

# למה פס- צד יחיד?

## חלק א'

מאת: פרופ' יוסי פנחסי 4Z4VC

E-mail: [yosip@ariel.ac.il](mailto:yosip@ariel.ac.il)

Web site: [www.ariel.ac.il/sites/yosip/](http://www.ariel.ac.il/sites/yosip/)

### 1. הקדמה

אקדים ואומר שייטכן שלרבים מכם, בעידן הנוכחי של תקשורת ספרתית המבוססת על שיטות אפנון וקידוד המתפתחות כל הזמן, נראית כותרת המאמר הזה מפתיעה ואולי קצת אנכרוניסטית. לא אתחמק מכך, ובעתיד אכתוב גם על שיטות ספרתיות. בחרתי להתחיל סדרת מאמרים לביטאון ה"גל" דווקא בדיון על שיטת האפנון האנלוגית, הוותיקה והמוכרת כל כך לחובבי הרדיו – אפנון פס- צד יחיד (או בקיצור SSB), על מנת להאיר צדדים תיאורטיים שלה ואולי גם לחדש קצת לאלה מכם שהשידור באופן זה נראה טבעי וברור. על מנת למשוך את הקוראים, אציין שהשימוש ב- SSB אינו נובע רק מרוחב הסרט הצר שלה, לפחות זו לא הסיבה העיקרית. למרות שהמאמר נכתב באופן קצת מדעי (עם נוסחאות...) אני מבטיח להבהיר את התוצאות גם לאלה שאינם בקיאים ברזי המתמטיקה. בקיצור, לא להירתע, אנחנו מתחילים.

### 2. מהו אפנון ?

אות המידע, בכלל זה דיבור (Voice), חזוי (Video) או נתונים ספרתיים (Data), ממוקם בדרך כלל בחלק הנמוך של ציר התדר, בפס בסיס (Base-band). על מנת להתאים את תחום התדר של התשדורת להיענות התווך שבו היא מועברת, נדרש להזיז את הספקטרום של אות המידע לתחום התדרים הרצוי. פעולה זו מתבצעת על ידי אפנון (Modulation) של גל נושא (Carrier) סינוסי. באופן מתמטי אות מאופנן נראה מהצורה:

$$y(t) = \underbrace{A(t)}_{\text{Amplitude}} \cdot \cos \left[ \underbrace{2\pi f_c t + \overbrace{\phi(t)}^{\text{Phase}}}_{\text{Angle}} \right]$$

בנוסחה זו מופיעים משרעת האות  $A(t)$ , תדר גל הנושא  $f_c$  והמופע שלו  $\phi(t)$ . מבחינים בשתי משפחות עיקריות של אפנון: אפנון משרעת ואפנון זוויתי. באפנון משרעת (Amplitude modulation), אות המידע גורם לשינויים רגועים במשרעת  $A(t)$  של גל הנושא. באפנון זוויתי (Angle modulation) השינויים הרגועים הם של המופע (Phase modulation) או של התדר (Frequency modulation). בשתי השיטות האחרונות ממשפחת האפנון הזוויתי והנקראות בקיצור PM ו-FM, אות המידע גורם לשינויים זמניים ב-  $\phi(t)$  בעוד שהמשרעת נשארת קבועה. במקרים רבים אף משלבים בין השיטות (כמו ה- OFDM), ועל כך בפעם אחרת.

### 3. אפנון פס- צד כפול

בשיטת האפנון הבסיסית, מוכפל גל הנושא המופק ממתנד מקומי (Local oscillator) בתדר נתון  $f_0$  באות המידע  $x(t)$ , ומתקבל אות בעל משרעת משתנה:

$$y_{DSB}(t) = x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t)$$

שיטה זו נקראת אפנון פס- צד כפול (Double Side Band - DSB) ומתוארת באופן סכמתי באיור 1.a. ניתן מיד להבין שאפנון ה- DSB שייך למשפחת אפנוני המשרעת. ביצוע הכפלה אידיאלית בהתקן אלקטרוני נעשה באמצעות אפנון מאוזן (Balanced modulator). חשוב לציין, שכאשר אות המידע הוא  $x(t) = 0$ , למשל כאשר 'שותקים' ולא מדברים, לא משודר הספק כי גם אות השידור  $y_{DSB}(t) = 0$  מתאפס. הצצה במד ההספק בעת שידור תבהיר את התופעה. זהו יתרון גדול מבחינת יעילות השידור, והוא בעל משמעות בעיקר במערכות תקשורת, אשר לצורך העברת התשדורת לטווחים ארוכים משדרות בהספק גדול ולא ניתן להרשות שידור הספק ללא אינפורמציה.

על מנת להמחיש את השיטה, נניח לדוגמה מקרה פשוט בו אות המידע הוא טון בודד (Single tone) בתדר שמע  $f_m$ :

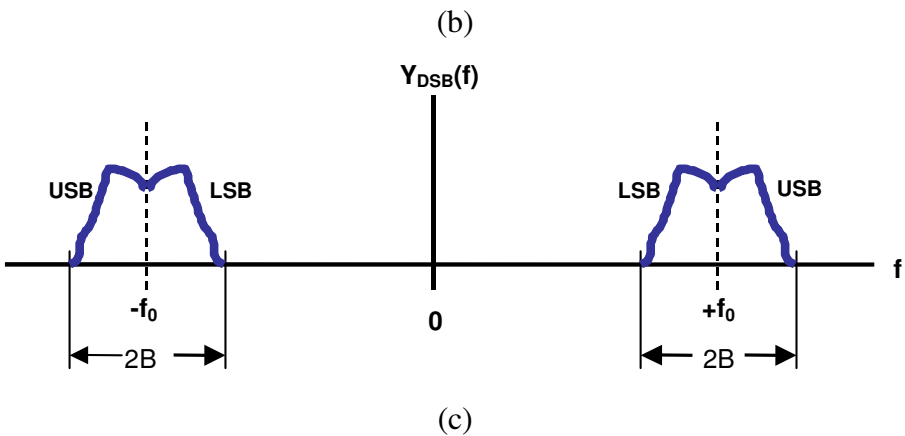
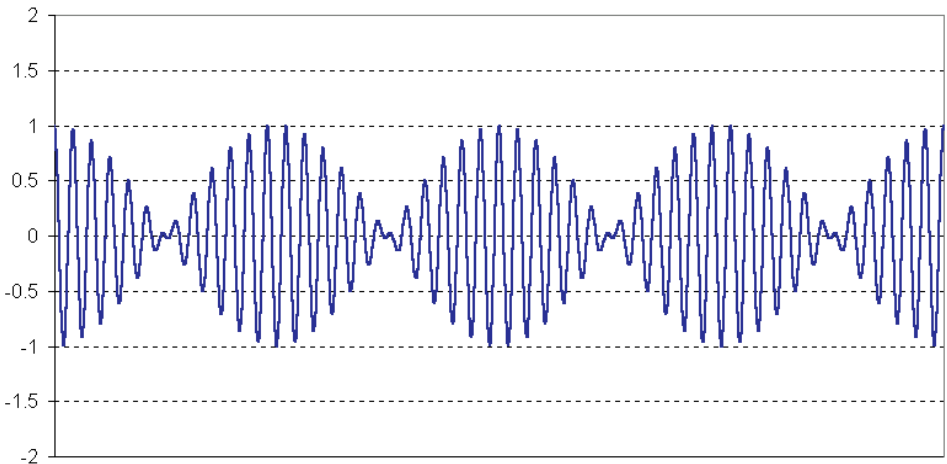
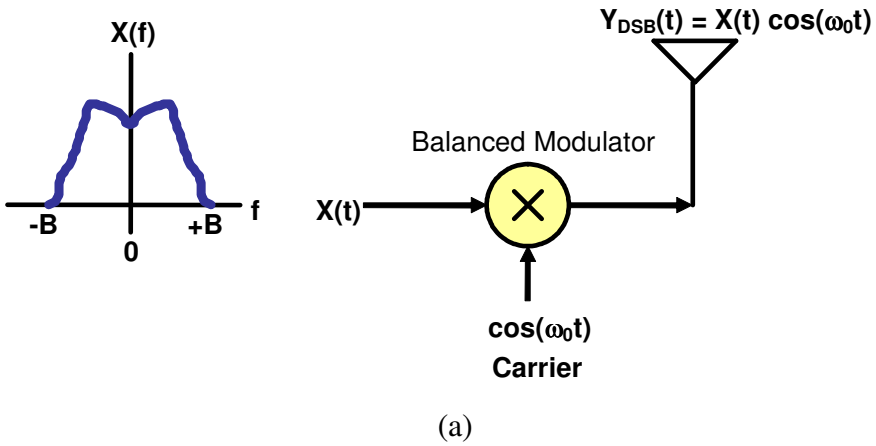
$$x(t) = \cos(2\pi f_m t)$$

הטון יכול להיות למשל 'צפצוף' בתדר שמע של  $f_m = 1\text{KHz}$ . האות המתקבל במוצא המשדר הוא:

$$\begin{aligned} y_{DSB}(t) &= x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) = \cos(2\pi f_m t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) = \\ &= \underbrace{\frac{1}{2} \cos[2\pi(f_0 - f_m)t]}_{LSB} + \underbrace{\frac{1}{2} \cos[2\pi(f_0 + f_m)t]}_{USB} \end{aligned}$$

צורת האות בזמן מתוארת באיור 1.b. נשים לב, שבשימוש בזהות מתמטית של כפל קוסינוסים ניתן לזהות את שני פסי הצד של האות המאופנון  $y_{DSB}(t)$ , התחתון (LSB) בתדר ההפרש  $f_0 - f_m$  והעליון (USB) בתדר הסכום  $f_0 + f_m$ , ביניהם נחלק ההספק באופן שווה.

