

# Campi elettromagnetici ad alta frequenza

Daniele Andreuccetti, IFAC-CNR, Firenze

## 1. Definizioni e unità di misura

Sebbene ampiamente utilizzato anche dai *media* più popolari, il termine “campi elettromagnetici ad alta frequenza” è certamente un po’ vago e generico e rischia in alcuni casi di risultare ambiguo. Secondo la terminologia ufficiale in uso nel settore delle telecomunicazioni, la denominazione *alta frequenza* (in inglese *High Frequency*, abbreviata con HF) dovrebbe essere riservata all’intervallo di frequenze compreso tra 3 e 30 MHz, una banda che in italiano viene spesso denominata anche *onde corte*.

D’altro canto, nel linguaggio di chi si occupa di protezione dalle esposizioni alle radiazioni non ionizzanti, si è andata recentemente diffondendo una terminologia adatta ad una ripartizione sommaria dello spettro elettromagnetico, secondo la quale si distinguono le *basse frequenze* (fino a 3 kHz), le *frequenze intermedie* (da 3 kHz a 3 MHz) e le *alte frequenze* (oltre 3 MHz, fino a 3 GHz e oltre).

In questa sede, per brevità useremo in qualche caso il termine “campi ad alta frequenza” per indicare genericamente tutto lo spettro delle radiazioni non ionizzanti, esclusi i soli campi elettrici e magnetici a frequenza industriale. Quando però verranno approfondite le tematiche relative alla valutazione dei campi elettromagnetici emessi dagli impianti di telecomunicazione, l’intervallo di frequenze a cui faremo riferimento si estenderà da 300 kHz fino a 3 GHz.

In tutti i casi, la banda di frequenza considerata è talmente ampia - e quindi l’intervallo di lunghezze d’onda è così esteso (da 10 cm a 1 km almeno) - da rendere possibili molteplici situazioni, in cui cambia profondamente il rapporto tra le grandezze fondamentali del campo che, ricordiamo, consistono nelle seguenti.

- Il **campo elettrico**  $\underline{E}$ , la cui ampiezza si misura in volt/metro [simbolo V/m].
- Il **campo magnetico**  $\underline{H}$ , la cui ampiezza si misura in ampere/metro [simbolo A/m].
- L’**intensità della radiazione**, ovvero la **densità di potenza**  $S$  (energia trasportata per unità di tempo e di superficie), misurata in watt/metroquadrato [simbolo  $W/m^2$ ].

Come è noto, la struttura del campo elettromagnetico si modifica sensibilmente in funzione della distanza dalla sorgente, rapportata alla lunghezza d’onda  $\lambda$ , cosicché si possono distinguere le regioni seguenti.

1. Regione dei **campi reattivi**, estesa fino ad una distanza dalla sorgente dell’ordine di una lunghezza d’onda. In questa regione campo elettrico e campo magnetico si comportano come grandezze scorrelate (essendo legati e determinati dalle rispettive sorgenti materiali: le cariche per il campo elettrico, le correnti per il campo magnetico) e non possono quindi essere ricavati uno dall’altro, ma devono essere valutati separatamente in modo indipendente, con strumenti e metodi specifici.
2. Regione dei **campi radiativi**, estesa a partire da alcune lunghezze d’onda di distanza dalla sorgente. In questa regione, campo elettrico e campo magnetico sono strettamente correlati, essendo legati da un meccanismo di mutua generazione: la variazione temporale del campo elettrico genera il campo magnetico, la variazione

temporale del campo magnetico genera il campo elettrico. In conseguenza di ciò, campo elettrico e campo magnetico risultano perpendicolari tra di loro ed alla direzione di propagazione e tra le loro intensità E ed H e la densità di potenza S esiste una precisa relazione matematica:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = Z_0 H^2 = E \cdot H \quad (1)$$

Questa equazione (detta talvolta **relazione di onda piana**) coinvolge anche l'impedenza  $Z_0$  del mezzo che riempie lo spazio dove il campo si sta propagando; per il vuoto, essa vale circa  $377 \Omega$ , un valore spesso approssimato con  $120\pi \Omega$ .

La transizione tra le due regioni avviene, ovviamente, in modo graduale, per cui a rigore non è possibile specificare una precisa "distanza di separazione", ma solo indicarne l'ordine di grandezza. In alcuni contesti però (per esempio quando si devono standardizzare le procedure di misura), è utile fare riferimento ad un valore netto della distanza di separazione, prefissandolo in modo convenzionale. Per esempio, la recente norma CEI 211-10 dell'aprile 2002 (*Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza*, paragrafo 6.3.2) distingue una **zona di campo reattivo** estesa dalla sorgente fino ad una distanza  $\lambda$  da essa, una zona di transizione (detta **zona di campo reattivo/radiativo**) compresa tra le distanze  $\lambda$  e  $3\lambda$  dalla sorgente ed infine una **zona di campo radiativo** estesa per distanze dalla sorgente maggiori di  $3\lambda$ .

Nel caso di sorgenti caratterizzate da una dimensione lineare massima D maggiore della lunghezza d'onda, è opportuno distinguere ulteriormente nella regione dei campi radiativi una zona di *campo radiativo vicino* ed una zona di *campo radiativo lontano*. La transizione dall'una all'altra zona avviene indicativamente ad una distanza dalla sorgente dell'ordine di  $2D^2/\lambda$ .

La zona dei **campi radiativi vicini** (o zona di Fresnel) è una regione caratterizzata dalla presenza di intensi fenomeni di interferenza, originati dalla sovrapposizione dei contributi che giungono nel punto di osservazione dai diversi elementi che compongono la sorgente. A causa di questi fenomeni, nella regione dei campi radiativi vicini si può passare da un massimo a un minimo locale dell'intensità del campo (cioè da un *punto caldo* a un *punto freddo*) muovendosi di una distanza dell'ordine di un quarto di lunghezza d'onda.

Nella zona dei **campi radiativi lontani** (o zona di Fraunhofer), i campi hanno invece un comportamento più regolare, sia in funzione della distanza dalla sorgente sia in funzione della posizione angolare. Solo in questa regione è possibile definire i concetti di *guadagno* e *diagramma di radiazione*, che permettono – come vedremo - di descrivere la modalità di propagazione dei campi nello spazio libero, presupposto necessario alla validità dei modelli di calcolo di cui ci occupiamo in questo volume.

## 2. Aspetti normativi

L'Italia non dispone ad oggi (novembre 2002) di una normativa organica che disciplini tutte le esposizioni ai campi elettromagnetici. La legge 22 febbraio 2001, n.36 (*Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*) fornisce delle linee guida generali per la tutela della popolazione (ma non dei lavoratori esposti per motivi professionali) da qualunque tipo di sorgente di campi elettromagnetici operante a qualunque frequenza fino a 300 GHz, ma ha affidato

al Governo il compito di emanare dei decreti applicativi che indichino i relativi **limiti di esposizione, valori di attenzione ed obiettivi di qualità**. In mancanza di questi decreti, ancora oggi la situazione resta quella in essere al momento della approvazione della legge quadro, ovvero:

1. non esistono limiti applicabili alle esposizioni professionali;
2. per i campi elettrici e magnetici a frequenza industriale, esistono *limiti di esposizione* applicabili soltanto alla popolazione non esposta per motivi professionali (DPCM 23 aprile 1992); non esistono invece *valori di attenzione né obiettivi di qualità*; esistono però limiti di distanza minima da alcune tipologie di sorgenti;
3. per i campi a radiofrequenza e microonde, sono regolamentate dal Decreto 381/1998 solo le esposizioni della popolazione provocate da impianti per telecomunicazione; il decreto indica *limiti di esposizione e misure di cautela*, ma non *obiettivi di qualità* intesi come valori numerici; esso non indica neppure limiti di distanza minima;
4. non esistono disposizioni per sorgenti a radiofrequenza e microonde collegate a servizi ed applicazioni non riconducibili alle telecomunicazioni

La legge 36/2001 specifica anche le competenze spettanti alle Regioni, alle Province ed ai Comuni. Alle prime, in particolare, affida le funzioni relative alla individuazione di siti di trasmissione ed al rilascio delle autorizzazioni all'installazione degli impianti fissi per la telefonia mobile e per la diffusione radiotelevisiva. La legge imporrebbe inoltre l'adozione (entro dodici mesi dall'entrata in vigore dei Decreti governativi sui limiti di esposizione) di *piani di risanamento*, con l'obiettivo di adeguare entro due anni ai nuovi limiti gli impianti di radiotelecomunicazione esistenti.

	<b>Limiti di esposizione</b> <i>(per esposizioni di durata inferiore alle quattro ore)</i>			<b>Valori di cautela</b> <i>(per esposizioni di durata maggiore di quattro ore)</i>	
	<b>da 100 kHz a 3 MHz</b>	<b>da 3 MHz a 3 GHz</b>	<b>da 3 a 300 GHz</b>	<b>da 100 kHz a 3 MHz</b>	<b>da 3 MHz a 300 GHz</b>
<b>Campo elettrico [V/m]</b>	60	20	40	6	
<b>Campo magnetico [A/m]</b>	0.2	0.05	0.1	0.016	
<b>Densità di potenza [W/m<sup>2</sup>]</b>	Non applicabile	1	4	Non applicabile	0.1

**Tabella 1** - Alcune prescrizioni del Decreto Ministeriale 381 del 1998.

In definitiva, allo stato attuale gli unici limiti applicabili in Italia alle esposizioni della popolazione ai campi elettromagnetici ad alta frequenza sono quelli indicati dal Decreto del Ministero dell' Ambiente 10 settembre 1998, n.381 *Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana*), che si applica in modo specifico ai "sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi operanti nell' intervallo di frequenza compresa fra 100 kHz e 300 GHz.

Il Decreto esclude esplicitamente i lavoratori professionalmente esposti e non si applica a sorgenti diverse dagli apparati per telecomunicazione, né a sorgenti di qualsiasi tipo operanti a frequenze inferiori a 100 kHz o superiori a 300 GHz. Le principali prescrizioni del decreto 381/1998 sono richiamate in Tabella 1.

Come si vede in tabella, il decreto fissa *limiti di esposizione* che variano in funzione della frequenza. Per esempio, per frequenze comprese tra 3 MHz e 3 GHz (intervallo in cui rientrano sia le emittenti radio FM e televisive, sia tutti i servizi di telefonia mobile) i valori limite sono fissati in 20 V/m per il campo elettrico e 0.05 A/m per il campo magnetico. Questi valori devono essere rispettati in qualunque punto accessibile agli individui della popolazione.

Oltre ai *limiti di esposizione*, il Decreto 381 introduce anche dei *valori di cautela* intesi a fornire una ulteriore protezione in caso di esposizioni che si protraggono a lungo nel tempo. Esso stabilisce infatti che in tutte le aree in cui siano prevedibili permanenze della popolazione superiori alle quattro ore (per esempio abitazioni e loro pertinenze, luoghi di lavoro, alberghi, ospedali, scuole ed asili) non devono essere presenti livelli maggiori di 6 V/m per il campo elettrico e di 0.016 A/m per il campo magnetico, indipendentemente dalla frequenza.

Si tratta di valori notevolmente più cautelativi di quelli proposti nell'aprile 1998 dall'ICNIRP (l'International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, un' istituzione non governativa formalmente riconosciuta dall' Organizzazione Mondiale della Sanità) e recepiti da una Raccomandazione della Comunità Europea del luglio 1999 e dalle amministrazioni centrali di numerosi Paesi europei e non.

<b>Applicazione e frequenza tipica</b>	<b>Campo elettrico [V/m]</b>	<b>Induzione magnetica [<math>\mu</math>T]</b>	<b>Densità di potenza [<math>W/m^2</math>]</b>
<b>Radiodiffusione a modulazione di ampiezza (1 MHz)</b>	87	0.92	Non applicabile
<b>Radiodiffusione a modulazione di frequenza (100 MHz)</b>	28	0.092	2
<b>Diffusione televisiva (600 MHz)</b>	34	0.11	3
<b>Telefonia analogica e GSM (900 MHz)</b>	41	0.14	4.5
<b>Telefonia GSM seconda banda (1800 MHz)</b>	58	0.20	9
<b>Telefonia UMTS (2000 MHz)</b>	61	0.21	10

**Tabella 2** - Alcuni limiti di riferimento ICNIRP per le esposizioni della popolazione ai campi elettromagnetici ad alta frequenza.

Le linee guida dell'ICNIRP sono state sviluppate sulla base di una revisione critica dell'intera letteratura scientifica accreditata, comprendente effetti termici e non termici. Esse rappresentano la più autorevole normativa internazionale a base scientifica attualmente disponibile, nella quale si riconosce la maggior parte della comunità scientifica che si occupa di argomenti correlati con l'esposizione ai campi elettromagnetici.

I limiti di esposizione raccomandati dall'ICNIRP sono notevolmente articolati e variano con la frequenza in modo abbastanza complesso. Ne riportiamo pertanto in

Tabella 2 solo un estratto, relativo ad alcune tra le più diffuse e significative sorgenti ambientali di campi elettromagnetici ad alta frequenza.

### 3. Principali applicazioni

Uno degli aspetti che maggiormente colpiscono chi si dedica allo studio delle sorgenti di campi elettrici, magnetici o elettromagnetici ad alta frequenza è la grande varietà di applicazioni ed apparati in cui ci si imbatte. Si tratta di una situazione diversa da quella che si riscontra alla cosiddetta frequenza industriale (50 Hz). Anche in questo secondo caso, infatti, le sorgenti sono innumerevoli ed estremamente diversificate (si pensi alla miriade di elettrodomestici e apparecchi elettrici da ufficio), ma hanno in comune una caratteristica: nella stragrande maggioranza dei casi, si tratta di sorgenti *accidentali* di campi elettrici e magnetici, ovvero di sorgenti la cui emissione non è collegata direttamente al servizio svolto dall'apparecchio, ma ne è una conseguenza indesiderata, al punto che si potrebbe concettualmente pensare di sviluppare tecniche per ridurre quanto si vuole l'emissione stessa, senza compromettere il buon funzionamento dell'apparecchio.

