

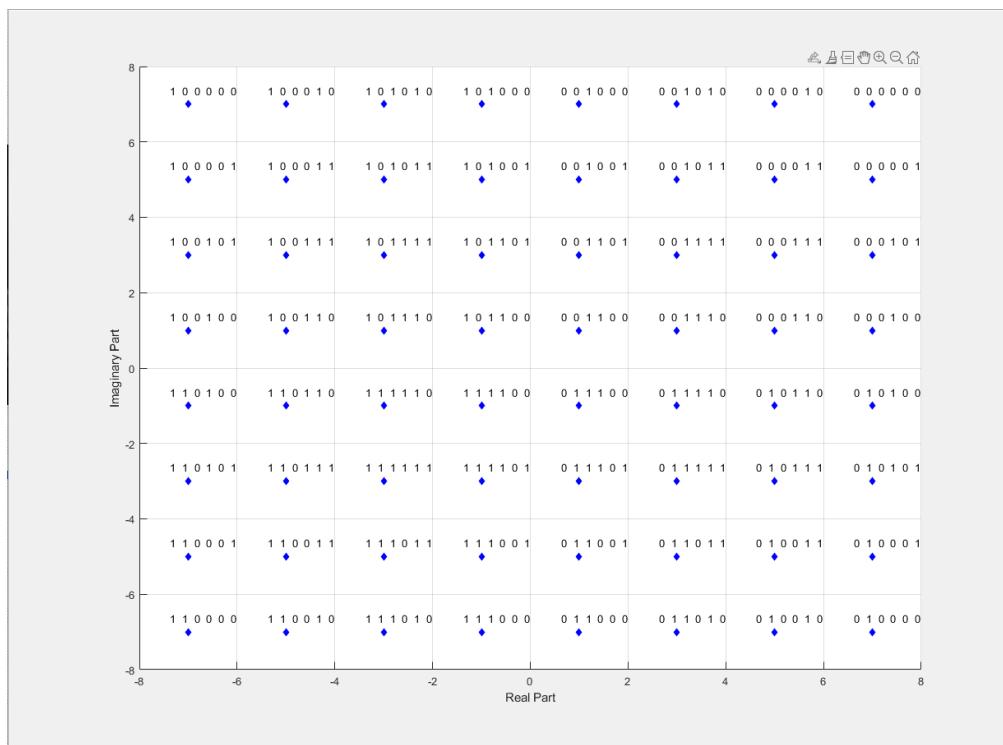
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΑΜ: 03120233 Ονοματεπώνυμο: Χρήστος Ηλιακόπουλος**

5<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση

**1<sup>ο</sup> Μέρος:**

Σχεδιάζουμε σηματικό αστερισμό 64-QAM πλήρους ορθογωνικού πλέγματος, με σημειωμένες τις δυαδικές λέξεις δίπλα σε κάθε σημείο του με κωδικοποίηση Gray:



Χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές από τις γραμμές 26-34 του κώδικα 5.2 όπως ακριβώς ζητήθηκε από την εκφώνηση.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε:

```
clc;
close all;
clear all;

M = 64;
k = 6; %log2(64)
l = k/2;

% Διάνυσμα mapping για την κωδικοποίηση Gray M-QAM
% Αφορά σε πλήρες ορθογωνικό πλέγμα σημείων, διάστασης M=L2
% l=log2(L): αριθμός bit ανά συνιστώσα (inphase, quadrature)
core=[1+i;1-i;-1+i;-1-i]; % τετριμμένη κωδικοποίηση, M=4
mapping=core;
if(l>1)
    for j=1:l-1
        mapping=mapping+j*2*core(1);
        mapping=[mapping;conj(mapping)];
        mapping=[mapping;-conj(mapping)];
    end
end;

scatter(real(mapping), imag(mapping),'filled','Marker', 'd', 'MarkerFaceColor',
'b');
xlabel("Real Part");
ylabel("Imaginary Part");
grid on; %adding grid
for i=1:M
    text(real(mapping(i))-1/8,imag(mapping(i))+1/8,num2str(de2bi(i-1,k,'left-
msb')), 'FontSize', 10);
end
```

