



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

**SIMULAZIONE IN AMBIENTE "SIMULINK" DEGLI  
EFFETTI DEL PHASE NOISE SULLA MODULAZIONE  
16QAM**

**SIMULATION IN A "SIMULINK" ENVIRONMENT OF THE  
EFFECTS OF PHASE NOISE ON THE 16QAM MODULATION**

Relatore:  
Prof. Ennio Gambi  
Correlatore:  
Prof. Adelmo De Santis

Tesi di laurea di:  
Riccardo Mangani

A.A. 2020 / 2021

## INDICE

<b>CAPITOLO 1. INTRODUZIONE A SIMULINK</b> .....	1
<b>1.1 Descrizione dell'ambiente di sviluppo</b> .....	1
<b>1.2 Descrizione dei blocchi</b> .....	3
<b>CAPITOLO 2. MODULAZIONE QAM</b> .....	6
<b>2.1 Introduzione alle modulazioni</b> .....	6
<b>2.1.1 modulazioni digitali</b> .....	9
<b>2.2 Descrizione della modulazione QAM</b> .....	10
<b>2.2.1 Tecnica di modulazione</b> .....	11
<b>CAPITOLO 3. PHASE NOISE</b> .....	12
<b>3.1 Concetti fondamentali</b> .....	12
<b>CAPITOLO 4. PROGETTO</b> .....	17
<b>4.1 Introduzione</b> .....	17
<b>4.2 Descrizione del progetto</b> .....	18
<b>4.3 Valutazione dell'effetto del Phase Noise sul bit error rate</b> .....	29
<b>CAPITOLO 5. CONCLUSIONI</b> .....	47
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	52
<b>SITOGRAFIA</b> .....	52



*Alla mia famiglia.  
Grazie per avermi sempre supportato.*

## **CAPITOLO 1. INTRODUZIONE A SIMULINK**

Nella seguente trattazione verrà esposto un progetto, realizzato su piattaforma Simulink, riguardante l'implementazione di un sistema di comunicazione in banda traslata modulato 16-QAM.

Durante la trattazione verrà spiegato il processo di modulazione e sarà evidenziato l'effetto che il Phase Noise esercita sulla qualità della trasmissione, su quest'ultimo verranno poi effettuate valutazioni esaustive svolgendo numerose simulazioni e variando i suoi parametri al fine di valutare la sua influenza sul sistema di comunicazione.

### **1.1 Descrizione dell'ambiente di sviluppo**

Il software "Simulink" è un ambiente grafico di simulazione accessibile tramite il programma di calcolo "Matlab" e ne costituisce fondamentalmente una sua interfaccia grafica. Simulink permette di progettare, simulare, implementare e verificare sistemi dinamici in diversi ambiti applicativi tra cui controllo, sistemi di telecomunicazione, elaborazione di segnali, immagini e video mediante strumenti "visuali" disponibili nell'ambiente di sviluppo.

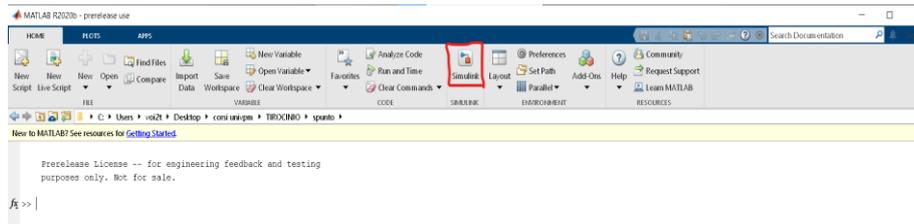
Il software si presenta piuttosto intuitivo e permette all'utente di limitarsi al tracciamento, su un foglio di lavoro elettronico, di uno schema a blocchi rappresentativo del sistema in esame.

Simulink si compone di una serie di librerie che contengono dei blocchi elementari i quali vengono portati nel workspace semplicemente tramite trascinarsi dell'icona, le librerie sono read-only perciò per poter variare i parametri dei blocchi essi devono trovarsi già nel workspace, dopodiché sarà sufficiente fare doppio click sull'icona per accedere alla maschera la quale fornirà inoltre informazioni sul blocco designato.

Vantaggi:

- Interfaccia grafica;
- Blocchi predefiniti;
- Elevata flessibilità del progetto;
- Riduzione dei costi rispetto ad un test pratico;
- Condivisione con Matlab delle variabili nel workspace;

*Figura 1. Accedere a Simulink.*



## 1.2 Descrizione dei blocchi

I principali blocchi usati nel progetto sono:

- Bernoulli Binary Generator: genera numeri binari random utilizzando una distribuzione di Bernoulli. Il blocco viene utilizzato per generare random data bits allo scopo di simulare sistemi di comunicazione digitali. Il segnale in uscita può essere un vettore riga o colonna, una matrice o uno scalare.
- Frame Conversion: definisce la modalità di campionamento del segnale in uscita dal blocco il quale offre due possibilità di scelta, Frame-based or Sample-based.
- Rectangular QAM Modulator Baseband: il blocco applica al segnale in ingresso una quadrature amplitude modulation sfruttando una costellazione in cui M definisce il numero di punti disposti sul reticolo rettangolare. In uscita si ottiene una rappresentazione in banda base del segnale modulato.
- Constellation Diagram: il blocco Constellation Diagram visualizza segnali a valori reali e complessi nel piano I/Q(in phase/quadrature). Il blocco viene utilizzato per effettuare un'analisi qualitativa e sui segnali modulati.
- Complex To Real-Imag: in uscita dal blocco si ottiene la parte reale e/o immaginaria del segnale in ingresso, a seconda dell'impostazione dei parametri di uscita.

- Product: In uscita dal blocco si ottiene il risultato della moltiplicazione di due ingressi, questi possono essere due scalari, uno scalare e un non-scalare, oppure due non-scalari che hanno la stessa dimensione.
- Sine Wave: il blocco Sine Wave produce una forma d'onda sinusoidale, il blocco può operare in due modalità, time-based oppure sample-based. Tra i parametri è possibile selezionare l'ampiezza, la frequenza, la fase ed il tempo di campionamento del segnale generato. Tramite il parametro output complexity è possibile definire se l'uscita sarà una sinusoide reale o un esponenziale complesso.
- Phase Noise: il blocco aggiunge Phase Noise al segnale complesso in ingresso, esso emula il disturbo introdotto dal oscillatore locale.
- Add, Subtract, Sum of Elements, Sum: il blocco svolge una somma o una sottrazione degli ingressi, essi possono essere scalari, vettori o matrici.
- AWGN Channel: il blocco canale AWGN aggiunge rumore bianco gaussiano al segnale in ingresso, dal quale deriva anche il tempo di campionamento. Il blocco permette di definire parametri molto importanti come il rapporto segnale-rumore del canale ed il numero di bit per simbolo.
- Digital Filter Design: il blocco permette l'implementazione di un filtro digitale di tipo FIR O IIR sfruttando l'interfaccia filter designer.

- Constant: il blocco genera un segnale a valore reale o complesso costante, il quale può essere sfruttato come ingresso ad altri blocchi.
- Abs: fornisce in uscita il valore assoluto dell'ingresso.
- Switch: il blocco lascia passare il primo ingresso o il terzo sulla base del valore del secondo ingresso. Il secondo ingresso svolge un ruolo di controllo ed è soggetto alla condizione imposta tramite i parametri del blocco.
- Delay: Dal blocco si ottiene in uscita il segnale in ingresso ritardato, il ritardo è determinato sulla base del valore del parametro Delay length. Il ritardo è espresso in campioni.
- Mux: il blocco mux combina gli ingressi dello stesso tipo in un vettore in uscita. Possono essere utilizzati più blocchi mux per realizzare un segnale in più fasi.
- Scope: il blocco mostra all'utente il segnale in ingresso nel dominio del tempo.
- Spectrum Analyzer: il blocco mostra all'utente lo spettro in frequenza del segnale in ingresso.
- Error Rate Calculation: il blocco accetta due segnali in ingresso, esso compara l'ingresso proveniente dal trasmettitore con l'ingresso proveniente dal ricevitore e calcola il tasso di errore dividendo il numero

di coppie di elementi discordanti per il numero totale di elementi provenienti da una sorgente.

- Display: il blocco mostra all'utente il valore del dato in ingresso. Se l'ingresso è un array è possibile ridimensionare il blocco verticalmente o orizzontalmente per mostrare più elementi, vengono mostrati i primi 200 elementi di un vettore e le prime 20 righe e 10 colonne di una matrice.

## **CAPITOLO 2. MODULAZIONE QAM**

### **2.1 Introduzione alle modulazioni**

Nella sua accezione più generale, ma comunque sempre in ambito telecomunicazionistico, il termine “modulazione” indica l'insieme di operazioni che permette di trasferire l'informazione da trasmettere tramite uno o più parametri del segnale portante. Il risultato sarà quindi il segnale modulato, il quale risulta maggiormente idoneo alla trasmissione nel canale.

Sebbene l'operazione di modulazione possa riferirsi a segnali passa-basso, storicamente la modulazione viene utilizzata per trasformare segnali passa-basso in segnali passa-banda, principalmente per tre motivi:

- Utilizzo di antenne con dimensioni ridotte: l'efficienza di un' antenna è anche funzione delle lunghezze d'onda che devono essere trasmesse, per poter irradiare o captare l'energia elettromagnetica l'antenna deve avere

dimensioni dell'ordine di grandezza delle lunghezze d'onda in gioco. Ciò significa che più il segnale trasmesso è a bassa frequenza maggiori dovranno essere le dimensioni dell'antenna.

- Utilizzare al meglio la funzione di trasferimento del canale trasmissivo: il canale di trasmissione presenta un intervallo di frequenze in cui le condizioni di non distorsione sono, approssimativamente, ritenute verificate. Tramite modulazione è possibile adattare l'intervallo di frequenze occupato dal segnale a quello ottimo del canale.
- Trasmettere più segnali che inizialmente occupavano lo stesso range di frequenze: è possibile assegnare a segnali che originariamente erano sovrapposti nel tempo e nella frequenza bande distinte di uguale estensione, esse saranno poi facilmente separabili in ricezione tramite dei filtri.

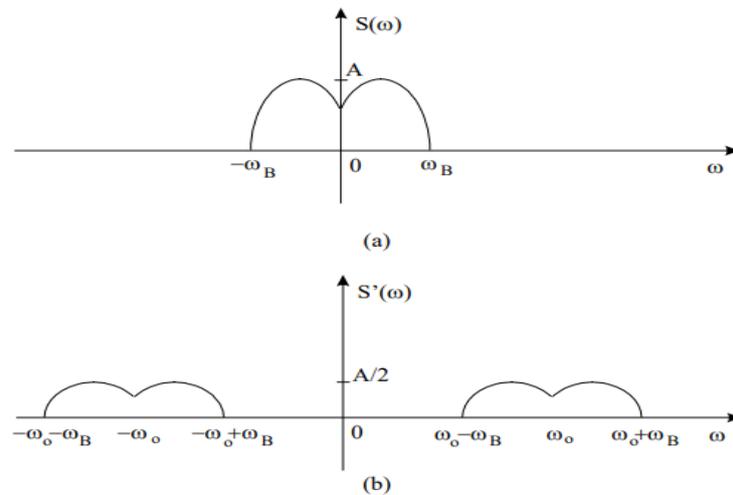
Consideriamo  $s(t)$  un segnale in banda base, e sia il suo spettro in frequenza  $S(f)$  (o  $S(\omega)$  nel dominio della pulsazione) allora è possibile ottenere il suo spettro in banda traslata dalla seguente operazione:

$$\int_{\mathbb{R}} s(t) * e^{-j*2*\pi*f*t} * \cos(2 * \pi * f_0 * t) dt = \frac{S(f + f_0) + S(f - f_0)}{2}$$

Come è possibile vedere il segnale in banda base è stato moltiplicato per una funzione cosinusoidale con frequenza  $f_0$ (portante) e successivamente si è svolta la trasformata di Fourier del nuovo segnale.

Quello che si ottiene sono delle repliche attenuate dello spettro del segnale sull'asse delle frequenze centrate in  $\pm f_0$  ( $\omega_0$  nel dominio della pulsazione).

**Figura 2.** *Traslazione in alta frequenza.*

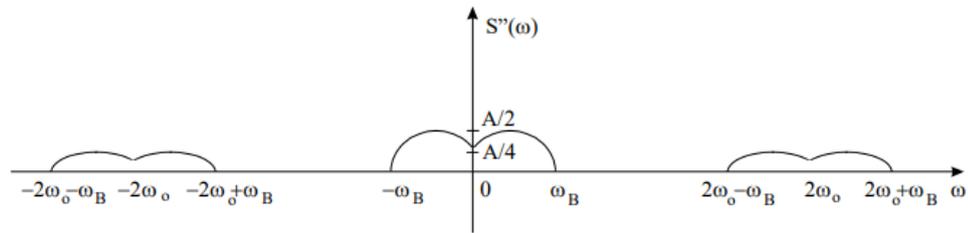


Per ottenere nuovamente il segnale in banda base è sufficiente moltiplicare ulteriormente per la portante utilizzata in precedenza così da ottenere due nuove repliche una centrata in  $2 * f_0$  ( $2 * \omega_0$ ) ed una in banda base:

$$s''(t) = s(t) * \cos^2(\omega_0 * t) = \frac{1}{2} * s(t) + \frac{1}{2} * s(t) * \cos(2 * \omega_0 * t)$$

Le repliche saranno ulteriormente attenuate ma sarà sufficiente isolare la replica desiderata sfruttando un filtro passa-basso e successivamente amplificarla per riottenere il segnale originale.

*Figura 3. Traslazione in banda base.*



*Figura 15*

### **2.1.1 modulazioni digitali**

L'obiettivo di una trasmissione digitale è quello di portare una sequenza binaria dal trasmettitore al ricevitore, i segnali vengono rappresentati come bit ovvero una sequenza di zero e uno, nello specifico nei circuiti elettronici essi sono rappresentati da due livelli in tensione, convenzionalmente +3,3V (o 5V) e 0V.

