



Rapporti Tecnici INAF INAF Technical Reports

Number	144
Publication Year	2022
Acceptance in OA@INAF	2022-03-17T14:39:59Z
Title	Un sistema automatico di acquisizione ed elaborazione per il monitoraggio RFI: prime misure da 300MHz a 18GHz presso la Stazione Radioastronomica di Noto
Authors	NICOTRA, GAETANO; NICOTRA, DAVIDE; SERRA, Giampaolo
Affiliation of first author	IRA Bologna
Handle	http://hdl.handle.net/20.500.12386/31674 ; https://doi.org/10.20371/INAF/TechRep/144

TECHNICAL REPORT

Un Sistema Automatico di Acquisizione ed Elaborazione per il Monitoraggio RFI: prime misure da 300MHz a 18GHz presso la Stazione Radioastronomica di Noto

Autori

Gaetano NICOTRA¹, Davide NICOTRA², Giampaolo SERRA⁴

Revisori

Pietro BOLLI³, Alessandra ZANICHELLI¹

¹INAF-Istituto di Radioastronomia, (Bo), Italy

²Università degli Studi di Padova, Italy

³INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Italy

⁴ASI - Italian Space Agency, Italy

IMPORTANT NOTICE: It should be noted that this document describes a radio receiving system for the acquisition of frequency spectra aimed exclusively at protection from radio interferences in the frequency bands assigned to the radio astronomy service. Any other use of the work presented and / or the considerations made therein is completely arbitrary and contrary to the will of the authors. Radio spectra with band occupations, presence of signals at various frequencies, even beyond the frequency bands assigned to the radio astronomy service, have been reported for the sake of example and with the only purpose of optimizing the design of the radio receivers that have to operate in the specific spectral environment and / or the choice of the most suitable type / observation strategy.

NOTA IMPORTANTE: Si precisa che il presente documento descrive un sistema radio ricevente per acquisizione di spettri di frequenza finalizzata esclusivamente alla protezione da radio disturbi nelle bande di frequenza assegnate al servizio di radioastronomia. Ogni altro utilizzo del lavoro presentato e/o delle considerazioni ivi effettuate è del tutto arbitrario e contrario alla volontà degli autori. Gli spettri radio con occupazioni di banda, presenza di segnali a varie frequenze, anche al di fuori delle bande di frequenze assegnate al servizio di radio astronomia, sono state riportate a titolo di esempio e con il solo scopo di ottimizzare il progetto dei radio ricevitori che dovranno operare nello specifico ambiente spettrale e/o la scelta della più idonea tipologia/strategia osservativa.

Indice

1	Descrizione del Sistema	7
2	Sistema di ricezione	10
3	Rotore di Antenna	16
4	Comandi e controllo strumentazione	21
4.1	Controllo del Rotore	21
4.2	Controllo dell'Analizzatore di Spettro	23
4.3	Interfaccia di acquisizione GUI	23
5	Sistema Operativo Virtuale	27
6	Elaborazione e Calibrazione dei Dati	28
7	Rappresentazione dei Dati	32
8	Campagne di misura	33
9	Conclusioni	39
10	Appendice - Manuale Operativo di Acquisizione	40

Sommario

Il monitoraggio periodico e la vigilanza delle Radio Frequency Interference (RFI) nelle bande di frequenza assegnate alla radioastronomia è un'attività fondamentale per il corretto funzionamento di una stazione di osservazione radioastronomica.

Il lavoro presentato descrive lo sviluppo di un sistema di acquisizione automatica di spettri attraverso un analizzatore di spettro, per il monitoraggio RFI al Radiotelescopio di Noto. Si è voluta valorizzare l'attrezzatura già presente presso i laboratori della stazione radioastronomica, mediante interventi di modifica e modernizzazione della strumentazione datata.

L'integrazione tra vecchie e nuove tecnologie ha trovato in questo lavoro terreno fertile ed ha consentito, con impegni economici minimali di realizzare un valido strumento di monitoraggio delle RFI nelle Bande radioastronomiche (RAS), rivelatosi efficiente e affidabile.

Introduzione

Le bande di frequenza ritenute importanti per la ricerca nel campo della radioastronomia, sono concordate e approvate dalla International Telecommunication Union (ITU)[1] e recepite dai singoli Stati per la loro assegnazione d'uso al servizio. L'Italia, importante partner internazionale nella ricerca Very Long Baseline Interferometry (VLBI), partecipa con tre importanti centri osservativi, sedi di altrettanti radiotelescopi: Medicina (BO), Noto (SR) e il Sardinia Radio Telescope (CA). In Italia, le bande di frequenza, assegnate al servizio di radio astronomia, sono indicate nel Piano Nazionale di Ripartizione delle Frequenze (PNRF) di competenza del Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE)[2]: alcune di esse sono dedicate a utilizzo esclusivo per attività di ricezione di segnali di emissione naturale da parte dei corpi celesti oggetto di studio e di ricerca. Tali bande sono dedicate unicamente alla radio-ricezione e non è consentita, in nessuna forma, la trasmissione di alcun segnale. Altre invece sono classificate come primarie o secondarie e quindi condivise con altri servizi.

L'attività di monitoraggio per la protezione dall'inquinamento elettromagnetico delle bande di frequenza assegnate alla Radioastronomia (RAS) rappresenta un'attività fondamentale per ogni stazione radioastronomica. Il monitoraggio consiste nella vigilanza, con verifica periodica, atta a determinare la presenza di segnali radio interferenti, detti Radio Frequency Interference (RFI), non consentiti nelle bande riservate.

L'inquinamento elettromagnetico dovuto alla continua nascita di nuovi servizi radio, aumenta il rischio di presenza di segnali nocivi per l'attività di ricerca in prossimità dei radiotelescopi: infatti gli elevati guadagni delle antenne e le altissime sensibilità dei ricevitori, fissano livelli di tolleranza estremamente bassi per i segnali interferenti[3]: sistemi non omologati, apparecchiature elettroniche attive, contatti striscianti, trasformatori di tensione, sono solo alcuni esempi delle sorgenti d'interferenza su cui risulta estremamente importante porre la corretta attenzione per tentare di eliminare o minimizzare l'impatto nocivo che essi possono avere sui risultati degli esperimenti e sulle osservazioni radioastronomiche.

Le bande di frequenza assegnate alla radioastronomia sono presenti in diverse zone nello spettro elettromagnetico radio: ogni radiotelescopio è dotato di un certo numero di ricevitori, ognuno di essi riceve una banda di frequenza caratteristica che comprende anche le bande assegnate al servizio di radioastronomia. Durante gli esperimenti programmati, si tende a sfruttare tutta la banda ricevuta disponibile e priva di segnali interferenti.

In materia di RFI, ogni radiotelescopio tende a proteggere tutte le bande RAS, incluse quelle temporaneamente non ricevute (mancanza di disponibilità dei ricevitori, sviluppo futuro). Per far fronte al problema RFI, ogni stazione adotta una strategia di monitoraggio ed è di regola attrezzata con sistemi di ricezione dipendenti o indipendenti dai radiotelescopi, con i quali effettuare misure e verifiche periodiche delle bande RAS.

I sistemi in uso possono essere di due tipi: fissi o mobili. I sistemi fissi sono sempre disponibili per la verifica e il monitoraggio immediato di segnali presenti che richiedono un maggiore livello di attenzione. Con l'allestimento di una stazione fissa, si possono effettuare delle campagne di misura periodiche su tutte le bande disponibili dal sistema stesso. Essi sono composti da un certo numero di antenne direttive, amplificatori, filtri e switch adeguati a funzionare nell'intervallo di frequenza in cui operano i ricevitori delle stazioni radio astronomiche e consentono di misurare i segnali interferenti presso postazioni che si trovano in genere in prossimità del radio telescopio. Una panoramica più ampia sui sistemi di ricezione fissa è disponibile in bibliografia [4, 5].

I sistemi mobili permettono di effettuare misure fuori dalla stazione osservativa e permettono quindi di sfruttare i rilievi naturali come postazioni di misura permettendo di acquisire segnali ad altezze maggiori o uguali all'altezza del radiotelescopio. Inoltre, questi sistemi consentono l'individuazione della posizione geografica di eventuali segnali interferenti mediante tecniche di triangolazione. Nel documento [6] si descrive l'attività di verifica sul territorio di segnali interferenti al sito del Sardinia Radio Telescope durante la sua costruzione, effettuata con l'ausilio di un laboratorio mobile. Per una più ampia informazione sui laboratori mobili in uso presso l'Istituto di Radioastronomia si rimanda ai documenti [7, 8, 9].

In questo lavoro si presenta un sistema di monitoraggio RFI operante presso la Stazione Radioastronomica di Noto nella banda di frequenze 300MHz - 18GHz. È stato progettato e realizzato un sistema di acquisizione automatica di spettri che, unitamente a una piattaforma software di elaborazione e rappresentazione delle misure, si propone di fornire un valido strumento di lavoro per l'attività del Laboratorio RFI.

Questo lavoro è stato supportato dal Techno PRIN 2012 dell'INAF con titolo del progetto "RFI mitigation at the Italian radio telescopes", P.I. Dr. Karl-Heinz Mack che mira a creare procedure di monitoring e mitigazione RFI. Verranno di seguito presentati una descrizione generale del sistema, i componenti utilizzati nella catena di ricezione, le modifiche elettroniche effettuate al rotore di antenna, i comandi e il controllo della strumentazione, l'interfaccia di acquisizione. Inoltre in appendice viene riportato un manuale operativo per l'utilizzo del sistema con l'elaborazione e la rappresentazione dei dati attraverso la piattaforma software appositamente realizzata.

Il documento qui presentato ha la seguente struttura:

- **1. Descrizione del sistema:** in questa sezione si descrivono le caratteristiche tecniche desiderate per il sistema e gli obiettivi che si intende raggiungere.
- **2. Sistema di ricezione:** questa sezione è dedicata alla descrizione tecnica della strumentazione e componentistica utilizzata nella sezione di ricezione.
- **3. Rotore di Antenna:** in questa sezione si riporta una descrizione della strumentazione usata per la movimentazione delle antenne e le relative modifiche elettroniche apportate.
- **4. Comandi e controllo strumentazione:** questa sezione descrive il protocollo software di controllo del rotore di antenna e dell'analizzatore di spettro.
- **5. Sistema Operativo Virtuale:** in questa sezione si descrive l'ambiente software operativo che consiste in un sistema Linux virtualizzato, configurato ad hoc.
- **6. Elaborazione e Calibrazione dei Dati:** questa sezione descrive la fase di post-elaborazione e calibrazione dei dati acquisiti.
- **7. Rappresentazione dei Dati:** in questa sezione si descrive il sistema di rappresentazione grafica degli spettri acquisiti.
- **8. Campagne di misura:** in questa sezione vengono presentati, a titolo esemplificativo, alcuni risultati ottenuti nel corso di quattro campagne di misura effettuate con il sistema descritto.
- **9. Conclusioni:** questa sezione fornisce un sunto della attività svolta e delle possibili prospettive future.
- **10. Appendice - Manuale Operativo di Acquisizione** in appendice si descrive in maniera dettagliata il processo operativo di misura con il sistema di acquisizione.

Denominazione Banda	Radioastronomia [MHz]	Assegnazione PNRF	Ricevitore [MHz]	Antenna RFI n.
<i>UHF</i>	322.0 – 328.6	<i>primaria</i>	<i>assente</i>	1
<i>UHF</i>	406.0 – 408.0	<i>primaria</i>	<i>assente</i>	1
<i>UHF</i>	608.0 – 614.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	1
<i>L</i>	1330.0 – 1400.0	<i>secondaria</i>	1289.0 – 1745.0	1
<i>L</i>	1400.0 – 1427.0	<i>primaria</i>	1289.0 – 1745.0	1
<i>L</i>	1610.6 – 1613.8	<i>primaria</i>	1289.0 – 1745.0	1
<i>L</i>	1660.0 – 1660.5	<i>secondaria</i>	1289.0 – 1745.0	1
<i>L</i>	1660.5 – 1668.4	<i>primaria</i>	1289.0 – 1745.0	1
<i>L</i>	1668.4 – 1670.0	<i>secondaria</i>	1289.0 – 1745.0	1
<i>L</i>	1718.8 – 1722.2	<i>secondaria</i>	1289.0 – 1745.0	1
<i>S</i>	2205.0 – 2351.0	<i>non assegnata</i>	2210.0 – 2410.0	2
<i>S</i>	2655.0 – 2690.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>S</i>	2690.0 – 2700.0	<i>primaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>S</i>	3260.0 – 3267.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>S</i>	3332.0 – 3339.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>S</i>	3352.5 – 3345.8	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>C</i>	4825.0 – 4835.0	<i>secondaria</i>	4700.0 – 5150.0	2
<i>C</i>	4950.0 – 4990.0	<i>secondaria</i>	4700.0 – 5150.0	2
<i>C</i>	4990.0 – 5000.0	<i>primaria</i>	4700.0 – 5150.0	2
<i>C</i>	6650.0 – 6675.2	<i>secondaria</i>	6500.0 – 6800.0	2
<i>X</i>	8205.0 – 8600.0	<i>non assegnata</i>	8176.0 – 8585.0	2
<i>X</i>	10600.0 – 10700.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>Ku</i>	14470.0 – 14500.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>Ku</i>	15350.0 – 15400.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	2
<i>K</i>	22000.0 – 22500.0	<i>primaria</i>	21850 – 22850	3
<i>K</i>	22810.0 – 22860.0	<i>secondaria</i>	21850 – 22850	3
<i>K</i>	23600.0 – 24000.0	<i>primaria</i>	<i>assente</i>	3
<i>Ka</i>	31300.0 – 31800.0	<i>secondaria</i>	<i>assente</i>	4
<i>V</i>	42500.0 – 43500.0	<i>secondaria</i>	39000 – 43500	4

Tabella 1: Bande di frequenza RAS da 300 MHz a 43 GHz. La tabella indica tutte le bande riconosciute al Servizio di Radioastronomia dal PNRF[2] ministeriale, la loro classe di assegnazione prioritaria, la presenza del ricevitore al Radiotelescopio di Noto e la banda di frequenza realmente ricevuta. L'ultima colonna indica l'antenna utilizzata nel sistema di ricezione delle RFI (vedi Sezione 2).

1 Descrizione del Sistema

Il sistema di acquisizione realizzato, è composto da strumentazione e componenti scelti o costruiti opportunamente per consentire la ricezione di bande di frequenza comprese tra 300MHz e 18GHz. Attualmente il Radiotelescopio di Noto è in grado di ricevere segnali con frequenza fino a 43GHz. In tale porzione dello spettro radio, le bande di frequenza assegnate al servizio della radioastronomia, sono molteplici.

Tutte le porzioni di spettro d'interesse scientifico per la radioastronomia vengono riportate in Tabella 1, dove viene indicata anche la classe di assegnazione nel PNRF, la banda ricevuta al radiotelescopio e l'antenna utilizzata per le misure RFI.

Nella realizzazione di questo progetto, si è operato con l'intento di raggiungere i seguenti obiettivi:

- **Adeguate estensione della banda ricevuta:** il sistema deve essere in grado di individuare la presenza di segnali RFI sia nelle bande assegnate e in uso presso la stazione osservativa di Noto, che in bande assegnate ma non ancora utilizzate. Si intende centrare l'obiettivo in due fasi successive: nella prima si intende raggiungere una copertura in frequenza da 300MHz a 18GHz, nella seconda, estendere tale copertura fino a 43GHz. L'esigenza di prevedere lo sviluppo completo del sistema in due fasi successive, nasce dalla necessità di disporre di strumentazione e componentistica adeguata a ricevere segnali nella banda 18-43 GHz, attualmente non disponibile.
- **Facile trasportabilità:** il sistema deve essere leggero e compatto per essere facilmente trasportato a mano e in auto per consentire l'esecuzione di misure anche all'esterno del perimetro della Stazione Radioastronomica di Noto.
- **Costi contenuti:** il sistema deve essere realizzato in economia cercando di sfruttare al meglio la strumentazione e le attrezzature già disponibili presso la Stazione di Noto, limitandosi ad acquistare solo la componentistica necessaria al completamento del sistema.

Un diagramma schematico del sistema è mostrato in Figura 1. Un computer, attraverso una connessione Ethernet, controlla i movimenti di un sistema ricevente di antenne e amplificatori e, contemporaneamente, gestisce un analizzatore di spettro il quale acquisisce continuamente spettri in forma numerica, collezionando i dati in file da trattare in fase di post-elaborazione. Il sistema è in grado di operare sia in *locale*, con connessione diretta a un PC, che in *remoto*, attraverso una rete LAN: tale flessibilità nella configurazione consente di poter utilizzare lo stesso sistema sia da postazione fissa che da postazione mobile.

Due foto del sistema in funzione, in fase di test, sono mostrate nelle Figure 2 e 3. La postazione di misura è stata opportunamente scelta per consentire di avere le antenne a una quota di circa otto metri dal suolo.

