

STRUMENTI PER RADIOASTRONOMIA AMATORIALE

Utilizziamo RAL10KIT e RAL10AP per costruire un radiotelescopio a microonde

FLAVIO FALCINELLI

Vers. 1.0 del 7 ottobre 2016

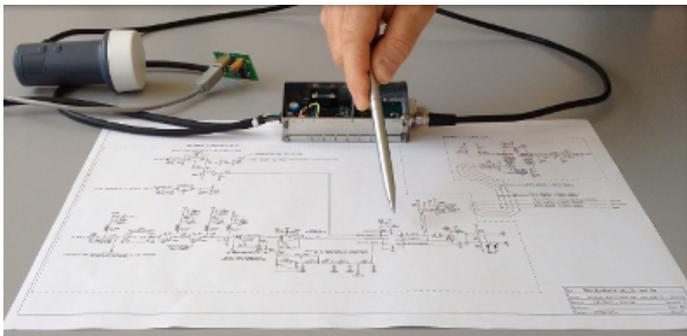
RadioAstroLab s.r.l.

Strada della Marina, 9/6 - 60019 Senigallia (AN) - Italy

<http://www.radioastrolab.it/>

<http://www.radioastrolab.com/>





Costruisci il tuo primo radiotelescopio a microonde con i prodotti RadioAstroLab.

Capitolo 1

Le basi della radioastronomia

1.1 Introduzione

Il cielo può essere osservato in tanti modi: lo spettacolo offerto è sempre magnifico ed entusiasmante. Si rimane stupiti contemplando le stelle 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 avvicinarsi all'oculare di un 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 wifi, 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 "vedere" altre "finestre" dello spettro elettromagnetico servono differenti strumenti, ognuno specializzato per misurare la radiazione in una certa banda di frequenze.

Questo documento ha un obiettivo molto ambizioso: vorremmo aggiungere un piccolo tassello di conoscenza per rendere accessibile la radioastronomia a tutti.

E' 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 un minimo di apprendimento, di passione e di 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. 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.

Si continua in questa direzione con rinnovato vigore, mantenendo l'obiettivo primario della divulgazione, dell'economia e della semplicità di utilizzo: ora abbiamo 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

FIGURA 1.1: Il modulo radiometrico *RAL10KIT*.FIGURA 1.2: Il ricevitore *RAL10AP*.

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 assicura 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 un certa pratica ed esperienza con il montaggio dei circuiti elettronici e, soprattutto, con la loro messa a punto.

Se, d'altra parte, 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 kit pre-assemblato *RAL10KIT* (figura 1.1) e il ricevitore *RAL10AP* (figura 1.2). 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 (figura 1.3). Realizzare ed imparare ad utilizzare uno strumento di questo tipo è didatticamente molto interessante, poiché che consente un approccio semplice

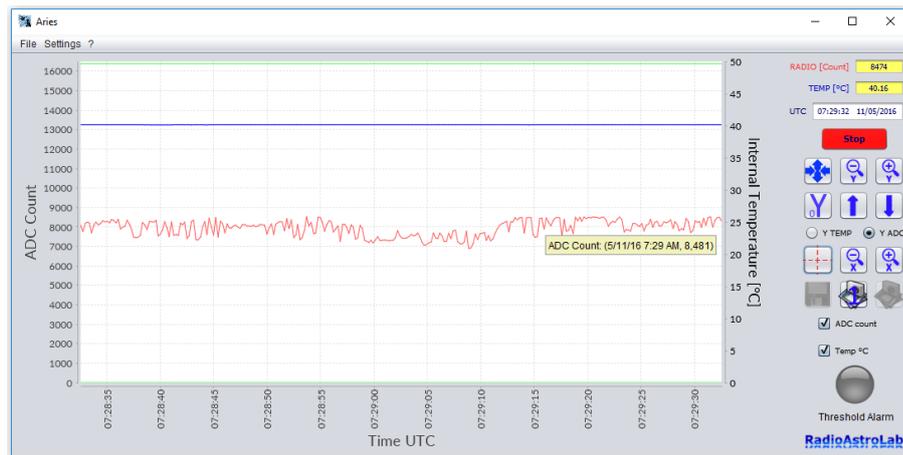


FIGURA 1.3: Il software di controllo e di acquisizione *Aries*, fornito gratuitamente con tutti i ricevitori della serie *RAL10*.

e immediato alla radioastronomia e alle tecniche strumentali di base.

RAL10KIT è stato pensato per chi ama costruire il ricevitore e possiede un minimo di pratica nei montaggi elettronici: occorre assemblare il modulo base all'interno di un adatto contenitore completando il lavoro con un alimentatore, anche autocostruito.

RAL10AP è un ricevitore con caratteristiche tecniche paragonabili a quelle di *RAL10KIT*, ed è fornito 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 (11.2 GHz) basato su questi dispositivi. Lo sperimentatore completa lo strumento aggiungendo pochi (ed economici) moduli commerciali provenienti dal mercato della TV satellitare: 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 con *RAL10KIT* o *RAL10AP* è possibile utilizzare qualsiasi prodotto concepito per la ricezione satellitare in banda 10-12 GHz. Questi componenti sono reperibili ovunque 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 al modulo *RAL10KIT* o al ricevitore *RAL10AP* si realizza un radiometro funzionante a 11.2 GHz adatto allo studio della radiazione termica del Sole, della Luna e delle radiosorgenti più intense, con sensibilità principalmente funzione delle dimensioni dell'antenna. E' uno strumento completo, che prevede anche il circuito interfaccia USB per la comunicazione con il PC di gestione equipaggiato con il nostro software *Aries*. Lo sperimentatore deve solo collegare i componenti secondo le istruzioni fornite: il radiotelescopio è pronto per iniziare le osservazioni.

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, la "fantasia" e la competenza spese per ampliare e perfezionare le prestazioni di base.

Data la piccola lunghezza d'onda, è relativamente semplice costruire strumenti con buone caratteristiche direttive e 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

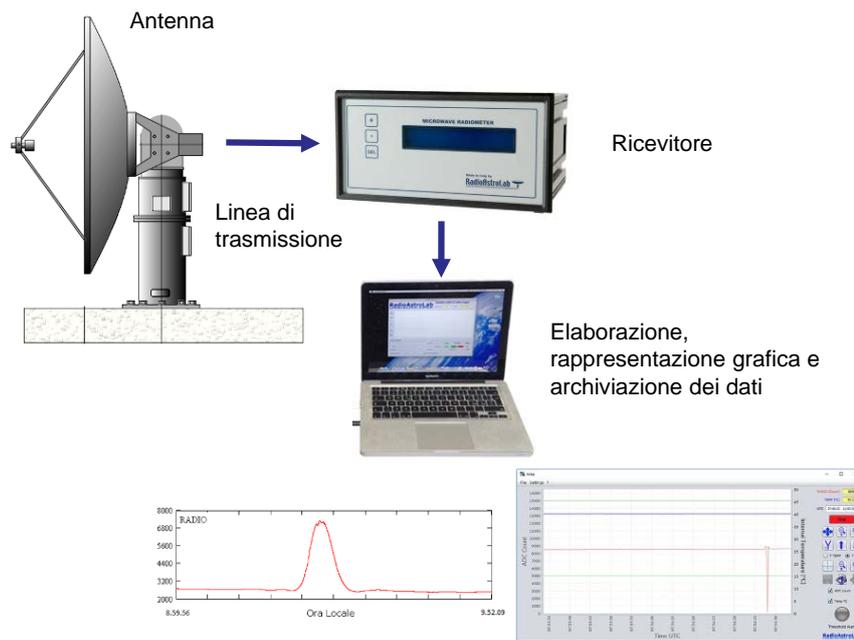


FIGURA 1.4: Schema di principio di un radiotelescopio a microonde.

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.

1.2 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 il termine *radiosorgente* si indica qualsiasi emettitore naturale di onde radio: nell'uso comune questo termine è diventato sinonimo di sorgenti cosmiche di onde radio.

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 (figura 1.4).

In onore a K. Jansky, l'iniziatore della radioastronomia, è stata definita l'unità di misura della densità di flusso delle radiosorgenti: $1 Jy = 10^{-26} W/(m^2 \cdot Hz)$. Da questa espressione si vede come un radiotelescopio misuri una potenza radiante proveniente dal cielo, precisamente la potenza (W) che incide sulla superficie di captazione dell'antenna (m^2), compresa nella banda passante del ricevitore (Hz).

Un modo alternativo, molto comodo per esprimere la potenza associata alla radiazione "raccolta" dall'antenna, è la cosiddetta *temperatura di brillantezza*: effettivamente un radiotelescopio misura la temperatura di rumore equivalente dello scenario "visto" dall'antenna. I termini "rumore" ed "equivalente" saranno chiariti in seguito. Come si vedrà, è

possibile dimostrare che la temperatura di brillanza di una radiosorgente è direttamente proporzionale alla sua potenza irradiata.

Se orientiamo l'antenna dello strumento in una data regione del cielo, in particolare verso una radiosorgente che si evidenzia rispetto al fondo, misuriamo un incremento nell'intensità del segnale ricevuto (per la precisione, una potenza) proporzionale alla *temperatura di brillanza* 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, almeno entro una limitata banda di frequenze.

Si può immaginare un radiotelescopio come un termometro del cielo: la temperatura misurata, cioè la *temperatura di brillanza*, sarà proporzionale alla temperatura fisica della regione "vista" dall'antenna tramite un coefficiente detto *emissività*. L'*emissività* di un materiale è una misura della sua capacità di irradiare energia ed è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche della radiosorgente e della frequenza. Un corpo nero ha *emissività* uguale a 1, quindi una temperatura di brillanza coincidente con la sua temperatura fisica, mentre un corpo materiale (corpo grigio) ha *emissività* compresa fra 0 e 1, quindi una temperatura di brillanza inferiore alla sua temperatura fisica.

Come vedremo, la tecnologia di un radiotelescopio non è sostanzialmente differente da quella di un apparecchio radio-ricevente casalingo (come, ad esempio, un televisore, un'autoradio o un telefono cellulare): ovviamente, alcune caratteristiche sono specializzate e le prestazioni ottimizzate per misurare i debolissimi segnali provenienti dallo spazio. In radioastronomia è necessario (e piuttosto difficile...) evidenziare il debolissimo rumore prodotto dalle radiosorgenti (segnale utile) rispetto al rumore generato dall'elettronica dello strumento e dall'ambiente (segnale indesiderato) che, generalmente, è molto intenso: questi "fruscii" di fondo, elettricamente simili a quelli che ascoltiamo quando non è sintonizzata alcuna stazione in una radio FM, hanno identica natura e sono, in linea di principio, indistinguibili.

1.3 L'atmosfera terrestre

La classificazione ufficiale delle bande di frequenza dello spettro radio è riportata nella figura 1.5.

La nostra atmosfera limita le frequenze utilizzabili per le osservazioni radioastronomiche dalla superficie terrestre, dato che si comporta come una vera e propria barriera per la radiazione elettromagnetica proveniente dallo spazio. Infatti, la misura diretta della radiazione cosmica è limitata a due "finestre" dello spettro elettromagnetico, quella compresa tra circa 0.3 e 0.8 micrometri (banda del visibile, con ampiezza di circa un'ottava) e quella compresa tra circa 1 centimetro e 1 metro di lunghezza d'onda (banda radio, con ampiezza superiore a 10 ottave). 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 (figure 1.10, 1.11 e A.1).

Per questi motivi, come si vede dai grafici della figura 1.7, l'intervallo delle frequenze radio utili per le osservazioni radioastronomiche da terra è compreso fra circa 20 MHz e circa 20 GHz.

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

FIGURA 1.5: Classificazione in bande di frequenza dello spettro radio.

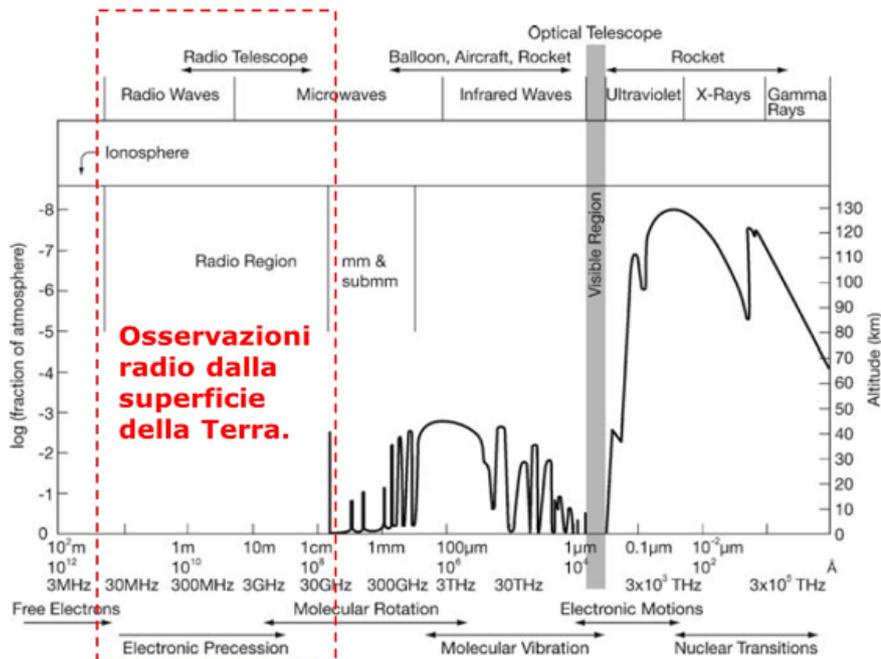


FIGURA 1.6: Rappresentazione schematica dello spettro elettromagnetico: è stata evidenziata la "finestra" radio.

