

D – SISTEMI, COPERTURE, PIANIFICAZIONE

Tecniche di trasmissione spread-spectrum

Sistemi radiomobili cellulari

Coperture cellulari in sistemi a canali limitati, geometria, cluster, settorizzazione

Tecniche di accesso multiplo FDMA, TDMA, CDMA, SDMA e ibride

Obiettivi di progetto: C ed I, handover e dropping, traffico e blocking

Pianificazione in base a copertura

Probabilità di outage, location probability

Copertura a bordo cella e power budget

Pianificazione in base al C/I

Legame m-C/I

Efficienza spettrale in sistemi a canali limitati ortogonali

Cenno al sistema GSM

Pianificazione in sistemi CDMA

Elementi di base, interferenza e power control

Rake receiver e soft handover

Vantaggi e svantaggi, efficienza spettrale

Cenno all'UMTS

Sistemi di accesso (Wi-Fi e Wi-MAX)

Sistemi pervasivi (reti di sensori, RF-ID, UWB)



Pianificazione di sistemi radiomobili a canali limitati

Generalmente la pianificazione di sistemi radiomobili a canali limitati (FDMA/TDMA e ibridi) in un' area omogenea consiste in due fasi:

- 1) pianificazione in base alla copertura (C/N) (*vale approx. anche per CDMA*)
- 2) pianificazione in base al C/I

Le problematiche relative al rapporto tra traffico e numero di canali per cella si rimandano a corsi specifici

Supponendo un ambiente omogeneo e ideale, con propagazione che segue una legge Hata-like con fattore di attenuazione α e presenza di fading è possibile una formulazione analitica semplice sulla quale impostare i passi di pianificazione 1) e 2)

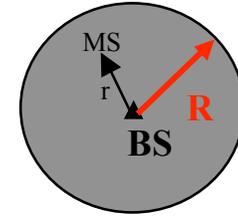


1) Pianificazione in base alla copertura

- ✓ In base alla tecnologia degli apparati Tx/Rx esiste una soglia di sensibilità del ricevitore (P_{sens}) cioè la minima potenza ricevuta compatibile con una sufficiente qualità (es: $\text{BER} < 10^{-4}$). Dipende dalla cifra di rumore degli apparati e dalla qualità degli stessi.
- ✓ Generalmente, essendo maggiore alla BS (base station) la potenza trasmessa, il collegamento più critico è il mobile-base (MS→BS) o up-link, ma la maggiore qualità degli apparati e l'adozione di diversità al lato BS può compensare
- ✓ La potenza ricevuta presenta un andamento aleatorio secondo statistiche note: la copertura radio di una cella viene ad essere definita in termini probabilistici.
- ✓ Occorrerà tenere conto del marginale di fading M_f



Calcolo a bordo cella (1/2)



Di solito si considera solo il fading lento lognormale perché il fading rapido viene parzialmente mediato dalle antenne, dalla diversità e dalle tecniche di codifica (di esso si tiene conto tramite un margine fisso pari a circa 2-3 dB).

Per il resto si considera un fading lento lognormale. A bordo cella ($r=R$), si può ricavare una prima formula di progetto:

$$P_R = P_{sens} = P_T + G_T + G_R - L_{TOT} \quad [\text{dB}]$$

$$L_{TOT} = \bar{L} + M_F (+L_C + M_I)$$

$$\bar{L} = \bar{L}(R) = L_0 + 10\alpha \log R \quad (\text{Hata-like})$$

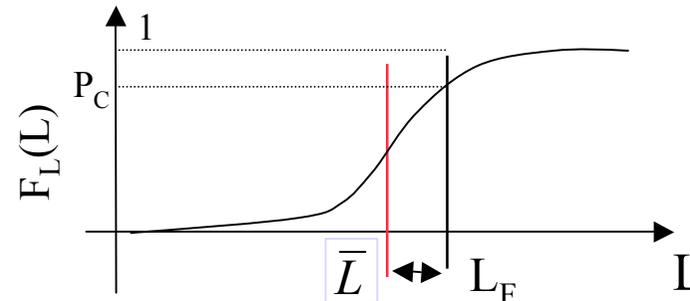
M_F margine di fading lognormale

M_I margine fading rapido e interf.

L_C perdite dei cavi ecc.

\bar{L} è il valor medio di L che viene previsto dal modello empirico. Se P_c è la probabilità di copertura/servizio richiesta a bordo cella e L_F è il P_c -esimo percentile della variabile aleatoria L si ha:

$$M_F = L_F - \bar{L}$$



Calcolo a bordo cella (2/2)

L è una variabile aleatoria Gaussiana a valor medio \bar{L} e deviazione standard σ ; valori tipici per σ oscillano tra i 4 dB e i 12 dB.

La densità di probabilità di L è quindi:

$$p_L(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(L-\bar{L})^2}{2\sigma^2}}$$

E la cumulativa vale:

$$F_L(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^L e^{-\frac{(x-\bar{L})^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{L-\bar{L}}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

Si avrà perciò:

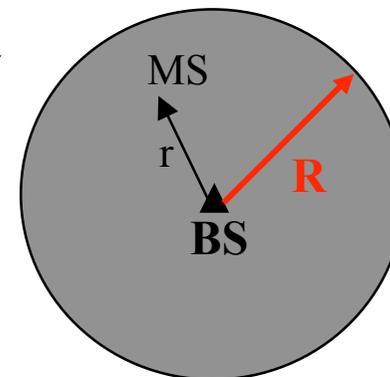
$$P_c(R) = F_L(L_f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{L_f} e^{-\frac{(x-\bar{L})^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{M_f}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

Da cui si ricava M_f relativo ad un mobile a bordo cella in funzione di P_c . Si può sostituire questo valore nella formula di progetto per ricavare per esempio P_T



Calcolo su tutta la cella (1/4)

- ✓ Il calcolo fatto corrisponde al caso peggiore. Infatti se si ha probabilità di copertura P_c a bordo cella, su tutta la cella si avrà una probabilità di copertura maggiore essendo minore l'attenuazione.
- ✓ La probabilità di copertura fissata la distanza r , e in particolare a bordo cella ($r=R$) viene detta Location Probability (LP):



$$LP(r) \triangleq P_c(r) = F_L(L_f) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{M_f}{\sqrt{2}\sigma} \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{L_f - \bar{L}(r)}{\sqrt{2}\sigma} \right)$$

E' possibile integrare questa formula e ottenere la probabilità di copertura su tutta la cella P_c fissata quella a bordo cella.

