

Comunicazioni Elettriche

Tecnica CDMA

Introduzione.....	1
L'operazione di spreading	4
Parametri caratteristici dell'operazione di spreading	8
Despreading e reiezione dell'interferenza.....	10

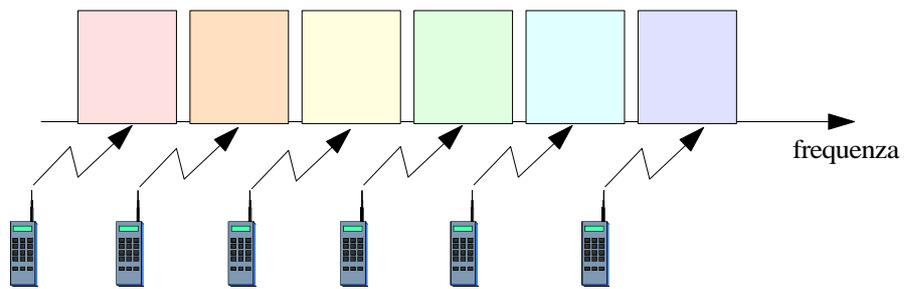
Introduzione

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 irriconoscibili 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:

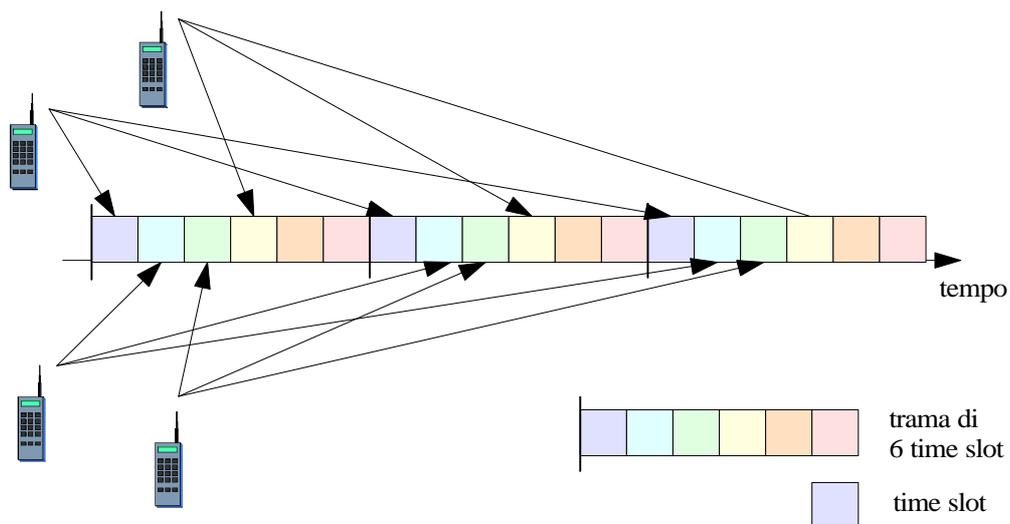
- la tecnica **FDMA** consiste nel dividere la banda assegnata al sistema in un certo numero di porzioni (chiamate **canali**), ognuna centrata su una **frequenza portante**; così facendo, ad ogni utente è assegnato un canale (cioè una portante) per tutta la durata della sua connessione e non c'è possibilità che il suo segnale interferisca con quello di un altro utente, allocato su una portante diversa (1):

¹ Tra l'altro, è sempre prevista una adeguata separazione (in frequenza) tra i vari canali



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**):



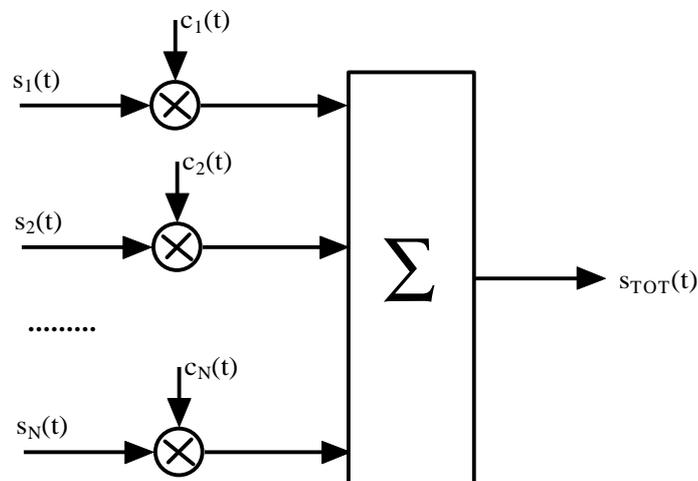
Tecnica TDMA

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**.



