



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

**Sviluppo di un codice in Python per l'ottimizzazione
dell'efficacia di schermatura di materiali stratificati**

*Development of a Python code for optimizing the
shielding effectiveness of layered materials*

Relatore: Prof.
FRANCO MOGLIE

Tesi di Laurea di:
ILARIA HOXHALLI

Correlatore: Prof.
MARIANI PRIMIANI VALTER

A.A. 2021/2022

Sommario

1. Schermi elettromagnetici	4
1.1 <i>Introduzione</i>	4
1.2 <i>Richiami di elettromagnetismo</i>	7
1.2.1 <i>Onda piana elettromagnetica</i>	8
1.2.2 <i>Propagazione di onde piane in mezzi con perdite</i>	11
2. Efficacia di schermatura	14
2.1 <i>Schermi multilamina</i>	18
2.2 <i>Confronto tra schermo singolo e schermi composti</i>	20
3. Simulazione set-up	22
3.1 <i>Open Source Cope (Python)</i>	22
3.2 <i>Ambiente di sviluppo (Jupyter)</i>	24
4. Codice Python per il calcolo della SE	27
4.1 <i>Biblioteche</i>	27
4.2 <i>Funzione materiale</i>	28
4.3 <i>Funzione interf</i>	29
4.4 <i>Funzione calcolo SE (efficacia di schermatura)</i>	30
4.5 <i>Main</i>	31

5. Simulazioni e risultati	33
5.1 Simulazione 1.....	33
5.2 Simulazione 2.....	34
6. Conclusioni	36
Bibliografia	37

1. Schermi elettromagnetici

1.1 Introduzione

Quando si parla di “schermatura elettromagnetica” si intende un sistema in grado di ridurre in una determinata zona dello spazio il campo elettromagnetico generato da una sorgente.

Si immagini uno schermo come un contenitore metallico al cui interno è racchiuso un'apparecchiatura elettronica. Il nostro “contenitore metallico” svolge una duplice funzione: schermare l'apparecchio che racchiude delle interferenze radiate che lo colpiscono e ad evitare che l'apparato emetta dei disturbi rendendolo fuori norma. Per questo la schermatura può essere utilizzata per ridurre la suscettività ai segnali esterni causati da radar o trasmettitori radio e TV ad alta potenza. Tuttavia, inserire uno schermo con lo scopo di diminuire gli effetti della suscettibilità e dell'emissione non è così facile come sembra, infatti l'efficacia ottimale (ideale) che si può ottenere si ha soltanto se i dispositivi elettronici sono completamente racchiusi al suo interno e lo schermo non presenta vie d'accesso dall'esterno come aperture, giunti, fessure o cavi; in quanto qualsiasi via d'accesso attraverso uno schermo può ridurre drasticamente la sua efficacia.

Una prima distinzione sulla schermatura elettromagnetica riguarda le varie tipologie di sorgente da schermare, con particolare riferimento alla frequenza dello spettro elettromagnetico generato dalla sorgente. La principale differenziazione è dunque tra schermature per la bassa frequenza (da 0 fino

a 100 kHz) e per l'alta frequenza (oltre i 100 kHz). In bassa frequenza il campo elettrico e magnetico sono separati ed esistono schermature per le due tipologie di campi.

Per la schermatura in ambienti in cui i campi magnetici variano lentamente al di sotto dei 100 kHz di frequenza, devono essere usati materiali magnetici "speciali". Un esempio tipico è un cavo schermato, che possiede una schermatura elettromagnetica RF sotto forma di una rete metallica che circonda un conduttore interno. La schermatura impedisce non solo la fuga di qualsiasi segnale dal conduttore centrale ma anche l'aggiunta di segnali al conduttore principale. Alcuni cavi hanno due schermi coassiali separati per massimizzare la schermatura sia dei campi elettromagnetici sia dei campi elettrostatici, uno risulta collegato a entrambe le estremità, l'altro solo a una.

Per Schermatura RF si intende la schermatura elettromagnetica che blocca le radiazioni elettromagnetiche a radiofrequenza, mentre un recinto conduttivo che ha il compito di bloccare i campi elettrici è anche chiamato "gabbia di Faraday", per quanto riguarda la quantità di riduzione, dipende da vari fattori: innanzitutto dal materiale utilizzato, dal suo spessore, dalle dimensioni del volume schermato, dalla frequenza dei campi di interesse e dalla dimensione, forma e orientamento delle aperture nello schermo rispetto a un campo elettromagnetico incidente.

I materiali schermati sono l'unica soluzione per proteggersi dal continuo aumento dell'inquinamento elettromagnetico dovuto ad antenne telefoniche, emettitori radio e TV, reti Internet wireless, telefoni, satelliti,

radar, contatori intelligenti e ad una varietà di altre applicazioni wireless, ed è per questo che è interesse di studio nel campo dell'ingegneria biomedica.

1.2 Richiami di elettromagnetismo

Onda piana

"L'onda piana" la possiamo definire come il più semplice tipo di propagazione dove l'onda è funzione di una sola coordinata spaziale e della coordinata temporale. In situazione reale le onde piane non esistono in quanto dovrebbero essere generate da una sorgente di potenza infinita; tuttavia, nella pratica alcune onde possono essere considerate piane ed uniformi se osservate in zone ristrette dello spazio, parliamo dunque di "onde localmente piane".

Lo studio della propagazione di una onda piana risulta estremamente importante in quanto è possibile rappresentare la soluzione di problemi elettromagnetici più complessi come opportuna sovrapposizione di infinite onde piane.

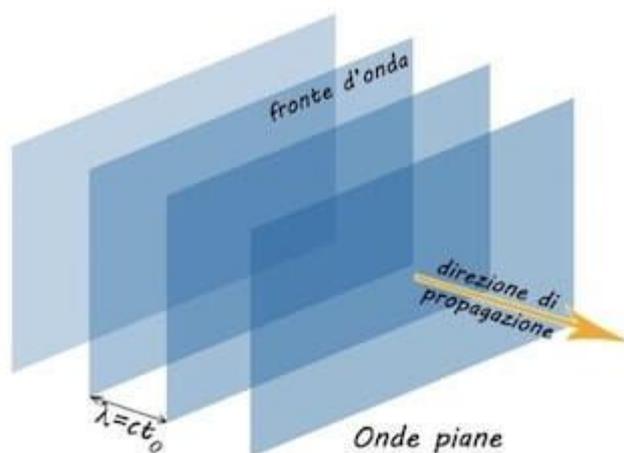


Figura 1: Onde Piane

1.2.1 Onda piana elettromagnetica

Le onde piane sono una soluzione particolare delle equazioni di Maxwell nei mezzi omogenei, si considerano come una buona approssimazione del campo elettromagnetico a una sufficiente distanza dalla sorgente.

