



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI
NAPOLI FEDERICO II

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Elaborato finale in **Teoria dei Segnali**

Ricezione segnali FM Stereo in SDR

Anno Accademico 2020/2021

Candidato:

Emanuele Riccio

Matr. N46005201

*"Somewhere something incredible
is waiting to be known."*

- Carl Sagan

Indice

Indice.....	III
Introduzione	4
Capitolo 1: GNU Radio e SDR.....	6
1.1 Software Defined Radio.....	6
1.2 RTL-SDR	7
1.2.1 Architettura RTL-SDR.....	8
1.2.2 Installazione dell'RTL-SDR	9
1.3 GNU Radio	11
1.3.1 GNU Radio Companion.....	11
1.3.2 Librerie personali	14
Capitolo 2: Modulazione AM, FM e FM Stereo.....	16
2.1 AM	17
2.1.1 Modulazione.....	17
2.1.2 Demodulazione	19
2.2 Modulazione FM e PM	21
2.2.1 Modulazione.....	21
2.2.2 Caratteristiche spettrali	22
2.2.3 Traslazione del segnale in banda base mediante SDR.....	24
2.2.4 Demodulazione	26
2.3 FM Stereo.....	28
Capitolo 3: Implementazione in ambiente GNU Radio	30
3.1 Hardware utilizzato	30
3.2 Flowgraph e descrizione dei blocchi.....	31
3.3 Esperimenti di ricezione da stazioni radio	40
Conclusioni effettuata	44
Bibliografia	45

Introduzione

Con il termine Software Defined Radio (SDR) si indica una tecnologia che consente di implementare sistemi radio “definiti in software”, ovvero sistemi radio nei quali le operazioni che tipicamente sono eseguite in hardware vengono invece eseguite in software, come ad esempio la modulazione/demodulazione, la sincronizzazione, l’equalizzazione. L’obiettivo di questa tecnologia è produrre sistemi radio versatili, in grado di supportare molteplici protocolli di comunicazioni, e capaci di essere riconfigurati “on the fly”.

Nel 2012 grazie ad alcuni studi sul chip RTL2832U DVB-T da parte del finlandese Antti Palosari, si è scoperto che tramite questi dispositivi, originariamente concepiti come ricevitori (“dongle” USB) per lo standard di televisione digitale DVB-T, è possibile costruire dei semplici ed economici SDR. Utilizzabili in ambito radioamatoriale e per uso professionale, data la loro grande versatilità e la vasta documentazione presente in rete.

In questo elaborato di tesi, verranno approfondite alcune caratteristiche della tecnologia SDR impiegando un dispositivo RTL-SDR, in particolare verrà illustrata l’implementazione di un sistema radio SDR per la ricezione di segnali FM stereo mediante un dispositivo RTL-SDR.

L’elaborato di tesi è organizzato come segue. Nel primo capitolo verrà fatta una breve panoramica sui dispositivi SDR e sul software GNU Radio utilizzato per implementare il sistema radio.

Nel secondo capitolo saranno illustrate le basi teoriche della modulazione FM e AM,

approfondendo in particolare lo standard di trasmissione radio broadcast FM stereo.

Nel terzo capitolo, utilizzando il software GNU Radio ed un dongle RTL-SDR, sarà implementato un ricevitore FM stereo e saranno presentati alcuni esperimenti eseguiti mediante il ricevitore

Capitolo 1: GNU Radio e SDR

1.1 Software Defined Radio

Concettualmente un dispositivo SDR (Fig. 1) presenta una sezione a radio frequenza (RF) e dei convertitori Analog Digital Converter(ADC) e Digital Analog Converter(DAC).

Nella sezione RF troviamo un'antenna per la ricezione dei segnali radio, un amplificatore ed un filtro anti-aliasing utilizzato prima del campionamento del segnale, al fine di limitare la banda del segnale stesso per soddisfare il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon.

Tenendo conto degli standard di trasmissione attuale, si dovrebbero utilizzare convertitori ADC e DAC con frequenze di campionamento molto elevate (nell'ordine dei GHz). Spesso questa soluzione risulta molto dispendiosa in termini economici e difficilmente realizzabile, si preferisce quindi effettuare una traslazione del segnale RF ricevuto ad una frequenza intermedia (IF) tramite un demodulatore: in questo modo è possibile utilizzare anche convertitori più economici e largamente reperibili (con frequenze di campionamento dell'ordine dei MHz). Infine, il segnale campionato viene inviato al processore per le elaborazioni successive eseguite via software: tale processore in base alle esigenze può essere un dispositivo specializzato ad alte prestazioni (ad esempio, un FPGA oppure un DSP) oppure un processore “general purpose” come quello di un personal computer[2].

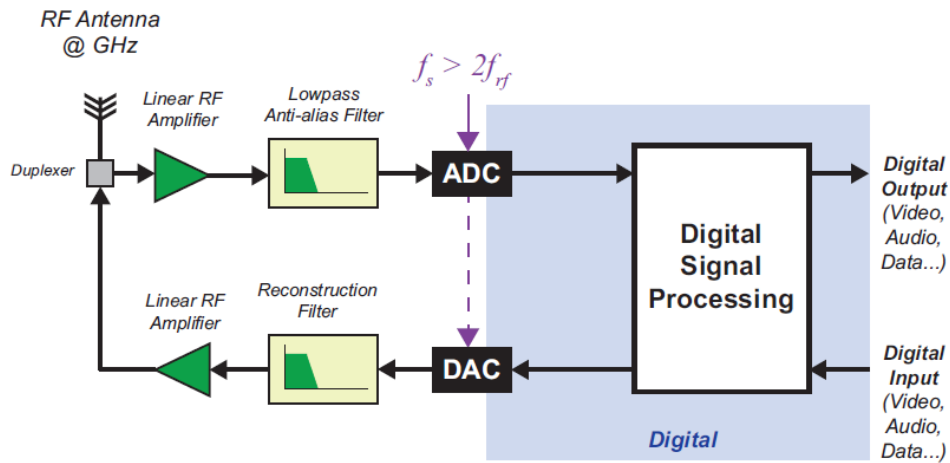


Figura 1 Schema di principio di un ricevitore SDR[2]

L'impiego di una tecnologia SDR presenta molteplici vantaggi:

- è possibile supportare diversi standard di comunicazione, utilizzando un hardware comune;
- una volta digitalizzato il segnale, possono essere eseguite molteplici elaborazioni, senza che il segnale venga degradato oppure attenuato, come accade nei dispositivi analogici;
- è possibile modificare il funzionamento del sistema agendo esclusivamente sul software, evitando quindi di dover modificare anche componenti hardware;
- è possibile effettuare un “upgrade” del sistema anche da remoto, evitando l'obsolescenza dello stesso;
- è possibile sviluppare rapidamente prototipi funzionanti.

Alcuni svantaggi sono la maggiore complessità di sviluppo, la necessità di avere molta capacità di calcolo ed i limiti in termini prestazionali introdotti dai convertitori ADC e DAC.

1.2 RTL-SDR

Il dispositivo o “dongle” RTL-SDR (Fig. 2) ha riscosso molto successo per il suo costo contenuto e per la sua versatilità. Infatti, esso può essere utilizzato in abbinamento ad

un PC e ad un software SDR in varie applicazioni, come ricezione di segnali radio, radio scanner, ricezione di segnali di controllo del traffico aereo e marittimo. Originariamente il dispositivo era stato progettato come ricevitore DVB-T, pensato per permettere la ricezione di segnali televisivi terrestri, per i quali l'operazione finale era la decodifica del segnale televisivo trasmesso nel formato MPEG[2].

Il vasto utilizzo dei dispositivi RTL-SDR si deve all'ingegnere Antti Palosari, che durante i suoi studi sui dongle DVB-T, scoprì la possibilità di forzare il dispositivo a lavorare in modalità di test ("test mode") mediante la quale viene bypassata l'operazione di decodifica MPEG, consentendo l'accesso ai dati I/Q raw campionati del segnale ricevuto, i quali tramite USB potevano essere inviati ad un software specifico per l'analisi e la demodulazione dei campioni. Una limitazione del dongle RTL-SDR è che esso può essere utilizzato solo per la ricezione, ma non è in grado di generare né trasmettere segnali.



Figura 2 Dongle RTL-SDR

1.2.1 Architettura RTL-SDR

Il dongle presenta un'architettura cosiddetta « low-IF », utilizza un tuner Rafael Micro R820T ed un demodulatore Realtek RTL2832U (Fig. 3). Il tuner è utilizzato per selezionare la porzione di spettro RF di interesse: esso inoltre trasla lo spettro RF centrandolo ad una frequenza intermedia IF di 3.57 MHz ed effettua un filtraggio tramite un filtro passa-basso in modo da conservare solo la porzione di frequenze di interesse, il tuner lavora con un intervallo di frequenze sintonizzabili nell'intervallo 25-1750 MHz con una banda di 6 MHz [2]. Il segnale risultante è applicato in ingresso al demodulatore il quale si occupa di traslare il segnale in banda base. Successivamente il

dispositivo effettua il campionamento del segnale mediante un ADC con frequenza di campionamento di 28.8MHz e risoluzione di 8 bit per campione, ed in seguito è effettuata la demodulazione in quadratura al fine di generare i campioni I/Q. Infine tramite decimazione del segnale la frequenza di campionamento viene abbassata a 2.8 MHz ed i campioni inviati al sistema host (tipicamente un PC) tramite USB.

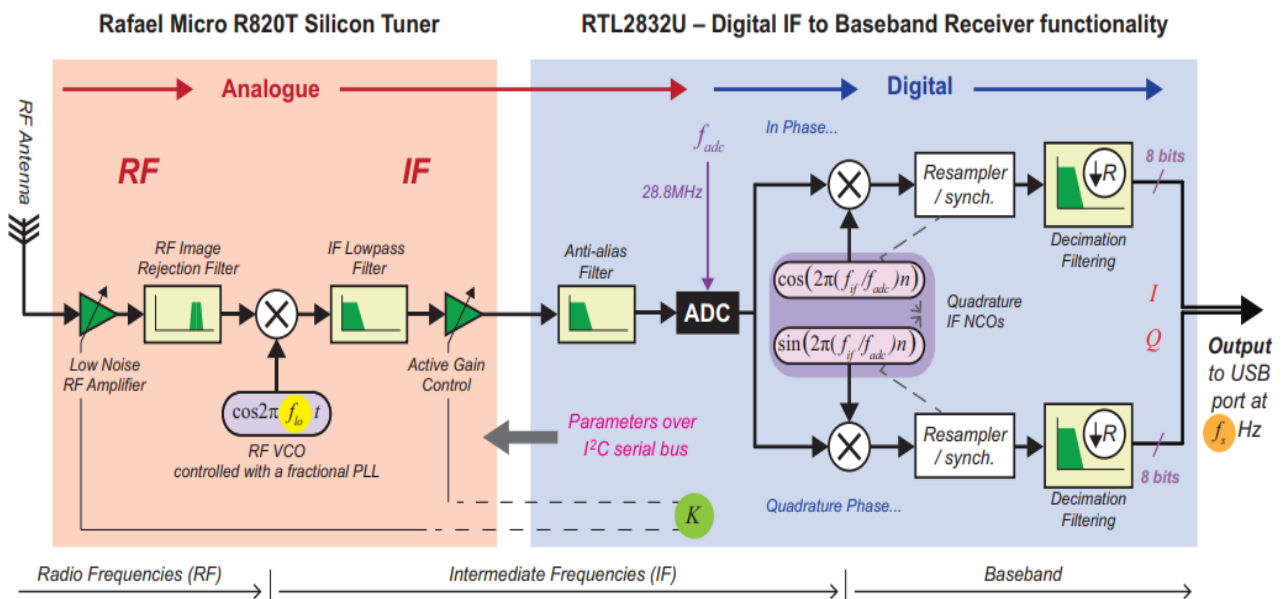


Figura 3 Architettura tipica di un dongle RTL-SDR[2]

1.2.2 Installazione dell'RTL-SDR

Per un corretto utilizzo è sufficiente disporre di un PC almeno dual-core, ma per utilizzare le più comuni applicazioni SDR basate su GUI è possibile utilizzare dispositivi Android Mobile oppure single board computer come Raspberry Pi 3 per eseguire alcuni tipi di elaborazioni. Il dongle RTL-SDR non è un dispositivo plug&play, ma è necessario installare alcuni driver per interfacciarsi con il dispositivo e recuperare correttamente il flusso dei campioni I/Q.

In ambiente Windows è possibile installare agevolmente i driver tramite l'applicativo Zadig dotato di interfaccia grafica. E' possibile reperire il pacchetto di installazione completo di librerie e driver, all'indirizzo www.airspy.com scaricando il pacchetto sdrsharp-x86.zip. Una volta estratto l'archivio si procede eseguendo lo script install-

rtlsdr.bar, il quale avvierà in automatico una finestra del terminale e scaricherà in automatico tutti i driver necessari, una volta terminato il download nella cartella saranno presenti il file rtlsdr.dll e l'eseguibile zadig.exe. Per terminare l'installazione, è necessario inserire il dongle in una porta USB ed eseguire l'applicativo zadig.exe. Una volta avviato l'applicativo, bisognerà spuntare la voce "List all devices" presente in Options(Fig. 4).

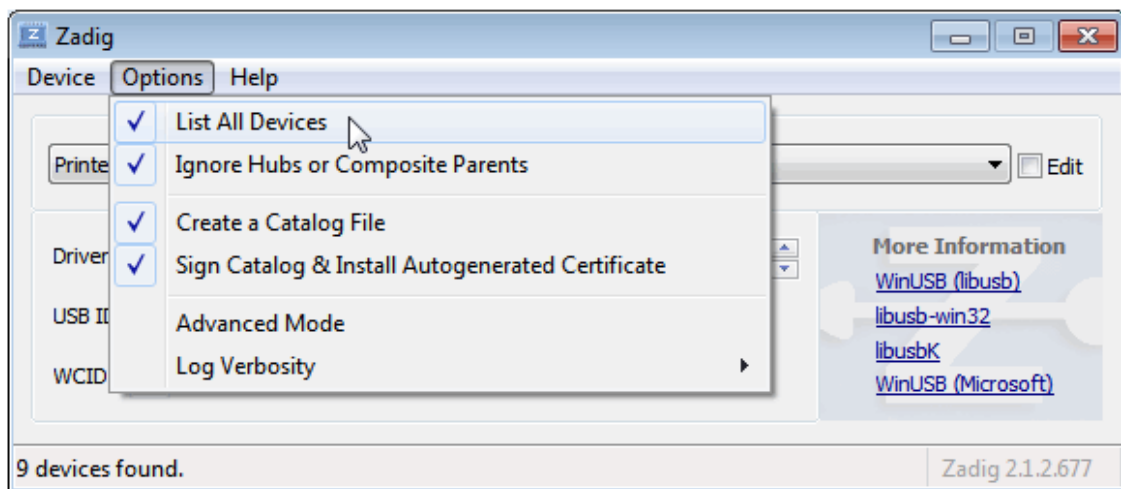


Figura 4 Installazione driver con Zadig

Infine selezionare dal menù a tendina la voce "Bulk-In Interface(Interface 0)" cliccando "Reinstall Driver" per completare la procedura(Fig. 5).

