

Temperatura di Rumore : Definizioni, Equazioni, ed Esempi

Sergio Mariotti

Rapporto Interno IRA 310 / 2001

Revisori: Monari J., Orfei A., Pisanu T.

Indice:

| | |
|---|----|
| 1. Lista Dei Simboli..... | 3 |
| 2. Potenze e Temperature Di Rumore..... | 4 |
| 2.1. Potenza e Temperatura Di Rumore Disponibili..... | 4 |
| 2.2. Potenza e Temperatura Di Rumore Effettiva..... | 5 |
| 2.3. Temperatura Retro Riflessa..... | 5 |
| 2.4. Temperatura Equivalente di Rumore di Ingresso..... | 6 |
| 2.5. T_{av} , T_{ne} , $T_{BACK-REF}$: approccio di Fisica Ottica..... | 9 |
| 2.6. Effetti Planckiani – Temperatura di Brillanza | 10 |
| 2.7. Cautele..... | 11 |
| 3. Attenuatore in Serie al Generatore Di Rumore | 12 |
| 3.1. Esempio: Attenuatore in serie a Generatore di Rumore..... | 13 |
| 3.2. Esempio: Accoppiatore Direzionale in serie a Generatore di Rumore | 15 |
| 3.3. Esempio: Cambiare il valore della Marca Di Rumore | 17 |
| 4. Temperatura di Rumore di un Attenuatore..... | 19 |
| 4.1. Esempio: Calcolo della Temperatura di Rumore Equivalente all'ingresso di un LNA nota la T_{SYS} | 20 |
| 4.2. Temperatura equivalente di rumore di un LNA alimentato da più linee in ingresso (Tipo “ Alberi Di Natale” Croce Del Nord)..... | 20 |
| 5. Reti in cascata | 23 |
| 5.1. $T_{Cascade}$: Un fattore di qualità per la scelta di HEMT..... | 23 |
| 5.2. Esempio: calcolare T_e di una cascata di reti..... | 24 |
| 6. Linee guida per realizzare Corpi Neri raffreddati con coni assorbitori (Eccosorb®)..... | 25 |
| 7. Bibliografia e Riferimenti | 28 |

Nota:

Questo Rapporto Interno è una review delle definizioni, suggerimenti pratici, e delle equazioni maggiormente utilizzate in pratica durante le misure di rumore. È rivolto principalmente al personale tecnologo in formazione.

1. Lista Dei Simboli

La simbologia adottata segue uno schema del tipo **XX_{yy}ZZ**

Dove:

XX Identifica la grandezza

yy (Indice minuscolo). Identifica la tipologia alla quale la grandezza si riferisce

zz (Indice maiuscolo). Identifica il dispositivo al quale la grandezza si riferisce

Simboli:

| | | |
|----------|--|----------------------|
| T | Temperatura di rumore elettrico | [°K] |
| T | Temperatura fisica | [°K] |
| Γ | Coefficiente di riflessione (numero complesso) | [Γ , ∠ Γ] |
| P | Potenza | [W] |
| G | Guadagno | [adimensionale] [dB] |
| L | Attenuazione | [adimensionale] [dB] |
| Z | Impedenza | [Ω] |

Indici minuscoli:

| | |
|---------------|--|
| av | Available, disponibile, si applica a Guadagno, Temperatura |
| ne | Effettiva, si applica a Temperatura |
| e | Equivalente di Ingresso |
| diss | dissipato, si applica a Guadagno |
| (adim) | Grandezza adimensionale in numeri cioè non in dB |
| (dB) | Grandezza espressa in dB |

Indici maiuscoli:

| | |
|------------|---|
| 1 | Se indice di T o Γ, relativo alla porta 1 (generalmente Input) Se indice di G, situazione con guadagno G ₁ |
| I | Relativo alla porta INPUT |
| 2 | Se indice di T o Γ, relativo alla porta 2 (generalmente Output) Se indice di G, situazione con guadagno G ₂ |
| O | Relativo alla porta OUTPUT |
| L | Relativo a Load, carico |
| S | Relativo a Source, generatore |
| NS | Noise Source, Generatore di Rumore |
| B | Brillanza |
| SYS | Sistema |
| RIC | Ricevitore |
| LP | Linea di trasmissione (attenuante) |
| ATT | Attenuatore |

Esempi:

T_{avO} Temperatura di rumore disponibile in uscita

Γ_{NS} Coefficiente di riflessione del generatore di rumore

2. Potenze e Temperature Di Rumore

2.1. Potenza e Temperatura Di Rumore Disponibili

Available Noise Power, Available Noise Temperature

La Definizione di **Potenza di Rumore disponibile** generata da una sorgente elettrica, data da Kraus [1] pag. 259, è:

Potenza di rumore che la sorgente invia (*exchange*) ad una rete (*network*) lineare, senza rumore, e che abbia Impedenza d'ingresso uguale al complesso coniugato dell'impedenza della sorgente ($Z_L=Z_S^*$)

La medesima dicitura, ma più completa, si incontra in [2] dove viene precisato che la **densità spettrale di potenza deve essere costante** (il rumore deve essere bianco).

La definizione di **Temperatura di Rumore disponibile** T_{av} (*Available Noise Temperature*) è legata alla Potenza di Rumore disponibile (P_{av}) dalla costante di Boltzmann K e dalla Banda Passante B .

$$T_{av} = P_{av}/(K \cdot B) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Note:

- Potenza di Rumore disponibile è una Grandezza fornita e prelevabile dai morsetti di uscita di una rete.
- La Temperatura di Rumore Disponibile non ha nulla a che vedere con la Temperatura Equivalente di Ingresso che solitamente, nel gergo comune presso il Radiotelescopio viene chiamata "temperatura di rumore", causando confusione di termini.
- È particolarmente scomodo avere a disposizione reti, o generici dispositivi (carichi, amplificatori, mixer ecc.) che abbiano il coefficiente di riflessione all'ingresso uguale al complesso coniugato del coefficiente di riflessione d'uscita dello stadio precedente ($\Gamma_{IN} = \Gamma_{OUT}^*$).
- Nella pratica è comodo ridurre al minimo i coefficienti di riflessione ($\Gamma_{IN} \approx 0, \Gamma_{OUT} \approx 0$), che per gli usuali circuiti coassiali significa che $Z_{IN} \approx 50 \Omega$ e che $Z_{OUT} \approx 50 \Omega$.
- Tale operazione viene solitamente eseguita sia inserendo un isolatore a ferrite e/o un Attenuatore (*Pad*) di basso valore (3 – 6 dB) in linea, sia attrezzandosi con dispositivi (Horn, LNA, Mixers) particolarmente adattati (*matched*).
- La Temperatura di Rumore disponibile (T_{av}) è una caratteristica propria del generatore di rumore e non varia con l'impedenza o la temperatura del carico (es. LNA) che va ad alimentare.
- Nei carichi adattati realizzati in Eccosorb[®], La Temperatura di Rumore disponibile è la temperatura di brillantezza (vedi par. 1.5) del carico stesso.

2.2. Potenza e Temperatura Di Rumore Effettiva

Effective Noise Power, Effective Noise Temperature

La **Temperatura di Rumore Effettiva** è definita in [2] come:

la temperatura prodotta dalla potenza che emerge da un generatore quando questo è chiuso su di un carico non-riflettente e non-emettente.

$$T_{ne} = T_{av} \cdot (1 - |\Gamma_S|^2) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Notare che:

- il carico non-emettente equivale alla “rete senza rumore” anche nella definizione precedente, ma è bene considerare che tale carico non esiste. Infatti tutti i carichi trovandosi ad una temperatura fisica $\neq 0$ °K, emetteranno una temperatura di rumore pari almeno alla propria temperatura fisica.
- Il carico non-riflettente, ovvero adattato, è una condizione sicuramente più comoda e realizzabile del carico complesso coniugato. Pertanto l’uso della Temperatura di Rumore effettiva (T_{ne}) nelle misure e negli algoritmi di calcolo rende le operazioni più semplici e più comode.
- T_{ne} è una caratteristica propria del generatore di rumore quindi non dipende dal carico sul quale è chiuso.
- Nei carichi adattati realizzati in Eccosorb[®], La Temperatura di Rumore effettiva è la temperatura di che effettivamente viene inviata al DUT (a meno dell’effetto di retro riflessione dal DUT stesso che viene comunemente trascurato – vedi par. 1.3), comprende quindi gli effetti di riflessione del carico.
- Nei generatori di rumore a stato solido, T_{ne} è il valore di temperatura di targa (spesso espresso in ENR)
- T_{ne} è il valore che solitamente viene adottato nelle misure e nei calcoli

2.3. Temperatura Retro Riflessa

Comunemente si suole considerare che la temperatura generata da una sorgente di rumore (noise source) sia una caratteristica propria della sorgente stessa ed indipendente dal circuito nel quale tale NS è collegata.

In realtà la temperatura di rumore applicata dal generatore di rumore ai morsetti di ingresso di un LNA dovrà tenere in conto, per effetto delle riflessioni multiple, anche della temperatura di rumore generata alla porta d’ingresso dell’LNA..

