

Sistema UMTS

Tecnica di accesso W-CDMA

<i>Introduzione: scelta della tecnica di accesso multiplo</i>	1
<i>Concetti generali sul CDMA</i>	3
<i>L'operazione di spreading</i>	6
Parametri caratteristici dell'operazione di spreading.....	10
Despreading e reiezione dell'interferenza	12
<i>La capacità dei sistemi CDMA</i>	14
Problema del near-far.....	15

Introduzione: scelta della tecnica di accesso multiplo

In ogni **sistema radiomobile**, i diversi segnali d'utente sono trasmessi tramite una o più **portanti radio**. Dato che lo spettro elettromagnetico a disposizione è inevitabilmente limitato, è necessario sfruttarlo nel modo più efficiente possibile. A questo scopo servono le **tecniche di accesso multiplo**: esse consentono di condividere la risorsa comune (lo spettro) tra più utenti contemporaneamente, garantendo una sufficiente qualità del servizio.

All'interno delle tecniche di accesso, è possibile individuare varie "parti". Una di queste è senz'altro quella comprendente le **procedure di trasmissione e ricezione del segnale d'utente**. Tali procedure fanno parte propriamente del **livello fisico** (o livello 1) della *pila ISO-OSI*: esse definiscono appunto le modalità con cui si accede al mezzo radio.

I **protocolli di livello fisico**, uniti ai protocolli di livello 2 (**data link layer**) e tre (**network layer**) della *pila ISO-OSI*, costituiscono l'interfaccia radio del sistema UMTS.

In questo capitolo, ci occupiamo specificamente delle tecniche di accesso utilizzate e delle principali caratteristiche del livello fisico della pila ISO-OSI specificate per il sistema UMTS.

Sin dall'estate del 1997, all' ETSI ci si rese conto che solo due tecniche di accesso radio avevano proprietà adatte al nuovo sistema che si voleva realizzare:

- tecnica **W-CDMA** (*Wideband - Code Division Multiple Access*)
- tecnica **TD-CDMA** (*Time Division - Code Division Multiple Access*)

Nel gennaio del 1998 fu finalmente deciso che queste due tecniche avrebbero costituito l'**interfaccia radio** del sistema UMTS, nota con l'acronimo **UTRA** (*UMTS Terrestrial Radio Access*). In particolare, la decisione ruotava su 4 punti cardine:

- nelle due bande appaiate (1), gestite con il **duplexing FDD** (a divisione di frequenza), il sistema avrebbe adottato la tecnica **W-CDMA**;
- nelle due bande non appaiate (2), gestite con il **duplexing TDD** (a divisione di tempo), il sistema avrebbe adottato la tecnica **TD-CDMA**;
- la componente FDD avrebbe permesso ad un operatore di fornire servizi UMTS con una allocazione minima di frequenza pari a **5 MHz** per ogni banda (quindi 10 MHz in tutto);
- il sistema avrebbe dovuto garantire la possibilità di realizzare terminali a basso costo che potessero funzionare in **dual mode** UMTS/GSM e FDD/TDD.

E' interessante notare una cosa: la *risoluzione WARC* che, nel 1992, aveva assegnato le bande di frequenza al sistema UMTS, non aveva in alcun modo stabilito in quale modo si dovesse separare il segnale ricevuto da quello trasmesso (il cosiddetto **duplexing** (3)), lasciando in questo ampia libertà in base alla soluzione radio adottata. Tuttavia, gli addetti ai lavori hanno comunque colto, nella suddetta risoluzione, un suggerimento implicito a soluzioni già adottate nei sistemi esistenti e vale a dire:

¹ Da 1920 MHz a 1980 MHz e da 2110 MHz a 2170 MHz

² Da 1900 MHz a 1920 MHz e da 2010 a 2025 MHz

³ Il duplexing è ovviamente un caso particolare del multiplexing: quest'ultimo, infatti, rappresenta sostanzialmente le modalità (ad esempio TDMA o FDMA) con cui devono essere distinti N segnali che condividono lo stesso canale di trasmissione; il duplexing è relativo al caso in cui N=2, dove i due segnali sono quello proveniente dal terminale mobile e quello diretto al terminale mobile.

- **FDD** (*Frequency Division Duplexing*): è la soluzione adottata nel **GSM** e prevede che il segnale di andata (verso il terminale) ed il segnale di ritorno (dal terminale) vengano allocati su portanti diverse (secondo la classica *tecnica a divisione di frequenza*); generalmente, la *sottobanda inferiore* è quella riservata all'up-link, mentre la *sottobanda superiore* è riservata al down-link; usando frequenze diverse, è ovvio che i due segnali possano essere trasmessi e ricevuti simultaneamente;
- **TDD** (*Time Division Duplexing*): è la soluzione adottata nel sistema **DECT** (*Digital European Cordless Telephone*) e prevede che il segnale di andata ed il segnale di ritorno vengano trasmessi nella stessa sottobanda (quindi usando la stessa portante) ma in momenti diversi (secondo la classica *tecnica a divisione di tempo*).