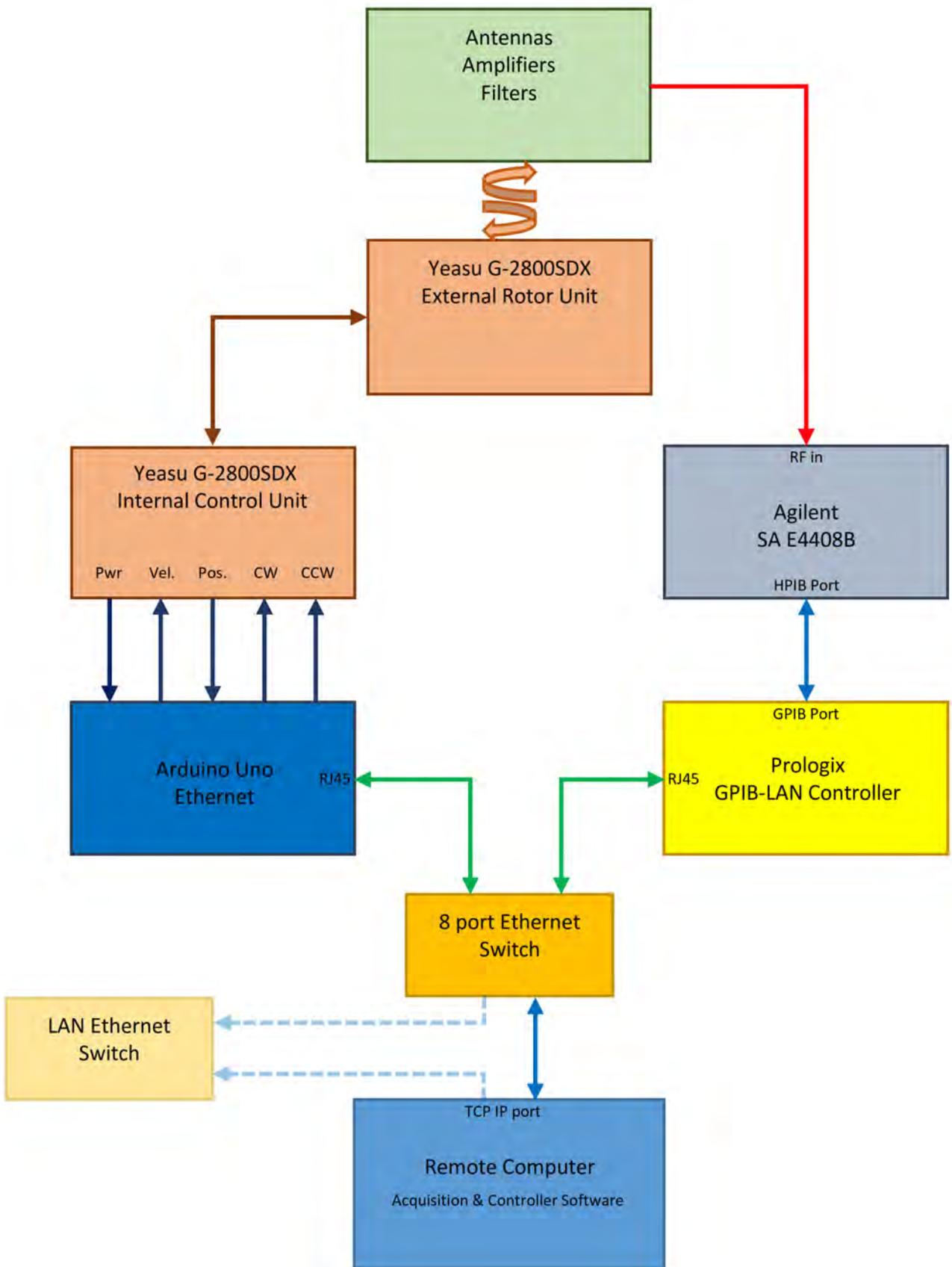


Figura 1: Diagramma a blocchi del sistema di ricezione.



Figura 2: Stazione di misura esterna provvisoria durante il test iniziale presso il Radiotelescopio di Noto.

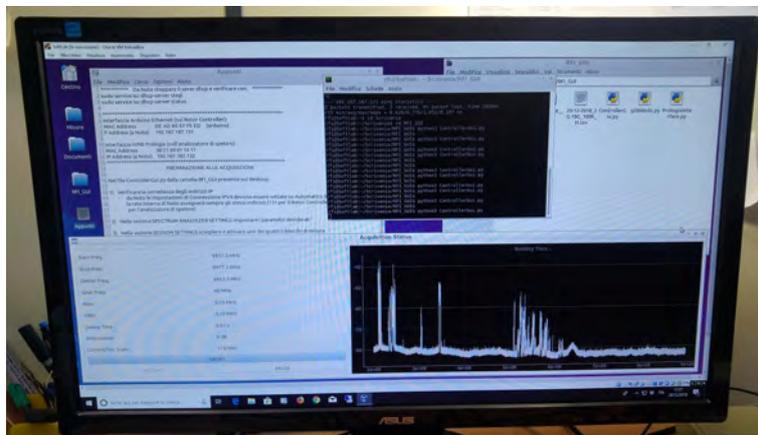


Figura 3: Stazione di misura interna durante il test iniziale.

2 Sistema di ricezione

Per poter ottenere una copertura continua su tutte le bande d'interesse, si è scelto di operare con diverse tipologie di antenne e amplificatori a larga banda. Allo stesso tempo, si è cercato di minimizzare il numero di antenne necessarie, per rendere meno complesse le fasi di acquisizione, elaborazione e calibrazione, nonché per agevolare il trasporto del sistema.

L'intero spettro di frequenza che si intende ricevere, è stato suddiviso in 4 porzioni. A ogni porzione dello spettro è stato dedicato l'utilizzo di una configurazione antenna - cavo coassiale - amplificatore, dei quali si conoscono le caratteristiche di risposta in frequenza fornite dai rispettivi costruttori, da poter utilizzare successivamente in fase di calibrazione:

- Banda 300-2000 MHz, antenna 1
 - Antenna log periodica realizzata presso l'Istituto di Radioastronomia di Noto, Gain 7-7.5 dBi da 300 a 3000 MHz (Fig.4)
 - Amplificatore *MiniCircuit* Mod. ZKL-2R5[10], 10-2500 MHz, Gain 30.0 dB, NF 5.0 dB, (Fig.5)
 - Cavo coassiale *Radiall* SHF3M (5m) SMA-M/SMA-M; DC to 40 GHz; Att.: 0.2dB/m (0.3GHz), 0.39 dB/m (1GHz), 0.56 dB/m (2GHz)(Fig.9)[11]
- Banda 2-18 GHz, antenna 2
 - Antenna Horn *TDK* Mod. HRN-0118 [12]; 1-18 GHz; Gain: 6 dB (1GHz), 10 dB (10 GHz), 11.5 dB (18GHz) (Fig.6)
 - Amplificatore *Miteq* Mod. AMF-5D-02001800-40-20P-R, 2-18 GHz, +30dB gain, NF 4.0 (Fig.7)[13]
 - Cavo coassiale *Radiall* SHF3M (5m) SMA-M/SMA-M; DC to 40 GHz; Att.: 0.56 dB/m (2GHz), 1,15 dB/m (8GHz), 1.77 dB/m (18GHz) (Fig.9)[11]
- Banda 18-26 GHz, antenna 3
 - Antenna *Horn A-INFOMW* LB-42-25-C2-SF (Fig.8)[15], 25dBi gain
 - Amplificatore *Miteq* Mod. AMF-5F-18004000-60-8P, 18-40 GHz, +30dB gain. NF 6.0[14]
 - Cavo coassiale *Radiall* SHF3M (5m) SMA-M/SMA-M; DC to 40 GHz; Att.: 1.77 dB/m (18GHz), 2.19 dB/m (26.5GHz)(Fig.9)[11]
- Banda 26-43 GHz, antenna 4
 - Antenna *Horn A-INFOMW* LB-28-25-C2-XX, 26.6-40 GHz, 25dBi gain[15]
 - Amplificatore *Miteq* Mod. AMF-5F-18004000-60-8P, 18-40 GHz, +30dB gain, NF 6.0[14]
 - Cavo coassiale *Radiall* SHF3M (5m) SMA-M/SMA-M; DC to 40 GHz; Att.: 2.19 dB/m (26.5GHz), 2.76 dB/m (40GHz)(Fig.9)[11]

L'analizzatore di spettro utilizzato Agilent Mod.E4408B ha una frequenza limite superiore di 26.5 GHz, tale frequenza rappresenta al momento anche il limite superiore di ricezione del nostro sistema.

I valori caratteristici del nostro sistema di ricezione RFI, nelle bande di frequenza corrispondenti a quelle dei ricevitori presenti e operativi al Radiotelescopio di Noto, sono riportati in Tabella 2. La prima colonna della tabella riporta la denominazione della banda di ricezione; la seconda colonna riporta la frequenza di centro banda; la colonna Ch.Gain riporta il guadagno complessivo alla specifica frequenza come somma dei contributi di tutta la catena ricevente:

$$\text{Ch.Gain} = G_{\text{ant}} - A_{\text{coax}} + G_{\text{amp}}$$

dove G_{ant} è il guadagno d'antenna, A_{coax} è l'attenuazione di cavi coassiali e delle transizioni e G_{amp} è il guadagno dell'amplificatore.

La colonna NF riporta la figura di rumore complessiva del canale ricevente:

$$NF = 10 \log_{10} F$$

dove F è il noise factor, definito come:

$$F = F_{\text{coax}} + (1 - F_{\text{amp}}) + \frac{1 - F_{\text{cable}}}{G_{\text{amp}}}$$

dove F_{coax} rappresenta il noise factor dei cavi e delle transizioni presenti tra l'antenna e l'ingresso dell'amplificatore, F_{amp} e G_{amp} rappresentano rispettivamente il noise factor e il guadagno lineare dell'elemento amplificatore, F_{cable} è il noise factor del cavo che collega l'uscita dell'amplificatore all'analizzatore di spettro.

Nella colonna Measured Noise Floor vengono riportati i valori di rumore di fondo misurati all'analizzatore di spettro e corretti per il guadagno complessivo della catena ricevente:

$$\text{Measured Noise Floor} = P_{\text{SA}} - \text{Ch.Gain}$$

dove P_{SA} è il valore letto (in Max Hold) sull'analizzatore di spettro in assenza di segnale durante una misura presso il sito di Noto e il Ch.Gain è il guadagno della catena ricevente. Questo valore da informazioni utili sullo stato di rumore di fondo nella banda.

La colonna Receiver System Noise riporta le sensibilità del sistema ricevente e rappresenta il livello di potenza minimo misurabile:

$$\text{Receiver System Noise} = -174 \text{ dBm} + NF + 10 \log_{10} \text{RBW}$$

dove NF è la figura di rumore complessiva del sistema e RBW (Resolution Bandwidth) è la risoluzione dell'analizzatore di spettro. Il valore -174 dBm è la potenza P disponibile all'ingresso del ricevitore per un resistore posto a 290 K, risultante dalla relazione

$$P = kTB$$

con k costante di Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T temperatura pari a 290 K e B è la banda, pari ad 1 Hz.

La Tabella 2 riporta i valori di Receiver System Noise e Measured Noise Floor per i due valori di RBW utilizzati durante le misure: 100kHz e 3MHz. La presenza di segnali diffusi su tutta la banda, determina un aumento del rumore di misura che ha maggiore contributo nelle misure con RBW maggiori. Dunque, la differenza ΔP fra i valori di potenza misurati a 100kHz e 3MHz è indicativa del rumore complessivo presente nella banda. Come è possibile apprezzare nella colonna Receiver System Noise, il contributo a ΔP dato dal rumore termico del sistema ricevente è di circa 15dB. Valori di $\Delta P > 15\text{dB}$ presenti nella colonna Measured Noise Floor sono da attribuire al rumore ambientale a banda larga presente in ciascuna regione di spettro.

Band	Freq. [MHz]	Ch.Gain [dB]	NF [dB]	Measured Noise Floor		Receiver System Noise	
				[dBm]		[dBm]	
				RBW 100kHz	RBW 3MHz	RBW 100kHz	RBW 3MHz
<i>P</i>	325	37.0	5.4	-110.0	- 88.50	-118.6	- 103.8
<i>L</i>	1520	37.0	5.5	-117.5	- 102.7	-118.5	- 103.7
<i>S</i>	2310	42.0	4.0	-116.4	- 102.3	-120.0	- 105.2
<i>C-</i>	4925	42.0	2.8	-118.7	- 103.8	-121.2	- 106.4
<i>C+</i>	6650	42.5	2.5	-119.5	- 104.3	-121.5	- 106.7
<i>X</i>	8380	43.0	2.5	-119.5	- 104.5	-121.5	- 106.7

Tabella 2: Guadagno (Ch.Gain), figura di rumore (NF), Noise Floor e sensibilità del sistema di acquisizione RFI nelle diverse bande di frequenza per le quali al Radiotelescopio di Noto, si dispone di ricevitori operativi.

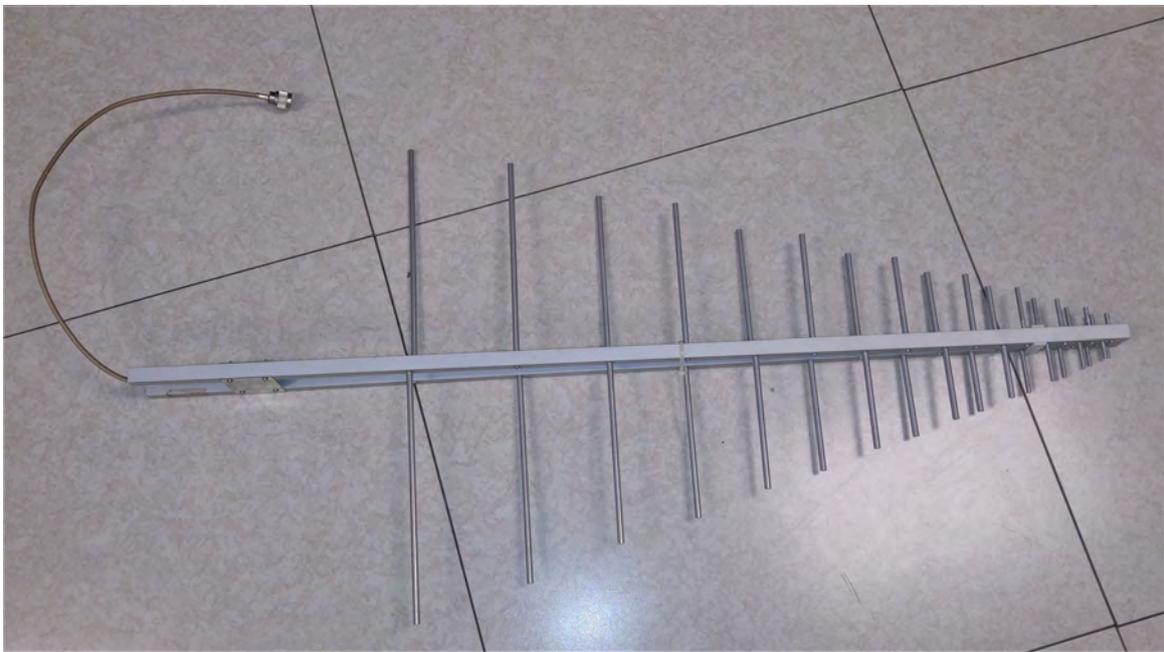


Figura 4: Log periodica LPDA 300-3000 MHz, (Antenna 1)



Figura 5: Amplificatore RF MiniCircuits ZKL-2R5, 10-2500 MHz

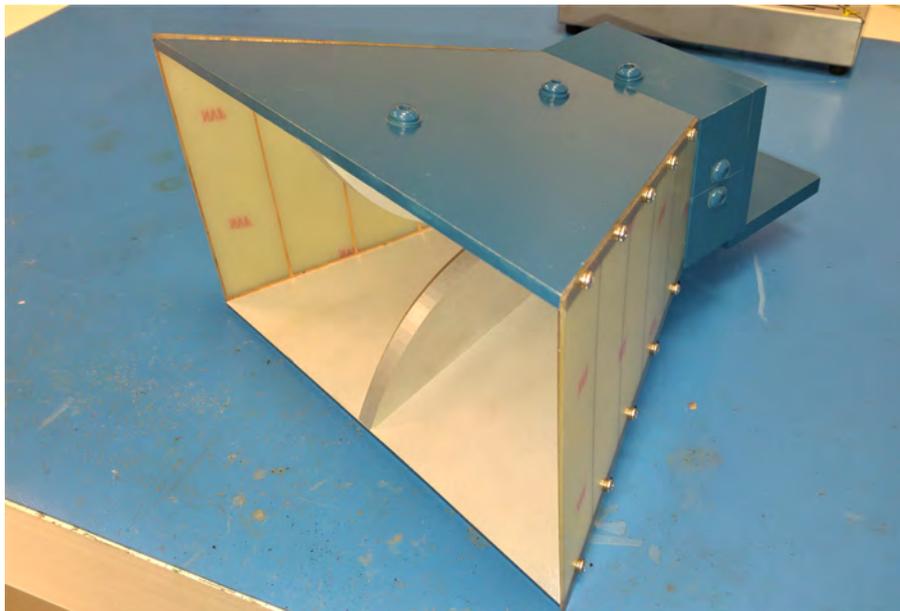


Figura 6: TDK HRN-0118 Double-Ridged Horn Antenna, 1-18GHz, (Antenna 2)

