Sistemi di Telecomunicazione

Parte 12: Concetti di Planning Radiomobile

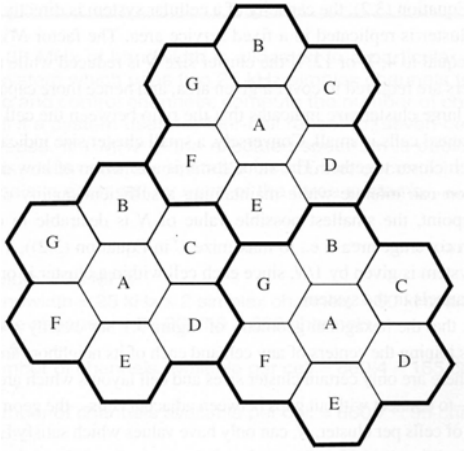
Universita' Politecnica delle Marche

A.A. 2013-2014

Sistemi cellulari

- Sistemi cellulari: sistemi in cui il territorio interessato dal servizio viene suddiviso in tante porzioni relativamente piccole dette **celle**, ciascuna delle quali servita da una **BTS**
- All'interno di ciascuna cella, viene impiegato un sottoinsieme delle frequenze disponibili
- Le frequenze utilizzate in una cella sono diverse da quelle utilizzate nelle celle adiacenti allo scopo di limitare le interferenze causata da celle adiacenti che utilizzano la stessa frequenza portante (la cosiddetta **interferenza co-canale**)
- Le frequenze disponibili vengono distribuite opportunamente su un gruppetto base (detto **cluster**) di celle adiacenti, il quale viene replicato (**riuso delle frequenze**) quante volte e' necessario per coprire un'area geografica comunque vasta
- In questo modo si consente l'accesso ad un numero piu' grande di utenti operanti all'interno dell'area coperta dal servizio. Infatti, agendo sulle dimensioni delle celle, e' possibile variare la densita' geografica degli utenti stessi (ad esempio, in una citta', dove le celle verranno realizzate con una dimensione piu' piccola)
- Ciascun cluster utilizza nel complesso tutte le frequenze portanti allocate al servizio, ma ogni cella ne impiega un sottoinsieme

Riuso delle frequenze



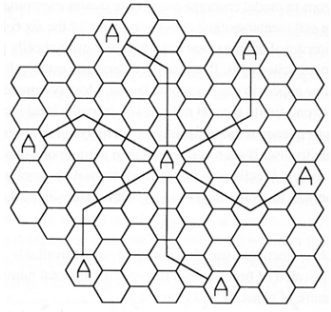
Per comprendere il concetto di riuso delle frequenze, consideriamo un sistema cellulare che abbia in totale S canali duplex utilizzabili. Se a ciascuna cella e' allocato un gruppo di $k < S$ canali, e se gli S canali sono suddivisi tra le celle in gruppi unici e disgiunti, ciascuno contenente lo stesso numero di canali, il numero totale di canali radio disponibili puo' essere espresso come:

$$S = k \cdot N$$

L'insieme delle N celle che collettivamente utilizzano l'intero set di frequenze disponibili e' detto **cluster**. Se un cluster viene replicato M volte nel sistema, il numero totale di canali duplex disponibili C puo' essere usato come misura della capacita' del sistema, e risulta pari a:

$$C = M \cdot k \cdot N = M \cdot S$$

Dimensione del cluster



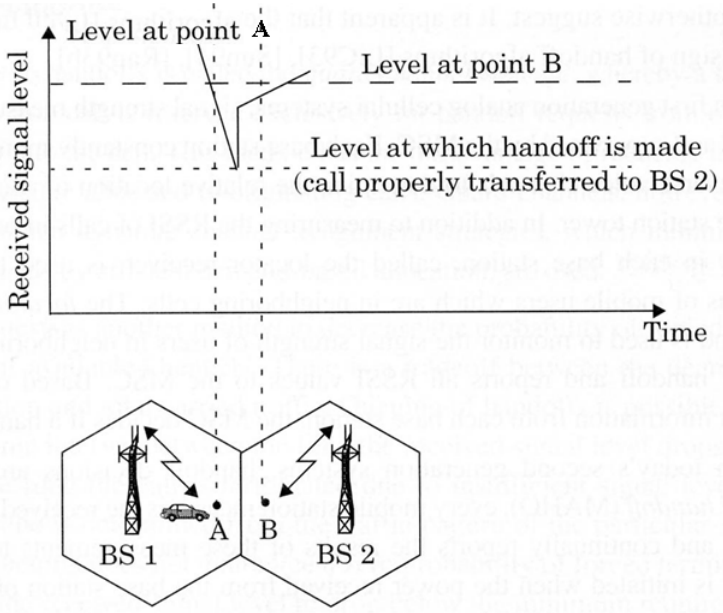
Sebbene le antenne delle stazioni base abbiano diagrammi di radiazione tipicamente omnidirezionali sul piano orizzontale - quindi in realta' la copertura delle antenne e' circolare - la forma di riferimento della cella viene presa esagonale. Cio' e' dovuto al fatto che con celle esagonali l'intero territorio puo' essere ricoperto senza buchi o sovrapposizioni. Scelta una geometria esagonale per le celle, come in figura, solo alcune dimensioni di cluster sono possibili.
Affinche' si possa realizzare una copertura cellulare, ovvero congiungere senza 'buchi' le celle adiacenti, la geometria dell'esagono e' tale che il numero di celle per cluster, N, puo' assumere solo i valori che soddisfano l'equazione:

$$N = i^2 + i \cdot j + j^2$$

dove i e j sono interi non negativi. Per trovare la cella confinante co-canale piu' vicina ad una determinata cella, occorre: 1) spostarsi di i celle in direzione perpendicolare ad uno dei lati dell'esagono, 2) ruotare di 60° in senso anti-orario, 3) spostarsi di altre j celle. Nella figura si mostra un esempio per $i = 3$ e $j = 2$, cioe' $N = 19$.

