

L'impiego della CAMERA ANECOICA nella progettazione delle antenne

PARTE SECONDA: misure d'antenna in camera anecoica.

Ing. Francesco Zaccarini

Andiamo avanti presentando la seconda parte del focus su una delle più importanti attrezzature utilizzate nella ricerca e sviluppo delle antenne: la *camera anecoica*.

PARTE PRIMA:

Cos'è e come viene realizzata una camera anecoica per la misura dei parametri elettrici delle antenne?

PARTE SECONDA:

Quali accorgimenti possono essere messi in pratica per ottenere misure affidabili nel corso della progettazione di una nuova antenna?

PARTE TERZA:

Quali altre attrezzature di laboratorio sono necessarie per le misure dei parametri di radiazione delle antenne?



...continua dalla PRIMA PARTE:

5. Il setup di misura in campo lontano.

5.1. La configurazione.

L'impiego più tradizionale (ed universale) della camera anecoica consiste nell'effettuare le misure ponendosi in una *condizione di campo lontano*, ovvero simulando al suo interno un tipico radiocollegamento in spazio libero tra due antenne poste ad una distanza R , per la quale sia valida la condizione:

$$R \geq 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad [1]$$

che dipende sia dalla dimensione massima D dell'antenna, sia dalla lunghezza d'onda λ ovvero dalla frequenza operativa. Per le antenne con dimensione D inferiore a λ , in campo lontano deve valere sempre la relazione:

$$R \gg \lambda \quad [2]$$

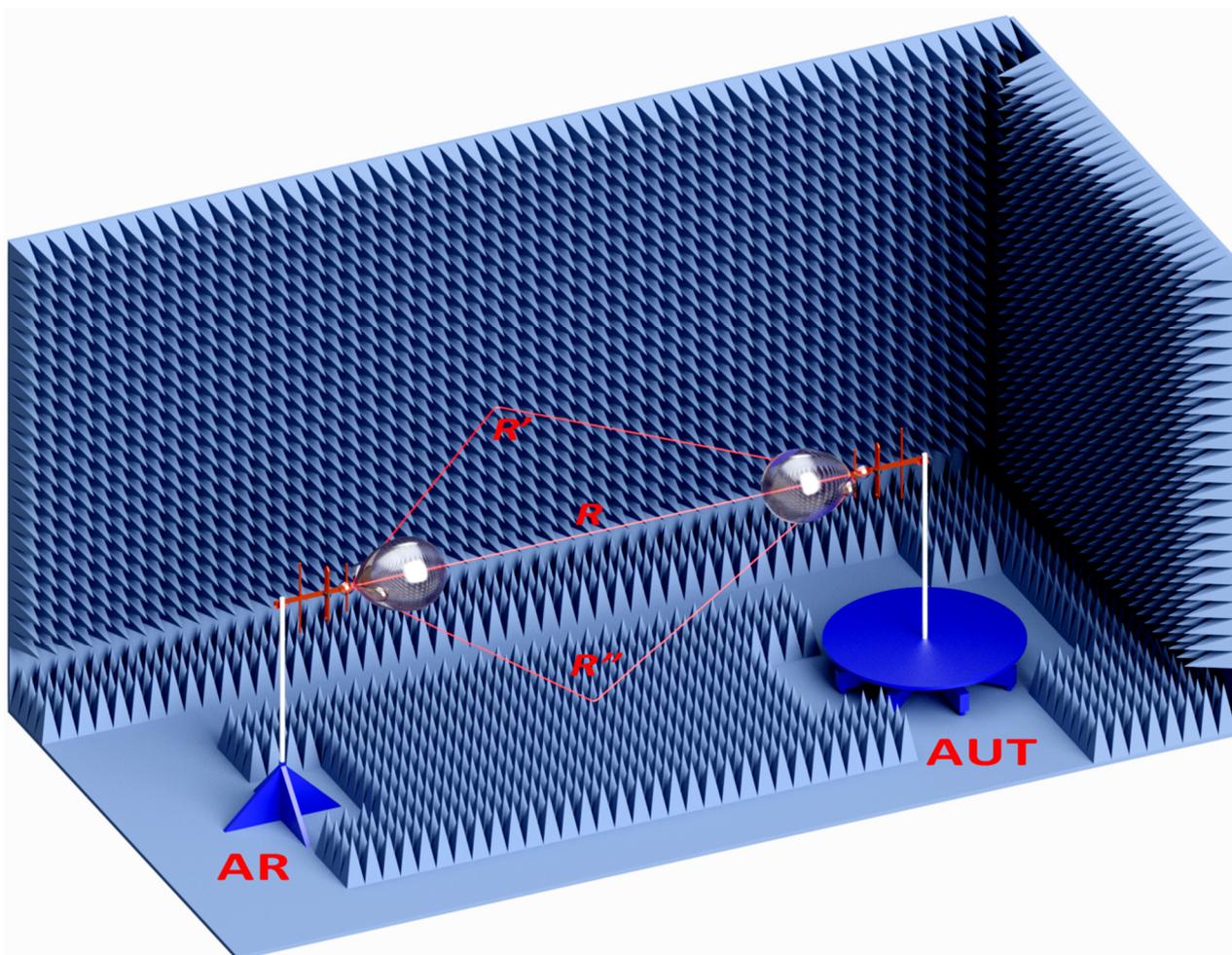


Figura 5

Setup di misura in campo lontano.

La **Figura 5** mostra una rappresentazione schematica di questo tipo di misure in camera anecoica, dove si possono riconoscere l'antenna sotto misura (**AUT**) e l'antenna di riferimento (**AR**), posta all'altro capo del link.

Nell'immagine sono anche rappresentati il raggio diretto, che percorre distanza minima **R** tra le due antenne, nonché i principali raggi riflessi dalle pareti verticali e orizzontali della camera, i cui percorsi sono rispettivamente **R'** e **R''**.

Scopo di una camera anecoica è quello di creare, all'interno di essa, una certa regione di spazio nella quale l'energia riflessa da qualsiasi raggio elettromagnetico incidente su pavimento, pareti e soffitto risulti molto più attenuato rispetto al raggio diretto **R**.

Si identifica pertanto, ad una certa frequenza od intervallo di frequenze, una cosiddetta *zona di quiete* della camera stessa.

Oltre alle caratteristiche di riflettività proprie del materiale assorbente ed al tipo di struttura (conduttrice o dielettrica) con cui è realizzata la camera, anche le caratteristiche di radiazione dell'antenna di riferimento (**AR**) di solito contribuiscono a discriminare i raggi riflessi da quello diretto.

La condizione migliore si verifica quindi nel caso in cui si debba effettuare **una misura di guadagno** tra due antenne di tipo direttivo: in questo caso le due antenne (**AUT** e **AR**) risultano puntate tra loro ed entrambe le loro funzioni di direttività (rappresentate in figura) agiscono da filtro spaziale nei confronti di tutti i cammini riflessi provenienti da direzioni diverse rispetto ad **R**.

Nella misura dei diagrammi di radiazione, l'antenna **AUT**, montata su di una tavola girevole, viene ruotata di 360° in azimut e di conseguenza il suo lobo principale illumina varie superfici della camera con diversi angoli di incidenza, dando luogo a raggi riflessi che in linea di principio tendono ad alterare la misura in maniera più consistente rispetto al caso precedente.

Infatti, nel caso limite in cui il diagramma di radiazione dell'**AUT** presenti degli zeri nel diagramma di radiazione, la profondità massima osservabile di questi minimi dipenderà dal livello di energia associato ai raggi riflessi, comunque captati dall'antenna di riferimento **AR**.

5.2. La misura di guadagno.

La prima misura che viene eseguita in una camera anecoica è sicuramente quella di guadagno. Come vedremo nel paragrafo che segue, disponendo di una coppia di antenne calibrate (con valori di guadagno noti), mediante tale misura è anche possibile effettuare una veloce stima delle prestazioni della camera.

Il radiocollegamento di **Figura 5** può essere identificato come una rete a due porte nella quale le sezioni di riferimento (*porta 1* e *porta 2*) sono rispettivamente i connettori delle due antenne **AUT** e **AR**. E' quindi possibile, mediante un analizzatore di reti vettoriale (VNA), effettuare una misura di perdita d'inserzione **IL(f)** [dB] in corrispondenza di queste porte, acquisendo la curva **|S₁₂(f)|** (o **|S₂₁(f)|**) [dB] nella banda operativa dell'**AUT**.

A meno di casi particolari, il sistema è reciproco e quindi vale la relazione:

$$IL(f) = -|S_{12}(f)| = -|S_{21}(f)| \quad [\text{dB}] \quad [3]$$

ovvero è indifferente utilizzare l'**AUT** come antenna trasmittente o ricevente.