Si noti che al diminuire di r , fissata L_f , calando \bar{L} cresce $LP(r)$.



Calcolo su tutta la cella (2/4)

Per calcolare la probabilità di copertura su tutta la cella occorre fare il seguente integrale:

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{1}{A_{\text{cella}}} \int_{A_{\text{cella}}} LP(r) ds = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} LP(r) r d\varphi dr = \frac{2\pi}{\pi R^2} \int_0^R LP(r) r dr = \\ &= \frac{2}{R^2} \int_0^R \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{L_f - \bar{L}(r)}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right] r dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\bar{L}(R) + M_f - \bar{L}(r)}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right] r dr \\ &= \frac{2}{R^2} \int_0^R \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{10\alpha \log \left(\frac{R}{r} \right) + M_f}{\sqrt{2\sigma}} \right) \right] r dr \end{aligned}$$

$\bar{L}(r) = L_0 + 10\alpha \log r$

Sostituendovi l'espressione integrale della funzione erf e svolgendo alcuni passaggi si ricava quanto segue



Calcolo su tutta la cella (3/4)

$$P_c = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf}(a) + \exp\left(\frac{2ab+1}{b^2}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{ab+1}{b}\right) \right] \right\} =$$
$$= LP(R) + \frac{1}{2} \left\{ \exp\left(\frac{2ab+1}{b^2}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{ab+1}{b}\right) \right] \right\}$$

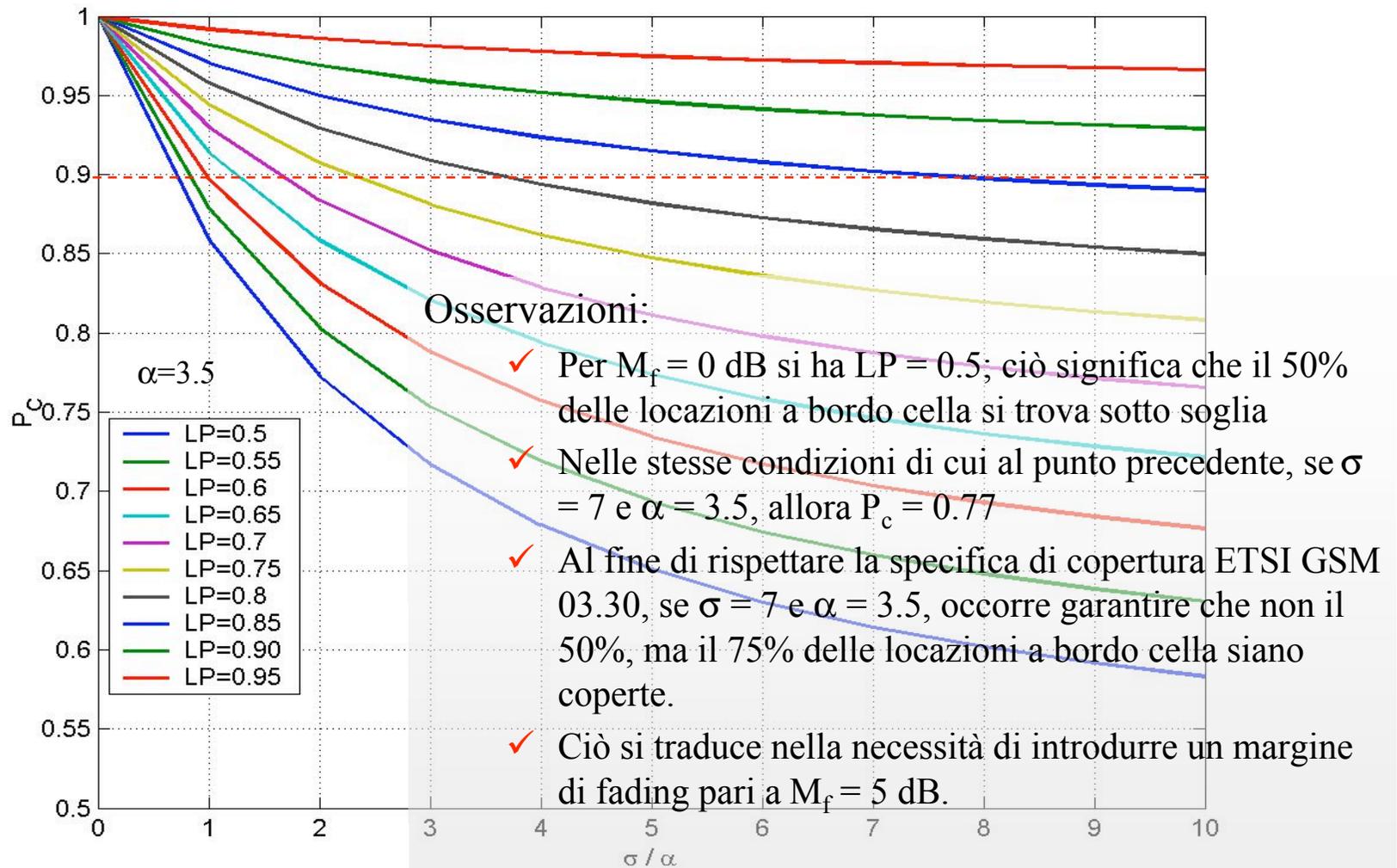
con

$$a = \left(\frac{M_f}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad b = \left(\frac{10\alpha}{\sqrt{2}\sigma} \log_{10} e \right)$$