Supponendo che il Γ_{IN} dell’LNA sia limitato, ovvero le riflessioni multiple siano trascurabili, (si può ottenere questa condizione con un isolatore a ferrite in ingresso), si possono trascurare i termini a prodotto, quindi la temperatura applicata all’ingresso vale:

$$T_{APP} = T_{av} \cdot (1 - |\Gamma_{NS}|^2) + |\Gamma_{NS}|^2 \cdot T_{BACK-REF} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

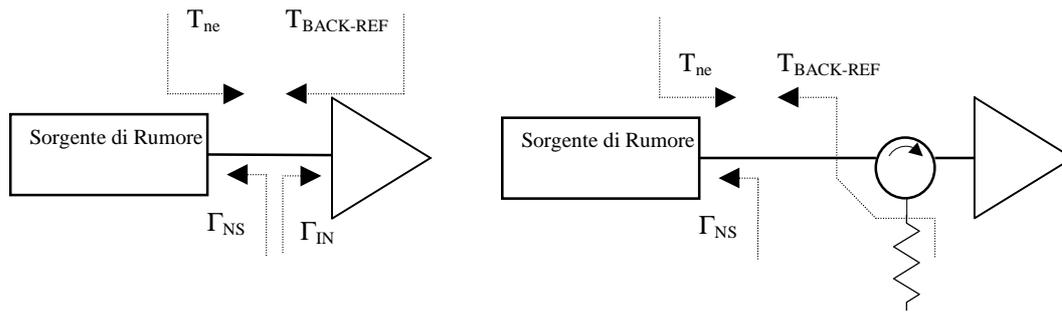


Figura 2.1 Temperatura Retro Riflessa dal Preamplificatore

La temperatura retro riflessa $T_{\text{BACK-REF}}$ (back reflected) è la temperatura dell'elemento che genera rumore percorrendo la linea verso il NS (percorso a ritroso). Quindi, $T_{\text{BACK-REF}} = T_{\text{AMB}}$ nel caso sia montato un isolatore a ferrite fra NS e LNA. Quando invece in NS è collegato direttamente all'LNA, il valore $T_{\text{BACK-REF}}$ assume un valore discusso, secondo alcune fonti assume il valore T_{AMB} , secondo altre fonti assume il valore T_e .

Normalmente il secondo addendo della (Eq. 2.3) è trascurabile, ma in casi particolari, con T_e particolarmente alte, e/o T_{ne} particolarmente basse (misure con carico raffreddato 77° K o 4.2° K), è bene tenere in considerazione tale effetto.

Notare che:

- Quando si misurano T_e di DUT senza un circolatore in ingresso, non è possibile utilizzare il valore $T_{\text{BACK-REF}}$ in quanto anche tale valore, dipendendo da T_e , è di fatto essa stessa un'incognita.

2.4. Temperatura Equivalente di Rumore di Ingresso *Input Noise Temperature*

La temperatura equivalente di ingresso (T_e) di un LNA (di una qualunque rete lineare), è la temperatura assegnata all'impedenza d'ingresso di una rete lineare "noise free", equivalente al DUT da misurare , tale che fornisca in uscita la stessa potenza di quando il DUT reale ha la porta d'ingresso chiusa su un carico "noise free" [2].

La T_e è comunemente chiamata "temperatura di rumore" dell'LNA.

T_e è legata alla **cifra di rumore** (NF [dB] , F [adim.]) dalle note relazioni:

$$T_e = 290 \cdot (10^{\text{NF}/10} - 1) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$T_e = 290 \cdot (F - 1) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

A differenza di T_{av} , e di T_{ne} , T_e non è una grandezza né prelevabile da morsetti di uscita né direttamente misurabile con un misuratore di potenza; è invece una grandezza “interna” al DUT.

Per le grandezze T_{av} , e T_{ne} possiamo definire una sezione (un connettore) alla quale connettersi per prelevarle; per T_e è necessario definire due sezioni, una di ingresso ed una di uscita dove viene piazzato il “probe” per la misura di T_e stessa. In un buon progetto il guadagno del preamplificatore è così elevato da “mascherare” a sufficienza il rumore degli stadi successivi rendendo ininfluenza la posizione del “probe” di misura.

La misura di T_e viene effettuata per confronto con un salto noto fra due livelli di temperatura.

Il generatore di rumore fornisce due livelli noti di temperatura T_H (T hot) e T_C (T cold).

Il valore T_e vale:

$$T_e = (T_H - Y \cdot T_C) / (Y - 1) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$Y = P_H / P_C \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Dove:

P_H = Potenza letta all’uscita quando il generatore di rumore è acceso (P hot)

P_C = Potenza letta all’uscita quando il generatore di rumore è spento (P cold)

Comunemente, T_e è considerata caratteristica propria del LNA (o del Ricevitore, o del generico DUT). Contrariamente a ciò che spesso si ritiene, T_e non è caratteristica univoca del LNA ma è invece funzione del coeff. di riflessione del generatore:

$$T_e = 290 \cdot [F_{\min} + 4 \cdot R_n \cdot Z_0^{-1} \cdot [|\Gamma_{\text{opt}} - \Gamma_s|^2 / (|1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_s|^2))] - 1] \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Dove troviamo i 4 parametri di rumore caratteristici del DUT:

F_{\min} minima cifra di rumore

R_n Resistenza di rumore normalizzata

Γ_{opt} Coeff. di riflessione per il minimo rumore (modulo e fase)

ed i parametri del circuito nel quale il DUT è montato:

Z_0 Impedenza caratteristica

Γ_s Coeff. di riflessione del generatore

il valore R_n fornisce un’indicazione sulla tolleranza della rete di adattamento; più il valore è ridotto, meno è critica la realizzazione di tale rete.

Se si grafica l’eq. 2.8 in funzione di Γ_s e per diversi R_n , sulla carta di Smith si ottengono dei cerchi. Sono il luogo di punti di Γ_s che producono le stesse T_e (parametro R_n)

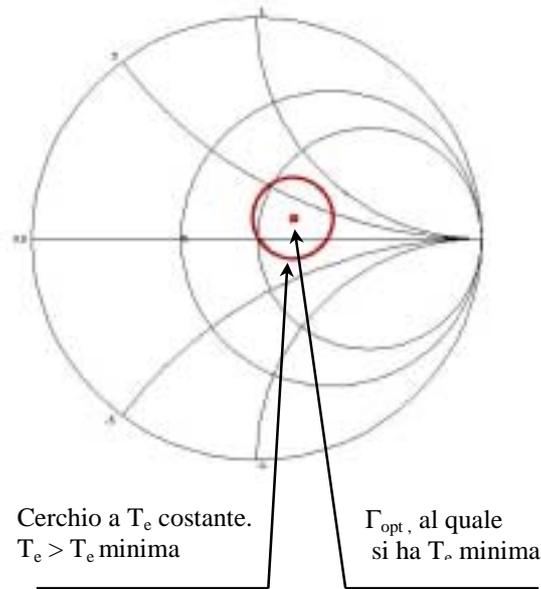


Figura 2.2 Cerchi a T_e costante di un LNA. Al centro corrisponde il valore minimo di T_e .

Un “buon” LNA, oltre a possedere una T_e molto bassa, è caratterizzato da R_n e $|\Gamma_{opt} - \Gamma_s|$ particolarmente contenuti da essere trascurati in modo che si possa considerare di fatto T_e una caratteristica propria del solo LNA.

T_e è inoltre dipendente dalla temperatura fisica alla quale è piazzato il LNA. Pertanto nel caratterizzare i LNA's è necessario specificare a quale temperatura ambiente viene effettuata la misura. Valori tipici di $\Delta T_e / \Delta T_{AMB}$ vanno da $+0.2 \div +1$ °K/°C. Questa forte variazione di T_e al variare della temperatura ambiente è il motivo sfruttato in Radioastronomia per ridurre la T_e degli LNAs tramite raffreddamento a temperature criogene.

Gli attuali valori tipici di Temperatura Equivalente di Ingresso per ricevitori “state of the art” sono riportati nel seguente grafico.

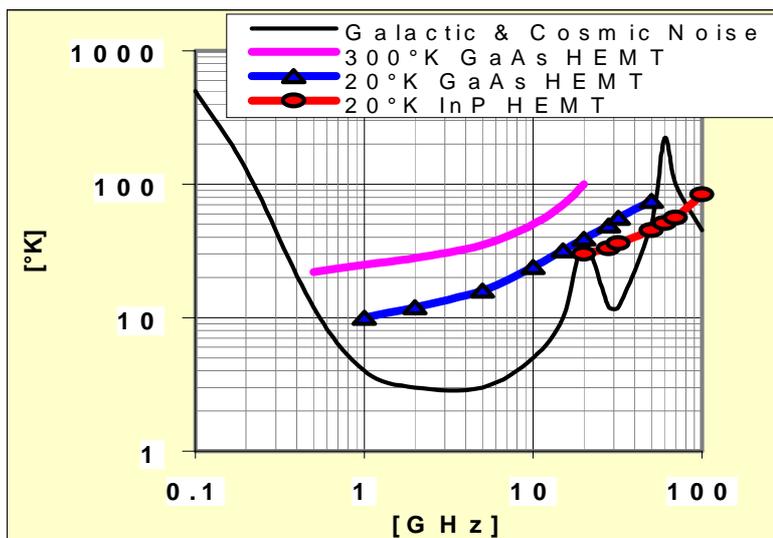


Figura 2.3 T_e tipica di Ricevitori state of the art

2.5. T_{av} , T_{ne} , $T_{BACK-REF}$: approccio di Fisica Ottica

Le terminologie viste finora, Temperatura di Rumore Disponibile T_{av} , Temperatura di Rumore Effettiva T_{ne} , Temperatura Retro Riflessa $T_{BACK-REF}$, costituiscono elementi di un linguaggio ed un approccio più ingegneristico che fisico.

