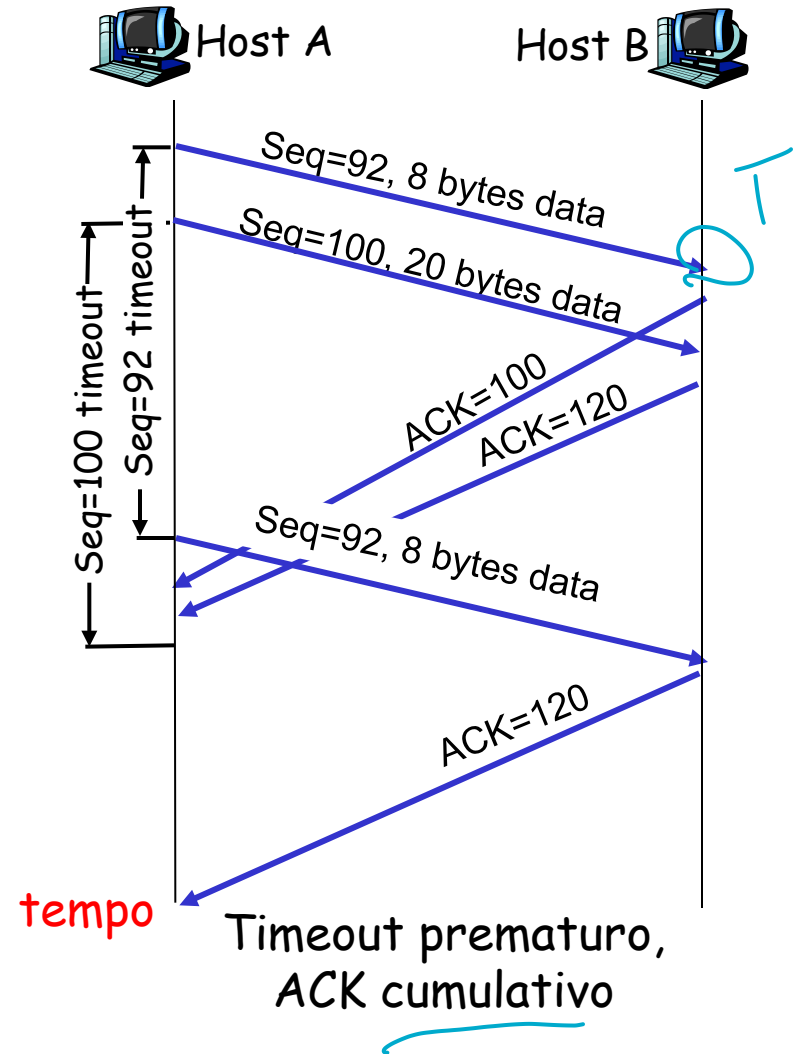
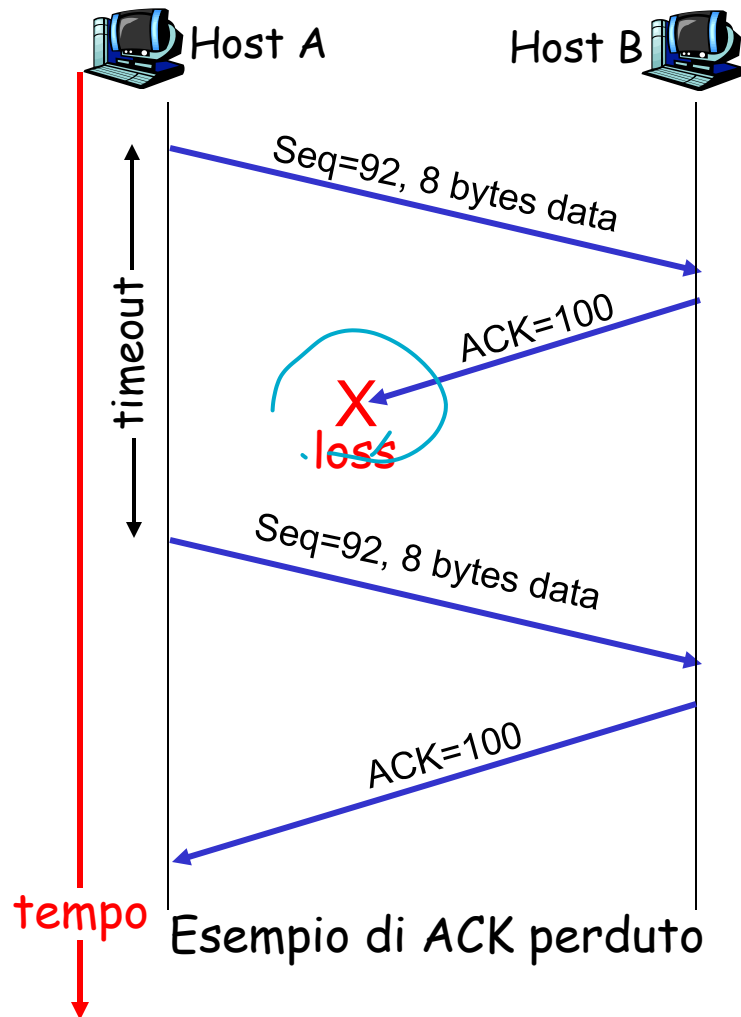
```
00 sendbase = initial_sequence number (inizio finestra scorrevole)
01 nextseqnum = initial_sequence number (puntatore alla parte libera)
02
03 loop (ciclo infinito) {
04     A seconda del tipo di evento esegui:
05     evento: ricevuti dati da spedire dall'applicazione
06         crea segmento TCP con numero nextseqnum
07         Avvia timer per il segmento nextseqnum
08         Spedisci segmento mediante servizio di livello rete (IP)
09         nextseqnum = nextseqnum + length(data) (aggiorna finestra)
10     evento: scatta timer per segmento numero y
11         Ritrasmetti segmento numero y
12         Calcola nuovo timeout per il timer del segmento y
13         Riavvia il timer per il segmento y
14     evento: ricevuto ACK per il segmento numero y
15         se (y > sendbase) { /* ACK cumulativo per tutti i byte fino a y */
16             Cancella tutti i timer per i segmenti con numero < y
17             sendbase = y (aggiorna il lato di inizio della finestra)
18         }
19         altrimenti { /* ACK duplicato per segmento già ricevuto */
20             Incrementa contatore di ACK duplicati del segmento y
             se (questo è il terzo ACK duplicato per segmento y) {
                 /* attiva fase "fast retransmit" di TCP*/
                 Rispedisci segmento con numero y
                 Riavvia timer per segmento y
             }
         }
     } /* fine ciclo infinito */
```



# TCP: regole per ACK [RFC 1122, RFC 2581]

Evento	Azione del receiver TCP
Segmento arriva in ordine Non ci sono “buchi”	ACK ritardato. Aspetta per 500ms l’arrivo anche del prossimo segmento. Se non arriva entro 500ms spedisci ACK
Segmento arriva in ordine Non ci sono “buchi” Ho già un ACK ritardato...	Spedisci subito un ACK cumulativo per i due segmenti ricevuti
Segmento arriva fuori ordine con numero superiore. Si crea un “buco”.	Spedisci un ACK duplicato che indica di nuovo quale è il numero del prossimo byte atteso
Arriva segmento che copre del tutto “o parzialmente l’inizio di” Un “buco”	Spedisci ACK immediato se il segmento cade all’inizio del “buco”

# TCP: esempi



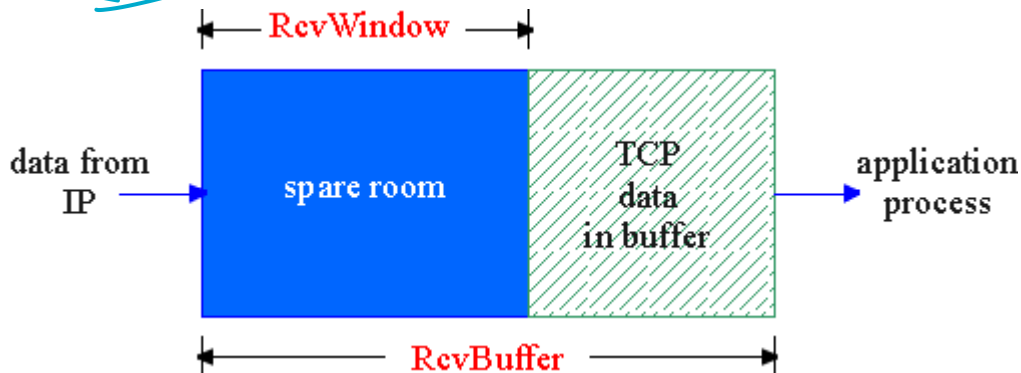
# TCP controllo di flusso

## controllo di flusso

Il sender evita di trasmettere dati troppo velocemente rispetto al buffer del receiver

RcvBuffer = dimensione del Buffer TCP del receiver

RcvWindow = dimensione del Buffer libero sul receiver



receiver buffer

receiver: informa esplicitamente il sender sulla quantità residua di buffer disponibile (parte azzurra) della figura: non me ne mandare più di questo!!!

