

# Introduzione alle reti

## Parte II

Reti di Calcolatori  
AA. 2023-2024

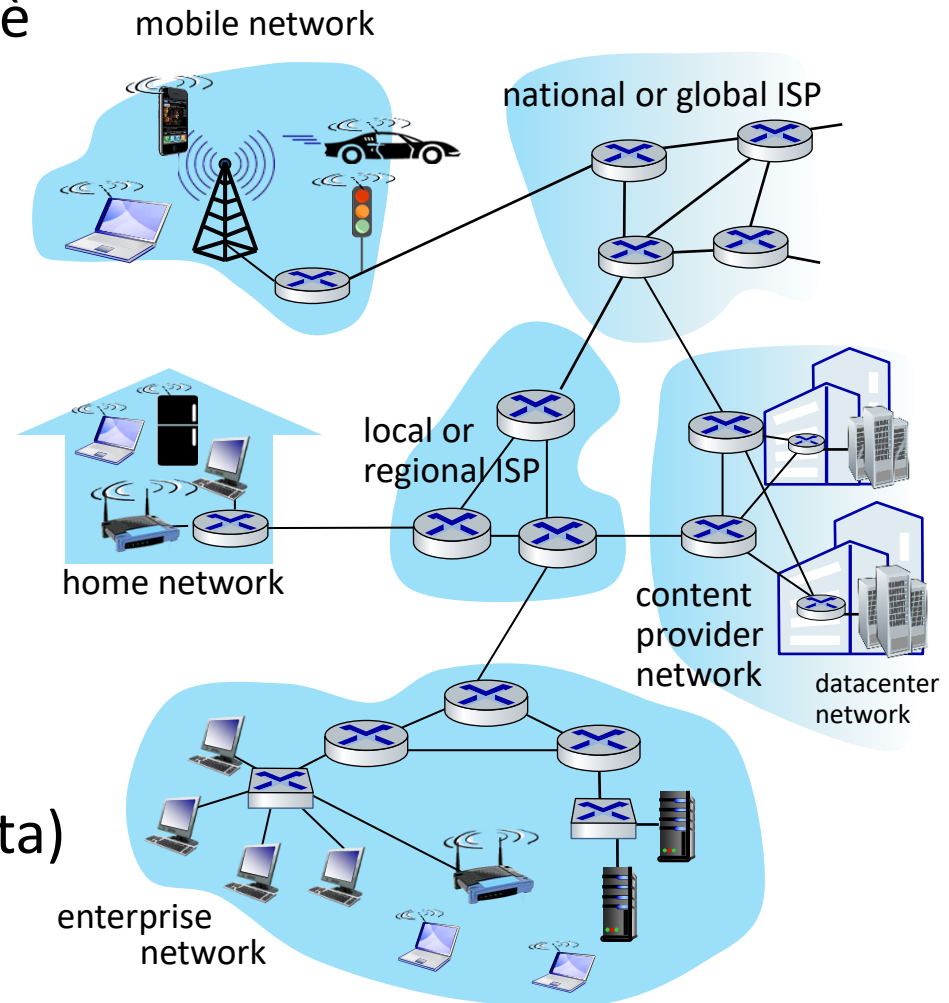
Docente: Federica Paganelli  
Dipartimento di Informatica  
[federica.paganelli@unipi.it](mailto:federica.paganelli@unipi.it)

# Oggi vedremo

- Commutazione di circuito vs commutazione di pacchetto
- Metriche di riferimento
- Ritardo in una rete a commutazione di pacchetto

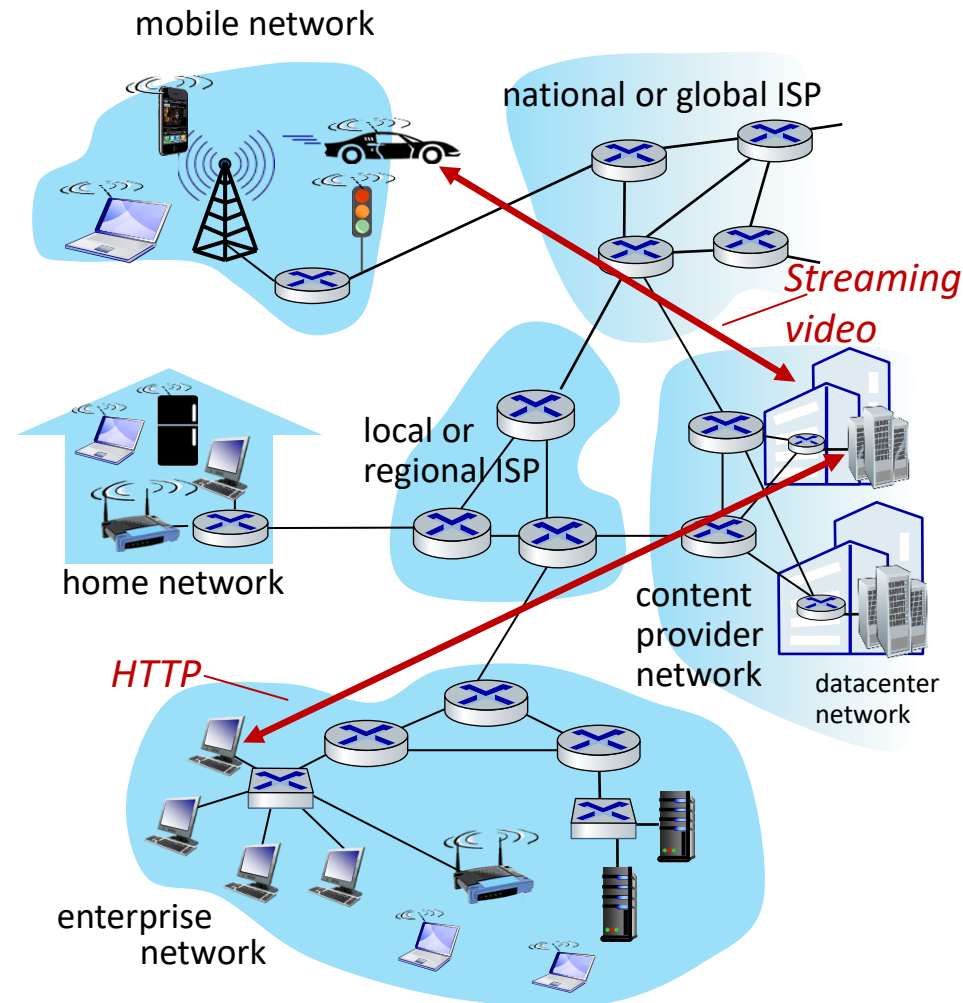
# Commutazione

- Una internet (o internetwork) è data dall'interconnessione di reti, composte da link e dispositivi capaci di scambiarsi informazioni.
- In particolare, i dispositivi si distinguono in:
  - Sistemi terminali (host)
  - Dispositivi di interconnessione che si trovano nel percorso (o rotta) tra i sistemi sorgente e destinazione nella comunicazione tra host.



# Commutazione

- Problema
  - Voglio stabilire una comunicazione (es. invio di un messaggio) tra due host
- Domande:
  - Come determinare il percorso da sorgente a destinazione?
  - Come effettuare trasferire delle informazioni dall porta di ingresso alla porta di uscita?



