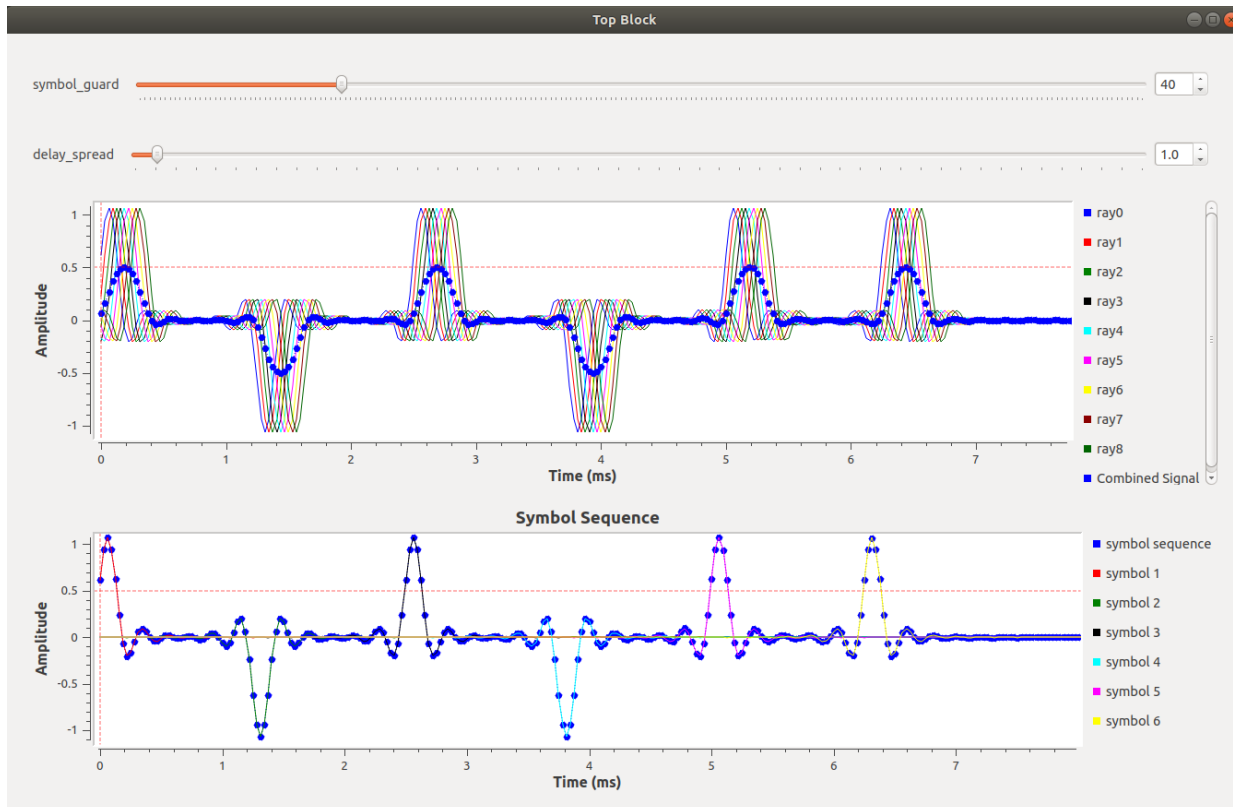
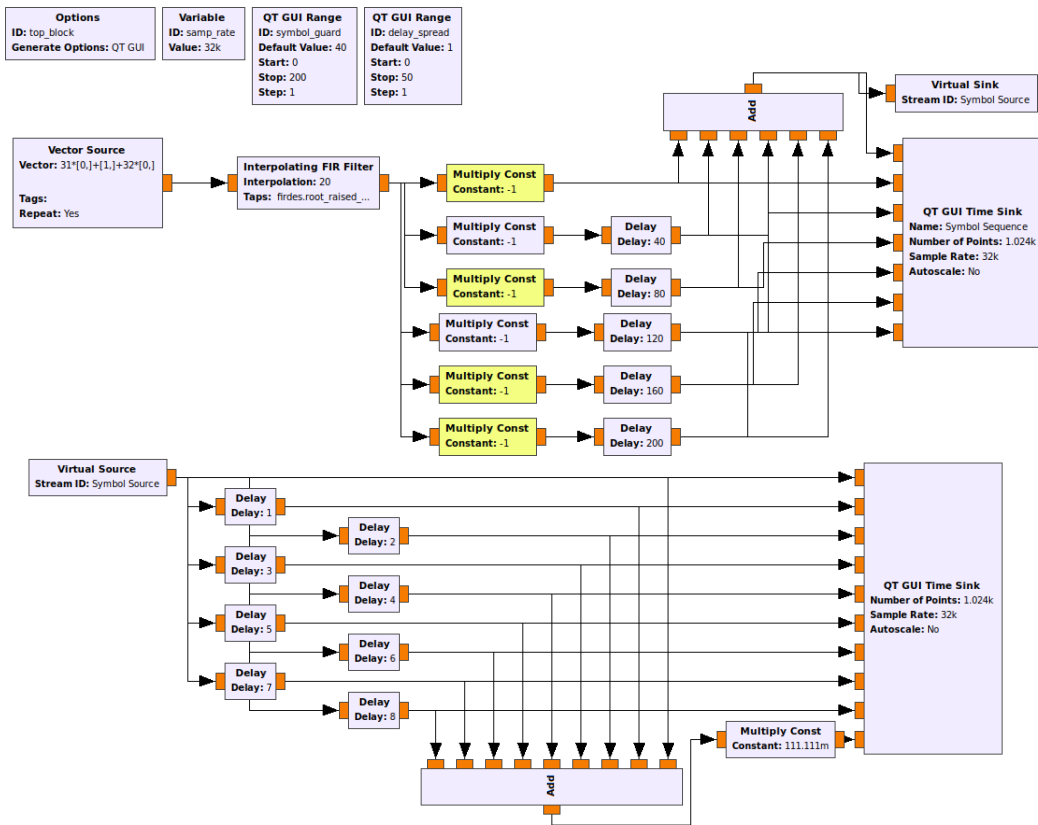


