

# 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.

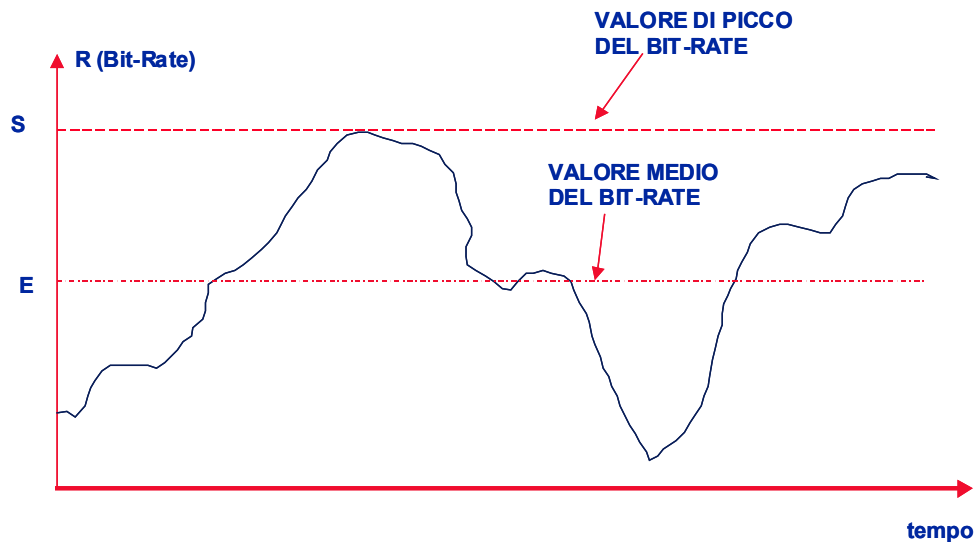


Figura 1.1. Esempio del bit rate  $R$  di un segnale in funzione del tempo.

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).

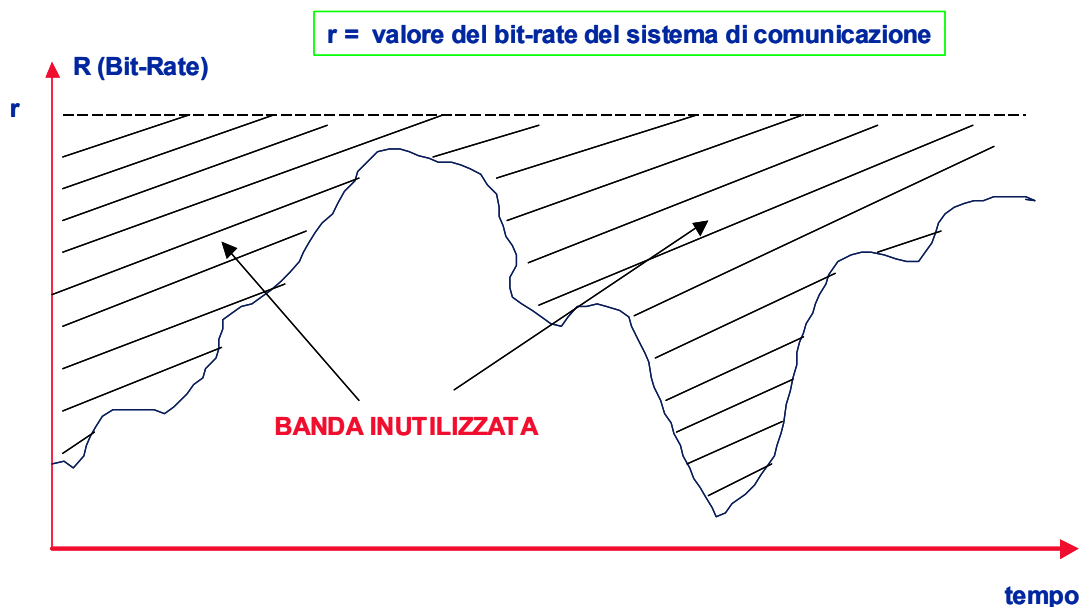


Figura 1.2. Situazione in cui la rete ha un bit-rate maggiore o uguale a  $S$ .

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.

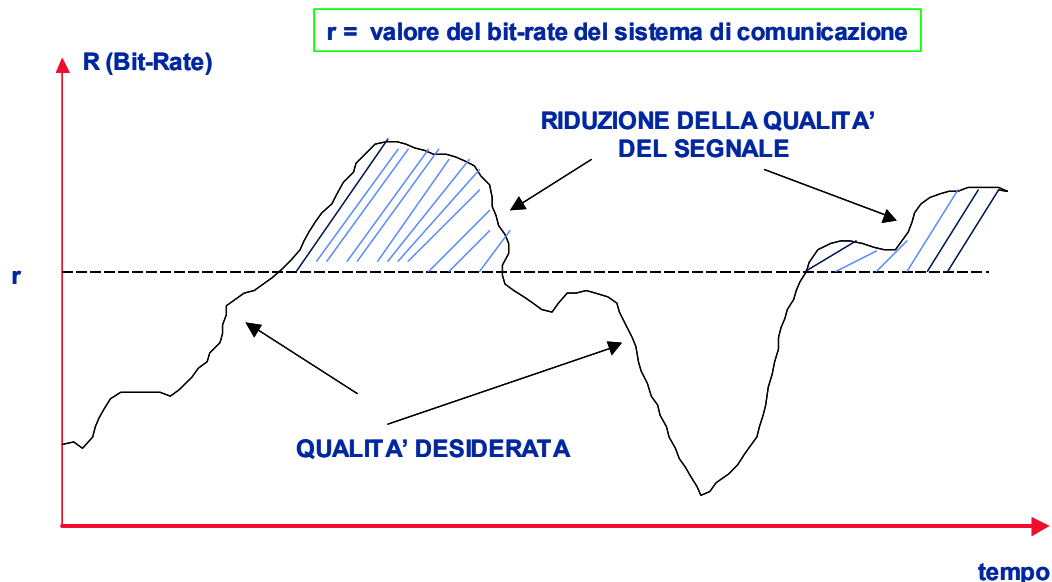


Figura 1.3. Situazione in cui la rete ha un bit-rate  $V$  minore di  $S$ .

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.

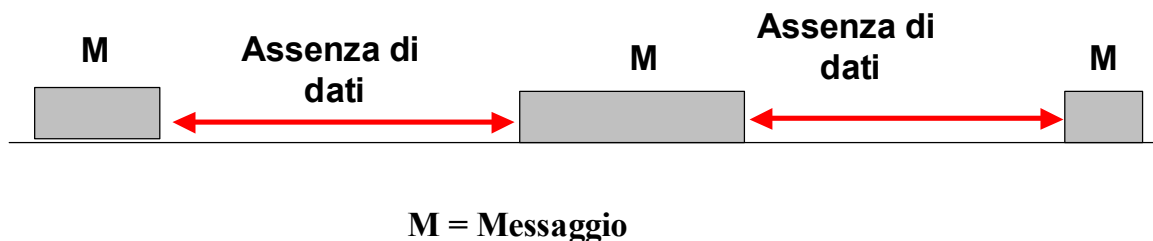


Figura 1.4 . Comportamento tipico di una sorgente dati.

### *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

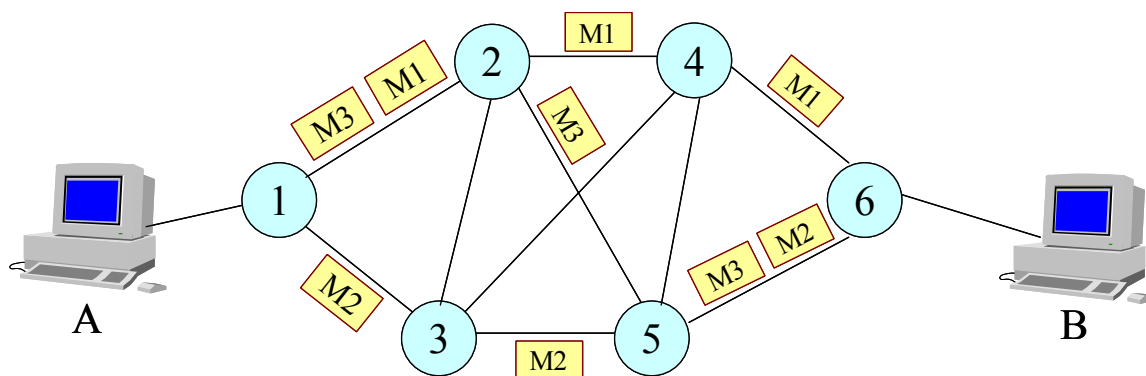


Figura 1.5. Esempio di collegamento tra due host.



