

Sacri Appunti Telecomunicazioni

Riccardo Pietrucci

14/12/2005

Indice

1	Teoria della ricezione	5
1.1	Introduzione	5
1.2	Rivelazione di segnali in rumore gaussiano	6
1.2.1	Analisi del problema della rivelazione	6
1.2.2	Verifica di ipotesi binaria	7
1.2.3	Formulazione del problema	8
1.2.4	Ricevitore a correlazione	9
1.2.5	Ricevitore a filtro adattato	9
2	Modulazioni numeriche	11
2.1	Interferenza intersimbolica	11
2.1.1	Analisi del problema dell'interferenza	11
2.1.2	Formulazione del problema	12
2.1.3	Il codice di Gray	15
2.2	ASK	18
2.2.1	Banda necessaria e vincoli	19
2.2.2	Trasformazione usata	19
2.2.3	Conclusioni	20
2.3	PSK	20
2.3.1	QPSK	21
2.3.2	OQPSK	23
2.4	FSK	23
2.4.1	MSK	24
2.5	QAM	24
2.5.1	Modulazione 16 QAM PSK	24
2.5.2	Modulatore QAM	26
2.6	CPM	27
3	Multiplazione CDMA	28
3.1	Tecniche di multiplazione	28
3.2	CDMA	29
3.2.1	DS-CDMA	29
3.2.2	OFDM	31

4	GSM	32
4.1	Lo standard GSM	32
4.2	La multiplazione in GSM	32
4.2.1	Suddivisione in celle	32
4.2.2	Handover	34
4.2.3	Multiplazione FDMA e riutilizzo delle frequenze	34
4.2.4	Multiplazione TDMA	34
4.2.5	Definizione del canale fisico	36
4.3	Architettura	37
4.3.1	Mobile Station (MS)	37
4.3.2	Base Station System (BSS)	42
4.3.3	Network Subsystem (NS)	42
4.3.4	SMS Gateway MSC (SMS-GMSC)	46
4.3.5	SMS Interworking MSC	46
4.3.6	The Interworking Function (IWF)	46
4.3.7	Group Call Register (GCR)	46
4.4	I canali logici	46
4.4.1	Traffic CHannel (TCH)	47
4.4.2	Broadcast CHannels (BCH)	48
4.4.3	Common Control CHannels (CCCH)	49
4.4.4	Dedicated Control Channels (DCCH)	49
4.5	Struttura del burst	50
4.6	Il codificatore vocale	51
4.6.1	Codec/Decodec	51
4.6.2	Enhanced Full Rate (EFR)	52
4.6.3	Half Rate (HR)	53
4.7	Modulazione	53
4.8	Equalizzazione	53
4.9	Il sistema GSM come rete di telecomunicazioni	53
4.9.1	Sistemi di segnalazione	54
4.9.2	Stratificazione e protocolli del modello GSM	54
4.9.3	Radio Resources management layer (RR)	55
4.9.4	Mobility Management (MM)	58
4.9.5	Communication management (CM)	61
5	Introduzione al GPRS	66
5.1	Nuove esigenze per la trasmissione dati	66
5.1.1	Novità rispetto al GSM	66
5.1.2	Interfacce	69
5.1.3	Servizi portanti	69
5.1.4	Quality Of Service (QOS)	70
5.2	Architettura di una rete GPRS	72
5.3	Conclusioni	73

6	GPRS	75
6.1	Motivazioni	75
6.2	Architettura della rete GPRS	76
6.3	Protocolli GPRS	79
6.4	Canali Logici	80

1 Teoria della ricezione

1.1 Introduzione

La **modulazione** è

una trasformazione generalmente reversibile tra i cui scopi, primari o indotti, vi è quello di modificare la banda del segnale a cui viene applicata

Ricordiamo che lo **scopo primario** di un sistema di telecomunicazioni è quello di trasferire in modo affidabile i messaggi emessi da una sorgente ad un destinatario.

La situazione più comune che si presenta è quella di una moltitudine di utenti collegati ad una rete di comunicazione con una molteplicità di messaggi da trasmettere. L'utilizzo contemporaneo della stessa banda da parte di tutti gli utenti renderebbe difficile distinguere ogni messaggio realmente inviato ad ogni destinatario. Un possibile modo per condividere lo stesso mezzo trasmissivo, garantendo al tempo stesso la separabilità tra i vari messaggi (operazione di moltiplicazione) consiste nel **processo di modulazione** che impiega bande separate per i singoli segnali da trasmettere in modo tale che, in ricezione, ogni messaggio sia estraibile da quello complessivo inviato.

D'altro canto non sempre è possibile trasferire un segnale in banda base a causa di limitazioni fisiche introdotte dal tipo di mezzo di comunicazione interposto tra sorgente e destinatari. In generale, infatti, la trasmissione di un messaggio da una sorgente ad un destinatario attraverso un canale di comunicazione comporta un insieme di *alterazioni* dei segnali impiegati per tale scopo, dovute in parte alle caratteristiche del mezzo trasmissivo ed in parte alle apparecchiature di trasmissione e di ricezione. Di conseguenza è necessario effettuare un'*elaborazione* del segnale disponibile a valle del canale di trasmissione al fine di recuperare il messaggio emesso dalla sorgente. Poiché di norma tali alterazioni non sono note a priori se non in senso statistico, occorre fare ricorso alle metodologie ed alle tecniche proprie della *Teoria statistica della Decisione e della Teoria della Stima*.

La modulazione può essere classificata come:

- modulazione a portante sinusoidale
- modulazione a portante impulsiva, analogica o numerica.

La **modulazione di frequenza** è un tipo di modulazione analogica a portante sinusoidale utilizzata per segnale modulato a banda stretta centrato intorno alla frequenza f_p (frequenza portante). In generale, il segnale $s(t)$ si può esprimere secondo una delle seguenti forme:

$$\begin{aligned} s(t) &= s_c(t) \cos(2\pi f_p t + \Phi) - s_s(t) \sin(2\pi f_p t + \Phi) & a(t) &= \sqrt{s_c^2(t) + s_s^2(t)} \\ s(t) &= a(t) \cos(2\pi f_p t + \Phi + \alpha(t)) & \alpha(t) &= \arctan\left(\frac{s_s(t)}{s_c(t)}\right) \\ \underline{s}(t) &= s_c(t) + j \cdot s_s(t) & \underline{s}(t) &= a \cdot e^{j \cdot \alpha(t)} \end{aligned}$$

con:

- Φ fase arbitraria
- $\cos(2\pi f_p t + \Phi)$ e $\sin(2\pi f_p t + \Phi)$ le portanti in fase e in quadratura
- $\underline{s}(t)$ inviluppo complesso del segnale
- $s_c(t)$ e $s_s(t)$ le componenti analogiche di bassa frequenza
- $a(t)$ e $\alpha(t)$ ampiezza e fase istantanea

Si parlerà di:

modulazione d'ampiezza se il messaggio $m(t)$ è trasportato dalle componenti analogiche in bassa frequenza in fase o in quadratura e, quindi, dall'ampiezza istantanea

modulazione angolare quando è invece la fase $\alpha(t)$ a portare l'informazione sul messaggio.

1.2 Rivelazione di segnali in rumore gaussiano

1.2.1 Analisi del problema della rivelazione

Nella **rivelazione** o misura di deboli segnali dobbiamo curare due aspetti:

1. *elettronica a basso rumore*, schermi, ritorni di massa, ... (curare il front-end)
2. *rivelazione del segnale* (signal recovery): per riuscire a distinguere fra segnale rumore questi debbono avere qualche caratteristica che li differenzia.

È a sua volta costituito da:

- a) *filtraggio* (teoria statistica della stima): ricostruzione della forma originale del segnale per consentire la stima di alcuni parametri: ampiezza, periodo, ...
- b) *correlazione* (teoria statistica della rivelazione): rivelare la presenza di un segnale di forma nota senza ricostruire la sua forma.

Con riferimento ai sistemi di telecomunicazione, consideriamo ora il caso in cui la sorgente emetta un simbolo binario e che conseguentemente venga trasmessa la forma d'onda:

- $s_0(t)$ se il simbolo generato è pari a 0
- $s_1(t)$ se il simbolo generato è pari a 1

Assumiamo inoltre che entrambe le forme d'onda siano limitate in banda:

$$[-W, W]$$

cosicché si possa fare riferimento alla rappresentazione costituita dai campioni:

$$\left\{ s_0 \left(\frac{k}{2W} \right) \right\} \quad \left\{ s_1 \left(\frac{k}{2W} \right) \right\} \quad \text{dove } t = kT = \frac{k}{2W} \quad (1.1)$$

Si supponga inoltre che il segnale ricevuto sia affetto da un **rumore additivo** modellabile come una realizzazione $n(t)$ di un processo gaussiano, stazionario, ergodico, a valor medio nullo e spettro di densità di potenza uniforme.

L'obiettivo è

decidere se è stato trasmesso il simbolo 0 o il simbolo 1 a partire dall'osservazione di un numero finito M di campioni del segnale ricevuto $z(t)$

1.2.2 Verifica di ipotesi binaria

Prima di poter formulare il problema, è necessario introdurre il problema di decisione noto come **verifica di ipotesi binaria** in cui la v.a.¹ di interesse X è una v.a. discreta con due possibili determinazioni che verranno indicate nel seguito rispettivamente come ipotesi H_0 e H_1 . Indicata con z la generica determinazione della v.a. Z N -dimensionale osservabile, il meccanismo di transizione probabilistica che descrive l'operazione di misura è descritto dalle funzioni di distribuzioni di probabilità condizionate²

$$P_{Z|H_0}(z|H_0) \quad (1.2)$$

$$P_{Z|H_1}(z|H_1) \quad (1.3)$$

dove si legge: **la densità di probabilità della variabile aleatoria Z condizionata all'ipotesi H_i vale z .**

Posso quindi suddividere lo spazio in due insiemi i e j ed osservare a tutte le varie combinazioni, pesate per il corrispondente costo C_{ij} :

	H_0	H_1
\hat{H}_0	C_{00}	C_{01}
\hat{H}_1	C_{10}	C_{11}

Da questa suddivisione si giunge al teorema di Bayes:

$$\frac{P(z|H_1)}{P(z|H_0)} \underset{H_0}{\geq} \underset{H_1}{\leq} \frac{(C_{10} - C_{00})P_0}{(C_{01} - C_{11})P_1} \quad (1.4)$$

dove il primo termine risulta essere:

$$\Lambda(Z) = \frac{P(z|H_1)}{P(z|H_0)} \quad (1.5)$$

noto come **rapporto di verosimiglianza**. Per rapporto di verosimiglianza si intende, infatti, più in generale:

$$\frac{P(A|B)}{P(A|\text{not}B)}$$

La regola descritta dal criterio di Bayes è infatti nota come **verifica del rapporto di verosimiglianza**.

Si nota infine come in caso di costo uniforme:

$$C_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{se } i = j \\ 1 & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (1.6)$$

la regola (1.4) può essere riscritta come:

$$P(z|H_1) \underset{H_0}{\geq} P(z|H_0) \quad (1.7)$$

In essenza il criterio della minima probabilità d'errore porta quindi a selezionare l'ipotesi per la quale risulta massima la probabilità condizionata a posteriori (ovvero condizionata rispetto all'osservazione z).

¹variabile aleatoria

²La probabilità di A condizionata da B è definita come la probabilità che si verifichi l'evento A a condizione che si verifichi pure l'evento B :

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

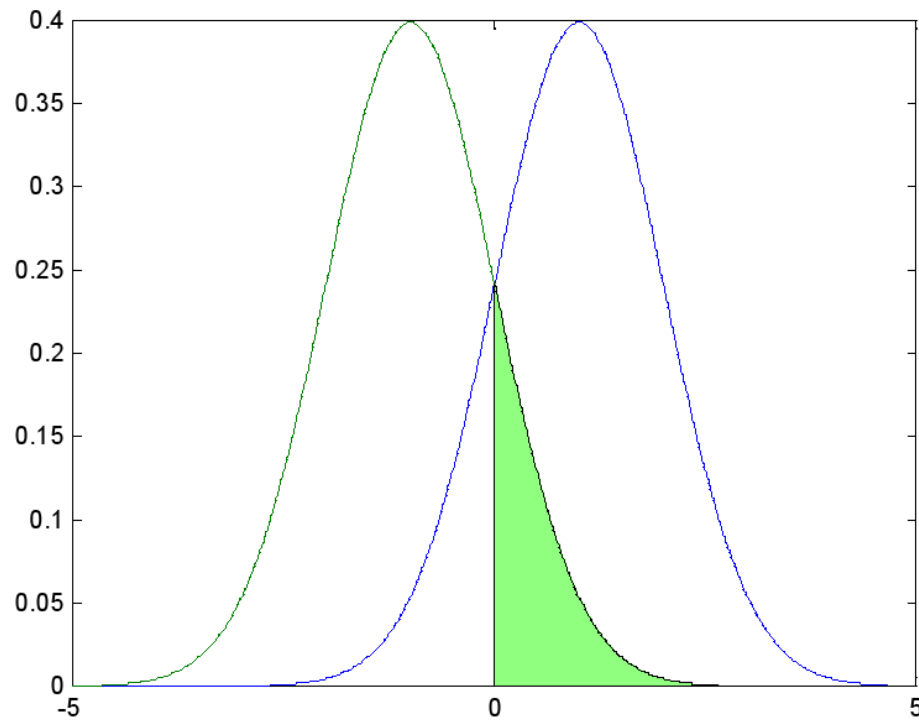


Figura 1.1: densità di probabilità della variabile aleatoria Z condizionata all'ipotesi H_0

1.2.3 Formulazione del problema

Il problema può essere formulato in termini di verifica di ipotesi binaria, tramite il seguente modello:

$$\begin{cases} H_0 : z_k = n_k + s_{0k} & k = 1, 2, \dots, M \\ H_1 : z_k = n_k + s_{1k} & k = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (1.8)$$

in cui si ricorda la convenzione $x(t) = x(kT) = x_k$. Inoltre, indicando semplicemente con z , s_0 , s_1 , n i vettori a M componenti:

$$z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_M \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

il problema può essere riscritto in modo compatto come segue

$$\begin{cases} H_0 : z = n + s_0 \\ H_1 : z = n + s_1 \end{cases} \quad (1.10)$$

Discende come si osserva anche dalla fig. 1.1, che la densità di probabilità della variabile aleatoria Z condizionata all'ipotesi H_0 o H_1 vale

$$P_{Z|H_0}(z|H_0) = P_N(z - s_0) \quad (1.11)$$

$$P_{Z|H_1}(z|H_1) = P_N(z - s_1) \quad (1.12)$$

Riassumendo finora l'approccio adottato:

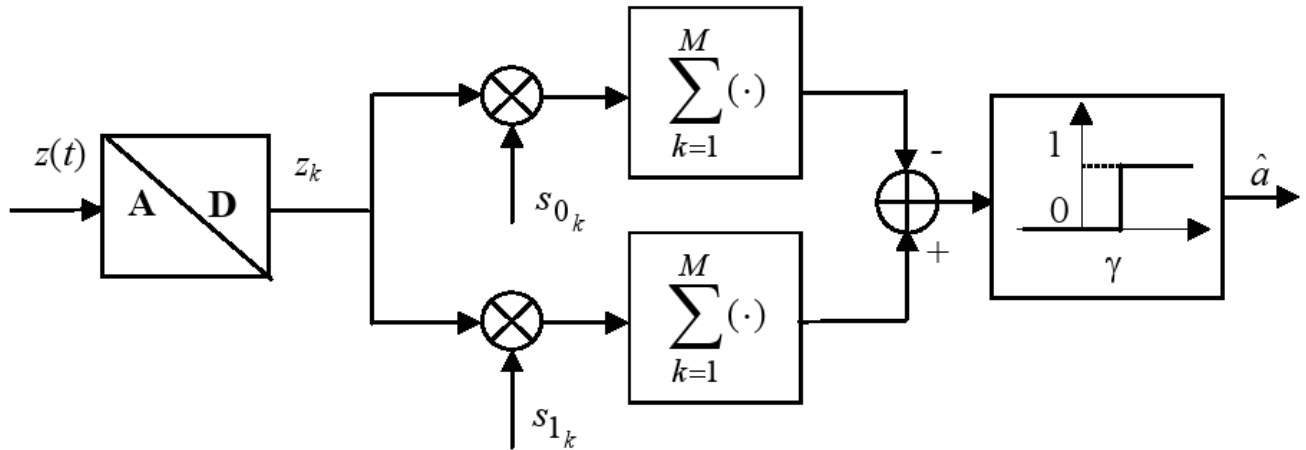


Figura 1.2: Ricevitore a correlazione

nel problema di decisione la specificazione della funzione di costo richiede unicamente l'individuazione di quattro valori, cosicché la **struttura del decisore ottimo** è in genere riconducibile ad una verifica di un rapporto di verosimiglianza in cui la funzione di costo ed il criterio di ottimalità adottato determinano il valore della soglia

1.2.4 Ricevitore a correlazione

Sostituendo a (1.11) il valore $P_N(\dots)$ con la funzione densità di probabilità corrispondente a una variabile aleatoria gaussiana, si ottiene la regola di decisione del **ricevitore a correlazione**³, in cui è riportata la corrispondente struttura in fig. 1.2. In particolare, osserviamo come lo schema di correlazione individui la presenza di un segnale **in assenza** di un segnale di riferimento, sfruttando la correlazione fra osservazioni diverse dello stesso segnale allo stesso tempo, utilizzando due misure dello stesso segnale (tecnica Twiss-Brown). Si nota infatti come la correlazione incrociata di questi processi fornisce la varianza del segnale.

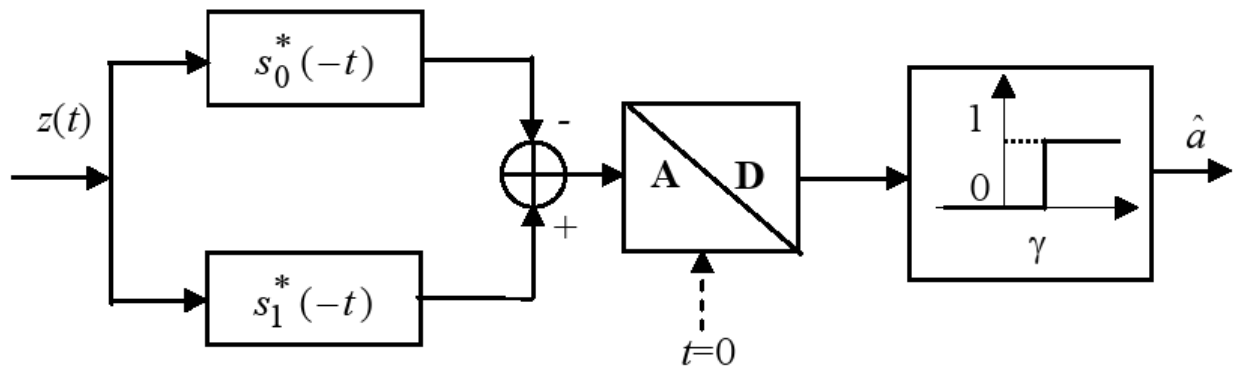
1.2.5 Ricevitore a filtro adattato

Per $M \rightarrow \infty$ la regola di decisione si trasforma corrispondentemente. Si osservi che la correlazione tra il segnale ricevuto e i segnali di riferimento può essere valutata per mezzo di una coppia di filtri con risposte impulsive $s_0^*(-t)$ e $s_1^*(-t)$. Pertanto la rivelazione ottima in presenza di rumore gaussiano può essere effettuata comparando con una soglia l'uscita di un sistema lineare. In questo caso il ricevitore, il cui schema a blocchi è illustrato in fig.1.3(a), prende il nome di ricevitore a filtro adattato. Osserviamo infine che se le due forme d'onda risultano pari a

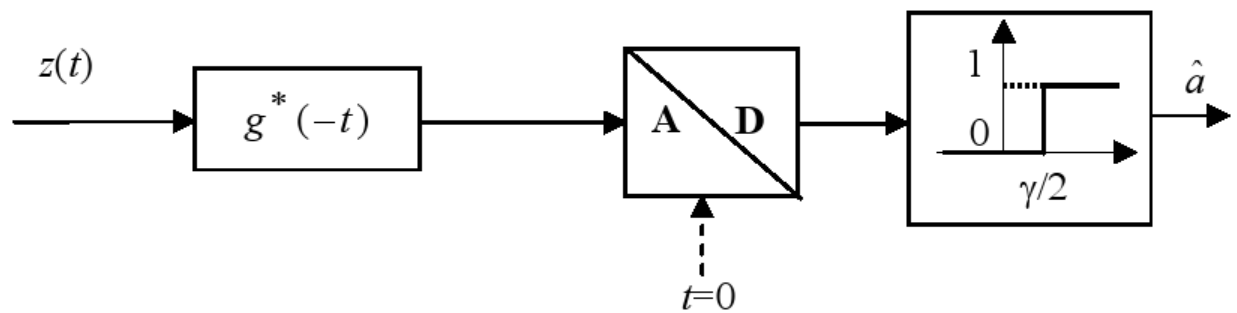
$$s_0(t) = -g(t) \qquad s_1(t) = g(t) \qquad (1.13)$$

il calcolo del rapporto di verosimiglianza richiede un unico filtro adattato, e il relativo schema a blocchi diventa quello espresso in fig. 1.3(b), in cui il ricevitore ottimo è costituito dal ricevitore a correlazione,

³per **ricevitore** si intende tutto l'insieme di apparati e dispositivi che assolve alla funzione di estrazione del messaggio trasmesso



(a) Caso generale

(b) Caso $s_0(t) = -g(t)$ e $s_1(t) = g(t)$ **Figura 1.3:** Ricevitore a filtro adattato

seguito da un campionatore e da un decisore a soglia. Inoltre nel caso usuale di costo uniforme, (1.6), e simboli d'ingresso equiprobabili, la soglia è **nulla**⁴ e la regola di decisione si semplifica ulteriormente.

⁴si ha quindi la condizione $\gtrsim_{H_0}^{H_1} 0$

2 Modulazioni numeriche

2.1 Interferenza intersimbolica

2.1.1 Analisi del problema dell'interferenza

Si considerino due utenti che scambiano tra loro flussi informativi numerici di lunghezza indefinita in modo isocrono. Assumiamo che essi siano connessi tramite una rete capace di trasmettere segnali analogici limitati in banda $[-W, W]$ contigua all'origine.

Il flusso informativo $\{\alpha[k]\}$, con un alfabeto ad L determinazioni, passa attraverso un formatore di impulsi, che in corrispondenza del k -esimo $\alpha[k]$ genera in uscita un impulso matematico con area $v[n]$, secondo una predefinita trasformazione biunivoca che associa a ciascun simbolo dell'alfabeto \mathcal{A} uno tra L livelli equispaziati nell'intervallo $[-A, A]$:

$$v_j = -A + \frac{2A}{L-1}j \quad j = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2.1)$$

cosicché il segnale all'uscita del circuito formatore d'impulsi è del tipo

$$b(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} v[m]u_0(t - mT_L) \quad (2.2)$$

In generale, *prima* di essere trasmesso il segnale $b(t)$ viene fatto transitare attraverso un filtro sagomatore¹ $h_T(t)$ ed un amplificatore con guadagno G_T , dando così origine ad un'onda PAM² $s(t)$ del tipo:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} v[m]G_T h_T(t - mT_L) \quad (2.3)$$

Il segnale $s(t)$ transita successivamente attraverso il canale di trasmissione, il quale è modellabile per mezzo di un filtro con risposta impulsiva $h_C(t)$ ed un rumore additivo $n(t)$, gaussiano, stazionario ergodico, a valor atteso nullo e noto spettro di densità di potenza uniforme nella banda $[-W, W]$. Di conseguenza, il

¹il **filtro sagomatore** (shaper) serve a limitare la banda del segnale. I filtri sagomatori comunemente impiegati sono:

- filtro a coseno rialzato
- filtro Gaussiano

²La tecnica indicata con la sigla **PAM** (Pulse Amplitude Modulation) consente di trasmettere una sequenza di cifre binarie su un canale di trasmissione passa basso (in banda base). La tecnica consiste nell'inviare una successione di forme d'onda di tipo passa basso $g(t - kT)$, repliche traslate di una forma d'onda prefissata $g(t)$, ciascuna con ampiezza positiva o negativa in accordo con il flusso dei dati da trasmettere: livello positivo per l'uno e negativo per lo zero, o viceversa. $fs = 1/T$ è la frequenza di simbolo (o frequenza di cifra), ed è uguale al bit rate nel caso di trasmissione binaria

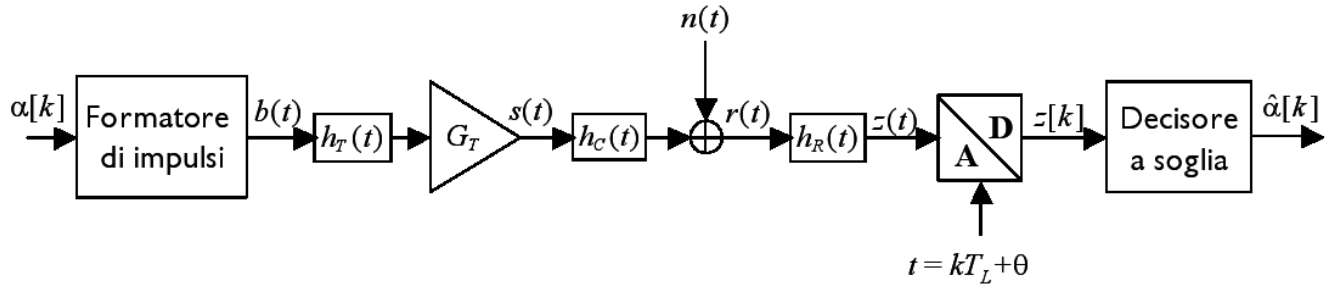


Figura 2.1: Ricevitore lineare

segnale ricevuto $r(t)$ vale

$$r(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} v[m] \underbrace{(G_T h_T * h_C)}_{g(t)}(t - mT_L) + n(t) \quad (2.4)$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{\infty} v[m] g(t)(t - mT_L) + n(t) \quad (2.5)$$

In base ai risultati relativi alla rivelazione di un segnale in rumore gaussiano (par. 1.2), *se la sorgente emette un unico simbolo* il ricevitore ottimo è costituito dal ricevitore a correlazione, seguito da un campionatore e da un decisore a soglia (fig. 1.3(b)). Lo scopo di quanto segue è

determinare sotto quali condizioni, lo schema definito (fig. 1.3(b)) costituisca la soluzione ottima *anche nel caso della trasmissione di una sequenza indefinita di simboli*, ovvero sotto quali condizioni la decisione possa essere effettuata simbolo per simbolo.

2.1.2 Formulazione del problema

A tal fine si consideri lo schema di fig.2.1 che rappresenta un generico ricevitore basato su un filtro, non necessariamente adattato al segnale ricevuto, con in cascata un comparatore a soglia. Posto

$$h(t) = G_T h_T(t) * h_C(t) * h_R(t) \quad n_R(t) = n(t) * h_T(t) \quad (2.6)$$

si ha che il segnale all'ingresso del campionatore ha una forma d'onda del tipo

$$z(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} v[m] h(t)(t - mT_L) + n_R(t) \quad (2.7)$$

Di conseguenza, il segnale a valle del campionatore vale:

$$z[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} v[m] h(kT_L - mT_L) + n_R(kT_L) \quad (2.8)$$

$$= \underbrace{v[k] h[0] + n_R[k]}_{\text{emissione del solo simbolo } \alpha[k]} + \underbrace{\sum_{m \neq k} v[m] h[k - m]}_{\text{interferenza degli altri simboli}} \quad (2.9)$$

I contributi relativi al rumore ed all'interferenza tra simboli possono essere visualizzati agevolmente tramite un oscilloscopio con memoria con frequenza di scansione orizzontale pari a $1/T_L$. L'immagine che si

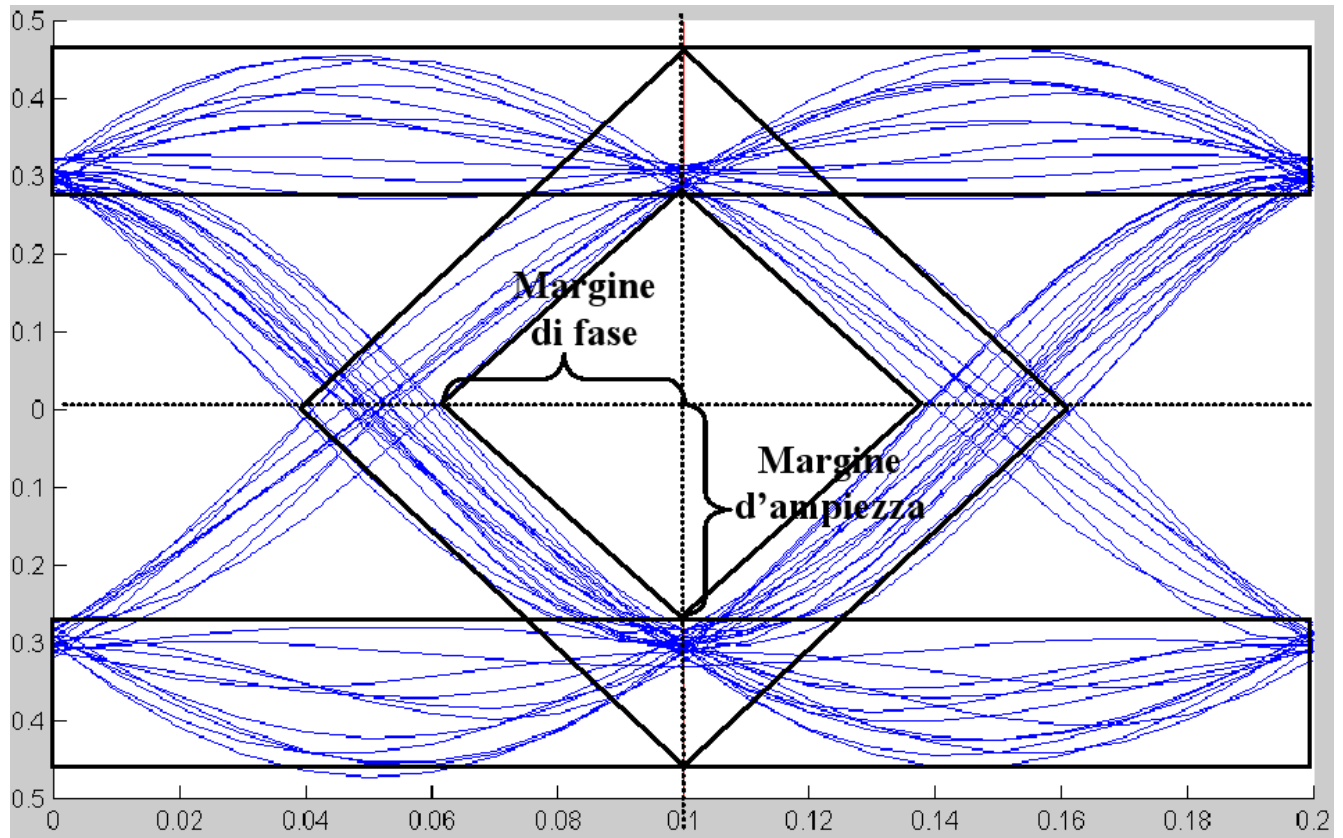


Figura 2.2: Diagramma ad occhio ($L = 2$) in presenza di interferenza tra simboli ed in assenza di rumore

ottiene prende il nome di *diagramma ad occhio* (si veda la fig. 2.2) a causa della sua somiglianza con la forma dell'occhio umano. In presenza di interferenza tra simboli l'occhio tende a chiudersi ed il margine nei confronti del rumore si riduce.