# Commutazione

**Tecniche di commutazione:** modalità con cui viene determinato il percorso sorgente-destinazione e vengono dedicate ad esso le risorse della rete

Meccanismi principali:

- Circuit-switched network – Reti a commutazione di circuito
- Packet-switched network – Reti a commutazione di pacchetto

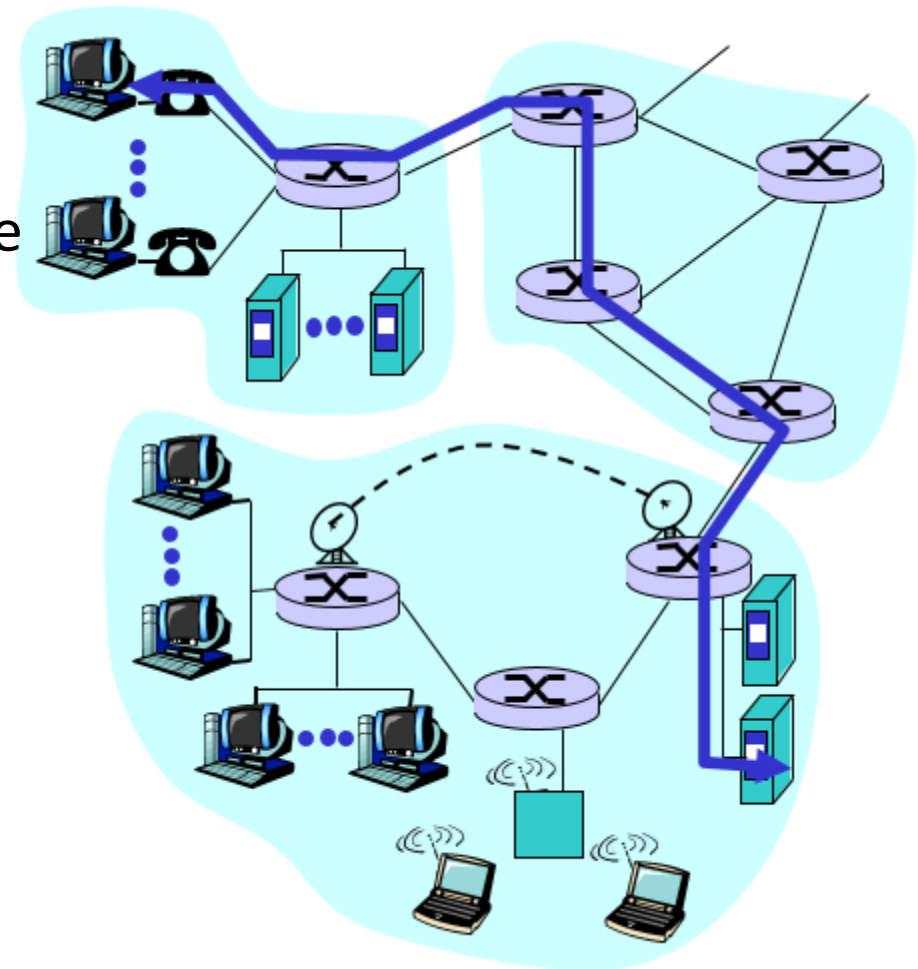
# Commutazione di circuito

- Instaura un **cammino dedicato** tra i due dispositivi che vogliono comunicare
  - l'instradamento avviene una volta per tutte prima della comunicazione, e l'attraversamento impegna in modo permanente ed esclusivo le risorse fisiche dei nodi della rete, es. telefonia



# Commutazione di circuito

- Il percorso viene stabilito all'inizio della comunicazione (setup)
- Sul percorso vengono dedicate risorse alla comunicazione (canale logico o circuito) in modo **esclusivo**
  - banda di frequenza o slot di trasmissione sui collegamenti
  - capacità commutative nei nodi
- le risorse allocate sono garantite per tutta la durata della comunicazione, indipendentemente dall'utilizzo effettivo



# Commutazione di circuito

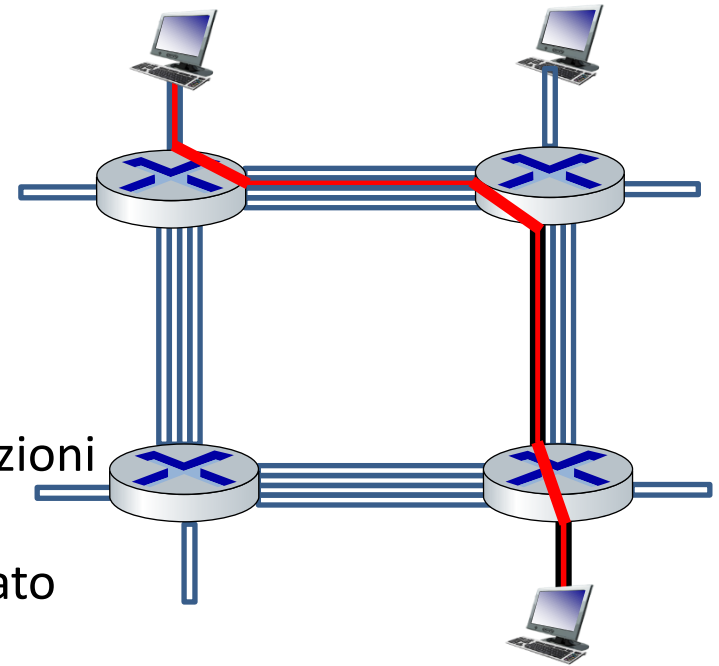
risorse end-end allocate e riservate alla  
“comunicazione” tra sorgente e destinazione

Nell'esempio ogni collegamento ha quattro circuiti.

La comunicazione ottiene il 2° circuito nel collegamento superiore e il 1° circuito nel collegamento a destra.

Risorse dedicate: nessuna condivisione prestazioni simili a quelle di un circuito (garantite).

- segmento di circuito inattivo se non utilizzato dalla chiamata (nessuna condivisione)

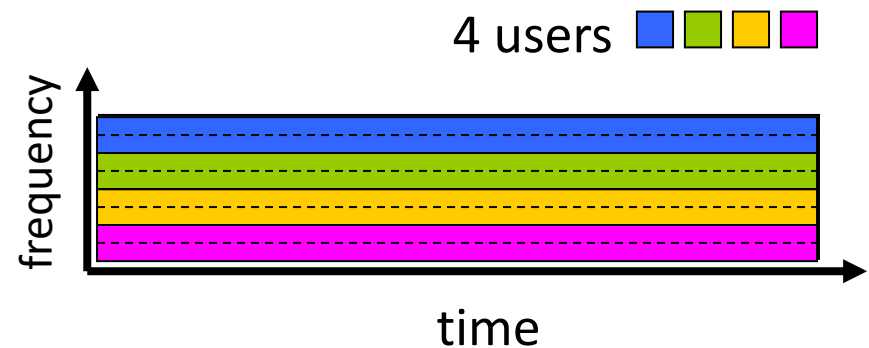




# Commutazione di circuito: FDM e TDM

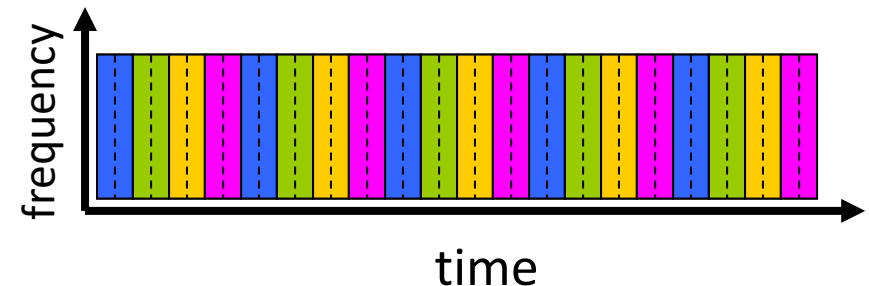
## Frequency Division Multiplexing (FDM)

- frequenze ottiche, elettromagnetiche suddivise in bande di frequenza (strette).
- Ad ogni comunicazione è assegnata una certa banda



## Time Division Multiplexing (TDM)

- tempo suddiviso in slot di tempo
- ogni comunicazione ha uno o più slot periodici assegnati
- può trasmettere alla velocità massima di una banda di frequenza (più ampia), ma solo durante i suoi intervalli di tempo



# Commutazione di circuito

## Svantaggi

- Necessaria una fase di instaurazione (setup) della comunicazione
- le risorse rimangono inattive se non utilizzate (non c'è condivisione)
  - Ad es. silenzi durante conversazione telefonica

## Vantaggi

- Performance (garantita)
- Tariffazione facile
- Esempio: rete Telefonica fissa tradizionale (Public Switched Telephone Network)

