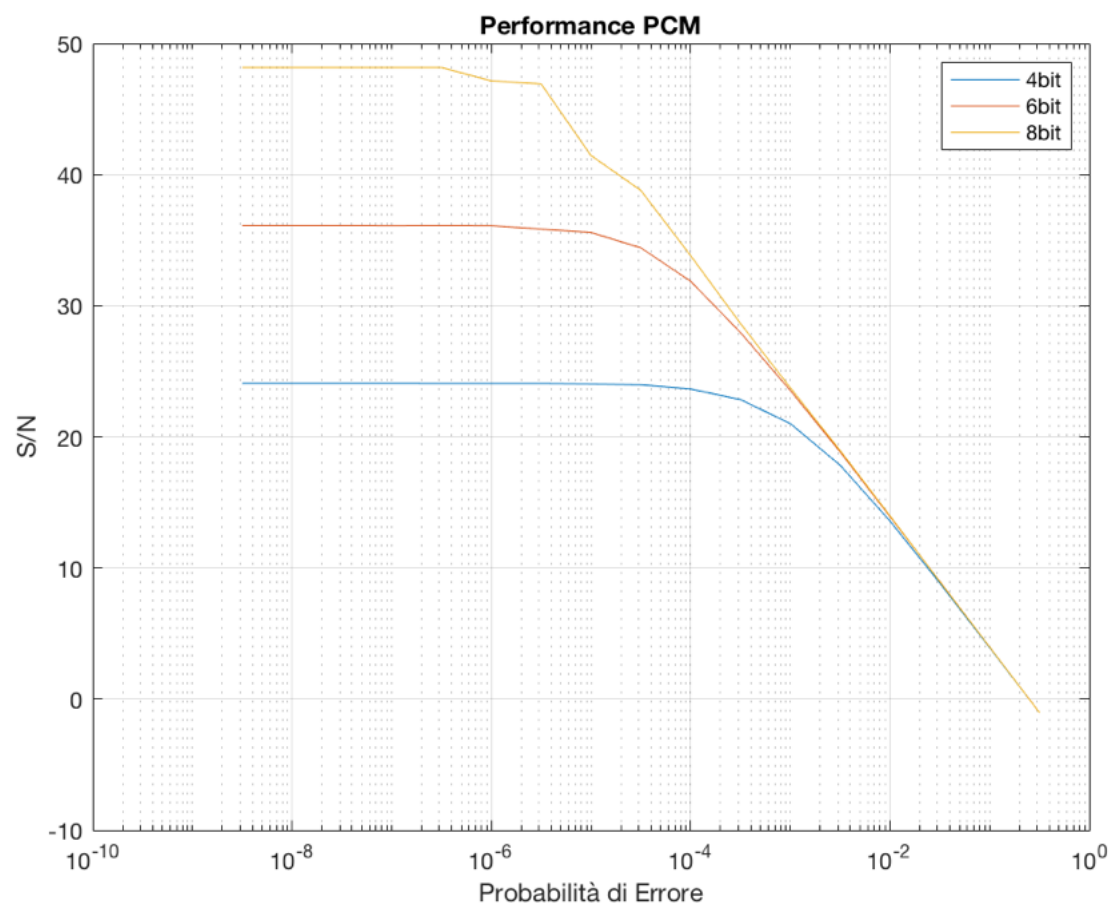


01QZD**Laboratorio di Internet e Comunicazioni****Comunicazioni****LAB 1**

In questa esercitazione è stata effettuata un'analisi sulle prestazioni di un sistema PCM basato su una quantizzazione uniforme, con trasmissione lungo un canale BSC.

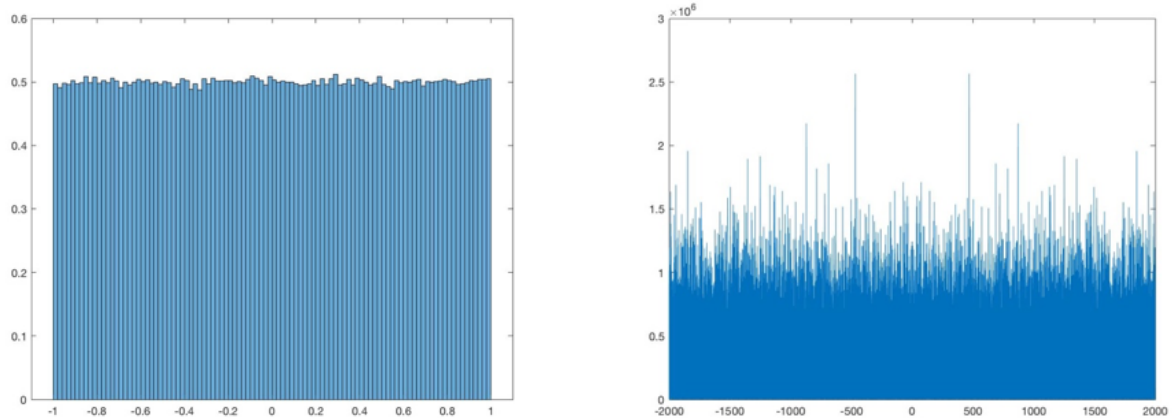
Il primo passo effettuato consiste nella valutazione delle performances in termini di rapporto segnale-rumore in funzione della probabilità di errore sul canale di trasmissione. L'analisi è stata condotta su 3 numeri di bit di quantizzazione diversi: 4, 6, 8 bit. I risultati ottenuti sono riportati nel grafico seguente:



Si evidenzia che, per probabilità di errore basse, quantizzare su un numero di bit alto è più vantaggioso dal punto di vista delle prestazioni, perché il rapporto segnale-rumore risulta mediamente più elevato. Al contrario, per probabilità di errore molto alte, la scelta nel numero di bit di quantizzazione risulta praticamente ininfluente per quanto riguarda le prestazioni. L'SNR, infatti, tende a uniformarsi lungo una singola retta.

1) Segnale con distribuzione uniforme, quantizzazione uniforme

È stata condotta un'analisi su un segnale con distribuzione uniforme, effettuando una quantizzazione uniforme. È stata scelta una quantizzazione su 6 bit, assumendo inoltre una probabilità di errore pari a $1e-5$.



In alto sono riportati la distribuzione di probabilità (PDF) e lo spettro del segnale.

Il rapporto segnale rumore teorico è stato calcolato sfruttando la seguente relazione:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = 10 \log_{10}(M^2) = 36.1236 \text{ dB}$$