Solitamente, ma non necessariamente, il valore più alto in tensione rappresenta il livello logico uno mentre il valore più basso rappresenta lo zero.

A causa della natura del canale di trasmissione il segnale sarà affetto da rumore, distorsione e attenuazione.

Per trasmettere la sequenza binaria sul canale è necessario che quest'ultima sia rappresentata da un segnale con una banda coerente rispetto a quella del canale stesso, per fare ciò è necessario mappare la

sequenza binaria in una serie di valori reali e complessi per poi assegnarli a delle forme d'onda che possano rappresentarli, l'informazione viene trasmessa facendo variare i valori di ampiezza, fase e frequenza del segnale portante.

## **2.2 Descrizione della modulazione QAM**

La modulazione definita come Multilevel o M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) è una tecnica che modula l'ampiezza e la fase di una portante a radiofrequenza per trasmettere l'informazione proveniente dal segnale modulante. Il valore di M rappresenta il numero di simboli nel diagramma costellazione, maggiore è il suo valore, maggiore sarà l'efficienza della modulazione, ovvero la quantità di informazione trasmessa nell'unità di tempo, ogni simbolo rappresenta più bit a seconda della cardinalità L della modulazione ( $M=2^L$ ).

Aumentare il numero di punti nella costellazione significa però che essi saranno più vicini tra di loro e quindi più suscettibili all'effetto del rumore, ciò risulta in un peggioramento del bit error rate.

Per evitare che ciò accada sarà quindi necessario aumentare il rapporto segnale rumore (SNR) aumentando la potenza del segnale trasmesso o diminuendo quella del rumore.

### 2.2.1 Tecnica di modulazione

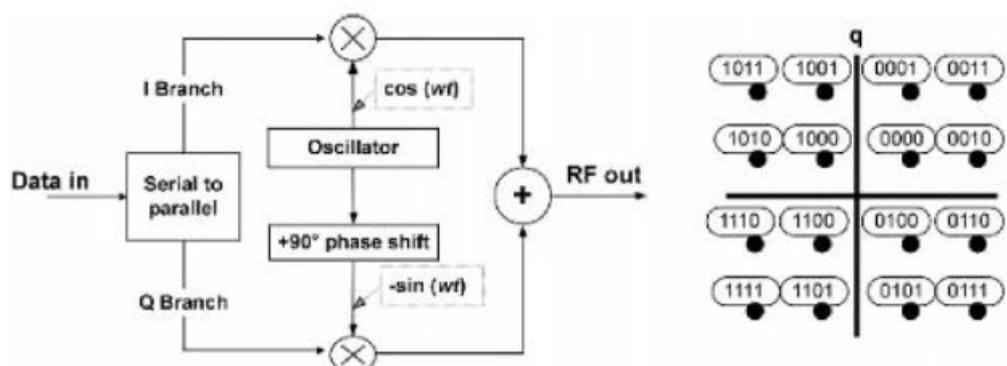
Il termine “quadrature” significa che nella modulazione vengono utilizzate due portanti in quadratura, cioè due segnali sinusoidali sfasati di un angolo di  $90^\circ$ , questo permette al ricevitore di trattarle indipendentemente l’una dall’altra, ciò significa che la capacità del canale di trasmissione è doppia rispetto all’utilizzo di una portante singola.

Entrambe le portanti sono modulate variando la loro fase e la loro ampiezza, nella 16-QAM il bit stream in ingresso è diviso in gruppi da 4 bit i quali saranno poi separati in due coppie di bit, una di queste seguirà il percorso caratterizzato dalla moltiplicazione per il segnale coseno mentre l’altra seguirà quello caratterizzato dalla presenza della moltiplicazione per il segnale seno, le due coppie saranno comunque prima convertite da serie a parallelo, ciò comporterà che il symbol rate sarà un quarto del bit rate iniziale.

Il valore dei bit di ogni coppia determinerà il valore di ampiezza che sarà assegnato alla sua relativa portante, le quali saranno poi sommate per dar vita ad un segnale sinusoidale con sedici possibili combinazioni di fase ed ampiezza.

I valori di ampiezza  $I(L)$  e  $Q(L)$  rappresentano le coordinate di un punto sul piano complesso (costellazione).

*Figura 4. Processo di modulazione 16-QAM.*



In ricezione per demodulare sarà sufficiente moltiplicare il segnale in ingresso separatamente per la portante in fase e per quella in quadratura per poi filtrare passa-basso così da poter recuperare i valori di  $I(L)$  e  $Q(L)$ , tramite i quali è possibile risalire ai quattro bit trasmessi attraverso la forma d'onda.

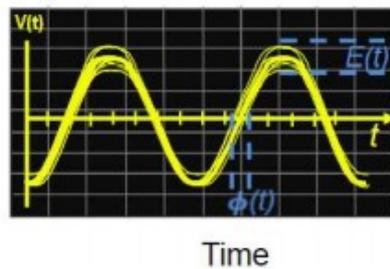
## CAPITOLO 3. PHASE NOISE

### 3.1 Concetti fondamentali

Il Phase Noise è un parametro che consente di valutare la qualità di un oscillatore. In particolare, ne misura la stabilità di breve termine, ovvero quella valutata nell'arco di un secondo.

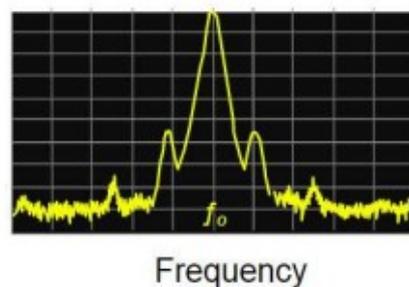
Rispetto ad un oscillatore ideale, un oscillatore reale ha un segnale di uscita caratterizzato da termini tempo varianti, nello specifico uno legato all'ampiezza ed uno alla fase.

**Figura 5.** *Variazione di fase e ampiezza di un segnale reale nel tempo dovuta al Phase Noise.*



Per quanto riguarda lo spettro del segnale il Phase Noise si riflette sul fatto che a differenza del caso ideale, nel caso reale non è presente una singola riga spettrale ma l'energia è distribuita sulle bande laterali nell'intorno della portante. La valutazione del Phase Noise viene fatta analizzando solo una delle due bande laterali.

**Figura 6.** *Spettro in frequenza di un segnale sinusoidale affetto da Phase Noise.*



Il Phase Noise è espresso in dBc/Hz, per valutare il suo effetto in un punto abbiamo bisogno di tre informazioni:

- La distanza in frequenza dalla portante (offset);
- Il valore della Power Spectral Density in una banda unitaria;
- Il valore della Power Spectral Density relativo alla potenza della portante;

Tra i maggiori contributi al Phase Noise annoveriamo il rumore termico ed il rumore flicker (o  $1/f$ ) generato dai portatori di carica nei circuiti elettronici. Il Phase Noise può deteriorare notevolmente la qualità della trasmissione infatti durante la downconversion in ricezione se l'oscillatore utilizzato ha un elevato Phase Noise questo può andare a diminuire il rapporto segnale rumore costringendoci di conseguenza a diminuire il bit rate.

Allo stesso tempo questo fenomeno comporta anche il mixing reciproco, ovvero una conversione in frequenza indesiderata, del segnale in ingresso con il Phase Noise, che risulta nella generazione di segnali anch'essi indesiderati in banda base i quali compromettono le prestazioni del sistema.

Riassumendo, negli apparati di misura il Phase Noise è, alla stregua di ogni altro rumore, un fenomeno che deve essere minimizzato. Sia che

l'apparato sia usato per la sintesi o per l'analisi di un segnale, il Phase Noise degrada le prestazioni dello strumento.

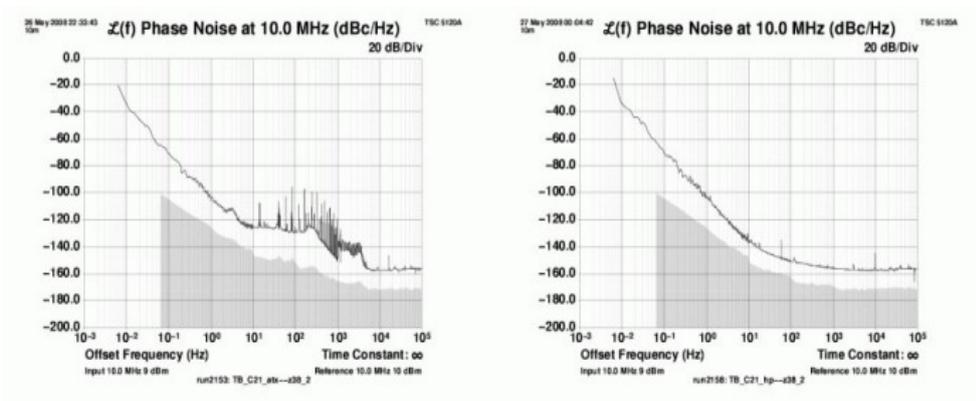
Realizzare un oscillatore poco affetto da questo fenomeno è complesso. Occorre valutare diverse soluzioni circuitali, cercando quella che offre le migliori caratteristiche nell'intervallo di frequenza, tensione e temperatura necessari.

Cause di degrado del PN in un oscillatore:

- Design del circuito-alcuni circuiti sono meno rumorosi di altri;
- Tecnica costruttiva;
- Rumore nelle alimentazioni;
- Scelta ed implementazione del filtro in un PLL;
- Frequenza di lavoro del comparatore di fase di un PLL;

Alcuni dispositivi o componenti sono meno rumorosi di altri ma, tipicamente, impongono vincoli sul range di frequenza utilizzabile o nella velocità di cambio frequenza. Se potessimo realizzare tutti i circuiti con degli oscillatori a quarzo, sarebbe ottimo: il quarzo esibisce tipicamente un basso PN ma non è sintonizzabile ( se non per pochi ppm).

*Figura 7. Effetto dell'alimentazione sul PN.*



La figura di sinistra mostra il PN di un oscillatore alimentato con un alimentatore switching per un computer portatile. Risulta evidente la presenza di spurie nella regione del kHz, data dal rumore dell'alimentatore. Il rumore non è necessariamente trasmesso attraverso i cavi di alimentazione o la massa, potrebbe essere una interferenza radiata. Nella figura di destra, lo stesso oscillatore è alimentato con un sistema lineare di alta qualità. Il grafico del PN appare molto più pulito e non sono presenti le spurie che caratterizzavano l'altra misura.



## 4.2 Descrizione del progetto

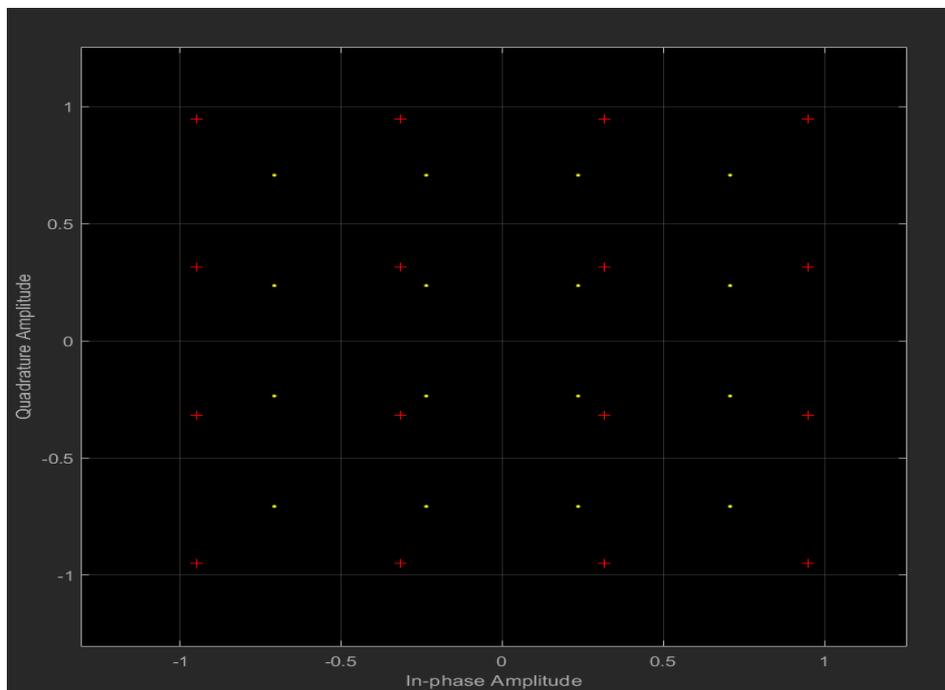
Come è possibile vedere dalla figura, in ingresso al modello è fornito un bit stream binario il quale verrà modulato 16-QAM tramite il metodo esplicitato nel secondo capitolo, il blocco che se ne occupa è il Rectangular QAM Modulator Baseband.