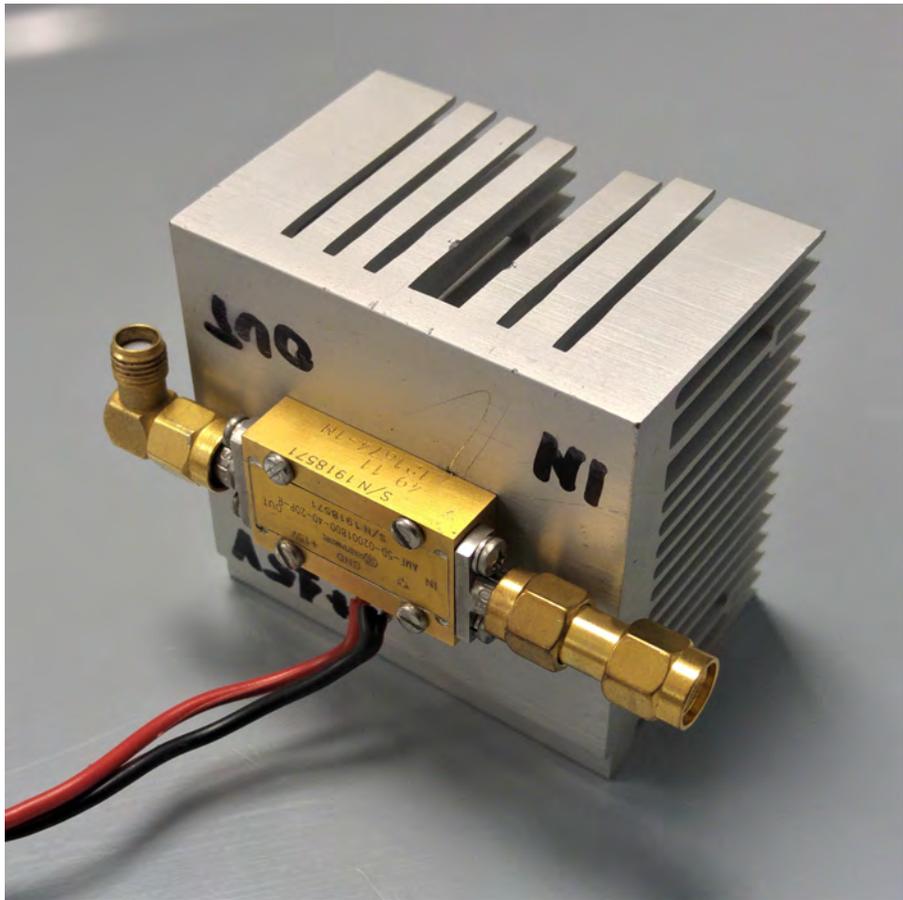


Figura 7: Amplificatore RF Miteq Mod. AMF-5D-02001800-40-20P-R, 2-18GHz

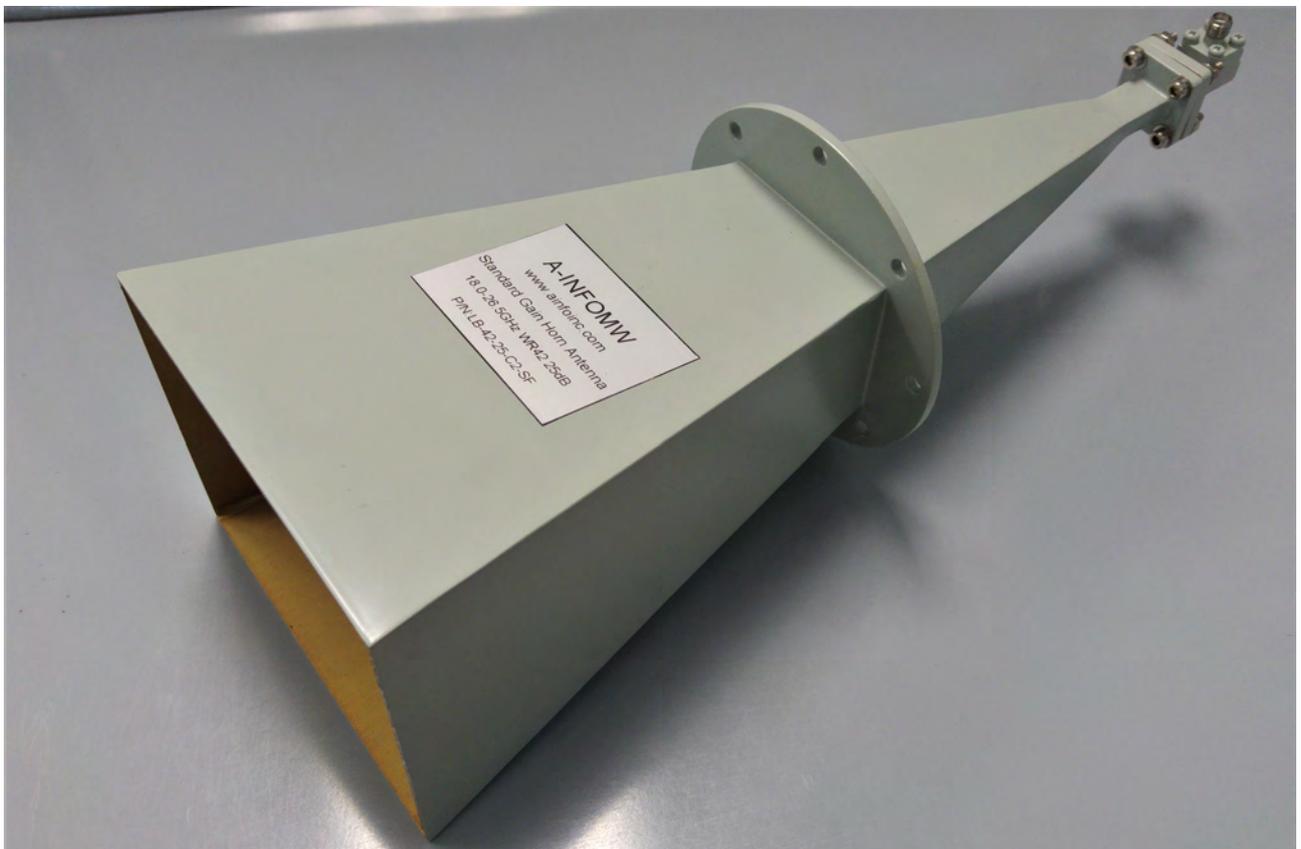


Figura 8: A-INFO MW LB4225 Horn Antenna 18-26.5 GHz (Antenna 3)

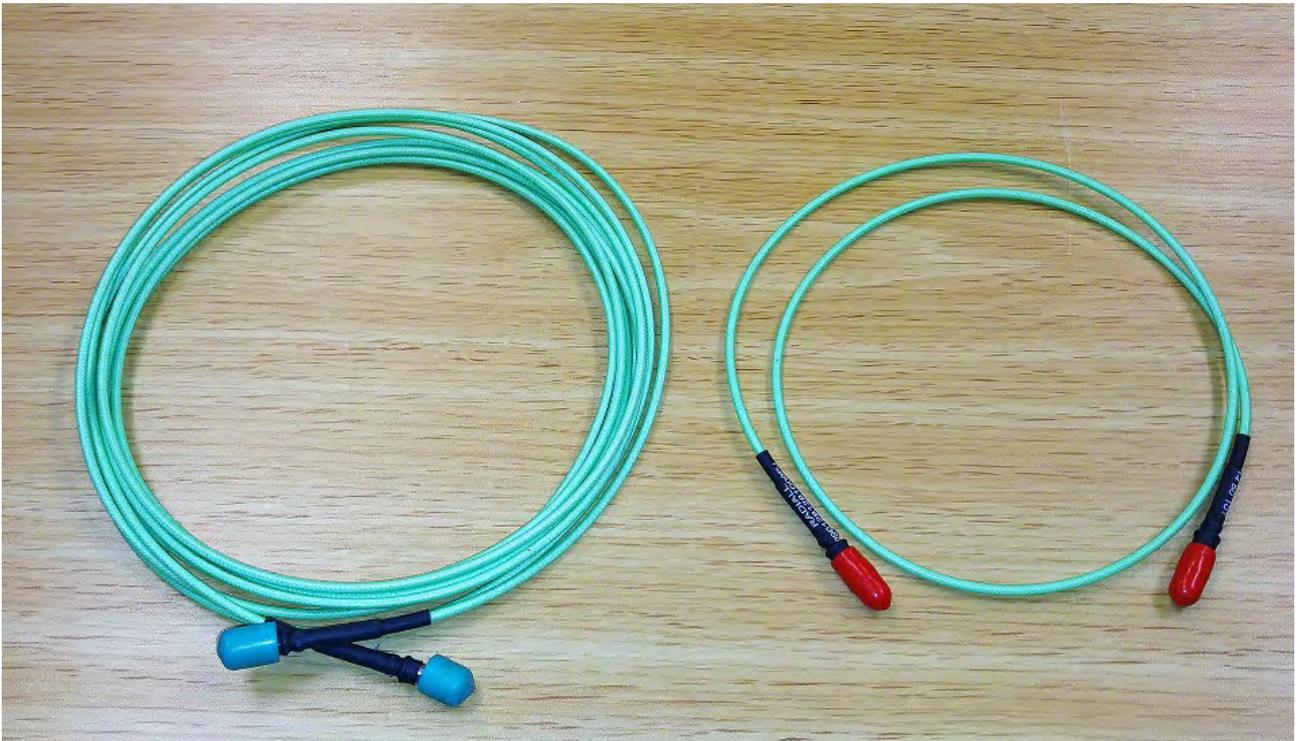


Figura 9: Cavi coassiali flessibili Radiall mod. SHF3M utilizzati per il collegamento tra amplificatore e analizzatore di spettro.

3 Rotore di Antenna

Il rotore di antenna permette di controllare la direzione dell' antenna attraverso un apparecchio motorizzato composto da due unità: un'unità esterna di attuazione e una unità interna di controllo.

Per il progetto è stato scelto un rotore già presente presso la Stazione di Noto prodotto dalla YEASU e identificato dal modello G-2800SDX[16]. Questo rotore monoasse è progettato per la movimentazione di sistemi di antenna con carico verticale fino a 300 Kg. Le due unità di cui si compone sono visibili nelle Figure 10 e 11.

L'unità interna presenta un pannello di controllo composto da un quadrante analogico illuminato che indica la direzione puntata e una sezione con potenziometri e pulsanti dove poter impostare la velocità di rotazione, l'angolo da raggiungere in preset e l'attuazione manuale LEFT e RIGHT per movimenti manuali in senso antiorario (CCW) e orario (CW).



Figura 10: Rotore di antenna, unità interna di controllo

L'unità di controllo, allo stato originale, non prevede alcun sistema di controllo remoto o porte di comunicazione dedicate a sistemi esterni come micro-controllori o computer. Si dispone esclusivamente di un connettore interno tipo mini DIN a otto pin che, attraverso l'uso di un'interfaccia supplementare, da implementare, ne renderebbe possibile il controllo. La sezione di schema elettrico che riproduce il connettore in questione è visibile in Figura 12.

L'interfaccia originale prevista per questa unità richiede un modulo addizionale per la comunicazione tramite porta RS-232 che risulta ormai fuori produzione. Ciò non costituisce problema in quanto la trasmissione seriale, nel caso specifico, risulterebbe per molti aspetti, fortemente limitante. Per permettere il controllo via rete LAN del rotore, si è optato per lo sviluppo di una interfaccia dedicata attraverso un micro-controllore programmabile: per tale scopo, è stata utilizzata una scheda di sviluppo tipo Arduino Uno[17] con interfaccia Ethernet (Figura 13).



Figura 11: Rotore di antenna, unità esterna di attuazione

Le dimensioni della scheda di sviluppo sono tali che si adattano bene allo spazio disponibile sotto il coperchio di chiusura del controller del rotore, in un vano appositamente predisposto per l'aggiunta di eventuali schede di espansione. Con pochi interventi di modifica e di adattamento meccanico, si è riusciti a installare sia la scheda di sviluppo che la relativa scheda di programmazione rappresentata in Figura 14, in maniera da renderli facilmente disponibili dall'esterno per ogni eventuale intervento di modifica del firmware. Un'immagine di quanto realizzato è mostrato in Figura 15.

La scheda Arduino e i pin del controller sono connessi tramite una interfaccia realizzata appositamente che consente di realizzare tre importanti funzioni:

- Adattare i livelli di tensione tra l'Arduino, di tipo Transistor-Transistor Logic (TTL) a +5V, con quelli del controller, a +12V.
- Inserire un filtro passa basso su una uscita Pulse-Width Modulation (PWM) del micro-controllore per realizzare un'uscita analogica proporzionale in tensione da iniettare sull'ingresso del set di velocità.
- Propagare il segnale del potenziometro di posizione e l'alimentazione alla scheda Arduino.

Lo schema elettrico della suddetta interfaccia è mostrato nella Figura 16: ai Pin 1 e 2 del connettore YA8604-061, corrispondono i due controlli di direzione, in particolare sul Pin 1 si aziona il movimento di rotazione in senso orario (CW o Right), al Pin 2 quello in senso antiorario (CCW o Left). Una tensione di +12V è presente ai terminali e l'attuazione avviene ponendo a massa rispettivamente l'uno o l'altro pin.

La gestione diretta attraverso le uscite digitali del micro-controllore non è possibile data la incompatibilità dei livelli di tensione tra la scheda Arduino (5V) e controller del rotore (12V). Dunque, sono stati impiegati due transistor a giunzione bipolare (BJT) come interruttori controllati dalle due corrispondenti uscite digitali a 5V. In tal modo la gestione ON/OFF può

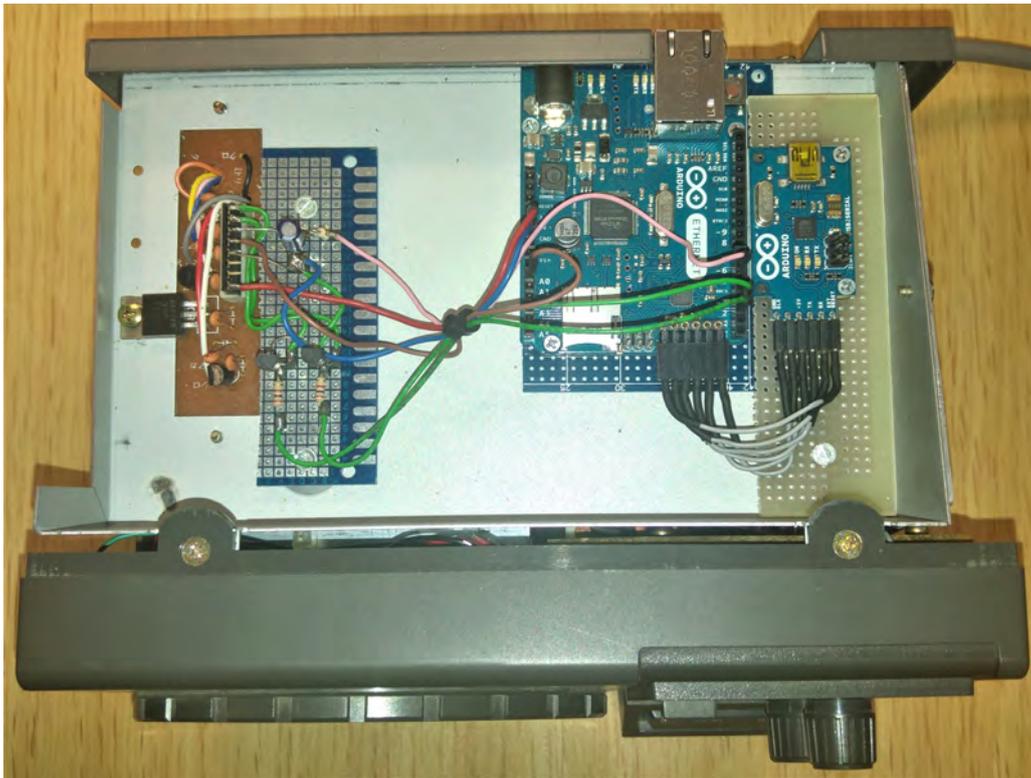


Figura 15: Modifiche effettuate al controller del rotore. Sulla destra, il micro-controllore Arduino Ethernet con l'interfaccia di programmazione seriale. Sulla sinistra, la mini-board originale con il connettore mini DIN di controllo e una piccola interfaccia di adattamento, realizzata appositamente, tra le I/O del controller e quelle di Arduino.

avvenire senza l'utilizzo di relè a contatto meccanico.

Il Pin 3 dello stesso connettore, è un ingresso abilitato a comando di velocità. Tra 0V e 5V si opera tra minima e massima velocità consentita. Il controllo di tipo analogico proporzionale, consente d'impostare la velocità di movimento o di cambiarla al volo durante la rotazione stessa. È importante far notare che, durante la messa in movimento attraverso il controllo remoto, i comandi manuali presenti a pannello restano disabilitati, senza che venga fornita alcuna indicazione visibile. Il rilascio contemporaneo dei due comandi di direzione, abilita automaticamente al controllo manuale da pannello, come allo stato originale.

Sul Pin 4 del connettore mini DIN è presente una tensione proporzionale alla posizione angolare del rotore: essa può assumere valori compresi tra 0V e 5V per posizioni angolari dell'asse comprese tra 0 e 450 gradi. Tale tensione viene letta attraverso un ingresso analogico del micro-controllore e utilizzata come feedback di posizione.

Il Pin 5 è la massa comune (GND), mentre ai Pin 6 e 7 sono presenti rispettivamente una -12V e una +12V, non utilizzate dal progetto.

Al Pin 8 è presente una +5V che invece viene utilizzata per alimentare il micro-controllore e l'interfaccia di programmazione. Tutte le alimentazioni disponibili sono stabilizzate attraverso regolatori di tensione dedicati.

L'unità esterna non ha subito alcuna modifica, essa è collegata all'unità di controllo attraverso un cavo multipolare intestato a connettori dedicati, lo schema di cablaggio è visibile in Figura 17.

