

עידן ה-SDR הגיע

ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

מבוסס על פרסומי ARRL, RSGB, ויקיפדיה ומקורות נוספים באינטרנט.

(סדרת מאמרים שפורסמה ב-"הגל" בשנים 2007-2009)

מבוא ורקע היסטורי

לפני כ-100 שנים היו בשימוש מקלטי רדיו בשיטת TRF (ראשי תיבות של Tuned Radio Frequency). מקלטים פשוטים ששינוי התדר, בהם, דרש מספר רב של פעולות. עברו מספר שנים ובתקופת מלחמת העולם הראשונה (1914-1918) הומצא מקלט הסופר הטרודין שהוא הטכנולוגיה השלטת עד היום ואנחנו חיים איתו מאז.

אגב – "כולם יודעים" שאת הטכנולוגיה הזאת המציא ארמסטרונג אבל לא כולם יודעים כי הפטנט שלו נשלל מכיוון שאחרים כבר פיתחו את זה לפניו (תזכורת – גם לאלכסנדר גראהם בל נשלל הפטנט בגלל סיבה דומה).

במקביל לסופר-הטרודין שאנחנו מכירים, פותחו עוד סוגי טכנולוגיות, כגון "אוטודיין" או "Quadrature Detector" שלא היו פופולאריות וספק אם אפילו חלק מהקוראים שמע עליהן.

מקלטי הרדיו יושמו בעזרת חומרה ורק בשנות ה-80-90, של המאה העשרים, התחילו לשלב בהם את המחשבים. השילוב נעשה הן ע"י הכנסת מיקרופרוססורים לתוך המקלטים או שימוש חיצוני במחשב אישי.

שילוב מחשבים, במכשירי הרדיו, יצר מונח חדש שהוא SDR. האותיות SDR הינן ראשי תיבות של Software Defined Radio, או, בתרגום חופשי לעברית, "רדיו מוגדר תוכנה". מה מיחד רדיו זה ממכשירי רדיו אחרים ואיזה בשורה הוא מביא לנו?

"מקלטים מוגדרי תוכנה", SDR, קיימים כבר מספר שנים כאשר בקטגוריה זו נופלים גם מקלטים קונבנציונליים שחלק מהבקרה שלהם, כגון בקרת תדר או סוג אפנון, הועברו לשליטת המחשב. כאילו לקחנו רק את הבקורת מחזית מכשיר הקשר והעברנו אותם למסך המחשב ושאר המעגלים נשארו ב-"קופסה שחורה". עם הזמן הועברו יותר ויותר פונקציות למחשב.

אם נעקוב אחרי התפתחות ה-SDR נראה שהנושא תפס תאוצה רק בשנים האחרונות. לא שלא ידעו את העקרונות מקודם אבל רק לאחרונה בשלו התנאים להגשים את ה-SDR. התיאוריה קיימת כמה עשרות שנים אבל רק עכשיו המחשבים הגיעו למהירות הנדרשת, פותחו רכיבים מהירים המאפשרים טיפול ספרתי באותות (DSP), כרטיסי הקול משופרים וכול מה שהיה בחזקת חלום, רק לפני שנים מועטות, היום הוא כבר בהישג יד.

במערכת SDR ניתן לקלוט ולשדר, בעזרת תוכנה מתאימה, את אופני השידור של AM, FM, CW, SSB, RTTY, AMTOR, PACTOR, SSTV, PSK31. ניתן להוסיף למערכת, בכול עת, אופני שידור/קליטה חדשים וזאת ע"י עדכוני תוכנה בלבד. מערכת SDR אחת מסוגלת לתקשר עם מכשירי קשר שונים, כדוגמת המכשירים של זרועות הצבא השונים העובדים בתחומי תדרים וסוגי אפנון שונים.

ל-SDR ישנה משמעות כלכלית ומבצעית אדירה במיוחד כאשר יש צורך בהכנסת פרוטוקולים חדשים למערכות צבאיות הכוללות מאות אלפי מכשירי קשר. תחשבו על המאמץ הלוגיסטי הניתן לחיסכון רק ע"י משלוח מהיר, של CD קטן, או אפילו משלוח עדכון התוכנה בדוא"ל. זאת במקום לשנע עשרות ומאות אלפי פריטי חומרה שהתקנתם תמשך תקופת זמן ארוכה. אני מניח שהצבאות, במדינות שונות, כבר עובדים על ה-SDR שלהם ולנושא זה ישנן חדשות רעות וחדשות (אולי) טובות. החדשות הרעות, לאלה שעדיין מחפשים עודפי צבא, שהציוד הצבאי החדש יהיה בשימוש הרבה שנים אפילו אם יכניסו אופני שידור חדשים. החדשות הטובות הן שאם ציוד הקשר יצא לשוק העודפים, כול מה שיהיה צריך לעשות זה שינוי תוכנה ואולי אפילו את זה לא.

