

Caratterizzazione di Finestre da Vuoto e Radome

L. Carbonaro L. Cresci, R. Nesti, D. Panella

INAF-Arcetri Astrophysical Observatory, Largo E. Fermi 5, I-50125 Florence (Italy)

Arcetri Technical Report N° 3/2011
Firenze 2011

Sommario

La presente nota descrive una procedura di caratterizzazione delle proprietà elettriche di materiali comunemente utilizzati a protezione di antenne (radome) o come finestre da vuoto in guida d'onda.

1 Modello circuitale delle finestre da vuoto e dei radome

In questo paragrafo si ricava un modello circuitale equivalente di una finestra da vuoto o di un radome. Tale modello è basato sul concetto di matrice di diffusione ed è particolarmente utile nel caso di ricevitori per la radioastronomia dove c'è interesse a caratterizzare accuratamente il rumore introdotto dai componenti passivi che precedono il primo amplificatore a bassa cifra di rumore nella catena ricevente.

Una volta note le proprietà elettriche di un materiale è possibile ricavare le tre grandezze fondamentali di frazione di potenza riflessa R , assorbita L e trasmessa G (rispettivamente riflessione, assorbimento e guadagno) che caratterizzano l'interazione di un'onda elettromagnetica attraverso uno strato di materiale con perdite, immerso in un mezzo omogeneo (nel nostro caso aria, praticamente equivalente allo spazio libero).

La conservazione della potenza impone, nel caso di sistemi passivi, che le tre grandezze sopra definite soddisfino alla seguente equazione:

$$R + L + G = 1 \quad (1)$$

L'effetto di uno strato di dielettrico con perdite inserito in una struttura guidante (spazio libero compreso) può essere separato in due contributi. Il primo di questi è associato alla riflessione per discontinuità dielettrica di tipo multistrato, come ad esempio aria-dielettrico-aria nel caso qui d'interesse di radome e finestre da vuoto. Tale contributo può essere caratterizzato da una matrice di diffusione del tipo

$$S_R = \begin{bmatrix} \sqrt{R} & \sqrt{1-R} \\ \sqrt{1-R} & \sqrt{R} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Il secondo contributo è dovuto alle perdite intrinseche della struttura guidante ed è caratterizzato da una matrice di diffusione del tipo

$$S_L = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{P} \\ \sqrt{P} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Il parametro P è associato all'attenuazione di potenza dovuta a perdite distribuite di varia natura ed è legato allo spessore t del tratto interessato secondo la legge esponenziale

$$P = e^{-2\alpha t} \quad (4)$$

Tramite il coefficiente di attenuazione α è possibile caratterizzare in generale ogni tipo di perdita. Esempi di pratico interesse sono le perdite nel dielettrico per isteresi dielettrica $\alpha(\tan\delta)$ o per conducibilità $\alpha(\sigma_d)$ (dielettrici con perdite), le perdite per conducibilità finita delle pareti $\alpha(\sigma)$ (cavo coassiale, guida rettangolare e circolare), per irraggiamento (fibre ottiche non schermate, dielettrici in aria come i radome). Nel caso di finestre da vuoto e radome le perdite nel dielettrico rappresentano il fenomeno dominante.

Le diverse grandezze sono legate dalle seguenti relazioni:

$$L = (1 - R)(1 - P) \quad (5)$$

$$G = (1 - R)P \quad (6)$$

Le caratteristiche diffusive complessive sono ottenute dalla cascata delle matrici S_R e S_L .

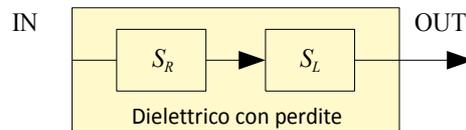


Fig. 1 - Modello circuitale di un'interfaccia dielettrica con perdite

Il modello di Fig. 1, basato sulla cascata di due blocchi associati l'uno alla riflessione e l'altro all'attenuazione rende possibile caratterizzare adeguatamente il rumore introdotto, nel presente caso discusso nella forma di temperatura equivalente di rumore.

