

INTERNAL REPORT

Calibrazione della Marca di Rumore del Ricevitore Coassiale LP

Sergio Mariotti, Giuseppe Valente

Report N. 26,
released: 12 Giugno 2013

Revisore: Pietro Bolli



Osservatorio
Astronomico
di Cagliari

1. INTRODUZIONE.....	3
1.1. OBIETTIVO	3
1.2. LISTA ACRONIMI	3
2. METODI DI MISURA	4
2.1. GENERALITÀ SUL METODO DI MISURA DELLA MARCA DI RUMORE.....	4
2.1.1. Cielo “freddo” – Carico a temperatura ambiente	4
2.1.2. Carichi ad Azoto Liquido - Temperatura Ambiente	5
2.1.3. Carichi a circa 20 K – Temperatura ambiente	7
2.1.4. Metodo indiretto: verifica osservativa	8
2.2. SCHEMA A BLOCCHI.....	9
2.3. SETUP BANDA P	9
2.4. SETUP BANDA L	12
2.5. FILTRO SINTONIZZABILE	13
2.6. WATTMETRO	13
2.7. ACCESSIBILITÀ AL RICEVITORE	14
2.8. DATI	14
2.9. RIPETIBILITÀ E RIPRODUCIBILITÀ	14
3. INCERTEZZE DI MISURA.....	15
3.1. INCERTEZZE DI TIPO A	15
3.2. INCERTEZZE TIPO B.....	15
3.2.1. Carico cryo 20K.....	16
3.2.2. Carico Maury 77K	16
3.2.3. Carico Caldo	16
3.3. STIMA DELL’INCERTEZZA COMBINATA	16
4. RISULTATI	17
5. RINGRAZIAMENTI	19
6. APPENDICE: LA QUESTIONE DEL PIANO DI RIFERIMENTO	20
6.1. GENERALITÀ	20
6.2. E’ NECESSARIO TRASLARE I PIANI?.....	20
6.3. IN CHE MODO TRASLARE I PIANI?.....	20
7. BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI	23

1. Introduzione

Nota dell'ultimo minuto.

Successivamente al lavoro descritto nel presente report, ma poco tempo prima di pubblicare lo stesso, gli autori sono venuti a conoscenza di un errore dell'assemblaggio hardware del ricevitore L/P tale da rendere parzialmente inutilizzabili i risultati presentati. La correzione di tale errore, inevitabilmente cambierà i valori dei risultati.

Tuttavia non sarà necessario ripetere il lavoro sperimentale descritto nel presente report in quanto i dati ivi contenuti costituiscono la fonte primaria dei dati necessari.

1.1. Obiettivo

L'obiettivo della campagna di misure, oggetto del presente rapporto, è calibrare in temperatura il ricevitore radioastronomico dual-frequency L/P di prima luce di SRT [1]. Tale calibrazione consiste nel determinare, con il metodo più accurato possibile, l'ampiezza della “marca” di rumore espressa in Kelvin.

Come si potrà leggere più dettagliatamente di seguito, la campagna di misure di calibrazione fornisce di fatto anche altre informazioni come ad esempio la temperatura di rumore del ricevitore ed indicazioni qualitative della linearità e del drift.

La temperatura di marca è un dato di targa fondamentale per l'osservazione radioastronomica.

La temperatura di rumore è un dato importante finalizzato a verificare la rispondenza del progetto ed il buon funzionamento del ricevitore.

Gli indicatori qualitativi di non-linearità e drift sono stati utilizzati per l'accettazione o il rifiuto dei dati in fase di acquisizione e processing, ma non si è ritenuta necessaria una menzione particolare nel presente report.

1.2. Lista acronimi

T_m, T_m	Temperatura di “marca”
T_e, T_e	Temperatura di rumore (al piano di ingresso, genericamente posizionato)
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_h, T_h	Temperatura del carico caldo
ENR	Excess Noise Ratio
CW	Continuos wave, segnale monocromatico

2. Metodi di misura

2.1. Generalità sul metodo di misura della marca di rumore

Il valore della temperatura della marca di rumore può essere caratterizzato attraverso due metodologie: (i) per via diretta, conoscendo la temperatura del generatore di rumore, le attenuazioni dell'accoppiatore e dei cavi di collegamento e l'ENR del generatore di rumore, oppure (ii) in modo derivato, per confronto con una differenza, ben nota, di temperature generata da due carichi piazzati alternativamente di fronte all'*horn*. Per generare una delle temperature richieste da quest'ultimo metodo è possibile basarsi su osservazioni astronomiche vere e proprie puntando la zona di cielo più fredda possibile.

Il primo metodo, apparentemente più semplice, è di fatto scarsamente accurato in quanto l'esperienza ha insegnato che spesso i generatori di rumore, sono sì caratterizzati da una incertezza di targa associata all'ENR molto contenuta (es. $\pm 0.1\text{dB}$), ma poi nella realtà lo scostamento è ben più grande, arrivando a superare il dB.

Il secondo metodo richiede che l'*horn* possa “puntare” due corpi neri le cui temperature siano conosciute con bassa incertezza e ben distanti fra loro (ad es. T_{amb} vs 77K, oppure T_{amb} vs 20 K, oppure temperatura ambiente vs cielo freddo) e che per entrambi i casi sia possibile inserire il segnale di marca.

Solitamente, la disponibilità di una sorgente a temperatura ambiente non costituisce un problema pratico.

Viceversa la fornitura e l'utilizzo della sorgente “fredda” costituisce spesso difficoltà ed è a sua volta fonte di incertezza.

Se si utilizzano carichi criogenici in guida d'onda o spazio libero, ne consegue che più è grande la lunghezza d'onda, più è grande il carico e di conseguenza maggiore è il volume di fluidi criogenici da utilizzare, il che genera un importante rischio di infortunio lavorativo.

Anche la dimensione angolare del *beam* dell'*horn* gioca un ruolo di rilievo; il *beam* sottile e collimato prodotto dal tipico *horn* per fuoco secondario (alto valore di rapporto f/d) richiede un carico adattato di minori dimensioni rispetto alle dimensioni richieste dal carico necessario a chiudere un *horn* caratterizzato da *beam* “largo”, tipicamente utilizzato per illuminare da fuoco primario (basso valore di rapporto f/d).

Di seguito sono riportate le soluzioni prese in considerazione. Di fatto il metodo implementato è quello basato con carichi ad Azoto Liquido vs temperatura ambiente sia per la banda P che per la banda L; per quest'ultima è stato possibile applicare anche la tecnica carico a 20 K vs temperatura ambiente.

2.1.1. Cielo “freddo” – Carico a temperatura ambiente

Il cielo è spesso considerato un'eccellente sorgente “fredda”.

Ma in banda P, ed illuminando con un *horn* a largo fascio, gli effetti non trascurabili del fondo galattico, delle radiosorgenti intense (Sole, Taurus, CasA), dello *spill-over* verso il terreno, delle RFI, renderebbero difficile, se non impossibile, la misura. Inoltre, in letteratura sono note le mappe alla sola frequenza di 408 MHz, non in tutta la banda P, ma è noto che la variabilità all'interno della banda P stessa è notevole.

Alle difficoltà elencate va aggiunto il fattore umano. La campagna di misure che si sarebbe condotta, avrebbe richiesto di osservare all'ora del giorno in cui la brillantezza allo Zenith fosse la minore possibile (circa ore siderali 09:00). Per questioni di schedula dei lavori, la campagna di misure sarebbe avvenuta alle ore 03:00 (ora locale) in pieno inverno! [2]

Tuttavia il metodo è stato preso in considerazione ed affrontato. Ma durante lo studio che avrebbe portato a conoscere la brillantezza del cielo convoluta nell'angolo solido del larghissimo *beam*, si è dovuti desistere causa difficoltà di calcolo.

