

## Final Report – FM Broadcasting Project, LAB6 -

### Simulation part –

#### 4. Homework Part I: Mono Audio Stream

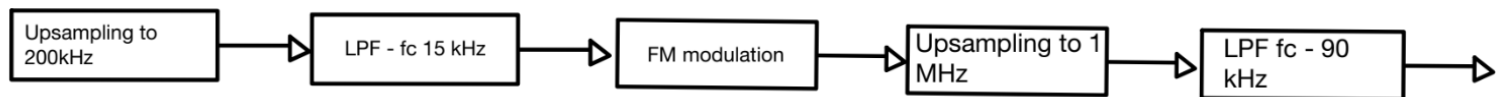
1. נדרשנו להציג את האות המאופק ב-FM pass-band. אנו מתחילים מפס הבסיס וע"י המודולציה בעצם עושים "shift" בתדר לאות. ובכתיב מתמטי –

$$y_{BB}(t) = e^{2\pi i f_{\Delta} \int_0^t x(\tau) d\tau} \text{ and the pass - band FM we got}$$

$$y_{PB}(t) = e^{2\pi i (f_{\Delta} \int_0^t x(\tau) d\tau + f_c t)} = e^{2\pi i f_c t} e^{2\pi i f_{\Delta} \int_0^t x(\tau) d\tau} = e^{2\pi i f_c t} y_{BB}(t)$$

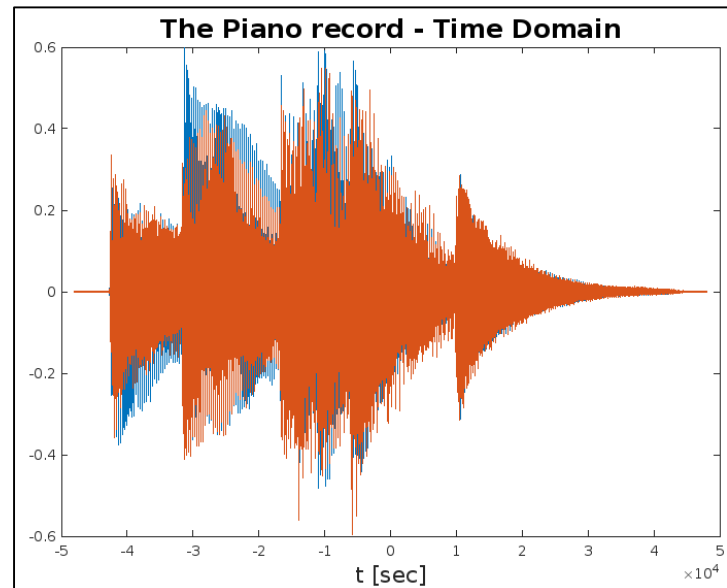
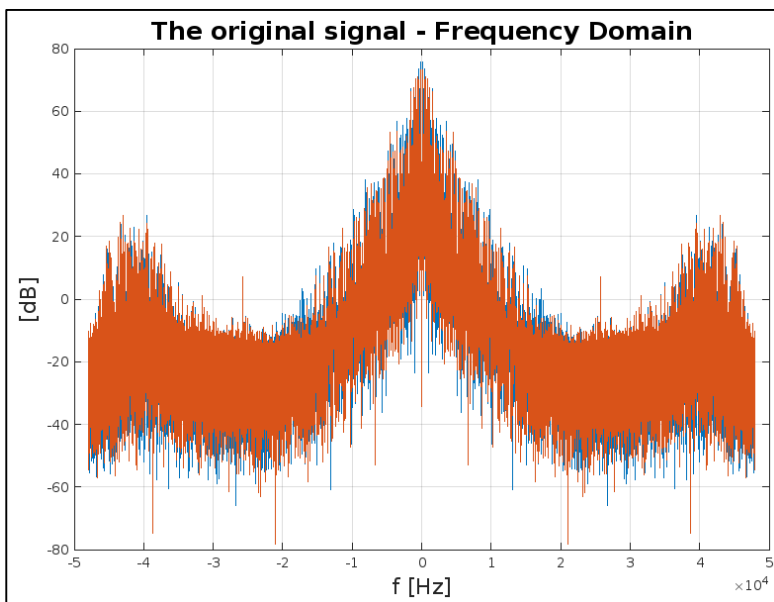
#### - Transmitter 4.1

בסעיף זה התבקשנו לכתוב את הפונקציה "Mono\_Fm\_Mod" אשר מבצעת מודולציה לאות. התבקשנו להציג דיאגרמת בלוקים עבור מערכת השידור והקליטה, להלן הדיאגרמה עבור מערכת השידור –

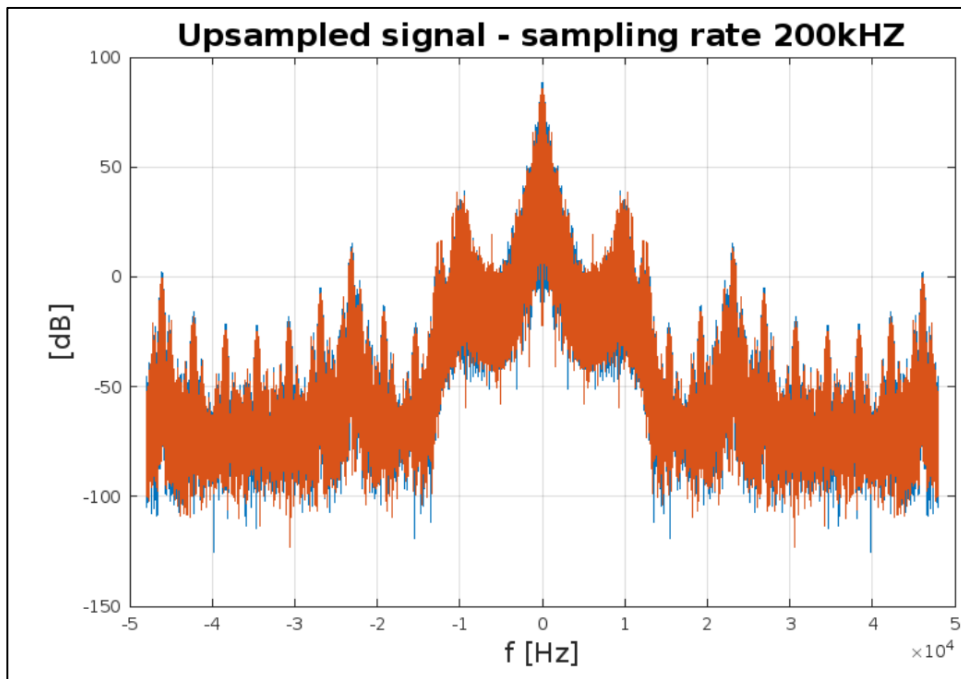


כלומר, אנו מעלים את קצב הדגימה תחילה, לאחר מכן מעבירים דרך מסנן מעביר נמוכים כדי לבצע את המודולציה, לבסוף מעלים את קצב הדגימה לקצב הדרוש לשם השידור ושוב, מעבירים דרך מסנן מעביר נמוכים בתדר הקיטעון אשר נדרשנו לו בשאלה.

אנו משדרים את קובץ הפסנתר בשם 'piano2'. להלן הקובץ המקורי בציר הזמן, והספקטרום שלו -



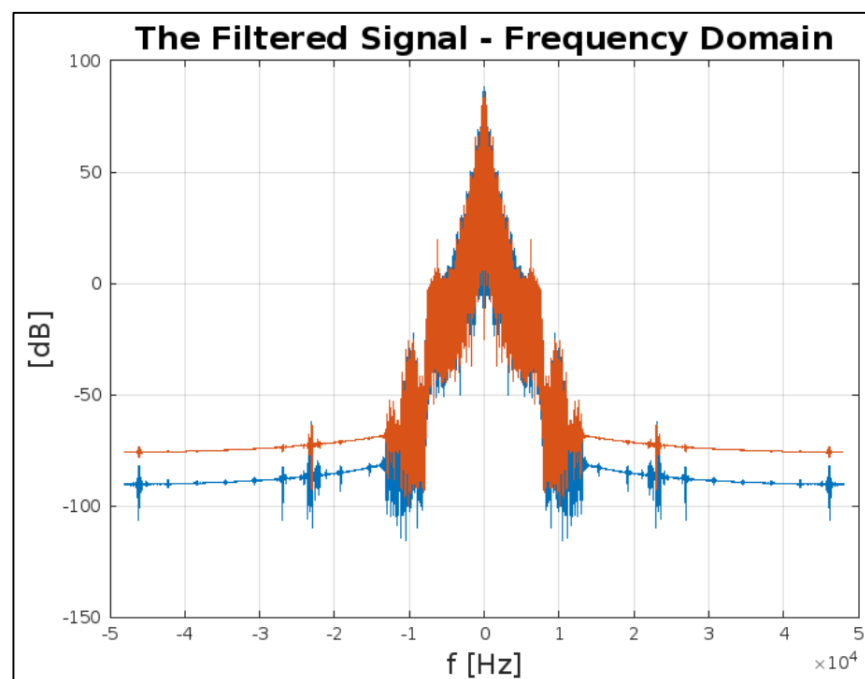
כעת, בהתאם לדיאגרמת הבלוקים, נעלה את קצב הדגימה ל-200 kHz, להלן התוצאה שהתקבלה (במישור התדר) –



פעולת ה-upsampling (מתבצעת באמצעות הפקודה `(resample)` מוסיפה אפסים בציר הזמן בין הדגימות, למשל אם אנו רוצים להעלות את קצב הדגימה פי 3 – אזי אנו 'דוחפים' בציר הזמן 2 אפסים  $(L - 1)$  בין כל דגימה מהאות המקורי. בציר התדר מתקבלת אינטרפולציה כלומר הגברת רזולוציית האות. לאחר הוספת האפסים, האות מועבר ב-LPF. מתמטית, אנו מקבלים בציר התדר את כיווץ הציור וכך מתקבלת הגברת רזולוציה, נניח שכל דגימה הייתה בערך מסוים  $p$ , אזי לאחר מעבר ב-upsampling שייקרא  $L$ , כל דגימה תהיה ב- $\frac{p}{L}$ .

היתרונות בכך שאנו משתמשי בהעלאת קצב הדגימה הם שנקבל שכפולים מרוחקים יותר בתדר, ומכך נסיק שישנו פחות חשש ל-aliasing, וכמו כן עקב כיווץ ציר התדר רוחב הפס של האות קטן. נדגיש שכדי להעלים את השכפולים, מופעל LPF עם cutoff בהתאם לגודל הכיווץ.

בהתאם לדיאגרמה, השלב הבא הוא מעבר במסנן מעביר נמוכים עם קיטעון של  $15\text{ kHz}$ . להלן ספקטרום האות לאחר מעבר במסנן ולאחר העלאת הקצב –

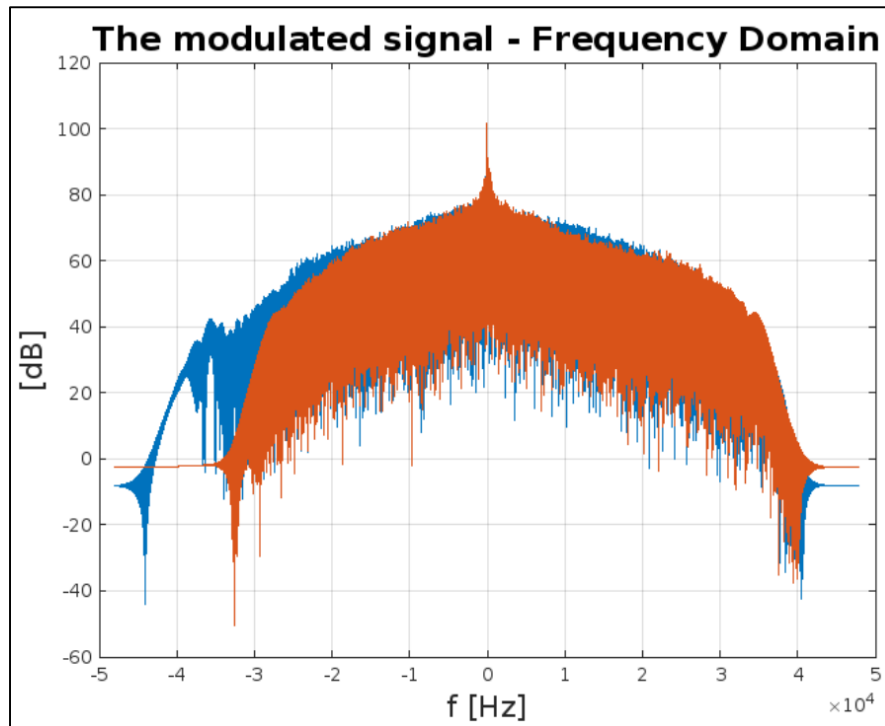


השתמשנו בדיוזין של LPF מעשי, כלומר לא אידיאלי – אנו מקבלים הנחתה מעבר לתדר הקיטעון של  $15\text{ kHz}$  אך ניתן לראות עיוותים ושההנחתה לא לגמרי חלקה מעבר לתדר זה.