Da questa misura è possibile calcolare la curva di guadagno dell'antenna G_{AUT} [dBi] mediante l'espressione:

$$G_{AUT}(f) = A_{SL}(f) - IL(f) - G_{AR}(f) \quad [\text{dBi}] \quad [4]$$

nella quale $G_{AR}(f)$ [dBi] è la curva di guadagno (nota) dell'antenna di riferimento, mentre $A_{SL}(f)$ [dB] è l'attenuazione di spazio libero, data da:

$$A_{SL}(f, R) = -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot R} \right) \quad [\text{dB}] \quad [5]$$

nella quale $\lambda = c/f$ [m] è la lunghezza d'onda e R [m] la distanza tra le due antenne AUT ed AR .

Nel caso in cui non sia disponibile un'antenna di riferimento per la banda di frequenza desiderata, è possibile effettuare una misura di guadagno approntando due antenne identiche, ovvero ponendo nella [4] $G_{AUT} = G_{AR}$. In questo caso il calcolo si semplifica, mediando anche sulle due antenne eventuali errori, e l'equazione [4] diventa:

$$G_{AUT}(f) = \frac{1}{2} [A_{SL}(f, R) - IL(f)] \quad [\text{dBi}] \quad [6]$$

5.3. Verifiche pratiche dell'attendibilità di una misura.

Vi sono studi, procedure e normative atte sia a definire la zona di quiete di una camera anecoica sia a stimarne le effettive caratteristiche così da calcolare, per un certo setup di misura, degli eventuali fattori di correzione da applicare nelle misure. L'argomento è complesso ed esula dallo scopo del presente articolo.

Cercherò quindi di affrontare l'argomento in maniera più operativa, dato che all'interno di un'azienda che progetta e produce antenne l'esigenza primaria è quella di poter caratterizzare i suoi nuovi prodotti, od i prototipi in fase di sviluppo, nel modo più veloce ed affidabile possibile.

Ogni tecnico che lavora all'interno di un laboratorio, utilizzando quotidianamente una determinata attrezzatura o strumentazione, si trova necessariamente ad acquisire una certa sensibilità su tutto ciò che sta facendo e, di conseguenza, sviluppa delle regole empiriche che gli permettono di valutare alla svelta l'affidabilità e l'accuratezza di una misura.

Non essendo un laboratorio di misura accreditato, in un'azienda può anche accadere che, per testare determinati prodotti, si debba utilizzare la camera anecoica al limite delle sue capacità operative, ad esempio a frequenze più basse della banda nella quale gli assorbitori sono più performanti. Naturalmente, anche in una tale ipotesi, bisogna sempre essere in grado di fornire al cliente un prodotto le cui specifiche d'interesse possano essere riscontrabili e verificabili, anche mediante un test indipendente di validazione condotto presso un qualsivoglia laboratorio accreditato.

Vediamo quindi alcuni metodi operativi che ci permettono di valutare empiricamente l'efficacia della zona di quiete, all'interno della quale dobbiamo effettuare una misura.

- **Confronto delle curve di guadagno misurate sui piani E ed H.**

Supponendo di operare con antenne in polarizzazione lineare, all'interno di una camera anecoica non ideale agiscono delle riflessioni con meccanismi diversi nei due piani principali. Quindi è

possibile misurare le curve di guadagno nei due piani ortogonali E ed H $G_E(f)$ e $G_H(f)$ e porle tra loro a confronto.

Un esempio può essere il seguente: in occasione dello sviluppo di una particolare antenna integrata per la quale era necessario misurare guadagno e diagrammi di radiazione nelle due polarizzazioni lineari orizzontale e verticale, è stata progettata e costruita ad hoc una coppia di antenne di riferimento, identiche tra loro, operanti nella banda 800 ÷ 1000 MHz.

Ciascuna di queste antenne, con una larghezza di fascio di circa 60°, è provvista di due elementi radianti identici in polarizzazione ortogonale (orizzontale e verticale) commutabili da remoto mediante appositi relè comandati da una tensione di controllo.

In questo modo è possibile acquisire direttamente le due perdite d'inserzione $IL_E(f)$ ed $IL_H(f)$ dalle quali, mediante la [6], le due curve di guadagno $G_E(f)$ e $G_H(f)$ nei due piani ortogonali.

La **Figura 6** riporta la misura di entrambe le curve, rispettivamente in colore rosso (piano H) ed in colore blu (piano E), con aggiunto (in tratteggio) l'andamento del guadagno medio.

In questo caso il risultato è più che buono, dal momento che lo scarto massimo è inferiore ad 0.4 dB e questo errore tiene conto anche di eventuali tolleranze costruttive tra le due coppie di elementi radianti ortogonali inevitabilmente presenti nelle due antenne.

