



# Reti cellulari

## Gli standard 2G-3G

Fulvio Babich (babich@units.it)

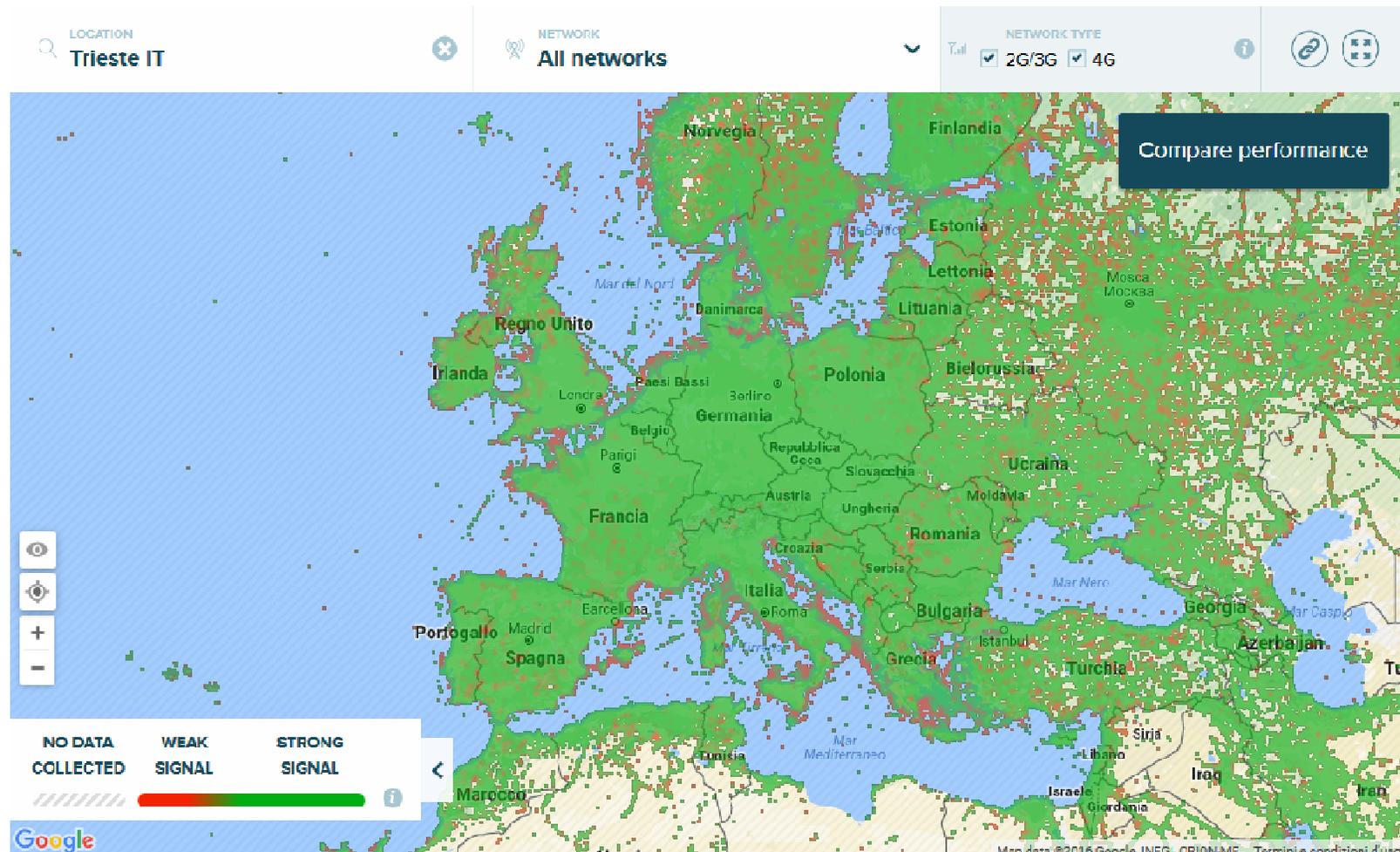
DIA – Università di Trieste



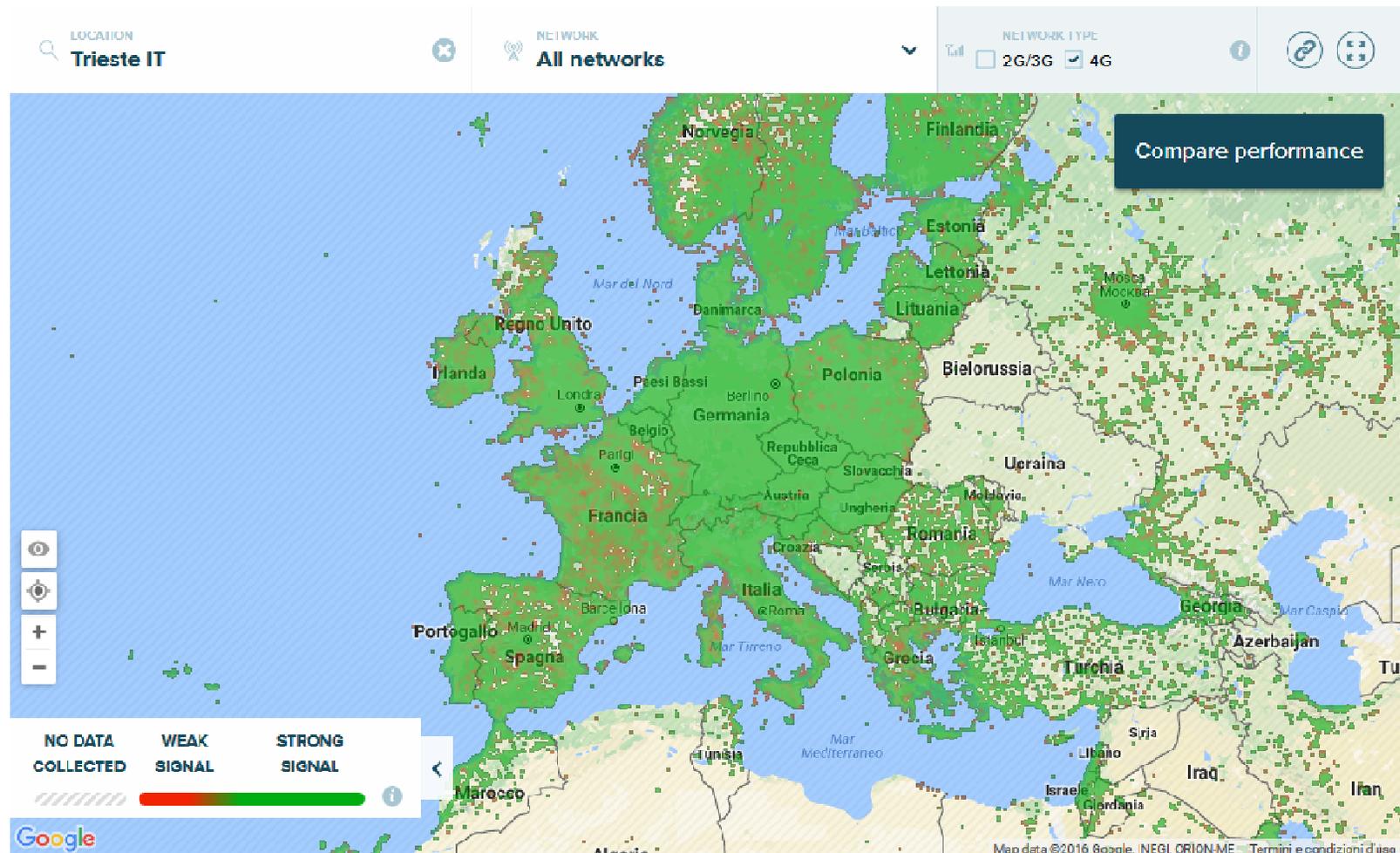
# Reti radiomobili (cellulari)

- **Esigenza:** mobilità (= indipendenza).
  1. Indipendenza dalla **posizione**: terminale mobile.
  2. Indipendenza dalla **locazione**: la rete deve essere in grado di individuare e seguire l'utente **ovunque** si trovi.
  3. Indipendenza dal **terminale**: raggiungibilità dell'utente e non del suo apparecchio.
- **Soluzione adottata:** rete cellulare.
  1. Indipendenza dalla **posizione** resa possibile dal **mezzo wireless**.
  2. Indipendenza dalla **locazione** resa possibile dalla **rete intelligente** (diffusione mondiale) e dalla **architettura cellulare**: insieme di dispositivi e database della rete con informazioni sugli abbonati, sulle configurazioni e sullo stato della rete (*network management*). La comunicazione tra i database garantisce l'indipendenza dalla locazione (funzione di **roaming**). Si genera traffico (di segnalazione, indipendente dall'informazione) anche se non si telefona, ma semplicemente ci si sposta (costo di una telefonata nel segmento internazionale attribuito al chiamato).
  3. Indipendenza dal **terminale** resa possibile dalla **distinzione tra Subscriber Identity Module (SIM) e terminale fisico**.

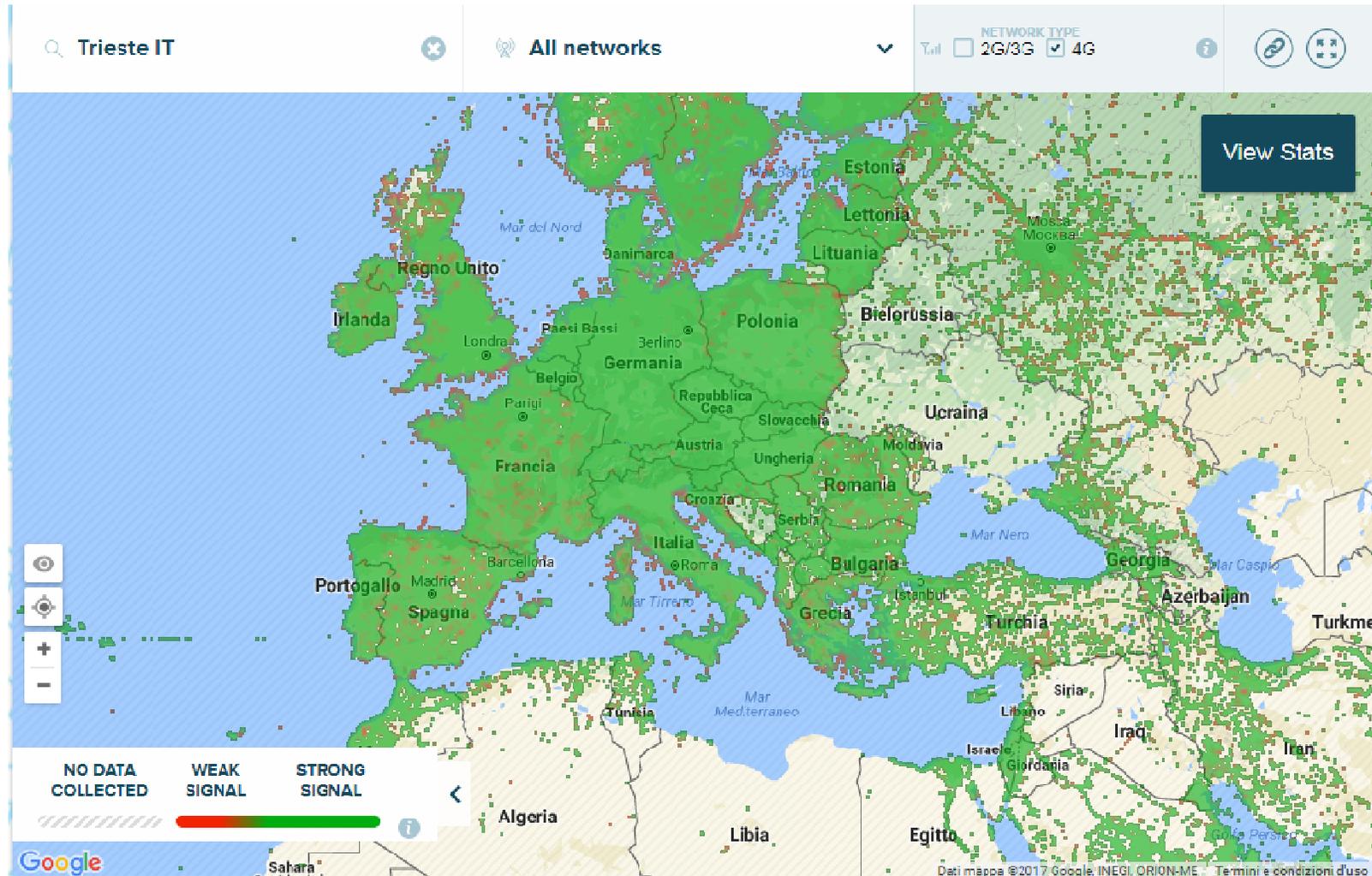
# Copertura Europea (opensignal.com)



# Copertura 4G (novembre 2016)



# Copertura 4G (novembre 2017)





# Generazioni

- **1G** (inizio anni 80): **TACS, AMPS**
  - Analogico.
  - Solo traffico vocale
- **2G** (1991): **GSM** (commutazione di circuito)
  - Digitale
  - A banda stretta
  - Prevalentemente per traffico vocale
- **2.5G** (anni 90): **GPRS**, (commutazione di pacchetto), **EDGE**.
  - Fino a 270 kbit/s
- **3G** (2001): **UMTS** (circuito) / **HSPA** (pacchetto)
  - A banda larga (W-CDMA)
  - Fino a 2 Mbit/s
- **4G** (2010): **LTE**
  - OFDM
  - Commutazione di pacchetto.



# Generazioni

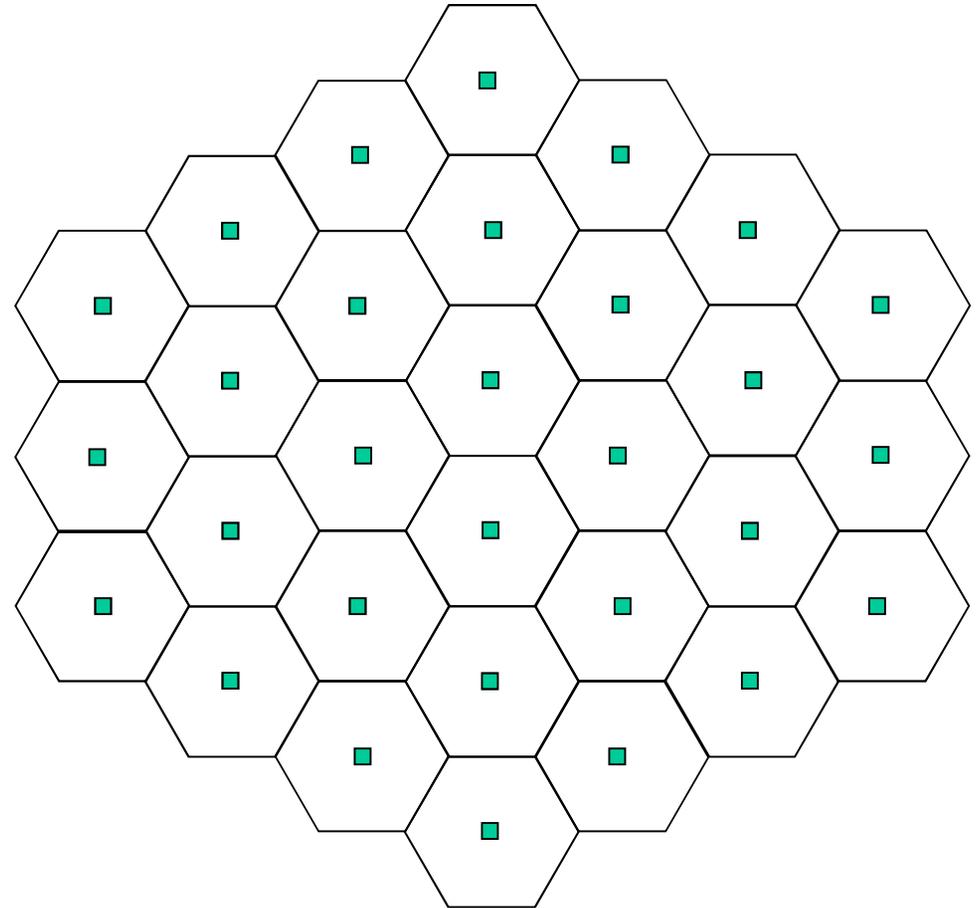
| Generazione                            | Proponente | Standard   |
|--|------------|--|
| 2G                                     | GSM/3GPP   | GSM CSD HSCSD  |
|  | 3GPP2      | cdmaOne  |
| 2G transitional<br>(2.5G, 2.75G)       | GSM/3GPP   | GPRS EDGE/EGPRS  |
|  | 3GPP2      | CDMA2000 1x  |
| 3G                                     | 3GPP       | UMTS UTRA-FDD /W-CDMA  |
|  | 3GPP2      | CDMA2000 1xEV-DO Release 0   |
| 3G transitional<br>(3.5G, 3.75G, 3.9G) | 3GPP       | HSPA, HSDPA, HSUPA, HSPA+<br>LTE (E-UTRA)  |
|  | 3GPP2      | CDMA2000 1xEV-DO Revision A  |
| 4G                                     | 3GPP       | LTE Advanced (E-UTRA) LTE<br>Advanced pro (4.5G pro) LTE<br>Advanced (pre 5G) (4.9G) |
| 5G                                     |            |  |

3GPP2: responsabile del CDMA2000, lo standard 3G basato sul cdmaOne 2G con tecnologia CDMA.

ARIB/TTC (Japan), China Communications Standards Association, Telecommunications Industry Association (North America), Telecommunications Technology Association (South Korea).

# Architettura cellulare (I)

- Regione di copertura servita dal sistema **idealmente** suddivisa in **celle esagonali** (in grado di ricoprire integralmente un piano senza sovrapposizioni, a differenza dei cerchi).
- Ogni cella ha al centro una stazione base (Base Station - **BS**) che fa da intermediario, tramite una serie di apparati di controllo, tra l'utente mobile (Mobile Station - **MS**) e la rete telefonica pubblica commutata (PSTN).
- Il cambio di cella viene detto **handover**. Tale procedura deve garantire la continuità della comunicazione.





## Architettura cellulare (II)

- Un sistema cellulare che operi un Frequency Duplexing (FD) ha una banda  $B$  assegnata per l'**uplink** (da MS a BS), ed una banda  $B$  assegnata per il **downlink** (da BS a MS).
- Il mezzo radio è condiviso, per cui vanno adottate tecniche di multiplazione (*down-link*), accesso multiplo (*up-link*):
  - **2G** - Global System for Mobile communications (**GSM**): FDMA/TDMA (1 canale =  $N$  telefonate), FDMA per separare i canali, TDMA in una banda (canale) per sostenere  $N$  telefonate.
  - **3G** - Universal Mobile Telecommunications System (**UMTS**): CDMA (1 codice = 1 telefonata), codici ortogonali per separare le telefonate (ogni utente usa un canale a banda larga per tutto il tempo, simultaneamente ad altri utenti).
  - **4G** - Long Term Evolution (**LTE**): Orthogonal FDMA (OFDMA) (1 insieme di sottoportanti = 1 telefonata), numero di sottoportanti dipendente dal servizio richiesto (miglior sfruttamento delle frequenze disponibili).
- Tuttavia, qualunque tecnologia si usi, in un sistema a banda limitata il numero di telefonate simultanee sostenibili è comunque limitato. Perciò si è introdotta la tecnica del **riutilizzo cellulare**.