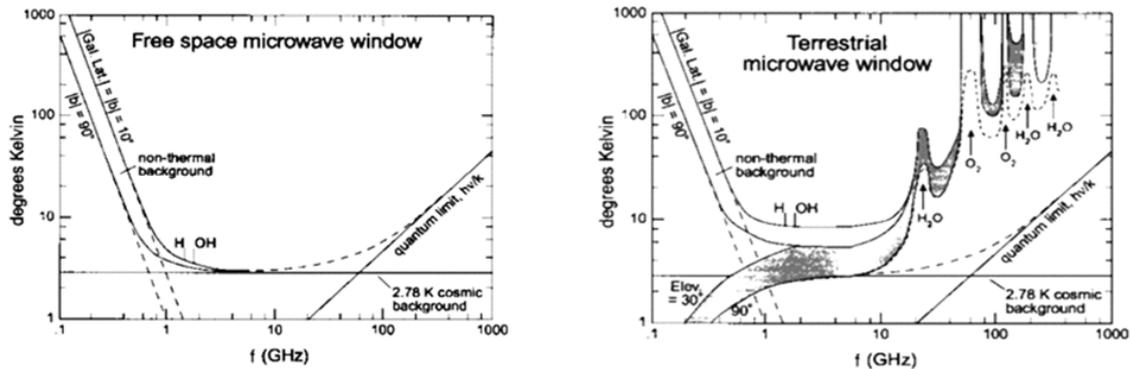


FIGURA 1.7: Effetti dell'atmosfera terrestre, ben visibili confrontando i grafici che rappresentano la "finestra" radio dello spettro elettromagnetico vista da terra e vista da un radiotelescopio operante nello spazio.

1.4 Radioastronomia amatoriale

Ammirando la tecnologia e l'imponenza strutturale dei radiotelescopi professionali, per non parlare dei 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. E' necessario comprendere i limiti raggiungibili con l'attività amatoriale evidenziando, comunque, le numerose e interessanti possibilità di sperimentazione. E' indispensabile 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 un pizzico di 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, proporrò 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 per sviluppi futuri.

Tutti possono costruire un radiotelescopio per esplorare l'affascinante mondo della

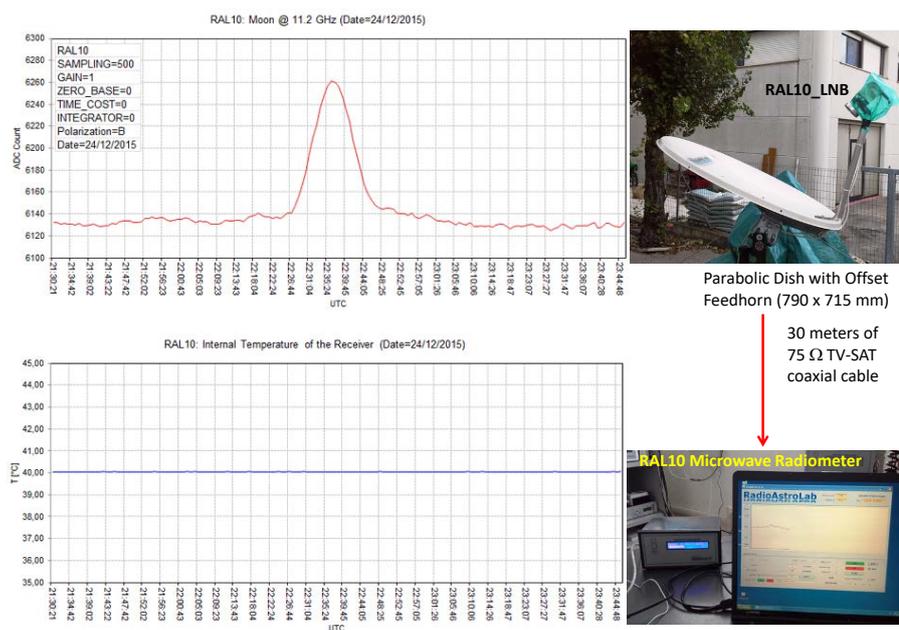


FIGURA 1.8: Osservazione del transito lunare con un radiotelescopio amatoriale basato sul ricevitore RAL10.

radioastronomia amatoriale.

1.5 Come, cosa e dove guardare

L'osservazione radioastronomica "per eccellenza" (la più semplice) consiste nel determinare 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 (la cosiddetta *registrazione al transito*). Si orienta il radiotelescopio nel punto celeste dove è previsto, nel suo moto apparente, il transito della radiosorgente e si attende la formazione della classica traccia "a campana" nel software di acquisizione (figura 1.8).

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 "ad inseguimento" delle 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? Sarà chiaro fra un attimo.

L'antenna è il componente più importante di un radiotelescopio, essendo il collettore della radiazione cosmica: la sensibilità e le prestazioni dello strumento saranno quindi proporzionali alle sue dimensioni (trascuriamo, per un attimo, problemi economici, di spazio e di installazione). E' altrettanto noto che, fissati i requisiti in sensibilità e nel potere risolutivo per il radiotelescopio, le dimensioni necessarie per l'antenna aumentano considerevolmente al diminuire della frequenza operativa. Solo 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:

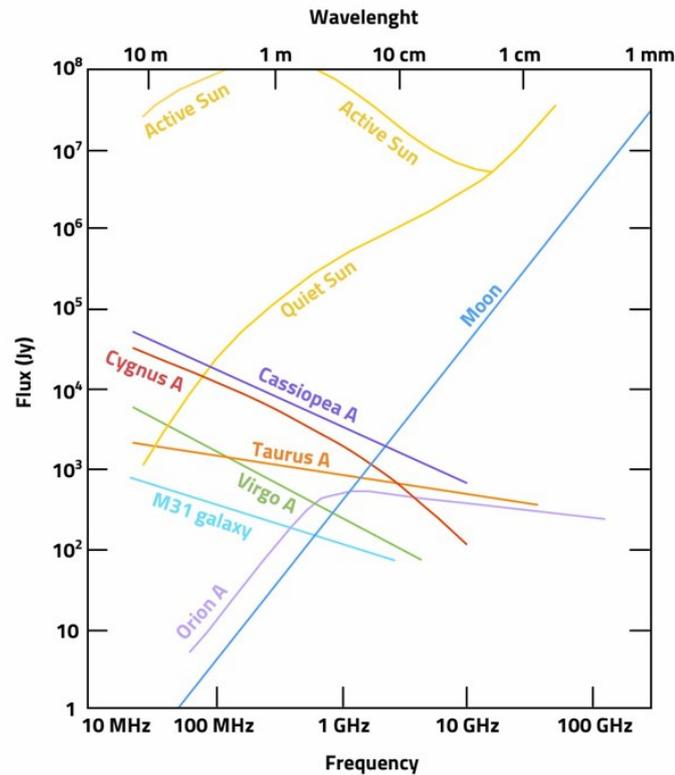


FIGURA 1.9: Spettri delle principali radiosorgenti nella banda radio.

- 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 propri degli strumenti amatoriali 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 figura 1.9, 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 (detto *non termico*) che incrementa l'intensità dell'emissione al diminuire della frequenza.

Tuttavia, occorre considerare "l'affollamento" radio nella zona dove installeremo il radiotelescopio, dovuto alla presenza di varie interferenze. I disturbi artificiali, molto intensi nelle zone urbane e industrializzate, sono un grosso problema per l'osservazione radioastronomica: lo spettro radio è praticamente saturo di ogni sorta di segnale.

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 figura 1.11 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 a 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, elettromagneticamente più tranquilla, 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 ad un livello di parità fra "pro" e "contro". Decisive saranno le considerazioni tecnologiche ed economiche.

Un radiotelescopio dilettantistico "per tutti", 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 parti e moduli commerciali economici e facilmente reperibili. Tutto ciò è possibile grazie alla diffusione della ricezione TV satellitare nella banda 10-12 GHz e alla reperibilità di antenne, amplificatori, cavi e un'infinità di 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 di un radiotelescopio. Anche la reperibilità commerciale di questo delicato componente gioca un ruolo fondamentale. Se consideriamo che, a parità di guadagno dell'antenna (è una misura della sua attitudine a captare deboli segnali in determinate direzioni dello spazio), le sue dimensioni (quindi peso e 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 da 1 metro di diametro per TV-SAT funzionante a 10-12 GHz. D'altra parte, un'antenna a riflettore parabolico è la 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 si "vedranno" 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.

1.6 L'antenna

In un radiotelescopio l'antenna trasforma l'energia elettromagnetica incidente in una differenza di potenziale successivamente 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.

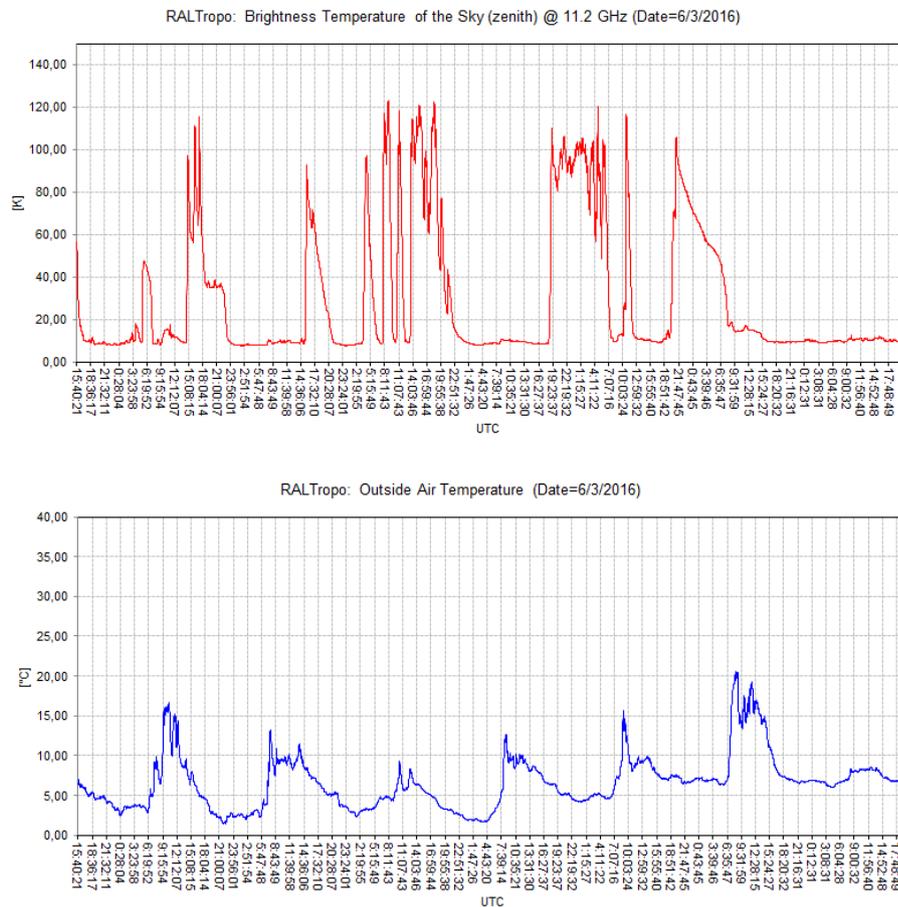


FIGURA 1.10: *Temperatura di brillantezza* del cielo allo zenit misurata da un radiometro a 11.2 GHz. Si registrano ampie variazioni nell'emissione propria dell'atmosfera dovuta alla presenza di formazioni nuvolose portatrici di pioggia e di precipitazioni (corrispondenti ai picchi di segnale nella registrazione). Mentre il cielo sereno e asciutto in una zona libera da radiosorgenti (a 10-12 GHz) è uno scenario molto "freddo", caratterizzato da una *Temperatura di brillantezza* inferiore a 10 K, in presenza di idrometeorite diventa un oggetto molto più "caldo", con temperature fino a circa 200 K se le precipitazioni sono molto intense. Si vede come, a queste frequenze operative, le perturbazioni troposferiche siano importanti sorgenti di interferenza per le osservazioni radioastronomiche, mascherando la debole radiazione proveniente dallo spazio esterno. Gli effetti dei disturbi troposferici diventano meno rilevanti a frequenze inferiori (grafico di figura 1.11).

