

Capitolo 1: Introduzione alle reti di telecomunicazione

1.1 Caratteristiche generali dei segnali e dei sistemi di telecomunicazione

I segnali che sono incontrati nelle applicazioni pratiche presentano spesso caratteristiche diverse tra loro, come è stato in parte già sottolineato nei precedenti capitoli. Per questo motivo la scelta e la realizzazione di un sistema di comunicazione deve sempre essere effettuata tenendo presenti le principali caratteristiche e requisiti dei segnali da trasmettere. Per alcuni segnali, come ad esempio il segnale telefonico o il segnale video, non sono accettabili ritardi troppo elevati e quindi il sistema di comunicazione deve garantire che il segnale sia ricevuto entro un massimo intervallo di tempo prefissato. Per altri segnali, quali ad esempio il traffico dati su Internet, il requisito essenziale è la correttezza dell'informazione ricevuta, mentre non esistono vincoli stringenti sul massimo ritardo.

Differenti tipi di traffico pongono requisiti diversi alla rete di comunicazione; per questo, una rete ottima per una certa classe di traffico può non risultare efficiente per altre classi di traffico.

La rete telefonica è stata ottimizzata per il traffico telefonico, ma è poco adatta per la trasmissione dei dati. Una rete o un sistema di comunicazione utilizzato in modo inefficiente non solo offre prestazioni non soddisfacenti, ma può comportare anche un costo maggiore per l'utente.

Una caratteristica fondamentale per ciascun segnale numerico è il numero di bit per secondo richiesti per rappresentarlo. Ad esempio, per trasmettere un segnale telefonico in forma numerica utilizzando un sistema PCM è necessaria una velocità di 64 Kb/s. Tuttavia, il numero di bit necessari per rappresentare o trasmettere un segnale è spesso un numero variabile con il tempo, poiché dipende dal contenuto informativo e dalla tecnica di codifica utilizzata per rappresentare il segnale.

Un esempio tipico del numero R di bit/s (o bit-rate) necessari per trasmettere un segnale al variare del tempo è mostrato nella Figura 1.1. Come si può mostrare il valore di R può variare notevolmente nel tempo.

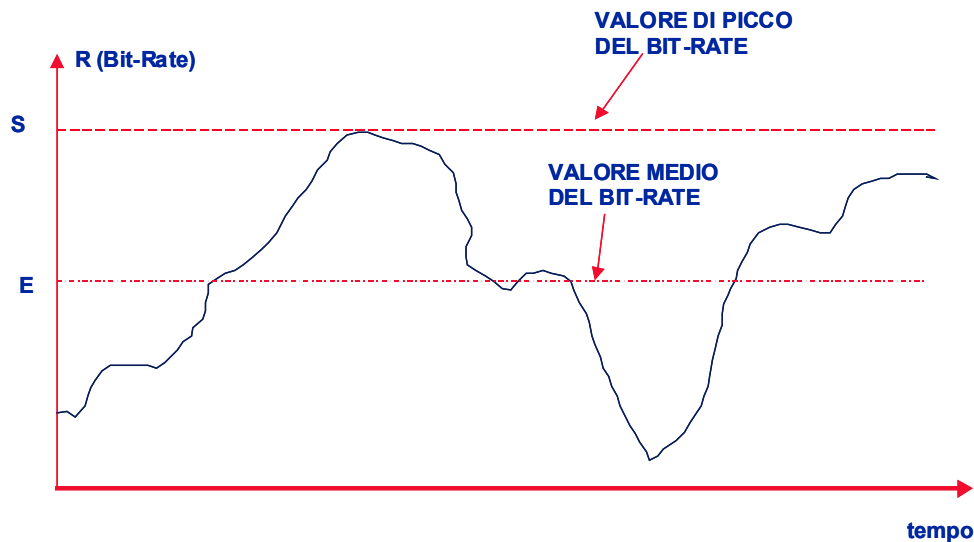


Figura 1.1. Esempio del bit rate R di un segnale in funzione del tempo.

In molti casi esiste una notevole differenza tra il valore massimo (o di picco) S e quello minimo. Il valore medio E del bit-rate R è un parametro caratteristico di ciascuna classe di segnali. Ad esempio, per il segnale telefonico si ha $E = 32\text{Kb/s}$ e $S = 64\text{Kb/s}$, mentre per un segnale video di qualità standard E può essere $20 - 30\text{ Mb/s}$ e S circa 2 – 3 volte più grande. Per trasmettere un segnale con un bit-rate variabile si possono adottare varie strategie.

Una soluzione possibile per trasmettere tale segnale è di utilizzare una rete con una velocità uguale al massimo valore di R . In questo caso si ha una riproduzione esatta del segnale numerico, tuttavia, in molti istanti si ha uno spreco della banda del sistema di comunicazione poiché in molti casi sarebbe necessaria una velocità di trasmissione più bassa (Figura 1.2).

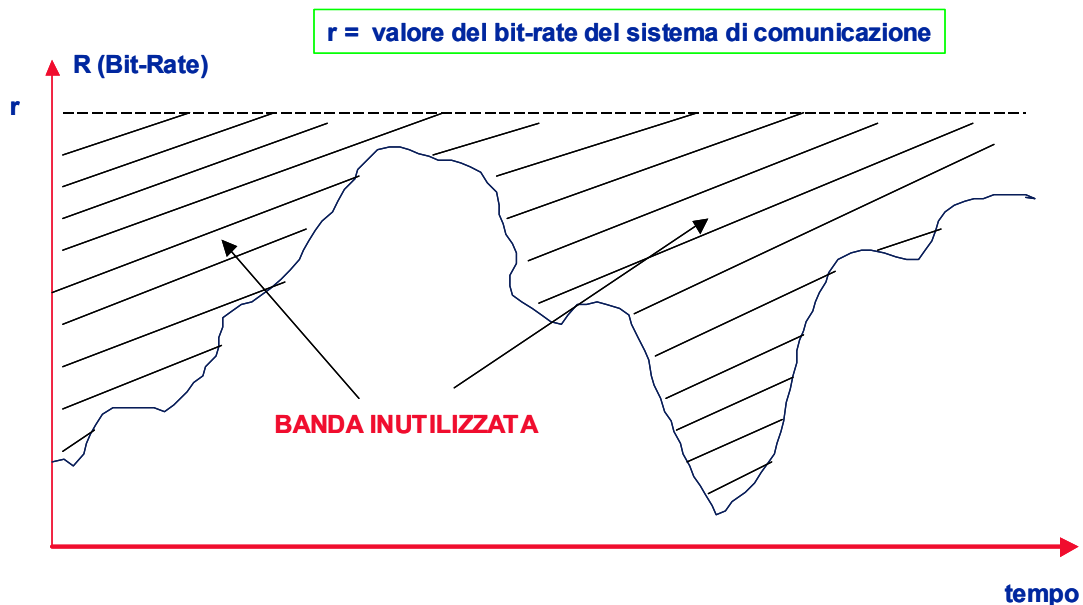


Figura 1.2. Situazione in cui la rete ha un bit-rate maggiore o uguale a S .

