

Appunti di Fondamenti di Comunicazioni e Internet

Canale 2 · Reti · Prof. Marco Polverini

Capitolo 3: Commutazione di pacchetto

Autore: Tommaso C.

Appunti tratti dalle lezioni in aula e dal materiale del corso

Argomenti: Pacchetti: intestazione e payload · Reti senza connessione · Tabella di instradamento

Store and forward e suo ritardo · Multiplazione statistica · Accodamento e perdita
Utenti attivi e congestione · Dimensione dei pacchetti e overhead · Circuito e pacchetto a confronto

Indice

1	Pacchetti	1
2	Inoltro nei router	1
3	Store and forward	2
4	Multiplazione statistica	4
4.1	Utenti attivi e congestione	5
5	Dimensione dei pacchetti e overhead	6
6	Circuito e pacchetto a confronto	6
7	Esercizi	7
8	Soluzioni	9

1 Pacchetti

Definizione – Commutazione di pacchetto

Nella **commutazione di pacchetto** la sorgente divide i dati da inviare in blocchi di bit, i **pacchetti**, e la rete inoltra ciascun pacchetto da solo. Nella commutazione di circuito, invece, la sorgente emette i bit come un flusso continuo.

La lunghezza dei pacchetti può variare; qui si suppone che tutti i pacchetti abbiano la stessa lunghezza. Per esempio, un file di 12 bit diviso in pacchetti di 4 bit dà 3 pacchetti, inviati uno alla volta.

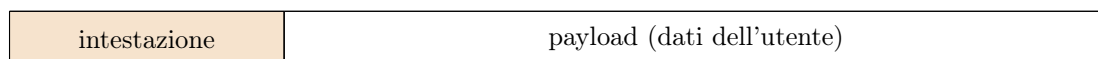
Definizione – Intestazione e payload

Un pacchetto ha due parti:

- l'**intestazione** (*header*), con le informazioni che servono alla rete per consegnarlo, almeno gli identificativi della sorgente e della destinazione;
- il **payload**, la parte con i dati che l'utente vuole trasferire.

La lunghezza del pacchetto, in bit, è la somma delle due:

$$L = L_{\text{header}} + L_{\text{payload}}$$



Definizione – Rete senza connessione

Una rete a pacchetto è **senza connessione** (*connectionless*): l'host che ha dati da inviare li manda subito, senza chiedere prima alla rete di instaurare un circuito. La rete a circuito è invece orientata alla connessione (Capitolo 2).

È la differenza principale fra le due reti. Il vantaggio è che non si spendono tempo e messaggi per instaurare il circuito, la fase che rende inefficiente il circuito quando lo scambio è breve (Capitolo 2).

2 Inoltro nei router

Un host ha di solito una sola interfaccia di rete: tutto ciò che non è destinato a un processo della macchina stessa esce da lì. Il router, invece, è un commutatore con molte porte e deve scegliere per ogni pacchetto l'interfaccia d'uscita, senza che nessuno lo abbia configurato prima per quella comunicazione.

Definizione – Tabella di instradamento

Ogni router ha una **tabella di instradamento** (*routing table*) che associa all'identificativo di una destinazione l'interfaccia d'uscita su cui inoltrare i pacchetti diretti lì.

Destinazione	Interfaccia d'uscita
H_2	2
H_3	3

Proposizione – Inoltro di un pacchetto

Quando riceve un pacchetto, il router:

1. legge nell'intestazione l'identificativo della destinazione;
2. cerca nella tabella l'interfaccia d'uscita associata;
3. inoltra il pacchetto su quell'interfaccia.

La tabella la calcola la funzione di **instradamento** (*routing*), svolta da un protocollo; qui si suppone che la riga per ogni destinazione ci sia già.

3 Store and forward

Definizione – Store and forward

Un router lavora in modalità **store and forward** (immagazzina e rilancia): prima di inoltrare un pacchetto deve averlo ricevuto per intero.