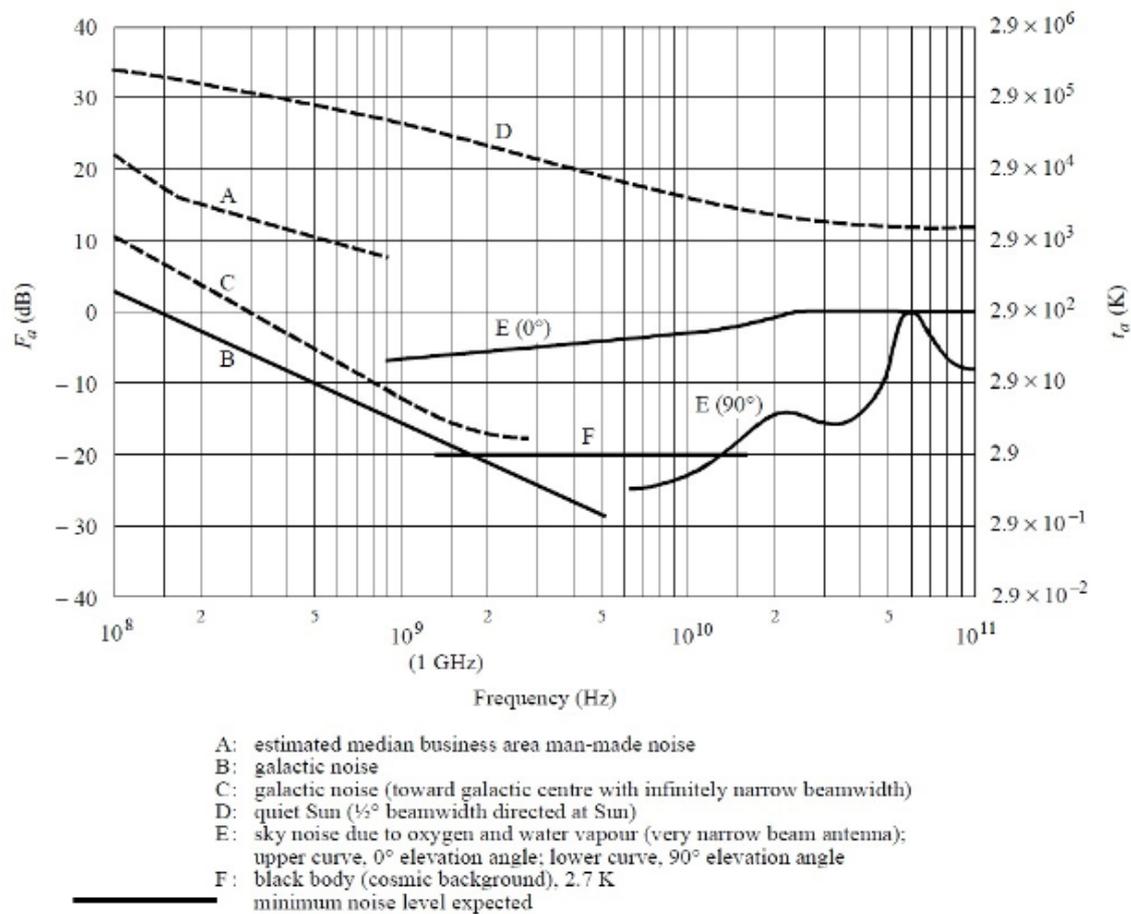


FIGURA 1.11: Andamento della potenza di rumore naturale e artificiale in funzione della frequenza. Sono riportati i livelli stimati nell'intervallo da 100 MHz fino a 100 GHz (Recommendation ITU-R P.372-7 "Radio Noise").

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 carico (dell'antenna) e la densità di potenza incidente in condizioni di adattamento. L'*area efficace* di un'antenna ricevente rappresenta, quindi, quella superficie ideale da cui si ottiene potenza utile, estraendola dalla radiazione incidente. Questo parametro dipende solo dalle caratteristiche dell'antenna ed è una quantità che misura la sua efficienza come collettore di radioonde. È importante notare come un'antenna elementare sia 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.

Il grande 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 di interesse, con un segnale particolarmente intenso quando la radiosorgente è in una prefissata direzione rispetto all'antenna. Altra caratteristica molto importante è il *potere risolutivo*, cioè la capacità di separare (risolvere) due oggetti vicini nello spazio, quindi "vedere" fini dettagli strutturali di una radiosorgente estesa. Questo parametro è proporzionale al rapporto fra la lunghezza d'onda della radiazione ricevuta e le dimensioni fisiche dell'antenna (calcolate in lunghezza d'onda): non sarà possibile distinguere particolari angolari minori di questo rapporto.

Queste caratteristiche dell'antenna definiscono le prestazioni del radiotelescopio.

Un'antenna molto utilizzata nella banda delle microonde è il riflettore a paraboloide di rivoluzione, caratterizzato da un lobo di ricezione molto stretto e simmetrico. Le sue qualità derivano proprio 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, poiché se il dispositivo di captazione (illuminatore) è ben collocato, tutta l'energia elettromagnetica incidente catturata dal riflettore potrà essere utilizzata per estrarre il segnale utile.

Il guadagno ottenibile da un'antenna a riflettore parabolico si stima utilizzando la seguente relazione:

$$G_a = \eta \cdot \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (1.1)$$

dove D è il diametro dell'antenna (espresso in metri). Il parametro η è detto *efficienza*: generalmente compreso fra 0.45 e 0.55, tiene conto di tutti i fattori (errori sulla superficie, tolleranze costruttive, errori di focalizzazione, eccessiva ampiezza dei lobi secondari, etc.) che riducono il massimo guadagno teorico ottenibile.

L'ampiezza del fascio a metà potenza *HPBW* (Half Power Beam Width) dell'antenna si può calcolare utilizzando la seguente formula approssimata:

$$HPBW \approx \frac{(60 \div 70) \cdot \lambda}{D} \quad [gradi] \quad (1.2)$$

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 la misura dell'energia captata da una specifica regione di cielo 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 dell'antenna e il profilo di brillantezza dello scenario osservato. L'antenna di un radiotelescopio tende, quindi, a "livellare", 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 antenna.

Quindi, il problema che si pone all'osservatore è quello di ricavare la distribuzione vera della *temperatura di brillantezza* partendo dalla misura della temperatura di antenna: è necessario effettuare un'operazione di deconvoluzione fra la distribuzione della temperatura equivalente di antenna (brillantezza misurata) e la funzione che descrive il diagramma di ricezione dell'antenna. Ecco perché 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 240-300 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 figura 1.12 mostra le tracce (simulata e reale) del transito della Luna (flusso dell'ordine di 52600 Jy a 11.2 GHz) "vista" da un radiotelescopio amatoriale realizzato con *RAL10KIT* e un'antenna a riflettore parabolico TV-SAT da 1.5 metri di diametro (larghezza del fascio appena inferiore a 1.5 gradi).

Per evidenziare l'effetto di distorsione creato dall'antenna sul profilo spaziale di brillantezza di una regione del cielo, si è simulata la risposta dello strumento approssimando l'antenna come un'apertura circolare uniformemente illuminata. I grafici mostrano, sovrapposte per chiarezza di rappresentazione, le tracce del profilo della *temperatura di brillantezza* della Luna (diametro apparente di circa mezzo grado) e della corrispondente temperatura di antenna misurata dal radiotelescopio durante il transito della radiosorgente (condizioni teoriche ideali). Sono anche riportate le risposte radiometriche del radiotelescopio, espresse in unità arbitrarie di conteggio dell'ADC *count*, del transito simulato e di un transito "vero".

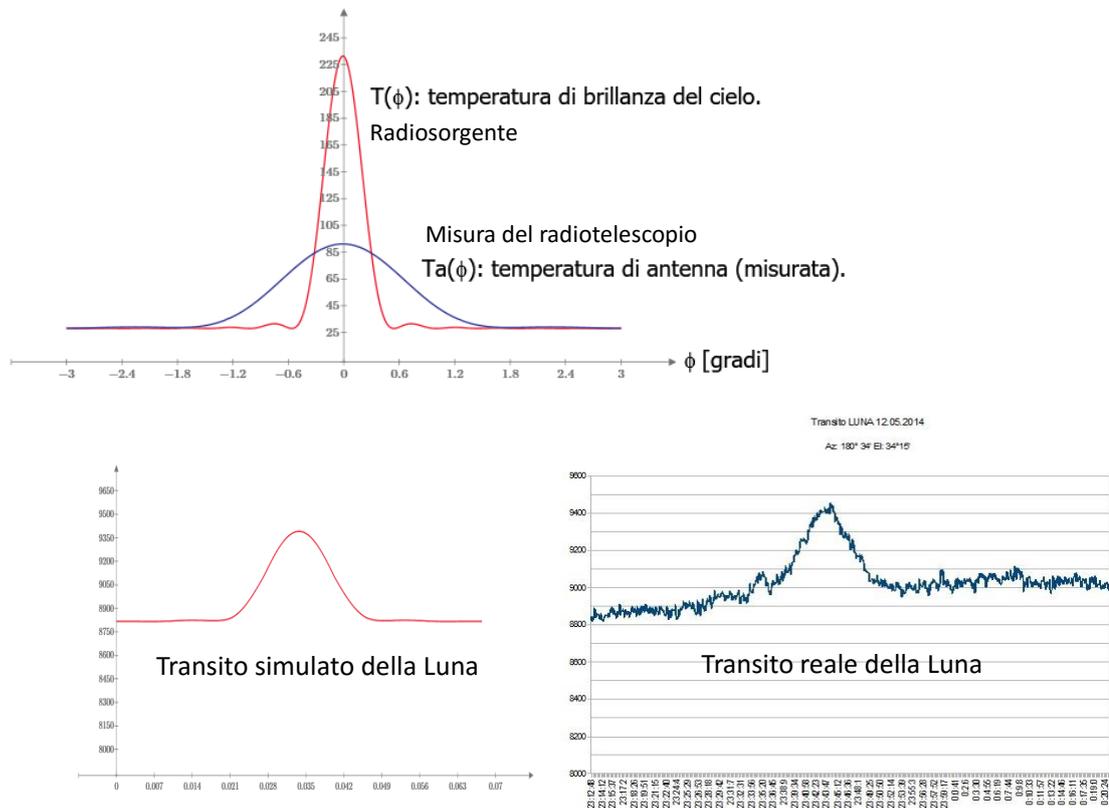


FIGURA 1.12: Il profilo della temperatura della Luna rilevata da un radiotelescopio (temperatura di antenna) durante un transito è diverso dal profilo "vero" della sua *temperatura di brillantezza*, dato che il processo di misura eseguito con l'antenna è una convoluzione fra la vera *temperatura di brillantezza* dello scenario osservato e la forma del suo diagramma di ricezione. L'antenna di un radiotelescopio, quindi, "diluisce" la vera 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, interessa sottolineare l'effetto prodotto dall'antenna di un radiotelescopio sulla misura dello scenario osservato. Quando analizziamo la registrazione del transito di una radiosorgente osserviamo una traccia che non corrisponde al profilo di brillantezza "vero" dello scenario, ma ad una sua versione distorta che è la convoluzione fra la forma del diagramma di ricezione dell'antenna e la vera distribuzione di brillantezza (quest'ultima è "pesata" dalle caratteristiche direttive dell'antenna). 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.

E' facile comprendere come questo problema sia particolarmente 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 "viste" da questi piccoli strumenti. Tutto ciò non è valido per la Galassia che, nella banda radio, è caratterizzata da una notevole estensione angolare.

1.7 Il radiometro a potenza totale (Total-Power)

Un radiometro a microonde è un ricevitore molto sensibile utilizzato per misurare la radiazione elettromagnetica emessa dallo scenario osservato dall'antenna (la potenza media della radiazione 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 ad una frequenza che è direttamente proporzionale alla sua temperatura. Per la maggior parte dei corpi naturali il picco di emissione si verifica nella regione dell'infrarosso. 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 (che è una 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 - paragrafo 1.6). Per questa ragione in radioastronomia è conveniente esprimere la potenza in termini di temperatura equivalente radiometrica o *temperatura di brillantezza* di un oggetto (espressa in Kelvin) per indicare l'ammontare della sua radiazione termica.

In sostanza, è sempre possibile definire una temperatura di un corpo nero (chiamata *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 (figura 1.13) 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 rumore rivelato, quindi ottimizzare

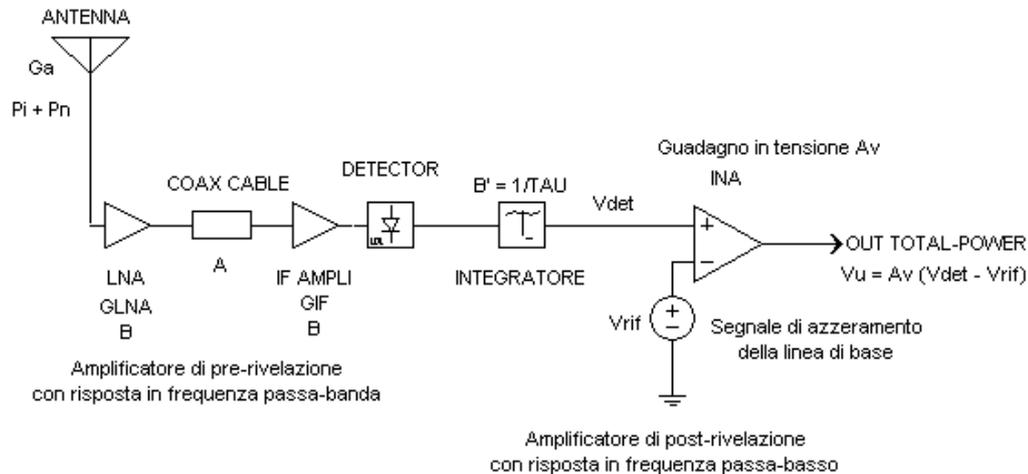


FIGURA 1.13: Schema di principio di un ricevitore Total-Power.

la sensibilità del sistema ricevente, segue un blocco integratore (essenzialmente 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 totale 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, è possibile misurare solo le variazioni di potenza dovute alla radiazione proveniente dall'antenna, eliminando la componente quasi-continua dovuta al rumore interno.

Nella realtà, un radiometro a potenza totale adotta una tipica configurazione circuitale 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 dell'operazione di 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 figura 1.14.