Tecnica CDMA: operazione di spreading in trasmissione

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

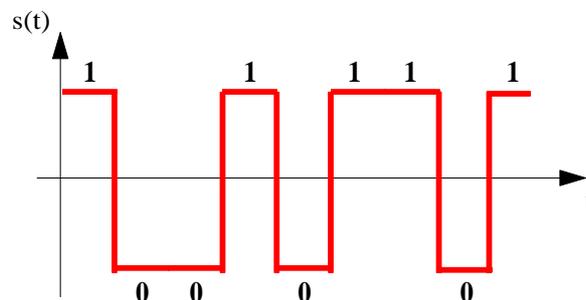
In effetti, così come si è visto prima, sono sempre possibili *approcci ibridi* con le tecniche sopra citate; ad esempio, si potrebbe usare la stessa tecnica FDMA/TDMA usata dal GSM e, in più, si potrebbe usare il CDMA per consentire a più utenti di usare lo stesso time slot, aumentando così in modo 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 vogliono utilizzarlo contemporaneamente (**accesso multiplo**).

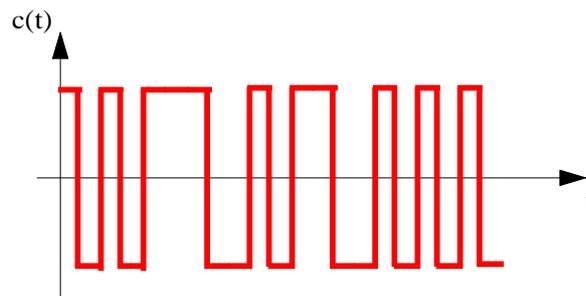
L'operazione di **spreading** consiste in questo: ciascun segnale da trasmettere sul canale radio (unico) viene moltiplicato con una sequenza binaria caratterizzata da una velocità di trasmissione (detta **chip rate**) molto maggiore. Per renderci conto del significato di questa affermazione, consideriamo il caso di un utente mobile che, tramite il proprio terminale mobile, voglia trasmettere dei dati sul canale radio messogli 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

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 **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**):

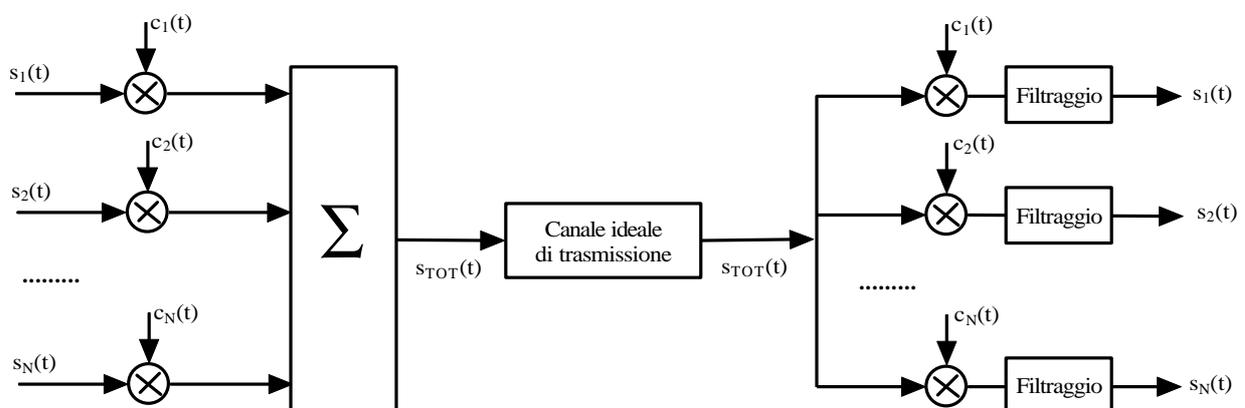


sequenza di spreading: 101011100101100101010

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.

Una volta eseguita l'operazione di spreading sui vari segnali d'utente, le rispettive sequenze di chip vengono sommate ⁽²⁾ 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 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 $s_k(t)$:



Schema generale semplificato di un sistema CDMA

² Ovviamente, sono i segnali ad essere sommati e non certo i bit

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 $s_k(t)$ ⁽³⁾; 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

³ Si ricordi, infatti, che la banda occupata in una trasmissione numerica è direttamente proporzionale alla velocità di cifra che si vuol garantire.

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.

