

Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες

Εργαστηριακή Άσκηση Ακαδημαϊκού Έτους 2020-21

1^ο Ερώτημα:

Δίνεται το σήμα $y(t)=A\cos(2\pi f_m t)\cos[2\pi(AM+2)f_m t]$, όπου $A=1\text{ V}$, $AM=8$ και $f_m=0+4+8=12 \Leftrightarrow f_m=1+2 \Leftrightarrow f_m=3\text{ kHz}$. Άρα το σήμα θα είναι το $y(t)=\cos(2\pi f_m t)\cos[2\pi 10f_m t]$.

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι η δειγματοληψία είναι η μετατροπή ενός συνεχούς σήματος σε διακριτό, παίρνοντας δείγματα της συνάρτησης ανά σταθερές χρονικές στιγμές, δηλαδή κάθε T δευτερόλεπτα, όπου T ονομάζεται η περίοδος δειγματοληψίας του σήματος.

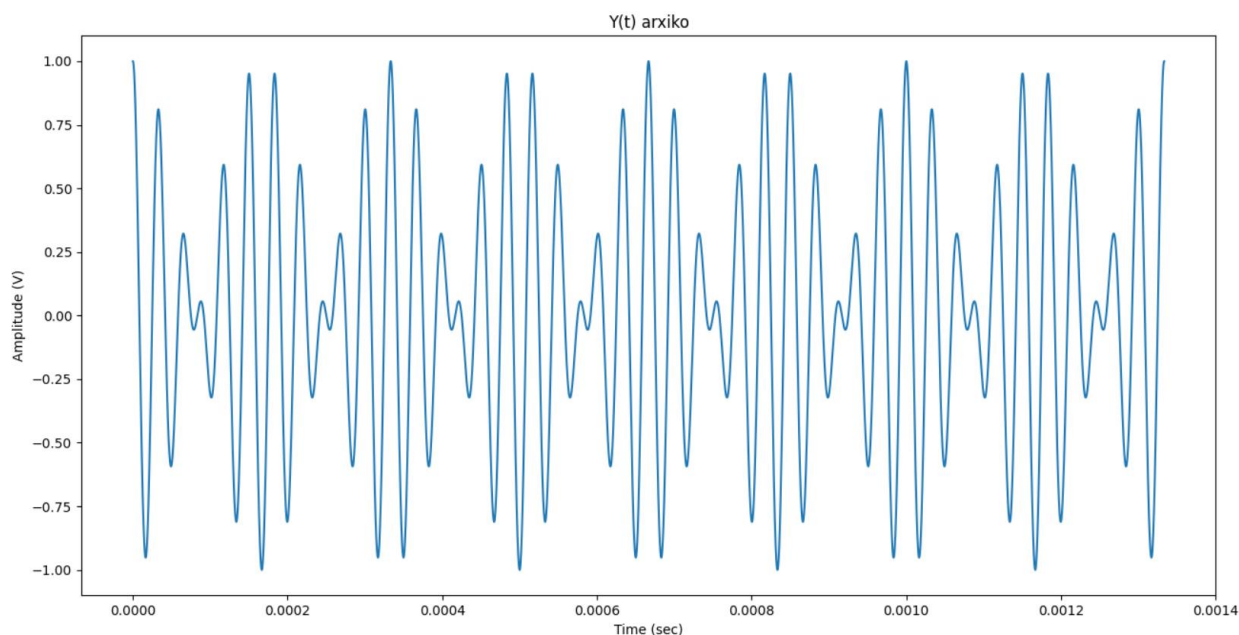
Θα προκύψει ένα σήμα της μορφής $y[n]=y_c[nT]$, με $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Δοθείσα της συχνότητας δειγματοληψίας η χρονική απόσταση των δειγμάτων υπολογίζεται από τον τύπο $T = \frac{1}{f_s}$.

Για τη δειγματοληψία ενός σήματος γνωρίζουμε ότι $X_s(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega - k\omega_s)$.

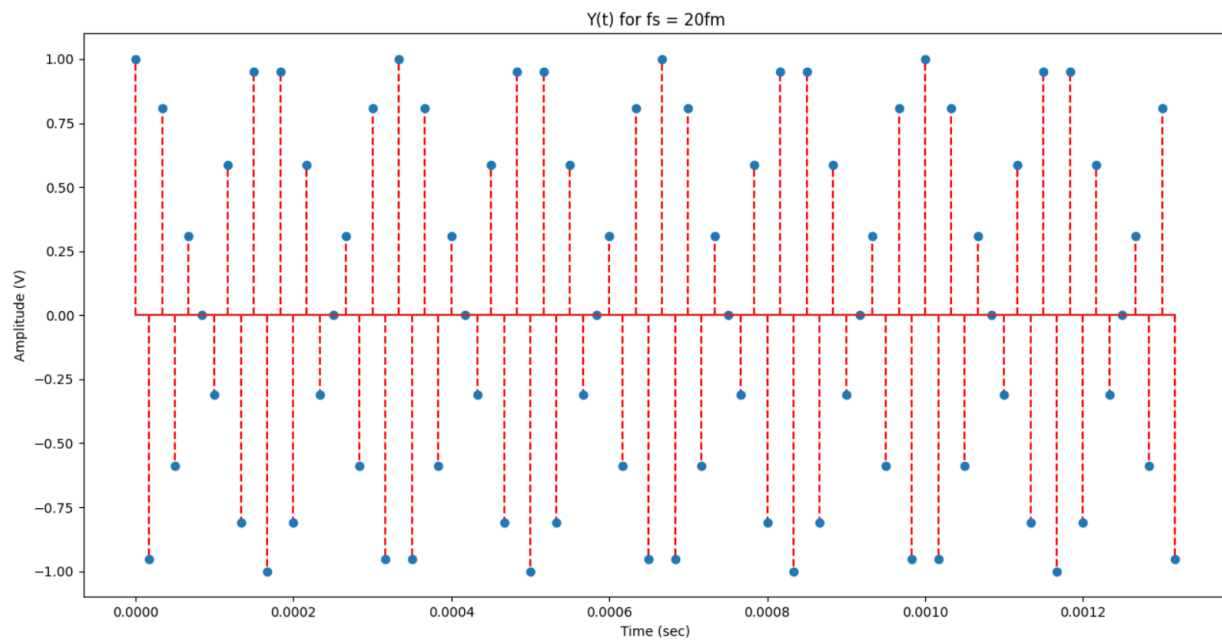
α’

Από το σήμα $y(t)$ παρατηρήθηκε ότι ισοδυναμεί με $y(t)=\cos(x)\cos(10x)$, όπου $x=2\pi f_m t$, που σημαίνει ότι το σήμα θα έχει τη μορφή:



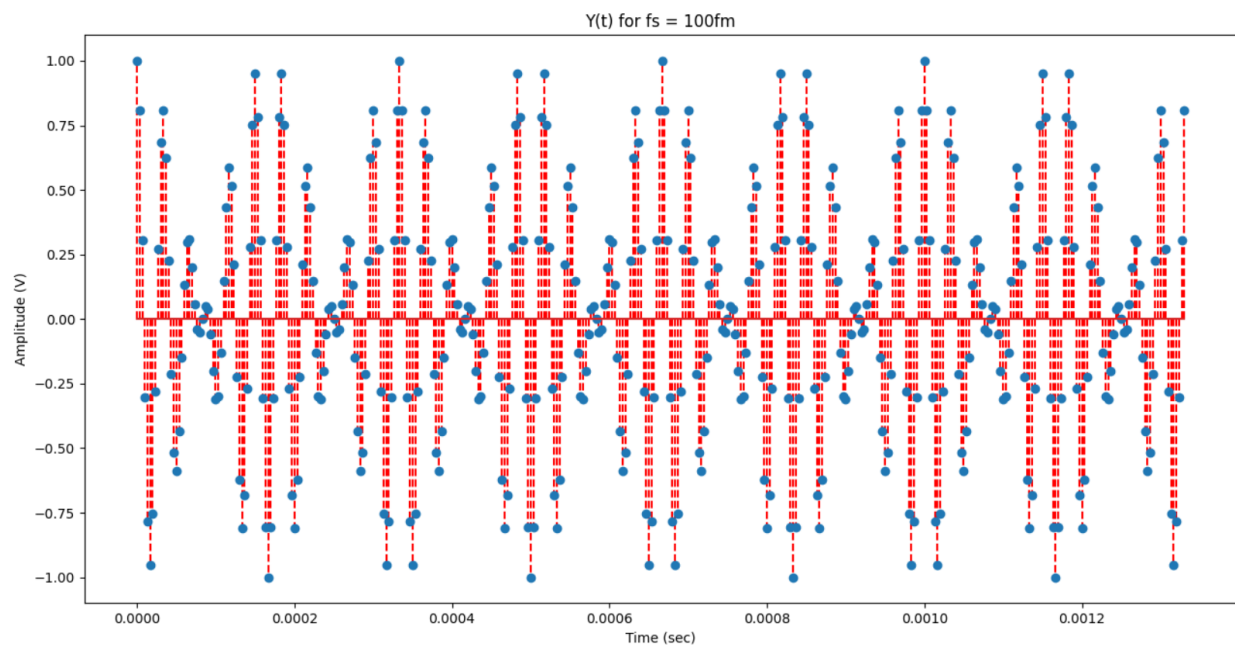
(i)

Για συχνότητας δειγματοληψίας $f_{s1}=20f_m$:



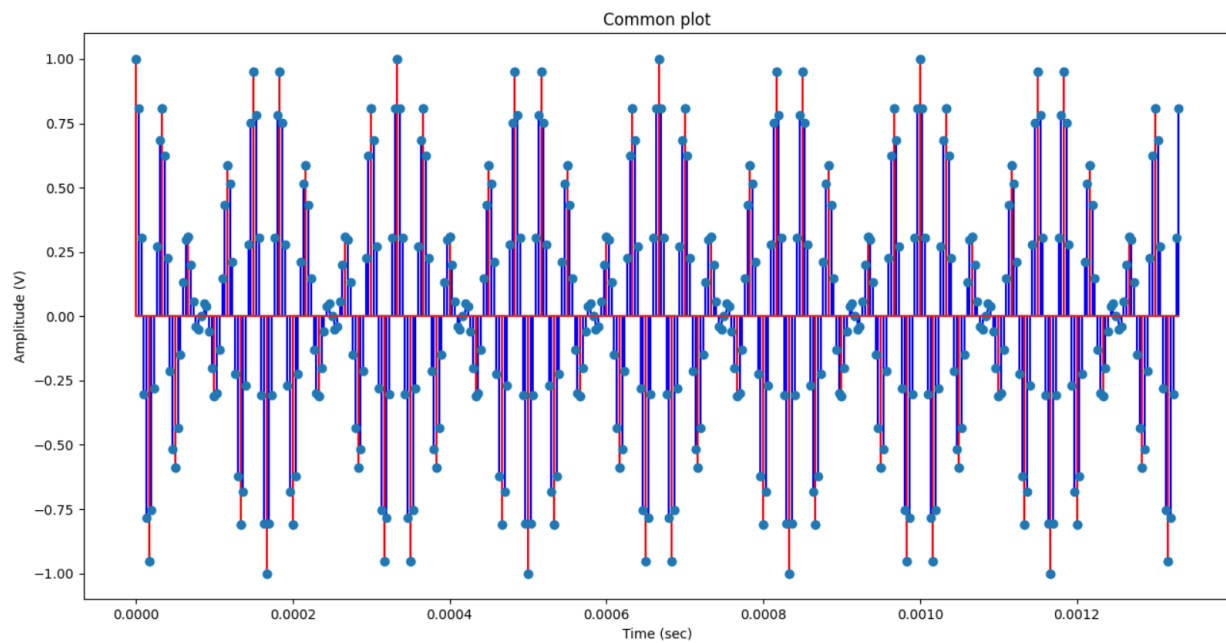
(ii)