Le sorgenti collegate alle applicazioni ad alta frequenza sono invece quasi sempre di tipo *intenzionale*, poiché il servizio svolto dall'apparecchio è, nella maggior parte dei casi, collegato proprio alla generazione di un campo elettrico, magnetico o elettromagnetico, per cui non è possibile pensare di ridurre oltre un certo limite il campo emesso, se non compromettendo il buon funzionamento della sorgente. Rientrano in questo gruppo i trasmettitori radio, TV e per la telefonia cellulare, i forni a microonde, il telefono cellulare, il *cordless* domestico, gli antifurto radar ed i varchi magnetici, per citare solo alcune tra le applicazioni più diffuse.

Per illustrare in modo sintetico questa situazione, si sono indicate in Tabella 3 alcune tra le principali sorgenti ad alta frequenza, riportando per ciascuna il tipo di applicazione (si distingue tra applicazioni termiche, applicazioni nel settore delle telecomunicazioni ed altre applicazioni), la banda di frequenza tipica e l'ambito sociale in cui la sorgente si trova principalmente ad operare: domestico, industriale, sanitario, civile o militare.

### 4. Telecomunicazioni

La società moderna necessita di una grande varietà di servizi di telecomunicazione pubblici e privati. Molti di questi utilizzano i campi elettromagnetici come veicoli per la trasmissione di informazioni e sfruttano quindi la capacità dei campi di propagarsi nello spazio, giungendo anche a grandissima distanza dalla sorgente. Tra le numerosissime applicazioni esistenti potrà essere utile ricordare le seguenti.

Servizi di diffusione radiofonica e televisiva, nei quali un sito - detto *ripetitore* - irradia un campo elettromagnetico con l'obiettivo di raggiungere il maggior numero

possibile di utenti. La comunicazione avviene “a senso unico”, dal ripetitore verso gli utenti.

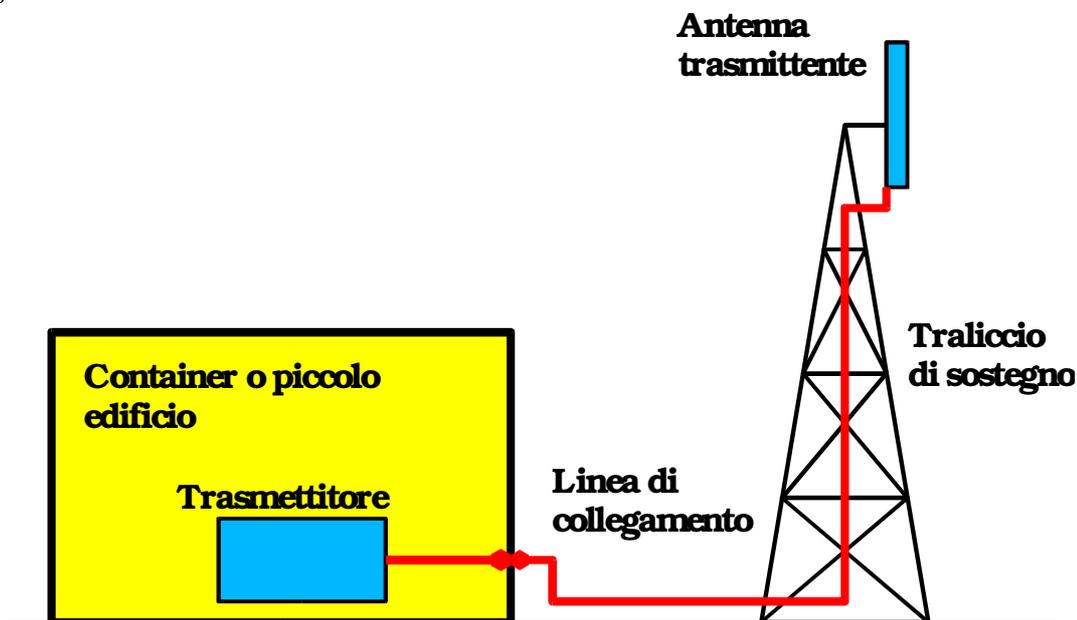
Servizi di telefonia cellulare, nei quali è possibile realizzare una serie di collegamenti bidirezionali tra un sito centrale (che in questo caso prende il nome di *stazione radio base*) ed un numero massimo prefissato di utenti contenuti in una area limitata, detta *cella*, servita dalla stazione stessa.

Reti di comunicazione radio ad uso privato, come quelle utilizzate da radiotaxi, ambulanze, aziende pubbliche di trasporto, pubblica sicurezza, forze armate.

Altre applicazioni di telecomunicazione o assimilabili, come per esempio i *walkie-talkie*, le comunicazioni hobbistiche o di servizio sulla banda CB (dall'inglese *Citizen Band*), le vere o proprie comunicazioni radioamatoriali, i collegamenti punto-punto e punto-multipunto.

In questa sede, prenderemo in considerazione le sorgenti di campi elettromagnetici ad alta frequenza che operano nell'ambiente esterno a supporto dei servizi pubblici di telecomunicazione nell'intervallo di frequenza tra 300 kHz e 3 GHz. Rientrano in questa categoria la radiodiffusione AM ed FM, la diffusione televisiva e la telefonia cellulare; su quest'ultima in particolare appunteremo il nostro interesse.

Tutti i servizi di telecomunicazione basati sulla propagazione libera del campo elettromagnetico prevedono l'esistenza di un **sito trasmittente** da cui il campo si irradia nell'ambiente circostante. Pur con alcune differenze a seconda delle applicazioni, i *siti trasmittenti* si conformano ad una struttura comune, illustrata in **Figura 1**, nella quale è possibile riconoscere tre componenti fondamentali: il *trasmettitore*, la *linea di collegamento* e l'*antenna trasmittente*.

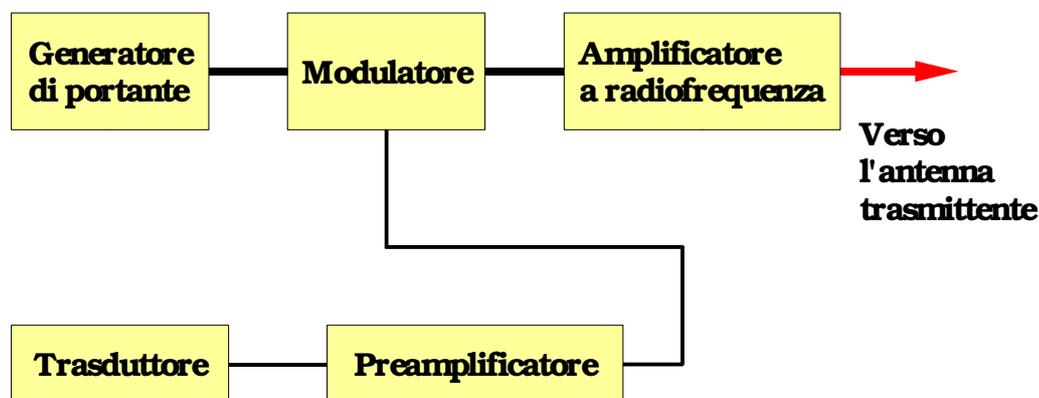


**Figura 1** - Schema generale della struttura di un sito trasmittente

Il **trasmettitore** è costituito da una serie di apparecchiature elettroniche in grado di generare un segnale a radiofrequenza alla frequenza e della potenza necessaria a svolgere il servizio affidato al sistema. Come mostrato in **Figura 2**, esso comprende:

- un *generatore di portante*, che produce un segnale sinusoidale oscillante alla frequenza di lavoro assegnata al trasmettitore;

- un *modulatore*, che sovrappone alla portante l'informazione che si vuole diffondere;
- un *amplificatore*, che innalza il segnale modulato al livello di potenza desiderato.



**Figura 2** - Schema a blocchi di un trasmettitore per telecomunicazioni

La **potenza** del trasmettitore stabilisce l'*intensità* del campo elettromagnetico irradiato, che risulta ad essa direttamente proporzionale. Se, per esempio, la potenza del trasmettitore raddoppia, allora la *densità di potenza* del campo elettromagnetico prodotto dall'antenna ad esso collegata raddoppia quasi istantaneamente in ogni punto dello spazio, mentre l'ampiezza del campo elettrico e del campo magnetico subiscono un incremento del 40% circa, come si ricava facilmente dalla relazione (1) sopra riportata.

La **linea di collegamento** è una struttura guidante (in genere un cavo elettrico coassiale) che collega il trasmettitore alla propria antenna trasmittente e permette quindi di trasferire la potenza generata dal primo alla seconda, che la irraderà nello spazio.

Tuttavia, non tutta la potenza prodotta dal trasmettitore riesce ad essere irradiata. Vi sono casi, specialmente alle frequenze più elevate, in cui una parte cospicua della potenza prodotta viene dissipata sotto forma di calore nella linea di collegamento, specie se questa è molto lunga oppure di cattiva qualità. Ulteriori perdite sono possibili negli altri dispositivi presenti lungo il percorso del segnale e nell'antenna stessa, che non irradia mai tutta la potenza che riceve.

L'**antenna trasmittente**, infine, è il componente a cui è assegnato il compito di irradiare nello spazio l'energia elettromagnetica ricevuta dal trasmettitore attraverso la linea di collegamento. Si tratta ovviamente di un componente chiave, in quanto stabilisce le modalità con cui il segnale trasmesso sarà distribuito nello spazio e, in particolare, la direzione preferenziale verso cui esso sarà diretto.

La potenza elettromagnetica generata dal trasmettitore eccita nelle strutture metalliche dell'antenna una distribuzione di cariche e di correnti elettriche oscillanti. Queste producono rispettivamente un campo elettrico ed un campo magnetico oscillanti nella regione di spazio immediatamente circostante l'antenna (*regione dei campi reattivi*) i quali poi, grazie alla mutua generazione tra campo elettrico e campo magnetico che sta alla base del fenomeno della radiazione, generano un campo elettromagnetico che si allontana indefinitamente dalla sorgente. La *regione dei campi*

*reattivi* si estende, come si è detto, fino ad una distanza dall'antenna trasmittente dell'ordine di una lunghezza d'onda, cioè per esempio qualche centinaio di metri per le emittenti radio ad onde medie, circa 3 metri per le emittenti radio a modulazione di frequenza (FM), da 30 cm a 2 metri per le emittenti televisive e da 15 a 30 cm per la telefonia cellulare.

L'utilizzo dei campi elettromagnetici a scopo di trasmissione delle informazioni richiede che siano risolti numerosi problemi tecnici, relativi per esempio alla *modulazione*, all'*accesso multiplo*, al *duplexing* ed alle modalità di *distribuzione nello spazio della potenza irradiata*. Il complesso delle soluzioni adottate, tra le molte disponibili per risolvere questi problemi, costituisce la caratteristica peculiare di ciascun servizio.

#### 4.1 Modulazione

Una forma d'onda perfettamente sinusoidale, nella quale ampiezza, frequenza e fase rimangono costanti nel tempo, non è in grado di trasportare alcun tipo di informazione. Affinché questo sia possibile, occorre rendere variabile nel tempo uno dei tre parametri della sinusoide in modo che questa variazione sia associata in modo univoco all'informazione da trasmettere. Questo processo prende il nome di **modulazione**. La forma d'onda sinusoidale di partenza si chiama **portante** e la sua frequenza si chiama **frequenza portante**. Il segnale elettrico ricavato dall'informazione da trasmettere si chiama **segnale modulante** ed il risultato della modulazione è il **segnale modulato**. Ovviamente, nel ricevitore dovrà avvenire un procedimento opposto alla modulazione (detto **demodulazione**), mediante il quale dal *segnale modulato* si ricava il *segnale modulante* e da questo l'informazione trasmessa.

Più in dettaglio, nel trasmettitore l'informazione da trasmettere (per esempio una voce umana) viene innanzitutto trasformata in un segnale elettrico. Se la modulazione adottata è di tipo **analogico**, questo segnale risulterà variabile con continuità all'interno di un prefissato intervallo di valori e tale variazione rispecchierà fedelmente quella della grandezza originaria. Nel caso invece della modulazione **digitale**, il segnale elettrico consisterà in una appropriata successione di due soli valori ben distinti, rappresentanti i due livelli di una codifica binaria attraverso la quale viene rappresentata numericamente la grandezza originaria.

In entrambi i casi, il segnale elettrico così ottenuto (*segnale modulante*) viene utilizzato per modificare istantaneamente uno dei tre parametri fondamentali della forma d'onda sinusoidale prodotta dal generatore di portante. A seconda di quale parametro viene modificato, si parla di **modulazione di ampiezza**, **modulazione di frequenza** o **modulazione di fase**. Tutte e tre queste tecniche vengono comunemente adottate nelle telecomunicazioni, scegliendo in ogni tipo di servizio la tecnica più adatta. Si veda a questo proposito la Tabella 4, dove sono sintetizzate le principali caratteristiche tecniche dei più diffusi servizi di telecomunicazione.

È importante ricordare che, qualunque sia il tipo di modulazione impiegata, questa comporta un allargamento della regione di frequenze occupata dal segnale trasmesso. Mentre infatti una portante non modulata occupa unicamente la frequenza nominale ad essa assegnata (*frequenza portante*), la sovrapposizione della modulazione porta ad occupare una certa banda di frequenza, estesa in genere sia al di sopra sia al di sotto della frequenza portante stessa.

## 4.2 Accesso multiplo

Quasi tutti i servizi pubblici di telecomunicazione devono affrontare il problema della coesistenza di più comunicazioni dello stesso tipo nella stessa area geografica. Per esempio, uno stesso apparecchio radiofonico o televisivo deve poter captare più programmi diversi senza che questi si sovrappongano tra di loro, più utenti di cellulare (dello stesso operatore o di operatori diversi) devono poter telefonare contemporaneamente senza disturbarsi a vicenda, anche restando molto vicini tra di loro e così via. Affinché questo sia possibile, sono state sviluppate tre tecniche distinte note con gli acronimi inglesi FDMA, TDMA e CDMA.