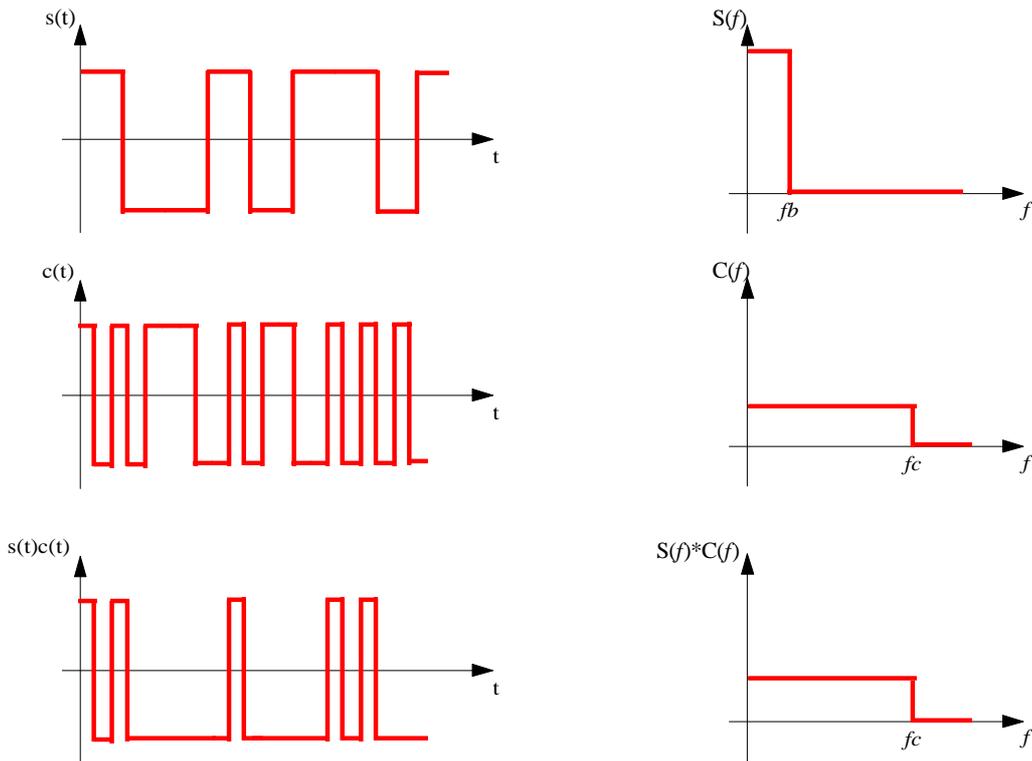
A questo punto, può essere utile fare una semplice analogia per chiarire ancora meglio il concetto del CDMA. Immaginiamo una sala conferenze in cui tre relatori stanno effettuando una presentazione; se ognuno di essi usa una lingua diversa (ad esempio italiano, inglese e francese) e tutti parlano con 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 decriptata con lo stesso codice in ricezione, viene recuperata, mentre le altre 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.



Forme d’onda nel tempo (figure di sinistra) e corrispondenti spettri (figure a destra)

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 $\mathbf{f_b}$ più piccola di quella $\mathbf{f_c}$ della sequenza di spreading $\mathbf{c(t)}$, che invece è più “veloce”. La moltiplicazione nel tempo delle due forme d’onda genera una 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 (4).

⁴ 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).

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 gain⁵), 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.

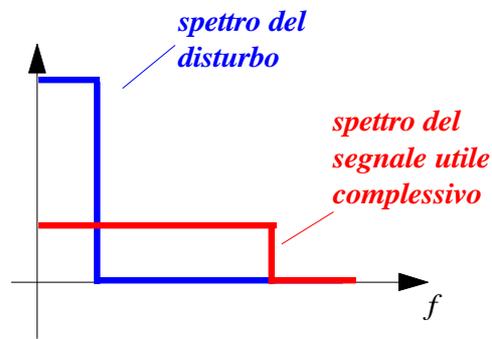
Il processing gain è invece legato fortemente alla capacità della tecnica CDMA di ridurre l'interferenza in ricezione. Vediamo allora con maggiore dettaglio cosa avviene in un generico **ricevitore CDMA**.

⁵ 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).

Despreading e reiezione dell'interferenza

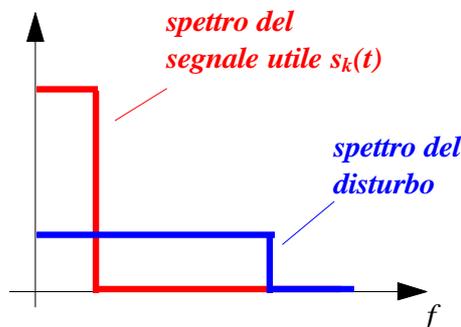
Si è detto che, in ricezione, per poter distinguere un segnale d'utente da un altro, si moltiplica il segnale ricevuto $s_{TOT}(t)$ per lo stesso codice $c_k(t)$ assegnato all'utente in trasmissione; dopo la moltiplicazione, l'uso di un **filtro passa-basso** consente di selezionare la componente utile 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**:



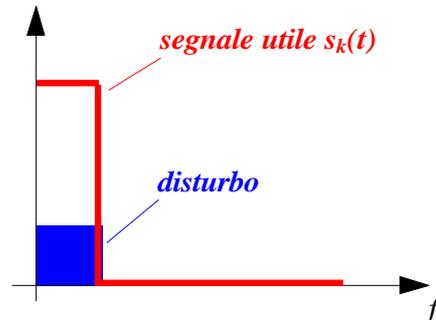
Spettro del segnale ricevuto

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.

Autore: **Sandro Petrizzelli**

e-mail: sandry@iol.it

sito personale: <http://users.iol.it/sandry>

succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>