dove $M = 2^{n_{bit}} = 2^6$

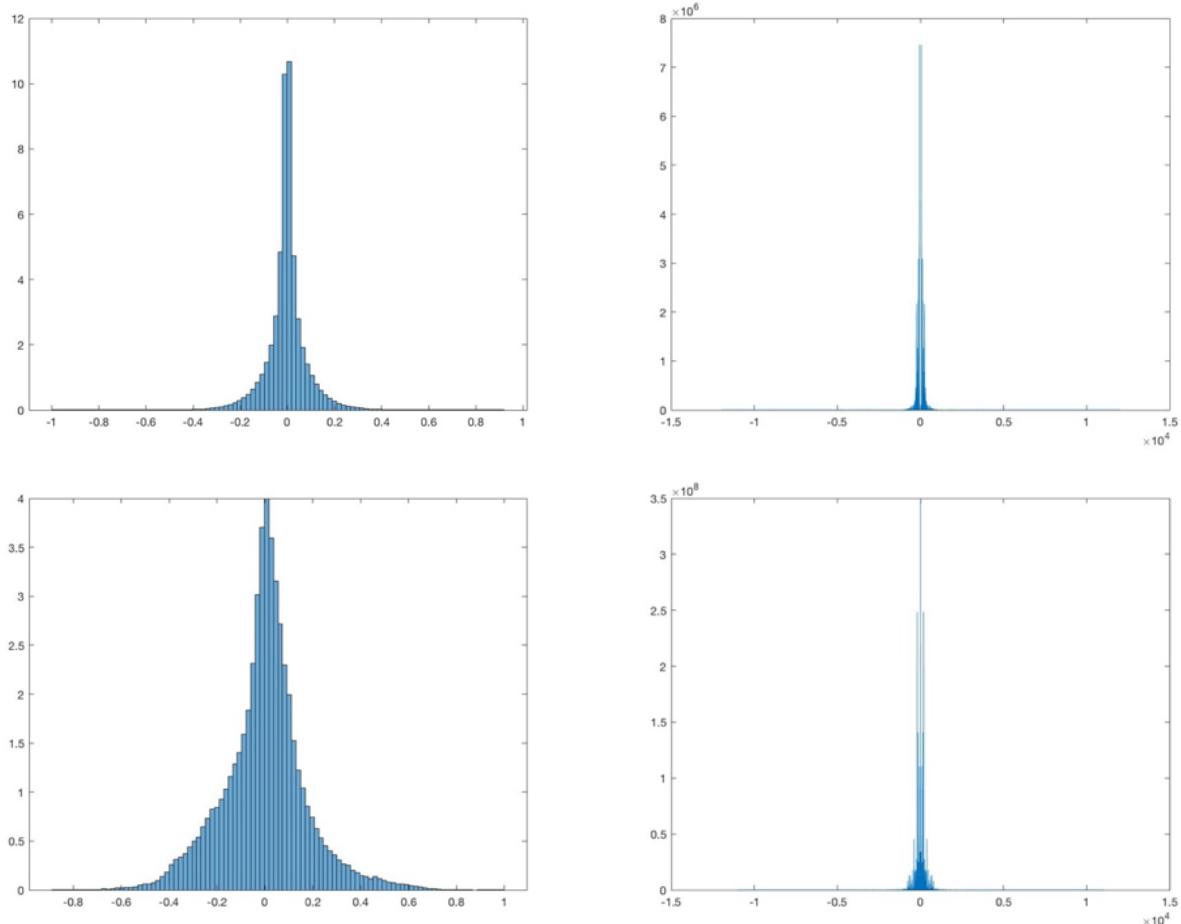
Il rapporto segnale rumore effettivo, tenendo conto della probabilità di errore assunta, risulta:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{eff} = 35.3703 \text{ dB}$$

Si evidenzia quindi una perdita di 0.7533 dB .

2) Segnale con distribuzione uniforme, quantizzazione uniforme

È stata effettuata una nuova analisi, questa volta considerando due segnali audio: uno con registrazione vocale; uno con una traccia musicale. Entrambi sono caratterizzati da una distribuzione di probabilità non uniforme. È stata mantenuta una quantizzazione uniforme su 6 bit, assumendo inoltre sempre la probabilità di errore di $1e-5$. Di seguito sono rappresentate le distribuzioni di probabilità (PDF) e gli spettri delle frequenze di entrambi i segnali.



Analizzando le PDF, e confrontandole con quella relativa a un segnale uniforme, si evidenziano dei picchi marcati intorno ad un valore centrale, con una varianza molto bassa. Effettuando una quantizzazione uniforme, ci si aspetta una perdita notevole in termini di dB, decisamente maggiore rispetto al caso di segnale uniforme. Questo perché i valori centrali della distribuzione probabilistica sono decisamente più frequenti, al contrario dei valori periferici. Dunque, per quantizzare fedelmente il segnale, bisognerebbe utilizzare degli intervalli ridotti nell'intorno dei valori più probabili e ampliati nella zona dei meno probabili. Questa operazione permette di ottenere una maggiore precisione e una minore perdita di informazione nella zona in cui è presente la maggior parte dei campioni.

Gli SNR teorico ed effettivo risultano:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = 10 \log_{10} \left(\frac{3SM^2}{V^2} \right) = 29.8525 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{eff} = 26.3427 \text{ dB}$$

Come spiegato in precedenza, si verifica una notevole perdita di informazione rispetto alla quantizzazione uniforme di un segnale con distribuzione uniforme: essa corrisponde a circa 9 dB.

3) Miglioramenti prestazioni

Sono stati effettuati dei tentativi di miglioramento delle prestazioni inerenti alla quantizzazione. In particolare sono state effettuate due operazioni: utilizzo dell'algoritmo di Lloyd per trovare una distribuzione di quantizzazione adattata al segnale e utilizzo della tecnica del companding.

3.1) ALGORITMO LLOYD

Un metodo possibile per ottenere un miglioramento delle prestazioni è l'utilizzo dell'algoritmo Lloyd. Il funzionamento dell'algoritmo è il seguente: dato un segnale in ingresso, esso restituisce le ampiezze degli intervalli che consentirebbero di effettuare una quantizzazione ottimale del segnale stesso, riducendo il più possibile la perdita di informazioni. Come evidenziato in precedenza, gli intervalli saranno più stretti dove c'è maggior concentrazione di campioni e più ampi nelle zone marginali. La modifica delle ampiezze degli intervalli di quantizzazione effettuata dall'algoritmo consente di migliorare notevolmente le prestazioni.

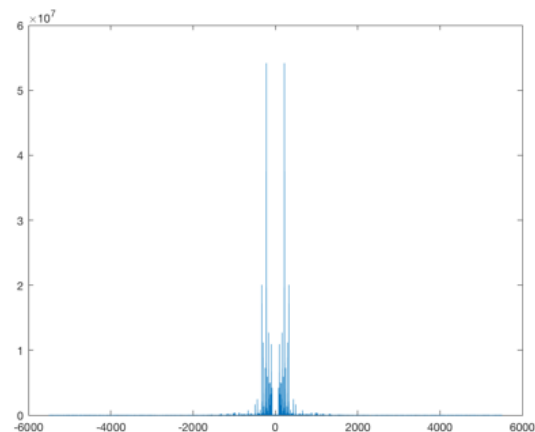
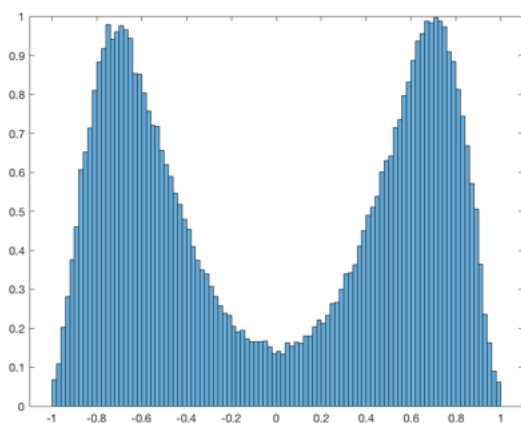
Infatti, l'SNR ottenuto risulta:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{eff} = 30.2807dB$$

Il miglioramento ottenuto è di circa 4 dB rispetto ad una quantizzazione uniforme.

3.2) TECNICA DEL COMPANDING

La tecnica del companding, a differenza dell'algoritmo di Lloyd, non agisce sugli intervalli di quantizzazione, ma sulla distribuzione di probabilità del segnale. Quest'ultimo viene moltiplicato per una funzione specifica che distorce il segnale rendendolo distribuito più uniformemente.



