

D.I.A.A.

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale ed Astronautica



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale e Astronautica

SASLab

Scientific Aerospace Solution Laboratory

Scientific Director :

Prof. Mario Marchetti

University of Rome "La Sapienza"

D.I.A.A. – Department of Aerospace and Astronautics Engineering

Tel. +39 06 44 585 800 / fax. +39 06 44 585 670

Authors:

Eng. Davide Micheli

Eng. Carmelo Apollo

Dott. Roberto Pastore

Approved:

Prof. Mario Marchetti

1. Introduzione

Nel seguente documento sono descritte le metodologie di progettazione/ottimizzazione ed i risultati ottenuti sui radar absorbing material (RAM).

In relazione alle misure sui materiali, sono riportati i risultati in termini di costanti dielettriche ed impedenza caratteristica intrinseca dei materiali nella banda X (8.2--12.4 GHz).

Per quanto riguarda invece le metodologie di progettazione ed ottimizzazione delle strutture RAM si riportano brevemente i modelli metaeuristici utilizzati ed i risultati ottenuti in termini coefficiente di riflessione, coefficiente di trasmissione e fattore di perdita di potenza dissipata all'interno della struttura RAM.

I sistemi RAM (Radar Absorbing Material), si basano su materiali capaci di ridurre la riflessione delle onde elettromagnetiche emesse dai radar le quali incidono su di essi.

Tipicamente quando si parla di sistemi RADAR, la capacità di un oggetto di essere rilevabile dal Radar si misura mediante la sua RCS (Radar Cross Section) che in qualche modo identifica una superficie. Quanto minore risulta la RCS di un oggetto tanto minore sarà la possibilità per esso di essere rilevato da un RADAR. Per fare un esempio la RCS di un aereo Stealth equivale ad una superficie utile poco più grande di quella di un insetto e di conseguenza risulta meno rilevabile di un normale aereo la cui RCS può viceversa essere molto grande.

La RCS dipende fondamentalmente da due fattori:

- Forma dell'oggetto;
- Materiale dell'oggetto, o di cui è rivestito l'oggetto.

La forma determina la direzione di riflessione delle onde elettromagnetiche pertanto l'obiettivo sta nel trovare delle geometrie che riducano la riflessione verso la sorgente di emissione (RADAR) delle onde elettromagnetiche, è proprio per questo motivo che gli aerei di tipo Stealth ha una forma tanto particolare.

Il materiale di cui è costituito l'oggetto determina invece la quantità di onda riflessa. L'obiettivo di questi materiali è quello di riflettere il meno possibile ovvero assorbire il più possibile e per ottenere questo occorrono due requisiti principali che sono:

- Adattamento delle impedenze elettriche tra aria e materiale;
- Capacità del materiale stesso di assorbire e dissipare i campi elettromagnetici provenienti dal RADAR.

Il vincolo fondamentale per la scelta di un materiale è costituito dallo spessore che il materiale deve avere affinché sia soddisfatto un certo criterio di assorbimento minimo nella banda di frequenze considerata. Poiché inoltre l'assorbimento dipende anche dall'angolo di incidenza e dalla frequenza dell'onda elettromagnetica, si comprende come il processo di ottimizzazione debba tenere conto contemporaneamente di molteplici fattori. In particolare, giacché il materiale può il rivestimento esterno di un aereo si richiede che lo spessore sia minimo in modo tale cioè da non compromettere gli aspetti aerodinamici e la massa utile del payload. L'ottimizzazione pertanto determina sempre una soluzione che rappresenta il miglior compromesso tra i diversi aspetti citati cercando in definitiva di ottenere la minima riflessione possibile, con il minimo spessore del materiale, su tutta la banda di frequenze trasmesse dal RADAR e per tutti gli angoli di incidenza in particolare quelli vicini alla direzione normale in quanto determinano riflessioni verso la sorgente.

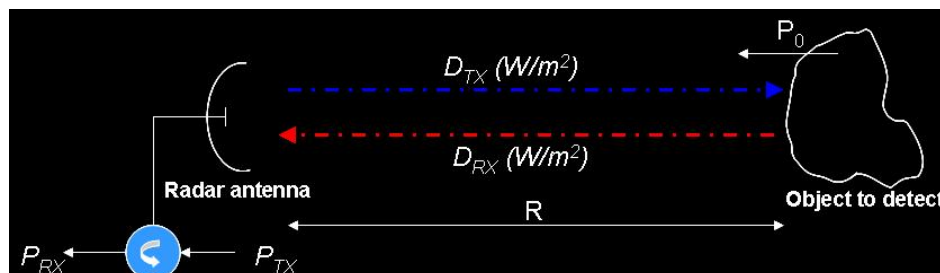


Figura 1: Schema semplificato di un RADAR che trasmette e riceve il segnale riflesso dall'oggetto sotto osservazione

L'equazione fondamentale del RADAR porta ad una espressione della potenza ricevuta P_{RX} che è inversamente proporzionale alla quarta potenza della distanza R , inversamente proporzionale al quadrato della frequenza f , direttamente proporzionale al quadrato del guadagno G di antenna RADAR e alla potenza utilizzata P_{TX} , direttamente proporzionale alla RCS dell'oggetto σ

$$D_{TX} (W / m^2) = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX}}{4\pi R^2} \Rightarrow P_0 = D_{TX} \cdot \sigma = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX}}{4\pi R^2} \cdot \sigma$$

$$\Rightarrow D_{RX} = \frac{P_0}{4\pi R^2} = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX}}{(4\pi R^2)^2} \cdot \sigma \quad \text{since: } A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_{RX} \quad \text{then:}$$

$$\Rightarrow P_{RX} = D_{RX} \cdot A_{eff} = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX}}{(4\pi R^2)^2} \cdot \sigma \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_{RX} = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \sigma$$

$$\text{if: } G_{TX} = G_{RX} = G_{antenna} \quad \text{then: } P_{RX} = \frac{P_{TX} \cdot G_{antenna}^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \sigma$$

Equazione Fondamentale RADAR

LA RCS è funzione delle *dimensioni* dell'oggetto, della sua *forma geometrica*, del *materiale* di cui è costituito.

in definitiva la RCS rappresenta a meno di una costante pigreco, il rapporto tra la potenza riflessa dall'oggetto oggetto di detection nella direzione del RADAR e la potenza trasmessa dal RADAR.

$$\sigma = 4\pi \frac{P_{Backscatter}}{P_{Incident}}$$

Equazione RCS

la RCS può essere espressa in Decibel square meter ovvero:

$$dBsm = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{\sigma}{1m^2} \right)$$

Nelle sezioni seguenti sono presentati risultati degli studi fino ad ora fatti partendo dai materiali costruiti in laboratorio fino agli algoritmi utilizzati per le simulazioni.

2. Materiali utilizzati per la realizzazione dei campioni RAM

I materiali utilizzati per le misure sono di tipo nanostrutturato: resine con aggiunta di micrografite e differenti tipi di nanopolveri di carbonio. Nelle Figure che riportano le immagini al microscopio tali nanopolveri sono indicate come MWCNT, SWCNT, CNF, Fullerene.

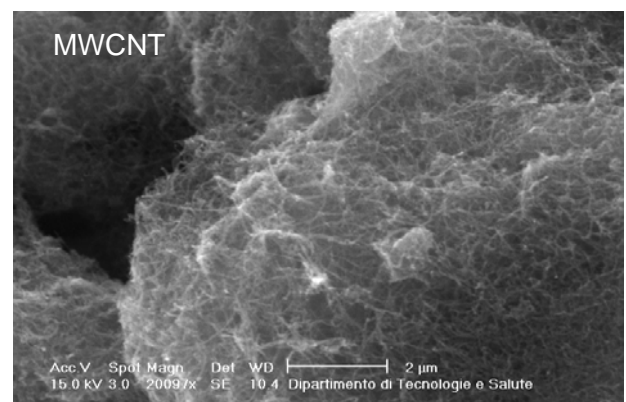
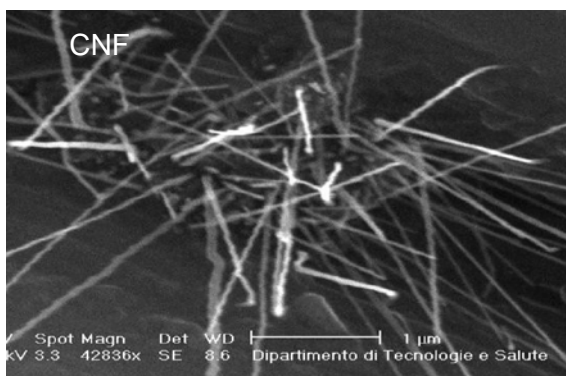
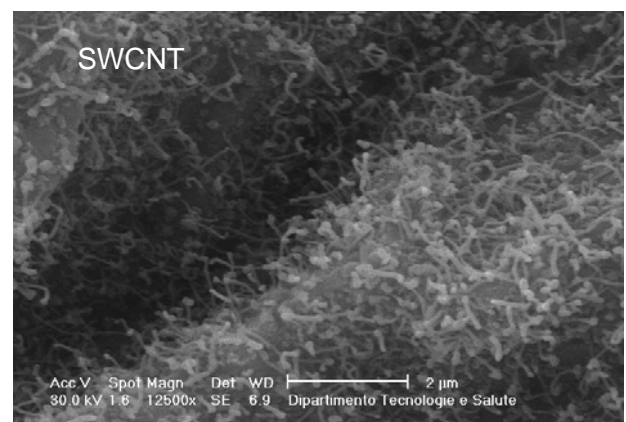
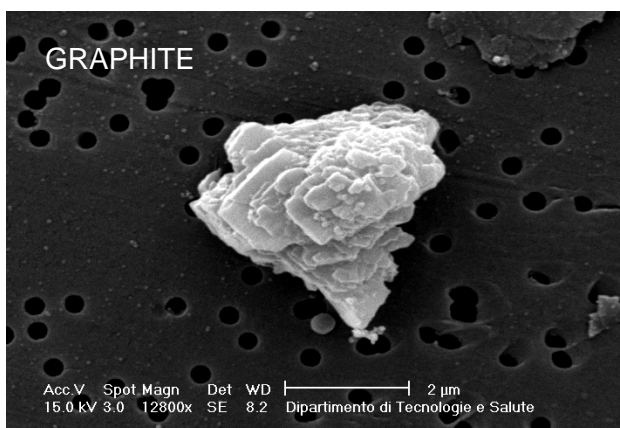


Figura 2: Immagini dei campioni in composito nanostrutturato ottenute al SEM

3. Misura delle caratteristiche dielettriche dei materiali nanostrutturati

La misura della permittività e della permeabilità dei materiali utilizzati è stata effettuata con una tecnica ben nota in letteratura. Questa tecnica è basata su misure in guida d'onda.

