



Concetti di Copertura Cellulare



Copertura cellulare

- ☞ **Una cella è una porzione di territorio coperto da un'unica stazione radio**
 - BTS nel GSM
- ☞ **Ad ogni cella è assegnata almeno una frequenza portante**
 - Una portante multipla fino a 8 connessioni full rate e 16 half rate nel GSM
- ☞ **La copertura cellulare consente un aumento della capacità del sistema mediante il riuso delle frequenze**
 - E' una forma di Space Division Multiple Access (SDMA)
 - Una frequenza può essere riutilizzata in un'altra cella a distanza tale da rendere tollerabile l'interferenza



La cella radio

- Il concetto di cella non fa riferimento a dimensioni geografiche precise, dato che l'area di copertura di un PA dipende dalla potenza massima erogata in trasmissione, dalle caratteristiche del canale radio e dalla sensibilità dei ricevitori, fissati i vincoli di qualità trasmissiva
- Si usa comunque parlare di
 - ▶ pico-celle per celle di pochi m di diametro
 - ▶ micro-celle per celle di dimensioni dell'ordine di poche centinaia di m di diametro
 - ▶ macro-celle per celle con diametri dell'ordine del km o decina di km



Risorse nell'accesso radio

- Una rete cellulare nell'accesso radio è caratterizzata da
 - ▶ la porzione di spettro assegnata al servizio, B
 - ▶ l'area di copertura A , cioè la porzione di spazio (superficie) nella quale è disponibile l'accesso ai servizi offerti dalla rete
- I servizi richiedono tipicamente comunicazioni bidirezionali, non necessariamente simmetriche
 - ▶ *Uplink* (reverse channel): verso dal TM all'infrastruttura fissa (PA)
 - ▶ *Downlink* (forward channel): verso dall'infrastruttura (PA) ai TM
- La porzione di spettro disponibile per l'accesso radio è condivisa dai terminali mediante tecniche di accesso multiplo
 - ▶ Assegnazione statica
 - ▶ Assegnazione dinamica



Pianificazione

- L'assegnazione delle risorse radio può essere
 - ▶ Statica (pianificazione secondo la strategia Fixed Channel Allocation, FCA)
 - ▶ Dinamica (strategie di Dynamic Channel Allocation, DCA)
- La FCA pianifica l'assegnazione delle risorse in base a una caratterizzazione di **caso peggiore** del canale radiomobile e dell'interferenza e in base a stime a priori del traffico
- La DCA può adattarsi alla variabilità temporale del traffico e dell'interferenza
 - ▶ Può portare ad assegnazioni sub-ottime, nel caso di decisioni autonome dei PA (ottimo=maximum packing del ri-uso delle risorse radio)



QoS e costi

- Scopo della pianificazione dell'accesso radio di una rete cellulare, è sostenere il traffico offerto nell'area di servizio con fissati requisiti di qualità di servizio
 - ▶ Probabilità di copertura entro prefissati requisiti di BER o SNR
 - ▶ Probabilità di blocco o caduta di chiamate, probabilità di successo della consegna dei pacchetti
 - ▶ Ritardo (di accesso, di trasferimento delle informazioni)
 - ▶ Portata media, flessibilità di variazione della capacità resa disponibile
- La soluzione va cercata con l'obiettivo di minimizzare una funzione di "costo" della rete stessa
 - ▶ costi proporzionali al traffico da sostenere (per es. numero di rice-trasmittitori con cui equipaggiare ogni sito di antenna)
 - ▶ costi non direttamente proporzionali al traffico (per es. il costo dell'installazione di un sito)



Efficienza e ri-uso spaziale

$$\eta_c = (\text{num. tot. canali disponibili in } A) / (A * B) \text{ [canali/km}^2 \cdot \text{Hz]}$$

- La chiave per ottenere un'elevata efficienza con un insieme limitato di risorse radio al crescere dell'area di copertura, sta nel concetto di

ri-uso spaziale delle risorse radio



Ri-uso delle risorse radio

- **Principio del ri-uso.** Le stesse risorse radio sono usate in **celle *sufficientemente* distanti**
- *Sufficientemente* = l'*interferenza* reciproca è *tollerabile*
- *Interferenza*: segnale sovrapposto a quello desiderato nel punto di ricezione e da esso non separabile (completamente)
 - ▶ Se due segnali $x(t)$ e $y(t)$ si sovrappongono in un mezzo lineare, il ricevitore rivela $r(t)=x(t)+y(t)$; se $x(t)$ e $y(t)$ sono *ortogonali* in qualche dominio (tempo, frequenza, codice,...) essi sono separabili esattamente, proiettando il segnale ricevuto sui versori dello spazio nel quale i segnali sovrapposti sono ortogonali
- *Tollerabile*: il disturbo additivo prodotto dall'*interferenza* permette il rispetto dei limiti di SNR (o BER) fissati come requisito



Assegnamento dei canali alle celle

- **La tecnica di accesso multiplo nei sistemi cellulari non serve solo a dividere i canali fisici per uplink e downlink nella cella, ma anche per dividere le risorse tra le celle**
- **Se si pensa alle migliaia di celle che coprono il territorio sembra apparentemente sorprendente che si possa dividere la risorsa radio in tante parti**



Riuso di frequenza

- In realtà neache assegnando un solo canale per cella sarebbe possibile assegnarne uno a tutti

Soluzione:

usare più volte gli stessi canali in celle diverse

- il riuso degli stessi canali genera *interferenza co-canale*
- il riuso è possibile in celle sufficientemente distanti da far sì che l'interferenza sia tollerabile (buona qualità del collegamento)
- l'interferenza è la caratteristica fondamentale dei sistemi cellulari



Cellular system architecture

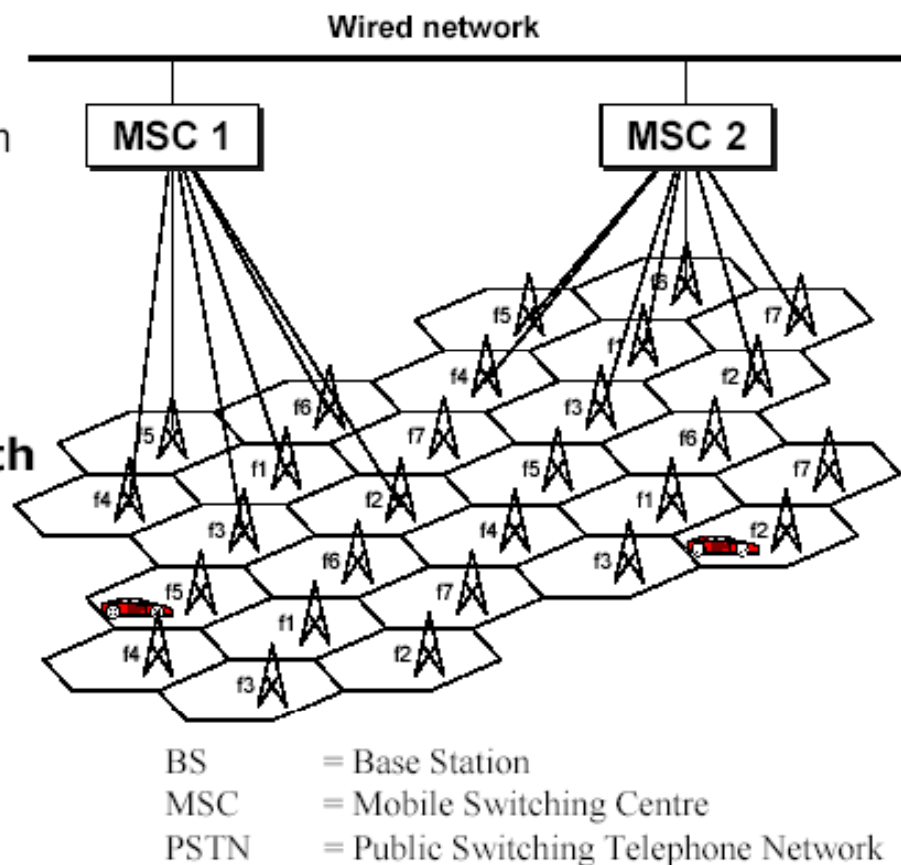
→ 1 BS per cell

- ⇒ Cell: Portion of territory covered by one radio station
- ⇒ One or more carriers (frequencies; channels) per cell

