

Appunti di Fondamenti di Comunicazioni e Internet

Canale 2 · Reti · Prof. Marco Polverini

Capitolo 2: Nucleo della rete e commutazione di circuito

Autore: Tommaso C.

Appunti tratti dalle lezioni in aula e dal materiale del corso

Argomenti: Il nucleo della rete · Circuito virtuale · Instaurazione e rilascio
Moltiplicazione statica: TDM e FDM · Canali liberi e blocco · Diagramma spazio-tempo
Prestazioni deterministiche ed efficienza · Trasmissione, propagazione e tempo totale

Indice

1	Il nucleo della rete	1
2	Commutazione di circuito	1
2.1	Percorso e tabelle di commutazione	2
3	Multiploazione: TDM e FDM	3
3.1	Multiploazione a divisione di tempo	3
3.2	Multiploazione a divisione di frequenza	4
4	Canali liberi, instaurazione e blocco	5
5	Diagramma spazio-tempo	6
6	Pregi e limiti della commutazione di circuito	8
7	Tempo di trasferimento su un circuito	9
8	Esercizi	11
9	Soluzioni	12

1 Il nucleo della rete

Definizione – Rete core

La **rete core** è tutto ciò che non è sistema terminale né rete di accesso: i commutatori e i collegamenti fra loro. Qualunque siano tecnologie e mezzi trasmissivi, funziona in uno di due modi:

- a **commutazione di circuito** (rete a circuito), come la vecchia rete telefonica e le vecchie reti cellulari;
- a **commutazione di pacchetto** (rete a pacchetto), come Internet.

Definizione – Commutazione

Il core sposta il **flusso di dati** di un utente, una sequenza di bit che può essere un file, un video o una chiamata vocale, dal punto d'ingresso nella rete al punto d'uscita. **Commutare** significa spostare i dati da un ingresso a un'uscita in modo dinamico; gli apparati che lo fanno sono i **commutatori**.

Il **router** è un commutatore di pacchetto: i nodi di una rete a circuito sono commutatori, non router.

Collegare direttamente ogni coppia di N utenti richiederebbe $N(N-1)/2$ cavi, un numero che cresce come N^2 : con milioni di utenti è impossibile. Inoltre l'attenuazione (Capitolo 1) impedisce il collegamento diretto fra punti lontani, come Roma e Tokyo. Per questo fra sorgente e destinazione ci sono commutatori intermedi.

2 Commutazione di circuito

Definizione – Circuito virtuale

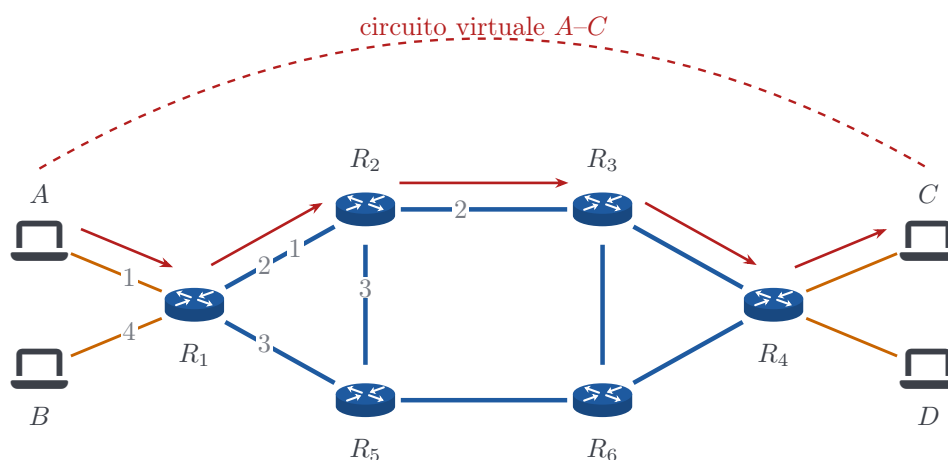
In una rete a commutazione di circuito la rete costruisce, fra i due utenti che vogliono comunicare, un **circuito virtuale**: un'astrazione che li fa apparire collegati direttamente, come da un unico link. Il circuito non esiste fisicamente: è realizzato dai commutatori lungo un percorso.