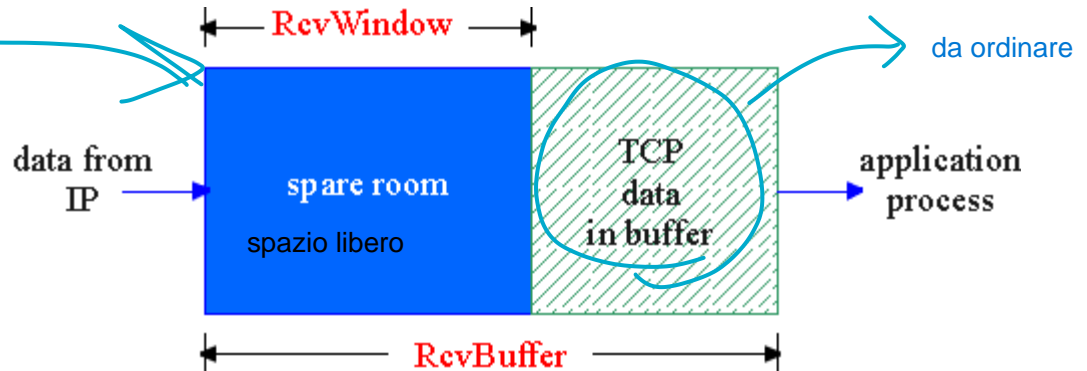
- Questa informazione va scritta nel campo RcvWindow del segmento TCP

# TCP controllo di flusso: receiver

**receiver:**  $\text{LastByteReceived} - \text{LastByteRead} \leq \text{RcvBuffer}$  (parte azzurra)

nel campo **RcvWindow** del segmento TCP devo dunque scrivere il valore:

$$\text{RcvWindow} = \text{RcvBuffer} - (\text{LastByteReceived} - \text{LastByteRead})$$



receiver buffer

# TCP controllo di flusso: sender

Anche il **sender** usa due variabili per gestire il proprio buffer:  
LastByteSent e LastByteAcked

La differenza (LastByteSent - LastByteAcked) corrisponde a bytes che devono essere conservati nel buffer perche' potrebbero necessitare di ritrasmissione

Cioe' fa si' che:  $(\text{LastByteSent} - \text{LastByteAcked}) \leq \text{RcvWindow}$

**Ovvero il sender:** limita il numero di segmenti per i quali non ha ricevuto ACK inferiore all'ultimo RcvWindow ricevuto

# TCP controllo di flusso: problema

Supponiamo **receiver** abbia comunicato a sender  $RcvWindow = 0$

Il **sender** si ferma e non manda piu' nulla

Come fa il **receiver** a comunicare che  $RcvWindow$  non e' piu' a 0 se non puo' rispondere a segmenti del sender che s'e' fatto muto per rispettare le regole?

Per ovviare al problema, il **sender** manda comunque segmenti di dati nulli (anche se  $RcvWindow = 0$ ) per dare modo al **receiver** di rispondere ai segmenti con gli eventuali nuovi valori (diversi da 0) della  $RcvWindow$

# TCP Round Trip Time e Timeout

D: come si definisce il valore del timeout?

- ❑ Maggiore di RTT
  - ma: RTT può variare
- ❑ Troppo corto: timeout prematuro
  - Implica ritrasmissione inutile
- ❑ Troppo lungo: reazione lenta in caso di perdita di segmento

D: come stimare RTT?

- ❑ SampleRTT: tempo misurato dalla trasmissione del segmento alla ricezione dell'ACK
  - Si ignorano le ritrasmissioni
  - Valgono gli ACK cumulativi (uno solo alla volta in un dato RTT)
- ❑ SampleRTT può variare rapidamente: occorre un modo per rendere "morbida" la variazione
  - Si usa una media pesata delle ultime stime di SampleRTT sperimentate

# TCP Round Trip Time and Timeout

storia RTT

RTT misurato

→  $\text{EstimatedRTT} = (1-x) * \text{EstimatedRTT} + x * \text{SampleRTT}$

- Medie mobili pesate (esponenziali)
- L'effetto di una singola stima decade nel tempo esponenzialmente

□ Valore tipico di x: 0.125 (1/8)

Per dare più peso alla storia rispetto all'ultimo valore

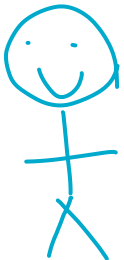
## Come si definisce quindi il timeout?

- EstimatedRTT al quale si aggiunge un margine di sicurezza
- se EstimatedRTT varia molto → occorre un margine di sicurezza superiore

→  $\text{Timeout} = \text{EstimatedRTT} + 4 * \text{Deviation}$

Deviation =  $(1-y) * \text{Deviation} + y * |\text{SampleRTT} - \text{EstimatedRTT}|$

con  $y=0.25$  di solito





# TCP: instaurazione di una connessione

N.B.: TCP sender e receiver devono stabilire una connessione prima di scambiare segmenti

□ Necessario per inizializzare le variabili di TCP:

- Numeri di sequenza #s
- Buffer e controllo di flusso (es. RcvWindow)

□ *client*: chi inizia la connessione

```
Socket clientSocket = new  
Socket("hostname", "port  
number");
```

□ *server*: chi riceve la richiesta

```
Socket connectionSocket =  
welcomeSocket.accept();
```

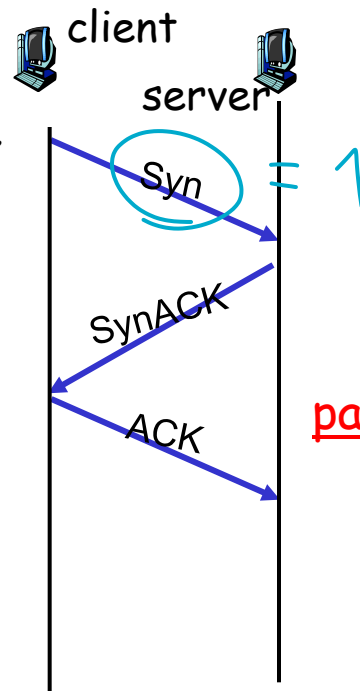
→ Handshake a 3 vie: 3WH

passo 1: client spedisce segmento TCP con SYN=1 al server e specificando un num.seq. iniziale scelto a caso

passo 2: appena il server riceve SYN, risponde con SYN/ACK

- Conferma ricezione con suo SYN a 1
- mette  $ACK = num.seq(r) + 1$  del client
- Alloca spazio per buffer
- Sceglie casualmente il suo seq.num.

passo 3: client riscontra il segmento di conferma del server, alloca il suo buffer, mette il suo  $ACK = num.seq(s) + 1$ , e mette SYN = 0 perché l'handshake è terminato