→ Mobile users full-duplex connected with BS

→ 1 MSC controls many BSs

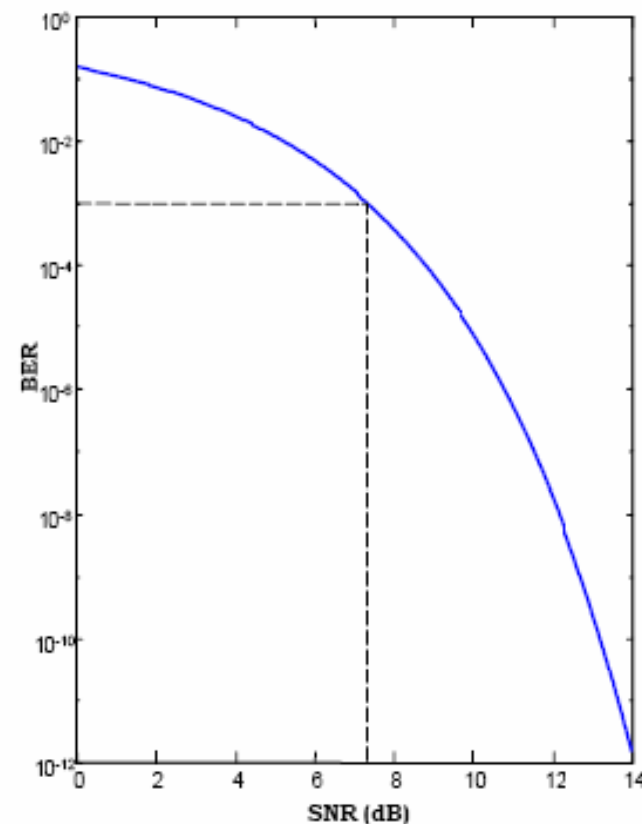
→ MSC connected to PSTN





Qualità

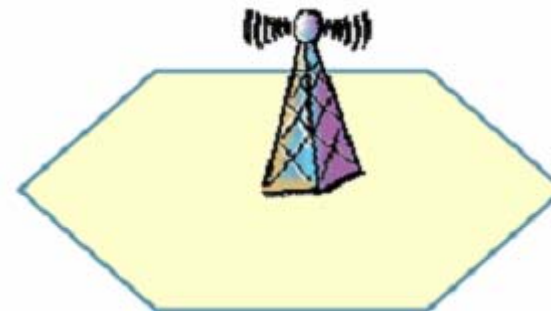
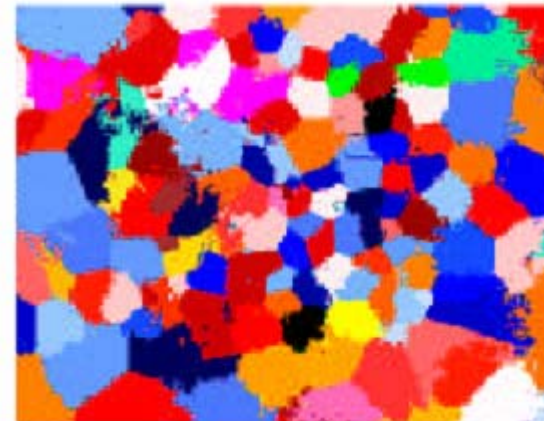
- Nei normali sistemi di comunicazione la qualità (in termini di BER – Bit Error rate) di collegamento dipende dal rapporto segnale-rumore (*SNR* – Signal-to-Noise Ratio)
- Nei sistemi radiomobili si considera il rapporto tra potenza del segnale e potenza dell'interferenza *SIR*





Forma delle celle

- Tradizionalmente per descrivere in modo semplificato la struttura delle celle si usano degli esagoni regolari
- Ovviamente a causa della posizione delle stazioni base e della propagazione irregolare del segnale a causa di ostacoli, la forma reale delle celle è spesso molto diversa
- L'uso della forma regola come modello di cella è comunque un buon modo per comprendere i principi alla base del riuso di frequenza e del dimensionamento del sistema

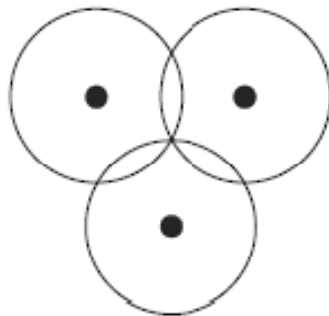




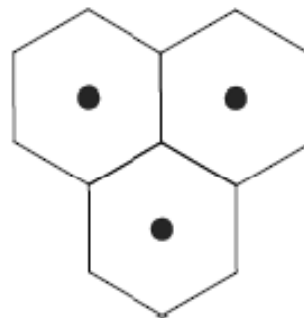
Forme e dimensioni della cella

Forma e dimensione della cella sono determinate da:

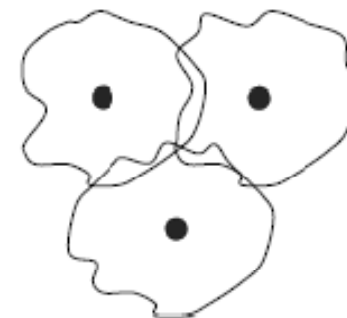
- ❑ Potenza delle antenne
- ❑ Guadagno delle antenne
- ❑ Morfologia del territorio (in aree urbane dalla forma degli edifici)
- ❑ Condizioni di propagazione



Celle ideali



**Modello esagonale
(nessuna sovrapposizione)**

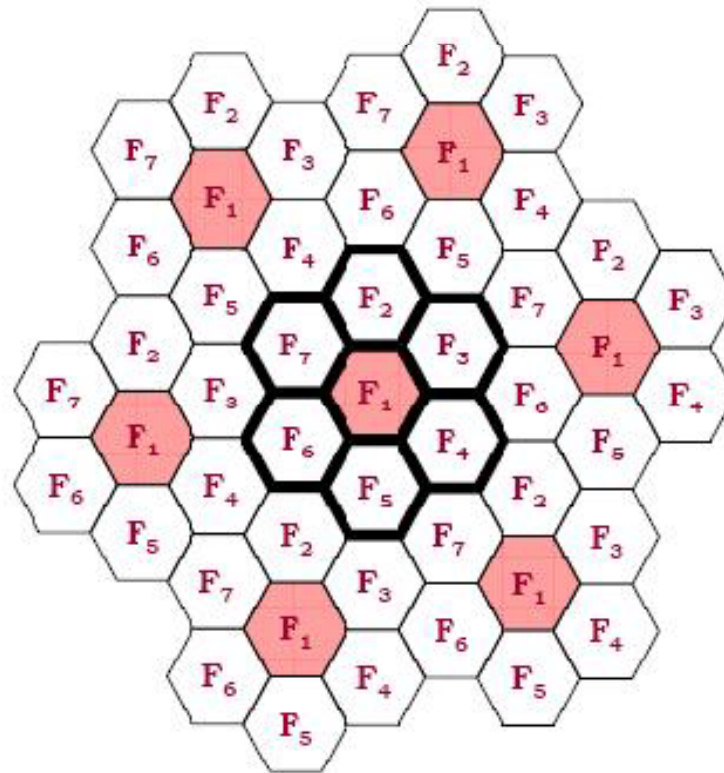


Celle reali



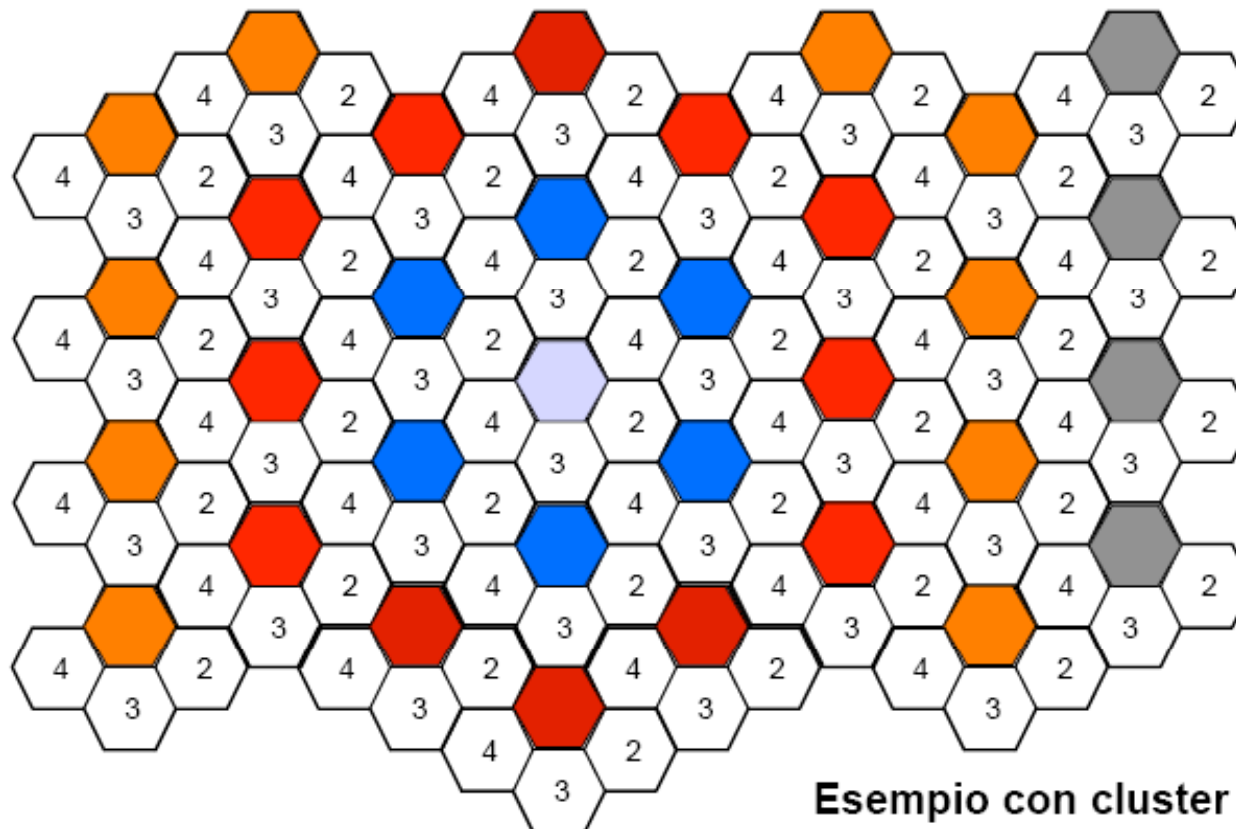
Cluster

- L'insieme delle portanti disponibili viene diviso in **G** gruppi
- Viene creata una struttura regolare di celle formata da **G** elementi detta *cluster*
- ad ogni cella del cluster viene assegnato un gruppo
- per massimizzare la distanza tra celle che usano lo stesso gruppo la struttura a cluster viene ripetuta sul territorio in modo regolare





Chi interferisce?