Per ovviare a questo inconveniente e tenendo conto che in molti segnali il valore massimo viene raggiunto solo raramente si può decidere di trasmettere ad una velocità V inferiore rispetto a quella massima. In questo caso, quando il segnale genera un bit – rate superiore a V si ha una riduzione della qualità del segnale. Tuttavia, anche in questo caso se $R < V$ si ha uno spreco di banda del sistema di comunicazione. Per evitare che si verifichi in alcuni momenti uno spreco di banda, si può trasmettere ad ogni istante il numero di bit informativi contenuti effettivamente nel segnale.

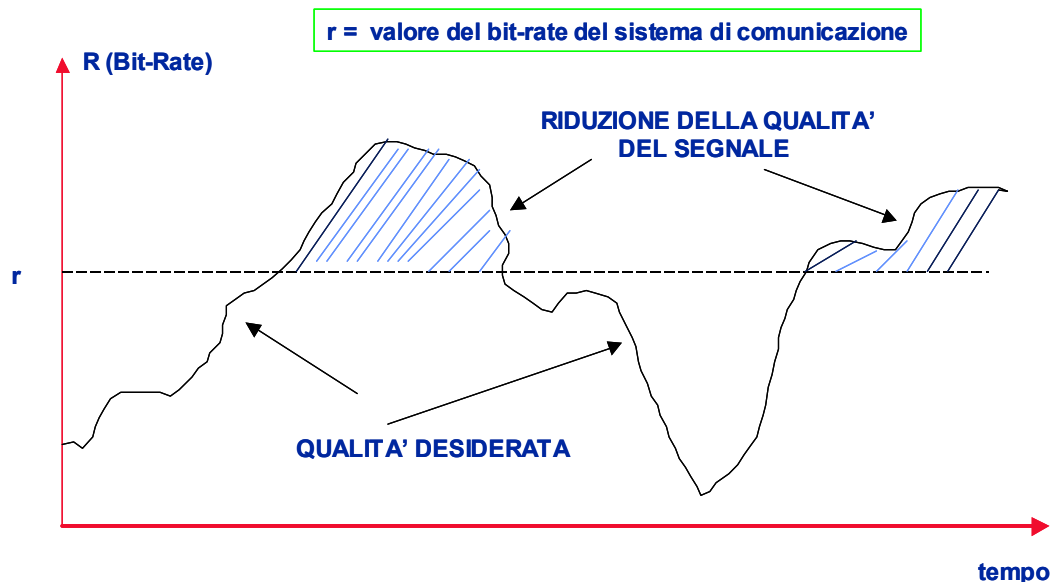


Figura 1.3. Situazione in cui la rete ha un bit-rate V minore di S .

In base a queste considerazioni i servizi possono essere divisi in due categorie:

- *Servizi isocroni o a bit rate fisso*: sono servizi con un bit – rate costante nel tempo. Un esempio tipico è il segnale telefonico codificato mediante un sistema PCM, che richiede una velocità fissa di 64 Kb/s.
- *Servizi asincroni o a bit rate variabile*: sono servizi in cui il numero di bit inviati nella rete varia nel tempo.

Il traffico dati generato da un computer è generalmente assimilabile ad un traffico asincrono: i messaggi sono generati ad istanti casuali e hanno lunghezza variabile, gli intervalli di tempo tra due messaggi consecutivi hanno generalmente una durata molto maggiore di quella dei messaggi (spesso di diversi ordini di grandezza). Come conseguenza, dedicare un canale di comunicazione soltanto alla trasmissione di un segnale di questo tipo comporta sia uno spreco di risorse di comunicazione (poiché per periodi di tempo significativi non si ha nessun segnale da trasmettere) sia un costo elevato per l'utente. Si tratta perciò di una situazione molto diversa rispetto al caso del segnale telefonico numerico in cui esiste ad ogni intervallo di tempo $T = 125 \mu\text{sec}$ un gruppo di 8 bit (un campione) da trasmettere.

1.2. Tecniche di commutazione

Il trasferimento dell'informazione (voce, dati, ...) tra due (o più) stazioni attraverso una rete di comunicazioni può essere effettuato utilizzando diverse procedure, chiamate *tecniche di commutazione* che differiscono per l'uso delle risorse di comunicazione e possono essere divise in tre principali categorie:

- *Commutazione di circuito;*
- *Commutazione di messaggio;*
- *Commutazione di pacchetto.*

Ciascuna classe è ottima per la trasmissione di certi tipi di traffico, mentre può non risultare adatta a trasmettere altre categorie di traffico.

Commutazione di circuito

In questo tipo di commutazione, un circuito è assegnato a due utenti per tutta la durata del collegamento; nessun altro utente può utilizzarlo in questo periodo. Il termine circuito è utilizzato in modo generico per indicare una risorsa di rete; esso può essere un circuito fisico (bidirezionale) effettivo, una porzione di banda, un intervallo di tempo.

La commutazione di circuito è stata utilizzata sin dall'inizio nella rete telefonica. Quando un utente effettua una chiamata verso un altro utente, la rete costruisce un collegamento fisico riservato soltanto ai due utenti per tutta la durata della chiamata.

Nella commutazione di circuito si possono distinguere tre fasi:

1. creazione del circuito. Nel caso del collegamento telefonico, questa fase inizia quando il primo utente compone il numero e termina quando l'altro utente risponde.
2. trasferimento dell'informazione da un utente all'altro. Nel caso telefonico, corrisponde alla conversazione tra i due utenti. Il trasferimento dell'informazione può avvenire soltanto dopo la conclusione della fase 1.
3. abbattimento del collegamento. Dopo la fine del trasferimento dell'informazione (uno dei due utenti chiude il collegamento), la rete effettua una serie di operazioni per liberare il circuito e renderlo nuovamente disponibile per altri utenti.

La commutazione di circuito è generalmente adatta alla trasmissione di segnali continui nel tempo e che presentano una durata temporale (fase di trasferimento dell'informazione) molto maggiore rispetto alle altre due fasi (creazione e abbattimento del collegamento). Un esempio tipico è rappresentato da una conversazione telefonica, in cui il segnale è (almeno in linea di principio) sempre presente fino a quando dura la conversazione tra i due utenti. Inoltre, la fase di conversazione è abbastanza grande (in base a misure effettuate una conversazione telefonica ha una durata media di circa 3 min) rispetto alla fase iniziale e finale che generalmente richiedono qualche decina di secondi).