# Attenuazione in funzione della distanza

- La potenza media ricevuta segue una legge del tipo:  $P_R = P_{R0} (r/r_0)^{-\alpha}$  con  $\alpha \approx 4$  (valore tipico) (*path loss*).
- Un'ulteriore attenuazione è dovuta agli ostacoli (*ombreggiatura o shadowing*), con legge log-normale, e al *multi-path (fading)*.

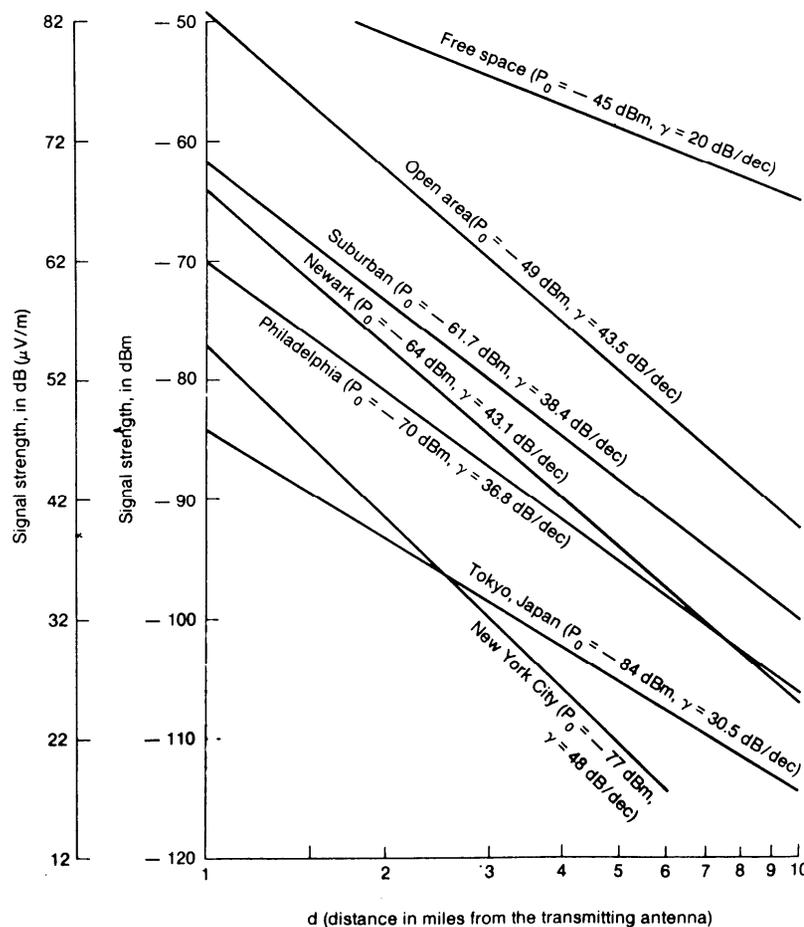


Figure 4.3 Propagation path loss in different areas.

# Shadowing

- Attenuazione derivante da ombreggiatura. La potenza ricevuta ha la seguente densità di probabilità (dove  $\xi=10/\ln(10)$ ).

$$f_{\text{sh}}(x) = \frac{\xi}{x\sigma_x\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(10\log_{10}(x) - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] U(x)$$

- Detto  $z=10\log_{10}(x)$ , da cui  $x=10^{z/10}=\exp(z/\xi)$ ,  $dx=dz x/\xi$ , si ottiene:

$$f_{\text{sh}}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(z - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right]$$

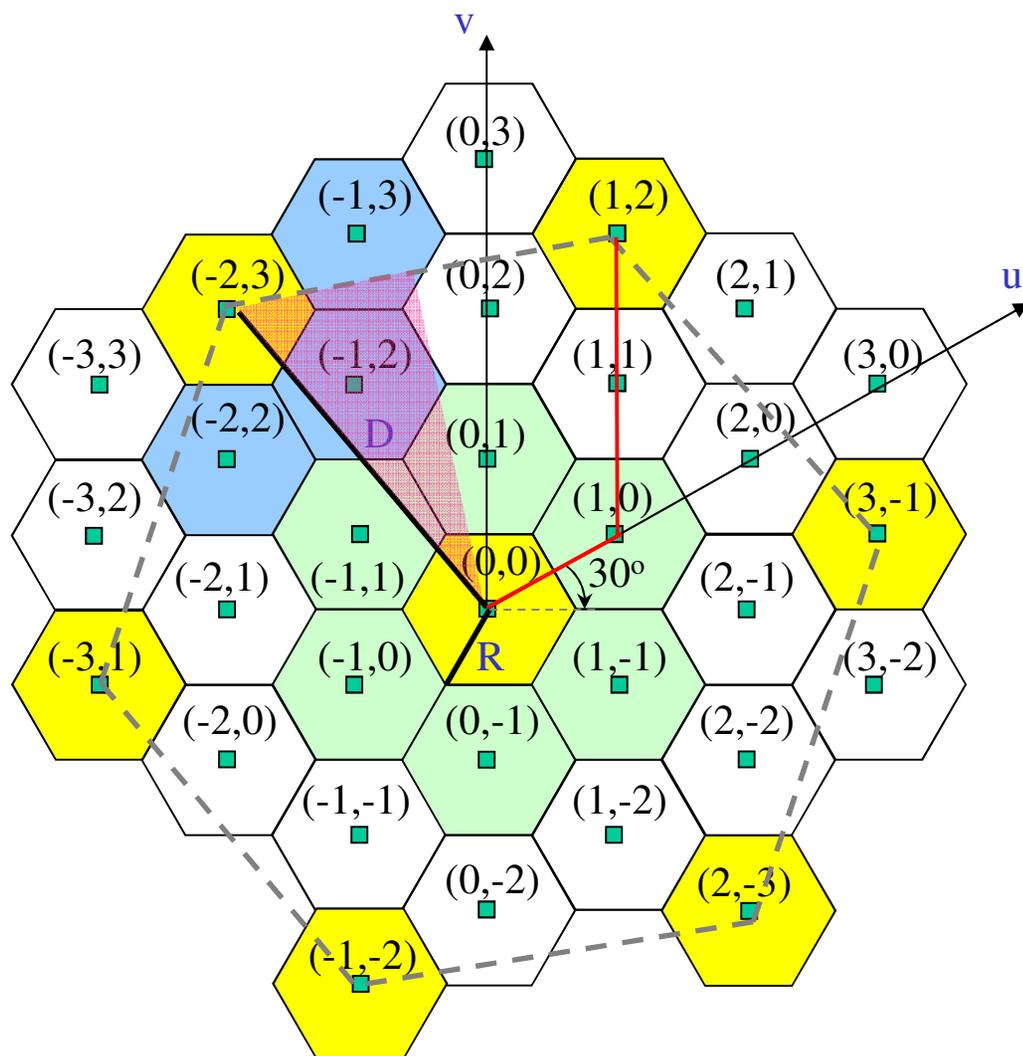
$$E[x] = \exp\left[\frac{\mu_x}{\xi} + \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_x}{\xi}\right)^2\right] \quad \text{var}[x] = \exp\left[2\frac{\mu_x}{\xi} + \left(\frac{\sigma_x}{\xi}\right)^2\right] \left(\exp\left[\left(\frac{\sigma_x}{\xi}\right)^2\right] - 1\right)$$

- Se  $\mu_x=0$ , posto  $\alpha=\sigma_x/\xi$ , si ottiene

$$E[x] = \exp(\alpha^2/2) \quad \text{var}[x] = \exp(\alpha^2)(\exp(\alpha^2) - 1)$$

- In questo caso, detto  $y=x/E[x]$ , si ha  $E[y]=1$ ,  $\text{var}[y]=\exp(\alpha^2)-1$ .

## Architettura cellulare (III)



- L'insieme di  $C=i^2+j^2+ij$ , con  $i$  e  $j$  interi, celle che usano canali diversi è detto **cluster**.
- Esempio: la figura è riferita al caso  $C=7$  ( $i=1, j=2$ ). Le celle in giallo utilizzano lo stesso sottoinsieme di canali ed il cluster è dato dalla cella di riferimento e dalle altre sei attorno.
- Ci sono **6 celle** aventi distanza  $D$  dalla cella di riferimento. I centri di queste sei celle formano un ulteriore **esagono**.
- Il numero di celle contenuto all'interno di questo esagono permette di ottenere una relazione da cui ricavare  $C$ .



# Fattore di riutilizzo (I)

- Valori bassi di  $C$  garantiscono molti canali in una cella ma più interferenza (le celle che usano gli stessi canali sono più vicine), mentre valori elevati di  $C$  garantiscono meno interferenza, ma pochi canali per cella.
- $C$  viene stimato in base al rapporto segnale-interferenza (Signal-to-Interference Ratio – SIR), dato dal rapporto tra la potenza del segnale desiderato  $P_D$  e la potenza di interferenza  $P_I$ .
- Definiamo:
  - $P_T$ : potenza trasmessa (assunta per semplicità uguale per tutte le BS).
  - $\alpha$ : fattore di attenuazione che tiene conto dell'attenuazione del segnale dovuta alla distanza (es.  $\alpha = 2$  per lo spazio libero,  $\alpha > 2$  in ambito urbano).
- Dato che il sistema deve funzionare sempre una volta installato, assumiamo di trovarci nella condizione peggiore: ovvero quella in cui una MS presente nella cella di riferimento si trova a bordo cella (a distanza  $R$  dalla sua BS) e le altre 6 BS delle celle che usano gli stessi canali sono attive.



## Fattore di riutilizzo (II)

- In questo caso il SIR ricevuto dalla MS è:

$$\text{SIR} = \frac{P_D}{P_I} = \frac{\frac{P_T}{R^\alpha}}{6 \frac{P_T}{D^\alpha}} = \frac{(\sqrt{3CR})^\alpha}{6R^\alpha} = \frac{(3C)^{\alpha/2}}{6}$$

- Il SIR aumenta all'aumentare di C.
- Il SIR non dipende da  $P_T$  se tutte le basi trasmettono con la stessa potenza.
- La ricezione si considera avvenuta con successo se il SIR è maggiore di un valore di **soglia**  $\text{SIR}_t$  che dipende dal ricevitore (man mano che si sale di generazione le tecniche di trasmissione adottate – modulazione/codifica – e i ricevitori diventano sempre migliori e sono in grado di fornire valori di  $\text{SIR}_t$  più bassi, e quindi di garantire la ricezione in presenza di SIR più bassi rispetto alle generazioni precedenti).

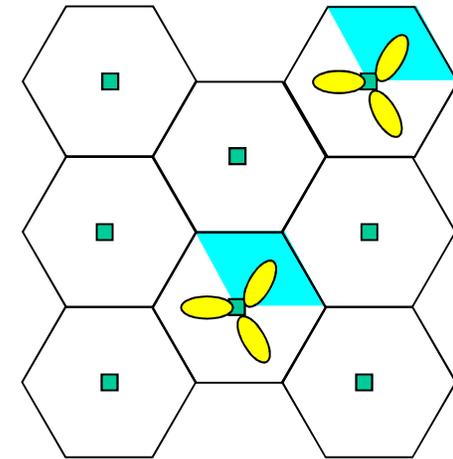
## Fattore di riutilizzo (III)

Il valore di  $C$  per un sistema cellulare va quindi fissato in base alla  $SIR_t$  che caratterizza i ricetrasmittitori usati.

- GSM (2G)
  - $SIR_t \approx 18 \text{ dB} \Rightarrow C = 7$  (antenne omnidirezionali).
  - $SIR_t \approx 16 \text{ dB} \Rightarrow C = 3$  (antenne direttive),  
settorizzazione ottenuta adottando 3 settori per cella

$$SIR = \frac{P_D}{P_I/3} = \frac{(3C)^{\alpha/2}}{2}$$

- UMTS/LTE (3/4G)
  - $SIR_t \approx 2 \text{ dB} \Rightarrow C = 1$  (antenne direttive, codici efficienti)





# Classificazione celle

- Macrocelle
  - Regioni ampie (fino a 35 km) con traffico scarso.
  - Potenze di trasmissione dell'ordine di decine di watt.
  - Copertura *overlay*.
- Microcelle
  - Copertura di regioni limitate (fino a 2 km), a traffico elevato.
- Celle Piccole (*Small cells*): copertura locale
  - Picocelle: copertura di singoli edifici.
  - Femtocelle: copertura indoor di case o piccoli edifici.



# GSM: caratteristiche generali

- Banda operativa:

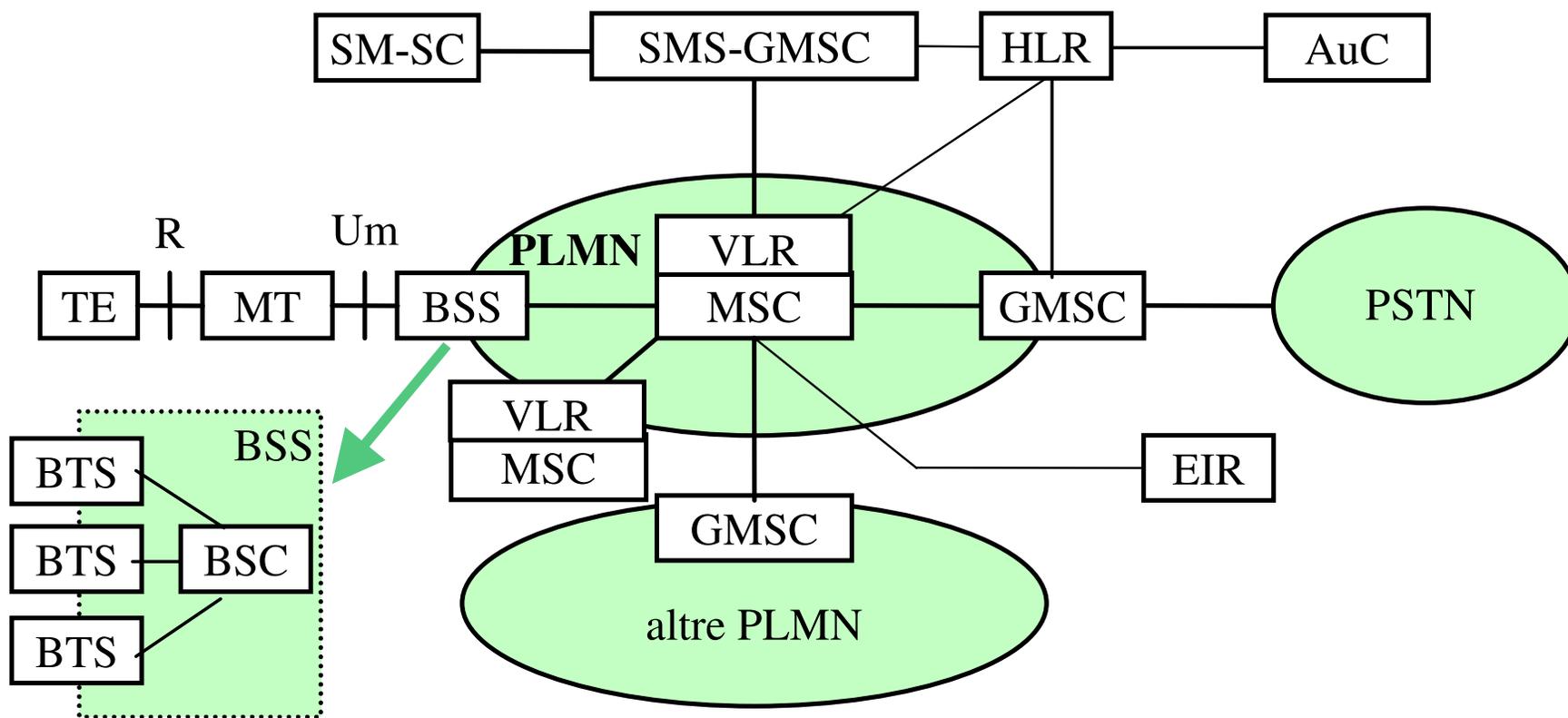
|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| 880-915 MHz UL,   | 925-960 MHz DL   |
| 1740-1785 MHz UL, | 1835-1880 MHz DL |

- FDD, passo di duplice 45 MHz
- passo di canalizzazione FDMA 200 kHz
- 124 portanti per banda (canali radio)
- TDMA, 8 canali telefonici per portante
- frequency hopping FH (217/s), FEC e interleaving
- modulazione GMSK (Gaussian-Minimum Shift Keying)
- Raggio massimo cella: 35 km per ragioni di sincronizzazione (*timing advance*)



# Architettura della rete GSM

## PLMN: *Public Land Mobile Network*





# GSM: elementi

- **BASE STATION SUBSYSTEM**  
Base Transceiver Stations (BTSs) controllati da un Base Station Controller (BSC)
- **NETWORK SUBSYSTEM**
  - MSC (Mobile Switching Center): segnalazione e commutazione dati
  - VLR (Visitor Location Register): memorizza stato e locazione dell'utente
  - HLR (Home Location Register): memorizza dati d'utente e VLR servente
  - AuC (Authentication Center) : Ki
  - EIR (Equipment Identity Register): controllo IMEI
- **GMSC (Gateway MSC)**  
interfaccia verso altre PLMN, PSTN, SMS Service Center