אחד היתרונות הנוספים, של מערכת SDR, היא תצוגה פנוראמית של כול תחום התדרים אותו אנו בוחרים. במקום לסובב כפתורים ולחפש תחנות רואים את כול התחנות הפעילות, במבט אחד, ועוברים ישירות לאותה תחנה. בהמשך אתיחס לזה בהרחבה.

ישנם היום סוגים שונים של מקלטי SDR כאשר המחיר, של לפחות חלק מהם, יקר מאוד. בהמשך אתרכז במקלטים המשתמשים בטכנולוגיה הידועה בשם QSD (קיצור של Quadrature Sampling Detector) המצטיינת במחירה הזול במיוחד. בהמשך נשתמש בראשי התיבות SDR או SDR-QSD, למכשירי קשר, בטכנולוגית QSD. שכמעט כול תפקודיהם מבוצעים בעזרת המחשב.

טכנולוגיה זו מתבססת על גלאי שתפקידו ליצור את אותות ה-IQ שהינם הבסיס לממשק בין ראש המקלט וכרטיס הקול שבמחשב, הן לצורכי קליטה והן לצורכי שידור. בפעם הזאת נתרכז רק בערוץ הקליטה.

טכנולוגית ה-IQ אינה חדשה, היא נמצאת בשימוש כבר כמה עשרות שנים כאשר בעבר היו לה שמות כמו "מספרים מורכבים" (Complex Numbers) או שמות אחרים. טכנולוגיה זו, שהוגשמה ויושמה בעבר בעזרת חומרה, הייתה בשימוש רב לפני עידן המחשבים ובין קוראי מאמר זה ישנם כאלה, כך אני מאמין, שכבר השתמשו בה בעבר למשדרי SSB.

התקשורת הספרתית ממשיכה להשתלט על התעבורה האלחוטית ולצורך זה נדרש מחשב שמחברים אותו לתפוקת המקלט הקונבנציונלי. נראה לי שהיום לכול חובב רדיו ישנו מחשב המחובר למקלט, לצורך קליטה בלבד, או ל-מקמ"ש לצורך קליטה ושידור.

פעולת המחשב מבוססת על עיבוד אותות סיפרתי המכונה DSP (ראשי תיבות של Digital Signal Processing) הנעשה בעזרת המחשב הכולל גם את כרטיס הקול שבתוכו.

מכיוון והמחשב קיים במילא, בעזרת ה-DSP אפשר לבצע כמעט את כול הפונקציות שמבצעים מקלטים או מקמ"שים קונבנציונליים. הכוונה לכול מה ששייך להגברת האותות, בחירת תדרים, סינון וניקוי האותות הנקלטים, טיפול באותות השמע וכדומה.

אם זה אכן כך, אולי אפשר להסתפק ב-"ראש המקלט" (מינוח חדש ל-Front End) בלבד ולוותר על כול מה שמעבר לו? אולי נוכל לוותר על מגברי תדר הביניים, הגלאים השונים, מסננות הגביש לסרט צר ומגברי השמע?

נקנה או נבנה "ראש מקלט", נחבר אותו לכרטיס הקול, נטעין את התוכנה וקדימה לעבודה.



"ראשי מקלט", לתחום תדרים צר בלבד, ניתנים להשגה במחיר זול במיוחד. דוגמה לכך הוא כרטיס SoftRock_40 (קלט להרכבה עצמית שגודלו 3.8x3.8 ס"מ ומחירו, כולל משלוח ארצה, \$12) וזאת תמונתו:

למקלט ישנן חסרונות (תחום תדרים צר מאוד) וחוסר אפשרות לעבור בין תחומי התדר של חובבי הרדיו. אמנם כבר היום ישנם אבי טיפוס לסינטסיזרים (DDS – Direct Digital Synthesizer) אבל נתייחס אליהם מאוחר יותר.

יחד עם זאת המקלט, כבר במצבו הנוכחי, הוא פרויקט קטן ונחמד למי שאוהב לבנות מכשירים ורוצה ללמוד על ה-SDR.

מהעבר השני, ישנם מקמ"שי SDR שיכולים לכלול בתוכם גם את כרטיס הקול והמחשב (תחשבו על הגודל של מחשב נייד ולא על מחשב שולחני). דוגמה לכך הוא ה-FlexRadio-5000 מסדרת Flex-5000 שאחד מדגמיו מתואר



בתמונות הבאות:

שימו לב שעל חזית ה-מקמ"ש אין בקרות כול שהן, פרט למתג ההפעלה ומחברי המיקרופון והאוזניות. לעומת זאת, יש מספיק מחברים בצידו האחורי. גודלו 31.5 X 22.1 X 23.5 ס"מ, משקלו כ-6 ק"ג ומחירו כ-\$2500.