Nell'ipotesi di assenza di sorgenti, la conducibilità σ è nulla e siamo in assenza di cariche.

$$J = 0 \text{ e } \rho V = 0 \quad (1.1)$$

Inoltre, ipotizziamo di avere un mezzo omogeneo e tempo-invariante. Le equazioni di Maxwell ai rotori diventano:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \text{ e } \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.2)$$

Prendiamo il rotore della prima:

$$\nabla \times \nabla \times E = \nabla \nabla \cdot E - \nabla^2 E = -\nabla \times \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) \quad (1.3)$$

Equazione d'Onda:

$$\nabla \times B = \nabla \times (\mu H) = \mu \nabla \times H = \varepsilon \mu \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\varepsilon \mu E) \quad (1.5)$$

Usando le espressioni precedenti:

$$\nabla^2 E = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \nabla^2 H = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

Con E: campo elettrico H: campo magnetico

Si tratta di equazioni alle derivate parziali che, per essere soluzioni delle equazioni di Maxwell, devono soddisfare opportune condizioni iniziali [1].

Per un'onda piana, le condizioni al contorno corrispondono al fatto che la direzione di propagazione avviene in una sola dimensione, più precisamente, quando i fronti d'onda sono piani. In questo caso le derivate delle equazioni delle onde del campo elettrico e del magnetico sono nulle per le variabili y e z , e ciascuna delle componenti dei campi soddisfa l'equazione delle onde con:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1.7)$$

La velocità di propagazione dell'onda, che è in generale sovrapposizione di un'onda progressiva e di un'onda regressiva. Nel vuoto si ha:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \cong 2,99 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.8)$$

E quindi in un dielettrico perfetto:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \quad (1.9)$$

Il rapporto $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ è l'indice di rifrazione del materiale dielettrico.

Dalle equazioni che descrivono l'onda si ricavano le componenti dei campi:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = \frac{\partial B_y}{\partial t} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} = \frac{\partial E_x}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial B_y}{\partial x} = \epsilon\mu \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad \frac{\partial B_z}{\partial x} = -\epsilon\mu \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (1.11)$$

Valgono infine le relazioni:

$$\frac{E_y}{B_z} = \frac{E_z}{B_y} = \pm v \quad E = B \times V \quad \frac{E}{B} = v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1.12)$$

Dove l'ultima espressione viene vista anche in termini di campo elettrico e del campo magnetizzante:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z \quad (1.13)$$

Dove Z ha le dimensioni di un'impedenza [1].

1.2.2 Propagazione di onde piane in mezzi con perdite

Bisogna considerare la propagazione delle onde piane in diverse situazioni come nel caso di mezzi senza perdite e con la presenza di perdite. Nel caso delle onde in un mezzo conduttore, quindi in presenza di perdite del segnale, definendo la costante di propagazione e l'equazione delle onde omogenee per E:

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (1.14)$$

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_c = -\omega^2 \mu (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (1.15)$$

$$\epsilon' = \epsilon \quad \epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.16)$$

Essendo γ complessa la posso esprimere come:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.17)$$

α : coefficiente di attenuazione

β : costante di fase

Sostituendo la (1.16) nella (1.14) si ottiene:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (1.18)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (1.19)$$

Per un'onda piana uniforme con un campo elettrico che viaggia nella direzione delle z positive, l'equazione delle onde data dalla (1.14) si riduce a

$$\frac{d^2 E_x(z)}{dz^2} - \gamma^2 E_x(z) = 0 \quad (1.20)$$

La soluzione di questa equazione fornisce

$$E_1(z) = E^i (e^{-\gamma_1 z} + \Gamma e^{\gamma_1 z}) = E^i (e^{-(\alpha_1 + j\beta_1)z} + \Gamma e^{(\alpha_1 + j\beta_1)z}) \quad (1.21)$$

$$H_1(z) = \frac{E^i}{\eta_{c1}} (e^{-\gamma_1 z} + \Gamma e^{\gamma_1 z}) = \frac{E^i}{\eta_{c1}} (e^{-(\alpha_1 + j\beta_1)z} + \Gamma e^{(\alpha_1 + j\beta_1)z}) \quad (1.22)$$

L'ampiezza del campo elettrico E_2 e del campo magnetico H_2 è data dall'onda trasmessa:

$$E_2(z) = \tau E^i e^{-\gamma_2 z} = \tau E^i e^{-(\alpha_2 + j\beta_2)z} \quad (1.23)$$

$$H_2(z) = \tau \frac{E^i}{\eta_{c2}} e^{-\gamma_2 z} = \tau \frac{E^i}{\eta_{c2}} e^{-(\alpha_2 + j\beta_2)z} \quad (1.24)$$

Dove Γ : coefficiente di riflessione e τ : coefficiente di trasmissione

Inoltre, sono legati uno all'altro dalla legge $\tau = 1 + \Gamma$

$$\Gamma = \frac{\eta_{c2} - \eta_{c1}}{\eta_{c2} + \eta_{c1}} \quad (1.25)$$

$$\tau = \frac{2\eta_{c2}}{\eta_{c2} + \eta_{c1}} \quad (1.26)$$

L'ampiezza dei campi scende esponenzialmente verso la direzione di propagazione z , con un tasso specificato dalla costante di attenuazione. Questo processo di attenuazione converte in calore parte dell'energia trasportata dall'onda elettromagnetica. Dopo una distanza $z = \delta$ l'ampiezza dell'onda scende di un $e^{-1}=0.37$ rispetto al valore di $z=0$. In un dielettrico perfetto avendo $\sigma = 0$ e quindi una $\alpha = 0$ si avrà uno spessore di penetrazione δ pari ad infinito, comporta che un'onda nel vuoto si propaghi senza perdite. Mentre, nel caso di un conduttore perfetto $\sigma = \infty$ con l'uso dell'equazione (1.16) si ottiene una $\alpha = \infty$ quindi ad un δ pari a zero. Nell'ambito pratico un esempio può essere fatto con il cavo coassiale, progettato in modo che l'energia interna al cavo non fluisca al suo esterno [1].