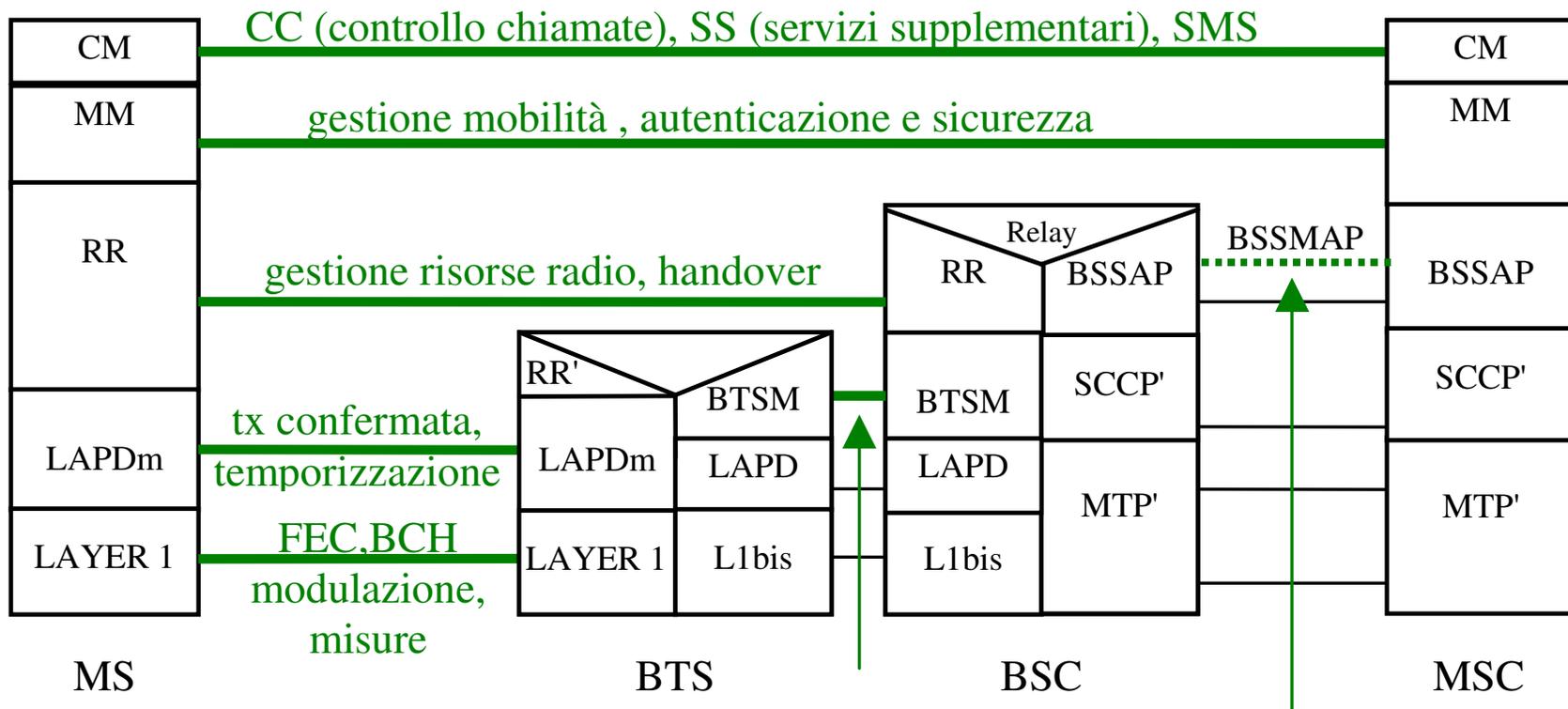


# GSM: terminale mobile

- **SIM** (*Subscriber identity module*)
  - identifica la nazione, l'operatore e l'abbonato,
  - contiene il numero telefonico, le informazioni per la cifratura della voce, i codici di sicurezza personale (*Personal Identity Number* – PIN, *Personal Unblocking Key* – PUK).
- **ME** (*Mobile Equipment*)
  - **MT** (*Mobile Termination*)
    - Trasmissione radio, handover, codifica/decodifica segnale vocale, controllo dell'errore, segnalazione, accesso alla SIM. Identificato mediante il codice IMEI (*International Mobile Station Equipment*).
    - effettua il controllo di potenza, necessario in quanto il raggio di una cella può variare da 100 m a 35 km.
  - **TE** (*Terminal Equipment*)
    - Funzioni d'utente indipendenti dal GSM (schermo, tastiera, ...)



# Architettura protocollare GSM



**LAPD:** Link Access Protocol type D

**RR:** Radio Resource

**MM:** Mobility Management

**CM:** Connection Management

**BTSM:** BTS Management

**BSSAP:** BSS Application Part

**SCCP:** Signalling Connection Control Protocol

**MTP:** Message Transfer Part



# GSM: canali (I)

Due tipologie di canali.

- Canali di traffico: per il trasporto di voce o dati.
- Canali di controllo.
  1. **Canali broadcast:** canali di servizio generici su cui le BS trasmettono in continuazione. Nei tempi in cui la MS non fa nulla, ascolta questi canali.

**BS → MS** – BCCH (Broadcast Control CHannel): utilizzato dalla BS per inviare un segnale detto **identità di cella codice colore**, contenente il codice identificativo della BS (Base Station Identity Code - BSIC) e le informazioni sui canali attualmente in uso (codice colore). La prima operazione che la MS deve eseguire è identificare la cella più vicina, quindi la MS stima la potenza ricevuta da tutte le BS sentite e sceglie la migliore.

**BS → MS** – FCCH (Frequency Correction Channel)

**BS → MS** – SCH (Synchronization Channel)

} utilizzati per il sincronismo



## GSM: canali (II)

2. **Canali comuni:** utilizzati da una MS per presentarsi ad una BS o per avvisare la MS che c'è una chiamata per lei.

BS ← MS

- RACH (Random Access CHannel): utilizzato dalla MS per accreditarsi quando entra in una cella o deve effettuare una chiamata. La MS esegue una procedura di **accesso casuale** inviando la richiesta. Se ci sono più richieste contemporanee c'è collisione e le MS che hanno colliso ritentano dopo un ritardo casuale. L'accreditamento va comunque ripetuto ogni mezz'ora, in quanto una base non tiene il telefono in memoria per sempre.

BS → MS

- AGCH (Access Grant CHannel): utilizzato dalla BS per inviare la risposta ad una MS che è riuscita ad accedere tramite il RACH.

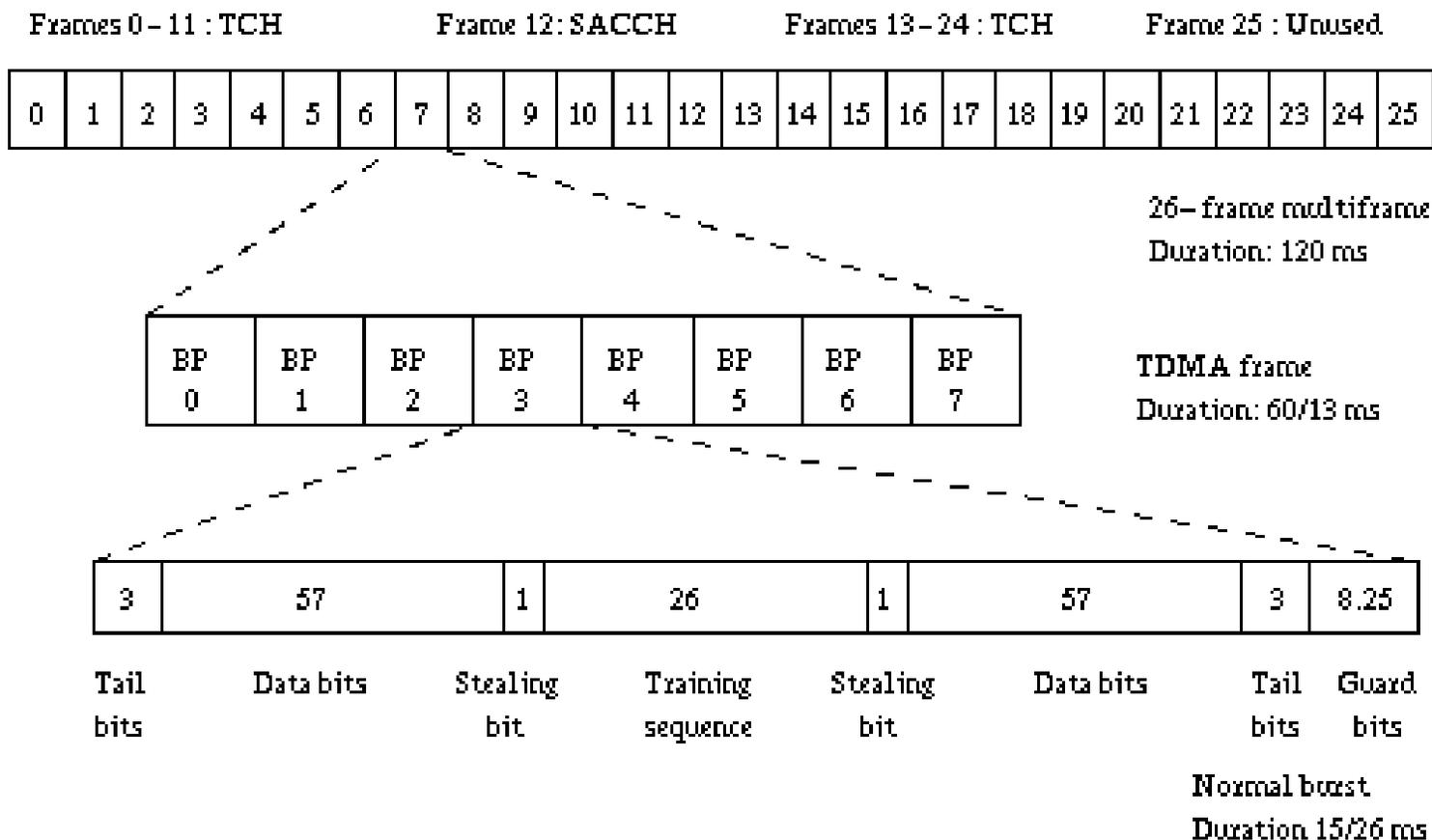
BS → MS

- PCH (Paging CHannel): ascoltato da tutte le MS di una BS, utilizzato dalla BS per allertare una MS di una chiamata. Poi, comunque, la MS deve richiedere il canale tramite il RACH.

3. **Canali dedicati:** utilizzati per la singola telefonata (controllo di potenza, stima del time-advance, ...).

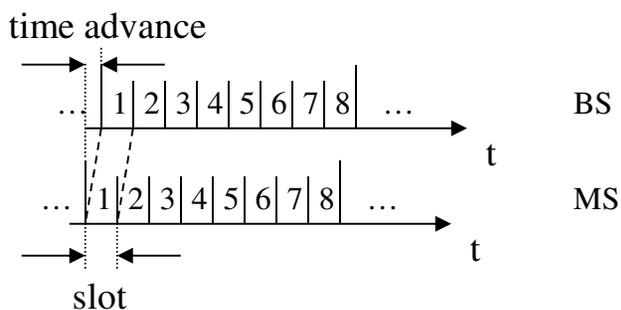
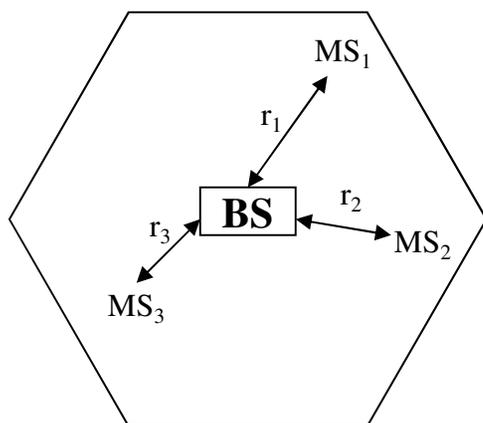
# GSM - multitrama

- Struttura temporale TDMA



# Timing advance

- In un sistema TDMA MS e BS devono concordare sullo slot scelto per la chiamata. Una volta scelto lo slot, i bit devono arrivare alla BS nel tempo giusto, ma le **diverse MS si trovano a distanze  $r$  diverse dalla BS** (diversi ritardi di propagazione  $\tau$ , **ciascuna  $MS_i$  deve trasmettere in anticipo di  $\tau_i$** ).

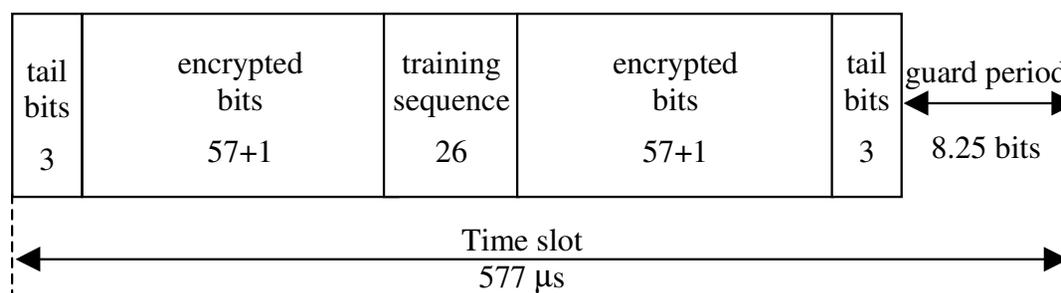


- La  $MS_i$  sente la presenza della BS ascoltando il canale di broadcast. All'inizio la  $MS_i$  assume di non avere ritardo e, per avvisare la BS della sua presenza, invia un segnale nel canale ad accesso casuale (RACH). In questo primo tentativo la  $MS_i$  invia pochissimi bit per essere sicura di **rimanere all'interno del suo slot**. La BS risponde fornendo le informazioni sul ritardo  $\tau_i$ , in modo da ricevere i bit dalla  $MS_i$  al centro dello slot. Questo colloquio viene ripetuto in modo da tener conto della variazione della posizione della  $MS_i$  (anticipo o ritardo rispetto al valore iniziale di  $\tau_i$ ). La frequenza della ripetizione dipende dalla velocità reale del telefono (fino a 200 km/h).

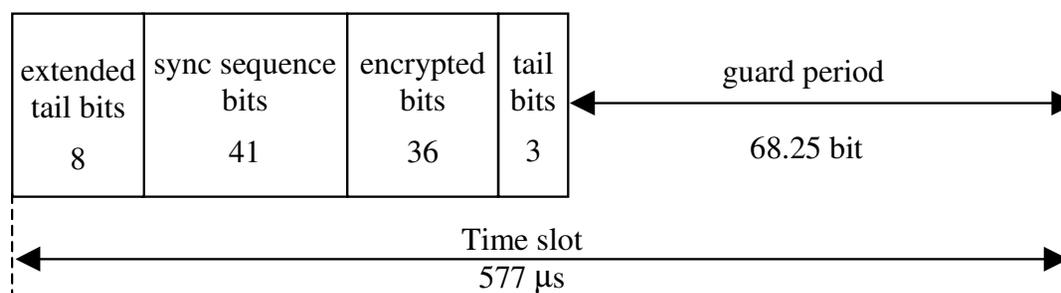


# Normal Burst (NB), Access Burst (AB)

- *Normal burst*



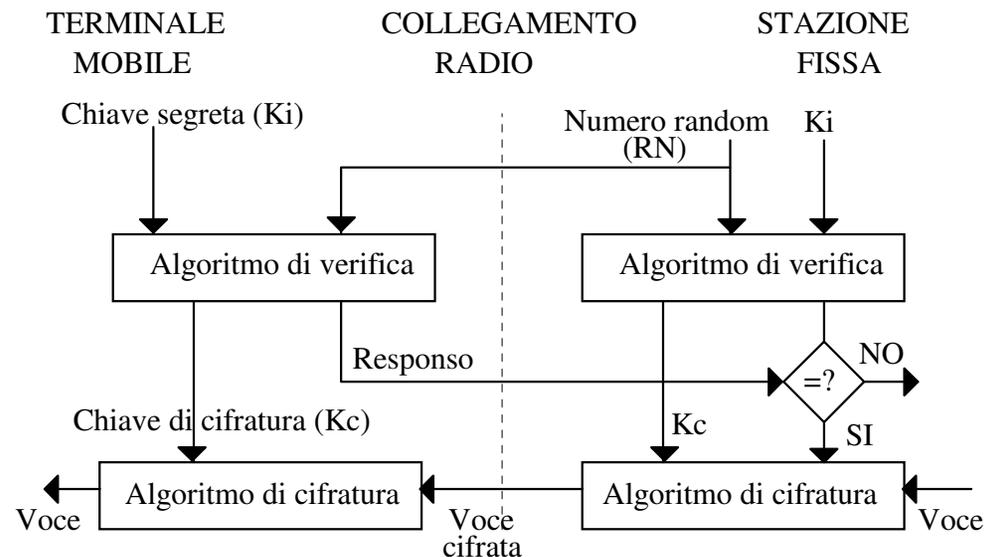
- *Access burst*



# Autenticazione e cifratura

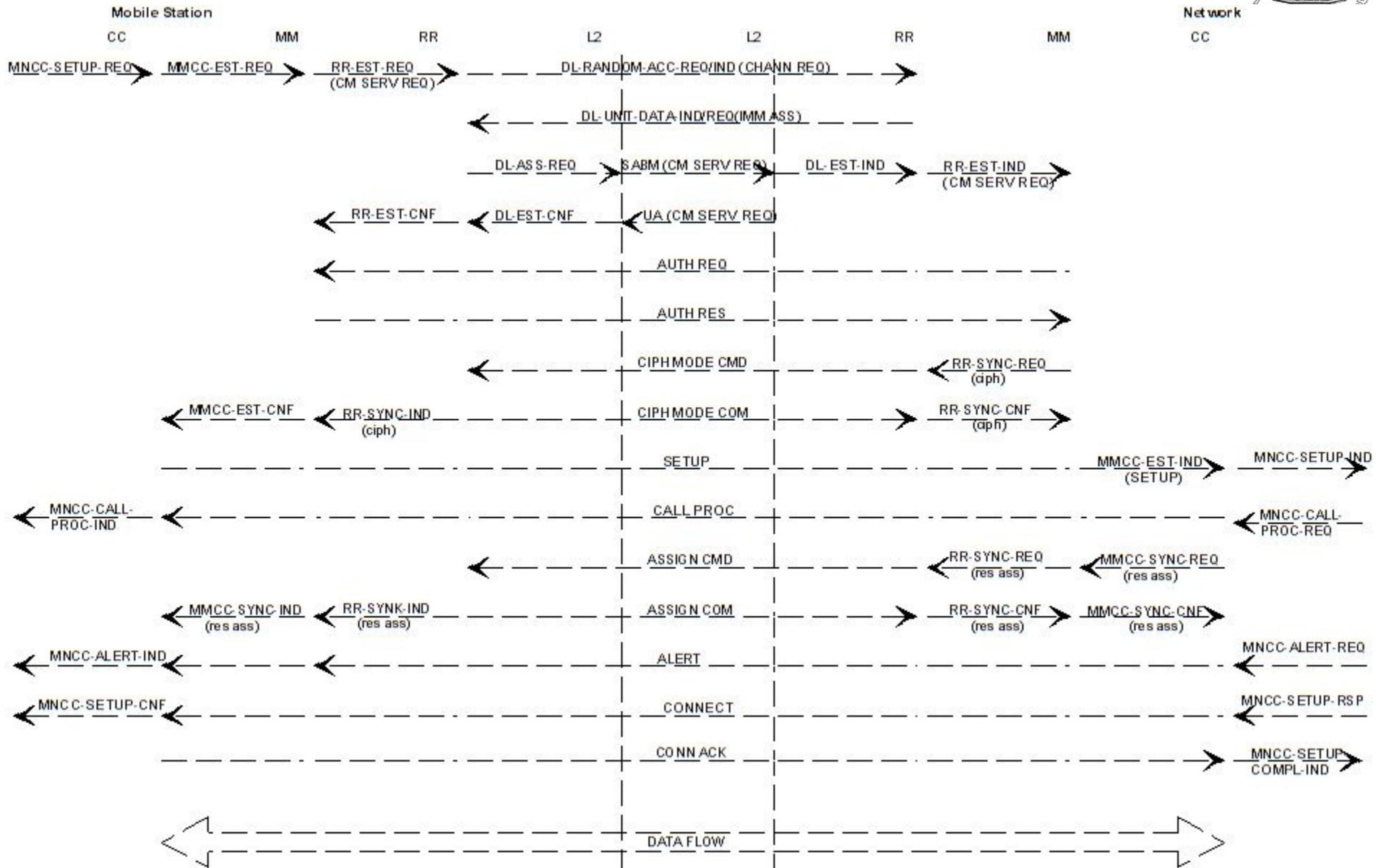
- **Obiettivo:** combattere usi non consentiti ed intercettazioni (mediante procedure di certificazione ed autenticazione), resistere ad interferenze volontarie (jamming).
- La comunicazione GSM è cifrata. La cifratura si basa su due chiavi: la chiave segreta  $K_i$  (contenuta nella SIM e nell'AuC del MSC), e la chiave di cifratura  $K_c$ . L'AuC invia un numero casuale (Random Number – RN) alla MS. Ambedue (AuC e MS) eseguono un algoritmo che fornisce la chiave di cifratura  $K_c$  ed un responso che viene trasmesso dalla MS all'AuC.