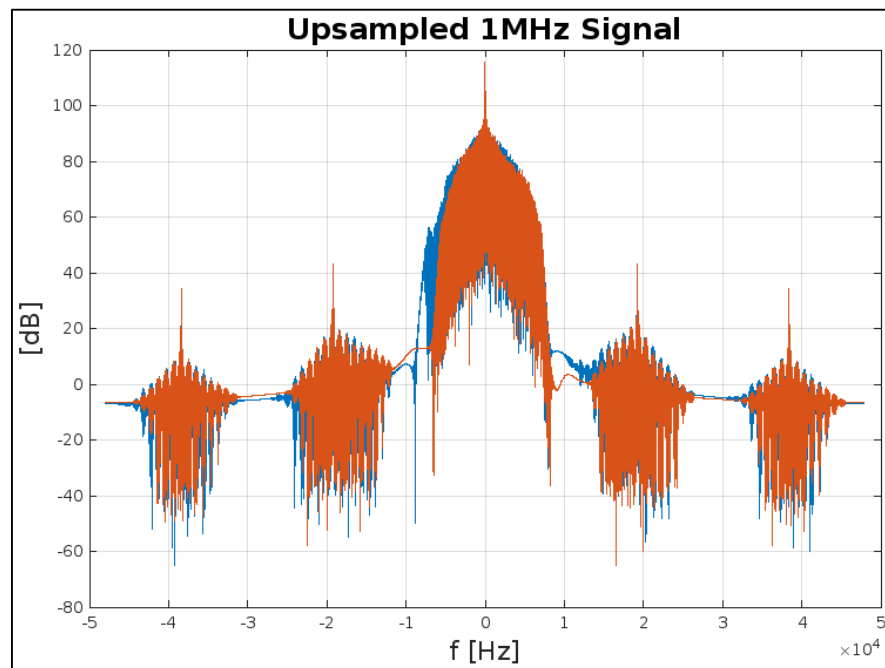
כעת, נרצה לבצע אפנון FM לאות בפס הבסיס, האפנון יתבצע באמצעות הנוסחה מסעיף קודם, אשר ניתנה בהוראות למעבדה זו  $y_{BB}(t) = e^{2\pi i * f_{\Delta} \int_0^t x(\tau) d\tau}$

כאשר אנו נדרשים לשמור על האות  $|x(t)| < 1$ . האינטגרל בוצע בשיטה נומרית אותה ה-Matlab יכול לקלוט – בעזרת הפקודה `cumsum()`, וחלוקה בתדר הדגימה  $200\text{ kHz}$ .

פקודת ה-`cumsum()` מבצעת בעצם סכום מצטבר ומחזירה וקטור שכל אחד מאיבריו הוא סכום של האיברים הקודמים לו, ולאחר חלוקה בתדר הדגימה נקבל שיטה נומרית לחישוב האינטגרל (ע"י סכימה מצטברת – הגיוני, אינטגרל זה בעצם סכום). לאחר אפנון האות, קיבלנו את הספקטרום בצורה הנ"ל –



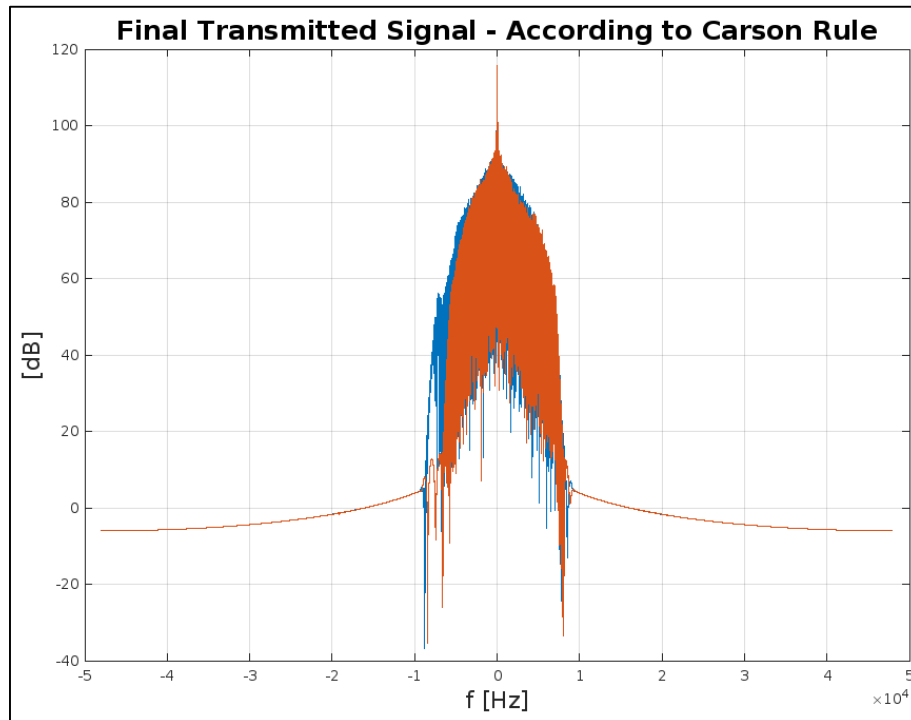
בהתאם לדיאגרמה, כדי לשדר עלינו להעלות שוב את קצב השידור, כדי להגיע ל-1 MHz ולשדר עם ה-USRP, להלן התוצאה -



לאחר העלאת קצב הדגימה, נרצה לבסוף להעביר במסנן מעביר נמוכים (LPF), עם תדר קטעון לפי כלל קרסון. כלל קרסון קובע את רוחב הסרט האפקטיבי בו נמצאת רוב האנרגיה (98 אחוז) של האות באפנון אקספוננציאלי – FM or PM. הנוסחה במקרה זה היא  $BW_{FM} = 2(f_{\Delta} + f_m)$ . בנוסחא,  $f_m$  הוא התדר הגבוה ביותר של אות המידע,  $f_{\Delta}$  הוא תדר ה-deviation שהתבקשנו לעבוד לפיו בהוראות. כלומר לפי קרסון נסיק שרוחב הפס שלנו הוא

$$BW_{FM} = 2(75kHz + 15kHz) = 180 kHz$$

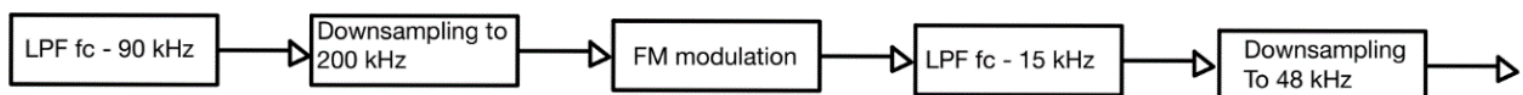
כלומר, בחרנו את תדר הקטעון של המסנן להיות  $90 \text{ kHz}$ . להלן הספקטרום שהתקבל לאחר הסרת השכפולים בתדר (כפי שניתן לראות בתמונה לאחר העלאת קצב הדגימה) -



כלומר, לבסוף בקצה המערכת אנו משדרים את הסיגנל לאחר כלל המניפולציות שבצענו עליו – העלאת קצב הדגימה פעמיים, ביצוע מודולציה לאות וסינון ע"י מסננים מתאימים בתדרים המתאימים.

#### – Receiver and Comparison 4.2

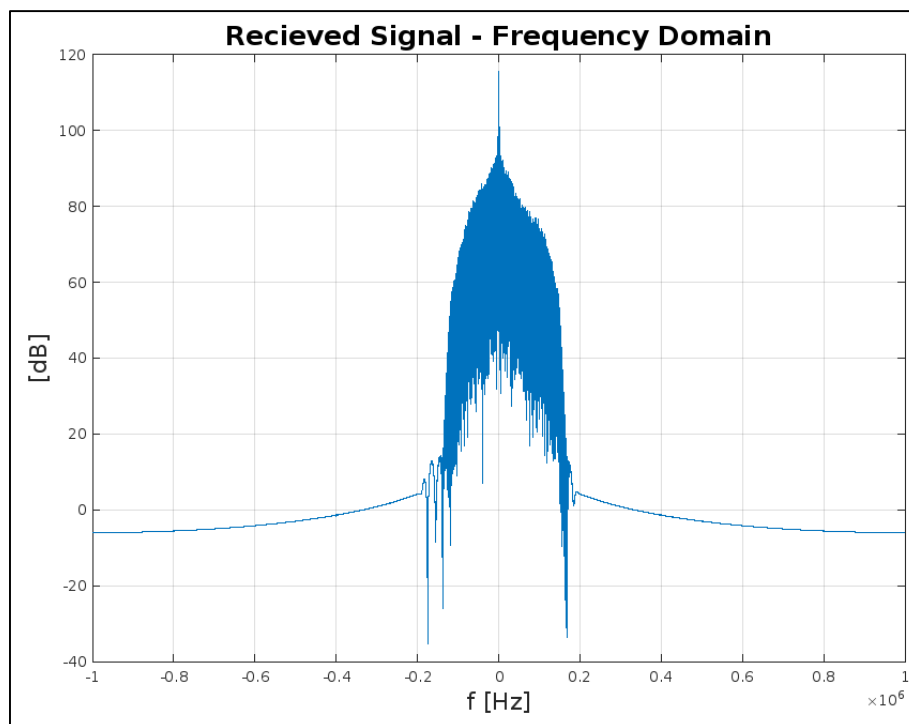
בסעיף זה התבקשנו לכתוב את הפונקציה "Mono\_Fm\_DeMod" אשר מבצעת מודולציה לאות. התבקשנו להציג דיאגרמת בלוקים עבור מערכת השידור והקליטה, להלן הדיאגרמה עבור מערכת השידור –



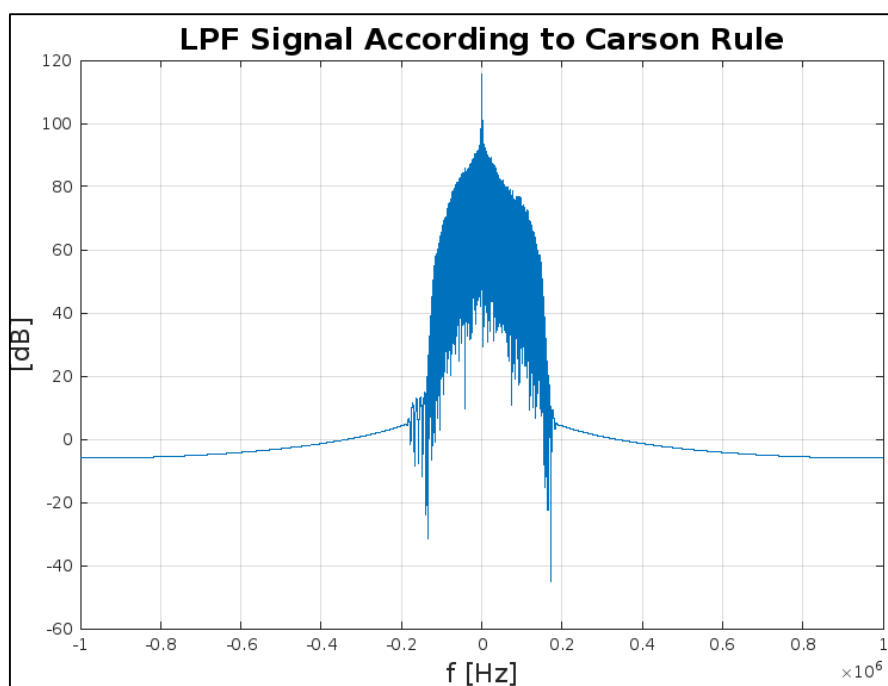
כעת, אנו מורידים את קצב הדגימה תחילה, לאחר מכן מעבירים דרך מסנן מעביר נמוכים כדי לבצע את הדה-מודולציה, שוב מורידים את קצב הדגימה לקצב הדרוש לשם החזרת האות לקצב הדגימה המקורי. לבסוף, מעבירים דרך מסנן מעביר נמוכים בתדר הקטעון אשר נדרשנו לו בשאלה.

מטרת פונקציה זו היא לבצע פענוח לאות המשודר שהתקבל בסעיף הקודם. כאשר שמרנו את האות בסוף הסעיף הקודם, נדרשנו להסיר חלק מהדגימות עקב זמן הסנכרון (שידור וקליטה) של packet-ה, זאת במטרה לקבל שמע נקי בחזרה.

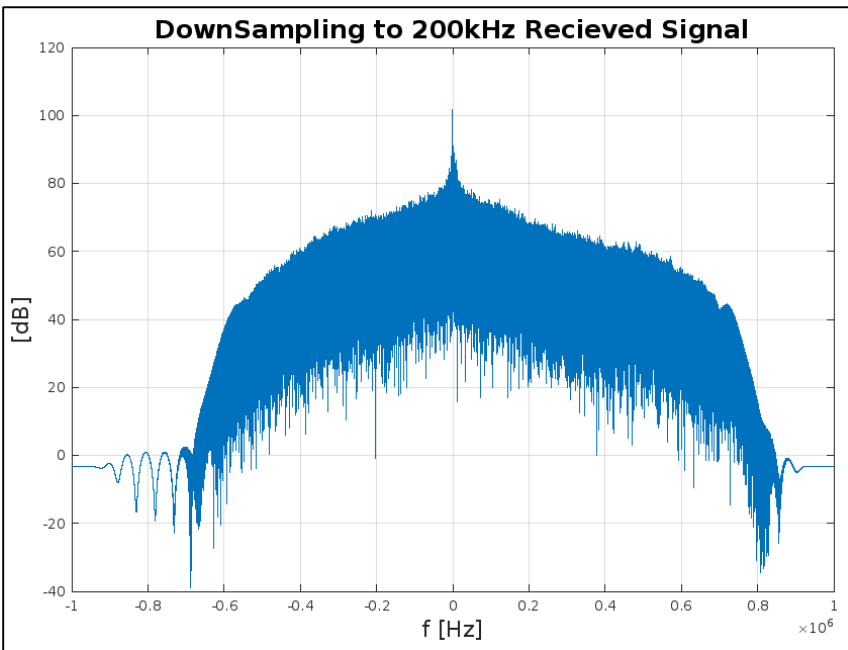
נציג את ספקטרום האות הנקלט -



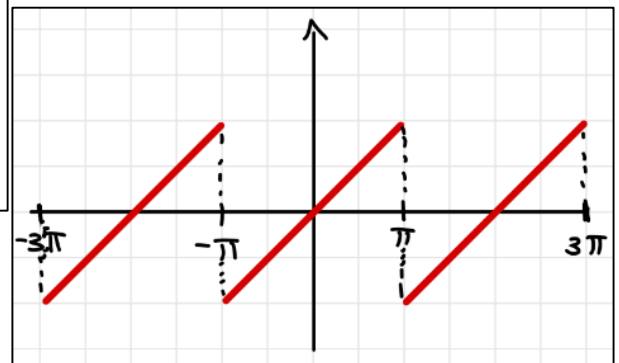
אנו מממשים מערכת להורדת קצב דגימה לשם החזרתו לקצב המקורי, מערכת זו בנויה קודם ממסנן מעביר נמוכים, ולאחר מכן מרכיב שמבצע פעולת דסימציה (מוריד קצב דגימה). העברנו את האות שהתקבל במסנן עם תדר קטעון של  $90 \text{ kHz}$ , להלן התוצאה –