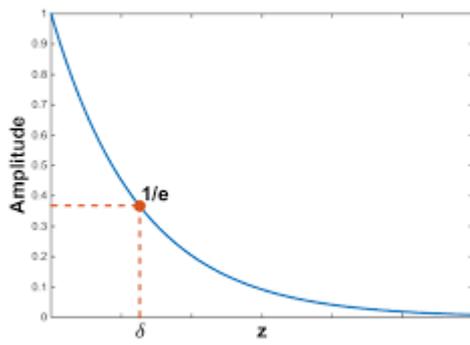


Figura 2: Attenuazione del modulo

2. Efficacia di schermatura

Il dimensionamento di una schermatura è un processo lungo e articolato che prevede più fasi e inizia dalla scelta della lastra di materiale con cui operare.

L'efficacia schermante di una lastra tiene conto di diversi fattori: la frequenza del campo; la natura della sorgente; la distanza tra la sorgente e la lastra e le caratteristiche fisiche della lastra e del materiale che lo compone (spessore, conducibilità elettrica e permeabilità magnetica).

L'efficacia di schermatura (*SE, Shielding Effectiveness*) esprime quantitativamente l'abilità di uno schermo a ridurre l'intensità del segnale elettromagnetico in una determinata regione.

L'efficacia schermante nei confronti del campo elettrico è definita da:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \quad (1.27)$$

Ove:

E_1 : esprime l'ampiezza del campo elettrico in un punto della regione di interesse prima del posizionamento dello schermo;

E_2 : esprime l'ampiezza del campo elettrico nello stesso punto, dopo il posizionamento dello schermo;

analogamente, si definisce l'efficacia schermante nei confronti del campo magnetico:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad (1.28)$$



Figura 3: schermo interposto tra la sorgente e un punto in considerazione

In base alle caratteristiche del campo elettromagnetico incidente, lo schermo si comporterà in maniera diversa. Nel caso di campi elettrici statici, per gli schermi costituiti da materiali conduttori, esso si comporterà come una gabbia di Faraday, e il campo interno sarà nullo. Nel caso di campo elettromagnetico incidente variabile nel tempo, esso indurrà sullo schermo conduttore delle correnti parassite, le quali genereranno un campo elettromagnetico che si opporrà al campo incidente da schermare.

Nel grafico a seguire si mostra l'andamento della SE in funzione della frequenza per tre schermi elettromagnetici (supposti piani di spessore d e infiniti) in rame con diverso spessore. Quello che si nota è che la SE aumenta all'aumentare della frequenza [2].

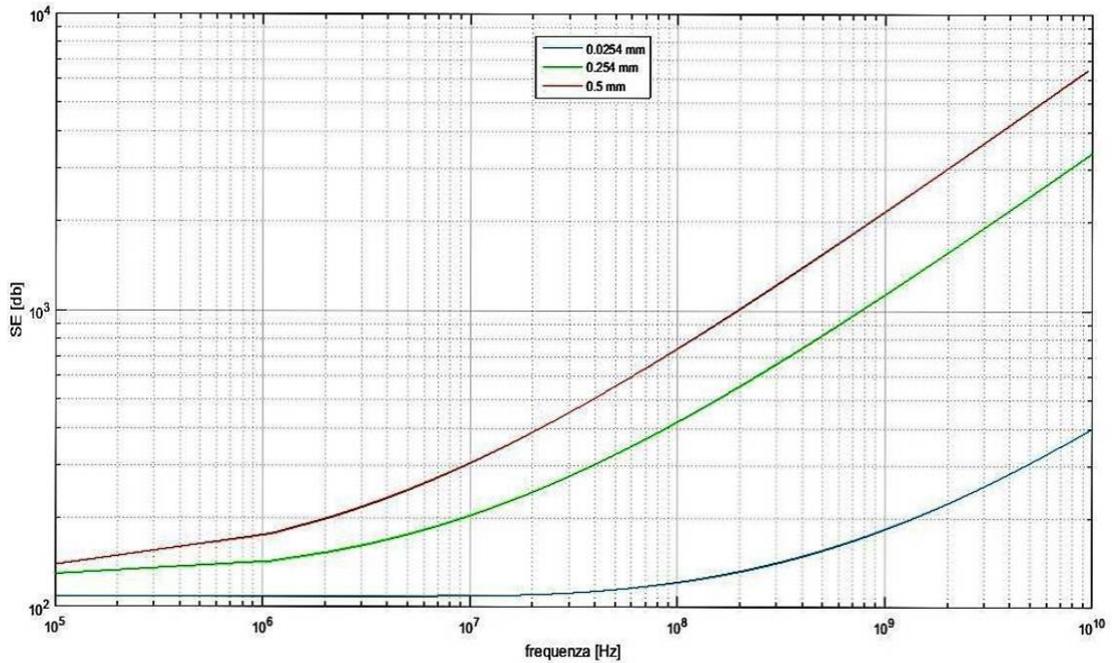


Figura 4: l'andamento della SE in funzione della frequenza per tre schermi elettromagnetici

La SE nel dettaglio è formata dalla somma di tre termini:

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB} \quad (1.29)$$

Sono rispettivamente: coefficiente di riflessione, di assorbimento e di riflessioni multiple. Il primo termine tiene conto delle riflessioni che si hanno sulla prima e seconda interfaccia dello schermo. Il terzo termine riguarda le riflessioni multiple che si hanno all'interno dello schermo.

