

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo vengono descritti i passi dell'evoluzione tecnologica che hanno portato alla nascita ed allo sviluppo dei sistemi di radiocomunicazione mobile oggi ampiamente diffusi quali il GSM, oppure in fase di introduzione come GPRS o in fase di sperimentazione come UMTS; vengono, inoltre, brevemente analizzate le varie tecniche di accesso multiplo utilizzate da questi sistemi sul canale radio.

1.1 L'evoluzione dei sistemi di comunicazione mobile

Il primo impiego delle radiocomunicazioni mobili risale alla fine del diciannovesimo secolo quando Marconi, sulla base degli studi effettuati da Hertz, dimostrò la possibilità di stabilire un collegamento radio tra una stazione base ed un mezzo in movimento senza utilizzare alcun tipo di cavo. Da allora le comunicazioni mobili si sono diffuse e sviluppate considerevolmente, dapprima nel settore marittimo e successivamente in quello militare e di sicurezza pubblica. Il primo esperimento in ambito urbano venne effettuato nel 1921 dal dipartimento di Polizia di Detroit. Il sistema di comunicazione era costituito da una stazione radio base e da alcune entità mobili. Inizialmente solo la stazione base, operante alla frequenza di 2 MHz, nella parte inferiore della banda VHF, era in grado di trasmettere, ma successivamente anche le varie unità mobili acquisirono questa capacità. La copertura radioelettrica era assicurata in un'area di territorio ampia circa 10 miglia. Ben presto l'utilità di questi servizi venne riconosciuta anche dagli altri dipartimenti di polizia, i

quali installarono in breve tempo i loro sistemi, con la conseguente congestione dello spettro di frequenze disponibili. Le prime comunicazioni supportate erano accomunate da una scarsa qualità della trasmissione a causa delle caratteristiche di propagazione dei segnali sul canale radio: infatti il segnale ricevuto è costituito da una somma di diverse versioni di quello trasmesso, ognuna identificata da un proprio ritardo temporale, da un'ampiezza e da una fase. Il segnale risultante è così caratterizzato da un involuppo rapidamente variabile sia nel tempo che nello spazio; per questo motivo si ha un considerevole peggioramento della qualità della ricezione, soprattutto nel caso in cui si utilizzi la modulazione di ampiezza (AM) come tecnica di trasmissione, molto sensibile alle caratteristiche del canale appena descritte. Questi problemi furono superati soltanto nel 1935 grazie all'invenzione della modulazione di frequenza (FM) da parte di Armstrong. Questa nuova tecnica permise di migliorare notevolmente la qualità della trasmissione e per questo si diffuse velocemente, benché richiedesse un'ampiezza di banda molto maggiore (120 kHz per la trasmissione di un segnale telefonico che in banda base occupa 5 kHz) rispetto alla modulazione d'ampiezza. I sistemi FM subirono un grande sviluppo durante la seconda guerra mondiale nei settori pubblici, privati, militari, governativi, di polizia e di trasporto. Alla fine degli anni '40 furono introdotti i primi sistemi di telefonia mobile che consentivano ad un numero molto ristretto di utenti di effettuare chiamate telefoniche da un'automobile durante spostamenti in ambito cittadino. Nel corso degli anni '50 la banda del canale radio FM venne ridotta a 60 kHz e più tardi a 30 kHz, per poi arrivare negli anni '70 ad una banda di 25 kHz. La vera svolta nei sistemi di comunicazione mobile si ebbe tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80, quando vennero introdotti i primi sistemi cellulari PLMN (*Public Land Mobile Network*) di tipo analogico, i quali permisero di effettuare, tramite i terminali mobili, conversazioni telefoniche con un qualunque altro utente connesso alla rete fissa PSTN (*Public Switched Telephone Network*). Questi sistemi, basati sulla tecnica FDMA, offrirono un'efficace rimedio alla congestione delle bande di frequenza poiché introdussero il riutilizzo delle frequenze, il quale consiste principalmente nell'impiegare una stessa frequenza più volte in luoghi diversi e sufficientemente lontani per non avere livelli di interferenza troppo elevati. Un altro carattere distintivo delle PLMN è la suddivisione del territorio in aree di dimensione limitata (celle), ognuna servita da una stazione radio base alla quale viene assegnato un certo insieme di frequenze. Quando un utente in movimento si trova a dover passare da una

cella ad un'altra è necessario evitare che la connessione cada: l'insieme delle procedure utilizzate per garantire la continuità della comunicazione, come il cambio di frequenza e la scelta della stazione radio base a cui connettersi, vengono definite con il termine *handover* (o *handoff*). Tra gli anni '80 e l'inizio degli anni '90, invece, sono stati sviluppati i sistemi cellulari digitali definiti di "seconda generazione" di cui fanno parte il sistema numerico europeo GSM (*Global System for Mobile communications*) ed il sistema americano TIA IS-95. Il primo si basa sulla tecnica di accesso multiplo FDMA combinata con quella TDMA, mentre il secondo sulla tecnica di accesso CDMA. I sistemi cellulari numerici hanno permesso una maggiore capacità ed una migliore qualità della trasmissione rispetto ai loro predecessori grazie all'utilizzo delle modulazioni digitali che risultano meno sensibili alle interferenze. Questi sistemi hanno avuto una grande diffusione sui mercati mondiali raggiungendo in pochi anni livelli di penetrazione di massa paragonabili a quelli della telefonia fissa. Attualmente sta per essere introdotto il sistema GPRS (*General Packet Radio Service*) che rappresenta l'evoluzione del GSM, il quale, oltre alle comunicazioni telefoniche, permette di effettuare anche il trasferimento di dati utilizzando la modalità a commutazione di pacchetto sull'interfaccia radio raggiungendo alti livelli di efficienza. Altri sviluppi del sistema GSM/GPRS verranno discussi nei prossimi paragrafi. A partire dagli anni '90 è stata decisa la realizzazione di un nuovo sistema, denominato di terza generazione, che potesse permettere di soddisfare la crescente domanda di servizi "multimediali". Il progetto, denominato IMT2000 (*International Mobile Telecommunications 2000*) è stato avviato dall'ITU (*International Telecommunication Union*) e coinvolge tutti gli enti mondiali di standardizzazione. In Europa l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) ha proposto il sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) che attualmente è ancora in fase di standardizzazione. La sua introduzione è prevista per l'anno 2002.

