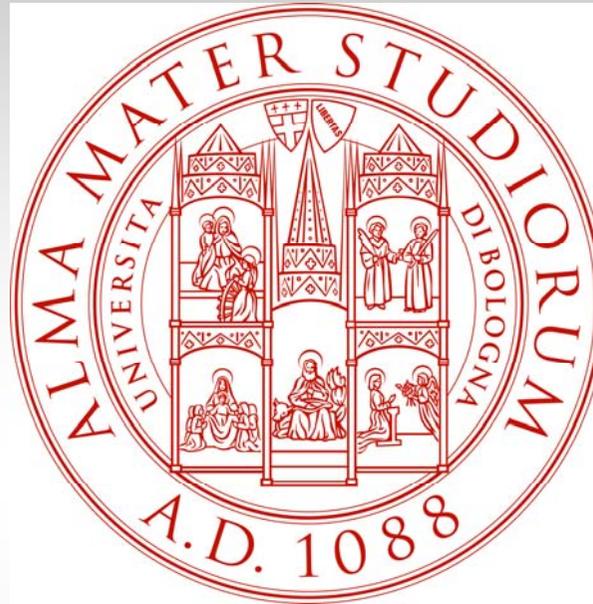
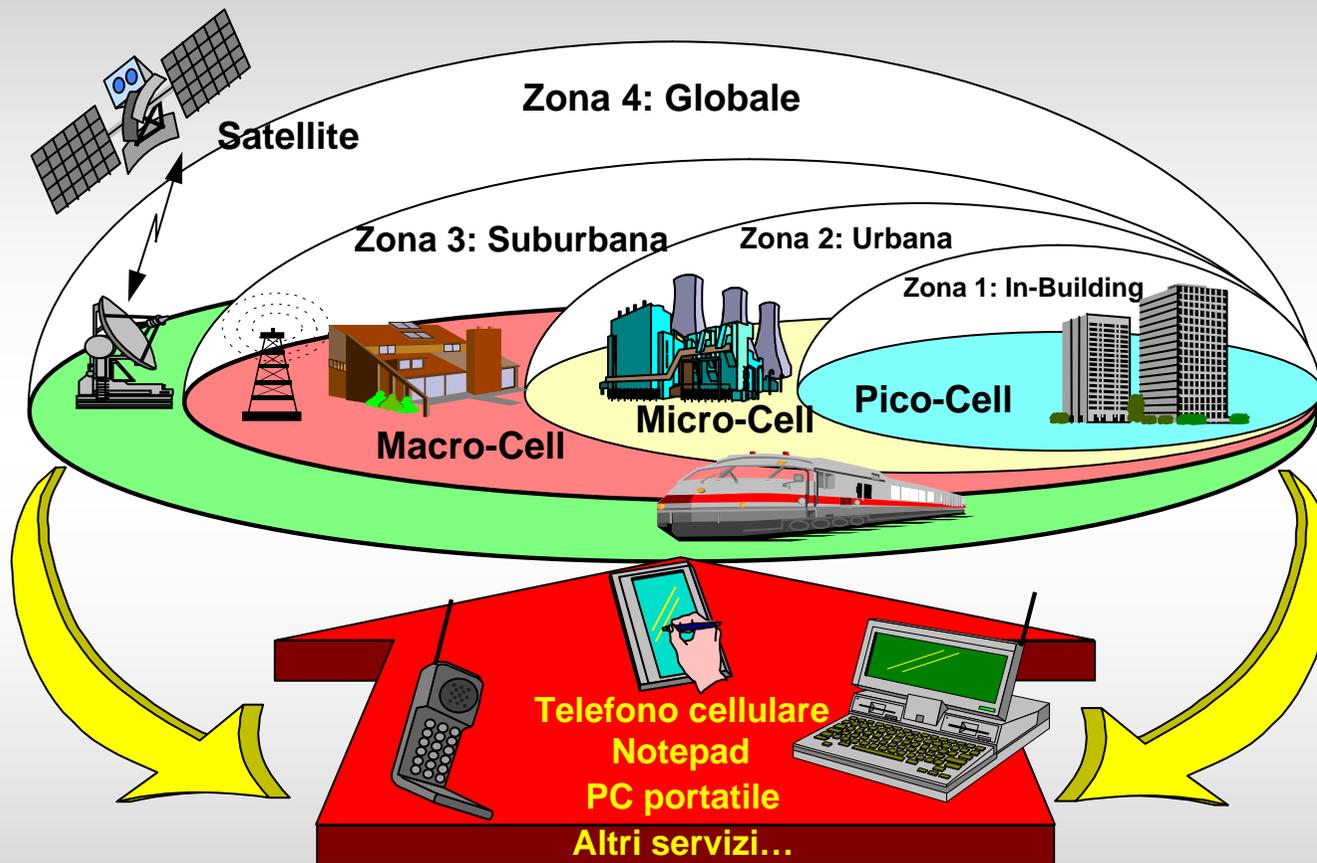


**Dipartimento di Elettronica Informatica e Sistemistica
Università di Bologna**



Sistemi radiomobili cellulari

Le comunicazioni radiomobili



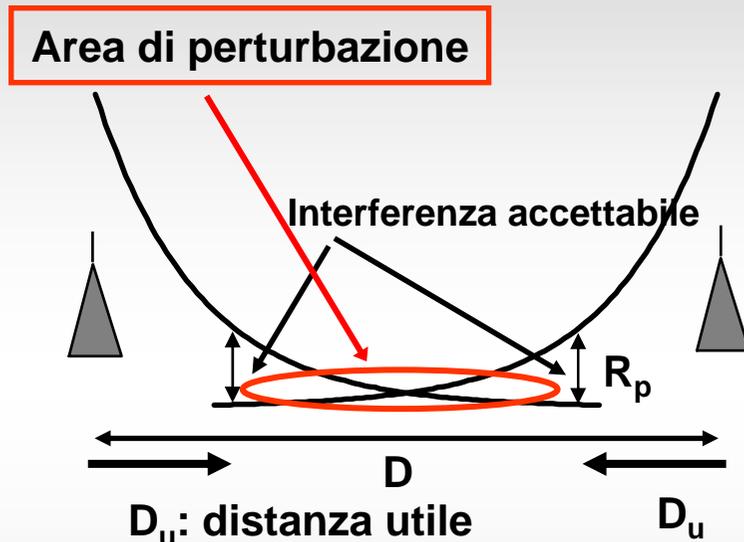
Integrazione con la rete fissa

Sistemi d'area - Riutilizzo delle risorse (1/2)

- ✓ I sistemi d'area si prefiggono di realizzare collegamenti tra terminali di cui (almeno) uno posizionato arbitrariamente all'interno dell' **area di servizio**. In generale l'altro terminale è fisso e connesso ad una rete.
- ✓ A causa dell'attenuazione, ad una certa distanza fra le antenne il rapporto segnale/rumore scende al di sotto della soglia minima per un'accettabile qualità di collegamento (sensibilità del ricevitore).
- ✓ L'area di servizio deve pertanto essere divisa in **celle** per ciascuna delle quali si deve prevedere una **stazione radio base** fissa che utilizza opportune frequenze/risorse per comunicare con i suoi **mobili**.
- ✓ Il passaggio da una cella all'altra di un mobile è detto **handover**.