2 Caratterizzazione della temperatura equivalente di rumore

Alla perdita per assorbimento e per riflessione possono essere associati contributi di rumore, che hanno una diretta influenza sulla sensibilità del ricevitore soprattutto quando, nella catena ricevente, il dispositivo è posto prima dell'amplificatore a bassa cifra di rumore; spesso si usa il concetto di temperatura equivalente di rumore per caratterizzare tale effetto. In un dispositivo passivo perfettamente adattato, o per il quale si possano trascurare gli effetti di riflessione, la temperatura equivalente di rumore è data in riferimento allo schema di Fig. 2. La temperatura equivalente riportata in ingresso è pari alla temperatura fisica T moltiplicata per il rapporto fra potenza assorbita e guadagno, ovvero ($A=G^{-1}$ è l'attenuazione):

$$T_E = T \frac{(1-G)}{G} = T(A-1) \quad (7)$$

La potenza termica assorbita dal dispositivo passivo è riemessa sotto forma di rumore termico.

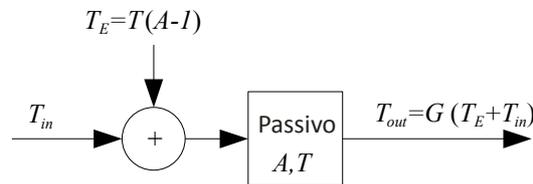


Fig. 2 – Modello di temperatura equivalente di rumore di un dispositivo passivo adattato

In generale un dispositivo passivo è non adattato, ovvero riflette parte della potenza su di esso incidente. In questo caso il termine di attenuazione $A=G^{-1}$ è costituito da due fattori (6): un primo, A_R , associato alla perdita per riflessione

$$A_R = (1-R)^{-1} \quad (8)$$

un secondo, A_L , associato alla perdita per assorbimento.

$$A_L = P^{-1} \quad (9)$$

Per caratterizzare anche questo effetto consideriamo il modello di Fig. 3. Analogamente al caso di passivo adattato, la temperatura in uscita ha due contributi: un primo dato dalla temperatura in ingresso moltiplicata per il guadagno ($G T_m$); un secondo dato dalla temperatura del passivo moltiplicata per la frazione di potenza assorbita ($L T$). Sempre analogamente al caso di passivo adattato, il secondo contributo è riportato in ingresso alla parte adattata della cascata (S_L) ed è dato dalla temperatura fisica T moltiplicata per il rapporto fra potenza da questo assorbita $(1-P)(1-R)$ ed il suo guadagno P (Fig. 3).

$$T_L = T A L (1-R) = T \frac{(1-P)(1-R)}{P} \quad (10)$$

Nel caso in cui il passivo riflette parte della potenza incidente, un terzo contributo deve essere considerato. Tale contributo è legato al rumore che il passivo riflette dalla parte del ricevitore ed in generale non è di facile

caratterizzazione dovendosi considerare ogni possibile percorso per cui un arbitrario punto sorgente di rumore trasferisce potenza al ricevitore per riflessione dal passivo. Se la regione interessata ha temperatura uniforme T_0 allora tale contributo in termini di temperatura equivalente di rumore in uscita dal passivo non adattato risulta essere $R T_0$ (Fig. 3). Quest'ultima forma può essere usata sempre. In generale T_0 rappresenta una temperatura equivalente essa stessa che caratterizza come media la distribuzione di temperatura intorno al ricevitore.

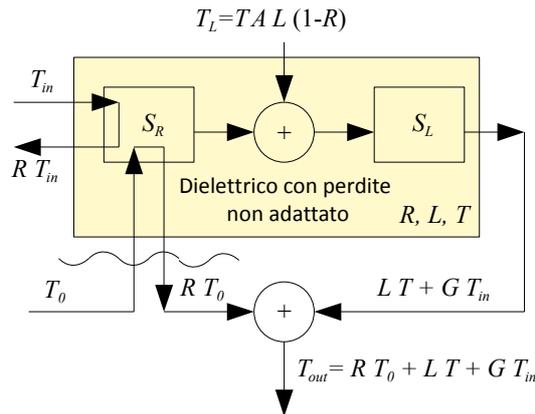


Fig. 3 – Temperatura di rumore di un dispositivo passivo non adattato

Nel caso ad esempio di finestra dielettrica all'interno di una guida d'onda e di un ricevitore raffreddato a temperatura T_0 , l'espressione $R T_0$ rappresenta accuratamente la temperatura equivalente per riflessione in uscita dal passivo. Nel caso di radome oltre alla temperatura fisica del ricevitore c'è da considerare anche la temperatura ambiente che può essere riflessa in ingresso al ricevitore, in maniera maggiore o minore a seconda della posizione reciproca feed-radome e della loro geometria. Entrambi i contributi termici (T_R , T_L) introdotti da un passivo con perdite e non adattato, possono essere riportati al suo ingresso, come mostrato in Fig. 4, e ciò consente di includere gli effetti di un tale dispositivo nella caratterizzazione G/T di un ricevitore. È importante osservare che i parametri R e G possono essere misurati con un analizzatore sia scalare sia vettoriale o dedotti dalla misura delle costante dielettrica relativa ϵ_r e della tangente di perdita $\tan\delta$ utilizzando la metodologia descritta in [1]. Essendo $A=G^{-1}$ tutti i restanti parametri possono essere ricavati utilizzando le equazioni [1], [6], [8], [9]

