

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 *Total-Power* 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.

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.

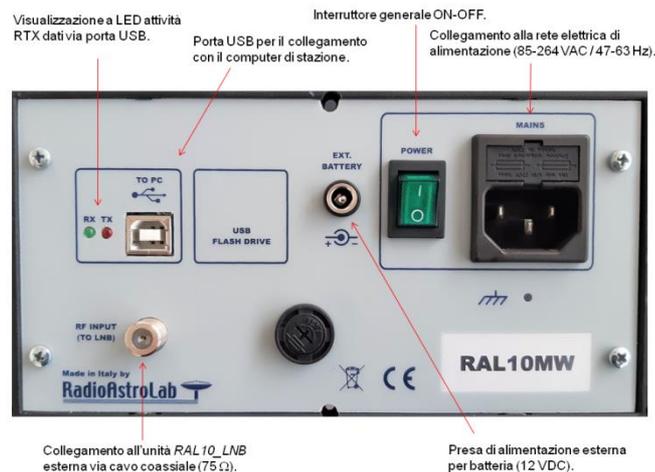


Fig. 1: Pannello frontale e posteriore del radiometro *RAL10MW*.

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 in altre bande di frequenza, se preceduto da adatti amplificatori-convertitori. 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, 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:

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

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

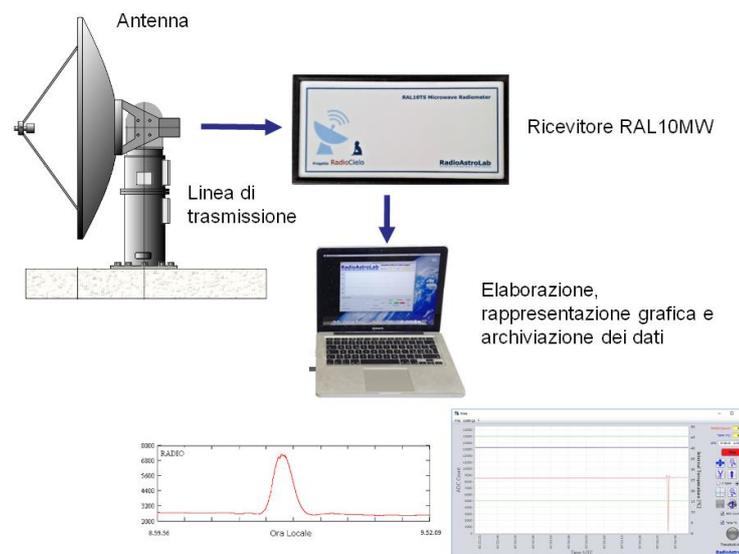


Fig. 2: Schema di principio di un semplice radiotelescopio a microonde.

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.

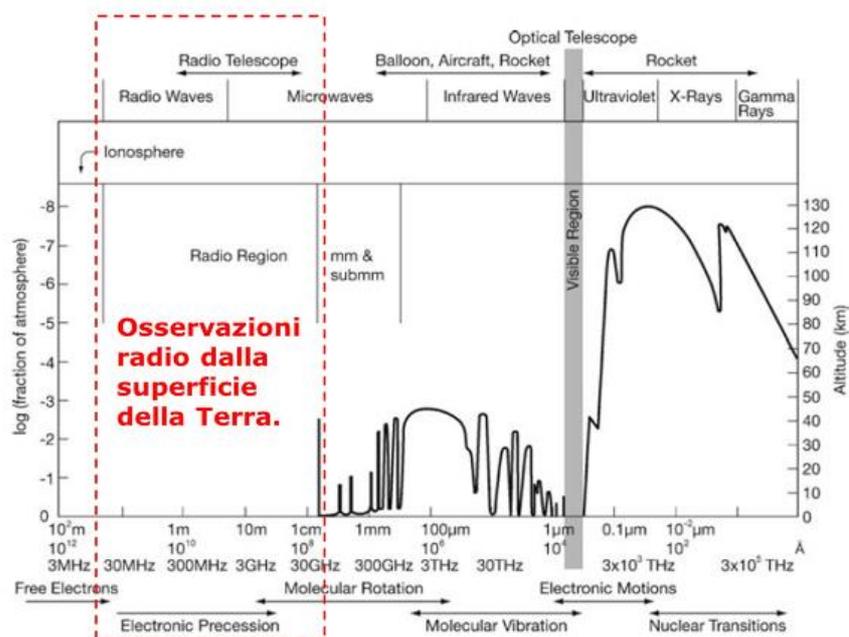


Fig. 4: Rappresentazione dello spettro elettromagnetico dove è stata evidenziata la “finestra radio”.

L'atmosfera terrestre limita le frequenze utilizzabili per le osservazioni radioastronomiche dalla superficie, 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 radiofrequenze utili per le osservazioni radioastronomiche da terra è compreso fra circa 20 MHz e circa 20 GHz.