Microcontroller Interface

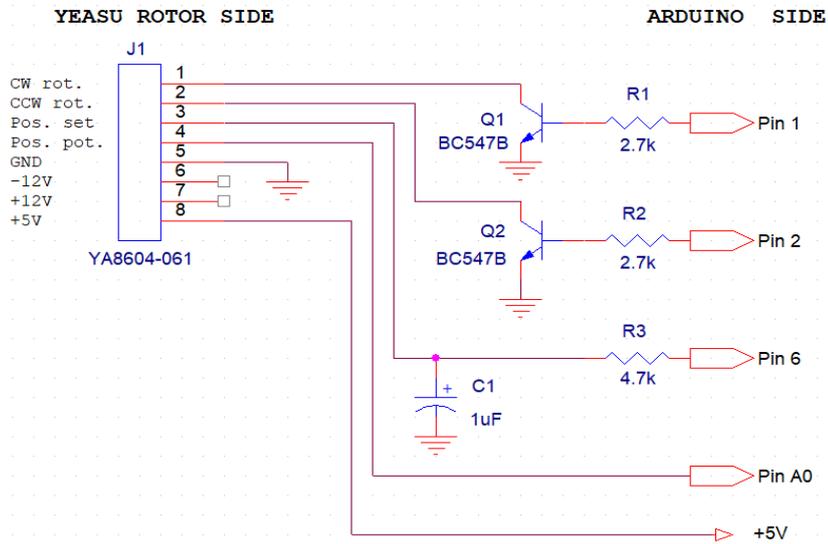


Figura 16: Schema elettrico dell'interfaccia con il rotore

Solder-End Views of Plugs

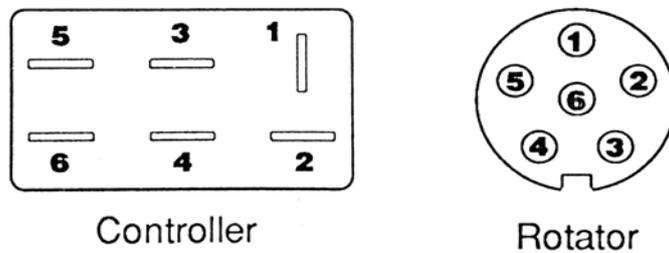


Figura 17: Connettori del cavo di collegamento tra controller e rotore

4 Comandi e controllo strumentazione

4.1 Controllo del Rotore

Il controllo del rotore è stato implementato tramite un semplice protocollo di rete User Datagram Protocol (UDP) che permette al software di acquisizione dati di controllare in tempo reale la rotazione dell'antenna, dialogando con il micro-controllore Arduino Ethernet. Il protocollo prevede lo scambio di pacchetti UDP nel seguente formato:

[*PAYLOAD*; *CHECKSUM*]

Il *PAYLOAD* rappresenta l'operazione da eseguire sul rotore; il *CHECKSUM* è il CRC-32[18] del *PAYLOAD* e garantisce l'integrità della comunicazione (normalmente non garantita dal protocollo UDP). I possibili comandi eseguibili sul rotore sono i seguenti:

- **S**[0-255]: (**S**peed) imposta la velocità di rotazione del rotore attraverso un parametro da 0 (velocità minima) a 255(velocità massima).
- **G**[3-450]: (**G**oto) manda il rotore all'angolo desiderato, da 3° a 450°. Una volta raggiunto l'angolo, il rotore viene fermato.
- **H**[3-450]: (**g**oto and **H**old) manda il rotore all'angolo desiderato, da 3° a 450°. Una volta raggiunto l'angolo, il rotore tenta di tenere la posizione all'angolo desiderato, correggendo la posizione in caso di alterazioni.
- **C**: (**C**urrent angle) restituisce l'angolo a cui si trova il rotore.
- **T**: (**t**urrent speed) restituisce la velocità impostata sul rotore come numero intero da 0 a 255.
- **D**[> 1]: (**D**elta) imposta la tolleranza sulla misura degli angoli. Questo parametro deve essere tenuto > 1 per evitare instabilità nel funzionamento. valore consigliato 2.
- **I** : (**I**nf) restituisce informazioni sullo stato del motore e sul tipo di rotazione in corso.
- **A**: (**A**bort) interrompe qualsiasi tipo di rotazione in corso.

Ogni comando richiede comunque la risposta di un pacchetto OK che certifichi la avvenuta ricezione ed esecuzione.

Il protocollo di comunicazione e il controllo del rotore sono implementati in Arduino Ethernet attraverso una semplice macchina a stati finiti (illustrata in Figura 18). Questa soluzione permette di rendere “non-bloccanti” le operazioni di rotazione, dando la possibilità all'operatore di agire sul controller, per modificare la velocità di rotazione o per fermare il rotore, anche durante una rotazione in corso.

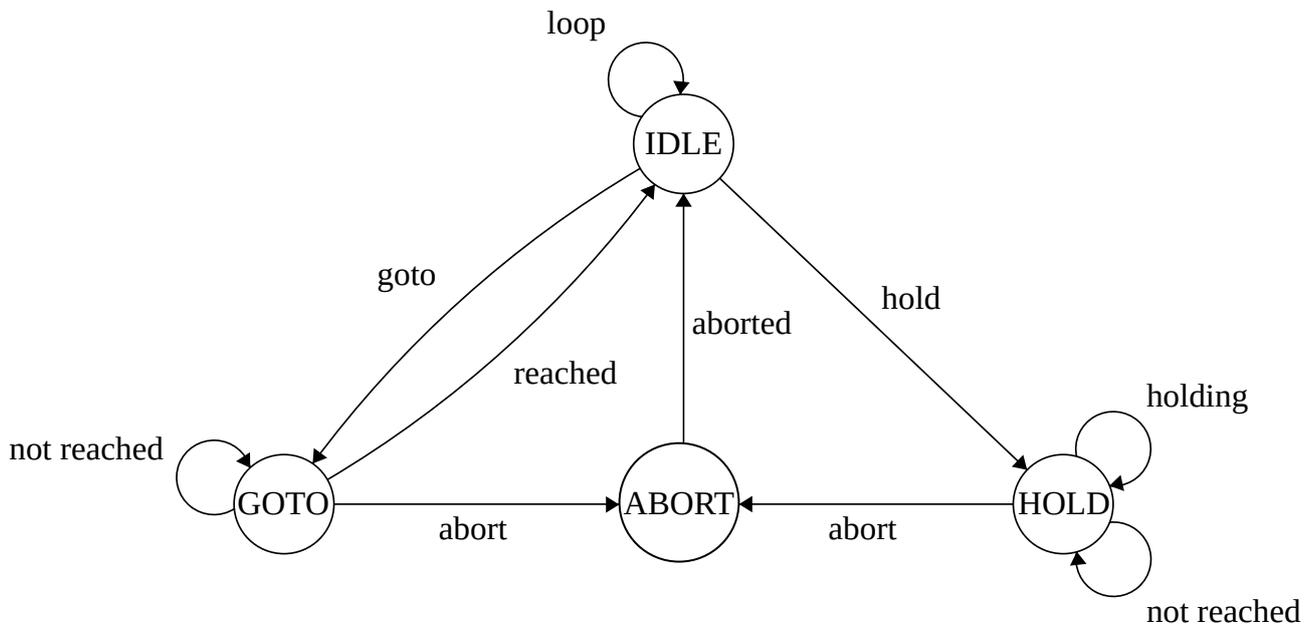


Figura 18: Diagramma della macchina a stati finiti del controller del rotore.

Il firmware agisce sul moto del rotore attraverso i seguenti pin di Arduino Ethernet come in Fig. 16:

- Pin A0: ingresso analogico con tensione proporzionale all'angolo a cui si trova il rotore. È stata effettuata la calibrazione per la conversione $V \longleftrightarrow$ gradi.
- Pin 6: uscita PWM che, associata al filtro passa-basso, fornisce il valore di tensione per l'impostazione della velocità di rotazione.
- Pin 2: uscita digitale TTL 5V per l'attivazione della rotazione in senso Orario.
- Pin 3: uscita digitale TTL 5V per l'attivazione della rotazione in senso Anti-Orario

È stata implementata in Python la libreria di controllo del rotore (`g2800sdx.py`), che gestisce la comunicazione, tramite protocollo UDP, con l'Arduino Ethernet, preposto all'interfaccia con il rotore. La libreria specchia le funzioni messe a disposizione dal firmware di Arduino, occupandosi dell'impacchettamento dei messaggi e della verifica del checksum:

- Get Current Status
- Get/Set Rotation Speed
- Go To Angle
- Hold On Angle
- Set Angle tollerance
- Abort operation

4.2 Controllo dell'Analizzatore di Spettro

L'interfaccia con l'analizzatore di spettro Agilent mod. E4408B di Figura 19, viene realizzata mediante un controller Prologix GPIB-LAN riportato in Figura 20.

Questo dispositivo permette il controllo remoto di strumentazione fornendo un'interfaccia hardware e software fra lo standard GPIB e il TCP/IP.

Il dispositivo, una volta alimentato, va connesso direttamente all'analizzatore di spettro attraverso la porta GPIB e alla LAN tramite la porta Ethernet RJ-45 come in Figura 21. Esso implementa un protocollo di comunicazione descritto all'interno del datasheet[19], che ne permette la configurazione e l'utilizzo.

Per il controllo del processo di acquisizione delle misure, è stato sviluppato uno script Python che automatizza il controllo coordinato del rotore e dell'analizzatore di spettro. È stato scelto Python come linguaggio di programmazione per via dell'ampia disponibilità di librerie open source per l'interfaccia con il controller Prologix e per la realizzazione di una minimale interfaccia grafica di monitoring.

Per la comunicazione con il controller Prologix è stata usata la libreria Python `plx_gpib_ethernet`¹, opportunamente modificata per adattarsi alla comunicazione con l'analizzatore di spettro.

È stata sviluppata una libreria che implementa i comandi di configurazione e acquisizione dati sull'analizzatore di spettro; in particolare segue un elenco esaustivo dei comandi implementati[20, 21, 22]:

- Trace Mode
- Start/Stop/Span/Center Frequency
- CF Step
- Set Zero/Full Span
- Set Auto CF Step
- Average Count/Type
- Start Averaging
- RBW
- VBW
- VBW/RBW Ratio
- Input Impedence Correction
- Sweep Time
- Input Attenuation
- Reference Level
- Y-Scale Division
- Y-Scale Type (Lin/Log)
- Preset
- Clear Status (CLS)
- Wait
- Get Trace Points
- Get Screenshot

4.3 Interfaccia di acquisizione GUI

Lo script Python `ControllerGUI.py` per l'automazione del processo di acquisizione delle misure fornisce anche l'interfaccia grafica del sistema.

La schedula di acquisizione viene definita all'interno del metodo `run` nel file `ControllerGUI.py`; in questa fase l'utente può definire tutte le operazioni da svolgere durante il processo di misura, facendo uso dei comandi implementati, precedentemente descritti. Ad esempio, la configurazione usata per l'acquisizione di ampie porzioni di spettro ad alta risoluzione prevede la

¹<https://github.com/nelsond/prologix-gpib-ethernet>



Figura 19: Spectrum Analyzer Agilent Mod.E4408B



Figura 20: Prologix Controller GPIB-LAN

suddivisione del range di frequenze da acquisire in un numero opportuno di scan, compatibili con la risoluzione scelta e con il numero di punti gestibili dall'analizzatore di spettro. Ciascuno scan è poi effettuato tenendo la traccia in modalità MAX HOLD, effettuando contemporaneamente una rotazione completa del rotore. I dati acquisiti sono poi salvati all'interno di un file .csv per l'analisi successiva.

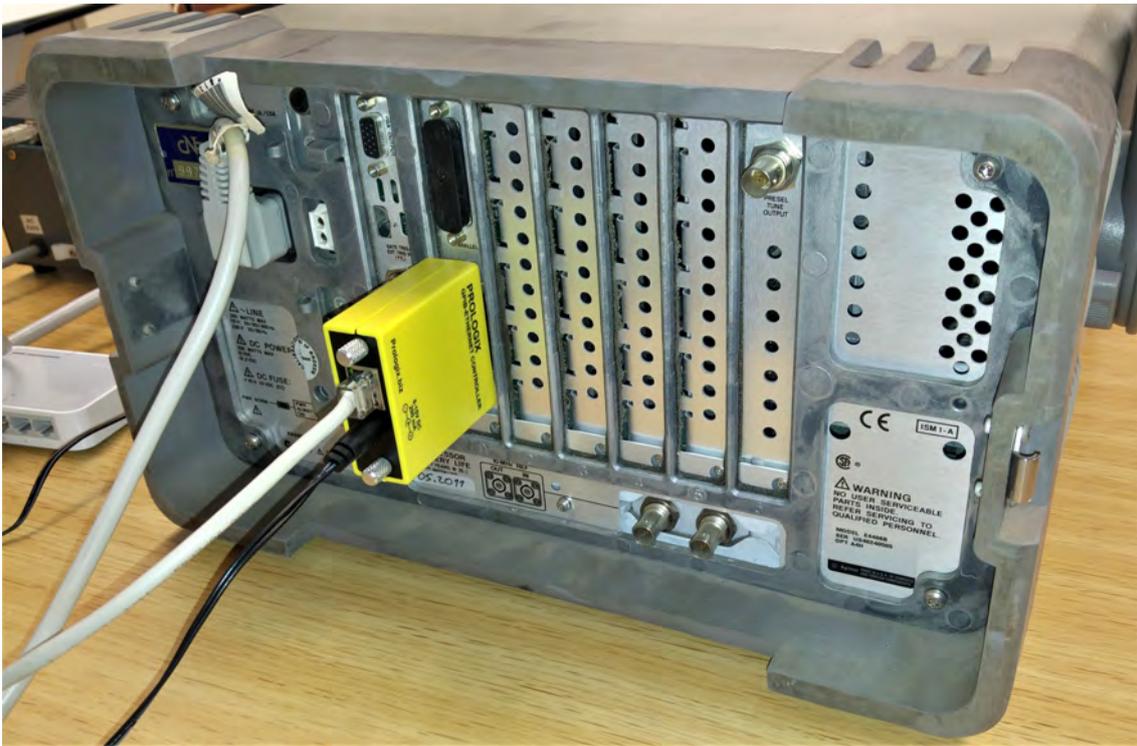


Figura 21: Controllo via LAN dell'analizzatore di spettro attraverso l'adattatore Prologix HPIB(GPIB)-LAN

Il software è stato dotato di una interfaccia grafica minimale, scritta con pyQT², per permettere all'utente di tenere sotto controllo lo stato della misura.

L'interfaccia mostra i parametri correnti dell'analizzatore di spettro, il progresso della schedula e un plot degli spettri acquisiti, essa permette d'intervenire per mettere in pausa o annullare la schedula in corso. Un'immagine dell'interfaccia prima e durante le misure, è mostrata nelle Figure 22 e 23.

²<https://wiki.python.org/moin/PyQt>

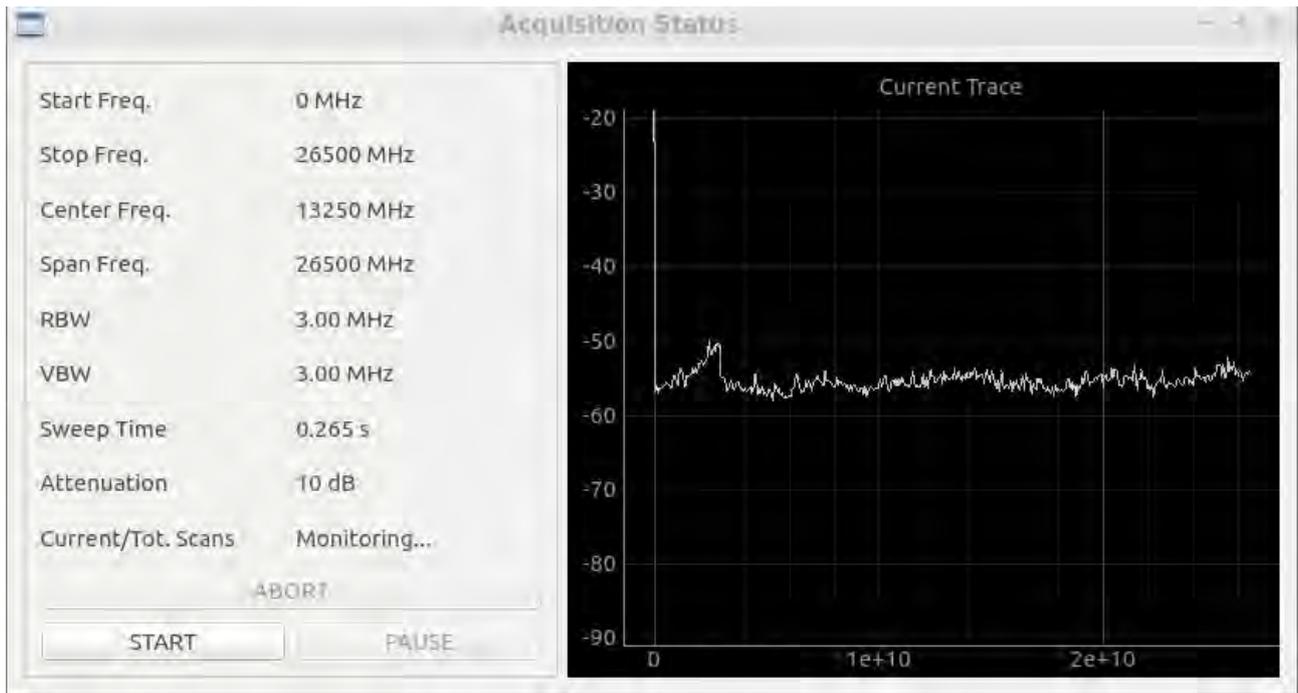


Figura 22: Interfaccia monitor all'avvio del programma. A connessione stabilita, mostra uno spettro in Full Span aggiornato ogni 4 secondi.

