



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale **Ingegneria Biomedica**

**ACQUISIZIONE DI MISURE DELL'EFFICACIA DI  
SCHERMATURA IN CAMERA RIVERBERANTE**

**ACQUISITION OF SHIELDING EFFECTIVENESS  
MEASUREMENTS IN A REVERBERATION CHAMBER**

Relatore:

Prof. **Franco Moglie**

Tesi di Laurea di:

**Shamil Tariq**

Correlatore:

Prof. **Valter Mariani Primiani**

**A.A 2023/2024**



# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITOLO 1 - Richiami di Elettromagnetismo.....</b>	<b>5</b>
1.1 Equazioni di Maxwell .....	5
1.2 Propagazione delle Onde.....	7
1.2.1 Onda piana.....	7
1.2.2 Propagazione onde piane in mezzi con perdite .....	8
<b>CAPITOLO 2 - Schermatura Elettromagnetica .....</b>	<b>11</b>
2.1 Concetti Fondamentali sugli Schermi Elettromagnetici .....	11
2.2 Efficacia di Schermatura .....	13
<b>CAPITOLO 3 – La Camera Riverberante .....</b>	<b>15</b>
3.1 Struttura e Principio di Funzionamento .....	15
3.2 Camera Riverberante Annidata.....	17
3.3 Modal Stirrer .....	20
<b>CAPITOLO 4 - Antenne .....</b>	<b>21</b>
4.1 Antenna log-periodica e double ridge .....	21
<b>CAPITOLO 5 - Preparazione delle Misure .....</b>	<b>23</b>
5.1 Preparazione e Posizionamento dei Campioni.....	23
5.1 Misura di fondo.....	24
<b>CAPITOLO 6 – Algoritmo per il Calcolo della SE .....</b>	<b>29</b>
6.1 Python: dalle Origini alle Applicazioni Avanzate.....	29
6.2 Ambiente di Sviluppo: Jupyter Notebook .....	31
6.2.1 Funzionalità.....	31
6.2.2 Condivisione e Collaborazione .....	32
6.3 Sviluppo del Codice Python per l'Analisi dell'Efficacia di Schermatura.....	32
6.3.1 Calcolo dell'Efficienza dell'Antenna tramite la Funzione ea(tipo) .....	32
6.3.2 Gestione dei dati di frequenza con la funzione riempi_tab_nwa.....	33
6.3.3 Confronto delle misure tramite la funzione sub_15 .....	35

6.3.4 Uso di reshape .....	39
6.3.5 Calcolo delle medie.....	40
<b>CAPITOLO 7 – Calcolo della SE .....</b>	<b>41</b>
7.1 Analisi dei risultati .....	41
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>45</b>

# INTRODUZIONE

Nell'era della tecnologia moderna, la gestione delle interferenze elettromagnetiche (EMI) rappresenta un elemento fondamentale nella progettazione e produzione di dispositivi elettronici. Tali interferenze, generate da correnti elettriche che variano in ampiezza e frequenza, possono compromettere il funzionamento di dispositivi sensibili, causando anomalie operative, cali di prestazione o, in situazioni critiche, problemi di sicurezza. Per far fronte a queste problematiche, è necessario sviluppare soluzioni affidabili di schermatura elettromagnetica, in grado di ridurre gli effetti delle interferenze e garantire la piena operatività dei dispositivi in differenti contesti applicativi.

La schermatura elettromagnetica si basa sull'impiego di materiali specifici e tecniche, volti sia a proteggere le aree sensibili dall'esposizione a campi elettromagnetici indesiderati sia a contenere le emissioni dei dispositivi, evitando interferenze reciproche. Con l'aumento della complessità dei sistemi elettronici e l'adozione di componenti sempre più compatti, il settore della compatibilità elettromagnetica (EMC) si è evoluto rapidamente. Le soluzioni tradizionali si trovano oggi ad affrontare nuove sfide, legate all'efficienza delle schermature, alla realizzazione di tecnologie sempre più compatte e alla sostenibilità economica. In questo contesto, l'innovazione nei materiali e nelle metodologie di schermatura diventa indispensabile per garantire dispositivi sicuri, performanti e conformi agli standard normativi.

Valutare l'efficacia della schermatura non è solo necessario per soddisfare requisiti di sicurezza, ma anche per ottimizzare le prestazioni dei dispositivi e identificare possibili miglioramenti. Tra le tecniche di misurazione disponibili, l'utilizzo delle camere riverberanti si distingue per la capacità di fornire un ambiente controllato, statistico e rappresentativo delle condizioni operative reali. Questi strumenti consentono di analizzare con precisione le proprietà schermanti dei materiali, offrendo una panoramica completa delle loro interazioni con i campi elettromagnetici.

In questa tesi, l'efficacia schermante è stata analizzata a diverse frequenze mediante un programma di simulazione sviluppato in Python. Questo linguaggio, scelto per la sua versatilità e per la disponibilità di librerie avanzate come NumPy e Matplotlib, ha facilitato l'elaborazione dei dati sperimentali, consentendo di effettuare calcoli complessi e di

generare rappresentazioni grafiche chiare ed efficaci. Attraverso questi strumenti, è stato possibile visualizzare le variazioni delle prestazioni schermanti in funzione della frequenza, fornendo una base solida per ulteriori ottimizzazioni.

La tesi approfondisce i fondamenti teorici dell'elettromagnetismo e della propagazione delle onde con un'analisi pratica sull'uso delle camere riverberanti e delle proprietà dei materiali schermanti. Questo approccio integrato permette di identificare i parametri chiave che influenzano l'efficacia della schermatura e di proporre strategie mirate per il miglioramento delle tecnologie attuali.

# CAPITOLO 1 - Richiami di Elettromagnetismo

## 1.1 Equazioni di Maxwell

Le equazioni di Maxwell rappresentano la base della teoria elettromagnetica e descrivono come i campi elettrici e magnetici interagiscono e si propagano. Queste equazioni sono valide in qualsiasi materiale, compreso il vuoto, e in ogni punto dello spazio. Sono fondamentali non solo per quanto riguarda i fenomeni elettromagnetici, ma anche per applicazioni pratiche, come la progettazione di sistemi di schermatura elettromagnetica e l'analisi della propagazione delle onde elettromagnetiche. In condizioni statiche, ovvero quando tutte le cariche sono ferme o si muovono a velocità costante, le equazioni di Maxwell si semplificano notevolmente. In questo caso, le variazioni temporali sono nulle ( $\partial/\partial t = 0$ ), e i campi elettrici e magnetici possono essere trattati come separati. Questo porta alla suddivisione dello studio in due aree distinte: l'elettrostatica, che si occupa dei campi elettrici statici generati da cariche fisse, e la magnetostatica, che tratta dei campi magnetici statici generati da correnti stazionarie. Quando le cariche sono in movimento o variano nel tempo, i campi elettrici e magnetici non possono più essere trattati separatamente. In queste condizioni, le equazioni di Maxwell diventano fondamentali per descrivere come un campo genera l'altro, portando alla formazione di onde elettromagnetiche, che, a loro volta, si propagano attraverso lo spazio libero o all'interno di materiali, e sono alla base di molti fenomeni fisici, come la propagazione della luce. Le quattro equazioni di Maxwell sono espresse nella loro forma differenziale come segue:

**LEGGE DI FARADAY**

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

**LEGGE DI AMPÈRE**

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

**LEGGE DEL MAGNETISMO DI GAUSS**

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

**LEGGE DI GAUSS**

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$$

Dove:

- $\mathbf{E}$  è il vettore campo elettrico [V/m];
- $\mathbf{H}$  è il vettore campo magnetico [A/m];
- $\mathbf{B}$  è il vettore induzione magnetica ( $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$  con  $\mu$  permeabilità magnetica del materiale) [Wb/m<sup>2</sup>];
- $\mathbf{J}$  è la densità di corrente ( $\mathbf{J}=\sigma\mathbf{E}$  con  $\sigma$  conducibilità del materiale) [A/m<sup>2</sup>];
- $\mathbf{D}$  è il vettore induzione elettrica ( $\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E}$  con  $\varepsilon$  costante dielettrica) [C/m<sup>2</sup>];
- $\rho_V$  è la densità di carica elettrica [C/m<sup>3</sup>];

Le equazioni di Maxwell descrivono proprietà fondamentali per comprendere i campi elettrici e magnetici e le loro interazioni. Da queste equazioni possono essere derivate le seguenti caratteristiche:

- In ogni punto dello spazio dove esiste una carica elettrica, questa genera un campo elettrico che tende a riequilibrare le cariche in tutto il volume considerato.
- Un flusso magnetico che attraversa una superficie chiusa genera un campo magnetico che rispetta il principio di conservazione, secondo cui il flusso che entra è equivalente a quello che ne esce.
- Le correnti elettriche che attraversano un conduttore producono un campo magnetico circolare attorno al conduttore stesso, come descritto dalla legge di Ampère.
- Una corrente variabile nel tempo, invece, genera un campo elettrico, come spiegato dal principio dell'induzione elettromagnetica di Faraday.

Maxwell dimostrò teoricamente che un campo elettrico variabile nel tempo induce un campo magnetico, il quale, a sua volta, genera un ulteriore campo elettrico variabile. Questo continuo scambio tra i due campi produce le onde elettromagnetiche, che si propagano trasportando energia sia nel vuoto che attraverso materiali.

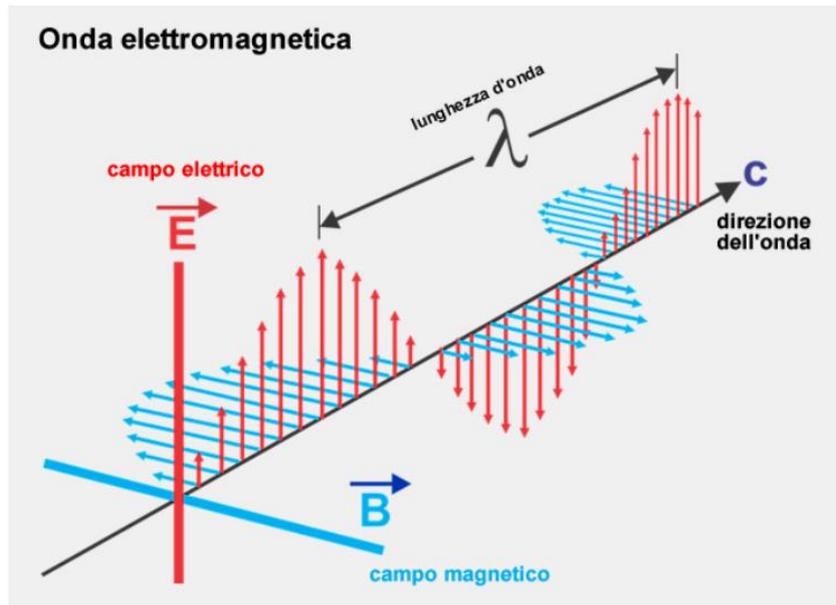


Figura 1.1 Rappresentazione della propagazione di un'onda elettromagnetica

## 1.2 Propagazione delle Onde

La propagazione delle onde è un fenomeno fisico fondamentale che riguarda la trasmissione di energia da un punto all'altro sotto forma di onde. Le onde possono propagarsi in vari mezzi, come l'aria, il vuoto o i materiali solidi, e possono essere di natura meccanica o elettromagnetica. Nel caso delle onde meccaniche, l'energia viene trasmessa attraverso l'oscillazione delle particelle del mezzo, mentre nelle onde elettromagnetiche, l'energia viene trasferita tramite l'interazione tra campi elettrici e magnetici oscillanti.