Για συχνότητας δειγματοληψίας $f_{s2}=100f_m$:

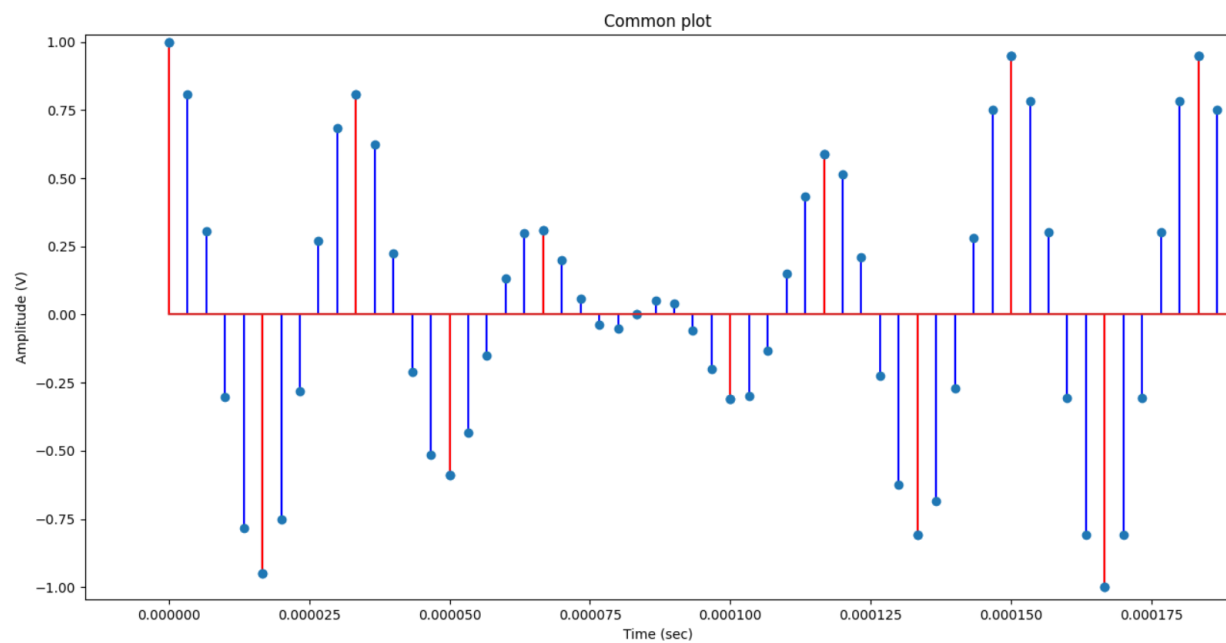


(iii)

Για το κοινό διάγραμμα των f_{s1}, f_{s2} :

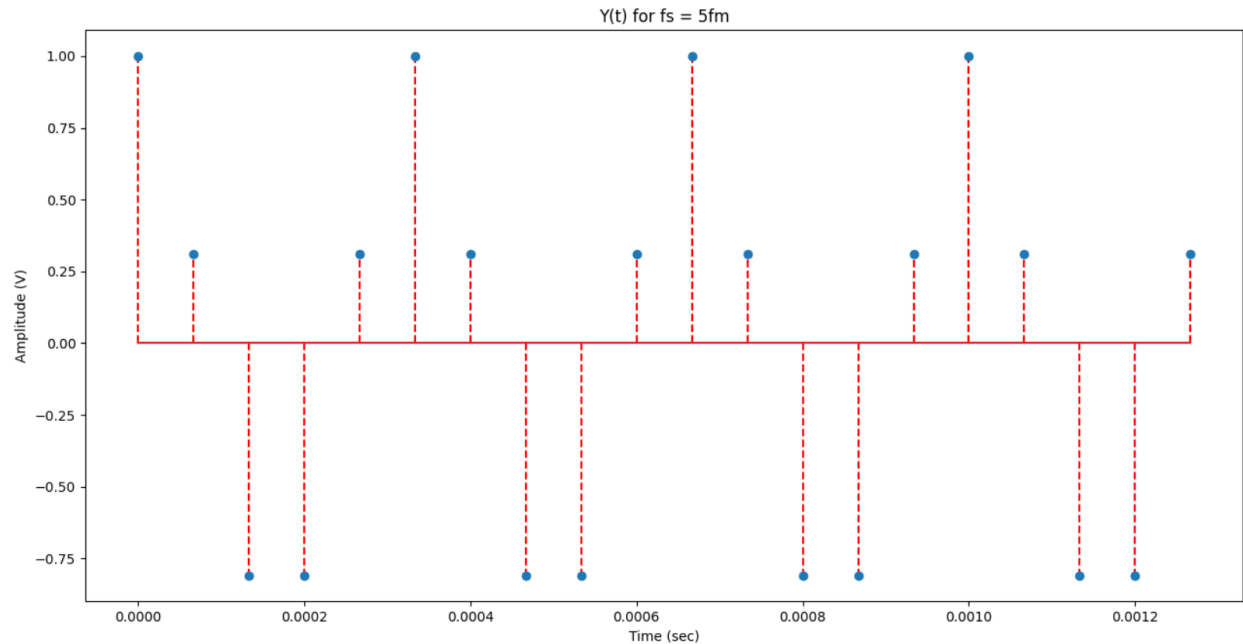


Στο παρακάτω διάγραμμα έγινε μια μεγέθυνση για να φανεί ξεκάθαρα πω συμπίπτουν οι δύο γραφικές.



β'

Όταν το σήμα δειγματοληπτηθεί με $f_s=5\text{fm}$ τότε



Η ελάχιστη θεωρητική f_s , ώστε να είναι δυνατή η ακριβής ανακατασκευή του σήματος, πρέπει να είναι $f_s = 16\text{kHz}$, αφού πρέπει να επαληθεύεται το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist-Shannon $f_s \geq 2f_N$. Σύμφωνα με αυτό το θεώρημα σήματα περιορισμένου φάσματος μπορούν να ανακατασκευαστούν πλήρως από την δειγματοληπτημένη μορφή τους εάν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη ή ίση από το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητάς τους f_N . Πρέπει δηλαδή να μην έχουμε φαινόμενα επικαλύψεων (aliasing).

Στην προκειμένη περίπτωση, βλέπουμε ότι έχουμε σχεδόν φαινόμενα επικάλυψης αφού η δειγματοληψία έγινε με $f_s < f_N$, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να ανακτήσουμε επαρκώς το σήμα.

2^ο Ερώτημα:

Σε αυτό το ερώτημα το δειγματοληπτημένο σήμα, που βρέθηκε στο προηγούμενο ερώτημα, θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε ομοιόμορφο κβαντιστή mid riser, με κβάντιση 5-bit.

α'

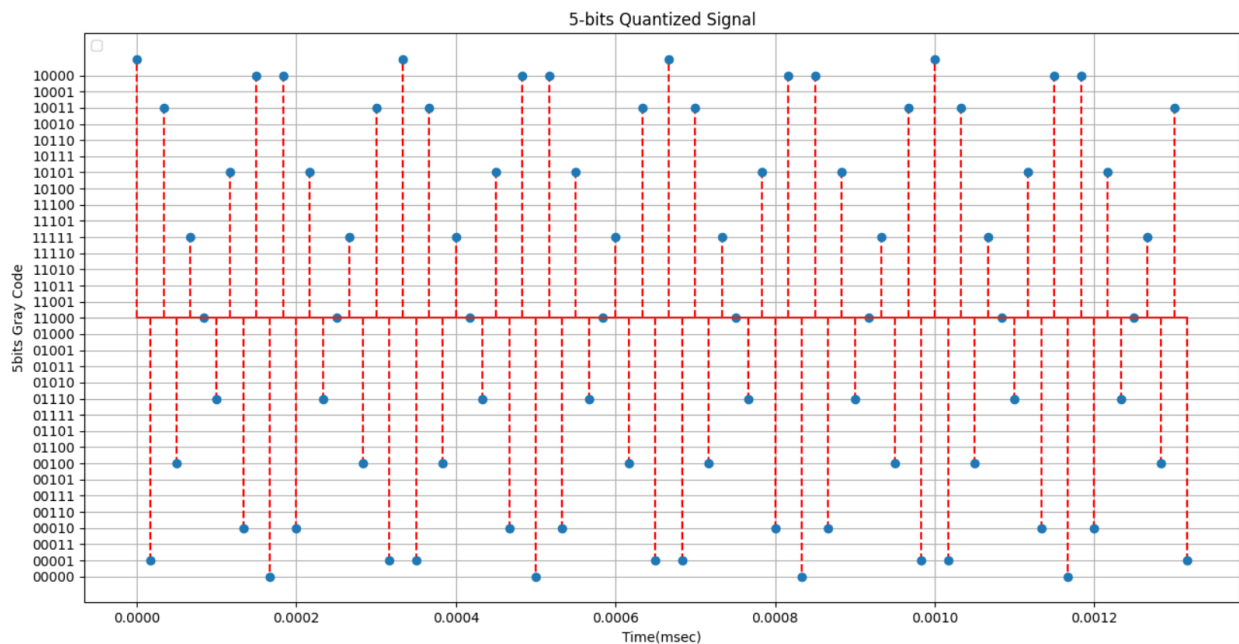
Το σήμα, που βρέθηκε στο προηγούμενο ερώτημα, $y(t) = \cos(2\pi f_m t) \cos[2\pi 10 f_m t]$, με $f_m = 3\text{kHz}$ δειγματοληπτείται με $f_s = 45f_m$. Το δειγματοληπτημένο σήμα y_1 , που προκύπτει, εισέρχεται ως είσοδος σε ομοιόμορφο κβαντιστή 5-bit, αφού η f_m είναι περιττή. Ύστερα, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας θα γίνει κωδικοποίηση με Gray, για να αναπαρασταθεί το σήμα ως δυαδικός αριθμός.

Δεδομένου ότι το κβαντισμένο δείγμα εκφράζεται σε δυαδική μορφή, ισχύουν τα ακόλουθα:

- Συνολικός Αριθμός Επιπέδων: $L = 2^R$
- Μέγεθος Βήματος: $\Delta = \frac{2y_{1_max}}{L} = \frac{2y_{1_max}}{2^R}$

όπου $y_{1\max} = 1 \text{ Volt}$ η μέγιστη τιμή του $y_1(t)$ και R το πλήθος των bits κβάντισης.

Διάγραμμα εξόδου του κβαντιστή 5-bit:



β'

Θεωρούμε πως το σφάλμα κβάντισης συμβολίζεται από την τυχαία μεταβλητή Q της τιμής του σφάλματος q :

$$q = y_1 - \text{quantized_signal}$$

$$Q = Y_1 - \text{QUANTIZED_SIGNAL}$$

Όπου: q το σφάλμα κβάντισης, y_1 το δειγματοληπτημένο σήμα, quantized_signal το κβαντισμένο σήμα και Q , Y_1 , QUANTIZED_SIGNAL οι αντίστοιχες τυχαίες μεταβλητές τους.

