

Strumenti per Radioastronomia Amatoriale

## Utilizziamo RAL10KIT e RAL10AP per costruire un radiotelescopio a microonde

Flavio Falcinelli

RadioAstroLab s.r.l. 60019 Senigallia (AN) - Italy – Strada della Marina, 9/6

tel. +39 071 6608166 - [www.radioastrolab.com](http://www.radioastrolab.com)

### 1. Introduzione

Il cielo può essere osservato in tanti modi: lo spettacolo offerto è sempre magnifico ed entusiasmante. Stupisce la vista della volta stellata in una limpida notte invernale e lontano dalle luci cittadine, la meraviglia aumenta osservando i particolari della luna con un binocolo o i pianeti con un telescopio. Questi strumenti, che amplificano le nostre possibilità visive, sono familiari: chi non ha mai avuto il piacere di osservare al telescopio durante una serata divulgativa offerta dal locale gruppo di astrofili? Non tutti sanno, però, che esistono altri modi per guardare il cielo, altrettanto affascinanti di quello visuale.

Viviamo immersi in un mare di onde elettromagnetiche generate dalla tecnologia (telefoni cellulari, apparecchi wi-fi, ripetitori televisivi) e dal mondo naturale, con radiazioni che provengono anche dallo spazio extra-terrestre. I pianeti, le stelle e le galassie più lontane emettono onde elettromagnetiche: dai raggi gamma, ai raggi X, alle radiazioni ultraviolette e visibili, fino alle emissioni infrarosse e radio. L'essere umano percepisce le emissioni nella banda del visibile perché madre natura ci ha equipaggiati con il senso della vista, indispensabile per la nostra sopravvivenza. Per osservare altre "finestre" dello spettro elettromagnetico servono differenti strumenti, ognuno specializzato per misurare la radiazione in una certa banda di frequenze.

È possibile costruire un piccolo radiotelescopio per studiare in modo diverso gli oggetti celesti, padroneggiando i principi basilari di questa affascinante tecnica osservativa, in pieno giorno e con il cielo nuvoloso. Indubbiamente non è banale captare l'emissione radio di una galassia lontana: i segnali sono molto deboli, soffocati dalle interferenze artificiali e dal rumore di fondo. Per avere successo serve conoscenza della materia, passione e continuità operativa. Questo non è forse vero per qualsiasi attività?

*RadioAstroLab s.r.l.* è stata la prima azienda italiana a proporre sul mercato, nel 2000, il ricevitore *RAL10* insieme alle informazioni necessarie per costruire e utilizzare un radiotelescopio dilettantistico. Questo strumento, economico e pensato per sfruttare moduli commerciali per la ricezione della TV satellitare, ha iniziato molti appassionati alla radioastronomia.



**Fig. 1:** Modulo radiometrico *RAL10KIT*.



**Fig. 2:** Ricevitore *RAL10AP*.

Studenti, astrofili, radioamatori, scuole e università, hanno costruito i loro piccoli radiotelescopi per iniziare ad esplorare il “radio-cielo”. Abbiamo ricevuto apprezzamenti e nuove richieste, fornito risposte e sostenuto gli appassionati organizzando eventi e conferenze in molte città. Siamo felici e orgogliosi per aver contribuito allo sviluppo della radioastronomia amatoriale.



**Fig. 3:** Il software di controllo e di acquisizione *ARIES*, fornito con tutti i ricevitori della serie *RAL10*.

È oggi disponibile una nuova famiglia di prodotti che soddisfa le esigenze dell'appassionato e consente a tutti di conoscere la radioastronomia attraverso la costruzione, l'installazione e l'esercizio di un piccolo radiotelescopio.

La via dell'approccio sperimentale è sempre preferibile: registrare le onde radio provenienti dagli oggetti celesti con uno strumento “home made” è un'esperienza molto eccitante. Certo, non possiamo attenderci le prestazioni dei grandi radiotelescopi della ricerca, incomparabilmente grandi e complessi. Tuttavia, la realizzazione e la messa in opera di uno strumento costruito con le proprie mani assicurano molte soddisfazioni e un grande valore educativo. Questa è una strada percorribile e didatticamente molto interessante: numerosi sono gli esempi reperibili sul web che descrivono la costruzione di semplici ed economici radiotelescopi utilizzando componenti e moduli provenienti dal mercato della TV satellitare. Si tratta di soluzioni interessanti e di immediata realizzazione che, in ogni caso, richiedono pratica ed esperienza con il montaggio dei circuiti elettronici e, soprattutto, con la loro messa a punto. D'altra parte, se desideriamo iniziare con garanzia di successo, sarà preferibile orientarsi verso applicazioni progettate “ad hoc” per la radioastronomia amatoriale, pur non rinunciando alla semplicità di utilizzo.

Per questi motivi proponiamo agli sperimentatori il modulo *RALIOKIT* (Fig. 1) e il ricevitore *RALIOAP* (Fig. 2). Questi strumenti, abbinati a componenti commerciali di facile reperibilità, diventano un completo ricevitore radioastronomico che include l'interfaccia per la comunicazione con un personal computer (PC) e il software *ARIES* di gestione (Fig. 3). Costruire ed imparare ad utilizzare un radiotelescopio è didatticamente molto interessante ed è un approccio semplice e immediato alla radioastronomia e alle tecniche strumentali di base.

*RALIOKIT* è stato pensato per chi ama costruire il ricevitore e possiede un minimo di pratica nei montaggi elettronici: occorre assemblare il modulo all'interno di un adatto contenitore completando il lavoro con un alimentatore.

*RALIOAP* è un ricevitore pronto all'uso, racchiuso in un elegante e compatto contenitore di alluminio anodizzato completo di alimentatore esterno.

In questo documento proponiamo la costruzione di un interessante radiotelescopio amatoriale a microonde (banda 10-12 GHz) basato su questi dispositivi. Lo sperimentatore completa lo strumento aggiungendo pochi moduli commerciali provenienti dal mercato della TV satellitare secondo le istruzioni fornite: antenna con unità esterna (amplificatore-convertitore di frequenza a basso rumore LNB - Low Noise Block) che comprende l'illuminatore, il cavo coassiale e il personal computer per l'acquisizione. C'è ampia libertà nella scelta di questi dispositivi, dato che *RALIOKIT* e *RALIOAP* sono compatibili con qualsiasi prodotto concepito per la ricezione satellitare in banda 10-12 GHz, componenti ovunque reperibili a basso costo grazie alla diffusione commerciale di questo servizio. Utilizzando un'antenna a riflettore parabolico con LNB completo di illuminatore e collegando il sistema ai nostri ricevitori si realizza un radiometro a microonde adatto allo studio della radiazione termica del Sole, della Luna e delle radiosorgenti più intense, con sensibilità in funzione delle dimensioni dell'antenna.

La costruzione e la messa a punto di questo strumento potrebbe essere affrontata con soddisfazione da studenti, radioamatori e appassionati di radioastronomia, ottenendo risultati tanto più interessanti quanto maggiori sono le dimensioni dell'antenna utilizzata. 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.

## 2. Radioastronomia e radiotelescopi

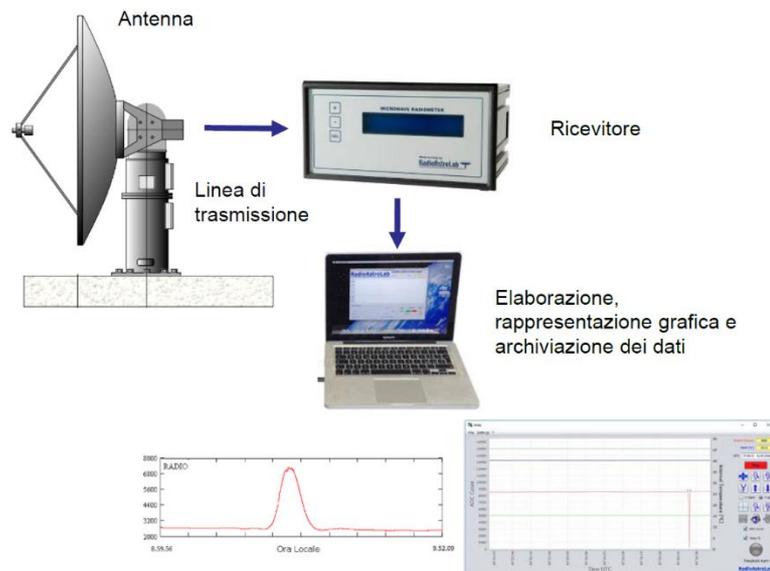
La radioastronomia studia il cielo analizzando le onde radio naturali emesse dai corpi celesti: qualsiasi oggetto irradia onde elettromagnetiche misurabili che, captate dall'antenna e visualizzate, manifestano le caratteristiche incoerenti di un rumore elettrico ad ampio spettro.

In generale, con *radiosorgente* si indica qualsiasi emettitore naturale di onde radio: nell'uso comune questo 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. 4).

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 misuri una potenza radiante proveniente dal cielo che incide sulla superficie di captazione dell'antenna, entro la banda passante del ricevitore.



**Fig. 4:** 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* di quell'oggetto, 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, cioè la *temperatura di brillantezza*, sarà proporzionale alla temperatura fisica della regione osservata dall'antenna 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.

Lo schema di principio di un semplice radiotelescopio è analoga quella di un apparecchio radio-ricevente casalingo (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 (segnale indesiderato) che, generalmente, è molto intenso: 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.

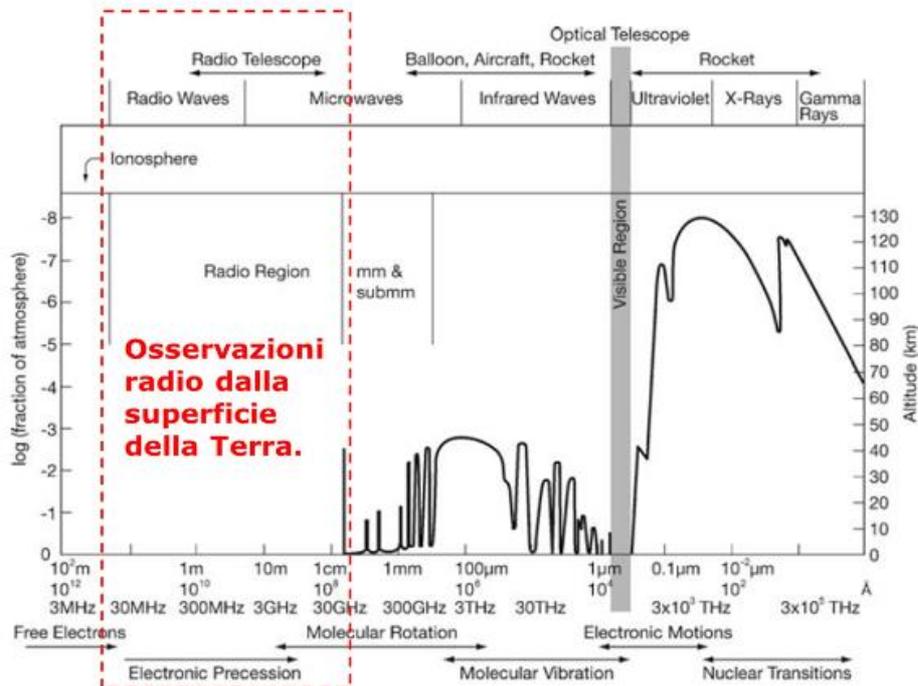
### 3. L'atmosfera terrestre

La classificazione ufficiale delle bande di frequenza dello spettro radio è riportata nella Fig. 5.