Mentre i due primi termini contribuiscono sempre ad aumentare l'efficienza di schermatura l'ultimo può anche essere negativo

In caso di sorgente lontana l'onda incidente può essere considerata localmente piana: definiamo le caratteristiche elettriche associate all'onda:

Costante di propagazione del vuoto: $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ (1.30)

Impedenza caratteristica del vuoto: $\zeta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ (1.31)

Costante di propagazione del mezzo conduttore:

$$k_2 = \omega\sqrt{\mu\varepsilon_0\left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)} \quad (1.32)$$

Impedenza caratteristica del mezzo conduttore:

$$\zeta_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_0\left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)}} \quad (1.33)$$

Con $\mu = \mu_0\mu_r$. Nel caso di buon conduttore, la costante di propagazione del secondo mezzo può essere approssimata da: $k_2 \cong \frac{1}{\delta}(1 - j)$

Analogamente, l'impedenza del mezzo conduttore diventa

$$\zeta_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon_0\varepsilon_r\omega - j\sigma}} \cong \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1 + j) = \frac{1}{\sigma\delta}(1 + j) \quad (1.34)$$

Dove abbiamo introdotto la profondità di penetrazione $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ [3].

2.1 Schermi multi-lamina

Nel caso di uno schermo costituito da più lamine di materiale diverso con diversa impedenza caratteristica e spessore come mostrato in figura 4, l'efficacia di schermatura si ricava sempre considerando i tre contributi dovuti alle riflessioni, all'assorbimento e alle riflessioni multiple.

In particolare, il reciproco del termine delle prime riflessioni diventa:

$$\frac{E^t}{E^i} = \frac{2\zeta_0}{(\zeta_0 + \zeta_1)} \frac{2\zeta_1}{(\zeta_1 + \zeta_2)} \frac{2\zeta_2}{(\zeta_2 + \zeta_3)} \cdots \frac{2\zeta_n}{(\zeta_n + \zeta_0)} \quad (1.35)$$

Il logaritmo del valore inverso rappresenta quindi il termine R_{dB} :

$$\begin{aligned} R_{dB} &= 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2^{n+1}} \left(1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_0}\right) \left(1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_1}\right) \cdots \left(1 + \frac{\zeta_n}{\zeta_{n-1}}\right) \left(1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_n}\right) \right| = \\ &= 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_0}\right) \right| + 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_1}\right) \right| + \cdots + 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_n}\right) \right| \end{aligned} \quad (1.36)$$

Il termine dovuto all'assorbimento diventa:

$$A_{dB} = 8,6859 \left(\frac{t_1}{\delta_1} + \frac{t_2}{\delta_2} + \cdots + \frac{t_n}{\delta_n} \right) \quad (1.37)$$

Un'importante osservazione è che le impedenze dei materiali con cui sono realizzate le lamine variano con la radice quadrata della frequenza. Ne consegue che il termine di riflessione dovuto all'interfaccia metallo-metallo è indipendente dalla frequenza, abbiamo dunque dipendenza solo dal termine di interfaccia aria-metallo. La SE totale può quindi essere aumentata agendo sull'impedenza dei materiali e sul loro spessore.

Per quanto riguarda il termine dovuto alle riflessioni multiple:

$$\begin{aligned}
 M_{dB} &= 20 \log_{10} |(1 - v_1 e^{-2k_1 t_1})(1 - v_2 e^{-2k_2 t_2}) \dots (1 - v_n e^{-2k_n t_n})| = \\
 &= 20 \log_{10} |1 - v_1 e^{-2k_1 t_1}| + 20 \log_{10} |1 - v_2 e^{-2k_2 t_2}| + \dots + \\
 &20 \log_{10} |1 - v_n e^{-2k_n t_n}|
 \end{aligned}
 \tag{1.38}$$

Dove k_i è la costante di propagazione del mezzo i -esimo e i termini v_i sono definiti come:

$$v_i = \frac{\zeta_i - \zeta_{i-1}}{\zeta_i + \zeta_{i-1}} \cdot \frac{\zeta_i - \hat{\zeta}_i}{\zeta_i + \hat{\zeta}_i}
 \tag{1.39}$$

Dove $\hat{\zeta}_i$ è l'impedenza vista dalla sezione i -esima verso destra [3].

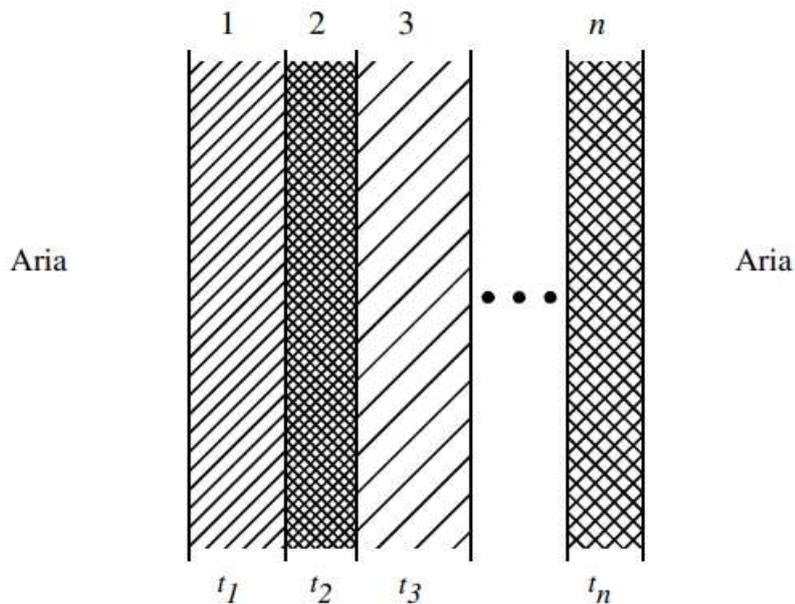


Figura 5: schermo multi-lamina

2.2 Confronto tra schermo singolo e schermi composti

Consideriamo il caso di uno schermo composito, formato da due materiali con caratteristiche diverse. In questo caso il termine dovuto alle prime riflessioni diventa:

$$\frac{E^t}{E^i} = \frac{2\zeta_0}{(\zeta_0 + \zeta_1)} \frac{2\zeta_1}{(\zeta_1 + \zeta_2)} \frac{2\zeta_2}{(\zeta_2 + \zeta_0)} = \frac{8\zeta_0\zeta_1\zeta_2}{(\zeta_0 + \zeta_1)(\zeta_1 + \zeta_2)(\zeta_2 + \zeta_0)} \quad (1.40)$$