1.2 I sistemi di prima generazione in Italia

1.2.1 RTMI

Il sistema RTMI (Radio Telefono Mobile Integrato) risale al 1973. Le caratteristiche principali sono evidenziate nel seguente elenco:

- Trasmissione analogica.
- Non di tipo cellulare.

- Operante a 160 MHz.
- 32 canali radio bidirezionali di fonìa.
- 4 canali di controllo.
- Modulazione FM con banda di canale pari a 25 kHz.
- Chiamata automatica da mobile a fisso.
- Chiamata da fisso verso mobile tramite operatrice.
- Localizzazione non automatica.
- Handover non supportato.

1.3 I sistemi di seconda generazione in Italia

1.3.1 RTMS 450

Il sistema RTMS (Radio Telefono Mobile di Seconda generazione) è stato introdotto nel 1984 e ha permesso di superare alcune delle limitazioni del sistema precedente. Le sue caratteristiche principali sono qui di seguito elencate:

- Trasmissione analogica.
- Di tipo cellulare.
- Operante a 450 MHz.
- Modulazione FM con banda di canale pari a 25 kHz.
- Suddivisione del territorio nazionale in 10 aree di controllo e chiamata.
- Localizzazione automatica.
- 200 canali radio (192 di fonìa e 8 di controllo).
- Handover supportato tra le celle appartenenti alla stessa area e quindi ad uno stesso centro di controllo.

1.3.2 TACS 900

Il sistema TACS (*Total Access Communication System*), molto simile al sistema americano AMPS, è stato introdotto nel 1990 e ha raggiunto un'ampia diffusione e copertura del territorio nazionale. Le caratteristiche principali sono le seguenti:

- Trasmissione analogica.
- Di tipo cellulare.
- Operante a 900 MHz.
- Modulazione FM con banda di canale di 25 MHz.

- 1320 canali bidirezionali (E-TACS, Extended TACS). Di questi solo 504 sono utilizzati per permettere la coesistenza con il sistema GSM.
- Localizzazione automatica.
- Handover garantito in tutta la rete.

1.3.3 GSM

L'inizio degli anni '80 fu caratterizzato dallo sviluppo in Europa di un insieme di sistemi nazionali di comunicazione radiomobile incompatibili tra di loro che non costituivano una grande attrattiva per gli utenti a causa delle elevate tariffazioni applicate e degli ingenti costi delle apparecchiature. Per questo motivo nel 1982 a Vienna il CEPT (*Conférence Européenne des Postes et des Télécommunications*) decise di sviluppare e standardizzare un sistema radiomobile cellulare paneuropeo. Lo scopo era quello di realizzare un nuovo sistema in grado di operare nella banda dei 900 MHz allocata per le comunicazioni radio terrestri. Il compito fu assegnato ad un *Working Group* chiamato *Group Spécial Mobile* (GSM). Inizialmente non vi erano direttive su quale tipo di tecnologia sarebbe stata utilizzata, infatti la decisione di realizzare un sistema numerico fu presa soltanto nella fase di sviluppo nel 1985, ma era chiaro che si sarebbe dovuto tenere in considerazione ed incorporare le nuove tecnologie come il modello di riferimento ISO/OSI, ISDN ed il sistema ITU-T SS7. Nel 1987, dopo una serie di test su alcuni prototipi, vennero scelte le caratteristiche migliori di ognuno di essi e furono combinate in un unico standard. Con la firma del *Memorandum of Understanding on the Introduction of the Pan-European Digital Mobile Communication Service* (MoU), i 13 paesi partecipanti, ai quali se ne aggiunsero altri negli anni successivi, confermarono la loro volontà di introdurre il nuovo sistema radiomobile basato sulle raccomandazioni del GSM. Più tardi, nel 1989, il lavoro di standardizzazione venne affidato all'ETSI ed in seguito l'acronimo GSM venne ridefinito *Global System for Mobile communications*. Il sistema GSM è stato introdotto nel 1992. Le principali caratteristiche sono qui riassunte.

- Trasmissione numerica.
- Di tipo cellulare.
- Operante a 900 MHz (GSM 900: 890-915 MHz in uplink; 935-960 MHz in downlink) e 1800 MHz (DCS 1800: 1710-1785 MHz in uplink; 1805-1880 MHz in downlink).
- Modulazione GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*).
- Banda di canale di 200 kHz.

- Spaziatura di 45 MHz tra canale in uplink e canale in downlink.
- Accesso multiplo di tipo ibrido FDMA/TDMA con 8 time slot per portante.
- Localizzazione automatica.
- Handover supportato.
- 124 portanti radio per banda (GSM 900).
- 992 (124 x 8) canali full rate (GSM 900).
- Controllo di potenza.
- Frequency hopping (217 hops/s).
- Codifica della voce a 13 kbit/s (full rate).
- Trasmissione dati in modalità circuito a 9.6 kbit/s.

In seguito alla diffusione di Internet ed alla crescente richiesta di servizi multimediali anche per quanto riguarda la telefonia mobile, è stato necessario introdurre nelle reti GSM alcune modifiche e miglioramenti che hanno portato allo sviluppo di nuove tecnologie per incrementare la velocità di trasferimento delle informazioni. Alcune di esse sono descritte nei seguenti paragrafi.

1.3.3.1 HSCSD (High Speed Circuit Switched Data)

La tecnologia HSCSD permette di incrementare la velocità di trasferimento dei dati nella modalità a commutazione di circuito grazie ad un nuovo schema di codifica che aumenta il *bit rate* su un solo time slot dai 9.6 kbit/s del GSM ai 14.4 kbit/s. Inoltre HSCSD permette di utilizzare fino a 8 time slot per trama, in modo tale da rendere possibili bit rate multipli di 9.6 kbit/s e 14.4 kbit/s. HSCSD, essendo principalmente un “aggiornamento software” del sistema, non richiede l’introduzione di nuovi elementi nelle reti GSM, tuttavia è necessaria la commercializzazione di nuovi terminali mobili che possano sfruttare questo nuovo tipo di servizio offerto.