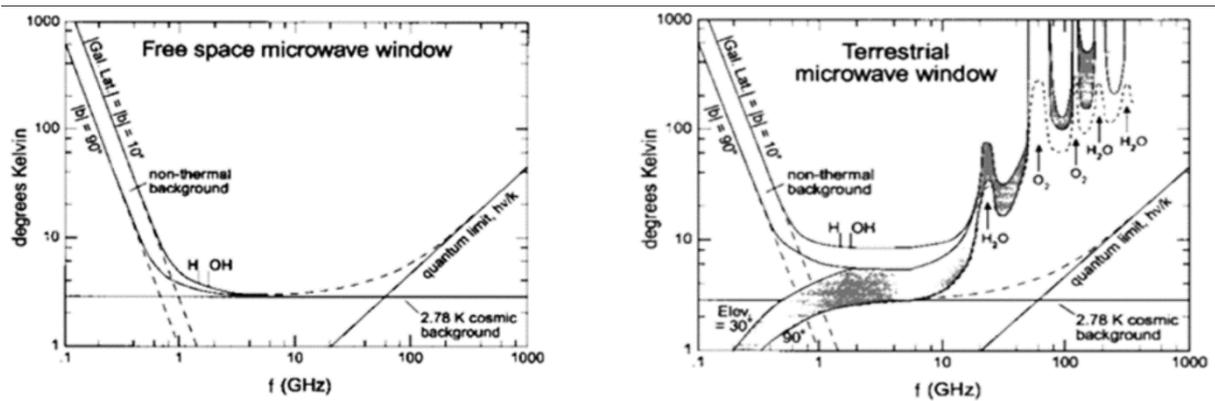
**Designazione ITU**

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. 5:** Classificazione in bande di frequenza dello spettro radio.



**Fig. 6:** Rappresentazione dello spettro elettromagnetico dove è stata evidenziata la “finestra radio”.



**Fig. 7:** 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.

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. 6, Fig. 7, Fig. 10). Per questi motivi (Fig. 7), l'intervallo delle frequenze radio utili per le osservazioni radioastronomiche da terra è compreso fra circa 20 MHz e circa 20 GHz.

#### 4. Radioastronomia amatoriale

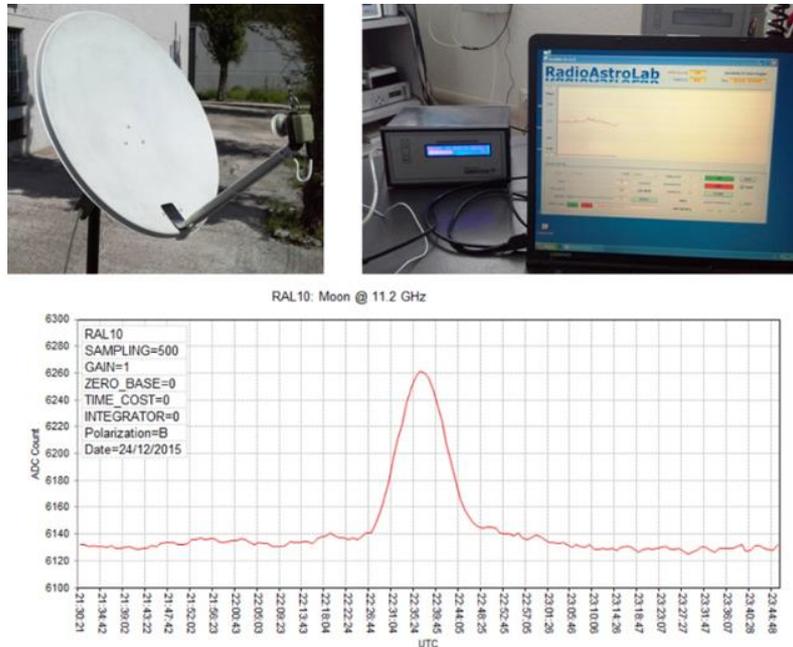
Ammirando la tecnologia e l'imponenza dei radiotelescopi professionali, per non parlare dei loro costi "astronomici", è legittimo domandarsi se sia concepibile un'attività radioastronomica amatoriale e, in caso affermativo, quali siano le reali possibilità di sperimentazione aperte ai dilettanti. Molti 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, con limitate possibilità di sperimentazione a livello amatoriale, 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 dalle nozioni di base, partendo da progetti concreti, economici e facilmente realizzabili, con prestazioni sicure e ripetibili, accettando i limiti raggiungibili nell'attività dilettantistica. È sempre consigliabile partire da progetti semplici e di immediato successo, in modo da acquisire gradualmente confidenza con la tecnica strumentale e 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.

Esiste poi il problema della strumentazione: occorre essere esperti elettronici, così da realizzare tutto in casa? Non necessariamente.

Chi ha conoscenze pratiche di elettronica è, ovviamente, facilitato: sul web si trovano eccellenti esempi che descrivono la costruzione di piccoli radiotelescopi. Tuttavia, per facilitare

l'approccio alla radioastronomia a qualsiasi persona di buona volontà, 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. 8:** 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. 8). 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 di cielo 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.

Perché iniziare proprio con uno strumento a microonde?

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 operare?
- 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 dal grafico di Fig. 9, Sole e Luna a parte 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 per frequenze inferiori a 1 GHz, con un meccanismo (non termico) che incrementa l'intensità dell'emissione al diminuire della frequenza.

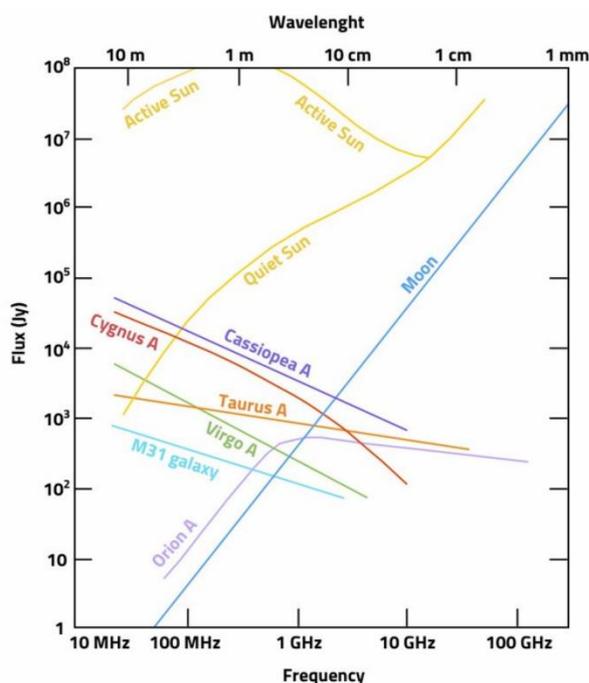
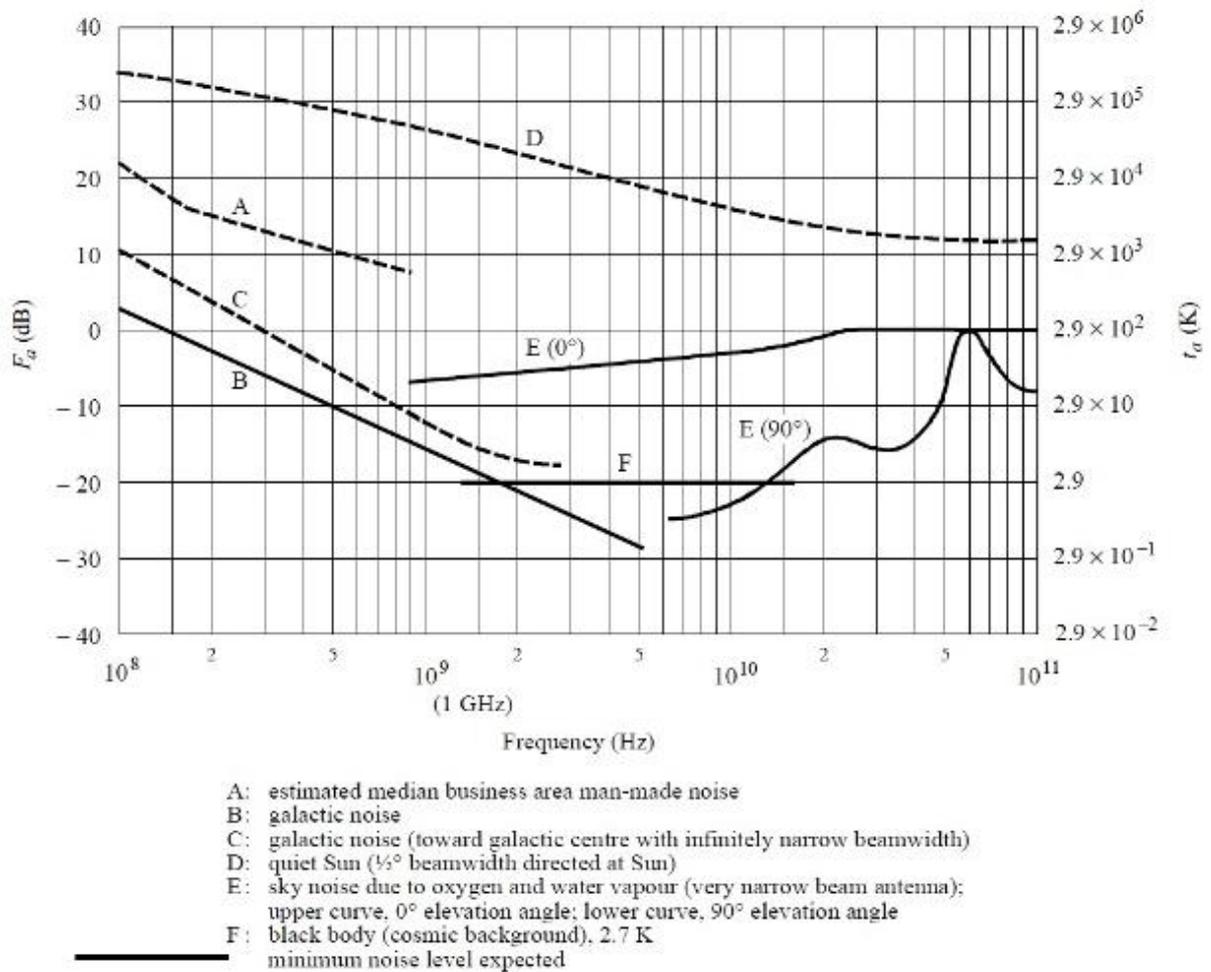


Fig. 9: Spettri delle principali radiosorgenti.