L'AuC verifica che il responso ricevuto dalla MS sia identico a quella da lui generato (autenticazione). La stessa  $K_c$  viene inviata (non via radio) alla BS per crittore la voce (cifratura) e viene usata dalla MS per decrittare la. La  $K_c$  vale solo per quella conversazione. La  $K_i$  non viene mai trasmessa.





# Chiamata originata da mobile





# GPRS - General Packet Radio Service

- GSM

Servizi dati CS fino a 9.6 kbps, SMS

- HSCSD (High Speed CS Data)

Aggregazione a livello RLP → bit rate netta 14.4

multislot (4 slot=57 kbps)

- Evoluzione

traffico Internet (dati) in crescita

penetrazione altissima della telefonia mobile

accesso a Internet dal cellulare mantenendo l'infrastruttura e le funzionalità del GSM

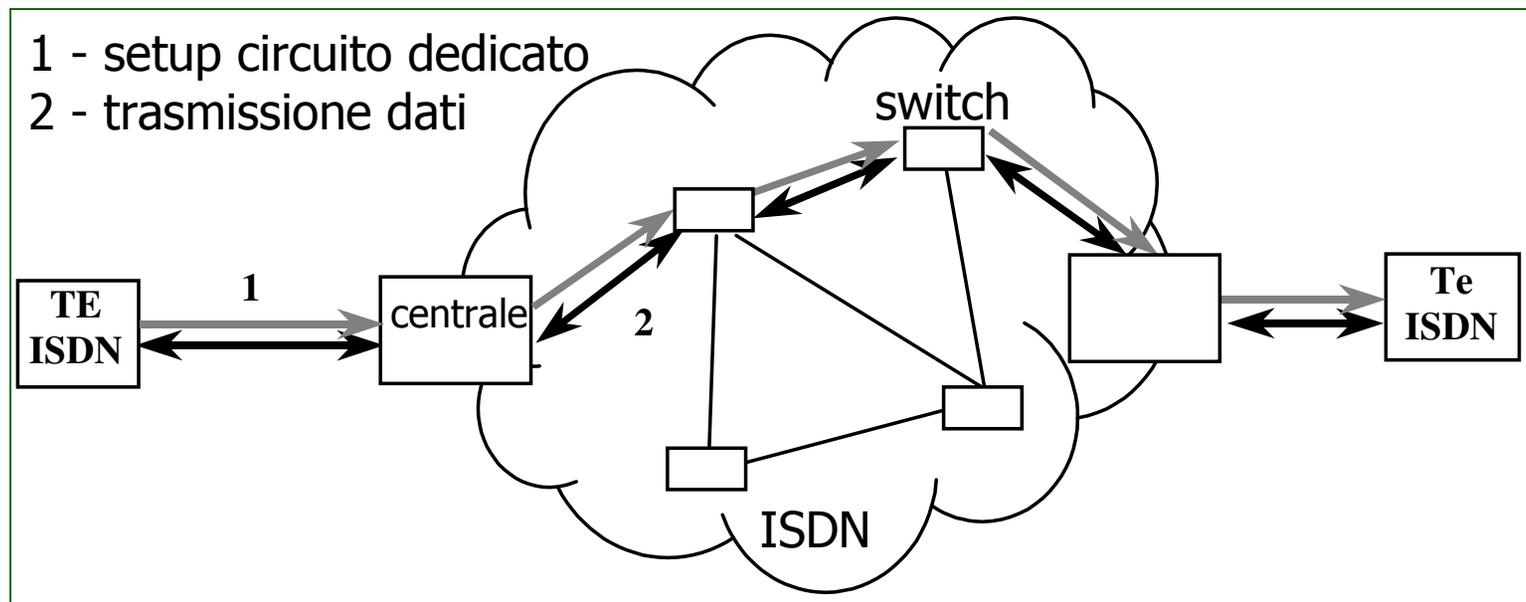
# GPRS: caratteristiche generali

maggior capacità → multislot

asimmetria servizi dati → gestione separata link UL/DL

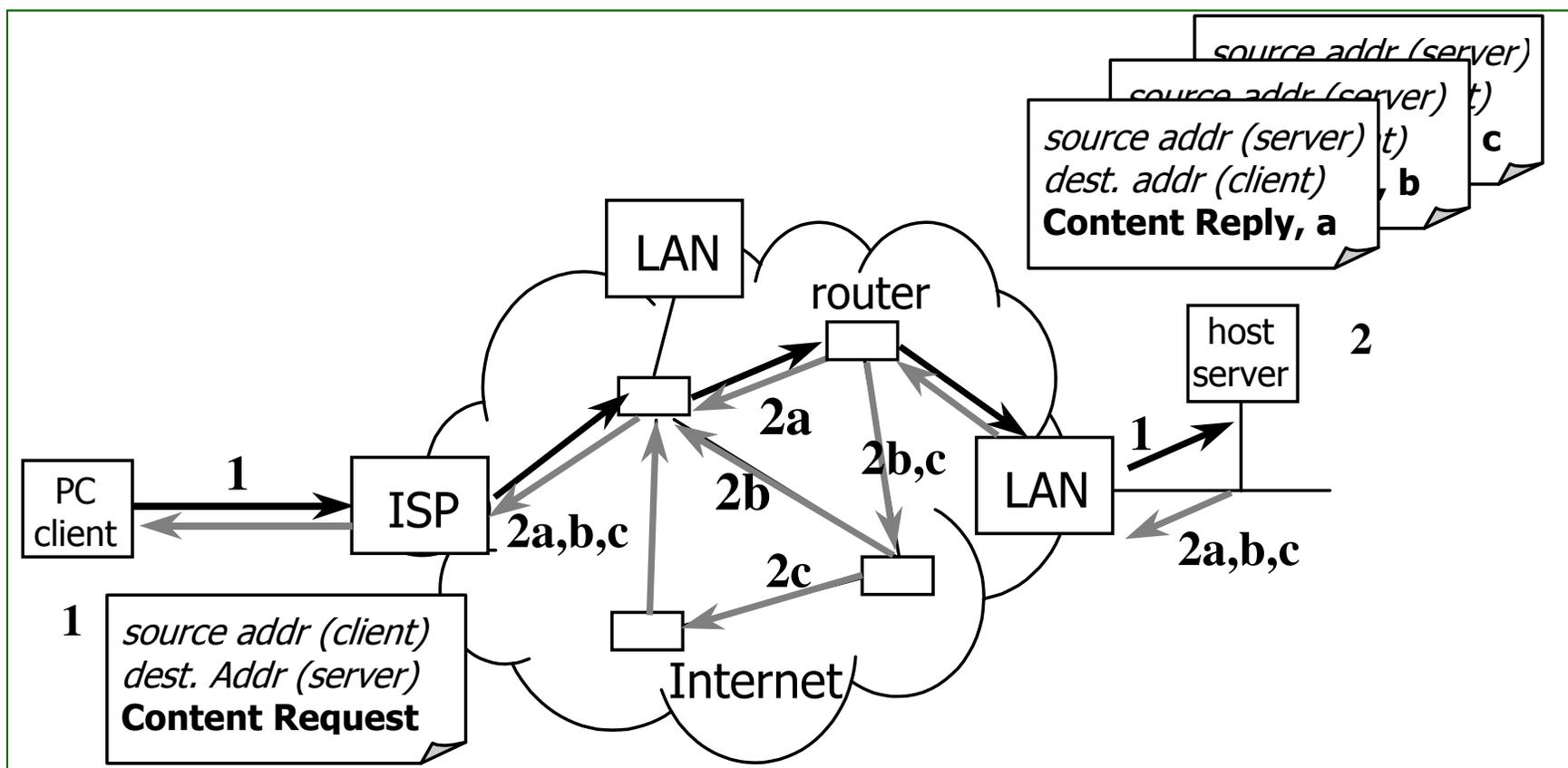
allocazione on demand, commutazione di pacchetto → efficienza uso risorse radio

## Circuit-Switching



# Packet switching

Ogni pacchetto (datagram) è autonomo, indica **Source Add** e **Dest Add**, **numero sequenza** e viene inoltrato in modo indipendente dai **router** tramite tabella di indirizzamento aggiornata da un protocollo di routing.

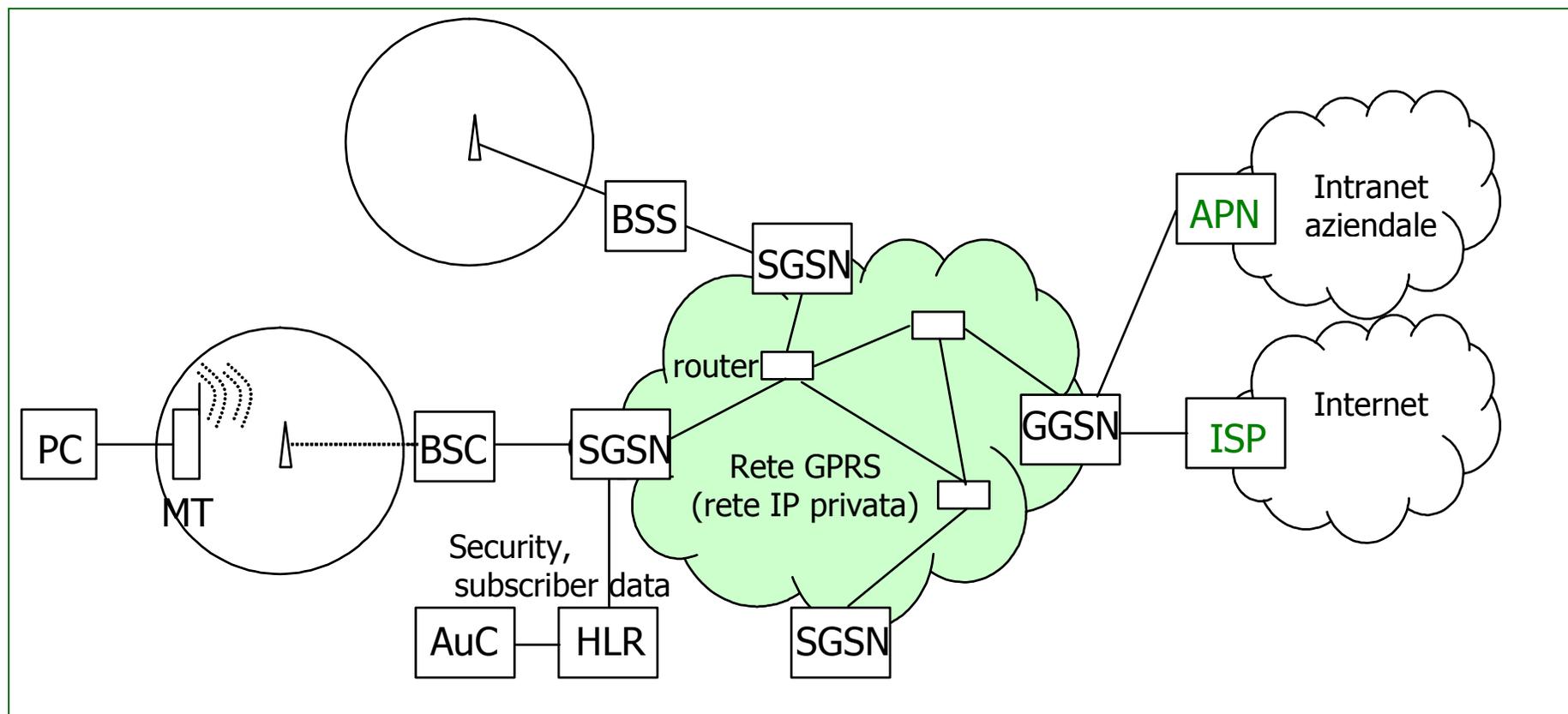


# Architettura della rete GPRS

**SGSN** - Serving GPRS Support Node

**GGSN** - Gateway GPRS Support Node

**APN** - Access Point Name





# Encapsulated IP protocol

- Ha l'obiettivo di nascondere la mobilità agli utenti che accedono a IP mediante il sistema cellulare.
  - **Serving GPRS Support Node (SGSN)**. Riceve i pacchetti IP dell'utente. Connesso al registro HLR, per acquisire informazioni su QoS dell'utente gestito.
  - **Gateway GPRS Support Nodes (GGSN)**. Connette la rete cellulare a Internet.
    - Ha una tabella con l'indirizzo IP dell'SGSN associato al mobile con un dato indirizzo IP.
    - Il pacchetto diretto al mobile viene incapsulato in un pacchetto con l'indirizzo dell'SGSN (tunneling). Il pacchetto comprende due coppie di indirizzi IP: mobile-nodo IP con cui dialoga, coppia SGSN-GGSN tramite i quali ha luogo lo scambio.
    - Il GGSN è responsabile dell'assegnazione dell'indirizzo IP a un terminale wireless che accede a Internet. Può utilizzare il NAT, per evitare il ricorso a troppi indirizzi pubblici.



# QoS in GPRS

Profilo di servizio caratterizzato da un set di parametri:

- precedence class
- delay class
- reliability class
- peak and mean throughput class

Precedence class: priorità high, normal, low

Delay class:

| Delay Class      | Delay (maximum values)    |                           |                           |                           |
|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                  | SDU size: 128 octets      |                           | SDU size: 1024 octets     |                           |
|                  | Mean Transfer Delay (sec) | 95 percentile Delay (sec) | Mean Transfer Delay (sec) | 95 percentile Delay (sec) |
| 1. (Predictive)  | < 0.5                     | < 1.5                     | < 2                       | < 7                       |
| 2. (Predictive)  | < 5                       | < 25                      | < 15                      | < 75                      |
| 3. (Predictive)  | < 50                      | < 250                     | < 75                      | < 375                     |
| 4. (Best Effort) | Unspecified               |                           |                           |                           |



# Classe di affidabilità

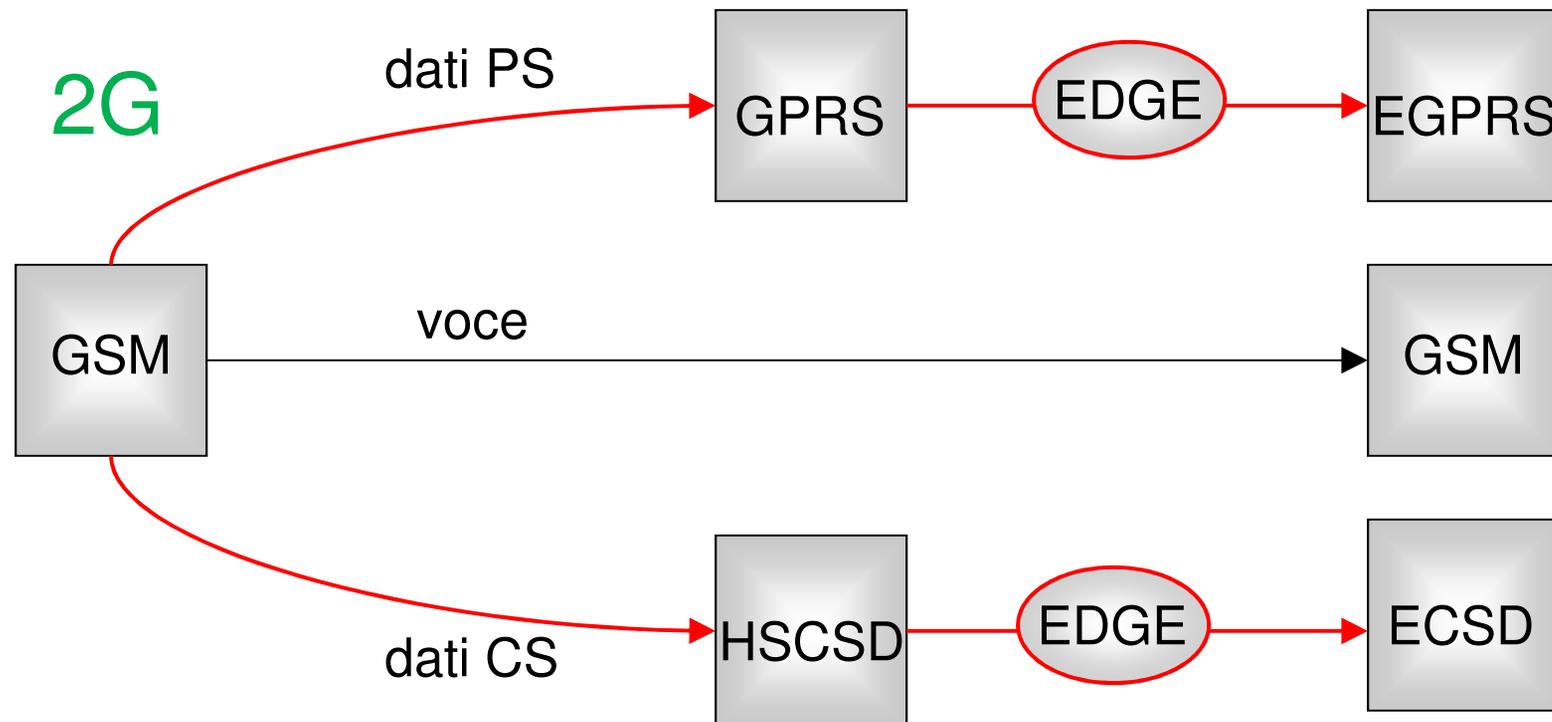
- probability of data loss
- probability of data delivered out of sequence
- probability of duplicate data delivery
- probability of corrupted data

| Reliability class | Lost SDU probability (a) | Duplicate SDU probability | Out of Sequence SDU probability | Corrupt SDU probability (b) | Example of application characteristics.   |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---|
| 1                 | $10^{-9}$                | $10^{-9}$                 | $10^{-9}$                       | $10^{-9}$                   | Error sensitive, no error correction capability, limited error tolerance capability.          |
| 2                 | $10^{-4}$                | $10^{-5}$                 | $10^{-5}$                       | $10^{-6}$                   | Error sensitive, limited error correction capability, good error tolerance capability.        |
| 3                 | $10^{-2}$                | $10^{-5}$                 | $10^{-5}$                       | $10^{-2}$                   | Not error sensitive, error correction capability and/or very good error tolerance capability. |