# LAB 4

יוחאי תבל 207235052

שיר משה 318492667

## Experiment 1 Instructions – Inter-Symbol Interference



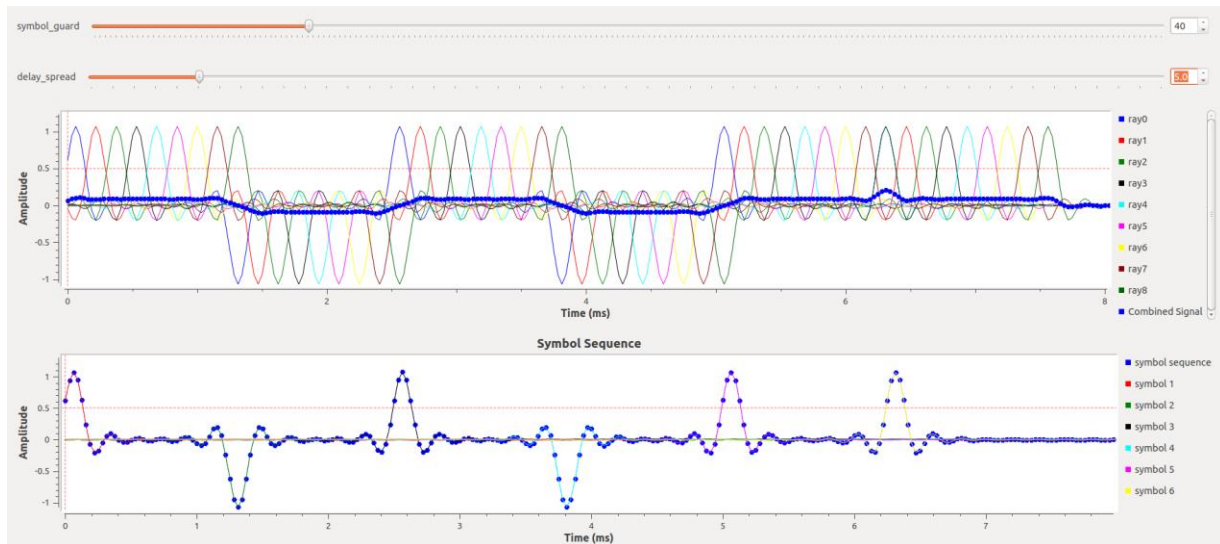
## Experiment 1 Questions

1.

a. יש inter symbol interference:

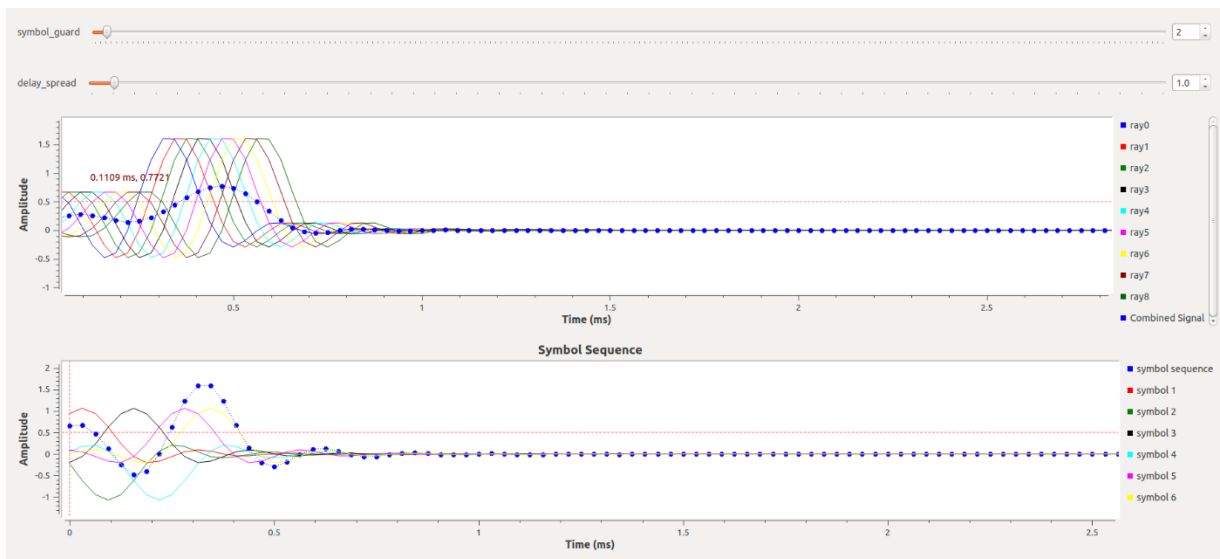
1. symbol guard = 40, delay spread = 5

ניתן לראות שיש הפרעה בשידור של הסימבולים בערוץ. הגדלנו את delay spread מה שגרם לכך שזמן שידור הסימבול קטן יותר מזמן הדיליי, וקיבלנו חיבורים של סימבולים שונים מקרניים שונות.