כל חובב רדיו אשר בתחנתו מערכת הכוללת מעבר אות, יש באפשרותו לקבל את התמונה הספקטראלית של אות השידור בתחום התדר. במקרה כזה, מחשב מבצע טרנספורמציה מתמטית הנקראת 'התמרת פוריה', הנקראת כך על שם המתמטיקאי הצרפתי Jean Baptiste Joseph Fourier מהמאה ה-18 שהציע אותה. עבור המקרה הכללי, ספקטרום אות ה- DSB במרחב התדר יראה מהצורה המופיע באיור 1.c. ניתן בקלות להבחין בשני פסי הצד, הממוקמים באופן סימטרי סביב התדר המרכזי של הגל הנושא, ומכאן שמו של האפנון. פס הצד העליון (Upper Side Band – USB) מוגדר כחלק המצוי מעל לתדר הנושא, ולעומתו פס הצד התחתון (Lower Side Band - LSB) הוא זה המצוי מתחתיו. נדגיש שלא קיים רכיב בתדר הנושא, ולכן יש המוסיפים לשם האפנון DSB-SC (מלשון Suppressed Carrier), על מנת להדגיש שגל הנושא באפנון זה מדוכא. אם רוחב סרט של אות המידע בפס בסיס הוא  $B$ , רוחב סרט האות של האות המאופנון הוא כפול מכך, כלומר  $BW_{DSB} = 2 \cdot B$ . לדוגמה, רוחב הפס של אות דיבור הוא כ-  $B = 3\text{KHz}$ , ולכן שידור באפנון DSB ייפרס על פני  $BW_{DSB} = 2 \cdot B = 6\text{KHz}$ .



איור 1: (a) אפנון פס- צד כפול (DSB) באמצעות אפנון מאוזן (Balanced modulator), (b) האות המאופנן בזמן, (c) הספקטרום במרחב התדר.

במקלט נדרש לבצע מיצוי אות המידע  $x(t)$  מתוך האות המאופנן  $y_{DSB}(t)$ . בתהליך הגילוי, הפעולה שמתבצעת היא ערבול (Mixing) של האות הנקלט עם טון סינוסי המופק ממתנד מקומי (Local oscillator) המכוון לתדר  $f_0$ , הזהה לתדר גל הנושא במשדר. מבנה עקרוני של המקלט מובא באיור 2. כוונת התדר היא פעולה שאנו מבצעים באופן פשוט באמצעות סיבוב חוגת המקמ"ש, אולם אין לנו שליטה על המופע  $\theta$  של המתנד המקומי. האות  $y_{DSB}(t)$  נקלט במבוא (נקודה 1) ומועבר לגלאי מכפלה (Product detector), המבצע הכפלה עם אות סינוסי. תוצאת ההכפלה בנקודה 2 לאחר הגלאי היא:

$$y_{DSB}(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta) = x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta) = \frac{1}{2} x(t) \cdot \cos(\theta) + \frac{1}{2} x(t) \cdot \cos[2\pi(2f_0)t + \theta]$$

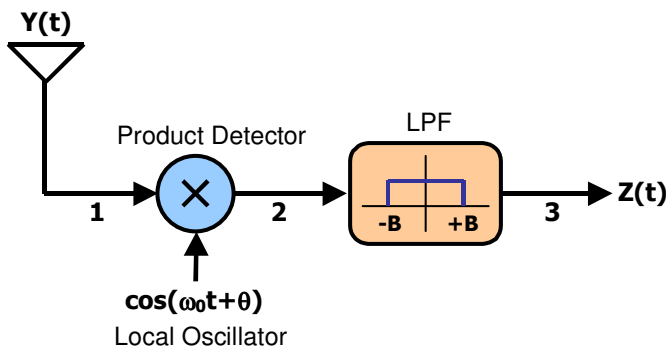
סינון התוצר בתדר הכפול באמצעות מסנן מעביר נמוכים (LPF), משאיר את אות המידע המתקבל בנקודה 3:

$$z(t) = \frac{1}{2} x(t) \cdot \cos(\theta)$$

ניכר שעוצמת אות המידע המתקבל במוצא תלוי במופע  $\theta$  בין המתנד המקומי במקלט לזה של גל הנושא של האות הנקלט. עוצמה מרבית של אות מידע מתקבלת כאשר  $\theta = 0^\circ$ , והיא מתאפסת כאשר  $\theta = 90^\circ$ . כלומר, לגילוי אופטימלי של המידע, נדרש בנוסף לנעילת תדר גם סנכרון מופע של המתנד המקומי במקלט עם גל הנושא של האות הנקלט.

סנכרון מופע אינו תהליך פשוט. הוא מבוצע במודמים של מערכות תקשורת ספרתיות. על מנת להמחיש זאת, ניזכר באירועים המתרחשים כאשר שולחים פקס דרך מערכת הטלפוניה הביתית. בתחילת השידור של הפקס נשמע טון טהור למשך כמה שניות. המקלט, שמקבל את הטון הזה משתמש בו לנעילת המתנד המקומי שלו לתדר ומופע האות המשודר. רק לאחר מכן מתחילה העברת הנתונים וה'צפצוף' ששומעים כבר אינו 'נקי'. תהליך זה הכרחי להקמת ערוץ התקשורת ובלעדיו לא תיתכן העברת הנתונים ללא שגיאות.

היות שבמערכות תקשורת המעבירות דיבור באופן אנלוגי לא מעוניינים לבצע תהליך של סנכרון, לא נמצא מערכות המבצעות תקשורת באפנון ה-DSB עם גל נושא מדוכא. לחילופין משתמשים באפנון תנופה (AM), בו מוסיפים במתכוון רכיב של בתדר גל הנושא של אות השידור. מחד, מיצוי המידע מאות AM מבוצע במקלט באמצעות גלאי מעטפת (Envelope detector) פשוט. מאידך 'מבזבזים' במשדר הספק רב (יותר מ-50%) על אות CW בתדר נושא המשודר תמיד ואינו תורם להגדלת טווח התקשורת. אנחנו מתקרבים להבנה מדוע צריך SSB. על כך בחלק ב'.



איור 2: מקלט ישיר לגילוי Homodyne באמצעות גלאי מכפלה (Product detector).

# למה פס- צד יחיד?

## חלק ב'

מאת: פרופ' יוסי פנחסי 4Z4VC

E-mail: yosip@ariel.ac.il

Web site: www.ariel.ac.il/sites/yosip/

### 1. הקדמה

בחלק הראשון של המאמר שהתפרסם בגיליון 394 של ה"גל", הכרנו את שיטת האפנון הבסיסית המכונה פס- צד כפול (DSB). בשיטת אפנון זו מוכפל אות המידע (הדיבור למשל) בגל נושא סינוסי ומשנה את משרעתו. בניגוד לאפנון תנופה (AM) כאן גל הנושא מדוכא (Suppressed carrier), וכאשר אות המידע מתאפס, לא משודר כל הספק. בשיטת ה- DSB משודרים באופן סימטרי לתדר הגל הנושא שני פסי צד, עליון (USB) ותחתון (LSB), כך שהוא נפרס על רוחב סרט הכפול מזה של אות המידע.

המקלט, מבוסס על גלאי מכפלה (Product detector) המבצע ערבול (Mixing) של האות הנקלט עם גל המופק ממתנד מקומי (Local oscillator). על מנת שבמוצא הגלאי יתקבל אות המידע ללא עיוותים וללא נזילות, נדרש שהגל הסינוסי מהמתנד המקומי יהיה בתדר ובמופע הזהים לאלה של האות הנקלט. בעוד שהבאת תדר המתנד המקומי לערך המתאים מתבצעת פשוט על ידי כוונון חוגת המקלט, סנכרון המופע הוא תהליך מסובך הדורש מנגנוני נעילה אלקטרוניים לביצועו. זו הסיבה מדוע אפנון ה- DSB אינו משמש אותנו כאמצעי להעברת דיבור. עקרונות האפנון בפס- צד כפול משמשים בדרך כלל בשיטות תקשורת ספרתיות, שם מבוצע תהליך הסנכרון כחלק מהקמת הערוץ בין המודמים.

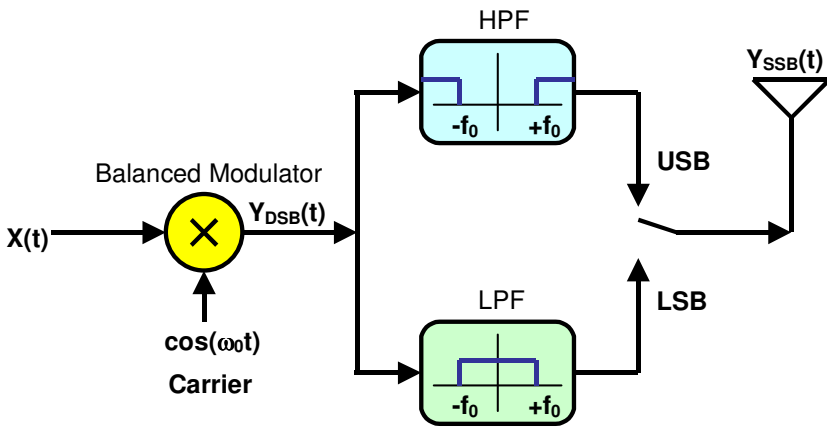
### 2. אפנון פס- צד יחיד

באפנון פס- צד יחיד (Single Side Band – SSB), משודר רק אחד מפסי הצד במחצית רוחב הסרט של אפנון ה- DSB. קיימים מספר סוגים של אפננים המחוללים את מאופנן SSB. בשיטה המקובלת, נעשה שימוש במסנן המעביר רק את אחד מפסי הצד של אות באפנון פס- צד כפול (DSB), כמתואר עקרונית באיור 1.a. במקרה זה, אות הדיבור  $x(t)$  בפס בסיס מוזן לאפנון מאוזן (Balanced modulator) המבצע הכפלה של אות המידע בגל הנושא בתדר  $f_0$  ליצירת אות DSB:

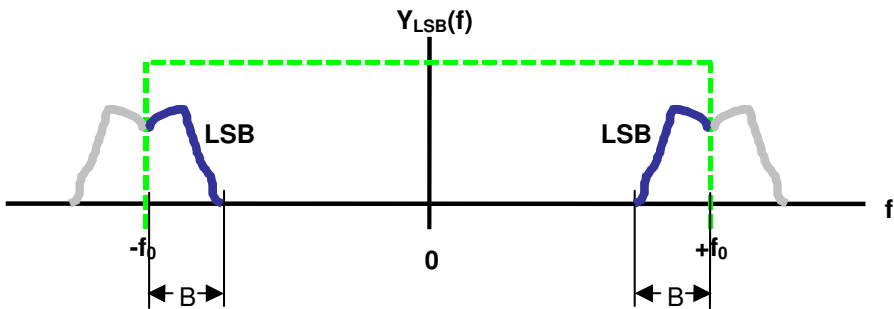
$$y_{DSB}(t) = x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t)$$

אשר מוזן למסננים להורדת אחד מפסי הצד. על ידי המתג ניתן לבחור בין שתי האפשרויות. פס הצד התחתון (LSB) מתקבל ממסנן מעביר נמוכים (LPF) כמתואר באיור 1.b. פס הצד העליון (USB) מתקבל בהעברת אות ה- DSB דרך מסנן מעביר גבוהים (HPF), כמופיע באיור 1.c. אם רוחב סרט של אות המידע בפס בסיס הוא  $B$ , רוחב סרט האות של האות המאופנן גם הוא  $B$ , מחצית מזה שמתקבל באפנון DSB. חיסכון זה ברוחב הסרט מאפשר ל"צופף" פי שניים תחנות במרווח תדרים נתון. זהו יתרון חשוב בעידן בו קיימת מצוקת תדרים, אך הוא אינו היחיד.