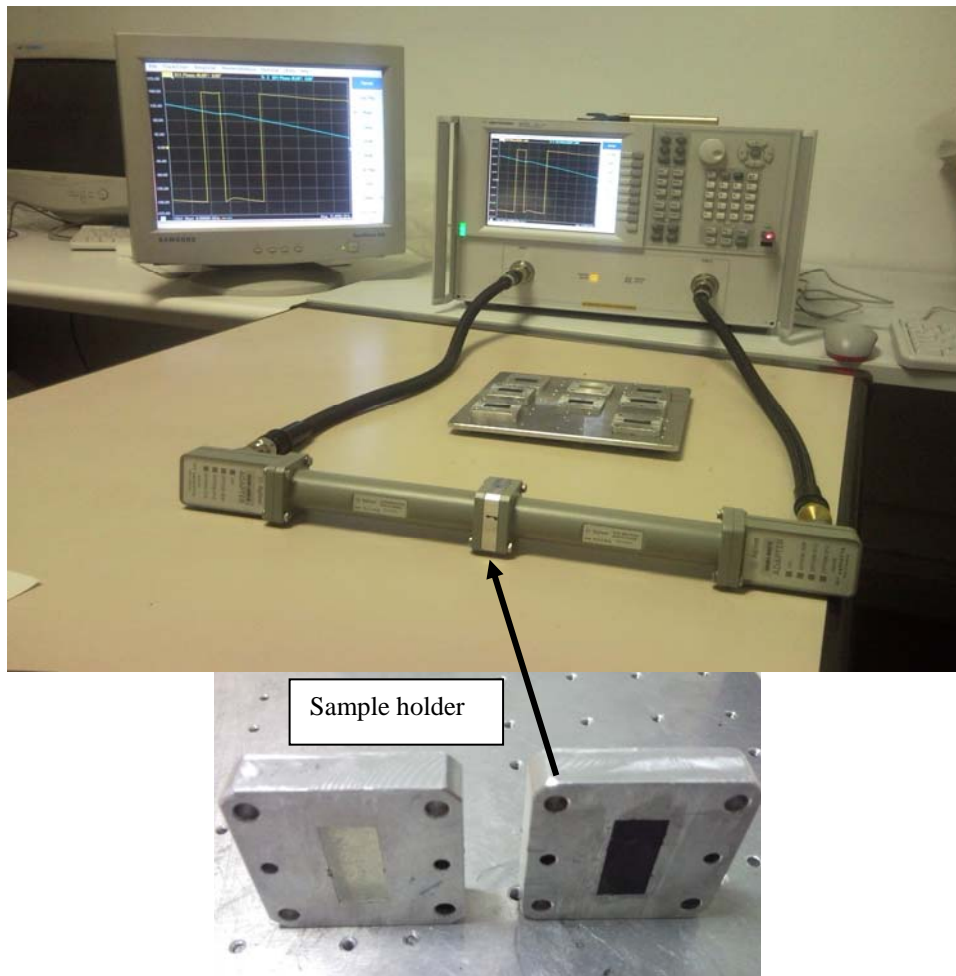


Figura 3: Misura dei parametri di scattering e determinazione della permittività elettrica e della permeabilità magnetica dei materiali utilizzando il metodo di analisi in guida d'onda.

Nella figura sopra lo strumento di analisi vettoriale effettua misure dei parametri di scattering in altri termini fornisce in frequenza il livello della potenza a microonde riflessa e trasmessa da ed attraverso il materiale da analizzare.

Successivamente dalle misure dei parametri di scattering, tramite algoritmi standard disponibili in letteratura (Nicholson Ross), si possono determinare la permittività elettrica e la permeabilità magnetica dei materiali.

Si riporta la permittività elettrica di alcuni materiali utilizzati in funzione della frequenza.

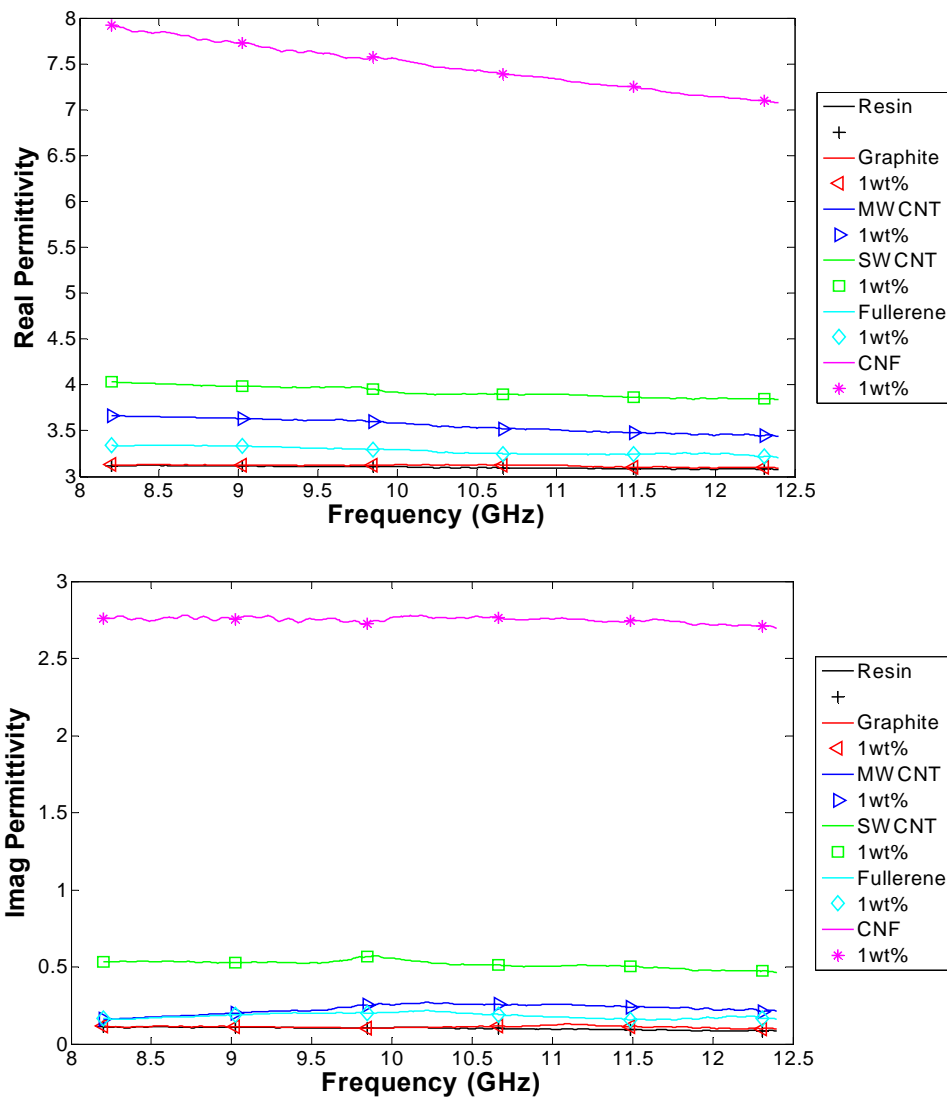


Figura 4: Parte reale e parte immaginaria della permittività elettrica in funzione della frequenza.

La parte immaginaria della permittività elettrica esprime la l'attitudine del dielettrico a dissipare la potenza del campo elettromagnetico incidente su di esso. Più grande è il suo valore, maggiore risulta la possibilità di aumentare la capacità di assorbimento del campo elettromagnetico incidente dissipandolo sostanzialmente in calore. Il principio per il quale un materiale dielettrico assorbe una parte del campo elettromagnetico incidente su di esso può essere ricondotto a diversi meccanismi di assorbimento come orientazione dei dipoli, conduzione ionica, polarizzazione atomica ed elettronica.

Quali che siano i meccanismi di perdita del materiale dielettrico, questi sono bene riassunti dai valori delle costanti dielettriche ed in particolare dalla tangente del rapporto tra la parte immaginaria e la parte reale della permittività elettrica all'aumentare delle quale aumentano le perdite nel materiale.