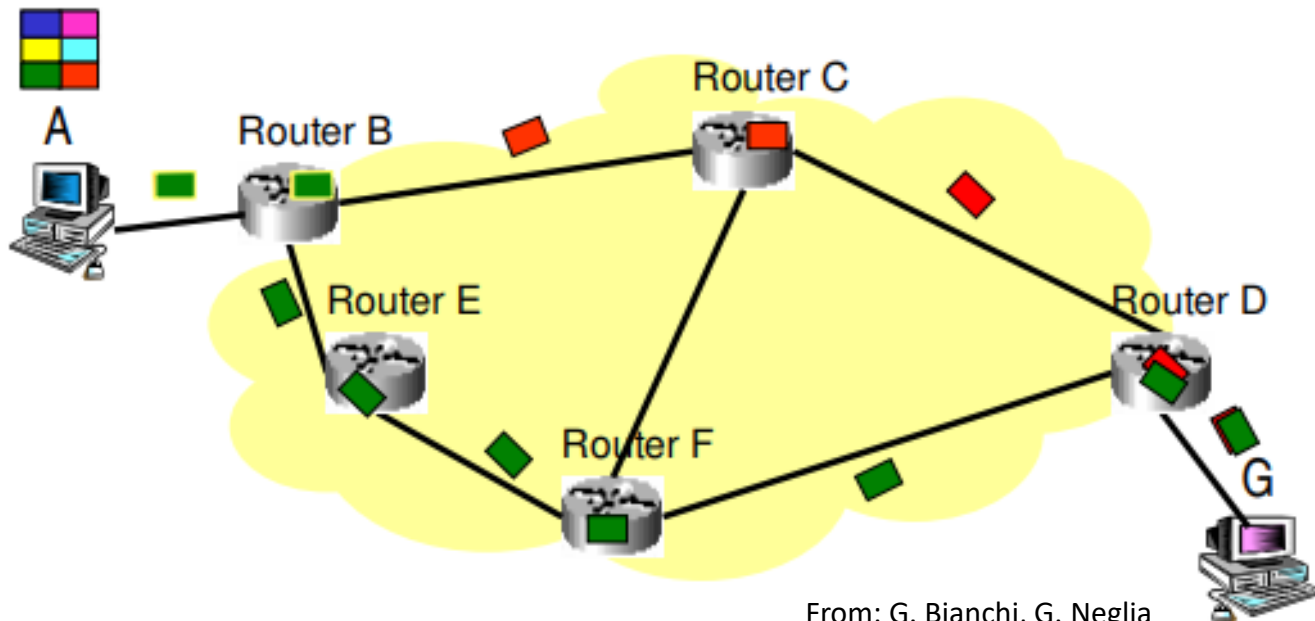
On (activity) period

OFF period

# Commutazione di pacchetto

1. Il flusso di dati punto-punto viene suddiviso in *pacchetti*

- I pacchetti degli utenti A e G *condividono* le risorse di rete
- ogni pacchetto è instradato singolarmente e indipendentemente dagli altri pacchetti della stessa comunicazione (possono seguire lo stesso percorso o percorsi diversi)
- Le risorse vengono usate *a seconda delle necessità*

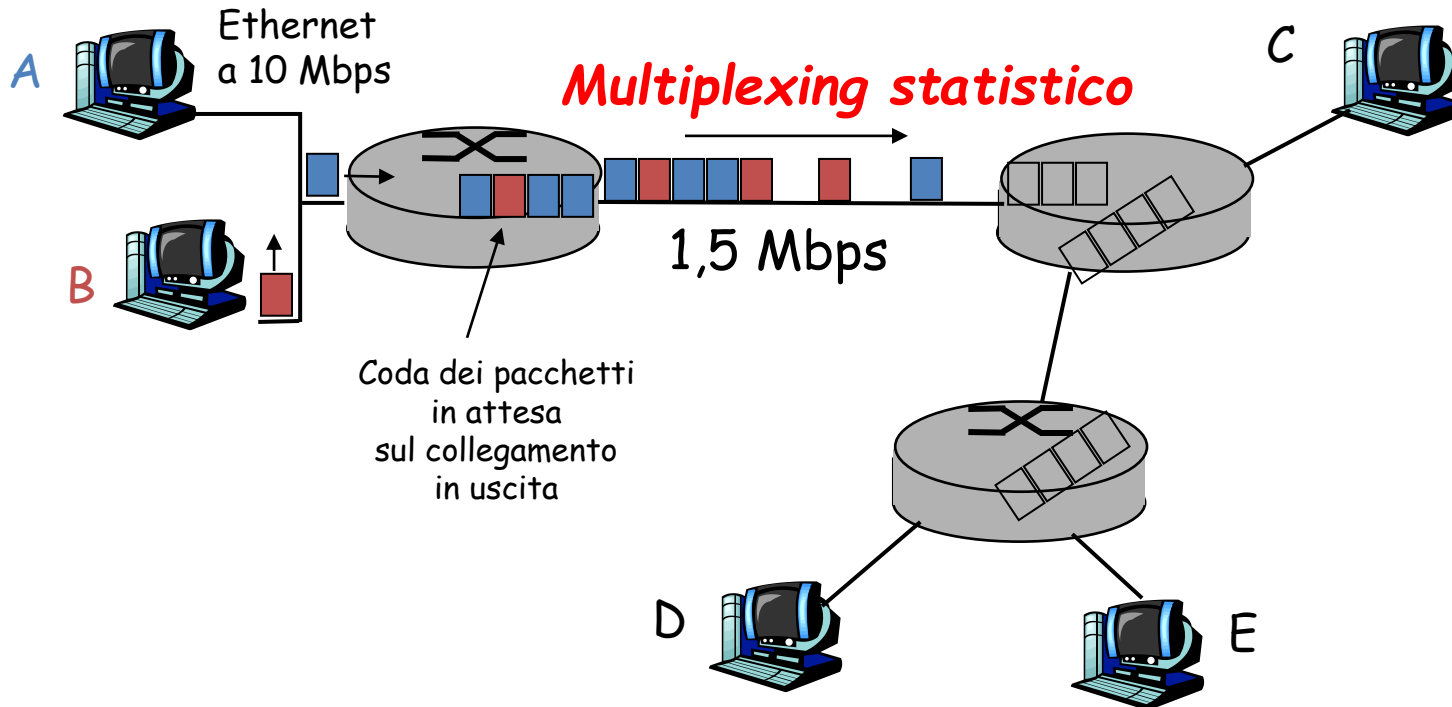


# Commutazione di pacchetto

## 2. Trasmissione store and forward

- Il commutatore (es. router) deve ricevere l'intero pacchetto prima di poter cominciare a trasmettere il primo bit del pacchetto sul collegamento in uscita -> Ritardo di store and forward
- Attesa dei pacchetti in code di output (buffer) -> Ritardi di coda
- I buffer hanno dimensione finita -> Perdita di pacchetti

# Commutazione di pacchetto



- pacchetto dopo pacchetto la capacità trasmissiva dei collegamenti sarà condivisa solo tra gli utenti che devono trasmettere sul collegamento
- La sequenza dei pacchetti A e B sul collegamento a 1,5 Mbps non segue uno schema prefissato -> **condivisione di risorse su richiesta** (detta anche multiplexing statistico delle risorse)

# Commutazione di pacchetto

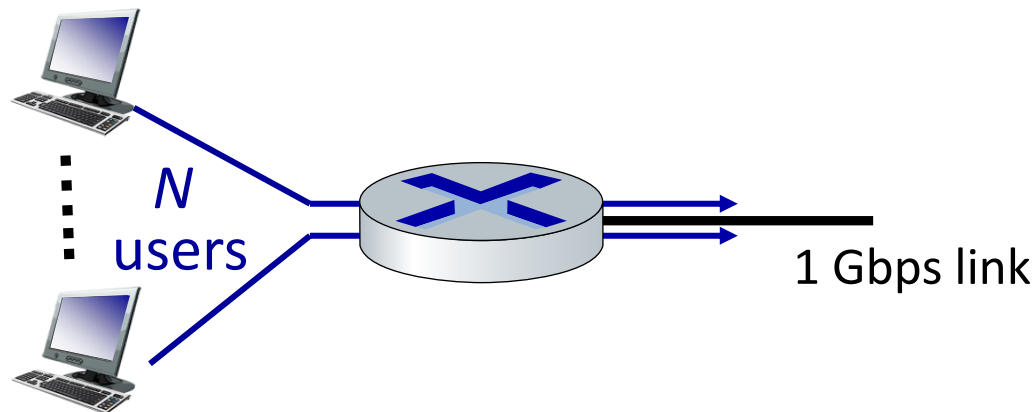
- Non c'è un canale dedicato, gli host comunicano scambiandosi pacchetti
- I router possono memorizzare i pacchetti nelle code (buffer)
- Se il collegamento tra i due router è usato alla massima capacità, gli ulteriori pacchetti che arrivano vengono messi in coda

## Contesa per le risorse

- La richiesta di risorse può eccedere il quantitativo disponibile
- congestione: accodamento dei pacchetti, attesa per l'utilizzo del collegamento
- Utilizzo efficiente delle risorse ma non c'è garanzia nelle prestazioni (es. ritardi)

# circuit switching vs. packet switching

- esempio
  - $N=35$  utenti condividono un link 1 Gbps
  - Ogni utente genera 100 Mb/s quando è “attivo”
  - Ogni utente è attivo 10% del tempo



# circuit switching vs. packet switching

- **Circuit Switching**

Con la commutazione di circuito, occorre riservare 100Mbps per ogni utente, in ogni istante.