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.

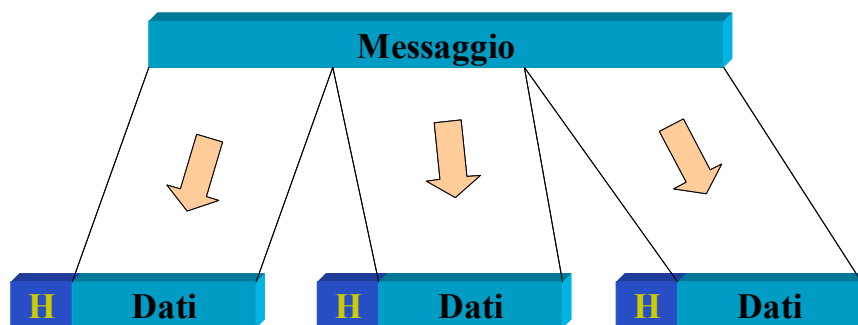


Figura 1.7 - Costruzione dei pacchetti.

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.

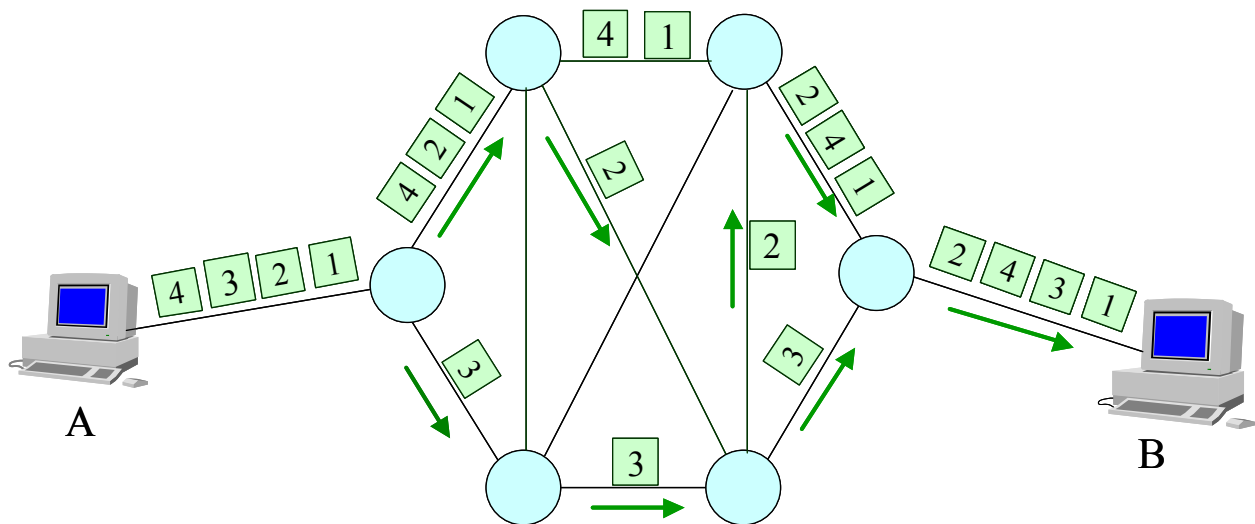


Figura 1.8. Commutazione di pacchetto di tipo datagram

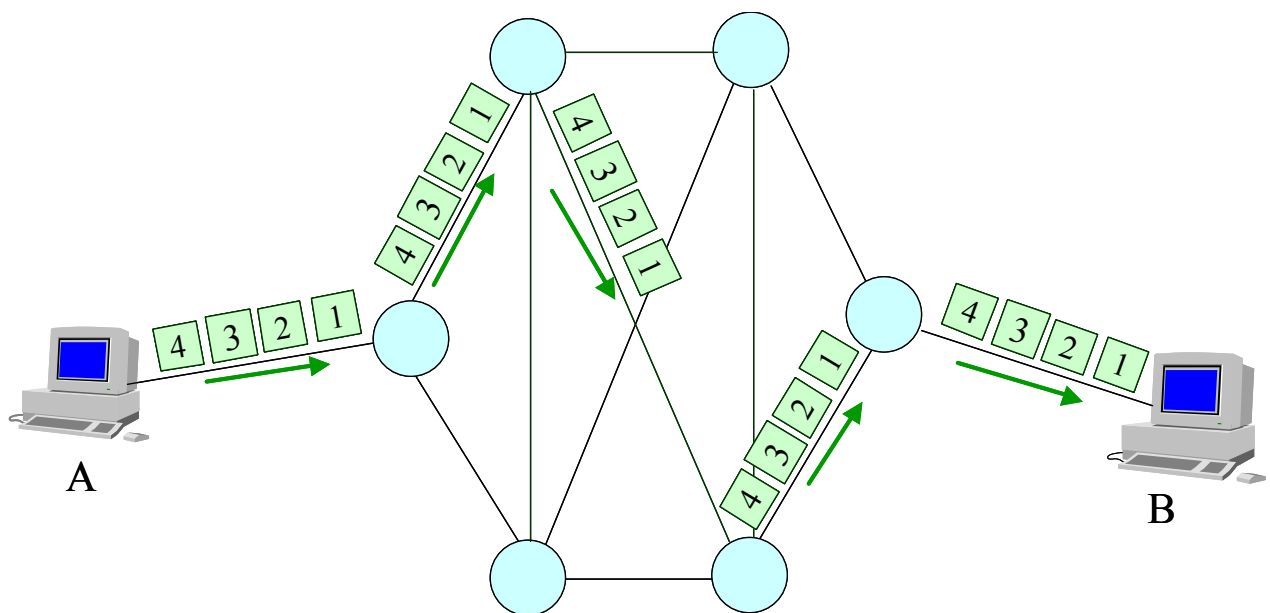


Figura 1.9. Commutazione di pacchetto di tipo a circuiti virtuali

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.

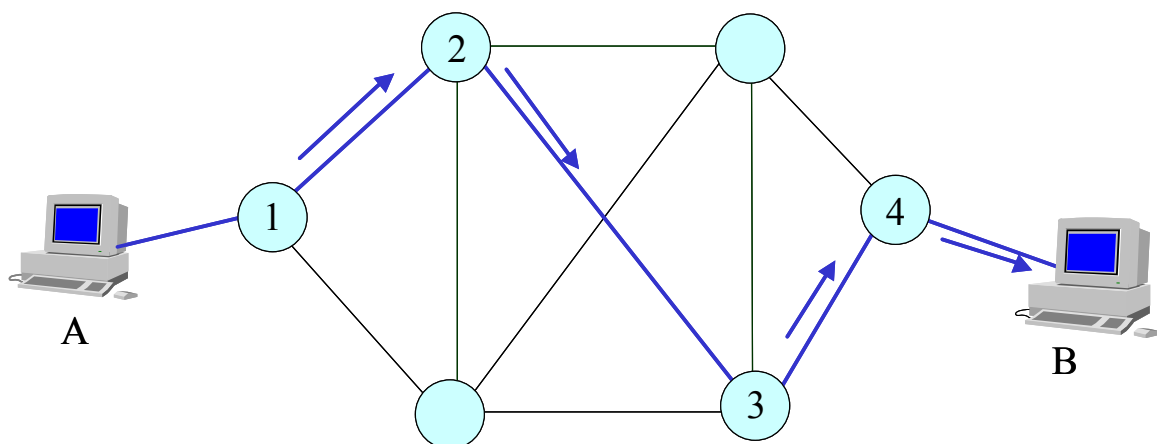


Figura 1.10. Esempio di collegamento tra due host.