Dai valori delle costanti dielettriche si possono poi calcolare i valori della impedenza intrinseca η dei materiali la quale costituisce la variabile funzione della frequenza che viene utilizzata dagli algoritmi metaeuristici di progettazione ed ottimizzazione delle strutture RAM.

$$\eta_k = \sqrt{\frac{\mu_k}{\epsilon_k}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon' - j\epsilon''}} \cong 377 \frac{1}{\sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}}$$

$$\mu_r \cong 1$$

(1)

377 = impedenza caratteristica dello spazio libero

$\epsilon' - j\epsilon''$ = permittività

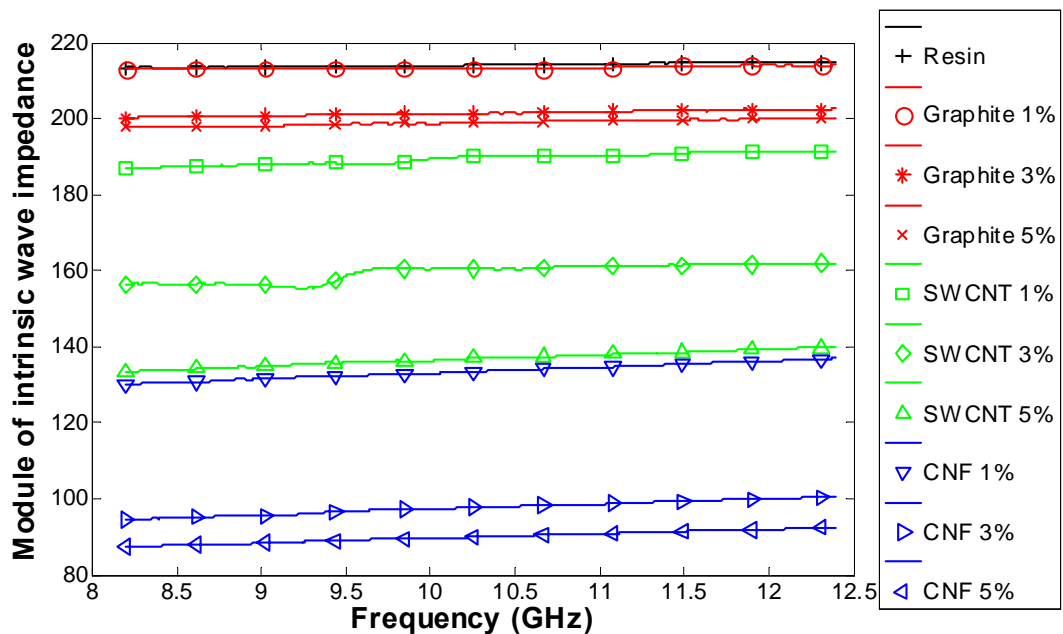


Figura 5: Modulo dell'impedenza caratteristica intrinseca dei materiali nanostrutturati in carbonio. I materiali con impedenza in modulo più bassa sono quelli che presentano il maggiore fattore dissipativo di potenza.

Dalla Figura si osserva che i valori dei moduli delle impedenze sono funzione del tipo di materiale e della concentrazione rispetto alla resina.

Il significato della impedenza intrinseca risiede nei meccanismi di conduzione elettrica del materiale. Questi meccanismi variano e pesano in maniera differente a seconda del tipo e della concentrazione dei nanomateriali utilizzati. In prima approssimazione i meccanismi di dissipazione della potenza aumentano all'aumentare della conducibilità elettrica del composito nanostrutturato e la conducibilità elettrica aumenta con il diminuire della impedenza caratteristica del composito stesso.

Le impedenze caratteristiche dei materiali sono in generale dei numeri complessi. attraverso le impedenze e/o la permittività e permeabilità dei materiali è possibile definire anche l'indice di rifrazione che come è noto viene utilizzato nella legge di Snell per determinare gli angoli di rifrazione di un'onda elettromagnetica che attraversa un'interfaccia tra differenti materiali dielettrici.

$$n_k = \sqrt{\mu_k \epsilon_k} \quad (2)$$

$$n_k \sin \theta_k = n_{k-1} \sin \theta_{k-1} \quad (3)$$

4. Meccanismo di assorbimento del campo elettromagnetico

Il meccanismo di assorbimento del campo elettromagnetico incidente su un materiale è funzione della forma, dimensioni e del tipo di materiale. In questo contesto si presentano i risultati relativi solamente al tipo di materiale utilizzato.

Si ipotizzi per semplicità una struttura semplice come quella di Figura costituita da un materiale su cui incide in campo elettromagnetico. Come noto una parte dell'energia viene riflessa ed una parte dell'energia viene trasmessa dall'altra parte propagandosi attraverso il materiale che ne assorbe una certa porzione.

La quantità di energia riflessa è legata alla differenza tra l'impedenza intrinseca dello spazio libero (circa 377 Ohm) e l'impedenza intrinseca del materiale. Se tale differenza è nulla allora l'energia viene completamente trasmessa attraverso il materiale. Questo meccanismo sembra contrapporsi con quello visto precedentemente per il fattore di perdita di potenza all'interno del materiale, legato alla conducibilità elettrica del materiale che invece richiede un valore basso di impedenza caratteristica.

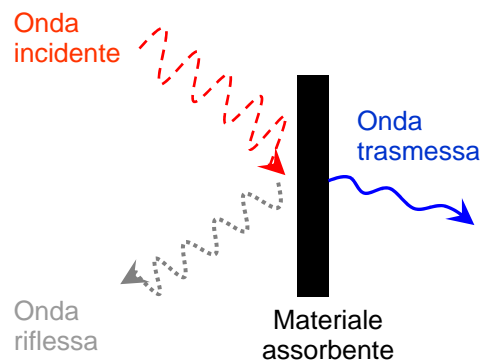


Figura 6: Interazione campo elettromagnetico a microonde e lastra piana di materiale di dimensioni trasversali idealmente infinite

Visto che i due meccanismi sono tra loro legati e antagonisti si deduce che una struttura per essere assorbente deve avere una impedenza intrinseca variabile che si riduce, possibilmente con continuità, dall'esterno verso l'interno dove il campo elettromagnetico viene assorbito in virtù della maggiore conducibilità del materiale.

Su questo principio di (Impedance tapering) si basano i sistemi con geometria piramidale noti (camere anecoiche) ed i sistemi multistrato come in Figura.

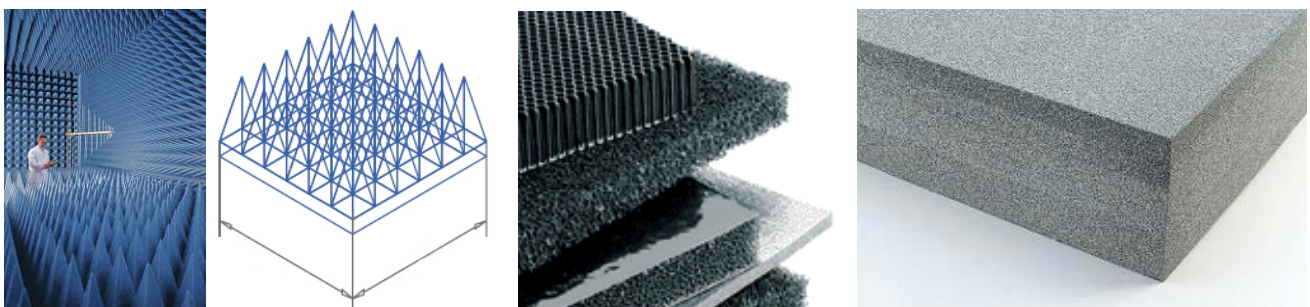


Figura 7: sistema di adattamento progressivo delle impedenze caratteristiche intrinseche dei materiali partendo da quella tipica dello spazio libero (circa 377 Ohm) per ridursi a quella di un materiale dielettrico maggiormente conduttivo (esempio 80 Ohm).

5. Sistema RAM basato su strutture multilayer

Un sistema RAM basato su una struttura multilayer ha in generale una larghezza di banda estesa, e un coefficiente di riflessione con vari minimi all'interno della banda di frequenze. nel campo delle microonde questi sistemi si studiano mediante l'utilizzazione delle linee di trasmissione. Considerata la tediosità matematica

Un semplice sistema come quello visto rappresentato sotto è equivalente a 3 tratti di linea di trasmissione: il primo e l'ultimo tratto sono costituiti da aria (spazio libero) mentre il tratto intermedio è l'equivalente elettromagnetico del materiale considerato.

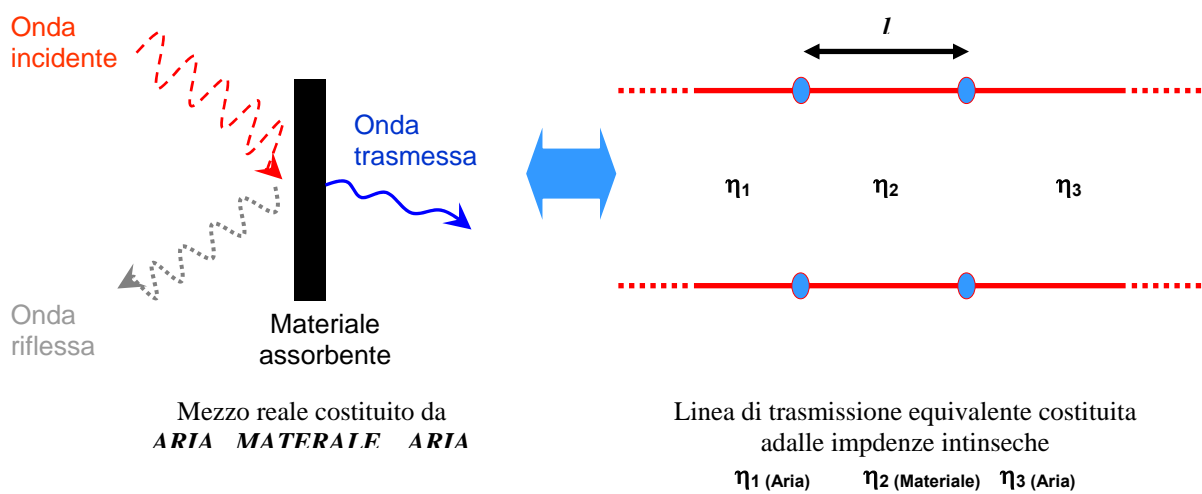


Figura 8: Rappresentazione di un sistema reale mediante le linee di trasmissione.