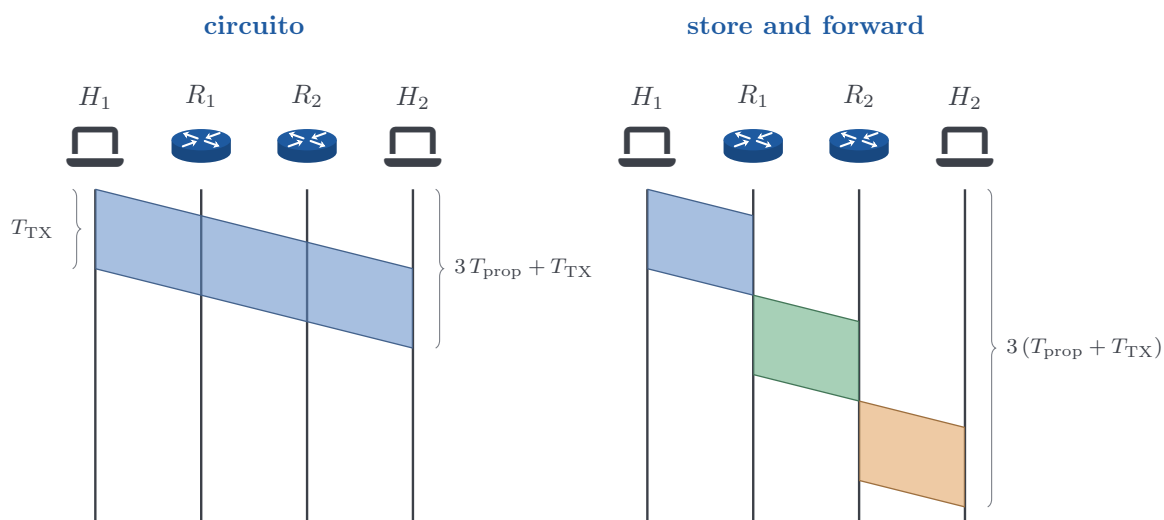
Il motivo è l'intestazione. Il commutatore di circuito rilancia subito ogni bit, perché la porta e il canale su cui lo riceve bastano a dire dove mandarlo (Capitolo 2). Il router deve leggere la destinazione nell'intestazione, e per leggerla deve prima ricevere il pacchetto.

Senza moltiplicazione statica il collegamento non è diviso in canali: chi trasmette un pacchetto usa tutta la capacità C del collegamento, finché il pacchetto non è finito.

Definizione – Tempo di trasmissione di un pacchetto

Il **tempo di trasmissione** di un pacchetto di L bit su un collegamento di capacità C è il tempo per immettervi tutti i suoi bit:

$$T_{\text{TX}} = \frac{L}{C}$$



Proposizione – Tempo di trasferimento con store and forward

Un pacchetto di L bit attraversa un percorso di N_{hop} salti, tutti con capacità C e tempo di propagazione T_{prop} , in una rete a pacchetto senza altro traffico e con elaborazioni istantanee. L'ultimo bit arriva a destinazione dopo

$$T_{\text{trasf}} = N_{\text{hop}} (T_{\text{TX}} + T_{\text{prop}})$$

Dimostrazione

1. La sorgente comincia a trasmettere all'istante 0. L'ultimo bit parte all'istante T_{TX} e arriva al primo router all'istante $T_{\text{TX}} + T_{\text{prop}}$: solo ora il router ha tutto il pacchetto.
2. Il router legge l'intestazione e ritrasmette il pacchetto, che arriva per intero al nodo successivo dopo altri $T_{\text{TX}} + T_{\text{prop}}$.
3. Ogni salto aggiunge lo stesso intervallo: dopo N_{hop} salti l'ultimo bit è a destinazione all'istante $N_{\text{hop}} (T_{\text{TX}} + T_{\text{prop}})$.

□

Sullo stesso percorso, un circuito con capacità C su ogni collegamento fa arrivare l'ultimo bit dopo $N_{\text{hop}} T_{\text{prop}} + T_{\text{TX}}$ (Capitolo 2), perché i commutatori rilanciano subito ogni bit. Lo store and forward fa quindi pagare $N_{\text{hop}} - 1$ tempi di trasmissione in più, uno per ogni router: nella figura, due su tre salti.