$$L = 1 - R - G \quad (11)$$

$$P = \frac{G}{(1-R)} \quad (12)$$

$$A_R = \frac{1}{(1-R)} \quad (13)$$

$$A_L = \frac{(1-R)}{G} \quad (14)$$

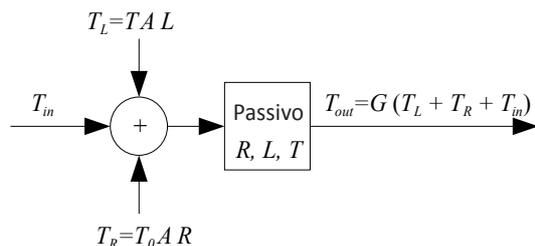


Fig. 4 – Modello di temperatura equivalente di rumore di un dispositivo passivo non adattato

Nota la temperatura T a cui è posto il dispositivo e la temperatura equivalente per riflessione T_0 è possibile valutare le temperature equivalenti per assorbimento e riflessione riportate in ingresso secondo le formule

$$T_L = T A L \quad (15)$$

$$T_R = T_0 A R \quad (16)$$

3 Misura delle proprietà elettriche dei materiali

Tramite una procedura in guida d'onda, è possibile determinare le caratteristiche intrinseche del materiale, come la costante dielettrica relativa ϵ_r e la tangente di perdita $\tan\delta$ [1].

Il materiale dielettrico da caratterizzare (DUT) è inserito all'interno di una guida d'onda e, nel caso lo spessore ridotto (tipicamente frazioni di mm) lo renda necessario, è supportato da due unità di materiale dielettrico dalle proprietà dielettriche note (in questo caso è stato utilizzato Styrodur). Sia il DUT che il materiale di supporto devono essere lavorati in maniera da avere una sezione uguale a quella della guida d'onda per evitare effetti spuri sulla misura dovuti a disomogeneità di riempimento della guida. Dalla misura dei parametri di riflessione e trasmissione eseguiti dapprima sulla guida vuota e successivamente sulla stessa guida riempita con il DUT e l'eventuale materiale di supporto consentono di ricavare le proprietà elettriche del DUT stesso. I dati salienti relativi all'applicazione di tale procedura sono riportati di seguito.

Caratteristiche della misura:

Strumento: Anritsu VNA

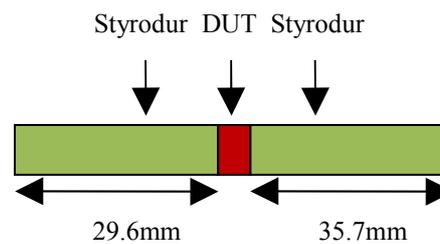
Banda: 18-26GHz

Caratteristiche guida d'onda:

Standard: WR42 (10.668x4.318)[mm]

Lunghezza: 66.3mm

Conducibilità elettrica pareti: $\sigma = 2.7 \cdot 10^{-6}$ [S/m]



Caratteristiche materiale supporto dielettrico:

Styrodur: $\epsilon_r = 1.05$; $\tan\delta = 3 \cdot 10^{-5}$

4 Test sulla temperatura equivalente di rumore di alcuni dielettrici

Sulla base della teoria sopra esposta sono stati caratterizzati alcuni dielettrici in termini di temperatura equivalente di rumore.