### 1.2.1 Onda piana

L'onda piana è un modello teorico fondamentale per descrivere la propagazione delle onde elettromagnetiche, in cui l'onda dipende esclusivamente da una singola variabile spaziale e una temporale. In realtà, la generazione di un'onda piana ideale sarebbe impossibile, poiché richiederebbe una sorgente con energia infinita. Tuttavia, in determinate regioni dello spazio, alcune onde possono essere approssimate come piane e uniformi, dando origine al concetto di "onde piane localizzate". Questo modello risulta particolarmente utile come soluzione delle equazioni di Maxwell in un mezzo omogeneo. In tale modello, i fronti d'onda sono piani infiniti e paralleli, mentre le oscillazioni avvengono in direzioni perpendicolari alla direzione di propagazione. Sebbene le onde piane perfette non esistano in natura, a causa dell'impossibilità di generare una sorgente infinita, esse costituiscono una semplificazione matematica efficace per studiare la propagazione elettromagnetica in condizioni ideali, in

particolare a grande distanza dalla sorgente, dove il fronte d'onda può essere approssimato come piano.

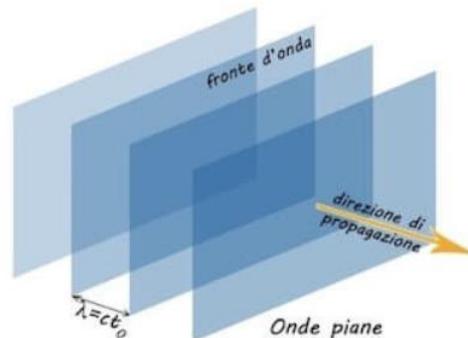


Figura 1.2 Rappresentazione delle onde piane

### 1.2.2 Propagazione onde piane in mezzi con perdite

Nella propagazione di onde elettromagnetiche in mezzi reali, è fondamentale considerare gli effetti delle perdite. Le onde piane, in particolare, subiscono attenuazioni quando si propagano attraverso materiali conduttivi o resistivi, ossia quei mezzi che presentano dissipazione di energia. Quando si parla di un mezzo ideale senza perdite, l'onda si propaga senza subire attenuazioni. Tuttavia, in un mezzo con perdite, l'onda subisce un progressivo smorzamento dell'ampiezza del campo elettrico e magnetico. Quando l'onda elettromagnetica si propaga attraverso un mezzo conduttore caratterizzato da una conducibilità  $\sigma$ , si introduce il concetto di costante di propagazione  $\gamma$ . Questa grandezza complessa descrive il comportamento dell'onda nel mezzo, tenendo conto sia dell'attenuazione causata dalle perdite sia della variazione di fase durante la propagazione. La costante di propagazione può essere definita come:

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu (\epsilon' - j\epsilon'')$$

In questo contesto,  $\epsilon'$  rappresenta la parte reale della permittività del materiale, mentre  $\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega}$  indica la sua parte immaginaria, legata alle perdite. Poiché  $\gamma$  è complessa, si può esprimere come  $\gamma = \alpha + j\beta$  dove  $\alpha$  è la costante di attenuazione e  $\beta$  la costante di fase.

Queste due costanti si possono esprimere come:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [\text{Np/m}]$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [\text{rad/m}]$$

Nell'ipotesi che il campo elettrico abbia come unica componente  $E_x$  l'equazione delle onde in un mezzo conduttore diventa:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \gamma^2 E_x$$

Le soluzioni di questa equazione descrivono come il campo elettrico varia lungo l'asse  $z$ :

$$E_x(z) = E_x^+ e^{-\gamma z} + E_x^- e^{\gamma z}$$

Il corrispondente campo magnetico può essere espresso come:

$$H_y(z) = \frac{1}{\eta} (E_x^+ e^{-\gamma z} + E_x^- e^{\gamma z})$$

dove  $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$  è l'impedenza intrinseca del materiale, una variabile complessa che rappresenta come il materiale resiste alla propagazione dell'onda. Un aspetto importante della propagazione delle onde nei materiali con perdite è lo spessore di penetrazione  $\delta_s$ , che indica quanto profondamente l'onda può penetrare nel materiale prima che la sua ampiezza decresca di un fattore  $e^{-1}$ . La profondità di penetrazione è definita come:

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha}$$

Dopo una distanza  $z = \delta_s$ , l'ampiezza del campo elettrico decresce esponenzialmente e si riduce di  $e^{-1}$  rispetto al suo valore iniziale. Questo comportamento può essere descritto graficamente con una curva di attenuazione che mostra come l'onda si smorza nel mezzo.

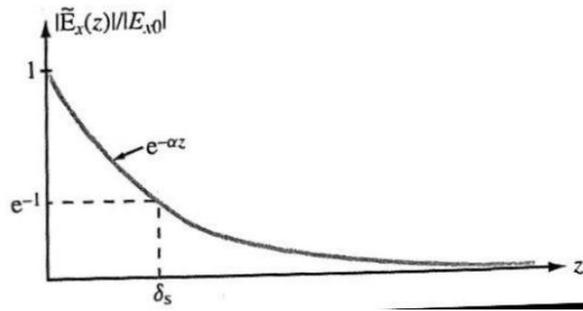


Figura 1.3 Decadimento esponenziale dell'ampiezza del campo elettrico  $E_x$  lungo la direzione  $z$

In un dielettrico ideale, la conducibilità  $\sigma$  è pari a 0. Di conseguenza, anche il coefficiente di attenuazione  $\alpha$  risulta nullo, e lo spessore di penetrazione  $\delta_s$  tende all'infinito. In questa condizione ideale, un'onda piana elettromagnetica può propagarsi senza subire alcuna perdita di energia. Questo comportamento si verifica, ad esempio, nel vuoto, dove non vi sono meccanismi di dissipazione energetica. Al contrario, in un buon conduttore, come il rame, per il quale  $\sigma \rightarrow \infty$ , il coefficiente  $\alpha$  assume valori estremamente elevati, indicando una fortissima attenuazione dell'onda elettromagnetica al suo interno. In questa situazione,  $\delta_s$  si avvicina a zero, evidenziando come l'onda non riesca a propagarsi efficacemente nel conduttore. Per dare un esempio numerico, la conducibilità del rame puro è circa  $\sigma = 5.8 \times 10^7$  S/m, rendendolo un ottimo conduttore per applicazioni elettriche ed elettromagnetiche.

Per mezzi reali, che non sono né dielettrici perfetti né buoni conduttori, si tiene conto della parte immaginaria e reale della costante dielettrica complessa  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ . In questi casi, il rapporto tra la parte immaginaria e quella reale della costante dielettrica,  $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ , diventa un parametro fondamentale per quantificare le perdite. Questo rapporto definisce l'entità delle perdite per il materiale in esame:

- Se  $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \ll 1$ , il materiale è detto "dielettrico a basse perdite", poiché le perdite energetiche sono trascurabili.
- Se  $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \gg 1$ , il materiale è considerato un "buon conduttore", poiché le perdite dominano il comportamento dell'onda.

# CAPITOLO 2 - Schermatura Elettromagnetica

## 2.1 Concetti Fondamentali sugli Schermi Elettromagnetici

La schermatura elettromagnetica è una tecnica utilizzata per ridurre o eliminare l'influenza di campi elettromagnetici indesiderati in una determinata area dello spazio. Questo approccio è particolarmente importante nel contesto delle apparecchiature elettroniche, che possono essere vulnerabili alle interferenze elettromagnetiche (EMI) provenienti dall'esterno o generare esse stesse disturbi che potrebbero interferire con altri dispositivi.

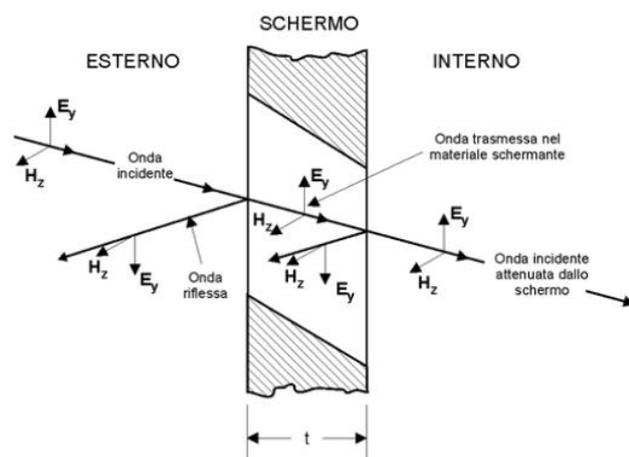


Figura 2.1 Rappresentazione del fenomeno di schermatura elettromagnetica

Uno schermo elettromagnetico è comunemente rappresentato come un contenitore metallico che circonda completamente un dispositivo o una sua parte. Questo contenitore serve a svolgere una doppia funzione: da un lato, protegge l'apparecchio elettronico dalle interferenze esterne; dall'altro, impedisce che le emissioni elettromagnetiche generate dall'apparecchio stesso si propaghino all'esterno, evitando così di creare disturbi in altri sistemi. Per ottenere un'efficace schermatura, è fondamentale che il dispositivo sia completamente racchiuso nello schermo e che non vi siano aperture, fori o cavi non schermati, che potrebbero compromettere l'efficacia dello schermo.

Nell'immagine fornita, è possibile osservare come l'onda elettromagnetica incidente interagisca con lo schermo. In primo luogo, l'onda subisce una riflessione parziale alla superficie esterna dello schermo, che rappresenta la discontinuità tra l'aria e il materiale metallico. Parte dell'onda riesce a penetrare nel materiale schermante, ma viene attenuata a causa delle proprietà elettromagnetiche del materiale stesso. Infine, la porzione dell'onda che attraversa lo schermo è notevolmente ridotta rispetto all'onda originale, dimostrando così l'efficacia del sistema di schermatura.

Esistono due principali tipologie di schermatura, distinte in base alla frequenza delle onde elettromagnetiche da attenuare: la schermatura a bassa frequenza (fino a 100 kHz) e quella ad alta frequenza (oltre i 100 kHz). Nel caso delle basse frequenze, il campo elettrico e quello magnetico possono essere considerati separatamente. Gli schermi utilizzati per queste applicazioni sono spesso realizzati in materiali ferromagnetici, come le leghe ferro-silicio, che hanno un'alta permeabilità magnetica e sono particolarmente efficaci nel deviare le linee di campo magnetico. Per le alte frequenze, invece, i campi elettrici e magnetici sono strettamente correlati, e gli schermi sono generalmente realizzati in materiali ad alta conducibilità elettrica, come il rame o l'alluminio, sfruttando la legge dell'induzione elettromagnetica (legge di Faraday) per generare correnti indotte che oppongono il loro campo magnetico a quello dell'onda incidente.

Un altro aspetto fondamentale della schermatura è la sua efficacia in funzione della distanza dallo schermo. Per i materiali conduttivi, l'efficacia di schermatura è maggiore vicino alla superficie dello schermo e diminuisce gradualmente all'aumentare della distanza. Al contrario, i materiali ferromagnetici offrono un'efficacia elevata nelle vicinanze dello schermo, ma questa decresce rapidamente allontanandosi da esso.

In conclusione, la scelta del tipo di schermatura e del materiale da utilizzare dipende dalla natura del campo elettromagnetico da schermare e dall'applicazione specifica. Una comprensione approfondita delle proprietà dei materiali e dei principi fisici alla base della schermatura elettromagnetica è essenziale per progettare sistemi efficaci e affidabili.