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.



**Fig. 10:** Andamento della potenza di rumore naturale e artificiale in funzione della frequenza. Sono riportati i livelli stimati nell'intervallo da 100 MHz fino a 100 GHz (Recomm. ITU-R P.372-7 "Radio Noise").

Il grafico in Fig. 10 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 "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, elettro-magneticamente quieta, ammesso di trovarla. Effettivamente, le scelte basate sull'analisi dello spettro delle radiosorgenti sono in contrasto con quelle derivanti dall'analisi dello spettro dei disturbi: siamo a un livello di quasi parità fra i vantaggi e gli svantaggi. Decisive saranno le considerazioni tecnologiche ed economiche.

Un radiotelescopio dilettantistico dovrebbe essere facilmente realizzabile, economico e di immediato funzionamento: il nucleo centrale dello strumento dovrebbe essere un modulo appositamente progettato per la radioastronomia che integra le parti indispensabili di un ricevitore radioastronomico di base. Lo sperimentatore completa il radiotelescopio utilizzando componenti e moduli commerciali economici e facilmente reperibili. Ciò è possibile grazie alla diffusione della ricezione TV satellitare nella banda 10-12 GHz e alla reperibilità di antenne, amplificatori, cavi e accessori (nuovi e di recupero), adatti per costruire un perfetto radiotelescopio amatoriale.

Abbiamo già evidenziato come le dimensioni dell'antenna siano determinanti per le prestazioni e per il costo finale dello strumento. Anche la reperibilità commerciale di questo

delicata componente gioca un ruolo fondamentale. Se consideriamo che, a parità di guadagno dell'antenna (attitudine a captare deboli segnali in determinate direzioni dello spazio), le sue dimensioni (quindi il peso e l'ingombro) diminuiscono all'aumentare della frequenza, 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 più 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, 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 Total-Power.

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 non è altro che 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 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 esterna LNB. 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  $\varepsilon$  è detto *efficienza*: generalmente compreso fra 0.45 e 0.55, tiene conto di tutti i fattori che riducono il massimo guadagno teorico ottenibile (errori 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.

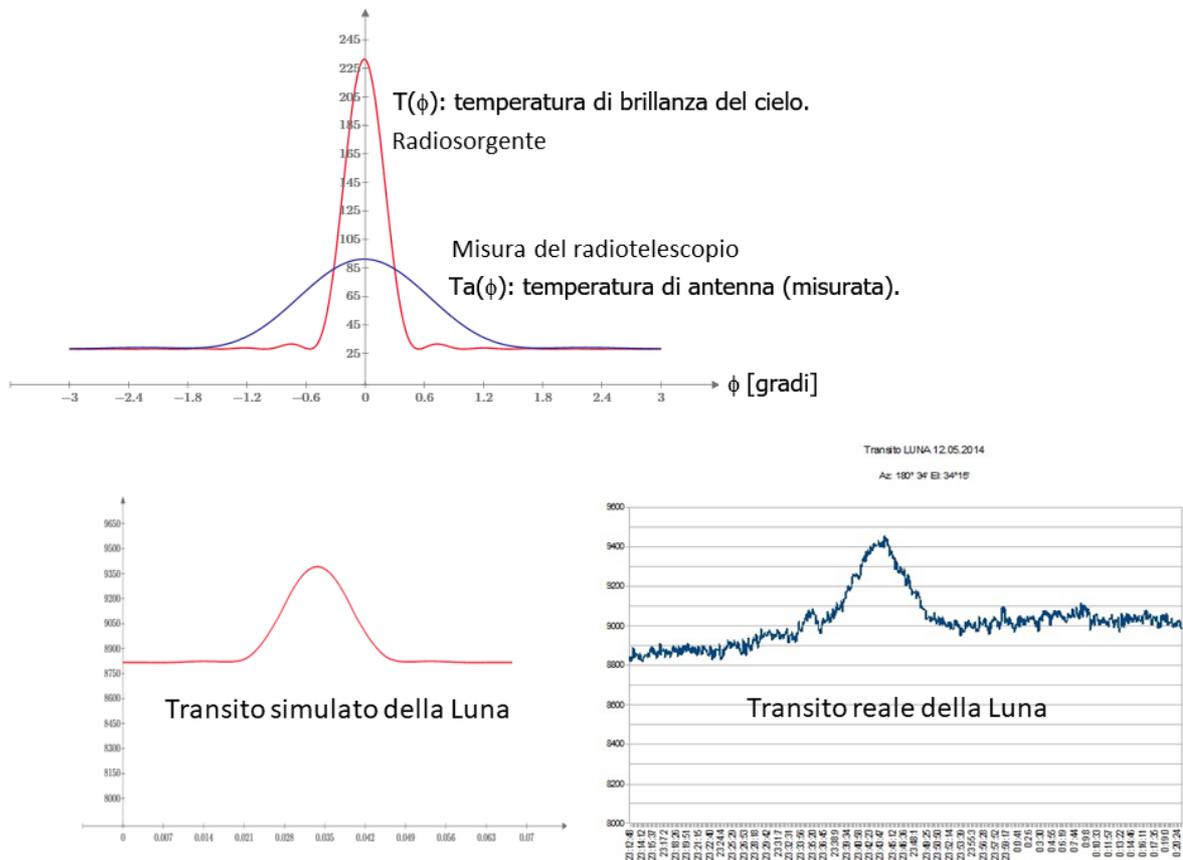
Le possibili strutture di un sistema di antenna variano molto in funzione della frequenza operativa e del tipo di applicazione. Alle frequenze più basse le antenne sono prevalentemente di tipo filare (dipoli metallici), mentre alle alte frequenze (microonde) sono costituite da elementi radianti più facilmente 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): è sempre necessario che le dimensioni siano sempre molto maggiori della lunghezza d'onda operativa comportando, alle basse frequenze, la realizzazione di strutture 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 una specifica regione di cielo che irradia con una data temperatura di brillanza. 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 brillanza dello scenario osservato. L'antenna di un radiotelescopio tende, quindi, a "livellare" e "diluire" la distribuzione di brillanza reale che risulterà pesata dalla forma del suo diagramma di ricezione. La misura delle variazioni spaziali di brillanza osservata approssimerà quella vera solo se le dimensioni angolari della radiosorgente sono estese rispetto a quelle del fascio di antenna. Il problema che si pone all'osservatore è quello di ottenere la distribuzione vera della temperatura di brillanza partendo dalla misura della temperatura di antenna: è necessario effettuare un'operazione di *de-convoluzione* fra la distribuzione della temperatura equivalente di antenna (brillanza 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 brillanza dell'ordine di 240-300 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.

La Fig. 10 mostra le tracce (simulata e reale) del transito della Luna (flusso dell'ordine di 52600 Jy a 10-12 GHz) registrato da un radiotelescopio amatoriale basato su *RAL10KIT* e un'antenna a riflettore parabolico TV-SAT con 1.5 metri di diametro (larghezza del fascio appena inferiore a 1.5 gradi).



**Fig. 10:** Il profilo della temperatura della Luna rilevata da un radiotelescopio (temperatura di antenna) durante un transito è diverso dal profilo “vero” della sua temperatura di brillantezza, dato che il processo di misura eseguito con l’antenna è una convoluzione fra la vera 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 l’osservazione reale (eseguita dal sig. Giancarlo Madaia 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 sia un problema

rilevante per i radiotelescopi amatoriali 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. 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.

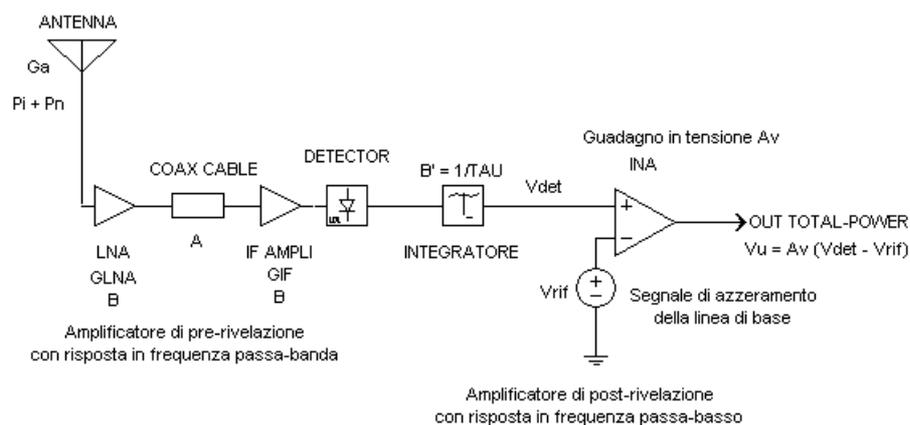
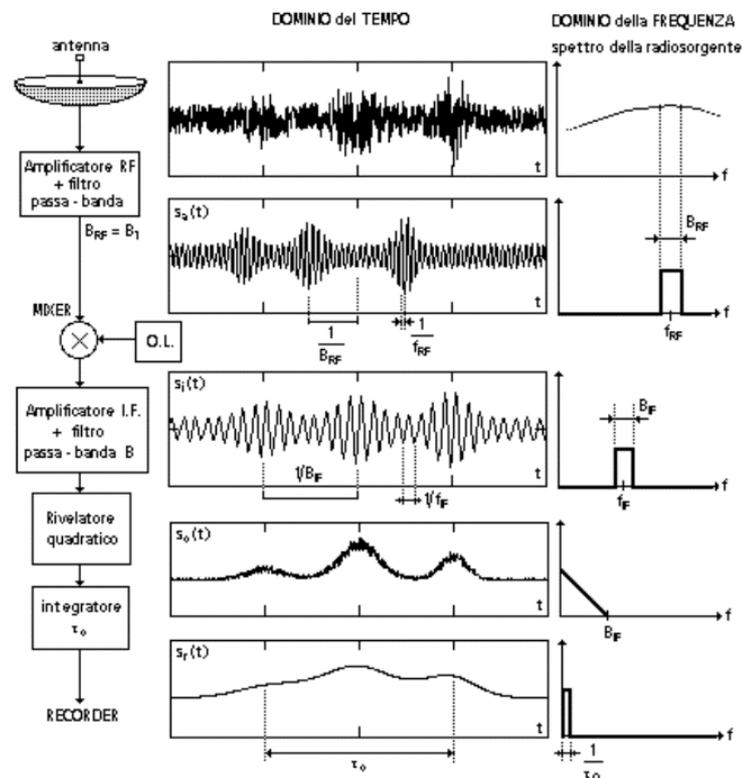


Fig. 11: Schema di principio di un ricevitore Total-Power.