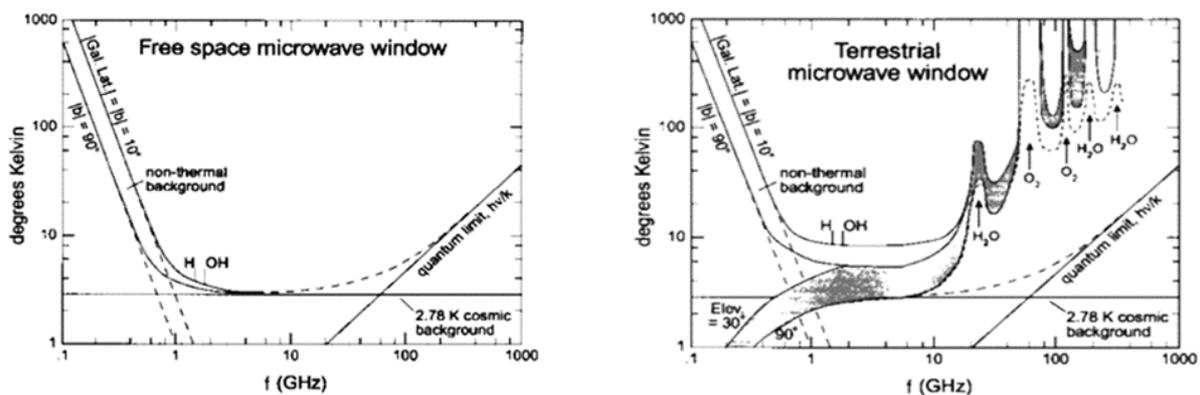


Fig. 5: Effetti dell'atmosfera terrestre, ben visibili confrontando i grafici che rappresentano la "finestra" radio" dello spettro elettromagnetico vista da terra e vista da un radiotelescopio operante nello spazio.

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: esiste un mondo interessante e affascinante da scoprire rappresentato dall'astronomia invisibile.

Per superare questi ostacoli è importante iniziare con progetti facilmente realizzabili, utilizzando strumenti con prestazioni sicure e ripetibili, studiando i fondamenti teorici della disciplina 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.

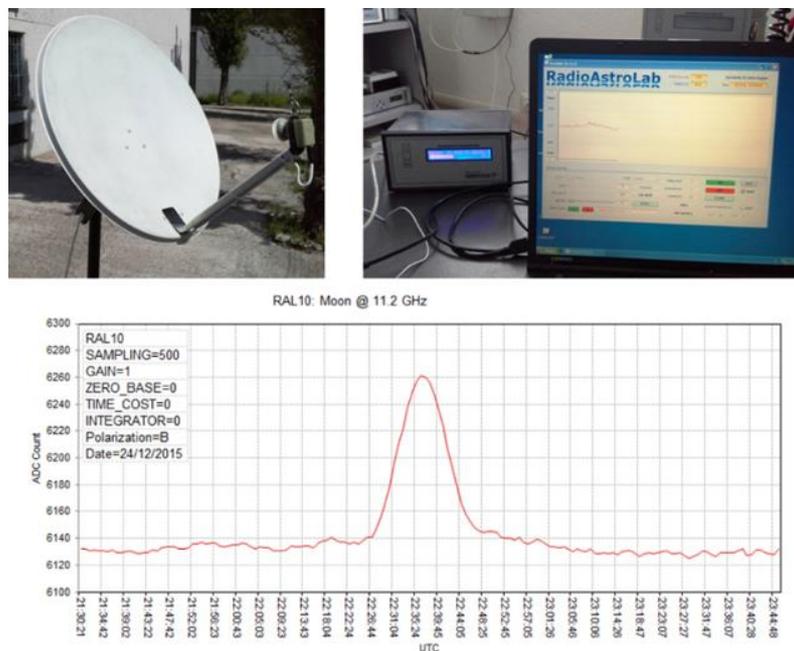


Fig. 6: Osservazione del transito lunare con un radiotelescopio basato sul ricevitore *RAL10*.

La più semplice osservazione radioastronomica 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.