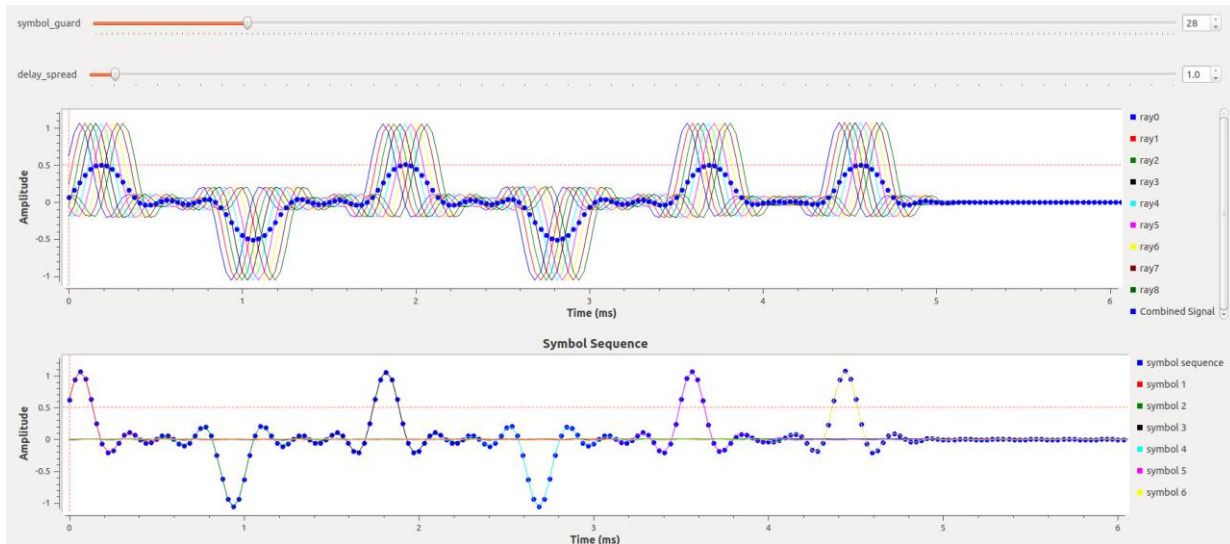


2. symbol guard = 2, delay spread = 1

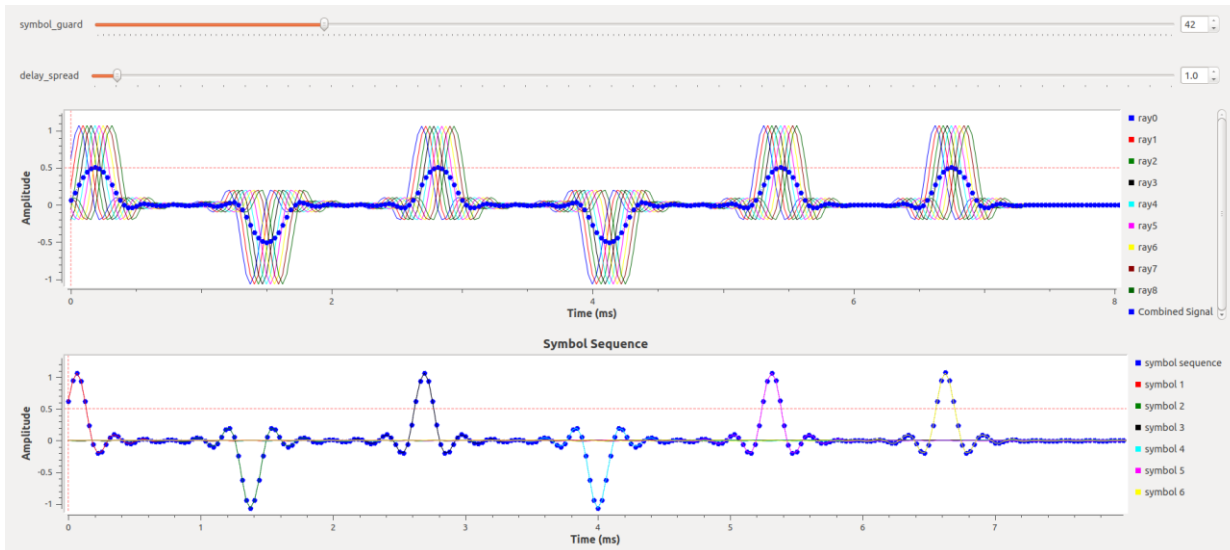
הפעם צמצמנו את המרווח בין הסימבולים עוד בבניית הסיגנל. מה שגרם לחפיפה בין הסימבולים והסיגנל ששודר היה מעוות מלכתחילה.



b. 2 מקרים בהם אין הפרעה וניתן לפענח את האות:  
 1.  $\text{symbol guard} = 2, \text{delay spread} = 1$



2.  $\text{symbol guard} = 42, \text{delay spread} = 1$



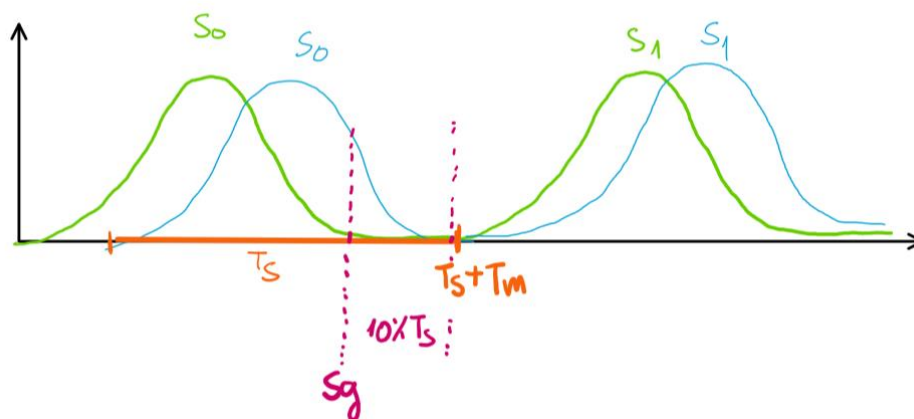
כעת יש מספיק מרווח בין הסימבולים בעת שבונים את הסיגנל. בנוסף יש מספיק דיליי בין הקרניים השונות, וכאשר סוכמים את כל הקרניים המתקבלות במקלט, ניתן לזהות כל סימבול בנפרד ואין חפיפה שפוגעת בגילוי.

2. נתון:

$$T_m = \text{delay spread} \quad T_s = \text{symbol duration} \quad R = \text{symbol rate} = \frac{1}{T_s}$$

נחפש  $S_g = \text{symbol guard}$  כך שתתקבל חפיפה בין 2 סימבולים שונים של עד 10 אחוז.

הסיגנל הירוק הוא המהיר ביותר, ובכחול – האיטי ביותר. נשים לב שהדרישה היא חפיפה בין שני סימבולים שונים של עד 10 אחוז, כלומר נאפשר מצב בו  $s_1$  – הסימבול השני (בסיגנל המהיר), יחפוף עד 10 אחוז עם  $s_0$  הסימבול הראשון (מהסיגנל האיטי):



$$S_g = (T_s + T_m) - 0.1 * T_s = T_m + 0.9T_s = T_m + 0.9 * \frac{1}{R}$$

3. עבור  $\text{delay spread} = 1$  מינימלי נקבל שהדיליי בין הקרן הראשונה לקרן האחרונה הוא

$$8 * 1 - 0 = 8 \text{ ms}$$

$$B_{c\_min} = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{8 * 10^{-3}} = 125 \text{ Hz} \quad \text{נחשב את ה } B_c \text{ המתאים:}$$

עבור  $\text{delay spread} = 50$  מקסימלי נקבל שהדיליי בין הקרן הראשונה לקרן האחרונה הוא

$$8 * 50 - 0 = 400 \text{ ms}$$

$$B_{c\_max} = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{400 * 10^{-3}} = 2.5 \text{ Hz} \quad \text{נחשב את ה } B_c \text{ המתאים:}$$

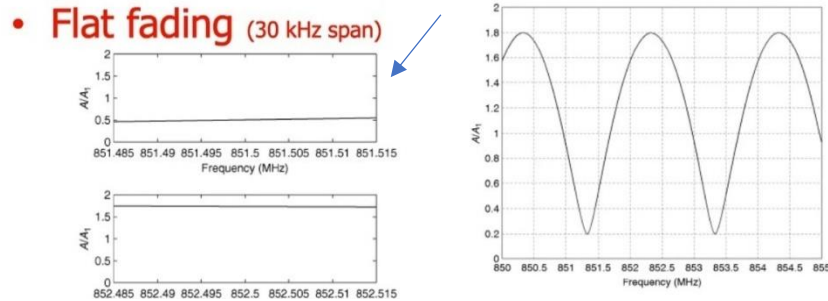
$$2.5 \text{ Hz} \leq B_c \leq 125 \text{ Hz} \quad \text{סה"כ}$$