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 determinare la sensibilità teorica di un ricevitore Total-Power, quindi valutare la minima variazione nella temperatura equivalente di rumore ΔT misurabile dal sistema, utilizzando l'equazione del radiometro:

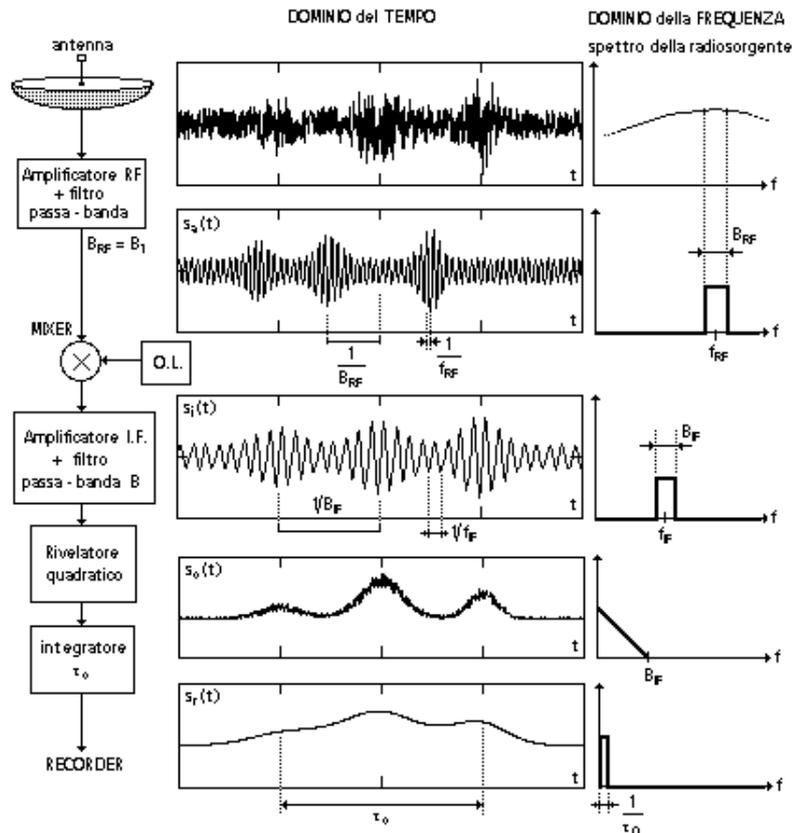


FIGURA 1.14: Variazioni del segnale captato dall'antenna mentre è elaborato dai vari stadi di un ricevitore a potenza totale (radiometro). A sinistra sono descritti i segnali in funzione del tempo ad una data frequenza, a destra è rappresentata la variazione della potenza in funzione della frequenza (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.

$$\Delta T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{\tau \cdot B}} \quad (1.3)$$

dove $T_{sys} = T_a + T_r = T_a + T_0 \cdot (F_r - 1)$ è la temperatura di rumore del radiotelescopio, T_a è la temperatura di rumore dell'antenna, $T_r = T_0 \cdot (F_r - 1)$ è la temperatura di rumore del ricevitore ($T_0 = 290K$ e F_r è la figura di rumore del ricevitore), τ è costante di tempo dell'integratore (espressa in secondi) e B è la larghezza di banda del ricevitore (in Hz). Le temperature sono espresse in K . Un'eventuale radiosorgente "vista" 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 del ricevitore, sul tempo di integrazione τ nell'impostazione dei parametri operativi durante il funzionamento. È possibile rendere ΔT piccolo a piacere facendo in modo che T_{sys} sia minimo, oppure B e τ più grandi possibile.

Fissati parametri del ricevitore come la temperatura di rumore del sistema e la sua

banda passante, la sensibilità può essere ottimizzata scegliendo un valore opportuno per la costante di integrazione del segnale rivelato. Incrementare questo parametro significa applicare un graduale filtraggio e "livellamento" 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 la posizione della radiosorgente (ora apparente del transito).

Un modo semplice per stimare il massimo valore utilizzabile per il tempo di integrazione τ di un segnale caratterizzato da variabilità temporali pari a Δt è dato dalla relazione approssimata:

$$\tau \leq 0.35 \cdot \Delta t \quad (1.4)$$

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 (che è un 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. Se 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 parzialmente 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. E' anche possibile 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 sola temperatura.

Capitolo 2

Un radiotelescopio per tutti

2.1 Radiotelescopio Total-Power a 11.2 GHz

In questo capitolo proporremo la costruzione di un piccolo ma efficiente radiotelescopio funzionante a 11.2 GHz, equipaggiato con un'antenna a riflettore parabolico di circa un metro di diametro, 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, oltre che la radiazione dell'atmosfera terrestre.

Questo strumento può essere considerato il punto di partenza della radioastronomia amatoriale e un'ottima "palestra" per familiarizzare con le tecniche radioastronomiche. Sarà possibile, con una semplice procedura di calibrazione (capitolo 3), 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: una volta 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 migliore approccio sperimentale alla radioastronomia prevede sempre un inizio con strumenti compatti e "maneggevoli" che osservano le più intense radiosorgenti del cielo come il Sole e Luna: in questo modo si apprende facilmente la tecnica strumentale e osservativa, si impara a calibrare lo strumento e si comprende il processo di misurazione radiometrica, con le varie problematiche che rendono difficoltosa e incerta la misura. Come più volte sottolineato, siamo convinti che il metodo migliore per acquisire conoscenza e competenza con la radioastronomia è, senza dubbio, quello che prevede la costruzione e la messa in opera di un piccolo radiotelescopio.

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 kit del radiometro *RAL10KIT* oppure il ricevitore *RAL10AP*, abbinati al software di acquisizione e di controllo *Aries*.

Il radiotelescopio utilizza, quindi, le seguenti parti:

- Antenna a riflettore parabolico TV-SAT con diametro di circa 1 metro, completa di unità esterna (LNB) e illuminatore;
- Cavo coassiale da 75 Ω per TV-SAT;
- Kit radiometro *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 il modulo *RAL10KIT* oppure 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 di tipo 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 "illuminazione" e una messa a fuoco ottimale per quel tipo di riflettore.

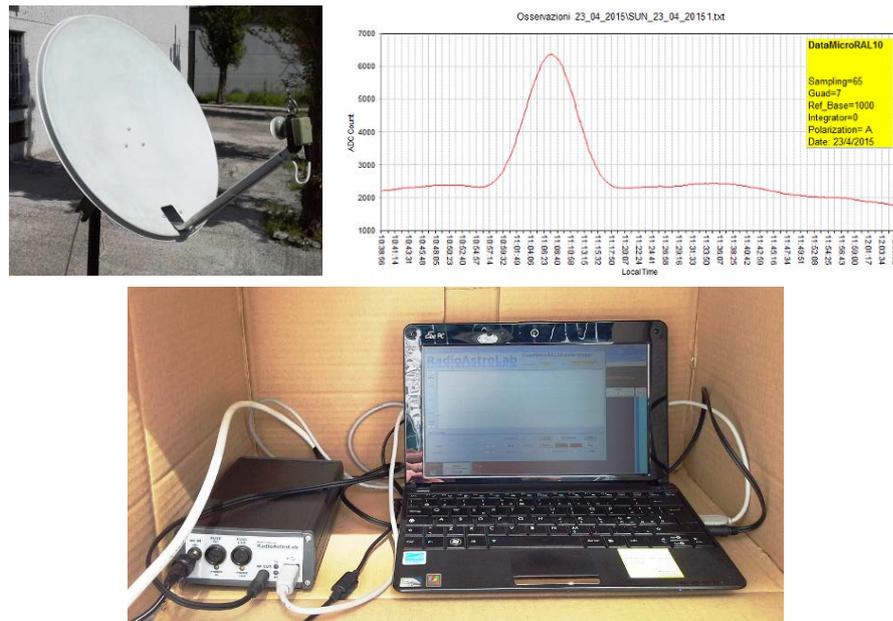
Utilizzando fantasia e abilità costruttiva è possibile realizzare sistemi di puntamento automatico, almeno per antenne non troppo grandi, attingendo al mercato delle attrezzature per radioamatori. Le ridotte dimensioni e il peso contenuto di questo radiotelescopio rendono possibile l'utilizzo di una 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: è senz'altro possibile sviluppare un sistema di aggancio a questa montatura per sostituire al tubo telescopico l'antenna del radiotelescopio. Chi possiede e conosce bene l'utilizzo di questi attrezzi, non avrà difficoltà a sfruttare il sistema per gestire l'antenna del radiotelescopio. E' evidente la praticità di questa soluzione 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) esistenti in commercio per TV-SAT a 10-12 GHz con l'uscita a frequenza intermedia 950-2150 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: i ricevitori *RAL10KIT* e *RAL10AP* supportano tale funzionalità tramite apposito comando via software. Un cavo coassiale TV-SAT da 75 Ω 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 necessario 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.

L'osservazione radioastronomica più semplice consiste nel determinare come varia l'intensità del segnale ricevuto durante il "passaggio" di una radiosorgente (ad esempio, il Sole o la Luna) nel "campo di vista" dell'antenna (la cosiddetta registrazione al transito). Si orienta il radiotelescopio nel punto celeste dove è previsto, nel suo moto apparente, il transito della radiosorgente e si attende la formazione della classica traccia "a campana" nel software di acquisizione. La figura 2.1 mostra un esempio di transito solare registrato con il nostro radiotelescopio. Se l'antenna è gestita da una montatura motorizzata e collegata al PC tramite uno dei vari programmi normalmente utilizzati dagli astrofili, sarà interessante monitorare come varia nel tempo la radiazione solare nella banda 10-12 GHz, inseguendo l'oggetto durante la giornata.

Altre interessanti esperienze riguardano l'osservazione della Luna (che si comporta come un corpo nero a circa 200 K), l'osservazione della galassia e l'osservazione della radiazione dell'atmosfera terrestre.



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

FIGURA 2.1: Prova di ricezione del Sole con il ricevitore RAL10AP.

2.2 Il modulo radiometrico *microRAL10*

È interessante descrivere brevemente le caratteristiche del modulo radiometrico *microRAL10* che costituisce il nucleo centrale dei radiometri RAL10KIT e RAL10AP. La figura 2.2 mostra lo schema a blocchi del dispositivo.

Il segnale a frequenza intermedia (IF) proveniente dall'unità esterna (LNB) è applicato al modulo *microRAL10* 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). Un amplificatore di post-rivelazione adatta il livello del segnale rivelato alla dinamica di acquisizione del convertitore analogico-digitale (ADC con 14 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 (è il segnale ZERO_BASE nella figura 2.2), 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. 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 (paragrafo 2.6) i loro valori si conservano togliendo e ripristinando l'alimentazione del modulo. Il processore esegue le funzioni di elaborazione e di controllo minimizzando il numero di componenti elettronici esterni e massimizzando la flessibilità del sistema.

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. *microRAL10* implementa tutte le funzioni indispensabili per un radiometro a microonde adatto alla radioastronomia, con particolare attenzione ai requisiti di sensibilità e stabilità che tale applicazione richiede.

microRAL10 costituisce il blocco centrale dei ricevitori RAL10KIT e RAL10AP che,

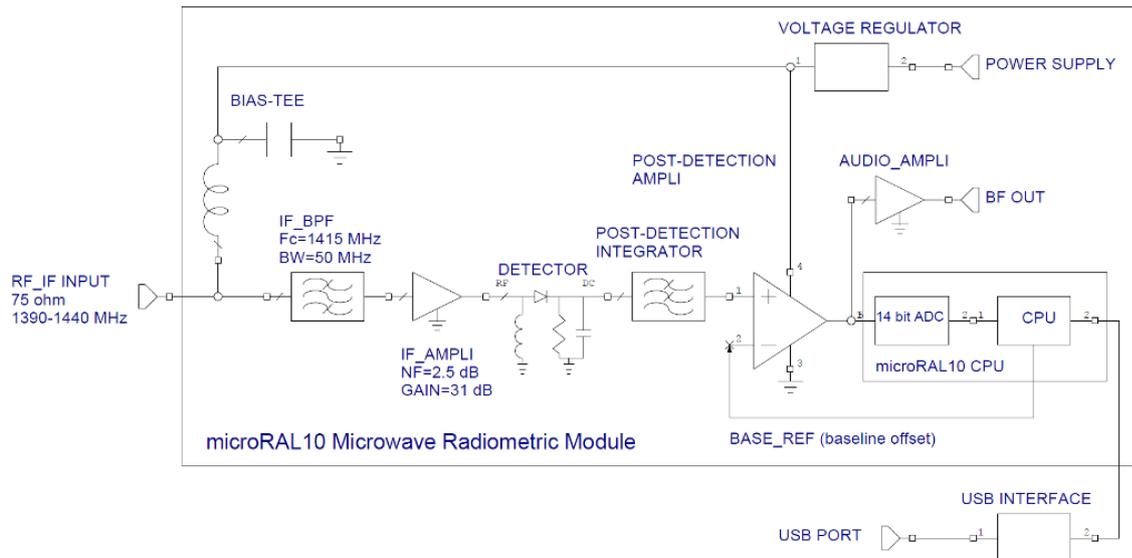


FIGURA 2.2: Schema a blocchi del modulo radiometrico *microRAL10*, il nucleo centrale dei ricevitori *RAL10KIT* e *RAL10AP*.

quindi, hanno identiche prestazioni. Infatti, 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 adeguate per costruire un radiotelescopio amatoriale adatto all'osservazione delle più intense radiosorgenti alla frequenza di 11.2 GHz. 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 amatoriale: una 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.