Tornando finalmente allo scopo del problema, la possibilità di applicare lo schema di decisione simbolo per simbolo senza introdurre un degrado delle prestazioni si traduce in un *vincolo da applicare alla risposta impulsiva complessiva del sistema*. Infatti, *il termine di interferenza risulta nullo*, qualunque sia la sequenza trasmessa, se accade che, a meno di un ritardo costante,

$$h[k] = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (2.10)$$

risulta che il segnale trasmesso costituisce, un semplice impulso $u_0(t)$, per tutti gli impulsi che costituiscono l'interferenza. Dall'impulso è successivamente semplice ricavare il valore dell'area $v[n]$. Espresso in termini matematici, deve quindi risultare:

$$h^0(t) = h(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_0(t - kT_L) \quad (2.11)$$

$$= h(t)\pi_{T_L}(t) \quad (2.12)$$

$$= u_0(t) \quad (2.13)$$

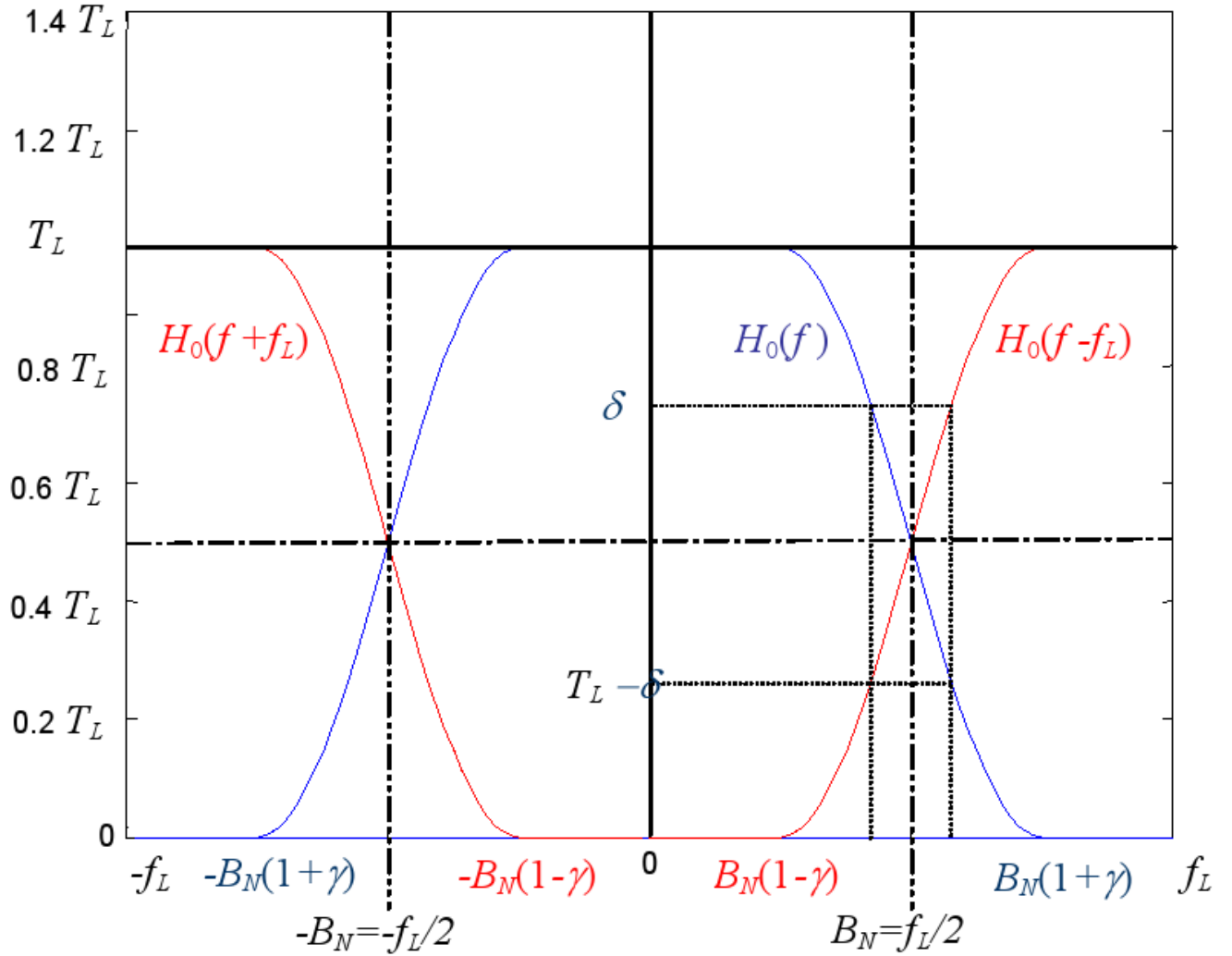


Figura 2.3: Caratteristica di Nyquist

Nel dominio della frequenza la precedente relazione diviene, per le regole dell'impulso matematico:

$$1 = \mathcal{F}\{h(t)\pi_{T_L}(t)\} \quad (2.14)$$

$$= \frac{1}{T_L} H(f) * \sum_m u_0(f - mf_L) \quad \text{con } f_L = \frac{1}{T_L} \quad (2.15)$$

$$= \frac{1}{T_L} \sum_m H(f - mf_L) \quad (2.16)$$

da cui si ha:

$$\boxed{\sum_m H(f - mf_L) = T_L} \quad (2.17)$$

La condizione (2.17) di assenza di interferenza intersimbolica è nota in letteratura come **criterio di Nyquist**, mentre una funzione di trasferimento che soddisfi la (2.17) viene indicata con il termine di **caratteristica di Nyquist**.

Si consideri ora il caso delle caratteristiche di Nyquist normalizzate, limitate in banda $[-W, W]$, con W compreso tra $f_L/2$ e f_L . In tal caso, come esemplificato nel grafico di fig. 2.3, la condizione di Nyquist si

riduce a:

$$\boxed{H[\pm(B_N + \Delta f)] = T_L - H[\pm(B_N - \Delta f)] \quad 0 \leq \Delta f \leq B_N} \quad (2.18)$$

Si osservi che:

1. esiste un *numero infinito* di funzioni che presentano la simmetria speculare individuata dalla (2.18)
2. d'altro canto:
 - a) è impossibile generare impulsi di Nyquist con banda inferiore a B_N
 - b) esiste una ed una sola caratteristica di Nyquist a banda minima, pari a:

$$H_o(f) = T_L \text{rect}_{f_L}(f) \quad (2.19)$$

La famiglia di caratteristiche di Nyquist più nota è quella denominata a *coseno rialzato*. Consente di smussare il segnale senza introdurre interferenza intersimbolo. È pari a:

$$G_0(f) = \begin{cases} T_L & 0 \leq |f| \leq B_N(1 - \gamma) \\ \frac{T_L}{2} \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2\gamma B_N}(f - B_N) \right] \right\} & B_N(1 - \gamma) \leq |f| \leq B_N(1 + \gamma) \\ 0 & |f| > B_N(1 + \gamma) \end{cases} \quad (2.20)$$

dove

$$B_N = \frac{f_L}{2} \quad (2.21)$$

come illustrato in fig. 2.4(a) e 2.4(b). Le variazioni sono determinate dal termine di *roll-off* γ , compreso tra 0 e 1. Come illustrato dalla figura 2.5, al diminuire del roll-off l'occhio tende a chiudersi ed il margine temporale diminuisce. Un esempio come quello di fig. 2.2 presenta un roll-off minore.

2.1.3 Il codice di Gray

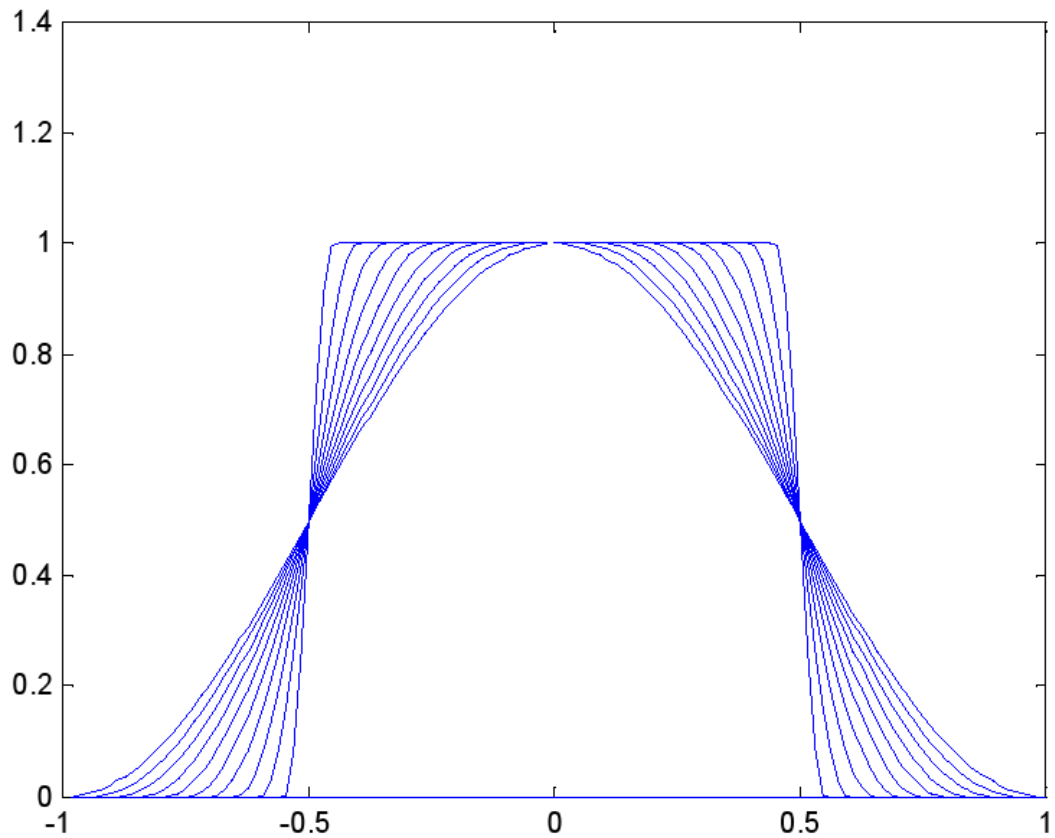
Molti dispositivi o segnali indicano cambiamenti nelle configurazioni attraverso l'apertura e la chiusura di determinati switch. Se tali dispositivi utilizzassero codici binari naturali si potrebbe avere la seguente successione:

...
011
100
...

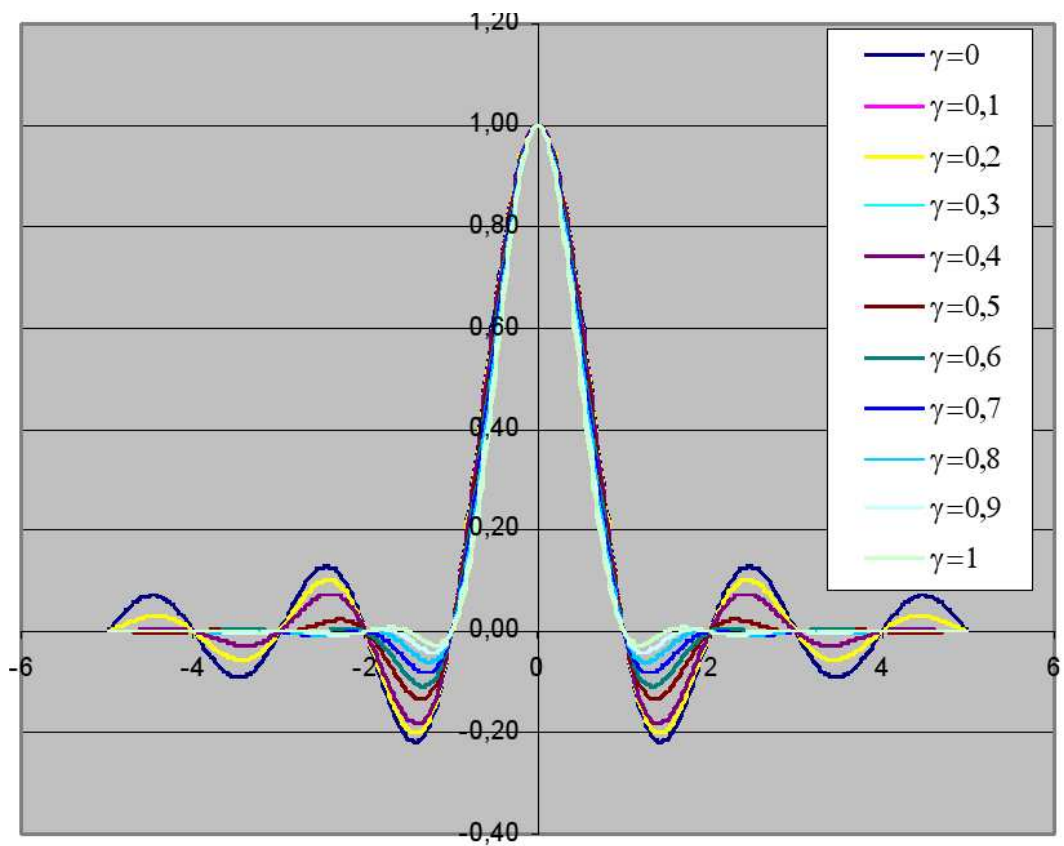
La configurazione descritta non è realistica, poiché con switch meccanici non è possibile che i cambi di stato siano perfettamente sincronizzati. La transizione — anche molto breve — può essere del tipo:

011
001
101
100

Quindi si presenta il seguente problema:



(a) Caratteristiche di Nyquist a coseno rialzato



(b) Risposta impulsiva del filtro con funzione di trasferimento a coseno rialzato

Figura 2.4: Coseno rialzato

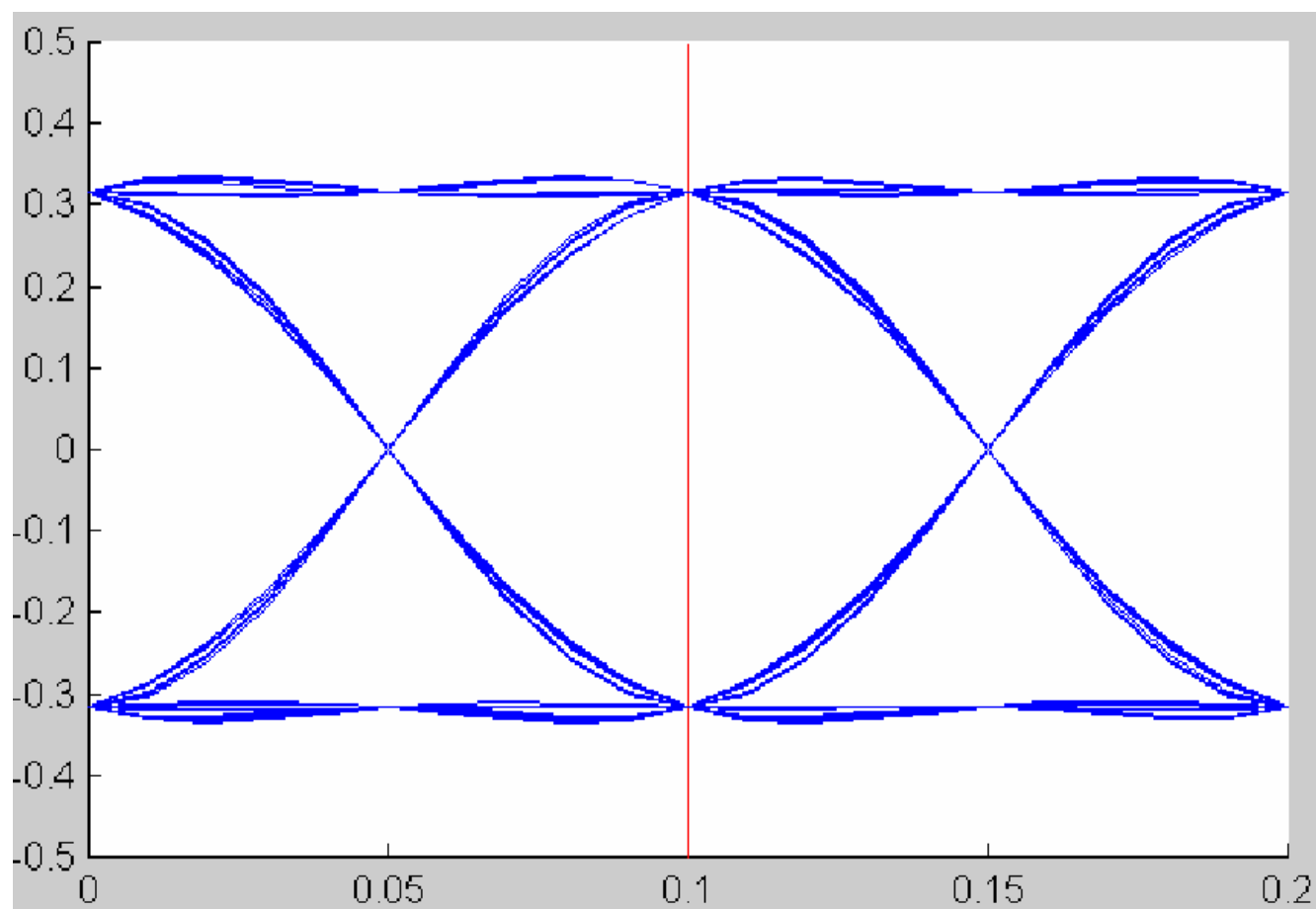


Figura 2.5: Diagramma ad occhio per roll-off $\gamma = 1$

Decimale	Gray	Binario
0	000	000
1	001	001
2	011	010
3	010	011
4	110	100
5	111	101
6	101	110
7	100	111

Tabella 2.1: Comparazione codice di Gray – codice binario

non è possibile stabilire il tipo di posizione assunto dal sistema (transizionale o permanente)

Quanto descritto genera ambiguità nell'interpretazione.

Il **codice di Gray** risolve questo problema permettendo un unico cambio di switch alla volta, ed eliminando quindi qualsiasi forma di ambiguità, come si osserva nella tab. 2.1. Più formalmente, Il codice di Gray $\{\beta_i^k, i = 1, \dots, 2^k\}$ relativo a blocchi di k simboli può essere costruito (ricorsivamente) a partire dal codice $\{\beta_i^{k-1}, i = 1, \dots, 2^{k-1}\}$ relativo a blocchi di $k - 1$ simboli con la seguente regola:

1. le prime 2^{k-1} righe della tabella di codifica si ottengono concatenando il simbolo 0 con le parole del codice relativo a blocchi di $k - 1$ simboli
2. le rimanenti 2^{k-1} righe si ottengono per riflessione speculare delle prime 2^{k-1} righe e sostituzione del primo simbolo (pari a 0) con il simbolo 1

Ad esempio, il codice di Gray per $k = 2$ si ottiene:

1. si ottiene il codice di Gray per $k = 1$, ottenendo quindi $\beta_1 = 0$ e $\beta_2 = 1$
2. si segue la regola ricorsiva:
 - a) si concatena il simbolo 0 con le parole ricavate precedentemente, ottenendo $\beta_1 = 00$ e $\beta_2 = 01$
 - b) le rimanenti si ottengono per riflessione speculare parole appena prodotte, sostituendo il simbolo iniziale 0 con il simbolo 1, ottenendo $\beta_3 = 11$ e $\beta_4 = 10$

Analogamente si può ottenere il codice di Gray per $k = 3$, riportato in tab. 2.1.

Più formalmente, risulta:

$$\beta_i^k = \begin{cases} (0, \beta_i^{k-1}) & i \in [1, 2^{k-1}] \\ (1, \beta_{2^k-i+1}^{k-1}) & i \in [2^{k-1} + 1, 2^k] \end{cases} \quad (2.22)$$

2.2 ASK

Come illustrato nel paragrafo precedente, nella modulazione **Amplitude-shift keying** ASK il segnale $s(t)$ trasmesso è costituito da un'onda PAM a simboli indipendenti. Nel caso di assenza di interferenza intersimbolo, il ricevitore ottimo è l'estensione del ricevitore per trasmissione binaria ed è costituito,

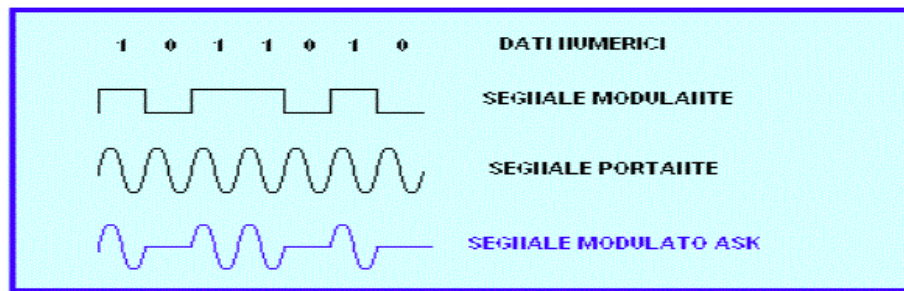


Figura 2.6: Modulazione ASK

quindi, da un filtro seguito da un comparatore a soglia, come illustrato in fig.2.1. Nella modulazione ASK l'ampiezza della portante sinusoidale viene fatta variare in correlazione al segnale digitale modulante. Nel caso più semplice e più comune in corrispondenza dello zero logico il segnale modulato ha ampiezza zero ed in corrispondenza dell'uno logico ha ampiezza pari a quella della portante non modulata. In questo caso si parla di **modulazione OOK** (**On-Off Keying**), come si osserva in fig.2.6.

2.2.1 Banda necessaria e vincoli

Si consideri ora il caso di una sorgente binaria caratterizzata da un ritmo costante pari a f_b . Dalla (2.22) discende che, per un valore assegnato γ del rolloff, la trasmissione del flusso informativo tramite una modulazione ASK a 2 livelli richiede una larghezza di banda pari a $f_b(1 + \gamma)$. Qualora una banda di tale ampiezza non sia disponibile, si può suddividere il flusso di simboli binari emesso dalla sorgente in blocchi di k simboli. Ciascun blocco viene poi trasformato in un simbolo appartenente ad un nuovo alfabeto \mathcal{B} ad $L = 2^k$ determinazioni. Il flusso dei simboli a valle della trasformazione presenterà un ritmo pari a:

$$f_L = \frac{f_b}{k} = \frac{f_b}{\log_2 L} \quad (2.23)$$

Pertanto la banda necessaria per trasmettere il segnale tramite una modulazione ASK a L livelli varrà

$$\frac{f_b}{\log_2 L}(1 + \gamma) \quad (2.24)$$

Si osservi che, nel caso in cui sia assegnata la banda $[-B, B]$, il numero di livelli da impiegare deve essere scelto in modo da soddisfare la condizione:

$$\frac{f_b}{\log_2 L}(1 + \gamma) \leq 2B \quad (2.25)$$

$$\log_2 L \geq \frac{f_b}{2B}(1 + \gamma) \quad (2.26)$$

Poiché, come mostrato nel seguito, a parità di altre condizioni le prestazioni della modulazione ASK peggiorano con l'aumentare del numero di livelli impiegati, è opportuno scegliere L pari al più piccolo intero che soddisfa la (2.26).

2.2.2 Trasformazione usata

In relazione alla trasformazione si osserva che in genere l'errore più frequente consiste nella scelta di uno dei due livelli adiacenti a quello trasmesso. Pertanto, è consuetudine adottare per la trasformazione il *codice di Gray* (2.22), che presenta la proprietà che tra simboli adiacenti varia una sola delle k cifre binarie che compongono un blocco.

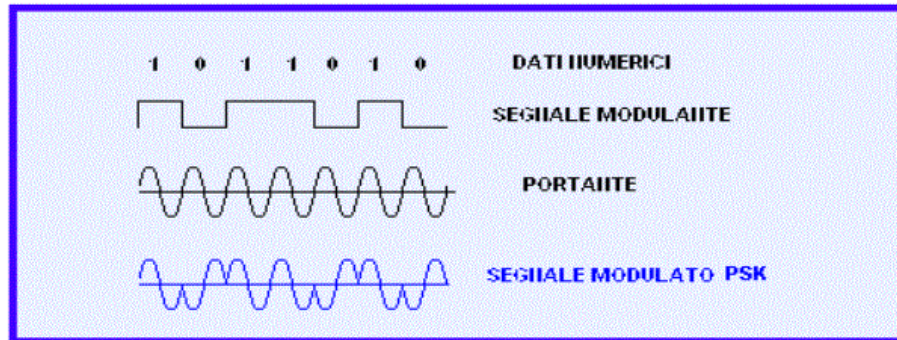


Figura 2.7: Modulazione 2-PSK

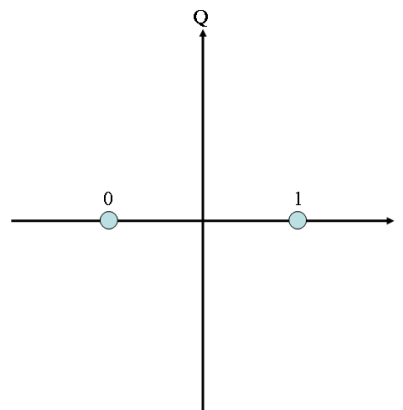


Figura 2.8: Diagramma di costellazione BPSK

2.2.3 Conclusioni

Questo tipo di modulazione, di facile realizzazione sia nei modulatori sia nei demodulatori, è stata usata sempre nelle telescriventi e in qualche tipo di ponte radio a breve distanza. Purtroppo è molto sensibile al rumore, per questo oggi è utilizzata poco, nonostante sia stata impiegata per prima.

2.3 PSK

Nella modulazione **Phase Shifting Key** PSK, si ha una sola portante e quindi i due valori numerici uno e zero sono fatti corrispondere alle due fasi della stessa frequenza: 0° e 180° come in fig. 2.7, a cui corrisponde la configurazione binaria BPSK, riportata in fig. 2.8. Più formalmente, nella modulazione PSK la fase istantanea è costituita da un'onda PAM ad impulsi rettangolari di durata pari all'intervallo di simbolo

$$\alpha(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi[n] \text{rect}_{T_L}(t - nT_L) \quad (2.27)$$

I simboli $[n]$ appartengono ad un alfabeto composto da L_T caratteri corrispondenti, a meno di una fase arbitraria Φ , a L_T livelli equispaziati nell'intervallo $[-\pi, \pi]$:

$$\varphi_j = \Phi + \frac{2\pi}{L_T} j \quad j = 0, 1, \dots, L_T - 1 \quad (2.28)$$

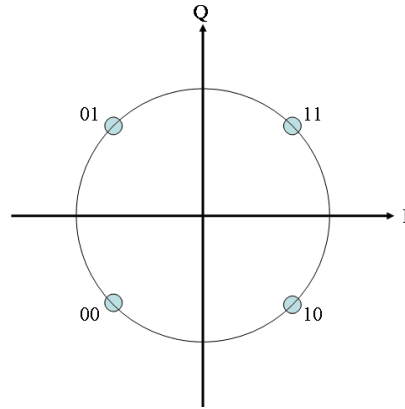


Figura 2.9: Diagramma di costellazione QPSK con codifica di Gray: ogni simbolo adiacente differisce di un unico bit.

