

1472-1440 MHz RAL10MW

Microwave Radiometer

Radiometro ad elevata risoluzione e stabilità

Applicazione in Radioastronomia: costruzione di un radiotelescopio didattico a microonde

Flavio Falcinelli

RadioAstroLab s.r.l. 60019 Senigallia (AN) - Italy – Strada della Marina, 9/6
tel. +39 071 6608166 - www.radioastrolab.com

1. Introduzione

RAL10MW è un radiometro a microonde di elevate prestazioni sviluppato per applicazioni in campo radioastronomico, nei sistemi di telerilevamento ambientale e di monitoraggio atmosferico (*passive microwave remote sensing*), in campo medicale e industriale. La sua compattezza e flessibilità operativa ne semplificano l'utilizzo in svariati settori applicativi. Il ricevitore può operare in modo *Total-Power* o a commutazione (*Dicke-Switch*): il principio di funzionamento di quest'ultimo, detto anche *radiometro a confronto*, è stato ideato da R. Dicke nel lontano 1946 e sarà brevemente descritto nei paragrafi successivi.

In questo documento illustreremo le caratteristiche e le prestazioni dello strumento partendo dalla sua applicazione principale, come componente base di un ricevitore per radioastronomia operante nella banda di frequenze $10 \div 12$ GHz. E' semplice ed economico, ad esempio, installare piccoli radiotelescopi con finalità didattiche di introduzione alla radioastronomia, essendo facilmente reperibili componenti e accessori provenienti dal mercato della TV satellitare da abbinare al ricevitore *RAL10MW*. Per completare lo strumento occorre un'antenna a riflettore parabolico equipaggiata con adatta unità esterna (amplificatore-convertitore di frequenza a basso rumore LNB - *Low Noise Block*) comprendente l'illuminatore, il cavo coassiale e, infine, il personal computer per l'acquisizione automatica dei dati e il controllo dell'impianto. C'è ampia libertà nella scelta di questi dispositivi, dato che *RAL10MW* è compatibile con qualsiasi prodotto concepito per la ricezione satellitare in questa banda di frequenze. Si realizza, così, un radiotelescopio adatto allo studio della radiazione termica del Sole, della Luna e delle radiosorgenti più intense, con sensibilità funzione delle dimensioni dell'antenna. E' fornito il software che controlla il ricevitore ed acquisisce automaticamente i dati delle misure. Data la piccola lunghezza d'onda, è relativamente semplice costruire strumenti con buone caratteristiche direttive ed accettabile potere risolutivo. Anche se in questa gamma di frequenze non "brillano" radiosorgenti particolarmente intense (esclusi il Sole e la Luna), la sensibilità del sistema è esaltata dalle grandi larghezze di banda utilizzabili e dalla ridotta influenza dei disturbi artificiali: il radiotelescopio può essere comodamente installato sul tetto o sul giardino di casa, in zona urbana. I satelliti geostazionari televisivi che possono creare interferenze sono in posizione fissa e nota sul cielo e non è difficile evitarli senza limitare troppo il campo osservativo.

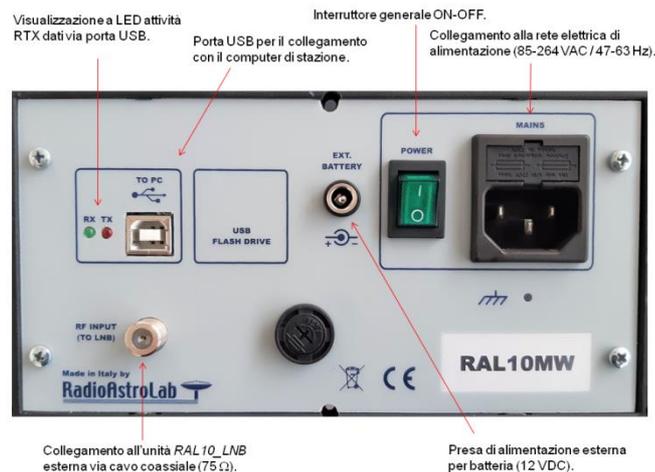


Fig. 1: Pannello frontale e posteriore del radiometro *RAL10MW*.

Sebbene l'utilizzo più comune del radiometro *RAL10MW* sia previsto con antenne e unità esterne (LNB) per la banda TV satellitare $10 \div 12 \text{ GHz}$, lo strumento è perfetto come stadio finale di un ricevitore operante anche ad altre frequenze, se preceduto da amplificatori-convertitori specifici per una data banda di ricezione. Ovviamente, la banda di uscita di tali dispositivi deve essere compatibile con le frequenze di ingresso di *RAL10MW*, comprese nell'intervallo $1377 \div 1444 \text{ MHz}$. Se la frequenza di lavoro del sistema non è troppo elevata, è possibile eliminare il blocco LNB amplificatore-convertitore esterno sostituendolo con un blocco di amplificazione a basso rumore (LNA) caratterizzato da un guadagno equivalente, realizzando un ricevitore a conversione diretta: il segnale raccolto dall'antenna sarà amplificato e filtrato per operare alla frequenza stabilita, con la desiderata banda passante.

2. Radioastronomia e radiotelescopi

La radioastronomia studia il cielo analizzando le onde radio naturali emesse dai corpi celesti: qualsiasi oggetto irradia onde elettromagnetiche misurabili che, captate dall'antenna e visualizzate, manifestano le caratteristiche incoerenti di un rumore elettrico ad ampio spettro.

In generale, con *radiosorgente* si indica qualsiasi emettitore naturale di onde radio: nell'uso comune il termine è diventato sinonimo di sorgenti radio cosmiche. I *radiotelescopi*, strumenti che registrano il debole flusso radio proveniente dallo spazio extra-terrestre, comprendono un sistema di antenna, linee di trasmissione e un ricevitore: l'elettronica amplifica il segnale captato dall'antenna fino a renderlo misurabile. Seguono dispositivi per l'elaborazione e la registrazione delle informazioni, oltre agli organi per il controllo dello strumento e per l'orientamento dell'antenna (fig. 2).

In onore a K. Jansky, l'iniziatore della radioastronomia, è stata definita l'unità di misura della densità di flusso delle radiosorgenti:

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hz}}$$

Da questa espressione si vede come un radiotelescopio (in particolare un radiometro) misuri una potenza radiante proveniente dal cielo che incide sulla superficie di captazione dell'antenna, entro la banda passante del ricevitore.

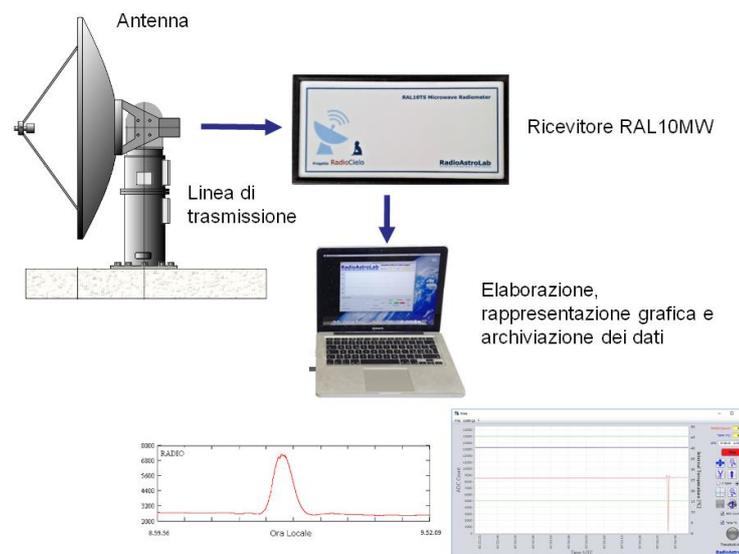


Fig. 2: Schema di principio di un semplice radiotelescopio a microonde.

Un modo alternativo per esprimere la potenza della radiazione “raccolta” dall'antenna utilizza il concetto di *temperatura di brillantezza*. Se orientiamo l'antenna dello strumento in una data regione del cielo, in particolare verso una radiosorgente, misuriamo un incremento nell'intensità del segnale ricevuto proporzionale alla *temperatura di brillantezza* dello scenario osservato, che coinciderà con la sua temperatura fisica solo se questo è un *corpo nero*, cioè un materiale (ideale) che assorbe perfettamente tutta la radiazione che lo investe, senza rifletterla. In natura non esistono corpi neri, ma si trovano oggetti che approssimano molto bene il loro comportamento entro una limitata banda di frequenze. Si può quindi immaginare un radiotelescopio come un termometro del cielo: la temperatura misurata, detta *temperatura di rumore di antenna*, coinciderà con la *temperatura di brillantezza* dello scenario osservato se questo occupa tutto il campo di vista dell'antenna e sarà proporzionale alla temperatura fisica della regione osservata tramite un coefficiente detto *emissività*, che quantifica la capacità della sorgente di irradiare energia, dipendente dalle sue caratteristiche chimico-fisiche e dalla frequenza. L'*emissività* di un corpo nero è uguale a 1, con una temperatura di brillantezza coincidente con la temperatura fisica, mentre l'*emissività* di un corpo materiale (detto *corpo grigio*) è compresa fra 0 e 1, con una temperatura di brillantezza inferiore alla sua temperatura fisica.

Come si vede dalla fig. 2, lo schema di principio di un radiotelescopio è analogo quello di un comune apparecchio radio-ricevente (come, ad esempio, un televisore, un'autoradio o un telefono cellulare): ovviamente il sistema è specializzato e le prestazioni sono ottimizzate per

misurare i debolissimi segnali provenienti dallo spazio. In radioastronomia è necessario (e difficile) evidenziare il rumore prodotto dalle radiosorgenti (segnale utile) rispetto a quello generato dall'elettronica dello strumento e dall'ambiente (segnali indesiderati) che, generalmente, sono molto intensi: questi disturbi di fondo, elettricamente simili a quelli che ascoltiamo quando non è sintonizzata alcuna stazione in una radio, hanno identica natura e sono, in linea di principio, indistinguibili.

3. L'atmosfera terrestre

La classificazione ufficiale delle bande di frequenza dello spettro radio è riportata in fig. 3.

Designazione ITU		
banda	frequenze	lunghezza d'onda
ELF	3 – 30 Hz	100 000 km – 10 000 km
SLF	30 – 300 Hz	10 000 km – 1000 km
ULF	300 – 3000 Hz	1000 km – 100 km
VLF	3 – 30 kHz	100 km – 10 km
LF	30 – 300 kHz	10 km – 1 km
MF	300 – 3000 kHz	1000 m – 100 m
HF	3 – 30 MHz	100 m – 10 m
VHF	30 – 300 MHz	10 m – 1 m
UHF	300 – 3000 MHz	1000 mm – 100 mm
SHF	3 – 30 GHz	100 mm – 10 mm
EHF	30 – 300 GHz	10 mm – 1 mm
THF	300 – 3000 GHz	1 mm – 0.1 mm

Fig. 3: Classificazione in bande di frequenza dello spettro radio.

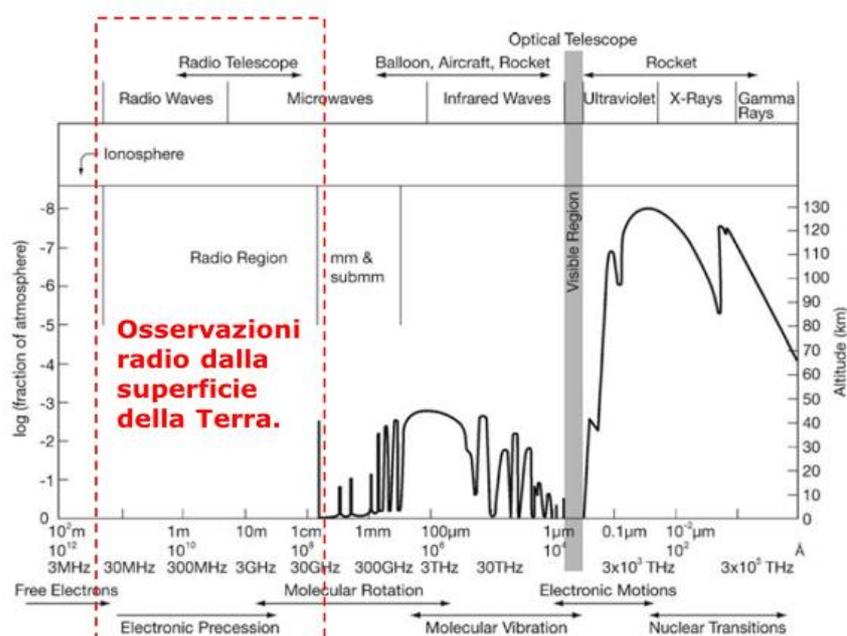


Fig. 4: Rappresentazione dello spettro elettromagnetico dove è stata evidenziata la “finestra radio”.

La nostra atmosfera limita le frequenze utilizzabili per le osservazioni radioastronomiche dalla superficie terrestre, dato che si comporta come un filtro per la radiazione elettromagnetica proveniente dallo spazio. La misura diretta della radiazione cosmica, infatti, è limitata a due “finestre” dello spettro elettromagnetico: quella compresa tra circa 0.3 e 0.8 micrometri (banda del visibile) e quella compresa tra circa 1 centimetro e 1 metro di lunghezza d’onda (banda radio). La “finestra radio” è, a sua volta, limitata inferiormente dagli effetti schermanti della ionosfera (particelle elettricamente cariche che agiscono come un riflettore per le onde radio), superiormente dai fenomeni di assorbimento molecolare dovuti al vapore acqueo e all’ossigeno (fig. 4, 5). Per questi motivi l’intervallo delle frequenze radio utili per le osservazioni radioastronomiche da terra è compreso fra circa 20 MHz e circa 20 GHz.

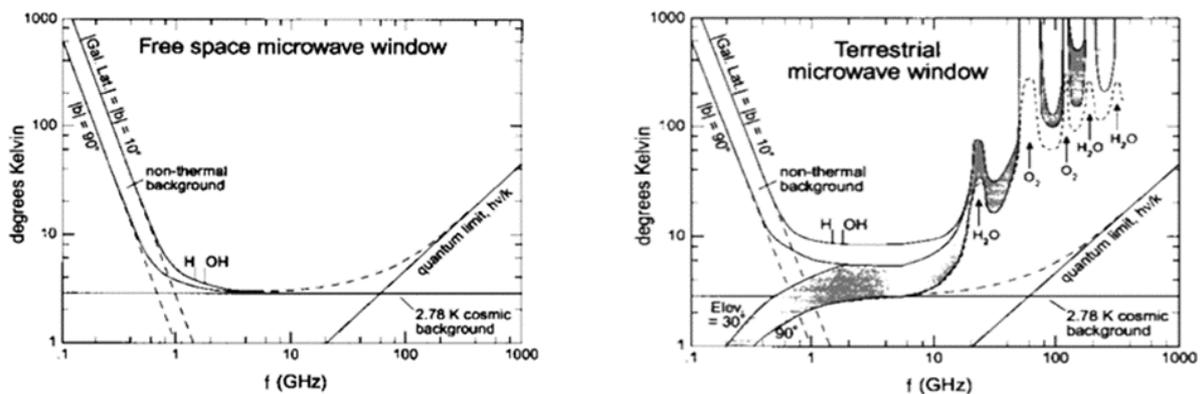


Fig. 5: Effetti dell’atmosfera terrestre, ben visibili confrontando i grafici che rappresentano la “finestra” radio” dello spettro elettromagnetico vista da terra e vista da un radiotelescopio operante nello spazio.

4. La radioastronomia e i dilettanti

Ammirando la tecnologia e l’imponenza dei radiotelescopi professionali, per non parlare dei loro costi astronomici, è legittimo domandarsi se sia concepibile un’attività radioastronomica dilettantistica e, in caso affermativo, quali siano le reali possibilità di sperimentazione. Molti fra gli esperti del cielo visibile, come gli astrofili, hanno notizie frammentarie sulle tecniche radioastronomiche e, quelle che colpiscono l’immaginazione riguardano i grandi strumenti della ricerca. L’opinione diffusa è che la radioastronomia sia una disciplina essenzialmente inaccessibile ai dilettanti, quindi poco interessante per ampliare le proprie conoscenze del cielo. Naturalmente le cose stanno diversamente, perché c’è tutto un mondo interessante e affascinante da scoprire.

Per superare questi ostacoli è importante iniziare con progetti facilmente realizzabili, utilizzando strumenti con prestazioni sicure e ripetibili, studiando i fondamenti teorici della disciplina ed accettando i limiti raggiungibili nell’attività dilettantistica. Questo approccio aiuta ad acquisire gradualmente confidenza con la tecnica strumentale e con la pratica dell’osservazione radioastronomica, affatto scontate. Serve volontà nell’investire tempo e pazienza per un approccio graduale verso una disciplina che è certamente meno immediata e spettacolare rispetto all’osservazione del cielo nel visibile, dato che l’essere umano non è sensibile alle onde radio. In questo campo, la visualizzazione dello scenario cosmico e l’estrazione dell’informazione che ne deriva non sono immediate: servono specifici strumenti (i radiotelescopi) per rivelare i segnali radio e visualizzarli.