Le seguenti caratteristiche specializzano *microRAL10* per applicazioni di radioastronomia amatoriale:

- Radiometro comprendente il filtro di banda, l'amplificatore IF, il rivelatore quadratico compensato in temperatura, l'amplificatore di post-rivelazione con guadagno, offset e costante di integrazione programmabili, il convertitore analogico-digitale (ADC) per l'acquisizione del segnale radio con 14 bit di risoluzione, un processore per la gestione del dispositivo e per la comunicazione seriale. Un regolatore alimenta l'unità esterna (LNB) attraverso il cavo coassiale commutando su due differenti livelli di tensione (circa 12.75 V e 17.25 V) abilitando la selezione della polarizzazione in ricezione (orizzontale o verticale).
- Frequenza centrale e banda passante di ingresso compatibili con la frequenza protetta in radioastronomia di 1420 MHz e con i valori di frequenza intermedia (IF) standard della TV satellitare. Definire e limitare la banda passante del ricevitore è importante per garantire ripetibilità nelle prestazioni e per minimizzare gli effetti

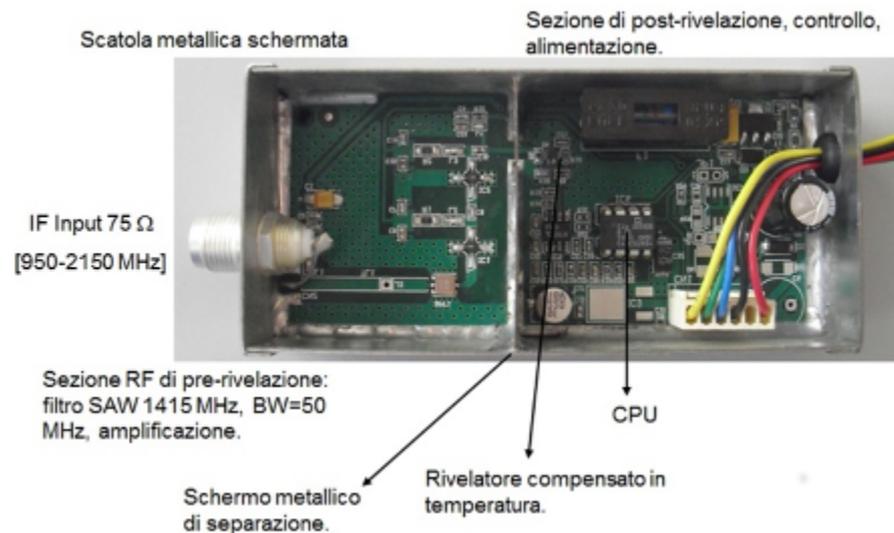


FIGURA 2.3: Particolari interni del modulo radiometrico *microRAL10*, il "cuore" del radiotelescopio.

delle interferenze esterne (le frequenze vicine a 1420 MHz dovrebbero essere abbastanza libere da emissioni, in quanto riservate per la ricerca radioastronomica). La frequenza di ricezione del radiotelescopio sarà prossima a 11.2 GHz quando si utilizzano unità esterne (LNB) standard con oscillatore locale a 9.75 GHz.

- Ridotti consumi elettrici, modularità, compattezza, economia.

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 passacavo dal quale escono i cavi per la comunicazione seriale e quelli per il collegamento all'alimentatore (figura 2.3).

La figura 2.4 mostra la risposta del radiometro quando è impostato un guadagno di post-rivelazione $GAIN=7$ ed è applicato all'ingresso del modulo un segnale sinusoidale con frequenza di 1415 MHz. La curva mostra come variano i valori dell'uscita radiometrica (espressa in unità arbitrarie *count* di conteggio dell'ADC) al variare della potenza di segnale applicata all'ingresso (espressa in *dBm*). Le tolleranze nei valori nominali dei componenti, soprattutto per quando riguarda il guadagno dei dispositivi attivi e la sensibilità di rivelazione nei diodi, generano differenze nella caratteristica ingresso-uscita fra distinti dispositivi. Sarà quindi necessario calibrare la scala di misura dello strumento se si desidera ottenere una valutazione assoluta della potenza associata alla radiazione ricevuta.

Riassumiamo le caratteristiche tecniche del modulo radiometrico *microRAL10*:

- Frequenza 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 ;
- Gestione del cambio di polarizzazione (orizzontale o verticale);
- Rivelatore quadratico compensato in temperatura (misura della potenza RF).

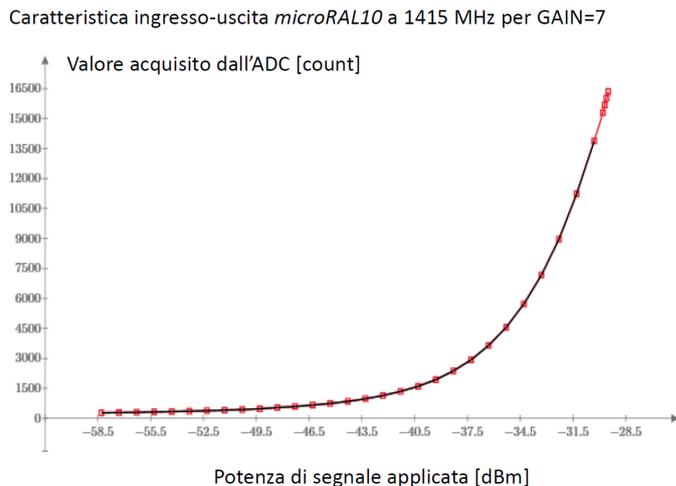


FIGURA 2.4: Caratteristica ingresso-uscita del modulo *microRAL10* con un guadagno di post-rivelazione $GAIN=7$ (guadagno in tensione 168). Il ascissa è riportato il livello di potenza del segnale RF-IF applicato (espresso in dBm), in ordinata il livello di segnale acquisito dal convertitore analogico-digitale (espresso in unità relative *count*).

- 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 risoluzione nominale ADC a 14 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.

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* (paragrafo 2.6). 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 figura 1.13, utilizzata per impostare un offset sulla linea di base radiometrica. E' 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.

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

TABELLA 2.1: Costante di tempo dell'integratore in funzione del valore impostato per il parametro *INTEGRATOR*.

- *GAIN*: è il fattore di amplificazione del segnale rivelato.
- *INTEGRATOR*: è il valore della costante di integrazione τ 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. Il parametro *INTEGRATOR* riduce le fluttuazioni del segnale rivelato con un'efficacia proporzionale al suo valore. 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 (paragrafo 1.7). E' possibile stimare il valore della costante di tempo τ (espressa in secondi) consultando la tabella 2.1.
- *POL*: definisce la polarizzazione in ricezione utilizzata nell'unità esterna (LNB).

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

2.3 Il kit per radioastronomia RAL10KIT

RAL10KIT è un kit per radioastronomia dedicato agli sperimentatori con un minimo di pratica nei montaggi elettronici che desiderano costruirsi "in casa" il ricevitore per il radiotelescopio. Come si vede dalla figura 2.5, la confezione comprende il modulo radiometrico *microRAL10*, 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 una comune antenna con unità esterna (LNB) funzionante nella banda TV-SAT 10-12 GHz (figura 2.7). Si è così realizzato il primo radiotelescopio a microonde.

La figura 2.8 mostra lo schema di cablaggio del gruppo *RAL10KIT* e le informazioni necessarie per il collegamento dei cavi di alimentazione: è possibile utilizzare qualsiasi circuito alimentatore stabilizzato ben filtrato, oppure utilizzare un alimentatore commerciale idoneo a fornire le tensioni e le correnti specificate. E' 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.



FIGURA 2.5: Kit per radioastronomia *RAL10KIT* fornito da RadioAstroLab.

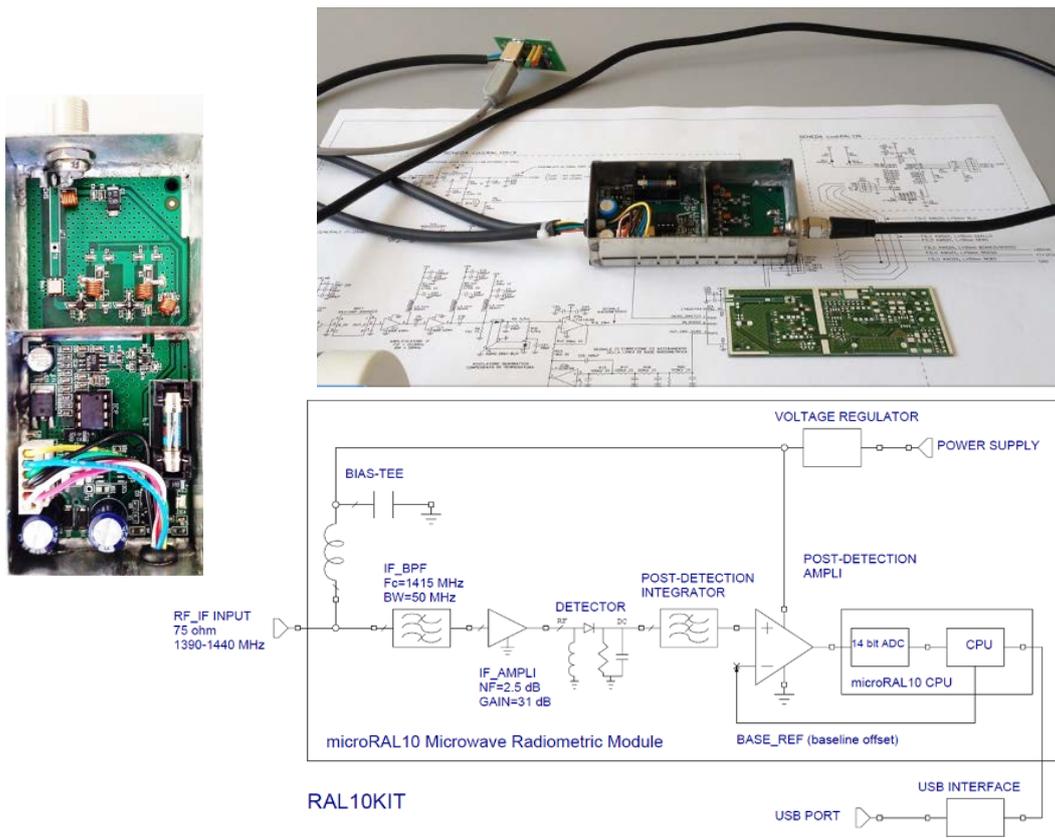


FIGURA 2.6: Kit per radioastronomia *RAL10KIT*: il modulo radiometrico *microRAL10* è il nucleo centrale del ricevitore.

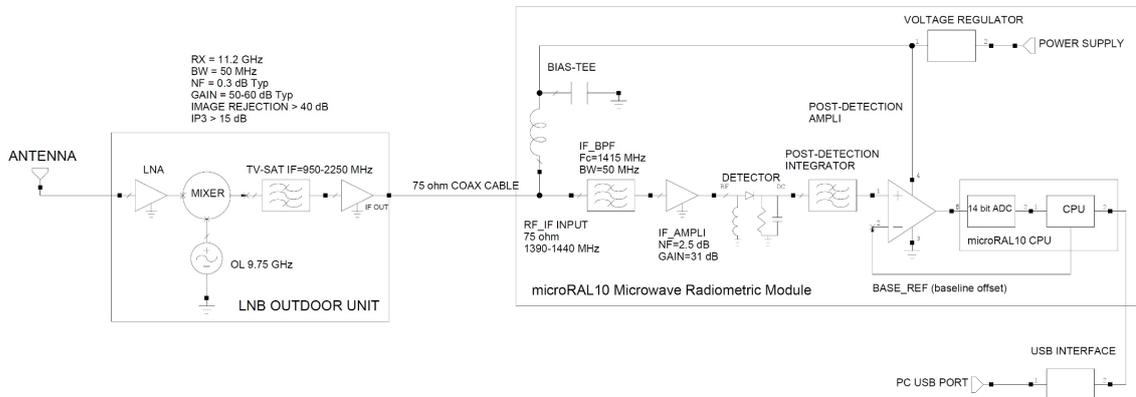


FIGURA 2.7: Struttura di un radiotelescopio a microonde (11.2 GHz) costruito con *RAL10KIT*. Il segnale ricevuto dall'antenna parabolica, amplificato e convertito in frequenza dall'unità esterna (LNB) verso la banda IF standard TV-SAT 950-2250 MHz, è applicato al gruppo *RAL10KIT* che elabora tutte le 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.

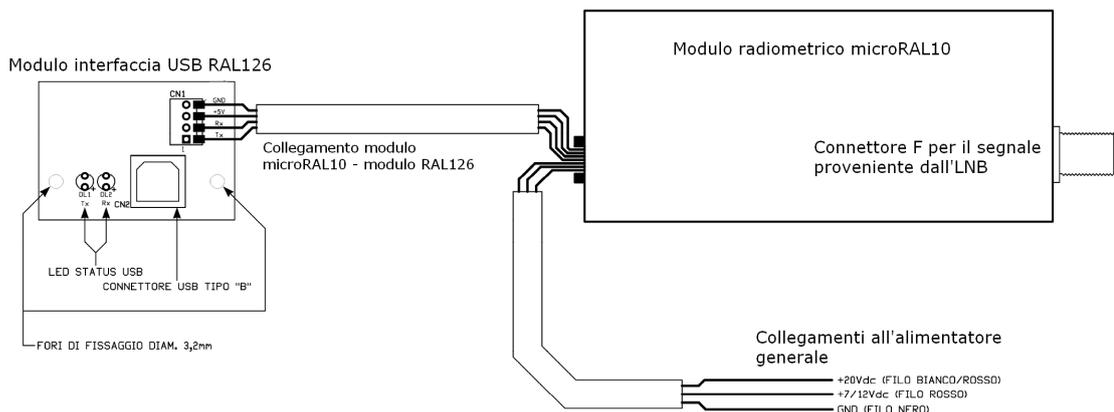


FIGURA 2.8: Schema di cablaggio del gruppo *RAL10KIT*: il modulo radiometrico *microRAL10* (fornito assemblato e collaudato) è contenuto all'interno di una scatola metallica schermata che prevede un connettore coassiale F per il collegamento con il segnale proveniente dall'unità esterna (LNB) (tramite 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.