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.

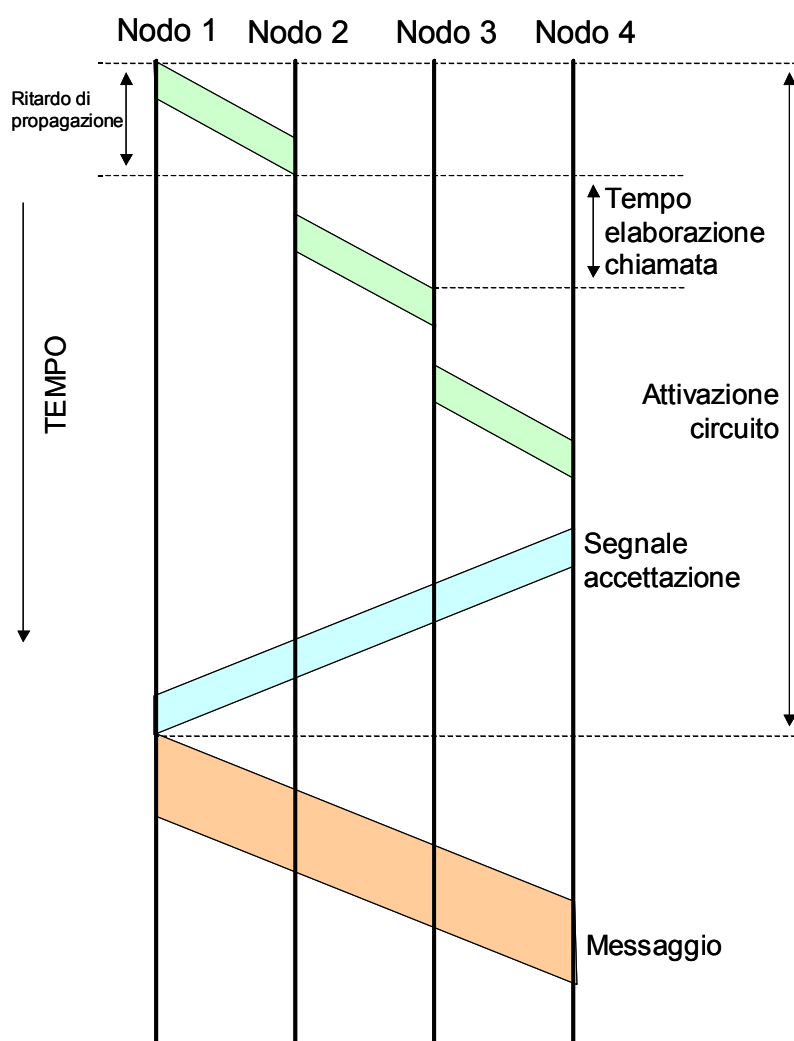


Figura 1.11. Diagramma temporale della commutazione di circuito per il caso di Figura 1.10.

- 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.

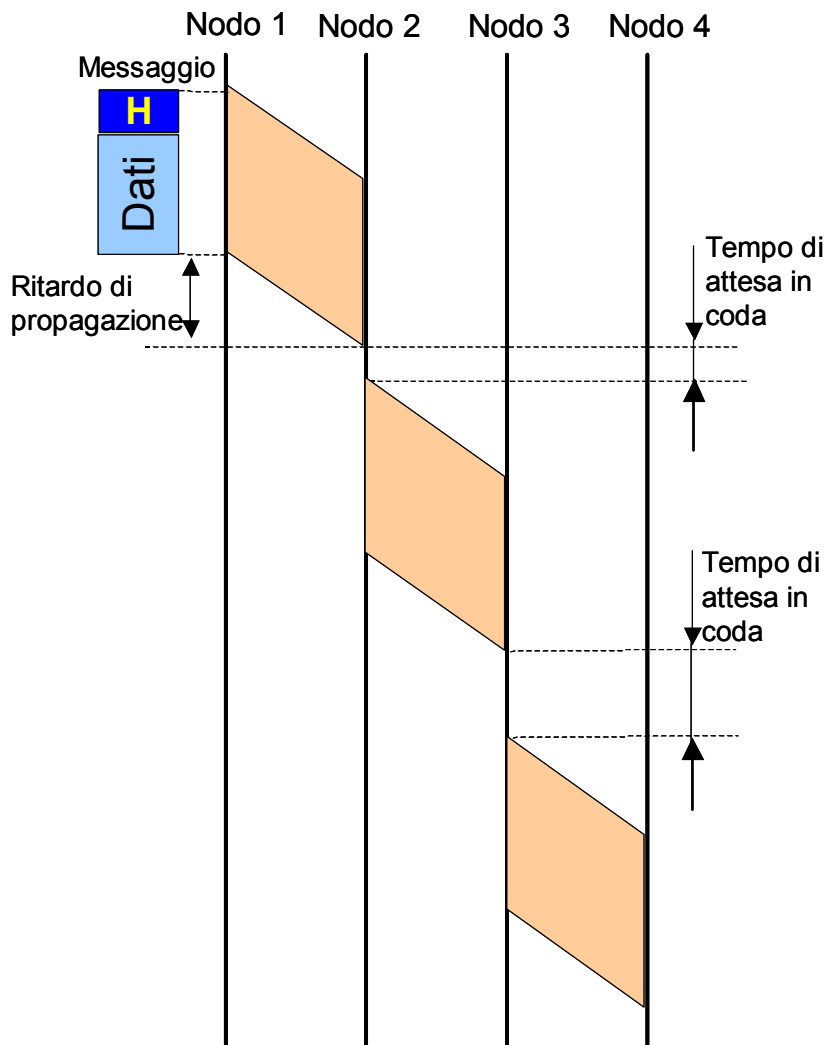


Figura 1.12. Diagramma temporale della commutazione di messaggio per il caso di Figura 1.10.

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.

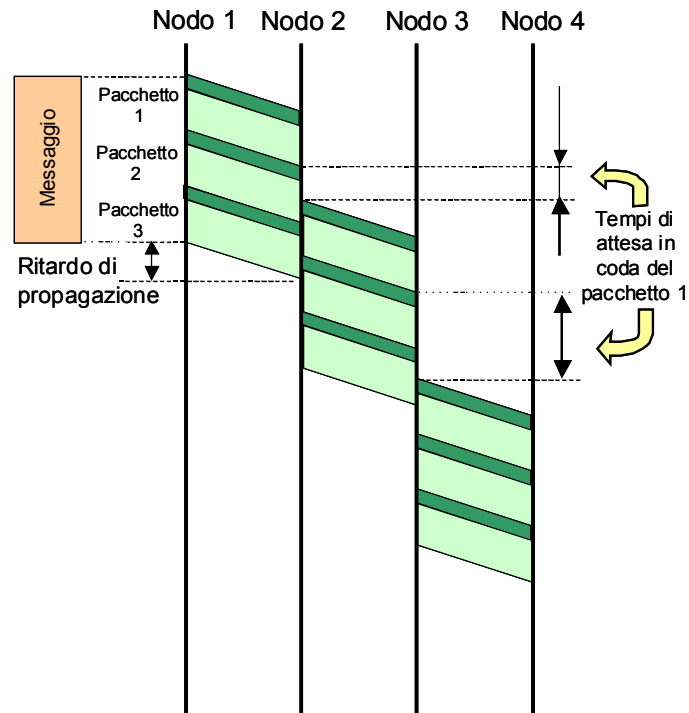


Figura 1.13. Diagramma temporale della commutazione di pacchetto di tipo datagram per il caso di Figura 1.10.