Dalla misura sulle proprietà elettriche è possibile stimare i parametri di scattering del dielettrico in spazio libero a 22GHz e le temperature equivalenti di rumore. I dati sono riportati in tabella I

TABELLA I

Materiale	Spessore [mm]	Proprietà elettriche		Coefficienti di scattering a 22GHz in spazio libero			Temperatura equivalente	
		ϵ_r	$\tan\delta \cdot 10^2$	R, A_R [dB]	L, A_L [dB]	A [dB]	T_R / T_0	T_L / T
Mylar	0.025	3	4.0	-55.5, $1.2 \cdot 10^{-5}$	-29.4, $5.0 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
Goretex	0.25	1.65	0.04	-28.6, $6.0 \cdot 10^{-3}$	-58.8, $5.7 \cdot 10^{-6}$	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
Kapton	0.025	3.4	6.0	-55.5, $1.2 \cdot 10^{-5}$	-27.4, $8.0 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Kapton (II)	0.125	3.4	3.0	-25.2, $1.3 \cdot 10^{-2}$	-22.0, $2.8 \cdot 10^{-2}$	$4.1 \cdot 10^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{-3}$	$6.4 \cdot 10^{-3}$
Telo Camion	0.58	2.75	0.7	-13.2, 0.21	-23.2, $2.2 \cdot 10^{-2}$	0.23	$5.0 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
Telo Camion (II)	0.58	2.72	1.2	-13.4, 0.20	-21.0, $3.7 \cdot 10^{-2}$	0.24	$4.8 \cdot 10^{-2}$	$8.5 \cdot 10^{-3}$
HR500	0.019	3.0	10.0	-29.6, $4.8 \cdot 10^{-3}$	-18.0, $6.9 \cdot 10^{-2}$	$7.4 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$

5 Riflettività radio del filtro infrarosso della finestra da vuoto del Multibeam

Sempre utilizzando il metodo descritto precedentemente è stata fatta una stima della riflettività a radiofrequenza del filtro di bloccaggio della radiazione infrarossa utilizzato nella finestra da vuoto del ricevitore Multibeam.

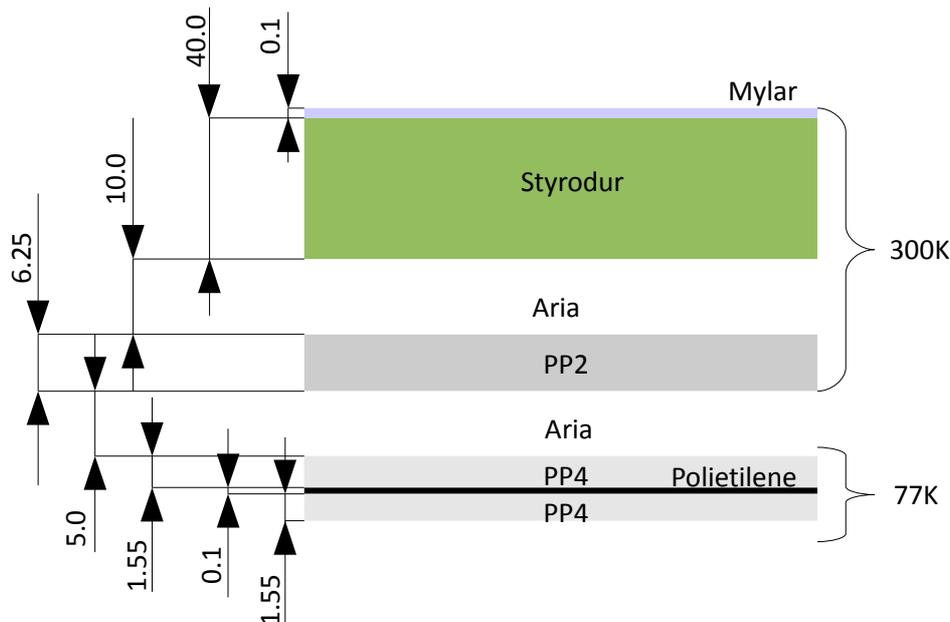


Fig. 5 – Schema (non in scala) della finestra Multibeam (dimensioni mm)

Uno schema qualitativo della finestra da vuoto del Multibeam è riportata in Fig. 5. Sopra ciascuno dei sette feed dell'array sono posti diversi strati di materiale dielettrico aventi appunto la funzione di schermo infrarosso, con in più il Mylar che opera come finestra da vuoto.

Gli spessori dei diversi materiali hanno un impatto determinante sulla riflettività a radiofrequenza dello schermo, non direttamente interessata invece dalla loro temperatura operativa.

Per prima cosa sono state fatte le misure per stimare le proprietà elettriche dei diversi materiali, i cui dati sono riportati nella tabella II.

TABELLA II

Materiale	Spessore [mm]	Proprietà elettriche	
		ϵ_r	$\tan\delta \cdot 10^2$
Mylar(2)	0.1	3.5	8.0
Styrodur(2), 3035CS, 5000CS	10	1.045, 1.050, 1.070	0.007, 0.003, 0.003
PP2	6.25	1.04	0.02
Aria	5	~ 1	~ 0
PP4	1.55	1.08	0.1
Polietilene	0.1	2.24	0.2

Si noti che i materiali indicati con (2) hanno caratteristiche leggermente diverse dagli analoghi in tabella I; ciò è dovuto in parte al fatto che i campioni di materiale sono diversi, in parte alle tolleranze di misura.