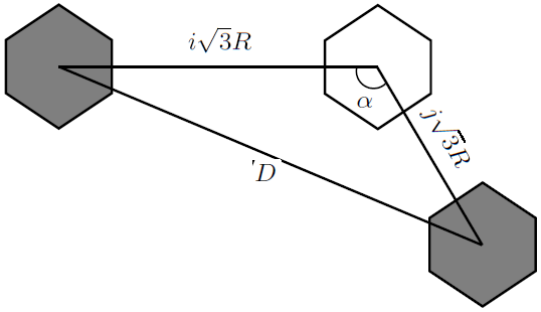
Handoff

Il passaggio tra due celle adiacenti e' trasparente per l'utente: la rete fissa di controllo provvede automaticamente ad assegnare un nuovo canale (con frequenza portante diversa) che sara' mantenuto all'interno della cella di arrivo. Questa operazione di sostituzione del canale prende il nome di **handover** o **handoff** e puo' essere gestita sostanzialmente in due modi: sulla base di misure realizzate esclusivamente dalla parte fissa della rete (l'handoff avviene nel momento in cui il livello del segnale ricevuto da una BTS adiacente a quella competente e' maggiore di quello della BTS di competenza); con la partecipazione del terminale mobile, che genera dati utili trasmessi su un canale di servizio: in questo caso, si ha un handoff assistito (come nel caso del GSM).



Distanza e frequenza di riuso co-canale - I

- Nei sistemi basati su tecniche di accesso multiplo quali FDMA e TDMA, si ha interesse a far si' che celle con gli stessi canali siano le piu' lontane possibili, per minimizzare l'interferenza
- Non si puo' quindi avere riuso dei canali tra celle adiacenti, poiche' l'interferenza co-canale sarebbe troppo grande
- Esiste una soluzione al problema dell'assegnazione dei canali, ovvero esiste una certa distanza, indicata con D, uguale per tutte le celle, che permette di avere celle omologhe (cioe' celle che usano gli stessi canali) sufficientemente lontane tra loro. Questa distanza, detta **distanza di riuso**, a parita' di raggio della cella R, dipende dal numero di celle per cluster, N
- Aumentando N, aumenta la distanza di riuso e di conseguenza aumenta il rapporto C/I tra la potenza C del segnale utile e quella I dell'interferenza. Tuttavia, e' opportuno ricordare che la densita' geografica di utenti (numero di utenti per chilometro quadrato nella cella) diminuisce



Distanza e frequenza di riuso co-canale - II

Quando la dimensione di ciascuna cella e' approssimativamente la stessa e le stazioni radio-base trasmettono la stessa potenza, il rapporto di interferenza co-canale diventa indipendente dalla potenza trasmessa e diventa funzione del raggio della cella (R) e della distanza tra i centri delle celle co-canale piu' vicine (D). Incrementando il rapporto D/R la separazione spaziale tra celle co-canale, relativa alla distanza di copertura di una cella, cresce. In questo modo l'interferenza si riduce, grazie a un migliore isolamento dell'energia a radiofrequenza tra celle co-canale. Il parametro Q, detto rapporto di riuso co-canale, e' legato alla dimensione del cluster. Per una geometria esagonale, $Q = D/R = \sqrt{3N}$.
Un valore piccolo di Q fornisce maggiore capacita' perche' la dimensione del cluster e' ridotta, mentre un valore elevato di Q migliora la qualita' della trasmissione, per i minori livelli di interferenza co-canale. Nel progetto di un sistema cellulare si scelgono valori di compromesso tra queste due condizioni.

	Cluster Size (N)	Co-channel Reuse Ratio (Q)
$i = 1,\ j = 1$	3	3
$i = 1,\ j = 2$	7	4.58
$i = 2,\ j = 2$	12	6
$i = 1,\ j = 3$	13	6.24

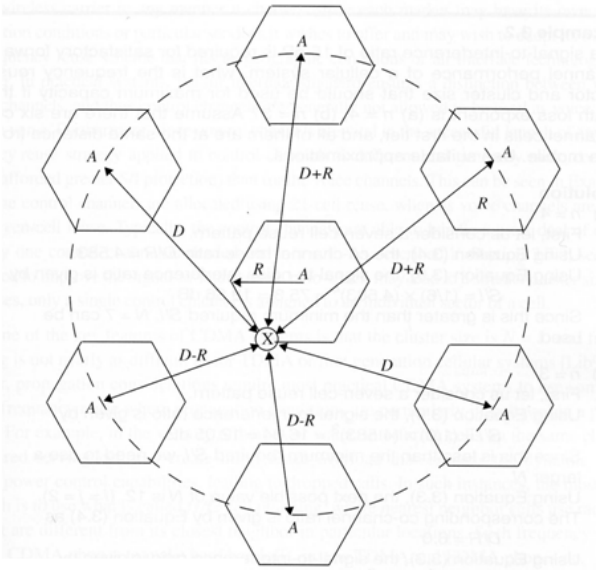
Rapporto Segnale/Interferente

Al fine di valutare il rapporto C/I, conviene mettersi nella situazione peggiore, ovvero quella in cui la MS e' situata a distanza massima dalla BTS. Si fanno poi delle ipotesi semplificative: le BTS sono poste al centro della cella di competenza, BTS e MS presentano un diagramma di radiazione omnidirezionale, soltanto le celle omologhe di prima fascia (**first tier**) sono considerate come potenzialmente interferenti, la potenza trasmessa da tutte le BTS e' la stessa, il modello di propagazione e' lo stesso per tutti i segnali.
La potenza di segnale utile alla MS si puo' esprimere come $S = \chi / R^n$, dove χ e' una costante che dipende dalle caratteristiche geometriche ed elettromagnetiche del collegamento, n e' il path loss exponent, che dipende dall'ambiente considerato, e R e' il raggio della cella. Allo stesso modo, la potenza interferente generata dalla i-esima BTS di prima fascia e': $I_i = \chi / D_i^n$, dove D_i e' la distanza tra la MS e la i-esima BTS. Supponendo $N >> 1$, si ha $D_i \approx D$, $\forall i$. Il valore i_0 indica il numero di celle omologhe nel first tier, originanti l'interferenza.