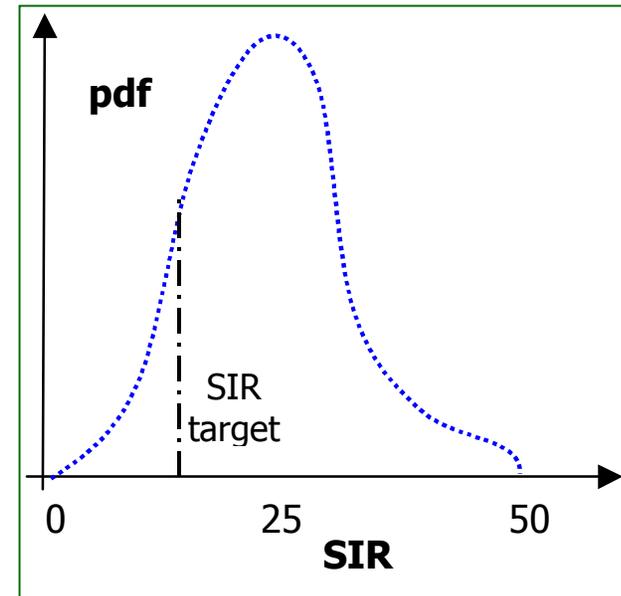
# EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)

- Migrazione verso la terza generazione
- GSM EDGE Radio Access Network (**GERAN**)



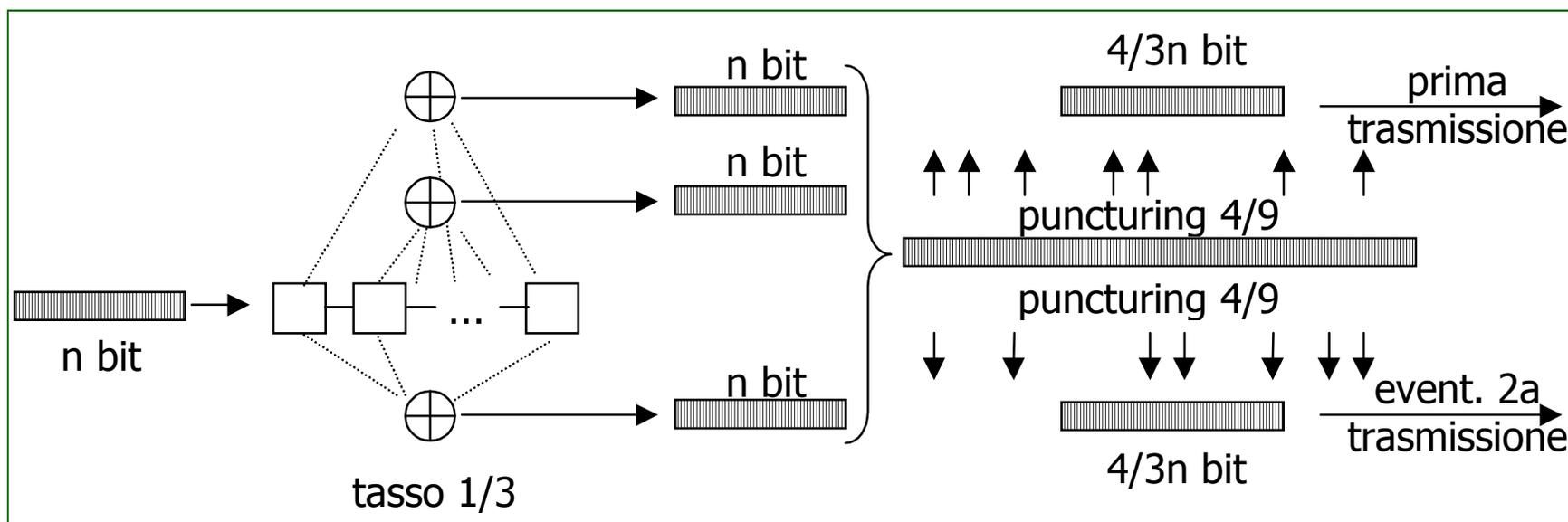
# Un sistema adattativo

- piccola % utenti sotto SIR target
- alta % utenti sopra SIR target
- EDGE migliora l'efficienza mediante *Link Quality Control* (adattamento della codifica di canale alla qualità del canale)
  - Link Adaptation: stima del SIR e selezione di modulazione e schema di codifica
  - Incremental Redundancy
- Modulazione 8-PSK (oltre a GMSK)-
  - maggior efficienza spettrale (271 kbaud/s, 1 simbolo = 3 bit)
  - moderata complessità



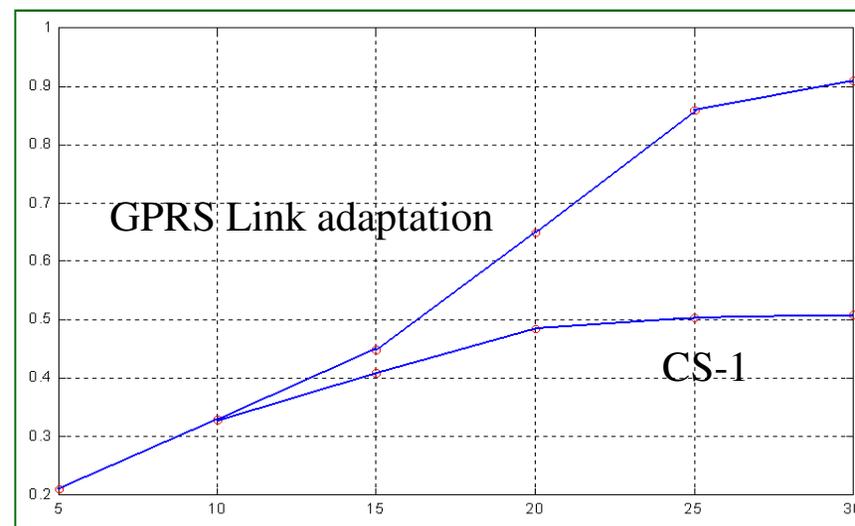
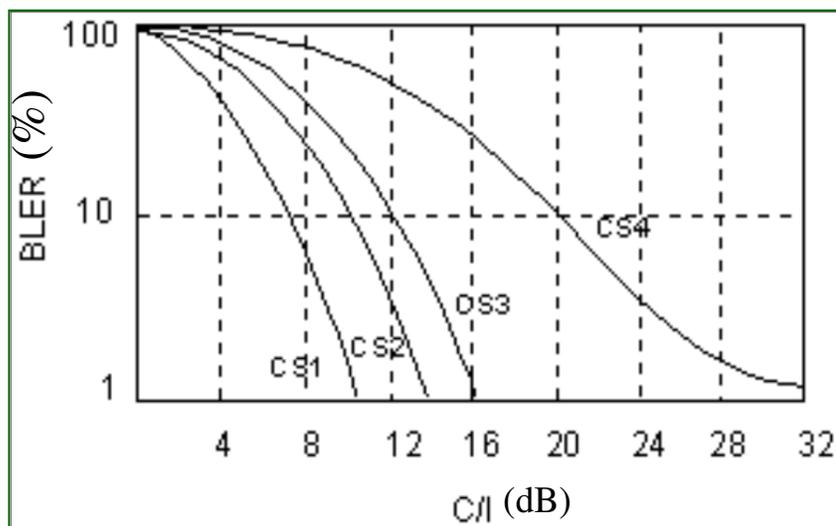
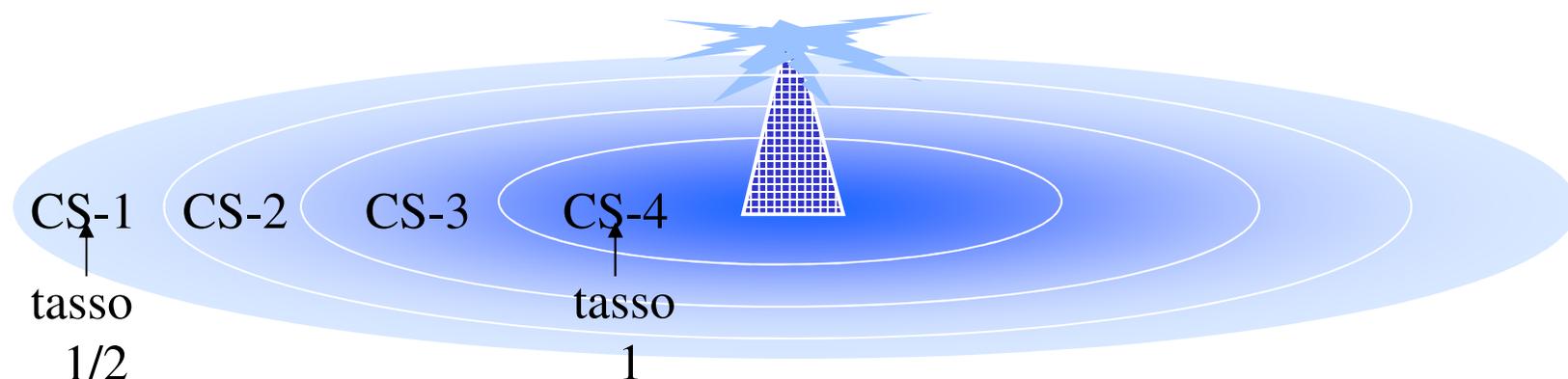
# Incremental Redundancy

- trasmissione con tasso di codifica selezionato da Link Adaptation
- blocco radio ricevuto corretto: elevato throughput
- blocco radio ricevuto errato: ritrasmissione con ridondanza “diversa”



# Link Adaptation: codifica dinamica nel GPRS

- *Coding Scheme* in funzione della posizione





# Schemi di codifica di canale per GPRS

| nome del canale | tasso del codice, $R_c$ | modulazione | bit-rate utile per slot |
|-----------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| CS-1            | 0.49                    | GMSK        | 8.0 kbps                |
| CS-2            | 0.63                    | GMSK        | 12.0 kbps               |
| CS-3            | 0.73                    | GMSK        | 14.4 kbps               |
| CS-4            | 1                       | GMSK        | 20.0 kbps               |

- Si adotta un codice convoluzionale di tasso  $1/2$ , perforato per ottenere i tassi utilizzati da CS-2 e CS-3.
- Un pacchetto include il MAC header, l'RLC header, i dati RLC, e alcuni bit disponibile. La bit rate utile per slot è determinata considerando i dati RLC. La bit rate totale è pari a  $22.8 R_c$  kbps
- CS: *Code Scheme*



# Schemi di codifica di canale per EDGE

| nome del canale | tasso del codice | modulazione | bit-rate utile per slot |
|-----------------|------------------|-------------|-------------------------|
| MCS-1           | 0.53             | GMSK        | 8.0 kbps                |
| MCS-2           | 0.66             | GMSK        | 10.4 kbps               |
| MCS-3           | 0.80             | GMSK        | 14.8 kbps               |
| MCS-4           | 1                | GMSK        | 16.8 kbps               |
| MCS-5           | 0.37             | 8-PSK       | 21.6 kbps               |
| MCS-6           | 0.49             | 8-PSK       | 28.8 kbps               |
| MCS-7           | 0.76             | 8-PSK       | 44.0 kbps               |
| MCS-8           | 0.92             | 8-PSK       | 53.6 kbps               |
| MCS-9           | 1                | 8-PSK       | 58.4 kbps               |

MCS: *Modulation and Coding Scheme*



## Modalità Circuit-Switched (ECSD)

- Obiettivo: conservare il protocol stack GSM.
- Servizi non trasparenti: GSN RLP (Radio Link Protocol)
- Utilizzo di tecniche adattative: *New Transcoder and rate adaptation*

| nome del canale   | tasso | modulazione | bit-rate per slot |
|-------------------|-------|-------------|-------------------|
| TCH/F2.4          | 0.16  | GMSK        | 3.6 kbps          |
| TCH/F4.8          | 0.26  | GMSK        | 6 kbps            |
| TCH/F9.6          | 0.53  | GMSK        | 12 kbps           |
| TCH/F14.4         | 0.64  | GMSK        | 14.5 kbps         |
| ECSD TCS-1 (NT+T) | 0.42  | 8-PSK       | 29 kbps           |
| ECSD TCS-2 (T)    | 0.46  | 8-PSK       | 32 kbps           |
| ECSD TCS-3 (NT)   | 0.56  | 8-PSK       | 38.8 kbps         |

T: *Transparent*, NT: *Non Transparent* (consegna senza errori)



## Evolved EDGE

- **Latenza ridotta.** In EDGE, per trasmettere un blocco dati (23-148 byte) si utilizzano un singolo slot e 4 trame consecutive (con una latenza pari a circa 20 ms). In Evolved EDGE si utilizzano 2 slot e 2 trame (latenza dimezzata).
- **Trasmissione *dual carrier*:** c'è la possibilità di utilizzare simultaneamente due frequenze diverse, con raddoppio del throughput.
- Utilizzo di **modulazioni di ordine elevato** (16 QAM, 64 QAM) (aggregando gli slot, si possono raggiungere tassi di trasmissione di 1.3 Mbit/s in down-link e 650 kbit/s in up link).
- Utilizzo di **tecniche di codifica efficienti** (turbo codici), con riduzione del rapporto segnale/rumore richiesto per la corretta decodifica. Possibile riduzione del fattore di riutilizzo.



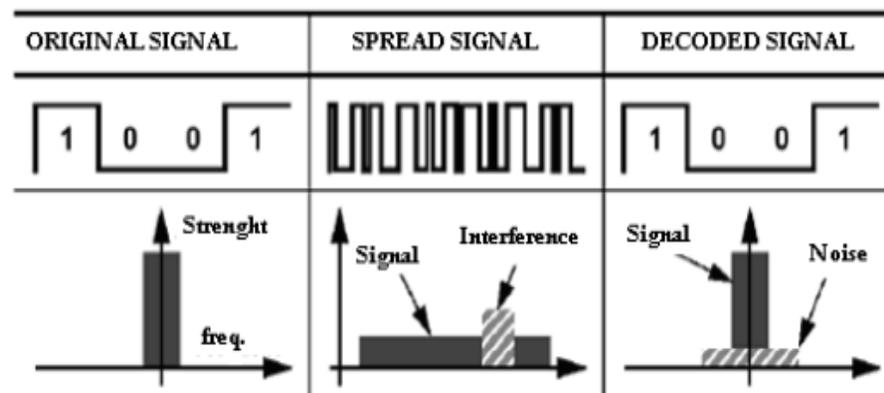
# UMTS: caratteristiche generali

- Migliori prestazioni e flessibilità con accesso multiplo CDMA
- Flessibilità nel trasporto dati
  - modalità PS-CS
  - Canali di trasporto (bearer) asimmetrici UL/DL
  - modalità FDD e TDD
- Adozione di soluzioni tecnologiche evolute
  - antenne intelligenti
  - *multi-user detection* (con cancellazione dell'interferenza)
  - organizzazione gerarchica celle

# UMTS

- Nato per la fornitura di **servizi multimediali** (Internet, videoconferenza, video on demand, gaming, browsing, ...) tramite cellulare.
- Adotta la **commutazione di pacchetto per i servizi dati**, mantenendo la commutazione di circuito per la voce (come nel GSM).

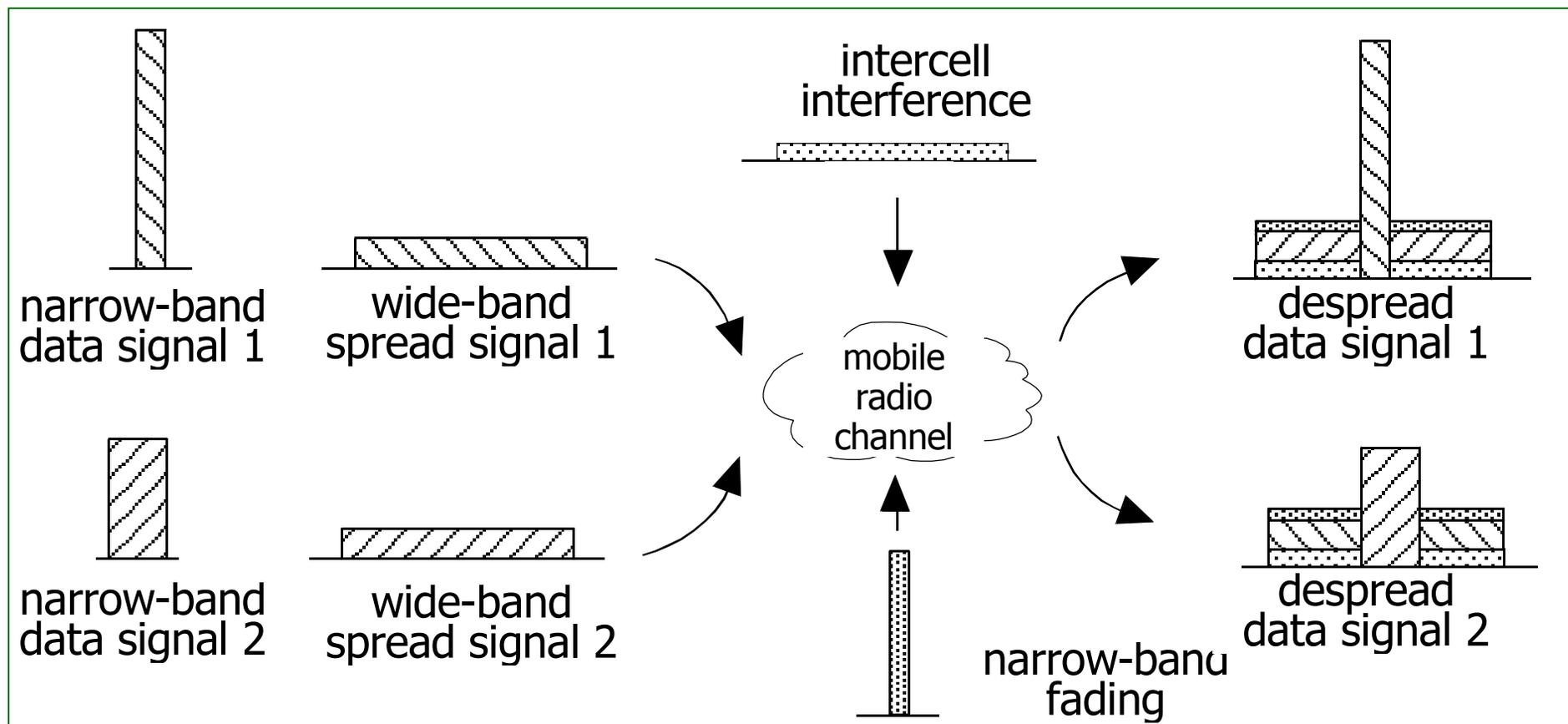
- Adotta il Wideband CDMA (**WCDMA**), in cui gli utenti sono distinti in base a sequenze ortogonali. In trasmissione il segnale contenente l'informazione viene moltiplicato per una sequenza di spreading (diversa per ogni utente), determinando così un'**espansione diretta dello spettro** (Direct Sequence Spread Spectrum – **DSSS**). In ricezione il segnale viene rimoltiplicato per la stessa sequenza in modo da ricostruire il segnale trasmesso.