Con la tecnica **FDMA** (*Frequency Division Multiple Access*) le varie trasmissioni e i vari operatori sono distinti sulla base della frequenza portante. L'intervallo complessivo di frequenze assegnato ad un certo tipo di servizio viene ripartito in "fette" di larghezza costante e predeterminata, dette **canali**. Ad ogni emittente autorizzata a trasmettere in una determinata area geografica viene permesso di utilizzare in quell'area uno di tali canali, identificato dalla frequenza centrale; l'emittente dovrà fare in modo che tutta la banda occupata dal *segnale modulato* rientri all'interno del canale assegnato.

Per fare un esempio, si consideri la diffusione radiofonica FM, a cui è assegnata complessivamente la banda da 88 a 108 MHz. Questa banda è ripartita in 100 canali larghi 200 kHz e ad ogni emittente autorizzata a trasmettere in una certa zona verrà consentito di utilizzare in quella zona uno di tali canali; in questo modo, in ogni area geografica potranno coesistere fino a 100 trasmissioni FM. Così, per esempio, dire che una certa emittente radio FM opera alla frequenza di 91 MHz significa che ad essa è stata assegnata la "fetta" della banda FM compresa tra 90.9 MHz e 91.1 MHz.

La tecnica FDMA richiede quindi di utilizzare frequenze portanti diverse per mantenere distinte le informazioni trasmesse dai vari servizi di telecomunicazione. Le sempre maggiori esigenze di comunicazione che contraddistinguono la nostra società hanno quindi portato ad utilizzare porzioni sempre più elevate dello spettro elettromagnetico, sfruttando le possibilità offerte dal contemporaneo sviluppo delle tecnologie elettroniche. Questa tendenza ha importanti conseguenze anche sulla qualità dei servizi offerti, poiché l'utilizzo di frequenze sempre più elevate rende possibile utilizzare canali sempre più larghi.

A prima vista, sembrerebbe conveniente adottare canali molto stretti, in modo da permettere la presenza contemporanea di un maggior numero di comunicazioni, a parità di ampiezza totale dell'intervallo di frequenze assegnato ad un determinato servizio. Per esempio, se per la radiofonia FM si utilizzassero canali larghi 20 kHz, in ogni area geografica potrebbero essere contemporaneamente attive 1000 emittenti anziché le 100 permesse dalla larghezza di 200 kHz effettivamente adottata.

Tuttavia vi è una controindicazione all'uso di canali troppo stretti. La larghezza di un canale determina infatti la quantità di informazioni per unità di tempo che è possibile far passare in esso e, di conseguenza, la qualità del servizio di comunicazione che il canale stesso può svolgere. Comunicazioni a basso flusso di informazioni o di bassa qualità, come la telefonia o la radiofonia orientata al solo "parlato", si accontentano di canali relativamente stretti, mentre per ottenere maggiore qualità (per esempio, per musica a livello di alta fedeltà) o un flusso di informazioni più elevato (per esempio, per la trasmissione televisiva o il trasferimento di grandi quantità di dati) occorrono canali più larghi.

La radiofonia a modulazione di ampiezza (AM) è il servizio di telecomunicazione che utilizza la frequenza più bassa, tra quelli di cui ci occupiamo. Essa adotta canali larghi solo 10 kHz, che consentono di trasmettere il “parlato” con buona qualità e la musica con qualità mediocre. La possibilità di utilizzare frequenze portanti più elevate permette oggi di scegliere tra la realizzazione di un grande numero di canali di larghezza limitata o di un numero inferiore di canali di larghezza maggiore. Nel primo caso (molti canali stretti), il sistema sarà in grado di sostenere un grande numero di comunicazioni simultanee di qualità limitata. È ciò che succede, per esempio, con la telefonia cellulare analogica TACS la quale, utilizzando canali larghi 25 kHz, fornisce una qualità audio poco superiore alla radiofonia AM. Nel secondo caso (pochi canali larghi), è possibile invece realizzare un minor numero di comunicazioni contemporanee, ma di qualità superiore ed in grado, all’occorrenza, di trasmettere una maggior quantità di informazione per unità di tempo. Per esempio, la radiofonia a modulazione di frequenza (FM) utilizza canali larghi 200 kHz e fornisce un audio stereofonico di qualità a livello di alta fedeltà, mentre le trasmissioni televisive UHF utilizzano canali larghi 8 MHz, adatti a sostenere l’elevato flusso di informazioni necessario alla codifica dei segnali audio e video.

La tecnica FDMA, pur essendo la prima soluzione storicamente sviluppata per risolvere il problema dell’accesso multiplo, rimane tuttora di importanza fondamentale, vista la quantità e la qualità dei servizi che ancora la adottano (si veda la Tabella 4).

Il recente sviluppo delle tecnologie per il trattamento digitale del segnale ha reso possibili due alternative alla tecnica FDMA, che presentano notevoli vantaggi soprattutto ai fini di uno sfruttamento ottimale dello spettro elettromagnetico.

Col metodo **TDMA** (*Time Division Multiple Access*), tutte le comunicazioni dello stesso tipo in una certa area utilizzano la stessa frequenza ma “a turno”, ovvero in intervalli di tempo distinti (detti in linguaggio tecnico **time slot**); naturalmente gli intervalli stessi sono così brevi e si susseguono tanto rapidamente che il fenomeno non viene percepito dall’utente. Come si vede in Tabella 4, le applicazioni più importanti della tecnica TDMA si hanno nella telefonia cellulare di seconda generazione GSM (che per la precisione utilizza una combinazione di FDMA e TDMA) e nella telefonia *cordless* cittadina DECT (che all’interno di ogni cella utilizza un metodo TDMA puro).

Infine, l’utilizzo della tecnica **CDMA** (*Code Division Multiple Access*) consiste nel far convivere le comunicazioni alla stessa frequenza e nello stesso momento, ma rendendole distinte e riconoscibili una dall’altra per mezzo di una complessa operazione di codifica. Questo metodo verrà utilizzato nella telefonia cellulare di terza generazione UMTS in due varianti adatte ad applicazioni diverse: la tecnica W-CDMA (Wideband CDMA, un metodo ibrido FDMA-CDMA) e la tecnica TD-CDMA (Time Division CDMA, una combinazione di TDMA, FDMA e CDMA).

#### 4.3 Duplexing

I servizi di telecomunicazione bidirezionali, come le ricetrasmittenti o i telefoni cellulari, devono affrontare anche la necessità di dare supporto alla comunicazione simultanea nei due versi. Per risolvere questo problema esistono due approcci, uno basato sull’utilizzo di due diversi canali di frequenza (metodo **FDD**, dall’inglese

*Frequency Division Duplex*) ed uno basato sull'utilizzo del medesimo canale in istanti di tempo diversi (metodo **TDD**, dall'inglese *Time Division Duplex*).

Come si vede in Tabella 4, la maggior parte dei servizi di telefonia cellulare in esercizio (e cioè TACS, GSM e DCS) utilizza la tecnica FDD e quindi necessita di due intervalli di frequenze, uno destinato alla comunicazione verso il cellulare (frequenze di *downlink*) ed uno destinato alla comunicazione verso la stazione radio base (frequenze di *uplink*). In questo caso, ogni *canale* FDMA si compone in realtà di due "sottocanali", uno di *uplink* ed uno di *downlink*, ciascuno appartenente alla rispettiva banda di frequenza.

I cordless urbani in standard DECT utilizzano invece il metodo TDD, mentre per UMTS sono state ipotizzate entrambe le possibilità, a seconda del tipo di servizio da svolgere.

#### 4.4 Distribuzione della potenza irradiata

L'antenna trasmittente svolge un ruolo fondamentale nel processo di trasmissione, poiché stabilisce in che modo la potenza irradiata si distribuisce nello spazio circostante, ovvero quanta ne viene concentrata attorno alla **direzione di massima radiazione** e quanta invece viene inviata in direzioni diverse.

Una antenna si dice **isotropica** se irradia in tutte le direzioni con uguale intensità. L'antenna isotropica è solo una astrazione ideale, tecnicamente impossibile a realizzarsi: tutte le antenne reali presentano invece una direzione di massimo irraggiamento. Diremo che una data antenna ha **guadagno massimo**  $G_{MAX}$  se la densità di potenza  $S_{MAX}(r)$  da essa prodotta ad una certa distanza  $r$  *nella direzione di massimo irraggiamento* è superiore di un fattore  $G_{MAX}$  a quella che sarebbe prodotta alla stessa distanza da un radiatore isotropico ideale alimentato con la stessa potenza. In formule, detta  $P_{alim}$  la **potenza di alimentazione** (o, più correttamente, la **potenza totale irradiata** dall'antenna), avremo:

$$S_{MAX}(r) = \frac{G_{MAX} \cdot P_{alim}}{4\pi r^2} \quad (2)$$

Il guadagno di una antenna è per definizione una grandezza priva di unità di misura. Tuttavia, per motivi pratici, si è diffusa nella tecnica la consuetudine di esprimere il guadagno in *decibel rispetto al radiatore isotropico* (simbolo dBi). Con le seguenti relazioni si può passare dal valore in dBi ( $G_{dBi}$ ) al valore naturale  $G_{MAX}$  e viceversa:

$$\begin{aligned} G_{dBi} &= 10 \cdot \text{Log}_{10} G_{MAX} \\ G_{MAX} &= 10^{\frac{G_{dBi}}{10}} \end{aligned} \quad (3)$$

dove "Log<sub>10</sub>" indica il logaritmo in base 10. Se, per esempio, una antenna ha un guadagno  $G_{dBi}$  pari a 17 dBi, ciò significa che essa irradia nella direzione di massimo irraggiamento un'onda elettromagnetica con una intensità circa 50 volte maggiore di quella che produrrebbe un radiatore isotropico a pari potenza di alimentazione. Il radiatore isotropico ha per definizione  $G_{MAX} = 1$ , ovvero  $G_{dBi} = 0$  dBi; per ogni antenna reale risulta invece  $G_{MAX} > 1$  e quindi  $G_{dBi} > 0$  dBi.

In queste espressioni, l'indicazione "dBi" esprime chiaramente il fatto che il guadagno è riferito al radiatore isotropico. Ricordiamo, per completezza, che in alcuni ambienti è rimasta in uso l'indicazione del guadagno *rispetto all'antenna a dipolo sottile*, grandezza per la quale si usa il simbolo dBd; siccome il dipolo sottile, a sua

volta, ha un guadagno  $G_{MAX} = 1.64$  (cioè  $G_{dBi} = 2.15$  dBi), risulta che il guadagno di una data antenna espresso in dBd è inferiore di 2.15 dB rispetto al guadagno della stessa antenna espresso in dBi.

Il *guadagno massimo* è uno dei parametri più importanti per caratterizzare il comportamento di una antenna trasmittente e per questo motivo il suo valore è sempre indicato tra le specifiche delle antenne commerciali. Attraverso il guadagno si hanno anche informazioni sul modo in cui la potenza irradiata si distribuisce nello spazio. Poiché infatti qualunque antenna irradia nella direzione di massimo di più di un radiatore isotropico, deve necessariamente irradiare di meno in altre direzioni, se la potenza complessivamente irradiata deve essere la stessa. Quindi, maggiore è il guadagno massimo, più la radiazione è concentrata intorno alla direzione di massimo irraggiamento.

Maggiori informazioni sulla effettiva distribuzione spaziale dell'intensità del campo irradiato da una antenna sono fornite da altri due parametri quasi sempre dichiarati dai costruttori di antenne trasmittenti: le **larghezze del fascio a metà potenza** sul piano orizzontale  $\Delta_h$  e sul piano verticale  $\Delta_v$ . Ciascuno di questi due valori rappresenta, sul piano a cui si riferisce, la distanza angolare tra le due direzioni in corrispondenza delle quali l'intensità irradiata è pari alla metà del valore corrispondente alla direzione di massimo irraggiamento.

È interessante osservare che la larghezza del fascio irradiato da una antenna trasmittente, misurata su un determinato piano, è in prima approssimazione inversamente proporzionale alla dimensione dell'antenna su quel particolare piano, rapportata alla lunghezza d'onda della radiazione emessa. In formule, se indichiamo con  $D_h$  e  $D_v$  le dimensioni rispettivamente orizzontale e verticale dell'antenna ed esprimiamo gli angoli  $\Delta_h$  e  $\Delta_v$  in gradi sessagesimali, risulta:

$$\begin{aligned}\Delta_h &\cong 57 \frac{\lambda}{D_h} \\ \Delta_v &\cong 57 \frac{\lambda}{D_v}\end{aligned}\tag{4}$$

In altre parole, se per esempio una antenna è molto estesa verticalmente (rispetto alla lunghezza d'onda), allora essa produce un fascio di radiazione molto stretto sul piano verticale; analogamente, un'antenna piuttosto stretta in direzione orizzontale produce un fascio proporzionalmente largo sullo stesso piano. È quindi possibile, semplicemente osservando una antenna e conoscendo la lunghezza d'onda, farsi un'idea delle caratteristiche generali del fascio irradiato.

Come ci si poteva aspettare, esiste anche una relazione approssimata tra il *guadagno massimo* e i due angoli di larghezza di fascio a metà potenza:

$$G_{MAX} \cong \frac{40.000}{\Delta_h \Delta_v}\tag{5}$$

Il guadagno massimo e la larghezza del fascio a metà potenza forniscono informazioni utili a descrivere il comportamento di una antenna trasmittente, ma non sufficienti a determinare con ragionevole accuratezza l'intensità del campo elettromagnetico da essa prodotto nei punti posti al di fuori della direzione di massima radiazione. Tutti i più diffusi modelli di calcolo dei campi richiedono infatti la conoscenza del *diagramma di radiazione di potenza* dell'antenna, o quanto meno della proiezione di tale diagramma sul piano orizzontale e sul piano verticale.