La commutazione di circuito, una volta completata la fase di creazione del collegamento, non richiede alcuna operazione aggiuntiva per il trasferimento dell'informazione.

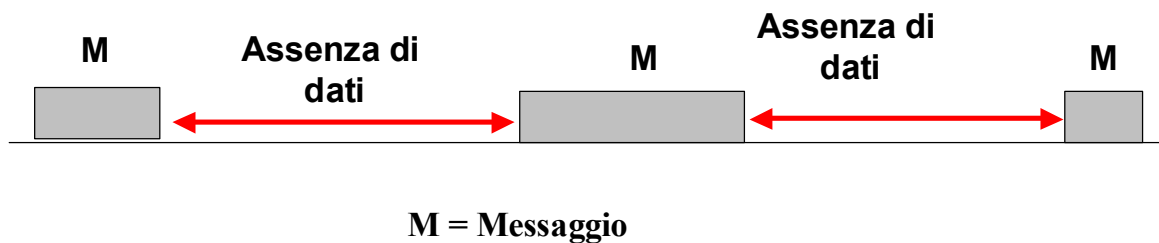


Figura 1.4 . Comportamento tipico di una sorgente dati.

Commutazione di messaggio

Nella commutazione di messaggio, ogni messaggio è considerato un'unità informativa autonoma, e segue per arrivare a destinazione un percorso deciso volta per volta in base allo stato della rete. Un circuito (cioè una risorsa della rete) viene utilizzato soltanto per il tempo necessario per trasferire il messaggio; in questo modo, lo stesso circuito può essere utilizzato contemporaneamente da vari utenti.

Per spiegare il funzionamento della commutazione di messaggio, consideriamo l'esempio mostrato nella Figura 1.5 in cui il terminale A invia a B un insieme di messaggi (ad esempio tre messaggi indicati con M1, M2, M3). Ogni messaggio è composto da una testata (o header) H e dall'informazione, come mostrato nella Figura 1.6. La testata contiene tra l'altro gli indirizzi della stazione di destinazione (B) e della stazione che ha generato il messaggio (A); in questo modo ogni messaggio è autonomo, poiché contiene tutte le informazioni necessarie per portarlo a destinazione . Il messaggio viene inviato al nodo di commutazione che immagazzina il messaggio, lo inserisce nella coda dei

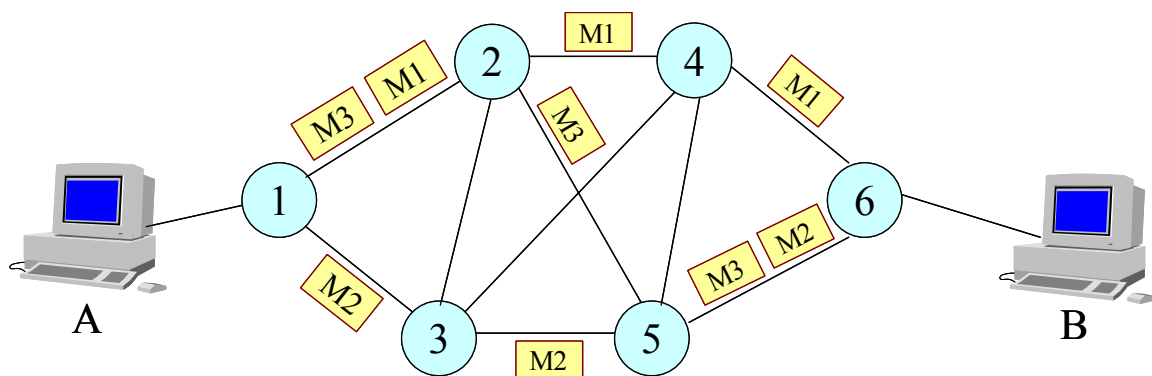


Figura 1.5. Esempio di collegamento tra due host.



Figura 1.6. Formato di un messaggio.

messaggi in attesa di essere trasmessi e, quando esso diventa il primo messaggio della coda, provvede ad instradarlo verso un nodo successivo della rete scelto in base al nodo di destinazione (contenuto nella testata) e utilizzando opportune tecniche di instradamento (o routing). Il funzionamento della rete è quindi basato sul concetto store and forward (memorizza e invia).

La commutazione di messaggio è molto più adatta alla trasmissione dati della commutazione di circuito; tuttavia è scarsamente utilizzata poiché la commutazione di pacchetto presenta prestazioni superiori. Una rete che utilizza la commutazione di messaggio è quella utilizzata per la distribuzione dei telegrammi.

Commutazione di pacchetto

La commutazione di pacchetto rappresenta un'evoluzione di quella di messaggio ed è utilizzata in molte reti per la trasmissione dati. In questa tecnica, il messaggio generato da un terminale viene diviso in pacchetti di dimensioni più ridotte, come mostrato nella Figura 1.7. Ogni pacchetto è formato da una testata H e da una parte dei dati del messaggio.

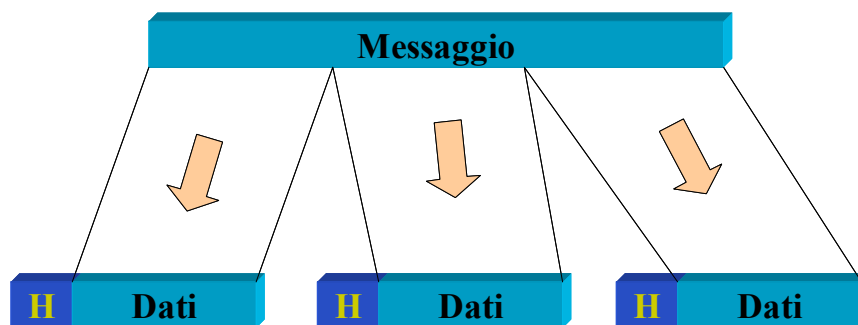


Figura 1.7 - Costruzione dei pacchetti.

La testata contiene numerosi campi utili per l'instradamento e la gestione dei dati, tra cui un numero progressivo che individua la posizione del pacchetto e gli indirizzi della stazione di destinazione e di trasmissione. In questo modo ogni pacchetto diventa un'entità autonoma.

La trasmissione dei pacchetti nella rete può essere effettuata utilizzando due diverse tecniche:

- datagram
- circuiti virtuali.