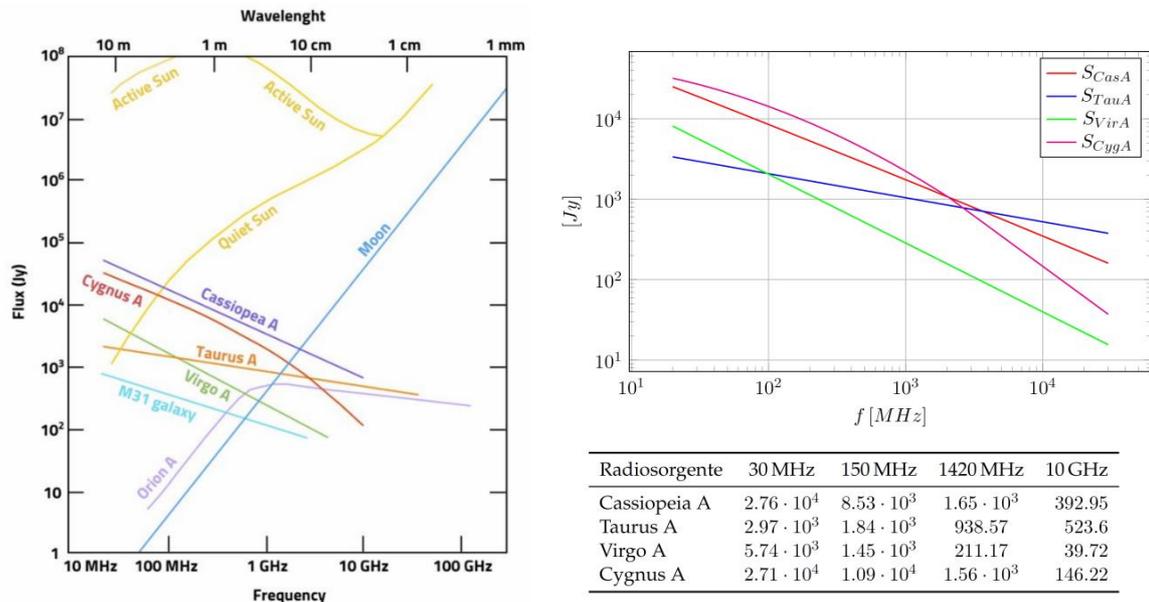


Fig. 7: Spettri delle principali radiosorgenti.

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 $10 \div 12$ GHz nel giardino di casa, in zona urbana, mentre è molto difficoltosa la ricezione alle frequenze più basse. In quest'ultimo caso, bisognerà scegliere una zona rurale, elettromagneticamente quieta,

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 del sistema (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 utile. 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 paraboloide 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 (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 comprendenti molti elementi (array) spazialmente distribuiti ed opportunamente alimentati: 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 *RALIOKIT* 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).

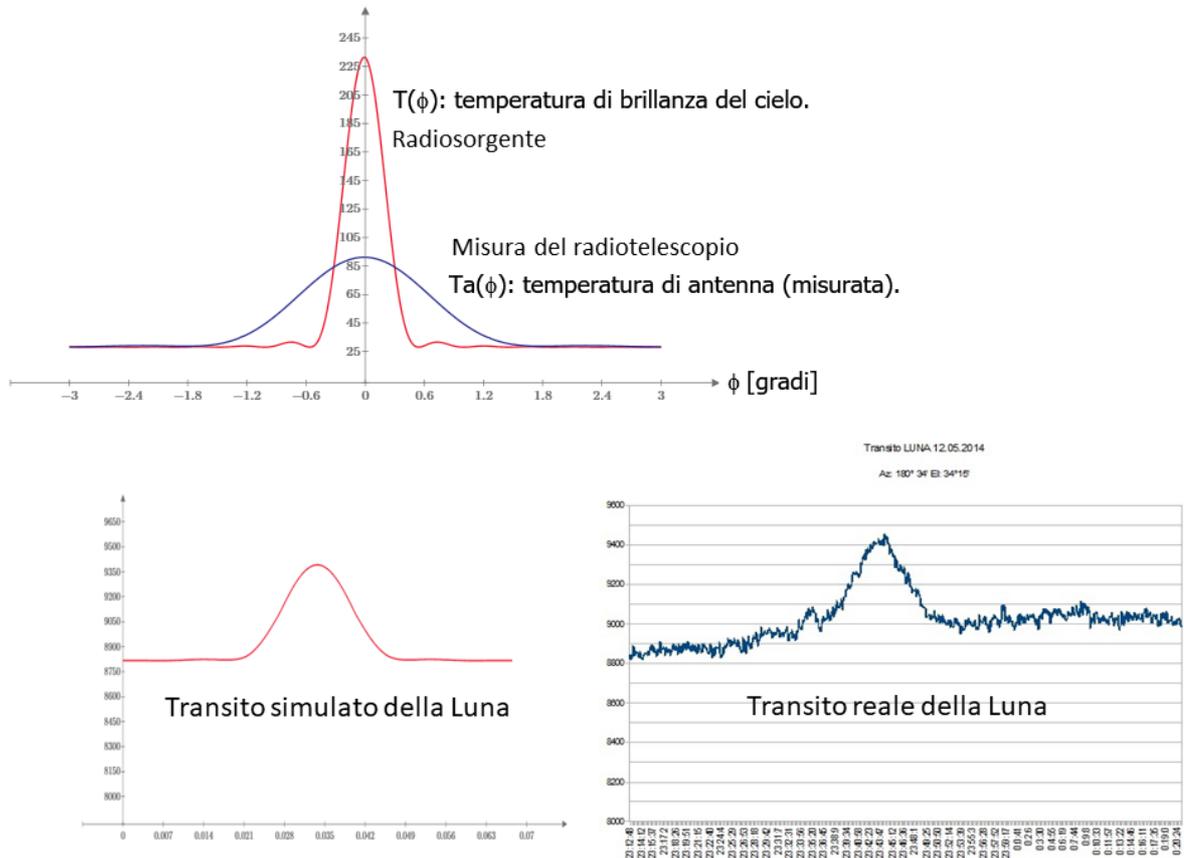


Fig. 9: Il profilo della temperatura della Luna rilevata da un radiotelescopio (*temperatura di antenna*) durante un transito è diverso dal vero profilo della sua temperatura di brillantezza, dato che il processo di misura eseguito con l'antenna è una convoluzione fra la temperatura di brillantezza dello 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 *RALIOKIT*).