Come esempio pratico, proporremo la costruzione di un radiotelescopio a microonde basato su una filosofia modulare che privilegia la semplicità, l'economia e il riutilizzo delle parti per ampliamenti e sviluppi futuri. Tutti possono costruire un radiotelescopio per esplorare l'affascinante mondo della radioastronomia amatoriale.

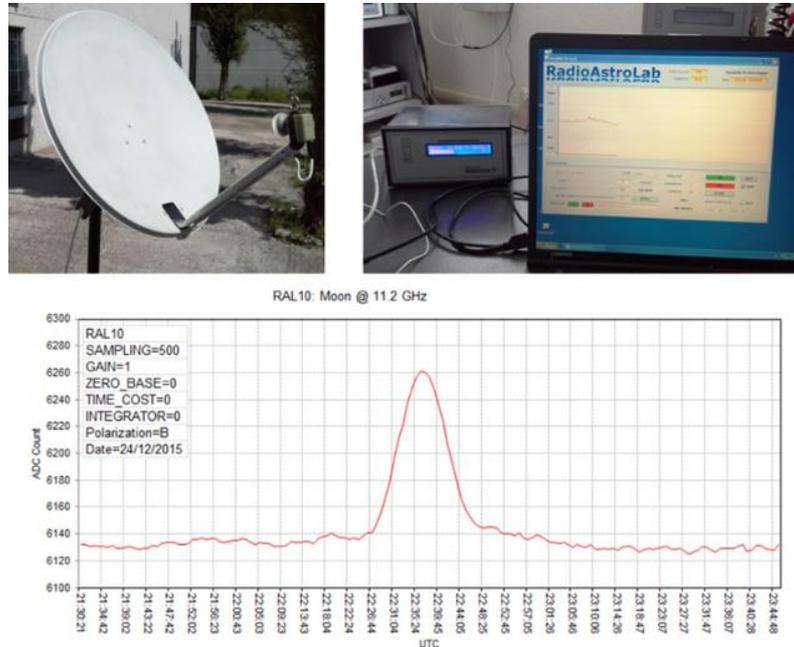


Fig. 6: Osservazione del transito lunare con un radiotelescopio basato sul ricevitore *RAL10*.

L'osservazione radioastronomica più semplice consiste nel misurare come varia l'intensità del segnale ricevuto durante il transito apparente di una radiosorgente (come, ad esempio, il Sole o la Luna) nel campo di vista dell'antenna (*registrazione al transito*). Si orienta il radiotelescopio nel punto celeste dove è previsto, nel suo moto apparente, il passaggio della radiosorgente e si attende la formazione della classica traccia a campana visualizzata dal software di acquisizione (fig. 6). Il passo successivo, più complesso e laborioso, prevede la registrazione dell'intensità del segnale ricevuto dalle diverse direzioni di cielo. Collezionando con pazienza e metodo una serie di misure, si compila una radio-mappa della regione osservata. Ovviamente sono possibili osservazioni "inseguendo" le radiosorgenti come, ad esempio, quando si desidera monitorare l'attività solare. Questo richiede un'attrezzatura motorizzata e automatica per la gestione del sistema di orientamento dell'antenna.

L'antenna è il componente più importante di un radiotelescopio, essendo il collettore della radiazione cosmica: la sensibilità e le prestazioni dello strumento saranno principalmente dipendenti dalle sue dimensioni (trascuriamo, per un attimo, problemi economici, di spazio e di installazione). Stabiliti i requisiti in sensibilità e nel potere risolutivo per il radiotelescopio, le dimensioni necessarie per l'antenna aumentano considerevolmente al diminuire della frequenza operativa. Questo aspetto è sufficiente per creare un'infinità di dubbi e porre qualche problema a chi intende iniziare un'attività radioastronomica dilettantistica.

Ci chiediamo allora:

- in quale banda di frequenze è preferibile iniziare le osservazioni?
- Quali radiosorgenti sono osservabili con un piccolo radiotelescopio?
- Esistono requisiti particolari nella scelta del sito di installazione dello strumento?

Le risposte sono tutte collegate.

I meccanismi che spiegano le emissioni delle radiosorgenti sono complessi, legati alle loro caratteristiche chimico-fisiche. Un buon punto di partenza consiste nel catalogare gli oggetti radio più intensi del cielo e scoprire come varia la loro emissione al variare della frequenza (*spettri delle radiosorgenti*). Tenendo conto dei limiti in sensibilità degli strumenti dilettantistici, dovuti principalmente alla ridotta superficie di antenna, una prima ragionevole scelta sembra privilegiare le frequenze dove sono più intense e numerose le radiosorgenti. Come si vede dai grafici di fig. 7, esclusi il Sole e Luna che, grossomodo si comportano come corpi neri nella banda radio (almeno per quanto riguarda l'emissione del Sole quieto), le altre radiosorgenti irradiano con maggiore intensità alle frequenze inferiori a 1 GHz, con un meccanismo (non termico) che incrementa l'intensità dell'emissione al diminuire della frequenza.

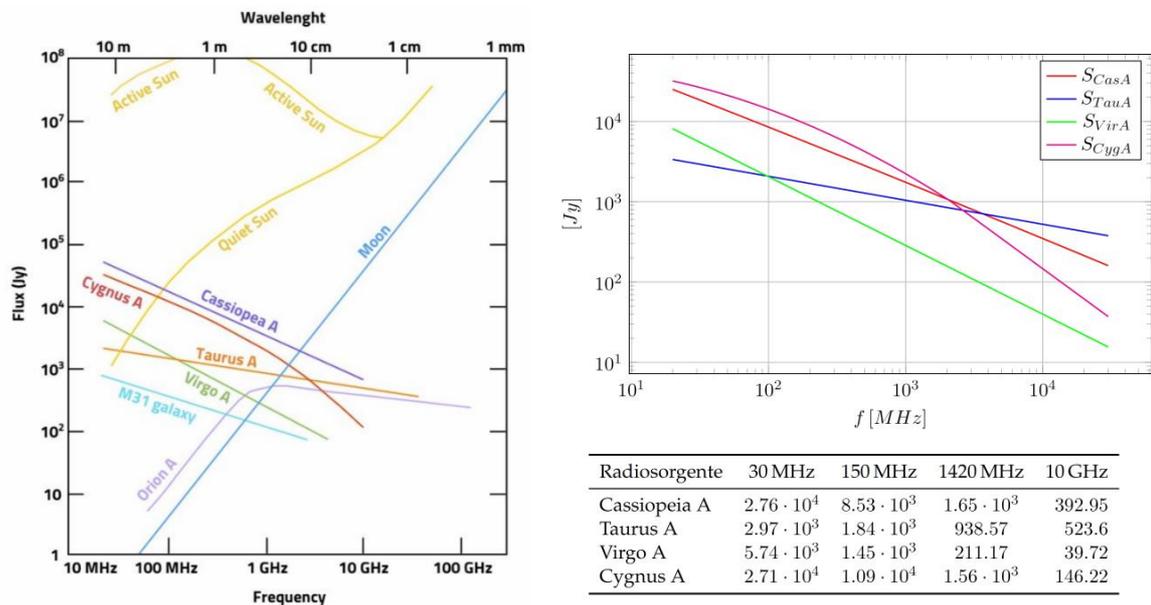


Fig. 7: Spettri delle principali radiosorgenti.

Tuttavia, occorre considerare la congestione dei segnali radio nella zona dove installeremo il radiotelescopio, dovuta alla presenza di varie interferenze. I disturbi artificiali, molto intensi nelle zone urbane e industrializzate, sono il principale ostacolo per l'osservazione radioastronomica, essendo lo spettro radio praticamente saturo. Le più comuni sorgenti naturali di interferenza sono i fulmini, le scariche elettriche atmosferiche, le radioemissioni prodotte dalle particelle cariche nella parte superiore dell'atmosfera (disturbi ionosferici), le emissioni provenienti dai gas atmosferici e dalle precipitazioni meteorologiche. Le interferenze artificiali sono causate dai disturbi prodotti dalla distribuzione, dall'utilizzo e dalla trasformazione di potenza dell'energia elettrica, dalle trasmissioni radar per il controllo del traffico aereo militare e civile, dalle stazioni trasmettenti terrestri utilizzate per i servizi di diffusione radio e televisiva, dai trasmettitori e transponder sui satelliti artificiali, dalla rete telefonica cellulare e dalle stazioni militari.

Il grafico in fig. 8 evidenzia il fatto interessante che l'intensità dei disturbi artificiali e naturali diminuisce all'aumentare della frequenza: per questo motivo è ipotizzabile l'installazione di un radiotelescopio operante nella banda di frequenze 10 ÷ 12 GHz nel

comprendiamo come sia possibile, oltre che semplice ed economico, costruire il nostro primo radiotelescopio utilizzando una comune antenna a riflettore parabolico per TV-SAT, struttura economicamente vantaggiosa nel rapporto prestazioni/dimensioni. L'unico svantaggio rimane il limitato numero di radiosorgenti rivelabili a queste frequenze: con antenne di piccolo diametro saranno osservabili solo il Sole e la Luna. Però, essendo molto intensa la loro radiazione, il loro studio rappresenta un ottimo punto di partenza per iniziare a familiarizzare con gli strumenti e con le tecniche della radioastronomia, in vista di osservazioni più impegnative. Per registrare radiosorgenti più deboli, come *Taurus*, *Cassiopea*, *Cygnus* e *Virgo*, ad esempio, sono necessarie antenne di maggiori dimensioni, mantenendo invariato il resto del sistema.

5. L'antenna

L'antenna trasforma l'energia elettromagnetica incidente in una differenza di potenziale, amplificata ed elaborata dal ricevitore. La funzione dell'antenna è analoga a quella svolta da una lente o da uno specchio per uno strumento ottico: un ruolo di primo piano per quanto riguarda le prestazioni dello strumento (e i suoi costi). L'argomento è molto vasto e specializzato: affronteremo solo alcuni aspetti essenziali per la comprensione del processo di misura della *temperatura di brillantezza* del cielo eseguito da un semplice radiotelescopio.

Lo studio delle antenne deriva dalla teoria della radiazione elettromagnetica e dall'analisi dei campi elettromagnetici generati da sorgenti nello spazio libero. Il meccanismo della radiazione riguarda l'energia delle onde elettromagnetiche erogata dalle sorgenti e trasportata a grande distanza per effetto della propagazione. Si usa il termine *direttività* per quantificare la capacità di un'antenna di ricevere energia da una direzione privilegiata, mentre il parametro principale che la caratterizza è *l'area efficace*, cioè il rapporto tra la potenza consegnata al ricevitore e la densità di potenza incidente in condizioni di adattamento. Questo parametro rappresenta, quindi, la superficie ideale di un'antenna dalla quale si ottiene potenza utile, estraendola dalla radiazione incidente. L'area efficace dipende solo dalle caratteristiche dell'antenna ed è una quantità che misura la sua efficienza come collettore di radioonde. Un'antenna elementare è sensibile solo a una componente polarizzata della radiazione aleatoria incidente (verticale od orizzontale, circolare destra o sinistra), estraendo da questa solo il 50% di energia.

L'ovvio vantaggio di un'antenna direttiva consiste nella capacità di eliminare i contributi di segnale provenienti dalle direzioni indesiderate migliorando la qualità di ricezione nella direzione che interessa. Altra caratteristica molto importante è il *potere risolutivo*, cioè la capacità di separare (risolvere) due oggetti vicini nello spazio, quindi osservare fini dettagli strutturali di una radiosorgente estesa, parametro proporzionale al rapporto fra la lunghezza d'onda della radiazione ricevuta e le dimensioni fisiche dell'antenna. Sono queste le caratteristiche dell'antenna che definiscono le prestazioni del radiotelescopio.

Il riflettore a paraboloidi di rivoluzione, caratterizzato da un lobo di ricezione molto stretto e simmetrico, è un'antenna molto utilizzata nella banda delle microonde. Le sue qualità derivano dalle proprietà focalizzanti della parabola: l'energia captata, proveniente da una sorgente lontana, è riflessa dalla superficie del riflettore e focalizzata in un punto dove è posizionata l'unità di ricezione. La possibilità di avere un solo punto focale è molto interessante: se il dispositivo di captazione (illuminatore) è ben collocato, tutta l'energia elettromagnetica incidente catturata dal riflettore sarà utilizzata per estrarre il segnale utile. Il guadagno ottenibile da un'antenna a riflettore parabolico si stima utilizzando la seguente relazione:

$$G_a = \varepsilon \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$$

dove D è il diametro dell'antenna (espresso in metri). Il parametro ε è detto *efficienza*: generalmente compreso fra 0.45 e 0.55, tiene conto dei fattori che riducono il massimo guadagno teorico ottenibile (errori meccanici sulla superficie, tolleranze costruttive, errori di focalizzazione, eccessiva ampiezza dei lobi secondari). L'ampiezza del fascio a metà potenza *HPBW* (*Half Power Beam Width*) si può calcolare utilizzando la seguente formula approssimata:

$$HPBW \cong \frac{(60 \div 70)\lambda}{D} \quad [gradi]$$

Da queste relazioni si vede come il guadagno dell'antenna sia direttamente proporzionale alle sue dimensioni, l'opposto accade per la larghezza del fascio di ricezione: un'antenna con un guadagno elevato avrà un fascio di ricezione stretto e sarà, quindi, più direttiva.

Le possibili strutture di un sistema di antenna variano molto in funzione della frequenza operativa e del tipo di applicazione. Alle frequenze più basse le antenne sono prevalentemente di tipo filare (dipoli metallici), mentre alle alte frequenze (microonde) sono costituite da elementi radianti più facilmente collegabili con le guide d'onda (antenne a tromba, a fenditura) e con sistemi ottici (antenne a riflettore parabolico). Nella radioastronomia professionale si realizzano impianti composti costituiti da molti elementi (array) e/o da elementi focalizzanti di tipo ottico (riflettori, lenti): per ottenere le prestazioni desiderate nella ricerca avanzata è necessario che le dimensioni siano sempre molto maggiori della lunghezza d'onda operativa comportando, soprattutto alle basse frequenze, la realizzazione di strutture veramente imponenti per complessità e costi.

La *temperatura di antenna* rappresenta la potenza di segnale effettivamente disponibile all'ingresso del ricevitore, quindi una misura dell'energia captata da uno scenario che irradia con una data temperatura di brillantezza. Nel processo di misura è importante considerare l'effetto di filtraggio spaziale prodotto dalla forma del diagramma di ricezione dell'antenna: questa operazione è matematicamente descritta dalla *convoluzione* fra le funzioni che descrivono le proprietà direttive della struttura e il profilo di brillantezza dello scenario osservato. L'antenna di un radiotelescopio tende, quindi, a "livellare" e a "diluire" la distribuzione di brillantezza reale che risulterà pesata dalla forma del suo diagramma di ricezione. La misura delle variazioni spaziali di brillantezza osservata approssimerà quella vera solo se le dimensioni angolari della radiosorgente sono estese rispetto a quelle del fascio di ricezione. Il problema che si pone all'osservatore è quello di ottenere la distribuzione vera della temperatura di brillantezza partendo dalla misura della temperatura di antenna: è necessario effettuare un'operazione di *de-convoluzione* fra la distribuzione della temperatura equivalente di antenna (brillantezza misurata) e la funzione che descrive il suo diagramma di ricezione. Per queste ragioni è molto importante conoscere la forma del diagramma direttivo di un radiotelescopio.

Tutto lo spazio che circonda un'antenna contribuisce ad incrementare la sua temperatura equivalente di rumore, secondo le sue caratteristiche direttive. Se l'antenna possiede lobi secondari di livello troppo elevato, orientando il lobo principale verso una data regione dello spazio la temperatura di antenna può ricevere un contributo energetico non trascurabile proveniente da altre direzioni, in modo particolare dal terreno (oggetto molto esteso e caldo con una temperatura di brillantezza dell'ordine di $240 \div 300 K$). Se l'antenna è orientata verso il cielo, può captare radiazione termica dal terreno solo attraverso i suoi lobi secondari: questo contributo dipende dalla loro ampiezza rispetto a quella del lobo principale.

A titolo di esempio, la fig. 9 mostra le tracce (simulata e reale) del transito della Luna (flusso dell'ordine di $52600 Jy$ nella banda $10 \div 12 GHz$) registrato da un piccolo radiotelescopio amatoriale basato sul modulo *RAL10KIT* proposto RadioAstroLab s.r.l. e un'antenna a riflettore parabolico TV-SAT con 1.5 metri di diametro (larghezza del fascio appena inferiore a 1.5 gradi).