Dopo aver effettuato il companding viene eseguita una quantizzazione uniforme del segnale distorto. Poiché esso ha una distribuzione più uniforme rispetto a quella evidenziata nel punto 2), ci si aspetta un notevole miglioramento delle prestazioni, con un relativo incremento del rapporto segnale rumore. Infatti, dalle misure effettuate risulta che:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{eff} = 28.1541dB$$

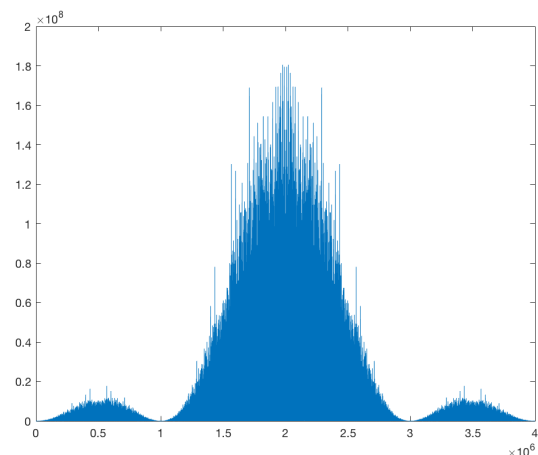
Il miglioramento evidenziato ammonta a circa 2 dB rispetto alle condizioni del punto 2).

01QZD**Laboratorio di Internet e Comunicazioni****Comunicazioni****LAB 2**

In questa esercitazione sono analizzate le prestazioni di un sistema di trasmissione 2-PAM basato su simboli antipodali, con tecnica NRZ, e che trasmette lungo un canale rumoroso.

Lo scopo principale dell'esercitazione è quello di confrontare il numero di errori prodotti nella trasmissione del segnale con il numero di errori teorico previsto. Tale confronto sarà effettuato attraverso la valutazione del BER.

A lato è rappresentato lo spettro del segnale a trasmettitore. Esso teoricamente ha estensione infinita. Tuttavia, poiché i lobi successivi ai primi due sono poco significativi, è possibile trascurarli e rendere finito lo spettro.



Trasmissione del segnale su un canale rumoroso con tecnica 2-PAM e NRZ su di un Matched Filter

Per valutare le prestazioni in termini di BER in funzione del rapporto E_b/N_0 , il procedimento effettuato è il seguente:

- Generazione del segnale
- Codifica di protezione con tecnica NRZ
- Aggiunta di un rumore gaussiano al segnale
- Filtraggio con un filtro apposito
- Conteggio gli errori e confronto con il BER teorico

Quando il segnale codificato, dopo essere stato sottoposto al filtro che lo depura dal rumore, arriva al ricevitore, quest'ultimo deve ricostruire il segnale originario. A tal fine è importante dunque stabilire:

- la soglia ottimale di decisione
- il bit di campionamento ottimale

Per determinare la soglia si tiene presente che i simboli utilizzati sono antipodali. Il loro valore medio è dunque nullo e la soglia ottimale risulta uguale a 0.

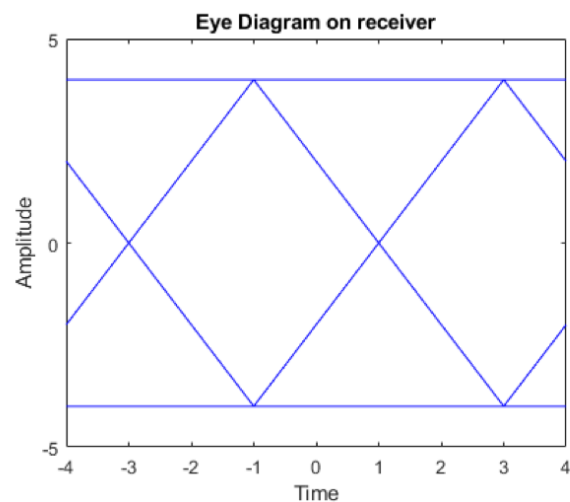
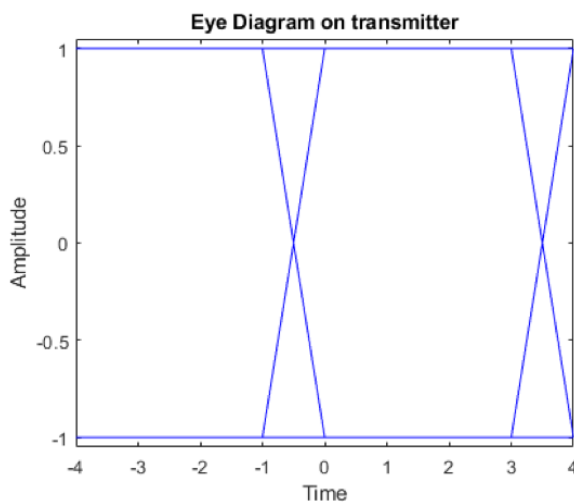
Il bit di campionamento ottimale è stato ricavato con un calcolo iterativo. Esso consiste in un ciclo for che valuta, al variare del bit di campionamento scelto, la probabilità di errore risultante:

```

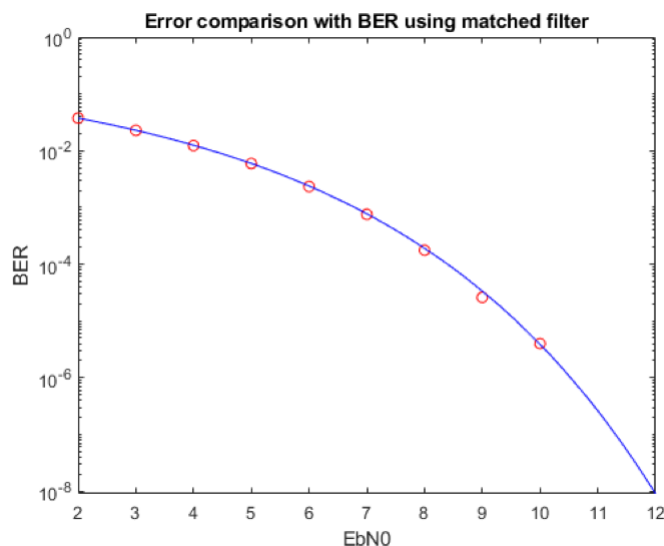
BERS = zeros(SpS, 1);
for bit = 1:SpS
    r = y(bit:SpS:end) > 0;
    r = 2*r-1;
    err = in ~= r;
    BERS(bit) = sum(err)/Nbits;
end
BERS
[m, i] = min(BERS);
i

```

Il bit ottimale su cui campionare è dunque l'ultimo. Questa conclusione è confermata dall'analisi del diagramma ad occhio del ricevitore. Infatti, in corrispondenza dell'ultimo bit, il grafico presenta l'apertura massima.



Comparando la sequenza di bit che arriva al ricevitore con quella che è generata dal trasmettitore, viene effettuato il conteggio degli errori che si verificano durante la trasmissione. L'operazione è ripetuta per diversi rapporti E_b/N_0 e i valori di BER ottenuti vengono confrontati con i rispettivi valori teorici. Di seguito è riportata la rappresentazione grafica dell'andamento teorico del BER in funzione dell' E_b/N_0 con il relativo confronto con i valori di BER che sono stati effettivamente misurati.

