

עבודה בתקשורת ספרתית 8PSK Modulation

ליאל צמח, 207849415

נריה חדד, 207338781

מתרגל: מר פאר טל

מרצה: ד"ר משה זוהר

תוכן עניינים

3.....	שאלות הכנה:
11.....	סימולציית MATLAB:
12.....	יצירת בסיס נתונים:
12.....	בניית משדר:
13.....	מקודד:
14.....	שידור בסיס נתונים ראשון:
15.....	שידור בסיס נתונים שני:
17.....	בניית המקלט:
17.....	שידור ראשון לפני ואחרי מודולציה:
20.....	קליטה עם חוסר סנכרון:
22.....	קליטה עם רעש:
25.....	קליטה עם הפרש פאזה קבוע:
29.....	שיערוך פאזה הגל נושא:

שאלות הכנה :

1. התיאור המתמטי של האות המשודר $S_M(t)$ בצורתו הבסיסית באפנון PSK הוא:

$$S_M(t) = \text{Re}\{S_d(t) \cdot \sqrt{2P_c} \cdot e^{jw_c t}\}$$

כאשר $S_d(t)$ הוא חלק המידע, ו $\sqrt{2P_c} \cdot e^{jw_c t}$ הוא הגל נושא.

נחלק כל סימבול לשני תתי סימבולים אשר כל תת-סימבול מוכפל בפונקציית גל נושא אחרת החלק הממשי יוכפל ב $\cos(w_c t)$ והחלק המדומה יוכפל ב $-\sin(w_c t)$

כתוצאה מהכפלות אלו החלק הממשי והמדומה יהפכו לאורתוגונליים ונוכל לשדר אותם יחד בערוץ.

ונקבל את הביטוי הבא :

$$S_M(t) = \sqrt{2P_c} \cdot \left(\sum_k |A_k| \cos(\varphi_k) \cdot g(t - KT_S) \cdot \cos(w_c t) - \sum_k |A_k| \sin(\varphi_k) \cdot g(t - KT_S) \cdot \sin(w_c t) \right)$$

נגדיר:

$$S_{di} = \sum_k |A_k| \cos(\varphi_k) \cdot g(t - KT_S)$$

$$S_{dq} = \sum_k |A_k| \sin(\varphi_k) \cdot g(t - KT_S)$$

$$A_c = \sqrt{2P_c}$$

ונכתוב כך:

$$S_M(t) = A_c \cdot (S_{di} \cdot \cos(w_c t) - S_{dq} \cdot \sin(w_c t))$$

2. כדי לקבל את הביטוי הנ"ל נעשה התמרת פורייה לביטוי מהסעיף הקודם :

$$F\{S_M(t)\} = \frac{A_c^2}{4} \cdot [S_{di}(f - f_c) + S_{dq}(f - f_c) + S_{di}(f + f_c) + S_{dq}(f + f_c)]$$

$$S_d(f) = \frac{\sigma^2}{T_s} |G(f)|^2 + \frac{\mu^2}{T_s^2} \sum_k \left| G\left(\frac{k}{T_s}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T_s}\right)$$

נחשב את התוחלת והשונות שלנו בהתאם לאפנון שקיבלנו, PSK בגודל 8

מכיוון שמדובר במילון סימטרי (PSK) נומר כי $\mu = 0$

נחשב את השונות :

$$\sigma^2 = \sum_M p_i * |A_i|^2 - \mu^2 = 1$$

נסביר את החישוב: הסתברות השגיאה של כל סימבול היא 0.125 מכיוון שמדובר ב-PSK ידוע כי כל הסימבולים על מעגל היחידה ולכן גודלם 1 ובהתאם לתוחלת שמצאנו נקבל שהשונות היא 1.

נחשב $G(f)$:

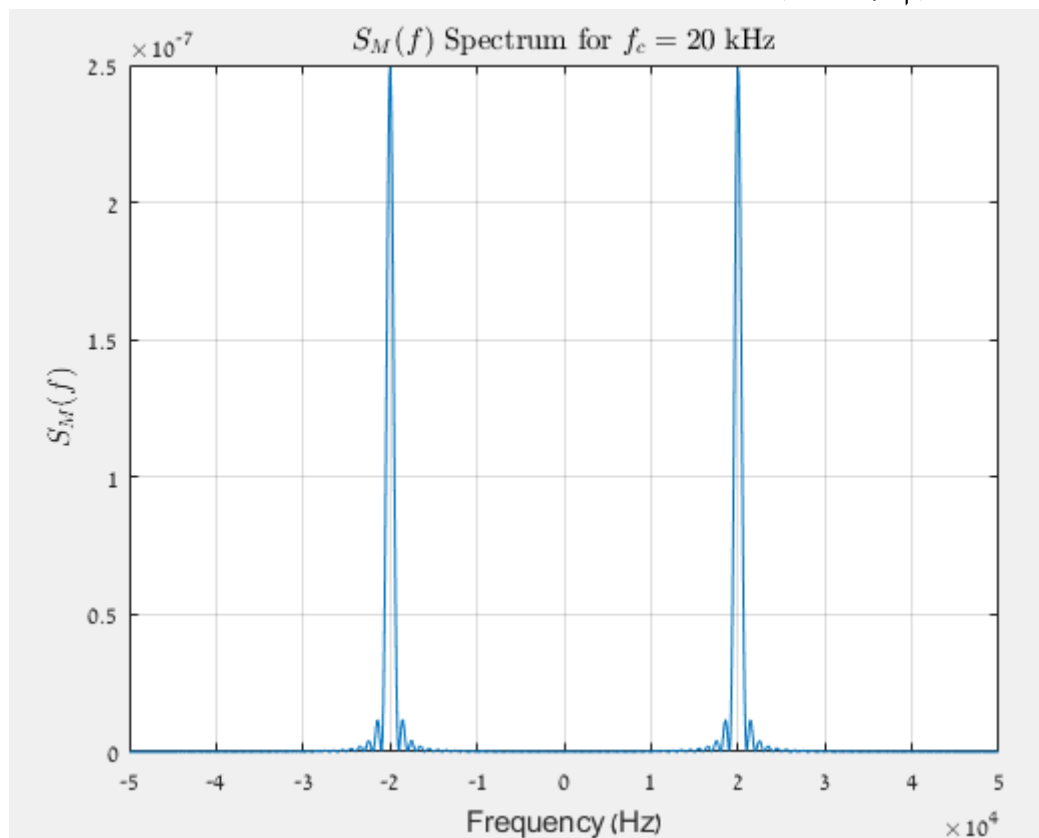
$$G(f) = F\{g(t)\} = T_s \text{sinc}(\pi T_s f) e^{-j\pi f T}$$

$$S_d(f) = T_s \text{sinc}(\pi T_s f)^2$$

ונקבל:

$$S_M(f) = \frac{A_c^2 * T_s}{4} \cdot [\text{sinc}^2(\pi T_s (f - f_c)) + \text{sinc}^2(\pi T_s (f + f_c))]$$

נציג את הגרף על פי הדרישות :



כפי שציפינו לקבל מפונקציית הסינק הכפולה.

3. הקשר נתון בנוסחה הבאה :

$$R_b = k_b * R_s$$

$$R_s = \frac{BW}{2}$$

$$k_b = \log_2 M$$

$$R_b = K * 2f_{max}$$

כאשר:

BW – רוחב פס, M – גודל המילון, K – מספר הביטים לדגימה.

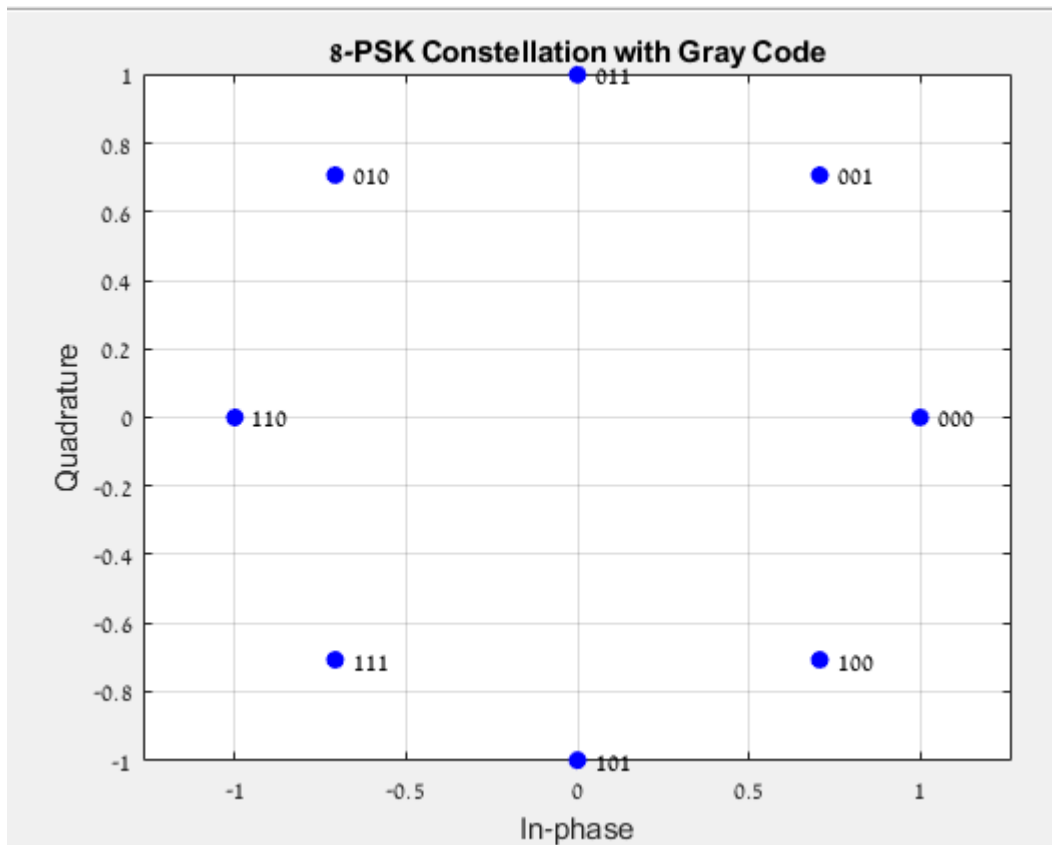
4. התכונה המיוחדת של קוד גריי היא שבין 2 סימבולים סמוכים יש שינוי רק בביט אחד מה שהופך אותו למאוד יעיל עבור זיהוי שגיאות

כאשר יש שגיאת סימבול יהיה פענוח שגוי ולרוב של סימבול סמוך.

לפי גריי ניתן להבטיח כי בכל שגיאה שבה פוענח סימבול הסמוך לסימבול האמיתי השגיאה תתבטא בביט אחד בלבד.

טבלת סימבולים וקוד גריי עבור מערכת QAM-16

Gray Code	Binary Value	Complex Value	Symbol
000	000	$0i + 1.00$	A1
001	001	$0.71i + 0.71$	A2
011	010	$1.00i + 0.00$	A3
010	011	$0.71i + 0.71-$	A4
110	100	$0i + 1.00-$	A5
111	101	$0.71i - 0.71-$	A6
101	110	$1.00i - 0.00$	A7
100	111	$0.71i - 0.71$	A8



6. באפנון שלנו הקונסטלציה סימטרית לכן מספיק לחשב את המרחק בין 2 סימבולים סמוכים פעם אחת.

על פי נוסחת הדיסטנס בין 2 נקודות נקבל:

$$d = \sqrt{(1 - 0.707)^2 + (0 - 0.707)^2} = 0.765$$

7. רעש אדטיבי: רעש הקיים בכל מערכת תקשורת, זהו רעש תרמי גאוזי לבן.

נגרם מהתנועה התרמית של אלקטרונים בחומר מוליך, כמו בתנאים של חום.

רעש זה נגרם על ידי התנועות הלא מסודרות של חלקיקים חופשיים בתוך מעגלים חשמליים. הרעש התרמי מופיע בכל מכשירי האלקטרוניקה, והוא מדוד ביחידות של רעש גזי.

תוספת הרעש תקטין כמובן את SNR .

רוחב פס מוגבל (ISI): מתאר את התופעה שבה סימבולים שונים במערכת תקשורת משפיעים זה על זה בגלל מגבלות רוחב הפס של הערוץ.

כאשר ערוץ התקשורת אינו אידיאלי ויש לו רוחב פס מוגבל, התגובה של הערוץ לסיגנל יכולה לגרום לשיבוש בתדרים שונים. התוצאה היא שסימבולים הנשלחים אחד אחרי השני עלולים להתערב זה בזה, ולגרום לבלבול בקבלה.