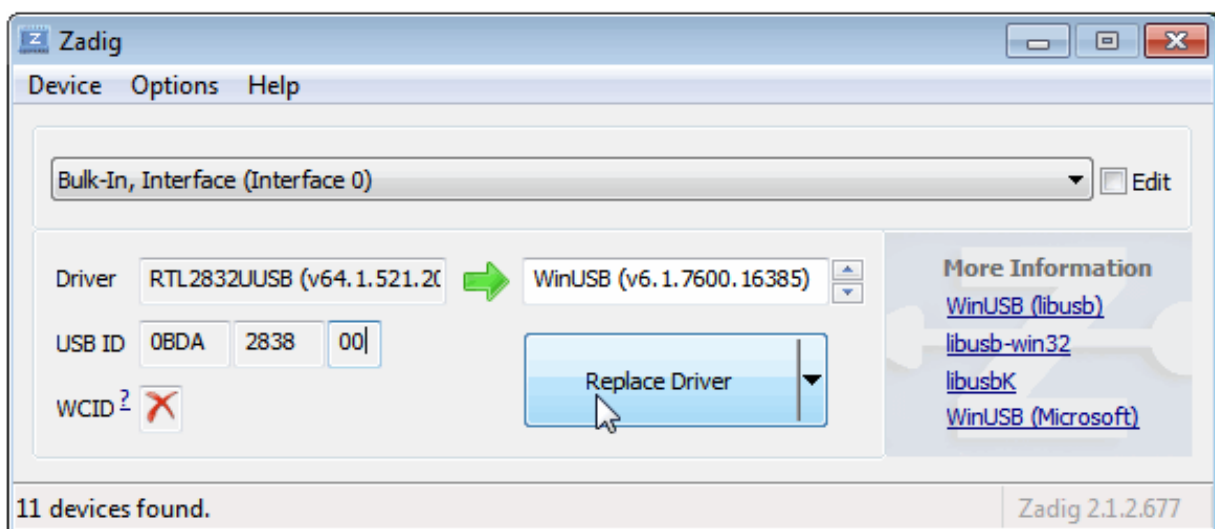


Figura 5 Installazione driver con Zadig

1.3 GNU Radio

Il software GNU Radio è un progetto di Software Defined Radio (SDR) sviluppato all'inizio degli anni 2000 da parte dell'ingegnere elettronico Eric Blossom. Esso permette di sviluppare software per l'elaborazione dei segnali ed implementare SDR anche con GUI, tramite flowgraph, facilitandone lo sviluppo, può essere utilizzato come ambiente di simulazione oppure per gestire il flusso di dati proveniente da dispositivi esterni, come nel nostro caso il dongle RTL-SDR oppure dispositivi SDR più sofisticati.

I blocchi che realizzano operazioni su segnali sono generalmente implementati in C++, mentre la struttura del grafo viene definita in Python: ogni flowgraph che si realizza è trasformato dal software GNU Radio in un programma Python, questo ne garantisce la portabilità anche su altri dispositivi[3]

1.3.1 GNU Radio Companion

La GUI di GNU Radio, chiamata GNU Radio Companion(Fig. 6), presenta diverse sezioni: sulla destra abbiamo la libreria con moduli per svolgere svariate elaborazioni, in basso troviamo un terminale dove vengono visualizzati i comandi eseguiti per compilare ed eseguire il flowgraph ed eventuali errori, inoltre è presente una sezione dove è possibile visualizzare le variabili utilizzate nel flowgraph.

Al centro abbiamo il workspace utilizzato per la costruzione del flowgraph vero e proprio, infine sulla parte superiore troviamo la toolbar. All'interno della libreria possiamo trovare diverse tipologie di blocchi, come filtri, demodulatori, analizzatori di spettro, audio sink.

E' possibile cercare rapidamente un blocco tramite CTRL+F digitandone il nome, i blocchi possono essere trasportati dalla libreria al workspace diventando parte del flowgraph.

Su ogni blocco(Fig. 7) sono presenti dei terminali per la connessione tra i blocchi, nei quali il colore blu indica la presenza di un segnale complesso, mentre il colore

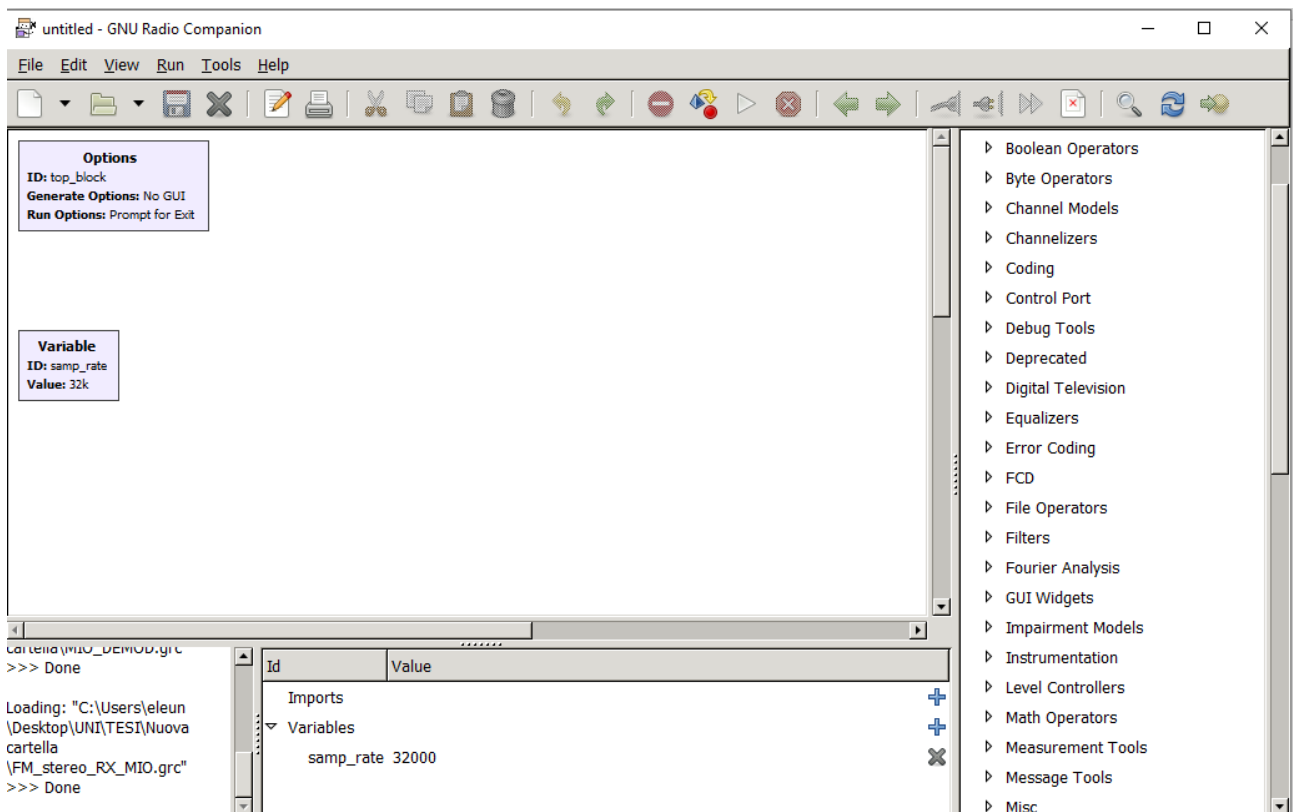


Figura 6 GNU Radio Companion

arancione di un segnale reale. L'interconnessione tra i blocchi è realizzata tramite appositi elementi di connessione.

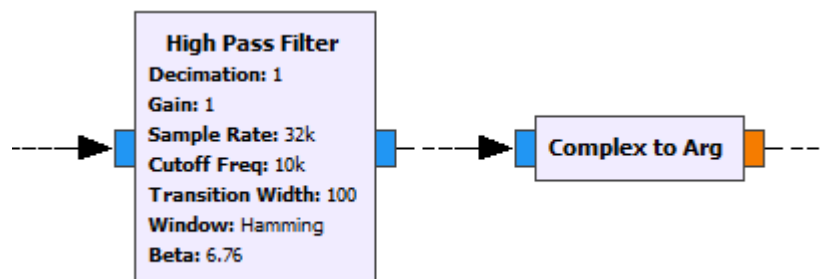


Figura 7 Blocco di GNU Radio

In ogni workspace è presente un blocco speciale denominato Options(Fig. 8), tramite il quale è possibile specificare le opzioni globali del progetto, come la tipologia di GUI che si preferisce utilizzare (da scegliere tra QT e WX). Tramite il campo ID si specifica il nome del file Python sul quale sarà memorizzato il flowgraph, inoltre è possibile inserire commenti e creare una documentazione del progetto.

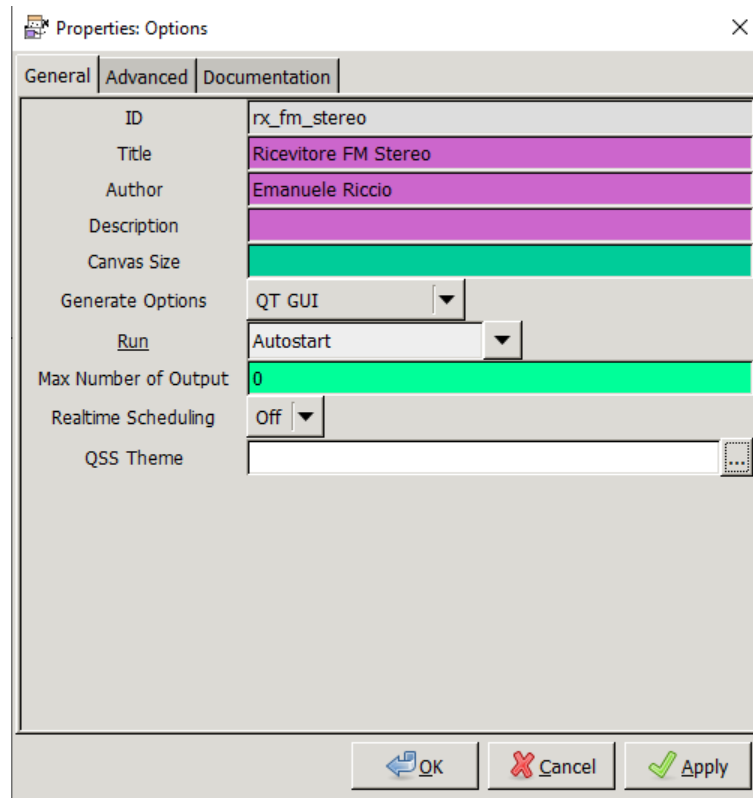


Figura 8 Options Block

Attraverso i blocchi Variable(Fig. 9) è possibile specificare delle variabili a cui sarà dato un nome, in modo da poterle utilizzare all'interno del progetto(Fig. 10): il vantaggio è che cambiando il valore della variabile nel blocco Variable specificato, la modifica si rifletterà su tutti i blocchi che la utilizzano.

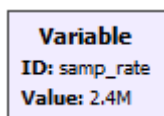


Figura 9 Blocco Variable

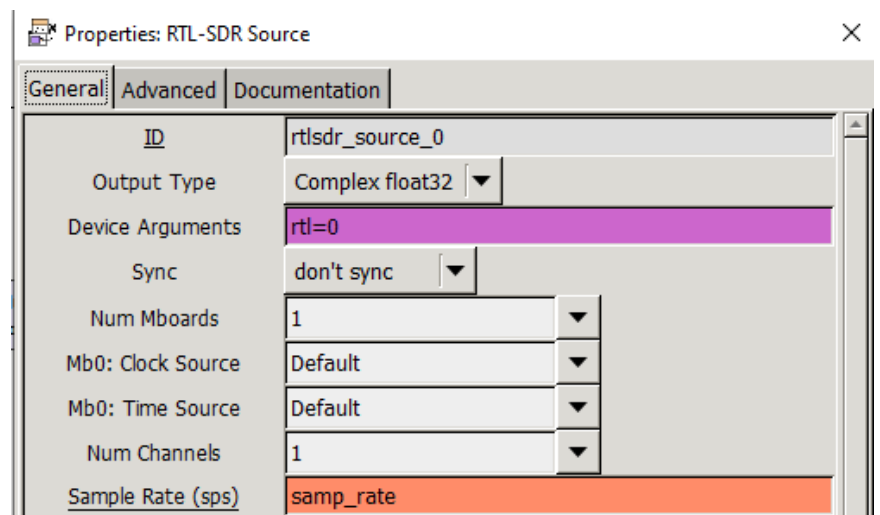


Figura 10 Parametro che richiama una Variable

Nella toolbar sono presenti due pulsanti fondamentali, il primo (Fig. 11) è utilizzato per effettuare la compilazione (“build”) del flowgraph: esso controlla la corretta struttura dei flowgraph segnalando eventuali errori e genera il file Python; tramite il secondo (Fig. 12) è possibile eseguire il flowgraph realizzato lanciando in esecuzione il file Python generato.



Figura 11 Pulsante Build



Figura 12 Pulsante Run

1.3.2 Librerie personali

Spesso si realizzano flowgraph molto complessi, nei quali la grande quantità di blocchi utilizzati può rendere complicata la lettura dei flowgraph, la correzione di eventuali bug e la produzione di documentazione chiara. GNU Radio permette di creare blocchi personalizzati, da poter riutilizzare nei proprio flowgraph, ed è possibile aggregare i blocchi che si creano in librerie, secondo la procedura descritta di seguito.

Prima di tutto bisogna creare un nuovo schema, nel quale attraverso il blocco Options (Fig. 13) si seleziona « Hier Block » per il campo Generate Options e si specifica il nome della libreria a cui si vuole aggiungere il nuovo blocco « gerarchico ».

