# Capitolo 3
# Livello di trasporto


## Nota per l'utilizzo:

Abbiamo preparato queste slide con l'intenzione di renderle disponibili a tutti (professori, studenti, lettori). Sono in formato PowerPoint in modo che voi possiate aggiungere e cancellare slide (compresa questa) o modificarne il contenuto in base alle vostre esigenze.
Come potete facilmente immaginare, da parte nostra abbiamo fatto *un sacco* di lavoro. In cambio, vi chiediamo solo di rispettare le seguenti condizioni:

- se utilizzate queste slide (ad esempio, in aula) in una forma sostanzialmente inalterata, fate riferimento alla fonte (dopo tutto, ci piacerebbe che la gente usasse il nostro libro!)
- se rendete disponibili queste slide in una forma sostanzialmente inalterata su un sito web, indicate che si tratta di un adattamento (o che sono identiche) delle nostre slide, e inserite la nota relativa al copyright.

*Thanks and enjoy!* JFK/KWR



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

4ª edizione
Jim Kurose, Keith Ross

Pearson Paravia Bruno Mondadori Spa
©2008

# Capitolo 3: Livello di trasporto

Obiettivi:

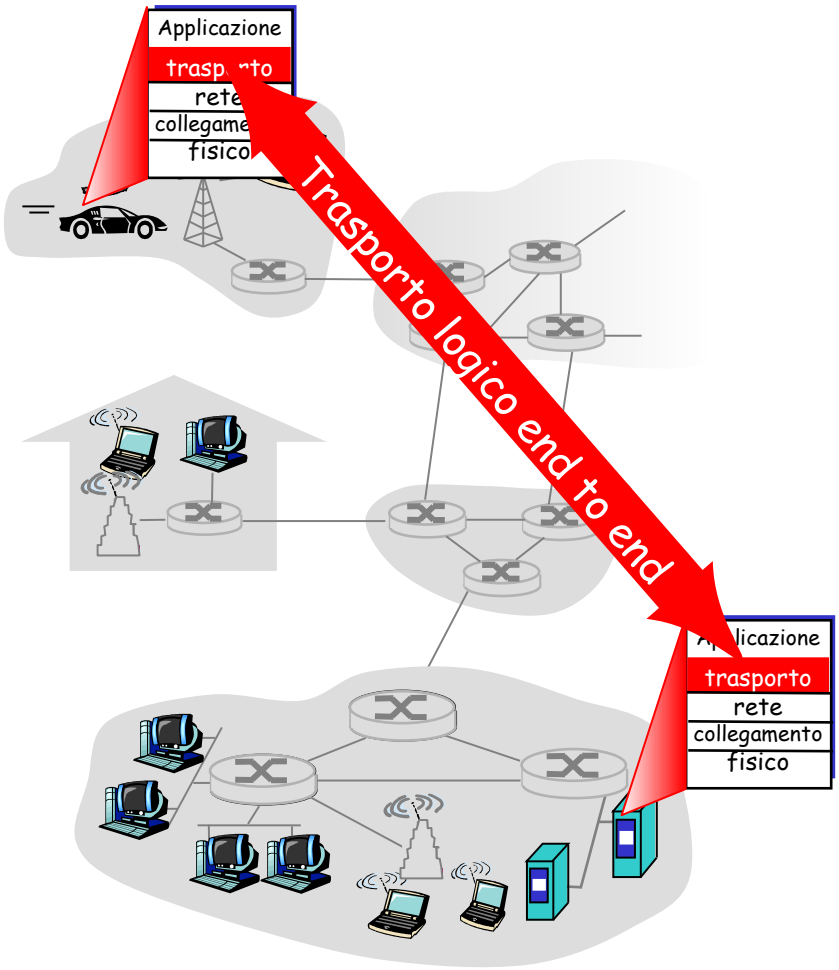
- Capire i principi che sono alla base dei servizi del livello di trasporto:
  - multiplexing/demultiplexing
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - controllo di congestione
- Descrivere i protocolli del livello di trasporto di Internet:
  - UDP: trasporto senza connessione
  - TCP: trasporto orientato alla connessione
  - controllo di congestione TCP

# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

# Servizi e protocolli di trasporto

- Forniscono la *comunicazione logica* tra processi applicativi di host differenti
- I protocolli di trasporto vengono eseguiti nei sistemi terminali
  - lato invio: scinde i messaggi in segmenti e li passa al livello di rete
  - lato ricezione: riassembla i segmenti in messaggi e li passa al livello di applicazione
- Più protocolli di trasporto sono a disposizione delle applicazioni
  - Internet: TCP e UDP



# Relazione tra livello di trasporto e livello di rete

- *livello di rete:* comunicazione logica tra host
- *livello di trasporto:* comunicazione logica tra processi
  - si basa sui servizi del livello di rete e li potenzia

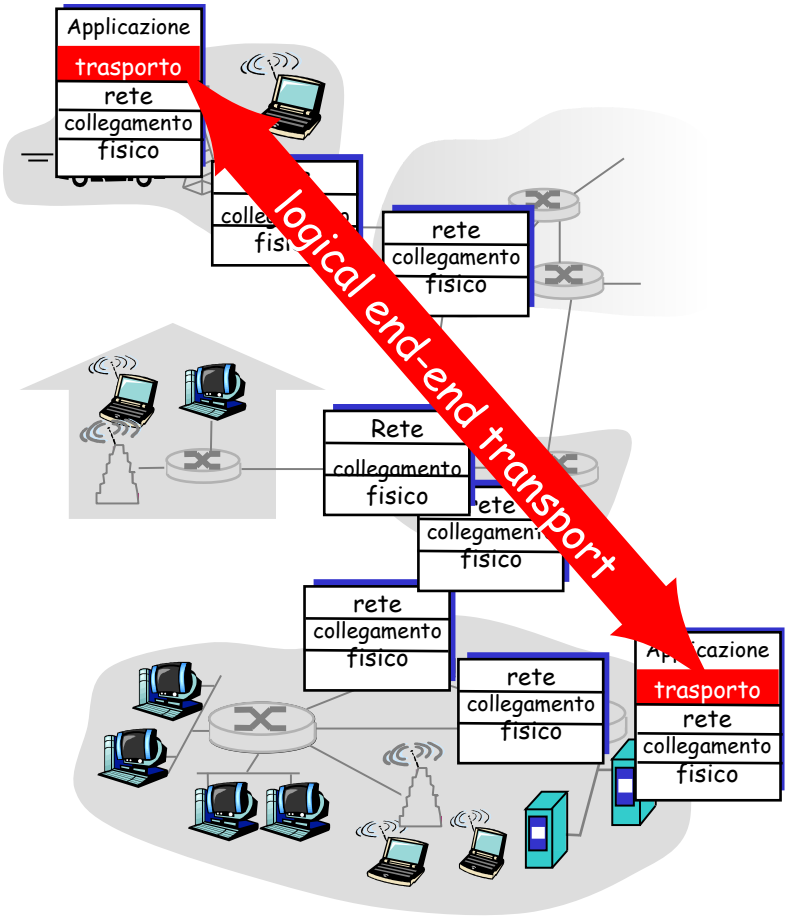
Analogia con la posta ordinaria:

*12 ragazzi inviano lettere a 12 ragazzi*

- processi = ragazzi
- messaggi delle applicazioni = lettere nelle buste
- host = case
- protocollo di trasporto = Anna e Andrea
- protocollo del livello di rete = servizio postale

# Protocolli del livello di trasporto in Internet

- Affidabile, consegne nell'ordine originario (TCP)
  - controllo di congestione
  - controllo di flusso
  - setup della connessione
- Inaffidabile, consegne senz'ordine: UDP
  - estensione senza fronzoli del servizio di consegna best effort
- Servizi non disponibili:
  - garanzia su ritardi
  - garanzia su ampiezza di banda



# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

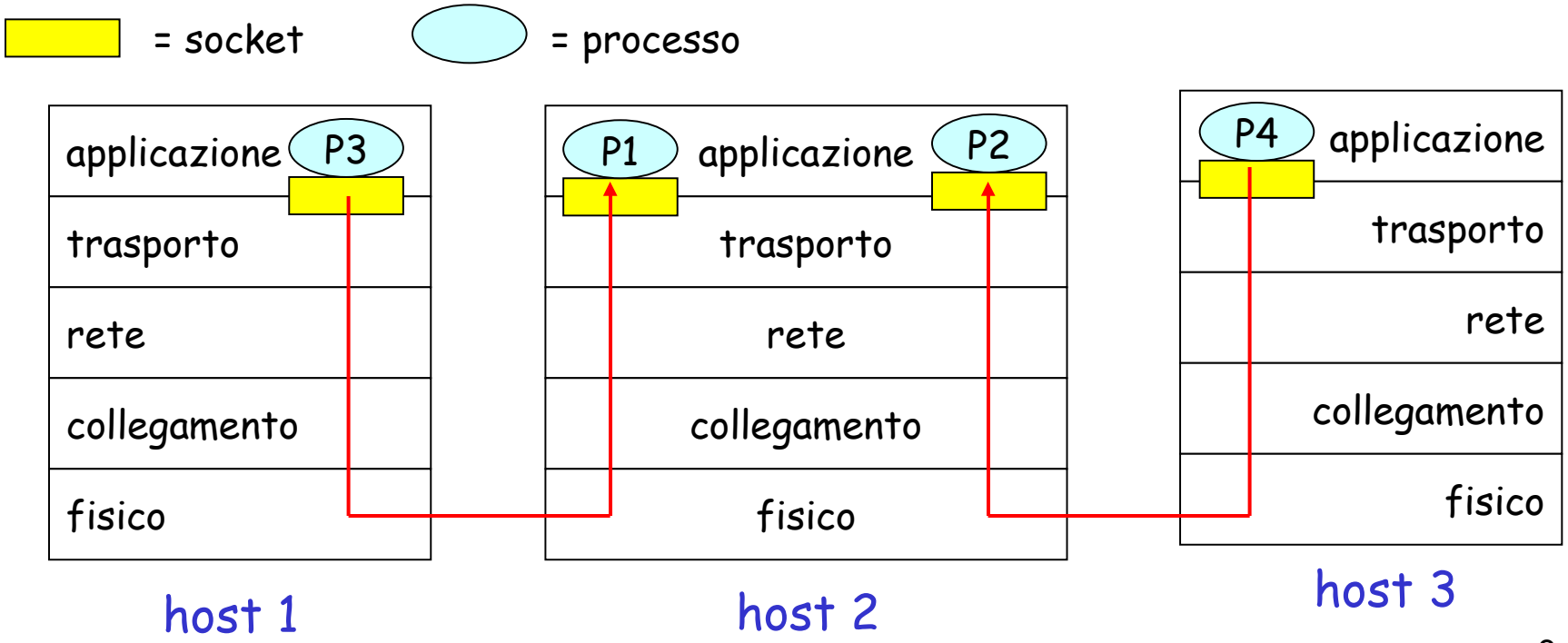
# Multiplexing/demultiplexing

**Demultiplexing nell'host ricevente:**

consegnare i segmenti ricevuti alla socket appropriata

**Multiplexing nell'host mittente:**

raccogliere i dati da varie socket, incapsularli con l'intestazione (utilizzata poi per il demultiplexing)

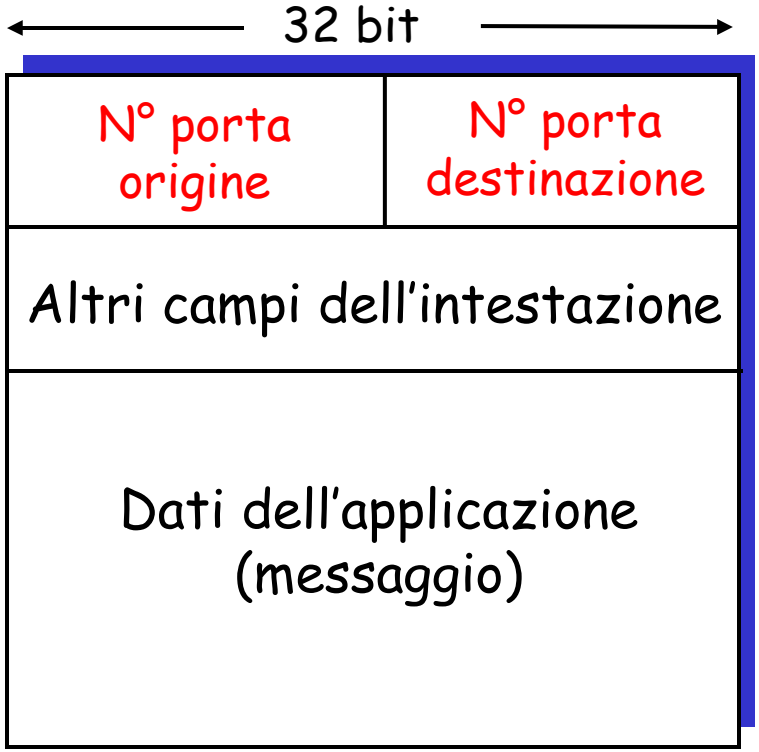


# Come funziona il demultiplexing

L'host riceve i datagrammi IP

- ogni datagramma ha un indirizzo IP di origine e un indirizzo IP di destinazione
- ogni datagramma trasporta 1 segmento a livello di trasporto
- ogni segmento ha un numero di porta di origine e un numero di porta di destinazione

L'host usa gli indirizzi IP e i numeri di porta per inviare il segmento alla socket appropriata




Struttura del segmento TCP/UDP

# Demultiplexing senza connessione

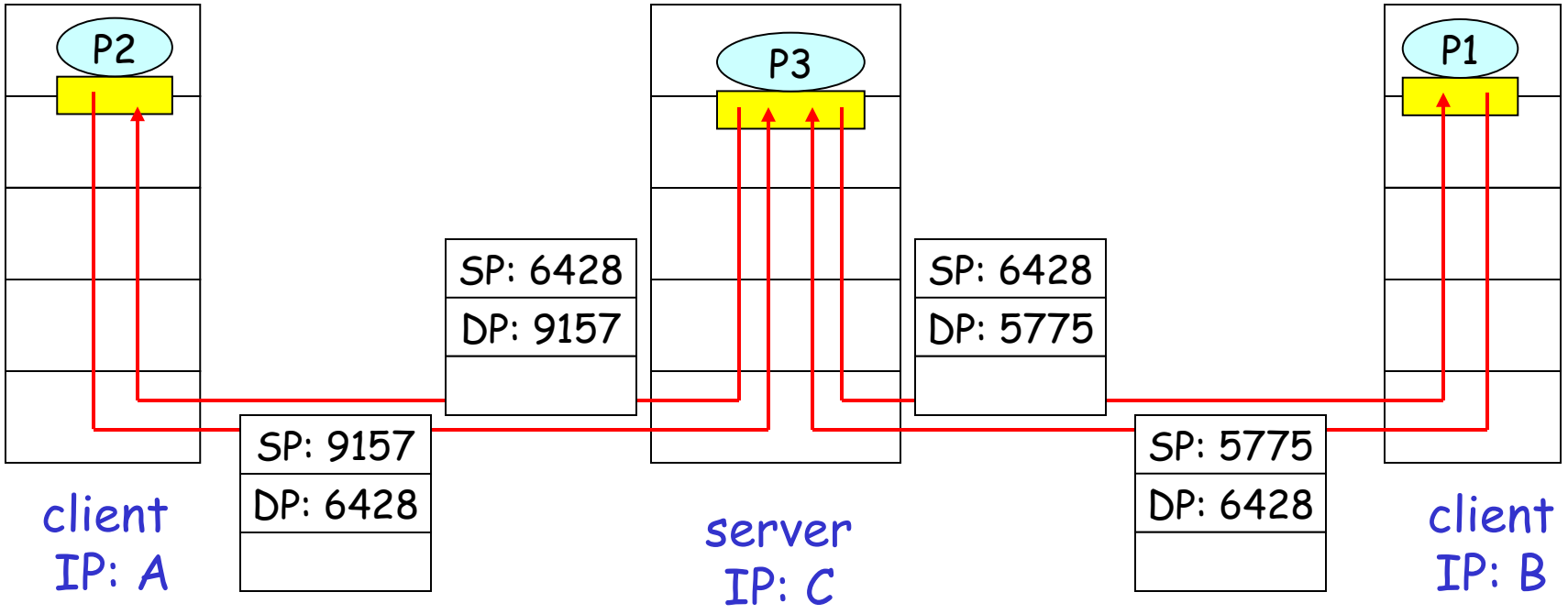
- Crea le socket con i numeri di porta:
- `DatagramSocket mySocket1 = new DatagramSocket(12534);`
- `DatagramSocket mySocket2 = new DatagramSocket(12535);`
- La socket UDP è identificata da 2 parametri:

  (indirizzo IP di destinazione, numero della porta di destinazione)

- Quando l'host riceve il segmento UDP:
  - controlla il numero della porta di destinazione nel segmento
  - invia il segmento UDP alla socket con quel numero di porta
- Datagrammi IP con indirizzi IP di origine e/o numeri di porta di origine differenti vengono inviati alla stessa socket

# Demultiplexing senza connessione (continua)

```
DatagramSocket serverSocket = new DatagramSocket(6428);
```

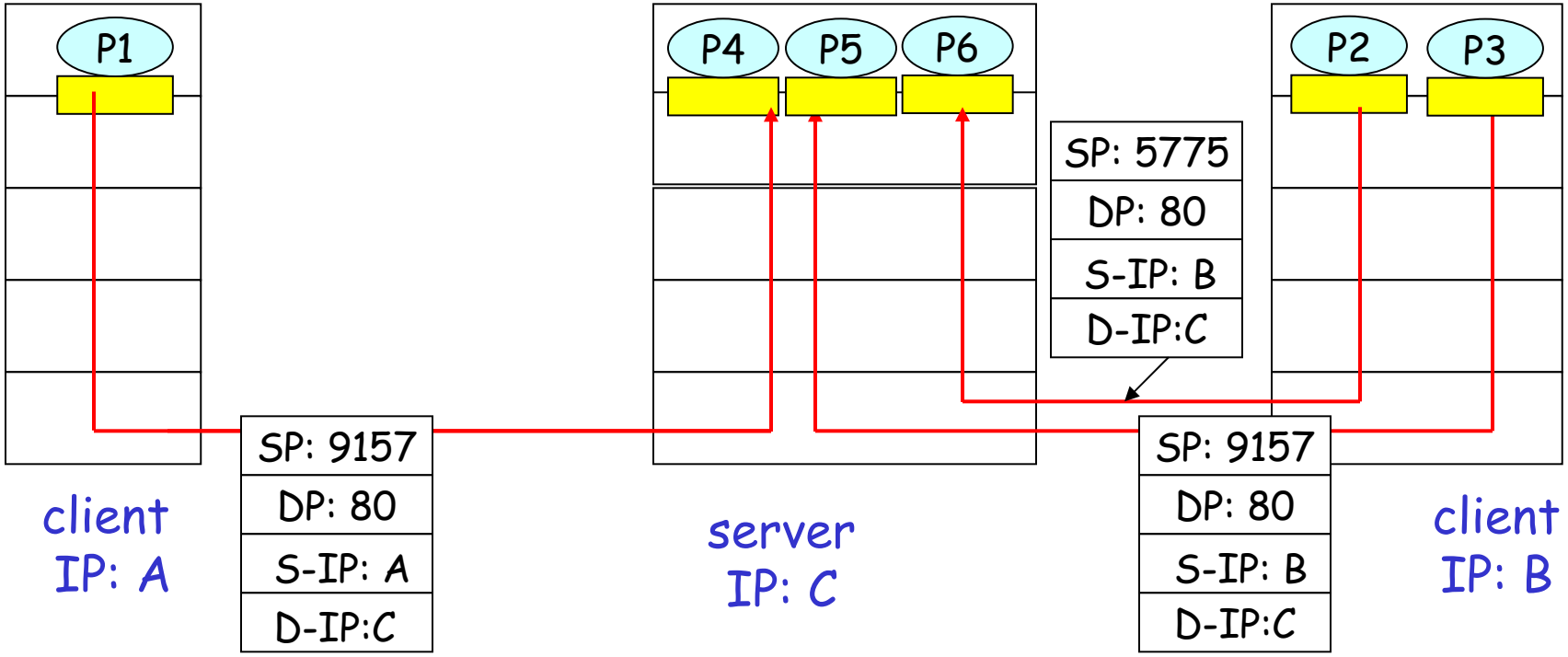



SP fornisce "l'indirizzo di ritorno"

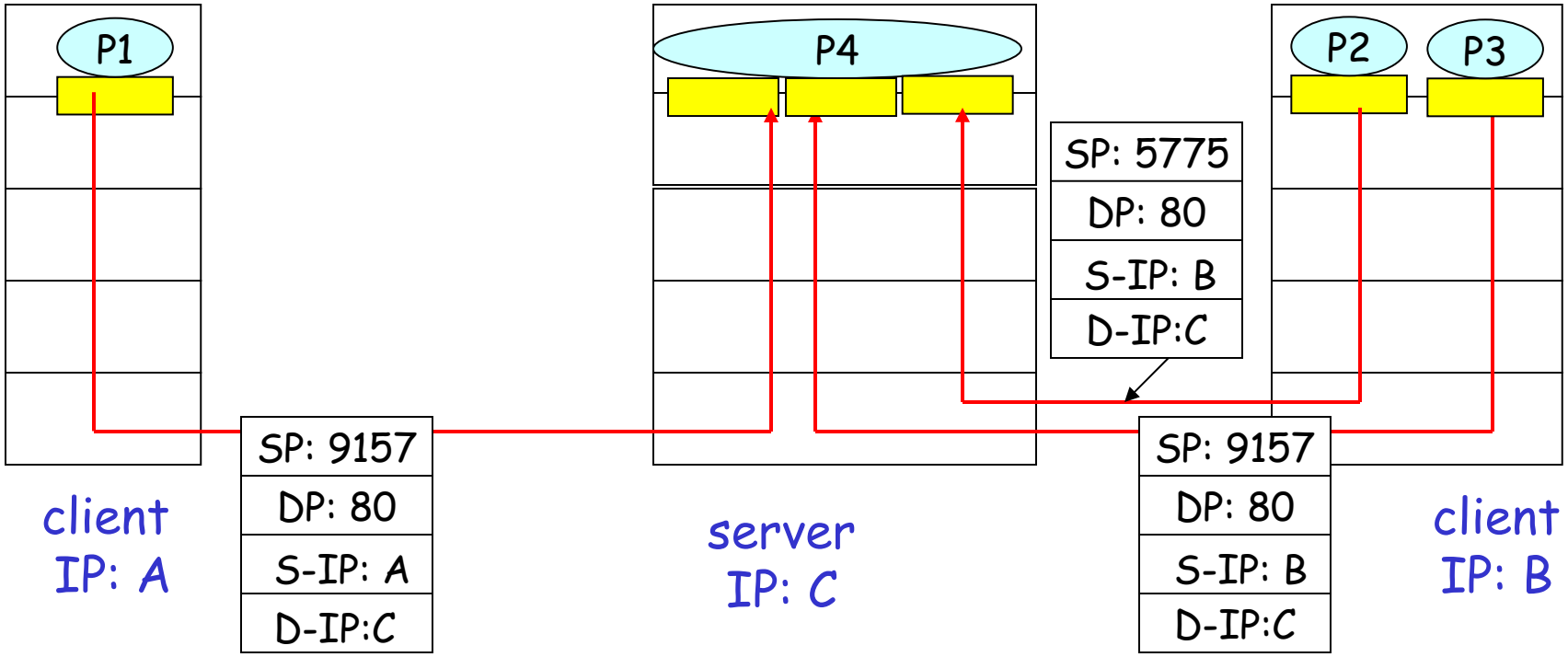
# Demultiplexing orientato alla connessione

- La socket TCP è identificata da 4 parametri:
  - indirizzo IP di origine
  - numero di porta di origine
  - indirizzo IP di destinazione
  - numero di porta di destinazione
- L'host ricevente usa i quattro parametri per inviare il segmento alla socket appropriata
- Un host server può supportare più socket TCP contemporanee:
  - ogni socket è identificata dai suoi 4 parametri
- I server web hanno socket differenti per ogni connessione client
  - con HTTP non-persistente si avrà una socket differente per ogni richiesta

# Demultiplexing orientato alla connessione (continua)



# Demultiplexing orientato alla connessione: thread dei server web



# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

# UDP: User Datagram Protocol [RFC 768]

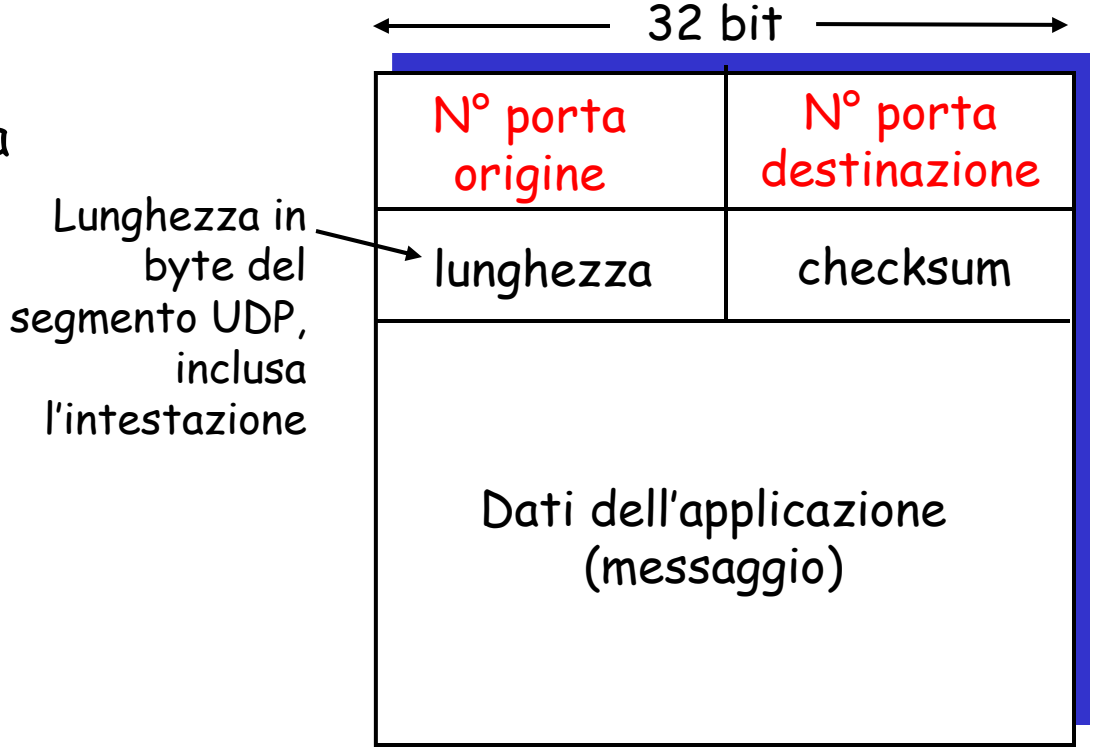
- Protocollo di trasporto "senza fronzoli"
- Servizio di consegna "a massimo sforzo", i segmenti UDP possono essere:
  - perduti
  - consegnati fuori sequenza all'applicazione
- *Senza connessione:*
  - no handshaking tra mittente e destinatario UDP
  - ogni segmento UDP è gestito indipendentemente dagli altri

## Perché esiste UDP?

- Nessuna connessione stabilita (che potrebbe aggiungere un ritardo)
- Semplice: nessuno stato di connessione nel mittente e destinatario
- Intestazioni di segmento corte
- Senza controllo di congestione: UDP può sparare dati a raffica

# UDP: ulteriori informazioni

- Utilizzato spesso nelle applicazioni multimediali
  - tollera piccole perdite
  - sensibile alla frequenza
- Altri impieghi di UDP
  - DNS
  - SNMP
- Trasferimento affidabile con UDP: aggiungere affidabilità al livello di applicazione
  - Recupero degli errori delle applicazioni!