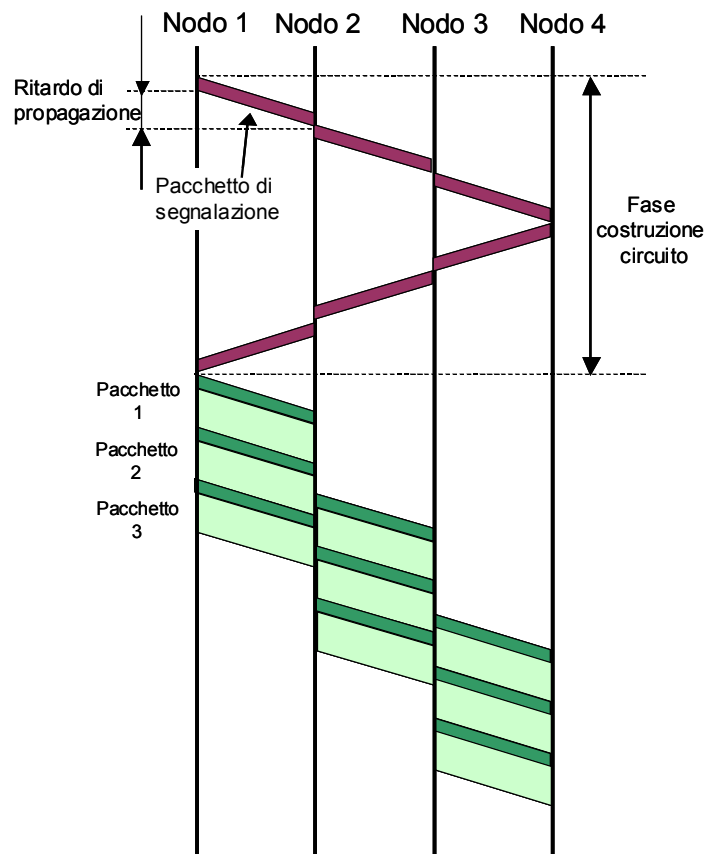


Figura 1.14. Diagramma temporale della commutazione di pacchetto di tipo a circuiti virtuali per il caso di Figura 1.10.

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.

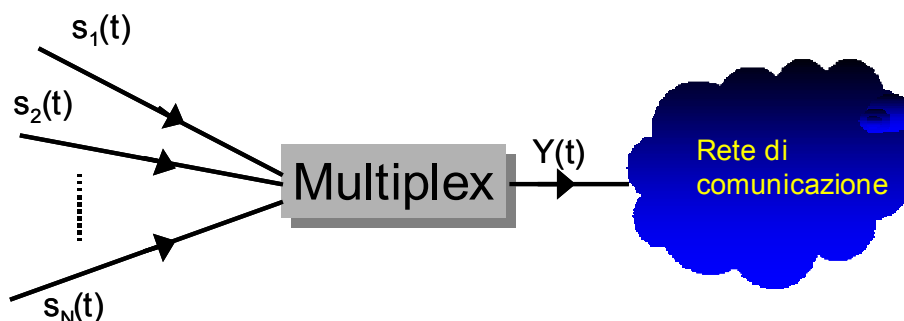


Figura 1.15. Un multiplex.

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.

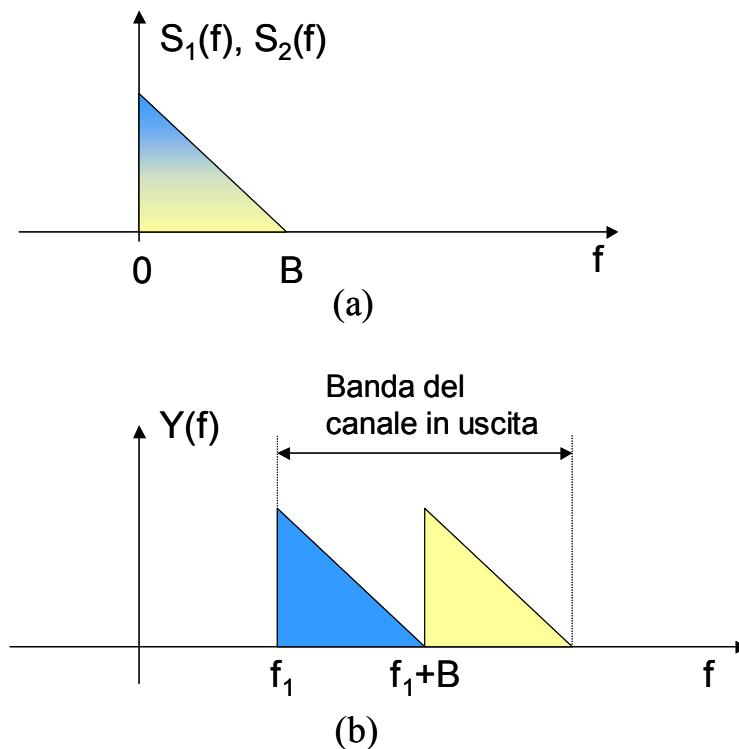


Figura 1.16. Esempio di multiplex FDM per due segnali.

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.

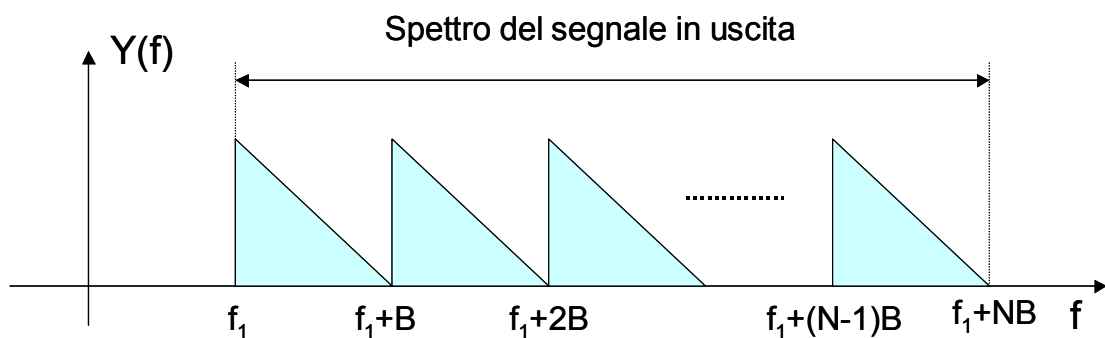
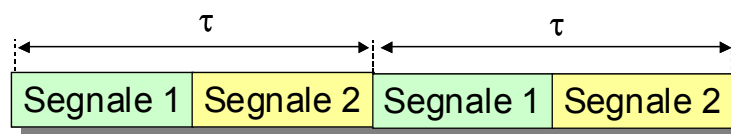


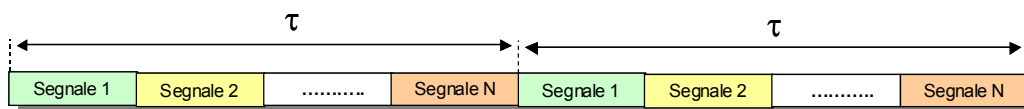
Figura 1.17. Multiplex a divisione di frequenza con  $N$  segnali.

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  $\tau$  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  $\tau$ ; l'intervallo  $\tau$  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  $\tau$  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  $\tau$  prende il nome di frame ed il suo valore può variare da centinaia di  $\mu\text{sec}$  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  $\tau$  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  $32 \times 8$  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  $2 \text{ MHz}$ .

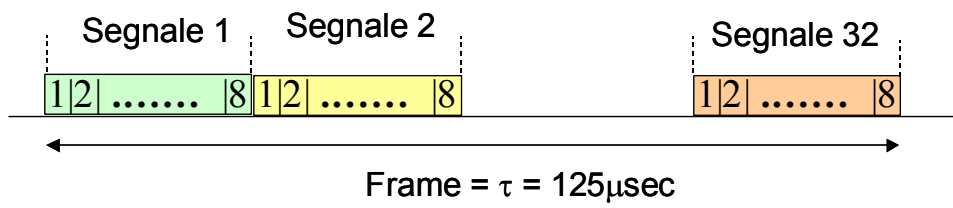


Figura 1.19. Multiplex a 32 canali.

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.