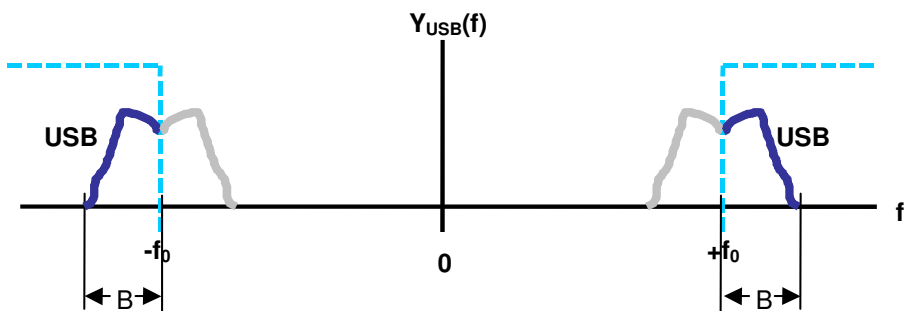
עיון במבנה משדרי ה- SSB יגלה שהדרך המקובלת לקבל פס צד יחיד היא באמצעות מסנן בודד, בדרך כלל מסנן גבישי או קרמי, המעביר פס צד ברוחב סרט הדיבור של כ- 3KHz סביב תדר השידור. למסנן מוזן אות DSB אשר תדר הנושא שלו מוזן במקצת מהתדר המרכזי של המסנן בהתאם לפס- הצד הנבחר. לקבלת שידור LSB מסיטים את התדר ב- 1.5KHz כלפי מעלה כך שרק הפס התחתון עובר במסנן. שידור ב- USB מתקבל בהסטת התדר ב- 1.5KHz כלפי מטה כך שרק הפס העליון עובר במסנן.



(a)



(b)



(c)

איור 1: (a) אפנון פס- צד יחיד (SSB) המתקבל מסינון אחד מפסי הצד של אפנון DSB והמבנה הספקטראלי שלו בתחום התדר: (b) פס- צד תחתון (LSB) ו- (c) פס- צד עליון (USB).

הביטוי המתמטי לאות מאופנן ה-SSB מורכב במקצת, ונתון על ידי:

$$y_{SSB}(t) = x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \underset{LSB}{\mp} \underset{USB}{\pm} \hat{x}(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t)$$

מעיון בביטוי אנו מגלים שהוא כולל חיסור או חיבור של שני אותות מאופננים סביב תדר הנושא  $f_0$ . בחיסור מתקבל שידור USB ובחיבור LSB. את הביטוי הראשון אנו כבר מכירים כאפנון DSB בו מוכפל אות הדיבור  $x(t)$  בגל הנושא. הביטוי השני גם הוא אות DSB אך בו מופיע גורם חדש, האות  $\hat{x}(t)$ . זהו התמרת Hilbert של אות הדיבור  $x(t)$ , על שם המתמטיקאי אשר בסוף המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20 הניח את היסודות לאנליזה הפונקציונאלית. לא כאן המקום להעמיק בהתמרה חשובה זו, אך נציין שהאות  $\hat{x}(t)$  הוא למעשה אות הדיבור אשר המופע של כל מרכיבי התדר שלו הרוזו ב- $90^\circ$ . מבחינת האוזן אין לכך כל משמעות, שכן היא אינה מבחינה כלל בהבדלי מופע, והאותות  $x(t)$  ו- $\hat{x}(t)$  נשמעים אותו הדבר. על מנת להמחיש זאת, נזכיר שאם נאזין ל"צפצופים" המופקים ממחוללים שונים המכוונים לאותו התדר בתחום השמע, לא נוכל להבחין בהבדל גם אם קיים היסט מופע כלשהו ביניהם. מהתבוננות בביטוי לאפנון SSB, ניכר שגם הוא יעיל מבחינת הספקי שידור, שכן כאשר אות המידע מתאפס ( $x(t) = 0$ ), לא משודר אות במוצא המשדר, כלומר מתקבל  $y_{SSB}(t) = 0$ .

### 3. אפנון על ידי טון בודד

נבחן עתה את המקרה הפשוט בו אות המידע הוא טון בודד (Single tone) בתדר שמע  $f_m$  (למשל 'צפצוף' בתדר שמע של  $f_m = 1\text{KHz}$ ) מוזן לאפנון. הביטוי לאות נתון על ידי:

$$x(t) = \cos(2\pi f_m t)$$

והתמרת ה- Hilbert שלו מתקבלת כאמור מתוך הזזת המופע שלו ב- $90^\circ$ :

$$\hat{x}(t) = \cos(2\pi f_m t - 90^\circ) = \sin(2\pi f_m t)$$

נציב את שני האותות בביטוי לאות מאופנן SSB, נשתמש בזהויות טריגונומטריות ונקבל:

$$y_{SSB}(t) = \underbrace{\cos(2\pi f_m t)}_{x(t)} \cdot \cos(2\pi f_0 t) \underset{LSB}{\mp} \underset{USB}{\pm} \underbrace{\sin(2\pi f_m t)}_{\hat{x}(t)} \cdot \sin(2\pi f_0 t) =$$

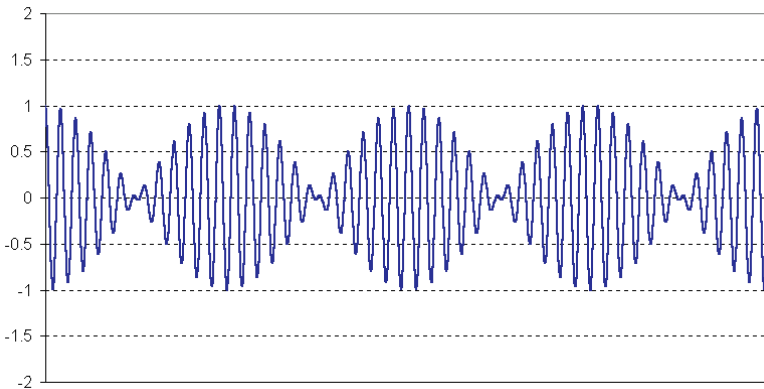
$$= \begin{cases} \cos[2\pi(f_0 + f_m)t] & USB \\ \cos[2\pi(f_0 - f_m)t] & LSB \end{cases}$$

לא פעם, בהרצאות שנשאתי, נתקלתי בקושי גם אצל מהנדסים מוסמכים להגיע לתשובה אינטואיטיבית לשאלה איך יראה אות SSB המאופנן על ידי טון בודד. זאת למרות שהתוצאה לא אמורה להפתיע כלל. אם נעיון בפיתוח של הביטוי לאות מאופנן DSB על ידי טון בודד מחלק א' של המאמר, ניווכח ששם התקבל

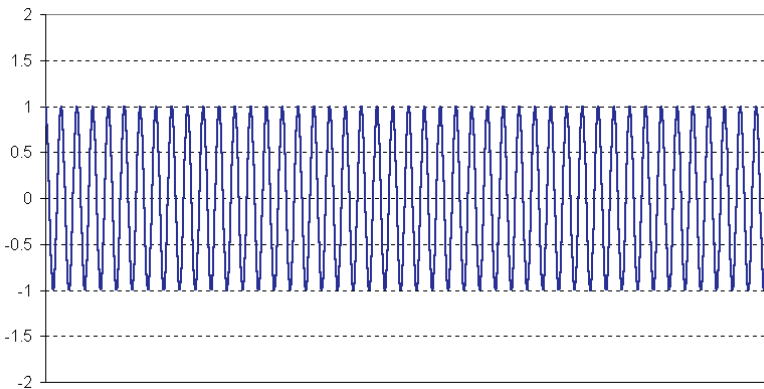
הסכום של שני פסי הצד, ביניהם נחלק ההספק באופן שווה. ואילו כאן, כל פס צד מופיע בנפרד, כאות סינוסי בעל משרעת קבועה בתדר המתאים לפס הצד הנבחר, התחתון (LSB) בתדר ההפרש והעליון (USB) בתדר הסכום.

לצורך השוואה, נתבונן באיור 2 כיצד נראים האותות בזמן המתקבלים בשני סוגי האפנון. באפנון פס- צד כפול על ידי טון בודד מתקבל גל 'פועם' בתדר הנושא  $f_0$  אשר משרעתו משתנה בתדר  $f_m$  של הטון, כמודגם באיור 2.a. תוצאת אפנון פס- צד יחיד על ידי טון מתוארת באיור 2.b. כאן מתקבל אות CW בעל משרעת קבועה בתדר ההפרש  $f_0 - f_m$  בשידור LSB או בתדר הסכום  $f_0 + f_m$  בשידור USB.

בגיליון הבא, נדון במבנה המקלט ונתייחס לביצועיו.



(a)



(b)

איור 2 : השוואה בין אפנון DSB ו-SSB באפנון על ידי טון בודד (a) באפנון פס- צד כפול מתקבל גל בתדר הנושא  $f_0$  שמשרעתו 'פועמת' בתדר הטון  $f_m$ . (b) באפנון פס- צד יחיד מתקבל אות CW בתדר ההפרש  $f_0 - f_m$  בשידור LSB או בתדר הסכום  $f_0 + f_m$  בשידור USB.