(i)

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος κβάντισης για τα 10 πρώτα δείγματα είναι: -
2.706168622523819e-17

The quantist error for the 10 first samples is= -2.706168622523819e-17

(ii)

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος κβάντισης για τα 10 πρώτα δείγματα είναι: -
1.1449174941446926e-17

The quantist error for the 20 first samples is= -1.1449174941446926e-17

(iii)

Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι η τιμή της απόκλισης του σφάλματος κβάντισης δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_Q^2 = \frac{1}{3} * y_{\max}^2 * 2^{-2R} = 0,334$$

Άρα η θεωρητική τιμή της απόκλισης του σφάλματος κβάντισης ισούται με $\sigma_Q^2 = \frac{1}{3} * 1^2 * 2^{-2R}$

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του SNR κβάντισης έγινε χρήση του τύπου: $SNR_q = \frac{P}{\sigma^2}$.

όπου P η μέση ισχύς του δειγματοληπτημένου σήματος $y_1(t)$ και σ^2 η τυπική απόκλιση του σφάλματος κβάντισης.

Η μέση ισχύς του σήματος δίνεται από τον τύπο $P = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} y^2(t) dt$.

Για να αποφευχθεί η επίλυση του προβλήματος υπολογισμού της μέσης ισχύς θα χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος τύπος ο οποίος δίνει και αυτός το θεωρητικό SNR.

$$SNR_q = 20 * \log(2^R) \Leftrightarrow SNR_q = 20 * \log(2^5) \Leftrightarrow SNR_q = 20 * \log(32) \Leftrightarrow$$

$$SNR_q = 30,1029dB$$

Άρα προέκυψαν αντιστοίχως οι παρακάτω SNR:

- Για την τυπική απόκλιση των πρώτων 10 δειγμάτων σφάλματος κβάντισης:
 $SNR_{10} = 53.804581143398956$
`The experimental SNR10= 53.804581143398956`
- Για την τυπική απόκλιση των πρώτων 20 δειγμάτων σφάλματος κβάντισης:
 $SNR_{20} = 53.804581143398885$
`The experimental SNR20 = 53.804581143398885`
- Για τη θεωρητική τιμή της τυπικής απόκλισης του σφάλματος κβάντισης:
 $SNR_q = 30,1029dB$

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η θεωρητική τιμή του SNR κβάντισης απέχει ελάχιστα από τις τιμές, που υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα. Αυτό συμβαίνει διότι, στις δύο πρώτες περιπτώσεις η τυπική απόκλιση του σφάλματος κβάντισης υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη μόνο ένα μέρος δειγμάτων (10 και 20 δείγματα αντιστοίχως) και όχι ολόκληρο το σήμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, οι τυπικές αποκλίσεις Var1 και Var2 να διαφέρουν ελάχιστα από τη θεωρητική τιμή της τυπικής απόκλισης σφάλματος. Για αυτό το λόγο, επίσης, τα SNR10 και SNR20 διαφέρουν και από τη θεωρητική τιμή του SNR κβάντισης

Επιπλέον, φαίνεται ότι όσα περισσότερα δείγματα σφάλματος κβάντισης λαμβάνουμε υπόψη, τόσο περισσότερο η «πειραματική» τιμή SNR προσεγγίζει την θεωρητική τιμή.

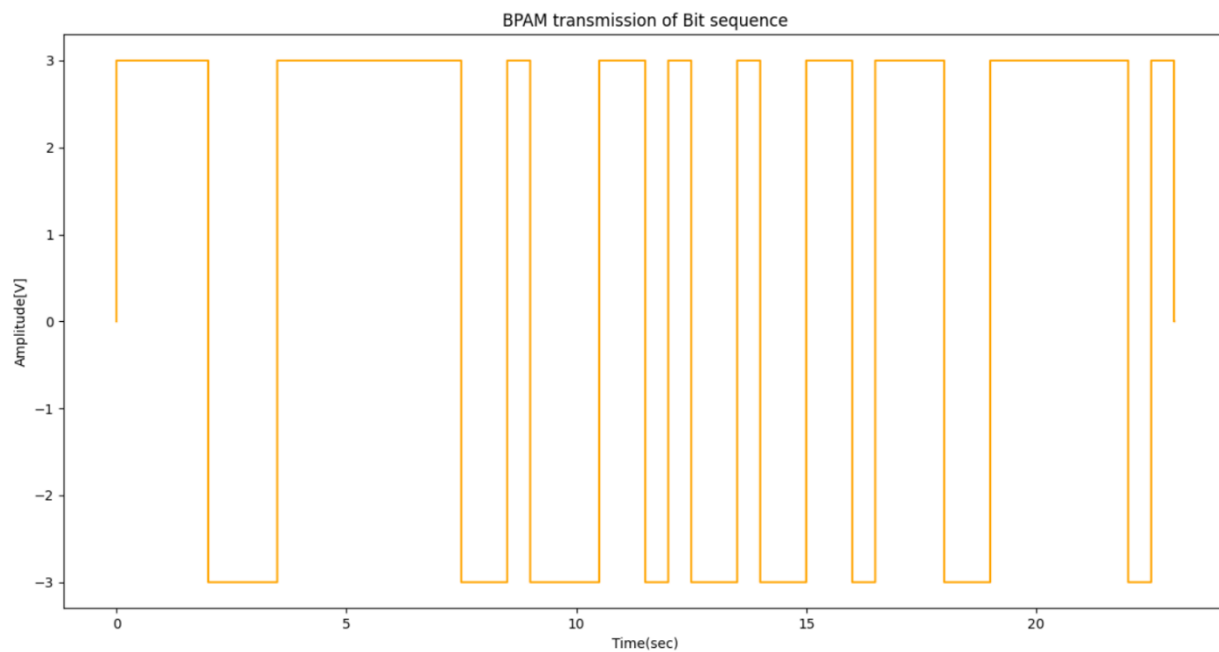
3^ο Ερώτημα:

Σε αυτό το ερώτημα θα γίνει η υλοποίηση μιας ακολουθίας 46 ψηφίων με ίση πιθανότητα εμφάνισης τιμών 0 ή 1. Για να γίνει αυτό θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

α'

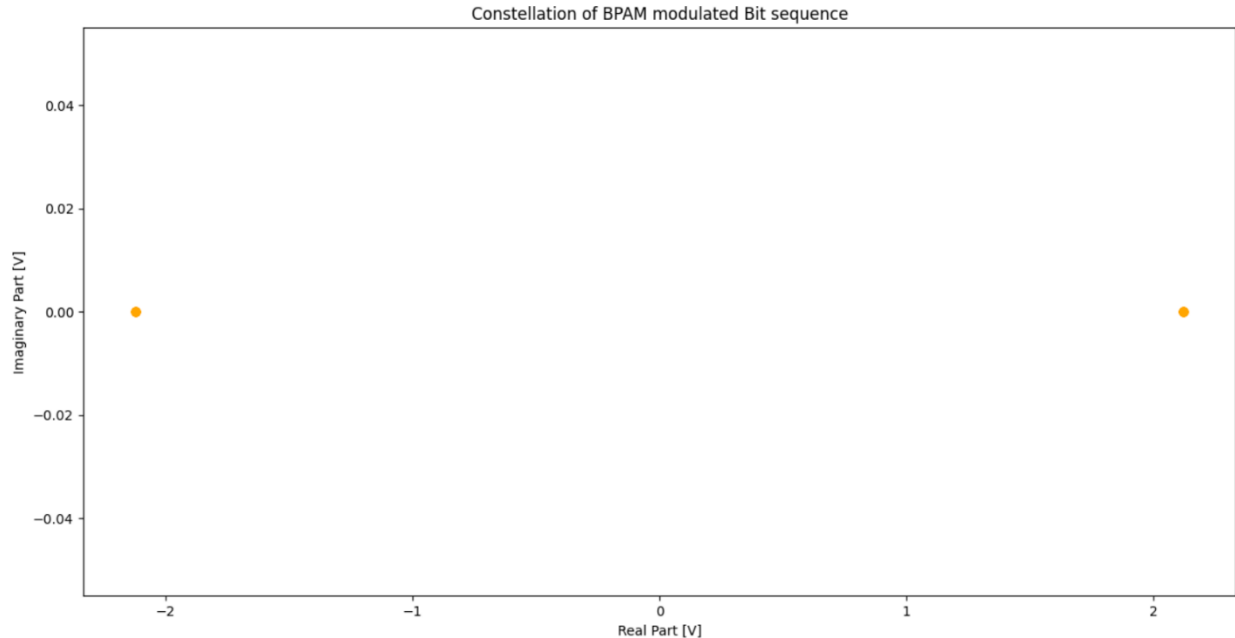
Το πλάτος A θα ισούται με $A = 0+4+8=12 \Leftrightarrow A = 1+2 \Leftrightarrow A = 3$. Αρχικά, παράγεται η τυχαία ακολουθία 46 ψηφίων, για την οποία η διάρκεια κάθε ψηφίου είναι $T_b=0.5\text{sec}$. Έπειτα, διαμορφώνεται η ακολουθία bits κατά B-PAM πλάτους $A=3\text{V}$.

Διάγραμμα ψηφιακού σήματος:



β'

Διάγραμμα αστερισμού B-PAM σήματος:



Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι ο αστερισμός αποτελείται από δύο κυματομορφές που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των bits 0 και 1. Οι κυματομορφές αυτές βρίσκονται πάνω στον οριζόντιο άξονα στις θέσεις $\pm\sqrt{E_{bit}} \cong \pm 2,121$,

$$\text{όπου } E_{bit} = A^2 T_b \Leftrightarrow E_{bit} = 9 \cdot 0,5 \Leftrightarrow E_{bit} = 4,5$$

Επιπλέον, φαίνεται ότι οι δύο κυματομορφές βρίσκονται σε θέσεις συμμετρικές ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Ξεκινώντας από τον κατακόρυφο άξονα επιλέγεται κάθε φορά είτε το 0 και κατευθύνεται στα αρνητικά είτε το 1 και κατευθύνεται στα θετικά.

γ'

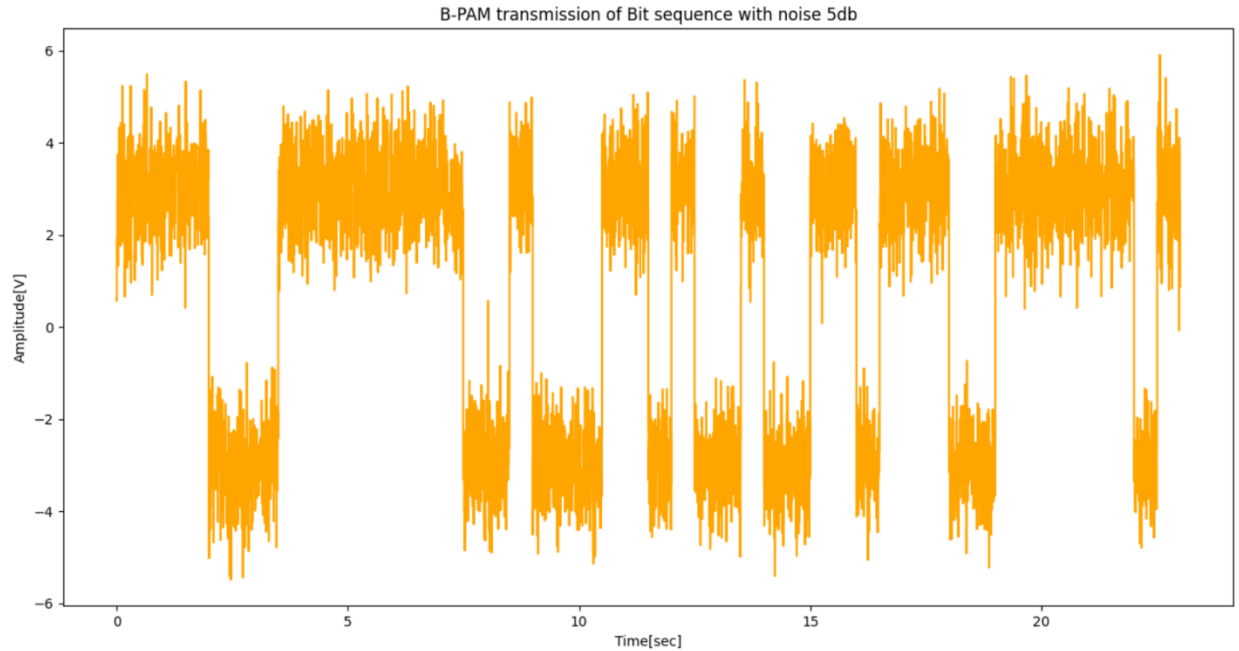
Σε αυτό το ερώτημα παράγεται θόρυβος AWGN, ο οποίος προστίθεται στο σήμα B-PAM, για δύο τιμές E_b/N_0 5dB και 15dB αντίστοιχα.