## 2.2 Efficacia di Schermatura

L'efficacia di schermatura è un concetto fondamentale nell'ambito della compatibilità elettromagnetica (EMC) e della protezione dei dispositivi elettronici dalle interferenze elettromagnetiche (EMI). Questo parametro misura la capacità di un materiale o di una struttura di attenuare i campi elettromagnetici che tentano di attraversarla. Con l'aumento delle fonti di radiazioni elettromagnetiche nell'ambiente, la necessità di sviluppare e valutare efficacemente le soluzioni di schermatura è diventata cruciale, sia per garantire il funzionamento sicuro dei dispositivi elettronici, sia per prevenire possibili rischi per la salute umana. La qualità di uno schermo elettromagnetico viene valutata numericamente attraverso l'**efficacia di schermatura** (Shielding Effectiveness), definita come il rapporto tra l'intensità del campo elettromagnetico incidente e quella del campo trasmesso attraverso il materiale schermante. In termini matematici, l'efficacia di schermatura può essere espressa come:

$$SE = 20 \log_{10} \left( \left| \frac{E^i}{E^t} \right| \right)$$

Dove:

- $E^i$  è il campo incidente
- $E^t$  è il campo trasmesso

L'efficacia di schermatura può essere espressa in decibel (dB), con valori più alti che indicano una schermatura più efficace. Questo parametro è importante non solo per progettare schermi elettromagnetici per applicazioni industriali e militari, ma anche per garantire la compatibilità elettromagnetica in dispositivi di uso comune, come telefoni cellulari, computer e dispositivi medici. L'efficacia di schermatura di un materiale dipende da tre meccanismi principali:

1. **Riflessione:** La riflessione dell'onda elettromagnetica alla superficie del materiale schermante, dovuta alla discontinuità di impedenza tra l'aria e il materiale.
2. **Assorbimento:** L'assorbimento del campo elettromagnetico all'interno del materiale, che riduce ulteriormente l'ampiezza dell'onda man mano che penetra nel materiale stesso.

3. **Ricomposizione delle Onde:** La cancellazione parziale o totale delle onde riflesse all'interno del materiale, che contribuisce a ridurre l'intensità del campo trasmesso.

Il modello classico per descrivere l'efficacia di schermatura considera la somma dei contributi di riflessione e assorbimento:

$$SE_{dB} = R_{dB} + M_{dB} + A_{dB}$$

Dove  $R_{dB}$  è la perdita per riflessione,  $A_{dB}$  è la perdita per assorbimento e  $M_{dB}$  quella dovuta alla ricomposizione delle onde. Nella pratica, l'efficacia di schermatura viene spesso valutata sperimentalmente in camere riverberanti, in cui è possibile misurare con precisione l'attenuazione del campo elettromagnetico attraverso il materiale schermante. Le camere riverberanti offrono un ambiente controllato in cui il campo elettromagnetico è uniformemente distribuito, consentendo una valutazione accurata della schermatura.

# CAPITOLO 3 – La Camera Riverberante

## 3.1 Struttura e Principio di Funzionamento

La camera riverberante è una cavità multimodale caratterizzata da grandi dimensioni in termini elettrici, completamente rivestita da pareti metalliche ad alta conducibilità, generalmente realizzate in alluminio. Questo rivestimento metallico ha la funzione di riflettere le onde elettromagnetiche, evitando che si disperdano all'esterno e promuovendo la creazione di campi elettromagnetici altamente riflessivi all'interno della cavità. All'interno di questa camera vengono condotti esperimenti volti a valutare la risposta elettromagnetica di materiali e sistemi di schermatura elettromagnetica. Questo ambiente è studiato per simulare condizioni di campo in cui le onde elettromagnetiche vengono riflesse ripetutamente, generando una distribuzione del campo che assume proprietà statistiche ben definite. Una caratteristica distintiva della camera riverberante è che il campo elettromagnetico generato al suo interno possiede caratteristiche statistiche specifiche, tra cui: omogeneità, isotropia, incoerenza e depolarizzazione. Queste proprietà sono essenziali per garantire che i risultati sperimentali siano validi e riproducibili in diversi contesti applicativi, come i test di compatibilità elettromagnetica (EMC):

- **Omogeneità:** si riferisce al fatto che le posizioni spaziali all'interno della cavità sono equivalenti, ovvero che le condizioni di propagazione del campo elettromagnetico risultano uniformi in ogni punto dello spazio. Ciò consente al campo elettromagnetico di essere distribuito in maniera omogenea in tutta la camera, riducendo eventuali accumuli di intensità in aree specifiche.
- **Isotropia:** indica che il campo elettromagnetico presenta la stessa intensità e comportamento in tutte le direzioni. Questo garantisce che non ci siano direzioni privilegiate all'interno della camera, un fattore importante per ottenere una distribuzione del campo che rappresenta un ambiente caratterizzato da variabilità casuale.
- **Incoerenza:** si riferisce alla capacità del campo elettromagnetico di variare nel tempo a causa di piccole perturbazioni legate alla geometria della cavità o agli elementi

presenti al suo interno. Tali fluttuazioni casuali sono essenziali, poiché riproducono in modo realistico un ambiente elettromagnetico complesso e caotico.

- **Depolarizzazione:** rappresenta l'assenza di una polarizzazione predominante nel campo. Questo significa che il campo elettromagnetico non ha una direzione di polarizzazione dominante, ma è distribuito su tutte le possibili polarizzazioni, garantendo un'analisi completa del comportamento elettromagnetico dei materiali o dei dispositivi sottoposti a test.

Per far sì che queste proprietà si manifestino, la camera è dotata di miscelatori modali. Questi sono dispositivi metallici in movimento che modificano i modi risonanti del campo elettromagnetico all'interno della cavità. Attraverso la loro azione, il campo elettromagnetico viene costantemente ridistribuito, generando nuove configurazioni modali e favorendo una distribuzione uniforme dell'energia all'interno della camera. Questo continuo processo consente una costante riconfigurazione del campo, creando le condizioni di variabilità richieste per le analisi. La natura deterministica dell'ambiente elettromagnetico all'interno della camera è garantita dal teorema dell'Unicità, secondo cui, assegnata una sorgente elettromagnetica e date le condizioni al contorno, esiste una sola soluzione per il campo elettromagnetico in quella regione di spazio. Tuttavia, per via delle continue riflessioni e delle piccole variazioni nei modi risonanti, si può adottare un approccio statistico per descrivere le proprietà del campo elettromagnetico, trattandolo come una variabile aleatoria. Questo consente di modellare l'ambiente in modo realistico e predire il comportamento del campo su scale temporali e spaziali differenti. Un parametro fondamentale utilizzato per caratterizzare le performance delle camere riverberanti è il Fattore di Merito, noto anche come Quality Factor (Q). Questo parametro misura l'efficienza della camera nel trattenere e immagazzinare l'energia elettromagnetica. Un valore alto di Q indica che la camera dissipa poca energia, permettendo al campo elettromagnetico di persistere più a lungo. La formula che descrive il fattore di merito Q è:

$$Q = \omega \frac{U}{P_d}$$

dove:

- $\omega$  è la pulsazione
- $U$  è l'energia elettromagnetica immagazzinata all'interno della cavità

- $P_d$  è la potenza dissipata nelle pareti metalliche o nel carico della camera.

### 3.2 Camera Riverberante Annidata

La **Camera Riverberante Annidata (NRC)**, conosciuta anche come **Nested Reverberation Chamber**, è un sistema avanzato utilizzato per determinare le proprietà elettromagnetiche di materiali e dispositivi. Il termine "annidata" si riferisce alla configurazione della camera interna, che è posizionata all'interno di una camera riverberante principale. Questo design a doppia cavità consente di condurre test in un ambiente più controllato e preciso, riducendo le interferenze esterne e migliorando l'efficacia del campo elettromagnetico. La camera esterna è una cavità riverberante di grandi dimensioni che garantisce la riflessione e il rimescolamento del campo elettromagnetico grazie all'azione dei miscelatori modali, come visibile nella seguente figura:



Figura 3.1 Interno di una camera riverberante con agitatore modale, antenna di misurazione e camera nested

All'interno di questa camera principale è posizionata una camera interna più piccola, che consente di effettuare test di schermatura e misurazioni di dispositivi con maggiore precisione. La presenza di due cavità consente di testare l'efficacia di schermatura in condizioni controllate, misurando le differenze di propagazione del campo elettromagnetico

tra le due camere. I miscelatori modali nella camera esterna garantiscono l'omogeneità del campo, mentre la camera interna offre un ambiente più isolato, dove possono essere condotti esperimenti di schermatura avanzati.

La camera interna, appositamente progettata per ridurre le interferenze esterne, garantisce condizioni ideali per misurazioni di schermatura precise, come illustrato nella figura seguente:

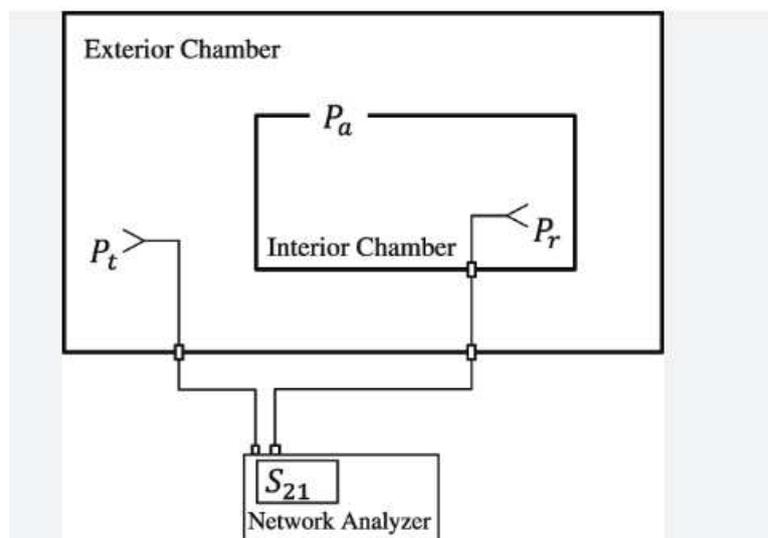


Figura 3.2 Schema del setup utilizzato per le misurazioni  $S_{21}$  all'interno di una camera riverberante nested

La rappresentazione schematica fornisce un'idea più chiara di come funziona il sistema. Il flusso di potenza  $P_t$  viene emesso dall'antenna nella camera esterna e successivamente riflessa all'interno della cavità principale. Una parte di questa potenza  $P_a$  viene trasferita alla camera interna, dove subisce ulteriori riflessioni e viene misurata come potenza  $P_r$ , con la differenza tra le due potenze che rappresenta le perdite di schermatura. L'analizzatore di rete  $S_{21}$  misura la risposta in frequenza del sistema, permettendo di valutare l'efficacia complessiva di schermatura del campione in esame. Un parametro fondamentale per la NRC è il rapporto tra le dimensioni della camera interna e quella esterna, in quanto influisce direttamente sulla distribuzione del campo elettromagnetico e sulle prestazioni di schermatura. Un rapporto non ottimale potrebbe portare a una distribuzione non uniforme del campo elettromagnetico, con conseguente diminuzione dell'efficacia di schermatura.

Nella Nested Reverberation Chamber, uno degli elementi fondamentali per garantire l'isolamento elettromagnetico tra la cavità interna e l'ambiente esterno è l'uso di aperture schermate. Queste aperture consentono l'accesso alla camera interna, preservando le proprietà schermanti della struttura. La figura che segue mostra un dettaglio di una di queste aperture:



Figura 3.3 Apertura schermata nella Nested Reverberation Chamber

La porta è dotata di bulloni e guarnizioni per assicurare una chiusura ermetica, minimizzando la dispersione elettromagnetica e mantenendo l'ambiente interno isolato da eventuali interferenze esterne. Ciò è importante per le analisi accurate, specialmente quando si valutano le proprietà di schermatura di materiali o dispositivi. Le aperture della porta svolgono una duplice funzione:

- **Accesso per il montaggio del campione:** consentono l'inserimento e il corretto posizionamento del campione da testare all'interno della cavità, senza compromettere le condizioni dell'ambiente controllato.
- **Chiusura ermetica:** una volta installato il campione, la porta viene chiusa ermeticamente per impedire la fuoriuscita di onde elettromagnetiche e garantire che il campo elettromagnetico all'interno della cavità sia uniforme e non influenzato dall'esterno. Questo tipo di chiusura è particolarmente importante quando si effettuano misurazioni ad alta frequenza, poiché eventuali perdite attraverso la porta

potrebbero alterare significativamente i risultati, riducendo l'efficacia di schermatura.