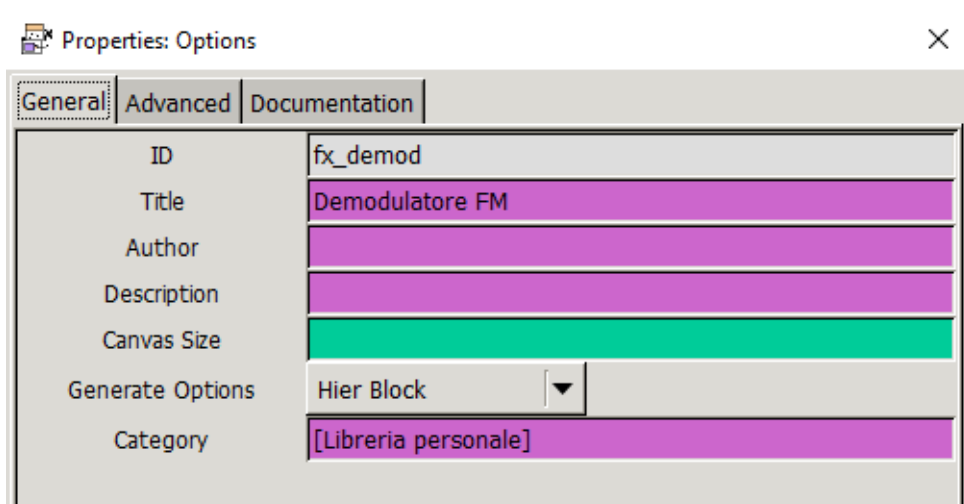


Figura 13 Options Block

Utilizzando i blocchi Parameter è possibile specificare i parametri di ingresso che l'utilizzatore dovrà fornire al blocco, per ognuno di essi sarà presente una voce nelle proprietà del blocco personalizzato che stiamo creando. Grazie ai blocchi Pad Source è possibile specificare i segnali da mettere in input al blocco, per ognuno di essi sarà presente un terminale connettivo in input. Infine tramite Pad Sink si specificano i segnali di uscita che il blocco fornisce, anche in questo caso saranno presenti tanti terminali connettivi in output quanti i blocchi Pad Sink.

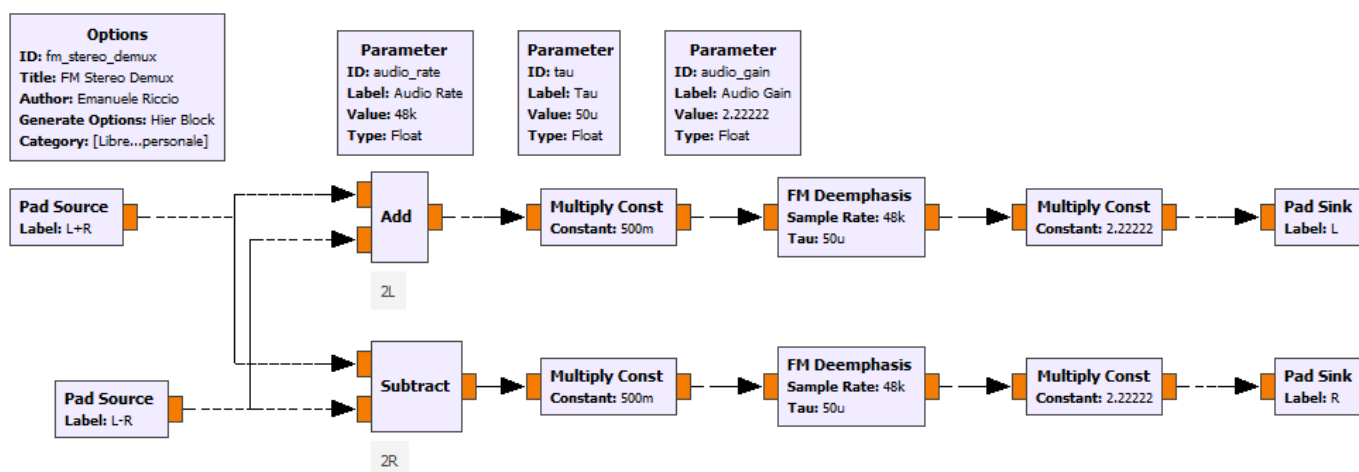


Figura 14 Flowgraph di esempio

Terminato il flowgraph(Fig. 14) è sufficiente eseguire il comando build, GNU Radio aggiornerà in automatico le librerie disponibili(Fig. 15) aggiungendo il nuovo blocco implementato(Fig. 16). Sarà quindi possibile utilizzarlo trascinandolo dalla libreria all'interno del flowgraph, fornendo i parametri necessari ed effettuato i collegamenti in modo corretto.

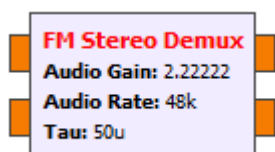


Figura 16 Blocco Stereo Demux



Figura 15 Libreria personale

Capitolo 2: Modulazione AM, FM e FM Stereo

Si consideri il segnale analogico di informazione $m(t)$ da trasmettere di tipo passabasso, con una banda W finita, ovvero per definizione $M(f)=0$ per $|f|>W$, si assuma inoltre che $m(t)$ sia un segnale di potenza. Il segnale $m(t)$ è trasmesso tramite il canale di comunicazione tramite la portante $c(t)$, caratterizzata da un'ampiezza A_c , una frequenza f_c ed una fase φ_c [1]:

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_c) \quad (1)$$

Il segnale $m(t)$ può modulare la portante $c(t)$ in ampiezza, frequenza oppure in fase, in base a quale dei parametri della portante per effetto della modulazione diventa dipendente dal segnale $m(t)$.

In generale, si utilizzano le tecniche di modulazione perché i segnali di informazioni da trasmettere sono in prevalenza passabasso, cioè il loro contenuto spettrale è concentrato alle basse frequenze, mentre i canali trasmissivi che comunemente si utilizzano sono passbanda. Occorre quindi traslare in frequenza lo spettro del segnale di informazione che si vuole trasmettere. Inoltre la modulazione consente di trasmettere più segnali sullo stesso canale senza sovrapposizione frequenziale, grazie alla tecnica Frequency Division Multiplexing (FDM).

Riassumendo i vantaggi della modulazione sono[4]:

- Traslazione della banda del segnale informativo per adattarlo alla banda del canale di comunicazione
- Modulando segnali a frequenze diverse, è possibile trasmettere simultaneamente più segnali sullo stesso mezzo trasmissivo (FDM)

- Se i segnali devono essere trasmessi mediante onde radio, la trasmissione di segnali ad alte frequenze richiede antenne più piccole rispetto alla trasmissione a basse frequenze.

2.1 AM

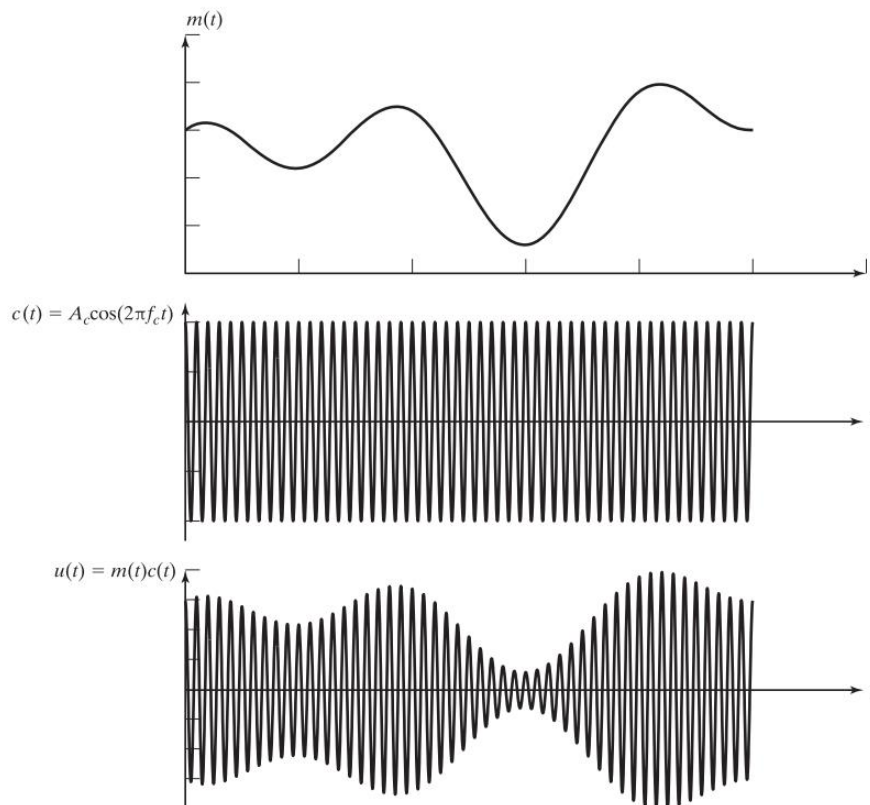
2.1.1 Modulazione

Nella modulazione di ampiezza il messaggio $m(t)$ è utilizzato per modulare l'ampiezza della portante $c(t)$ data dall'espressione (1).

In particolare, si illustra di seguito la tecnica DSB-SC. Per ottenere un segnale modulato $u(t)$ si moltiplica il messaggio $m(t)$ con la portante $c(t)$

$$u(t) = m(t)c(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi_c) \quad (2)$$

Un esempio di segnale $m(t)$, portante $c(t)$ e segnale modulato $u(t)$ sono mostrati in Fig.17, dove si vede come il segnale $m(t)$ lentamente variabile sia trasformato tramite modulazione nel segnale $u(t)$ rapidamente variabile nel tempo, il quale proprio a causa di questa caratteristica presenta componenti ad alta frequenza. E' possibile ricostruire il segnale $m(t)$ da $u(t)$, dato che quest'ultimo trasporta la stessa informazione.



E' possibile osservare l'effetto della modulazione osservando lo spettro di ampiezza del segnale $u(t)$, che può essere calcolato come segue [1]:

$$\begin{aligned}
 U(f) &= \mathcal{F}[m(t)] * \mathcal{F}[A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_c)] \\
 &= M(f) * A_c/2 [e^{j\varphi_c} \delta(f - f_c) + e^{-j\varphi_c} \delta(f + f_c)] \\
 &= A_c/2 [M(f - f_c)e^{j\varphi_c} + M(f + f_c)e^{-j\varphi_c}]
 \end{aligned} \tag{3}$$

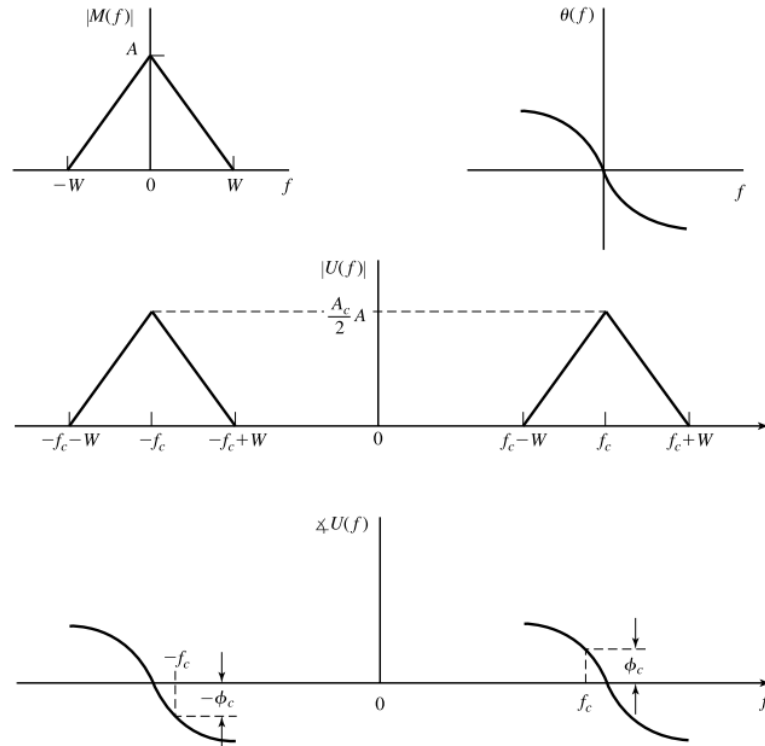


Figura 18 Spettri di ampiezza e fase dei segnali $m(t)$ e $u(t)$ [1]

Lo spettro di ampiezza del segnale $m(t)$ (Fig.18) ha subito una doppia traslazione (sia verso destra che verso sinistra) di f_c . Inoltre la banda del segnale $m(t)$ è W , mentre la banda occupata dal segnale modulato è $2W$. In generale è necessario che $f_c \gg W$, in modo da evitare sovrapposizioni tra le due traslazioni dello spettro.

Il contenuto spettrale del segnale modulato $u(t)$ nella banda $|f| > f_c$ è chiamata upper sideband (banda laterale superiore), mentre per $|f| < f_c$ prende il nome di lower sideband (banda laterale inferiore). Entrambe le bande laterali contengono tutte le componenti frequenziali di $M(f)$, ad esempio per la banda laterale superiore il contenuto frequenziale di $U(f)$ $f > f_c$ è il contenuto frequenziale di $M(f)$ $f > 0$, mentre $U(f)$ $f < -f_c$

contiene le frequenze di $M(f)$ $f < 0$ (valgono considerazioni simili per la banda laterale inferiore) [1].

Poiché il segnale $U(f)$ è formato da entrambe le bande laterali esso è chiamato double-sideband (DSB); inoltre esso non contiene la componente frequenziale della portante $c(t)$, da cui scaturisce il termine suppressed-carrier (SC)

2.1.2 Demodulazione

Supponendo di trasmettere su un canale ideale (senza distorsioni nè rumore) è possibile assumere il segnale ricevuto $r(t) = u(t)$. In questo caso è possibile demodulare il segnale $r(t)$ ricostruendo perfettamente il messaggio $m(t)$, moltiplicandolo per una sinusoide del tipo $\cos(2\pi f_c t + \varphi)$ avente la stessa frequenza della portante $c(t)$ utilizzata per la modulazione ed effettuando un filtraggio passa-basso. Infatti si ha[1]:

$$\begin{aligned} y(t) &= r(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi) = A_c m(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi_c)\cos(2\pi f_c t + \varphi) \\ &= 1/2 A_c m(t)\cos(\varphi_c - \varphi) + 1/2 A_c m(t)\cos(4\pi f_c t + \varphi + \varphi_c) \end{aligned} \quad (4)$$

Osservando lo spettro di $y(t)$ in Fig.19 possiamo notare come il messaggio $m(t)$ sia stato riportato in banda base, mentre troviamo delle componenti indesiderate alle frequenze $\pm 2f_c$. Dato che il segnale $m(t)$ ha banda limitata pari a W Hz ed essendo inoltre $f_c \gg W$, è possibile eliminare le componenti indesiderate tramite un filtro passa-basso. Il segnale in uscita prodotto è

$$y_l(t) = 1/2 A_c m(t)\cos(\varphi_c - \varphi) \quad (5)$$

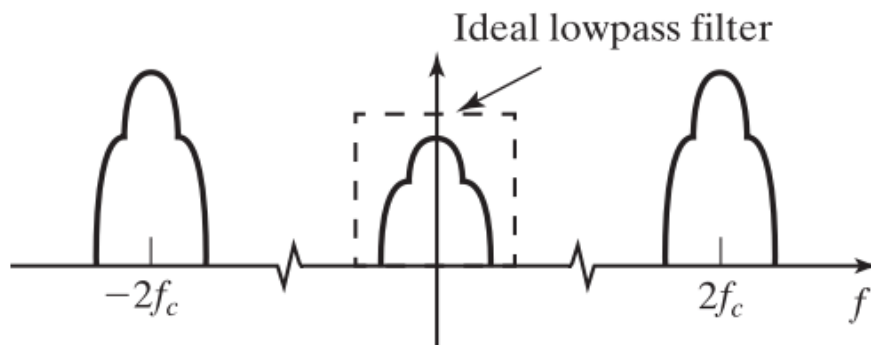


Figura 19 Spettro di ampiezza del segnale $y(t)$

Nell'espressione precedente, il segnale $m(t)$ è moltiplicato per il termine $\cos(\varphi_c - \varphi)$, dove φ è la fase della sinusoide generata dal ricevitore per la demodulazione. Nel caso in cui $\varphi_c - \varphi = 90^\circ$ il segnale $m(t)$ verrebbe moltiplicato per $\cos(\varphi_c - \varphi) = 0$ e il suo contenuto informativo andrebbe perso. E' necessario quindi che la fase φ della sinusoide generata dal ricevitore sia pari alla fase φ_c della portante usata per la trasmissione, in modo che il termine $\cos(\varphi_c - \varphi) = 1$, lasciando inalterato $m(t)$. Un metodo per sincronizzare le fasi è trasmettere(Fig.20) una componente portante $c(t)$, denominata "pilot tone" la quale si presenta in frequenza idealmente come un impulso localizzato nell'intorno della frequenza f_c : il ricevitore(Fig.20) estrae questa componente tramite un filtro per utilizzarla nella demodulazione, moltiplicandola per il segnale ricevuto $r(t)$ [1].