# למה פס- צד יחיד?

## חלק ג'

מאת: פרופ' יוסי פנחסי 4Z4VC

E-mail: [yosip@ariel.ac.il](mailto:yosip@ariel.ac.il)

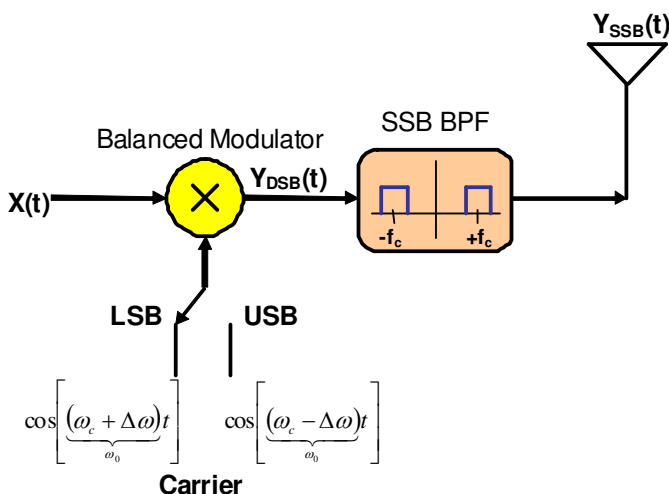
Web site: [www.ariel.ac.il/sites/yosip/](http://www.ariel.ac.il/sites/yosip/)

### 1. אפנון SSB

בשני הגיליונות האחרונים של ה"גל", למדנו על שתי שיטות אפנון. התחלנו עם אפנון בסיסי המכונה פס-צד כפול (DSB) עם גל נושא מדוכא (Suppressed carrier), בו מתקבלים שני פסי צד באופן סימטרי סביב גל הנושא, עליון (USB) ותחתון (LSB), המשודרים ברוחב סרט כפול מזה של המידע (דיבור למשל). מקלט DSB, מבוסס על גלאי מכפלה (Product detector) המבצע ערבול (Mixing) של האות הנקלט עם גל המופק ממתנד מקומי (Local oscillator). ראינו שלצורך מיצוי המידע נדרש סינכרון תדר ומופע של המתנד המקומי במקלט עם גל הנושא, דבר המחייב ביצוע של תהליך נעילה לצורך הקמת הערוץ לפני העברת המידע (כפי שמבוצע במודמים ספרתיים).

באפנון SSB מסונן אחד מפסי הצד, כך שהשידור הוא ברוחב סרט השווה לזה של המידע. ברוב משדרי ה-SSB נהוג לקבל רק את אחד מפסי הצד באמצעות מסנן מעביר פס (BPF) בודד, בדרך כלל מסנן גבישי או קרמי, ברוחב סרט הדיבור של כ-  $B = 3\text{KHz}$  סביב תדר מרכזי  $f_c$ , כמתואר באיור 1. אות הדיבור מוזן לאפנון מאוזן (Balanced modulator) ליצירת אות DSB, אשר תדר הנושא שלו  $f_0$  מוזן במקצת מהתדר המרכזי של המסנן בהתאם לפס- הצד הנבחר. לקבלת שידור LSB קובעים את תדר השידור להיות מוסט ב-  $\Delta f = B/2 = 1.5\text{KHz}$  כלפי מעלה (כלומר  $f_0 = f_c + \Delta f$ ), כך שרק הפס התחתון עובר במסנן. שידור ב- USB מתקבל בהזנת התדר באותה הסטייה כלפי מטה (כלומר  $f_0 = f_c - \Delta f$ ), כך שרק הפס העליון עובר במסנן.

נציין שבאיור 1 מובא מבנה של משדר פשוט, המבצע המרה ישירות לתדר השידור ללא תדרי ביניים. בפועל, שרשרת השידור מכילה מספר המרות תדר, כאשר סינון פס הצד מבוצע בתדר ביניים נמוך יחסית על מנת להשיג סינון חד של פס- הצד המבוקש ודחיית האחר. רק לאחר מכן מבצעים המרות נוספות לתדר השידור. הדבר אינו משנה את הניתוח המתמטי.



איור 1 : אפנון פס- צד יחיד (SSB) המתקבל מסינון אחד מפסי הצד של אפנון DSB באמצעות מסנן בודד.

בחלק ב' של המאמר הצגנו את הביטוי המתמטי לאות מאופנן ה-SSB סביב תדר הנושא  $f_0$  :

$$y_{SSB}(t) = x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \mp \hat{x}(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t)$$

כאמור, בחיסור מתקבל שידור USB ובחיבור LSB, כאשר  $x(t)$  הוא אות הדיבור ו- $\hat{x}(t)$  הוא התמרת ה-Hilbert שלו. נזכיר שהאות  $\hat{x}(t)$  הוא למעשה אות הדיבור אשר המופע של כל מרכיבי התדר שלו הוזזו ב- $90^\circ$ . מבחינת האוזן אין לכך כל משמעות, שכן היא אינה מבחינה כלל בהדלי מופע, והאותות  $x(t)$  ו- $\hat{x}(t)$  נשמעים אותו הדבר. חשוב לזכור נקודה זו גם להמשך הדיון.

עד עתה אנו מזהים שתי תכונות חשובות של אפנון ה-SSB: רוחב סרט צר, כשל פס צד אחד בלבד, וכן יעילות שידור גבוהה הנובעת מהעובדה שלא משודר הספק ( $y_{SSB}(t) = 0$ ) כאשר אות המידע  $x(t) = 0$ . זהו יתרון גדול על אפנון התנופה (המוכר לנו כ-AM) שהיה האפנון הראשון בו נעשה שימוש מתחילת המאה ה-20 בשידורי רדיו להעברת דיבור. אפנון ה-SSB החליף את אפנון ה-AM בעיקר בגלל היעילות הנמוכה של האחרון ו'בזבוז' ההספק על גל הנושא גם בהעדר מידע. המעבר ל-SSB התאפשר בשל העובדה שניתן במקלט לבצע מיצוי של הדיבור גם ללא כל תהליך של סנכרון כמוסבר להלן.

## 2. מבנה המקלט

מקלט פס-צד יחיד דומה בעיקרו למקלט פס-צד כפול שנדון בחלק א', והוא מתואר באיור 2. אות ה-SSB הנקלט במבוא (נקודה 1) מועבר לגלאי מכפלה (Product detector) המבצע עירבול (Mixing) עם טון סינוסי המופק ממתנד מקומי (Local oscillator) בתדר  $f_0$ , הזהה לתדר גל הנושא במשדר, ובעל מופע  $\theta$  ביחס אליו. גם כאן, כוונון התדר היא פעולה שאנו מבצעים באופן פשוט באמצעות סיבוב חוגת המקמ"ש, אולם אין לנו שליטה על המופע  $\theta$  של המתנד המקומי. תוצאת ההכפלה בנקודה 2 לאחר המכפל מתקבלת מתוך זהויות טריגונומטריות:

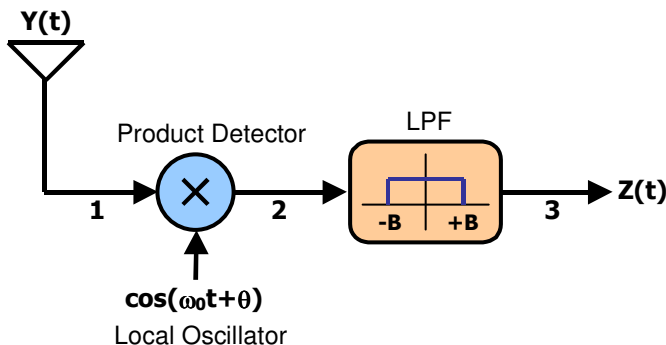
$$\begin{aligned} y_{SSB}(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta) &= [x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \pm \hat{x}(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t)] \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta) = \\ &= \frac{1}{2} x(t) \cdot \cos(\theta) + \frac{1}{2} x(t) \cdot \cos[2\pi(2f_0)t + \theta] \mp \frac{1}{2} \hat{x}(t) \cdot \sin(\theta) \pm \frac{1}{2} \hat{x}(t) \cdot \sin[2\pi(2f_0)t + \theta] \end{aligned}$$

בפיתוח השתמשנו בנוסחאות מוכרות של מכפלת פונקציות טריגונומטריות סינוסים וקוסינוסים. לאחר מסנן מעביר נמוכים (Low-Pass Filter), לא מועברים התוצרים בתדר הכפול, ובמוצא השמע של המקלט מתקבל רק אות הדיבור בפס בסיס:

$$z(t) = \frac{1}{2} x(t) \cdot \cos(\theta) \mp \frac{1}{2} \hat{x}(t) \cdot \sin(\theta)$$

על פי התוצאה האחרונה, על מנת לקבל את אות המידע המקורי  $x(t)$  בלבד (ללא  $\hat{x}(t)$ ), יש לדאוג לסנכרון מופע ( $\theta = 0^\circ$ ) של המתנד המקומי עם תדר הנושא של האות הנקלט, בדומה לגילוי DSB. אולם, בהעברת אותות דיבור אין חובה בסנכרון זה. כאמור, האוזן מבחינה רק בעוצמת התדרים המרכיבים את האותות ולא במופעים שלהם. היא לא תבחין אפוא בין האות המקורי  $x(t)$  להתמרת ה-Hilbert שלו  $\hat{x}(t)$ . כלומר, גם אם קיימת הזזת מופע כלשהי, ואפילו אם היא  $\theta = 90^\circ$  ונקבל רק את  $\hat{x}(t)$ , לא נרגיש בהבדל. זהו יתרון מבחינת פשטות המקלט, שכן אין צורך במימוש של מנגנון נעילת מופע, כפי שנדרש בגילוי אות DSB. זאת הסיבה שהשימוש באפנון SSB הפך לנפוץ יותר, בעיקר בתקשורת לטווח רחוק ובקרב חובבי רדיו. הוא יעיל

מבחינת השידור, צר סרט, ובהעברת תשדורות שמע והכי חשוב - אינו דורש סנכרון מופע, אלא רק כוונון מדויק לתדר השידור.



איור 2: מקלט ישיר לגילוי SSB באמצעות גלאי מכפלה (Product detector).