Sistemi d'area - Riutilizzo delle risorse (2/2)



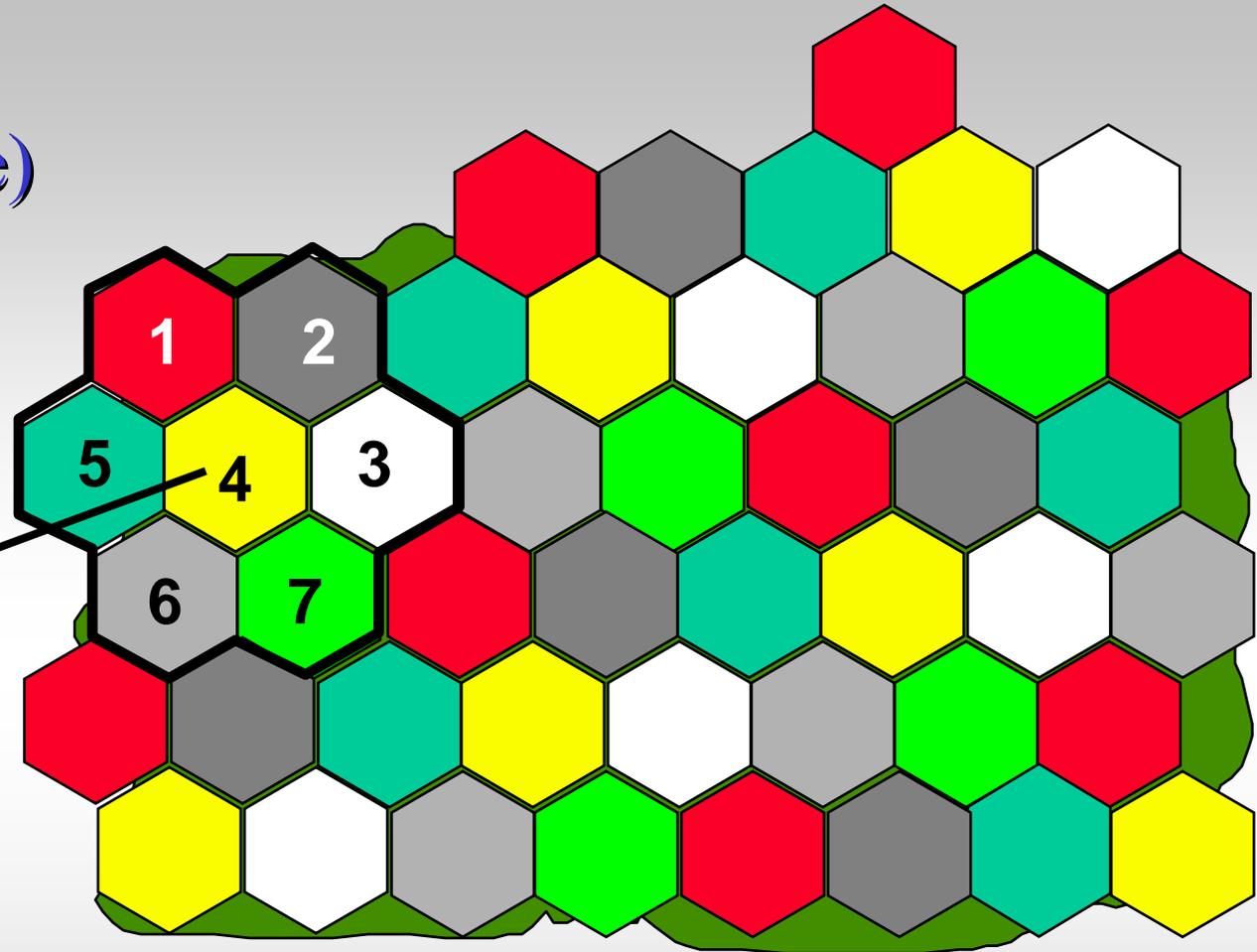
- ✓ Collegamenti differenti che utilizzano contemporaneamente la stessa frequenza/risorsa *interferiscono* fra loro, a discapito della qualità del collegamento;
- ✓ Per evitare che il rapporto C/I scenda al di sotto della soglia minima di qualità occorre operare in modo che celle che utilizzano le stesse risorse siano opportunamente distanziate (*distanza di riutilizzo D*);
- ✓ Le risorse spettrali a disposizione devono essere distribuite sul territorio in maniera opportuna, in modo da realizzare un sistema ad interferenza controllata. L'insieme delle celle fra le quali viene suddivisa la totalità delle risorse disponibili prende il nome di *cluster*.



Esempio: $m = 7$
(m : cluster-size)

Ogni cella utilizza un
subset di risorse

CLUSTER



All'aumentare del cluster-size, diminuiscono le risorse a disposizione di ogni singola cella, ma si allontanano gli interferenti (rispetto al segnale utile)



Esempio: cluster-size = 9



Il cluster size m , affinché si abbia un ricoprimento continuo, deve rispettare questa regola:

$$m = i^2 + j^2 + ij; \quad i, j = 0, 1, 2, \dots \text{ non entrambi nulli}$$



Obiettivi di progetto

- ✓ Il progetto ottimo di un sistema d'area deve perseguire simultaneamente i seguenti obiettivi:
 1. Potenza ricevuta utile maggiore della sensibilità del ricevitore in ogni punto dell'area coperta (o di una prefissata percentuale di tale area);
 2. Rapporto C/I (Potenza Utile su Potenza Interferente) maggiore di una prefissata soglia per ogni comunicazione attiva (maggiore della soglia secondo un'assegnata probabilità);
 3. Dimensionare il numero di risorse per cella al traffico atteso
 4. Minimizzare il numero di celle;



1. Potenza ricevuta e sensibilità del ricevitore

- ✓ Stabilite le dimensioni (raggio) della cella da coprire, noti I guadagni delle antenne e valutata la legge di attenuazione con la distanza (filtraggio spaziale) è possibile calibrare la potenza P_{irr} irradiata dalla BS affinché all'interno della cella sia $P_{\text{RX}} \geq P_{\text{SENS}}$
- ✓ A causa di *shadowing* e *fast fading* l'andamento della potenza ricevuta non può essere facilmente valutato in maniera accurata e precisa \Rightarrow essendo nota la statistica delle oscillazioni (lente e veloci) in pratica si calibra la potenza P_{irr} in modo che sia $P_{\text{RX}} \geq P_{\text{SENS}}$ con una certa prefissata probabilità (in una prefissata percentuale dell'area)



2. $C/I \geq SIR_{th}$

- ✓ Il SIR (*Signal to Interference Ratio threshold*) rappresenta il rapporto minimo fra la potenza del segnale utile e la potenza interferente necessario per garantire una sufficiente qualità di servizio (caso numerico: una certa BER). Il suo valore dipende dal tipo di sistema
- ✓ Per garantire $C/I \geq SIR_{th}$ occorre progettare il sistema in modo che il segnale utile sia opportunamente “protetto” dai segnali interferenti \Rightarrow il valore del *cluster-size* m è evidentemente un parametro utile in tal senso



3. Risorse per cella e traffico atteso

- ✓ Le risorse assegnate ad ogni cella devono essere sufficienti a soddisfare le richieste di connessione degli utenti che si trovano all'interno della cella (in termini quantitativi, la probabilità che una richiesta di accesso alla rete sia respinta – Probabilità di Blocco - deve essere minore di un valore prefissato)

- ✓ E' evidente che la probabilità di blocco
 - aumenta al crescere del *cluster-size* m (diminuiscono le risorse disponibili per ogni cella);
 - aumenta al crescere delle dimensioni della cella (aumenta il numero di utenti per cella)