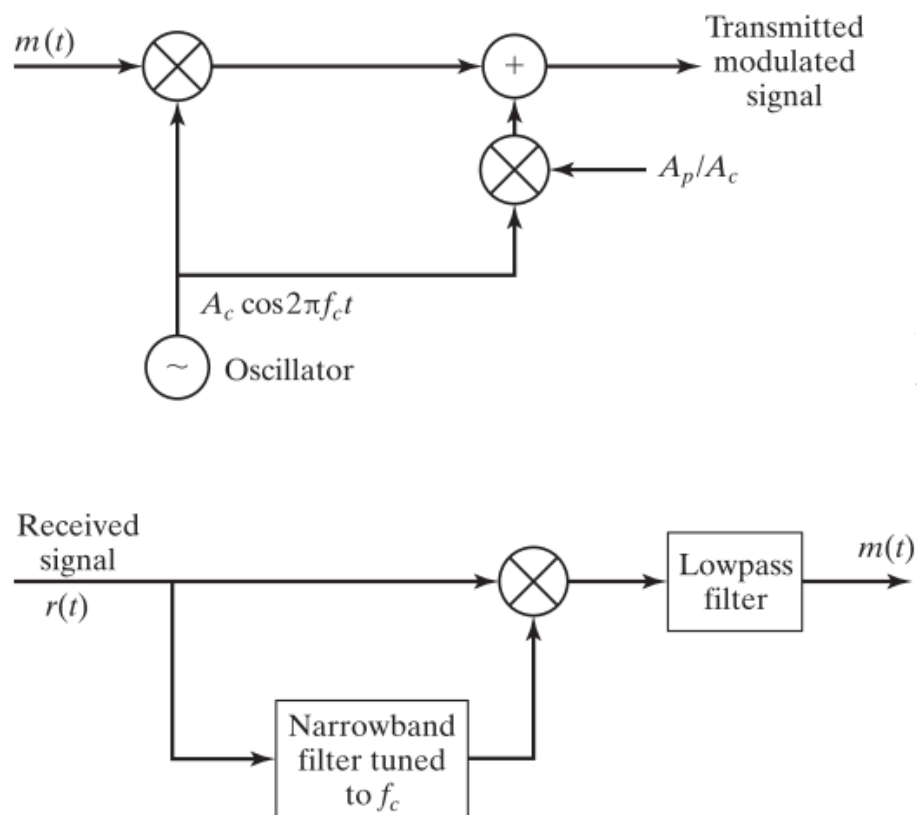


Figura 20 Schemi di trasmissione(in alto) e ricezione(in basso) della componente pilot tone [1]

2.2 Modulazione FM e PM

2.2.1 Modulazione

Le modulazione FM/PM appartengono alla famiglia delle modulazioni angolari. Un segnale risultante dalla modulazione angolare può essere espresso come:

$$u(t) = A_c \cos(\theta(t)) \quad (6)$$

L'argomento del coseno è chiamata la fase del segnale, mentre la frequenza istantanea è:

$$f_{i(t)} = 1/2\pi \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (7)$$

Il segnale $u(t)$ può essere rappresentato anche come:

$$u(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi(t)) \quad (8)$$

di conseguenza la frequenza istantanea diventa:

$$f_{i(t)} = f_c + 1/2\pi \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (9)$$

Detto $m(t)$ il segnale modulante, nel caso della modulazione FM si vuole far variare la frequenza istantanea rispetto al valore f_c in modo proporzionale al valore assunto dal segnale $m(t)$:

$$f_i(t) - f_c = k_f m(t) = 1/2\pi \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (10)$$

Nella modulazione PM, invece, è il termine $\varphi(t)$ a variare proporzionalmente al messaggio, secondo la legge:

$$\varphi(t) = k_p m(t) \quad (11)$$

Riassumendo, l'espressione della fase per una modulazione angolare è:

$$\varphi(t) = \begin{cases} k_p m(t) & PM \\ 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau & FM \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \begin{cases} k_p \frac{dm(t)}{dt} & PM \\ 2\pi k_f m(t) & FM \end{cases} \quad (13)$$

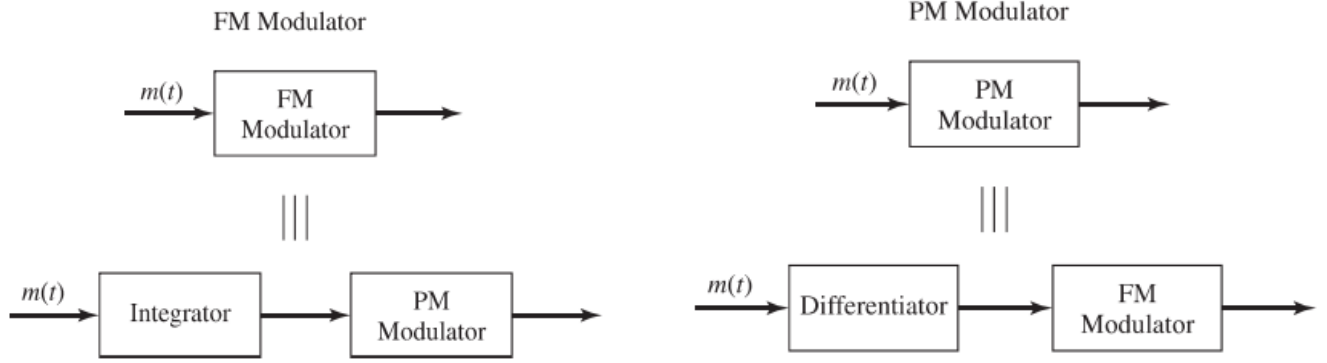


Figura 21 Modulatore FM [1]

Figura 22 Modulatore PM [1]

E' possibile notare una relazione tra le due tecniche di modulazione angolari: in particolare, modulando in fase la portante con l'integrale del messaggio $m(t)$ si ottiene lo stesso risultato della modulazione in frequenza con il messaggio originale $m(t)$ (Fig. 21). Inoltre è valido anche l'opposto, infatti modulando in frequenza la portante con la derivata del messaggio $m(t)$ si ottiene la modulazione in fase (Fig. 22). Per la modulazione PM si definisce la massima deviazione di fase come segue:

$$\Delta\varphi_{max} = k_p \max[|m(t)|] \quad (15)$$

Per la modulazione FM si definisce invece la massima deviazione di frequenza:

$$\Delta f_{max} = k_f \max[|m(t)|] \quad (16)$$

Infine, sfruttando queste definizioni, si ricavano gli indici di modulazione, dove ancora W indica la banda messaggio $m(t)$:

$$\beta_p = \Delta\varphi_{max} \quad (17)$$

$$\beta_f = \frac{\Delta f_{max}}{W} \quad (18)$$

2.2.2 Caratteristiche spettrali

Data la natura non lineare delle tecniche di modulazione angolare, la descrizione spettrale dei segnali modulati risulta complessa, pertanto saranno illustrati tre semplici casi.

Segnale modulante sinusoidale

In questo caso sia per la modulazione FM che PM, otteniamo :

$$u(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)) \quad (19)$$

Il parametro β equivale ai due parametri β_p e β_f . L'espressione può essere riscritta come[1]:

$$u(t) = \Re e(A_c e^{j2\pi f_c t} e^{j\beta \sin 2\pi f_m t}) \quad (20)$$

Essendo il termine $\sin(2\pi f_m t)$ periodico con $T_m = \frac{1}{f_m}$, lo stesso vale per il termine $e^{j\beta \sin 2\pi f_m t}$, il quale può essere espresso tramite serie di Fourier, con coefficienti :

$$c_n = f_m \int_0^{\frac{1}{f_m}} e^{j\beta \sin 2\pi f_m t} e^{-jn2\pi f_m t} dt \quad (21)$$

Sostituendo $u = 2\pi f_m t$, otteniamo :

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{j(\beta \sin u - nu)} du \quad (22)$$

L'integrale definito nell'espressione sopra è denominato « funzione di Bessel del primo tipo di ordine n » ed è indicato come $J_n(\beta)$. Otteniamo dunque :

$$e^{j\beta \sin 2\pi f_m t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) e^{jn2\pi f_m t} \quad (23)$$

Di conseguenza sostituendo nell'espressione di $u(t)$ (20) :

$$\begin{aligned} u(t) &= \Re(A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) e^{jn2\pi f_m t} e^{j2\pi f_c t}) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_c J_n(\beta) \cos(2\pi(f_c + n f_m)t) \end{aligned} \quad (24)$$

Pur trattandosi di un semplice caso, dove il segnale modulante è una sinusoide di frequenza f_m , lo spettro del segnale modulato contiene componenti del tipo $f_c + n f_m$ con $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, in sostanza la banda del segnale modulato è idealmente infinita [1].

Per n molto grande, tuttavia, l'ampiezza delle componenti sinusoidali diventa piccola: pertanto, nel caso considerato (cioè con segnale modulante di tipo sinusoidale), è possibile definire la banda « efficace » come l'intervallo di frequenze dove è contenuto almeno il 98% della potenza del segnale [1]. Questa banda può essere approssimata dalla relazione seguente :

$$B_c = 2(\beta + 1)f_m \quad (25)$$

dove β è l'indice di modulazione, mentre f_m rappresenta la frequenza della sinusoide. E' interessante analizzare l'effetto dell'ampiezza massima del segnale sinusoidale modulante e della sua frequenza sulla banda del segnale modulato. Prendendo ad esempio il segnale $m(t) = a \cos(2\pi f_m t)$, la banda del segnale modulato sarà descritta dalla seguente espressione :

$$B_c = 2(\beta + 1)f_m = \begin{cases} 2(k_p a + 1)f_m & PM \\ 2(k_f a + f_m) & FM \end{cases} \quad (26)$$

Incrementando il parametro a (ampiezza del segnale modulante) l'effetto è identico in entrambe le tecniche di modulazione, ovvero la banda B_c è incrementata. Invece, il parametro f_m influenza in maniera proporzionale la banda del segnale modulato in PM ed in maniera additiva[1].

Caso segnale modulante arbitrario

In questo caso, per un generico segnale modulante $m(t)$, non esiste un modo generale per definire lo spettro del segnale modulato, a causa della non linearità del processo di modulazione. E' possibile definire approssimativamente la banda effettiva del segnale modulato tramite un'espressione denominata « regola di Carson » [1] :

$$B_c = 2(\beta + 1)W \quad (27)$$

dove W indica ancora la banda del segnale $m(t)$.

2.2.3 Traslazione del segnale in banda base mediante SDR

Per il processo di demodulazione, è interessante approfondire l'elaborazione effettuata dal dongle RTL-SDR sul segnale radio in ricezione dal quale vengono generati i campioni I/Q trasmessi al software SDR. Il segnale radio FM $s_{f_{mRF}}(t)$ ricevuto dal dongle è elaborato da un moltiplicatore o « mixer » (Fig. 23), il quale effettua il prodotto tra il segnale ricevuto ed un fasore di frequenza f_{lo} , che idealmente rappresenta la parte di spettro su cui ci si vuole sintonizzare. L'effetto del mixer è di traslare la porzione di spettro selezionato in banda base. Il risultato di questa moltiplicazione è elaborato da un filtro passa basso per eliminare le componenti indesiderate : questo processo è denominato « downconversion ».