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i}$$

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} (D_i)^{-n}}$$

$$\frac{S}{I} = \frac{(D/R)^n}{i_0} = \frac{(\sqrt{3N})^n}{i_0}$$



Il rapporto C/I e' direttamente proporzionale alla dimensione del cluster N, ed aumenta se si incrementa n, al quale corrisponde una maggiore attenuazione dei segnali.

Determinazione del numero di canali per cella

- Determinazione della richiesta di traffico
- Calcolo del numero dei canali necessari attraverso le formule di Erlang
- Assegnazione dei canali alle celle considerando l'interferenza da canale adiacente
- Ipotesi di lavoro: non tutti gli utenti necessiteranno contemporaneamente della risorsa di comunicazione (trunked radio channel)

Il dimensionamento dei nodi: la richiesta di traffico

Nella teoria del dimensionamento in base al traffico, una serie di definizioni vengono introdotte per poter stimare la capacita' del sistema. L'intensita' di traffico offerta da ciascun utente e' definita come il prodotto tra il tasso di call request e il tempo di attesa. Quindi, ogni utente U genera una intensita' di traffico di A_U Erlangs, definita come

$$A_U = \lambda \cdot H$$

dove H e' la durata media di una chiamata, λ e' il numero medio di call request per ciascun utente nell'unita' di tempo. Per un sistema che contiene U utenti e un numero non specificato di canali, l'intensita' di traffico offerta totale e' pari a: $A = U \cdot A_U$.

Esempio calcolo traffico offerto:

Se il numero medio di call request e' di 5 al minuto e la durata media di una chiamata e' di 3 minuti, il traffico offerto sara' pari a 15 E (erlang). Il volume di traffico medio in una giornata di 8 ore e' di 120 E-ore (erlang- ore)

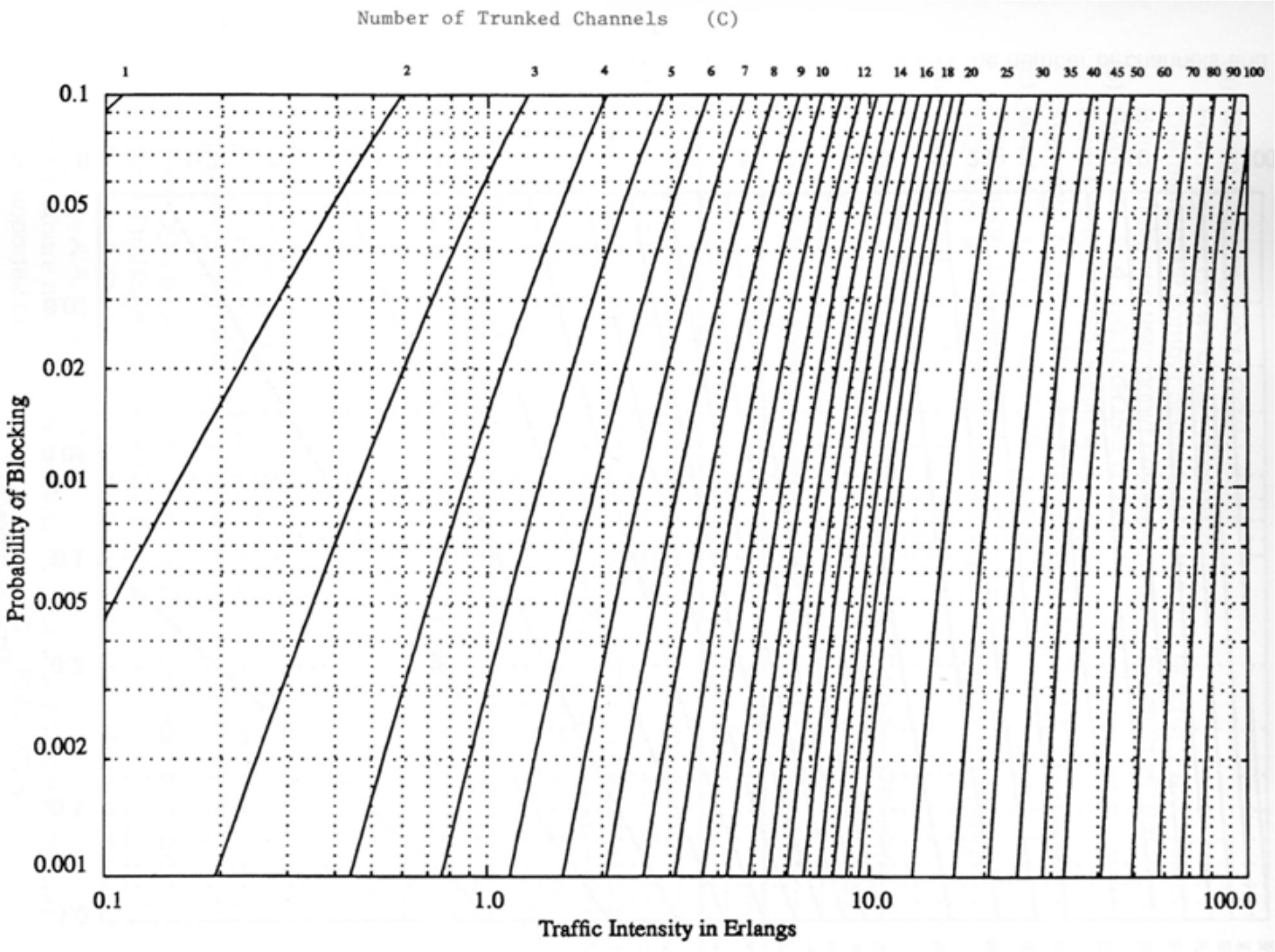
Probabilita' di blocco - I

$$Pr[blocking] = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^{C} \frac{A^k}{k!}} = GOS$$