La determinazione della Temperatura di rumore che un NS applica ad un LNA può essere considerata anche in un contesto di fisica ottica. Un tale approccio può diventare conveniente in “free – space” e/o a frequenze millimetriche.

Alle frequenze millimetriche si utilizza spesso, come generatore di rumore, un carico adattato costituito da coni di Eccosorb[®] simile al classico “cartone per le uova”. Tale carico, possiede comunemente un coeff. di riflessione proprio estremamente ridotto tale da essere trascurato (Return Loss < - 40 dB). Pertanto la temperatura di brillantezza del corpo nero coincide con il valore T_{av} . Con tale carico si può realizzare un corpo nero raffreddato semplicemente immergendolo in azoto liquido. Per evitare la formazione di ghiaccio e condensa, i coni di Eccosorb[®] sono collocati in un contenitore chiuso costituito di materiale termo-isolante e radio-trasparente. Purtroppo non esiste nessun materiale perfettamente radio-trasparente, ma se di tale materiale se ne conosce l’indice di rifrazione n o la costante dielettrica relativa ϵ_r se ne può calcolare la riflettività.

$$n = \epsilon_r^{0.5} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Nella propagazione dell’onda elettromagnetica, si ha una riflessione quando avviene un cambio repentino di n . Il coefficiente di riflessione di potenza per un’onda che si propaga in un mezzo con n che varia da n_1 a n_2 è dato da:

$$|\Gamma_{STEP}|^2 = [(n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)]^2 \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Nel caso di uno step aria – dielettrico, $n_1 = 1$.

La finestra di protezione di materiale schiumoso presenta ben due riflessioni, aria – dielettrico – aria, che costituiscono un sistema interferente. Quindi il $|\Gamma_{WIN}|^2$ di un foglio di materiale dielettrico (finestra) varia periodicamente con la frequenza assumendo valori compresi fra [10]:

$$0 < |\Gamma_{WIN}|^2 < 4 \cdot |\Gamma_{STEP}|^2 / (1 + |\Gamma_{STEP}|^2)^2 \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Per spessori di finestra pari a $N \cdot \lambda_{diel}/2$, avremo che $|\Gamma_{WIN}|^2 = 0$

Per spessori di finestra pari a $N \cdot \lambda_{diel}/2 + \lambda/4$, avremo che $|\Gamma_{WIN}|^2 = (1 + |\Gamma_{STEP}|^2)$

Dove:

$N = 0, 1, 2, 3, \dots$ Intero e positivo

$\lambda_{diel} = c \cdot f \cdot \epsilon_r^{-0.5}$ Lunghezza d’onda in dielettrico

Assumendo che l’attenuazione dissipativa della finestra sia trascurabile, $|\Gamma_{WIN}|^2$ è di fatto il valore da sostituire nelle Eq. 2.2, ed Eq. 2.3 al fine di trovare T_{ne} e T_{APP} .

Se invece l’attenuazione dissipativa non è trascurabile occorre applicare anche la metodologia che verrà descritta nel cap. 3. Tipicamente i materiali schiumosi tipo BASF Styrofoam[®] 3035 possiedono un’attenuazione dissipativa che introduce circa $0.2 \div 0.5$ °K/cm in banda C e circa $0.5 \div 2$ °K/cm nelle bande Ka e Q [9].

2.6. Effetti Planckiani – Temperatura di Brillanza

L'equazione della potenza di rumore disponibile comunemente utilizzata, $P_{av} = K \cdot T \cdot B$, il rumore Johnson, descrive un rumore bianco cioè con densità spettrale di potenza costante. Tale equazione è un'approssimazione valida nella cosiddetta regione di Rayleigh-Jeans dello spettro elettromagnetico. In realtà l'espressione completa è la seguente:

$$P_{av} = K \cdot T \cdot B \cdot p \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$p = h \cdot f \cdot K^{-1} \cdot T^{-1} \cdot (e^{hf/(K \cdot T)} - 1)^{-1} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Dove: h = Costante di Planck $6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s
 f = Frequenza in Hz
 K = Costante di Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/°K
 T = Temperatura termodinamica del corpo nero in °K

Normalmente si considera $p = 1$ per frequenze inferiori a parecchi GHz. In [2] si sostiene che tale effetto è trascurabile per frequenze inferiori a 100 GHz.

Si ricorda che nella misura di T_e con il fattore Y , anche piccoli errori nell'acquisizione dei due livelli di potenza si esaltano fortemente causando grandi errori nel risultato.

Utilizzando carichi raffreddati la differenza fra T_B e Temperatura termodinamica è maggiore che a temperatura ambiente.

Si può dimostrare pertanto che già alla frequenza di 22 GHz, trascurare "l'effetto Planckiano" può causare un errore fino al 0.5% che produce un errore fino al 5% nella misura di Temperatura di rumore dell'LNA.

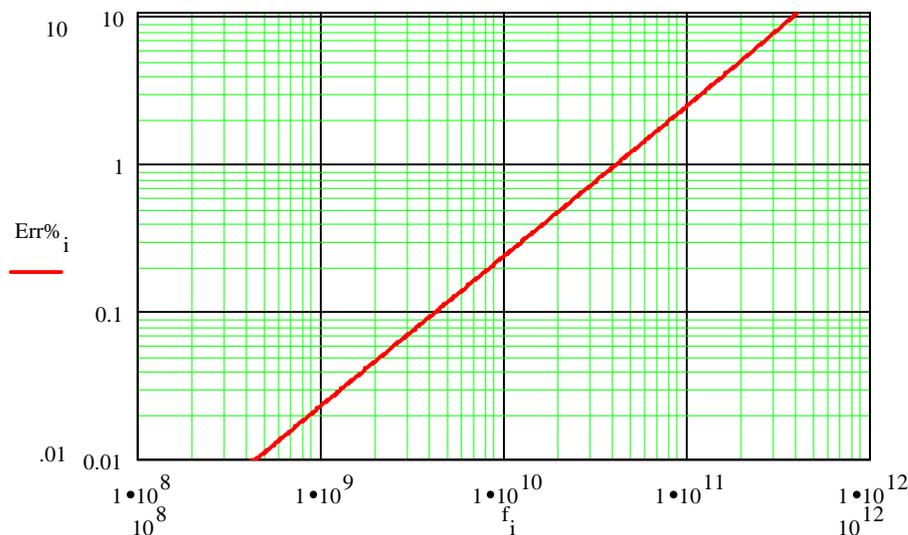


Figura 2.4 Errore Max. % commesso nel valutare Y se si trascurano gli "effetti planckiani" (77 – 300 °K)

La determinazione di T_e o T_{SYS} con il metodo del fattore Y , presuppone linearità. D'altro canto le potenze di rumore generate da due carichi a temperature diverse, se operanti in regione Planckiana, hanno un andamento non-lineare. Al fine di linearizzare l'andamento è necessario ricorrere alla

temperatura di brillantezza, che è la temperatura “equivalente”, che produce la stessa potenza di rumore di un carico operante in sola regione di Rayleigh-Jeans anziché di Planck.
 La temperatura di brillantezza di un carico adattato (corpo nero) è quindi leggermente inferiore della temperatura termodinamica del carico stesso.

$$T_B = T \cdot p \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Nell’uso dei misuratori di rumore (es. MAMBO) e nelle misure con carico caldo-freddo, si utilizza la temperatura di brillantezza.

Per facilitare la determinazione della temperatura di brillantezza, conoscendo la temperatura termodinamica, è stato scritto un semplice programma software in linguaggio LabView® (Planck Tb.vi) [6] di cui si mostra il pannello nella seguente figura.

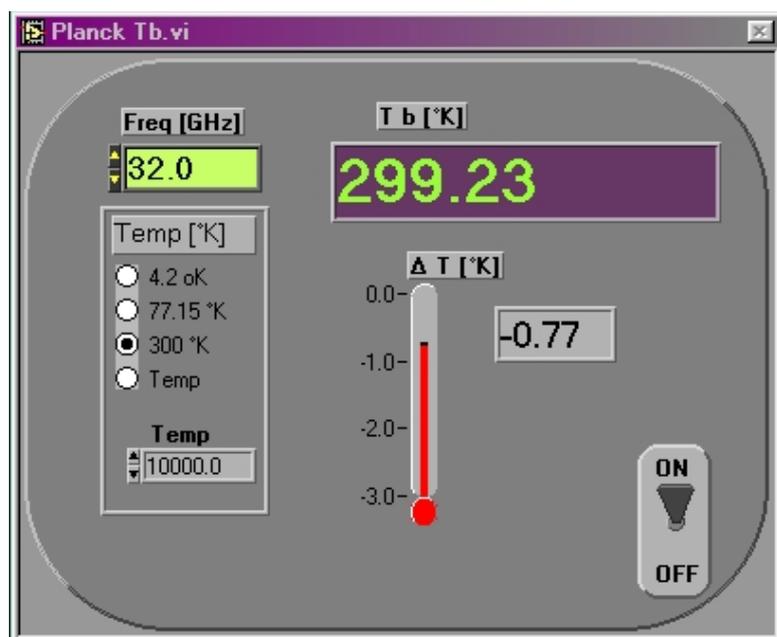


Figura 2.5 Pannello di calcolo della Temperatura di Brillantezza Tb

2.7. Cautele

La realizzazione di Ultra LNA è un lavoro che richiede un approccio preciso in ogni fase; dal progetto alla realizzazione alla misura, le fonti di errore sono molteplici. È necessario conoscere a priori il risultato atteso e non perderlo mai di vista.

