



ANPA

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

**GUIDA TECNICA PER LA MISURA DEI CAMPI
ELETTRICI E MAGNETICI COMPRESI NELL'INTERVALLO DI
FREQUENZA 100 kHz – 3 GHz IN RIFERIMENTO
ALL'ESPOSIZIONE DELLA POPOLAZIONE**

RTI CTN_AGF 1/2000

ANPA
Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente
Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi

**Guida tecnica per la misura dei campi elettromagnetici
compresi nell'intervallo di frequenza 100 kHz – 3 GHz in
riferimento all'esposizione della popolazione**

Autori

L. Anglesio (ARPA Piemonte)

Co-autori

G. d'Amore (ARPA Piemonte), L. Belleri (ARPA Veneto), E. Borghese (ARPA Valle d'Aosta), S. De Donato (ARPA Emilia-Romagna), F. Francia (ARPA Toscana),
G. Licitra (ARPA Toscana), B. M. Stievano (ARPA Veneto), R. Tommasi (ANPA),
M. Valle (ARPA Liguria), S. Violanti (ARPA Emilia-Romagna)

Responsabile di progetto ANPA
Maria Belli, Salvatore Curcuruto



Responsabile CTN_AGF
Pierluigi Mozzo

Informazioni legali

L'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

Informazioni addizionali sull'argomento sono disponibili nel sito Internet (<http://www.sinanet.anpa.it>)

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Stampato in Italia

Stampato su carta ecologica

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi

Via Vitaliano Brancati, 48

00144 Roma

Centro Tematico Nazionale – Agenti Fisici

c/o ARPA Veneto

P.le L. A. Scuro, 10

37134 Verona

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
2.	DEFINIZIONI	3
3.	CARATTERISTICHE DELLE SORGENTI	9
3.1	Trasmittenti radio e TV	9
3.2	Sistemi per telefonia mobile TACS e GSM	13
3.3	Apparati radar e radioaiuto alla navigazione	15
3.4	Impianti per trasmissioni satellitari	18
4.	CARATTERISTICHE DEI SISTEMI DI MISURA	21
4.1	Misuratori in banda larga	21
4.2	Catena di misura in banda stretta	22
4.2.1	<i>Allestimento del mezzo mobile</i>	25
5.	PROCEDURE DI MISURA	26
5.1	Modalità di misura dei campi elettromagnetici emessi da impianti di teleradiodiffusione e da stazioni radio base per telefonia mobile	26
5.2	Misure in banda larga	27
5.3	Misure in banda stretta	29
5.3.1	<i>Procedure di misura</i>	30
	<i>Radio FM</i>	32
	<i>Radio AM</i>	33
	<i>TV</i>	33
	<i>SRB</i>	34
5.4	Incertezza di misura	34
5.5	Valutazione dei risultati	36
APPENDICI		
	Appendice 1 Caratteristiche delle modulazioni AM e FM	37
	Appendice 2 Esempi di sorgenti radar	43
	Appendice 3 Procedure per il calcolo di n_{eq}	46
	Appendice 4 Taratura dei misuratori di campo	47
	Appendice 5 G –TEM	52
	BIBLIOGRAFIA	54

1. INTRODUZIONE

La definizione di una procedura di misura e di valutazione dell'esposizione è necessaria al fine di ottenere dati sperimentali confrontabili. Tale problema risulta particolarmente critico per le misure ambientali, dove vi è una grande variabilità dei parametri che intervengono nella rilevazione del dato e nella sua analisi finalizzata alla stima dell'esposizione umana.

Il tipo di catena strumentale da utilizzare, l'influenza di fattori ambientali sui parametri di misura, la scelta dei punti di misura caratterizzanti un dato ambiente sono tutti elementi che influenzano il valore del parametro oggetto dell'indagine.

Per quanto riguarda la rilevazione ambientale dell'intensità del campo elettromagnetico a radiofrequenza, finalizzata alla valutazione dell'esposizione umana, non esistono protocolli definiti da riferimenti normativi nazionali, ma solamente riferimenti tecnici sia nazionali che, soprattutto, internazionali emanati da gruppi di lavoro e associazioni tecnico scientifiche. Tra i riferimenti esistenti citiamo quelli che riteniamo più significativi: protocollo Network Italiani-Ispesl "Modalità e strumenti di misura", linee guida interministeriali e ANPA-ARPA per l'applicazione del D.M. 381, norma tecnica IEC 61566 "*Measurement of exposure to radiofrequency electromagnetic field strength in the frequency range 100 kHz-1GHz*"; standard IEEE-ANSI C95.3 "*Recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields – RF and microwave*"; raccomandazioni ITU-R SM 326-7 "*Determination and measurement of the power of amplitude-modulated radio transmitters*" e 378-6 "*Field strength measurements at monitoring stations*".

Tutti i documenti tecnici sopra citati, pur contenendo importanti indicazioni su alcuni aspetti delle procedure di misura, risultano incompleti e non possono costituire una guida esaustiva per l'effettuazione delle misure. In particolare alcuni documenti sono non adeguati perché le metodiche descritte si riferiscono esclusivamente alle misure non selettive in frequenza (banda larga); o non vi sono indicazioni sulla dipendenza della risposta dei sensori a banda larga da particolari tipologie di segnali, quali quelli modulati in ampiezza e fase e quelli multifrequenza; o ancora la trattazione delle procedure rimane ad un livello generico e non affronta dettagli operativi sulle metodiche da adottare in campo in funzione del tipo di sorgente; le procedure relative alle misure selettive in frequenza (banda stretta) non vengono descritte in modo dettagliato in funzione del tipo di segnale da analizzare. Questo aspetto può essere particolarmente critico laddove le diverse impostazioni strumentali influenzano in modo significativo il valore rilevato.

Questa situazione di carenza di riferimenti certi e condivisi è stata avvertita in particolar modo dai tecnici operanti all'interno del sistema delle agenzie ambientali, dove è indispensabile l'adozione di procedure dettagliate e uniformi che consentano la produzione di dati confrontabili per la valutazione dello stato dell'ambiente. Procedure omogenee e condivise dalle strutture tecniche di controllo su tutto il territorio nazionale

rappresentano inoltre un importante riferimento per un corretto approccio radioprotezionistico nella valutazione dell'esposizione.

Per i motivi fin qui esposti, il gruppo di lavoro ANPA-ARPA sulle Radiazioni Non Ionizzanti, istituito nel maggio 1997 dal Consiglio delle Agenzie Regionali, ha promosso l'iniziativa di redigere una guida tecnica che affrontasse le problematiche di misura delle radiazioni elettromagnetiche a radiofrequenza generate da impianti per telecomunicazione. L'entrata in vigore del D.M. 381/98 sulla regolamentazione delle emissioni da impianti per telecomunicazione, ha reso tale guida un documento tecnico necessario per tutti gli operatori impegnati nella valutazione del rispetto dei limiti di esposizione.

La riorganizzazione del sistema delle Agenzie con l'istituzione di Centri Tematici Nazionali, ha portato, infine, a svolgere il lavoro di messa a punto della guida tecnica all'interno del Centro Tematico Nazionale Agenti Fisici.

L'impostazione della guida tecnica consiste in un nucleo centrale in cui vengono descritte le modalità di misura, con metodiche a banda larga ed a banda stretta, riferite alle sorgenti ritenute più significative per la diffusione sul territorio e l'impatto sull'esposizione della popolazione. In particolare, si farà riferimento alle seguenti categorie di sorgenti: stazioni radiobase per la telefonia cellulare (900 MHz e 1800 MHz circa), emittenti televisive in banda UHF (da 450 a 900 MHz circa), stazioni radio FM-VHF (da 87,5 a 108 MHz) e AM-onde medie (da 500 a 1600 kHz circa).

Oltre al nucleo centrale, costituito dal cap. 5 relativo alle procedure di misura a banda larga ed a banda stretta ed alla valutazione dei risultati, sono riportate informazioni generali, con minore contenuto operativo ma di importanza fondamentale per la corretta esecuzione delle misure, riguardanti:

- Cap. 2 definizioni
- Cap. 3 caratteristiche delle sorgenti e dei segnali da esse emessi
- Cap. 4 caratteristiche degli strumenti per misure a banda larga e a banda stretta

Sono inoltre presenti le seguenti appendici:

- Appendice 1 *Caratteristiche della modulazione AM e FM*
- Appendice 2 *Esempi di sorgenti radar*
- Appendice 3 *Procedure per il calcolo di n_{eq}*
- Appendice 4 *Taratura dei misuratori di campo*
- Appendice 5 *GTEM*

2. DEFINIZIONI

Campo elettrico (E)

Si definisce campo elettrico una quantità vettoriale che, in ogni punto di una data regione di spazio, rappresenta il rapporto tra la forza esercitata su una carica elettrica di prova q ed il valore della carica medesima. L'unità di misura del campo elettrico nel sistema S.I. è il volt/metro (V/m).

Campo magnetico (H)

Si definisce campo magnetico una quantità vettoriale-assiale definita in ogni punto di una data regione di spazio in modo tale che il suo rotore sia eguale alla densità di corrente elettrica totale, compresa la corrente di spostamento. L'unità di misura del campo magnetico nel sistema S.I. è l'ampère/metro (A/m).

Campi a frequenza multipla

Sovrapposizione di due o più campi elettromagnetici di fase arbitraria e di frequenza diversa.

Conducibilità (σ)

Rapporto tra la densità di corrente di conduzione in un mezzo e l'intensità del campo elettrico. La conducibilità è espressa in siemens per metro (S/m).

Corrente di contatto

Corrente che passa attraverso il corpo quando quest'ultimo viene in contatto con un oggetto conduttore immerso in un campo elettromagnetico.

Densità di corrente

Corrente indotta da un campo elettromagnetico nell'unità di superficie all'interno del corpo umano.

La densità di corrente si esprime in ampère per metro quadrato (A/m²).

Densità di energia

Energia incidente su un'area unitaria normale alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica. È espressa in Joule per metro quadrato (J/m²).

Densità di potenza (S)

Potenza che fluisce nell'unità di superficie posta perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica. È normalmente espressa in watt per metro quadro (W/m²).

Nota : Nel caso di onde piane, la densità di potenza, l'intensità di campo elettrico (E) e l'intensità di campo magnetico (H) sono legate fra loro dall'impedenza d'onda Zo del vuoto (Zo = 377 Ohm). In particolare: $S = E^2/Zo = Zo H^2 = E H$ dove E, H ed S sono espressi rispettivamente in V/m, A/m e W/m². Benché molti strumenti di misura indichino il valore della densità di potenza, le grandezze effettivamente misurate sono E o H.

Densità di potenza media nel tempo

Valore istantaneo della densità di potenza, mediato nel tempo, definito dalla formula:

$$S_m = \frac{1}{T} \int_T S(t) dt$$

dove T è il periodo del segnale generato dalla sorgente.

Densità di potenza, picco

Densità di potenza istantanea massima che si manifesta quando si trasmette potenza.

Densità di potenza, di onda piana equivalente

Termine di uso comune associato a qualsiasi onda elettromagnetica, uguale in ampiezza alla densità di potenza di un'onda piana che ha la stessa intensità dei campi elettrico (E) e/o magnetico (H).

Effetto diretto dell'esposizione

Conseguenza di una interazione diretta dei campi elettromagnetici con il corpo umano esposto.

Effetto indiretto dell'esposizione

Conseguenza di una interazione indiretta che si manifesta quando il corpo umano viene a contatto con oggetti metallici in campi elettromagnetici.

Esposizione breve

Tempi di esposizione più brevi del corrispondente tempo di media.

Esposizione continua

Esposizione per periodi di tempo più lunghi del corrispondente tempo di valutazione della media.

Esposizione non uniforme

Livelli di esposizione non uniforme si determinano quando i campi non sono uniformi su volumi di dimensioni paragonabili alle dimensioni del corpo umano considerato nella sua interezza. Questa situazione può essere causata da onde stazionarie, da radiazione diffusa oppure può verificarsi in zona di campo vicino.

Esposizione parziale del corpo

L'esposizione parziale ha luogo quando si ha una deposizione localizzata di energia.

Frequenza (f)

Numero di cicli o periodi nell'unità di tempo. L'unità di misura nel sistema S.I. è l'hertz (Hz).

Impedenza d'onda del vuoto

Rapporto tra l'intensità del campo elettrico e quella del campo magnetico di un'onda elettromagnetica che si propaga. Per un'onda piana che si propaga nel vuoto, l'impedenza d'onda intrinseca del vuoto è circa 377 Ohm.

Induzione elettrica (D)

Modulo di un vettore, pari al prodotto dell'intensità del campo elettrico (E) per la costante dielettrica (ϵ):

$$D = \epsilon E.$$

L'induzione elettrica è espressa in coulomb per metro quadrato (C/m^2).

Induzione magnetica (B)

Modulo di un vettore, pari al prodotto dell'intensità del campo magnetico (H) per la permeabilità magnetica (η) del mezzo:

$$B = \eta H.$$

L'induzione magnetica si esprime in tesla (T).

Livello di esposizione

Valore della grandezza considerata quando una persona è esposta a campi elettromagnetici.

Lunghezza d'onda (λ)

La lunghezza d'onda (λ) di un'onda elettromagnetica è legata alla frequenza (f) ed alla velocità di propagazione (c) dall'espressione $c = f \lambda$. Nel vuoto la velocità di un'onda elettromagnetica è uguale alla velocità della luce. La lunghezza d'onda si esprime in metri (m).

Media temporale della potenza assorbita (Pm)

Tasso di trasferimento di energia, mediato nel tempo, definito dalla formula seguente:

$$P_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt$$

dove t_1 e t_2 sono i tempi di inizio e fine dell'esposizione. Il periodo $t_2 - t_1$ rappresenta la durata dell'esposizione.

Modulazione

La modulazione consiste nel modificare le caratteristiche di un segnale, detto *portante*, in funzione di un altro segnale, detto *modulante*. La forma d'onda che si ottiene è detta *segnale modulato*.

Modulazione di ampiezza

La modulazione di ampiezza (AM) consiste nel variare, istante per istante, l'ampiezza di un segnale, detto portante, in funzione di un altro segnale, detto modulante.

Modulazione di frequenza

La modulazione di frequenza (FM) consiste nel variare, istante per istante, la frequenza di un segnale, detto portante, in funzione di un altro segnale, detto modulante.

Modulazione di fase

La modulazione di fase (PM) consiste nel variare, istante per istante, l'angolo di fase di un segnale, detto portante, in funzione di un altro segnale, detto modulante.

Obiettivi di qualità

Sono valori di campo elettromagnetico da conseguire nel breve, medio e lungo periodo, usando tecnologie e metodiche di risanamento disponibili, al fine di minimizzare l'esposizione della popolazione.

Onda piana

È una distribuzione di campo elettromagnetico propagativo, in cui in ogni punto i vettori campo elettrico e campo magnetico sono perpendicolari fra loro e giacciono su piani perpendicolari alla direzione di propagazione.

Permeabilità magnetica (μ)

La permeabilità magnetica di un materiale è definita dal rapporto fra il valore dell'induzione magnetica (B) e l'intensità del campo magnetico (H) :

$$\mu = B/H$$

La permeabilità magnetica μ si esprime in henry per metro (H/m).

Permettività, o costante dielettrica (ϵ)

Proprietà di un materiale dielettrico (ad esempio un tessuto biologico) definita dal rapporto fra l'intensità dell'induzione elettrica (D) e l'intensità del campo elettrico (E):
 $\epsilon = D/E$.

La costante dielettrica si esprime in farad per metro (F/m).

Polarizzazione

Caratteristica dei campi elettromagnetici che descrive la direzione e l'ampiezza, variabili nel tempo, del vettore di campo elettrico; in particolare, indica la figura tracciata, in funzione del tempo, dall'estremità del vettore campo elettrico in un punto fisso nello spazio come è vista lungo la direzione di propagazione.

Nota : Generalmente, la figura è ellittica e viene tracciata in senso orario o antiorario. Le polarizzazioni comunemente indicate come circolari e lineari si ottengono quando l'ellisse diventa rispettivamente un cerchio o una linea retta. La rotazione in senso orario del vettore elettrico viene detta polarizzazione destrorsa e quella in senso antiorario polarizzazione sinistrorsa.

Popolazione

Tutti i non esposti a campi elettromagnetici per ragioni professionali.

Punti caldi

Zona o volume molto localizzati di irraggiamento o assorbimento di energia elettromagnetica, prodotto da radiazione diffusa, da effetti focalizzanti o da altre disomogeneità.

Radiazione diffusa

Campo elettromagnetico risultante da correnti indotte in un oggetto secondario, conduttore o dielettrico, da onde elettromagnetiche incidenti sull'oggetto stesso da una o più fonti primarie. L'oggetto diffondente è talvolta chiamato "re-irradiatore" o "irradiatore secondario".

Radio frequenza (RF)

È l'intervallo di frequenza da 10 kHz – 300 GHz.

Rapidità di variazione dell'induzione magnetica

Derivata rispetto al tempo dell'induzione magnetica.

Regione di campo lontano

Regione di spazio, sufficientemente lontano dalla sorgente, nella quale il campo elettromagnetico ha una distribuzione caratteristica dell'onda piana. L'estensione di questa regione dipende dalle dimensioni massime lineari D del sistema d'antenna e dalla lunghezza d'onda λ del campo stesso. Si assume convenzionalmente che la regione di campo lontano inizi ad una distanza dalla sorgente maggiore della quantità r eguale alla maggiore fra le quantità λ e D^2/λ .

Regione di campo vicino

Regione in prossimità di un'antenna o di altra struttura radiante, in cui i campi elettrico e magnetico non presentano la caratteristica dell'onda piana, ma variano notevolmente da punto a punto. La regione di campo vicino si suddivide ancora in regione reattiva ($r < \lambda/10$), che è la più vicina alla struttura radiante e che contiene buona parte dell'energia immagazzinata e la regione radiante in cui il campo di radiazione predomina su quello reattivo, ma si scosta sostanzialmente dall'onda piana e ha configurazione complessa.

Nota: Per molte antenne, si assume che la zona reattiva di campo vicino si estenda per una distanza pari a mezza lunghezza d'onda dalla superficie dell'antenna.

Tempo di media (t_m)

Intervallo di tempo su cui è mediata l'esposizione allo scopo di determinare il rispetto dei limiti. Per gli scopi di questa norma è pari a 6 minuti.

Tempo di risposta

Tempo necessario ad uno strumento di misura del campo per raggiungere una specificata percentuale del valore finale della grandezza misurata, dopo essere stato posto nel campo da misurare. Tipicamente si assume il 90 % del valore finale.

Valore efficace (root-mean-square [rms])

Valore efficace di una grandezza fisica, $a(t)$, che varia nel tempo con periodo T . Esso si ottiene calcolando la radice quadrata del valore medio rispetto al tempo del quadrato della funzione che descrive la grandezza stessa nel modo seguente:

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

3. CARATTERISTICHE DELLE SORGENTI

3.1 Trasmettenti radio e TV

Gli impianti radiofonici (FM, AM) e quelli televisivi (TV) hanno potenze che variano da alcuni W ad alcuni kW; in particolare, potenze che variano tra 2 kW a 10 kW sono caratteristiche degli impianti progettati per coprire una estesa area di servizio. Si analizzano nel seguito le principali caratteristiche dei diversi tipi di trasmissione.

Trasmissione FM

I trasmettitori radiofonici trasmettono segnali modulati in frequenza (FM) nell'intervallo 87.5-108 MHz con frequenza del segnale modulante (f_m) fino a 15 kHz e deviazione di frequenza (Δf) fino a 75 kHz.