4. את הזמן בין הסימבולים נרצה למלא במידע שידוע מראש למקלט ולמשדר ולא להשאיר ריק כמו קודם בניסוי, נשתמש בטריק מהמעבדה ברשתות מחשבים. בין כל שני סימבולים נשדר 1 לוגי ברצף – למשל 6 רצוף, ולאחר מכן נשדר 0 לוגי. ברגע שהמקלט יזהה את הירידה ל 0 הוא ידע שכעת מגיע סימבול מהמידע שנשלח ויזהה אותו. הסיבה שנשלח 1 בין השידורים היא משום שכך נוכל לוודא את החיבור כל העת בין המקלט למשדר ואם תהיה תקלה והקו ייפול נוכל להבחין בכך – מה שלא ניתן אם לא משדרים דבר.

## 5. Multipath delay spread:

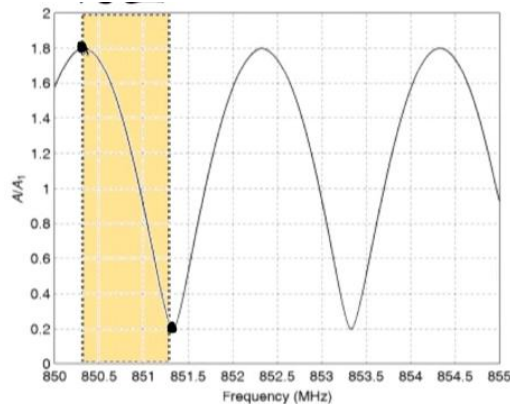
### – Flat fading

רוחב הפס של הסיגנל קטן מרוחב הפס של הערוץ, או כשאר זמן שידור הסימבול קטן מ  $\text{delay spread}$ . דוגמא מהרצאה 5: טווח תדרים נמוך (בסדר גודל) מה  $B_c$ , בטווח זה כל התדרים יחוו את אותה השפעה מהערוץ ובערך את אותה הנחתה.



### – Frequency Selective Fading

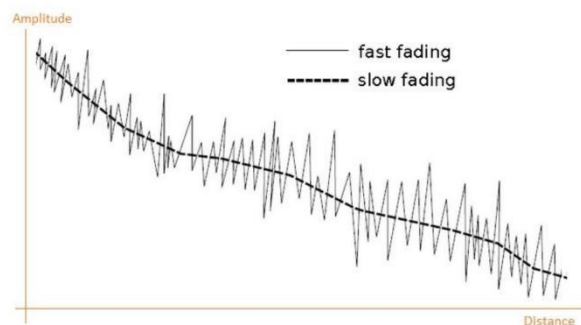
כאשר זמן שידור הסימבול גדול מה  $\text{delay spread}$  יש חפיפה בין שידור הסימבולים השונים מה שגורם להתאבכויות בונות/ הורסות בטווח תדרים קטן. בנוסף אם טווח תדרים של הסיגנל גדול מה  $B_c$ , יהיו תדרים שיחוו הנחתה גבוהה בערוץ וכאלה שיחוו הנחתה נמוכה. דוגמא מהרצאה 5:



### :Doppler Spread

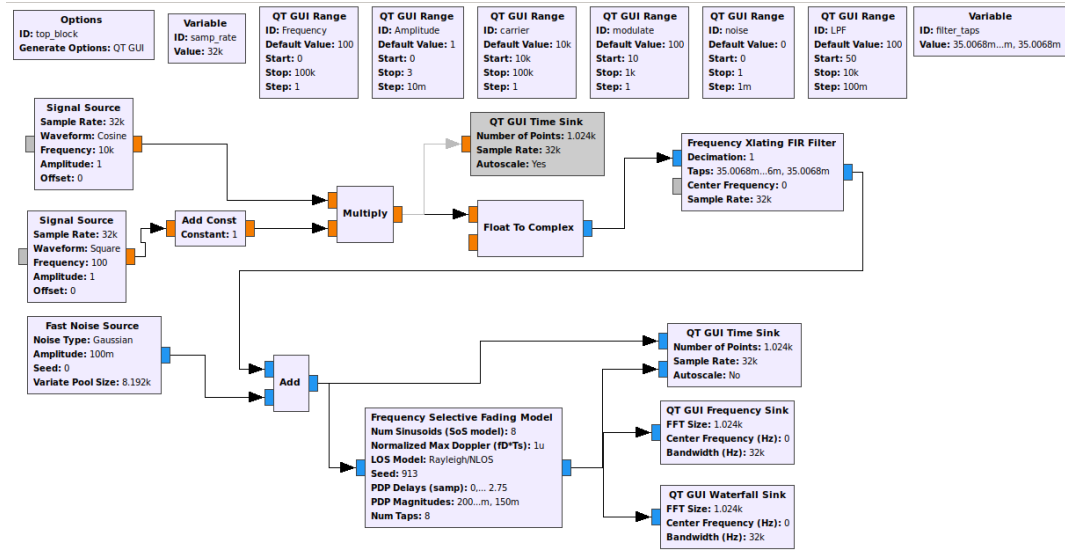
Fast Fading – קורה כאשר ה  $T_c$  קטן מזמן שידור הסימבול האמפליטודה והפאזה חוות שינויים חדים.

Slow Fading – במצב ההפוך, בו ה  $T_c$  גדול מזמן שידור הסימבול האמפליטודה והפאזה חוות שינויים קטנים, והאות יחסית קבוע.