## 2<sup>ο</sup> Μέρος:

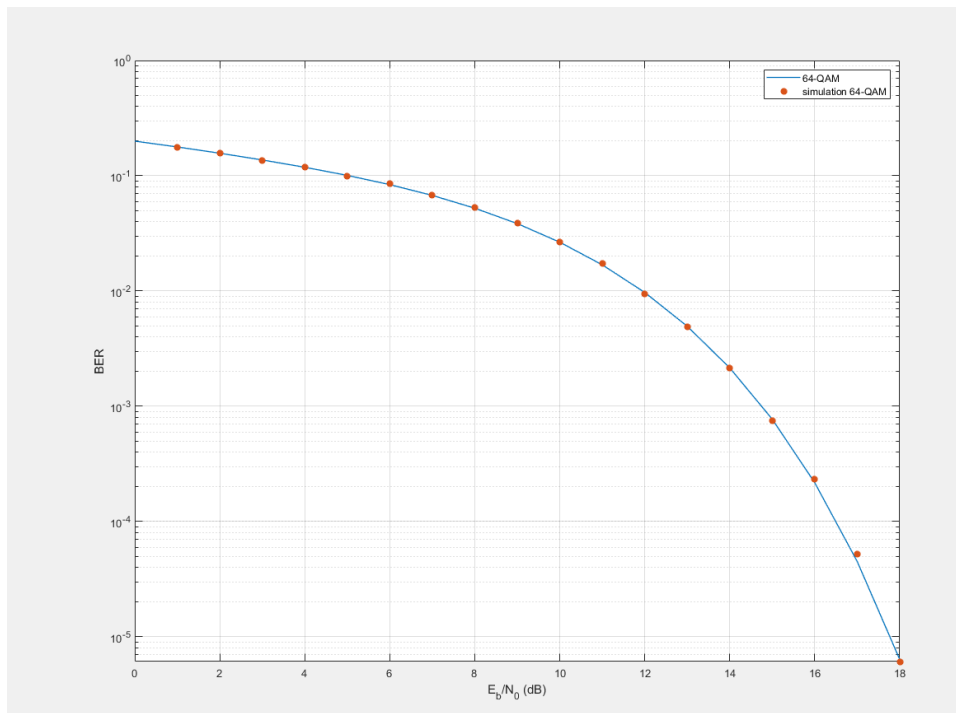
Χρησιμοποιούμε ζωνοπερατό δίαυλο 8.75-11.25 Mhz και θέλουμε ρυθμό εκπομπής  $R=12\text{Mbps}$  και  $W = 11.25-8.75 = 2.5 \text{ Mhz}$ .

Για να καταφέρουμε να έχουμε το ελάχιστο δυνατό  $M$ , συμπεριλαμβανομένου ότι το  $M$  παίρνει τιμές ίσες με δυνάμεις του 2 ( $M = 2^k, K=2,4,6,8,\dots$ ) θα αξιοποιήσουμε τις σχέσεις που μας δίνονται στο θεωρητικό κομμάτι και τα δεδομένα που έχουμε. Γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης  $R(\text{bits/sec})$  συνδέεται με το ρυθμό μετάδοσης  $1/T(\text{Baud rate})$ , αλλά και με το μέγεθος σηματοδότη  $M$ , με τη σχέση  $\frac{R}{\log_2 M} = \frac{1}{T}$ . Το απαιτούμενο εύρος ζώνης για ζωνοπερατή μετάδοση με σηματοδοσία Nyquist, ισούται με  $W = \frac{1}{2T}(1+a)$  όπου  $a$  ο συντελεστής εξάπλωσης (roll-off factor) του φίλτρου Nyquist. Προκύπτει, λοιπόν, από το συνδυασμό των παραπάνω ότι  $\log_2 M \geq \frac{R}{W}(1+a)$ . Έχοντας ότι  $R=12\text{Mbps}$  και  $W = 2.5\text{Mhz}$  θα έχουμε ότι  $\log_2 M \geq 4.8(1+a)$  και δοκιμάζοντας αρχικά μία μικρή τιμή rolloff ( $a=0.1$ ) θα έχουμε ότι  $M = 2^k \geq 2^{5.28}$  και αφού το  $M$  έχει τιμές για  $k = 2, 4, 6, \dots$  στο πλήρες ορθογωνικό πλέγμα με κωδικοποίηση Gray σύμφωνα με τη θεωρία του βιβλίου, το ελάχιστο νούμερο που μπορεί να είναι το  $M$  είναι 64, δηλαδή  $k=6$  (bits ανά σύμβολο).