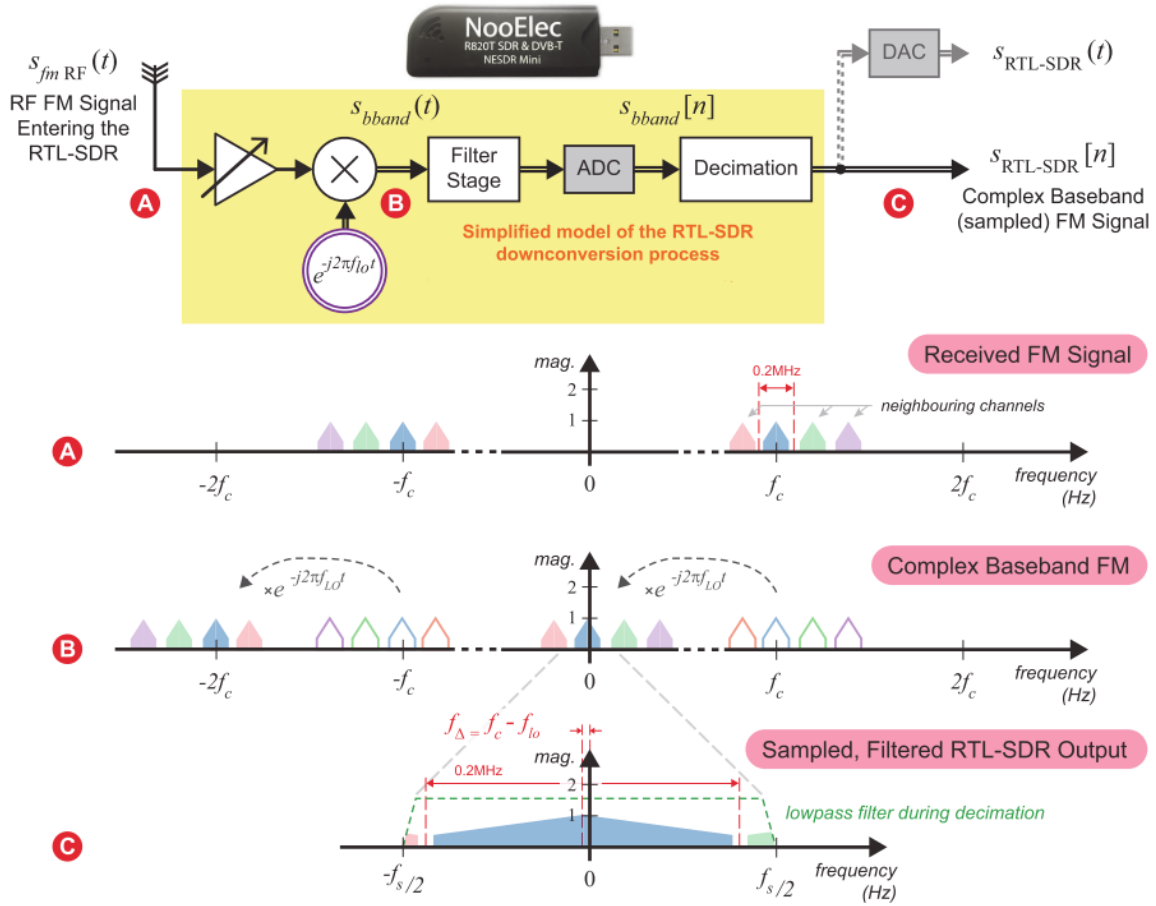


Figura 23 Processo di downconversion [2]

Supponendo di trasmettere su un canale ideale senza distorsioni nè rumore è possibile modellare il segnale radio ricevuto come

$$s_{fmRF}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_{fm}(t)) \quad (28)$$

$$\varphi_{fm}(t) = 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \quad (29)$$

Indichiamo con $s_{RTL-SDR}(t)$ il segnale generato in output dal dongle, il quale tramite USB è inviato al software SDR che si utilizza. Idealmente la frequenza f_{lo} del fasore utilizzato per la demodulazione dovrebbe corrispondere esattamente alla frequenza f_c della portante del segnale modulato ricevuto, in modo da traslare perfettamente il segnale in banda base. Definiamo $f_{\Delta} = f_c - f_{lo}$ e $\omega_{\Delta} = \omega_c - \omega_{lo}$ (nelle derivazioni matematiche per brevità utilizzeremo la pulsazione invece della frequenza). Indichiamo con $s_{bband}(t)$ l'uscita del mixer, si ha [2] :

$$\begin{aligned} s_{bband}(t) &= s_{fmRF}(t) e^{-j\omega_{lo}t} \\ &= A_c \cos(\omega_c t + \varphi_{fm}(t)) (\cos(\omega_{lo}t) - j\sin(\omega_{lo}t)) \end{aligned} \quad (30)$$

Svolgendo i calcoli e sostituendo l'espressione ω_Δ , otteniamo:

$$s_{bband}(t) = \frac{A_c}{2} \left[\cos(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) + \cos(\omega_c t + \varphi_{fm}(t) + \omega_{lo} t) \right] - j \frac{A_c}{2} \left[\sin(\omega_c t + \varphi_{fm}(t) + \omega_{lo} t) - \sin(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) \right] \quad (31)$$

Le due espressioni evidenziate in grigio sono componenti ad alta frequenza: esse saranno eliminate dal filtro passa basso, il quale lascerà passare le altre due componenti non evidenziate [2].

$$\begin{aligned} s_{RTL-SDR}(t) &= LPF[s_{bband}(t)] \\ &= \frac{A_c}{2} \left[\cos(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) + j \sin(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) \right] \\ &= \frac{A_c}{2} e^{j(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t))} \end{aligned} \quad (32)$$

La precedente espressione è complessa, presentando sia una componente reale che immaginaria. Separando le due componenti possiamo ottenere i campioni I/Q :

$$s_{ip}(t) = \Re[s_{RTL-SDR}(t)] = \frac{A_c}{2} \cos(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) \quad (33)$$

$$s_{qp}(t) = \Im[s_{RTL-SDR}(t)] = \frac{A_c}{2} \sin(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) \quad (34)$$

In generale ω_Δ ha un valore molto prossimo allo zero poiché $\omega_{lo} \cong \omega_c$

2.2.4 Demodulazione

Una delle possibili tecniche adoperate in ambiente SDR per la demodulazione FM a partire dai campioni I/Q è denominata « complex delay line frequency discriminator ».

Lo schema che realizza questo algoritmo è mostrato in Fig. 24, mentre nel prossimo capitolo verranno illustrati i risultati della ricezione di segnali FM stereo, demodulati grazie a questo schema

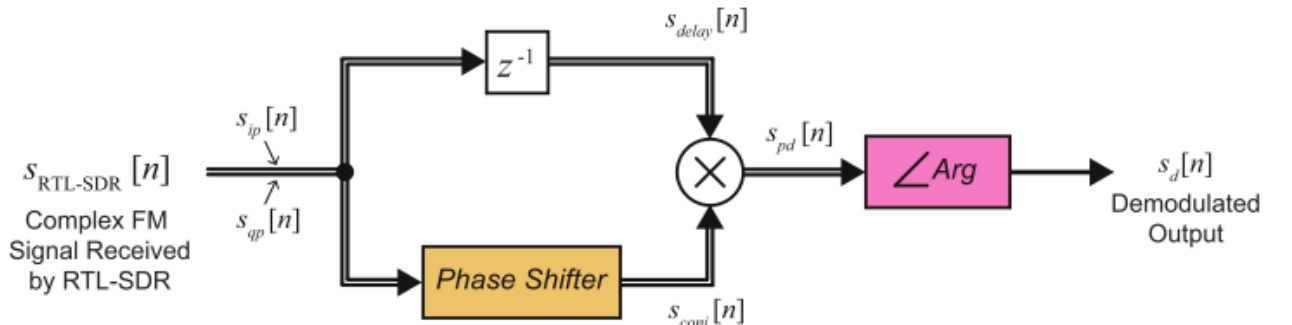


Figura 24 Schema "Complex delay line frequency discriminator" [2]

Il segnale complesso in ingresso $s_{RTL-SDR}(t)$ è applicato all'ingresso di due blocchi in parallelo. Il blocco z^{-1} introduce un ritardo τ nel segnale, indichiamo il suo output con $s_{delay}(t)$. Il blocco denominato « phase shifter » calcola il complesso coniugato del segnale in input, il suo output è indicato come $s_{conj}(t)$. Un terzo blocco effettua il prodotto dei segnali producendo in output il segnale $s_{pd}(t)$, il quale come ultimo passo dello schema, viene elaborato dal blocco Arg che ne calcola la fase. E' possibile modellare il funzionamento dello schema come segue [2]:

$$s_{RTL-SDR}(t) = \frac{A_c}{2} e^{j(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t))} \quad (35)$$

$$s_{delay}(t) = \frac{A_c}{2} e^{j(\omega_\Delta [t-\tau] + \varphi_{fm}(t-\tau))} \quad (36)$$

$$s_{conj}(t) = \frac{A_c}{2} e^{-j(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t))} \quad (37)$$

Indichiamo con $s_d(t)$ l'output del blocco Arg e quindi il segnale prodotto in output dallo schema. Si ha :

$$s_{pd}(t) = s_{conj}(t)s_{delay}(t) = \frac{A_c^2}{2} e^{-j[(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) - (\omega_\Delta [t-\tau] + \varphi_{fm}(t-\tau))]} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} s_d(t) &= \angle s_{pd} \\ &= -[(\omega_\Delta t + \varphi_{fm}(t)) - (\omega_\Delta [t-\tau] + \varphi_{fm}(t-\tau))] \\ &= -[(\omega_\Delta t - \omega_\Delta [t-\tau]) + (\varphi_{fm}(t) - \varphi_{fm}(t-\tau))] \end{aligned} \quad (39)$$

Con τ molto piccolo, possiamo approssimare l'ultima espressione(39) come :

$$s_d(t) \approx -\left[\omega_\Delta + \frac{d\varphi_{fm}(t)}{dt}\right] = -[\omega_\Delta + 2\pi k_f m(t)] \quad (40)$$

Otteniamo un segnale proporzionale al segnale $m(t)$, essendo ω_Δ trascurabile, per cui è possibile ripristinare il segnale $m(t)$ moltiplicando il risultato ottenuto per un guadagno $g = -\frac{1}{2\pi k_f}$. In termini di campioni I/Q nel tempo discreto, l'output del demodulatore si può esprimere come.

$$s[n] = \angle(s_{ip}[n] - s_{qp}[n])(s_{ip}[n-1] + s_{qp}[n-1]) \quad (41)$$

2.3 FM Stereo

Le stazioni radio commerciali utilizzano maggiormente la modulazione FM per il broadcasting di segnali musicali e vocali. In particolare si utilizza lo spettro di frequenze portanti 88-108 MHz, nel quale ogni stazione radio trasmette utilizzando una portante ad una specifica frequenza per la modulazione, quindi occupando una precisa porzione dello spettro RF. La distanza tra le frequenze portanti è di 200 kHz, con una deviazione di frequenza massima di 75kHz, in questo modo più stazioni radio possono trasmettere simultaneamente senza sovrapposizioni, grazie alla tecnica FDM. Il broadcasting FM è progettato in modo da permettere la ricezione in modalità stereo, garantendo al tempo stesso la compatibilità del formato mono. Specificamente, un segnale audio stereo è composto da due flussi informativi sonori diversi denominati Left (L) e Right (R), ognuno dei quali viene riprodotto da un diverso diffusore acustico posizionato nell'ambiente d'ascolto, conferendo spazialità al suono. In Fig. 25 è mostrato lo spettro del segnale FM broadcast in banda base.

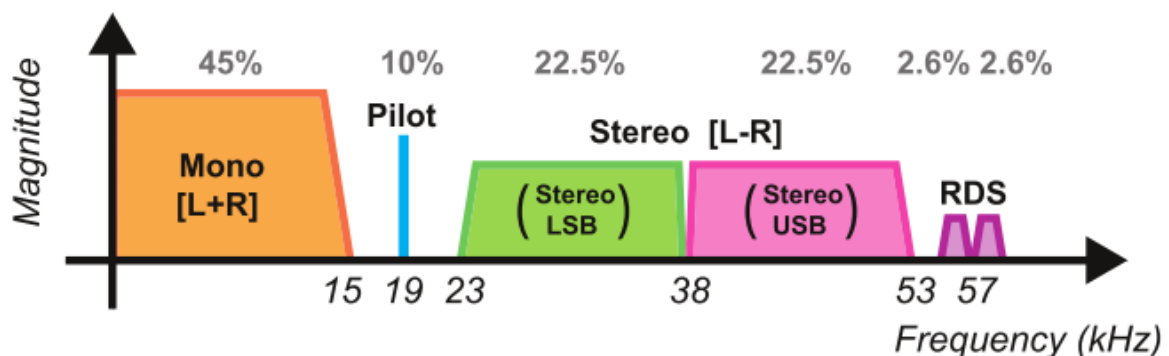


Figura 25 Spettro del segnale FM broadcast in banda base [2]

La componente 'Mono' è creata sommando i segnali L ed R, ed è situata in banda base: essa occupa lo spettro 30Hz-15kHz, in questo modo è garantita la retro compatibilità con ricevitori radio mono. La componente stereo è creata modulando in ampiezza (con tecnica DSB-SC) la differenza dei segnali L ed R ed utilizzando una portante a 38 kHz: l'effetto della modulazione DSB-SC è quello di raddoppiare la banda necessaria, infatti pur essendo i segnali L ed R limitati ad uno spettro di 15 kHz, la componente stereo

occupa lo spettro di frequenze da 23 kHz a 53 kHz, con una banda monolatera di 30 kHz. Non tutte le stazioni radio trasmettono in FM Stereo, la componente denominata ‘Pilot Tone’ a 19 kHz, se presente, indica al ricevitore la presenza della componente stereo: inoltre da tale componente è possibile ottenere un segnale a 38 kHz utilizzato per la demodulazione della componente stereo, come descritto nella sezione 2.1.2. Infine la componente Radio Data System (RDS) rappresenta un segnale modulato digitalmente contenente informazioni riguardanti la stazione radio e la trasmissione in onda [2].

Il segnale FM ricevuto viene demodolato in maniera convenzionale e tramite dei filtri si isolano le singole componenti(Fig. 26). Il ‘Pilot Tone’ è utilizzato mediante dei moltiplicatori di frequenza (x2 e x3) per ottenere segnali a 38 kHz e 57 kHz, che serviranno per demodulare la componente stereo e la componente RDS. I singoli canali L ed R, sono ottenuti rispettivamente sommando e sottraendo le componenti Mono e Stereo demodolata

$$[L + R] + [L - R] = 2L$$

$$[L + R] - [L - R] = 2R$$

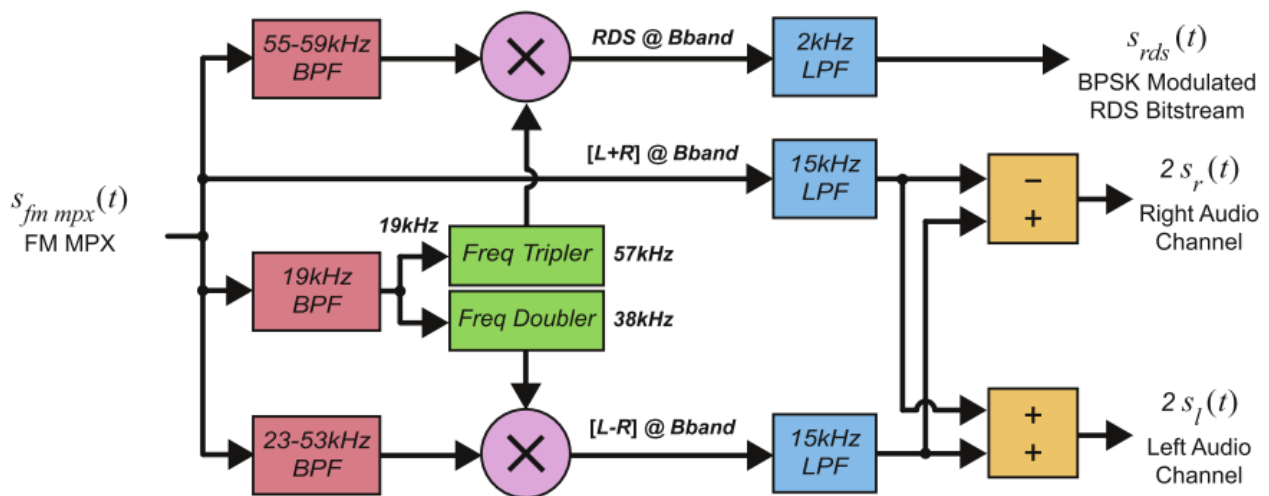


Figura 26 Schema a blocchi del ricevitore FM Stereo [2]

Capitolo 3: Implementazione in ambiente GNU Radio

3.1 Hardware utilizzato

Per sfruttare l'approccio SDR, si è adoperato il dongle RTL-SDR descritto nella sezione 1.2, mentre per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato l'ambiente GNU Radio descritto nella sezione 1.3. Approssimativamente si può calcolare la lunghezza ideale per l'antenna in base allo spettro di frequenze di interesse. Trattandosi di ricezione di trasmissioni FM lo spettro di frequenze è 88 MHz–108 MHz: considerando una frequenza di $f = 100\text{MHz}$, l'antenna dovrebbe essere lunga circa $\frac{\lambda}{4}$, con $\lambda = \frac{c}{f}$ dove $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ è la velocità della luce. Si ottiene $\lambda \approx 3\text{m}$, quindi l'antenna deve rispettare una lunghezza di circa 75 cm, per questo motivo l'antenna utilizzata è quella di tipo telescopico (Fig. 27), collegata tramite un cavo coassiale al dongle[5].