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. Il radiometro si comporta, quindi, come un termometro che misura la temperatura di brillantezza dello scenario celeste osservato.

Il più semplice radiometro a microonde (Fig. 11) 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 (un filtro passa-basso) 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. Utilizzando un circuito differenziale di post-rivelazione, se i parametri del ricevitore si mantengono stabili, si misurano solo le variazioni di potenza dovute alla radiazione proveniente dall'antenna, eliminando la componente quasi-continua dovuta al rumore interno.



**Fig. 12:** 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). Lo schema a blocchi del ricevitore 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 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 ricevitore 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 nella Fig. 12. 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 ricevitore Total-Power, quindi valutare la minima variazione nella temperatura equivalente di rumore  $\Delta T$  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),  $\tau$  è costante di tempo dell'integratore (in secondi) e  $B$  è la larghezza di banda del ricevitore (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  $\Delta T$  agendo sui parametri di sistema  $T_a$ ,  $T_r$ ,  $B$  in fase di progetto, sul tempo di integrazione  $\tau$  durante il funzionamento ( $T_{sys}$  dovrebbe essere minimo,  $B$  e  $\tau$  più grandi possibile). Quindi, fissati 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  $\tau$  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  $\Delta T$  è dato dalla 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 rispetto alle variazioni della temperatura ambiente. 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 ricevitore, che producono ambiguità e limitano la sensibilità e la precisione delle misure. Questo problema si può risolvere, con risultati soddisfacenti nelle applicazioni amatoriali, 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 delle derive termiche "a posteriori" 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. Costruire un radiotelescopio Total-Power nella banda 10-12 GHz

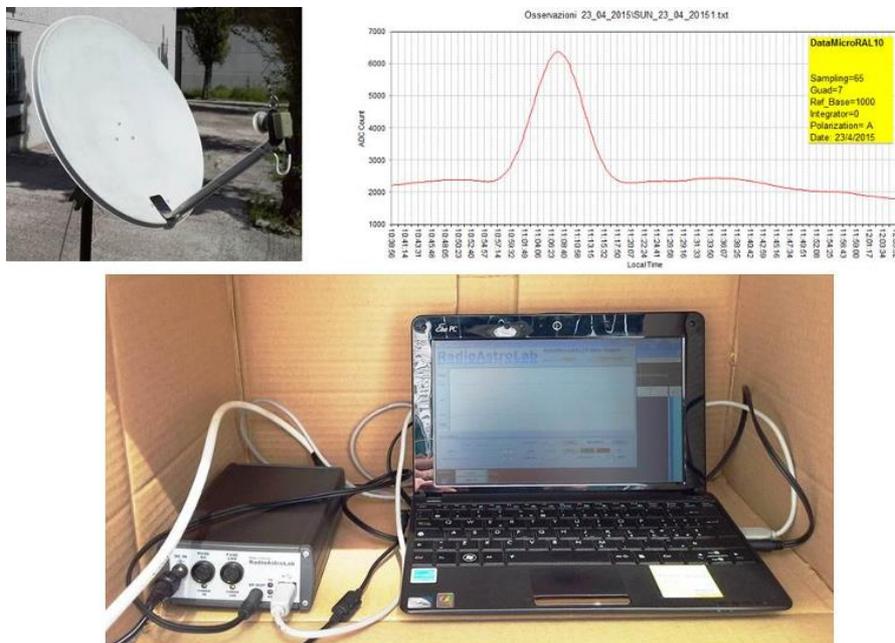
Descriveremo la costruzione di un piccolo ma efficiente radiotelescopio funzionante nella banda 10-12 GHz, equipaggiato con un'antenna standard per TV-SAT a riflettore parabolico, in grado di misurare la temperatura di brillanza del Sole e della Luna, di evidenziare la componente non termica della radiazione 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. Sarà possibile, con una semplice procedura di calibrazione, trasformare il radiotelescopio in uno strumento di misura che stima la temperatura di brillanza dello scenario osservato. Per osservare altri oggetti sarà solo necessario utilizzare antenne di maggiori dimensioni.

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 e alimentatore) si è subito pronti per le radio-osservazioni. Il nucleo centrale sul quale si basa il funzionamento del radiotelescopio è un radiometro a potenza totale. Il nostro progetto prevede l'utilizzo di ricevitori a microonde appositamente sviluppati per questa applicazione: il modulo *RAL10KIT* oppure il ricevitore *RAL10AP*, abbinati al software di acquisizione e di controllo *ARIES*. Sono necessari i seguenti componenti:

- Antenna a riflettore parabolico TV-SAT, completa di unità esterna (LNB) e illuminatore;
- Cavo coassiale da 75  $\Omega$  per TV-SAT;
- Modulo *RAL10KIT* oppure ricevitore *RAL10AP*;
- Software per l'acquisizione delle misure e per il controllo del ricevitore *ARIES*;
- 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 *RAL10KIT* o con il ricevitore *RAL10AP* 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.



**Tests of radio astronomy @ 11.2 GHz : the radio signals from the Sun with RAL10AP.**

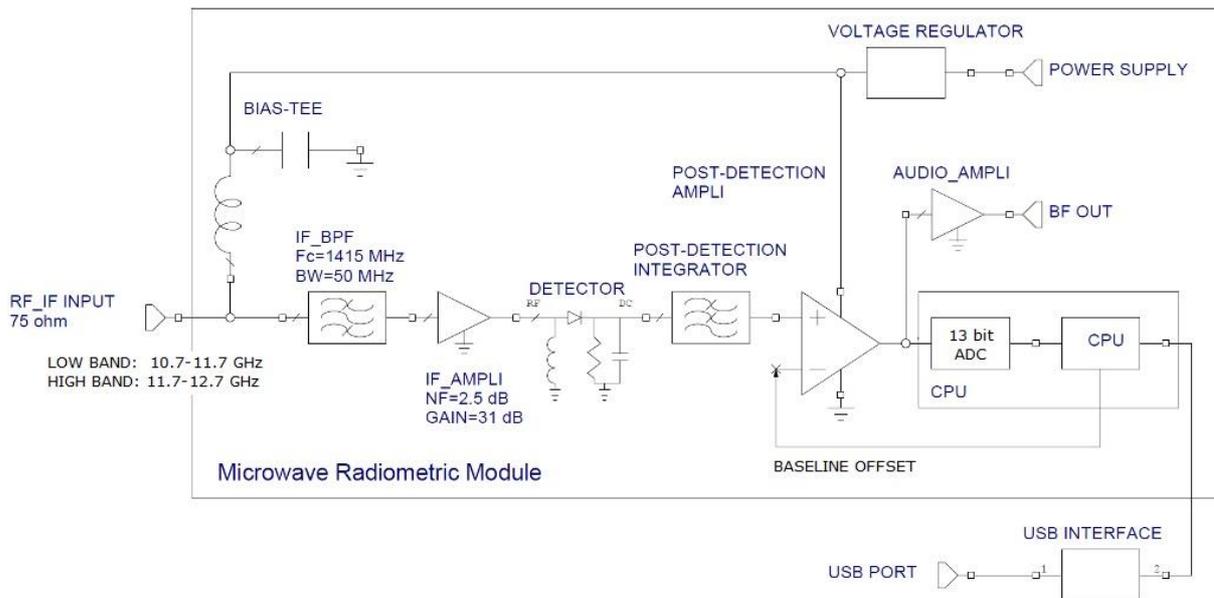
**Fig. 13:** Prova di ricezione del Sole con il ricevitore *RAL10AP*.

Come accennato, sono utilizzabili praticamente tutte le unità esterne (LNB) esistenti in commercio per TV-SAT a 10-12 GHz con l'uscita a frequenza intermedia 950-2250 MHz. Nei moderni dispositivi è possibile gestire il cambio di polarizzazione (orizzontale o verticale) con un salto di tensione, tipicamente 12.75-17.25 V e la commutazione della banda di ricezione (LOW BAND/HIGH BAND) tramite l'iniezione di un tono a 22 kHz lungo la linea coassiale: i ricevitori *RAL10KIT* e *RAL10AP* supportano tali funzionalità tramite comandi via software. Un cavo coassiale TV-SAT da 75  $\Omega$  di opportuna lunghezza, terminato con connettori tipo F, collegherà l'uscita RF-IF dell'unità esterna (LNB) con l'ingresso del ricevitore *RAL10KIT* o *RAL10AP*. Si raccomanda di scegliere cavi della migliore qualità, a bassa perdita. In alcuni casi, quando si osservano radiosorgenti di debole intensità o quando la linea coassiale è molto lunga, può essere utile inserire un amplificatore IF di linea (da 10 a 15 dB di guadagno) fra l'unità esterna e il ricevitore. Questi prodotti sono facilmente reperibili in qualsiasi supermercato

dell'elettronica di consumo o presso i migliori installatori di impianti TV-SAT. La Fig. 13 mostra un esempio di transito solare registrato con il nostro radiotelescopio.

## 8. Il modulo radiometrico

Descriveremo brevemente le caratteristiche del modulo radiometrico che costituisce il nucleo centrale dei radiometri *RAL10KIT* e *RAL10AP*. La Fig. 14 mostra lo schema a blocchi del dispositivo.



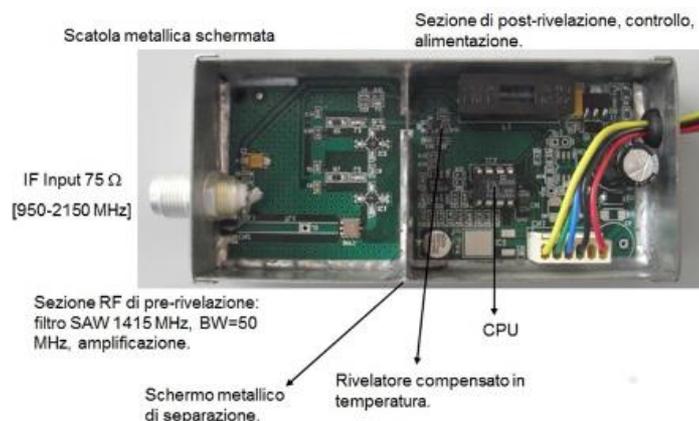
**Fig. 14:** Schema a blocchi del modulo radiometrico, il nucleo centrale dei ricevitori *RAL10KIT* e *RAL10AP*.