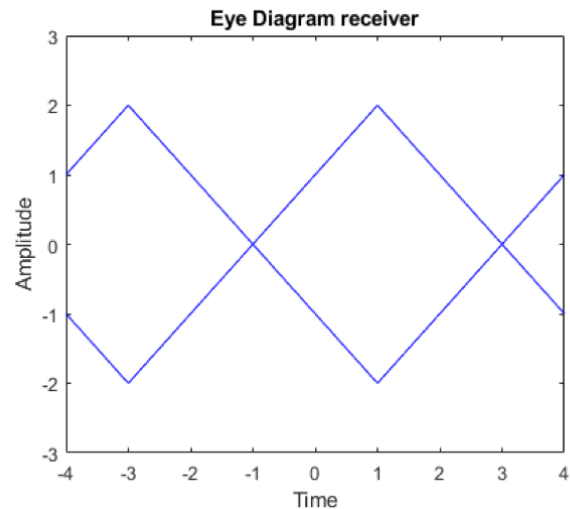
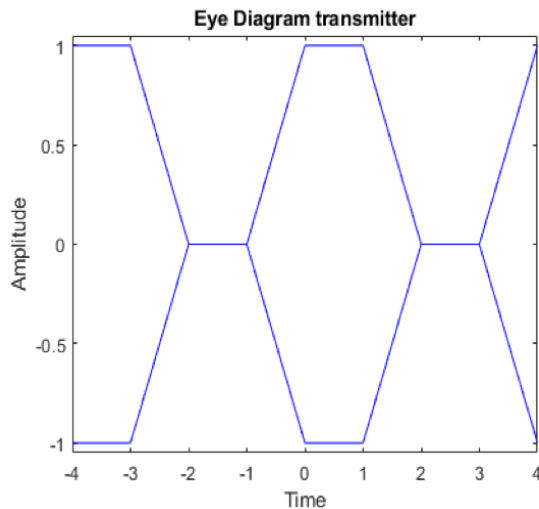


Risulta importante evidenziare che, i valori del BER valutati sperimentalmente seguono fedelmente la curva che rappresenta la relazione teorica. Questo risultato è quello che ci si aspetta ed è legato all'affidabilità del filtro ottimizzato. Nella zona a sinistra del grafico, per E_b/N_0 piccoli, si verifica una distorsione rispetto all'andamento teorico atteso dovuta al fatto che la probabilità di errore teorica è molto piccola, dunque eventuali distorsioni rispetto all'andamento atteso sono molto più evidenti. Queste distorsioni non sono state rappresentate in figura.

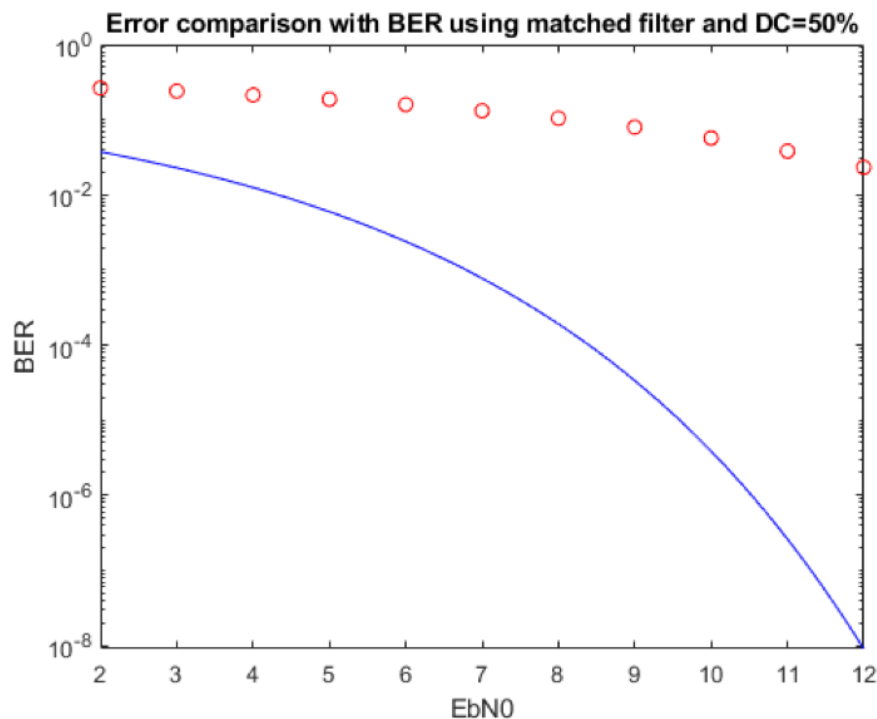
TECNICA RZ 50%

Sono state ripetute tutte le operazioni svolte, ma stavolta utilizzando la tecnica RZ con un duty cycle pari alla metà del totale.

La soglia ideale da fissare è sempre 0, mentre il bit ottimale su cui campionare, come evidenziato dal diagramma ad occhio del ricevitore, è il secondo.



Anche in questo caso è stato effettuato il conteggio degli errori e i risultati ottenuti sono stati confrontati con l'andamento teorico del BER. Si nota facilmente che, a parità di E_b/N_0 , il BER risultante è più alto rispetto a quello corrispondente all'utilizzo della tecnica NRZ, che segue mediamente l'andamento teorico. Questo risultato si verifica perché il duty cycle è stato dimezzato, e quindi, per ogni bit da trasmettere, viene effettuata la metà delle ripetizioni rispetto alla tecnica NRZ.

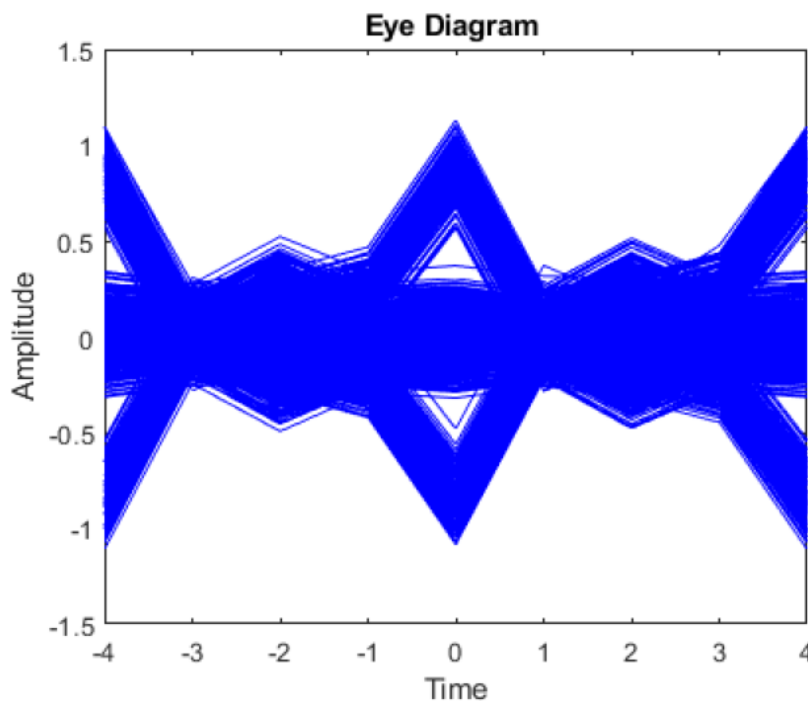


Trasmissione del segnale su un canale rumoroso con tecnica 2-PAM e NRZ su di un Single Pole Filter

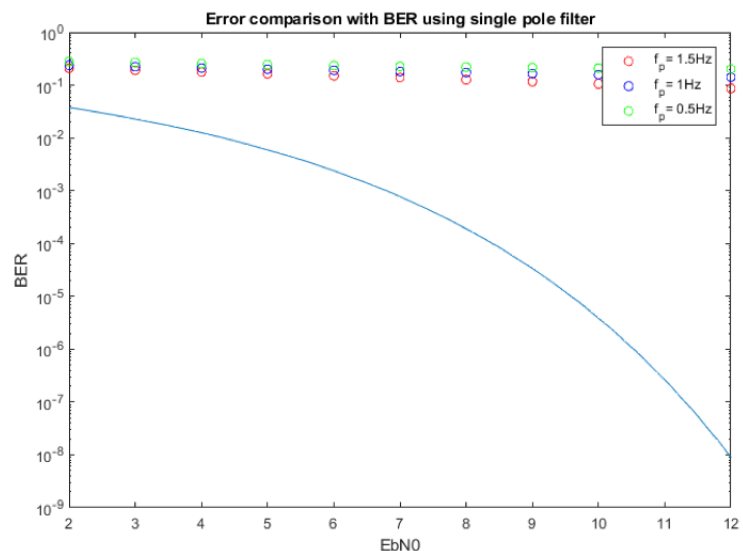
Il filtro ottimizzato è stato a questo punto sostituito con un filtro RC (single pole filter), avente la seguente funzione di trasferimento:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_p}}$$

Il diagramma ad occhio del segnale al trasmettitore è analogo a quello del punto 1). Dal diagramma ad occhio del segnale al ricevitore si ricava che il bit ottimale su cui campionare è il primo. È opportuno osservare che il diagramma ad occhio al ricevitore non è depurato dal rumore, proprio perché il filtro applica al segnale passante la sua funzione di trasferimento, e quest'ultima non è ideale. Di conseguenza il filtro introduce da sé un rumore nel segnale.