P_c è la grandezza di interesse in fase di dimensionamento. Es. Lo standard ETSI GSM 03.30 richiede $P_c = 0.9$



Calcolo su tutta la cella (4/4)



Esempio di calcolo del link-budget GSM 1800: up-link

Ricezione BTS			Trasmissione MS (classe veicolare*)		
Sens. Ric.	-104	dBm	Potenza Picco	39	dBm
Perdite cavo	4	dB	Guadagno G_T	2	dB
Guadagno G_R	12	dB	Perdite Cavo	2	dB

Margine Interf.	3	dB			
Margine Log.	5	dB			

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{IO} - M_I - M_F - L_{CT} - L_{CR}$$

* Ci sono 5 classi. Quella più comune ha potenza di picco di 1 W



Perdite di propagazione accettabili:

$$\begin{aligned} L_{I0} &= +P_T + G_T - L_{CT} + G_R - P_R - M_I - M_F - L_{CR} \\ &= 39 + 2 - 2 + 12 - (-104) - 3 - 5 - 4 = 143 \text{ [dB]} \end{aligned}$$



Es: massima distanza di tratta in zona rurale

$$h = 60m \Rightarrow$$

distanza di breakpoint:

$$R_{BP} \approx \frac{4 \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda} = \frac{4 \cdot 60 \cdot 1.5}{0.17} = 2.1km$$

orizzonte radio:

$$R_{or} \approx 2\sqrt{2hkR_0} = 2\sqrt{2 \cdot 60 \cdot \frac{4}{3} \cdot 6370 \times 10^3} = 64km$$

$$L_{BP} = \left(\frac{4\pi R_{BP}}{\lambda} \right)^2$$

massima distanza con formula "dual slope"

$$L(R) = L(R_{BP}) \left(\frac{R}{R_{BP}} \right)^4 \Rightarrow R = R_{BP} \left(\frac{L}{L_{BP}} \right)^{1/4} = 2100 \left(\frac{10^{14.3}}{2.41 \times 10^{10}} \right)^{1/4} = 20.03 km$$

Massima distanza con formula ETSI per GSM 1800 veicolare in area rurale

$$143 = 100.1 + 33.3 \log(R) \rightarrow R = 19.5 km \quad (PS: con Friis viene 370 km!!)$$



2) Pianificazione in base al C/I

- ✓ Si tratta di determinare il cluster size che garantisce il C/I per una corretta ricezione (detto anche SIR_{th}), cioè per un BER sufficientemente basso.
- ✓ Siccome la relazione tra m e D/R in una copertura a reticolo esagonale uniforme è già stata ricavata occorre mettere ora in relazione D/R e C/I ipotizzando una semplice legge di attenuazione con la distanza Hata-like
- ✓ In realtà sia C sia I sono variabili aleatorie. Per la legge dei grandi numeri, se gli interferenti sono molti I si potrebbe approssimare con il suo valor medio. Tuttavia C rimane una variabile aleatoria.
- ✓ Nel seguito per semplicità si considerano valori medi e si trascura il fading ai fini del dimensionamento in base al C/I.
- ✓ Altre formulazioni possono essere facilmente ricavate per coperture su reticolo quadrato o esagonale settorizzato



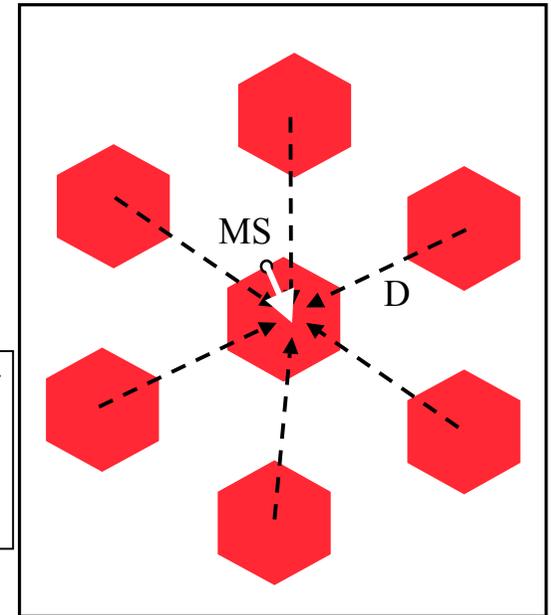
m in funzione del C/I - *up-link* (1/2)

✓ Ipotesi di lavoro:

- Mobile utile a bordo cella (distanza utile = R);
- Considerati solo mobili interferenti della prima cerchia, supposti al centro delle rispettive celle (distanza interferente = D);
- Stessa potenza (P_{MS}) trasmessa da ogni mobile;
- Territorio ad attenuazione uniforme di tipo *Hata-like*:

$$L(r) = L(r_0) \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha$$

$$C = P_U = \frac{P_{MS}}{L(R)} = \frac{P_{MS}}{L(r_0)} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^\alpha$$
$$I = P_I = \frac{6P_{MS}}{L(r_0)} \cdot \left(\frac{r_0}{D} \right)^\alpha$$