Come in una telefonata, una comunicazione a circuito ha quattro fasi.

Proposizione – Fasi di una comunicazione a circuito

1. **Richiesta di instaurazione:** uno dei due utenti, per esempio A , chiede alla rete un circuito, indicando gli estremi della comunicazione (A e C). È il numero composto prima di avviare la chiamata.
2. **Instaurazione:** la rete trova un percorso nella propria topologia, assegna al circuito un canale su ogni collegamento del percorso (Sezione 4) e configura i commutatori.
3. **Scambio informativo (utilizzo):** A consegna i messaggi alla rete, che li porta a C lungo il circuito, e viceversa.
4. **Rilascio** (o abbattimento): a fine comunicazione, come quando si riattacca, la rete elimina il circuito virtuale e le regole configurate nei commutatori. Può chiederlo l'uno o l'altro utente.

La richiesta segue una procedura standard e indica almeno le identità dei due sistemi terminali; la rete deve poi sapere dove si trova il destinatario. Nelle reti più evolute la richiesta può chiedere anche più risorse di un canale, per esempio per un utente che paga di più o per un servizio critico.



2.1 Percorso e tabelle di commutazione

Durante l'instaurazione la rete guarda la propria **topologia**, la mappa di nodi e collegamenti, e sceglie il percorso: in figura R_1, R_2, R_3, R_4 . L'utente A non deve conoscere il percorso; lo sceglie la rete.

Scegliere il percorso è l'instradamento (Capitolo 1), un problema di ottimizzazione che dipende dall'obiettivo: un criterio ragionevole è fare **meno salti** possibile, e si possono aggiungere vincoli, come passare per un certo nodo o garantire la banda minima chiesta dall'utente. Con vincoli si parla di **instradamento vincolato**.

Definizione – Tabella di commutazione

Ogni commutatore del percorso riceve una **tabella** che associa a ogni circuito, cioè alla coppia di utenti che comunica, l'interfaccia d'uscita su cui commutarne l'informazione.

Commutatore	Circuito	Porta d'uscita
R_1	$A-C$	2
R_2	$A-C$	2

La tabella fa da cartello stradale a un incrocio: per il circuito $A-C$ indica la strada da prendere. Anche il percorso di ritorno, da C ad A , va configurato, e non è detto che coincida con quello di andata: dipende dalla tecnologia di rete.

3 Multiplazione: TDM e FDM

Definizione – Multiplazione statica

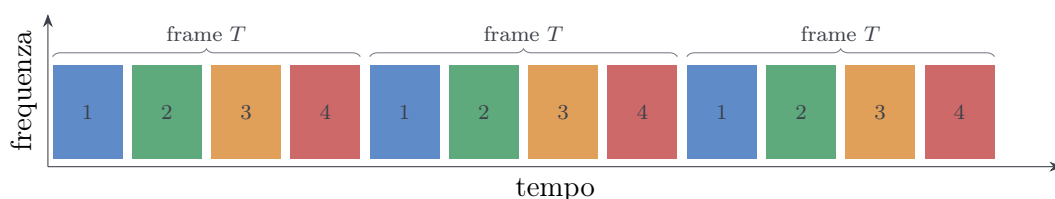
La **multiplazione** è la funzione che fa condividere a più utenti una risorsa fisica. In una rete a circuito la risorsa è la **capacità dei collegamenti**, su cui passano più circuiti virtuali. La multiplazione è **statica**: la ripartizione, una volta fatta, resta com'è finché non interviene una modifica.