Il segnale modulante è l'informazione audio che si vuole trasmettere, che si estende nei toni acuti fino a 15 kHz. La "deviazione di frequenza" rappresenta di quanto può variare la frequenza istantanea del segnale modulato rispetto alla frequenza della portante non modulata a causa del segnale modulante (vedi approfondimento in nota) e assieme alla f_m determina la larghezza di banda del segnale modulato.

Si intuisce allora che non è immediato definire qual è la banda occupata, perché si ha a che fare con due parametri: la frequenza del segnale modulante e la deviazione di frequenza che questo provoca.

Volendo calcolare la banda occupata da un segnale FM è allora possibile utilizzare la relazione di Carson che la esprime nel seguente modo:

$$B \cong 2 * (f_m + \Delta f) = 2 * (1 + m_f) * f_m \quad (3.1.1)$$

dove $m_f = \Delta f / f_m$ è detto "indice di modulazione".

Per piccoli rapporti tra Δf e f_m , ossia per piccoli "indici di modulazione m_f " ($m_f = \Delta f / f_m$), lo spettro del segnale modulato è simile a quello della AM, ossia vi è la portante con due righe laterali distanti f_m ; in tal caso la banda del segnale è circa

$$B \cong 2 * f_m \quad \Delta f \ll f_m \quad (3.1.2)$$

e si parla di FM a banda stretta (NBFM).

Per indici più grandi invece, la relazione va applicata integralmente; se la portante è modulata da un segnale con spettro continuo ma limitato a f_{max} , si avrà ancora

$$B \cong 2 * (f_{max} + \Delta f) \quad (3.1.3)$$

Per m_f molto grandi si ha ancora una semplificazione:

$$B \cong 2 * \Delta f \quad \Delta f \gg f_m \quad (3.1.4)$$

e in questo caso si parla di modulazione di frequenza a banda larga (WBFM).

Se si analizza lo spettro di una portante, per esempio con $f_p = 100$ MHz, modulata da un tono a 15 kHz con deviazione di frequenza pari a 75 kHz si ha, quindi, che la frequenza istantanea del segnale modulato varia da 99.025 MHz a 100.075 MHz e si ha:

$$m_f = \Delta f / f_m = 5;$$

andando ad analizzare le componenti spettrali con ampiezza maggiore del 15% della portante non modulata, queste risultano essere 12, per cui la banda occupata risulta:

$$B \cong 12 * f_m = 190 \text{ kHz.}$$

La formula di Carson fornisce un valore di

$$B \cong 2 * (f_{\max} + \Delta f) = 180 \text{ kHz}$$

che si può quindi considerare un'indicazione valida della banda occupata.

L'assegnazione dei canali in FM viene dunque effettuata con passo di 200 kHz, come risulta dalle considerazioni precedenti. Nel caso di trasmissione stereofonica, il segnale trasmesso risulta più complesso, perché si è dovuto adottare un sistema che fosse compatibile con la ricezione monofonica e che avesse una occupazione di banda analoga. In Figura 3.1 è riportato lo spettro di un segnale FM modulato con un tono a 15 kHz e deviazione di frequenza pari a 75 kHz, cioè $m_f = 5$ (componenti con ampiezza maggiore del 15% dell'ampiezza della portante).

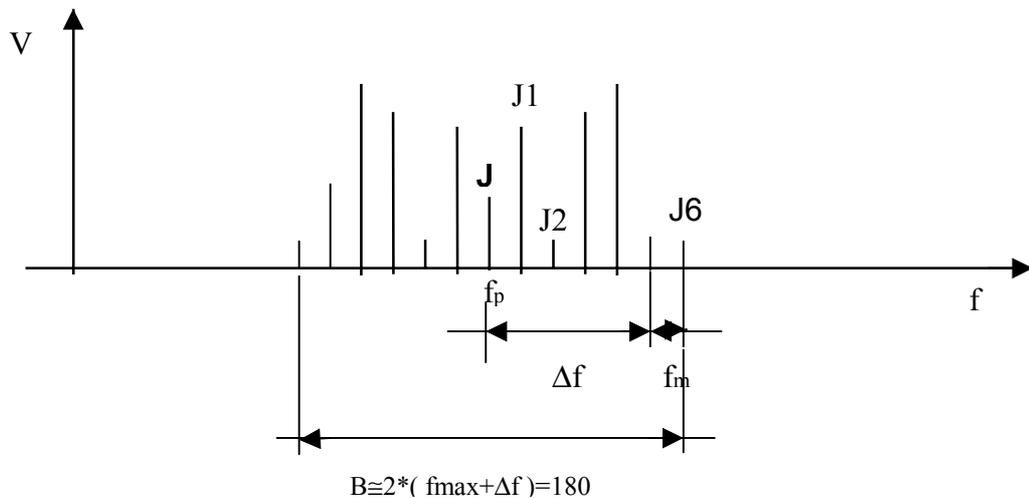


Figura n. 3.1

Trasmissione AM

I trasmettitori radiofonici trasmettono segnali modulati in ampiezza (AM) nelle bande 150-285 kHz (onde lunghe), 525-1605 kHz (onde medie), 2-26 MHz (onde corte) con frequenza modulante fino a 4, 5 kHz in Italia (5 kHz in America) e indice di modulazione inferiore a 1.

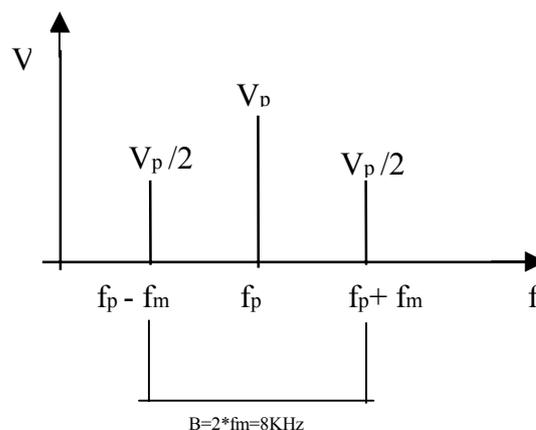


Figura n. 3.2

La banda di ciascun canale è il doppio della banda base (vedi approfondimento in nota); si ha perciò una larghezza di canale per le onde lunghe, medie e corte di 9 kHz in Europa e di 10 kHz in America. In Figura n. 3.2 è riportato lo spettro di un segnale modulato in AM con un tono a frequenza $f_m = 4$ kHz e $m = 1$.

Trasmissione TV

Gli impianti televisivi trasmettono segnali formati da due componenti: la componente audio, a modulazione FM, e la componente video modulata in ampiezza (AM) negli intervalli di frequenze 47-230 MHz (VHF) e 470-862 MHz (UHF). In realtà il segnale televisivo è abbastanza complesso, poiché deve trasportare le informazioni di luminosità, di colore, di suono e deve essere strutturato in modo da portare anche le informazioni relative al sincronismo di riga e di quadro; lo spettro di un segnale PAL televisivo può comunque essere schematizzato così come riportato in Figura n. 3.3.

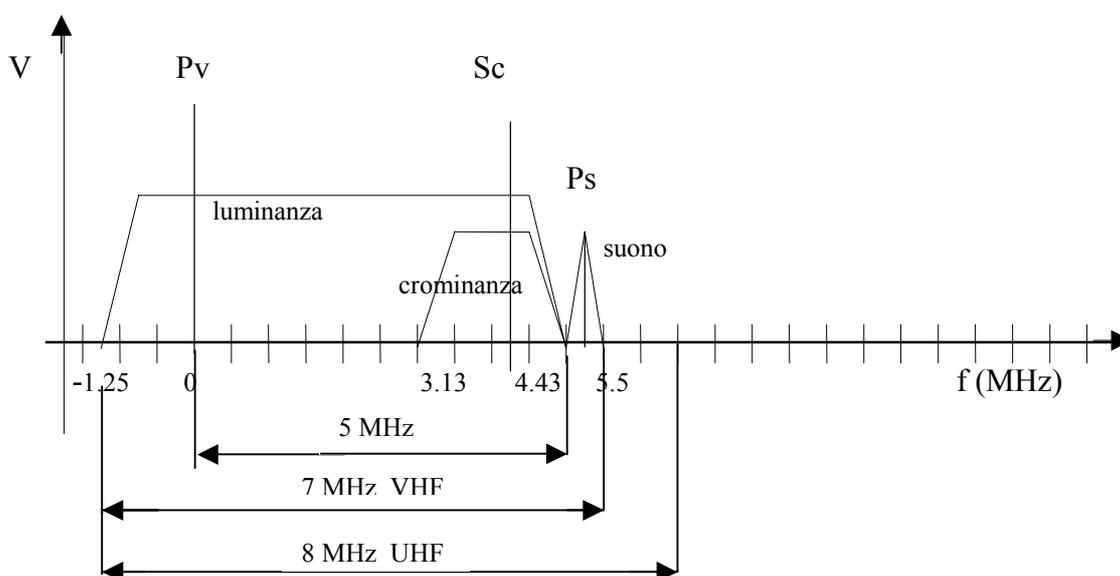


Figura n. 3.3

Vi è una portante video (P_v) che trasporta l'informazione di luminosità modulata in AM-VSB (modulazione di ampiezza con banda laterale parzialmente soppressa) e con occupazione di banda di $5 + 1,25 = 6,25$ MHz; vi è poi una sottoportante colore (Sc) centrata a 4,43 MHz dalla P_v che trasporta l'informazione di crominanza modulata in AM-VSB e va ad occupare lo «spazio» libero tra le righe spettrali della luminanza nell'intervallo 3,13 - 5 MHz; vi è poi la portante suono (Ps) posta a 5,5 MHz dalla P_v e viene modulata in FM con $\Delta f_{max} = 50$ kHz. Il limite superiore del canale è fissato a 5,75 MHz, per cui la larghezza totale risulta di 7 MHz per i canali in VHF. In UHF è lasciato un intervallo di guardia di 1 MHz fra i canali, per cui si considera il canale di 8 MHz.

Antenne di trasmissione

Gli elementi di trasmissione radiofonici FM sono costituiti solitamente da schiere di antenne tipo Yagi, montate in modo da ottenere un segnale polarizzato verticalmente, le singole antenne hanno dimensioni fisiche corrispondenti all'incirca a mezza lunghezza d'onda.

Gli elementi di trasmissione radiofonici AM sono costituiti solitamente da antenne corte rispetto alla lunghezza d'onda (che risulta per queste frequenze molto grande), sostenute da tralici, montate in modo da ottenere un segnale polarizzato verticalmente.

Gli elementi di trasmissione televisivi sono invece costituiti generalmente da pannelli contenenti schiere di dipoli montati in polarizzazione orizzontale. Le dimensioni tipiche dei pannelli variano da 2 a 4 metri. Le antenne televisive hanno, generalmente, una emissione più direzionale di quelle radiofoniche, mostrando quindi un diagramma di irradiazione più stretto. In figura riportiamo a titolo di esempio due diagrammi di irradiazione verticale: uno tipico di un'antenna televisiva (4a) e l'altro tipico di un'antenna radiofonica (4b).

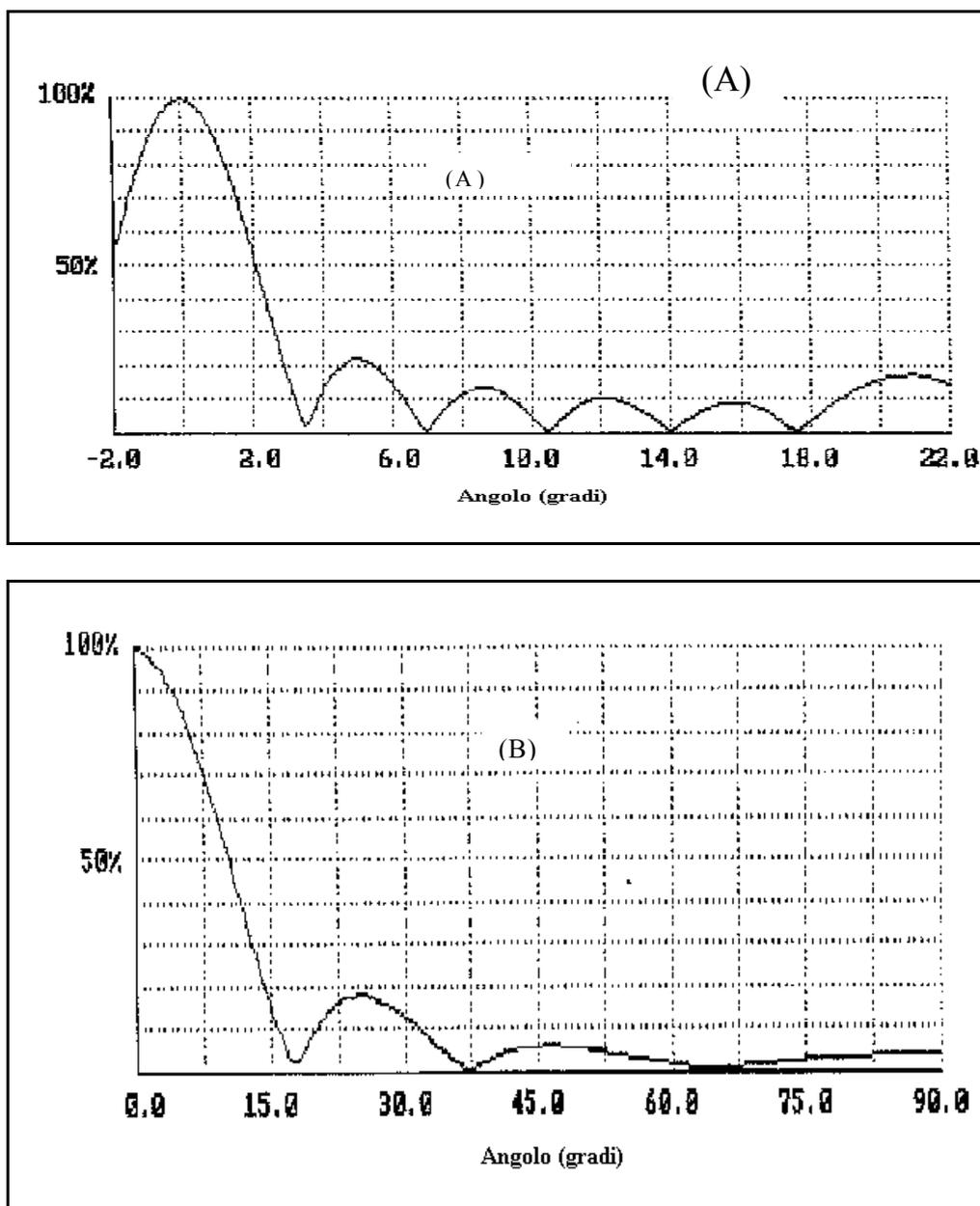


Figura n. 3.4: Diagrammi di irradiazione verticale di un'antenna trasmittente televisiva (4a) e radiofonica (4b)

3.2 Sistemi per telefonia mobile TACS e GSM

I sistemi radiomobili attualmente più utilizzati sono di due tipi: TACS (*Total Access Communication System*) e GSM (*Global System for Mobile communication*).

Entrambi questi sistemi sono di tipo cellulare in quanto applicano una tecnica che consiste nel riutilizzo della stessa frequenza più volte in luoghi diversi e sufficientemente lontani tra loro. Per ottenere questo risultato si suddivide il territorio in aree aventi dimensioni limitate, dette celle, ognuna delle quali è servita da una Stazione Radio Base (SRB) che opera quindi con potenza ridotta. L'utilizzo di potenze inferiori a quelle tipiche dei sistemi di comunicazione non cellulari, quali quelli che effettuano trasmissioni radiotelevisive, è una importante caratteristica di tali impianti. In particolare, essi hanno una potenza in antenna variabile da alcune decine di watt (solitamente inferiore a 50 W per i sistemi GSM) a circa 300 W.

I sistemi TACS e GSM presentano profonde differenze sia nelle caratteristiche tecniche degli impianti che nelle modalità di accesso alle risorse radio.

Il sistema TACS opera con segnali modulati in frequenza (FM) in modo analogico e con banda di canale pari a 25 kHz. Esso utilizza una tecnica di accesso al canale radio di tipo FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) sulla base della quale ad ogni frequenza portante corrisponde un singolo canale radio sul quale la stazione mobile e la SRB trasmettono continuamente e simultaneamente (vedi Figura n. 3.5). La SRB trasmette generalmente un massimo di 32 canali nell'intervallo di frequenze centrato sui 900 MHz.

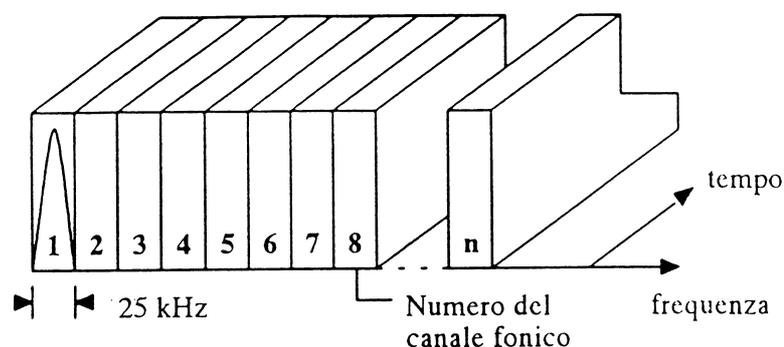


Figura n. 3.5: Sistema di accesso multiplo a divisione di frequenza (FDMA – Frequency Division Multiple Access)

Il sistema GSM utilizza segnali con modulazione digitale. Questa tecnica consente di adottare la modalità di accesso a divisione di tempo (TDMA - Time Division Multiple Access) per la trasmissione su una stessa frequenza portante di più canali radio (vedi Figura n. 3.6). L'apparecchio mobile non trasmette continuamente, ma emette su una data frequenza in intervalli di tempo prefissati, detti "timeslot", che ricorrono ciclicamente. In questo modo con una stessa frequenza vengono serviti più utenti, pari al numero totale di timeslot (trama) realizzati su quella frequenza, che nell'attuale sistema GSM è pari ad 8. Tenendo conto che la durata della trama è di 4,616 msec, la frequenza di ripetizione dei timeslot è di 217 Hz.

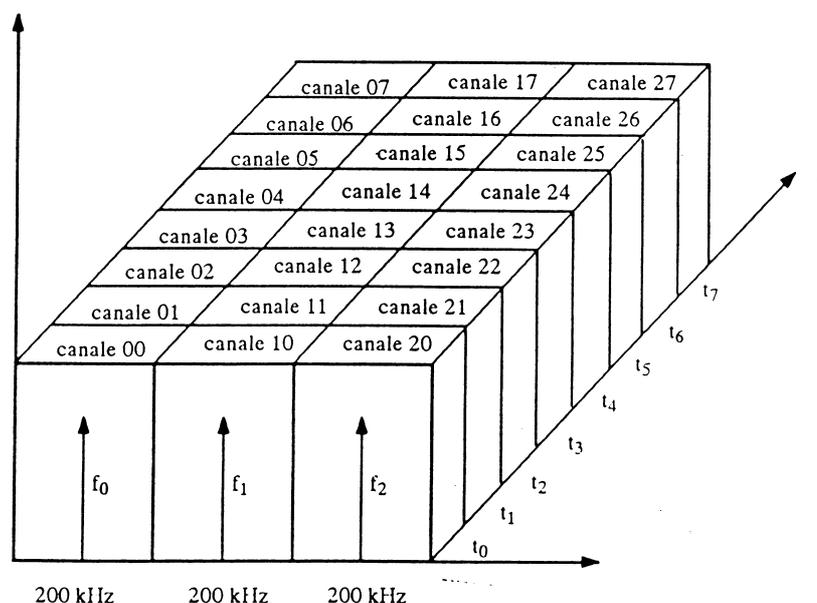


Figura n. 3.6: Sistema di accesso multiplo misto a divisione di tempo e frequenza (TDMA – Time Division Multiple Access e FDMA)

Una caratteristica fondamentale del sistema GSM è il tipo di modulazione digitale del segnale che riguarda sia la sua fase che la sua frequenza (GMSK - Gaussian Minimum Shift Keying). In particolare, nella modulazione GMSK si ha uno spostamento nella fase del segnale da $+90^\circ$ a -90° in corrispondenza ad uno spostamento nella frequenza della portante da $+67.708$ kHz a -67.708 kHz (vedi Figura n. 3.7). Lo spettro di modulazione è ridotto grazie all'utilizzo di un filtro gaussiano. In relazione al tipo di modulazione, risulta che la banda relativa ad ogni portante è di 200 kHz. Solitamente le SRB trasmettono fino ad un massimo di 8 portanti nell'intervallo di frequenze intorno ai 950 MHz.