Il link di output può quindi supportare simultaneamente al massimo  $1\text{Gbps}/100\text{Mbps} = 10$  utenti

- **Packet Switching**

- 10 o meno utenti simultaneamente attivi -> banda richiesta  $\leq 1$  Mbps, ritardo trascurabile
- Più di 10 utenti attivi simultaneamente -> frequenza aggregata di arrivo dei dati supera la capacità del collegamento in uscita e quindi si incrementa il ritardo di accodamento
- N.B. la probabilità che ci siano 10 o meno utenti attivi contemporaneamente è 0.9996
- con alta probabilità la tecnica del packet switching supporta tutti i 35 utenti senza introdurre alcun ritardo!

La commutazione di pacchetto consente a più utenti di utilizzare la rete



# ...ricapitolando

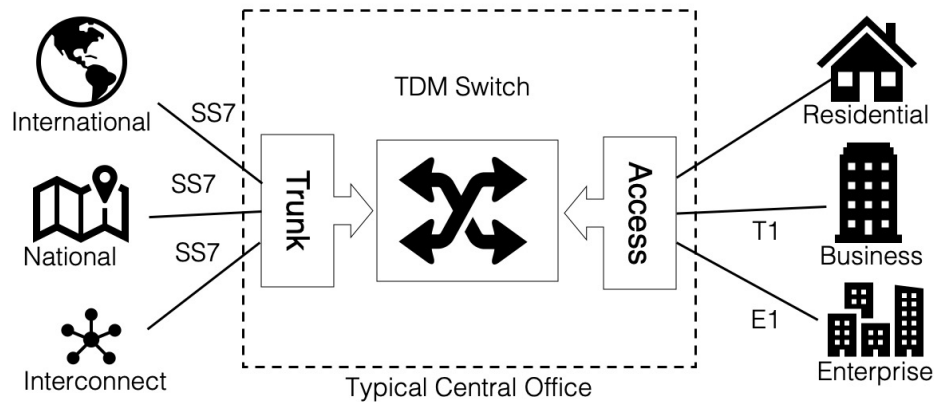
## Circuit Switching

- **Vantaggi**
  - Prestazioni garantite (es. Latenza end-to-end)
  - Tecnologie di switching efficienti
- **Svantaggi**
  - E' richiesta la segnalazione per instaurare il circuito (configurare le tabelle di switching)
  - Sottoutilizzo delle risorse in presenza di traffico a raffica (burst) e rate di traffico variabile

## Packet Switching

- **Vantaggi**
  - Risorse trasmissive usate solo se necessario
  - Segnalazione non richiesta
- **Svantaggi**
  - Tecnologie di inoltro non efficienti (necessità di selezionare l'uscita per ogni pacchetto)
  - Ritardi variabili nel percorso end-to-end (jitter)
    - Tempo di elaborazione ai router (routing table lookup)
    - Accodamento ai router
  - protocolli necessari per un trasferimento dati affidabile, controllo della congestione

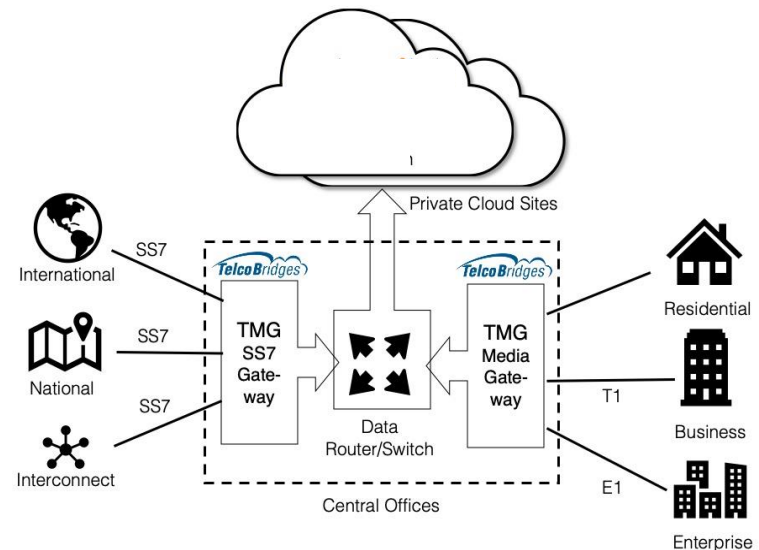
## Network Transformation - Before



Gli operatori di telefonia stanno migrando le reti PSTN verso sistemi All-IP

[Da: Case Study - HKT IP Net Transformation - TelcoBridge](#)

## Network Transformation - After



1. Qual è un vantaggio della commutazione di pacchetto rispetto alla commutazione di circuito?



- ☐ Le reti a commutazione di pacchetto sono meno suscettibili al jitter rispetto alle reti a commutazione di circuito.
- ☐ Le reti a commutazione di pacchetto possono utilizzare in modo efficiente le risorse di una rete di un provider di servizi.
- ☐ Le reti a commutazione di pacchetto garantiscono prestazioni migliori rispetto alle reti a commutazione di circuito (es. latenza di un pacchetto da sorgente a destinazione)

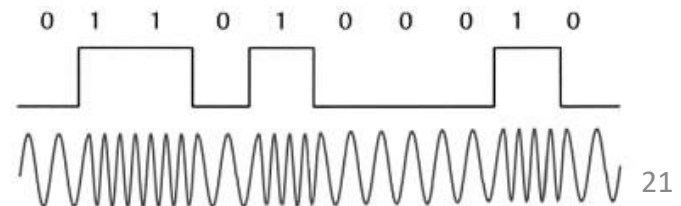
Invia

# Metriche

- Come misurare le prestazioni della rete
- Ampiezza di banda e bitrate
- Throughput
- Latenza
- Prodotto  $\text{rate} \times \text{ritardo}$