Nella commutazione di tipo datagram ogni pacchetto viene instradato nella rete in modo indipendente, per cui i pacchetti generati da un messaggio possono seguire strade diverse (Figura 1.8) e quindi i pacchetti possono arrivare al nodo di destinazione in ordine diverso rispetto a quello con cui sono stati generati. Il nodo terminale deve ricostruire l'ordine esatto dei pacchetti utilizzando il numero progressivo contenuto nella testata di ogni pacchetto.

Nella commutazione a circuiti virtuali i pacchetti generati a partire dallo stesso messaggio seguono tutti lo stesso percorso, come mostrato nella Figura 1.9. In questo modo i pacchetti sono sempre nell'ordine corretto con cui sono stati generati e quindi non è necessario al nodo terminale riordinare i pacchetti.

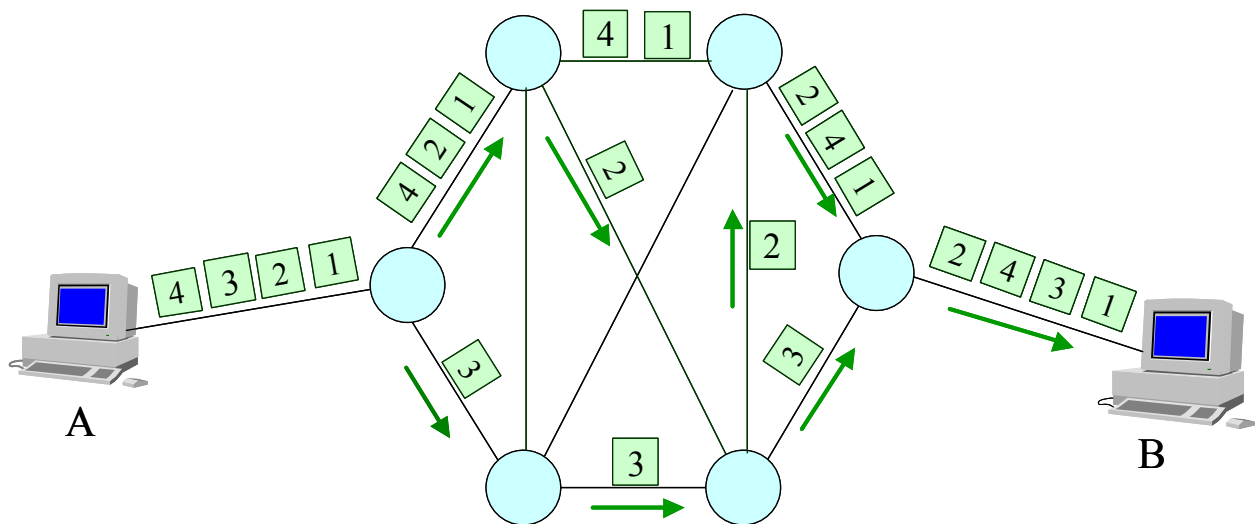


Figura 1.8. Commutazione di pacchetto di tipo datagram

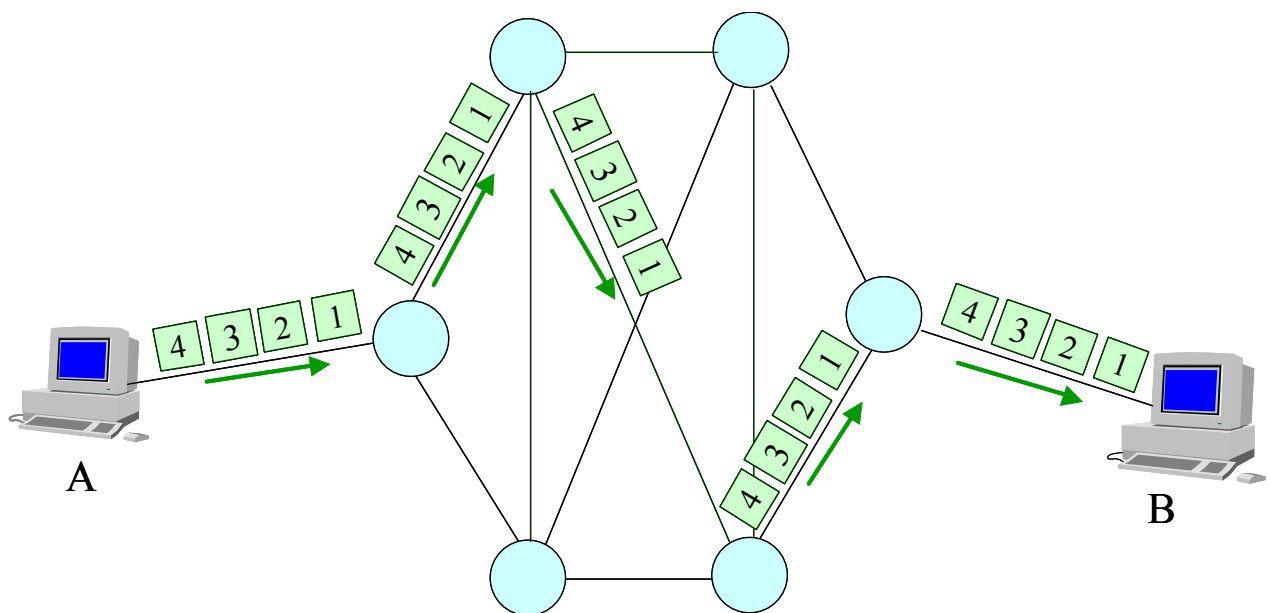


Figura 1.9. Commutazione di pacchetto di tipo a circuiti virtuali

Il termine circuito virtuale indica che, contrariamente a quanto accade nella commutazione di circuito, lo stesso circuito può essere condiviso tra diversi utenti.

Il circuito virtuale viene individuato prima della trasmissione dei pacchetti, per cui sono necessarie tutte le fasi presenti nella commutazione di circuito:

1. creazione del circuito virtuale;
2. trasmissione dei pacchetti;
3. abbattimento del circuito virtuale.

Una volta individuato il percorso, la trasmissione dei pacchetti è molto più veloce rispetto alla tecnica datagram poiché i diversi nodi non devono effettuare scelte o elaborare strategie di instradamento. Per questo motivo, la tecnica dei circuiti virtuali è molto utilizzata nelle moderne reti per la trasmissione di dati ad alta velocità

La tecnica datagram, utilizzata da Internet, presenta alcuni vantaggi rispetto alla tecnica a circuiti virtuali, quali:

- non è necessaria la creazione del circuito prima di iniziare la trasmissione;
- risulta molto più robusta a guasti e a malfunzionamenti; infatti, se un nodo o un link non funzionano correttamente il sistema a datagram identificherà percorsi alternativi, mentre nel caso di circuiti virtuali tutte le connessioni attive passanti per quel nodo o link sono interrotte;
- l'instradamento dei pacchetti della rete può essere progettato in modo da ridurre il periodo di congestione di un nodo o della rete.