Struttura del segmento UDP

# Checksum UDP

Obiettivo: rilevare gli "errori" (bit alterati) nel segmento trasmesso

**Mittente:**

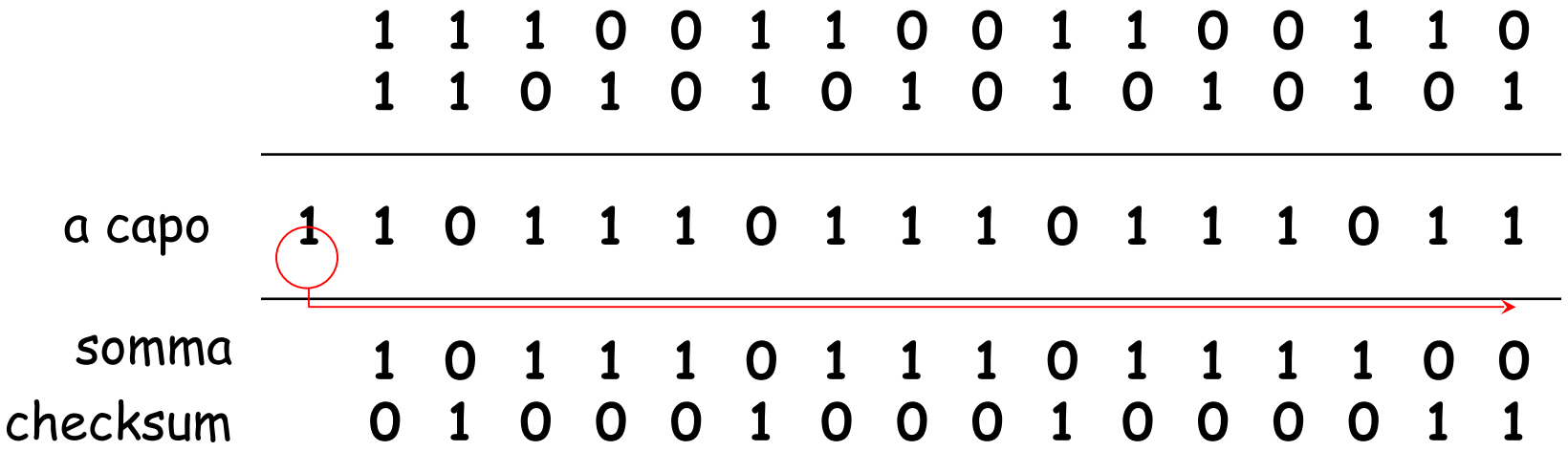
- Tratta il contenuto del segmento come una sequenza di interi da 16 bit
- checksum: somma (complemento a 1) i contenuti del segmento
- Il mittente pone il valore della checksum nel campo checksum del segmento UDP

**Ricevente:**

- calcola la checksum del segmento ricevuto
- controlla se la checksum calcolata è uguale al valore del campo checksum:
  - No - errore rilevato
  - Sì - nessun errore rilevato. *Ma potrebbero esserci errori nonostante questo?* Lo scopriremo più avanti …

# Esempio di checksum

- Nota
  - Quando si sommano i numeri, un riporto dal bit più significativo deve essere sommato al risultato
- Esempio: sommare due interi da 16 bit

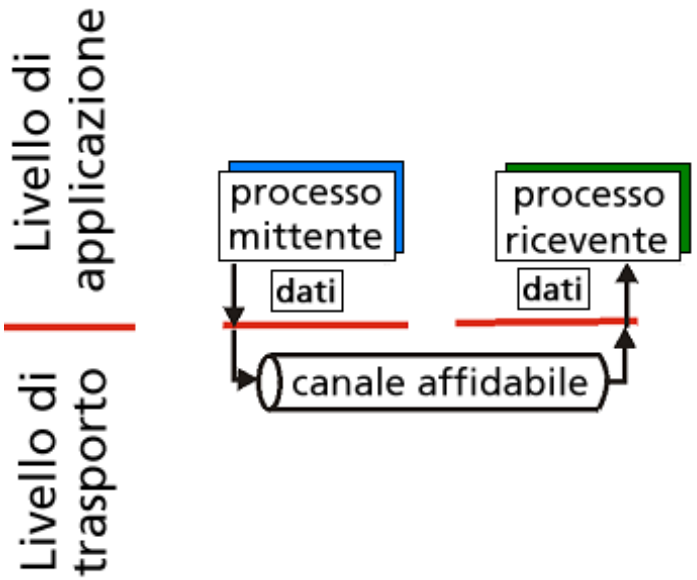


# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

# Principi del trasferimento dati affidabile

- Importante nei livelli di applicazione, trasporto e collegamento
- Tra i dieci problemi più importanti del networking!

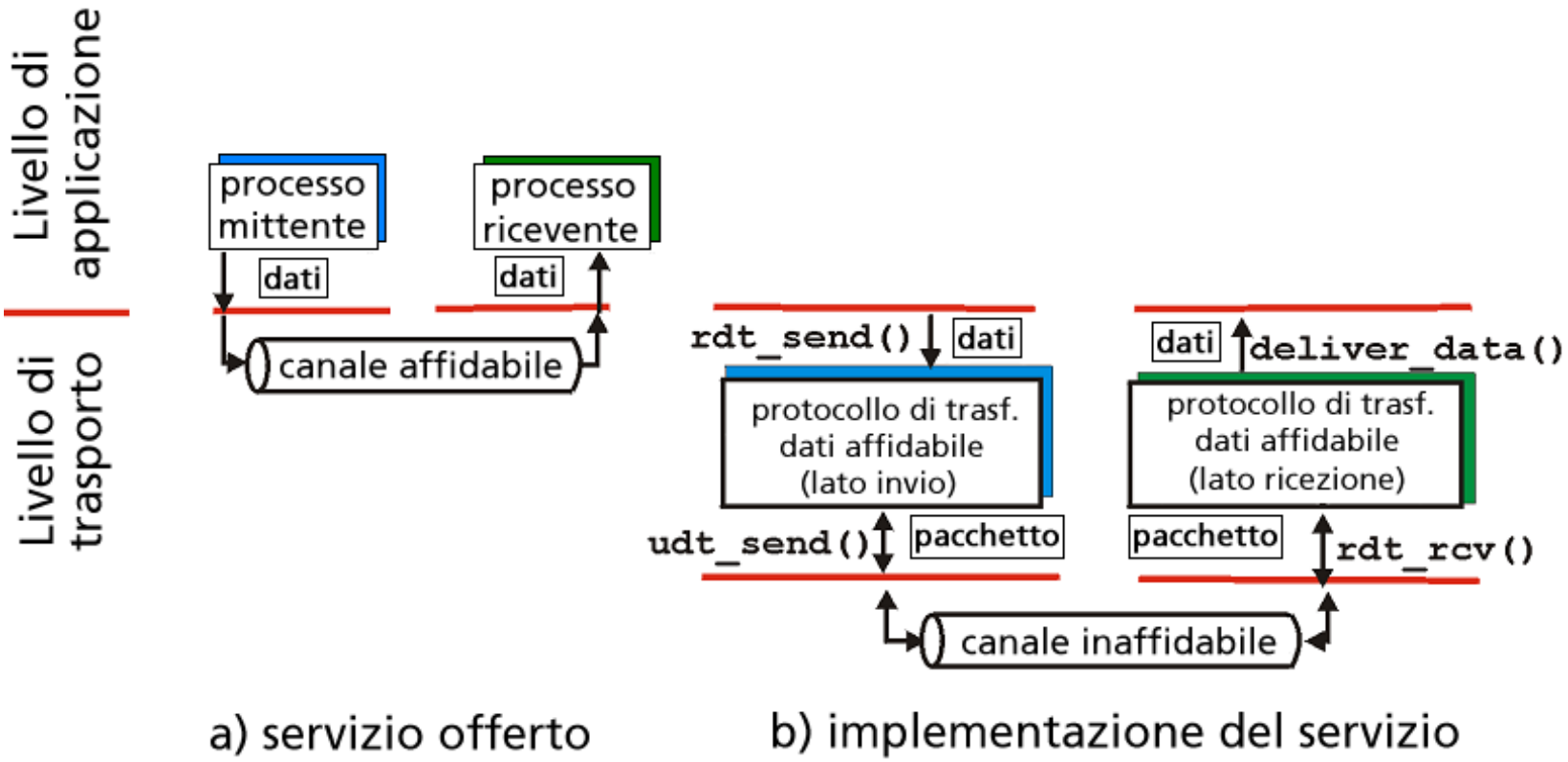



a) servizio offerto

- Le caratteristiche del canale inaffidabile determinano la complessità del protocollo di trasferimento dati affidabile (reliable data transfer o rdt)

# Principi del trasferimento dati affidabile

- Importante nei livelli di applicazione, trasporto e collegamento
- Tra i dieci problemi più importanti del networking!

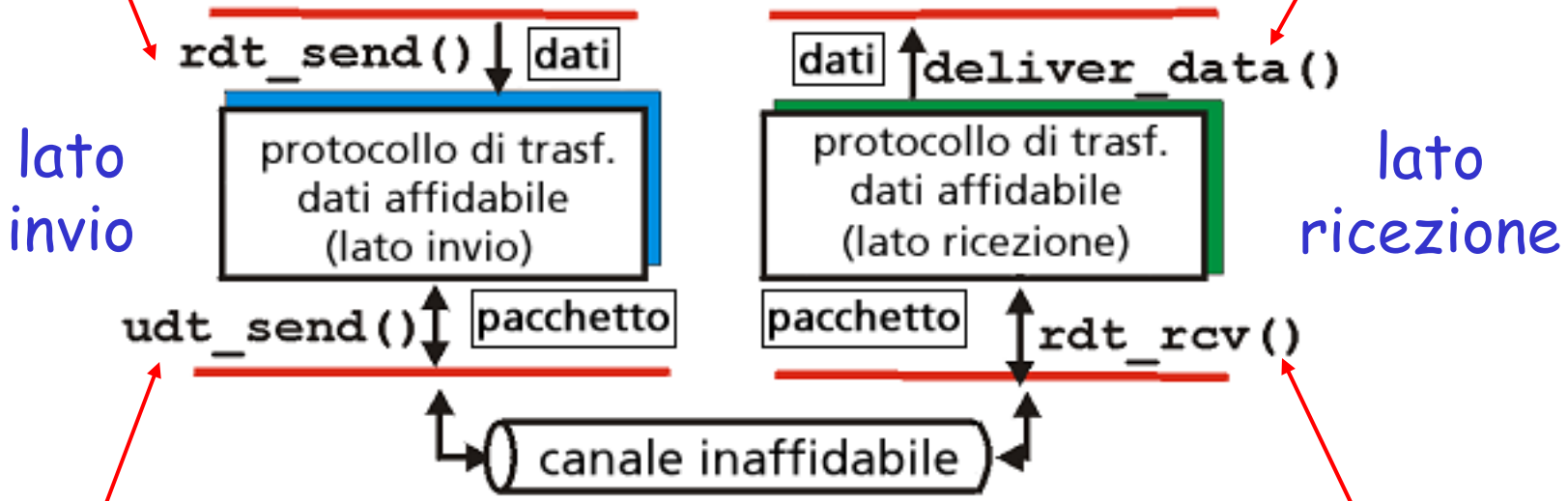



- Le caratteristiche del canale inaffidabile determinano la complessità del protocollo di trasferimento dati affidabile (reliable data transfer o rdt)

# Trasferimento dati affidabile: preparazione

**`rdt_send()`:** chiamata dall'alto, (ad es. dall'applicazione). Trasferisce i dati da consegnare al livello superiore del ricevente

**`deliver_data()`:** chiamata da `rdt` per consegnare i dati al livello superiore



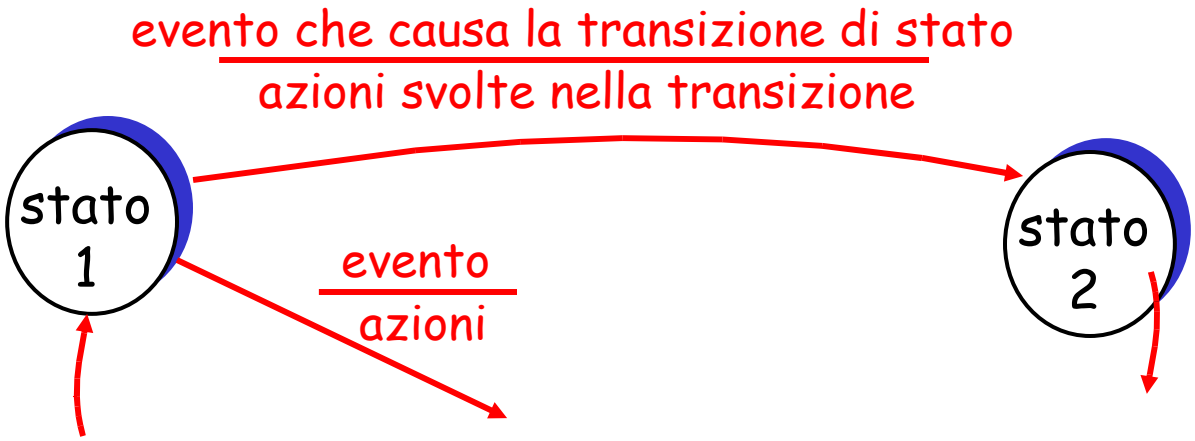

**`udt_send()`:** chiamata da rdt per trasferire il pacchetto al ricevente tramite il canale inaffidabile

**`rdt_rcv()`:** chiamata quando il pacchetto arriva nel lato ricezione del canale

# Trasferimento dati affidabile: preparazione

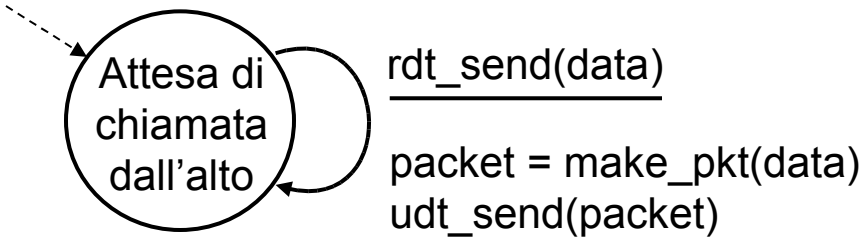
- Svilupperemo progressivamente i lati d'invio e di ricezione di un protocollo di trasferimento dati affidabile (rdt)
- Considereremo soltanto i trasferimenti dati unidirezionali
  - ma le informazioni di controllo fluiranno in entrambe le direzioni!
- Utilizzeremo automi a stati finiti per specificare il mittente e il ricevente

stato: lo stato successivo a questo è determinato unicamente dall'evento successivo

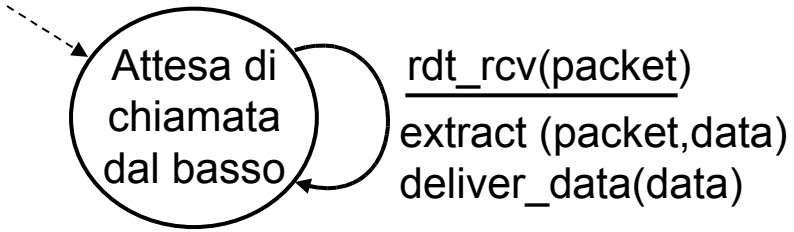


# Rdt1.0: trasferimento affidabile su canale affidabile

- Canale sottostante perfettamente affidabile
  - Nessun errore nei bit
  - Nessuna perdita di pacchetti
- Automa distinto per il mittente e per il ricevente:
  - il mittente invia i dati nel canale sottostante
  - il ricevente legge i dati dal canale sottostante




mittente

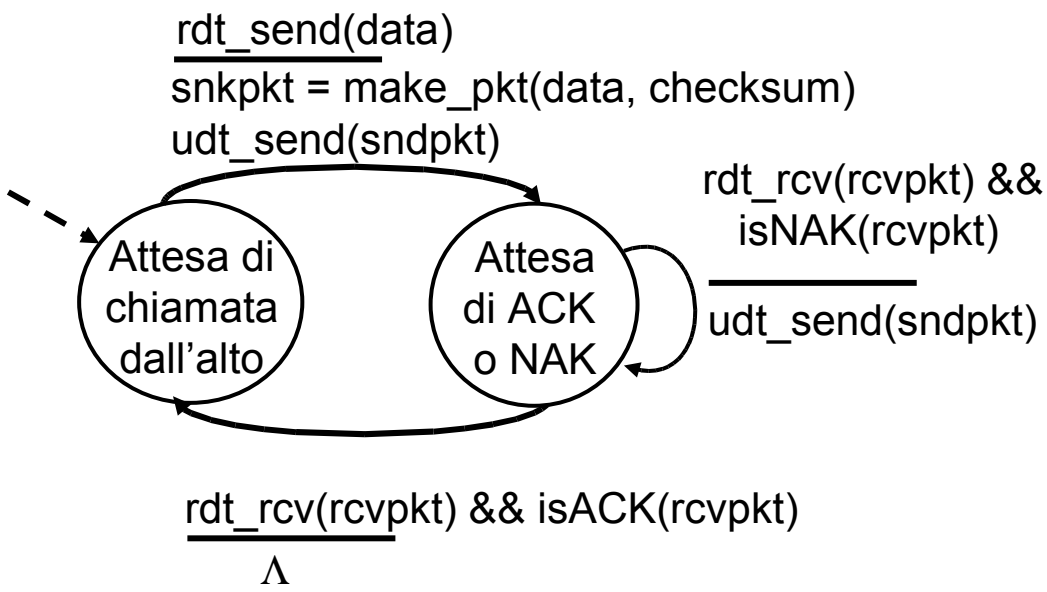


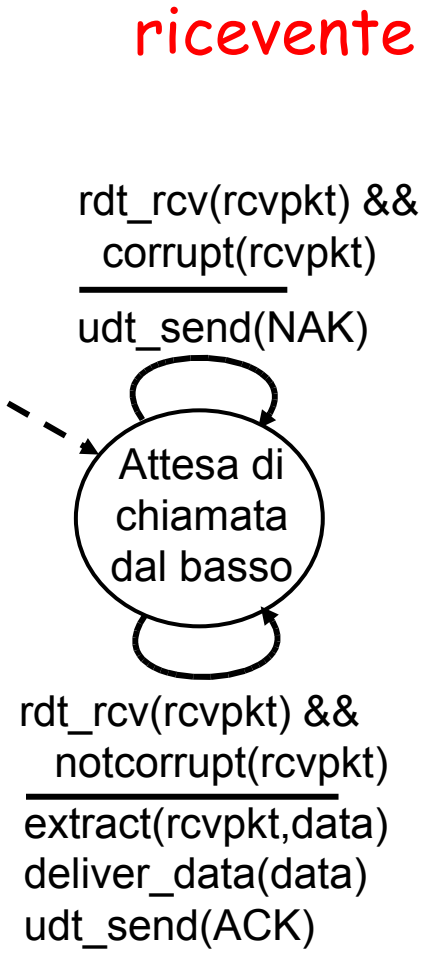

ricevente

# Rdt2.0: canale con errori nei bit

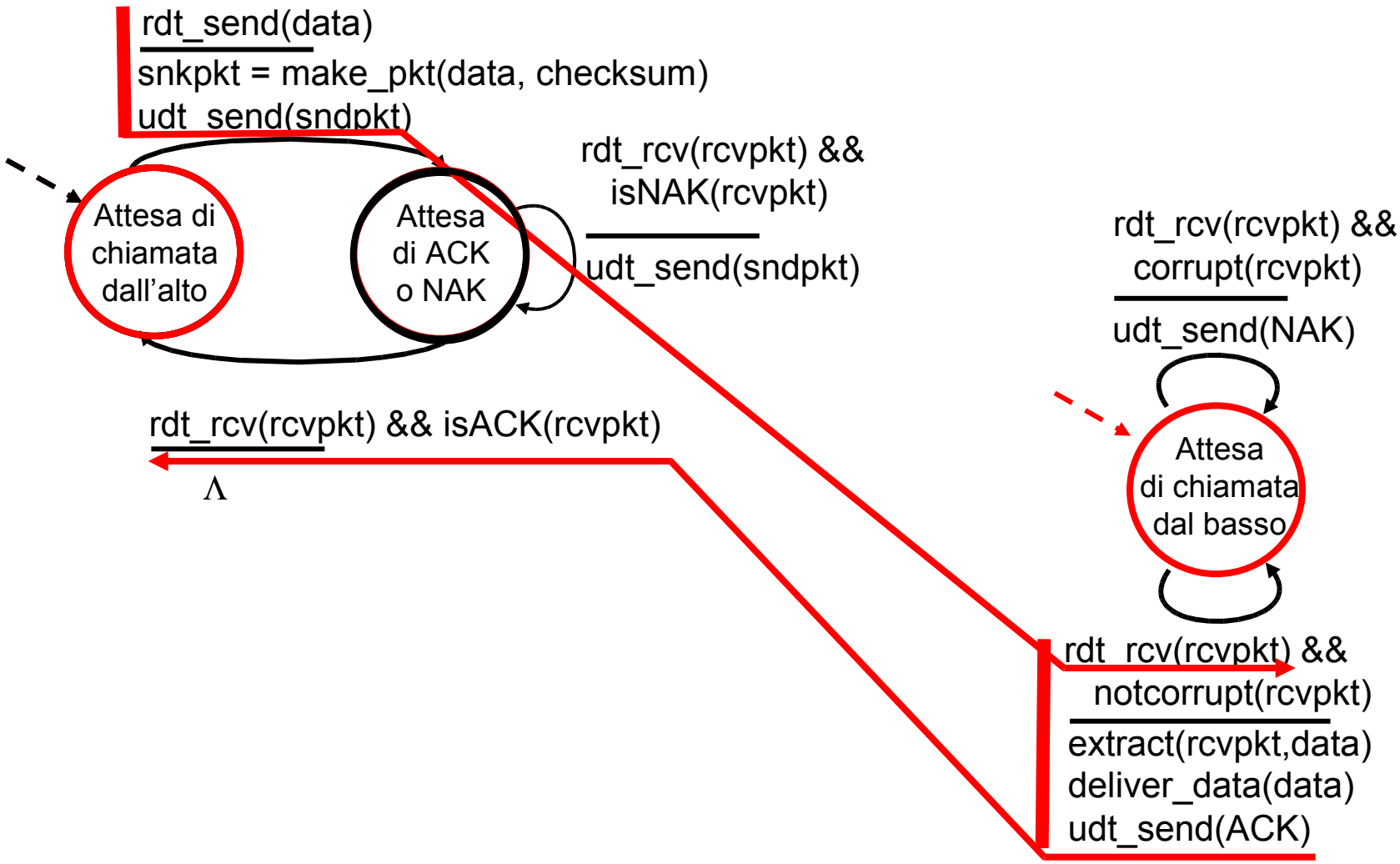
- Il canale sottostante potrebbe confondere i bit nei pacchetti
  - checksum per rilevare gli errori nei bit
- *domanda*: come correggere gli errori:
  - *notifica positiva (ACK):* il ricevente comunica espressamente al mittente che il pacchetto ricevuto è corretto
  - *notifica negativa (NAK):* il ricevente comunica espressamente al mittente che il pacchetto contiene errori
  - il mittente ritrasmette il pacchetto se riceve un NAK
- nuovi meccanismi in `rdt2.0` (oltre a `rdt1.0`):
  - rilevamento di errore
  - feedback del destinatario: messaggi di controllo (ACK, NAK) ricevente->mittente

