

Appunti di Fondamenti di Comunicazioni e Internet

Canale 1 · Reti · Prof.ssa Francesca Cuomo

Capitolo 3: Ritardi, perdite e throughput

Autore: Tommaso C.

Appunti tratti dalle lezioni in aula e dal materiale del corso

Argomenti: Quattro componenti del ritardo · Trasmissione e propagazione
Diagramma spazio-tempo · Ritardo end-to-end · Andata e ritorno (RTT)
Pacchetti su più collegamenti · Intensità di traffico
Perdita di pacchetti · Throughput e collo di bottiglia

Indice

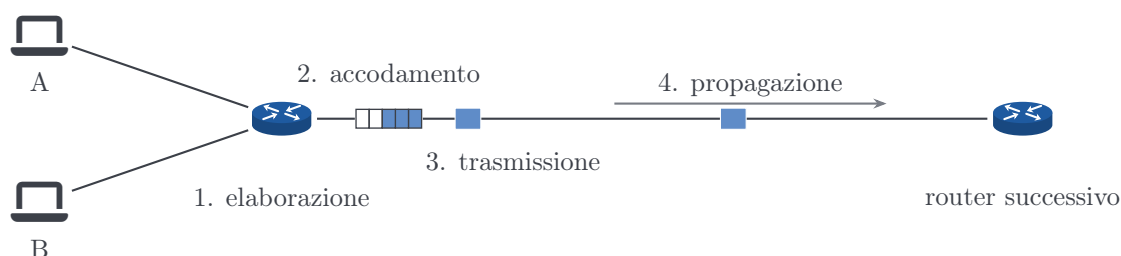
1	Le quattro componenti del ritardo	1
1.1	Elaborazione	1
1.2	Accodamento	1
1.3	Trasmissione	2
1.4	Propagazione	3
1.5	Che cosa si può ridurre	3
2	Trasmissione e propagazione	4
2.1	Ritardo end-to-end	6
2.2	Più pacchetti su collegamenti diversi	7
3	Intensità di traffico e perdita di pacchetti	9
3.1	Perdita di pacchetti	9
4	Throughput e collo di bottiglia	10
5	Esercizi	12
6	Soluzioni	15

1 Le quattro componenti del ritardo

Definizione – Ritardo di nodo

Un pacchetto che attraversa un nodo (router) e il collegamento in uscita verso il nodo successivo subisce quattro ritardi: di **elaborazione**, di **accodamento**, di **trasmissione** e di **propagazione**. Il ritardo complessivo è la somma:

$$d_{\text{nodo}} = d_{\text{elab}} + d_{\text{coda}} + d_{\text{trasm}} + d_{\text{prop}}.$$



I pacchetti di A e di B entrano nel router e devono uscire sullo stesso collegamento, come auto che attraversano lo stesso incrocio. Le quattro componenti sono molto diverse fra loro e si studiano una alla volta.

1.1 Elaborazione

Definizione – Ritardo di elaborazione

Il **ritardo di elaborazione** d_{elab} è il tempo che il nodo impiega per esaminare il pacchetto: legge nell'intestazione le informazioni sulla destinazione e decide su quale collegamento inoltrarlo (**instradamento**). Comprende eventuali altri controlli, come quello degli errori sui bit.

Il nodo non analizza tutto il pacchetto, solo le informazioni utili all'instradamento. d_{elab} è di solito molto piccolo e dipende dalla potenza di calcolo (CPU) del router: pochi microsecondi o meno. Negli esercizi spesso si trascura.

1.2 Accodamento

Definizione – Ritardo di accodamento

Il **ritardo di accodamento** d_{coda} (*queuing delay*) è il tempo che un pacchetto passa in coda, nel buffer del nodo, aspettando che il collegamento in uscita sia libero. Dipende da quanti pacchetti lo precedono, cioè dal **livello di congestione** del nodo, e non si conosce a priori.

Due pacchetti diretti allo stesso collegamento non possono essere trasmessi insieme, come due auto non possono occupare lo stesso tratto di corsia. Parte prima quello arrivato prima (FIFO, Capitolo 2); se arrivano esattamente nello stesso istante e non c'è una priorità, l'ordine è casuale.

Proposizione – Attesa in coda

Pacchetti arrivati insieme a un nodo vuoto, con elaborazione trascurabile: il k -esimo pacchetto trasmesso aspetta la trasmissione di tutti quelli che lo precedono,

$$d_{\text{coda}}^{(k)} = \sum_{j=1}^{k-1} \frac{L_j}{R} \quad \text{e, con lunghezze uguali,} \quad d_{\text{coda}}^{(k)} = (k-1) \frac{L}{R}.$$

Il primo pacchetto parte subito, il secondo aspetta L_1/R , il terzo $L_1/R + L_2/R$, e così via. Chi è in coda aspetta solo che il precedente sia stato *trasmesso*, non che sia arrivato a destinazione. I pacchetti hanno lunghezze diverse: trovarsi davanti un pacchetto lungo è come trovarsi in coda dietro un camion invece che dietro una Smart.

Nella commutazione di pacchetto a nessun utente si dice in anticipo quanti altri trasmetteranno: per questo d_{coda} non si può calcolare a priori. Dipende dal traffico (Sezione 3), non dalla strada.

1.3 Trasmissione

Definizione – Ritardo di trasmissione

Il **ritardo di trasmissione** è il tempo necessario per immettere sul collegamento tutti i bit del pacchetto. Per un pacchetto di L bit su un collegamento a R bps:

$$d_{\text{trasm}} = \frac{L}{R}.$$

È il tempo L/R della commutazione di pacchetto (Capitolo 2): cresce con la lunghezza del pacchetto e diminuisce se la linea è più veloce.

1.4 Propagazione

Definizione – Ritardo di propagazione

I bit viaggiano su un segnale (onda elettromagnetica, luce nella fibra) che si propaga nel mezzo con velocità finita s , la **velocità di propagazione**, in metri al secondo. Il **ritardo di propagazione** è il tempo che un bit impiega per percorrere il collegamento di lunghezza d :

$$d_{\text{prop}} = \frac{d}{s}.$$

s dipende solo dal **mezzo**: la luce nel vuoto va a circa 3×10^8 m/s, nei mezzi cablati come il rame il segnale va a circa 2×10^8 m/s. Con $s = 2 \times 10^8$ m/s ogni chilometro costa 5 μ s. Un'onda nell'acqua, come quella di un sasso in uno stagno, è molto più lenta.