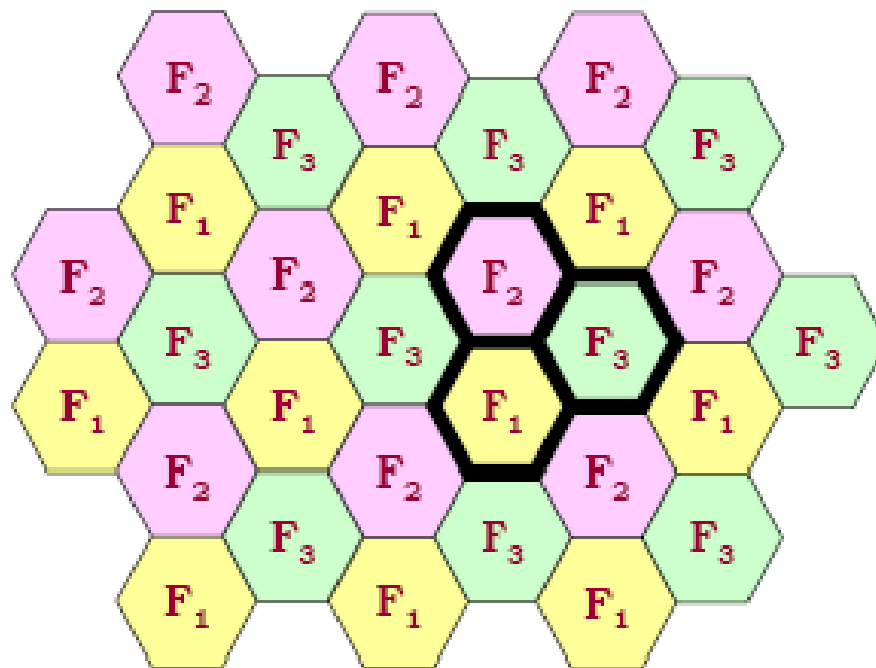


Riuso delle frequenze

- ❑ Si divide lo spettro a disposizione, S , in N canali di quella larghezza di banda (per il GSM un canale è pari a 200 kHz) e si definiscono le frequenze associate (portanti)
- ❑ Si partizionano gli N canali in G gruppi di $k=N/G$ canali ognuno (k canali/cella)
- ❑ Si definisce cluster l'insieme delle G celle adiacenti che usano tutti gli N canali
- ❑ Si divide il territori in cluster di celle



Cluster con 3 celle



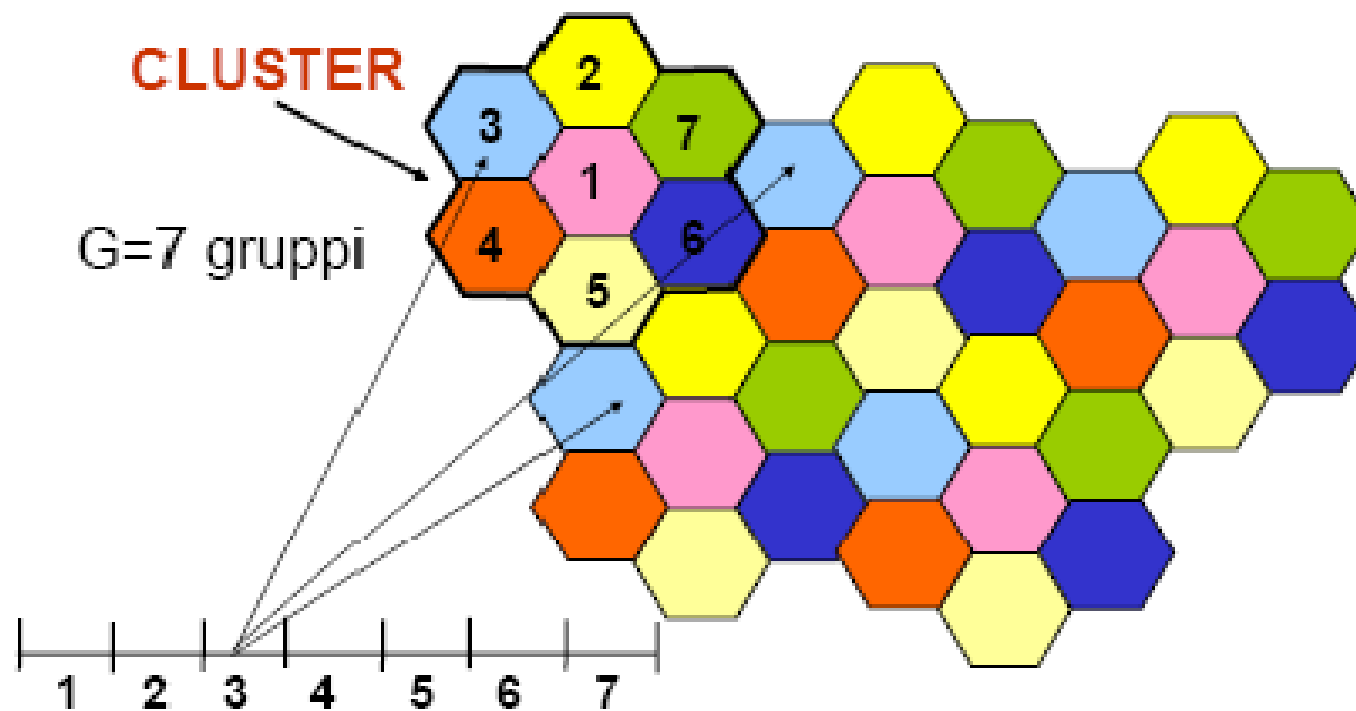
$K = 3$

L'insieme dei canali nel gruppo azzurro, giallo e viola sono disgiunti

Celle dello stesso colore sono dette co-canale



Cluster con 7 celle

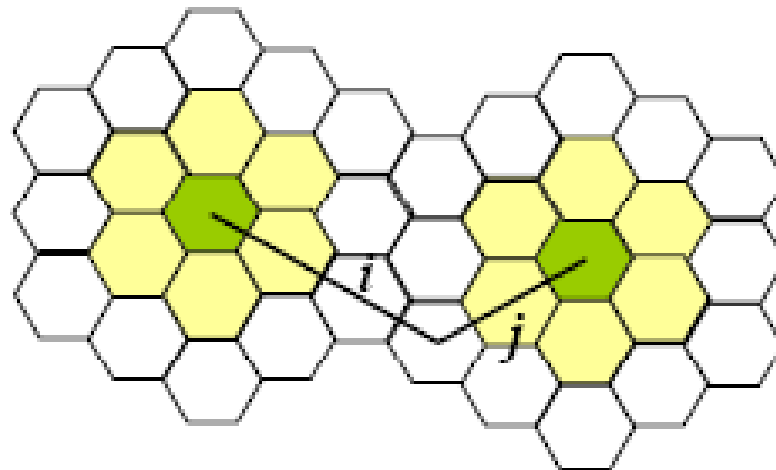




Dimensione del cluster

La geometria degli esagoni è tale che il numero di celle per cluster ha valori che soddisfano l'equazione di G

- No. celle/cluster: $G = i^2 + j^2 + ij$



i e j interi

- Possibili valori di G. 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, ...

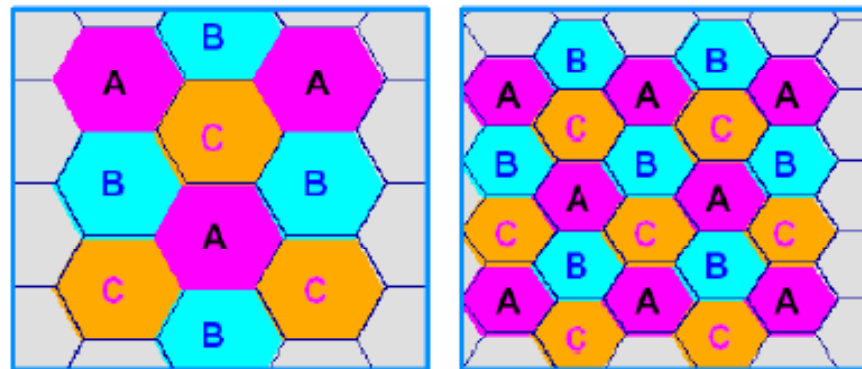


Capacità della rete cellulare

- M : numero di volte che devo ripetere il cluster per coprire l'intera area

$$\text{Capacità} = M \cdot G \cdot k \cdot \frac{S}{N} = M \cdot S$$

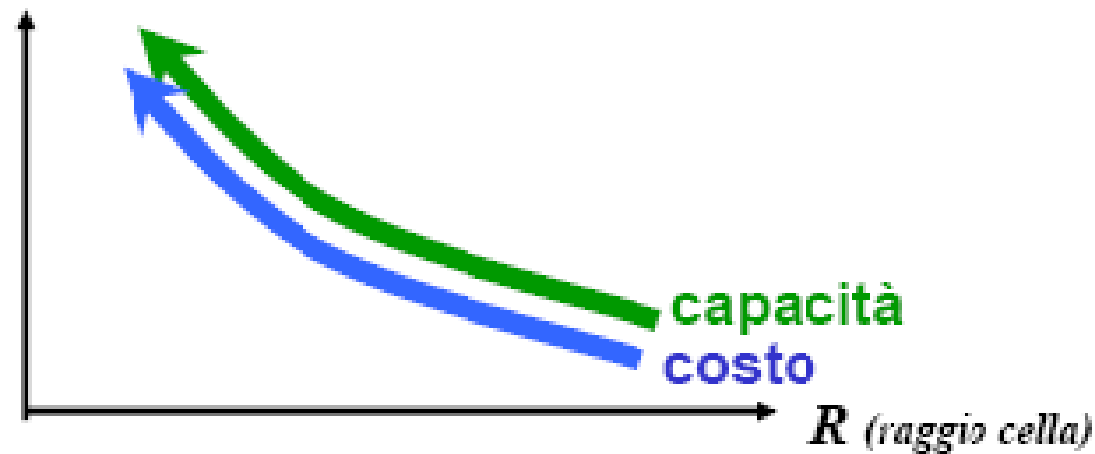
A pari area geografica da coprire e pari G :



Al crescere di M (celle più piccole), aumenta la capacità del sistema



Dimensione della cella



A pari G :

- Minore R , maggiore M , maggiore capacità
- Minore R , maggiore numero di antenne per avere la stessa copertura