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 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.

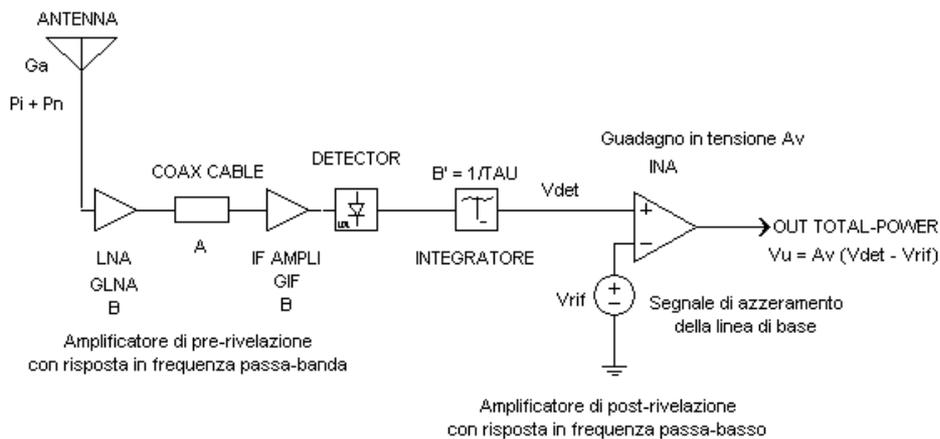


Fig. 10: Schema di principio di un ricevitore a potenza totale.

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.

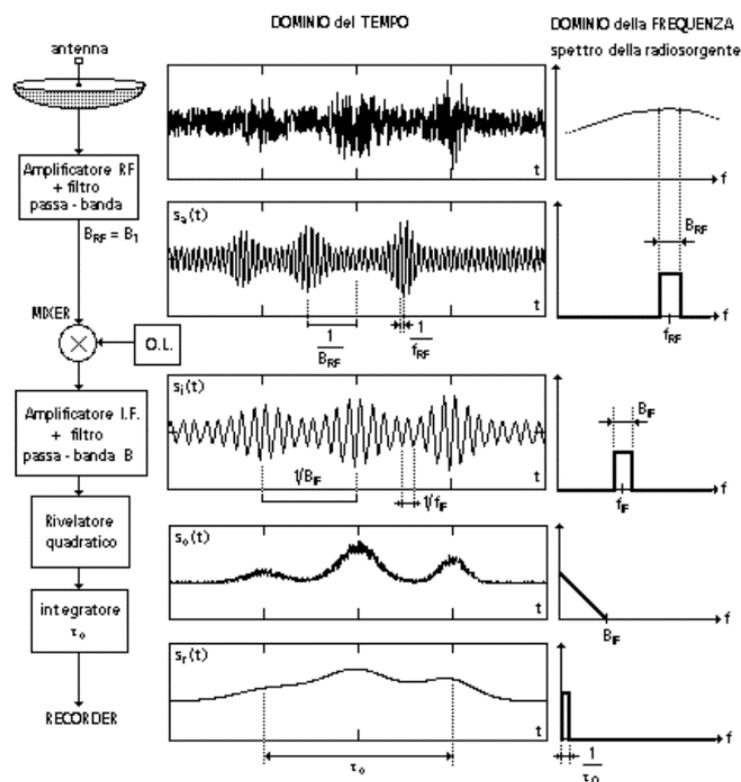


Fig. 11: Variazioni del segnale captato dall'antenna mentre è elaborato dai vari stadi di un ricevitore a potenza totale. A sinistra sono descritti i segnali in funzione del tempo a una data frequenza, a destra è rappresentata la variazione della potenza in funzione della frequenza (spettro). Questo 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 RAL10MW

Sviluppando ed ingegnerizzando una struttura hardware semplice, compatta ed economica, utilizzante 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*, con la possibilità di programmare e memorizzare un insieme completo di parametri operativi e 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. 12 che, a titolo di esempio, illustra la struttura a blocchi di un semplice radiotelescopio a microonde funzionante nella banda di frequenze 10 ÷ 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 dello strumento 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 di un amplificatore passa-banda a radiofrequenza seguito da un rivelatore di precisione a caratteristica quadratica e 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 ÷ 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 e altri parametri caratteristici (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. 12. Come è facile immaginare, c'è ampia possibilità di scelta per questi dispositivi, in funzione della frequenza di ricezione e dell'antenna utilizzata: dagli LNB commerciali destinati alla ricezione della TV-SAT in banda X (7 ÷ 12.5 GHz), in banda C (4 ÷ 8 GHz) o in banda K (18 ÷ 27 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 ÷ 50 dB.