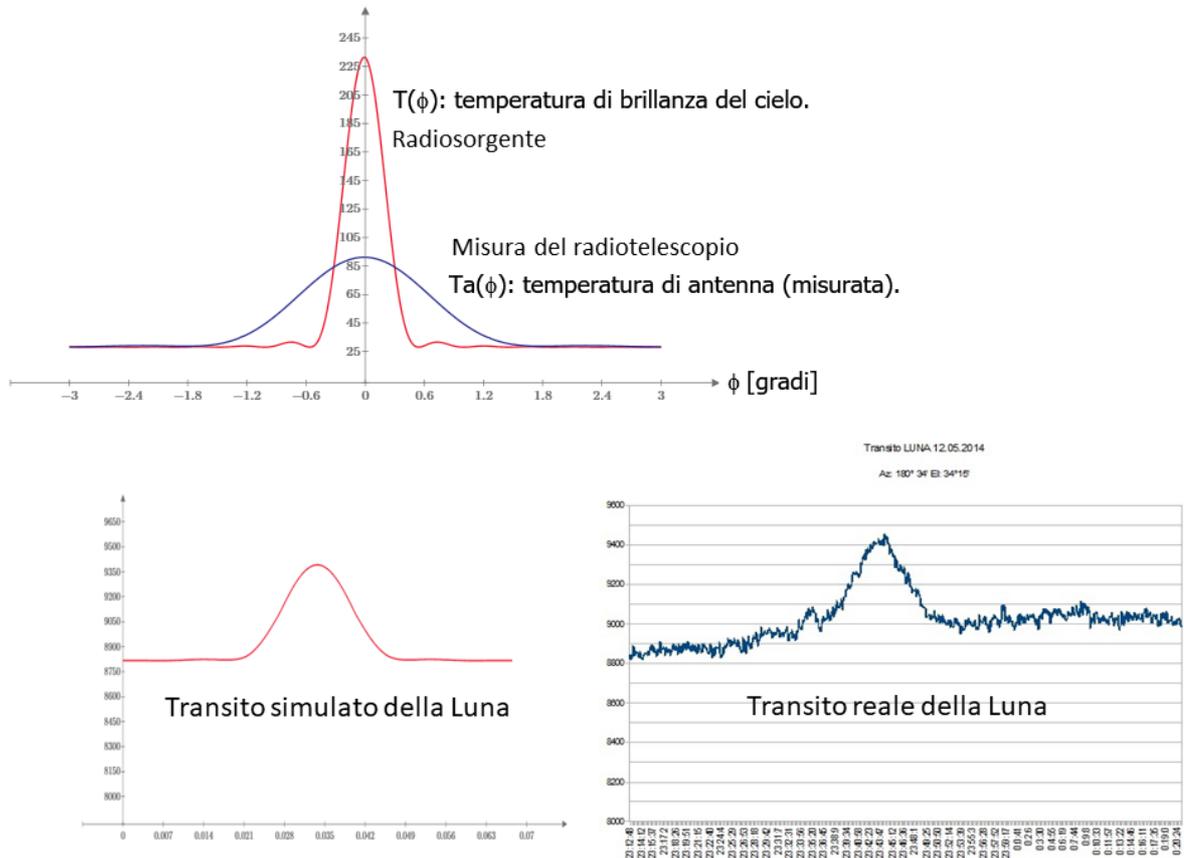


Fig. 9: Il profilo della temperatura della Luna rilevata da un radiotelescopio (*temperatura di antenna*) durante un transito è diverso dal vero profilo della sua temperatura di brillantezza, dato che il processo di misura eseguito con l'antenna è una convoluzione fra la temperatura di brillantezza dello scenario osservato e la forma del suo diagramma di ricezione. L'antenna di un radiotelescopio "diluisce" la distribuzione di brillantezza osservata: l'entità della distorsione è dovuta alle caratteristiche di filtraggio spaziale dell'antenna ed è legata al rapporto fra le dimensioni angolari del fascio di ricezione e quelle apparenti della radiosorgente. Nessuna distorsione si verifica se il diagramma di ricezione dell'antenna è molto stretto rispetto all'estensione angolare della sorgente. I grafici mostrano un confronto fra la registrazione simulata del transito lunare e un'osservazione reale (eseguita dal sig. Giancarlo Madiati con *RAL10KIT*).

Concludendo, quando analizziamo la registrazione del transito di una radiosorgente osserviamo una traccia che non corrisponde al vero profilo di brillantezza dello scenario, ma ad una sua versione distorta, convoluzione fra la forma del diagramma di ricezione del radiotelescopio e la reale distribuzione di brillantezza. L'effetto è tanto più pronunciato quanto maggiore è l'ampiezza del fascio di ricezione dell'antenna rispetto alle dimensioni angolari apparenti della radiosorgente. Al contrario, si misura senza distorsioni il profilo spaziale della temperatura di brillantezza della radiosorgente solo se le sue dimensioni angolari sono molto grandi rispetto all'ampiezza del fascio di antenna. Si comprende come questo problema sia rilevante per i radiotelescopi che utilizzano antenne singole di piccole dimensioni, con

ampiezze del lobo di ricezione paragonabili alle dimensioni angolari di radiosorgenti come il Sole e la Luna (circa mezzo grado), oppure molto più grandi rispetto a tutte le altre radiosorgenti che, a buon diritto, possono essere considerate puntiformi quando osservate da questi strumenti. Tutto ciò non è valido per la Galassia che, nella banda radio, è caratterizzata da una notevole estensione angolare.

6. Il radiometro a potenza totale

Un radiometro a microonde è un ricevitore molto sensibile utilizzato per misurare l'intensità della radiazione elettromagnetica captata dall'antenna, all'interno di una specifica banda di frequenze, mostrando come varia nel tempo la potenza del segnale ricevuto.

Qualsiasi corpo con una temperatura superiore allo zero assoluto emette energia elettromagnetica (*Legge della Radiazione di Planck*) in tutto lo spettro, con un massimo a una frequenza direttamente proporzionale alla sua temperatura. La legge di Planck descrive la radiazione di un *corpo nero*, un oggetto ideale perfettamente efficiente nel trasformare tutta la sua energia termica in radiazione elettromagnetica. Nella regione delle microonde, la legge di Planck si semplifica nell'*approssimazione di Rayleigh-Jeans* che fornisce una corrispondenza fra la potenza dell'energia radiante captata dall'antenna di un radiometro e la temperatura di antenna misurata, grandezza che dipende dalla sorgente, dalle caratteristiche dello strumento di misura e dall'ambiente circostante. Come si è visto, la temperatura di antenna corrisponderà all'effettiva temperatura di brillantezza dello scenario osservato (caratteristica emissiva specifica della sorgente) solo in condizioni ideali, cioè quando il fascio di antenna è molto piccolo rispetto alla distribuzione spaziale di brillantezza osservata e quando sono insignificanti i contributi di rumore provenienti dai suoi lobi secondari (terreno, sorgenti interferenti). Per questa ragione è conveniente, in radioastronomia, esprimere la potenza in termini di temperatura equivalente radiometrica o *temperatura di brillantezza* di un oggetto (in Kelvin) per indicare l'ammontare della sua radiazione termica.

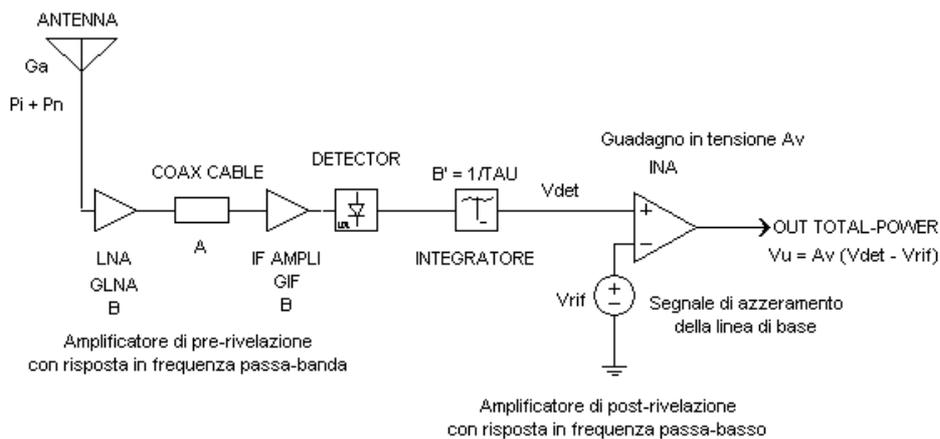


Fig. 10: Schema di principio di un ricevitore a potenza totale.

In sostanza, è sempre possibile definire una temperatura di un corpo nero (temperatura di brillantezza) che irradia la stessa potenza di quella dissipata da una resistenza di terminazione collegata a un'antenna ricevente. Come accennato, il radiometro si comporta come un termometro che misura la temperatura di brillantezza dello scenario celeste osservato.

Il più semplice radiometro a microonde (fig. 10) comprende un'antenna collegata a un amplificatore a basso rumore seguito da un rivelatore a caratteristica quadratica che fornisce l'informazione utile, cioè la potenza associata al segnale ricevuto. Per ridurre il contributo delle fluttuazioni statistiche del segnale rivelato, quindi ottimizzare la sensibilità del sistema ricevente, segue un blocco integratore che calcola la media temporale della misura secondo una determinata costante di tempo. Il segnale all'uscita dell'integratore si presenta, quindi, come una componente quasi-continua dovuta al valore medio del rumore di fondo del ricevitore al quale sono sovrapposte piccole variazioni (generalmente di ampiezza molto inferiore a quella della componente stazionaria) dovute alle emissioni delle radiosorgenti. Lo strumento si chiama *ricevitore a potenza totale (Total-Power)* perché la sua risposta è la somma della potenza dovuta alla radiazione captata dall'antenna e al rumore di fondo del sistema. In linea di principio, se i parametri del ricevitore si mantengono stabili, utilizzando un circuito differenziale di post-rivelazione si dovrebbero misurare solo le variazioni di potenza dovute alla radiazione proveniente dall'antenna, eliminando la componente stazionaria dovuta al rumore interno.

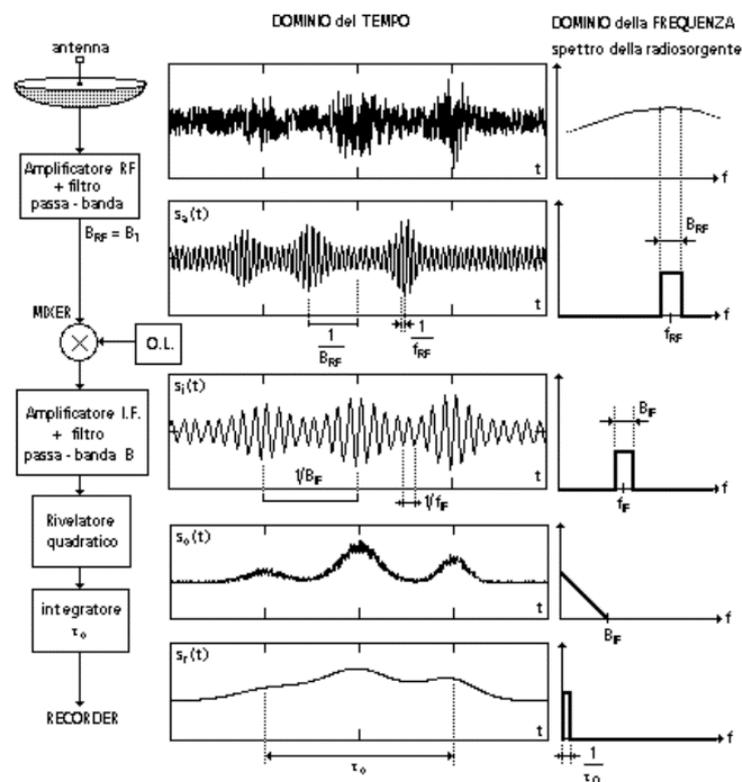


Fig. 11: Variazioni del segnale captato dall'antenna mentre è elaborato dai vari stadi di un ricevitore a potenza totale. A sinistra sono descritti i segnali in funzione del tempo a una data frequenza, a destra è rappresentata la variazione della potenza in funzione della frequenza (spettro). Questo schema a blocchi rappresenta una struttura a conversione di frequenza: il segnale ricevuto è traslato in frequenza (verso il basso) tramite un mixer pilotato dall'oscillatore locale (OL). All'uscita del mixer si ritrova un segnale a frequenza intermedia (IF) successivamente amplificato, rivelato e integrato.

La configurazione circuitale utilizzata in pratica è quella del ricevitore a conversione di frequenza (eterodina), dove il segnale captato dall'antenna, amplificato e filtrato da dispositivi elettronici a basso rumore, è applicato a un moltiplicatore (MIXER) che, alimentato da un segnale sinusoidale proveniente da un oscillatore locale (OL), esegue la traslazione in frequenza (verso il basso) del segnale ricevuto. In questo modo sarà tecnicamente agevole

definire la banda passante del sistema e amplificare il segnale prima della rivelazione. Una schematizzazione dei segnali durante il processo di elaborazione all'interno dei vari stadi di un ricevitore Total-Power a conversione di frequenza è mostrata in fig. 11. Il processo di rivelazione quadratica e la successiva integrazione non conservano le caratteristiche spettrali del segnale: forniscono un singolo valore che rappresenta la sua potenza media entro la banda passante del ricevitore. Se si utilizzano ricevitori a larga banda e stabili (il fattore di amplificazione del sistema e la caratteristica del rivelatore non dovrebbero variare durante la misura) si raggiungono sensibilità molto elevate, anche grazie alla possibilità di integrare il segnale rivelato con lunghe costanti di tempo, ammesso che il fenomeno da studiare sia sufficientemente stazionario nel tempo.

È possibile stimare la sensibilità teorica di un radiometro a potenza totale, quindi valutare la minima variazione nella temperatura equivalente di rumore ΔT misurabile dal sistema, utilizzando l'equazione del radiometro:

$$\Delta T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{\tau B}}$$

dove

$$T_{sys} = T_a + T_r = T_a + T_0(F_r - 1)$$

è la temperatura di rumore del radiotelescopio, T_a è la temperatura di rumore dell'antenna, $T_r = T_0(F_r - 1)$ è la temperatura di rumore del ricevitore ($T_0 = 290 K$ e F_r è la cifra di rumore del ricevitore), τ è costante di tempo dell'integratore (in secondi) e B è la larghezza di banda del sistema (in Hz). Le temperature sono espresse in K . Un'eventuale radiosorgente captata dall'antenna produrrà una piccola variazione nella temperatura di antenna T_a che rappresenta il nostro segnale utile.

Per ottimizzare le prestazioni del radiotelescopio è desiderabile minimizzare ΔT agendo sui parametri di sistema T_a, T_r, B in fase di progetto, sul tempo di integrazione τ durante il funzionamento (T_{sys} dovrebbe essere minimo, B e τ più grandi possibile). Quindi, fissati i parametri del ricevitore, si ottimizza la sensibilità scegliendo un valore opportuno per la costante di integrazione del segnale rivelato. Incrementare questo parametro significa applicare un filtraggio passa-basso sulle caratteristiche di variabilità del fenomeno osservato: sono mascherate le variazioni del segnale di durata inferiore a τ e si alterano (o si perdono) le informazioni sull'evoluzione temporale della grandezza studiata. Per una corretta registrazione di fenomeni con variazioni proprie di una certa durata è indispensabile predisporre un valore per la costante di integrazione sufficientemente minore di tale durata. Se si osserva, ad esempio, una radiosorgente con piccolo diametro apparente che attraversa il lobo principale di un radiotelescopio (strumento di transito) in un certo tempo, non è possibile integrare il segnale rivelato con una costante di tempo troppo grande, senza modificare l'intensità del segnale ricevuto e l'ora apparente del transito. Il massimo valore utilizzabile per il tempo di integrazione applicabile a un segnale caratterizzato da variabilità temporali dell'ordine di ΔT può essere stimato con la seguente relazione approssimata:

$$\tau \leq 0.35 \cdot \Delta T$$

I tempi sono espressi in secondi. Questa relazione è basata sulla considerazione che, per conservare le caratteristiche di variabilità del segnale integrato, eliminando la maggior parte dei disturbi e del rumore sovrapposto ad alta frequenza, occorre integrare questo segnale con una costante di tempo tale che la banda equivalente di rumore dell'integratore (filtro passa-basso) sia circa uguale all'occupazione in banda del segnale.

Il problema principale delle misure radiometriche riguarda l'instabilità dei parametri del ricevitore (soprattutto il guadagno complessivo del sistema e il fattore di conversione del rivelatore a caratteristica quadratica) rispetto alle variazioni della temperatura. Dato che l'amplificazione complessiva dello strumento è molto elevata, tipicamente superiore a 100 dB , è facile osservare fluttuazioni nel segnale di uscita dovute a minime variazioni nei parametri del sistema che producono ambiguità e limitano la sensibilità e la precisione delle misure. Questo problema si può risolvere stabilizzando termicamente il ricevitore e l'unità elettronica esterna (LNB) collocata sul punto focale dell'antenna, quindi maggiormente esposta alle escursioni termiche giornaliere. Può essere utile sviluppare procedure di compensazione a posteriori delle derive termiche sui dati acquisiti misurando la temperatura interna dello strumento, caratterizzando il comportamento del ricevitore rispetto alle escursioni termiche giornaliere e implementando un algoritmo di compensazione sui campioni radiometrici acquisiti tendente a minimizzare le variazioni della risposta strumentale dovute alla temperatura.