In uscita al blocco otterremo un segnale di questo tipo:

$$s(t) = A_i * m_i * \sin(\omega_0 * t) + A_q * m_q * \cos(\omega_0 * t)$$

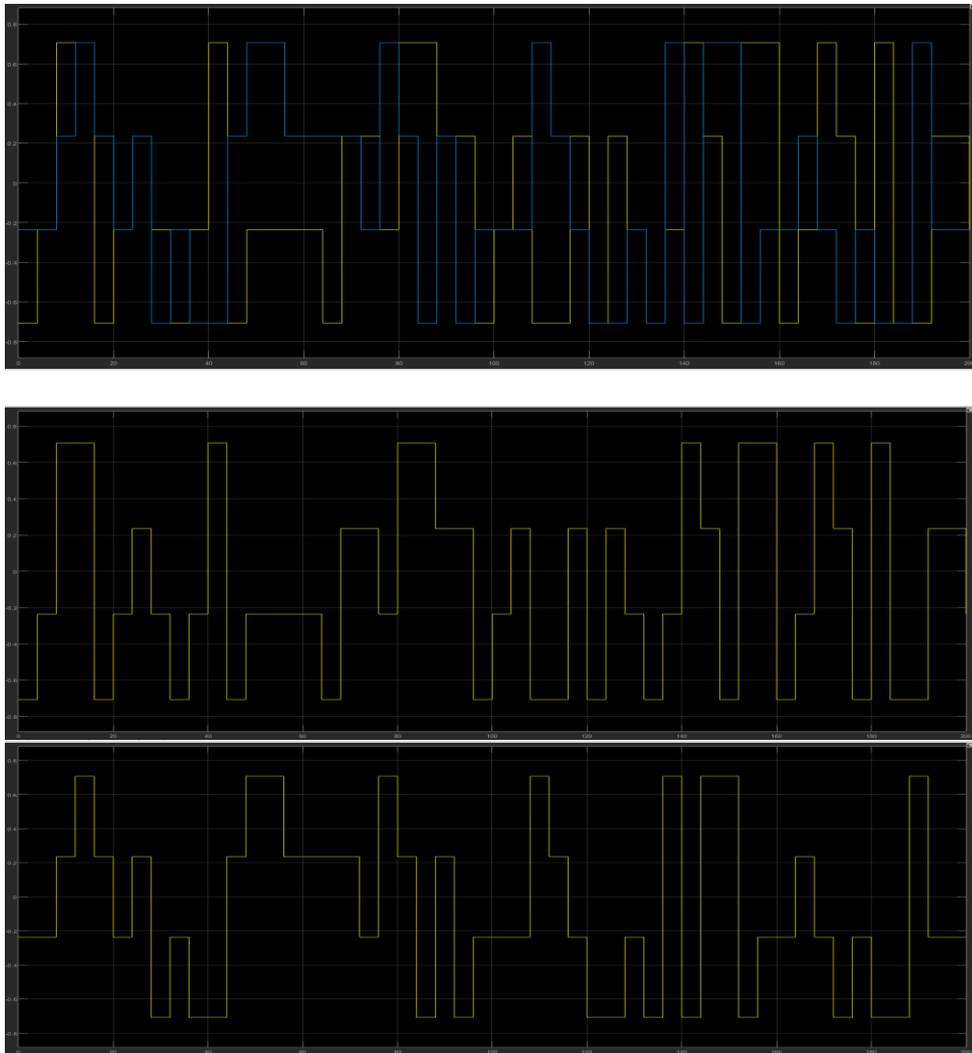
Riportato in seguito è possibile vedere il diagramma della costellazione in cui sono rappresentati i simboli che rispecchiano le 16 possibili combinazioni di fase e ampiezza del segnale modulato.

*Figura 9. Grafico costellazione.*



Successivamente il segnale modulato, passando attraverso il blocco Complex To Real-Imag, sarà diviso nella sua parte reale ed immaginaria, questo processo viene effettuato per andare poi a traslare il segnale in frequenza.

*Figura 10. Segnale modulato prima e dopo il blocco Complex To Real-Imag.*



Tramite i due blocchi product le parti reale ed immaginaria del segnale vengono moltiplicate rispettivamente per un segnale coseno (S1) ed un segnale seno (S2), ovvero due segnali sfasati di 90°, cioè in quadratura tra loro e con una frequenza di 20Hz, valore scelto allo scopo di diminuire il tempo di elaborazione. I due segnali sinusoidali sono ottenuti dal blocco Sine Wave impostando l'uscita come complex, quest'ultima avrà la forma:

$$Y = A * \{\cos(2 * \pi * f * t + \varphi) + j * \sin(2 * \pi * f * t + \varphi)\};$$

In cui  $A = \sqrt{2}$ ,  $f = 20\text{Hz}$  e  $\varphi = 0^\circ$ , in seguito al passaggio attraverso il blocco Phase Noise il segnale sarà diviso nella sua parte reale ed immaginaria tramite l'ulteriore utilizzo del blocco Complex To Real-Imag dando così origine ai segnali S1 e S2.

$$S1(t) = \sqrt{2} * \cos(2 * \pi * 20 * t);$$

$$S2(t) = \sqrt{2} * \sin(2 * \pi * 20 * t);$$

Considerando come ampiezze A1 e A2 quello che otterremo nei due rami sarà:

$$S1'(t) = A1 * \cos(\omega_0 * t) * \cos(2 * \pi * 20 * t);$$

$$S2'(t) = A2 * \sin(\omega_0 * t) * \sin(2 * \pi * 20 * t);$$

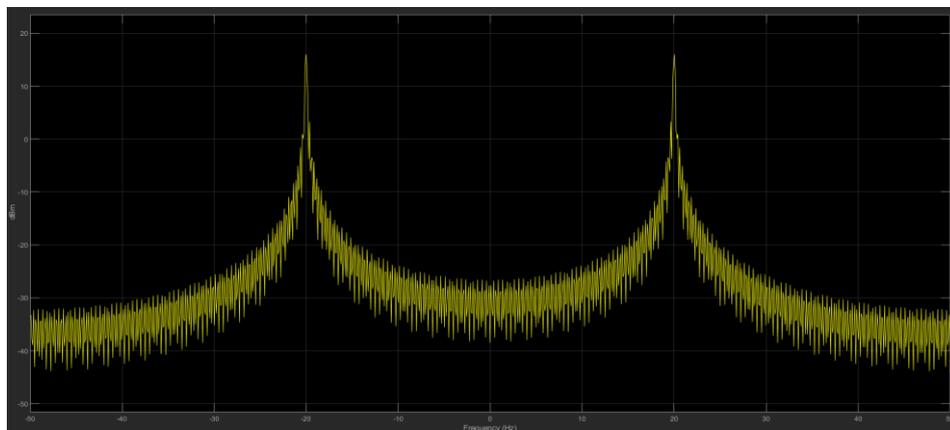
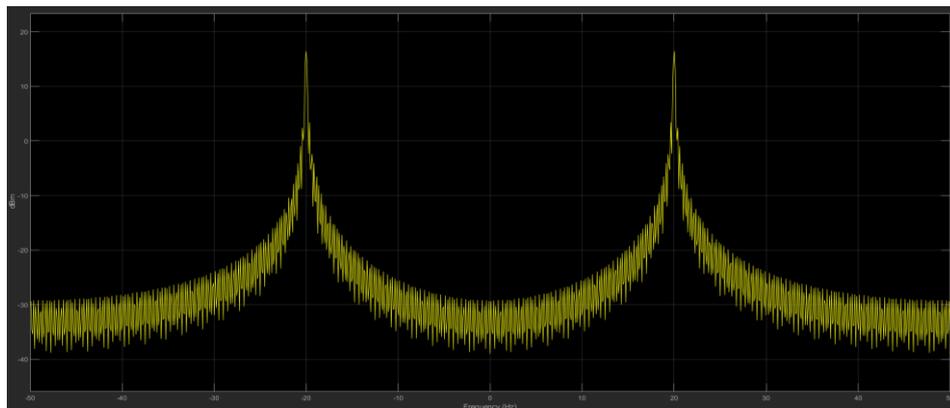
Sviluppando le due espressioni infine otteniamo:

$$S1'(t) = \frac{A1}{2} * [\cos(2 * \pi * (f_0 - 20) * t) + \cos(2 * \pi * (f_0 + 20) * t)];$$

$$S2'(t) = \frac{A2}{2} * [\cos(2 * \pi * (f0 - 20) * t) - \cos(2 * \pi * (f0 + 20) * t)];$$

Andando ad osservare i segnali nel dominio nella frequenza in figura possiamo apprezzare delle righe spettrali a  $\pm 20$  Hz.

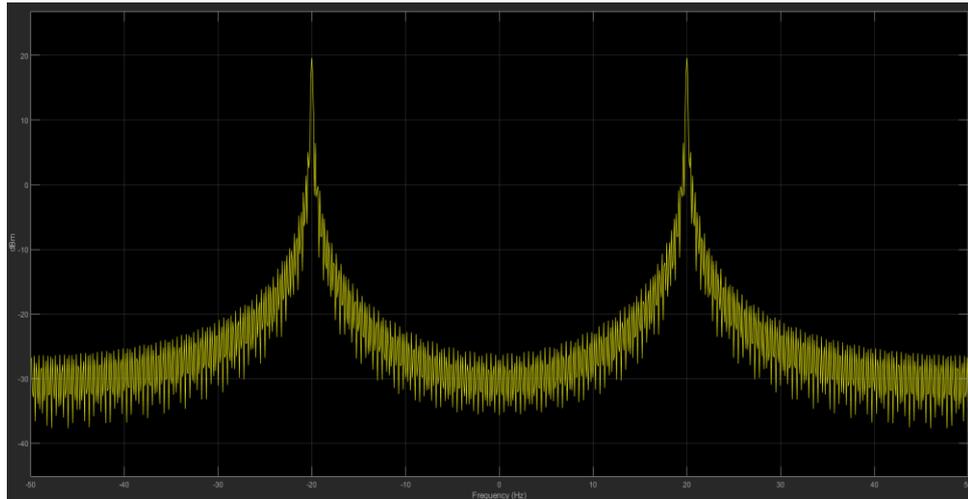
*Figura 11. Rappresentazioni dei segnali nel dominio della frequenza.*



Successivamente utilizzando il blocco Sum andiamo a sommare i due segnali. Dal risultato in figura è possibile notare la presenza ancora una

volta di due righe spettrali a  $\pm 20$  Hz ma con una potenza maggiore rispetto alle precedenti.

*Figura 12. Rappresentazione in frequenza del segnale somma.*

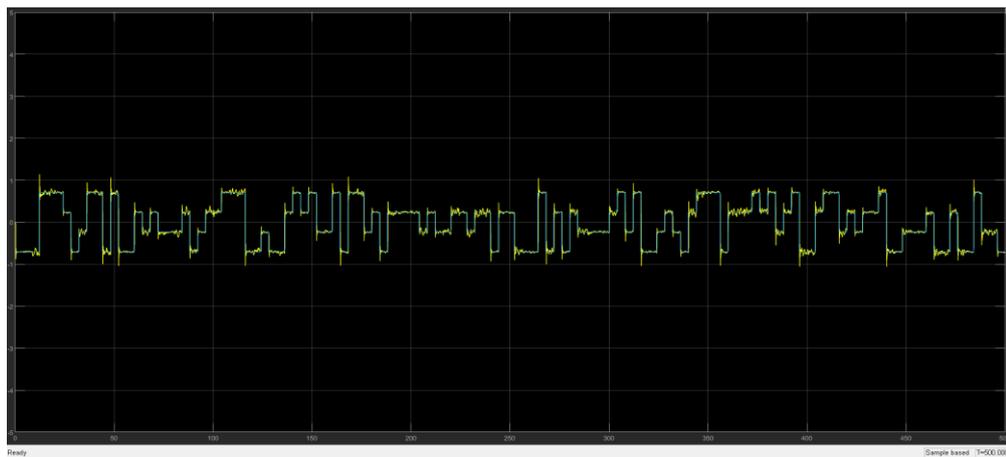
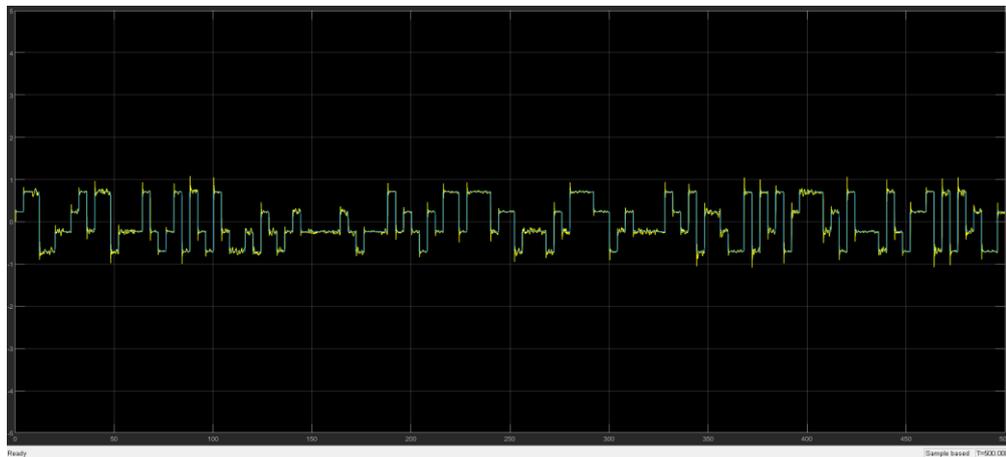


Il segnale modulato ora è pronto per essere trasmesso sul canale, che nel modello è rappresentato dal blocco AWGN Channel. Il canale di comunicazione aggiunge rumore bianco Gaussiano al segnale in ingresso e come visto nel capitolo 1 permette di definire tramite l'impostazione dei suoi parametri l'SNR (rapporto segnale rumore) sul canale stesso.

In ricezione è necessario ricostruire il segnale originale, cioè il bit stream, per farlo inizialmente si riporterà il segnale in banda base moltiplicando il segnale ricevuto nuovamente per  $S_1(t)$  e  $S_2(t)$  ottenendo così sui due rami distinti la parte reale ed immaginaria del segnale modulato.

Questo processo porterà però alla creazione, oltre che della replica in banda base, di una replica a frequenza  $2 \cdot f_0$ . Per eliminare la replica indesiderata sarà sufficiente utilizzare un filtro passabasso creato tramite il blocco Digital Filter Design.