1.3.3.2 GPRS (General Packet Radio Service)

L’evoluzione delle reti GSM verso il sistema GPRS permette di introdurre servizi basati sulla tecnica a commutazione di pacchetto, offrendo così una maggior attrattiva verso l’accesso wireless ad Internet e verso le altre reti PDN (*Packet Data Network*), proponendo un nuovo tipo di tariffazione basato non più sulla durata della connessione, ma sul volume di traffico ricevuto e/o trasmesso. Questo sistema permette di occupare le risorse disponibili soltanto quando vi è effettivamente la necessità di trasmettere o ricevere informazioni, raggiungendo così alti livelli di *throughput* ed efficienza. La tecnica prende il

nome di multiplazione statistica, in contrasto alla multiplazione statica a divisione di tempo in cui i time slot sono assegnati ad un utente per tutta la durata della comunicazione, anche durante i periodi di silenzio. GPRS permette di arrivare a velocità dell'ordine di 170 kbit/s nel caso in cui siano allocati ad uno stesso terminale mobile tutti gli 8 slot di una portante. Almeno nella fase iniziale dell'introduzione di GPRS, prevista per la fine dell'anno 2000, verrà utilizzata la condivisione delle risorse radio tra GPRS e GSM. Diversamente da HSCSD, questo nuovo sistema richiede l'apporto di modifiche sull'interfaccia radio ed all'interno dei *base station sub-system* per permettere la trasmissione dei dati nella modalità a pacchetto.

1.3.3.3 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)

Il sistema GPRS e la tecnica HSCSD permettono di raggiungere velocità di trasferimento dell'informazione più alte rispetto al GSM principalmente tramite l'allocazione di più slot per ogni utente; la tecnica EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*), sviluppata dall'ETSI, permette invece di raggiungere un'ulteriore incremento della velocità tramite l'utilizzo di nuovi schemi di codifica del segnale. Il nuovo tipo di modulazione utilizzato è il Q-O-QAM (*Quaternary Offset QAM*) ed è totalmente compatibile con l'ampiezza di banda dei canali GSM, corrispondente a 200 kHz: il massimo bit rate raggiungibile corrisponde a 384 kbit/s per frequenza portante. I vantaggi offerti da EDGE, inoltre, possono essere combinati con quelli di HSCSD e GPRS: in quest'ultimo caso il sistema prende il nome di EGPRS (*Enhanced GPRS*).

1.4 I sistemi di terza generazione

1.4.1 UMTS

Le origini dei sistemi di terza generazione risalgono alla metà degli anni '80, quando l'ITU propose il progetto di un nuovo e unico sistema radiomobile mondiale, prima chiamato FPLMTS (*Future Public Land Mobile Telephone System*) e poi denominato IMT-2000. A questo progetto hanno partecipato i principali enti di standardizzazione mondiale. Tra essi l'ETSI ha proposto il sistema UMTS, ancora oggi in fase di standardizzazione. La molteplicità di soluzioni presentate non ha permesso di raggiungere un accordo tra le varie parti, per questo motivo il progetto IMT-2000 sarà costituito da un insieme di sistemi diversi, ma con un certo livello di compatibilità reciproca, per permettere il roaming mondiale ai terminali in grado di operare con i vari

sistemi. La compatibilità tra i sistemi è stata raggiunta tramite la collaborazione fra diversi enti come l'ETSI (Europa), ARIB (*Association of Radio Industries and Business*, Giappone), TTA (*Telecommunication Technology Association*, Corea) e ANSI (*America National Standards Institute*, USA). Una di queste collaborazioni è l'organismo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) costituito da ETSI, ARIB, CWTS, T1, TTA e TTC. Le caratteristiche del sistema UMTS proposto dall'ETSI, la cui introduzione è prevista per l'anno 2002, sono le seguenti:

- Due modalità di trasmissione FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*).
- Tecnica di accesso multiplo CDMA e ibrida CDMA/TDMA.
- Banda assegnata per l'accesso CDMA: 1920-1980 MHz in uplink e 2110-2170 per il downlink.
- Banda assegnata per l'accesso CDMA/TDMA: 1900-1920 MHz in uplink e 2010 e 2025 MHz in downlink.
- Canalizzazione di 4.5–5 MHz.
- Modulazione dual BPSK in uplink e QPSK in downlink per la modalità FDD.
- Modulazione QPSK in uplink e downlink per la modalità TDD.
- Velocità di chip 3.84 Mchip/s.
- Suddivisione in trame (10 ms) di 15 slot ognuna.
- Velocità di trasmissione fino a 2.048 Mbit/s e variabile ad ogni trama.

1.5 Le tecniche di accesso multiplo

La condivisione delle risorse può essere un modo molto efficiente per ottenere un'alta capacità in qualunque rete di telecomunicazione. Nei sistemi radiomobili le risorse sono costituite dai canali o, più genericamente, dall'ampiezza di banda. La modalità di accesso deve permettere ad ogni terminale mobile di utilizzare le risorse in modo completamente condiviso. A seconda di come lo spettro disponibile viene utilizzato, il sistema può essere classificato come a banda stretta (*narrow-band*) o a banda larga (*wide-band*). Nel primo caso, tutta la banda di frequenze disponibile viene suddivisa in più canali mentre, nel secondo caso, tutta la banda o la maggior parte di essa è utilizzabile da tutti gli utenti. Vi sono principalmente tre diversi tipi di accesso:

- Accesso multiplo a divisione di frequenza (FDMA).

- Accesso multiplo a divisione di tempo (TDMA).
- Accesso multiplo a divisione di codice (CDMA).

La modalità FDMA è intrinsecamente di tipo *narrow-band*, mentre quella CDMA è di tipo *wide-band*; la modalità TDMA può rientrare, invece, in entrambe le classificazioni. Quando viene richiesta una comunicazione a due vie, deve essere fornita una connessione di tipo *full-duplex* tramite la divisione di frequenza o di tempo. Il primo caso è denominato FDD (*Frequency Division Duplex*), mentre il secondo TDD (*Time Division Duplex*) e verranno trattati entrambi nel paragrafo 1.6.