Un secondo esempio è mostrato in **Figura 7** e si riferisce alle analoghe curve di guadagno di una coppia di antenne Yagi nella banda 300 ÷ 315 MHz,

dove gli assorbitori della camera hanno inevitabilmente prestazioni peggiori rispetto al caso precedente. Rispetto a quest'ultimo, pur essendo le larghezze di fascio comparabili, si è dovuto fisicamente ruotare di 90° entrambe le antenne per cambiare il piano sul quale effettuare la misura. Ciononostante si è riusciti ad ottenere uno scarto inferiore agli 0.5 dB, sicuramente merito della struttura dielettrica della camera anecoica.

A seguito di queste misure, una differenza massima di 0.5 dB può essere ritenuto un valore accettabile.

Le stesse misure di **Figura 7**, condotta in una camera anecoica identica, con la stessa dimensione di assorbitori ma di tipo schermato, avrebbe sicuramente portato ad un risultato peggiore.

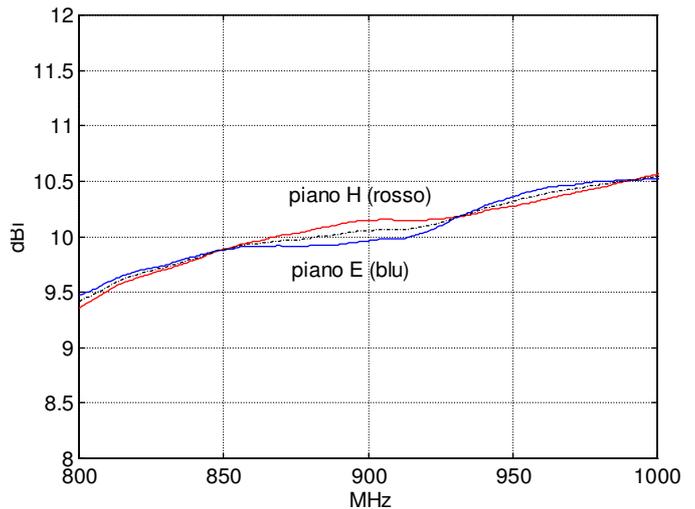


Figura 6

Curve di guadagno nei piani E ed H delle antenne a doppia polarizzazione commutabile, misurate rispettivamente nei due piani E ed H.

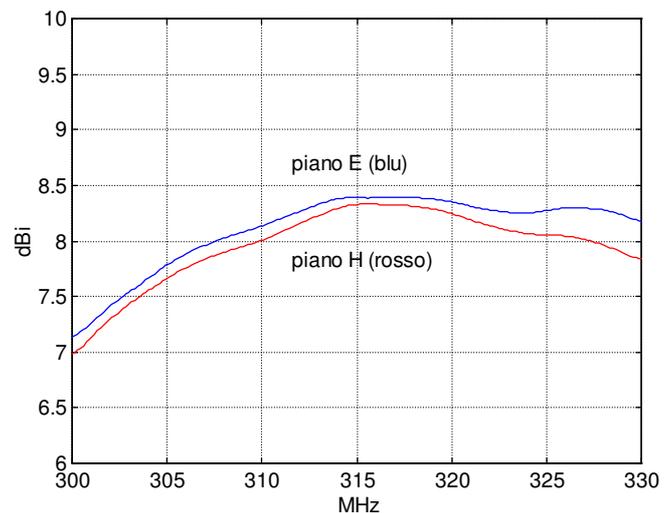


Figura 7

Curve di guadagno nei piani E ed H di due antenne Yagi identiche, nella banda 300 ÷ 330 MHz, misurate rispettivamente nei due piani E ed H.

- **Confronto delle curve di guadagno misurate a distanze diverse.**

Se ragioniamo in modo più pratico rispetto alle definizioni rigorose, possiamo definire l'estensione massima della zona di quiete della nostra camera anecoica in funzione della frequenza e della tipologia di antenna che stiamo misurando.

Supponendo che la condizione di campo lontano sia sempre verificata, più avviciniamo le due antenne **AUT** e **AR**, più ottengo un migliore discriminazione dei raggi riflessi dal raggio principale. Infatti, al diminuire di **R**, si ha che:

- La perdita d'inserzione del radiocollegamento diminuisce;
- Il diagramma di radiazione dell'antenna di riferimento **AR** (ed eventualmente anche dell'**AUT**, se questa è di tipo direttivo) riesce a discriminare meglio i raggi riflessi dal raggio principale;
- I raggi che vengono riflessi in corrispondenza del punto medio del radiocollegamento hanno un angolo di incidenza maggiore, quindi l'attenuazione degli assorbitori, è migliore.