FIGURA 2.9: Il 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 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.

2.4 Il 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 – 2A. 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 ci sono fusibili di protezione (con interruzione segnalata a led) per l'alimentazione principale e per l'alimentazione dell'unità esterna (LNB) attraverso il cavo coassiale (figura 2.9).

L'ingresso dello strumento accetta frequenze comprese nella banda 1390-1440 MHz, definita da un filtro che protegge dalle interferenze, con la possibilità di ricevere la frequenza "magica" dell'idrogeno a 1420 MHz. Il ricevitore amplifica e misura la potenza del segnale ricevuto e, tramite un convertitore analogico-digitale (ADC) ad elevata risoluzione (14 bit), converte in forma numerica il segnale rivelato posizionando il livello di "zero" in punto opportuno della scala. Le funzioni critiche del ricevitore, così come la possibilità di impostare i vari parametri operativi e la comunicazione con il PC tramite il modulo interfaccia USB, sono gestite dal processore interno. Per ottimizzare la sensibilità del sistema, è possibile integrare il segnale rivelato con una costante di tempo programmabile. Il sistema è gestito dal software *Aries* per l'acquisizione dei dati e per il controllo dello strumento.

Le caratteristiche tecniche di *RAL10AP* sono identiche a quelle di *RAL10KIT*, dato che anche questo strumento utilizza il modulo radiometrico *microRAL10* come unità di base.

Con *RAL10AP* si può costruire un radiotelescopio a microonde esattamente identico a quello descritto nella figura 2.7.

Un'opzione interessante, disponibile solo su *RAL10AP*, riguarda l'uscita audio di

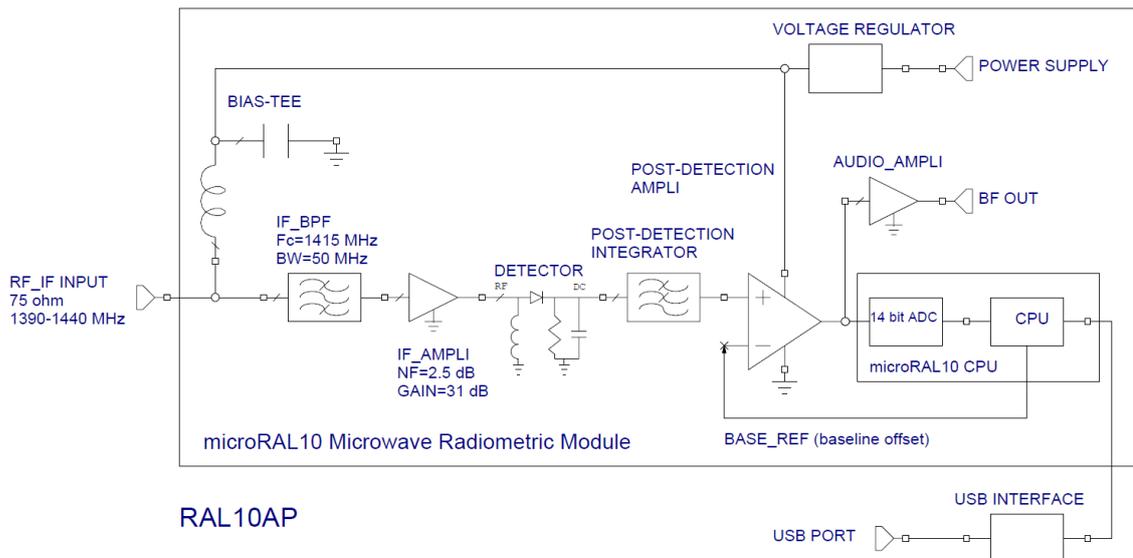


FIGURA 2.10: Struttura interna del ricevitore RAL10AP.

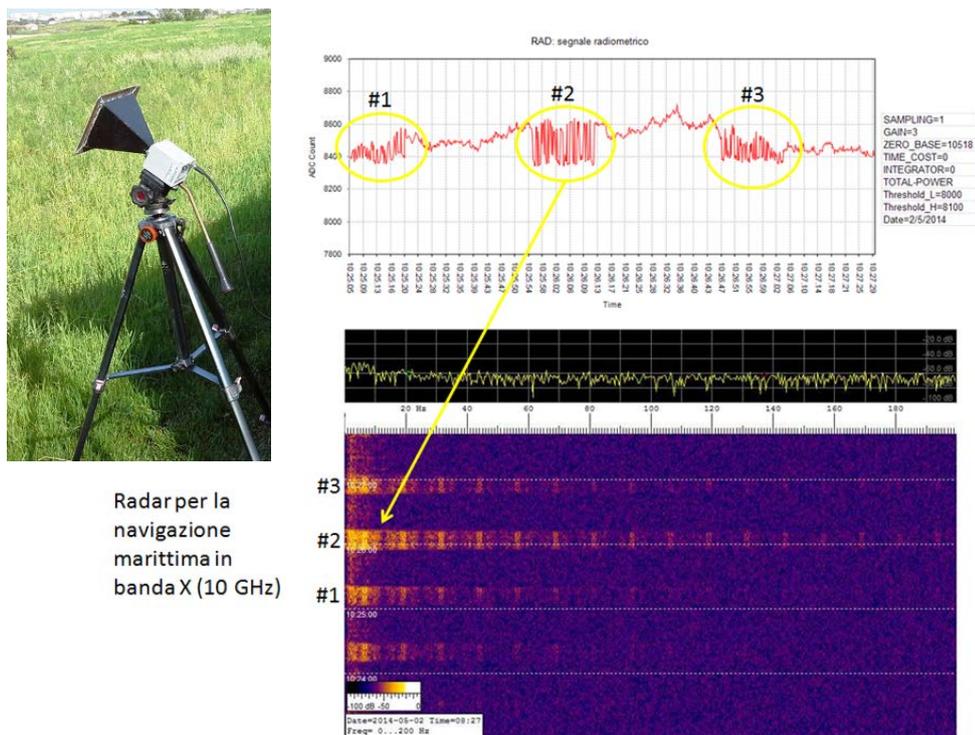


FIGURA 2.11: Regrazioni di prova effettuate con RAL10AP. Per l'esperimento si è utilizzata un'antenna horn tronco-piramidale (20 dB di guadagno) con unità esterna (LNB) posizionate su un cavalletto fotografico e collegate al ricevitore RAL10AP con un cavo coassiale. Un PC portatile registra il segnale radiometrico a 11.2 GHz ricevendo dati dalla porta USB (grafico in alto) mentre è contemporaneamente registrato il segnale audio di post-rivelazione visualizzato come spettrogramma tramite il software Spectrum Lab (<http://www.qsl.net/dl4yhf/spectral1.html>). Le immagini mostrano i segnali radar in banda X provenienti dalle navi quando l'antenna è orientata verso il mare.

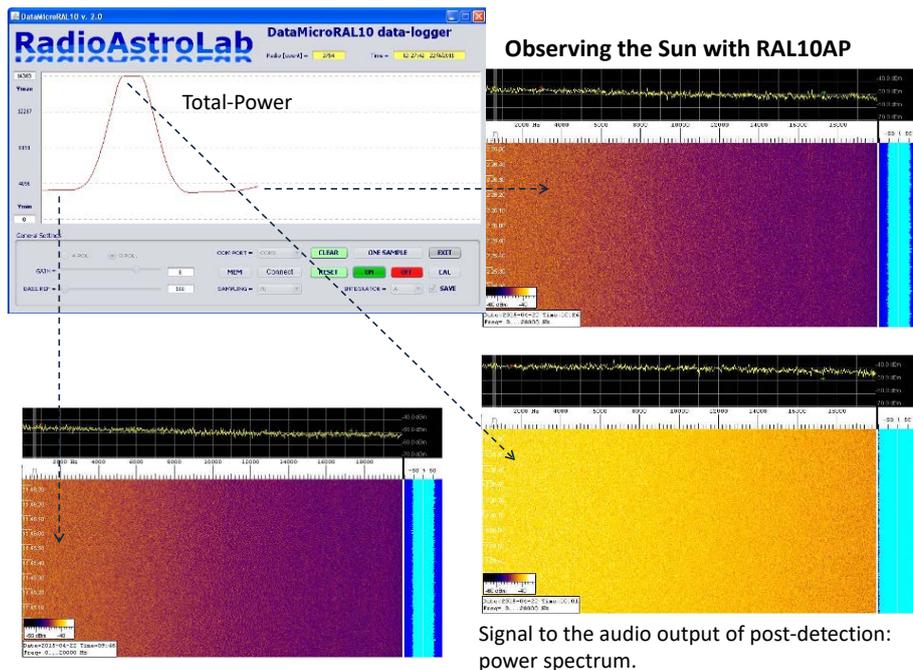


FIGURA 2.12: Osservazione del transito solare con *RAL10AP* tramite analisi in frequenza (spettrogramma) dell'uscita audio di post-rivelazione.

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 figura 2.10, 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. Nella figura 2.11 è mostrato un esempio di utilizzo dell'uscita audio di post-rivelazione non propriamente radioastronomico, ma utile per individuare potenziali segnali interferenti di origine artificiale.

Dato che il ricevitore *RAL10AP* rende disponibili due uscite, è possibile monitorare simultaneamente la radiosorgente da due "punti di vista": la registrazione del transito solare mostrata nella figura 2.1 è il risultato dell'osservazione radiometrica acquisita attraverso la porta USB tramite il programma *Aries* che documenta il transito del disco solare entro il lobo principale dell'antenna, mentre gli spettrogrammi nella figura 2.12 visualizzano come varia la distribuzione in frequenza del segnale rivelato (la densità di potenza del segnale ricevuto) durante il transito. Si nota l'incremento uniforme del rumore di fondo dovuto alla radiazione a spettro continuo dell'emissione termica del Sole durante le varie fasi del transito. Tramite gli altoparlanti del PC è possibile ascoltare anche il corrispondente incremento del rumore audio.

2.5 Impostazione dei parametri operativi

Il livello del segnale all'uscita del ricevitore radioastronomico è proporzionale alla potenza associata alla radiazione ricevuta, quindi alla *temperatura di brillantezza* della regione

di cielo "vista" dall'antenna. Il nostro radiotelescopio si comporta come un sensibile termometro del cosmo.

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 notevolmente, 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 (capitolo 3) e rappresenta un ottimo test per verificare l'efficienza dello strumento.

Quando un tipico radiotelescopio amatoriale è orientato verso il Sole, che alla frequenza di 11.2 GHz appare come un disco ampio circa mezzo grado e irradia come un corpo nero con *temperatura di brillantezza* circa uguale a quella superficiale (circa 6000 K), la temperatura di antenna misurata dallo strumento è dell'ordine di 300-400 K, un valore nettamente inferiore a quello "vero". 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. Nel paragrafo 1.6 si sono illustrati gli effetti di distorsione causati dalla forma del diagramma di ricezione di un'antenna sulla "vera" distribuzione di brillantezza dello scenario osservato.

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

La prima operazione da fare è quella di alimentare il ricevitore e attendere che lo strumento abbia raggiunto la stabilità termica. 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 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.

Trovati gli appropriati valori per 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. E' sempre possibile incrementare ulteriormente l'integrazione del segnale ricevuto aggiustando il valore *SAMPLING* nel programma *Aries* (paragrafo 2.5).

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 "vede" una regione priva di radiosorgenti: un incremento rispetto al riferimento indicherà la presenza di una radiosorgente. 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 per la linea di base radiometrica in modo da posizionare correttamente la traccia.

Se si utilizzano unità esterne (LNB) adatte, è possibile modificare 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 con polarizzazione casuale: in questi casi può essere utile modificare 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 radioosservatori professionali, consente di "tarare" il radiotelescopio in modo che la dinamica della sua risposta e il fattore di scala siano adeguati per registrare senza errori 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 azzerramenti 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 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 del radiometro 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.