1.5.1 Accesso multiplo a divisione di frequenza FDMA

Il tipo di accesso più semplice da realizzare è quello a divisione di frequenza, in cui l'intera banda di frequenze viene suddivisa in un certo numero di bande di canale con larghezza prefissata; con questo sistema i segnali provenienti dai mobili o dalle stazioni radio base sono trasmessi su diverse frequenze portanti. All'interno di una cella tutti i canali sono disponibili per tutti gli utenti e la loro assegnazione è realizzata in seguito alla richiesta da parte degli utenti stessi sulla base del criterio "primo arrivato - primo servito". Nel caso in cui una frequenza venga assegnata ad un solo utente (fig. 1.1), il sistema è denominato SCPC (*Single Channel Per Carrier*). Una volta assegnata la banda, il numero di canali che possono essere ottenuti dipende non solo dalla tecnica di modulazione, ma anche dagli intervalli di guardia lasciati tra i vari canali; questi ultimi permettono di minimizzare l'interferenza da canale adiacente dovuta alle imperfezioni dei filtri e degli oscillatori utilizzati nelle apparecchiature. Di tutti i canali disponibili, una parte può essere dedicata alla trasmissione delle informazioni di controllo, mentre i restanti vengono utilizzati per le comunicazioni degli utenti. Il numero di canali di controllo varia con le dimensioni del sistema, ma generalmente costituisce solo una piccola porzione del numero totale di canali. La banda disponibile per ogni utente può essere definita come:

$$B_0 = \frac{B}{N}$$

dove B rappresenta la banda totale a disposizione e N il numero di canali che si vogliono ricavare.

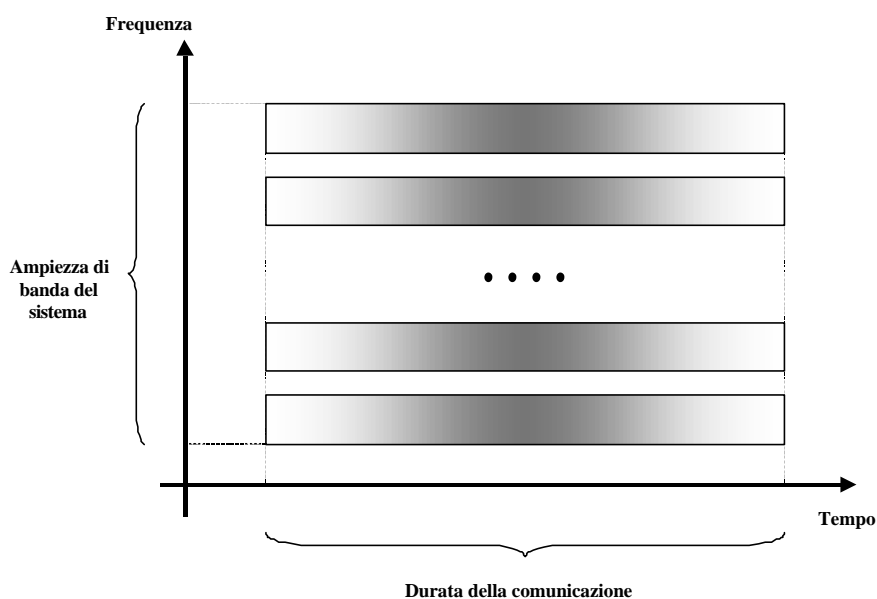


Figura 1.1: Rappresentazione della tecnica SCPC/FDMA

Le principali caratteristiche della modalità FDMA sono le seguenti:

- **Trasmissione continua:** i canali, una volta assegnati, possono essere utilizzati dall'utente e dalla stazione radio base contemporaneamente ed in modo continuativo.
- **Banda stretta:** la banda richiesta per ogni canale è relativamente stretta (25-30 kHz a seconda del sistema radiomobile).
- **Hardware semplice:** rispetto alle altre modalità di accesso multiplo, sono richieste apparecchiature relativamente poco complesse sia per quanto riguarda i terminali mobili, che per le stazioni base.
- **Utilizzo del duplexer:** dato che il sistema opera in modalità *full duplex* e viene utilizzata una sola antenna per la trasmissione e per la ricezione, l'introduzione di un *duplexer* (un insieme di filtri interposto tra trasmettitore e ricevitore) è necessario per evitare il fenomeno dell'interferenza.
- **Alti costi per la stazione base:** l'architettura richiede l'impiego di un trasmettitore ed un ricevitore per ogni canale, comportando così costi notevoli nel caso in cui si voglia servire un elevato numero di utenti.