2.1.2. Carichi ad Azoto Liquido - Temperatura Ambiente

Un metodo per generare un salto noto di temperature è la commutazione fra carico a temperatura ambiente / carico raffreddato in azoto liquido.

E' stato verificato che, per entrambe le bande P ed L, era disponibile un carico criogenico di prestazioni metrologiche e dei necessari adattatori a bassissima (e conosciuta) attenuazione.

Il carico criogenico "Maury[®] MT7118A" è uno strumento di altissima qualità, esso è addirittura considerato uno "Standard" metrologico secondario. La temperatura di rumore, certificata dal costruttore, è fornita come funzione della frequenza, della pressione barometrica e della temperatura ambiente. Viene fornita anche l'incertezza associata.

Il carico criogenico "Maury[®] MT7118A" è dotato inoltre di *switch* per commutare fra "carico freddo" e "carico caldo". Il connettore è coassiale disponibile all'utente è tipo 2.92mm M (compatibile SMA).



Fig. 1 carico criogenico "Maury[®] MT7118A.

Per quanto riguarda la banda L, per ciascuna polarizzazione lineare, il collegamento dal ricevitore al carico freddo, avviene per mezzo di una transizione Guida Tonda-WR650 (vedi componente ritratto a sinistra nella Fig. 2), un adapter WR650-CoaxNf (Fig. 2 a destra) ed un adapter di precisione Nm-SMAf [3].

Il contributo di rumore introdotto da qualunque tipo di linea di adduzione utilizzata per necessità di collegamento deve essere conosciuto con grande accuratezza. E' noto che, un errore o incertezza di pochi centesimi di dB, che l'esperienza comune consentirebbe di trascurare, produce una differenza non trascurabile in termini di errore nella temperatura di rumore.

Pertanto è necessario conoscere con grande accuratezza i contributi di temperatura di rumore generati dalle linee di adduzione per poi venir rimossi in fase di post processing. Tali contributi dipendono esclusivamente dall'attenuazione e dalla temperatura fisica.

Per determinare l'attenuazione della transizione Guida tonda-WR650 si è ritenuto che il metodo più accurato di conoscenza sia la stima, basata sulla lunghezza, conducibilità della lega di Alluminio ed alla rugosità [4].

L'attenuazione dell'adapter WR650-coaxNf è stata misurata in precedenti sessioni, così pure l'attenuazione dell'adattatore Nm-SMAf [5].

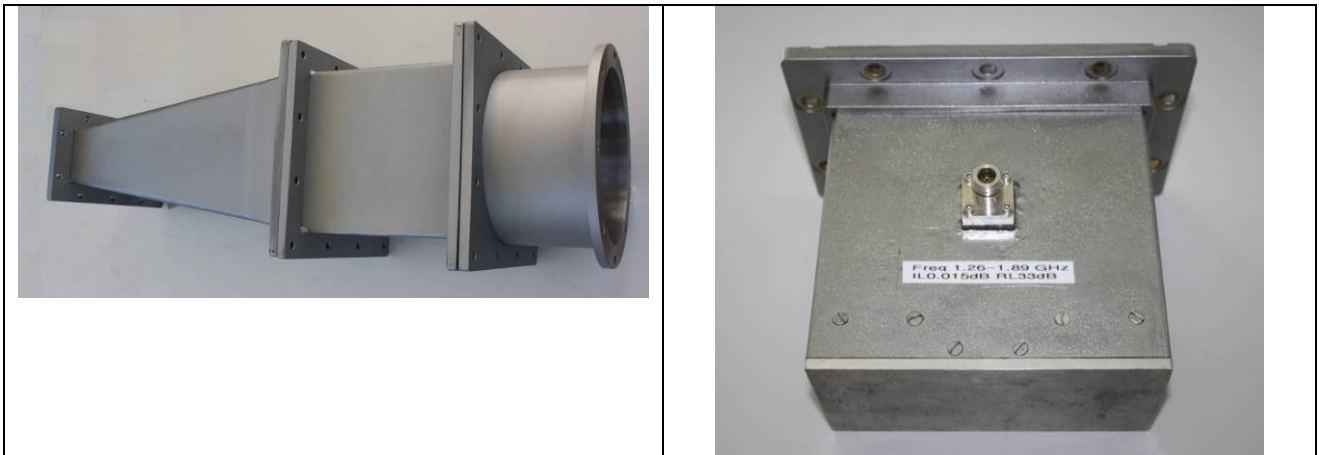


Fig.2 Transizioni utilizzate collegare il carico criogenico della Maury e la guida circolare del ricevitore nella banda L.

Nell'impossibilità meccanica di iniettare il segnale prodotto dal carico freddo attraverso la bocca dell'horn banda P, per ciascuna polarizzazione lineare, il collegamento è avvenuto combinando a due a due i connettori tipo Nf di accesso al Dewar, tramite due cavi di identica lunghezza ed a bassa perdita, sommati fra loro con un power splitter "Mini-Circuits" (180° elettrici), ed adattati al carico Maury tramite un adattatore BNCm-SMAm.

Le attenuazioni dei due cavi, dello splitter 180° Mini-Circuits e dell'adattatore, non trascurabili, sono state misurate accuratamente (vedi Fig. 3) per poi venir detratte in fase di post processing.