לאחר מכן, ביצענו הורדת קצב דגימה בחזרה ל- $200 \text{ kHz}$ , לאחר מכן נרצה לבצע את פענוח האות חזרה. נציג את התוצאה שוב, במישור התדר-

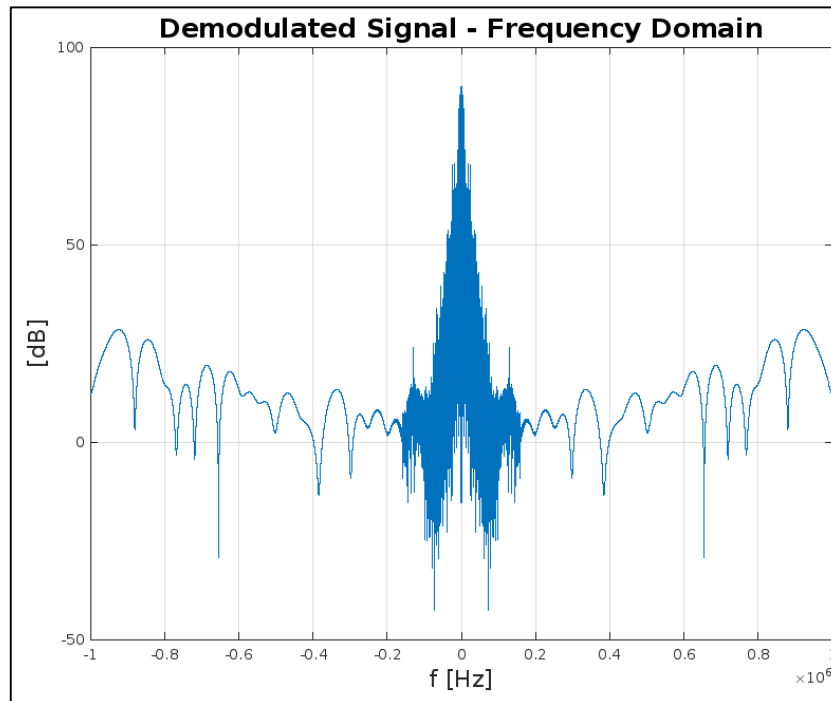


לאחר הורדת קצב הדגימה, נרצה לבצע את הפענוח. לשם כך נידרש לחלץ את הביטוי שבתוך האקספוננט (האפנון) – כלומר את פאזה האות (זווית). השתמשנו בפקודת angle אשר מחלצת את הזווית של מספר המרוכב, אך אנו כביכול בבעיה כיוון שפקודה זו מחזירה ערכים בתחומים  $[-\pi, \pi)$  ונוצר מצב בו אנו מקבלים את פאזה האות בכפולות של  $2\pi$  – אות לא רציף. אפשר לדמיין פאזה רציפה למקוטעין בצורה הבאה (האיור להמחשה בלבד !!) –

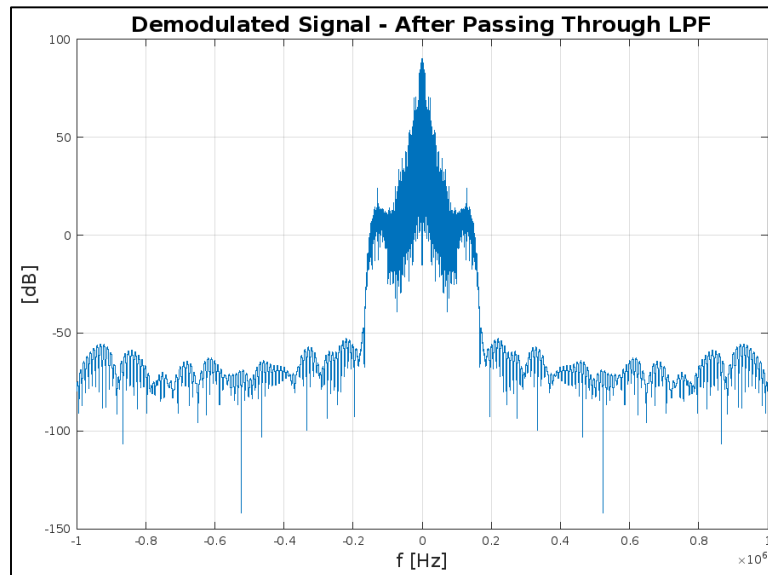


בפעולת המודולציה, ביצענו מידול נומרי לאינטגרל, אזי בפעולת "החזרה" – הדה-מודולציה, נבצע מידול נומרי לנגזרת. בגלל הצורך בנגזרת, אנו נדרשים לעבוד עם אות רציף כפי שהיה לפני ביצוע האפנון, לשם כך השתמשנו בפקודה unwrap אשר 'מחליקה' את האות ומונעת את הקפיצות כתוצאה מהפאזה הרציפה למקוטעין. לאחר פעולה זו

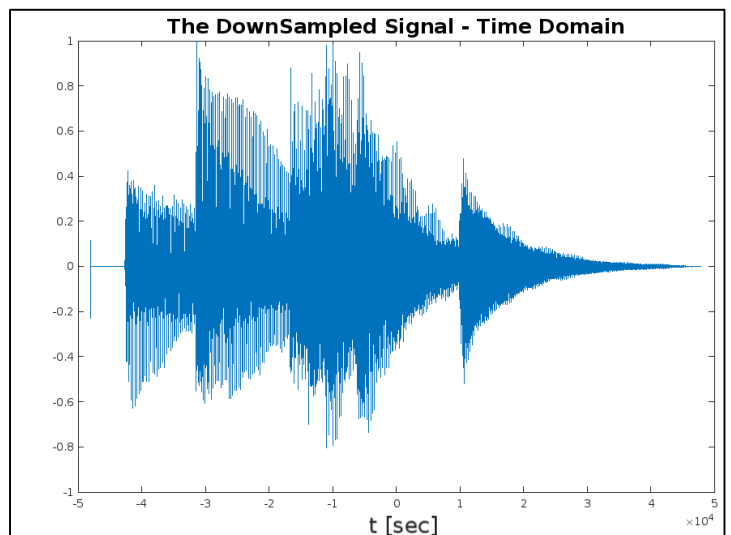
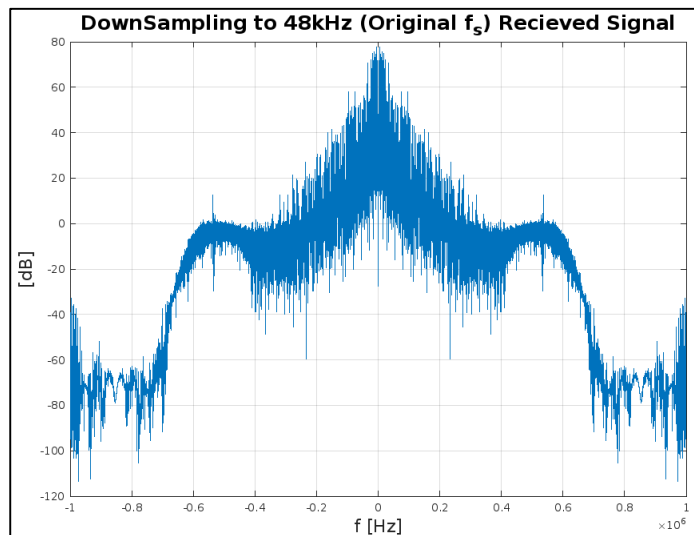
נקבל את הביטוי הבא –  $2\pi i * (f_{\Delta} \int_0^t x(\tau) d(\tau))$ . כדי לקבל את האות עצמו, נבצע גזירה ונרמול מתאים, את הגזירה ביצענו באמצעות הפונקציה diff – אשר מחזירה ווקטור (בגודל הווקטור המקורי) שאיבריו הם ההפרש בין הערך באינדקס מסוים לקודמו ולאחר חלוקה בתדר הדגימה נקבל מעין גזירה נומרית לאות. להלן האות שהתקבל לאחר ביצוע פעולת הדה-מודולציה –



כעת ובהתאם לדיאגרמה, נעביר במסנן מעביר נמוכים שוב, עם תדר קטעון של 15 kHz, לאחר המעבר במסנן התקבל הסיגנל הבא –



לבסוף, נרצה להוריד את קצב הדגימה לקצב הדגימה המקורי של האות, לשם כך ביצענו הורדת קצב הדגימה ל- $48\text{ kHz}$ . נציג את התוצאה שהתקבלה במישור הזמן ובמישור התדר –



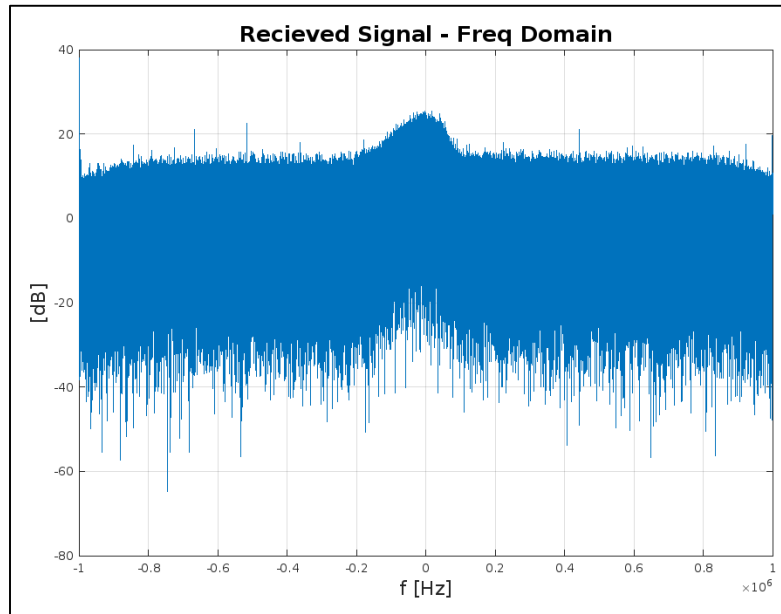
נשים לב כי קיבלנו אותות מאוד דומים בקליטת האותות, למול האותות ששידרנו בתחילת קובץ ה-Mod (עמוד 1). ובכל זאת, ישנו שוני קטן בין האותות וזאת עקב השימוש במסננים לא אידיאליים. בצורה הכללית, ניתן להגיד כי קיבלנו התנהגות דומה עד מאוד, בסימטריה סביב 0 במישור התדר, באזור ה-0 במישור התדר ותצורת האות במישור הזמן ובמישור התדר.

הערה לגבי פעולת ה-Downsampling –

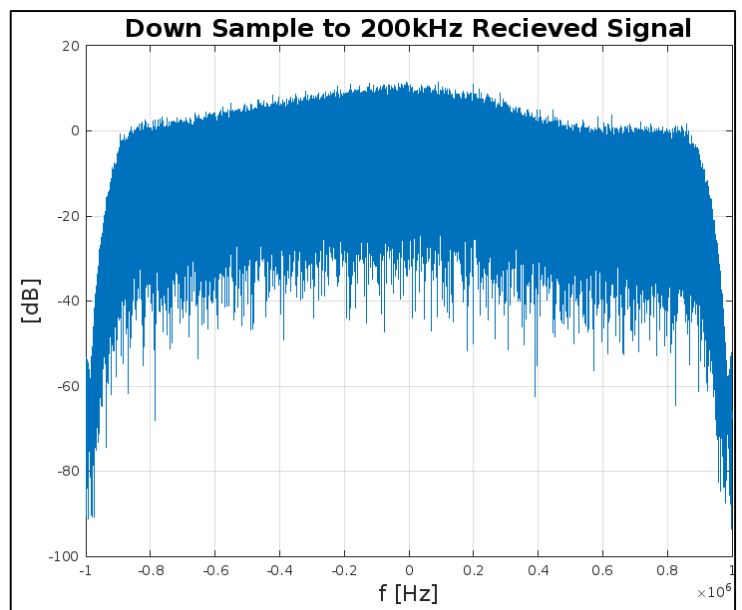
פעולה זו מטרתה להקטין את קצב הדגימה, כלומר האות במישור התדר נמתח, ערך שהיה לפני הפעולה ב-p, לאחר הפעולה יהיה ב-Mp בהתאם לפקטור ה-M. פעולת הדסימציה בעצם לוקחת את הדגימה ה-M-ית וזורקת את שאר הדגימות, למשל אם נרצה להוריד את קצב הדגימה פי 2, אזי אנו ניקח כל דגימה 2, ואת מה שבאמצע פשוט 'זורקים' (לעומת הוספת אפסים בפעולת ה-Upsampling).

כעת, לאחר שביצענו את פעולת השידור והקליטה לאחד מקבצי המוזיקה, התבקשנו להשתמש במקלט שבנינו על מנת לקלוט את הקובץ הבא –  
"rx\_data\_4MSamples1MsPs\_97.8MHz.bin". נקלוט את הקובץ, נחזור על פעולת הפונקציה Demod.