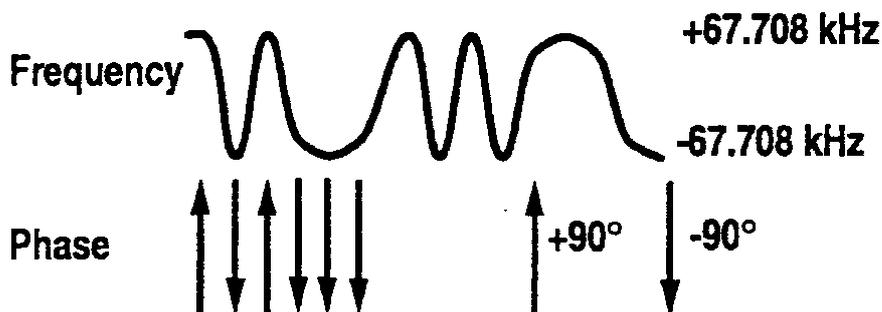


Figura n. 3.7: Modulazione digitale di un segnale in frequenza e fase di tipo GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)

Essendo non elevata la distanza massima entro cui può essere realizzato il collegamento telefonico, variabile generalmente da 0,5 a 35 km, la densità di installazioni SRB in aree urbane è grande e ancora in fase di grossa crescita. A fronte di una maggiore penetrazione nell'ambiente urbano rispetto ai trasmettitori radiotelevisivi, gli impianti SRB presentano una minore potenza in antenna dando luogo, quindi, ad esposizioni più localizzate. Gli impianti sono solitamente costituiti da un minimo di uno ad un massimo di tre sistemi di antenne (celle) che emettono in modo molto direttivo e, nel caso di più sistemi, lungo direzioni che differiscono di 120° . Ogni antenna è costituita da schiere di dipoli di dimensioni globali pari a circa 2 m. In Figura n. 3.8 sono riportati un diagramma di irradiazione orizzontale e verticale tipici di una antenna utilizzata in una SRB per telefonia mobile. In alcuni casi gli impianti SRB possono anche essere costituiti da antenne omnidirezionali.

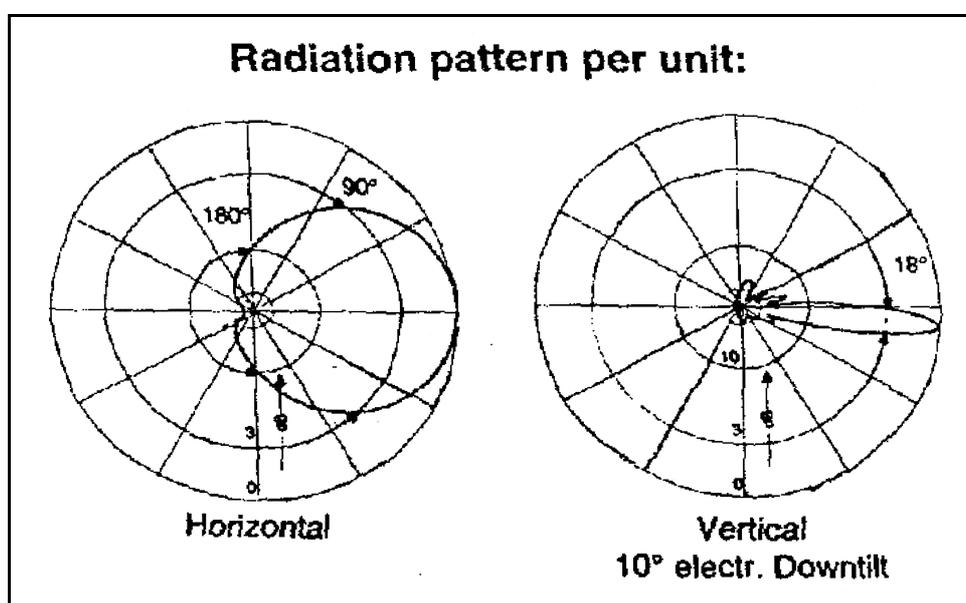


Figura n. 3.8: Diagrammi di irradiazione orizzontale e verticale, in coordinate polari, di un'antenna per telefonia mobile

3.3 Apparati RADAR e radioaiuto alla navigazione

Questi apparati sono usati sia per scopi militari che per usi civili. I luoghi di installazione installati sono, prevalentemente, zone non aperte al pubblico (aree militari, piste aeroportuali).

I radar sono apparati che, utilizzando onde elettromagnetiche in genere alla frequenza delle microonde, sono in grado di determinare la posizione, la direzione e la velocità di un oggetto nello spazio. Per la generazione dei segnali sono largamente utilizzati tubi a microonde come i magnetron e, più recentemente, i klystron di potenza e i TWT. La sezione irradiante è generalmente costituita da uno specchio di forma parabolica illuminato da un *lanciatore* (antenna a dipolo, antenna a tromba) posto nel fuoco.

Il principio di funzionamento del radar consiste nell'inviare verso l'oggetto cercato un fascio di onde elettromagnetiche e nel rivelare le onde riflesse dall'oggetto stesso; a seconda del funzionamento, si distingue in *radar a impulsi* e *radar Doppler*.

Il radar a impulsi emette pacchetti di energia a microonde (impulsi) di durata molto breve (alcuni microsecondi) e di elevata potenza di picco ($1 \div 10$ MW in impianti di elevata potenza) che generano fronti d'onda che si allontanano dall'antenna trasmittente alla velocità della luce.

Quando il fronte d'onda incontra un ostacolo una parte dell'energia viene riflessa e ritorna verso la sorgente (impianto radar). Il tempo T che intercorre tra l'emissione di un impulso e l'arrivo dell'eco permette di misurare la distanza, d , tra la sorgente radar e l'ostacolo ($d = \text{velocità della luce} * T/2$).

Il tempo che intercorre tra l'invio di un impulso e il successivo (periodo di ripetizione) è dell'ordine di alcuni millisecondi e questo determina la massima distanza teorica a cui un oggetto può essere avvistato dal radar (per un tipico radar per il controllo del traffico aereo questa distanza è dell'ordine di 400 km). Generalmente si usa una sola antenna con funzione di trasmittente e ricevente, interrompendo temporaneamente la ricezione durante l'emissione del breve impulso. Durante il tempo fra un impulso e il successivo l'apparato radar funziona invece da ricevitore per rivelare gli echi riflessi dagli ostacoli nella direzione in cui si propaga il fronte d'onda. L'antenna del radar viene inoltre fatta ruotare a velocità costante su un piano orizzontale in modo da esplorare l'intero orizzonte.

Il radar Doppler, invece, funziona emettendo un'onda continua e rivela la presenza dei soli oggetti in movimento, sfruttando l'effetto per il quale la frequenza dell'onda riflessa da un oggetto in movimento è più alta se l'oggetto si avvicina alla sorgente e più bassa se l'oggetto se ne allontana. I radar Doppler possono avere potenze dell'ordine dei chilowatt (radar militari) o dell'ordine delle decine di milliwatt nei dispositivi antifurto e in quelli utilizzati da molte polizie stradali per la misura della velocità dei veicoli.

Caratteristica comune a tutti i tipi di radar è l'alta direttività dell'antenna (guadagni dell'ordine di 40 dB per i grossi radar e 10 dB per gli allarmi antifurto) che permette fasci irradiati molto stretti (dell'ordine del grado in orizzontale e della decina di gradi in verticale nei grossi impianti). Le antenne sono progettate per avere il valore massimo dell'irraggiamento in direzione alcuni gradi sopra l'orizzonte, mentre il minimo si ha nell'irraggiamento verso il suolo (il valore massimo nella direzione del suolo è tipicamente $1.000 \div 10.000$ volte più basso di quello nella direzione di massimo irraggiamento).

Dal punto di vista dell'esposizione è importante calcolare la potenza media irradiata: se P è la potenza di picco, τ è il tempo di durata dell'impulso e T l'intervallo tra l'inizio di un impulso e il successivo ($T = 1/f$ con f , frequenza di ripetizione degli impulsi), la potenza media P_m è data da:

$$P_m = P * \frac{\tau}{T} \quad (3.3.1)$$

Il rapporto τ/T prende il nome di duty cycle. La potenza media coincide con la potenza massima nel caso dei radar ad onda continua (Doppler).

Il valore massimo della densità di potenza che ci possiamo aspettare ad una distanza r dall'apparato è quella che si può misurare lungo la direzione di massimo irraggiamento. In Figura n. 3.9 è riportato l'andamento del rapporto S/S_m in funzione della distanza dall'antenna nella direzione di massimo irraggiamento. S è la densità di potenza a

distanza r , mentre S_m è la densità di potenza media sulla bocca dell'antenna, che si calcola conoscendo la potenza media P_m e l'area dell'antenna, A . Allora $S_m = P_m/A$.

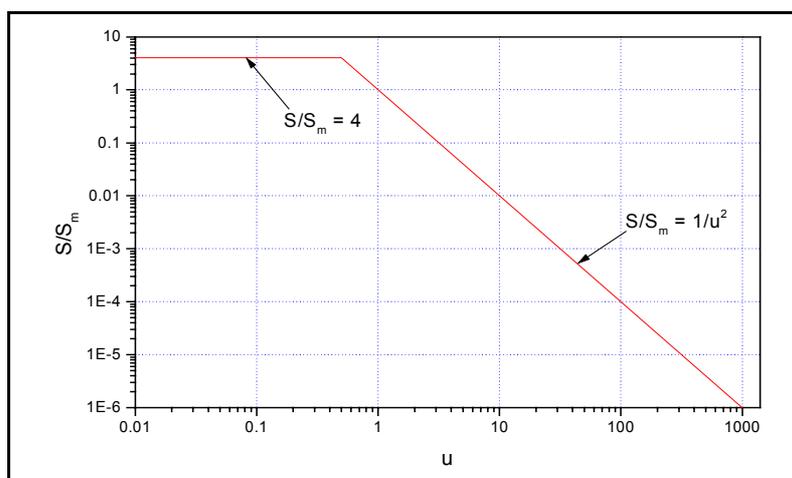


Figura n. 3.9: Valore massimo della densità di potenza normalizzata S/S_m a distanza u dall'apparato

Per svincolarsi dal tipo particolare di antenna è introdotta la grandezza adimensionale $u = r \lambda/A$. Così, ad esempio, se l'area dell'antenna è $A = 10 \text{ m}^2$ e la lunghezza d'onda è $\lambda = 0.3 \text{ m}$ (apparato funzionante alla frequenza di 1 GHz), l'ascissa $u = 1$ di Figura n. 3.9 corrisponde ad una distanza $r = 33.3 \text{ m}$. L'ordinata $S/S_m = 1$ corrisponde al valore medio della densità di potenza sulla superficie dell'antenna; la densità di potenza in prossimità dell'antenna può raggiungere valori più alti di quelli sulla bocca, ma queste oscillazioni non superano il valore di $4 S_m$ e sono limitate alla zona di Fresnel (distanza inferiore a D^2/λ ossia, ad esempio, nel caso di una antenna a superficie rotonda di diametro D , a valori di $u \leq 4/\pi \approx 1.3$). A distanze superiori a D^2/λ la densità di potenza decade con il quadrato della distanza (nel grafico di Figura n. 3.10, $S/S_m = 1/u^2$).

La densità di potenza nella direzione di massimo irraggiamento è la più alta che ci si possa aspettare all'esterno dell'apparato ma il pericolo di esposizione è puramente teorico poiché solo per incidente un individuo può essere esposto al fascio principale (ad es. nella manutenzione dell'antenna radar mentre l'apparato è in funzione ma l'antenna è ferma).

Un caso più significativo è quello dell'irraggiamento indesiderato dell'antenna nella direzione del suolo circostante, ove potrebbero trovarsi degli operatori. Valori che arrivano a qualche mW/cm^2 si possono trovare nelle immediate vicinanze dell'apparato (Figura n. 3.10) dovuti all'insufficiente direttività del lanciatore e alle dimensioni limitate della parabola (fughe e "trabocamenti").

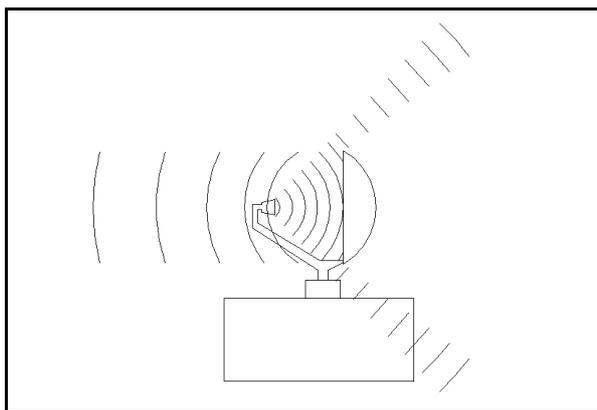


Figura n. 3.10: Esempio di emissioni indesiderate

3.4 Impianti per trasmissioni satellitari

Gli impianti via satellite sono usati per una grande varietà di trasmissioni, sia in campo militare, sia civile: telecomunicazioni telefoniche, televisive, trasmissioni dati, gestione in orbita dei satelliti, telerilevamento.

L'elemento attivo è costituito da un'antenna a paraboloidale, del tipo detto *antenna ad apertura* o a *superficie radiante*. Il principio di funzionamento è simile a quello delle antenne usate nei ponti radio e impianti radar, un esempio è riportato in Figura n. 3.11.

L'antenna è composta da:

- un riflettore costituito da una superficie ottenuta dalla rotazione di una parabola intorno al proprio asse (paraboloide), e limitata da un piano ortogonale a quest'ultimo;
- un elemento radiante detto genericamente *illuminatore*, di dimensioni molto piccole rispetto al diametro del riflettore e posto nel fuoco del paraboloide; questo genera onde elettromagnetiche sferiche che, mediante riflessione vanno a dare luogo ad un fascio di onde piane di diametro molto ristretto, teoricamente uguale a quello del riflettore.

In alcuni casi l'illuminatore è posto in prossimità del vertice del paraboloide e la formazione del fascio di onde piane avviene attraverso doppia riflessione, mediante una superficie iperbolica detta *subriflettore* e situata intorno al fuoco del paraboloide.

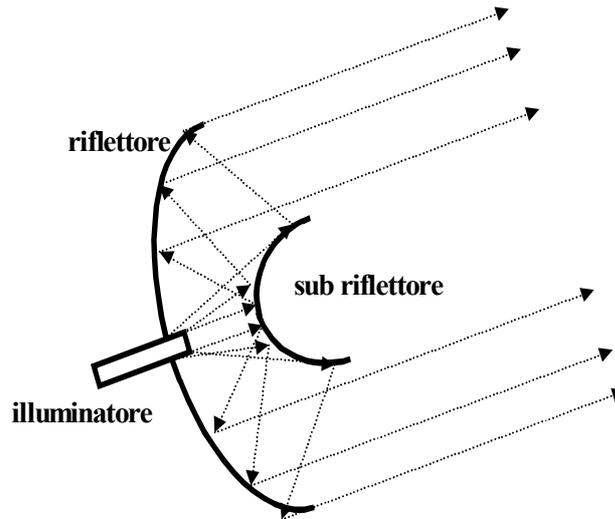


Figura n. 3.11: Antenna ad apertura con subriflettore

In tutti i casi gli impianti sono dotati di dispositivo per l'orientamento azimutale e zenitale dell'asse dell'antenna, in direzione dei satelliti di interesse. Per questo motivo il fascio di onde elettromagnetiche, in cui è concentrata la quasi totalità della potenza emessa, non dovrebbe mai scendere sotto l'orizzonte.

L'apertura dell'antenna, ovverosia il *diametro di bocca*, deve essere maggiore di circa dieci volte la lunghezza d'onda di esercizio. L'ingombro dell'antenna limita pertanto le frequenze di esercizio a partire da 1 GHz in su. Le potenze in gioco vanno genericamente da alcune centinaia di W ad alcune decine di kW.

Si tratta di antenne molto direttive che raggiungono valori di guadagno molto elevati, sino a 50 dBi ed oltre. Dal punto di vista della valutazione dell'esposizione alla popolazione, la situazione più onerosa si ha in caso di orientamento accidentale al di sotto dell'orizzonte. Un'altra componente che vale la pena verificare è quella dovuta alla potenza emessa fuori fascio (talvolta chiamata *spill-over*), che in ogni caso è dell'ordine del 5-10% della potenza emessa.

Gli impianti sono situati generalmente in aree non accessibili al pubblico, in modo tale che in prossimità delle antenne stesse sia presente solo personale addetto. Esiste la possibilità, in alcuni casi, di radiazione dal *brancing*, ovvero da una rete costituita da un insieme di parti meccaniche e guide d'onda giuntate reciprocamente con una certa precisione. Queste sono soggette a diverse sollecitazioni termiche e meccaniche, dovute sia ai sistemi di raffreddamento sia ai movimenti indotti dal sistema, le quali causano col tempo perdita di tenuta delle giunzioni, con conseguente emissione di radiazioni sui lavoratori. Valutazioni in tal senso non possono essere compiute a tavolino e sono necessarie misure in loco.

Principio di funzionamento di un'antenna ad apertura

Queste antenne hanno frequenze portanti corrispondenti a lunghezze d'onda di valore compreso tra 30 cm e qualche millimetro. Godono di notevoli proprietà direttive, essendo capaci di concentrare fortemente l'irradiazione attorno alla direzione del collegamento, con il duplice vantaggio di consentire risparmi della potenza a radio

frequenza di alimentazione e bassi valori di campo elettromagnetico in tutte le regioni dello spazio che non siano nelle immediate vicinanze dell'asse di puntamento dell'antenna medesima.

Nel tipo più comune, di antenna parabolica centrata, la superficie riflettente principale è una porzione di un paraboloide limitata da una sezione ortogonale all'asse, prossima al vertice, che definisce una superficie piana circolare di diametro D , *area di bocca* o *apertura dell'antenna* (Figura n. 3.12); l'energia elettromagnetica emessa dall'irradiatore primario ha il fondamentale effetto di provocare la presenza sul menzionato cerchio di una porzione di onda piana, con vettori campo elettrico \mathbf{E}_s e magnetico \mathbf{H}_s giacenti sul cerchio e ortogonali tra loro, che ai fini della determinazione del campo elettromagnetico nello spazio circostante può essere considerata come un insieme continuo di sorgenti elettromagnetiche elementari S .