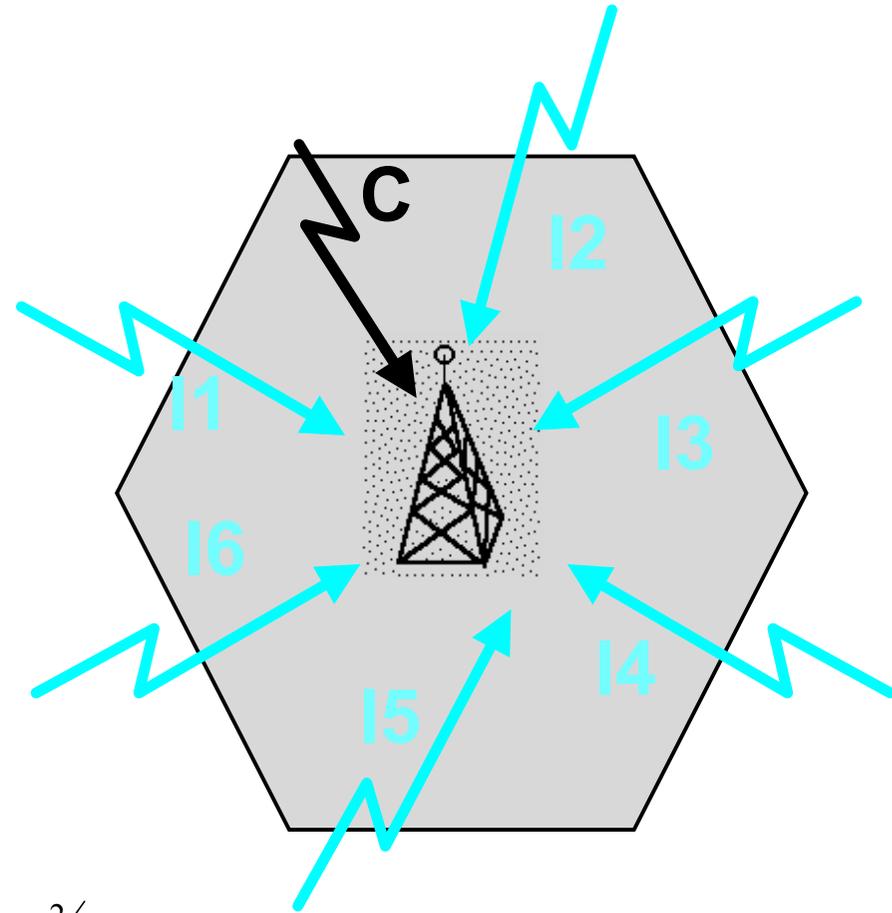


m in funzione del C/I - *up-link* (2/2)

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{D}{R} \right)^\alpha$$

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3m}$$

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6} \cdot (3m)^{\alpha/2}$$



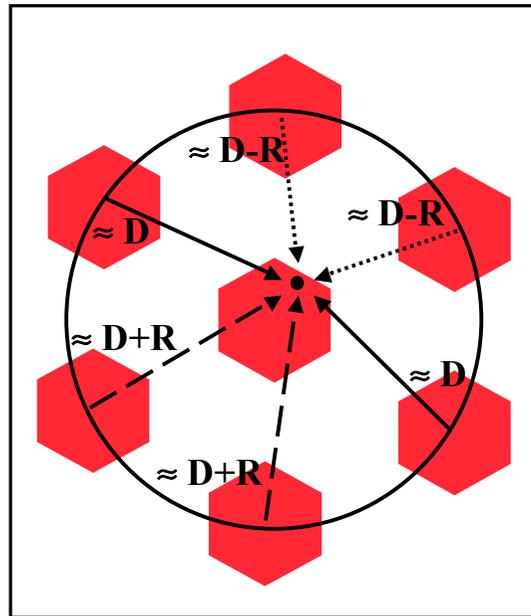
$$\text{Es: } SIR_{th}=10, \alpha=3 \rightarrow m = \frac{1}{3} (6 SIR_{th})^{2/\alpha} = 5.1 \rightarrow m = 7$$



m in funzione del C/I - *down-link* (1/2)

✓ Ipotesi di lavoro:

- Mobile utile a bordo cella (distanza utile = R);
- Considerate solo BS interferenti della prima cerchia;
- Stessa potenza (P_{BS}) trasmessa da ogni BS;
- Territorio ad attenuazione uniforme di tipo *Hata-like*:



$$C = P_U = \frac{P_{BS}}{L(r_0)} \cdot \left(\frac{r_0}{R} \right)^\alpha$$

$$I = P_I = \frac{2P_{BS} \cdot r_0^\alpha}{L(r_0)} \cdot \left(\frac{1}{(D-R)^\alpha} + \frac{1}{D^\alpha} + \frac{1}{(D+R)^\alpha} \right)$$

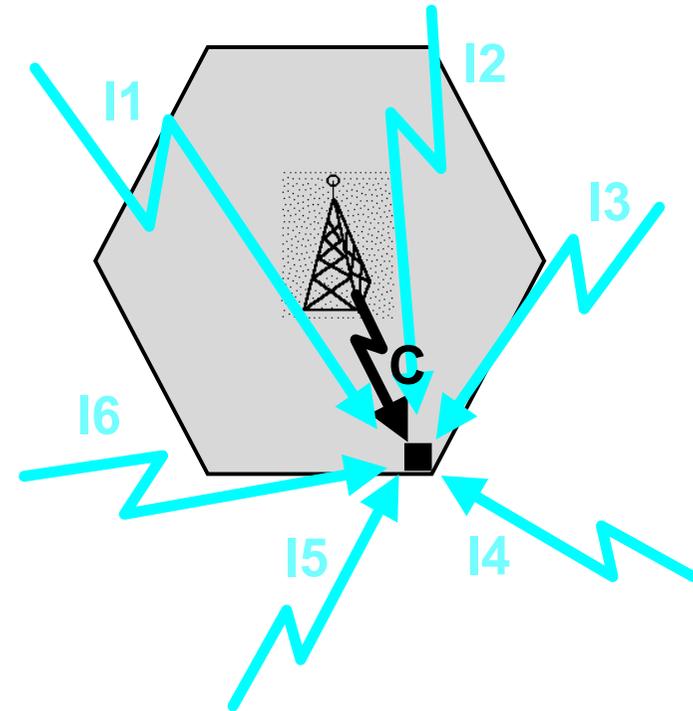


m in funzione del C/I - *down-link* (2/2)