3.1 Multiplazione a divisione di tempo

Definizione – TDM

Nel **TDM** (*Time Division Multiplexing*) l'asse dei tempi è diviso in **frame** di durata T , che si ripetono; ogni frame è diviso in N intervalli di uguale durata, i **time slot**. A un utente si assegna in uso esclusivo uno slot, lo stesso in ogni frame: è il suo **canale**.

L'utente trasmette nel proprio slot di ogni frame, con tutta la banda del mezzo, e tace negli altri: due utenti non trasmettono mai insieme. Con un frame di 10s diviso in slot da 1s, un utente trasmetterebbe per 1s ogni 10s; nella realtà gli slot durano millisecondi o microsecondi.



Proposizione – Capacità di un canale TDM

Se un collegamento di capacità C è diviso in N canali TDM uguali, ciascun canale ha capacità

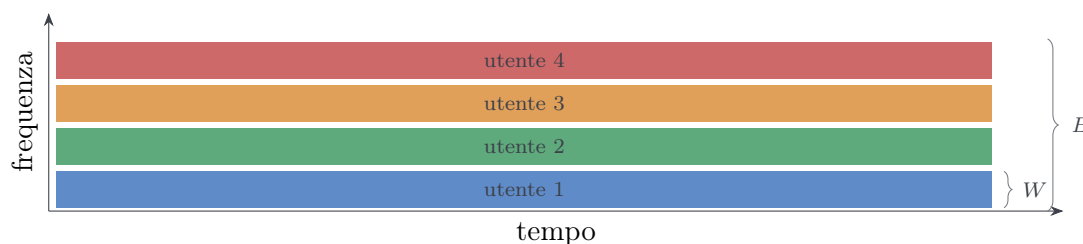
$$C_{\text{canale}} = \frac{C}{N}$$

Chi ha un canale trasmette alla capacità C del collegamento, ma solo per $1/N$ del tempo. Per esempio un collegamento da 10 Gbit/s diviso in 10 canali TDM dà a ciascun canale 1 Gbit/s.

3.2 Multiplazione a divisione di frequenza

Definizione – FDM

Nel **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*) la banda passante B del collegamento (Capitolo 1) è divisa in **sottobande** non sovrapposte, ciascuna assegnata a una comunicazione. Gli utenti trasmettono per tutto il tempo, anche insieme, senza interferire.



Proposizione – Velocità di un sottocanale FDM

La velocità di un sottocanale dipende solo dalla **larghezza** W della sua sottobanda, non dalla sua posizione sull'asse delle frequenze: una sottobanda a frequenze più alte, con la stessa W , non dà una velocità maggiore.

Sottobande di uguale larghezza ripartiscono il collegamento in modo equo; il sistema può anche assegnare sottobande più larghe ad alcuni utenti, per esempio a chi paga di più. Una banda passante più larga ospita più sottobande, cioè più utenti.

	TDM	FDM
Si divide	il tempo, in slot	la banda passante, in sottobande
Canale di un utente	uno slot in ogni frame	una sottobanda di larghezza W
Quando trasmette	solo nel suo slot	sempre
Con quale banda	tutta la banda B	solo la sua sottobanda
Utenti insieme	no	sì

4 Canali liberi, instaurazione e blocco

Proposizione – Condizione di instaurazione

Ogni collegamento del percorso è multiplato in canali. Il circuito si può instaurare lungo un percorso solo se su **ogni** collegamento del percorso c'è almeno un canale libero; la rete assegna allora quel canale al circuito, in uso esclusivo. Il canale può cambiare da un collegamento all'altro.

Il canale è uno slot TDM o una sottobanda FDM; in linea di principio ogni collegamento può usare una tecnica di multiploazione diversa.