Si può intuire che la prima soluzione sia opportuna quando il traffico è sostanzialmente lo stesso nelle due direzioni (**traffico simmetrico**), mentre invece la seconda è più opportuna quando il traffico in una direzione è nettamente prevalente su quello nell'altra direzione (**traffico asimmetrico**, come ad esempio nella navigazione sul Web e nella consultazione delle banche dati): in casi come questi, dove cioè generalmente si effettua una breve richiesta e poi si ricevono grandi moli di dati, è possibile far trasmettere più spesso in una direzione (quella con più traffico) che non nell'altra, semplicemente regolando opportunamente *l'istante di commutazione* tra le operazioni di trasmissione e ricezione.

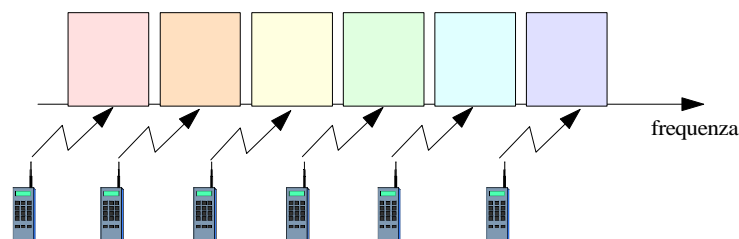
Concetti generali sul CDMA

I sistemi radio trasmettono e ricevono i segnali su una risorsa comune rappresentata da quella porzione di **spettro elettromagnetico** che è stata loro assegnata dagli *enti regolatori*. Essendoci quindi più utenti che vogliono usare quest'unica risorsa, potrebbero nascere grossi problemi qualora due o più di questi utenti volessero trasmettere contemporaneamente e sulla stessa frequenza (si parla in genere di **conflitto** o anche **collisione**): se non si prevedessero opportuni meccanismi di gestione della risorsa comune, i segnali trasmessi andrebbero a sommarsi diventando irricognoscibili gli uni dagli altri. Allo scopo di risolvere situazioni come queste e di massimizzare la **capacità** del sistema (ossia il numero di

utenti che il sistema può servire contemporaneamente con una prefissata qualità del servizio), sono state introdotte le **tecniche di accesso multiplo**.

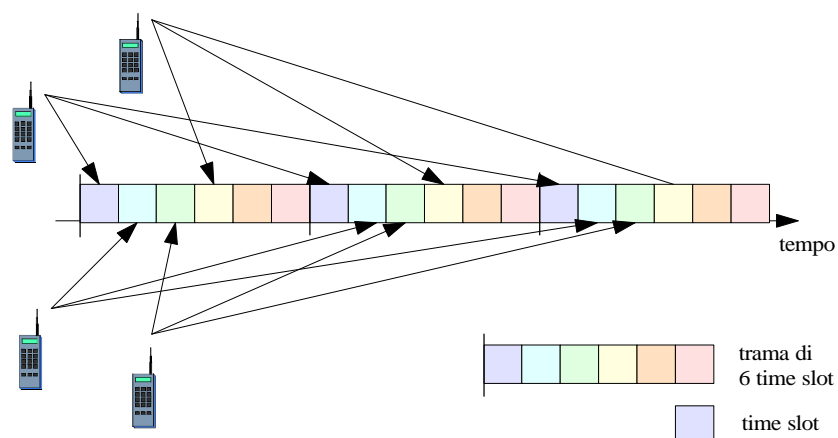
Le due tecniche più classiche sono FDMA e TDMA:

- la tecnica **FDMA** consiste nel dividere la banda assegnata al sistema in un certo numero di porzioni (chiamate **canali**), ognuna centrata su una **frequenza portante**; così facendo, ad ogni utente è assegnato un canale (cioè una portante) per tutta la durata della sua connessione e non c'è possibilità che il suo segnale interferisca con quello di un altro utente, allocato su una portante diversa (4):



Tecnica FDMA

- la tecnica **TDMA** consiste invece nel ripartire l'intera banda disponibile in frazioni temporali denominate **time slot**; in questo modo, tutti gli utenti possono accedere all'intera banda, ma possono farlo solo per intervalli di tempo limitati che si ripetono periodicamente con una certa cadenza (la cosiddetta **durata di trama**):



Tecnica TDMA

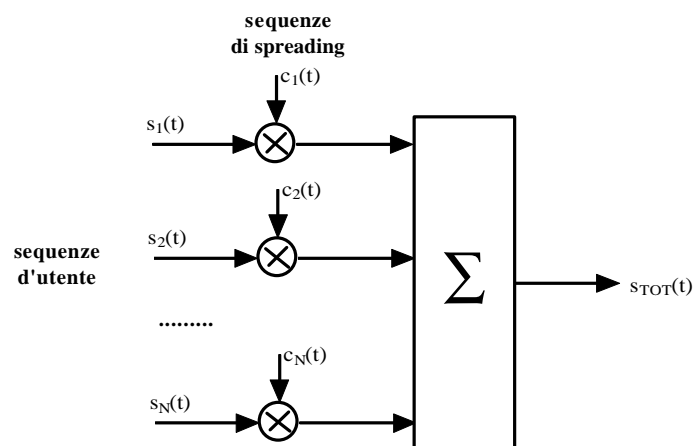
⁴ Tra l'altro, è sempre prevista una adeguata separazione (in frequenza) tra i vari canali

Come si può vedere, il singolo utente accede al canale (che è unico) per un intervallo prefissato di tempo (il time slot), dopodiché si mette in attesa dello stesso time slot appartenente alla **trama** successiva. La breve durata delle trame garantisce che l'utente non percepisca la distinzione tra gli istanti in cui il terminale trasmette/riceve e quelli in cui invece è in attesa.