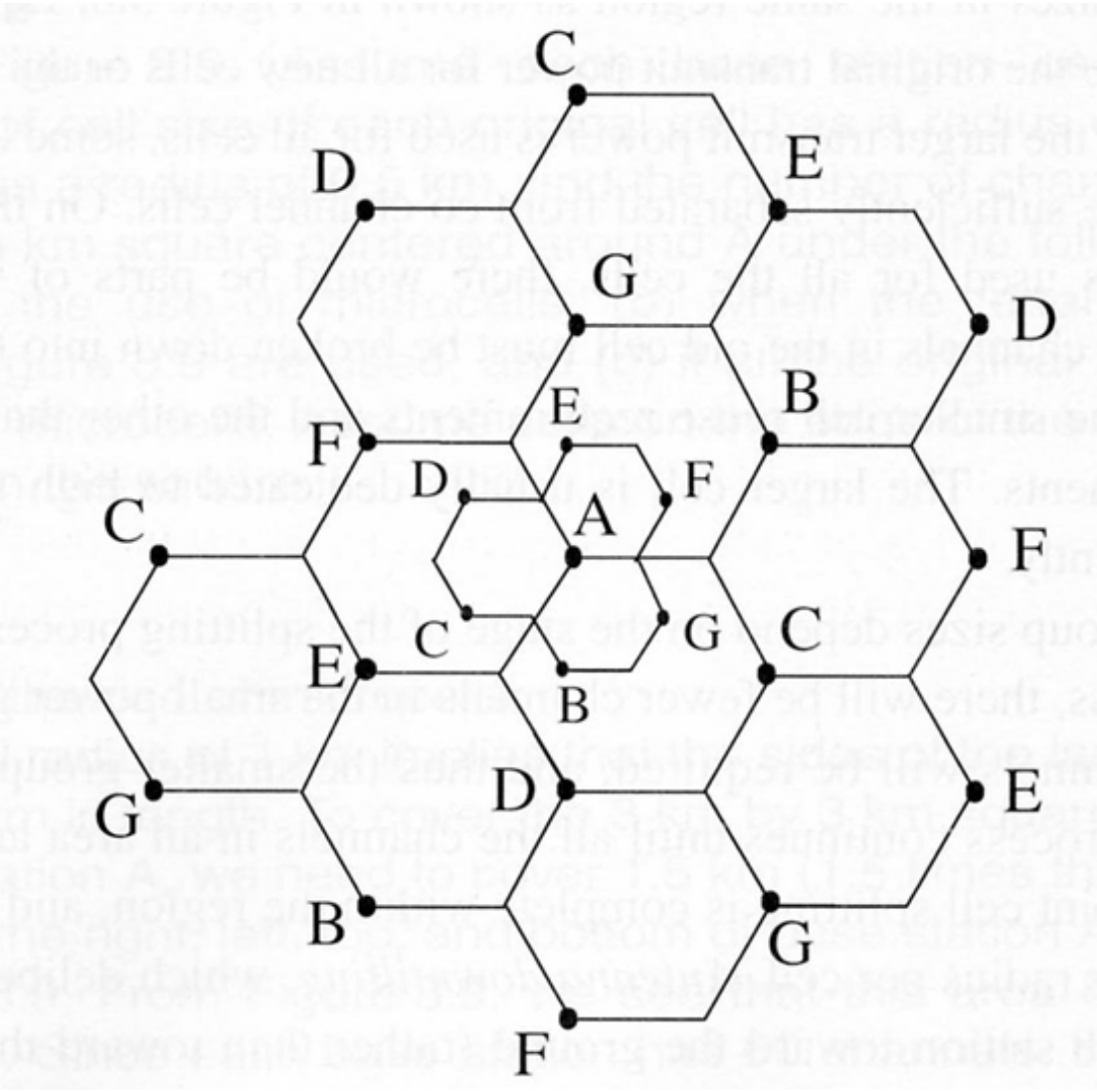
Number of Channels C	Capacity (Erlangs) for GOS = 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
2	0.153	0.105	0.065	0.046
4	0.869	0.701	0.535	0.439
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09
20	12.0	11.1	10.1	9.41
24	15.3	14.2	13.0	12.2
40	29.0	27.3	25.7	24.5
70	56.1	53.7	51.0	49.2
100	84.1	80.9	77.4	75.2

GOS = Grado di Servizio (def. in ITU E.600, misura l'adeguatezza di un insieme di risorse di comunicazione sotto specifiche condizioni)
Blocco di un sistema di TLC: un sistema di TLC (es. telefonico) non viene dimensionato in modo da poter ospitare contemporaneamente le chiamate di tutti gli utenti, ma viene dimensionato in modo che possa gestire il traffico dell'ora di punta con un certo (solitamente ampio) margine di funzionamento (in modo da poter gestire burst momentanei del traffico).