Capacità di un sistema cellulare

- La capacità di un sistema cellulare può essere aumentata:
 - ▶ allargando la **banda frequenziale** a disposizione dell'accesso radio;
 - Maggiore occupazione spettrale
 - ▶ aumentando l'**efficienza spettrale** nella banda disponibile, per es. con algoritmi di link adaptation, nuove modulazioni (space-time coding)
 - Maggiore complessità della segnalazione e di realizzazione degli apparati
 - ▶ aumentando la **densità di riuso**, mediante riduzione del diametro delle celle e quindi della potenza in trasmissione;
 - Maggiore costo infrastrutturale
 - ▶ riducendo i **requisiti** (livello di ricezione, SIR, BER)
 - Si sposta la complessità verso altre parti del sistema: per es. tecnologia del ricevitore, codificatori di sorgente
 - ▶ aumentando la **diversità** (per es. in frequenza - OFDM; nello spazio - multiple antenna array)



Dimensioni della cella (1/2)

- Le dimensioni di una cella dipendono da due fattori
 - ▶ Portata
 - ▶ Interferenza
- La **portata** è la distanza raggiungibile dal campo e.m. emesso da un PA entro la quale la qualità del segnale ricevuto da un TM mantiene il livello minimo richiesto dalle specifiche (per es. un valore minimo di livello di ricezione o di SIR)
- L'**interferenza** è la quota parte di segnale indesiderato ma non separabile da quello voluto al ricevitore
 - ▶ E' una conseguenza del fatto che lo spettro radio è condiviso da molti trasmettitori (TM e PA); la collisione è una forma "estrema" di interferenza
 - ▶ E' spesso dominante nel determinare le prestazioni dell'accesso radio



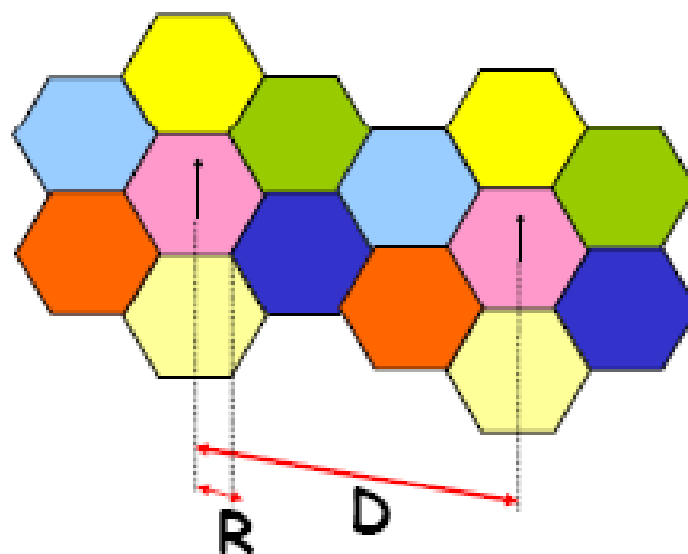
Dimensioni della cella (2/2)

- La portata di una cella isolata dipende da
 - ▶ la potenza di picco erogata dal trasmettitore
 - ▶ le caratteristiche di propagazione del canale radio
 - ▶ Altri parametri dipendenti dall'accesso multiplo (per esempio intervalli temporali di guardia tra "burst" radio successivi emessi da diversi TM verso lo stesso PA)
- L'interferenza in un sistema cellulare dipende da
 - ▶ I livelli di potenza in trasmissione delle comunicazioni interferenti
 - ▶ Le caratteristiche del canale radio tra trasmettitore e ricevitore disturbato;
 - ▶ Lo schema di accesso multiplo e il ri-uso delle risorse radio della rete cellulare, funzione dell'assegnazione (statica o dinamica) e del traffico
 - Interferenza intra-cella e extra-cella



I parametri D e R

- Per celle con stessa dimensione e stazioni base con la stessa potenza, l'interferenza co-canale diventa funzione solo di R e D





Fattore di riuso Q

- SIR (I=interferenza co-canale) valutato con C/I
- Maggiore è la distanza D tra i trasmettitori, minore è l'interferenza
- Maggiore è il raggio R di una cella, maggiore la potenza usata e quindi l'interferenza

E' fondamentale $Q = D/R$

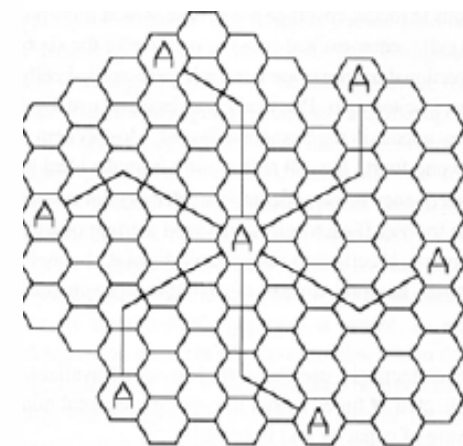


Riutilizzo delle frequenze

- Considerando che celle co-canale si trovano in linea retta e poi ad angolo di **120°** vale la relazione:

$$Q = D / R = \sqrt{3G}$$

- Più grande è G , maggiore è Q , maggiore C/I, migliore la qualità del servizio fornito all'utente



$i=3, j=2$

Per trovare la cella co-canale più vicina si deve: 1) muovere i celle lungo una catena dell'esagono; 2) girare di 120 gradi muovendosi di j celle



Proof

→ Distance between ... cell centers:

$$\Rightarrow (u_1, v_1) \leftrightarrow (u_2, v_2)$$

$$D = \sqrt{[(u_2 - u_1) \cos 30^\circ]^2 + [(v_2 - v_1) + (u_2 - u_1) \sin 30^\circ]^2}$$

⇒ Simplifies to:

$$D = \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 + (u_2 - u_1)(v_2 - v_1)}$$

⇒ Distance of cell (i,j) from (0,0):

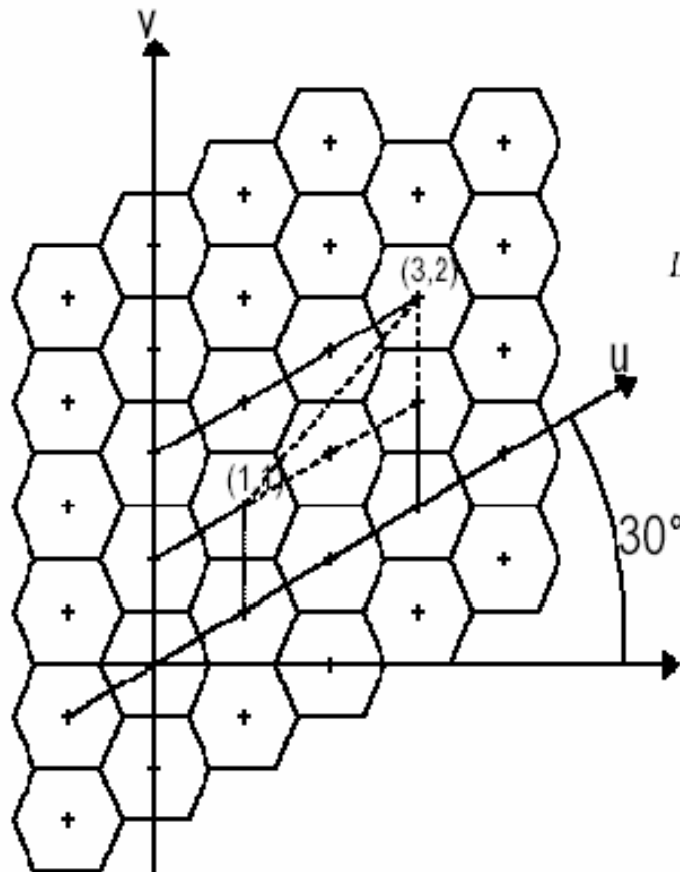
$$D = \sqrt{i^2 + j^2 + ij} \sqrt{3} R$$

$$D_R = \sqrt{i^2 + j^2 + ij}$$

⇒ Cluster: easy to see that

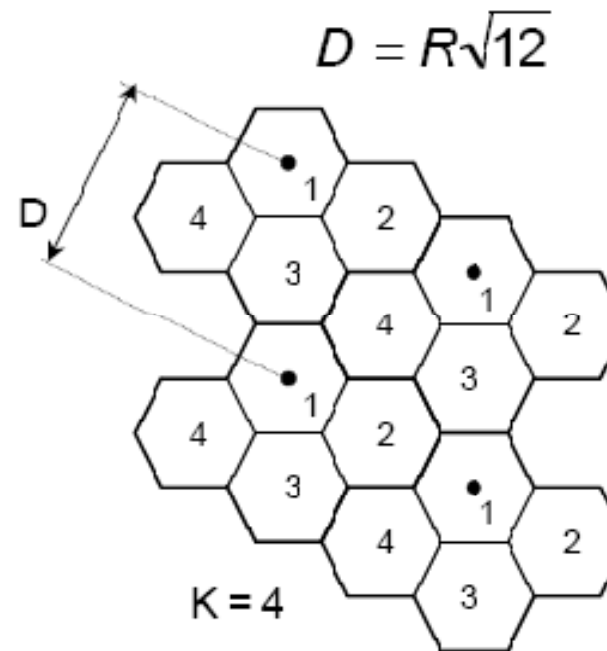
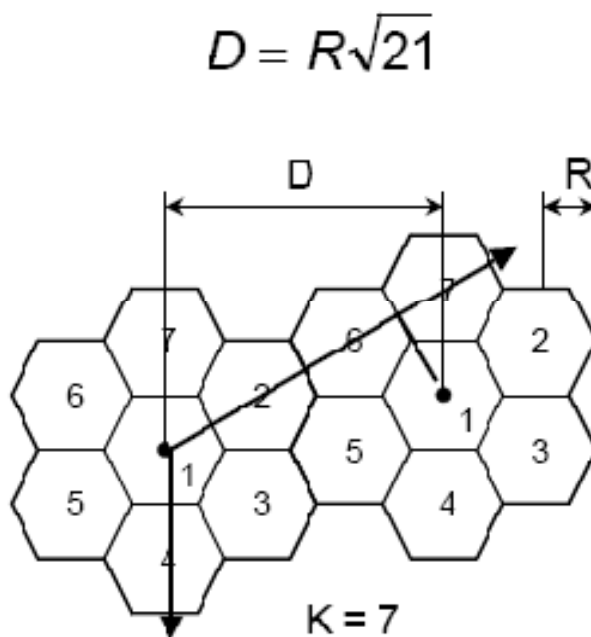
$$G = D_R^2 = i^2 + j^2 + ij$$

⇒ hence: $D = R\sqrt{3G}$



Cluster di riuso

- Il cluster di riuso è l'insieme compatto delle celle che usano risorse radio distinte
 - ▶ K = numero di celle del cluster, D =distanza di riuso.