# rdt2.0: specifica dell'automa

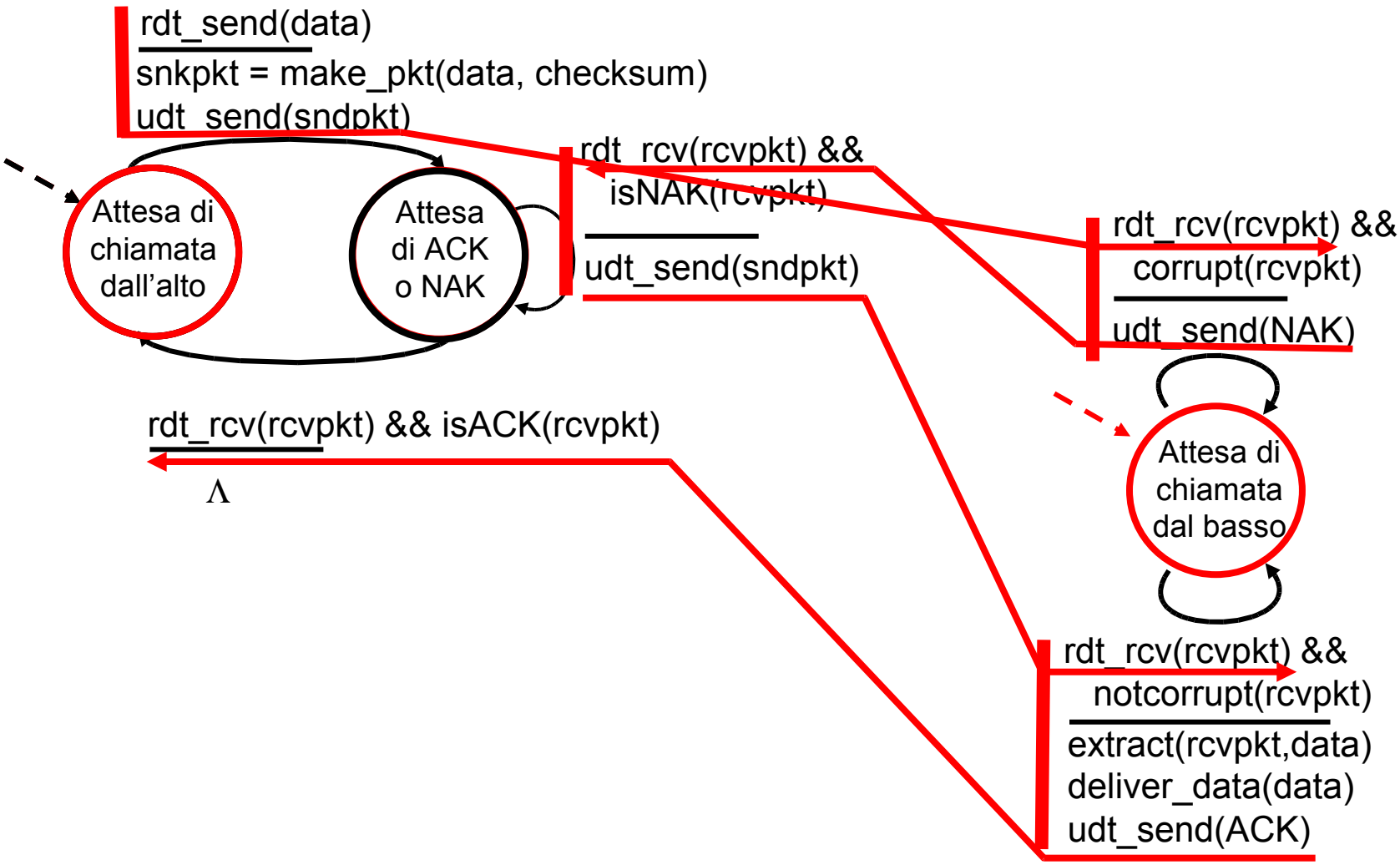


# rdt2.0: operazione senza errori



# rdt2.0: scenario di errore



# rdt2.0 ha un difetto fatale!

## Che cosa accade se i pacchetti ACK/NAK sono danneggiati?

- Il mittente non sa che cosa sia accaduto al destinatario!
- Non basta ritrasmettere: possibili duplicati

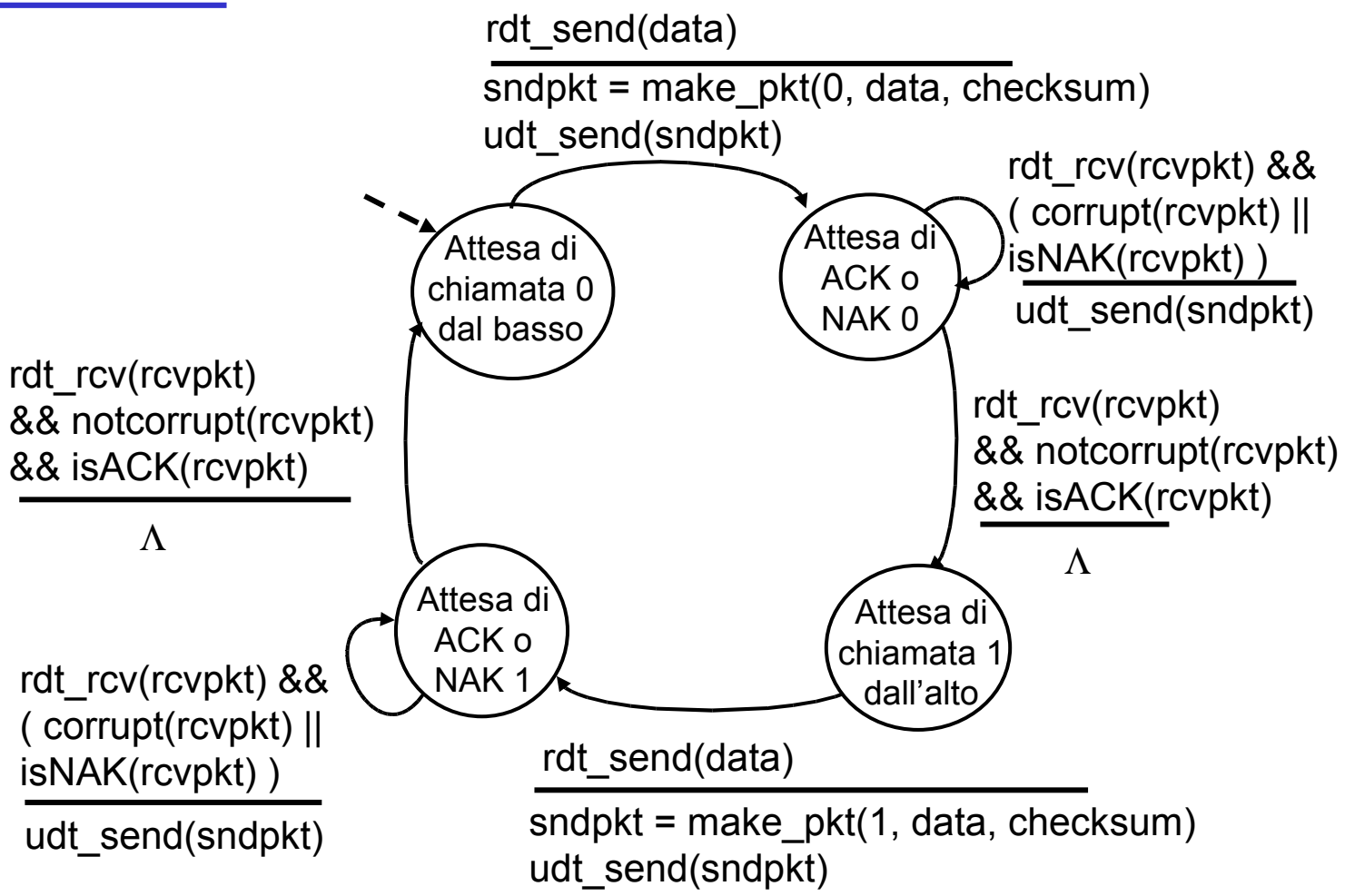
## Gestione dei duplicati:

- Il mittente ritrasmette il pacchetto corrente se ACK/NAK è alterato
- Il mittente aggiunge un *numero di sequenza* a ogni pacchetto
- Il ricevente scarta il pacchetto duplicato

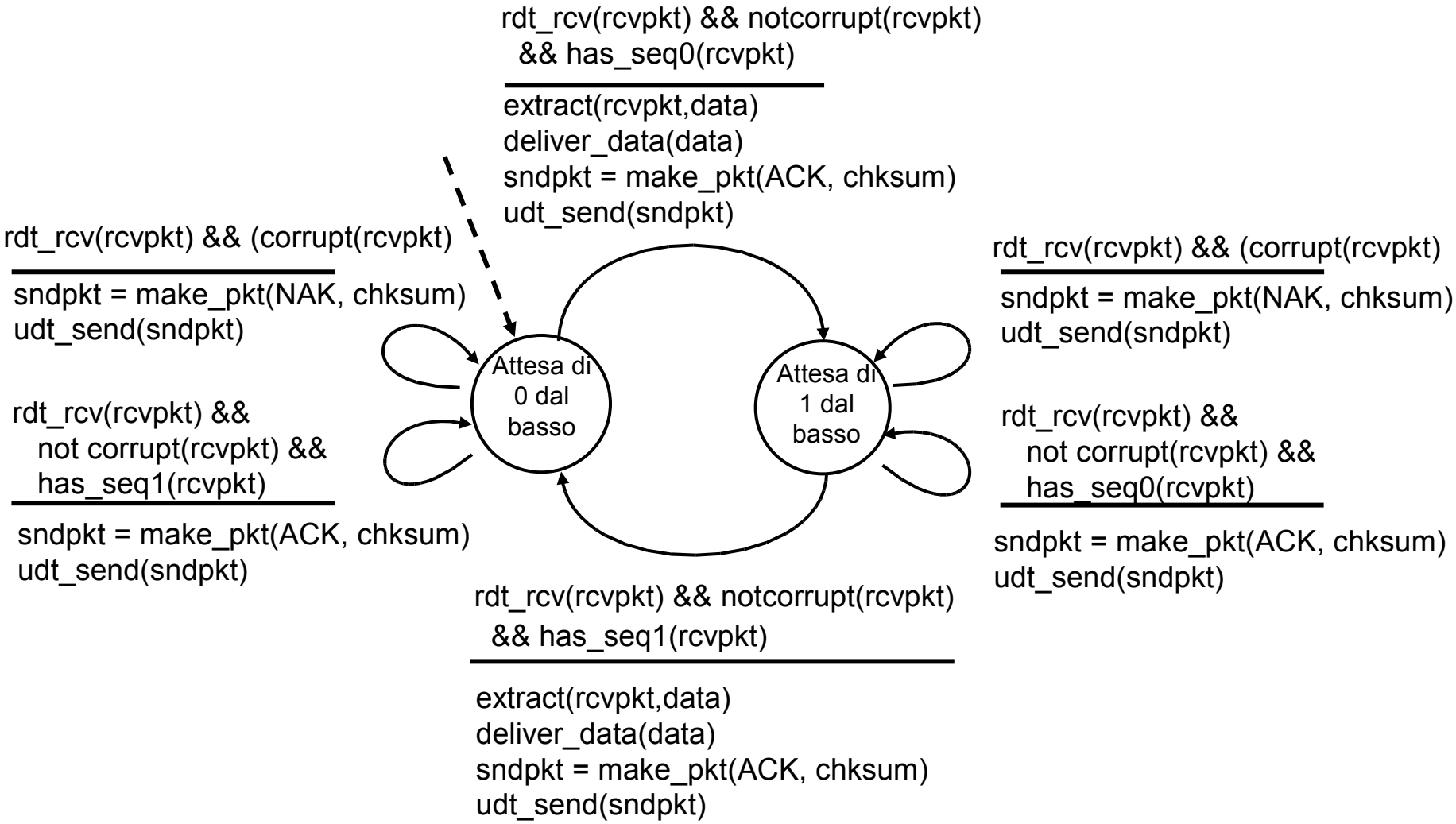
**stop and wait**

Il mittente invia un pacchetto, poi aspetta la risposta del destinatario

# rdt2.1: il mittente gestisce gli ACK/NAK alterati



# rdt2.1: il ricevente gestisce gli ACK/NAK alterati



# rdt2.1: discussione

Mittente:

- Aggiunge il numero di sequenza al pacchetto
- Saranno sufficienti due numeri di sequenza (0,1). Perché?
- Deve controllare se gli ACK/NAK sono danneggiati
- Il doppio di stati
  - lo stato deve "ricordarsi" se il pacchetto "corrente" ha numero di sequenza 0 o 1

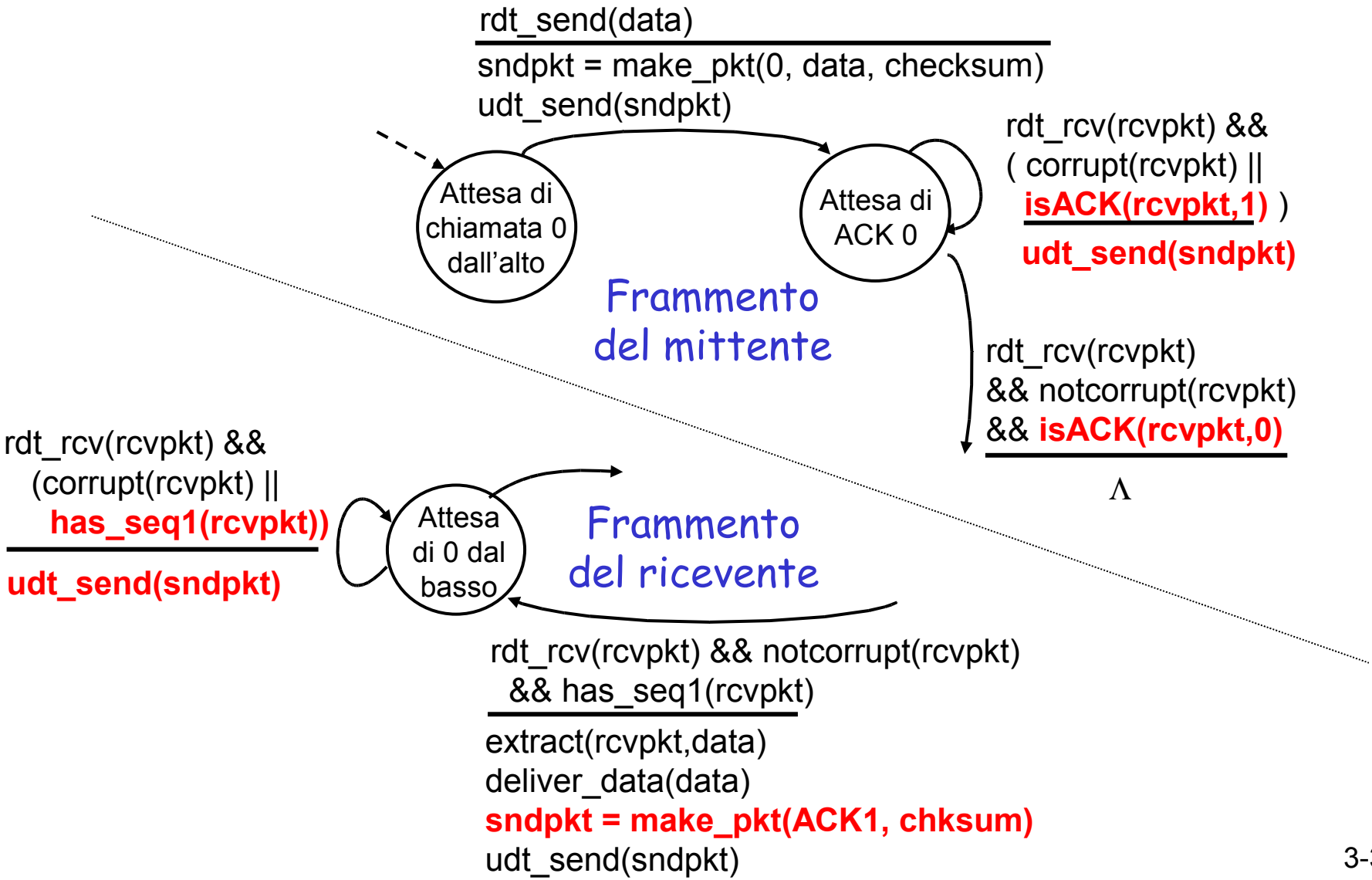
Ricevente:

- Deve controllare se il pacchetto ricevuto è duplicato
  - lo stato indica se il numero di sequenza previsto è 0 o 1
- nota: il ricevente *non* può sapere se il suo ultimo ACK/NAK è stato ricevuto correttamente dal mittente

# rdt2.2: un protocollo senza NAK

- Stessa funzionalità di rdt2.1, utilizzando soltanto gli ACK
- Al posto del NAK, il destinatario invia un ACK per l'ultimo pacchetto ricevuto correttamente
  - il destinatario deve includere *esplicitamente* il numero di sequenza del pacchetto con l'ACK
- Un ACK duplicato presso il mittente determina la stessa azione del NAK: *ritrasmettere il pacchetto corrente*

# rdt2.2: frammenti del mittente e del ricevente



# rdt3.0: canali con errori e perdite

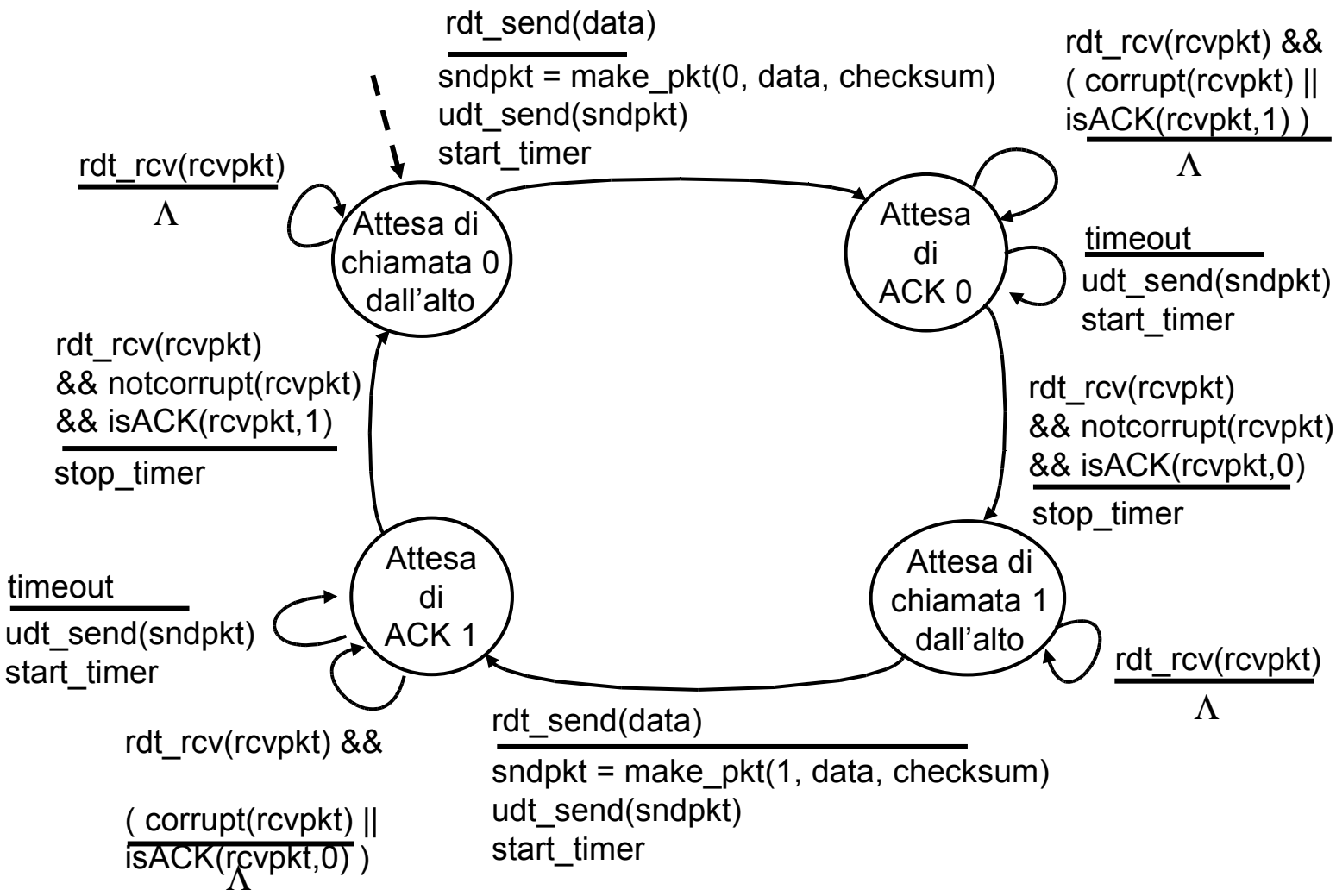
Nuova ipotesi: il canale sottostante può anche smarrire i pacchetti (dati o ACK)

- checksum, numero di sequenza, ACK e ritrasmissioni aiuteranno, ma non saranno sufficienti

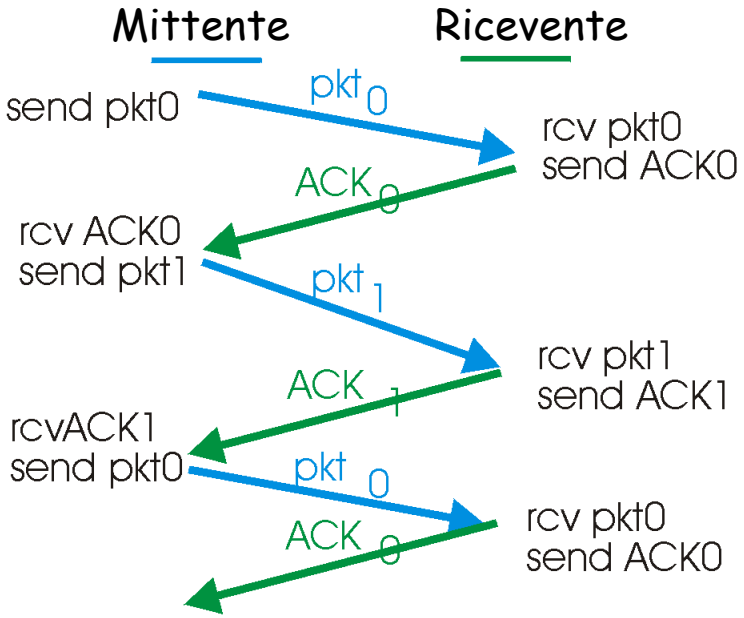
Approccio: il mittente attende un ACK per un tempo "ragionevole"

- ritrasmette se non riceve un ACK in questo periodo
- se il pacchetto (o l'ACK) è soltanto in ritardo (non perso):
  - la ritrasmissione sarà duplicata, ma l'uso dei numeri di sequenza gestisce già questo
  - il destinatario deve specificare il numero di sequenza del pacchetto da riscontrare
- occorre un contatore (*countdown timer*)