ואחרון-אחרון חביב. ישנו גורם נוסף, שחשיבותו ל-SDR היא ממדרגה ראשונה, והוא קבוצת ה-"משוגעים לדבר". התקשורת, בתדר גבוה, קודמה לא מעט בגלל פעילות של חובבי רדיו. תוך כדי קריאת מאמרים, העוסקים ב-SDR, נזכרים מפתחי ציוד בחברות ענק שליד שמם מופיע אות קריאה. כמה טוב שהם כן יכולים לשלב Business עם Pleasure.

בין הרבים, העוסקים בנושא, ברצוני לציין את Steve VK6VZ ואת ידידו Phil VK6APH, המפרסמים באופן קבוע מאמרים ב-RadCom. גם Peter Martinez G3PLX, הזכור לטובה מימי ה-AMTOR וה-PSK 31 עדיין בעניינים.

Tony Parks KB9YIG, המפתח והמפיץ של המקלט SoftRock 40, עובד כנראה יומם ולילה. פניתי אליו מספר פעמים, בשעות שונות של היממה, והתשובה הגיעה ממנו תוך שעה או פחות.

שם נוסף הוא דן טיילואי (Dan Tayloe – W7VE) שפיתח (בחברת מוטורולה) את הגלאי הידוע גם בשם QSD – Quadrature Sampling Detector. על גלאי זה, שהוא רכיב מפתח במערכת, נרחיב בהמשך. דן טיילואי אמנם הוציא פטנט על הגלאי אבל, כמו במקרים של כל וארמסטרונג, גם כאן ישנן השגות על הממציא המקורי.

סביב גרעין זה, של אנשים, ישנן קבוצות דיון בהם מחליפים מידע שכדאי לעקוב אחריו.

מתחילים ללמוד

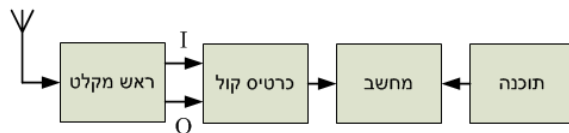
לחלק גדול מאיתנו יש ניסיון רב בציוד קשר "קונבנציונלי" אבל כאשר פתאום נתקלים בטכנולוגיה חדשה לא תמיד יודעים היכן להתחיל.

האפשרות המיידית היא להיכנס ל-"גוגל", לצלול למים העמוקים ולהתחיל לטבוע בים המידע. קיים כבר מידע רב בנושא ומי שיכנס ל-"גוגל" ימצא כשני מליון אזכורים.

אני החלטתי להיכנס לים על יד החוף ולראות מה אפשר ללמוד, הן תיאורטית והן מעשית, מבלי לאבד את הראש ואת המכנסיים (הרבה כסף). אני חושב שמצאתי את הדרך, כפי שעשו זאת כבר כמה מחברינו בארץ שמקדימים אותי בהרבה, ורוצה לחלוק את ניסיוני עם קוראי העיתון.

מכיוון שהפרויקט שלנו הוא לימודי בלבד, נשתדל לבצעו במחיר נמוך ונראה שבהשקעה של כ-50 נה נוכל לבנות מקלט שפועל. אינני מבטיח שהוא יאפשר לנו להשיג קשרים רבים, או אפילו מעטים, אבל נוכל לדעת עליו הרבה יותר לפני שמחליטים להשקיע בציוד "אמיתי".

בהמשך פרק זה אתאר את מערכת הקליטה בלבד המורכבת מארבעה חלקים עיקריים שהם ראש המקלט, כרטיס



הקול, המחשב והתוכנה כפי שמתואר באיור 1. לחלק המשדר אתייחס מאוחר יותר.

איור 1 – תרשים מלבני של מקלט SDR-QSD.

איור 1 הינו תרשים של מקלט בסיסי. ישנן אפשרויות לבנות אותו בצורות והרכבים שונים אבל בהמשך אתייחס למבנה הבסיסי בלבד.

האות מהאנטנה נכנס לראש המקלט המפיק שני אותות שמסמנים אותם ב-I וב-Q. חשיבותם וצורת הפקתם, של אותות ה-IQ, ידונו בהרחבה בהמשך.

חשוב לציין, אפילו כבר בשלב זה, שאותות ה-IQ הם ממשק נפוץ בין ראש המקלט ובין מה שאחריו. זה נותן לנו אפשרות להחליף את כול אחד מרכיבי המערכת, בנפרד, מבלי שזה ישפיע על חלקי המערכת האחרים.

אפשר היה לבנות את ה-SDR לפני הרבה שנים ואז נשאלת השאלה: למה זה קרה רק עכשיו?