Σε αυτό το ερώτημα θα χρησιμοποιηθεί μόνο το πραγματικό μέρος του θορύβου που σημαίνει ότι για τη μετατροπή του λόγου E_b/N_0 σε SNR θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος :

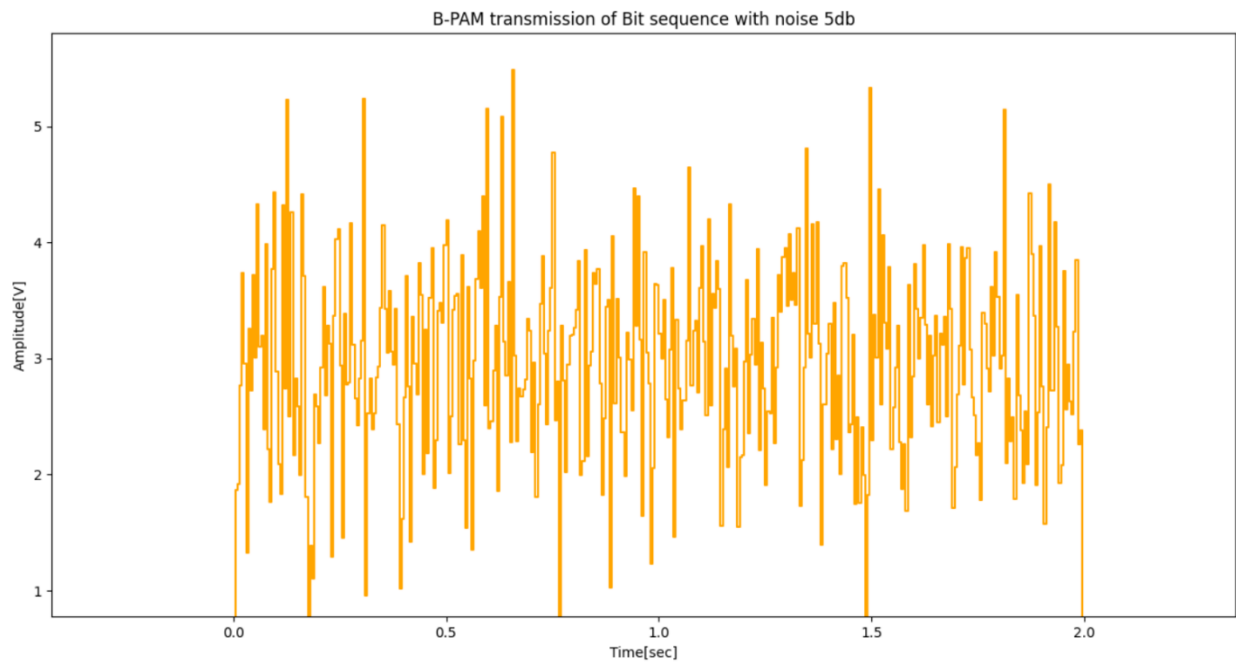
$$SNR = E_b/N_0 + 10\log R,$$

όπου $R=1$ ο αριθμός των bits για την αναπαράσταση ενός συμβόλου.

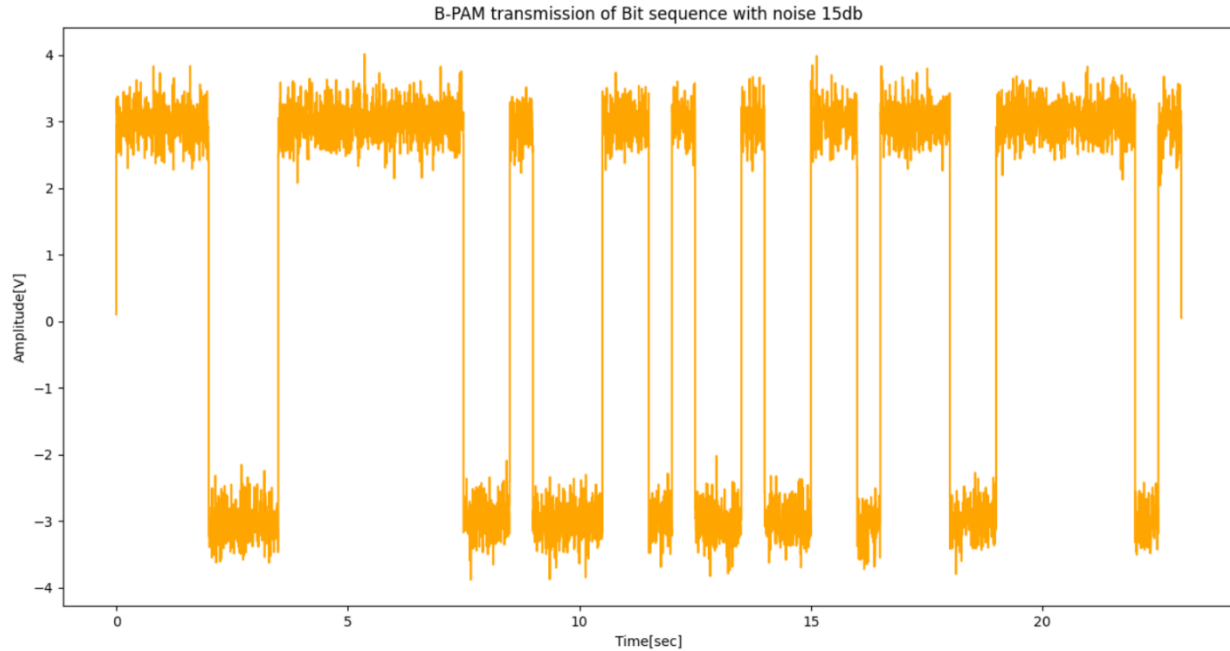
Διάγραμμα επίδρασης AWGN θορύβου 5dB στο σήμα B-PAM:



Με μεγέθυνση σε μια peak του διαγράμματος φαίνονται οι έντονες διακυμάνσεις που προκάλεσε η επίδραση αυτού του θορύβου, όταν στο B-PAM σήμα αυτή η κορυφή ήταν σταθερή.



Διάγραμμα επίδρασης AWGN θορύβου 15dB στο σήμα B-PAM:



Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι όσο μικραίνει ο λόγος E_b/N_0 τόσο πιο θορυβώδες γίνεται το κανάλι μετάδοσης, αφού στην προσθήκη 5dB θορύβου φαίνεται να έχει μεγαλύτερη επίδραση από ότι τα 15dB. Στην περίπτωση του λόγου $E_b/N_0 = 5\text{dB}$, η αλλοίωση του σήματος έχει φτάσει στο σημείο όπου κυματομορφές που θα έπρεπε να έχουν την τιμή 1, περνάνε κάτω από το 0 και αντίστροφα. Τέλος φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος E_b/N_0 τόσο μικρότερο είναι το εύρος τιμών που παίρνει το πλάτος A .

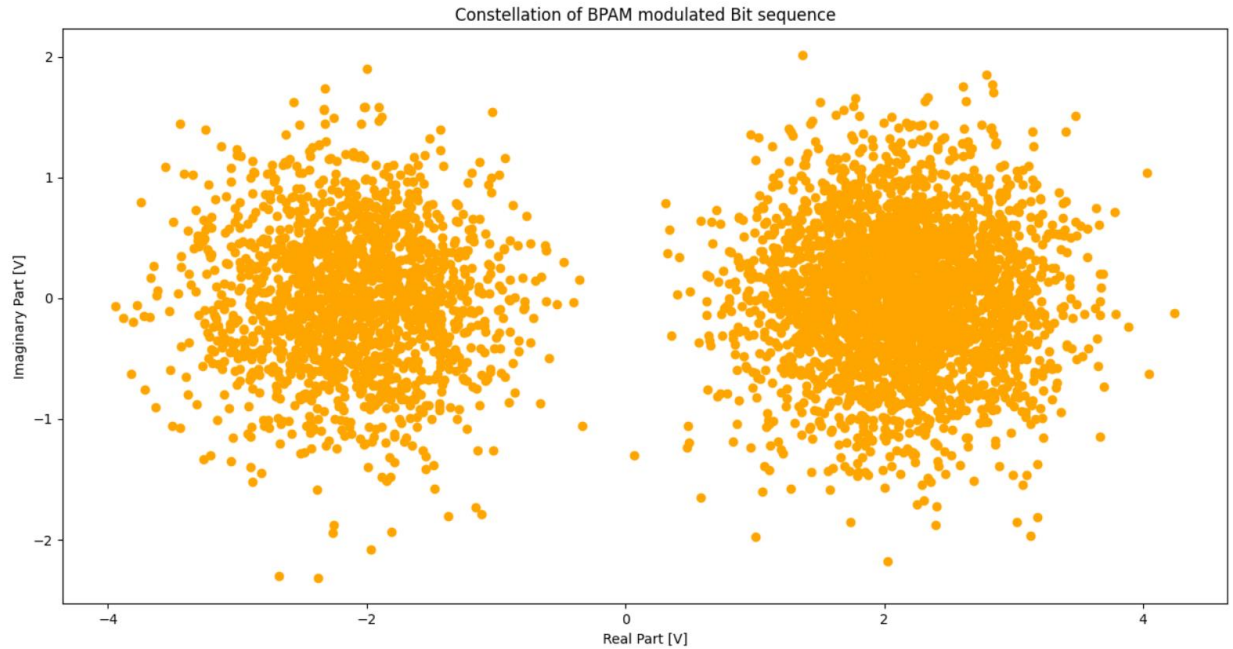
δ'

Σε αυτό το ερώτημα θα χρησιμοποιηθεί μόνο η μιγαδική τυχαία μεταβλητή του θορύβου που σημαίνει ότι για τη μετατροπή του λόγου E_b/N_0 σε SNR θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος :

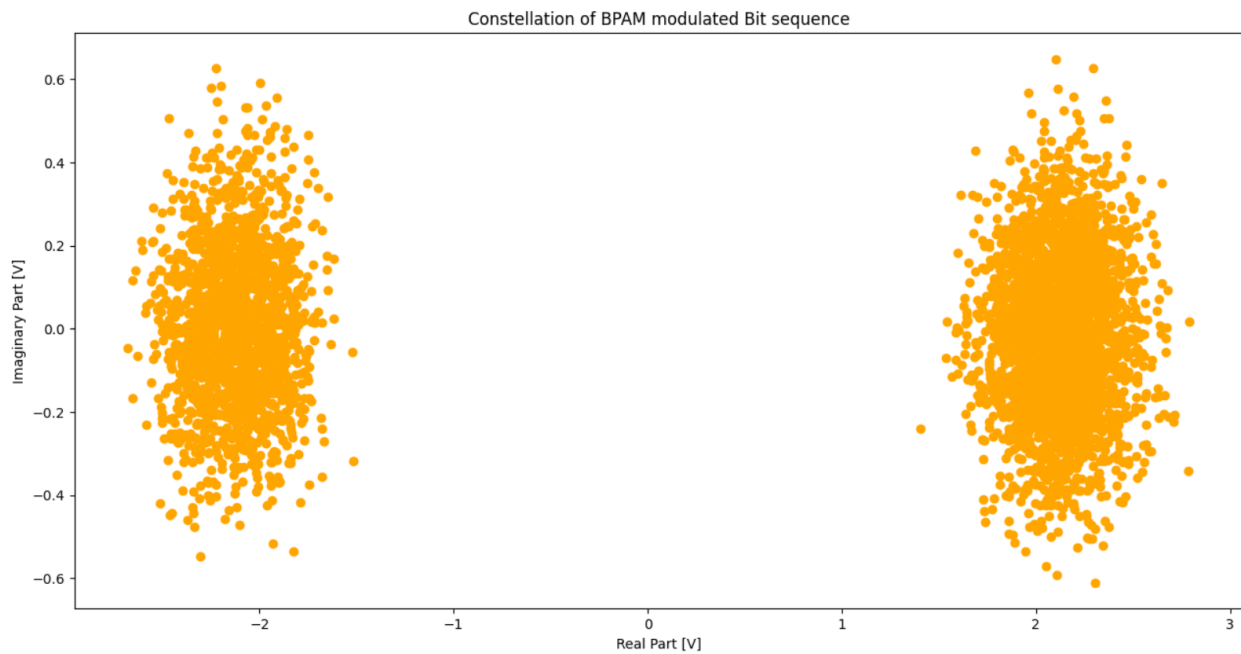
$$\text{SNR} = E_b/N_0 + 10\log R + 3\text{dB},$$

όπου $R=1$ ο αριθμός των bits για την αναπαράσταση ενός συμβόλου.

Διάγραμμα αστερισμού σήματος B-PAM με AWGN θόρυβο 5dB:



Διάγραμμα αστερισμού σήματος B-PAM με AWGN θόρυβο 15dB:



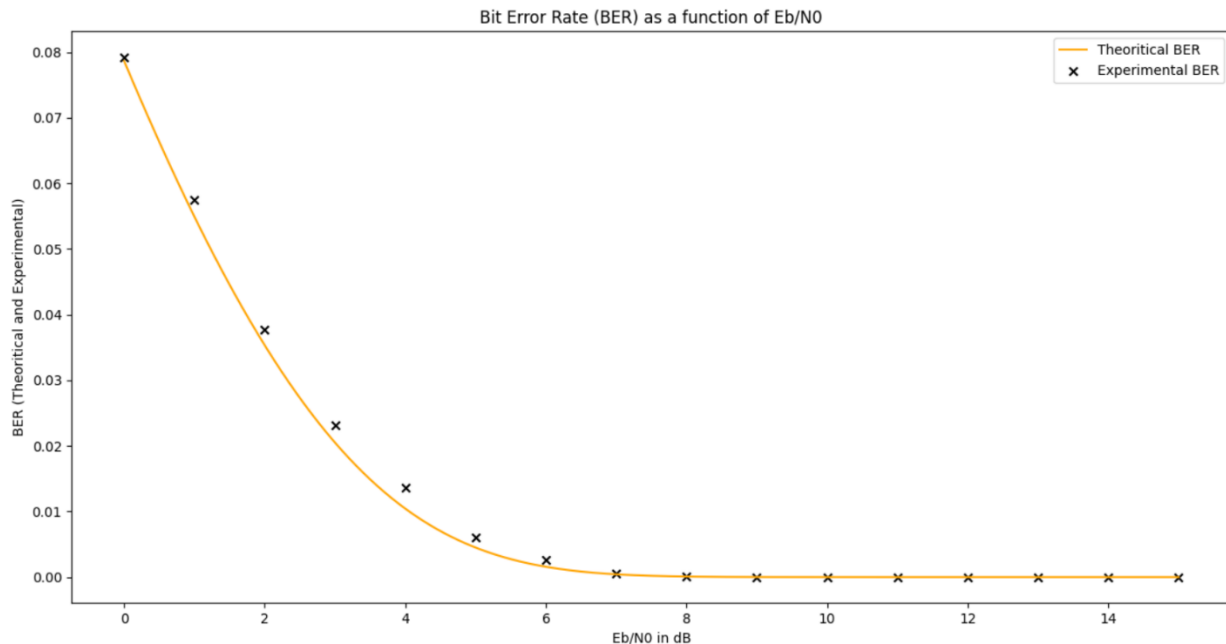
Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι όσο μειώνεται ο λόγος E_b/N_0 τόσο απομακρύνονται από τον κατακόρυφο άξονα y , οι κυματομορφές που αντιστοιχούν στα bits 0 και 1.

ε’

Κατά τη διαμόρφωση B-PAM σημάτων η πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου (BER) δίνεται από τον τύπο:

$$P[\text{error}]_{\text{BPAM}} = Q(x) * \sqrt{\frac{2Eb}{No}}, \text{ όπου } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Διάγραμμα BER:



Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι οι τιμές του πειραματικού υπολογισμού της Πιθανότητας Εσφαλμένου Ψηφίου δεν είναι πλήρως ταυτιζόμενες με αυτές της θεωρητικής καμπύλης που προκύπτει.

Επιπλέον, φαίνεται ότι όσο ο λόγος E_b/N_0 αυξάνεται, η πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου για διαμόρφωση B-PAM μειώνεται, το οποίο επαληθεύεται και θεωρητικά.

4^ο Ερώτημα:

Σε αυτό το ερώτημα η ακολουθία που φτιάχτηκε στο 3^ο ερώτημα θα διαμορφωθεί κατά QPSK με σύμβολα πλάτους $A=3V$, πάνω στη βασική ζώνη.

α’

Στο σχήμα διαμόρφωσης QPSK κάθε σύμβολο αναπαρίσταται από $R=2$ bits. Για την τυχαία ακολουθία των 46 bits προκύπτει η ακόλουθη αντιστοίχιση :

Αντιστοίχιση Gray συμβόλων	
00	s3
01	s2

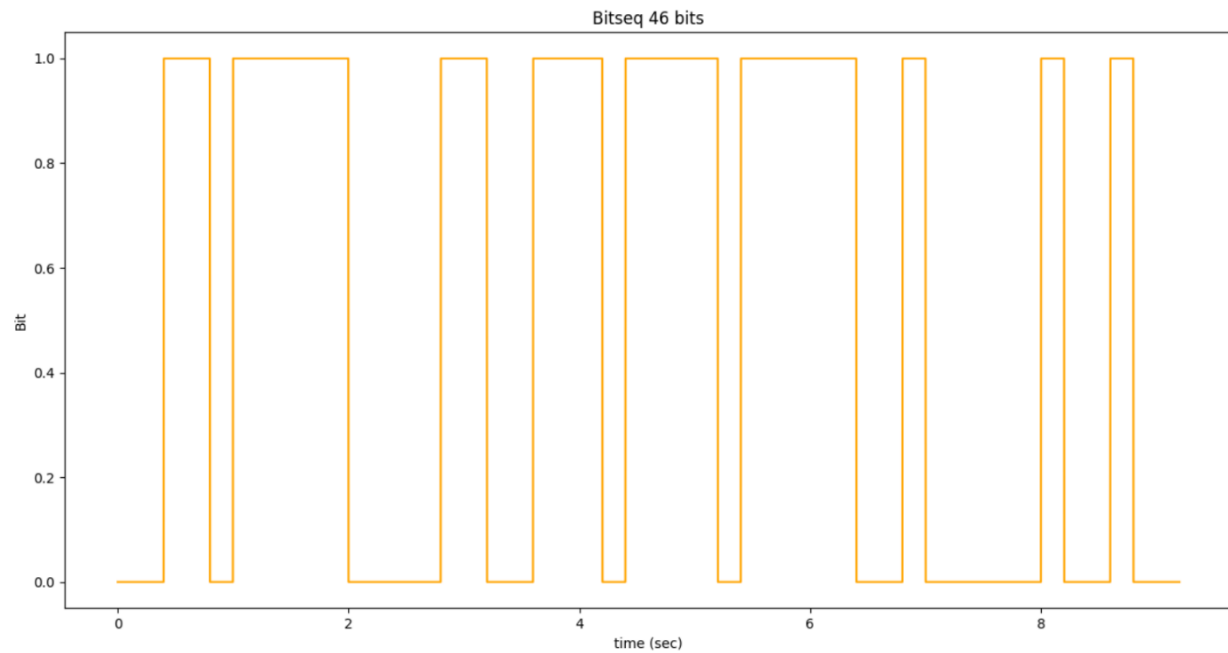
11	s1
10	s4

Όπως υπολογίστηκε πιο πάνω τα σύμβολα θα βρίσκονται στις θέσεις που θα βρίσκονται σε απόσταση $\pm\sqrt{E_{bit}} \cong \pm 2,121$, και από τον οριζόντιο και από τον κατακόρυφο άξονα,

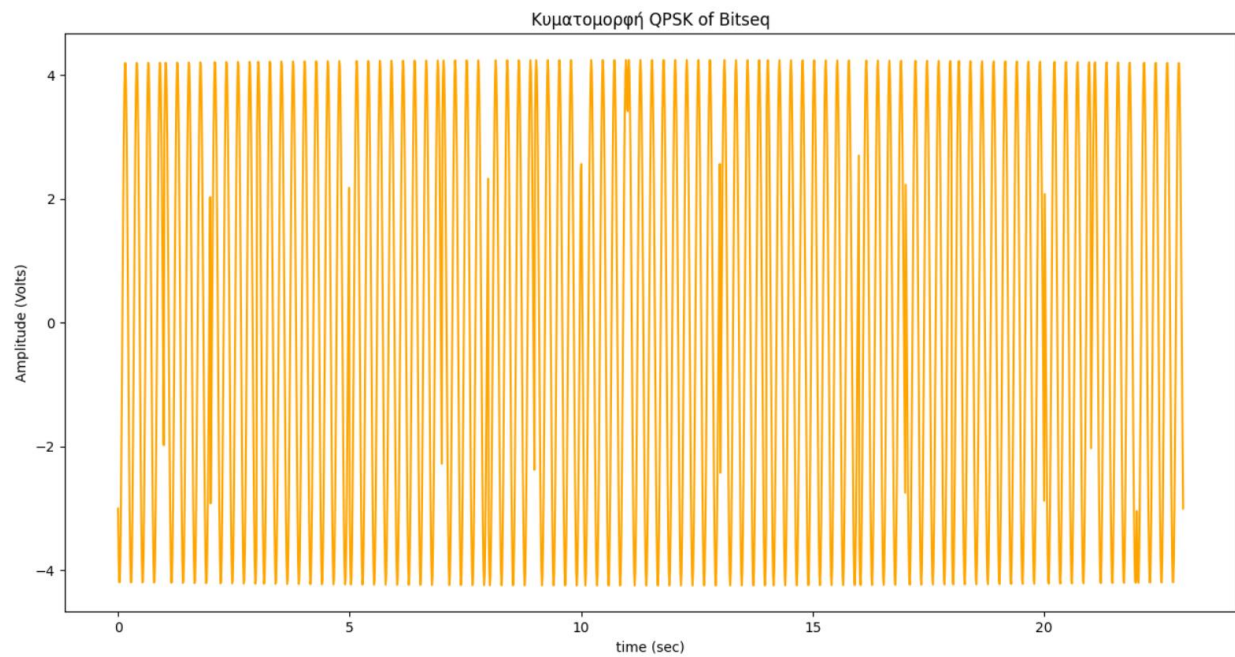
όπου $E_{bit}=A^2T_b \Leftrightarrow E_{bit} = 9*0,5 \Leftrightarrow E_{bit} = 4,5$

Άρα θα βρίσκονται στα σημεία s1(2.121,2.121), s4(2.121,-2.121), s2(-2.121,2.121), s3(-2.121,-2.121).