Nelle Figg. 6, 7 sono riportati i risultati delle simulazioni della riflettività della catena di dielettrici costituenti la finestra da vuoto – schermo infrarosso. Si stima (Fig. 6) un coefficiente di riflessione sempre inferiore a -17dB su tutta la banda ed un coefficiente di assorbimento compreso fra -18.7dB e -20.2dB.

Dai dati in tabella II si può risalire all'attenuazione del singolo materiale utilizzando la formula:

$$\alpha [dB] = -8.686 \frac{\pi f}{c} \tan \delta \sqrt{\epsilon_r} x \quad (17)$$

dove f è la frequenza, c la velocità della luce nel vuoto ed x lo spessore del materiale.

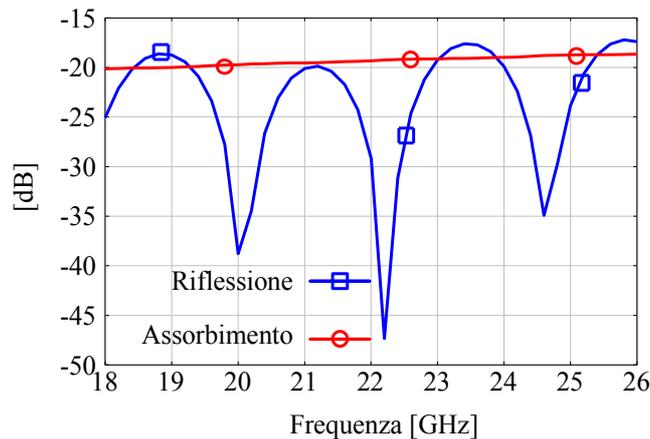


Fig. 6 – Stima del coefficiente di riflessione e di assorbimento della finestra Multibeam

La stima del coefficiente di trasmissione (Fig. 7) è sempre superiore a -0.14dB su tutta la banda.

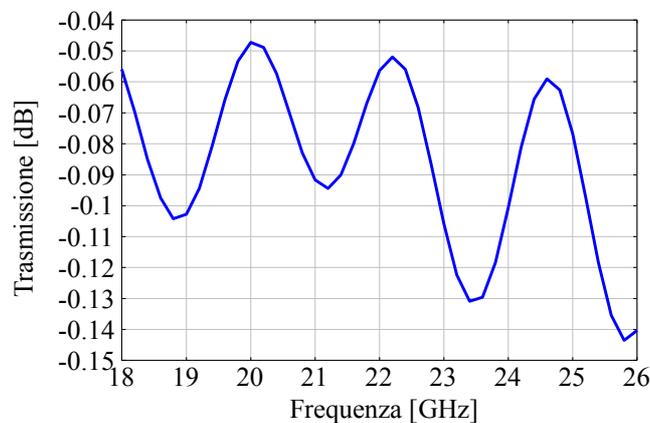


Fig. 7 – Stima del coefficiente di trasmissione della finestra Multibeam

6 Studio del rinforzo della finestra da vuoto

Dopo un periodo di esercizio di circa un anno, la finestra di Styrodur ha mostrato dei cedimenti in prossimità del bordo dei fori circolari di percorso ottico sulla piastra di metallica.

Si è deciso di studiare ipotesi di rinforzo (Soluzione A) della finestra nel tentativo di allungarne la vita (media). Una prima ipotesi è l'utilizzo di un ulteriore strato di Mylar (0.1mm di spessore) come rinforzo della struttura in prossimità della zona critica (interfaccia Aria Styrodur) e si ottiene la finestra multistrato schematizzata in Fig. 8. Una seconda ipotesi (Soluzione B) è l'utilizzo di una finestra di Styrodur più spessa, come schematizzato nella Fig. 9.