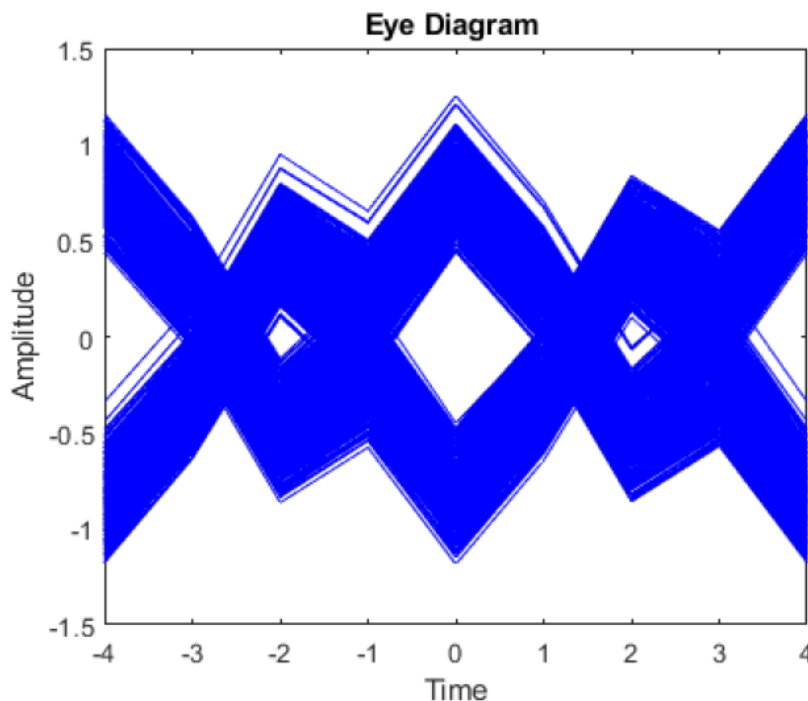
Procedendo alla rappresentazione grafica BER-Eb/N0 è immediato osservare che, confrontando lo scenario attuale e lo scenario NRZ-filtro ottimizzato, il BER risulta enormemente cresciuto a parità di Eb/N0 e non segue più l'andamento teorico. Questo risultato è prevedibile, ed è dovuto alla non idealità del filtro. Infatti il filtro RC non è ottimizzato in favore del segnale su cui agisce, e dunque ci si aspetta un peggioramento in termini di prestazioni.



TECNICA RZ 50%

Sono state ripetute tutte le operazioni svolte, utilizzando la tecnica RZ con un duty cycle pari alla metà del totale.

La soglia ideale da fissare è sempre 0, mentre il bit ottimale su cui campionare, come evidenziato dal diagramma ad occhio del ricevitore, è ancora il primo. Anche in questo caso ovviamente il filtro RC trasferisce un 'suo' rumore sul segnale, dunque il diagramma ad occhio risulta distorto.



Di seguito si riporta il confronto tra l'andamento del BER teorico e i valori effettivamente misurati. Anche in questo caso si evidenzia un netto peggioramento delle prestazioni dovuto al dimezzamento del duty cycle, coerentemente con le osservazioni fatte nel punto **1.1**).

01QZD

Laboratorio di Internet e Comunicazioni



Comunicazioni

LAB 3.1

In questa esercitazione è stato implementato un sistema di trasmissione digitale in grado di trasmettere un file di dati da un trasmettitore ad un ricevitore, attraverso l'utilizzo di un segnale audio trasportabile su un cavo audio standard.

Il modello implementato è stato testato su due tipi di file:

- un file di testo
- un file audio

Implementazione del Modello su un File di Testo

Operazioni al Trasmettitore

In ingresso è fornito un file che bisogna trasferire da un trasmettitore a un ricevitore.

Il primo passo consiste nel campionamento dei dati del file. Il file può essere considerato come un segnale analogico abbastanza anomalo, dato che è già codificato ASCII. Si sceglie una frequenza di campionamento $f_{c_{tx}} = 20000Hz$ abbastanza elevata in modo tale da avere l'assoluta sicurezza di rispettare il teorema del campionamento.

Il passo successivo è la quantizzazione del segnale campionato. Si sceglie in particolare di utilizzare una quantizzazione uniforme. Risulta dunque necessario determinare il numero di bit (e dunque il numero di livelli) su cui quantizzare. A tal proposito, si deve tener presente che la codifica ASCII comprende 256 simboli diversi. Dunque, per ottenere un segnale quantizzato che rispetti fedelmente il segnale originale, bisogna effettuare una quantizzazione con almeno 256 livelli, e quindi su almeno 8 bit. Infatti, nel caso in cui si implementi una quantizzazione su un numero di bit minore, ci sarebbe il rischio concreto di avere due caratteri diversi in codifica ASCII ma situati sullo stesso livello di quantizzazione, il che risulterebbe ovviamente gravoso per una trasmissione efficiente del segnale. La scelta finale ricade su una quantizzazione a 8 bit.

Dopo essere stato quantizzato, il segnale viene codificato in binario e trasformato dunque in una sequenza di bit da trasmettere. La tecnica scelta per la trasmissione della sequenza di bit ottenuta è la 2-PAM con NRZ. Si stabiliscono ora i valori di due parametri di progetto fondamentali:

- frequenza di trasmissione
- bit-rate R_B

Per quanto riguarda la frequenza di trasmissione, si assume che essa sia uguale alla frequenza di campionamento $f_{c_{tx}}$ del segnale originario, mentre il bit-rate scelto è pari a 100 bit/s. Noti questi due parametri di progetto, si determina l'SpS necessario a garantire la velocità di trasmissione scelta:

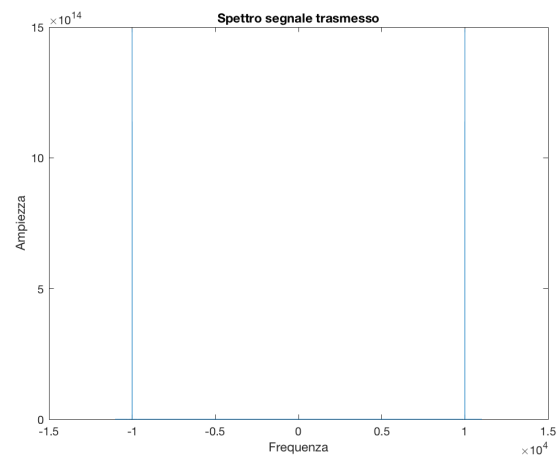
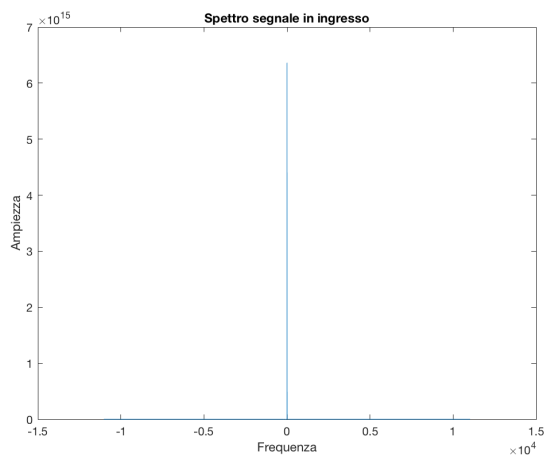
$$SpS = \frac{f_{c_{tx}}}{R_B} = 200$$