## Capitolo 2: Tecniche di accesso multiplo

### 2.1 Le risorse

La descrizione seguente delle tecniche di accesso multiplo fa riferimento alle trasmissioni radio in sistemi wireless e cellulari in cui si hanno celle di copertura, ma può essere direttamente estesa ad altri scenari come la trasmissione su cavo o in fibra ottica. Il caso dei sistemi wireless e cellulari è stato prescelto data la sua importanza nell'attuale panorama delle telecomunicazioni. Tuttavia le considerazioni seguenti possono essere applicati anche ad altri scenari di telecomunicazioni, quali (ad esempio) i ponti radio e le comunicazioni satellitari.

Un utente mobile in una cella trasmette alla stazione base utilizzando opportune risorse radio. Una trasmissione nella cella si distingue dalle altre perché fa uso di risorse radio differenti.

Un risorsa trasmissiva viene contraddistinta (in generale) dall'intervallo temporale a disposizione per la trasmissione, la banda di frequenza disponibile, il codice usato per la trasmissione e il livello di potenza usato. Tutti e quattro questi aspetti (e cioè: tempo, frequenza, codice e potenza) concorrono ad identificare univocamente una risorsa.

A seconda della tecnica di accesso multiplo usata, le varie trasmissioni in una cella si differenzieranno per una o più di queste caratteristiche. Ad esempio, se le varie trasmissioni si differenziano solo per la banda di frequenza utilizzata si ha la tecnica di accesso multiplo a divisione di frequenza; se invece le trasmissioni si differenziano per il codice (ed il livello di potenza adottato) si ha la tecnica di accesso multiplo a divisione di codice.

In generale le tecniche di accesso multiplo si occupano di come ripartire le varie risorse tra le trasmissioni simultaneamente attive.

All'interno di una cella si hanno due direzioni di collegamento: il *collegamento uplink* dagli utenti mobili alla stazione base ed il *collegamento downlink* da stazione base agli utenti mobili. Nella tratta uplink si considera l'utilizzo di un protocollo di accesso multiplo per regolare l'accesso dei vari utenti al canale radiomobile; nella tratta downlink è la stazione base che ha da trasmettere con opportuna tecnica di multiplexing i segnali ai vari utenti che serve.

Di seguito sono descritte le principali tecniche di accesso multiplo usate nelle reti radiomobili.

### 2.2 Frequency Division Multiple Access (FDMA)

La banda del sistema viene divisa in sottobande, ogni sottobanda è un canale (Figura 2.1); i vari canali vengono così distribuiti fra le celle. Fra bande adiacenti sono lasciati degli spazi di guardia. I sistemi cellulari terrestri della prima generazione basati su trasmissioni analogiche (con modulazioni di frequenza) usavano questo tipo di tecnica di accesso multiplo. Con l'introduzione delle modulazioni digitali, oltre alla FDMA sono possibili le tecniche descritte nei paragrafi seguenti (TDMA e CDMA).



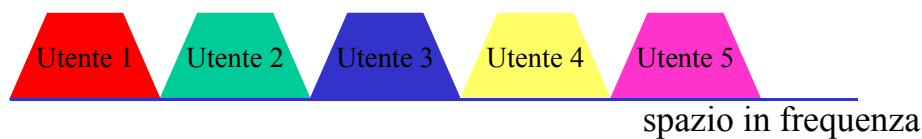


Figura 2.1: Tecnica di accesso FDMA.

### 2.3 Time Division Multiple Access (TDMA)

Ad ogni utente viene assegnato periodicamente un intervallo (=slot) in cui trasmette un insieme di bit (= pacchetto). La voce viene campionata ed ogni campione è quantizzato (ad esempio si prende un campione ogni  $125\ \mu\text{s}$  e si quantizza ad 8 bit, il flusso di bit risultante è di 64 Kbit/s; questa è la tecnica PCM classica). Si usano poi opportune codifiche di sorgente per ridurre il bit-rate fino a valori bassissimi (per i sistemi satellitari si prevede di scendere fino a valori di 2.4 Kbit/s). I bit informativi dell'utente sono raggruppati in pacchetti e la trasmissione è organizzata in trame (*frame*) ciascuna contenente un numero fissato,  $N_s$ , di intervalli temporali (*slot*) in ciascuno dei quali un utente trasmette un pacchetto (Figura 2.2). Quando un utente trasmette, ha a disposizione l'intera banda associata alla portante.

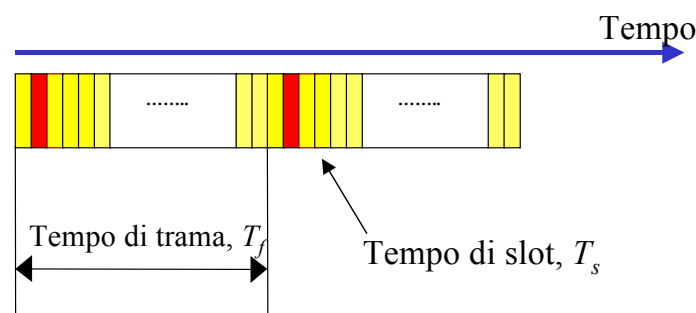


Figura 2.2: Struttura della trama di una portante TDMA.

Lo standard cellulare digitale americano IS-54 che usa TDMA ha triplicato, a parità di banda allocata, la capacità (= numero di utenti simultanei per cella) dello standard analogico AMPS basato su FDMA. Anche il sistema cellulare europeo di seconda generazione GSM (*Global System for Mobile Communications*) fa uso della tecnica di accesso TDMA. Più esattamente si tratta di una tecnica di tipo FDMA/TDMA in cui, infatti, la banda disponibile viene suddivisa in sotto-bande di 200 KHz e ciascuna di esse trasporta una portante GSM in cui l'accesso è TDMA.

### 2.4 Code Division Multiple Access (CDMA)

Le tecniche per l'allargamento dello spettro trasmesso ("*Spread Spectrum*", SS) sono state inizialmente introdotte in ambito militare (metà anni '50) per rendere le trasmissioni particolarmente immuni da disturbi e interferenze intenzionali ("*jamming*"). In trasmissione il segnale viene distribuito su una banda  $PG$  volte più grande di quella originaria tramite una

apposita modulazione ottenuta con un codice pseudocasuale (codice *PseudoNoise* - PN<sup>1</sup>); il fattore di allargamento di banda *PG* è detto “*processing gain*” e suoi valori tipici variano da 10 a 1000. Ogni utente ha un suo codice, tutti gli utenti attivi trasmettono nella stessa banda simultaneamente. Anche se nel canale sono introdotti disturbi intenzionali, l’operazione in ricezione che riporta il segnale nella sua banda originaria, distribuisce il disturbo su una banda molto più ampia, rendendolo praticamente influente. In ricezione si deve disporre di una sequenza di codice sincronizzata con quella usata in trasmissione per poter effettuare questa operazione.

Due sono le tecniche possibili per l’allargamento di spettro:

- *tecnica “Direct Sequence” DS* (a sequenza diretta), secondo cui il segnale trasmesso è moltiplicato per un segnale modulato dai bit (detti chip) della sequenza di codice PN con tasso molto più elevato (*PG* volte più elevato) di quello informativo;
- *tecnica “Frequency Hopping” FH* (a salti di frequenza), secondo cui la sequenza di codice PN va a variare la frequenza della portante.

La prima soluzione è preferita alla seconda, perché la tecnologia attuale non consente di ottenere economicamente sintetizzatori di frequenza capaci di effettuare le variazioni di frequenza della tecnica FH con la rapidità richiesta per ottenere elevati valori di *PG*.

Nella tecnica DS-CDMA ogni utente trasmette alla stazione base usando un proprio codice; il codice è come una firma dell’utente. Invece la stazione base trasmette a tutti i mezzi mobili della cella utilizzando un codice suo proprio. Il canale radiomobile è caratterizzato da forti disturbi fra i quali, in particolare, il fading (= fluttuazioni del segnale) prodotto da cammini multipli per la presenza di una miriade di ostacoli (terreno, edifici, vegetazione). Questo tipo di fading è selettivo in frequenza. Nelle reti cellulari terrestri come in quelle via satellite si è quindi pensato di usare tecniche DS-CDMA, perché queste trasmissioni a larga banda presentano un’intrinseca diversità di frequenza particolarmente adatta per combattere il fading veloce prodotto dalle riflessioni multiple e perché sono trasmissioni particolarmente insensibili all’interferenza derivante dalla presenza nella stessa banda di trasmissioni simultanee.