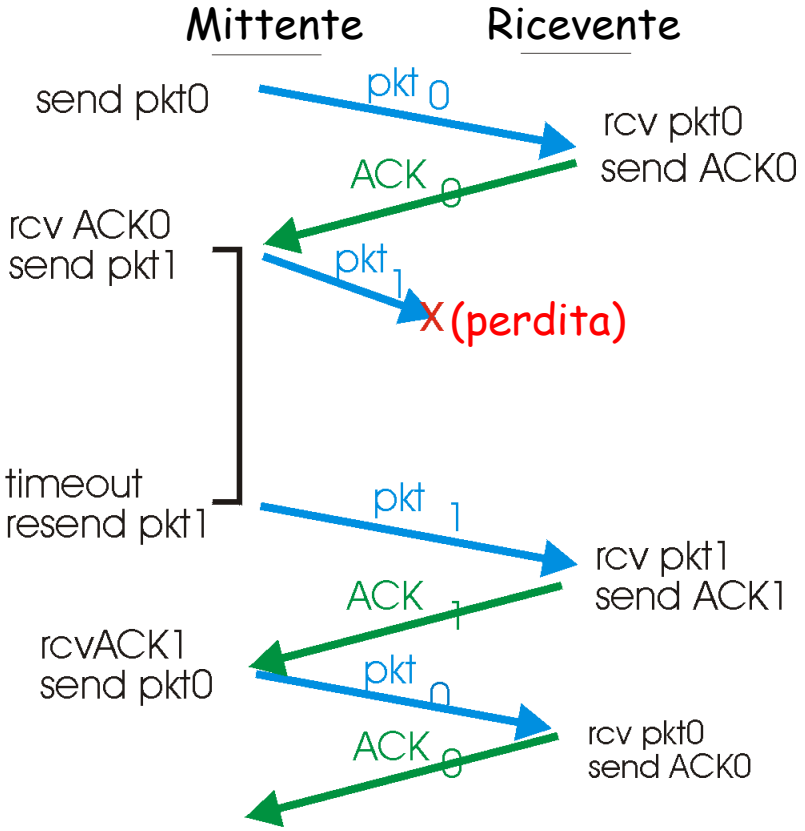
# rdt3.0 mittente



# rdt3.0 in azione

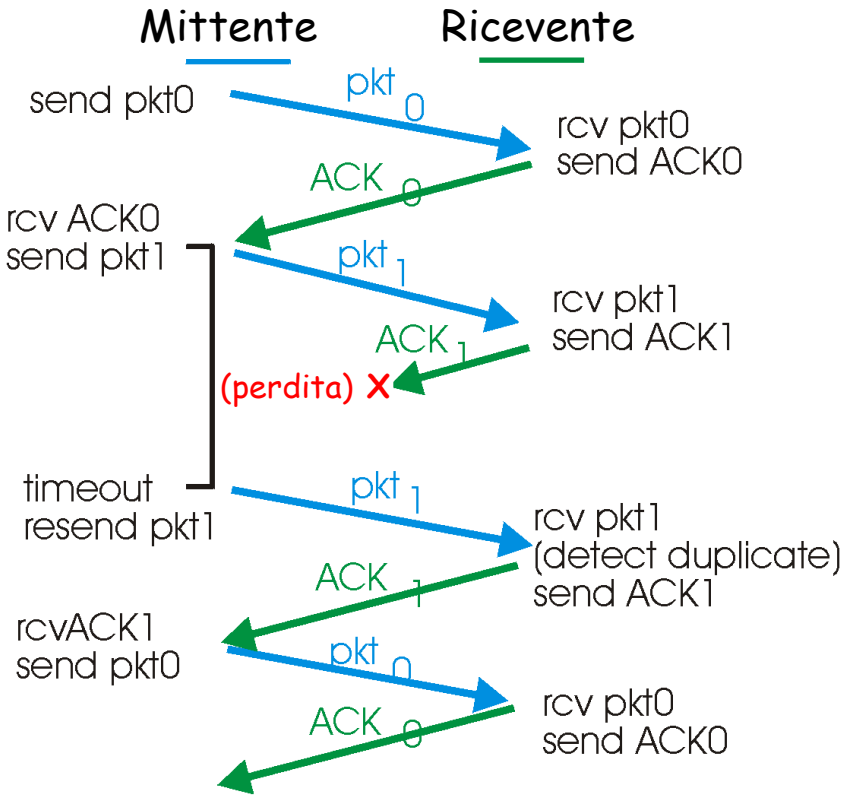



a) Operazioni senza perdite

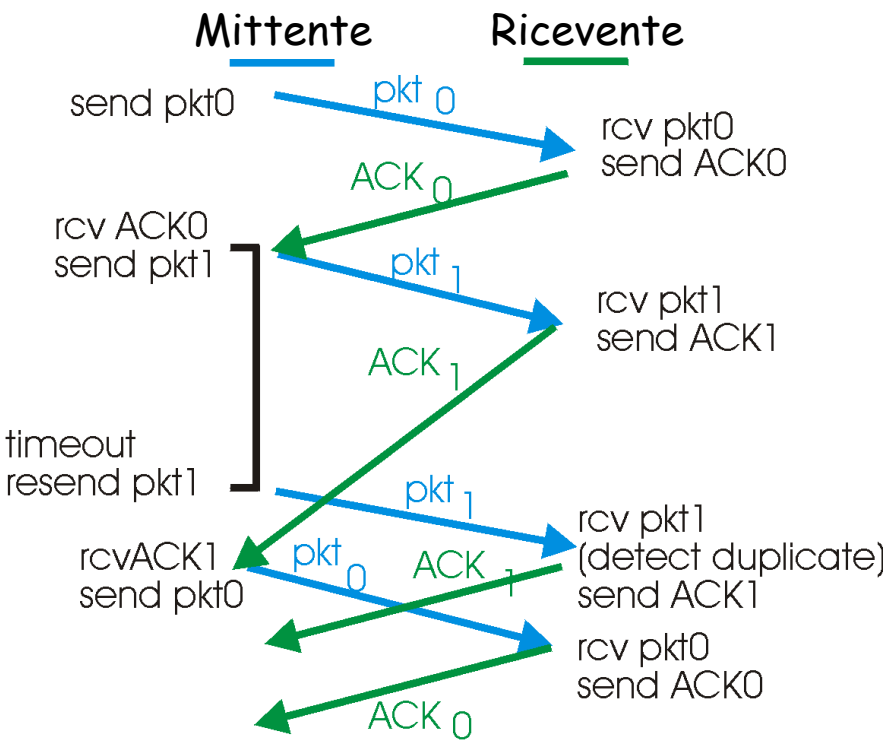



b) Perdita di pacchetto

# rdt3.0 in azione




c) Perdita di ACK




d) Timeout prematuro

# Prestazioni di rdt3.0

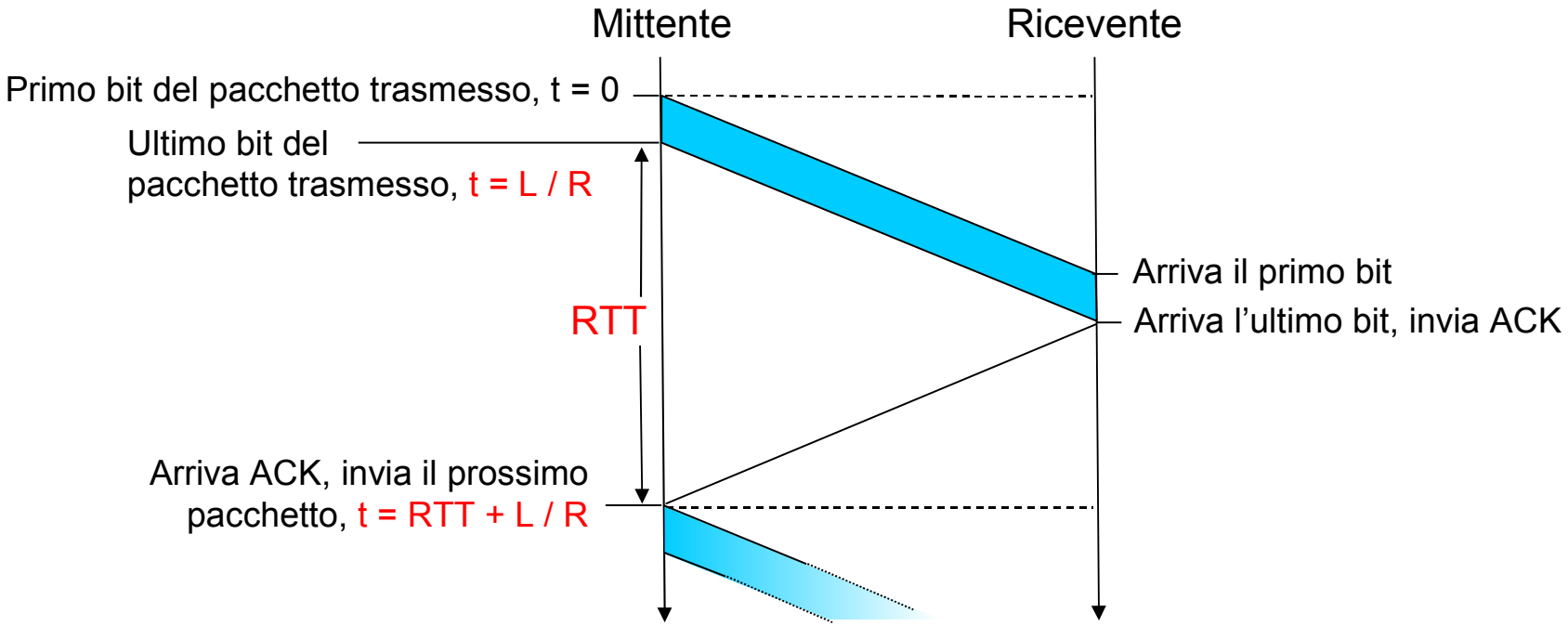
- rdt3.0 funziona, ma le prestazioni non sono apprezzabili
- esempio: collegamento da 1 Gbps, ritardo di propagazione 15 ms, pacchetti da 1 KB:

$$T_{trasm} = \frac{L \text{ (lunghezza del pacchetto in bit)}}{R \text{ (tasso trasmissivo, bps)}} = \frac{8 \text{ kb/pacc}}{10^9 \text{ b/sec}} = 8 \text{ microsec}$$

$$U_{mitt} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{0{,}008}{30{,}008} = 0{,}00027 \text{ microsec}$$

- $U_{mitt}$ : utilizzo è la frazione di tempo in cui il mittente è occupato nell'invio di bit
- Un pacchetto da 1 KB ogni 30 msec -> throughput di 33 kB/sec in un collegamento da 1 Gbps
- Il protocollo di rete limita l'uso delle risorse fisiche!

# rdt3.0: funzionamento con stop-and-wait

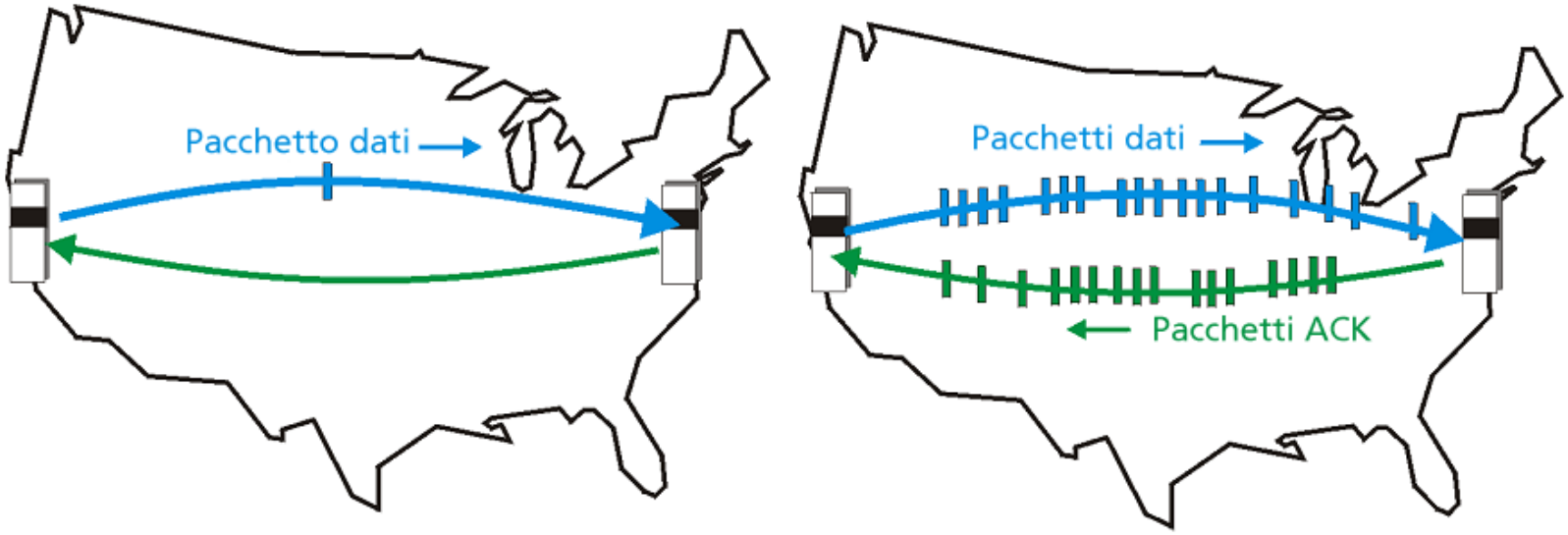



$$U_{mitt} = \frac{L / R}{RTT + L / R} = \frac{0{,}008}{30{,}008} = 0{,}00027 \text{ microsec}$$

# Protocolli con pipeline

Pipelining: il mittente ammette più pacchetti in transito, ancora da notificare

- l'intervallo dei numeri di sequenza deve essere incrementato
- buffering dei pacchetti presso il mittente e/o ricevente

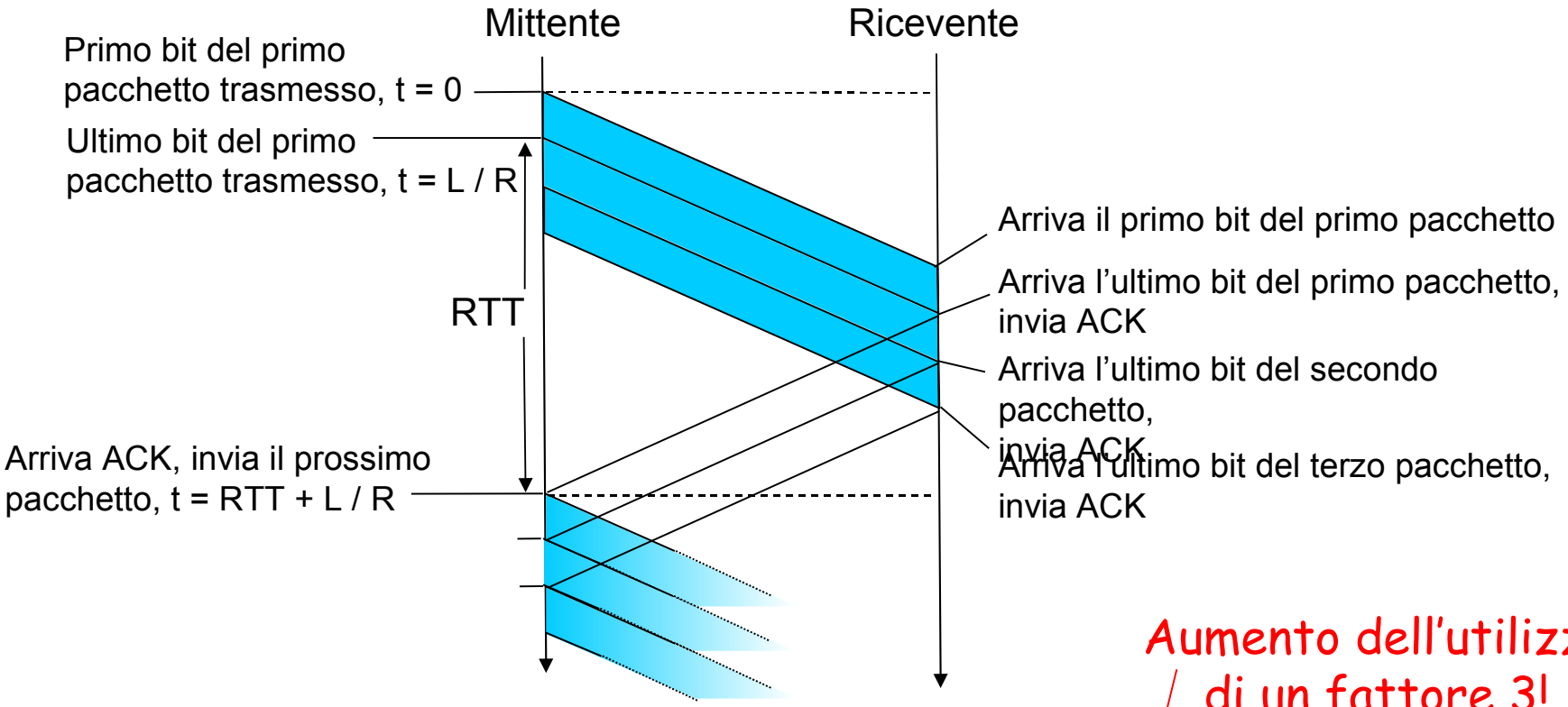



a) Protocollo stop-and-wait all'opera

b) Protocollo con pipeline all'opera

- Due forme generiche di protocolli con pipeline: *Go-Back-N* e *ripetizione selettiva*

# Pipelining: aumento dell'utilizzo




Aumento dell'utilizzo di un fattore 3!

$$U_{mitt} = \frac{3 * L / R}{RTT + L / R} = \frac{0{,}024}{30{,}008} = 0{,}0008 \text{ microsec}$$

# Protocolli con pipeline

## Go-back-N:

- Il mittente può avere fino a *N* pacchetti senza ACK in pipeline
- Il ricevente invia solo ACK cumulativi
  - Non dà l'ACK di un pacchetto se c'è un gap
- Il mittente ha un timer per il più vecchio pacchetto senza ACK
  - Se il timer scade, ritrasmette tutti i pacchetti senza ACK

## Ripetizione selettiva

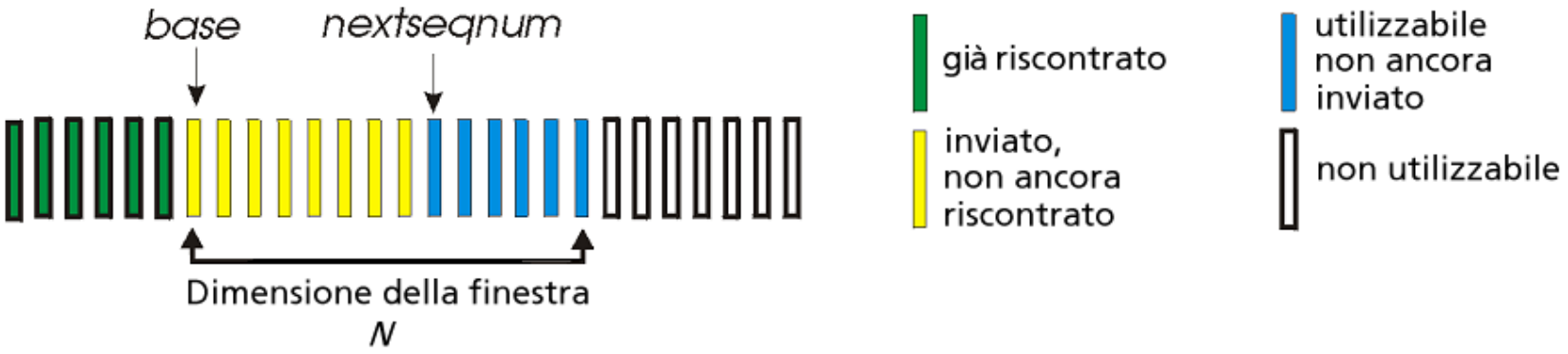
- Il mittente può avere fino a *N* pacchetti senza ACK in pipeline
- Il ricevende dà lìACK solo ai singoli pacchetti
- Il mittente mantiene un timer per ciascun pacchetto che non ha ancora ricevuto ACK
  - Quando il timer scade, ritrasmette solo i pacchetti che non hanno avuto ACK

# Ripetizione selettiva

- Il mittente può avere fino a N pacchetti nella pipeline che non hanno ancora ricevuto ACK
- Il ricevente accusa ricevuta di ciascun singolo pacchetto
- Il mittente mantiene un timer per ciascun pacchetto che non ha ancora avuto ACK
  - Quando il timer scade, ritrasmette solo i pacchetti non riscontrati

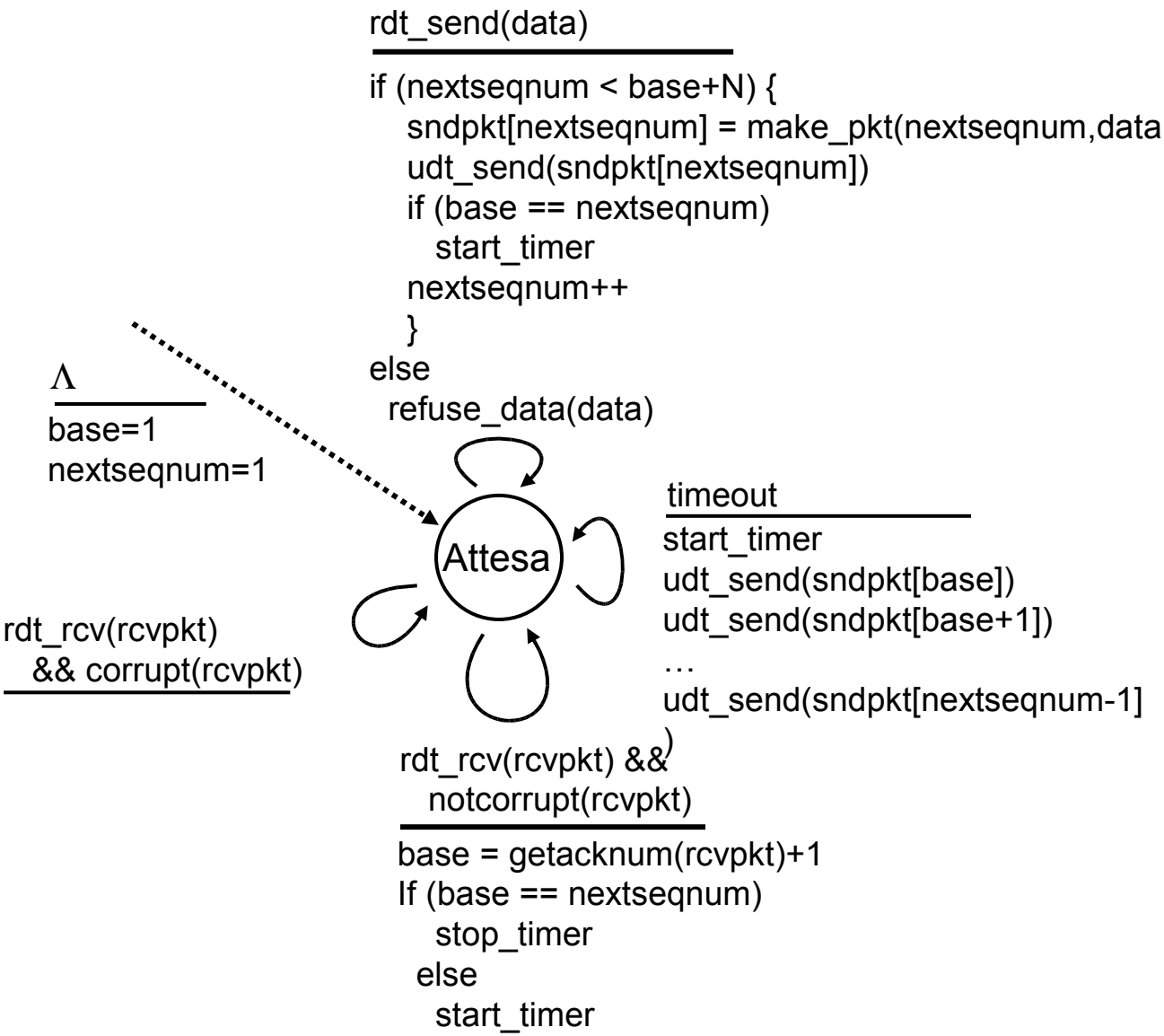
# Go-Back-N

- Mittente:
- Numero di sequenza a k bit nell'intestazione del pacchetto
- "Finestra" contenente fino a N pacchetti consecutivi non riscontrati

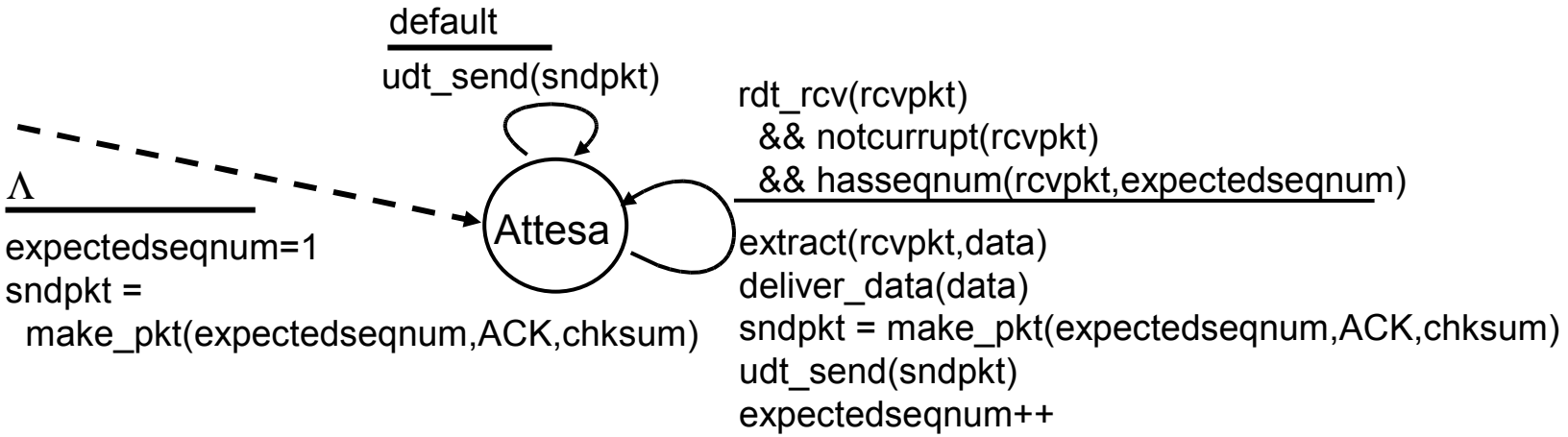



- ACK(n): riscontro di tutti i pacchetti con numero di sequenza minore o uguale a n - "riscontri cumulativi"
  - pacchetti duplicati potrebbero essere scartati (vedere il ricevente)
- timer per ogni pacchetto in transito
- *timeout(n):* ritrasmette il pacchetto n e tutti i pacchetti con i numeri di sequenza più grandi nella finestra