Con i canali, la tabella di commutazione (Sezione 2.1) ha una parte d'**ingresso** e una d'**uscita**, ciascuna con **porta** e **canale**: ciò che arriva su una porta e un canale d'ingresso esce su una porta e un canale d'uscita. Per il circuito $A-C$ della Sezione 2, con i canali 1 fra A e R_1 , 5 fra R_1 e R_2 , 7 fra R_2 e R_3 :

Commutatore	Circuito	Ingresso		Uscita	
		porta	canale	porta	canale
R_1	$A-C$	1	1	2	5
R_2	$A-C$	1	5	2	7

Il commutatore rilancia **subito** ogni bit che riceve sulla porta e sul canale d'ingresso; le reti a pacchetto, invece, non lo fanno. A instaurazione finita sorgente e destinazione sono unite come da un cavo virtuale.

Definizione – Blocco

Se nessun percorso ha almeno un canale libero su ogni collegamento, la rete rifiuta la richiesta: è un evento di **blocco**. La **probabilità di blocco** è uno dei principali parametri prestazionali di una rete a circuito.

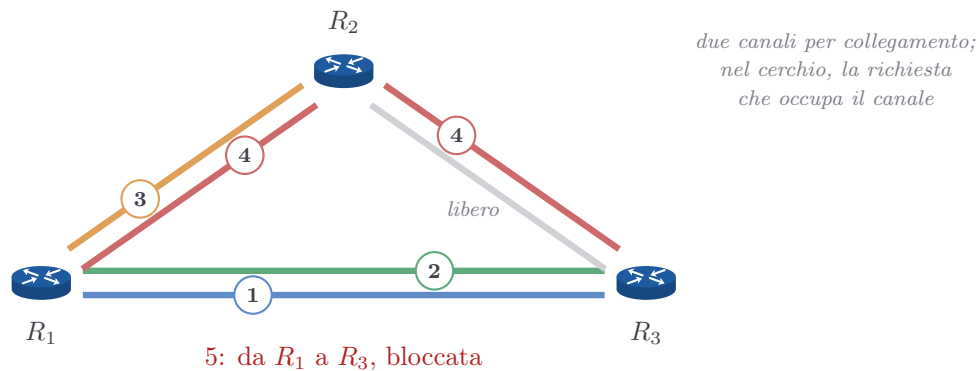
Quando molti utenti chiedono un circuito nello stesso momento, come per gli auguri di Capodanno nella rete telefonica, i canali si esauriscono e alcune chiamate non si instaurano.

Esempio – Blocco con due canali per collegamento

Tre commutatori R_1 , R_2 , R_3 sono collegati a triangolo e ogni collegamento ha due canali. Arrivano cinque richieste da utenti di R_1 , e nessun circuito viene rilasciato:

1. verso R_3 : percorso diretto, canale 1 di R_1-R_3 ;
2. verso R_3 : canale 2 di R_1-R_3 , che ora è pieno;
3. verso R_2 : canale 1 di R_1-R_2 ;
4. verso R_3 : il collegamento diretto è pieno, quindi il percorso è R_1, R_2, R_3 , con il canale 2 di R_1-R_2 e il canale 1 di R_2-R_3 ;
5. verso R_3 : R_1-R_3 è pieno, e passando per R_2 lo è R_1-R_2 . Nessun percorso ha un canale libero su ogni collegamento: la richiesta è **bloccata**.

Il blocco avviene anche se il canale 2 di R_2-R_3 è ancora libero.