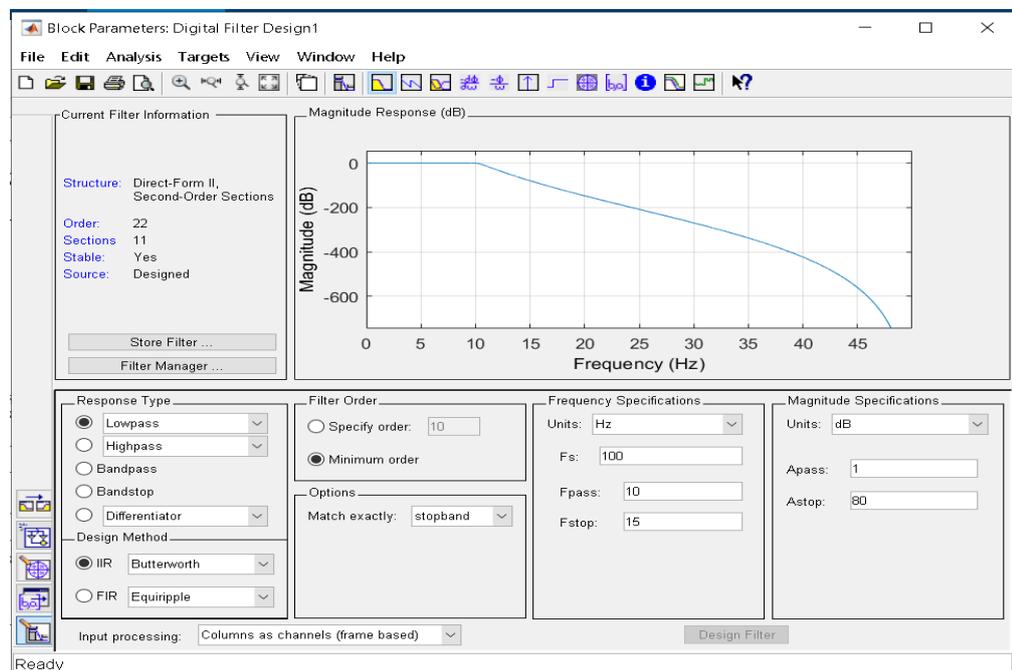
**Figura 13.** Confronto tra le parti reali ed immaginarie originali e recuperate del segnale modulato, con un SNR di 50 dB e un PN di  $[-40, -80]$ dBc/Hz  $[10, 100]$ Hz Tx e  $[-50, -80]$ dBc/Hz  $[10, 100]$ Hz Rx.



In figura sono mostrate, sovrapposte, la parte reale del segnale modulato 16-QAM prima della traslazione in frequenza e la parte reale in banda base recuperata dal segnale in ricezione dopo il filtraggio, valgono le stesse considerazioni per la parte immaginaria riportata nella figura sottostante.

Il filtro passabasso utilizzato è un filtro IIR di Butterworth in cui tra i parametri sono stati imposti una frequenza di campionamento di 100Hz, la frequenza di taglio a 10Hz e la frequenza di bandstop a 15Hz, questa rappresenta il punto in cui il segnale viene attenuato di 80db, la banda di transizione vale 5Hz.

**Figura 14.** Rappresentazione in frequenza del filtro.

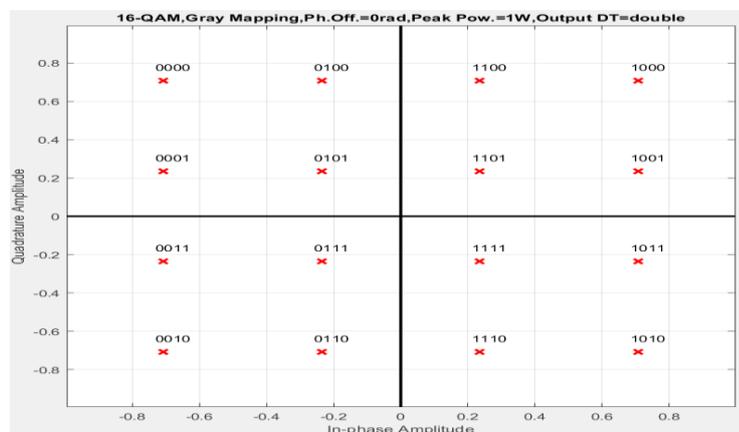


Sui due rami ora sono presenti due segnali modulati 4-ask. In questo tipo di modulazione l'informazione è codificata nell'ampiezza della portante che assume valori discreti (convenzionalmente equidistanti) in funzione del bit o della sequenza di bit che rappresenta. Nello specifico la modulazione 4-ask sfrutta uno schema di codifica a quattro livelli il quale è adatto a rappresentare due bit con ciascuna variazione di ampiezza.

Per questo motivo i due segnali assumono i quattro livelli di ampiezza relativi agli assi delle ascisse e delle ordinate del diagramma della costellazione.

Per poter demodulare i due segnali è necessario ottenere due bit da ogni ramo per ogni livello di tensione (rispettando l'ordine relativo al simbolo ricevuto) in modo da combinarli ed ottenere in uscita una sequenza di bit che sia uguale a quella originale, andando così infine a ricostruire il bit stream sorgente.

**Figura 15.** Diagramma costellazione con relative sequenze di bit per ogni simbolo.

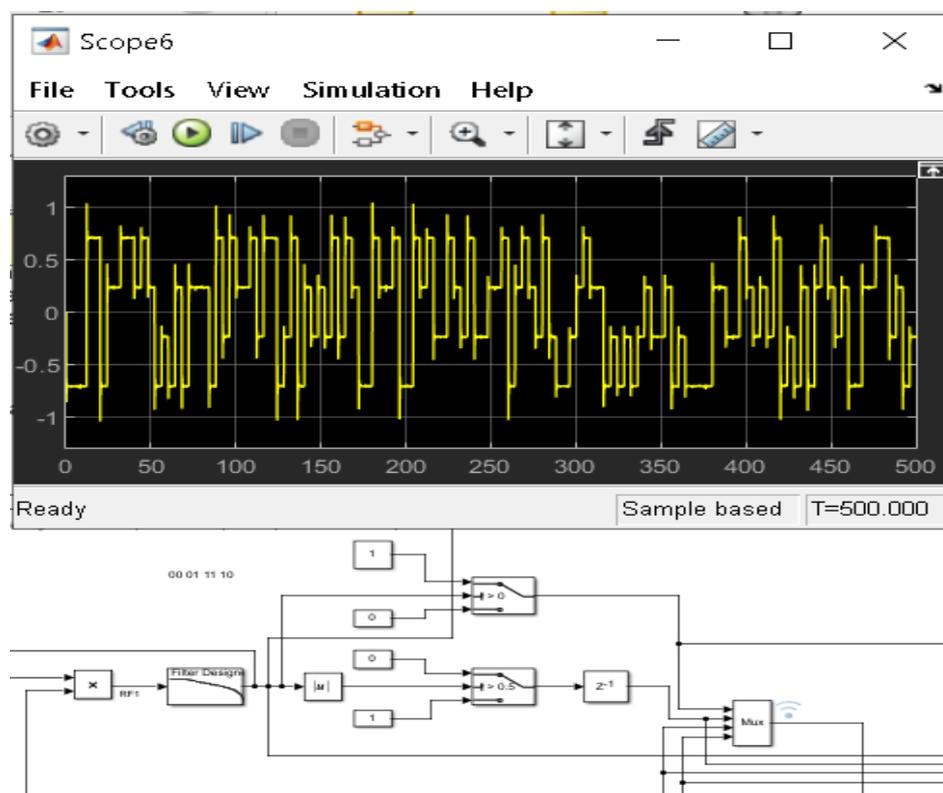


Per demodulare è stato quindi necessario implementare un decisore tramite un sistema di confronti con delle costanti che rappresentano parte dei valori delle ampiezze presenti sull'asse delle ascisse e delle ordinate del diagramma della costellazione.

Questo metodo comporta una relazione univoca tra i valori in tensione del segnale ed il pattern di bit generato.

I valori sull'asse delle ascisse influenzano i primi due bit della sequenza mentre i valori sulle ordinate influenzano la seconda coppia di bit.

*Figura 16. Demodulatore 4-ask (ramo superiore).*

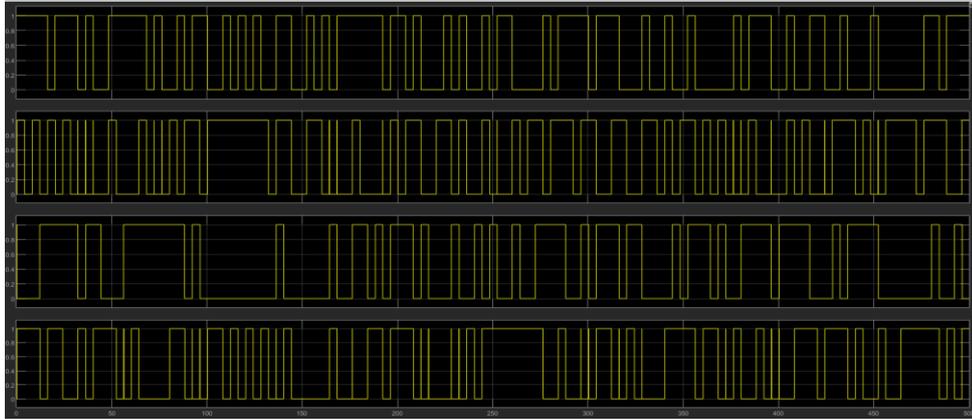


Allo scopo di ricostruire la corretta coppia di bit su ogni ramo relativa ai valori di ampiezza del segnale sono stati quindi utilizzati dei blocchi chiamati Switch, i quali forniscono in uscita un valore 1 o 0 in base ad una condizione imposta nei parametri, nel progetto in questione il ramo superiore è indice dell'asse delle ascisse mentre quello inferiore delle ordinate.

Ogni ramo per dare in uscita due bit necessita di due Switch e quindi di due condizioni, nel ramo superiore se l'ingresso è maggiore di zero il primo switch darà in uscita un 1 altrimenti uno 0 mentre l'altro Switch nel caso di un ingresso in modulo maggiore di 0.5 darà in uscita uno 0 o altrimenti un 1 in caso contrario. Questo permette di generare le 4 possibili combinazioni dei due bit variabili sull'asse delle ascisse.

Per quanto riguarda il ramo inferiore vale la stessa dinamica ma con condizioni leggermente diverse. I blocchi Delay vengono utilizzati per ritardare le uscite e far sì che rispettino l'ordine dei bit nella costellazione, ciò permette al blocco Mux di convertire i bit al suo ingresso da parallelo a serie rispettando la giusta sequenza.

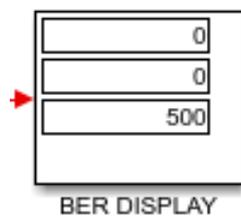
**Figura 17.** Sequenze di bit provenienti dagli switch.



Infine l'uscita del Mux, ovvero il bit stream ricostruito, viene confrontata con la sequenza iniziale tramite il blocco Error Rate Calculation.

Il risultato può essere visionato sul Display dove compaiono in ordine la percentuale di errore, il numero di errori avvenuti ed il numero totale di campioni analizzati.

**Figura 18.** Esempio di display con 500 campioni confrontati e un SNR di 50 dB.



### 4.3 Valutazione dell'effetto del Phase Noise sul bit error rate

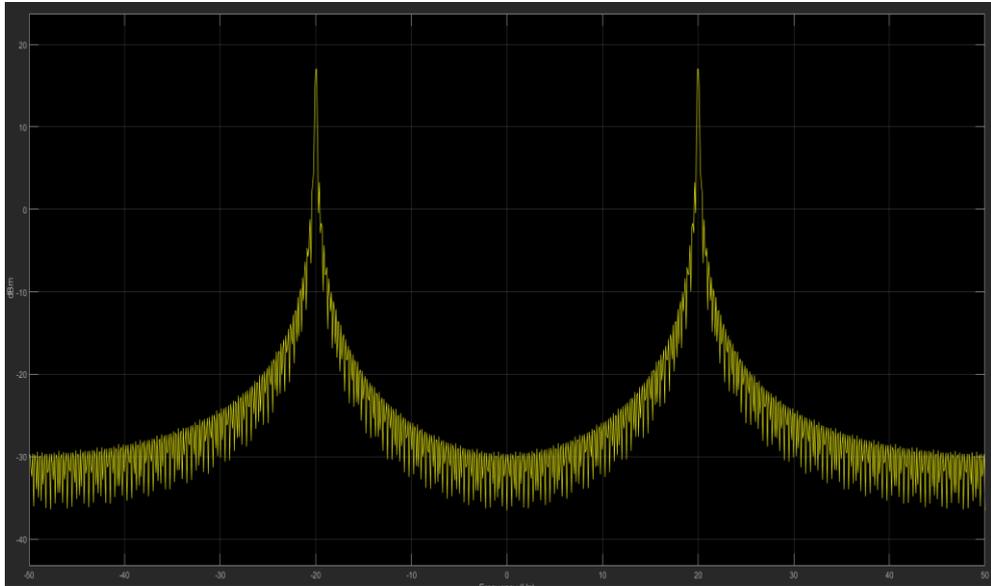
Allo scopo di valutare l'effetto del Phase Noise sul BER sono state effettuate svariate simulazioni del sistema di comunicazione variando i parametri di offset in frequenza e del Phase Noise level dei blocchi situati dopo gli oscillatori, essi rappresentano nella realtà il disturbo associato all'oscillatore stesso.

Come valore standard del rapporto segnale rumore è stato scelto 22dB il quale, omettendo il Phase Noise, si riflette in un BER basso del sistema di comunicazione ma non nullo, cioè un valore compreso tra l'1% ed il 2.4%. Inizieremo la valutazione da un valore minimo di Phase Noise level di -90dBc/Hz poiché valori inferiori hanno un effetto trascurabile sul sistema.