Il segnale a frequenza intermedia (IF) proveniente dall'unità esterna (LNB) è applicato al modulo che, con una banda passante di 50 MHz centrata sulla frequenza di 1415 MHz, filtra, amplifica e misura la potenza del segnale ricevuto (blocco rivelatore). Se l'unità esterna lo prevede, è possibile selezionare la banda di ricezione (LOW BAND-HIGH BAND) iniettando un tono a 22 kHz attraverso il cavo coassiale d'ingresso.

Un amplificatore di post-rivelazione adatta il livello del segnale rivelato alla dinamica di acquisizione del convertitore analogico-digitale (ADC con 13 bit di risoluzione) che "digitalizza" l'informazione radiometrica. Questo blocco finale, gestito da un processore, genera un offset programmabile per la linea di base radiometrica, calcola il valore medio su un numero di campioni stabilito e forma il pacchetto dei dati seriali che sarà trasmesso al PC. I dati acquisiti dalle misure radiometriche e i parametri operativi del radiometro sono gestiti da un protocollo di comunicazione proprietario attraverso la porta seriale (USB). Una memoria interna non volatile consente la registrazione delle impostazioni ottimali dei parametri operativi: una volta tarato il sistema per una particolare applicazione, se è inviato il comando di registrazione dei parametri impostati, i loro valori si conservano togliendo e ripristinando l'alimentazione. Il processore esegue le funzioni di elaborazione e di controllo minimizzando il numero di componenti elettronici esterni e massimizzando la flessibilità del sistema. L'uscita AUDIO del segnale rivelato è presente solo nel modello *RAL10AP*. L'utilizzo di un modulo specificamente progettato per radioastronomia, che integra tutte le funzionalità richieste da un

radiometro, garantisce allo sperimentatore prestazioni sicure e ripetibili: è il blocco centrale dei ricevitori *RAL10KIT* e *RAL10AP* che, quindi, hanno identiche prestazioni.

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 di circa 75 dB. Queste prestazioni sono più che adeguate a costruire un radiotelescopio amatoriale. La sensibilità del sistema sarà, comunque, dipendente dalle dimensioni dell'antenna, mentre le escursioni termiche esterne influenzeranno la stabilità e la ripetibilità della misura. La fantasia e l'abilità dello sperimentatore sono determinanti per ottimizzare le prestazioni di un radiotelescopio dilettantistico: una corretta scelta e un'installazione adeguate delle parti critiche a radiofrequenza (antenna, illuminatore e LNB), la messa in opera di contromisure che minimizzano gli effetti negativi delle escursioni termiche, assicurano importanti vantaggi nelle prestazioni finali.



**Fig. 15:** Particolari interni del modulo radiometrico.

Caratteristiche tecniche del modulo radiometrico:

- Frequenza centrale di ingresso RF-IF: 1415 MHz;
- Larghezza di banda: 50 MHz;
- Guadagno tipico della sezione RF-IF: 20 dB;
- Impedenza di ingresso (connettore tipo F): 75 Ω;
- Selezione polarizzazione (orizzontale o verticale);
- Selezione della banda di ricezione LNB (LOW BAND – HIGH BAND);
- Rivelatore quadratico compensato in temperatura (misura della potenza RF).
- Impostazione dell'offset per la linea di base radiometrica;
- Calibrazione automatica della linea di base radiometrica;
- Guadagno in tensione di post-rivelazione programmabile: da 42 a 1008 in 10 passi.
- Costante di integrazione programmabile (da 0.1 secondi fino a 26 secondi);
- Acquisizione del segnale radiometrico con ADC a 13 bit.
- Processore che controlla il sistema ricevente e gestisce la comunicazione seriale.
- Memorizzazione dei parametri del radiometro (memoria interna non volatile).
- Interfaccia USB (connettore tipo B) per il collegamento al PC.
- Compatibile con il software di acquisizione e di controllo *ARIES*.
- Tensioni di alimentazione: 7-12 VDC / 50 mA.

- Alimentazione per LNB attraverso il cavo coassiale, protetta con fusibile interno.

L'elettronica è assemblata all'interno di una scatola metallica comprendente un connettore coassiale tipo F per il segnale proveniente dall'unità esterna (LNB) e un passa-cavo dal quale escono i cavi per la comunicazione seriale e quelli per il collegamento all'alimentatore (Fig. 15). Come si è detto, è possibile impostare via software i parametri operativi del radiometro utilizzando opportuni comandi codificati nel protocollo di comunicazione del dispositivo, automaticamente gestiti dal software *ARIES*. Questi parametri sono:

- *ZERO\_BASE*: è un valore proporzionale alla tensione di riferimento  $V_{rif}$ , mostrata nello schema di principio del radiometro a potenza totale di Fig. 11, utilizzata per impostare un offset sulla linea di base radiometrica. È possibile aggiustare automaticamente il valore di *ZERO\_BASE* attivando la procedura di calibrazione che posiziona il livello di riferimento del segnale ricevuto (corrisponde allo "zero") al centro della scala di misura.

- *GAIN*: è il fattore di amplificazione del segnale rivelato.

- *INTEGRATOR*: è il valore della costante di integrazione  $\tau$  della misura radiometrica, risultato del calcolo di una media mobile eseguito su  $N=2^{INTEGRATOR}$  campioni di segnale acquisiti. Incrementando questo valore si riduce l'importanza della fluttuazione statistica del rumore sulla misura, migliorando la sensibilità del sistema. Come per qualsiasi processo di integrazione della misura, occorre considerare un ritardo nella registrazione del segnale legato al tempo di campionamento dell'informazione, al tempo di conversione del convertitore analogico-digitale e al numero di campioni utilizzati per calcolare la media. Utilizzando la tabella di Fig. 16 è possibile stimare il valore della costante di tempo  $\tau$  (espressa in secondi).

<i>INTEGRATOR</i>	Costante di tempo dell'integratore $\tau$ [s]
0	0.1
1	0.2
2	0.4
3	0.8
4	2
5	3
6	7
7	13
8	26

**Fig. 16:** Costante di tempo dell'integratore in funzione del valore impostato per il parametro *INTEGRATOR*.

- *POL*: seleziona la polarizzazione in ricezione utilizzata nell'unità esterna (LNB).
- *BAND*: seleziona la banda di ricezione dell'unità esterna (LOW BAND = 10.7-11.7 GHz, HIGH BAND = 11.7-12.7 GHz).

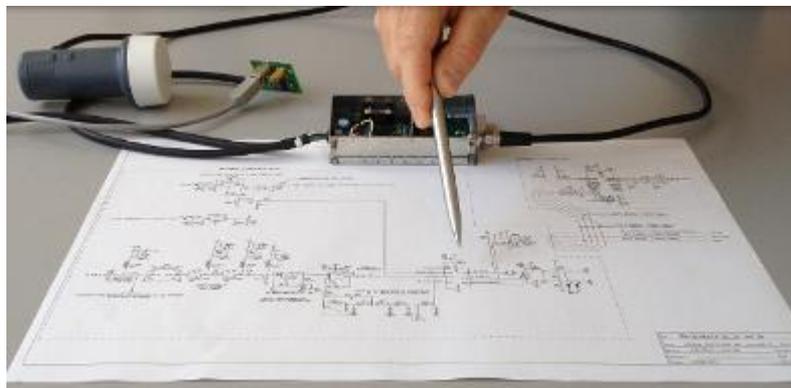
Questi parametri possono essere memorizzati nella memoria interna non volatile del dispositivo.

## 8. RAL10KIT

*RAL10KIT* è un modulo per radioastronomia dedicato agli sperimentatori con un minimo di pratica nei montaggi elettronici che desiderano costruirsi “in casa” il ricevitore per il radiotelescopio. La confezione comprende il modulo radiometrico, la scheda interfaccia USB per il collegamento con il PC, le istruzioni di assemblaggio, il software *ARIES* per l’acquisizione e il controllo del radiometro. I moduli sono assemblati e collaudati: è sufficiente racchiudere tutto in un adatto contenitore, completarlo con un alimentatore, un cavo coassiale e un’antenna con unità esterna (LNB) funzionante nella banda TV-SAT 10-12 GHz. Si è così realizzato il primo radiotelescopio a microonde (Fig. 19).

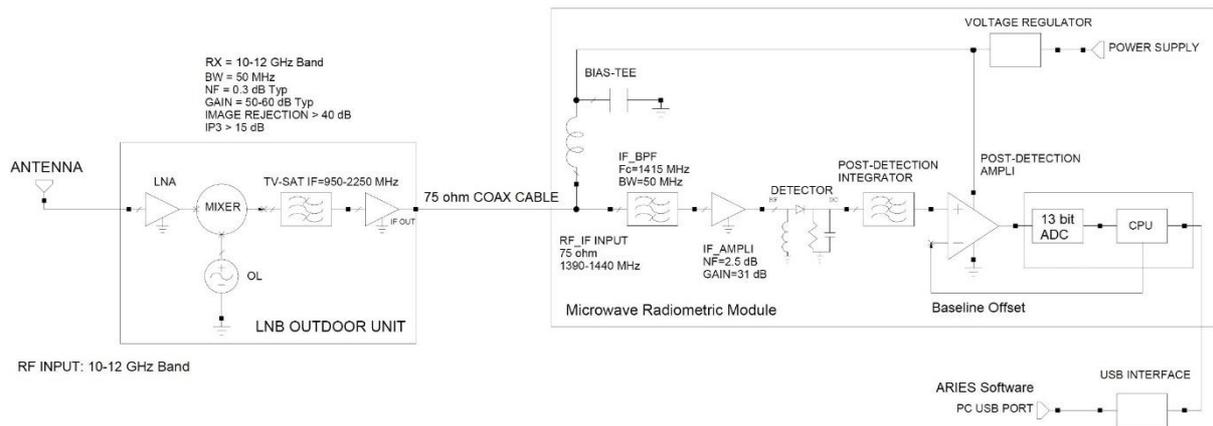


**Fig. 17:** Kit per radioastronomia *RAL10KIT* fornito da RadioAstroLab.

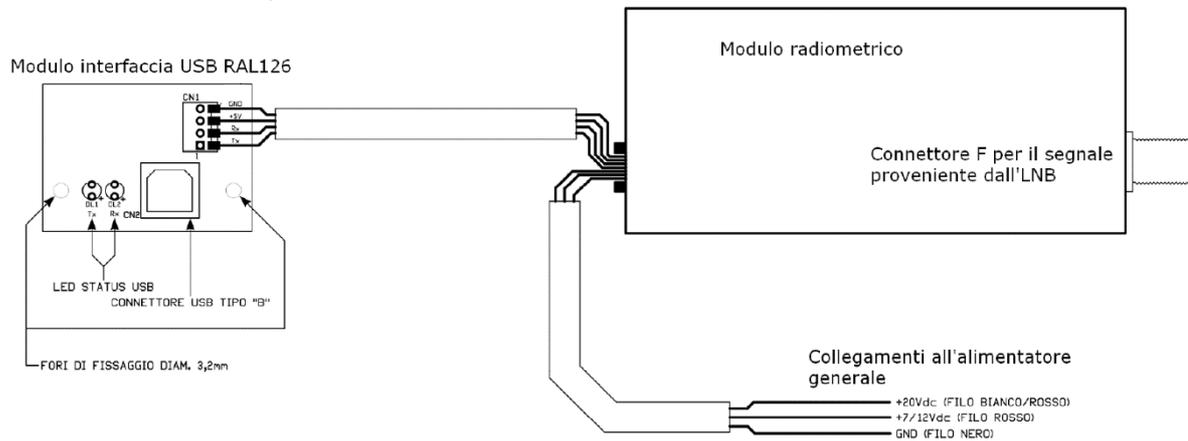


**Fig. 18:** Kit per radioastronomia *RAL10KIT*: il modulo radiometrico è il nucleo centrale del ricevitore.

La Fig. 20 mostra lo schema di cablaggio del gruppo *RAL10KIT* e le informazioni necessarie per il collegamento dei cavi di alimentazione: è possibile utilizzare qualsiasi alimentatore stabilizzato ben filtrato, idoneo a fornire le tensioni e le correnti specificate. È consigliabile racchiudere i moduli, compreso l’alimentatore, in un contenitore metallico che realizza uno schermo per il ricevitore. Come si vede nello schema, il modulo interfaccia USB è stato progettato per il montaggio a pannello: occorrerà predisporre fori e asole per le viti di fissaggio, per i led rosso e verde che segnalano l’attività della comunicazione seriale e per il connettore USB di tipo B.