Se anziché un solo strato vengono affacciati molti strati denominati con indici k allora la struttura che si presenta diventa come quella rappresentata nella Figura sotto:

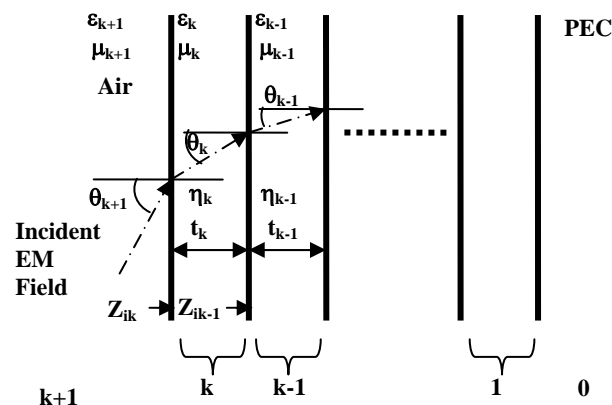


Figura 9: Schema di una struttura multistrato; t è lo spessore, Z_i è l'impedenza vista all'inizio di ogni strato che tiene conto di quella degli strati precedenti, η è l'impedenza intrinseca di ogni strato ϵ , μ sono permittività elettrica e permeabilità magnetica di ciascuno strato, PEC significa perfect electric conductor (in pratica metallo)

6. Algoritmi e simulazioni delle strutture RAM

In questa sezione sono discussi i due algoritmi fino ad ora applicati per lo studio delle strutture RAM. Gli algoritmi sono:

- Algoritmi Genetici (di tipo evolutivistico);
- Particle Swarm (di tipo ad intelligenza distribuita).

Entrambi questi algoritmi sono utilizzati regolarmente nel campo dell'intelligenza artificiale per la ricerca delle soluzioni migliori quando le variabili di cui bisogna tenere conto sono numerose. In questi casi a volte non esiste una soluzione univoca al problema che possa essere determinata in forma chiusa ma esistono varie soluzioni con qualità al di sopra di una soglia minima specificata.

Algoritmi genetici (GA)

Come evidente dal nome, questi algoritmi sfruttano le conoscenze acquisite su un certo processo in istanti precedenti per migliorare la ricerca della soluzione ottimale negli istanti successivi, seguendo un schema simile a quello adottato dalla natura per l'evoluzione delle specie mediante la selezione naturale.

In pratica si parte da una popolazione iniziale casuale che contiene soluzioni buone e meno buone, si procede poi con una serie di iterazioni dell'algoritmo. Ogni iterazione, nel linguaggio Darwiniano, corrisponde ad una nuova generazione di soluzioni ottenute a partire dalle soluzioni precedenti. Scartando ad ogni iterazione le soluzioni meno buone si fa in modo che le nuove generazioni di soluzioni vengano generate a partire dalle generazioni di soluzioni geneticamente migliori ed in tal modo, l'evoluzione dell'algoritmo procede per passi fino a trovare una soluzione ottimale per cui anche con nuove iterazioni non si ottiene più alcun miglioramento delle nuove soluzioni rispetto alle precedenti; si dice in questo caso che l'Algoritmo Genetico converge alla soluzione ottimale. In ambito matematico il meccanismo di convergenza di un algoritmo è rappresentato da una funzione che decresce tendendo ad un valore asintotico ed è pertanto ben valutabile.

Il meccanismo genetico con cui si tiene memoria dei miglioramenti acquisiti è l'accoppiamento dei cromosomi migliori ad ogni iterazione (generazione) del processo evolutivo. Infatti in questo modo il materiale genetico viene delle generazioni con i risultati migliori viene incrociato ogni volta e portato avanti di generazione in generazione fino ad adattarsi perfettamente all'ambiente circostante.

Nell'ambito delle strutture RAM l'ambiente in questione è quello che vuole la minima riflessione dei campi elettromagnetici da parte del materiale RAM, il minimo spessore del materiale della struttura RAM, tenendo simultaneamente conto della più ampia banda di frequenze possibile, della polarizzazione dei campi elettromagnetici e degli angoli di incidenza dei campi elettromagnetici.

Come si può osservare lo spazio delle variabili è pertanto uno spazio multidimensionale che per essere trattato matematicamente viene rappresentato con matrici ad m -dimensioni. Nel nostro caso $m=6$ (epsilon reale, epsilon immaginario, μ reale, μ immaginario, frequenza, angolo di incidenza). All'interno dell'algoritmo è previsto anche un meccanismo di mutazione casuale di alcuni geni (componenti elementari delle configurazioni da ottimizzare) che al pari di quanto avviene in natura, assicura che le generazioni più promettenti siano quelle ottenute dall'accoppiamento di elementi non troppo parenti tra loro. Questa modalità assicura che l'algoritmo genetico non cada in quello che in gergo tecnico è chiamato un minimo locale ovvero assicura che venga esplorato tutto lo spazio possibile delle soluzioni. In analogia a quanto accade nella teoria dell'evoluzione della specie umana, gli individui più resistenti alle malattie non sono quelli generati dall'accoppiamento tra parenti ma quelli generati tra persone di famiglie che hanno minore grado di parentela tra loro.

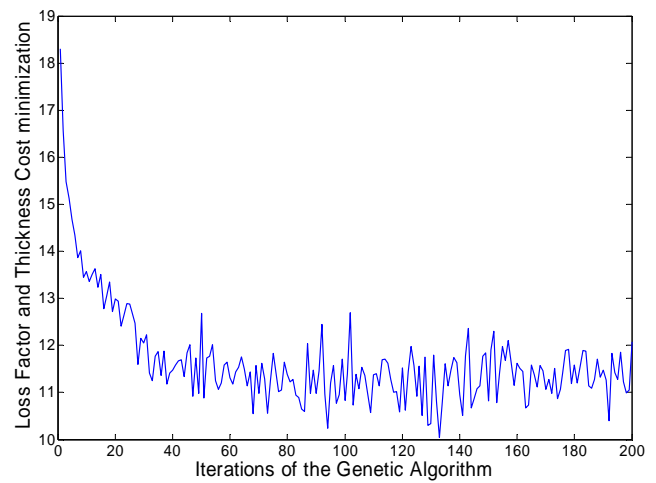
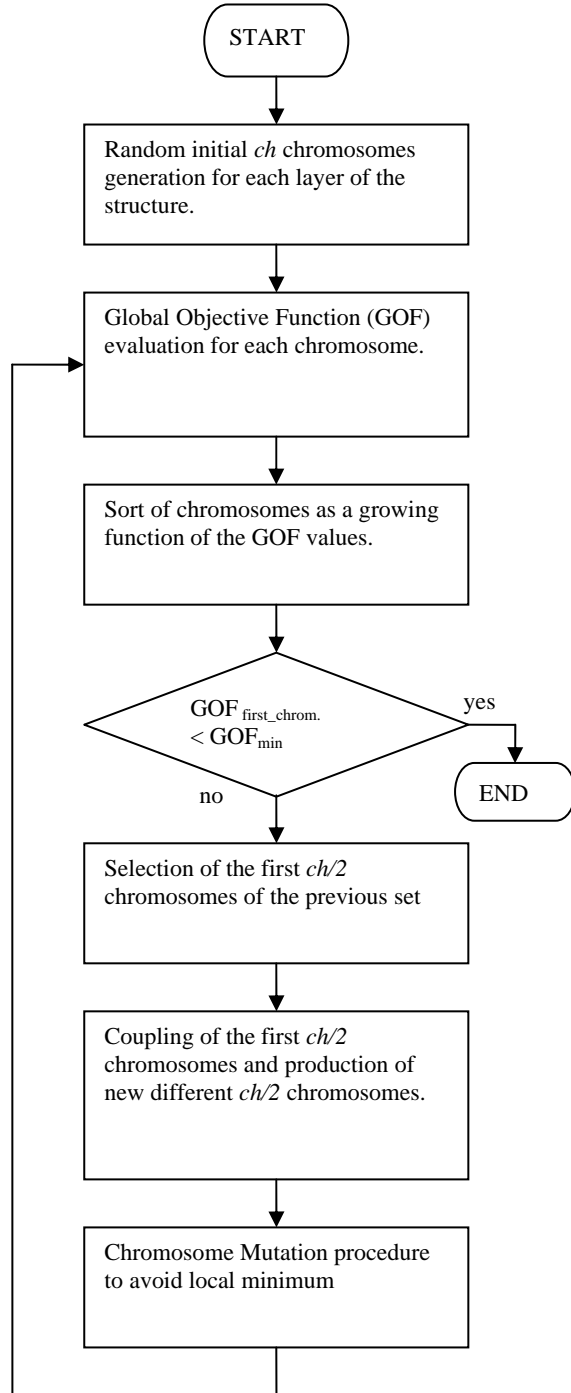


Figura 10: Schema di un Algoritmo Genetico ed esempio di Convergenza di un algoritmo genetico nella minimizzazione di un funzionale per il progetto di una struttura RAM

Algoritmi di Particle Swarm Optimization (PSO)

Questi algoritmi sono molto recenti sono stati introdotti nel 2001. Il PSO è un metodo di ricerca ed ottimizzazione, auto-adattativo, basato sulla simulazione del comportamento sociale di uccelli, api, pesci. L'algoritmo tende a simulare il movimento di ciascun elemento dello sciame nella ricerca per esempio del cibo (soluzione migliore), tenendo conto anche del movimento dell'intero sciame. Similmente all'algoritmo genetico il PSO inizia la ricerca partendo da una distribuzione casuale di popolazione di insetti (particelle) nello spazio di ricerca e per ciascuno di essi viene calcolato il valore del funzionale da minimizzare (ovvero la qualità del cibo trovato). Tuttavia diversamente dall'algoritmo genetico non vi è una diretta ricombinazione del materiale genetico tra gli individui durante la ricerca infatti qui si sfrutta il comportamento sociale delle particelle nello sciame. pertanto il PSO trova la migliore soluzione aggiustando la traiettoria e la velocità di ciascuna particella verso la propria migliore soluzione e verso la migliore soluzione trovata fino a quel momento da tutte le altre particelle dello sciame. Il processo di PSO viene iterato un numero fissato di volte o fino a che la soluzione trovata non soddisfa i requisiti minimi richiesti. Nel PSO la traiettoria di ciascuna particella nello spazio di ricerca viene dinamicamente aggiustata alterando la velocità di ciascuna particella in accordo con la propria esperienza maturata fino a quel momento ed in accordo con l'esperienza delle altre particelle. In particolare il termine di velocità è la somma pesata di tre termini, il primo dei quali è la velocità assunta all'iterazione precedente, il secondo è il termine di esperienza personale ovvero il pensiero di ciascuna particella, il terzo termine è il termine di cognizione collettiva ovvero il termine di intelligenza distribuita o coscienza collettiva dell'intero sciame che è stata maturata osservando la migliore soluzione ottenuta da tutte le particelle dello sciame negli istanti precedenti.