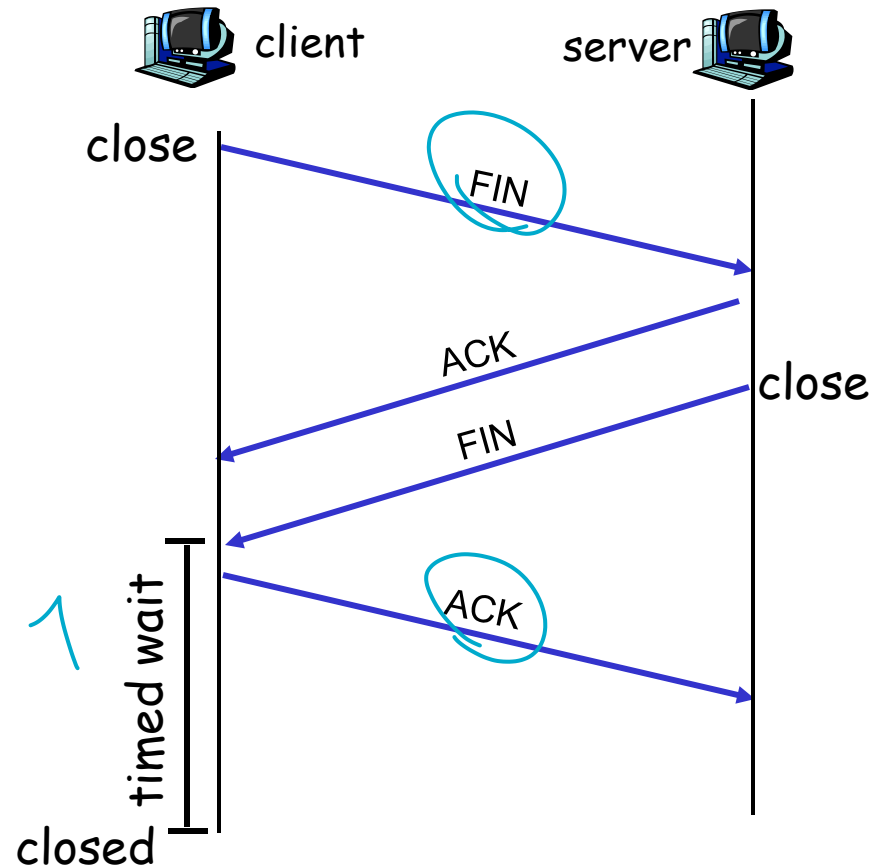
# TCP: gestione della connessione

## Chiusura della connessione:

client closes socket:  
`clientSocket.close()` ;

Passo 1: client spedisce  
segmento TCP FIN al  
server

passo 2: server riceve FIN = 1  
e conferma con ACK, poi  
chiude la connessione e  
spedisce segmento FIN a  
sua volta.



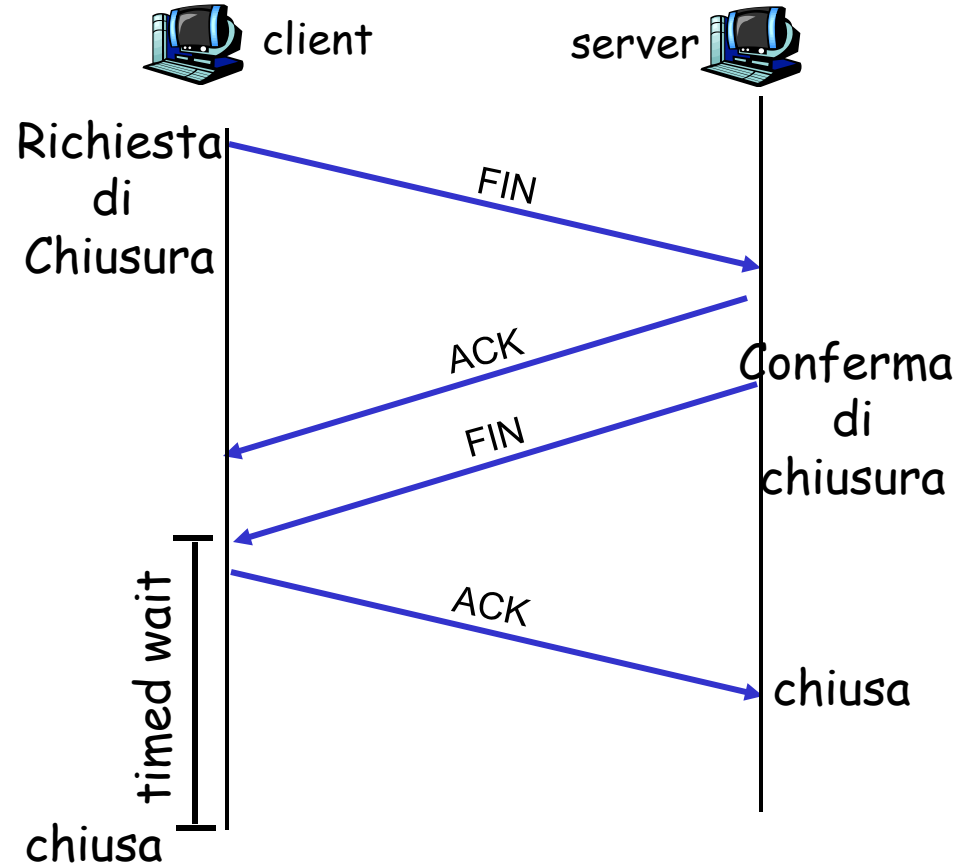
# TCP: gestione della connessione

ND

**passo 3:** client riceve FIN e risponde con ACK.

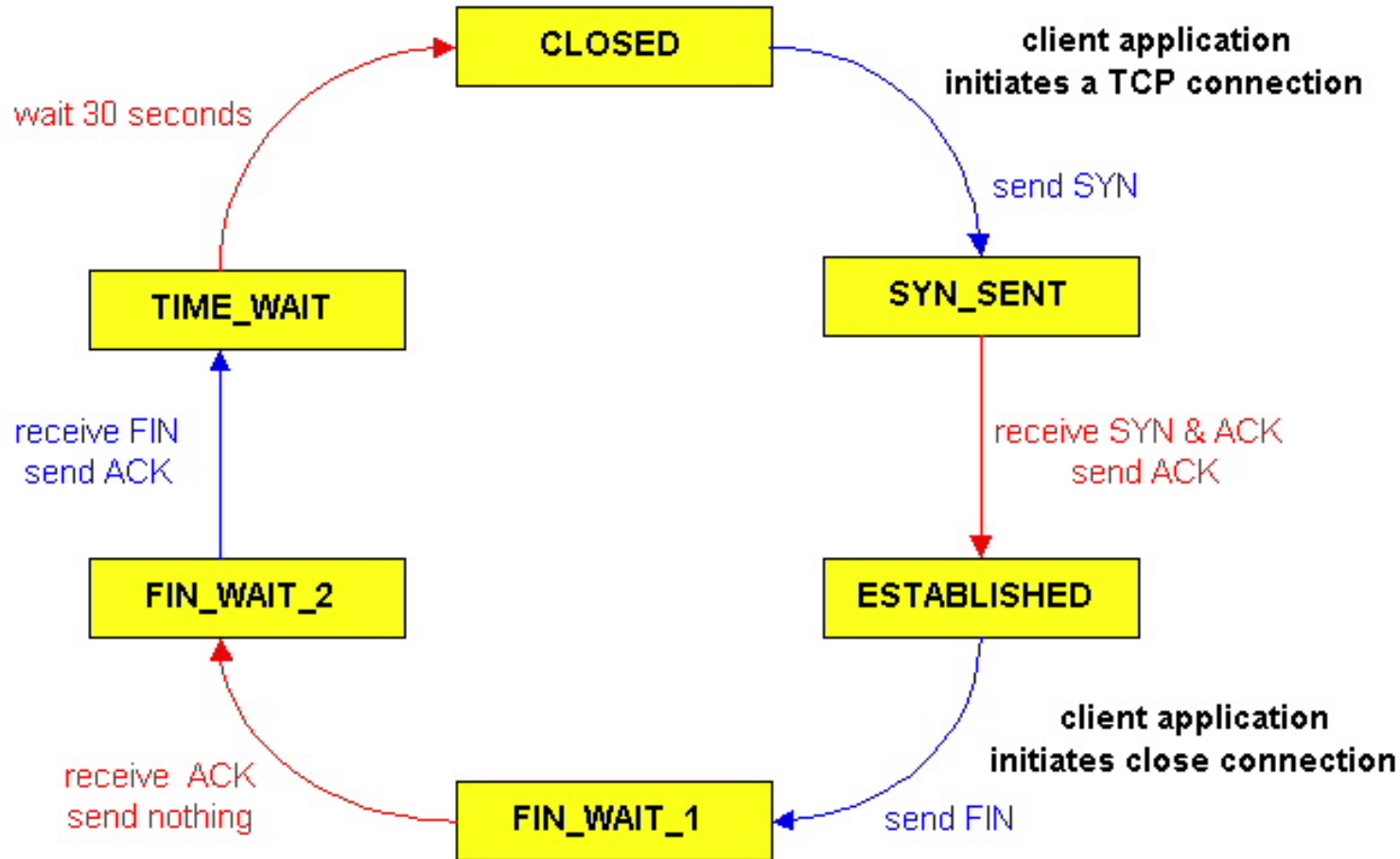
- ...poi entra in fase di attesa limitata nella quale risponde con ACK a eventuali FIN replicati