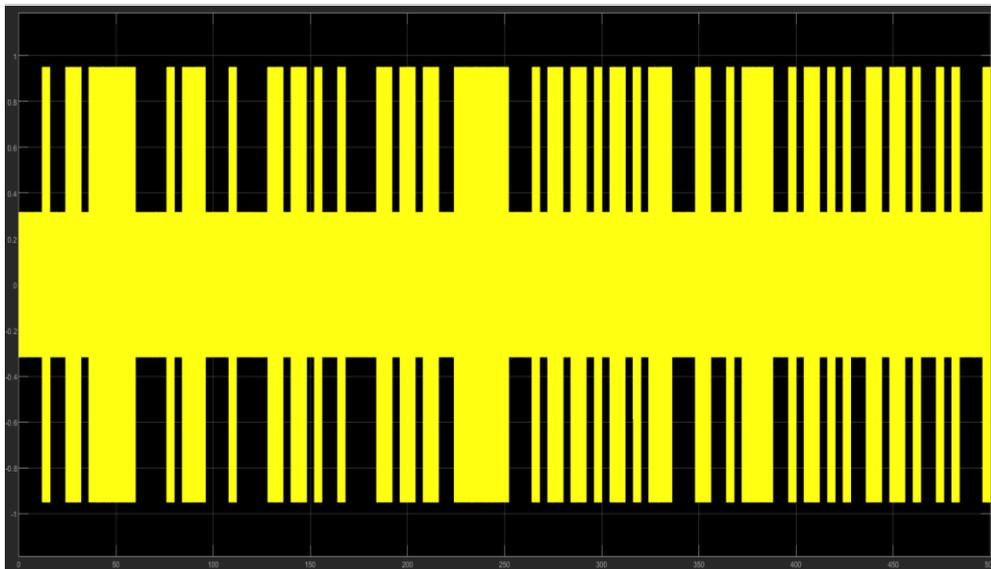
- SNR: 22dB Phase Noise: non inserito BER: 1-2.4%

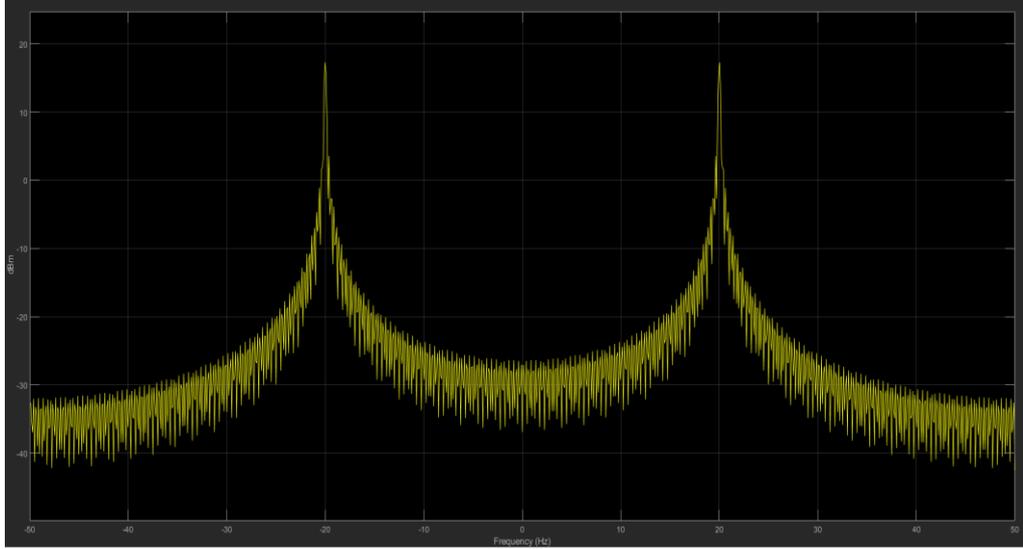
*Figura 19. Prodotto tra la parte reale del segnale modulato 16-QAM ed il coseno nel tempo ed in frequenza.*



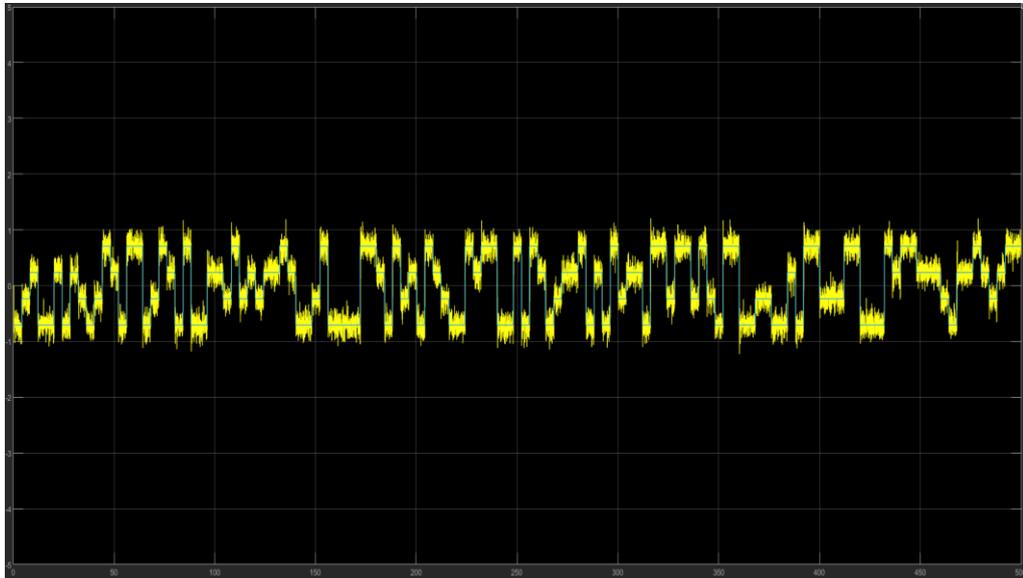


*Figura 20. Prodotto tra la parte immaginaria del segnale modulato 16-QAM ed il seno nel tempo ed in frequenza.*

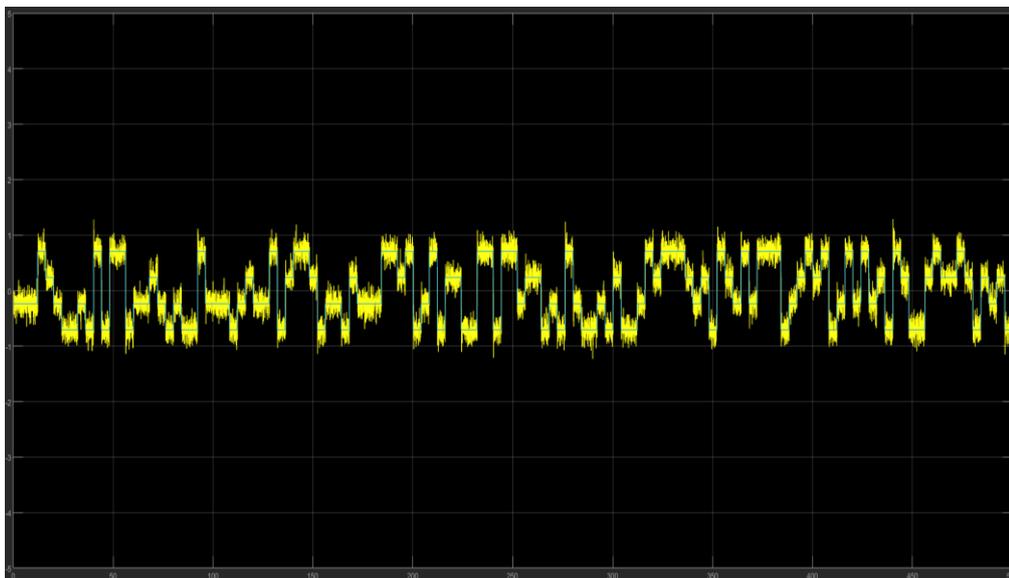




*Figura 21. Confronto tra la parte reale del segnale modulato(blu) e la parte reale recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo.*



*Figura 22. Confronto tra la parte immaginaria del segnale modulato(blu) e la parte immaginaria recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo.*



Osservando le figure è chiaro che sebbene il BER non sia nullo, le linee spettrali in frequenza sono ben distinguibili e nel tempo la parte reale ed immaginaria del segnale assumono valori di ampiezza che il decisore riesce agevolmente a distinguere seppure la forma d'onda ottenuta in ricezione non sia perfettamente uguale a quella in trasmissione.

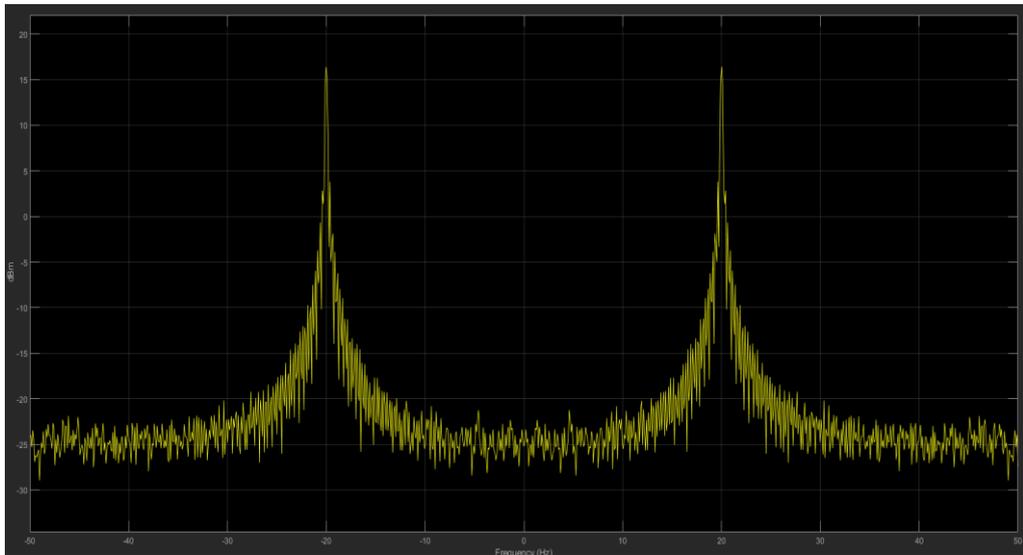
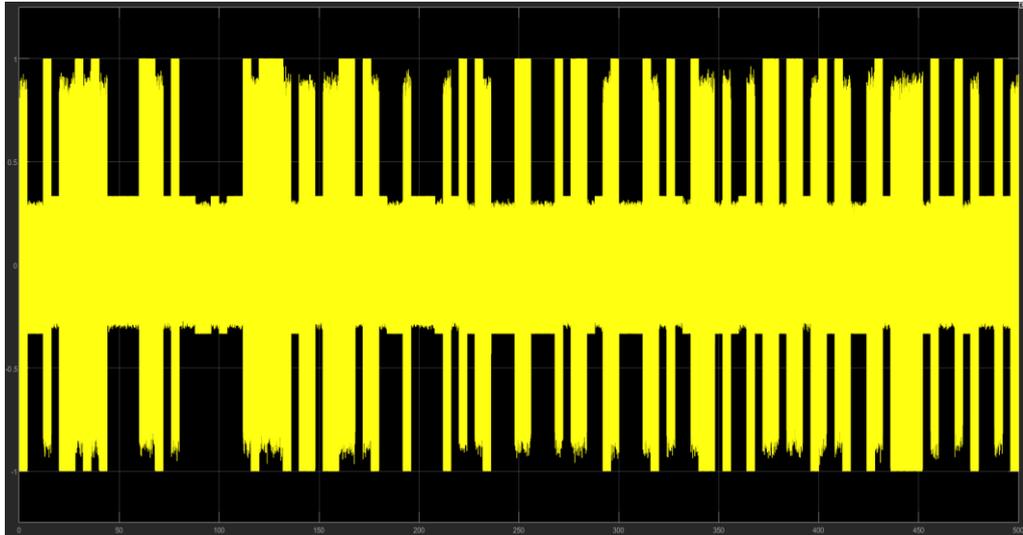
Questo fenomeno di disturbo è dovuto al rumore bianco Gaussiano introdotto dal canale di comunicazione che si somma al segnale trasmesso.

- SNR: 22 dB Phase Noise: [-50, -70, -90] dBc/Hz

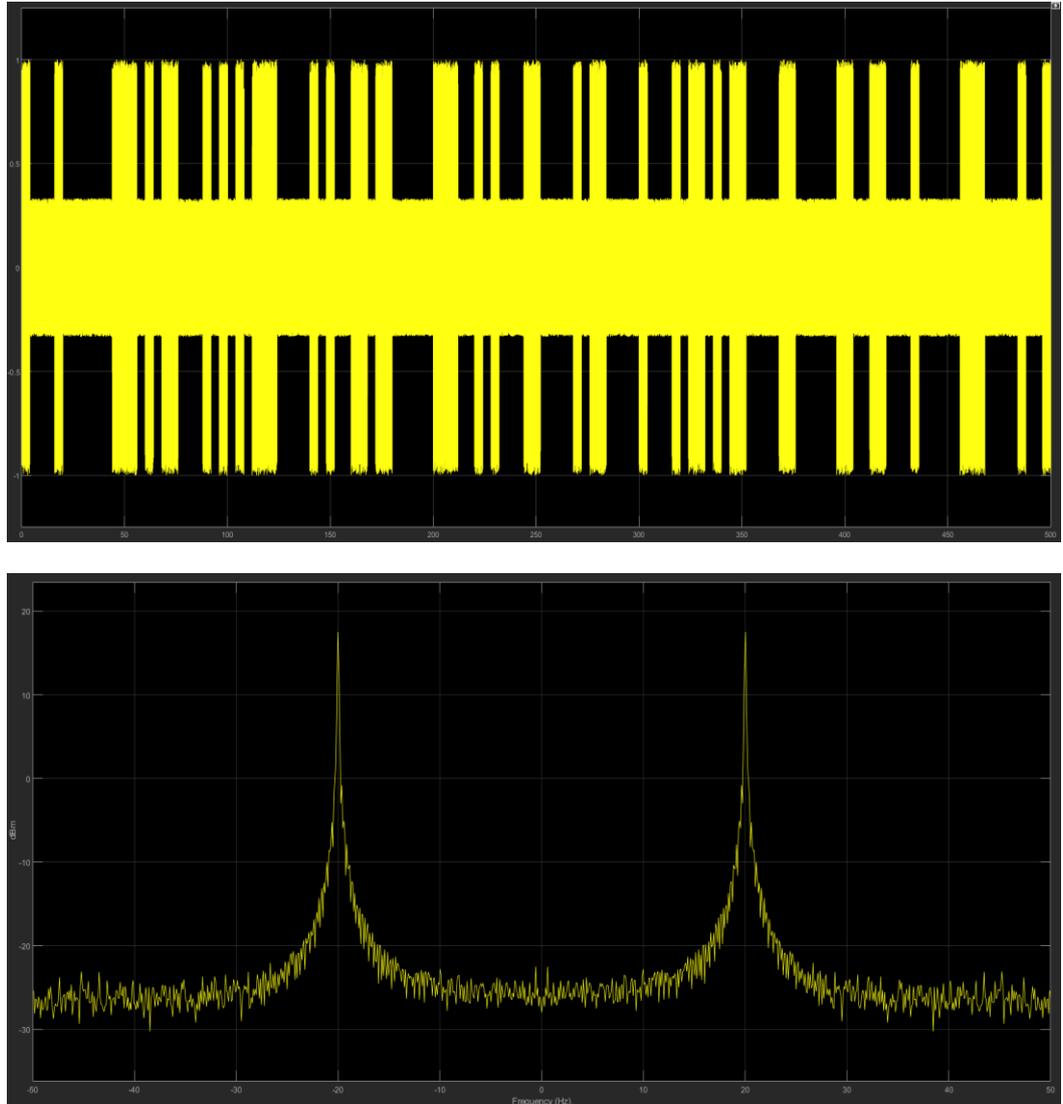
Offset frequenza: [5, 50, 100] Hz	BER: 1 – 2.4%
[10, 100, 150] Hz	BER: 1 – 2.4%
[50, 100, 150] Hz	BER: 1.2 – 2.6%
[100, 150, 200] Hz	BER: 1.4 - 3%
[350, 450, 500] Hz	BER: 1.6 – 3.4%

Come è possibile osservare dai dati raccolti l'introduzione del Phase Noise ha comportato un aumento del BER, seppure quest'ultimo sia di poco conto a causa del livello impostato nei parametri che ancora risulta piuttosto basso. Nelle immagini sono riportati i casi con offset in frequenza di [50, 100, 150] Hz, nel tempo sono stati analizzati 500 campioni.