### 3.3 Modal Stirrer

I mescolatori modali, comunemente noti con il termine inglese *stirrer*, sono elementi composti da pannelli metallici, spesso realizzati in alluminio, di dimensioni significative, progettati per rendere il campo elettromagnetico isotropo e statisticamente uniforme all'interno della camera riverberante, con l'obiettivo di attivare un numero elevato di modi risonanti. In alcune configurazioni, è possibile che all'interno della camera vengano impiegati più mescolatori, i quali possono operare sia indipendentemente che contemporaneamente, contribuendo ulteriormente alla complessità del campo generato. La forma degli agitatori non è standardizzata, e la loro geometria può essere oggetto di studio per individuare la configurazione che garantisca il miglior rendimento. Per ottimizzare l'efficacia, è buona norma evitare qualsiasi tipo di simmetria nella progettazione, assicurando così che, durante una rotazione completa, il campo non riproduca mai le stesse condizioni. Nel contesto di questo studio è stato utilizzato uno stirrer orizzontale costituito da quattro pannelli metallici, orientati in maniera casuale, con dimensioni di 52 cm x 102 cm, installato a contatto con la parete della camera. Per ogni campione, la durata della prova di schermatura è stata di circa tre ore, durante le quali lo stirrer è stato posizionato in nove configurazioni differenti, favorendo così una caratterizzazione approfondita del comportamento elettromagnetico della camera.



Figura 3.4 Camera riverberante con agitatori modali disposti orizzontalmente

# CAPITOLO 4 - Antenne

## 4.1 Antenna log-periodica e double ridge

In questo studio sperimentale sono state utilizzate quattro antenne, due posizionate nella camera esterna e due all'interno della camera annidata. Le antenne esterne sono due antenne log-periodiche Schwarzbeck USLP 9143, una utilizzata per la trasmissione e una per la ricezione. All'interno della Inner Chamber, invece, sono state posizionate due antenne double ridge EMCO 3115, anch'esse rispettivamente trasmittente e ricevente. Le antenne esterne sono state disposte in modo da evitare qualsiasi configurazione simmetrica, puntandole verso gli spigoli delle pareti della camera riverberante. Questo posizionamento ha una doppia funzione: garantire la massima diffusione della potenza elettromagnetica nel volume totale della camera e, contemporaneamente, evitare un'irradiazione diretta del campione in esame. Questo approccio è fondamentale per ottenere una distribuzione del campo elettromagnetico più omogenea, migliorando la qualità dei dati raccolti e riproducendo condizioni più realistiche del campo elettromagnetico. Inoltre, il posizionamento asimmetrico delle antenne aiuta a ridurre le zone di accumulo di energia, permettendo una valutazione più precisa delle proprietà di schermatura del campione. L'assenza di simmetria, infatti, è fondamentale per garantire che il campo elettromagnetico generato sia il più caotico possibile, limitando le concentrazioni locali di energia e aumentando l'affidabilità delle misure effettuate.

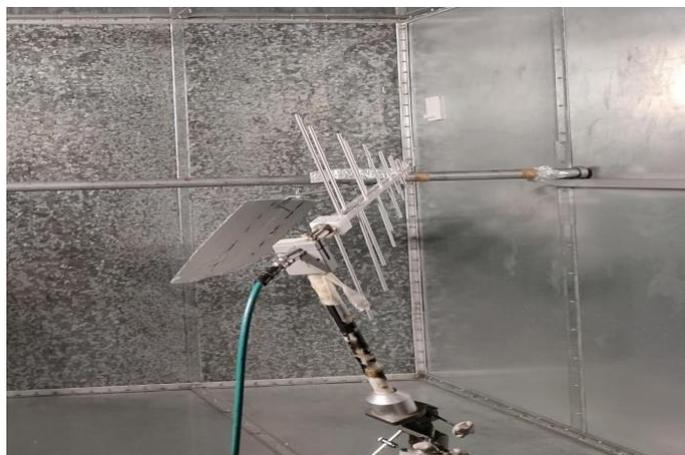


Figura 4.1 Posizionamento antenna log-periodica esterna

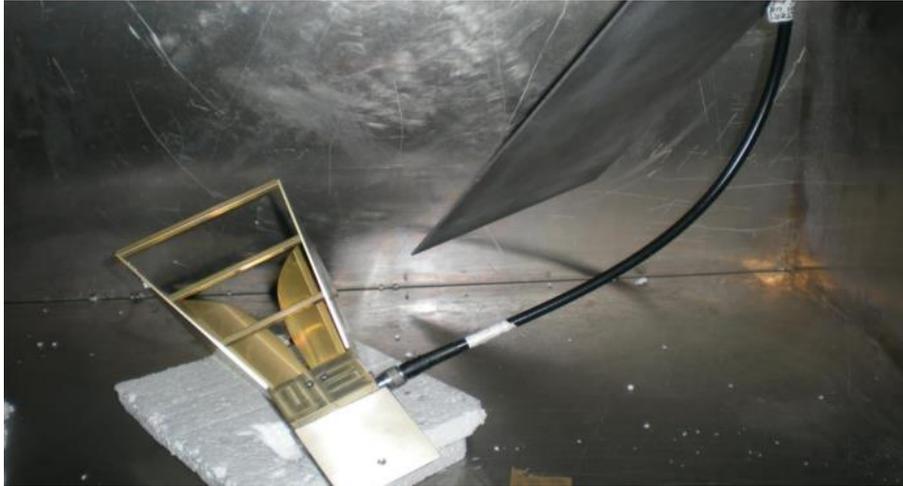


Figura 4.2 Antenna Double Ridge nella Inner Chamber

# CAPITOLO 5 - Preparazione delle Misure

## 5.1 Preparazione e Posizionamento dei Campioni

Per la preparazione delle misure, l'attenzione si è concentrata sull'analisi dell'efficacia della schermatura elettromagnetica di campioni di cemento. Ogni campione è stato incorniciato da un supporto metallico che, durante il processo di presa e indurimento, ha contribuito a conferirgli una forma quadrata precisa. Per eseguire il test di schermatura, il campione viene posizionato sull'apertura della camera nested, in modo da adattarsi perfettamente alla fessura predisposta. Questo stratagemma garantisce un isolamento ottimale tra il campione e la struttura della camera interna, prevenendo eventuali perdite di energia elettromagnetica lungo i bordi. Per risolvere il problema della dispersione elettromagnetica, è stata applicata una ghiera dotata di perforazioni che, una volta fissato il campione, permette un ancoraggio saldo grazie a bulloni specifici. Questo assicura che il campione rimanga stabile e in posizione durante tutta la durata del test, garantendo risultati di misura accurati.



Figura 5.1 Campione di cemento con ossido di grafene

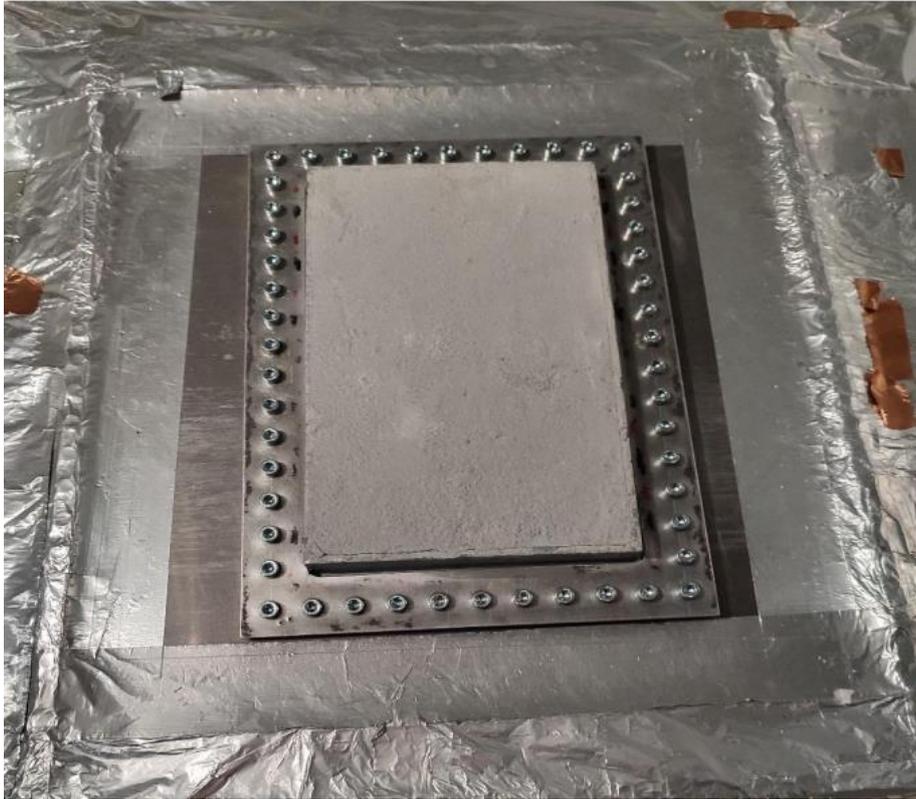


Figura 5.2 Campione montato sulla ghiera metallica utilizzando bulloni

Il procedimento per la sostituzione di un campione con un altro è il seguente: utilizzando un avvitatore, vengono rimosse tutte le viti dalla ghiera. Successivamente, il nuovo campione da testare viene posizionato nell'apertura della camera. Ogni vite viene quindi reinserita nella sua posizione originale e serrata nuovamente utilizzando l'avvitatore.

## 5.2 Misura di fondo

La determinazione del **dynamic range**, o misura di fondo, è stata la misurazione che ha richiesto più tempo e precisione. Questo valore rappresenta il livello di fondo della camera nested, misurato in assenza del campione. Il metodo adottato consisteva nel rivestire il campione con un foglio di alluminio, rendendolo così "invisibile" alla misurazione. In questo modo, per eseguire la misurazione successiva, è stato sufficiente rimuovere l'alluminio, esponendo il campione pronto per la misura. Un'attenzione particolare è stata rivolta alla fase di preparazione, al fine di evitare che l'alluminio si strappasse durante il serraggio delle viti. In alcuni casi, si sono verificati dei piccoli strappi, risolti mediante l'applicazione di nastro adesivo in rame, per rinforzare il rivestimento.