Cluster e distanza di riuso

- Nel caso di celle esagonali i possibili valori di K sono dati dalla serie dei numeri rombici $K \in \{1, 3, 4, 7, 9, 12, \dots\}$, cioè numeri del tipo $i^2 + j^2 + ij$, con i e j interi non negativi
- La distanza di riuso D è data da

$$D = R \cdot \sqrt{3K}$$

K	D
4	3.46 R
7	4.58 R
12	6.00 R

- Occorre scegliere il minimo valore di K in modo da soddisfare i vincoli sulla qualità della comunicazione
 - ▶ Assumiamo siano specificati mediante il valore minimo γ del SIR



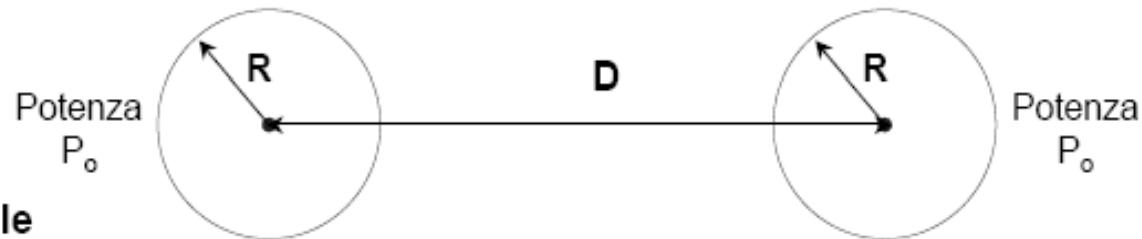
Possible clusters all integer i,j values

i	j	$K=ii+jj+ij$	$q=D/R$
1	0	1	1,73
1	1	3	3,00
2	0	4	3,46
2	1	7	4,58
2	2	12	6,00
3	0	9	5,20
3	1	13	6,24
3	2	19	7,55
3	3	27	9,00
4	0	16	6,93
4	1	21	7,94
4	2	28	9,17
4	3	37	10,54
4	4	48	12,00
5	0	25	8,66
5	1	31	9,64



Distanza di riuso e SIR

- La distanza di riuso D può essere valutata applicando la legge di propagazione con attenuazione deterministica e considerando il **caso peggiore**
- Nel caso di due celle si ha



Potenza segnale utile

$$C = \text{cost} \cdot R^{-\alpha}$$

Potenza segnale interferente

$$I = \text{cost} \cdot D^{-\alpha}$$

Rapporto segnale/Interferente

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



Esempio: Calcolo di C/I

Ipotesi:

- Interferenti co-canale del primo tier (6)
- Celle della stessa dimensione (raggio R)
- Trasmettitori usano la stessa potenza P_t
- La potenza ricevuta alla distanza d è proporzionale a $1/d^n$

$$\frac{C}{I} = \frac{P_t R^{-n}}{6 P_t D^{-n}} = \frac{(D / R)^n}{6} = \frac{(\sqrt{3} G)^n}{6}$$



CCI computation

$$\frac{S}{N} \approx \frac{S}{I} = \frac{\text{cost} \cdot R^{-\eta}}{\sum_{k=1}^{N_I} \text{cost} \cdot D^{-\eta}} = \text{By using the assumptions of same cost and same } D:$$
$$= \frac{1}{N_I} \left(\frac{R}{D} \right)^{-\eta} = \frac{1}{N_I} \left(\frac{D}{R} \right)^{\eta} = \frac{1}{N_I} q^{\eta}$$

Results depend on ratio $q=D/R$ (q =frequency reuse factor)

Alternative expression: recalling that $D = R\sqrt{3K}$

$$\frac{S}{N} \approx \frac{S}{I} = \frac{1}{N_I} \left(\frac{R}{R\sqrt{3K}} \right)^{-\eta} = \frac{1}{N_I} (3K)^{\eta/2} = \frac{(3K)^{\eta/2}}{6}$$
$$N_I=6, \mu=4 \rightarrow \frac{S}{I} = \frac{(3K)^2}{6} = \frac{3}{2} K^2$$

$K_{\min} = \frac{(6SIR)^{2/\eta}}{3}$

USAGE: Given an S/I target, cluster size K is obtained



Examples

→ target conditions:

$$\Rightarrow S/I = 9 \text{ dB}$$

→ Solution:

$$\frac{S}{I} = 10^{0.9} = 7.94 \approx 8$$

$$\frac{S}{I} = \frac{(3K)^{\eta/2}}{6} \bigg|_{\eta=4} \Rightarrow K = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{S}{I}}$$

$$K \geq 2.3 \Rightarrow K = 3$$

→ target conditions:

$$\Rightarrow S = 18 \text{ dB}$$

$$\Rightarrow \eta = 4.2$$

→ Solution:

$$\frac{S}{I} [\text{dB}] = 5\eta \log(3K) - 10 \log 6$$

$$\log(3K) = \frac{18 + 7.78}{21} = 1.23$$

$$K \geq \frac{10^{1.23}}{3} = 5.63 \Rightarrow K = 7$$



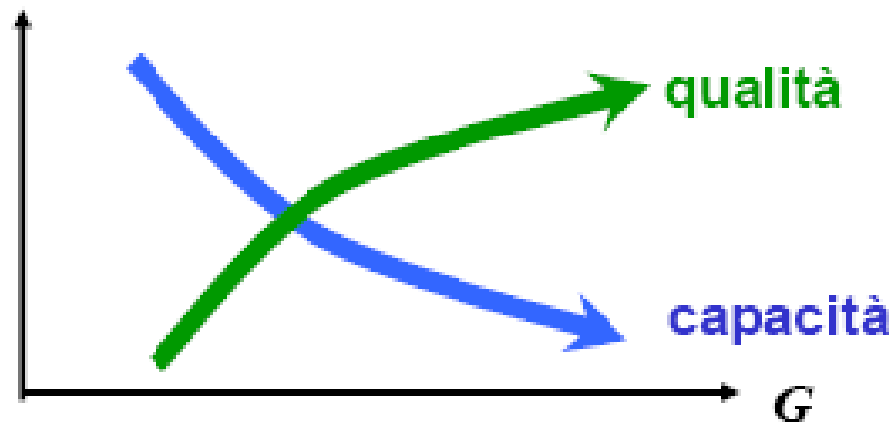
S/I computation

assuming 6 interferers only (first ring)

K	$q=D/R$	S/I	S/I dB
3	3,00	13,5	11,3
4	3,46	24,0	13,8
7	4,58	73,5	18,7
9	5,20	121,5	20,8
12	6,00	216,0	23,3
13	6,24	253,5	24,0
16	6,93	384,0	25,8
19	7,55	541,5	27,3
21	7,94	661,5	28,2
25	8,66	937,5	29,7



La dimensione del cluster



A pari R (= a parità di copertura di una cella):

- Minore G , maggiore num di canali per cella (k) e maggiore $M \rightarrow$ maggiore capacità
- Maggiore G , maggiore D , minore interferenza, migliore qualità

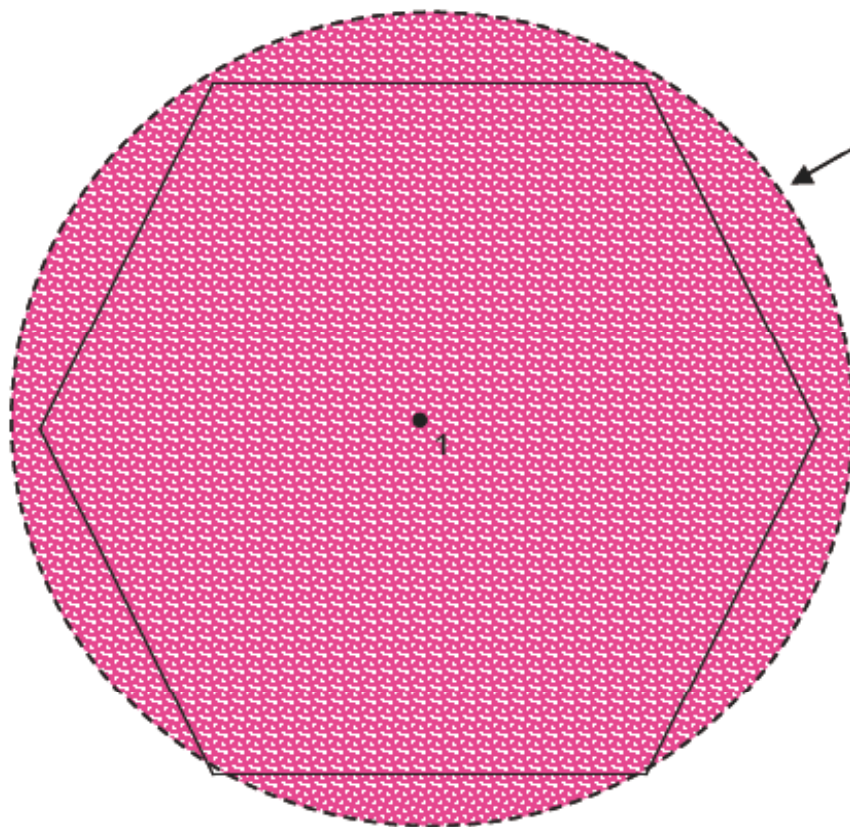


...riassumendo

- Per l'efficienza di una rete cellulare possiamo scrivere
$$\eta = \text{Num_Can} / (\text{BW} \times \text{Area_Cella} \times \text{Dim_Clu}) \quad [\text{Canali/Hz} \cdot \text{km}^2]$$
- L'efficienza può essere aumentata
 - ▶ aumentando il numero dei canali radio, Num_Can, a parità di banda, BW, impiegata
 - Maggiore efficienza spettrale della modulazione, codifica e dello schema di accesso multiplo
 - ▶ aumentando il riuso delle frequenze
 - diminuendo il diametro delle celle (diminuisce Area_Cella)
 - diminuendo il requisito di C/I in ricezione (diminuisce Dim_Clu)