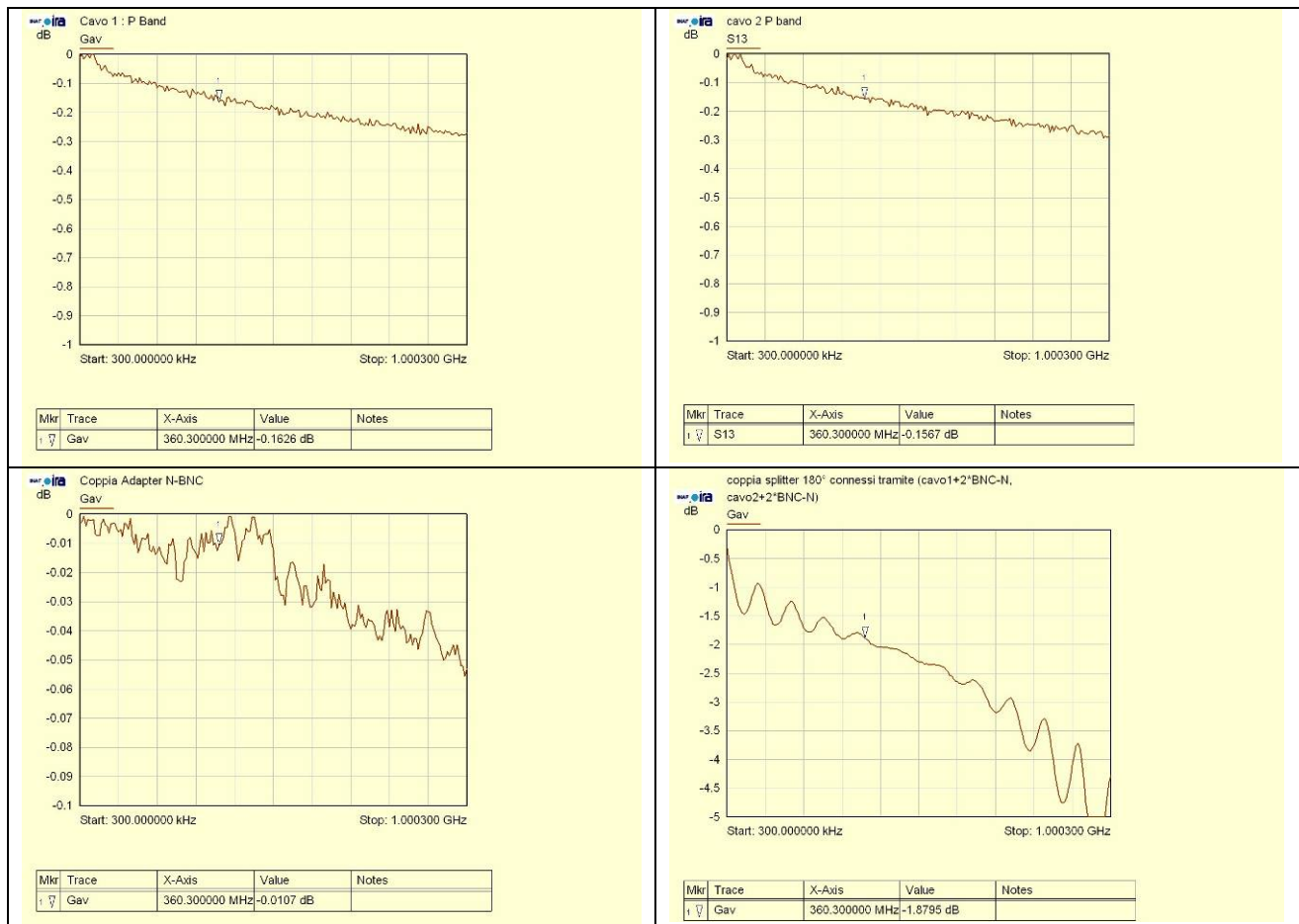


Fig.3 Attenuazioni delle linee coassiali di collegamento fra carico Maury e Porte Ricevitore P

La catena di misura, necessariamente esclude il feed (contributo trascurabile) ed i cavetti di collegamento “Andrew_FSJ-2_290_mm_N-7/16” [6] il cui contributo non è trascurabile. In fase di post-processing verrà applicata una opportuna correzione per tenerne conto.

2.1.3. Carichi a circa 20 K – Temperatura ambiente

Un altro metodo per generare un salto noto di temperatura è dato dalla possibilità di commutazione fra carico a temperatura criogenica (circa 20K...25K) ed un carico a temperatura ambiente.

Tale possibilità è offerta da una caratteristica unica del ricevitore L/P cioè la presenza di relais coassiali criogenici a due vie e cablati in modo tale che possono commutare il percorso RF a monte del LNA. L’LNA può venir alimentato, alternativamente dall’horn oppure da un carico adattato raffreddato criogenicamente e piazzato a ridosso del relais stesso.

La temperatura fisica, indicativamente compresa fra 20K e 25K, viene letta tramite un accurato sensore termometrico [7] piazzato nelle vicinanze.

Come si può intuire dalla fig. 4 in banda L, la marca di rumore è visibile sia quando il relais è commutato su “horn” sia quando è commutato su “cryoload”. Questo fa sì che la marca sia visibile in qualunque posizione dello switch. E’ pertanto possibile utilizzare la commutazione del cryo-relais per calibrare il valore di marca.

In banda P, al contrario, la marca di rumore è invisibile quando il relais è commutato su carico criogenico. Pertanto in banda P di fatto sarà possibile determinare il valore di marca utilizzando la commutazione descritta in 2.1.2.

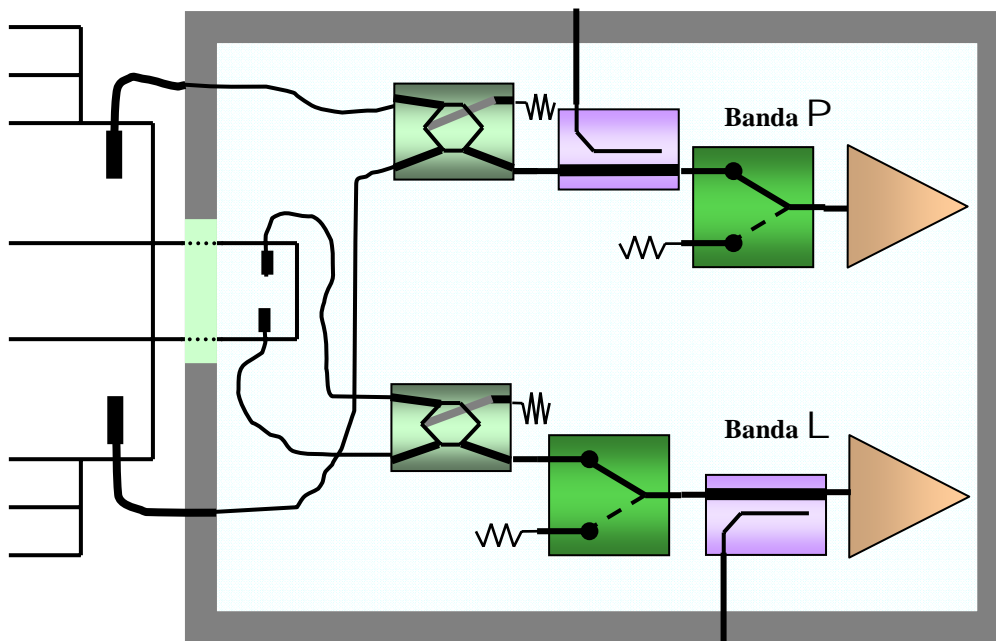


Fig. 4 Schema semplificato dei percorsi RF all'interno del Dewar

2.1.4. Metodo indiretto: verifica osservativa

Benché le misure oggetto del presente report siano state eseguite con la minore incertezza possibile, non si può escludere che esse siano affette da errori sistematici non conosciuti e/o sbagli umani.

La verifica consisterà nella misura osservativa sperimentale del SEFD e dell'efficienza d'antenna utilizzando una radiosorgente di flusso noto e del successivo confronto con l'efficienza d'antenna plausibile ed attesa.

In caso di discordanza, tuttavia, prima di effettuare eventuali aggiustamenti, è bene discutere con gli autori del presente report la strategia da adottare.