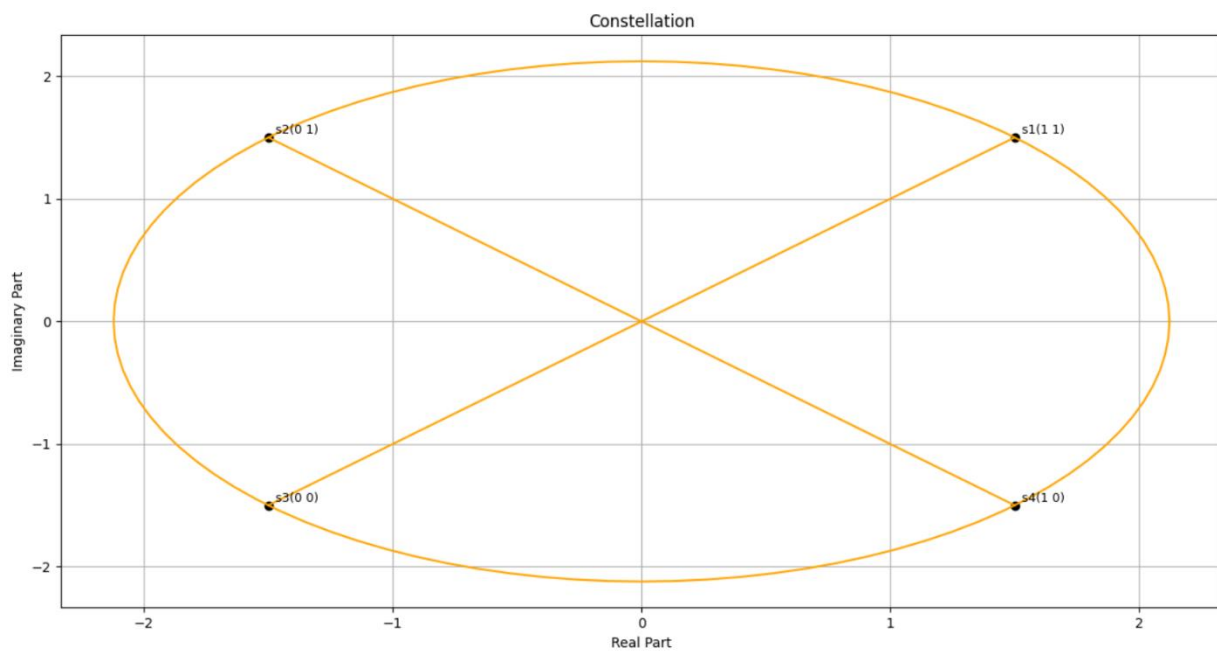
Διάγραμμα ακολουθίας 46 ψηφίων:



Διάγραμμα κυματομορφής QPSK:



Διάγραμμα αστερισμού QPSK:



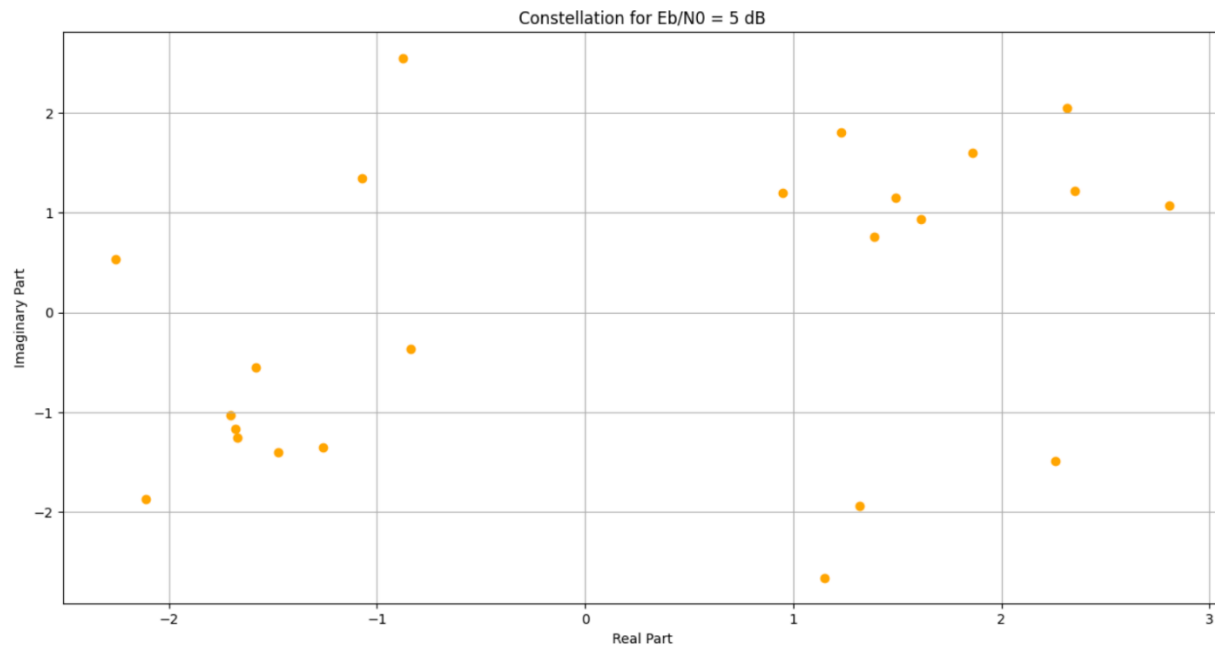
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι υπάρχει μια μικρή απόκλιση στις θεωρητικές θέσεις που περιμέναμε να ήταν να τέσσερα σημεία.

β’

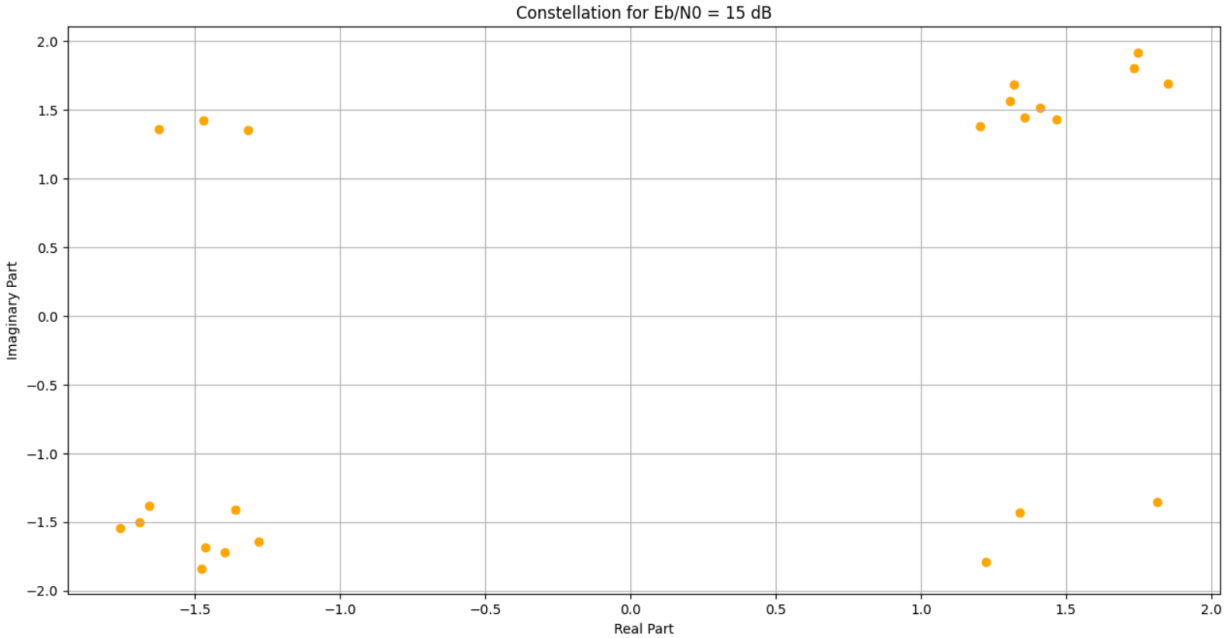
Ο θόρυβος, όπως και στο ερώτημα 3, προσομοιώνεται ως μιγαδική τυχαία μεταβλητή $Z = X + jY$, όπου οι πραγματικές τυχαίες μεταβλητές X και Y είναι ανεξάρτητες και καθεμία εξ’ αυτών ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση τέτοια ώστε η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου να είναι $N_0/2$.

Τα παρακάτω διαγράμματα αστερισμού για τη διαμορφωμένη κατά QPSK ακολουθία ψηφίων απεικονίζεται με κωδικοποίηση $\frac{\pi}{4}$ Gray.

Διάγραμμα αστερισμού σήματος QPSK με AWGN θόρυβο 5dB:



Διάγραμμα αστερισμού σήματος QPSK με AWGN θόρυβο 15dB:



Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα σύμβολα απέχουν μεταξύ τους απόσταση περίπου $2\sqrt{E_{bit}}$, γιατί έχουμε $E_{bit} = 4,5$ και παίρνοντας υπόψιν και τις θέσεις που βρίσκονται τα σημεία.