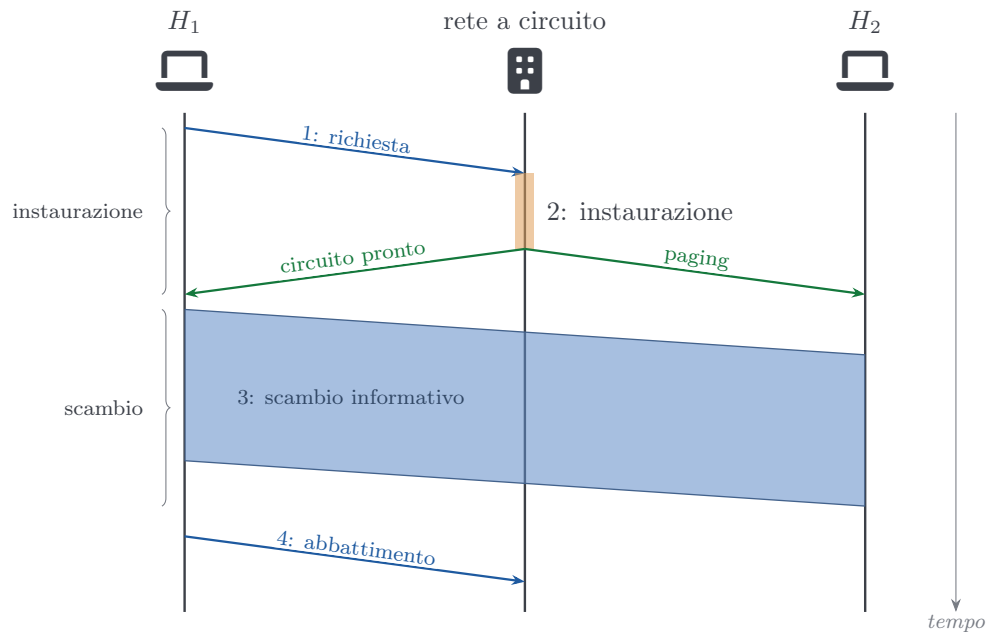


Il **rilascio** è indispensabile perché la multiplazione è statica: finché il circuito resta attivo, i suoi canali sono bloccati e nessun altro può usarli. Senza rilasci, come nell'esempio, presto nessun collegamento ha più canali liberi.

5 Diagramma spazio-tempo

Definizione – Diagramma spazio-tempo

Il **diagramma spazio-tempo** descrive un protocollo con lo **spazio** sull'asse orizzontale, dove stanno gli attori (sorgente, rete, destinazione), e il **tempo** sull'asse verticale, che scorre verso il basso. Ogni attore ha il proprio asse dei tempi, ma il tempo è uno solo: ripetere l'asse è una comodità grafica.



Nel diagramma le quattro fasi della Sezione 2 si leggono così:

1. la richiesta va da H_1 alla rete su una freccia **inclinata**, perché impiega tempo ad arrivare: una freccia orizzontale vorrebbe dire propagazione istantanea;
2. la rete instaura il circuito al proprio interno, poi avvisa i due utenti che il circuito è pronto: in una telefonata, dopo il tasto verde c'è un silenzio, poi chi chiama sente il segnale di ritorno e al destinatario squilla il telefono (*paging*);
3. lo scambio informativo, disegnato da H_1 a H_2 ma bidirezionale;
4. il messaggio di abbattimento, inviato da uno dei due utenti.

Definizione – Tempo di propagazione

Il **tempo di propagazione** è il tempo che un segnale impiega a percorrere un collegamento. Il segnale è un'onda elettromagnetica, veloce quasi come la luce, ma non arriva istantaneamente: il tempo cresce con la lunghezza del collegamento.

Nelle reti piccole vale pochi microsecondi ed è trascurabile. Non lo è con un satellite geostazionario, a circa 36 000 km da terra: andare al satellite e tornare richiede circa 250 ms, il **tempo di andata e ritorno** (RTT, *round trip time*), un ritardo fastidioso per alcune applicazioni.

6 Pregi e limiti della commutazione di circuito

Proposizione – Prestazioni deterministiche

Instaurato il circuito, le sue prestazioni sono **deterministiche**, cioè note in anticipo e costanti per tutta la comunicazione, perché le risorse sono riservate:

- il **ritardo end-to-end**, il tempo che un messaggio impiega dalla sorgente alla destinazione;
- la **banda**, cioè il bit rate del canale, in bit/s.

Nota – Due significati di «banda»

«Banda» indica sia una larghezza di frequenze, in hertz (la banda passante del Capitolo 1, le sottobande FDM), sia il bit rate, in bit/s. Nelle prestazioni di una rete, banda significa bit rate.