# GBN: automa esteso del mittente



# GBN: automa esteso del ricevente

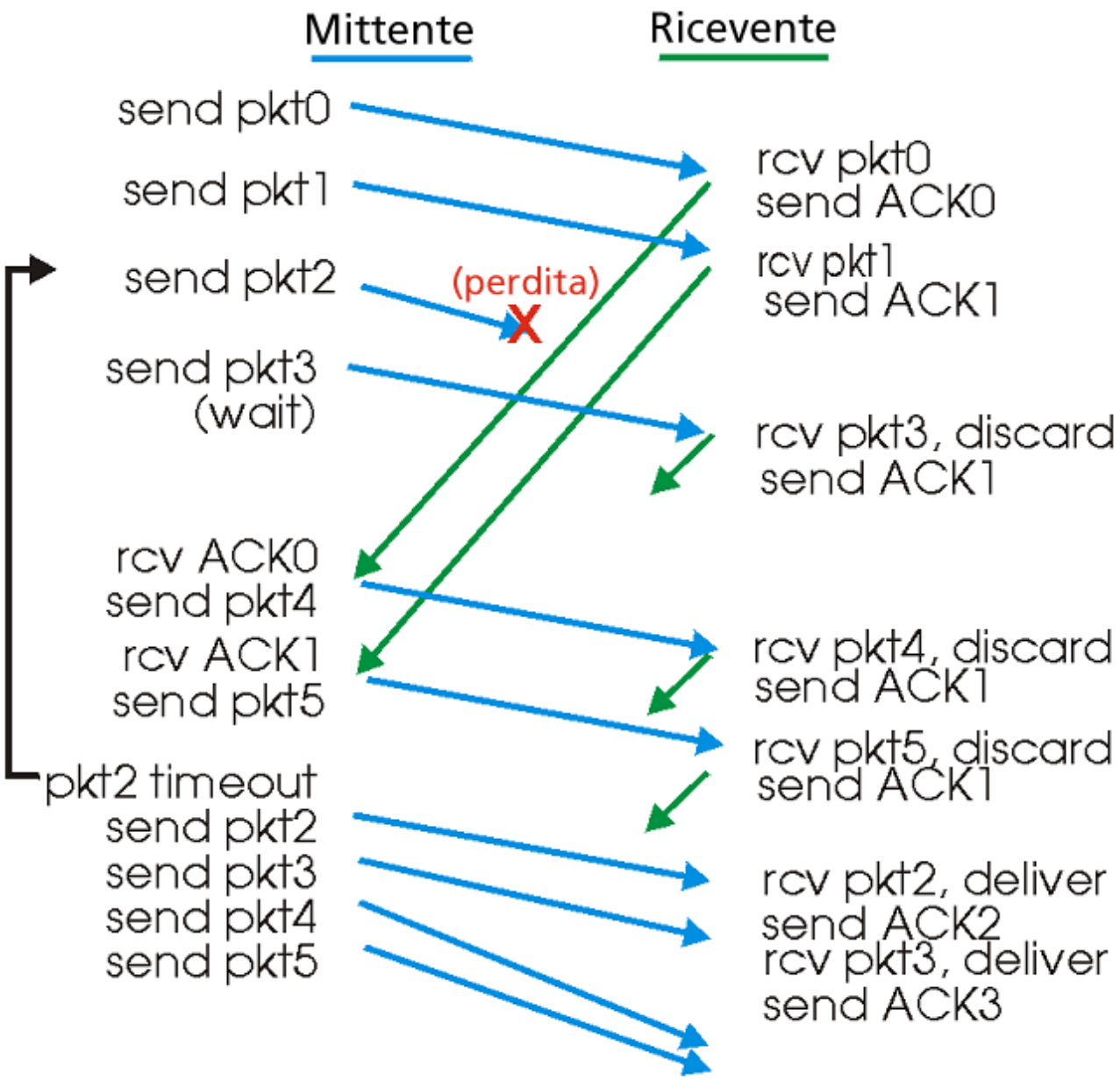



ACK-soltanto: invia sempre un ACK per un pacchetto ricevuto correttamente con il numero di sequenza più alto *in sequenza*

- potrebbe generare ACK duplicati
- deve memorizzare soltanto **`expectedseqnum`**

- Pacchetto fuori sequenza:
  - scartato (non è salvato) -> senza buffering del ricevente!
  - rimanda un ACK per il pacchetto con il numero di sequenza più alto *in sequenza*

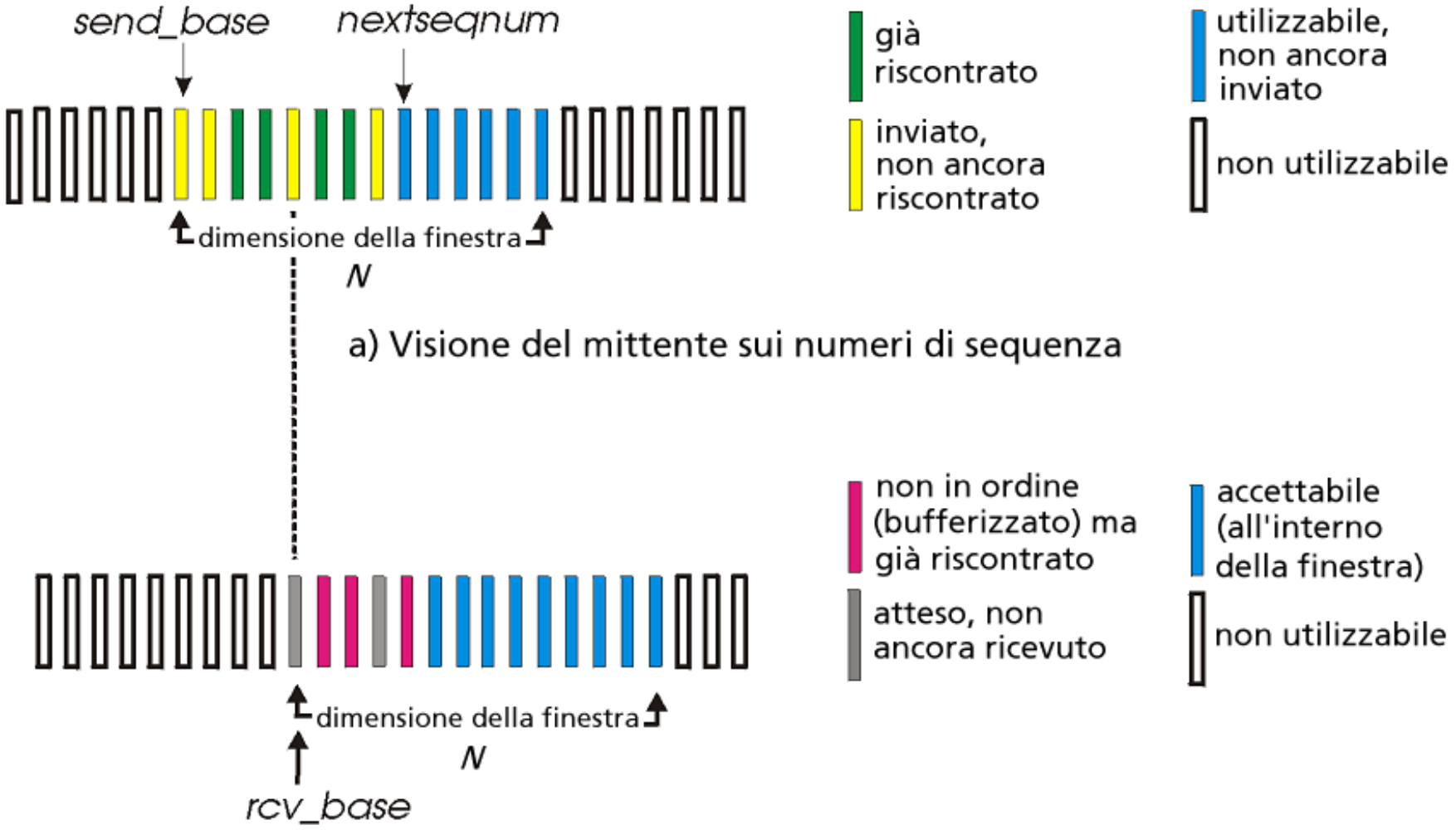
# GBN in azione



# Ripetizione selettiva

- Il ricevente invia riscontri *specifici* per tutti i pacchetti ricevuti correttamente
  - buffer dei pacchetti, se necessario, per eventuali consegne in sequenza al livello superiore
- Il mittente ritrasmette soltanto i pacchetti per i quali non ha ricevuto un ACK
  - timer del mittente per ogni pacchetto non riscontrato
- Finestra del mittente
  - N numeri di sequenza consecutivi
  - limita ancora i numeri di sequenza dei pacchetti inviati non riscontrati

# Ripetizione selettiva: finestre del mittente e del ricevente



# Ripetizione selettiva

## Mittente

**Dati dall'alto:**

- Se nella finestra è disponibile il successivo numero di sequenza, invia il pacchetto

**Timeout(n):**

- Ritrasmette il pacchetto n, riparte il timer

**ACK(n) in [sendbase,sendbase+N]:**

- Marca il pacchetto n come ricevuto
- Se n è il numero di sequenza più piccolo, la base della finestra avanza al successivo numero di sequenza del pacchetto non riscontrato

## Ricevente

**Pacchetto n in [rcvbase, rcvbase+N-1]**

- Invia ACK(n)
- Fuori sequenza: buffer
- In sequenza: consegna (vengono consegnati anche i pacchetti bufferizzati in sequenza); la finestra avanza al successivo pacchetto non ancora ricevuto

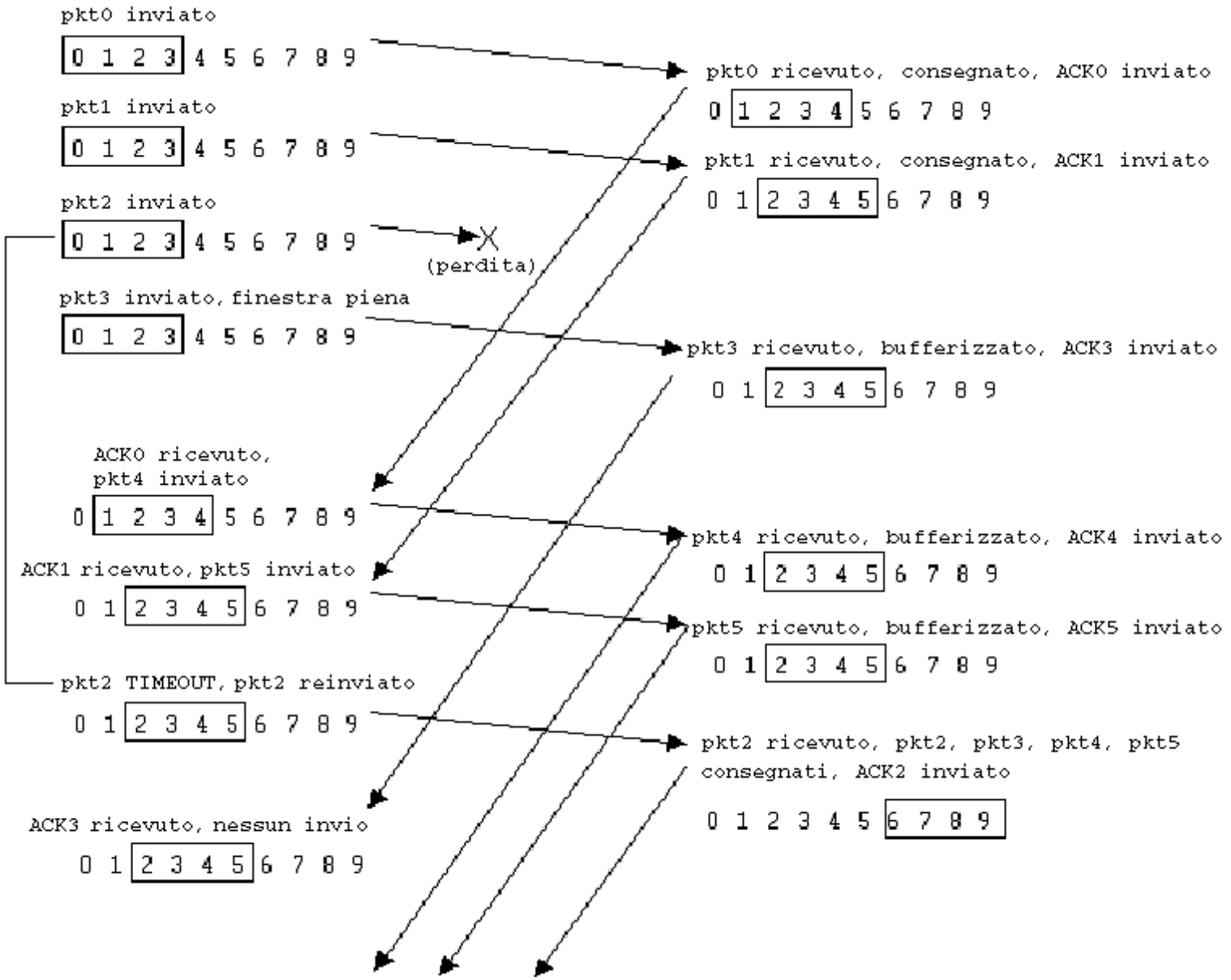
**Pacchetto n in [rcvbase-N, rcvbase-1]**

- ACK(n)

**altrimenti:**

- ignora

# Ripetizione selettiva in azione



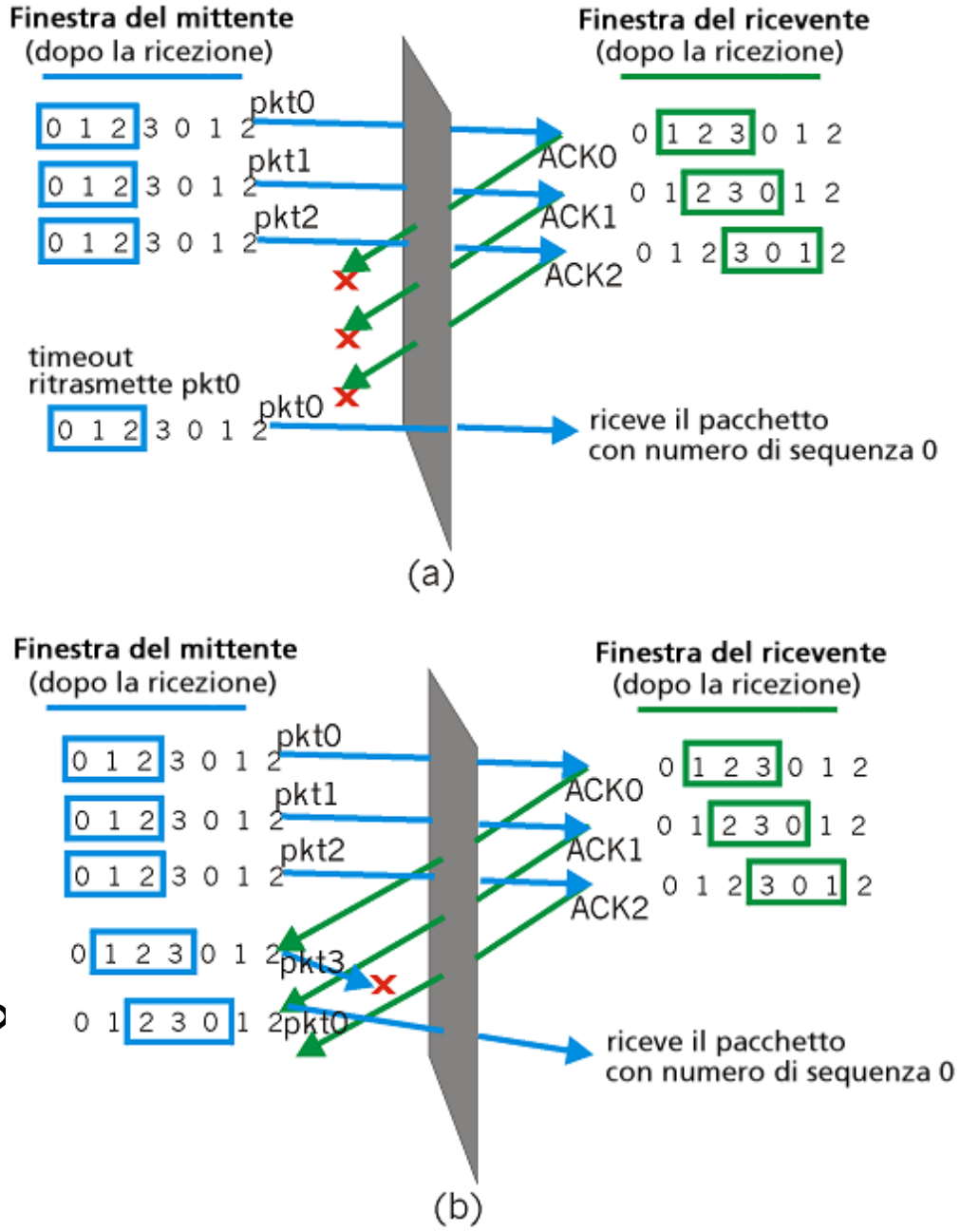
# Ripetizione selettiva: dilemma

Esempio:

- Numeri di sequenza: 0, 1, 2, 3
- Dimensione della finestra = 3

- Il ricevente non vede alcuna differenza fra i due scenari!
- Passa erroneamente i dati duplicati come nuovi in (a)

D: Qual è la relazione fra lo spazio dei numeri di sequenza e la dimensione della finestra?



# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

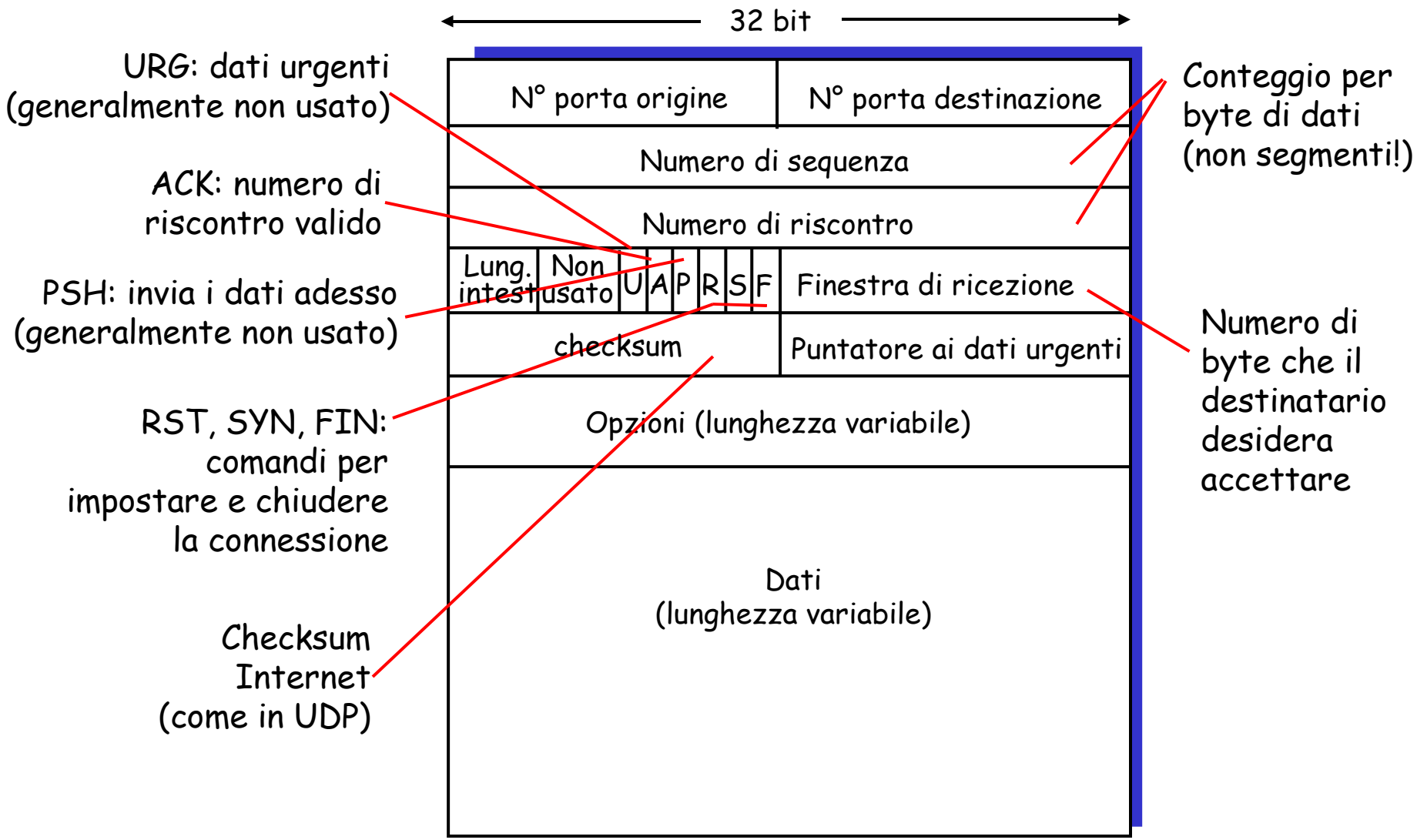
# TCP: Panoramica

RFC: 793, 1122, 1323, 2018, 2581

- punto-punto:
  - un mittente, un destinatario
- flusso di byte affidabile, in sequenza:
  - nessun "confine ai messaggi"
- pipeline:
  - il controllo di flusso e di congestione TCP definiscono la dimensione della finestra
- *buffer d'invio e di ricezione*


- full duplex:
  - flusso di dati bidirezionale nella stessa connessione
  - MSS: dimensione massima di segmento (maximum segment size)
- orientato alla connessione:
  - l'handshaking (scambio di messaggi di controllo) inizializza lo stato del mittente e del destinatario prima di scambiare i dati
- flusso controllato:
  - il mittente non sovraccarica il destinatario

# Struttura dei segmenti TCP



# Numeri di sequenza e ACK di TCP

Numeri di sequenza:

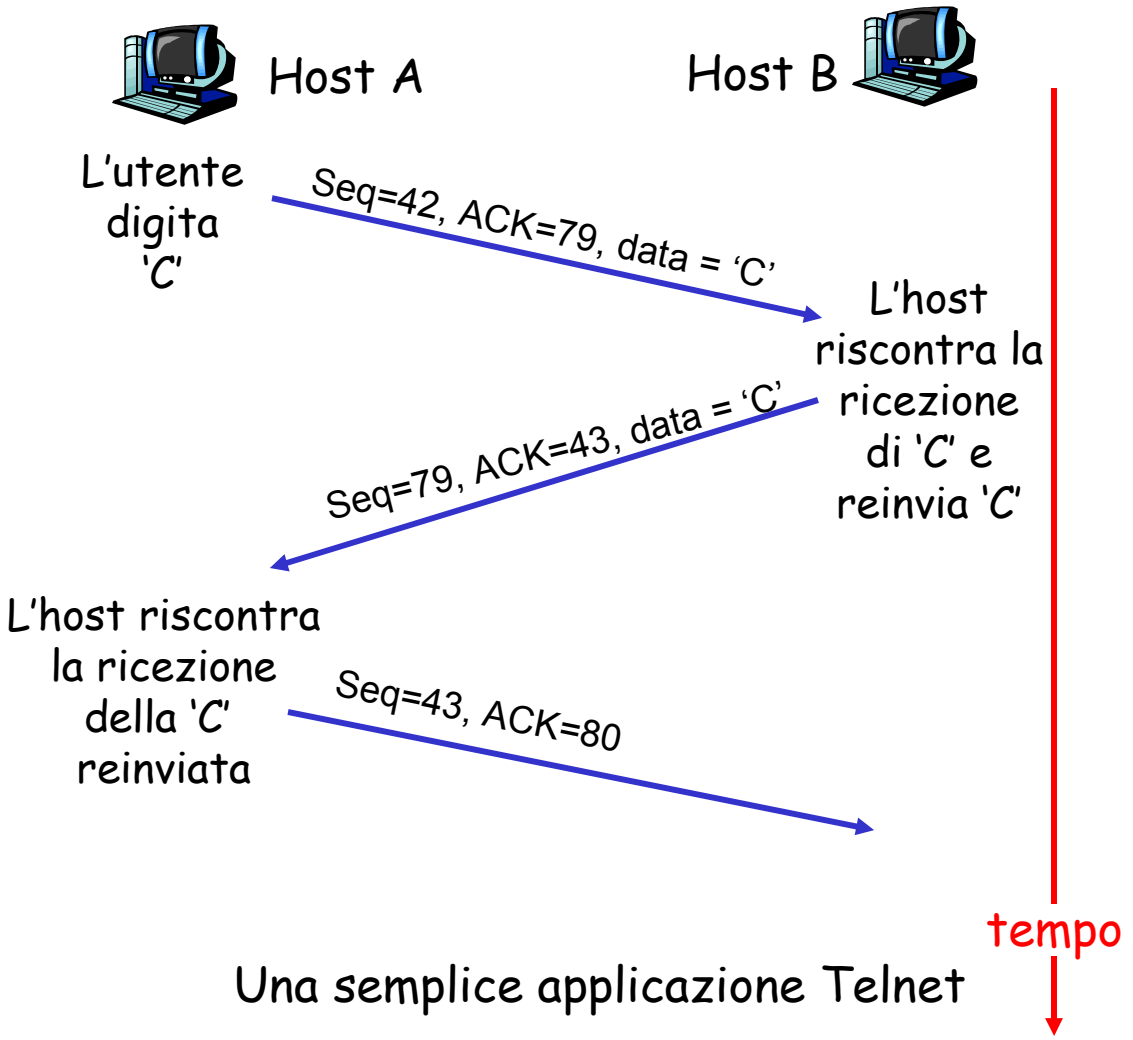
- "numero" del primo byte del segmento nel flusso di byte

ACK:

- numero di sequenza del prossimo byte atteso dall'altro lato
- ACK cumulativo

D: come gestisce il destinatario i segmenti fuori sequenza?

- R: la specifica TCP non lo dice – dipende dall'implementatore




Una semplice applicazione Telnet

# TCP: tempo di andata e ritorno e timeout

D: come impostare il valore del timeout di TCP?

- Più grande di RTT
  - ma RTT varia
- Troppo piccolo: timeout prematuro
  - ritrasmissioni non necessarie
- Troppo grande: reazione lenta alla perdita dei segmenti

D: come stimare RTT?