1.5 Che cosa si può ridurre

Ritardo	Dipende da	Ordine di grandezza	Come si riduce
d_{elab}	CPU del router	μ s o meno	di solito si trascura
d_{coda}	traffico	variabile	trasmettere a rete scarica
$d_{\text{trasm}} = L/R$	L e R	rilevante se R è basso	aumentare R
$d_{\text{prop}} = d/s$	d e mezzo	da μ s a centinaia di ms	ridurre la distanza d

Tabella 1: Le quattro componenti del ritardo.

Osservazione – Quali leve sono davvero disponibili

- **Accodamento**: si trascura solo se non c'è altro traffico (sei solo sulla strada). Spostare un trasferimento di notte funziona per scaricare un file, non per un video o un servizio interattivo.
- **Trasmissione**: non si trascura. Diminuire L la riduce solo matematicamente: vuol dire trasmettere meno dati.
- **Propagazione**: il mezzo non si cambia, ma si può accorciare il percorso. Per i servizi a bassa latenza, come i videogiochi, conviene un server vicino.

2 Trasmissione e propagazione

Proposizione – Due tempi diversi

- $d_{\text{trasm}} = L/R$ dipende dalla lunghezza del pacchetto e dal bit rate, non dalla distanza fra i nodi.
- $d_{\text{prop}} = d/s$ dipende dalla distanza e dal mezzo, non dalla lunghezza del pacchetto né dal bit rate.

R (bit al secondo) e s (metri al secondo) sono grandezze molto diverse.

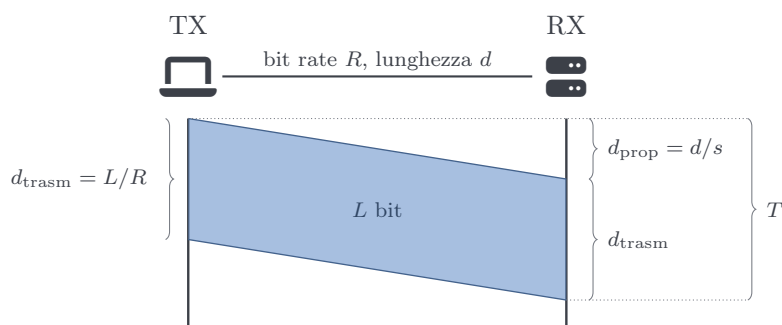
Definizione – Diagramma spazio-tempo

Il **diagramma spazio-tempo** disegna una trasmissione con lo spazio in orizzontale, una linea verticale per ogni nodo, e il tempo che scorre verso il basso. Un pacchetto è una **banda obliqua**: sulla linea del trasmettitore è alta quanto il tempo di trasmissione, dal primo all'ultimo bit, e ogni bit scende in diagonale fino al ricevitore nel tempo di propagazione.

Proposizione – Dal primo bit trasmesso all'ultimo ricevuto

Su un collegamento, fra la trasmissione del primo bit e la ricezione dell'ultimo passa

$$T = d_{\text{prop}} + d_{\text{trasm}} = \frac{d}{s} + \frac{L}{R}.$$



L'ultimo bit lascia il trasmettitore dopo L/R e, come tutti gli altri, impiega d/s per arrivare: le linee dei bit sono parallele. Al ricevitore la banda ha la stessa altezza L/R , spostata in basso di d/s .

Nel diagramma si vede subito l'effetto dei parametri:

- se R aumenta la banda si accorcia, perché la trasmissione dura meno; se R diminuisce si allunga;

- se d aumenta ogni bit arriva più in basso; dimezzando d si dimezza d_{prop} , mentre d_{trasm} non cambia.

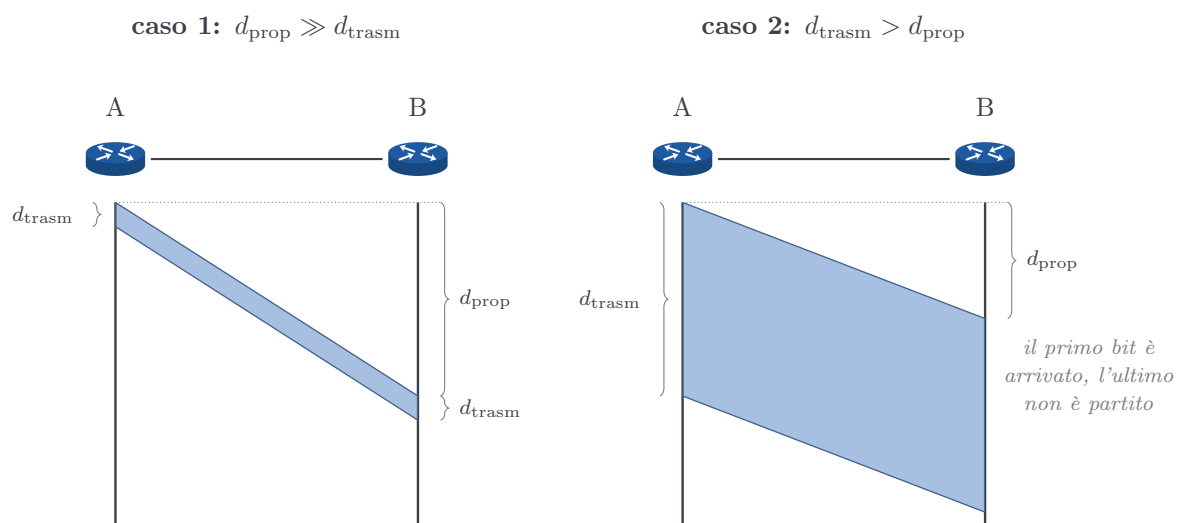
Un esempio numerico è l'Esercizio 3.