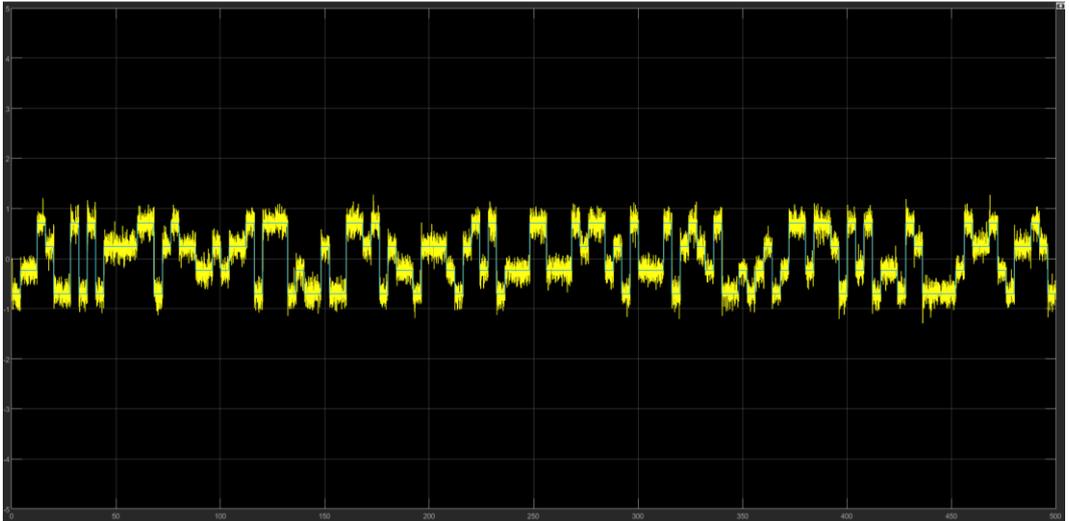
*Figura 23. Prodotto tra la parte reale del segnale modulato 16-QAM ed il coseno nel tempo ed in frequenza con  $PN = [-50, -70, -90]$  dBc/Hz.*



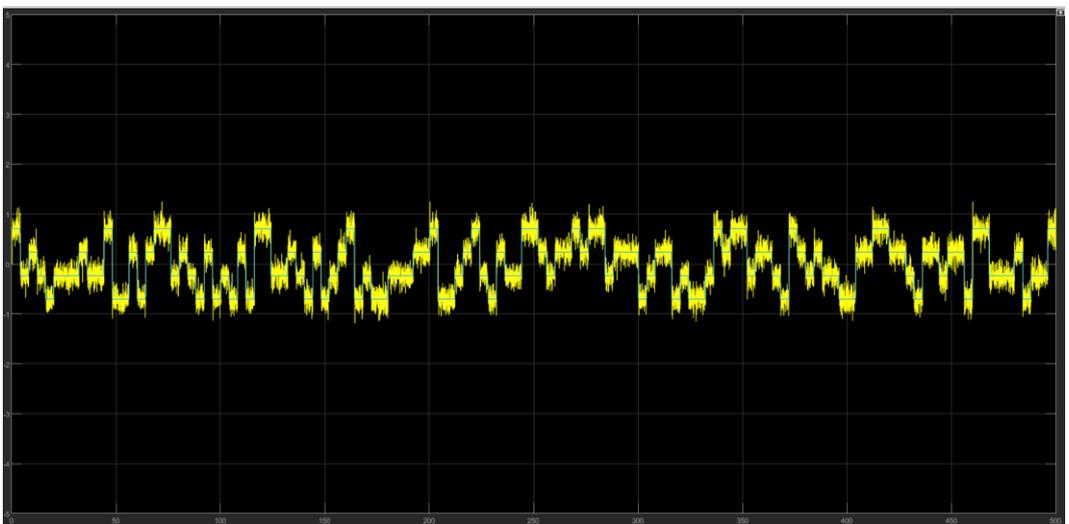
*Figura 24. Prodotto tra la parte immaginaria del segnale modulato 16-QAM ed il seno nel tempo ed in frequenza con  $PN = [-50, -70, -90]$  dBc/Hz.*



*Figura 25. Confronto tra la parte reale del segnale modulato(blu) e la parte reale recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo con  $PN = [-50, -70, -90]$ .*



*Figura 26. Confronto tra la parte immaginaria del segnale modulato(blu) e la parte immaginaria recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo con  $PN = [-50, -70, -90]$ .*



Anche in questo caso, essendo trascurabile l'entità del Phase Noise, valgono le stesse considerazioni del caso precedente, è però possibile notare che nelle rappresentazioni in frequenza il livello del rumore è aumentato rispetto al caso senza Phase Noise.

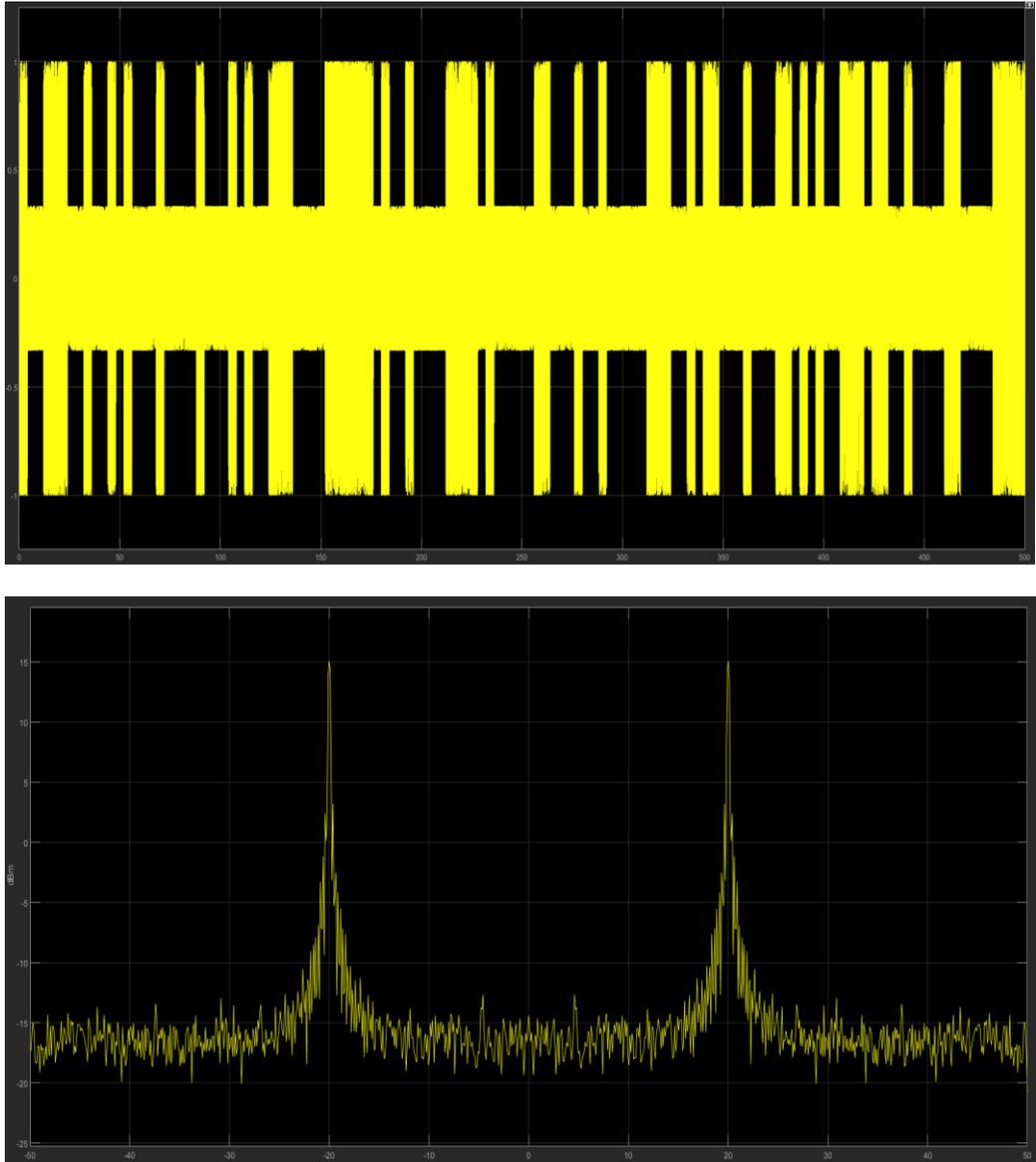
- SNR: 22 dB Phase Noise: [-40, -40, -40] dBc/Hz

Offset frequenza: [5, 50, 100] Hz	BER: 7 - 10%
[10, 100, 150] Hz	BER: 8 - 11.2%
[50, 100, 150] Hz	BER: 9.2 - 13.6%
[100, 150, 200] Hz	BER: 10 - 13.6%
[200, 250, 300] Hz	BER: 10.4 - 15.4%
[300, 400, 500] Hz	BER: 10.4 - 15.4%

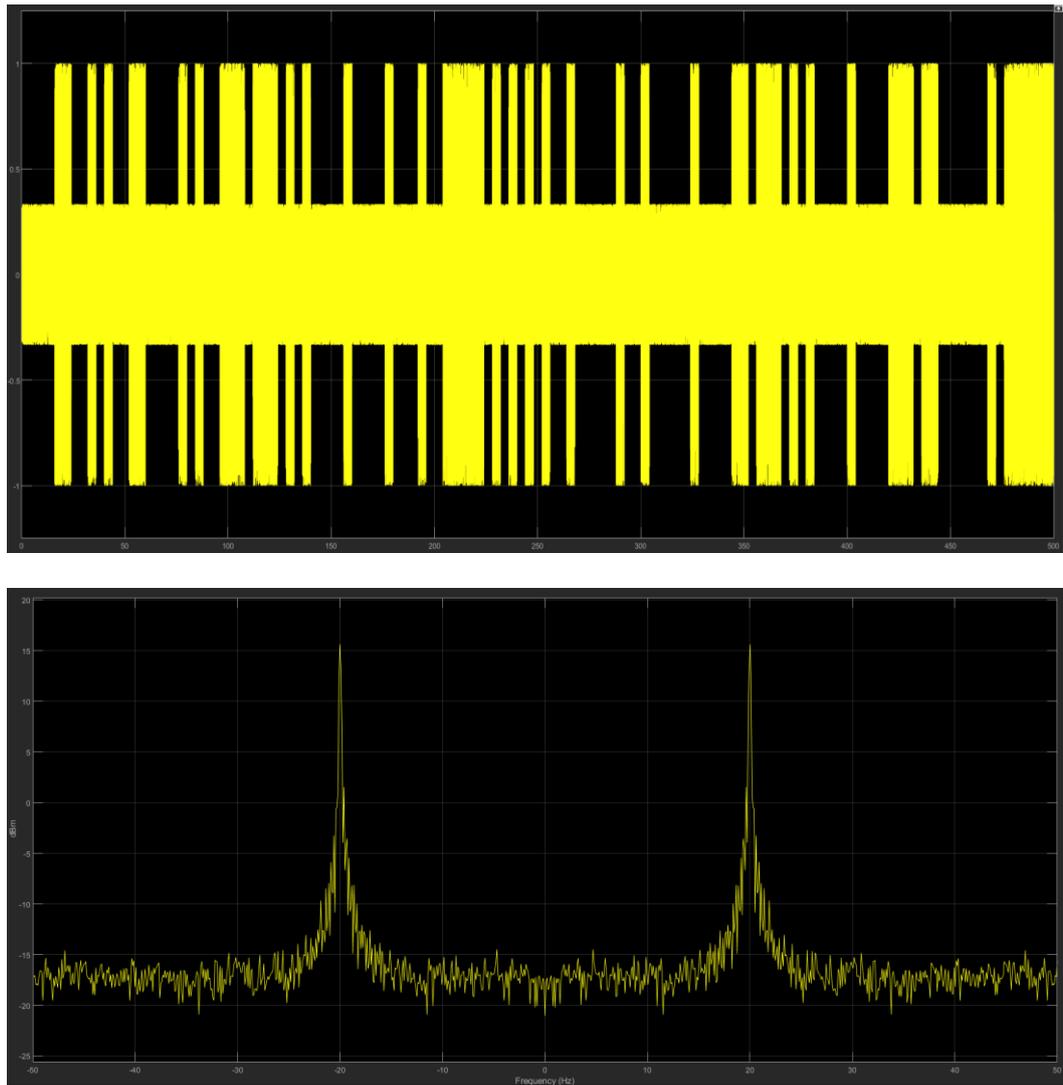
Da questi valori di Phase Noise è evidente il sensibile aumento del BER che passa da un massimo del 3.4% del caso precedente a circa un massimo del 15% nel caso in esame, inoltre è possibile osservare anche che quest'ultimo è influenzato in parte anche dai valori assunti dall'offset in frequenza.