במחשב ישנם שני מרכיבים חשובים במיוחד והם המעבד וכרטיס הקול.

המחשב צריך לעבד, בקצב גבוה מאוד, נתונים ספרתיים המגיעים בשטף מכרטיס הקול. כדי לבצע את העבודה, נדרש מעבד בעל קצב פעולה גבוה. חבל להתחיל במשחקים עם מחשב שקצב עבודתו נמוך משני גיגה-הרץ. בעבר הלא רחוק היה יקר לרכוש מחשבים כאלה אבל למזלנו רוב המחשבים, שהיום בשימוש, עומדים כבר בקצב הזה.

המרכיב החשוב השני הוא כרטיס הקול שתפקידו להפוך את האותות האנלוגיים לאותות ספרתיים. אפשר להתחיל לעבוד גם עם כרטיס קול פשוט, אפילו כזה הנמצא על לוח האם, אבל כרטיס משובח יותר עשוי לשפר את הביצועים במידה משמעותית. למזלנו ניתן להשיג היום כרטיסי-קול, המיועדים למקצוענים ו/או ל-"משוגעי מוסיקה". כרטיסים אלה נותנים אפשרות להכפיל את תחום התדרים הנקלט אבל ישנה רק בעיה קטנה והיא המחיר, כרטיס-קול מקצועי עולה בסביבות 150-200\$.

דווקא שני רכיבים אלה, המעבד וכרטיס הקול, הם עניין של החלטה בלבד (לקנות או לא לקנות) ולכן ארחיב עליהם את הדיבור כאשר יהיה לזה קשר ישיר לעיבוד האותות.

המרכיבים האחרים, שנשאר לנו לשחק בהם, הם התוכנה וראש המקלט.

לשמחתנו התוכנות הן חנימיות. כול מה שצריך לעשות הוא להחליט באיזה תוכנה משתמשים ולהוריד אותה מהאינטרנט. התוכנות נמצאות בשיפור מתמיד ולעיתים קרובות העדכונים מכילים שיפורים משמעותיים ביותר. כאשר החלטתם על תוכנה, תמשיכו לעקוב אחר העדכונים השוטפים. אזרהה קטנה – רוב התוכנות מותאמות לחלונות XP, אל תרצו להתקין ויסטה.

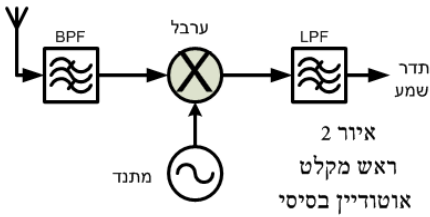
ראש המקלט עצמו, שעליו ארחיב בהמשך, בנוי בטכנולוגיה שיש לה מספר שמות, כגון "המרה ישירה" (Direct Conversion), "תדר ביניים של אפס" (Zero IF Frequency) או "אוטודיין". אני אמשך להשתמש בשם "אוטודיין" למרות שבחלק מהספרות הלועזית הוא מכונה דווקא "המרה ישירה" או, בקיצור, D-C.

ישנם היום מקלטי SDR המסוגלים לכסות את כול תחומי התדרים העשויים לעניין אותנו (General Coverage) אבל לא כאן המקום להתייחס אליהם, לפחות לא בשלב זה (ראו Flex-5000 לעיל).

כדי לא להתפרס על יריעה גדולה מדי, אתייחס בהמשך למערכת בסיסית הכוללת ראש מקלט SoftRock 40 ותוכנת Rocky. ראש המקלט, בצורתו הקיימת, מיועד לפס תדרים צר מאוד (עשרות ק"ה לעומת מאות ק"ה של תחום חובבים אחד, הכול תלוי באיכות כרטיס השמע) אבל כלי טוב וזול למי שרוצה להתחיל ללמוד את הנושא.

ראש מקלט (Front End)

כפי שהזכרתי לעיל, ראש המקלט הישים הוא מסוג אוטודיין שבצורתו היסודית הוא בנוי כפי שמתואר באיור 2.



ניתן לזהות, בקלות רבה, את הערבל, המתנד המקומי והמסננות בכניסה וביציאה. בכניסה מסננת מעבר לפס תדרים (BPF) וביציאה מסננות מעבר לתחום נמוך (LPF).

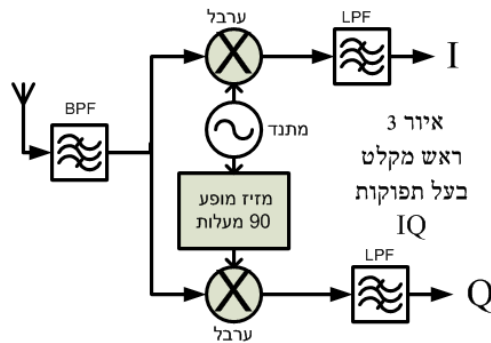
כפי שלימדו אותנו בבית ספרינו, כשמערבבים שני תדרים מקבלים ביציאה (פרט לתדרים שהוכנסו לערבל) גם את סכומם והפרשם.