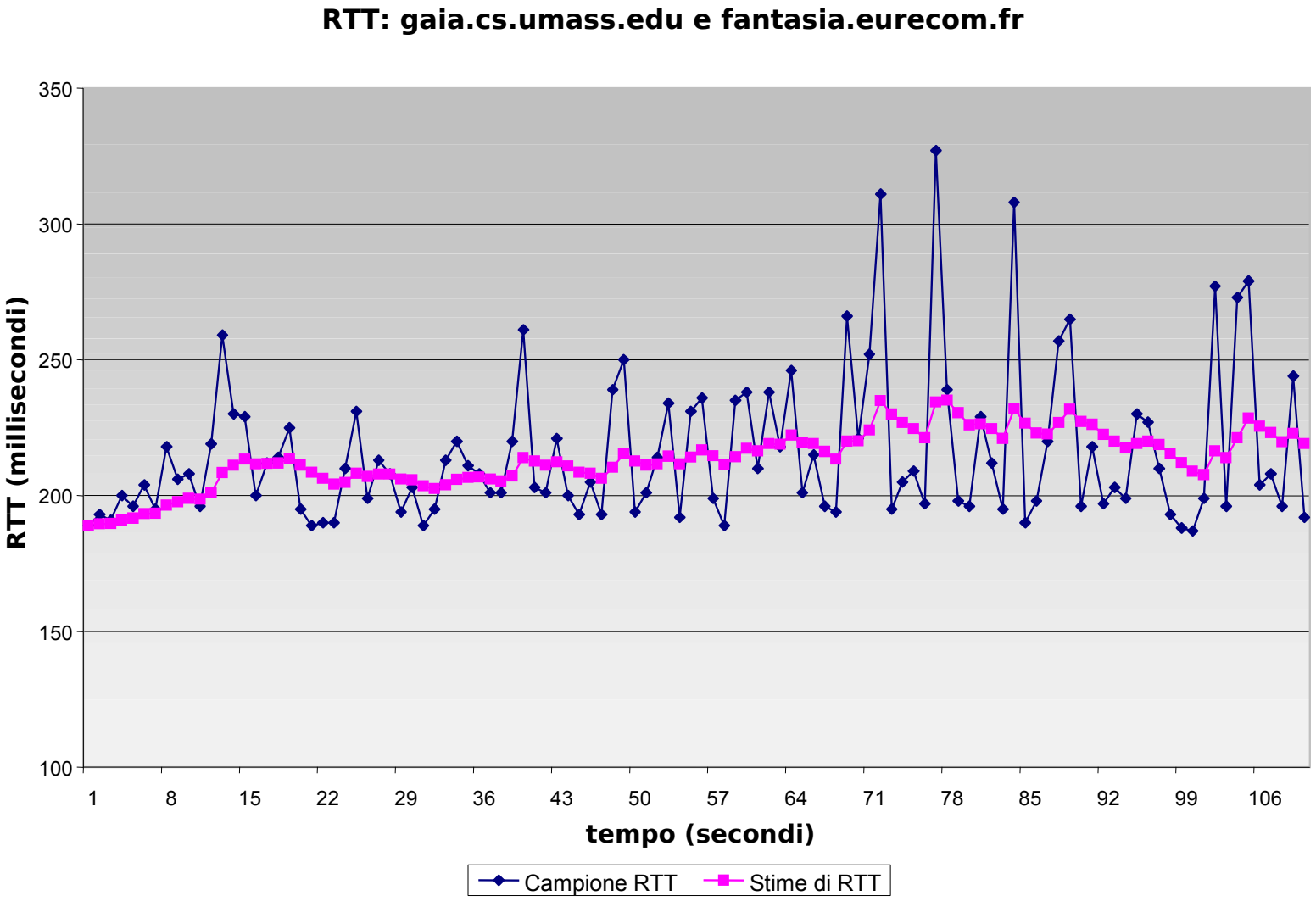
- **SampleRTT**: tempo misurato dalla trasmissione del segmento fino alla ricezione di ACK
  - ignora le ritrasmissioni
- **SampleRTT** varia, quindi occorre una stima "più livellata" di RTT
  - media di più misure recenti, non semplicemente il valore corrente di **SampleRTT**

# TCP: tempo di andata e ritorno e timeout

**EstimatedRTT = (1 - α )*EstimatedRTT + α *SampleRTT**

- Media mobile esponenziale ponderata
- L'influenza dei vecchi campioni decresce esponenzialmente
- Valore tipico: $\alpha = 0{,}125$

# Esempio di stima di RTT:



# TCP: tempo di andata e ritorno e timeout

## Impostazione del timeout

- **EstimtedRTT** più un "margine di sicurezza"
  - grande variazione di **EstimatedRTT** -> margine di sicurezza maggiore
- Stimare innanzitutto di quanto SampleRTT si discosta da EstimatedRTT:

**DevRTT = (1-β )*DevRTT +**
**β *|SampleRTT-EstimatedRTT|**

**(tipicamente, β = 0,25)**

Poi impostare l'intervallo di timeout:

**TimeoutInterval = EstimatedRTT + 4*DevRTT**

# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

# TCP: trasferimento dati affidabile

- TCP crea un servizio di trasferimento dati affidabile sul servizio inaffidabile di IP
- Pipeline dei segmenti
- ACK cumulativi
- TCP usa un solo timer di ritrasmissione
- Le ritrasmissioni sono avviate da:
  - eventi di timeout
  - ACK duplicati
- Inizialmente consideriamo un mittente TCP semplificato:
  - ignoriamo gli ACK duplicati
  - ignoriamo il controllo di flusso e il controllo di congestione

# TCP: eventi del mittente

## Dati ricevuti dall'applicazione:

- Crea un segmento con il numero di sequenza
- Il numero di sequenza è il numero del primo byte del segmento nel flusso di byte
- Avvia il timer, se non è già in funzione (pensate al timer come se fosse associato al più vecchio segmento non riscontrato)
- Intervallo di scadenza:

  `TimeOutInterval`

## Timeout:

- Ritrasmette il segmento che ha causato il timeout
- Riavvia il timer

## ACK ricevuti:

- Se riscontra segmenti precedentemente non riscontrati
  - aggiorna ciò che è stato completamente riscontrato
  - avvia il timer se ci sono altri segmenti da completare

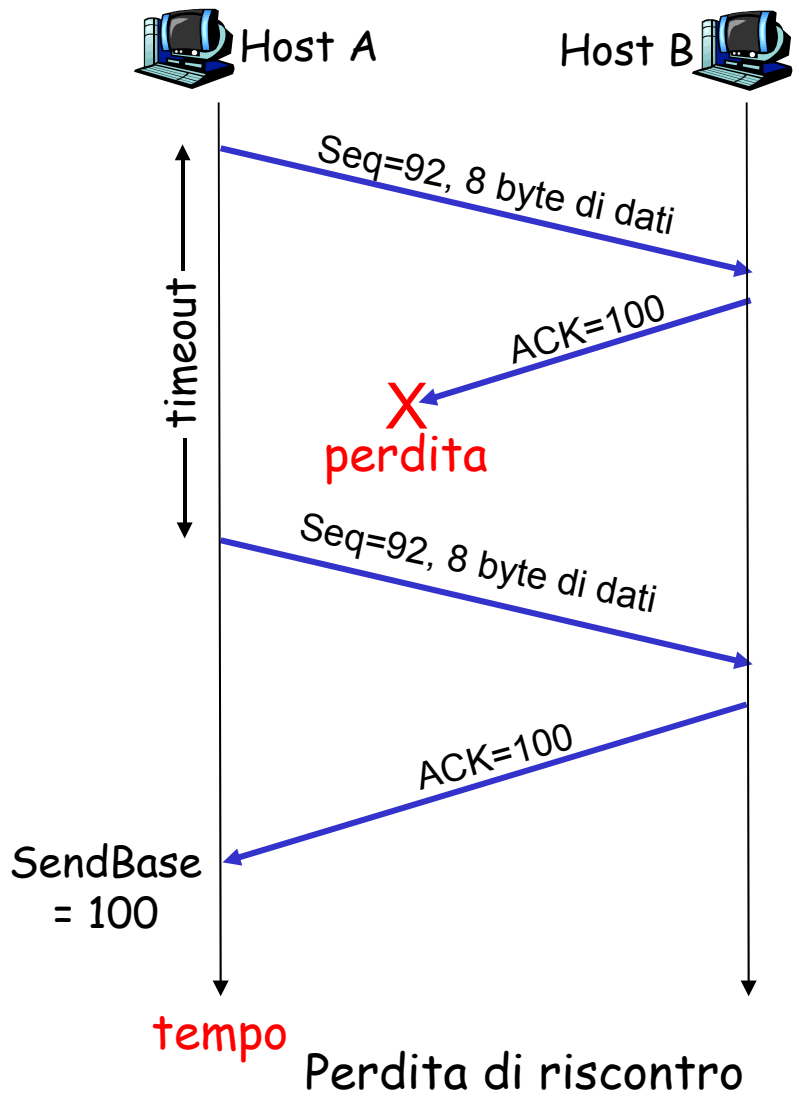
```
NextSeqNum = InitialSeqNum
SendBase = InitialSeqNum

loop (sempre) {
  switch(evento)

  evento: i dati ricevuti dall'applicazione superiore
      creano il segmento TCP con numero di sequenza NextSeqNum
      if (il timer attualmente non funziona)
          avvia il timer
      passa il segmento a IP
      NextSeqNum = NextSeqNum + lunghezza(dati)

  evento: timeout del timer
      ritrasmetti il segmento non ancora riscontrato con
          il più piccolo numero di sequenza
      avvia il timer

  evento: ACK ricevuto, con valore del campo ACK pari a y
      if (y > SendBase) {
          SendBase = y
          if (esistono attualmente segmenti non ancora riscontrati)
              avvia il timer
          }

} /* fine del loop */
```

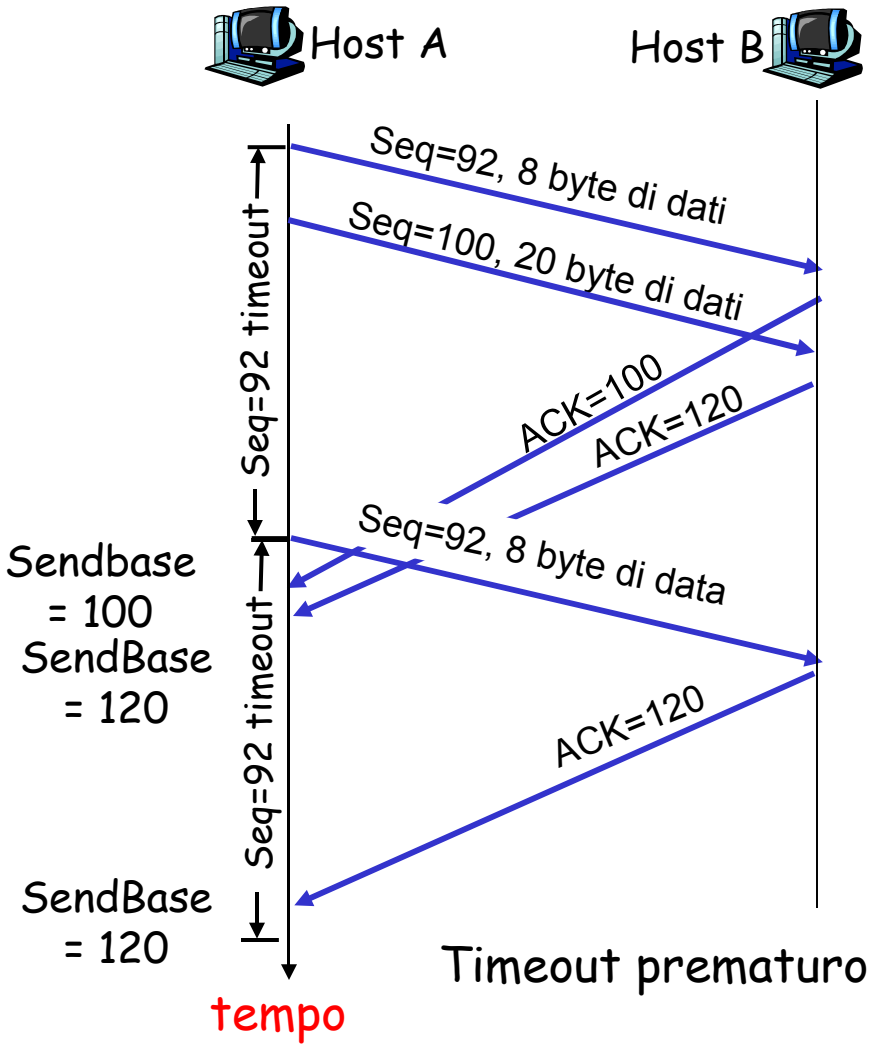
## Mittente TCP (semplificato)

Commento:
- SendBase-1: ultimo byte cumulativamente riscontrato

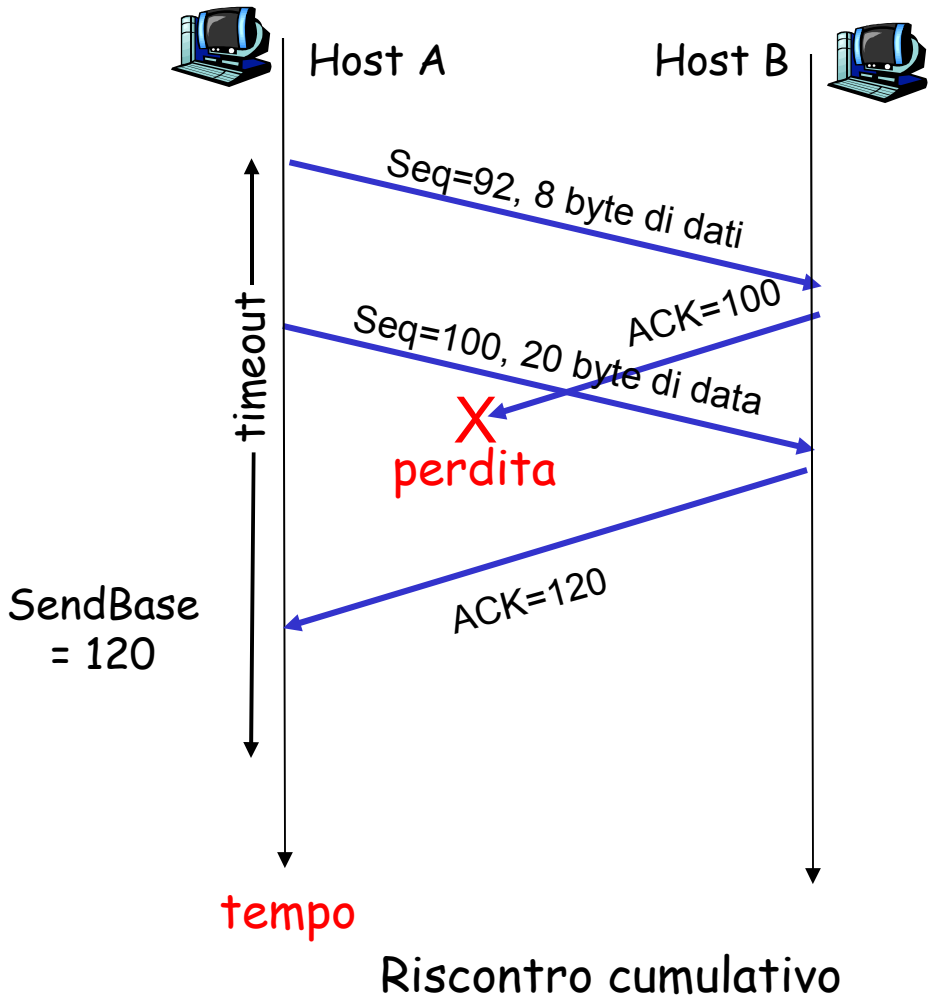
Esempio:
- SendBase-1 = 71; y = 73, quindi il destinatario vuole 73+ ; y > SendBase, allora vengono riscontrati tali nuovi dati

# TCP: scenari di ritrasmissione



# TCP: scenari di ritrasmissione




Riscontro cumulativo

# TCP: generazione di ACK [RFC 1122, RFC 2581]

| Evento presso il destinatario | Azione del ricevente TCP |
|---|---|
| Arrivo ordinato di un segmento con numero di sequenza atteso. Tutti i dati fino al numero di sequenza atteso sono già stati riscontrati. | ACK ritardato. Attende fino a 500 ms l'arrivo del prossimo segmento. Se il segmento non arriva, invia un ACK. |
| Arrivo ordinato di un segmento con numero di sequenza atteso. Un altro segmento è in attesa di trasmissione dell'ACK. | Invia immediatamente un singolo ACK cumulativo, riscontrando entrambi i segmenti ordinati. |
| Arrivo non ordinato di un segmento con numero di sequenza superiore a quello atteso. Viene rilevato un buco. | Invia immediatamente un ACK duplicato, indicando il numero di sequenza del prossimo byte atteso. |
| Arrivo di un segmento che colma parzialmente o completamente il buco. | Invia immediatamente un ACK, ammesso che il segmento cominci all'estremità inferiore del buco. |

# Ritrasmissione rapida

- Il periodo di timeout spesso è relativamente lungo:
  - lungo ritardo prima di ritrasmettere il pacchetto perduto.
- Rileva i segmenti perduti tramite gli ACK duplicati.
  - Il mittente spesso invia molti segmenti.
  - Se un segmento viene smarrito, è probabile che ci saranno molti ACK duplicati.
- Se il mittente riceve 3 ACK per lo stesso dato, suppone che il segmento che segue il dato riscontrato è andato perduto:
  - ritrasmissione rapida: rispedisce il segmento prima che scada il timer.

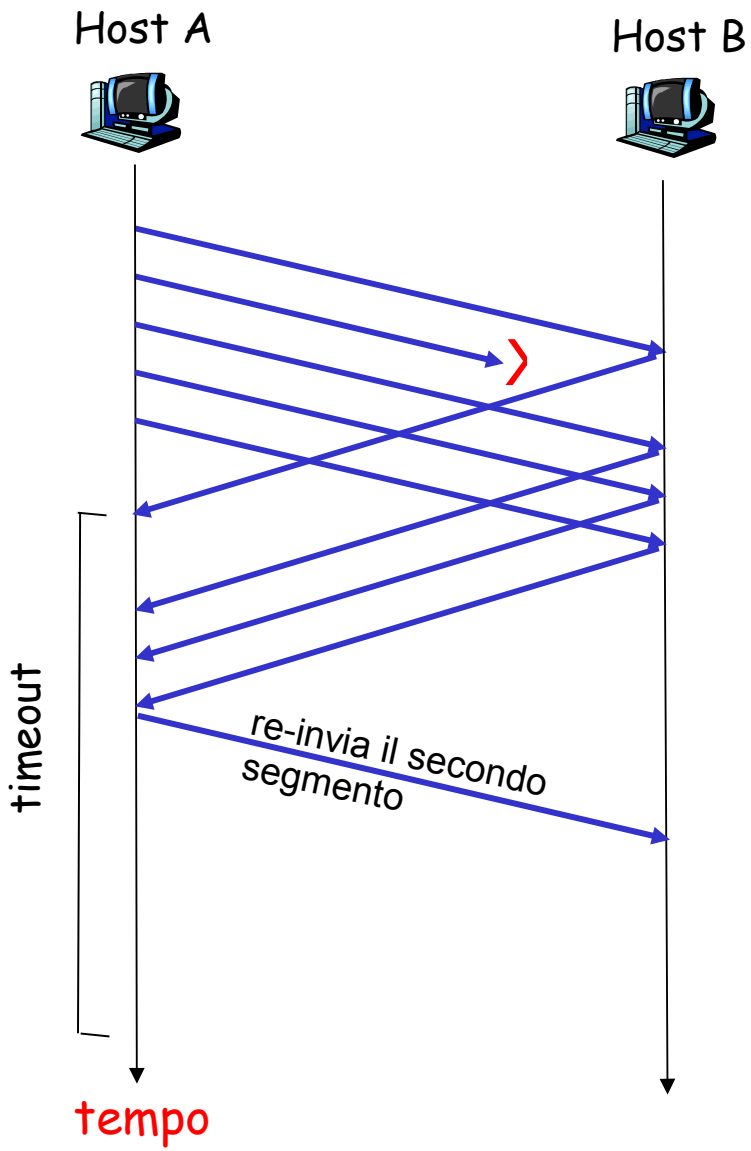



Figure 3.37 Re-invio di un segmento dopo un triplice ACK

# Algoritmo della ritrasmissione rapida:

```
evento: ACK ricevuto, con valore del campo ACK pari a y
            if (y > SendBase) {
                SendBase = y
                if (esistono attualmente segmenti non ancora riscontrati)
                    avvia il timer
              }
            else {
                incrementa il numero di ACK duplicati ricevuti per y
                if (numero di ACK duplicati ricevuti per y = 3) {
                    rispedisci il segmento con numero di sequenza y
                }
```

un ACK duplicato per un segmento già riscontrato

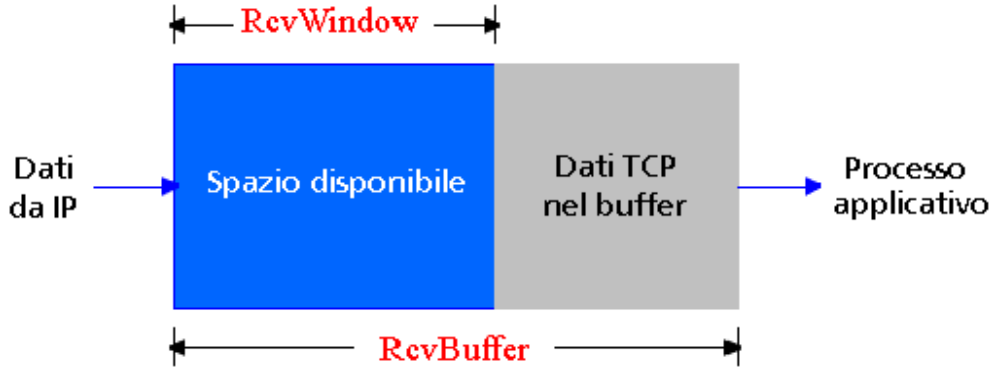
ritrasmissione rapida

# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

# TCP: controllo di flusso

- Il lato ricevente della connessione TCP ha un buffer di ricezione:



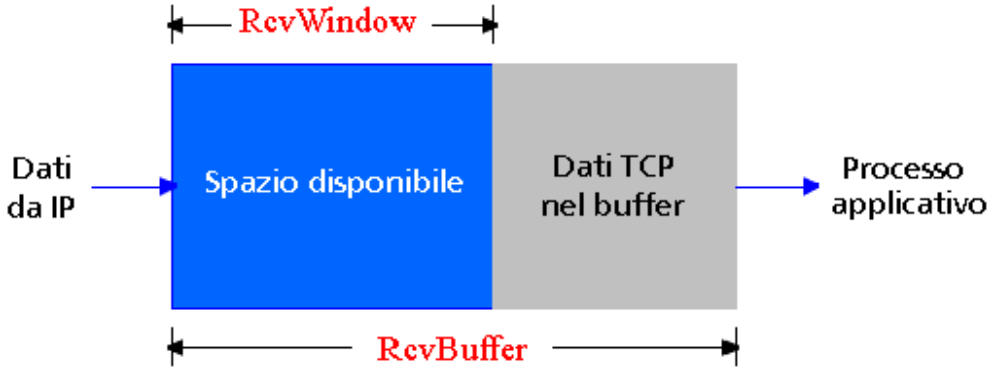

- Il processo applicativo potrebbe essere rallentato dalla lettura nel buffer

**Controllo di flusso**

Il mittente non vuole sovraccaricare il buffer del destinatario trasmettendo troppi dati, troppo velocemente

- Servizio di corrispondenza delle velocità: la frequenza d'invio deve corrispondere alla frequenza di lettura dell'applicazione ricevente

# TCP: funzionamento del controllo di flusso




(supponiamo che il destinatario TCP scarti i segmenti fuori sequenza)

- Spazio disponibile nel buffer

= **RcvWindow**

= **RcvBuffer - [LastByteRcvd - LastByteRead]**

- Il mittente comunica lo spazio disponibile includendo il valore di **RcvWindow** nei segmenti
- Il mittente limita i dati non riscontrati a **RcvWindow**
  - garantisce che il buffer di ricezione non vada in overflow

# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

# Gestione della connessione TCP

Ricordiamo: mittente e destinatario TCP stabiliscono una "connessione" prima di scambiare i segmenti di dati

- inizializzano le variabili TCP:
  - numeri di sequenza
  - buffer, informazioni per il controllo di flusso (per esempio, **RcvWindow**)
- *client:* avvia la connessione
- `Socket clientSocket = new Socket("hostname","portnumber");`
- *server:* contattato dal client
- `Socket connectionSocket = welcomeSocket.accept();`

## Handshake a tre vie:

Passo 1: il client invia un segmento SYN al server
- specifica il numero di sequenza iniziale
- nessun dato

Passo 2: il server riceve SYN e risponde con un segmento SYNACK
- il server alloca i buffer
- specifica il numero di sequenza iniziale del server

Passo 3: il client riceve SYNACK e risponde con un segmento ACK, che può contenere dati