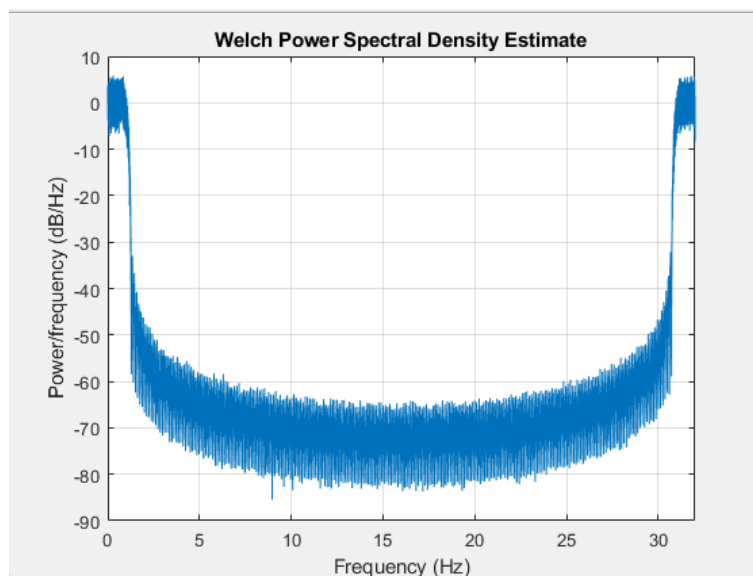
Έχοντας το  $M = 64$  βρίσκουμε ότι ο roll-off factor είναι 0.25, άρα  $a=0.25$ .

Στη συνέχεια δημιουργούμε την `gam_errors`, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην γνωστή συνάρτηση `ask_ber_func()` μέσω του `bertool`. Θα καταφέρουμε με αυτόν τον τρόπο να τον πομπό και τον δέκτη αλλά και να σχεδιάσουμε θεωρητικά και πειραματικά την καμπύλη  $P_b \rightarrow E_b/N_0$ .

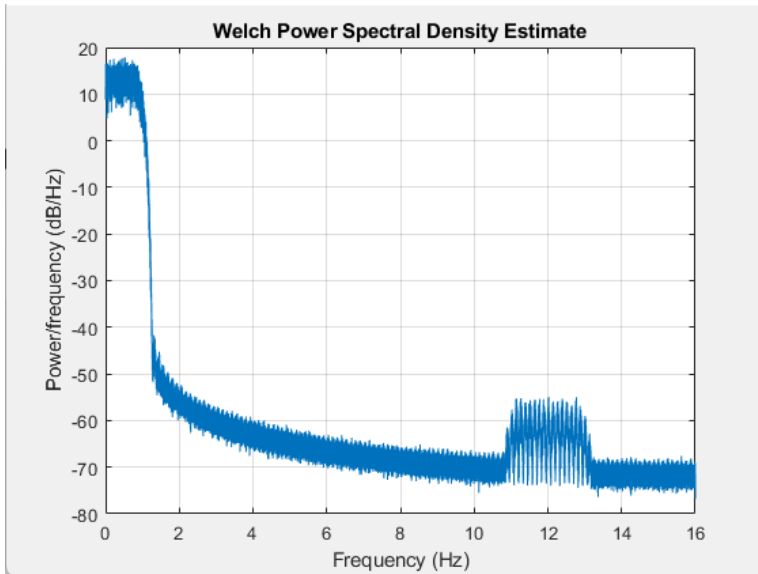
Έχουμε  $N_{\text{symb}} = 30000$ ,  $k=6$ ,  $n_{\text{samp}}=16$  και το διάγραμμα φαίνεται παρακάτω:



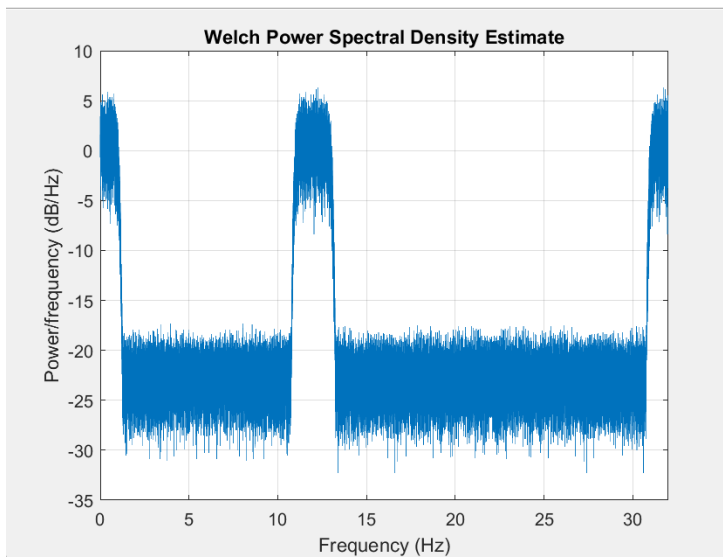
Παρακάτω εμφανίζονται επίσης και η πυκνότητα φάσματος ισχύος των σημάτων μας αλλά και το διάγραμμα αστερισμού για  $N_{\text{symb}} = 30000$ ,  $k=6$ ,  $n_{\text{samp}}=16$  και  $E_b/N_0=14$ .