Esempio – Tre salti con propagazione trascurabile

Un pacchetto di $L = 7,5 \text{ Mbit}$ attraversa due router, quindi tre collegamenti da $C = 1,5 \text{ Mbit/s}$, con propagazione trascurabile. Il tempo di trasmissione su un collegamento è

$$T_{\text{TX}} = \frac{L}{C} = \frac{7,5 \text{ Mbit}}{1,5 \text{ Mbit/s}} = 5 \text{ s},$$

quindi con lo store and forward $T_{\text{trasf}} = 3 \cdot 5 \text{ s} = 15 \text{ s}$. Un circuito alla stessa capacità impiegherebbe 5 s: lo store and forward costa $2 \cdot 5 \text{ s} = 10 \text{ s}$ in più.

4 Multiplazione statistica

Definizione – Multiplazione statistica

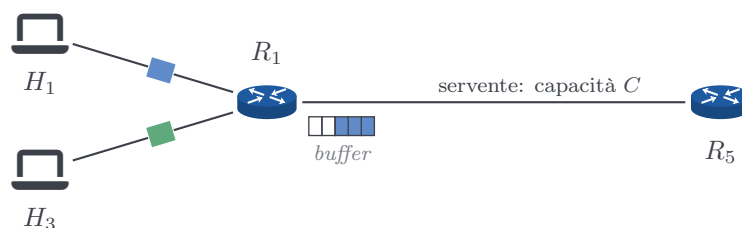
Nella **multiplazione statistica** la rete non riserva risorse: un utente usa tutta la capacità del collegamento quando ha un pacchetto da trasmettere, e la lascia agli altri quando non ne ha. Gli utenti non sono più separati in un dominio fisico, tempo o frequenza, ma in un dominio **probabilistico**.

Un collegamento fra due router resta una risorsa condivisa: su R_1-R_5 può passare il traffico di H_1 verso H_2 e quello di un altro host. Per questo la multiplazione serve ancora, ma non è più statica come TDM e FDM (Capitolo 2).

Un pacchetto che arriva al router può quindi trovare il collegamento d'uscita libero, e allora è trasmesso subito, oppure occupato dalla trasmissione di un altro pacchetto, e allora aspetta. Quale dei due casi capiti non si sa in anticipo: si conosce solo la probabilità di ciascuno.

Definizione – Buffer e accodamento

Davanti a ogni collegamento d'uscita il router ha un **buffer**, una memoria in cui i pacchetti aspettano di essere trasmessi. Il collegamento è il **servente**, con velocità di servizio pari alla sua capacità C . Il tempo che un pacchetto passa nel buffer è il **ritardo di accodamento** (*queueing delay*).



Proposizione – Prestazioni non deterministiche

Il ritardo di accodamento si aggiunge a quello dello store and forward e **non è noto a priori**: dipende da quanti pacchetti sono già nel buffer quando il pacchetto arriva. Le prestazioni di una rete a pacchetto sono quindi aleatorie, non deterministiche come quelle di un circuito.

Definizione – Perdita di pacchetti

Il buffer ha memoria finita. Un pacchetto che arriva quando il buffer è pieno non trova posto e il router lo scarta: è una **perdita di pacchetto** (*packet loss*).

4.1 Utenti attivi e congestione**Definizione – Sorgente on-off e fattore di attività**

Una **sorgente on-off** alterna periodi ON, in cui trasmette, e periodi OFF, in cui tace. Il suo **fattore di attività** è la frazione del tempo che passa nello stato ON; è anche la probabilità p di trovarla ON in un istante qualsiasi.

Proposizione – Utenti attivi insieme

N sorgenti on-off indipendenti, ciascuna ON con probabilità p . La probabilità che esattamente K siano ON nello stesso istante è

$$P(N_{\text{ON}} = K) = \binom{N}{K} p^K (1 - p)^{N-K}$$

Dimostrazione

1. Si fissano K utenti precisi ON e gli altri $N - K$ OFF. Gli stati sono indipendenti, quindi la probabilità di questa combinazione è il prodotto $p^K (1 - p)^{N-K}$.
2. Ogni scelta dei K utenti attivi fra gli N ha la stessa probabilità, e le scelte possibili sono $\binom{N}{K}$.
3. Le combinazioni sono eventi disgiunti: le loro probabilità si sommano.