Esempio – L'analogia del casello

Dieci auto in colonna (i bit) formano un pacchetto; i caselli, a 100 km l'uno dall'altro, sono i router. Il casello “trasmette” le auto una alla volta, le auto “si propagano” sull'autostrada. Quanto tempo serve perché le 10 auto siano davanti al secondo casello?

	Caso 1	Caso 2
Servizio al casello	un'auto ogni 12 s	un'auto al minuto
Velocità delle auto	100 km/h	1000 km/h
Trasmissione della colonna	$10 \cdot 12 \text{ s} = 2 \text{ min}$	$10 \cdot 1 \text{ min} = 10 \text{ min}$
Propagazione di un'auto	$100/100 \text{ h} = 60 \text{ min}$	$100/1000 \text{ h} = 6 \text{ min}$
Colonna al 2° casello	$2 \text{ min} + 60 \text{ min} = 62 \text{ min}$	$10 \text{ min} + 6 \text{ min} = 16 \text{ min}$

Nel caso 1 pesa la propagazione. Nel caso 2 la prima auto, servita in un minuto e in viaggio per sei, arriva al secondo casello dopo 7 min, quando tre auto sono ancora in coda al primo.



Nel caso 2 il primo bit arriva al router successivo mentre gli ultimi bit non hanno ancora lasciato il primo: in partenza si crea una coda. L'Esercizio 1 confronta i due tempi su un collegamento reale.

2.1 Ritardo end-to-end

Proposizione – Ritardo end-to-end

Un pacchetto di L bit attraversa N collegamenti uguali (bit rate R , lunghezza d) e $N - 1$ nodi store-and-forward, in ciascuno dei quali resta $t_{\text{nodo}} = d_{\text{elab}} + d_{\text{coda}}$:

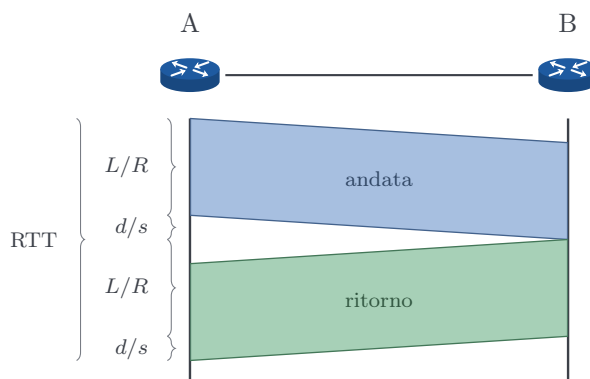
$$T = N \left(\frac{L}{R} + \frac{d}{s} \right) + (N - 1) (d_{\text{elab}} + d_{\text{coda}}).$$

Su ogni collegamento il pacchetto viene prima trasmesso e poi si propaga; in ogni nodo aspetta elaborazione e coda. Senza propagazione si ritrova la formula T_{PS} del Capitolo 2; con collegamenti diversi si sommano i singoli L/R_i e d_i/s .

Proposizione – Andata e ritorno

A invia a B un pacchetto di L bit su un collegamento lungo d a R bps; B lo riceve tutto e poi lo rimanda ad A alla stessa velocità. Dalla trasmissione del primo bit in A alla ricezione dell'ultimo bit in A passa il **tempo di andata e ritorno** (*round trip time*, RTT):

$$\text{RTT} = 2 \left(\frac{L}{R} + \frac{d}{s} \right).$$



B fa da nodo store-and-forward: è la formula end-to-end con $N = 2$ collegamenti e nessuna permanenza nel nodo. In questo scambio l'RTT è la latenza del Capitolo 1, il tempo fra l'invio e la ricezione della risposta: conta in ogni interazione con un server o con un altro utente.

Osservazione – Bit rate o distanza

I due termini dell'RTT pongono due limiti diversi:

- $2L/R$ resta a qualunque distanza: con R basso ridurre d non basta, e chiedere un RTT minore di $2L/R$ porta a una distanza negativa;
- $2d/s$ resta a qualunque bit rate: con R alto l'RTT è quasi tutto propagazione, e per ridurlo bisogna avvicinare i due estremi.

Conviene agire sul termine che pesa di più (Esercizio 4).

2.2 Più pacchetti su collegamenti diversi**Proposizione – Pacchetti in fila su più collegamenti**

All'istante 0 il primo nodo ha in coda alcuni pacchetti di L bit per la stessa destinazione. Il percorso ha N collegamenti con bit rate R_i e ritardo di propagazione $\tau_i = d_i/s$; i nodi sono store-and-forward, senza altro traffico e con elaborazione trascurabile.

- Il primo pacchetto è ricevuto completamente a destinazione all'istante

$$T_1 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{L}{R_i} + \tau_i \right).$$

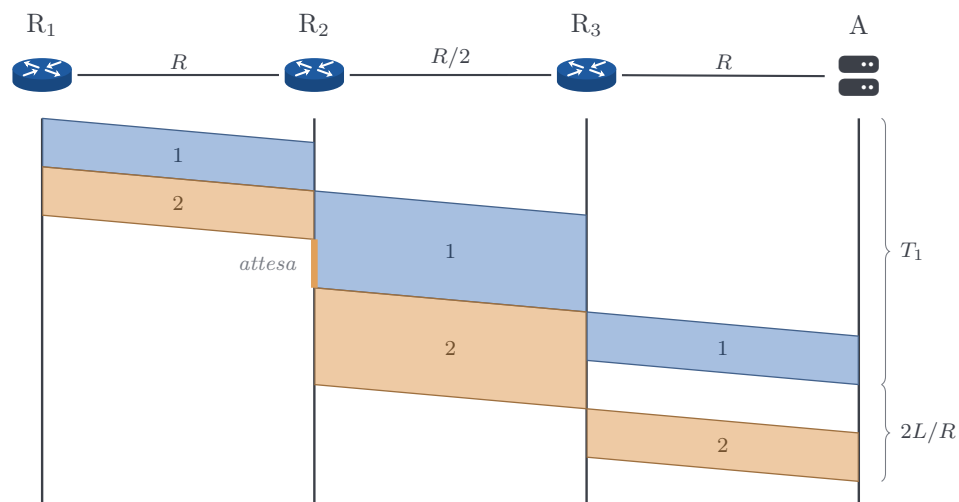
- Ogni pacchetto successivo arriva $L/R_{\min}$ dopo il precedente, dove $R_{\min}$ è il bit rate del collegamento più lento: il k -esimo arriva a