נניח שאנחנו רוצים לקלוט שידור של AM בתדר של 14.000 מ"ה באפנון סינוס נקי של 1 ק"ה. אי לכך נפעיל את המתנד בתדר 14.000 מ"ה וביציאה נקבל את ההפרש שהוא אכן 1 ק"ה ושנשמע אותו כצליל נקי. אם האפנון יכיל אות דיבור (אוסף תדרים בו זמני) נשמע גם אותו במלואו (כמו בקליטת SSB).

סכום התדרים, של 28.000 מ"ה, יסונן בעזרת המסננת ביציאה (LPF), יעלם ולא יפריע יותר.

יחד עם זאת קיימת עדיין בעיה הקשורה לאותות בתדרים הנמצאים מתחת ל-14.000 מ"ה אבל צמודים אליו. גם הם יופיעו, הפעם כ-"אותות מתחזים" (Alias Signals), ויגרמו לרעש ועיוותים.

אי לכך, מסתבר שלא האוטודיין הזה יביא לנו את הפיתרון. נאלץ לחפש מעגל קצת שונה, מעגל בעל תפוקות



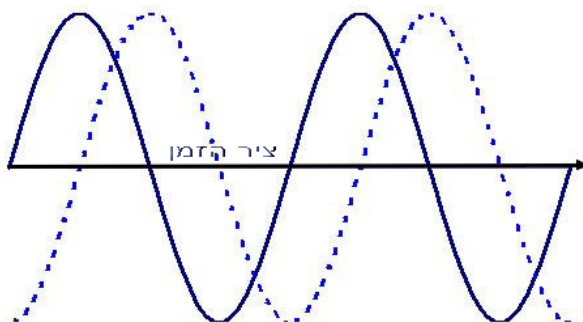
הניתנות לעיבוד נוסף. באיור 3 ניתנת דוגמת ראש מקלט מתאים יותר.

כפי שהזכרתי לעיל, הממשק בין ראש המקלט לכרטיס הקול, נעשה בעזרת אותות IQ המוזנים לכרטיס הקול.

אות ה-I יהיה זהה לאות תפוקת השמע של המעגל הבסיסי המתואר באיור 2. מכיוון שהערוץ שלו מוזן ישירות מהמתנד, הוא נקרא בשם In phase signal, או בקיצור I. למעשה, מקובל להגדיר, כאות I, את האות שיגיע ראשון למקסימום.

אות ה-Q זהה לאות ה-I אלא שהוא מוזן ממנו בפאזה של 90° (רבע מחזור) ומכאן שמו Quadrature Signal, או בקיצור, Q.

אם ביציאה יהיה אות סינוס טהור הרי שנקבל שני אותות, אות I בפאזה ואות ה-Q כשהוא מוזן ב- 90° כפי שרואים באיור 4.



איור 4 – תצוגת אותות I ו-Q על ציר הזמן. אות ה-Q (קו מקווקו) מפגר אחרי אות ה-I ב- 90° מעלות.

עמוד 5 מתוך 28

הגלאים, המופיעים בתרשימים, עובדים בשיטת QSD, שכבר הזכרנו אותה, ומכאן שם המקלט. האם אותות ה-IQ יתנו לנו את הרגישות והברירות של מקלטי רדיו קונבנציונליים? את זה נראה בהמשך.

* * * * *

עידן ה-SDR הגיע

ה-IQ של ה-SDR

ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

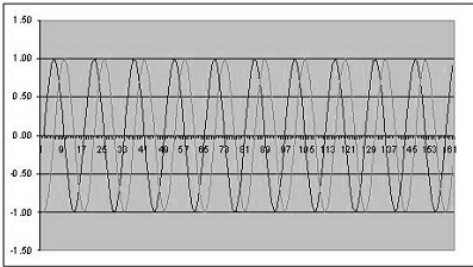
מבוסס על פרסומי ARRL, RSGB, ויקיפדיה ומקורות נוספים באינטרנט.

(מאמר שני בסדרה)

בפרק הקודם ראינו, אומנם רק באופן כללי, כיצד יוצרים את אותות ה-IQ ועכשיו יש צורך להבין גם מה הם נותנים לנו. למרות שישנם הסברים המתבססים על הוכחות של מתמטיקה גבוהה, תורת הווקטורים ומספרים מורכבים הרי שהחלטתי להתבסס דווקא על מאמר שנכתב ע"י Steve Ireland VK6VZ ושפורסם ב-RadCom של ינואר 2007. המאמר מתבסס על הסבר פשוט שניתן לאמת אותו בבדיקה מעשית.