Contano per le applicazioni sensibili a ritardo e banda. Una chiamata vocale sotto circa 4–8 kbit/s arriva a scatti, e con un ritardo end-to-end troppo grande la conversazione non procede: un canale riservato garantisce entrambe le soglie. Le prestazioni si calcolano anche in modo analitico (Sezione 7).

Proposizione – Limiti della commutazione di circuito

1. È **orientata alla connessione** (*connection oriented*): prima di comunicare servono la richiesta e l'instaurazione.
2. L'**efficienza**, cioè quanto bene si sfrutta la capacità dei collegamenti, può essere bassa: un circuito non usa la capacità che gli altri canali lasciano libera.
3. Una richiesta può essere rifiutata: c'è una probabilità di **blocco** (Sezione 4).
4. Se lo scambio è breve, l'**instaurazione** dura quanto lo scambio o di più.

Per il punto 2: un collegamento da 100 Gbit/s diviso in 10 canali dà a ogni circuito 10 Gbit/s. Un utente che deve trasferire un file enorme, anche se è l'unico nella rete, usa solo il 10% della capacità del collegamento.

Per il punto 4: nel diagramma della Sezione 5 l'instaurazione (fasi 1 e 2) dura T_{setup} e lo scambio informativo T_{utile} ; la comunicazione dura in tutto $T_{\text{tot}} = T_{\text{setup}} + T_{\text{utile}}$.

Definizione – Efficienza di un circuito

L'**efficienza** di un circuito è la frazione del tempo totale occupata dallo scambio informativo:

$$\eta = \frac{T_{\text{utile}}}{T_{\text{tot}}}$$

Dividendo per T_{utile} , $\eta = 1/(1 + T_{\text{setup}}/T_{\text{utile}})$: l'efficienza è vicina a 1 se lo scambio dura molto più dell'instaurazione e scende sotto 1/2 se dura meno.

La telefonia è il caso adatto: una chiamata dura da pochi secondi ad alcune ore, e l'instaurazione circa un secondo. I calcolatori invece si scambiano pochi byte in pochi millisecondi: l'instaurazione durerebbe più dello scambio, ed è una delle ragioni per cui Internet è una rete a pacchetto.

7 Tempo di trasferimento su un circuito**Proposizione – Capacità di un circuito**

Se tutti i collegamenti del percorso hanno capacità C e sono divisi in N canali TDM, il circuito ha la capacità di un solo canale, qualunque sia il numero di commutatori:

$$C_{\text{circuito}} = \frac{C}{N}$$

Su ogni collegamento il circuito ha un canale della stessa capacità: è un tubo di sezione costante, senza un collo di bottiglia (Capitolo 1) più stretto degli altri. Per chi trasmette, il circuito è un unico collegamento diretto di capacità C_{circuito} .