**passo 4:** server, riceve ACK e la connessione è chiusa.



# TCP: gestione della connessione

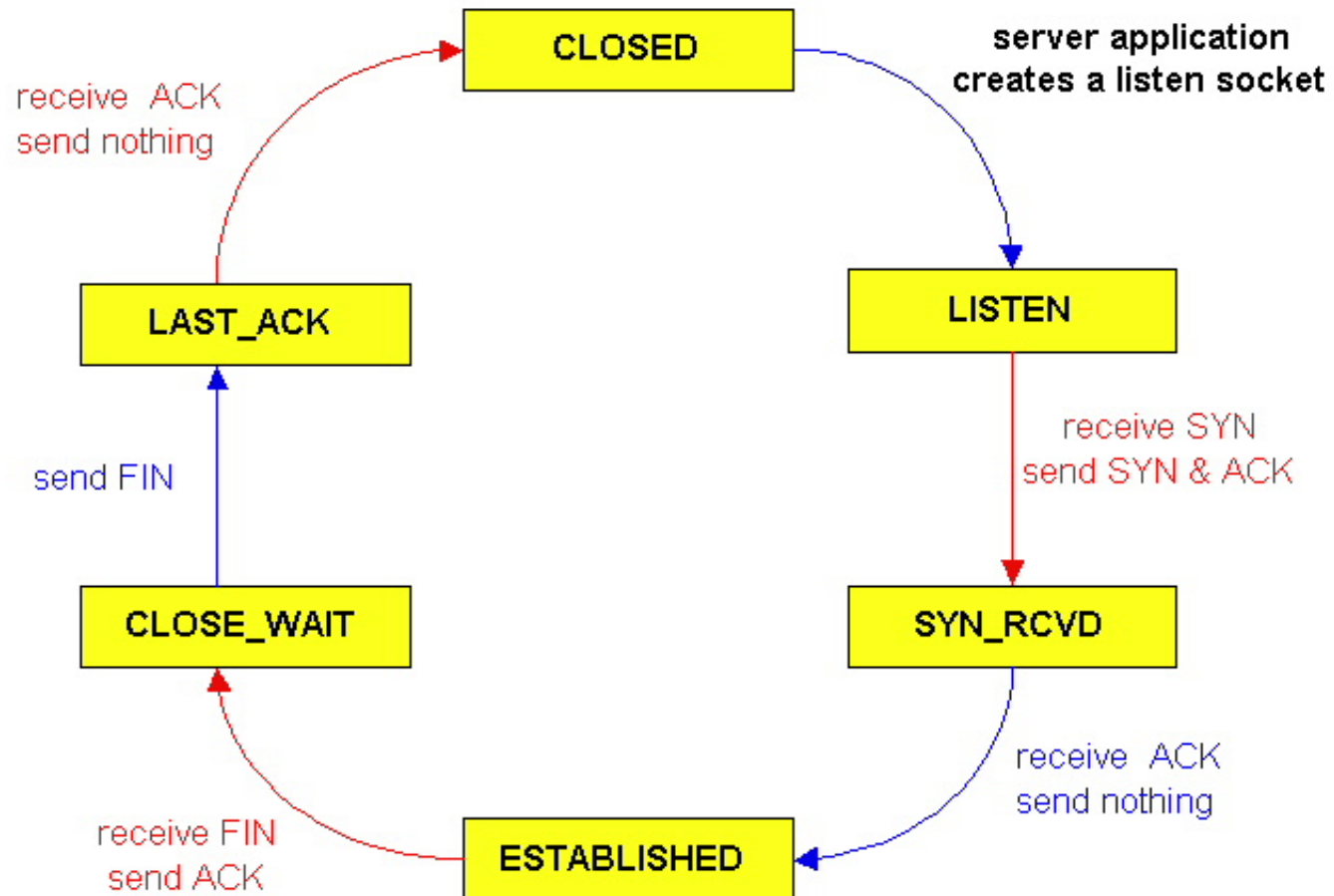
N9



Ciclo di vita degli stati  
del client TCP

# TCP: gestione della connessione NO

Ciclo di vita degli stati del server TCP



# Il controllo della congestione

## Congestione:

- ❑ Troppi host spediscono troppi dati e la rete non è in grado di inoltrarli tutti verso le destinazioni
- ❑ È un problema dei router intermedi del cammino (e non solo del receiver, come per il controllo di flusso)
- ❑ Cosa causa:
  - Pacchetti perduti (buffer dei router saturi)
  - Lunghi ritardi (lunghe code nei buffer)

# Come si realizza il controllo di congestione

Due approcci possibili:

## Controllo di congestione End-end:

Non c'è indicazione esplicita dalla rete

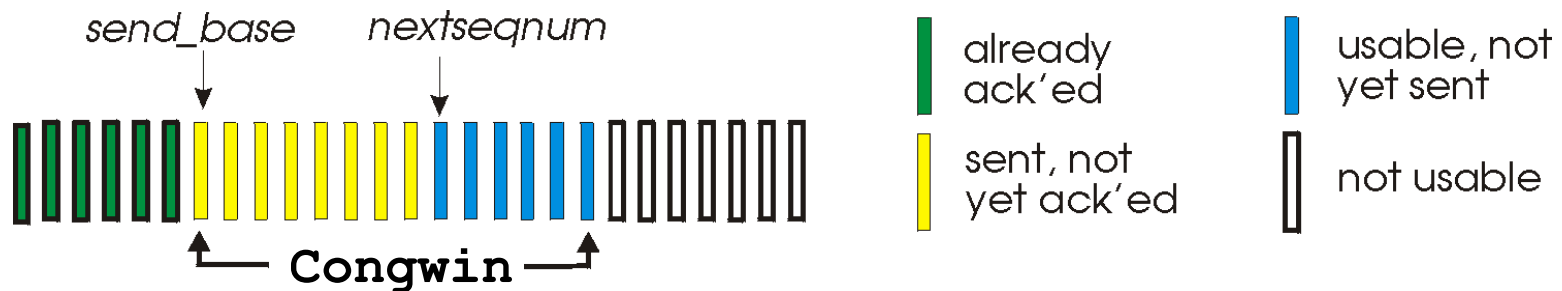
- La congestione si interpreta sulla base dei pacchetti perduti e dei ritardi stimati
- TCP usa questa tecnica

## Controllo di congestione assistito dalla rete

- I router forniscono segnali di rischio
  - Un bit nell'header indica presenza o rischio di congestione (explicit congestion notification)  
**TCP/IP ECN**
  - Si indica anche il ritmo di invio che il sender dovrebbe assumere

# TCP: controllo della congestione

- Controllo end-end (non assistito dai router intermedi della rete)
- Il ritmo di invio è limitato dalla dimensione della finestra di congestione **Congwin**:



- Dati  $w$  segmenti, di  $MSS$  bytes spediti ogni  $RTT$ , posso raggiungere un throughput massimo di:

$$\text{throughput} = \frac{w * MSS}{RTT} \text{ Bytes/sec}$$



# TCP: controllo della congestione e del flusso

- ❑ Algoritmi per il controllo della congestione e del flusso vanno armonizzati
  - idea: si usa il minimo tra I valori di Congwin (congestione) e di RcvWindow (flusso) evitando perdita segmenti
  - Cio' e' fatto dal sender nell'inviare segmenti al receiver nella seguente maniera:

$\text{LastByteSent} - \text{LastByteAcked} \leq \min\{\text{Congwin}, \text{RcvWindow}\}$