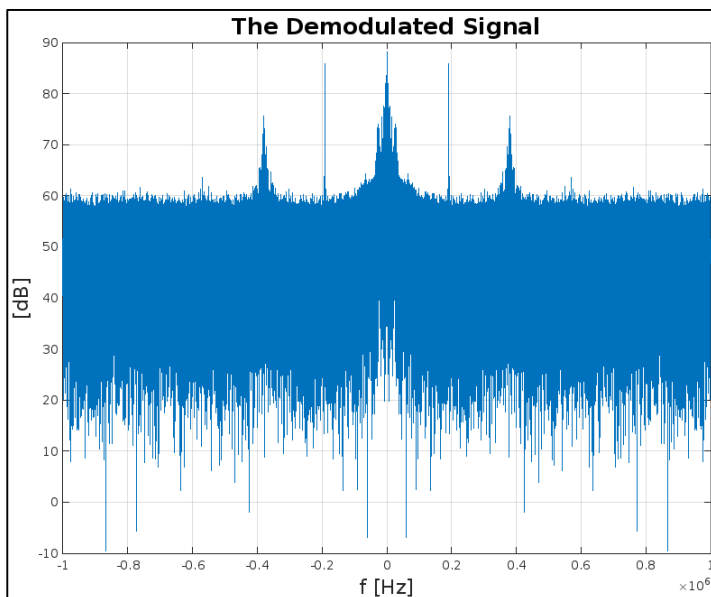
ראשית, האות שהתקבל –



כפי שעשינו בחלק של אות המוזיקה, נוריד את קצב הדגימה ל-200kHz, להלן התוצאה –

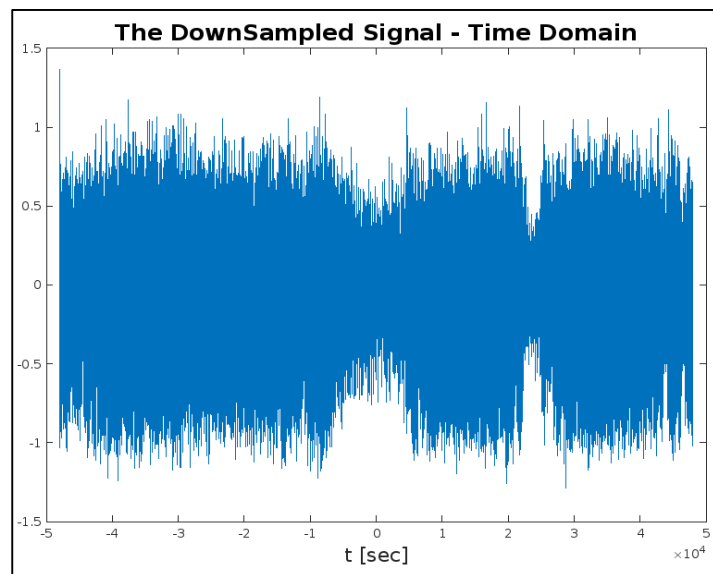
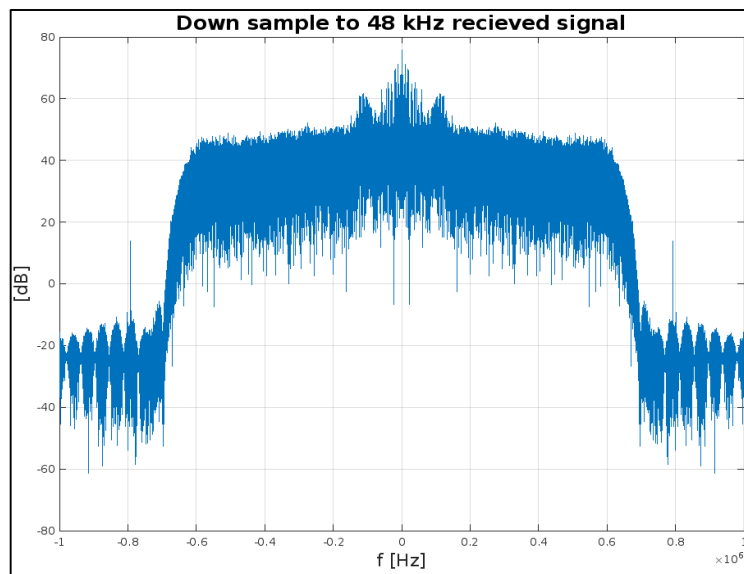


לאחר מכן, נבצע דה-מודולציה לאות -





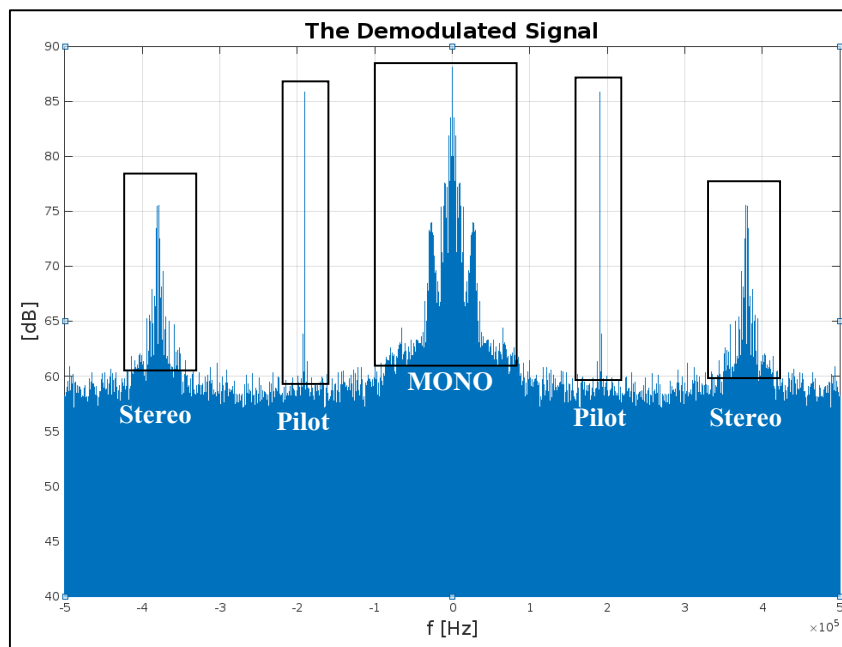
לאחר מכן, השלב הסופי הינו להעביר במסנן מעביר נמוכים ולהוריד את קצב הדגימה חזרה לקצב המקורי של האות. נציג את התוצאה במישור הזמן ובמישור התדר –



## 5. Homework Part II: Stereo Audio Stream

1. בסעיף זה, נדרשנו לזהות את רכיבי התדר השונים עבור הקובץ –

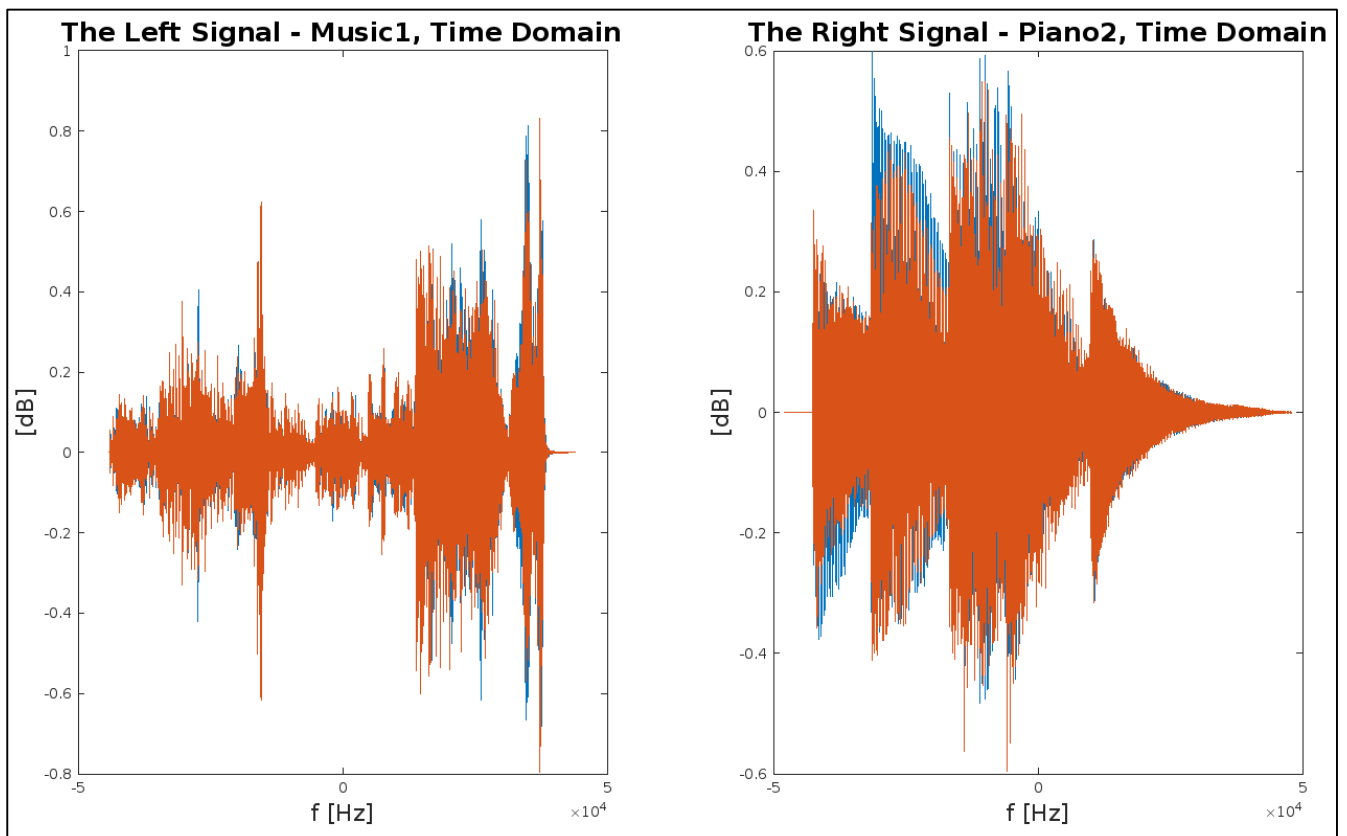
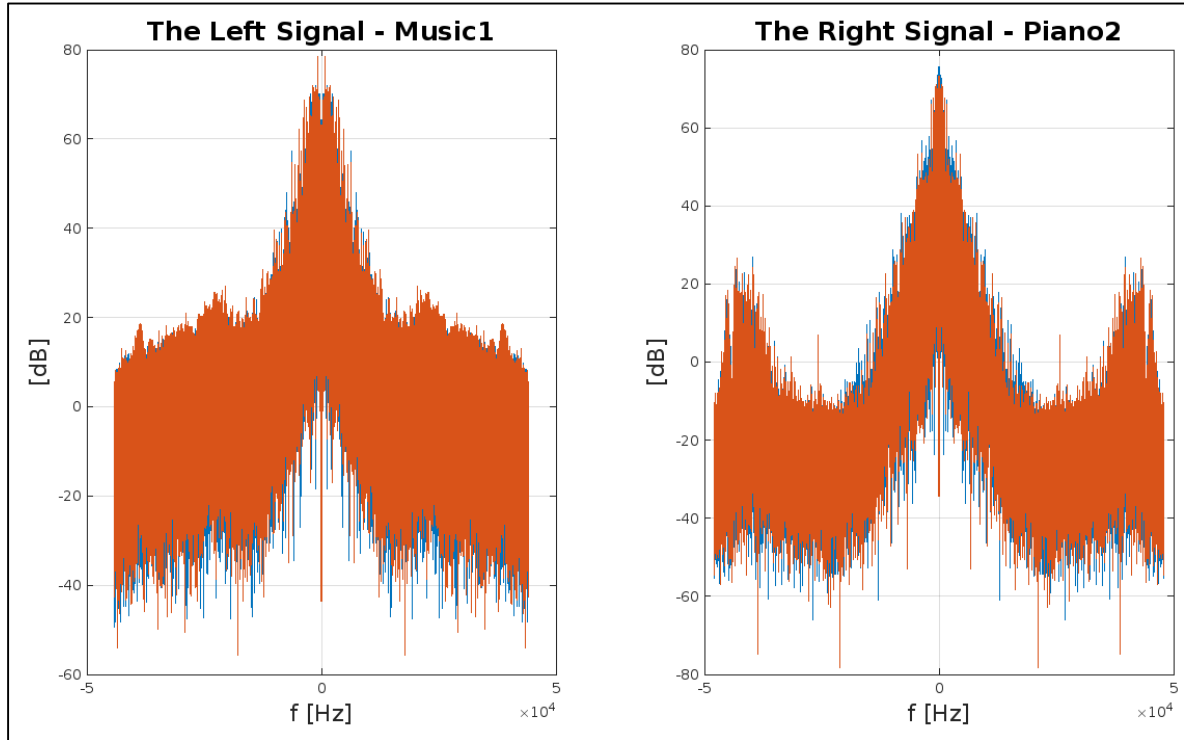
" rx\_data\_4MSamples1MsPs\_97.8MHz.bin ". להלן הספקטרום שהתקבל לאחר קליטת האות במקלט, נשתמש בתמונה מהעמוד הקודם, עבור קובץ זה לאחר ביצוע הדה-מודולציה, כמו כן ביצענו תקריב לתמונה מסוף העמוד הקודם, כך שנוכל להבחין בין רכיבי הקוד.