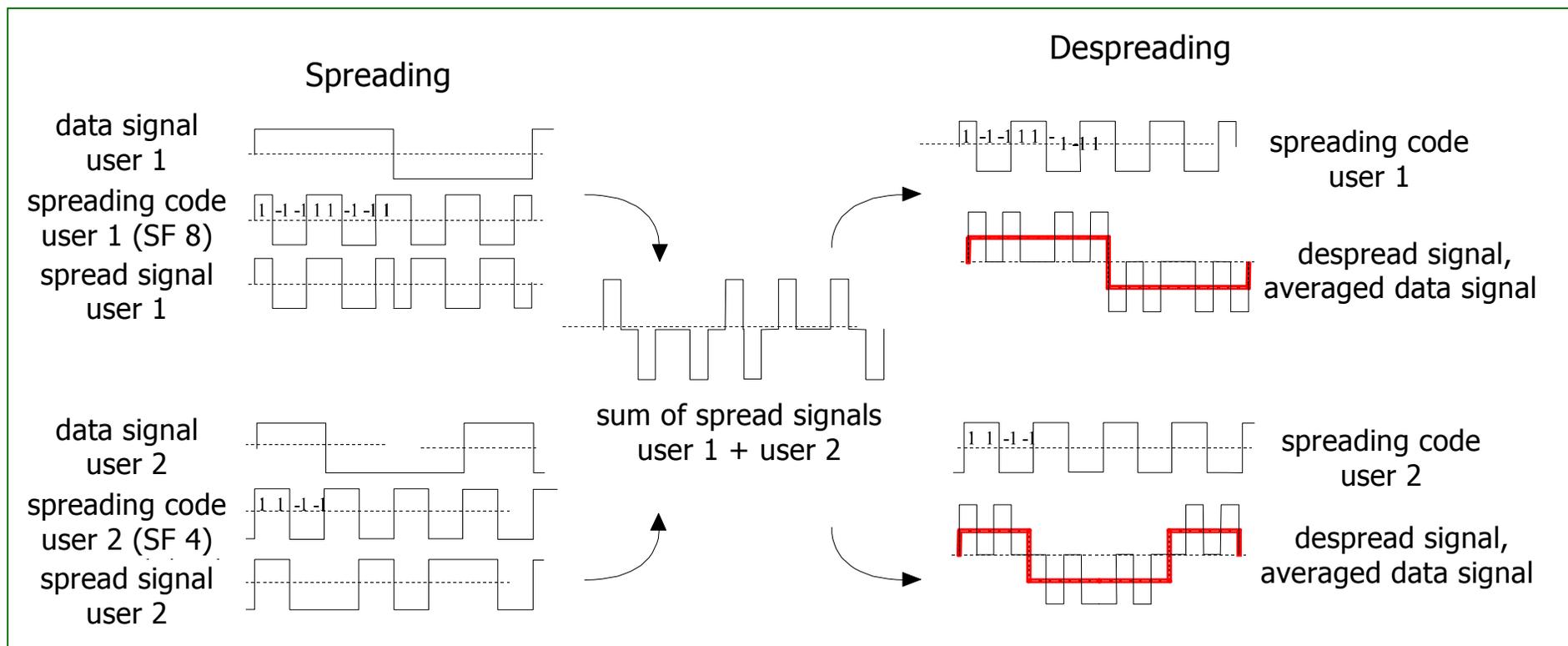
- Forte **immunità all'interferenza** dei segnali esterni a banda stretta.
- Il **limite sul numero di utenti** in una cella **non più rigido** come nel GSM dove, una volta finite le sequenze per il FHSS, si aveva il fenomeno del blocco. Ora il limite è **soft**, accettando sequenze di spreading quasi ortogonali si possono accettare nuovi utenti, al prezzo di un peggioramento distribuito tra tutti gli utenti.

# W-CDMA

- Effetti del *despreading* su interferenze e disturbi:



# Spreading e despreading per due segnali di diversa bit-rate



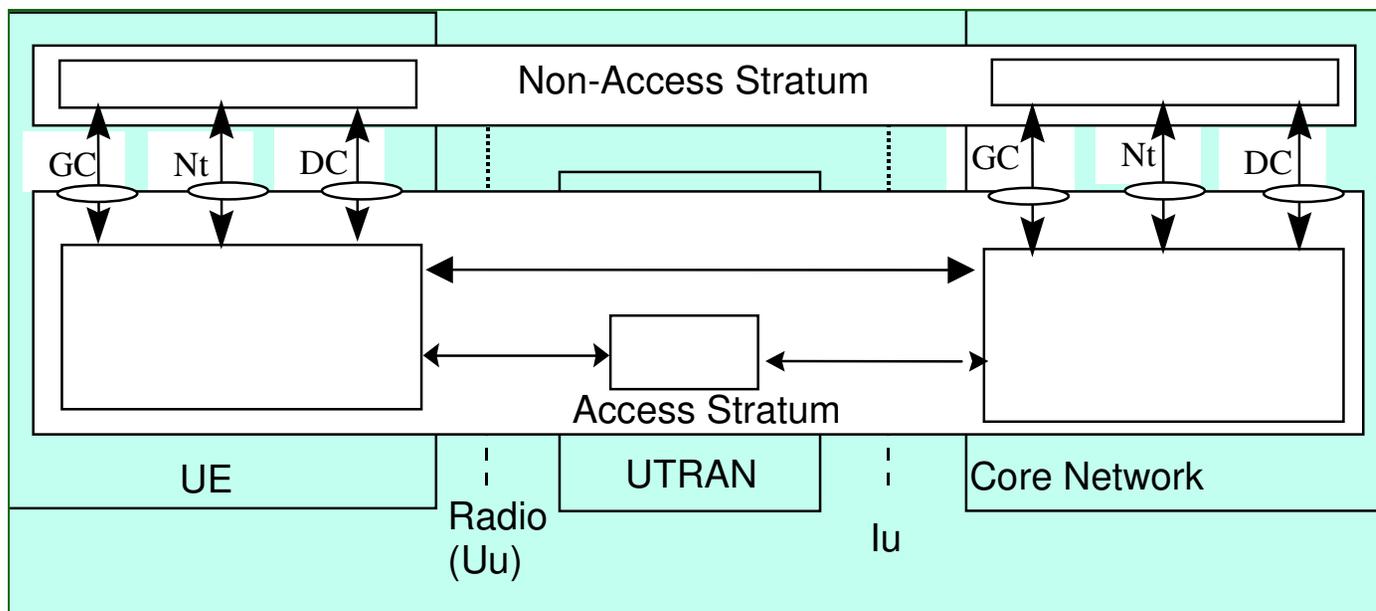


# Componenti Rete UMTS

- Tre componenti principali:
  - Core Network (CN),
  - UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network),
  - UE (User Equipment).
- Elementi Core Network
  - HLR, AuC, MSC, VLR, GMSC, SGSN, GGSN.
- Elementi UTRAN
  - RNC (Radio Network Controller), Node B.
- Le entità appartenenti alla Core Network e all'UTRAN comunicano mediante collegamenti dedicati. Analogamente, Core Network e UTRAN comunicano mediante collegamenti dedicati (interfaccia Iu).
- UTRAN e UE comunicano via radio (interfaccia Uu).

# Architettura della rete UMTS

**UTRAN:** UMTS Terrestrial Radio Access Network)



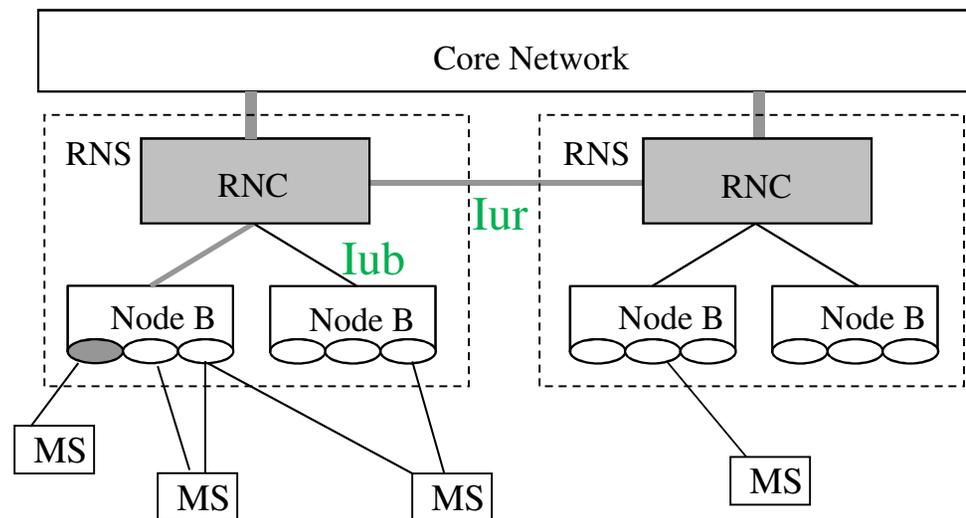
**Access Stratum:** protocol stack tra la radio network e il dispositivo utente

**Non-Access Stratum:** protocol stack tra la core network e il dispositivo utente

# UMTS

- L'architettura di rete include ulteriori sistemi.
  - Radio Network Subsystem (RNS):
    - Node B: stazione base (che può servire più celle).
    - Radio Network Controller (RNC): controlla i node B connessi ad esso.
  - Core Network: supporta sia **commutazione di circuito** (fonia) che **commutazione di pacchetto** (servizi dati), comprende gli MSC dell'UMTS e del GSM.
  - L'insieme dei diversi RNS formano la UTRAN (UMTS Radio Access Network).

- Il controllo da parte di un singolo Node B di più celle permette il **soft handover** (uso simultaneo da parte di un'unica MS di più collegamenti con celle diverse in uno stesso Node B o in Node B diversi ma gestiti da un unico RNC).



# Architettura GSM/UMTS

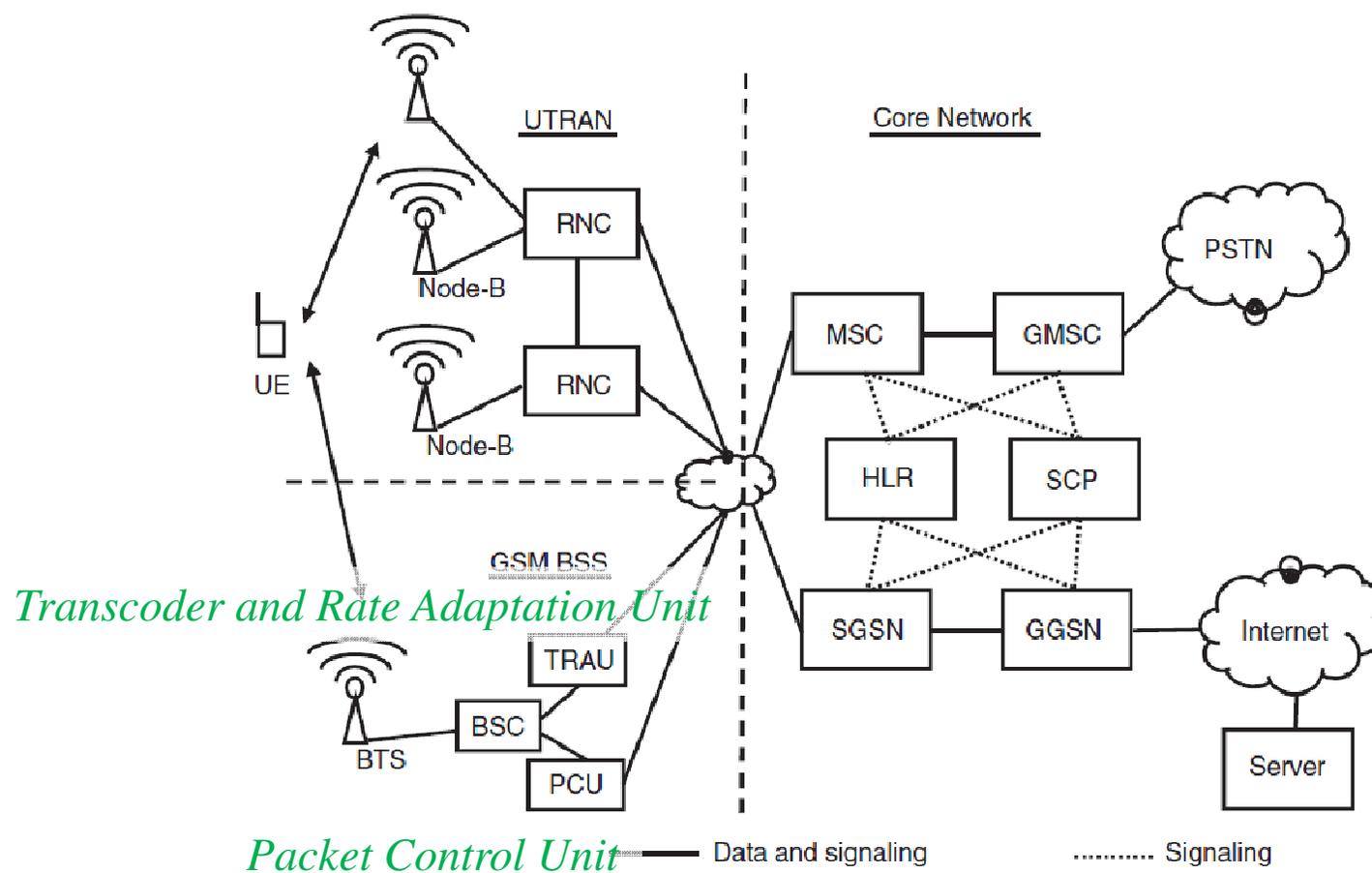


Figure 2.1 Common GSM/UMTS network. (Reproduced from *Communication Systems for the Mobile Information Society*, Martin Sauter, 2006, John Wiley & Sons, Ltd, Ref. [1].)



## Funzioni dell'interfaccia Iur (SRNC-CRSN o SRNC-DRNS)

- Gestione della rete di trasporto.
- Gestione del traffico sui canali di trasporto comune:
  - preparazione delle risorse;
  - Paging.
- Gestione del traffico sui canali di trasporto dedicati:
  - setup, add, remove di link radio;
  - report misure.
- Gestione del traffico sui TrCH condivisi DL e TDD UL:
  - setup, add, remove di link radio;
  - allocazione di risorse.
- Report misure per “oggetti” comuni e dedicati:

**SRNC/DRNC**: splitting/combining di flussi di informazione.

**RNSAP** (Radio Network System Application Part).



# UMTS: interfaccia radio (I)

- Multiplazione: **W-CDMA** (*Wideband Code Division Multiple access*).
- Intervallo di frequenze: 1920 MHz - 1980 MHz and 2110 MHz - 2170 MHz (*Frequency Division Duplex*) UL and DL.
- Banda: **W=5 MHz** (in entrambe le direzioni).
- **Frequency re-use: 1.**
- Canali vocali disponibili per canale radio di 2x5MHz: ~196 ( $S_f=256$  UL, AMR 7.95kbps) / ~98 ( $S_f=128$  UL, AMR 12.2kbps).
- Codifiche vocali: AMR (*Adaptive Multi Rate*) codecs (4.75- 12.2 kbit/s), GSM *Enhanced Full Rate* (12.2 kbit/s).
- Codifica di canale: Codici convoluzionali, turbo codici.
- **Modulazione: QPSK**
- Impulso: *Root raised cosine*, *roll-off* = 0.22

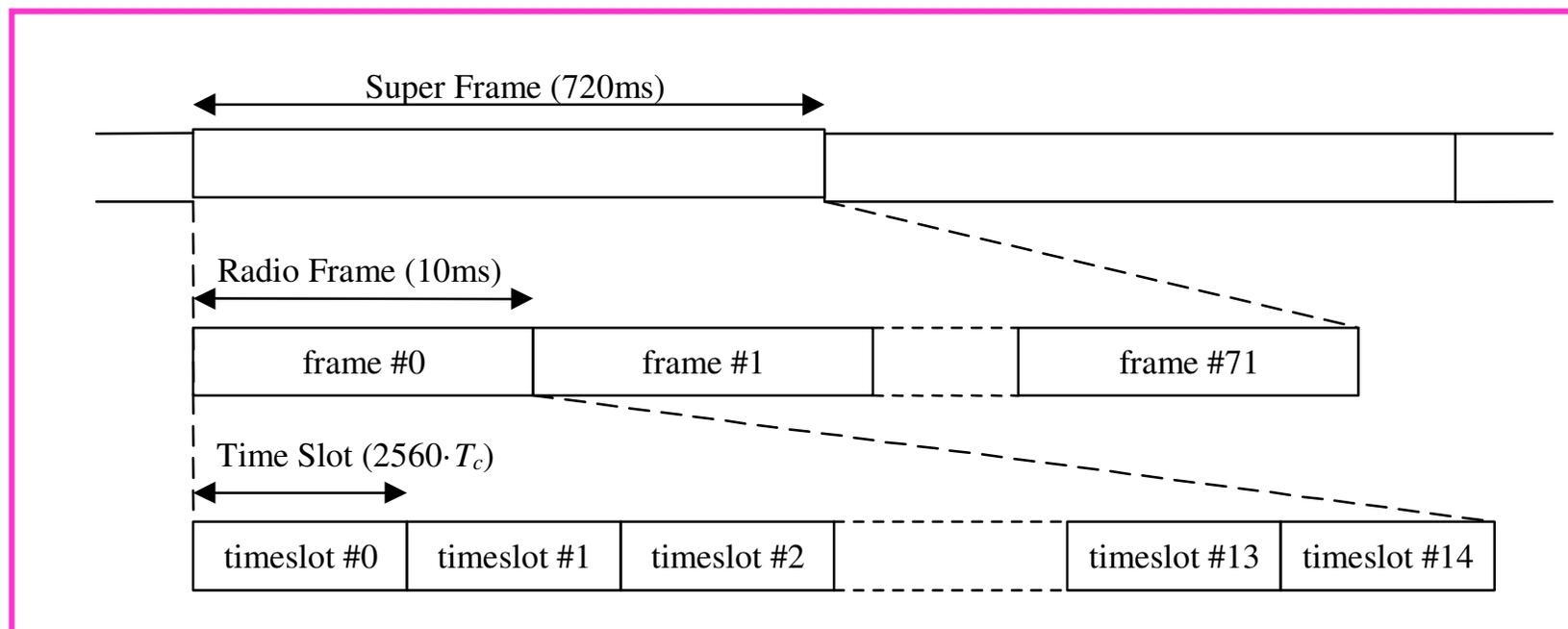


## UMTS: interfaccia radio (II)

- Chip rate: 3.84 Mcps.
- Massima bit rate utente (disponibile): ~ 2.3Mbps ( $S_f=4$ , trasmissione con codici in parallelo 3 DL / 6 UL),  $R_c=1/2$ ). Limitato fortemente dall'interferenza.
- Massima bit rate utente (offerta): 384 kbps.
- HSPDA: 8-10 Mbps (20 Mbps - MIMO)
- Trama: 10 ms (38400 chips)
- Slot / trama: 15
- Chip / slot: 2560 chip
- Handover: Soft (NodeB diverso: *Selection Combining*), Softer (stesso NodeB: *Maximal Ratio Combining*), Hard (cambio di frequenza)
- Controllo di potenza (frequenza): Time slot = 1500 Hz rate
- Controllo di potenza (step): 0.5, 1, 1.5 and 2 dB (Variable)
- Potenza di trasmissione: Power class 1: +33 dBm (+1dB/-3dB) = 2W; class 2 +27 dBm, class 3 +24 dBm, class 4 +21 dBm
- Fattori di espansione disponibili: 4 ... 256 UL, 4 ... 512 DL