Nel misurare T_e , il valore T_{ne} del NS è inferiore a T_{av} , ma si diffidi di grandi differenze. Utilizzando un carico raffreddato, è improbabile che la T_{APP} sia di fatto inferiore a T_{av} .

In fase di misura, valori di T_{ne} (o T_{APP}) in difetto rispetto al vero valore, producono sotto stime di T_e causando falsi ottimismo.

3. Attenuatore in Serie al Generatore Di Rumore

Spesso è richiesto di attenuare la potenza di rumore prodotta da un Generatore di Rumore. A tal scopo si inserisce un attenuatore in linea fra il Generatore di Rumore (NS) ed il carico (Load). Un attenuatore è solitamente costituito di elementi dissipativi come le reti di resistori a T o Pigreco o come i Pad coassiali che contengono *thick film resistor card*.

Quando un attenuatore segue il NS, la temperatura di uscita sarà attenuata del valore L (attenuazione adimensionale).

Si ricorda che il il valore dell'Attenuazione (adimensionale) è pari al reciproco del Guadagno (adimensionale).

$$L_{(adim.)} = G_{(adim.)}^{-1} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Di per sé l'attenuatore (dissipativo) produce anche una temperatura di rumore propria dovuta alla propria emittività.

Pertanto la temperatura di rumore disponibile in uscita vale:

$$T_{avO} = G_{av} \cdot T_{neS} + (1 - G_{av}) \cdot T_{LP} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Oppure

$$T_{avO} = T_{neS} / L + (1 - 1/L) \cdot T_{LP} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

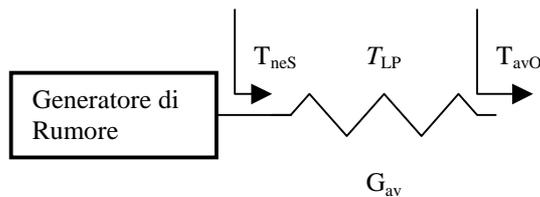


Figura 3.1 Attenuatore in cascata a Generatore Di Rumore

Poiché la temperatura di rumore generata negli attenuatori è dovuta agli effetti dissipativi, e i reali dispositivi attenuatori hanno anche un disadattamento proprio ($\Gamma > 0$), si può supporre, che solo la parte dissipativa dell'attenuazione concorra a produrre la temperatura di rumore.

Il Termine G_{av} vale:

$$G_{av} = (|s_{21}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_{NS}|^2) / [|1 - \Gamma_{GEN} \cdot s_{11}|^2 - (1 - |\Gamma_2|^2)]) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

e diventa:

$$G_{av} \cong |s_{21}|^2 / (1 - |s_{22}|^2) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

quando $\Gamma_S \cong 0$.

La parte dissipativa del guadagno di un attenuatore non perfettamente adattato vale:

$$G_{\text{diss}} = |s_{21}|^2 / (1 - |s_{11}|^2) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

per attenuatori simmetrici dove $s_{11} = s_{22}$, e nel caso di $\Gamma_{\text{NS}} \approx 0$ si ha che il Guadagno disponibile coincide con l'attenuazione dissipativa. [3] pag. 13

L'equazione che fornisce la Temperatura di rumore Effettiva all'uscita della serie NS e Attenuatore è la seguente [4]:

$$T_{\text{neO}} = (T_{\text{avO}} \cdot G_{\text{av}} + (1 - G_{\text{av}}) \cdot T_{\text{LP}}) (1 - |\Gamma_{\text{OUT}}|^2) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Con NS e attenuatori di ottima qualità si possono raggiungere condizioni di adattamento d'impedenza particolarmente buone; se $\Gamma_{\text{NS}} \approx 0$, allora $\Gamma_{\text{OUT}} = s_{22 \text{ att}} \approx 0$.

3.1. Esempio: Attenuatore in serie a Generatore di Rumore

Dati:

| | |
|--|--------------|
| Noise Source ENR: | +15.50 dB |
| Noise Source Return Loss: | -24 dB |
| $\Delta\text{ENR}/\Delta\text{Temp}$: | +0.009 dB/°C |
| Attenuazione attenuatore: | +10.1 dB |
| Return Loss attenuatore: | -30 dB |
| Temperatura fisica. | +27.3 °C |

In accordo con quanto descritto cap.2, la temperatura di rumore disponibile all'uscita di un Generatore Di Rumore con un attenuatore dissipativo (pad) in serie è dato dalla somma di due addendi, la temperatura generata dal NS attenuata, e la componente prodotta dall'attenuatore stesso posto alla temperatura ambiente.

Si trasforma la temperatura ambiente da °C a °K aggiungendo 273.15, quindi la temperatura fisica vale:

$$27.3 + 273.15 = 300.45 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.1})$$

Il valore ENR viene specificato dal costruttore alla temperatura standard $T_0 = 290 \text{ °K}$. Alla temperatura fisica 27.3 oC, il nuovo ENR vale:

$$\text{ENR}_{@300.45 \text{ °K}} = 15.5 + (300.45 - 290) \cdot 0.009 = 15.59 \text{ dB} \quad (\text{Espr. 3.2})$$

La temperatura di rumore disponibile prodotta dal NS vale:

$$T_{\text{ne}} = 290 \cdot (1 + 10^{15.59/10}) = 10805 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.3})$$

Si converte il Return Loss in coefficiente di riflessione:

$$|\Gamma_{NS}| = 10^{-|RL|/20} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

pertanto:

$$|\Gamma_{NS}| = 10^{-24/20} = 0.063 \quad (\text{Espr. 3.4})$$

La temperatura disponibile vale:

$$T_{av} = 10805/(1-0.063^2) = 10848 \text{ }^\circ\text{K} \quad (\text{Espr. 3.5})$$

A questo punto è necessario determinare il coeff. Di riflessione Γ_2 . Se è disponibile un analizzatore di reti vettoriale (VNA), lo si può misurare direttamente, se invece non si può misurare è necessario calcolarlo dalla seguente equazione:

$$\Gamma_2 = s_{22} + (s_{12} \cdot s_{21} \cdot \Gamma_{NS}) / (1 - \Gamma_{NS} \cdot s_{11}) \quad (\text{Eq. 3.9})$$

spesso però si conoscono solo i moduli dei parametri s e di Γ_{NS} , pertanto nel nostro caso, dove sia i quattro parametri s , sia Γ_{NS} hanno un modulo particolarmente contenuto, si possono trascurare i termini a prodotto, pertanto $\Gamma_2 \approx s_{22}$, quindi

$$|\Gamma_2| \approx 10^{-30/20} = 0.032 \quad (\text{Espr. 3.6})$$

Il Guadagno in dB dell'attenuatore, sempre negativo, è pari all'attenuazione (valore positivo) cambiata di segno.

Generalmente il valore "guadagno" di un attenuatore fornito nelle specifiche del costruttore è pari a $|s_{21}|^2$.

Il guadagno misurato con VNA calibrato "full two port" è pari a $|s_{21}|^2$.

Il guadagno misurato con Scalar Network Analyzer (SNA) o con VNA calibrato in "response" è invece l'Insertion Gain.

Se si utilizza un attenuatore particolarmente adattato ($s_{11} \approx 0$, $s_{22} \approx 0$) si può assumere che G_{av} coincida con $|s_{21}|^2$.

Nel nostro esempio assumiamo che G_{av} coincida con $|s_{21}|^2$, pertanto

$$G_{av} = 10^{-10.1/10} = 0.0977 \quad (\text{Espr. 3.7})$$

La temperatura effettiva in uscita vale:

$$T_{neO} = (300.45 \cdot (1 - 0.0977) + 0.0977 \cdot 10848) \cdot (1 - 0.032^2) = 1329.6 \text{ }^\circ\text{K} \quad (\text{Espr. 3.8})$$

3.2. Esempio: Accoppiatore Direzionale in serie a Generatore di Rumore

Diversamente dall'attenuatore dissipativo (pad), in un Accoppiatore Direzionale, l'attenuazione fra il ramo accoppiato ed il ramo principale è di natura non-dissipativa (solo componenti reattive). Pertanto la temperatura di uscita non risente della temperatura fisica dell'Accoppiatore Direzionale (a meno dell'attenuazione intrinseca del ramo principale che solitamente, negli A.D. in guida d'onda è particolarmente bassa).

Un problema tipico è determinare il gradino di temperatura fra NS acceso e NS spento (marca di temperatura).