# Gestione della connessione TCP (continua)

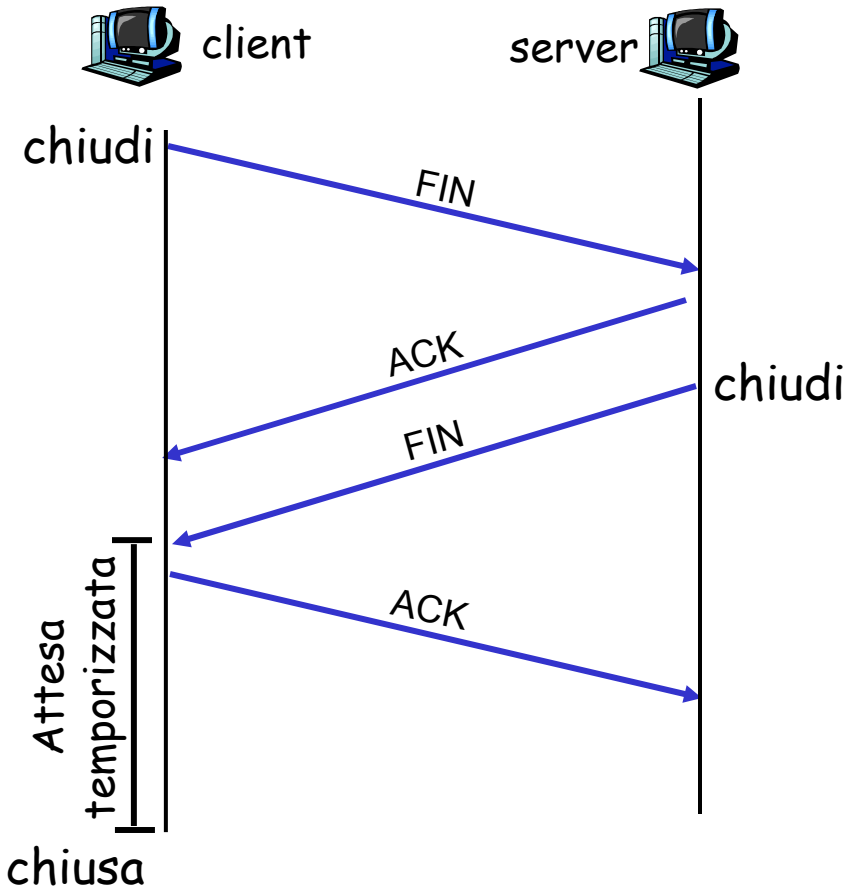
## Chiudere una connessione:

Il client chiude la socket:

```
clientSocket.close();
```

**Passo 1:** il client invia un segmento di controllo FIN al server.

**Passo 2:** il server riceve il segmento FIN e risponde con un ACK. Chiude la connessione e invia un FIN.



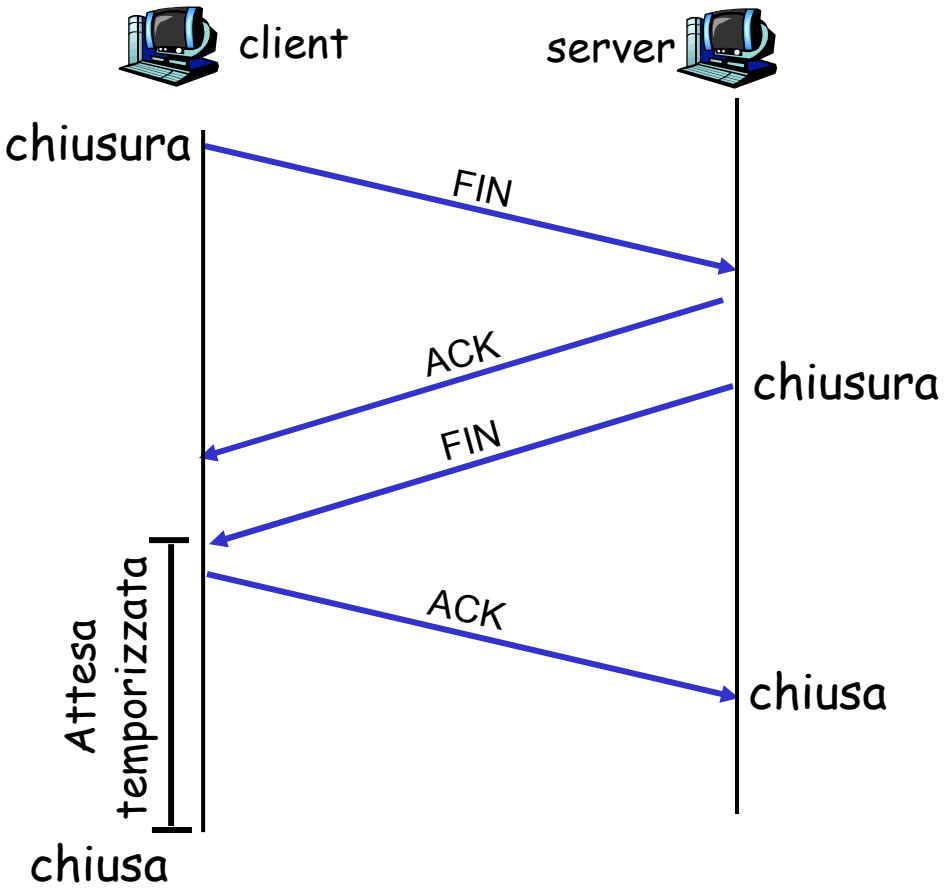
# Gestione della connessione TCP (continua)

Passo 3: il client riceve FIN e risponde con un ACK.

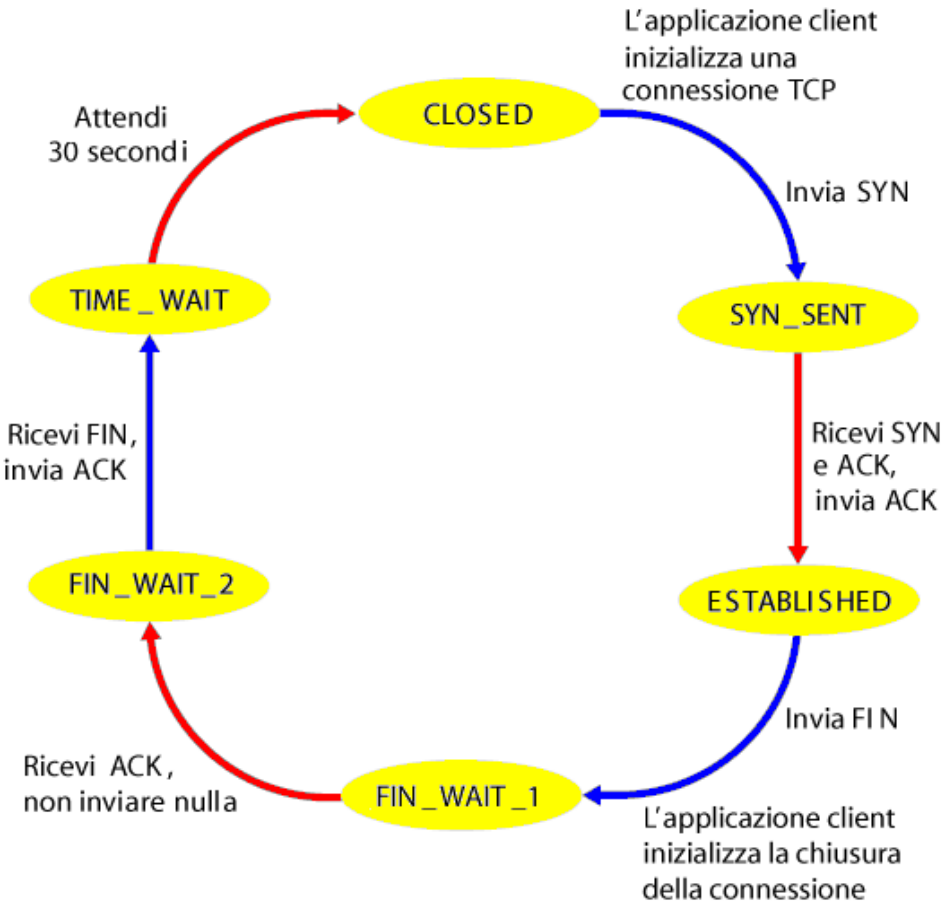
- inizia l'attesa temporizzata - risponde con un ACK ai FIN che riceve

Passo 4: il server riceve un ACK. La connessione viene chiusa.

Nota: con una piccola modifica può gestire segmenti FIN contemporanei.

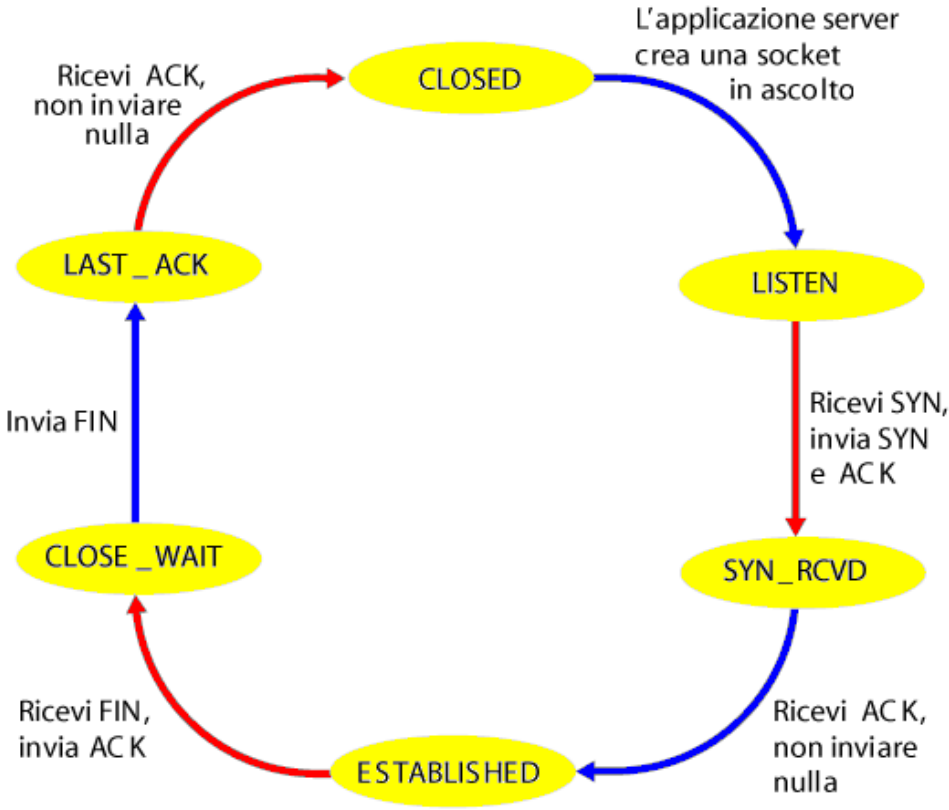


# Gestione della connessione TCP (continua)




Sequenza di stati visitati da un client TCP

Sequenza di stati visitati dal TCP sul lato server



# Capitolo 3: Livello di trasporto

- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

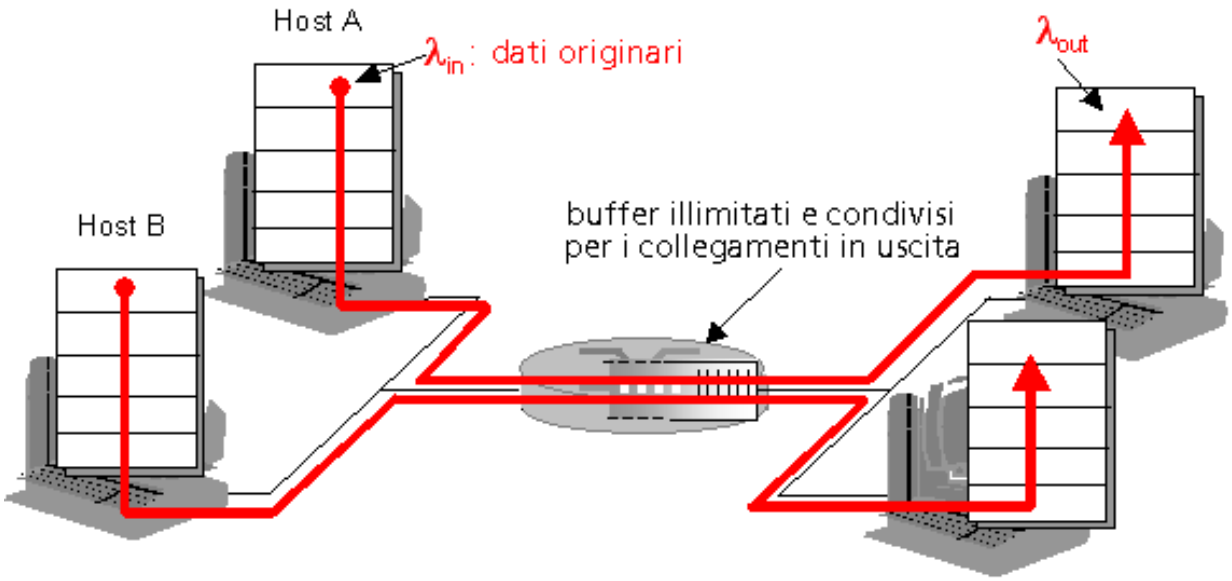
# Principi del controllo di congestione

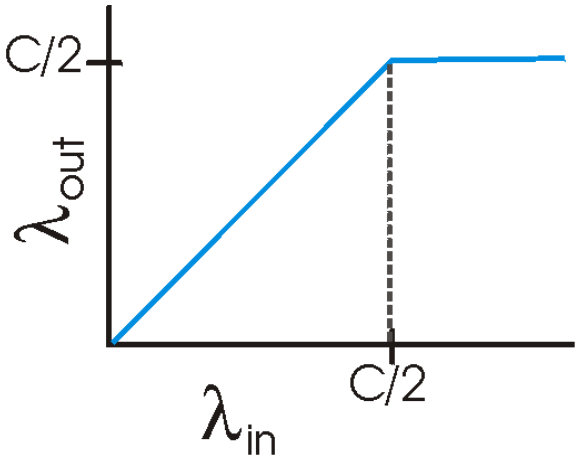
## Congestione:

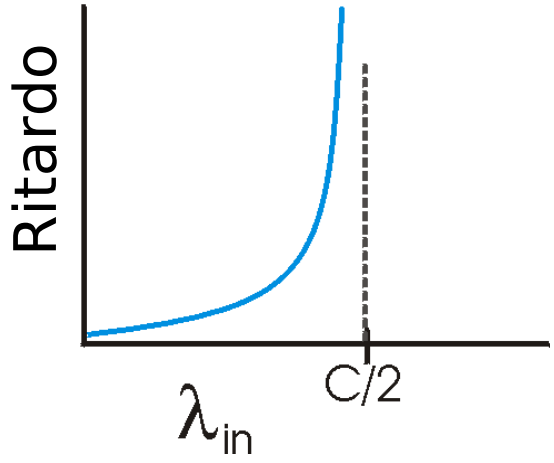
- informalmente: "troppe sorgenti trasmettono troppi dati, a una velocità talmente elevata che la *rete* non è in grado di gestirli"
- differisce dal controllo di flusso!
- sintomi:
  - pacchetti smarriti (overflow nei buffer dei router)
  - lunghi ritardi (accodamento nei buffer dei router)
- tra i dieci problemi più importanti del networking!

# Cause/costi della congestione: scenario 1

- due mittenti, due destinatari
- un router con buffer illimitati
- nessuna ritrasmissione



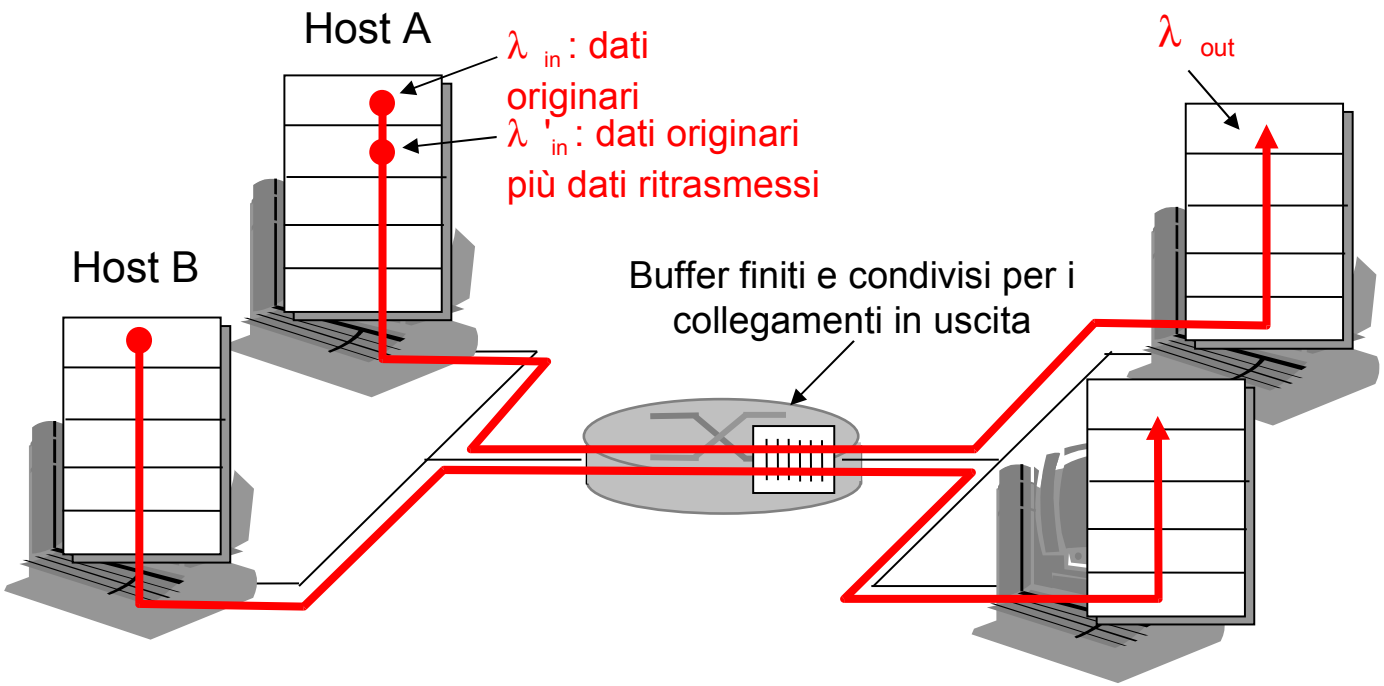




- grandi ritardi se congestionati
- throughput massimo

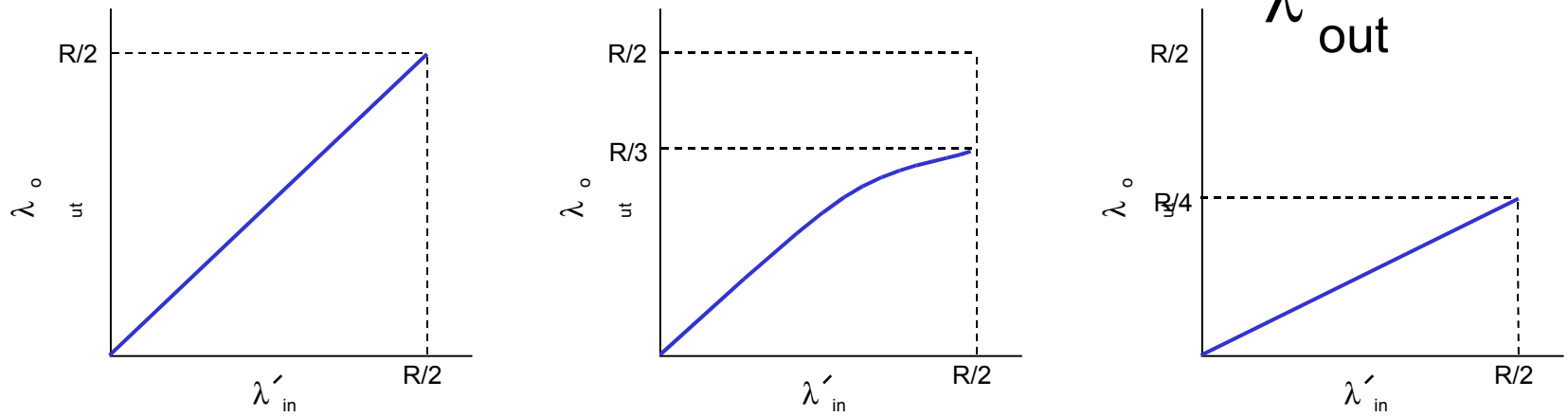
# Cause/costi della congestione: scenario 2

- un router, buffer *finiti*
- il mittente ritrasmette il pacchetto perduto



# Cause/costi della congestione: scenario 2

- Sempre: $\lambda_{in} = \lambda_{out}$ (goodput)
- Ritrasmissione "perfetta" solo quando la perdita: $\lambda'_{in} > \lambda_{out}$
- La ritrasmissione del pacchetto ritardato (non perduto) rende $\lambda'_{in}$ più grande (rispetto al caso perfetto) per lo stesso $\lambda_{out}$



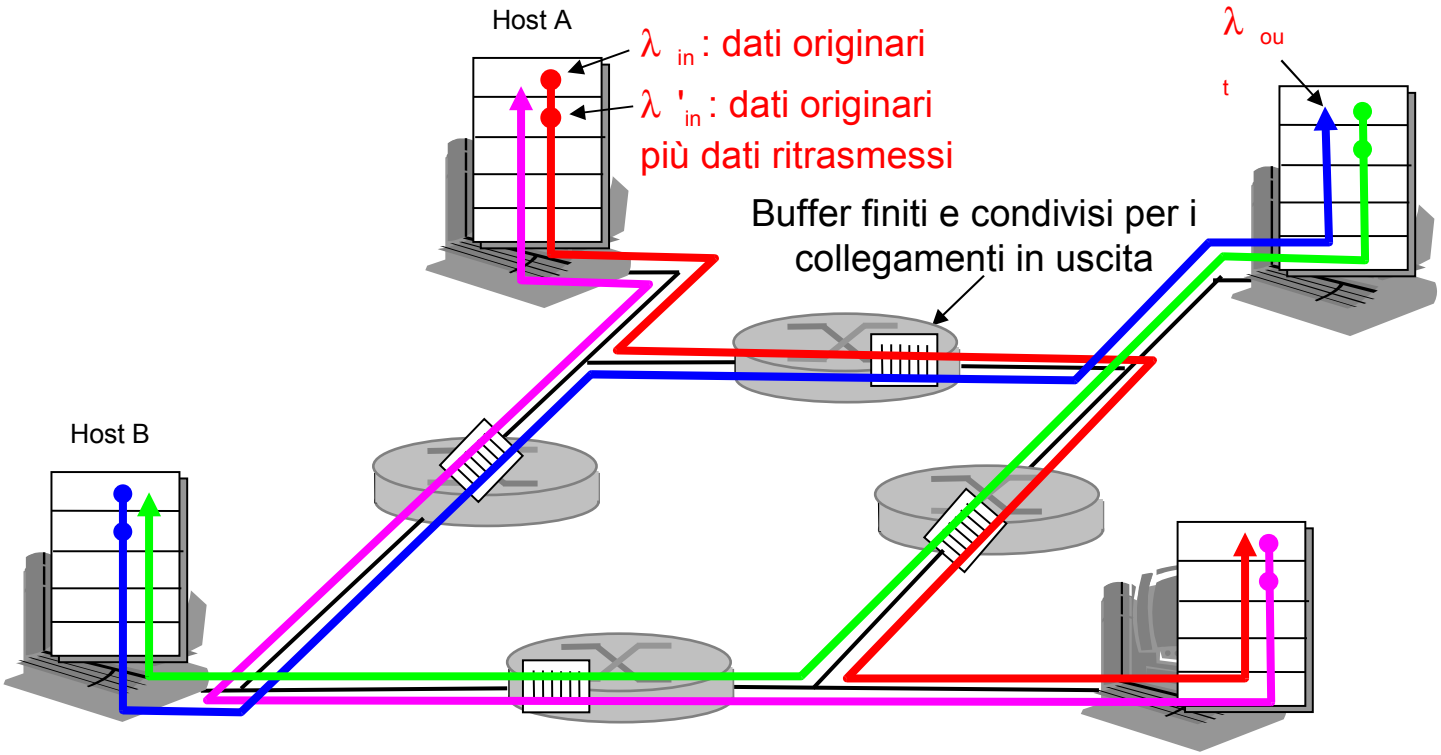

"Costi" della congestione:

- Più lavoro (ritrasmissioni) per un dato "goodput"
- Ritrasmissioni non necessarie: il collegamento trasporta più copie del pacchetto

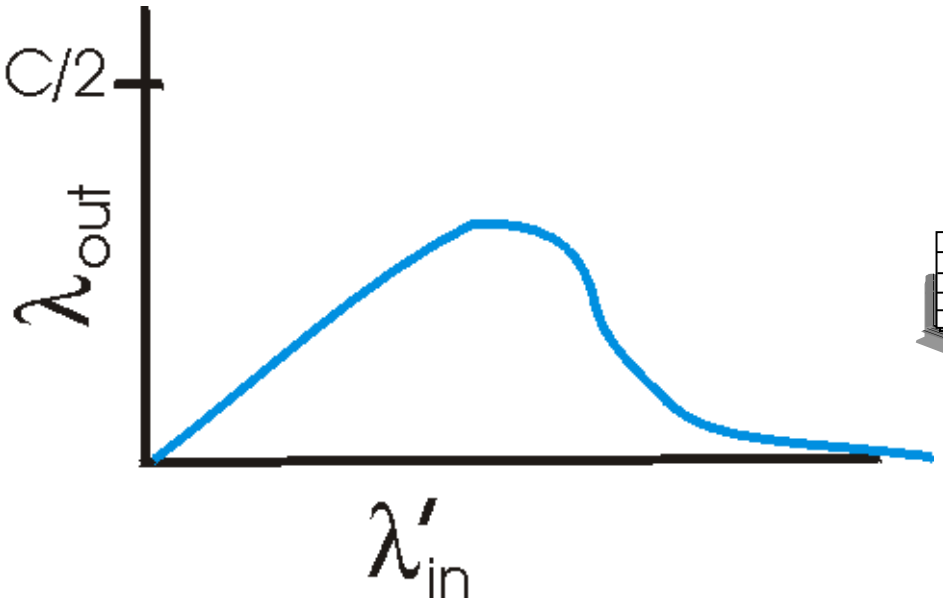
# Cause/costi della congestione: scenario 3

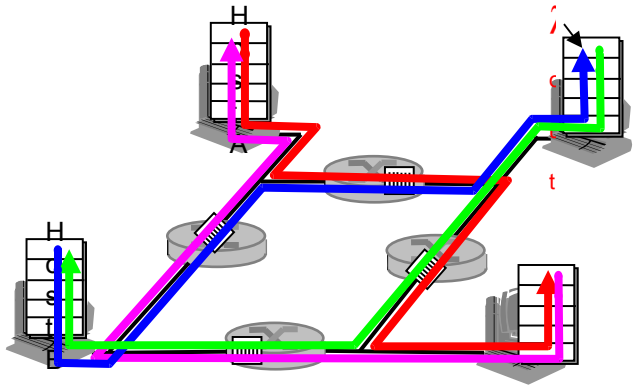
- Quattro mittenti
- Percorsi multihop
- timeout/ritrasmissione

D: Che cosa accade quando $\lambda_{in}$ e $\lambda'_{in}$ aumentano?



