

# 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).

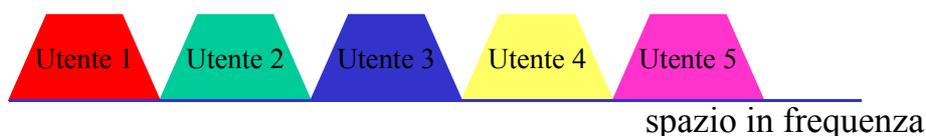


Figura 2.1: Tecnica di accesso FDMA.

### 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.

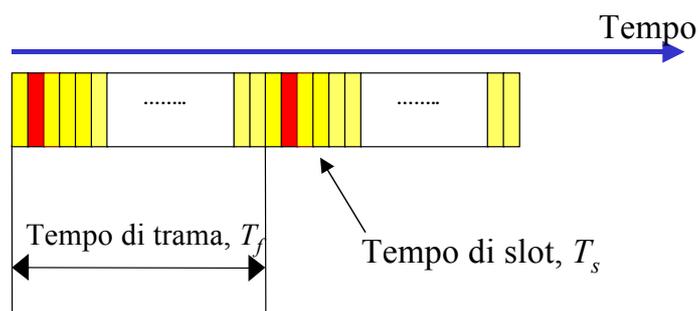


Figura 2.2: Struttura della trama di una portante TDMA.

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 ininfluenza. 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 multisetto 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.