La capacità con CDMA è solo limitata dall’interferenza, mentre con FDMA e TDMA è limitata principalmente dall’ampiezza di banda. Con CDMA, qualsiasi riduzione di interferenza si traduce direttamente e linearmente in un incremento di capacità. Alcune tecniche per ottenere questo sono:

- “silenziamento” delle trasmissioni, nei periodi non attivi di una conversazione (*squelching*);
- uso di celle multisetore che limitano l’interferenza ricevuta alla stazione base a quella che proviene da una porzione della cella;
- uso di diverse polarizzazioni per il segnale trasmesso e di un’antenna in ricezione alla stazione base che le discrimina.

Inoltre la tecnica CDMA necessita di sistemi di controllo della potenza trasmessa da un utente mobile in relazione alla sua distanza dalla stazione base, per evitare che le

---

<sup>1</sup> I codici PN sono codici ciclici che ben approssimano la generazione casuale di bit 0 e 1 (ad esempio i codici di Gold). Questi codici devono essere caratterizzati da alti valori di auto-correlazione, in modo da distinguere il segnale utile da altri segnali interferenti con codici diversi, e da bassi valori per la correlazione incrociata.

trasmissioni di utenti più vicini impediscano la corretta ricezione di quelli più lontani (effetto “*near-far*”).

Con CDMA è possibile utilizzare una struttura di ricevitore denominata RAKE e cioè a più rami, uno per ciascun cammino che si riesce a risolvere nell'ampia banda di trasmissione. Ciò consente una tecnica a diversità appositamente per CDMA (nel ricevitore RAKE si hanno diversi blocchi demodulatori corrispondenti a repliche diversamente ritardate del segnale).

Infine, l'efficienza della tecnica CDMA non risente dell'introduzione di potenti codifiche a correzione (indispensabili per combattere i disturbi nel canale radiomobile), perché l'operazione di allargamento di spettro può essere opportunamente ripartita fra il processo di codifica e quello di DS. La codifica PN deve comunque rimanere per distinguere gli utenti. Questo consente di avvantaggiare molto il CDMA rispetto alle altre tecniche di accesso multiplo specie nelle reti radiomobili in cui occorre proteggere il segnale trasmesso con potenti codifiche.

Un altro vantaggio del protocollo CDMA è che esso può coesistere con trasmissioni a banda stretta (ad esempio altri sistemi cellulari che usano TDMA) rappresentando per questi solo un rumore accettabile.

Lo standard americano di seconda generazione per sistemi cellulari terrestri basato sul CDMA è lo standard IS-95 (cui corrisponde il sistema cellulare americano denominato cdmaOne); per i sistemi satellitari si può considerare che il sistema GLOBALSTAR fa uso della tecnica CDMA. Per i sistemi cellulari terrestri di terza generazione (3G) lo standard mondiale è basato su una versione di DS-CDMA a larga banda denominata Wideband-CDMA.

#### 2.4.1 Descrizione della tecnica di spreading a sequenza diretta

Facciamo riferimento ad uno schema di trasmissione DS-CDMA semplificato.

Per operare questa tecnica di *spreading* i bit informativi (di durata  $T_b$ ) che devono essere trasmessi vengono resi antipodali (e cioè, ad esempio, al bit 1 si fa corrispondere il valore +1 ed al bit 0 si fa corrispondere il valore -1). La sequenza di bit informativi viene moltiplicata per la sequenza di codice PN tipica della trasmissione. Tale sequenza produce dei bit antipodali (+1 e -1) detti *chip* di durata (durata  $T_c$ ) più breve di quella dei bit informativi. Tipicamente si assume che  $PG$  chip siano contenuti in un tempo di bit:

$$PG = T_b / T_c$$

$PG \gg 1$  rappresenta il *processing gain* (o *spreading gain*) e cioè il fattore di espansione della banda rispetto a quella del segnale originario.

Il segnale così prodotto va ad un modulatore prodotto che lo moltiplica per un'oscillazione ad alta frequenza.

Questo processo di spreading è descritto nella Figura 2.3.

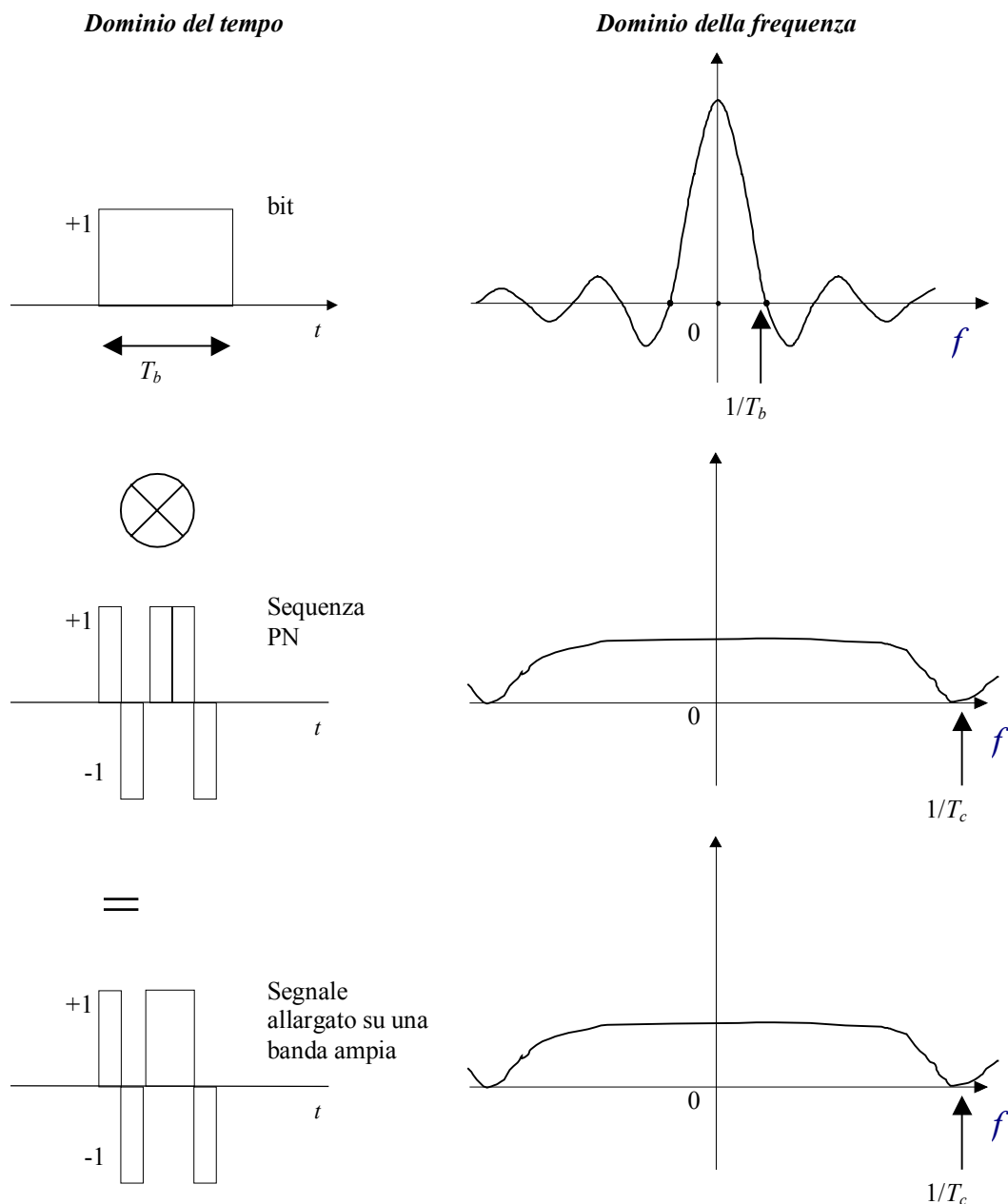


Figura 2.3: Processo di spreading con tecnica DS.