Dati:

| | |
|---|--------------|
| Noise Source ENR: | +25.50 dB |
| Noise Source Return Loss: | < -20 dB |
| $\Delta\text{ENR}/\Delta\text{Temp}$: | +0.009 dB/°C |
| Attenuazione ramo accoppiato: | +27.3 dB |
| Return Loss A.D. ramo principale: | < -40 dB |
| Return Loss A.D. ramo accoppiato: | < -25 dB |
| Direttività A.D. | > 40 dB |
| Attenuazione dissipativa ramo principale: | 0.07 dB |
| Temperatura fisica. | +27.3 °C |

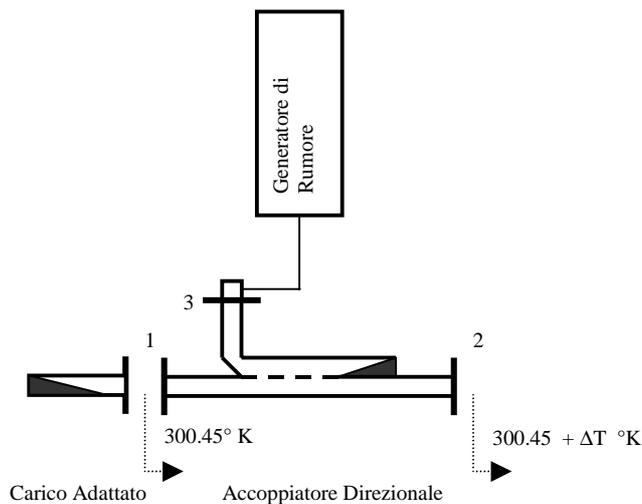


Figura 3.2 Generatore di Rumore in serie ad Accoppiatore Direzionale

Soluzione:

Il guadagno disponibile dell'A.D. fra porta accoppiata (porta 3) e porta di uscita (porta 2) è difficilmente valutabile in quanto il coefficiente di riflessione Γ_2 è dominato dal coefficiente di riflessione del carico adattato (o feed-horn o sorgente adattata) connesso alla porta 1 più che dall'accoppiatore stesso.

Nota:

- Una valutazione accurata dei coefficienti di riflessione delle porte 2 e 3 potrebbe essere eseguita con un VNA provvisto di opzione “*time domain*” in modo da eliminare le riflessioni prodotte sia dal carico connesso alla porta 1 sia dal carico interno all’A.D. . Il coefficiente di riflessione di quest’ultimo non influisce sul valore dell’accoppiamento bensì influisce sul valore di direttività. Comunque il coefficiente di riflessione alla porta 3, usualmente molto contenuto in A.D. in guida d’onda, è generalmente dominato dal disadattamento della curva piuttosto che dal carico interno.

Quindi, mancando informazioni più dettagliate si può considerare che il guadagno fra ramo accoppiato e ramo principale coincida con $|s_{23}|^2$ e la temperatura di rumore effettivamente iniettata nella porta 3 sia la Temperatura effettiva moltiplicata per il coefficiente di riflessione della porta 3.

Si trasforma la temperatura ambiente da °C a °K aggiungendo 273.15, quindi la temperatura fisica vale:

$$27.3 + 273.15 = 300.45 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.9})$$

Il valore ENR viene specificato dal costruttore alla temperatura standard $T_0 = 290 \text{ °K}$. Alla temperatura fisica 27.3 °C, il nuovo ENR vale:

$$\text{ENR}_{@300.45 \text{ °K}} = 25.5 + (300.45 - 290) \cdot 0.009 = 25.59 \text{ dB} \quad (\text{Espr. 3.10})$$

La temperatura di rumore disponibile prodotta dal NS vale:

$$T_{\text{neO}} = 290 \cdot (1 + 10^{25.59/10}) = 105340 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.11})$$

In base all’approssimazione di cui sopra, e trascurando la riflessione multipla nel ramo accoppiato, la temperatura applicata alla porta 3 vale:

$$\begin{aligned} T_{\text{APP } 3} &= T_{\text{ne}} \cdot (1 - |\Gamma_3|^2) + 300.45 \cdot |\Gamma_3|^2 = \\ &= 105340 \cdot (1 - 10^{-25/10}) + 300.45 \cdot |\Gamma_3|^2 = 105008 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.12}) \end{aligned}$$

$$\text{Il guadagno } |s_{32}|^2 \text{ vale } 10^{-27.3/10} = 1.862\text{E-}3 \quad (\text{Espr. 3.13})$$

La temperatura trasferita in uscita per il solo effetto del NS acceso vale:

$$105008 \cdot 1.862\text{E-}3 = 195.5 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.14})$$

Analogamente quando il NS è spento, sempre in base alle stesse approssimazioni, avremo che la temperatura trasferita in uscita vale:

$$300.45 \cdot 1.862\text{E-}3 = 0.55 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.15})$$

Il “salto” di temperatura generato alla porta 2 dell’A.D. che si va ad iniettare nel ricevitore vale quindi:

$$\Delta T = 109.5 - 0.55 = 108.95 \text{ } ^\circ\text{K} \quad (\text{Espr. 3.16})$$

3.3. Esempio: Cambiare il valore della *Marca Di Rumore*

Capita, se pur di raramente, di dover cambiare il livello della “marca” di rumore (il salto noto di rumore con il quale si misura la T_{SYS} dei ricevitori radioastronomici). Il circuito di iniezione del rumore è mostrato nella seguente figura.

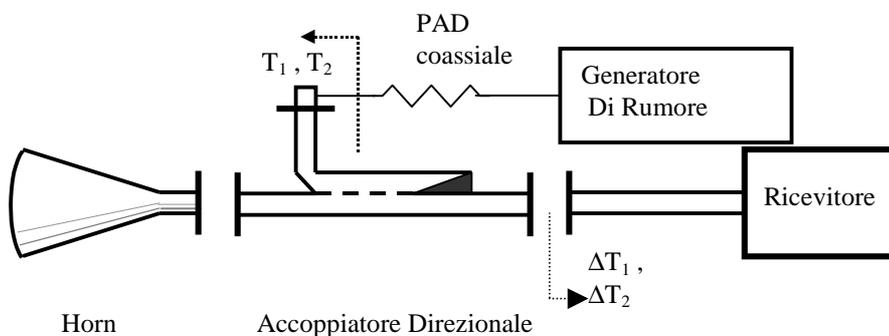


Figura 3.3 Configurazione tipica del circuito di iniezione della “marca” di rumore

Dati:

| | |
|---|---|
| $\Delta T_1 = 52 \text{ } ^\circ\text{K}$ | Valore attuale della marca |
| $G_1 \text{ (dB)} = -10 \text{ dB}$ | Valore nominale di attenuazione del Pad coassiale |
| $T_{\text{LP}} = 300 \text{ } ^\circ\text{K}$ | Temperatura degli attenuatori coassiali |
| $\text{ENR} = 32 \text{ dB}$ | Valore nominale ENR |

Obiettivo:

Ridurre ΔT_1 fino ad arrivare ad un valore ΔT_2 pari a circa il 25% del valore iniziale utilizzando un attenuatore addizionale da 6 dB nominali.

Soluzione:

Si misurano i parametri s dei due attenuatori, i valori da adottare nei calcoli saranno i valori misurati e non i valori nominali.

Si esprime un giudizio di qualità sui valori misurati, eventualmente si seleziona l’attenuatore da 6 dB.

Supponiamo che le misure dei parametri s diano i seguenti risultati:

$$G_1 \text{ (dB)} = 10.1 \text{ dB}$$

$$G_2 \text{ (dB)} = G_1 + 6.1 \text{ dB} = 16.2 \text{ dB}$$

Per ricavare il nuovo valore ΔT_2 non conoscendo né la temperatura generata dal NS né l'accoppiamento dell'Accoppiatore direzionale, occorre formulare un'equazione che esprima il rapporto $\Delta T_2 / \Delta T_1$.

$$\Delta T_1 = G_{AD} \cdot (T_{ne} \cdot G_1 + (1 - G_1) \cdot T_{LP}) \quad (\text{Eq. 3.10})$$

$$\Delta T_2 = G_{AD} \cdot (T_{ne} \cdot G_2 + (1 - G_2) \cdot T_{LP}) \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$T_1 = T_{ne} \cdot G_1 + (1 - G_1) \cdot T_{LP} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$T_2 = T_{ne} \cdot G_2 + (1 - G_2) \cdot T_{LP} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$(1 - G_1) \cdot T_{LP} = (1 - 10^{-10.1/10}) \cdot 300 = 270.68 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.17})$$

$$(1 - G_2) \cdot T_{LP} = (1 - 10^{-16.2/10}) \cdot 300 = 292.8 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.18})$$

$$T_{ne} \cdot G_1 = 290 \cdot (1 + 10^{32/10}) \cdot 10^{-10.1/10} = 44944 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 3.19})$$

Notiamo che i termini $(1 - G_1) \cdot T_{LP}$ e $(1 - G_2) \cdot T_{LP}$ hanno valori molto simili fra loro rispetto ai valori tipici di $T_{ne} \cdot G_1$; in questo caso si può pertanto scrivere:

$$(1 - G_1) \cdot T_{LP} \approx (1 - G_2) \cdot T_{LP} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

e si può porre:

$$(1 - G_1) \cdot T_{LP} \equiv A \quad (\text{Eq. 3.15})$$

$$(1 - G_2) \cdot T_{LP} \equiv A \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Combinando la (Eq. 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.15, 3.16) otteniamo che:

$$T_2 - A = G_2 \cdot G_1^{-1} \cdot (T_1 - A) \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Il rapporto $\Delta T_2 / \Delta T_1$ vale pertanto:

$$\Delta T_2 / \Delta T_1 = G_2 \cdot G_1^{-1} - A \cdot T_1^{-1} \cdot (G_2 \cdot G_1^{-1} + 1) \quad (\text{Eq. 3.18})$$

Poiché l'addendo di destra dell' (Eq. 3.18) ha un peso molto inferiore all'addendo di sinistra, si possono a ragione utilizzare i valori approssimati A e T_1 senza commettere un errore sensibile.