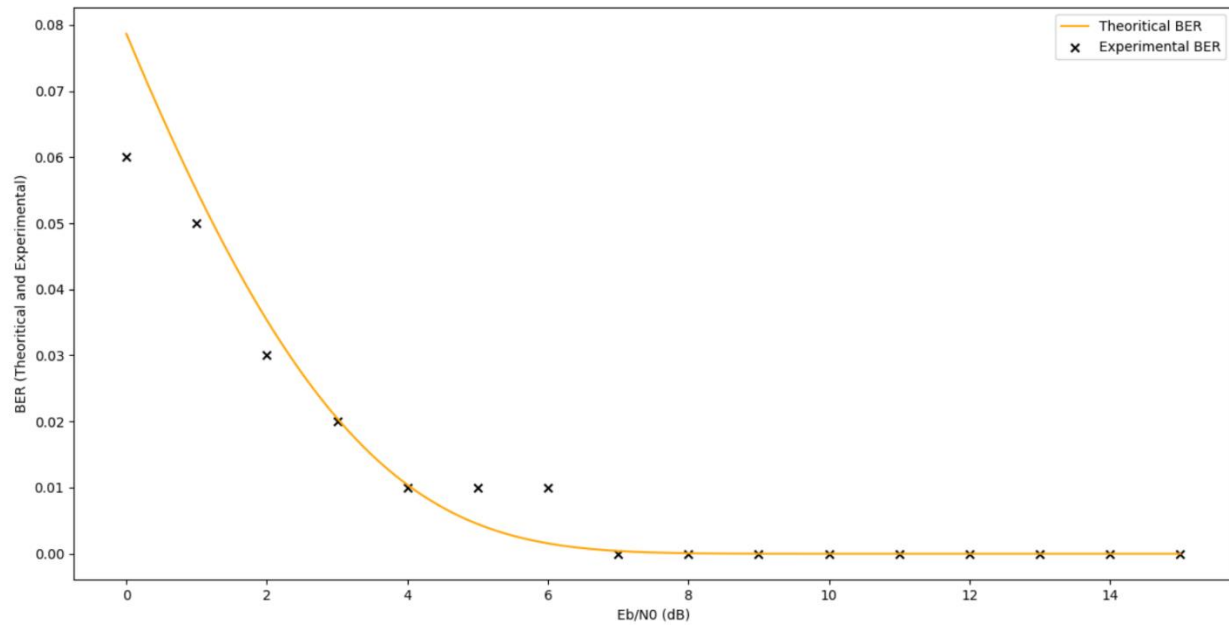
Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο θόρυβος AWGN αλλοιώνει το διάγραμμα αστερισμού αυτού του σήματος, με αποτέλεσμα να γίνεται δύσκολη η αντιστοίχιση των τεσσάρων συμβόλων με την κατάλληλη περιοχή απόφασης. Αυτό το πρόβλημα δυσχεραίνεται στην περίπτωση του θορύβου με $E_b/N_0=5\text{dB}$, αφού η κατανομή των σημείων είναι πιο χαοτική με αποτέλεσμα οι αποστάσεις να μειώνονται.

γ’

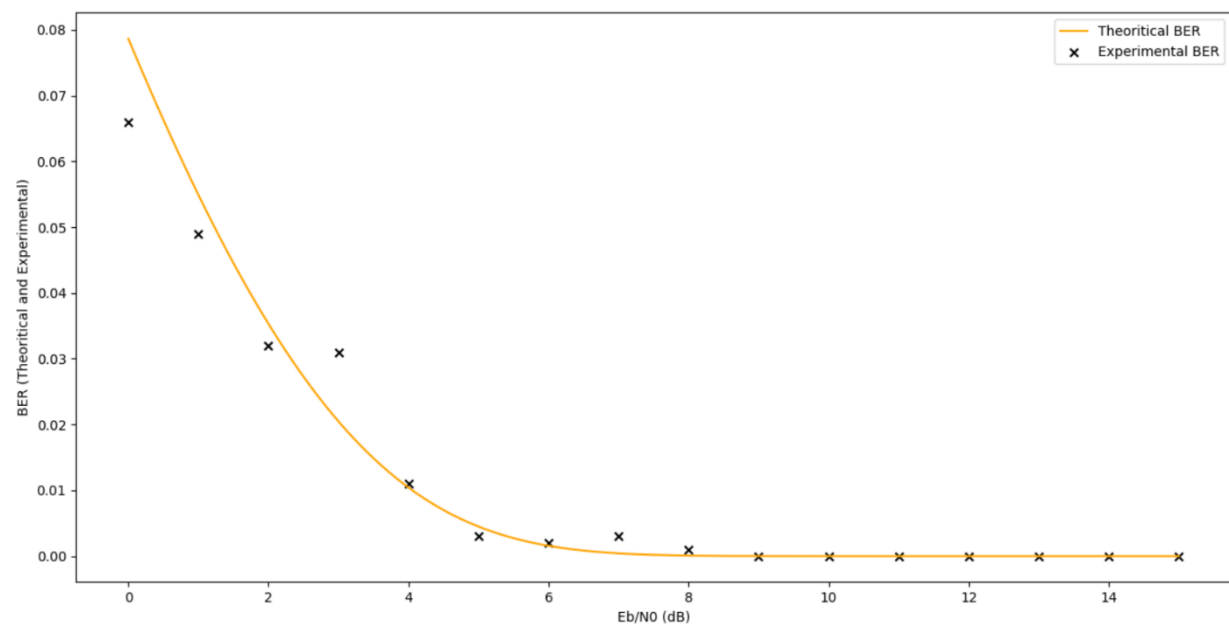
Κατά τη διαμόρφωση QPSK σημάτων, η πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου (BER) δίνεται από τον τύπο:

$$P[\text{error}]_{\text{QPSK}} = Q(x) * \sqrt{\frac{E_{bit}}{N_0}}, \text{ όπου } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du.$$

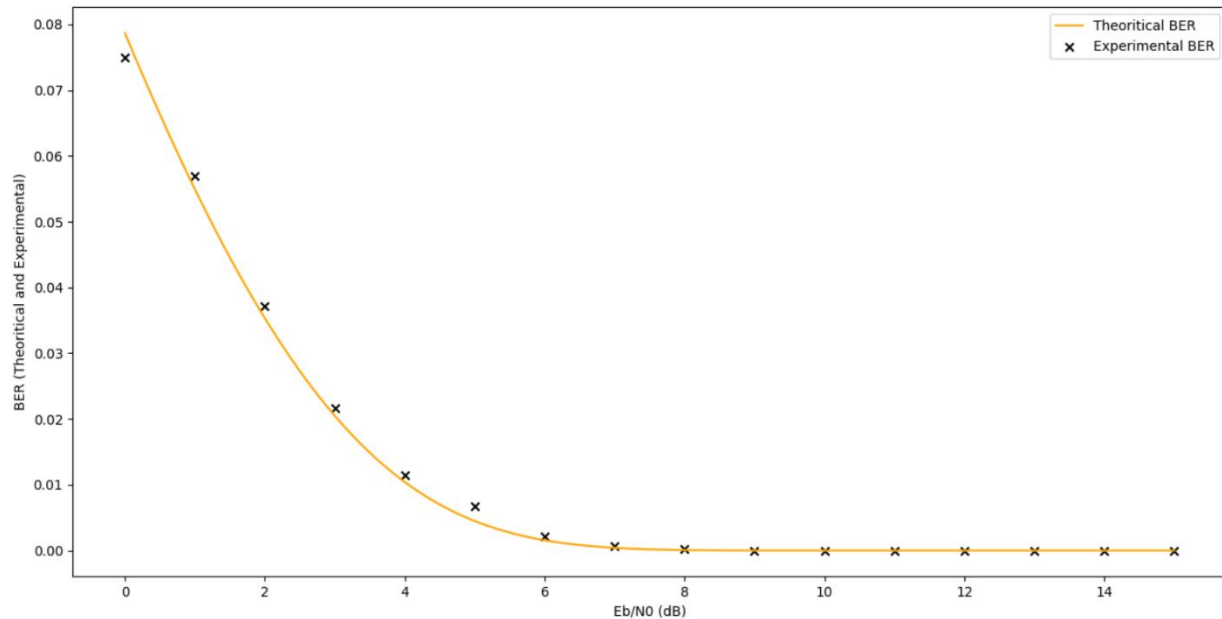
Διάγραμμα BER για 100 δείγματα:



Διάγραμμα BER για 1000 δείγματα:



Διάγραμμα BER για 10000 δείγματα:



Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι οι τιμές της «πειραματικής» Πιθανότητας Εσφαλμένου Ψηφίου (BER) είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες τιμές της θεωρητικής καμπύλης και όσο αυξάνονται τα δείγματα, που λαμβάνονται. Επιπλέον, όσο ο λόγος E_b/N_0 αυξάνεται, η πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου για διαμόρφωση QPSK μειώνεται.

Συγκρίνοντας το διάγραμμα BER της διαμόρφωσης QPSK με αυτό της διαμόρφωσης B-PAM, παρατηρούμε ότι οι δύο θεωρητικές καμπύλες ταυτίζονται όταν αναφερόμαστε σε αντίστοιχα συστήματα, όμως στους πειραματικούς υπολογισμούς οι τιμές της QPSK δίνουν σε ορισμένες περιπτώσεις μικρότερη πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου από τη διαμόρφωση B-PAM.

δ'

Στα πλαίσια αυτού του υποερωτήματος, θα χρησιμοποιηθεί το αρχείο κειμένου shannon_even.txt, αφού ο αριθμός μητρώου είναι $AM=03117048 \Leftrightarrow A = 0+4=8 \Leftrightarrow A=12$, αφού στην εκφώνηση δεν ζητάει να φτάσουμε το άθροισμα μέχρι τέλους, όπως ζητήθηκε στο πρώτο ερώτημα.

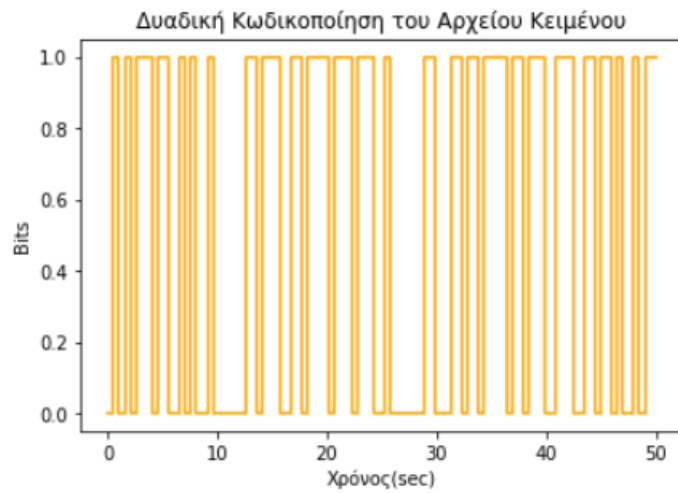
Το αρχείο αυτό που δόθηκε υπέστη επεξεργασία, αφού στην αρχή διαβάστηκαν οι γραμμές του και ύστερα μετατράπηκε η κωδικοσειρά ASCII σε binary (bits), δηλαδή σε ένα αρχείο δυαδικής μορφής.

Σε αυτό το ερώτημα θα γίνει κβάντιση του σήματος, με ομοιόμορφο κβαντιστή $R=8$ bits. Το σήμα εκφράζεται σε δυαδική μορφή οπότε ισχύουν τα εξής:

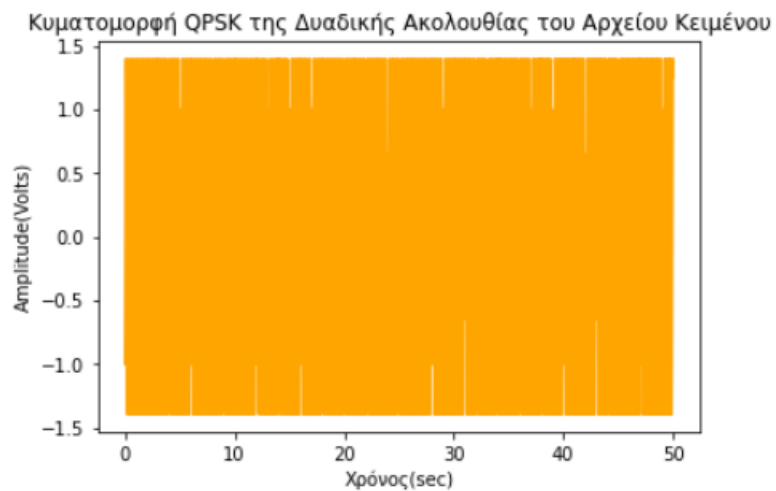
- συνολικός αριθμός επιπέδων: $L = 2^R = 256$
- μέγεθος βήματος: $\text{Step} = \frac{y_{1\max} - y_{1\min}}{L} = \frac{y_{1\max} - y_{1\min}}{2^R}$

Επομένως, προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα με ομοιόμορφη κβάντιση και με διαμόρφωση κατά QPSK.