La commutazione datagram richiede tuttavia che ogni pacchetto contenga l'indirizzo del nodo di destinazione di validità geografica e quindi con un numero consistente di bit. Ad esempio, Internet è una rete a commutazione di pacchetto di tipo datagram e utilizza indirizzi universali formati da 32 bit. Nella commutazione a circuiti virtuali, ogni pacchetto contiene un indirizzo relativo al circuito virtuale che ha una validità locale, per cui richiede un numero minore di bit.

Confronti tra le diverse tecniche di commutazione

Per illustrare in modo semplice le differenze tra i tre tipi di commutazione, consideriamo lo schema mostrato nella Figura 1.10, in cui viene disegnato il percorso scelto dal sistema per passare da A a B.

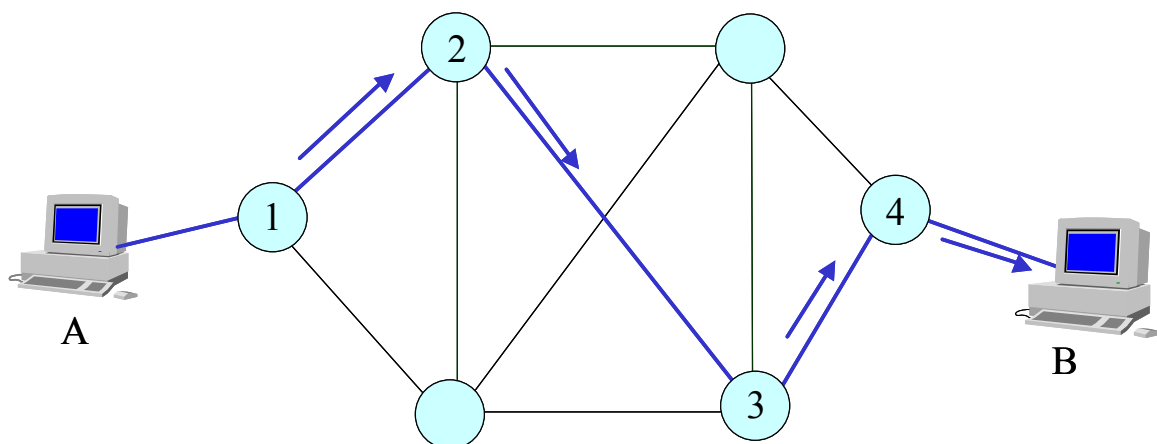


Figura 1.10. Esempio di collegamento tra due host.

Il diagramma temporale della trasmissione di un messaggio da A a B nel caso della commutazione di circuito è mostrato nella Figura 1.11, dove sono evidenziati i tempi di ritardo e di elaborazione incontrati dal messaggio nella rete. Nel disegno sono evidenziate le fasi necessarie per la costruzione del circuito, per il trasferimento del messaggio e per l'abbattimento del collegamento. Si possono evidenziare alcuni elementi caratteristici della commutazione di circuito:

- il ritardo totale con cui B riceve il messaggio è la somma dei tempi di ritardo introdotti dalle fasi 1 e 2;
- una volta terminata la costruzione del circuito (fase 1), il trasferimento del messaggio è immediato a parte il tempo richiesto al segnale per passare da A a B (ritardo di propagazione) e non è necessaria nessuna elaborazione ai nodi.

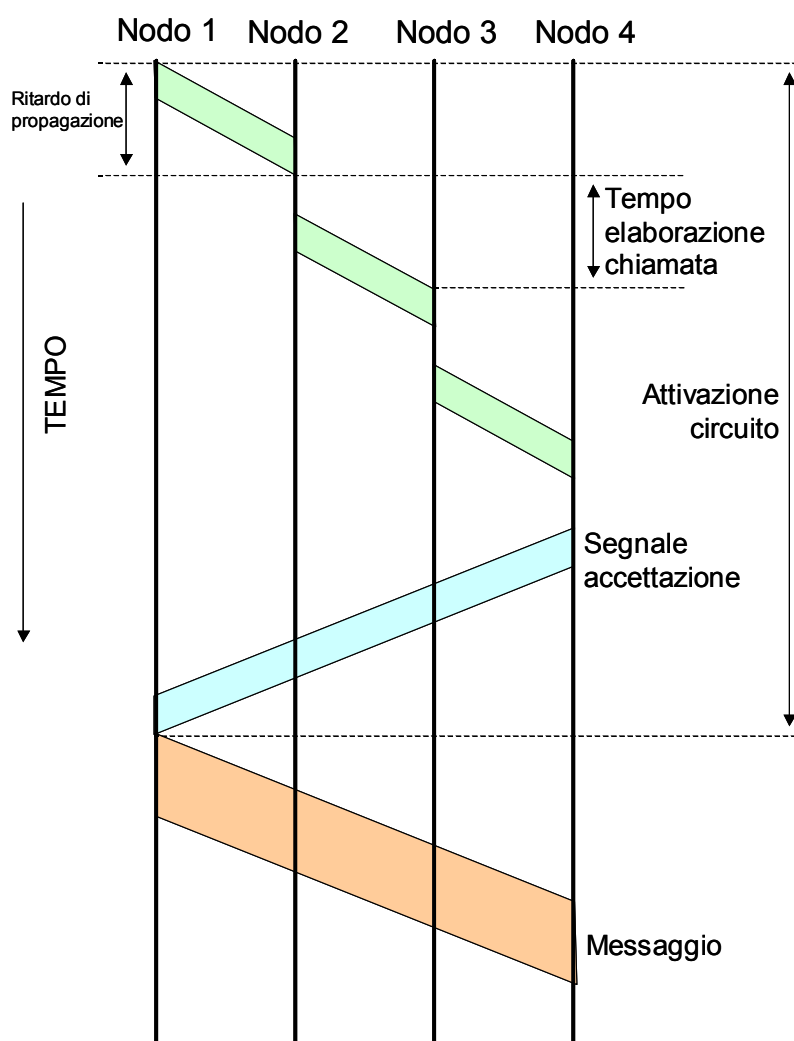


Figura 1.11. Diagramma temporale della commutazione di circuito per il caso di Figura 1.10.

- il ritardo introdotto dalle fasi 1 e 3 può essere superiore a quello dovuto alla trasmissione del messaggio;

- la fase 3 viene eseguita soltanto alla fine del collegamento una volta terminato il trasferimento di tutti i messaggi da A a B.