קליטת CW ו-SSB

קליטת שידורי CW ו-SSB היא הדוגמה הפשוטה ביותר להוכחת הפעולה של המערכת.

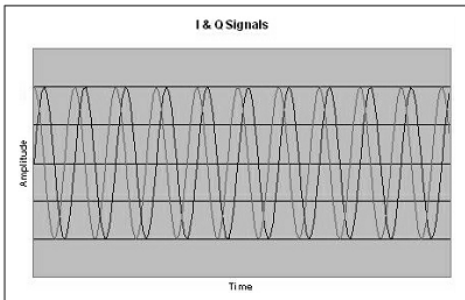


הבה וננתח זאת בעזרת דוגמה "אמיתית". נניח שיש לנו את CW בתדר 14.101 מ"ה וברצוננו לשמוע אותו בתדר של 1 ק"ה. לצורך זה נכוון את המתנד המקומי לתדר של 14.100 מ"ה והתוצאה תהיה:

$$14.101 \text{ MHz} - 14.100 \text{ MHz} = 1 \text{ KHz}$$

אם נסתכל באיור 1, נראה את האותות של IQ עבור האות הרצוי כאשר I הוא הקו הכהה וה-Q, הקו האפור, מפגר אחריו ב-90 מעלות.

איור 1 – אותות IQ של האות הרצוי



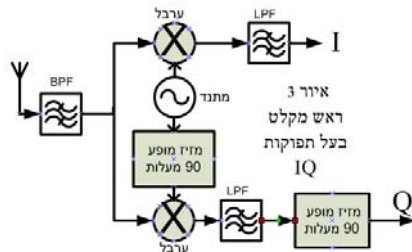
יחד עם זאת, אם יהיה אות נוסף, לא רצוי, של 13.399 מ"ה הרי גם הוא יופיע בתדר של 1 ק"ה:

$$14.100 \text{ MHz} - 13.999 \text{ MHz} = 1 \text{ KHz}$$

באיור 2 נראה את אותות IQ עבור האות שאיננו מעוניינים בו. שימו לב שאות ה-Q (הקו הבהיר יותר) הופך את הקוטביות שלו ב-180 מעלות

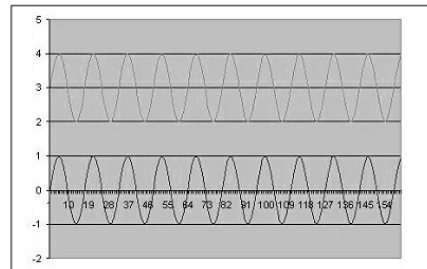
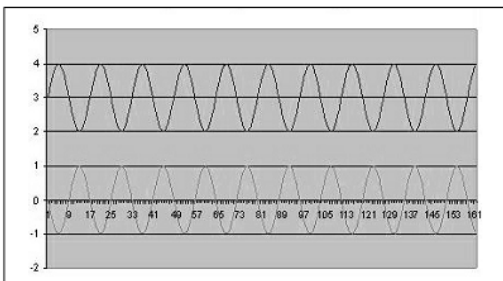
איור 2 – אותות IQ של האות הלא רצוי

נניח ששינינו את מעגל ראש המקלט ע"י הוספת מזיז מופע, של 90^0 , בערוץ ה-Q. ראה איור 3 להלן:



נראה עכשיו מה קורה עם האותות של ה-IQ.

אותות ה-IQ, של האות הרצוי, יהיו באותו מופע כמתואר באיור 4. אותות ה-IQ, של האות הלא רצוי, יהיו



במופע הפוך (180°) כמתואר באיור 5.

איור 5 – אותות ה-IQ של האות הלא רצוי

איור 4 – אותות ה-IQ של האות הרצוי

אם נסכם את אותות ה-IQ, הרי שהם יחזרו, עבור האות הרצוי, ויבוטלו עבור האות הלא רצוי. אי לכך קיבלנו את מה שרצינו.

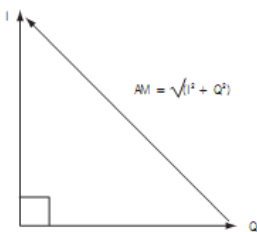
מה שנכון לאות בתדר אחד (CW) נכון גם לתחום תדרי שמע (SSB). כאשר מחברים את אותות ה-IQ מקבלים את ה-USB (פס צד עליון) ומדכאים את ה-LSB (פס צד תחתון). אם נחסיר את IQ אחד מהשני, נקבל את ה-LSB ונדכא את ה-USB.