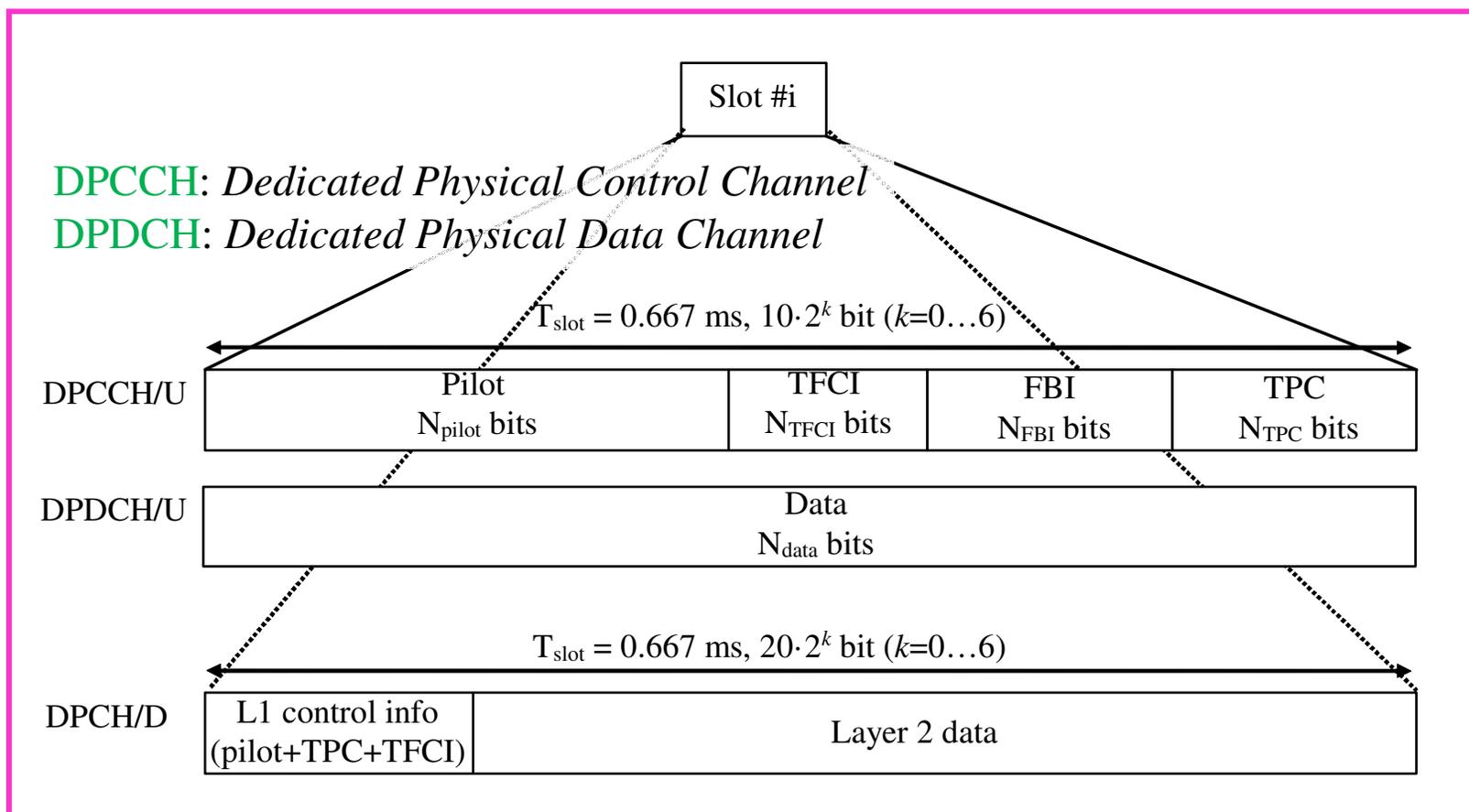
# Struttura di trama

- Superframe= 72 radio frame.
- System frame number (SFN) 0-71.
- Radio frame = 15 slot, con numero variabile di simboli.
- Symbol=SF chip.
- Canale fisico = burst ripetuto nello stesso slot ogni  $N$  frame ( $N$  sottomultiplo di 72) a partire da una certa trama.



# Slot

- Simboli pilota
- Transport Format Combination Indicator
- Transmit Power Control
- Feedback Info





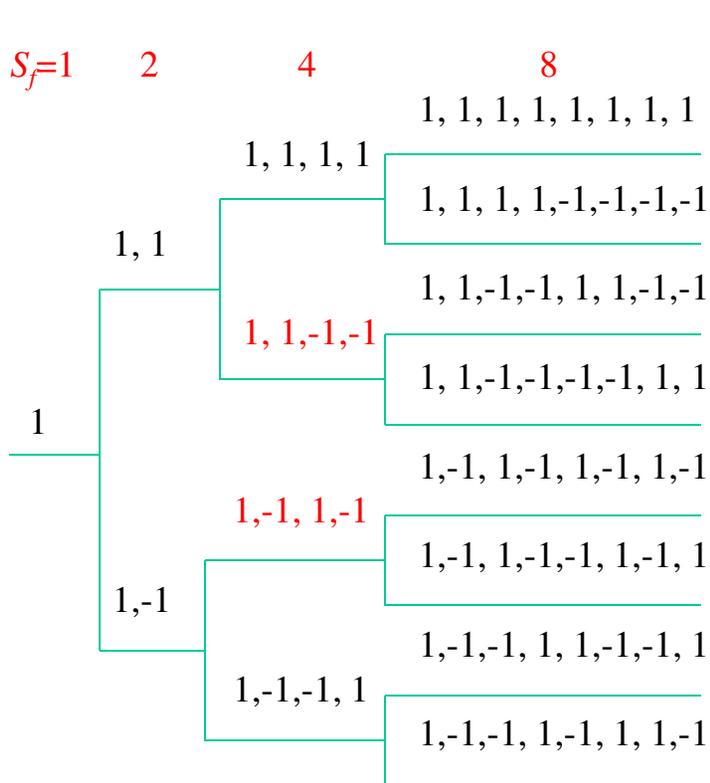
# Livello fisico

- Parte semi-statica del TF
  - codifica di canale (BCH, codici convoluzionali, turbocodici)
  - Interleaving
  - rate-matching (ripetizione o perforazione)
  - Transmission Time Interval (TTI)
- Parte dinamica del TF:
  - dimensione pacchetto radio
  - numero pacchetti radio per TTI
- Altre funzioni implementate dal livello fisico
  - macrodiversity (ricezione)
  - misura SIR e controllo potenza a ciclo chiuso e aperto
  - ricetrasmisione RF



# Albero di canalizzazione

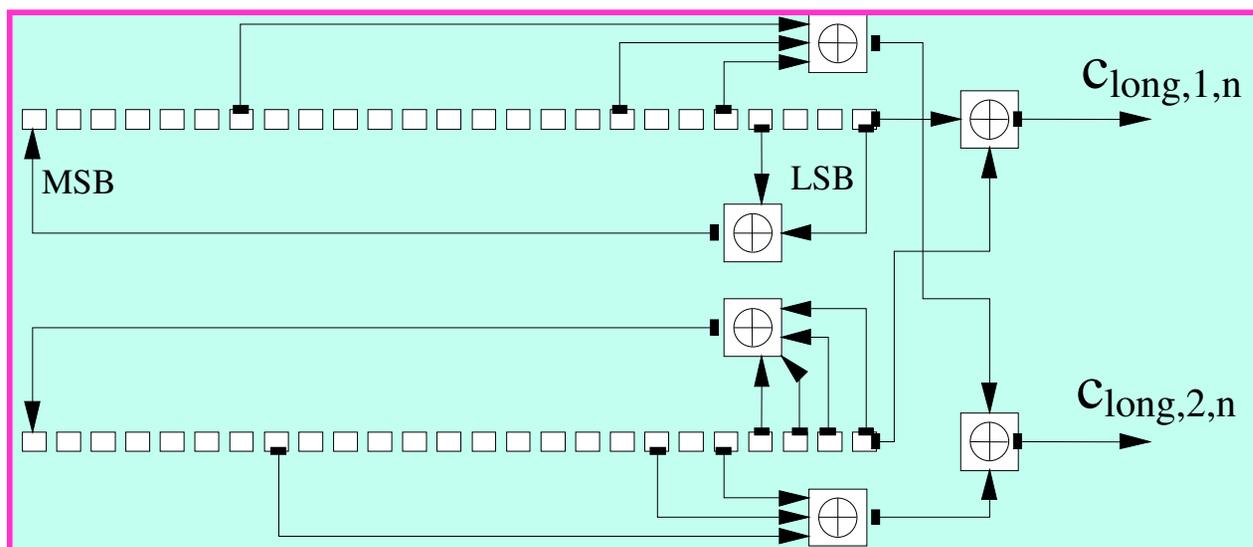
- Ad ogni  $S_f$  corrisponde un insieme di codici ortogonali. In downlink consentono di ottenere una ortogonalità certa fra i canali. Qualora venga usato un codice corrispondente a un dato  $S_f$ , tutti i codici che lo seguono nell'albero non sono disponibili. In uplink, per diminuire l'interferenza è necessario utilizzare le sequenze PN, con funzione di scrambler.



## Esempio

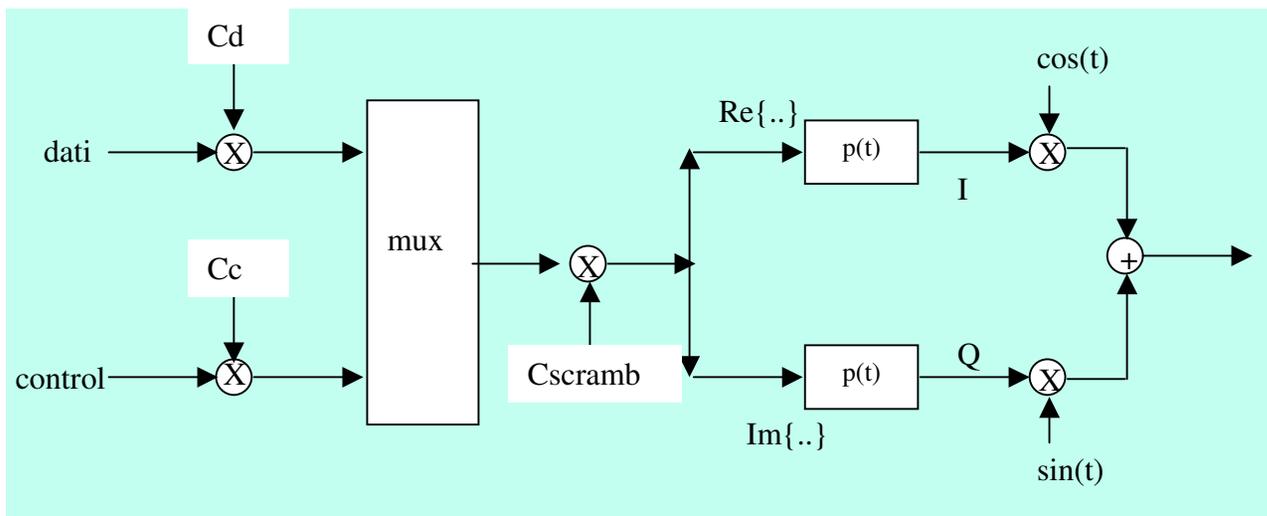
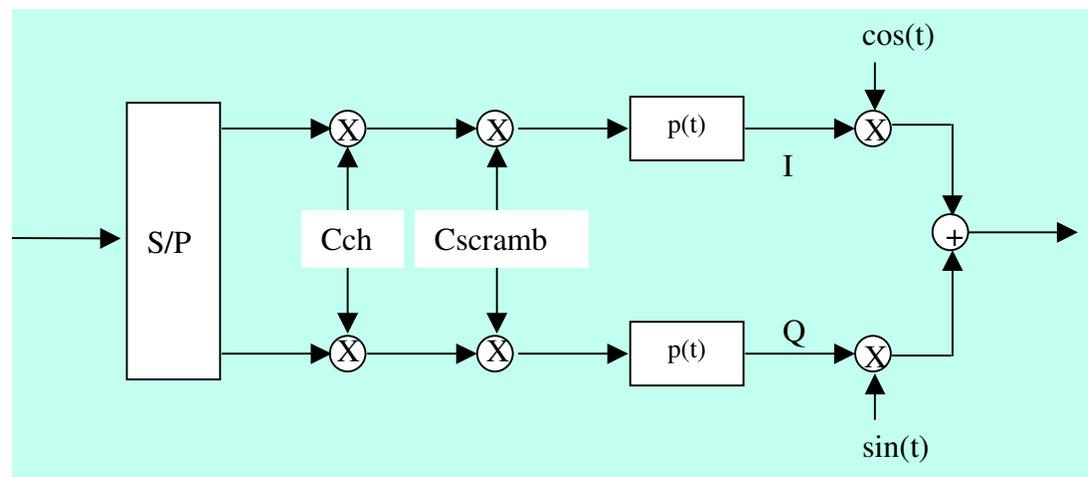
|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Info A                       | $I_A = +1$          |
| Spreading A                  | $S_A = +1 +1 -1 -1$ |
| Espansa A = $I_A \cdot S_A$  | $E_A = +1 +1 -1 -1$ |
| Info B                       | $I_B = -1$          |
| Spreading B                  | $S_B = +1 -1 +1 -1$ |
| Espansa B = $I_B \cdot S_B$  | $E_B = -1 +1 -1 +1$ |
| Canale = $E_A + E_B$         | $C = 0 +2 -2 0$     |
| De-espansa A = $C \cdot S_A$ | $D_A = 0 +2 +2 0$   |
| De-espansa B = $C \cdot S_B$ | $D_B = 0 -2 -2 0$   |
| Somma( $D_A$ ) > 0           | $\rightarrow +1$    |
| Somma( $D_B$ ) < 0           | $\rightarrow -1$    |

# Esempi codici di *scrambling*



# Spreading e modulazione

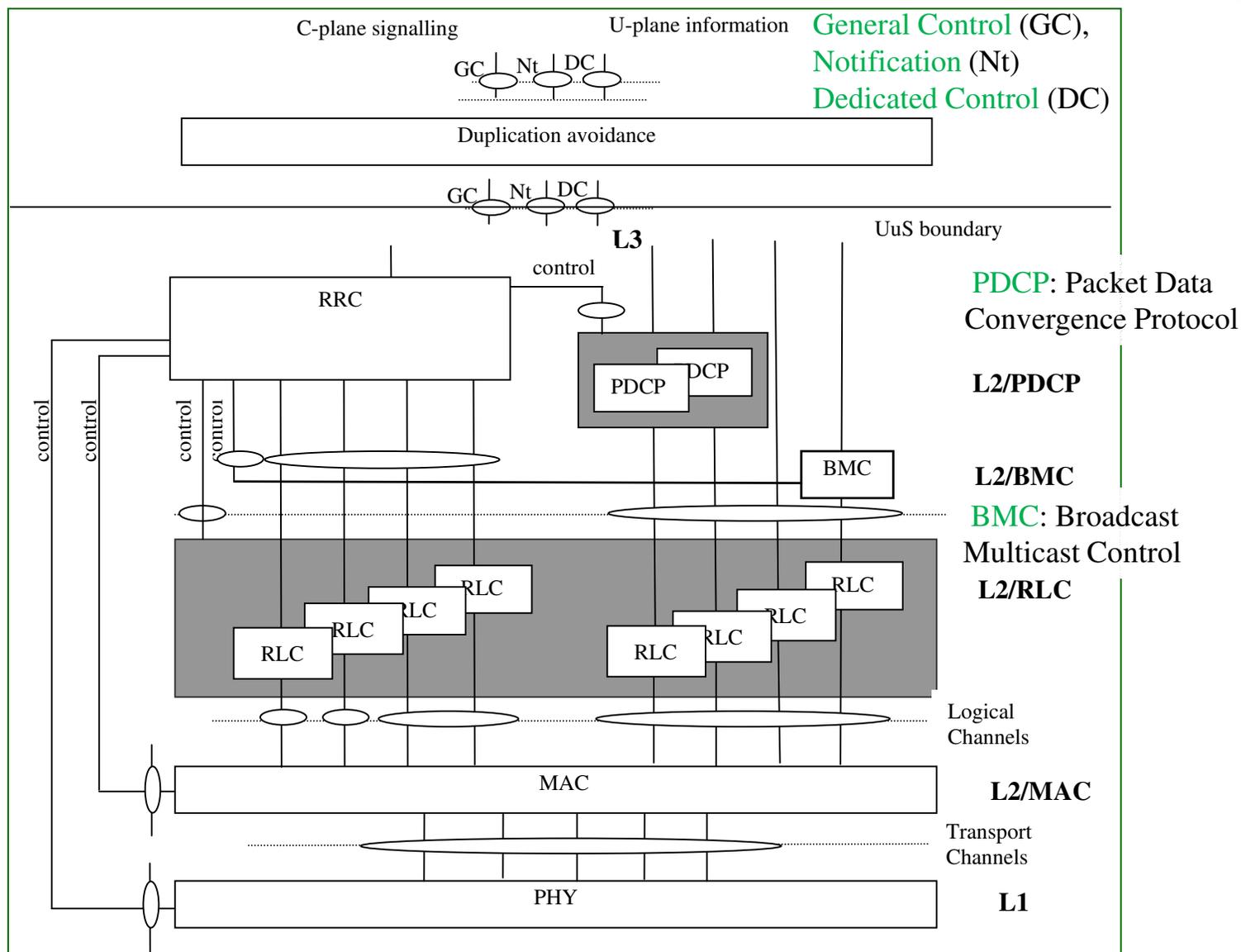
Down-link



Up-link



# Architettura protocollare interfaccia radio





# Canali logici

- **BCCH: broadcast control channel**  
For broadcasting system control information DL
- **CCCH: common control channel**  
Supports common procedures required to establish a dedicated link between the UE and the network. UL/DL
- **CTCH: common traffic channel**  
A point-to-multipoint unidirectional channel for transfer of dedicated user information for all or a group of specified UEs. DL
- **DCCH: dedicated control channel**  
A point-to-point dedicated channel for transmitting control information between a UE and the network. UL/DL
- **DTCH: dedicated traffic channel**  
A point-to-point dedicated channel for transmitting user traffic information between a UE and the network. UL/DL
- **PCCH: paging control channel**  
Transfers paging information. Used when the network does not know the location cell of the UE or the UE is in sleep mode. DL



# Canali di trasporto

- Ruolo intermediario tra canali logici e canali fisici.
- Canali dedicati
  - Dedicated channel (DCH)
  - Fast Uplink Signalling Channel (FAUSCH)
- Canali di trasporto comuni
  - Random Access Channel (RACH)
  - Forward Access Channel (FACH)
  - Broadcast Channel (BCH)
  - Synchronisation Channel (SCH) - TDD mode
  - Paging Channel (PCH)
  - Common Packet Channel (CPCH)
  - Downlink Shared Channel (DSCH)
  - Uplink Shared Channel (USCH)



## Livello fisico: servizi di trasporto

- Servizi di trasporto: definiscono come, con quali caratteristiche l'informazione di livello 2 viene trasferita dal livello fisico.
  - TrCH comuni, dove è necessaria l'identificazione in-band della UE (RACH, FACH, PCH, CPCH, DSCH, USCH) o di interesse generale (BCH, SCH-tdd)
  - TrCH dedicati, dove non è necessaria l'identificazione dell'UE (Dedicated Channel- DCH)
- Il servizio di trasporto del livello fisico si configura in uno o più formati di trasporto per i canali TrCH; in una combinazione di formati di trasporto per un canale “composto”.