לדוגמה, אם סיגנל מסוים נשלח דרך ערוץ עם תגובה דינמית, החלקים השונים של הסיגנל יכולים להתפשט ולהתערבב עם חלקים של סימבולים סמוכים. התוצאה היא שהקבלה של סימבול אחד עלולה לכלול גם מידע מהסימבולים הקודמים והבאים, מה שמוביל לירידה בדיוק ולשגיאות בתקשורת.

תופעה זו מחייבת שימוש בטכניקות תיקון שגיאות, פילטרים מתאימים או שיטות אחרות כדי למזער את השפעת ה-*ISI* ולשפר את הביצועים של מערכת התקשורת.

הסחת פאזה והסחת תדר: הן תופעות שנגרמות כאשר אות עובר דרך ערוץ תקשורת שאינו אידיאלי, והן משפיעות על איכות האות הנקלט

הסחת פאזה: מתייחסת לשינוי בזווית הפאזה של האות במהלך המעבר שלו דרך הערוץ. תופעה זו יכולה להתרחש כאשר האות עובר דרך ערוץ עם תגובה אוטומטית שאינה ליניארית, כמו פילטרים או רכיבים עם התנהגות מורכבת.

שינוי זה בפאזה עלול לגרום ל-*distortion* באות הנקלט ולהשפיע על יכולת הדמיון שלו לאות המקורי. במיוחד במערכות דיגיטליות, שינויים בפאזה יכולים להוביל לשגיאות בקביעת ה-"1" וה-"0" בסימבולים הדיגיטליים.

הסחת תדר: מתייחסת לשינוי בתדר של האות לאחר שהעבר דרך הערוץ. זה יכול לקרות כתוצאה מהשפעות שונות כמו רעש, דחיסת תדרים, או תופעות פיזיקליות כמו דופלר.

ההסחה בתדר גורמת לכך שהתדר של האות הנקלט שונה מהתדר של האות שנשלח, מה שעלול לגרום ל-*distortion* ולירידה באיכות האות. במיוחד במערכות תקשורת בתדר גבוה, אפילו שינוי קטן בתדר יכול להשפיע על ביצועי המערכת.

שתי התופעות הללו, הסחת פאזה והסחת תדר, מצריכות התאמות טכניות כמו תיקון פאזה, תיקון תדר, או שימוש בטכניקות מתקדמות כדי לשמור על איכות האות ולמזער את השפעת השיבושים.

8.

$$SNR_{bit} = \frac{SNR_{sym}}{\log_2 M} = \frac{SNR_{sym}}{k_b}$$

$$SNR_{sym} = \frac{E_T}{2N_0BW} \Rightarrow SNR_{bit} = \frac{E_T}{2N_0BWk_b}$$

הסבר:

יחס אות לרעש לביט מודד את היחס בין האנרגיה של ביט אחד לבין צפיפות הרעש. זהו מדד לאיכות השידור של ביט בודד ומדגים כיצד הרעש משפיע על כל ביט בנפרד.

יחס אות לרעש לסימבול מודד את היחס בין האנרגיה של סימבול אחד לבין צפיפות הרעש. זהו מדד לאיכות השידור של סימבול שלם, ומהווה מדד לחשיבות של איכות השידור עבור כל סימבול בתקשורת, שמייצג את המידע שנשלח.

9. נרשום את שתי הפונקציות תחילה:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$$

נעבוד על Q נעשה הצבת משתנים ונומר כי: $\sqrt{2}t = y$ ולכן $\sqrt{2}dt = dy$ וכמובן נשנה את הגבולות ונציב:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{2}x}^\infty e^{-t^2} dt$$

ומכאן נקבל:

$$\operatorname{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$$

$$Q(x) = 0.5\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$$

10. בהתאם למבנה המקלט המרוכב באפנון PSK נומר כי q_{k_i} עבור החלק העליון של המקלט ו- q_{k_q} עבור התחתון.

על פי מבנה המקלט שראינו בהקלטה נוכל לכתוב:

$$q_{k_i} = \int_0^{T_s} x_r(t) * A_0 \cos(\omega_c t) g(t) dt = \int_0^{T_s} [s_r(t) + n_r(t)] * A_0 \cos(\omega_c t) g(t) dt$$

נפריד את החלק של המידע:

$$a_{k_i} = \int_0^{T_s} \sqrt{2P_r} [A_{mi} \cos(\omega_c t) g(t) - A_{mq} \sin(\omega_c t) g(t)] A_0 \cos(\omega_c t) g(t) dt$$

מכאן נפתח סוגריים ונשים לב שקיבלנו אינטגרל על מחזור שלם של פונקציית קוסינוס בריבוע ועל פונקציית סינוס כפול קוסינוס.

על פי זהויות טריגונומטריות של סינוס על זווית כפולה וקוסינוס על זווית כפולה נקבל שהמכפלה של סינוס וקוסינוס תתאפס ואילו קוסינוס בריבוע יהפוך ל-0.5 ומכאן נקבל:

$$a_{k_i} = \frac{A_0 A_{mi} \sqrt{2P_r}}{2} \int_0^{T_s} g^2(t) dt = \frac{E_g A_0 A_{mi} \sqrt{P_r}}{\sqrt{2}}$$

נעבור לשונות הרעש, נציב:

$$n_r(t) = n_i(t) \cos(\omega_c t) - n_q(t) \sin(\omega_c t)$$

$$z_{k_i} = \int_0^{T_s} [n_i(t) \cos(\omega_c t) - n_q(t) \sin(\omega_c t)] * A_0 \cos(\omega_c t) g(t) dt$$

על פי אותן זהויות מחישוב קודם נומר כי:

$$z_{k_i} = \frac{A_0}{2} \int_0^{T_s} n_i(t) g(t) dt \Rightarrow$$

$$\sigma_{z_i}^2 = \left(\frac{A_0}{2}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} G_{n_i}(f) * |G(f)|^2 df = \frac{A_0^2 * N_0}{4} E_g$$

עבור החלק התחתון של המקלט:

$$\begin{aligned} q_{k_q} &= \int_0^{T_s} x_r(t) * -A_0 \sin(\omega_c t) g(t) dt \\ &= \int_0^{T_s} [s_r(t) + n_r(t)] * -A_0 \sin(\omega_c t) g(t) dt \end{aligned}$$

נפריד את החלק של המידע:

$$a_{k_q} = \int_0^{T_s} \sqrt{2P_r} [A_{mi} \cos(\omega_c t) g(t) - A_{mq} \sin(\omega_c t) g(t)] (-A_0) \sin(\omega_c t) g(t) dt$$

מכאן נפתח סוגריים ונשים לב שקיבלנו אינטגרל על מחזור שלם של פונקציית סינוס בריבוע ועל פונקציית סינוס כפול קוסינוס.

על פי זהויות טריגונומטריות של סינוס על זווית כפולה וקוסינוס על זווית כפולה נקבל שהמכפלה של סינוס וקוסינוס תתאפס ואילו סינוס בריבוע יהפוך ל-0.5 ומכאן נקבל:

$$a_{k_q} = \frac{A_0 A_{mq} \sqrt{2P_r}}{2} \int_0^{T_s} g^2(t) dt = \frac{E_g A_0 A_{mq} \sqrt{P_r}}{\sqrt{2}}$$

נעבור לשונות הרעש, נציב:

$$n_r(t) = n_i(t) \cos(\omega_c t) - n_q(t) \sin(\omega_c t)$$

$$z_{k_q} = \int_0^{T_s} [n_i(t) \cos(\omega_c t) - n_q(t) \sin(\omega_c t)] * (-A_0) \sin(\omega_c t) g(t) dt$$

על פי אותן זהויות מחישוב קודם נומר כי:

$$z_{k_q} = \frac{A_0}{2} \int_0^{T_s} n_i(t) g(t) dt \Rightarrow$$

$$\sigma_{z_q}^2 = \left(\frac{A_0}{2}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} G_{n_i}(f) * |G(f)|^2 df = \frac{A_0^2 * N_0}{4} E_g$$

עכשיו נכתוב את הביטוי למרחק המינימלי של הקונסטלציה, בעצם מה שכבר חישבנו כפול a_k שחישבנו כעת

$$d_{min} = 0.765 * \frac{E_g A_0 \sqrt{P_r}}{\sqrt{2}} = 0.54119 E_g A_0 \sqrt{P_r}$$

עכשיו נחשב הסתברות לשגיאת סימבול. מכיוון והקונסטלציה סימטרית הסתברות השגיאה עבור כל סימבול זהה לכן נחשב עבור מקרה יחיד ונשליך על השאר.

$$p(er \setminus A_1) = 1 - \left[1 - Q\left(\frac{d_{2,1}}{2\sigma}\right) \right] \left[1 - Q\left(\frac{d_{3,1}}{2\sigma}\right) \right] \left[1 - Q\left(\frac{d_{4,1}}{2\sigma}\right) \right] \left[1 - Q\left(\frac{d_{5,1}}{2\sigma}\right) \right] \\ \left[1 - Q\left(\frac{d_{6,1}}{2\sigma}\right) \right] \left[1 - Q\left(\frac{d_{7,1}}{2\sigma}\right) \right] \left[1 - Q\left(\frac{d_{8,1}}{2\sigma}\right) \right]$$

על פי הקונסטלציה והטבלת ערכים ניתן לראות כי המרחק המינימלי מהסימבול A_1 הוא מהסימבולים A_2, A_8 לכן כל שאר המרחקים גדולים יותר וכידוע לנו מפונקציית Q שכל שהערך גדול יותר כך היא מתקרבת ל-0 לכן נומר בקירוב כי:

$$p(er \setminus A_1) = 1 - \left[1 - Q\left(\frac{d_{min}}{2\sigma}\right) \right]^2 = 1 - \left[1 - 2Q\left(\frac{d_{min}}{2\sigma}\right) - Q^2\left(\frac{d_{min}}{2\sigma}\right) \right]$$

גם כאן Q בריבוע תשאף ל-0 ונקבל:

$$p(er \setminus A_1) = 2Q\left(\frac{d_{min}}{2\sigma}\right)$$

$$p_{err} = 2Q\left(\frac{0.54119 E_g A_0 \sqrt{P_r}}{2\sqrt{\frac{A_0^2 * N_0}{4} E_g}}\right) = 2Q(0.54119 \sqrt{\frac{P_r E_g}{N_0}})$$

נשתמש בקשר שידוע לנו:

$$\gamma_d = \frac{P_r E_g}{N_0}$$

$$p_{err} (sym) = 2Q(0.54119 \sqrt{\gamma_d})$$

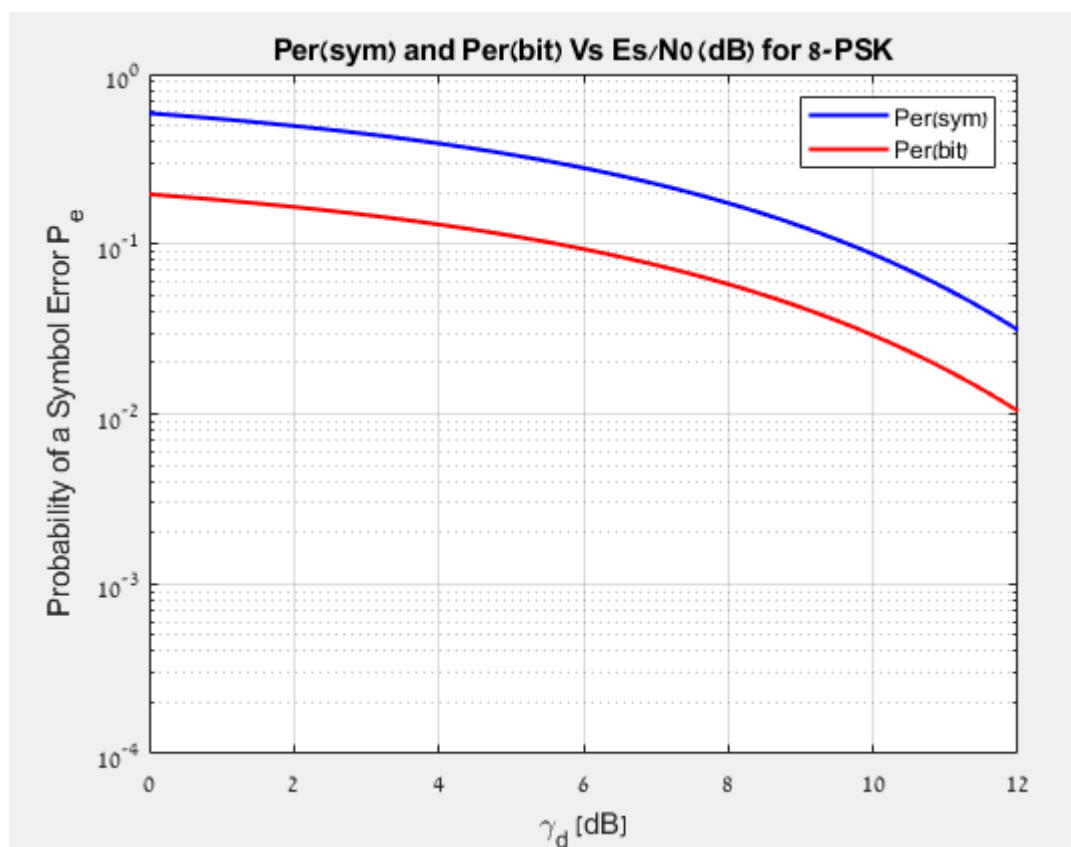
באפנון זה כל סימבול מיוצג על ידי 3 ביטים לכן:

$$p_{err} (bit) = \frac{p_{err} (sym)}{3} = \frac{2}{3} Q(0.54119 \sqrt{\gamma_d})$$