Figura 27 Dongle RTL-SDR ed antenne telescopiche adoperate

3.2 Flowgraph e descrizione dei blocchi

Il software per la ricezione di segnali FM è stato realizzato in ambiente GNU Radio, in

Fig. 28 si riporta lo schema a blocchi implementato.

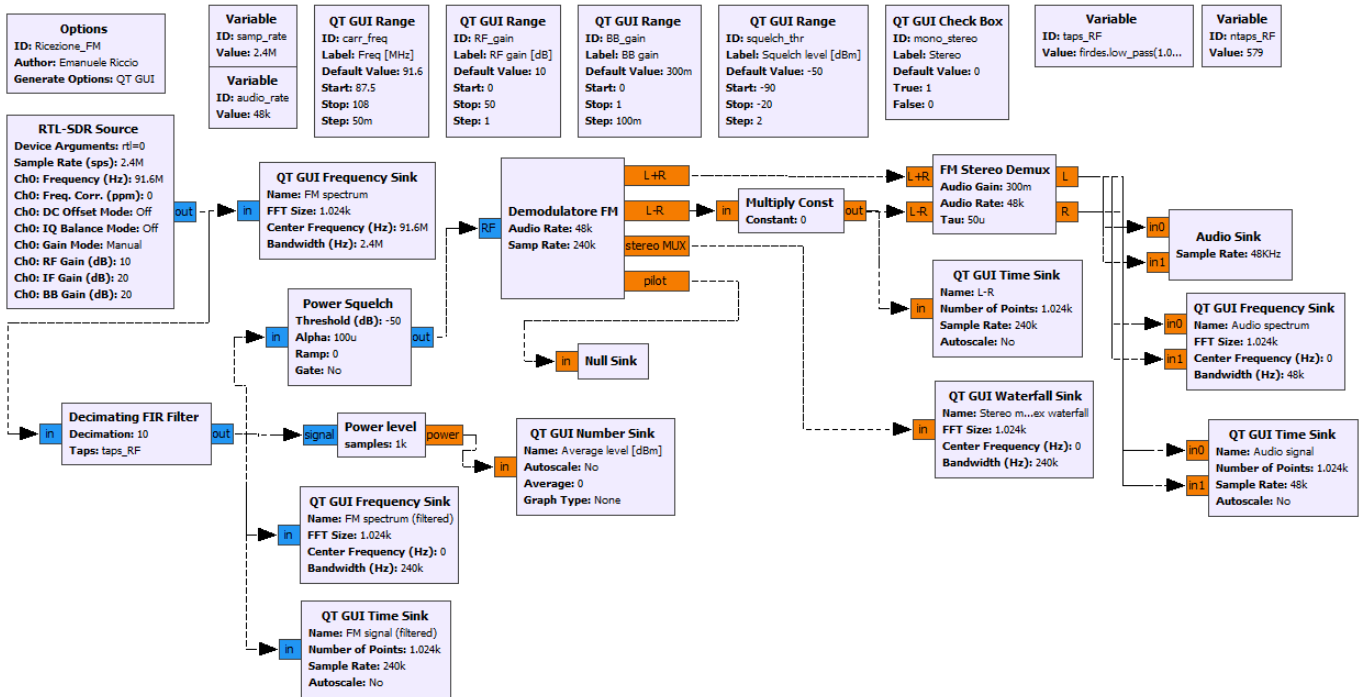


Figura 28 Flowgraph ricevitore FM Stereo

In particolare, tramite i blocchi QT GUI, si realizza l'interfaccia grafica utente. In particolare, tramite i blocchi QT GUI Range è possibile creare dei dispositivi di scorrimento grafici ("slider") utili per modificare il contenuto di alcune variabili utilizzate nel flowgraph, durante l'esecuzione. Nel nostro caso, sono presenti quattro blocchi di questa tipologia: carr_freq utilizzato per la sintonizzazione, RF_gain per regolare il guadagno del dispositivo, volume per regolare il volume della riproduzione audio, squelch_thr utilizzato per regolare la sensibilità della radio. E' impiegato anche un blocco di tipo QT GUI Check Box, utilizzato dall'utente per selezionare la modalità di ricezione Mono\Stereo.

RTL-SDR Source

Questo è il blocco principale del flowgraph, e serve ad interconnettere il flowgraph con il dongle RTL-SDR fisico, fungendo così da sorgente del flusso di dati complessi I/Q. Tramite le impostazioni è possibile regolare alcuni parametri fondamentali per il corretto funzionamento del sistema, come mostrato in Fig. 29. Il parametro Device Arguments

specifica quale dongle utilizzare, in quanto è possibile ricevere dati da più dongle simultaneamente: nel nostro caso il parametro è impostato a 0, poichè si utilizza un singolo dispositivo. Il parametro Sample Rate indica quanti campioni al secondo si vuole ricevere dal dongle, ed è specificato utilizzando la variabile `samp_rate` definita nel flowgraph con il blocco Variable, impostata a 2.4 MHz. Per la sintonizzazione, si utilizza il parametro Ch0 : Frequency, richiamando la variabile `carr_freq` specificata dal blocco QT GUI Range: questo parametro indica la frequenza su cui ci si vuole sintonizzare, in particolare attraverso esso si imposta la frequenza f_{lo} del mixer come descritto nella sezione 2.2.3. Il blocco restituisce in output il segnale radio ricevuto, con la frequenza specificata nel parametro Ch0 : Frequency centrata in zero. Infine, tramite il parametro Ch0 : RF Gain si indica il guadagno RF del dispositivo : esso è utilizzato per aumentare il livello del segnale senza far crescere eccessivamente il rumore di fondo (« noise floor ») in modo da avere un miglioramento complessivo della qualità della ricezione. Tale parametro è specificato richiamando la variabile `RF_gain` del blocco QT GUI Range.

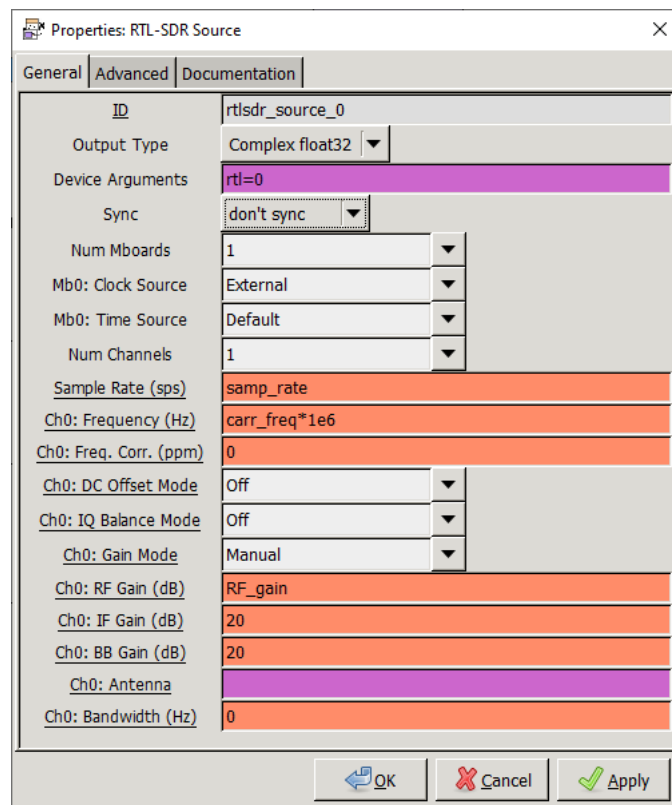


Figura 29 Parametri blocco RTL-SDR Source

Decimating FIR Filter

Il blocco Decimating FIR Filter (Fig. 30) effettua come prima operazione una decimazione: il parametro Decimation è impostato a 10, ciò significa che solo un decimo dei campioni viene salvato. La decimazione serve per abbassare la frequenza di campionamento da 2.4 MHz a 240 kHz, sufficiente per elaborare il segnale FM prodotto da una singola stazione radio, il quale ha una banda bilatera di 200 kHz. Il blocco precedente RTL-SDR Source restituisce il segnale radio ricevuto, riportando nell'intorno della frequenza 0 lo spettro della trasmissione su cui si è sintonizzati. E' necessario pertanto filtrare questa porzione di spettro per isolare il segnale da demodulare, questa è la seconda operazione effettuata dal blocco Decimating FIR Filter. La tipologia ed altri parametri del filtro sono specificati dal parametro Taps, in questo caso è richiamata la variabile taps_RF definita nel flowgraph, essa realizza tramite il comando `firdes.low_pass(1.0,samp_rate, 180e3, 10e3, firdes.WIN_HAMMING)` un filtro di tipo passa basso utilizzato per selezionare il segnale che si vuole demodulare, con frequenza di taglio di 180 kHz, in Fig. 31 è mostrata la risposta in frequenza di tale filtro, da cui si può notare che presenta un'attenuazione superiore a 50 dB del segnale nella banda oscura, comportandosi come un filtro quasi ideale.

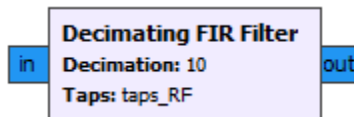


Figura 30 Blocco Decimating FIR Filter

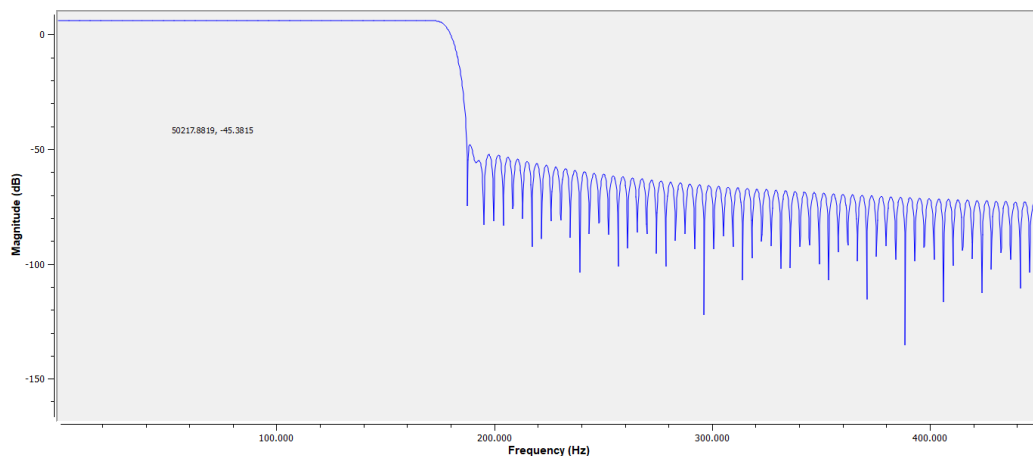


Figura 31 Risposta in frequenza del blocco Decimating FIR Filter

Power Squelch

Questo blocco serve ad impostare un livello di soglia per la riproduzione del segnale: se la potenza del segnale radio ricevuto non supera la soglia impostata, l'output del blocco è nullo, altrimenti il segnale viene lasciato passare invariato, ciò è utile per disattivare la demodulazione nel momento in cui non si ricevono trasmissioni, così da evitare la riproduzione di un segnale sgradevole all'ascolto.

FM Stereo Demod

Il blocco FM Stereo Demod (Fig. 32) effettua la demodulazione stereo del segnale radio FM ricevuto, esso ha come ingresso il segnale in uscita dal blocco Power Squelch, mentre fornisce in uscita quattro segnali distinti: il segnale mono L+R, la componente differenza L-R, il segnale FM demodulato in uscita dal connettore stereo MUX ed infine il Pilot Tone. I parametri configurabili di tale blocco sono il Sample Rate che indica la frequenza dei campioni in ingresso, mentre il secondo parametro Audio Rate specifica la frequenza di campioni che si vuole in uscita.

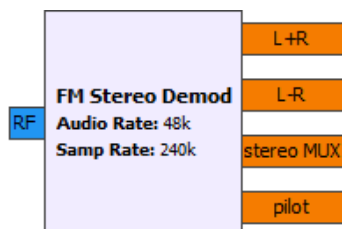


Figura 32 Blocco FM Stereo Demod

Il blocco appena descritto, non fa parte della libreria standard GNU Radio, ma è stato implementato come blocco gerarchico, assemblando blocchi più semplici: in Fig. 33 è riportato il flowgraph che lo realizza. In particolare possiamo distinguere quattro sezioni fondamentali nel flowgraph. La prima sezione(1) implementa il demodulatore Complex Delay Line descritto al paragrafo 2.2.4, esso riceve in ingresso tramite il Pad Source il segnale radio ricevuto ed ha in uscita, tramite il blocco Complex to Arg il segnale demodulato. Il segnale in uscita viene utilizzato da tutte le altre sezioni presenti, in particolare i blocchi della seconda sezione(2) filtrano la componente audio mono grazie ad un filtro con frequenza di taglio pari a 15kHz, fornendo in uscita la componente filtrata grazie ad un Pad Sink. Lo schema della terza(3) sezione isola tramite un filtro la componente Pilot Tone, generando tramite un moltiplicatore di frequenza un segnale a

38 kHz, il quale viene utilizzato nella quarta(4) parte dello schema per la demodulazione AM DSB SC della componente audio stereo, come descritto al paragrafo 2.1.2. Infine anche la componente audio stereo L-R è messa in uscita tramite un Pad Sink. I due blocchi di tipo Decimating FIR Filter presenti nella sezione 2 e 4, servono anche a decimare i segnali, in essi il parametro Decimation è impostato al valore $\text{int}(\text{samp_rate}/\text{audio_rate})$, in modo da ottenere in uscita una frequenza di campioni pari al valore Audio Rate specificato.