Nella commutazione di messaggio si ha una situazione abbastanza diversa. Consideriamo per questo il trasferimento del messaggio da A a B nella rete mostrata nella Figura 1.10 secondo il solito percorso evidenziato e utilizzando una commutazione di messaggio. Il diagramma temporale è mostrato nella Figura 1.12. In ogni nodo il messaggio subisce un ritardo dovuto al tempo di attesa in coda e al tempo di elaborazione necessario per identificare il nodo successivo di destinazione. Tuttavia, non c'è più il ritardo dovuto alla costruzione del circuito presente invece nella Figura 1.11. In generale, questo fatto consente di ottenere ritardi di trasmissione di un messaggio minori rispetto al caso della commutazione di circuito.

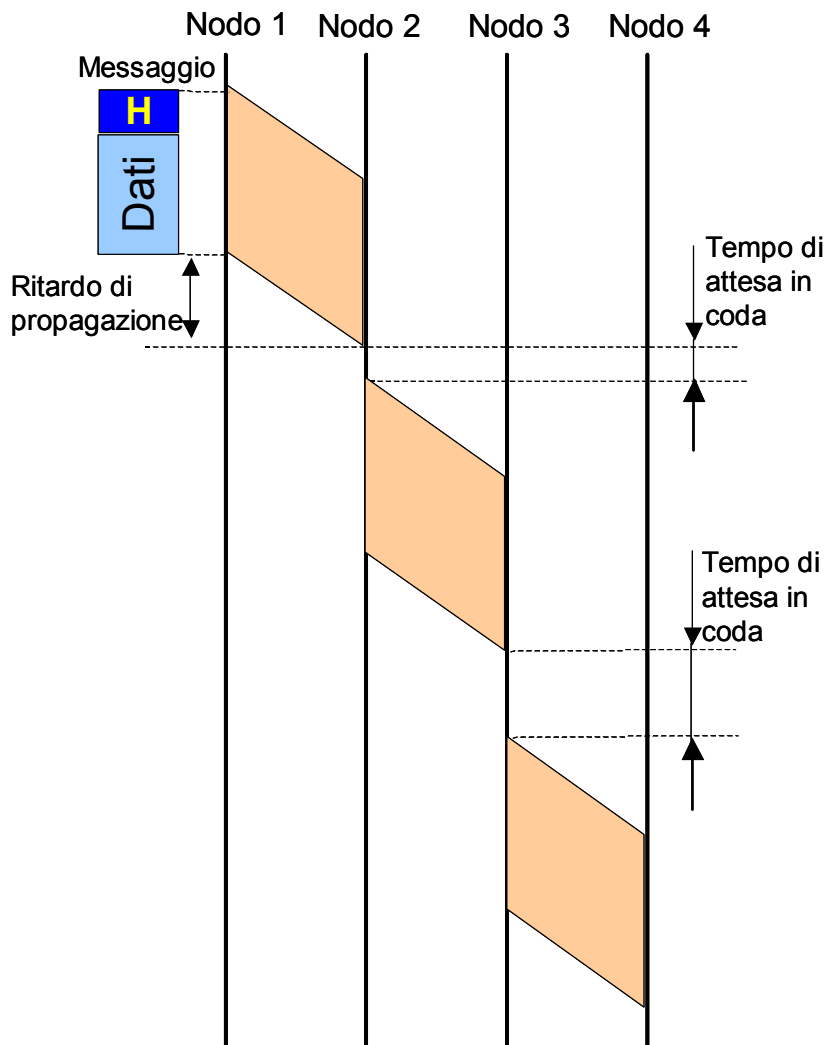


Figura 1.12. Diagramma temporale della commutazione di messaggio per il caso di Figura 1.10.

Nella commutazione di pacchetto, il messaggio viene diviso in pacchetti di dimensione ridotta e si può iniziare a trasmettere un pacchetto appena formato. In questo nodo della rete possono essere presenti contemporaneamente diversi pacchetti dello stesso

messaggio. Consideriamo anche in questo caso la rete della Figura 1.10 e supponiamo che il messaggio sia diviso in tre pacchetti, come nella Figura 1.7.

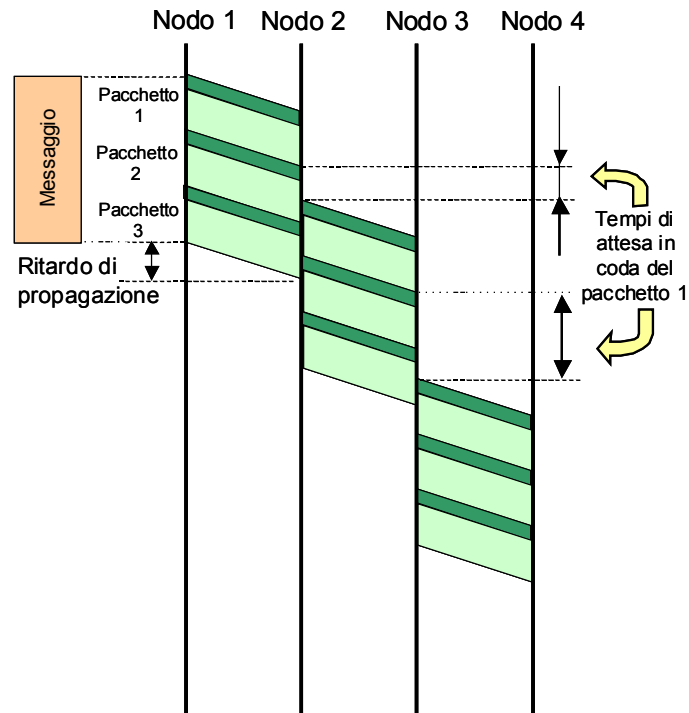


Figura 1.13. Diagramma temporale della commutazione di pacchetto di tipo datagram per il caso di Figura 1.10.