באמצעות הקשר בין פונקציית Q לבין $erfc$ במטלב שמצאנו בסעיפים קודמים נציג את הקשר בין הגרפים:

$$p_{err} (sym) = erfc(0.54119 \sqrt{\frac{\gamma_d}{2}})$$

$$p_{err} (bit) = \frac{1}{3} erfc(0.54119 \sqrt{\frac{\gamma_d}{2}})$$



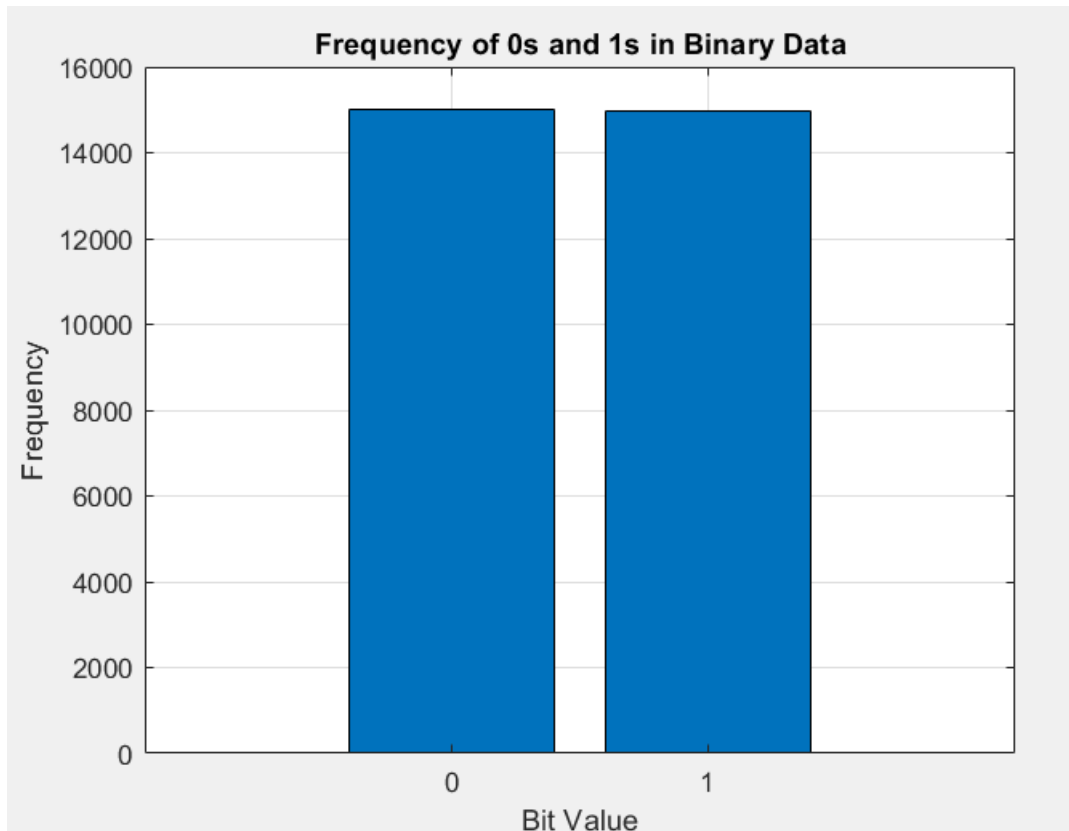
הג

פרק 3: הסימולציה

חלק 1: יצירת בסיס נתונים

נתחיל מליצור 2 בסיסי נתונים כמו שנדרשנו בתרגיל כאשר הבסיס נתונים הראשון יכיל את כל צירופי הביטים לסימבול האפשריים במערכת בהתאם לגודל שהתבקשנו במקרה שלנו זה יהיה מהצורה $\{000,001,\dots\}$ וכן הלאה.

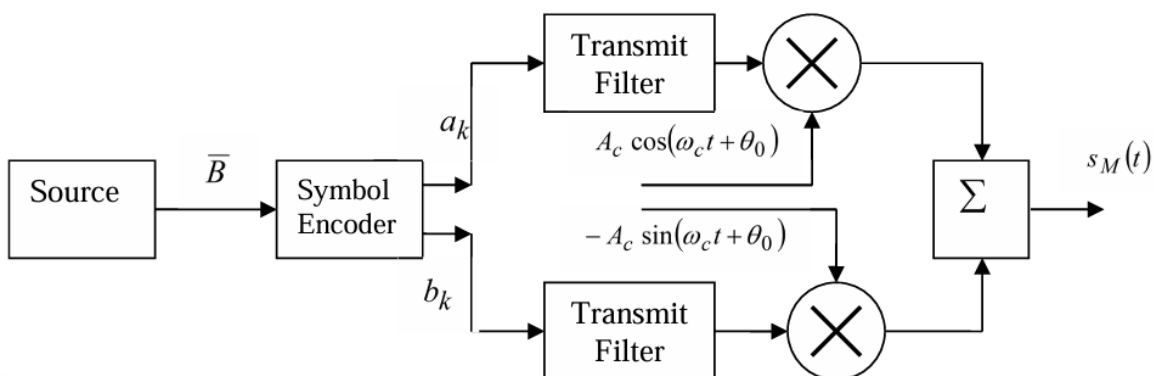
בסיס נתונים השני יהיה אותך אקראי שיצור בסיס נתונים של 30000 ביטים אקראיים לפי גודל המילון הנתון במקרה שלנו של $M=8$.



גרף זה מתאר את התפלגות הסתברות הביטים עבור בסיס הנתונים השני.

חלק 2: בניית המשדר

נעבור לתכנון המשדר על פי השרטוט שניתן באיור 2 בקובץ העבודה דיאגרמת המשדר,



באיור נתון מבנה בסיסי של משדרת מערכת תקשורת עבור האפנון שקיבלנו PSK .

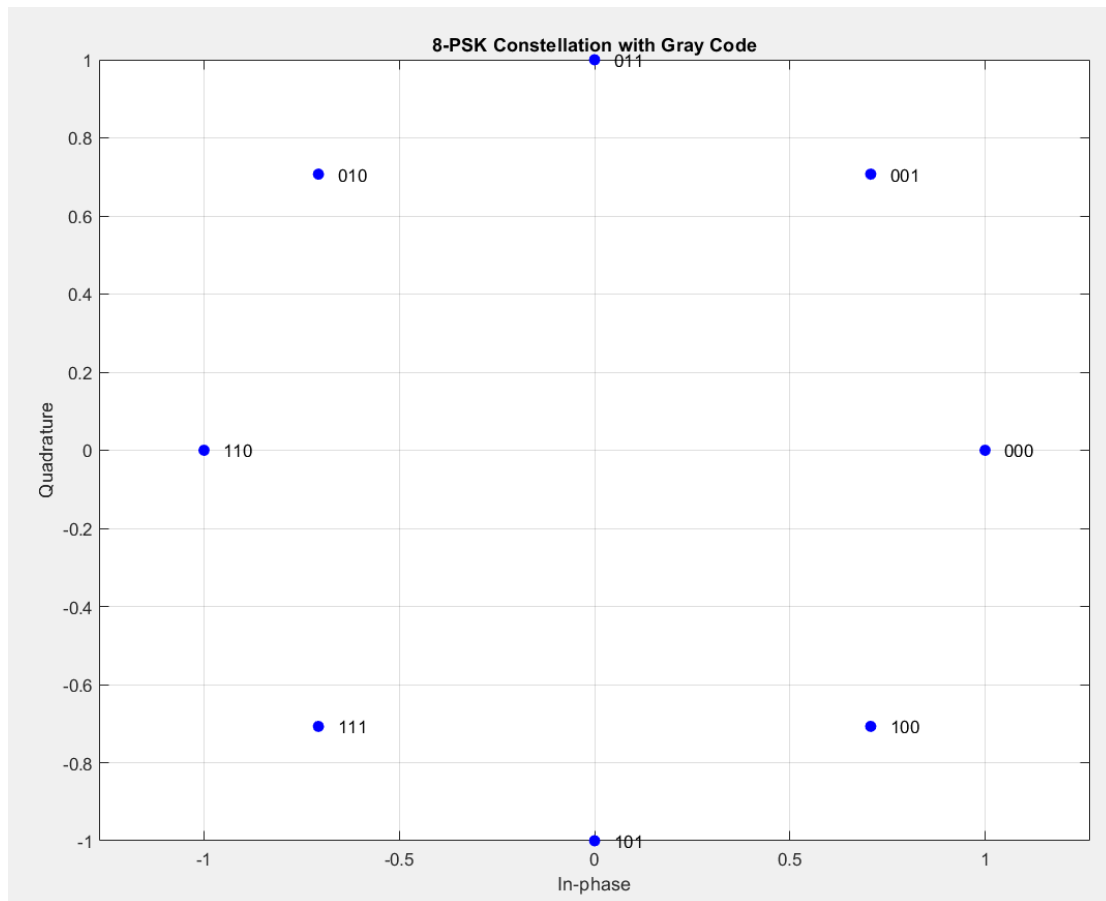


מקודד

את סדר הקידוד של הסימבולים נקבע על פי קוד GRAY.

Gray Code	Complex Representation	Symbol
000	$0.0000i + 1.0000$	A1
001	$0.7071i + 0.7071$	A2
011	$1.0000i + 0.0000$	A3
010	$0.7071i + 0.7071-$	A4
110	$0.0000i + 1.0000-$	A5
111	$0.7071i - 0.7071-$	A6
101	$1.0000i - 0.0000$	A7
100	$0.7071i - 0.7071$	A8

הקונסטילציה המתקבלת עבור קידוד זה:



שידור בסיס הנתונים הראשון

ידוע לנו שהביטוי לחישוב הספק האות נתון על פי הביטוי

$$P_M = \sum_{k=1}^8 p_k * p_{dk}$$

ההסתברות לשידור כל סימבול שווה ל: $P_K = \frac{1}{8}$

למציאת הספק של כל סימבול נעבוד לפי הנוסחה:

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} S_0^2(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} [D_{k_i} g(t) A_c \cos(\omega_c t) + D_{k_q} g(t) A_c \sin(\omega_c t)]^2 dt = \\ &= \frac{A_c^2}{2T_s} \int_0^{T_s} \underbrace{g^2(t)}_1 \underbrace{|D_k|^2}_1 dt = \frac{A_c^2}{2T_s} \cdot T_s = \frac{A_c^2}{2} \end{aligned}$$