In definitiva, quindi, nella tecnica FDMA la **risorsa elementare** a disposizione degli utenti è la singola portante radio, mentre invece nella tecnica TDMA è il singolo time slot.

E' possibile poi combinare le due tecniche, ottenendo una **tecnica ibrida FDMA/TDMA**, come accade nei sistemi cellulari di seconda generazione come il **GSM** e il **PDC** (*Personal Digital Cellular*): la banda assegnata al singolo operatore viene prima divisa in un certo numero di canali (124 nel GSM, ognuna da 200 kHz) e ciascun canale viene gestito con la tecnica TDMA (nel GSM si usano trame da 8 time slot, ciascuno della durata di 0.5477 ms). In questo caso, quindi, la risorsa elementare è costituita dalla **coppia portante radio / time slot**.

La tecnica **CDMA** rappresenta una innovazione rispetto alle due appena descritte: infatti, essa consente agli utenti di trasmettere sulla stessa frequenza e nello stesso istante. Per ottenere questo, è ovviamente necessario prevedere un ulteriore meccanismo per la separazione dei vari segnali di utente: si procede assegnando a ciascun utente un diverso codice binario (detto **sequenza di spreading**). Le sequenze di spreading sono usate per "codificare" in modo univoco i segnali dei singoli utenti, in modo che siano univocamente distinguibili: questa operazione di "codifica" prende il nome di **spreading**.



Schematizzazione del processo di generazione di un segnale ottenuto come sovrapposizione di segnali multiplati a divisione di codice (CDMA)

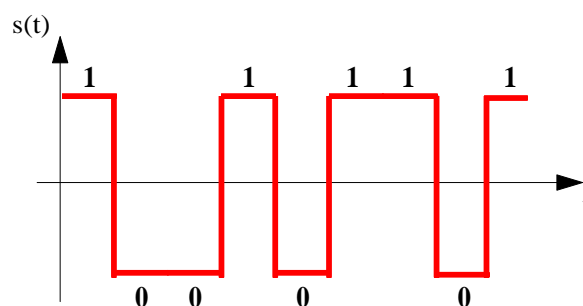
Così facendo, la risorsa elementare a disposizione di ciascun utente diventa appunto la sequenza di spreading.

In effetti, così come si è visto prima, sono sempre possibili *approcci ibridi* con le tecniche sopra citate; ad esempio, si potrebbe usare la stessa tecnica FDMA/TDMA usata dal GSM e, in più, si potrebbe usare il CDMA per consentire a più utenti di usare lo stesso time slot, aumentando così in modo radicale la capacità del sistema. Con una soluzione di questo tipo, la risorsa elementare verrebbe rappresentata dalla terna di parametri **portante - time slot - sequenza di spreading**.

L'operazione di spreading

Vediamo allora nel dettaglio in cosa consiste lo **spreading**. Per semplicità, supponiamo, per il momento, che ci sia un unico canale a disposizione, ad esempio l'intera porzione di spettro assegnata ad un operatore, e che ci siano diversi utenti che vogliano utilizzarlo contemporaneamente (**accesso multiplo**).

L'operazione di **spreading** consiste in questo: ciascun segnale da trasmettere sul canale radio (unico) viene moltiplicato con una sequenza binaria caratterizzata da una velocità di trasmissione (detta **chip rate**) molto maggiore. Per renderci conto del significato di questa affermazione, consideriamo il caso di un utente mobile che, tramite il proprio terminale mobile, voglia trasmettere dei dati sul canale radio messi a disposizione; "trasmettere dati" significa trasmettere una forma d'onda **s(t)** che, in assenza di modulazione, ha l'aspetto di un'onda quadra (in cui il valore alto corrisponde ad esempio all' 1 logico ed il valore basso allo 0 logico):

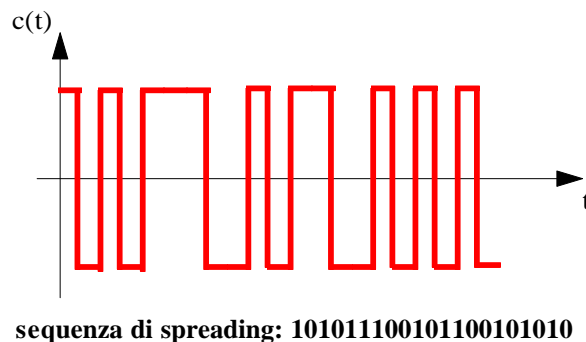


sequenza logica: 1 0 0 1 0 1 1 0 1

Esempio di segnale d'utente

La velocità alla quale si susseguono i vari bit del segnale d'utente è la cosiddetta **velocità di trasmissione (o trasferimento) dell'informazione d'utente**, ossia sostanzialmente la velocità alla quale la sorgente emette i propri bit: nel caso, ad esempio, della *voce digitalizzata*, potrebbe trattarsi dei 13 kbit/s del sistema GSM oppure di valori ancora inferiori (fino a soli 4 kbit/s) nel caso dell'UMTS.