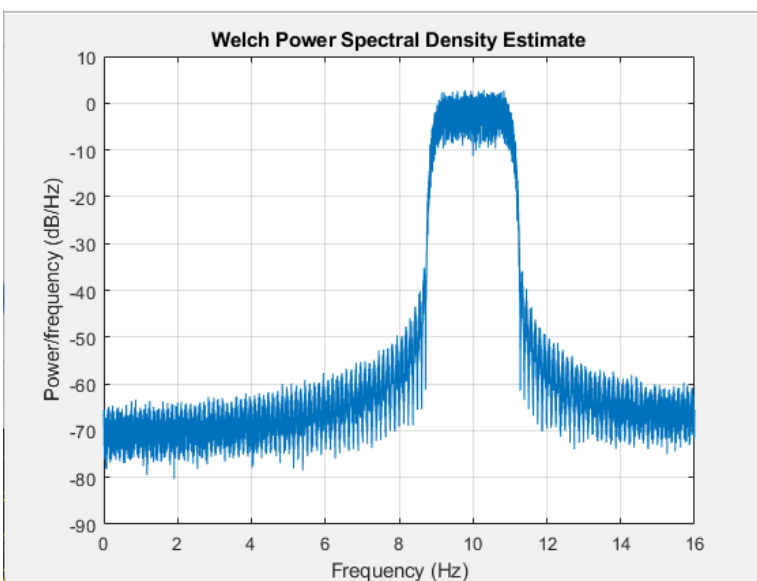
Το φάσμα ισχύος του γιγ:



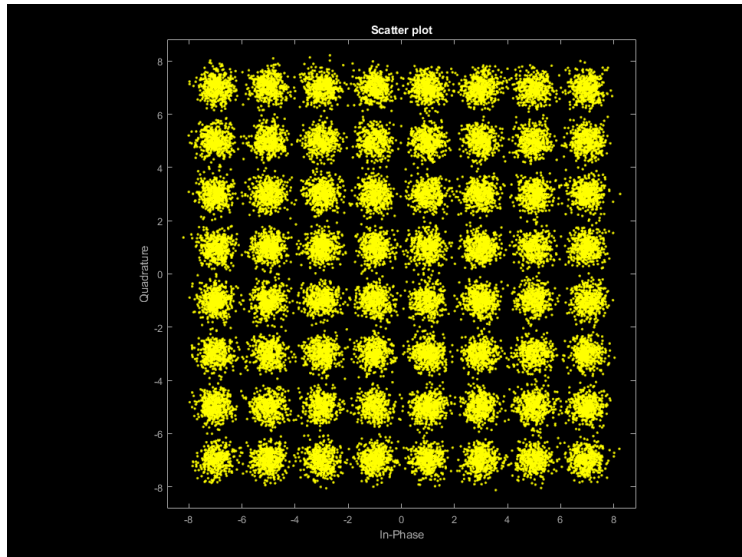
Το φάσμα ισχύος του  
yrx μετά το  
φιλτράρισμα και πριν  
την υποδειγμάτιση