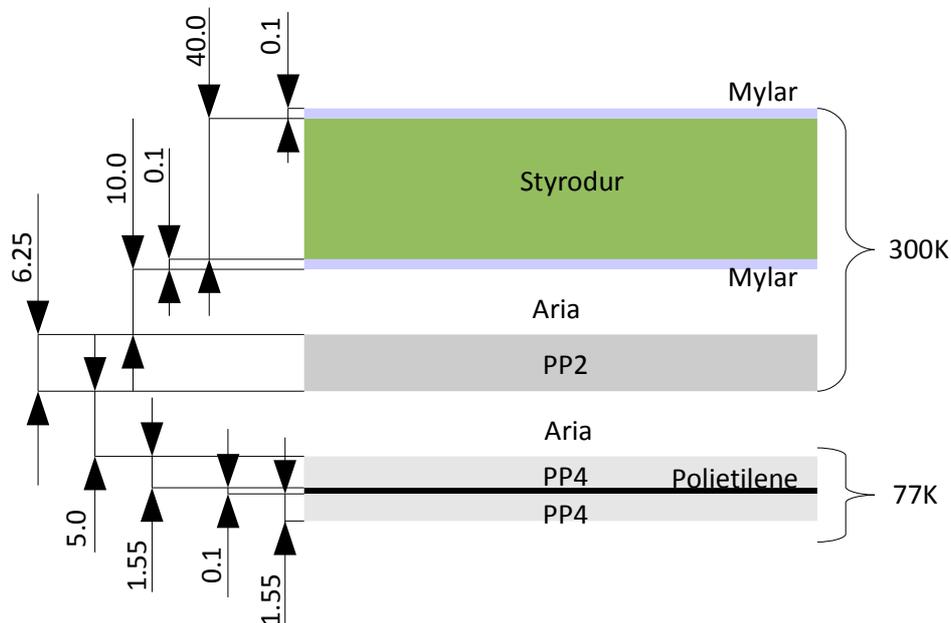


Fig. 8 – Schema (non in scala) di un ipotesi di rinforzo (Soluzione A) della finestra Multibeam (dim. mm)

Una stima della degradazione in termini di riflessione, trasmissione, attenuazione e temperatura di rumore equivalente introdotta nel ricevitore, ottenuta mediante simulazione elettromagnetica, è riportata nelle Figg. 10-12 e confrontata con le prestazioni della finestra base (Soluzione 0) di Fig. 5.

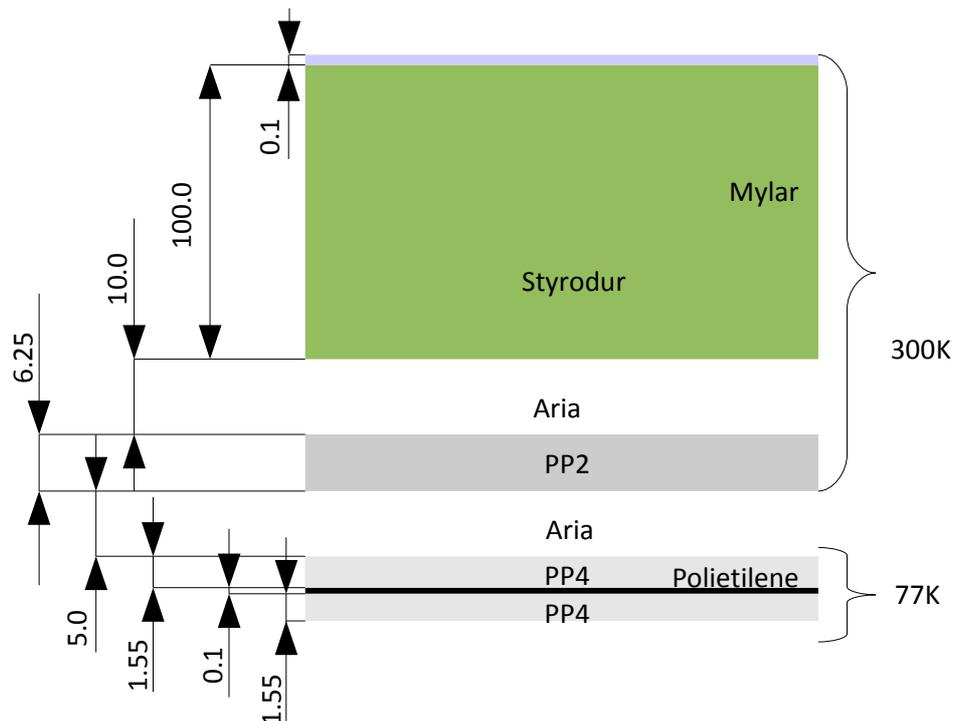


Fig. 9 – Schema (non in scala) di un ipotesi di rinforzo (Soluzione B) della finestra Multibeam (dim. mm)