7. Il radiometro a commutazione

È stato dimostrato che la densità spettrale di potenza delle fluttuazioni di guadagno con la temperatura in un ricevitore, principale causa di instabilità in un radiometro, è concentrata nella banda di frequenze inferiori a 1 Hz : si tratta, quindi, di variazioni relativamente lente. Per minimizzare il loro contributo è stato sviluppato il *radiometro a commutazione* (o *a confronto*, fig. 12): l'ingresso del ricevitore è periodicamente commutato fra l'antenna (temperatura equivalente T_a) e una sorgente di rumore di riferimento stabile (resistenza o generatore di rumore calibrato con temperatura T_{ref}) con una frequenza f_c maggiore della componente a frequenza più elevata presente nello spettro delle fluttuazioni di guadagno. In pratica, si sceglie il periodo di commutazione in modo che le variazioni di guadagno del ricevitore, entro un periodo, siano talmente lente da sembrare costanti. Valori tipici sono $1 \div 1000\text{ Hz}$. La scelta definitiva della frequenza di commutazione dipende dalla stabilità nel tempo del ricevitore: i primi strumenti radioastronomici a valvole termoioniche, molto meno stabili rispetto a quelli attuali, utilizzavano elevate frequenze di commutazione dato che i parametri variavano piuttosto rapidamente. Oggi sono accettabili frequenze inferiori a 1 Hz . La risposta del radiometro sarà proporzionale alla differenza fra la temperatura di antenna e quella della sorgente di rumore e gli effetti delle variazioni di guadagno saranno minimizzati.

Come si vede dallo schema di principio in fig. 12, il segnale captato dall'antenna è inviato a un commutatore RF che collega, alternativamente, l'ingresso del ricevitore (schematicamente indicato con un amplificatore di guadagno G) all'antenna (posizione A) e a una resistenza R_{ref} (posizione B) di valore identico alla resistenza di ingresso R_{in} del ricevitore, mantenuta a temperatura costante T_{ref} . Il segnale è amplificato e inviato al rivelatore quadratico che restituisce una differenza di potenziale proporzionale alla potenza applicata. Il successivo blocco di post-rivelazione è rappresentato da un elemento sincrono con il commutatore RF che cambia la polarità del segnale di ingresso: durante la prima metà del periodo di commutazione (ricevitore collegato all'antenna) la polarità sarà conservata, durante la seconda metà (ricevitore collegato al carico adattato) sarà invertita. Tale operazione è equivalente, dopo integrazione, alla sottrazione algebrica fra i segnali applicati durante i due semi-periodi. L'uscita del rivelatore sincrono è integrata con una costante di tempo τ (molto maggiore del periodo di commutazione), ottenendo una componente quasi-continua che rappresenta il valore medio del segnale rivelato, quindi la risposta del radiometro. Se il duty-cycle del segnale di commutazione è del 50%, l'integratore restituirà un valore proporzionale alla differenza fra la temperatura di antenna e quella del generatore di rumore di riferimento. È teoricamente cancellato il rumore del ricevitore ed è possibile azzerare il termine costante

dell'uscita radiometrica quando $T_{ref} = T_a$ (radiometro bilanciato), evidenziando solo le minime variazioni sulla temperatura di antenna dovute alla radiosorgente.

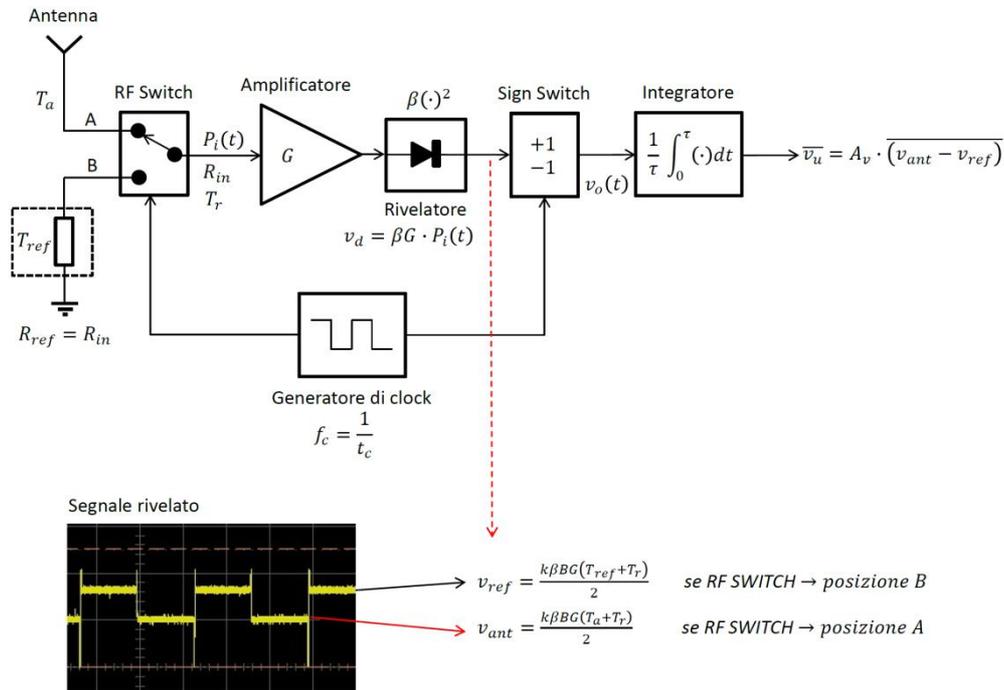


Fig. 12: Principio di funzionamento di un radiometro a confronto. Segnale rivelato in un ricevitore sbilanciato (con $T_a > T_{ref}$). Il blocco centrale del ricevitore è schematizzato con un amplificatore di guadagno G seguito da un rivelatore a caratteristica quadratica. Il segnale all'uscita del sistema sarà proporzionale (secondo un fattore di amplificazione in tensione A_v) alla differenza fra il segnale rivelato proveniente dall'antenna v_{ant} e quello dal generatore di rumore di riferimento v_{ref} .

Come si è accennato, le principali cause di instabilità in un radiometro sono dovute alle fluttuazioni di guadagno nella sezione di pre-rivelazione e alle variazioni nel fattore di conversione del rivelatore quadratico causate dalle variazioni di temperatura, dalle fluttuazioni di polarizzazione dei dispositivi attivi e dalle instabilità meccaniche (connessioni, cablaggi, vibrazioni di componenti critici). L'esperienza mostra che, se si progetta un sistema meccanicamente robusto e si utilizzano i moderni alimentatori stabilizzati, le escursioni termiche sperimentate dai circuiti sono la principale causa di instabilità. Essendo molto elevato il guadagno richiesto, sono sufficienti minime fluttuazioni per osservare importanti variazioni sull'uscita. Nel radiometro a commutazione è virtualmente possibile eliminare il contributo dovuto alle fluttuazioni di guadagno regolando la temperatura di rumore del generatore di confronto in modo che coincida con quella di antenna (radiometro bilanciato), ottenendo una stabilità teorica molto elevata. Serve un generatore di rumore con ampiezza regolabile, difficile da ottenere, soprattutto a frequenze elevate. Spesso si rinuncia alla possibilità di variare la sorgente di rumore (eliminando ulteriori cause di instabilità) e si utilizza una resistenza con valore identico alla resistenza di ingresso del ricevitore mantenuta a una temperatura (costante) prossima a quella di antenna. Mentre questo è facilmente realizzabile negli strumenti che osservano scenari con temperatura di brillantezza prossima a quella ambiente (come nelle applicazioni di monitoraggio del terreno), quando si osserva il cielo "freddo" in radioastronomia è necessaria una temperatura di riferimento molto bassa per bilanciare lo strumento: negli impianti radioastronomici professionali si utilizzano carichi resistivi adattati, immersi in bagni di azoto (77.3 K) o di elio liquidi (4.2 K). Nella banda

delle microonde, quando è difficile termostabilizzare un carico resistivo a temperature criogeniche, si può utilizzare la cosiddetta *terminazione di riferimento del cielo freddo (cold sky reference)*: il carico di riferimento è un'antenna horn ausiliaria (con guadagno di circa 20 dB) orientata verso una regione del cielo libera da radiosorgenti. Nelle lunghe sessioni di misura è preferibile orientare l'antenna di riferimento verso il polo nord celeste in modo da osservare sempre la stessa porzione di cielo, con una temperatura di riferimento costante (fluttuazioni atmosferiche a parte).

Poiché un radiometro a commutazione “vede” il segnale di antenna per metà del tempo a disposizione (l'altra metà essendo utilizzata per misurare il riferimento), è possibile dimostrare che, in condizioni di bilanciamento, la sua sensibilità è dimezzata rispetto a quella teorica del radiometro a potenza totale descritta nel precedente paragrafo che, in pratica, rappresenta un limite irraggiungibile. In ogni caso, anche quando è sbilanciato, il radiometro a commutazione è molto meno sensibile alle fluttuazioni di guadagno rispetto al radiometro a potenza totale. Come si vedrà, grazie alla disponibilità di componenti elettronici con prestazioni sempre più avanzate e di veloci processori, è possibile implementare un sistema di controllo integrato per un radiometro multifunzione che, utilizzando un algoritmo brevettato, realizza un modulo molto versatile operante come ricevitore a potenza totale o a commutazione.

8. Il radiometro RAL10MW

La struttura originale del radiometro a commutazione, insieme alle numerose varianti che sono state sviluppate negli anni, risolve il problema della stabilità rispetto alle fluttuazioni di guadagno degli amplificatori al prezzo di un sensibile incremento nella complessità circuitale e nei costi dello strumento, rendendo generalmente difficoltosa la diffusione dei radiometri a microonde come moduli sensori utilizzabili su larga scala nelle applicazioni.

Sviluppando ed ingegnerizzando una struttura hardware semplice, compatta ed economica, utilizzando componentistica professionale di qualità, abbinata ad un algoritmo dedicato al controllo e alla gestione dello strumento, abbiamo integrato all'interno di un singolo modulo le funzionalità di un *ricevitore a potenza totale e a commutazione*, con la possibilità di programmare e memorizzare un insieme completo di parametri operativi, compresa una procedura di calibrazione per il segnale di uscita, in modo da adattarsi ad un'ampia gamma di applicazioni.

Con riferimento allo schema in fig. 13 che, a titolo di esempio, illustra la struttura a blocchi di un semplice radiotelescopio a microonde funzionante nella banda di frequenze $10 \div 12$ GHz, descriveremo in dettaglio il funzionamento del radiometro RAL10MW. Si tratta, ovviamente, di considerazioni di carattere generale valide per una vasta gamma di applicazioni che prevedono l'utilizzo di RAL10MW abbinato a una generica unità LNB esterna (generalmente equipaggiata con illuminatore e posizionata sul fuoco di un'antenna a riflettore parabolico) che converte e amplifica la banda di ricezione nella banda di ingresso accettata dal nostro strumento. Come si vede, la struttura del radiometro è concettualmente semplice, trattandosi fondamentalmente di un amplificatore passa-banda a radiofrequenza seguito da un rivelatore di precisione a caratteristica quadratica ed ampia dinamica che calcola la potenza di rumore associata al segnale ricevuto, integrata all'interno della banda passante del dispositivo, compresa nell'intervallo di frequenze $1377 \div 1444$ MHz. Il radiometro non opera conversioni di frequenza e rivela direttamente i segnali interni alla sua banda passante. La tipologia di antenna utilizzata, la specifica banda di ricezione e la sua ampiezza, il guadagno complessivo a radiofrequenza ed altri parametri caratteristici del ricevitore (come, ad esempio, la cifra di rumore) saranno stabiliti dall'unità LNB esterna, dedicata alla particolare applicazione, strutturalmente analoga a quella descritta dal blocco

front-end rappresentato in fig. 13. Come è facile immaginare, c'è ampia possibilità di scelta per questi dispositivi, in funzione della frequenza di ricezione e dell'antenna utilizzata: dai numerosi LNB commerciali destinati alla ricezione della TV-SAT in banda X ($7 \div 12.5 \text{ GHz}$), in banda C ($4 \div 8 \text{ GHz}$) o in banda K ($18 \div 27 \text{ GHz}$), ai dispositivi amplificatori a basso rumore (LNA)-convertitori di frequenza appositamente costruiti per una specifica frequenza, fino alle catene amplificatrici a basso rumore senza conversione di frequenza che operano direttamente nella banda ingresso del radiometro (ricevitori ad amplificazione diretta). In ogni caso, il primo stadio del front-end (quello direttamente collegato all'antenna ricevente) deve essere a basso rumore, con un guadagno complessivo dell'ordine di $30 \div 50 \text{ dB}$.

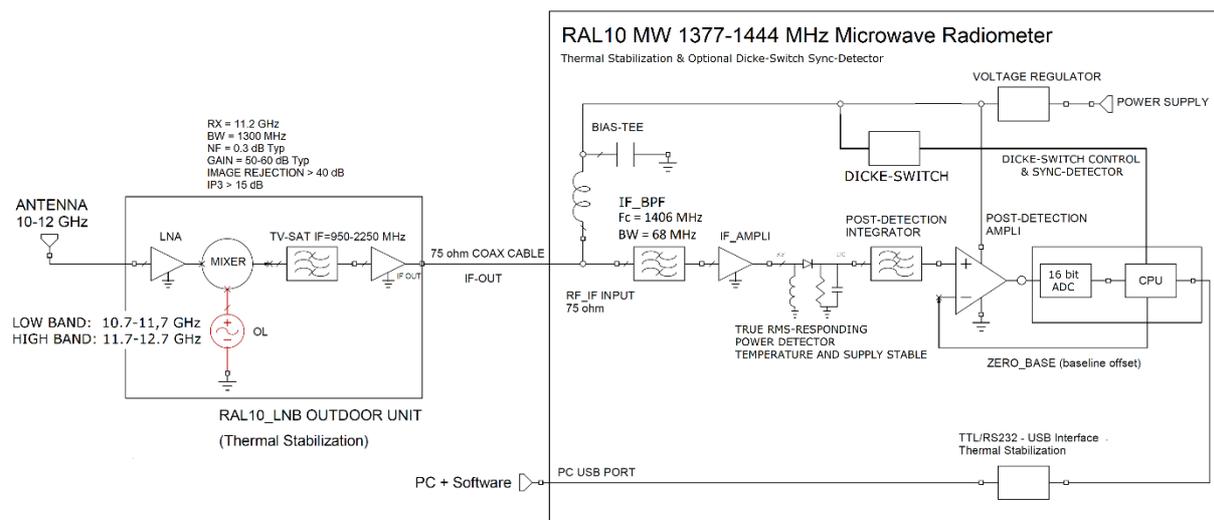


Fig. 13: Schema a blocchi che descrive i principali componenti di un radiotelescopio didattico operante nella banda $10 \div 12 \text{ GHz}$ basato sul radiometro *RAL10MW*. Il blocco a sinistra rappresenta l'unità esterna (LNB) commerciale, completa di illuminatore, assemblata sul punto focale di un'antenna a riflettore parabolico (primo fuoco od offset) comunemente utilizzata per la ricezione TV-SAT. Il segnale a frequenza intermedia $950 \div 2250 \text{ MHz}$ proveniente dall'unità esterna è trasmesso al radiometro *RAL10MW* attraverso un cavo coassiale da 75Ω , amplificato ed elaborato dal ricevitore, trasmesso al computer di stazione attraverso una porta seriale USB.

La struttura del radiometro *RAL10MW* è illustrata nel blocco a destra di fig. 13: il segnale proveniente dall'unità esterna LNB è filtrato, amplificato e applicato a un rivelatore di precisione che calcola la potenza di rumore associata al segnale ricevuto. Limitare la banda passante del sistema intorno alla frequenza 1420 MHz , riservata alla ricerca radioastronomica, è importante per minimizzare gli effetti delle interferenze esterne.

Si è visto come nelle applicazioni radiometriche l'informazione utile sia la potenza associata al segnale ricevuto. Il rivelatore a caratteristica quadratica esegue tale misura ed è un componente critico e delicato dal quale dipendono la precisione e la stabilità della misura. Nella sua versione basilare è realizzato con un dispositivo non lineare (diodo) funzionante nella zona della sua caratteristica diretta (esponenziale) che approssima una parabola, quindi nell'intorno dell'origine. Ciò impone l'applicazione di segnali a basso livello con alcune limitazioni sulla dinamica e sulla precisione della risposta, soprattutto rispetto alle variazioni di temperatura, con derive del segnale rivelato che possono causare instabilità a lungo termine. Queste lente fluttuazioni introducono errori nella misura mascherando le piccole variazioni di segnale captato dall'antenna e rendendo difficoltosa l'amplificazione di post-rivelazione. Nel radiometro *RAL10MW* si è utilizzato un rivelatore di precisione ad elevata

dinamica, caratterizzato da una risposta in tensione lineare rispetto al livello di potenza applicata (fig. 14): si tratta del circuito integrato AD8362 di Analog Devices, un *true rms-responding power detector* con un intervallo di misura ampio 65 dB. All'interno del chip è implementato un blocco rivelatore quadratico a larga banda che fornisce una risposta ai segnali RF essenzialmente indipendente dalla loro forma d'onda. Il dispositivo è stato concepito come un voltmetro RMS per misurare, con scala calibrata, la potenza associata ai segnali RF. Implementando un circuito di compensazione delle derivate termiche e controllando la temperatura interna del ricevitore, si minimizzano gli errori sulla misura legati alle variazioni della temperatura ambiente.