יש לזכור כי מזיז מופע של 90° , בתחום הרחב של תדרי השמע, הוא קשה להגשמה בחומרה. לעומת זה, קל יחסית לבצע זאת בעזרת תוכנה ולכן לא תמצאו את מזיז המופע הזה במעגלי ראש המקלט השונים.

למעשה אפשר לקלוט CW ו-SSB גם במקלט המתואר באיור 2 של המאמר הקודם, אז למה לנו להיכנס בכלל לכול הסיבוך של ה-IQ? כי בעזרת מקלטי IQ אפשר להשתמש, בנוסף ל-CW ו-SSB, גם ל-AM, FM, PM וצורות אפנון אחרות, שיכולות לעלות בדמיונו בעתיד. בזה נוכח בהמשך.

קליטת AM

לצורך הסבר נחזור למשפט פיתגורס הזכור לנו עוד משנות לימודנו הראשונות (הריבוע של המיתר, במשולש ישר זווית, שווה לסכום הריבועים של שתי הצלעות הניצבות). אות ה-AM יהיה הסיכום של I ו-Q כמתואר באיור 6



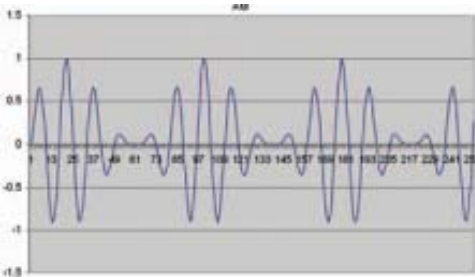
הבא ובהתאם לנוסחה: $AM = \sqrt{I^2 + Q^2}$

כול אחד מהוקטורים, של I ו-Q, ישתנה באמפליטודה של אפנון האות הנקלט. לפיכך, המיתר ישתנה עם עומק האפנון. המתמטיקה יחסית פשוטה אבל, לצורך ההבנה, היא אינה מעניינת.

איור 6 – סיכום I ו-Q

אפשר גם לשאול: אם I ו-Q מאופננים כול אחד בנפרד, למה אי אפשר לגלות את האפנון של אחד מהם, בלבד, ולהסתפק בכך? כנראה יש סיבה טובה להמשיך עם ה-IQ שלנו.

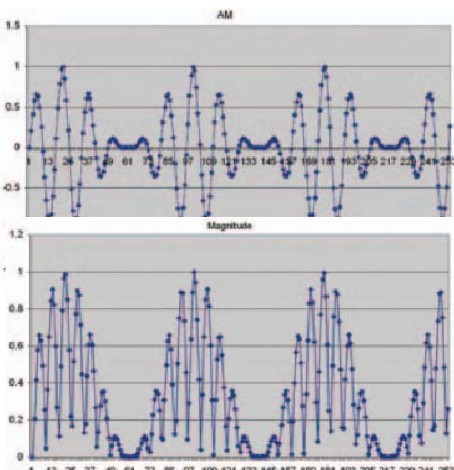
בשלב זה נדבר על מרכיב ה-I בלבד. נניח שהמרנו, את אות הכניסה (בעל אפנון של 1 ק"ה) לתדר שהוא בתחום העבודה של כרטיס הקול (בין 10 הרץ ל-20 ק"ה) ונניח שההפרש בין תדר הכניסה ותדר המתנד המקומי (Local Oscillator) יהיה 10 ק"ה, הרי שנקבל את תדר זה כשהוא מאופנן בתדר של 1 ק"ה. את מה שנקבל נראה באיור 7 המזכיר לנו, בעצם, את מה שאנחנו רגילים לראות בתדר ביניים (IF), גל נושא של 10 ק"ה ומעטפת של 1 ק"ה.



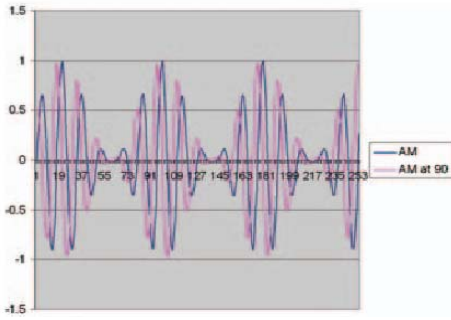
איור 7 – צורת האותות של ה-I וה-Q. צורות זהות המופיעות בהפרש מופע

בכרטיס הקול, שלמעשה הוא ממיר אנלוגי לדיגיטלי, דוגמים את אותות ה-IQ כפי שמתואר באיור 8.