$$T_k = T_1 + (k - 1) \frac{L}{R_{\min}}.$$

Dimostrazione

1. Il primo pacchetto trova tutti i collegamenti liberi: su ciascuno è trasmesso in L/R_i e si propaga in τ_i , e la somma è T_1 .
2. Due pacchetti consecutivi che arrivano a un nodo distanziati di Δ ne ripartono distanziati di $\max(\Delta, L/R_i)$: se $\Delta < L/R_i$ il secondo aspetta in coda la trasmissione del primo, altrimenti trova il collegamento libero. La propagazione ritarda entrambi dello stesso τ_i .
3. All'inizio $\Delta = 0$, perché i pacchetti sono tutti in coda. Collegamento dopo collegamento la distanza diventa il più grande dei L/R_i , cioè $L/R_{\min}$.

□



Nel diagramma ogni banda è alta L/R_i : stretta sui collegamenti veloci, larga su quelli lenti. Qui il collegamento centrale va a metà velocità: il secondo pacchetto arriva in R_2 mentre il primo è ancora in trasmissione, e aspetta. A destinazione i due pacchetti arrivano distanziati di $2L/R$, il tempo di trasmissione sul collegamento più lento.

I pacchetti dopo il primo aspettano quindi in coda al primo nodo, come nella proposizione «Attesa in coda» (Sezione 1), e davanti al collegamento più lento. Se il più lento è il primo, aspettano solo al primo nodo (Esercizio 5); il caso con il collegamento lento al centro e tre pacchetti è l'Esercizio 6, quello con due destinazioni l'Esercizio 7. Nei testi degli esercizi il bit rate di un collegamento si chiama anche **capacità** e si indica con C .

3 Intensità di traffico e perdita di pacchetti

Definizione – Intensità di traffico

Su un collegamento a R bps arrivano in media a pacchetti al secondo di L bit. L'**intensità di traffico** è il rapporto fra il bit rate in arrivo e quello del collegamento:

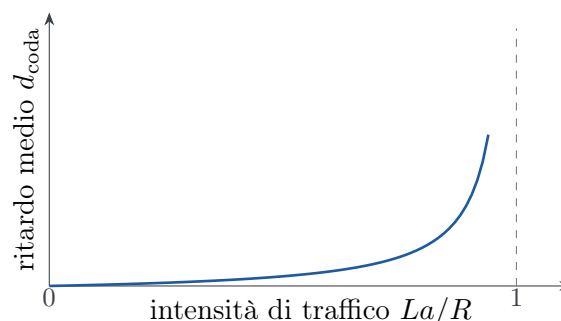
$$I = \frac{La}{R}.$$

Il collegamento trasmette R/L pacchetti al secondo, quindi I è anche il rapporto fra i pacchetti che arrivano e quelli che il nodo riesce a far uscire.

Proposizione – Ritardo di accodamento e intensità di traffico

- $I \approx 0$: il ritardo di accodamento è molto piccolo.
- $I \rightarrow 1$: il ritardo cresce in modo non lineare, sempre più rapidamente.
- $I \geq 1$: arriva più lavoro di quanto il collegamento possa smaltire; la coda cresce senza limite e il ritardo medio tende all'infinito.

Un sistema si progetta quindi con $I < 1$.



Gli intervalli fra gli arrivi sono **casuali**: anche quando in media arrivano tanti pacchetti quanti ne escono, ci sono momenti in cui ne arrivano di più e si forma una coda. Per questo il ritardo esplode già vicino a $I = 1$. È lo stesso che succede su una strada sempre trafficata: basta un piccolo aumento del traffico per allungare molto l'attesa.

3.1 Perdita di pacchetti

Definizione – Perdita di pacchetti

Il buffer di un nodo ha **capacità finita**. Un pacchetto che arriva a buffer pieno non può essere memorizzato e viene scartato: è la **perdita di pacchetti** (*packet loss*).

Arrivi a	Uscite R/L	I	Coda
350	1000	0,35	quasi sempre vuota
500	1000	0,5	si svuota subito
500	500	1	si forma per la casualità degli arrivi e cresce
500	350	1,43	si riempie rapidamente; poi i pacchetti si perdono

Tabella 2: Coda di un router al variare di arrivi e uscite, in pacchetti al secondo.

Con un buffer finito il ritardo non tende davvero all'infinito: quando I si avvicina o supera 1 il buffer si riempie e i pacchetti in più vanno persi (ultima riga della Tabella 2). In Internet la perdita non si recupera al livello di IP: se serve, se ne occupa un livello superiore, per esempio il TCP con la ritrasmissione (Capitolo 2).

Osservazione – Quanta perdita si tollera

Dipende dall'applicazione:

- **voce e video:** una piccola percentuale di pacchetti persi si tollera, perché chi ascolta o guarda ricostruisce il senso da ciò che sta intorno; con una perdita alta (per esempio il 50%) non si capisce più nulla;
- **file, testi, e-mail:** anche pochi pacchetti persi rendono il file corrotto, che non si ricostruisce.

4 Throughput e collo di bottiglia

Definizione – Throughput

Il **throughput** (*portata*) è il bit rate con cui i bit vengono trasferiti da un estremo all'altro della comunicazione, fra mittente e ricevente. Si misura in bps, come il bit rate, ma non è la velocità di una singola linea.

Proposizione – Collo di bottiglia

Se un trasferimento attraversa collegamenti a $R_1, R_2, \dots, R_N$ bps e non c'è altro traffico, il throughput è il bit rate del collegamento più lento, il **collo di bottiglia** (*bottleneck*):

$$\text{throughput} = \min(R_1, R_2, \dots, R_N).$$

Non è la media dei bit rate.