4. Minimizzare il numero delle celle

- ✓ Il costo di ogni impianto (progettazione, realizzazione, gestione e manutenzione) è di svariate migliaia di euro (~ **200000 euro**) \Rightarrow minimizzare il numero di celle significa limitare i costi della rete
- ✓ Poiché l'area di servizio deve essere coperta, limitare il numero di celle significa (ovviamente) aumentarne le dimensioni (aumentando P_{irr} e/o l'altezza delle BS)
- ✓ Aumentare le dimensioni della cella significa aumentare la probabilità di blocco \Rightarrow necessario compromesso fra la minimizzazione del numero di impianti e contenimento della probabilità di blocco entro il valore richiesto



Obiettivi di progetto (2/2)

- ✓ Reti radio-televisive (Broadcast Systems)

- Comunicazione monodirezionale (punto-multipunto);
- Pochi canali simultaneamente attivi;

Non esistono reali problemi di allocazione/gestione delle risorse \Rightarrow obiettivo della progettazione é ottenere la copertura più ampia possibile.

- ✓ Reti di telefonia cellulare (più in generale, Point-to-Point Networks)

- Comunicazione bidirezionale (punto-punto);
- Molti canali simultaneamente attivi (traffico elevato, anche su aree limitate);

Celle di dimensione ridotte (diminuendo PT e/o aumentando filtraggio spaziale), perché il numero di risorse per cella deve essere adeguato al traffico offerto; si avvicinano così gli interferenti ed aumenta il numero di siti necessari \Rightarrow obiettivo della progettazione é trovare il compromesso ottimo fra “copertura e traffico”



Metodi di Canalizzazione (1/2)

- ✓ All'interno di ogni cluster vengono utilizzate tutte le risorse assegnate al servizio, opportunamente suddivise fra le celle. Tali risorse possono in generale essere descritte come un *set* $[\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_{N_c}(t)]$ di *funzioni ortonormali*:

$$\langle \psi_i(t), \psi_j(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_i(t) \cdot \psi_j^*(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{se } i = j \text{ (auto-correlazione)} \\ 0 & \text{se } i \neq j \text{ (cross-correlazione)} \end{cases}$$

- ✓ Ogni volta si attiva un canale di comunicazione, n fra le N_c funzioni ortonormali vengono assegnate in maniera esclusiva alla comunicazione. Le forme d'onda trasmesse dall' i -mo trasmettitore sono quindi del tipo

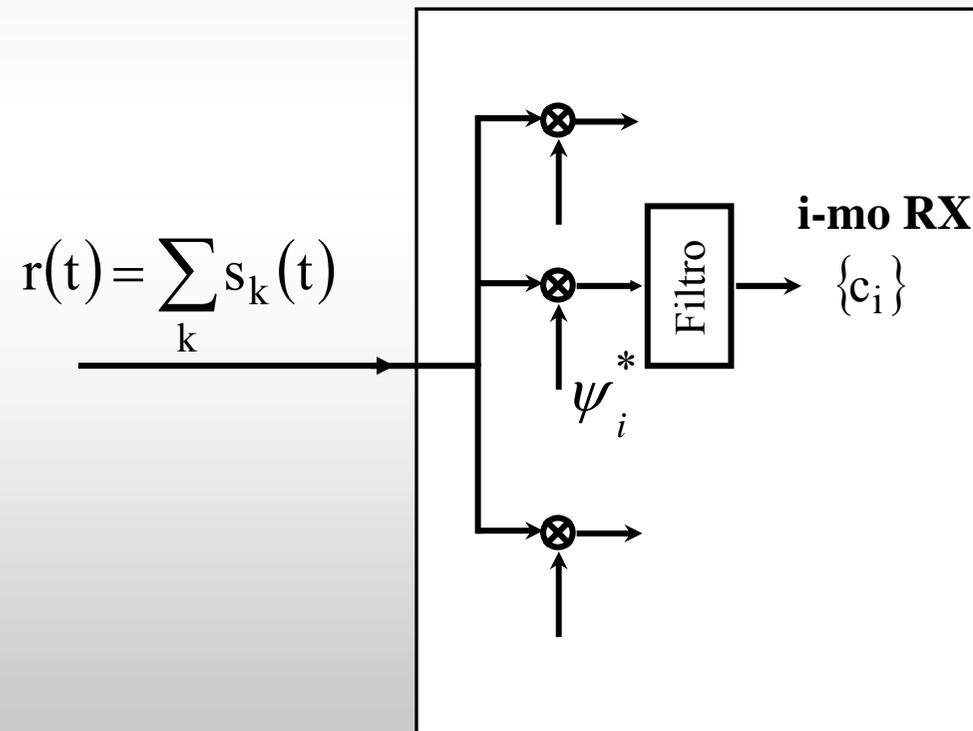
$$s_i(t) = \sum_{j=0}^n c_j \cdot \psi_{i_j}(t)$$

dove l'informazione viene trasmessa al variare dei simboli c_i . (Es. $c_i = \pm 1$)



Metodi di Canalizzazione (2/2)

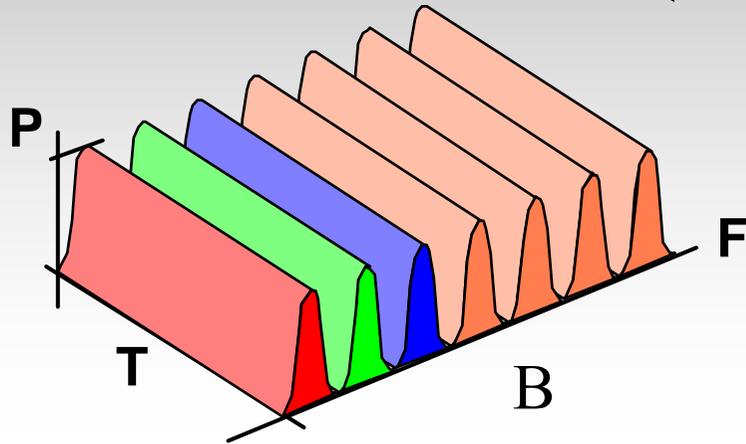
- ✓ Poiché il canale radio é per sua natura condiviso, il ricevitore i-mo riceve tutti i segnali trasmessi; per recuperare l'informazione desiderata (i simboli c_{ij}) esegue quindi la correlazione del segnale complessivo ricevuto con tutte le funzioni ortonormali assegnate al “canale utile”



* sincronizzazione!



Frequency Division Multiple Access (FDMA)



$$\psi_i(t) = K \cdot \sin \left[\left(\omega_0 + \frac{2\pi B \cdot i}{N_c} \right) t \right]$$

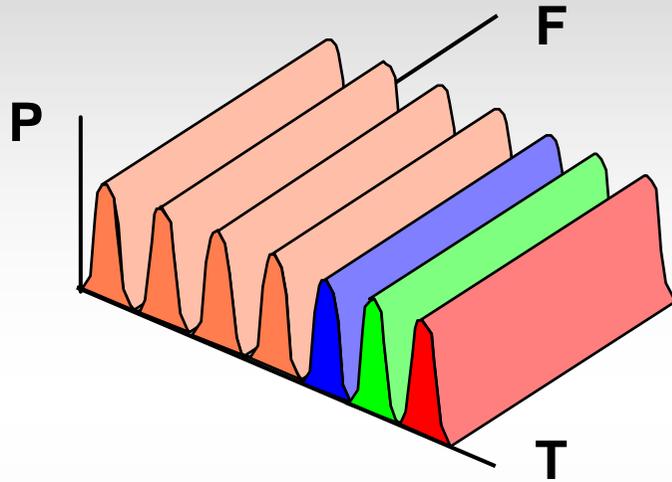
$$0 \leq t \leq T$$

- ✓ Funzioni ortogonali in frequenza, ovvero di lunghezza temporale pari all'intero periodo T e bande praticamente disgiunte; la separazione dei canali può essere quindi ottenuta mediante filtri passa-banda
- ✓ Necessarie "bande di guardia" per limitare l'*interferenza da canale adiacente*;
- ✓ Esempio: AMPS (*Advanced Mobile Phone System*):

$N_c = 790$ canali, ciascuno avente banda pari a 30 KHz.