וכך נקבל ש:

$$P_M = \sum_1^8 \frac{1}{8} * \frac{A_c^2}{2} = \frac{A_c^2}{2}$$

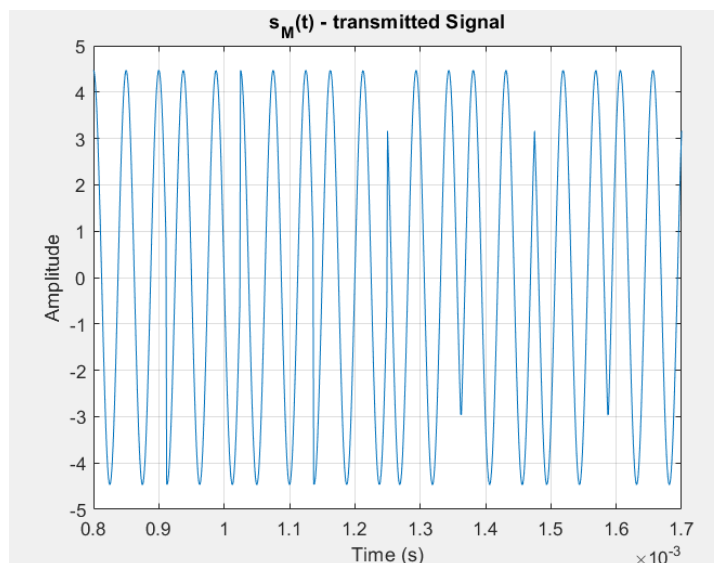
ומכאן את הקשר הבא:

$$A_c = \sqrt{2 * P_M}$$

בנתוני השאלה קיבלנו ש: $P_M = 10W$ נקבל ש: $A_c = \sqrt{20}$

שידור בסיס הנתונים הראשון

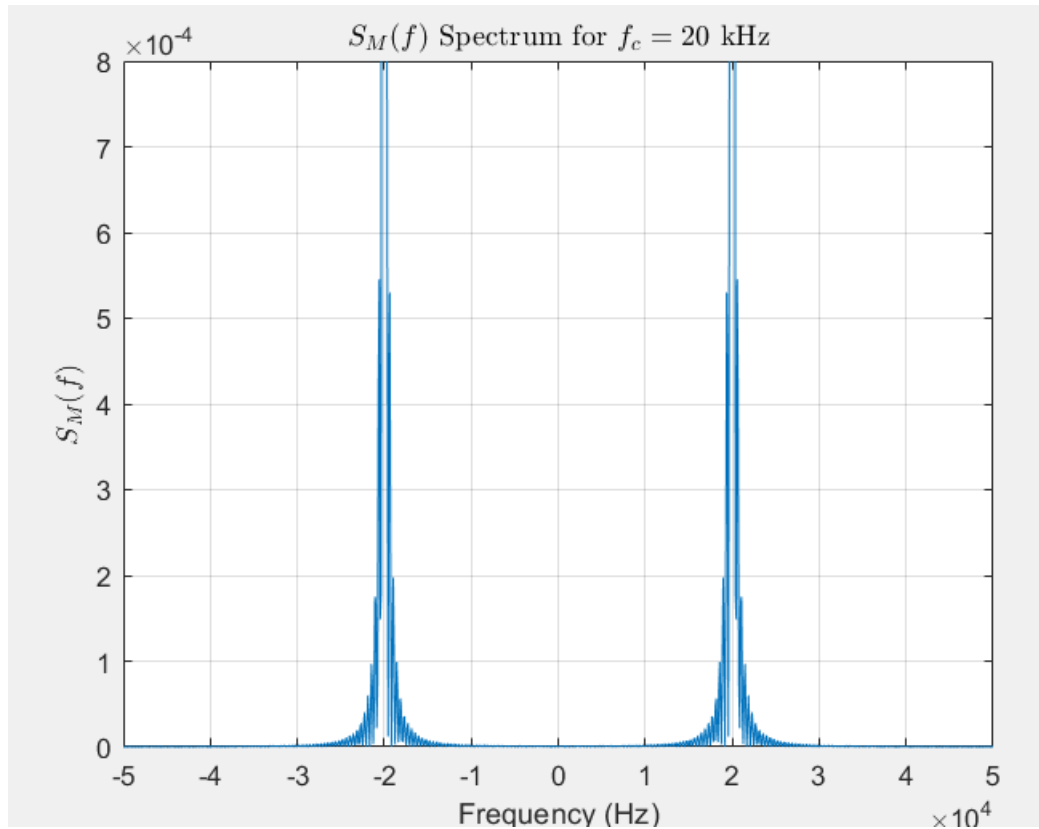
נציג כעת בצורה גרפית את האות המאופנן $S_M(t)$.



שידור בסיס נתונים שני:

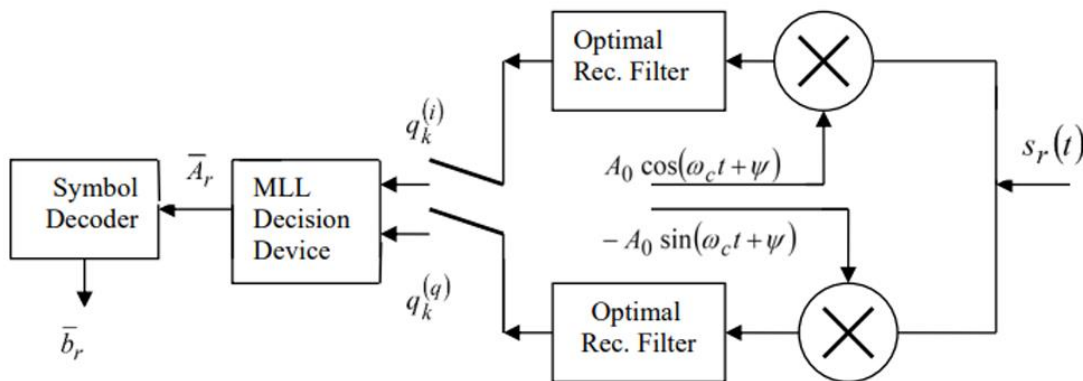
נעבור כעת לשידור הבסיס נתונים השני על האות המשודר בוצעה התמרת FFT.

נציג כעת את האות המאופן $S_M(t)$



ניתן לראות כי רכיבי התדר הדומיננטיים הינם ב-20KHZ הסיבה לכך היא המודולציה שלוקחת אותם ל-20KHZ בצד החיובי והשלילי של הציר בהתאם לתדר גל נושא.

חלק 3: בניית המקלט



התרשים מתאר מקלט של מערכת תקשורת דיגיטלית המבוססת על דמודולציה של אותות QPSK (או מערכת אפנון אחרת מבוססת פאזה). להלן שלבי המקלט:

האות הנקלט $S_r(t)$ - האות המתקבל לאחר השידור ומורכב משני רכיבים: רכיב \cos ורכיב \sin עם תדר מוביל ופאזה.

כפל עם גל נושא - בשלב זה, האות הנקלט מוכפל בשני אותות נושא אורתוגונליים (אות \cos ו- \sin) במטרה להפריד בין רכיב ה- In Phase (רכיב ממשי) לבין רכיב ה- Quadrature (רכיב מדומה).

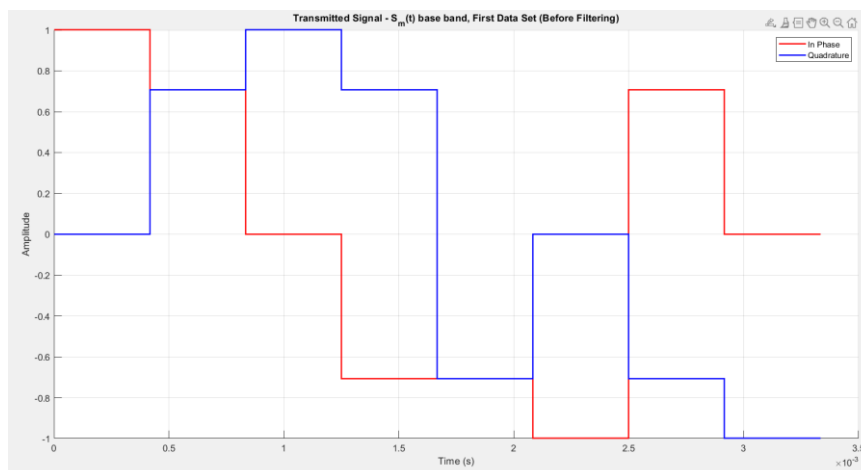
סינון בעזרת Optimal Rec Filter - שני הרכיבים המופרדים $q_k^{(i)}$ ו- $q_k^{(q)}$ עוברים דרך פילטר קבלה מיטבי (Optimal Receiver Filter), שתפקידו להסיר רעשים ולשפר את האותות.

החלטה על בסיס MLL Decision Device - רכיבי האות המסוננים $q_k^{(i)}$ ו- $q_k^{(q)}$ מוזנים אל יחידת החלטות (MLL Decision Device), שבה מתבצע חישוב להחלטה על הסמל הדיגיטלי שנקלט, בהתבסס על הקונסטלציה של האותות.

פענוח סמלים - לאחר החלטה על הסמל הנקלט, מתבצע פענוח הסמל לייצוג הביטים המקורי \bar{b}_r .

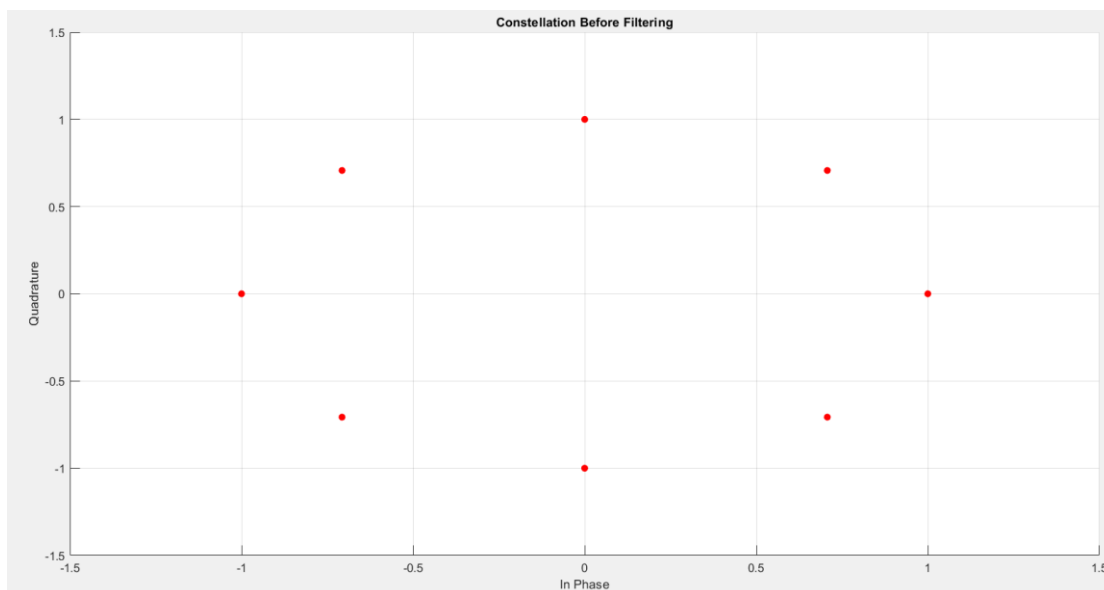
שידור בסיס נתונים ראשון מהמסדר למקלט

נציג את זה לפני מודולציה (אפנון)





הסימבולים המתקבלים במשדר

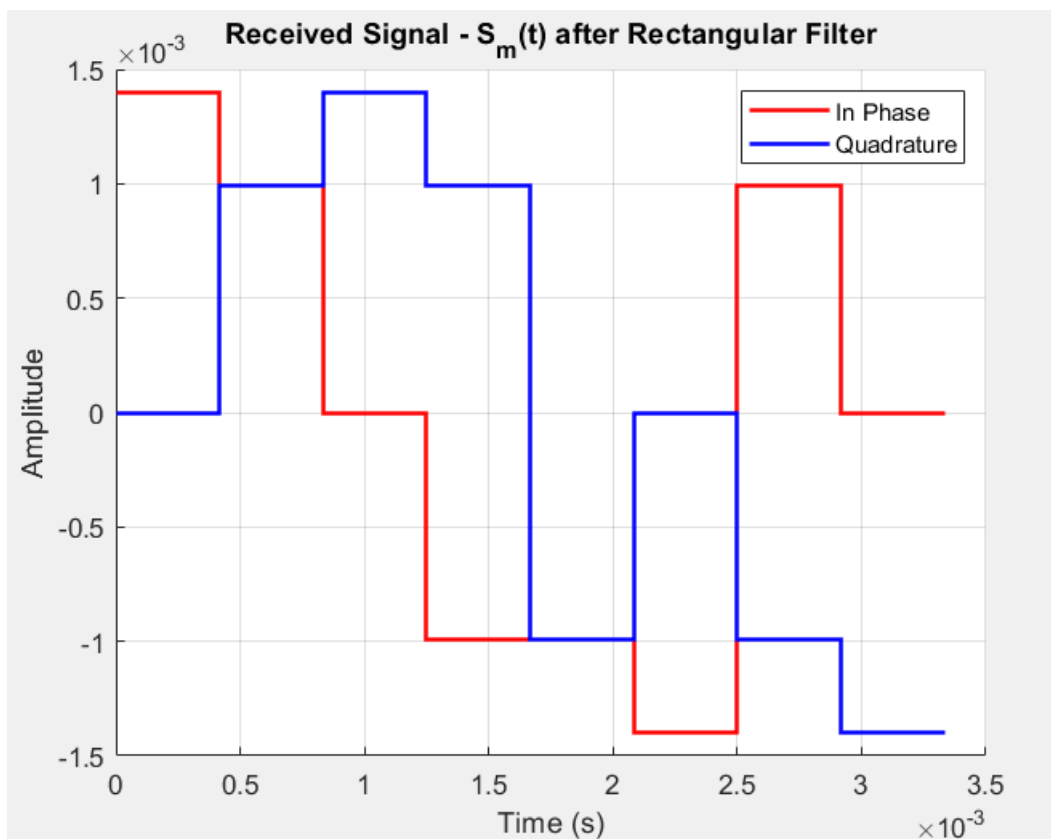


המרחקים בין הסימבולים שהתקבלו במשדר:

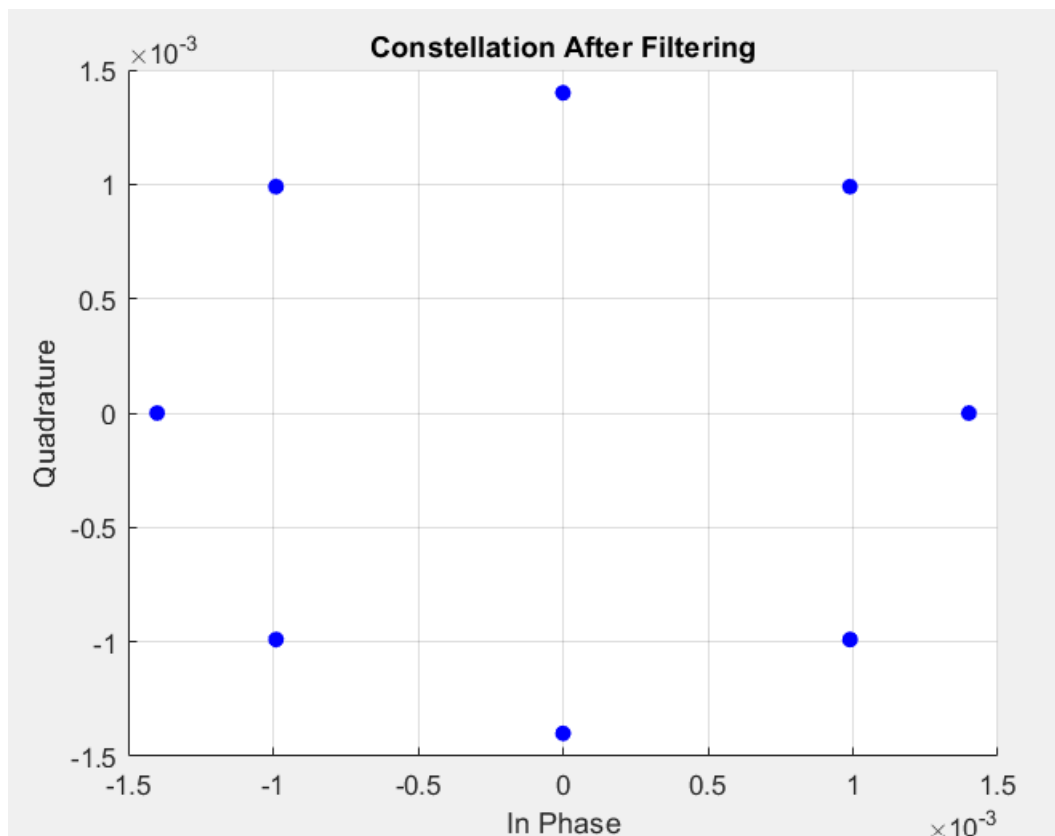
$k+1$ Distance Between A and	Complex Value	$A1$
0.7653	$j0 + 1$	$A1$
0.7653	$j0.707 + 0.707$	$A2$
0.7653	$j1 + 0$	$A3$
0.7653	$j0.707 + 0.707-$	$A4$
0.7653	$j0 + 1-$	$A5$
0.7653	$j0.707 - 0.707-$	$A6$
0.7653	$j1 - 0$	$A7$
0.7653	$j0.707 - 0.707$	$A8$



כעת נציג את אותו האות אך לאחר האפנון:



הקונסטליציה המתקבלת במקלט



המרחק בין הסימבולים המתקבלים במקלט הינו:

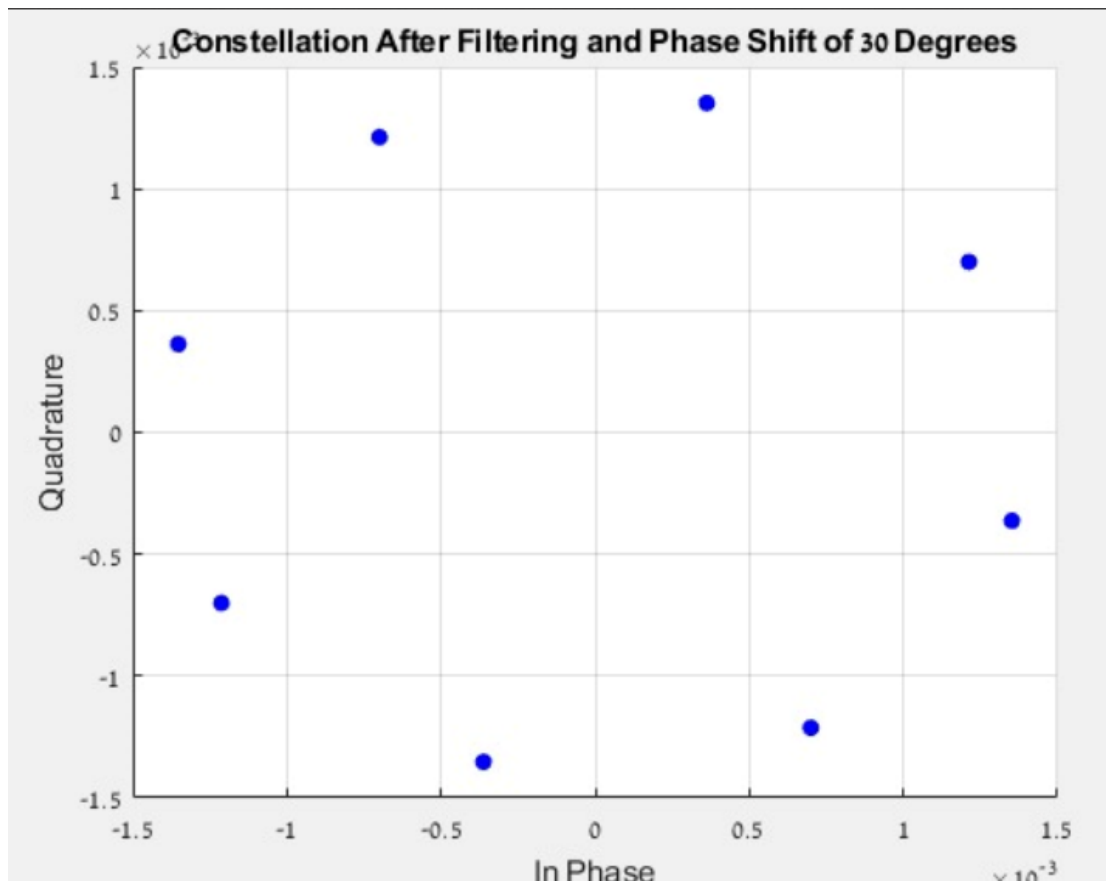
$k+1$ Distance Between A and	Complex Value	A1
0.0014	$j0 + 0.0014$	A1
0.0014	$j0.0014 + 0.0014$	A2
0.0014	$j0.0014 + 0$	A3
0.0014	$j0.0014 + 0.0014 -$	A4
0.0014	$j0 - 0.0014 -$	A5
0.0014	$j0.0014 - 0.0014 -$	A6
0.0014	$j0.0014 - 0$	A7
0.0014	$j0.0014 - 0.0014$	A8

לסיכום ביצעתי השוואה בין המרחקים של הסימבולים במשדר לבין אלו שנקלטו במקלט. בקוד שהרצתי, גיליתי שהמרחקים בין הסימבולים שנקלטו במקלט קטנים משמעותית מאלו שנשלחו במשדר. הסיבה לכך היא שהאותות במקלט עברו דרך המסנן האופטימלי, שגרם לעיוות מסוים באות עקב סינון בזמן קצר (Ts).

במהלך העבודה על המערכת, ראיתי שהקונסטלציה במקלט ובמשדר נשמרת, אבל במקלט היו המרחקים קרובים מאוד אחד לשני, מה שיכול להשפיע על דיוק ביצועי המערכת ולהוביל לבעיות בזיהוי הסימבולים בצורה אופטימלית.

קליטה עם חוסר סנכרון בין המשדר למקלט

הקונסטלציה שהתקבלה במקלט עם הסחת פאזה של 30 מעלות:



נכניס כעת את המרחקים בין הסיבולים שהתקבלו לאחר ההזחה:

	A	Distance Between A and B	Complex Value
1	A1	0.0014	$j0.0003623 + 0.0013523$
2	A2	0.0014	$j0.0012124 + 0.0007000$
3	A3	0.0014	$j0.0013523 + -0.0003623$
4	A4	0.0014	$j0.0007000 + -0.0012124$
5	A5	0.0014	$j-0.0003623 + -0.0013523$
6	A6	0.0014	$j-0.0012124 + -0.0007000$
7	A7	0.0014	$j-0.0013523 + 0.0003623$
8	A8	0.0014	$j-0.0007000 + 0.0012124$

לסיכום לאחר הסחת הפאזה של 30 מעלות, נשמרו מספר מאפיינים בקונסטלציה אך גם חלו שינויים משמעותיים. המרחק בין הסיבולים הסמוכים נותר זהה, ועומד על 0.0014, כך שהקונסטלציה ממשיכה לשמור על סידור מעגלי עם ריחוק שווה בין הסיבולים. עם זאת, השינוי העיקרי שהתרחש הוא במיקום של כל סימבול – בעקבות הסחת הפאזה, כל הסימבולים זזו ב-30 מעלות סביב המעגל, אך נותרו במיקומים סימטריים. במילים אחרות, הפאזה של כל סימבול השתנתה, אך המבנה הכללי של הקונסטלציה לא השתנה מבחינת המרחקים בין הנקודות. השינוי הזה קריטי לשמירה על אורתוגונליות במערכת, ומסייע במניעת טעויות בזיהוי סימבולים סמוכים.

חלק 4: קליטה עם רעש

נתחיל בחישוב ערכי γ_d המקסימלי והמינימלי:

$$P_{er}(sym) = 2 \cdot Q(\sqrt{SNR_s}) = 2 \cdot Q(\sqrt{\gamma_d}) = 10^{-3}$$

נחלץ את γ_d

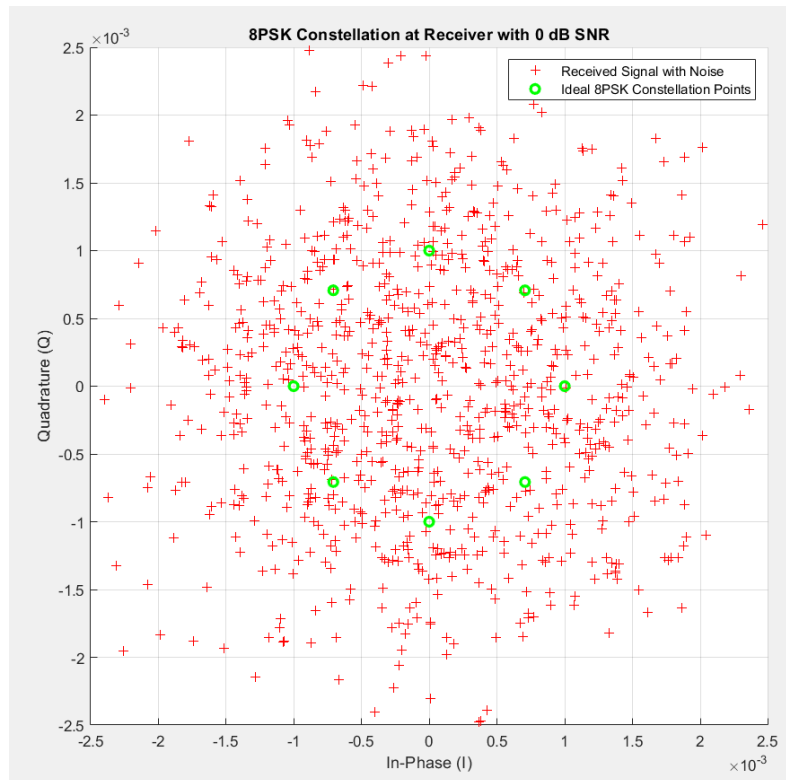
ונקבל:

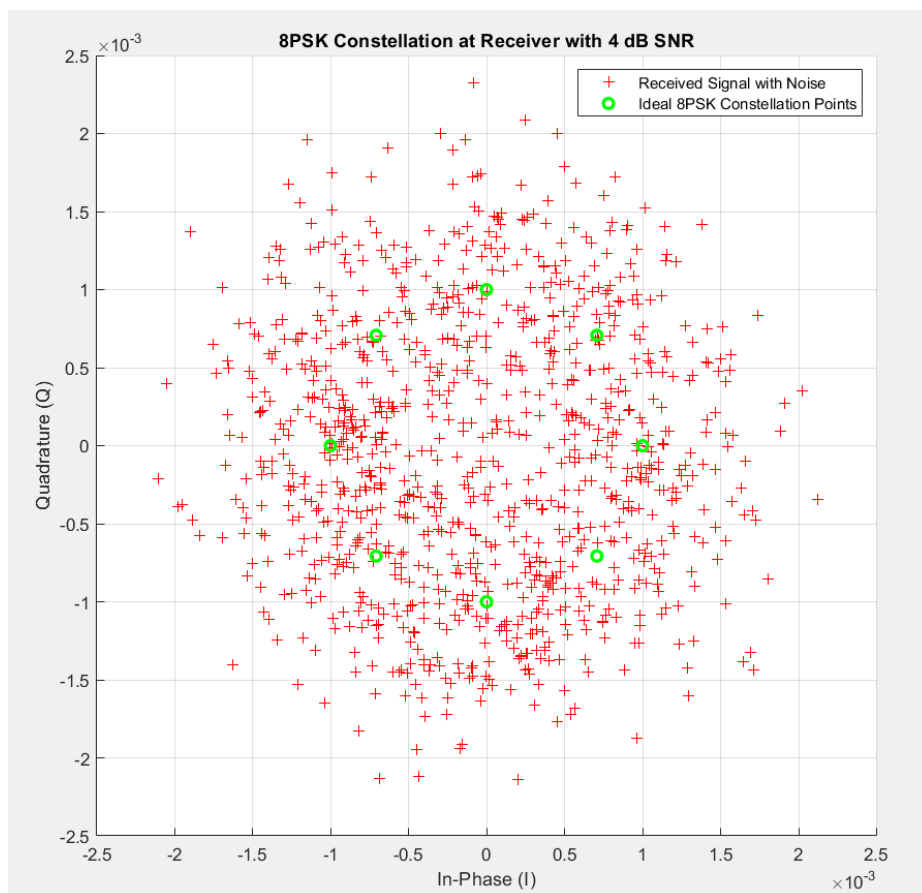
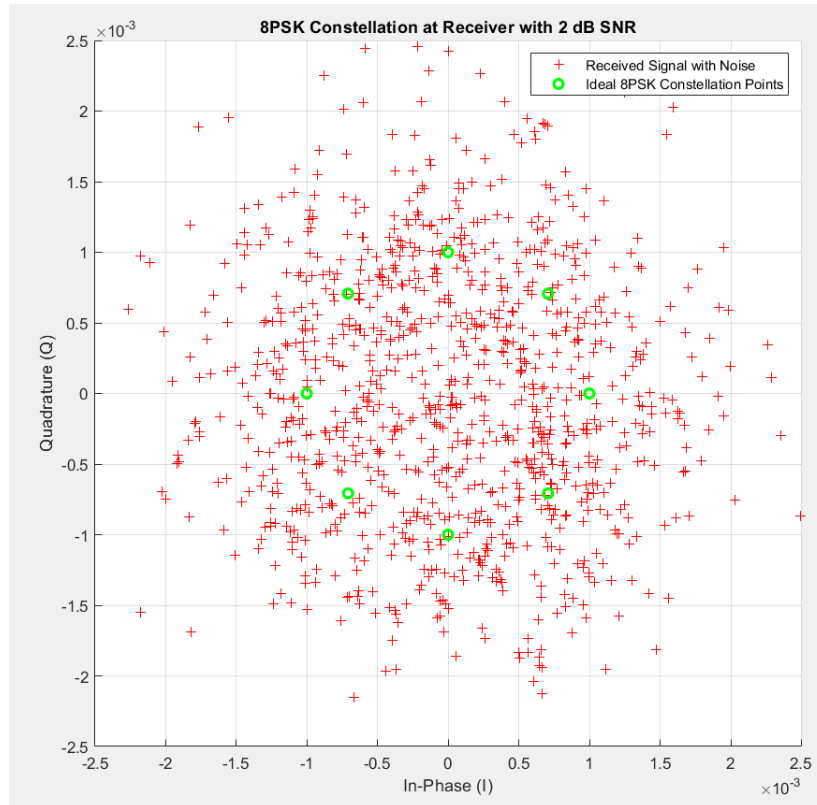
$$\sqrt{\gamma_d} = 3.2905$$

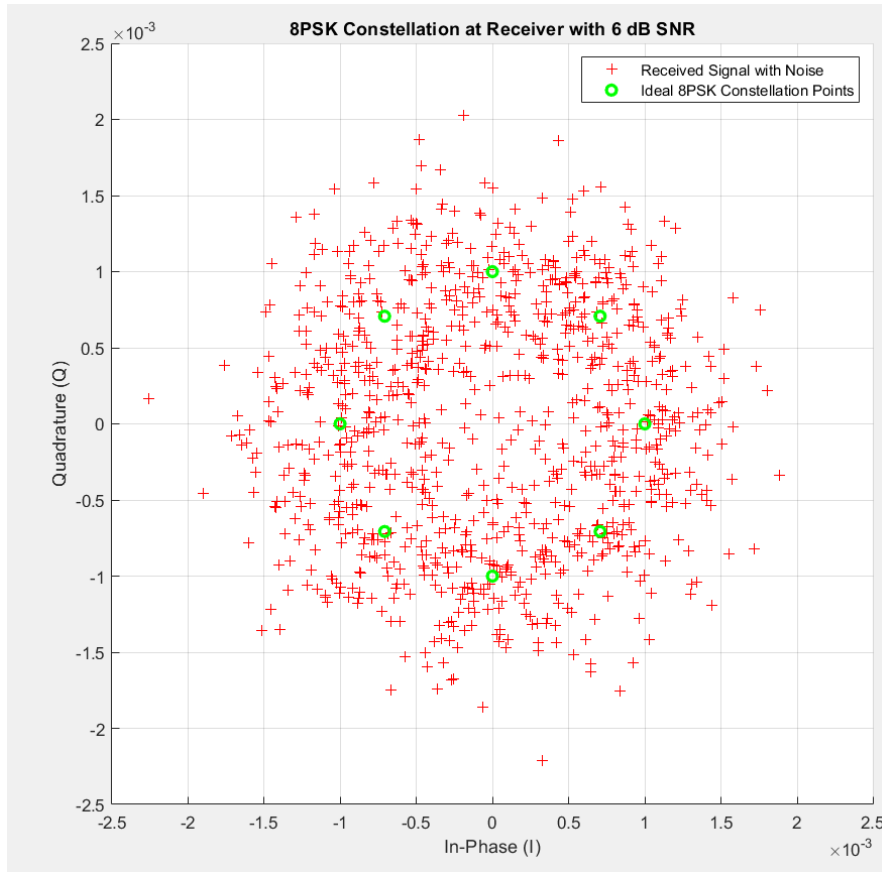
נעלה בריבוע ונקבל שהערך המקסימלי יהיה בסביבות 10.8

אותו דבר נחשב גם עבור per השני שנתון לנו ובו נקבל ערך מינימלי של 1.64

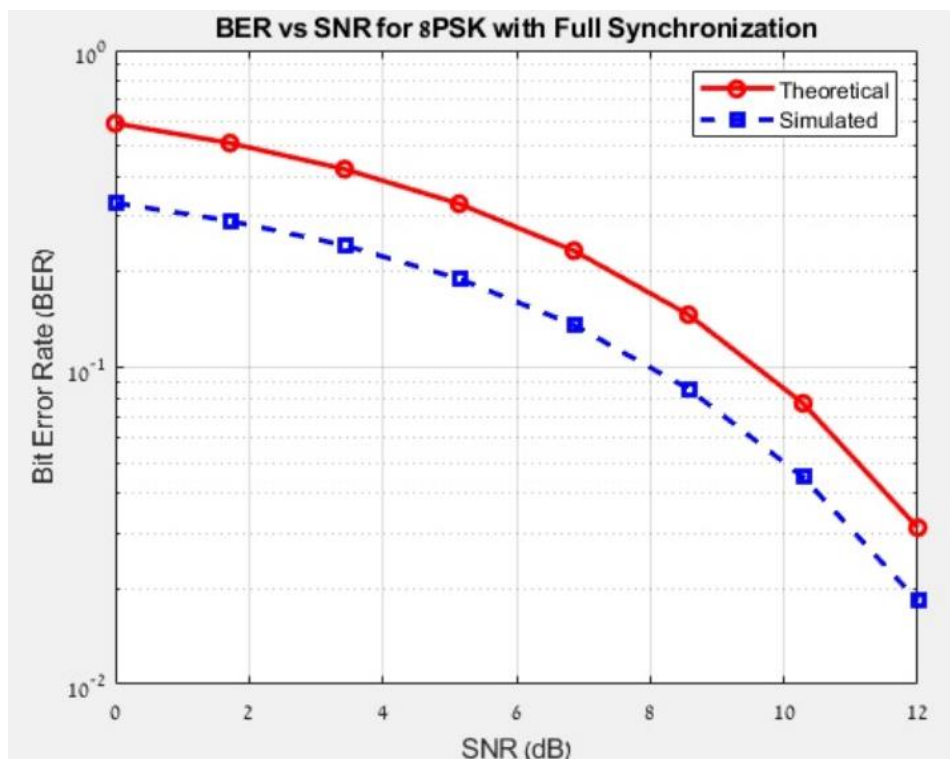
כעת נצרף את תוצאות הקונסטלציות שהתקבלו במקלט







נצרך גרף BER VS SNR המבצע השוואה בין הערכים התיאורטיים והמעשיים.