Stante la linearità del sistema, la determinazione dei vettori campo elettrico \mathbf{E} e magnetico \mathbf{H} in un generico punto R dello spazio, supposto vuoto, si effettua sommando i contributi singolarmente prodotti in R dalle sorgenti elementari S , tramite una opportuna operazione analitica di integrazione. Nella ipotesi di distribuzione ottimale del campo elettromagnetico sull'apertura, equifase e di ampiezza uniforme, \mathbf{E}_s e \mathbf{H}_s sono invariati in direzione, intensità e fase, in modo che l'esito della somma dei contributi prodotti dalle sorgenti elementari in un punto R a grande distanza è massimo a patto che esso sia nella direzione ortogonale all'apertura; in ogni altra direzione la differenza $r_s - r$ non è più trascurabile. Si producono infatti differenze tra le fasi dei diversi contributi elementari. Si ottiene in tale modo la concentrazione della potenza irradiata sull'asse del paraboloide, che è dunque la direzione di puntamento dell'antenna.

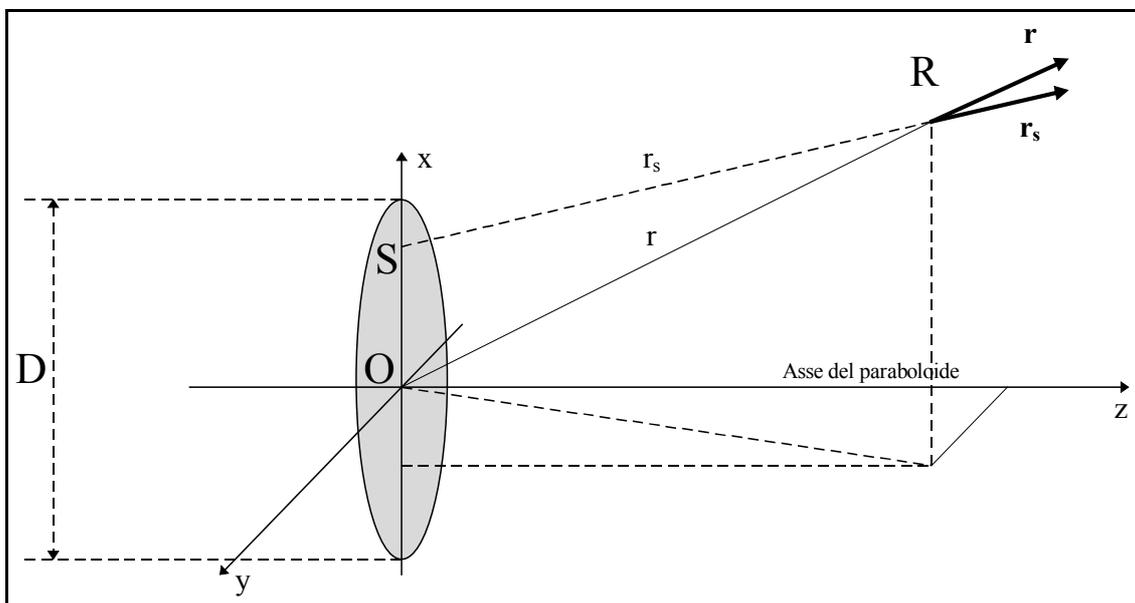


Figura n. 3.12: Rappresentazione dell'apertura di un'antenna parabolica centrata

4. CARATTERISTICHE DEI SISTEMI DI MISURA

4.1 Misuratori in banda larga

I misuratori di intensità di campo sono costituiti generalmente da tre parti: a) un'antenna; b) un rivelatore; c) uno strumento misuratore

L'antenna è costituita in genere da un elemento sensibile al campo elettrico (dipolo corto rispetto alla lunghezza d'onda) o al campo magnetico (un piccolo "loop"). Per rendere il misuratore isotropico (risposta indipendente dalla direzione di propagazione del campo) l'antenna viene realizzata con tre elementi (dipoli o "loop") disposti in modo mutuamente ortogonale. A ciascuno di essi è collegato il rivelatore, che genera una tensione o corrente continua proporzionale al quadrato dell'intensità di campo a radiofrequenza, e che può essere di tipo a diodo oppure di tipo a termocoppia. Nel misuratore viene utilizzato un circuito non lineare che fornisce la radice quadrata della somma dei segnali in uscita dai rivelatori (proporzionali ai valori efficaci delle tre componenti ortogonali del campo, captate dai tre elementi sensibili). In questo modo l'indicazione fornita dal misuratore è proporzionale al valore quadratico medio del campo misurato secondo le relazioni seguenti:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad \text{oppure} \quad H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (4.1.1)$$

In questo paragrafo vengono illustrate in modo schematico le caratteristiche che deve possedere un misuratore di campo elettromagnetico in banda larga nell'intervallo di frequenze 100 kHz – 10 GHz.

- Sensore isotropo entro 1 dB.
- Risposta piatta, entro 2 dB, nella banda di funzionamento.
- Possibilità di mediare le misure su intervalli di 6 minuti.
- Le dimensioni del sensore, compreso l'alloggiamento, non devono superare una lunghezza d'onda alla massima frequenza di lavoro, questo perchè il sensore non dovrebbe produrre scattering significativo del cem incidente.
- I cavi di collegamento sensore-misuratore non devono interagire significativamente con il campo. Il misuratore dovrebbe essere collegato ad un ricevitore mediante un cavo in fibra ottica di almeno 3 metri di lunghezza. Il misuratore deve essere alimentato a batteria, isolato dall'esterno e dotato di apposito filtro di disaccoppiamento. L'autonomia dovrebbe essere di almeno 8 ore con funzionamento entro l'accuratezza dichiarata.
- Le grandezze misurate devono essere W/m² o V/m o A/m, la densità di potenza non dovrebbe essere usata sotto i 3 MHz.
- Il range dinamico deve andare da - 10 dB a + 5 dB dei limiti di esposizione relativi all'intervallo di frequenza considerato.
- Deve essere misurato il valore RMS della grandezza fisica considerata.

- Dovrebbe essere fornito il fattore di correzione da applicare in caso di segnali modulati.
- Il tempo di risposta, tempo richiesto per raggiungere il 90% del valore finale, dovrebbe essere non superiore ad 1 secondo.
- Il misuratore dovrebbe essere dotato della funzione “max-hold” per poter valutare il livello massimo del segnale nel caso di variabilità temporale del suo livello di picco.
- Lo strumento dovrebbe essere fornito di certificato di calibrazione con incertezza entro 1 - 2 dB, dovrebbe anche essere valutata la risposta dello strumento fuori banda. Le specifiche del misuratore devono contenere indicazioni sul suo comportamento in caso di modulazioni del segnale incidente o di presenza di più frequenze contemporaneamente.
- Il display deve essere chiaramente leggibile alla distanza di un braccio teso, deve essere chiaramente indicata la scala in uso assieme alla grandezza misurata.
- Lo strumento deve essere di dimensioni e peso tali da consentire un facile uso e trasporto, devono essere evitate procedure complicate.
- Lo strumento non deve essere sensibile alle cariche elettrostatiche.
- Il sistema di misura deve comprendere un tripode in materiale dielettrico per sostenere il sensore con un sistema di supporto regolabile in altezza in modo telescopico fino ad almeno 2 metri.

4.2 Catena di misura in banda stretta

La rivelazione delle singole componenti spettrali e delle relative ampiezze dei campi emessi da sorgenti elettromagnetiche RF e microonde viene ottenuto per mezzo di una catena di misura costituita da:

- sistema di ricezione del segnale costituito da un'antenna;
- sistema di rivelazione delle singole componenti spettrali e delle relative ampiezze costituito da un analizzatore di spettro;
- sistema di trasmissione del segnale dal ricevitore (antenna) al sistema di misura (analizzatore di spettro) costituito da un cavo coassiale o, per alcune nuove antenne attive, da trasduttori elettro-ottici e cavi di collegamento a fibra ottica.

Antenna. Nell'utilizzo di un'antenna per la ricezione di campi EM, occorre introdurre il parametro area efficace dell'antenna. Essa è definita come la superficie A_{eff} (misurata in m^2) che moltiplicata per la densità di potenza S (W/m^2) incidente sull'antenna, fornisce la potenza P_r (in watt) che è immessa nel ricevitore e trasferita al carico presente a valle del ricevitore (risultando così da esso dipendente):

$$P_r = S * A_{eff} \quad (4.2.1)$$

La relazione che lega l'area efficace al guadagno dell'antenna G è la seguente:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2 * G}{4\pi} \quad (4.2.2)$$

dove per guadagno si intende il rapporto tra la densità di potenza S_m irradiata dall'antenna, ad una certa distanza r , nella direzione di massimo irraggiamento e la densità di potenza S_i prodotta alla stessa distanza da un'antenna isotropa.

Esistono una grandissima varietà e disponibilità commerciale di antenne standard. Di seguito vengono indicati i tratti caratteristici di alcune di esse.

Il *dipolo a $\lambda/2$* è un'antenna a banda stretta avente una lunghezza complessiva pari a metà della lunghezza d'onda della radiazione da misurare. Questo tipo di antenna viene comunemente utilizzato per misure di campi EM a polarizzazione lineare e viene utilizzata soprattutto per frequenze da 30 MHz a 1 GHz. Naturalmente occorre un dipolo di diversa lunghezza per ogni singola frequenza, diminuendo così l'utilità pratica di tale antenna. È infatti necessario sostituire l'antenna nel caso di dipoli non telescopici o regolare il dipolo accordabile in modo da far coincidere la lunghezza dello stesso con $\lambda/2$ della frequenza in esame.

L'*antenna loop* è un'antenna a larga banda costituita da un loop conduttore ed utilizzata tipicamente nell'intervallo di frequenze da 10 kHz a 20 MHz per misure di campo magnetico.

L'*antenna biconica* è una delle antenne standard più diffuse per misure di campo. Si tratta di un'antenna a banda larga che copre tipicamente la gamma da 20 a 200 MHz. La sua area equivalente dipende fortemente dalla frequenza. Sono attualmente in commercio alcuni modelli di biconica di nuova concezione e dimensioni contenute (minore sensibilità) ma di intervallo di risposta in frequenza esteso fino a oltre 2 GHz.

L'*antenna logaritmica periodica* è costituita da una successione di dipoli paralleli e complanari, di lunghezza ed interdistanza crescente, tutti collegati tra loro. È un'antenna a banda larga (tipicamente da 200 MHz ad 1 GHz) a polarizzazione lineare.

L'*antenna a spirale conica logaritmica* è costituita da una spirale conduttrice che si avvolge su una superficie conica con un passo che diminuisce procedendo dalla base verso il vertice. Si tratta di un'antenna a banda larga, a polarizzazione circolare, disponibile in due modelli standard, dimensionati per funzionare rispettivamente da 200 MHz ad 1 GHz e da 1 a 10 GHz. La sua area equivalente dipende fortemente dalla frequenza.

Le *trombe a guadagno standard* sono antenne realizzate mediante progressivo allargamento di una guida d'onda rettangolare. Sono tipicamente utilizzate per misure nella banda SHF (3-30 GHz) e nella parte più bassa della EHF (30-300 GHz); presentano valori dell'area equivalente pari ad una frazione (di norma 0,5-0,9) dell'area geometrica della bocca.

Nell'utilizzo di un'antenna in ricezione, viene anche definito il parametro *fattore d'antenna*. Con esso viene generalmente indicato, in scala logaritmica, il rapporto tra la grandezza del campo (elettrico o magnetico) incidente e la tensione ad esso corrispondente, presente al connettore dell'antenna.

Analizzatore di spettro. L'analizzatore di spettro può essere utilizzato per eseguire delle scansioni in frequenza allo scopo di individuare le componenti spettrali presenti o come ricevitore sintonizzabile per eseguire indagini sull'andamento temporale del segnale associato ad una frequenza ben precisa (modalità "span zero").

Nel primo caso, la selezione dell'intervallo di frequenze da indagare può essere ottenuta o tramite selezione della frequenza centrale (CF) e dell'intervallo di scansione (SPAN) o tramite selezione della frequenza di inizio (START) e di fine dell'intervallo (STOP).

Nel secondo caso, l'andamento temporale del segnale in esame può essere ottenuto selezionando come frequenza centrale la frequenza della portante e ponendo uguale a zero l'ampiezza dell'intervallo di scansione.

La risoluzione R in frequenza fornita dall'analizzatore dipende dall'ampiezza dell'intervallo di scansione unitamente al numero di punti calcolati nell'intervallo (da 400 a 600 a seconda della marca e modello dello strumento), mentre la sua accuratezza dipende oltre che dallo SPAN anche dalla deriva dell'oscillatore interno all'analizzatore (trascurabile per i nostri scopi e tipicamente dell'ordine di 10^{-6} anno).

In presenza di due componenti spettrali vicine tra loro nell'intervallo di frequenze selezionato, si può agire sulla RBW (Resolution BandWidth) dello strumento per poter risolvere in frequenza le due componenti. Un valore della RBW più stretto consente di aumentare la risoluzione in frequenza e la separazione delle componenti. Al contrario la selezione di una RBW troppo grande in rapporto alla larghezza spettrale di una componente può determinare la non rivelazione della componente stessa o la non risoluzione di due componenti tra loro vicine. Un buon criterio di scelta consiste nel selezionare una RBW dello stesso ordine di grandezza della larghezza di banda della componente spettrale cercata.

A parità di intervallo di frequenza, la scelta di una RBW più stretta può comportare l'aumento del tempo (SWEEP) necessario alla scansione dell'intervallo prescelto.

Il miglioramento del rapporto segnale/rumore viene ottenuto per mezzo di un filtro posto all'uscita del rivelatore di involuppo (VBW – Video Band Width) la cui larghezza può essere scelta minore o al più uguale alla RBW.

Un ulteriore miglioramento del rapporto S/N può essere ottenuto, per i soli segnali non modulati, con l'operazione di media (AVERAGE) in cui i valori mostrati sul display sono il risultato della media eseguita su più scansioni dell'intervallo in frequenza selezionato.

Per individuare il valore di frequenza corrispondente ad una componente spettrale l'analizzatore dispone generalmente di uno o più MARKER.

Gli analizzatori di spettro sono in grado di misurare segnali con un'ampia dinamica (valori da -130 dBm a $+25$ dBm, come tipico intervallo dinamico). Il segnale viene misurato rispetto ad un valore di riferimento (la cui accuratezza è tipicamente di ± 1 dB) e visualizzato sul display solitamente con scala logaritmica. La presenza di componenti spettrali che differiscono tra loro per diversi ordini di grandezza giustifica l'utilizzo di questa scala rispetto a quella lineare che è comunque selezionabile da parte dell'operatore.

La misura dell'ampiezza dei segnali può essere ottenuta in diverse unità (dBm, dB μ V, dBpW, V, mW).

L'analizzatore presenta in ingresso un attenuatore variabile (tipicamente fino a qualche decina di dB); questo attenuatore permette di limitare il segnale in ingresso al mixer al fine di evitarne il funzionamento in condizioni di saturazione. In presenza di segnali di ampiezza sconosciuta è buona norma iniziare la misura anteponendo, invece, un attenuatore esterno che protegga lo stadio di ingresso dell'analizzatore da danni permanenti. La massima ampiezza accettata in ingresso varia a seconda del modello di analizzatore ed è chiaramente evidenziata in prossimità del connettore di ingresso.

Alcuni analizzatori consentono inoltre di introdurre il fattore d'antenna alla frequenza in esame in modo da ottenere immediatamente la misura dell'ampiezza della componente spettrale.

La risoluzione in ampiezza è una caratteristica intrinseca dell'analizzatore ed è tipicamente di $0,1 \div 0,2$ dB. La visualizzazione della scala delle ampiezze è definita da una griglia a 10 divisioni generalmente regolabili tra 10 dB/divisione a 0,1 dB/divisione.

La maggior parte dei modelli di analizzatore di spettro richiede una alimentazione a 220 V - 50 Hz e, pertanto, per le misure in campo richiede l'utilizzo di un generatore portatile stabilizzato.

Cavo coassiale. Un cavo coassiale permette la trasmissione di segnali a radiofrequenza con perdite contenute grazie al mantenimento dell'impedenza caratteristica (50 Ohm) al variare della frequenza ed elevata reiezione ai campi elettromagnetici esterni. Le attenuazioni sono generalmente espresse in dB/m ed aumentano al crescere della frequenza trasmessa. Per un cavo tipo RG-223/U, ad esempio, i valori vanno da 0,005 dB/m alla frequenza di 1 MHz a 0,6 dB/m alla frequenza di 1 GHz. A tali attenuazioni deve essere sommata l'attenuazione dovuta alla transizione cavo-connettore, che - se non corretta - incide in maniera rilevante. È necessario pertanto conoscere il fattore di attenuazione di ogni insieme cavo-connettori utilizzato, per apportare le opportune correzioni al valore rilevato alle frequenze di misura.

4.2.1 Allestimento del mezzo mobile

Per effettuare correttamente le misure sul campo, che comportano l'utilizzo dei vari strumenti costituenti la catena di misura, non devono essere presenti livelli di campo elettromagnetico tali da influenzarne il corretto funzionamento. Per garantire questa condizione è auspicabile poter disporre di un mezzo mobile schermato in modo da creare un ambiente a basso livello di campo all'interno dello stesso (alcuni analizzatori hanno immunità radiata nell'intervallo 80 MHz - 1 GHz solo fino a 3 V/m).

Per minimizzare le interferenze sulla misura dovute a segnale condotto è inoltre necessario che il mezzo mobile sia dotato di un pannello che permetta di connettere tramite un giunto passaparatia, con la propria massa collegata alla massa della schermatura, il cavo schermato proveniente dall'antenna con l'analizzatore di spettro posto all'interno del furgone. In questo modo viene disaccoppiato l'esterno dall'interno del mezzo.

Per poter effettuare misure in autonomia è utile inoltre un generatore portatile stabilizzato a 220 V da posizionarsi ad una distanza di almeno 15 m dall'antenna usata in ricezione.

5. PROCEDURE DI MISURA

5.1 Modalità di misura dei campi elettromagnetici emessi da impianti di teleradiodiffusione e da stazioni radio base per telefonia mobile

Il presente protocollo è mirato a fissare le modalità di misura del campo elettromagnetico emesso dalle sopraccitate sorgenti fisse per teleradiocomunicazione nell'intervallo di frequenza 100 kHz – 3 GHz.

Tutti gli strumenti per la misura di campi EM a scopo protezionistico misurano o l'intensità del campo elettrico o quella del campo magnetico, nel senso che sono dotati di sensori che rispondono all'uno o all'altro di questi agenti fisici; il fatto che esistano strumenti che combinano i sensori dei due tipi per fornire una misura contemporanea di entrambi i campi non altera la sostanza di questo stato di cose. Pressoché nessuno strumento, invece, misura direttamente la densità di potenza della radiazione. Il fatto che talvolta l'indicazione dello strumento sia espressa proprio in termini di densità di potenza (cioè sia espressa in W/m^2 o mW/cm^2) può essere considerato una sorta di retaggio storico; in questi strumenti, infatti, l'effettiva grandezza misurata dal sensore (intensità del campo elettrico o del campo magnetico) viene convertita al momento della visualizzazione in una "densità di potenza di onda piana equivalente" per mezzo delle note formule.

Poiché le norme di riferimento (compreso il D.M. 381/98) specificano sempre i valori massimi sia del campo elettrico sia del campo magnetico e, quando specificano anche la densità di potenza (per frequenze oltre 3 MHz, nel caso del D.M. 381/98), questa è semplicemente il prodotto delle altre due grandezze, si può concludere che la determinazione della densità di potenza non ha particolare significato dal punto di vista della misura e che quelle che invece devono essere valutate sono le intensità del campo elettrico e del campo magnetico.