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(\frac{D}{R}\right)^\alpha \cdot \left(\left(\frac{D}{R}\right)^2 - 1\right)^\alpha}{\left(\frac{D}{R}\right)^\alpha \cdot \left[\left(\frac{D}{R} + 1\right)^\alpha + \left(\frac{D}{R} - 1\right)^\alpha\right] + \left(\left(\frac{D}{R}\right)^2 - 1\right)^\alpha}$$

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3m}$$

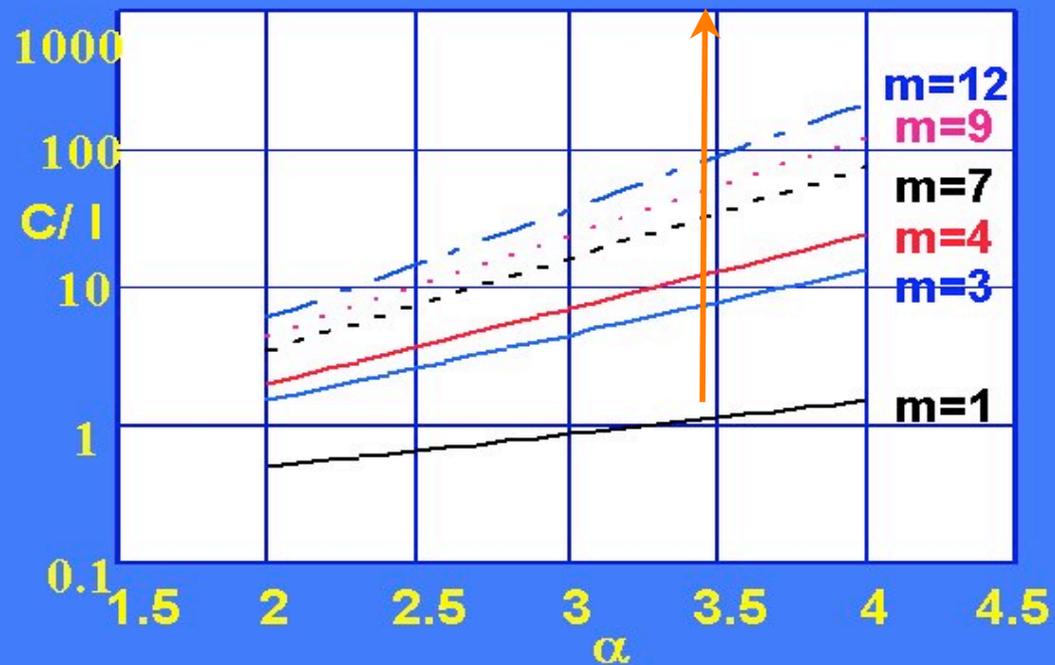
$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(3m)^{\alpha/2} \cdot (3m - 1)^\alpha}{(3m)^{\alpha/2} \cdot \left(\left(\sqrt{3m} + 1\right)^\alpha + \left(\sqrt{3m} - 1\right)^\alpha\right) + (3m - 1)^\alpha}$$



è praticamente uguale alla formula per l'up-link se si possono trascurare gli “uni”, cioè m è grande



Relazione fra C/I, m e α



Uso ottimo dello spettro: L'efficienza spettrale

L'efficienza spettrale è un rapporto fra costi e benefici di un sistema radiomobile. Il costo è costituito dallo spettro radio che è una risorsa limitata. Non è necessariamente < 1 !!

Nel caso ideale con un numero N_c limitato di canali si può fare la seguente formulazione

Efficienza spettrale

$$\eta \triangleq \frac{MB_r}{B}$$

M numero utenti del sistema (subscribers)

B_r bitrate per utente

B banda totale allocata al servizio

Si può definire una banda equivalente per canale

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

N_c numero totale di canali

Data una certa probabilità di blocco (blocking) con N_c canali si possono servire (formula Erlang-B per code a lunghezza nulla) M_0 utenti. M_0 è il numero di utenti in un cluster.



Le efficienze spettrali parziali

Si possono allora definire 3 efficienze spettrali parziali:

Efficienza nel tempo

$$\eta_t = \frac{M_0}{N_c}$$

È più alta quando il traffico offerto da ciascun utente è basso (gli utenti usano il servizio in una bassa % di tempo): si possono moltiplicare più utenti sugli stessi canali

Efficienza in frequenza

$$\eta_f = \frac{B_r}{B_0}$$

È la classica efficienza frequenziale e dipende dalla tecnica di mo-dem. Tecniche ad alta efficienza richiedono un alto SIR_{th} .

Efficienza nello spazio

$$\eta_s = \frac{M}{M_0} = N_{cluster}$$

È la più importante per noi. Indica il grado di riuso spaziale dei canali. $N_{cluster}$ è il numero di cluster sull'area di servizio.