All'uscita dei due filtri di trasmissione sono quindi presenti le due onde PAM:

$$s_c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A \cos(\varphi[n]) G_T h_T(t - nT_L) \quad (2.29)$$

$$s_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A \sin(\varphi[n]) G_T h_T(t - nT_L) \quad (2.30)$$

che modulano rispettivamente la componente in fase e la componente in quadratura del segnale trasmesso che pertanto è pari a:

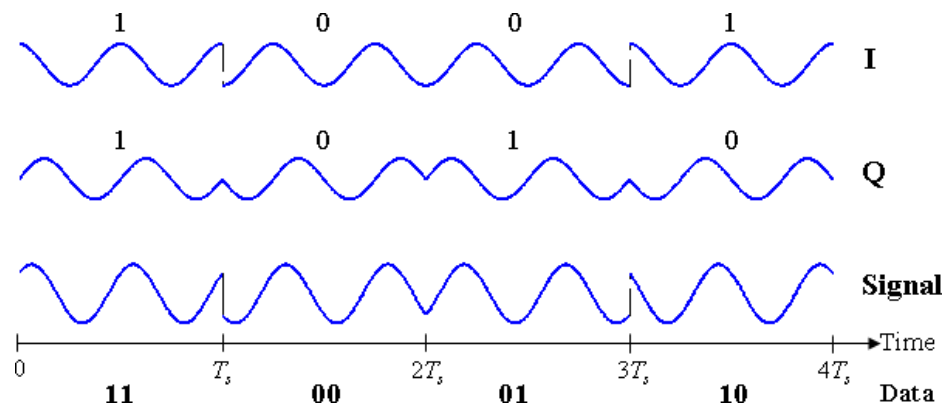
$$\begin{aligned} s(t) &= s_c(t) \cos(2\pi f_p t + \Theta) - s_s(t) \sin(2\pi f_p t + \Theta) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} A \cos(\varphi[n]) G_T h_T(t - nT_L) \cos(2\pi f_p t + \Theta) - \\ &\quad - \sum_{n=-\infty}^{\infty} A \sin(\varphi[n]) G_T h_T(t - nT_L) \sin(2\pi f_p t + \Theta) \end{aligned} \quad (2.31)$$

con

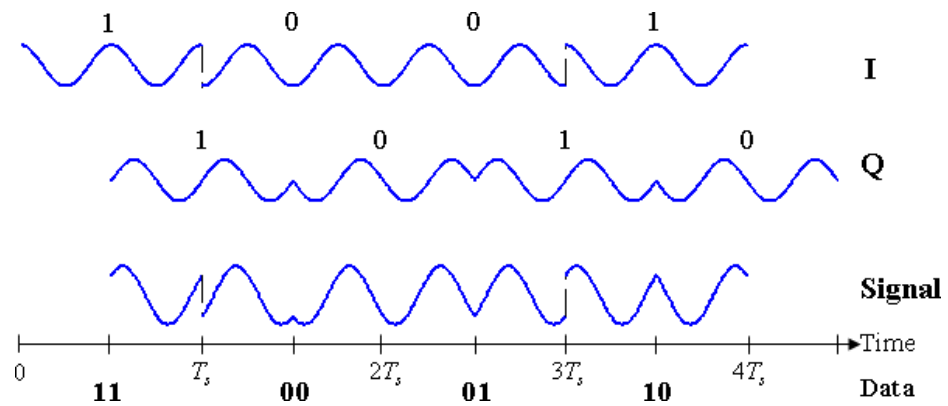
$$h_T(t) = \text{rect}_{T_L}(t) \quad (2.32)$$

2.3.1 QPSK

Nella modulazione **Quaternary PSK** (QPSK o 4-PSK) la fase della portante cambia ogni T_L secondi. Un esempio di configurazione è dato dalla fig. 2.9, dove si nota l'uso della codifica di Gray, analizzata nel par. 2.1.3. Poiché usualmente il segnale QPSK è successivamente limitato in banda da un filtro passabanda al fine della prevenzione delle interferenze tra canali adiacenti, le variazioni di fase di 180° che possono presentarsi in una data realizzazione, inducono una temporanea diminuzione dell'involuppo, che non si mantiene pertanto costante, come desiderato. Le due portanti di modulazione hanno medesima frequenza ma le loro fasi differiscono di 90 gradi (per questo vengono dette in quadratura). In pratica la fase del segnale in uscita dal primo modulatore può assumere i valori 0 gradi e 180 gradi mentre quella del segnale in uscita dal secondo assume i valori 90 gradi e 270 gradi. Infine le due portanti vengono sommate originando un segnale che può assumere quattro fasi diverse (45 gradi, 135 gradi, 225 gradi, 315 gradi). Un esempio di QPSK in dominio temporale è dato in fig. 2.10(a)



(a) Esempio di qpsk in dominio temporale. I dati binari modellati dalla forma d'onda è: 1 1 0 0 0 1 1 0, dove i bit dispari contribuiscono alla componente in fase, mentre i bit pari contribuiscono alla componente in quadratura



(b) Esempio di oqpsk in dominio temporale. Si noti lo sfasamento di metà periodo tra le due componenti del segnale

Figura 2.10: QPSK ed OQPSK in dominio temporale

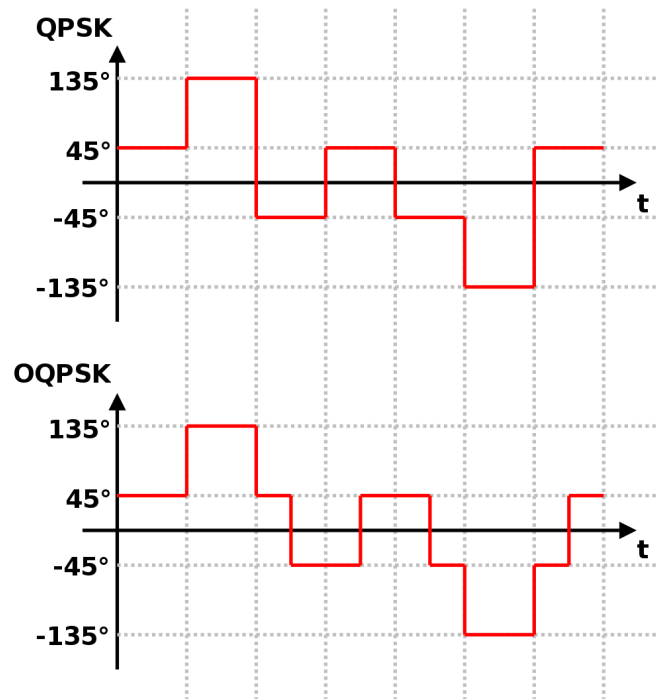


Figura 2.11: Differenza di fase tra QPSK e OQPSK: nel primo grafico la fase può cambiare di 180° , mentre in OQPSK i cambiamenti non sono mai più ampi di 90°

2.3.2 OQPSK

La modulazione **Offset Quaternary PSK** (OQPSK) è una variante della QPSK. Quest'ultima infatti potrebbe produrre salti di oltre 180° alla volta, dando luogo a qualità scadenti di comunicazione. Nella OQPSK il canale in quadratura è ritardato rispetto a quello in fase per un intervallo pari a $T_L/2$. Pertanto la forma d'onda trasmessa è pari a

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A \cos(\varphi[n]) G_T h_T(t - nT_L) \cos(2\pi f_p t + \Theta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} A \sin(\varphi[n]) G_T h_T(t - nT_L - \frac{T_L}{2}) \sin(2\pi f_p t + \Theta) \quad (2.33)$$

in tal modo si elimina la possibilità di cambiamenti di fase di 180° , come si evidenzia dalla fig. 2.11 e nella fig. 2.10(b)

2.4 FSK

Nella modulazione digitale di frequenza **Frequency-shift keying** FSK ad ogni simbolo logico viene assegnata una frequenza di valore compreso all'interno della banda passante del mezzo trasmissivo. Ad esempio all'uno logico può essere assegnata una frequenza f_a mentre allo zero una frequenza f_b che solitamente è di valore maggiore rispetto f_a . Si hanno in altre parole due possibili portanti a frequenze diverse che vengono abbinate ai due valori logici binari 1 e 0 come in fig. 2.12. Questo tipo di modulazione è stata usata nei primi modem, V21 e V23 molto lenti rispetto a quelli odierni, ed è tuttora usata nei ponti radio e nelle trasmissioni fra cellulari del tipo GSM.

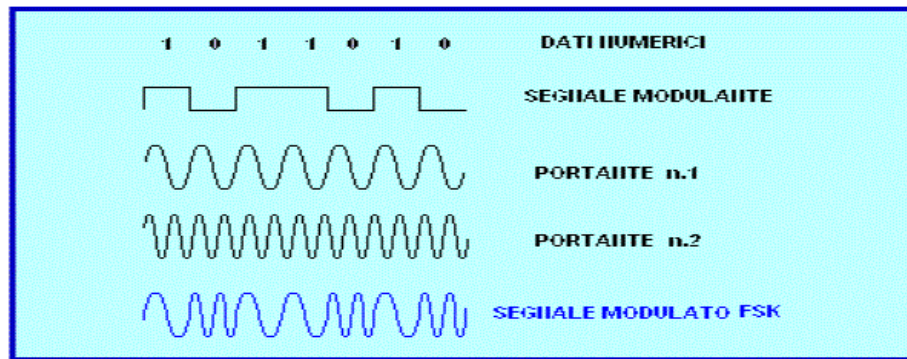


Figura 2.12: Modulazione FSK

2.4.1 MSK

La modulazione **Minimum Shift Keying** MSK si ottiene dalla modulazione OQPSK, impiegando al posto di un impulso di forma rettangolare un impulso di forma cosinusoidale, ovvero sostituendo $h_T(t)$ nell'espressione (2.33) con:

$$h_T(t) = \cos \left[\frac{\pi}{T_L} \left(t - \frac{T_L}{2} \right) \right] \text{rect}_{T_L} \left(t - \frac{T_L}{2} \right) \quad (2.34)$$

È realizzato utilizzando un filtro a coseno rialzato immediatamente prima la trasmissione: smussa il segnale senza introdurre interferenza intersimbolo.

La modulazione MSK è un caso particolare della modulazione CPM. In particolare la modulazione MSK può essere interpretata sia come modulazione di frequenza (FSK) che come modulazione di fase (PSK): la famiglia CPM è conosciuta anche come *continuous phase-frequency-shift keying* (CPFSK).

La variante gaussiana GMSK è il tipo di modulazione usato nel GSM.

2.5 QAM

Per aumentare la velocità di trasmissione dell'informazione, mantenendo costante la velocità di modulazione, invece di trasmettere, come nel caso PSK, solo due valori angolari 0° e 180° , oggi si trasmette un maggior numero di angoli diversi fra loro. Inoltre, per consentire una più facile demodulazione in ricezione (poiché il demodulatore potrebbe commettere errore di interpretazione) si fa variare anche l'ampiezza del segnale modulato dando luogo così alla modulazione QAM PSK. Le più moderne modulazioni numeriche, quelle quindi che determinano grandi velocità di trasmissione, sono quindi modulazioni di fase e di ampiezza.

Questo tipo di modulazioni è usato soprattutto nel campo dei modem, ma anche dei ponti radio, delle trasmissioni satellitari.

2.5.1 Modulazione 16 QAM PSK

I 16 simboli della modulazione sono costituiti da due gruppi di 8 ciascuno. La modulazione 16 QAM PSK, è una modulazione numerica di ampiezza e fase a 16 livelli diversi.

In questo caso quindi si ha una sola portante sinusoidale, a una sola frequenza, ma si possono trasmettere 16 simboli diversi tra loro per cui, poiché $2^4 = 16$, l'informazione racchiusa in ogni simbolo che arriva a destinazione è eguale a 4 bit.

COSTELLAZIONE PER LA MODULAZIONE 16 QAM PSK

IN ROSSO: ANGOLI
IN VERDE: QUADRIBIT
IN BLU: AMPIEZZE

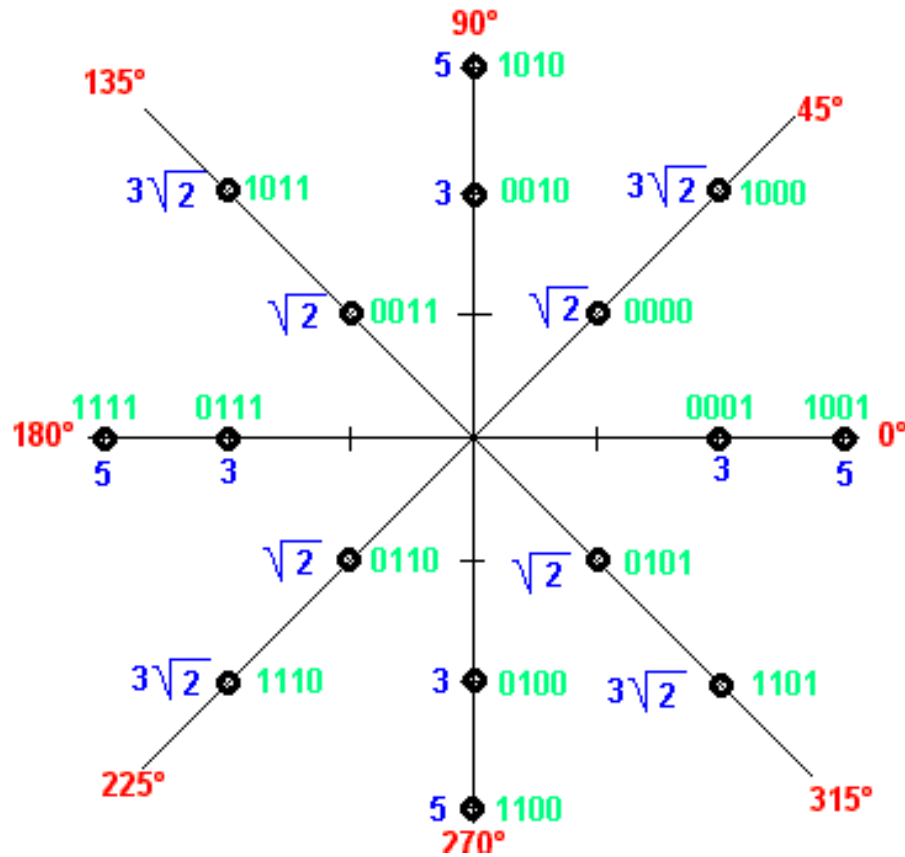


Figura 2.13: Modulazione 16 QAM PSK

I due gruppi di 8 sono costituiti da:

- un tratto di senoide con fase scelta fra: $0^\circ - 90^\circ - 180^\circ - 270^\circ$ e ampiezza $3V$ oppure $5V$;
- un tratto di senoide con fase scelta fra: $45^\circ - 135^\circ - 225^\circ - 315^\circ$ e ampiezza $\sqrt{2}V$ oppure $3\sqrt{2}V$

Ogni configurazione che arriva a destinazione, costituita da una fase angolare e un'ampiezza, porta con sé l'informazione di **4 bit**, secondo la fig. 2.13.

Più formalmente il metodo è il seguente:

- si fa variare la fase della portante (con la regola della 8-DPSK) a seconda dei tre *ultimi bit* componenti il quadrabit
- il primo bit lo si utilizza per operare una modulazione di ampiezza sul segnale già modulato in fase.

Così facendo si ottengono $2^3 = 8$ salti di fase, ad ognuno dei quali può essere associata un'ampiezza corrispondente all'uno o allo zero logico del primo bit, come espresso in tab. 2.2

n. stati	Configurazione binaria				Ampiezza A	Fase $\Delta\varphi$
	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1		
1	0	0	1	0	3	0°
2	0	0	1	1	5	0°
3	0	0	0	0	$\sqrt{2}$	45°
4	0	0	0	1	$3\sqrt{2}$	45°
5	0	1	0	0	3	90°
6	0	1	0	1	5	90°
7	0	1	1	0	$\sqrt{2}$	135°
8	0	1	1	1	$3\sqrt{2}$	135°
9	1	1	1	0	3	180°
10	1	1	1	1	5	180°
11	1	1	0	0	$\sqrt{2}$	225°
12	1	1	0	1	$3\sqrt{2}$	225°
13	1	0	0	0	3	270°
14	1	0	0	1	5	270°
15	1	0	1	0	$\sqrt{2}$	315°
16	1	0	1	1	$3\sqrt{2}$	315°

Tabella 2.2: Ampiezza relativa al segnale modulato QAM nelle varie fasi

Il segnale modulato QAM risulta piuttosto sensibile al rumore (meno sensibile, in ogni caso, di un eventuale 16-DPSK) perchè implica una modulazione d'ampiezza. Per questo motivo in fase di demodulazione si distinguono delle aree (dette *aree di decisione*) entro le quali il segnale, sebbene lievemente distorto, viene correttamente riconosciuto. È necessario quindi, affinché non si verifichino errori, che gli spostamenti dei punti di modulazione, dovuti ai disturbi del canale, non cadano al di fuori della propria area di decisione.

I sistemi QAM comportano una complessità circuitale notevole ma risultano vantaggiosi rispetto ai PSK, perchè, a parità di rapporto segnale/rumore del canale di trasmissione, sono meno soggetti ad errore. In particolari situazioni si utilizzano sistemi QAM anche molto sofisticati che possono arrivare sino a 256 livelli (come nel caso delle comunicazioni spaziali) e che garantiscono una comunicazione molto veloce e relativamente immune agli errori.

2.5.2 Modulatore QAM

Come illustrato in fig. 2.14, nella modulazione QAM il codificatore di trasmissione ed il separatore di flussi convertono la sequenza binaria prodotta dalla sorgente in due flussi di simboli $v_c[n]$ e $v_s[n]$ appartenenti ad un alfabeto composto da L_T caratteri corrispondenti a L_T livelli equispaziati nell'intervallo $[-A, A]$, analogamente a quanto già descritto nell'equaz. (2.1):

$$v_j = -A + \frac{2A}{L_T - 1}j \quad j = 0, 1, \dots, L_T - 1 \quad (2.35)$$

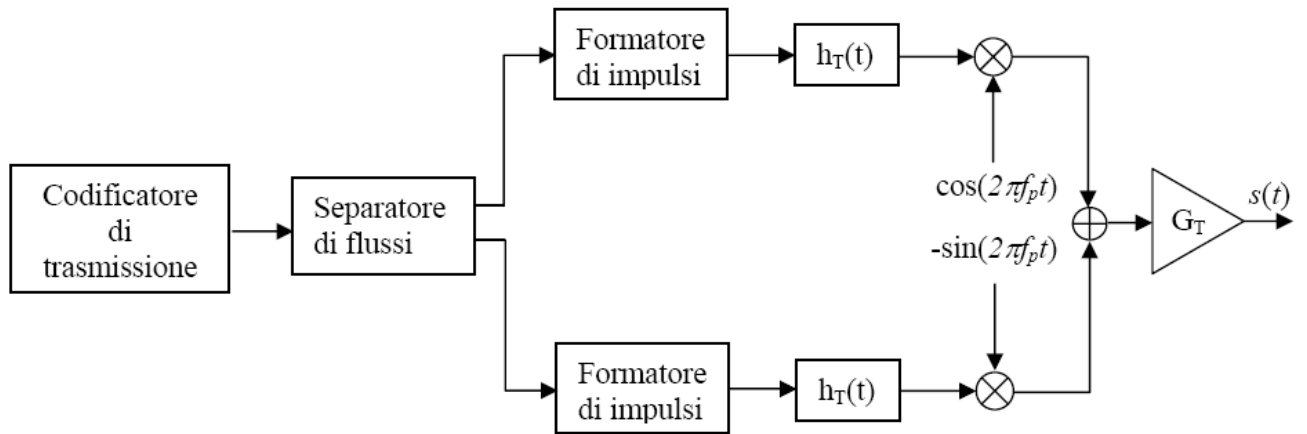


Fig6. Modulatore QAM

Figura 2.14: Modulatore QAM

Indicando con f_b il ritmo binario della sorgente, il ritmo delle due sequenze codificate sarà (ricordando quanto affermato in (2.23)):

$$f_{L_T} = \frac{f_b}{2 \log_2 L_T} = \frac{f_b}{\log_2 L_T^2} \quad (2.36)$$

All'uscita dei due filtri di trasmissione sono quindi presenti le due onde PAM:

$$s_c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_c[n] G_T h_T(t - nT_L) \quad (2.37)$$

$$s_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_s[n] G_T h_T(t - nT_L) \quad (2.38)$$

che modulano rispettivamente la componente in fase e la componente in quadratura del segnale trasmesso che pertanto è pari a:

$$\begin{aligned} s(t) &= s_c(t) \cos(2\pi f_p t + \Theta) - s_s(t) \sin(2\pi f_p t + \Theta) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_c[n] G_T h_T(t - nT_L) \cos(2\pi f_p t + \Theta) - \\ &\quad - \sum_{n=-\infty}^{\infty} v_s[n] G_T h_T(t - nT_L) \sin(2\pi f_p t + \Theta) \end{aligned} \quad (2.39)$$

Nel caso di assenza di interferenza intersimbolo, il ricevitore ottimo è l'estensione del ricevitore per trasmissione binaria ed è costituito, per ciascuno dei due canali fase e quadratura da un filtro seguito da un comparatore a soglia.

2.6 CPM

Il **Continuous phase modulation** (CPM), conosciuta anche come *continuous phase-frequency-shift keying* (CPFSK), è un metodo di modulazione comunemente usato nei modem wireless.

3 Multiplazione CDMA

3.1 Tecniche di multiplazione

Dato un canale di comunicazione, con il termine **multiplazione** (e demultiplazione) si intende l'operazione che consente di trasmettere più flussi informativi prodotti da diverse sorgenti, dette *tributarie*, per mezzo dello stesso sistema trasmissivo, garantendone la separabilità in ricezione. Le tecniche di multiplazione comprendono:

1. *Tecniche a divisione di spazio*: ad ogni flusso informativo è assegnato un singolo portante fisico (es. doppino telefonico).
2. *Tecniche a divisione di frequenza (FDMA : Frequency Division Multiple Access)*: l'occupazione del canale multiplato da parte di un flusso informativo (o di un raggruppamento di flussi), avente origine da una sorgente tributaria avviene in una banda di frequenze (all'interno della banda passante del canale multiplato) che è disgiunta rispetto alle bande di frequenze utilizzate dagli RCB emessi da altre sorgenti tributarie, come si osserva in fig. 3.1
3. *Tecniche a divisione di tempo (TDMA : Time Division Multiple Access)*: l'occupazione del canale multiplato da parte di un flusso informativo (o di un raggruppamento di flussi) avente origine da una sorgente tributaria avviene in intervalli di tempo che non si sovrappongono con quelli riguardanti i flussi emessi da altre sorgenti tributarie (es. multiplazione PCM, numerica asincrona e sincrona)
4. *Tecniche miste FDM-TDM* : combinano la tecnica d'accesso FDMA, con la tecnica TDMA. La porzione disponibile dello spettro è prima divisa in sottobande (canali) ed all'interno di ciascun canale, viene creata un'ulteriore suddivisione temporale della risorsa, come si osserva in fig. 3.2
5. *Tecniche a divisione di codice (CDMA : Code Division Multiple Access)*: sono anche note come tecniche di multiplazione ad espansione dello spettro (tecniche spread-spectrum). Nate inizialmente per applicazioni militari, sono ora molto diffusa nelle reti radiomobili (ad es. UMTS). Esse consistono nel trasmettere simultaneamente e nella stessa banda di frequenza un insieme di N segnali, uno per ciascun flusso informativo,
 - o moltiplicando ciascun segnale per una sequenza di codice, scelta tra un insieme di sequenze (pseudo)ortogonali (**DS** , **Direct Sequence**)
 - o cambiando velocemente la frequenza portante più volte in ogni tempo di simbolo secondo una sequenza prestabilita e diversa per ciascun segnale (**FH** , **Frequency Hopping**)

Si parla di *trasmissione a spettro espanso* quando la banda impiegata dal sistema trasmissivo è molto maggiore (almeno un ordine di grandezza) rispetto alla banda di Nyquist del segnale utile.

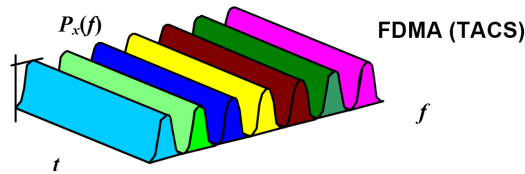


Figura 3.1: FDMA

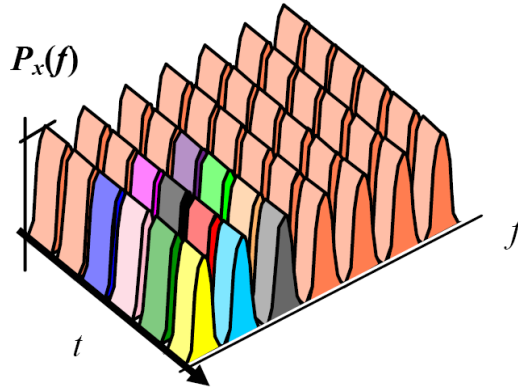


Figura 3.2: FDMA-TDMA (GSM)

Quindi a differenza delle altre tecniche di moltiplicazione, nella tecnica CDMA tutti gli utenti trasmettono **su tutta la banda nello stesso istante**. In ricezione, la separabilità tra i singoli segnali è basata sull'impiego da parte di ciascun utente di un proprio “codice” per il quale viene moltiplicata in trasmissione l'informazione d'utente (operazione di espansione dello spettro o “spreading”). Se i codici impiegati sono ortogonali tra loro, il ricevitore è in grado di isolare e ricostruire nuovamente i flussi informativi dei diversi utenti, con operazioni semplici. A causa del rumore, delle distorsioni introdotte nel canale di propagazione e delle proprietà non ideali dei codici, il numero massimo di segnali che si possono sovrapporre è limitato.

3.2 CDMA

3.2.1 DS-CDMA

Con riferimento alla fig. 3.3, nell'operazione di espansione, la sequenza d'informazione con intervallo di ripetizione dei simboli T_b viene modulata sui livelli antipodali $+1$ e -1 e moltiplicata per una sequenza binaria con valori $\{-1, 1\}$, con intervallo di ripetizione T_c (detto intervallo di chip) tra i simboli elementari detti chip. L'operazione di ricostruzione prevede, che la sequenza ricevuta venga moltiplicata chip a chip, per lo *stesso codice* usato nel processo di espansione. Mediando sul periodo di bit e campionando si ricostruisce in questo caso esattamente la sequenza d'informazione, come si osserva in fig. 3.4. Si presentano due casi:

caso sincrono si presenta quando i segnali relativi ai singoli utenti presentano gli stessi ritardi. Questa situazione è tipica delle comunicazioni relative alla tratta dalla stazione base ai terminali mobili. Le prestazioni del ricevitore coincidono con quelle di un sistema BPSK.

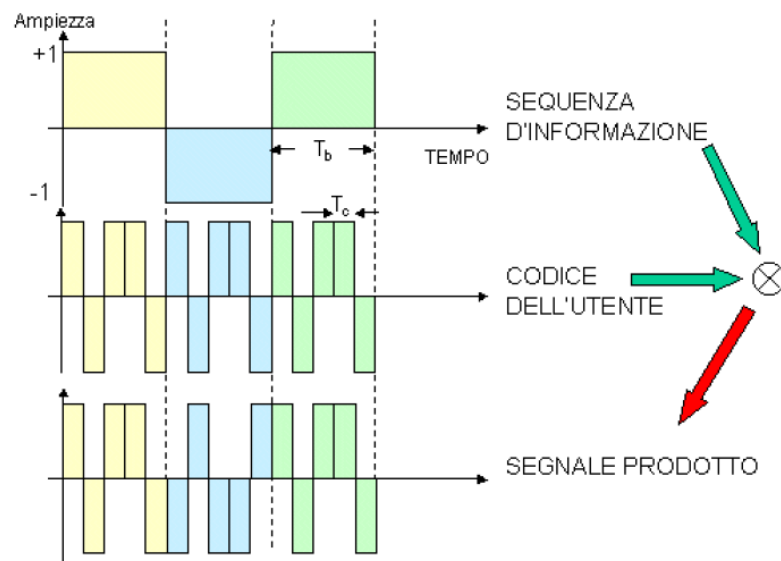


Figura 3.3: Modulazione DS-SS

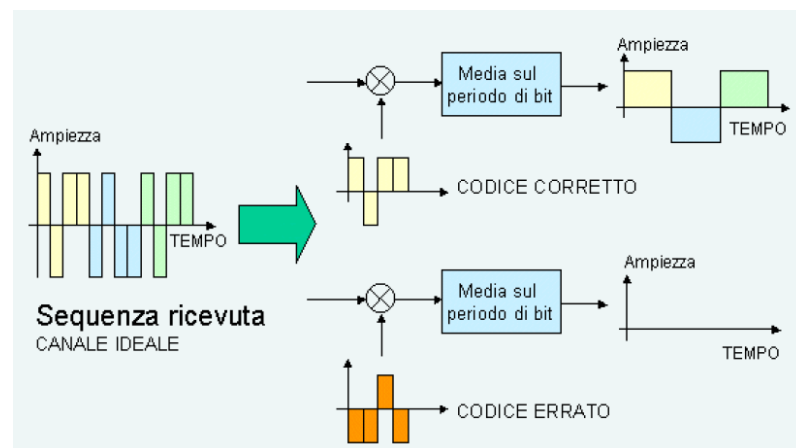


Figura 3.4: Modulazione DS-SS

caso asincrono si presenta tipicamente quando i segnali relativi ai singoli utenti presentano ritardi diversi. Questa situazione è tipica della tratta da terminali mobili a stazione base.

3.2.2 OFDM

4 GSM

4.1 Lo standard GSM

Il GSM, con oltre 800 milioni di utenti distribuiti su più di 500 reti operanti su circa 200 stati è il sistema radiomobile più diffuso a livello mondiale. Lo standard GSM (Global System for Mobile Communications) nasce negli anni '80 con lo scopo di definire e sviluppare un sistema radiomobile cellulare paneuropeo, comune a tutti i paesi dell'Europa occidentale, per sostituire i precedenti sistemi, incompatibili fra di loro, sviluppati in ogni paese con standard diversi. Il sistema proposto doveva rispettare dei criteri ben precisi:

- assicurare una buona qualità audio della conversazione
- bassi costi per i terminali e per la gestione del servizio
- supporto per il roaming internazionale
- supporto per un ampio ventaglio di nuovi servizi
- compatibilità con il sistema digitale ISDN
- garantire un eccellente grado di sicurezza e riservatezza nelle comunicazioni

4.2 La moltiplicazione in GSM

4.2.1 Suddivisione in celle

Nel GSM, la condivisione da parte di più mobili del canale radio si basa sulla combinazione delle tecniche FDM (Frequency Division Multiplexing) e TDM (Time Division Multiplexing). In particolare, *così come negli altri sistemi radiomobili cellulari*, l'area geografica che deve essere coperta dal servizio è suddivisa in **celle**. Celle adiacenti sono organizzate in gruppi (**cluster**) Ogni cella di un cluster è servita da una stazione fissa a cui è assegnato l'uso esclusivo di un insieme di canali FDM (all'interno del gruppo). Uno stesso canale FDM è riutilizzato in celle di altri gruppi, sufficientemente distanti da poter trascurare gli effetti prodotti dalle interferenze. Un esempio è dato in fig. 4.1, dove si nota che all'aumentare del rapporto $\frac{D}{R}$, il segnale utile deve aumentare corrispondentemente per sostenere il carico richiesto, mentre si beneficia di una minore interferenza. Quanto affermato viene espresso dalla *Carrier to Interference Ratio*:

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^\gamma \quad (4.1)$$

Una riduzione del rapporto tra segnale utile e interferente può essere ottenuto suddividendo ulteriormente la cella in **settori**. In tal caso, indicato con N_{sect} il numero di settori si ha:

$$\frac{C}{I} = \frac{N_{sect}}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^\gamma \quad (4.2)$$

in tab. 4.1.

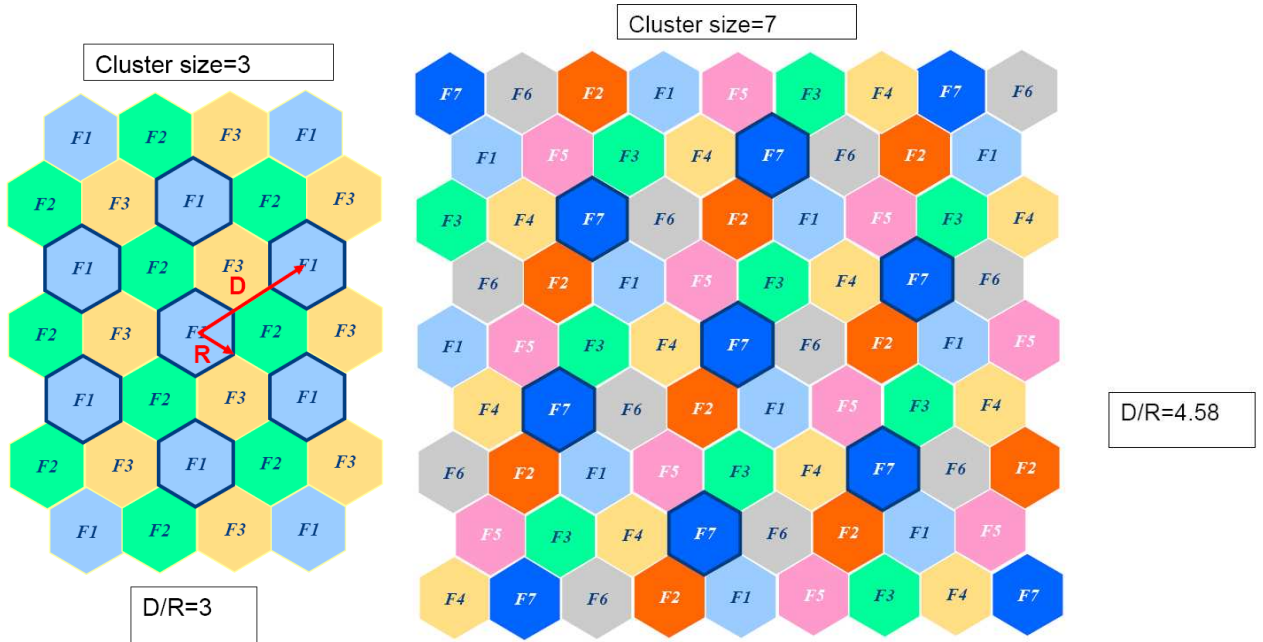


Figura 4.1: Riuso delle frequenze in GSM tramite FDM-TDM

Denominazione	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]
GSM 900 Standard o primario	890 – 915	935 – 960
Extended GSM 900	880 – 915	925 – 960
DCS 1800	1710 – 1785	1805 – 1880

Tabella 4.1: GSM: bande di frequenza

4.2.2 Handover

Una delle caratteristiche peculiari dei sistemi cellulari è la possibilità di mantenere attiva una comunicazione pur continuando a spostarsi liberamente nel territorio. Questa mobilità può causare la necessità di cambiare frequentemente cella di servizio oppure canale di trasmissione per continuare a garantire all'utente una buona qualità del segnale. Questa commutazione automatica senza interruzione nel collegamento è chiamato **handover**. Si veda a tale proposito il par. 4.9.3

4.2.3 Moltiplicazione FDMA e riutilizzo delle frequenze

Il GSM utilizza la tecnica FDMA-TDMA:

- l'ampiezza di banda concessa è divisa in frequenze portanti o **canali**. La spaziatura tra le portanti è di 200 kHz. Ad ognuna di queste è associato un numero di canale, detto **ARFCN** (Absolute Radio Frequency Channel Number), per identificarle in modo univoco.
- inoltre l'asse dei tempi è organizzato in trame (o **frames**) della durata di 4.615 ms. Ogni trama è suddivisa in 8 intervalli temporali (time slot) della durata di 0.577 ms l'uno (4.615/8).