Con questa premessa, la specifica di quale grandezza effettivamente debba essere misurata (e cioè se solo il campo elettrico, solo il campo magnetico o entrambi) dipende dalle caratteristiche della sorgente, dalla frequenza e dalla distanza del punto di misura da essa. Infatti, la struttura stessa del campo elettromagnetico varia notevolmente in funzione della distanza dalla sorgente, rapportata alla lunghezza d'onda. A questo proposito, si è soliti distinguere tre regioni, con l'ovvia considerazione che non si tratta di zone separate da barriere precise, bensì che sfumano una nell'altra con continuità: la regione dei campi reattivi ($r < \lambda/10$), la regione dei campi radiativi vicini (zona di Fresnel) e la regione dei campi radiativi lontani ($r > D^2/\lambda$) (zona di Fraunhofer).

Nella regione dei campi reattivi occorre misurare indipendentemente sia il campo elettrico sia il campo magnetico, poiché essi non possono essere dedotti uno dall'altro. Per la misura, occorre utilizzare sensori dotati della necessaria risoluzione spaziale, cioè di dimensioni piccole rispetto sia alla lunghezza d'onda sia all'estensione dell'area da caratterizzare. Nel nostro caso questa situazione si può verificare unicamente in relazione

ai trasmettitori ad onde medie; già nella banda delle radio FM infatti, esposizioni nella regione dei campi reattivi possono riguardare tutt'al più il personale addetto alla manutenzione degli apparati.

Nella regione dei campi radiativi (vicini o lontani) è in genere sufficiente misurare o il solo campo elettrico o il solo campo magnetico, calcolando la grandezza non misurata in base alle note relazioni d'onda piana. Nella zona di campo radiato vicino, il campo elettrico ed il campo magnetico sono correlati punto a punto ma con grosse variazioni spaziali dell'intensità. Nella regione dei campi radiativi vicini è necessario utilizzare sensori a risoluzione spaziale alta anche *rispetto alla lunghezza d'onda*, mentre nella zona lontana possono essere usate antenne estese (cioè paragonabili o grandi rispetto alla lunghezza d'onda), purché sufficientemente compatte nei confronti dell'estensione dell'area da caratterizzare.

In generale le misure di campo possono essere effettuate in banda larga se:

- è necessario individuare punti critici in una zona su cui insistono più impianti;
- il valore misurato non supera il 75% del limite (vedi linee guida applicative D.M. 381/98);

viceversa è necessario effettuare la misura utilizzando una catena strumentale in banda stretta se:

- sono presenti più sorgenti che emettono in intervalli di frequenza su cui devono essere applicati differenti valori limite;
- mediante la misura in banda larga viene evidenziato un superamento del limite per cui si rende necessaria la riduzione a conformità, procedura che richiede di valutare i diversi contributi forniti singolarmente da ogni sorgente.

Ovviamente questo equivale ad una prevalenza del dato ottenuto mediante misura in banda stretta sul dato ottenuto in banda larga. In altri termini se vi è discordanza tra i dati in banda larga e in banda stretta si acquisiscono questi ultimi.

Tutte le misure descritte nelle presenti procedure devono essere effettuate con strumenti tarati e riferibili secondo il D.L. 273/91. La periodicità della taratura deve essere almeno biennale per i sensori di campo a banda larga, per le antenne attive o dotate di balun e per i cavi coassiali, e almeno triennale per le antenne passive e non provviste di balun e per analizzatori di spettro o ricevitori.

5.2 Misure in banda larga

Se la misura non viene effettuata con sensore isotropo (costituito da tre dipoli elettrici o magnetici mutuamente ortogonali) ma con un sensore direzionale, questo deve essere orientato dall'operatore in tempi successivi secondo tre direzioni mutuamente ortogonali mantenendo il centro sempre nella stessa posizione. L'intensità del campo si ottiene effettuando la radice quadrata della somma dei quadrati delle tre componenti senza tenere conto di ciascuna fase.

I conduttori di collegamento sensore-misuratore devono perturbare il campo il meno possibile. È opportuno inoltre cambiare la direzione dei cavi di collegamento tenendo la sonda fissa per controllare eventuali variazioni del segnale misurato dovuto ad accoppiamenti con il campo elettromagnetico.

Per non influenzare la misura del campo l'operatore deve porsi ad una certa distanza dalla sonda di campo elettrico, generalmente almeno 3 o 4 metri, e questa deve essere

fissata su cavalletto in materiale dielettrico per evitare riflessioni dovute allo stesso. La lettura dell'intensità del campo può essere effettuata tramite ripetitore collegato al lettore con fibra ottica o, in assenza di possibilità di tale collegamento, allontanandosi dal misuratore ed effettuando la stessa per mezzo di binocolo.

Effettuare una prima serie di misure scansionando l'area di interesse con un numero di punti adeguato alla lunghezza d'onda al fine di determinare il punto in cui l'intensità di campo elettrico o magnetico è massima. Tale scansione va effettuata posizionando il sensore su un supporto dielettrico a una medesima altezza dal piano di calpestio (1.5 m). Tale valutazione è valida se la sorgente di campo è sufficientemente costante nel periodo della misura. Se le misure vengono eseguite in campo vicino, verificare che il valore del campo non vari rapidamente spostando il sensore per brevi distanze; in questo caso considerare il punto relativo al valore massimo misurato.

I punti di misura devono essere lontani da oggetti metallici presenti occasionalmente (automobili ecc.). La sonda deve essere mantenuta ad una certa distanza (di norma circa 1 metro)⁽¹⁾ da qualunque oggetto conduttivo, ivi compresa la sorgente, per minimizzare l'accoppiamento, che altererebbe la risposta della sonda.

La sonda di campo elettrico o magnetico deve essere fissata su di un supporto o cavalletto dielettrico (nel caso di misure di campo elettrico disaccoppiando quando possibile la discesa resistiva dalla componente principale del campo in esame).

I risultati delle misure devono essere forniti come valori efficaci di campo elettrico o magnetico mediati temporalmente su 6 minuti e mediati nello spazio su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano secondo quanto previsto dalle linee guida applicative del DM 381/98. A tal fine, devono essere effettuate per ogni punto tre misure con centro della sonda alle altezze di 1.1 m, 1.5 m e 1.9 m dal piano di calpestio. Il valore di campo elettrico o magnetico misurato sarà pari rispettivamente a:

$$E_{\text{med}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 E_i^2}{3}} \quad [\text{V/m}] \qquad H_{\text{med}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 H_i^2}{3}} \quad [\text{A/m}] \quad (5.2.1)$$

Ricordiamo che le medie temporale e spaziale devono essere effettuate sulla densità di potenza e quindi sul quadrato del valore di campo. Per ogni misura deve essere fornito il valore medio su 6 minuti. Non tutte le sonde hanno la possibilità di acquisire su 6 minuti e registrare il valore medio del quadrato del campo. In questo caso verificare che l'intensità del campo non vari nel tempo osservando il visore dello strumento e se ciò non succede, annotare alcune (per avere una statistica sufficiente, almeno 12) letture a intervalli di tempo regolari entro i 6 minuti e quindi calcolare la media temporale. Nel caso di misure su sorgenti di onde medie, in cui è presumibilmente necessario effettuare anche misure di campo magnetico, occorre verificare il fattore di reiezione al campo elettrico della sonda utilizzata. Non tenere conto di questo fattore è spesso causa di misure non corrette in quanto la risposta del misuratore è influenzata dal campo elettrico presente che, viste le caratteristiche delle sorgenti, può fornire il contributo maggiore al valore letto sullo strumento. Quando si eseguono misure di segnali modulati (es. modulazione digitale, modulazione in ampiezza) o di segnali multifrequenza (caso riconducibile alla modulazione in ampiezza) occorrerebbe conoscere la correzione da

¹ Per una sonda di dimensione massima pari a 10 cm si può contenere l'errore della risposta dovuto all'accoppiamento con un corpo conduttivo entro 1 dB se si rispettano le seguenti distanze minime: 25 cm per frequenze da 100 KHz a 3 MHz; 15 cm per frequenze da 3 MHz a 10 MHz; 10 cm per frequenze > 10 MHz. Ovviamente, a causa delle riflessioni, l'intensità del campo misurato potrà subire localmente variazioni cospicue rendendo poco riproducibile la misura.

apportare alla risposta del sensore. Nel caso in cui la sorgente in esame sia una stazione radio base per telefonia mobile il risultato della misura in banda larga può essere correlato ad una condizione di minimo traffico con un basso numero di portanti attive. Per evitare sottostime del livello di campo misurato rispetto a quello presente in situazioni di maggiore carico, che potrebbero dare luogo a superamento del limite non evidenziato, è opportuno procedere alla valutazione in uno dei seguenti modi:

- procedere alla misura in banda stretta che consente di determinare le condizioni di traffico presenti al momento della misura in modo da correggere il valore misurato rapportandolo al numero di portanti gestibili dall'impianto (questa procedura richiede tempi maggiori e non è sempre applicabile in quanto è necessaria la disponibilità di catene di misura in banda stretta);
- chiedere al gestore la situazione del traffico al momento della misura e riportare il valore misurato in banda larga a quello possibile nelle condizioni di massimo traffico;
- acquisito il valore misurato, stimare il valore massimo di campo prodotto dalla stazione radio base correggendolo per un fattore n_{eq} che, ipotizzando una situazione limite di misura effettuata con un'unica portante attiva da parte di tutti gli impianti che insistono sul punto di misura, risulta uguale a \sqrt{n} con n pari al numero massimo di portanti gestite dall'impianto. Questo fattore correttivo, molto grossolano, può essere affinato secondo quanto riportato in appendice 2 con un fattore che tenga conto delle attenuazioni dovute alla distanza ed all'orientazione delle celle.

Quest'ultima procedura, pur essendo più accurata, ha lo svantaggio di richiedere la conoscenza di tutti i parametri tecnici delle celle (potenza, diagrammi verticale e orizzontale di irradiazione, guadagno, tilt elettrico e/o meccanico, altezza del centro elettrico del sistema radiante e orientamento rispetto al nord geografico delle celle) e conseguentemente richiedere un calcolo non immediato.

La procedura riportata al punto 3 ha lo scopo di evidenziare le situazioni in cui il limite non è sicuramente superato e che, pertanto, non richiedono ulteriori approfondimenti. Tale procedura non può invece essere applicata per fornire un valore di esposizione al campo elettrico, che deve essere stimata mediante le procedure riportate ai punti 1 e 2 o in Appendice 3.

5.3 Misure in banda stretta

La rivelazione delle singole componenti spettrali e delle relative ampiezze dei campi emessi da sorgenti elettromagnetiche RF e microonde viene ottenuto per mezzo di una catena di misura costituita da:

- sistema di ricezione del segnale costituito da un'antenna;
- sistema di rivelazione delle singole componenti spettrali e delle relative ampiezze costituito da un analizzatore di spettro o ricevitore;
- sistema di trasmissione del segnale dal ricevitore (antenna) al sistema di misura (analizzatore di spettro o ricevitore) costituito da un cavo coassiale schermato.

Siccome la risposta dell'analizzatore di spettro può essere influenzata dal campo elettromagnetico ambientale (immunità elettromagnetica), questo strumento deve essere posizionato in un'area con bassi livelli di fondo ambientale. Nell'effettuare misure in

ambiente esterno è, quindi, consigliabile l'utilizzo di un furgone schermato. In Figura n. 5.1 riportiamo un diagramma esemplificativo della catena di misura in banda stretta.

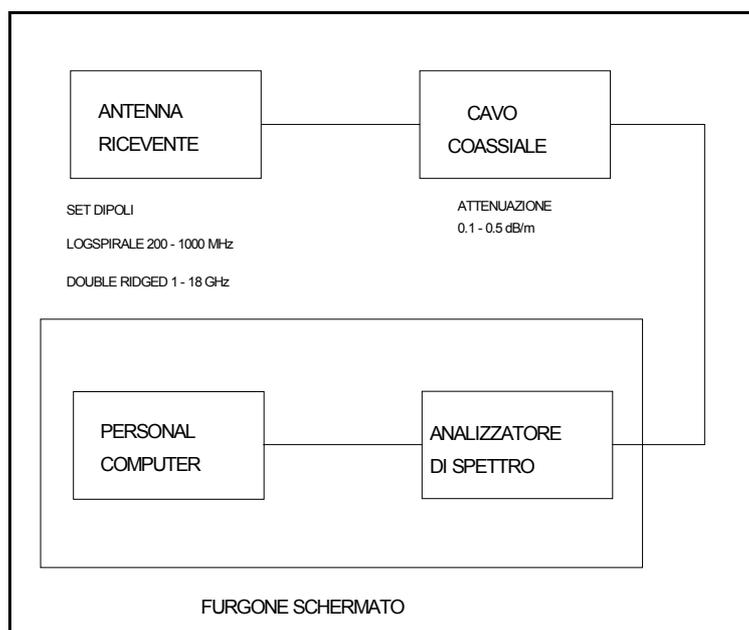


Figura n. 5.1: Schema dell'allestimento strumentale in banda stretta

Per quanto riguarda l'analizzatore di spettro è opportuno conoscerne l'immunità radiata in modo da poter effettuare misure affidabili. La maggior parte degli analizzatori di spettro ha una immunità radiata nell'intervallo 80 MHz - 1 GHz solo fino a 3 V/m. L'analizzatore presenta in ingresso un attenuatore variabile (tipicamente fino a qualche decina di dB); questo attenuatore permette di limitare il segnale in ingresso al mixer al fine di evitarne il funzionamento in condizioni di saturazione. In presenza di segnali di ampiezza sconosciuta è buona norma iniziare la misura anteponendo, invece, un attenuatore esterno che protegga lo stadio di ingresso dell'analizzatore da danni permanenti.

Nell'impostazione della misura risulta determinante la scelta di alcuni parametri quali l'intervallo di frequenza in cui effettuare l'analisi, la risoluzione dei filtri di banda e video, etc., la cui scelta avviene in funzione del tipo di segnale da analizzare.

5.3.1 Procedure di misura

Condizioni ambientali

Le misure all'aperto devono essere eseguite in assenza di precipitazioni atmosferiche e con clima asciutto. La temperatura ambientale deve essere compresa nell'intervallo di funzionamento dichiarato dal costruttore per la strumentazione utilizzata.

Predisposizione della strumentazione

- Il gruppo elettrogeno deve essere posizionato il più lontano possibile dalla catena di misura in particolar modo dall'antenna di misura, per ridurre eventuali disturbi.

- L'analizzatore deve essere collocato possibilmente in una posizione schermata dal campo elettromagnetico (ad esempio all'interno di una struttura schermante) o comunque in una zona dove il campo non sia superiore a qualche V/m (3 V/m o secondo specifiche del costruttore).
- Lasciare acceso l'analizzatore di spettro per circa mezz'ora prima di utilizzarlo (o secondo prescrizioni) ed eseguire la procedura di verifica della calibrazione secondo le indicazioni fornite dal costruttore.
- L'antenna dovrebbe essere posta ad una distanza pari ad almeno una λ (la più grande nel caso di più sorgenti) dall'analizzatore e da oggetti metallici (veicoli, etc.) o nel caso di antenne corte (rispetto la lunghezza d'onda) ad una distanza pari a 2 volte le dimensioni dell'antenna stessa.
- Il cavo coassiale di collegamento antenna-analizzatore deve essere disposto nel modo più rettilineo possibile.
- L'antenna di misura viene montata su di un cavalletto non metallico. Nel caso di antenne di dimensioni contenute ($D < 50$ cm) se la differenza Δ tra le misure effettuate in banda larga alle tre diverse altezze non supera il 25% ($\Delta = 100 * (E_{max} - E_{min}) / E_{min}$), posizionare il centro elettrico alla sola altezza di 1.5 m, in caso contrario posizionare il centro dell'antenna alle altezze di 1.1 m - 1.5 m - 1.9 m (come nel caso della misura in banda larga). Nel caso di utilizzo di antenne estese ($D > 50$ cm), quali ad esempio la biconica tradizionale o il dipolo (a frequenze inferiori a circa 300 MHz) posizionare il centro elettrico dell'antenna ad un'altezza da terra di 1.5 m (in questo caso le dimensioni dell'antenna consentiranno di ottenere un valore rappresentativo della media sulla sezione verticale del corpo umano).

Per ogni posizione la prima misura viene fatta utilizzando in ingresso all'analizzatore opportuni attenuatori esterni (10 o 20 dB), per evitare che il segnale in ingresso superi il valore massimo accettabile dall'analizzatore (tipicamente 20-30 dBm) danneggiandolo; successivamente, nel caso si rilevino complessivamente valori inferiori al massimo ingresso consentito, si può eventualmente scegliere di effettuare la misura senza attenuatori esterni.

I parametri che caratterizzano l'acquisizione dello spettro (RBW, VBW, SWEEP) vengono fissati in modo da risolvere al meglio le varie sorgenti.

La scala dell'ampiezza deve consentire di visualizzare in modo ottimale i picchi di interesse.

Calcolo del campo

Per ogni frequenza (j) la componente i-esima (ad esempio x,y,z per le antenne loop e biconica, orizzontale e verticale per l'antenna log-periodica) è data dalla seguente formula:

$$E(i)_j = 10 [\text{dBm} + \text{AF} + \text{IA} + \text{CA} - 13.01] / 20 \quad [\text{V/m}] \quad (5.3.1)$$

dove: dBm è l'ampiezza del segnale letto sull'analizzatore;

AF(dB) è il fattore d'antenna;

IA (dB) è l'eventuale l'attenuazione esterna all'ingresso dell'analizzatore;

CA (dB) l'attenuazione del cavo.

I valori di AF, IA, CA, quando non direttamente disponibili, vengono calcolati per ogni frequenza mediante interpolazione lineare tra due dati sperimentali successivi ricavati dal certificato di taratura.

Acquisizione dei dati L'acquisizione dello spettro viene fatta memorizzando i valori massimi (MAX HOLD) per un tempo sufficiente perché i valori di picco si stabilizzino. Solitamente sono sufficienti tempi dell'ordine della decina di secondi.

I parametri ottimali per l'acquisizione degli spettri (RBW, VBW, SWP) in relazione alle diverse tipologie di sorgenti sono riportati nella Tabella n. 5.1.

L'elemento rivelatore del sistema di misura è costituito da antenne che possono essere classificate in due tipologie a seconda dell'apertura del lobo di irradiazione, un lobo stretto equivale, se usate in trasmissione, ad un guadagno elevato (> 3 dB), cioè elevata direttività, mentre se il lobo è aperto il guadagno è basso (antenne a bassa direttività). La metodologia di misura sarà differente per le due tipologie di antenna ed in particolare:

- **antenne a bassa direttività (es. dipolo, biconica):** si acquisiscono tre spettri corrispondenti a tre posizioni mutuamente perpendicolari, mantenendo il centro elettrico sempre nella medesima posizione. I tre spettri così acquisiti saranno elaborati sommando quadraticamente i valori di campo elettrico o magnetico, rilevati per ogni frequenza nelle tre posizioni, per ottenere lo spettro risultante. Se indichiamo con $E_{i,j}$ il contributo della i -esima frequenza alla j -esima componente il valore globale del campo E sarà dato dalla seguente somma quadratica:

$$E = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n E_{i,j}^2} \quad [\text{V/m}] \quad (5.3.2)$$

con n numero totale di componenti spettrali.