Il **diagramma di radiazione di potenza** di una antenna trasmittente è una funzione analitica che, per ogni direzione individuata da una coppia di coordinate angolari, specifica l'intensità della radiazione in quella direzione, rapportata al valore nella direzione di massimo irraggiamento. In formule, preso un sistema di coordinate sferiche  $(r, \theta, \varphi)$  con origine nel centro elettrico dell'antenna, il diagramma di radiazione di potenza  $D(\theta, \varphi)$  consente di generalizzare l'equazione (2) anche per direzioni diverse da quella di massimo, a cui l'equazione (2) stessa era limitata. Avremo infatti:

$$S(r, \theta, \varphi) = \frac{G_{MAX} \cdot D(\theta, \varphi) \cdot P_{alim}}{4\pi r^2} = S_{MAX}(r) \cdot D(\theta, \varphi) \quad (6)$$

In molti casi, si usa definire una **funzione guadagno**  $G(\theta, \varphi)$ , che combina insieme il *guadagno massimo* ed il *diagramma di radiazione di potenza*:

$$G(\theta, \varphi) = G_{MAX} \cdot D(\theta, \varphi) \quad (7)$$

con questa definizione, la (6) diviene allora:

$$S(r, \theta, \varphi) = \frac{G(\theta, \varphi) \cdot P_{alim}}{4\pi r^2} \quad (8)$$

Naturalmente, una volta determinata con questa relazione la densità di potenza  $S(r, \theta, \varphi)$  in un qualunque punto, potremo determinare grazie alla (1) anche le intensità del campo elettrico e del campo magnetico presenti in quel punto. Per il campo elettrico risulta per esempio:

$$E(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{G(\theta, \varphi) \cdot P_{alim} \cdot Z_0}{4\pi}} \cong \frac{1}{r} \sqrt{30 \cdot G(\theta, \varphi) \cdot P_{alim}} \quad (9)$$

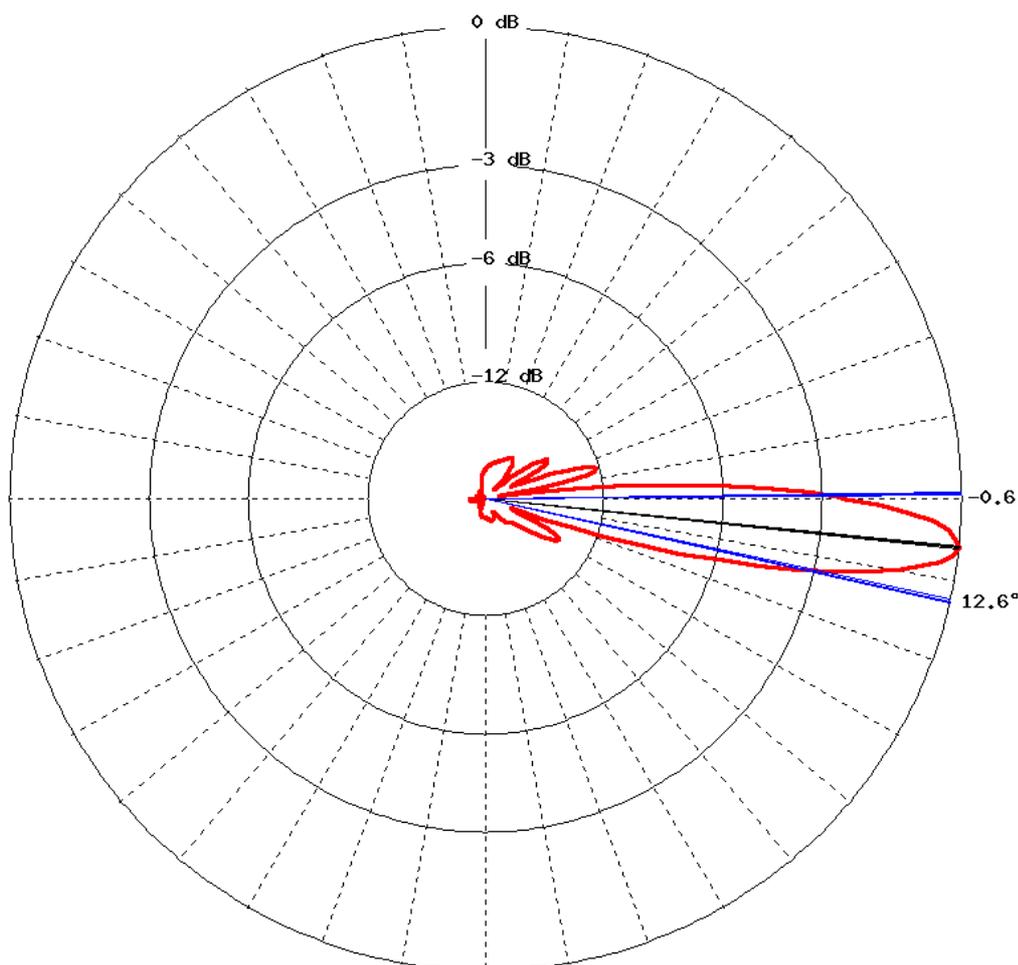
Nella pratica, risulta complesso determinare e documentare il diagramma di radiazione completo di una antenna, per la difficoltà di rappresentarne il comportamento in funzione delle due variabili angolari. Pertanto, i costruttori di antenne si limitano in genere a fornire, sotto forma di tabelle o grafici, l'andamento delle due proiezioni del diagramma stesso sui piani orizzontale  $D_H(\varphi)$  e verticale  $D_V(\theta)$ . In questo caso, l'espressione seguente costituisce una buona approssimazione per la *funzione guadagno*  $G(\theta, \varphi)$  limitatamente al lobo principale dell'antenna, ovvero alle direzioni vicine a quella di massimo irraggiamento:

$$G(\theta, \varphi) \cong G_{MAX} \cdot D_V(\theta) \cdot D_H(\varphi) \quad (10)$$

A titolo di esempio, si riporta in **Figura 3** il diagramma di radiazione sul piano verticale  $D_V(\theta)$  di una tipica antenna per telefonia cellulare GSM-900, caratterizzata da un guadagno  $G_{MAX}$  pari a circa 35, da una larghezza a metà potenza  $\Delta_V$  di circa  $13^\circ$  e da un tilt elettrico (v.sotto) di circa  $6^\circ$ .

Concludiamo questa panoramica sulle caratteristiche generali del campo irradiato da una antenna trasmittente ricordando che le definizioni di guadagno massimo, larghezza del fascio a metà potenza, diagramma di radiazione e funzione guadagno, nonché tutte le relazioni che coinvolgono questi parametri (in particolare tutte le relazioni da (2) a (10) sopra riportate) hanno a rigore validità soltanto **in condizioni di propagazione libera (senza ostacoli) del campo elettromagnetico, nella regione dei campi radiativi lontani**. Lo stesso vale, ovviamente, per i modelli di previsione dei livelli di campo che fanno uso di tali relazioni. Se applicati al di fuori delle condizioni suddette (per esempio per valutazioni nella regione dei *campi radiativi vicini*), questi modelli conducono in genere a **sovrastimare** le intensità dei campi e possono quindi continuare

a risultare adeguati per un approccio di tipo cautelativo. In ogni caso, l'accuratezza fornita è tanto maggiore quanto più le condizioni indicate sono verificate.



**Figura 3** - Diagramma di radiazione sul piano verticale di una tipica antenna per telefonia cellulare GSM-900 (guadagno circa 15.6 dBi, larghezza a metà potenza circa 13°, tilt elettrico 6°). Per permettere di apprezzare meglio i lobi secondari, si è rappresentato in grafico il *diagramma di radiazione di campo*, uguale in ogni punto alla radice quadrata del diagramma di radiazione di potenza definito nel testo. L'espressione in dB delle due grandezze è in ogni caso la stessa.

#### 4.5 Caratteristiche dei principali servizi di diffusione radiotelevisiva

La radiodiffusione ad onde medie costituisce una delle più antiche tipologie di trasmissione radiofonica, quella sicuramente di gran lunga più popolare fino all'avvento della radiofonia privata ed al conseguente moltiplicarsi delle emittenti VHF a modulazione di frequenza. La banda di frequenza ad essa riservata si estende da 526.5 a 1606.5 kHz. Le stazioni ad onde medie utilizzano antenne a traliccio alte anche oltre un centinaio di metri, situate in posizione panoramica, sulla cima di colli o montagne. Gli apparati trasmettitori hanno potenze che possono arrivare a diverse centinaia di chilowatt. Valori così elevati, rispetto ad altre classi di apparati per telecomunicazione,

sono giustificati dalla grande estensione del bacino di utenza che ciascuna di queste stazioni deve in genere servire, anche per l'impossibilità di concentrare in aree limitate la radiazione emessa. Infatti, le lunghezze d'onda (comprese tra 200 e 600 m circa) sono tali che le antenne utilizzate, per quanto di grandi dimensioni, hanno guadagni molto bassi, dell'ordine di qualche unità. La radiodiffusione ad onde medie utilizza una modulazione analogica di ampiezza (AM) ed una tecnica di accesso multiplo a divisione di frequenza (FDMA), con canali larghi 10 kHz.

Le emittenti radiofoniche a modulazione di frequenza (FM) operano nella porzione della banda VHF compresa tra 87.5 e 108 MHz. Fanno uso di ripetitori situati quasi sempre in luoghi elevati, sulla cima di colline o sul tetto di edifici molto alti, ed utilizzano per lo più sistemi d'antenna costituiti da schiere di antenne *yagi* collegate elettricamente tra di loro e fissate meccanicamente ad un supporto a palo o a traliccio, che le mantiene su una stessa fila verticale. Le varie *yagi* sono in genere allineate con i dipoli disposti verticalmente (trasmissione a *polarizzazione verticale*) e orientate a puntare nella medesima direzione orizzontale. Ne risulta un sistema di antenna piuttosto esteso in direzione verticale e molto stretto orizzontalmente, che irradia quindi un fascio abbastanza stretto sul piano verticale e quasi omnidirezionale sul piano orizzontale. I guadagni che si possono ottenere da questi sistemi sono dell'ordine delle decine. Le potenze impiegate sono dell'ordine di alcuni chilowatt. La radiofonia FM utilizza una modulazione analogica di frequenza ed un accesso multiplo di tipo FDMA con canali larghi 200 kHz.

L'emittenza televisiva infine sfrutta tre distinte bande di frequenza, collocate nella regione delle VHF (52.5 – 68 MHz e 174 – 230 MHz) e delle UHF (470 – 854 MHz). Vi è di conseguenza anche una certa variabilità nei tipi di antenna trasmittente impiegati per le varie bande. Una scelta molto comune, specialmente per emittenti che operano nelle UHF, è costituita dalle *antenne a pannello*. Si tratta, anche in questo caso, di sistemi di antenna che consistono in schiere di dipoli opportunamente disposti e collegati tra di loro. I singoli dipoli sono orientati quasi sempre in direzione orizzontale (trasmissione a *polarizzazione orizzontale*), sono paralleli gli uni agli altri e giacciono su un piano verticale perpendicolare alla direzione di puntamento del sistema d'antenna. Le schiere sono chiuse in contenitori ermetici la cui superficie posteriore, metallica, funge da riflettore, mentre la superficie anteriore, in plastica colorata, ha solo funzioni protettive. Un sistema di antenna può consistere anche in numerosi pannelli opportunamente affiancati e collegati. Il guadagno dei sistemi di questo tipo (che generano un fascio relativamente stretto su entrambi i piani di riferimento) è dell'ordine di alcune decine. Per le trasmissioni TV si utilizzano di solito potenze inferiori al chilowatt. La modulazione è analogica, di ampiezza per il segnale video e di frequenza per il segnale audio. L'accesso multiplo è di tipo FDMA, con canali larghi 7 MHz nella banda VHF e 8 MHz nella banda UHF.

## **5. Stazioni radio base per la telefonia cellulare**

### *5.1 La telefonia cellulare*

La telefonia cellulare è quella branca della telefonia pubblica il cui scopo è fornire un servizio telefonico senza fili, che permetta agli utenti (dotati di appositi *terminali*) di essere individuati e raggiunti ovunque si trovino e di fare o ricevere telefonate anche rimanendo in movimento a velocità sostenuta (per esempio in treno o in autostrada).

La telefonia cellulare funziona suddividendo il bacino d'utenza complessivo in *celle territoriali* (da cui il nome), ognuna delle quali è equipaggiata da una **stazione radio base** fissa (detta anche, con termine inglese, Base Transceiver Station, abbreviata in **BTS**) che, in termini semplici, stabilisce la connessione tra i terminali d'utente (detti comunemente **cellulari** o **telefonini**) presenti nel territorio della cella e la rete telefonica tradizionale.

Attualmente in Italia sono attivi, o in procinto di essere attivati, i seguenti tipi di servizi di telefonia cellulare pubblica.

Il sistema TACS (acronimo dell'inglese *Total Access Communication System*), che costituisce il servizio di telefonia cellulare analogica di prima generazione, con ambito di funzionamento limitato al territorio nazionale. Introdotto nel 1990, il TACS è stato dato in concessione unicamente all'operatore Tim e risulta oggi in fase di lento declino, seppure conti ancora numerosissimi abbonati.

Il sistema GSM (*Global System for Mobile communications*), ovvero il servizio radiomobile digitale europeo di seconda generazione. Varato sperimentalmente nel 1992 e commercializzato dal 1995, il GSM ha avuto negli ultimi anni una diffusione impressionante e viene oggi offerto da tre operatori (Omnitel, Tim e Wind).

Il sistema DCS (*Data Communication System*), che rispetta tutte le specifiche dello standard tecnico GSM, ma funziona ad una frequenza portante circa doppia (intorno ai 1800 MHz invece che ai 900 MHz del GSM tradizionale). Introdotto nel 1998 per aumentare la capacità di traffico telefonico della rete GSM, in modo da far fronte all'incredibile aumento della domanda di cui questo sistema è stato fatto oggetto, anche il DCS viene oggi offerto in Italia dagli operatori Omnitel, Tim e Wind. Pressoché tutti i moderni telefonini in circolazione sono in grado di utilizzare sia il sistema GSM sia il sistema DCS e vengono pertanto designati col termine *dual band*.

Il sistema DECT (*Digital European Cordless Telecommunications*), un servizio radiomobile a livello urbano, che costituisce l'estensione in ambito cittadino del concetto di *telefono cordless* domestico. È stato offerto negli anni passati in Italia da Telecom col nome commerciale di *rete Fido*, ma non ha riscontrato un grande successo ed è stato di fatto abbandonato.