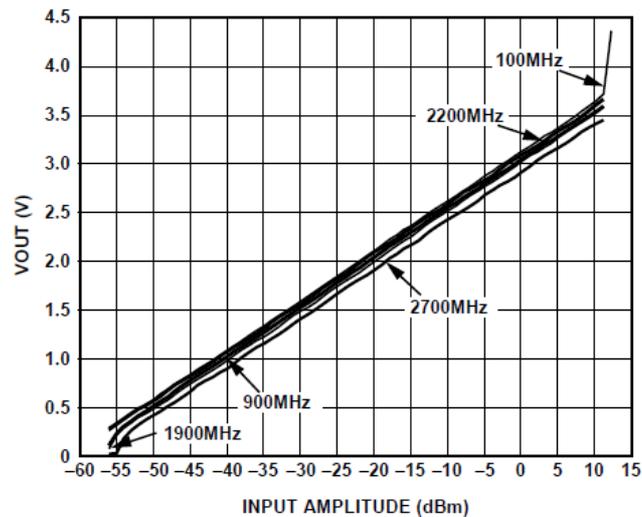


Fig. 14: Caratteristica ingresso-uscita del rivelatore compensato in temperatura AD8362 utilizzato nel radiometro *RAL10MW*.



Fig. 15: Particolare interno del radiometro: all'interno della scatola metallica schermata (è stato rimosso il coperchio) si vede il circuito del modulo radiometrico che gestisce il funzionamento dello strumento.



Fig. 16: Sezione di alimentazione da rete (230 Vac – 50/60 Hz) del radiometro. E' disponibile un ingresso a bassa tensione (12 Vdc) che consente di alimentare lo strumento tramite batterie esterne per utilizzi “sul campo”.

Segue un amplificatore di post-rivelazione da strumentazione con guadagno in tensione programmabile che applica un filtraggio passa-basso al segnale rivelato (integrazione preliminare) e un offset di tensione programmabile *ZERO_BASE* (fig. 13) alla linea di base, ottimizzando lo “zero” di riferimento per la scala di misura. Questo segnale è generato da un DAC (Digital-to-Analog Converter) a 16 bit seguito da un filtro passa-basso.

Un convertitore analogico-digitale (ADC) a 16 bit “digitalizza” l’informazione radiometrica e misura la temperatura interna dello strumento. Il sistema è governato da un processore che elabora il segnale radiometrico e controlla il circuito riscaldatore-termostato tramite un modulatore PWM asservito a un regolatore PID che mantiene costante la temperatura del ricevitore. Il processore gestisce anche la comunicazione del radiometro con un dispositivo host esterno (tipicamente un computer equipaggiato con il software *RAL10MW_DataLogger* fornito in dotazione) secondo un protocollo proprietario attraverso un canale USB standard. Indipendentemente dalla modalità operativa scelta per lo strumento (radiometro a potenza totale o a commutazione), la precisione e la ripetibilità delle misure sono ottenute stabilizzando termicamente *RAL10MW* tramite il controllo automatico PID. Ovviamente, l’abbinamento della tecnica di stabilizzazione radiometrica a commutazione con il controllo della temperatura garantisce le migliori prestazioni.

Sono previsti un generatore di tono a 22 kHz necessario per commutare la banda di ricezione delle unità LNB predisposte (come, ad esempio, i sistemi utilizzati per la TV-SAT: LOW BAND 10.70 ÷ 11.70 GHz, HIGH BAND 11.70 ÷ 12.75 GHz) e un modulatore sincrono con il rivelatore che, tramite salto di tensione, seleziona la polarizzazione in ricezione (orizzontale o verticale) se lo strumento opera come radiometro a potenza totale (modalità *TOTAL – POWER*), commuta periodicamente l’ingresso dell’unità LNB esterna fra l’antenna e un generatore di rumore di riferimento (tipicamente una resistenza a temperatura costante) se lo strumento opera come radiometro a commutazione (modalità *DICKE – SWITCH*). Il tono a 22 kHz e il segnale di commutazione (fra due livelli di tensione con frequenza compresa fra 27 Hz e 82 Hz) sono inviati all’unità LNB esterna attraverso il cavo coassiale da 75 Ω. Le fig. 15 e 16 mostrano i particolari interni del ricevitore e in Appendice sono riportati dettagli sul protocollo di comunicazione.

Come accennato, sono cruciali per il corretto funzionamento del sistema gli algoritmi sviluppati (implementati nel firmware del processore CPU) per gestire la demodulazione del segnale rivelato, le procedure automatiche che stabilizzano le misure, che compensano le derive termiche del sistema e controllano in tempo reale la dinamica dei segnali campionati in modo da garantire una corretta demodulazione sincrona. Per completezza e comodità di utilizzo è stata implementata anche una procedura di calibrazione del radiometro che, tramite l'introduzione di opportuni parametri, consente la calibrazione del segnale di uscita direttamente in unità $[K]$ di misura della temperatura di brillantezza associata allo scenario osservato. Tutte queste operazioni sono eseguibili da remoto attraverso il canale di comunicazione seriale dello strumento.

Le fig. 17 e 18 mostrano, rispettivamente, la caratteristica ingresso-uscita e la risposta in frequenza dello strumento, ottenute in laboratorio nelle condizioni specificate. Si tratta di valori nominali: ogni singolo strumento può presentare valori leggermente diversi a causa delle tolleranze costruttive che riguardano soprattutto le prestazioni dei blocchi di pre-rivelazione.

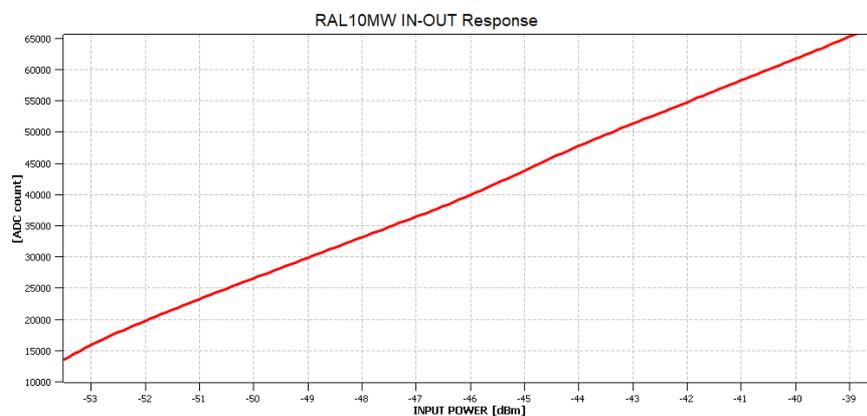


Fig. 17: Caratteristica ingresso-uscita del radiometro *RAL10MW* ottenuta in laboratorio applicando all'ingresso dello strumento un segnale sinusoidale a 1415 MHz e variando la sua potenza da -55 dBm fino a -38 dBm . Il radiometro è stato impostato per funzionare in modalità *TOTAL - POWER* con il minimo guadagno di post-rivelazione ($GAIN = 0$) e una costante di integrazione $TCOST = 8$. E' stato annullato l'offset per la linea di base ($ZERO_BASE = 0$) e le misure sono iniziate dopo che lo strumento si è termicamente stabilizzato alla temperatura di regime ($TREF = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

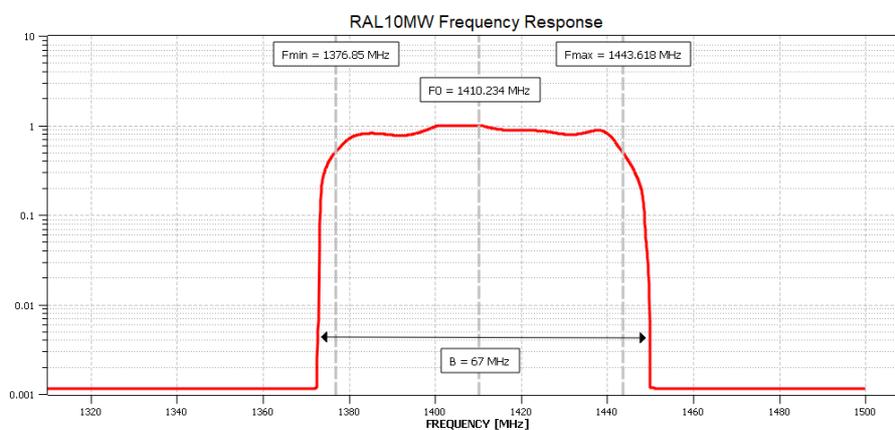


Fig. 18: Risposta in frequenza del radiometro *RAL10MW*: lo strumento accetta all'ingresso segnali compresi nell'intervallo $1377 \div 1444\text{ MHz}$.

La seguente tabella riassume le specifiche tecniche del radiometro *RAL10MW*.

- Dimensioni: circa $L = 200\text{ mm}$, $H = 100\text{ mm}$, $P = 155\text{ mm}$
(L : lunghezza, H : altezza, P : profondità).
- Peso: 1.5 *Kg* circa.
- Banda di frequenze di ingresso: 1377 ÷ 1444 *MHz*.
- Input RF: Connettore tipo *F*, impedenza 75 Ω .
- Circuito rivelatore quadratico di precisione per la misura della potenza del segnale RF.
- Impostazione offset per la linea di base radiometrica.
- Calibrazione e controllo automatico della linea di base radiometrica.
- Guadagno in tensione di post-rivelazione programmabile.
- Costante di integrazione programmabile.
- Memorizzazione dei parametri operativi del ricevitore nella memoria interna.
- Misura del segnale radiometrico e della temperatura interna: ADC 16 bit.
- Modalità operative del radiometro (solo per LNB predisposti): TOTAL-POWER
REFERENCE
DICKE-SWITCH
- Selezione polarizzazione in ricezione per LNB esterni (solo modo TOTAL-POWER).
- Selezione della banda di ricezione per LNB compatibili (tono 22 *kHz*).

Nella configurazione standard, il tono a 22 *kHz* per la commutazione della banda di ricezione e il segnale di selezione per la polarizzazione in ricezione o per la commutazione *antenna/riferimento* quando il radiometro opera nel modo *DICKE – SWITCH* (solo per LNB predisposti) sono inviati all'unità esterna attraverso il cavo coassiale. Su richiesta, è possibile avere il segnale di commutazione su un connettore indipendente (frequenza di commutazione circa 4 *Hz*).

- Controllo del radiometro con microprocessore.
- Controllo temperatura interna con regolatore PID (programmabile da 40 a 55 $^{\circ}\text{C}$).
- Procedura di calibrazione della scala di misura in temperatura equivalente di antenna [*K*] previo inserimento dei parametri di calibrazione memorizzabili.
- Porta USB di comunicazione seriale con protocollo proprietario.
- Alimentazione da rete: 85 ÷ 264 *Vac*, 47 ÷ 63 *Hz*, 36 *W*.
- Alimentazione a bassa tensione: 12 *Vdc* da sorgente esterna (batteria).

9. Il programma di acquisizione e di controllo

RAL10MW_DataLogger (fig. 19) è un programma per personal computer basilare e semplice da utilizzare, dedicato all'acquisizione automatica e al controllo del radiometro *RAL10MW* in attesa di aggiornare il più completo software *ARIES*.

RAL10MW_DataLogger controlla tutti i parametri operativi dello strumento: nello stile di un registratore grafico, è visualizzato l'andamento delle misure nel tempo e sono archiviate le informazioni acquisite in file di dati in formato testo, facilmente utilizzabili per successive elaborazioni. Le variazioni dei dati radiometrici acquisiti sono visualizzate sulla finestra grafica come tracce mobili di differenti colori: in un diagramma rettangolare l'ascissa è la variabile temporale (espressa in tempo UTC) e l'ordinata l'intensità dei segnali espressa in unità relative di conteggio [*count*] se lo strumento non è stato calibrato, oppure in [*K*] (temperatura equivalente di antenna) se lo strumento è stato calibrato. Quando è selezionata la

misura in $[count]$ (unità di conteggio del convertitore analogico-digitale) la scala varia fra 0 e 65535 unità (risoluzione 16 bit).



Fig. 19: Software *RAL10MW_DataLogger* impostato per il funzionamento del radiometro in modalità *DICKE – SWITCH* (radiometro a commutazione). Nella finestra grafica sono visualizzate (con differenti colori, se abilitate) le tracce che rappresentano i segnali radiometrici *ANT* (traccia *TOTAL – POWER* di colore blu quando l’ingresso del radiometro è collegato all’antenna), *REF* (traccia *REFERENCE* di colore nero quando l’ingresso del radiometro è collegato alla resistenza termicamente stabilizzata) e la risposta radiometrica $RADIO = ANT - REF + BASELINE$ (traccia di colore rosso). Se lo strumento è impostato come radiometro a potenza totale (modalità *TOTAL – POWER*), le tracce grafiche dei segnali *REF* e *RADIO* convergeranno verso il segnale *ANT* come una traccia unica, mentre se lo strumento è impostato in modalità *REFERENCE*, le tracce dei segnali *ANT* e *RADIO* convergeranno verso il segnale *REF*.

Il programma, molto semplice, comprende tutto ciò che serve per gestire e visualizzare le misure, con ampie possibilità di impostazione delle scale grafiche e di programmazione dei parametri operativi.

Sono presenti i comandi necessari per impostare tutti i parametri dello strumento. Dopo aver lanciato il programma si seleziona la porta seriale *COM* disponibile sull’apposito menù a tendina e si attiva la comunicazione premendo il pulsante *Connect*. I comandi operativi saranno accettati solo dopo che è stato attivato il canale di comunicazione fra lo strumento e il software di controllo e dopo che si è digitato il numero identificativo del radiometro nella casella corrispondente ($ID = 15$). Nella parte superiore della consolle si vedono la finestra dell’ora e della data (in formato di tempo universale UTC) che si aggiorna ogni volta che è ricevuto un pacchetto di dati dal canale seriale, i comandi *ANT* e *REF* utilizzati per abilitare la visualizzazione delle tracce grafiche dei segnali *TOTAL – POWER* e *REFERENCE* quando il radiometro funziona in modalità *DICKE – SWITCH* (fig. 19, comando *DS* attivo), i comandi che selezionano l’unità di misura ($[count]$ per la misura non calibrata, $[K]$ per la misura calibrata in temperatura di brillanza).

E' possibile impostare la velocità di trasmissione continua dei pacchetti di dati (attivata o disattivata tramite i pulsanti verde *ON* e rosso *OFF* a destra) digitando nella casella *VTX* un numero compreso fra 1 e 65. I valori della risposta radiometrica *RADIO* e della varianza *VAR* saranno visualizzati, nelle unità di misura selezionate, nelle caselle di colore giallo in alto a destra.

Utilizzando i bottoni di zoom dell'asse *Y* si aggiusta la risoluzione delle ordinate grafiche, con i pulsanti freccia verso l'alto o verso il basso si posizionano le tracce in modo che siano completamente visibili in tutta la loro escursione dinamica (sono comandi che consentono la traslazione delle tracce lungo l'asse delle ordinate). Analogamente, è possibile effettuare uno zoom sull'asse del tempo (ascissa) utilizzando i relativi pulsanti, modificando anche la velocità di scorrimento delle tracce. Come accennato, il formato della rappresentazione del tempo è in UTC.

I comandi *ONE SAMPLE*, *CLEAR* e *MEM* (a destra nella consolle) richiedono al radiometro la trasmissione di un pacchetto di dati comprendente i valori dei parametri e delle misure attuali, la pulizia della finestra grafica e la memorizzazione dei parametri operativi dello strumento nella memoria interna del ricevitore: ogni volta che si alimenta il radiometro, sono ripristinate le condizioni operative ottimali, scelte dopo opportuna calibrazione in funzione delle caratteristiche del sistema ricevente e dello scenario osservato.

In basso a sinistra nella consolle sono presenti le caselle necessarie per inserire i parametri di calibrazione dello strumento (come specificato nel paragrafo seguente) e il menù a tendina *SAMPLING* che seleziona ogni quanti campioni ricevuti deve essere aggiornata la misura. Questa funzione acquisisce il numero di campioni selezionato, calcola la loro media aritmetica e visualizza il risultato nella traccia grafica. Si esegue, in pratica, un'integrazione addizionale sul segnale ricevuto in aggiunta a quella stabilita dal parametro *TCOST*.

Il bottone vicino seleziona la banda di ricezione *A BAND* o *B BAND* che, nel caso si utilizzi, ad esempio, un'unità esterna LNB per TV-SAT nella banda $10 \div 12 \text{ GHz}$, corrispondono alle bande di ricezione $A \text{ BAND} = 10.70 \div 11.70 \text{ GHz}$ e $B \text{ BAND} = 11.70 \div 12.75 \text{ GHz}$.