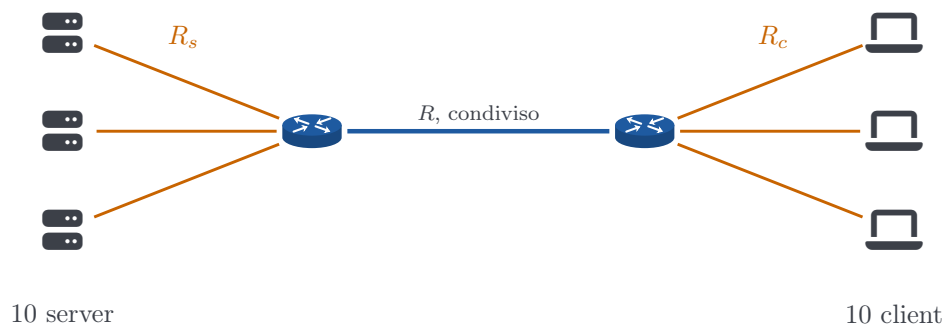
Come l'acqua in una serie di tubi, i bit scorrono alla velocità del tubo più stretto, in qualunque punto si trovi. Con un server a R_s e un client a R_c il throughput è R_s se $R_s < R_c$, e R_c se $R_c < R_s$. Una fibra velocissima da un lato non serve se l'altro estremo ha una linea lenta: il collo di bottiglia può essere all'inizio, al centro o alla fine del percorso.

Nel tempo, il collo di bottiglia è il collegamento più lento della proposizione «Pacchetti in fila su più collegamenti» (Sezione 2.2): dopo di esso arriva un pacchetto di L bit ogni $L/R_{\min}$, cioè $R_{\min}$ bit al secondo.

Proposizione – Collegamento condiviso

Se K connessioni attraversano lo stesso collegamento a R bps e se lo dividono in parti uguali, ciascuna ne ha R/K . Con accesso del server a R_s e del client a R_c :

$$\text{throughput} = \min \left(R_s, R_c, \frac{R}{K} \right).$$



Nella realtà il collo di bottiglia è spesso l'accesso, R_s o R_c ; ma anche un collegamento veloce del nucleo lo diventa se lo attraversano molti flussi. I numeri dell'esempio della lezione sono nell'Esercizio 2.

Riepilogo

- **Ritardo di nodo:** $d_{\text{nodo}} = d_{\text{elab}} + d_{\text{coda}} + d_{\text{trasm}} + d_{\text{prop}}$.
- **Accodamento:** dipende dal traffico; il k -esimo di pacchetti uguali arrivati insieme aspetta $(k - 1)L/R$.
- **Trasmissione e propagazione:** $d_{\text{trasm}} = L/R$ (pacchetto e linea), $d_{\text{prop}} = d/s$ (distanza e mezzo); dal primo bit trasmesso all'ultimo ricevuto $T = d/s + L/R$.
- **End-to-end:** $T = N(L/R + d/s) + (N - 1)(d_{\text{elab}} + d_{\text{coda}})$; andata e ritorno $\text{RTT} = 2(L/R + d/s)$.
- **Pacchetti in fila:** $T_1 = \sum_i (L/R_i + \tau_i)$, poi uno ogni $L/R_{\min}$, il tempo del collegamento più lento.
- **Intensità di traffico:** $I = La/R$; il ritardo esplode per $I \rightarrow 1$, si progetta con $I < 1$.
- **Perdita:** buffer finito, pacchetti scartati; tollerata da voce e video, non dai file.
- **Throughput:** $\min(R_1, \dots, R_N)$, il collo di bottiglia; con K flussi su R condiviso, $\min(R_s, R_c, R/K)$.

5 Esercizi

Esercizio 1 – Trasmissione e propagazione su 10 km

Un pacchetto di 100 byte viene trasmesso fra due router distanti 10 km, con velocità di propagazione $s = 2 \times 10^8$ m/s.

1. Calcolare d_{trasm} e d_{prop} con bit rate $R = 512$ kbit/s.
2. Ripetere con $R = 10$ Mbit/s.
3. In quale dei due casi il primo bit arriva al secondo router prima che l'ultimo sia stato trasmesso?

Soluzione a pagina 15 →

Esercizio 2 – Dieci connessioni su un collegamento condiviso

Dieci coppie server-client scaricano contemporaneamente, e i loro dieci flussi attraversano lo stesso collegamento a R bps, diviso in parti uguali. Ogni server accede alla rete a R_s , ogni client a R_c ; gli altri collegamenti sono molto più veloci. Calcolare il throughput di una connessione nei due casi:

1. $R = 10$ Mbit/s, $R_s = 10$ Mbit/s, $R_c = 10$ Mbit/s;

2. $R = 10 \text{ Mbit/s}$, $R_s = 5 \text{ Mbit/s}$, $R_c = 500 \text{ kbit/s}$.

[Soluzione a pagina 15 →](#)

Esercizio 3 – Dal primo bit trasmesso all'ultimo ricevuto

Un sistema trasmissivo a 100 kbit/s è lungo 500 km . Calcolare il tempo che passa fra la trasmissione del primo bit e la ricezione dell'ultimo bit di un pacchetto di 2000 bit , con un ritardo di propagazione di $5 \mu\text{s}$ al chilometro.

[Soluzione a pagina 16 →](#)

Esercizio 4 – Andata e ritorno, bit rate e distanza

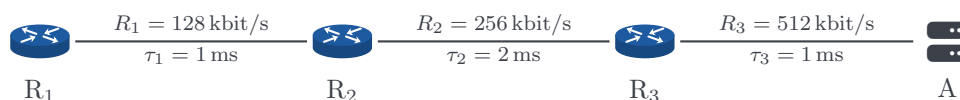
Un pacchetto di $10\,000 \text{ bit}$ viene inviato dal nodo A a 100 kbit/s su un collegamento di 100 km . Il pacchetto viene ricevuto tutto in B e poi rimandato ad A alla stessa velocità di trasmissione. La velocità del segnale è $200\,000 \text{ km/s}$.

1. Calcolare il tempo fra la trasmissione del primo bit in A e la ricezione dell'ultimo bit, sempre in A.
2. Ripetere il conto con velocità di trasmissione 10 Gbit/s .
3. Lasciando la velocità a 100 kbit/s , quale distanza fra A e B darebbe lo stesso tempo del punto 2?