Il passo successivo consiste nella modulazione dell'ampiezza del segnale. Questa operazione viene effettuata per rendere il segnale da trasmettere compatibile con la scheda audio di entrambi i dispositivi. Infatti, da una parte il segnale in banda base ha uno spettro centrato nell'origine che non può essere trasmesso dalla scheda audio che non supporta frequenze minori di circa 20 Hz. Dunque, per trasmettere efficientemente il segnale, evitando rischi di perdita di informazione, è necessario shiftarne lo spettro verso frequenze più elevate. La frequenza di modulazione f_0 va inoltre scelta tenendo anche conto del limite massimo di frequenza compatibile con la scheda, pari a circa 20000 Hz. Un ultimo vincolo per la scelta di f_0 è costituito dalla frequenza di campionamento f_c scelta: deve essere valida infatti la seguente relazione:

$$f_{c_{tx}} \geq f_0 + 2R_S$$

$$R_S = \frac{f_{c_{tx}}}{SpS} \text{ coincide con il bit-rate perchè } BpS = 1$$

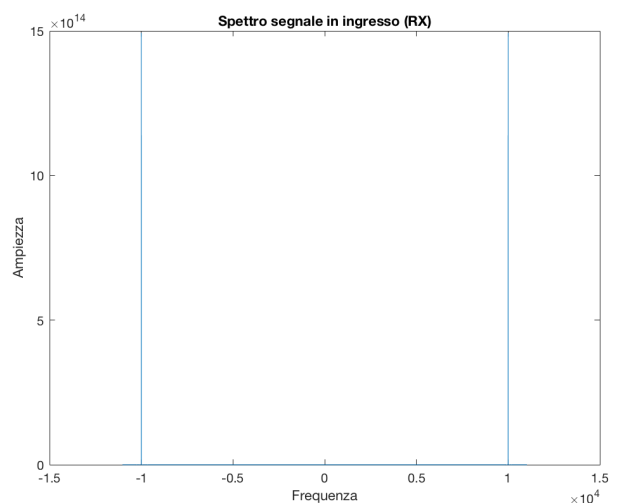
Un valore di f_0 che rispetti tutti i vincoli è 10000 Hz. Lo shift del segnale in banda base avviene moltiplicando il segnale stesso per un carrier avente frequenza f_0 . Si ottiene dunque il segnale nella configurazione in cui esso sarà trasmesso al ricevitore.



Operazioni al Ricevitore

La prima operazione che il ricevitore svolge all'arrivo del segnale è il campionamento dello stesso. Bisogna dunque scegliere una nuova frequenza di campionamento $f_{c_{rx}}$ che rispetti il teorema del campionamento. Non necessariamente la frequenza di campionamento a ricevitore deve equivalere quella a trasmettitore, ma per questioni di semplicità si pone $f_{c_{rx}} = f_{c_{tx}}$.

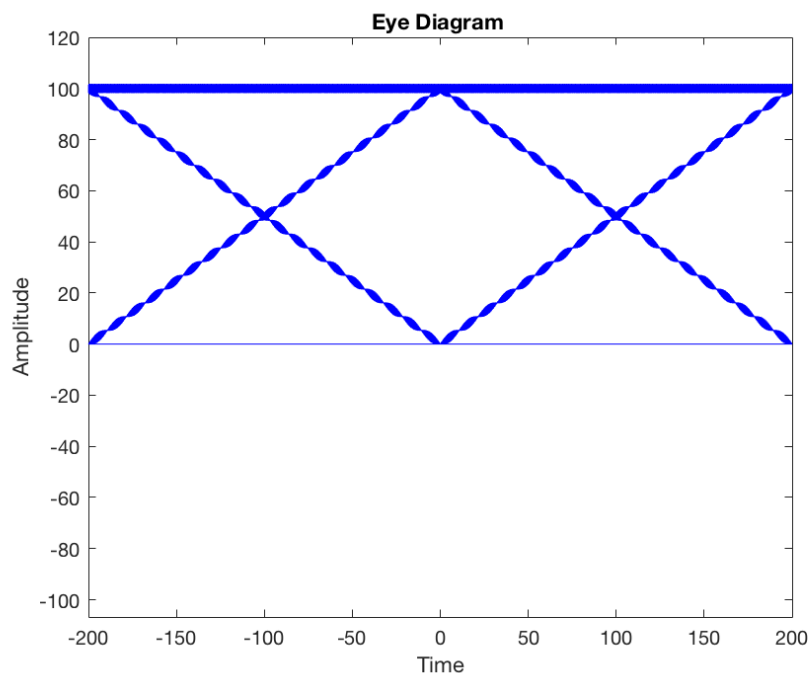
Il segnale appena campionato è un segnale passa banda. È dunque necessario attuare una demodulazione che consenta di ritornare a un segnale



banda base. L'operazione è effettuata moltiplicando il segnale passa banda per un carrier avente la stessa f_0 del carrier a trasmettitore.

Per depurare lo spettro dai due picchi concentrati in corrispondenza delle frequenze $\pm 2f_0$, si fa passare il segnale attraverso un filtro passabasso ottimizzato.

A questo punto si ha a disposizione una sequenza di bit da cui bisogna ricostruire il segnale codificato in binario. A tale scopo è necessario scegliere il bit migliore su cui campionare. La scelta viene effettuata costruendo il diagramma ad occhio del segnale a ricevitore.



Il bit migliore è evidentemente il primo.

L'ultimo passo consiste nel confronto del segnale di output a ricevitore con il segnale di input a trasmettitore, al fine di effettuare il conteggio degli errori. Il numero di errori trovato è pari a 0, dunque il modello si può ritenere perfettamente funzionante per il file che è dato in ingresso. Infatti, riconducendo nuovamente il segnale a ricevitore alla codifica ASCII e stampando il testo, esso risulta totalmente identico al testo di partenza.

Implementazione del Modello su un File Audio

Operazioni al Trasmettitore

Utilizzando la funzione `audioread`, si effettua l'acquisizione del segnale e della frequenza a cui esso è campionato ($f_s = 22050Hz$).

Si procede ora alla quantizzazione, che si effettua ancora su 8 bit, un buon compromesso per ottenere una quantizzazione efficiente senza appesantire eccessivamente il file in uscita. La PDF del segnale audio, come evidenziato nel Lab 1, non è uniforme, ma ha un picco nella regione centrale. Per poter utilizzare una quantizzazione uniforme, evitando il rischio di perdita eccessiva di informazione, si usa la tecnica del companding che appiattisce la PDF del segnale, rendendo la quantizzazione uniforme più efficace.