**Fig. 19:** Struttura di un radiotelescopio a microonde (banda 10-12 GHz) costruito con *RAL10KIT*. Il segnale ricevuto dall'antenna parabolica, amplificato e convertito in frequenza dall'unità esterna (LNB) verso la banda IF standard TV-SAT 950-2250 MHz, è applicato al gruppo *RAL10KIT* che elabora tutte le informazioni e le trasmette al PC tramite un canale seriale USB. Il software *ARIES* acquisisce le misure radiometriche, visualizza i dati come un registratore grafico e controlla i parametri operativi del ricevitore.



**Fig. 20:** Schema di cablaggio del gruppo *RAL10KIT*: il modulo radiometrico (fornito assemblato e collaudato) è contenuto all'interno di una scatola metallica schermata che prevede un connettore coassiale F per il collegamento con il segnale proveniente dall'unità esterna (LNB) (tramite cavo coassiale da 75 Ω per TV-SAT) e un passa-cavo in gomma dal quale escono i collegamenti per l'interfaccia USB e per l'alimentatore.

## 9. Ricevitore RAL10AP

Il ricevitore a microonde *RAL10AP* è un radiometro a potenza totale completo e semplice da utilizzare, uno strumento pronto all'uso racchiuso in un elegante e compatto contenitore di alluminio anodizzato, fornito con un alimentatore esterno da 12 V-2°. È possibile alimentare il dispositivo con una batteria per facilitare misure "sul campo", in località remote dove non è disponibile l'alimentazione da rete. Sul pannello frontale sono presenti i fusibili di protezione (con interruzione segnalata a led) per l'alimentazione principale e per l'alimentazione dell'unità esterna (LNB) attraverso il cavo coassiale (Fig. 21).



**Fig. 21:** Ricevitore *RAL10AP*: si notano (in alto) la presa per l'alimentazione generale a 12 VDC, i porta-fusibili con interruzione segnalata a led per l'alimentazione generale e per l'alimentazione dell'unità esterna LNB attraverso il cavo coassiale (le spie si spengono quando il rispettivo fusibile è bruciato), l'uscita audio di post-rivelazione (BF-OUT) e la porta USB per il collegamento con il PC (i led indicano il flusso dei dati). Sul pannello posteriore (in basso) si trova il connettore F per l'ingresso del segnale (IN RF) proveniente dall'unità esterna.

L'ingresso dello strumento accetta frequenze comprese nella banda 1390-1440 MHz, con caratteristiche identiche a quelle del modulo *RAL10KIT* precedentemente descritto. Un'opzione interessante, disponibile solo su *RAL10AP*, riguarda l'uscita audio di post-rivelazione: è possibile applicare il segnale rivelato a un amplificatore esterno o all'ingresso di una scheda audio per PC in modo da ascoltare il rumore rivelato a scopo di monitoraggio. Questo segnale, proporzionale alla densità di potenza del segnale ricevuto, può essere studiato nel dominio della frequenza utilizzando uno dei tanti programmi gratuiti scaricabili dal web che visualizzano spettrogrammi in banda audio. Come si vede dallo schema a blocchi di Fig. 14, l'uscita audio è prelevata dopo l'amplificatore di post-rivelazione, quindi il suo livello dipende dal livello di calibrazione della linea di base radiometrica. Tramite gli altoparlanti del PC è possibile ascoltare il rumore audio.

## 10. Impostazione dei parametri operativi

Il livello del segnale all'uscita del radiotelescopio è proporzionale alla potenza associata alla radiazione ricevuta, quindi alla *temperatura di brillantezza* della regione di cielo osservata 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 6-10 K (il cosiddetto *cielo freddo*), corrispondente alla minima temperatura misurabile. Orientando l'antenna verso il terreno la temperatura sale fino a valori dell'ordine di 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.

Quando un tipico radiotelescopio amatoriale 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 300-400 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, come precedentemente descritto.

In questo paragrafo suggeriremo come impostare i parametri del ricevitore prima di iniziare un'osservazione radioastronomica.

Per prima cosa occorre alimentare il ricevitore e attendere che lo strumento abbia raggiunto un equilibrio termico. Le instabilità del sistema (il problema principale dei radiometri a potenza totale) sono principalmente causate dalle variazioni della temperatura ambiente e della temperatura interna del radiometro: 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 osservando 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 *ARIES*.

Il fattore di amplificazione *GAIN* dovrebbe essere impostato su valori intermedi (tipicamente *GAIN=7*). 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 valori minimi di prova (per evitare saturazioni del sistema ricevente), successivamente ottimizzando con ripetute scansioni della stessa regione di cielo. Per osservare il Sole è consigliabile scegliere *GAIN=7* (o valori inferiori se il segnale tende a saturare). Per osservare la Luna conviene partire con *GAIN=10*. Tuttavia, 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 *INTEGRATOR* in modo da stabilizzare la misura. Conviene iniziare con valori minimi (0.1 secondi), 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. È sempre possibile incrementare ulteriormente l'integrazione del segnale ricevuto aggiustando il parametro *SAMPLING* nel programma *ARIES*.

Il parametro *ZERO\_BASE* stabilisce il livello di riferimento (offset) della linea di base radiometrica: la sua corretta impostazione dipende dall'amplificazione globale del ricevitore. Come regola generale, si dovrebbe scegliere *ZERO\_BASE* 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 il valore *ZERO\_BASE* o attivare la calibrazione automatica in modo da posizionare correttamente la traccia.

Utilizzando adatte unità esterne (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 amatoriale 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 a 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.

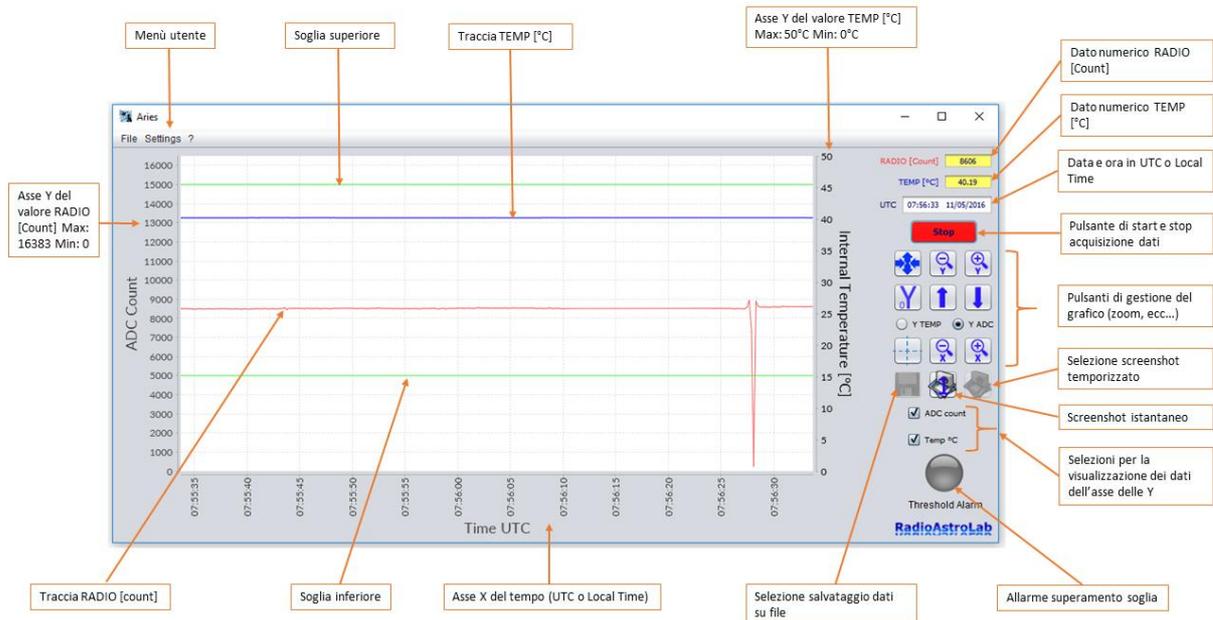
È sempre opportuno ricordare come il fattore principale che limita la stabilità e l'accuratezza della risposta radiometrica sono le escursioni termiche sperimentate dal radiometro, soprattutto dall'unità esterna (LNB): queste variazioni di temperatura provocano minime variazioni nel guadagno del front-end e nei parametri interni dello strumento sufficienti a causare significative fluttuazioni nel livello di riferimento, data la notevole amplificazione del sistema. 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 *ARIES* 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 a 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.

## **11. Il software di controllo e di acquisizione ARIES**

*ARIES* (Fig. 22) è un programma per Personal Computer (PC) avanzato e semplice da utilizzare, sviluppato per gestire l'acquisizione automatica e il controllo dei ricevitori Total-Power a microonde della serie *RALIO*. Concepito per ottimizzare la robustezza e la flessibilità nella comunicazione propria di questi dispositivi, il programma controlla i parametri operativi dello specifico modello utilizzato: nello stile di un registratore grafico, è visualizzato l'andamento delle misure nel tempo e sono archiviate le informazioni acquisite secondo varie modalità e formati. La variazione del dato acquisito è visualizzata come una traccia mobile di colore rosso, rappresentata in un diagramma rettangolare dove l'ascissa è la variabile temporale (espressa in Tempo Locale o in tempo UTC) e l'ordinata è l'intensità del segnale espressa in unità relative *ADC\_count*. Dato che non è attualmente disponibile la gestione di una procedura di calibrazione del segnale ricevuto in unità assolute di temperature di brillantezza, le intensità del

segnale radiometrico sono visualizzate in unità di conteggio del convertitore analogico-digitale interno (ADC), su una scala che varia da 0 fino a 8191 (risoluzione di misura pari a 13 bit).