La soluzione diventa pertanto:

$$\Delta T_2 / \Delta T_1 = 10^{(-16.2+10.1)/10} - 270.68 \cdot 44944 \cdot (10^{(-16.2+10.1)/10} + 1) = 0.25299 \quad (\text{Espr. 3.20})$$

La temperatura ΔT_2 vale pertanto $52 \cdot 0.25299 = 13.16 \text{ °K}$

4. Temperatura di Rumore di un Attenuatore

La linea di trasmissione che collega l'antenna al ricevitore ha sempre una propria attenuazione diversa da zero. Tale attenuazione si può modellare come attenuatore fra antenna ed LNA.

La temperatura di rumore prodotta da un attenuatore [1] vale:

$$\mathbf{T_{IN}} = (1/G_{av}-1) \cdot T_{LP} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\mathbf{T_{IN}} = (L-1) \cdot T_{LP} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Alla quale va aggiunto la temperatura di rumore dell'LNA riportata all'ingresso

$$\mathbf{T_{IN}} = T_{ATT} + T_{RIC}/G_{avATT} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

L'equazione completa diventa:

$$\mathbf{T_{IN}} = (1/G_{avATT} - 1) \cdot T_{LP} + T_{RIC}/G_{avATT} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

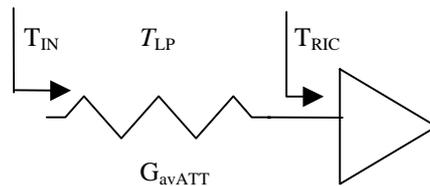


Figura 4.1 Attenuazione della linea prima del ricevitore

Quindi risolvendo per gli altri parametri abbiamo:

$$\mathbf{T_{RIC}} = (T_{IN} - (1/G_{avATT} - 1) T_{LP}) G_{avATT} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$\mathbf{G_{avATT}} = (T_{RIC} + T_{LP}) / (T_{IN} + T_{LP}) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$\mathbf{T_{LP}} = (G_{avATT} T_{IN} - T_{RIC}) / (1 - G_{avATT}) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

4.1. Esempio: Calcolo della Temperatura di Rumore Equivalente all'ingresso di un LNA nota la T_{SYS}

Dati:

| | | |
|--|------|----|
| T_{SYS} | 55 | °K |
| Sommatoria delle attenuazioni a monte dell'LNA: (Feed Horn, A.D., Polarizzatore, OMT, ecc.) | 0.35 | dB |
| Temperatura fisica delle attenuazioni a monte LNA | 22 | °C |

Soluzione:

Assumiamo come nei precedenti esempi che il termine “guadagno” significhi “guadagno disponibile”.

Il guadagno di una linea attenuante in dB è pari al valore attenuazione (sempre positiva) cambiato di segno, Oppure il guadagno adimensionale di una linea attenuante (sempre inferiore a 1) è pari al reciproco del valore Attenuazione adimensionale (sempre maggiore di 1).

Si trasformano i dati in dB in numeri adimensionali.

$$G_L = 10^{-0.35/10} = 0.9226 \quad (\text{Espr. 4.1})$$

Si trasformano le temperature da °C a °K

$$T_L = 22.0 + 273.15 = 295.15 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 4.2})$$

La Temperatura di rumore equivalente all'ingresso dell'LNA, applicando la (Eq. 4.5) vale:

$$T_{LNA} = (55 - (1/0.9226 - 1) \cdot 295.15) \cdot 0.9226 = 27.9 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 4.3})$$

4.2. Temperatura equivalente di rumore di un LNA alimentato da più linee in ingresso (Tipo “Alberi Di Natale” Croce Del Nord)

Il caso di più antenne riceventi che alimentano, tramite più linee, un solo LNA, essendo un caso particolare, richiede un chiarimento sul principio di funzionamento al fine di applicare il corretto metodo di calcolo.

Il principio che sta alla base del ragionamento considera la potenza di rumore raccolta da una sola antenna di area colletttrice A e rendimento η , pari alla potenza di rumore raccolta da N antenne di area colletttrice A/N con lo stesso rendimento η che puntano la stessa zona di cielo.

Se le linee di collegamento sono uguali fra di loro, in attenuazione, disadattamento, fase, e temperatura fisica, il modello equivalente diventa il classico schema considerato nell'esempio precedente. L'attenuazione da applicare è l'attenuazione di una singola linea (e non l'attenuazione di N linee in parallelo), la temperatura da applicare è la temperatura di una singola linea.

Se invece i rendimenti delle Antenne sono diversi e/o le attenuazioni delle linee sono differenti, la situazione deve essere valutata di volta in volta, ma in generale si procede come segue.

Si considera che la sorgente di rumore celeste che investe l'array di antenne si suddivide in proporzione al prodotto $\eta \cdot A$ (rendimento Area collettrice) di ogni singola antenna.

Il calcolo delle temperature di rumore introdotte dalle singole linee deve poi essere effettuato ramo per ramo, seguendo la metodologia generale descritta in cap.4 avendo cura di considerare che il sommatore di potenza esegue una somma coerente del segnale celeste ed una somma non coerente del rumore introdotto da ciascuna linea.

Un "sommatore di Potenza" (*power splitter*) ideale, ovvero senza attenuazione propria, fornisce alla porta "somma" (uscita) la somma dei segnali coerenti presenti in ingresso.

Lo stesso sommatore di potenza ideale se alimentato con segnali non coerenti, fornisce in uscita la somma delle singole potenze diviso il N° delle porte.

In un sommatore reale, ovvero con una propria attenuazione ohmico-dissipativo, sia nel caso di alimentazione con segnali coerenti, sia nel caso opposto, di alimentazione con segnali non-coerenti, la potenza di uscita risulterà diminuita di un valore pari all'attenuazione propria del sommatore.

Problema:

Trovare la temperatura equivalente di ingresso alla flangia d'antenna ($T_{RIC\ TOT}$) del sistema rappresentato in fig. 4.2

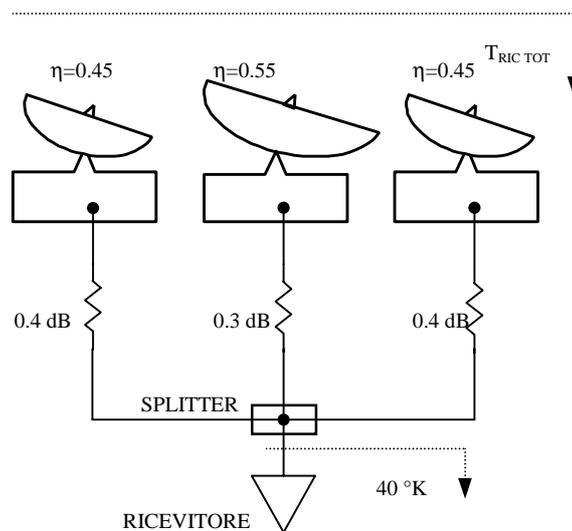


Figura 4.2 Un LNA è alimentato da più sorgenti che puntano la stessa radiosorgente

Dati:

| | |
|----------------------|--------------------|
| N° antenne: | 3 |
| Antenna 1 | |
| Area 1 | 125 m ² |
| η_1 | 45% |
| Attenuazione linea 1 | 0.4 dB |
| Antenna 2 | |
| Area 2 | 125 m ² |
| η_2 | 55% |
| Attenuazione linea 2 | 0.3 dB |

| | |
|----------------------|--------------------|
| Antenna 3 | |
| Area 3 | 125 m ² |
| η_3 | 45% |
| Attenuazione linea 3 | 0.4 dB |

| | |
|--------------------------------|--------|
| Temperatura fisica delle linee | 300 °K |
| $T_{LNA+STADI\ SUCCESSIVI}$ | 40° K |

Soluzione:

La prima operazione da eseguire è normalizzare a **1** la somma dei guadagni delle singole antenne in modo da potersi riferire ad una sola antenna equivalente alla somma dei guadagni delle singole antenne che puntano contemporaneamente verso la stessa sorgente.

$$A_{EQ\ TOT} = 125 \cdot 0.45 + 125 \cdot 0.55 + 125 \cdot 0.45 = 181.25 \text{ m}^2 \quad (\text{Espr. 4.4})$$

$$\eta_{ANT\ 1} = 125 \cdot 0.45 / 181.25 = 0.310 \quad (\text{Espr. 4.5})$$

$$\eta_{ANT\ 3} = 125 \cdot 0.55 / 181.25 = 0.379 \quad (\text{Espr. 4.6})$$

$$\eta_{ANT\ 3} = 125 \cdot 0.45 / 181.25 = 0.310 \quad (\text{Espr. 4.7})$$

La seconda operazione è calcolare i guadagni (reciproci delle attenuazioni) adimensionali delle singole linee.

$$G_{(adim)\ 1} = 10^{-0.4/10} = 0.912 \quad (\text{Espr. 4.8})$$

$$G_{(adim)\ 1} = 10^{-0.3/10} = 0.933 \quad (\text{Espr. 4.9})$$

$$G_{(adim)\ 1} = 10^{-0.4/10} = 0.912 \quad (\text{Espr. 4.10})$$

La terza operazione è applicare la (Eq.4.4) ricordandosi di applicare i criteri descritti per i sommatore (o splitter) di potenza in presenza di segnali coerenti. Consideriamo coerente la temperatura di rumore di ingresso dell LNA quando la si “riporta” all’ingresso del sommatore.