Riuso delle frequenze (1/3)



A : Area geografica
M : Numero canali
K = 1: Num. di celle nel cluster
H = 1: Num di cluster nell'area
R : raggio della cella

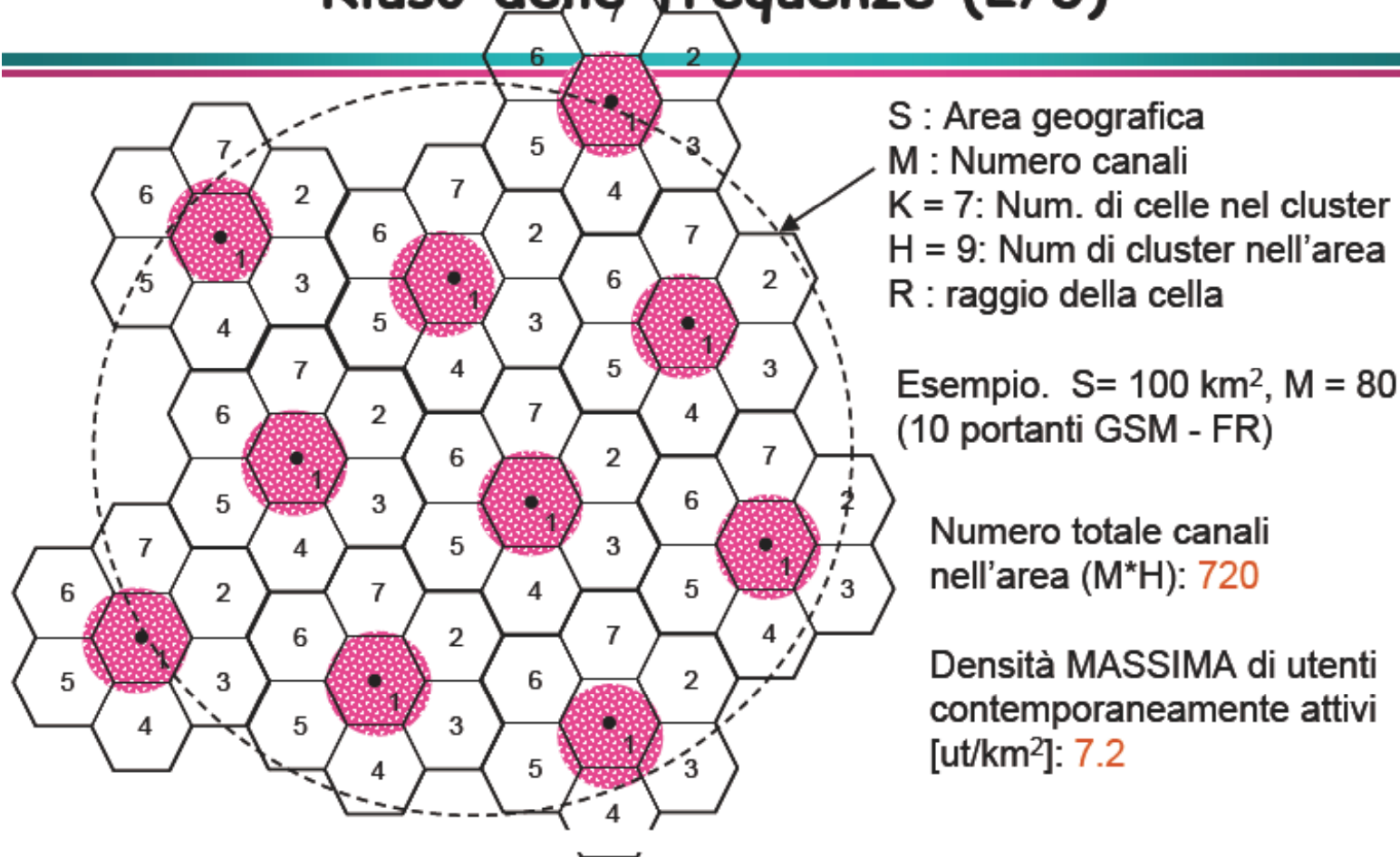
Esempio. $S = 100 \text{ km}^2$, $M = 80$
(10 portanti GSM - FR)

Numero totale canali
nell'area ($M \cdot H$): **80**

Densità MASSIMA di utenti
contemporaneamente attivi
[ut/km²]: **0.8**

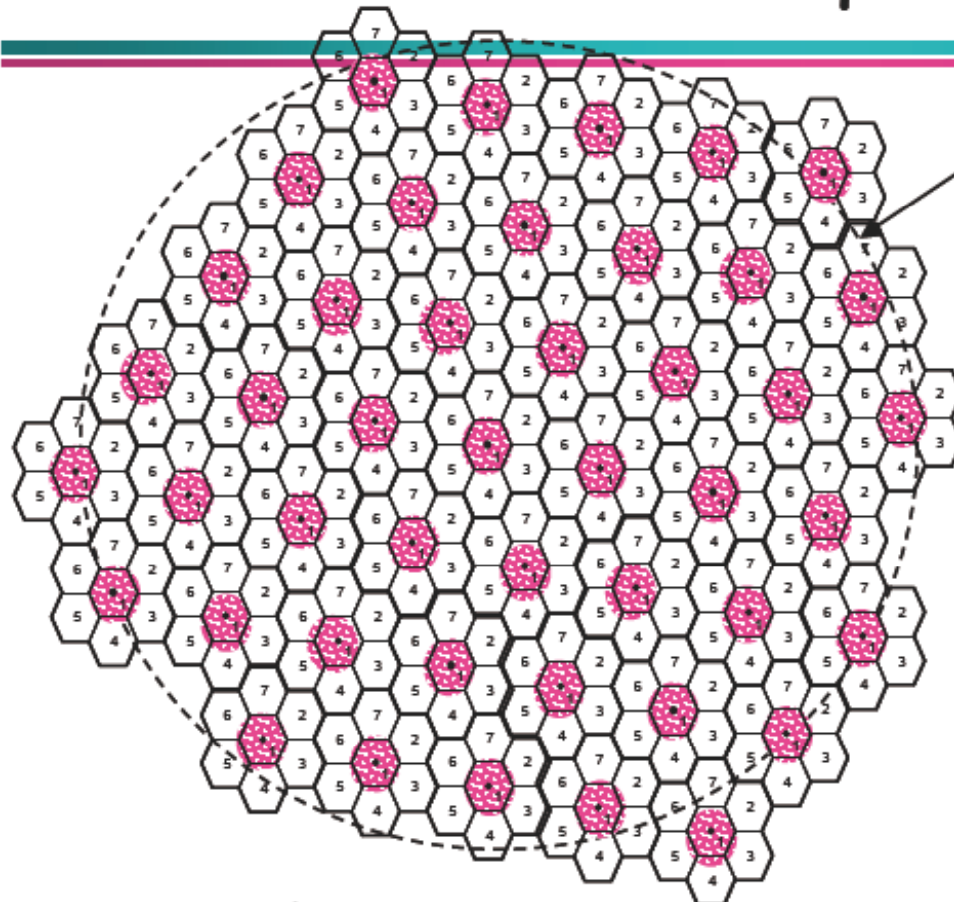


Riuso delle frequenze (2/3)





Riuso delle frequenze (3/3)



S : Area geografica

N : Numero Canali per cella

K = 7: Num. di celle nel cluster

H = 44: Num di cluster nell'area

R : raggio della cella

Esempio. $S = 100 \text{ km}^2$, $N = 80$
(10 portanti GSM - FR)

Numero totale canali
nell'area ($N \cdot H$): **3520**

Densità MASSIMA di utenti
contemporaneamente attivi
[ut/km²]: **35.2**



Riutilizzo delle frequenze : criteri di progetto

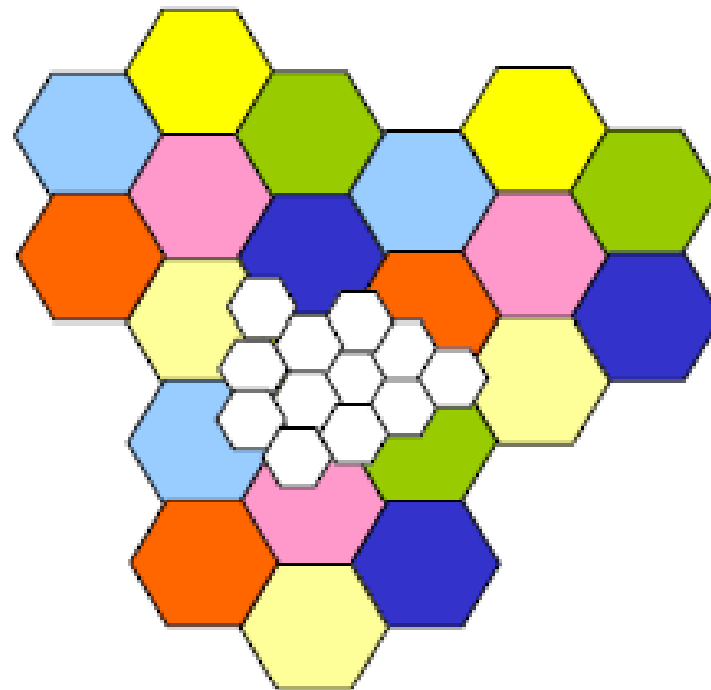
- Maggiore D/R , maggiore G , maggiore C/I , migliore la qualità del servizio fornito all'utente
- Minore D/R , minore G , meno celle nel cluster. A pari numero di canali N , più canali nella cella e maggiore M → maggiore la capacità del sistema
- Alcune tecniche consentono di aumentare la capacità di traffico e/o diminuire l'interferenza
 - Splitting
 - Sectoring
 - Tilting