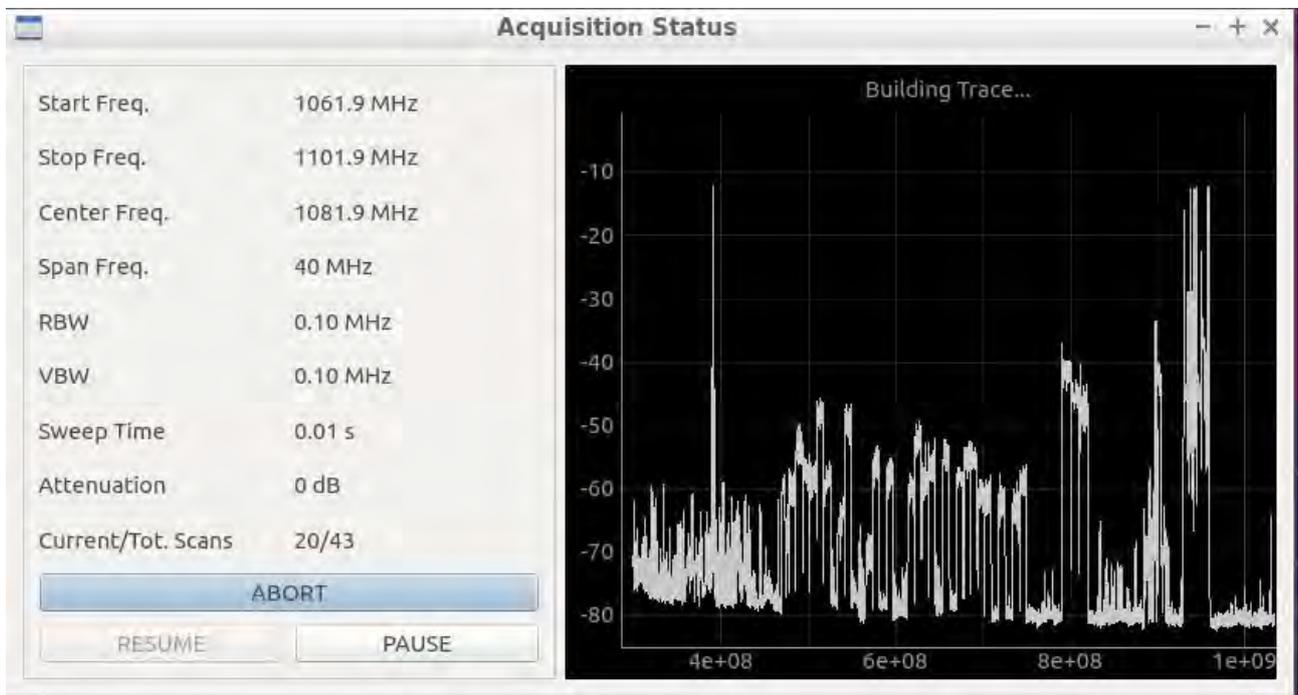


Figura 23: Interfaccia monitor durante l'acquisizione. Gli spettri acquisiti vengono aggiunti ai precedenti e visualizzati insieme. E' tuttavia possibile, intervenendo sui comandi opzionali del grafico, visualizzare modalità diverse rappresentazione anche durante l'acquisizione.

5 Sistema Operativo Virtuale

Si è scelto di adottare di un sistema operativo (SO) indipendente e attrezzato esclusivamente per questo tipo di attività, operando attraverso macchina virtualizzata.

La virtualizzazione del SO consente di ottenere diversi vantaggi:

- Rendere il sistema indipendente dalla macchina ospitante, per quanto riguarda tutte le impostazioni di rete e di visualizzazione.
- Consentire di operare su più macchine con la semplice replica del sistema software, nel caso, per esempio, si debba operare su postazione fissa o mobile.
- Permettere di effettuare backup e il ripristino veloci e completi del sistema.

Il sistema di acquisizione non richiede particolari risorse hardware o software, per tanto si è scelto di operare con un SO *GNU/Linux* molto leggero: *Lubuntu*³. La macchina è stata generata attraverso il software di virtualizzazione *Oracle VirtualBox*⁴. Il nome della macchina virtuale è **SoftLab**, l'utente definito è **RFI** e la password di accesso di default è **softlab**.

Per l'utilizzo al Radiotelescopio di Noto, questa macchina virtuale è stata installata in un desktop fisso in laboratorio, per le misure all'interno della stazione, e su un sistema portatile per quelle esterne.

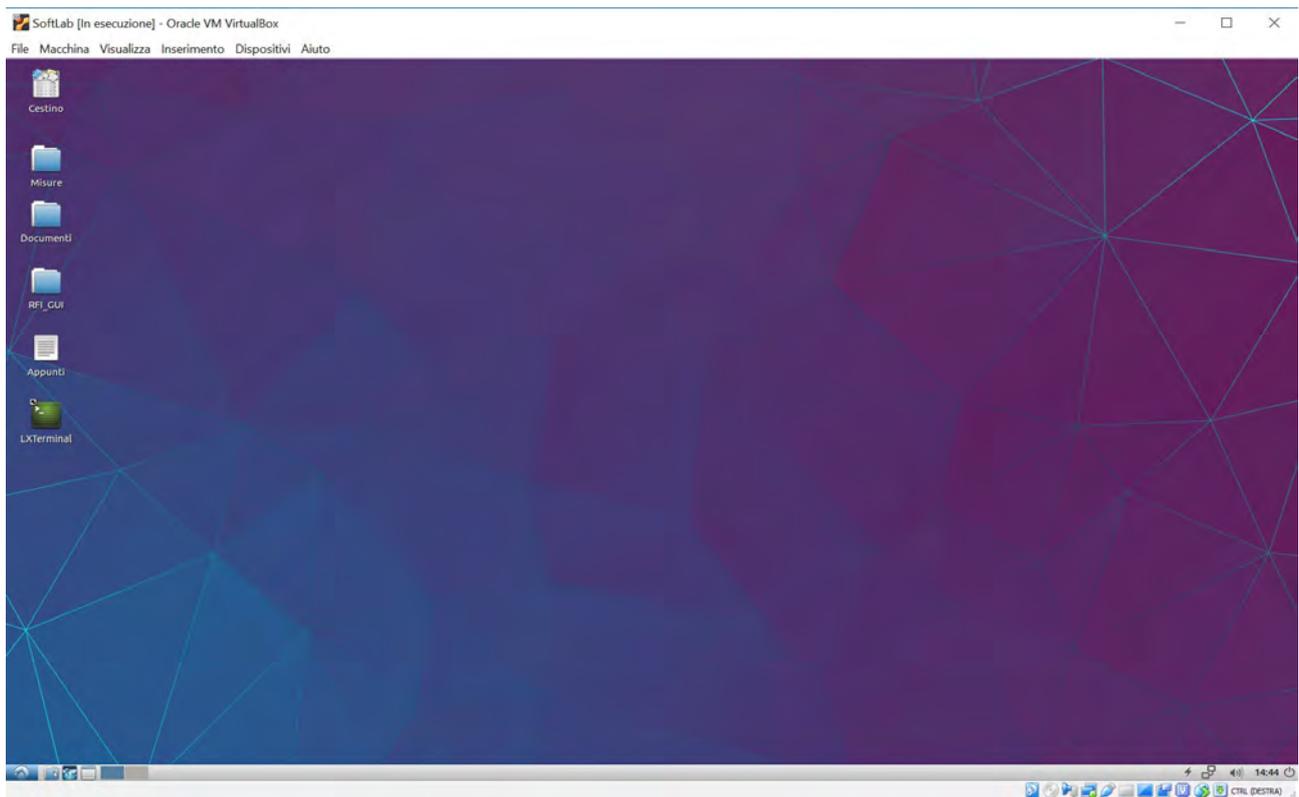


Figura 24: Macchina Virtuale Oracle VirtualBox con sistema operativo Lubuntu

³versione 16.04.1 per sistemi a 64bit

⁴versione 5.2.18 r.124319

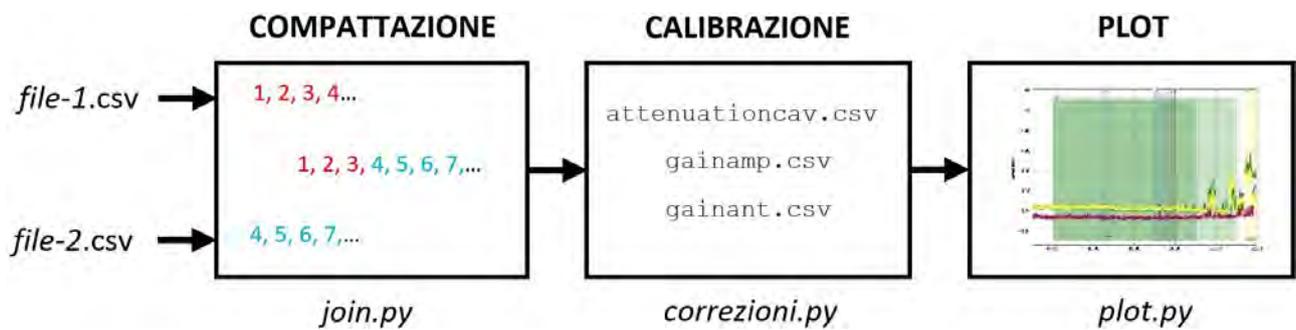


Figura 25: Workflow del processo di analisi dati: i dati raccolti su file separati, vengono compattati, calibrati e quindi plottati.

6 Elaborazione e Calibrazione dei Dati

Il processo di elaborazione dei dati è rappresentato schematicamente in Figura 25. I dati di uno spettro completo, per ognuna delle due polarizzazioni, e per ognuna delle RBW utilizzate, vengono acquisiti su diversi file: ogni file contiene quelli relativi all'acquisizione di misure in funzione della banda di frequenza esplorata e all'antenna utilizzata. Nel nostro caso, essendo al momento soltanto due le antenne utilizzate, verranno prodotti otto file distinti, quattro per la polarizzazione verticale e quattro per quella orizzontale.

La prima delle due antenne coprirà lo spettro di frequenze compreso tra 300MHz e 2GHz, la seconda, da 2GHz a 18GHz, gli otto file prodotti saranno quindi del tipo:

- ggmmaa-300M2G-100k-H.csv
- ggmmaa-2G18G-100k-H.csv
- ggmmaa-300M2G-100k-V.csv
- ggmmaa-2G18G-100k-V.csv
- ggmmaa-300M2G-3M-H.csv
- ggmmaa-2G18G-3M-H.csv
- ggmmaa-300M2G-3M-V.csv
- ggmmaa-2G18G-3M-V.csv

Prima di procedere alla calibrazione delle misure, tutti i dati grezzi devono essere raggruppati in un unico file che rappresenterà uno spettro di frequenza completo della sessione di misura alla RBW corrispondente, si avranno quindi complessivamente quattro file, due per polarizzazione.

Dalla lista di file precedenti otterremo quindi:

- ggmmaa-300M18G-100k-H.csv
- ggmmaa-300M18G-100k-V.csv
- ggmmaa-300M18G-3M-H.csv
- ggmmaa-300M18G-3M-V.csv

Ogni file che contiene dati grezzi, è in realtà il frutto di una registrazione discreta di singoli spettri il cui numero viene calcolato dal software al momento dell'avvio dell'acquisizione. Tale quantizzazione fa in modo che ciascun file contenga più dati di quanto imposto dai limiti di banda scelti: per esempio, supponiamo d'impostare una acquisizione compresa tra 300MHz e 2GHz con una risoluzione di 100kHz con spettri di 401 punti, che è il massimo numero di punti

acquisiti dal nostro analizzatore di spettro, si avrà che ogni spettro coprirà 40.1 MHz di banda. Quanto appena descritto può essere espresso più in generale dalla relazione:

$$\text{N. spettri} = \left\lceil \frac{\Delta f}{\text{RBW} \times \text{N. punti}} \right\rceil$$

dove $\Delta f = f_{max} - f_{min}$ è la banda complessiva da acquisire. Nell'esempio in oggetto:

$$\text{N. spettri} = \left\lceil \frac{2000 - 300}{0.1 \times 401} \right\rceil = 43$$

Saranno necessari quindi 43 spettri per garantire la copertura totale della banda in modo che ogni punto acquisito rappresenti un intervallo di frequenza pari alla RBW (in questo caso 100 kHz). Se si tiene conto di una registrazione di 43 spettri completi, allora il file prodotto conterrà valori compresi tra 300.0 MHz e 2024.3 MHz. Si dovrà quindi tener conto di selezionare solamente i dati utili di ogni file, scartando quelli in eccesso durante l'operazione di compattazione.

La selezione e l'unione dei dati utili registrati sui file separati, viene eseguita automaticamente attraverso l'utilizzo di uno script Python dedicato. Lo script denominato `join.py`, necessita di essere istruito nel codice, circa la posizione e i nomi dei file che deve elaborare in input per poter produrre un file di output corrispondente al risultato che si vuole ottenere.

Il sistema di elaborazione dei file è facilmente adattabile all'utilizzo di un numero maggiore di antenne o bande utilizzate.

I file così prodotti, conterranno dati grezzi i cui livelli saranno quelli misurati dall'analizzatore di spettro all'uscita del sistema ricevente. Questi, dovranno essere corretti per i contributi, in termini di guadagno o attenuazione, di ogni componente presente nella catena ricevente. Si stabiliranno quindi dei parametri di correzione da applicare ai dati grezzi per ricavare, per ogni frequenza ricevuta, il livello di segnale ricevuto realmente presente al sito di misura.

Per rendere direttamente confrontabili le misure acquisite in diverse campagne di misura, è necessario che il sistema ricevente venga calibrato su tutta la banda ricevuta.

Ogni variazione, modifica o sostituzione di qualunque componente impiegato nella catena, comporterà una nuova calibrazione del sistema per stabilirne le nuove curve di correzione.

È pertanto estremamente importante mantenere sempre gli stessi componenti utilizzati nel sistema di ricevente.

Ogni curva di correzione terrà conto dei seguenti contributi:

- Guadagno d'antenna riferita all'antenna isotropica
- Insertion loss della transizione antenna-cavo coassiale (N/SMA)
- Insertion loss filtro + transizione (opzionale)
- Guadagno dell'amplificatore
- Insertion loss filtro + transizione (opzionale)
- Insertion loss del cavo coassiale
- Attenuatore di ingresso + transizione (opzionale)
- Insertion loss della transizione Cavo coassiale-strumento di misura (SMA/N)

Uno schema semplificato della catena di ricezione utilizzata, è visibile in Figura 26. Va tenuto conto che il sistema attuale, non comprende la componentistica indicata come opzionale, pertanto anche le correzioni da applicare risultano semplificate. Utilizzando le misure di caratterizzazione con certificazione o da datasheet fornite dai costruttori dei componenti utilizzati nella catena ricevente, si sono stabiliti dei parametri di correzione in funzione della frequenza i cui valori sono contenuti in tabelle in formato dati .csv. Le tabelle di correzione attuali sono distribuite in tre file distinti:

- `attenuationcav.csv` (misure di attenuazione per il cavo coassiale e transizioni)
- `gainamp.csv` (misure di guadagno per gli amplificatori)
- `gainant.csv` (misure di guadagno per le antenne)

L'operazione di correzione dei dati grezzi acquisiti viene effettuata a opera di uno script Python denominato `correzioni.py`. Lo script richiede di essere istruito in ingresso circa la posizione e il nome del file che conterrà i dati grezzi e produrrà in uscita il file calibrato rispetto alle tabelle di correzione.

La curva di correzione complessiva, relativa al contributo di tutti i file, è visibile in Figura 27. Nell'operazione di calibrazione, i valori riportati in ordinata vanno algebricamente sommati a quelli misurati dall'analizzatore di spettro.

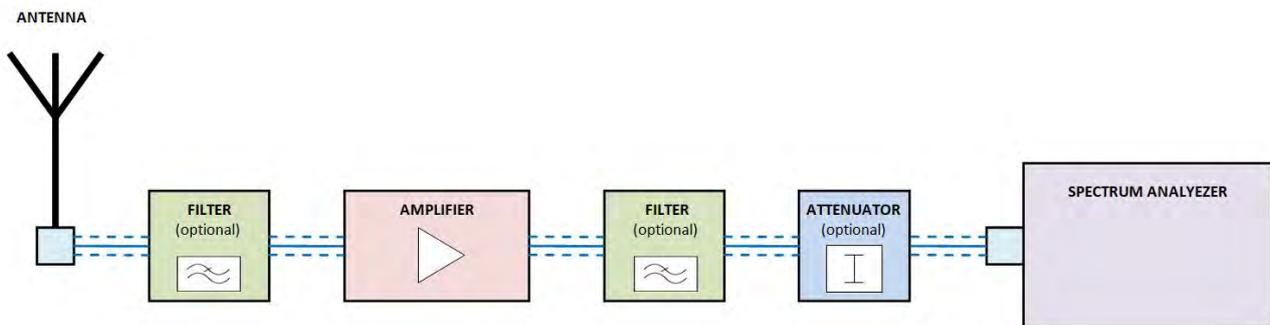


Figura 26: Rappresentazione schematica della catena ricevente.