למרות שסנכרון מופע לא נדרש בתהליך גילוי אות SSB, יש לדאוג לכך שתדר המתנד המקומי במקלט יהיה זהה לזה של הגל הנושא. שאם לא כך, הדיבור ישמע מעוות עם ה'צירצור' המוכר לנו כאשר איננו מקפידים לכוון במדויק את חוגת המקלט. כוונון התדר הוא בעבורנו תהליך פשוט, המבוצע תוך שמיעת התחנה הנקלטת.

גם המקלט תואר כאן במבנה עקרוני המבוסס על גילוי Homodyne. בתצורה זו, המכונה גם מקלט ישיר (Direct receiver), הגילוי מבוצע על ידי המרה ישירה של האות הנקלט סביב תדר הנושא לאות בפס בסיס. בפועל נעשה שימוש בתדרי ביניים במבנה של מקלט Super-Heterodyne, על מנת להגדיל את הברירות ולדחות תדרי בבואה. גם בשרשרת הקליטה מותקן מסנן המעביר פס צר ברוחב סרט המידע על מנת למנוע הפרעות של תחנות שכנות.

כל מי שקרא את שלושת החלקים של המאמר, הפך לבקיא ברזי האפנון המשמש אותנו בתקשורת ארוכת טווח בתחום הת"ג (HF), אפנון ה-SSB. אגב, שיטת אפנון זו ניתנת ליישום בכל תחום תדר בספקטרום האלקטרומגנטי. תחום ה-HF מאפשר תקשורת ארוכת טווח אל מעבר לאופק, על סמך החזרים מהיונוספירה. על מנת לנצל תכונה חשובה זו, ואכן להגיע לטווח מרוחק, נדרש לשדר בהספק מספיק גבוה וחשוב לנצלו באופן יעיל. בעבר, התקשורת הייתה מבוססת על אפנון תנופה (AM), שבה לפחות 50% מהספק השידור 'מבוזבז' על גל נושא שאינו מכיל אינפורמציה. לעומת ה-AM, אפנון ה-SSB מנצל את ההספק כולו להעברת האינפורמציה וגם עושה זאת ברוחב סרט צר. בשל יעילותו והפשטות היחסית של מערכת הגילוי, נבחר בסופו של דבר להעביר תקשורת דיבור לטווח ארוך בתחום ה-HF באמצעות אפנון פס-צד יחיד.

בחלק הבא של המאמר, נדון במימוש האפנון והגילוי במערכת רדיו מבוססת תוכנה, המוכרת בשם Software Defined Radio.

# למה פס- צד יחיד?

## חלק ד'

מאת: פרופ' יוסי פנחסי 4Z4VC

E-mail: [yosip@ariel.ac.il](mailto:yosip@ariel.ac.il)

Web site: [www.ariel.ac.il/sites/yosip/](http://www.ariel.ac.il/sites/yosip/)

### 1. רדיו מוגדר תוכנה (SDR)

בשלושת החלקים הראשונים של המאמר, ניתחנו מבחינה מתמטית את שיטת האפנון המקובלת אצלנו בתקשורת HF, פס- צד יחיד. באפנון ה-SSB משודר רק אחד מפסי הצד, כך שהשידור הוא ברוחב סרט השווה לזה של המידע המאפנון. בנוסף, הצגנו את המבנה העקרוני של מערכת השידור ומערכת הקליטה באפנון זה ואת התכונות שבגללן נבחר לתקשורת רדיו ארוכת טווח. כאמור, אפנון ה-SSB נמצא מתאים מבחינת הניצול היעיל של הספקי שידור, רוחב הסרט הצר וכן העובדה שניתן לבצע את גילוי של הדיבור ללא כל צורך בנעילת מופע. נציין שבהעברת אותות באפנון זה ללא עוות, נדרשים המגברים, בכלל אלה מגברי ההספק של המשדר, להיות ליניאריים, ובעלי תחום דינמי רחב. זה אגב, חיסרון מסוים.

כל מי שיעיין בשרשרות השידור או הקליטה של מערכת רדיו, למשל כמו אלה שתוארו כאן בהתייחס לאפנון SSB, יבחין מיד שאלה בנויות למעשה ממרכיבים הכוללים מתנדים (Oscillators) ומחוללי אותות, ערבילים (Mixers), מסננים (Filters) מסוגים שונים ומגברים הפועלים בתדר רדיו (RF), תדר ביניים (IF) ובתדר שמע (Base band). מרכיבים אלה מבוססים על מעגלים אלקטרוניים המבצעים באמצעות חומרה פעולות שהן כולן מתמטיות. למשל, המתנדים מחוללים גל מחזורי שצורתו סינוסית והערבילים מבצעים הכפלה של אותות. נשאלת אם כך שאלה מדוע לא לבצע זאת בעזרת מחשב? הרי המחשב הספרתי הוא מערכת אשר באמצעות תוכנה מתאימה ניתן לבצע בה את כל הפעולות המתמטיות והלוגיות הנדרשות במערכות תקשורת, ובלבד שנבצע המרה מתאימה של האותות האנלוגיים לקובצי נתונים ספרתיים ונעבירם למחשב באמצעות ממשק מתאים. מערכת כזו מציגה בפנינו עולם חדש ההופך את המחשב הביתי גם למערכת רדיו אשר ניתן לתכנת אותה בהתאם לאופן הפעולה ללא צורך בכל מעגלי התקשורת המצויים במקמ"שים שלנו. כל שנדרש הוא להוסיף למחשב ממירי A/D ו-D/A מהירים מספיק, שיאפשרו את העברת אותות הרדיו למחשב וממנו וחיבור לאנטנה. הדבר יבטל את הצורך בשימוש במקמ"ש ואמור להוזיל מאד את עלויות התחנה.

לא כל כך פשוט! טכנולוגיית המחשבים והממירים כיום עדיין אינה מאפשרת לממש מערכת רדיו מלאה הפועלת בתחום תדרי התקשורת המקובלים ואפילו בתחומים הנמוכים של הספקטרום האלקטרומגנטי. הסיבות העיקריות לכך הן:

- א. הטכנולוגיה מתקדמת בכוון הגדלת מהירות ההמרה של ה- A/D וה- D/A, וכבר היום קיימים ממירים המאפשרים דגימה בקצב של מספר גיגה-הרצים. אבל הם עדיין יקרים מאד.
- ב. בתקשורת רדיו, יש חשיבות רבה מאד לתחום הדינמי. במאמרים הבאים אציג את הנושא ביתר פירוט. בינתיים אציין שהתחום הדינמי הוא היחס בין רמת האות החזק ביותר שעשויים לקלוט באנטנה לבין זו של האות החלש ביותר (רמת הרעש). במערכות ספרתיות נקבע התחום הדינמי על ידי מספר הסיביות הבינאריות של מילה ספרתית המייצגת כל דגימה של האות אנלוגי. ככל שמספר הסיביות רב יותר, כך גדל מספר הרמות האנלוגיות הניתנות לייצוג, והתחום הדינמי רחב יותר. הגדלת מספר הסיביות מביא להאטה ניכרת בקצב הדגימה.
- ג. זמני החישוב ועיבוד הנתונים. זו למעשה הבעיה הגדולה. גם במחשבים של היום, אשר פועלים עם שעונים בתדירויות גבוהות, לא ניתן עדיין לבצע את העיבוד המתמטי במהירות הנדרשת על מנת לשדר ולקלוט בתדרים של יותר מכמה מאות בודדות של קילו-הרצים. פעולת הכפל למשל,

הנדרשת באפנון או בגילוי, היא פעולה מורכבת הדורשת מספר רב של מחזורי שעון וכן מספר פניות לזיכרון שגם הוא מעט את הקצב.

המסקנה מכך היא שלצערנו הרב הטכנולוגיה עדיין לא בשלה למימוש מערכת רדיו שהיא כולה מבוססת על מחשב ותוכנה. בינתיים, השיטה המקובלת במקלטי SDR (ראשי התיבות של Software Defined Radio) היא לבצע הזזה של האות הנקלט בתדר הרדיו (RF) לתחום תדרים נמוך הרבה יותר, ואפילו לפס בסיס (Base band) בתחום השמע. בתדרים כאלה, ניתן כבר לבצע דגימה של האות בקצב נמוך ולהמירו באמצעות A/D פשוט לקובץ נתונים ספרתיים. במקרים רבים נעשה שימוש ב-A/D הקיים במחשבים ומיועד לאותות בתחום השמע (תדר דגימה של 44.1KHz). כל שמוטל על המחשב הוא לבצע מיצוי של המידע (הדיבור או הנתונים). במקרה זה, המהירות הנדרשת לביצוע החישובים מופחתת הרבה יותר, דבר המאפשר למחשב להתמודד עם עיבוד האות ביתר קלות. הזזת תחום התדר שיתאים לכניסת השמע (Line in) של המחשב הביתי, מבוצעת באמצעות חומרה חיצונית שבמרכזה ערבלים (Mixers) המבצעים Down conversion בקליטה או Up conversion בשידור. על מנת להבין כיצד הדבר מתבצע נכיר את המערכת החשובה ביותר בתקשורת – אפנון וגלאי I/Q.

## 2. אפנון Quadrature

אחד המרכיבים החשובים שנעשה בו שימוש במודמים של מערכות תקשורת הוא אפנון בתצורת ה-Quadrature, המתואר באיור 1.a. אפנון זה כולל שני מכפלים, אשר לכל אחד מהם בנפרד מוזן אות בפס בסיס. לכניסת ה-In-phase מוזן האות  $i(t)$  המאפנון גל נושא בתדר  $f_0$ , ולכניסת ה-Quadrature מוזן האות  $q(t)$  המאפנון את אותו גל הנושא אך במופע מוזז ב- $90^\circ$ . במוצא האפנון מתקבל האות מורכב אשר ניתן להציגו כגל סינוסי בעל שינויי מעטפת ומופע:

$$y(t) = i(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) - q(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t) = A(t) \cdot \cos[2\pi f_0 t + \phi(t)]$$

את האות שקיבלנו ניתן להציג בצורה ווקטורית כמודגם באיור 1.b. עיון באיור ממחיש את משמעות האותות  $i(t)$  ו- $q(t)$  והקשר הטריגונומטרי שלהם למעטפת ולמופע. רכיבי ה-I/Q "מאונכים" זה לזה, ובאמצעותם ניתן לקבל מעטפת  $A(t)$  ומופע  $\phi(t)$  של אות מאופנן בהתאם לצורך.