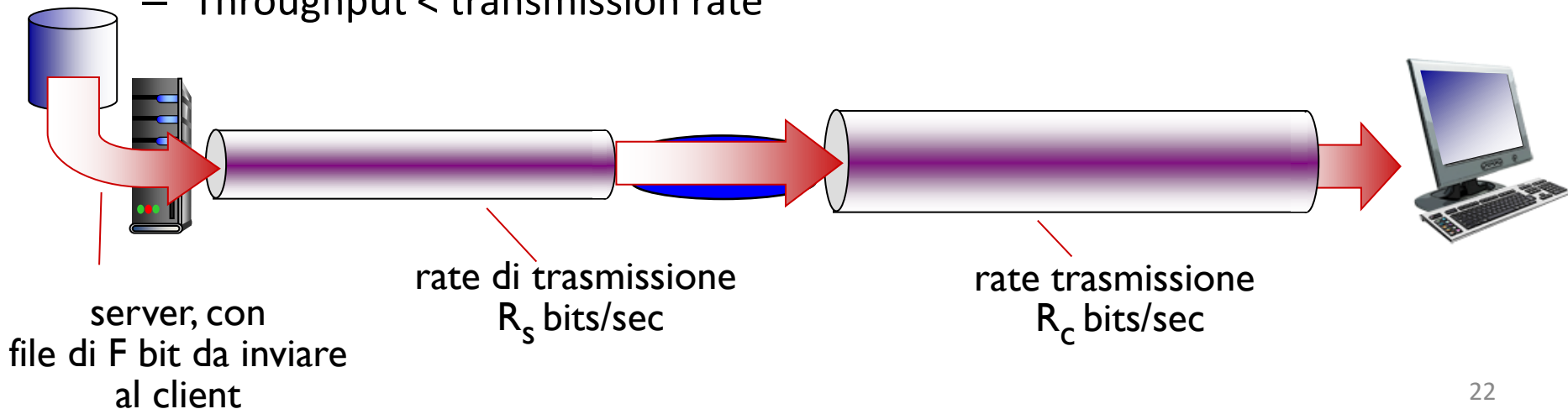
# Larghezza di banda e bit rate

- Velocità di trasmissione (transmission rate)
  - quantità di dati (bits) che possono essere trasmessi (“inseriti nella linea”) nell'unità di tempo (bits/secondo or bps) su un certo collegamento
- Larghezza di banda (Bandwidth)
  - larghezza dell'intervallo di frequenze utilizzato dal sistema trasmissivo. Si misura in Hertz (Hz – cycles per second)
- **N.B. Larghezza di banda e bit rate non sono la stessa cosa**
- Transmission rate dipende dalla larghezza di banda ma è influenzato anche da altri fattori (tecnica trasmissiva usata, rumore, ecc.)
- Esempio: il rate di un link Fast Ethernet è di 100 Mbps, ovvero tale rete può inviare al massimo 100 Mbps



# Throughput

- **Quantità di dati che possono essere trasmessi con successo dalla sorgente alla destinazione in un certo intervallo di tempo**
- **bitrate e throughput non sono la stessa cosa.**
  - Throughput indica la velocità con cui trasferiamo i dati, al netto di perdite sulla rete, duplicazioni, protocolli, ecc.
  - Il rate è una misura della potenziale velocità di un link, il throughput è una misura dell'effettiva velocità di un link (quanto velocemente riusciamo a inviare i dati in realtà)
  - $\text{Throughput} < \text{transmission rate}$



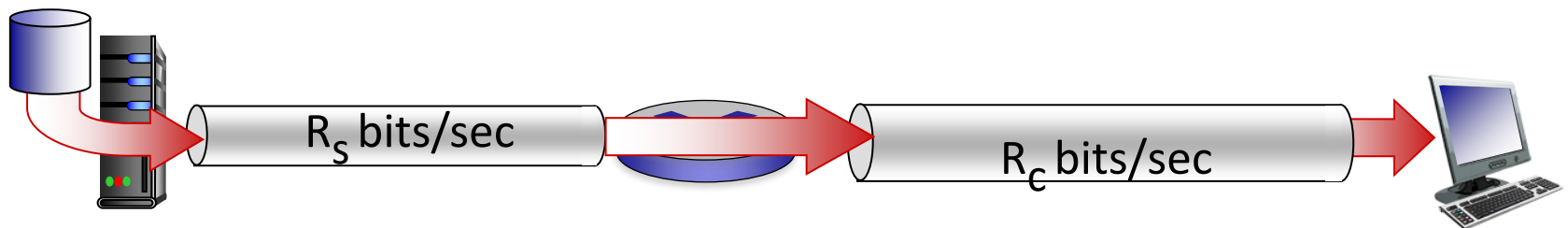
# Throughput

- NB. Il throughput dipende non solo dalla velocità di trasmissione del collegamento ma anche dalla quantità di dati (flussi di traffico aggiuntivi rispetto a quello di interesse), **effetti dei protocolli**, ecc...
- La definizione esatta e metodologia di misura dipendono dal sistema che stiamo osservando (System UnderTest – SUT)
- Ad es. throughput di un dispositivo di interconnessione:  
*The maximum rate at which none of the offered frames are dropped by the device*  
<https://www.ietf.org/rfc/rfc1242.txt>
- Più avanti parleremo di throughput di una connessione TCP...

# Throughput

In un percorso da una sorgente a una destinazione un pacchetto può passare attraverso numerosi link, ognuno con throughput diverso

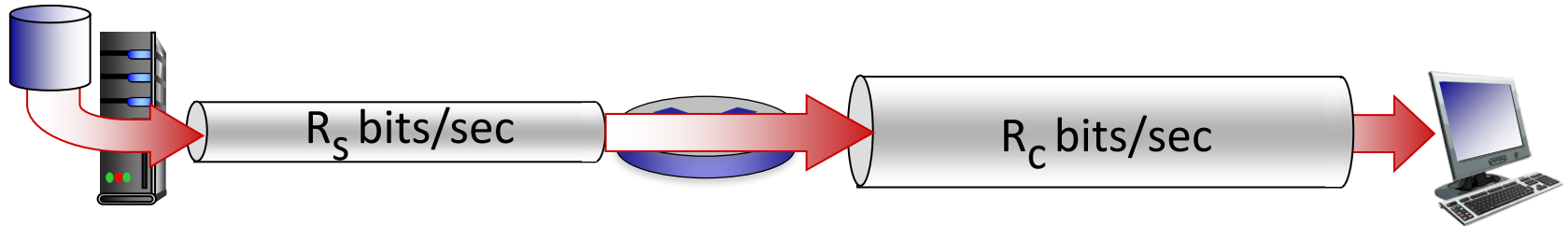
Come si determina il throughput dell'intero percorso (end to end)?



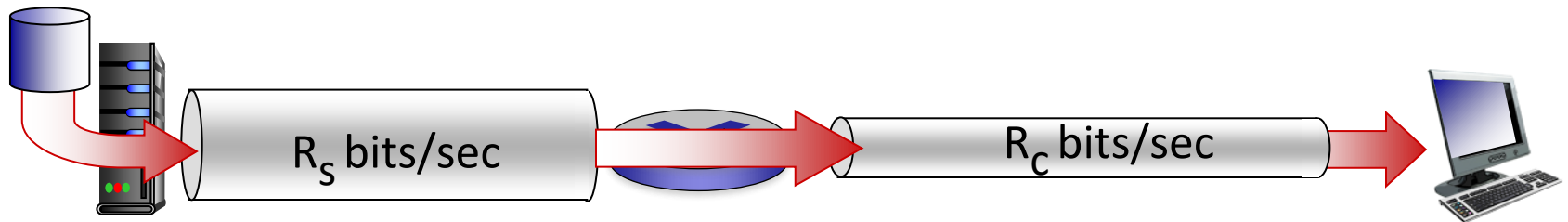


# Throughput

$R_s < R_c$  Qual è il throughput end-to-end?



$R_s > R_c$  Qual è il throughput end-to-end?



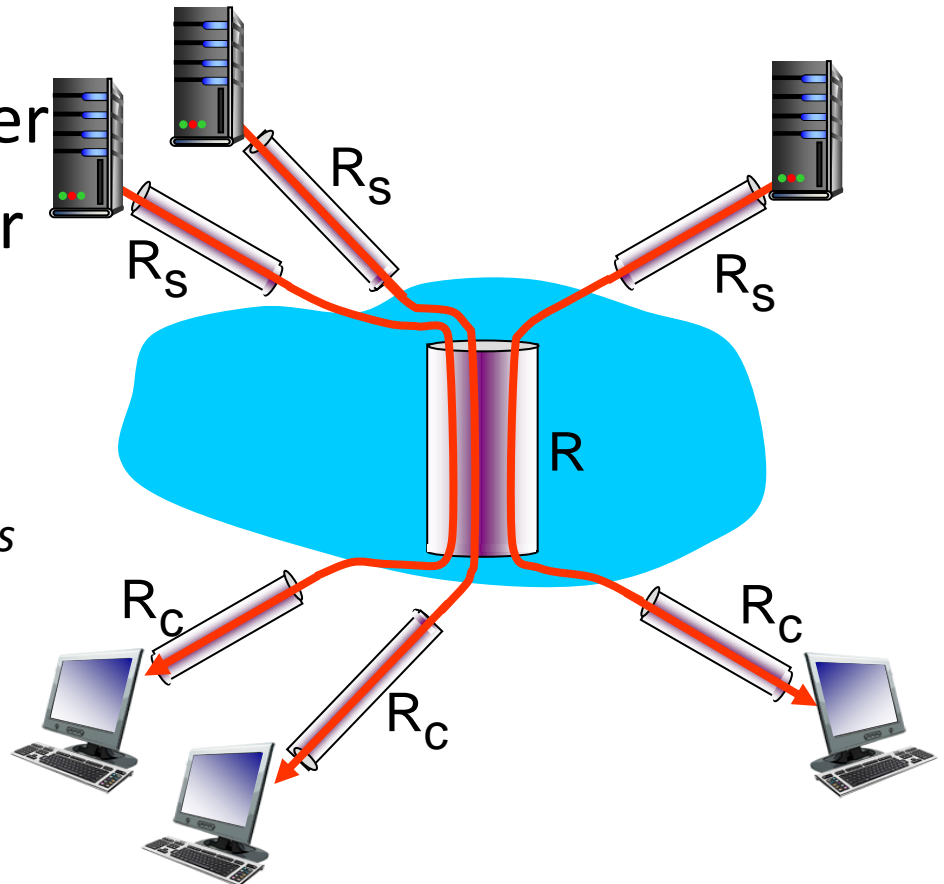
**End to end Throughput =  $\min(R_s, R_c)$**