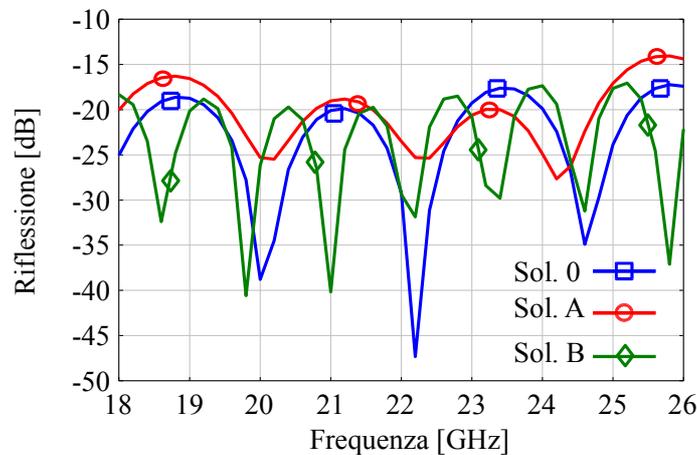


Fig. 10 – Stima del coefficiente di riflessione della finestra Multibeam: attuale e con ipotesi di rinforzo

La Fig. 10 mostra il confronto fra le tre finestre per quanto riguarda la potenza riflessa, legata alla discontinuità dielettrica prodotta dal multistrato con i diversi materiali. La parte di potenza trasmessa è messa a confronto nella Fig. 11.

Nella successiva Fig. 12 è riportato il confronto in termini di potenza assorbita dai tre tipi di finestra. L'assorbimento è ritenuto essere l'effetto dominante nella generazione del rumore da parte della finestra. Nella scala di sinistra è riportata la temperatura di rumore prodotta dalla finestra (in uscita verso il feed) ed associata all'assorbimento secondo la semplice formula (ricavata dalla (15)):

$$T_L^{out} = G(T A L) = T L \quad (18)$$

in cui L è l'assorbimento e si è assunta una temperatura fisica di $T = 300K$.

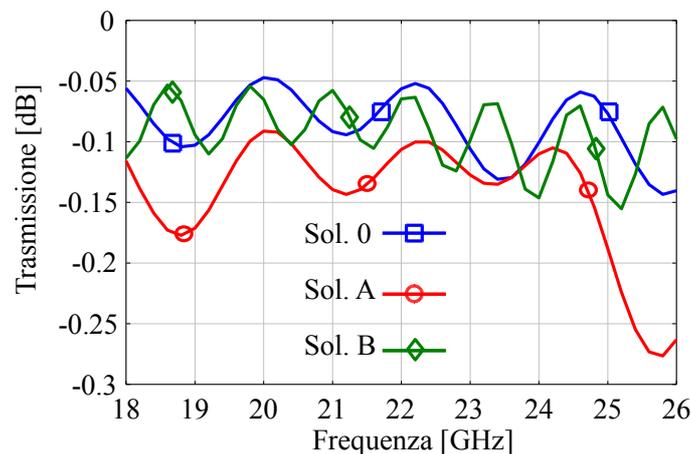


Fig. 11 – Stima del coefficiente di trasmissione della finestra Multibeam: attuale e con ipotesi di rinforzo

Nelle seguenti Figg. 13-15 si mostra il confronto fra la finestra originale (Sol. 0) con due ipotesi di Styrodur (rispettivamente 3035CS e 5000CS) utilizzati nella configurazione Sol. B di Fig. 9. Si può notare che non c'è sostanziale differenza fra le curve. Si noti invece che, rispetto alla Sol. B delle Figg. 10-12, la differenza del parametro $\tan \delta$ (vedi Tabella II) produce una sensibile differenza, apprezzabile soprattutto nel coefficiente di assorbimento (Fig. 12, 15) per un valore di circa 0.5dB.