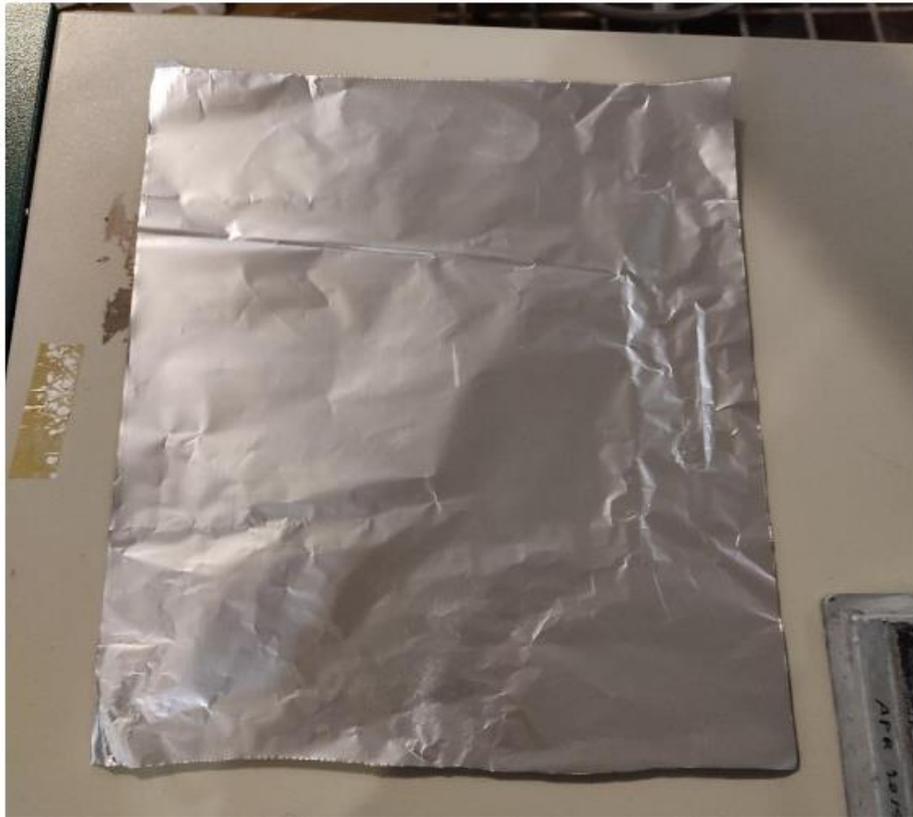


Figura 5.3 foglio di alluminio



Figura 5.4 Campione avvolto in un foglio di alluminio



Figura 5.5 Posizionamento della ghiera sul campione di fondo



Figura 5.6 Campione di fondo fissato sulla ghiera

Le soluzioni adottate non sono riuscite a eliminare del tutto le fonti di disturbo durante la misurazione. Pertanto, si è deciso di inserire una calza metallica tra la ghiera e la cornice metallica del campione, con lo scopo di eliminare qualsiasi spazio tra l'apertura della camera nested che collega la camera interna a quella esterna.

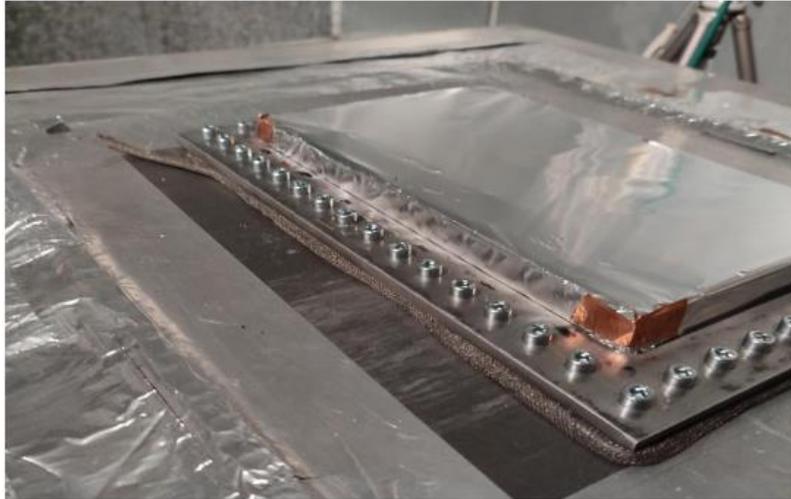


Figura 5.7 Campione rinforzato con calza metallica nastro adesivo in rame

Dopo aver completato la misurazione di fondo, si procede con precisione alla rimozione del rivestimento metallico. A questo punto, si esegue una nuova misurazione, questa volta direttamente sul campione sottostante.



Figura 5.8 rimozione lamina metallica



Figura 5.9

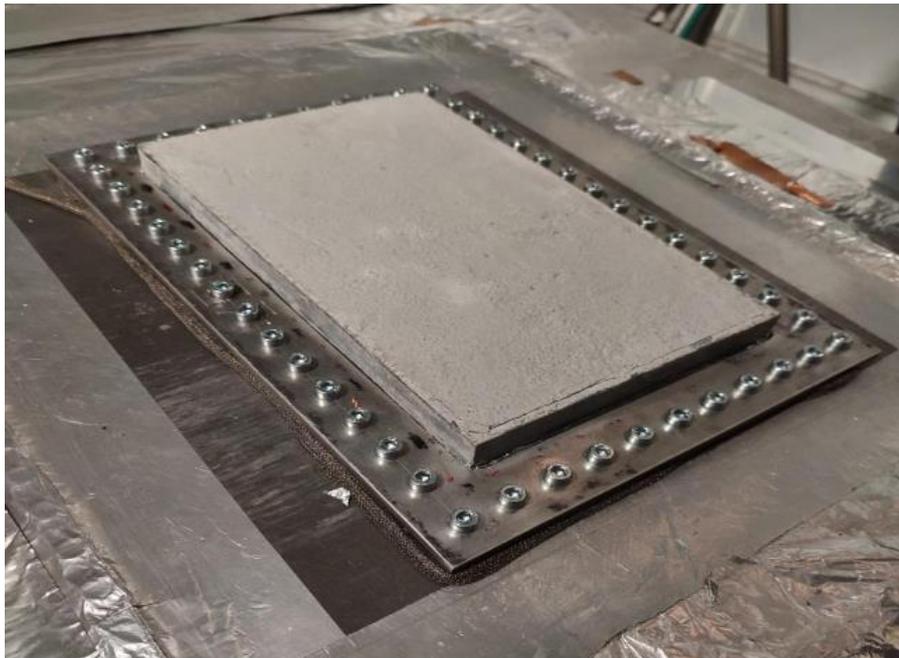


Figura 5.10 Campione pronto per la successiva fase di misurazione

Una volta posizionato il campione, il processo di misurazione può essere avviato tramite un motore che controlla lo stirrer. Successivamente, il computer di controllo viene collegato all'analizzatore di rete per iniziare la raccolta dei dati.

# CAPITOLO 6 – Algoritmo per il Calcolo della SE

## 6.1 Python: dalle Origini alle Applicazioni Avanzate

Python, grazie alla sua sintassi chiara e alla capacità di gestire applicazioni complesse, è diventato uno dei linguaggi di programmazione più utilizzati nei settori scientifico e ingegneristico. Si distingue per la sua versatilità, applicabile in una vasta gamma di contesti, tra cui lo sviluppo web, la grafica 3D, il calcolo scientifico, la gestione di database, e la creazione di giochi e applicazioni desktop.

Sviluppato nei primi anni '90 da Guido van Rossum, un programmatore olandese, Python ha visto la sua prima versione ufficiale nel 1991. Il nome del linguaggio è ispirato al celebre programma comico "Monty Python's Flying Circus", un riferimento all'approccio innovativo e non convenzionale voluto da van Rossum. Oggi, la Python Software Foundation, un'organizzazione no-profit, supervisiona lo sviluppo continuo del linguaggio, grazie al contributo di una comunità internazionale di sviluppatori che arricchisce costantemente le sue funzionalità.

Una delle caratteristiche principali di Python è il supporto alla programmazione orientata agli oggetti (OOP), che consente di progettare moduli software organizzati in oggetti che interagiscono tra loro tramite metodi e proprietà definiti dal programmatore. Tuttavia, Python non è limitato alla OOP, ma offre anche il supporto per la programmazione strutturata e funzionale, garantendo una flessibilità che lo rende particolarmente utile per affrontare problemi complessi.

L'aspetto che ha contribuito maggiormente alla diffusione di Python è la sua leggibilità. La sintassi semplice e chiara rende il linguaggio accessibile anche ai principianti, permettendo una scrittura di codice facile da leggere e mantenere, anche in progetti collaborativi. Inoltre, essendo un linguaggio interpretato, Python non richiede un processo di compilazione esplicito prima dell'esecuzione. Il codice sorgente viene interpretato direttamente in tempo reale, il che aumenta la sua portabilità, poiché lo stesso codice può essere eseguito su piattaforme diverse, come Windows, macOS e GNU/Linux, senza necessitare modifiche.

Python è anche open-source e distribuito gratuitamente, consentendo agli sviluppatori di modificarlo e ridistribuirlo liberamente. Questo ha permesso una rapida diffusione globale del linguaggio, facilitando l'interazione di una vasta comunità che contribuisce al suo continuo miglioramento. Negli ultimi anni, Python è diventato il linguaggio di riferimento per lo sviluppo di applicazioni scientifiche e ingegneristiche. Grazie a librerie come **NumPy**, che supporta la creazione di array multidimensionali e operazioni matematiche avanzate, e **SciPy** e **Matplotlib**, utilizzate rispettivamente per il calcolo numerico e la visualizzazione grafica dei dati, Python ha dimostrato di essere uno strumento potente per analisi numeriche e rappresentazioni visive. La sua capacità di gestire calcoli complessi e operazioni matriciali lo rende particolarmente indicato per l'analisi di grandi volumi di dati, risultando cruciale in aree come l'analisi dei segnali, la simulazione fisica, l'intelligenza artificiale e la compatibilità elettromagnetica.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import sys
import os
```

Figura 6.1 Librerie Python

Dove:

**sys** e **os** sono utilizzate per gestire errori e operazioni di file, garantendo che il programma possa trattare correttamente la lettura dei dati e terminare in modo sicuro in caso di problemi. Inoltre, grazie alla disponibilità di ambienti di sviluppo interattivi come JupyterLab, Python può essere utilizzato per eseguire il codice direttamente all'interno di un browser, fornendo un feedback immediato e facilitando l'iterazione tra sviluppo e analisi.

In questa tesi, Python è stato scelto come strumento principale per analizzare le misure di efficacia di schermatura in camera riverberante. Le sue capacità avanzate di elaborazione dati e calcolo numerico hanno reso possibile automatizzare le analisi, garantendo risultati precisi in tempi brevi. La chiarezza e la semplicità della sintassi hanno facilitato la gestione di script complessi, rendendo Python particolarmente adatto per applicazioni scientifiche e ingegneristiche. Inoltre, la versatilità del linguaggio ha permesso di sviluppare soluzioni

efficienti per il calcolo dell'efficacia di schermatura, accompagnate da visualizzazioni grafiche che illustrano in modo chiaro e dettagliato i risultati ottenuti.

## 6.2 Ambiente di Sviluppo: Jupyter Notebook

Jupyter Notebook è una piattaforma open-source basata sul web che consente lo sviluppo e l'esecuzione di codice in vari linguaggi di programmazione, tra cui Python e R. Questo strumento fornisce un ambiente integrato che semplifica la scrittura, l'esecuzione e la documentazione del codice in un'unica interfaccia, risultando particolarmente utile per progetti di analisi dei dati e modelli predittivi.

Insieme a JupyterLab, una versione evoluta con maggiore flessibilità, Jupyter è disponibile all'interno del pacchetto software Anaconda, uno degli ambienti di sviluppo più utilizzati per la gestione dei pacchetti scientifici in Python. Per installare Jupyter, è sufficiente scaricare e installare Anaconda, che rende Jupyter immediatamente disponibile. In alternativa, è possibile installare Jupyter autonomamente dal sito ufficiale del progetto e avviarlo direttamente tramite un browser web.

### 6.2.1 Funzionalità

Jupyter Notebook si distingue per la sua capacità di integrare codice, visualizzazioni grafiche e testo in un'unica interfaccia, rendendolo particolarmente vantaggioso per una vasta gamma di progetti. Ogni progetto è suddiviso in celle, che possono contenere sia codice eseguibile che testo formattato (come le celle Markdown), offrendo una visualizzazione immediata dei risultati e facilitando l'organizzazione delle fasi di sviluppo.

Questa caratteristica rende Jupyter Notebook uno strumento ideale per lo sviluppo e il testing, in quanto consente di eseguire il codice, testarlo e visualizzarne i risultati in tempo reale, senza la necessità di passare tra applicazioni diverse. Inoltre, la piattaforma supporta numerose librerie scientifiche, facilitando l'integrazione con strumenti per l'analisi dei dati e la creazione di grafici, come **Matplotlib** e **NumPy**.

## 6.2.2 Condivisione e Collaborazione

Un'altra caratteristica fondamentale di Jupyter Notebook è la possibilità di condivisione collaborativa. Grazie alla sua struttura flessibile, un progetto può essere facilmente condiviso con altri membri di un team, consentendo a più persone di visualizzare, modificare ed eseguire il codice all'interno dello stesso ambiente. Questa funzionalità facilita la cooperazione tra i diversi componenti di un progetto, in particolare in contesti multidisciplinari, dove l'interazione tra programmatori, data scientist e ingegneri risulta essenziale. L'interfaccia di Jupyter Notebook è particolarmente intuitiva e accessibile, anche per coloro che non possiedono una grande familiarità con la programmazione tradizionale. Tale caratteristica lo rende uno strumento ideale non solo per la scrittura di codice, ma anche per l'analisi dei dati, la modellazione di dati scientifici e la presentazione dei risultati in modo chiaro e immediato.

## 6.3 Sviluppo del Codice Python per l'Analisi dell'Efficacia di Schermatura

Il calcolo dell'efficacia di schermatura (SE) è stato implementato attraverso un codice Python appositamente sviluppato, che elabora i dati raccolti durante le misurazioni effettuate in camera riverberante. Il processo prevede diversi passaggi, tra cui la lettura dei file di dati delle misurazioni, l'elaborazione delle informazioni relative alle frequenze e alla potenza, e il calcolo finale dell'efficacia di schermatura.

### 6.3.1 Calcolo dell'Efficienza dell'Antenna tramite la Funzione `ea(tipo)`

Nell'analisi delle misurazioni effettuate in una camera riverberante, uno degli aspetti importanti è la corretta valutazione dell'efficienza delle antenne impiegate durante i test. L'efficienza di un'antenna è un parametro fondamentale che influenza direttamente la qualità delle misurazioni e i risultati ottenuti, in particolare nel calcolo dell'efficacia di schermatura (SE). Le antenne utilizzate in questo progetto sono di diversi tipi, e ciascuna presenta una propria efficienza nominale. Per semplificare l'assegnazione dell'efficienza a ciascuna antenna durante i test, è stata sviluppata la funzione Python `ea(tipo)`, che ha il compito di restituire l'efficienza dell'antenna in base al tipo richiesto. I valori di efficienza sono predefiniti per ciascun tipo di antenna:

```

## Funzione `ea(tipo)`
Questa funzione calcola e restituisce l'efficienza di un'antenna in base al tipo richiesto. I tipi di antenna sono:
- **0**: Antenna a doppio corrugamento (Double Ridge) con un'efficienza di 0.9.
- **1**: Antenna logperiodica con un'efficienza di 0.75.
- **2**: Antenna ideale senza perdite con un'efficienza di 1.
Se viene fornito un tipo di antenna non noto, viene restituita un'efficienza di 1 e viene stampato un messaggio di errore.

# Ritorna l'efficienza di antenna per il tipo richiesto
def ea(tipo):
    if tipo == 0: # Double Ridge
        return 0.9
    elif tipo == 1: # Logperiodica
        return 0.75
    elif tipo == 2: # Ideale senza perdite
        return 1
    else:
        printf ("*****\n");
        printf ("* Antenna non presente tra i tipi noti *\n");
        printf ("*****\n");
        return 1

```

Figura 6.3.1

## 6.3.2 Gestione dei dati di frequenza con la funzione `riempi_tab_nwa`

Nel contesto delle misurazioni elettromagnetiche effettuate in camera riverberante, si deve gestire correttamente i dati relativi alle frequenze, assicurando che le misurazioni vengano organizzate in modo coerente per permettere l'analisi successiva. La funzione `riempi_tab_nwa` è stata sviluppata per automatizzare la gestione dei dati, garantendo un'analisi rapida e precisa, facilitando l'inserimento delle misurazioni di frequenza all'interno di oggetti `MisuraNWA`.

```

## Funzione `riempi_tab_nwa(flag_stirred, nwafire, fin, ffi, fstep, filein, mismax)`

Questa funzione riempie una lista di oggetti `MisuraNWA` con le misurazioni di frequenza. La funzione può operare in due modalità:

1. **Modalità senza file di configurazione (`nwafire` è False)**:
- Se `flag_stirred` è True, vengono generate misurazioni a intervalli di frequenza che partono da `fin` e si estendono fino a `ffi` con un passo di `fstep`.
- Se `flag_stirred` è False, vengono impostati solo i valori di frequenza iniziale (`fin`) e finale (`ffi`) per la prima misura.

2. **Modalità con file di configurazione (`nwafire` è True)**:
- Viene aperto e letto un file specificato da `filein`. Ogni riga del file deve contenere i valori per `freq_ini`, `freq_fi`, `npoint`, `sweeptime`, `power`, `ifbandwidth` e `span`, che vengono assegnati agli oggetti `MisuraNWA` fino a un massimo di `mismax` misurazioni.
- Se il file non viene trovato, viene visualizzato un messaggio di errore e il programma termina.

La funzione restituisce l'indice dell'ultima misura riempita e la lista degli oggetti `MisuraNWA`.

```

Figura 6.3.2

La funzione restituisce due valori principali:

- **Indice dell'ultima misura riempita:** Questo valore indica la posizione dell'ultima misurazione completata nella lista degli oggetti MisuraNWA.
- **Lista degli oggetti MisuraNWA:** Questa lista contiene tutti gli oggetti MisuraNWA riempiti con le misurazioni effettuate, pronti per essere utilizzati nelle fasi successive dell'analisi.

Ecco un esempio di come appare la funzione nel codice:

```
import sys

class MisuraNWA:
    def __init__(self, freq_ini=0.0, freq_fi=0.0, npoint=0, sweeptime=0.0, power=0.0, ifbandwidth=0.0, span=0.0):
        self.freq_ini = freq_ini
        self.freq_fi = freq_fi
        self.npoint = npoint
        self.sweeptime = sweeptime
        self.power = power
        self.ifbandwidth = ifbandwidth
        self.span = span

def riempi_tab_nwa(flag_stirred, nwafilename, fin, ffi, fstep, filein, mismax):
    ind = 0
    fa = 0.0
    npoint = 0
    power = 0.0
    ifbandwidth = 0.0
    span = 0.0
    sweeptime = 0.0

    # Inizializza l'array delle scansioni del VNA
    scanmax = 17 # Numero massimo di misure da riempire
    misure_nwa = [MisuraNWA() for _ in range(scanmax)] # Inizializza la lista di oggetti MisuraNWA

    if not nwafilename:
        if flag_stirred:
            ind = 0
            fa = fin
            while fa <= ffi and ind < mismax:
                misure_nwa[ind].freq_ini = fa
                misure_nwa[ind].freq_fi = fa
                ind += 1
                fa += fstep
            else:
                ind = 0
                misure_nwa[ind].freq_ini = fin
                misure_nwa[ind].freq_fi = ffi
        else:
            try:
                with open(filein, "r") as fconfig:
                    ind = 0
                    while ind < mismax:
                        line = fconfig.readline()
                        if not line:
                            break
                        fin, ffi, npoint, sweeptime, power, ifbandwidth, span = map(float, line.split())
                        misure_nwa[ind].freq_ini = fin
                        misure_nwa[ind].freq_fi = ffi
                        misure_nwa[ind].npoint = int(npoint)
                        misure_nwa[ind].sweeptime = sweeptime
                        misure_nwa[ind].power = power
                        misure_nwa[ind].ifbandwidth = ifbandwidth
                        misure_nwa[ind].span = span
                        ind += 1
            except FileNotFoundError:
                print(f"Funzione 'riempi_tab_nwa': \nERRORE nell'apertura del file {filein}")
                sys.exit(1)

    return ind, misure_nwa
```

Figura 6.3.3

### 6.3.3 Confronto delle misure tramite la funzione sub\_15

Nell'analisi delle misurazioni effettuate in camera riverberante, uno degli aspetti chiave è il confronto tra i risultati ottenuti in due configurazioni diverse: con e senza l'applicazione di un particolare setup. La funzione **sub\_15** si occupa di gestire questo confronto, analizzando i parametri di scattering ( $S_{21}$ ,  $S_{31}$ ,  $S_{43}$ ) e calcolando le medie delle misurazioni per fornire una valutazione finale.

```
## Funzione `sub_15`

La funzione `sub_15` esegue una serie di operazioni per analizzare e confrontare le misure di S-parameters (S21, S31, S43) tra due scenari diversi (senza e con l'applicazione di un determinato setup). La funzione gestisce vari processi tra cui la lettura dei dati, la trasformazione dei segnali, e il calcolo delle medie per produrre i risultati finali.

### Parametri

- flag_stirred: booleano per indicare se la misura è stata "stirred".
- flag_nwafile: booleano per indicare se esiste un file NWA.
- flag_calcola_fs: booleano per decidere se eseguire il calcolo del frequency stirring.
- ant_Tx, ant_Rx: parametri per l'antenna di trasmissione e ricezione.
- nome_dir_senza, nome_dir_con: stringhe che indicano le directory per i dati "senza" e "con" il setup applicato.
- mismax, pos, delta_freq, ncol_pos: parametri numerici che definiscono il numero massimo di misure, la posizione, lo step di frequenza e il numero di colonne per posizione.

### Processo Principale

1. Inizializzazione dei Parametri:
   - Frequenza iniziale, finale, e step sono impostati in MHz e convertiti in Hz.
   - Lettura dei dati da file NWA.

2. Lettura dei Dati S-Parameters:
   - I dati sono letti per S21, S31, e S43 per entrambi i setup (senza e con) tramite la funzione `leggi_fri_tuned`.

3. Calcolo del Frequency Stirling:
   - Se `flag_calcola_fs` è attivo, viene eseguito il calcolo del frequency stirring per i parametri letti.

4. Calcolo delle Medie:
   - Vengono calcolate le medie dei segnali (sia per il setup "senza" che "con").

5. Output:
   - I risultati finali, inclusi i valori medi e il confronto tra i due setup, sono scritti nel file di output `SEfst.txt`.

### Output

- Grafico delle Medie:
   - I risultati calcolati vengono salvati in un file di output, con i valori medi normalizzati e i confronti tra le due configurazioni.
```

Figura 6.3.4

L'inizializzazione dei parametri di frequenza è un passaggio fondamentale per definire il contesto delle misurazioni. In questa fase, vengono impostati i valori di frequenza iniziale, finale e lo step di frequenza, garantendo che le misurazioni coprano l'intervallo desiderato. Le frequenze iniziale e finale, definite in **MHz**, vengono poi convertite in **Hz** per garantire compatibilità con le unità utilizzate nella strumentazione e nel calcolo successivo.

Nel codice, la conversione da MHz a Hz avviene tramite la moltiplicazione per  $10^6$ , come mostrato di seguito:

```
freq_iniziale = 500.0
freq_finale = 5000.0
freq_step = 10.0
freq_iniziale *= 1.0E6 # conversion from MHz to Hz
freq_finale *= 1.0E6 # conversion from MHz to Hz
freq_step *= 1.0E6 # conversion from MHz to Hz
```

Figura 6.3.5

Inoltre, la funzione `sub_15` calcola il **frequency stirring** quando richiesto, per tenere conto delle variazioni di frequenza nelle diverse posizioni dello stirrer. Se il parametro **flag\_calcola\_fs** è attivo, la funzione calcola il frequency stirring per ciascun parametro di scattering. Questo calcolo tiene conto delle variazioni in frequenza che avvengono a causa del movimento dello stirrer all'interno della camera. Il calcolo del frequency stirring avviene attraverso la funzione `frequency_stirring0`, applicata agli array contenenti i valori dei parametri di scattering:

```
### Funzione `frequency_stirring0`

Questa funzione applica un processo di "frequency stirring" ai dati forniti. Il processo di frequency stirring è una tecnica utilizzata per analizzare la risposta del sistema su un intervallo di frequenze. La funzione:

1. Calcola la quantità di punti di frequenza (nfs2) da utilizzare per il stirring.
2. Inizializza un array vefs con valori inizializzati a zero per memorizzare i risultati del stirring.
3. Esegue il processo di stirring se il numero di punti è maggiore di 1 e inferiore alla metà dei punti totali.
4. Distribuisce i valori stirrati in vefs per i punti intermedi e finali.
5. Gestisce i casi in cui il passo di stirring (df) è troppo piccolo o troppo grande rispetto all'intervallo di frequenze, mantenendo inalterato l'array originale ve.