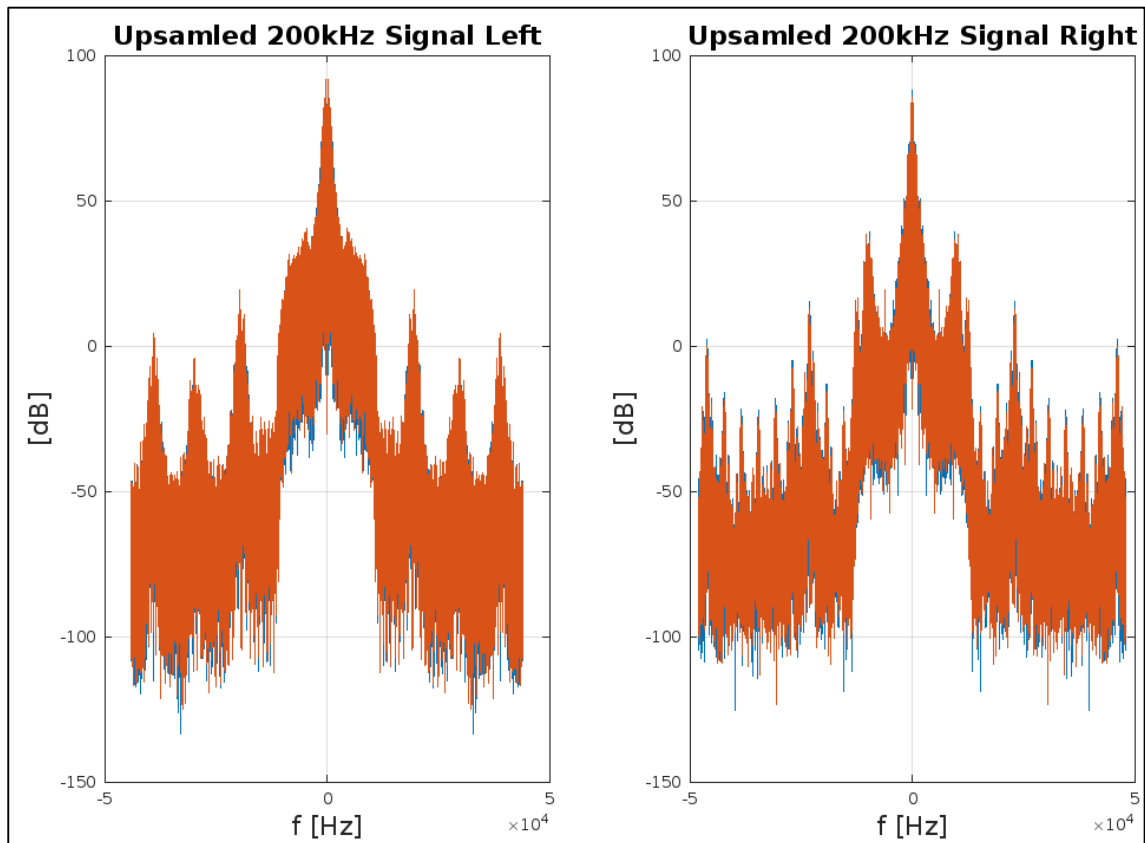
כפי שניתן לראות בתמונה, וכפי שניתן ללמוד מההמחשה בקובץ ההנחיות למעבדה זו, זיהינו את רכיבי התדרים שמתקבלים בקליטת הקובץ הנ"ל.

2. כעת אנו קוראים את שני קבצי המוזיקה – "piano2", "music1". אנו נשדר אותם באותו הקונספט שבוצע בשאלה הראשונה, תוך העלאת קצב דגימה ומעברים במסננים מעבירי נמוכים. בקליטת האות חזרה, אנו נבצע הפרדה לשני סיגנלים – left, right, כדי לקבל מסוגלות להפרדה ולהשמעת האותות בנפרד בקליטת האותות.

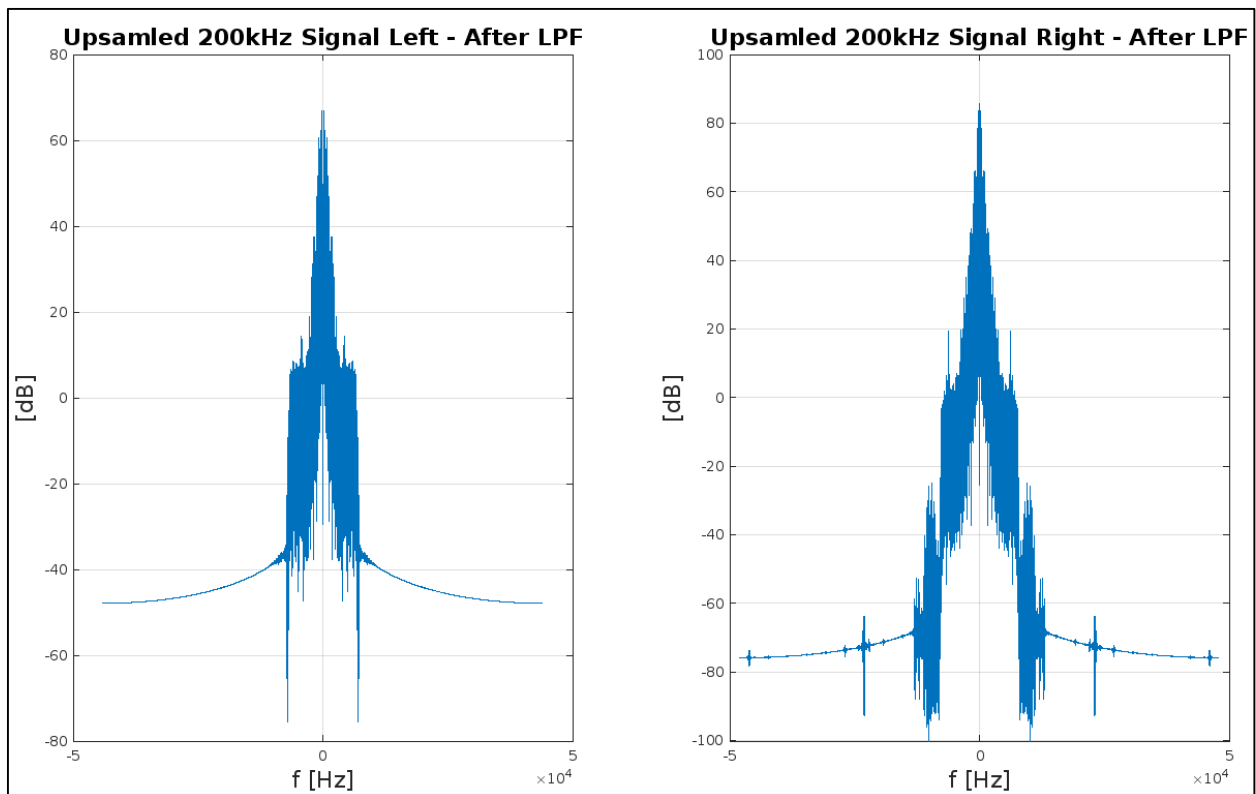
נציג תחילה את שני האותות, במישור הזמן ובמישור התדר –



כעת, בהתאם למערכת מסעיפים קודמים, נעלה את קצב הדגימה ל- $200\text{ kHz}$ . נציג את התוצאה -



נידרש להעביר את התוצאה הנ"ל ב-LPF עם תדר קטעון של  $15\text{ kHz}$ , נציג את התוצאה -



כעת, בהתאם לדף ההוראות, נדרשנו לחבר בין האותות לכדי אות ה-DSB-SC, על פי הנוסחה –

$L(t)$  – the Left signal,  $R(t)$  – the Right signal

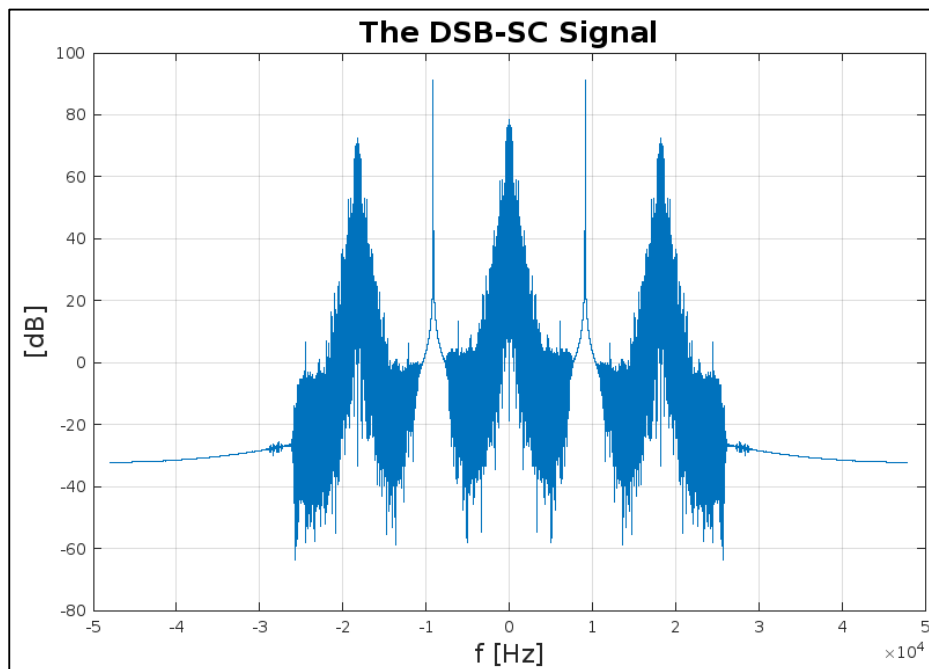
$$x(t) = 0.9 * \left[ \frac{L(t) + R(t)}{2} + \frac{L(t) - R(t)}{2} \sin(4\pi f_p t) \right] + 0.1 \sin(2\pi f_p t)$$

כאשר אות ה-DSB-SC מורכב ממספר אותות –

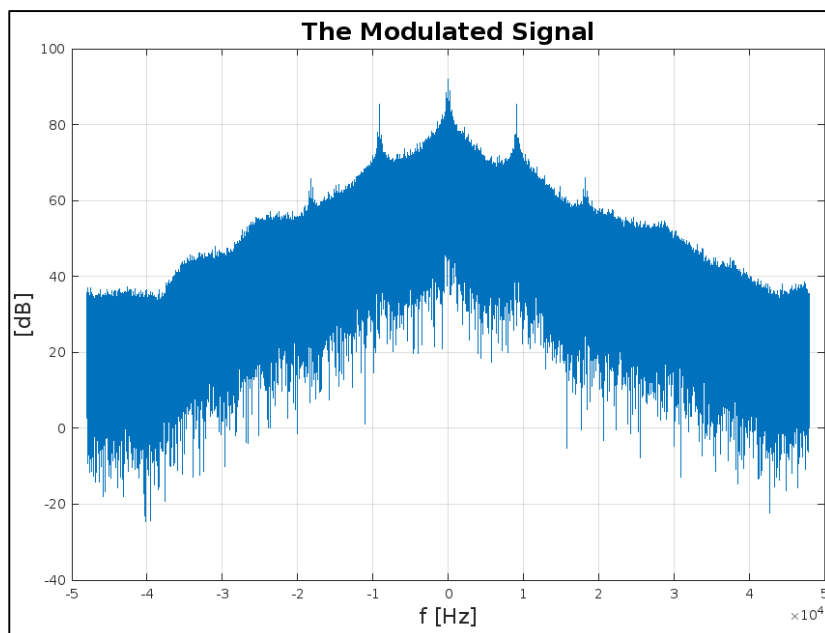
**באדום**, אות ה-Mono. **בירוק**, אות ה-Stereo (אפנון בתדר גבוה  $2f_p$ ). **בסגול**, אות ה-pilot.

נציג את ספקטרום האות שהתקבל –

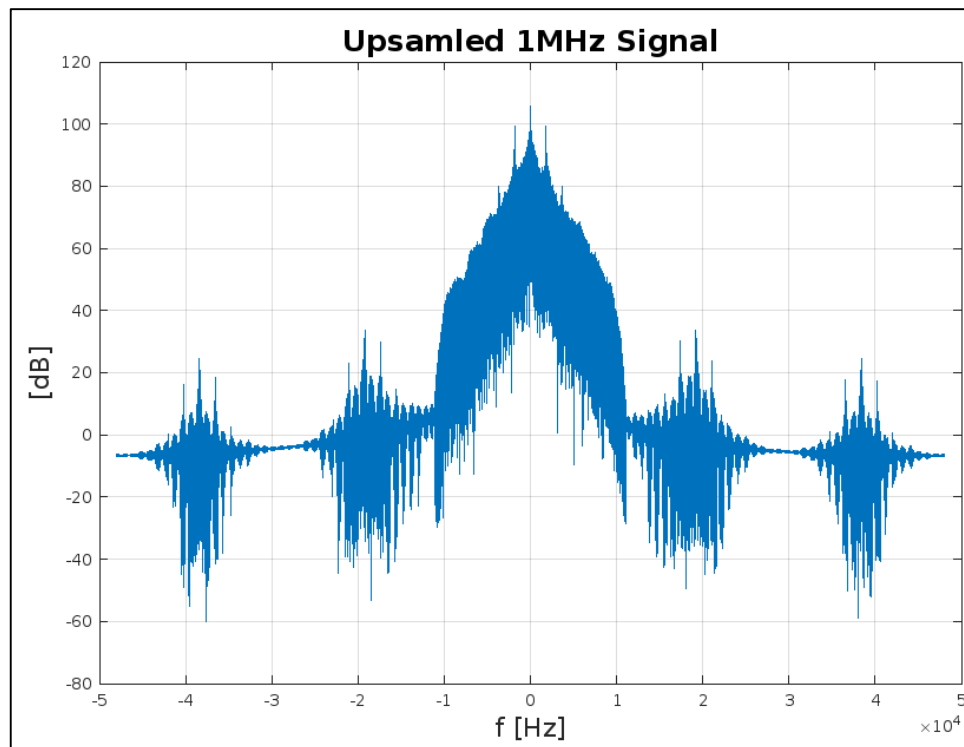
כעת, נבצע מודולציה FM כפי שעשינו בסיגנל ה-MONO.