Dai dati raccolti risulta che il BER aumenta all'aumentare dei valori di offset fino a circa i 200 Hz dopodiché si stabilizza mantenendosi in un range costante.

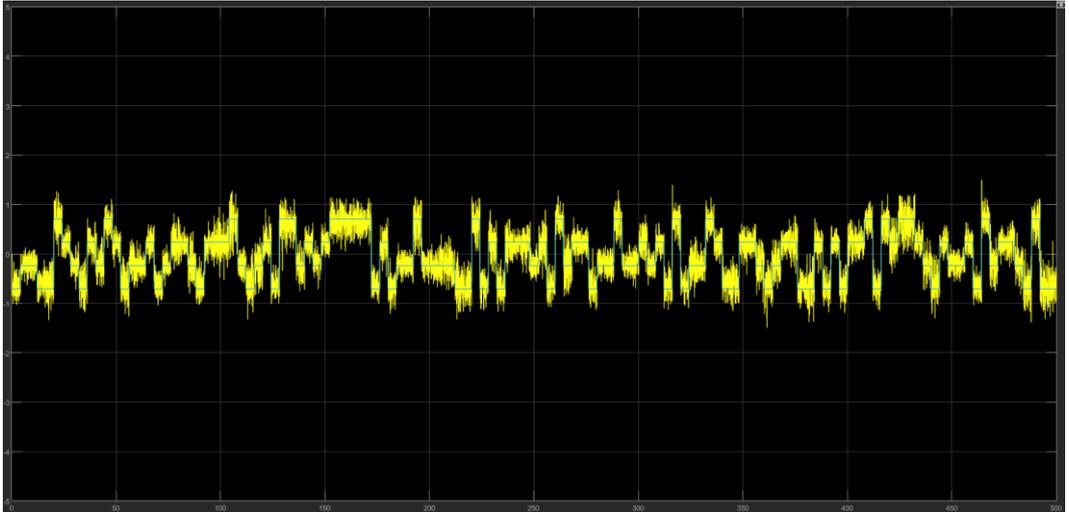
*Figura 27. Prodotto tra la parte reale del segnale modulato 16-QAM ed il coseno nel tempo ed in frequenza con  $PN = [-40, -40, -40]$  dBc/Hz.*



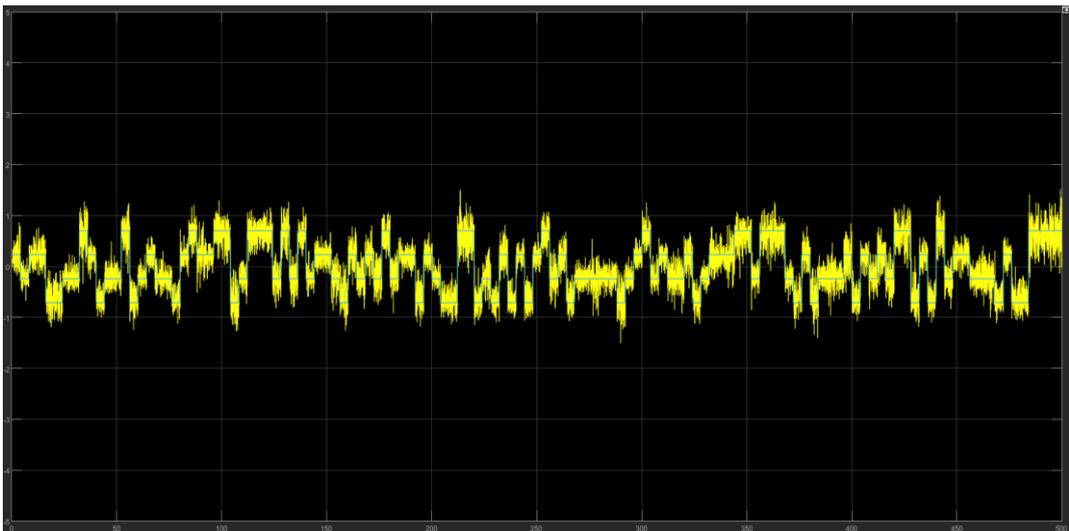
*Figura 28. Prodotto tra la parte immaginaria del segnale modulato 16-QAM ed il seno nel tempo ed in frequenza con  $PN = [-40, -40, -40]$  dBc/Hz.*



*Figura 29. Confronto tra la parte reale del segnale modulato(blu) e la parte reale recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo con  $PN = [-40, -40, -40]$  dBc/Hz.*



*Figura 30. Confronto tra la parte immaginaria del segnale modulato(blu) e la parte immaginaria recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo con  $PN = [-40, -40, -40]$  dBc/Hz.*



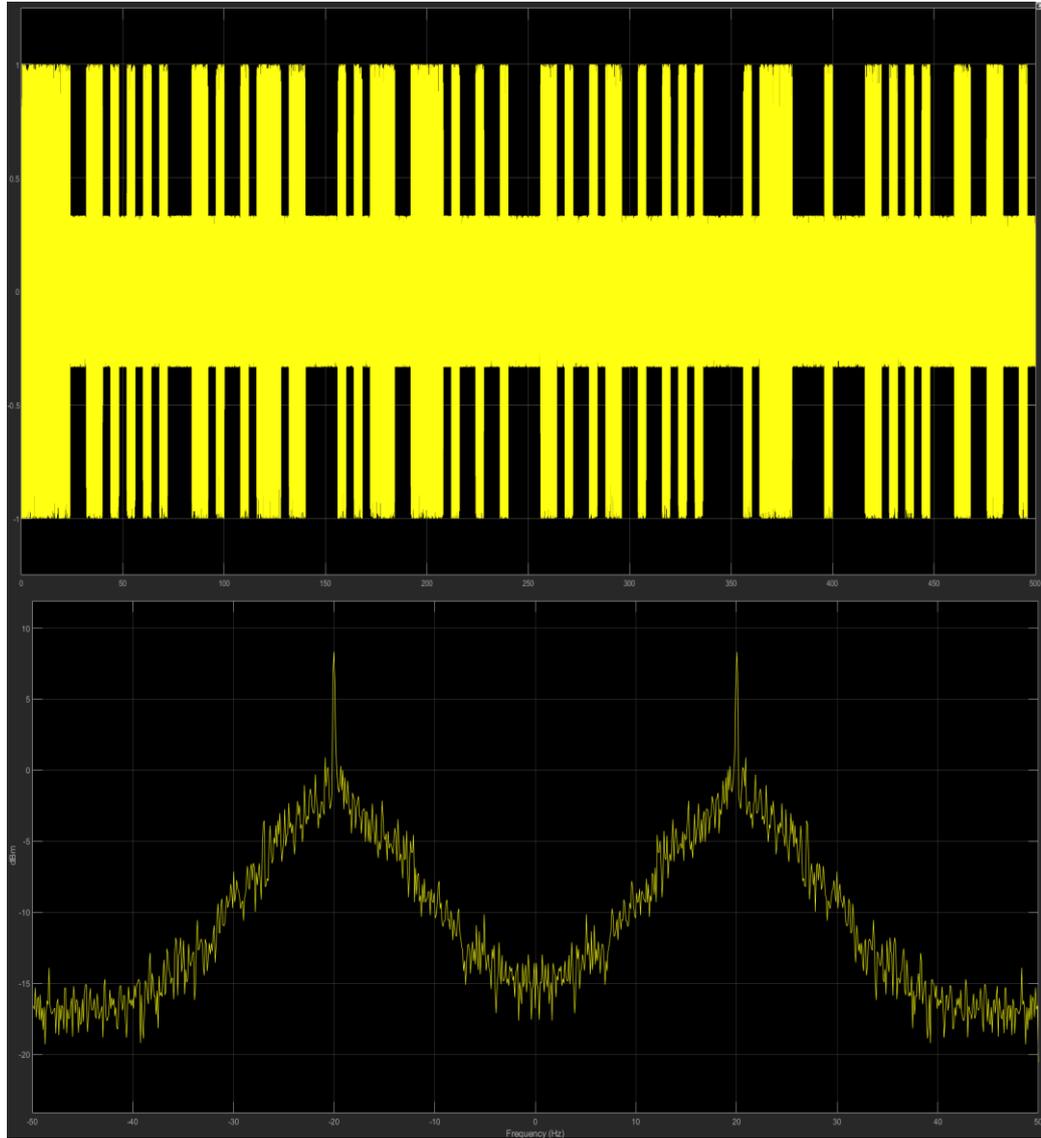
Dalle figure è chiaro che il livello di rumore si è innalzato ulteriormente e questo si riflette ampiamente anche sulla parte reale ed immaginaria ottenute in ricezione dopo la conversione in frequenza, infatti i livelli di ampiezza non sono più facilmente distinguibili dal decisore e ciò comporta un aumento del BER.

- SNR: 22 dB Phase Noise: [-20, -30, -40] dBc/Hz

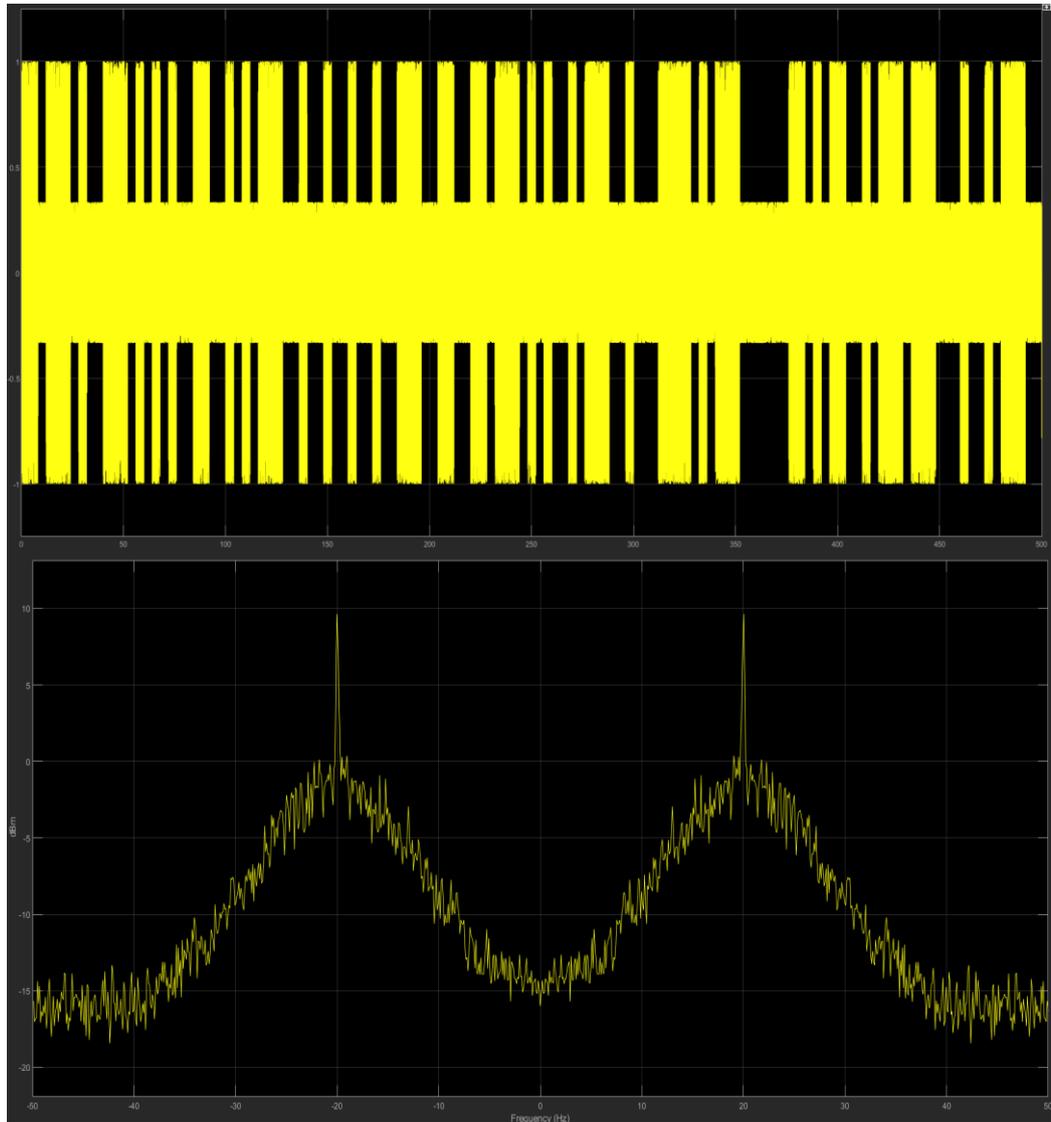
Offset frequenza: [5, 50, 100] Hz	BER: 23 - 26%
[10, 100, 150] Hz	BER: 30 – 34.4%
[50, 100, 150] Hz	BER: 37.6 – 42.4%
[100, 150, 200] Hz	BER: 44.4 – 48.6%

Aumentando ulteriormente il Phase Noise otterremo un aumento drastico anche del BER che arriva ad un valore circa del 50%, in questo caso è evidente anche l'effetto della variazione dell'offset in frequenza la quale impatta largamente sui risultati e sulle figure successive.