E anche spazio libero nell ack

# TCP: controllo della congestione

Na

## □ “probing” della banda disponibile

- *idea*: inviare al ritmo massimo (Congwin più grande possibile) evitando perdita segmenti
- *incrementa* Congwin finchè non c'è perdita
- *decrementa* Congwin se c'è perdita e poi riparti con la fase di incremento

## □ Due fasi

- *slow start*
- *congestion avoidance*

## □ variabili usate:

- Congwin (dimensione della finestra)
- *threshold*: definisce la soglia di dimensione della finestra oltre la quale termina la fase “slow start” e inizia “congestion avoidance”

# TCP Slow(!?)start

→ No Problema  
congestione

## Algoritmo Slowstart

inizializza: Congwin = 1

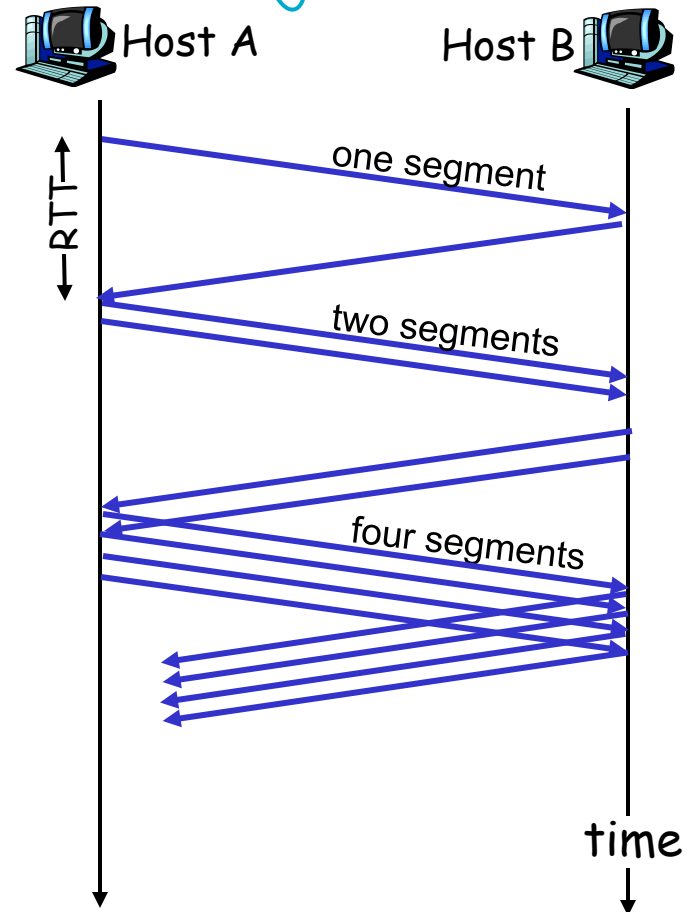
Per ogni ACK ricevuto

Congwin\*2

finché (ACK non ricevuto  
oppure

CongWin > threshold)

- Crescita esponenziale (per  
RTT) della finestra (quindi  
non troppo LENTA!!  
Aumenta di 1 MSS ad ogni  
ACK all'interno di un RTT)



# TCP "Congestion Avoidance"

## Congestion avoidance

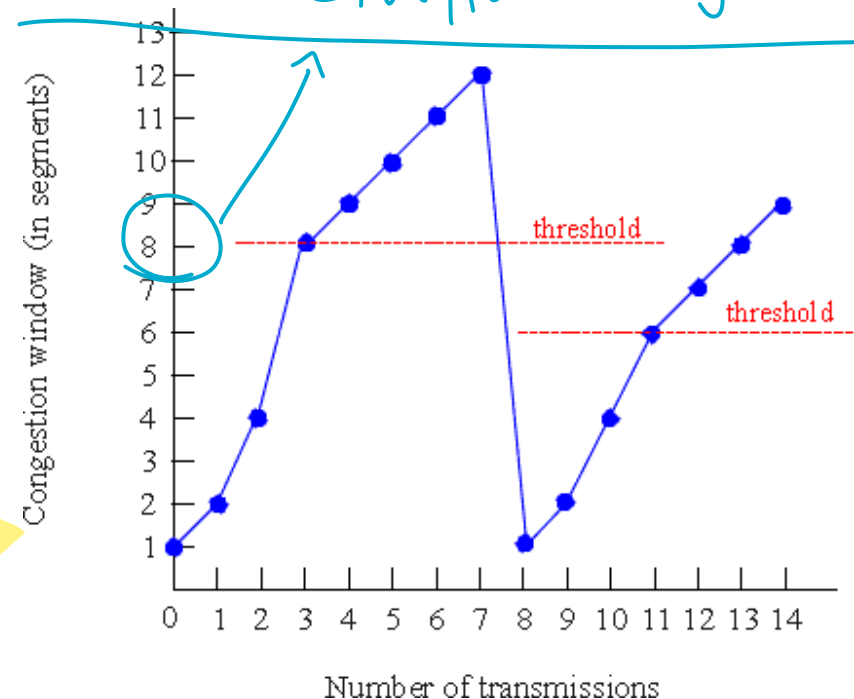
```
/* slowstart terminata */  
/* Congwin > threshold */  
finchè (non perde segm.) {  
    ogni w ACK ricevuti:  
        Congwin++ (cioè  
        aumenta di 1 MSS)  
}  
/* se perde ACKs (timeout)  
*/
```

$\text{threshold} = \text{Congwin} / 2$

Congwin = 1

Riparti da fase "slowstart"

*soffitto di cristallo  
livello di soglia*



# TCP "Congestion Avoidance" con 3 ACK duplicati -> fast recovery

## Congestion avoidance

2 alternative:

threshold

/\* se perde ACKs (timeout) \*/

threshold = Congwin/2

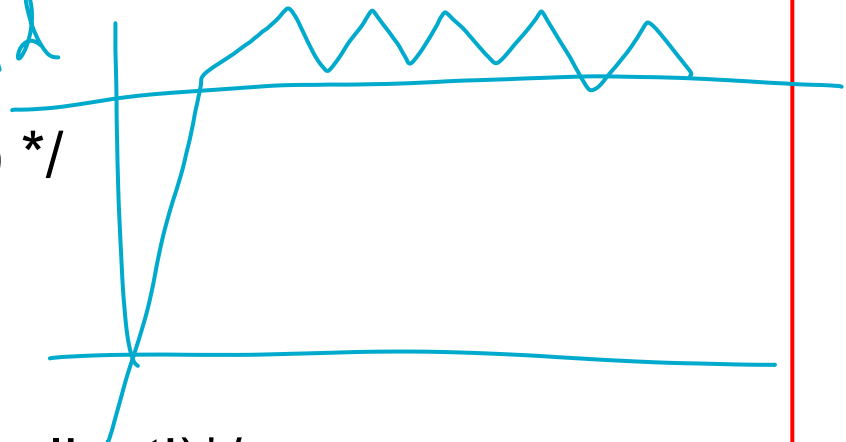
Congwin = 1

/\* se perde ACKs (3 ack duplicati) \*/

threshold = Congwin/2

Congwin = threshold

Non ri-inizia da 1MSS, i 3 ack duplicati dicono  
che rete puo' fare di piu'



# AIMD

La fase "congestion avoidance" di TCP si dice **AIMD**:  
*additive increase, multiplicative decrease*

- Xchè incrementa finestra di 1 per RTT
  - In realta' ad ogni ACK entro RTT aumento Congwin con la seguente formula:  $MSS \times (MSS / Congwin)$  byte
  - Per esempio se  $MSS=1460$  byte e Congwin 14600 byte in un RTT sono spediti 10 segmenti. Ad ogni ACK per ciascuno di questi aumento la dimensione di Congwin e quindi la spedizione di un 1/10. Se mi arrivano tutto, ho incrementato di un intero MSS la spedizione.
- Divide la finestra per 2 in caso di perdita segmento

# throughput TCP : modello semplificato(!!)

Escludiamo le fasi di slow-start: percentualmente durano poco e poco pesano

Detta  $w$  in bytes la finestra di congestione all'interno di un  $RTT$ , la frequenza trasmissiva e':  $w/RTT$

A ogni  $RTT$ , si aumenta di 1 MSS fino al primo timeout, diciamo  $W$  il valore della finestra  $w$  al timeout, supponiamo  $W$  e  $RTT$  costanti, allora lo throughput in  $RTT$  varia linearmente in:  $[W/(2RTT), W/RTT]$ , cresco di 1 fino a  $W$  e poi dimezzo al timeout (TCP Reno)

Ovvero mediamente e':  $TCP\text{-throughput} = 0.75 \times W/RTT$

# throughput TCP : modello meno semplificato e futuro

Col modello semplificato di prima, se ho connessione TCP a larga banda (10 Gbps) con MSS di 1500 byte, RTT=100 msec, dovrei avere una finestra media di dimensione pari a: 83333 segmenti

Sono tantissimi, che succede se li perdo? Come rimedio? Quanto buffer al receiver mi occorre?