Espresso in dB diventa:

$$\begin{aligned} R_{dB} &= 20 \log_{10} \left| \frac{1}{8} \left(1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_0}\right) \left(1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_1}\right) \left(1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_2}\right) \right| = \\ &= 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_0}\right) \right| + 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_1}\right) \right| + 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_2}\right) \right| \end{aligned} \quad (1.41)$$

Quello dovuto alle riflessioni multiple è pari a:

$$\begin{aligned} M_{dB} &= 20 \log_{10} |(1 - v_1 e^{-2k_1 t_1})(1 - v_2 e^{-2k_2 t_2})| = \\ &= 20 \log_{10} |1 - v_1 e^{-2k_1 t_1}| + 20 \log_{10} |1 - v_2 e^{-2k_2 t_2}| \end{aligned} \quad (1.42)$$

Il termine di assorbimento è semplicemente pari alla somma dell'assorbimento in ogni singolo schermo:

$$\begin{aligned} A &= e^{-\alpha_1 t_1} e^{-\alpha_2 t_2} \Rightarrow A_{dB} = 8,6859(\alpha_1 t_1 + \alpha_2 t_2) \\ &= 8,6859 \left(\frac{t_1}{\delta_1} + \frac{t_2}{\delta_2} \right) \end{aligned} \quad (1.43)$$

Notiamo come le impedenze ζ_1 e ζ_2 variano entrambe con la radice quadrata della frequenza. Quindi la perdita per riflessione all'interfaccia metallo-

metallo non varia con la frequenza. Infatti, il secondo termine di (1.41)

diventa:

$$20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right) \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{\mu_1 \sigma_2}{\mu_2 \sigma_1}} \right) \right| \quad (1.44)$$

È quindi possibile scegliere opportunamente il rapporto $\mu_1 \sigma_2 / \mu_2 \sigma_1$ per aumentare le proprietà schermanti [3].

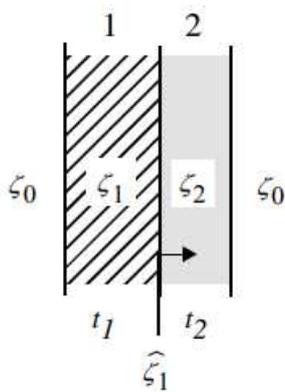


Figura 6: schermo composito

3. Simulazione set-up

3.1 Open Source Cope (Python)

Python è un popolare linguaggio di programmazione che può essere utilizzato per un'ampia varietà di applicazioni.

Ideato negli anni Novanta dello scorso secolo dall'informatico olandese Guido Van Rossum, rientra anche nella categoria dei linguaggi orientati ad oggetti, permettendo di definire oggetti software in grado di interagire tra di loro attraverso un dialogo rappresentato dalle istituzioni del programmatore.

Grazie alla sua semplicità, dinamicità e flessibilità, Python è in grado di supportare anche altre modalità di programmazione, come quella strutturata, quella funzionale e la riflessione.

Tutte le versioni moderne di Python sono protette da copyright con una licenza compatibile GPL certificata da Open Source Initiative.

Ci sono diversi motivi per cui Python è una buona scelta come linguaggio di programmazione, esso viene utilizzato in moltissime realtà informatiche ed ingegneristiche di importanza globale.

Chi è nuovo alla programmazione può trarre vantaggio dall'alto livello di astrazione di Python, è altamente interattivo e noto per le sue "opinioni forti" sulla sintassi specifica.

Python come altri linguaggi di alto livello, ha un processo di raccolta dei rifiuti per gestire la memoria o eliminare le risorse inutilizzate.

Un utente può ricevere un feedback immediato dall'interprete digitando "Python" sulla riga di comando o utilizzando progetti come JupyterLab se desidera un'esperienza di sviluppo basata su Browser.

Molti utenti apprezzano anche che Python abbia una sintassi rigorosa applicata dal compilatore, rendendo facile la "giusta scrittura" di un programma. [4]



Figura 7: Logo Python

[3.2 Ambiente di sviluppo \(Jupyter\)](#)

Jupyter Notebook è un'applicazione web open source, gestita localmente, che permette di sviluppare un progetto. E' un ambiente di sviluppo e di supporto utile anche per lavorare nella data science tramite i linguaggi di programmazione R e Python, i più usati nella data science e nel machine learning.

Jupyter Notebook e Jupyter Lab sono inclusi nel software Anaconda, per procedere dunque all'installazione è sufficiente installare Anaconda sul PC.

Al termine dell'installazione Jupyter è già disponibile. In alternativa, si può installare a parte Jupyter sul browser tramite il sito ufficiale del "Jupyter Project". [5]



Figura 8: Install JupyterLab

Jupyter Notebook è uno strumento di sviluppo che supporta diversi linguaggi di programmazione.

Le attività di sviluppo e test sono organizzate in un'unica interfaccia utente che semplifica il lavoro con le librerie.

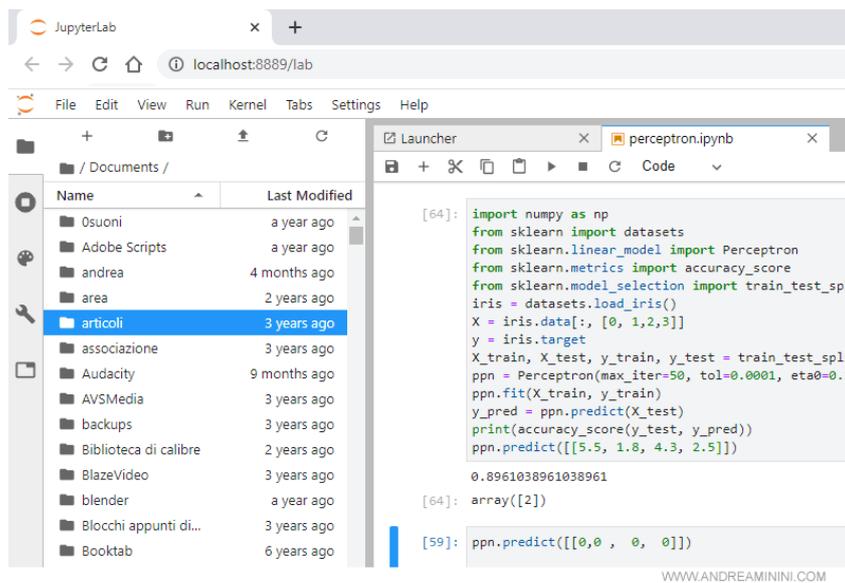


Figura 9: Jupyter interfaccia utente

Jupyter ha le stesse funzionalità di Python ma utilizza un'interfaccia più user friendly.