2.2. Schema a blocchi

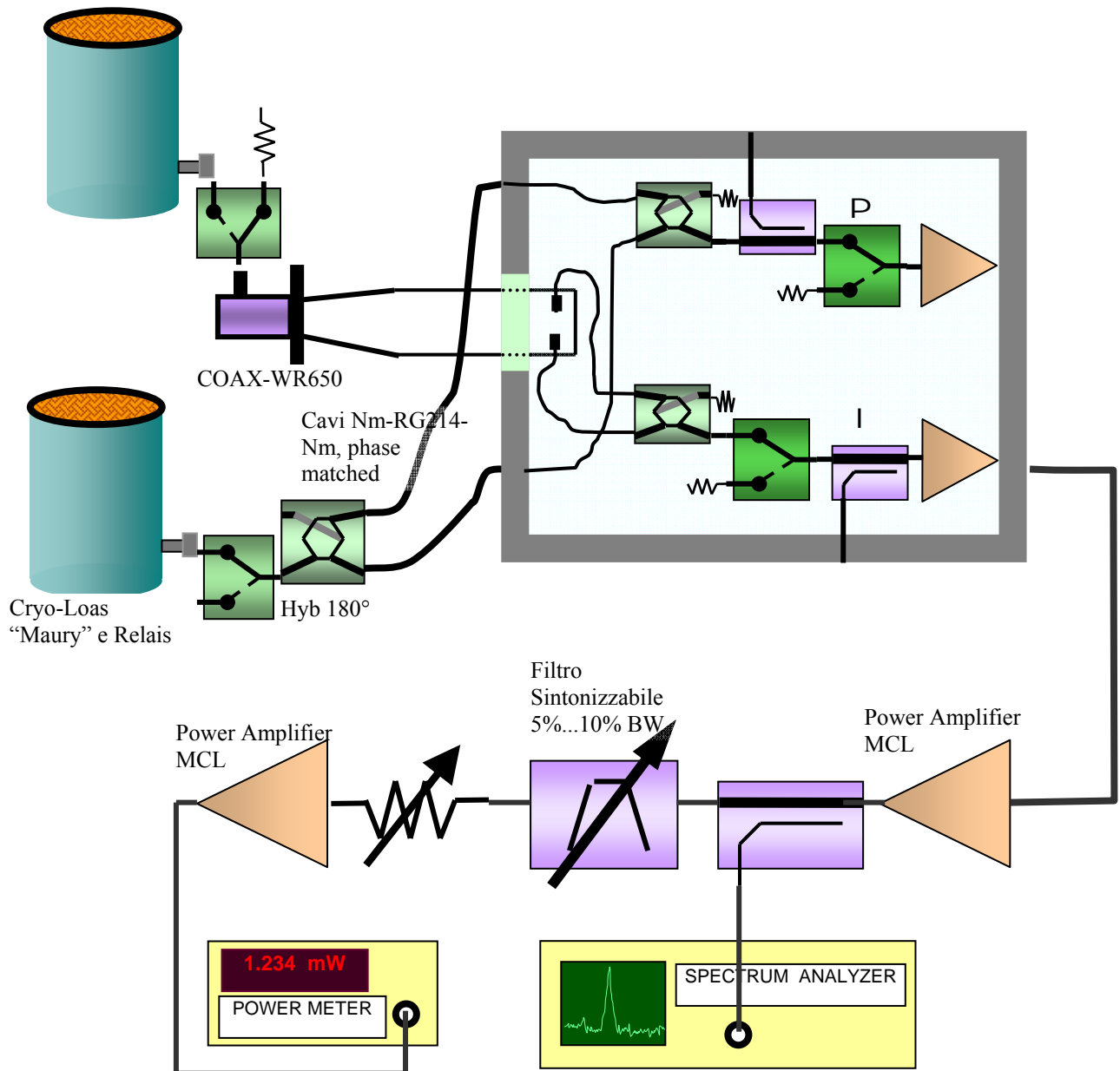


Fig.5 Schema a blocchi del banco di misura

2.3. Setup Banda P

In banda P, la dimensione ingombrante dell'horn non consente l'iniezione dei segnali di test direttamente tramite l'horn stesso. E' necessario un compromesso; si iniettano i due livelli di rumore necessari alla misura tramite i connettori coassiali (tipo N) di accesso al criostato. Pertanto rimane escluso dal percorso analizzato la serie: cavo Andrew FSJ2-50 (290mm Nm-7/16m) + Horn.

Assumendo che la temperatura di rumore dell'horn compreso ciascun dipolo/lanciatore sia trascurabile, la presenza del cavo FSJ2, il cui contributo non è viceversa trascurabile, necessita di una correzione che viene eseguita in post-processing.

In banda P è possibile generare la differenza di temperature note in due diversi modi che per semplicità chiameremo:

- **Carico Maury (~77K)**
- **Cryo Relais (20-25K)**

Entrambi i metodi producono come risultato la Temperatura di Rumore, ma, come messo in luce nel paragrafo 2.1.3, solamente il metodo “Carico Maury” è un grado di produrre anche la necessaria Temperatura di Marca.

Per collegare il carico Maury[®] mod. MT7118A s/n 143 (porta coassiale tipo K maschio) al ricevitore (due porte coassiali tipo N femmina) sono necessari, come mostrato in Fig.7:

- adattatore SMA_f-BNC_m
- divisore di potenza (“splitter”) 180° (connettori BNC_f) . MCL[®] mod ZFSCJ-2-1
- Q.tà 2 adattatori BNC_m-N_f
- Q.tà 2 cavi coassiali di lunghezza opportuna (1 m) a bassa perdita, uguali in attenuazione e fase connettorizzati N_m.



Fig.6 Setup di misura del banda P, nel dettaglio il collegamento del carico della Maury allo splitter che divide e sfasa di 180° il carico caldo e freddo.

Di ciascun elemento sono stati misurati accuratamente i parametri S (S-par), sia singolarmente sia in cascata.

E' stato verificato che i cavi non variavano sensibilmente i propri S-par in funzione di flessioni multiple.

Quando si è generato il salto termico utilizzando il cryo relais, il setup appena descritto è rimasto installato, con l'accortezza di mantenere il carico Maury commutato su “temperatura ambiente”.

E' evidente che quando il salto termico era generato dal carico Maury, il piano di misura era posizionato in coincidenza dello stesso, quindi in fase di post processing sono state condotte due traslazioni, da Carico Maury verso parete Dewar e poi da Parete Dewar, a ritroso, lungo i cavetti Andrew FSJ2-50 fino alla bocca dell'horn.

Quando invece il salto termico era generato del cryo relais, il piano di misura, coincidendo con lo stesso, era posizionato all'interno del Dewar. In fase di post processing si sono condotte due traslazioni: la temperatura calda verso il cryo relais, poi la temperatura di rumore, a ritroso fino alla bocca dell'horn.

Le traslazioni interne al Dewar hanno richiesto la conoscenza accurata delle attenuazioni e delle temperature fisiche dei percorsi.

Al fine di semplificare il calcolo, il percorso RF interno al Dewar è stato suddiviso in tre sezioni comprendenti rispettivamente l'insieme delle attenuazioni piazzate a temperatura ambiente, a temperatura intermedia (cavetto inox), e a temperatura criogenica. Le lunghezze dei cavetti coassiali UT141SS (95mm) ed UT141B (410mm), così come l'attenuazione dell'ibrido 180° sono state rese disponibili da precedenti misure con analizzatore di rete vettoriale. Le attenuazioni e le temperature fisiche equivalenti dei citati cavetti coassiali UT141SS e UT141B sono state desunte dai datasheets (dati @ Tamb) dopo averli estrapolati con l'ausilio di un simulatore termico [4].



Fig. 7. Banco di misura del banda P a valle del ricevitore;

Nel dettaglio il banco di misura in uscita dal ricevitore era costituito da:

- LNA ZRL 700+
- Accoppiatore direzionale MiniCircuit ZFDC-20-4L;
- Filtri variabili: K&L® mod. 5BT-250/500-5-N-NP s/n 1;
- Attenuatore variabile HP 3550 VHF Attenuator;
- Amplificatore MiniCircuit ZFL-1000VH
- Filtro BPF K&L 61B10-300/400

2.4. Setup Banda L

Come già messo in evidenza, in banda P, la dimensione ingombrante dell'horn non consente l'iniezione dei segnali di test radiati direttamente tramite l'horn stesso. Viceversa ciò è stato possibile per il banda L, grazie alla rimozione delle corrugazioni esterne presenti nella flangia del banda P (la cui attenuazione è decisamente trascurabile) ed all'introduzione di un insieme di adattatori fra Guida_Circolare-Coassiale K_f descritti nel paragrafo 2.1.2.

A tale porta coassiale è stato collegato il carico Maury®.



Fig.8 Setup di misura del banda L. Nel dettaglio il collegamento del carico della Maury alla guida d'onda per l'iniezione del carico caldo e del carico freddo.