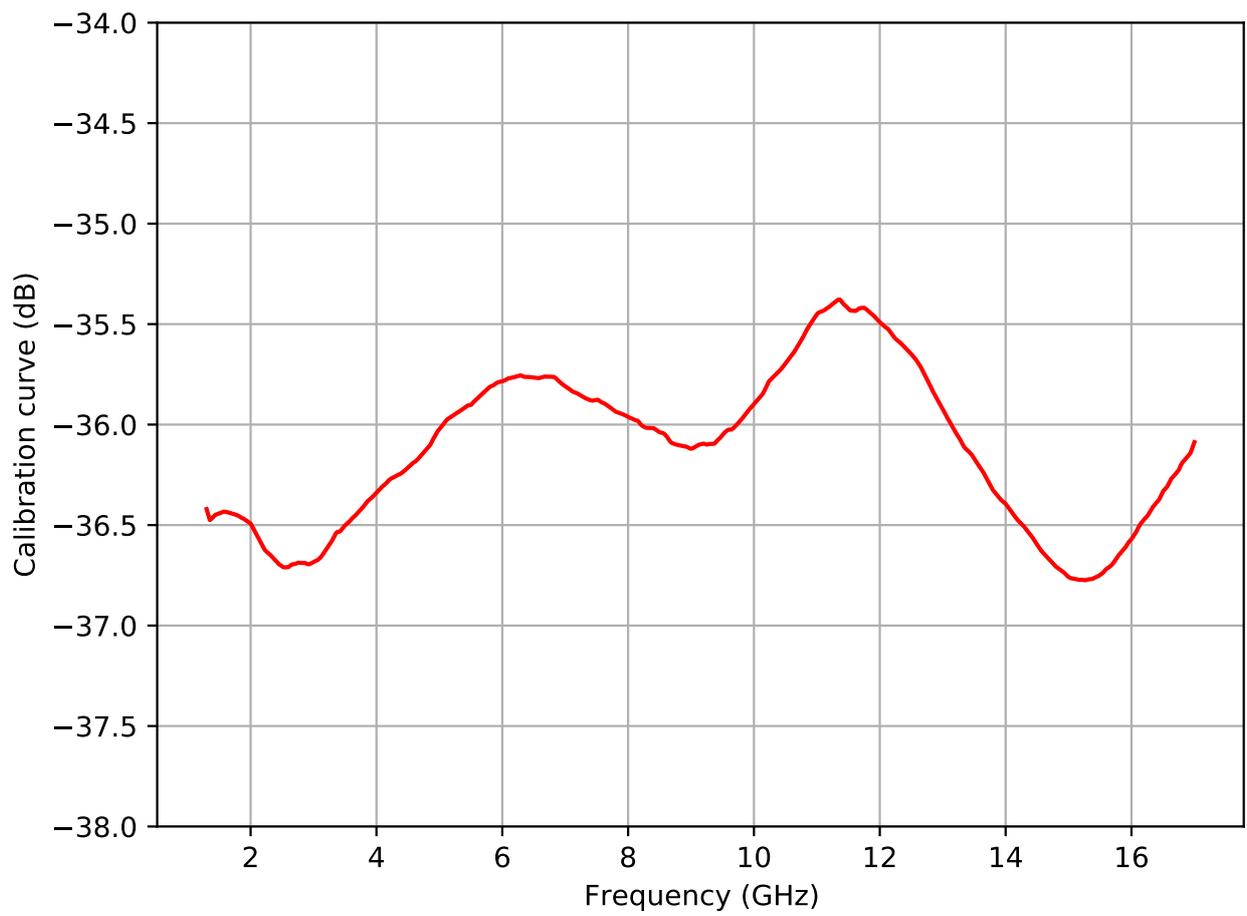


Figura 27: Curva di calibrazione applicata per la correzione dei livelli misurati.

7 Rappresentazione dei Dati

I file prodotti in post-elaborazione già calibrati, verranno utilizzati per rappresentare graficamente lo spettro di frequenza della porzione di banda desiderata. Questa operazione può essere effettuata su un qualsiasi computer, anche fuori dall'ambiente virtualizzato dedicato al controllo della strumentazione e all'acquisizione delle misure.

Per rendere più agevole e veloce la rappresentazione dei dati, si è scelto di sviluppare una piattaforma di lavoro software dedicata a questa attività. Essa prevede di riportare graficamente i dati in tracce sovrapposte a un campo precedentemente allestito che riporta tutte le informazioni che si ritiene necessario far comparire.

La piattaforma di lavoro è sostanzialmente costituita dallo script Python `plot.py` nel quale vengono mantenute aggiornate tutte le informazioni legate alle bande di frequenza sulle quali si opera. Esso è stato realizzato utilizzando la libreria `matplotlib`⁵ e rappresenta il principale strumento di lavoro per la rappresentazione dei dati acquisiti e post elaborati. Lo script necessita di essere opportunamente configurato per garantirne una corretta esecuzione.

La possibilità d'inserire note, fasce colorate in trasparenza, simboli grafici e caselle di testo legate a un preciso valore di frequenza o di ampiezza, aiuta a individuare facilmente le informazioni che si desidera far comparire sul grafico o usarle semplicemente come promemoria durante l'analisi dei risultati. Con tale metodo è possibile riportare, per esempio, i limiti di banda reali dei ricevitori in uso, le bande di frequenza assegnate al servizio RAS, le righe di emissione radio degli elementi chimici, eventuali note sui servizi presenti nelle bande adiacenti, etc.

La visualizzazione di tali fasce in sovrapposizione offre una precisa idea sullo stato della banda ricevuta e sul posizionamento in frequenza di eventuali segnali RFI presenti per una loro immediata individuazione.

La possibilità di selezionare più file da graficare contemporaneamente consente di effettuare facilmente confronti tra campagne di misura differenti.

La visualizzazione del grafico è dinamica, cioè è possibile scorrere l'asse delle frequenze, modificare lo span o la scala delle ampiezze, per una rappresentazione ottimale dello spettro d'interesse.

Tutte le impostazioni relative alla generazione del grafico, vengono selezionate all'interno dello script prima di essere eseguito. Per facilitare tale operazione, sono state predisposte righe di programma che verranno attivate o meno, in base alle specifiche esigenze.

Gli spettri mostrati di seguito sono stati generati con `plot.py` e riassumono lo scopo di questo lavoro.

Nelle Figure 28-33, è possibile distinguere le bande reali di ricezione per alcuni ricevitori attualmente disponibili a Noto in entrambe le polarizzazioni, le bande di frequenza RAS previste dal PNRF e distinte per tipologia di assegnazione (servizio primario o secondario), le bande immediatamente adiacenti, assegnate ad altri servizi, e la posizione delle righe di emissione di elementi chimici d'interesse scientifico in queste bande.

Negli esempi mostrati compaiono solamente le due tracce relative alle polarizzazioni Orizzontale e Verticale, tuttavia è possibile rappresentare un numero arbitrario di tracce. I grafici prodotti possono facilmente essere esportati in file immagine di diversi formati e risoluzione.

⁵<https://matplotlib.org/>

8 Campagne di misura

Per verificare le performance e l'affidabilità su lunghi periodi del sistema di acquisizione e analisi dati, è stata effettuata una prima campagna di misura in laboratorio: è stata eseguita una misura completa nelle due polarizzazioni che ha richiesto l'acquisizione di circa 900 spettri nella banda di frequenza compresa tra 300MHz e 18GHz. L'operazione ha richiesto circa 12 ore di acquisizione continua, con computer e controller in collegamento diretto. Il sistema ha mostrato buone qualità di funzionamento e affidabilità.

Un secondo test è stato effettuato presso il Radiotelescopio di Noto per verificare l'affidabilità di funzionamento del sistema quando controllato attraverso LAN di stazione. In questo caso infatti, l'attrezzatura di acquisizione restava posizionata all'esterno dell'edificio, vicino alle antenne rotanti in posizione riparata, mentre il programma di acquisizione veniva eseguito sul PC in laboratorio. Anche in questo caso non si sono verificati inconvenienti legati alla comunicazione o al funzionamento del sistema.

Le misure rilevate in questa seconda campagna, sono state confrontate con quelle fatte durante la sessione di misure effettuate nel 2016[9], con il furgone attrezzato di SRT, verificando che i livelli di alcuni segnali caratteristici fossero coerenti tra loro a conferma che le correzioni di calibrazione applicate erano corrette.

A titolo di esempio, illustriamo una collezione di spettri ottenuti con il sistema qui descritto: ciascuna figura riporta le condizioni di misura (RBW, VBW, Sweep time); in sovrapposizione, sono riportate le bande RAS ad assegnazione primaria (in rosa) e secondaria (in blu); le bande dei ricevitori (in verde) con le due polarizzazioni leggermente sfalsate in verticale per evidenziarne possibili differenze, vedi Figura 31; le frequenze delle righe di emissione d'interesse scientifico (in viola). Le bande di frequenza con altri colori visibili fuori dalle bande dei ricevitori, rappresentano altri servizi radio nelle bande adiacenti riportate come promemoria.

In Figura 28 è mostrato uno spettro che include la banda P : il fondo risulta particolarmente alto, oltre i -110 dBm, con una notevole differenza tra le polarizzazioni. Inoltre si rileva la presenza di RFI in banda RAS in entrambe le polarizzazioni. Ciò suggerisce la presenza di rumore generato e diffuso su tutta la banda, ed è individuato come proveniente da alcune telecamere di sicurezza all'interno della stazione.

La Figura 29 mostra lo spettro di frequenza della banda L ed evidenzia alcune criticità RFI. La presenza di numerosi servizi nelle bande adiacenti a quelle RAS limita significativamente la disponibilità di banda utile per le osservazioni radio astronomiche. Inoltre una banda RAS, assegnata a servizio secondario, risulta parzialmente occupata. L'acquisizione degli spettri tra una polarizzazione e l'altra avviene con diverse ore di differenza. Infatti alcuni segnali, che ordinariamente sono visibili in entrambe le polarizzazioni, sono invece apprezzabili in una sola delle due: si tratta di segnali non continui nel tempo.

In Figura 30 viene rappresentata la Banda S dove non sono presenti bande RAS. La presenza di RFI dà indicazioni sulla effettiva banda utile alle osservazioni e suggerisce le eventuali modifiche al ricevitore.

In Figura 31 è rappresentata la banda C . Le due fasce sovrapposte colorate in verde rappresentano i canali Left e Right ricevuti dal ricevitore radio astronomico. Si noti come la banda del canale Left sia notevolmente più ampia di quella del canale Right e sconfinava in una banda assegnata ad altri servizi, dove sono presenti segnali molto intensi. Risulta libera la banda RAS

con assegnazione primaria (in rosa) invece una delle due bande con assegnazione secondaria (in blu) risulta parzialmente disturbata .

Le Figure 32 e 33 mostrano rispettivamente la banda C Metanolo e X, evidenziando una condizione ottimale per le osservazioni radio astronomiche.

Nella Figura 34 sono state rappresentate e messe a confronto le misure della banda L, effettuate nel 2016 con il laboratorio mobile di SRT e quelle effettuate nell'estate del 2021 con il sistema descritto in questo documento. Da questa immagine si nota come i livelli misurati dai due sistemi risultino confrontabili. Inoltre, dal confronto fra le due campagne, è possibile apprezzare variazioni sul lungo periodo delle RFI.

In Figura 35 sono rappresentate le misure della stessa polarizzazione della banda L, con RBW stretta (100 kHz) e larga (3 MHz).

Nella Figura 36 vengono mostrate tre tracce in banda L relative alla stessa polarizzazione acquisite in anni differenti: la traccia blu è stata acquisita con il laboratorio mobile di SRT nel 2016, la traccia verde e gialla con il sistema qui descritto, rispettivamente nel 2019 e nel 2021.

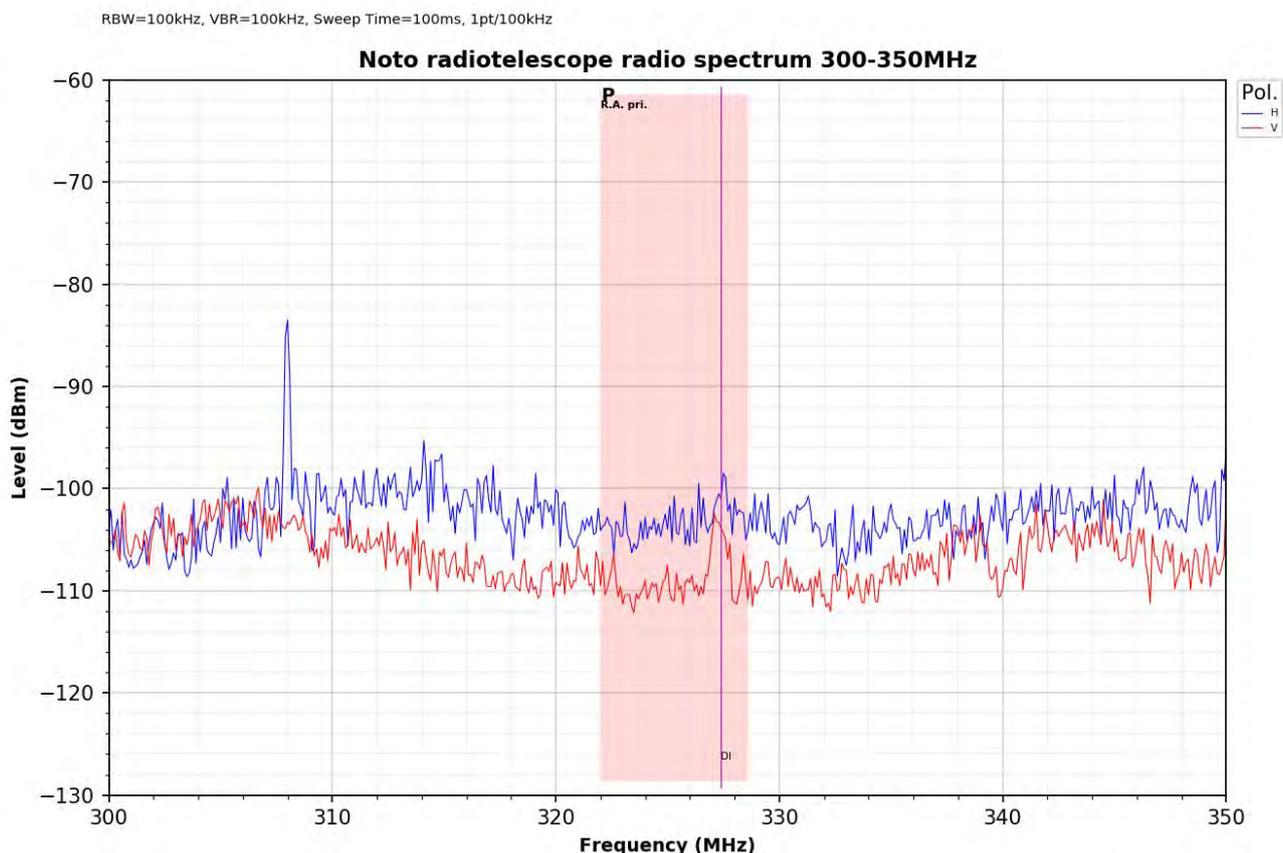


Figura 28: Spettro di frequenza in Banda P.

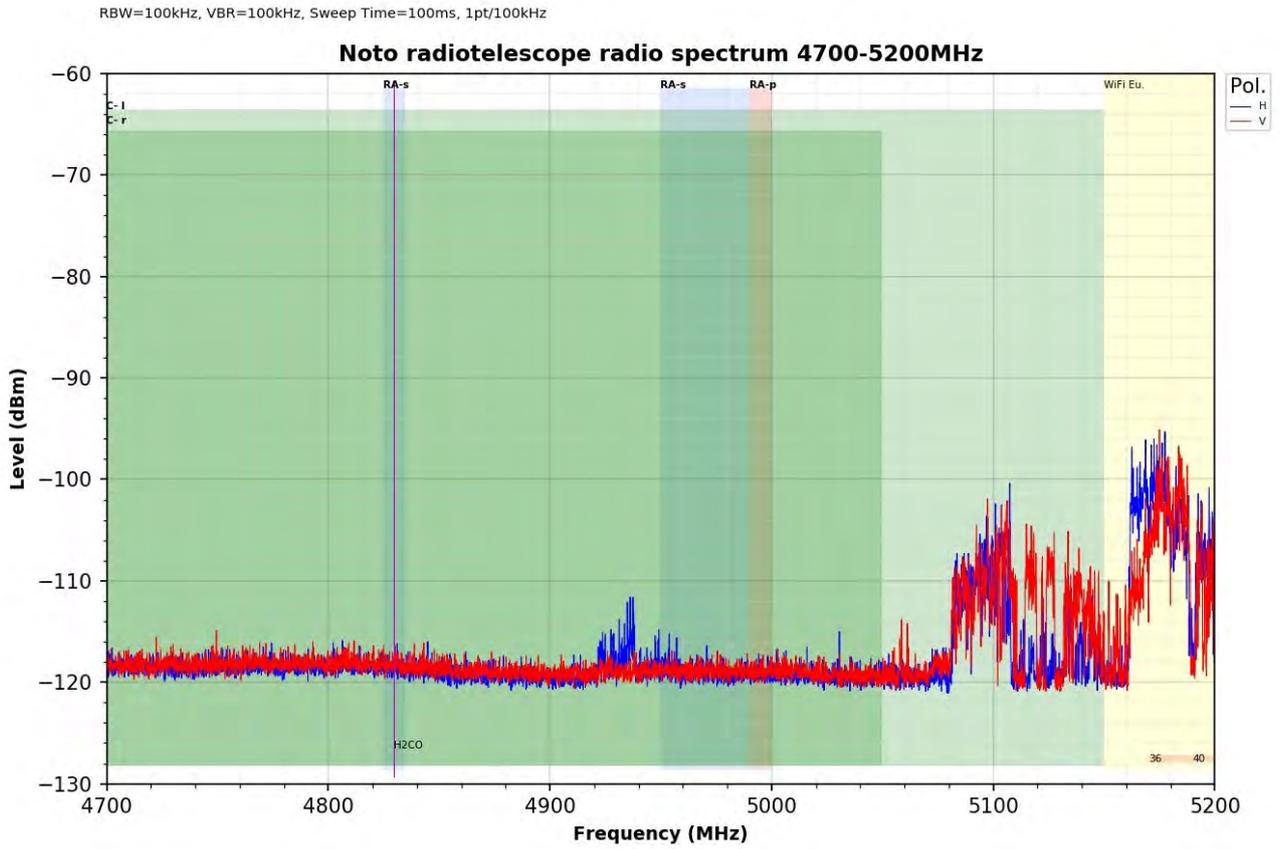


Figura 31: Spettro di frequenza in Banda C.