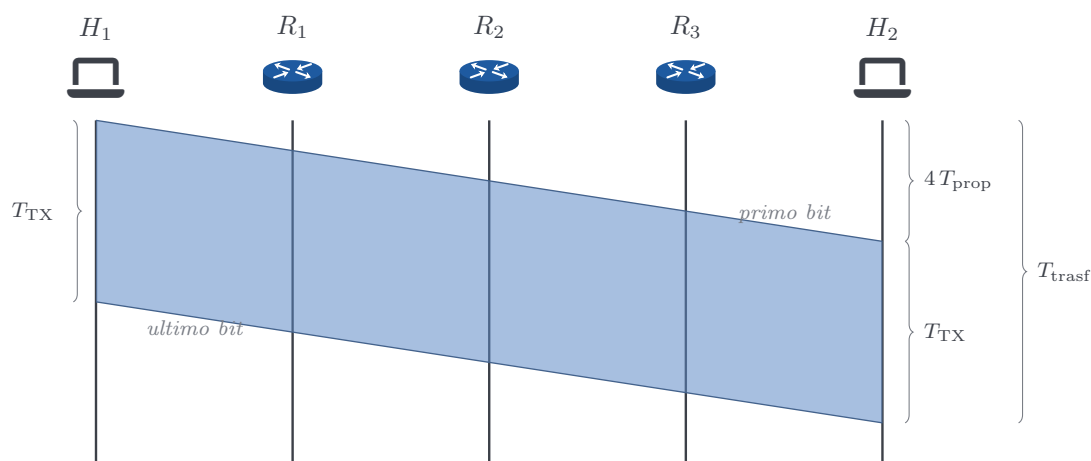
Definizione – Tempo di trasmissione

Il **tempo di trasmissione** è il tempo per immettere nel circuito tutti gli F bit di un file, alla capacità del circuito:

$$T_{\text{TX}} = \frac{F}{C_{\text{circuito}}}$$

Su un collegamento con propagazione trascurabile, T_{TX} coincide con il tempo di trasferimento $T = F/C$ del Capitolo 1.

La scheda di rete della sorgente trasmette i bit uno dopo l'altro alla capacità del circuito. Ogni bit, come onda elettromagnetica, raggiunge il primo commutatore dopo il tempo di propagazione; il commutatore lo rilancia subito, e così via fino alla destinazione. Intanto i bit successivi viaggiano o aspettano nella scheda di rete.



Un **salto** (*hop*) è il passaggio da un dispositivo al successivo lungo il percorso: il numero di salti N_{hop} è il numero di collegamenti attraversati. Il circuito A–C della Sezione 2, da A a C per R_1, R_2, R_3, R_4 , fa 5 salti; il percorso della figura ne fa 4.

Proposizione – Tempo di trasferimento e tempo totale

Su un percorso di N_{hop} salti, ciascuno con tempo di propagazione T_{prop} , con elaborazioni istantanee nei commutatori e senza errori sui bit né perdite:

- l'ultimo bit arriva a destinazione dopo il **tempo di trasferimento**

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

- con l'instaurazione, la comunicazione dura il **tempo totale**

$$T_{\text{tot}} = T_{\text{setup}} + T_{\text{trasf}}$$

Dimostrazione

1. La sorgente trasmette i bit dall'istante 0 all'istante T_{TX} , quando parte l'ultimo.
2. Ogni bit, rilanciato subito da ogni commutatore, arriva a destinazione $N_{\text{hop}} T_{\text{prop}}$ dopo essere partito.
3. L'ultimo bit arriva quindi all'istante $T_{\text{TX}} + N_{\text{hop}} T_{\text{prop}}$. Il tempo totale aggiunge l'instaurazione, che viene prima e dura T_{setup} .

□

Il numero di salti conta solo nella propagazione: il tempo di trasmissione è lo stesso con uno o cento commutatori. Se il tempo di propagazione non è dato, lo si trascura, come in una rete locale dove vale pochi microsecondi: allora $T_{\text{trasf}} = T_{\text{TX}}$.

Il tempo utile dell'efficienza (Sezione 6) è il tempo di trasferimento. Errore tipico: dare come tempo totale il solo tempo di trasferimento, dimenticando T_{setup} . Un calcolo completo è l'Esercizio 1.

Riepilogo

- **Rete core:** commutatori e link; circuito (vecchia telefonia) o pacchetto (Internet).
- **Circuito virtuale:** richiesta, instaurazione, scambio informativo, rilascio.
- **Instaurazione:** canale libero su ogni link; tabelle con porte e canali.
- **Multiploazione statica:** TDM, uno slot per frame, C/N ; FDM, conta solo W .
- **Blocco:** nessun percorso con un canale libero su ogni link.
- **Pregi e limiti:** prestazioni garantite; instaurazione, capacità inutilizzata, blocco.
- **Efficienza:** $\eta = T_{\text{utile}}/T_{\text{tot}}$, alta se lo scambio dura molto più dell'instaurazione.
- **Tempo totale:** $T_{\text{setup}} + F/C_{\text{circuito}} + N_{\text{hop}} T_{\text{prop}}$.