Questa forma d'onda deve essere moltiplicata con una sequenza di spreading $\mathbf{c(t)}$, ossia ancora una sequenza di bit caratterizzata però dal fatto che tali bit si susseguono a velocità molto più elevata (detta **chip rate**):



Esempio di sequenza di spreading

L'esito della moltiplicazione sono bit che vengono chiamati **chip**: essi si susseguono evidentemente alla stessa velocità con cui si susseguono i bit della sequenza di spreading, da cui appunto il nome di **chip rate** attribuito a tale velocità ⁽⁵⁾.

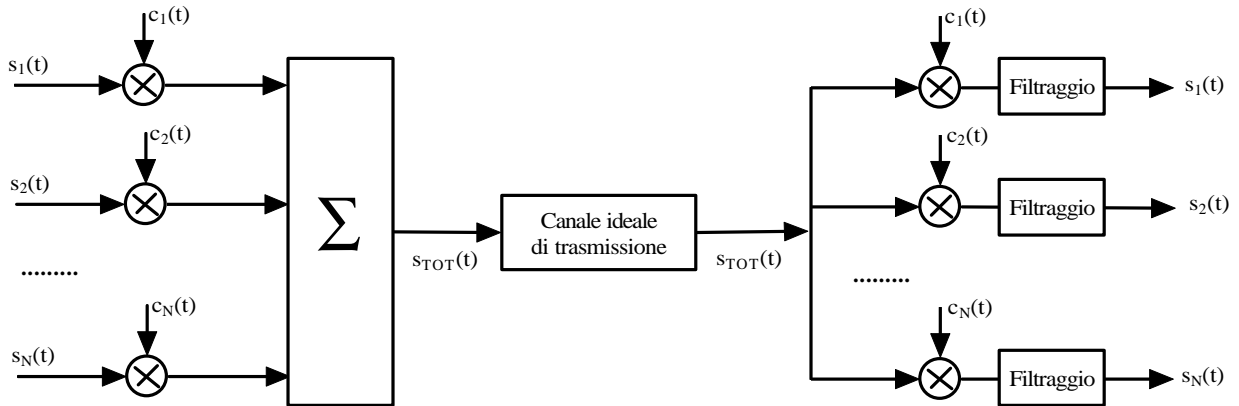
Una volta eseguita l'operazione di spreading sui vari segnali d'utente, le rispettive sequenze di chip vengono sommate ⁽⁶⁾ e trasmesse contemporaneamente sullo stesso canale. Il problema si pone così in ricezione, dove sarà necessario distinguere un segnale da un altro.

Le sequenze di codice assegnate agli utenti che condividono uno stesso canale sono tra loro diverse e sono scelte in modo che la loro *cross-correlazione* sia nulla (si dice che le sequenze sono **ortogonali**): questo fa sì che, almeno in condizioni ideali di funzionamento, l'operazione duale (detta di **despreading**) in ricezione annulli l'effetto delle interferenze mutue. In altre parole, se un dato segnale d'utente $s_k(t)$ è stato moltiplicato con la sequenza $c_k(t)$ e poi sommato a tutti gli altri, dando un

⁵ Segnaliamo che una caratteristica dell'UMTS è quella per cui il chip rate, a prescindere dalla sequenza d'utente, è costante e pari a **3.84 Mchip/s**.

⁶ Ovviamente, sono i segnali ad essere sommati e non certo i bit

segnale complessivo $s_{TOT}(t)$, in ricezione basta moltiplicare $s_{TOT}(t) \cdot c_k(t)$ e effettuare un successivo opportuno filtraggio per ottenere nuovamente $s_k(t)$:



Schematizzazione di un sistema di trasmissione ideale basato su CDMA

Abbiamo parlato di “condizioni ideali di funzionamento” in quanto bisogna sempre tener conto di quello che avviene ai segnali durante la loro propagazione in aria dalla sorgente alla destinazione: se tale propagazione fosse ideale (si potrebbe tollerare tutt’al più una attenuazione costante in frequenza e nel tempo), il segnale trasmesso $s_{TOT}(t)$ coinciderebbe esattamente con il segnale ricevuto e quindi l’operazione di despreading sarebbe in grado di annullare del tutto le interferenze mutue, separando i singoli segnali di utenti in base alle rispettive sequenze di spreading; al contrario, nelle condizioni di propagazione reali, il segnale $s_{TOT}(t)$ subisce inevitabilmente attenuazioni, distorsioni e disturbi, il che degrada le condizioni di ortogonalità tra le sequenze di spreading; questo comporta che la moltiplicazione $s_{TOT}(t) \cdot c_k(t)$ non dia mai solo $s_k(t)$, ma anche una interferenza sovrapposta di entità più o meno rilevante. Risultano allora evidenti due considerazioni:

- in primo luogo, dato che questa **interferenza residua** dipende (a parità di *disturbi esterni*) dal numero di segnali che sono stati sovrapposti a $s_k(t) \cdot c_k(t)$ per dare $s_{TOT}(t)$, le prestazioni del sistema saranno tanto peggiori quanti più utenti vengono serviti contemporaneamente.
- in secondo luogo, è evidente che il limite della capacità del sistema è dato proprio dal livello di interferenza residua dopo l’operazione di despreading: fin quando il sistema è in grado di “proteggersi” da questa interferenza, ossia è in grado di

ricostruire i segnali nonostante l'interferenza (sfruttando appunto le proprietà delle sequenze di spreading), esso può accettare ulteriori utenti, mentre invece quando l'interferenza dovesse superare una **soglia** massima tollerabile, il sistema sarebbe saturo ed ogni ulteriore richiesta di servizio sarebbe rigettata.

Tornando all'operazione di spreading, risulta importante la seguente considerazione: il fatto che il chip rate del segnale $s_k(t) \cdot c_k(t)$ sia molto maggiore della velocità con cui si succedono i bit nel segnale $s_k(t)$ determina evidentemente che anche la banda di $s_k(t) \cdot c_k(t)$ sia molto maggiore di quella occupata da $s_k(t)$ (7); quindi, l'operazione di spreading determina un allargamento dello spettro del segnale da trasmettere rispetto allo spettro del segnale d'utente originale $s_k(t)$ (da cui la terminologia **spread spectrum**), il che sembrerebbe indice di scarsa efficienza spettrale; in effetti, questa perdita apparente di efficienza è compensata dalla possibilità di sovrapporre più segnali sullo stesso canale radio.

Inoltre, come vedremo meglio tra poco, il sistema risulta tanto più "robusto" nei confronti dell'interferenza quanto maggiore è il rapporto tra il chip rate e la velocità di trasmissione del segnale d'utente; quanto maggiore è questa robustezza, tanto maggiore sarà il numero di utenti servibili contemporaneamente sullo stesso canale. Nelle implementazioni pratiche, la robustezza all'interferenza è talmente alta da poter usare, almeno da questo punto di vista, la stessa frequenza portante in tutte le celle di una rete radiomobile. Ci sono in realtà altre problematiche che invece suggeriscono una più oculata ripartizione delle frequenze tra celle di dimensioni molto diverse tra loro.

A questo punto, può essere utile fare una semplice analogia per chiarire ancora meglio il concetto del CDMA. Immaginiamo una sala conferenze in cui tre relatori stanno effettuando una presentazione; se ognuno di essi usa una lingua diversa (ad esempio italiano, inglese e francese) e tutti parlano con lo stesso livello di voce, è molto probabile che ogni ascoltatore riesca, entro certi limiti, a seguire solo la presentazione nella lingua di propria conoscenza, percependo le altre due sostanzialmente come un rumore di fondo. Lo stesso accade in un sistema CDMA: la generica sequenza di informazione, criptata con il codice usato in trasmissione e decryptata con lo stesso codice in ricezione, viene recuperata, mentre le altre

⁷ Si ricordi, infatti, che la banda occupata in una trasmissione numerica è direttamente proporzionale alla velocità di cifra che si vuol garantire.

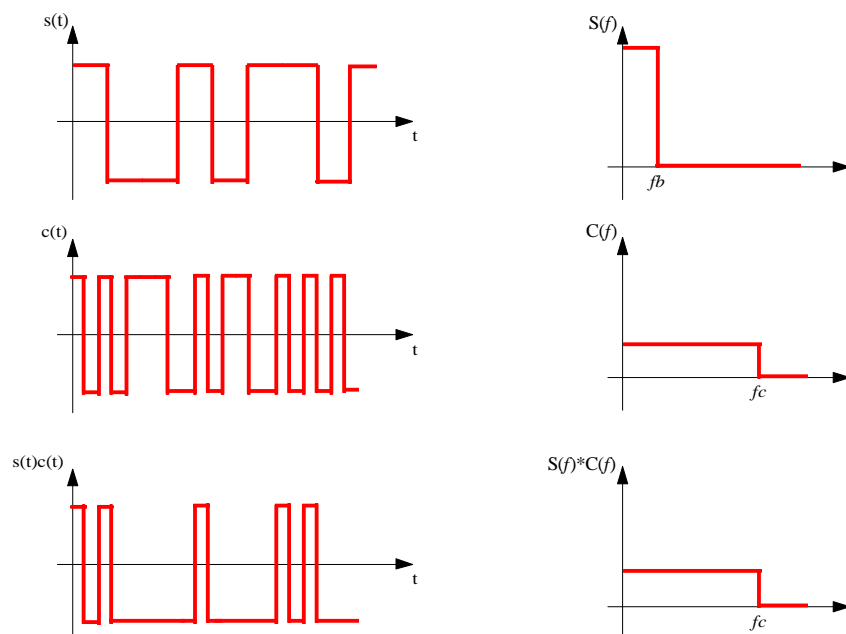
sequenze, che usano codici diversi, vengono idealmente cancellate o comunque, in condizioni reali, fortemente attenuate.