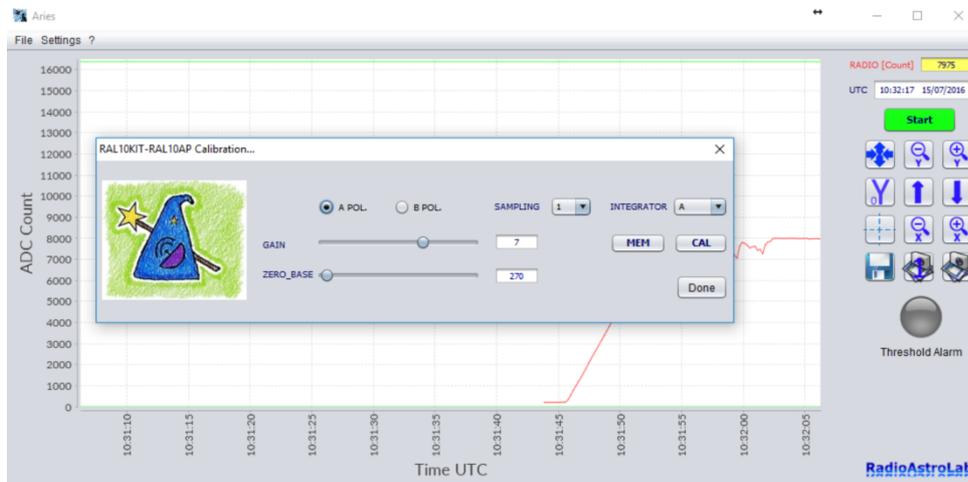
**Fig. 22:** Finestra principale del programma *ARIES* (le impostazioni sono relative al ricevitore *RAL10*).

Con *ARIES* è possibile controllare in modo semplice e immediato tutti i parametri di un singolo ricevitore, oppure gestire sessioni di misura differenti e contemporanee con più dispositivi (anche dello stesso tipo) collegati ad un unico PC: il protocollo di comunicazione implementato negli strumenti e l'interfaccia del programma consentono una gestione molto affidabile della comunicazione, perfetta anche nelle applicazioni che prevedono misure continuative per tempi lunghi e in località remote non presidiate da operatori.

Concepito come sistema di acquisizione dati per stazioni radioastronomiche amatoriali, *ARIES* 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. La capacità di registrazione automatica dei dati e la possibilità di impostare opportune soglie di allarme al verificarsi di eventi nel segnale misurato, assicurano semplicità, versatilità e praticità nella gestione della stazione radioastronomica. Nella Fig. 22 si vede la consolle principale di visualizzazione e di controllo del programma: si tratta di una finestra grafica che visualizza l'andamento nel tempo del segnale radiometrico acquisito, dove sono presenti i pulsanti di comando più frequentemente utilizzati per la gestione dell'acquisizione dei dati, della rappresentazione grafica delle misure e della registrazione automatica. Sono disponibili versioni del programma per le più diffuse piattaforme per PC.

La finestra mostrata nella Fig. 23 contiene i comandi necessari per impostare i parametri dello strumento. È possibile selezionare ogni quanti campioni ricevuti deve essere aggiornata la misura scegliendo il periodo di campionamento *SAMPLING*, funzione che include il calcolo del valore medio sui campioni acquisiti, quindi una ulteriore integrazione del segnale in aggiunta a quella stabilita dal parametro *INTEGRATOR*: il programma aggiornerà le tracce grafiche dopo aver acquisito il numero di campioni impostato, quindi calcolerà la media su quel numero. Il pulsante *CAL* attiva la calibrazione automatica della linea di base ("zero" di riferimento) per la misura radiometrica. È possibile salvare nella memoria interna del ricevitore

i valori dei parametri operativi tramite il comando *MEM*: in questo modo, 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.



**Fig. 23:** Finestra dei comandi per l'impostazione dei parametri del ricevitore.

Utilizzando i bottoni di zoom dell'asse Y si aggiusta la risoluzione delle ordinate, con i pulsanti freccia verso l'alto o verso il basso si posiziona la traccia sul grafico in modo che sia completamente visibile in tutta la sua escursione dinamica (sono comandi che consentono la traslazione dell'intera 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. La velocità massima impostabile è di sessanta secondi per schermata: la traccia impiegherà un minuto per coprire tutta la finestra grafica. Nel menu delle impostazioni del programma è possibile scegliere il formato della rappresentazione del tempo (in UTC oppure Tempo Locale).

Oltre alla semplice visualizzazione grafica, *ARIES* registra le misure in vari formati. È possibile scegliere di salvare i dati in formato testo o come immagine utilizzando i pulsanti dedicati alla registrazione dei dati. Per controllare l'andamento del segnale ricevuto durante una sessione di misura, il programma offre la possibilità di impostare due soglie di controllo (superiore e inferiore) che, se superate dalla traccia radiometrica, attiveranno un allarme visivo colorando di rosso una spia e attivando un allarme acustico, se desiderato. Le soglie si presentano come due righe orizzontali di colore verde sulla finestra grafica. Ulteriori dettagli sulle caratteristiche e sulle funzioni di *ARIES*, così come le versioni aggiornate del programma, sono reperibili sulle pagine del sito di *RadioAstroLab s.r.l.* e sul manuale d'uso, scaricabile da: [http://www.radioastrolab.it/pdf/ARIES\\_Manuale\\_IT\\_11.pdf](http://www.radioastrolab.it/pdf/ARIES_Manuale_IT_11.pdf)

## 12. Calibrazione del radiotelescopio

Qualsiasi strumento analizza una grandezza secondo una scala di specificate unità di misura. Questo è vero anche per un radiotelescopio: quando si devono eseguire misure assolute, è necessario calibrare lo strumento, quindi stabilire una procedura di taratura per ottenere una risposta coerente con una scala assoluta di *temperatura di brillantezza* (o di unità di flusso). Inoltre, le tolleranze costruttive, le condizioni ambientali e le variazioni parametriche dei dispositivi attivi causano variazioni nelle caratteristiche del ricevitore e rendono ogni strumento unico

nella sua risposta: sarà difficile confrontare le misure eseguite da differenti radiotelescopi o quelle dello stesso impianto effettuate in tempi diversi. Osservando ripetutamente una radiosorgente è possibile riscontrare cambiamenti di intensità nella sua emissione: è importante capire se tali fluttuazioni sono dovute a reali variazioni del flusso o a variazioni indesiderate nella risposta dello strumento. Per questi motivi sarebbe desiderabile riferirsi ad un sistema di misurazione universale. La procedura di calibrazione di un radiotelescopio 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 dell'ADC).

In questo paragrafo forniremo alcuni suggerimenti per calibrare la scala di misura di un radiotelescopio dilettantistico, in modo semplice e pratico, osservando sorgenti di riferimento facilmente disponibili. Come esempio, descriveremo la calibrazione di un impianto che utilizza il ricevitore *RAL10AP* e un'antenna parabolica offset per la ricezione satellitare in banda 10-12 GHz, simile a quello mostrato nella Fig. 13. La tecnica è semplice: anche se approssimata, è adeguata alle esigenze di uno strumento amatoriale, utilizzabile 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, è possibile calibrare lo strumento 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  $T_{sky}$  del cielo allo zenit può essere stimata utilizzando la procedura descritta in Appendice A. Trascurando il contributo di rumore dovuto alla radiazione captata dai lobi secondari dell'antenna, si utilizza il valore  $T_{sky}=6.8$  K.

- 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) è  $T_{soil}$  e la sua *emissività* a microonde vale  $\eta=0.95$  (un valore medio, stimato), la sua temperatura di brillantezza sarà:

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

Essendo prossimo a 1 il valore di emissività, si è trascurata la radiazione del cielo riflessa dal terreno verso il radiometro.

Se le risposte dello strumento quando si misurano i target con differenti temperature di brillantezza  $T_{b\_soil}$  e  $T_{sky}$  sono, rispettivamente,  $count_{soil}$  e  $count_{sky}$ , si può esprimere la temperatura equivalente di antenna  $T_a$  in funzione della corrispondente risposta radiometrica  $count$  come:

$$T_a(count) = T_{b\_soil} + (T_{b\_soil} - T_{sky}) \cdot \frac{count - count_{soil}}{count_{soil} - count_{sky}}$$

equazione di una retta nel piano  $\{count, T_a\}$ .

La temperatura  $T_a$  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. La retta di

calibrazione appena trovata converte le misure radiometriche espresse in unità arbitrarie di acquisizione dell'ADC in una scala assoluta di temperature, quindi determina la caratteristica di taratura dello strumento.

Questa semplice procedura è approssimata, anche se adeguata alle nostre esigenze e fornisce una stima accettabile sulla dinamica della scala di misura in K dello strumento. La sua accuratezza dipende da molti fattori, strumentali e ambientali: incidono molto le stime sulla temperatura di brillantezza del cielo  $T_{sky}$  e sull'emissività  $\eta$  del terreno (il *target caldo*), la costanza dei parametri del radiometro (stabilità, soprattutto con la temperatura) e la linearità della sua caratteristica potenza applicata/tensione rivelata. La Fig. 24 mostra le registrazioni della risposta di un radiotelescopio che utilizza il ricevitore *RAL10AP* quando l'antenna è orientata verso il terreno (si è scelto un vasto appezzamento di terreno uniforme, appena arato, per il quale abbiamo stimato  $\eta \approx 0.95$ ) 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 ai due target caldo e freddo per calcolare, utilizzando la precedente formula, la retta di calibrazione dello strumento.

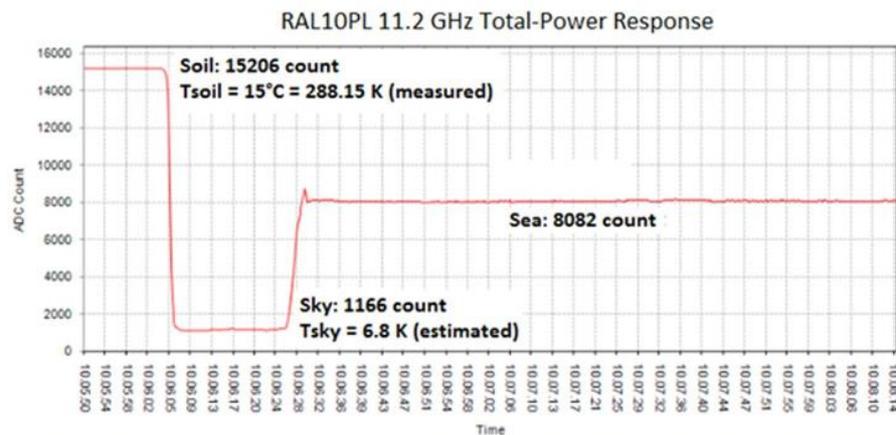


Fig. 24: Misure del terreno e del cielo allo zenit per la calibrazione di un radiotelescopio (ricevitore *RAL10AP*).