Banda operativa GSM standard o primary (P-GSM)

Secondo la tab. 4.1, risulta un uplink di 890 MHz – 915 MHz e un downlink di 935 MHz – 960 MHz. L' n -esima portante (ARFCN n), ricordando che $200\text{kHz} = 0.2\text{MHz}$ è definita come segue:

- $F_{Uplink}(n) = 890 + n \cdot 0.2$
- $F_{Downlink}(n) = 935 + n \cdot 0.2$

poiché deve risultare:

$$890 < F_{Uplink}(n) < 915 \qquad 935 < F_{Downlink}(n) < 960 \qquad (4.3)$$

si ottiene per entrambi i casi:

$$1 \leq n \leq 124 \qquad (4.4)$$

Il GSM ha quindi una banda di 25 MHz divisa in 124 portanti numerate da 1 a 124. Si noti che i valori delle portanti sono correlati per l'uplink e il downlink. Alcuni esempi sono riportati nella tab. 4.2

4.2.4 Moltiplicazione TDMA

Inoltre si ricordi che l'asse dei tempi è organizzato in trame, ognuna di esse suddivisa in 8 intervalli temporali. Il time slot k -esimo di ogni trama della i -esima portante costituisce un canale, in tutto sono 992 ($124 \cdot 8$)

Ipertrame, supertrame, multitrame

A loro volta anche la sequenza delle trame è divisa periodicamente tra più canali, con una sorta di TDMA di secondo livello, assegnando una o più trame ad un singolo canale.

L'asse temporale è organizzato secondo una struttura gerarchica, come si osserva in fig. 4.2:

Tch (n)	Up (MHz)	Down (MHz)
1	890,2	935,2
2	890,4	935,4
5	891,0	936,0
10	892,0	937,0
50	900,0	945,0
100	910,0	955,0
120	914,0	959,0
124	914,8	959,8

Tabella 4.2: Banda GSM standard

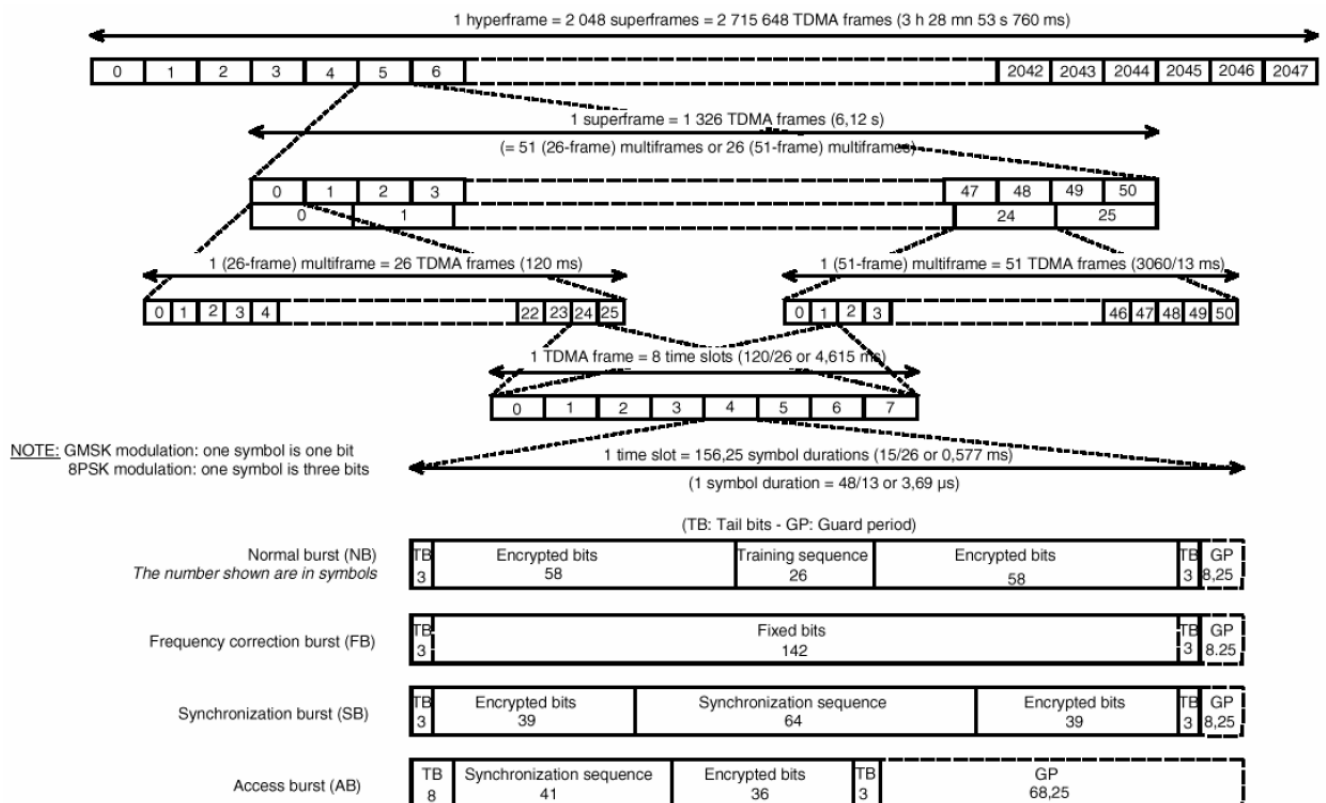


Figura 4.2: Trame, time slot e burst

- l'**ipertrama** la cui durata è di 3 h 28 mn 53 s 760 ms (o 12 533,76 s). Una ipertrama comprende 2.715.648 trame, ciascuna identificata attraverso il proprio numero d'ordine (Frame Number (FN)), compreso tra 0 e 2715647 .
- ogni ipertrama è suddivisa in 2.048 **supertrame** ciascuna con durata di 6,12 secondi (2715647/2048).
- la supertrama è a sua volta suddivisa in **multitrime**. Esistono 4 tipi di multitrime (per informazioni più dettagliate sulle sigle si consulti il par. 4.4):
 - una **26-multitrime** (51 per supertrama) con durata di 120 ms (6.12/51), composta da 26 trame TDMA, utilizzata per trasportare canali TCH (e SACCH/T) e FACCH;
 - una **51-multitrime** (26 per supertrama) con una durata di 235,4ms (6.12/26 o analogamente 3.060/13), composta da 51 trame TDMA. Questa multitrime è usata per il trasporto dei canali BCCH, CCCH (NCH, AGCH, PCH e RACH) e SDCCH (e SACCH/C), o PBCCH e PCCCH.
 - una **52-multitrime** (25,5 per supertrama) con una durata di 240 ms (6.12/25,5), comprendente 52 trame TDMA. Questa multitrime è usata per il trasporto dei canali PBCCH, PCCCH (PNCH, PAGCH, PPCH e PRACH), PACCH, PDTCH, e PTCCH. Può essere assimilate ad una coppia di due 26-multitrime consecutive le cui trame sono numerate da 0 a 51.
 - una **52-multitrime** (25.5 per supertrama) per CTS, con una durata di 240 ms (6,12/25,5), comprendente 52 trame TDMA. Questa multitrime è usata per il trasporto dei canali CTSCCH (CTSBCH, CTSPCH, CTSARCH e CTSAGCH).

Il numero totale dei canali fisici disponibili risulta essere di 992 da distribuire all'interno del cluster di celle. I canali logici devono essere inseriti fisicamente nella struttura TDMA. Un canale logico viene associato ad un time slot di una frequenza su cui si alterna con gli altri canali nella successione delle trame.

Ai canali di segnalazione (BCCH , SCH , FCCH, AGCH, PCH, RACH, SDCCH) (si veda il par. 4.4) è di norma riservato il time slot 0 di una sola delle frequenze assegnate ad una cella in entrambe le direzioni. Tale frequenza prende il nome di portante fondamentale o portante BCCH. Nella direzione downlink i canali FCCH, SCH e BCCH devono sempre essere trasmessi per consentire alle MS di agganciarsi alla rete.

4.2.5 Definizione del canale fisico

Un canale fisico è quindi definito, come schematizzato in fig. 4.3, da:

- una sequenza di trame TDMA
- un numero di time slot (TN = Time slot Number)
- una sequenza di frequenze secondo l'algoritmo del Frequency hopping (algoritmo noto sia alla BS che alla MS utilizzato per ovviare agli effetti delle interferenze e del fading mediante il passaggio da un canale all'altro secondo un dato schema¹)

¹consiste nel trasmettere messaggi successivi di una stessa comunicazione su frequenze portanti diverse, mantenendo però sempre lo stesso time slot assegnato inizialmente

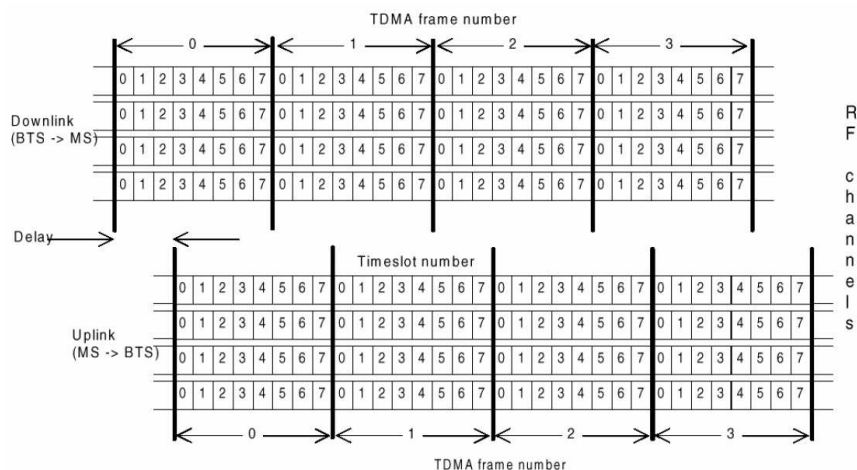


Figura 4.3: Definizione del canale fisico

4.3 Architettura

L'architettura dei servizi a commutazione di circuito GSM è mostrata in fig. 4.4. Una rete GSM è composta da numerose entità funzionali che possono essere raggruppate in quattro sottosistemi:

- la Stazione Mobile (Mobile Station) è il terminale mobile usato dall'abbonato.
- la Stazione Base (Base Station Subsystem) controlla la trasmissione radio con il terminale.
- il Sottosistema di rete (Network Subsystem), la cui parte principale è il Centro di Commutazione (Mobile services Switching Center) realizza la connessione tra l'utente della rete mobile e gli utenti delle altre reti, fisse o mobili
- il Sottosistema di esercizio e manutenzione (Operation and Support Subsystem) sovrintende al corretto funzionamento e settaggio della rete.

La comunicazione tra le diverse entità del sistema GSM è assicurata da specifiche **interfacce**. La possibilità di effettuare il roaming, cioè di potersi spostare liberamente sul territorio servito dal proprio gestore, ed anche su quello servito dagli altri gestori delle nazioni che aderiscono al GSM, richiede di memorizzare in un database la posizione degli utenti ed aggiornarla man mano che questi si spostano. A tal scopo l'area geografica di servizio del sistema GSM è suddivisa gerarchicamente in diverse aree, dette **Network service areas**. Un operatore GSM è quindi sempre in grado di conoscere la posizione di ciascun suo abbonato. L'architettura e le interfacce sono raffigurate inoltre in fig. 4.5. In particolare, si noti come le interfacce siano standardizzate e identificate da una sigla.

4.3.1 Mobile Station (MS)

La Mobile Station è costituita dalle apparecchiature fisiche utilizzate dall'utente mobile per connettersi alla rete ed usufruire dei servizi GSM. Comprende:

- una smart card intelligente detta **SIM** (Subscriber Identity Module), che *permette ad un utente di caratterizzare come proprio un qualsiasi terminale mobile GSM*. Vi è infatti una netta distinzione

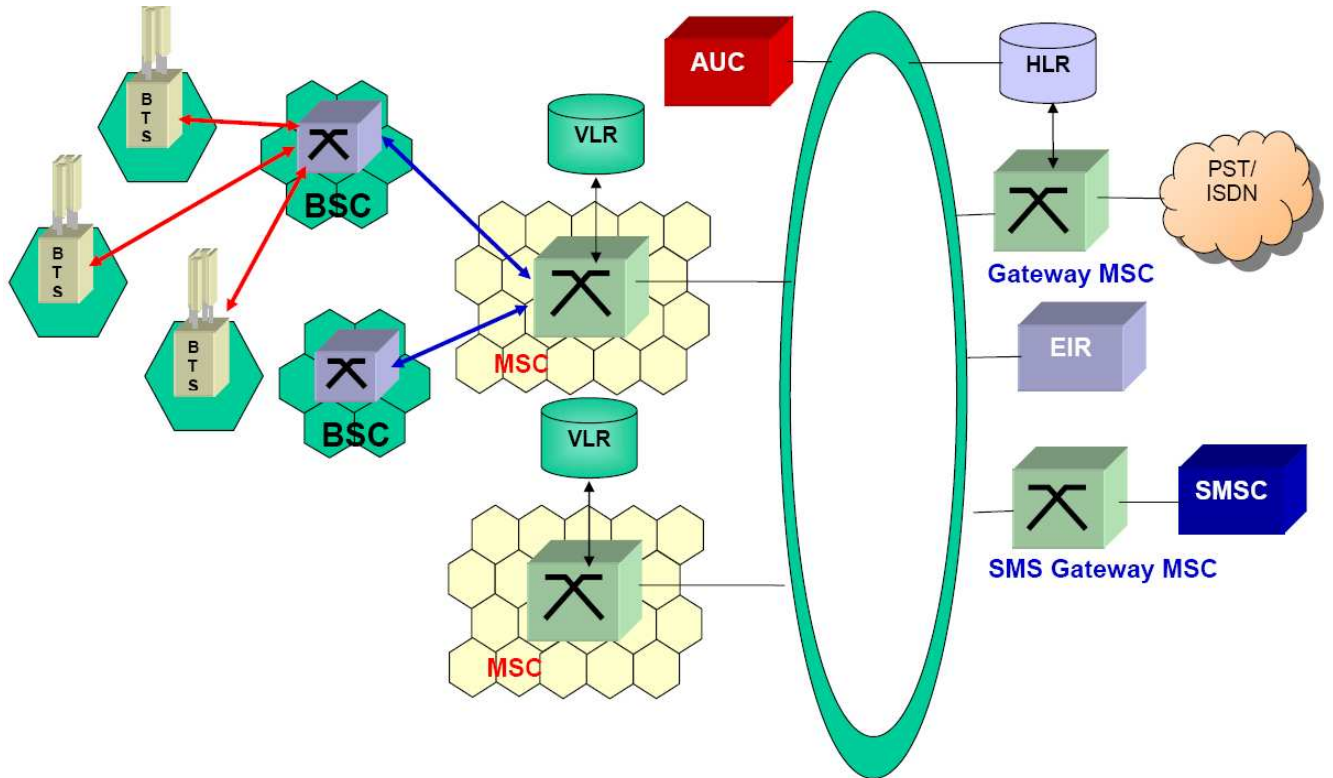


Figura 4.4: Architettura del sistema GSM

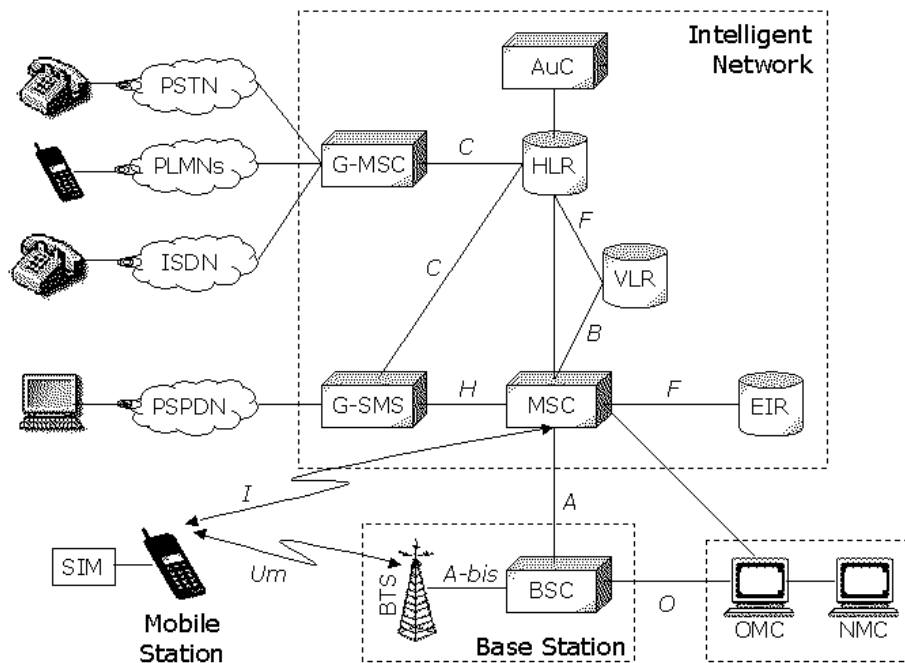


Figura 4.5: Architettura e Interfacce del sistema GSM

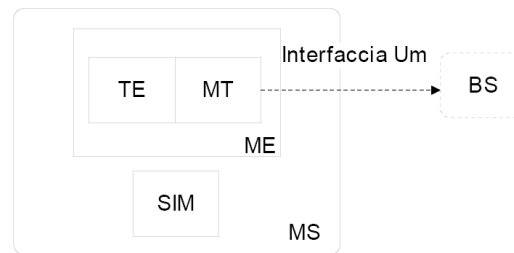


Figura 4.6: Mobile Station

tra l'apparecchio mobile vero e proprio e la SIM che contiene tutti i dati dell'abbonato. Quest'ultima è distinta rispetto al terminale ed è, da esso, rimovibile.

- il terminale mobile **ME** (Mobile Equipment), che comprende:
 - il TE (Terminal Equipment)
 - il MT (Mobile Termination), che consente di interfacciarsi alla BS (Base Station), come descritto in fig. 4.6.

SIM Card

La SIM card contiene una memoria seriale, nella quale vengono memorizzate diverse informazioni, e un processore in grado di eseguire alcuni algoritmi di cifratura (*Encryption algorithms*). Le possibilità offerte da queste smart-card possono variare notevolmente da operatore a operatore, in dipendenza delle specifiche implementazioni.

La SIM card contiene le seguenti informazioni (obbligatorie)²:

- IC card identification: codice seriale identificativo della SIM;
- SIM service table: indica i servizi opzionali disponibili nella SIM;
- International Mobile Subscriber Identity (**IMSI**);
- Location information: Temporary Mobile Subscriber Identity (**TMSI**), Location Area Information (**LAI**), valore corrente del **Periodic Location Updating** Timer (T3212) e del Location update status;
- Individual subscribers authentication key (**Ki**)
- Chiave di crittografia (**Kc**) e cipher key sequence number;
- Ciphering key generating algorithm (**A8**)
- Authentication algorithm (**A3**)
- **Access control class**
- Personal Identity Number (PIN);

²ne sono citate solo alcune

- contatore errori di digitazione PIN;
- PIN Unlocking Key (PUK);
- contatore errori di digitazione PUK;

Ed inoltre può contenere le seguenti informazioni opzionali³:

- PLMN selector: Selezione automatica dell'operatore di rete;
- MSISDN number: numero **MSISDN** dell'abbonato;
- Personal Identity Number 2 (PIN2);
- contatore errori di digitazione PIN2;
- PIN Unlocking Key 2 (PUK2);
- contatore errori di digitazione PUK2;

E' la SIM card che fornisce l'abilitazione al servizio e viene attivata (per evitarne un uso non autorizzato) tramite un numero di identificazione personale di 4 o 8 cifre, denominato PIN (Personal Identity Number). Per garantire una sicurezza ancora maggiore, se il codice PIN viene digitato erroneamente per 3 volte consecutive la carta si blocca. In questo caso sarà necessario utilizzare il codice PUK di 8 cifre (PIN Unlocking Key) per sbloccarla. Se anche quest'ultimo venisse digitato erroneamente per 10 volte consecutive la carta andrebbe in blocco totale e sarebbe necessario sostituirla.

L'introduzione di alcuni nuovi servizi nella fase 2 di sviluppo del sistema GSM ha richiesto l'introduzione di un secondo PIN (PIN2) per proteggere il contenuto di alcuni nuovi campi e differenziare così l'accesso (ad esempio un abbonato può prestare la propria SIM card ad un amico fornendogli il solo PIN. Sarà così sicuro che questo, pur potendo telefonare, non potrà usufruire di tutti i servizi che richiedono invece il PIN2). Chiaramente, esiste anche un PUK2 con le stesse funzionalità del PUK.

International Mobile Subscriber Identity (IMSI) La SIM card contiene un codice per identificare l'utente, denominato IMSI (International Mobile Subscriber Identity), una chiave segreta di autenticazione Ki (Individual subscribers authentication key), un algoritmo di autenticazione (Authentication algorithm), detto A3, e uno di cifratura (Encryption algorithm), detto A8 (questi ultimi possono riuniti in un solo algoritmo dello A38). Il codice IMSI e la chiave di autenticazione Ki costituiscono le credenziali di identificazione dell'abbonato.

Il codice IMSI è quindi associato all'utente che ha sottoscritto l'abbonamento al GSM, mentre è svincolato dall'apparato mobile (ME) utilizzato. Il codice IMSI, che ha una lunghezza massima di 18 cifre, è composto da tre parti, come si osserva in fig. 4.7:

1. il Mobile Country Code (MCC) (3 cifre) che identifica lo stato in cui è domiciliato l'abbonato (Italia: 222).
2. il Mobile Network Code (MNC) (2 cifre) identifica la rete dell'operatore con il quale si è sottoscritto l'abbonamento (rete base) (Tim: 01, Vodafone: 10)

³ne sono citate solo alcune

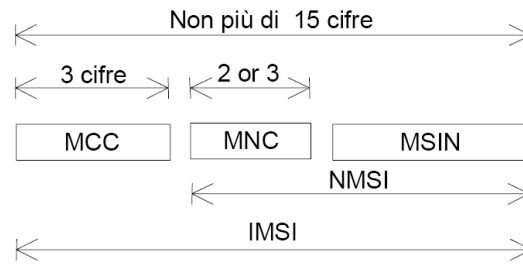


Figura 4.7: International Mobile Subscriber Identity

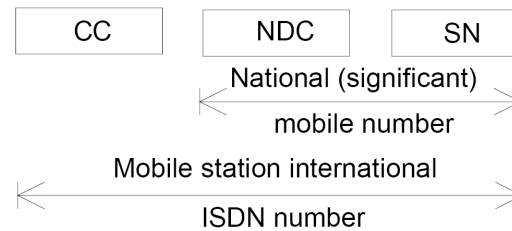


Figura 4.8: Mobile Station International ISDN number

3. il Mobile Subscriber Identification Number (MSIN) (max. 13 cifre) è il numero seriale: identifica l'abbonato all'interno di una rete mobile terrestre (PLMN)

La concatenazione dell'MNC e dell'MSIN costituisce la National Mobile Subscriber Identity (NMSI).

Mobile Station International ISDN number (MSISDN) Poiché una rete GSM è interconnessa con altre reti (PSTN , ISDN , altri PLMN), deve prevedere un piano di numerazione con esse compatibile. Ad ogni MS è assegnato un numero di telefono (MSISDN), che identifica univocamente un abbonato nel piano di numerazione della rete telefonica commutata pubblica internazionale, in conformità con le specifiche E.164 sulla numerazione per reti ISDN (naturali sostituiti delle tradizionali PSTN). L'MSISDN ha una lunghezza massima di 15 cifre con la seguente struttura, come si osserva in fig. 4.8:

1. il Country Code (**MCC**) che identifica lo stato in cui è registrata la stazione mobile. (Italia: 39)
2. il National (significant) mobile number, composta da:
 - un National Destination Code (**NDC**): identifica una PLMN ⁴ GSM in un ambito nazionale. Ad una PLMN possono essere allocati più NDC (Tim: 335, 338, 339; Vodafone: 347, 348, 349).
 - il Subscriber Number (**SN**): numero che identifica l'abbonato nel PLMN del proprio operatore.

Nelle applicazioni GSM/UMTS ad ogni rete è allocato un National Destination Code. In alcuni stati può essere necessario associare ad una rete più di un NDC. La sua composizione deve essere tale da consentirne l'uso come indirizzo globale nell'istradamento dei messaggi verso l'HLR del mobile da parte dello strato Signalling Connection Control Part (SCC P). Tale informazione è ottenuta concatenando il CC e l'NDC ed, eventualmente, le prime cifre dell'SN.

⁴operatore di rete

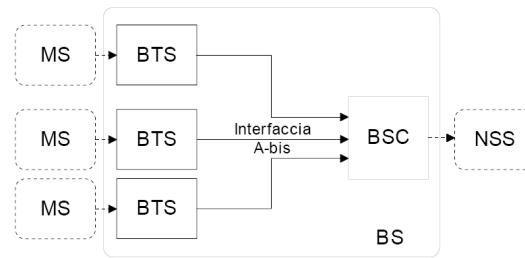


Figura 4.9: Base Station System

4.3.2 Base Station System (BSS)

Il sottosistema BSS (Base Station Subsystem) si occupa della parte radio del sistema e di conseguenza comprende le unità funzionali che consentono di fornire la copertura radio di un'area costituita da una o più celle. È quindi l'entità responsabile delle comunicazioni con la Stazione Mobile (MS) all'interno di una data area. Gli apparati radio di una BS possono servire una o più celle. È composta da:

- uno o più Base Transceiver Station (**BTS**), ciascuno dei quali serve una cella.
- un Base Station Controller (**BSC**), La stazione base di controllo (BSC) governa il funzionamento di uno o più BTS , gestisce il settaggio dei canali radio (instaurazione e rilascio delle connessioni), il frequency-hopping, gli handover interni e altro ancora. Fornisce la connessione tra una unità mobile (MS) e il centro di commutazione (MSC). In una grande area urbana ci sono un gran numero di BTS controllate da una o poche BSC.

Quanto descritto è raffigurato in fig. 4.9

La distanza massima tra BTS e MS

Per comunicare, la distanza tra stazione trasmittente (BTS) e terminale mobile (MS) *non può superare i 35 km* anche quando le condizioni morfologiche del terreno lo permetterebbero (ad esempio in una vasta zona pianeggiante). Infatti, quando la stazione base invia un messaggio ad un terminale, può aspettare da questo una risposta solo per un breve periodo prima di dover passare ad analizzare le altre MS sullo stesso canale, in base alla tecnica TDMA (altrimenti si avrebbero sovrapposizioni di burst). Se il terminale si trova a più di 35 Km dalla stazione base la sua risposta arriva troppo tardi e l'utente risulta quindi non raggiungibile.

In particolare il sistema GSM riesce a compensare fino ad un ritardo massimo di 233 microsecondi⁵ tra l'invio di un messaggio e la ricezione della risposta, che corrispondono ad un viaggio BTS – MS – BTS di circa 70 km (e quindi ad una distanza massima di 35 km tra BTS e MS) poiché risulta:

$$233 \cdot 10^{-6} \cdot 300000 \approx 70 \quad (4.5)$$

ricordando che la velocità della luce è 300000 km/s.

4.3.3 Network Subsystem (NS)

Il sottosistema di rete fornisce diversi servizi, che vengono discussi di seguito.

⁵quindi il tempo che impiega il segnale dell'utente più lontano per arrivare alla stazione mobile è di circa 115 μ s

Il sistema radiomobile GSM costituisce una rete pubblica di telecomunicazioni, esso deve quindi comprendere delle centrali di commutazioni che si occupino dell'instradamento delle chiamate. Il componente centrale è allora il centro di commutazione **Mobile services Switching Center (MSC)**.

Un MSC ha in carico una certa area del territorio (controlla quindi tutte le BSC in quella zona) e deve servire tutte le MS che transitano in quell'area. Per gestire la mobilità degli utenti esso deve scambiare continuamente informazioni con un database, detto **Visitor Location Register (VLR)**, che memorizza, temporaneamente, le informazioni relative alle MS che si trovano in quell'area (identità dell'utente **IMEI**, numero telefonico **MSISDN**, parametri di autenticazione, ecc.). Le MS in questione sono semplicemente in visita nell'area servita dal VLR. Esse, infatti, si possono spostare in qualsiasi momento entro l'area servita da un altro VLR. Nonostante quest'ultimo, come entità funzionale, possa essere implementata in maniera indipendente dall'MSC, tutti i costruttori preferiscono integrarli assieme (l'interfaccia tra i due elementi può essere proprietaria) ed il tutto viene usualmente definito MSC/VLR. In questo caso entrambi servono la stessa area geografica, detta **MSC/VLR area**.

Ogni gestore possiede un database centrale, denominato **Home Location Register (HLR)**, che memorizza permanentemente sia i dati di abbonamento degli utenti (noti come statici) sia i dati (detti dinamici) che possono variare a seguito di azioni degli utenti stessi (attivazione servizi supplementari, ecc.) che l'identità del VLR presso cui la MS dell'utente è registrata come visitor.

L'HLR è semplicemente un database e quindi memorizza i parametri di sicurezza, ma non provvede alla loro generazione. Il compito di calcolare, tramite degli appositi algoritmi, questi parametri è demandato ad una unità funzionale denominata **Authentication Center (AuC)**.

Per cercare di risolvere il problema del possibile utilizzo di apparati mobili ME rubati, difettosi o non omologati, esiste una unità funzionale, il **Equipment Identity Register (EIR)**, che memorizza al suo interno tutti i codici IMEI segnalati come difettosi o rubati. La rete può così effettuare un controllo sull'IMEI richiedendolo alla MS e vietarne l'accesso nel caso questo non sia in regola.

Mobile-services Switching Centre (MSC)

Il Mobile-services Switching Centre è un normale nodo di commutazione che svolge tutte le funzioni di commutazione e di segnalazione a supporto dei tutti i terminali mobili che si trovano nell'area geografica servita (denominata nello standard con il termine di MS C area): instaurare, controllare, tassare le chiamate da/verso le MS presenti nell'area geografica da esso servita.