Fattorizzazione della efficienza spettrale

Si ricava immediatamente:

$$\eta_t \cdot \eta_f \cdot \eta_s = \frac{M_0}{N_c} \cdot \frac{B_r}{B_0} \cdot \frac{M}{M_0} = \frac{MB_r}{N_c B_0} = \frac{MB_r}{B} = \eta$$

Si ha anche:

$$\eta = \eta_f \frac{M_0}{N_c} \cdot N_{cluster} = \eta_f \frac{M_0}{N_c} \cdot \frac{N_{celle}}{m}$$

N_{celle} . È il numero di celle totali del sistema

Si vede che l'efficienza spettrale dipende dal numero di celle. Se si desidera una figura di merito indipendente da questo parametro, e quindi più indicativo della *bontà del progetto*, si può utilizzare l'efficienza spettrale per cella

$$\eta_c \triangleq \frac{\eta}{N_{celle}} = \eta_f \cdot \left(\frac{M_0}{N_c} \right) \cdot \frac{1}{m}$$



Analisi dell'efficienza spettrale per cella (1/2)

I primi due fattori dipendono dal modem e da problematiche di traffico. Per sistemi con molti canali il secondo tende ad una costante. Dato che $m=m(C/I)$ come si è visto si ottiene perciò

$$\eta_c = \eta_f \cdot k \cdot \frac{1}{m(C/I)}$$

A prima vista si potrebbe aumentare l'efficienza aumentando η_f , ma modulazioni efficienti in banda richiedono anche un C/I maggiore e quindi un m maggiore. Nel caso semplice dell'up-link si ha:

$$\eta_c = \eta_f \cdot k \cdot \frac{1}{\frac{1}{3} \left(6 \frac{C}{I}\right)^{2/\alpha}} = 3 \cdot \eta_f \cdot k \cdot \left(6 \frac{C}{I}\right)^{-2/\alpha}$$

Cioè facendo il logaritmo da entrambe le parti e riorganizzando si ha:

$$\log \eta_c = \log \eta_f + k' - \frac{2}{\alpha} \log \frac{C}{I} = \log \eta_f + k' - \frac{1}{5\alpha} \left(\frac{C}{I}\right)_{dB}$$



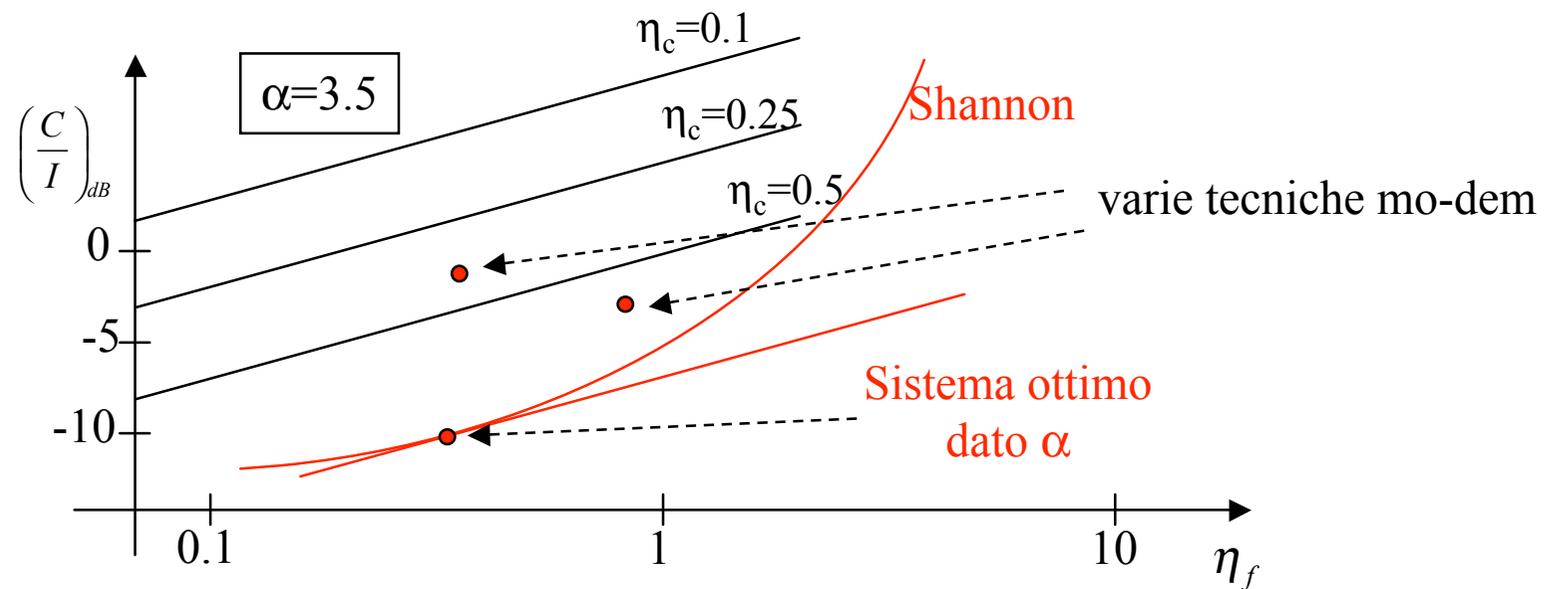
Analisi dell'efficienza spettrale per cella (2/2)

Cioè

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{dB} = 5\alpha \cdot \log \eta_f - 5\alpha \cdot \log \eta_c + k''$$

Quindi in un diagramma logaritmico C/I in funzione di $\log(\eta_f)$ è una retta di coefficiente angolare proporzionale ad α e intercetta decrescente con η_c .

Sullo stesso diagramma, assimilando l'interferenza a rumore AWGN si potrebbe rappresentare la curva del teorema di Shannon e vedere come il sistema si comporta rispetto al caso ideale.