Το φάσμα ισχύος του  
yrx μετά την  
αποδιαμόρφωση και πριν  
την υποδειγμάτιση



Το φάσμα ισχύος του  
σήματος s



Το διάγραμμα  
αστερισμού

### Ο κώδικας της qam\_errors():

```
function errors=qam_errors_a(k, Nsymb, nsamp, EbNo)

M = 2^k;
L = sqrt(M);
l = k/2;
fc = 10; % συχνότητα φέροντος, πολλαπλάσιο του Baud Rate (1/T)
SNR=EbNo-10*log10(nsamp/k/2); % SNR ανά δείγμα σήματος

a= 0.25; %όπως προκύπτει από το θεωρητικό μέρος από
        %από τη σχέση με το W και το R
rolloff = a; %συντελεστής εξάπλωσης φίλτρου

core=[1+1i;1-1i;-1+1i;-1-1i];
mapping=core;
if(l>1)
    for j=1:l-1
        mapping=mapping+j*2*core(1);
        mapping=[mapping;conj(mapping)];
        mapping=[mapping;-conj(mapping)];
    end
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ΠΟΜΠΟΣ %%%%%%%%%%%%%%
x=floor(2*rand(k*Nsymb,1)); % τυχαία δυαδική ακολουθία
xsym=bi2de(reshape(x,k,length(x)/k).','left-msb');
y=[];
for n=1:length(xsym)
    y=[y mapping(xsym(n)+1)];
end

scatterplot(y);
```

```

%%%%%%%%filter definition%%%%%%%%
delay = 8; %group delay of input symbols
filtorder = delay*nsamp*2;
%ο παράγοντας rolloff ορίστηκε προηγουμένως
%create a square root nyquist filter
rrcfilter = rcosine(1,nsamp,'fir/sqrt', rolloff, delay);

%%Transmitted signal%%
%upsample and apply square root Nyquist filter.
%it is performed on thw complex signal
ytx = upsample(y, nsamp);
ytx = conv(ytx, rrcfilter);%to pros ekpompsh shma
figure(10);
pwelch(ytx,[],[],[],nsamp*2);

%%Modulation%%diamorfwsh
W = 2.5; %Mhz
T = (1 + rolloff)/W; Fs = nsamp/T;
m = (1:length(ytx));
s = real(ytx.*exp(1j*2*pi*fc*m/nsamp));
figure(12);
pwelch(s,[],[],[],nsamp*2);

%%noise%%
snoisy = awgn(s, SNR,'measured'); %noisy signal
clear ytx;

%%RECEIVED SIGNAL%%apodiamorfwsh
%The filter which received the signal used square root Nyquist filter we
%created before
yrx = 2*snoisy.*exp(-1j*2*pi*fc*m/nsamp); clear noisy;
yrx = conv(yrx, rrcfilter);
figure(11);
pwelch(real(yrx),[],[],[],nsamp*2);

%%downsample%%
yrx = downsample(yrx, nsamp);
yrx = yrx(2*delay+1:end-2*delay); %account for delay

%yi=real(yrx); yq=imag(yrx); % συμφασική και εγκάρσια συνιστώσα
xrx = []; %διάνυσμα δυαδικής ακολουθίας εξόδου --αρχικά κενό

%finding the nearest qam point
%q=[-L+1:2:L-1];
%for n=1:length(yrx) % επιλογή πλησιέστερου σημείου
%[m,j]=min(abs(q-yi(n)));
%yi(n)=q(j);
%[m,j]=min(abs(q-yq(n)));
%yq(n)=q(j);
%m=1;
%while (mapping(m)~=yi(n)+i*yq(n)) m=m+1; end
%xrx=[xrx; de2bi(m-1,k,'left-msb')'];
%end

for n=1:length(yrx)
    [m,j] = min(abs(yrx(n)-mapping));
    xrx=[xrx; de2bi(j-1,k,'left-msb')'];

```

```

end
errors = sum(not(xrx == x));

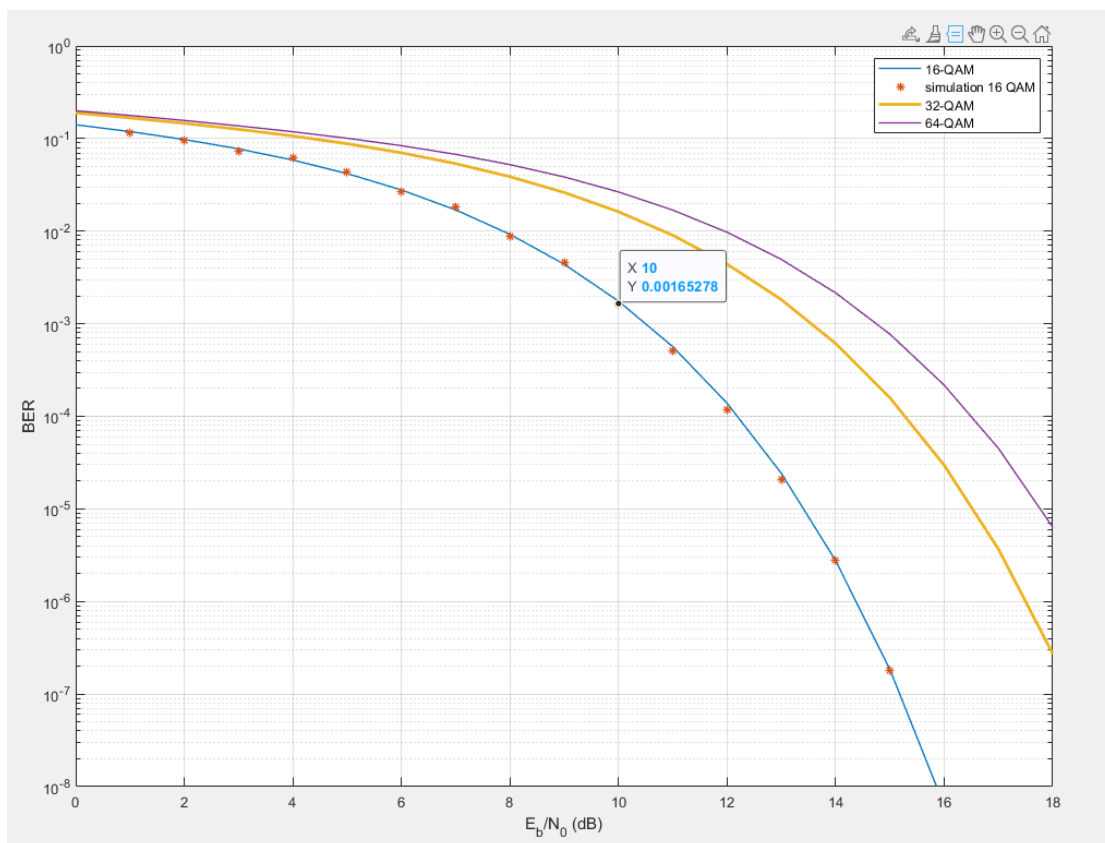
ber = sum(not(xrx==x))/length(x);

end