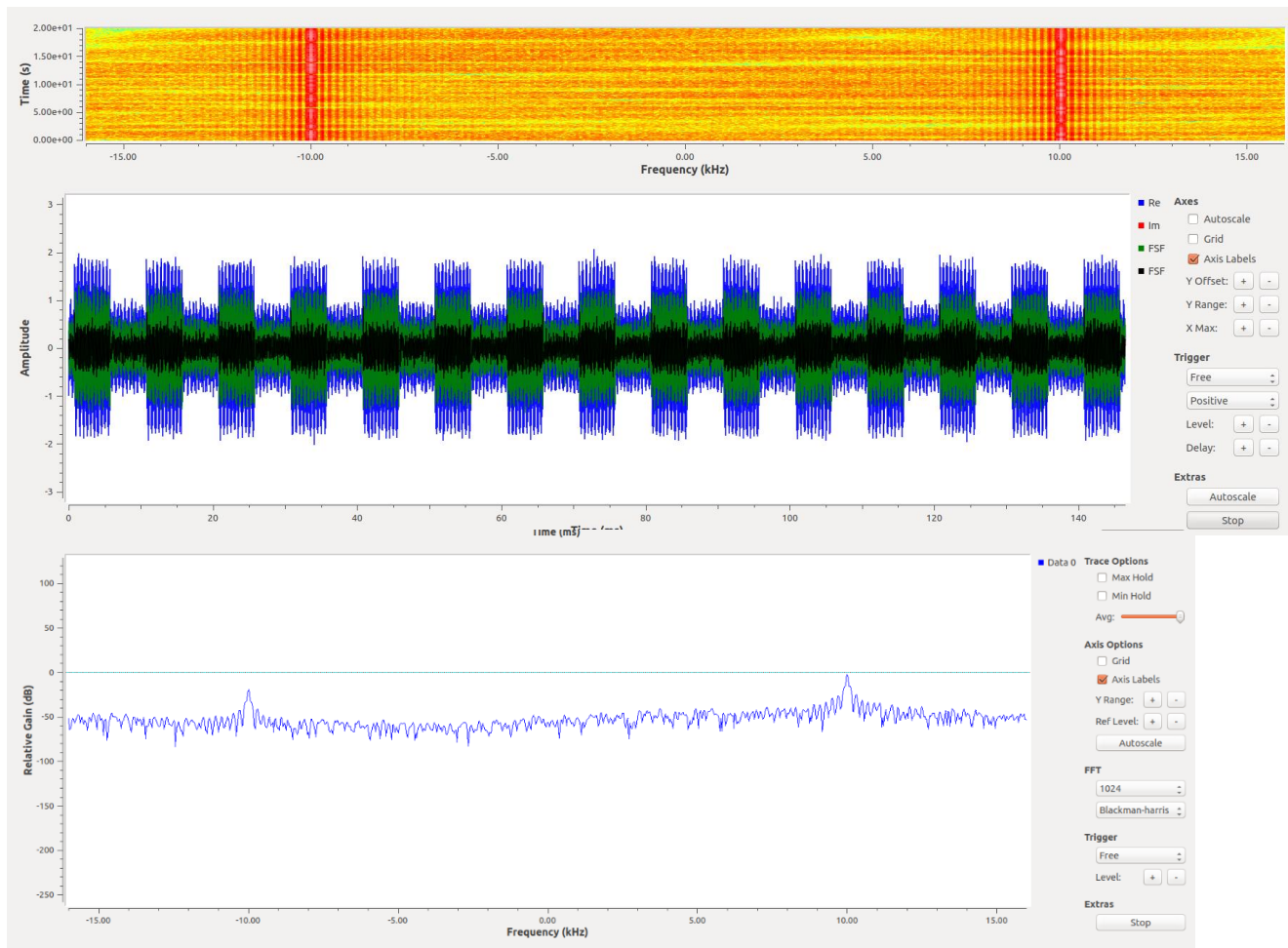


## Part 2 – Fading

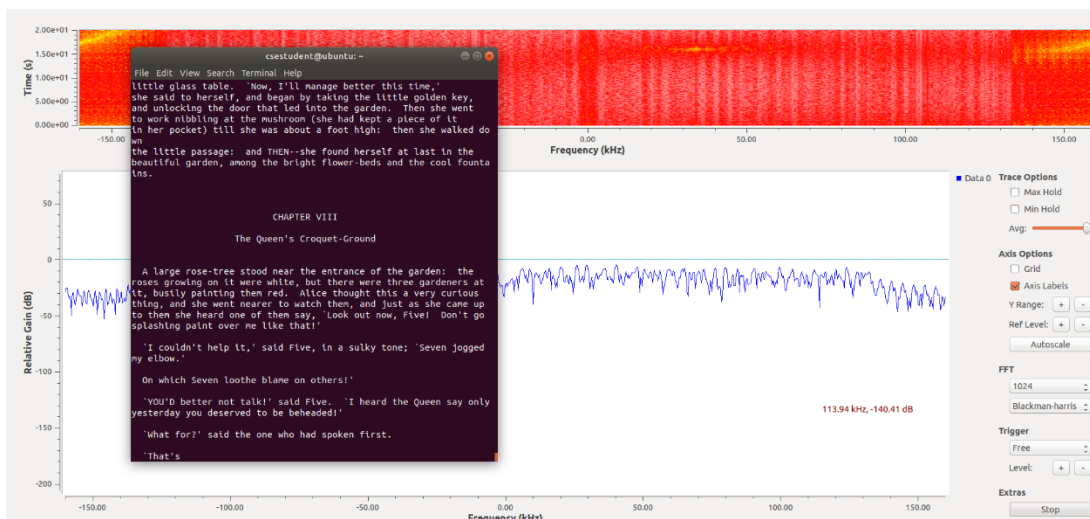
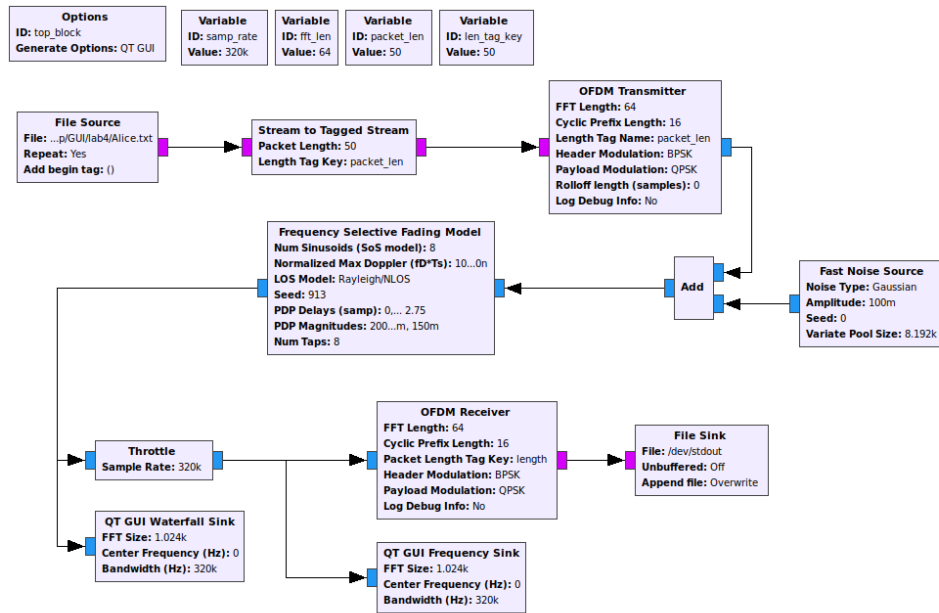
### ASK



אפשר לראות את ההפרעה לאות לאחר השפעה של frequency selective fading (האותות הירוקים והשחורים):



## OFDM



ניתן לראות שכעת הטקסט מגיע ללא שגיאות. למרות שיש את ההפרעה של frequency selective fading  
וזאת משום שהאותות עליהם רוכבים הסימבולים הם אורתוגונליים ב OFDM.