- **antenne ad elevata direttività:** se la direzione di provenienza della radiazione è ben individuabile, si orienta l'antenna verso la sorgente e si acquisisce lo spettro. Questa operazione deve essere ripetuta nel caso di antenne a polarizzazione lineare per due direzioni di polarizzazione ortogonali alla direzione di provenienza del segnale, quindi, i valori di campo così ottenuti devono essere sommati quadraticamente fra di loro per ottenere il campo risultante. Quando la radiazione proviene da più direzioni, perché generata da sorgenti installate in più postazioni, si devono effettuare più misure orientando l'antenna verso le diverse sorgenti. In presenza di molte direzioni di provenienza dei segnali, si tenga conto che la radiazione compresa in un settore angolare di circa $\pm 15^\circ$ dall'asse dell'antenna viene misurata senza significative attenuazioni. Successivamente per ogni frequenza rilevata verrà utilizzato il valore massimo misurato nelle varie direzioni, rispettivamente per il piano orizzontale e per quello verticale.
- Se indichiamo con $E_{i,j}$ il contributo massimo della i -esima frequenza alla j -esima componente il valore globale del campo E sarà dato dalla seguente somma quadratica:

$$E = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{i,j}^2} \quad [\text{V/m}] \quad (5.3.3)$$

con n numero totale di componenti spettrali, $m=2$ nel caso di antenne direttive a polarizzazione lineare, $m=1$ nel caso di antenne direttive a polarizzazione circolare.

Radio FM

Al fine di distinguere i segnali adiacenti, che non dovrebbero differire in frequenza per meno di 150 kHz (256 kHz per trasmissioni stereo), sarebbe necessario utilizzare una

risoluzione (RBW) almeno pari a 100 kHz. In realtà, poiché non è difficile trovare segnali che differiscono per meno di 100 kHz, tenendo conto delle impostazioni disponibili sugli analizzatori di spettro, risulta ottimale l'adozione di una RBW di 30 kHz con una uguale VBW. Per avere a video una buona risoluzione dei segnali, ed una migliore accuratezza nell'individuazione del picco, è opportuno l'utilizzo di un intervallo di lettura (span) al più pari a 10 MHz. Si ritiene consigliabile un valore di 5 MHz.

Radio AM

Uno degli aspetti più critici della misura dei segnali modulati di tipo AM è la difficoltà di determinare l'ampiezza globale del segnale dovuto alla portante e ad una modulante con indice di modulazione e frequenza variabili. A tale scopo risulta fondamentale determinare l'ampiezza della portante e ricavare da questa il valore efficace del segnale AM ipotizzando un indice di modulazione che si ritiene significativo per una determinazione cautelativa del livello medio del segnale. Siccome la frequenza minima di modulazione dei segnali AM è di 30 Hz, per poter determinare l'ampiezza della portante occorrerebbe utilizzare una RBW inferiore a 30 Hz, parametro che solitamente non è disponibile sugli analizzatori di spettro. Per ovviare a tale problema si può agire sulla VBW che corrisponde ad un filtro passa basso che segue il filtro passa banda corrispondente alla RBW. In particolare impostando una RBW di 10 kHz (in modo da considerare il contributo di segnali modulanti alla massima frequenza di banda possibile), uno span di 200 kHz ed una VBW di 10 Hz, parametri usualmente disponibili sugli analizzatori di spettro, è possibile determinare il contributo associato alla sola portante. Dall'ampiezza della portante così determinata si può ricavare l'ampiezza del segnale modulato, ipotizzando la condizione cautelativa di una modulazione dell'80%, aggiungendo 1,2 dB al valore misurato sulla portante.

TV

Le caratteristiche della componente video del segnale televisivo, modulata in ampiezza, sono molto complesse in quanto la modulazione varia in modo significativo in funzione dell'immagine trasmessa. Queste caratteristiche presentano però una componente costante, dovuta agli impulsi di sincronismo che si ripetono sempre con la stessa ampiezza ed indice di modulazione del 100%, ad intervalli di tempo regolari ma che permangono per un tempo molto breve. Per determinare in modo riproducibile il livello del segnale video occorrerà pertanto valutare l'ampiezza del picco di sincronismo e, successivamente, correggere tale valore, al fine di ottenere un livello medio del segnale video televisivo. Tenendo conto di queste considerazioni e del fatto che tra il picco video e quello audio vi è una differenza in frequenza di 5,5 MHz e che tra due canali adiacenti vi è una differenza tra le portanti video di 8 MHz, è consigliabile selezionare il filtro passa banda fino ad un valore di RBW pari a 1 MHz; si può in questo modo determinare il livello di picco del segnale video dovuto all'impulso di sincronismo risolvendo i due canali adiacenti. Per ridurre il rapporto segnale-rumore è consigliabile impostare una VBW pari a 300 kHz. Riducendo il livello misurato sul picco di sincronismo di una quantità pari a 2,7 dB, si ottiene un livello efficace del segnale video corrispondente ad una trasmissione di un quadro "tutto nero" (trascurando il contributo energetico dovuto al segnale di sincronismo), così come indicato dalle normative internazionali ITU-R SM.326.7 "*Determination and measurement of the power of amplitude-modulated radio transmitters*" in relazione allo standard in uso nel nostro

Paese. Determinare il livello del picco di sincronismo e ridurlo di 2,7 dB corrisponde pertanto a porsi nella condizione cautelativa di una trasmissione continua di immagine “tutto nero”. Al segnale video così calcolato viene sommato quadraticamente il contributo dovuto al segnale audio per ottenere il contributo totale al campo elettrico dovuto a ciascun canale televisivo. Il segnale audio, modulato in frequenza, potrà essere valutato con una RBW di 30 kHz ed una uguale VBW. Per la misura su segnali televisivi si consiglia di impostare uno span non inferiore a 8 MHz in modo da visualizzare contemporaneamente il segnale video ed il segnale audio insieme all’intervallo di circa 1 MHz che può venire utilizzato per ponti di trasferimento ed il cui eventuale contributo deve essere comunque valutato.

SRB

Al fine di distinguere i picchi adiacenti, la cui differenza in frequenza minima è di 200 kHz nel caso dei GSM e di 25 kHz nel caso dei TACS, si consiglia l’utilizzo per segnali TACS di una RBW di 30 kHz con pari VBW e per quelli GSM (900 e 1800) di una RBW di 100 kHz. Nel caso non si riescano a risolvere i segnali GSM è possibile utilizzare una RBW di 30 kHz aumentando opportunamente il tempo di max hold. L’intervallo di frequenza (span), per entrambe le tipologie di segnali, deve essere pari al più a 10 MHz per consentire un tempo di sweep compatibile con una buona risoluzione dei picchi.

SORGENTE	RBW	VBW	SPAN
Radio FM	30 kHz	30 kHz	5 MHz
Radio AM	10 kHz	10 Hz	200 kHz
TV (video)	1 MHz	300 kHz	9 MHz
TV (audio)	30 kHz	30 kHz	9 MHz
TACS	30 kHz	30 kHz	5 - 10 MHz
GSM	100 – 30 kHz	100 - 30 kHz	5 – 10 MHz

Tabella n. 5.1: Parametri ottimali per l’impostazione dell’analizzatore di spettro

5.4 Incertezza di misura

Il calcolo dell’incertezza standard combinata U_c associata alla misura dell’intensità del campo si basa sulle linee guida ISO del 1993.

Misure in banda larga

Le principali sorgenti di incertezza sono individuate in :

- accuratezza di calibrazione, A_c , riportata sul certificato di calibrazione ed espressa in dB;
- risposta isotropica, R_i , riportata sul certificato di calibrazione o sul manuale dello strumento ed espressa in dB;
- accuratezza del misuratore, A_m , dipendente dalla scala di lettura (linearità di risposta in ampiezza), ed espressa in V/m o A/m.

Ipotizzando per queste incertezze una distribuzione di probabilità rettangolare, le incertezze standard espresse in dB risultano :

$$U_{R_i} = R_i / \sqrt{3} \quad U_{A_c} = A_c / \sqrt{3} \quad U_{A_m} = \frac{20}{\ln 10} \times \frac{A_m}{2\sqrt{3} \times E_{mis}} \quad (5.4.1)$$

L'incertezza standard combinata espressa in V/m o A/m è data da :

$$U_c = \frac{\ln 10}{20} \times E \times \sqrt{U_{A_c}^2 + U_{R_i}^2 + U_{A_m}^2} \quad (5.4.2)$$

Ad ogni valore di misura viene quindi associata l'incertezza estesa con un fattore di copertura $k=2$ per cui si avrà:

$$E_{mis} = E_{letto} [V/m] \pm 2U_c[V/m] \quad \text{o} \quad H_{mis} = H_{letto} [A/m] \pm 2U_c[A/m] \quad (5.4.3)$$

Misure in banda stretta

In questo caso il campo elettrico non deriva da una lettura diretta dello strumento ma deve essere calcolato mediante la seguente formula:

$$E(i)_j = 10 [dBm + AF + IA + CA - 13.01] / 20 \quad [V/m] \quad (5.4.4)$$

dove: dBm è l'ampiezza del segnale letto sull'analizzatore;

AF(dB) è il fattore d'antenna;

IA (dB) è l'eventuale attenuazione esterna all'ingresso dell'analizzatore;

CA (dB) è l'attenuazione del cavo.

Analogamente a quanto sopra descritto per le misure in banda larga, l'incertezza standard combinata U_c della componente i -esima della frequenza j -esima sarà:

$$U_{c,j,i}(V/m) = \frac{\ln 10}{20} E_{j,i}(V/m) \sqrt{U_{dBm,j,i}^2 + U_{AF,j}^2 + U_{CA,j}^2 + U_{IA,j}^2} \quad (5.4.5)$$

L'incertezza standard combinata dell'intensità di campo elettrico della frequenza j -esima sarà:

$$U_{c,j}(V/m) = \frac{1}{E_j} \sqrt{\sum_i E_{j,i}^2 U_{c,j,i}^2} \quad (5.4.6)$$

L'incertezza standard combinata dell'intensità di campo elettrico totale sarà quindi:

$$U_c(V/m) = \frac{1}{E_{tot}} \sqrt{\sum_j E_j^2 U_{c,j}^2} \quad (5.4.7)$$

Assumendo una distribuzione rettangolare valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} U_{dBm,j,i} &= \sigma_{dBm} / \sqrt{3} (\text{dB}) & U_{AF,j} &= \sigma_{AF} / \sqrt{3} (\text{dB}) \\ U_{IA,j} &= \sigma_{IA} / \sqrt{3} (\text{dB}) & U_{CA,j} &= \sigma_{CA} / \sqrt{3} (\text{dB}) \end{aligned} \quad (5.4.8)$$

con σ_{dBm} (dB) = incertezza sull'ampiezza del segnale, σ_{AF} (dB) = incertezza sul fattore d'antenna, σ_{Iaj} (dB) = incertezza sull'eventuale attenuazione esterna dell'analizzatore e σ_{Caj} (dB) = incertezza sul fattore d'attenuazione del cavo.

Ad ogni valore di misura viene quindi associata l'incertezza estesa con un fattore di copertura $k=2$ per cui si avrà:

$$E_{mis} = E_{letto} [V/m] \pm 2Uc[V/m] \quad (5.4.9)$$

Nel caso in cui sia nota la distribuzione di probabilità delle incertezze di alcuni dei parametri (normale, ad U etc) occorrerà applicare l'opportuno fattore nel calcolo dei contributi di cui alle (5.4.1) e (5.4.8).

5.5 Valutazione dei risultati

Il risultato dell'analisi spettrale, nel caso di misure su stazioni radio base per telefonia mobile, indica il numero di portanti attive al momento della misura e, conseguentemente, il valore globale del campo elettrico che viene determinato per quella condizione di traffico telefonico varierà in funzione del traffico stesso. Per rendere la misura indipendente dalle condizioni di funzionamento della stazione radiobase e, pertanto, riproducibile e confrontabile con quella effettuata in qualunque situazione di traffico telefonico, occorre estrapolare dalla misura in banda stretta il valore di campo prodotto dalla stazione radiobase nella condizione di massimo carico della stessa, corrispondente all'attivazione di tutte le portanti. Questa procedura che, secondo un approccio cautelativo, consente di valutare l'esposizione umana nel corso del peggiore periodo di 6 minuti, deve essere effettuata misurando il valore di campo elettrico associato alla portante BCCH, E_{BCCH} , (sempre attiva con ampiezza costante) e calcolando il valore globale, E, con l'espressione:

$$E = E_{BCCH} \sqrt{n} \quad [V/m] \quad , \quad (5.5.1)$$

con n numero massimo di portanti gestite dalla stazione radio base.

I dati sperimentali, ottenuti sia con misure a banda larga che con misure a banda stretta, devono essere riportati unitamente all'incertezza di misura associata. Nel valutare il rispetto del limite occorrerà pertanto considerare la variabilità del dato tra gli estremi $E-\Delta E$ ed $E+\Delta E$ con ΔE errore assoluto di misura. Si consiglia comunque di adottare catene strumentali che diano luogo ad incertezze inferiori a 2 dB.

APPENDICE 1

Caratteristiche delle modulazioni AM e FM

A1.1 Modulazione AM

Consiste nel variare, istante per istante, l'ampiezza di un segnale, detto *portante*, in funzione del valore di un altro segnale, detto *modulante*.

A1.1.1 Generalità

Indicando con $v_m = V_m \cos \omega_m t$ il segnale modulante e con $v_p = V_p \cos \omega_p t$ il segnale portante, l'onda modulata in ampiezza ha l'espressione:

$$v = (V_p + K_a V_m \cos \omega_m t) \cos \omega_p t \quad (\text{A.1.1})$$

dove il fattore K_a determina la massima variazione dell'ampiezza $K_a V_m$ causata dal segnale modulante.

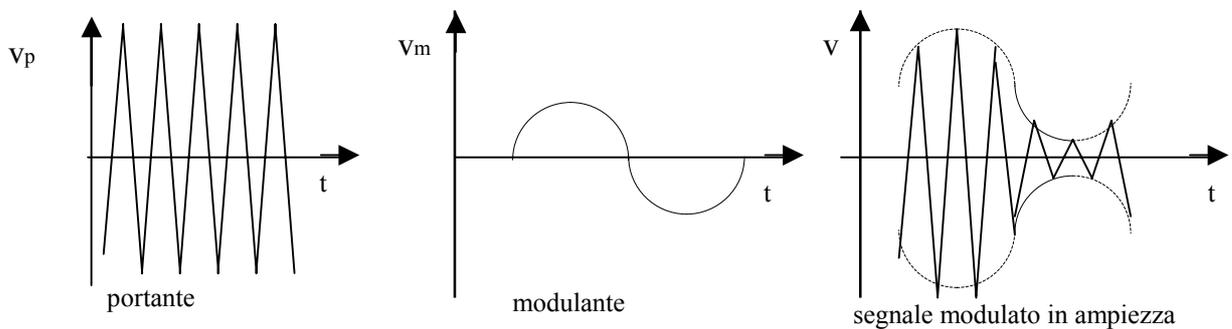


Figura A1.1

Comunemente l'espressione precedente è scritta nella forma:

$$v = V_p (1 + (K_a V_m / V_p) \cos \omega_m t) \cos \omega_p t = V_p (1 + m \cos \omega_m t) \cos \omega_p t \quad (\text{A.1.2})$$

dove $m = K_a V_m / V_p$ è l'indice di modulazione ed è compreso tra 0 e 1 (0-100%); per $m > 100\%$ l'onda risulta distorta (sovramodulazione).

In generale, indicando con $g(t)$ l'informazione, l'onda modulata in ampiezza ha l'espressione

$$v = V_p (1 + m g(t)) \cos \omega_p t \quad (\text{A.1.3})$$

A1.1.2 Spettro di un'onda modulata in ampiezza

Sviluppando il prodotto della (A.1.2) si ottiene:

$$v = V_p \cos 2\pi f_p t + (m V_p / 2) \cos 2\pi (f_p - f_m)t + (m V_p / 2) \cos 2\pi (f_p + f_m)t \quad (\text{A.1.4})$$

da cui si deduce lo spettro dell'onda modulata:

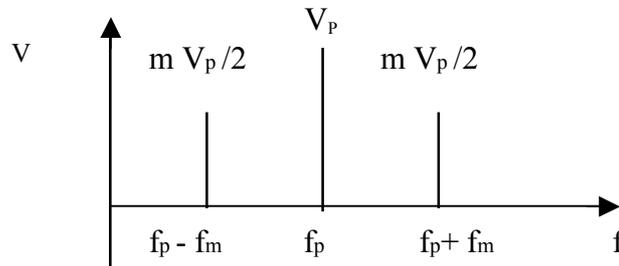


Figura A1.2

In tale spettro si notano la portante, la riga laterale superiore e la riga laterale inferiore. In generale, in presenza di un segnale modulante complesso avente lo spettro come in Figura A1.3a, l'onda modulata ha lo spettro riportato in Figura A1.3 b; si parla in questo caso di banda laterale inferiore (lower side band LSB) e di banda laterale superiore (upper side band USB).

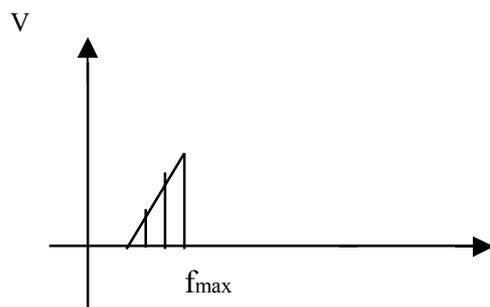


Figura A1.3 a

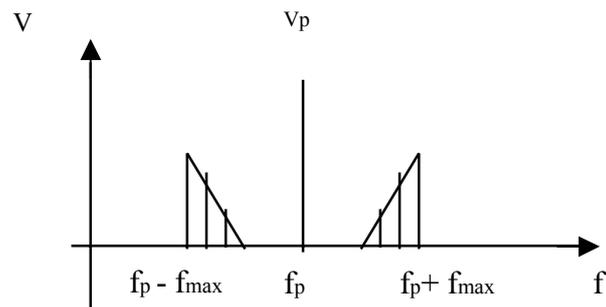


Figura A1.3 b

A1.1.2 Potenza di un'onda modulata in ampiezza

Dalla (A.1.4), indicando con P_p la potenza della portante, le righe laterali destra e sinistra, che portano l'informazione, sono caratterizzate da una potenza:

$$P(f_p - f_m) = P(f_p + f_m) = (m^2 P_p / 4) \quad (\text{A.1.5})$$

La potenza totale dell'onda modulata è perciò:

$$P = P_p + P(f_p - f_m) + P(f_p + f_m) = P_p + (m^2 P_p / 4) + (m^2 P_p / 4) = P_p (1 + m^2 / 2) \quad (\text{A.1.6})$$

Da questa formula si vede che la potenza associata a ciascuna riga laterale, cioè all'informazione, è al massimo 1/4 della potenza della portante; in questo tipo di

modulazione vi è quindi uno «spreco» di potenza perché viene trasmessa anche la portante; questo svantaggio viene compensato dal fatto che se è presente la portante il ricevitore è semplice da realizzare. Vi sono altri tipi di modulazione in cui la portante viene soppressa con conseguente risparmio di potenza e maggiore complessità del ricevitore: modulazione DSB, SSB, VSB.

Nella DSB (modulazione a doppia banda laterale) viene soppressa la portante e quindi la potenza viene ridotta a quella della bande laterali.

Nella SSB (modulazione a banda laterale unica) viene soppressa la portante e una delle due bande laterali, con ulteriore risparmio di potenza.