# Canali fisici

- A ogni canale corrisponde un codice di espansione.
- **Primary Common Control Physical Channel (P-CCPCH)** – (DL) utilizzato dal *Broadcast Control Channel* (BCCH) (canale logico) monitorato dai mobili che non hanno una connessione in corso (identità della cella, codici di espansione, temporizzazione).
- **Secondary Common Control Physical Channel (S-CCPCH)** – (DL) utilizzato da diversi canali logici, per informazioni di *paging* (chiamata in arrivo), invio SMS o invio di piccole quantità di dati.
- **Physical Random Access Channel (PRACH)** – (UL-DL) richiesta di stabilire una connessione, risposta al paging, invio SMS, invio di piccole quantità di dati (*round trip time* elevato, di circa 200 ms).
- **Dedicated Physical Data Channel and Dedicated Physical Control Channel (DPDCH, DPCCH)** – (UL-DL) Bit rate limitata a 384 kbit/s (bearer). I canali dedicati erano utilizzati inizialmente sia per la commutazione di circuito che per quella di pacchetto (prima dell'introduzione delle tecniche specifiche per la commutazione di pacchetto (*High Speed Packet data Access* (HSPA))).



# RLC - Radio Link Control

- Servizi e funzioni:
  - Data transfer
  - transparent mode
  - unacknowledged mode
  - acknowledged mode
- SAR (Segmentation & Reassembly)
- Concatenazione di PDU
- Duplication Avoidance
- Selezione QoS

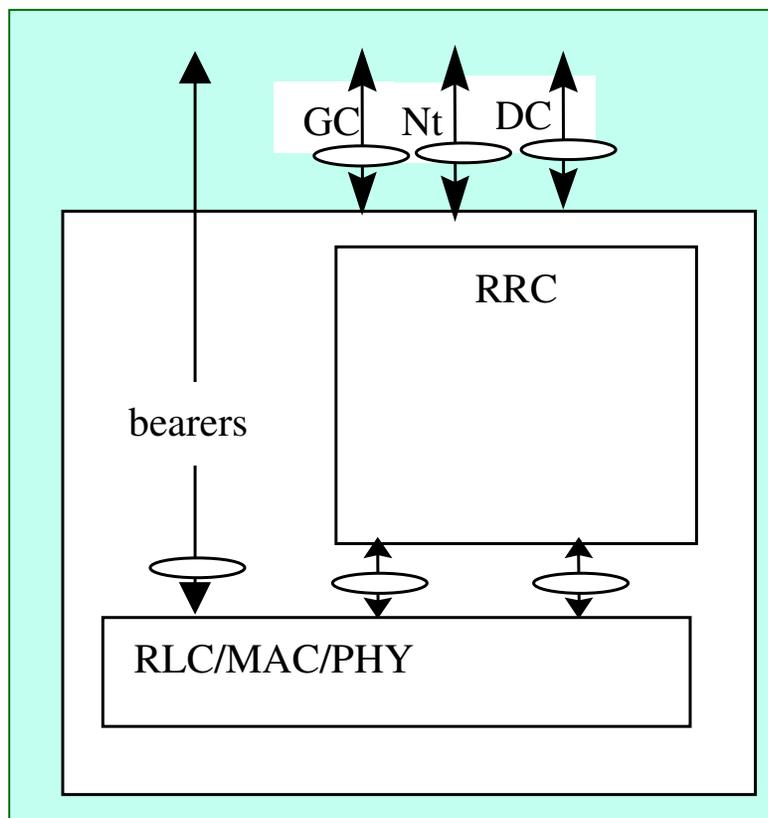


# Principali funzioni di RRC

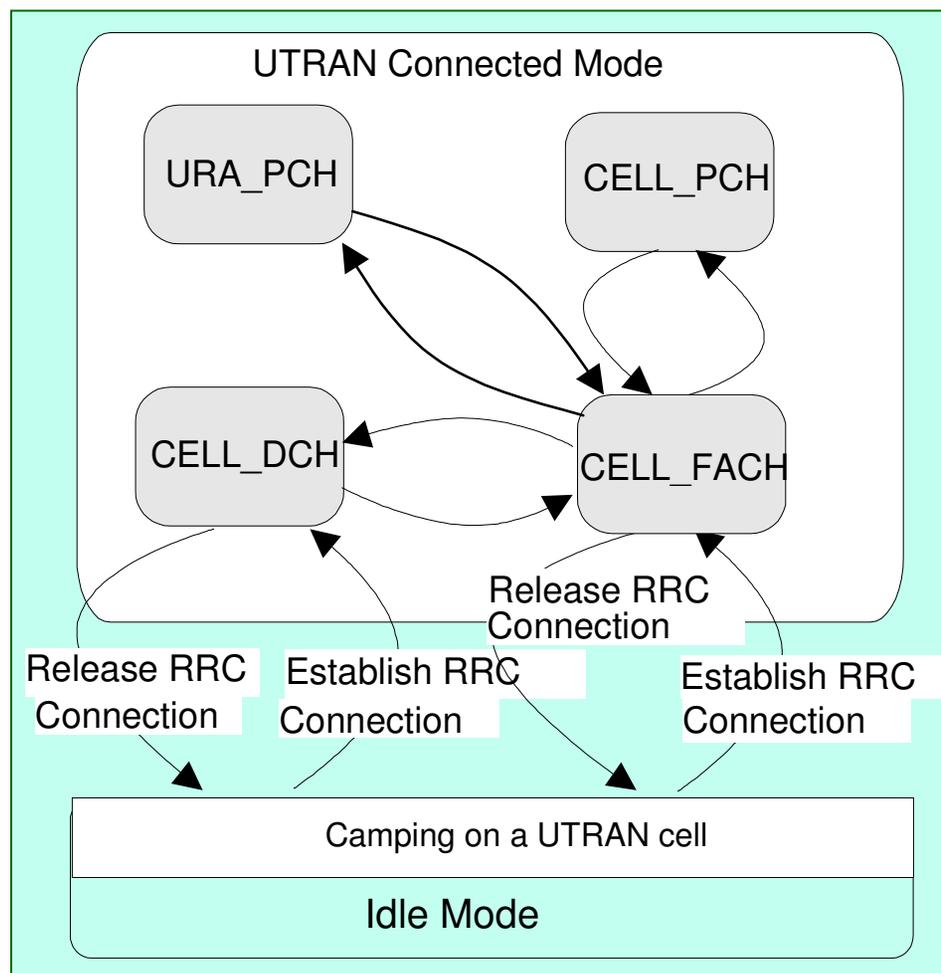
- Broadcast di informazioni di sistema e di accesso
- Instaurazione, mantenimento e rilascio di una connessione radio
- Instaurazione, riconfigurazione ed abbattimento di un RB (Radio Bearer)
- Gestione delle funzioni connesse alla mobilità (decisione ed esecuzione di hard o soft handover)
- Paging
- Assegnazione di risorse e controllo d'accesso
- Controllo di potenza, assegnazione dei canali condivisi USCH e del Timing advance (TDD)
- Cell selection e reselection

# RRC - Radio Resource Control

General Control (GC),  
Notification (Nt)  
Dedicated Control (DC)



URA (UTRAN Registration Area)





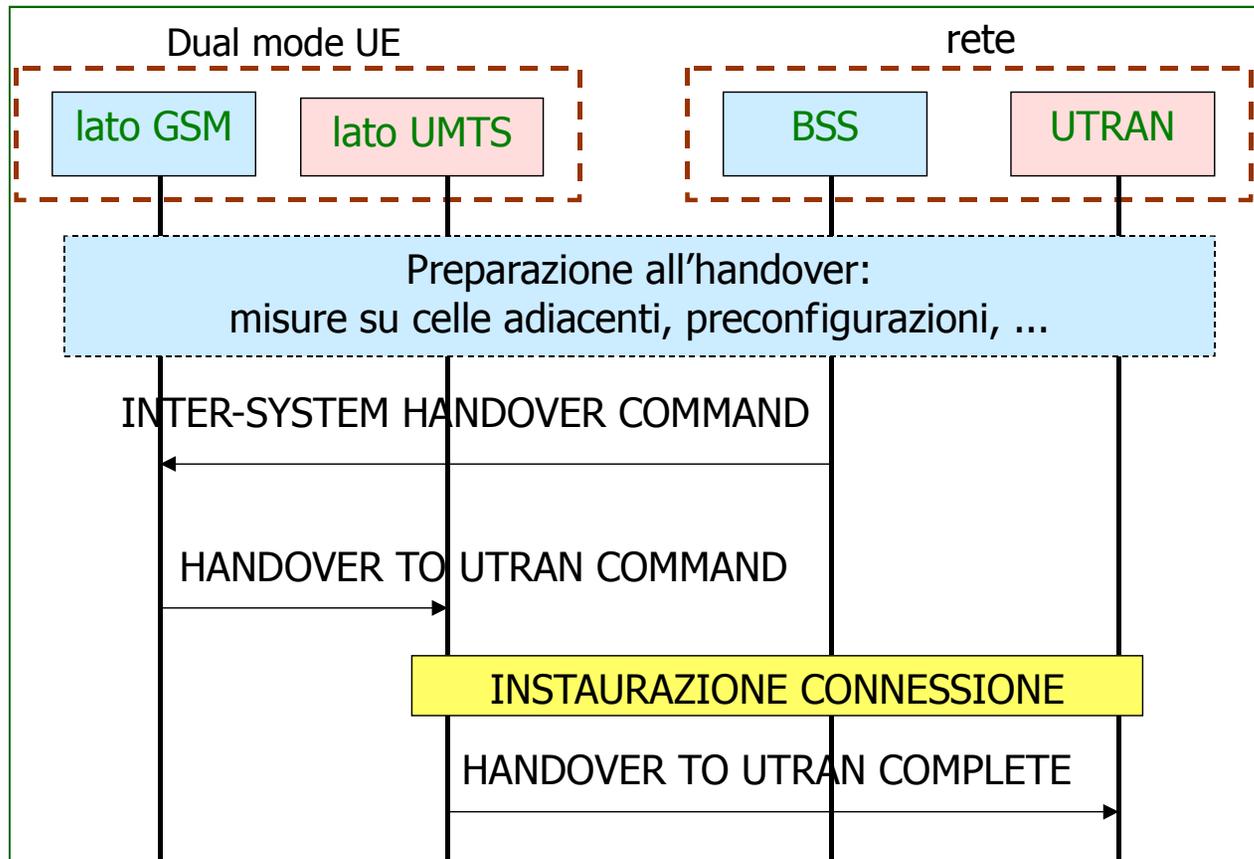
# Procedure per la gestione della mobilità

- Cell Update
  - Eseguibile solo negli stati cell-FACH e cell-PCH.
- 2. URA (UTRAN Registration Area) Update
- 3. Handover
  - measurement report (DCH)
  - soft add
  - soft drop
  - hard Handover (TDD, interfrequency, TDD-FDD)
- 4. Handover inter-RAT (Radio Access Technology)



# Handover inter-RAT (Radio Access Technology)

esempio: UTRAN to GSM, GSM to UTRAN Handover



## Handover GSM - UTRAN



## *High Speed Packet data Access (HSPA)*

- High Speed Packet data Access (HSPA) è un insieme di tecniche utilizzate per migliorare le prestazioni delle reti WCDMA per quanto riguarda la trasmissione a pacchetto.
- In un primo momento è stata migliorata la prestazione in downlink (High Speed Down Link (DL) Packet data Access (HSDPA))
- Successivamente è stata migliorata la prestazione in uplink (High Speed UL Packet data Access (HSUPA)).
- L'uso combinato di HSDPA e HSUPA è indicato con il termine HSPA.
- Le prestazioni sono state migliorate ulteriormente nello standard HSPA+.

# High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)



- Il ricevitore è in grado di ricevere simultaneamente alcuni **canali (5-15) di traffico condivisi** (*High Speed – Physical Downlink Shared Channel HS-PDSCH*), ciascuno con  $S_f=16$ .
- Riceve simultaneamente le informazioni di assegnazione degli slot su altri **4 canali di controllo condivisi**.
- I segnali vocali e le informazioni di controllo a loro associate vengono inviate su canali dedicati.
- In direzione uplink, un dispositivo HSDPA utilizza canali diversi con codici distinti.
  - Un codice è utilizzato per un canale di controllo usato per l'*acknowledgment*.
  - Un canale dedicato è utilizzato per trasmettere pacchetti IP in uplink.
  - Un canale dedicato è utilizzato per comunicare con l'RNC (cambio cella) e per il traffico vocale in downlink.
  - Un canale di controllo è, inoltre, necessario per scambiare informazioni sulla qualità della comunicazione con il *node B*.



# HSDPA

- Lo standard utilizza uno schema di **modulazione e codifica adattativa**:
  - Codifica: turbo codici perforati, con tasso regolabile tra 1/3 e 1.
  - Modulazione: QPSK o 16 QAM.
  - Tasso massimo: 14.4 Mbit/s
- La **decisione si basa sulle informazioni fornite dall'unità mobile** (per favorire la rapidità dell'intervento, le informazioni vengono fornite con periodicità di **2 ms**, pari a un Time Transmission Interval - **TTI**).
- **Ad ogni TTI è possibile scegliere l'unità a cui assegnare i canali condivisi**, in modo da assegnare le risorse all'unità con le migliori condizioni di propagazione.
- HSDPA adotta un meccanismo di ripetizione ibrido, con **soft combining (HARQ)**. È utilizzata anche una tecnica di tipo **incrementale**.



# HSDPA

- Modulazione adattativa: controllata dal Node B
- Ci sono 16 codici disponibili ( $S_f=16$ ) e possono essere assegnati in gruppo (fino a un massimo di 15).
- Bit rate disponibili (i valori più elevati sono possibili in prossimità della base).

| Modulazione | Rc  | SIR (dB) | 5 codici    | 10 codici   | 15 codici    |
|-------------|-----|----------|-------------|-------------|--------------|
| QPSK        | 1/4 | -3.8     | 600 kbit/s  | 1200 kbit/s | 1800 kbit/s  |
| QPSK        | 1/2 | 0.2      | 1200 kbit/s | 2400 kbit/s | 3600 kbit/s  |
| QPSK        | 3/4 | 3.4      | 1800 kbit/s | 3600 kbit/s | 5400 kbit/s  |
| 16-QAM      | 1/2 | 5.1      | 2400 kbit/s | 4800 kbit/s | 7200 kbit/s  |
| 16-QAM      | 3/4 | 9.3      | 3600 kbit/s | 7200 kbit/s | 10800 kbit/s |
| 16-QAM      | 1   | >16      | 4800 kbit/s | 9600 kbit/s | 14400 kbit/s |



# High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)

- In uplink i mobili possono usare più di un canale dedicato ad alta capacità (**E-DCH *Enhanced Dedicated Channel***, controllato dalla stazione base).
- Le informazioni sulle modalità di utilizzo della banda sono trasmesse utilizzando un canale condiviso ad alta capacità (**E-AGCH *Absolute Grant Channel***), mentre un controllo rapido di potenza può essere effettuato utilizzando un ulteriore canale di controllo condiviso (**E-RGCH *Enhanced Relative Grant Channel***).
- Anche l'algoritmo HARQ utilizza un canale di controllo condiviso (***Enhanced HARQ Information Channel, E-HICH***). Nelle operazioni di soft handover, l'ACK viene inviato da tutte le stazioni base coinvolte. Il terminale si considera connesso solo a quelle che lo hanno inviato.
- Per incrementare la velocità si può adottare l'opzione **multi-codice**, mentre non si possono utilizzare modulazioni di elevata complessità (64 QAM) per i bassi valori di SINR.



# HSPA +

- Evoluzione dello standard HSPA, introdotta nella Release 7 del 3GPP, per competere con l'evoluzione LTE.
  - **Modulazione 64-QAM in DL** (6 chip per trasmissione, anziché i 4 della 16-QAM), con bit rate di picco pari a 21.1 Mbit/s (anziché 14.4 Mbit/s) ed effettiva pari a 16 Mbit/s.
  - **Trasmissione dual-carrier in DL**, con utilizzo di 2 canali adiacenti a 5 MHz di banda, e bit rate complessiva di picco pari a 42.2 Mbit/s.
  - **MIMO 2x2 in DL**, che combinato con le tecniche precedenti, in condizioni molto favorevoli può portare la bit rate a 84 Mbit/s (dispositivi di categoria 28).
  - **Multi-carrier, multi-band in DL**, per aggregare canali anche non adiacenti, anche in numero maggiore di 2.
  - **Modulazione 16-QAM** e trasmissione **dual-carrier in UL**.
  - **Continuous Packet Connectivity (CPC)** per limitare la segnalazione necessaria, fino a quando il terminale è in possesso di un indirizzo IP.