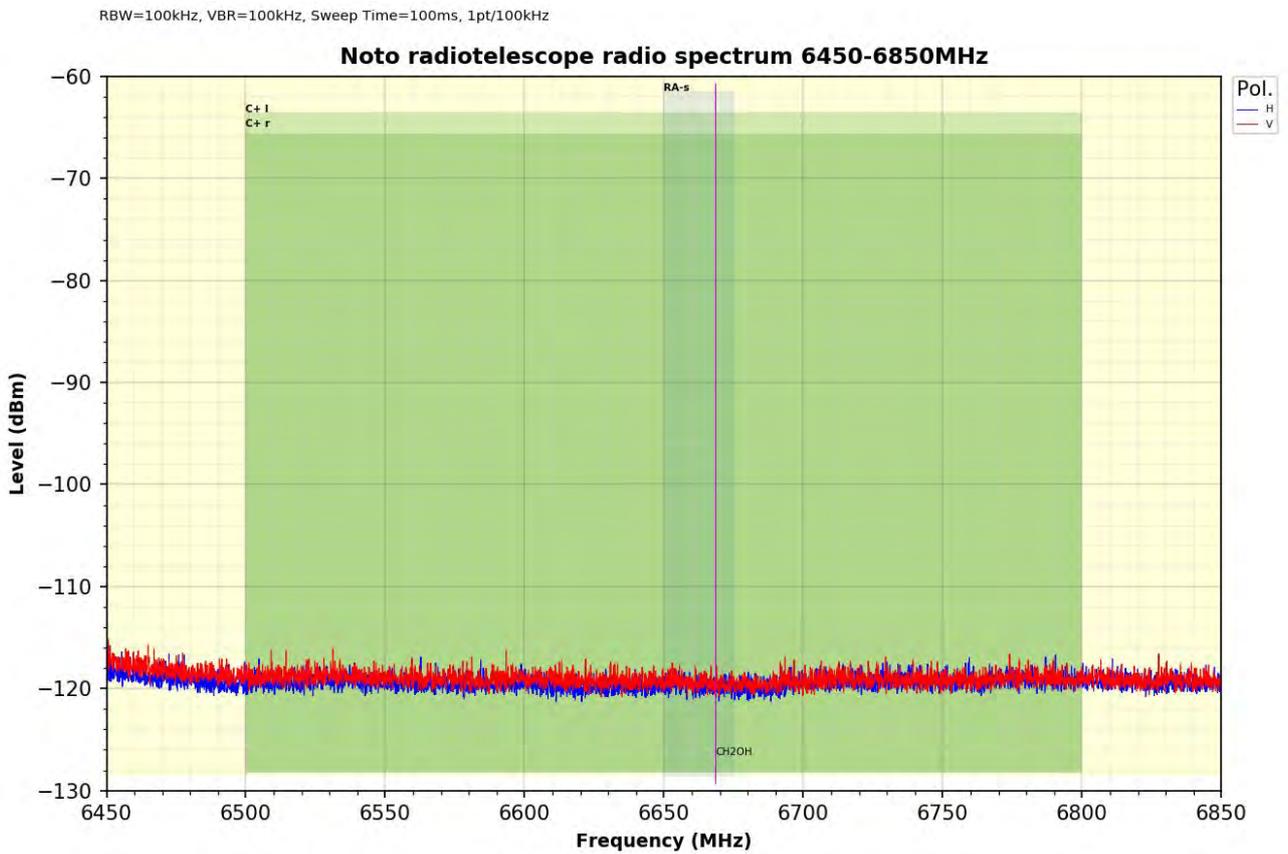


Figura 32: Spettro di frequenza in Banda C Metanolo.

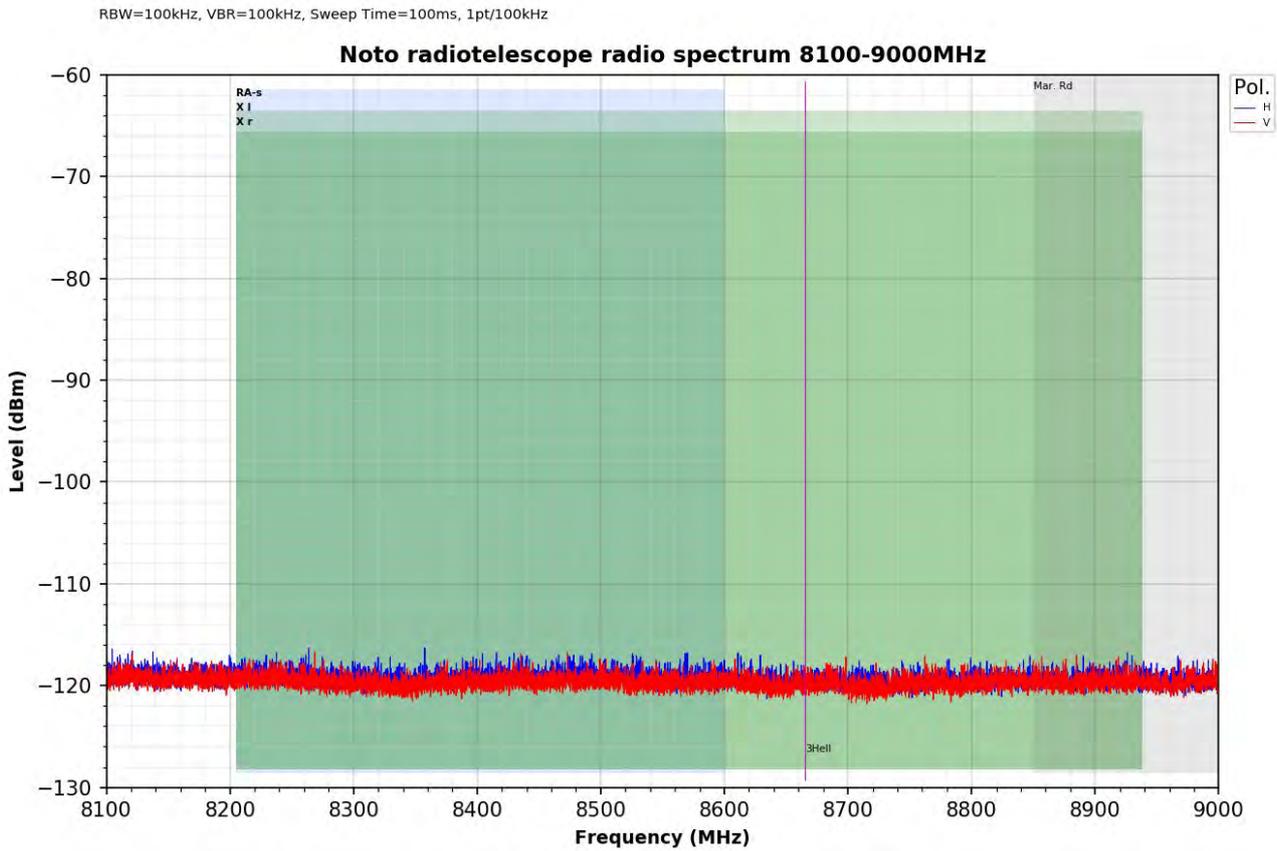


Figura 33: Spettro di frequenza in Banda X.

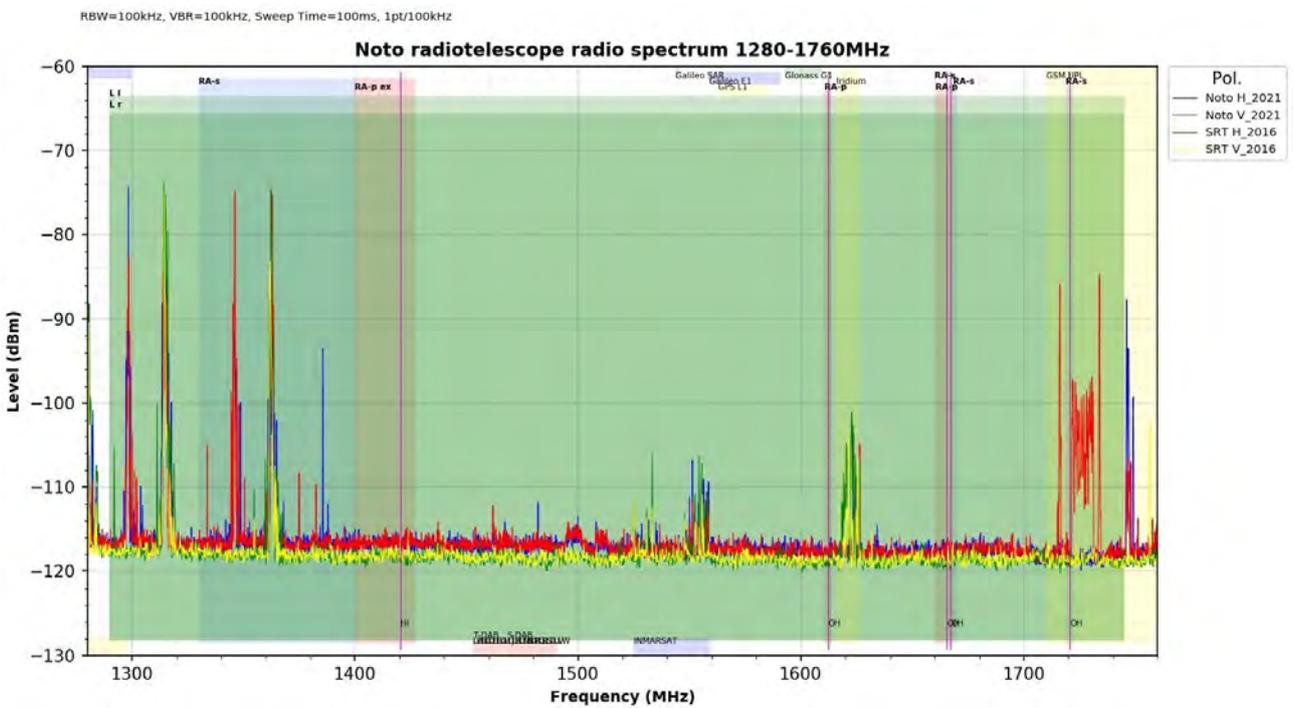


Figura 34: Confronto tra le acquisizioni della banda L, in entrambe le polarizzazioni, fatte con il laboratorio mobile di SRT (traccia verde e gialla) nel 2016 e quelle effettuate a Noto nel 2021 (traccia rossa e blu) con il sistema qui descritto, presso la stessa postazione di misura.

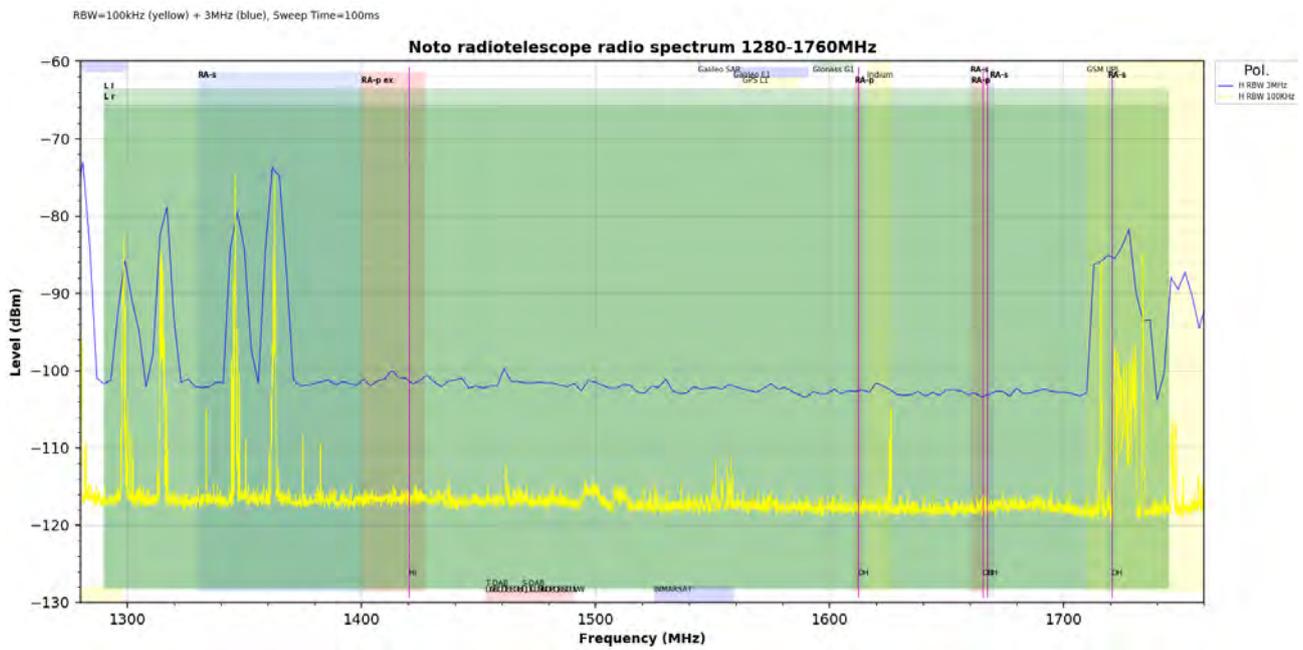


Figura 35: Confronto tra due tracce della banda L che rappresentano la stessa polarizzazione. La traccia blu acquisita con RBW a 3 MHz, la gialla con RBW a 100kHz.

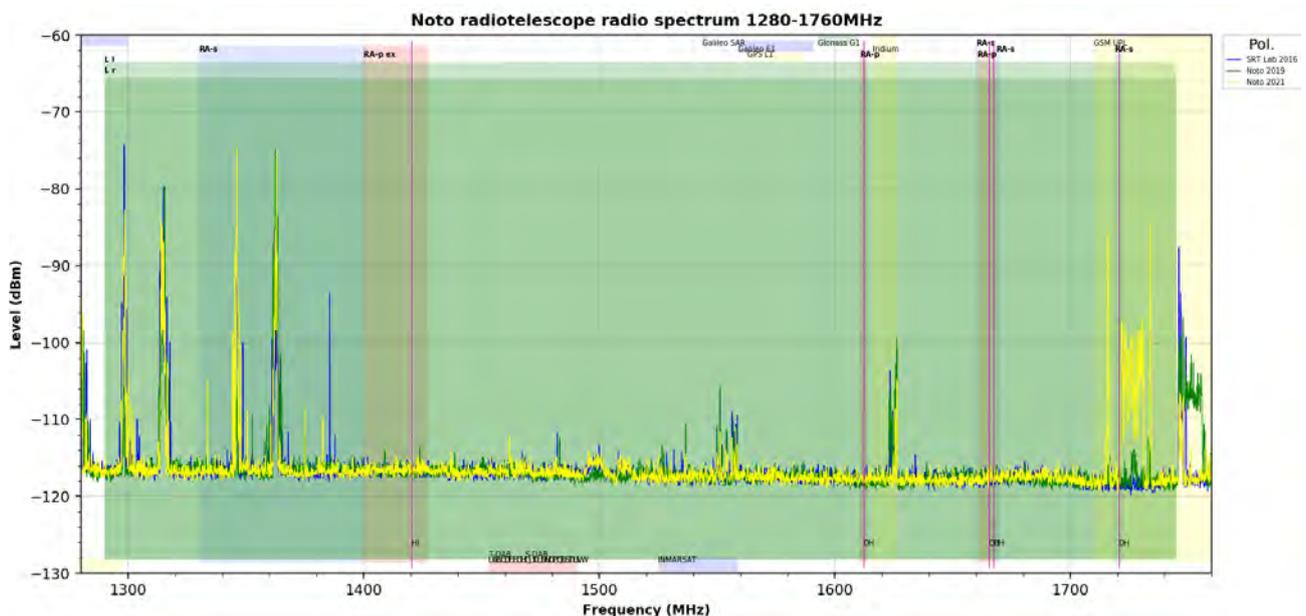


Figura 36: Sovrapposizione di tre tracce della banda L rappresentanti la stessa polarizzazione, acquisite in anni differenti. La traccia blu è stata acquisita con il laboratorio mobile di SRT nel 2016, la traccia verde e gialla con il sistema di Noto, rispettivamente nel 2019 e nel 2021.