□

Con la moltiplicazione statistica, gli utenti ON offrono insieme $N_{\text{ON}} R_u$ se ciascuno trasmette a R_u . Finché $N_{\text{ON}} R_u \leq C$ il collegamento basta; oltre, il traffico offerto supera la

capacità, la coda cresce e arrivano ritardi altissimi e perdite: è la **congestione**. La sua probabilità è la somma delle probabilità di tutti i K con $KR_u > C$.

La moltiplicazione statistica conviene quando gli utenti sono **molti** e il fattore di attività è **basso**: chi vuole trasmettere trova quasi sempre libero il collegamento. Su un collegamento d'accesso che con il circuito serve 10 utenti, attivi il 10% del tempo, il pacchetto ne serve 35 con una probabilità di congestione di circa $4 \cdot 10^{-4}$ (Esercizio 1).

5 Dimensione dei pacchetti e overhead

Definizione – Overhead

L'**overhead** di un pacchetto sono i bit che la rete deve trasferire ma che non sono dati dell'utente: i L_{header} bit dell'intestazione.

Lo store and forward costa $T_{\text{TX}} = L/C$ per router, e L lo sceglie la sorgente: pacchetti più corti ridurrebbero il ritardo. Al limite, con pacchetti di un bit, i router rilancerebbero ogni bit come nel circuito. Due vincoli lo impediscono:

1. L_{header} non si può ridurre sotto il minimo necessario, che contiene almeno gli identificativi di sorgente e destinazione: si può accorciare solo il payload;
2. con un payload piccolo l'intestazione pesa più dei dati, e gran parte della capacità del collegamento trasporta overhead invece di dati dell'utente.

La lunghezza dei pacchetti è quindi un compromesso fra ritardo di store and forward e overhead.

6 Circuito e pacchetto a confronto

	Circuito	Pacchetto
Connessione	orientata: richiesta e instaurazione	senza connessione
Risorse	riservate (moltiplicazione statica)	su richiesta (moltiplicazione statistica)
Nei commutatori	rilancio immediato di ogni bit	store and forward, buffer
Trasferimento di L bit	$N_{\text{hop}} T_{\text{prop}} + T_{\text{TX}}$, noto a priori	$N_{\text{hop}} (T_{\text{prop}} + T_{\text{TX}})$ più accodamento aleatorio
Rifiuti e perdite	blocco della richiesta	perdita con buffer pieno

Nessuna delle due è migliore in assoluto: dipende dal servizio. Per la telefonia, con scambi lunghi e un flusso continuo, il circuito va bene. Per milioni di sensori che mandano

ogni tanto pochi bit, un canale riservato a ciascuno sarebbe quasi sempre inutilizzato e l'instaurazione durerebbe più dello scambio: conviene il pacchetto.

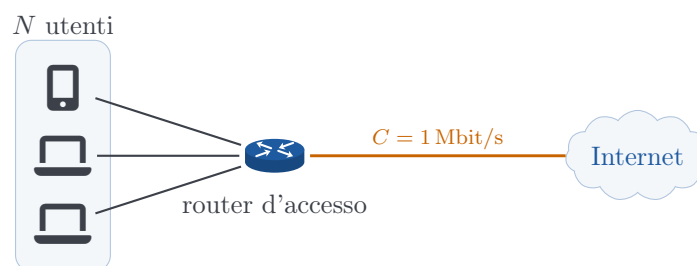
Riepilogo

- **Pacchetto:** intestazione e payload, $L = L_{\text{header}} + L_{\text{payload}}$.
- **Senza connessione:** si trasmette senza instaurare un circuito.
- **Inoltro:** destinazione dall'intestazione, interfaccia dalla tabella di instradamento.
- **Store and forward:** il router riceve tutto il pacchetto prima di inoltrarlo.
- **Trasferimento:** $N_{\text{hop}} (T_{\text{TX}} + T_{\text{prop}})$, con $T_{\text{TX}} = L/C$; $N_{\text{hop}} - 1$ trasmissioni in più del circuito.
- **Multiplazione statistica:** nessuna riserva, accodamento aleatorio; $P(N_{\text{ON}} = K) = \binom{N}{K} p^K (1 - p)^{N-K}$.
- **Perdita:** un pacchetto che trova il buffer pieno è scartato.
- **Overhead:** pacchetti corti riducono lo store and forward ma sprecano capacità.