Il risultato finale è un array vefs che contiene i valori stirrati, oppure l'array originale ve se il stirring non è stato applicato.

def frequency_stirring0(freq, ve, n, df):
    i = 0
    nfs2 = int((df / (freq[1] - freq[0]) + 1) / 2)
    vefs = np.zeros(mymax)
    if (nfs2 > 1) and (nfs2 < n / 2):
        for i in range(nfs2):
            vefs[0] += ve[i]
            vefs[n - 1] += ve[n - 1 - i]
        vefs[0] /= nfs2
        vefs[n - 1] /= nfs2
        for i in range(nfs2):
            vefs[i + 1] = (vefs[i] * (nfs2 + i) + ve[i + nfs2]) / (nfs2 + i + 1.)
            vefs[n - 2 - i] = (vefs[n - 1 - i] * (nfs2 + i) + ve[n - 1 - i - nfs2]) / (nfs2 + i + 1.)
        for i in range(nfs2, n - nfs2 - 2):
            vefs[i + 1] = (vefs[i] * nfs2 * 2 + ve[nfs2 + i] - ve[i - nfs2]) / (2. * nfs2)
    else:
        vefs = ve
    return vefs
```

```

# Calcola il frequency stirring
if flag_calcola_fs:
    for i in range(pos):
        for j in range(mismax):
            vex[j] = vS21Atun[j,i]
            vey[j] = vS31Atun[j,i]
            vez[j] = vS43Atun[j,i]
        vS21Afs = frequency_stirring0 (freq, vex, mismax, delta_freq)
        vS31Afs = frequency_stirring0 (freq, vey, mismax, delta_freq)
        vS43Afs = frequency_stirring0 (freq, vez, mismax, delta_freq)
        for j in range(mismax):
            vS21Atunfs[j][i] = vS21Afs[j]
            vS31Atunfs[j][i] = vS31Afs[j]
            vS43Atunfs[j][i] = vS43Afs[j]
        for j in range(mismax):
            vex[j] = vS21Btun[j,i]
            vey[j] = vS31Btun[j,i]
            vez[j] = vS43Btun[j,i]
        vS21Bfs = frequency_stirring0 (freq, vex, mismax, delta_freq)
        vS31Bfs = frequency_stirring0 (freq, vey, mismax, delta_freq)
        vS43Bfs = frequency_stirring0 (freq, vez, mismax, delta_freq)
        for j in range(mismax):
            vS21Btunfs[j,i] = vS21Bfs[j]
            vS31Btunfs[j,i] = vS31Bfs[j]
            vS43Btunfs[j,i] = vS43Bfs[j]

```

Figura 6.3.6

Questa operazione permette di ottenere valori medi più rappresentativi, migliorando la qualità dei dati acquisiti e fornendo una misura più accurata dell'efficacia di schermatura. Un altro passaggio fondamentale nella funzione `sub_15` è la lettura dei dati relativi ai parametri  $S_{21}$ ,  $S_{31}$ ,  $S_{43}$  che vengono letti per entrambe le configurazioni: "senza" campione e "con" campione schermante. Questo passaggio fornisce i dati necessari per l'analisi e il confronto. La lettura dei dati viene eseguita tramite la funzione **leggi\_fri\_tuned**, che gestisce l'importazione e l'organizzazione dei dati relativi alle misure di frequenza, suddivisi per diverse posizioni dello stirrer e per diverse frequenze, memorizzando i risultati in matrici apposite. Questo permette di avere una visione chiara e strutturata dei dati, facilitando i calcoli successivi relativi all'efficacia di schermatura (SE).

```

## Funzione `leggi_fri_tuned`

### Descrizione
La funzione `leggi_fri_tuned` legge e gestisce i dati delle misure di frequenza e li memorizza in una matrice. La funzione è progettata per elaborare misure provenienti da file di dati e per gestire le informazioni in base a diverse posizioni e frequenze.

### Parametri
- **filein**: Radice del nome del file di ingresso, a cui vengono aggiunte frequenze iniziali e finali.
- **rad_dir**: Radice del nome della directory contenente i file di ingresso.
- **misurenwa**: Lista di oggetti `MisuraNWA` contenente i dettagli delle misurazioni.
- **nfile**: Numero di file da cui leggere i dati.
- **pos**: Numero delle posizioni dello stirrer per le quali sono state fatte delle misure.
- **mismax**: Numero massimo di misure per frequenza.
- **col_file_pos**: Numero di colonne nel file delle posizioni (2 o 3).

### Operazioni
1. **Verifica Parametri**: Controlla che `nfile` e `pos` siano valori validi.
2. **Lettura File Posizioni**:
   - Legge il file delle posizioni (`./DatiMisure/posizioni.txt`) e memorizza le posizioni in un array.
   - Gestisce errori se il file non esiste o se ci sono problemi nella lettura.
3. **Lettura Dati Misura**:
   - Per ogni posizione e per ogni file, costruisce il percorso del file di dati e legge i valori.
   - Memorizza i dati in un array `ve` e in un array `freq`, con gestione di eventuali errori e avvisi se il numero di misure supera `mismax`.

### Output
- **letti**: Numero totale di misure lette.
- **veridim**: Matrice contenente i valori delle misure, riorganizzati per frequenza e posizione.
- **freq**: Array delle frequenze lette.

```

```

stringa = "S_21_"
oldi,vS21Atun,freq = leggi_fri_tuned(stringa, nome_dir_senza, misurenwa, tot_misure, pos, mismax, ncol_pos)
if f31:
    stringa = "S_31_"
else:
    stringa = "S_41_"
i,vS31Atun,freq = leggi_fri_tuned(stringa, nome_dir_senza, misurenwa, tot_misure, pos, mismax, ncol_pos)
if i != oldi:
    sys.exit(1)
stringa = "S_43_"
i,vS43Atun,freq = leggi_fri_tuned(stringa, nome_dir_senza, misurenwa, tot_misure, pos, mismax, ncol_pos)
if i != oldi:
    stringa = "S_21_"
i,vS21Btun,freq = leggi_fri_tuned(stringa, nome_dir_con, misurenwa, tot_misure, pos, mismax, ncol_pos)
if i != oldi:
    if f31:
        stringa = "S_31_"
    else:
        stringa = "S_41_"
i,vS31Btun,freq = leggi_fri_tuned(stringa, nome_dir_con, misurenwa, tot_misure, pos, mismax, ncol_pos)
if i != oldi:
    stringa = "S_43_"
i,vS43Btun,freq = leggi_fri_tuned(stringa, nome_dir_con, misurenwa, tot_misure, pos, mismax, ncol_pos)
if i != oldi:
    mismax = i

```

Figura 6.3.7

Questa fase è fondamentale poiché consente di raccogliere le informazioni necessarie per calcolare l'efficacia di schermatura.

### 6.3.4 Uso di reshape

Durante il processo di riorganizzazione dei dati, la funzione utilizza **reshape** per ristrutturare l'array monodimensionale dei valori delle misurazioni in una matrice bidimensionale, dove le righe rappresentano le diverse frequenze e le colonne rappresentano le diverse posizioni dello stirrer. Questo passaggio è importante per ottenere una visione strutturata e coerente dei dati raccolti.

Il motivo per cui si utilizza **reshape** anziché **resize** risiede nelle differenze fondamentali tra i due metodi:

- **reshape**: genera una nuova struttura dei dati esistenti, permettendo di riorganizzare l'array senza modificare il contenuto originale; reshape è ideale in situazioni in cui si vuole mantenere l'integrità dei dati, garantendo che nessuna informazione venga persa o alterata. Inoltre, se la dimensione richiesta non corrisponde al numero di elementi presenti, reshape avverte immediatamente di un possibile errore nei dati o nelle dimensioni specificate. Questo comportamento è molto utile in contesti come quello dell'analisi delle misurazioni, dove la coerenza dei dati è essenziale.
- **resize**: può alterare i dati esistenti. Se le dimensioni richieste sono maggiori di quelle effettive, resize riempirà i nuovi elementi con valori di default (di solito zeri), il che potrebbe portare a errori di interpretazione nelle analisi. Inoltre, resize modifica l'array originale, causando perdita di informazioni importanti. Questo lo rende meno sicuro in applicazioni dove è fondamentale mantenere intatti i dati sperimentali.

Nel contesto dell'analisi dell'efficacia di schermatura, è necessario che i dati letti dai file delle misurazioni rimangano intatti e che non vengano introdotti dati falsi o alterati durante la riorganizzazione. Ecco perché l'uso di reshape è preferibile a resize: garantisce che la ristrutturazione dei dati sia eseguita in modo sicuro e senza la possibilità di corrompere i valori misurati.

Ecco l'estratto della funzione che utilizza **reshape** per riorganizzare i dati:

```
veridim = np.reshape(ve, (letti, pos), order='F')
```

Figura 6.3.8

### 6.3.5 Calcolo delle medie

Per ottenere una valutazione complessiva dei risultati delle misurazioni, vengono calcolate le medie dei parametri di scattering  $S_{21}$ ,  $S_{31}$ ,  $S_{43}$ . Le medie sono calcolate sia per i parametri "senza" campione schermante che per quello "con", permettendo di confrontare i due scenari in modo preciso. Il calcolo delle medie è eseguito per ogni frequenza e posizione dello stirrer:

```
for cont in range(mismax):
    if flag_calcola_fs:
        for j in range(pos):
            vS21A[j] = vS21Atunfs[cont,j]
            vS21B[j] = vS21Btunfs[cont,j]
            vS31A[j] = vS31Atunfs[cont,j]
            vS31B[j] = vS31Btunfs[cont,j]
            vS43A[j] = vS43Atunfs[cont,j]
            vS43B[j] = vS43Btunfs[cont,j]
        media_S21Afs[cont] = np.mean(vS21A)
        media_S21Bfs[cont] = np.mean(vS21B)
        media_S31Afs[cont] = np.mean(vS31A)
        media_S31Bfs[cont] = np.mean(vS31B)
        media_S43Afs[cont] = np.mean(vS43A)
        media_S43Bfs[cont] = np.mean(vS43B)
        for j in range(pos):
            vS21A[j] = vS21Atunfs_quad[cont,j]
            vS21B[j] = vS21Btunfs_quad[cont,j]
            vS31A[j] = vS31Atunfs_quad[cont,j]
            vS31B[j] = vS31Btunfs_quad[cont,j]
            vS43A[j] = vS43Atunfs_quad[cont,j]
            vS43B[j] = vS43Btunfs_quad[cont,j]
        media_S21Afs_quad[cont] = np.mean(vS21A)
        media_S21Bfs_quad[cont] = np.mean(vS21B)
        media_S31Afs_quad[cont] = np.mean(vS31A)
        media_S31Bfs_quad[cont] = np.mean(vS31B)
        media_S43Afs_quad[cont] = np.mean(vS43A)
        media_S43Bfs_quad[cont] = np.mean(vS43B)
```

Figura 6.3.9

# CAPITOLO 7 – Calcolo della SE

## 7.1 Analisi dei risultati

Il calcolo dell'efficacia di schermatura (SE) rappresenta il risultato finale dell'analisi. L'SE è calcolato come rapporto tra le medie dei segnali nei due setup “s” e “c” (rispettivamente “senza” e “con” campione schermante), fornendo una misura della capacità del campione di ridurre l'intensità del campo elettromagnetico. L'efficacia di schermatura viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

$$SE = 10 \log \frac{\langle |S_{31}^s|^2 \rangle \langle |S_{21}^c|^2 \rangle \langle |S_{43}^c|^2 \rangle}{\langle |S_{31}^c|^2 \rangle \langle |S_{21}^s|^2 \rangle \langle |S_{43}^s|^2 \rangle}$$