כאשר המעטפת:

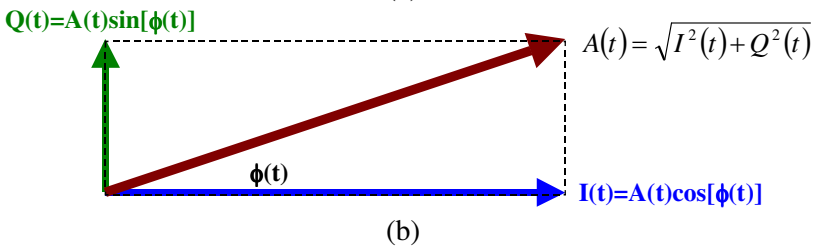
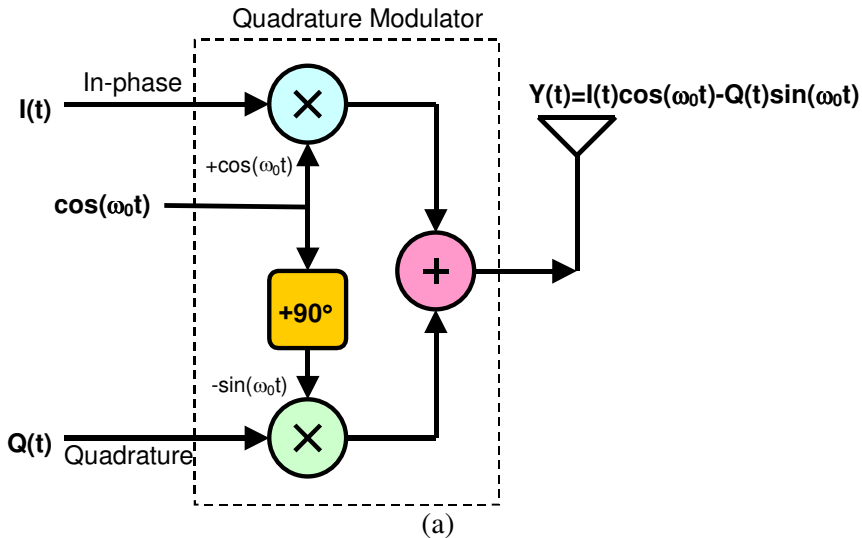
$$A(t) = \sqrt{i^2(t) + q^2(t)}$$

והמופע:

$$\phi(t) = \arctg\left[\frac{q(t)}{i(t)}\right]$$

ניכר שבעזרת אפנון ה-I/Q ניתן ליצור כל שיטת אפנון המבוססת על שינויי משרעת, מופע (ותדר) או השילוב ביניהם. זאת על ידי הזנה מתאימה של האותות  $i(t)$  ו- $q(t)$ , כמתואר באופן פאזורי באיור 1.b. לצורך קבלת אפנון כלשהו, ניצור באמצעות תוכנת המחשב את האותות  $i(t)$  ו- $q(t)$  שהם בפס בסיס

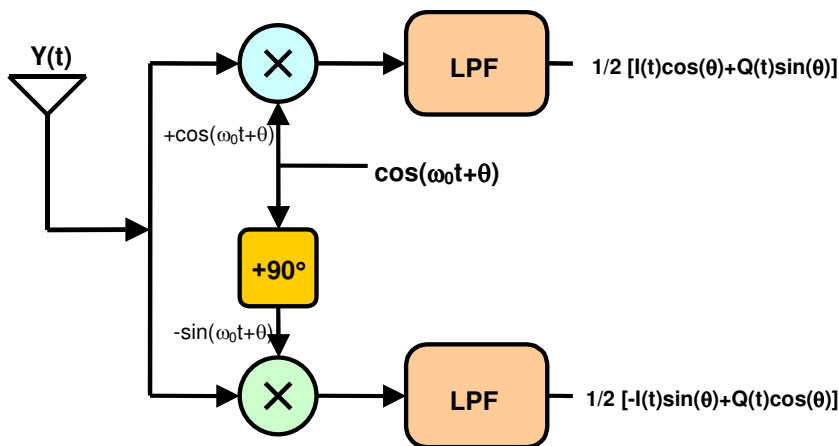
ובעלי ספקטרום בתחום התדרים הנמוך, נעביר אותם דרך יציאת ה-Line out (שהיא סטריאופונית וכוללת שני ערוצים) אל יחידת האפנן הממומשת בחומרה ונשדר את האות המתקבל בתדר הרדיו (RF).



איור 1: (a) אפנן Quadrature, (b) הצגה ווקטורית של האות המאופנן.

מבנה מקלט המגלה את האותות  $i(t)$  ו- $q(t)$  נתון באיור 2. אפילו מבלי לעקוב באופן מלא על הניתוח מתמטי, ניתן להבחין שאם המתנד המקומי מסונכרן עם התדר והמופע של הגל הנושא של האות הנקלט, כלומר כאשר  $\theta = 0$ , ניתן לפענח כל אחד מהאותות האלה בנפרד ובמדויק. היות שהם בפס בסיס, נעביר אותם דרך כניסת ה-Line in של המחשב שגם היא סטריאופונית ונבצע את מיצוי המידע באמצעות תוכנה מתאימה.

מערכות ה-SDR הפועלות עם מחשב אישי מפרידות את הרדיו לשני מקטעים. המקטע האחד הוא מודם I/Q הממומש בחומרה ומתחבר מצד אחד לאנטנה ומהצד השני לכניסה ויציאת השמע של המחשב. עיבוד האותות הממוקמים בפס בסיס מבוצע כולו במחשב באמצעות תוכנה מתאימה המהווה את המקטע השני. אמנם לא מבוצע כאן עיבוד אות ברמת תדר ה-RF, אבל זוהי התקדמות משמעותית המאפשרת גמישות בבניית מערכות תקשורת רדיו הפועלות בטכניקות שונות. אני מקווה שבאחד מהמאמרים הבאים אוכל להציג בפניכם שרטוט חשמלי פשוט של מערכת רדיו מוגדרת תוכנה הפועל בכל שיטות האפנן המוכרות. זאת לאחר שאחד מהסטודנטים שלי יבנה אותו ויבדוק שהוא אכן עובד כראוי. בינתיים ניגש לניתוח מערכת SDR לאפנן פס צד יחיד, נושא המאמר.



איור 2: מבנה מקלט המבצע מיצוי של האותות I/Q מאות באפנון Quadrature.

### 3. אפנון פס צד יחיד בתצורת Hartley

בחלקי המאמר הקודמים, הוצגו שתי שיטות לקבלת אות SSB. למעשה שתייהן דומות בכך שהיו מבוססות על העברת אחד מפסי הצד ודחיית האחר באמצעות מסנן מעביר פס. אם ניוזר בביטוי שכתבנו לאות באפנון פס צד יחיד סביב תדר הנושא  $f_0$ :

$$y_{SSB}(t) = x(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \begin{matrix} USB \\ \mp \\ LSB \end{matrix} \hat{x}(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t)$$

נוכל לזהות כי זוהי למעשה הצגת I/Q שהכרנו עכשיו, כאשר אות המידע (הדיבור)  $x(t)$  הוא האות המוזן לכניסת ה-In-phase, והתמרת ה-Hilbert שלו  $\hat{x}(t)$  היא המוזנת לכניסת ה-Quadrature של האפנון. תצורה זו הוצעה על ידי Hartley<sup>1</sup> כבר בשנת 1928, ומוכרת לציבור החובבים כטכניקה העושה שימוש ב'מזין מופע' (Phase shifter) ליצירת אפנון SSB. התמרת ה-Hilbert היא המזיזה את מופע כל מרכיבי התדר של אות המידע ב- $90^\circ$ , והיות שאות הדיבור  $x(t)$  הוא בפס בסיס, ניתן לבצע בתוכנה במקום על ידי רשת סבוכה של נגדים וקבלים. כל שנותר הוא להחליט על הסימן שלפני  $\hat{x}(t)$  לקבלת USB או LSB ולהעביר את האותות דרך יציאת ה-Line out של המחשב לאפנון שבאיור 1.a הממומש בחומרה.

המקלט המאפשר למצות את המידע מכל אחד מפסי הצד  $x_L(t)$  מהתחתון או  $x_U(t)$  מהעליון בנפרד הוא זה המופיע באיור 3. האותות לאחר מסננים מעבירי נמוכים (LPF) הם בפס בסיס ולכן ניתן להזינם לכניסת ה-Line in של המחשב לצורך ביצוע שאר הפעולות בתוכנה. בחיבור או חיסור האותות  $i_{out}(t)$  ו- $q_{out}(t)$  מתקבל אות המידע המשודר בפס הצד הרצוי. המידע המועבר בפס הצד התחתון מתקבל בחיבור האותות:

<sup>1</sup> R. V. L. Hartley: "Transmission of information", Bell Syst. Tech. J. 7, (1928) 535-563  
R. Hartley: "Modulation System", US Patent 1,666,206, April 1928

$$i_{out}(t) + \hat{q}_{out}(t) = x_L(t) \cos(\theta) - \hat{x}_L(t) \sin(\theta)$$

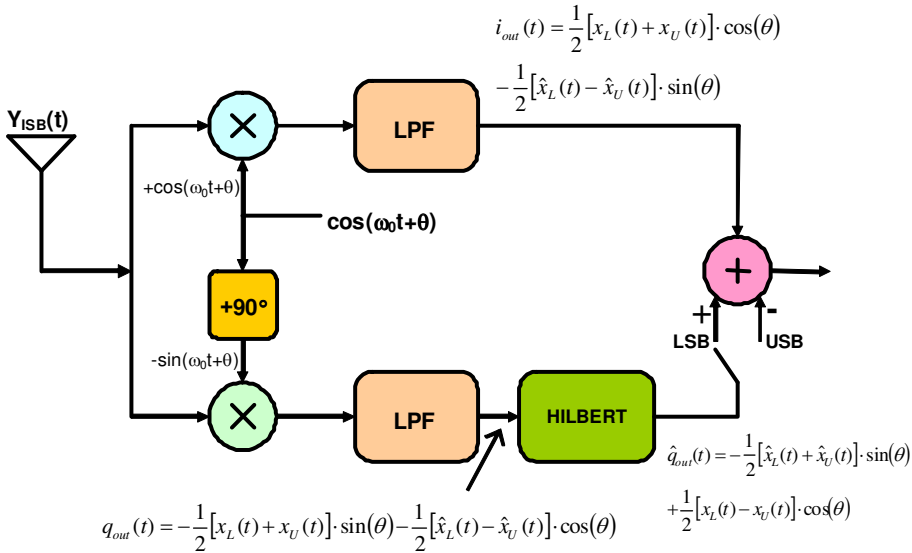
בחיסור האותות מתקבל המידע המועבר בפס הצד העליון:

$$i_{out}(t) - \hat{q}_{out}(t) = x_U(t) \cos(\theta) + \hat{x}_U(t) \sin(\theta)$$

כאמור, בהעברת שמע אין חשיבות ערך המופע  $\theta$  של המתנד המקומי במקלט ולא נדרשת נעילת מופע שלו עם מופע גל הנושא של האות הנקלט.