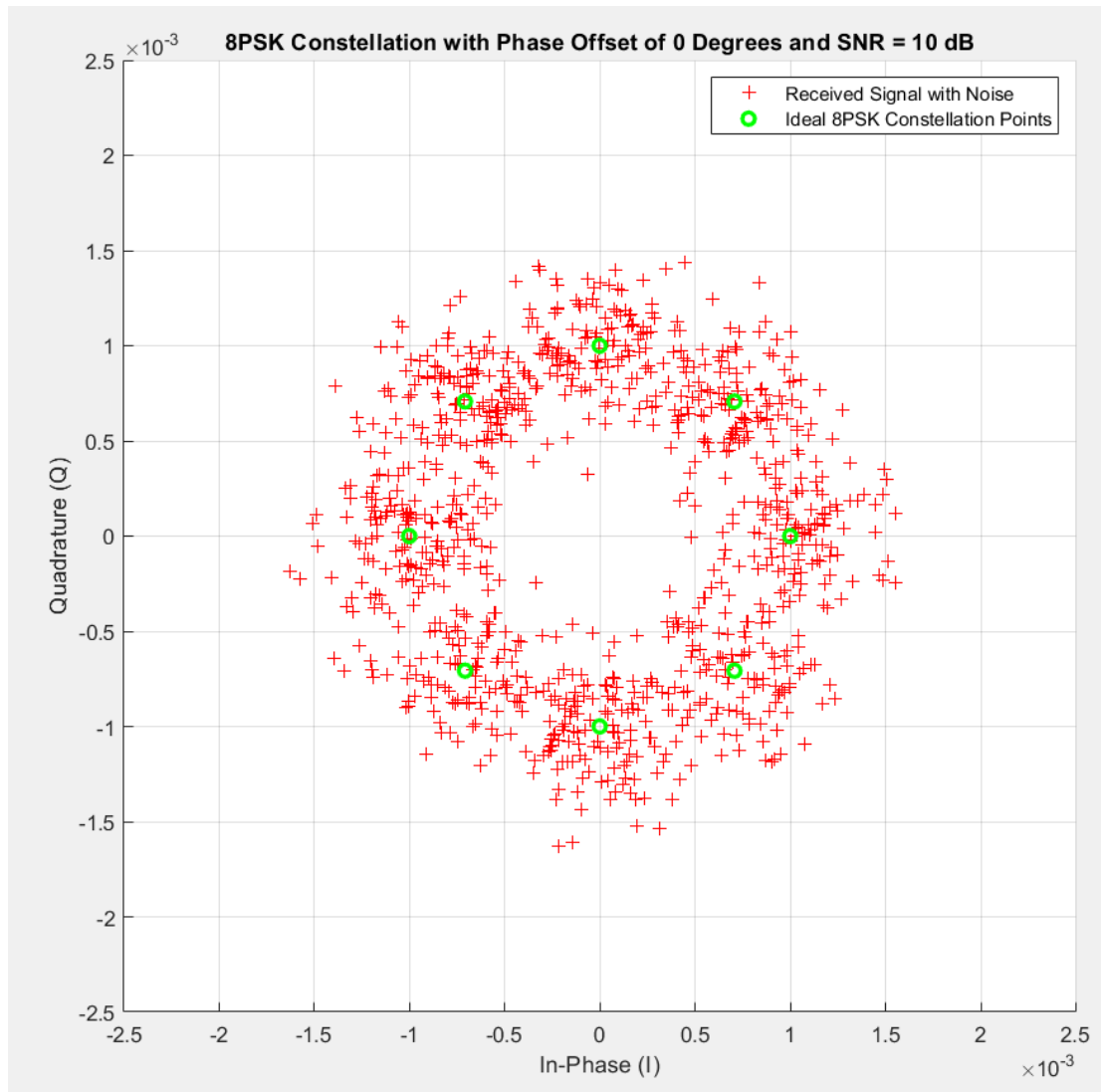


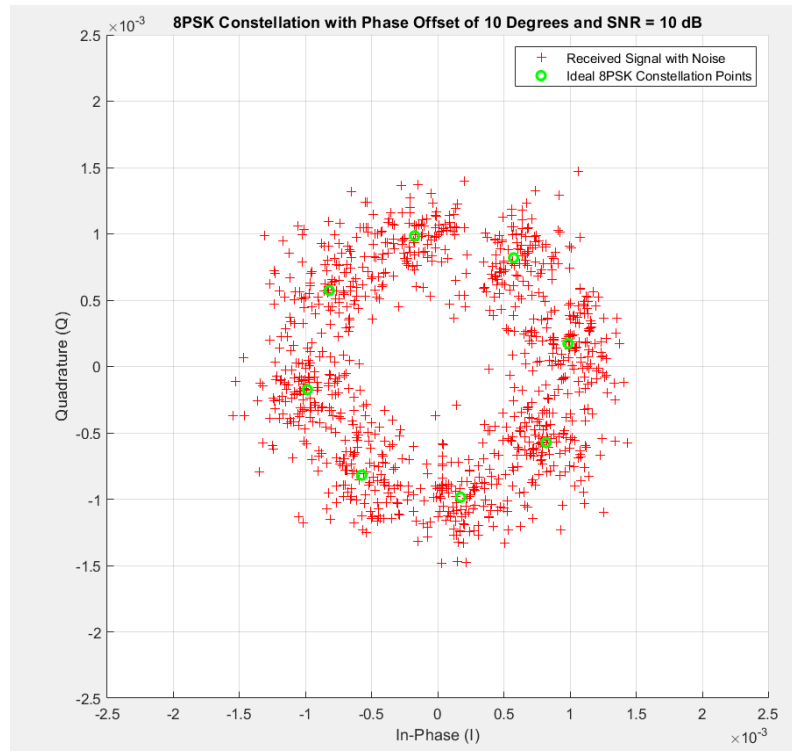
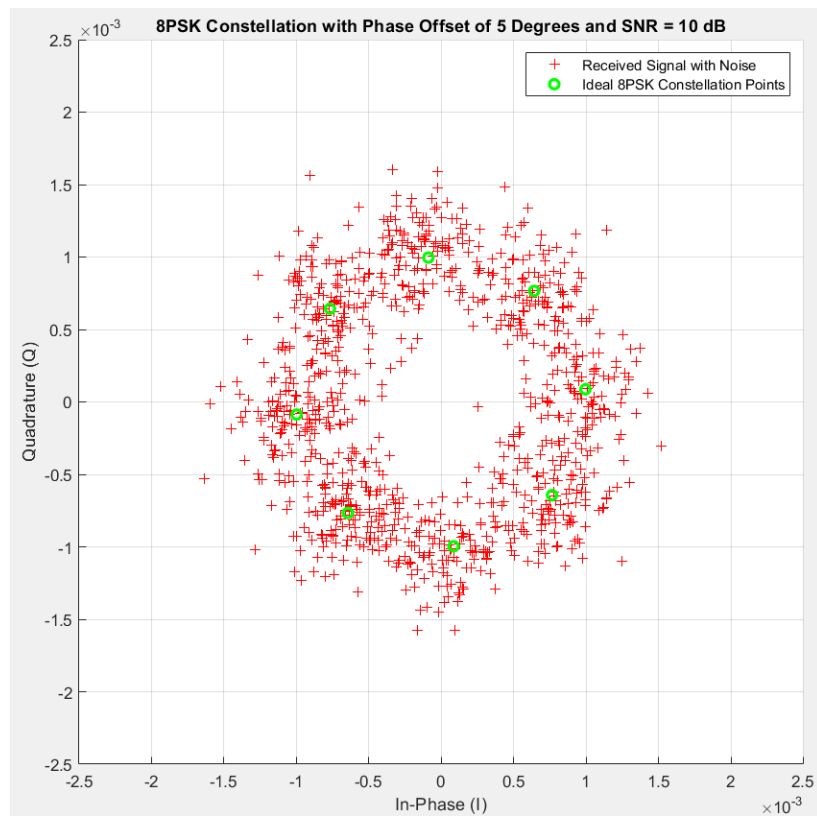
בסיכום התוצאות שניתן לראות בגרפים של ה-8PSK, השוואת הפלט שהתקבל בין הנקודות המתקבלות עם רעש לנקודות האידיאליות בקונסטלציה מראה את השפעת הרעש בתנאי SNR שונים. ככל שה SNR-נמוך יותר, נצפה פיזור רחב יותר של נקודות הרעש סביב הנקודות האידיאליות, דבר שמעיד על פחות דיוק בהעברת המידע. לעומת זאת, כאשר ה-SNR גבוה יותר, הנקודות המתקבלות קרובות יותר לנקודות האידיאליות, והפיזור מצטמצם, מה שמעיד על אמינות גבוהה יותר בהעברת הסימבולים.

בנוסף, ניתן לראות כי הקונסטלציה האידיאלית נשארת קבועה, בעוד שהנקודות המתקבלות משתנות בהתאם לרמות הרעש השונות שהוכנסו לכל אחת מהמדידות.

חלק 5: קליטה עם הפרש פאזה קבוע

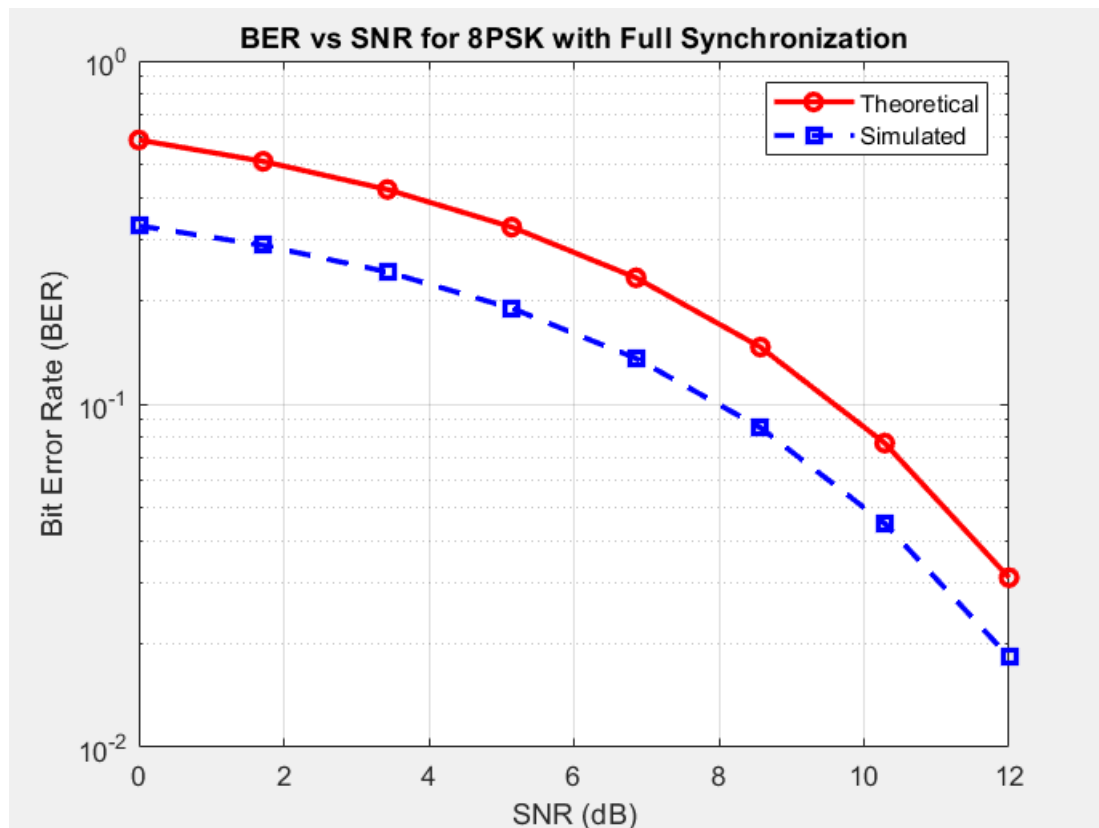
להלן הגרפים המתקבלים עבור הסחות הפאזה הנתונות בשאלה





הסבר קצר על הגרף האחרון אך הוא תקף גם ל-2 הגרפים הקודמים בהזזת פאזה של 10 מעלות כמו במקרה שהוצג בקוד, כל הנקודות בקונסטלציה של 8PSK על המעגל בצורה אחידה בהתאם להיסט הפאזה שהוגדר. התוצאה היא שהמיקום האידיאלי של הסימבולים משתנה, אך עדיין שומר על המרחקים בין הסימבולים. כאשר מוסיפים רעש (כפי שנעשה בקוד), הנקודות המתקבלות עם רעש מתפזרות סביב הנקודות החדשות עם הפאזה המוסטת. הדבר עלול לגרום לשגיאות בזיהוי הסימבולים (בעיקר במערכות שלא מסונכרנות היטב), מאחר שהנקודות זזו מהפאזה האידיאלית שלהן, והמרחק ביניהן מצטמצם עבור זיהוי שגוי.

נציג כעת את גרף ההשוואה



תוצאות ה-BER שקיבלנו הם:

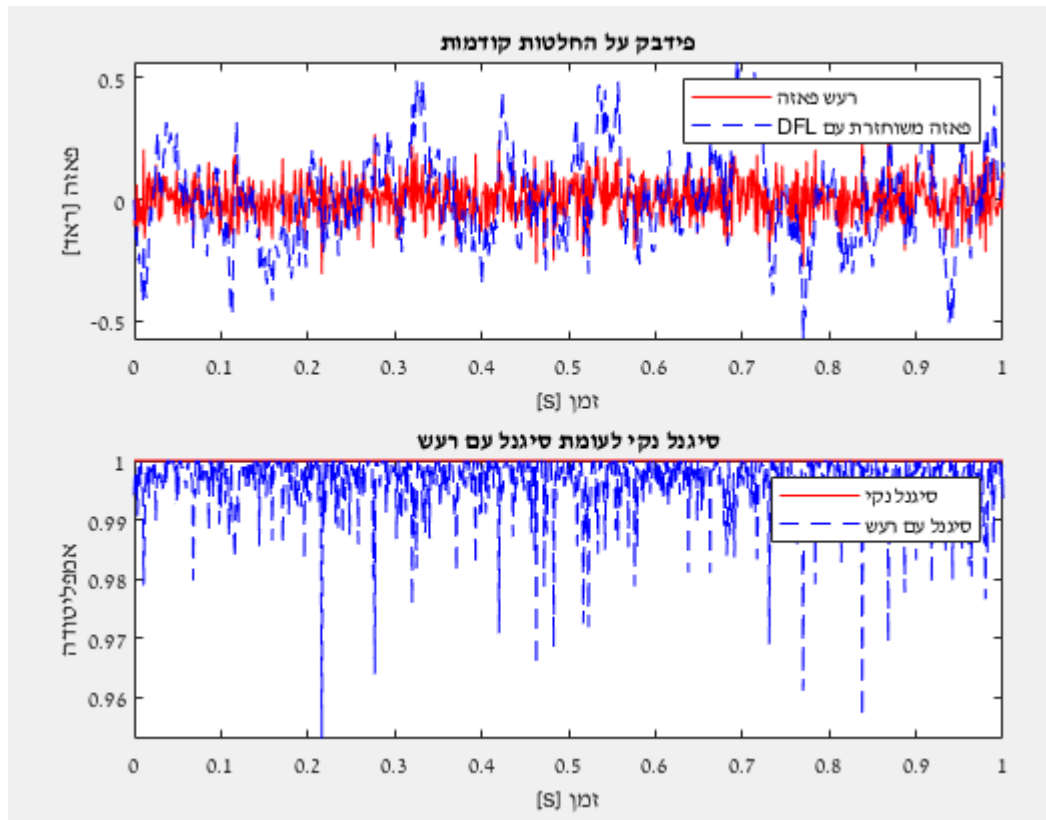
```
BER simulated values:
    0.3307    0.2902    0.2426    0.1902    0.1358    0.0854    0.0449    0.0183

SNR required in the ideal case: 4.32 dB
SNR required in the unsynchronized case: 7.33 dB
Power penalty due to unsynchronization: 3.01 dB
```

בתוצאות שהתקבלו אצלנו, ניתן לראות ירידה הדרגתית ב-BER (שיעור השגיאות בסיבית) ככל שה-SNR (יחס אות לרעש) עולה. לדוגמה, עבור SNR נמוך של 0 dB, ה-BER הוא גבוה מאוד, 0.3307, כלומר כ-33% מהסיביות אינן מזוהות נכון. עם העלייה ב-SNR, שיעור השגיאות יורד בצורה משמעותית, כאשר עבור SNR של 12 dB, ה-BER מגיע ל-0.0183 בלבד, שזה אומר כ-1.83% שגיאות. הירידה הזו מראה שהמערכת מתפקדת בצורה טובה יותר ככל שהרעש מופחת, ומדגישה את החשיבות של יחס אות לרעש גבוה עבור ביצועים אופטימליים במערכת תקשורת מבוססת PSK8.