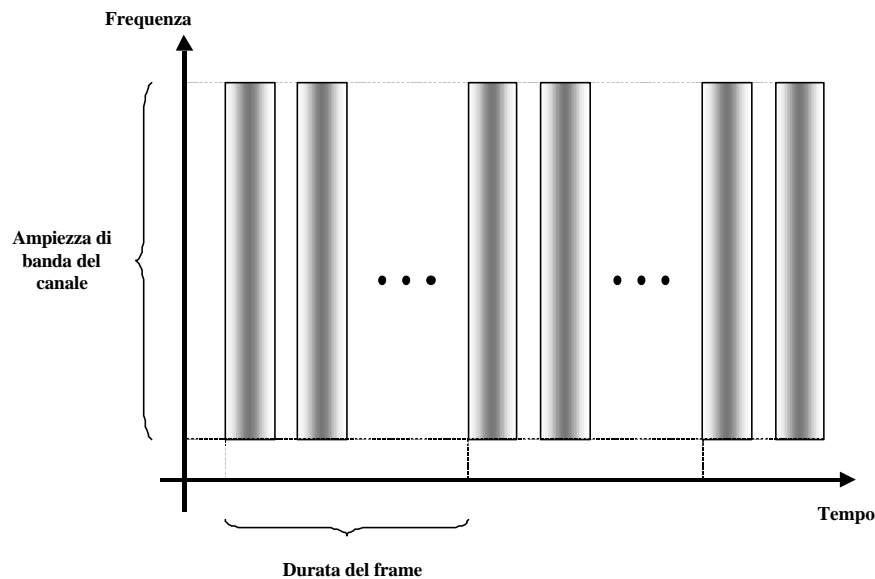


Figura 1.2: Rappresentazione della tecnica TDMA

- **Bassi costi per i terminali mobili:** gli unici vincoli ai quali i terminali devono sottostare sono il rispetto della frequenza di portante assegnata e la larghezza di banda; inoltre, il trasmettitore ed il ricevitore operano in modo continuo. Queste caratteristiche permettono di mantenere bassi i costi dei terminali mobili.
- **Scarsa protezione della comunicazione:** la protezione intrinseca offerta dalla modalità FDMA è inesistente; occorre quindi aggiungere opportuni dispositivi o procedure di cifratura per raggiungere tali obiettivi. Inoltre, anche una semplice portante non modulata può causare un'interferenza isofrequenziale sufficiente per compromettere la comunicazione.

1.5.2 Accesso multiplo a divisione di tempo TDMA

La tecnica TDMA è la principale alternativa a quella FDMA. Il vantaggio del TDMA consiste nell'inserire, sulla base del teorema del campionamento di Nyquist, più flussi di informazioni su una frequenza radio incrementando il rate di trasmissione. Una frequenza portante può essere condivisa da molti utenti ognuno dei quali ne fa uso in intervalli di tempo, denominati *time slot*, distinti da tutti gli altri. Il numero di time slot per portante dipende da molti fattori, tra

i quali la tecnica di modulazione e l'ampiezza di banda disponibile. La trasmissione da o verso un determinato terminale mobile avviene in modo discontinuo, poiché un utente può trasmettere solo nel time slot che gli viene assegnato in modo ciclico. Un ciclo è definito come la successione di tutti i time slot in cui è stato suddiviso il tempo sulla portante (fig. 1.2) e prende il nome di trama radio (*radio frame*). La trasmissione risultante sarà quindi di tipo *buffer and burst*. Una volta ottenuto l'accesso su una portante, la trasmissione e la ricezione sono realizzate in time slot distinti, separati da un opportuno intervallo di guardia (alcuni time slot). La modalità *buffer and burst* implica che la velocità di trasmissione sul canale sia più elevata di quella della codifica di un fattore maggiore o uguale al numero di time slot per portante. Le caratteristiche dell'accesso multiplo a divisione di tempo sono riassunte qui di seguito:

- **Più canali per portante:** su una portante non tutto il tempo è a disposizione della trasmissione di un solo utente, ma è diviso in una serie di intervalli (time slot) ognuno dei quali viene assegnato ad un utilizzatore diverso. In questo modo, una frequenza portante può essere condivisa da più utenti. Nel sistema europeo GSM il numero di canali vocali per ogni portante è otto.
- **Trasmissione discontinua:** ogni utente è abilitato a trasmettere soltanto nel time slot che gli è stato assegnato, quindi una volta ogni trama radio. Nel sistema GSM la trama radio ha una durata di 4.616 ms mentre il time slot corrisponde a 577 s.
- **Overhead:** a causa delle caratteristiche della trasmissione discontinua a *burst* propria dei sistemi TDMA, la sincronizzazione tra trasmettitore e ricevitore può essere complicata, quindi una parte consistente dei bit totali trasmessi deve essere dedicata alle operazioni di sincronizzazione. Questa necessità, oltre alla presenza di intervalli di guardia tra un time slot e quello successivo, riduce il numero di bit di informazione d'utente che un terminale può trasmettere in ogni *frame* e quindi contribuisce a diminuire il rendimento di trama. Quest'ultimo è definito come segue:

$$h_r = \frac{N_u}{N_T}$$

dove N_u è il numero di bit utili e N_T il numero di bit totali per trama.

- **Nessun duplexer:** dato che la trasmissione e la ricezione avvengono in tempi distinti ed in diversi time slot, non è richiesto l'utilizzo di un duplexer; tuttavia è necessario un commutatore veloce in grado di attivare e disattivare rapidamente il trasmettitore ed il ricevitore negli istanti di tempo opportuni.
- **Hardware complesso:** rispetto ai sistemi FDMA, l'utilizzo della tecnologia digitale nei sistemi TDMA aumenta la complessità dei terminali mobili, in quanto essi devono sottostare a severi vincoli riguardo al corretto allineamento del burst all'interno della trama radio al fine di evitare interferenze. Nel GSM, inoltre, sono necessari circuiti sofisticati che realizzino l'algoritmo di frequency hopping: esso consiste nell'effettuare la trasmissione sempre sul medesimo time slot, ma su frequenze diverse ad ogni trama. Questa tecnica permette di controbattere in modo estremamente efficace gli effetti del fading veloce.
- **Costi ridotti:** i costi delle base station sono relativamente ridotti in quanto ogni portante supporta più canali e quindi è sufficiente una sola coppia di trasmettitore e ricevitore per servire gli utenti su una portante.
- **Handover efficiente:** nei sistemi TDMA, in cui la trasmissione avviene in modo discontinuo, è possibile effettuare le procedure di handover con maggiore efficienza, senza disturbare la conversazione.
- **Scarsa protezione della comunicazione:** anche in questo caso, come nei sistemi FDMA, una semplice portante non modulata può generare un'interferenza isofrequenziale sufficiente per compromettere la comunicazione. E' quindi necessario aggiungere opportuni dispositivi o procedure di cifratura per prevenire l'acquisizione non autorizzata dei dati trasmessi.

Il sistema numerico GSM è costituito da una combinazione delle tecniche di accesso multiplo FDMA e TDMA (fig. 1.3), infatti le bande assegnate per l'uplink e per il downlink vengono suddivise in 124 portanti, ognuna delle quali consiste in una successione di trame da 8 slot temporali. In questo modo si ottengono $124 \times 8 = 992$ canali disponibili.

1.5.3 Accesso multiplo a divisione di codice CDMA

Il sistema CDMA è un metodo di accesso in cui tutti gli utenti hanno il permesso di trasmettere contemporaneamente, operando alla stessa frequenza e utilizzando tutta la banda disponibile (fig. 1.4).