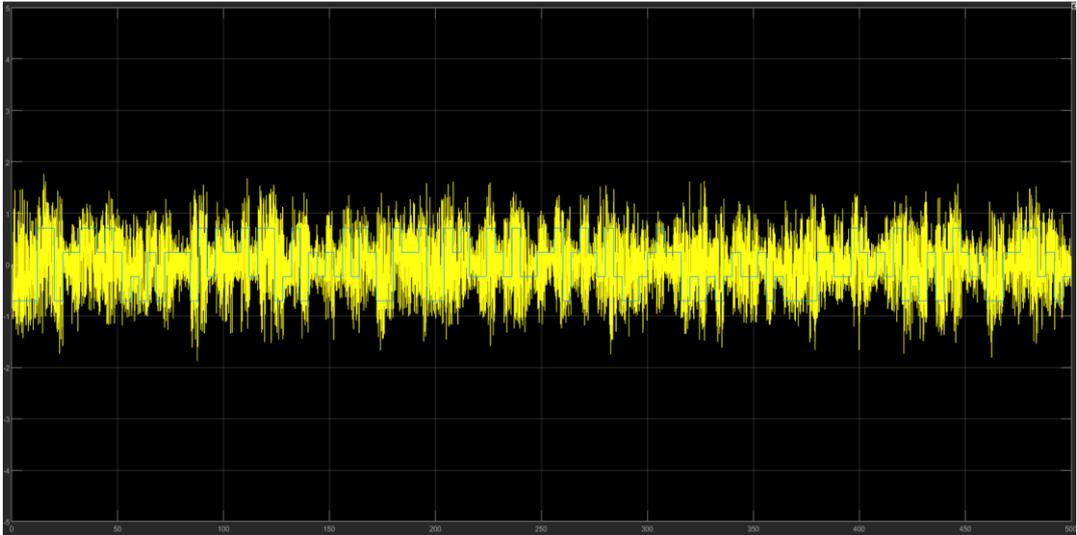
*Figura 31. Prodotto tra la parte reale del segnale modulato 16-QAM ed il coseno nel tempo ed in frequenza con  $PN = [-20, -30, -40]$  dBc/Hz.*



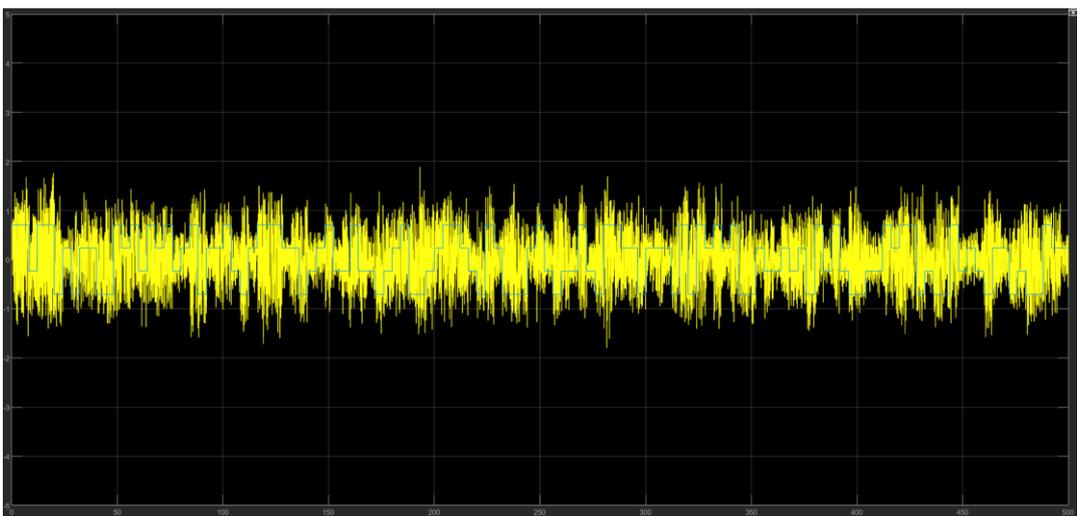
*Figura 32. Prodotto tra la parte immaginaria del segnale modulato 16-QAM ed il seno nel tempo ed in frequenza con  $PN = [-20, -30, -40]$  dBc/Hz.*



*Figura 33. Confronto tra la parte reale del segnale modulato(blu) e la parte reale recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo con  $PN = [-20, -30, -40]$  dBc/Hz.*



*Figura 34. Confronto tra la parte immaginaria del segnale modulato(blu) e la parte immaginaria recuperata dopo la conversione in frequenza in ricezione(giallo) nel tempo con  $PN = [-20, -30, -40]$  dBc/Hz.*



Dalle figure si evince che il segnale non è più distinguibile poiché coperto dal rumore, questo è chiaro sia nelle rappresentazioni nel tempo che in frequenza.

In particolare le parti reale ed immaginaria del segnale recuperate in ricezione non assumono livelli di ampiezza distinguibili a causa del Phase Noise, questo significa che il decisore non sarà in grado di recuperare la sequenza di bit correttamente e ciò risulterà in un BER di circa 50%, valore che può essere ottenuto anche assegnando i valori casualmente.

In seguito riporterò gli altri dati raccolti che come vedremo da qui rimarranno pressoché costanti sia all'aumentare del livello del Phase Noise sia dell'offset in frequenza.

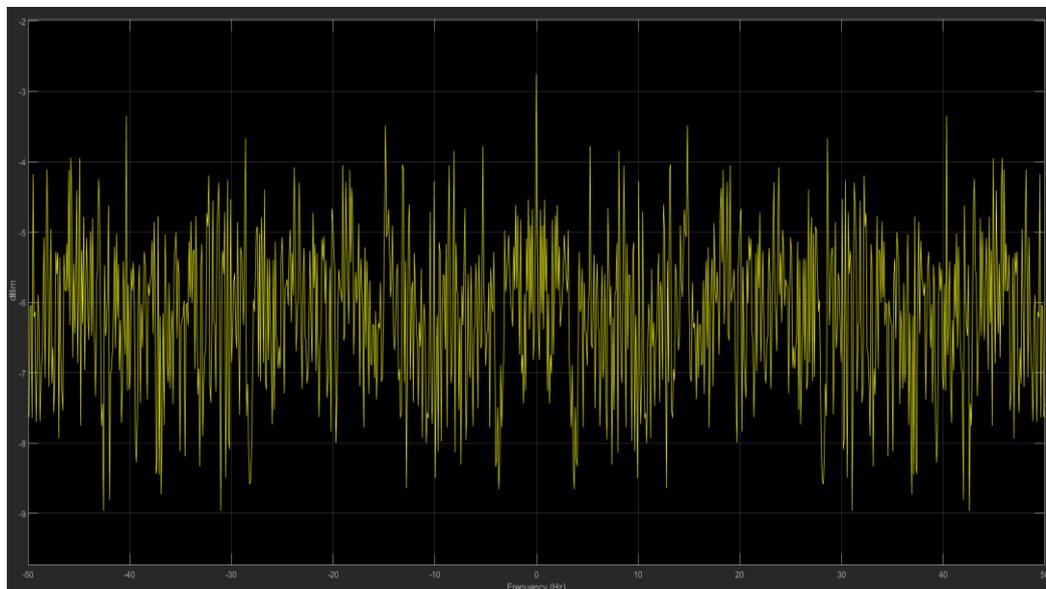
- SNR: 22 dB Phase Noise: [-20, -20, -20] dBc/Hz  
Offset frequenza: [5, 50, 100] Hz BER: 44 - 49%  
[10, 100, 150] Hz BER: 44 - 49%  
[50, 100, 150] Hz BER: 44 - 49%  
[100, 150, 200] Hz BER: 44 - 49%

- SNR: 22 dB Phase Noise: [-10, -10, -10] dBc/Hz
 

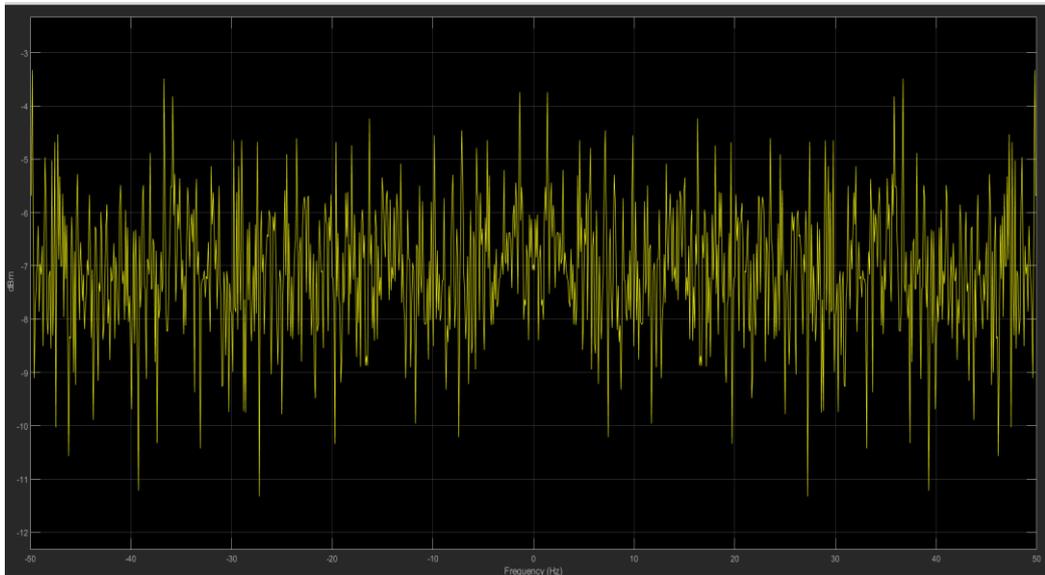
Offset frequenza: [5, 50, 100] Hz	BER: 44 - 49%
[10, 100, 150] Hz	BER: 44 - 49%
[50, 100, 150] Hz	BER: 44 - 49%
[100, 150, 200] Hz	BER: 44 - 49%

Di quest'ultimo caso andrò a mostrare, nelle figure successive, che il rumore ha coperto completamente i segnali in frequenza rendendo non più visibili le righe spettrali.

*Figura 35. Prodotto tra la parte reale del segnale modulato 16-QAM ed il coseno in frequenza con  $PN = [-10, -10, -10]$  dBc/Hz.*



**Figura 36.** Prodotto tra la parte immaginaria del segnale modulato 16-QAM ed il seno nel tempo ed in frequenza con  $PN = [-10, -10, -10]$  dBc/Hz.



## CAPITOLO 5. CONCLUSIONI

Il rumore di fase negli oscillatori è uno dei problemi relativi al comparto hardware e risulta sicuramente un fattore limitante nei sistemi di comunicazione digitale ad alta velocità di trasmissione dati.

Tutti gli elementi di un sistema di comunicazione sono costituiti da dispositivi elettronici come resistori, induttori, condensatori, diodi e transistor, i quali sono composti da materiali conduttori e semiconduttori.

Questi componenti elettronici non sono ideali e possono comportarsi in modo diverso da quanto previsto, questo avviene per molte ragioni: la variazione di temperatura, l'invecchiamento, o la pressione su di loro esercitata. Le problematiche relative al comparto hardware sono quindi una conseguenza inevitabile dell'utilizzo di componenti non ideali nei sistemi di comunicazione.

Gli oscillatori sono uno dei principali elementi costitutivi di un sistema di comunicazione, nel progetto illustrato nella trattazione il loro ruolo è nello specifico quello di convertire in frequenza i segnali in banda base e in banda traslata. Sfortunatamente ogni oscillatore reale, come evidenziato precedentemente, soffre di imperfezioni che introducono rumore di fase al sistema di comunicazione.

Il Phase Noise limita fortemente le prestazioni dei sistemi che impiegano costellazioni dense ed inoltre è possibile affermare che, il livello del rumore di fase (ad una data frequenza di offset) aumenta con la frequenza di portante, ciò significa che questo fenomeno risulta peggiorare nei sistemi che sfruttano portanti a frequenze elevate.

La progettazione di sistemi di comunicazione in presenza di rumore di fase è stato un campo attivo di ricerca negli ultimi decenni. L'obiettivo finale di tali studi è quello di raggiungere prestazioni vicine a quelle dei sistemi coerenti. Varie tecniche sono proposte per mitigare gli effetti dannosi del

rumore di fase, i metodi comunemente utilizzati possono essere classificati in tecniche “transmitter-side” e “receiver-side”.

Nelle tecniche transmitter-side, il segnale trasmesso viene manipolato prima della trasmissione per renderlo maggiormente immune alle distorsioni dovute al rumore di fase. Adottare tecniche di design della costellazione e di modulazione differenziale rientra in questa categoria.

Le tecniche receiver-side si basano principalmente sul tracciamento/stima del rumore di fase. I metodi di tracciamento (ad es. phase tracking loops) riducono la variazione di fase del segnale ricevuto mentre nelle tecniche di stima vengono forniti un valore stimato del rumore di fase o le sue statistiche, le quali possono essere ulteriormente utilizzate per il rilevamento dei simboli.





## BIBLIOGRAFIA

- Keysight Technologies-Phase Noise Measurement Fundamentals-Webina(Settembre 2020).
- Dispense del corso di Sistemi di telecomunicazione, Prof. De Santis.
- Dispense del corso di Teoria dei segnali, Prof. Chiaraluce.
- Dispense del corso di Telecomunicazioni, Prof. Chiaraluce.
- M. Luise, G. M. Vitetta, “Teoria dei Segnali”, Terza Edizione, McGraw-Hill, 2009.
- John G. Proakis, Masoud Salehi, “Communication Systems Engineering”, 2nd Edition, Prentice Hall, 2002.

## SITOGRAFIA

<https://www.slideshare.net/fiberoptics4sale/what-is-16-qam-modulation>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature\\_amplitude\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation)

[Modulation Methods | Utran Wiki | Fandom](#)

[main.dvi \(chalmers.se\)](#)