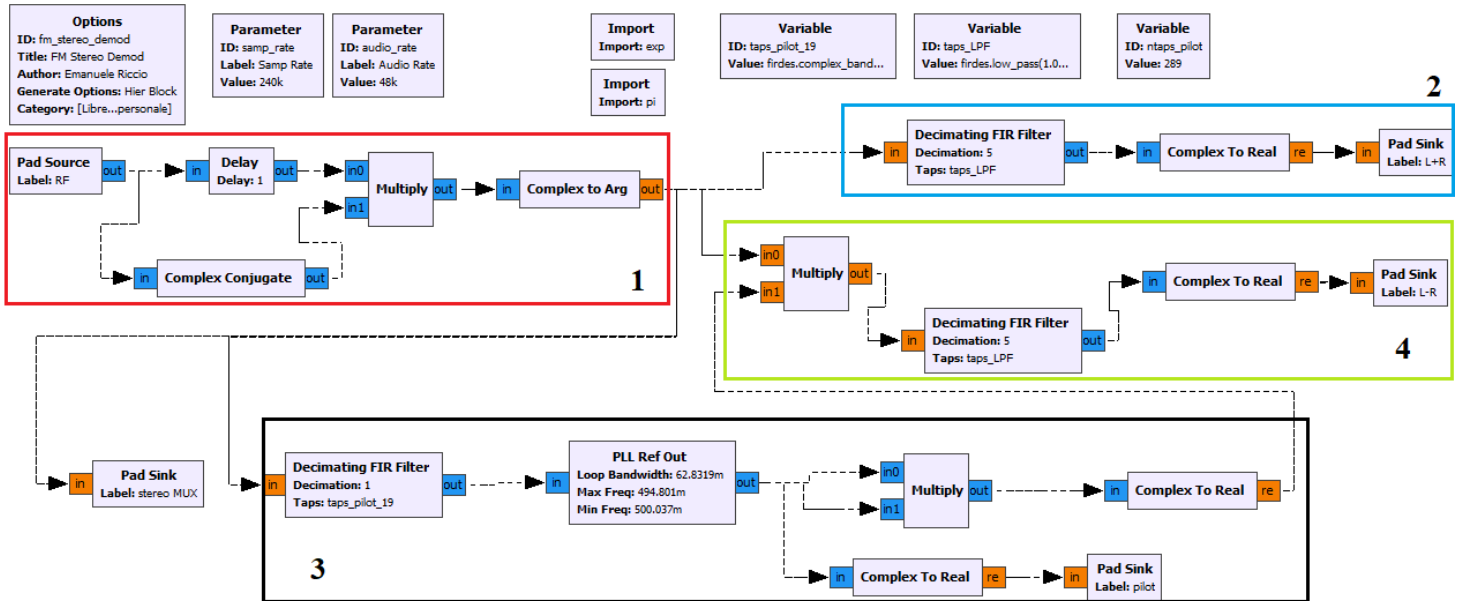


Figura 33 Flowgraph del blocco FM Stereo Demod

Multiply Const

Il blocco Multiply Const ha in ingresso la componente L-R in uscita dal blocco FM Stereo Demod. tale blocco moltiplica il suo ingresso per la variabile numerica mono_stereo, specificata dal blocco QT GUI Check Box. In base alla selezione effettuata dall'utente sulla Check Box presente nella GUI, il segnale in ingresso viene moltiplicato per 1 oppure 0, lasciando passare inalterata oppure annullando la componente audio stereo.

FM Stereo Demux

Anche il blocco Fm Stereo Demux (Fig. 34) è stato realizzato come blocco gerarchico, come mostrato in Fig. 35. Esso ha in ingresso le componenti L+R ed L-R, precedentemente descritte, e fornisce in uscita le singole componenti Left e Right. Tramite il parametro `audio_gain` è possibile regolare il volume dei segnali audio generati. Inoltre viene effettuato il processo di de-enfasi (associata all'operazione di pre-enfasi utilizzata in trasmissione) che serve per aumentare l'ampiezza di alcune componenti frequenziali all'interno del messaggio, per migliorare il rapporto segnale-rumore.

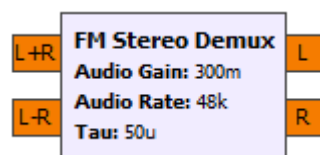


Figura 34 Blocco FM Stereo Demux

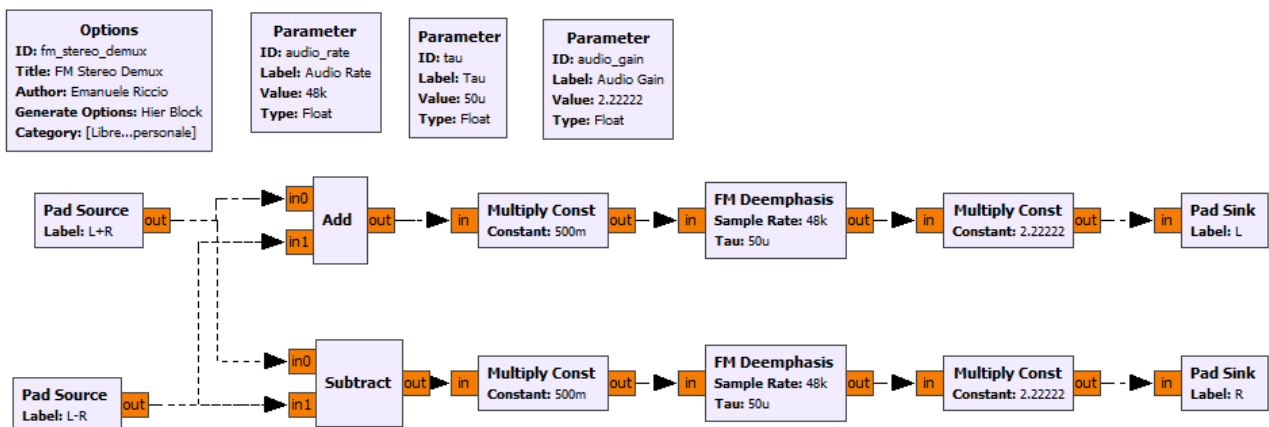


Figura 35 Flowgraph del blocco FM Stereo Demux

QT GUI Frequency Sink

Tramite questi blocchi è possibile visualizzare graficamente lo spettro dei segnali generati in punti diversi del flowgraph. Lo spettro è generato con tecniche di FFT (Fast Fourier Transform). I parametri configurabili per questo blocco sono: il parametro Center Frequency f_c specifica la frequenza centrale del segnale in ingresso, mentre il parametro Bandwidth

specifica la banda bilatera del segnale, sarà visualizzato lo spettro $\left(f_c - \frac{Bandwidth}{2}, f_c + \frac{Bandwidth}{2}\right)$. Il primo blocco QT GUI Frequency Sink è connesso direttamente al blocco RTL-SDR Source, in modo da poter visualizzare lo spettro RF (Fig. 36), contenente le trasmissioni FM di tutte le stazioni radio, nel nostro caso il dongle è sintonizzato sulla frequenza 91.600 MHz, inoltre il parametro Bandwidth è impostato al valore 2.4 MHz, pari al sample rate del segnale che entra nel blocco QT GUI.

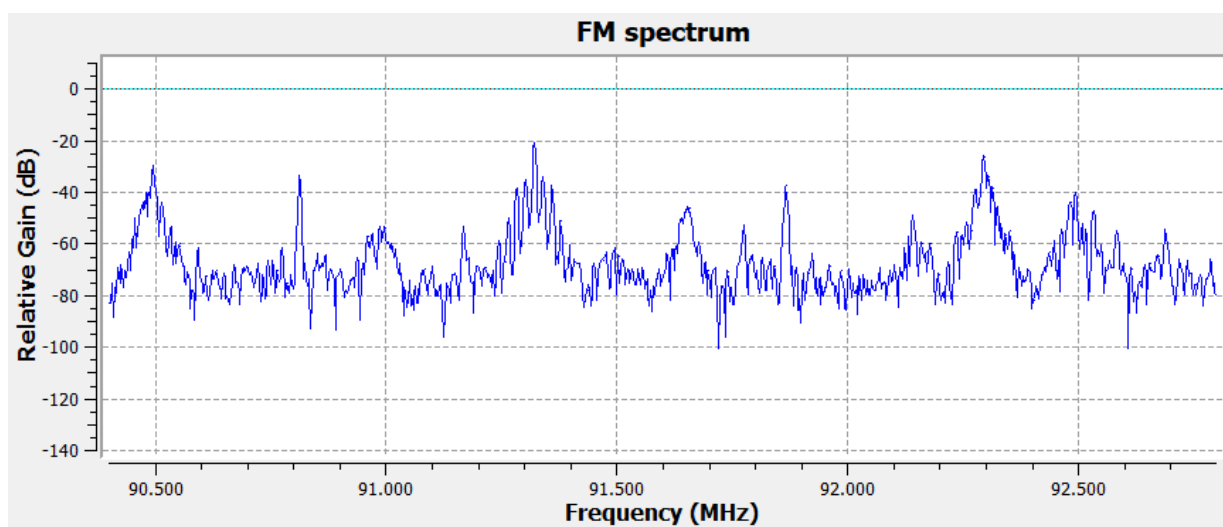


Figura 36 Spettro del segnale RF

Il secondo blocco (Fig. 37), è collegato in cascata al blocco Decimating FIR Filter, esso mostra esclusivamente lo spettro della trasmissione radio su cui si è sintonizzati, i parametri del Center Frequency e Bandwidth sono configurati rispettivamente a 0 Hz e 240 kHz. Essendo il segnale in banda base, si visualizza lo spettro nella banda $(-100 \text{ kHz}, 100 \text{ kHz})$. L'ultimo blocco QT GUI Frequency Sink (Fig. 38), è collegato al blocco FM Stereo Demux, esso mostra lo spettro delle componenti audio mono (blu) e stereo (rosso). E' anche visibile un residuo (filtrato) della portante pilota a 19 kHz (picco dello spettro in corrispondenza di tale frequenza).

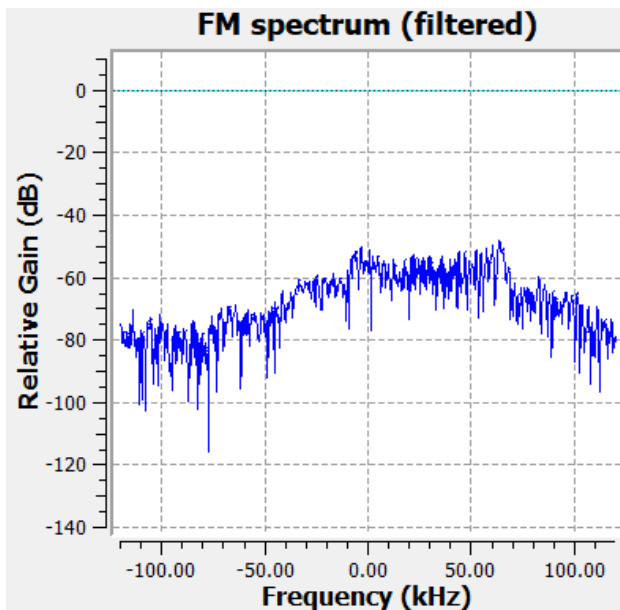


Figura 37 Spettro del segnale RF in banda base

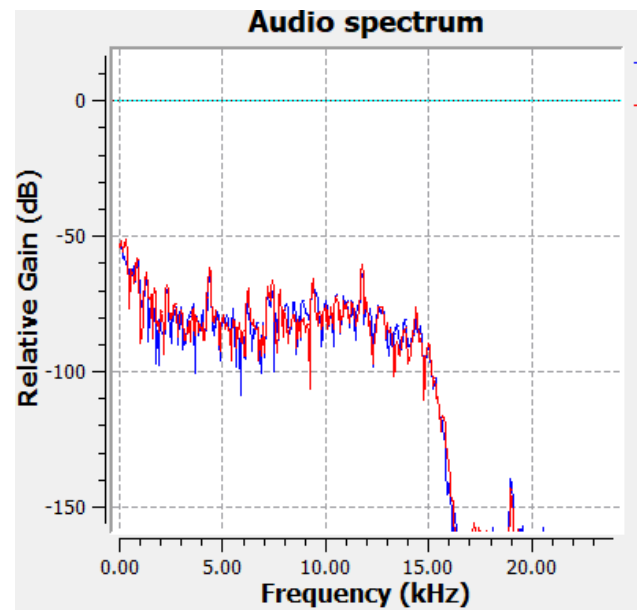


Figura 38 Spettro delle componenti audio mono e stereo

QT GUI Waterfall Sink

Questa tipologia di blocco (Fig. 39), è utilizzata per visualizzare graficamente l'intensità dello spettro di un segnale al variare del tempo (rappresentazione tempo-frequenza). Sull'asse orizzontale si trova la frequenza (come nel blocco Frequency Sink) mentre sull'asse verticale è rappresentato il tempo: il colore della traccia varia in base all'intensità del segnale, con colori più luminosi che indicano intensità maggiore. Lo spettro del segnale attualmente demodulato è rappresentato alla posizione 0.00e+00, mentre spettri di segnali precedenti sono posizionati verso l'alto rispetto all'asse del tempo. Nel nostro caso tale blocco QT GUI è collegato in cascata alla porta stereo MUX del blocco FM Stereo Demod, pertanto esso mostra lo spettro del segnale FM demodulato. Infatti è possibile notare la forte intensità della componente mono 0-15 kHz, la presenza del pilot tone a 19 kHz ed infine la presenza della componente stereo nella porzione di frequenze 23-53 kHz. I parametri configurabili sono gli stessi presenti nei blocchi di tipo Frequency Sink