Nella VSB (modulazione a banda laterale parzialmente soppressa) si hanno caratteristiche intermedie tra DSB e SSB; in particolare essa viene usata nelle trasmissioni televisive, in cui sono importanti la riduzione della banda occupata, la buona risposta alle basse frequenze e la semplicità del demodulatore.

A1.2 Modulazione FM

Sia nella FM (modulazione di frequenza) che nella PM (modulazione di fase), la modulazione consiste nel variare la fase istantanea della *portante* in funzione dell'informazione (*modulante*), ossia far variare la fase ϕ di un segnale del tipo:

$$v(t) = V_p \cos \phi \quad (\text{A.1.7})$$

Essendo $\phi = \int \omega dt + \theta$, nella FM si sceglie di far variare la pulsazione istantanea ω al variare del segnale modulante.

Se il segnale modulante è sinusoidale e vale:

$$v_m = V_m \cos \omega_m t \quad (\text{A.1.8})$$

la pulsazione e la frequenza istantanee del segnale modulato diventano:

$$\omega = \omega_p + K_f V_m \cos \omega_m t \quad (\text{A.1.9})$$

$$f = f_p + (K_f/2\pi) V_m \cos \omega_m t = f_p + \Delta f \cos \omega_m t \quad (\text{A.1.10})$$

dove $\Delta f = (K_f/2\pi) V_m$ è la deviazione di frequenza, ossia la massima differenza tra la frequenza del segnale modulato e la frequenza della portante non modulata.

Più in generale, se $g(t)$ è l'informazione si ha:

$$\omega = \omega_p + K_f g(t) \quad (\text{A.1.11})$$

Essendo $\omega = d\phi/dt$, l'angolo ϕ vale

$$\phi = \int \omega dt = 2\pi \int f dt = 2\pi \int (f_p + \Delta f \cos \omega_m t) dt = 2\pi [f_p t + (\Delta f/2\pi f_m) \sin 2\pi f_m t]$$

avendo posto $\phi=0$ per $t=0$.

In definitiva dunque si ha:

$$v(t) = V_p \cos \phi = V_p \cos [2\pi f_p t + (\Delta f / f_m) \sin 2\pi f_m t] \quad (\text{A.1.12})$$

Il rapporto $\Delta f / f_m$ è detto indice di modulazione ed è indicato con mf .

In figura A1.4 è grossolanamente rappresentato un segnale modulante e il rispettivo segnale modulato in frequenza:

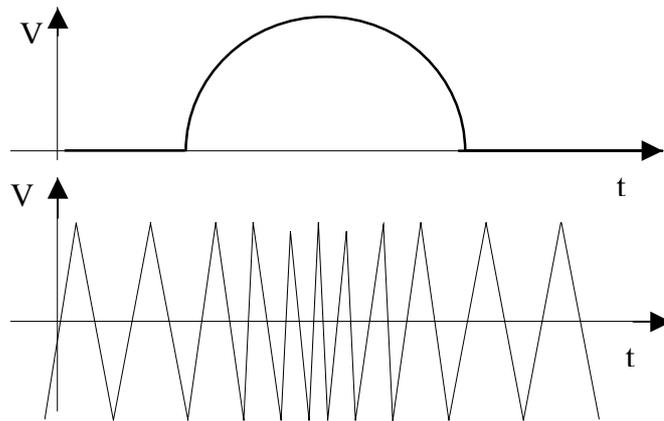


Figura A1.4

A1.2.1 Spettro del segnale

Lo spettro del segnale si ottiene sviluppando la (A.1.12) in serie di Bessel; il risultato è:

$$v(t) = V_p (J_0(mf) \cos \omega_p t + \\ -J_1(mf) \cos(\omega_p - \omega_m)t + J_1(mf) \cos(\omega_p + \omega_m)t + \\ +J_2(mf) \cos(\omega_p - 2\omega_m)t + J_2(mf) \cos(\omega_p + 2\omega_m)t + \\ -J_3(mf) \cos(\omega_p - 3\omega_m)t + J_3(mf) \cos(\omega_p + 3\omega_m)t + \dots) \quad (\text{A.1.13})$$

dove il primo termine rappresenta la portante; gli altri termini rappresentano le componenti laterali, spaziate di ω_m e di ampiezza determinata dal valore delle funzioni di Bessel calcolate in mf . Tenendo conto che le funzioni di Bessel da J_1 in poi hanno un andamento oscillante smorzato con valore iniziale nullo (eccetto J_0 che ha valore iniziale non nullo), si può osservare che se mf è piccolo ($<0,5$), solo le prime righe sono significative; all'aumentare di mf diventano apprezzabili anche le altre componenti. Quindi:

- se $f_m =$ costante, all'aumentare dell'ampiezza della modulante aumenta Δf , quindi aumenta $mf = \Delta f / f_m$ e perciò aumentano le righe significative dello spettro;
- se l'ampiezza della modulante = costante (cioè $\Delta f =$ costante), all'aumentare della f_m diminuisce mf e quindi lo spettro ha meno componenti, che però sono più spaziate.

Per alcuni valori di mf la portante si annulla, e il primo zero si ha per $mf = 2,4048$ (può essere utile per eseguire delle misure di Δf).

Una formula approssimata utilizzata per calcolare la banda occupata da un segnale FM è la formula di Carson, che si basa sull'ipotesi che le componenti di ordine maggiore di $(1 + mf)$ si possano trascurare; seguendo tale assunzione si ha

$$B \cong 2 * (f_m + \Delta f) = 2 * (1 + mf) * f_m$$

che si può ulteriormente semplificare a seconda del valore di mf .

A1.2.2 Potenza di un'onda modulata in frequenza

Poiché l'ampiezza del segnale modulato non varia in presenza della modulazione, la potenza totale trasmessa relativa a portante e bande laterali deve essere uguale alla potenza trasmessa in assenza di modulazione; al variare dell'indice di modulazione mf , varia solo la distribuzione di potenza fra la portante e le componenti laterali.

Riferimenti appendice A1

Nano E. : *Appunti dal corso di radiotecnica*, Politecnico di Torino

Biondo G., Sacchi E.: *Manuale di elettronica e telecomunicazioni*, Hoepli

APPENDICE 2

Esempi di sorgenti radar

Esempio 1: RADAR ATCR

L'ATCR è un radar utilizzato per assicurare la copertura continua del territorio dal punto di vista del traffico aereo. La frequenza di funzionamento è compresa fra 1000 e 1500 MHz. Valori tipici delle altre grandezze sono i seguenti: modulazione a impulsi rettangolari, durata $\sim 3 \mu\text{s}$, frequenza di ripetizione $\sim 500 \text{ Hz}$. Possibilità di funzionamento "in diversity", con un secondo impulso emesso alcuni μs dopo il primo, a frequenza diversificata di qualche decina di MHz. Potenza di picco di un singolo trasmettitore: $\approx 2 \text{ MW}$; potenza media $\approx 2500 \text{ W}$ per trasmettitore. Nel funzionamento in diversity la potenza media è dunque di $\approx 5000 \text{ W}$. Perdita di trasmissione: $\approx 1,5 \text{ dB}$. Antenna: guadagno 30 - 40 dB; ampiezza del fascio nel piano verticale: $2 - 6^\circ$; nel piano orizzontale: $1 - 3^\circ$. Lobi secondari: $\approx 30 \text{ dB}$ al di sotto dell'orizzonte. Velocità di rotazione: 4 - 6 giri/min; dimensioni: $\sim 10 \times 3 \text{ m}^2$. Si tratta come si vede di impianti di notevole potenza. Valutiamo la potenza media irradiata.

Il fattore di media dovuto alla rotazione dell'antenna, ottenuto integrando il diagramma di radiazione sul piano orizzontale, è $\approx 0,003$. La direzione di massimo irraggiamento è di circa 2° sopra l'orizzonte. La densità di potenza calcolata è rappresentata nel grafico di Figura A2.1: il tratto rettilineo a destra della figura rappresenta la densità di potenza calcolata nel modo consueto e moltiplicata per il fattore di media nell'ipotesi di antenna puntiforme. Per i nostri scopi abbiamo considerato accettabile l'ipotesi di sorgente puntiforme fino una distanza minima $r_{\min} = D^2/2\lambda$ (nel nostro caso circa 200 m).

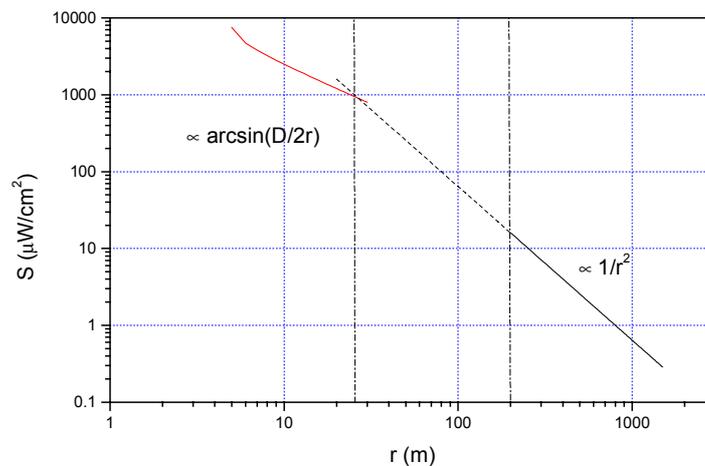


Figura A2.1: Densità di potenza S a distanza r dall'apparato ATCR

Questa linea è proseguita a tratti anche per distanze minori, dove tuttavia non è valida; comunque la densità di potenza reale indicata in questa zona è sempre inferiore a quella calcolata secondo l'ipotesi di antenna puntiforme. Per distanze brevi dall'antenna (dell'ordine di alcune aperture d'antenna, cioè qualche decina di metri) abbiamo valutato la potenza facendo l'ipotesi di illuminazione uniforme della bocca dell'antenna e di un fascio di radiazione parallelo, a diffrazione trascurabile. In questo caso l'effetto di media della rotazione dell'antenna è rappresentato dal tempo di illuminazione rispetto al tempo totale di rotazione dell'antenna e la potenza media diventa:

$$S = \frac{P_{mi}}{\pi A} \arcsin\left(\frac{D}{2r}\right) \quad (\text{A.2.1})$$

dove P_{mi} è la potenza media irradiata, A è l'area dell'antenna, D la sua apertura, r la distanza dall'asse di rotazione. La curva è interrotta a 5 m, raggio spazzato dall'antenna in rotazione, e si estende fino ad una ventina di metri. Si vede che la densità di potenza massima sulla bocca dall'antenna è circa 5 mW/cm^2 . La potenza di picco è circa $1,7 \text{ W/cm}^2$.

Un'altra apparecchiatura tipica nell'aiuto alla navigazione aerea è il TACAN. Questo apparato ha la funzione di trasmettere in codice all'aereo che lo ha interrogato (transponder) la sua posizione relativa rispetto al TACAN stesso (distanza e angolo). L'apparato funziona ad una frequenza compresa nella banda 960 - 1215 MHz. La potenza a radiofrequenza è modulata a impulsi della durata di $3,5 \mu\text{s}$ con involucro di forma gaussiana e frequenza di ripetizione di 7200 impulsi al secondo. La potenza di picco al trasmettitore è di circa 5 kW mentre la potenza media è inferiore a circa 150 W. L'antenna è realizzata per avere il massimo guadagno a pochi gradi sopra l'orizzonte con un guadagno massimo di circa 6. Essa è posta ad una distanza da terra tra 6 e 18 m. Nella direzione di massimo guadagno già a 15 m di distanza la densità di potenza è ridotta al livello di pochi $\mu\text{W/cm}^2$ e anche sul rivestimento esterno di protezione dell'antenna assume valori piuttosto bassi ($0,5 \text{ mW/cm}^2$). In pratica questi apparati difficilmente presentano problemi di inquinamento elettromagnetico perché i livelli di densità di potenza misurabili nelle immediate vicinanze dell'antenna ($\sim 15 \text{ m}$) sono dell'ordine di $0,05 \mu\text{W/cm}^2$.

Esempio 2: RADIOFARO TACAN

È un sistema transponder nella UHF, le cui caratteristiche elettromagnetiche sono qui riportate. Antenna con polarizzazione verticale; diagramma di radiazione nel piano orizzontale: approssimativamente circolare (poiché l'antenna ruota intorno all'asse verticale, per i nostri scopi il diagramma di radiazione può essere assunto esattamente circolare). Per quanto riguarda il diagramma verticale si assume che il guadagno nella direzione di massima intensità (circa 5° sopra l'orizzonte) sia pari a 8 dB. La lunghezza dell'antenna (dimensione parallela all'asse) può stimarsi in circa 1,5 m. La collocazione dell'antenna avviene tipicamente su pilone di altezza pari a 18 m (l'altezza minima per questo tipo di installazioni è 6 m).

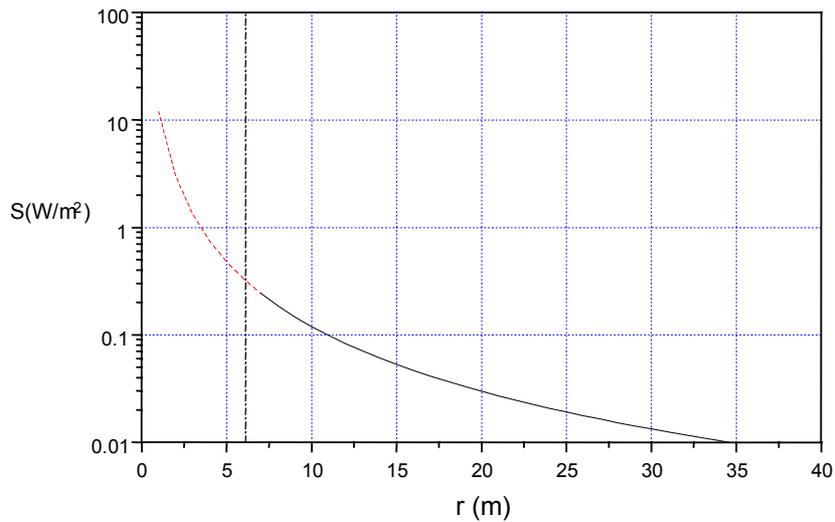


Figura A2.2: Densità di potenza S a distanza r dall'apparato TACAN

La situazione più sfavorevole ai fini della valutazione della densità di potenza è quella di trovarsi nella direzione di massima irradiazione dell'antenna (circa 5° sopra l'orizzontale per l'antenna tipo) anche se è estremamente difficile che si realizzi questa circostanza (specie se si suppone una permanenza illimitata). Questo caso è comunque interessante per la sua estrema semplicità. Il risultato è rappresentato in Figura A2.2, che riporta la densità di potenza in funzione della distanza r dell'antenna.

Data la potenza di picco irradiata P_{pi} (che assumiamo 6 dB al di sotto di 5 kW) la potenza media irradiata, tenendo conto della forma dell'impulso è:

$$P_{mi} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{\ln 4} P_{pi} f_{rip} \tau \quad (\text{A.2.2})$$

dove f_{rip} è la frequenza di ripetizione e τ la durata dell'impulso.

Con i dati assunti: $P_{mi} \cong 24 \text{ W}$.

Nell'ipotesi di sorgente puntiforme, la densità di potenza media alla distanza r è data da:

$$S = G_{\max} \frac{P_{mi}}{4 \pi r^2} \quad (\text{A.2.3})$$

ove G_{\max} è il massimo valore del guadagno dell'antenna. Questa relazione è riportata in Figura A2.2. L'ipotesi di sorgente puntiforme è valida con ottima approssimazione per i nostri scopi fino ad una distanza minima $R_{\min} = D^2/\lambda$, dove D rappresenta la massima dimensione dell'antenna. Qualitativamente, i risultati della (A.2.3) sono accettabili anche a distanze inferiori di R_{\min} (dell'ordine della metà), e comunque la densità di potenza reale rimane sempre al di sotto dei valori dati dalla (A.2.3). Naturalmente però, a brevi distanze ci sarebbero da considerare anche i componenti non radiativi dei campi. La distanza R_{\min} con i dati del nostro problema risulta circa 7,4 m: in Figura A2.2 è tratteggiata la regione al di sotto di R_{\min} a significare che la correttezza della curva in quella zona diviene discutibile.

Il livello di $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ si raggiunge alla distanza di 35 m e al di là di questa distanza il campo elettromagnetico è ovunque inferiore al più restrittivo livello di sicurezza esistente al mondo. Una valutazione orientativa può farsi schematizzando l'antenna vista da breve distanza come una sorgente di onde cilindriche uniformi. Stimando che il diametro del tamburo protettivo in vetroresina che circonda l'antenna sia di 1,1 m, si ha sulla superficie cilindrica dello schermo una densità di potenza media inferiore a $0,5 \text{ mW}/\text{cm}^2$. La potenza di picco è circa $24 \text{ mW}/\text{cm}^2$. Ricordiamo che non abbiamo considerato i campi di induzione e questo richiederebbe una analisi a parte. Comunque non vi è motivo di ritenere che siano particolarmente intensi a confronto con i termini radiativi, almeno a distanze non inferiori al raggio dello schermo in vetroresina.

Riferimenti appendice 2

AA.VV. – IROE C.N.R.: *Protezione dai campi elettromagnetici non ionizzanti*, 2P Ed., 1997 Firenze

APPENDICE 3

Procedure per il calcolo di n_{eq}

Il campo generato dalle “i” celle si calcola in modo esatto come:

$$E^2 = \sum \frac{n_i * G_i(\vartheta, \varphi) * P_i * 30}{d_i^2} \quad (A3.1)$$

Siccome facendo la misura a banda larga viene misurato *almeno il campo dato dalle “i” portanti in aria*, cioè il campo:

$$E^2_{min} = \sum \frac{G_i(\vartheta, \varphi) * P_i * 30}{d_i^2} \quad (A3.2)$$

allora si può pensare di calcolare il numero n_{eq} per cui moltiplicare E_{min} in modo da stimare il campo reale attraverso la seguente equazione:

$$E^2 = \sum \frac{n_i * G_i(\vartheta, \varphi) * P_i * 30}{d_i^2} = n_{eq} * \sum \frac{G_i(\vartheta, \varphi) * P_i * 30}{d_i^2} \quad (A3.3)$$

da cui:

$$n_{eq} = \frac{\sum \frac{n_i * G_i(\vartheta, \varphi) * P_i * 30}{d_i^2}}{\sum \frac{G_i(\vartheta, \varphi) * P_i * 30}{d_i^2}} \quad (A3.4)$$

dove d_i è la distanza dal punto di misura dell’i-esima cella avente guadagno $G_i(\vartheta, \varphi)$, potenza al singolo trasmettitore P_i e numero massimo di portanti pari a n_i .

APPENDICE 4

Taratura dei misuratori di campo

I metodi di taratura prevedono di esaminare il comportamento dei sensori di campo in funzione dei seguenti parametri: frequenza, livello dell'intensità di campo, orientamento dell'elemento captante.

La mancanza di queste informazioni può causare errori anche notevoli nell'uso del sensore nei suoi diversi campi di applicazione. Infatti la misura del livello di intensità di campo all'aperto o in ambiente confinato può essere affetta da un'incertezza anche dell'ordine del 30 - 40 % a causa di diverse sorgenti di errore. In particolare si possono avere errori casuali come quelli dovuti alla presenza dell'operatore, alle diverse distanze dalla sorgente (campo vicino - campo lontano), agli effetti dell'accoppiamento diretto del campo con lo strumento misuratore. A questi si aggiungono gli errori sistematici che dipendono essenzialmente dal buon funzionamento e dalla qualità del misuratore di campo e la cui entità può essere notevolmente ridotta da una taratura accurata.