Un metodo valido è quindi quello di effettuare la misura di guadagno a diverse distanze **R**, naturalmente entro un intervallo compatibile con la dimensione fisica della camera e senza avvicinarsi troppo agli assorbitori, che potrebbero interagire con il campo vicino dell'antenna.

Questo metodo permette di verificare l'attendibilità della misura di guadagno in modo abbastanza veloce ed inequivocabile. Se immaginiamo di utilizzare due antenne di riferimento identiche di guadagno **G_{AR}(f)** noto, ponendoci alla distanza **R_i** dovremmo poter acquisire una curva della perdita d'inserzione data da:

$$IL(f, R_i) = A_{SL}(f, R_i) - 2 \cdot G_{AR}(f) \quad [\text{dB}] \quad [7]$$

Se, ad esempio, anche senza conoscere le curve di guadagno **G_{AR}(f)** delle antenne che impiego, effettuo la misura di guadagno a due diverse distanza **R₁** e **R₂** [m], in condizioni ideali dovrei trovare una differenza tra le curve di perdita d'inserzione **ΔIL(R₂, R₁)** [dB] data da:

$$\Delta IL(R_2, R_1) = IL(f, R_2) - IL(f, R_1) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad [\text{dB}] \quad [8]$$

Quindi, ad ogni raddoppio della distanza, la perdita d'inserzione (qui intesa sempre come valore positivo) deve aumentare di 6 dB, semplicemente traslando la curva acquisita entro la banda di misura.

Pur essendo un metodo banale, la presenza di eventuali riflessioni appare evidente nel momento in cui, al variare di **R**, la curva della **IL(f)** si deforma dando luogo, nei casi peggiori, a veri e propri minimi in corrispondenza di certi valori di frequenza, che stanno ad indicare la presenza di un'interferenza distruttiva tra raggio diretto e raggi riflessi.

Anche in questo caso, la regola empirica stabilisce una tolleranza massima di 0.5 dB rispetto a quanto indicato nella [8].

- **Simmetria dei diagrammi di radiazione.**

Nel caso in cui si debbano misurare degli elementi radianti con caratteristiche, sia geometriche che elettriche, di tipo simmetrico, è logico aspettarsi un andamento simmetrico anche per quanto riguarda forma dei diagrammi di radiazione effettivamente misurati.

Al giorno d'oggi questo comportamento è anche confortato dal fatto che esistono molti software di analisi elettromagnetica che permettono di effettuare una modellizzazione precisa dell'antenna e

del suo sistema di alimentazione, e che quindi permettono di stimare con notevole precisione il suo comportamento radiativo.

Questo tipo di antenne, che non di rado capita di dover progettare, permettono di eseguire indirettamente una verifica delle prestazioni della camera anecoica. Anche se questa affermazione può risultare eccessiva, colgo l'occasione per fare l'esempio di un'antenna omnidirezionale UWB operante nella banda $3.25 \div 4.25$ GHz, che ci è stata recentemente commissionata. Essendo in questo caso in una banda di frequenza piuttosto elevata nella quale gli assorbitori della camera hanno prestazioni eccellenti, sono stati ottenuti i diagrammi di radiazione riportati nella **Figura 8**, rispettivamente per i piani E ed H, che rappresentano un esempio di simmetria.