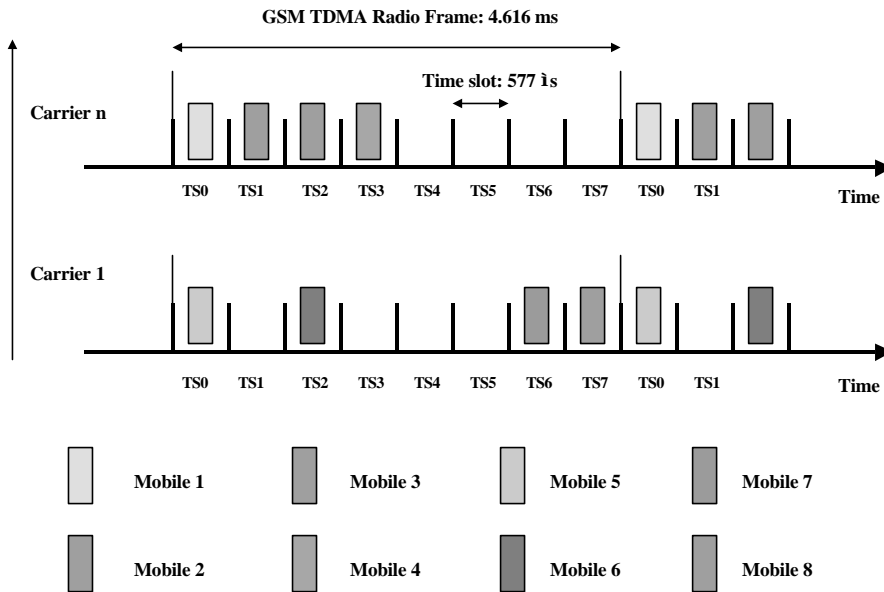


Figura 1.3: Il sistema ibrido FDMA/TDMA utilizzato nel GSM

Per poter rendere intellegibile la comunicazione è necessario assegnare una particolare sequenza di codice ad ogni utente in modo da rendere distinguibili le varie trasmissioni e poter risalire alle informazioni inviate.

I codici utilizzati (codici di spreading) sono particolari sequenze pseudocasuali che godono della proprietà di avere una cross-correlazione nulla. L'operazione di spreading (fig. 1.5) consiste nel moltiplicare il segnale da trasmettere per una sequenza di simboli (*chip*) pseudocasuale con una velocità di trasmissione molto maggiore del bit rate della sorgente di informazione. E' possibile definire il *Processing Gain* come:

$$PG = \frac{f_c}{f_b}$$

dove f_b è la banda del segnale di informazione e f_c la banda del segnale trasmesso. Il *PG* non tiene in considerazione soltanto l'operazione di spreading, ma anche tutte le elaborazioni applicate in trasmissione al segnale originario. In ricezione, per risalire ai dati trasmessi, è necessario applicare nuovamente il codice al segnale ricevuto. Nei sistemi CDMA teoricamente non vi sono limiti sul numero di utenti che si possono servire.

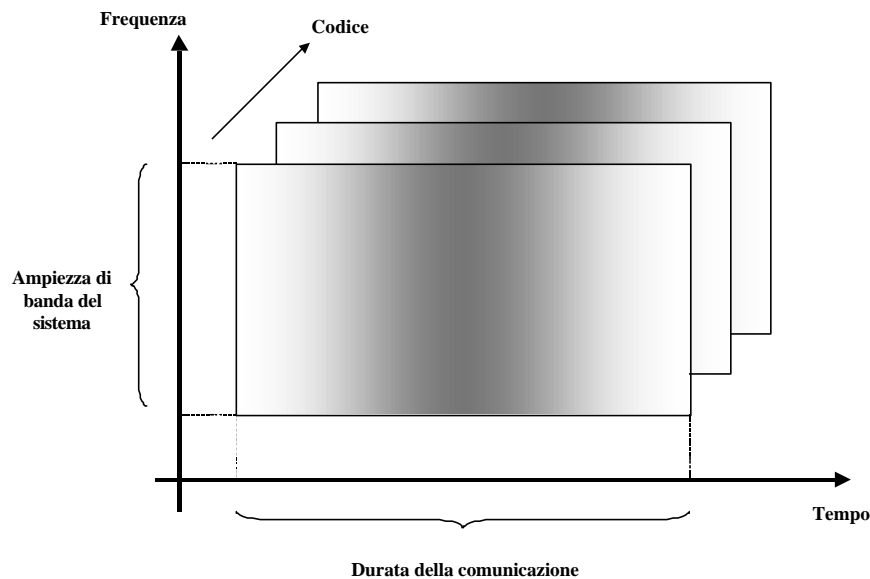


Figura 1.4: Rappresentazione della tecnica CDMA (Direct Sequence)

Infatti, quello che avviene è una graduale diminuzione della qualità del segnale all'aumentare del numero di utenti presenti nel sistema. Questo fenomeno è dovuto al fatto che le sequenze utilizzate per la trasmissione, a causa della distorsione che i segnali subiscono sul canale radio, giungono al ricevitore non più perfettamente ortogonali, introducendo così un certo livello di interferenza che, in presenza di un congruo numero di utenti, può rendere inaccettabile la qualità della trasmissione. La tecnica CDMA permette di ridurre le distorsioni introdotte dai cammini multipli e offre un'alta resistenza alle interferenze intenzionali. Queste caratteristiche dipendono dal fatto che il segnale viene espanso sull'intero spettro disponibile: solo una parte di esso, quindi, è affetta dalla presenza del multipath, mentre con l'operazione di despreading in ricezione i segnali indesiderati vengono distribuiti su tutta la banda, riducendo di molto il loro effetto (fig. 1.6). Inoltre, la trasmissione è per sua natura codificata e quindi solo gli utenti coinvolti nella comunicazione possono risalire ai dati inviati, poiché conoscono il tipo di codice utilizzato. Le caratteristiche principali dei sistemi CDMA sono le seguenti:

- **Ricevitori Rake:** a causa del fatto che il segnale viene espanso su tutta la banda disponibile, è possibile l'utilizzo di un particolare tipo di ricevitore

denominato Rake che consente di discriminare i vari cammini multipli. Per questo motivo i problemi di multipath non costituiscono più un aspetto negativo della ricezione, ma vengono utilizzati per richiedere una potenza minore in trasmissione.