Oltre all'esistenza di indicazioni comunitarie relative alla taratura e riferibilità degli strumenti di misura (EN 29000, EN 45000) ed al D.L. 273, 11.8.91, che istituisce il Sistema Nazionale di Taratura, differenti organizzazioni scientifiche e normative sottolineano l'importanza dell'armonizzazione e dell'accuratezza nelle misure dei campi elettromagnetici. Ad esempio l'ANSI (American National Standard Institute) raccomanda che i misuratori di campo abbiano risposta isotropica entro ± 1 dB e siano forniti con un'incertezza sul fattore di taratura entro ± 2 dB. È quindi necessario poter disporre di campi elettromagnetici campione noti con buona accuratezza nell'intervallo di frequenze di interesse.

I metodi di taratura generalmente utilizzati sono i seguenti:

- tecniche per la generazione di campi elettromagnetici "campione" all'interno di camere anecoiche;
- metodi che utilizzano strutture ad onda guidata.

A4.1 Generazione di campi elettromagnetici in camera anecoica

Il sito ideale per la generazione di un campo elettromagnetico noto è lo spazio libero, privo di riflessioni, che ovviamente non è realizzabile. Pertanto, le tarature vengono condotte all'interno di camere anecoiche, ovvero camere schermate le cui pareti sono ricoperte di materiale assorbente la radiazione a radiofrequenza e microonde. Lo scopo di una camera anecoica è quello di creare un ambiente per quanto possibile privo di riflessioni nella zona in cui vengono posti l'antenna o il sensore da tarare. Tali camere sono estremamente costose e richiedono disponibilità di ampi spazi. In Figura A4.1 è illustrata schematicamente una di queste camere.

Per generare con buona accuratezza livelli prestabiliti di intensità di campo si utilizzano antenne trasmettenti campione, quali antenne a tromba ("standard gain horns") o guide d'onda aperte ("open-ended waveguides"). La gamma di frequenze si estende tipicamente da 300 MHz a parecchi GHz.

L'intensità di campo o la densità di potenza alla distanza d dall'antenna trasmittente si valuta con l'espressione:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{PG}{4\pi d^2} \quad (\text{A.3.1})$$

dove: S = densità di potenza (W/m^2),
 E = intensità del campo elettrico (V/m),
 P = potenza netta fornita all' antenna trasmittente (W),
 G = guadagno dell' antenna trasmittente,
 $Z_0 = 377 \Omega$.

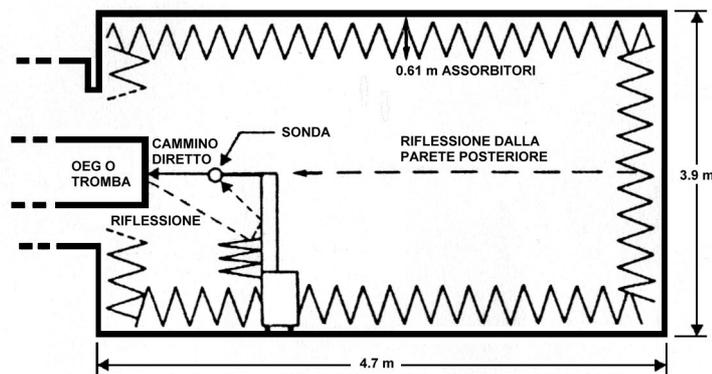


Figura A4.1: Vista laterale di una camera anecoica

Campi elettromagnetici generati all' interno di una cella TEM

Una cella TEM è essenzialmente una linea di trasmissione a tre piani, di impedenza caratteristica pari a 50Ω , con le pareti laterali chiuse al fine di prevenire l'irradiazione dell'energia RF verso l'esterno e di assicurare l'"isolamento" elettromagnetico dall'ambiente circostante.

La cella consiste di un tratto di linea coassiale, a sezione rettangolare, rastremata alle due estremità per adattarla ai tradizionali connettori coassiali. La linea e le transizioni sono progettate in modo da avere una impedenza caratteristica di 50Ω su tutta la lunghezza e ridurre al minimo il rapporto d'onda stazionaria (VSWR). Una cella ben progettata, terminata sulla sua impedenza caratteristica, è in grado di produrre un campo elettromagnetico "calcolabile", che può essere utilizzato per tarare antenne elettricamente piccole o sensori RF. Quando si alimenta la linea collegando alla porta di ingresso un generatore RF, si stabilisce un campo elettromagnetico di buona uniformità

tra i piatti all'interno della cella; la porta di uscita è collegata ad una terminazione adattata a 50 Ω.

Il campo elettrico E, in volt al metro, all'interno della cella è dato dall'espressione:

$$E = \frac{V}{b} = \frac{\sqrt{PZ_0}}{b} \quad (\text{A.3.2})$$

dove: V = tensione sul conduttore centrale (setto) (V),

b = distanza tra il setto e la parete inferiore o superiore (m),

P = potenza netta fornita alla cella (W),

Z₀ = parte reale dell'impedenza caratteristica della cella (circa 50 Ω).

L'onda che si propaga attraverso la cella ha essenzialmente una impedenza pari a quella dello spazio libero (377 Ω) e, quindi, approssima molto bene un'onda piana che si propaga nel campo lontano di un'antenna in spazio libero.

La massima frequenza di utilizzazione per una cella è limitata dalle distorsioni subite dal campo elettromagnetico a causa dei fenomeni di risonanza e propagazione multimodale, che intervengono all'interno della cella a frequenze superiori a quelle di taglio dei modi superiori. Più piccola è la cella, maggiore è il limite superiore di frequenza a cui si può ottenere la propagazione del solo modo TEM (modo fondamentale). Le celle TEM potrebbero essere utilizzate anche a frequenze superiori a 1 GHz ma, in pratica, a causa delle dimensioni dei misuratori da tarare, esse sono normalmente impiegate solo fino a 300 - 500 MHz. È, inoltre, pratica comune limitare la dimensione verticale dell'oggetto da inserire all'interno della cella a non più di un terzo della distanza di separazione tra il setto e la parete superiore o inferiore. Esiste pertanto un compromesso tra massima frequenza di utilizzo e dimensioni del dispositivo in prova, che deve perturbare poco il campo elettromagnetico.

In Figura A4.2 è riportato un disegno schematico dei due sistemi di generazione di campi elettromagnetici sopra descritti.

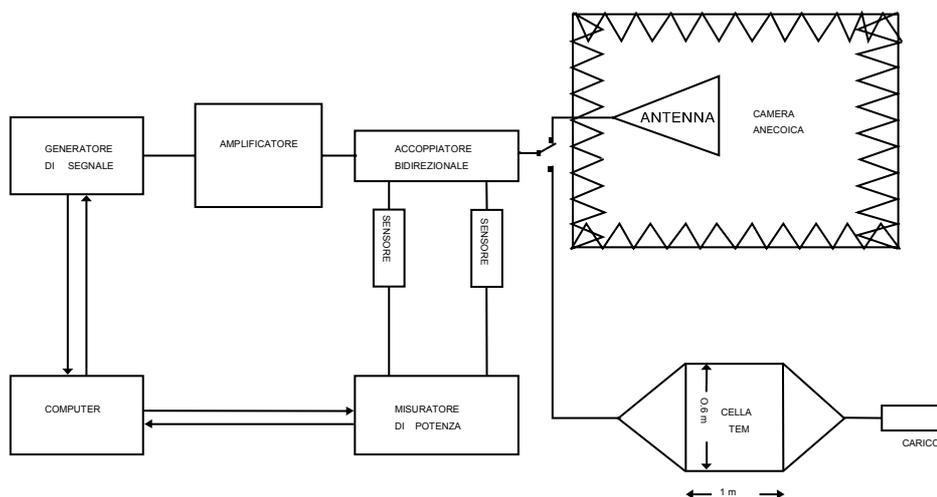


Figura A4.2: Schema della catena per la generazione dei campi elettromagnetici

A4.2 Esempi di taratura di antenne e sensori di campo elettromagnetico

Da quanto detto sopra emerge che scopo della taratura di un'antenna o sensore di campo elettromagnetico è di valutarne la risposta in funzione della frequenza, intensità e polarizzazione del campo incidente. In Figura A4.3 viene riportato il risultato di una tipica taratura di antenna, cioè l'andamento del fattore d'antenna di una log-periodica, utilizzata per misure di emissioni nella banda televisiva. Poiché il fattore d'antenna, nel caso di antenne passive o prive di balun, dipende sostanzialmente dalla geometria dell'antenna, a meno di danni gravi, è difficile trovare valori che si discostino molto dal fattore d'antenna fornito dalla casa produttrice e valutato sperimentalmente o teoricamente.

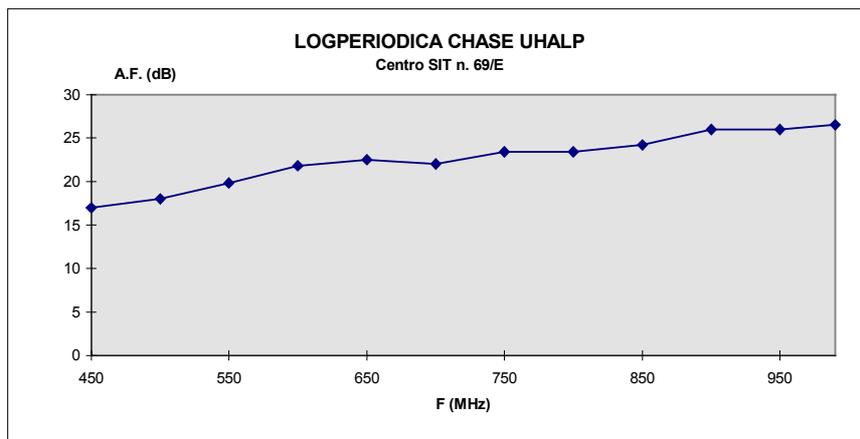


Figura A4.3: Esempio di fattore d'antenna di log-periodica

Un esempio dei risultati di un'attività di calibrazione di sensori di campo a radiofrequenza è riportato in tabella 1a e 1b dove sono riportati i dati ottenuti presso il centro SIT di Ivrea. Un totale di 100 sensori sono divisi secondo la loro risposta al campo campione. Come si può notare è facile trovare strumenti che richiedono l'applicazione di un fattore di correzione superiore ad 1 dB (valore già indicato come riferimento al paragrafo 4.1 della guida). Infatti alla frequenza di 100 MHz (tipica delle radiocomunicazioni) solo il 65% degli strumenti mostra una risposta entro ± 1 dB del valore nominale del campo. Per circa un quarto del totale dei sensori risulta invece necessario applicare un fattore correttivo superiore a 2 dB (pari a circa il 25%). Per quanto riguarda l'isotropicità, circa il 90% dei sensori ha mostrato una risposta entro ± 1 dB (sebbene il 4% dei sensori avesse uno o più dipoli rotti, all'insaputa degli utilizzatori, con un'anisotropicità maggiore di ± 3 dB). Questi risultati sono in accordo con quanto riportato in letteratura e sottolineano l'importanza di una regolare e periodica taratura degli strumenti utilizzati per il monitoraggio dei campi elettromagnetici.

F(MHz)	Fattore di taratura (dB)				
	< 1	1 - 2	2 - 3	3 - 5	> 5
100	65 %	10 %	20 %	5 %	/
500	54 %	13 %	20 %	6 %	/
800	43 %	28 %	21 %	/	/

Tabella A1a: Percentuale di sensori per classi di fattori di taratura, numero totale di sensori: 100

F(MHz)	ANISOTROPIA (dB)			
	< 0,5	0,5 ÷ 1	1 ÷ 1,5	> 3
100	46 %	46 %	4 %	4 % (#)

(#) In queste sonde sono stati trovati uno o più dipoli guasti

Tabella A1b: Percentuale di sensori che rientrano nell'anisotropia riportata, numero totale di sensori: 57

Riferimenti appendice 4

Standard IEEE Std C95.3-1991 "*IEEE Recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields -RF and microwaves.*"

IEEE Std 1309-1996 "*Standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes, excluding antennas, from 9 kHz to 40 GHz*"

L. Anglesio, G. d'Amore, A. Benedetto and M. Tasso, "*Accuracy in radiofrequency electromagnetic field measurements*", Proceedings of the IRPA Regional Symposium on Radiation Protection, Praga, 8-12 settembre 1997, pp. 624-627.

S. Tofani, L. Anglesio, G. Agnesod, P. Ossola, "*Electromagnetic standard fields: generation and accuracy levels from 100 kHz to 990 MHz*"., *IEEE Trans. on MTT*, Vol.34, N.7, 1986, pp.832-835.

R. Bostrom, K. Mild and G. Nilsson, "*Calibration of commercial power density meters at RF and microwaves frequencies.*", *IEEE Trans. on IM*, Vol. 35, 1986, pp. 111-115.
Report NIS 3003 "The expression of uncertainty and confidence in measurement for calibrations", NPL, Teddington , UK, may 1995

APPENDICE 5

G-TEM

Fino ad ora, le tecniche più comuni per effettuare la calibrazione dei sensori si sono basate sull'utilizzo di relativamente economiche celle TEM per le frequenze più basse (di solito fino a circa 300 MHz) e di costose camere anecoiche (o similari) e antenne per le frequenze più alte. Di fatto, le celle TEM standard sono limitate nella risposta in frequenza dalle dimensioni della cella (la struttura rettangolare favorisce l'instaurarsi di onde stazionarie), mentre le camere anecoiche non sono adatte alla propagazione di radiazione alle frequenze più basse. Le strutture aperte chiamate O.A.T.S. (Open Area Test Site) potrebbero combinare i vantaggi di entrambe, al prezzo di dover uscire dal laboratorio e di disporre di un'ampia area aperta con minime interferenze RF. Queste tecniche (specialmente la seconda) sono piuttosto onerose, inoltre la scelta dell'una o dell'altra può influenzare pesantemente il risultato finale. Tutto ciò fa sorgere l'esigenza di una tecnica che consenta, se non di effettuare in proprio la calibrazione, perlomeno di procedere ad una verifica periodica della corrispondenza della risposta dello strumento alla carta di calibrazione più recente. Questa filosofia, certamente non rivoluzionaria, si è sempre scontrata con l'impossibilità tecnica di reperire sul mercato strumenti sufficientemente compatti ed economici in grado di soddisfare le specifiche richieste. Attualmente, questa limitazione può essere superata utilizzando uno strumento chiamato cella GTEM (Gigahertz Transverse Electro Magnetic). Tale cella è, sostanzialmente, una guida d'onda coassiale rastremata di forma piramidale di dimensioni variabili, con una frequenza di lavoro piuttosto ampia (da DC ad alcuni GHz), terminata con un carico resistivo (resistenze al carbone) e uno dissipativo (coni assorbitori) a 50 Ω , per l'adattamento rispettivamente alle frequenze più basse e più alte, al cui interno è possibile generare un campo elettromagnetico di orientamento noto (modo TEM) e di intensità variabile. Questa cella può essere vantaggiosamente inserita in una catena strumentale a RF utilizzata per la verifica dei sensori di campo EM [1,2].

Per conseguire tale scopo, è necessario condurre una serie di prove di caratterizzazione della cella GTEM. Occorre effettuare analisi TDR (Time Domain Reflectometry) e misure di impedenza della cella al variare della frequenza di lavoro, risalendo al suo VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). Inoltre, occorre misurare l'uniformità di campo all'interno della cella, con particolare riferimento alla zona più interna, cercando di individuare la posizione ottimale del sensore all'interno del volume di prova. In questa fase, risulta senz'altro di aiuto la disponibilità di un sensore triassiale a larga banda, calibrato indipendentemente, da utilizzare per comparazione con i valori teorici del campo previsto all'interno della cella, calcolato secondo la seguente equazione:

$$E = \frac{\sqrt{P * Z}}{d} \quad (\text{V/m}) \quad (\text{A.4.1})$$

dove P è la potenza incidente, Z l'impedenza della cella e d la distanza tra il setto centrale della cella e il piano inferiore della cella stessa.

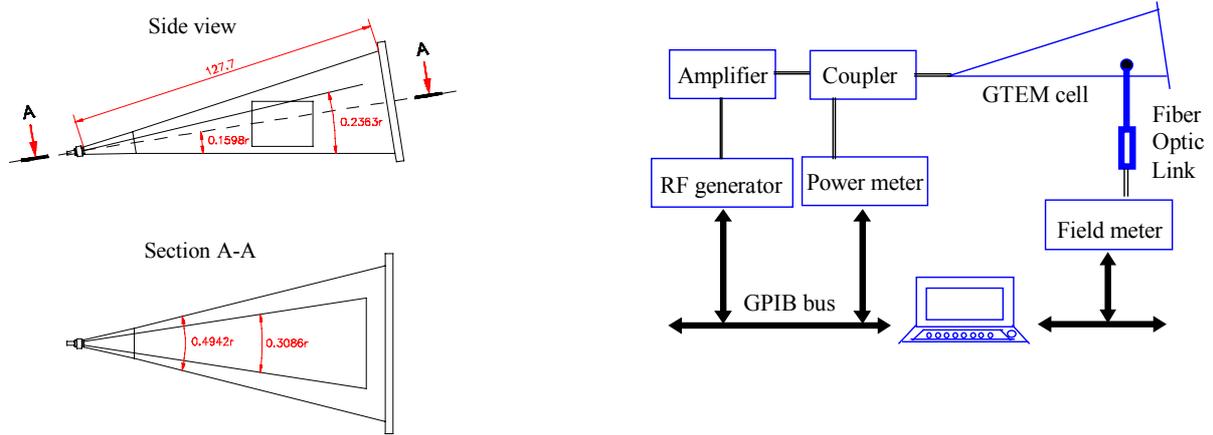


Figura A5.1: Schema della cella GTEM EMCO 5302 (a sinistra) e tipico set-up sperimentale (a destra)

Riferimenti appendice 5

G. Licitra, M. Poci, F. Francia *“Broad Band Sensor Calibration by a GTEM Cell”*, IRPA9, International Congress on Radiation Protection, Vienna, Austria, 14-19 April 1996

G. Licitra, M. Poci, F. Francia *“New Perspective in Broad Band Sensor Calibration”* EMC'96 Roma, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Roma, Italy, 17-20 September 1996

BIBLIOGRAFIA

International Organization for Standardization (ISO), *“Guide to the expression of uncertainty in measurement”*, 1993.

National Institute of Standard and Technology, Technical Note 1297, *“Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST Measurements results”*, 1993.

Decreto 10 settembre 1998, n. 381: Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 3 novembre 1998, Serie generale n. 257.

Ministero dell’Ambiente, Ministero delle Comunicazioni, Ministero della Sanità; Decreto 10 settembre 1998 n° 381 *“Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana”* – Linee Guida Applicative a cura del Gruppo di Lavoro (Decreto Ministero Ambiente 2 giugno 1997). Roma, luglio 1999.

IEC 61566 – 1997, *“Measurement of exposure to radiofrequency electromagnetic fields Field-strength in the frequency range 100 kHz – 1 GHz”*

International Standard CEI IEC 61566, 1997-06 *“Measurement of exposure to radiofrequency electromagnetic field- Field strength in the frequency range 100 kHz -1 GHz”*.

Linee guida CEI 111.B per misure di campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz. Undicesima bozza, aprile 1996.

Standard IEEE Std C95.3-1991 *“IEEE Recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields”* -RF and microwaves.

ITU-R SM.326.7 *“Determination and measurement of the power of amplitude-modulated radio transmitters”*, 1990

ITU-R SM 378-6 *“Field strength measurements at monitoring stations”*

Protocollo Network Italiani-Ispesl , gdl *“Modalità e strumenti di misura”*, 1999