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 della sorgente 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

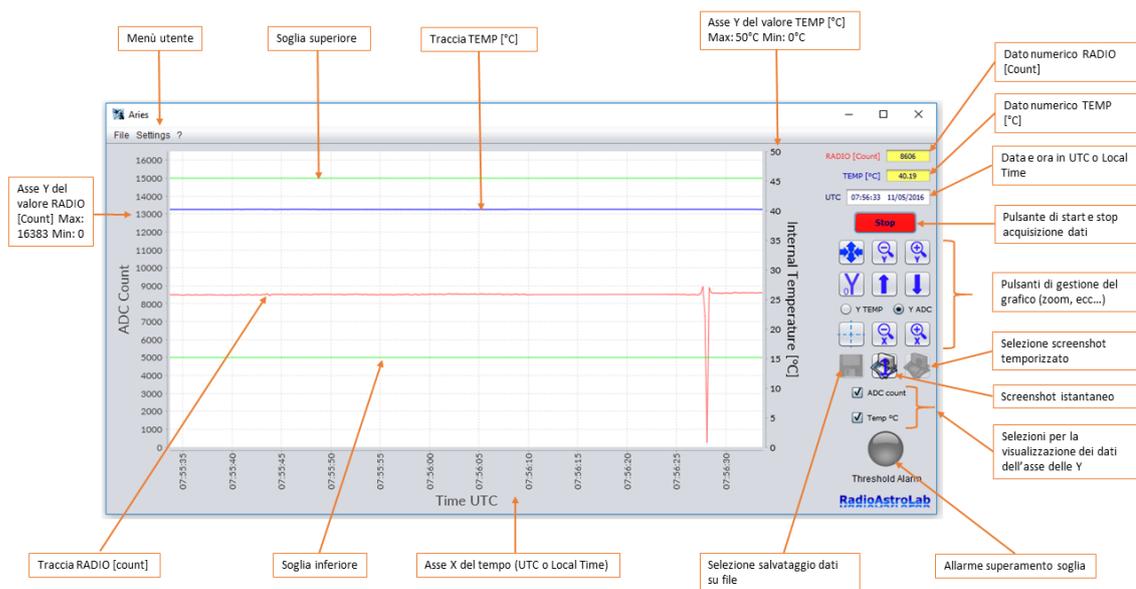


FIGURA 2.13: Finestra principale del programma *Aries* (le impostazioni sono relative al ricevitore mod. *RAL10*).

corso della giornata, l'antenna intercetta le radiosorgenti desiderate e se i valori scelti per i parametri sono adeguati per 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.

2.6 Il software di acquisizione e di controllo *Aries*

Aries (figura 2.13) 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 *RAL10*.

Concepito per ottimizzare la "robustezza" e la flessibilità nella comunicazione propria di questi prodotti, il programma controlla i parametri operativi dello specifico modello utilizzato (*RAL10KIT* o *RAL10AP*): nello stile di un registratore grafico, *Aries* visualizza l'andamento delle misure nel tempo e archivia le informazioni acquisite secondo varie modalità e formati. La variazione del dato acquisito è visualizzata in funzione del tempo 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, attualmente, non è disponibile la gestione di una procedura di calibrazione del segnale ricevuto in unità assolute di *temperatura di brillantezza* (questa opzione sarà implementata in una successiva versione del programma), le intensità del segnale radio-metrico sono visualizzate su una scala di unità di conteggio del convertitore analogico-digitale interno (ADC). Questa scala varia da 0 fino a 16383, dato che la risoluzione di misura dello strumento è pari a 14 bit.

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

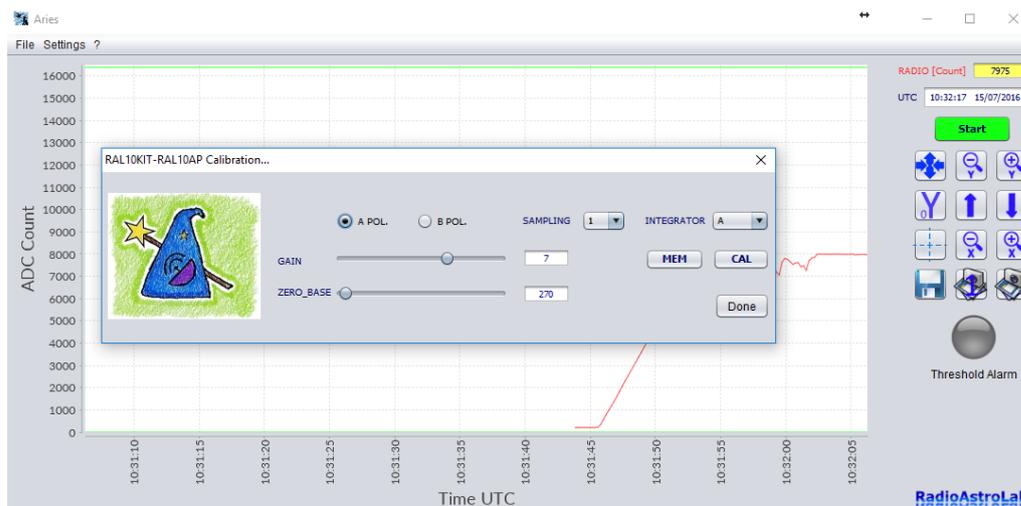


FIGURA 2.14: Finestra dei comandi per l'impostazione dei parametri del ricevitore.

più dispositivi (anche dello stesso tipo) collegati ad un unico PC: il protocollo di comunicazione implementato negli strumenti e l'interfaccia di *Aries* 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 delle osservazioni, 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 figura 2.13 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 ed, eventualmente, di altri segnali ausiliari gestiti dal particolare ricevitore utilizzato. Sono presenti i pulsanti di comando più frequentemente utilizzati nella gestione dell'acquisizione dei dati, della rappresentazione grafica delle misure e della registrazione automatica dei dati. Il programma lavora su piattaforme Microsoft Windows x86 e x64 (requisiti minimi Windows Xp SP3) e, a breve, saranno rilasciate anche le corrispondenti versioni per ambienti Mac Os e Linux.

La finestra mostrata nella figura 2.14 contiene i comandi necessari per impostare i parametri dello strumento: si vedono i bottoni per la selezione della polarizzazione in ricezione, i cursori e le caselle per l'impostazione del guadagno di post-rivelazione, per l'offset della linea di base radiometrica e per l'impostazione della costante di integrazione della misura. E' 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. E' possibile salvare nella memoria interna non volatile 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 (paragrafo 2.5).

Utilizzando i bottoni di zoom dell'asse Y è possibile incrementare o diminuire la risoluzione dell'asse delle ordinate e utilizzare i pulsanti freccia verso l'alto e freccia verso il basso per posizionare la traccia sul grafico in modo che sia completamente visibile in tutta la sua escursione dinamica (si tratta, sostanzialmente, di 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 e in formato immagine utilizzando i pulsanti dedicati alla registrazione dei dati.

Per controllare l'andamento del segnale ricevuto durante una sessione di misura, *Aries* 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* 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.

Capitolo 3

Calibrazione del radiotelescopio

Qualsiasi strumento analizza una grandezza secondo una scala di specificate unità di misura. Questo è vero anche per un radiotelescopio: in effetti, una parte molto importante e delicata del suo funzionamento riguarda proprio la calibrazione.

È necessario stabilire una procedura di taratura per ottenere all'uscita del radiotelescopio dati coerenti con una scala assoluta di *temperatura di brillantezza* (o di unità di flusso). Le tolleranze costruttive, le condizioni ambientali e le variazioni parametriche dei dispositivi attivi causano variazioni nelle caratteristiche del ricevitore, inoltre ogni strumento è unico nella sua risposta ed è difficile confrontare le misure eseguite da diversi radiotelescopi o quelle dello stesso impianto effettuate in tempi diversi.

Osservando ripetutamente una radiosorgente è possibile riscontrare cambiamenti nell'intensità della sua emissione. È importante capire se tali fluttuazioni sono dovute a reali variazioni nel flusso della sorgente o a variazioni indesiderate nella risposta dello strumento: è quindi necessario utilizzare un sistema di misurazione universale. La procedura di calibrazione di un radiotelescopio serve a stabilire una relazione fra la *temperatura di brillantezza* dello scenario osservato (espressa in K) e una data quantità in uscita dallo strumento (espressa, ad esempio, in unità arbitrarie *count* di conteggio dell'ADC).

In questo paragrafo forniremo alcuni suggerimenti per calibrare la scala di misura di un radiotelescopio amatoriale, in modo semplice e pratico, osservando sorgenti di riferimento facilmente "reperibili". Come esempio, descriveremo la calibrazione di un piccolo radiotelescopio che utilizza il ricevitore *RAL10AP* e un'antenna parabolica offset per la ricezione satellitare in banda 10-12 GHz: lo strumento è simile a quello mostrato nella figura 2.1.

La tecnica è semplice: anche se approssimata, è adeguata alle esigenze di un radiotelescopio amatoriale e consente di convertire i valori radiometrici misurati in una scala assoluta di temperatura. Questa procedura è 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), 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 radiosorgenti, la temperatura di brillantezza T_{sky} del cielo allo zenit può essere stimata, alla frequenza di 11.2 GHz, 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 $T_{sky} = 7 K$.

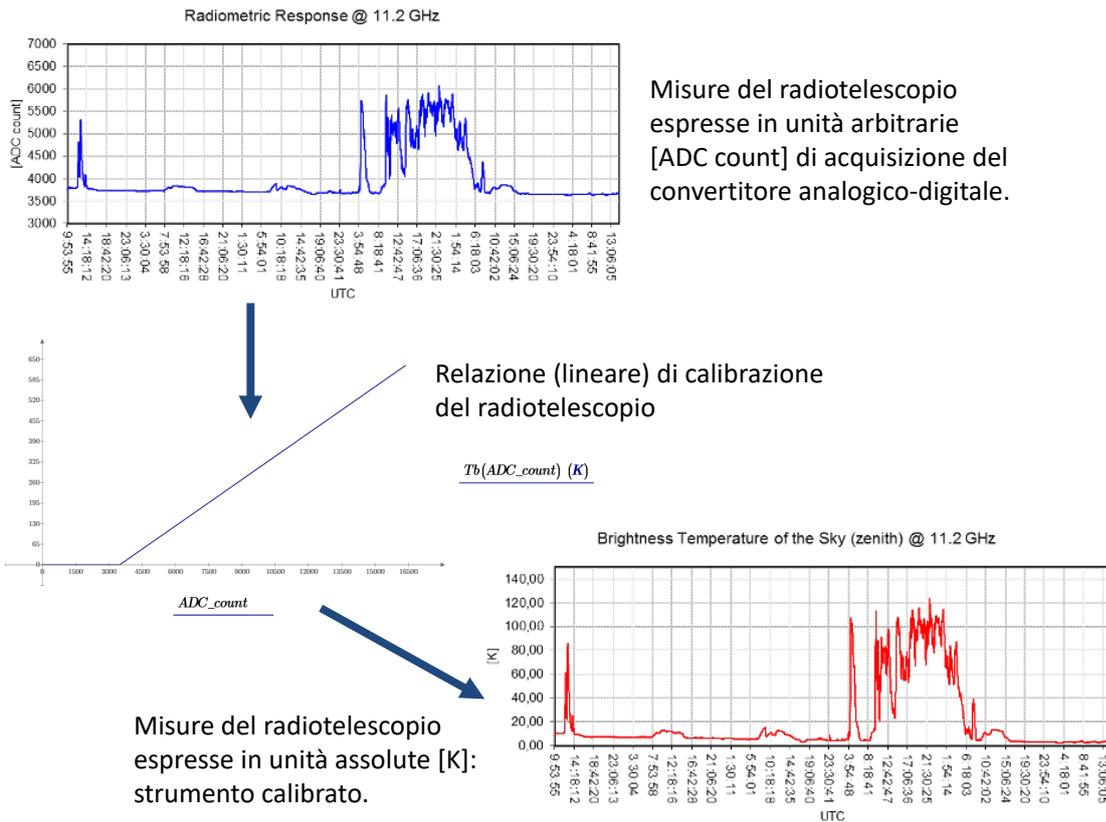


FIGURA 3.1: Un radiotelescopio misura l'intensità della radiazione proveniente dallo scenario osservato in unità arbitrarie *count*, che rappresentano il valore numerico, all'uscita del convertitore analogico-digitale (ADC), della grandezza analogica "digitalizzata" (segnale radio rivelato). Un calcolo trasforma la risposta dello strumento in unità assolute di temperatura K utilizzando la relazione di calibrazione.

- *Misura del target "caldo"*: si orienta l'antenna verso il terreno in modo che questo riempra tutto il suo campo di vista e sia sufficientemente distante 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, ragionevolmente stimato), la sua *temperatura di brillantezza* vale:

$$T_{b_soil} = \eta \cdot T_{soil} \quad [K] \quad (3.1)$$

Poichè l'*emissività* è elevata, 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 *temperatura di brillantezza* T_{b_soil} e T_{sky} sono, rispettivamente:

$count_{soil}$ quando il radiometro misura il target "caldo" T_{b_soil}

$count_{sky}$ quando il radiometro misura il target "freddo" T_{sky}

si può esprimere la temperatura equivalente di antenna T_a in funzione della corrispondente risposta *count* come:

$$T_a(count) = T_{b_soil} + (T_{b_soil} - T_{sky}) \cdot \frac{count - count_{soil}}{count_{soil} - count_{sky}} \quad [K] \quad (3.2)$$

che è l'equazione di una retta nel piano $\{count, T_a\}$.

La temperatura T_a misurata dal radiometro dipenderà, in generale, dalle caratteristiche direttive dell'antenna effettivamente utilizzata (forma del suo diagramma di ricezione) e sarà diversa dalla *temperatura di brillantezza* dello scenario osservato, dato che l'antenna opera una convoluzione matematica fra la forma del suo diagramma di ricezione e il profilo di brillantezza della sorgente. Come si è visto nel paragrafo 1.6, per ottenere la *temperatura di brillantezza* vera della regione osservata è necessario conoscere l'andamento spaziale del diagramma di ricezione dell'antenna (il guadagno in funzione dell'angolo azimutale e di elevazione) ed eseguire una deconvoluzione fra questo e la temperatura misurata.

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 un'idea attendibile 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* η 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 figura 3.2 mostra le registrazioni della risposta del radiotelescopio di figura 2.1 quando l'antenna è orientata verso il terreno (si è scelto un vasto appezzamento di terreno uniforme, appena arato, per il quale abbiamo stimato un'*emissività* di circa 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 formula (3.2), la retta di calibrazione dello strumento mostrata nella figura 3.3.