Se invece volessimo fare una analogia più tecnica, potremmo pensare, con le dovute cautele, alla *tecnica di modulazione analogica di ampiezza con due portanti in quadratura*: in un sistema di questo tipo, si usa un unico canale trasmissivo per trasmettere due distinti segnali; i due segnali, ad esempio $s(t)$ e $g(t)$, vengono prima moltiplicati per due portanti in quadratura, ad esempio $\cos(\omega_0 t)$ e $\sin(\omega_0 t)$ rispettivamente, e poi sommati e trasmessi; in ricezione, il segnale totale ricevuto viene moltiplicato su un ramo ancora per $\cos(\omega_0 t)$ e sull'altro ramo ancora per $\sin(\omega_0 t)$ e, tramite una successiva operazione di filtraggio su ciascun ramo, vengono nuovamente estratti $s(t)$ e $g(t)$. In questo caso, le due portanti in quadratura corrispondono a due sequenze ortogonali tra loro, analogamente alle sequenze di spreading.

Parametri caratteristici dell'operazione di spreading

Continuiamo ad analizzare la tecnica dello spreading/despreading, scendendo ulteriormente in dettaglio.

Come detto, la tecnica CDMA è caratterizzata dal notevole incremento della banda del segnale trasmesso rispetto a quella che sarebbe strettamente necessaria. La figura seguente aiuta a comprendere il concetto:



Andamento nel tempo ed in frequenza del segnale d'utente (in alto), della sequenza di spreading (al centro) e del loro prodotto (in basso)

Sono qui riportate le forme d'onda dei vari segnali coinvolti ed i corrispondenti spettri. Il segnale di informazione $\mathbf{s(t)}$, essendo più "lento", ha una banda f_b più piccola di quella f_c della sequenza di spreading $\mathbf{c(t)}$, che invece è più "veloce". La moltiplicazione nel tempo delle due forme d'onda genera un segnale veloce quanto $c(t)$ e quindi con la stessa banda (si ricordi che, in frequenza, si ha la convoluzione dei due spettri). Confrontando perciò il segnale finale $s(t)c(t)$ con quello d'utente $s(t)$, si nota l'evidente allargamento dello spettro ⁽⁸⁾.

Questo allargamento è quantificato dal cosiddetto **processing gain**, pari al rapporto tra la banda del segnale trasmesso e quella del segnale di informazione:

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

In generale, questo guadagno può variare da alcune decine fino al centinaio di volte.

Si definisce inoltre **spreading factor** il numero di chip con cui viene rappresentato ogni bit di informazione (cioè ogni bit che giunge all'ingresso del blocco che esegue lo spreading).

Esiste una differenza fondamentale tra processing gain e spreading factor: il processing gain include tutte le elaborazioni che vengono eseguite tra la sorgente di informazione e l'antenna trasmittente e contribuiscono perciò ad allargare la banda (ad esempio, i **codici per la correzione degli errori** sono inclusi nel processing gain⁹), il che significa che questo parametro non dipende solo dall'operazione di spreading; al contrario, lo spreading factor comprende solo l'operazione di spreading, ossia la moltiplicazione del segnale di utente per la sequenza di spreading ad esso assegnata. In qualche modo, lo spreading factor è legato al numero di sequenze disponibili per lo spreading e quindi, di conseguenza, regola il numero di utenti che possono essere serviti.

⁸ E' utile segnalare che l'allargamento dello spettro di un segnale è ottenibile anche con altre tecniche, come ad esempio quelle per la rilevazione e correzione d'errore, in base alle quali nel segnale originale vengono introdotti bit ridondanti a patto però che la velocità di cifra venga aumentata rispetto a quella originale (in modo da non degradare eccessivamente le prestazioni in termini di velocità di trasmissione).

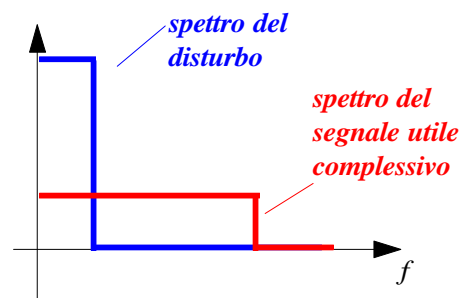
⁹ A tal proposito, possiamo usare una terminologia appropriata: chiameremo "**bit di informazione**" quello proveniente dalla sorgente (ad esempio dal codificatore vocale che digitalizza la voce emessa dal parlatore); chiameremo invece "**simbolo**" l'elemento di informazione dopo le operazioni di codifica del canale (tipicamente dopo l'introduzione dei codici a correzione d'errore); chiameremo infine "**chip**" il generico bit della sequenza finale ottenuta dopo lo spreading (nonché il generico bit della sequenza di spreading, essendo identica la velocità di cifra tra la sequenza di spreading e la sequenza finale da trasmettere).