Anche in banda L, così come in banda P, è stato possibile generare la differenza di temperature note nei due diversi modi:

- **Carico Maury**
- **Cryo Relais**

Differentemente dalla misura in banda P, entrambi i metodi producono ora come risultato sia la Temperatura di Rumore sia la Temperatura di Marca.

L'insieme di adattatori fra Guida_Circolare-Coassiale K_f ha necessitato una caratterizzazione estremamente accurata. In particolare è necessario conoscere la temperatura fisica ed il Massimo Guadagno Disponibile.

L'insieme di adattatori era costituito da:

- Adattatore in guida d'onda sagomata, Guida_Circolare-WR 650
- Adattatore WR 650-Coassiale N_f
- Adattatore N_f-K_f

Per una guida d'onda, il massimo guadagno disponibile può essere calcolato dalla matrice S oppure stimato (ma in modo più accurato della misura stessa) in base alla lunghezza, conducibilità superficiale e rugosità. E' stato utilizzato quest'ultimo metodo.

L'adattatore WR 650-Coassiale N_f era dotato di targa credibile riportante l'attenuazione.

L'adattatore N_f-K_f è stato misurato molto accuratamente in [4].

Per effettuare le necessarie traslazioni di piano di riferimento, analogamente a quanto descritto in Appendice, il percorso RF interno al Dewar è stato diviso in due sezioni, una a temperatura ambiente e l'altra a temperatura criogenica. I dati delle attenuazioni sono stati ricavati da [8].

Nel dettaglio il setup di misura a valle del ricevitore ha incluso la seguente componentistica:

- LNA ZRL 700+
- Accoppiatore direzionale MiniCircuits ZFDC-20-4L
- Filtri variabili: K&L[®] mod. 5BT-1000-2000-5N s/n UT430-1 con banda passante pari a circa 5%
- Attenuatore variabile HP 3550 VHF Attenuator
- Amplificatore MiniCircuits ZFL 2500 VH++
- Filtro Passa Banda K&L 1000-2000 MHz

2.5. Filtro sintonizzabile

Al fine di produrre una serie di risultati che fossero funzione della frequenza, sono stati utilizzati filtri sintonizzabili.

- In banda P il filtro utilizzato era K&L[®] mod. 5BT-250/500-5-N-NP s/n 1 con banda passante pari a circa 5%¹.
- In banda L il filtro utilizzato era K&L[®] mod. 5BT-1000-2000-5N s/n UT430-1 con banda passante pari a circa 5%.

2.6. Wattmetro

La consolle utilizzata era Hewlett-Packard[®] mod. 437B con calibrazione in corso di validità.

Il sensore utilizzato era Hewlett-Packard[®] mod. 8481A del tipo a termocoppia. Tale tecnologia, a differenza dei modelli a diodo, offre una linearità assoluta qualunque sia la natura del segnale applicato (rumore piuttosto che CW).

Per poter apprezzare con un sufficiente numero di cifre significative la temperatura di marca è stato necessario che la lettura del wattmetro offrisse una granulosità di +/- 0.1% o minore. Questa condizione, critica, è stata appena raggiunta bilanciando potenza applicata e tempo di integrazione. Una consolle di prestazioni maggiori sarebbe stata di aiuto.

¹ Inizialmente era stato utilizzato un Thrilitch[®] mod. VF-40000 s/n 143 con banda passante pari a circa 12 MHz, poi sostituito a causa di un falso contatto.

2.7. Accessibilità al ricevitore

L'intero box ricevitore è stato sostenuto da una culla rotante, progettata e costruita ad hoc, che ha permesso di ruotare nella posizione più opportuna, di volta in volta, il ricevitore sotto test.

Le dimensioni ragguardevoli e la necessità di rotazione ha richiesto che i cavi di collegamento al banco di misura dovessero essere di adeguata lunghezza (circa 3 mt), ma per cavi di tale lunghezza quando si cerca di apprezzare variazioni potenze dell'ordine 0.1%, diventa critico il problema della microfonicità. I cavi sono stati pertanto fissati meccanicamente durante le operazioni di misura.

2.8. Dati

A rigore, per calibrare la temperatura di marca sono necessari solamente tre valori per ciascuna frequenza e per ciascuna polarizzazione. Tuttavia poiché è possibile che durante la sequenza di misura, fenomeni di drift e non linearità possano disturbare, viene utilizzato un metodo ridondante che raccoglie cinque punti. Tale metodo è descritto in dettaglio in [9].

In mancanza di un meccanismo automatico, peraltro auspicabile, i dati vengono raccolti manualmente da due persone che agiscono in sinergia, sincronia e rapidità.

Una persona comanda sia il relais che genera il salto termico sia l'accensione e spegnimento dalla marca.

L'altra persona legge il wattmetro e riporta i valori nelle celle MS Excel.

Al termine della sequenza di raccolta dei cinque valori, il foglio MS Excel fornisce istantaneamente un giudizio di qualità dei dati raccolti (T_e , T_m , drift, non-linearità). Se a giudizio dei due operatori i dati non sono convincenti, si ripete la sequenza.

Una volta raccolti tutti i dati, si procede con la fase post-processing al fine di applicare le necessarie correzioni non prevedibili a priori.

Il foglio MS Excel assume quindi il duplice valore di strumento di misura e di memoria storica dei dati. La totale completezza dei dati si trova in tale foglio MS Excel, il presente rapporto ne può essere solamente un estratto.

2.9. Ripetibilità e riproducibilità

In condizioni di ripetibilità cioè utilizzando il medesimo setup ed in un breve arco di tempo, tipicamente alcuni minuti, il jitter dei dati osservati (potenza RF) è stato generato sia dalla distribuzione normale sia da importanti fenomeni di drift.

I valori T_e e T_m , calcolati istantaneamente e benché grezzi, sono stati affetti, come lecito aspettarsi, dalla sola distribuzione normale.

La campagna di misure è stata ripetuta dopo circa un mese.

Il confronto fra i risultati ottenuti nelle due diverse sessioni costituiscono la base per poter giudicare i risultati in condizioni di riproducibilità.

3. Incertezze di misura

3.1. Incertezze di tipo A

In ottemperanza al moderno metodo di trattamento, propagazione e presentazione dell'incertezza, bisogna distinguere fra incertezza di tipo A (incertezza di origine statistica) ed incertezza di tipo B (incertezza di tutte le altre origini, ivi comprese quelle desunte dalle tolleranze degli strumenti) [10].

La deviazione standard aspettata della potenza letta dal wattmetro è pari a

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\Delta v \cdot \tau}}$$

Dove:

Δv = Banda passante

τ = costante di tempo

Nel caso pratico, oggetto del presente report, $\Delta v \approx 12$ MHz , $\tau \approx 0.5$ sec. ne consegue che $\sigma \approx 0.0004$. Assumendo una distribuzione gaussiana, il jitter percepito dall'operatore sul display sarà pari a $5\sigma \approx 0.002$ cioè al 0.2% della lettura di potenza.

Se, nella lettura del display della consolle del wattmetro, il digit meno significativo non consentisse di leggere il dato con granulosità inferiore allo 0.2% ne conseguirebbe che l'incertezza statistica sarebbe maggiore. Nel caso pratico, essendo disponibile solamente una consolle-wattmetro di prestazioni limitate, tale granulosità è stata appena raggiunta ma non ampiamente superata.

E' stato scelto, di considerare nei contributi di tipo A, non solo le incertezze statistiche causate dal rumore di misura tipico del breve tempo. Sono presenti anche contributi, pur sempre statistici, raccolti in condizioni di "riproducibilità" cioè raccolti in giornate diverse e con setup diversi (carico Maury e cryo_switch).