Time Division Multiple Access (TDMA)



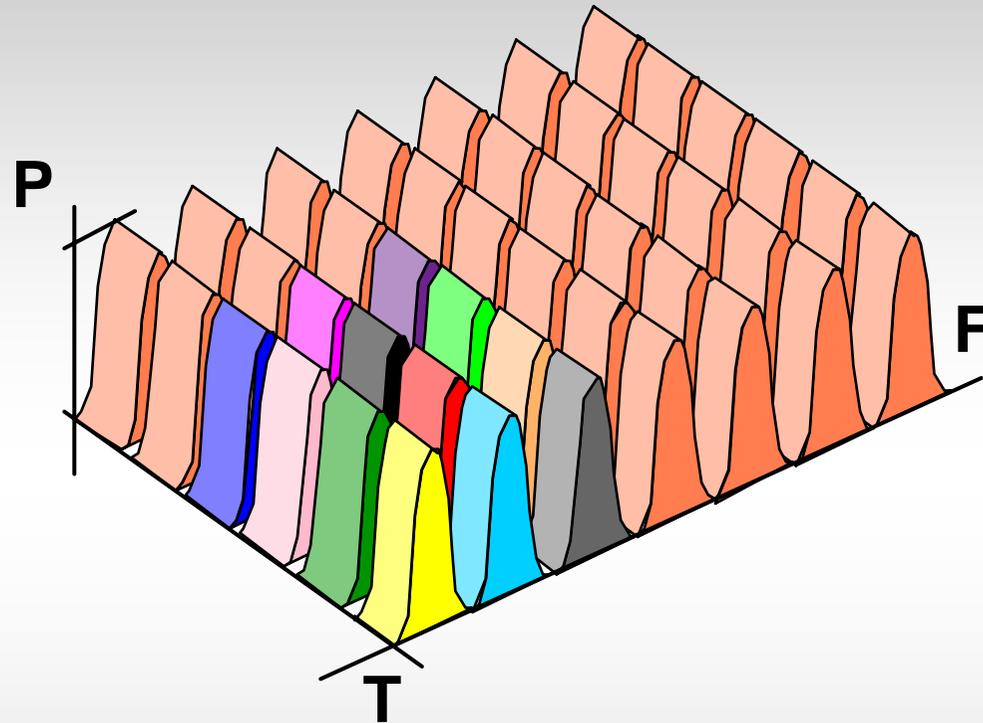
$$\psi_i(t) = K' \cdot \sin(\omega_0 t)$$

$$(i-1) \cdot \frac{T}{N_C} \leq t \leq i \cdot \frac{T}{N_C}$$

- ✓ Funzioni ortogonali in tempo, ovvero non nulle su intervalli temporali disgiunti ed aventi banda pari a tutta la banda disponibile; la separazione dei canali può essere quindi ottenuta mediante porte temporali;
- ✓ Necessari "tempi di guardia" per limitare l'*interferenza da canale adiacente*;



Esempio: GSM (*Global System for Mobile Communication*)



- ✓ Ibrido TDMA-FDMA: 248 canali di 200 KHz ciascuno multiplati in frequenza, ognuno dei quali supporta 8 canali multiplati nel tempo (0.577 ms per *slot* temporale)



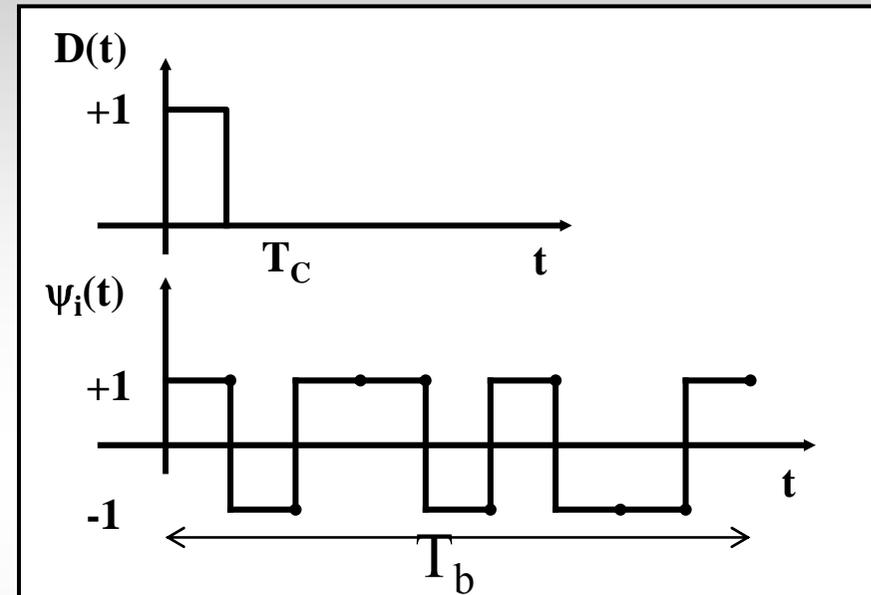
Code Division Multiple Access (CDMA)

$$\psi_i(t) = \sum_j b_i^{(j)} \cdot D(t - jT_C)$$

$\psi_i(t)$: codice o (parola di codice);

es: $b^{(j)} = \pm 1$;

T_C : tempo di chip



- ✓ Ogni utente ha assegnato un codice, cioè una Ψ_i
- ✓ Il codice può essere utilizzato per costruire il segnale $s_i(t)$ in 2 modi diversi:
 1. CDMA-DS (*Direct Sequence*): il codice va a moltiplicare il segnale informativo (sequenza dei simboli c_i);
 2. CDMA-FH (*Frequency Hopping*): il codice determina i salti in frequenza della portante di modulazione;



Digressione:

Cenni sulla trasmissione Spread Spectrum

Salvo rare eccezioni, tutti i sistemi CDMA rientrano nella più ampia categoria dei cosiddetti sistemi *Spread Spectrum*.