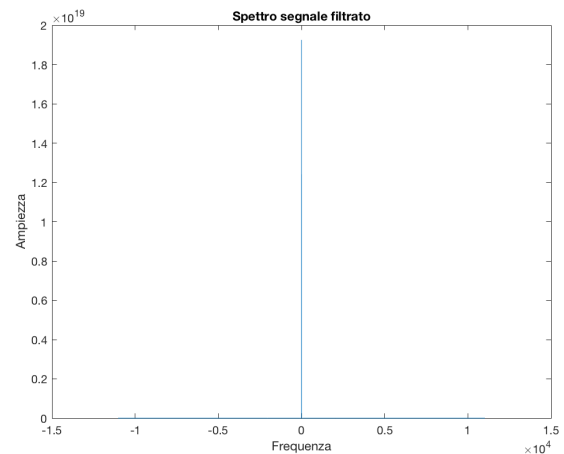
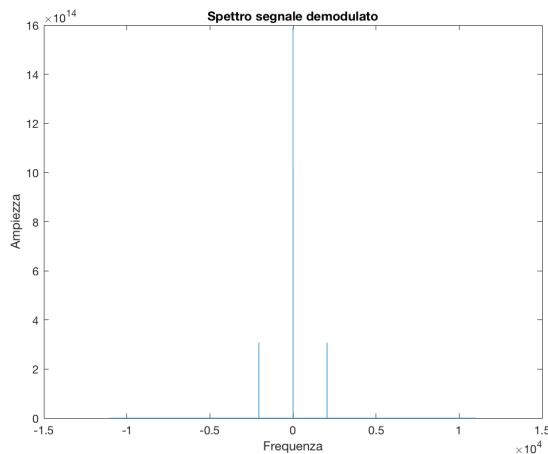
In seguito alla quantizzazione, il segnale viene codificato in binario e trasformato dunque in una sequenza di bit da trasmettere. La tecnica scelta per la trasmissione della sequenza di bit è anche in questo caso la 2-PAM con NRZ. La frequenza di trasmissione è assunta uguale ad f_s mentre il bit-rate scelto è $R_B = 150 \text{ bit/s}$. L'SpS risultante è pari a 147.

Si passa ora alla modulazione del segnale per cui si sceglie una f_0 pari a 10000 Hz tale da soddisfare tutti i vincoli già evidenziati per il modello implementato per il file di testo.

Operazioni al Ricevitore

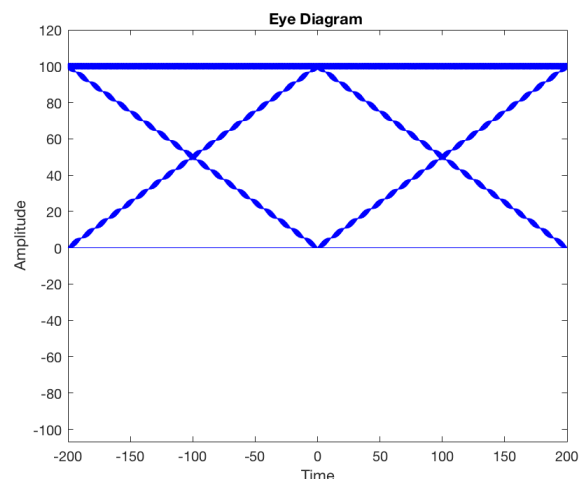
Per quanto riguarda il campionamento del segnale in arrivo, si sceglie anche qui una frequenza di campionamento pari ad f_s .

Al campionamento del segnale segue la demodulazione, consistente nella moltiplicazione del segnale per un carrier avente frequenza f_0 , seguita dall'azione di un filtro passabasso ottimizzato che depura lo spettro dai picchi situati in corrispondenza delle frequenze $\pm 2f_0$.



Si ricostruisce ora il segnale in output, scegliendo il bit ottimale su cui campionare, e successivamente si procede al conteggio degli errori, confrontando bit per bit il segnale in output con il segnale in input.

Come si osserva dal diagramma ad occhio il bit ottimale è il primo. Il segnale risulta trasmesso efficientemente, con un numero di errori nullo, dunque il modello risulta perfettamente funzionante. Infatti, riproducendo il file a ricevitore, l'audio viene scandito fedelmente al segnale originario, con disturbi praticamente inesistenti.



Test del Bit-Rate massimo

Per testare il bit-rate massimo si può diminuire SpS: si diminuisce finché il numero di errori è uguale a 0, quando gli errori crescono vuol dire che si è andati oltre al massimo supportabile dall'hardware.

Diminuendo sempre di più SpS si ottiene che il valore minimo per cui non si hanno errori è 5. Quindi il bit-rate supportabile dall'hardware utilizzato per l'esperimento è

$$R_s = \frac{f_c}{SpS} = \frac{22050}{5} = 4410 \text{ bit/s}$$

01QZD**Laboratorio di Internet e Comunicazioni****Comunicazioni****LAB 3.2**

L'obiettivo del laboratorio è quello di simulare la trasmissione di segnali radio, in particolare analizzando lo spettro delle onde FM (87.6 MHz - 107.9MHz) e quello delle onde GSM (925 MHz - 960 MHz).

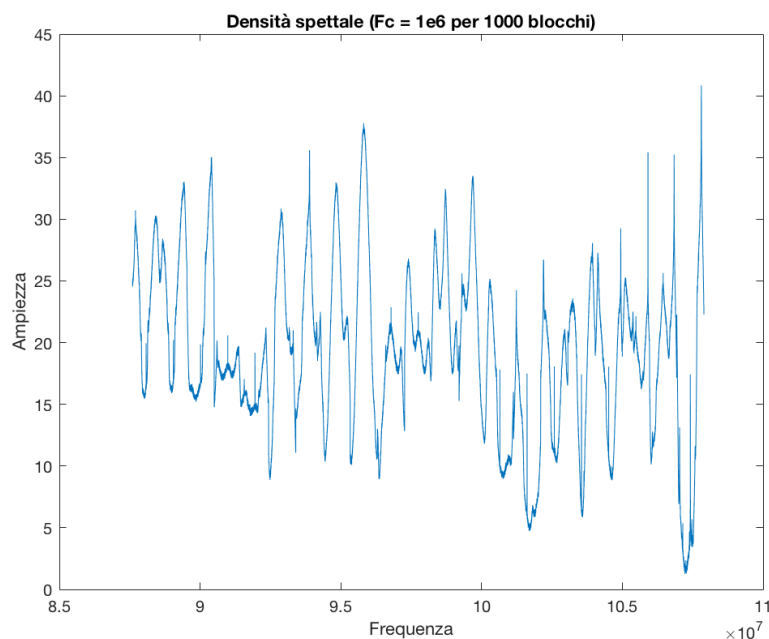
Analisi Spettro FM

Il processo è composto da due fasi di trattamento del segnale: una analogica ed una digitale.

A livello analogico, svolto all'interno dell'antenna e della funzione *SDRRTLReceiver*, le operazioni effettuate sono:

- acquisizione del segnale sull'intera banda FM
- selezione di una singola frequenza attraverso una modulazione e il successivo attraversamento di un filtro passa banda
- eliminazione di possibili fonti di aliasing attraverso un filtro apposito