E' quest'ultimo il contributo che pesa maggiormente; $U(T_m)$ raggiunge valori fin ben $\pm 0.25K$ ($k=2$).

Nonostante ciò, si è scelto di pubblicare le medie e le deviazioni standard così ottenute anche se sarebbe stato lecito applicare un filtro a mediana che avrebbe ridotto la deviazione standard.

3.2. Incertezze tipo B

Delle incertezze descritte di seguito, fornite dai costruttori, non è noto il "*coverig factor*" k , in questi casi, è lecito adottare le linee guida del NIST al riguardo, pertanto si assume $k=2$ e distribuzione normale [10].

La propagazione dell'incertezza nell'equazione di misura non è stata effettuata analiticamente, bensì numericamente tramite una simulazione simile al metodo Montecarlo e realizzata molto semplicemente in foglio MS Excel. E' tale foglio è la sede dei calcoli statistici; di seguito viene riportato solamente un estratto dei valori più significativi.

3.2.1. Carico cryo 20K

L'incertezza associata alla temperatura fisica letta dal termometro criogenico è stata fornita dal costruttore stesso $\pm 1.5 \text{ K}$ [11].

L'analisi numerica ha mostrato che $\frac{\partial T_e}{\partial T_{cold}} \cdot U(T_{cold}) = \pm 0.98 K$, cioè $\pm 2 K$ ($k=2$)

La dipendenza di T_m da variazioni ed incertezze associate a T_{cold} appare più consolante, $\frac{\partial T_m}{\partial T_{cold}} \cdot U(T_{cold}) = \pm 0.01 K$ cioè $\pm 0.02 K$ (95%).

3.2.2. Carico Maury 77K

L'incertezza associata alla temperatura di brillanza del carico Maury è stata fornita dal costruttore stesso $\pm 1.0 \text{ K}$.

L'analisi numerica ha mostrato che $\frac{\partial T_e}{\partial T_{cold}} \cdot U(T_{cold}) = \pm 0.74 K$, cioè $\pm 1.48 K$ ($k=2$).

La dipendenza di T_m da variazioni ed incertezze associate a T_{cold} appare più consolante, $\frac{\partial T_m}{\partial T_{cold}} \cdot U(T_{cold}) = \pm 0.005 K$ cioè $\pm 0.01 K$ (95%).

3.2.3. Carico Caldo

La temperatura del carico caldo è stata letta con termometro digitale calibrato. L'incertezza associata è stata fornita dal costruttore stesso $\pm 0.5 \text{ K}$.

L'analisi numerica ha mostrato che $\frac{\partial T_e}{\partial T_{hot}} \cdot U(T_{hot}) = \pm 0.12 K$, cioè $\pm 0.24 K$ ($k=2$).

La dipendenza di T_m da variazioni ed incertezze associate a T_{hot} è praticamente insensibile, $\frac{\partial T_m}{\partial T_{hot}} \cdot U(T_{hot}) = \pm 0.003 K$ cioè $\pm 0.006 K$ (95%).

3.3. Stima dell'incertezza combinata

La stima dell'incertezza associata al valore di temperatura di marca è la somma RSS moltiplicata per $k=2$ (95%) dei contributi di tipo A e tipo B.

4. Risultati

Di seguito si riportano i valori di Temperatura di marca e Temperatura di rumore, validi al piano della bocca del feed, da utilizzare come dato di targa del ricevitore. Dove disponibile è stata riportata pure la stima dell'incertezza associata.

I valori di temperatura di marca per la Banda L sono stati determinati con due metodologie (Carico Maury all'azoto liquido e carico criogenico 20K...25K), in due tempi diversi; conservativamente, si è scelto di mediare i quattro valori ottenuti, benché l'applicazione di un filtro a mediana avrebbe probabilmente ridotto l'incertezza.

I valori di temperatura di marca per la Banda P sono stati determinati con una sola metodologia (carico Maury all'azoto liquido), in due tempi diversi; i due valori ottenuti sono stati mediati.

Le differenze numeriche fra i risultati ottenuti, in termini di temperatura di marca, si sono dimostrate particolarmente contenute al variare dei metodi di misura.

I valori di temperatura di marca rispettano la specifica richiesta $T_m \approx 0.1 T_{sys}$.

Banda P: Temperatura di Marca (al piano della flangia di ingresso)			
Freq.	Polarizzazione		Incetezza k=2 (probabilità 95%)
	V	H	
[MHz]	[K]	[K]	± [K]
310	3.53	3.40	0.32
330	4.17	3.87	0.32
350	4.71	4.31	0.32
380	5.58	4.81	0.32
410	6.33	5.64	0.32

Banda L: Temperatura di Marca (al piano della flangia di ingresso)			
Freq.	Polarizzazione		Incetezza k=2 (probabilità 95%)
	V	H	
[MHz]	[K]	[K]	± [K]
1300	1.50	1.73	0.34
1400	1.39	1.65	0.34
1500	1.59	1.89	0.34
1600	1.60	2.15	0.34
1700	1.88	1.97	0.34
1800	2.11	2.28	0.34

I valori di temperatura di rumore alla flangia, sia per la Banda P sia per la Banda L sono stati determinati con due metodologie (Carico Maury all'azoto liquido e carico criogenico 20K...25K), in due tempi diversi; conservativamente, si è scelto di mediare i quattro valori ottenuti, benché l'applicazione di un filtro a mediana avrebbe probabilmente ridotto l'incertezza.

Le misure effettuate lo stesso giorno con due metodi diversi sono in grande accordo fra loro, mentre la differenza si esalta quando le misure sono riprodotte dopo circa un mese, prescindendo dal metodo.

Banda P: Temperatura di Rumore (al piano della flangia di ingresso)			
Freq.	Polarizzazione		Incerteza k=2 (probabilità 95%)
	V	H	
[MHz]	[K]	[K]	± [K]
310	20	18	N/D
330	21	19	N/D
350	19	19	N/D
380	17	18	N/D
410	22	19	N/D

Banda L: Temperatura di Rumore (al piano della flangia di ingresso)			
Freq.	Polarizzazione		Incerteza k=2 (probabilità 95%)
	V	H	
[MHz]	[K]	[K]	± [K]
1300	12	11	N/D
1400	10	10	N/D
1500	12	11	N/D
1600	13	11	N/D
1700	13	11	N/D
1800	12	11	N/D

5. Ringraziamenti

Si ringraziano:

i sig.ri Claudio Bortolotti e Mauro Roma per le simulazioni di brillantezza del cielo con il software Nova for Windows ma soprattutto per gli utili suggerimenti critici durante tutta la fase delle misure.

Il dott. Sergio Poppi per l'impegno nella simulazioni della brillantezza del cielo convoluta con il fascio dell'horn.

I sig.ri Pasqualino Marongiu e Juri Roda per aver approntato la più che utile culla rotante sulla quale è stato installato il ricevitore durante la campagna di misure.

I colleghi del Radiotelescopio di Medicina per aver sopportato con pazienza il disordine generato dagli autori durante la campagna di misure.

6. Appendice:

La questione del piano di riferimento

6.1. Generalità

Le misure di Temperatura di rumore, implicano la definizione di un “piano di riferimento”, cioè una linea ideale che definisca il confine fra ingresso del ricevitore e tutto il mondo a monte del ricevitore stesso.