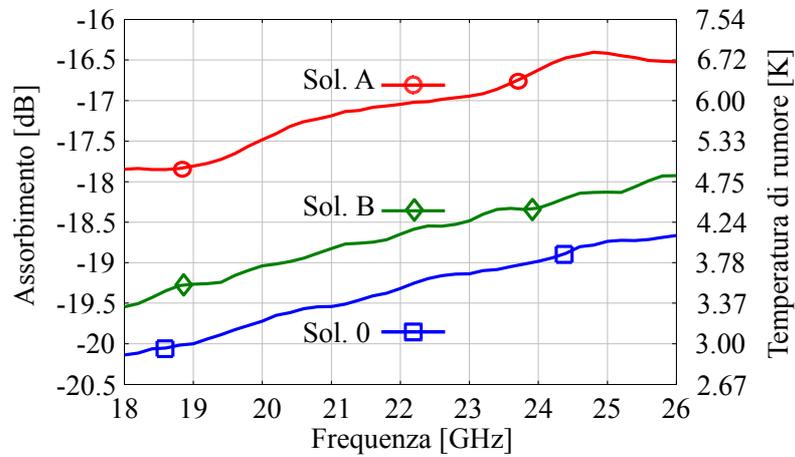


Fig. 12 – Stima dell'assorbimento (scala di sinistra) e della temperatura di rumore (scala di destra) della finestra Multibeam: attuale e con ipotesi di rinforzo

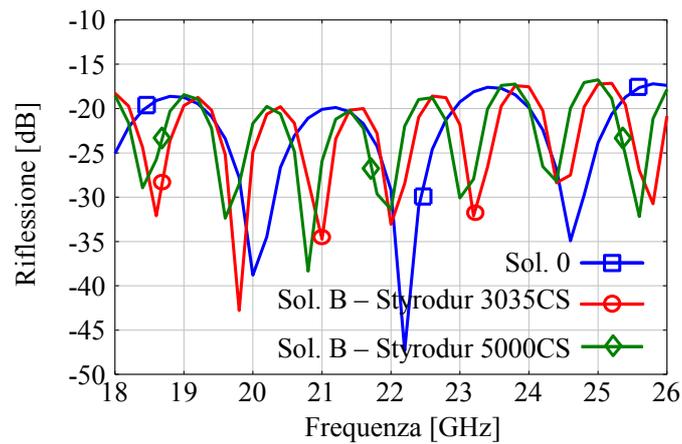


Fig. 13 – Stima del coefficiente di riflessione della finestra Multibeam: attuale e con ipotesi di rinforzo

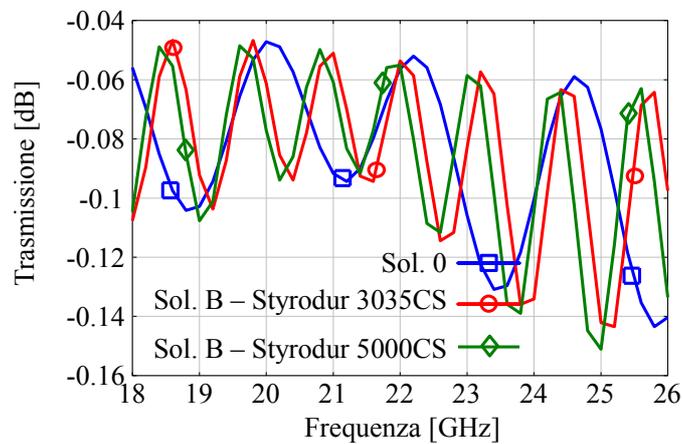


Fig. 14 – Stima del coefficiente di trasmissione della finestra Multibeam: attuale e con ipotesi di rinforzo

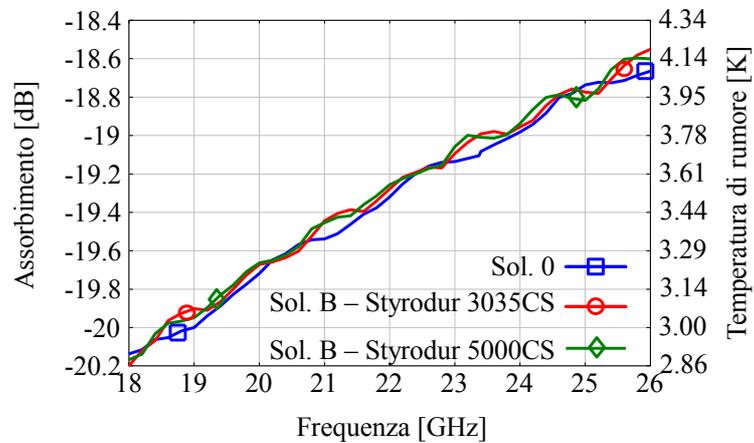


Fig. 15 – Stima dell'assorbimento (scala di sinistra) e della temperatura di rumore (scala di destra) della finestra Multibeam: attuale e con ipotesi di rinforzo

Bibliografia

- [1] R. Nesti, V. Natale, *Notes On Dielectric Characterization In Waveguide*, Nota Tecnica, Giugno 2005