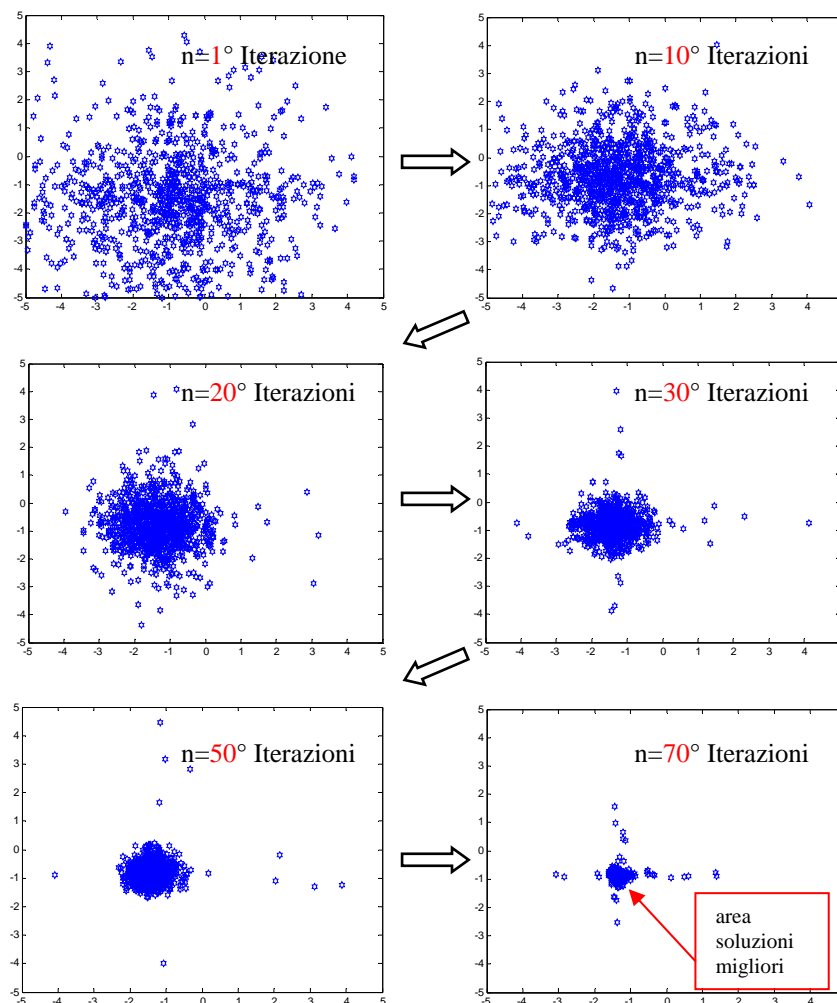


Figura 11: Particle Swarm Optimization, durante l'evoluzione nella ricerca della soluzione.

7. Risultati RAM con Algoritmo Genetico e DB misure dei materiali banda-X

In questa sezione sono presentati i risultati relativi ad un sistema RAM ottenuto a partire dai materiali caratterizzati in precedenza in banda-X (8.2--12.4 GHz).

I risultati sono relativi ad una struttura multistrato di materiali posta sopra una parete metallica. La struttura complessiva multistrato ha uno spessore di circa 6mm.

Gli spessori possono essere tuttavia ridotti andando ad agire sulle concentrazioni dei nanomateriali presenti all'interno della struttura multistrato.

Si riportano di seguito il coefficiente di riflessione per vari angoli di incidenza e per le polarizzazioni TM/ TE dell'onda elettromagnetica incidente.

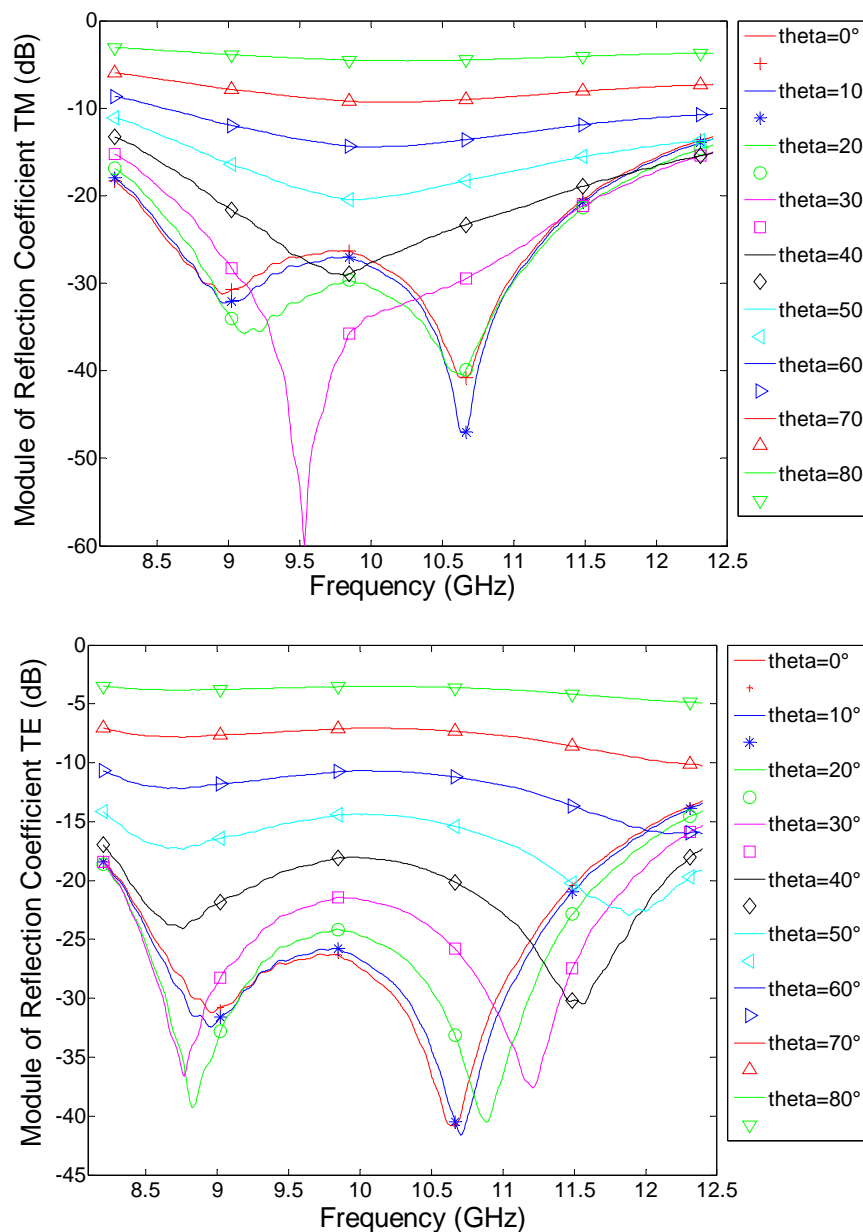


Figura 12: Coefficiente di riflessione della struttura RAM per le polarizzazioni TM / TE e per vari angoli di incidenza

Nei grafici successivi sono riportati i fattori di perdita (Loss Factor %) che rappresentano la percentuale di potenza che viene dissipata all'interno del dielettrico rispetto alla potenza che incide sulla struttura RAM.