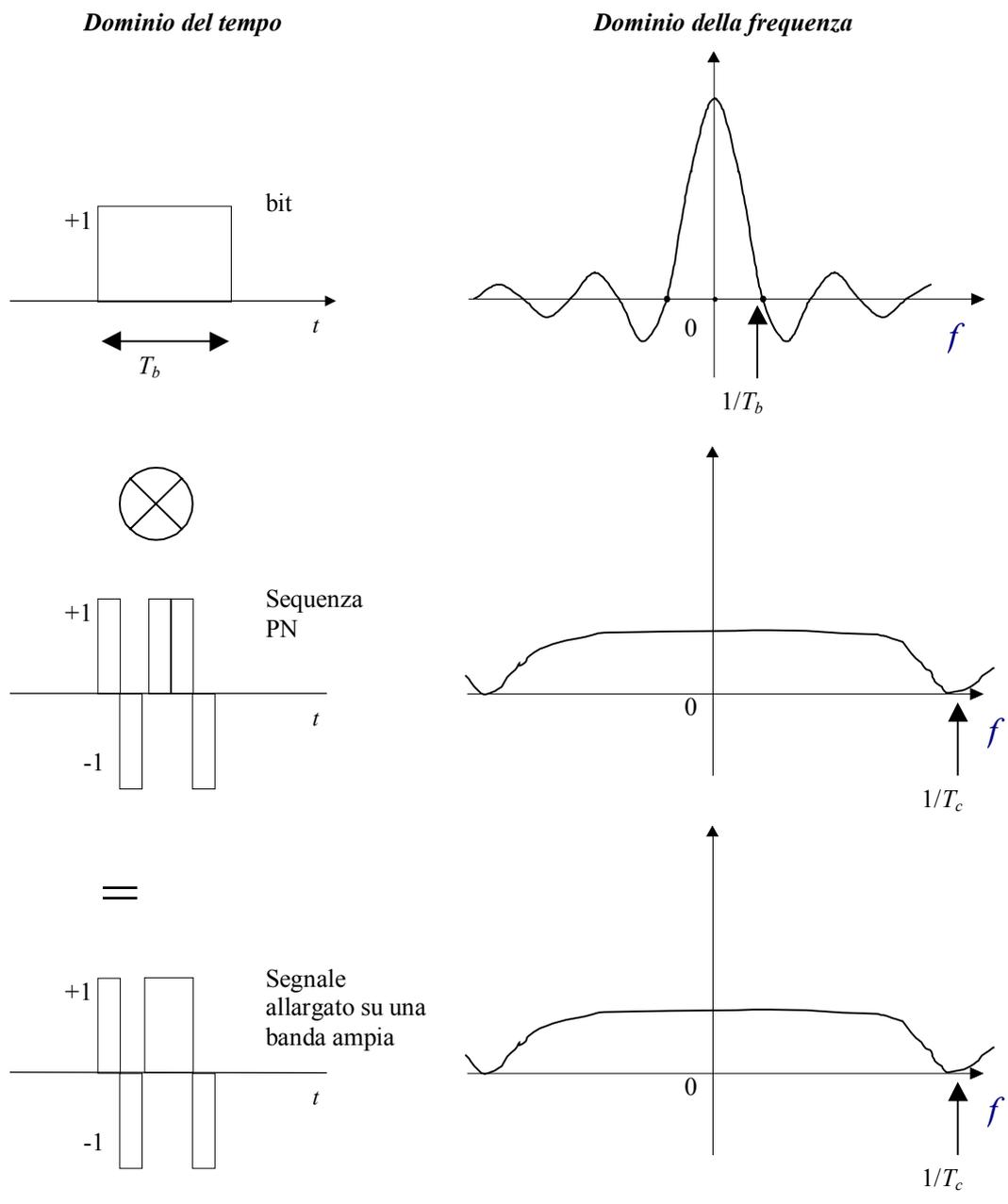


Figura 2.3: Processo di spreading con tecnica DS.

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.

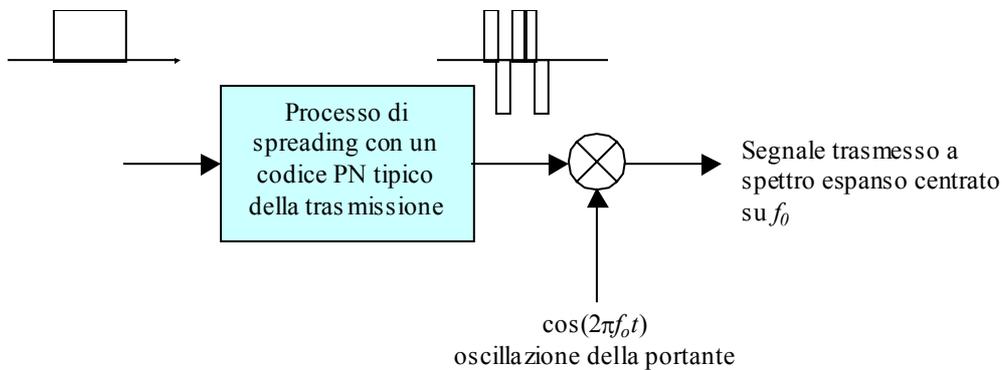


Figura 2.4: Trasmissione DS-CDMA.

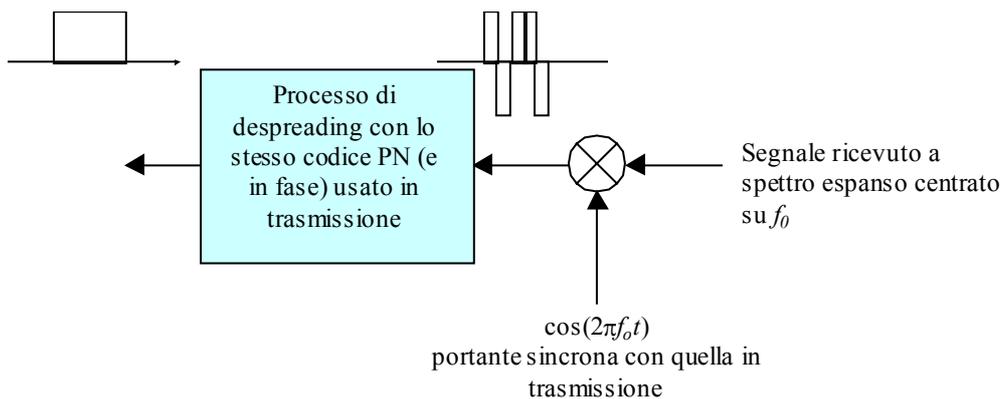


Figura 2.5: Ricezione DS-CDMA.

### 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 crosscorelazione 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):

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

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:

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

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:

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

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 trasmissione utilizzate (es., codici, modulazione) e dai requisiti imposti sulla probabilità d'errore per bit.