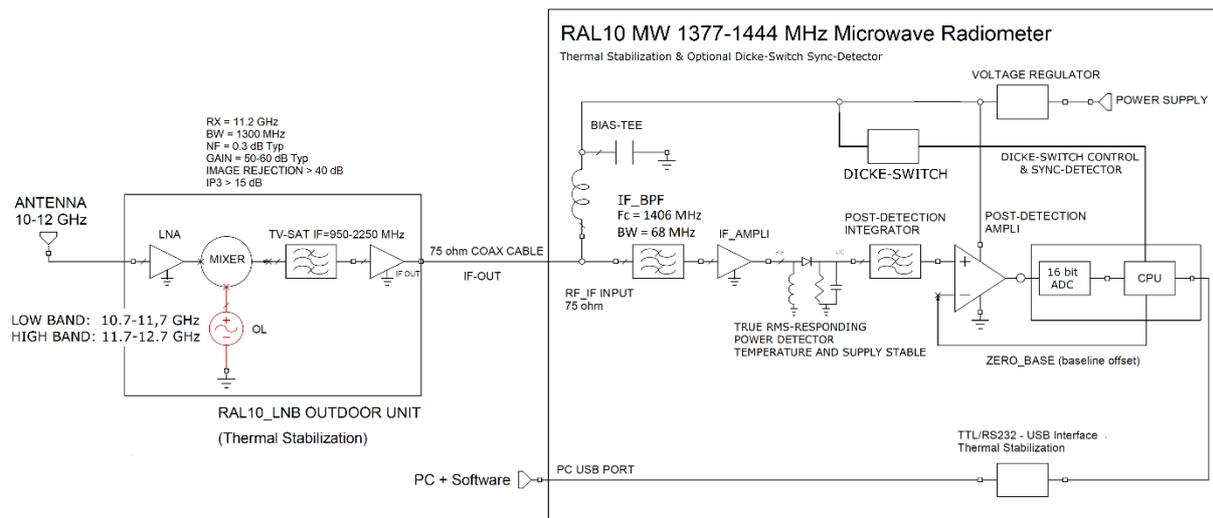


Fig. 12: Schema a blocchi che descrive i principali componenti di un radiotelescopio didattico operante nella banda $10 \div 12$ GHz basato sul radiometro *RAL10MW*. Il blocco a sinistra rappresenta l'unità esterna (LNB) commerciale, completa di illuminatore, assemblata sul punto focale di un'antenna a riflettore parabolico (primo fuoco od offset) comunemente utilizzata per la ricezione TV-SAT. Il segnale a frequenza intermedia $950 \div 2250$ MHz proveniente dall'unità esterna è trasmesso al radiometro *RAL10MW* attraverso un cavo coassiale da 75 Ω , 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. 12: 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. 13): 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 derive termiche e controllando la temperatura interna del ricevitore, si minimizzano gli errori sulla misura legati alle variazioni della temperatura ambiente.

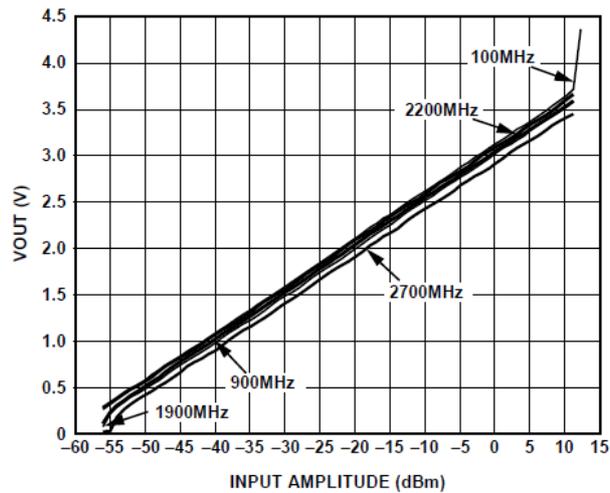


Fig. 13: Caratteristica ingresso-uscita del rivelatore compensato in temperatura AD8362 utilizzato nel radiometro *RAL10MW*.



Fig. 14: 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. 15: 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. 12) 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* fornito in dotazione) secondo un protocollo proprietario attraverso un canale USB standard. La precisione e la ripetibilità delle misure sono ottenute, quindi, stabilizzando termicamente l’unità tramite il controllo automatico PID.

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). Il tono a 22 kHz e il segnale di commutazione fra due livelli di tensione sono inviati all’unità LNB esterna attraverso il cavo coassiale da 75 Ω. Le fig. 14 e 15 mostrano i particolari interni del ricevitore e nel paragrafo 12 sono riportati dettagli sul protocollo di comunicazione.