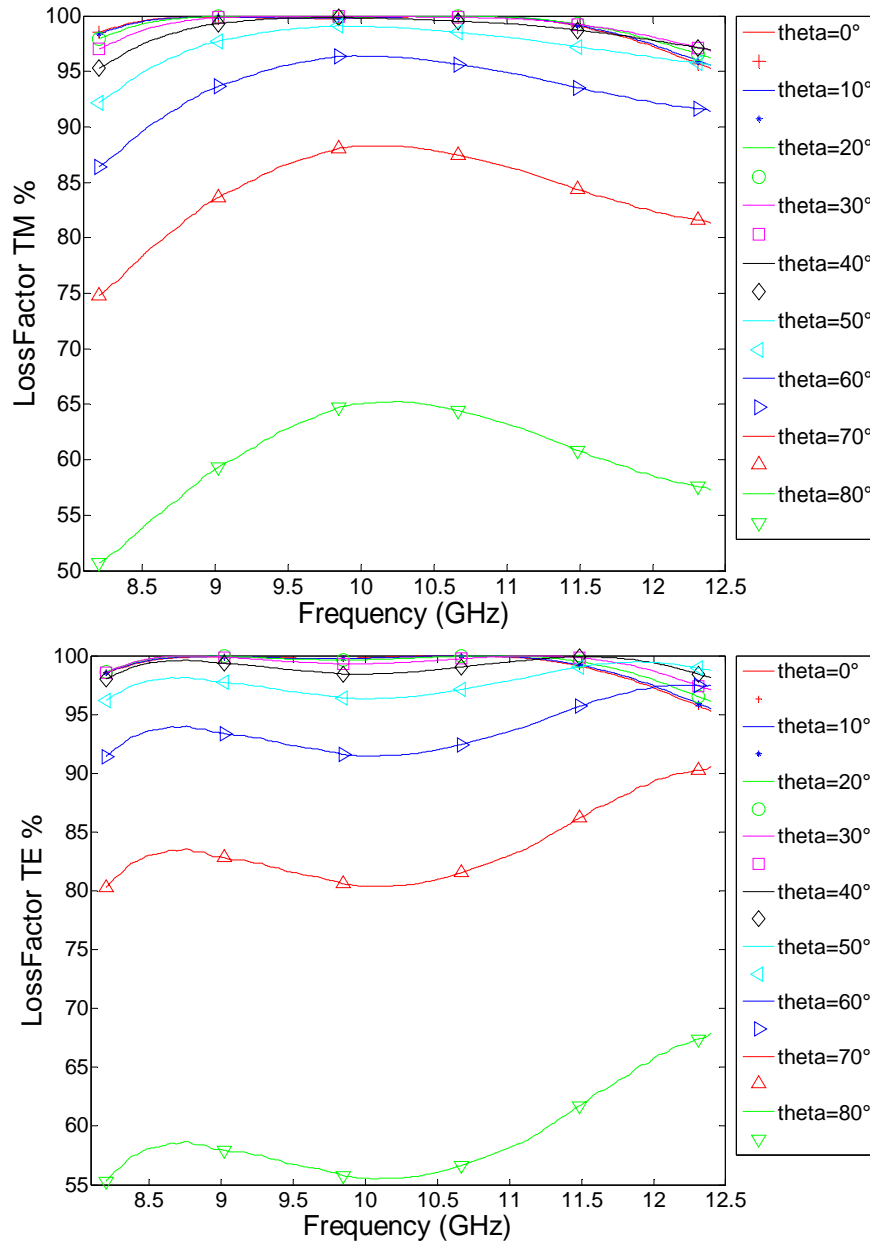


Figura 13: Loss Factor% TM / TE per la struttura RAM

Dalle figure, si può osservare che i coefficienti di riflessione sono sempre minori di -25 dB per gli angoli di incidenza normali e rimangono tali anche per angoli di incidenza fino a circa 40°. Con questi valori dei coefficienti di riflessione i corrispondenti Loss Factor % sono vicini al 100 %. Questi valori sono rilevanti per un sistema RAM in quanto implicano che l'energia riflessa nella direzione del RADAR è talmente bassa che essa viene quasi tutta assorbita in un range angolare -40°÷+40° nella maggior parte della banda di frequenze considerata.

Un'altra particolarità è che vi sono angoli per i quali il coefficiente di riflessione è addirittura minore di quello che si ha con incidenza normale (0°). Questi angoli sono gli angoli di Brewster per il sistema multistrato mostrato.

8. Risultati RAM con Particle Swarm Optimization e DB misure dei materiali banda-X

In analogia a quanto ottenuto precedentemente con l'algorithmo genetico si riportano i principali risultati ottenuti con questo nuovo metodo di ricerca delle soluzioni. Il motivo per cui sono state eseguite simulazioni con algoritmi differenti è per verificare se entrambi i metodi convergono alle medesime soluzioni o a soluzioni in ogni caso simili tra loro. Questo risultato è stato ottenuto confermando che la struttura RAM progettata è la migliore ottenibile con il DB di materiali a disposizione nella banda di frequenze considerata. Si riportano i principali risultati relativi solo all'angolo di incidenza normale.

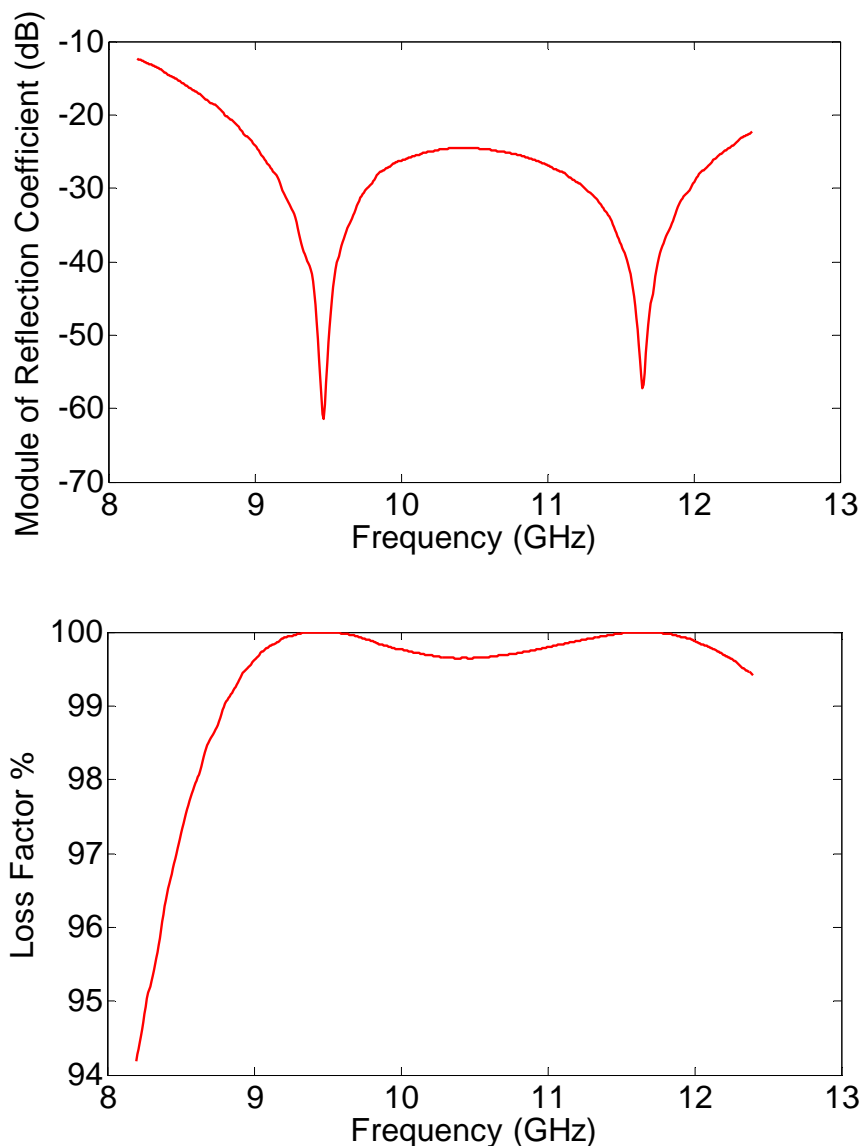


Figura 14: Coefficiente di riflessione e Loss Factor % della struttura RAM progettata ed ottimizzata con algoritmo Particle Swarm Optimization.

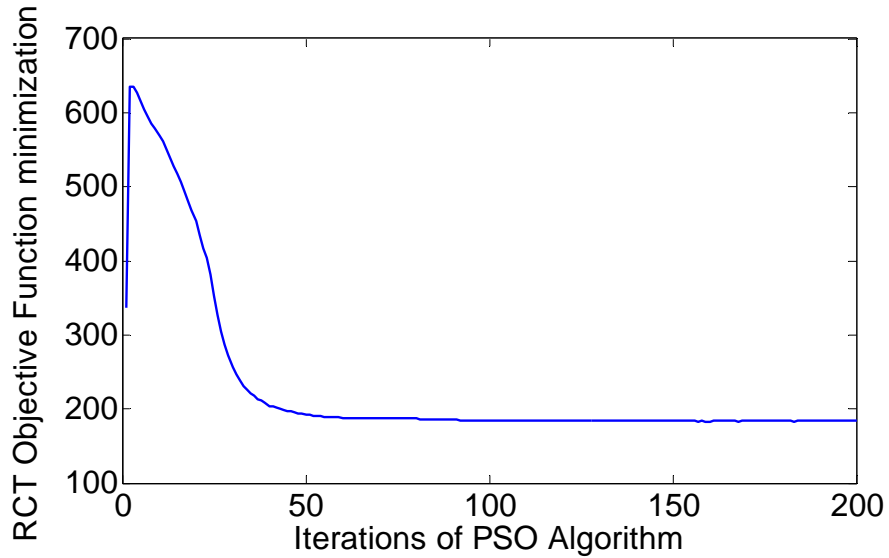


Figura 15: convergenza alla soluzione migliore con il metodo Particle Swarm Optimization.

Lo spessore della struttura RAM ottenuta con il PSO varia di mezzo millimetro in meno rispetto a quella ottenuta con l'algoritmo genetico, pertanto possono a tutti gli effetti considerarsi uguali.

Le lievi differenze tra i picchi di frequenza sono dovute al fatto che nel primo caso l'ottimizzazione richiesta al Genetico era la minimizzazione del coefficiente di riflessione per tutti i possibili angoli di incidenza tra 0 e 80 ° mentre nel caso di ottimizzazione con il PSO si è chiesto di ottimizzare la struttura RAM solo per l'angolo di incidenza normale cioè nonostante i risultati corrispondenti agli angoli di incidenza normali sono tra loro simili.