La sequenza PN è una data da un codice periodico: ogni  $L$  chip la sequenza si ripete. Di solito si fa sì che un periodo della sequenza coincida con un tempo di bit (cioè  $L = PG$ ).

Lo schema della trasmissione con questa tecnica può essere riassunto come indicato in Figura 2.4.

In ricezione si deve avere la stessa sequenza PN (e in fase) di quella trasmessa in modo che dal prodotto dei simboli PN uguali in trasmissione e in ricezione venga fuori un valore 1. Con questo prodotto si elimina il processo di spreading (operazione di *despreading*) e si riporta il segnale nella banda originaria. Lo schema della ricezione è stato riassunto in Figura 2.5.

Il vantaggio di questa tecnica è che un qualunque disturbo a banda stretta introdotto dal canale viene allargato in ricezione su tutta la banda di spreading e quindi la sua presenza ha un impatto ridotto.

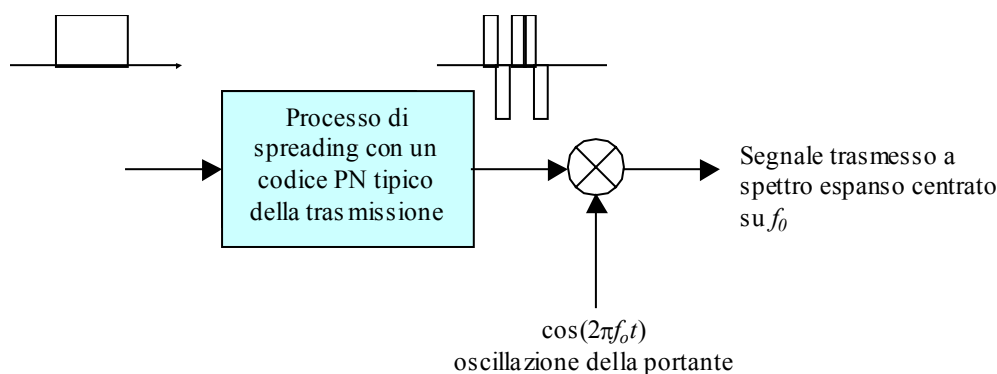


Figura 2.4: Trasmissione DS-CDMA.

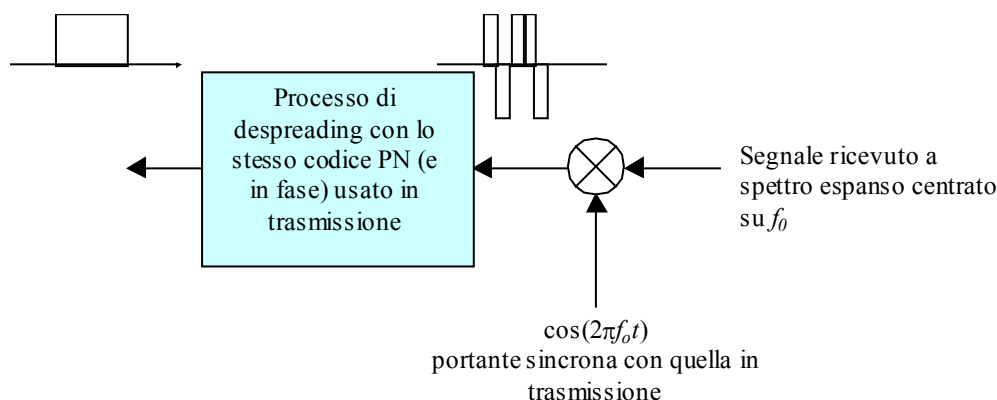


Figura 2.5: Ricezione DS-CDMA.

#### 2.4.2 Proprietà delle sequenze di codice PN

Idealmente il codice di spreading dovrebbe essere progettato in modo che i valori dei chip sono statisticamente indipendenti. Nella pratica il codice PN viene prodotto da registri a scorrimento opportunamente retroazionati e quindi la sequenza che si ottiene è periodica. Il prodotto (chip a chip) della parola di codice PN per una parola di codice ottenuta dalla precedente con un shift ciclico di  $k$  posizioni e la somma del risultato ottenuto (*autocorrelazione*) deve essere massima per  $k = 0$  (sequenze in fase) e praticamente nulla per  $k$  diverso da zero. In questo modo con tali sequenze si può recuperare in ricezione il sincronismo del segnale. Inoltre il prodotto (chip a chip) di due sequenze PN distinte e la somma dei risultati (*crosscorrelazione*) deve essere sufficientemente piccola (idealmente nulla) in modo che le trasmissioni di un utente che usa un codice siano separabili (ortogonali) rispetto alle trasmissioni di un altro utente che usa un altro codice.

Questa è una proprietà di fondamentale importanza nei sistemi radiomobili. Si faccia riferimento alla trasmissione dei mezzi mobili di una cella alla stazione base. Le trasmissioni DS-CDMA degli utenti usano due codici distinti. In questo modo la stazione base effettuando la procedura di despreading con il codice di un utente elimina totalmente il segnale dell'altro utente. Pertanto la proprietà della crosscorrelazione garantisce che le trasmissioni multiple a divisione di codice in una cella siano distinguibili alla stazione base.

Tuttavia, siccome le trasmissioni di due utenti non sono sincrone fra loro, si vengono a ridurre le capacità di ortogonalizzazione delle trasmissioni degli utenti con codici diversi. Pertanto, se la stazione base fa il despreading con un codice, rimane un contributo di interferenza dovuto alla trasmissione dell'altro utente con codice differente. Questa è l'*interferenza di multiaccesso*; pertanto la trasmissione di un utente in una cella subisce interferenza di accesso multiplo sia dagli altri utenti che trasmettono nella stessa cella sia dagli utenti nelle celle vicine. Questo fenomeno limita la capacità di utenti che possono trasmettere simultaneamente in una cella garantendo che il rapporto (alla stazione base) tra la potenza del segnale utile e la potenza del segnale interferente stia sopra una certa soglia. Altrimenti il segnale utile non può essere correttamente ricevuto e si dice che si ha un *evento di outage*.

Un esempio tipico di codice PN usato per trasmissioni DS-CDMA è dato dai codici di Gold.

#### 2.4.3 Il controllo di potenza

La tecnica CDMA fa sì che i segnali delle diverse comunicazioni siano distinti dall'uso di un codice diverso. Nella realtà, però, le condizioni di propagazione riducono le proprietà di ortogonalità delle sequenze di codice usate. Di conseguenza il numero delle conversazioni gestibile per cella con un accettabile livello del *rapporto segnale-interferenza* (SIR) è limitato dall'interferenza prodotta dalle altre trasmissioni nella stessa cella e dalle altre trasmissioni nelle celle adiacenti.

Se dunque una trasmissione ha un livello troppo basso di SIR essa può decidere di aumentare il livello della potenza trasmessa. In questo modo però, tale trasmissione può arrecare un livello di interferenza anche intollerabile alle altre trasmissioni nella stessa cella ed in quelle vicine. Inoltre, se un terminale mobile che si trova molto vicino alla stazione base decide di trasmettere con un livello di potenza troppo elevato, tutti gli altri segnali provenienti da mezzi mobili più distanti non possono essere ricevuti correttamente. Questo è il problema di *near-far*. In generale, è essenziale che nella tratta da terminali mobili a stazione base (*uplink*) i segnali vengano ricevuti alla stazione base dai diversi mezzi mobili con la stessa potenza. Ciò può essere ottenuto tramite un meccanismo di controllo della potenza trasmessa dal terminale mobile.

Un sistema cellulare CDMA si avvale di due sistemi di controllo di potenza: controllo ad anello aperto e controllo ad anello chiuso. Nel primo caso è il mobile che in base al livello di potenza di un segnale di riferimento trasmesso dalla stazione base (segnale pilota) autoregola la potenza trasmessa. Nel secondo caso è la stazione base che ricevendo il segnale trasmesso dal mezzo mobile comanda che esso alzi o abbassi la potenza trasmessa in modo di adeguare il livello ricevuto.