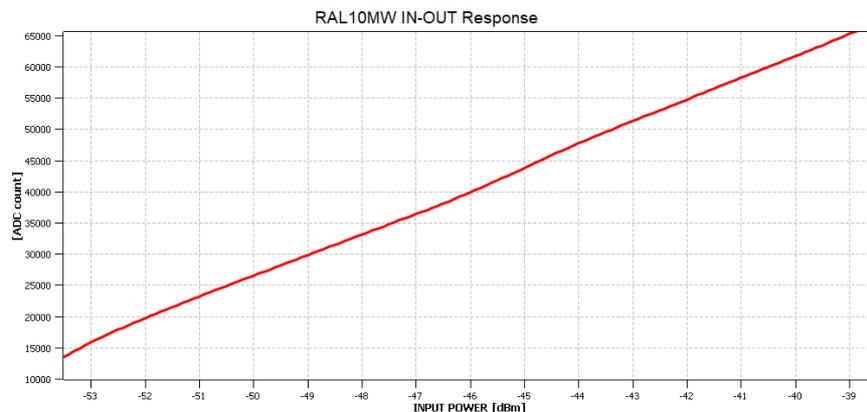


Fig. 16: Caratteristica ingresso-uscita del radiometro *RAL10MW* ottenuta in laboratorio applicando all’ingresso dello strumento un segnale sinusoidale a 1415 MHz e variando la sua potenza da -55 dBm fino a -38 dBm. Il radiometro è stato impostato con il minimo guadagno di post-rivelazione ($GAIN = 0$) 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 è termicamente stabilizzato alla temperatura ($TREF = 50$ °C).

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. 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

- Alimentazione a bassa tensione: 12 Vdc da sorgente esterna (batteria).

8. Il programma di acquisizione e di controllo

E' fornito un programma per personal computer basilare e semplice da utilizzare, dedicato all'acquisizione automatica e al controllo del radiometro *RAL10MW* (fig. 18).

Nota bene: Dopo aver installato il programma *RAL10MW_DataLogger* e creato il collegamento sul computer di stazione, per poter avviare il programma e procedere con l'acquisizione, è necessario eseguire il file come amministratore (tasto destro sul collegamento e scegliere l'opzione "esegui come amministratore").

Il programma controlla i parametri operativi dello strumento: nello stile di un registratore grafico, è visualizzato l'andamento della misura nel tempo e sono archiviate le informazioni acquisite in file di dati in formato testo, facilmente utilizzabili per successive elaborazioni. Le variazioni della misura radiometrica sono visualizzate sulla finestra grafica come una traccia mobile di colore rosso: in un diagramma rettangolare l'ascissa è la variabile temporale (espressa in tempo UTC) e l'ordinata l'intensità del segnale ricevuto 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. 18: Software *RAL10MW_DataLogger* utilizzato per l'acquisizione delle misure e per il controllo del radiometro.

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. 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*. Nella parte superiore della consolle si vedono la finestra dell'ora e della data (nel formato di tempo universale UTC) che si aggiorna ogni volta che è ricevuto un pacchetto di dati dal canale seriale e il valore numerico della risposta strumentale.

È possibile attivare o disattivare l'acquisizione continua dei pacchetti di dati (la traccia si aggiorna scorrendo nella finestra grafica) tramite i pulsanti verde *ON* e rosso *OFF*.

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 posiziona la traccia in modo che sia completamente visibile nella sua escursione dinamica (sono comandi che traslano la traccia 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 della traccia. 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, puliscono la finestra grafica e memorizzano i parametri operativi del ricevitore: ogni volta che si alimenta lo strumento, 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 sono presenti la casella *R* che seleziona la risposta dello strumento (digitare 0 per ottenere la misura *RADIO* [count] non calibrata, 1 per la misura *TB* [K] calibrata), le caselle necessarie per inserire i parametri di calibrazione (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 adiacente seleziona la banda di ricezione *A BAND* o *B BAND* che, nel caso si utilizzi, ad esempio, un'unità esterna LNB standard per TV-SAT, corrispondono alle bande di ricezione $A BAND = 10.70 \div 11.70 GHz$ e $B BAND = 11.70 \div 12.75 GHz$.

La polarizzazione in ricezione dello strumento si seleziona utilizzando i bottoni *POL_A* e *POL_B* (polarizzazione orizzontale o verticale).

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) 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 *TEMP_CONTR*, è possibile scegliere il valore di temperatura desiderato nella casella *TREF* [°C]. La finestra vicina, di colore giallo, visualizza il valore del modulatore PWM che regola automaticamente la temperatura.

È possibile posizionare il livello di riferimento della linea di base in qualsiasi punto della scala di misura impostando un valore compreso fra 0 e 65535 nella casella *ZERO_BASE*.

Ricordarsi di confermare qualsiasi valore numerico inserito nelle caselle di programmazione premendo il tasto \leftrightarrow (ENTER) sulla tastiera del computer.