8 Esercizi

Esercizio 1 – File su un circuito TDM

Quanto tempo occorre per inviare un file di 640 000 bit dall'host A all'host B su una rete a commutazione di circuito? Tutti i collegamenti hanno bit rate 2,048 Mbit/s e usano TDM con 32 slot al secondo (un frame di 1 s diviso in 32 slot); servono 500 ms per instaurare il circuito punto-punto. Qual è l'efficienza del circuito?

Soluzione a pagina 12 →

Esercizio 2 – Appelli del 12/01/2023, domanda 10, e del 08/02/2023, domanda 2, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo

Avendo un canale in banda traslata di dimensione 40 MHz:

- con una multiploazione FDM si possono teoricamente moltiplicare fino a 10 comunicazioni digitali con occupazione di banda 2 MHz ognuna;
- si può avere sempre solo una singola comunicazione digitale per volta di banda 20 MHz;
- con una multiploazione FDM si possono teoricamente moltiplicare fino a 20 comunicazioni digitali con occupazione di banda 2 MHz ognuna;
- si può avere sempre solo una singola comunicazione digitale per volta di banda 40 MHz.

Soluzione a pagina 12 →

9 Soluzioni

Soluzione dell'Esercizio 1 – File su un circuito TDM

Capacità del circuito. Ogni frame ha 32 slot, quindi ogni collegamento ha $N = 32$ canali, e il circuito ha la capacità di un canale, qualunque sia il numero di commutatori:

$$C_{\text{circuito}} = \frac{C}{N} = \frac{2048 \times 10^3 \text{ bit/s}}{32} = \frac{2^{11}}{2^5} \cdot 10^3 \text{ bit/s} = 2^6 \cdot 10^3 \text{ bit/s} = 64 \text{ kbit/s}.$$

Tempo di trasferimento. La propagazione non è data e si trascura, quindi

$$T_{\text{trasf}} = T_{\text{TX}} = \frac{F}{C_{\text{circuito}}} = \frac{640\,000 \text{ bit}}{64\,000 \text{ bit/s}} = 10 \text{ s}.$$

Tempo totale. Va sommata l'instaurazione, $T_{\text{setup}} = 500 \text{ ms} = 0,5 \text{ s}$:

$$T_{\text{tot}} = T_{\text{setup}} + T_{\text{trasf}} = 0,5 \text{ s} + 10 \text{ s} = \boxed{10,5 \text{ s}}.$$

Efficienza. Il tempo utile è il tempo di trasferimento:

$$\eta = \frac{T_{\text{utile}}}{T_{\text{tot}}} = \frac{10 \text{ s}}{10,5 \text{ s}} \approx \boxed{0,95}.$$

L'efficienza è alta perché lo scambio dura 20 volte l'instaurazione.

[← Torna all'Esercizio 1, pagina 11](#)

Soluzione dell'Esercizio 2 – Appelli del 12/01/2023, domanda 10, e del 08/02/2023, domanda 2, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo

Conta solo la larghezza della banda, non la sua posizione sull'asse delle frequenze: che sia traslata, cioè lontana dallo zero, non cambia nulla. L'FDM divide la banda $B = 40 \text{ MHz}$ in sottobande non sovrapposte, una per comunicazione, e tutte trasmettono insieme. Con sottobande di $W = 2 \text{ MHz}$:

$$N = \frac{B}{W} = \frac{40 \text{ MHz}}{2 \text{ MHz}} = 20.$$

- b e d sono false: la multiplazione serve proprio a far convivere più comunicazioni sullo stesso canale.
- a è falsa come limite: 10 comunicazioni da 2 MHz occupano solo 20 MHz dei 40 disponibili.

Risposta: ☒ c.

[← Torna all'Esercizio 2, pagina 11](#)