Il sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) di terza generazione, sviluppato con l'obiettivo di rinnovare profondamente la rete di telefonia mobile, dotandola di caratteristiche tali da consentire lo scambio agevole non solo di messaggi di tipo vocale o testuale, ma anche di contenuti multimediali e di documenti audio e video, nonché la trasmissione di dati e l'accesso ad Internet ad alta velocità. Verrà presumibilmente commercializzato in Italia a partire dal 2003 dai cinque operatori che nel 2000 hanno vinto la gara di appalto delle licenze ministeriali: H3G (ex Andala 3G), Ipse 2000, Omnitel Pronto Italia, Telecom Italia Mobile e Wind Telecomunicazioni.

## 5.2 Principali differenze tra i vari servizi di telefonia cellulare

Dal punto di vista tecnico, i vari servizi di telefonia cellulare si differenziano per la banda di frequenza impiegata, il tipo di modulazione e la modalità di accesso multiplo e di duplexing adottate. Queste differenze si riflettono in modo complesso sulle caratteristiche del servizio offerto.

La *modulazione* è di tipo *analogico* solo per la telefonia TACS; tutte le tecniche più recenti (GSM, DCS, DECT, UMTS) utilizzano una modulazione *digitale*. Con la

modulazione analogica, il segnale audio da trasmettere viene convertito in una tensione variabile con continuità, che viene utilizzata per modificare la frequenza istantanea della portante a radiofrequenza (*modulazione di frequenza*), in modo simile a quanto avviene nella radiofonia FM. Con la tecnica digitale invece, il segnale audio viene convertito in forma numerica e quindi codificato in una sequenza di bit, che vengono sovrapposti alla portante a radiofrequenza.

La modulazione digitale presenta una migliore efficienza ed una maggiore immunità ai disturbi rispetto alla modulazione analogica e quindi consente di realizzare comunicazioni affidabili con livelli di potenza inferiori. Essa inoltre rende assai difficile l'intercettazione delle conversazioni che invece, nel caso dei TACS, risulta possibile anche con attrezzature relativamente semplici. Infine, mentre la modulazione analogica è orientata soprattutto alla trasmissione del *parlato*, le reti telefoniche a modulazione digitale possono ospitare con grande facilità anche la trasmissione di dati (come fax, messaggi, posta elettronica, pagine Internet).

Per quanto riguarda l'*accesso multiplo*, si trovano applicate nella telefonia - come si è già accennato - tutte le tecniche descritte nel precedente capitolo 4 (paragrafo 4.2). La telefonia TACS utilizza una tecnica FDMA pura, in cui la banda di frequenza assegnata al servizio viene suddivisa in canali larghi 25 kHz, ciascuno in grado di ospitare una ed una sola comunicazione. La telefonia GSM e la sua variante DCS utilizzano una tecnica mista FDMA+TDMA: ad ogni operatore sono assegnati numerosi canali larghi 200 kHz, ciascuno dei quali viene utilizzato da 8 comunicazioni per volta, suddivise nel tempo. Il periodo di suddivisione è lungo 4.6 ms (millesimi di secondo) ed ogni comunicazione ne può utilizzare a turno una "fetta" (*time slot*) pari ad 1/8 del totale, ovvero 0.58 ms circa. I cordless DECT impiegano invece un metodo TDMA un po' più rigoroso: in ogni cella territoriale si utilizza un unico canale, ripartendone nel tempo la disponibilità tra i vari utenti, mentre celle diverse utilizzano canali diversi. Per ogni cella, sono previste al massimo 12 conversazioni bidirezionali contemporanee, ciascuna delle quali può utilizzare il canale per un *time slot* di circa 0.8 ms ogni 10 ms. Infine, la telefonia UMTS di terza generazione utilizzerà una tecnica CDMA, con la quale tutti gli utenti che richiedono la comunicazione in una determinata area utilizzeranno lo stesso canale di frequenza (largo 5 MHz) nel medesimo intervallo di tempo; la distinzione tra le varie comunicazioni viene affidata ad una complessa operazione di codifica. Detto in termini semplici, a ciascuna comunicazione viene assegnata, al momento della trasmissione, una *firma elettronica digitale* univoca, che rende possibile a ciascun ricevitore distinguere la comunicazione di propria competenza e separarla dalla moltitudine delle trasmissioni contemporaneamente presenti sulla stessa frequenza. Per citare una analogia spesso utilizzata a proposito del metodo CDMA, è come se in una stanza si trovassero a parlare numerose coppie di persone, ciascuna utilizzante una lingua diversa: ognuno comprenderà quello che dice il suo interlocutore e percepirà come rumore di fondo le altre conversazioni, che avvengono in una lingua per lui incomprensibile.

Per venire infine al *duplexing*, la maggior parte dei servizi attivi (e cioè TACS, GSM e DCS) utilizza la tecnica FDD e quindi dispone di due intervalli di frequenze distinti, uno destinato alla comunicazione verso il cellulare (frequenze di *downlink*) ed uno destinato alla comunicazione verso la stazione radio base (frequenze di *uplink*). Anche UMTS dovrebbe utilizzare una tecnica FDD, sebbene per essa siano state ipotizzate entrambe le possibilità, a seconda del tipo di servizio da svolgere. Infine, i

cordless urbani in standard DECT utilizzano un metodo TDD, nel quale ogni periodo di 10 ms ospita di fatto 24 comunicazioni, di cui 12 in direzione downlink e altrettante in direzione uplink; ogni comunicazione può utilizzare il canale per 0.4 ms circa ogni periodo di 10 ms.

### 5.3 Caratteristiche del sistema TACS

Sebbene la diffusione del telefonino come oggetto di consumo di massa si debba senza dubbio collegare all'avvento dei più recenti sistemi GSM e DCS, tuttavia fu con l'entrata in esercizio della rete TACS che la telefonia mobile iniziò ad acquisire popolarità, cessando di essere un fenomeno di elite. Ciò si deve anche alle buone caratteristiche dello standard TACS, nel quale iniziarono ad essere impiegate tecniche come la ripartizione dei canali tra le celle ed il riutilizzo delle frequenze, che poi verranno riprese dallo standard GSM e notevolmente perfezionate grazie all'impiego della tecnologia digitale.

Allo standard TACS sono oggi riservate due bande di frequenza (una di *uplink* ed una di *downlink*) ampie 33 MHz ciascuna, suddivise in canali di 25 kHz, per complessivi 1320 canali FDMA/FDD, ciascuno in grado di ospitare una ed una sola conversazione. L'operatore unico nazionale (Tim) ripartisce questi canali tra le varie celle, in modo da ottimizzare il rapporto tra capacità di traffico (assegnando più canali nelle celle con maggiori esigenze) e rischio di interferenze. Se indichiamo con  $N_p$  il numero di canali (detti anche in gergo "portanti") assegnati ad una cella e con  $P_p$ , la potenza di cui dispone ciascuno di essi (in genere uguale per tutti i canali), la potenza massima complessiva  $P_{BTS}$  prodotta dai trasmettitori che equipaggiano la cella è data da:

$$P_{BTS} = N_p \cdot P_p \quad (11)$$

### 5.4 Caratteristiche del sistema GSM-DCS

Protagonista negli anni passati di una incredibile espansione, la rete GSM rappresenta oggi il servizio di telefonia mobile che riscuote di gran lunga il maggior consenso tra gli utenti. Poiché ad esso afferisce il maggior numero di stazioni radio base attualmente presenti sul territorio nazionale, è senza dubbio opportuno dedicare al sistema GSM una particolare attenzione e descriverne con un certo dettaglio le caratteristiche.

La diffusione delle stazioni radio base GSM nei centri abitati è talmente capillare da generare qualche perplessità. Ci si chiede in particolare se sia proprio indispensabile inserire così tante stazioni direttamente nel tessuto urbano e se non sarebbe possibile invece sistamarle sulle alture fuori delle città, come avviene in genere per i trasmettitori radiotelevisivi. La domanda è ancora più sensata se si considera che lo standard GSM classico impiega frequenze assai vicine a quelle utilizzate dai più alti canali televisivi, al punto che è ragionevole attendersi nei due casi delle modalità di propagazione completamente analoghe.

In realtà, vi sono alcune limitazioni tecniche che rendono sconsigliabile il posizionamento delle stazioni radio base GSM sulla cima delle colline o in altri siti isolati collocati in posizioni panoramiche. Innanzitutto, il ritardo massimo di propagazione del segnale elettromagnetico che può essere compensato da una stazione radio base è limitato a circa 233 microsecondi. Poiché in questo intervallo il campo elettromagnetico copre una distanza di circa 70 km, se un telefonino si trova a più di 35 km circa dalla stazione, non può essere gestito correttamente. In secondo luogo, si deve

ricordare che allontanare la stazione radio base dagli utenti dei cellulari significa imporre che nella comunicazione radio venga utilizzata una potenza maggiore. Se in genere non sussistono problemi per la stazione, che dispone di potenza più che sufficiente e di autonomia illimitata, vi possono invece essere conseguenze negative per il cellulare, per quanto riguarda sia l'esposizione dell'utilizzatore sia l'autonomia di funzionamento dell'apparecchio. Maggior distanza da coprire significa infatti maggior potenza emessa e questo implica un più rapido esaurimento delle batterie. Infine, vi è una questione legata all'efficienza del servizio offerto. Infatti, come vedremo, il numero di comunicazioni contemporanee che possono aver luogo in ciascuna cella è limitato. Se la cella è di dimensioni troppo grandi, questo numero viene ad essere conteso da troppi utenti, con alta probabilità di mancato servizio, specie nelle aree ad alta densità di popolazione.

#### 5.4.1 Pianificazione della rete GSM-DCS

Alla telefonia GSM sono oggi riservati in tutto 548 canali di *downlink* (ed altrettanti di *uplink*), ciascuno largo 200 kHz ed in grado di ospitare fino ad un massimo di 8 conversazioni simultanee. Di questi canali, 174 sono assegnati alla banda GSM classica (sui 900 MHz) e 374 alla banda DCS (sui 1800 MHz).

Ogni operatore titolare di licenza ministeriale ha ottenuto in concessione il diritto di utilizzare in esclusiva sul territorio nazionale un certo numero di tali canali, dell'ordine di alcune decine: per esempio, all'operatore Tim sono stati assegnati in tutto 81 canali (57 GSM-900 e 24 DCS-1800, dati aggiornati al 1999). L'operatore può decidere liberamente come distribuire i canali a lui riservati tra le celle che intende attivare, ma deve fare i conti con alcuni vincoli oggettivi.

A prima vista, potrebbe sembrare conveniente utilizzare in ogni cella tutti i canali disponibili, in modo da massimizzare la disponibilità di traffico nella cella stessa. Questa soluzione, consentendo di realizzare celle molto ampie, avrebbe anche il vantaggio di minimizzare il numero di stazioni radio base presenti sul territorio, con evidenti vantaggi in termini economici e di impatto visivo. Purtroppo però essa non è realizzabile in pratica, a causa della cosiddetta **interferenza di cocanale**, consistente nel reciproco disturbo tra due o più conversazioni che utilizzano lo stesso canale in celle territoriali vicine. L'interferenza di cocanale rappresenta una delle principali cause di possibile deterioramento della qualità del servizio GSM.

La soluzione diametralmente opposta, consistente nel assegnare ad ogni cella un solo canale e nel non utilizzare mai lo stesso canale in due celle diverse, porterebbe alla completa eliminazione del problema dell'interferenza, ma costringerebbe a fare celle molto piccole e consentirebbe di fornire copertura solo ad una porzione molto ridotta del territorio nazionale.

La soluzione ottimale richiede quindi un compromesso, nel quale da una parte si assegna ad ogni cella solo una piccola parte dei canali ricevuti in concessione e dall'altra si riutilizzano più volte gli stessi canali in celle diverse, purché ragionevolmente distanti le une dalle altre, in modo da scongiurare il rischio di interferenza. In pratica, nel pianificare una rete GSM ogni operatore deve conformarsi ai tre criteri che seguono.

1. Assegnare ad ogni cella un numero di canali (compreso in genere da un minimo di 1 ad un massimo di 6) proporzionato al traffico telefonico che ritiene di dover servire nella cella stessa. Qualora tale numero dovesse successivamente rivelarsi insufficiente (per esempio per aumentata richiesta di traffico), l'operatore può

decidere di aumentarlo (se possibile) oppure diminuire l'estensione della cella stessa, in modo che i canali presenti siano messi a disposizione di un bacino di utenza più limitato. Ovviamente., in questo secondo caso nuove celle dovranno essere attivate (e nuove stazioni radio base dovranno essere installate) per servire le zone rimaste scoperte.

2. Distribuire i canali tra le celle in modo che uno stesso canale non sia mai utilizzato in due celle tra loro confinanti; riutilizzare quindi i canali attivati in una data cella solo in altre celle non confinanti con essa.
3. Calibrare la potenza impiegata in ogni cella in modo che il segnale emesso copra una regione di territorio poco più ampia dell'estensione della cella stessa; potenze maggiori non servono, poiché le celle immediatamente circostanti dispongono di altre stazioni che utilizzano frequenze diverse.

Come conseguenza di questa impostazione, è facile rendersi conto che, in ultima analisi, la soluzione più radicale ed efficace per aumentare la disponibilità di traffico telefonico in una data area consiste nell'utilizzare celle di dimensioni più piccole, equipaggiate con trasmettitori di potenza più bassa. Una diminuzione generalizzata delle dimensioni delle celle comporta evidentemente un loro aumento di numero e quindi un aumento delle stazioni radio base sul territorio. Oltre a migliorare la qualità del servizio, una scelta di questo tipo comporta anche altri vantaggi, come la minore emissione da parte dei telefonini (poiché vengono a trovarsi in media più vicini alle stazioni radio base) e la loro maggiore autonomia di funzionamento (la batteria ha durata maggiore perché l'apparecchio impiega mediamente una potenza inferiore). Come sempre, vi sono anche degli svantaggi, che consistono principalmente in un maggior impatto visivo, una maggior complessità della rete (e quindi una minore affidabilità dell'intero sistema), maggiori oneri economici di installazione e di gestione.