I sistemi a spettro espanso hanno trovato applicazione applicazione:

✓ in campo militare

- Funzione *anti-jamming*

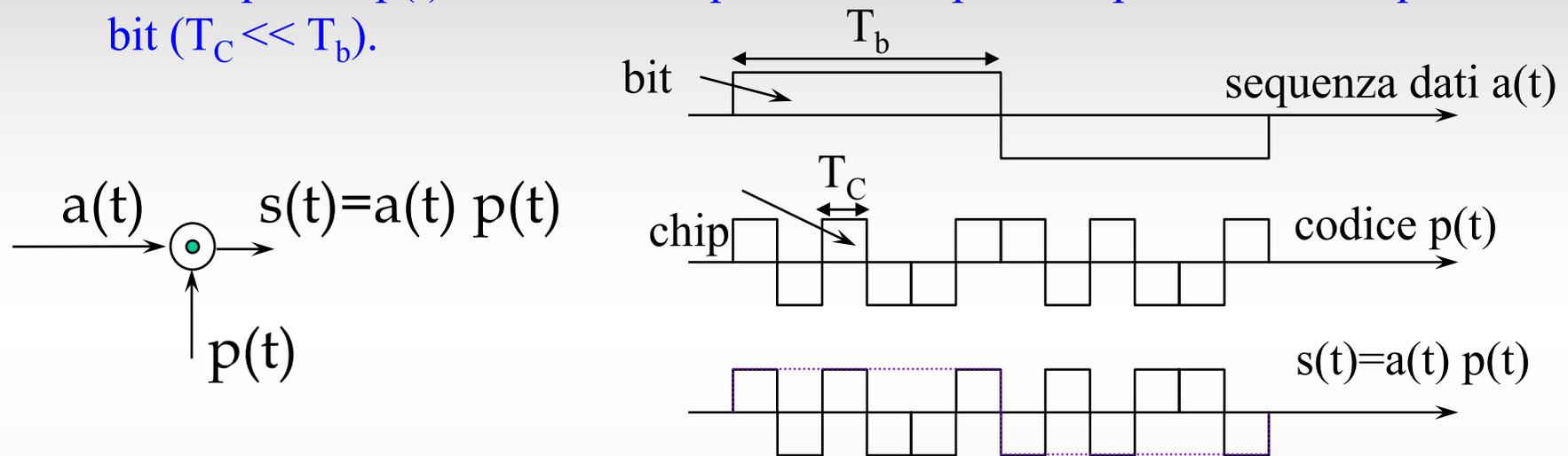
✓ in campo civile

- Sistemi cellulari americani (IS-95)
- Sistemi di terza generazione cellulare (ITU-IMT200: UMTS)
- Reti locali via radio (wireless LANs)
- Sistemi di posizionamento (GPS)
- ...



Trasmissione SS: lo Spreading

- ✓ In un sistema SS il segnale dati $a(t)$ viene moltiplicato in trasmissione per una sequenza $p(t)$ nota ed a frequenza di chip molto più elevata di quella di bit ($T_c \ll T_b$).



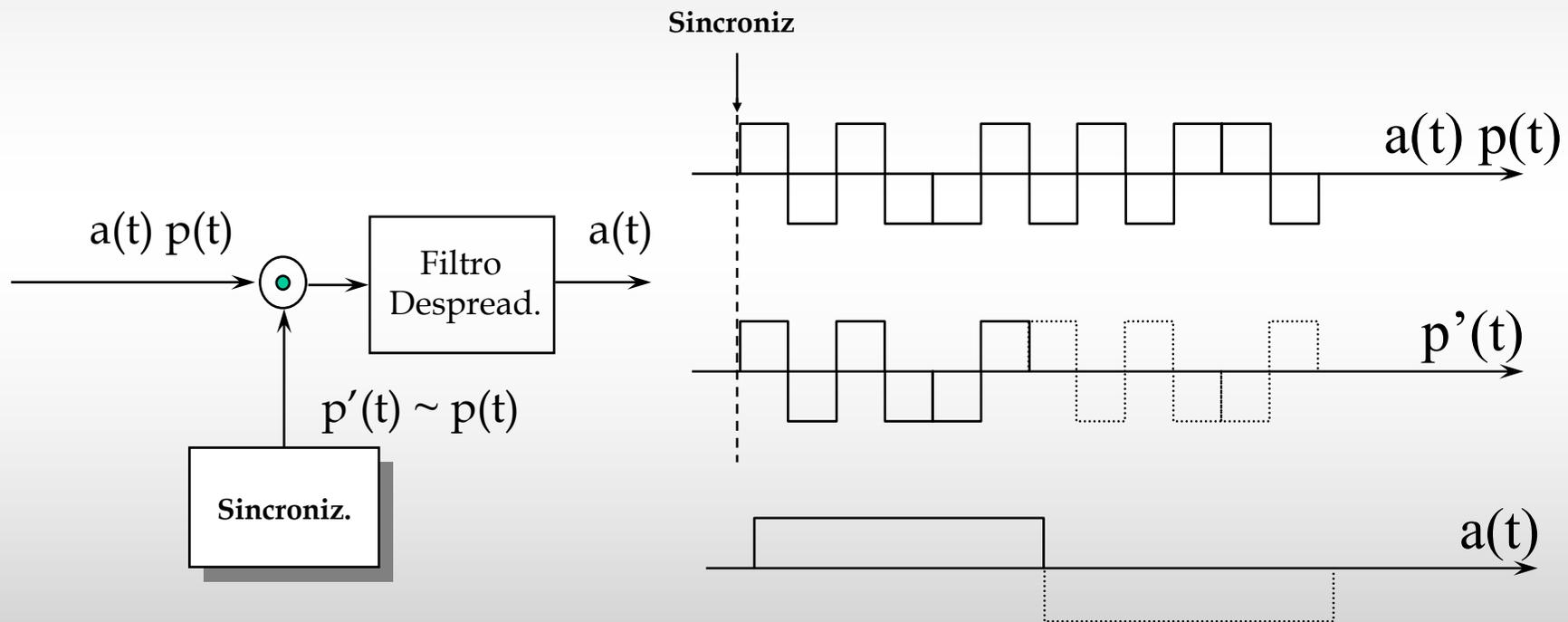
- ✓ È possibile mostrare che il segnale $s(t) = a(t)p(t)$ occupa una banda molto maggiore di quella del segnale dati $a(t)$. Il fattore di allargamento della banda è detto **Guadagno di Processo (Process Gain)** e vale