La *temperatura di brillantezza* del cielo allo zenit è stata stimata pari a $T_{sky} = 6.8 K$.

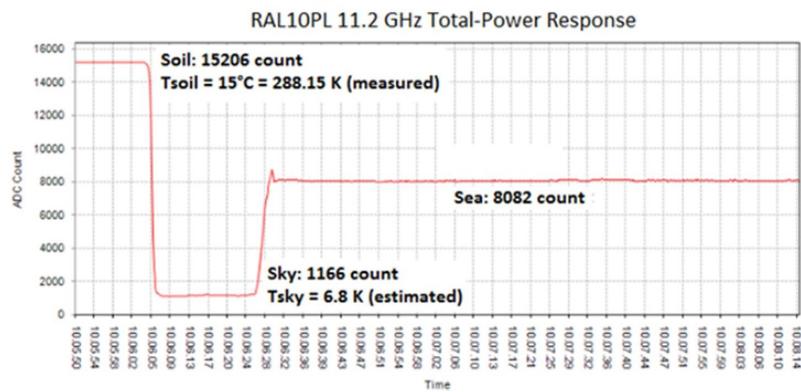


FIGURA 3.2: Misure del terreno e del cielo allo zenit per la calibrazione di un radiotelescopio che utilizza il ricevitore *RAL10AP*.

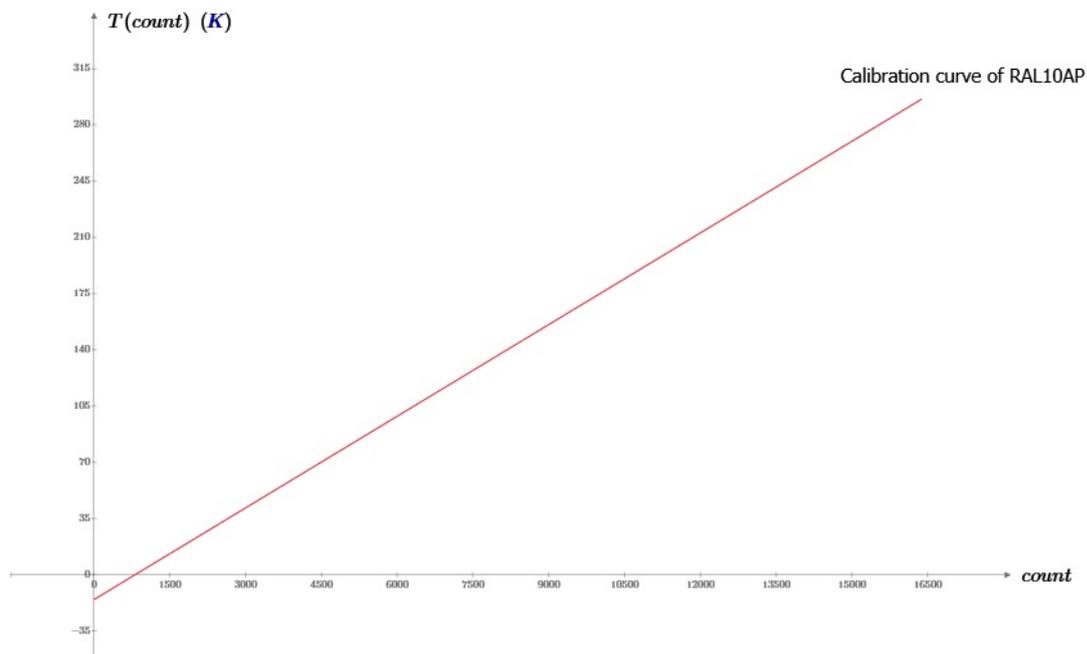


FIGURA 3.3: Retta di calibrazione per il radiotelescopio che utilizza il ricevitore *RAL10AP*.

Appendice A

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 delle microonde 10-12 GHz, considera trascurabile il contributo di rumore d'antenna dovuto ai disturbi atmosferici naturali (idrometeore, fulmini, scariche elettriche temporalesche) e quello dovuto ai disturbi interferenti di origine artificiale.

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 θ dell'antenna rispetto all'orizzonte.

Per la sua valutazione si è utilizzato il grafico della figura A.1, 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 (T_{gnd}) captato dai lobi laterali dell'antenna.

Estrapolando i dati dal grafico, alla frequenza di 11.2 GHz, si ricava una tabella di valori, interpolando i quali si può calcolare il contributo di rumore dell'atmosfera $T_{atm}(\theta)$ dovuto ai fenomeni di assorbimento (modello dell'atmosfera U.S. Standard Atmosphere, 1976), funzione solo dell'angolo di elevazione dell'antenna rispetto all'orizzonte (figura A.2).

La *temperatura di brillantezza* del cielo allo zenit ($\theta = 90^\circ$) sarà:

$$T_{sky}(90^\circ) = T_{cmb} + T_{atm}(90^\circ) = 7.025 [K] \quad (A.1)$$

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.

Angolo di elevazione dell'antenna θ [°]	temperatura di brillantezza dell'atmosfera T_{atm} [K]
0	170
5	41
10	22
20	11.5
30	8.2
60	5
90	4.3

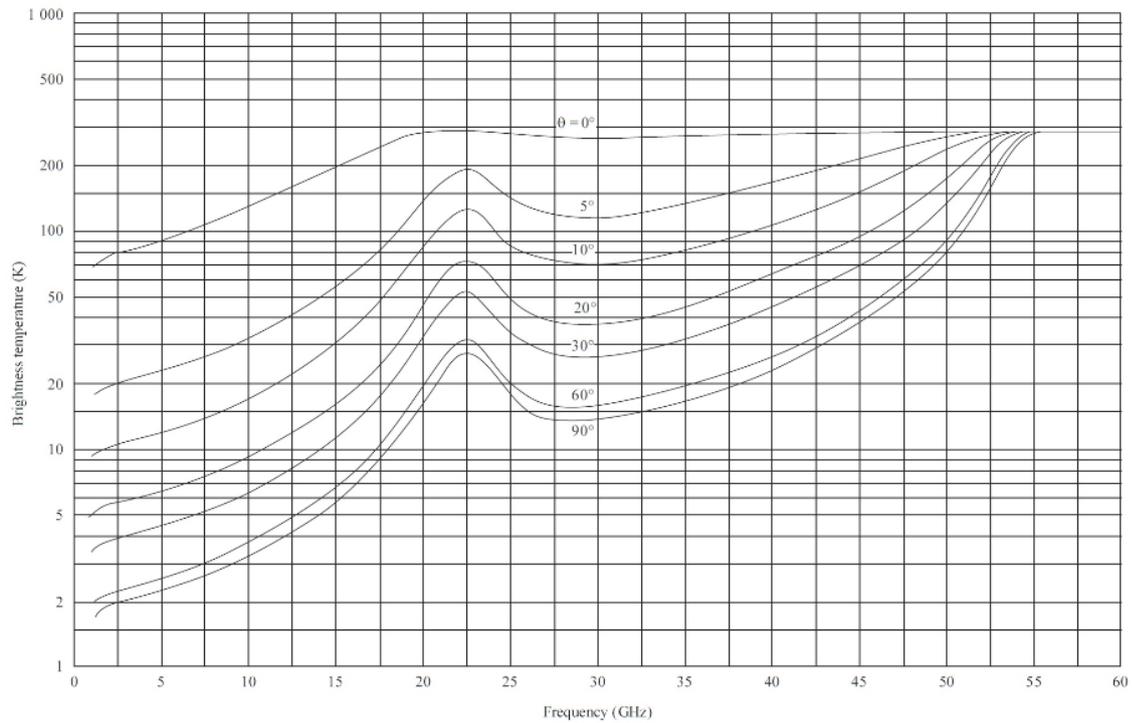


FIGURA A.1: *Temperatura di brillantezza dell'atmosfera simulata (Recommendation ITU-R P.372-12 (07/2015) Radio Noise).*

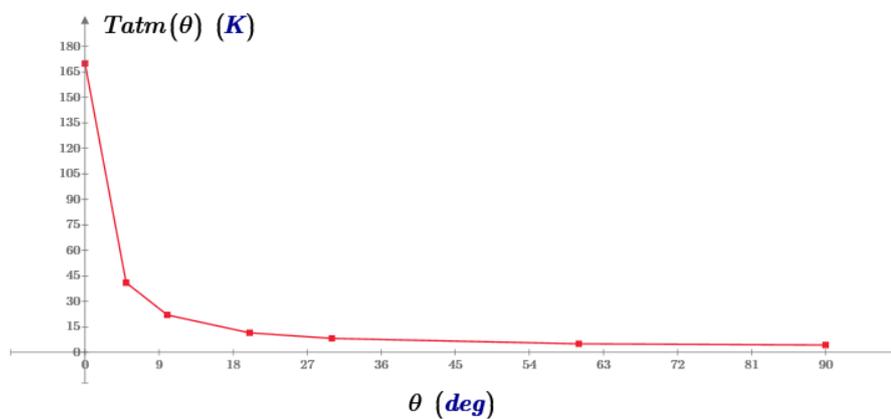


FIGURA A.2: *Temperatura di brillantezza dell'atmosfera a 11.2 GHz, in funzione dell'angolo di elevazione dell'antenna, ottenuta interpolando i valori riportati nella precedente tabella.*

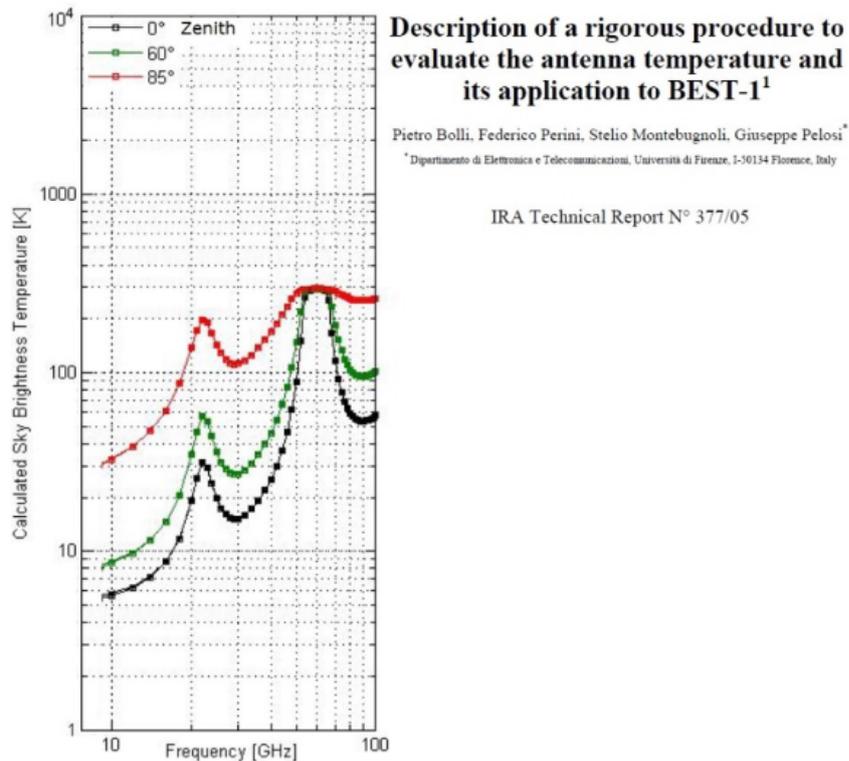


FIGURA A.3: *Temperatura di brillantezza* dell'atmosfera (IRA Technical Report N. 377/05).

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 figura A.3, 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.

Estrapolando i dati per la frequenza di 11.2 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.

Bibliografia

- Abrami, A. (1984). «Corso di radioastronomia». In: *Hoepli, Milano*.
 «Basic of Radio Astronomy» (1998). In: *Documento JPL D-13835*.
- Christiansen, Hogbom. «Radiotelescopes». In: *Camb. Univ. Press*.
- Dicke, R. H. (1946). «The Measurement of Thermal Radiation at Microwaves Frequencies». In: *The Review of Scientific Instruments* 17.7, pp. 268–275.
- Falcinelli, F. (2003). «Radioastronomia Amatoriale». In: *Il Rostro, Segrate, MI*.
- (2008). «Tecniche Radioastronomiche». In: *Sandit, Albino, BG*.
- (2013). «Unità Radiometrica Esterna RAL20_LNB». In: *Rapporto Interno RadioAstroLab 18102013*.
- (2015). «RAL10 1.2 GHz Total-Power Microwave Radiometer». In: *Rapporto Interno RadioAstroLab 13012015*.
- Kraus, J. D. (1988). «Radio Astronomy». In: *Cygnus-Quasar Books, Powell, Ohio*.
- Liou, K. N. (1980). «An introduction to atmospheric radiation». In: *Academic Press, New York, NY*.
- N. Skou, D. Le Vine (2006). «Microwave Radiometer Systems – Design and Analysis (2nd ed.)». In: *Artech House*.
- Papoulis, A. (1984). «Signal Analysis». In: *McGraw-Hill International Editions, New York*.
- R. E. Collin, F. J. Zucker. «Antenna Theory». In: *Mc Graw-Hill Book Co*.
- «Recommendation ITU-R P.372-12 (07/2015) Radio Noise» (2015). In: *Recommendation ITU-R*.
- Rohlfs, K. «Tools of Radio Astronomy». In: *Springer Verlag*.
- Sinigaglia, G. «Elementi di tecnica radioastronomica». In: *C. e C., Faenza*.