#### 5.4.2 Potenza emessa da una stazione radio base GSM-DCS

Al fine sia di minimizzare il rischio delle interferenze, sia di risparmiare energia ed aumentare così l'autonomia consentita dalle batterie del telefonino, nella telefonia GSM vengono adottati dispositivi automatici quali il *controllo della potenza* emessa e la *trasmissione discontinua*. Grazie al **controllo della potenza**, tanto il telefonino quanto la stazione radio base operano, in ogni situazione, al valore minimo di potenza che assicura una accettabile qualità di servizio. La **trasmissione discontinua** consiste invece nell'interrompere l'emissione di potenza durante le normali pause del parlato.

Più esattamente, ogni stazione radio base GSM diffonde in continuazione, anche in assenza di telefonate, un segnale "di servizio" a piena potenza su un canale ben preciso (il **canale principale** della stazione, denominato in linguaggio tecnico *Broadcast Control Channel* ed indicato con la sigla BCCH). Detto in termini semplici, questo segnale ha lo scopo di rendere nota la presenza della stazione ai telefoni cellulari che si trovano nell'area servita dalla stazione stessa. Il *canale principale* è anche in grado di ospitare fino a 7 conversazioni simultanee, senza alcun aumento della potenza emessa. Al canale principale si possono eventualmente aggiungere altri canali, se predisposti nella stazione, che vengono attivati solo in caso siano richieste ulteriori conversazioni oltre a quelle che possono essere ospitate dal canale principale. Ogni canale aggiuntivo può ospitare 8 nuove conversazioni simultanee, ma i relativi *time slot* saranno attivati solo se necessario; su questi canali aggiuntivi (ma non sul canale principale) sono attivate anche le funzionalità di *controllo della potenza* e di *trasmissione discontinua*. La potenza emessa da questi canali secondari varia quindi da 0 (quando il canale non è

impegnato) ad un valore massimo  $P_{MAX}$  (quando il canale è impegnato con tutti i *time slot* attivi alla massima potenza). Il valore istantaneo dipende dal numero di conversazioni contemporaneamente attive, dalla distanza dei relativi telefonini e dalla direzione del flusso delle conversazioni.

L'intensità complessiva della radiazione emessa da una stazione radio base GSM dipende pertanto istante per istante da numerosi parametri tra cui:

- il **traffico**, ovvero numero di telefonate che la stazione gestisce in quel momento (in linea di massima, più grande è tale numero, maggiore è la potenza complessiva emessa);
- la distanza dei telefonini collegati (più lontani sono i telefonini, maggiore è la potenza necessaria a raggiungerli);
- il “verso” della conversazione: quando è l'utente del telefonino a parlare, la stazione non emette potenza; quando l'utente del telefonino ascolta, la stazione radio base emette la potenza necessaria ad inviargli la voce dell'interlocutore.

L'intensità (e quindi l'ampiezza del campo elettrico e del campo magnetico in ogni punto raggiunto) può dunque variare notevolmente nel tempo. In ogni istante, essa potrà essere compresa tra un **valore minimo** ed un **valore massimo**. Il *valore minimo* corrisponde al contributo del solo canale principale. Il *valore massimo* si verifica quando al canale principale si uniscono i contributi di tutti i canali aggiuntivi installati nella stazione e questi emettono alla massima potenza possibile.

In definitiva, se in una cella sono installati  $N$  canali e ciascuno utilizza un trasmettitore di potenza massima  $P_{MAX}$  (in genere uguale per tutti i canali di una stessa cella), la potenza complessiva  $P_{BTS}$  prodotta dai trasmettitori che equipaggiano la cella è data da:

$$P_{BTS} = P_{MAX} + (N - 1) \cdot P_{MAX} \cdot \alpha_{TRAF} \alpha_{PC} \alpha_{DTX} \quad (12)$$

dove si è indicato con  $\alpha_{TRAF}$  il fattore di riduzione dovuto al *traffico*,  $\alpha_{PC}$  il fattore dovuto al *controllo della potenza* e  $\alpha_{DTX}$  quello dovuto alla *trasmissione discontinua*. I valori dei tre coefficienti non sono noti in modo deterministico, poiché dipendono da parametri casuali. Stime di tipo statistico portano a prevedere per gli ultimi due un valore tipico pari a circa 0.7, mentre il fattore dovuto al traffico viene normalmente considerato pari a 1 (si immagina cioè, in via cautelativa, che la stazione gestisca quasi sempre il massimo numero possibile di conversazioni simultanee).

#### 5.4.3 Antenne per le stazioni radio base GSM-DCS

Le antenne trasmettenti impiegate nelle stazioni radio base della telefonia cellulare GSM sono di vario tipo. In modo sommario, possiamo distinguere le antenne *omnidirezionali* (o a *basso guadagno*) e le antenne *settoriali* (o ad *alto guadagno*).

Le prime, meno frequenti, hanno la forma di uno stilo filiforme e trovano impiego soprattutto in aree extraurbane a bassa densità abitativa. Una singola antenna di questo tipo è in grado di “coprire” un'area (o *cella*) circolare estesa intorno ad essa fino ad una distanza che dipende dalla potenza del trasmettitore che la alimenta.

La soluzione più diffusa nelle grandi città utilizza però antenne del secondo tipo, che hanno la forma di pannelli verticali alti e stretti. Una configurazione assai tipica è quella in cui un unico sostegno (costituito per lo più da un traliccio posto sul tetto di un edificio o in cima ad un apposito palo o torrino) ospita - ad un' altezza dal suolo che può variare dai 15 ai 50 metri - le antenne per gestire il servizio radiomobile di tre *celle* di territorio contigue, aventi un vertice in comune e disposte in modo da suddividere l' area

circostante la stazione in tre parti grossomodo uguali. In questo caso, nella stazione si impiegano tre sistemi di antenne (uno per ogni cella), ciascuno orientato in modo da puntare lungo la direzione centrale della cella servita, cosicché le tre direzioni di puntamento orizzontale formano tra di loro angoli di ampiezza approssimativamente pari a  $120^\circ$ .

Nel caso più semplice, il sistema di antenne di ciascuna cella è costituito da un solo pannello, che svolge tanto la funzione trasmittente quanto la funzione ricevente; nel sito sono quindi presenti in tutto solo tre pannelli. In altri casi, vi sono due pannelli per ogni cella (quindi sei pannelli in tutto), di cui uno con funzione trasmittente ed uno con funzione ricevente. Il caso forse più comune è quello in cui si usano tre pannelli per ogni cella (quindi nove pannelli in tutto), di cui due con funzione ricevente ed uno (quello in posizione centrale) con funzione trasmittente; le installazioni di questo tipo hanno un tipico aspetto “a triplo candeliere”. In alcuni casi infine, i pannelli sono addirittura quattro per cella (e cioè dodici in tutto), perché vi sono due pannelli anche per la funzione trasmittente; di questi, solo uno viene però utilizzato per il servizio GSM, mentre l'altro svolge il servizio TACS.

Ciascun pannello presenta nella parte posteriore una superficie metallica riflettente, mentre anteriormente l'antenna è ricoperta da un contenitore di materiale plastico avente funzione di protezione dagli agenti atmosferici.

Un tipico pannello settoriale trasmittente per stazione radio base può avere per esempio un guadagno  $G_{\text{dBi}}$  di 17 dBi (quindi un guadagno  $G_{\text{MAX}}$  circa uguale a 50); più in generale, sono comuni valori di guadagno compresi tra 7 e 20 dBi.

Le antenne a pannello hanno in genere una lunghezza verticale compresa tra 1 e 2.5 metri, quindi relativamente grande rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione emessa; la larghezza orizzontale è invece sensibilmente inferiore (15 - 30 cm). Per questo motivo, il fascio irradiato risulta piuttosto stretto sul piano verticale e più ampio sul piano orizzontale. Valori tipici della *larghezza a metà potenza* possono essere rispettivamente compresi tra  $5^\circ$  e  $15^\circ$  sul piano verticale e tra  $60^\circ$  a  $90^\circ$  sul piano orizzontale, ma vi è molta variabilità a seconda delle specifiche esigenze.

La direzione di massima radiazione è orizzontale (frontale al pannello) o lievemente inclinata verso il basso; l'eventuale inclinazione, detta *tilt*, è anch'essa dell'ordine di  $5^\circ$  -  $15^\circ$ . Il tilt può essere ottenuto sia modificando la posizione del pannello in fase di installazione (*tilt meccanico*), sia intervenendo sul diagramma di radiazione verticale in fase di progetto dell'antenna (*tilt elettrico*).

#### 5.4.4 Livelli tipici di campo elettromagnetico nel sistema GSM-DCS

Per una valutazione esemplificativa dei livelli di campo che possono essere presenti lungo la direzione di massima radiazione dell'antenna, facciamo riferimento ad una ipotetica stazione radio base GSM operante con una potenza  $P_{\text{BTS}}$  di 20 W ed un guadagno  $G_{\text{dBi}}$  di 17 dBi (equivalente a  $G_{\text{MAX}} = 50$ ). Applicando le (1) e (2) (con  $P_{\text{alim}} = P_{\text{BTS}}$ ), si trova che i limiti di 20 V/m e di 6 V/m prescritti dal Decreto 381/1998 si raggiungono rispettivamente a poco meno di 9 metri ed a circa 29 metri dal *centro elettrico* dell'antenna. Oltre quest'ultima distanza, si è sicuramente al di sottodelle disposizioni normative italiane, che ricordiamo essere tra le più cautelative esistenti.

Se si esce dalla direzione di massima radiazione, l'intensità del campo si attenua rapidamente a causa della riduzione operata dalla *funzione guadagno*  $G(\theta, \varphi)$  (si veda l'equazione (8)), soprattutto muovendosi in direzione verticale. Per questo motivo, i

valori che ci si possono attendere negli edifici prossimi alla stazione, ma più bassi di quella, sono sempre piuttosto ridotti. Anche facendo riferimento ai punti più esposti (come terrazzi, balconi e finestre), difficilmente si supererà 1 V/m, un valore dello stesso ordine del fondo ambientale talvolta presente nell'ambiente urbano a causa delle emissioni degli apparati radiotelevisivi. Una abitazione distante dall'antenna, ma abbastanza alta da intercettare la direzione di massima radiazione, potrebbe pertanto risultare più esposta di una abitazione più vicina, ma più bassa.

Spostandosi verso l'interno degli edifici, ci si devono ovviamente attendere valori ancora inferiori di quelli rilevabili all'esterno, a causa dell'azione schermante delle pareti. Per questo motivo, risulta spesso difficile utilizzare il telefonino nei locali più interni di una abitazione.

### 5.5 Caratteristiche del sistema UMTS

Sebbene UMTS venga talvolta presentato come "sistema di telefonia mobile di terza generazione", è alquanto riduttivo limitarsi a considerarlo un servizio di telefonia. Esso consiste piuttosto in una complessa *piattaforma di comunicazione mobile multiservizi a banda larga e copertura globale*.

Si tratta di un sistema **multiservizi**, perché nasce fin dall'inizio per dare supporto ad una grande varietà di servizi di telecomunicazione diversi tra cui, oltre alla tradizionale fonìa, rientrano la trasmissione dati ad alta velocità e la comunicazione multimediale audio/video di buona qualità. Da questo punto di vista, il sistema sarà caratterizzato da una certa scalabilità delle prestazioni, che dovrebbe permettere agli operatori di offrire, zona per zona, i servizi di interesse per l'utenza prevista nella zona stessa. Questo comporterà anche la necessità di individuare il miglior compromesso tra alcune caratteristiche parzialmente in conflitto tra loro, come le dimensioni delle celle, la velocità di trasmissione dei dati, la rapidità di spostamento dell'utente ed il numero di utenti che possono essere serviti contemporaneamente. La velocità di trasmissione dati, in particolare, potrà arrivare a 2 Mbit/s per utenti fissi o a bassa mobilità, per ridursi fino a 144 kbit/s al crescere della mobilità dell'utente, per la quale è previsto un limite massimo di 500 km/h. È ragionevole attendersi che nelle zone extraurbane saranno privilegiati gli aspetti legati alle dimensioni delle celle ed alla rapidità di spostamento, mentre in ambiente urbano sarà più importante garantire una elevata velocità di trasmissione dati ed una buona disponibilità del servizio.

UMTS si propone anche l'obiettivo della **copertura globale**, da ottenersi attraverso l'integrazione tra la rete terrestre (identificata dalla sigla **UTRAN**, *Umts Terrestrial Radio Access Network*) ed i collegamenti satellitari. A ciascuna delle due modalità sono state assegnate specifiche bande di frequenza, come appare in Tabella 4. Per la componente terrestre, vi è anche la distinzione tra **servizi a traffico simmetrico** (il più comune dei quali è la *conversazione telefonica*) e **servizi a traffico asimmetrico** (adatti per alcune tecniche di trasmissione dati, prima fra tutte la navigazione Internet). I primi utilizzeranno una modalità duplex di tipo FDD ed un accesso multiplo di tipo W-CDMA (un metodo ibrido FDMA-CDMA); i secondi utilizzeranno invece un approccio misto TDMA-FDMA-CDMA (denominato TD-CDMA) per l'accesso multiplo ed una modalità duplex a divisione di tempo (TDD).

Prescindendo dai protocolli tecnici ufficiali, complessi ed estremamente dettagliati, le informazioni generali disponibili per UMTS non hanno ancora raggiunto la maturità, la diffusione e l'accessibilità che troviamo, per esempio, per il GSM. I protocolli stessi,

inoltre, prevedono un certo ventaglio di possibili soluzioni e configurazioni alternative, tra le quali i gestori dei servizi opereranno le scelte opportune, in modo da adeguare le prestazioni offerte alla domanda attesa. Alcuni aspetti tecnici non saranno pertanto completamente definiti prima che le reti UTRAN siano state effettivamente realizzate e prenda avvio l'offerta commerciale.

A quanto si sa, i primi ad essere disponibili saranno i servizi di tipo *terrestre simmetrico*. Poiché essi utilizzeranno, come si è detto, la tecnica FDD, sono state riservate loro due bande di frequenza appaiate, di 60 MHz ciascuna, una per l'*uplink* (comunicazione verso la stazione) e una per il *downlink* (comunicazione verso il terminale mobile). La banda di 60 MHz è stata ripartita in 12 canali larghi 5 MHz, distribuiti tra gli operatori in ragione di due o tre canali ciascuno; hanno ricevuto due canali gli operatori già titolari di licenza GSM (Tim, Omnitel e Wind), mentre i nuovi operatori (H3G e Ipse) hanno ricevuto tre canali.