Il codice è organizzato insieme a visualizzazioni e testo, in questo modo il progetto viene sviluppato e in tempo reale si può scrivere la documentazione tramite un unico software.

Importante è anche la possibilità di condivisione del progetto tra più persone di un gruppo di lavoro.

Jupiter è anche utile per lavorare con la “data scienza”, permette di analizzare, elaborare e modellare i dati tramite lo stesso framework.

4. Codice Python per il calcolo della SE

In questo capitolo viene illustrato passo per passo il codice in linguaggio Python che abbiamo utilizzato per fare le simulazioni.

4.1 Biblioteche

La prima parte del codice è costituita dall'impostazione delle biblioteche, che contengono le variabili e le funzioni che ci saranno utili nel corso del codice stesso.

```
import numpy as np
import scipy.constants as scp
import matplotlib.pyplot as plt

#utilizzo di alcune variabili contenute nella libreria scipy
pi=scp.pi           #pigreco
esp0=scp.epsilon_0 #permettività dielettrica nel vuoto
mu0=scp.mu_0       #permeattività magnetica nel vuoto
c=scp.c            #velocità della luce
```

Figura 10: biblioteche

Per chiamare le librerie uso la sintassi import "nome libreria" as "acronimo", quando voglio richiamare una variabile o una funzione all'interno di una libreria ad esempio #pigreco basta che digito "acronimo". "nome variabile", nel caso del *pigreco* quindi: *pi=scp.pi*.

In Python tutto quello che viene scritto dopo # è dichiarato come commento, Quando l'interprete Python incontra # nel codice, ignora tutto ciò che segue questo simbolo e non produce errore.

4.2 Funzione materiale

La funzione “materiale” definita come *def materiale(strato)* prende in ingresso la variabile *strato* (definita nel *main*) e calcola la costante di propagazione *gamma* (chiamata: *gamma*) e l’impedenza caratteristica (chiamata: *eta*) per ogni materiale che compone i vari strati dello schermo.

All’interno della funzione qui sotto riportata avvengono in ordine le seguenti operazioni:

- Assegnamento dei parametri di *strato* e delle variabili;
- Calcolo della pulsazione *omega* a partire dalla frequenza (definita nel *main*);
- Nella variabile *epsr2* si ricava la parte immaginaria della permittività elettrica relativa complessa nel mezzo;
- Calcolo del termine *tgd2*;
- Si calcolano parte reale e immaginaria della costante di propagazione, *alfa* e *beta*;

- Con i valori che abbiamo precedentemente ricavato si calcolano i parametri finali, richiamati a fine funzione con *return gamma, eta*;

```
#funzione materiali
def materiale(strato):
    epsr=strato[1]
    mur=strato[2]
    sigma=strato[3]
    omega=2*scp.pi*freq
    epsr2=sigma/(omega*scp.epsilon_0)
    tgd2=(epsr2**2)/(epsr**2)
    alfa=omega*np.sqrt(mur*scp.mu_0*epsr*scp.epsilon_0*0.5*(np.sqrt(1+tgd2)-1))
    beta=omega*np.sqrt(mur*scp.mu_0*epsr*scp.epsilon_0*0.5*(np.sqrt(1+tgd2)+1))
    gamma=alfa+beta*1j
    eta=np.sqrt(mur*scp.mu_0/((epsr-epsr2*1j)*scp.epsilon_0))
    return gamma,eta
```

Figura 11: funzione materiali

4.3 Funzione interf

La funzione *interf* prende in ingresso le impedenze caratteristiche dei due strati, tra cui è posta l'interfaccia (*eta1* e *eta2*), viene poi calcolato il coefficiente di riflessione ed il coefficiente di trasmissione chiamati rispettivamente *rho* e *tt*.

```
#funzione interf
def interf(eta1,eta2):
    eta1=eta1
    eta2=eta2
    rho=(eta2-eta1)/(eta2+eta1)
    tt=1+rho
    return rho,tt
```

Figura 12: Funzione interf

4.4 Funzione calcolo SE (efficacia di schermatura)

In questa parte del codice viene definita la funzione SE, parte fondamentale del programma, con il compito di calcolare l'efficacia di schermatura del nostro multistrato.

Dopo aver definito la nostra funzione "*def SE(freq):*" alla frequenza dell'onda incidente sul primo strato, si inizia con un ciclo *for* che esegue un numero di iterazioni uguale a *nstrati* ed ha il compito di calcolare la costante di propagazione (*gamma[i]*) e l'impedenza caratteristica di ogni strato (*eta[i]*), richiamando *materiali*. Successivamente, abbiamo un altro ciclo *for* pari a *nstrati-1*, in cui vengono calcolati i coefficienti di riflessione (*rho[i]*) e trasmissione (*tt[i]*) per ogni interfaccia, andando a richiamare la funzione *interf*. Con l'indice *i* impostato a *nstrati-1* seguono due vettori che rappresentano i valori del campo elettrico trasmesso e quello riflesso chiamati rispettivamente *e_p[i]* e *e_m[i]*.

Nel terzo ed ultimo ciclo *for*, l'interazione inizia con *i=nstrati-2* e si conclude con *i=0*, al suo interno viene richiamata la funzione *campi* e vengono calcolati i valori del campo elettrico trasmesso e riflesso in ogni strato.