נציג את הספקטרום שהתקבל –

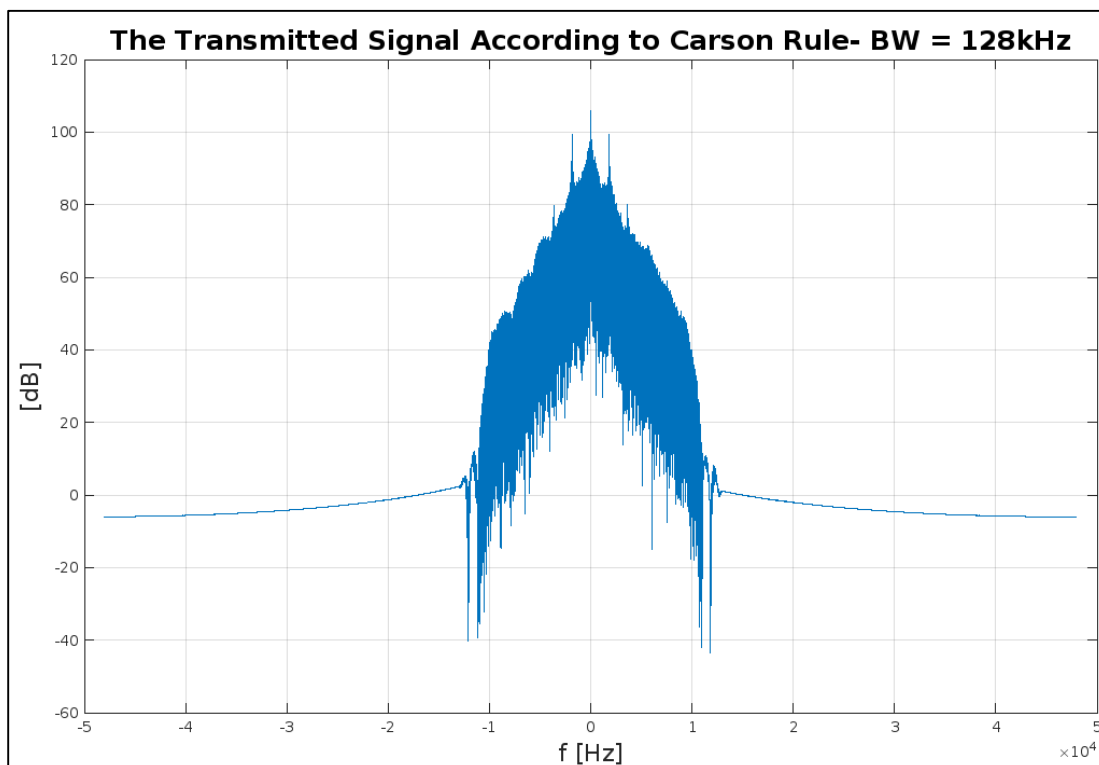


ושוב, כפי שעשינו בשידור אות ה-Mono, נעלה את קצב הדגימה ל-1 MHz. נציג את התוצאה –

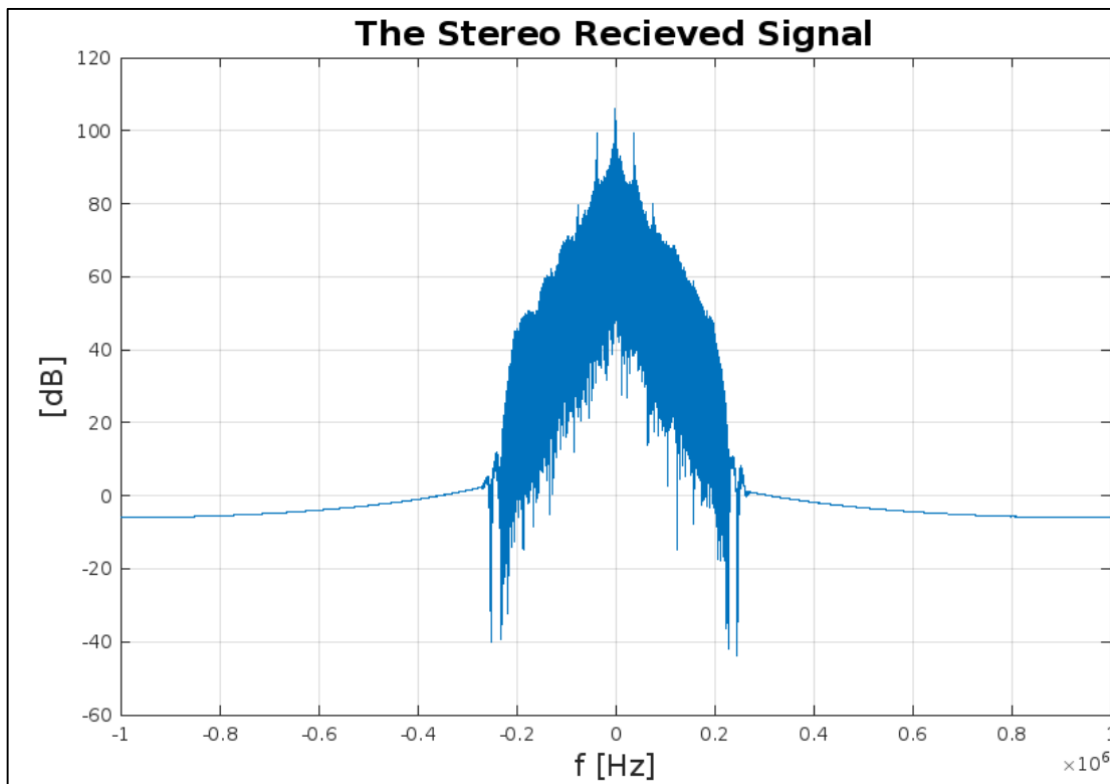


נשים לב שכיאה להעלות קצב דגימה, קיבלנו שכפולים באות, נפעיל מסנן מעביר נמוכים ( $LPF$ ) בתדר קטעון  $128\text{ kHz}$ .

נדגיש למה דווקא תדר זה (קרסון) -  $B_{FM} = 2(75\text{ kHz} + 53\text{ kHz}) = 256\text{ kHz}$  כאשר המספר  $53\text{ kHz}$  נובע מה- $LPF$  שהפעלנו בקטעון  $15\text{ kHz}$ , בתוספת לפעמיים תדר ה-pilot ואנו יודעים מהתאוריה שתדר ה-pilot הינו  $f_p = 19\text{ kHz}$ , ומהנוסחה בתדר גבוה נקבל את הנ"ל  $(2f_p)$ . נציג את התוצאה-

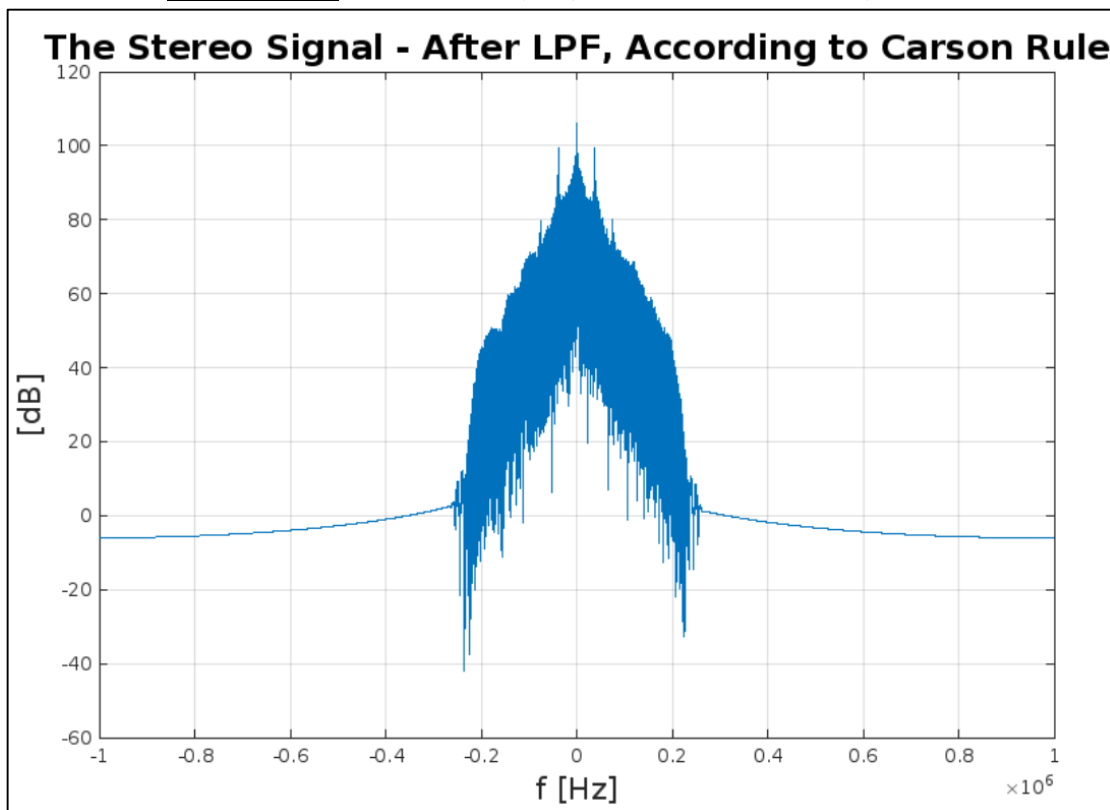


לאחר סיום תהליך השידור, נעבור לתהליך הפענוח במקלט. להלן האות שהתקבל במקלט –

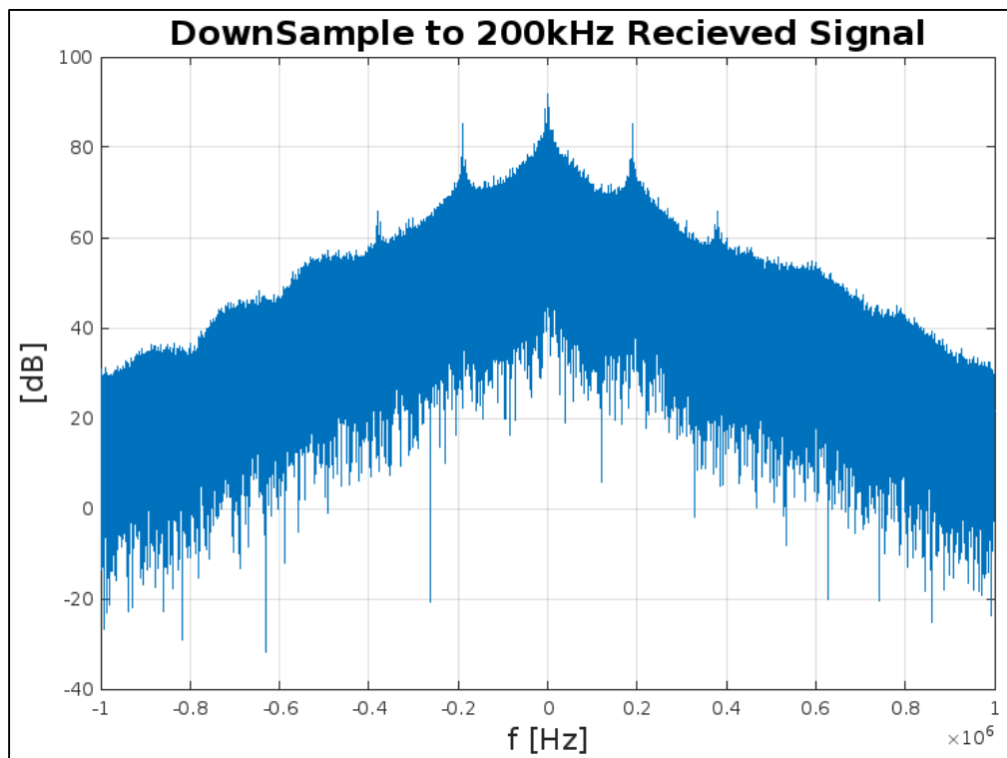


וכעת, נתחיל בתהליך הדה-מודולציה תוך הורדת קצב הדגימה והפרדת האות. נזכיר, בשימוש ב-Downsampling אנו מעבירים קודם במסנן מעביר נמוכים ורק לאחר מכן מבצעים את הורדת קצב הדגימה.

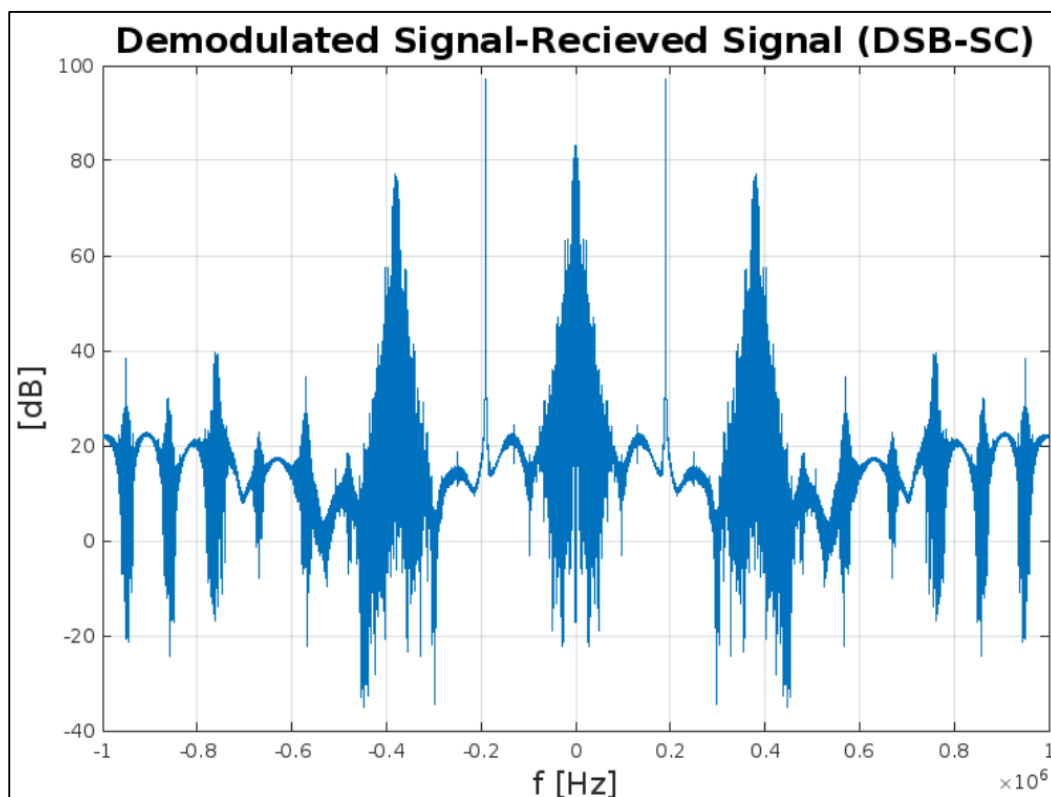
נעביר את האות במסנן מעביר נמוכים עם תדר קטעון של 128 kHz, להלן התוצאה–



ונוריד את קצב הדגימה חזרה ל-200 kHz, להלן התוצאה –



בדומה לאות ה-Mono, נצטרך לבצע דה-מודולוציה לאות, להלן התוצאה לאחר הדה-מודולוציה-



לאחר הדה-מודולוציה והורדת קצב הדגימה של האות, נשארו עם אות ה-DSB-SC, נרצה לחלץ מאות זה את חלקי ה- $L(t) + R(t)$  ואת אות ה- $L(t) - R(t)$ , כך נוכל להפריד את חלקי L ו-R של האות.