Per i 3 Rami avremo quindi i seguenti contributi:

$$T_{RIC\ 1} = 0.310 \cdot 300 \cdot (0.912^{-1} - 1) + 40 \cdot 0.912^{-1} \cdot 3^{-1} = 23.59 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 4.11})$$

$$T_{RIC\ 2} = 0.379 \cdot 300 \cdot (0.933^{-1} - 1) + 40 \cdot 0.933^{-1} \cdot 3^{-1} = 22.39 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 4.12})$$

$$T_{RIC\ 3} = 0.310 \cdot 300 \cdot (0.912^{-1} - 1) + 40 \cdot 0.912^{-1} \cdot 3^{-1} = 23.59 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 4.13})$$

La Temperatura di rumore dell’intera catena di 3 antenne, 3 linee, 1 sommatore ed 1 LNA è pari a

$$T_{RIC\ TOT} = T_{RIC\ 1} + T_{RIC\ 2} + T_{RIC\ 3} = 23.59 + 22.39 + 23.59 = 69.57 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 4.14})$$

Nel caso pratico, puntando la galassia, che alla frequenza di 408 MHz produce una temperatura variabile ma che possiamo approssimare a circa 20 °K, la temperatura di sistema vale:

$$T_{SYS} = 20 + 69.57 \cong 90 \text{ °K} \quad (\text{Espr. 4.15})$$

5. Reti in cascata

Per amplificatori o generiche reti lineari collegate come nella seguente figura

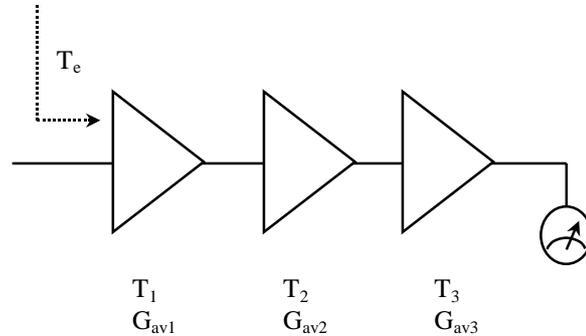


Figura 5.1 Amplificatori in cascata

La T_e vale:

$$T_e = T_1 + T_2 / G_{av1} + T_3 / (G_{av1} \cdot G_{av2}) + \dots \quad (\text{Eq. 5.1})$$

5.1. T Cascade: Un fattore di qualità per la scelta di HEMT

Nella scelta degli HEMT da utilizzare negli LNA, uno dei fattori da tenere in considerazione è la T cascade che identifica, ancor prima di progettarlo, la minima T_e ottenibile dal LNA

Tanto più la T_e ottenuta dall'LNA si avvicinerà a T cascade, tanto più il progetto dell'LNA si può definire "state of the art".

$$T \text{ cascade} = T_{eMIN} + T_{eMIN} / G_{OPT} + T_{eMIN} / G_{OPT}^2 + T_{eMIN} / G_{OPT}^3 + T_{eMIN} / G_{OPT}^4 \dots \quad (\text{Eq. 5.2})$$

5.2. Esempio: calcolare T_e di una cascata di reti.

Data la configurazione mostrata nella seguente figura, calcolare T_e

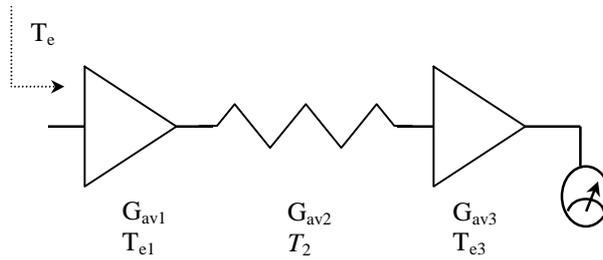


Figura 5.2 Esempio di reti in cascata

Dati:

| | |
|-----------|--------|
| G_{av1} | 16 dB |
| T_{e1} | 30 °K |
| G_{av2} | -6 dB |
| T_2 | 305 °K |
| G_{av3} | 40 dB |
| T_{e1} | 60 °K |

Soluzione:

Questo caso è complicato dal fatto che nella cascata ci sono sia elementi attivi sia elementi passivi. La difficoltà sta proprio nel valutare correttamente il rumore prodotto dall'attenuatore.

Un modo per procedere può essere quello di definire un piano di taglio fra l'uscita del 1° LNA e l'ingresso dell'attenuatore e calcolare T_e a tale piano.

Si convertono i Guadagni da dB a numeri adimensionali:

$$\begin{aligned}G_{av1} \text{ (adim)} &= 10^{(16/10)} = 39.81 \\G_{av2} \text{ (adim)} &= 10^{(-6/10)} = 0.2512 \\G_{av3} \text{ (adim)} &\text{ non necessario}\end{aligned}$$

Applichiamo la eq.4.4 ed otteniamo:

$$T_{e2} = (0.2512^{-1}-1) \cdot 305 + 60/0.2512 = 1148^\circ\text{K} \quad (\text{Espr. 5.1})$$

Si può quindi calcolare la T_e all'ingresso applicando la 5.1

$$T_e = 30 + 1148/39.81 = 58.83^\circ\text{K} \quad (\text{Espr. 5.2})$$

6. Linee guida per realizzare Corpi Neri raffreddati con coni assorbitori (Eccosorb[®])

In fase di accettazione e di test, la misura di Temperatura di rumore equivalente di rumore di ricevitori radioastronomici richiede spesso l'uso di almeno un generatore di rumore raffreddato. Alle frequenze inferiori a circa 10 GHz, con horn di grandi dimensioni l'utilizzo di tali carichi non risulta pratico per l'ingombro ed il peso notevoli.

Alle frequenze millimetriche, non solo le dimensioni ed il peso contenuti ne suggeriscono l'utilizzo ma il rapporto prestazioni/costo rende il carico raffreddato auto costruito estremamente vantaggioso rispetto a soluzioni commerciali.

In questa sede si elencano le linee guida per progettare e costruire un carico adattato raffreddabile ad Azoto liquido.

Il cuore del carico è sempre un assorbitore commerciale tipo Eccosorb[®], spugnoso (*foam*) con struttura a cellula aperta, in modo che se immerso in liq. N₂ si possa impregnare e quindi raffreddarsi uniformemente fino alla temperatura di ebollizione del liq. N₂ stesso (77.15 °K @ 1013 mbar).

Il carico deve inoltre essere isolato termicamente sia per prevenire la condensazione sulle pareti, sia per aumentare l'autonomia della carica di liq. N₂, sia per garantire l'isotropia della temperatura.

In un carico adattato da utilizzare come campione di temperatura, la "finestra" attraverso la quale passa il rumore deve presentare un'attenuazione e disadattamento trascurabili.

Alcuni materiali schiumosi espansi utilizzati in edilizia (polistirene espanso, polistirolo espanso, ecc.), sono ottimi candidati per il loro eccezionale isolamento termico, la loro radio-trasparenza, e la sufficiente robustezza meccanica.

A metà anni '90, per ragioni ecologiche, sono cambiati i processi di espansione dei materiali schiumosi, e solo alcuni materiali ancora in giacenza sono sufficientemente radio-trasparenti, in particolare il Basf Styrodur[®] 3035.

In generale, più il foam è denso e compatto, più l'attenuazione e la riflessione risulteranno elevate.

D'altro canto un materiale poco compatto potrebbe far trasudare il liq. N₂ e/o non isolare a sufficienza.

Il foam Basf Styrodur[®] 3035 ha un'attenuazione non misurabile @ 40 GHz ed una costante dielettrica $\epsilon_r = 1.06$; una transizione repentina da aria a Styrodur[®], produce un Return Loss di circa 20 dB.

Dove possibile, per minimizzare le riflessioni, quindi abbattere l'incertezza dovuta al disadattamento, la finestra (il passaggio fra dielettrici diversi) deve essere "modulata" e/o posto pari a $\lambda/2$. D'altro canto per ragioni di isolamento termico non conviene scendere al di sotto di spessori di 30 mm.

I comodi e leggeri contenitori (Dewar in acciaio Inox) per liq. N₂ contengono nominalmente 10 litri. Durante le operazioni di travaso, molto azoto si disperde in aria, difficilmente possono entrare nel carico più di 6-7 litri di liq. N₂.

Nel limite del possibile è conveniente che il volume interno del carico sia inferiore a 6-7 litri.

Il volume occupato dall'Eccosorb[®] non deve essere conteggiato, in quanto, essendo spugnoso, si impregna.

Il materiale assorbitore deve essere meno riflettente possibile. Sono adatti allo scopo i coni a punta arrotondata (tipo “cartone delle uova”); più i coni sono alti, minore è la riflessione alle basse frequenze.

Per frequenze superiori a 15 GHz , il Eccosorb[®] CV3 ha dimensioni sufficienti per garantire riflessione trascurabile.