Il processing gain è invece legato fortemente alla capacità della tecnica CDMA di ridurre l'interferenza in ricezione. Vediamo allora con maggiore dettaglio cosa avviene in un generico **ricevitore CDMA**.

Despreading e reiezione dell'interferenza

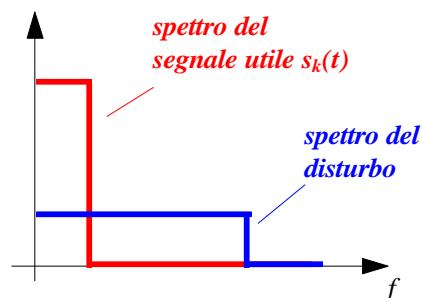
Si è detto che, in ricezione, per poter distinguere un segnale d'utente da un altro, si moltiplica il segnale ricevuto $s_{TOT}(t)$ per lo stesso codice $c_k(t)$ assegnato all'utente in trasmissione; dopo la moltiplicazione, l'uso di un **filtro passa-basso** consente di selezionare la componente utile di segnale e di filtrare ciò che si trova esternamente alla banda da essa occupata. Ciò non significa, ovviamente, eliminare l'interferenza, in quanto ci sono ulteriori segnali che cadono nella stessa banda del segnale utile e quindi si trovano comunque in uscita dal filtro.

Per renderci conto della situazione, supponiamo che al segnale trasmesso $s_{TOT}(t)$ risulti sovrapposto un **disturbo additivo a banda stretta**:



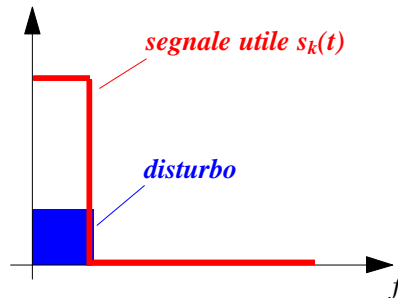
Spettro del segnale ricevuto

La moltiplicazione di questo segnale per la generica sequenza di spreading $c_k(t)$ genera un segnale costituito da $s_k(t)$ (segnale utile) più un disturbo additivo che adesso è a banda larga (l'allargamento è anche in questo caso quantificato dal processing gain, in quanto è come se avessimo effettuato lo spreading sul disturbo additivo):



Spettro del segnale dopo il despreading

Filtrando passa-basso questo segnale, viene fuori il segnale utile $s_k(t)$ cui si è sovrapposto un disturbo la cui potenza risulta però ridotta di un fattore pari al processing gain:



Spettro del segnale dopo il filtraggio

Quindi, l'effetto del despreading è non solo quello di recuperare il segnale utile, ma anche quello di ridurre, di un fattore pari al processing gain, la densità spettrale di potenza del disturbo additivo. Questo mostra, tra l'altro, l'importanza di avere un processing gain elevato, ossia l'affermazione fatta in precedenza per cui il sistema è tanto più robusto nei confronti dell'interferenza quanto maggiore è il rapporto tra chip rate e velocità di cifra dell'utente (questo rapporto è proprio il processing gain).

Il discorso non cambia molto se, al posto di considerare un disturbo a banda stretta, consideriamo un **disturbo a banda larga**. Tipicamente, questo disturbo sarà il segnale di un secondo utente al quale è stata assegnata una sequenza di spreading $c_h(t)$ diversa da $c_k(t)$. Questo significa che il segnale ricevuto sarà del tipo

$$s_{\text{TOT}}(t) = s_k(t)c_k(t) + s_h(t)c_h(t)$$

Moltiplicando questo segnale nuovamente per $c_k(t)$ (cioè effettuando il despreading per l'utente k), si ottiene

$$s_{\text{TOT}}(t)c_k(t) = s_k(t)c_k(t)c_k(t) + s_h(t)c_h(t)c_k(t)$$

Dato che il prodotto $c_h(t)c_k(t)$ coinvolge sequenze ortogonali, il segnale $s_h(t)c_h(t)c_k(t)$ è ancora a spettro espanso, per cui il successivo filtraggio tira fuori il segnale utile $s_k(t)$ e quella porzione di $s_h(t)c_h(t)c_k(t)$ che risulta allocata nella stessa banda di $s_k(t)$. Questa "porzione" è proprio l'interferenza residua di cui si parlava in precedenza (si tenga conto, ovviamente, che i segnali interferenti coinvolti sono

molti di più). In ogni caso, il despreading e successivo filtraggio eliminano la componente di segnale interferente che cade fuori della banda utile.