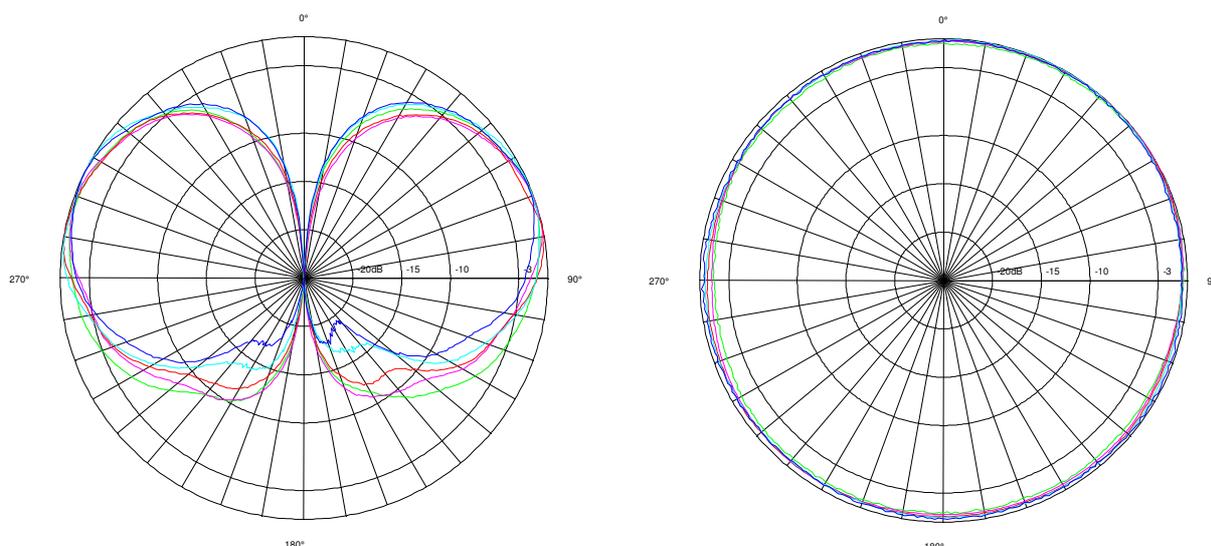


Figura 8

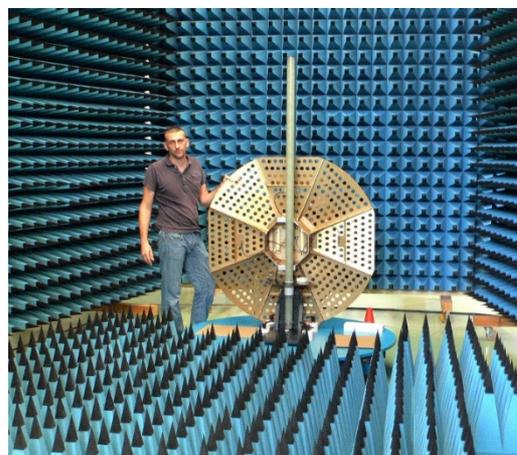
Diagrammi di radiazione di un'antenna omnidirezionale UWB nei piani E (a sinistra) ed H (a destra), misurati per cinque valori di frequenza nella banda $3.25 \div 4.25$ GHz.

- **Misure su antenne grandi.**

Non sempre si riesce a condurre una misura in condizioni simili a quelle dei diagrammi riportati in **Figura 8**, vale a dire in condizioni che potremo definire ottimali.

Vi sono tuttavia delle antenne che possono essere efficacemente misurate anche al limite delle prestazioni di una camera anecoica, sia per quanto riguarda le caratteristiche degli assorbitori che per le dimensioni utili della camera stessa.

Un esempio interessante può essere quello di un'antenna SATCOM in banda $243 \div 318$ MHz: un pannello direttivo con una dimensione **D** di 1,3 metri (**Figura 9**).



Una volta calcolata la condizione di campo lontano data dalla [1], le misure sono state condotte ad una distanza di circa 6λ ad inizio banda ($f=243\text{ MHz}$, ovvero $\lambda=1.23\text{ m}$): ciò è stato possibile in quanto la camera anecoica è stata appositamente costruita con delle pareti mobili, così da poter allontanare di qualche metro il fondo della camera e guadagnare lo spazio sufficiente ad alloggiare entrambe le antenne (*AUT* ed *AR*) senza interferire con gli assorbitori.

Dato che in questo caso la polarizzazione caratteristica dell'*AUT* è una circolare destra, i diagrammi di radiazione delle antenne direttive coinvolte nella misura hanno contribuito a discriminare efficacemente i raggi riflessi da altre direzioni, specialmente quella posteriore e, alla frequenza di 243 MHz, si è ottenuto il diagramma di radiazione mostrato in **Figura 10**.

La misura, ripetuta a distanze diverse (anche maggiori) ha dato risultati simili, perfettamente in accordo con le specifiche di progetto dell'antenna.

- **Misure su antenne piccole.**

Un altro modo in cui è possibile spingersi un po' oltre i limiti di una camera anecoica è quando si misura un'antenna cosiddetta corta, ovvero con dimensione D che verifica la relazione:

$$D \leq \frac{\lambda}{2\pi} \quad [\text{m}] \quad [9]$$

Si suppone anche di condurre le misure in corrispondenza di una sola frequenza o comunque a banda stretta, indicativamente inferiore all'uno per cento.

Sebbene queste due limitazioni siano un po' particolari, non è raro operare in queste condizioni quando si sviluppano antenne integrate nella banda *ISM* dei 169 MHz: questo è il caso, ad esempio, delle antenne per i dispositivi di telelettura dei contatori del gas.

Immaginiamo che nella camera siano presenti delle riflessioni, associabili ad un certo numero di raggi elettromagnetici che collegano le due antenne *AUT* ed *AR*, percorrendo cammini R_i diversi dal raggio diretto che copre la distanza minima $R < R_i$.