```

### 3<sup>ο</sup> Μέρος:

Θέλουμε να πετύχουμε μέγιστο σηματοθρομβικό λόγο  $E_b/N_0 = 10\text{dB}$  και η πιθανότητα εσφαλμένου bit να μην ξεπερνάει την τιμή 0.002. Εξετάζουμε QAM χαμηλότερης τάξης, καθώς κοιτάζοντας τη θεωρητική (αλλά και προσομοίωση) της 64-QAM παρατηρούμε ότι για  $E_b/N_0=10\text{dB}$  απέχουμε αρκετά από  $BER=0.002$ . Επομένως δοκιμάζουμε την αμέσως επόμενη (σε ορθογωνικό πλέγμα QAM) για 16-QAM.



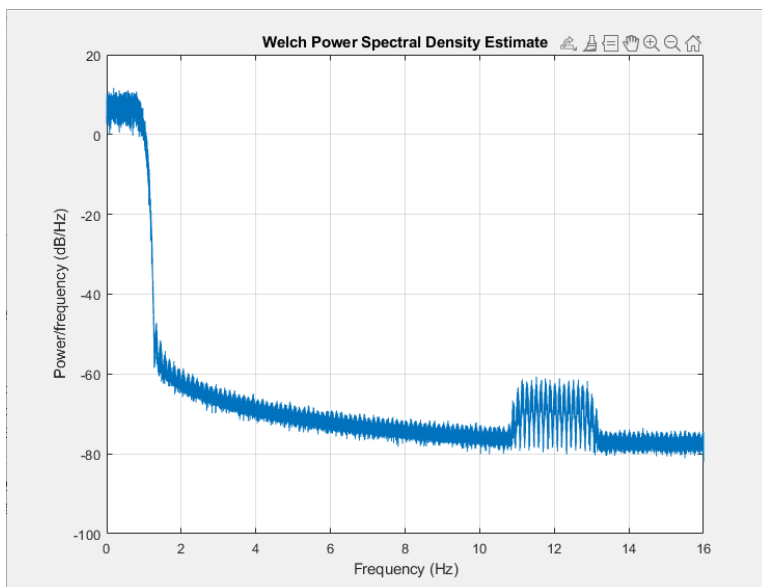
Προφανώς η 32 θεωρητική δεν υφίσταται για ορθογωνικό πλέγμα QAM.