9. RAM ottenuto da materiali Ideali proposti dal metodo di ottimizzazione con Algoritmo Genetico

In questa sezione si riporta come esempio una struttura RAM progettata ed ottimizzata con Algoritmo Genetico che a differenza dei casi precedenti non utilizza un DB di materiali ma genera esso stesso i parametri dielettrici (permettività elettrica e permeabilità magnetica) dei materiali di ciascun layer affinché venga minimizzato il coefficiente di riflessione e lo spessore della struttura. Al pari dei casi precedenti esiste un parametro di ingresso il quale permette di dare maggiore importanza al thickness oppure al coefficiente di riflessione da minimizzare durante l'ottimizzazione. Seguono due esempi in cui cambiando il valore di questo parametro si ottengono strutture differenti.

ESEMPIO n°1

Il primo esempio di struttura che viene riportato ha uno spessore di 3 mm, la banda di frequenze che si è richiesto di ottimizzare è tra 6 e 18 GHz in modo da coprire la maggior parte delle frequenze RADAR. Si sono considerati materiali non ferromagnetici pertanto si considera solo la permettività elettrica ponendo la permeabilità magnetica relativa pari a 1. Il Genetico fornisce i seguenti materiali:

Layer	LA10	LA9	LA8	LA7	LA6	LA5	LA4	LA3	LA2	LA1	Tot
Thickness (mm)	0.7	0.7	0.4	0	0.1	0.3	0.6	0.1	0.1	0	3mm

Tabella 1: spessori dei vari layer, a partire da sinistra (LA10) dove incide il campo elettromagnetico.

	LA10	LA9	LA8	LA7	LA6	LA5	LA4	LA3	LA2	LA1
ϵ_r	13	0.7	8.3	8.3	1.7	24.7	41.4	43.4	38.8	38.8
ϵ_i	0.6	4.0	10.6	10.6	6.1	21.9	10.1	25.0	0.3	0.3

Tabella 2: Permettività elettriche generate dal Genetico per ciascun layer

	LA10	LA9	LA8	LA7	LA6	LA5	LA4	LA3	LA2	LA1
η (Ω)	104.4	185.8	102.6	102.6	149.1	65.5	57.7	53.2	60.4	60.4

Come si può notare dai valori delle impedenze generate, il layer di sinistra che si interfaccia con l'aria (LA10) ha una impedenza caratteristica più elevata rispetto a quella dei layer verso destra (LA1). Questo è appunto un sistema di variazione progressiva dell'impedenza associata allo spessore di ciascun layer che fa in modo che il campo elettromagnetico rimanga intrappolato all'interno della struttura ovvero non venga riflesso dal layer LA10 e venga successivamente assorbito e dissipato dai layer più interni fino ad arrivare ad LA1 per poi ritornare indietro di nuovo. Dove lo spessore del materiale è zero il genetico pone l'impedenza pari a quella dello strato precedente, questo assicura che non vi siano errori nel calcolo degli indici di rifrazione e degli angoli di rifrazione in uscita da ciascun layer.

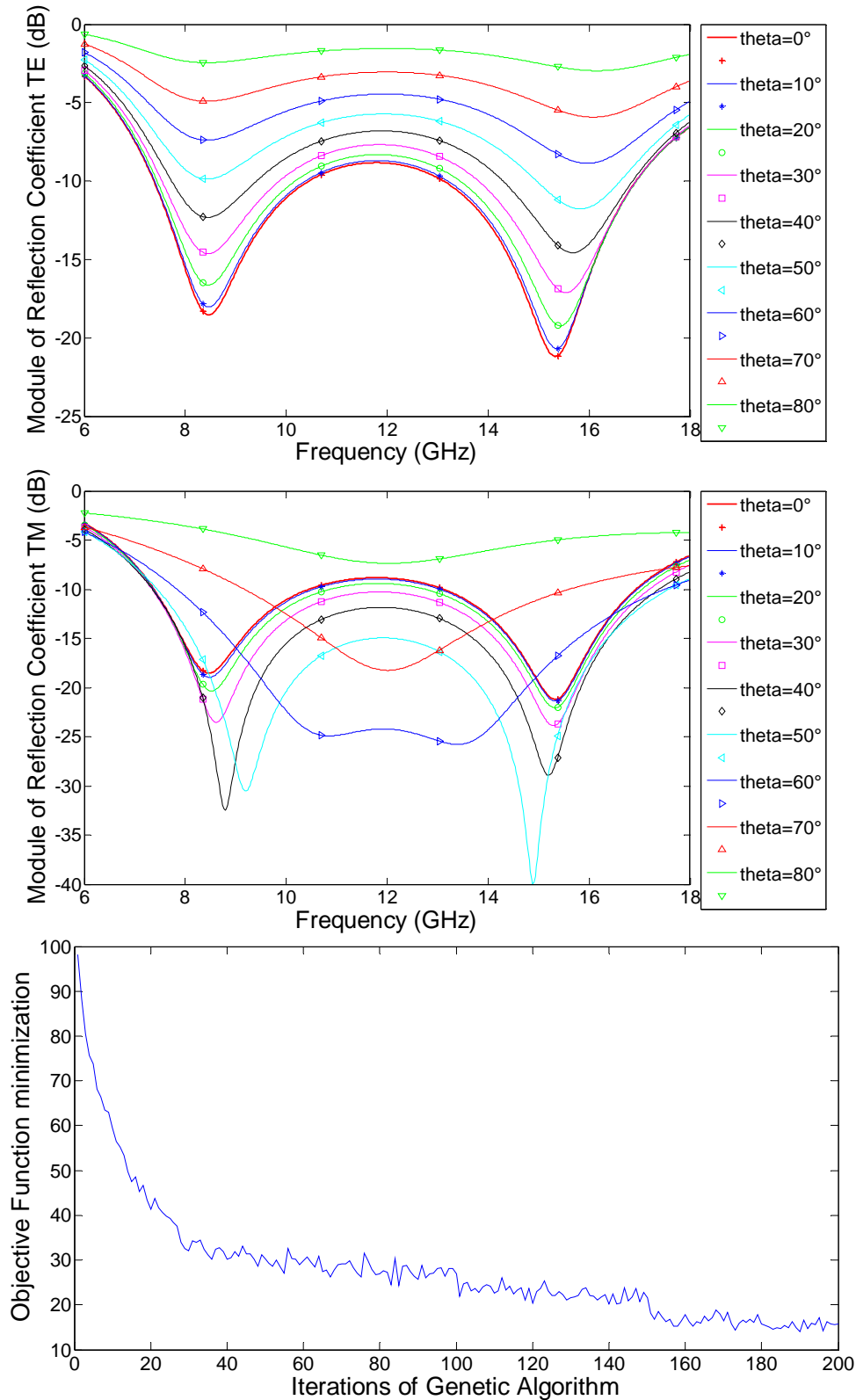


Figura 16: RAM 3mm; coefficiente di riflessione TE / TM e minimizzazione funzionale.

ESEMPIO n°2

Il secondo esempio di struttura che viene riportato ha uno spessore di 4.8 mm, la banda di frequenze che si è richiesto di ottimizzare è tra 6 e 18 GHz in modo da coprire la maggior parte delle frequenze RADAR.

Si sono considerati materiali non ferromagnetici pertanto si considera solo la permittività elettrica ponendo la permeabilità magnetica relativa pari a 1. Il Genetico fornisce i seguenti materiali:

Layer	LA10	LA9	LA8	LA7	LA6	LA5	LA4	LA3	LA2	LA1	Tot
Thickness (mm)	2.6	0.3	0.5	0.1	0.4	0	0.2	0.1	0.4	0.2	4.8mm

Tabella 3: spessori dei vari layer, a partire da sinistra (LA10) dove incide il campo elettromagnetico.

	LA10	LA9	LA8	LA7	LA6	LA5	LA4	LA3	LA2	LA1
ϵ_r	3.5	25.4	5.8	7.0	16.9	16.9	9.8	26.2	13.8	42.8
ϵ_i	0.06	5.34	11.0	8.4	25.3	25.3	29.3	22.3	21.0	23.2

Tabella 4: Permittività elettriche generate dal Genetico per ciascun layer

	LA10	LA9	LA8	LA7	LA6	LA5	LA4	LA3	LA2	LA1
η (Ω)	101.3	73.9	106.7	113.9	68.2	68.2	67.7	64.2	75.1	54.0

Tabella 5: Impedenze caratteristiche dei material di ciascun layer

Come si può notare dai valori delle impedenze generate, il layer di sinistra che si interfaccia con l'aria (LA10) ha una impedenza caratteristica più elevata rispetto a quella dei layer verso destra (LA1). Questo è appunto un sistema di variazione progressiva dell'impedenza associata allo spessore di ciascun layer che fa in modo che il campo elettromagnetico rimanga intrappolato all'interno della struttura ovvero non venga riflesso dal layer LA10 e venga successivamente assorbito e dissipato dai layer più interni fino ad arrivare ad LA1 per poi ritornare indietro di nuovo.

Dove lo spessore del materiale è zero il genetico pone l'impedenza pari a quella dello strato precedente, questo assicura che non vi siano errori nel calcolo degli indici di rifrazione e degli angoli di rifrazione in uscita da ciascun layer.

Nei grafici che seguono sono riportati i coefficienti di riflessione e i fattori di perdita per le polarizzazioni TE / TM. si può osservare che rispetto al caso precedente i valori di riflessioni sono minori e i Loss Factor % sono maggiori. questo è dovuto al fatto che lo spessore del materiale è leggermente maggiore.