L'MSC fornisce la connessione con le reti fisse: Public State Telephone Network (**PSTN**), Integrated Services Digital Network (**ISDN**), rete dati a commutazione di pacchetto (**PSPDN**, Packet Switched Public Data Network) o di circuito (**CSPDN**, Circuit Switched Public Data Network).

Rispetto ad un nodo di commutazione di una rete fissa, l'MSC deve tenere conto dell'impatto dell'allocation delle risorse radio e della natura mobile dell'utente e pertanto deve svolgere, in collaborazione con altre entità del Network Subsystem, almeno le seguenti funzioni aggiuntive:

- registrazione ed aggiornamento della localizzazione di un terminale mobile (MS);
- gestione dell'handover

Gateway MSC (GMSC)

Costituisce il punto d'accesso ad una rete GSM per chiamate da/a reti fisse o mobili di altri gestori. Nel caso di una chiamata entrante, il GMSC interroga il registro HLR dell'abbonato, che a sua volta interroga

il corretto registro VLR, e quindi instrada la chiamata verso il centro MSC che controlla la zona nella quale si trova l'abbonato.

Home Location Register (HLR)

L'HLR costituisce il database in cui il gestore della rete GSM memorizza, in modo permanente, i dati relativi agli utenti che hanno sottoscritto un abbonamento presso di lui. Ogni azione di tipo amministrativo che il gestore di rete effettua sui dati di utente viene svolta attraverso l'HLR. Può essere unico o distribuito e contiene, per ogni utente, due tipologie di informazioni:

- dati relativi al *contratto* (specialmente ora che il prefisso non coincide più con il gestore)
- dati sulla *localizzazione* del terminale ai fini della contabilizzazione e dell'istradamento delle chiamate verso l'MSC nella cui area si trova il mobile quali:
 - MS Roaming Number,
 - VLR address,
 - MSC address,
 - Local MS Identity.

I principali compiti di un HLR sono:

- sicurezza / autenticazione (dialogo con l'AUC)
- gestione della localizzazione
- informazioni sull'istradamento
- gestione dei dati utente e dei costi delle chiamate
- gestione (attivazione/disattivazione) dei servizi supplementari

Ad ogni utenza sono associati due tipi di numeri memorizzati nella base di dati:

- una *International Mobile Station Identity (IMSI)* che identifica l'abbonato all'interno di una qualunque rete GSM e che è contenuto anche nella SIM.
- uno o più *Mobile Station International ISDN number(s) (MSISDN)* che identificano l'abbonato univocamente nel piano di numerazione della rete telefonica internazionale (ad es. un MSISDN per i servizi di fonìa, un MSISDN per i servizi di trasmissione dati e fax)

Sia l'IMSI che l'MSISDN possono essere utilizzati come chiavi per accedere al record relativo ad un'utenza. Il database contiene anche altre informazioni quali:

- dati sui teleservizi e servizi portanti sottoscritti
- restrizioni sui servizi (e.g. limitazioni del roaming);
- una lista degli identificativi dei gruppi che un abbonato può utilizzare per le chiamate di gruppo;
- servizi supplementari

Visitor Location Register (VLR)

L'MSC è solo una centrale di commutazione e non è quindi in grado di conoscere la posizione del mobile. Il VLR costituisce il database in cui sono memorizzati temporaneamente i dati relativi ai terminali mobili presenti in una **MS C area**. Quando un terminale (MS) entra nell'area coperta da un nuovo MSC, i dati relativi al mobile vengono inseriti nel registro dei visitatori (VLR) associato all'MSC e contemporaneamente l'indirizzo del VLR viene annotato nel registro generale degli utenti 'HLR relativo al mobile. I dati utente contenuti nel VLR comprendono:

- IMSI, MSISDN, e parametri di sicurezza
- HLR number,
- Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI) usato per garantire la sicurezza dell'IMSI, viene assegnato ogni volta che si cambia Location Area
- stato della MS
- stato dei servizi supplementari
- Location Area Identifier (LAI) in cui si trova la MS

Authentication Centre (AUC)

Ad ogni HLR è associato un AuC in cui sono memorizzate le chiavi primarie utilizzate nelle procedure di identificazione e autenticazione del mobile e di crittazione dei flussi informativi nella tratta radio. Le chiavi primarie sono impiegate per generare i parametri temporanei impiegati nelle procedure di sicurezza citate al punto precedente.

Il meccanismo di autenticazione verifica la legittimità della SIM senza trasmettere sul canale radio le informazioni personali dell'abbonato, quali IMSI e chiave di cifratura, al fine di verificare che l'abbonato che sta tentando l'accesso sia quello vero e non un clone; la cifratura invece genera alcuni codici segreti che verranno usati per criptare tutta la comunicazione scambiata sul canale radio.

L'AuC contiene: il codice IMSI, la chiave di autenticazione (Ki), il codice TMSI corrente e il codice LAI corrente, usati per autenticare e codificare i canali radio, oltre ad un generatore di numeri casuali (RAND), agli algoritmi A3 e A8.

Equipment Identity Register (EIR)

Nel GSM ogni apparato mobile (ME) è identificato univocamente dal codice IMEI (codici univocamente associati ad ogni apparato mobile). L'IMEI è distinto rispetto all'identità della persona che ha sottoscritto l'abbonamento (codice IMSI memorizzato nella SIM card). Questa entità contiene uno o più database in cui sono memorizzati i codici IMEI : un IMEI può non essere valido quando l'unità mobile risulta rubata o non approvata. Pertanto i dati relativi agli apparati possono essere memorizzati in tre liste diverse:

- White List: IMEI autorizzati
- Grey List: IMEI apparecchi non omologati
- Black List: IMEI bloccati, non autorizzati a connettersi.

Un IMEI può anche risultare sconosciuto ad un EIR . Un EIR deve contenere almeno la white list.

4.3.4 SMS Gateway MSC (SMS-GMSC)

L'SMS Gateway MSC (SMS-GMSC) agisce da interfaccia tra un centro per la gestione degli SMS (Short Message Service Centre) ed una rete GSM per l'inoltro di SMS dal centro servizi alla stazione mobile.

4.3.5 SMS Interworking MSC

L'SMS Interworking MSC (SMS-IMSC) agisce da interfaccia tra un centro per la gestione degli SMS (Short Message Service Centre) ed una rete GSM per la sottomissione di SMS dalla stazione mobile ad un centro servizi.

4.3.6 The Interworking Function (IWF)

L'Interworking Function (IWF) è un'entità funzionale associata ad un MSC che fornisce le funzionalità necessarie per l'interoperabilità tra una rete GSM ed una rete fissa (ISDN, PSTN e PDN). Le funzioni dipendono dai servizi e dal tipo di rete. L'IWF effettua la conversione tra i protocolli usati dalla rete GSM e quelli usati dalle rete fissa. Nel caso di compatibilità diretta tra le due reti l'IWF l'insieme delle funzionalità IWF potrebbe essere vuoto.

4.3.7 Group Call Register (GCR)

Il Registro delle Chiamate di Gruppo o Group Call Register (GCR) contiene per un'area MSC per ogni gruppo (individuate tramite il proprio identificativo o ID) e per ogni cella per la quale è attivo il servizio delle chiamate di gruppo, o Voice Group Call Service (VGCS), o il servizio di diffusione della voce, o Voice Broadcast Service (VBS), il riferimento alla chiamata di gruppo alla chiamata di diffusione voce da usare per il servizio VGCS o per il servizio VBS con l'indicazione se l'MSC che origina la chiamata è responsabile della chiamata stessa. Il GCR include:

- la lista delle celle appartenenti all'area dell'MSC in cui la chiamata deve essere diffusa (parte della group call area);
- la lista degli altri MSC a cui deve essere inoltrata la chiamata
- la lista degli identificativi dei dispatcher con i quali occorre attivare un collegamento dedicato
- la lista degli identificativi dei dispatcher ai quali è consentito iniziare una chiamata VGCS o VBS
- la lista degli identificativi dei dispatcher ai quali è consentito terminare una chiamata VGCS o VBS
- la durata dell'intervallo di tempo trascorso il quale la chiamata è terminate automaticamente nel caso di assenza di attività.
- necessità del riscontro.

4.4 I canali logici

I canali logici sono utilizzati per trasportare informazioni dal terminale (BS) alla stazione (BTS). In particolare, i canali di controllo trasportano la segnalazione ed i segnali per la sincronizzazione. Esistono 4 categorie di canali di controllo: diffusivi (broadcast), comuni, dedicati e canali di controllo CTS, come si osserva in fig. 4.10.

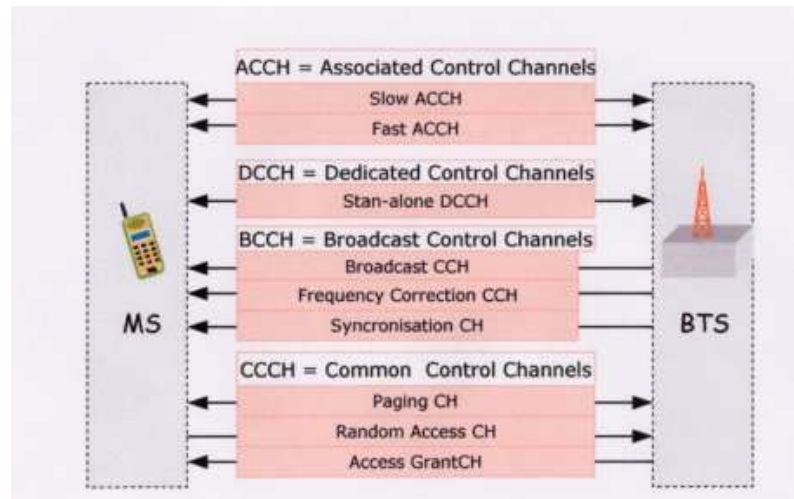


Figura 4.10: Canali di controllo

Tipo di canale	Capacità lorda (kbit/s)
Full rate traffic channel (TCH/F)	22,8
Half rate traffic channel (TCH/H)	11,4
Enhanced full rate channel (E-TCH/F)	69,6
8-PSK full rate traffic channel (O-TCH/F)	68,4
8-PSK half rate traffic channel (O-TCH/H)	34,2

Tabella 4.3: Tipi di canali TCH

4.4.1 Traffic Channel (TCH)

I canali di traffico trasportano le informazioni di tipo fonia e dati generati dall'utente. Sono definiti in base a gruppi di 26 trame della durata di 120 ms. Di queste, 24 sono usate per trasportare il traffico, 1 per il SACCH e 1 è ancora inutilizzata. I tipi sono riportati in tab. 4.3, da cui si sono diffusi i seguenti canali di traffico di fonia:

- TCH/EFS: Enhanced Full rate Speech
- TCH/FS: Full rate Speech
- TCH/HS: Half rate Speech

e i seguenti canali di traffico dedicati ai dati:

- TCH/F9.6: dati a 9.6 kbps (FR)
- TCH/F4.8: dati a 4.8 kbps (FR)
- TCH/F2.4: dati a 2.4 kbps (FR)
- TCH/F1.2: dati a 1.2 kbps (FR)

Canali di traffico dati a pacchetto (PDTCH)

I canali Packet data traffic (PDTCH) sono utilizzati per il trasporto dei dati nella modalità a commutazione di pacchetto. Un canale PDTCH/F corrisponde alla risorsa allocata ad una singola MS su un canale fisico. A causa della multiplexazione dinamica di differenti canali logici sullo stesso canale fisico, un canale PDTCH/F che impiega la modulazione GMSK ha una capacità variabile tra 0 e 22,8 kbit/s, mentre quello che impiega la modulazione 8-PSK ha una capacità variabile tra 0 e 69,6 kbit/s. Si noti che tutti i canali di traffico a pacchetto sono unidirezionali.

4.4.2 Broadcast Channels (BCH)

Sono canali che trasportano informazioni di interesse generale. Sono trasmessi in modo monodirezionale downlink (da BTS a MS) punto-multipunto.

I canali sono: BCCH , FCCH e SCH . Ogni cella irradia un solo canale FCCH (trama 0) e un solo canale SCH (trama 1) nel time slot 0 della portante fondamentale (la stessa del canale BCCH).

Broadcast Control Channel (BCCH)

Per ciascuna cella trasporta informazioni a tutti gli utenti serviti da quella BTS. Trasmesso in continuazione e in modo downlink. E' costituito da 184 byte che trasportano numerosi parametri, tra i quali: l'identità della cella (Cell Identity), dell'area di localizzazione (Local Area Code), dell'operatore di rete (MCC e MNC), oltre ai parametri richiesti dall'algoritmo di Frequency-Hopping.

Packet Broadcast Control Channel (PBCCH) Se il GPRS è supportato ed esiste il canale PBCCH . Il BCCH diffonde la posizione del packet data channel (PDCH) che trasporta il PBCCH. Il PBCCH diffonde sia informazioni di carattere generale usate dal mobile per la trasmissione e la ricezione dei pacchetti sia le informazioni contenute nel BCH, cosicché un terminale che opera solo in modalità GPRS non ha necessità di monitorare il canale BCH. In assenza del canale PBCCH le informazioni vengono veicolate tramite il canale BCH.

Il canale PBCCH di una cella è allocato sulla stessa banda di frequenza impiegata dal BCCH.

Frequency Correction Channels (FCCH E CFCH)

Il canale FCCH trasporta l'informazione per la correzione della frequenza usata dalla MS.

Synchronization Channel (SCH E CSCH)

I canali di sincronizzazione trasportano in 25 bit l'informazione per:

- la sincronizzazione della trama attraverso un Reduced Frame Number di 19 bit (dai quali è possibile ricavare il Frame Number (FN) di 22 bit)
- l'identificazione della stazione base BTS attraverso il Base Station Identity Code (BSIC) di 6 bit.

Essi sono utilizzati solo per il funzionamento del sottosistema radio.

4.4.3 Common Control Channels (CCCH)

Canali che portano informazioni di controllo relativa ad una data connessione in una fase preliminare cui non corrisponde una associazione di un canale di sistema per la connessione. Sono monodirezionali ma non tutti downlink.

Paging Channel (PCH)

E' usato dalla BTS per segnalare ad un terminale mobile l'arrivo di una chiamata. Downlink in tutte le celle di una Location Area.

Random Access Channel (RACH)

Canale di uplink, ad accesso slotted-aloha, usato da un terminale mobile per richiedere l'accesso alla rete e rispondere alle chiamate e alle richieste della rete (ad es. ai location update).

Access Grant Channel (AGCH)

Canale downlink utilizzato dalla rete per rispondere ad una richiesta RACH allocando alla MS il canale richiesto.

4.4.4 Dedicated Control Channels (DCCH)

Canali assegnati ad una connessione per lo scambio di informazioni di segnalazione relative alla specifica connessione.

Slow Associated Control Channel (SACCH)

Trasporta informazione di segnalazione tra MS e rete all'interno di una comunicazione. Nella direzione downlink trasporta i messaggi di testo SMS (recapitati durante una chiamata), le informazioni sulle misurazioni effettuate dalla BTS e tutte le informazioni del BCCH che altrimenti andrebbero perse dalla MS che si è assestata sul proprio canale di traffico. Nella direzione uplink, invece, trasporta le misurazioni effettuate dalla MS necessarie per un corretto link monitoring.

Fast Associated Control Channel (FACCH)

Utilizzato per trasmettere le segnalazione time-critical che non possono attendere di essere inserite nel canale SACCH. Ad esempio una segnalazione di handover. Viene mandato in modo asincrono sopprimendo l'informazione che avrebbe dovuto essere trasmessa.

Stand-alone Dedicated Control Channel (SDCCH)

Canale assegnato ad una MS mediante una segnalazione sul canale AGCH in risposta ad una richiesta RACH accolta. E' utilizzato per il trasporto dei messaggi di testo SMS (in fase di standby) e per lo scambio delle segnalazioni durante la fasi di identificazione, di registrazione, di location update e di call-setup prima dell'assegnazione definitiva di un canale di traffico TCH. Quando non è combinato con altri canali è detto **SDCCH/8** .

TB 3	ENCRYPTED BITS 58	TRAINING SEQUENCE 26	ENCRYPTED BITS 58	TB 3	GP 8,25
---------	----------------------	----------------------------	----------------------	---------	------------

(a) Normal Burst (NB)

TB 3	FIXED BITS 142	TB 3	GP 8,25
---------	-------------------	---------	------------

(b) Frequency correction Burst (FB)

TB 3	ENCRYPTED BITS 39	TRAINING SEQUENCE 64	ENCRYPTED BITS 39	TB 3	GP 8,25
---------	----------------------	----------------------------	----------------------	---------	------------

(c) Synchronization Burst (NB)

TB 3	SYNCHRONIZATION SEQUENCE 41	ENCRYPTED BITS 36	TB 3	GP 68,25
---------	-----------------------------------	----------------------	---------	-------------

(d) Access Burst (NB)

Figura 4.11: Struttura del burst

Cell Broadcast Control Channel (CBCH)

Il canale di Cell Broadcast viene usato solo in downlink per trasportare il cosiddetto SMSCB (Short message service Cell Broadcast). Viene implementato utilizzando lo stesso canale fisico degli SDCCH.

4.5 Struttura del burst

Le informazioni da trasmettere vengono inserite nel time slot opportuno per mezzo di pacchetti, chiamati burst. Esistono quattro tipi differenti di burst, la cui struttura si osserva in fig. 4.11:

Normal burst trasporta le informazioni sul traffico e sui canali di controllo, ad eccezione dei canali RACH, PRACH, e CPRACH. La struttura è riportata in fig. 4.11(a). Contiene 116 simboli criptati e include una guard time di 8,25 bit. I 156,25 bit sono trasmessi in 0,577 ms, quindi con una velocità media di 270.833 kbps. In dettaglio:

- l'informazione è inserita in due blocchi (payload) da 57 bit a cui si aggiunge uno stealing flag per indicare se il blocco contiene dati TCH oppure segnalazioni SACCH o FACCH
- i 26 bit di training sequence rappresentano la sequenza utilizzata dall'equalizzatore per determinare i parametri dell'algoritmo di decodifica
- gli 8,25 bit finali non vengono effettivamente trasmessi, ma rappresentano un guard period durante il quale l'assenza di segnale consente un margine di sicurezza al fine di evitare sovrapposizioni tra burst appartenenti a time slot adiacenti (8,25 bit vengono trasmessi in 0,03046 ms. consentendo una composizione fino a 9 Km)

Frequency correction burst (FB) utilizzato dal canale FCH per la sincronizzazione della frequenza del mobile. La struttura è riportata in fig. 4.11(b). Contiene la stessa guard time del NB. La ripetizione di più FB viene anche denominata Frequency Correction CHannel (FCCH). Viene trasmesso in broadcast con il BCCH.

Synchronization burst (SB) utilizzato dal canale SCH per la sincronizzazione nella temporizzazione del mobile. La struttura è riportata in fig. 4.11(c). Contiene una training sequence lunga, in grado di trasportare il TDMA frame number (FN) e il base station identity code (BSIC). La ripetizione di più SB viene anche denominata Synchronization CHannel (SCH). Viene trasmesso in broadcast con gli FB.

Access burst (AB) utilizzato dal canale RACH (random access). La struttura è riportata in fig. 4.11(d). È caratterizzato da un guard period più lungo (68,25 bit, o 252 μ s) per consentire la trasmissione a un mobile che non conosce in anticipo lo scostamento temporale (o dopo un handover)

I burst period FB e SB hanno la stessa lunghezza di un burst normale (156,25 bit) ma una differente struttura interna; il burst AB è invece più corto degli altri (88 bit).

4.6 Il codificatore vocale

Dato che il GSM è un sistema digitale, la voce, che è interamente analogica, deve essere digitalizzata. Poiché il sistema veniva a inserirsi in una struttura di rete fissa in parte preesistente (ISDN e sistemi telefonici ad alta velocità e su fibra ottica) il metodo scelto doveva essere compatibile con la modulazione PCM (Pulse Coded Modulation) da essi utilizzata. Però questa produce una sequenza digitale in uscita a 64 kbps, troppo veloce per essere trasmessa via radio.

Dato che il segnale vocale contiene una grande ridondanza, si sono studiati diversi algoritmi di codifica del segnale audio per ottimizzare la qualità del servizio e la complessità realizzativa (in termini di costi di implementazione, potenza elettrica assorbita e tempi di ritardo per la compressione). I prerequisiti erano: suono di alta qualità con bit rate al di sotto dei 16 kbps, campionamento alla frequenza di Nyquist di 8 kHz, protezione contro gli errori fino anche in presenza di un tasso dell'1%, ritardo di codifica e decodifica complessivo al di sotto dei 65 ms (per non introdurre eccessivi echi nella rete).

Dopo accurati studi, la struttura scelta è stata quella di un codificatore a tre stadi LPC-LTP-RPE (Regular Pulse Excited - Linear Predictive Coder - Long Term Predictor loop) in grado di fornire una qualità di poco inferiore a quella dello standard PCM e superiore a quella media dei sistemi telefonici cellulari analogici con solo 13 kbps. Tale codificatore è in grado di sfruttare sia le correlazioni di breve periodo tra campioni successivi del segnale vocale (filtro LPC , sia quelle tra segmenti di parlato adiacenti (filtro LTP).

Il sistema di funzionamento si basa sulla predizione dei campioni attuali dalle informazioni contenute nei campioni precedenti. La differenza tra il campione predetto e quello vero rappresenta il segnale da trasmettere. La voce è divisa in campioni di 20 ms., ognuno dei quali è codificato in blocchi di 260 bit, per una velocità di 13 kbps.

4.6.1 Codec/Decoder

Il CODEC riceve in ingresso un segnale analogico in banda base. Per prima cosa il segnale è filtrato per limitarne con precisione la massima frequenza, e poi passato al blocco campionatore. Il campionatore preleva ad intervalli successivi e regolari (con frequenza f_c) un campione del segnale in ingresso producendo in uscita una sequenza di campioni del segnale, ciascuno separato dal precedente di un tempo pari a T_c (con $T_c = 1/f_c$). Se la frequenza f_c di campionamento è almeno doppia della frequenza massima del

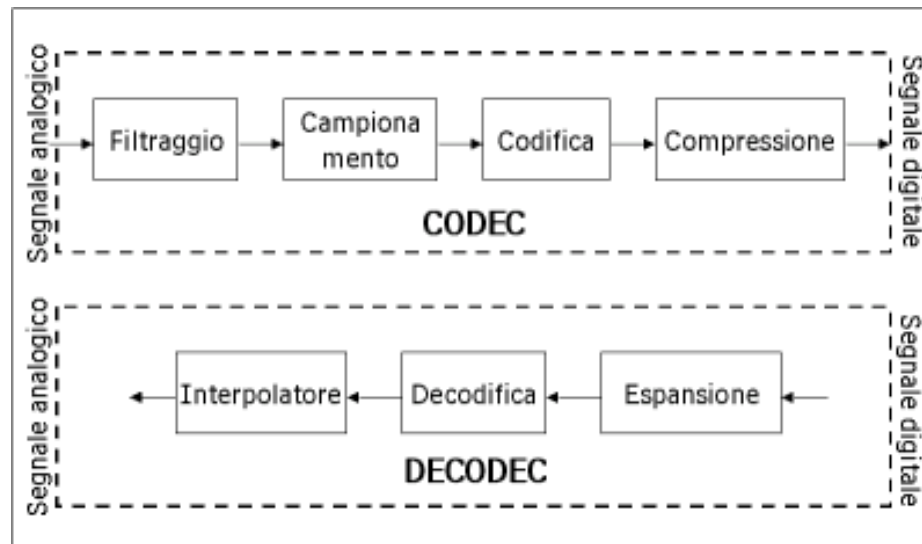


Figura 4.12: Diagramma a blocchi di un CODEC/DECODEC

segnale da campionare, in ricezione, partendo proprio dal segnale campionato, è possibile ricostruire un segnale proporzionale a quello originariamente in ingresso al campionatore (Teorema di Shannon).

Ogni campione viene quindi codificato in un numero adeguato di bit, numero sufficiente ad esprimere il valore massimo che un campione può assumere. La sequenza prodotta viene infine compressa sfruttando opportuni algoritmi per ridurne la lunghezza.

Il DECODED svolge la funzione inversa, partendo dalla sequenza di bit prodotti dal CODEC ricostruisce il segnale analogico originario. La sequenza prima viene espansa, quindi decodificata ed infine passata al blocco interpolatore che produce in uscita un segnale analogico proporzionale al segnale originario, prima del passaggio per il CODEC. Tranne il casi molto particolari il campione ricostruito in ricezione differisce di una certa quantità dal campione che si aveva in ingresso al codificatore. Infatti il processo di codifica e decodifica introduce normalmente un errore sui campioni ricostruiti, noto come errore di quantizzazione.

Lo schema a blocchi riportato in fig. 4.12 riassume il funzionamento di un CODEC e di un DECODEC.

4.6.2 Enhanced Full Rate (EFR)

La modalità Enhanced Full Rate (si cfr. la tab. 4.3) permette di ottenere una qualità del segnale audio superiore a quella usualmente offerta dal normale protocollo GSM. Ciò è ottenuto grazie all'utilizzo della nuova tecnologia di compressione dei dati Algebraic Code Excitation Linear Prediction. ASELP riesce, nello stesso numero di bit utilizzati dalla modalità LPC-RPE (Linear Prediction Coding with Regular Pulse Excitation), a migliorare la qualità della voce. Il risultato tangibile è un miglioramento nella qualità della conversazione, che in teoria potrebbe avvicinarsi a quella offerta dalla rete fissa. Come contropartita la conversazione in EFR in situazioni di BER elevato risulta più frammentata rispetto al classico FR. Una stessa sequenza di bit originale da luogo ad una sequenza compressa in modalità EFR più corta rispetto al caso FR proprio per la maggiore compressione utilizzata. I bit errati hanno così un peso maggiore.

4.6.3 Half Rate (HR)

La codifica Half Rate, come dice la parola stessa, permette di inviare un stesso segnale sfruttando solo metà della banda disponibile portando la codifica a soli 6.5 kbps. HR consente così di raddoppiare i canali di traffico sfruttabili per le conversazioni, con enormi vantaggi nel caso di congestione della rete. Una felice conseguenza del minore bit rate utilizzato è un risparmio considerevole della batteria del terminale, con un incremento di autonomia di quasi un 50% in conversazione. Il pegno da pagare è una riduzione della qualità del segnale audio.

4.7 Modulazione

Nei sistemi radiomobili la tecnica di modulazione deve offrire un buon compromesso tra efficienza spettrale, complessità del trasmettitore e limitazione delle emissioni spurie. La complessità del trasmettitore è strettamente legata alla potenza assorbita che dovrebbe essere la minima possibile per un terminale mobile. È poi fondamentale limitare le emissioni spurie fuori banda per limitare le interferenze con i canali adiacenti.

La modulazione digitale più comune, **FSK** (Frequency Shift Keying), trasmette i simboli variando la frequenza della modulante: al simbolo 0 corrisponde una precisa frequenza f_0 , al simbolo 1 una differente frequenza f_1 . Nella transizione da f_0 a f_1 o viceversa si possono generare dei salti di fase che provocano una discontinuità del segnale con conseguente allargamento dello spettro in frequenza utilizzato. Proprio questo allargamento della banda rende la modulazione FSK non adatta alle trasmissioni radiomobili.

Si rende necessario allora ricorrere ad una tecnica che garantisca la continuità di fase nel passaggio da un simbolo ad un altro. La modulazione scelta per il sistema GSM e che soddisfa questo requisito è la **GMSK** (Gaussian-filtered Minimum Shift Keying). **GMSK** deriva dalla modulazione **MSK** (Minimum Shift Keying) con l'introduzione di un filtro passa basso di premodulazione che riduce ulteriormente la componente fuori banda (lobi laterali). La modulazione **GMSK** offre i seguenti vantaggi:

- inviluppo costante
- spettro compatto
- interferenza tra canali adiacenti molto ridotte anche senza utilizzare filtri dopo la modulazione.

4.8 Equalizzazione

A 900 Mhz, le onde radio rimbalzano ovunque, palazzi, macchine, aeroplani, etc. Così una antenna può captare molti segnali riflessi, ognuno con una fase differente. L'equalizzazione è usata per separare il segnale desiderato dalle riflessioni spurie. Per questo un segnale conosciuto viene sempre trasmesso nei 26 bit riservati appositamente in ogni burst period. Così l'equalizzatore può cercare di scoprire come il segnale è stato modificato dal percorso, e quindi costruire un filtro inverso per estrarre la parte del segnale desiderata.

4.9 Il sistema GSM come rete di telecomunicazioni

Una rete radiomobile cellulare è a tutti gli effetti una rete di telecomunicazioni. In particolare una rete GSM, per la natura completamente digitale della comunicazione, è assimilabile ad una rete di calcolatori.

Una rete radiomobile necessita di implementare alcune funzioni, come la *gestione dell'interfaccia radio e la mobilità degli utenti* che invece non sono richieste in una rete fissa. Se in quest'ultima, ad un numero telefonico corrisponde biunivocamente una destinazione (fissa), in una rete radiomobile è necessaria una fase preliminare di "localizzazione" prima di poter instradare correttamente la chiamata. In particolare la mobilità "globale" degli utenti GSM richiede l'implementazione di alcune procedure:

Roaming Possibilità, offerta dal GSM, che permette ad un utente di essere sempre rintracciabile anche in nazioni diverse dalla propria (purché esista un operatore GSM locale con il quale il proprio operatore abbia raggiunto accordi di roaming internazionale) oppure, nella propria nazione, ma in zone non coperte dal proprio operatore (roaming nazionale).

Location Update Procedura che consente di localizzare l'abbonato sul territorio per potergli inoltrare le chiamate

Handover Procedura che consente ad un utente di proseguire una conversazione anche quando, spostandosi, passa da una cella ad un'altra.

4.9.1 Sistemi di segnalazione

Perché una rete di telecomunicazioni possa funzionare correttamente è necessario che le varie unità funzionali coinvolte (compreso l'utente) si scambino delle informazioni.

segnalazione associata al circuito viene utilizzata nella linea telefonica fissa tradizionale su doppino. Associa le segnalazioni sullo stesso canale usato per trasportare la fonia

segnalazione a canale comune viene utilizzata nella fonia moderna (ad es. GSM e ISDN). Separa nettamente la fonia dalle segnalazioni, assegnando a queste ultime dei canali trasmissivi dedicati

In una rete di telecomunicazioni moderna vi sono quindi due sottoreti: una per la fonia e una per le segnalazioni di controllo. Il sistema di segnalazione utilizzato nello standard GSM è il *Common Channel Signaling System 7 (CCSS7* o più brevemente *SS7*).

Va osservato che gestire tutte le fasi di instradamento della chiamata e di handover richiede un notevole lavoro di segnalazione tra le varie unità funzionali del sistema (in particolare MSC-VLR-HLR); *la rete di segnalazione rappresenta quindi in cuore della rete GSM*, mentre il flusso generato dal traffico utente ne occupa solo una parte.