```
# Calcola l'efficacia di schermatura e assegna gli array per i grafici
graf_x[cont] = freq[cont] * 1.0e-9
graf_y[cont] = 10 * np.log10(
    (media_S21Bfs_quad[cont] * media_S31Afs_quad[cont] * media_S43Bfs_quad[cont]) /
    (media_S21Afs_quad[cont] * media_S31Bfs_quad[cont] * media_S43Afs_quad[cont]))
#
    graf_y2[cont] = 10 * np.log10((media_S21Bfs_quad[cont] * media_S43Bfs_quad[cont]) / (media_S21Afs_quad[cont] * media_S43Afs_quad[cont]))
    graf_y3[cont] = 10 * np.log10(media_S31Afs_quad[cont])
    graf_y4[cont] = 10 * np.log10(media_S31Bfs_quad[cont])
    graf_y2[cont] = vS43Atun[cont, 0]
#
    graf_y[cont] = 10 * np.log10((media_S31Afs_quad[cont]) / (media_S31Bfs_quad[cont]))
# Fa il grafico
import matplotlib.pyplot as plt
plt.rc('xtick', labels=12)
plt.rc('ytick', labels=12)
plt.rc('axes', labels=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
plt.ylabel('SE (dB)')
plt.plot(graf_x, graf_y, label='1')
#
plt.plot(graf_x, graf_y2, label='2')
#
plt.plot(graf_x, graf_y3, label='3')
#
plt.plot(graf_x, graf_y4, label='4')
#
plt.legend(loc="Lower right")
plt.show()
return 0
```

Figura 7.1

Il grafico in figura mostra l'andamento dell'efficacia di schermatura (SE) in funzione della frequenza, espressa in **GHz**, generato utilizzando il codice di calcolo implementato in Python e visualizzato con Matplotlib.

Questo grafico evidenzia la riduzione progressiva dell'efficacia di schermatura al crescere della frequenza, nel caso della misura con una variazione di 491 del fondo dynamic range:

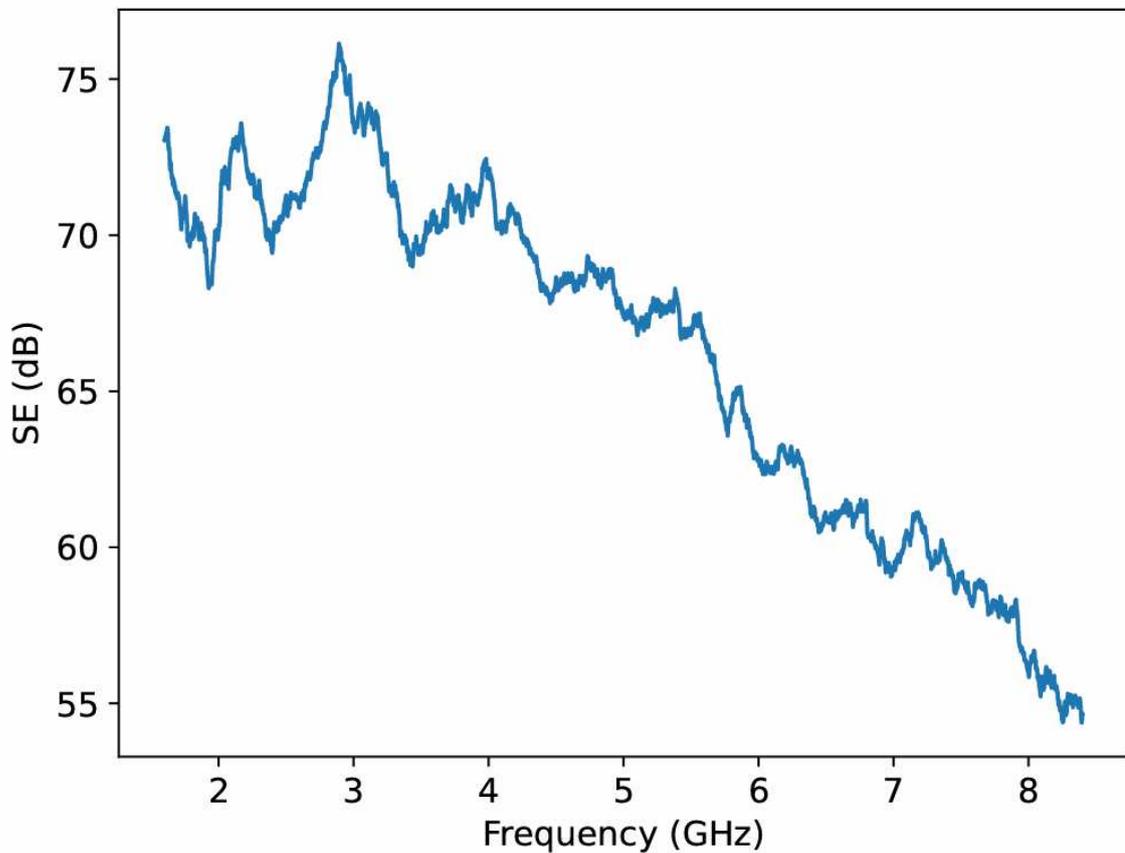


Figura 7.2: Grafico dell'efficacia di schermatura (SE) in funzione della frequenza, ottenuto dall'elaborazione dei dati sperimentali utilizzando Python.

Dal grafico si osserva che, per frequenze più basse, l'efficacia di schermatura è significativamente più alta, raggiungendo un valore massimo di circa 75 dB. Tuttavia, con l'aumentare della frequenza, l'efficacia diminuisce progressivamente, scendendo sotto i 50 dB. Questo comportamento è tipico dei materiali schermanti, che tendono a essere meno efficaci alle frequenze più elevate.

Ciò avviene perché, con l'aumento della frequenza, le onde elettromagnetiche interagiscono in modo più complesso con i materiali, riducendo l'efficacia dei meccanismi di assorbimento e riflessione.

Le principali conclusioni che emergono da questo grafico riguardano l'importanza di scegliere il materiale schermante giusto per l'applicazione specifica, considerando l'intervallo di frequenze da schermare. Il calo dell'efficacia a frequenze più alte suggerisce la necessità di progettare materiali o strutture schermanti ottimizzati per quegli specifici intervalli, soprattutto nei contesti in cui sono coinvolti dispositivi che operano a frequenze elevate.

Infine, questi risultati evidenziano l'importanza di una progettazione accurata della schermatura, sottolineando la necessità di adottare soluzioni multistrato o di combinare diversi tipi di materiali per migliorare la protezione su un ampio spettro di frequenze.

# CONCLUSIONI

In questa tesi sono state esplorate le proprietà della schermatura elettromagnetica tramite un approccio teorico e sperimentale. Partendo dai fondamenti dell'elettromagnetismo e dalla descrizione delle onde elettromagnetiche, è stato possibile analizzare il fenomeno della schermatura e la sua rilevanza nell'ambito della compatibilità elettromagnetica (EMC). La ricerca si è concentrata sull'uso delle camere riverberanti, in particolare della configurazione nested, per testare le proprietà schermanti di materiali specifici, come i campioni di cemento.

Un aspetto centrale dello studio è stato l'impiego del linguaggio di programmazione Python, che ha permesso di sviluppare strumenti computazionali per l'elaborazione dei dati sperimentali. Grazie a librerie come NumPy e Matplotlib, è stato possibile analizzare i dati raccolti in modo accurato e visualizzare i risultati sotto forma di grafici.

Durante i test, è emerso come le caratteristiche del materiale e la configurazione geometrica influiscano direttamente sull'efficacia di schermatura. In particolare, i risultati hanno mostrato che l'efficacia diminuisce con l'aumentare della frequenza, suggerendo la necessità di sviluppare materiali avanzati o soluzioni multistrato per migliorare le prestazioni schermanti su un ampio intervallo di frequenze.

Dal punto di vista pratico, l'uso della Nested Reverberation Chamber ha rappresentato un passo significativo per migliorare la precisione delle analisi, specialmente in ambienti caratterizzati da elevata variabilità.

In una prospettiva futura, lo studio della schermatura elettromagnetica potrebbe beneficiare dello sviluppo di nuove tecnologie computazionali e materiali innovativi. L'integrazione di approcci multidisciplinari, che combinano simulazioni numeriche, analisi sperimentale e progettazione avanzata di materiali, potrebbe portare a soluzioni più efficaci e sostenibili.

Questa tesi rappresenta un punto di partenza per ulteriori ricerche in un campo in continua evoluzione, dove l'aumento dell'interconnessione dei dispositivi elettronici e l'introduzione di nuove tecnologie, come il 5G e l'Internet of Things (IoT), richiedono soluzioni sempre più avanzate per la protezione elettromagnetica.

# BIBLIOGRAFIA

Holloway, C. L., et al. (2012). *"Shielding Effectiveness Measurements of Materials Using Nested Reverberation Chambers"*. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*.

Moglie Franco, Primiani Mariani Valter, Bastianelli Luca, 2021, articolo Shielding effectiveness Controlling of Coated Glass Assembly in Mobile and Positioning GPS Frequency Bands

Tesi di Lisa Trovarelli, *"Un codice Python per l'ottimizzazione di uno schermo elettromagnetico stratificato per ridurre al minimo l'esposizione umana"*.

Tesi di Eleonora Bianchi, *"Minimizzazione dell'esposizione elettromagnetica tramite schermi stratificati con un codice in Python."*

L. Bastianelli, V. Mariani Primiani, F. Moglie, J. Donnini, A. Mazzolli, V. Corinaldesi, G. Gradoni, and D. Micheli, *"Experimental analysis of the aging effects on shielding effectiveness of cementitious composites,"* in 2018 IEEE Symp. Electromagn. Compat. and Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI PI), Long Beach, CA, USA, Jul. 2018, pp. 71–75.

Tesi di Eleonora Puca, *"Valutazione dell'efficacia di schermatura di mezzi non omogenei"*.

Tesi di Marco Campana, *"Valutazione dell'efficacia di schermatura di composti cementizi in funzione dell'invecchiamento"*.

Fawwaz T. Ulaby, *Fondamenti di campi elettromagnetici*, Pearson 2004, prima edizione.

L. Bastianelli, F. Moglie and V. Mariani Primiani, *"Shielding Effectiveness of Randomly Distributed Conductive Elements: Experimental Analysis and Simplified Model,"* 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Amsterdam, Netherlands, 2018, pp. 752-756.

L. Bastianelli, F. Moglie, G. Gradoni, A. Gifuni and V. M. Primiani, *"Shielding Effectiveness of Cementitious Composites under Stochastic Excitation,"* 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Granada, Spain, 2019, pp. 0948-0951.

Pagina web di Python: <https://www.python.org/>.

Pagina web di Jupyter: <https://jupyter.org/>.

Breve introduzione a Python: <https://www.python.it/doc/intro/>.