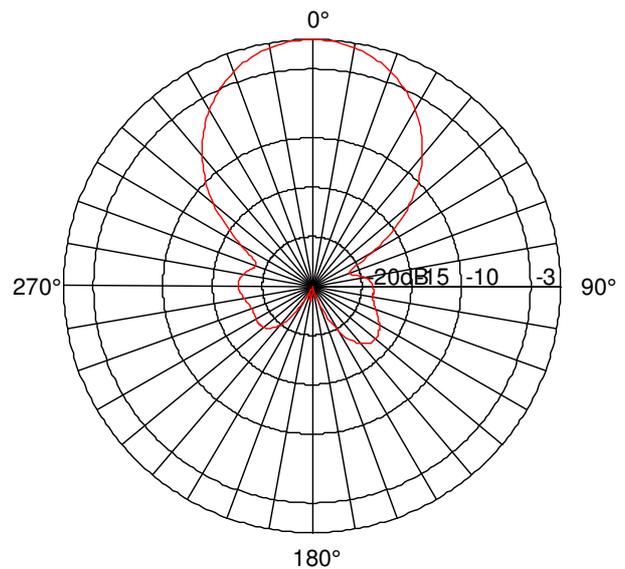


Figura 10

Diagramma di radiazione di un'antenna SATCOM, acquisito alla frequenza di 243 MHz.

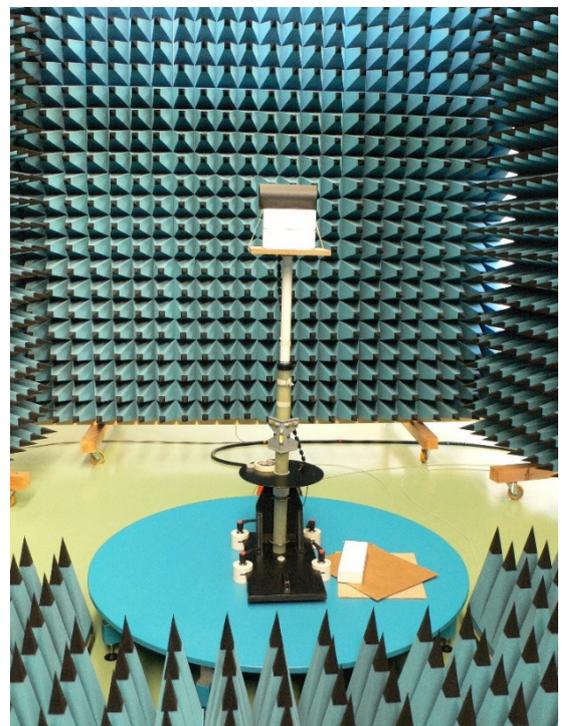


Figura 9

Allattamento della misura di un'antenna di grandi dimensioni.

In linea di principio, è possibile trovare empiricamente una posizione (X_0, Y_0, Z_0) dell'AUT per la quale la somma vettoriale dei segnali riflessi (ciascuno con la propria fase) produca una risultante trascurabile rispetto al raggio diretto. Naturalmente, dal momento che le fasi dipendono sia dalle distanze R_i che da λ , valgono le approssimazioni sopra descritte.

La determinazione della posizione (X_0, Y_0, Z_0) viene condotta nella pratica utilizzando una seconda antenna di riferimento, collocata al posto dell'AUT: in questo caso è stato utilizzato il nostro modello EP60012L, ovvero un'antenna biconica con dimensione $D \approx 20$ cm. Per tale antenna, calibrata SIT presso un ente certificatore esterno, il valore di guadagno G_{cal} a 169 MHz è pari a -15.25 dBi.

La **Figura 11** mostra tale antenna in posizione: questa procedura di calibrazione era stata condotta con la camera anecoica nella versione non attuale, non ancora completa di tutti gli assorbitori.

La **Figura 12** riporta alcune misure di guadagno a 169 MHz effettuate su entrambi i piani principali E ed H a varie distanze rispetto alla posizione di riferimento che si è poi rivelata essere quella ottimale, qui normalizzata a zero. La retta orizzontale (in verde nella figura) riporta il valore del guadagno effettivo dell'antenna calibrata EP60012L.