$$G_p = \frac{T_b}{T_c} \quad (\text{usualmente } \gg 1)$$

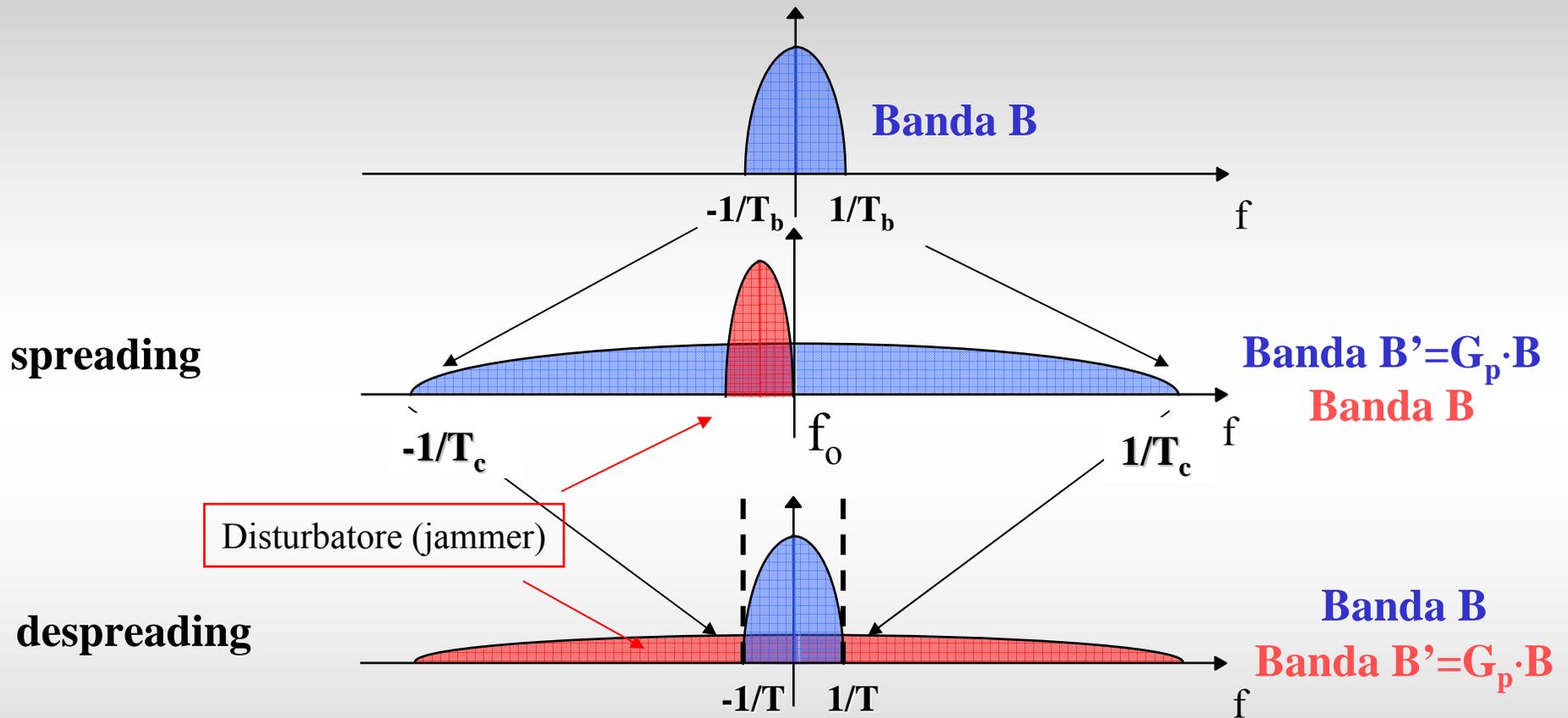


Ricezione SS: il *Despreading*

- ✓ In ricezione il segnale dati può essere riportato nella sua banda originale moltiplicando il segnale ricevuto per una replica locale della sequenza $p(t)$ sincronizzata con quella ricevuta.



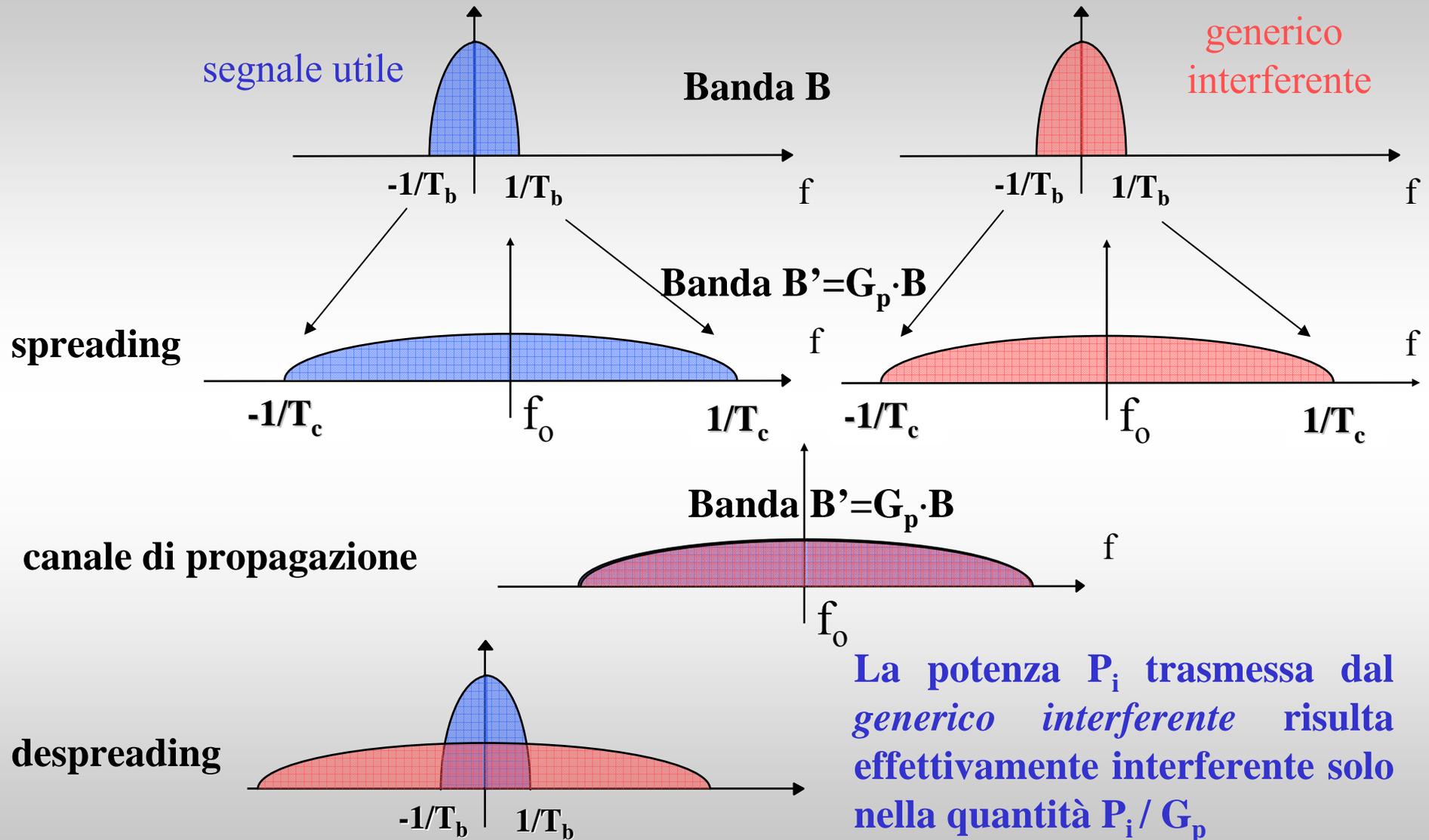
Esempio: *jammer* intenzionale



La potenza P_i trasmessa dal *jammer* risulta effettivamente interferente solo nella quantità P_i / G_p