Il controllo di potenza è usato sia nella tratta da mezzi mobili a stazione base (*uplink*) sia nella tratta da stazione base ai mezzi mobili della cella (*downlink*). Il controllo di potenza è

essenziale in uplink dove molti utenti (ciascuno avente differenti condizioni di canale di comunicazione) trasmettono contemporaneamente alla stazione base. In downlink il controllo di potenza è meno critico in quanto il trasmettitore della stazione base “affascia” i vari segnali di utente e li trasmette simultaneamente ai vari utenti della cella. In questo caso, ciascun mezzo mobile riceverà i vari contributi (quello utile e quelli destinati agli altri mezzi mobili della cella) sincroni fra loro e con uguale livello di potenza. In base a queste considerazioni risulta evidente che la tratta uplink risulta la più critica e cioè quella che maggiormente limita la capacità di un sistema CDMA. Grazie ai meccanismi di controllo della potenza, l'interferenza dovuta agli utenti di una cella non dipende quindi dalla loro distanza dalla stazione base.

Da tutte queste considerazioni appare chiaro che la valutazione della capacità di un sistema CDMA deve essere basata sulla valutazione accurata del livello di interferenza del sistema e quindi dal valore del SIR garantito.

#### 2.4.4 La capacità di un sistema cellulare (tratta uplink)

Si consideri il caso di una cella isolata perfettamente dalle altre in cui la stazione base controlla perfettamente i livelli di potenza trasmessi dai terminali mobili: tutti i segnali sono ricevuti alla stazione base con lo stesso livello di potenza. Sia detto  $N$  il numero di utenti simultaneamente attivi nella cella e sia detto  $C$  il valore della potenza ricevuta alla stazione base da un generico mezzo. Per un utente mobile, i restanti  $N-1$  utenti della cella danno un segnale interferente con potenza  $C(N-1)$  alla stazione base. Pertanto il rapporto  $C$  su  $I$ , vale a dire il SIR della trasmissione dell'utente considerato si ottiene come segue:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{\rho(N-1)}$$

dove  $\rho$  è il coefficiente di cross-correlazione parziale per dei codici (si tenga conto che il processo di despreading consiste in una correlazione tra il segnale ricevuto e il segnale associato al codice di spreading). Per codici di Gold  $\rho = 2/3$ .

Al fine di garantire la qualità di servizio desiderata occorre che il SIR sia maggiore di un certo valore di soglia che dipende dal tipo di servizio considerato (altrimenti si verifica *outage*).

Generalmente si passa dal SIR al rapporto tra l'energia del bit d'informazione e la densità spettrale del segnale di interferenza (nell'ipotesi che il rumore additivo termico sia trascurabile),  $E_b/I_0$ , come segue:

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{C/R_b}{I/W} = \frac{W}{R_b} \frac{1}{\rho(N-1)} = \frac{PG}{\rho(N-1)}$$

dove  $W$  è la banda di trasmissione del segnale CDMA e  $R_b$  è il bit-rate informativo. Il rapporto  $W/R_b$  è praticamente il processing gain e si indica tipicamente con  $PG$ .

Noto il valore richiesto di  $E_b/I_0$  e noto  $PG$ , si può ricavare come segue il numero di utenti che la cella può supportare (per semplicità si è posto  $\rho = 1$  in questo studio):

$$N \approx \frac{PG}{\left. \frac{E_b}{I_0} \right|_{richiesto}}$$

Come si vede ci sono due termini che influenzano la capacità di utenti di una cella: il valore richiesto di  $E_b/I_0$  e il processing gain  $PG$ . Ogni tecnica che consente di diminuire il valore richiesto del rapporto  $E_b/I_0$  (a parità di qualità) comporta automaticamente un guadagno in termini di capacità.

Se durante le pause della conversazione, la sorgente non trasmette alcun segnale, si ha un aumento di capacità. Sia  $d$  la frazione di tempo per cui è mediamente attiva una sorgente (per una sorgente vocale  $d \approx 0.5$ ). Allora anche l'interferenza subita da una trasmissione si riduce di un fattore  $d$  e ciò porta direttamente ad un incremento della capacità.

In queste condizioni quindi la capacità di utenti per cella diventa:

$$N \approx \frac{1}{d} \frac{PG}{\left. \frac{E_b}{I_0} \right|_{richiesto}}$$

Si consideri ora l'estensione delle precedenti considerazioni al caso in cui gli utenti sono uniformemente distribuiti in più celle e richiedono tutti lo stesso servizio. Supponiamo che  $N$  utenti siano presenti per cella. L'effetto dell'interferenza delle celle esterne alla cella di interesse è tenuto in conto aumentando il numero degli utenti interferenti nella cella ( $N - 1$  utenti) con un altro contributo proporzionale al numero di utenti  $N$  per cella, secondo un fattore  $\varepsilon$ . Pertanto la capacità di utenti per un fissato valore di  $E_b/I_0$  diventa:

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{PG}{\rho(N-1)d + \varepsilon Nd} \xrightarrow{\rho=1} N \approx \frac{PG}{(1+\varepsilon)d} \frac{1}{\left. \frac{E_b}{I_0} \right|_{richiesto}}$$

Come si nota questa capacità è ridotta di un fattore  $1 + \varepsilon$  rispetto al caso di singola cella. In questa espressione della capacità compare il parametro  $\varepsilon$  che risulta di non facile valutazione. Valori tipici di  $\varepsilon$  in un ambiente microcellulare sono 0.5 – 0.6 (la tecnica di controllo di potenza, la legge dello shadowing, il tipo di attenuazione con la distanza ed il fading hanno impatto sulla determinazione del valore di  $\varepsilon$ ).

## 2.5 Confronto fra le tecniche di accesso multiplo

Inconveniente della tecnica TDMA è che tutti gli utenti devono essere sincronizzati. Inoltre uno slot deve contenere degli intervalli di guardia rispetto al tempo di trasmissione del pacchetto, per compensare i diversi ritardi di propagazione degli utenti all'interno di una cella (questo è importante soprattutto nel caso via satellite). Per elevati bit-rate in trasmissione è richiesto l'uso di equalizzatori in ricezione per combattere l'interferenza intersimbolica introdotta dal canale dispersivo.



Un altro svantaggio del protocollo TDMA rispetto a CDMA è il seguente. Siccome i terminali di utente hanno un ciclo  $1/N_s$ , essi hanno un inviluppo di potenza periodicamente pulsante. Questo rappresenta un problema nel progettare i componenti e gli amplificatori di potenza a radiofrequenza che devono essere capaci di supportare elevate potenze di picco.

Rispetto alla tecnica CDMA, il protocollo TDMA ha il vantaggio di necessitare di un controllo di potenza meno stringente, dal momento che l'interferenza fra utenti è controllata dall'allocazione in tempo ed in frequenza. Un altro importante vantaggio rispetto a FDMA e CDMA è che la struttura con slot temporali dà tempo per effettuare misurazioni di slot, frequenze e stazioni base alternativi al fine di supportare procedure di handover assistite o controllate dal mezzo mobile.

In termini di efficienza di utilizzo della banda disponibile le varie tecniche di accesso multiplo si confrontano in termini del seguente parametro misurato in bit/s/Hz:

$$\eta = \frac{MR_b}{W}$$

dove  $M$  è il numero di utenti simultanei supportabili per cella (il numero di utenti che trasmettendo simultaneamente hanno garantita una probabilità d'errore per bit minore o uguale ad un dato valore massimo accettabile),  $R_b$  è il bit rate informativo per utente e  $W$  la banda totale disponibile.

In base al parametro  $\eta$  è stato possibile dimostrare che la tecnica CDMA consente un'efficienza superiore nell'utilizzo delle risorse delle altre tecniche. I valori dell'efficienza  $\eta$  dipendono comunque fortemente dalle caratteristiche del canale di comunicazione, dalle tecniche di trasmissione utilizzate (es., codici, modulazione) e dai requisiti imposti sulla probabilità d'errore per bit.