Alla fine di tutte le interazioni, la nostra funzione definita come SE ritorna il valore dell'efficacia di schermatura in dB alla frequenza definita utilizzando le funzioni *log10* e *abs*.

```

#funzione SE
def SE(freq):
    for i in range(nstrati):
        gamma[i],eta[i]=materiale(strati[i])
    for i in range(nstrati-1):
        rho[i],tt[i]=interf(eta[i],eta[i+1])
    i=nstrati-1
    e_p[i]=1+0j
    e_m[i]=0+0j
    for i in range(nstrati-2,-1,-1): #start, stop, step
        e_p[i],e_m[i]=campi(gamma[i+1],strati[i+1][4],rho[i],tt[i],e_p[i+1], e_m[i+1])
    return 20*np.log10(np.abs(e_p[0]))

```

Figura 13: Funzione SE

4.5 Main

All'interno del *main* per prima cosa viene definita la variabile *nstarti* a cui assegniamo come valore il numero degli strati che compongono il modello che vogliamo esaminare (il nostro multistrato).

Vengono in seguito definiti i vettori che contengono i valori dei parametri calcolati nella funzione SE.

Nella variabile *strati* vengono racchiusi i vari nomi degli strati che compongono il multistrato con i rispettivi parametri che in ordine sono: permittività dielettrica relativa, permeabilità magnetica relativa, conducibilità elettrica e spessore, ad esempio ("*aria 1*",1,1,0,0).

Nell'ultima parte del codice definiamo il grafico, partendo dalla variabile *freq* che crea un vettore a partire da 100 MHz fino a 10 GHz, contenente un numero di elementi pari a 501.

Segue la definizione della variabile $y=SE(freq)$, quindi il calcolo dell'efficacia di schermatura per i valori di frequenza che abbiamo precedentemente scelto.

Creiamo il grafico definendo gli assi, con i comandi *xlabel* e *ylabel*, infine plottiamo il tutto con funzione *plt.plot(freq*1e-9,y)* e mostriamo in schermo con funzione *plt.show()*.

```
#Main
nstrati=7
gamma=[0]*nstrati
eta=[0]*nstrati
rho=[0]*(nstrati-1)
tt=[0]*(nstrati-1)
e_p=[0]*nstrati
e_m=[0]*nstrati
strati=[("aria 1",1,1,0,0),
        ("vetro 1",7,1,0.001,0.004),
        ("metallo 1",1,1,61730000,6e-9),
        ("vetro 2",7,1,0.001,0.001),
        ("metallo 2",1,1,61730000,6e-9),
        ("vetro 3",7,1,0.001,0.004),
        ("aria 2",1,1,0,0)
        ]
freq=np.linspace(start=100e6 #100 MHz
                 ,stop=10e9 #10 GHz
                 ,num=501 #numero elementi
                 )
y=SE(freq)
plt.xlabel("Frequency (GHz)")
plt.ylabel("SE (dB)")
plt.rc("axes",labelsize=16) #dimensione caratteri numerici
plt.rc("xtick",labelsize=16)
plt.rc("ytick",labelsize=16)
plt.plot(freq*1e-9,y)
plt.show()
```

Figura 14: Main

5. Simulazioni e risultati

5.1 Simulazione 1

Nella prima simulazione (vedere figura 14) abbiamo studiato l'efficacia di uno schermo multistrato formato da 7 strati: aria 1, vetro 1, metallo 1, vetro 2, metallo 2, vetro 3 e aria 2.

Lo schermo presenta tre strati di vetro con diverso spessore, quelli esterni più spessi da 4 millimetri, quello interno da 1 millimetro.

Qui sotto viene riportato il grafico dell'andamento della SE in funzione della frequenza.

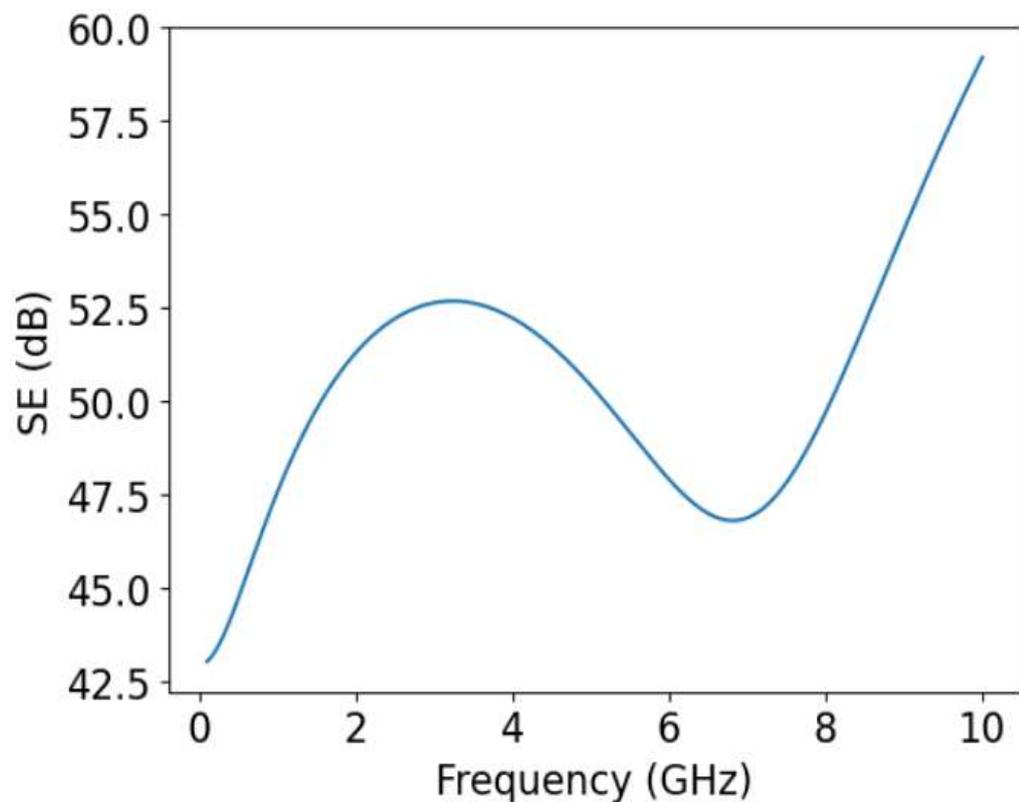


Figura 15: Grafico andamento SE, di 7 strati

Dal grafico notiamo che l'efficacia di schermatura è minore in prossimità della frequenza 7 GHz, dove assume valori di circa 47.5 dB, ciò significa che la vetrata permette maggiormente il passaggio di segnali a tale frequenza.