שימוש בהצגת אותות באמצעות רכיבי I/Q נפוץ גם בשיטות אפנון אנלוגיות אחרות כמו אפנון מעטפת (AM) ותדר (FM) וכן בשיטות מפתוחה המקובלות במודמים ספרתיים. כל אימת שתדירות האותות מאפשרת זאת, משתמשים במעבד אות לביצוע פעולות בתוכנה. אבל כאמור, לא ניתן להימנע ממקטע ה-RF שממומש בחומרה על ידי מעגלים אלקטרוניים.

כל האמור עד עתה, הציג את אפנון ה-SSB באופן תיאורטי, תוך דיון במבנה עקרוני של משדרים ומקלטים מסוגים שונים. בפרק הבא נדון ברכיבים מוכללים ומעגלים אלקטרוניים המבצעים את האפנון, ואף אציג את מערכת האפנון שתכננתי למשדר שבניתי. אז היכוננו לקצת אלקטרוניקה.



אזור 3: מקלט פס צד יחיד.



## למה פס- צד יחיד?

### חלק ה' - ואחרון

מאת: פרופ' יוסי פנחסי 4Z4VC

E-mail: [yosip@ariel.ac.il](mailto:yosip@ariel.ac.il)

Web site: [www.ariel.ac.il/sites/yosip/](http://www.ariel.ac.il/sites/yosip/)

#### 1. אפנן פס צד יחיד

בחלקי המאמר שפורסמו עד עתה, ניתחנו באופן תיאורטי את עקרונות האפנן והגילוי, באופן שידור בפס- צד יחיד (SSB). הכרנו שתי שיטות לביצוע האפנן. השיטה הראשונה אותה למדנו, התבססה על סינון. בשיטה זו, אות המידע (הדיבור) מוזן לאפנן מאוזן (Balanced modulator) המבצע הכפלה עם גל הנושא לקבלת אות מאופנן הכולל את שני פסי הצד. אות ה- DSB שמתקבל במוצא המכפל מוזן למסנן המעביר רק את אחד מפסי הצד, העליון, לקבלת אות USB או התחתון לקבלת LSB. בשיטה השנייה, הידועה בספרות החובבים בשם 'The phasing method', מזינים בהתאמה את אות המידע ואת התמרת ה- Hilbert של לכניסות ה- In-phase וה- Quadrature של אפנן I/Q. באופן מעשי, התמרת ה- Hilbert מתקבלת באמצעות שימוש ברשת סבוכה של נגדים וקבלים המזיזה את מרכיבי התדר של אות הדיבור ב-  $90^\circ$ .

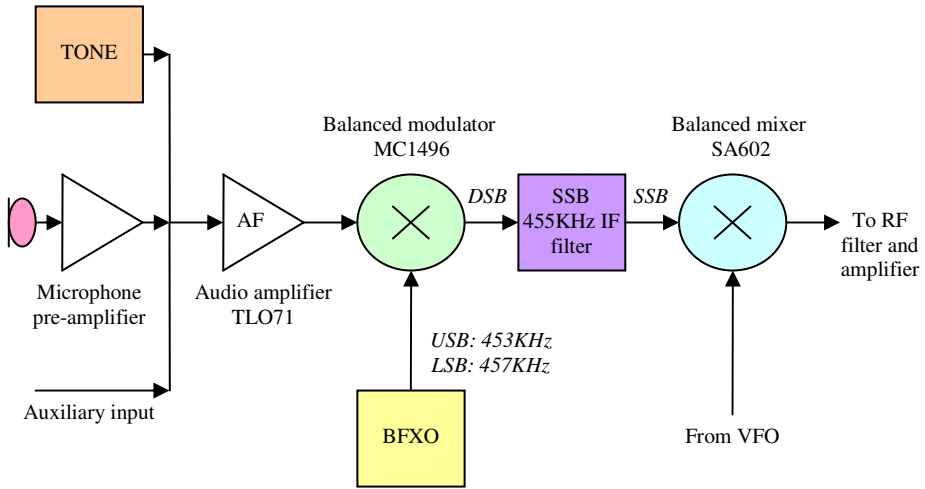
המקלט מבוסס על גלאי מכפלה (Product detector), המבצע עירבול (Mixing) של האות הנקלט עם גל סינוסי המופק ממתנד מקומי (Local oscillator). כאמור, במקרה של העברת אותות שמע, נדרש רק לכוון את תדר המתנד המקלט כך שיהיה זהה בריוק לתדר הנושא של האות הנקלט, אך אין צורך בנעילת מופע שהוא תהליך מורכב הרבה יותר. היות שתהליך מיצוי המידע מהאות המאופנן מחייב גילוי סינכרוני, יש להקפיד במיוחד על כך שהמתנדים הן במשדר והן במקלט יהיו מדויקים ויציבים בתדר.

נציין שוב שהמגברים בשרשרת השידור (וגם הקליטה), בכלל אלה מגבר ההספק של המשדר, חייבים להיות לינאריים, שאם לא כן, האות מתעוות ולא ניתן יהיה לשחזר את המידע באיכות הרצויה. זהו חיסרון מסוים, שכן למגברי הספק לינאריים, הפועלים במשטר עבודה של Class A או Class AB, נצילות נמוכה מזו של מגברים לא לינאריים ב- Class C, כמו אלה המשמשים במשדרי FM.

ניגש עתה לממש אפנן SSB באמצעות רכיבים אלקטרוניים. האפנן שיתואר להלן, מבוסס על השיטה הראשונה, כאשר נעשה שימוש במסנן מעביר פס (BPF) בודד להעברת פס- הצד הנבחר. המערכת תוכננה על ידי, נבנתה ופועלת במשדר SSB שבניתי לתחום ה- 20 מטר. בתכנון הושם דגש על רכיבים נפוצים שניתן להשיגם בנקל גם בתצורת DIP הנוחה יותר לבנייה עצמית של חובב הרדיו המצוי. האפנן, הכולל המרת תדר כפולה כמתואר באיור 1, בנוי משלושה מקטעים עיקריים:

- א. מגבר מבוא לתדר שמע (AF): ניתן לחבר אליו מיקרופון דינאמי או אלקטרוסטטי וכן להזינו בכניסת ה- Auxiliary באות המופק ממערכת שמע כלשהי, כמו למשל המחשב. בנוסף, ניתן להפעיל מתנד שמע פנימי המחולל טון בתדר של כ- 1KHz לצורך בדיקת המשדר ואיכות האפנן.
- ב. אפנן מאוזן לתדר ביניים (IF): הוא מבוסס על מעגל משולב MC1496 המחולל אות בפס- צד כפול. מסנן מעביר פס צר (SSB IF filter) סכיב תדר של 455KHz מסיר את אחד מפסי הצד לקבלת אות בפס- צד יחיד.
- ג. ערבול מאוזן: כאן נבחר המעגל המשולב SA602 המעלה את אות ה- SSB בתדר הביניים לתדר ה- RF של השידור.

את כל המעגל החשמלי, כולל החלקים האלקטרוניים של ספק הכוח (לא כולל השנאי) ומייצבי המתח, ניתן לבנות על מעגל מודפס חד-צדדי בגודל סטנדרטי של 10cm x 16cm. על מנת להשלים את המערכת למשדר שלם, יש להוסיף לאחר האפנן מסנן המעביר את פס התדרים הנדרש, מגבר דוחף (Driver) ומגבר הספק (Power amplifier) אשר אינם מתוארים כאן. ניגש עתה לתיאור מפורט של המעגל והרכיבים האלקטרוניים.



איור 1 : אפנן SSB המבוסס על מסנן מעביר פס יחיד.

## 2. מבוא השמע ומחולל תת-נושא

איור 2 מתאר את מבוא השמע לאפנן. מגבר שמע, המבוסס על מגבר השרת TLO71 (תחליף דל-רעש של ה-741 המוכר), מסכם שלוש כניסות שמע. אות המיקרופון מגיע מקדם-מגבר (הטרנזיסטור 2N3904) ועוצמתו ניתנת לוויסות באמצעות פוטנציומטר חיצוני. קדם-המגבר מאפשר חיבור גם של מיקרופון דינאמי אשר עוצמת האות ממנו נמוכה מזו המתקבלת ממיקרופון אלקטרוסטאטי. יש להקפיד לא לכוון לעוצמת אות גבוהה מידי שעלולה לגרום לקטימת השיאים הגבוהים ועיוות באות המאופנן. הדבר בא לידי ביטוי במיוחד בעת שימוש במיקרופון אלקטרוסטאטי הנחשב רגיש יותר בשל השימוש במגבר פנימי. המעגל כולל גם מתנד 'זיזת מופע' פשוט המחולל טון בתדר שמע של כ-1KHz אשר מופעל באמצעות מתג ייעודי. מתנד השמע, המבוסס גם הוא על הטרנזיסטור 2N3904, מאפשר לבצע בדיקות וכיולים של האפנן. את עוצמתו מכוונים באופן חד פעמי באמצעות נגד Trimmer של 50KΩ המותקן על המעגל. בנוסף, קיימת כניסת Auxiliary המאפשרת הזנת האפנן באות שמע ממקור אחר, למשל מיציאת ה-Line out של המחשב.