Probabilita' di blocco - II

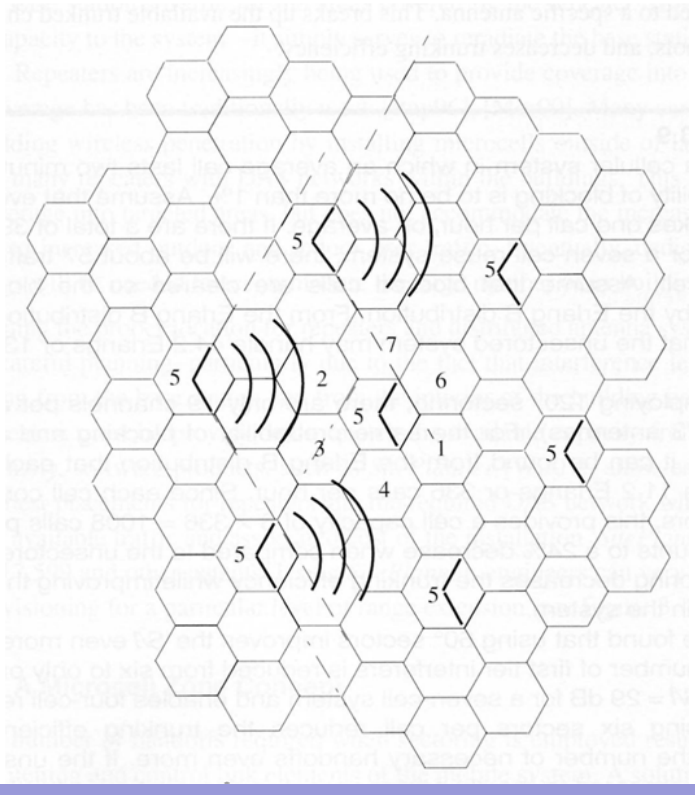


Incremento di capacita' - Splitting di cella



Settorizzazione di cella

Esistono numerose tecniche per mitigare il contributo dell'interferenza. Uno dei modi utilizzati abitualmente e' la cosiddetta settorizzazione di cella (cell sectoring), che consiste nel suddividere una cella in settori disgiunti. Si supponga di avere la BTS al centro della cella, costituita da tre antenne direttive, con apertura 120°. Ad ogni settore, coperto da una antenna, viene assegnato un terzo dei canali disponibili per la cella (non vengono assegnati tutti i canali perche', nella realta', i diagrammi di irradiazione delle tre antenne sono parzialmente sovrapposti e cio' causerebbe interferenza). Con questa soluzione l'interferenza totale, proveniente da celle omologhe, viene ridotta di un fattore compreso tra 2 e 3.



Osservazioni

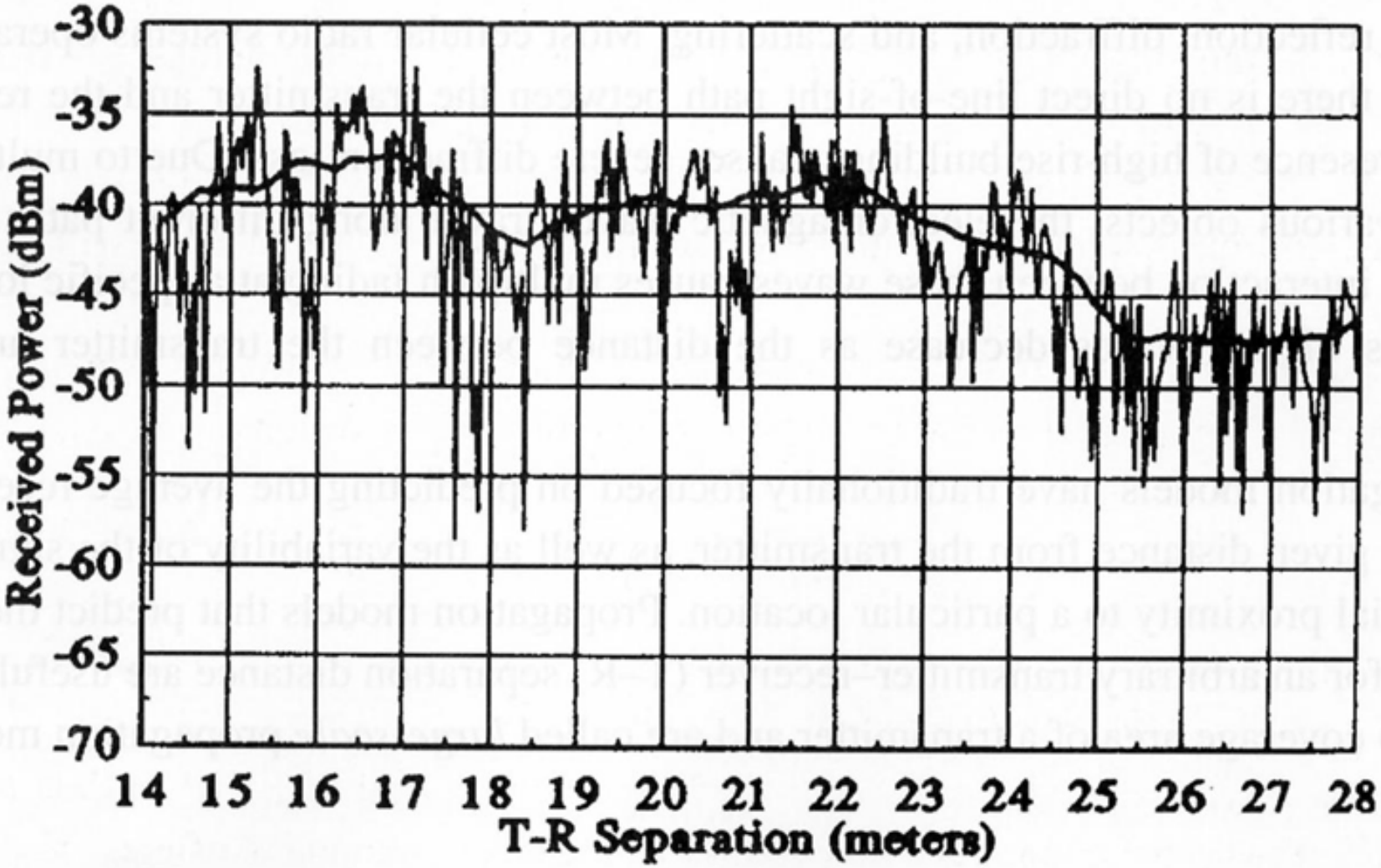
Nella pianificazione di una rete cellulare le variabili in gioco sono fattore di riuso (N) e raggio della cella (R). Per la scelta della combinazione migliore, occorre valutare i seguenti parametri:

- potenza in trasmissione P_T (critica nel caso della MS): l'obiettivo e' quello di mantenere P_T piu' bassa possibile; P_T cresce al crescere di R, mentre e' invariante al crescere di N;
- numero di handoff: l'obiettivo e' quello di mantenere il numero di handoff piu' basso possibile, per evitare un eccessivo spreco di risorse di gestione; il numero di handoff cresce al crescere di N e decresce al crescere di R;
- densita' geografica di utenti: l'obiettivo e' quello di mantenerla piu' alta possibile, per garantire un numero maggiore di utenze allocabili al servizio; essa decresce al crescere sia di R che di N;
- rapporto C/I (sia in downlink che in uplink): l'obiettivo e' quello di mantenere C/I piu' alto possibile, per offrire migliori prestazioni in termini di qualita' del servizio; C/I aumenta al crescere di N, mentre e' invariante al crescere di R.