[Soluzione a pagina 16 →](#)

Esercizio 5 – Due pacchetti su tre collegamenti

Si consideri la rete in figura, con i bit rate R_i e i ritardi di propagazione τ_i dei tre collegamenti. All'istante $t = 0$ la coda di uscita di R_1 ha 2 pacchetti diretti ad A, di lunghezza $L = 512 \text{ bit}$. Indicare per ciascun pacchetto l'istante in cui è ricevuto completamente a destinazione.



[Soluzione a pagina 17 →](#)

Esercizio 6 – Collegamento lento al centro

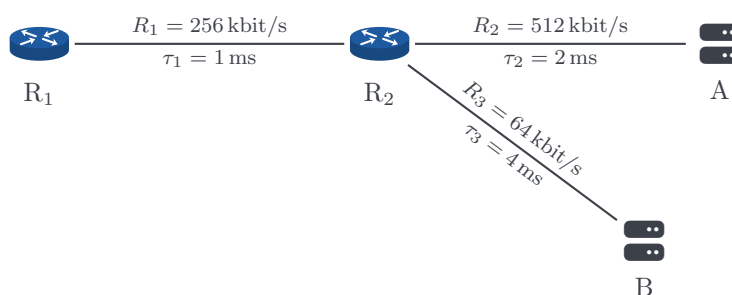
Nella rete dell'Esercizio 5 i bit rate diventano $R_3 = R_1$ e $R_2 = R_1/2$; la lunghezza L e i ritardi di propagazione τ_1, τ_2, τ_3 sono generici. All'istante 0 la coda di uscita di R_1 ha 3 pacchetti diretti ad A. In funzione di L/R_1 e dei τ_i :

1. calcolare l'istante in cui ciascun pacchetto è ricevuto completamente in A;
2. dire dove e quanto aspetta ciascun pacchetto.

Soluzione a pagina 18 →

Esercizio 7 – Quattro pacchetti per due destinazioni

Si consideri la rete in figura. All'istante $t = 0$ la coda di uscita di R_1 ha 4 pacchetti diretti rispettivamente ad A, A, B, B. Con pacchetti di lunghezza $L = 512$ bit, indicare per ciascun pacchetto l'istante in cui è ricevuto completamente a destinazione.



Soluzione a pagina 19 →

Esercizio 8 – Appello del 08/02/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 14, adattato

Si supponga di avere un file di dimensione 40 kByte e di utilizzare una compressione con rapporto di compressione 8 (il file compresso è 8 volte più piccolo dell'originale). Se in una linea che ha velocità di V Mbit/s il file viene trasferito in meno di 0,8 ms, qual è la velocità V della linea?

- a. $V = 40$ Mbit/s;
- b. $V = 62,5$ Mbit/s;
- c. $V = 6,25$ Mbit/s;
- d. $V = 50$ Mbit/s.

Soluzione a pagina 19 →

6 Soluzioni

Soluzione dell'Esercizio 1 – Trasmissione e propagazione su 10 km

Lunghezza del pacchetto: $L = 100 \cdot 8 = 800$ bit. La propagazione non dipende da R , quindi è la stessa nei due casi:

$$d_{\text{prop}} = \frac{d}{s} = \frac{1 \times 10^4 \text{ m}}{2 \times 10^8 \text{ m/s}} = 5 \times 10^{-5} \text{ s} = 50 \text{ } \mu\text{s}.$$

Verifica: 5 μs per chilometro, per 10 km.

1. Con $R = 512\,000$ bit/s:

$$d_{\text{trasm}} = \frac{800 \text{ bit}}{512\,000 \text{ bit/s}} = 1,5625 \times 10^{-3} \text{ s} \approx \boxed{1,56 \text{ ms}}, \quad d_{\text{prop}} = \boxed{50 \text{ } \mu\text{s}}.$$

2. Con $R = 1 \times 10^7$ bit/s:

$$d_{\text{trasm}} = \frac{800 \text{ bit}}{1 \times 10^7 \text{ bit/s}} = 8 \times 10^{-5} \text{ s} = \boxed{80 \text{ } \mu\text{s}}, \quad d_{\text{prop}} = \boxed{50 \text{ } \mu\text{s}}.$$

Il bit rate più alto accorcia solo la trasmissione.

3. Il primo bit arriva dopo d_{prop} , l'ultimo lascia il router dopo d_{trasm} . In entrambi i casi $d_{\text{trasm}} > d_{\text{prop}}$ (1562,5 μs e 80 μs contro 50 μs): come nel caso 2 del casello, il primo bit arriva prima che l'ultimo sia partito. Con 10 Mbit/s i due tempi sono vicini; aumentando ancora R , o la distanza, prevarrebbe la propagazione.

[← Torna all'Esercizio 1, pagina 12](#)

Soluzione dell'Esercizio 2 – Dieci connessioni su un collegamento condiviso

Ogni connessione ha dal collegamento condiviso $R/10 = 10 \text{ Mbit/s}/10 = 1 \text{ Mbit/s}$.

1.

$$\text{throughput} = \min(10 \text{ Mbit/s}, 10 \text{ Mbit/s}, 1 \text{ Mbit/s}) = \boxed{1 \text{ Mbit/s}}.$$

Il collo di bottiglia è la quota del collegamento condiviso, anche se ogni linea va a 10 Mbit/s.

2.

$$\text{throughput} = \min(5 \text{ Mbit/s}, 0,5 \text{ Mbit/s}, 1 \text{ Mbit/s}) = \boxed{500 \text{ kbit/s}}.$$

Ora il collo di bottiglia è l'accesso del client.

[← Torna all'Esercizio 2, pagina 12](#)

Soluzione dell'Esercizio 3 – Dal primo bit trasmesso all'ultimo ricevuto

Trasmissione:

$$d_{\text{trasm}} = \frac{L}{R} = \frac{2000 \text{ bit}}{1 \times 10^5 \text{ bit/s}} = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms}.$$

Propagazione, a 5 μs per chilometro:

$$d_{\text{prop}} = 500 \text{ km} \cdot 5 \mu\text{s/km} = 2500 \mu\text{s} = 2,5 \text{ ms}.$$

Il primo bit arriva dopo d_{prop} , l'ultimo dopo altri d_{trasm} :

$$T = d_{\text{prop}} + d_{\text{trasm}} = 2,5 \text{ ms} + 20 \text{ ms} = \boxed{22,5 \text{ ms}}.$$

La trasmissione pesa otto volte la propagazione.