Il bottone *POL DK* inverte la posizione dei segnali *ANT* e *REF* rispetto alla risposta radiometrica e al segnale fisico di commutazione. Questo comando è stato inserito per migliorare la flessibilità del radiometro quando abbinato ai vari tipi di unità esterne LNB e sarà utilizzato una sola volta, note le caratteristiche del LNB, per essere memorizzato permanentemente nella memoria interna dello strumento.

La modalità operativa del radiometro si imposta selezionando uno dei tre seguenti bottoni:

- *DS*: il radiometro opera come ricevitore a commutazione (l'ingresso del radiometro è commutato fra l'antenna e il generatore di rumore di riferimento (resistenza adattata a temperatura costante) con una frequenza $27 \div 82 \text{ Hz}$. Il programma visualizza, se selezionate, la traccia del segnale *ANT* di colore blu (radiometro connesso all'antenna), la traccia del segnale *REF* di colore nero (radiometro connesso alla resistenza adattata di riferimento a temperatura costante), la traccia della risposta radiometrica $RADIO = ANT - REF + BASELINE$ di colore rosso.
- *TP*: il radiometro opera come ricevitore a potenza totale (l'ingresso del ricevitore è collegato all'antenna) e il programma visualizza i segnali come una traccia unica: il segnale *RADIO* di colore rosso segue l'andamento del segnale *ANT*.
- *RF*: il radiometro opera come ricevitore in modalità *REFERENCE* (l'ingresso del ricevitore è collegato al generatore di rumore di riferimento (resistenza adattata a temperatura costante) il programma visualizza i segnali come una traccia unica: il segnale *RADIO* di colore rosso segue l'andamento del segnale *REF*.

I precedenti comandi sono funzionali se l'unità esterna LNB è predisposta per operare come front-end di un radiometro a commutazione, quindi equipaggiata con un commutatore RF e un carico adattato di riferimento (si veda lo schema di fig. 12). Se, invece, l'unità esterna è di tipo standard come, ad esempio, un dispositivo commerciale per TV-SAT 10 ÷ 12 GHz, il salto di tensione generato dal radiometro (comandi *TP* e *RF*) serve per selezionare la polarizzazione in ricezione (orizzontale o verticale) e non è utile attivare la commutazione in modalità *DS*.

I parametri del ricevitore come *GAIN* (guadagno in tensione di post-rivelazione), *ZERO_BASE* (offset per la linea di base radiometrica), *TCOST* (costante di integrazione della misura) e *BASELINE* (offset per la linea di base quando il radiometro opera a commutazione) sono impostabili nelle rispettive caselle di testo. Se è stato attivato il controllo automatico della temperatura interna del ricevitore (visualizzata nella casella *TEMP* [°C]) tramite il comando *TempContr*, è possibile impostare il valore di temperatura desiderato nella casella *TREF* [°C]. La finestra vicina, di colore giallo, visualizza il valore del duty-cycle del modulatore PWM che regola automaticamente la temperatura.

Il pulsante *CAL_BASE* attiva/disattiva la calibrazione automatica della linea di base (lo "zero" di riferimento) per la misura radiometrica. Questa procedura, se attivata, lavora continuamente quando il radiometro è impostato nella modalità a commutazione (*DICKE – SWITCH*), funzione importante che garantisce il corretto funzionamento dello strumento ottimizzando la dinamica dei segnali acquisiti, come si vedrà nei seguenti paragrafi. Quando lo strumento opera come radiometro a potenza totale, attivando il comando *CAL_BASE* si avvia la calibrazione automatica della linea di base radiometrica che varia l'offset *ZERO_BASE* finché la traccia non sarà posizionata vicino al centro della scala di misura. Quando il comando è disattivato, è sempre possibile posizionare manualmente, con grande precisione, il livello di riferimento della baseline in qualsiasi punto della scala impostando un valore compreso fra 0 e 65535 nella casella *ZERO_BASE*.

Su richiesta, sono disponibili versioni del programma per le più diffuse piattaforme per PC.

10. Calibrazione del radiometro

Quando si devono eseguire misure radiometriche assolute è necessario calibrare lo strumento per ottenere una risposta coerente con una scala assoluta di *temperatura di brillantezza* (o di unità di flusso). Le tolleranze costruttive, le condizioni ambientali e le variazioni parametriche dei dispositivi attivi, infatti, causano variazioni nelle caratteristiche del ricevitore rendendo ogni strumento unico nella sua risposta ed assai difficoltoso confrontare le misure eseguite da sistemi differenti o quelle di uno stesso impianto effettuate in tempi diversi. Per questi motivi sarebbe desiderabile riferirsi ad un sistema di misurazione universale. La procedura di calibrazione di un radiotelescopio, ad esempio, serve proprio a stabilire una relazione fra la *temperatura di brillantezza* dello scenario osservato (espressa in *K*) e una data quantità in uscita dallo strumento (espressa, come nel nostro caso, in unità arbitrarie di conteggio [*count*] del convertitore analogico-digitale interno).

In questo paragrafo forniremo alcuni suggerimenti per calibrare la scala di misura del radiometro *RAL10MW*, in particolare di un radiotelescopio basato su questo strumento, osservando sorgenti di riferimento facilmente disponibili. Come si è visto nei precedenti paragrafi, è prevista una procedura di calibrazione che, tramite l'introduzione di opportuni parametri attraverso il programma di controllo *RAL10MW_DataLogger*, converte la scala di misura dalle unità arbitrarie di conteggio [*count*] alle unità assolute [*K*] (*temperatura di antenna* o di *brillantezza* dello scenario osservato). La tecnica è semplice anche se approssimata, comunque adeguata alle esigenze di uno strumento didattico, generalizzabile per calibrare qualsiasi radiometro operante in questa banda di frequenze.

Se la caratteristica ingresso-uscita del radiometro è lineare fra il livello di potenza del segnale radio e il corrispondente valore acquisito dal convertitore analogico-digitale (ADC) interno (come in *RAL10MW* – fig. 14 e fig. 17), è possibile calibrare lo strumento con il metodo dei due punti, misurando due differenti livelli di potenza della radiazione ricevuta: prima si osserva un *target caldo* (oggetto a temperatura ambiente), poi un *target freddo* (come, ad esempio, il cielo allo zenit) tarando direttamente in *K* la temperatura di antenna. In pratica:

Misura del *target freddo*: si orienta l'antenna verso il cielo allo zenit, in una giornata serena e asciutta. Se sono assenti i contributi radiativi del Sole, della Luna e di altre sorgenti, la temperatura di brillantezza del cielo allo zenit può essere stimata con l'aiuto del seguente grafico (fig. 20). Trascurando il contributo di rumore dovuto alla radiazione captata dai lobi secondari dell'antenna, si utilizza il valore $T_{SKY} = 6.8 K$. Questo valore, moltiplicato per 100, sarà inserito nella casella di calibrazione relativa al *target freddo TC [K x100]* con il valore 6800 nel programma *RAL10MW_DataLogger*.

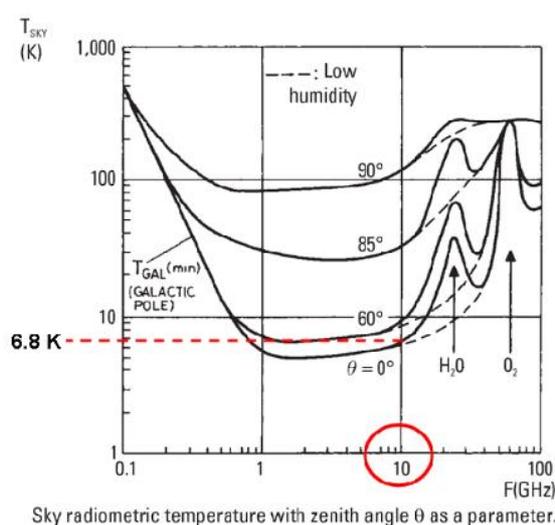


Fig. 20: Stima della temperatura di brillantezza del cielo allo zenit nella banda 12 ÷ 12 GHz (N. Skou, D. Le Vine - MICROWAVE RADIOMETER SYSTEMS - Design and Analysis).

Misura del *target caldo*: si orienta l'antenna verso il terreno in modo da coprire tutto il suo campo di vista, ad una distanza tale da considerare soddisfatta la condizione di campo lontano. Se la temperatura fisica del terreno (misurabile con un termometro ed espressa in *K*) è T_{soil} e la sua *emissività* a microonde vale $\eta = 0.95$ (è un valore medio, stimato), la sua temperatura di brillantezza sarà:

$$T_{GND} = \eta \cdot T_{soil} \quad [K]$$

Essendo prossimo a 1 il valore di emissività, si è trascurata la radiazione del cielo riflessa dal terreno verso il radiometro. Questo valore, moltiplicato per 100, sarà inserito nella casella di calibrazione relativa al *target caldo TW [K x100]* del programma *RAL10MW_DataLogger*. Supponendo, ad esempio, di ottenere $T_{GND} = 275.81 K$, si inserirà il valore 27581.

Se le risposte dello strumento quando si misurano i target con differenti temperature di brillantezza T_{SKY} e T_{GND} sono, rispettivamente, $radio_{SKY}$ e $radio_{GND}$ (unità arbitrarie di

conteggio *count*), si può esprimere la temperatura equivalente di antenna T_a in funzione della corrispondente risposta radiometrica *radio* come:

$$T_a(\text{radio}) = m \cdot \text{radio} + q \quad [K]$$

dove

$$\begin{cases} m = \frac{T_{GND} - T_{SKY}}{\text{radio}_{GND} - \text{radio}_{SKY}} \\ q = T_{SKY} - m \cdot \text{radio}_{SKY} \end{cases}$$

Sono il coefficiente angolare e il termine noto della retta di calibrazione del radiometro. Questi parametri sono automaticamente calcolati dopo aver inserito i corrispondenti valori per radio_{SKY} nella casella *RC* [count], per radio_{GND} nella casella *RW* [count] del programma *RAL10MW_DataLogger*. Confermati tutti i parametri di calibrazione è opportuno memorizzarli utilizzando il comando *MEM* (fig. 19): lo strumento sarà calibrato e, attivando il bottone [K], sarà possibile visualizzare la risposta direttamente in unità K.

La semplice procedura appena descritta fornisce una stima sulla dinamica della scala di misura dello strumento. La sua accuratezza dipende da molti fattori, strumentali e ambientali: incidono molto le stime sulla temperatura di brillantezza del cielo e del terreno. La fig. 21 mostra le registrazioni della risposta di un radiometro quando l'antenna è orientata verso il terreno (si è scelto un vasto appezzamento di terreno uniforme, appena arato) e quando l'antenna "vede" il cielo sereno allo zenit. Dopo aver misurato la temperatura fisica del terreno, si sono utilizzate le risposte del radiometro per calcolare, utilizzando la precedente formula, la retta di calibrazione dello strumento.

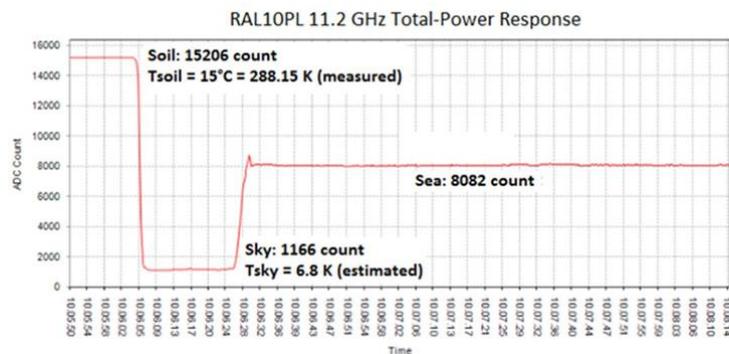


Fig. 21: Tipica escursione dinamica di un radiometro che misura il terreno, il cielo allo zenit e la superficie del mare.

Il metodo è sempre valido quando la risposta dello strumento è lineare con la potenza RF del segnale applicato (con nel caso del radiometro *RAL10MW*) e i migliori risultati si ottengono utilizzando target dei quali sono accuratamente note le rispettive temperature di brillantezza: inseriti i corrispondenti parametri di calibrazione nel programma di gestione, lo strumento risulterà tarato. Come specificato in Appendice, il calcolo della retta di calibrazione è eseguito dal processore interno del radiometro, non dal software *RAL10MW_DataLogger*. Ampia letteratura tecnica è disponibile sui metodi di calibrazione per i radiometri a microonde nelle varie applicazioni.

La temperatura di antenna T_a misurata dal radiometro dipenderà, in generale, dalle caratteristiche direttive dell'antenna utilizzata (forma del suo diagramma di ricezione) e sarà

diversa dalla temperatura di brillanza dello scenario osservato, dato che l'antenna opera una convoluzione fra la forma del suo diagramma di ricezione e il profilo di brillanza della sorgente. T_a coinciderà con la temperatura di brillanza dello scenario osservato solo se questo occupa tutto il campo di vista dell'antenna.

11. Costruire un radiotelescopio a microonde

Descriveremo la costruzione di un piccolo ma efficiente radiotelescopio funzionante nella banda $10 \div 12 \text{ GHz}$, equipaggiato con un'antenna standard per TV-SAT a riflettore parabolico, in grado di misurare la temperatura di brillanza del Sole e della Luna, di evidenziare la componente non termica della radiazione solare (a queste frequenze sono rivelabili i fenomeni più intensi) e del mezzo interstellare nella galassia, la radiazione dell'atmosfera terrestre. Questo strumento può essere considerato il punto di partenza della radioastronomia dilettantistica e un'ottima "palestra" per familiarizzare con le tecniche radioastronomiche. Seguendo la procedura di calibrazione descritta nel precedente paragrafo, sarà possibile trasformare il radiotelescopio in uno strumento di misura che stima la temperatura di brillanza dello scenario osservato. Il numero di radiosorgenti osservabili aumenterà in funzione delle dimensioni dell'antenna utilizzata.

Uno strumento di questo tipo è economico e facile da installare: effettuati i pochi collegamenti necessari (cavo coassiale che trasporta il segnale dall'antenna al ricevitore, cavo USB per il collegamento al PC di acquisizione) si è subito pronti per le radio-osservazioni. Sono necessari i seguenti componenti:

- Antenna a riflettore parabolico TV-SAT, completa di unità esterna (LNB) e illuminatore;
- Cavo coassiale di buona qualità da 75Ω per TV-SAT;
- Radiometro *RAL10MW*;
- Software per l'acquisizione delle misure e per il controllo del ricevitore *RAL10MW_DataLogger*;
- Personal Computer (PC) per la gestione della stazione.

L'antenna, l'unità esterna (LNB) e il cavo coassiale sono componenti standard utilizzati per la ricezione della TV satellitare, reperibili ovunque a basso costo. Non ci sono limiti nella scelta dei modelli: con *RAL10MW* sono utilizzabili tutti i dispositivi. Per quanto riguarda l'antenna, il mercato della TV satellitare offre molte possibilità di scelta: quelle più comuni sono le antenne paraboliche offset, per il miglior rapporto prestazioni/dimensioni che offrono rispetto a quelle circolari simmetriche. Importante è utilizzare kit che comprendono, in un'unica confezione, unità esterne (LNB) complete di illuminatori e di supporti adatti per la specifica antenna, che garantiscono una corretta messa a fuoco per lo specifico tipo di riflettore.

Utilizzando fantasia e abilità costruttiva è possibile realizzare sistemi di puntamento automatico, almeno per antenne non troppo grandi, attingendo al mercato delle attrezzature per radioamatori. Le ridotte dimensioni e il peso contenuto di questo radiotelescopio rendono possibile l'utilizzo di una montatura (equatoriale), manuale o motorizzata, del tipo di quelle normalmente utilizzate dagli astrofili per sostenere e orientare gli strumenti ottici. Anche in questo caso c'è ampio spazio per la fantasia e l'inventiva nel progettare un sistema di aggancio per questa montatura, sostituendo al tubo telescopico l'antenna del radiotelescopio. Chi possiede e conosce bene l'utilizzo di questi attrezzi, non avrà difficoltà a realizzare una soluzione pratica ed efficiente per la misura, con inseguimento, del flusso radio solare. Esistono molti esempi di interessanti e ingegnose realizzazioni sul web. Molto utili per il

corretto puntamento e per pianificare sessioni osservative sono i programmi di mappatura della volta celeste che riproducono, in qualsiasi località, data e ora l'esatta posizione e i movimenti degli oggetti celesti con notevole dettaglio e precisione.

Come accennato, sono utilizzabili praticamente tutte le unità esterne (LNB) commerciali per TV-SAT in banda $10 \div 12 \text{ GHz}$ con l'uscita a frequenza intermedia $950 \div 2250 \text{ MHz}$. Nei moderni dispositivi è possibile gestire il cambio di polarizzazione (orizzontale o verticale) con un salto di tensione, tipicamente $12.75 \div 17.25 \text{ V}$ e selezionare la banda di ricezione (*A BAND*: $10.70 \div 11.70 \text{ GHz}$, *B BAND*: $11.70 \div 12.75 \text{ GHz}$) tramite l'iniezione di un tono a 22 kHz lungo la linea coassiale. Come si è visto, il ricevitore *RAL10MW* supporta tali funzionalità quando opera in modalità *TOTAL – POWER*, mentre per il funzionamento come radiometro a commutazione sono necessarie unità esterne predisposte che prevedono la commutazione dell'ingresso fra l'antenna e un generatore di rumore di riferimento (rivolgersi a RadioAstroLab s.r.l. per informazioni). Un cavo coassiale TV-SAT da 75Ω di opportuna lunghezza, terminato con connettori tipo F, collegherà l'uscita dell'unità esterna con l'ingresso del ricevitore *RAL10MW*. Si raccomanda di scegliere cavi della migliore qualità, a bassa perdita.