Canale di propagazione wireless

- Per garantire la qualita' del servizio offerto da una rete cellulare, e piu' in generale da una rete wireless, assume particolare importanza lo studio delle caratteristiche del canale di propagazione, fondamentale per il progetto, il dimensionamento e l'analisi di un sistema di comunicazione radio.
- Il semplice modello propagativo in spazio libero **non** e' applicabile nel caso del canale radio wireless. Per descrivere adeguatamente in maniera statistica questo tipo di canale, esistono in letteratura due modelli largamente usati:
  - il modello **a piccola scala**, utilizzato per la predizione dell'energia istantanea ricevuta e delle sue fluttuazioni causate da piccoli movimenti della MS
  - il modello **a larga scala**, utilizzato per predire l'energia media ricevuta in un sistema wireless in funzione della distanza tra il trasmettitore ed il ricevitore (in genere utilizzato per determinare l'area di copertura di una rete cellulare)
- I due modelli si vanno a sovrapporre: osservando la potenza ricevuta in funzione del tempo, le rapide fluttuazioni sono originate dai movimenti su piccola scala della MS (fino a qualche decina di metri), mentre l'andamento del valor medio della potenza ricevuta e' da imputarsi a movimenti del MS su larga scala all'interno della cella.

Segnale ricevuto



Fading lento - formula approssimata

Nei canali NLOS, la perdita per propagazione deve essere considerata una grandezza aleatoria. Essa puo' essere espressa ricorrendo alla stessa formulazione della FSL valida per canali LOS, nella quale, pero', l'esponente del termine dipendente dalla distanza non e' piu' sempre pari a 2, ma assume un valore n variabile a seconda dello scenario di propagazione, e tale da determinare una perdita in genere superiore a quella della propagazione in spazio libero.

Environment	Path Loss Exponent, n
Free space	2
Urban area cellular radio	2.7 to 3.5
Shadowed urban cellular radio	3 to 5
In building line-of-sight	1.6 to 1.8
Obstructed in building	4 to 6
Obstructed in factories	2 to 3

Un modello meno generale ma piu' raffinato e' quello proposto da Hata.

Fading lento - formula di Hata - I

Il modello di Hata rappresenta una formulazione empirica dei dati di path-loss forniti da Okumura (modello Okumura-Hata), ed e' valido da 150 a 1500 MHz. Hata ha fornito una formula standard per stimare la perdita per propagazione in ambiente urbano, e una serie di equazioni correttive da applicare in altri scenari propagativi. La formula standard per la path loss media in ambiente urbano e' data da:

$$L_{50}(urban)(dB) = 69.55 + 26.16log(f_c) - 13.82log(h_{te}) - a(h_{re}) +$$

$$+(44.9 - 6.55log(h_{te})log(d)$$

dove f_c e' la frequenza in MHz (da 150 a 1500); h_{te} e' l'altezza effettiva dell'antenna di trasmissione (base station) in metri, variabile da 30 a 200; h_{re} e' l'altezza effettiva dell'antenna di ricezione (terminale mobile) in metri, variabile da 1 a 10; d e' la distanza di separazione tra trasmettitore e ricevitore (in km), e $a(h_{re})$ e' un fattore correttivo per l'altezza effttiva dell'antenna del ricevitore mobile, che e' funzione della dimensione dell'area di copertura.
Per una citta' di medie-piccole dimensioni, il fattore correttivo per l'antenna del ricevitore mobile e' dato da:

$$a(h_{re}) = (1.1log(f_c) - 0.7)h_{re} - (1.56log(f_c) - 0.8)dB$$

Fading lento - formula di Hata - II

Per una citta' di dimensioni maggiori:

$$a(h_{re}) = 8.29(log(1.54h_{re})^2 - 1.1dB$$

per $f_c \leq 300$ MHz, e:

$$a(h_{re}) = 3.2(log(11.75h_{re})^2 - 4.97dB$$

per $f_c \geq 300$ MHz. Per ricavare la perdita per propagazione in ambiente sub-urbano, la formula standard di Hata viene modificata in:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urban)(dB) - 2\left[log(f_c/28)\right]^2 - 5.4$$

e per la path-loss in aree rurali aperte, la formula viene modificata in:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urban)(dB) - 4.78(log(f_c))^2 + 18.33log(f_c) - 40.94$$

Le espressioni fornite hanno una certa importanza nelle applicazioni pratiche. I valori predetti dalle equazioni di Hata si avvicinano molto al modello originale di Okumura, fintanto che $d > 1$ km. Il modello di Hata e' adatto per sistemi mobili con celle di grandi dimensioni, ma non per personal communication systems (PCS) che hanno celle con un raggio prossimo a 1 km.

Fading lento - estensione COST-231

La European Cooperative for Scientific and Technical research (Euro-COST) ha formato un gruppo di lavoro, il comitato COST-231, per sviluppare una versione estesa del modello di Hata. Il COST-231 ha proposto la formula seguente per estendere il modello di Hata fino a 2 GHz:

$$L_{50}(urban)(dB) = 46.3 + 33.9log(f_c) - 13.82log(h_{te}) - a(h_{re}) +$$

$$+(44.9 - 6.55log(h_{te}))log(d) + C_M$$

dove $a(h_{re})$ e' definito come nelle equazioni mostrate in precedenza, e: $C_M = 0$ dB per citta' di medie dimensioni e aree sub-urbane, $C_M = 3$ dB per centri metropolitani. L'estensione COST-231 del modello di Hata vale per i seguenti range di valori dei parametri:

- f: 1500-2000 MHz
- h_{te}: 30-200 m
- h_{re}: 1-10 m
- d: 1-20 km

Fading rapido - I

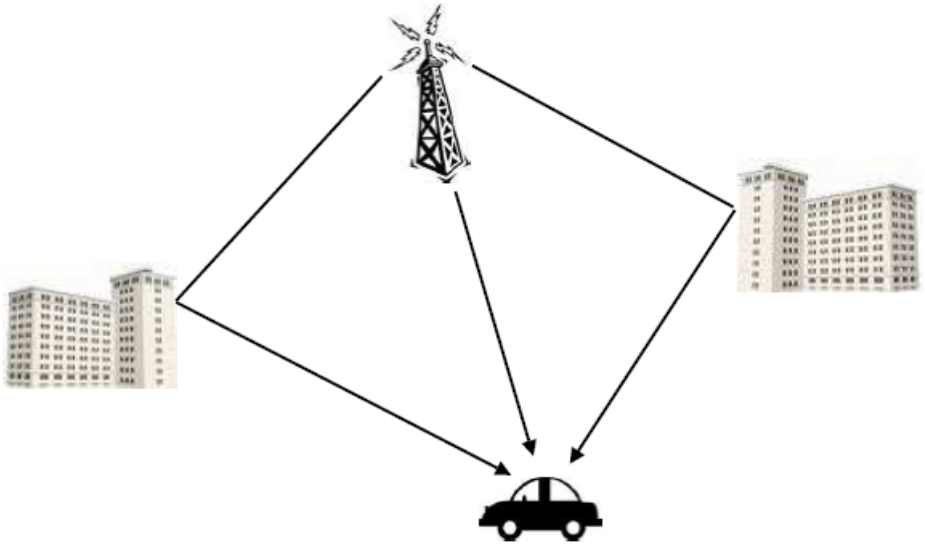
I modelli di path loss descritti, come altri presenti in letteratura, sono modelli statistici che forniscono una stima del valore mediano della perdita di propagazione. Mentre l'effetto della componente su larga scala del fading si riconduce alla sola variazione del livello di potenza dei segnali ricevuti rispetto a quello medio, piu' complesso risulta quello della componente su piccola scala (multipath fading), per cui per analizzarne le conseguenze sulla trasmissione dei segnali e' necessaria un'analisi del fenomeno che risulta notevolmente piu' complessa di quella del caso precedente.
Il fading rapido (su piccola scala) descrive le rapide fluttuazioni dell'ampiezza e della fase, o dei ritardi multipath, di un segnale radio, su brevi periodi di tempo o su brevi distanze, tali che gli effetti di fading su larga scala possano essere trascurati. **Il fading (rapido) e' causato dalla interferenza tra due o piu' repliche del segnale trasmesso che arrivano al ricevitore in tempi leggermenti diversi**. La risultante della combinazione delle componenti multipath del segnale al ricevitore puo' presentare grosse variazioni di ampiezza e di fase, a seconda della distribuzione della intensita' e dei tempi relativi di propagazione delle componenti multipath, e della banda del segnale trasmesso.
Il multipath sul canale radio crea effetti di fading su piccola scala, i piu' importanti dei quali sono:

- rapide variazioni del livello del segnale su brevi distanze o brevi periodi
- modulazione random della frequenza, dovuta a diversi valori di Doppler shift sulle diverse componenti multipath del segnale
- dispersione temporale (echi) dovute ai ritardi della propagazione multipath

Fading rapido - II

Propagazione multipath

La presenza di oggetti riflettenti e di scatterers nel canale crea un ambiente propagativo costantemente mutevole, che dissipa l'energia del segnale in ampiezza, fase e tempo. Questi effetti generano versioni multiple del segnale trasmesso che arrivano alla antenna ricevente, separate l'una rispetto all'altra nel tempo e nella orientazione spaziale. I valori random di ampiezza e fase delle diverse componenti multipath causano delle fluttuazioni nel livello di segnale, inducendo un fading su piccola scala, una distorsione del segnale, o entrambi i fenomeni. La propagazione multipath spesso allunga il tempo richiesto dal segnale di banda base per raggiungere il ricevitore, determinando cosi' una distorsione causata da ISI.



Fading rapido - III

Velocita' del ricevitore mobile
Il moto relativo tra la stazione radio base e il ricevitore mobile determina una modulazione random della frequenza a causa di diversi shift Doppler su ciascuna delle componenti multipath. Gli shift Doppler saranno positivi o negativi a seconda che il ricevitore si stia muovendo verso la stazione radiobase, o si stia allontanando da essa.
Velocita' degli oggetti circostanti
Se gli oggetti presenti nell'ambiente propagativo sono in movimento, essi inducono uno shift Doppler variabile nel tempo sulle componenti multipath. Se gli oggetti circostanti si muovono a velocita' maggiori di quella del terminale ricevente, questo effetto domina nel fading su piccola scala. Altrimenti, il movimento di tali oggetti puo' essere trascurato, e si considera solo la velocita' con cui si muove il terminale ricevente. Il **tempo di coerenza** definisce la *staticita'* del canale, ed e' direttamente influenzato dallo shift Doppler.

Fading rapido - IV

Banda del segnale trasmesso
Se la banda del segnale trasmesso e' maggiore della banda del canale multipath, il segnale ricevuto sara' distorto, sebbene il suo livello non sia troppo attenuato (il fading su piccola scala non e' significativo).
La banda del canale puo' essere quantificata attraverso la **banda di coerenza**, relativa alla specifica struttura multipath del canale. La banda di coerenza e' una misura della massima separazione in frequenza per la quale i segnali sono ancora fortemente correlati in ampiezza. Se il segnale trasmesso ha banda inferiore a quella di coerenza, l'ampiezza del segnale ricevuto veriera' rapidamente, ma il segnale non sara' distorto nel tempo.