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

9. 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 *temperature 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: diventa impossibile confrontare le misure eseguite da sistemi differenti o quelle di uno stesso impianto effettuate in tempi diversi. Per questi motivi sarebbe desiderabile riferirsi a 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, è prevista una procedura di calibrazione che, tramite l'introduzione di opportuni parametri attraverso il programma di gestione dello strumento, 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 radiotelescopio 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. 13 e fig. 16), è possibile calibrare il sistema 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 può essere stimata con l'aiuto del seguente grafico (fig. 19). Trascurando il contributo di rumore dovuto alla radiazione captata dai lobi secondari dell'antenna, si utilizza il valore $T_{SKY} = 6.8 K$. Questo dato, arrotondato al valore intero più vicino, sarà inserito nella casella di calibrazione relativa al *target freddo* $TC [K]$ come valore 7 nel programma di acquisizione.

Misura del *target caldo*: si orienta l'antenna verso il terreno in modo da coprire tutto il suo campo di vista, a 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 dato, arrotondato al valore intero più vicino, sarà inserito nella casella di calibrazione relativa al *target caldo* $TW [K]$ del programma di acquisizione. Supponendo, ad esempio, di ottenere $T_{GND} = 275.81 K$, si inserirà il valore 276.

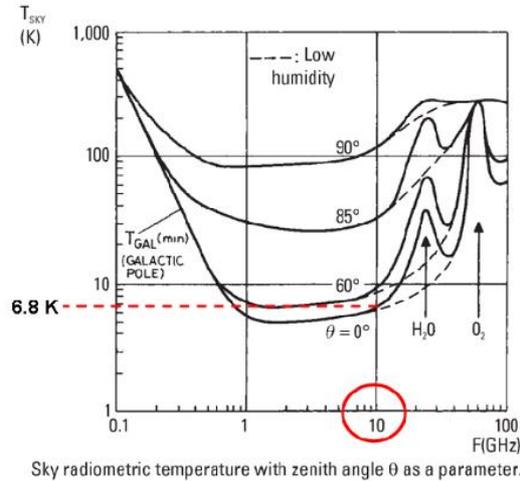


Fig. 19: Stima della temperatura di brillantezza del cielo allo zenit nella banda $12 \div 12 \text{ GHz}$ (N. Skou, D. Le Vine - MICROWAVE RADIOMETER SYSTEMS - Design and Analysis).

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, rispettivamente, il coefficiente angolare e il termine noto della retta di calibrazione. 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 di acquisizione. Confermati i valori per questi parametri, lo strumento sarà calibrato e, digitando il valore 1 nella casella *R*, sarà possibile visualizzare la risposta direttamente in unità *K*. I valori dei dati di calibrazione sono salvati in un file di testo “*RALIOMW_log.txt*” contenente 5 numeri in 5 righe (il file è posizionato nella stessa cartella del programma): la prima riga contiene il dato *TC*, le seguenti i dati *RC*, *TW* e *RW*. L’ultima riga contiene il valore per il parametro di rappresentazione della misura *R* (unità non calibrate o calibrate). E’ possibile modificare i valori di questi parametri utilizzando il programma, oppure sovrascrivendo i nuovi valori nel file “*RALIOMW_log.txt*”.

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. 20 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.

Il metodo è sempre valido quando la risposta dello strumento è lineare con la potenza RF del segnale applicato 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, il radiometro risulterà tarato. Il calcolo della retta di calibrazione è eseguito dal processore interno del radiometro, non dal software di gestione. Ampia letteratura tecnica è disponibile sui metodi di calibrazione per i radiometri a microonde nelle varie applicazioni.

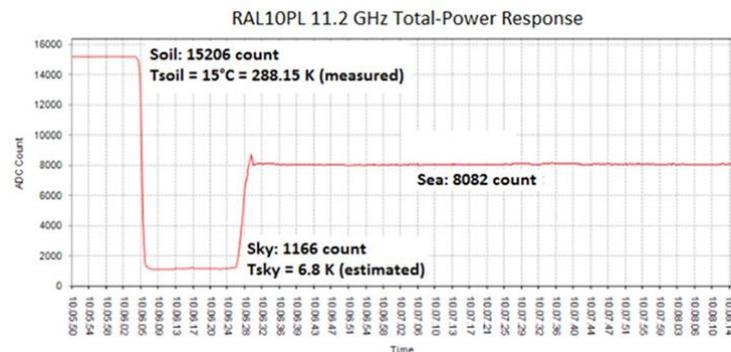


Fig. 20: Tipica escursione dinamica di un radiometro che misura il terreno, il cielo allo zenit e la superficie del mare.

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

10. 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 brillantezza 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 brillantezza 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.
- 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 *RALIOMW* 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. 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 *RALIOMW*. 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.