נסתכל על ביטוי אות ה-DSB-SC –

$$x(t) = 0.9 * \left[ \frac{L(t) + R(t)}{2} + \frac{L(t) - R(t)}{2} \sin(4\pi f_p t) \right] + 0.1 \sin(2\pi f_p t)$$

הרכיב **באדום** הינו ה- $L+R$ , נוכל לחלצו ע"י העברה במסנן מעביר נמוכים עם תדר קטעון מסוים וקבוע נרמול מתאים – זה בעצם חילוץ אות ה-Mono עם תדר קטעון של  $15 \text{ kHz}$ .  
הרכיב **בסגול** תלוי בתדר ה-Pilot בלבד, הוא משמש לגילוי הפרש הפאזה – נתאר את הדרך למציאת הפרש זה בהמשך ההסבר.  
הרכיב **בירוק** הינו ה- $L-R$  והוא כופל אות סינוסי בתדר גבוה ( $2f_p$  – ממורכז סביב תדר זה), את רכיב זה נוכל לקבל באמצעות **שני שלבים** – מעין "גלאי פאזה" (גלאי סינכרוני) ושגיאת הפאזה (הפרש הפאזה שיתקבל).

**השלב הראשון**, גלאי פאזה בעזרת תדר ה-Pilot –

תפקיד תדר זה הם להעיד שיש אות Stereo בתדר כפול מתדר ה-pilot (בשידור FM) – כלומר אם נדע שנקלט תדר ב- $19 \text{ kHz}$  (תדר ה-pilot) אזי נדע שב- $38 \text{ kHz}$  יש לנו אות Stereo. תפקיד נוסף הוא זיהוי ההזזה בתדר (שגיאת הפאזה). באפנון הני"ל (FM) אנו מזיזים את הספקטרום בעצם, וכל הספקטרום יוזז באופן זהה – גם ה-Pilot. כלומר ההפרש שבו אות ה-Pilot יוזז הוא יהיה ההפרש בפאזה של אות ה-Stereo. נפעיל את גלאי הפאזה על אות ה-Pilot ונוכל לקבל את ההזזה בפאזה.

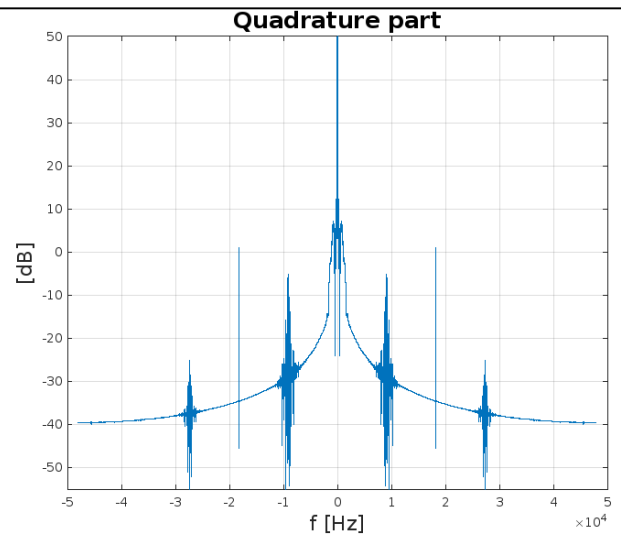
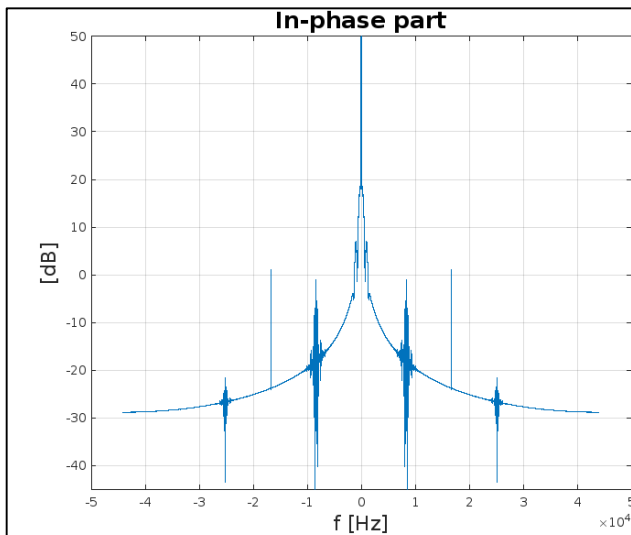
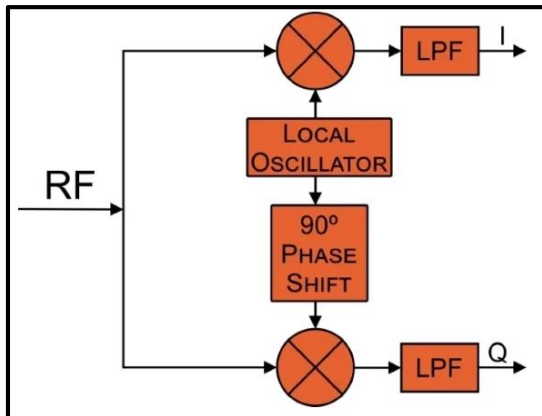
את ההסחה בפאזה נגלה ע"י שימוש בשיטת ה-IQ, כלומר נחלץ את רכיבי ה-Inphase וה-Quadrature באמצעות הכפלת רכיב ה-Pilot ב- $\sin()$  ו- $\cos()$  בהתאמה. כלומר ניעזר בתאוריה בנוסחה  $I(t)\cos(2\pi f t) - Q(t)\sin(2\pi f t)$ , לאחר ההכפלה נישאר עם שני אקספוננטים בכל רכיב – אחד בתדר גבוה, והשני בתדר נמוך (pilot). נעביר את האות ב-LPF ונקבל אקספוננט אחד בכל אחד מהרכיבים.

כלומר אנו ממדלים מעין מערכת, שבה מכפילים סיגנל באותות עם הפרשי פאזה של  $90^\circ$ . את הפרש הפאזה בין רכיבי התדר שלנו I ו-Q מוצאים ע"י –

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{Q}{I} \right]$$

כלומר במקרה שלנו, אקספוננטים בתדרים נמוכים.

נציג את רכיבי ה-Inphase וה-Quad שבעזרתם קיבלנו את הפרש הפאזה –





**בשלב השני**, לאחר שאנו יודעים את השגיאה שקיבלנו בפאזה (באמצעות ה- $(\tan^{-1})$ ), נסמן את השגיאה ב- $\Delta$ . נוכל לחלץ את אות ה-L-R ע"י כפל האות לאחר הפיענוח ב- $\sin(4\pi f_p t + \Delta)$  כלומר לבצע מעין דה-מודולוציה ומרכז סביב 0, ולאחר מכן להעבירו במסנן מעביר נמוכים עם תדר קטעון של 15 kHz. כלומר בצורה מתמטית –

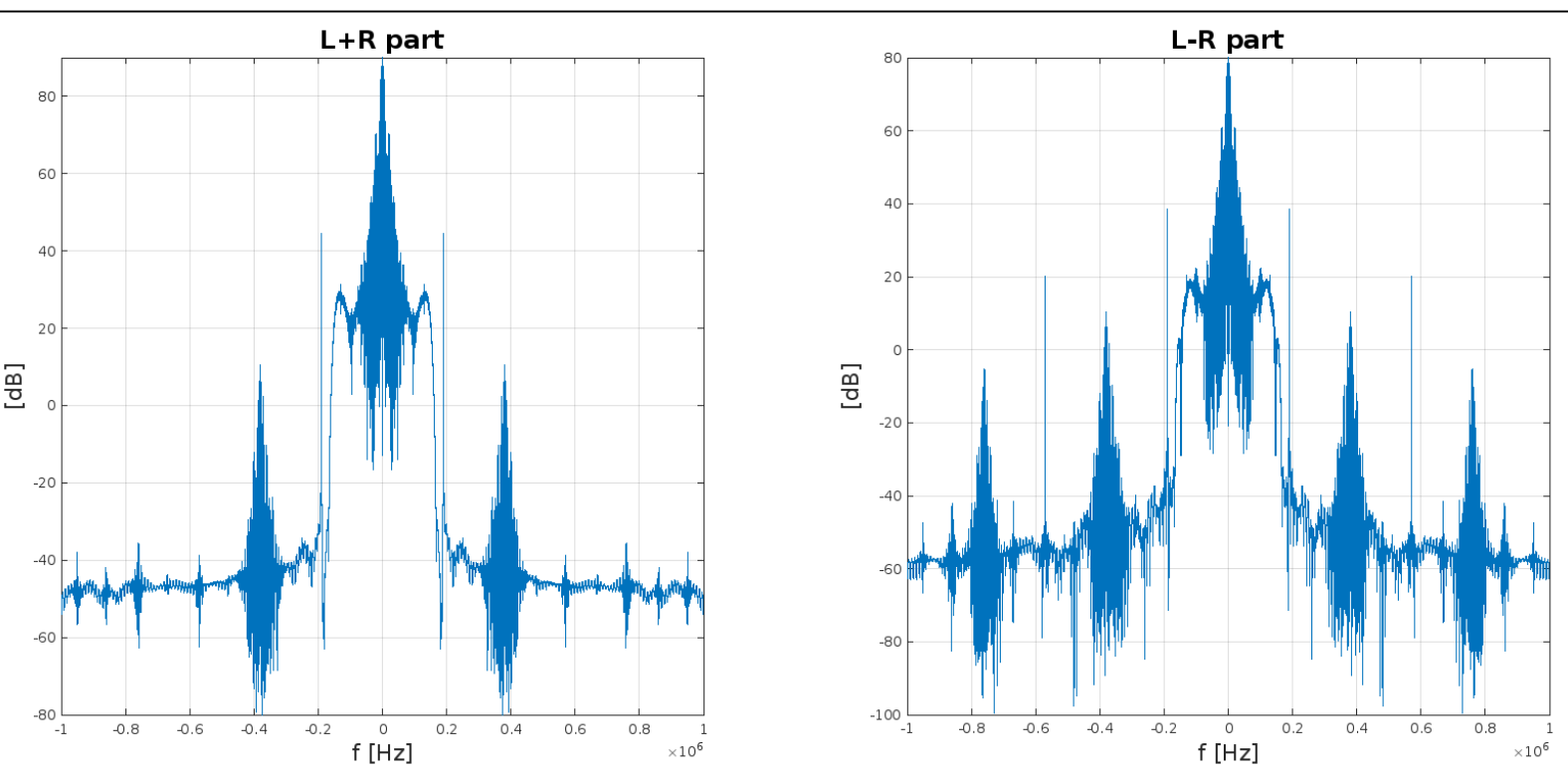
$$\text{LPF}_{\omega_c=15 \text{ kHz}} \left\{ \frac{L(t) - R(t)}{2} \sin(4\pi f_p t + \Delta) \sin(4\pi f_p t + \Delta) \right\} = \frac{L(t) - R(t)}{2}$$

בגלל שאנו יודעים את השגיאה בפאזה, נוכל לחלץ את החיסור בין האות הימני והשמאלי, כמובן שאנו נדרשים לנרמל בקבועים, במקרה שלנו הכפלנו בקוד בקבוע -  $\frac{2}{0.9}$  שהוא ההופכי לתוצאה

שהתקבלה. נדגיש כי יש לנו סימטריה בתדר עבור L-R (סביב תדר 19 kHz), לכן חילצנו את אות ה-L-R הימני בתדר הגבוה יותר. כפי שהובהר לנו ע"י מדריך המעבדה אלי, יכולנו לכפול בצורה אחרת ולקבל את אותה התוצאה – למשל באות סינוסואידלי בתדר נמוך ולא כפול -  $\sin(2\pi f_p t + \Delta)$  ולהעביר במסנן מעביר נמוכים – והיינו מחלצים את צידו השמאלי של האות.

בתיאור האלגוריתם הנ"ל, חילוץ אות החיסור בין הסיגנלים הוא החלק הקשה כאן, עבור החיבור ביניהם ציינו למעלה שנוכל להעביר במסנן מעביר נמוכים תוך נרמול בקבועים – ולקבל את הדרוש (כי אנו מקבלים את זה במבנה של תדר ה-Mono כבר).