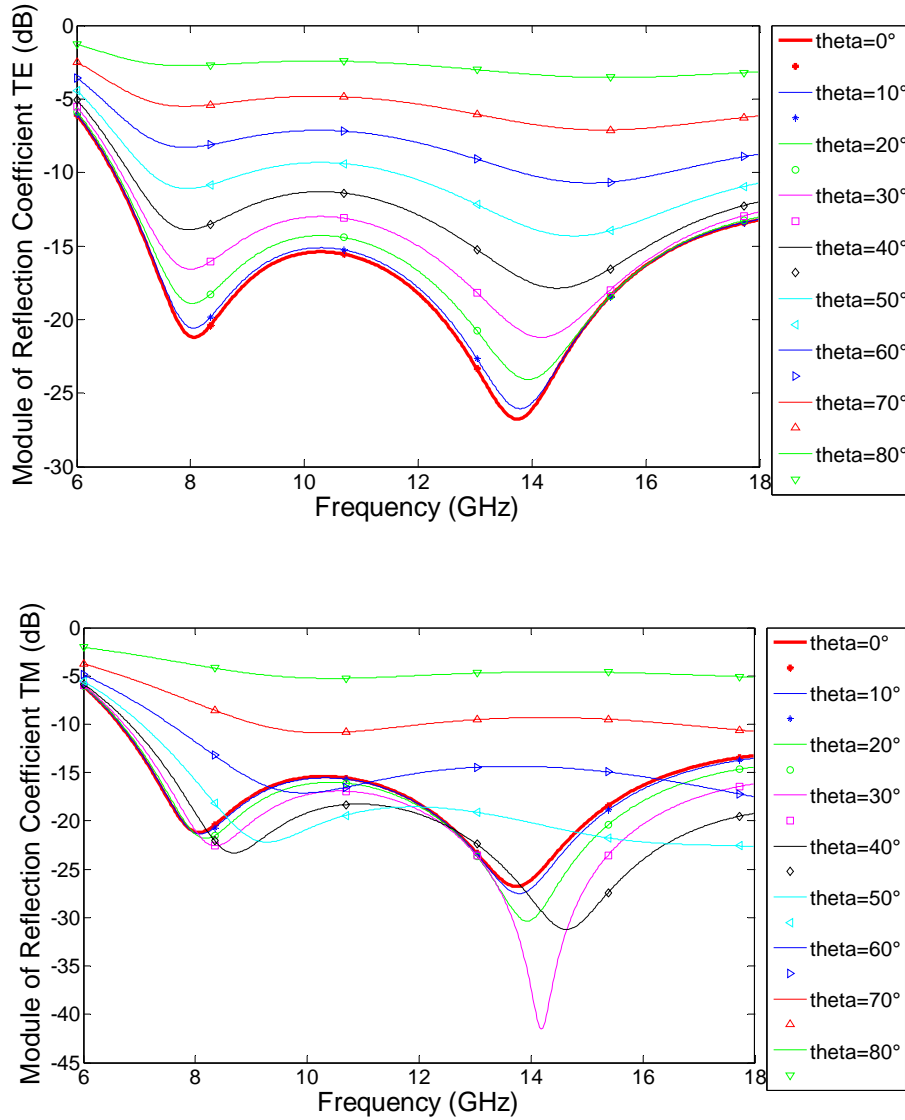


Figura 17: RAM 4.8mm; coefficiente di riflessione TE / TM e minimizzazione funzionale.

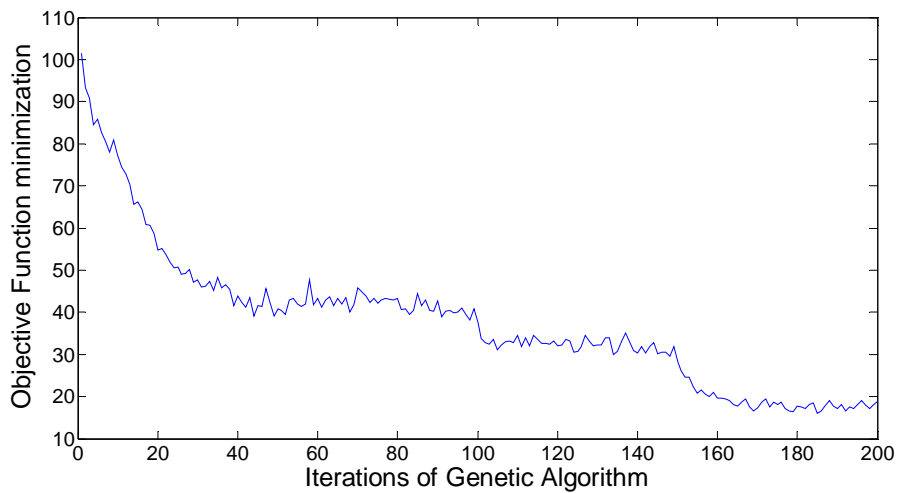
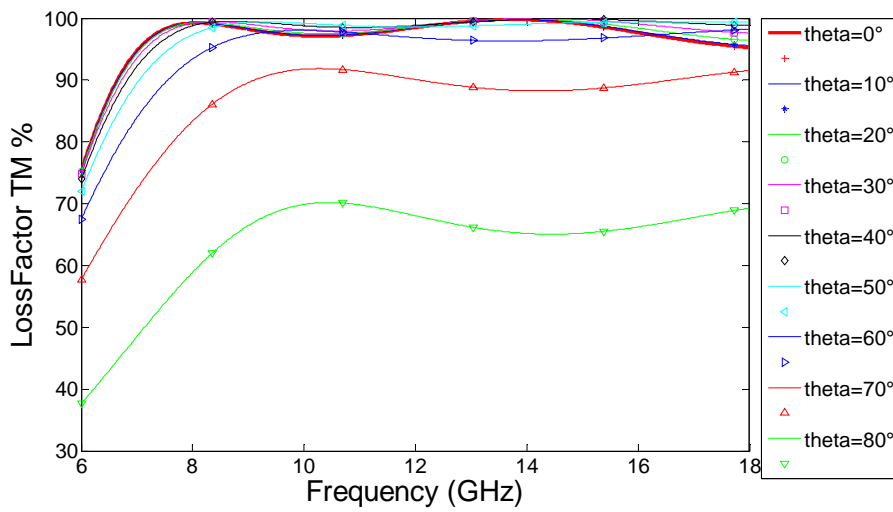
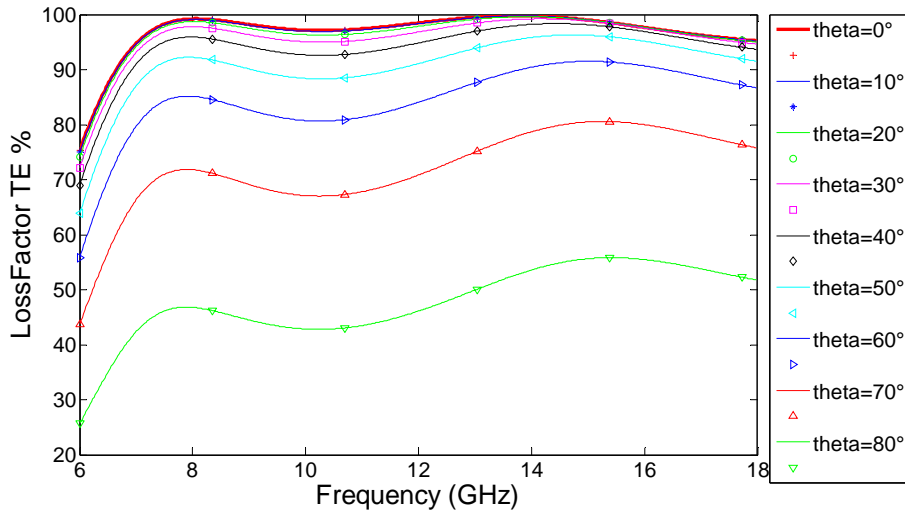


Figura 18: 4.8 mm Loss Factor % TE / TM e convergenza dell' algoritmo genetico

10. Conclusioni sistemi RAM

Nei paragrafi precedenti si sono mostrate differenti possibilità di arrivare alla formulazione di una struttura RAM. In particolare sono evidenziati due differenti approcci, il primo basato su algoritmi genetici e di particle swarm utilizzando misure di materiali nanostrutturati effettuate in laboratorio, il secondo basato su algoritmi genetici che decidono e propongono autonomamente le caratteristiche dielettriche dei materiali per ciascun layer della struttura. Al fine di non proporre valori dei dielettrici troppo distanti dalla realtà sono stati posti dei vincoli al programma dell'algoritmo genetico sui valori massimi che la permittività come parte reale ed immaginaria può assumere. allo stesso modo sono stati posti dei vincoli sullo spessore minimo di ciascun layer della struttura. In questa simulazione gli spessori di ogni layer proposti del genetico possono arrivare al minimo ad 1/10 di millimetro qualora vengano utilizzati.

I valori di coefficiente di riflessione in dB e di Loss Factor % sono in entrambi i casi citati interessanti e si aggirano mediamente tra i -15 ed i -25 dB e in corrispondenza i valori dei fattori di perdita Loss Factor % arrivano vicini al 100 % della potenza incidente. Si è visto che il maggiore assorbimento e la minore riflessione si hanno per angoli di incidenza tra -40° e $+40^\circ$ che è anche il range più critico per un sistema RADAR ed entro il quale la detection potrebbe essere possibile.

11. Sviluppi futuri nella ricerca sui sistemi RAM

Gli sviluppi futuri comprendono le seguenti attività di ricerca:

- misure con kit di calibrazione sui materiali in banda estesa da 6 a 18 GHz in modo da progettare ed ottimizzare una struttura RAM partendo da misure reali dei materiali nanostrutturati;
- Estensione del dB di misure da 16 a 64 materiali. questi sono i materiali che il genetico può utilizzare per la progettazione di una struttura RAM.
- Miglioramento del codice per permettere la selettività in frequenza ovvero dare maggiore importanza a determinate frequenze presenti nella banda.
- Ottimizzazione di strutture di assorbimento in una sola polarizzazione.