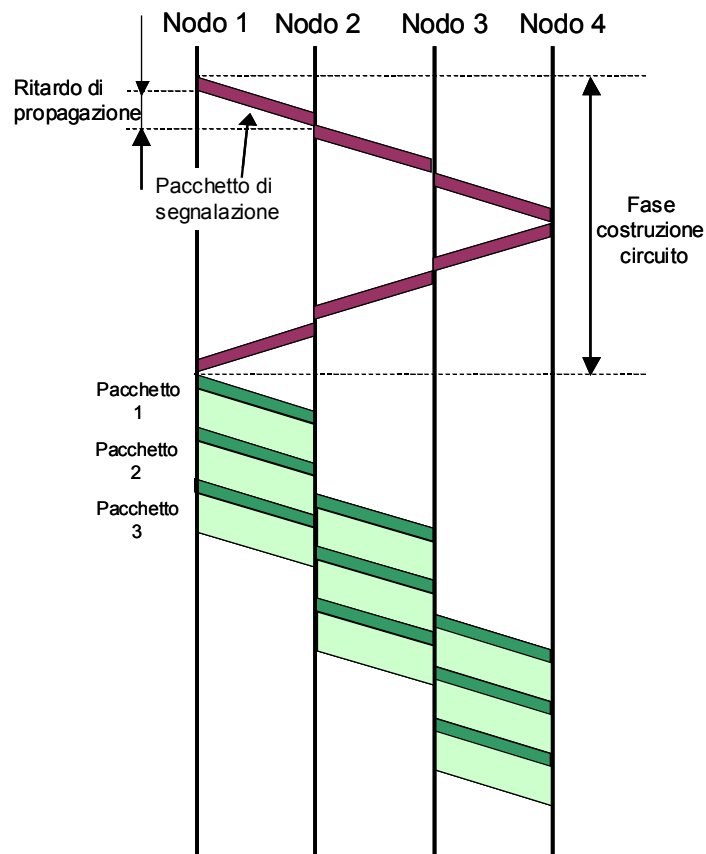


Figura 1.14. Diagramma temporale della commutazione di pacchetto di tipo a circuiti virtuali per il caso di Figura 1.10.

Il diagramma temporale dipende se la rete opera con una tecnica di tipo datagram o a circuiti virtuali. Nel caso di una rete di tipo datagram si ha il diagramma temporale mostrato nella Figura 1.13, mentre nel caso di una rete a circuiti virtuali si ha il diagramma mostrato nella Figura 1.14. Quest'ultimo tipo di commutazione presenta alcune caratteristiche simili alla commutazione di circuito (Figura 1.11) e in particolare la fase di costruzione del circuito. Tuttavia, in questo caso il circuito è virtuale e può quindi essere utilizzato da diversi utenti contemporaneamente.

1.3 Multiplex

Un canale di commutazione è capace spesso di trasportare contemporaneamente diversi segnali. Ad esempio, sui cavi telefonici o su un sistema satellitare possono essere trasmessi centinaia o migliaia di telefonate nello stesso istante. La possibilità di condividere le risorse e tra i diversi utenti consente di ridurre i costi di realizzazione della rete e quindi anche per l'utente. L'operazione con cui diversi segnali sono trasmessi sullo stesso canale (cavo, fibra, radio, ...) senza interferenze è chiamata multiplexing dei segnali e l'apparato che effettua tale operazione viene indicato con il nome di multiplex.

Un multiplex riceve N segnali distinti $s_1(t)$, $s_2(t)$, ..., $s_N(t)$ e li invia su un unico canale di uscita utilizzando opportune regole (o tecniche multiplex), come mostrato nella Figura 1.15.

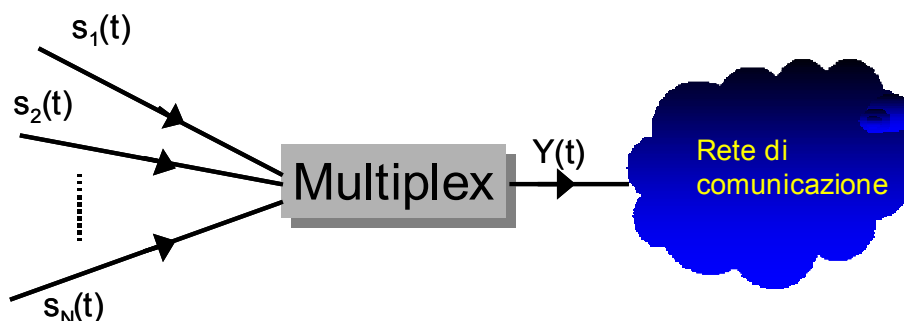


Figura 1.15. Un multiplex.

Il segnale in uscita $Y(t)$ è una combinazione degli N segnali in ingresso e da esso è possibile recuperare i segnali di partenza attraverso un'operazione di demultiplexing.

Le tecniche multiplex attualmente utilizzate si dividono in due classi:

- *multiplex a divisione di frequenza; indicati con la sigla FDM (Frequency Division Multiplex);*
- *multiplex a divisione di tempo, indicati con la sigla TDM (Time Division Multiplex).*

Un multiplex a divisione di frequenza trasporta lo spettro dei segnali al suo ingresso su frequenze diverse. Per spiegare in modo semplice questo concetto, consideriamo il caso

in cui all'ingresso del multiplex siano presenti due segnali $s_1(t)$ e $s_2(t)$, ambedue con lo spettro diverso da zero nell'intervallo $(0, B)$, come mostrato nella Figura 1.16.a.

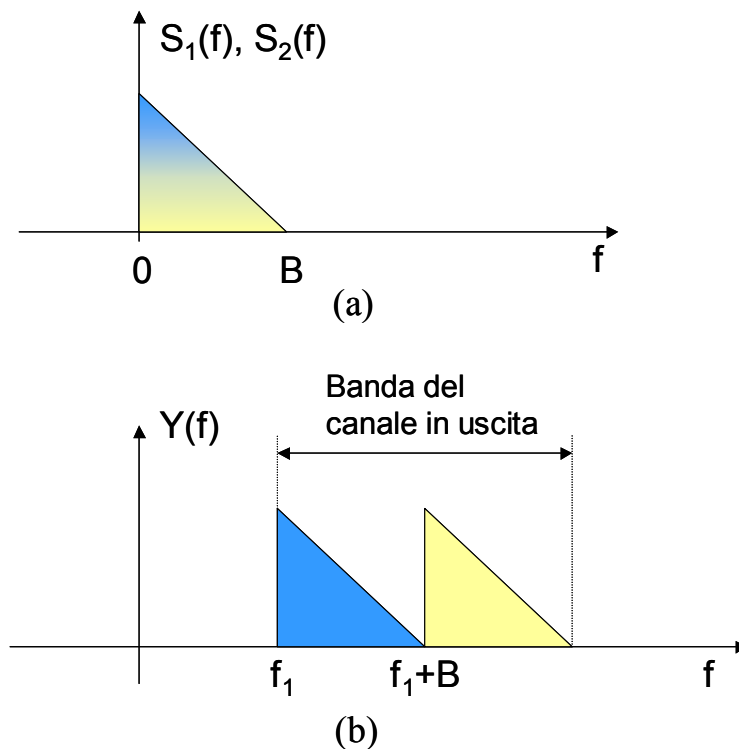


Figura 1.16. Esempio di multiplex FDM per due segnali.