Ogni operatore dovrebbe utilizzare in ogni cella tutti i propri canali ed ogni canale sarà equipaggiato da un trasmettitore con potenza di uscita complessiva massima  $P_{MAX}$  che dovrebbe arrivare a 20 o 40 W. Meccanismi di *controllo della potenza* e di *trasmissione discontinua* ancora più efficaci di quelli impiegati nel GSM potranno introdurre una certa variazione nel livello di potenza irradiata, con l'obiettivo di garantire la necessaria immunità alle interferenze. La principale fonte di variazione del livello emesso proverrà però dalla *variabilità del traffico* in corso, dato che ad ogni comunicazione utente deve essere assegnata una certa potenza, che si va a sommare a quella associata alle comunicazioni utente già attive ed alle comunicazioni di servizio, che ovviamente devono essere trasmesse di continuo ed a potenza costante.

Col metodo W-CDMA, all'interno di una cella varie comunicazioni utilizzano *lo stesso canale nello stesso intervallo di tempo* e se ne spartiscono la potenza. La separazione tra le diverse comunicazioni avviene associando ad ognuna - con una procedura detta **spreading** - un codice numerico univoco (detto *sequenza di spreading*). Il ricevitore, utilizzando il medesimo codice in un procedimento di **despreading**, è in grado di riconoscere la trasmissione di propria competenza, mentre percepisce le altre (associate a codici diversi) unicamente come *rumore di fondo*. Con questa tecnica, in uno stesso canale a radiofrequenza largo 5 MHz vengono immessi - ciascuno con la propria *sequenza di spreading* - tanto i canali<sup>1</sup> di segnalazione e servizio (*canali di controllo*) quanto quelli di traffico dell'utenza. I primi devono essere trasmessi continuamente e a potenza costante, i secondi sono presenti solo quando sono attive una o più comunicazioni utente; a questi ultimi si applicano gli algoritmi di controllo della potenza e di trasmissione discontinua.

Il limite del sistema (inteso come massimo numero di comunicazioni utente simultanee consentite, che dovrebbe essere dell'ordine di 100-200 per canale) può essere raggiunto o per esaurimento delle *sequenze di spreading* disponibili o, più spesso, quando il *rumore di fondo* dovuto alle comunicazioni estranee arriva a livelli che rendono impossibile il riconoscimento affidabile di quella codificata con la giusta

---

<sup>1</sup> Si faccia attenzione ai due significati distinti del termine *canale*; esso viene usato per indicare tanto l'intervallo di frequenza largo 5 MHz associato a ciascuna portante a radiofrequenza, quanto ciascun flusso di dati da trasmettere. I flussi di dati possono essere generati sia dalle informazioni di segnalazione e servizio (*canali di controllo*), sia dalle comunicazioni utente (*canali di traffico*). Su una stessa portante, ovvero in uno stesso canale a radiofrequenza, vengono inseriti tanto i canali di controllo quanto un certo numero di canali di traffico.

sequenza, oppure infine quando il trasmettitore non dispone della potenza necessaria ad attivare una nuova conversazione.

Quest'ultimo è il limite che ci interessa evidenziare maggiormente in questa sede, in quanto direttamente legato alla potenza massima emessa dalla stazione e quindi all'intensità del campo elettromagnetico generato. Poiché ad ogni comunicazione uscente deve essere assegnata una certa potenza, quando la potenza impegnata nelle conversazioni attive si avvicina alla potenza massima  $P_{MAX}$  disponibile al generatore può divenire impossibile attivare nuove conversazioni. Essendo inoltre necessario garantire un certo margine alle conversazioni già in corso (che potrebbero trovarsi ad aver bisogno di maggior potenza, per esempio in caso di allontanamento del terminale mobile o di peggioramento del collegamento per altri motivi), il sistema prevede il rifiuto di ulteriori conversazioni quando si raggiunge una potenza complessiva emessa pari ad una frazione prefissata "s" della potenza massima disponibile  $P_{MAX}$ . Il valore del parametro "s" viene deciso dall'operatore in base ad un compromesso tra qualità e disponibilità del servizio e si presume sarà compreso tra 0.5 e 0.9. Una valutazione cautelativa su base statistica della potenza massima emessa da una stazione radio base UMTS con N canali portanti può quindi essere espressa dalla relazione:

$$P_{BTS} = s \cdot P_{MAX} \cdot N \quad (13)$$

Oltre al parametro "s", un altro importante parametro operativo impostabile dall'operatore è il rapporto  $\rho$  tra la potenza dedicata ai canali di controllo e la potenza massima  $P_{MAX}$ . Maggiore è questa potenza (ovvero maggiore è il valore del parametro  $\rho$ ), più ampia è la zona coperta dalla stazione, ma minore è la potenza che resta disponibile per il flusso dati di traffico e quindi il numero di utenti servibili simultaneamente. A seconda della dimensione della cella, il parametro  $\rho$  dovrebbe assumere valori compresi tra 1% e 15%: valori bassi si adattano a celle piccole e ad alto traffico (celle urbane), valori maggiori a celle grandi e a basso traffico (celle extraurbane).

Per chi si occupa degli aspetti protezionistici, il parametro  $\rho$  riveste particolare importanza soprattutto dal punto di vista misuristico. È infatti evidente che, se tale parametro è noto, allora eseguendo una misura della sola intensità associata ai *canali di controllo* si può risalire alla intensità massima che sarebbe irradiata qualora fosse attivo il massimo numero di comunicazioni simultanee possibili.

### 5.6 Principali differenze tra telefonia cellulare e diffusione radiotelevisiva

Le principali differenze tra diffusione radiotelevisiva e telefonia cellulare consistono in sintesi nei tre punti seguenti.

1. L'emittenza televisiva impiega trasmettitori con potenze EIRP notevolmente più alte (fino a circa 100 kW) di quelle in uso in telefonia (massimo circa 2 kW), a causa della maggior distanza che normalmente intercorre tra trasmettitore e ricevitore. Questo è dovuto alla grande capillarità di diffusione sul territorio delle stazioni radio base della telefonia cellulare, che non ha riscontro nel settore televisivo, dove i trasmettitori sono relativamente pochi e concentrati in genere in siti isolati.
2. La televisione è unidirezionale (il segnale viaggia soltanto dal ripetitore verso l'apparecchio ricevente), mentre la telefonia è ovviamente bidirezionale. Ciò determina una grande diffusione nell'ambiente di piccoli trasmettitori (i telefonini), con potenze senza dubbio modeste (fino a qualche watt), ma in grado di determinare nell'utente una esposizione localizzata non necessariamente trascurabile.

3. Per motivi tecnici legati al problema della cosiddetta "interferenza di cocanale", gli standard tecnici alla base dei più moderni servizi di telefonia mobile (GSM, DCS, UMTS) mettono automaticamente in atto il principio della riduzione dell'emissione al minimo valore possibile, per mezzo di dispositivi come il *controllo della potenza emessa* o la *trasmissione discontinua*. Niente del genere avviene, invece, nel caso delle trasmissioni televisive, dove anzi l'esigenza di imporsi sulla concorrenza spinge talvolta verso un aumento indiscriminato delle potenze dei trasmettitori.

## 6. Algoritmo di calcolo per il campo elettromagnetico emesso dalle stazioni radio base della telefonia cellulare

L'analisi delle principali caratteristiche tecniche dei sistemi di telefonia mobile svolta nel capitolo precedente ci permette ora di affrontare la discussione dei modelli di calcolo utilizzati per prevedere i livelli di campo elettromagnetico irradiato da una stazione radio base. Ci limiteremo al più semplice dei modelli disponibili, basato sulla **modalità di propagazione nello spazio libero** che, come si è già avuto occasione di osservare, si applica a rigore solo nella regione dei *campi radiativi lontani* ed in totale *assenza di ostacoli*, ma che comunque, quando queste condizioni non sono completamente rispettate, porta quasi sempre a sovrastimare l'intensità del campo, fornendo pertanto stime di tipo **cautelativo**. Esistono ovviamente anche modelli più avanzati, tra i quali ricordiamo:

- il **metodo dei singoli elementi**, adatto a valutazioni che si spingono nella regione dei *campi radiativi vicini*, ma ancora in condizioni di assenza di ostacoli;
- i modelli basati sull'**ottica geometrica**, che permettono di tenere parzialmente conto degli ostacoli (cioè del suolo e degli edifici), prendendo in considerazione la riflessione su superfici di vario tipo;
- i modelli basati sulla **teoria geometrica della diffrazione**, in grado di dar conto anche delle zone di penombra provocate dai fenomeni di diffrazione su spigoli e bordi.

Vista la quantità e la complessità delle informazioni richieste, l'utilizzo dei modelli più avanzati è giustificato solo in situazioni particolari o quando vi siano esigenze di grande accuratezza. Il modello basato sulla *condizione di spazio libero*, viceversa, fornisce, in modo relativamente semplice e rapido, valutazioni che dovrebbero risultare adeguate a soddisfare molte delle esigenze delle istituzioni pubbliche che si occupano di sorveglianza fisica delle sorgenti di campo elettromagnetico.

Occorre anche ricordare che, mentre il modello in spazio libero conduce a descrivere il problema per mezzo di equazioni algebriche ed è quindi, in linea di principio, interamente risolvibile per via analitica, i modelli avanzati portano in alcuni casi a formulazioni basate su equazioni differenziali o integrali, per la cui soluzione è necessario ricorrere ai metodi numerici. Tra questi, i più frequentemente impiegati nei problemi di elettromagnetismo sono il *metodo dei momenti*, il *metodo degli elementi finiti* ed il *metodo delle differenze finite nel dominio del tempo*.

L'applicazione pratica dell'approccio basato sul *modello di propagazione nello spazio libero* può essere convenientemente descritta sulla base della successione di passi sotto riportata. Essa si rifa direttamente alle indicazioni contenute nei paragrafi 6.4.2 e 6.4.3 della già citata norma CEI 211-10 "Guida alla realizzazione di una Stazione Radio

*Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza*”, pubblicata dal Comitato Elettrotecnico Italiano nell’aprile 2002.

### 6.1 Sistema di riferimento globale

Il primo passo consiste nella definizione del **sistema di riferimento globale**. Si tratta di un sistema di riferimento cartesiano ortogonale avente origine in un qualunque punto O della zona soggetta ad indagine, asse  $X_G$  diretto orizzontalmente verso l’est geografico, asse  $Y_G$  diretto orizzontalmente verso il nord e asse  $Z_G$  diretto verticalmente verso lo zenit.

In questo sistema di riferimento, indicheremo con  $(x_G, y_G, z_G)$  le coordinate - supposte note - del cosiddetto **punto potenziato**, ovvero del generico punto P dove si vuole determinare l’intensità del campo elettromagnetico.

### 6.2 Selezione delle sorgenti

Dovranno essere successivamente identificati tutti i *siti trasmettenti* che si ritiene producano un contributo significativo al campo totale nel punto potenziato P. Per ciascuno di essi, dovranno essere eseguiti i passi 6.3 - 6.5 che seguono, che conducono alla determinazione di tale contributo.

### 6.3 Potenza di alimentazione

Nelle considerazioni sulla telefonia cellulare svolte nel capitolo 5 abbiamo più volte fatto riferimento alla potenza  $P_{BTS}$  emessa dalle stazioni radio base (si vedano le equazioni (11), (12) e (13)). D’altro canto, per la determinazione dei livelli di campo, si richiede invece di conoscere la potenza  $P_{alim}$  con cui è alimentata l’antenna del *sito trasmittente* (vedere equazioni (2), (6), (8) e (9)). Le due grandezze sono collegate, ma non coincidenti. Come infatti abbiamo già avuto modo di osservare, una parte talvolta anche cospicua della potenza generata dalla BTS non raggiunge l’antenna, ma viene persa sotto forma di calore o di riflessioni nelle strutture attraversate dal segnale a radiofrequenza nel suo percorso dal trasmettitore all’antenna stessa: la linea di collegamento, gli eventuali divisori di potenza, i filtri etc.

In linea del tutto generale, indicando con  $G (>1)$  il coefficiente di amplificazione di eventuali amplificatori posti lungo il percorso del segnale e con  $A (>1)$  il coefficiente di attenuazione complessiva dovuto alla linea di collegamento ed agli altri dispositivi attraversati (compresa, a rigore, la perdita di potenza che avviene nella stessa antenna, poiché nessuna antenna irradia mai tutta la potenza che riceve), la potenza di alimentazione da impiegare nelle relazioni per il calcolo dei campi risulta espressa da:

$$P_{alim} = \frac{P_{BTS} \cdot G}{A} \quad (14)$$

### 6.4 Sistema di riferimento locale

L’applicazione dell’equazione (6) per determinare il contributo di un dato *sito trasmittente* al campo complessivo presente nel punto potenziato P richiede che si conoscano, oltre alla *potenza di alimentazione*, anche il *guadagno massimo* ed il *diagramma di radiazione* dell’antenna che equipaggia il sito, nonché la distanza tra il punto P ed il centro elettrico A dell’antenna, che supporremo avere coordinate  $(x_A, y_A, z_A)$  nel sistema di riferimento globale sopra definito.