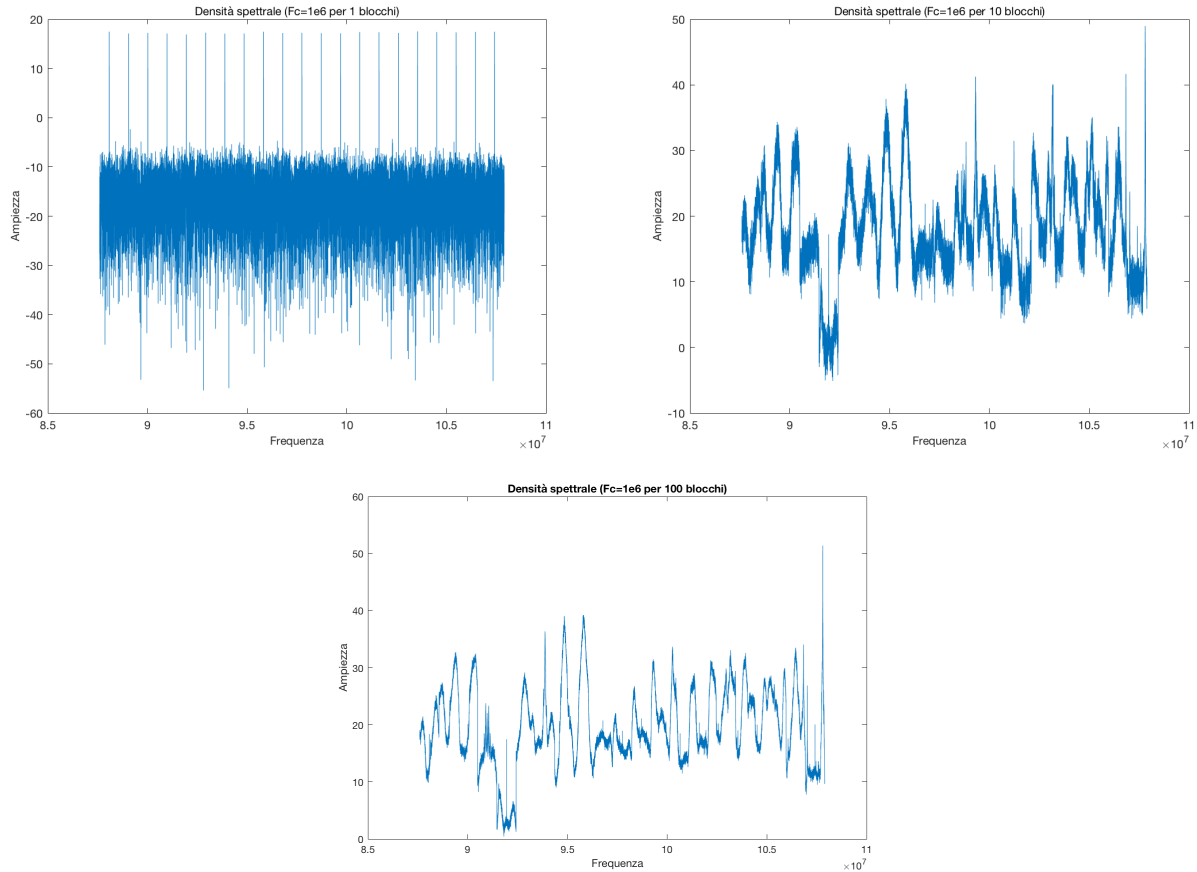
Una volta ottenuto il segnale digitale campionato con una frequenza f_C di 1 MHz, al fine di poterne costruire l'involuppo, si calcola la media dello spettro del segnale su 1000 blocchi ottenendo il seguente risultato.



Il grafico raffigura la densità spettrale per i valori di frequenze a cui abbiamo eseguito la simulazione.

Per analizzare l'intero spettro non è possibile effettuare una sola simulazione. Si eseguono quindi più simulazioni variando la frequenza centrale di un Δf pari a $B_{sim} = f_C$.

Nei grafici seguenti invece si nota come diminuendo il numero di blocchi si ha una precisione minore nel grafico.



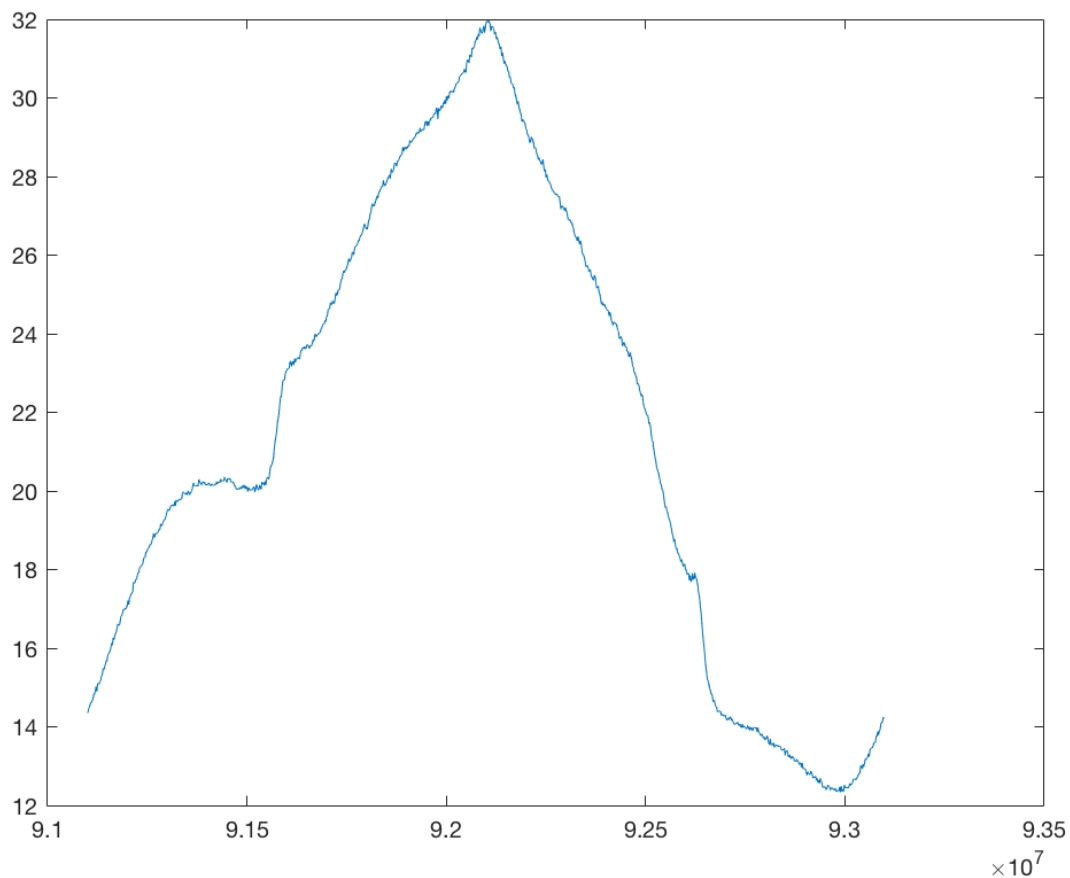
Per ottenere una qualità migliore dello spettro si può giocare sui seguenti parametri:

- frequenza di campionamento
- numero di blocchi

Diminuendo la frequenza o aumentando il numero di blocchi si ascolta il canale per più tempo in modo tale da evitare il rischio di avere solamente silenzi nel periodo di ascolto.

L'altra faccia della medaglia è che, aumentando eccessivamente la lunghezza della simulazione, lo spettro non può più essere inteso come catturato a tutte le frequenze al medesimo istante, ma sarà uno spettro 'diffuso' nel tempo.

Analizzando lo spettro di un singolo canale FM, si nota un picco di ampiezza nella frequenza centrale (92.1 MHz nel caso in esame).



Ai lati dovrebbero esserci due canali alle frequenze 91.80 MHz e 92.40 MHz, che però nella cattura effettuata non compaiono. Le possibili cause di questo fenomeno sono due:

- la qualità dell'hardware utilizzato non è sufficiente ad ottenere misure più precise della larghezza di banda e delle guardbands
- nell'area geografica in cui è stata effettuata l'esperienza il segnale corrispondente a quelle frequenze non ha sufficiente potenza

Misurando dallo spettro FM i canali che superano i 25 dB otteniamo un numero di canali pari a 21.

```
canali = 0;
tmp = 0;
for v = spettro
    if tmp < 0 && v > 0
        canali = canali + 1;
    end
tmp = v;
end
```

Analisi Spettro GSM

Nell'analisi dello spettro GSM si ha una differenza rispetto a quella dello spettro FM in quanto la banda del segnale in GSM, canale bidirezionale, è da suddividere in banda per uplink e downlink. La banda usata nella nostra simulazione è la E-GSM-900 e in uplink va da 880 MHz a 915 MHz mentre in downlink (la banda analizzata nel nostro codice) va da 925 MHz a 960 MHz.

Una volta decise le frequenze, il procedimento è analogo a quello per lo spettro FM e i parametri in gioco sono gli stessi.

Il risultato ottenuto analizzando lo spettro per 1000 blocchi a una frequenza di 1 MHz si ottiene il seguente risultato.