## Experiment 2 Questions

1. זמן קוהרנטי – טווח זמן בו אנו מצפים שהאמפליטודה של האות תהיה יחסית זהה (לא תחווה שינוי משמעותי), בפרק זמן זה נניח שהערוץ משפיע בצורה קבועה על האות.

$$T_{coh} = \frac{9}{16\pi f_d}$$

רוחב פס קוהרנטי – טווח תדרים בו הקורולציה מספיק חזקה, בטווח זה הערוץ משפיע על התדרים השונים בצורה דומה.



2. כאשר האות נשבר ומגיעות למקלט כמה קרניים, שעוברות מרחקים שונים- הן מגיעות בזמנים שונים. לפי חישוב האמפליטודה שראינו בהרצאה ראינו שהפרש הזמנים משפיע על התאבכות בונה/ הורסת. למשל עבור 2 קרניים טווח התדרים בין פיק לפיק יהיה:  $f_{n-n} = \frac{1}{t_1-t_2}$ , כשאר  $t_1 - t_2$  זה הפרש הדיילי. נשים לב שאם הדיילי גבוה- טווח התדרים יהיה מצומצם בין כל שני פיקים – כלומר נחוה frequency selective fading, נראה שינויים משמעותיים בטווח תדרים זה.

בנוסף, אם הדיילי יהיה נמוך, נקבל טווח תדרים רחב בין שני פיקים (זמן מחזור של האות יקטן), ונקבל יותר תדרים בעלי השפעה דומה- כלומר flat fading.

3. נתונים:  $T_d = 5 * 10^{-6} s$   $BW = 1 MHz$

נחשב את  $B_{coh}$  ונשווה ל  $BW$  של הסיגנל:  
 $BW = 1 MHz > B_{coh} = \frac{1}{T_d} = \frac{1}{5 * 10^{-6}} = 0.2 MHz$   
 ולכן לפי ההרצאה מדובר ב frequency selective fading

4. נתונים:  $T_d = 3.5 * 10^{-6} s$   $BW = 50 KHz = 50 * 10^3 Hz$   
 (נניח שציר הזמנים ביחס ל LOS – הקרן הכי מהירה)

נחשב את  $B_{coh}$  ונשווה ל  $BW$  של הסיגנל:  
 $BW = 50 KHz < B_{coh} = \frac{1}{T_d} = \frac{1}{3.5 * 10^{-6}} \approx 285 KHz$   
 ולכן לפי ההרצאה מדובר ב flat fading

5. נתונים 4 סיגנלים:

$P1 = -20dB = 0.01 W$   
 $P2 = P3 = -10dB = 0.1W$   
 $P4 = 0dB = 1W$

$$\sigma_d = \sqrt{\langle t_k^2 \rangle - \langle t_k \rangle^2}$$

$$\langle t_k^2 \rangle = \frac{1}{0.01 + 0.1 + 0.1 + 1} (0.01 * 0^2 + 0.1 * 1^2 + 0.1 * 2^2 + 1 * 5^2) = \frac{25.5}{1.21} \mu sec$$

$$\langle t_k \rangle = \frac{1}{0.01 + 0.1 + 0.1 + 1} (0.01 * 0 + 0.1 * 1 + 0.1 * 2 + 1 * 5) = \frac{5.2}{1.21} \mu sec$$

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{25.5}{1.21} - \left(\frac{5.2}{1.21}\right)^2} = 1.61 \mu sec$$

$$B_{coh} = \frac{1}{5\sigma_d} = \frac{1}{5 * 1.61 * 10^{-6}} = 124223 Hz$$

## Part 3 – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

### Theoretical Questions

1. כאשר רוחב הפס של ערוץ השידור רחב, האות הנשלח יחווה frequency selective fading, אם נחלק את הערוץ ל N תתי ערוצים, כל אחד מהם יקבל רוחב פס קטן יותר, ובכל תת ערוץ האות יחווה flat fading – כלומר השפעת הערוץ על האות תהיה יחסית קבועה בכל תת ערוץ.  
בנוסף, כשאר רוחב הפס גדול – קצב שידור הסימבול גבוהה, מה שיכול ליצור חפיפות בין הסימבולים (אם זה עובר את delay spread), כאשר נחלק את הערוץ, נוריד את קצב השידור בכל תת ערוץ ולא נקבל דריסה או חפיפה של הסימבולים.  
בנוסף, ע"מ להימנע מחפיפת סימבולים בין תדרים שונים (של כל תת ערוץ) נשתמש ב guard band, ונוסיף טווח תדרים ריק בין התדרים הנושאים השונים.
2. כאשר רוחב הפס של ערוץ השידור רחב, האות הנשלח יחווה frequency selective fading, אם נחלק את הערוץ ל N תתי ערוצים, כל אחד מהם יקבל רוחב פס קטן יותר, ובכל תת ערוץ האות יחווה flat fading – כלומר השפעת הערוץ על האות תהיה יחסית קבועה בכל תת ערוץ.
3. א.  $\text{length of multicarrier symbol} < \text{coherence time}$   
נרצה שהערוץ יהיה יחסית קבוע לאורך שידור הסימבול.  
ב.  $\text{multipath delay spread} > \text{length of multicarrier symbol}$   
נרצה ששידור הסימבול יהיה מהיר יותר מה delay spread.
4. א. פונקציות הבסיס של IDFT/DFT הן סינוס וקוסינוס, כאשר מוצא ההתמרה הוא קומבינציה של שתי הפונקציות הללו.  
ב. כאשר עושים התמרת IDFT ממירים את הדגימות של הסיגנל מהתדר לזמן, כאשר בנוסחה יש הכפלה בפונקציות הבסיס  $x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi nk}{N}}$ , כאשר ניתן לראות שמשנים את התדר לכל סימבול.  
ג. במקלט אנו מקבלים את הדגימות של הסיגנל בזמן, ואז מבצעים DFT:  
$$[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{j\frac{2\pi nk}{N}}$$
 - ההתמרה ההפוכה IDFT ואז מקבלים את הדגימות המקוריות בתדר לפני ההתמרות.