Supponendo di utilizzare un'unità esterna (LNB) di buona qualità, con una figura di rumore dell'ordine di 0.3 dB e un guadagno medio di 55 dB , si ottiene una temperatura equivalente di rumore del ricevitore dell'ordine di 21 K e un guadagno in potenza della catena a radiofrequenza superiore a 75 dB . Queste prestazioni sono più che adeguate per costruire un ottimo radiotelescopio didattico. La sensibilità del sistema sarà, comunque, dipendente dalle dimensioni dell'antenna, mentre le escursioni termiche esterne influenzeranno la stabilità e la ripetibilità della misura.

12. Impostazione dei parametri operativi

Prima di accennare ai criteri che è opportuno seguire per una corretta impostazione dei parametri operativi, con riferimento alla fig. 17 descriveremo il loro significato.

- $[0 \leq \text{ZERO_BASE} \leq 65535]$: è un valore proporzionale alla tensione di offset mostrata nello schema a blocchi del radiometro di fig. 13, necessaria per posizionare lo zero di riferimento della linea di base radiometrica in un punto opportuno della scala di misura. E' possibile aggiustare manualmente questo parametro digitandone il valore nell'apposita casella, oppure attivare la procedura automatica di calibrazione (solo quando lo strumento opera come radiometro a potenza totale) che posiziona il livello di riferimento del segnale ricevuto al centro della scala di misura. L'attivazione del comando *CAL_BASE*, quando lo strumento opera come radiometro a commutazione, regola continuamente il parametro *ZERO_BASE* mantenendo il livello dei segnali *ANT* e *REF* in posizione ottima all'interno della scala di misura.

- $[0 \leq \text{GAIN} \leq 100]$: è il fattore di amplificazione in tensione del segnale rivelato. In funzione del valore impostato per il parametro *GAIN*, è possibile calcolare il guadagno in tensione di post-rivelazione utilizzando la seguente relazione

$$A_v(\text{GAIN}) = 1 + \frac{2200 + \text{GAIN} \cdot 1000}{1000}.$$

- $[0 \leq \text{TCOST} \leq 15]$: è il valore della costante di integrazione τ della misura radiometrica, risultato del calcolo di una media mobile eseguito su $N = 2^{\text{TCOST}}$ campioni di segnale acquisiti. Incrementando questo valore si riduce l'importanza della fluttuazione

statistica del rumore sulla misura, migliorando la sensibilità. In funzione del valore impostato per il parametro $TCOST$, è possibile stimare la costante di tempo τ (espressa in secondi) con la seguente relazione:

$$\tau(TCOST) = 0.019 \cdot 2^{TCOST} \quad [s].$$

- $[0 \leq BASELINE \leq 65535]$: è un parametro di offset per la linea di base radiometrica quando lo strumento lavora come radiometro a commutazione. In questo caso, soprattutto quando il radiometro è prossimo alla condizione di bilanciamento, la differenza fra i segnali ANT e REF può essere vicina al valore nullo: è quindi utile l'inserimento di un offset che consente di posizionare lo zero di riferimento della misura in un punto opportuno della scala.

- Commutazione della modalità operativa con i comandi DS , TP e RF . Se si desidera che lo strumento operi come radiometro a potenza totale, deve essere selezionato il comando TP per la ricezione con una polarizzazione (ad esempio quella orizzontale) e il comando RF per la ricezione con l'altra polarizzazione (ad esempio, quella verticale). Il tipo di polarizzazione dipende dalle caratteristiche dell'unità esterna LNB che deve essere predisposta per la selezione delle polarizzazioni tramite un segnale che commuta fra due livelli di tensione, ricevuto attraverso il cavo coassiale. Se si desidera che lo strumento operi come radiometro a commutazione è necessario selezionare il comando DS , modalità utilizzabile con unità esterne opportunamente predisposte che, attraverso un segnale di commutazione fra due livelli di tensione inviato attraverso il cavo coassiale, consentono di commutare l'ingresso a radiofrequenza fra l'antenna e un generatore di rumore di riferimento. Su richiesta, è possibile accedere al segnale di commutazione (frequenza di commutazione circa 4 Hz), sincrono con il processo di rivelazione, attraverso un connettore dedicato.

- $POLDK$: è un comando che inverte lo stato dei segnali TP e RF (quindi la polarità del segnale di commutazione DS) per una maggiore flessibilità operativa, in modo da adattarsi facilmente alle varie configurazioni di unità esterne utilizzabili.

- $ABAND/BBAND$: seleziona la banda di ricezione dell'unità esterna predisposta per la commutazione tramite un tono a 22 kHz inviato attraverso il cavo coassiale. Questo è il metodo comunemente utilizzato per selezionare la banda di ricezione nelle unità esterne LNB commerciali per la ricezione TV-SAT in banda 10 ÷ 12 GHz.

- $TempContr$: è il comando che abilita il controllo automatico della temperatura interna del radiometro selezionata nella finestra $TREF$ [°C]. È possibile impostare una temperatura compresa nell'intervallo $[40^{\circ}C \leq TREF \leq 55^{\circ}C]$: il controllore PID manterrà costante la temperatura interna dello strumento al valore scelto. L'attività del regolatore è visualizzata nella casella adiacente di colore giallo e la misura attuale della temperatura è visualizzata nella casella $TEMP$ [°C].

- CAL_BASE : è il comando che attiva la calibrazione automatica della linea di base radiometrica (si veda la descrizione del parametro di offset $ZERO_BASE$).

- $[1 \leq VTX \leq 65]$: imposta il periodo di trasmissione seriale dei pacchetti di dati quando si è attivata la trasmissione continua dal radiometro al dispositivo host di controllo.

- Parametri di calibrazione del radiometro. Come specificato nel paragrafo che descrive la procedura di calibrazione dello strumento, si tratta di un gruppo di parametri associati ai due punti (*freddo* e *caldo*) necessari per calcolare la relazione lineare di taratura dello strumento che converte la scala di misura della risposta radiometrica dalle generiche unità di conteggio [*count*] del convertitore analogico-digitale interno alle unità assolute [*K*] della temperatura di antenna. Come precedentemente specificato, i valori dei parametri devono essere inseriti nelle rispettive caselle del programma *RAL10MW_DataLogger*.

Tutti i parametri appena decritti sono memorizzabili nella memoria interna del dispositivo.

Il livello del segnale all'uscita del radiotelescopio è proporzionale alla potenza associata alla radiazione ricevuta, quindi alla *temperatura di brillantezza* dello scenario osservato dall'antenna. Se l'antenna è orientata verso una regione di cielo sereno e asciutto dove sono assenti radiosorgenti, lo strumento misura una temperatura equivalente di rumore molto bassa, generalmente dell'ordine di $6 \div 10 K$ (il *cielo freddo* – fig. 20), corrispondente alla minima temperatura misurabile. Orientando l'antenna verso il terreno la temperatura sale fino a valori prossimi a $300 K$. Questo semplice procedimento illustra, anche se in modo approssimativo e semplificato, la tecnica utilizzabile per calibrare il radiotelescopio e rappresenta un ottimo test per verificare l'efficienza dello strumento (fig. 21).

Quando un piccolo radiotelescopio a microonde è orientato verso il Sole, che alle frequenze di nostro interesse appare come un disco ampio circa mezzo grado e irradia come un corpo nero con temperatura di brillantezza circa uguale a quella superficiale ($6000 K$), ci aspettiamo una misura della temperatura di antenna dell'ordine di $300 \div 400 K$, valore nettamente inferiore a quello vero. Infatti, la radiazione del fondo cosmico, captata in buona percentuale dalla corona più esterna del lobo di antenna, “diluisce” la potente radiazione solare se il fascio dell'antenna è ampio al punto di raccoglierne un contributo significativo e diminuisce l'ampiezza del segnale ricevuto come se questo provenisse da una sorgente con temperatura nettamente inferiore a quella reale.

In questo paragrafo suggeriremo come impostare i parametri del ricevitore prima di iniziare una sessione di misura. Anche se, per semplicità e a titolo di esempio, ci riferiremo a una tipica osservazione radioastronomica, le considerazioni sono di carattere generale.

Per prima cosa occorre alimentare il ricevitore e attendere che lo strumento abbia raggiunto l'equilibrio termico alla temperatura interna impostata. Le instabilità del sistema (il problema principale dei radiometri) sono principalmente causate dalle variazioni della temperatura: prima di iniziare qualsiasi misura è consigliabile attendere almeno un'ora dopo l'accensione dello strumento per consentire il raggiungimento della temperatura operativa a regime dei circuiti elettronici. Tale condizione è verificabile controllando che la temperatura interna *TEMP* [$^{\circ}C$] misurata sia prossima a quella impostata *TREF* [$^{\circ}C$]: si osserverà una stabilità a lungo termine del segnale radiometrico quando l'antenna punta una regione di cielo “fredda” (assenza di radiosorgenti): sono minime le fluttuazioni visualizzate dalla traccia grafica sul programma *RAL10MW_DataLogger*.

Il fattore di amplificazione *GAIN* dovrebbe essere inizialmente impostato sul valore minimo ($GAIN = 0$). Ogni installazione sarà caratterizzata da differenti prestazioni, non essendo prevedibili le caratteristiche dei componenti esterni che saranno scelti dagli utilizzatori. Conviene aggiustare il valore di questo parametro iniziando con il valore minimo (per evitare saturazioni del sistema ricevente), successivamente ottimizzando con ripetute scansioni dello stesso scenario. Per osservare il Sole è consigliabile scegliere $GAIN = 0$ (o inserire un attenuatore all'ingresso di *RAL10MW* se il segnale tende a saturare, cosa possibile quando si utilizzano grandi antenne), per osservare la Luna conviene partire con $GAIN = 10$

In ogni caso, queste impostazioni sono molto influenzate dalle dimensioni dell'antenna e dalle caratteristiche dell'unità esterna (LNB) e devono essere sempre verificate con cura.

Definito il fattore di amplificazione, si aggiusta la costante di integrazione *TCOST* in modo da stabilizzare la misura. Convieni iniziare con valori minimi, adeguati nella maggior parte dei casi. Come si è visto, è possibile (e desiderabile) migliorare la sensibilità della misura, al prezzo di una risposta del sistema più lenta e in ritardo rispetto alle variazioni del segnale, adottando una costante di tempo maggiore: si consiglia di incrementare il valore di questo parametro durante l'osservazione di radiosorgenti con emissioni relativamente stazionarie. Quando si registrano fenomeni rapidamente variabili o a carattere transitorio (come, ad esempio, le eruzioni solari a microonde) sarà opportuno selezionare il valore minimo. E' sempre possibile incrementare ulteriormente l'integrazione del segnale ricevuto aggiustando il parametro *SAMPLING* nel programma *RAL10MW_DataLogger*.

Il parametro *ZERO_BASE* stabilisce il livello di riferimento (offset) della linea di base radiometrica: la sua corretta impostazione dipende dall'amplificazione totale del ricevitore. Come regola generale, si dovrebbe scegliere il valore di questo parametro in modo che il minimo livello del segnale corrisponda al *cielo freddo* (riferimento ideale) quando l'antenna osserva una regione priva di radiosorgenti: un incremento rispetto a questo riferimento indicherà la presenza di un oggetto celeste emittente. La posizione della linea di base sulla scala di misura è funzione del fattore di amplificazione *GAIN* e del valore impostato per *ZERO_BASE*: se il segnale tende a spostarsi all'esterno della scala di misura (inizio-scala o fondo-scala) a causa delle derive interne, sarà necessario modificare manualmente questo valore o attivare la calibrazione automatica in modo da posizionare correttamente la traccia. Le precedenti considerazioni sono valide quando il radiometro opera a potenza totale. Se lo strumento è configurato come radiometro a commutazione ed è stata attivata la modalità di calibrazione continua (tramite il comando *CAL_BASE*), il parametro *ZERO_BASE* varierà automaticamente per mantenere, in egual misura, i segnali *ANT* (ingresso del ricevitore collegato all'antenna) e *REF* (ingresso del ricevitore collegato al generatore di rumore di riferimento) sempre all'interno della dinamica operativa. In questo caso, la risposta $RADIO = ANT - REF + BASELINE$ non dipenderà dalla posizione assoluta dei segnali *ANT* e *REF* ma solo dalla loro differenza e sarà possibile inserire un offset aggiustando il valore del parametro *BASELINE*.

Utilizzando adatte unità LNB esterne è possibile modificare la banda di ricezione e la polarizzazione in ricezione per osservare radiosorgenti dove predomina una emissione con componente polarizzata. Nella maggior parte delle osservazioni accessibili a livello dilettantistico le radiosorgenti emettono in un ampio spettro di frequenze con polarizzazione casuale: in questi casi può essere utile modificare la banda di ricezione e/o la polarizzazione per minimizzare eventuali interferenze di origine artificiale.

Acquistando prodotti commerciali per la ricezione TV satellitare è generalmente fissa la posizione dell'illuminatore (integrato con l'unità esterna LNB) lungo la linea focale dell'antenna. Se fosse meccanicamente possibile e si desidera migliorare le prestazioni del radiotelescopio, conviene orientare l'antenna nella direzione di una radiosorgente campione (come il Sole) e variare avanti-indietro la posizione dell'illuminatore lungo l'asse della parabola in modo da registrare un segnale di massima intensità. Misure ripetute e molta pazienza aiutano a ridurre gli errori.

La conferma per una corretta impostazione dei parametri del ricevitore richiede alcune osservazioni di prova. Tale procedura, normalmente adottata anche dai radio-osservatori professionali, consente di "tarare" il radiotelescopio in modo che la dinamica della sua risposta e il fattore di scala siano adeguati per registrare il fenomeno osservato. Se correttamente eseguita, questa impostazione iniziale (necessaria soprattutto quando si prevedono lunghi periodi di osservazione) agguisterà il guadagno e l'offset della scala per una

corretta misura, scongiurando rischi di saturazioni o di azzeramenti del segnale con conseguente perdita di informazione. Terminata la messa a punto iniziale, sarà preferibile memorizzare le impostazioni del radiometro tramite l'apposito comando.

E' sempre utile ricordare come il fattore principale che limita la stabilità e l'accuratezza della risposta radiometrica sono le escursioni termiche sperimentate dal ricevitore, soprattutto dall'unità esterna ed eventuali instabilità meccaniche. Si ottengono le migliori prestazioni dal radiotelescopio quando è termicamente stabilizzato il ricevitore. Questa è una condizione determinante per la qualità delle misure.

Come anticipato, la più semplice osservazione radioastronomica comporta l'orientamento dell'antenna verso sud e il suo posizionamento a un'elevazione tale da intercettare una specifica radiosorgente durante il suo transito al meridiano, cioè il passaggio apparente dell'oggetto per il meridiano locale (quello che contiene i poli e il punto di installazione del radiotelescopio). Impostando nel programma di acquisizione un periodo di campionamento sufficientemente lento (ad esempio, una schermata ogni 24 ore), si può verificare se, nel corso della giornata, l'antenna intercetta la radiosorgente desiderata e se i valori scelti per i parametri sono adeguati per documentare l'osservazione. Potrebbe capitare di dover aumentare il fattore di amplificazione per visualizzare i dettagli della traccia, oppure modificare il livello della linea di base per evitare che, in qualche punto sul grafico, il segnale si porti fuori scala. Terminata la procedura di messa a punto si possono avviare lunghe sessioni di registrazione automatica non presidiate.

13. Protocollo di comunicazione seriale

Il radiometro *RAL10MW* è uno strumento completo e versatile che trasmette i risultati delle misure e i valori dei parametri operativi verso un dispositivo host esterno dal quale è interrogato e controllato. Nei casi standard il dispositivo di controllo (che agisce come *master*) è tipicamente un personal computer sul quale è installato il programma di gestione *RAL10MW_DataLogger* che stabilisce un canale seriale di comunicazione con il radiometro (*slave*) attraverso una porta USB. Il dispositivo master interroga il radiometro che, ad ogni comando ricevuto, risponde con vari pacchetti di dati (contenenti misure o parametri) oppure con un flusso continuo di misure che può essere attivato o arrestato dal dispositivo di controllo. La comunicazione è gestita secondo le regole del seguente protocollo proprietario.

Su richiesta, in alternativa alla porta USB standard, è possibile equipaggiare lo strumento con un'interfaccia di comunicazione seriale tipo RS485 o Ethernet.

Per completezza, è descritto il protocollo completo implementato nei radiometri *RAL10MW*, comprendente alcune funzioni, comandi e parametri che non sono stati descritti in questo documento perché non si applicano all'attuale versione del ricevitore, ma sono di utilizzo generale (come, ad esempio, in applicazioni di *remote sensing* del territorio): il lettore può ignorare queste informazioni aggiuntive.