7 Esercizi

Esercizio 1 – Accesso condiviso: circuito e pacchetto

N utenti di una rete locale ad alta capacità comunicano con Internet attraverso un router d'accesso, collegato da un collegamento di capacità $C = 1 \text{ Mbit/s}$, il collo di bottiglia.



Ogni utente alterna periodi OFF, in cui non trasmette, e periodi ON, in cui trasmette a bit rate costante $R_u = 100 \text{ kbit/s}$; è attivo per il 10% del tempo.

- Qual è la probabilità P_{ON} di trovare un utente nello stato ON?
- Quanti utenti si possono servire con la commutazione di circuito?
- Con la commutazione di pacchetto gli utenti sono $N = 35$. Qual è la probabilità di congestione, cioè che il traffico offerto superi C ?

Soluzione a pagina 9 →

Esercizio 2 – Appello del 08/02/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 9

Con riferimento all'operazione di multiplazione dinamica di Unità Informative (UI) su un canale condiviso:

- a. non si verificano mai contese di utilizzazione;
- b. si possono verificare contese di utilizzazione quando il canale multiplato è impegnato e quindi non disponibile per il trasferimento immediato di una UI;
- c. le contese di utilizzazione si possono verificare solo se i buffer di multiplazione non sono adeguatamente dimensionati.

Soluzione a pagina 9 →

8 Soluzioni

Soluzione dell'Esercizio 1 – Accesso condiviso: circuito e pacchetto

a. Non c'è un intervallo di tempo fissato: la frazione di tempo in cui un utente è attivo è la probabilità di trovarlo attivo in un istante qualsiasi,

$$P_{\text{ON}} = 0,1.$$

b. Con il circuito il collegamento si divide in canali, TDM o FDM, e ogni utente ne riceve uno in uso esclusivo. Un canale più lento di R_u non basta all'utente, uno più veloce spreca capacità: i canali vanno fatti da R_u . Il loro numero è

$$N_{\text{CH}} = \frac{C}{R_u} = \frac{1 \times 10^6 \text{ bit/s}}{100 \times 10^3 \text{ bit/s}} = 10,$$

quindi si servono 10 utenti. Ognuno tiene il proprio canale anche nei periodi OFF, cioè per il 90% del tempo: con la moltiplicazione statistica il collegamento può essere condiviso da più utenti.

c. Con N_{ON} utenti attivi il traffico offerto è $N_{\text{ON}} \cdot 100 \text{ kbit/s}$: supera $C = 1 \text{ Mbit/s}$ quando $N_{\text{ON}} \geq 11$ (con 11 utenti attivi è già $1,1 \text{ Mbit/s}$). Gli utenti sono indipendenti e ciascuno è ON con $p = 0,1$, quindi

$$P(N_{\text{ON}} \geq 11) = \sum_{K=11}^{35} \binom{35}{K} 0,1^K 0,9^{35-K} \approx \boxed{4 \cdot 10^{-4}}.$$

Il primo termine domina: $\binom{35}{11} 0,1^{11} 0,9^{24} \approx 3,3 \cdot 10^{-4}$, e i successivi decrescono rapidamente. La congestione capita circa 4 volte su diecimila: tutti e 35 gli utenti usano il servizio, mentre il circuito ne serve 10 e blocca gli altri 25.

[← Torna all'Esercizio 1, pagina 7](#)

Soluzione dell'Esercizio 2 – Appello del 08/02/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 9

La moltiplicazione dinamica è quella che non riserva il canale in modo statico, cioè la moltiplicazione statistica; le unità informative sono i pacchetti. C'è una *contesa* quando una UI vuole il canale mentre lo sta usando un'altra.

- a è falsa: senza riserva, una UI può arrivare mentre il canale trasmette un'altra UI, e deve aspettare nel buffer (ritardo di accodamento).
- c è falsa: la contesa nasce dall'occupazione del canale, non dal buffer. Il buffer decide solo se la UI in attesa trova posto o va persa.
- b descrive proprio questo caso.

Risposta: .

[*← Torna all'Esercizio 2, pagina 8*](#)