4.9.2 Stratificazione e protocolli del modello GSM

Come si osserva nella pila protocollare in fig. 4.13, risultano tre livelli principali:

1. **Physical Layer**, dove si trovano le specifiche delle caratteristiche del mezzo fisico di trasporto. I protocolli devono essere adattati alle differenti interfacce. Quelle della parte a terra (A-bis e A) saranno trattate come un canale PCM. Il protocollo sull'interfaccia radio (Um) dovrà anche gestire la modulazione, la sincronizzazione e la codifica di canale.
2. **Data link layer**. Il protocollo standard OSI di livello 2 è l'*HDLC* (Highlevel Data Link Level). Da questo ne sono derivati numerosi altri, tra i quali la famiglia *LAP* (Link Access Protocol) utilizzata nello standard GSM. L'interfaccia A-bis, tra BSS e BTS, è gestita dal protocollo *LAPD* (Link Access

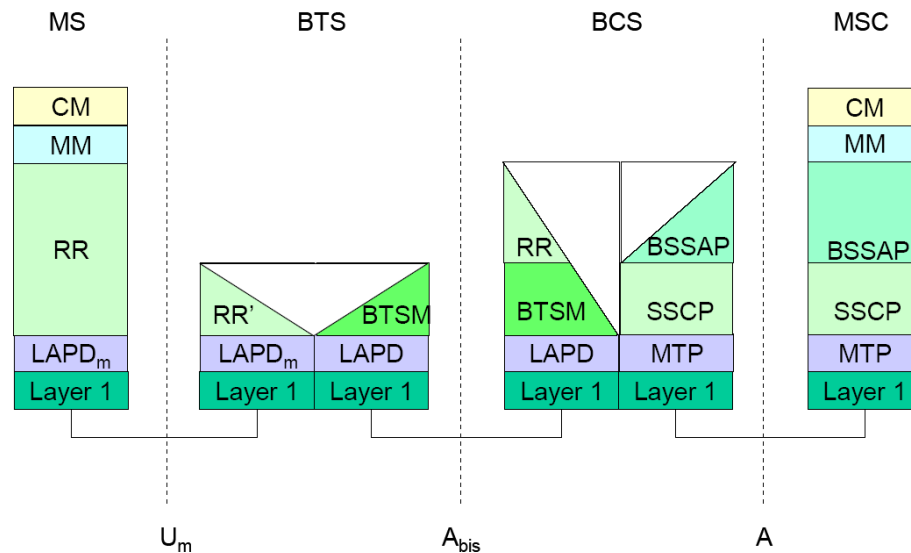


Figura 4.13: Pila protocollare del sistema GSM

Protocol on the D-Channel) utilizzato nella rete ISDN. Data la evidente particolarità dell'interfaccia radio, si è provveduto ad implementare uno specifico protocollo per gestirla, il *LAPD_m*

3. **Message layer** si occupa della gestione dei canali radio e di segnalazione utente. Tutte le funzioni sono raccolte nello strato Base Station System Application Part (*BSSMAP*).
5. **Radio Resources management layer (RR)**, gestisce l'interfaccia radio U_m . È incaricato di stabilire e mantenere una stabile connessione tra MS C e MS sulla quale far transitare dati e segnali. Tra le sue responsabilità anche gli handover e controllo della potenza. Viene gestito all'interno del sottosistema BSS (tranne gli handover esterni). In relazione al modelli ISO-OSI svolge le funzionalità del *livello 5 (sessione)*; si può così parlare di "sessione RR".
- 5'. **Radio Resources' management layer (RR')**, rappresenta quella parte delle funzionalità dello strato RR che sono gestite dalle stazioni BTS.

Inoltre si hanno:

MM (Mobility Management layer) gestisce le procedure di ricerca, localizzazione (location updating) e autenticazione delle MS

CM (Communication Management layer) livello più alto definito nello standard GSM, è responsabile di diversi compiti, ognuno dei quali può essere pensato come un sottostrato separato nello strato CM:

- Call Control
- Supplementary Services Management
- Short Message Service (SMS)

4.9.3 Radio Resources management layer (RR)

È incaricato di stabilire e mantenere una stabile connessione tra MS C e MS sulla quale far transitare dati e segnali.

Handover

Una delle caratteristiche peculiari dei sistemi cellulari è la possibilità di mantenere attiva una comunicazione pur continuando a spostarsi liberamente nel territorio. Questa mobilità può causare la necessità di cambiare frequentemente cella di servizio oppure canale di trasmissione per continuare a garantire all'utente una buona qualità del segnale. Questa commutazione automatica senza interruzione nel collegamento è chiamato *handover* (o *handoff* nel sistema americano).

Esistono quattro tipi differenti di handover nel sistema GSM, che coinvolgono il trasferimento di una comunicazione tra:

- canali (o TDMA timeslot) diversi di una stessa cella, cioè di una stessa BTS;
- celle diverse ma controllate da una stessa BSC;
- celle di diverse BSC, ma controllate da uno stesso MSC;
- celle controllate da diversi MSC.

I primi due tipi, chiamati **handover interni**, coinvolgono solo una stazione base (BSC). Sono gestiti direttamente dalla BSC senza coinvolgere l'MSC, eccetto che per notificargli il completamento del handover, così da non sovraccaricare inutilmente la rete.

Gli ultimi due tipi, chiamati **handover esterni**, sono invece trattati dagli MSC direttamente coinvolti. Nell'ultimo caso, l'MSC originale, detto anchor MSC, continua a rimanere responsabile della maggior parte delle funzioni relative alla chiamata in corso mentre gli handover interni (inter-BSC) che dovessero eventualmente verificarsi saranno gestiti dal nuovo MSC, detto *relay* MSC.

Dettagli implementativi Per assistere il processo di handover, la MS compie delle misure sulla qualità del collegamento in downlink durante i time slot di inattività. Tali misure consistono nella determinazione del tasso di errore per bit e del livello di potenza dei canali broadcast (BCCH) ricevuti sia dalla BTS attiva che dalle BTS vicine. Queste informazioni vengono poi trasmesse alla BTS, tramite il canale SACCH. La qualità del collegamento in uplink (tasso di errore sul bit e potenza ricevuta) viene invece misurata dalla BTS e inviata alla BSC insieme alle informazioni relative alla distanza della MS (time advance) e ai dati raccolti dalla MS.

La BSC quindi contiene tutte le informazioni sulle qualità delle proprie connessioni. La decisione di effettuare un handover è basata sull'osservazione di tutti i dati (MS e BTS) usando appositi algoritmi di handover. Esistono a tal proposito almeno due algoritmi per la decisione di effettuare un handover: *Minimum Acceptable Performance* e *Power Budget*.

Qualora sia rilevata la necessità di un handover, la scelta della nuova cella tiene conto non solo dei livelli di potenza radio, misurati dal radiomobile, della cella attiva e di quelle adiacenti, ma anche da altri parametri di sistema come la potenza irradiata dall'MS, la tipologia della cella, ecc. L'output di questo processo è una lista di 6 celle candidate, organizzate a partire dalla migliore.

Dopo che è stata presa la decisione di effettuare l'handover e dopo avere individuato la cella migliore, la stazione mobile e la rete entrano nella *fase di esecuzione dell'handover*.

L'informazione di segnalazione che la MS scambia con la BTS può essere minore o maggiore a seconda che si tratti di handover interno o esterno. Per questo motivo il canale di segnalazione utilizzato per l'esecuzione di un handover deve essere necessariamente un canale veloce (FACCH).

Il caso più semplice si ha quando le celle appartengono allo stesso BSC: in tal caso:

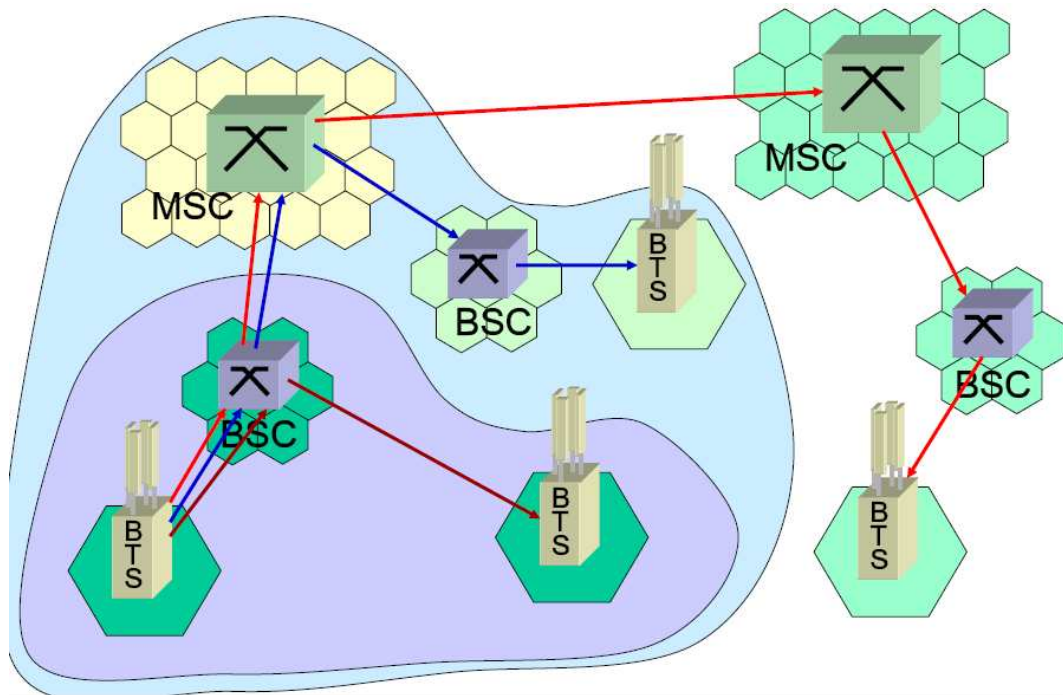


Figura 4.14: Handover

1. il BSC invia (tramite FACCH) un comando di handover (HANDOVER COMMAND) che contiene informazioni circa il nuovo canale da utilizzare.
2. l'MS semplicemente cambia canale ed invia il messaggio HANDOVER COMPLETED al BSC

Nel caso di BSC diversi (ma stesso MSC):

1. il BSC avvisa l'MSC tramite un messaggio HANDOVER REQUIRED.
2. L'MSC, quindi, invia un messaggio di HANDOVER REQUEST, contenente il TMSI del mobile, al nuovo BSC.
3. Il BSC, ricevuta la richiesta dall'MSC, assegna un canale TCH che verrà usato dalla stazione mobile.
4. A questo punto il BSC di origine invia l'ordine HANDOVER COMMAND alla stazione mobile affinché acquisisca il nuovo canale.

Nell'ultimo caso trattiamo l'handover tra celle appartenenti a due MSC diversi. In questo caso, mostrato in fig. 4.14:

1. il BSC-a invia la richiesta (HANDOVER REQUIRED) al proprio MSC-a la quale viene girata all'MSC-b che controlla la cella di destinazione.
2. L'MSC -b comanda al BSC-b di prepararsi ad un handover, quindi il BSC-b assegna un canale di traffico al nuovo BTS e risponde al proprio MSC con un HANDOVER REQUEST ACK.
3. L'MS C-b invia all'MSC-a le informazioni relative all'handover ed al nuovo canale di traffico assegnato dopodichè l'MSC-a può trasmettere alla MS i comandi necessari affinché cambi canale.

4.9.4 Mobility Management (MM)

La funzione Mobility Management (MM) gestisce la localizzazione e l'autenticazione degli abbonati. Essa ha anche il compito di garantire la sicurezza e la riservatezza delle comunicazioni.

Aggiornamento della localizzazione (Location updating)

Il sistema GSM differisce dalle telecomunicazioni via cavo principalmente per la necessità di gestire la mobilità dell'utente. *In un sistema cellulare l'utente mobile deve quindi essere localizzato prima che il sistema possa instradare una chiamata in arrivo al suo terminale.*

L'arrivo di una chiamata è notificato al terminale mobile (MS) attraverso un messaggio inviato sul canale di paging (PCH). Sarebbe inutilmente dispendioso, in termini di occupazione di banda, inviare questo messaggio da tutte le celle della rete per ogni chiamata. All'opposto sarebbe troppo complicato inviarlo solo dalla BTS corrente cui è agganciato il terminale. Così si è preferito adottare una soluzione di compromesso consistente nel raggruppare le celle in area più estese, dette aree di localizzazione (*Location Areas*) e identificate in modo univoco dal Local Area Identity (**LAI**). Il messaggio di paging (PCH) verso un MS, per notificargli una chiamata in arrivo, è allora inviato solamente alle celle dell'area di localizzazione dove la MS è attualmente registrato (localizzato).

Ogni BTS irradia, su un apposito canale di broadcast (BCCH), un messaggio di sistema che contiene proprio il codice LAI dell'area a cui appartiene la cella. Quando una MS attraversa il confine tra due aree di localizzazione, riceve un codice LAI diverso dal precedente. Di conseguenza essa deve informare la rete della sua nuova posizione.

La procedura di location updating (o *aggiornamento di dislocazione*) consiste nell'aggiornare la localizzazione della MS, in termini di codice LAI, nel registro VLR di competenza. Se la nuova e la vecchia location area appartengono ad MSC/VLR diversi, è cambiato anche il VLR. In questo caso è necessario informare anche il registro HLR. Quest'ultimo, infatti, memorizza la posizione della MS in termini di indirizzo del VLR (VLR number) in cui essa è correntemente registrata.

Una volta autenticato l'utente (e stabilita la chiave di cifratura) si procede con l'aggiornamento di dislocazione. Qui abbiamo due scenari:

- se l'utente era precedentemente registrato presso il VLR corrente basterà aggiornare (eventualmente) solo la nuova LA (di cui il VLR è già a conoscenza).
- se l'utente era precedentemente registrato presso un VLR diverso si deve procedere con la registrazione dell'utente nel nuovo VLR. Lo schema è riportato in fig. 4.15. A questo punto si instaurano una serie di scambi di informazione nessuno dei quali interessa direttamente l'utente:
 1. Il VLR corrente interroga l'HLR dell'utente richiedendone i dati relativi.
 2. Contemporaneamente l'HLR memorizza il nuovo VLR che sta servendo l'MS (per permettere all'MSC di instradare le chiamate) e invia un messaggio di cancellazione di dislocazione al VLR precedente.
 3. Come operazione conclusiva dell'aggiornamento, il VLR invia alla MS il nuovo TMSI che verrà sostituito al precedente nella SIM. Quest'ultima operazione è la prima ad essere effettuata sotto cifratura. Ogni ulteriore comunicazione avverrà con cifratura.

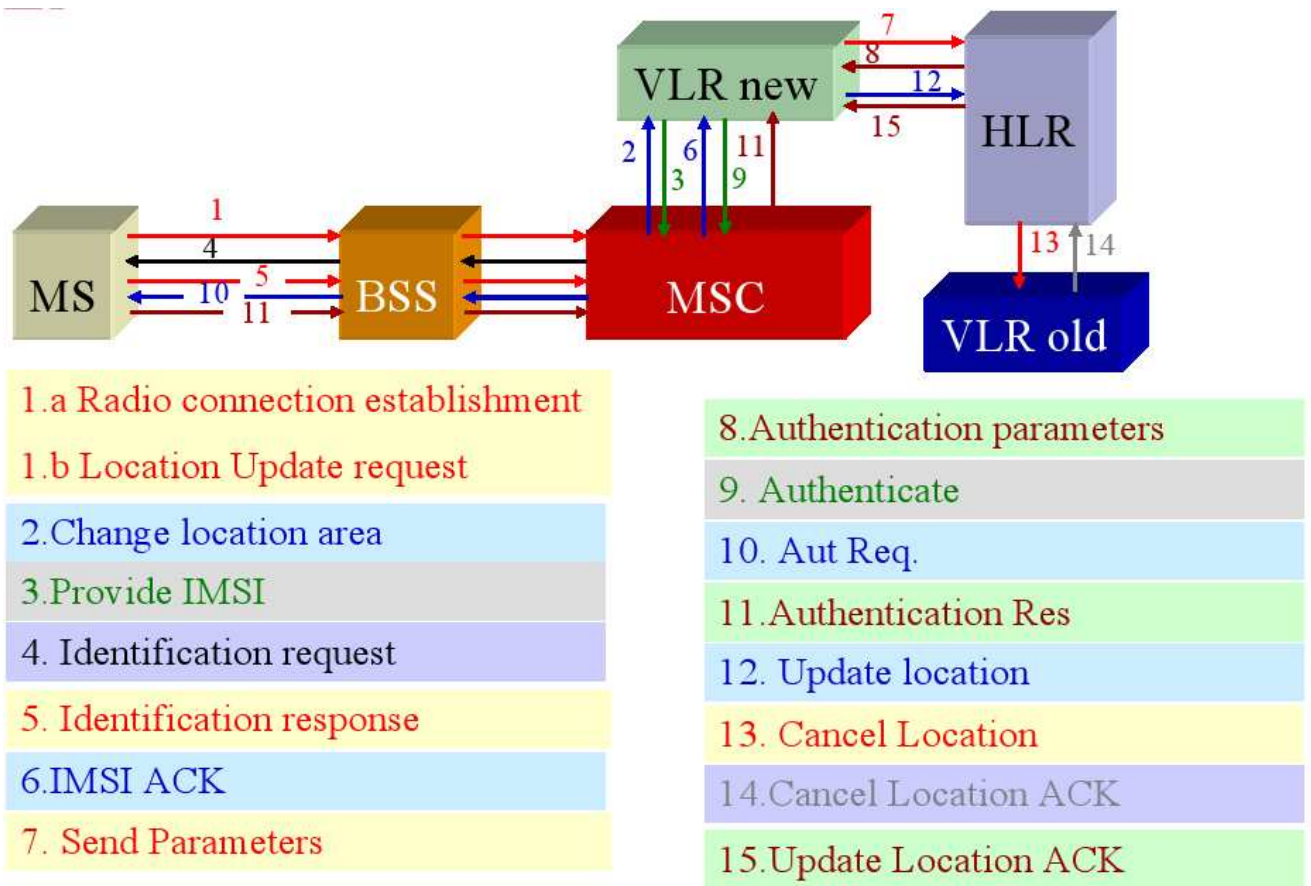


Figura 4.15: Location Updating (aggiornamento di dislocazione)

4. A questo punto la stazione mobile rimane in attesa di qualche evento come un aggiornamento di dislocazione periodico, una chiamata da parte dell'utente, da parte della rete mobile o fissa oppure un handover

Attivazione e disattivazione IMSI (IMSI attach/detach)

Un procedura legata all'aggiornamento di posizione è la connessione / sconnessione (IMSI attach / detach) dalla rete di una MS. La sconnessione informa la rete (MSC) che una MS è spenta o non più raggiungibile, così da evitare allocazione dei canali di controllo ad essa necessari e inoltro dei messaggi di paging. La connessione, invece, informa la rete (MSC) che la MS, già marcata come detached, è nuovamente raggiungibile. Si verifica quando una MS viene spenta e successivamente riaccesa, oppure quando rientra nell'area di copertura della rete.

Aggiornamento periodico (Periodic location updating)

Per ottimizzare lo sfruttamento del canale radio, è necessario evitare trasmissioni inutili. Ad esempio irradiare i messaggi di paging verso MS che non sono raggiungibili, e quindi che non sono in grado di ricevere chiamate.

Una MS non è più raggiungibile quando viene spenta (in questo caso effettua un IMSI detach) oppure quando esce dall'area di copertura senza poterlo comunicare alla rete che così continua ad allocare i canali di controllo anche per essa.

La rete si accorge della non raggiungibilità di una MS nel momento in cui tenta di inoltrargli una chiamata (non riceve risposta al messaggio di paging). Ora può marcare la MS come sconnessa (*implicit IMSI detach*).

Se però non vi sono chiamate dirette ad una MS non raggiungibile, questa continuerebbe ad essere considerata connessa per un tempo indefinito. Per evitarlo è stata introdotta la procedura di registrazione periodica (*periodic registration*). Una MS che si sposti all'interno di una stessa LA senza accedere alla rete per ricevere o effettuare chiamate, deve comunque, ad intervalli di tempo regolari (*location update timer*), confermare la propria localizzazione al VLR. Il valore del timer, scelto a discrezione dell'operatore di rete (1 ora per Vodafone e Wind, 2 ore per Tim), è trasmesso sul canale BCCH. Se una MS non effettua accessi alla rete per un tempo superiore al limite prefissato (e quindi non effettua la registrazione periodica), viene automaticamente marcata come sconnessa dalla rete stessa (*implicit IMSI detach*).

Tale valore deve essere un giusto compromesso: infatti un LU ad intervalli brevi eviterebbe di inviare messaggi di paging inutili per la LAC, ma in compenso saturerebbe subito i canali SDCCH. Viceversa un LU lungo gioverebbe al tempo di standby del terminale, risparmiando batteria, e saturerebbe meno i canali di SDCCH, ma se la MS uscisse di copertura verrebbe inutilmente cercata per un periodo oggettivamente troppo lungo. L'ideale sarebbe impostare questo valore in maniera da adeguarlo al territorio (copertura capillare, densità di BTS elevata, LU più radi) al contrario in una zona dove ci sono buchi di copertura, gallerie, montagne che impediscono alle onde em di propagarsi, un LU corto sarebbe l'ideale. La cosa, purtroppo, è del tutto ignorata in Italia, dove i nostri gestori usano tempi alti ed ingiustificati (Wind, 2 ore) alti ma giustificati dagli utenti e casini alla rete (TIM, sempre 2 ore) oppure relativamente bassi considerando la copertura (1 ora per Vodafone).

4.9.5 Communication management (CM)

Lo strato Communication Management (CM) gestisce le funzionalità di supervisione della chiamata, dei servizi supplementari e del servizio SMS.

Instradamento delle chiamate (Call routing)

Un abbonato GSM è identificato nel piano di numerazione pubblica internazionale dal proprio numero MS ISDN, definito nelle specifiche E.164. Questo numero include un Country Code e un National Destination Code che identificano la nazione di appartenenza e il fornitore di servizio dell'utente. Le restanti cifre identificano l'abbonato nel PLMN del proprio operatore. In pratica il numero MSISDN è il numero telefonico che si compone per chiamare una MS (completo anche di prefisso internazionale).

In una rete fissa, ad un numero telefonico corrisponde biunivocamente una destinazione (facilmente ricavabile dal numero stesso). In una rete radiomobile, il numero identifica, in prima istanza, la nazionalità e l'identità dell'operatore, ma non può essere utilizzato direttamente per instradare una chiamata verso la MS corrispondente (che può trovarsi in un qualunque posto entro l'area mondiale di servizio del sistema). L'MSISDN consente di instaurare una connessione soltanto fino al Gateway MSC (GMSC) (della MS chiamata) che interfaccia la rete del chiamante (PSTN, ISDN o altra rete radiomobile).

Ad esempio, digitando il numero MSISDN 0039-347-1234567, la chiamata viene instradata, dapprima in Italia (prefisso 0039), quindi al GMSC di Vodafone (prefisso 347) che, a sua volta, in base alla prima cifra del numero personale (2), può interrogare il corretto registro HLR che contiene i dati dell'utente chiamato (si ricorda nel PLMN di uno stesso operatore possono esserci più HLR).

Per permettere al GMS C di proseguire l'instradamento della chiamata verso l'MSC/VLR di destinazione, cioè quello presso cui è registrata la MS chiamata, è indispensabile assegnare alla MS un numero telefonico temporaneo, detto **Mobile Station Roaming Number (MSRN)**.

L'MSRN è assegnato dal VLR presso cui la MS è registrata, ed è associato al codice IMSI in modo che il VLR possa identificare l'utente dal numero MSRN assegnatoli. Va sottolineato che l'MSRN non è assegnato permanentemente ad un utente, ma può variare nel tempo. VLR diversi possono assegnare MSRN diversi alla stessa MS.

La struttura del numero MSRN è analoga a quella dell'MSISDN:

$$MSRN = CC/NDC/SN$$

SN è un particolare numero d'utente, valido solo entro l'area di servizio del VLR, che consente di identificare l'MSC/VLR che serve l'utente (prime cifre) e quindi l'utente stesso.

Procedura di instradamento

Analizziamo ora in dettaglio la procedura di instradamento per una chiamata originata da rete fissa (PSTN o ISDN) e diretta ad un utente mobile, il cui schema è riportato in fig. 4.16:

1. il chiamante, dalla rete fissa (PSTN o ISDN), compone il numero MSISDN dell'utente mobile che vuole contattare
2. le centrali di commutazione della rete fissa, analizzando i prefissi CC e NDC del numero MS ISDN, instradano la chiamata verso il GMSC della rete GSM a cui appartiene la MS chiamata

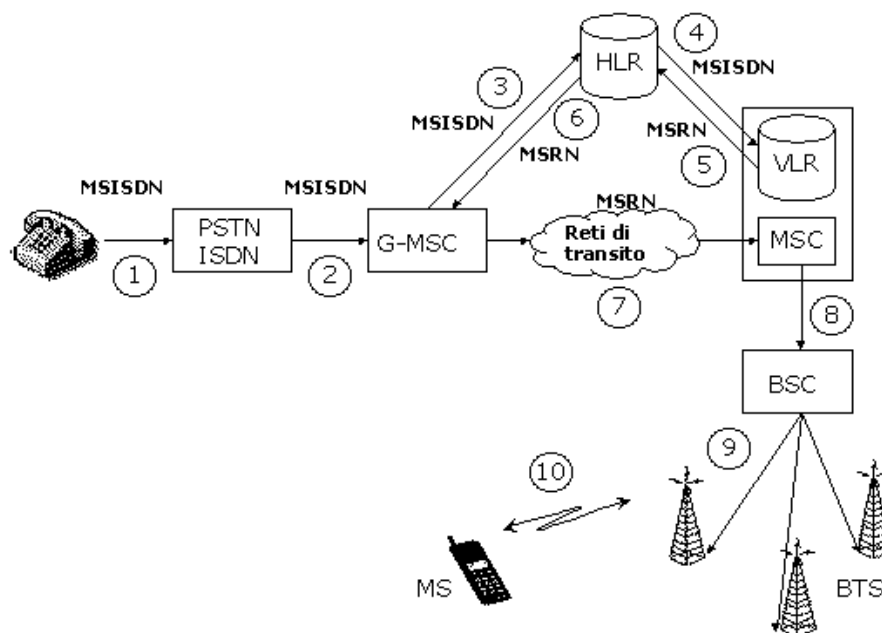


Figura 4.16: Instradamento di una chiamata verso una MS

3. il GMS C riceve il messaggio di segnalazione SS7 IAM (Initial Address Message) contenente il numero MSISDN di destinazione. Dalle prime cifre del numero SN, ricava il HLR su cui è registrata la MS e gli invia un messaggio di Send routing information
4. l'HLR, in base al numero MS ISDN, rintraccia tutte le informazioni dell'abbonato, compreso il codice IMSI e l'indirizzo SS7 del VLR su cui è temporaneamente registrata la MS (VLR number). Non conosce, però, il roaming number correntemente assegnato alla MS e così invia un messaggio di Provide roaming number al VLR indicando il codice IMSI della MS di cui richiede il numero MSRN
5. il VLR di destinazione fornisce al HLR dell'abbonato chiamato il numero MSRN
6. l'HLR ritorna al GMSC lo stesso numero MSRN
7. ora il GMSC, analizzato il numero MSRN ricevuto, può instradare la chiamata fino al MSC/VLR che serve (temporaneamente) la MS, attraversando anche eventuali reti di transito
8. adesso è necessario localizzare la MS. Il MSC/VLR, in base al codice IMSI, individua la location area corrente di registrazione. Invia quindi un messaggio di page ai BSC, che servono quell'area, perché trasmettano il paging
9. i BSC comandano a tutte le loro BTS di irradiare il messaggio di paging, sul canale PCH, indirizzato alla MS chiamata
10. la MS risponde al messaggio di paging attraverso una richiesta di accesso alla rete, sul canale RACH
11. la rete assegna un canale dedicato (SDCCH) alla MS e, attraverso un messaggio sul canale logico AGCH, gli ordina di spostarsi immediatamente su esso per effettuare le procedure di autenticazione
12. conclusasi positivamente la fase di autenticazione, il MS C/VLR assegna alla MS un canale di traffico (TCH) e le ordina di spostarsi su di esso

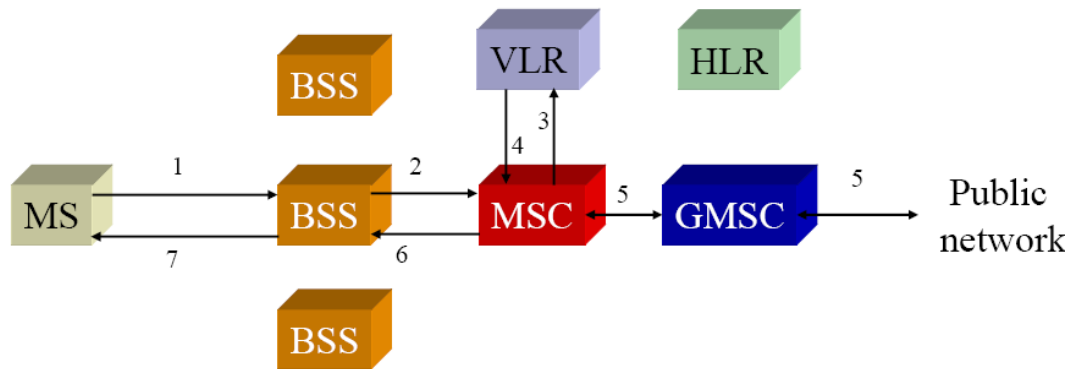


Figura 4.17: Instradamento di una chiamata originata da un MS

13. la connessione è instaurata e gli utenti possono comunicare

Chiamata dalla rete mobile Uno schema di comunicazione originata da un MS è riportata in fig. 4.17. Supponiamo che un utente della rete mobile voglia contattare un utente della rete fissa PSNT. L'impostazione di una chiamata prevede gli stessi passi descritti precedentemente fino all'autenticazione dell'utente. La differenza è che stavolta il motivo del collegamento di comunicazione tra la rete e l'MS è diverso. Una volta autenticato l'utente, iniziano una serie di scambi di messaggi tra mobile e rete:

1. La MS invia un messaggio di impostazione (SETUP) all'MSC sul collegamento (già stabilito) SDCCH, che a sua volta l'MSC invia al VLR. Il messaggio contiene il numero dell'utente chiamato e la capacità di trasporto necessaria per il tipo di comunicazione.
2. Da quest'ultima informazione l'MSC è in grado di capire se si tratta di una comunicazione vocale o dati e può allocare così il canale opportuno.
3. Il VLR, una volta verificato che la chiamata possa essere inoltrata, trasmette un messaggio all'MSC (COMPLETE CALL) che a sua volta avvisa la MS chiamante con un messaggio di chiamata inoltrata (CALL PROCEEDING).
4. Contemporaneamente l'MSC trasmette un messaggio al BSC contenente un comando di assegnazione del canale di traffico (che può essere un TCH/FS, TCH/HS, TCH/F9.6, a seconda della richiesta fatta dalla stazione mobile).
5. L'MSC a questo punto contatta la PSTN inviandogli un messaggio (ADDRESS INITIAL MESSAGE) passando per il GMSC, come risposta ottiene un messaggio (ADDRESS COMPLETE MESSAGE) che indica che la parte chiamata è stata avvisata.
6. A questo punto l'utente chiamante (mobile) sente un il tono di chiamata
7. Quando il destinatario risponde, dalla PSTN viene inviato un messaggio (ANSWER) all'MSC. Quest'ultimo connette il canale di traffico GSM al circuito PSTN completando così la comunicazione tra i due abbonati che possono iniziare la conversazione.