# Cause/costi della congestione: scenario 3



Un altro "costo" della congestione:

- Quando il pacchetto viene scartato, la capacità trasmissiva utilizzata sui collegamenti di upstream per instradare il pacchetto risulta sprecata!

# Approcci al controllo della congestione

I due principali approcci al controllo della congestione:

## Controllo di congestione punto-punto:

- nessun supporto esplicito dalla rete
- la congestione è dedotta osservando le perdite e i ritardi nei sistemi terminali
- metodo adottato da TCP

## Controllo di congestione assistito dalla rete:

- i router forniscono un feedback ai sistemi terminali
  - un singolo bit per indicare la congestione (SNA, DECbit, TCP/IP ECN, ATM)
  - comunicare in modo esplicito al mittente la frequenza trasmissiva

# Un esempio: controllo di congestione ATM ABR

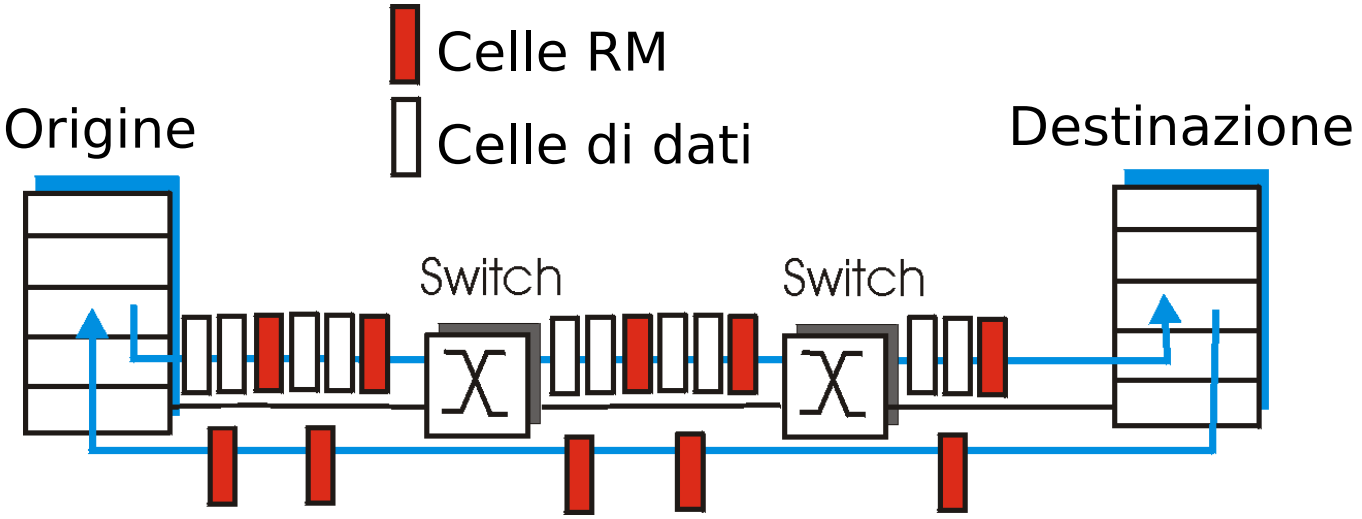
## ABR: available bit rate:

- "servizio elastico"
- se il percorso del mittente è "sottoutilizzato":
  - il mittente dovrebbe utilizzare la larghezza di banda disponibile
- se il percorso del mittente è congestionato:
  - il mittente dovrebbe ridurre al minimo il tasso trasmissivo

## Celle RM (resource management):

- inviate dal mittente, inframmezzate alle celle di dati
- i bit in una cella RM sono impostati dagli switch ("*assistenza dalla rete*")
  - bit NI: nessun aumento del tasso trasmissivo (congestione moderata)
  - bit CI: indicazione di congestione (traffico intenso)
- il destinatario restituisce le celle RM al mittente con i bit intatti

# Un esempio: controllo di congestione ATM ABR




- Campo esplicito di frequenza (ER, explicit rate) in ogni cella RM
  - lo switch congestionato può diminuire il valore del campo ER
  - in questo modo, il campo ER sarà impostato alla velocità minima supportabile da tutti gli switch sul percorso globale
- Ogni cella di dati contiene un bit EFCI: impostato a 1 nello switch congestionato
  - se la cella di dati che precede la cella RM ha impostato il bit EFCI, il mittente imposta il bit CI nella cella RM restituita

# Capitolo 3: Livello di trasporto

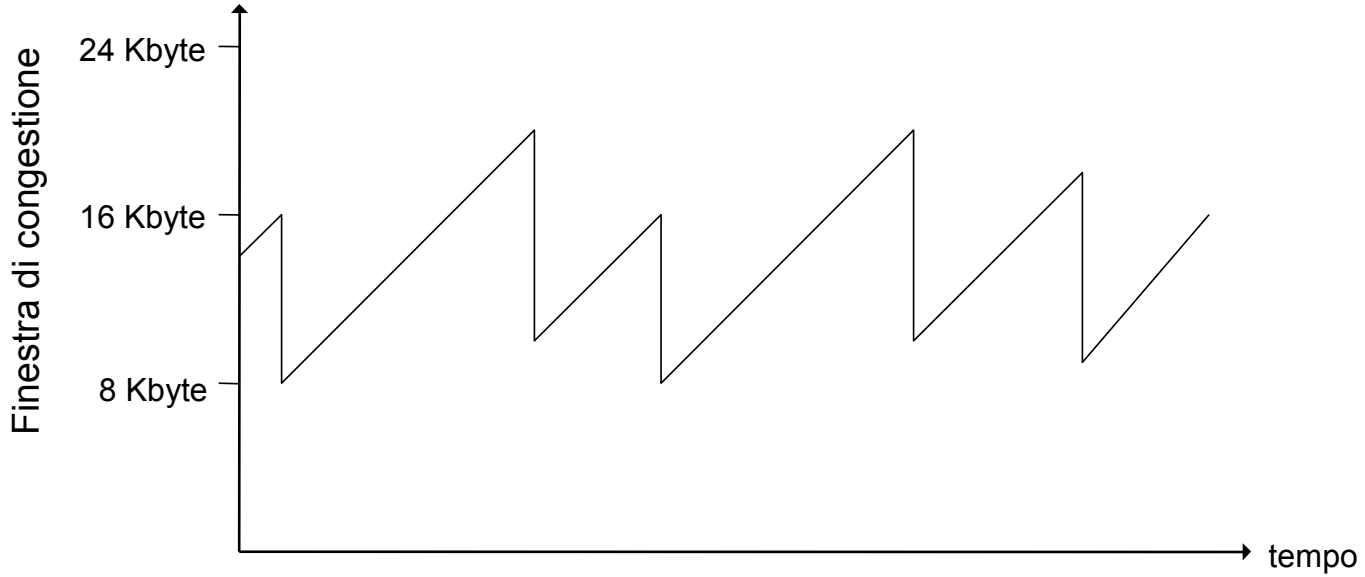
- 3.1 Servizi a livello di trasporto
- 3.2 Multiplexing e demultiplexing
- 3.3 Trasporto senza connessione: UDP
- 3.4 Principi del trasferimento dati affidabile
- 3.5 Trasporto orientato alla connessione: TCP
  - struttura dei segmenti
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - gestione della connessione
- 3.6 Principi del controllo di congestione
- 3.7 Controllo di congestione TCP

# Controllo di congestione TCP: incremento additivo e decremento moltiplicativo (AIMD)

*Approccio:* aumenta il tasso trasmissivo sondando la rete, fino a quando non si verifica una perdita

Incremento additivo: aumenta **CongWin** di 1 MSS a ogni RTT in assenza di eventi di perdita: *sondaggio*

Decremento moltiplicativo: riduce a metà **CongWin** dopo un evento di perdita




Controllo di congestione AIMD

# Controllo di congestione TCP

- Il mittente limita la trasmissione:

  **LastByteSent-LastByteAcked**

  **≤ CongWin**

- Approssimativamente:

$$\text{Frequenza d'invio} = \frac{\text{CongWin}}{\text{RTT}} \text{ byte/sec}$$

- **CongWin** è una funzione dinamica della congestione percepita

In che modo il mittente percepisce la congestione?

- Evento di perdita = timeout *o* ricezione di 3 ACK duplicati
- Il mittente TCP riduce la frequenza d'invio (**CongWin**) dopo un evento di perdita

tre meccanismi:

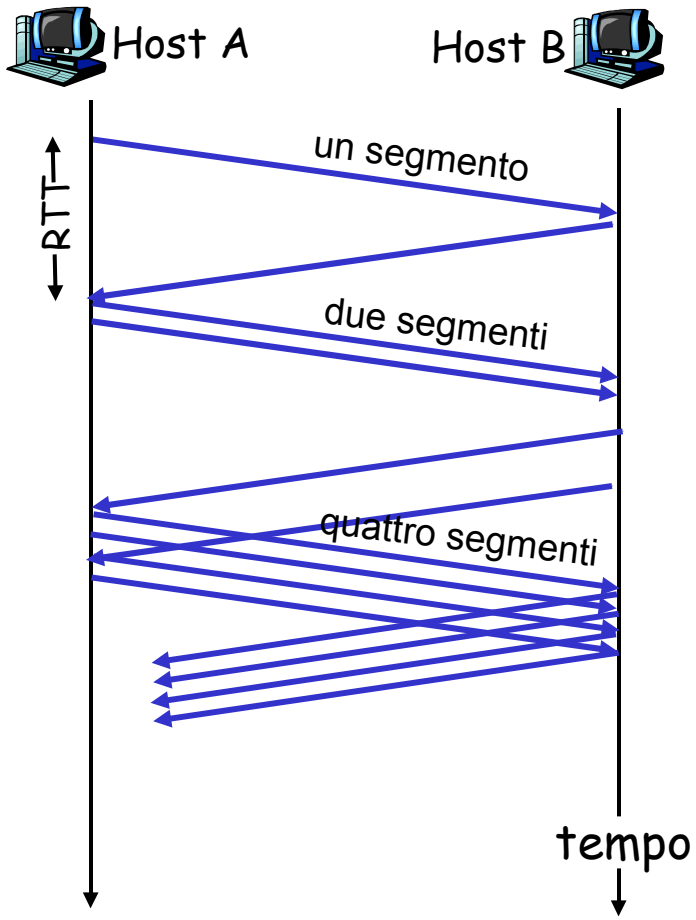
- AIMD
- Partenza lenta
- Reazione agli eventi di timeout

# Partenza lenta

- Quando si stabilisce una connessione, **`CongWin`** = 1 MSS
  - Esempio: MSS = 500 byte RTT = 200 msec
  - Frequenza iniziale = 20 kbps
- La larghezza di banda disponibile potrebbe essere >> MSS/RTT
  - Consente di raggiungere rapidamente una frequenza d'invio significativa
- Quando inizia la connessione, la frequenza aumenta in modo esponenziale, fino a quando non si verifica un evento di perdita

# Partenza lenta (continua)

- Quando inizia la connessione, la frequenza aumenta in modo esponenziale, fino a quando non si verifica un evento di perdita:
  - raddoppia **CongWin** a ogni RTT
  - ciò avviene incrementando **CongWin** per ogni ACK ricevuto
- Riassunto: la frequenza iniziale è lenta, ma poi cresce in modo esponenziale



# Affinamento

- Dopo 3 ACK duplicati:
  - **CongWin** è ridotto a metà
  - la finestra poi cresce linearmente
- Ma dopo un evento di timeout:
  - **CongWin** è impostata a 1 MSS;
  - poi la finestra cresce in modo esponenziale
  - fino a un valore di soglia, poi cresce linearmente

Filosofia:

- 3 ACK duplicati indicano

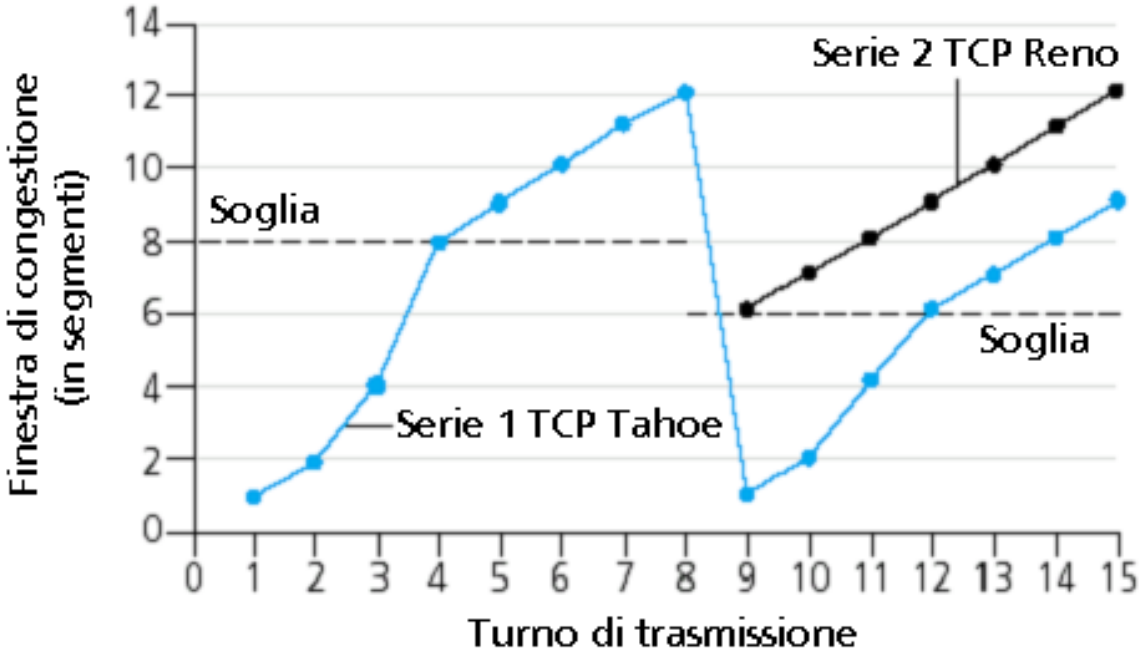
la capacità della rete di consegnare qualche segmento

- un timeout prima di 3 ACK duplicati è "più allarmante"

# Affinamento (continua)

D: Quando l'incremento esponenziale dovrà diventare lineare?

R: Quando **CongWin** raggiunge 1/2 del suo valore prima del timeout.




## Implementazione:

- Soglia variabile
- In caso di evento di perdita, la soglia è impostata a 1/2 di CongWin, appena prima dell'evento di perdita

# Riassunto: il controllo della congestione TCP

- Quando **CongWin** è sotto la soglia (**Threshold**), il mittente è nella fase di partenza lenta; la finestra cresce in modo esponenziale.
- Quando **CongWin** è sopra la soglia, il mittente è nella fase di congestion avoidance; la finestra cresce in modo lineare.
- Quando si verificano tre ACK duplicati, il valore di **Threshold** viene impostato a **CongWin/2** e **CongWin** viene impostata al valore di **Threshold**.
- Quando si verifica un timeout, il valore di **Threshold** viene impostato a **CongWin/2** e **CongWin** è impostata a 1 MSS.

# Controllo di congestione del mittente TCP

| Stato | Evento | Azione del mittente TCP | Commenti |
|---|---|---|---|
| Slow Start (SS) | Ricezione di ACK per dati precedente-mente non riscontrati | CongWin = CongWin + MSS,<br>If (CongWin > Threshold)<br>imposta lo stato a "Congestion Avoidance" | CongWin raddoppia a ogni RTT |
| Congestion Avoidance (CA) | Ricezione di ACK per dati precedente-mente non riscontrati | CongWin = CongWin + MSS * (MSS/CongWin) | Incremento additivo: CongWin aumenta di 1 MSS a ogni RTT |
| SS o CA | Rilevato un evento di perdita da tre ACK duplicati | Threshold = CongWin/2,<br>CongWin = Threshold,<br>imposta lo stato a "Congestion Avoidance" | Ripristino rapido con il decremento moltiplicativo. CongWin non sarà mai minore di 1 MSS |
| SS o CA | Timeout | Threshold = CongWin/2,<br>CongWin = 1 MSS,<br>imposta lo stato a "Slow Start" | Entra nello stato "Slow Start" |
| SS o CA | ACK duplicato | Incrementa il conteggio degli ACK duplicati per il segmento in corso di riscontro | CongWin e Threshold non variano |

# Throughput TCP

- Qual è il throughput medio di TCP in funzione della dimensione della finestra e di RTT?
  - Ignoriamo le fasi di partenza lenta
- Sia W la dimensione della finestra quando si verifica una perdita.
- Quando la finestra è W, il throughput è W/RTT
- Subito dopo la perdita, la finestra si riduce a W/2, il throughput a W/2RTT.
- Throughout medio: 0,75 W/RTT

# Futuro di TCP

- Esempio: segmenti da 1500 byte, RTT di 100 ms, vogliamo un throughput da 10 Gbps
- Occorre una dimensione della finestra pari a W = 83.333 segmenti in transito
- Throughput in funzione della frequenza di smarrimento:

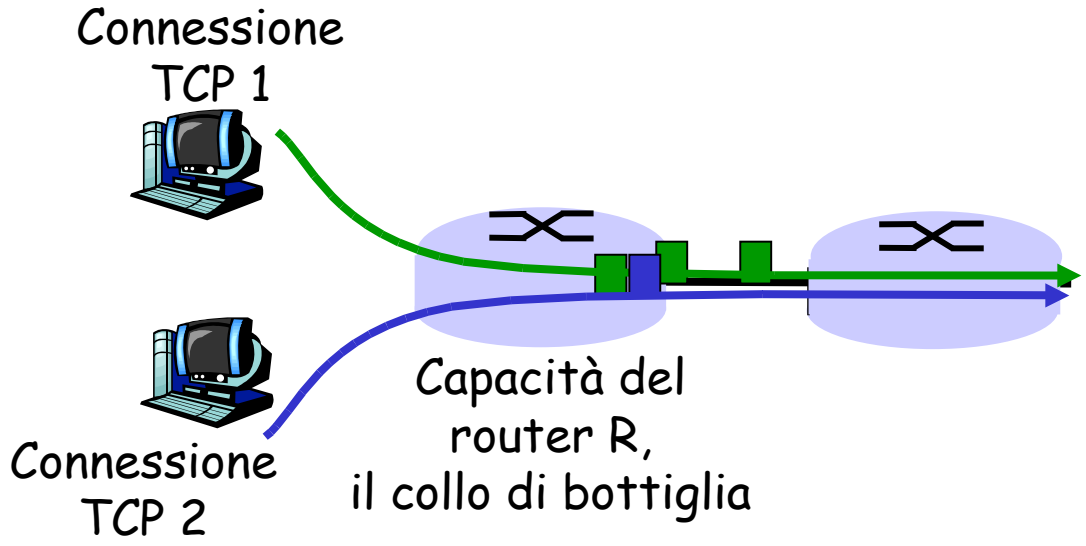
$$\frac{1.22 \cdot MSS}{RTT\sqrt{L}}$$

→ L = $2 \times 10^{-10}$ *Wow*

- Occorrono nuove versioni di TCP per ambienti ad alta velocità!

# Equità di TCP

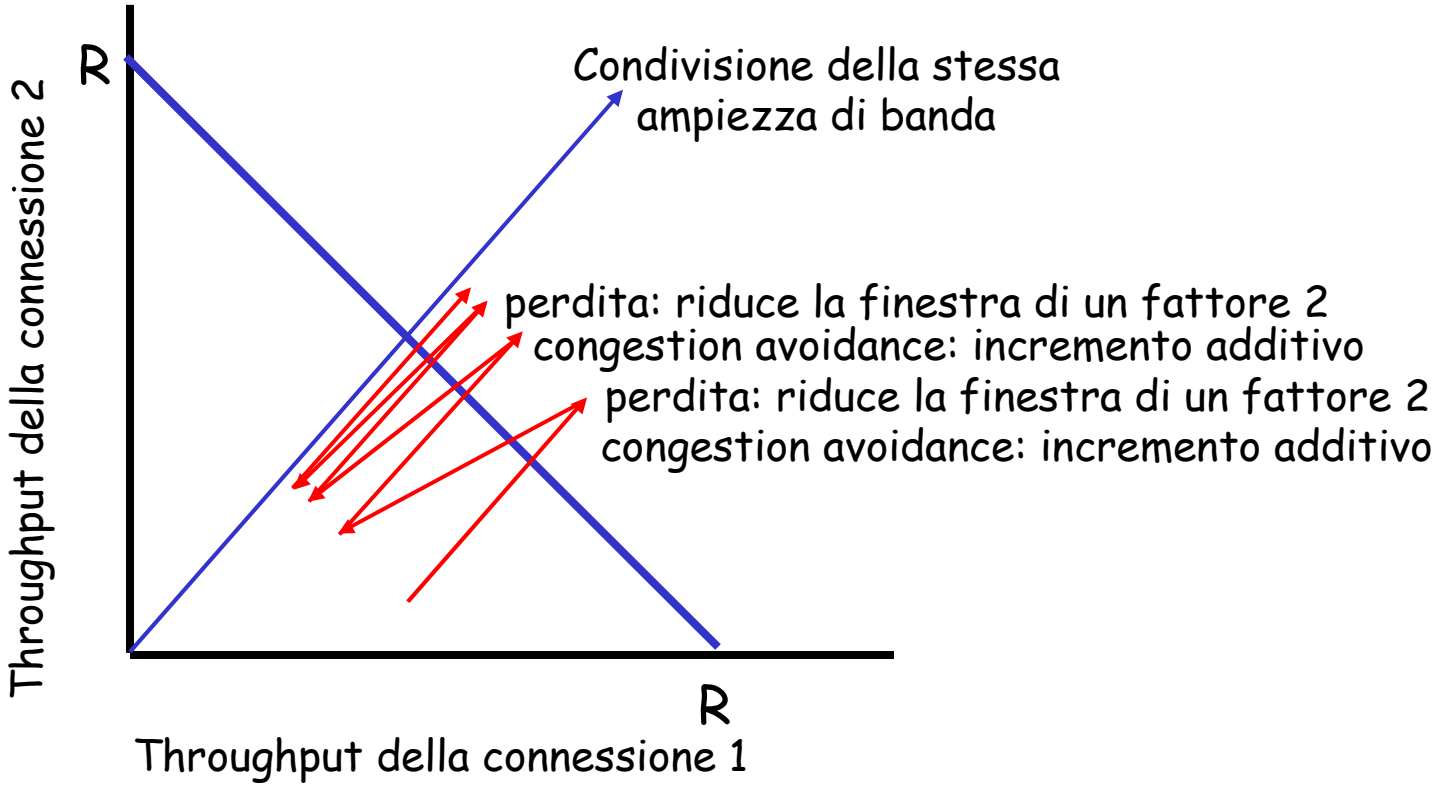
Equità: se K sessioni TCP condividono lo stesso collegamento con ampiezza di banda R, che è un collo di bottiglia per il sistema, ogni sessione dovrà avere una frequenza trasmissiva media pari a R/K.



# Perché TCP è equo?

Due connessioni in concorrenza tra loro:

- L'incremento additivo determina una pendenza pari a 1, all'aumentare del throughout
- Il decremento moltiplicativo riduce il throughput in modo proporzionale



# Equità

## Equità e UDP

- Le applicazioni multimediali spesso non usano TCP
  - non vogliono che il loro tasso trasmissivo venga ridotto dal controllo di congestione
- Utilizzano UDP:
  - immettono audio/video a frequenza costante, tollerano la perdita di pacchetti
- Area di ricerca: TCP friendly

## Equità e connessioni TCP in parallelo

- Nulla può impedire a un'applicazione di aprire connessioni in parallelo tra 2 host
- I browser web lo fanno
- Esempio: un collegamento di frequenza R che supporta 9 connessioni;
  - Se una nuova applicazione chiede una connessione TCP, ottiene una frequenza trasmissiva pari a R/10
  - Se la nuova applicazione chiede 11 connessioni TCP, ottiene una frequenza trasmissiva pari a R/2 !

# Capitolo 3: Riassunto

- principi alla base dei servizi del livello di trasporto:
  - multiplexing, demultiplexing
  - trasferimento dati affidabile
  - controllo di flusso
  - controllo di congestione
- implementazione in Internet
  - UDP
  - TCP

Prossimamente:

- lasciare la "periferia" della rete (livelli di applicazione e di trasporto)
- entrare nel "cuore" della rete