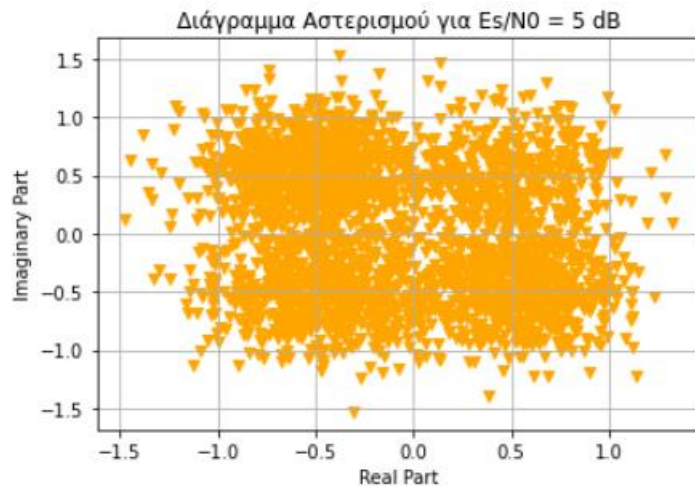
Διάγραμμα δυαδικής κωδικοποίησης του αρχείου:



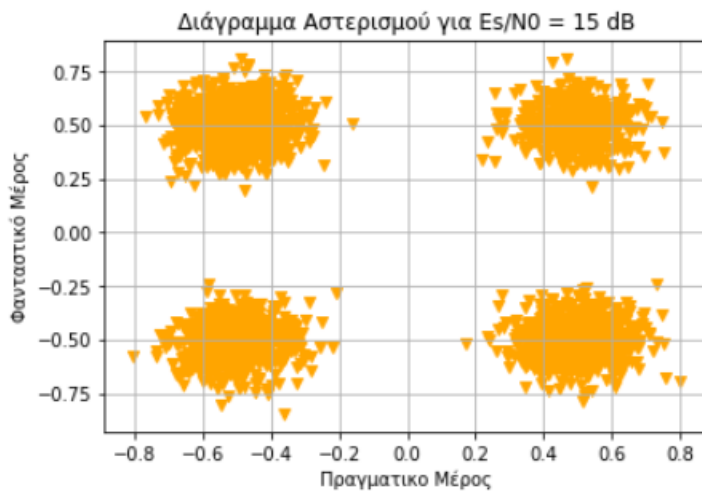
Διάγραμμα QPSK της δυαδικής ακολουθίας του αρχείου:



Διάγραμμα αστερισμού QPSK με θόρυβο AWGN 5dB:



Διάγραμμα αστερισμού QPSK με θόρυβο AWGN 15dB:



Για την πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία, κατά την οποία υπολογίστηκαν η θεωρητική και η πειραματική τιμή της πιθανότητας εσφαλμένου ψηφίου (BER) κατά τη μετάδοση του διαμορφωμένου κατά QPSK κβαντισμένου σήματος μέσα από κανάλι θορύβου AWGN για τις δύο περιπτώσεις E_s/N_0 . Συγκεκριμένα, βρέθηκαν:

For $E_s/N_0 = 5\text{dB}$:

Experimental BER = 0.03480320699708455

Theoretical BER = 0.03767898814746339

For $E_s/N_0 = 15\text{dB}$:

Experimental BER = 0.0

Theoretical BER = 9.361039990685043e-09

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών μετρήσεων είναι μικρή και ότι η απόκλιση αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται ο λόγος E_s/N_0 , αφού η απόκλιση για $E_s/N_0=15\text{dB}$ είναι μεγαλύτερη για $E_s/N_0=5\text{dB}$.

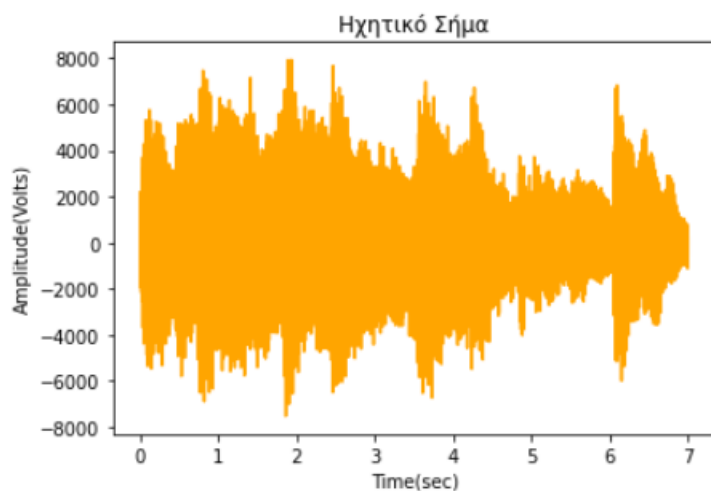
5^ο Ερώτημα:

Στα πλαίσια του ερωτήματος θα χρησιμοποιηθεί αρχείο ήχου τύπου .wav signed 16-bit PCM Mono 44100 Hz. Συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί το αρχείο soundfile2_lab2.wav, αφού ο αριθμός μητρώου δίνει $AM = 03117048 \Leftrightarrow AM = 0+4+8 \Leftrightarrow AM = 12$, ομοίως με πριν.

α’

Το αρχείο, που δόθηκε, υπέστη επεξεργασία αφού διαβάστηκε και μετατράπηκε σε μορφή για να φανεί στην παρακάτω γραφική παράσταση.

Διάγραμμα Ηχητικού σήματος:

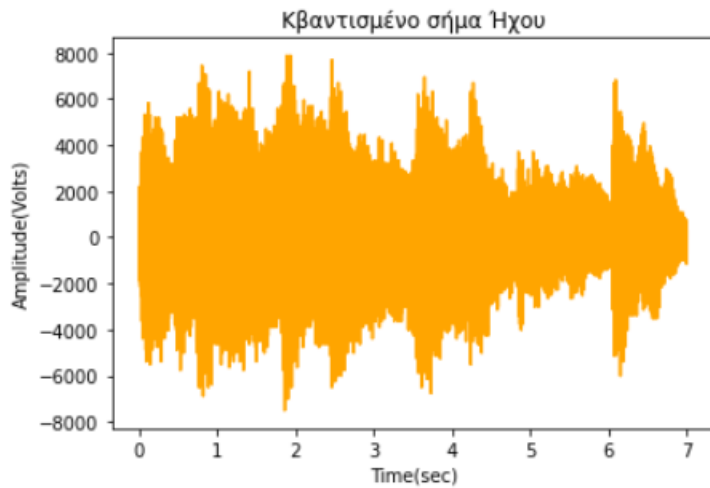


β’

Στη συνέχεια, το ηχητικό σήμα αυτό υπέστη κβάντιση με ομοιόμορφο κβαντιστή $R=8$ bits. Το σήμα εκφράζεται σε δυαδική μορφή, οπότε ισχύουν οι τύποι:

- συνολικός αριθμός επιπέδων: $L = 2^R = 256$
- μέγεθος βήματος: $\Delta = \frac{y1\max - y1\min}{L} = \frac{y1\max - y1\min}{2^R}$

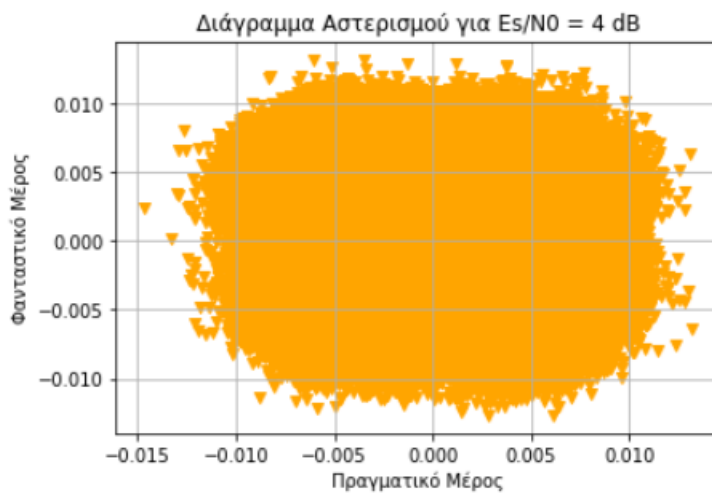
Διάγραμμα κβαντισμένου σήματος ήχου:



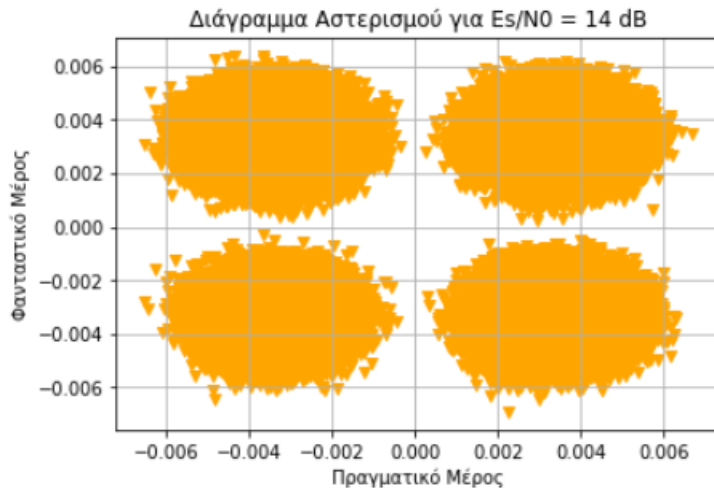
ε΄

Σε αυτό το ερώτημα φαίνονται τα διαγράμματα αστερισμού για το διαμορφωμένο κατά QPSK κβαντισμένο σήμα, ως απεικόνιση με κωδικοποίηση (0) Gray για τις δύο περιπτώσεις E_s/N_0 , 4 και 14 dB αντίστοιχα

Διάγραμμα αστερισμού για σήμα με θόρυβο AWGN 4dB:



Διάγραμμα αστερισμού για σήμα με θόρυβο AWGN 14dB:



Ομοίως με τα προηγούμενα ερωτήματα, υπολογίστηκαν η θεωρητική και η πειραματική τιμή της πιθανότητας εσφαλμένου ψηφίου (BER) κατά τη μετάδοση του διαμορφωμένου κατά QPSK κβαντισμένου σήματος $v(t)$ μέσα από κανάλι θορύβου AWGN για τις δύο περιπτώσεις E_s/N_0 .

For $E_s/N_0 = 4$ dB :

Experimental BER = 0.054597749791229375

Theoretical BER = 0.05649530174936165

For $E_s/N_0 = 14$ dB :

Experimental BER = 0.0

Theoretical BER = $2.6951481173667145 \times 10^{-7}$

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι η απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών μετρήσεων είναι μικρή και ότι η απόκλιση αυτή μειώνεται* όσο αυξάνεται ο λόγος E_s/N_0 , αφού η απόκλιση για $E_s/N_0 = 14$ dB είναι μικρότερη για $E_s/N_0 = 4$ dB.

*Άρα, σε σύγκριση με το σήμα QPSK του ερωτήματος 4, έχει αντίστροφη συμπεριφορά.