- **Nessuna pianificazione frequenziale:** diversamente dai sistemi FDMA e TDMA non viene richiesta la pianificazione territoriale delle frequenze per limitare le interferenze, poiché tutti gli utenti condividono la stessa banda.
- **Controllo di potenza:** i sistemi CDMA devono sottostare a stringenti requisiti per quanto riguarda il controllo di potenza per evitare l'effetto near-far. Questo è il fenomeno che avviene quando il trasmettitore più vicino alla base station maschera le trasmissioni dei terminali più lontani, ricevuti con minore potenza. E' quindi necessario utilizzare opportuni meccanismi che permettano alle stazioni radio base di ricevere i segnali di tutti i terminali con lo stesso livello di potenza, indipendentemente dalla loro distanza.
- **Capacità flessibile:** non essendoci limiti teorici al numero massimo di utenti che il sistema è in grado di supportare, è possibile applicare politiche basate essenzialmente sui livelli di interferenza massimi ammessi per garantire un determinato livello di qualità della trasmissione.
- **Sincronizzazione:** perché il sistema possa funzionare, è richiesta una sincronizzazione dei codici molto accurata.
- **Protezione della comunicazione:** la protezione offerta dai sistemi CDMA è intrinseca, in quanto per entrare in possesso dell'informazione occorre conoscere, oltre che la frequenza di lavoro ed il formato della modulazione, anche il codice utilizzato. Per questo motivo i sistemi CDMA trovano largo impiego in ambito militare.

Vi sono molti tipi di tecniche d'accesso CDMA; tra le più importanti vanno ricordate:

- **Direct sequence spread spectrum:** il segnale che trasporta le informazioni viene moltiplicato direttamente per un codice ad alto *chip rate*.
- **Frequency hopping spread spectrum:** la frequenza portante, con cui il segnale che trasporta le informazioni viene trasmesso, è soggetta a cambiamenti continui, determinati dal tipo di codice utilizzato.

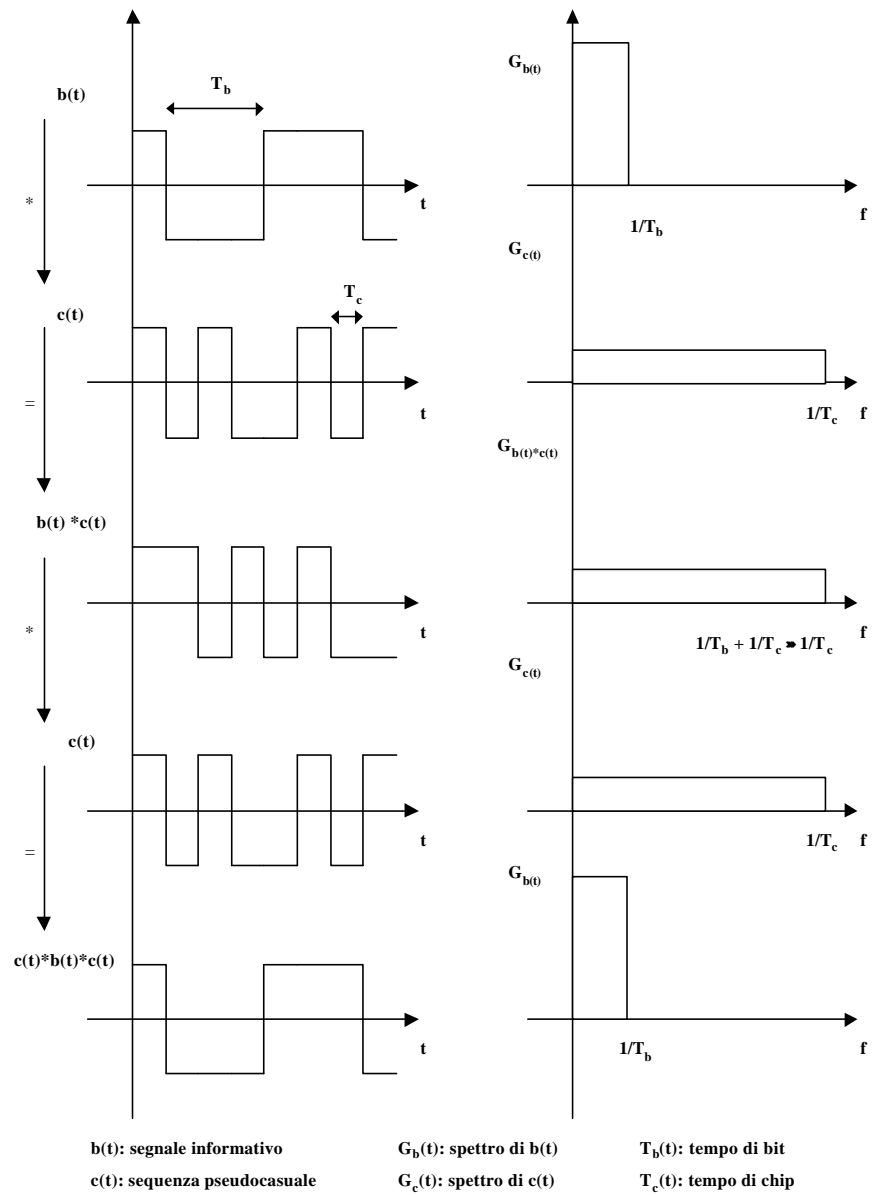


Figura 1.5: Operazioni di spreading e despreading sul segnale trasmesso

- **Time hopping spread spectrum:** il segnale che trasporta le informazioni non viene trasmesso in modo continuo, ma soltanto in determinati istanti di tempo la cui durata è determinata dal tipo di codice.
- **Hybrid modulation:** due o più delle modulazioni descritte possono essere usate contemporaneamente per combinare i loro vantaggi.