Un modello piu' sofisticato, con L frequenza di perdite, da' TCP-throughput =  $1.22 \times MSS / (RTT \times \sqrt{L})$

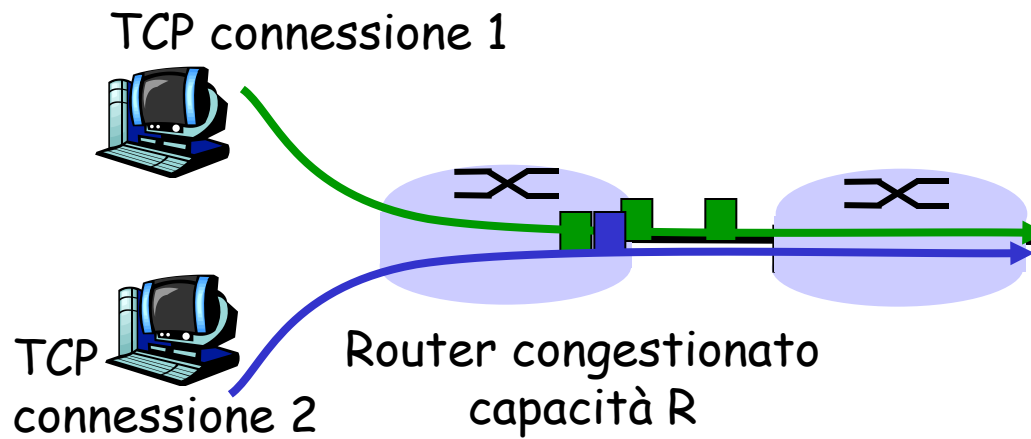
Se chiedo 10 Gbps di throughput dovrei avere probabilita' di perdite una su 5 miliardi di segmenti...!!!

TCP va ripensato: lo stanno facendo in molti



# TCP Fairness

**Fairness:** se  $N$  connessioni condividono lo stesso router che e' collo di bottiglia del sistema con capacita'  $R$  bps, ogni connessione dovrebbe ricevere  $R/N$  della capacita' del router (e del link)  
TCP e' fair? Vediamolo nella prossima slide



# Is TCP fair?

Situazione ideale con 2 connessioni TCP: senza traffico UDP, e medesimi valori di MSS e RTT

Ci si aspetta che:

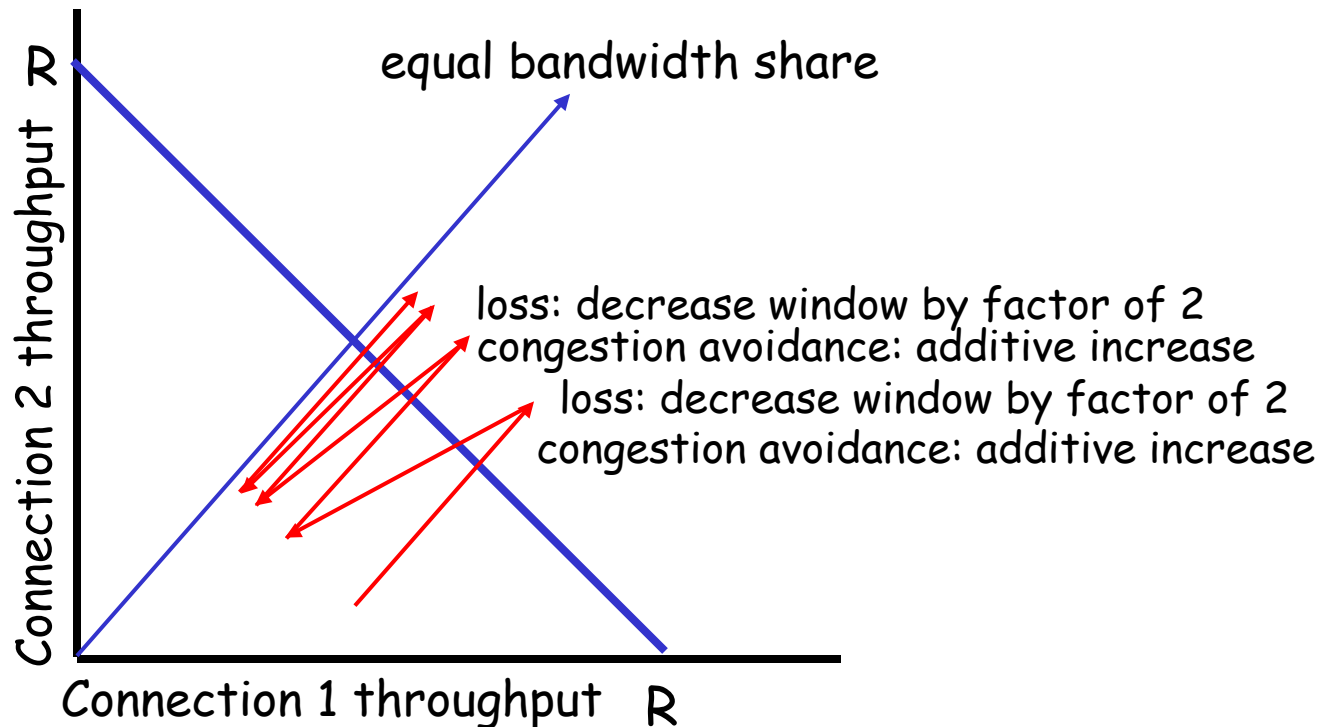
- Le due connessioni si dividano **a mezzo** la banda
- La usino al massimo: ovvero la somma di quanta ne usa una e di quanta ne usa l'altra dovrebbe essere uguale a **R**

E infatti... così succede:

# Why is TCP fair?

Two competing sessions:

- Additive increase gives slope of 1, as throughput increases
- multiplicative decrease decreases throughput proportionally



# TCP fairness?

Nella realta' pero':

- Piu' di 2 connessioni TCP
- I valori di MSS e RTT possono essere molto differenti

Dunque accade che:

- Le N connessioni non si dividano equamente la banda
- Bensì chi ha RTT piu' piccolo apre piu' velocemente la propria finestra di congestione e acquisisce piu' banda: unfairness
- Inoltre, il traffico UDP non si lascia diminuire, e' unfair in natura e quindi alla lunga estromette il traffico TCP
- In piu' se in un collegamento uso connessioni TCP multiple, peggioro ulteriormente il problema

# TCP latency modeling

Q: How long does it take to receive an object from a Web server after sending a request?

- TCP connection establishment
- data transfer delay (including slow start)

## Notation, assumptions:

- Assume one link between client and server of rate  $R$
- Assume: fixed congestion window,  $W$  segments
- $S$ : MSS (bits)
- $O$ : object size (bits)
- no retransmissions (no loss, no corruption)

## Without slow-start (minimal latency):

- Latency =  $2 \text{ RTT} + O/R$
- Obtained summing: 1)  $\text{RTT}$  for SYN + ACK between client & server, 2)  $\text{RTT}$  for final ACK plus request for object, 3)  $O/R$  for the object

# TCP latency modeling

Piu' in dettaglio, con finestra di  $W$  segmenti, dopo la richiesta del client, server trasferisce  $W$  segmenti e poi aumenta di 1  $S$  ogni ACK.