באיור 2 מופיע גם המתנד המייצר את תת-נושא בתדר ביניים (Beat Frequency Crystal Oscillator). על מנת שנבין את שיקולי בחירת התדר של המתנד הזה, נציין שמסנן ה-SSB שבחרתי לדרגת הביניים הוא מסנן קרמי פיאזואלקטרי מדגם CFWLA455KJFA-B0 המיוצר על ידי חברת Murata<sup>1</sup>. הוא מעביר פס תדרים צר ברוחב סרט של כ- $\pm 2\text{KHz}$  סביב תדר ביניים של 455KHz. למסנן זה מגיע אות DSB מהאפנן המאוזן (ראה איור 1). על מנת שיעביר רק את פס הצד העליון (USB) יש לקבוע את תדר תת הנושא להיות נמוך בכ-2KHz מהתדר המרכזי, כלומר לכוון את תדר ה-BFXO ל-453KHz. לקבלת LSB יש לכוון את תדר תת הנושא ל-457KHz (מעל לתדר המרכזי). מתנד ה-BFXO הוא מתנד גביש המבוסס על 'מהוד קרמי' (Ceramic resonator) המיועד לתדר 455KHz וניתן להשגה בקלות. את תדר התנודה של המתנד ניתן להסית ב- $\pm 2\text{KHz}$  לתדר הרצוי באמצעות כיוון של קבל המחובר בטור למהוד הקרמי. המתנד

<sup>1</sup> Specification of Piezoelectric Ceramic Filter CFWLA455KJFA-B0, Murata (July 23, 2010)



אך כיום קשה להשיגם. המסנן הקרמי CFWLA455KJFA-B0 נמצא כאמור מתאים לבצע את המשימה אפילו ללא דרגות הגברה נוספות. על מנת לקבל אות SSB יש לכוון את תדר מחולל תת- הנושא לתדר הנמוך או הגבוה במקצת מהתדר המרכזי של המסנן. הדבר מתבצע על ידי הפעלת מחולל טון השמע וכוונתו קבלת ה- Trimmer של ה- BFXO תוך התבוננות בצורת הגל המתקבלת במוצא המסנן. בתדר המרכזי של 455KHz מתקבל במוצא המסנן אות DSB 'פועם' שהכרנו במאמר הראשון בסדרה. משרעת האות המתקבלת מהאפנן היא של 200-500mVpeak. בהזזה של 2-3KHz מתחת או מעל לתדר המרכזי של המסנן נעלמת בהדרגה הפעימה ומתקבל גל סינוסי רציף, המעיד על כך שאחד מפסי הצד הוסר. עיון מחודש בחלק ב' של סדרת המאמרים יזכיר זאת. אין להתרחק יתר על המידה מהתדר המרכזי, על מנת שהאות לא יעלם לגמרי.

#### 4. ערבול מאוזן SA602

כל שנותר עתה הוא להעלות את האות המאופנן מתדר הביניים לתדר השידור. הדבר מתבצע באמצעות המרה נוספת בעזרת ערבול מאוזן (Balanced mixer). לצורך כך נבחר מעגל משולב הנפוץ מאד כיום בקרב החובבים והוא ה- SA602 מתוצרת Philips<sup>3</sup>. המעגל מבצע הכפלה בין האות ה- SSB בתדר הביניים שהגיע מהאפנן המאוזן וגל סינוסי המופק ממתנד VFO (ראשי תיבות של Variable Frequency Oscillator) המכוון לתדר ההפרש בין תדר השידור המבוקש לתדר ה- BFXO. משרעת האות של ה- VFO צריכה להיות כ- 500mVpeak. גם במעגל זה קיים נגד Trimmer (של 1MΩ) אשר בעזרתו מכוונים את איוון הערבול למינימום זליגה בתדר הנושא.

במוצא הערבול יש להתקין מסנן מעביר פס שמרכזו באמצע תחום תדרי השידור ורוחבו לא יעלה על מאות בודדות של קילו-הרצים. זאת על מנת למנוע שידור של אות בבואה (Image) שהוא תוצר נוסף של תהליך הערבול. נבחר זאת בעזרת הדוגמא הבאה. נניח שמעוניינים לשדר בתדר של 14.175MHz, שהוא מרכז תחום ה- 20 מטר המוקצה לחובבי הרדיו. באופן USB מכוון כאמור מתנד ה- BFXO לתדר של 453KHz, ולכן יש לכוון את ה- VFO לתדר של:

$$14.175 - 0.453 = 13.722MHz$$

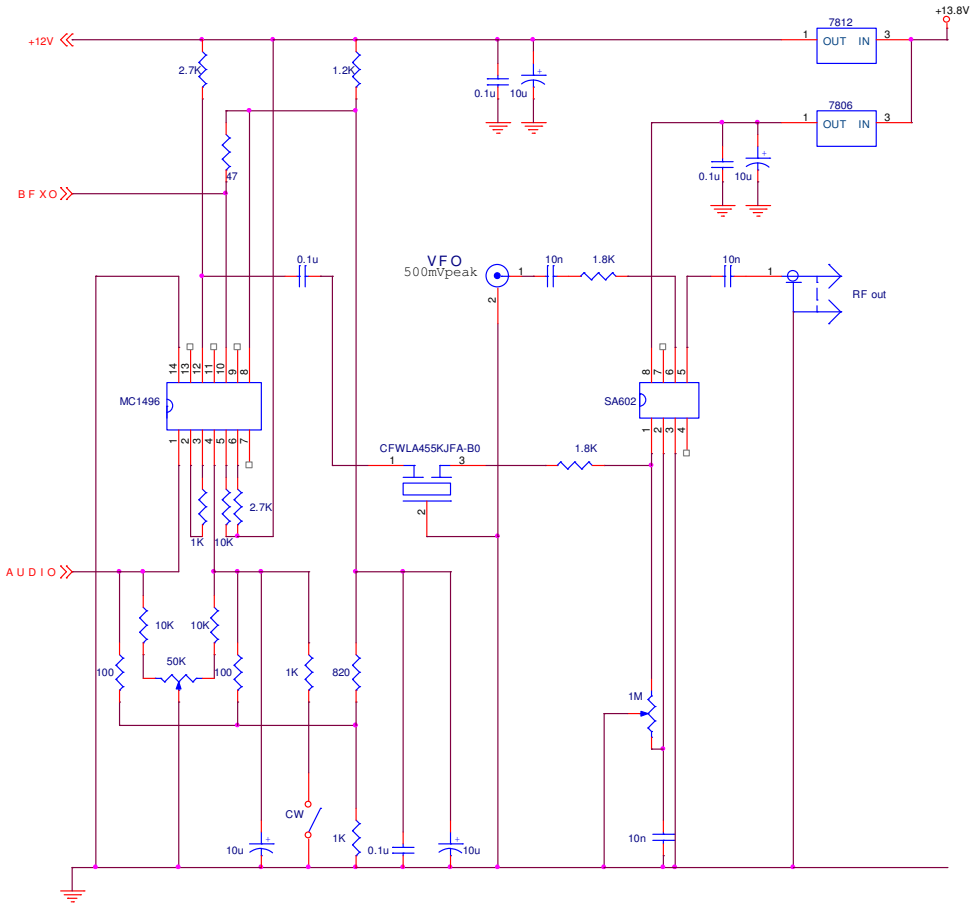
במוצא הערבול את ה- RF בתדר המבוקש (14.175MHz) אך גם תוצר נוסף בתדר בבואה:

$$13.722 - 0.453 = 13.269MHz$$

שהוא מחוץ לתחום התדרים המוקצה לחובבי הרדיו. המסנן הנוסף, תפקידו למנוע מעבר של תוצרי הבבואה לדרגות ההספק של המשדר ומשם לאנטנה. נשים לב שתוצר הבבואה ממוקם בתדר המרוחק פי שניים מתדר הביניים. בדוגמא שלנו נבחר תדר ביניים של 453KHz, ולכן אות הבבואה מתקבל בתדר הנמוך ב-  $2 \times 453 = 906KHz$  מתדר השידור. לביצוע הסינון, נדרש רוחב הסרט של מסנן מעביר- פס צריך להיות קטן מ- 906KHz. בדרך כלל בוחרים תדר ביניים גבוה הרבה יותר על מנת להרחיק את תוצר הבבואה ולהפרידו מתדר השידור כך שניתן יהיה לסננו באופן יעיל.

חשוב מאד שתדר ה- VFO יהיה מדויק ויציב במהלך השידור, שאם לא כן, יתלונן המאזין מעברו האחר של הערוץ על איכות שמע נמוכה ויעניק ציון Readability הנמוך מ- 5. בפעמים הראשונות שהפעלתי את המשדר שבניתי קיבלתי ציון נמוך, נעלבתי וניגשתי לתקן את יציבות המתנד...

<sup>3</sup> "High sensitivity applications of low-power RF/IF integrated circuits", Philips Semiconductors application note AN1993 (August 2007)



איור 3 : אפנן וערבול מאוזן.

## 5. סיכום

מאמר זה על חמשת חלקיו, הוא הראשון שכתבתי לביטאון "הגל". במסגרתו למדנו על נושא אפנון ה-SSB כמעט מכל זווית אפשרית. עם כל הניתוחים המתמטיים, אני מקווה שחובבי הרדיו בישראל שקראו את חמשת גליונות "הגל" האחרונים, הפכו בקיאים יותר באפנון החשוב הזה והבינו לעומק את הסיבות לשימוש בו. זהו אפנון חסכוני ברוחב סרט, יעיל מבחינת ניצול הספק השידור ואינו דורש סנכרון מופע לצורך מיצוי מידע השמע.

מערכות הרדיו הפכו עם השנים למשוכללות מאד. הרכיבים האלקטרוניים הפכו לזעירים, ומאפשרים בכך לצופף את המעגלים ולהקטין את ממדי הציוד. מעבדי אות ספרתיים מחליפים בהדרגה מעגלים אלקטרוניים ומאפשרים גמישות בתכנון ובמימוש של תחנות חובבים איכותיות. למרות זאת, יש עדיין מקום למעוניינים בכך לתכנן ולבנות משדרים ומקלטים (ולא רק אנטנות...). במאמרים הבאים אביא לא רק הסבר תיאורטי לנושאים המעניינים את ציבור חובבי הרדיו, אלא גם תכנון של מעגלים מעשיים.