Pianificazione assistita al computer (1/2)

- ✓ Per la pianificazione di sistemi in ambiente urbano in cui la propagazione interagisce fortemente con gli ostacoli, i passi di pianificazione 1) e 2) possono essere fatti in parte con l'ausilio del computer e sfruttando opportuni modelli di propagazione (es: ray tracing)
- ✓ Si tratta di una pianificazione deterministica in cui è possibile anche la scelta e la pianificazione dei siti, anzi essendo i siti il bene “scarso” si parte proprio dalla disponibilità di siti
- ✓ Dopo una pianificazione di massima fatta con i metodi visti, sulla base del database urbano e della localizzazione dei siti viene effettuata la verifica di copertura e di interferenza al computer
- ✓ Se la verifica non è soddisfacente si modificano i parametri o la localizzazione delle BS in maniera mirata e si ripete la verifica fino ad esito positivo
- ✓ Non è necessario il calcolo di margini di fading (fatta eccezione per il fading rapido) se si usano modelli di propagazione deterministici che riproducono e tengono conto del fading.

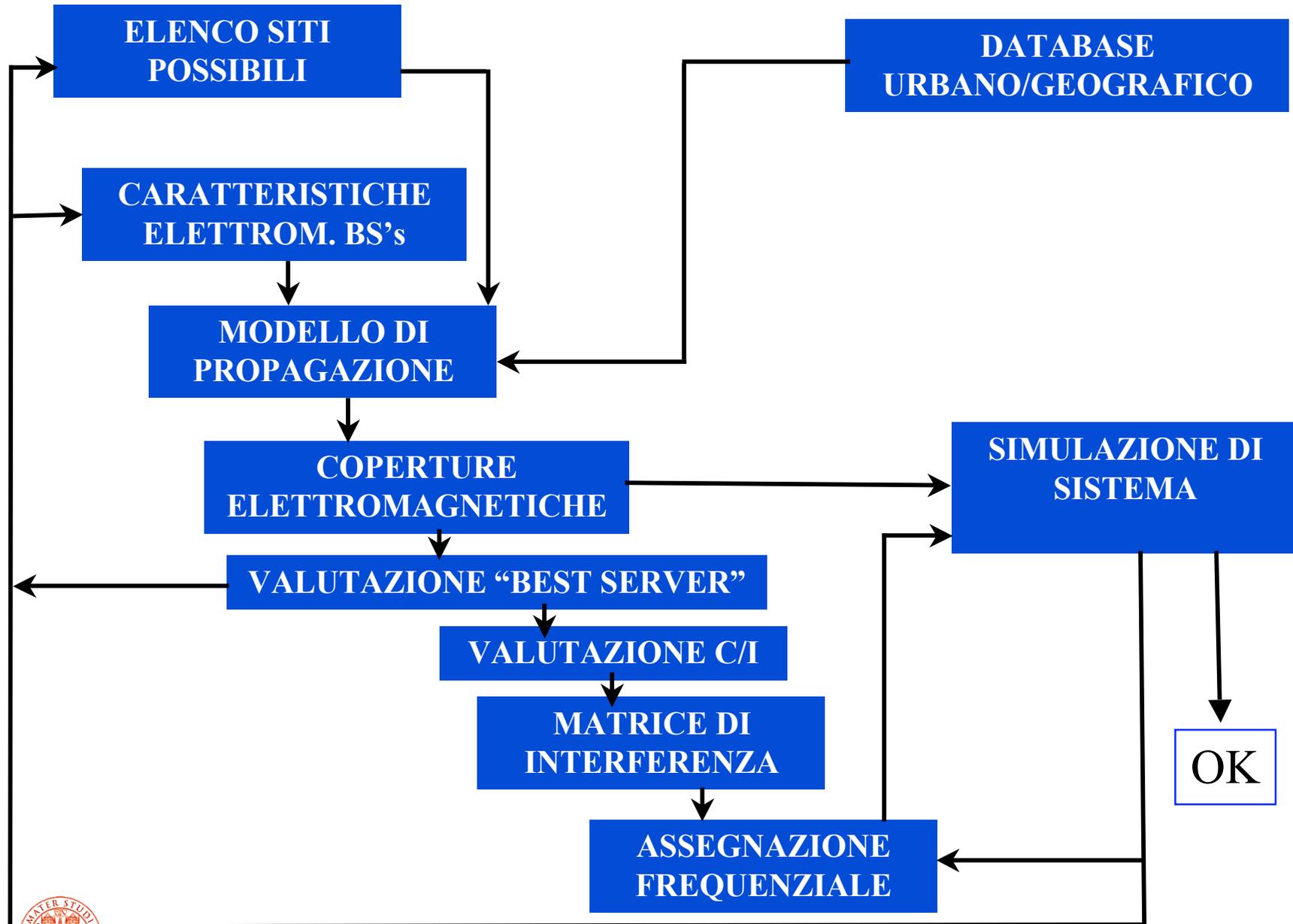


Pianificazione assistita al computer (2/2)

- ✓ Alla fine della procedura si può effettuare una simulazione di sistema per verificare la qualità complessiva del servizio
- ✓ Per l'assegnazione delle frequenze si tiene conto solitamente di un salto di due frequenze per celle non isocanale appartenenti allo stesso settore e di una frequenza se le celle sono di settori diversi
- ✓ L'algoritmo può essere molto complesso e dipende dalle strategie dell'operatore
- ✓ E' possibile avere overlay networks
- ✓ Analoghi algoritmi sono usati per la pianificazione di sistemi di radiodiffusione. Originariamente la pianificazione della radiodiffusione è stata “selvaggia” in Italia. Poi ora si tenta di imporre una ri-pianificazione ragionata delle frequenze. Con l'avvento dei sistemi digitali tutto cambia a causa della tecnica SFN