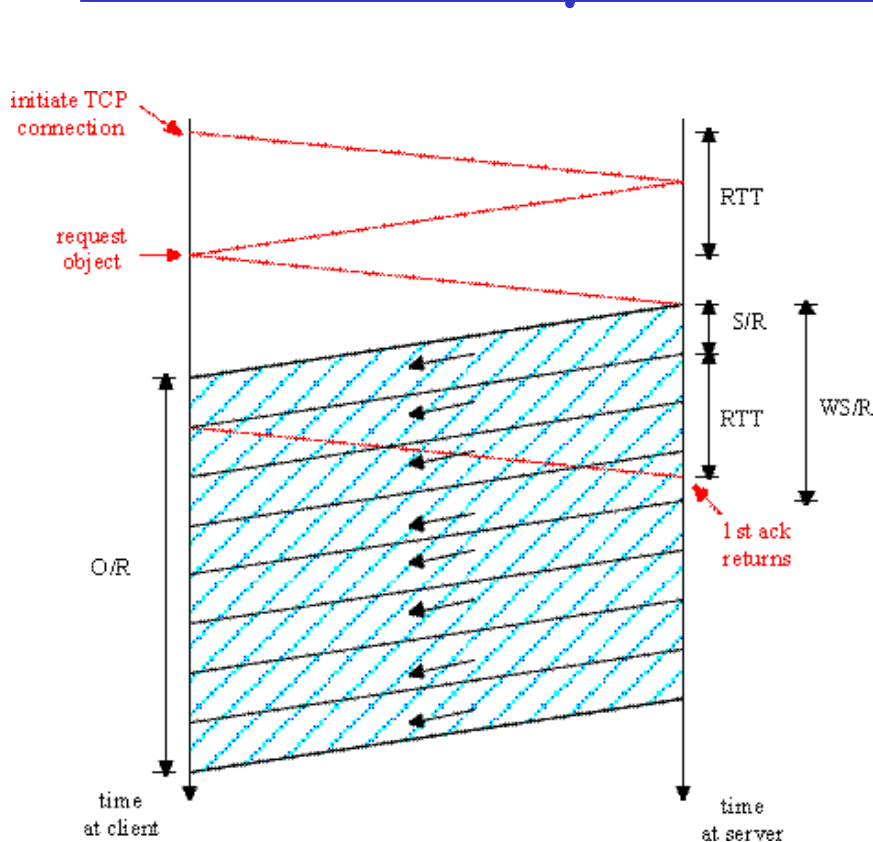
Sono dati due casi: 1) server finisce di mandare la prima finestra  $W$  (in tempo  $WS/R$ ), in tempo per ricevere il primo ACK **prima** della scadenza di  $WS/R$ , mentre 2) il server finisce di mandare la prima finestra  $W$ , ma riceve il primo ACK quando gia' **e' trascorso  $WS/R$**

## Two cases to consider:

- $WS/R > RTT + S/R$ : ACK for first segment in window returns before window's worth of data sent
- $WS/R < RTT + S/R$ : wait for ACK after sending window's worth of data sent

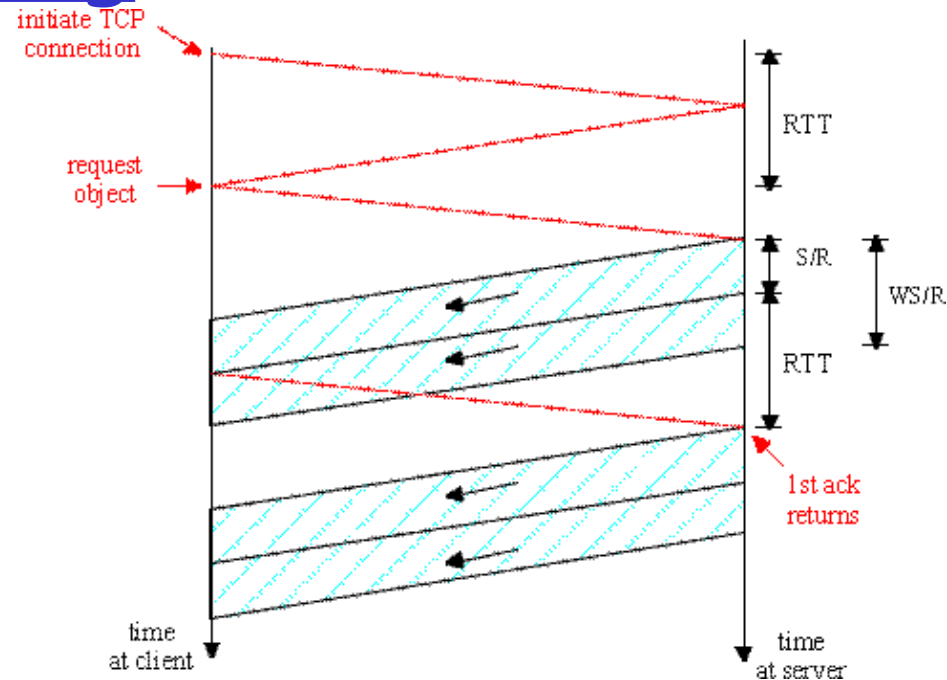
$$K := O/WS$$

# TCP latency Modeling



**Case 1:** Riesce a mandare finestre una dietro l'altra senza interruzioni e quindi

$$\text{latency} = 2RTT + O/R$$



**Case 2:** a ogni finestra mandata, si ferma x aspettare ACK, stalla per il numero K di finestre - 1, con periodo uguale a  $(S/R + RTT) - WS/R$ , quindi

$$\text{latency} = 2RTT + O/R + (K-1)[S/R + RTT - WS/R]$$

# TCP Latency Modeling: with Slow Start

Example:

O/S = 15 segments

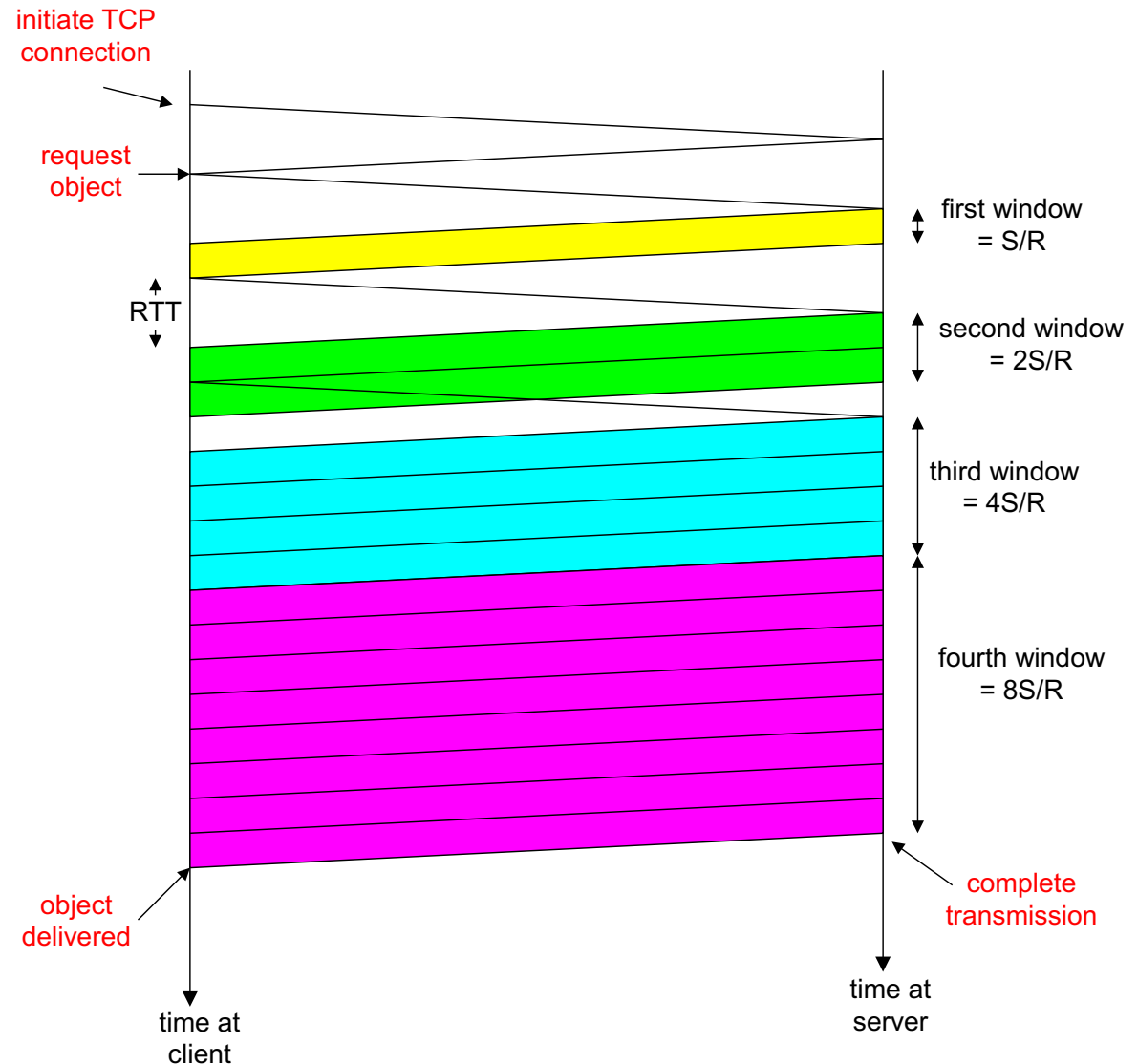
K = 4 windows

Kth windows has  $2^{(k-1)}$  segments

Q = 2

$P = \min\{K-1, Q\} = 2$

Server stalls P=2 times.