Splitting

- Consente di suddividere celle di dimensioni grandi in celle più piccole
- Coesistono
 - Microcelle: celle di dimensioni piccole in zone ad alta densità di traffico (aree metropolitane altamente popolate). Potenza alla stazione base $\approx 3\text{ W}$
 - Macrocelle: celle di dimensioni grandi in zone a bassa densità di traffico (zone rurali)

Splitting



- Ciascuna cella grande può essere **sostituita** con un certo numero di celle piccole

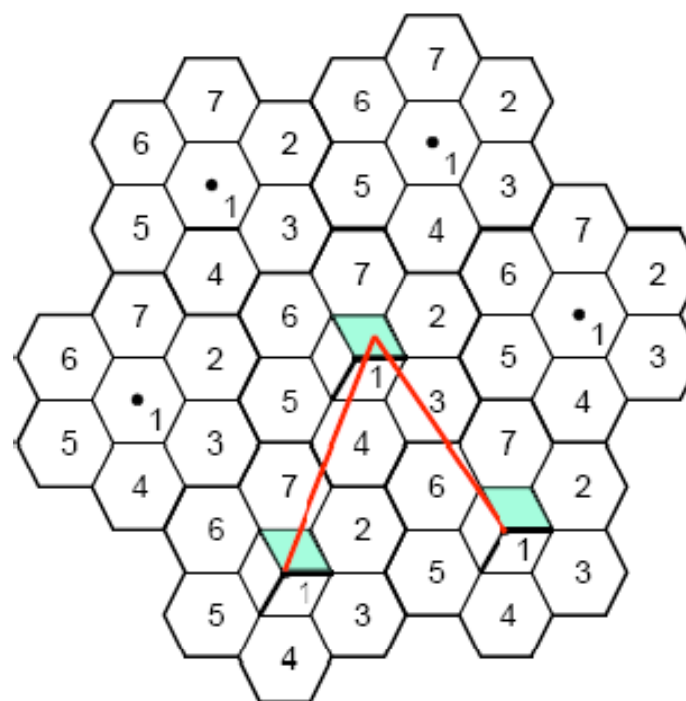
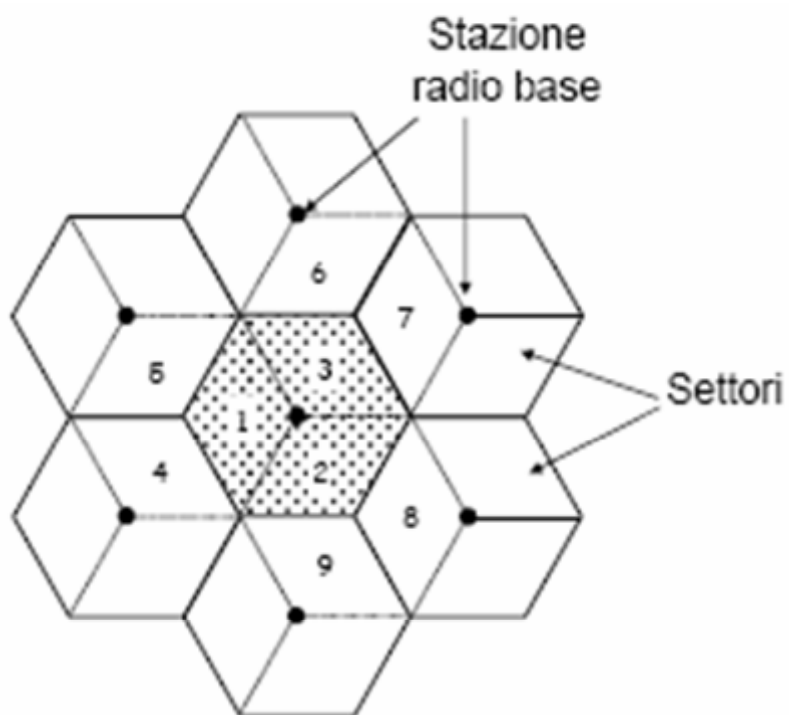


Sectoring

- La cella è divisa in settori tramite antenne direttive (a 60° o 120°). Settori diversi usano frequenze diverse
- Le antenne direttive riducono l'interferenza
- Creo nuove "celle" senza aumentare i costi dei siti radio
- Configurazione tipica è la tri-cellulare con 3 settori per cella (3 celle per sito) e antenne direttive separate di 120°



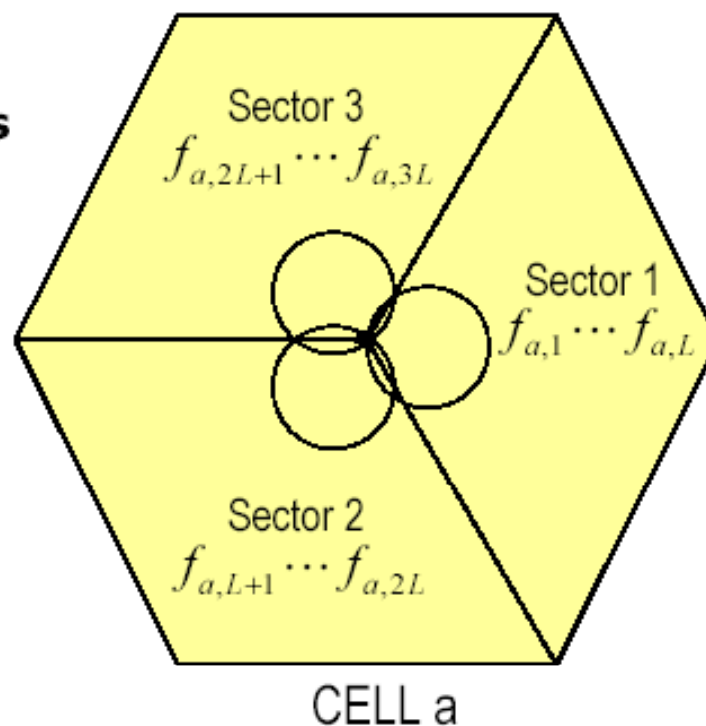
Copertura cellulare con cluster di 9 celle e antenne settoriali a 120°





sectorization

- **Directional antennas**
- **Cell divided into sectors**
- **Each sector uses different frequencies**
 - ⇒ To avoid interference at sector borders
- **PROS:**
 - ⇒ CCI reduction
- **CONS:**
 - ⇒ Increased handover rate
 - ⇒ Less effective “trunking” leads to performance impairments





CCI reduction via sectorization three sectors case

→ Inference from 2 cells, only

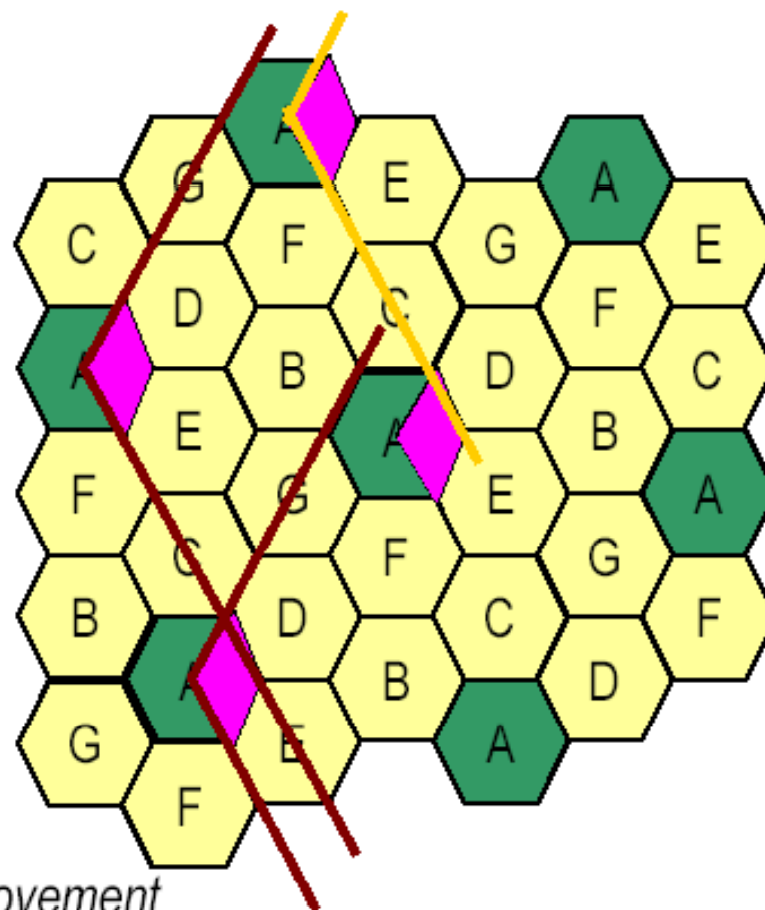
⇒ Instead of 6 cells

With usual approx
(specifically, $D_{\text{int}} \sim D$)

$$\left[\frac{S}{I} \right]_{120^\circ} = \frac{R^{-\eta}}{2D^{-\eta}} = 3 \cdot \left[\frac{S}{I} \right]_{\text{omni}}$$

$$\left[\frac{S}{I} \right]_{120^\circ} \text{ dB} = \left[\frac{S}{I} \right]_{\text{omni}} \text{ dB} + 4.77$$