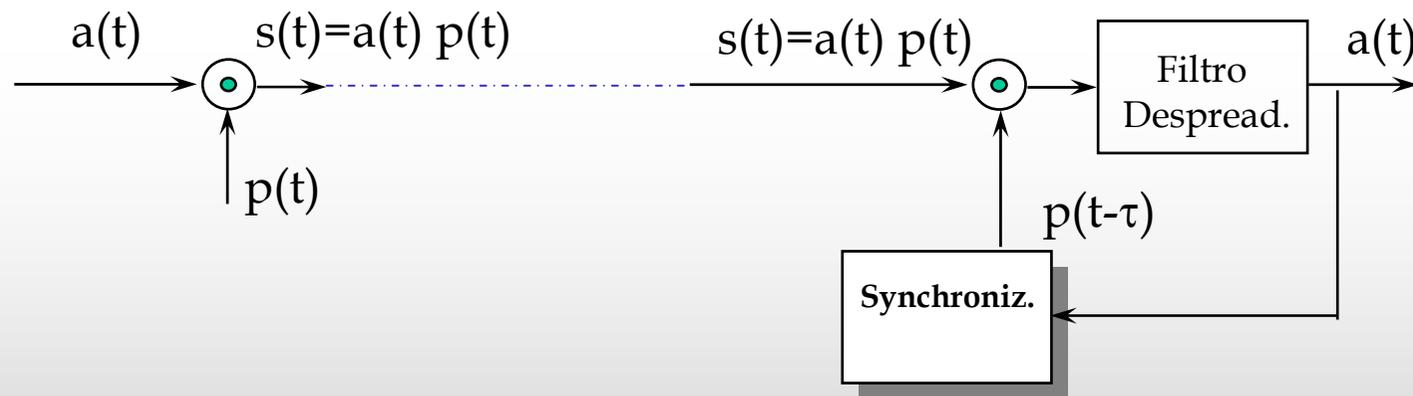


Esempio: *sistemi radiomobili*



La Sincronizzazione

- ✓ *In un sistema Spread Spectrum è essenziale che la sequenza generata localmente al ricevitore sia sincronizzata a quella ricevuta. Solo quando la sequenza locale è sincronizzata a quella ricevuta è infatti possibile ricompattare il segnale nella sua banda originale*
- ✓ *Ogni sistema spread spectrum ha un circuito di sincronizzazione della sequenza pseudocasuale.*



- ✓ *Il sistema di sincronizzazione produce come risultato "collaterale" l'offset temporale tra la sequenza ricevuta e quella generata localmente (= cioè lo spostamento necessario a sincronizzare le sequenza).*



CDMA e Spread Spectrum

Un qualunque sistema d'area ad accesso multiplo a divisione di codice è automaticamente un sistema a spettro espanso purché $T_c \ll T_b$ (ovvero se la *chip-rate* R_c è \gg della *bit-rate* R_b)

La quasi totalità dei radio sistemi a divisione di codice esistenti (UMTS) è di tipo CDMA-SS



Il problema del sincronismo

- ✓ I codici ortogonali mantengono le loro ottime proprietà di auto/cross-correlazione solo in condizioni di sincronismo; tale condizione difficilmente è perseguibile, in particolare per la tratta di *up-link* (ritardi di propagazione differenti)

$$\langle p_i(t) \cdot p_i(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} p_i(t) \cdot p_i(t) dt = 1$$

$$\langle p_i(t) \cdot p_j(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} p_i(t) \cdot p_j(t) dt = 0$$

In condizioni di perfetto sincronismo, l'interferenza viene completamente annullata

$$\langle p_i(t) \cdot p_i(t + \tau) \rangle = ? \quad (\text{non sempre nullo})$$

$$\langle p_i(t) \cdot p_j(t + \tau) \rangle \neq 0$$

In assenza di sincronismo, si ha interferenza dovuta a:

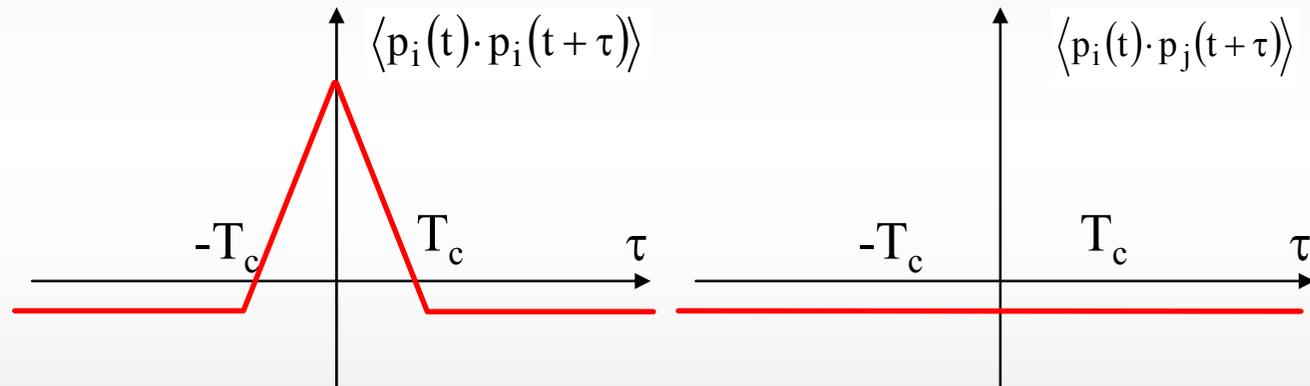
1. Repliche ritardate del codice utile (cammini multipli ed interferenti co-canale)
2. Codici differenti da quello utile (interferenti da canale adiacente)



I codici Pseudo-Noise (PN)

- ✓ Data l'impossibilità di garantire perfetto sincronismo, nei sistemi CDMA si utilizzano *codici Pseudo-Noise* (PN): si tratta di codici “quasi ortogonali”, poiché in caso di sincronismo ($\tau=0$) presentano proprietà simili a quelle dei codici ortogonali. Per $\tau > 0$, tuttavia, hanno un comportamento migliore dei codici ortogonali

Implicita robustezza
ai cammini multipli



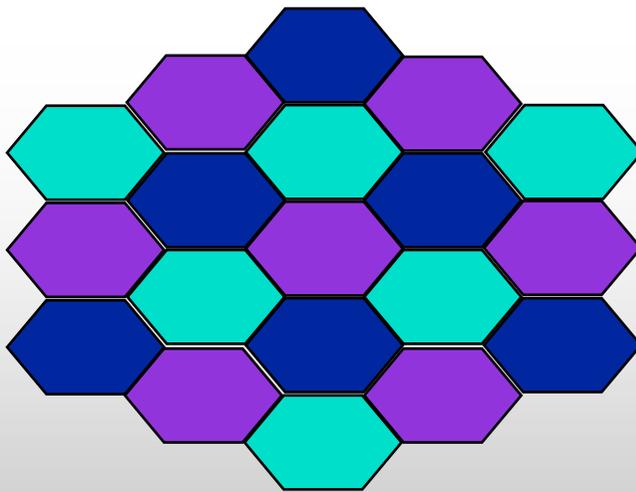
- ✓ Si osservi che un interferente co-canale produce la stessa interferenza di un interferente da canale adiacente (purché $\tau_{\text{ccanale}} > T_c$) \Rightarrow Differenza fra interferente co-canale ed interferente da canale adiacente solo teorica \Rightarrow non c'è motivo particolare di allontanare l'interferente co-canale \Rightarrow Riuso Unitario ($m=1$)



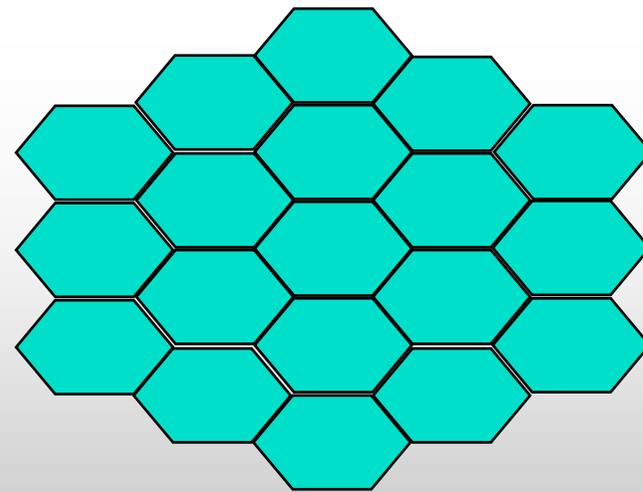
CDMA - Riuso unitario (1/2)

La separazione fra i canali è basata sull'uso di codici quasi ortogonali.
Tutte le stazioni base possono adoperare l'intera banda disponibile.