11. Impostazione dei parametri operativi

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

- $[0 \leq \text{ZERO_BASE} \leq 65535]$: è un valore proporzionale alla tensione di offset mostrata nello schema a blocchi di fig. 12, necessaria per posizionare lo zero di riferimento della linea di base radiometrica in un punto opportuno della scala di misura. E' possibile posizionare la linea di base in qualsiasi punto della scala digitando un valore *ZERO_BASE* appropriato nell'apposita casella.

- $[0 \leq \text{GAIN} \leq 100]$: 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

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

- $[0 \leq TCOST \leq 15]$: è il valore della costante di integrazione τ della misura radiometrica, risultato del calcolo di una media mobile eseguito su $N = 2^{TCOST}$ 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:

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

- Selezione della polarizzazione in ricezione con i comandi POL_A e POL_B . Il tipo di polarizzazione (orizzontale o verticale) 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.

- $A\ BAND / B\ BAND$: 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 $10 \div 12\ GHz$.

- $TEMP_CONTR$: è il comando che abilita il controllo automatico della temperatura interna del radiometro selezionata nella finestra $TREF\ [^{\circ}C]$. E' possibile impostare una temperatura compresa nell'intervallo $[40^{\circ}C \leq TREF \leq 55^{\circ}C]$: il controllore PID manterrà costante la temperatura 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 $TEMP\ [^{\circ}C]$.

- 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. I valori dei parametri devono essere inseriti nelle rispettive caselle del programma di gestione.

I parametri appena descritti sono memorizzabili.

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. 19), 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. 20).

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 $TEMP$ [°C] misurata sia prossima a quella impostata $TREF$ [°C]: si osserverà una stabilità a lungo termine del segnale ricevuto quando l'antenna punta una regione di cielo "fredda" (assenza di radiosorgenti): sono minime le fluttuazioni visualizzate dalla traccia grafica sul programma di acquisizione.

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. Conviene 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 di acquisizione.

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 il valore di questo parametro. Utilizzando adatte unità LNB 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) aggiusterà 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.

12. Protocollo di comunicazione seriale

Il radiometro *RALIOMW* 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 fornito in uso che stabilisce un canale seriale di comunicazione con il radiometro (*slave*) attraverso una porta USB. Il dispositivo master interroga lo strumento 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.

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 polarizzazione in ricezione del radiometro (orizzontale o verticale).
CMD_ONE=117	Chiede l'invio di un singolo pacchetto di dati (parametri e misure).
CMD_TEMP=119	Abilita il controllo automatico della temperatura interna.
CMD_TREF=120	Imposta la temperatura interna desiderata.
CMD_BAND=121	Seleziona la banda di ricezione dell'LNB (A BAND - B BAND).

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]: avvia il TX dei dati a ciclo continuo. Il radiometro risponde con un pacchetto completo delle misure.
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 un pacchetto completo di parametri.
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 un pacchetto completo di parametri.
CMD_MEM:	Memorizza i valori dei parametri attuali nella memoria interna:

	[ID, CMD_MEM, 0, 0, checksum]	Il radiometro 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 un pacchetto completo di parametri.
CMD_POL:	Imposta la polarizzazione in ricezione del radiometro. [ID, CMD_POL, 2, pol, checksum] con [pol=0]: Polarizzazione A (orizzontale o verticale); [pol=255]: Polarizzazione B (verticale o orizzontale).	Il radiometro risponde con un pacchetto completo di parametri.
CMD_ONE:	Chiede l'invio di un singolo pacchetto completo di dati (parametri/misure): [ID, CMD_ONE, PAR/MIS, 0, checksum]	Il radiometro risponde con un pacchetto completo di parametri/misure.
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 un pacchetto completo di misure.
CMD_TREF:	Imposta la temperatura interna per il radiometro [°C]: [ID, CMD_TREF, tref, 0, checksum] con [40<=tref<=55].	Il radiometro risponde con un pacchetto completo di parametri.
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 un pacchetto completo di parametri.

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]	Polarizzazione in ricezione 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]:	[x]	Non significativo.
datiTX[9]:	[x]	Non significativo.
datiTX[10]:	[tref]	Temperatura interna desiderata per il radiometro [°C].
datiTX[11]:	[0]	Non utilizzato.
datiTX[12]:	[0]	Non utilizzato.
datiTX[13]:	[0]	Non utilizzato.
datiTX[14]:	[0]	Non utilizzato.
datiTX[15]:	[x]	Non significativo.
datiTX[16]:	[x]	Non significativo.
datiTX[17]:	[x]	Non significativo.

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 parita'.

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]:	[x]	Non significativo.
datiTX[7]:	[x]	Non significativo.
datiTX[8]:	[x]	Non significativo.
datiTX[9]:	[x]	Non significativo.
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]:	[x]	Non significativo.
datiTX[14]:	[x]	Non significativo.
datiTX[15]:	[duty-cycle_RISC]	Duty-cycle del riscaldatore (controllo PID della temp. interna).
datiTX[16]:	[x]	Non significativo.
datiTX[17]:	[x]	Non significativo.
datiTX[18]:	[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 dei precedenti pacchetti di dati:

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;