Lo spettro del segnale $s_1(t)$ viene traslato in frequenza di f_1 , come mostrato nella Figura 1.16.b, mentre lo spettro del secondo segnale viene traslato di f_2 con $f_2 \geq f_1 + B$ (nella Figura 1.16.b si suppone $f_2 = f_1 + B$). Il multiplex trasmette il segnale $y(t)$ con lo spettro $y(f)$ in Figura 1.16.b, il canale in uscita deve avere una banda doppia rispetto al caso di trasmissione di un solo segnale.

Il procedimento è facilmente generalizzato al caso di $N > 2$ segnali; come mostrato nella Figura 1.17 in cui per semplicità si suppone che tutti i segnali in ingresso abbiano lo spettro diverso da zero nell'intervallo $(0, B)$ mostrato nella Figura 1.16.a.

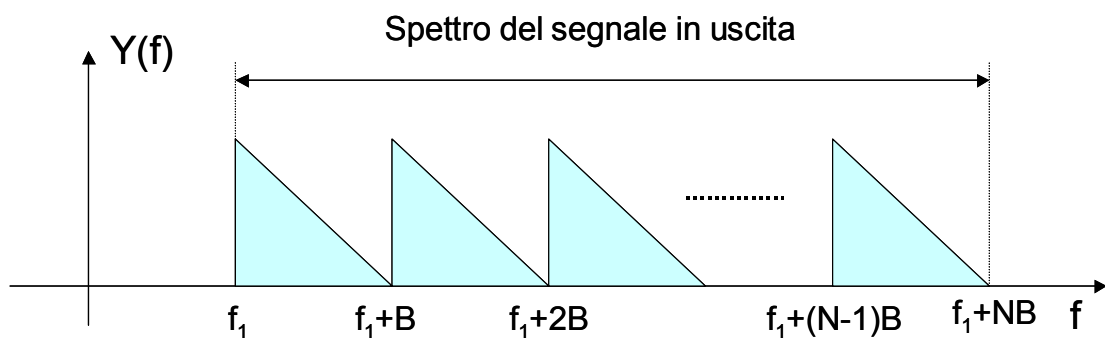
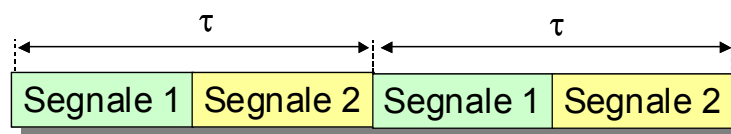


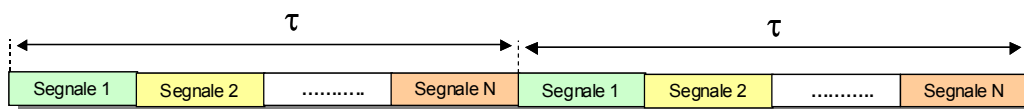
Figura 1.17. Multiplex a divisione di frequenza con N segnali.

Il canale di comunicazione in uscita, utilizzando per trasmettere il segnale $y(t)$, deve avere una larghezza di banda NB. I singoli segnali sono recuperabili senza distorsioni da $y(t)$ poiché occupano zone di frequenza diverse. I multiplex a divisione di frequenza sono utilizzati soprattutto per la trasmissione di segnali analogici; ad esempio, essi sono molto diffusi nella telefonia.

Nel multiplex a divisione di tempo, utilizzati per i segnali numerici, i diversi segnali si differenziano sostanzialmente per l'intervallo di tempo utilizzato per la trasmissione. Per illustrare in modo semplice il funzionamento dei multiplex a divisione di tempo, consideriamo il caso di due segnali numerici ciascuno dei quali richiede ogni τ secondi la trasmissione di m bit. Il multiplex opera come nella Figura 1.18.a. In questo caso il tempo viene diviso in intervalli di tempo τ ; l'intervallo τ viene suddiviso in due sotto intervalli: il primo viene utilizzato per trasmettere il primo segnale ed il secondo per trasmettere il secondo segnale.



(a)



(b)

Figura 1.18. Multiplex a divisione di tempo: a) caso di due segnali; b) caso di N segnali.

Il procedimento può essere facilmente generalizzato al caso di N segnali, come mostrato nella Figura 1.18.b. L'intervallo di tempo τ è diviso tra gli N segnali, a ciascuno dei quali viene assegnato un determinato sotto intervallo per la trasmissione; la situazione si ripete negli intervalli successivi. L'intervallo di tempo τ prende il nome di frame ed il suo valore può variare da centinaia di μsec a decine di msec .

I multiplex a divisione di tempo sono molto utilizzati nella telefonia numerica. In essa per ogni segnale telefonico si deve trasmettere un campione, rappresentato con 8 bit, ogni intervallo di $125 \mu\text{sec}$. Per questo nei multiplex per la telefonia, la durata del frame τ viene scelta uguale a $125 \mu\text{sec}$.

Sistemi TDM per la telefonia sono stati standardizzati dal CCITT; si hanno due standard: il primo standard applicato in Europa ha $N = 32$ canali; mentre il secondo applicato nel Nord America e Giappone usa $N = 24$.

Nella Figura 1.9 è riportato lo standard europeo con $N = 32$. Nell'intervallo $\tau = 125 \mu\text{sec}$ devono essere trasmessi 32×8 bit; in 1 secondo devono essere trasmessi $32 \times 8 / 125 \times 10^{-6} = 2.048 \text{ Mb}$. Il canale necessario per trasmettere il segnale multiplexato (canale all'uscita del multiplex) deve perciò avere una velocità di $2.048 \text{ Mb/s} \simeq 2 \text{ Mb/s}$ o una banda di circa 2 MHz .

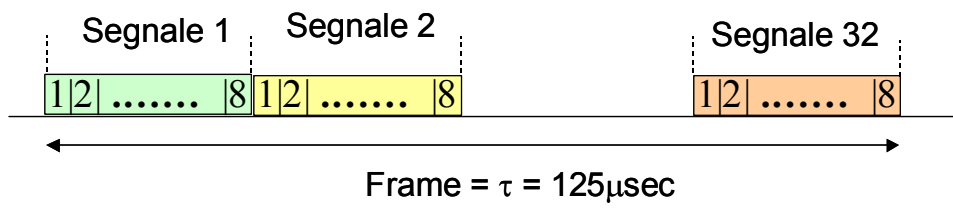


Figura 1.19. Multiplex a 32 canali.

Lo standard in uso in America del Nord e in Giappone è formato da 24 canali telefonici numerici (ciascuno a 64 Kb/s), per cui tali multiplex operano ad una velocità di 1.536 Mb/s.