### Cyclic Prefix

5. יתרונות:
  - לפתור את הבעיה של inter-symbol interference ע"י כך שמרחיב את הזמן בין שידור הסימבולים.
  - חלק מהנתונים משודרים שוב, גורם לאות להיות עמיד יותר לשגיאות מהערוץ.
  - ניתן לבצע קונבולוציה ציקלית במקום קונבולוציה רגילה- קל יותר למימוש.

### חסרונות:

- שידור של דברים כפולים, מפחית את קיבולת הערוץ.
- כל שידור של סימבול מתארך (נוסף לו  $Td$ ) ולכן דורש יותר אנרגיה לשידור.
- זמן השידור גדל לכל סימבול- מוסיף דיליי למערכת.

6. אם נבצע הרחבה מחזורית מספיק גדולה נקבל שיוויין בין הקונבולוציה הציקלית שקלה לחישוב לבין הקונבולוציה הליניארית – שאותה אנחנו רוצים לחשב.  
7. א. נתונים:

$$\begin{aligned} BW &= 20 \text{ MHz} \\ \text{length symbol (with CP)} &= 4 \mu s \\ CP &= \frac{4}{5} \mu s = 0.8 \mu s \end{aligned}$$

מרווח התדרים של תתי הערוצים:

$$\text{space} = \frac{1}{\text{length symbol} - CP} = \frac{1}{3.2 \mu s} = \frac{1}{3.2 * 10^{-6}} = 312500 \text{ Hz}$$

מספר תתי ערוצים יהיה:

$$N = \frac{20 * 10^6}{312500} = 64$$

- ב. כעת שולחים פקטה שמכילה: 2 סימבולים – preamble , ועוד 100 סימבולים של מידע.  
4 תתי ערוצים לא מעבירים מידע.

- סה"כ נוכל לשלוח בערוץ את כמות הביטים שנשלחים בכל תת ערוץ כפול מספר הערוצים:  
- QAM-4: כל סימבול מיוצג ע"י 2 ביטים, כלומר בכל תת ערוץ נוכל לשלוח 2 ביטים. סה"כ מספר הערוצים הפעילים  $60 = 64 - 4$ , כלומר סה"כ נוכל לשלוח במקביל  
 $60 * 2 * 102 = 12,240 \text{ bit}$   
- ועבור 64-QAM: כל סימבול מיוצג ע"י 6 ביטים. סה"כ נשלח בכל פקטה של OFDM:  
 $60 * 6 * 102 = 36720 \text{ bit}$

- ג. ה delay spread המקסימלי שנרצה יהיה קטן מהזמן ה"מבוזבז" בשידור ה CP כלומר :

$$T_d \leq T_{CP} = 0.8 \mu s$$

- ד. כעת דורשים להקטין את רוחב הפס של כל המערכת ב 1.25 MHz מכל צד, סה"כ 2.5 MHz רוחב הפס החדש:  $BW_{old} - 2.5 \text{ MHz} = 17.5 \text{ MHz}$   
כל שאר הנתונים זהים. נחשב את כמות תתי הערוצים שאיבדנו:

$$N = \frac{BW}{\text{space}} = \frac{17.5 * 10^6}{312500} = 56$$

קיבלנו הפעם 56 ערוצים שמעבירים מידע. כלומר איבדנו 8 תתי ערוצים.

נחשב את התעבורה (בביטים) עבור כל מודל.  
 זמן השליחה הכולל של פקטה (כולל preamble): 102 סימבולים, כשאר לכל סימבול  
 לוקח  $4\mu s$  סה"כ זמן שליחה כולל:  $102 * 4 = 408 \mu s$   
 נחשב בכל קונסטלציה כמה ביטי מידע נשלחים כאשר כעת מספר הערוצים הוא 56:  
 : QAM-4

$$56 * 2 * 100 = 11,200 \text{ bit}$$

$$\text{throughput} = \frac{\# \text{ data bit}}{\text{total time}} = \frac{11,200}{408 * 10^{-6}} = 27.45 \text{ Mbps}$$

:QAM-64

$$56 * 6 * 100 = 33,600 \text{ bit}$$

$$\text{throughput} = \frac{\# \text{ data bit}}{\text{total time}} = \frac{33,600}{408 * 10^{-6}} = 82.35 \text{ Mbps}$$

ה. כעת רוחב הפס ירד ל 10 MHz, מספר תתי הערוצים כמו בהתחלה שווה ל 64 כאשר  
 4 מיועדים לפיילוט, כלומר 60 תתי ערוצים פעילים למידע. אחוז ה CP מהסימבול גם  
 הוא נשאר זהה – 20%.

נחשב את האורך החדש של ה CP:

נחלק את רחב הפס החדש ל 64 תתי ערוצים, ונקבל לכל תת ערוץ:

$$\text{space} = \frac{10 * 10^6}{64} = 156250 \text{ Hz}$$

מרווח התדרים של תתי הערוצים כולל את CP:

$$\text{space} = \frac{1}{\frac{\text{length simbol} - 0.2 * \text{length simbol}}{5}} = \frac{1}{0.8 * \text{length simbol}}$$

$$= \frac{5}{4 * \text{length simbol}} = 156250 \text{ Hz} \rightarrow \text{length simbol} = 8 \mu s$$

ונקבל שה CP הוא:

$$0.2 * \text{length simbol} = 1.6 \mu s$$

המקסימום דיליי של הקרן הכי רחוקה מה LOS יהיה:

$$T_d \leq T_{CP} = 1.6 \mu s$$

## Part 4 – OFDM Tx\Rx system

1. נחשב את ה BW coherence של הסיגנל. ראשית – הזמן בין 2 דגימות הינו :

$$t = \frac{1}{32000} \text{ sec}$$

נחשב ע"י RMS כמו בהרצאה:

$$\sigma_d = \sqrt{\langle t_k^2 \rangle - \langle t_k \rangle^2}$$

מתוך המודל: עבור שני פולסים עם אמפליטודה 1, בזמנים 0 ו  $T_s$  :

$$\langle t_k^2 \rangle = \frac{1 * 0^2 + 1 * \left(\frac{1}{32000}\right)^2}{1 + 1} = 4.88 * 10^{-10} \text{ sec}$$

$$\langle t_k \rangle = \frac{0 * 1 + \frac{1}{32000} * 1}{1 + 1} = 1.56 * 10^{-5} \text{ sec}$$

$$\sigma_d = \sqrt{4.88 * 10^{-10} - (1.56 * 10^{-5})^2} = 1.56 * 10^{-5} \text{ sec}$$

$$B_{coh} = \frac{1}{5\sigma_d} = \frac{1}{5 * 1.56 * 10^{-5}} \approx 12.786 \text{ MHz}$$