Il piano di riferimento naturale è posto sulla bocca dell'horn. Tutti gli elementi a valle del piano di riferimento (horn, adattatori guida-coax, accoppiatori direzionali, LNA, ecc.) appartengono al ricevitore il quale è caratterizzato da una propria T_e e presenta una T_m per ogni frequenza e per ogni canale di polarizzazione. Tutti gli elementi a monte del piano di riferimento appartengono al paraboloide.

6.2. E' necessario traslare i piani?

Durante la fase di calibrazione della marca, quando il piano di riferimento al quale avviene la commutazione è posizionato in un piano diverso dal confine naturale (piano della bocca dell'horn), è evidentemente necessario traslare i valori T_e e T_m dal piano di commutazione fino alla bocca dell'horn. Questa operazione agisce sia sul valore T_e sia sul valore T_m .

Se invece il piano di commutazione coincide con il piano della bocca dell'horn, non è necessaria nessuna traslazione. In questo caso, il valore T_m , anche se iniettato in un piano differente, non necessita di traslazione in quanto, di fatto, è stato “calibrato” alla bocca dell'horn.

In entrambi i casi, il valore T_m utilizzato come dato di targa, sarà diverso (seppur di poco) dal “vero” valore iniettato dall'accoppiatore. Il valore T_m sarà tale che, utilizzato nei calcoli, produrrà come risultato il vero valore di temperatura di rumore alla bocca dell'horn.

6.3. In che modo traslare i piani?

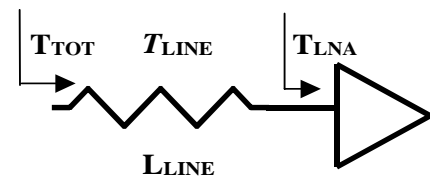
I valori Temperatura di Rumore e Temperatura di Marca raccolti sperimentalmente non sono stati osservati rispetto al piano di riferimento naturale, al contrario, in alcuni casi tale piano era necessariamente posizionato altrove.

La traslazione del piano è un'operazione di calcolo e si effettua risolvendo una, ed una sola, delle equazioni di seguito descritte.

L'equazione che permette di effettuare la traslazione di piano di riferimento della grandezza “Temperatura di rumore” è la seguente [12]:

$$T_{TOT} = \frac{T_{LNA}}{G_{LINE}} + T_{LINE} \cdot \left(\frac{1}{G_{LINE}} - 1 \right)$$

Eq. 6.1



T_{TOT} = Temperatura di rumore totale (cioè alla bocca dell'horn) [K]

$G_{LINE} = 1/L_{LINE}$ = Guadagno disponibile della linea di adduzione [num <1]

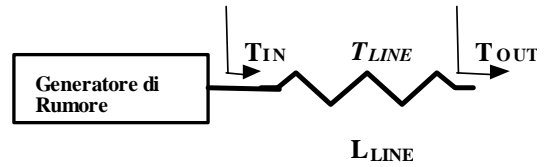
T_{LINE} = Temperatura fisica della linea di adduzione [K]

T_{LNA} = Temperatura di rumore del LNA (o misurata ad un piano interno al ricevitore)

L'equazione che permette di propagare la grandezza "Temperatura di rumore" è la seguente:

$$T_{OUT} = T_{IN} \cdot G_{LINE} + T_{LINE} \cdot (1 - G_{LINE})$$

Eq. 6.2



T_{IN} = Temperatura di rumore all'ingresso [K]

$G_{LINE} = 1/L_{LINE}$ = Guadagno disponibile della linea di adduzione [num., <1]

T_{LINE} = Temperatura fisica della linea di adduzione [K]

T_{OUT} = Temperatura di rumore all'uscita

Entrambe le equazioni hanno una propria ragion d'essere, pure nella medesima catena RF. L'utilizzo dell'una o dell'altra dipende dal contesto e quale problema si vuol risolvere.

Nel caso, semplice, del percorso RF principale la scelta è ovvia; si utilizza la Eq.6.1. Ma al momento di dover propagare lungo il percorso RF il piano di iniezione della marca, non è apparso ovvio agli autori come impostare il problema e quindi quale equazione adottare.

Pertanto gli autori hanno dovuto sapersi porre il corretto obiettivo, e per farlo si sono avvalsi di una simulazione.

La simulazione comprende l'intero radiotelescopio in condizioni reali. Si esaminano due casi, utilizzando l'Eq. 6.1 e l'Eq. 6.2. In entrambi i casi si simulano i valori di temperatura osservati a valle del ricevitore durante il transito su di una radiosorgente nota. L'obiettivo è trovare quale metodo di traslazione del piano di iniezione della marca mantiene invariati il flusso e l'efficienza d'antenna.

Per eseguire la simulazione sono stati assegnati alle variabili dei valori numerici plausibili.

Dati:

Radiotelescopio: **SRT (K/Jy = 1.16)**

Banda P: Brillanza del cielo: **30K**

Sorgente: puntiforme, **1Jy**

efficienza d'antenna: **50%** (contributo atmosferico: trascurato)

Attenuazione fra horn ed LNA: 0.51 dB , piazzato alla temperatura fisica: **24K**

T_m iniettata=**5K**

T_{LNA} =**10K**

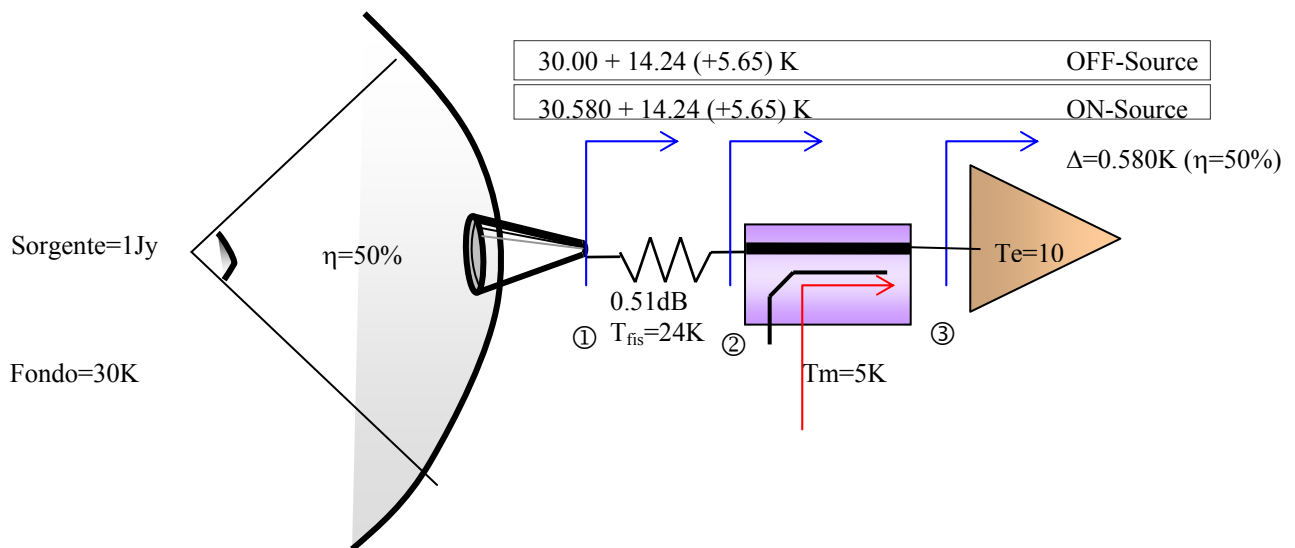


Fig. 9 Simulazione di iniezione marca e verifica dell'efficienza d'antenna con Eq. 6.1

Svolgimento:

Nella figura 9, in corrispondenza dei piani di colore blu, è applicata la Eq. 6.1, partendo dal piano ③ ed andando a ritroso, passo per passo, verso il piano ①.