Poiché il pericolo condensa è sempre in agguato, nonostante il potere termo-isolante dei foam impiegati, è bene prevenire soffiando aria secca sulla finestra.

Uno schermo metallico attorno al carico serve a convogliare il fascio dell'horn riducendo le dispersioni (spill-over) a quantità trascurabili. È importante che lo schermo sia realizzato con cura, non deve presentare “fessure” e possibilmente dovrebbe protrudere a mo’ di “paraluce” di un obiettivo fotografico, verso l'horn.

La fig. 6.1 mostra uno spaccato di un carico di facile realizzazione.

La fig. 6.2 mostra uno spaccato di un carico di difficile realizzazione, dovuta alla difficoltà di produrre coni di Styrodur[®] ma che assicura maggiori capacità schermanti e minore disadattamento.

Riferendosi alla fig. 6.1, la sezione ideale del carico (vista dall'horn) ai fini del minimizzare la quantità di liq.N₂ è circolare, ma è anche la soluzione che spreca più materiale in fase di costruzione.

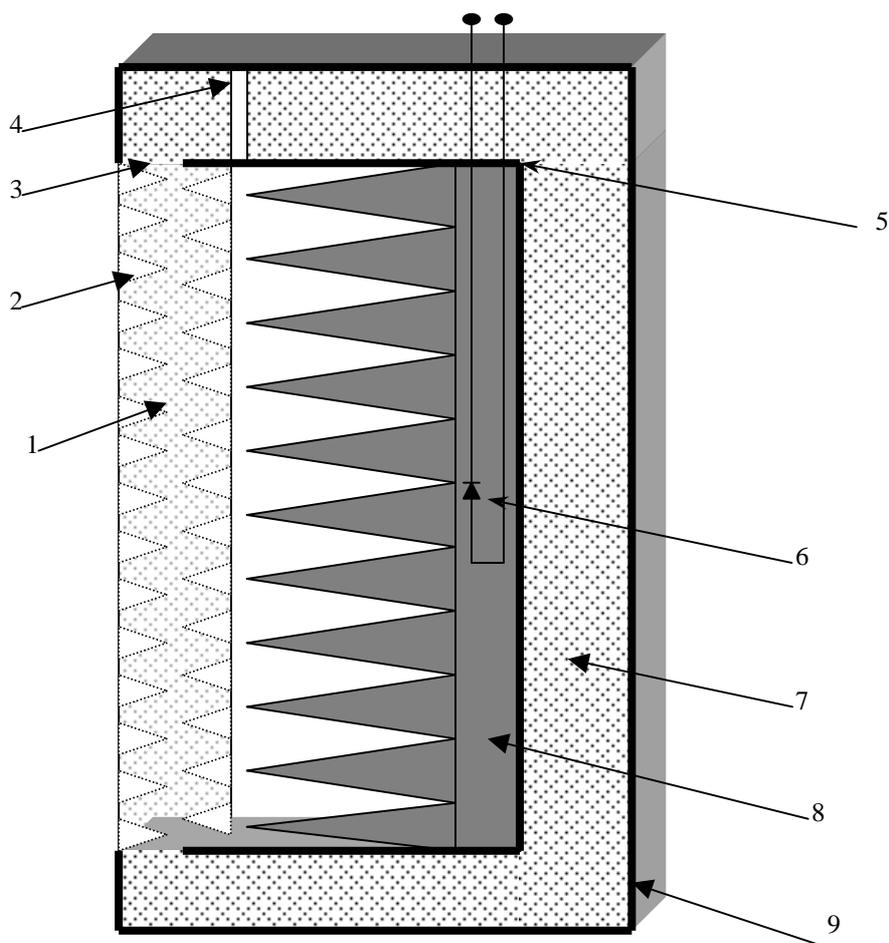


Figura 6.1 Idea realizzativa di carico raffreddabile con azoto liquido

La sezione più comoda per la realizzazione è quadrata.

Una soluzione esotica potrebbe essere una sezione esagonale, che, pur essendo di difficile realizzazione, ha il vantaggio di minimizzare la quantità di liq. N_2 e di scartare pochissimo foam in fase di realizzazione.

La fase dell'incollaggio dei foam è critica. La colla ha il duplice compito di assemblare il blocco e garantire la tenuta stagna del liq. N_2 .

La maggior parte delle colle non è sufficientemente termo-isolante, pertanto è necessario incollare i pezzi di foam fra loro con 2 cordoni di colla paralleli e senza contatto; il cordone interno, freddo, garantisce tenuta di liq. N_2 , il cordone esterno, caldo, garantisce tenuta meccanica ed funge da cordone di sicurezza se dal giro interno dovesse trafilare liq. N_2 .

Le colle suggerite sono :

- nel giro interno, Silicone rosso o Armstrong[®] A-12 (rapporto 4:1)
- nel giro esterno, una colla particolarmente tenace (es. bi-componente adatta per polistirolo/polistirene)

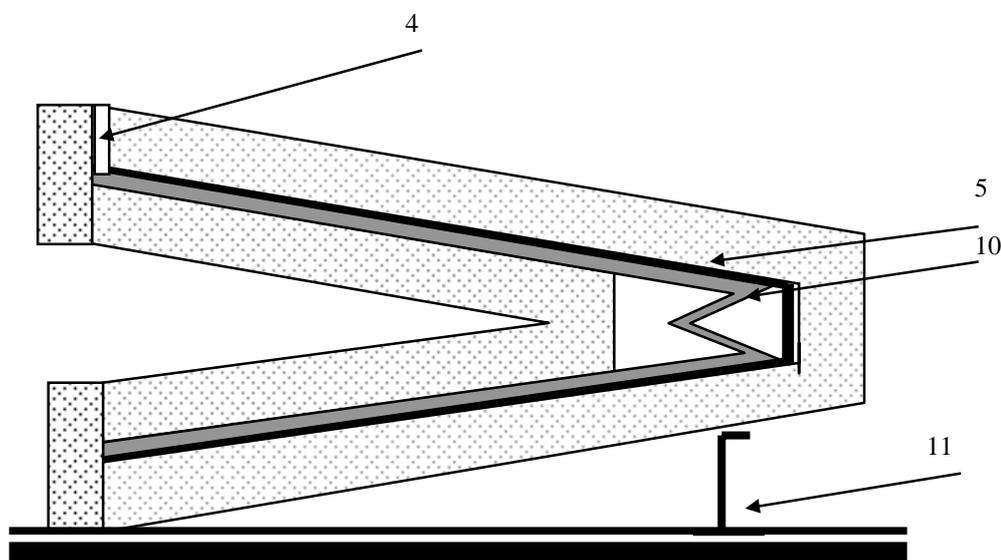


Figura 6.2 Idea realizzativa di carico raffreddabile con azoto liquido

Legenda fig. 6.1 e 6.2

- 1 Finestra radio-trasparente e termo-isolante.
- 2 Pattern di fresature a coni adiacenti per ridurre il disadattamento.
- 3 Gap. In questa zona è necessario creare un gap nella schermatura metallica per limitare la formazione di ghiaccio e/o condensa.
- 4 Foro di introduzione liq. N_2 e sfiato dei vapori.
- 5 Schermo metallico (tipo "Domopack[®]", nastro adesivo Alluminio o similari).
- 6 Sensore di temperatura.
- 7 Foam termo-isolante, non necessariamente radio-trasparente.
- 8 Eccosorb[®] CV 3 o similare
- 9 Eventuale schermo esterno (valutare se risulta più pratico del (5)).
- 10 Eccosorb[®] AN 72 o AN 74 o similare
- 11 Piedistallo e base di appoggio

7. Bibliografia e Riferimenti

- [1] KRAUS J. D. : - “Radio Astronomy” . *Cygnus-Quasar Books*
- [2] “AN 57-1 Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements”
Agilent Technologies
- [3] WARNER F.L.: “Microwave attenuation measurement”. *Peter Peregrinus Ltd. IEE series 19*
- [4] DE DOMINICIS M.: “Relazione sul calcolo dell’ENR di una sorgente di rumore coassiale equivalente”. *Università di Roma Tor Vergata. Fac. di Ingegneria*
- [5] MARIOTTI S., PISANU T., SCALAMBRA A.: “Accuratezza delle misure di temperatura di rumore”. *Rapporto Interno IRA 302/00*
- [6] MARIOTTI S.: “Planck Tb.vi”. Software in linguaggio LabView 4 per calcolare la temperatura di brillantezza. S.O.Win95
- [7] NATALE V.: Comunicazione privata.
- [8] BOYD D.: “Uncert.xls”. Agilent Technologies. Software in linguaggio MS. Excel per calcolare l’incertezza delle misure di temperatura di rumore. S:O. Win95
- [9] MARIOTTI S. : “finestre.doc”. Nota interna non pubblicata a riguardo dell’attenuazione e riflessione di materiali plastici.
- [10] LESURF J. C. G.: “Millimetre-wave Optics, Devices and Systems ”. *Adam Hilger*
- [11] PANELLA D., MARIOTTI S. Lavoro di calibrazione di rumore del ricevitore 6 GHz
- [12] “Catalogo generale Emerson & Cuming ”.
- [13] “64 m Sardinia Telescope. Final Design Report Optics and RF Design ”. *TR-1385-001*