### 13. Stima della temperatura di brillantezza del cielo a 10-12 GHz

La seguente stima della temperatura di brillantezza del cielo allo zenit, nella banda di frequenza 10-12 GHz, considera trascurabile il contributo del rumore di antenna dovuto ai disturbi atmosferici naturali (idrometeore, fulmini, scariche elettriche temporalesche) e artificiali. Si suppone, quindi, che l'unica sorgente di radiazione dell'atmosfera sia il rumore dovuto all'assorbimento atmosferico dei gas e delle molecole costituenti, espresso come temperatura radiante dell'atmosfera  $T_{atm}(f, \theta)$ , che dipende dalla frequenza  $f$  e dall'angolo di elevazione  $\theta$  dell'antenna rispetto all'orizzonte. Per la sua valutazione si è utilizzato il grafico della Fig. 25, estratto dal documento: "Recommendation ITU-R P.372-12 (07/2015) Radio Noise", che calcola la temperatura di brillantezza dell'atmosfera utilizzando l'equazione del trasferimento radiativo nell'approssimazione di Rayleigh-Jeans, escludendo i contributi di rumore dovuti al fondo cosmico a microonde ( $T_{CMB}=2.725$  K), all'emissione della galassia e di altre sorgenti cosmiche come il Sole e la Luna, al terreno captato dai lobi laterali dell'antenna. Estrapolando i dati dal grafico, nella banda di frequenze di 10-12 GHz, si ricava una tabella di valori, interpolando i quali si può calcolare il contributo di rumore dell'atmosfera dovuto ai fenomeni di assorbimento (modello dell'atmosfera U.S. Standard Atmosphere, 1976), funzione solo dell'angolo di elevazione dell'antenna rispetto all'orizzonte (Fig. 26).

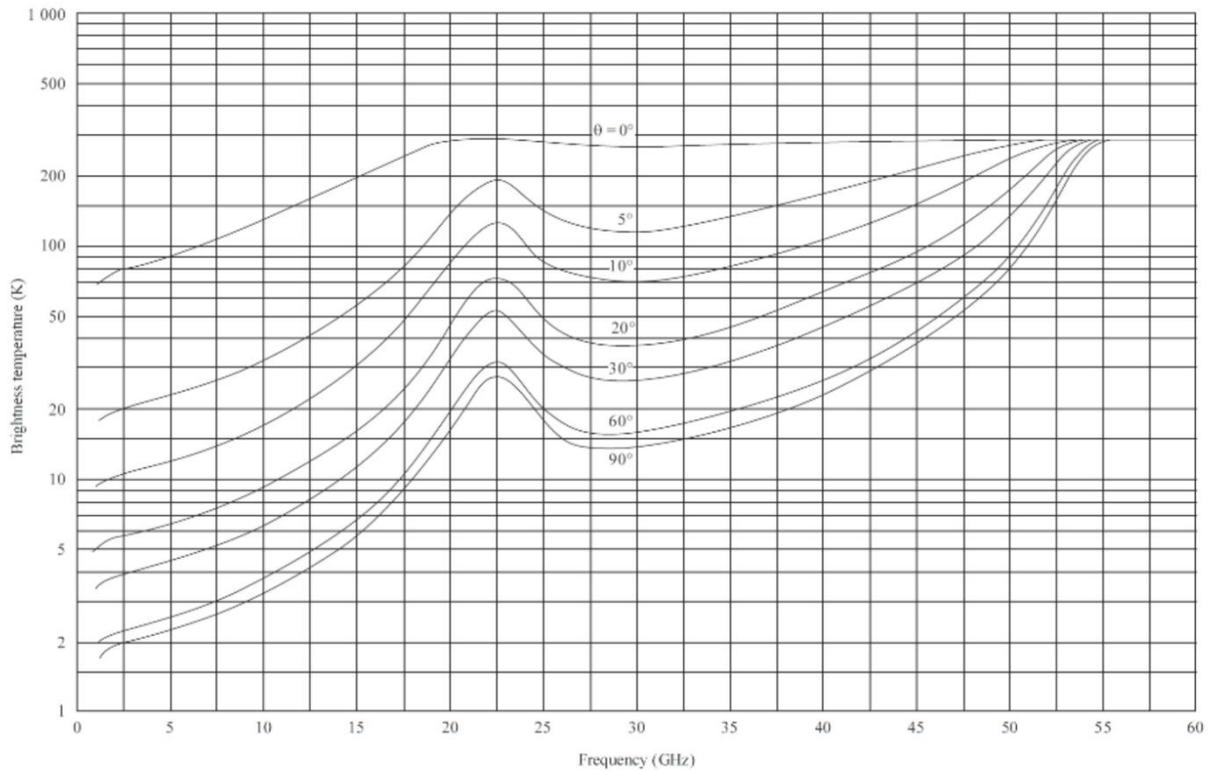


Fig. 25: Temperatura di brillantezza dell'atmosfera simulata (Recomm. ITU-R P.372-12 (07/2015) Radio Noise).

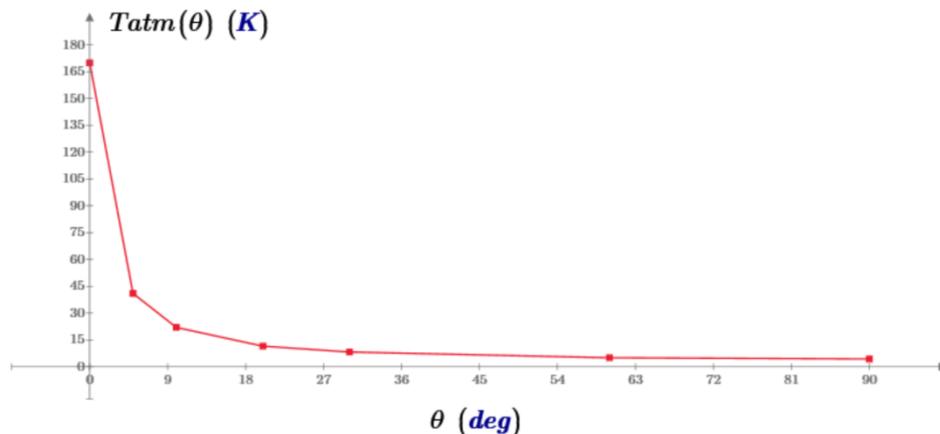
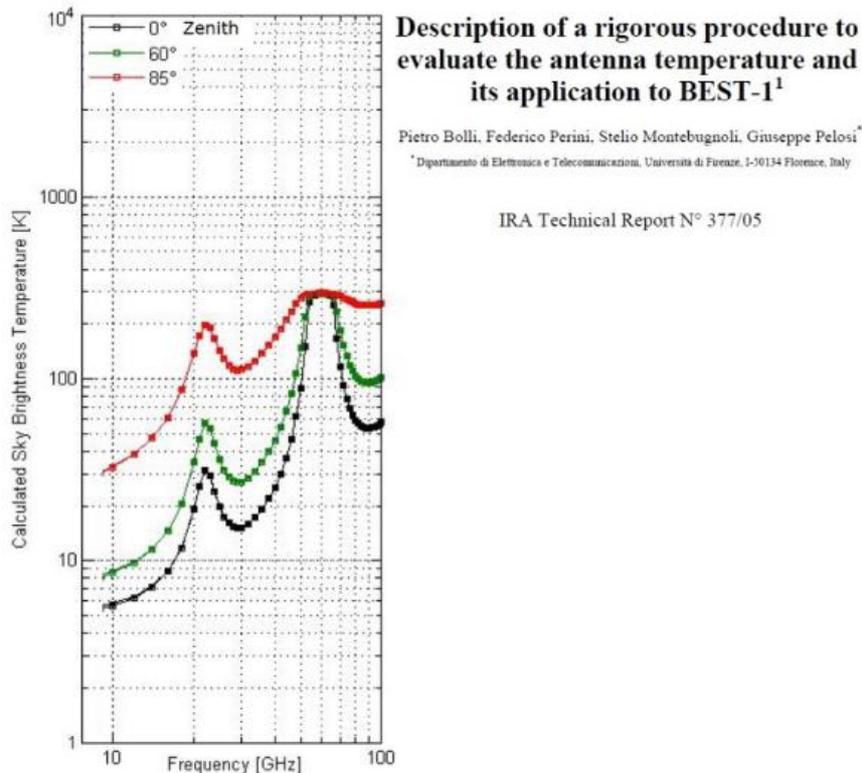


Fig. 26: Temperatura di brillantezza dell'atmosfera a 10-12 GHz, in funzione dell'angolo di elevazione dell'antenna, ottenuta interpolando i valori ottenuti campionando il precedente grafico.

Sommando il contributo di rumore del fondo cosmico a microonde  $T_{CMB}$  al valore della temperatura di brillantezza dell'atmosfera allo zenit ( $\theta=90^\circ$ ) ottenuta dal precedente grafico, si trova una temperatura di brillantezza del cielo allo zenit pari a  $T_{sky}(90^\circ)=7.025$  K. Questo valore può essere utilizzato nella procedura di calibrazione dei radiometri come temperatura del *target freddo*. Se si desidera considerare anche la radiazione proveniente dal terreno, captata attraverso i lobi secondari dell'antenna, si può aggiungere un contributo dell'ordine di 3-5 K, in funzione delle caratteristiche dell'antenna e del massimo livello dei suoi lobi secondari. Questa approssimazione è generalmente accettabile per radiotelescopi amatoriali orientati sul cielo allo zenit, sufficientemente distanti da ostacoli o costruzioni.

Per confronto, è utile tentare una stima alternativa della temperatura di brillantezza del cielo allo zenit utilizzando altri dati. Si è utilizzato il grafico di Fig. 27, che calcola la temperatura di brillantezza dell'atmosfera utilizzando l'equazione del trasferimento radiativo (nell'approssimazione di Rayleigh-Jeans), includendo i contributi di rumore dovuti al fondo cosmico e alla galassia.



**Fig. 27:** Temperatura di brillantezza dell'atmosfera (IRA Technical Report N. 377/05).

Estrapolando i dati per la banda di 10-12 GHz si vede come, quando l'antenna del radiometro è orientata verso il cielo sullo zenit, si misura una temperatura di brillantezza dell'ordine di  $T_{sky}(90^\circ)=7$  K, in accordo con la precedente valutazione.