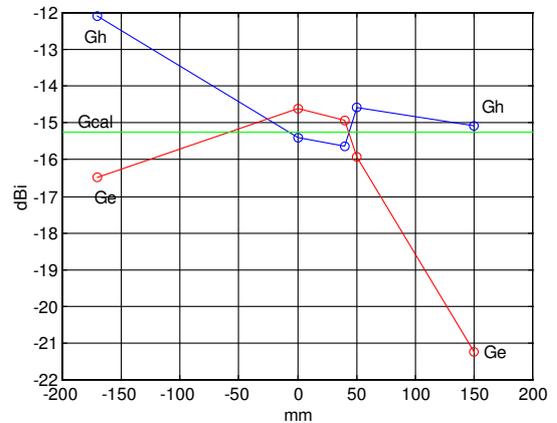


Figura 12

Valori di guadagno G_e e G_h a 169 MHz dell'antenna biconica di calibrazione (in ordinata), misurati rispettivamente nei piani E ed H, in funzione della variazione di distanza R di misura (in ascissa).

La **Figura 12** mostra come, spostando l'AUT, sia spesso possibile determinare una posizione ottimale, (circa 0 ± 50 mm) in corrispondenza della quale sia possibile condurre misure attendibili, con un errore stimato in questo esempio di circa ± 0.5 dB.

In **Figura 13** sono riportati i corrispondenti diagrammi di radiazione nel piano E acquisiti alle frequenze di 164 MHz e 169.5 MHz: a seguito di questa ottimizzazione, risultano molto regolari e simmetrici, conformi alle caratteristiche di radiazione dell'antenna EP60012L.

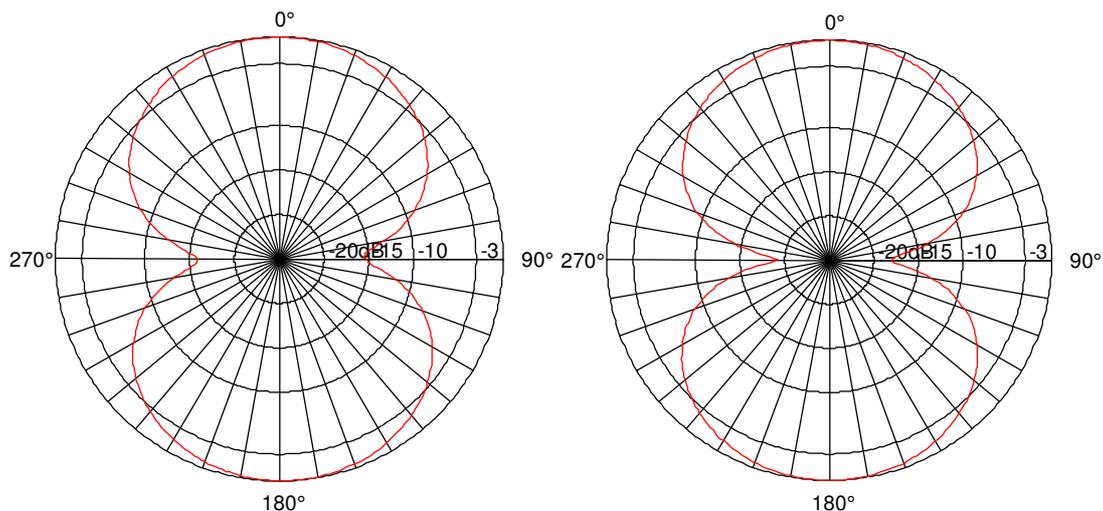


Figura 13

Diagrammi di radiazione nel piano E dell'antenna di calibrazione EP60012L, misurati rispettivamente a 164 MHz (a sinistra) e a 169.5 MHz (a destra).

La procedura empirica qui accennata, il cui principio di massima è applicato in alcune metodologie più rigorose per la verifica della zona di quiete di una camera anecoica, ha lo scopo di far comprendere come in certe condizioni sia possibile ottenere delle misure affidabili di pre-certificazione anche in condizioni di misura non ottimali.

... l'articolo continua nella **TERZA PARTE.**

*Tutte le informazioni e le esperienze riportate in questo articolo sono frutto dell'attività di **progettazione, sviluppo e realizzazione di antenne custom professionali** svolta da [ElettroMagnetic Services Srl](#) con il metodo [AntennaSuMisura](#).*

*Per **domande, chiarimenti o approfondimenti** in merito a questo o ad altri argomenti riguardanti le **antenne professionali** scrivi a bollini@elettromagneticervices.com*

Grazie per il tempo che hai dedicato alla lettura di questo articolo.

Trovi l'elenco completo delle nostre pubblicazioni tecniche cliccando qui:

<https://www.elettromagneticervices.com/news>

***ElettroMagnetic Services**
SRL
Trasmetti la tua eccellenza!*