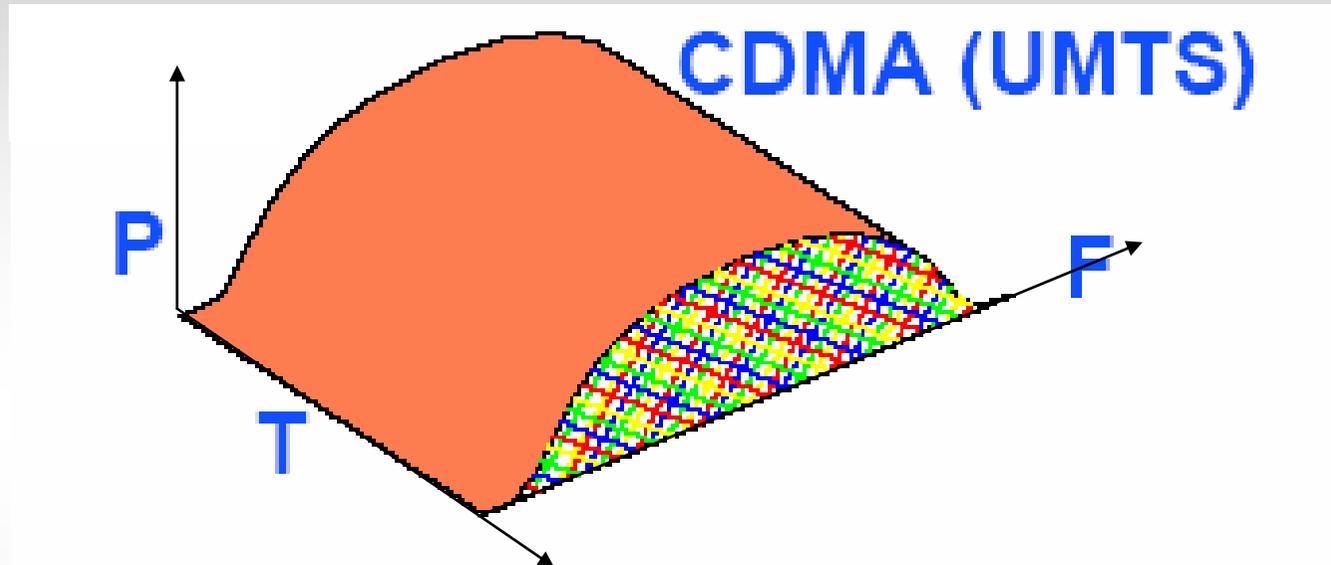
TDMA/FDMA (riuso > 1)



WCDMA (riuso = 1)



CDMA - Riutilizzo unitario (2/2)



In un sistema ad accesso a divisione di codice ogni utente utilizza “tutta la banda disponibile per tutto il tempo del collegamento”



Cluster size 1

- ✓ In ogni sistema cellulare la capacità è inversamente proporzionale al cluster size m (fattore di riuso).
- ✓ nel CDMA $m=1$ (il minimo possibile), perciò la capacità dovrebbe essere superiore.
- ✓ Tuttavia, l'interferenza residua dovuta a codici non ortogonali o a multipath viene da tutti gli utenti, compresi quelli della cella stessa.
- ✓ Conseguenza di $m=1$ è la possibilità di **soft handover**.



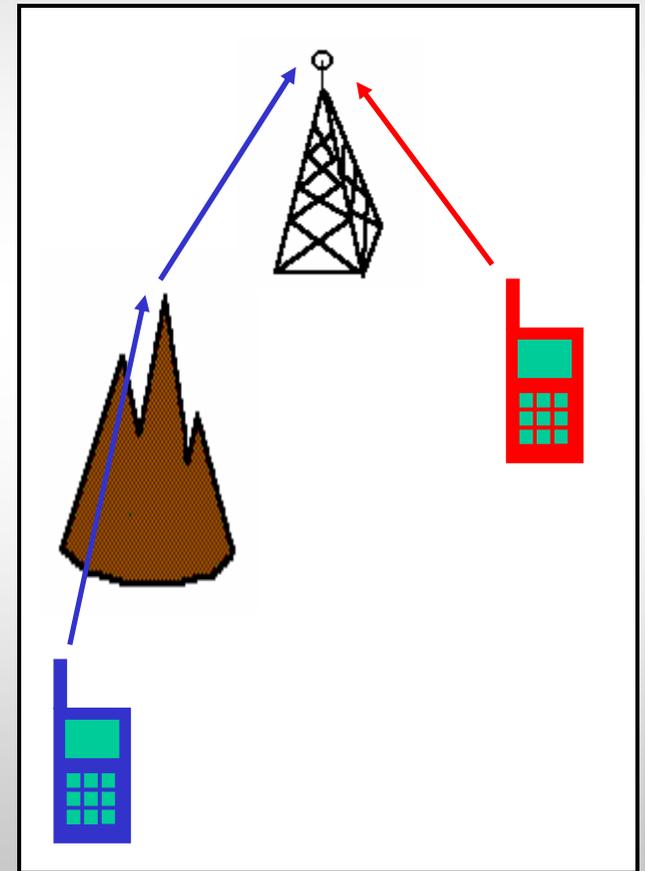
Cell Breathing

- ✓ Nei sistemi “tradizionali” (GSM) l’ammissione di un utente che chiede accesso al servizio e’ vincolata alla disponibilità di risorse libere (i. e. *time slot* e/o porzioni di banda non assegnate).
Se esistono risorse non allocate, l’ammissione e’ garantita; diversamente e’ certamente negata.
- ✓ Nei sistemi CDMA-SS ci sono sempre risorse disponibili (il numero di codici e’ “infinito”). Ogni nuovo ingresso determina pero’ un aumento dell’interferenza per tutti i collegamenti attivi, e può quindi essere rifiutato se risultasse, in tal senso, troppo gravoso. L’impatto di ogni nuovo accesso dipende di volta in volta anche dalla situazione pre-esistente: numero di utenti già attivi, potenze trasmesse, posizioni, ecc. ;
 - ⇒ Necessaria una oculata politica di *Call Admission*;
 - ⇒ La dimensione effettiva della cella varia al variare del traffico (*Cell Breathing*)



Power Control

- ✓ Il guadagno di processo “protegge” la comunicazione utile, poiché solo una frazione $1/G_p$ della potenza trasmessa da un utente interferente risulta effettivamente tale
- ✓ Tuttavia può accadere l'utente utile si trovi in condizioni di propagazione molto più penalizzanti rispetto all'utente interferente \Rightarrow nonostante il *process gain* la potenza interferente può risultare eccessivamente alta rispetto a quella utile, a scapito della buona qualità del collegamento
- ✓ Tale problematica (tipica dei sistemi CDMA) deve essere opportunamente controllata per mezzo di opportune politiche di *Controllo di Potenza* (i trasmettitori aggiustano la potenza irradiata al variare delle condizioni di propagazione)



Soft hand-over

- ✓ Il soft hand-over nasce dall'esigenza di consentire ad ogni mobile di essere collegato a più di 1 stazione base al confine fra più celle
- ✓ È possibile grazie al **Rake receiver**