Chiamata dalla rete fissa Uno schema di comunicazione originata da un MS è riportata in fig. 4.18:

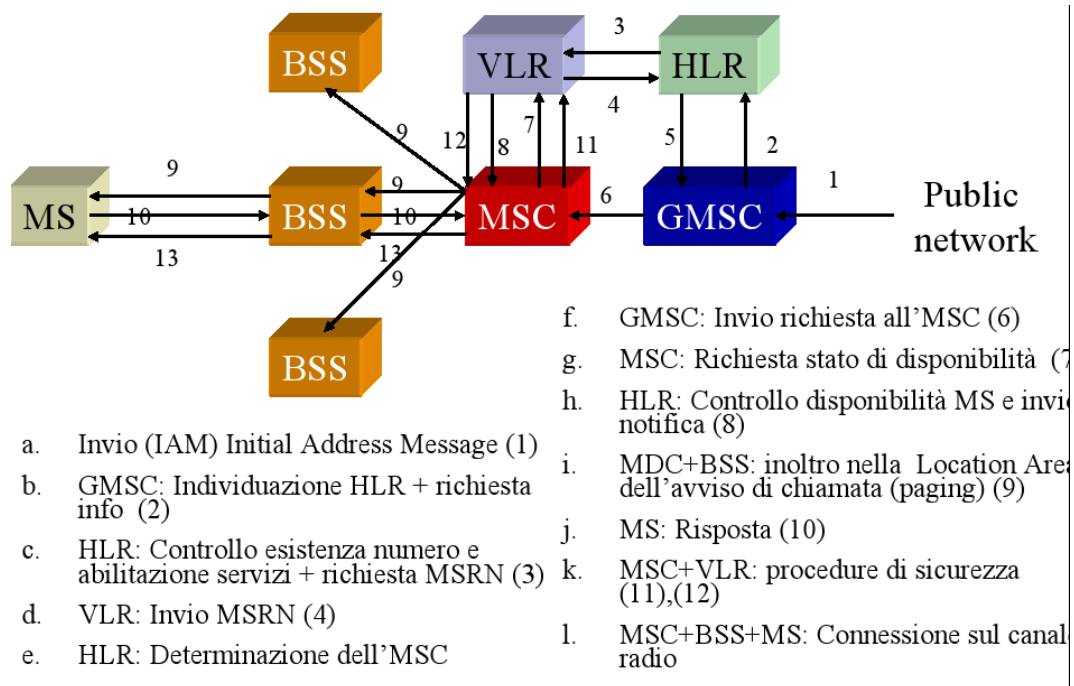


Figura 4.18: Instradamento di una chiamata originata da un PSTN

1. Un abbonato della rete fissa (PSTN) compone il numero telefonico (MSISDN) di un'abbonato della rete GSM.
2. La PSTN è in grado, osservando la prima parte del numero MSISDN (prefisso), di instradare la chiamata al Gateway MSC (GMSC) della rete dell'abbonato.
3. A questo punto il GMSC, sempre in base all'MSISDN, contatta l'HLR di appartenenza dell'abbonato (in cui è stato registrato al momento del contratto) il quale è a conoscenza del VLR corrente nel quale è registrato attualmente l'abbonato (dislocazione).
4. L'HLR a sua volta chiede al VLR corrente quale MSC contattare e il VLR risponde comunicando l'MSRN (cioè l'identificativo di MSC che serve per instradare una chiamata all'interno della rete).
5. L'HLR a sua volta comunica l'MSRN al GMSC il quale può ora contattare direttamente l'MSC che sta servendo l'utente mobile.
6. A questo punto l'MSC avvisa il VLR della chiamata in arrivo il quale restituisce il LAI (identificativo della location area).
7. L'MSC effettua quindi il paging request a tutte le BSC che fanno parte di quella LA, tale richiesta viene trasmessa da tutte le BTS sul canale broadcast PCH.
8. Nel momento in cui la stazione mobile riconosce il proprio TMSI (contenuto nel messaggio di paging) essa risponde con una richiesta di collegamento sul canale RACH (stessa procedura vista per l'aggiornamento di dislocazione).
9. Una volta stabilito il collegamento SDCCH la stazione mobile invia un messaggio di paging response all'MSC il quale, a sua volta, lo inoltra al VLR.

10. Il VLR, una volta appreso che la ricerca è andata a buon fine, invia un messaggio di impostazione (COMPLETE CALL) al mobile il quale risponde (sempre su SDCCH) con un messaggio di conferma (CALL CONFIRMATION) informando la rete che il messaggio di impostazione è stato ricevuto.
11. Dopo la conferma da parte del mobile, l'MSC assegna un canale di traffico al BSS che a sua volta assegna un TCH al mobile.
12. A questo punto la stazione mobile avvisa l'utente della chiamata in arrivo mediante un segnale acustico (suoneria).
13. Contemporaneamente il segnale CALL CONFIRMATION giunge all'utente della rete PSTN il quale sente un tono di chiamata.
14. Quando l'utente GSM risponde al telefono, la MS invia un messaggio di connessione (CONNECT) all'MSC, il quale lo invia al GSMC che a sua volta lo invia all'utente PSTN.
15. Allo stesso tempo GMSC e MSC interconnettono un canale di traffico GSM e un circuito PSTN attivando la comunicazione tra gli utenti.

5 Introduzione al GPRS

5.1 Nuove esigenze per la trasmissione dati

I servizi di trasmissione dati attualmente offerti dal sistema GSM sono a commutazione di circuito e consentono data rate fino a 9600 bit/s. Nell'immediato futuro verrà introdotto il nuovo servizio di fase 2+ High Speed Circuit-Switched Data (**HSCSD**) che permetterà di incrementare questo valore fino a circa 56 kbps. HSCSD, differentemente dal GSM normale che assegna un solo timeslot per connessione, riserva più timeslot (fino ad un massimo di 4) ad una singola connessione. Introduce inoltre i concetti di bandwidth on demand e configurazione uplink-downlink asimmetrica.

Si tratta però di servizi con modalità di trasferimento a *commutazione di circuito*. La rete, una volta stabilita la connessione fisica da capo a capo fra i due utenti, dedica le proprie risorse fino a quando non ne viene esplicitamente richiesto il rilascio, indipendentemente dal fatto che i due utenti si scambino dati durante tutto il periodo della connessione. Questa modalità di trasferimento è ottimale solo nel caso in cui i due utenti debbano scambiarsi una quantità significativa di dati (trasferimento file); diventa invece inefficiente non appena i dati da scambiare sono di modesta entità oppure, ed è il caso più frequente, il traffico dati è di tipo interattivo o bursty, cioè il tempo di utilizzo effettivo delle risorse di rete è solo una parte rispetto al tempo complessivo di connessione (come ad esempio la navigazione su internet tramite World Wide Web). Trasmissioni con queste caratteristiche necessiterebbero di una connessione a commutazione di pacchetto, modalità che attualmente non è offerta dal sistema GSM.

Si pone cioè per il GSM il problema di prevedere una modalità di trasferimento a pacchetto, in cui i dati degli utenti, racchiusi in entità di protocollo autosufficienti con indicazione del mittente e del destinatario, possono essere trasportati dalla rete senza la necessità di una stretta associazione con un circuito fisico.

Il General Packet Radio Service (**GPRS**) è stato pensato e specificato proprio per colmare questa mancanza e offrire un vero servizio di trasmissione a commutazione di pacchetto.

La velocità massima teorica (e probabilmente mai raggiungibile) è di 171,2 Kbps usando tutti ed otto i timeslots contemporaneamente, ciò consente una maggior efficienza nella trasmissione delle informazioni attraverso la rete di telefonia mobile.

Il GPRS facilita le connessioni istantanee perchè l'informazione può essere mandata o ricevuta immediatamente appena se ne ha bisogno, i terminali Gprs vengono identificati come sempre on line. Le risorse radio vengono impegnate solo quando vi è la necessità di inviare o ricevere i dati, ed è possibile avere più connessioni su un unico canale trasmissivo (multiplexing).

Il GPRS offre una infinità di vantaggi a tutte le applicazioni che intendano sfruttare il sistema GSM come mezzo per la trasmissione dati.

5.1.1 Novità rispetto al GSM

Ad oggi il GSM offre solo un servizio a commutazione di circuito per la trasmissione dati, ciò significa che ad ogni utente viene assegnato in modo esclusivo un canale di traffico che rimane a lui assegnato per

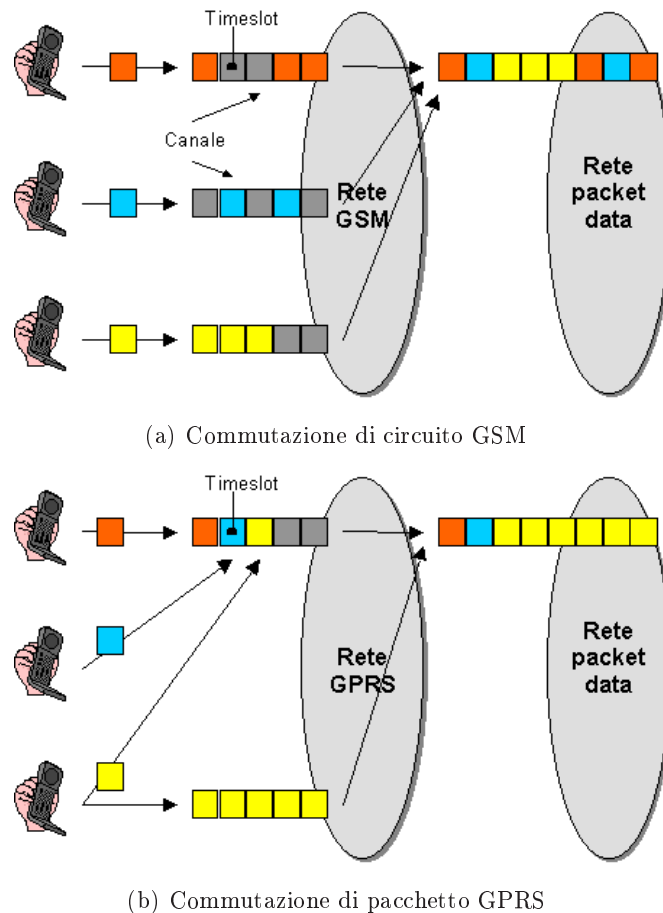


Figura 5.1: Modello semplificato di trasmissione dati

tutta la durata della sessione. Le risorse sono così gestite secondo la modalità *resource reservation*, ossia sono impegnate fino al momento in cui non viene fatta esplicita richiesta di rilascio.

Nello schema in fig. 5.1(a) è riportato il modello di trasmissione dati attuale a commutazione di circuito: ad ogni utente è riservato un canale (rappresentato nella figura seguente come sequenza di timeslot) che, se la trasmissione non è continua, può impegnare solo parzialmente. Esiste poi una entità nella rete GSM che provvede a riunire tutti i singoli canali dati convertendoli in un unico flusso a commutazione di pacchetto da instradare verso le reti esterne a pacchetto (X.25 o Internet).

Nel GPRS si adotta la tecnica del *context reservation*: le risorse radio sono effettivamente impegnate solo quando c'è la necessità di inviare o ricevere dati. Le stesse risorse radio di una cella sono così condivise da tutte le stazioni mobili (MS) presenti in quella cella, aumentando notevolmente l'efficienza del sistema.

Il servizio GPRS, pertanto, è rivolto ad applicazioni con le seguenti caratteristiche:

- trasmissione poco frequente di piccoli o grossi volumi di dati (ad esempio applicazioni interattive)
- trasmissione intermittente di traffico dati bursty (ad esempio applicazioni in cui il tempo medio tra due transazioni consecutive è di gran lunga superiore alla durata media di una singola transazione).

La commutazione di pacchetto offre diversi vantaggi:

- permette di multiplexare più connessioni su un unico canale trasmissivo, ciò significa che il canale diventa un mezzo condiviso da più connessioni. Non viene quindi assegnata nessuna risorsa di rete in modo esclusivo

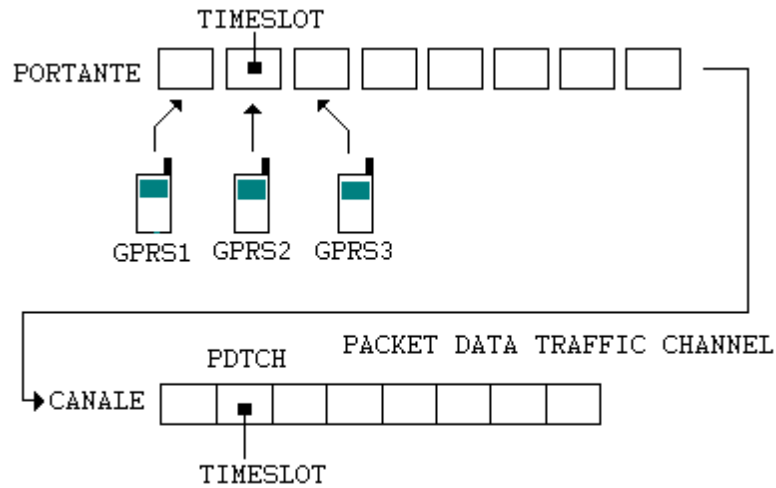


Figura 5.2: Il PDTCH nel GPRS

- non si richiede l'instaurazione di un circuito dedicato tra sorgente e destinatario, quindi la fase di set-up della connessione risulta notevolmente velocizzata
- è possibile eliminare le costose apparecchiature che, nel GSM base, fungevano da gateway per consentire l'interconnessione tra la rete GSM e le reti a commutazione di pacchetto. Queste ultime oramai costituiscono la maggior parte delle reti dati commerciali esistenti (si veda ad esempio Internet).

La rete può riservare uno o più timeslot di una portante per il servizio GPRS. Ogni timeslot, così configurato, costituisce un canale di traffico GPRS, detto Packet Data Traffic Channel (**PDTCH**). Su questo canale possono viaggiare, in trame diverse, pacchetti di utenti diversi; l'allocazione della banda ai singoli utenti è dinamica e dipende dal throughput istantaneo richiesto dall'utente e dalla banda disponibile. Quanto descritto è schematizzato in fig. 5.2.

Nello schema in fig. 5.1(b) è riportato il modello di trasmissione dati GPRS. Si osservi come due utenti (rosso e azzurro), che richiedono un basso throughput, condividano lo stesso canale di traffico GPRS, mentre il terzo (giallo), che invece necessita di un'alta banda, ne utilizzi addirittura due. Ciò dimostra come si riesca a sfruttare in modo ottimale la risorsa radio. Nel caso in esempio bastano due canali per garantire il servizio a tre utenti; nel GSM attuale a commutazione di circuito sarebbero stati necessari invece tre canali di traffico, uno per utente.

Per ottenere tutto questo i servizi e le modalità di trasferimento sono state *standardizzate* ed hanno lo scopo di adattarsi a traffici dati, i quali possono essere:

- traffici intermittenti o non periodici in cui il tempo fra due trasmissioni consecutive sia maggiore del ritardo di trasferimento medio end to end
- frequenti trasmissioni di piccoli volumi di dati: trasmissioni di meno di 500 ottetti con numerose trasmissioni al minuto
- trasmissioni non frequenti di grandi volumi di dati; esempio di questo tipo di traffico può essere un trasferimento di alcuni kbyte di dati con una frequenza di alcune richieste per ora

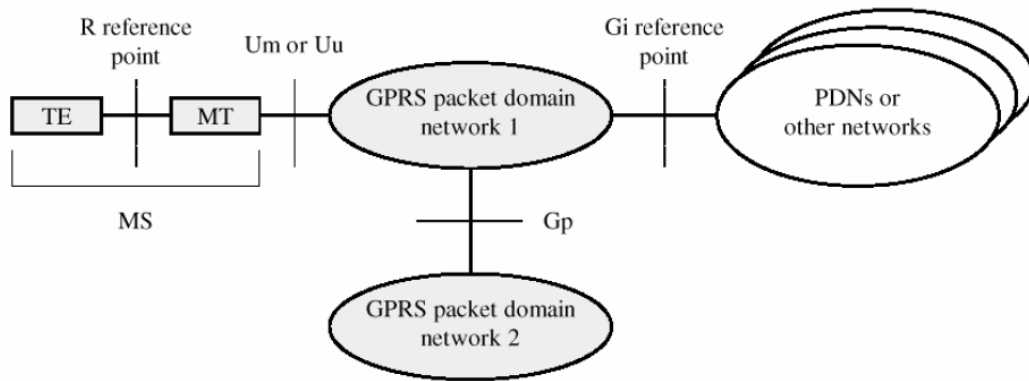


Figura 5.3: Interfacce nel GPRS

5.1.2 Interfacce

Come si osserva dalla fig. 5.3 ogni PLMN GPRS ha due punti di accesso:

Um per consentire l'accesso del mobile

R per originare e ricevere messaggi

Esiste una interfaccia PLMN inter-GPRS denominata **Gp**, che connette due reti GPRS indipendenti per permettere lo scambio di messaggi.

5.1.3 Servizi portanti

All'interno del sistema GPRS sono state definite due tipologie di servizi:

- punto-punto:
 - servizi di reperimento di informazioni su database remoti (es. WWW)
 - servizi di messaggistica per la comunicazione attraverso unità di memorizzazione (es. e-mail service)
 - servizi che prevedono una comunicazione con trasferimento dati bidirezionale in tempo reale (es. telnet)
 - servizi caratterizzati dal trasferimento di piccole quantità di dati (es. validazione di carte di credito, monitoraggio di un sistema remoto)
- punto-multipunto:
 - servizi di distribuzione da un punto centralizzato all'interno della rete verso destinatari sparsi sul territorio (es. trasmissione di informazioni meteo o di traffico automobilistico)
 - servizi di conferenza che consentono il trasferimento in tempo reale ed in modalità multidirezionale di dati fra utenti sparsi sul territorio

Per utilizzare i servizi forniti dall'architettura GPRS è previsto che l'utente registri l'attivazione del servizio mediante sottoscrizione esplicita e che identifichi il tipo di servizio richiesto mediante un profilo che definisce la qualità del servizio che deve essere garantita. I parametri necessari all'identificazione del

profilo sono parte integrante del contratto e vengono successivamente mappati sulle connessioni fra gli elementi logici all'interno del sistema. Visto che lo scenario di mobilità degli utenti cambia le condizioni radio su cui opera un servizio (copertura, interferenza, ecc.) i parametri si riferiscono a condizione di copertura accettabile (senza entrare nel merito di tale definizione) e di carico normale della rete. In caso di congestione, tali parametri sono indicativi e la rete è tenuta solo a garantire la priorità fra i vari servizi.

Ogni terminale è contraddistinto da una classe di servizio.

Il GPRS quando opera sotto la copertura radio, facilita le connessioni istantanee poiché l'informazione può essere mandata o ricevuta immediatamente appena se ne avesse bisogno, senza la necessità di modem come nel caso del PSTN (Public Switched Telephone Network, telefonia fissa). Il traffico dati risulterà inoltre interattivo. Un'altro aspetto che caratterizza il GPRS è l'immediatezza, diversamente dai terminali che si basano sulla tecnologia commutazione a circuito, ciò consentirà ad esempio pagamenti tramite carte di credito, la navigazione in internet su siti wap o www, invio ricezione di e-mail, instant messaging (evoluzione del SMS superando la limitazione dei 160 caratteri), MSM (Multimedia message Service) come l'invio e ricezione di immagini, clip audio o video, il download di files. Il GPRS faciliterà e permetterà una serie di nuove applicazioni che prima non era possibile implementare nel sistema GSM.

5.1.4 Quality Of Service (QOS)

Assieme con tutti gli aspetti positivi appena enunciati esistono anche alcuni aspetti negativi. I pacchetti, viaggiando indipendentemente gli uni dagli altri, possono seguire percorsi diversi ed arrivare al ricevente non nello stesso ordine in cui sono stati spediti. Ogni singolo pacchetto deve quindi contenere tutte le informazioni per poter arrivare a destinazione e fornire al ricevente la possibilità di ricostruire l'esatta sequenza di trasmissione. Il tempo di viaggio dei pacchetti ed il conseguente ritardo con cui arrivano a destinazione è però aleatorio, costituendo quindi un problema per tutte quelle applicazioni che necessitano invece di un data rate costante (stream di video). Un altro problema si verifica quando tutti gli utenti che utilizzano il medesimo canale GPRS vogliono comunicare nello stesso momento, si crea così una congestione con conseguente ritardo dovuto alle code di trasmissione. Quest'ultimo problema si somma a quello prima descritto.

Il GPRS prevede diverse soluzioni per minimizzare i problemi dovuti all'aleatorietà del tempo di trasmissione. Tra questi l'allocazione flessibile della risorsa radio che permette al GPRS di assegnare in modo esclusivo un canale ad una connessione che richieda una determinata Quality of Service (**QOS**), creando un *circuito virtuale*. Ad esempio per permettere una comunicazione vocale via GPRS, la rete può riservare un canale ad un solo utente, canale che quindi non è più una risorsa condivisa. Se è necessario un data rate maggiore (ad esempio per trasmissioni video), si può arrivare ad assegnare più canali (quindi più timeslot) in modo esclusivo ad uno stesso utente.

Service precedence (priorità)

La **service precedence** indica il livello di priorità relativa dei vari servizi in caso di funzionamento anomalo del sistema. Queste classi non vengono prese in considerazione nel caso in cui vi siano risorse sufficienti a servire tutti i flussi dati con gli attributi richiesti in fase di connessione o di sottoscrizione del contratto. Le classi di priorità previste dallo standard sono tre:

Precedenza alta in caso di congestione, i servizi appartenenti a questa classe devono avere la precedenza

Classe	Pacchetto 128 byte		Pacchetto 1024 byte	
	Ritardo medio	95° percentile	Ritardo medio	95° percentile
1	< 0.5s	< 1.5s	< 2s	< 7s
2	< 5s	< 25s	< 15s	< 75s
3	< 50s	< 250s	< 75s	< 375s
4	Best effort	Best effort	Best effort	Best effort

Tabella 5.1: Classi di ritardo (delay class)

sui servizi di ogni altra classe. Si realizza un meccanismo a priorità in cui questa classe deve essere servita a discapito di ogni altra

Precedenza normale mantiene le stesse caratteristiche della classe a precedenza alta ma soltanto nei confronti delle classi inferiori

Precedenza bassa è servita soltanto in assenza di traffico appartenente alle altre classi

Classi di ritardo (delay class)

Nel caso di servizi interattivi sono stati definiti i *ritardi massimi* che la rete deve garantire al flusso di informazioni transitante all'interno del sistema GPRS. Le classi sono definite in termini di valore medio ed 95° *percentile* del ritardo nel flusso di informazioni all'interno della rete GPRS ed includono il ritardo di accesso alla rete in uplink ed il ritardo di pianificazione in downlink. Ad entrambi i tipi di comunicazione va aggiunto il ritardo di transito all'interno della rete GPRS fino all'inoltro del traffico sulle reti esterne. I punti di riferimento su cui ci si basa per determinare i ritardi sono l'interfaccia R e l'interfaccia G dell'architettura logica del sistema. La rete dovrà garantire sicuramente la classe *best effort*, lasciando libertà ai gestori di adottare le altre tipologie. Le classi di ritardo sono riportate in tab. 5.1.

Altre classi

La *reliability class* (classe di affidabilità) indica le caratteristiche trasmissive che un'applicazione richiede ai livelli sottostanti. Le probabilità di un pacchetto perso, duplicato, fuori sequenza o con errori varia da 10^{-9} nella classe 1 a 10^{-2} nella classe 3

La *throughput class* è un parametro che dovrebbe fornire un'indicazione quantitativa della banda richiesta per il trasferimento dei dati di utente. I parametri di throughput che possono essere specificati si riferiscono al comportamento medio (mean throughput class) e di picco (peak throughput class) della comunicazione. Il peak throughput class varia da 8 Kbit/s per la classe 1 a 2048 Kbit/s per la classe 9. Il mean throughput class varia da 0.22 Kbit/s per la classe 1 a 111 Kbit/s per la classe 8 fino al best effort per la classe 9.

Il parametro *Peak Throughput class* è particolarmente importante in quanto viene utilizzato a livello MAC. Tale parametro è scambiato tra BTS e MS in fase di instaurazione della comunicazione e può essere utilizzato per allocare le risorse trasmissive. In base a questi parametri, negoziati al momento della sottoscrizione del servizio o in fase di instaurazione del collegamento, il terminale mobile ottiene una assegnazione delle risorse radio ed una priorità che viene utilizzata per la gestione dei flussi informativi. Le possibili priorità che possono essere assegnate a livello radio sono quattro e vengono utilizzate in fase

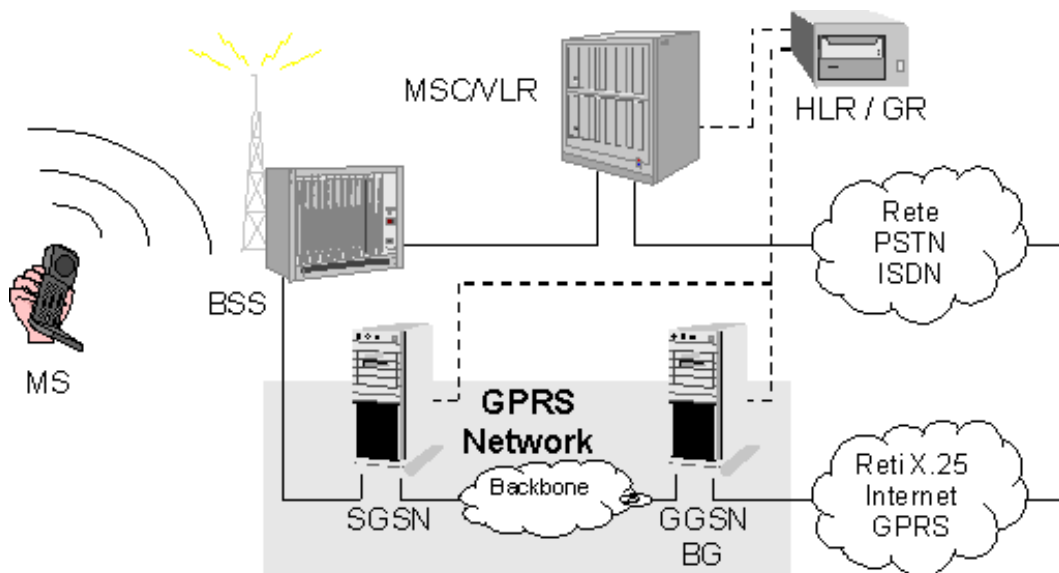


Figura 5.4: Architettura semplificata di una rete GSM/GPRS

di instaurazione del collegamento. L'assegnazione delle risorse radio si basa sulla peak throughput class e sulla capacità di ricezione e trasmissione del terminale mobile. La scelta della priorità radio viene mappata sullo specifico flusso dati e viene utilizzata in fase di pianificazione dei vari flussi all'interno della BTS.

5.2 Architettura di una rete GPRS

Per implementare il GPRS si possono seguire due diversi approcci:

approccio di sistema separato in cui si prevede che *tutta* l'infrastruttura necessaria per il supporto del servizio sia separato rispetto a quella della rete GSM

approccio di sistema integrato in cui si prevede l'aggiunta delle funzionalità necessarie per il supporto del GPRS alle entità che già compongono l'infrastruttura della rete GSM.

In realtà anche l'approccio "integrato" richiede l'introduzione di nuove entità, garantendo comunque, dal punto di vista economico, un impatto meno vistoso sui costi necessari per l'implementazione del servizio

Ogni singolo produttore seguirà l'approccio che reputa migliore per le proprie esigenze, entrambi presentano vantaggi e svantaggi.

Possiamo pensare la rete GSM completa scomposta in due parti:

1. una sottorete GSM a commutazione di circuito
2. una sottorete GPRS a commutazione di pacchetto

Le sottoreti sono logicamente isolate, ma condividono il sottosistema BSS (Base Station SubSystem) e HLR (Home Location Register).

Il GPRS introduce alcune nuove entità di rete, le cui interrelazioni sono riportate in fig. 5.4:

SGSN (*Serving GPRS Support Node*) è l'entità in cui sono localizzate gran parte delle funzioni necessarie per supportare il GPRS. Generalmente vi sono molteplici nodi SGSN e l'infrastruttura che li connette, denominata *backbone network*, consente il routing dei pacchetti trasmessi dagli utenti della rete o a questi indirizzati

GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) fornisce la connettività verso le altre reti dati, ad esempio X.25 o Internet

BG (*Border Gateway*) fornisce la connettività verso le reti GPRS degli altri operatori. Le funzioni principali svolte da queste entità sono

- la conversione dei protocolli
- il mapping degli indirizzi di rete degli utenti coinvolti nella comunicazione dei dati

MSC (*Mobile Switching Center*) integra le funzionalità di SGSN, GGSN e BG in un unico elemento della rete. Non è obbligatorio: possono anche essere tutti elementi separati

GR (*GPRS register*) memorizza informazioni riguardanti l'abbonato del servizio GPRS. Non necessariamente va vista come una nuova entità fisica, in quanto si può pensare di estendere l'insieme di funzioni dei VLR/HLR della rete GSM. In particolare ogni GS contiene:

- informazioni necessarie per il routing dei pacchetti indirizzati ad un mobile GPRS; ad esempio l'indirizzo di rete del mobile per un dato protocollo di rete ed il tipo di protocollo di rete cui l'indirizzo si riferisce
- informazioni relative al profilo di sottoscrizione dell'abbonato; ad esempio informazioni caratterizzanti a qualità del servizio richiesta dall'utente (Quality Of Service)

5.3 Conclusioni

Le principali caratteristiche del GPRS sono:

- gestione flessibile ed efficiente della risorsa radio.
- possibilità per l'utente di inviare e ricevere dati nella modalità di trasferimento end-to-end a commutazione di pacchetto senza utilizzare nessuna risorsa di rete in modalità a commutazione di circuito.
- riunisce tutti i positivi vantaggi della commutazione di pacchetto:
 - più connessioni possono condividere la medesima risorsa di rete (il canale trasmissivo);
 - possibilità di un servizio connectionless;
 - maggior velocità di set-up della connessione;
 - possibilità di inviare messaggi in Multicast o Broadcast;
- le caratteristiche negative sono invece minimizzate mediante l'uso di meccanismi di priorità e QOS;
- possibilità per l'utente di trasmettere contemporaneamente anche su più timeslot;

- velocità di trasmissione fino a 100 kbps utilizzando 5 timeslot, con un data rate di 20 kbps per timeslot.

Le maggiori novità introdotte dal Gprs per quanto riguarda le opportunità offerte ,si concentrano soprattutto nei servizi collegati alla trasmissione dei dati(Td) rispetto alla trasmissione della voce (Tv).Tra questi potremo distinguere le applicazioni connesse alla rete Internet e le applicazioni connesse ad altre servizi generali. I servizi GPRS potranno utilizzare diverse applicazioni Internet, le principali sono FTP, e-mail, CHAT, Videoconferenza, LAN.

Assisteremo ad una forte convergenza tra Internet e telefonia mobile anche con lo sviluppo e la diffusione di tecnologie **Wireless**. Il wireless si riferisce a una tipologia di comunicazione, a un monitoraggio e a sistemi di controllo in cui i segnali viaggiano nello spazio e non su fili o cavi di trasmissione.