[← Torna all'Esercizio 3, pagina 13](#)

Soluzione dell'Esercizio 4 – Andata e ritorno, bit rate e distanza

È l'RTT della proposizione «Andata e ritorno»: $\text{RTT} = 2(L/R + d/s)$. La propagazione non dipende dal bit rate:

$$\frac{d}{s} = \frac{100 \text{ km}}{2 \times 10^5 \text{ km/s}} = 5 \times 10^{-4} \text{ s} = 0,5 \text{ ms}.$$

1. Trasmissione a $R = 1 \times 10^5 \text{ bit/s}$:

$$\frac{L}{R} = \frac{1 \times 10^4 \text{ bit}}{1 \times 10^5 \text{ bit/s}} = 0,1 \text{ s} = 100 \text{ ms},$$

$$\text{RTT} = 2(100 \text{ ms} + 0,5 \text{ ms}) = \boxed{201 \text{ ms}}.$$

2. Trasmissione a $R = 1 \times 10^{10} \text{ bit/s}$:

$$\frac{L}{R} = \frac{1 \times 10^4 \text{ bit}}{1 \times 10^{10} \text{ bit/s}} = 1 \times 10^{-6} \text{ s} = 0,001 \text{ ms},$$

$$\text{RTT} = 2(0,001 \text{ ms} + 0,5 \text{ ms}) = \boxed{1,002 \text{ ms}}.$$

Il bit rate è cresciuto di 10^5 volte, l'RTT è sceso solo di circa 200: ora è quasi tutto propagazione.

3. Si cerca d con $R = 100 \text{ kbit/s}$ e $\text{RTT} = 1,002 \text{ ms}$:

$$2 \left(100 \text{ ms} + \frac{d}{s} \right) = 1,002 \text{ ms} \implies \frac{d}{s} = 0,501 \text{ ms} - 100 \text{ ms} = -99,499 \text{ ms},$$

$$d = -99,499 \times 10^{-3} \text{ s} \cdot 2 \times 10^5 \text{ km/s} \approx \boxed{-19\,900 \text{ km}}.$$

Una distanza negativa non esiste: a 100 kbit/s la sola trasmissione, andata e ritorno, dura 200 ms, più del tempo richiesto. Nessuna distanza, nemmeno zero, porta l'RTT sotto $2L/R$.

[← Torna all'Esercizio 4, pagina 13](#)

Soluzione dell'Esercizio 5 – Due pacchetti su tre collegamenti

Tempo di trasmissione sul primo collegamento:

$$\frac{L}{R_1} = \frac{512 \text{ bit}}{128\,000 \text{ bit/s}} = 4 \text{ ms.}$$

Allo stesso modo $L/R_2 = 512/256\,000 \text{ s} = 2 \text{ ms}$ e $L/R_3 = 512/512\,000 \text{ s} = 1 \text{ ms}$.

Primo pacchetto. Trova tutti i collegamenti liberi:

$$T_1 = (4 + 1) + (2 + 2) + (1 + 1) \text{ ms} = \boxed{11 \text{ ms}}.$$

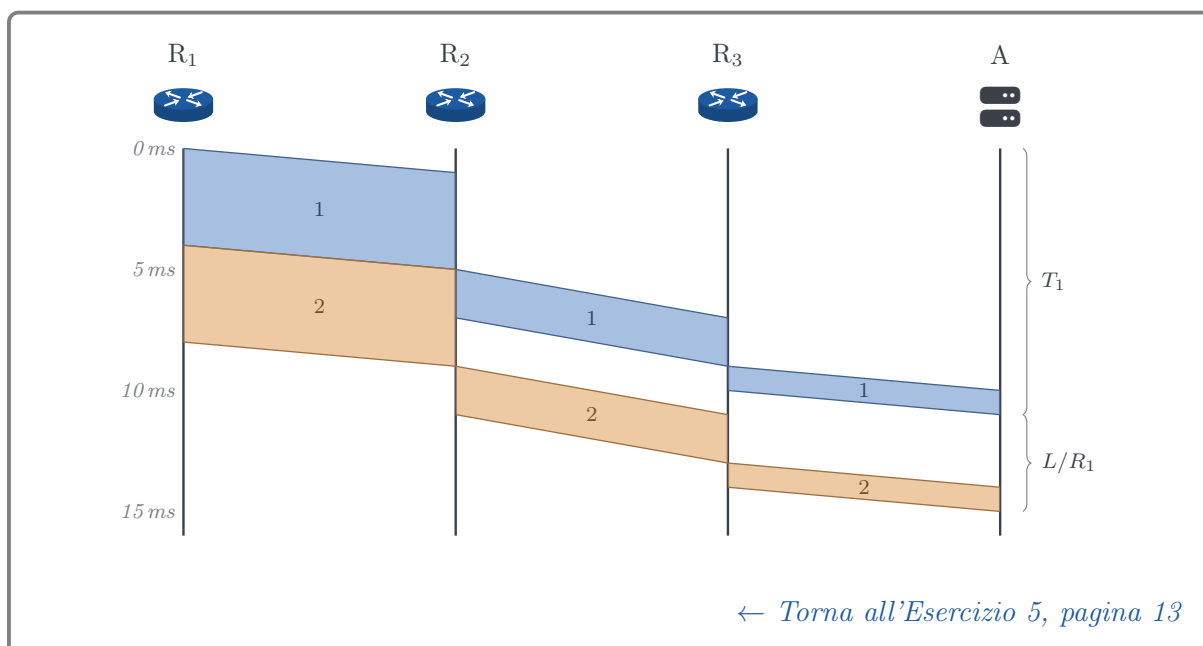
Secondo pacchetto. Aspetta in R_1 la trasmissione del primo. Il collegamento più lento è il primo, $R_{\min} = R_1$, quindi dopo non aspetta più:

$$T_2 = T_1 + \frac{L}{R_1} = 11 \text{ ms} + 4 \text{ ms} = \boxed{15 \text{ ms}}.$$