Fading rapido - V: Banda di coerenza

- Il delay spread e' un fenomeno naturale causato dalla propagazione per riflessione e scattering nel canale radio
- La banda di coerenza e' una quantita' definita a partire dalla media quadratica (rms) del delay spread. La banda di coerenza e' una misura statistica del range di frequenze sulle quali il canale puo' essere considerato piatto (lascia passare tutte le componenti spettrali all'incirca con la stessa attenuazione, e fase lineare)
- In altre parole, la banda di coerenza rappresenta l'intervallo di frequenze sul quale due componenti armoniche hanno ampiezza correlata. Due sinusoidi separate in frequenza di una quantita' maggiore della banda di coerenza sono affette dal canale in maniera sostanzialmente diversa
- Definendo la banda di coerenza B_C come la banda sulla quale le funzione di correlazione in frequenza supera il valore 0.9, allora: $B_C \approx 1/(50\sigma_\tau)$
- Rilassando il vincolo ad una correlazione in frequenza superiore a 0.5 abbiamo: $B_C \approx 1/(5\sigma_\tau)$
- La relazione esatta tra banda di coerenza e media quadratica del delay spread e' funzione della specifica risposta impulsiva del canale e del segnale applicato

Fading rapido - VI: Doppler shift

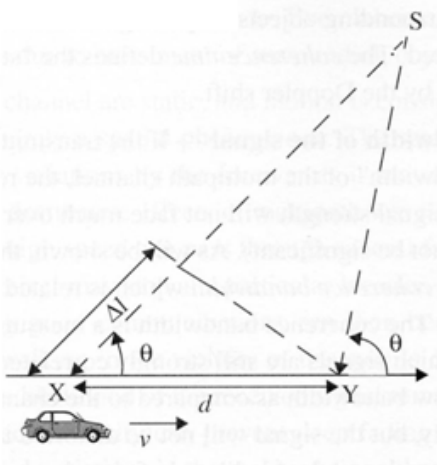
Consideriamo un terminale ricevente mobile che si muove a velocita' costante ν lungo un percorso di lunghezza d tra i punti X e Y, mentre riceve dei segnali da una sorgente remota S, come mostrato in figura. La differenza tra le lunghezze dei cammini percorsi dall'onda dalla sorgente S al mobile nei punti X e Y e' $\Delta l = dcos\theta = \nu \Delta t cos\theta$, dove Δt e' il tempo che il ricevitore mobile impiega ad andare da X a Y, e θ si assume sia lo stesso nei due punti, essendo la sorgente S molto lontana. La variazione di fase nel segnale ricevuto, dovuta alla differenza dei due cammini, e' data da:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi\nu\Delta t}{\lambda} cos\theta$$

quindi l'apparente variazione in frequenza, o Doppler shift, risulta pari a f_D:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\nu}{\lambda} \cdot cos\theta$$

e assume valore massimo $f_{Dm} = \nu/\lambda$



Fading rapido - VII: Doppler spread

- Il Doppler spread B_D e' una misura dell'allargamento spettrale causato dalla rapidita' di variazione nel tempo del canale radiomobile, ed e' definito come il range di frequenza sul quale lo spettro Doppler ricevuto e' non nullo
- Quando una sinusoide pura (tono) a frequenza f_C e' trasmessa, lo spettro del segnale ricevuto, chiamato spettro Doppler, avra' componenti nel range da $f_C - f_D$ a $f_C + f_D$, dove f_D e' il Doppler shift
- L'ammontare dell'allargamento spettrale dipende da f_D che e' funzione della velocita' relativa del mobile, e dell'angolo θ tra la direzione di moto del mobile e la direzione di arrivo dei segnali
- Se la banda del segnale in BB e' molto maggiore di B_D, gli effetti del Doppler spread sono trascurabili al ricevitore, e si ha un canale *slow fading*.

Fading rapido - VIII: Tempo di coerenza

Il tempo di coerenza T_C e' il duale, nel dominio del tempo, del Doppler spread, ed e' usato per caratterizzare la natura tempo-variante della dispersione in frequenza del canale, nel dominio del tempo. Il Doppler spread e il tempo di coerenza sono inversamente proporzionali l'uno all'altro:

$$T_C \approx 1/f_{Dm}$$

dove f_{Dm} e' il doppler shift massimo, pari a ν/λ.

Fading rapido - IX: Tempo di coerenza

- Tempo di coerenza: misura statistica del tempo per il quale la risposta impulsiva del canale e' sostanzialmente invariata; quantifica la somiglianza tra le risposte del canale in istanti diversi
- Ovvero, e' la durata temporale per la quale due segnali ricevuti hanno ampiezze fortemente correlate
- Se il reciproco della banda del segnale BB e' maggiore di T_C del canale, il canale cambiera' durante la trasmissione del segnale, provocandone la distorsione al ricevitore
- Definendo il tempo di coerenza come l'intervallo di tempo sul quale le funzione di correlazione nel tempo supera il valore 0.5, allora: $T_C \approx 9/(16\pi f_{Dm})$
- Nella pratica si stima: $T_C = \sqrt{9/(16\pi f_{Dm}^2)} = \frac{0.423}{f_{Dm}}$

Fading rapido - X: Tempo di coerenza

- La definizione del tempo di coerenza implica che due segnali che arrivino con una separazione nel tempo maggiore di T_C sono affetti in modo diverso dal canale
- Ad esempio, per un veicolo che viaggia a 60 mph usando una portante a 900 MHz, un valore conservativo di T_C risulta pari a 2.22 ms
- Se si usa un sistema di trasmissione digitale, fino a che il symbol rate e' maggiore di $1/T_C = 454$ bps (cioe' $T_S < T_C$), il canale non causera' distorsione dovuta al moto (anche se essa puo' esserci per effetto del time delay spread multipath)
- Usando la seconda formula della slide precedente, $T_C = 6.77$ ms e il symbol rate deve essere maggiore di 150 bit/s per evitare distorsione dovuta alla dispersione in frequenza

Sinottico

Small-Scale Fading
(Based on multipath time delay spread)

Flat Fading
1. BW of signal < BW of channel
2. Delay spread < Symbol period

Frequency Selective Fading
1. BW of signal > BW of channel
2. Delay spread > Symbol period

Small-Scale Fading
(Based on Doppler spread)

Fast Fading
1. High Doppler spread
2. Coherence time < Symbol period
3. Channel variations faster than base-band signal variations

Slow Fading
1. Low Doppler spread
2. Coherence time > Symbol period
3. Channel variations slower than baseband signal variations