La capacità dei sistemi CDMA

La tecnica **CDMA**, grazie al fatto per cui i diversi segnali d'utente sono contraddistinti da *sequenze di spreading* diverse, è in grado, almeno idealmente, di annullare completamente l'interferenza tra i diversi segnali. Tuttavia, nelle **condizioni reali di funzionamento** del sistema, la degradazione dei segnali durante la propagazione in aria fa sì che risulti anche degradata l'*ortogonalità tra le sequenze* e questo comporta che l'interferenza reciproca non possa **mai essere completamente eliminata**, ma solo fortemente attenuata.

Questa considerazione determina una conseguenza fondamentale: mentre nei sistemi di prima (TACS) e seconda generazione (GSM) l'unica limitazione alla capacità del sistema è data dal numero prestabilito di canali e di time slot, in un sistema CDMA questa limitazione viene meno, ma, allo stesso tempo, ogni volta che si accetta una nuova richiesta di servizio (ad esempio una nuova telefonata), la qualità di tutte le connessioni presenti nel sistema viene leggermente degradata, proprio perché aumenta l'interferenza. Quindi, nuove connessioni possono essere accettate solo fin quando il livello di interferenza rimane tale da consentire i requisiti di qualità desiderati; quando invece il sistema si dovesse rendere conto che una eventuale nuova connessione comprometterebbe questi requisiti, non esiterà a rifiutarla ⁽¹⁰⁾.

Per tutti questi motivi, si dice che i sistemi CDMA sono caratterizzati da una degradazione graduale della qualità (soft degradation).

Anche questo concetto può essere facilmente spiegato con l' "analogia della sala conferenze": supponiamo che i presenti stiano colloquiando tra loro a coppie; se ogni coppia usa una lingua diversa (sequenze di spreading), essi riescono a continuare le proprie conversazioni a patto di parlare con un livello normale di voce. Tuttavia, se il numero di coppie aumenta, ciascuna coppia percepisce un rumore di fondo sempre maggiore (*soft degradation*), fin quando tale rumore diventa talmente forte da compromettere la conversazione.

¹⁰ In realtà, ci possono essere situazioni di emergenza in cui il sistema possa accettare, per un tempo limitato, un numero di connessioni superiore a quello stabilito per puri criteri di qualità.

Problema del near-far

Sempre utilizzando l'esempio della sala conferenze, possiamo introdurre un nuovo importante concetto: immaginiamo che una delle tante coppie decida di mettersi ad urlare; se il livello di voce utilizzato è particolarmente alto, le altre coppie non possono più conversare, perché le varie conversazioni risentono di un disturbo troppo forte. In altre parole, quindi, l'uso di una potenza esagerata rispetto alle esigenze ha l'effetto pratico di impedire tutte le altre conversazioni. La stessa situazione avviene in un sistema cellulare, basato su CDMA, se un dato terminale mobile prende a trasmettere un alto livello di potenza verso la stazione base che lo sta servendo (insieme a tanti altri utenti): in base a come funziona il CDMA, l'interferenza provocata da tale utente è tale da degradare oltre misura le connessioni degli altri utenti.

Non solo, ma questo problema può anche presentarsi se l'utente (che è un utente mobile), anziché aumentare il livello di potenza emesso, semplicemente si avvicina molto alla stazione radio base: se il livello di potenza emesso dall'utente è sempre lo stesso ma la distanza dalla stazione radio base diminuisce, l'effetto è chiaramente lo stesso che si avrebbe se l'utente rimanesse fermo ma aumentasse la potenza trasmessa, in quanto il suo segnale subisce una attenuazione minore.

E' evidente dunque che, se non si prendessero provvedimenti in questo senso, la qualità delle connessioni dei vari utenti "attestati" sulla stessa stazione base verrebbe a dipendere strettamente dalla vicinanza reciproca utenti-stazione e questo è decisamente inaccettabile per un sistema radiomobile. Questo problema è noto come **near-far**.

La soluzione più ovvia a questo problema, implementata nel sistema UMTS, è quella di un meccanismo, noto come *controllo di potenza (power control)*, avente lo scopo di regolare il livello di trasmissione dei diversi segnali, in modo che la stazione radio base riceva tutti i segnali relativi ad uno stesso servizio con uguale livello di potenza. In particolare, quello appena descritto è il controllo di potenza relativo alla tratta **uplink**, ossia relativo ai segnali che dai vari terminali mobili giungono alla stazione radio base: in questo caso, come si è detto, l'interferenza dovuta ad utenti della stessa cella dipende dalla distanza dei medesimi dalla stazione radio base.

Viceversa, esiste anche un problema di controllo di potenza nella tratta **downlink**, ossia dalla stazione radio base ai vari terminali mobili: in questo caso, però, il problema è meno critico, in quanto c'è un unico trasmettitore (la stazione radio base) che mette insieme i vari segnali di utente e li trasmette simultaneamente verso i

diversi terminali mobili; quindi, ogni terminale riceve sempre i diversi segnali (quello utile e quelli interferenti, destinati agli altri mobili) ad un livello di potenza uguale. Quindi, nella tratta downlink, l'interferenza dovuta ad utenti di una stessa cella non dipende dalla distanza dalla stazione radio base.

Autore: **Sandro Petrizzelli**
e-mail: sandry@iol.it
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>