Conclusion: 3 sectors = 4.77 dB improvement



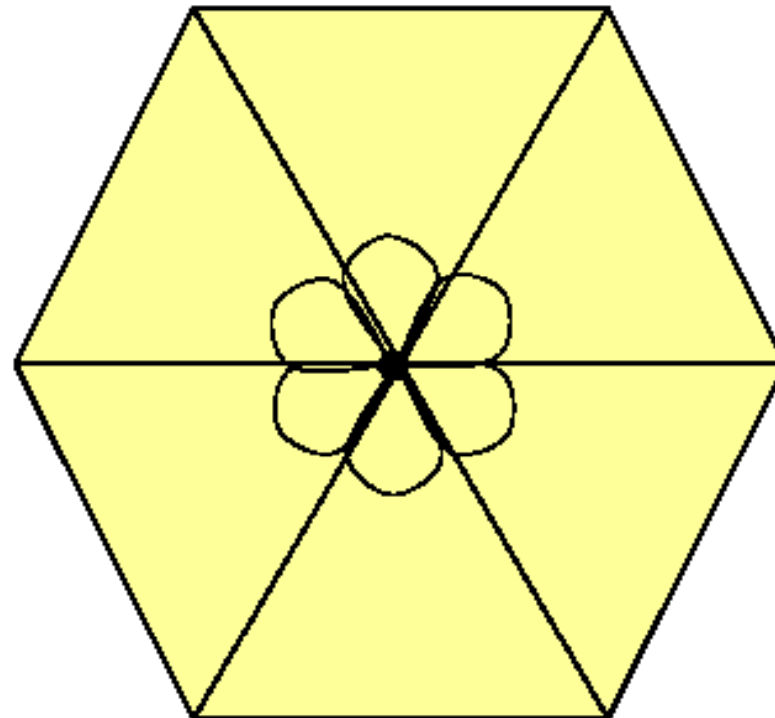


6 sectors

→ **60° Directional antennas**

→ **CCI reduction:**

- ⇒ 1 interfereer only
- ⇒ 6 x S/I in the omni case
- ⇒ Improvement: 7.78 dB





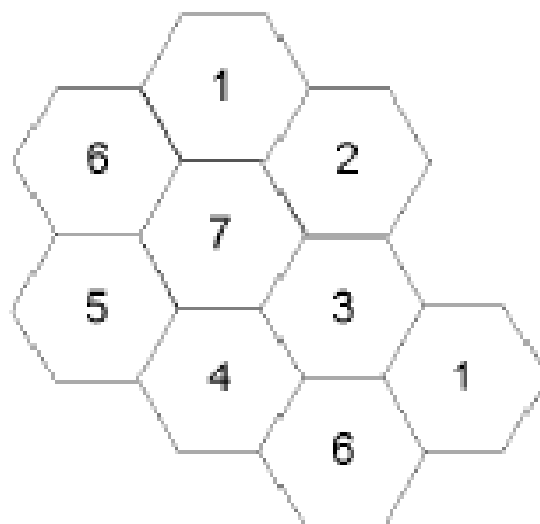
Tilting

- Le antenne direttive causano interferenza sostanzialmente solo lungo la direzione privilegiata
- L'interferenza in questa direzione può però essere elevata
- Le antenne vengono inclinate verso il basso di qualche grado (tilt)

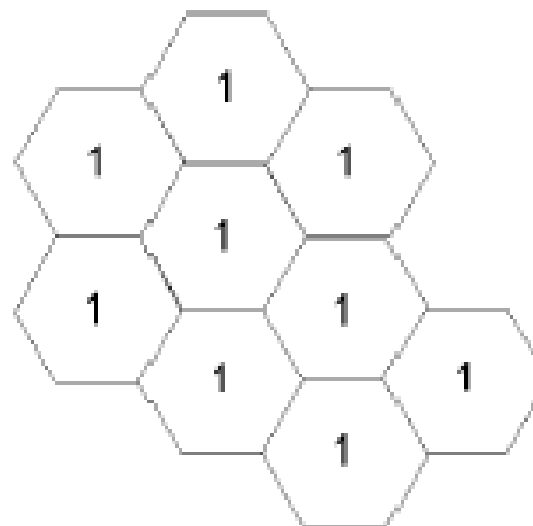


Riuso delle frequenze

FDMA/TDMA



CDMA



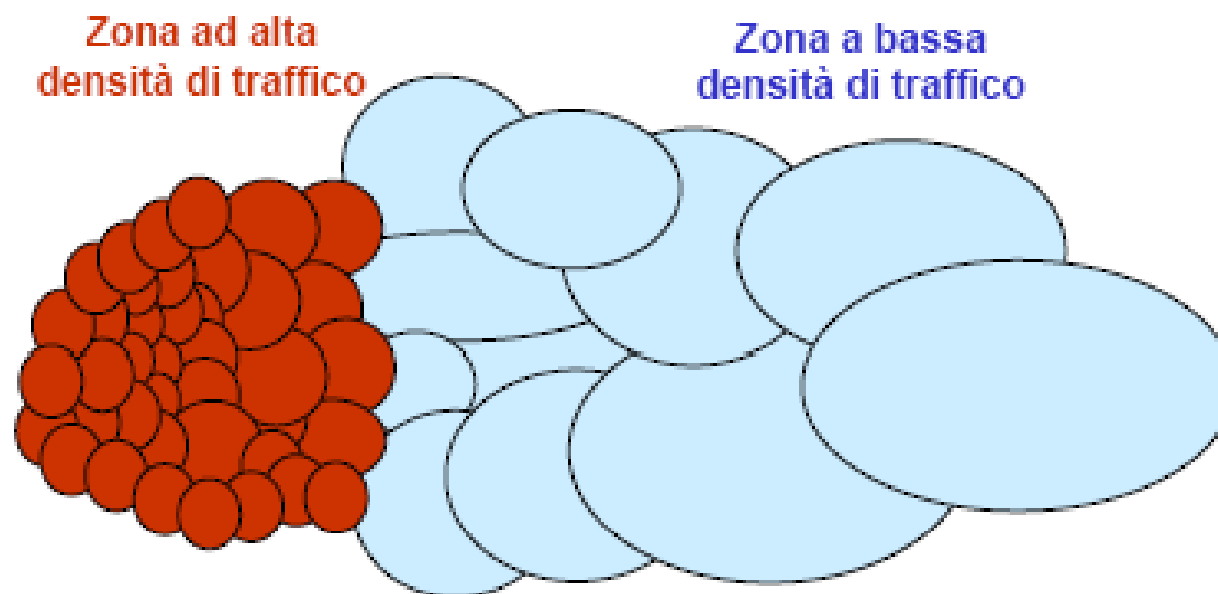


Tecniche di copertura cellulare

- È possibile usare antenne direzionali per avere celle di forma e dimensione particolare
 - Celle di dimensione (e forma) diversa
 - Celle “stratificate” (celle a ombrello)
- Sono allo studio tecniche per ottenere celle “puntiformi” che “inseguono” il terminale mobile

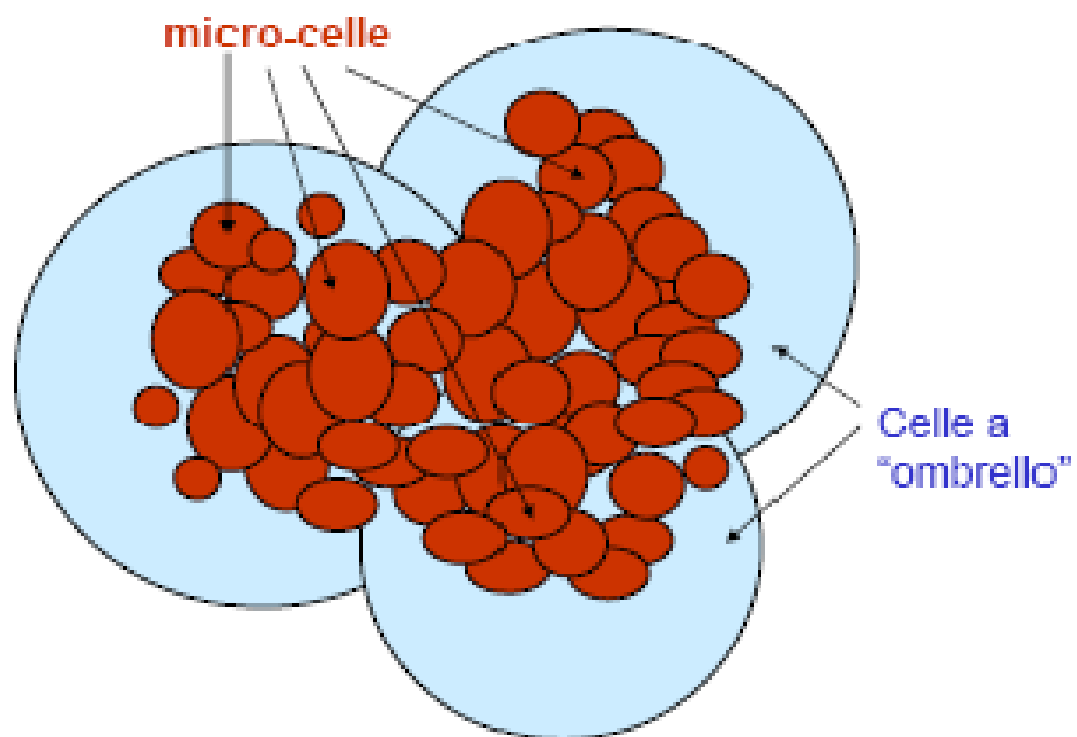


Adattare la dimensione delle celle alle aree con diversa intensità di traffico





Copertura cellulare stratificata





Copertura cellulare di tipo autostradale