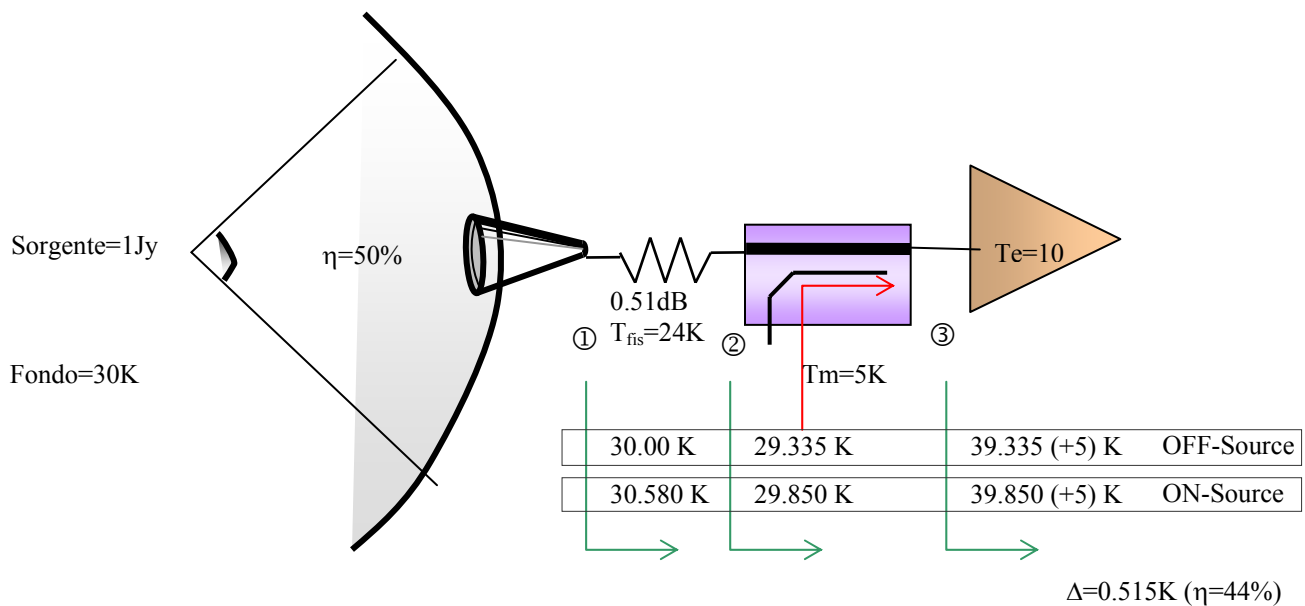


Fig. 10 Simulazione di iniezione marca e verifica dell'efficienza d'antenna con Eq. 6.2

Nella figura 10, in corrispondenza dei piani verdi, è stata condotta la medesima simulazione ma adottando la Eq. 6.2; si è partiti dal piano ① propagando passo per passo fino al piano ③.

Sezione dopo sezione, sono indicati i valori di temperatura di rumore e all'interno delle parentesi tonde sono indicati i valori di marca (T_m).

Per semplicità non si riportano i passaggi di calcolo. I risultati sono stati riportati nelle figure 9 e 10.

Si noti che fra i risultati delle simulazioni appare il calcolo di verifica dell'efficienza d'antenna nonostante sia un dato. Ciò che emerge dalla simulazione, è la conferma che, per mantenere invariato il valore di efficienza d'antenna, come è giusto che sia, (50% nell'esempio), l'equazione da utilizzare è la Eq. 6.1.

Ma una menzione particolare merita il metodo di traslazione del valore di Temperatura di Marca. Se da un lato la traslazione del valore di T_e non comporta difficoltà in quanto basta sostituire i valori nella Eq. 6.1, la traslazione del valore T_m necessita di un ragionamento particolare. Dato che T_e e T_m sono fra loro non correlate, è lecito trattarle come grandezze sommabili. Tuttavia data la non-proporzionalità nella Eq. 1 fra T_{TOT} e T_{LNA} , l'unico metodo corretto per traslare il piano di T_m è di traslare in un primo tempo la temperatura di rumore all'ingresso dell'LNA (T_e), poi supporre di "accendere" la marca di rumore; a questo punto la temperatura di rumore all'ingresso del LNA vale (T_e+T_m) che diventa il valore da traslare nel secondo step. La differenza dei due valori ottenuti, ciascuno traslato alla bocca dell'horn, sarà il nuovo valore di temperatura di marca valevole come dato di targa del ricevitore. Si noti che a questi due valori non deve venir sommato il segnale proveniente dal cielo, in ottemperanza al modello, di quadripolo rumoroso il quale contempla che la sorgente sia "non emitting source" [13].

7. Bibliografia e Riferimenti

- [1] G., Valente; T., Pisanu; P., Bolli; S., Mariotti; P., Marongiu; A., Navarrini; R., Nesti; A., Orfei; J., Roda **The dual-band LP feed system for the Sardinia Radio Telescope prime focus.** Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V. Edited by Holland, Wayne S.; Zmuidzinas, Jonas. Proceedings of the SPIE, Volume 7741, pp. 774126-774126-12 (2010)
- [2] <http://www.nlsa.com/>, - **Nova for Windows**, software licenziato.
- [3] T. Pisanu, P. Marongiu, A. Navarrini, G. Valente **“A compact L-band Ortho Mode Transducer”**, *Proceedings of SPIE Conference on Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V (Conference 7741), San Diego (USA) Vol. 7741 (2010).*
- [4] S. Mariotti – **ATT-CAVI e WG.xls** Foglio di calcolo che permette di simulare l'attenuazione e temperatura equivalente di cavi coassiali raffreddati conoscendo l'attenuazione a temperatura ambiente.
- [5] M. De Dominicis, - **Strumentazione e Metodologie per la Modellistica di Rumore di Dispositivi Attivi ad Alta Frequenza**, - cap. 3.4 e 3.5 - Uni Tor Vergata, dip. Ing. Elettronica, Tesi di dottorato XVI ciclo, Feb 2004.
- [6] *Datasheet del cavo andrew FSJ2-50*, http://www.rfparts.com/old_site/pdf_docs/AndrewHeliax/FSJ2-50.pdf
- [7] *Lake Shore Cryotronics* – <http://lakeshore.com/products/Cryogenic-Temperature-Sensors/Silicon-Diodes/DT-400/Pages/Specifications.aspx>
- [8] G. Valente, P. Marongiu, S. Mariotti, T. Pisanu, A. Navarrini, P. Bolli, A. Orfei, **Progettazione Realizzazione e Caratterizzazione dei Componenti del canale banda L del Ricevitore Coassiale LP**, pag 4 e pag 20 – R.I. OAC N°15/2011
- [9] C. Contavalle, A. Cremonini, S. Mariotti, C. Nocita, D. Panella **Ricevitore 43 GHz: Temperatura, Marca, Drift e Polarizzazione**, - par. 1.4 e 1.5 – R.I. IRA N° 372/05 <http://www.ira.inaf.it/Library/rapp-int/372-05.pdf>
- [10] NIST, “**TN-1297s**”, <http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/basic.html>
- [11] *Maury Microwave*® - **MT7118A datasheet**
- [12] John D. Kraus, **“Radio Astronomy**, cap. 7-2 , Ed. Cygnus-Quasar Books, 1982.
- [13] *Agilent Technologies* **AN 57-1**, pag. 20