# TCP Latency Modeling: Slow Start (cont.)

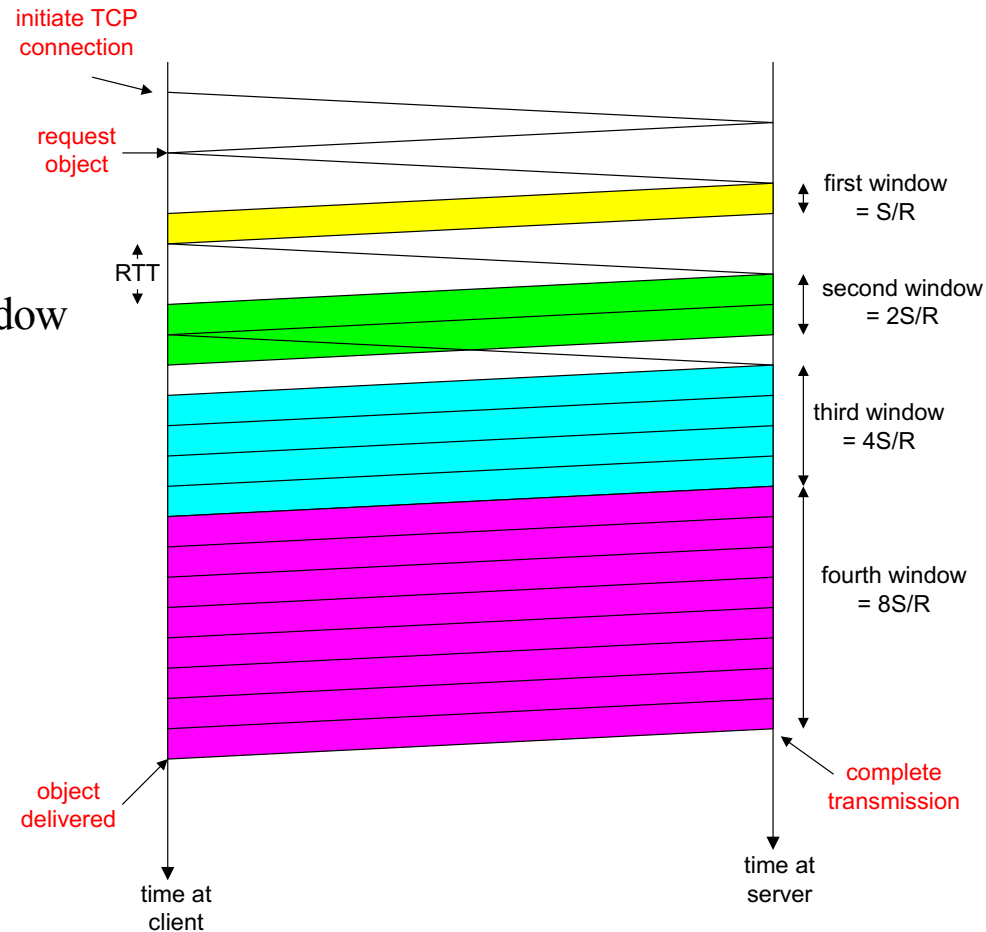
$\frac{S}{R} + RTT$  = time from when server starts to send segment

until server receives acknowledgement

$2^{k-1} \frac{S}{R}$  = time to transmit the  $k$ th window

$\left[ \frac{S}{R} + RTT - 2^{k-1} \frac{S}{R} \right]^+$  = stall time after the  $k$ th window

$$\begin{aligned} \text{latency} &= \frac{O}{R} + 2RTT + \sum_{p=1}^P \text{stallTime}_p \\ &= \frac{O}{R} + 2RTT + \sum_{k=1}^P \left[ \frac{S}{R} + RTT - 2^{k-1} \frac{S}{R} \right] \\ &= \frac{O}{R} + 2RTT + P \left[ RTT + \frac{S}{R} \right] - (2^P - 1) \frac{S}{R} \end{aligned}$$



# TCP Latency Modeling: Slow Start

- window grows according to slow start
- the latency of one object of size  $O$  is:

$$Latency = 2RTT + \frac{O}{R} + P \left[ RTT + \frac{S}{R} \right] - (2^P - 1) \frac{S}{R}$$

where  $P$  is the number of times TCP stalls at server:

$$P = \min\{Q, K - 1\}$$

- where  $Q$  is the number of times the server would stall if the object were comprised of a infinite number of segments  
 $Q = \text{parte\_intera}(\log(1 + (RTT/(S/R)))) + 1$
- and  $K$  is the number of windows that cover the object.

# TCP Latency Modeling: Conclusioni

- Oltre al valore del **ritardo** TCP dato dalla formula precedente, e' interessante confrontare la formula con controllo di congestione con quella senza controllo di congestione a latenza minima ( **$2RTT + O/R$** ). Si ha:
- $\text{latenza}/\text{latenza minima} \leq 1 + (P / ((O/R)/RTT) + 2)$

Ovvero slow-start non aumenta (peggiora) di molto il valore della latenza se  $RTT \ll O/R$ , ossia se il tempo di andata e ritorno e' molto inferiore al tempo di trasmissione dell'oggetto:  $\text{latenza}/\text{latenza minima}$  quasi uguale a 1

## TCP Latency: Alcuni casi

- S=536 bytes, RTT=100 msec, O=100 Kbyte, K=8:

R	O/R	P	latenza minima	latenza
28Kbps	28,6s	1	28,8s	28,9s
100Kbps	8s	2	8,2s	8,4s
1Mbps	800ms	5	1s	1,5s
10Mbps	80ms	7	0,28s	0,98s

- S=536 bytes, RTT=100 msec, O=5 Kbyte, K=4:

R	O/R	P	latenza minima	latenza
28Kbps	1,43s	1	1,63s	1,73s
100Kbps	0,4s	2	0,6s	0,76s
1Mbps	40ms	3	0,24s	0,52s
10Mbps	4ms	3	0,20s	0,50s

## TCP Latency: Alcuni casi commentati

- Slow start genera ritardi aggiuntivi apprezzabili solo quando il tasso trasmissivo e' piu' alto (grande banda!!)
- Ovvero, con poca banda TCP va prima a regime, e server rimane in stallo poche volte, a 10 Mbps invece va in stallo sempre
- Il fenomeno si nota meno se il file e' piccolo, ho bisogno di meno finestre

## TCP Latency: un altro caso, con RTT piu' alto

- S=536 bytes, RTT=1 sec, O=5 Kbyte, K=4:

- R	O/R	P	latenza minima	latenza
28Kbps	1,43s	3	3,4s	5,8s
100Kbps	0,4s	3	2,4s	5,2s
1Mbps	40ms	3	2,0s	5,0s
10Mbps	4ms	3	2,0s	5,0s

Il fenomeno peggiora anche con file piccoli e banda modesta se aumenta RTT!!!!

# Chapter 3: Summary

- principles behind transport layer services:
  - multiplexing/demultiplexing
  - reliable data transfer
  - flow control
  - congestion control
- instantiation and implementation in the Internet
  - UDP
  - TCP

## Next:

- leaving the network "edge" (application transport layer)
- into the network "core"