חלק 6: קליטה עם הפרש פאזה קבוע

(א) בהנחה וקיימת דיספרסיה כנדרש הגרף שיתקבל יהיה:



בגרף העליון רואים את רעש הפאזה מול הפאזה המשוחזרת באמצעות ה Decision-Feedback Loop

רעש הפאזה: הרעש הזה מייצג את השגיאות בפאזה שנכנסו לסיגנל כתוצאה מרעש חיצוני. הרעש הזה משתנה בצורה אקראית.

פאזה משוחזרת: הקו הכחול המקווקו מראה את הפאזה כפי שהמערכת משחזרת אותה על בסיס ה DFL-ככל שהמערכת מתקדמת בזמן, היא לומדת להתאים את הפאזה שלה לרעש שנכנס, ומצמצמת את הפער בין הרעש לבין הפאזה המקורית.

אפשר לראות איך הפאזה המשוחזרת מתקרבת לרעש האמיתי ככל שהזמן עובר, והמערכת לומדת את התנהגות הרעש.

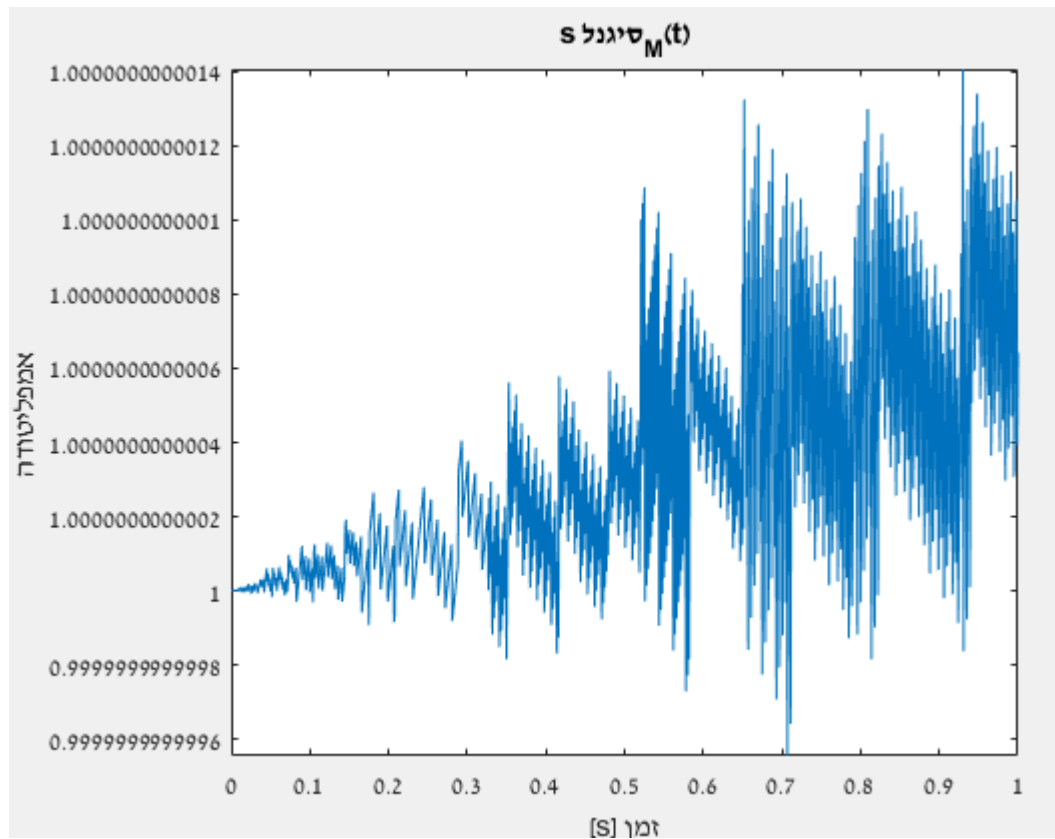
בגרף התחתון רואים השוואה בין סיגנל נקי (קו אדום) לבין סיגנל עם רעש פאזה (קו כחול מקווקו):

סיגנל נקי: הסיגנל כפי שהיה ללא שום השפעה של רעש פאזה, כלומר הסיגנל האידיאלי.

סיגנל עם רעש: הסיגנל האמיתי לאחר שהתווסף לו רעש פאזה. ניתן לראות שהרעש משנה מעט את צורת הגל, במיוחד את הזווית של השיאים והשקעים בסיגנל.

ניתן לראות את ההשוואה בין הסיגנל האידיאלי והסיגנל המושפע מרעש, שמדגישה כיצד רעש פאזה גורם לשינויים קטנים בסיגנל בעיקר בהסתת הפאזה שלו.

(ב) נציג את הגרף:



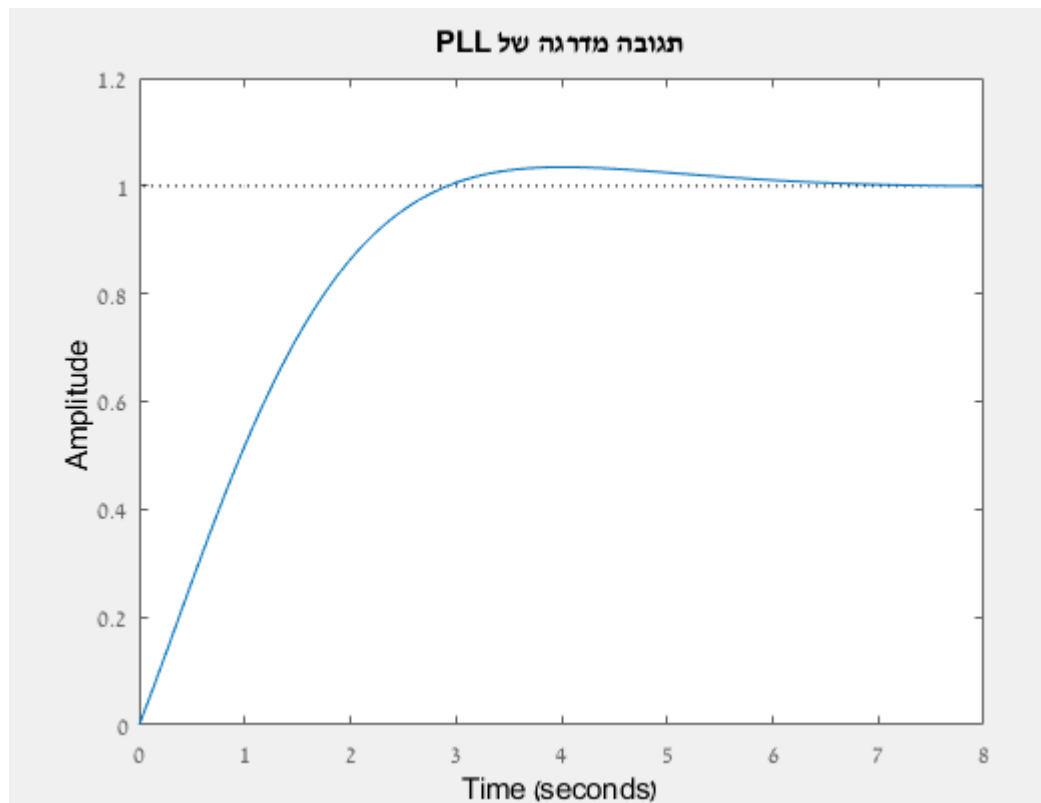
בגרף הזה רואים את הסיגנל שהוא תוצאה של שילוב רכיבי ה in-phase וה quadrature (קוסינוס וסינוס) עם תדר הנשא.

הסיגנל מורכב מחיבור של שני רכיבים, האחד הוא קוסינוס והשני הוא סינוס, כאשר כל אחד מהם מקבל רכיב של אמפליטודה המתאימה.

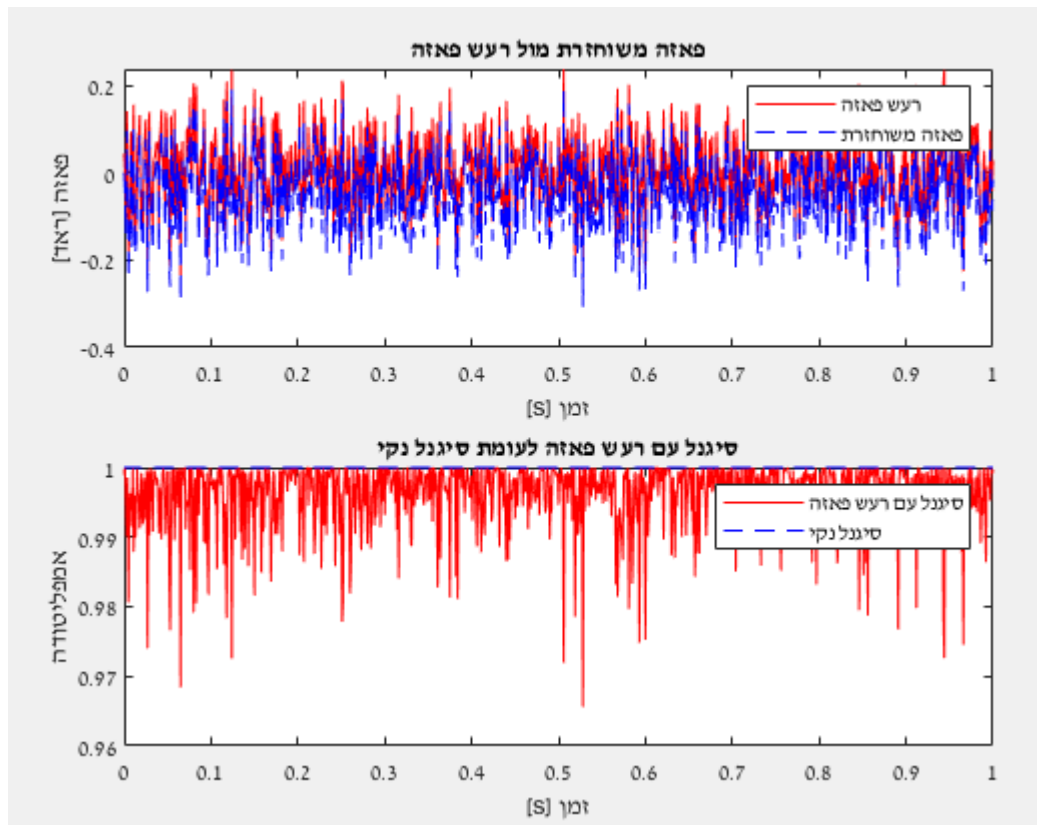
ניתן לראות שהסיגנל המתקבל הוא גל קוסינוס שנבנה תוך שילוב של רכיבי פאזה ואמפליטודה, כפי שנהוג במערכות תקשורת מודולציה פאזה.



ג) לאחר חישוב הנדרש נציג את גרף המדרגה כנדרש:



(ד)



בגרף הזה רואים השוואה בין הסיגנל עם רעש הפאזה (קו אדום) לבין הסיגנל הנקי ללא רעש (קו כחול מקווקו):

סיגנל עם רעש: הסיגנל לאחר שהתווסף לו רעש פאזה. אפשר לראות שהרעש משפיע על הפאזה של הסיגנל ומשנה מעט את צורתו.

סיגנל נקי: הסיגנל האידיאלי כפי שהיה צריך להיראות ללא רעש פאזה.

הגרף מציג השוואה ברורה בין סיגנל שנפגע מרעש פאזה לבין סיגנל נקי, כאשר רעש הפאזה גורם לשינויים קטנים בפאזה של הסיגנל.