***bottleneck link***

link sul path end-to-end che limita il throughput end-to-end

# Throughput: scenario Internet

- Ipotesi: 10 collegamenti tra coppie di client-server
- **end-end throughput** per connessione:  
 $\min(R_c, R_s, R/10)$
- in pratica spesso  $R_c$  or  $R_s$  sono il collo di bottiglia (rete di accesso)



Ipotesi: 10 connessioni sfruttano (equamente) il collegamento di backbone con rate  $R$  bits/sec

# Latenza (ritardo)

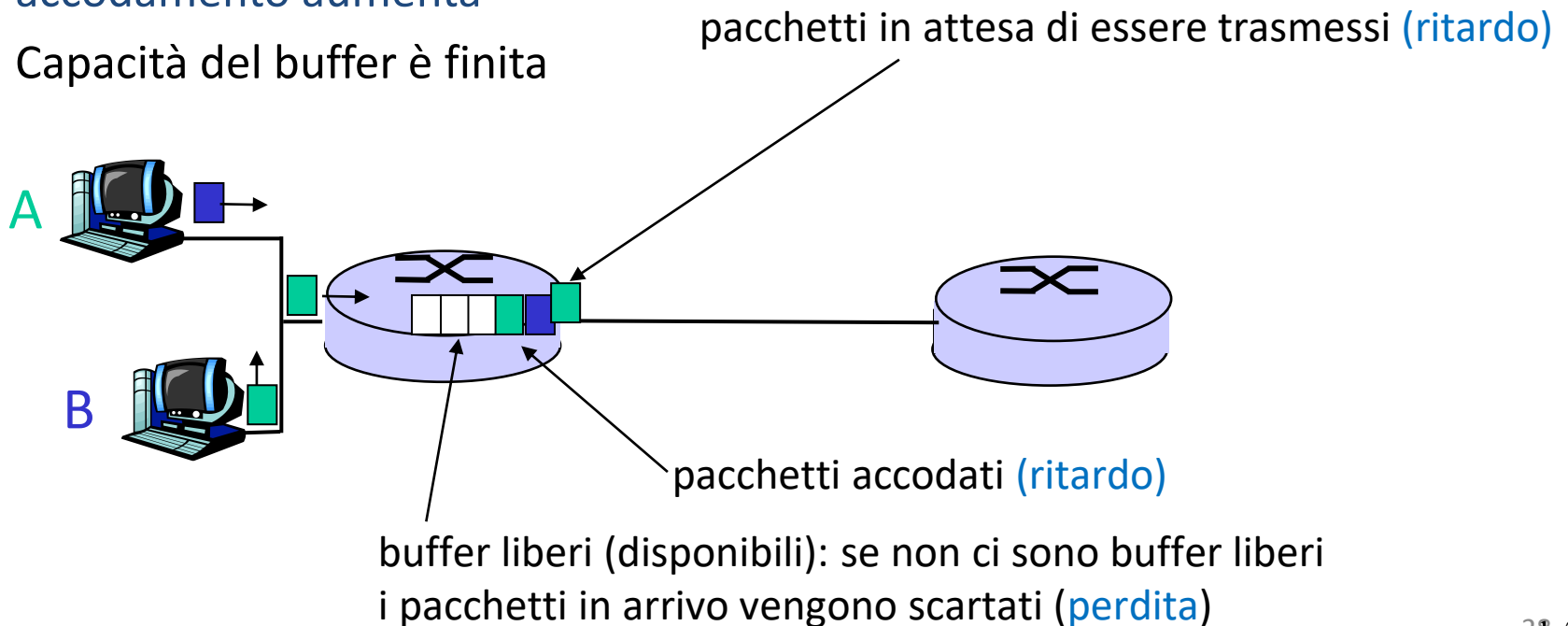
- Latenza: tempo richiesto affinché un messaggio arrivi a destinazione dal momento in cui il primo bit parte dalla sorgente

Da cosa è determinato il valore della latenza in una rete a commutazione di pacchetto?

# Come si verificano ritardi e perdite?

## I pacchetti *si accodano* nei buffer dei router

- Il ritardo di accodamento dipende dal tasso di arrivo dei pacchetti e dalla capacità del collegamento in uscita
- I pacchetti si accodano, in attesa del proprio turno
- All'aumentare del tasso di arrivo dei pacchetti sul collegamento il ritardo di accodamento aumenta
- Capacità del buffer è finita



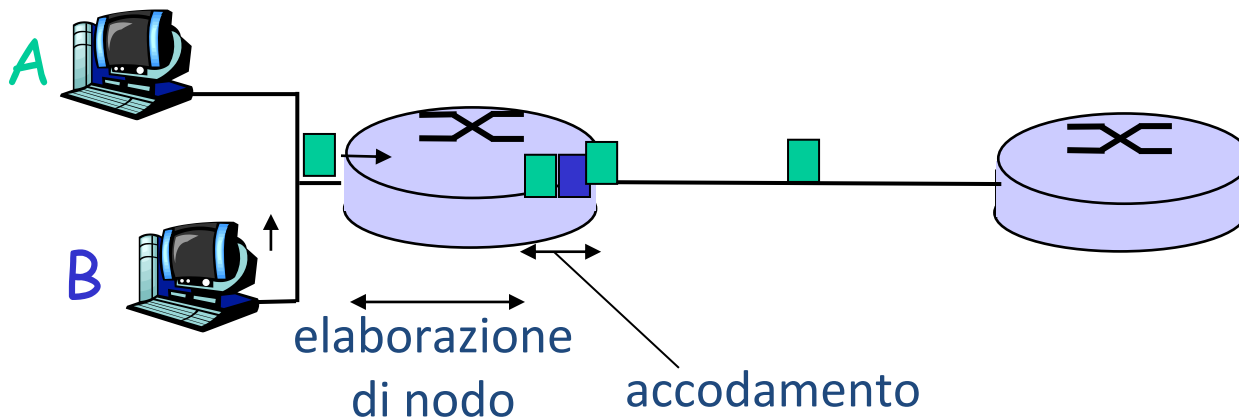
# Quattro cause di ritardo per i pacchetti

## 1. Ritardo di elaborazione del nodo

- controllo errori sui bit
- determinazione del canale di uscita

## 2. Ritardo di accodamento

- attesa di trasmissione
- Dipende da intensità e tipo di traffico (che influiscono sul numero di pacchetti in coda nel buffer)



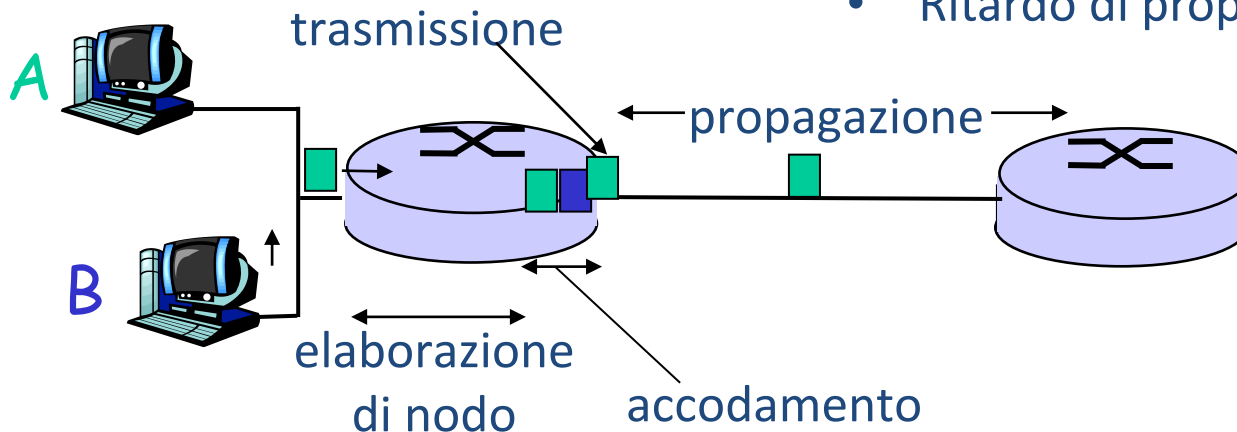
# Quattro cause di ritardo per i pacchetti