Definizione dei comandi utilizzati nella comunicazione seriale (i numeri sono espressi in notazione decimale):

CMD_REF=110	Imposta il valore di riferimento per il parametro <zero_base>.
CMD_GAIN=111	Imposta il valore del guadagno di post-rivelazione <gain>.
CMD_TX=112	Avvia/Arresta la trasmissione dei dati a ciclo continuo.
CMD_MEM=113	Memorizza i valori dei parametri attuali nella memoria interna.
CMD_INT=114	Imposta la costante di integrazione della misura <tcost>.
CMD_POL=115	Imposta la modalità operativa del radiometro.
CMD_CAL=116	Attiva/disattiva la calibrazione continua del parametro <zero_base>.
CMD_ONE=117	Chiede l'invio di un singolo pacchetto di dati.
CMD_BLINE=118	Imposta il parametro <baseline> (offset risposta radiometro DICKE-SWITCH).

CMD_TEMP=119	Abilita il controllo automatico della temperatura interna del radiometro.
CMD_TREF=120	Imposta la temperatura interna desiderata per il radiometro.
CMD_BAND=121	Seleziona la banda di ricezione dell'LNB (A BAND - B BAND).
CMD_RESET=122	Reset software del radiometro.
CMD_RADIO=123	Chiede l'invio di una singola misura radiometrica (pacchetto dati ridotto).
CMD_VAR=124	Chiede l'invio di una singola misura della varianza radiometrica (pacchetto ridotto).
CMD_TINT=125	Chiede l'invio di una singola misura della temperatura interna (pacchetto ridotto).
CMD_TEXT=126	Chiede l'invio di una singola misura della temperatura esterna (pacchetto ridotto).
CMD_SOGLIA=127	Imposta il valore della soglia per l'allarme radiometrico.
CMD_DELTAS=128	Imposta il valore dell'isteresi per la soglia di allarme radiometrico.
CMD_RISP=129	Seleziona la risposta dello strumento (RADIO [count], TB [K], RIFL [count]).
CMD_CALRC=130	Imposta il valore di calibrazione radiometrico del target "freddo".
CMD_CALRW=131	Imposta il valore di calibrazione radiometrico del target "caldo".
CMD_CALTC=132	Imposta il valore di calibrazione della temperatura del target "freddo" (in K x100).
CMD_CALTW=133	Imposta il valore di calibrazione della temperatura del target "caldo" (in K x100).
CMD_VTX=134	Imposta il periodo di trasmissione dei pacchetti di dati a ciclo continuo.

Definizione dei pacchetti di dati completi (misure o parametri) trasmessi dal radiometro verso l'host:

MIS=200	Codice che identifica il pacchetto completo delle misure.
PAR=201	Codice che identifica il pacchetto completo dei parametri di sistema.

ELENCO DEI COMANDI TRASMESSI DAL DISPOSITIVO HOST (MASTER) AL RADIOMETRO (SLAVE)

57600 bit/s, 1 bit di START, 8 bit di dati, 1 bit di STOP, nessun controllo di parità.

Il pacchetto dei comandi è composto da 5 byte: **[ID, comando, lsbyte, msbyte, checksum]**

con:

ID=15 Numero identificativo del dispositivo.

comando: Uno fra i seguenti comandi:

CMD_TX:	Chiede l'invio dei dati a ciclo continuo: [ID, CMD_TX, 0, 0, checksum]: arresta il TX dei dati a ciclo continuo. [ID, CMD_TX, 255, 0, checksum] Il radiometro risponde con un pacchetto completo delle misure. Avvia il TX continuo del pacchetto completo delle misure. [ID, CMD_TX, 10, 0, checksum] Il radiometro risponde con un pacchetto di dati ridotto: [ID, CMD_RADIO, LSByte di radio, MSByte di radio, checksum] Avvia il TX continuo del pacchetto di dati contenenti solo le misure <radio>. [ID, CMD_TX, 20, 0, checksum] Il radiometro risponde con: [ID, CMD_VAR, LSByte di var, MSByte di var, checksum] Avvia il TX continuo del pacchetto di dati contenenti solo le misure <var>. [ID, CMD_TX, 30, 0, checksum] Il radiometro risponde con: [ID, CMD_TINT, LSByte di temp, MSByte di temp, checksum] Avvia il TX continuo del pacchetto di dati contenenti solo le misure <temp>. [ID, CMD_TX, 40, 0, checksum] Il radiometro risponde con: [ID, CMD_TEXT, LSByte di text, MSByte di text, checksum] Avvia il TX continuo del pacchetto di dati contenenti solo le misure <text>.
---------	---

CMD_REF: Imposta il valore di riferimento per il parametro <zero_base>:
[ID, CMD_REF, LSByte di zero_base, MSByte di zero_base, checksum]
con [0<=zero_base<=65535]
Il radiometro risponde con:
[ID, CMD_REF, LSByte di zero_base, MSByte di zero_base, checksum].

CMD_GAIN: Imposta il guadagno in tensione di post-rivelazione <gain>:
[ID, CMD_GAIN, gain, 0, checksum]
con [0<=gain<=100]
Il radiometro risponde con:
[ID, CMD_GAIN, gain, 0, checksum].

CMD_MEM: Memorizza i valori dei parametri attuali nella memoria interna:
[ID, CMD_MEM, 0, 0, checksum]
Risponde con un pacchetto completo di parametri.

CMD_INT: Imposta la costante di integrazione <tcost> per le misure:
[ID, CMD_INT, tcost, 0, checksum]
con [0<=tcost<=15].
Il radiometro risponde con:
[ID, CMD_INT, tcost, 0, checksum].

CMD_POL: Imposta la modalità operativa e la polarità DICKE-SWITCH del radiometro.
[ID, CMD_POL, modo, 0/255, checksum]
con [modo=0]: funzionamento del ricevitore come DICKE-SWITCH;
[modo=1]: funzionamento del ricevitore come REFERENCE;
[modo=2]: funzionamento del ricevitore come TOTAL-POWER.
con [msbyte=0]: polarità A della commutazione DICKE-SWITCH;
[msbyte=255]: polarità B della commutazione DICKE-SWITCH.
Il radiometro risponde con:
[ID, CMD_POL, modo, status_flag, checksum].

CMD_CAL: Attiva/Disattiva la calibrazione continua del parametro <zero_base>:
[ID, CMD_CAL, 0, 0, checksum]: Calibrazione disattivata
[ID, CMD_CAL, 255, 0, checksum]: Calibrazione attivata.
Il radiometro risponde con:
[ID, CMD_CAL, status_flag, 0, checksum].

CMD_ONE: Chiede l'invio di un singolo pacchetto completo di dati (parametri/misure):
[ID, CMD_ONE, PAR/MIS, 0, checksum]
Risponde con un pacchetto completo di dati (parametri/misure).

CMD_BLINE: Imposta il parametro <baseline> per l'offset della linea di base (modo DS):
[ID, CMD_BLINE, LSByte di baseline, MSByte di baseline, checksum]
con [0<=baseline<=65535].
Il radiometro risponde con:
[ID, CMD_BLINE, LSByte di baseline, MSByte di baseline, checksum].

CMD_TEMP: Abilita/Disabilita il controllo automatico di temperatura del radiometro:
[ID, CMD_TEMP, 0, 0, checksum] Controllo di temp. disattivato
[ID, CMD_TEMP, 255, 0, checksum] Controllo di temp. attivato.
Il radiometro risponde con:
[ID, CMD_TEMP, status_flag, 0, checksum].

CMD_TREF: Imposta la temperatura interna per il radiometro [°C]:
[ID, CMD_TREF, tref, 0, checksum]

	con $[40 \leq \text{tref} \leq 55]$. Il radiometro risponde con: [ID, CMD_TREF, tref, 0, checksum].
CMD BAND:	Seleziona la banda di ricezione dell'LNB (OFF/ON tono a 22 kHz): [ID, CMD_BAND, 0, 0, checksum] A BAND [ID, CMD_BAND, 255, 0, checksum] B BAND. Il radiometro risponde con: [ID, CMD_BAND, status_flag, 0, checksum].
CMD RESET:	Reset software del dispositivo: [ID, CMD_RESET, 0, 0, checksum] Risponde con un pacchetto completo di dati (parametri/misure).
CMD_RADIO:	Chiede l'invio di una singola misura <radio>: [ID, CMD_RADIO, 0, 0, checksum] Il radiometro risponde con: [ID, CMD_RADIO, LSByte di radio, MSByte di radio, checksum].
CMD_VAR:	Chiede l'invio di una singola misura della varianza radiometrica <var>: [ID, CMD_VAR, 0, 0, checksum] Il radiometro risponde con: [ID, CMD_VAR, LSByte di var, MSByte di var, checksum].
CMD_TINT:	Chiede l'invio di una singola misura della temp. interna del radiometro: [ID, CMD_TINT, 0, 0, checksum] Il radiometro risponde con: [ID, CMD_TINT, LSByte di temp, MSByte di temp, checksum].
CMD_TEXT:	Chiede l'invio di una singola misura della temperatura esterna dell'aria: [ID, CMD_TEXT, 0, 0, checksum] Il radiometro risponde con: [ID, CMD_TEXT, LSByte di text, MSByte di text, checksum].
CMD_SOGLIA:	Imposta il valore della soglia per l'allarme radiometrico: [ID, CMD_SOGLIA, LSByte di soglia, MSByte di soglia, checksum] con $[(4 * \text{deltas}) \leq \text{soglia} \leq 65535 - (4 * \text{deltas})]$. Il radiometro risponde con: [ID, CMD_SOGLIA, LSByte di soglia, MSByte di soglia, checksum].
CMD_DELTAS:	Imposta il valore di isteresi e la polarità della soglia di allarme: [ID, CMD_DELTAS, deltas, pol_soglia, checksum] [pol_soglia=0]: è impostata una soglia negativa; [pol_soglia=255]: è impostata una soglia positiva. Il radiometro risponde con: [ID, CMD_DELTAS, deltas, pol_soglia, checksum].
CMD_VTX:	Imposta il periodo di trasmissione dei pacchetti di dati a ciclo continuo: [ID, CMD_VTX, velTX, 0, checksum] con $[1 \leq \text{velTX} \leq 65]$. Il radiometro risponde con: [ID, CMD_VTX, velTX, 0, checksum].
CMD_RISP:	Seleziona la risposta dello strumento: [ID, CMD_RISP, risposta, 0, checksum] [risposta=0]: seleziona la misura radiometrica non calibrata.

[risposta=1]: seleziona la misura della temperatura di brillantezza [K] x100.
 [risposta=2]: seleziona la misura della riflettività superficiale.
 Il radiometro risponde con:
 [ID, CMD_RISP, risposta, 0, checksum].

CMD_CALRC: Imposta il valore di calibrazione radiometrico del target "freddo":
 [ID, CMD_CALRC, LSByte di radio_c, MSByte di radio_c, checksum]
 Il radiometro risponde con:
 [ID, CMD_CALRC, LSByte di radio_c, MSByte di radio_c, checksum].

CMD_CALRW: Imposta il valore di calibrazione radiometrico del target "caldo":
 [ID, CMD_CALRW, MSByte di radio_w, MSByte di radio_w, checksum]
 Il radiometro risponde con:
 [ID, CMD_CALRW, LSByte di radio_w, MSByte di radio_w, checksum].

CMD_CALTC: Imposta il valore di calibrazione della temp. del target "freddo" (K x100):
 [ID, CMD_CALTC, LSByte di tmp_c, MSByte di tmp_c, checksum]
 Il radiometro risponde con:
 [ID, CMD_CALTC, LSByte di tmp_c, MSByte di tmp_c, checksum].

CMD_CALTW: Imposta il valore di calibrazione della temp. del target "caldo" (K x100):
 [ID, CMD_CALTW, LSByte di tmp_w, MSByte di tmp_w, checksum]
 Il radiometro risponde con:
 [ID, CMD_CALTW, LSByte di tmp_w, MSByte di tmp_w, checksum].

Il byte di <checksum> è calcolato come somma a 8 bit (con troncamento) dei precedenti byte.

Risposta del radiometro verso l'host (pacchetto completo dei parametri di sistema)

57600 bit/s, 1 bit di START, 8 bit di dati, 1 bit di STOP, nessun controllo di parità.

datiTX[0]:	[ID=15]	Numero identificativo del dispositivo.
datiTX[1]:	[PAR]	Identifica il pacchetto completo dei parametri di sistema.
datiTX[2]:	[gain]	Guadagno in tensione di post-rivelazione.
datiTX[3]:	[modo]	Modo operativo del radiometro.
datiTX[4]:	[LSByte di zero_base]	Byte meno significativo del parametro <zero_base>.
datiTX[5]:	[MSByte di zero_base]	Byte piu' significativo del parametro <zero_base>.
datiTX[6]:	[tcost]	Costante di integrazione delle misure.
datiTX[7]:	[status_flag]	Stato del sistema.
datiTX[8]:	[LSByte di baseline]	Byte meno significativo dell'offset <baseline>.
datiTX[9]:	[MSByte di baseline]	Byte piu' significativo dell'offset <baseline>.
datiTX[10]:	[tref]	Temperatura interna desiderata per il radiometro [°C].
datiTX[11]:	[LSByte di soglia]	Byte meno significativo del parametro <soglia> (allarme radio).
datiTX[12]:	[MSByte di soglia]	Byte piu' significativo del parametro <soglia> (allarme radio).
datiTX[13]:	[deltas]	Valore di isteresi per la soglia dell'allarme radiometrico.
datiTX[14]:	[risposta]	Variabile che indica la risposta selezionata per lo strumento.
datiTX[15]:	[0]	Non utilizzato.
datiTX[16]:	[0]	Non utilizzato.
datiTX[17]:	[0]	Non utilizzato.
datiTX[18]:	[checksum]	Checksum, somma a 8 bit (con troncamento) dei byte precedenti.

Risposta del radiometro verso l'host (pacchetto completo delle misure)

57600 bit/s, 1 bit di START, 8 bit di dati, 1 bit di STOP, nessun controllo di parità.

datiTX[0]:	[ID=15]	Numero identificativo del dispositivo.
datiTX[1]:	[MIS]	Codice che identifica il pacchetto completo delle misure.
datiTX[2]:	[LSByte di zero_base]	Byte meno significativo del parametro <zero_base>.

datiTX[3]:	[MSByte di zero_base]	Byte piu' significativo del parametro <zero_base>.
datiTX[4]:	[LSByte di radio]	Byte meno significativo della risposta radiometrica <radio>.
datiTX[5]:	[MSByte di radio]	Byte piu' significativo della risposta radiometrica <radio>.
datiTX[6]:	[LSByte di ant]	Byte meno significativo del segnale total-power <ant>.
datiTX[7]:	[MSByte di ant]	Byte piu' significativo del segnale total-power <ant>.
datiTX[8]:	[LSByte di ref]	Byte meno significativo del segnale di riferimento <ref>.
datiTX[9]:	[MSByte di ref]	Byte piu' significativo del segnale di riferimento <ref>.
datiTX[10]:	[status_flag]	Stato del sistema.
datiTX[11]:	[LSByte di temp]	Byte meno significativo della temp. del radiometro <temp>.
datiTX[12]:	[MSByte di temp]	Byte piu' significativo della temp. del radiometro <temp>.
datiTX[13]:	[LSByte di text]	Byte meno significativo della temperatura esterna <text>.
datiTX[14]:	[MSByte di text]	Byte piu' significativo della temperatura esterna <text>.
datiTX[15]:	[pwmT/256]	Variabile <pwmT/256> (controllo PID del riscaldatore).
datiTX[16]:	[LSByte di var]	Byte meno significativo della varianza radiometrica <var>.
datiTX[17]:	[MSByte di var]	Byte piu' significativo della varianza radiometrica <var>.
datiTX[18]:	[checksum]	Checksum, somma a 8 bit (con troncamento) dei byte precedenti.

Risposta del radiometro verso l'host (pacchetto ridotto di dati contenente un singolo parametro o misura):

57600 bit/s, 1 bit di START, 8 bit di dati, 1 bit di STOP, nessun controllo di parita'.

tx[0]:	[ID=15]	Numero identificativo del dispositivo.
tx[1]:	[CMD_XXX]	Codice del generico comando di richiesta informazioni.
tx[2]:	[dato1]	Risposta del radiometro: Dato1.
tx[3]:	[dato2]	Risposta del radiometro: Dato2.
tx[4]:	[checksum]	Checksum, somma a 8 bit (con troncamento) dei byte precedenti.

E' possibile riconoscere quale pacchetto di dati è stato inviato dal radiometro verso l'host esaminando il secondo byte ricevuto:

Se [2° byte ricevuto = PAR]	si è ricevuto il pacchetto completo dei parametri;
Se [2° byte ricevuto = MIS]	si è ricevuto il pacchetto completo delle misure;
Se [CMD_REF <= 2° byte ricevuto <= CMD_VTX]	si è ricevuto un pacchetto di risposta ai comandi.