Verifica istante per istante, in ms:

	Pacchetto 1	Pacchetto 2
trasmissione da R_1	0–4	4–8
ricevuto in R_2	5	9
trasmissione da R_2	5–7	9–11
ricevuto in R_3	9	13
trasmissione da R_3	9–10	13–14
ricevuto in A	11	15

Il secondo pacchetto arriva in R_2 a 9 ms, quando il collegamento è libero da 7 ms, e in R_3 a 13 ms, quando è libero da 10 ms. Nel diagramma le bande si accorciano da un collegamento all'altro (4, 2 e 1 ms) e l'inclinazione segue i τ_i :



Soluzione dell'Esercizio 6 – Collegamento lento al centro

Si pone $a = L/R_1$ e $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$. I tempi di trasmissione sono $L/R_1 = L/R_3 = a$ e $L/R_2 = 2a$: il collegamento più lento è quello centrale, con $L/R_{\min} = 2a$.

1. Con la proposizione «Pacchetti in fila su più collegamenti»:

$$T_1 = a + 2a + a + \tau = \boxed{4a + \tau},$$

$$T_2 = T_1 + 2a = \boxed{6a + \tau}, \quad T_3 = T_1 + 2 \cdot 2a = \boxed{8a + \tau}.$$

2. Verifica istante per istante fino a R_2 , dove il collegamento centrale si libera per il pacchetto k quando il precedente finisce di trasmettere:

Pacchetto	parte da R_1	ricevuto in R_2	parte da R_2	attesa in R_2	ricevuto in A
1	0	$a + \tau_1$	$a + \tau_1$	0	$4a + \tau$
2	a	$2a + \tau_1$	$3a + \tau_1$	a	$6a + \tau$
3	$2a$	$3a + \tau_1$	$5a + \tau_1$	$2a$	$8a + \tau$

- In R_1 il secondo pacchetto aspetta a e il terzo $2a$, la trasmissione dei precedenti.
- In R_2 il secondo aspetta ancora a e il terzo $2a$: il collegamento centrale impiega $2a$ per pacchetto, ma i pacchetti arrivano distanziati di a .
- In R_3 nessuno aspetta: i pacchetti arrivano distanziati di $2a$ e il collegamento finale ne trasmette uno in a .

A differenza dell'Esercizio 5, il ritardo in più si accumula anche davanti al collegamento lento, che non è il primo.

[← Torna all'Esercizio 6, pagina 14](#)

Soluzione dell'Esercizio 7 – Quattro pacchetti per due destinazioni

Tempi di trasmissione:

$$\frac{L}{R_1} = \frac{512 \text{ bit}}{256\,000 \text{ bit/s}} = 2 \text{ ms.}$$

Allo stesso modo $L/R_2 = 512/512\,000 \text{ s} = 1 \text{ ms}$ e $L/R_3 = 512/64\,000 \text{ s} = 8 \text{ ms}$.

I quattro pacchetti escono da R_1 nell'ordine della coda, sullo stesso collegamento. In R_2 quelli per A e quelli per B prendono collegamenti diversi e non si ostacolano.

Pacchetti per A. Partono per primi. Sul percorso R_1 – R_2 –A il collegamento più lento è il primo ($256 \text{ kbit/s} < 512 \text{ kbit/s}$), quindi con la proposizione «Pacchetti in fila su più collegamenti»:

$$T_{A,1} = (2 + 1) + (1 + 2) \text{ ms} = \boxed{6 \text{ ms}}, \quad T_{A,2} = T_{A,1} + \frac{L}{R_1} = \boxed{8 \text{ ms}}.$$

Pacchetti per B. Aspettano in R_1 la trasmissione dei due per A, $2 \cdot 2 \text{ ms} = 4 \text{ ms}$. Da quell'istante sono due pacchetti in fila sul percorso R_1 – R_2 –B, dove il più lento è il collegamento verso B (64 kbit/s , 8 ms a pacchetto):

$$T_{B,1} = 4 + (2 + 1) + (8 + 4) \text{ ms} = \boxed{19 \text{ ms}}, \quad T_{B,2} = T_{B,1} + \frac{L}{R_3} = \boxed{27 \text{ ms}}.$$

Verifica istante per istante, in ms:

Pacchetto	per	trasmissione da R_1	ricevuto in R_2	trasmissione da R_2	ricevuto
1	A	0–2	3	3–4	6
2	A	2–4	5	5–6	8
3	B	4–6	7	7–15	19
4	B	6–8	9	15–23	27

Il secondo pacchetto trova libero il collegamento verso A, che il primo ha lasciato a 4 ms . Il quarto arriva in R_2 a 9 ms e aspetta fino a 15 ms che il terzo finisca di trasmettere verso B.

[← Torna all'Esercizio 7, pagina 14](#)

Soluzione dell'Esercizio 8 – Appello del 08/02/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 14, adattato

Il testo dà solo la velocità della linea: il tempo di trasferimento è il ritardo di trasmissione del file compresso, $d_{\text{trasm}} = L/V$.

Dimensione del file compresso, in bit:

$$L = \frac{40\,000 \text{ byte}}{8} = 5000 \text{ byte} = 5000 \cdot 8 = 40\,000 \text{ bit.}$$

Velocità che trasferisce il file in 0,8 ms:

$$V = \frac{L}{d_{\text{trasm}}} = \frac{40\,000 \text{ bit}}{0,8 \times 10^{-3} \text{ s}} = 5 \times 10^7 \text{ bit/s} = 50 \text{ Mbit/s}.$$

Tempi con le quattro velocità: a. 1 ms, b. 0,64 ms, c. 6,4 ms, d. 0,8 ms.

- a e c sono troppo lente.
- b rispetta il limite, ma non è la velocità che la domanda chiede: la velocità della linea che basta, cioè la minima, è quella che trasferisce il file in 0,8 ms esatti.

Risposta: ☐ d.

[*← Torna all'Esercizio 8, pagina 14*](#)