Nella formulazione dell'equazione (6), era sottinteso che distanza e angoli fossero riferiti al cosiddetto *sistema di riferimento locale* dell'antenna considerata; metteremo in evidenza questo aspetto riscrivendo per comodità la (6) nella forma seguente:

$$S(r_L, \theta_L, \varphi_L) = \frac{G_{MAX} \cdot D(\theta_L, \varphi_L) \cdot P_{alim}}{4\pi r_L^2} \quad (15)$$

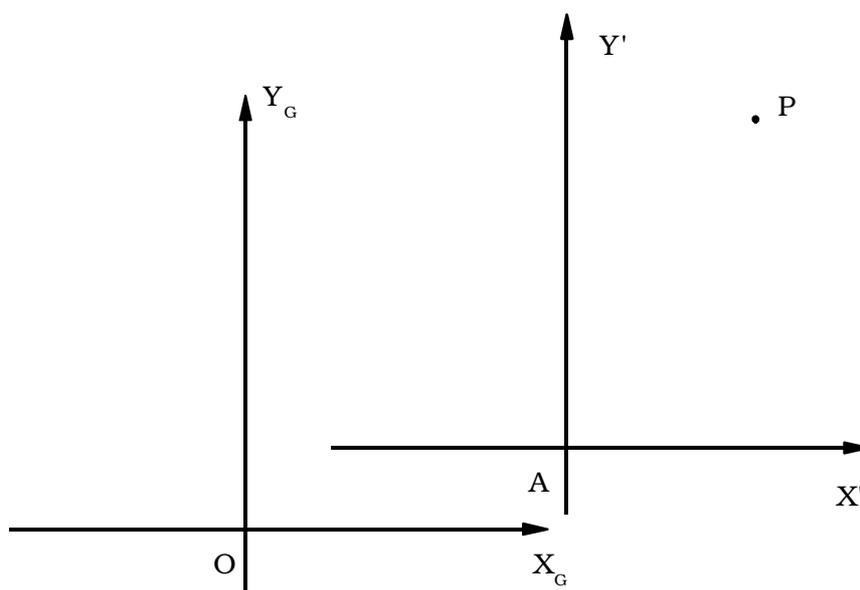
Il sistema di riferimento locale ha origine nel centro elettrico A dell'antenna trasmittente, asse  $X_L$  coincidente con la direzione di puntamento meccanico dell'antenna stessa, asse  $Y_L$  orizzontale e asse  $Z_L$  determinato in modo da costituire una terna destrorsa. Come si capisce, questo sistema di riferimento tiene automaticamente conto di un eventuale *tilt meccanico* dell'antenna, mentre il *tilt elettrico*, se esiste, viene gestito attraverso il diagramma di radiazione di potenza.

### 6.5 Trasformazione di coordinate

Poiché le coordinate del punto potenziato P sono note nel sistema globale, occorre applicare una opportuna trasformazione di coordinate, in modo da poter determinare innanzitutto le coordinate cartesiane  $(x_L, y_L, z_L)$  dello stesso punto nel sistema locale d'antenna e quindi le coordinate sferiche locali (distanza  $r_L$  ed angoli  $\theta_L, \varphi_L$ ) necessarie all'applicazione della (15).

A questo fine, si osservi che si passa dal sistema di riferimento globale al sistema locale attraverso la successione delle tre seguenti trasformazioni.

1. Traslazione dall'origine del sistema globale al punto di coordinate globali  $(x_A, y_A, z_A)$ , corrispondente al centro elettrico A dell'antenna trasmittente.



**Figura 4** – Traslazione dall'origine del sistema globale al punto A( $x_A, y_A, z_A$ ).

Con riferimento anche alla **Figura 4**, si trova immediatamente che risulta:

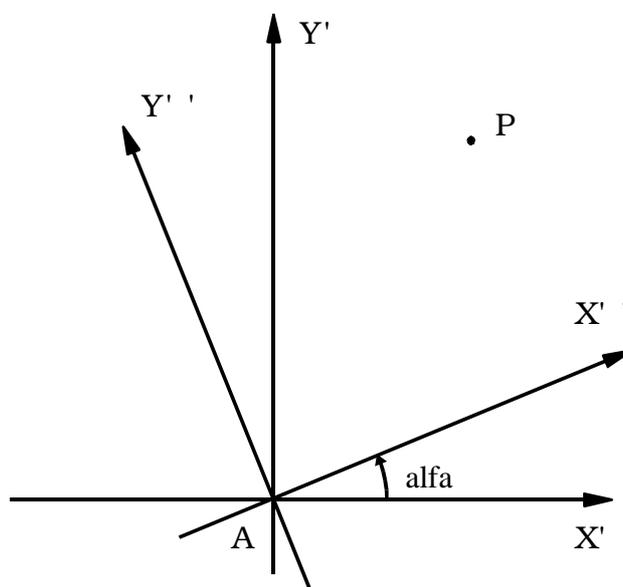
$$\begin{cases} x' = x_G - x_A \\ y' = y_G - y_A \\ z' = z_G - z_A \end{cases} \quad (16)$$

2. Rotazione di un angolo  $\alpha$  attorno alla direzione verticale  $Z'=Z''$ ; l'angolo  $\alpha$  è pari all'angolo tra la proiezione dell'asse di puntamento meccanico dell'antenna sul piano orizzontale e l'asse  $X'$ ; esso deve essere misurato a partire da quest'ultimo in senso antiorario. Si noti a questo proposito che, in genere, il gestore del sito fornisce piuttosto l'angolo  $\gamma$  tra la proiezione dell'asse di puntamento meccanico sul piano orizzontale e la direzione del nord geografico (rappresentata dall'asse  $Y'$ ); si vede facilmente che tra i due angoli sussiste la relazione:

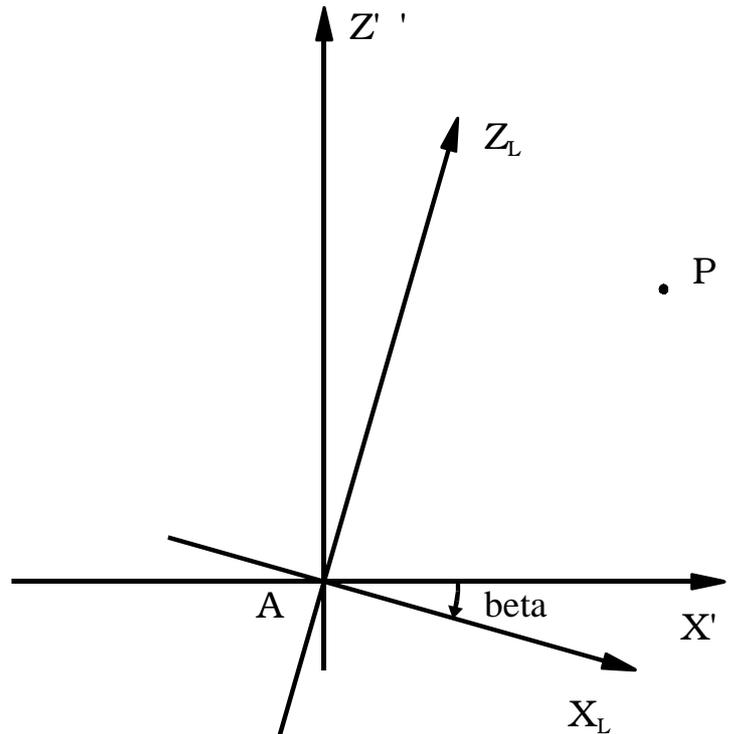
$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \gamma \quad (17)$$

Con riferimento anche alla **Figura 5**, si trova che risulta:

$$\begin{cases} x'' = x' \cos \alpha + y' \sin \alpha \\ y'' = -x' \sin \alpha + y' \cos \alpha \\ z'' = z' \end{cases} \quad (18)$$



**Figura 5** – Rotazione di un angolo  $\alpha$  attorno all'asse verticale  $Z'=Z''$ .



**Figura 6** – Rotazione di un angolo  $\beta$  attorno all'asse orizzontale  $Y''=Y_L$ .

3. Successiva rotazione di un angolo  $\beta$  attorno alla direzione orizzontale  $Y''=Y_L$ ; l'angolo  $\beta$  è compreso tra il piano orizzontale  $X''Y''$  e l'asse di puntamento meccanico dell'antenna; esso corrisponde quindi all'angolo di *tilt meccanico* dell'antenna stessa. Con riferimento anche alla **Figura 6**, si trova che risulta:

$$\begin{cases} x_L = x'' \cos \beta - z'' \sin \beta \\ y_L = y'' \\ z_L = x'' \sin \beta + z'' \cos \beta \end{cases} \quad (19)$$

Riunendo le tre trasformazioni, siamo adesso in grado di esprimere le coordinate cartesiane locali  $(x_L, y_L, z_L)$  del punto potenziato P in funzione delle sue coordinate cartesiane globali  $(x_G, y_G, z_G)$ , di quelle  $(x_A, y_A, z_A)$  del centro elettrico A dell'antenna e degli angoli di rotazione  $\alpha$  e  $\beta$ . La relazione in questione è agevolmente espressa in forma matriciale come segue:

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta & -\sin \beta \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_G - x_A \\ y_G - y_A \\ z_G - z_A \end{bmatrix} \quad (20)$$

Una volta trovate le coordinate cartesiane del punto potenziato P nel sistema locale, è possibile risalire alle sue coordinate polari  $(r_L, \theta_L, \phi_L)$  necessarie all'applicazione della (15). A proposito di queste ultime, ricordiamo che  $r_L$  rappresenta la distanza del punto P dal centro elettrico A dell'antenna,  $\theta_L$  ("latitudine") è l'angolo tra il piano  $X_L Y_L$  e la direzione della congiungente AP ed infine  $\phi_L$  ("azimut") è l'angolo tra l'asse  $X_L$  e la proiezione della congiungente AP sul piano  $X_L Y_L$ . In definitiva, tenendo anche conto del quadrante in cui viene a trovarsi il punto potenziato, si trova:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_L = \sqrt{x_L^2 + y_L^2 + z_L^2} = \sqrt{(x_G - x_A)^2 + (y_G - y_A)^2 + (z_G - z_A)^2} \\ \theta_L = \arcsin \frac{z_L}{r_L} \\ \varphi_L = \arcsin \left( \frac{y_L}{\sqrt{r_L^2 - z_L^2}} \right) \operatorname{sgn}(x_L) + \frac{\pi}{2} \operatorname{sgn}(y_L) [1 - \operatorname{sgn}(x_L)] \end{array} \right. \quad (21)$$

A questo punto, la relazione (15) ci permette di calcolare la densità di potenza nel punto potenziato P, a condizione di conoscere la *potenza di alimentazione*, il *guadagno massimo* ed il *diagramma di radiazione* dell'antenna che equipaggia il *sito trasmittente* considerato.

#### 6.6 Somma dei contributi

Attraverso i passi 6.3 - 6.5 sopra descritti si giunge alla determinazione del contributo alla densità di potenza nel punto P dovuto ad un singolo *sito trasmittente*.

In presenza di più siti, detta  $S_i(P)$  la densità di potenza dovuta al generico sito, la densità di potenza complessiva  $S_{TOT}(P)$  – nell'ipotesi che le varie sorgenti siano tra loro indipendenti e scorrelate – è data semplicemente dalla somma dei contributi individuali:

$$S_{TOT}(P) = \sum_i S_i(P) \quad (22)$$

Nota la densità di potenza complessiva, è agevole determinare le intensità del campo elettrico e del campo magnetico grazie alla *relazione di onda piana* (1). Si trova infatti:

$$E_{TOT}(P) = \sqrt{S_{TOT}(P) \cdot Z_0} \quad (23)$$

$$H_{TOT}(P) = \sqrt{\frac{S_{TOT}(P)}{Z_0}}$$

Applicazione		Frequenza	Ambito				
			domestico	industriale	sanitario	civile	militare
Riscaldamento elettromagnetico	a induzione magnetica	da 50 Hz a 3 MHz	Piastre di cottura	Lavorazione di metalli			
	a perdite dielettriche	da 3 a 50 MHz		Incollaggio del legno, saldatura della plastica	Marconiterapia		
	a microonde	oltre 300 MHz (in particolare 915 e 2450 MHz)	Forno a microonde	Essiccazione di ceramica, sterilizzazione e cottura di prodotti alimentari	Radarterapia		
Telecomunicazioni		oltre 30 kHz	Cordless Walkie-talkie Radioamatori	Applicazioni specialistiche Collaudo e manutenzione di apparati	Applicazioni specialistiche	Diffusione radiofonica e televisiva, telefonia cellulare	Telecomunicazioni militari
Altre applicazioni		varie	Sistemi antifurto	Prospezioni, indagini non distruttive	Risonanza magnetica, <i>imaging</i> a microonde	Controllo del traffico aereo (RADAR, radiofari)	

**Tabella 3** - Principali applicazioni dei campi elettromagnetici ad alta frequenza

		Frequenza [MHz]		Larghezza del canale [kHz]	Potenza [kW]	Guadagno $G_{MAX}$	Codifica del segnale	Modulazione	Accesso multiplo	Duplex	
		downlink	uplink								
<b>Emittenti radiofoniche ad onde medie</b>		0.5265 ÷ 1.6065		10	1 ÷ 500	poche unità	analogica	di ampiezza	FDMA	Non applicabile	
<b>Emittenti radiofoniche FM</b>		87.5 ÷ 108		200	1 ÷ 12	5 ÷ 50	analogica	di frequenza	FDMA		
<b>Emittenti TV</b>	<b>VHF I-II</b>	52.5 ÷ 68		7000	0.1 ÷ 1	1 ÷ 100	analogica	di ampiezza per il video, di frequenza per l'audio	FDMA		
	<b>VHF III</b>	174 ÷ 230									
	<b>UHF IV</b>	470 ÷ 590		8000							
	<b>UHF V</b>	614 ÷ 854									
<b>Stazioni radio base per la telefonia cellulare</b>	<b>TACS</b>	917 ÷ 950	872 ÷ 905	25	fino a 0.3 potenza tipica per le macrocelle 20 W circa	fino a 70	analogica	di frequenza	FDMA	FDD	
	<b>GSM</b>	925 ÷ 960	880 ÷ 915	200				digitale	di frequenza GMSK	FDMA+TDMA	FDD
	<b>DCS</b>	1805 ÷ 1880	1710 ÷ 1785						di frequenza GFSK	(FDMA+) TDMA	TDD
	<b>DECT</b>	1880 ÷ 1900							TD-CDMA	TDD	
	<b>UMTS terrestre asimmetrico</b>	1900 ÷ 1920 e 2010 ÷ 2025		5000					di fase QPSK	W-CDMA	FDD
	<b>UMTS terrestre simmetrico</b>	2110 ÷ 2170	1920 ÷ 1980								
	<b>UMTS satellitare</b>	2170-2200	1980-2010								

7. Tabella 4 - Caratteristiche tecniche dei più importanti servizi di telecomunicazione