## 3. Ritardo di trasmissione ( $L/R$ )

- Tempo impiegato per trasmettere un pacchetto sul link
- $R$  = rate (velocità) di trasmissione del collegamento (in bps)
- $L$  = lunghezza del pacchetto (in bit)
- Ritardo di trasmissione =  $L/R$

## 4. Ritardo di propagazione ( $d/s$ )

- Tempo impiegato da 1 bit per essere propagato da un nodo all'altro
- $d$  = lunghezza del collegamento fisico
- $s$  = velocità di propagazione del mezzo ( $\sim 3 \cdot 10^8$  m/sec)
- Ritardo di propagazione =  $d/s$



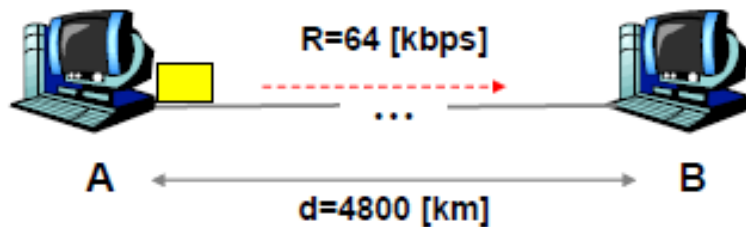
# Esempio

- Invio di 1 file di 1 Mbit su un link di lunghezza di 4800 km

$$d_{\text{propagation}} = \frac{d \text{ [m]}}{s \text{ [m/sec]}} = \frac{4800 \cdot 10^3 \text{ [m]}}{3 \cdot 10^8 \text{ [m/sec]}} = 0.016 \text{ [sec]}$$

- Velocità di trasmissione 64 kbps

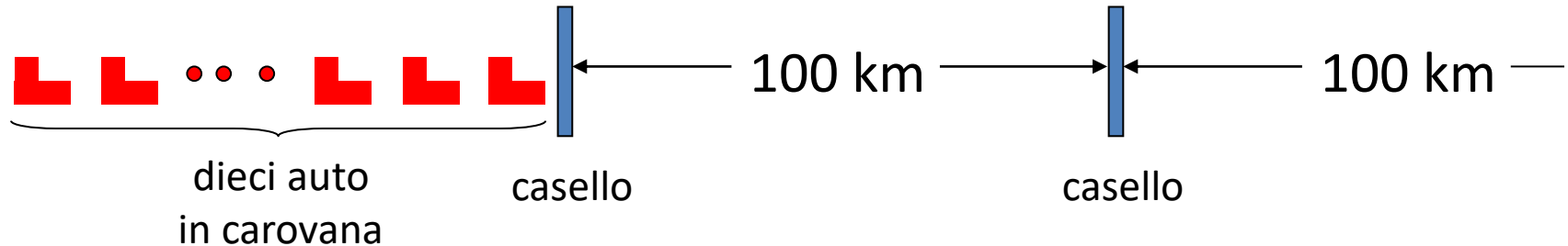
$$d_{\text{transmission}} = \frac{L \text{ [bits]}}{R \text{ [bps]}} = \frac{10^6 \text{ [bits]}}{64 \cdot 10^3 \text{ [bps]}} = 15.625 \text{ [sec]}$$



- Velocità di trasmissione 1 Gbps

$$d_{\text{transmission}} = \frac{L \text{ [bits]}}{R \text{ [bps]}} = \frac{10^6 \text{ [bits]}}{10^9 \text{ [bps]}} = 0.001 \text{ [sec]}$$

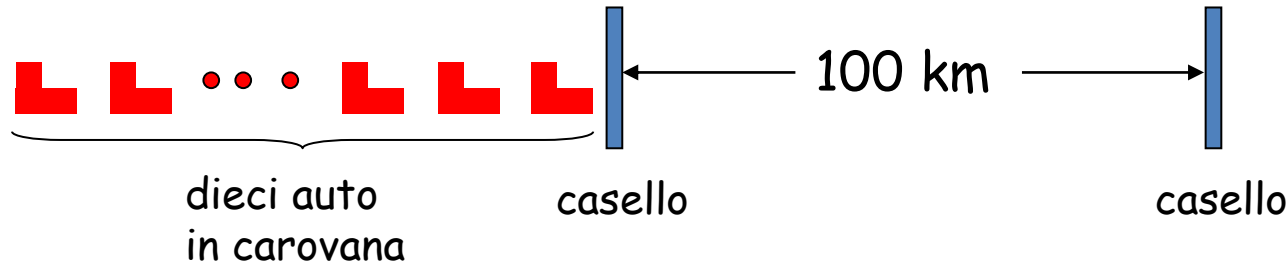
# L'analogia del casello autostradale



- Le automobili viaggiano (ossia “si propagano”) alla velocità di 100 km/h
- Il casello fa transitare (ossia “trasmette”) un’auto ogni 12 secondi
- D: auto~bit; carovana ~ pacchetto
- Quanto tempo occorre perché le 10 auto in carovana si trovino di fronte al secondo casello?



# L'analogia del casello autostradale



- Le auto ora “si propagano” alla velocità di 1000 km/h
- Al casello adesso occorre 1 min per servire ciascuna auto
- **D: le prime auto arriveranno al secondo casello prima che le ultime auto della carovana lascino il primo?**

# Ricapitolando...

Latenza = ritardo di propagazione + ritardo di trasmissione + ritardo di accodamento + ritardo di elaborazione

$$\text{Ritardo} = \text{Ritardo}_{pr} + \text{Ritardo}_{tr} + \text{Ritardo}_{acc} + \text{Ritardo}_{el}$$

- **Ritardo di propagazione:** tempo che serve a un bit per viaggiare da un punto A a un punto B sul mezzo trasmissivo. Dipende dalla distanza (valori tipici da pochi microsecondi a centinaia di millisecondi)

$$\text{Ritardo}_{pr} = \text{distanza} / \text{velocità}_{propagazione}$$

- **Ritardo di trasmissione:** tempo necessario per immettere un pacchetto sulla linea

$$\text{Ritardo}_{tr} = \text{lunghezza del pacchetto} / \text{rate}_{trasmissione}$$

- **Ritardo di accodamento:** tempo in cui il pacchetto attende nella coda del router (dipende dalla congestione)
- **Ritardo di elaborazione:** tempo per l'elaborazione al nodo intermedio (in genere pochi microsecondi, o anche meno)

# Ritardo end-to-end

Il ritardo end-to-end viene calcolato come somma dei ritardi dei singoli collegamenti. Il ritardo di ogni collegamento è pari alla somma dei ritardi di elaborazione  $\text{Ritardo}_{el}$ , di accodamento, di propagazione  $\text{Ritardo}_{prop}$  e di trasmissione  $\text{Ritardo}_{tr}$ .