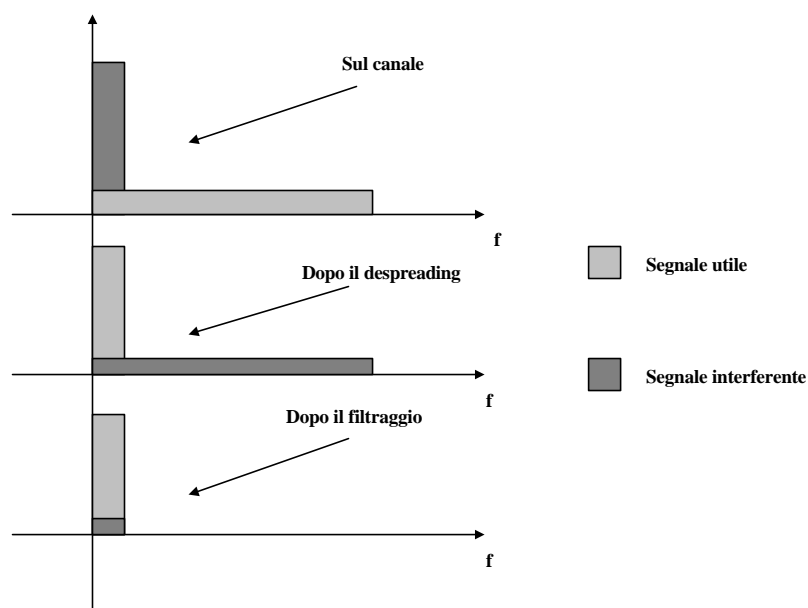


Figura 1.6: Riduzione dei disturbi nel sistema CDMA

Inoltre è anche possibile la combinazione con le tecniche TDMA e FDMA precedentemente descritte.

1.6 Comunicazioni a due vie

Le comunicazioni a due vie in modalità *full-duplex*, ovvero in entrambe le direzioni del collegamento simultaneamente, possono essere realizzate tramite la divisione di frequenza, di tempo e di codice. Quest'ultima corrisponde esattamente alla tecnica CDMA che è stata descritta nel paragrafo 1.5.3. Qui di seguito verranno brevemente esposte le altre due modalità (fig. 1.7).

1.6.1 Frequency Division Duplex FDD

Nelle comunicazioni FDD, le comunicazioni in uplink e quelle in downlink utilizzano bande di frequenza separate. Conseguentemente la trasmissione simultanea in entrambe le direzioni è facilmente realizzabile. Tra queste bande di frequenza deve essere lasciato un certo intervallo di guardia per minimizzare le interferenze.

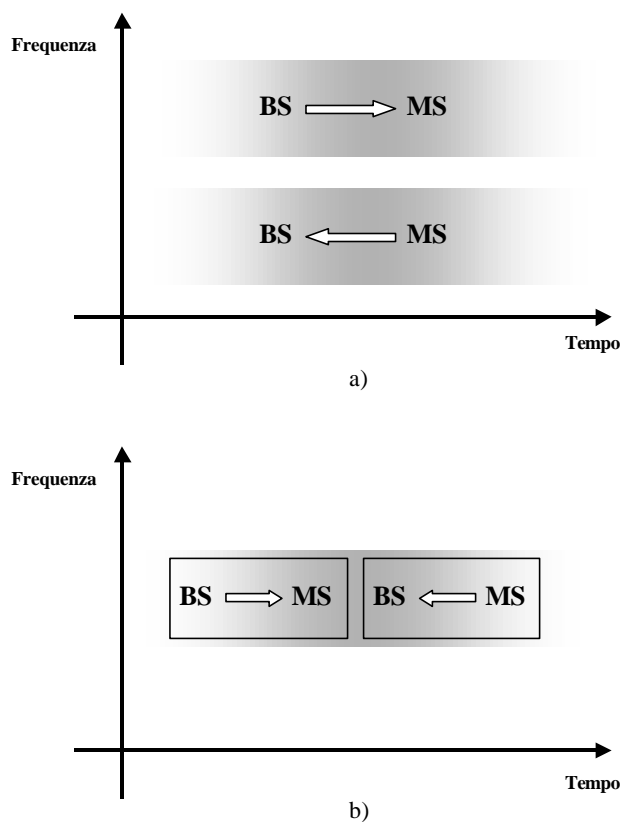


Figura 1.7: Esempi di comunicazione. a) FDD; b)TDD

1.6.2 Time Division Duplex TDD

Nelle comunicazioni TDD, entrambe le direzioni di comunicazione utilizzano la stessa banda di frequenza, ma in time slot diversi, in modo tale che la trasmissione da terminale mobile a base station e da base station a terminale mobile avvenga in tempi diversi in modo alternato. Condividendo lo stesso canale, quindi, la qualità della trasmissione sarà la stessa in entrambe le direzioni. Per minimizzare le interferenze è necessario garantire un certo intervallo di guardia tra i time slot e fornire un'accurata sincronizzazione.

1.7 Tecniche di commutazione

Le tecniche di commutazione in una rete di telecomunicazione stabiliscono in quale modo le risorse di sistema vengono utilizzate per permettere agli utenti di comunicare. Esistono due tipi di commutazione:

- **Commutazione di circuito:** questa tecnica assegna una parte delle risorse di sistema per una comunicazione in modo stabile e continuativo fino al termine della comunicazione. La commutazione di circuito, nata con le reti telefoniche, offre ritardi di trasferimento delle informazioni limitati e costanti; essa è però caratterizzata da una bassa efficienza in presenza di sorgenti intermittenti, poiché i canali (le risorse) risultano allocati anche durante i periodi di tempo in cui le sorgenti non trasmettono.
- **Commutazione di pacchetto:** con questa tecnica le risorse non vengono assegnate esclusivamente a due o più utenti, ma vengono condivise tra tutti gli utilizzatori. I dati vengono raccolti in pacchetti di informazione e affidati alla rete, il cui compito è quello di consegnarli all'utente finale. La commutazione di pacchetto, caratteristica delle reti di calcolatori, permette di raggiungere livelli di efficienza superiori a quelli offerti dalla commutazione di circuito quando si è in presenza di traffico intermittente, poiché le risorse vengono occupate solo quando vi è l'effettiva necessità di trasmettere informazioni.