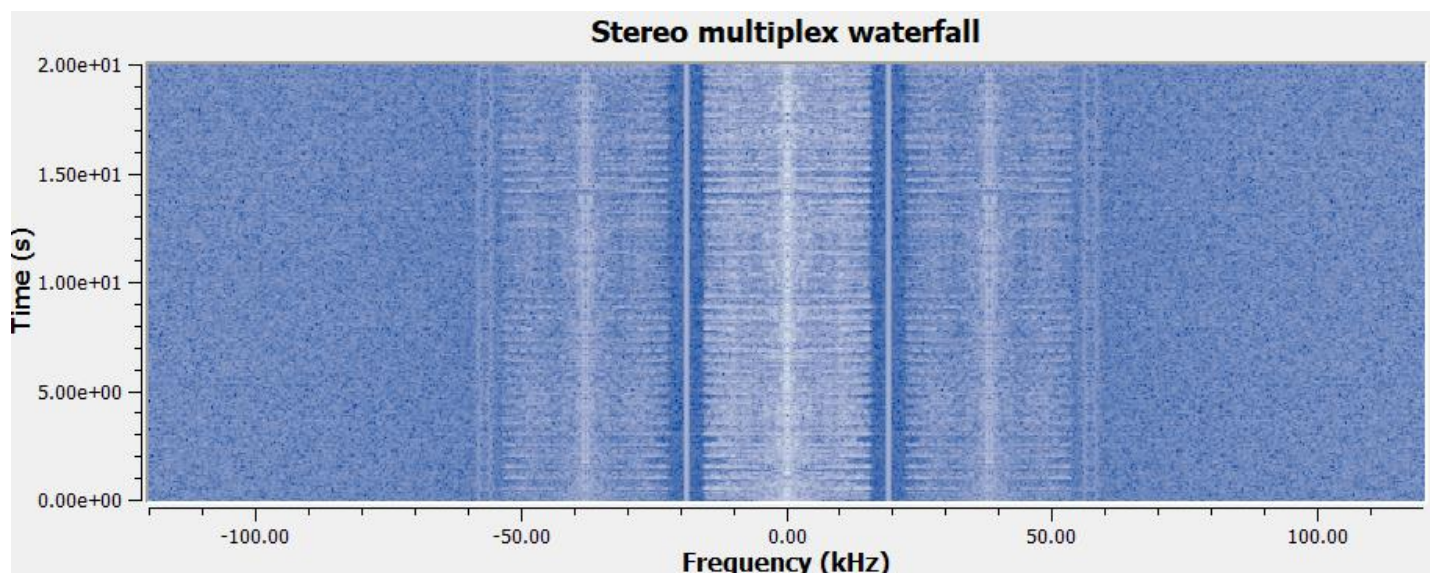


Figura 39 Grafico prodotto dal blocco QT GUI Waterfall Sink

QT GUI Time Sink

Grazie a questa tipologia di blocchi è possibile visualizzare graficamente l'andamento di un segnale rispetto al tempo. Il primo blocco QT GUI Time Sink è collegato al blocco FM Stereo Demux, in modo da visualizzare i segnali Left(blu) e Right(rosso) come mostrato in Fig. 40. Per verificare il corretto funzionamento della ricezione stereo, il secondo blocco QT GUI Time Sink visualizza l'uscita della porta L-R del blocco FM Stereo Demod, in modo da poter visualizzare la differenza tra i due segnali(Fig. 41)

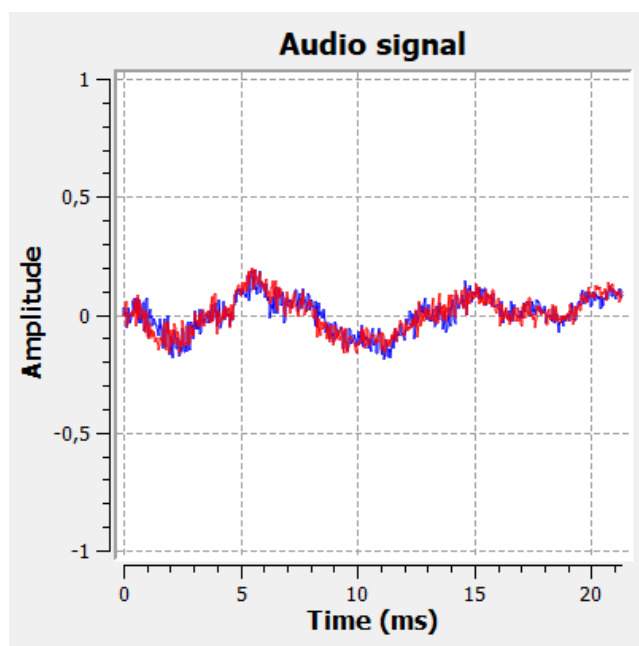


Figura 40 Ampiezza delle componenti audio Left(blu) e Right(rosso)

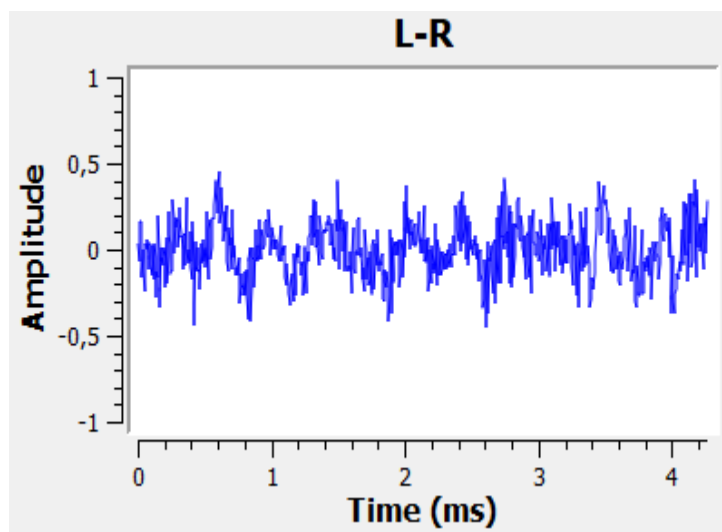


Figura 41 Differenza componenti audio Left e Right

Audio Sink

Il blocco Audio Sink(Fig. 42) consente di riprodurre una traccia audio mediante gli speaker del PC : esso è collegato in cascata al blocco FM Stereo Demux. Ha in ingresso il segnale Left e Right, il parametro Sample Rate è posto al valore di 48 kHz che coincide con la frequenza di campioni in output dal blocco FM Stereo Demux.

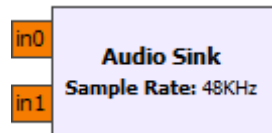


Figura 42 Blocco Audio Sink

Power Level e QT GUI Number Sink

Tramite il blocco Power level(Fig. 43) è possibile calcolare la potenza media del segnale in ingresso al blocco FM Stereo Demod. Il risultato (espresso in dBm) viene mostrato graficamente tramite il blocco QT GUI Number Sink(Fig. 44)

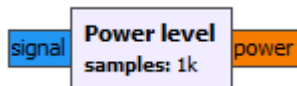


Figura 43 Blocco Power level



Figura 44 Display della potenza media

3.3 Esperimenti di ricezione da stazioni radio

Eseguendo il flowgraph, si visualizza la GUI(Fig. 45) realizzata tramite i blocchi QT GUI di GNU Radio. Nell'interfaccia grafica, sono presenti in alto quattro slider, che servono rispettivamente a sintonizzarsi su una particolare stazione radio (sinistra), regolare il guadagno RF (centro), controllare il volume per la riproduzione audio (destra) ed infine lo slider centrale serve a regolare il valore di soglia del Power Squelch. Sono presenti anche sei grafici generati da altrettante QT GUI:

- FM spectrum: mostra lo spettro RF, visualizzando tutte le stazioni radio;
- FM spectrum (filtered): mostra, più in dettaglio, lo spettro della stazione sintonizzata;
- L-R: visualizza al variare del tempo la differenza tra i segnali audio Left e Right, e serve per controllare il corretto funzionamento della ricezione stereo;

- Audio spectrum: rappresenta lo spettro dei segnali Left (blu) e Right (rosso) ricevuti
- Audio signal: visualizza nel tempo i segnali Left (blu) e Right (rosso) ricevuti
- Stereo multiplex waterfall: mostra l'evoluzione nel tempo dello spettro della stazione radio sintonizzata.

Infine, in alto a destra è presente un display Average level, tramite il quale è possibile visualizzare la potenza media del segnale ricevuto.

Per la sperimentazione sono state selezionate diciotto stazioni radio che trasmettono in modalità stereo i cui dati sono stati reperiti dal sito radiomap.eu/it/napoli. Nella tabella. 1 sono riportati i risultati qualitativi relativi alla ricezione ed ascolto di trasmissioni radio proveniente da stazioni diverse. Le ricezioni sono state eseguite a differenza di pochi minuti l'una dall'altra, inoltre i parametri RF gain e Squelch level sono stati impostati rispettivamente a 10 dB e -50 dBm.

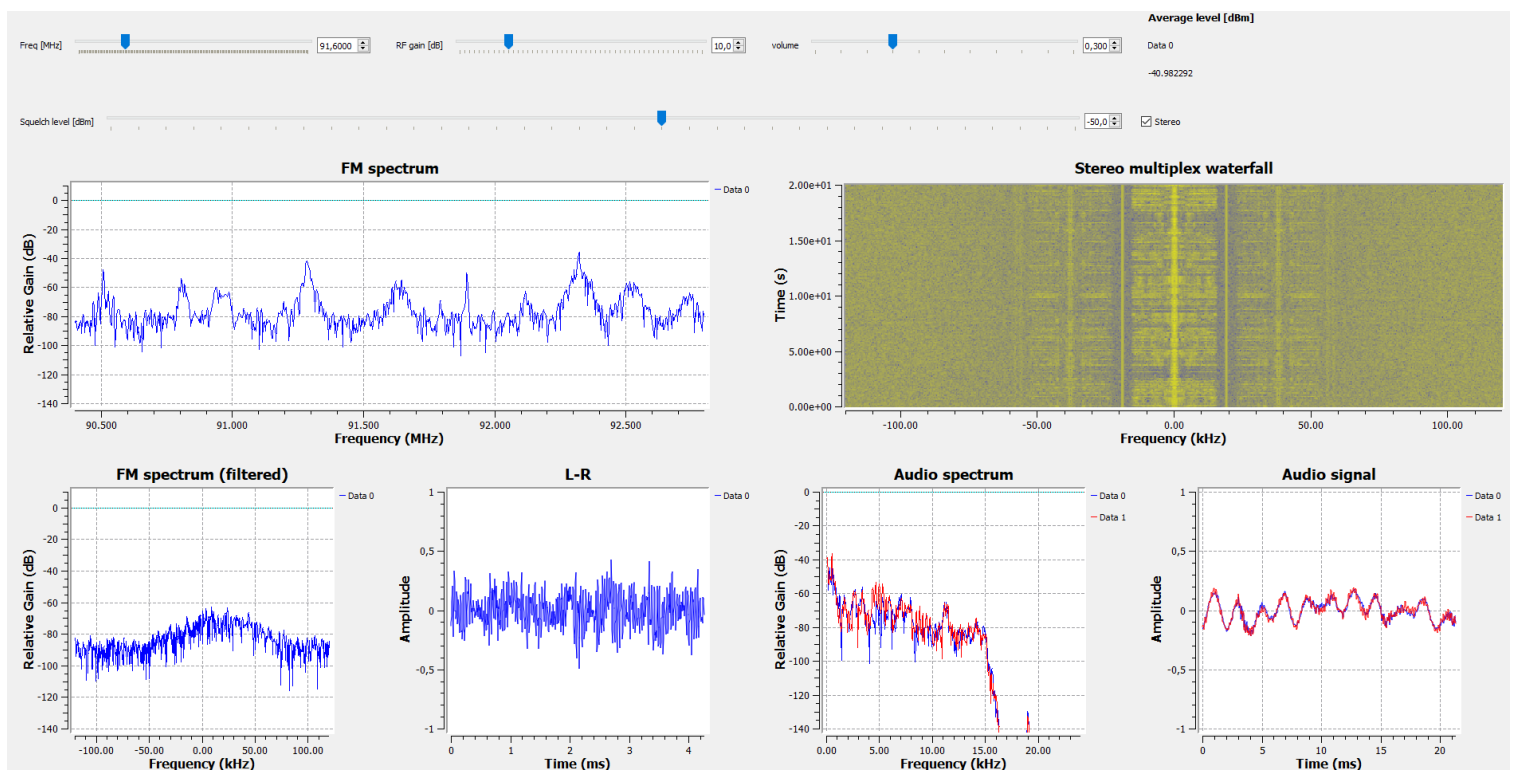


Figura 45 GUI del software di ricezione FM Stereo

FREQUENZA[MHz]	STAZIONE RADIO	TRASMETTITORE	QUALITÀ	AVERAGE LEVEL[dBm]
88.20	105	Monte Faito	Ottima	-30
88.70	LatteMiele	Vesuvio, Osservatorio	Pessima	-30
89.80	RDS	Collina dei Camaldoli	Pessima	-40
90.50	RDS	Vesuvio, Osservatorio	Ottima	-31
91.60	Monte Carlo	Monte Faito	Ottima	-39
93.90	Club 91	Vesuvio, Osservatorio	Buona	-29
94.10	Rai radio 1	Monte Faito	Buona	-29
95.60	Marte	Vesuvio, Osservatorio	Pessima	-40
97.70	Marte	Collina dei Camaldoli	Ottima	-15
98.60	Monte Carlo	Collina dei Camaldoli	Ottima	-19
99.00	Punto Nuovo	Vesuvio, Osservatorio	Pessima	-36
99.20	Kiss Kiss Napoli	Monte Faito	Buona	-32
100.20	Subasio	Collina dei Camaldoli	Ottima	-22
100.50	CRC	Vesuvio, Osservatorio	Pessima	-33
104.80	Capital	Collina dei Camaldoli	Ottima	-23
106.00	AFN The Eagle	Collina dei Camaldoli	Ottima	-13
107.50	RDS	Monte Faito	Ottima	-31
107.80	Radicale	Monte Faito	Pessima	-42

Tabella 1 Risultati di ricezione ed ascolto stazioni radio

Il luogo in cui sono state effettuate le analisi più vicino in linea d'aria alla collina dei Camaldoli(circa 5 km), segue la zona Vesuvio Osservatorio(circa 19.21 km) ed ultima la zona del Monte Faito(circa 33 km). Dalla tabella si evince che la qualità delle trasmissioni è migliore per le stazioni situate sulla collina dei Camaldoli. Per le stazioni trasmesse dal Monte Faito, solo in due casi è stato rilevato un rumore tollerabile, il quale può essere eliminato regolando il parametro RF gain. Nel caso delle stazioni trasmesse dalla zona Vesuvio Osservatorio, nella quasi totalità dei casi, anche incrementando di molto il parametro RF gain il rumore copriva completamente il segnale audio.

Conclusioni effettuata

I vantaggi dei dispositivi RTL-SDR come la versatilità, la possibilità di essere utilizzati per sviluppare prototipi funzionanti in breve tempo ed il costo contenuto, hanno reso popolari questa tipologia di dispositivi sia in ambito didattico, di ricerca ed industriale. Affiancando questa tecnologia con software come GNU Radio, SDR Sharp, CubicSDR è possibile realizzare svariati sistemi, come ricevitori radio, scanner, ricevitori di immagini satellitari, inoltre, la documentazione reperibile in rete, rende questi dispositivi accessibili anche a neofiti. Il grande limite di questi dispositivi riguarda la possibilità di poter realizzare solo sistemi di ricezione, infatti non sono ancora disponibili sul mercato dispositivi competitivi adoperabili per la trasmissione. Inoltre la risoluzione degli ADC ad 8 bit risulta limitante per applicazioni professionali.

Bibliografia

- [1] Proakis, Salehi, Communication System Engineering, Prentice Hall, 2001, 815.
- [2] Stewart, Barlee, Atkinson, Crockett, Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR, Strathclyde Academic Media, 2017, 674.
- [3] <https://www.gnuradio.org/about/>
- [4] <https://it.wikipedia.org/wiki/Modulazione>
- [5] <https://www.rtl-sdr.com/using-our-new-dipole-antenna-kit/>