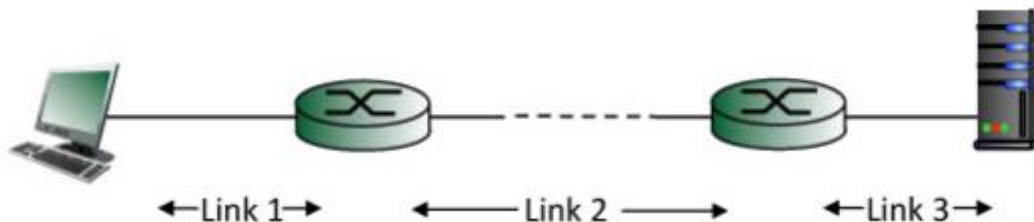
Trascurando ritardo di elaborazione e ritardo di accodamento:

$$\text{Ritardo}_{link1} = \text{Ritardo}_{tr1} + \text{Ritardo}_{prop1}$$

$$\text{Ritardo}_{link2} = \text{Ritardo}_{tr2} + \text{Ritardo}_{prop2}$$

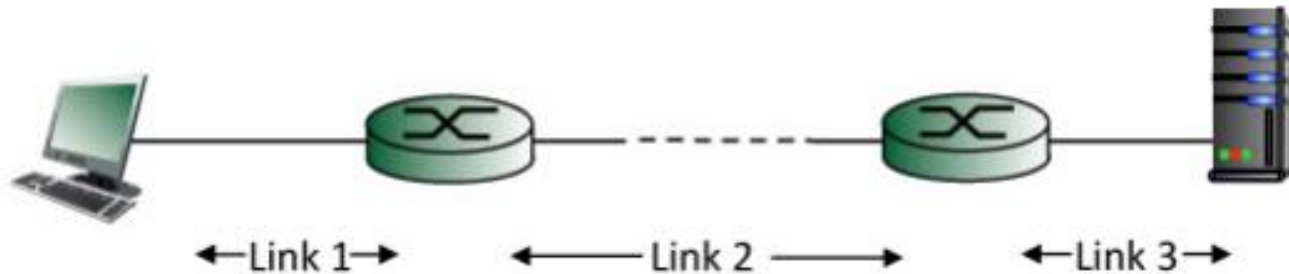
$$\text{Ritardo}_{link3} = \text{Ritardo}_{tr3} + \text{Ritardo}_{prop3}$$

$$\text{Ritardo}_{end-to-end} = \text{Ritardo}_{link1} + \text{Ritardo}_{link2} + \text{Ritardo}_{link3}$$



# Esercizio

- Considerare la topologia di rete a tre link della figura seguente



- Calcolare il ritardo end-to-end tra i due host nell'ipotesi che:
  - la dimensione del pacchetto sia pari a  $L = 1000$  bit
  - il link 1 abbia rate di trasmissione  $R1 = 100$  Mbps e lunghezza  $D1 = 100$  m
  - il link 2 abbia rate di trasmissione  $R2 = 2$  Mbps e lunghezza  $D2 = 2500$  km
  - il link 3 abbia rate di trasmissione  $R3 = 10$  Mbps e lunghezza  $D3 = 1$  km
  - la velocità di propagazione nei tre link sia pari a  $V = 2.5 \cdot 10^8$  m/s
- Qual è il throughput massimo end-to-end?

# Traceroute

- È un comando che traccia un pacchetto dal tuo computer all'host e mostra anche il ritardo e il numero di passaggi (salti) necessari per raggiungerlo dal mittente per ogni passaggio.

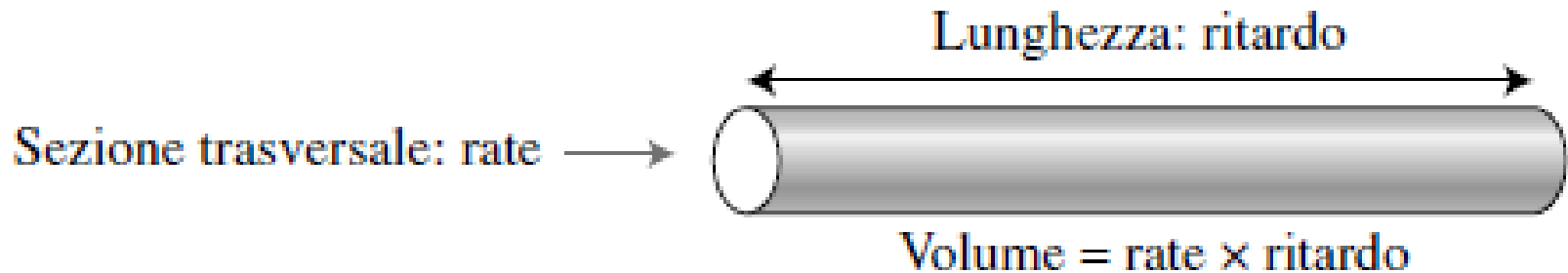
```
C:\Users\federica>tracert www.corriere.it

Traccia instradamento verso na-eu-corriere.map.fastly.net [151.101.241.50]
su un massimo di 30 punti di passaggio:

 1      2 ms      2 ms      2 ms  192.168.1.1
 2      *        13 ms     11 ms  151.7.198.15
 3     12 ms     11 ms     11 ms  151.7.32.22
 4     12 ms     11 ms     11 ms  151.7.32.94
 5     16 ms     14 ms     15 ms  151.6.2.5
 6     30 ms     17 ms     15 ms  151.6.1.182
 7     14 ms     14 ms     14 ms  fastly2.mix-it.net [217.29.67.78]
 8     14 ms     16 ms     14 ms  151.101.241.50
```

- Traceroute effettua tre volte l'esperimento -> 3 misure di latenza
- \* Perdita di pacchetti in rete
- **Notare la variazione nel tempo dei ritardi!**
- su windows il comando è tracert

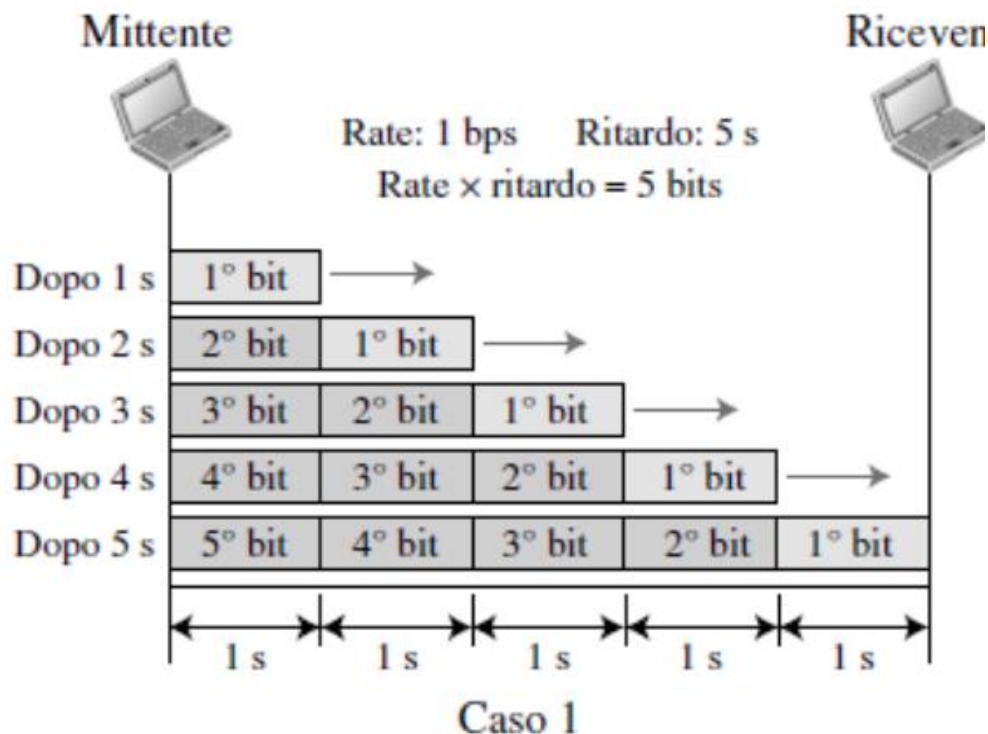
# Prodotto rate-ritardo



- Possiamo pensare al link tra due punti come a un tubo.
- La sezione trasversale del tubo rappresenta il rate e la lunghezza rappresenta il ritardo.
- Possiamo dire che il volume del tubo definisce il prodotto rate-ritardo
- Prodotto rate-ritardo: numero massimo di bit che il link può contenere ad un certo istante

# Prodotto rate-ritardo

- Supponiamo di avere un link con rate di 1 bps e un ritardo di 5 secondi
- Cosa rappresenta il prodotto  $\text{rate} \times \text{ritardo}$ ?



- Massimo numero di bit che possono riempire il collegamento
- Non possono esserci più di 5 bit contemporaneamente sul link