5.2 Simulazione 2

Nella seconda simulazione abbiamo aggiunto uno strato di vetro in più internamente, sempre con spessore 1 millimetro. Abbiamo dunque aggiornato il nostro codice Python nella parte del *main*.

Simulazione 8 strati

```

: #Main
nstrati=8
gamma=[0]*nstrati
eta=[0]*nstrati
rho=[0]*(nstrati-1)
tt=[0]*(nstrati-1)
e_p=[0]*nstrati
e_m=[0]*nstrati
strati=[("aria 1",1,1,0,0),
        ("vetro 1",7,1,0.001,0.004),
        ("metallo 1",1,1,61730000,6e-9),
        ("vetro 2",7,1,0.001,0.001),
        ("metallo 2",1,1,61730000,6e-9),
        ("vetro 3",7,1,0.001,0.001),
        ("vetro 4",7,1,0.001,0.004),
        ("aria 2",1,1,0,0)

        ]
freq=np.linspace(start=100e6 #100 MHz
                 ,stop=10e9 #10 GHz
                 ,num=501 #numero elementi
                 )
y=SE(freq)
plt.xlabel("Frequency (GHz)")
plt.ylabel("SE (dB)")
plt.rc("axes",labelsize=16) #dimensione caratteri numerici
plt.rc("xtick",labelsize=16)
plt.rc("ytick",labelsize=16)
plt.plot(freq*1e-9,y)
plt.show()
```

Figura16: Main 8 strati

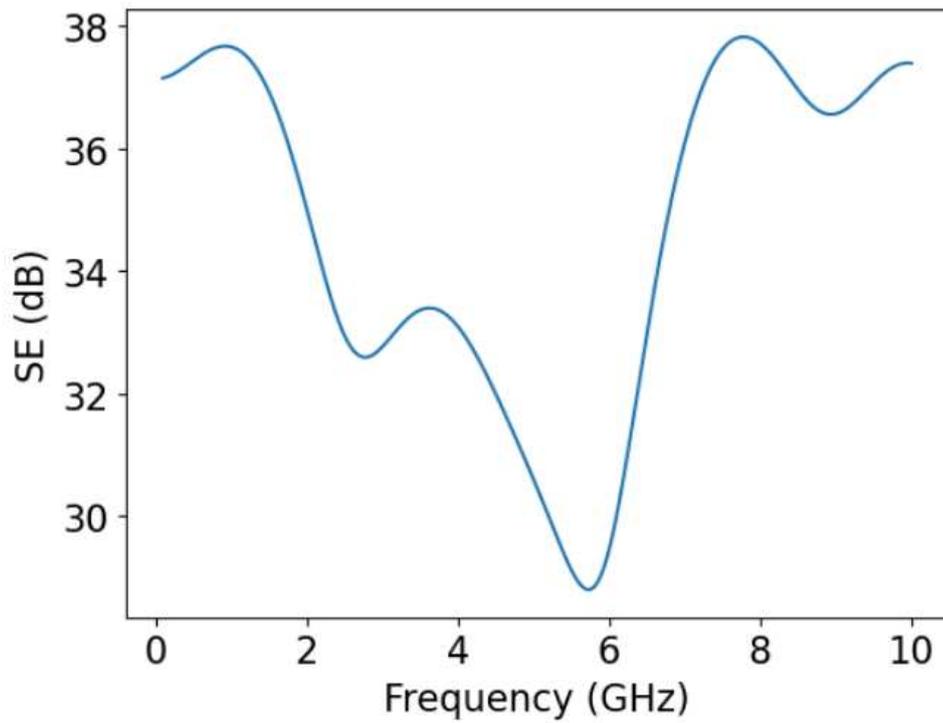


Figura 17: grafico andamento SE, 8 strati

Dal grafico si nota che aggiungendo uno strato di vetro in più, l'efficacia di schermatura si abbassa notevolmente alla frequenza di 5.8 GHz, circa 29 dB.

6. Conclusioni

Lo studio effettuato in questa tesi si è incentrato sulla realizzazione di un algoritmo in linguaggio Python volto a calcolare l'efficacia di schermatura di materiali stratificati per l'ottimizzazione di essi.

Importante è sottolineare la versatilità di questo codice informatico, giocando con parametri noti come la conducibilità, gli spessori delle interfacce, possiamo studiare la SE di svariati multistrati in funzione della frequenza scelta dall'utente, diventa dunque uno strumento di rilevante aiuto poiché la SE ha come obiettivo principale quello di ridurre le radiazioni elettromagnetiche.

Nelle due simulazioni viste precedentemente abbiamo messo in confronto due multistrati, il primo composto da un triplo vetro con diversi spessori, nel secondo abbiamo notato come cambia l'efficacia di schermature aggiungendo un ulteriore strato di vetro all'interno. In termini di efficacia di schermatura, si manifestano delle differenze al variare degli spessori degli strati, l'attenuazione del campo subisce variazioni di ampiezza e cambiano gli intervalli in frequenza ai quali essa presenta valori massimi e minimi. È dunque opportuno scegliere spessori a seconda della frequenza dei segnali ai quali si vuole permettere il passaggio attraverso il mezzo stratificato.

Sviluppi futuri saranno portati avanti volti al miglioramento e allo studio del calcolo della SE su varie frequenze e l'impiego di altri materiali stratificati.

Bibliografia

- [1] U. d. s. d. Padova, «Fondamenti di campi elettromagnetici. Teoria e applicazioni,» McGraw-Hill Education, 2019.
- [2] F. Di Bona, «Schermatura elettromagnetica, di cosa si tratta?,» [Online]. Available: <https://energycue.it/schermatura-elettromagnetica/12231/>.
- [3] A. Monorchio, *Compatibilità elettromagnetiche, dispense*.
- [4] «Python,» [Online]. Available: <https://www.python.org/about/>.
- [5] [Online]. Available: <https://www.andreaminini.com/datascience/anaconda/jupyter-notebook>.