Βλέποντας την προσομοίωση, για  $E_b/N_0=10$  λαμβάνουμε μία τιμή της τάξης 0.001652 η οποία είναι οριακά μικρότερη από το μέγιστο BER που επιθυμούμε για το συγκεκριμένο  $E_b/N_0$ . Άρα για να

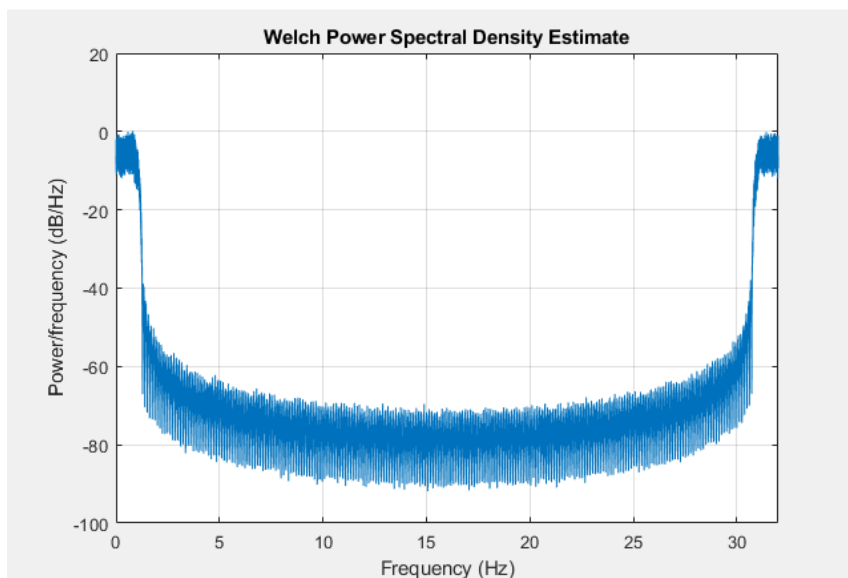


ικανοποιούνται τα παραπάνω πρέπει  $M=16$ . Με βάση τον τύπο που είχαμε στην αρχή της αναφοράς  $\log_2 M \geq \frac{R}{W}(1 + \alpha)$  και αντικαθιστώντας τις τιμές που έχουμε ( $\alpha = 0.25$ ,  $W = 2.5\text{MHz}$ ,  $M=16$ ) έχουμε ότι  $R \leq 2\log_2 M = 2\log_2 16 = 2 \cdot 4 = 8 \text{ Mbps}$  ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορούμε να έχουμε.

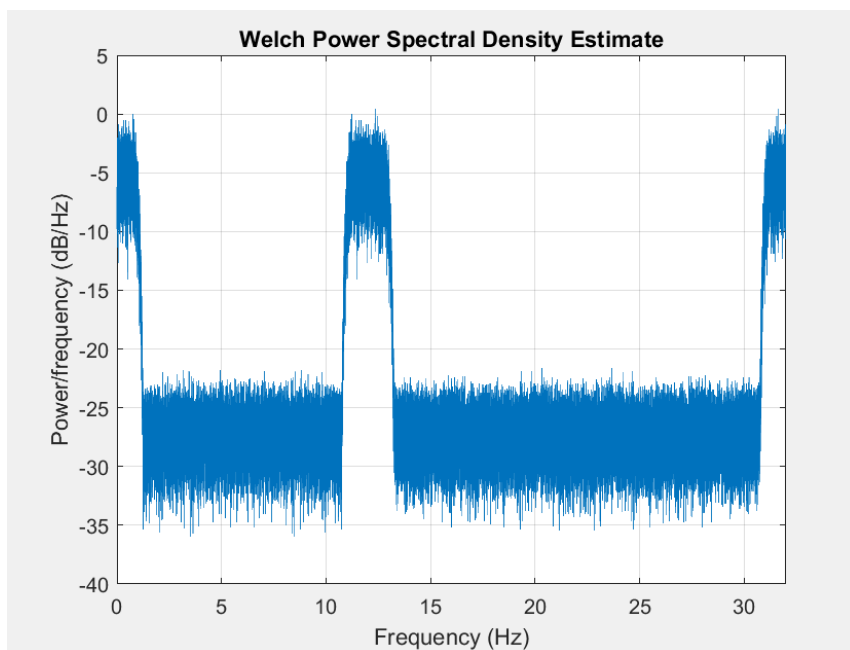
Για τα νέα δεδομένα έχουμε:



Το φάσμα ισχύος του  
yrx μετά το  
φιλτράρισμα και πριν  
την υποδειγμάτιση

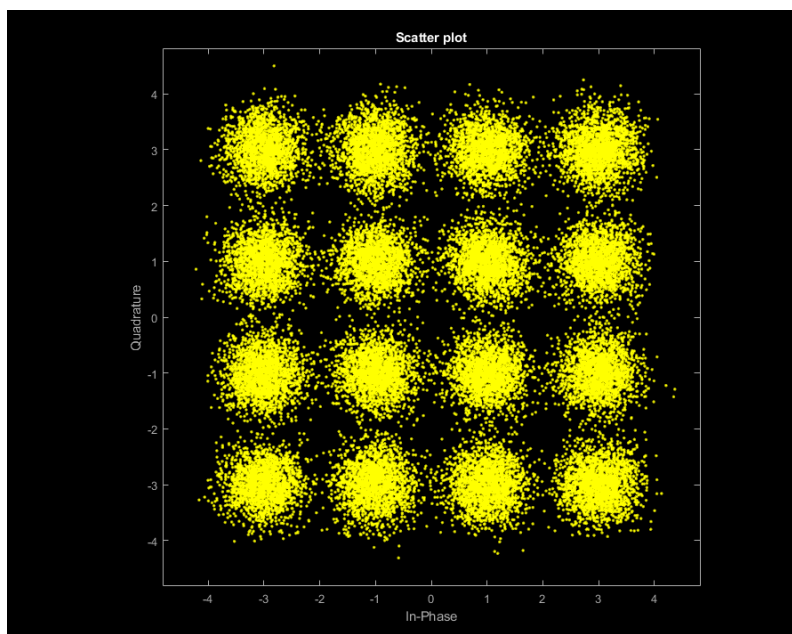
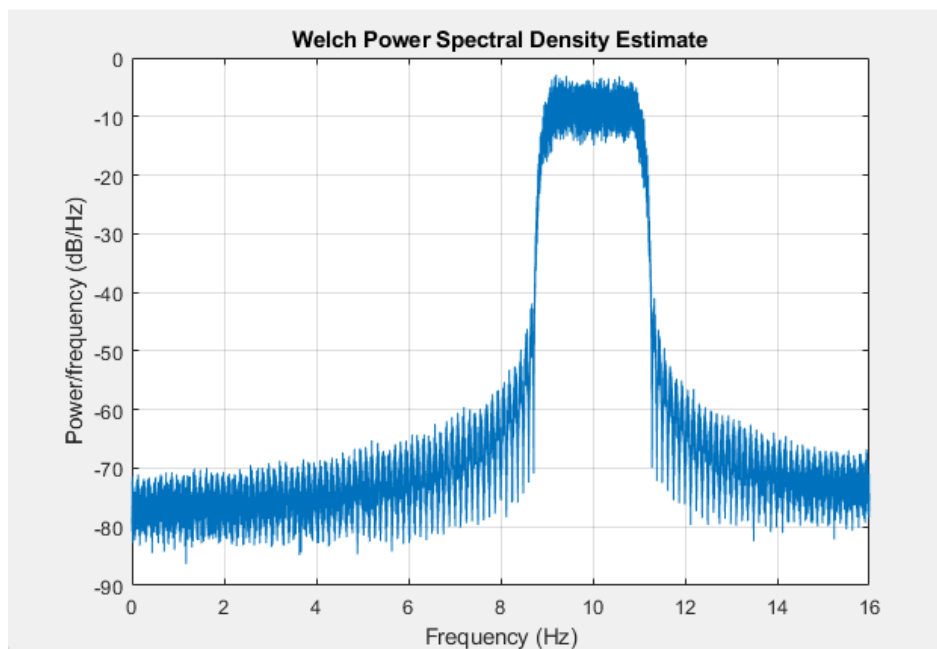


Το φάσμα ισχύος  
του πραγματικού  
μέρους του  $y_{tx}$



Το φάσμα ισχύος  
του  $y_{rx}$  μετά την  
αποδιαμόρφωση και  
πριν την  
υποδειγμάτιση

Το φάσμα ισχύος του ζωνοπερατού σήματος  $s$



Το διάγραμμα  
αστερισμού

Παρατηρούμε ότι γενικά στις πυκνότητες φάσματος ισχύος δεν υπάρχουν σοβαρές διαφοροποιήσεις από την 64-QAM. Αυτό συμβαίνει, καθώς οι παράμετροι που επηρεάζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά ( $T, \alpha, W$ ) μένουν σταθεροί.

#### **4ο Μέρος:**

Για  $M=16$  και  $W=2.5\text{Mhz}$  και  $\alpha'=0.125$  από τον συγκεκριμένο τύπο  $\log_2 M \geq \frac{R}{W}(1 + \alpha')$  θα προκύψει ότι  $R' \leq 8.889 \text{ Mbps}$  άρα θα ισχύει ότι ο ρυθμός μετάδοσης είναι εφικτό να λάβει μέγιστη αύξηση  $\frac{R'-R}{R} * 100\% = 11.11\%$