נציג את תוצאת החילוץ של האותות -  $L(t) - R(t)$ ,  $L(t) + R(t)$  במישור התדר –

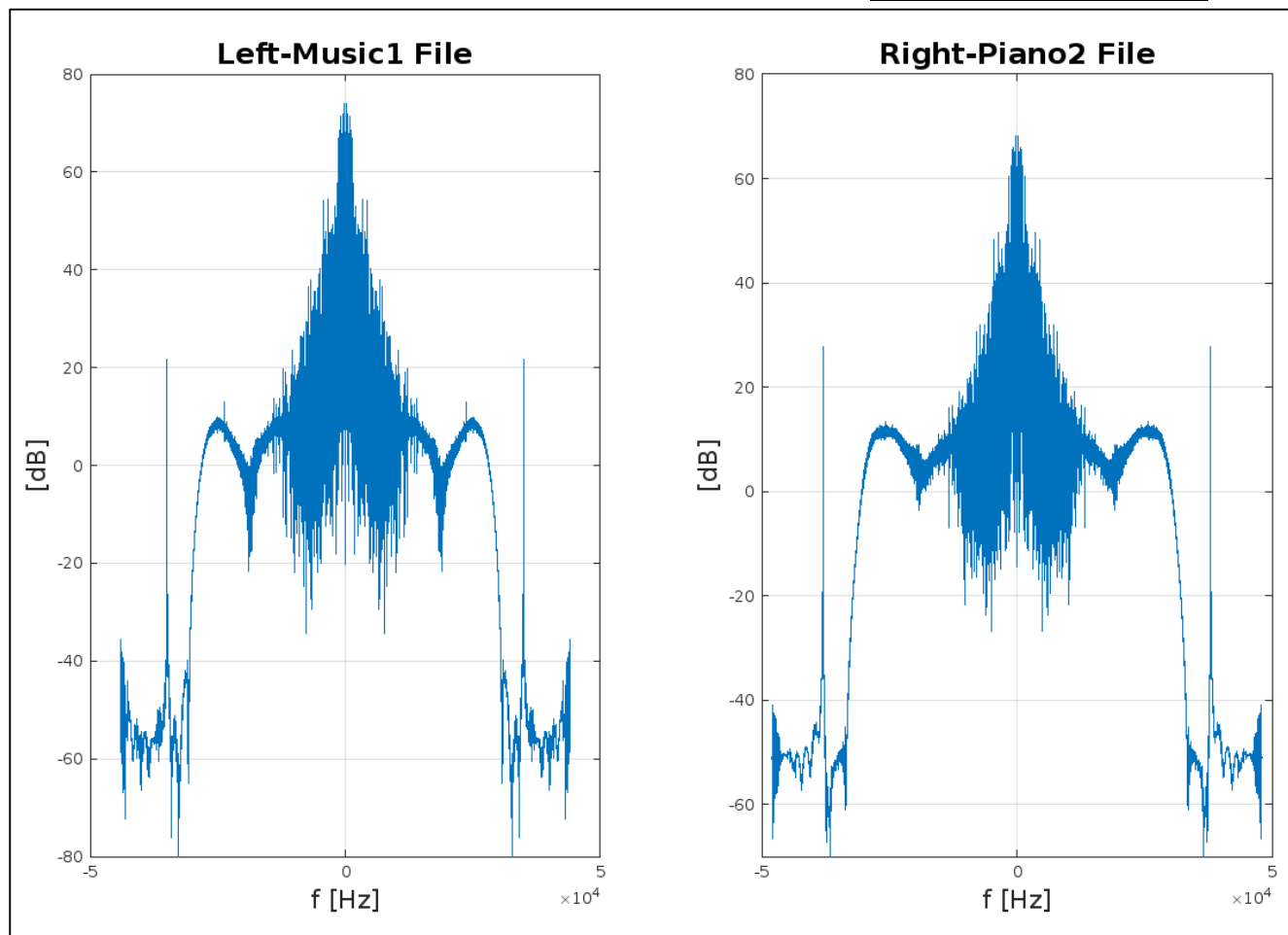


אנו נדרשנו להפריד בין הסיגנלים, לכן נוכל לבצע מניפולציה אלגברית על האותות כדי לקבל את הדרוש, כלומר ע"י חיבור וחיסור בין החלקים מסו, העמוד הקודם –

$$\frac{L(t) + R(t)}{2} + \frac{L(t) - R(t)}{2} = L(t), \frac{L(t) + R(t)}{2} - \frac{L(t) - R(t)}{2} = R(t)$$

כעת, ובהתאם לדיאגרמת קליטת האות – אנו נדרש להורדת קצב הדגימה, ההורדה תתבצע לפי קצב הדגימה של האות הגבוה יותר מבין שני קבצי השמע – תדר הדגימה של קובץ הפסנתר.

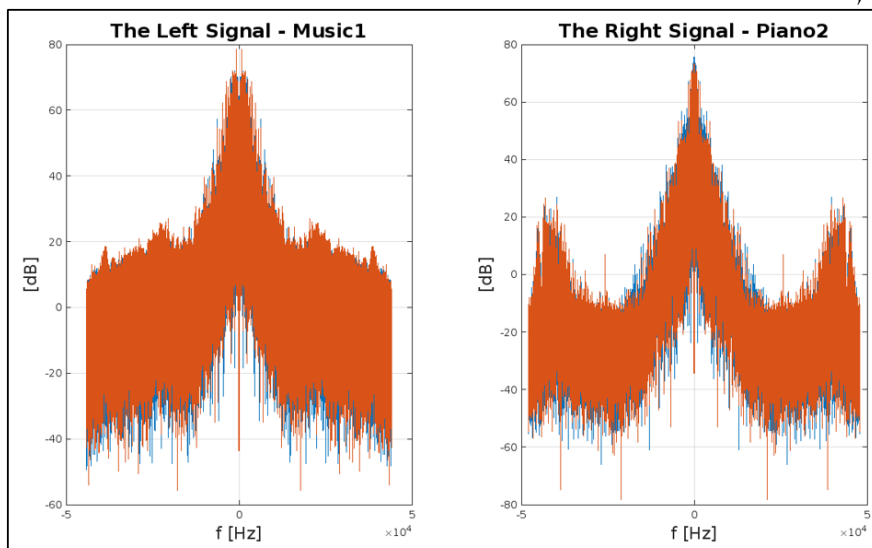
נציג את התוצאה שהתקבלה –



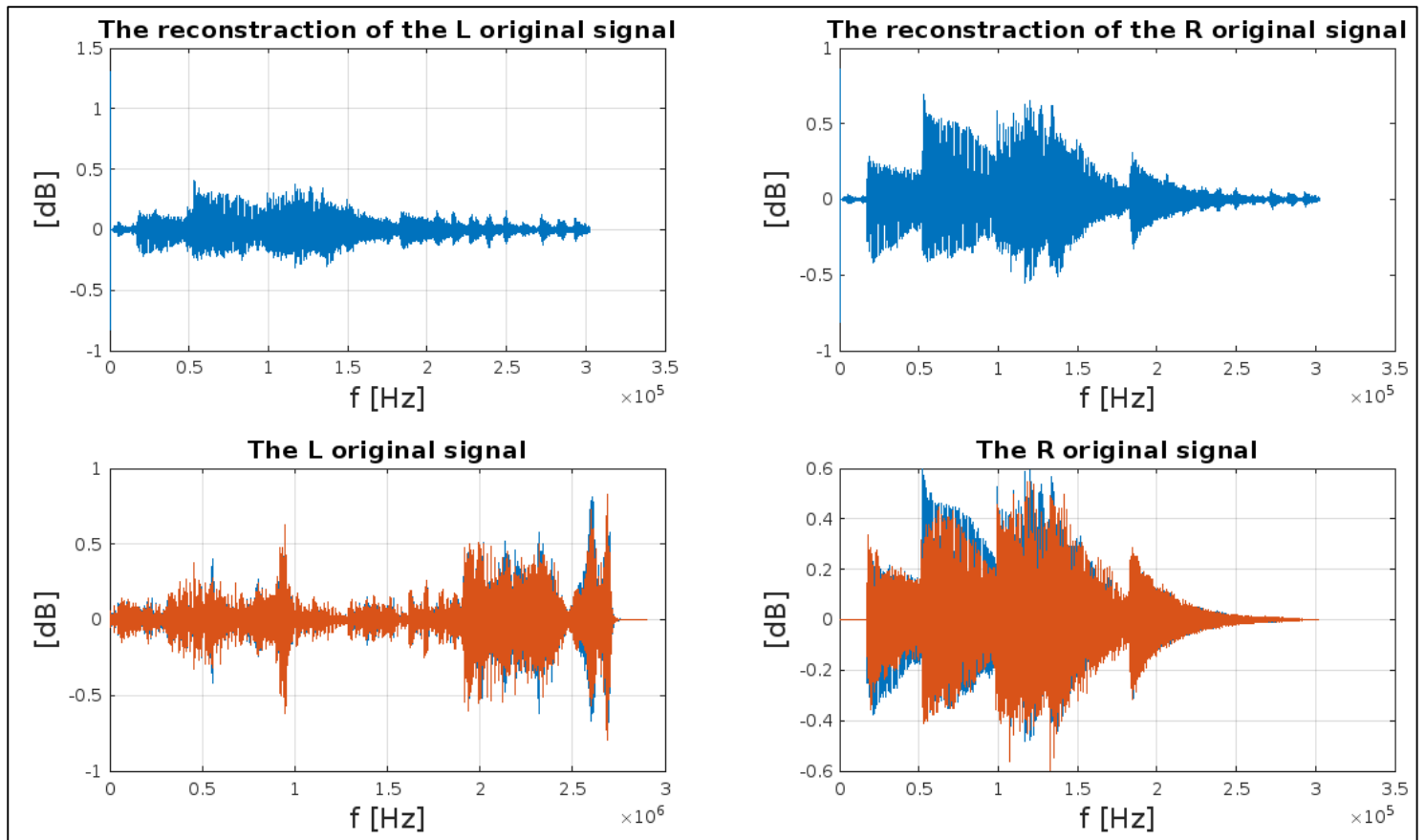
נצרך להמחשה את התמונה משמאל למטה,

של האותות המקוריים במישור התדר. נשים לב שבמרכז סביב 0, קיבלנו תוצאות דומות מאוד עד כדי זהות. עם זאת, ישנו שוני מסוים (קטן) בצדדי הספקטרום – הסיבה לשוני היא שימוש במסננים לא אידיאליים למימוש הקוד, תיתכן סיבה נוספת שאנו אמורים לקבל במציאות והיא העברה בערוצים לא אידיאליים, עם רעשים ועם ניחות מסוים (וזה אכן מה שקיבלנו במעבדה עצמה).

נדגיש, שכאשר הפעלנו את האותות, הצלחנו לשמוע כל צד ללא בעיה ובצורה טובה – ללא השפעה של האות האחר.



נציג את האותות המשוחזרים במישור הזמן – ביחס לאותות המקוריים:



ניתן לראות ששחזור האות הימני בוצע בדיוק רב למדיי (ייתכן שבגלל שקצב הדגימה נלקח כקצב הדגימה של הפסנתר שהגדרנו להיות האות הימני), שחזור האות השמאלי בוצע בצורה טובה, אם כי לא מדויק למדיי כמו האות הימני.

### הערה לגבי Frequency Deviation

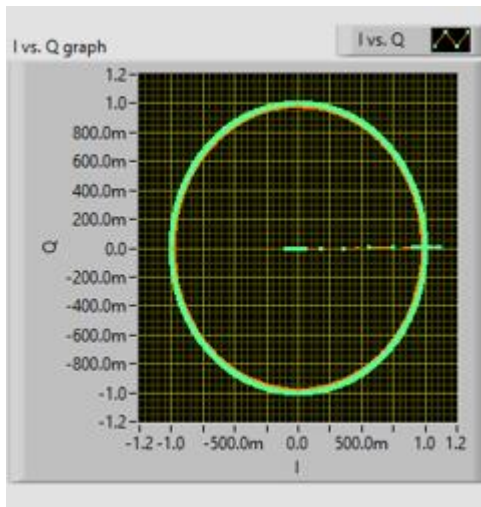
בשתי השיטות השתמשנו ב- $f_d = 75 \text{ kHz}$  כפי שנדרשנו, תדר זה משמש רבות בתחנות שידור הפועלות על FM. השימוש ב-frequency deviation נעשה כדי לתאר את ההבדל בין המינימום למקסימום של תדר האות המאופנן.

בעצם אנו מקבלים הפרדה בספקטרום, אם נקטין תדר זה נקטין את רוחב הפס – ונקבל שידור לא רצוי בערוצים לא רצויים (כנ"ל אם נגדיל). כלומר, המטרה היא למנוע הפרעות של ערוץ סמוך על גבי השידור שאנו רוצים.

### Hardware Part –

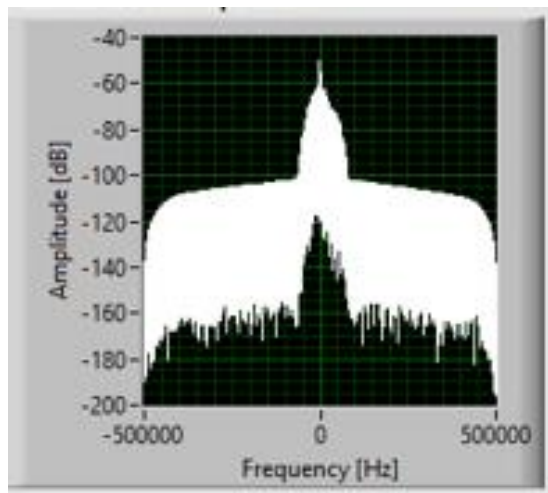
נדרשנו לשחזר את התוצאות שלנו, להריץ את הקוד מחדש ולבדוק שהכל עובד. כמו כן, נאמר לנו ע"י מדריך המעבדה לא להוציא גרפים אלא לוודא שהכל עובד ושמצליחים לשמוע את האותות ולאחר מכן, נקראנו לבחינה על העבודה שלנו במעבדה זו.

בעבודה במצב חומרה במעבדה, שידרנו את האותות דרך ה-USRP וקלטנו אותם חזרה למחשב שלנו. אנו משדרים אות באפנון FM, כלומר הכפלה באקספוננט כלשהו, לכן ציפינו לראות ב-Driver של ה-Transmitter מעין מעגל ששומר את הנקודות שלנו על גביו, וזה אכן מה שקרה בשידור האות, קיבלנו את צורת המעגל –



התמונה הנ"ל היא עבור אות ה-Mono, עבור ה-Stereo מעגל זה נראה עבה יותר (בצורה ניכרת).

בקליטת האותות, קיבלנו תוצאה דומה לזו שקיבלנו בבית –



שידרנו וקלטנו את כל האותות ולבסוף בחנו את השמע שלנו –

- עבור שידור ה-Mono, הצלחנו לקלוט חזרה ולשמוע בצורה דיי נקיה את קובץ הפסנתר.
- עבור שידור ה-Stereo, אכן הצלחנו להפריד בין האותות ולקבל שמע של כל אחד מהם בנפרד, אך נדגיש – קיבלנו שמע מאוד רועש, כלומר הניתוח הנ"ל מתבסס על שמע מחיבור אוזניות 'Aux' למחשב.