9 Conclusioni

Il sistema descritto in questo documento è stato sviluppato e testato nella banda 300 MHz - 18 GHz. Tuttavia si dovrà operare per estendere la banda ricevuta fino a 43 GHz e garantire il monitoring anche della banda K (21 - 24 GHz) e Q (42 - 43 GHz). Il raggiungimento di questo obiettivo è subordinato a una fase di ammodernamento della strumentazione: infatti l'analizzatore di spettro attualmente in uso può operare fino alla frequenza di 26.5 GHz.

L'utilizzo di un nuovo analizzatore di spettro, inoltre, introdurrebbe al sistema dei miglioramenti sostanziali in termini di sensibilità e di velocità nell'acquisizione degli spettri. Infatti, l'analizzatore di spettro Agilent E4408B attualmente in uso risolve ogni spettro ricevuto in un numero massimo di 401 punti: questa caratteristica impone una importante limitazione al sistema e costringe a collezionare un numero molto alto di spettri specie se si intende misurare bande di frequenza molto ampie con RBW relativamente strette. Attualmente una normale campagna di misura da 300MHz a 18GHz con RBW larga (3MHz) e stretta (100kHz), nelle due polarizzazioni H e V, necessita complessivamente di circa 900 spettri per un totale di oltre 12 ore di acquisizione.

Gli analizzatori di spettro più moderni, permettono di acquisire un numero di punti per spettro molto più alto, rendendo l'acquisizione più veloce. Per esempio, nella campagna di acquisizione RFI effettuata a Noto nel 2016 con il Laboratorio mobile di SRT, si è fatto uso di un analizzatore di spettro Agilent 8564EC che permette di acquisire spettri fino a 8000 punti. Tale strumento, consentirebbe di effettuare una misura completa dello spettro in circa un'ora.

Un sistema di acquisizione lento rende difficile l'esecuzione di più misure nell'arco della stessa giornata o qualora si intenda utilizzare risoluzioni di banda RBW molto strette, inferiori a 100kHz.

Il sistema di acquisizione qui descritto soddisfa tutti gli obiettivi preposti e rappresenta al momento il riferimento principale per le misure di RFI al Radiotelescopio di Noto: esso ha, infatti, già permesso di effettuare e archiviare quattro campagne di misura nel range 300MHz-18GHz.

10 Appendice - Manuale Operativo di Acquisizione

Ipotizziamo di voler effettuare una misura su tutto lo spettro disponibile da 300MHz a 18GHz per segnali provenienti da tutte le direzioni, nelle due polarizzazioni, impostando l'analizzatore di spettro con RBW pari a 100KHz e 3MHz. Avviata la macchina virtuale, troveremo sul desktop una cartella denominata *RFI-GUI*, all'interno della quale si trovano gli script Python attraverso i quali è possibile eseguire il controllo della strumentazione e la schedula di acquisizione automatica.

La prima operazione da eseguire è predisporre la strumentazione al controllo remoto attraverso il computer. A tal proposito bisogna distinguere due modalità di utilizzo: l'acquisizione di spettri dall'interno oppure dall'esterno della stazione radioastronomica. Nel primo caso, tutti gli strumenti che comunicano tra di loro e cioè: il PC dell'operatore, il controller del motore e l'interfaccia con lo SA, sono connessi alla rete locale dell'Istituto e dialogano attraverso essa; nel secondo caso, il controller del rotore e l'interfaccia dello SA, sono connessi direttamente al PC dell'operatore, attraverso l'utilizzo di uno switch Ethernet e la porta standard RJ45.

In entrambi i casi, è necessario assicurarsi che tutti gli strumenti siano accesi e collegati attraverso i loro cavi di rete allo switch Ethernet e che sia stato fissato al palo rotante il set di antenne e relativi amplificatori e filtri desiderato, in funzione della banda di frequenza che si vuole esplorare.

Immaginiamo di voler effettuare misure dall'interno della stazione radioastronomica, mediante PC fisso o laptop collegati alla rete locale d'istituto. È necessario eseguire le seguenti operazioni:

1. Assicurarsi di essere collegati alla rete LAN e di avere impostato l'assegnazione dell'indirizzo della scheda di rete del PC in Automatico DHCP.
2. Disabilitare il server DHCP locale del PC attraverso il comando

```
sudo service isc-server stop
```

Tale server si avvia automaticamente, per default, a ogni accensione o riavvio della macchina.

3. Verificare quindi di poter raggiungere altri dispositivi della rete testando attraverso il comando

```
ping indirizzo-ip
```

all'indirizzo del dispositivo remoto. I dispositivi da raggiungere nel nostro caso sono due: il Prologix che controlla l'analizzatore di spettro e che risponde all'indirizzo IP 192.167.187.131 e il microcontrollore Ethernet che controlla il rotore d'antenna che risponde invece all'IP 192.167.187.132.

I due dispositivi sono configurati per ricevere l'assegnazione automatica dell'indirizzo IP da parte del DHCP della rete alla quale sono collegati.

La rete locale di Noto, al momento, è configurata per associare a uno stesso indirizzo MAC uno stesso indirizzo IP, pertanto, nel caso ci si colleghi a una rete differente o si perda l'automatismo attuale, è necessario verificare gli eventuali nuovi indirizzi IP assegnati.

I MAC address dei due dispositivi sono:

- Interfaccia Ethernet (sul rotore) MAC DE:AD:BE:EF:FE:ED
- Interfaccia GPIB-LAN Prologix (sul SA) MAC 00:21:69:01:14:17

4. Editare lo script `ControllerGUI.py` contenuto nella cartella `RFI-GUI`.

Nella sezione *SPECTRUM ANALYZER SETTINGS* attivare le opzioni desiderate relative alle impostazioni di:

- Resolution Bandwidth in Hz (RBW)
- Video Bandwidth in Hz (VBW)
- Sweep Time in secondi
- Input Attenuation in dB
- Reference Level in dBm
- Scale Division in dB/div

Nella sezione del codice indicata con *SESSION SETTINGS*, attivare la porzione di codice relativo della sessione di misura, dove verranno indicate:

- Start Frequency in Hz
- Stop Frequency in Hz
- Frequency Resolution in Hz
- Points per Spectrum (normalmente 401 punti per l'Agilent E4408B)
- Output Filename

5. Da terminale, lanciare lo script di acquisizione tramite il comando

```
python3 ControllerGui.py
```

Verrà avviata una finestra grafica come in Figura 22, solamente se la comunicazione con i device avviene correttamente. In caso contrario, verrà restituito un messaggio di errore.

Per effettuare misure all'esterno della stazione, assicurarsi che sulla macchina virtuale sia attivo il server DHCP per l'assegnazione degli indirizzi IP ai dispositivi.

La verifica potrà essere fatta attraverso il comando:

```
sudo service isc-server start
```

se tale non risultasse attivo, avviarlo con:

```
sudo service isc-server start
```

Il server DHCP locale, assegnerà gli indirizzi 10.0.0.100 al microcontroller del rotore e 10.0.0.102 a quello del Prologix. Verificare tramite comando:

```
ping indirizzo-ip
```

la corretta assegnazione degli indirizzi con la raggiungibilità dei device.

La finestra di controllo denominata *Acquisition Status*, avviata con il processo di acquisizione, mostrerà lo stato dell'analizzatore di spettro dopo aver effettuato una operazione di *RESET* dello strumento e il riavvio alle condizioni di *PRESET*. La normale attività di comunicazione è confermata dall'aggiornamento del grafico che avviene ogni quattro secondi. Attraverso questa interfaccia, è possibile solamente monitorare l'attività della schedula durante il run e dare i

comandi essenziali di *START*, *PAUSE* e *ABORT*.

Il comando di *START* avvierà il programma di acquisizione secondo le impostazioni editate nello script `ControllerGui.py`. Verranno visualizzate le nuove impostazioni e calcolato il numero di spettri complessivo da acquisire. Contemporaneamente il motore del rotore viene azionato alla massima velocità per portare l'antenna in posizione definita a circa 3 gradi.

Quando l'antenna sarà arrivata alla sua posizione di partenza si avvierà per l'acquisizione del primo spettro, alla velocità definita, e in successione tutti gli altri fino al completamento. Gli spettri acquisiti verranno riportati in grafico al completamento di ognuno e rappresentati in modalità *APPEND*, cioè completato il primo spettro, esso verrà visualizzato da solo, al completamento del secondo, verrà visualizzato il primo unito al secondo, e così via.

In tal modo si ha la possibilità di avere sempre sotto controllo tutto lo spettro durante tutta l'acquisizione. Si può agire sul grafico attraverso le funzioni del mouse, per selezionare una particolare porzione dello spettro rappresentato e renderne più adeguata la visualizzazione.

I dati acquisiti per ogni spettro, verranno archiviati in un unico file dal nome definito in precedenza e relativo alla campagna in corso per esempio:

`ggmmaa-f-start-f-stop-RBW-Pol.csv`

Durante il *RUN* è possibile fermare momentaneamente la misura attraverso il tasto *PAUSE*. L'intervento sul tasto *PAUSE*, farà comunque completare lo spettro in corso di acquisizione prima di fermarsi. A quel punto, con il tasto *RESUME* si farà ripartire l'acquisizione dallo spettro successivo a quello in corso.

Il *RUN* potrà essere interrotto attraverso il tasto *ABORT*, anche in questo caso lo spettro in corso verrà completato prima di fermare definitivamente l'acquisizione ed effettuare automaticamente un nuovo *RESET-PRESET* dell'analizzatore di spettro.

Si effettuerà un run per polarizzazione per ogni antenna utilizzata distinguendo ulteriormente tra acquisizioni in banda larga o stretta.

Alla fine di ogni run bisognerà intervenire sul sistema per cambiare antenna e/o polarizzazione prima di poter avviare il run successivo. Si collezioneranno un certo numero di file che verranno utilizzati successivamente in fase di post elaborazione.

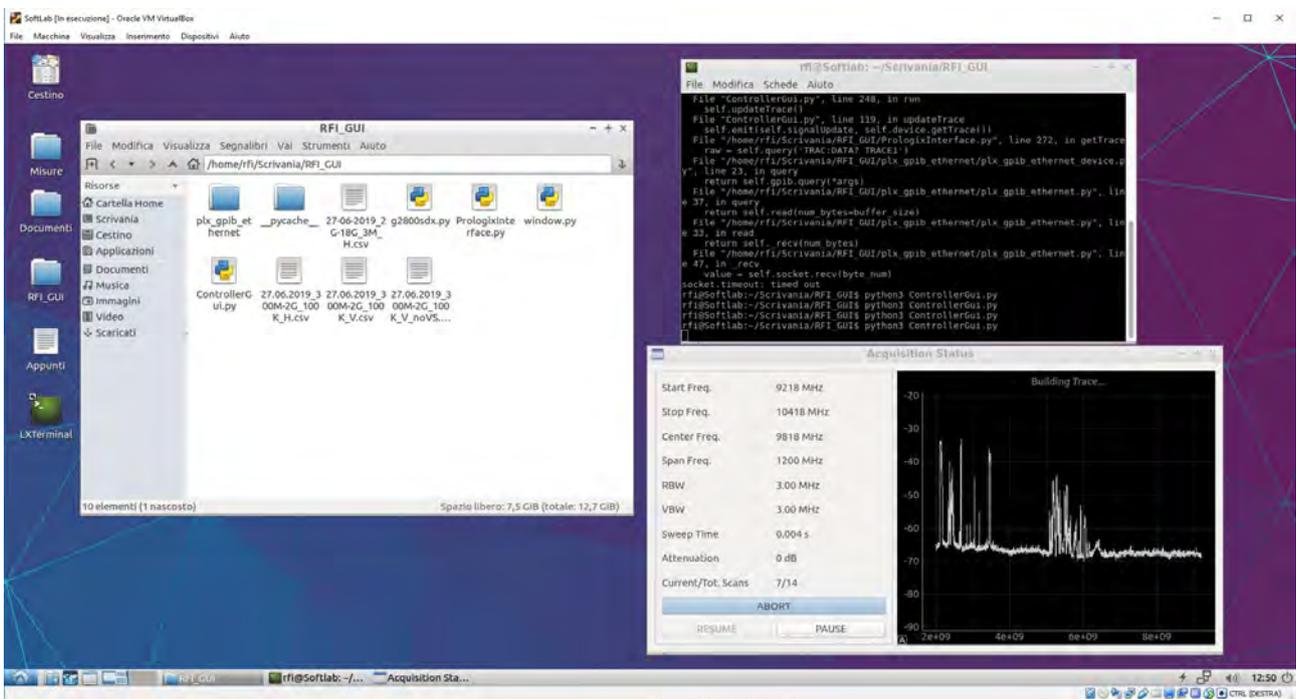


Figura 37: Tipica schermata di lavoro durante l'acquisizione di spettri.

Riferimenti bibliografici

- [1] ITU Radio Regulation 2016 Edition, *Radio astronomy service*, ARTICLE 29, <https://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.102.pdf>
- [2] Ministero dello Sviluppo Economico, *Piano Nazionale di Ripartizione delle Frequenze* <https://www.mise.gov.it/index.php/it/comunicazioni/radio/pnrf-piano-nazionale-di-ripartizione-delle-frequenze>
- [3] ITU Radiocommunication Assembly, *Protection criteria used for radio astronomical measurements*, Recommendation ITU-R RA.769-2
- [4] Ambrosini, R., Bortolotti, C., & Roma, M. (2011). *Estensione a 12 GHz del sistema ricevente installato sulla torre per controllo RFI di Medicina*. Technical Report of the INAF Institute of Radio Astronomy n. 453/11. <http://www.ira.inaf.it/Library/rapp-int/453-11.pdf>
- [5] Ambrosini, R., Bortolotti, C., & Roma, M. (2012). *Down Converter 22-24/1-3 GHz per il Sistema di ricezione RFI in banda K della Torre di Medicina*. Technical Report of the INAF Institute of Radio Astronomy 465/12. <http://www.ira.inaf.it/Library/rapp-int/465-12.pdf>
- [6] Ambrosini, R., Bortolotti, C., Roma, M., & Mureddu, L. (2004). *La quarta campagna di misure sulla distribuzione spettrale dei segnali potenzialmente interferenti il servizio di Radioastrofisica dalla stazione SRT*. Technical Report of the INAF Institute of Radio Astronomy n. 326/02. <https://www.ira.inaf.it/Library/rapp-int-2004/326-02-con-nota.pdf>
- [7] Ambrosini, R., Bortolotti, C., & Roma, M. (2008). *A 18-40 GHz RFI monitoring system for the Medicina mobile laboratory*. Technical Report of the INAF Institute of Radio Astronomy 420/08. <http://www.ira.inaf.it/Library/rapp-int/420-08.pdf>
- [8] Bolli, P., Gaudiomonte, F., Ambrosini, R., Bortolotti, C., Roma, M., Barberi, C., & Piccoli, F. (2013). *The Mobile Laboratory for Radio-Frequency Interference Monitoring at the Sardinia Radio Telescope*. IEEE Antennas and Propagation Magazine 55, pp 19-24. DOI: 10.1109/MAP.2013.6735468
- [9] Serra, G., Gaudiomonte, F., Poppi, S., Nicotra, G., Nicotra, L., Bolli, P., Bortolotti, C., Roma, M. *Monitoraggio RFI presso Radio Telescopio di Noto con il laboratorio mobile di SRT*. Technical Report of the INAF Institute of Radio Astronomy n. 55/2016 <http://hdl.handle.net/20.500.12386/1298>, https://www.oa-cagliari.inaf.it/area.php?page_id=10&skip=2
- [10] ZKL-2R5 MiniCircuits *Coaxial Amplifier Datasheet*, <https://www.minicircuits.com/>
- [11] Radiall *SHF CableAssemblies WEB 2015 Datasheet, D1A296CE - 2014 Edition*, <https://www.radiall.com/>
- [12] TDK *HRN-0118 Horn Antenna datasheet*, <https://www.tdkrfolutions.tdk.com/products/lisns/horn-antenna-hrn-0118>
- [13] *AMF-5D-02001800-40-20P-R MITEQ Coaxial Amplifier Datasheet*, <https://nardamiteq.com/>

- [14] *AMF-5D-18004000-60-8P MITEQ Coaxial Amplifier Datasheet*, https://nardamiteq.com/docs/MITEQ_Amplifier-AMF_c23.pdf
- [15] A-INFO *A-INFO Microwave Antenna Product*, http://www.ainfoinc.com.cn/en/p_ant_h_std.asp/
- [16] Yaesu Musen Co., LTD *Yaesu G-2800SDX Instruction manual*, 1994
- [17] *Arduino UNO Ethernet - Programming Reference*, <https://www.arduino.cc/>
- [18] W. W. Peterson and D. T. Brown, "Cyclic Codes for Error Detection," in *Proceedings of the IRE*, vol. 49, no. 1, pp. 228-235, Jan. 1961, doi: 10.1109/JRPROC.1961.287814.
- [19] Prologix *GPIB-Ethernet Controller User manual*, version 1.6.6.0 May 14, 2013, <http://prologix.biz/>
- [20] Agilent Technologies *ESA Spectrum Analyzers User Guide Manufacturing Part Number: E4401-90189*, August 2000
- [21] Agilent Technologies *User's and Programmer's Reference Volume 1 Core Spectrum Analyzer Functions; Manufacturing Part Number: E4401-90507* Supersedes: December 2006 Printed in USA February 2010
- [22] Agilent Technologies *User's and Programmer's Reference Volume 2 One-Button Power Measurements; Manufacturing Part Number: E4440-90618* Supersedes: E4440-9034 Printed in USA June 2008