Altre applicazioni più avanzate saranno disponibili con l'evoluzione 3G con terminali tipo UMTS o EDGE.

6 GPRS

6.1 Motivazioni

I primi sistemi radiomobili analogici sono anche noti come sistemi wireless di prima generazione (1G). Con l'introduzione del standard GSM è nata la seconda generazione (2G) di sistemi mobili, la cui caratteristica è quella di usare una tecnica di modulazione digitale con tutti i vantaggi che ciò comporta.

Il futuro delle reti radiomobili è quello di integrare sempre più una pluralità di servizi, quali comunicazione vocale, videocomunicazione, trasmissioni dati, internet. Purtroppo, per quanto riguarda la rete GSM, essa permette la trasmissione dei dati ad un rate non superiore a 9.6 kb/s (piuttosto basso). I motivi per cui la rete GSM non si presta al traffico dati sono principalmente due:

- la rete GSM permette l'utilizzo di un solo slot per utente, il che impedisce lo sfruttamento della capacità del canale anche quando è disponibile
- la rete GSM utilizza una commutazione di circuito.

Un utente che volesse comunicare con un'altro utente (sia che si tratti di traffico voce o dati) deve fare una richiesta di collegamento alla rete, la quale, se la richiesta viene accolta, instaura un percorso esclusivo per i due utenti riservato per l'intero periodo della conversazione. Solo alla fine della comunicazione si avrà il rilascio delle risorse che potranno essere riallocate ad altri utenti. Questo tipo di commutazione è estremamente adatta a comunicazioni vocali, in quanto garantisce l'ordine nell'arrivo dei dati e il ritardo massimo di ricezione. Purtroppo, però, utilizzare la commutazione di circuito per il traffico dei dati è estremamente inefficiente, specialmente se il traffico dati è di tipo interattivo o burty, in quanto le risorse della rete restano allocate anche durante i periodi di inattività

La rete **GPRS** (General Packet Radio Service), introdotta dall'ETSI con lo standard GSM 03.60, nasce proprio con lo scopo di assistere la rete GSM (alla quale si appoggia) per tutto ciò che riguarda il traffico dati a commutazione di pacchetto. La rete GPRS è nota anche come sistema di generazione 2.5 in quanto rappresenta un passaggio intermedio tra i precedenti sistemi di telefonia mobile (1G e 2G) e i nuovi sistemi di comunicazione personale (non solo telefonica) di terza generazione (3G) come l'UMTS.

La rete GPRS si differenzia dalla rete GSM innanzitutto per la *commutazione a pacchetto*: questa permette di multiplexare più connessioni sullo stesso canale fisico. Ogni risorsa (canale fisico) è condivisa tra più utenti senza che venga assegnata in modo esclusivo; ciò permette un uso molto efficiente della banda disponibile.

Inoltre, il GPRS prevede un'assegnazione molto flessibile delle risorse: a seconda delle necessità degli utenti (*classe multislot*) la rete può allocare da 1 a 8 time slot sulla stessa portante in cui l'utente può trasmettere (il bit rate va da 9.05 a 171.2 kb/s). In particolare utilizzando tutti gli 8 slot di una portante si possono trasferire fino a 171.2 kbit/s lordi (molto più veloce del GSM).

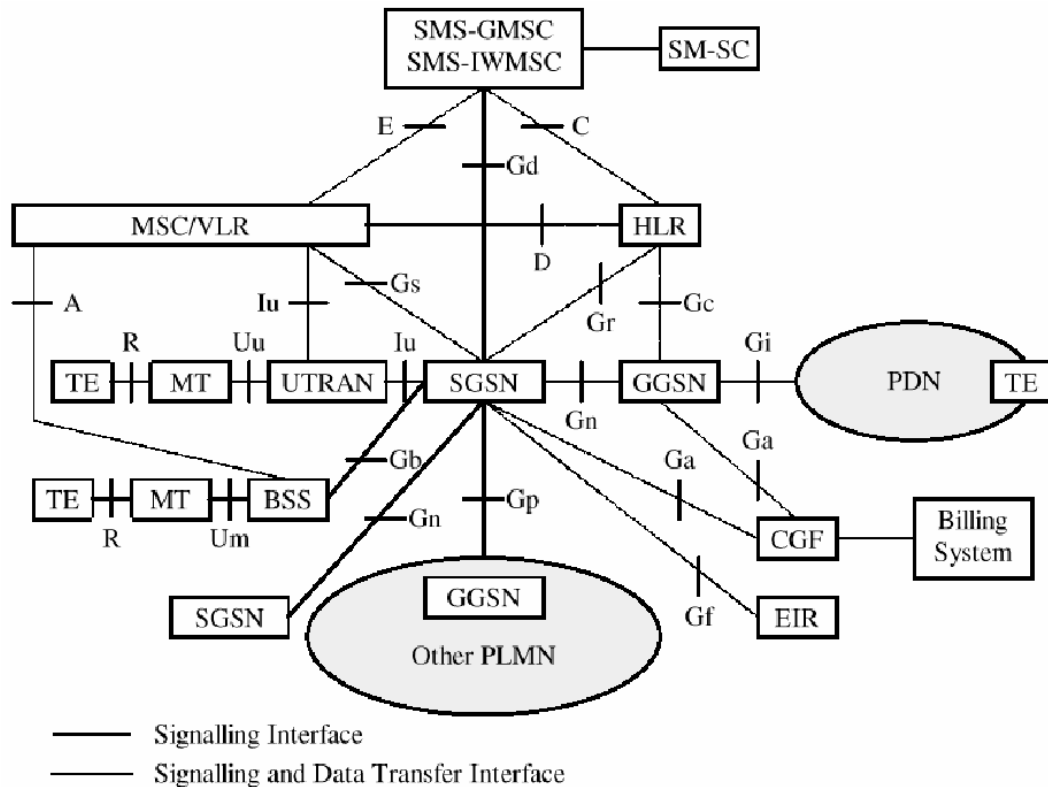


Figura 6.1: Architettura del GPRS

Un'altra differenza rispetto al GSM è che il GPRS non richiede nessun setup per accedere alla rete (l'instaurazione di un collegamento è quindi molto velocizzata); il terminale dell'utente è sempre connesso e la tariffazione, perciò, non avviene più sul tempo in cui le risorse restano allocate bensì sul volume di dati transitati. L'aumento della velocità di trasmissione permette all'utente, che fino ad oggi usufruiva di servizi estremamente lenti come il WAP, di accedere a servizi molto più potenti ed evoluti.

Ma l'aspetto più apprezzato dalla maggior parte dei consumatori è probabilmente la compatibilità con la rete internet. Infatti, essendo basata sul protocollo IP, la rete GPRS permette di accedere a tutti i servizi disponibili sulla rete. La rete GPRS può essere considerata, di fatto, la prima estensione wireless della rete internet.

6.2 Architettura della rete GPRS

Come già detto precedentemente, la rete GPRS nasce per affiancare la rete GSM esistente allo scopo di fornire un servizio di trasporto dati a commutazione di pacchetto alternativo a quello offerto dalla rete GSM. La rete GPRS, oltre che utilizzare le risorse radio della rete GSM, utilizza, per quanto è possibile, anche gli elementi funzionali già presenti. Di seguito diamo una descrizione di quali sono le novità introdotte nell'architettura della rete GSM/GPRS, riportata in fig. 6.1

- Per ciò che riguarda il terminale mobile (MS) dell'utente, questo può essere un PC collegato ad un cellulare GPRS oppure un terminale palmare PAD (Personal Digital Assistant) GPRS compatibile.
- Il sistema di accesso alla rete (BSS) prevede l'aggiunta di un'unità di controllo PCU (Packet Control Unit) presso il BSC mentre le BTS e l'MSC non necessitano di nessun cambiamento (salvo

l'aggiornamento del software). Il compito del PCU è quello di sollevare il BSC dalla gestione del traffico dei dati a pacchetto proveniente dalle BTS controllate. A livello BSC/PCU il traffico complessivo (voce e dati) proveniente dalle BTS viene separato: il traffico voce viene inviato all'MSC tramite la rete a commutazione di circuito GSM classica, mentre il traffico dati viene immesso nella nuova rete a commutazione di pacchetto GPRS.

- Le variazioni più significative riguardano, invece, il sottosistema di rete. In particolare è necessario un nuovo GPRS Core Network (uno per ogni rete) composto da due nuovi tipi di nodi di rete detti **GSN (Gprs Support Node)**:

SGSN L'SGSN (Service GPRS Support Node) è l'equivalente di un MS C (stesso livello gerarchico) funzionante a pacchetto ed è connesso alla stazione base tramite un collegamento Frame Relay. I suoi compiti, del tutto analoghi a quelli dell'MSC, sono: ricevere ed inviare i pacchetti da e verso i terminali mobili dislocati nella propria area (SGSN service area); gestire la mobilità degli utenti; autenticare gli utenti, applicare algoritmi di compressione e di cifratura dei dati (per questo utilizza le stesse procedure e gli stessi algoritmi utilizzati dalla rete GSM). Per fare ciò deve interagire con i database (spesso gli stessi usati dal GSM) e memorizzare alcune informazioni relative alla dislocazione (quali la cella corrente e il VLR corrente) e i profili d'utente (come l'IMSI e l'indirizzo di rete assegnato alla MS) di tutte le MS registrate presso l'SGSN.

GGSN Il GGSN (Gateway GPRS Support Node) ricopre il ruolo di interfaccia verso una rete a pacchetto esterna (IP o X.25) ed è connesso all'SGSN tramite una dorsale basata sul protocollo IP. I suoi compiti sono quelli di convertire i pacchetti GPRS che provengono dagli SGSN nei formati PDP (Packet data protocol) compatibili con le reti esterne e viceversa, mediante protocolli di tunnelling. Inoltre, è responsabile dell'inoltro dei pacchetti destinati alle reti PDN. Nell'altra direzione è responsabile dell'instradamento dei pacchetti, provenienti da reti esterne (PDN), verso l'SGSN che serve il terminale destinatario; gli indirizzi di rete dei pacchetti entranti vengono convertiti nell'indirizzo GPRS del destinatario, dopodichè vengono spediti all'SGSN che gestisce l'MS.

In generale esiste una corrispondenza many to many tra gli SGSN e i GGSN ; un GGSN serve da interfaccia di una rete esterna a molti SGSN e viceversa un SGSN può instradare i propri pacchetti a diversi GGSN ciascuno relativo ad una diversa rete a pacchetto

- Per ciò che riguarda i database il GPRS utilizza gli stessi utilizzati dal GSM (l'accesso può avvenire direttamente o su richiesta all'MSC). I database dovranno, quindi, gestire anche i dati degli abbonati al servizio GPRS.
- Attraverso le interfacce Gb (tra PCU e SGSN) e Gn transitano i dati utili e di segnalazione degli utenti;

l'interfaccia Gn (definita tra due nodi GSN) permette a due nodi di rete di scambiare informazioni sull'utente quando la MS si muove da una area SGSN ad un'altra

l'interfaccia Gi collega la rete GPRS con una rete esterna a pacchetto.

- Possono esistere due tipi di backbone GPRS, come si nota in fig. 6.2:

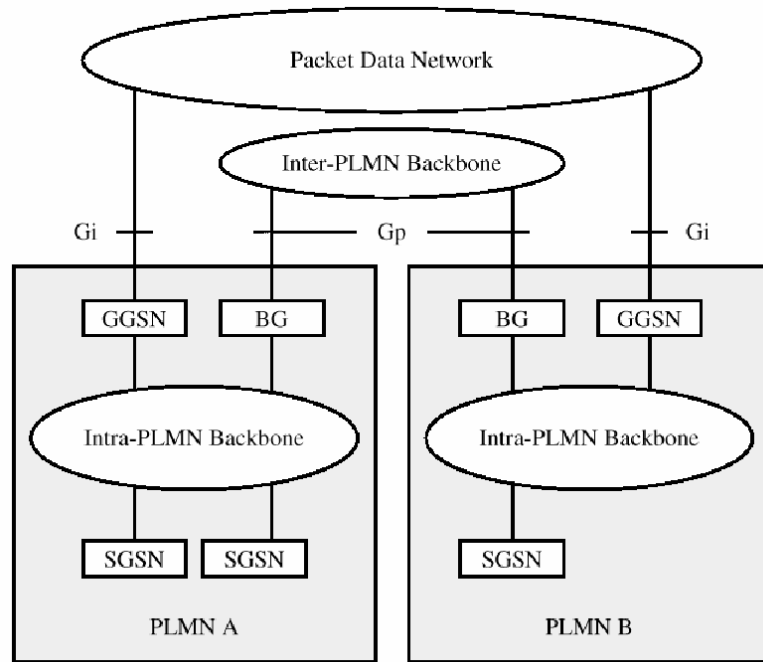


Figura 6.2: Architettura del GPRS

intra-PLMN backbone collega i nodi GSN di una stessa rete PLMN

inter-PLMN backbone collega nodi appartenenti a diverse PLMN. La dorsale inter-PLMN permette lo scambio delle informazioni necessarie per la gestione della mobilità degli utenti tra reti differenti (roaming). Il roaming deve essere supportato da specifici accordi tra i gestori delle rispettive reti.

Il **gateway** tra la PLMN e la dorsale inter PLMN esterna è detto gateway di confine.

- La rete GPRS prevede diverse modalità operative a seconda della classe a cui appartengono le stazioni mobili: classe A, B e C. Le stazioni mobili di:

classe A possono usufruire dei servizi GSM (chiamata vocale) e GPRS (connessione dati) contemporaneamente

classe B possono registrarsi in entrambe le reti ma non possono accedere ai due servizi contemporaneamente

classe C possono registrarsi solamente ad una rete (GSM o GPRS) alla volta

- La rete GPRS fornisce anche due differenti topologie di servizio:

PTP (Point To Point) Un servizio PTP può essere a sua volta di tipo:

PTP-CLNS (Connection Less) i pacchetti inviati al destinatario sono indipendenti tra loro; è un servizio noto come servizio a datagramma e può essere utile per supportare applicazioni bursty di tipo non interattivo

PTP-CONS (Connection Oriented) stabilisce una relazione logica virtuale tra sorgente e destinatario dei pacchetti, che resta attiva durante tutta la durata della connessione. La differenza rispetto alla commutazione di circuito è che le risorse vengono rilasciate quando

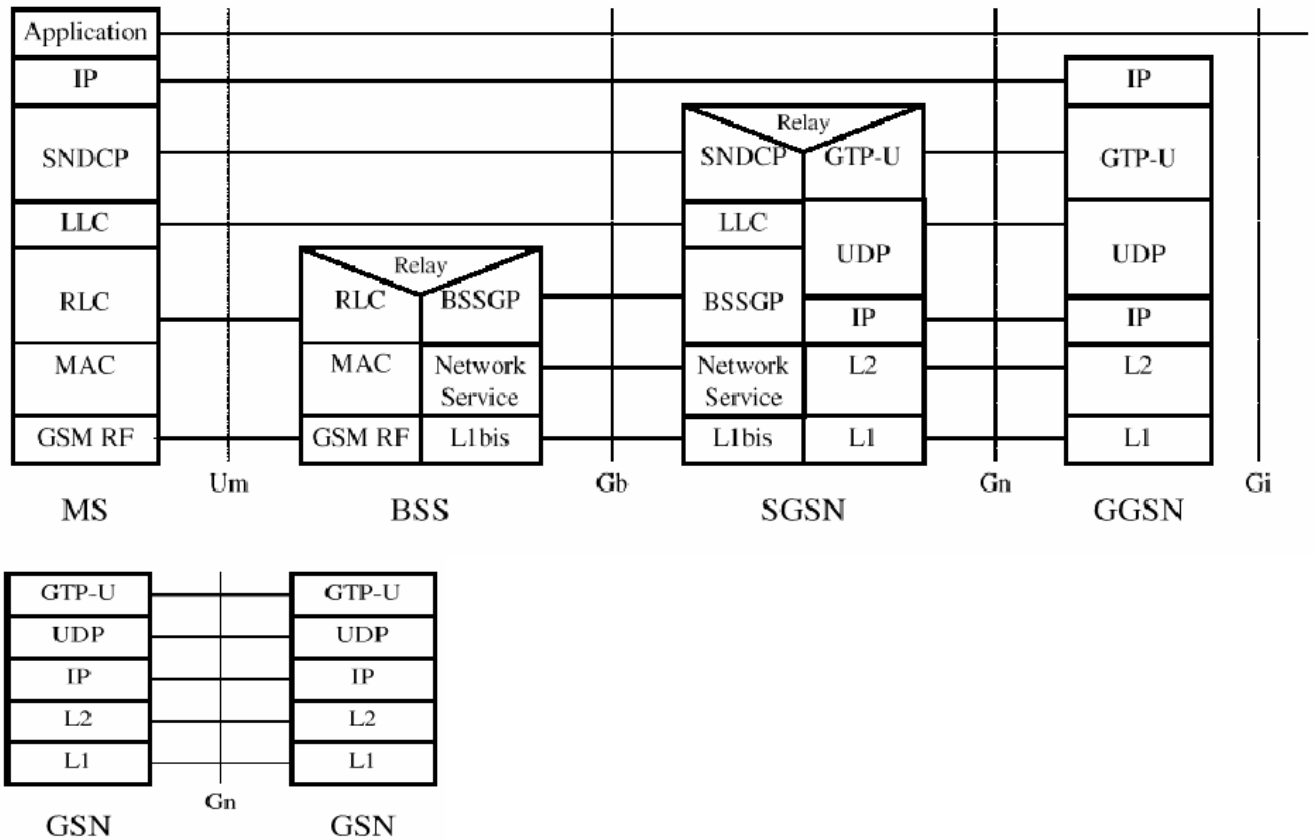


Figura 6.3: Pila protocollare del GPRS

ogni singolo pacchetto è stato trasferito (mantenendo la connessione logica). Inoltre, nella fase di setup, viene stabilito un percorso (route) che sarà seguito dai pacchetti (circuitto virtuale). Questo servizio di trasporto è più adatto ad applicazioni interattive in tempo reale.

PTM (Point To Multipoint) riguardano più di un utente destinatario; in questo caso l'indirizzamento dei pacchetti avviene su base geografica

6.3 Protocolli GPRS

Il trasferimento dei dati tra le entità della rete GPRS è regolato da una serie di protocolli a pila mostrati in fig. 6.3

- Tra due nodi della rete (SGSN o GGSN) il protocollo GTP (GPRS Tunneling Protocol) incapsula le PDU (Protocol Data Unit) di livello rete (IP o X.25) aggiungendovi le informazioni necessarie per il routing.
- Sotto il GTP troviamo i protocolli TCP/UDP e IP utilizzati per il trasporto dei dati sulla dorsale GPRS.
- Tra la BSS e l'SGSN il protocollo **BSSGP** (BSS GPRS Protocol) ha il compito di operare il trasferimento delle informazioni di routing e di dati riguardanti la QoS tra la BSS e l'SGSN. Esso utilizza il Frame relay come meccanismo di trasporto.

- Il protocollo responsabile dello scambio dei dati tra la stazione mobile e l'SGSN è, invece l'**SNDCP** (Sub Network Dependent Convergence Protocol). Esso provvede al multiplexing di più connessioni del livello di rete in una sola connessione logica a livello LLC; inoltre, è responsabile della compressione e decompressione dei dati.
- Sotto l'SNDCP c'è il sottolivello **LLC** (Logical Link Control) che garantisce un collegamento logico affidabile tra l'MS e l'SGSN da cui è controllato.
- Percorrendo la pila (MS o BSS) verso il basso troviamo il livello **RLC** (Radio Link Control) che è responsabile del collegamento tra la stazione mobile e la stazione radio base; esso realizza la segmentazione e il riassettaggio dei dati di livello superiore in blocchi RLC.
- L'ultimo sottolivello (del livello Data Link) è il **MAC** (Medium Access Control) il quale abilita le stazioni mobili a condividere uno o più canali fisici.
- Infine troviamo il **livello fisico**, composto dai sottolivelli **PLL** (Physical Link Layer) e **RFL** (Radio Frequency Layer), il quale fornisce il servizio di trasferimento dell'informazione sul canale fisico tra la stazione mobile e la rete GSM/GPRS

6.4 Canali Logici

In questo paragrafo illustreremo le differenze tra le interfacce radio dei sistemi GSM e GPRS. L'estensione del GSM al GPRS prevede l'aggiunta di alcuni canali logici (alternativi a quelli già visti per il GSM) sia di traffico che di controllo tali da permettere alla rete GSM/GPRS di gestire anche i dati a pacchetto.

- Per quanto riguarda i canali di traffico la rete GSM/GPRS prevede l'utilizzo di canali **PDTCH** (Packet Data Traffic Channel) per il trasporto di dati a commutazione di pacchetto. Un PDTCH corrisponde alle risorse allocate ad un mobile su un singolo canale fisico (slot) per la trasmissione dei dati. A causa del multiplexing dinamico di differenti canali logici (utenti) sullo stesso canale fisico, il rate istantaneo di un canale PDTCH può variare da 0 ad un massimo di 22.8 kb/s.
- All'interno dei canali di controllo, e in particolare i canali broadcast (BCH), è necessario introdurre un nuovo canale: il **PBCCH** (Packet Broadcast Control Channel). Il canale PBCCH è analogo al BCCH e serve per trasmettere in broadcast tutti i parametri necessari, alle stazioni mobili di una cella, per accedere alla rete e poter trasmettere i propri pacchetti. Inoltre, sul PBCCH viene replicata la trasmissione di tutte le informazioni broadcast del canale BCCH. Questo permette di accedere alla rete con funzionalità a commutazione di circuito (GSM). Questa ridondanza di informazione consente ai mobili attivi GPRS compatibili di accedere ai servizi GSM monitorando un solo canale (anziché due) per entrambe le funzionalità. L'esistenza del canale PBCCH, che è facoltativa, è dichiarata sul BCCH; nel caso in cui il PBCCH non fosse presente spetta al BCCH trasmettere tutte le informazioni relative alla trasmissione a pacchetto.
- Sempre all'interno dei canali di controllo è presente una nuova categoria di canali comuni per la commutazione di pacchetto: i **PCCCH** (Packet Common Control Channels). Essi si dividono in:
 - **PPCH** (Packet Paging Channel) analogo al PCH, serve ad informare il terminale mobile di una richiesta di trasferimento di pacchetti in downlink;

- il **PRACH** (Packet Random Access Channel), analogo al RACH, è utilizzato in uplink da una MS per richiedere l'allocazione di uno o più PDCCH. Questo può avvenire quando la MS desidera inizializzare una sessione GPRS (per trasferire dei pacchetti) oppure per rispondere ad un paging diffuso dalla rete.
 - Il **PAGCH** (Packet Access Grant channel), analogo all'AGCH per la commutazione di circuito, è utilizzato in downlink per assegnare le risorse (uno o più PDCCH) alla MS.
 - Infine il **PNCH** (Packet Notification Channel), usato in downlink, serve a notificare alla stazione mobile un trasferimento di pacchetti PTM-M (Point to Multipoint-Multicast). Analogamente a quanto visto prima, se i canali PCCCH non sono presenti, tutte le funzionalità appena descritte devono essere svolte dai canali CCCH.
- Tra i canali ACCH compaiono i canali duplex **PACCH** (Packet Associated Control Channel) i quali sono associati ad uno o più PDTCH (assegnati alla MS) e servono per il trasporto dell'informazione di segnalazione. Essi trasportano informazioni quali gli ACK (acknowledgments), i comandi per il controllo della potenza e i messaggi di assegnazione e rilascio delle risorse.
 - I **PTCCH/U** (Packed Timing Advance Control Channel in Uplink) vengono utilizzati dal mobile per trasmettere dei burst di accesso (con tempi di guardia lunghi) i quali consentono alla BTS di misurare il timing advance relativo alla comunicazione di pacchetto.
 - I **PTCCH/D** (Packet Timing Control Channel in Downlink) vengono utilizzati per trasmettere i valori di timing advance a un certo numero di stazioni mobili (un PTCCH/D può essere associato a uno o più PTCCH/U).

Indice analitico

- 16-DPSK, 26
- 2-PSK, 20
- 4-PSK, 21
- 8-DPSK, 25
- 8-PSK, 47, 48

- AB, 51
- ACCH, 81
- ACK, 81
- ADDRESS, 63
- AGCH, 49
- ANSWER, 63
- ARFCN, 34, **34**
- ASELP, 52
- ASK, 18, **18**, 19
- AUC, 45

- BCCH, 36, 48, 49, 56, 58, 80
- BCH, 48, 80
- BER, 52
- BG, 73
- BPSK, 20
- BS, 36, 39, 42, 46
- BSC, **42**, 43, 56, 57, 62–64, 76
- BSC-a, 57
- BSC-b, 57
- BSC/PCU, 77
- BSIC, 48, 51
- BSS, 42, 54, 55, 65, 72, 76, **79**, 80
- BSSGP, **79**
- BSSMAP, 55
- BTS, 42, **42**, 46, 48, 49, 56–58, 60, 62, 64, 71, 76, 81

- CALL, 63, 65
- CBCH, 50

- CC, 41, 61
- CCCH, 36, 49
- CCSS7, **54**
- CDMA, 28, **28**, **29**
- CFCCH, 48
- CHannel, 47, 48, 50, 51
- CHannels, 48, 49
- CM, 61
- CODEC, 51, 52
- CODEC/DECODEC, 52
- COMMAND, 57
- COMPLETE, 63, 65
- COMPLETED, 57
- CONFIRMATION, 65
- CONNECT, 65
- correlazione, 6, 9, 19
- CPFSK, 24, 27
- CPM, 24, 27, **27**
- CSCH, 48
- CSPDN, **43**
- CTSAGCH, 36
- CTSARCH, 36
- CTSCCH, 36

- DCCH, 49
- DCS, 33
- DECODED, 52
- DS, **28**
- DS-CDMA, **29**, 30

- E-TCH/F, 47
- EFR, 52
- EIR, 43, 45

- FACCH, 49, 56, 57
- FB, 50, 51

- FCCH, 48, 50
 FCH, 50
 FDM, 32
 FDM-TDM, 28, 33
 FDMA, **28**, 34
 FDMA-TDMA, 29
 FH, **28**
 FN, 36, 48, 51
 FR, 47, 52
 FSK, 23, **23**, 24, 53, **53**

 GCR, 46
 GGSN, 73, 77, 79
 GMSC, 43, 61, 62, 64, 65
 GMSK, 24, 48, 53, **53**
 GPRS, 48, 66, **66**, 67–73, 73, 74, 75, **75**, 76–81
 GS, 73
 GSM, 29, 32–35, 37, 38, 40–46, 51, 53–55, 58, 61, 63, 65–68, 72, 75–78, 80
 GSM/GPRS, 72, 80
 GSM/UMTS, 41
 GSMC, 65
 GSN, 77, **77**, 78
 GTP, 79

 HANDOVER, 57
 HDLC, 54
 HLR, 43–45, 61, 62, 72
 HR, 53
 HSCSD, **66**

 IAM, 62
 IC, 39
 ID, 46
 IMEI, 43, **43**, 45
 IMSI, **39**, 40, 44, 45, 60–62
 INITIAL, 63
 inter-BSC, 56
 inter-PLMN, 78
 IP, 77, 79
 ISDN, 41, **43**, 44, 51, 54, 61
 ISO-OSI, 55
 IWF, 46

 KHz, 34

 LA, 58, 60
 LAI, **39**, 45, 58, **58**, 64
 LAP, 54
 LAPD, 54
 LAPDm, 55
 LLC, **80**
 LPC, 51
 LPC-LTP-RPE, 51
 LPC-RPE, 52
 LTP, 51
 LU, 60

 MAC, **80**
 MCC, 40, **41**, 48
 ME, **39**, 40, 43, 45
 MESSAGE, 63
 MHz, 34, 35
 MM, 58
 MNC, 40, 48
 MS, 36, 37, 41–43, **43**, 44, **45**, 48, 49, 55–58, 60, 61, **61**, 62, 63, 65, 67, 71, 76, 77, 80, 81
 MSC, 42–44, 46, 56, 57, 60, 61, 64, 65
 MSC-a, 57
 MSC-VLR-HLR, 54
 MSC/VLR, **43**, 58, 62
 MSIN, 41
 MSISDN, **40**, 41, **43**, 44, 44, 61, 62, 64
 MSK, 24, **24**, **53**
 MSM, 70
 MSRN, 61, **61**, 62
 MT, 39

 NDC, **41**, 61
 NMSI, 41
 NS, 42

 O-TCH/F, 47
 O-TCH/H, 47
 OFDM, **31**
 OOK, 19
 OPQSK, 23
 OQPSK, 22, 23, **23**
 OSI, 54

 P-GSM, 34

- PACCH, **81**
 PAD, 76
 PAGCH, **81**
 PAM, **11**, 18, 20
 PBCCH, 36, 48, **80**
 PBCH, 48
 PC, 76
 PCCCH, **80**, 81
 PCH, 36, 49, 58
 PCM, 51
 PCU, **76**, 77
 PDCCH, 81
 PDCH, 48
 PDN, 46, 77
 PDP, 77
 PDTCH, 48, 68, **68**, **80**, 81
 PDTCH/F, 48
 PDU, 79
 PIN, 39, 40
 PIN2, 40
 PLL, **80**
 PLMN, 40, 41, 61, 69, 78
 PNCH, **81**
 PPCH, 36, **80**
 PRACH, 36, **81**
 PROCEEDING, 63
 PSK, 20, **20**, 21, 23–25
 PSPDN, **43**
 PSTN, 41, **43**, 46, 61, 63–65, 70
 PTCCH/D, 81, **81**
 PTCCH/U, 81, **81**
 PTM-M, 81
 PTP, 78
 PUK, 40
 PUK2, 40

 QAM, 24, **24**, 25–27
 QOS, 70, **70**
 QPSK, 21, **21**, 22, 23

 RACH, 36, 49, 51, 64
 RAND, 45
 RCB, 28
 REQUEST, 57

 REQUIRED, 57
 RFL, **80**
 RLC, **80**
 RR, 55, **55**

 SACCH, 47, 49, 50
 SACCH/C, 36
 SACCH/T, 36
 SB, 51
 SCH, 36, 48, 51
 SDCCH, 36, 49, 62, 64, 65
 SDCCH/8, **49**
 segnale, 5–7, 9, 11–13, 15, 18, 19, 21, 22, 24–28,
 32, 42, 50–53, 65
 SETUP, 63
 SGSN, 73, 77, 79
 SIM, **37**, 39, **39**, 40, 45
 SMS, 46, **46**, 49, 55, 70
 SMS-GMSC, 46
 SMS-IMSC, 46
 SMSCB, 50
 SN, **41**, 61, **61**
 SNDCP, **80**
 SS7, 54, 62

 TCH, 36, 47, 50, 57, 62, 65
 TCH/F, 47
 TCH/H, 47
 TCP/UDP, 79
 TDM, 32
 TDMA, **28**, 34, 42, 56
 TE, 39
 TMSI, **39**, 45, 57, 58, 64
 TN, 36

 UMTS, 28, 74

 VBS, 46
 VGCS, 46
 VLR, 43–45, 58, 61, 62, 64, 77
 VLR/HLR, 73