נחשב את ה Time coherence של הסיגנל לפי נוסחה מההרצאה:

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_d}$$

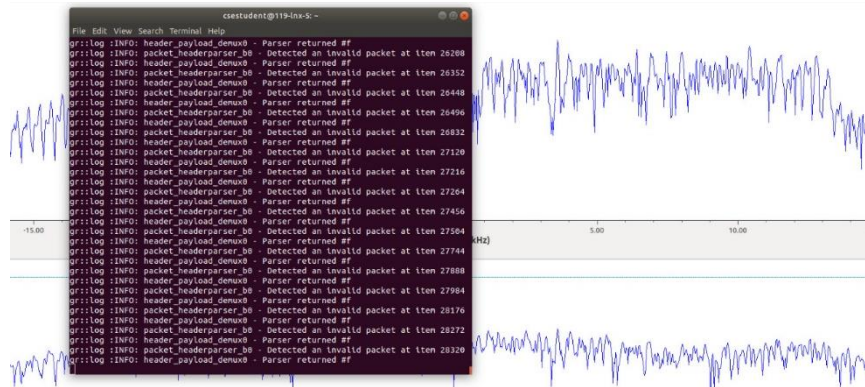
מתוך הדיאגרמה (frequency selective fading model) ניתן לראות ש:

$$f_d * T_s = \frac{1}{1/T_s} \rightarrow f_d = 1$$

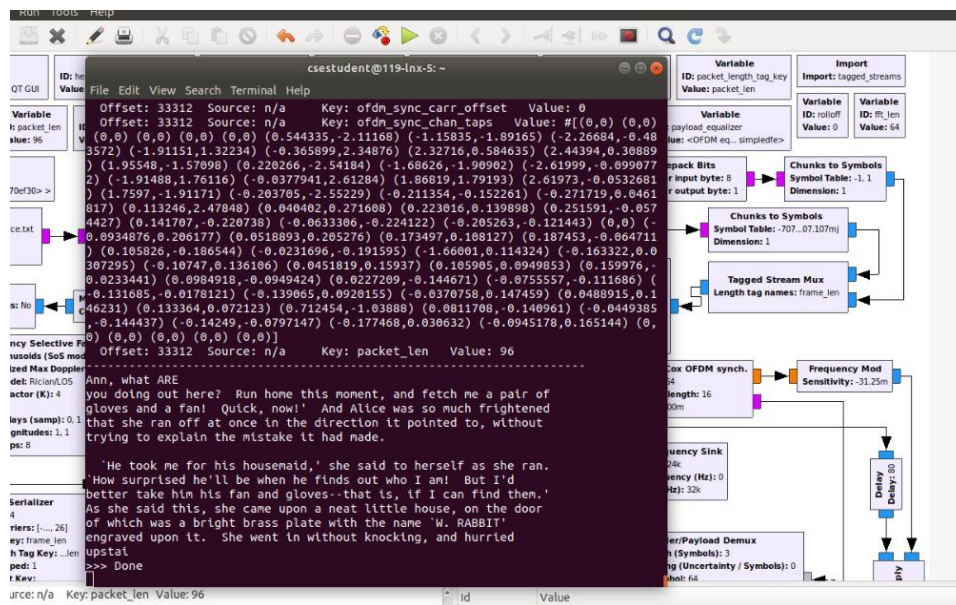
נציב:

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi} = 0.179 \text{ sec}$$

קעת שינינו את ה pdp amplitude – הוספנו עוד פולס עם מגניטודה 0.9, בזמן  $2T_s$  וניתן לראות שקיבלנו שיבושים באות והפקטות לא מגיעות טוב:

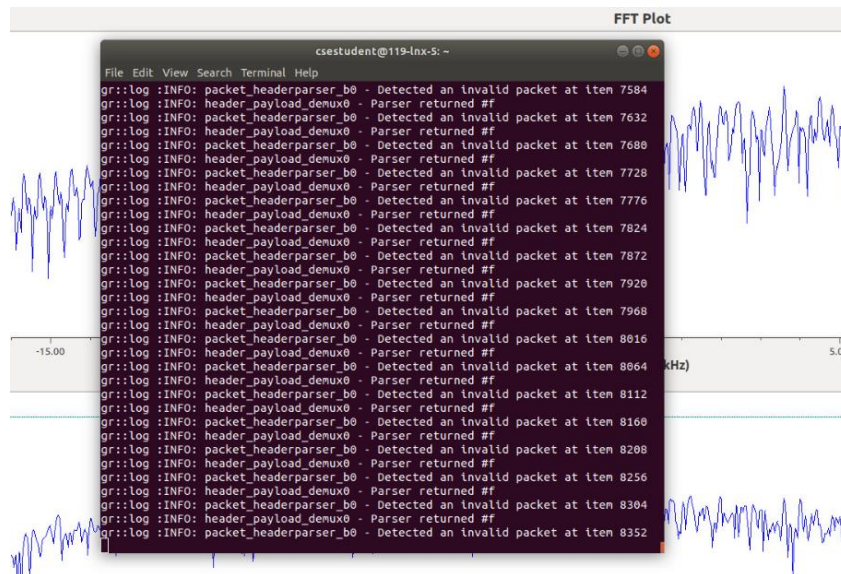


## 2. שינינו את ה LOS model ל Rician/LOS וקיבלנו את האות בצורה תקינה:



התפלגות *Rician* מתקבלת אם אחד הסיגנלים דומיננטי יותר מכל האחרים. במקרה שלנו קיים סיגנל *LOS* שדומיננטי יותר, לכן ההתפלגות הנ"ל גם רלוונטית לשידור האות.

כאשר שינינו את ה PDP והוספנו פולס בזמן 2Ts עם אמפליטודה של 0.9 קיבלנו שוב שגיאה כמו קודם:



## 3. נשים לב שכל חבילה בקוד הנתון מכילה הרבה פרטים מלבד התווים של המידע. גודל החבילה מוגדר במשתנה קבוע והוא 96 תווים. לכן זה גודל החבילה.