Es. di algoritmo di Pianificazione assistita al computer



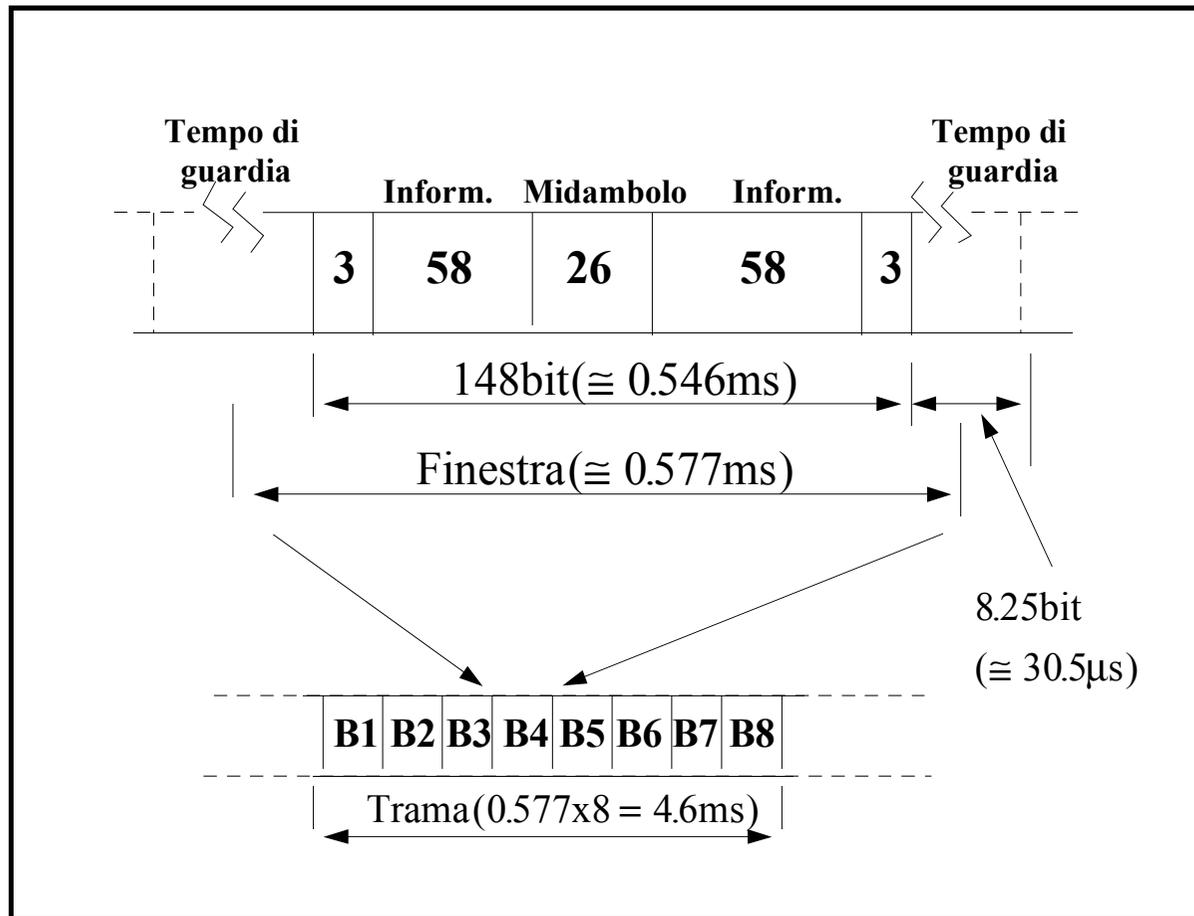
Caratteristiche fondamentali del GSM

Multiple Access Method	TDMA / FDMA
base station to mobile frequencies (MHz)	933-960 (basic GSM)
mobile to base station frequencies (MHz)	890-915 (basic GSM)
Duplexing	FDD
Channel spacing, kHz	200
Modulation	GMSK
Portable TX power, maximum / average (mW)	1000 / 125
Power control, handset and BSS	Yes
Speech coding and rate (kbps)	RPE-LTP / 13
Speech Channels per RF channel:	8
Channel rate (kbps)	270.833
Channel coding	Rate 1/2 convolutional
Frame duration (ms)	4.615

- ✓ A 900 MHz: 248 canali di 200 KHz ciascuno multiplati in frequenza, ognuno dei quali supporta 8 canali multiplati nel tempo (0.577 ms per *slot* temporale). 124 frequenze vengono usate per il collegamento mobile-base (up-link) e 124 per il collegamento mobile-base (down-link). In totale quindi $124 \times 8 = 992$ canali bidirezionali a disposizione degli Operatori.



Trama temporale GSM



- ✓ Ogni burst di traffico presenta la struttura indicata: l'informazione viene suddivisa in due pacchetti di 58 bit divisi dal midambolo di 26 bit utilizzato per le operazioni di sincronizzazione ed equalizzazione.



Altre note sul GSM

- ✓ Il GSM 1800 ha la stessa canalizzazione ma più banda disponibile. I canali del 1800 si aggiungono a quelli del 900
- ✓ L'handover avviene con una soglia di 10 dB
- ✓ E' presente un semplice controllo di potenza
- ✓ Anche a 900 Mhz sono state introdotte estensioni di frequenza diverse da paese a paese
- ✓ Non sempre tutte le frequenze vengono attivate per ragioni di costo e di protezione del pubblico dalla esposizione ai campi e.m.
- ✓ Le bande di 200 KHz sono generalmente inferiori alla banda di coerenza del canale: si è quindi introdotto come contromisura la tecnica del frequency-hopping "lento" come tecnica di diversità in frequenza.
- ✓ Trasmettendo l'informazione su diverse frequenze seguendo opportune sequenze di salti in frequenza, note al ricevitore, è possibile recuperare parte dell'informazione errata attraverso codici a correzione d'errore.
- ✓ Il SIR_{th} è di circa 9 dB. In generale si usa un cluster size 3x4, cioè $m=12$ con celle trisetoriali