איור 8 – דגימות I ו-Q



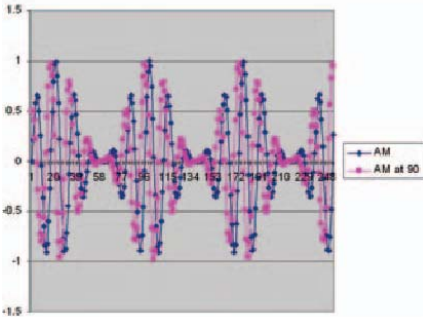
איור 9 – האמפליטודה של האות הנקלט



את אותות ה-IQ מזינים לכרטיס הקול המשמש כממיר A/D שבתפוקתו אנו רואים רכיב חזק, של תדר הביניים, שלכאורה יכולנו לסלק אותו בעזרת מסננת LPF לפני ההעברה לכרטיס הקול אבל בואו ונראה מה קורה הלאה כאשר נעביר את האותות לכרטיס הקול.

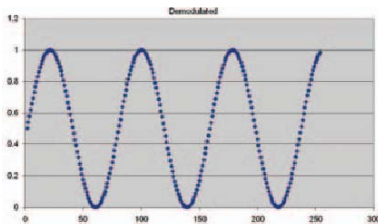
נחזור ונראה שוב את האות המאופנן של הגל הנושא, בכניסה לכרטיס הקול, אלא שהפעם שני המרכיבים, ה-IQ, המוצגים בהפרש מופע של 90° . כמתואר באיור 10.

איור 10 – מרכיבי IQ של AM



גם הפעם נדגום, את אותות ה-IQ, בעזרת כרטיס הקול. נקודות הדגימה מתוארות באיור 11 כאשר, לצורך נוחיות ההצגה בלבד, הן יושבות על אותות ה-IQ.

איור 11 - נקודות הדגימה של אותות ה-IQ



כאשר נחבר את ערכי נקודות הדגימה, בהתאם למשפט פיטגורס, נקבל את האות המתואר באיור 12. ובו רואים את תדר האפנון היפה שרצינו בו.

איור 12. – האות הרצוי

וודאי שמתם לב שתדר הביניים (IF) נעלם כליל. ע"י שימוש באותות I ו-Q קיבלנו, ישירות, את תדר האפנון ללא צורך בסינון תדר הביניים שהוא היה הגל הנושא.

הדבר מפתיע, עוד יותר, כאשר מורידים את תדר הביניים (IF) לתדר נמוך יותר, אפילו של 1 ק"ה. תדר זה נמצא כבר בתוך תחום השמע ולא ניתן לסנן אותו משם. טכניקת ה-IQ תעשה זאת בקלות ואפילו אם תדר הביניים יהיה שווה גם לאפס. למקלטים, עם תדר ביניים שווה לאפס, נחזור בפרק המדבר על חומרת ראשי מקלט.

קליטת FM ו-PM

על המחשב, לצורך קליטת אפנון מופע (PM), לבצע את חישוב הנוסחה של: $PM = \tan^{-1}(Q/I)$ מה יותר פשוט מזה?

קליטת אפנון תדר (FM) דורשת חישוב קצת יותר מסובך אבל המחשב יתמודד בקלות גם עם זה:

$$FM = (Q_n \cdot I_{n-1} - I_n \cdot Q_{n-1}) / (I_n \cdot I_{n-1} + Q_n \cdot Q_{n-1})$$

כאשר n שווה לדגימה הנוכחית ו-n-1 שווה לדגימה הקודמת.

אם הדגימה נעשית בקצב גבוה, ערכי IQ קרובים וניתן להשתמש גם בנוסחה:

$$FM = (Q_n \cdot I_{n-1} - I_n \cdot Q_{n-1}) / (I_n^2 + Q_n^2)$$

השפעת חוסר האיזון באותות ה-IQ

עמוד 10 מתוך 28

כפי שראינו לעיל, עיבוד אותו ה-IQ הינו עקרוני למקלטי SDR אבל הוא תלוי הרבה גם בדיוקם. הגבר לא זהה, של הערוצים, או הפרש מופע ביניהם, עלול לפגוע ברגישות הקליטה, בתחום הדינמי וגם להכניס רעש. מה שיותר גרוע, חוסר האיזון עלול לפגוע קשה בסילוק אותות הבבואה שאנחנו חפצים בסילוקם הגמור.

לדוגמה: הפרשים של 0.1 ד"ב, באותו ה-IQ, יאפשרו דחית בבואה של 40 ד"ב בלבד. אם רוצים דחית בבואה של 60 ד"ב, נדרש דיוק של 0.1 מעלה במופע ו-0.01 ד"ב בהגבר.

ההבדלים, בהגבר ובמופע, יכולים לנבוע, בין השאר, מרכיבי ראש המקלט ובמיוחד מאי יציבות תדר המתנד המקומי. גם כרטיסי הקול תורמים לאי האיזון ולכן בחירתם צריכה לקחת זאת בחשבון.

למזלנו, ניתן לקזז את ההבדלים בעזרת התוכנה, הן באופן ידני או באופן אוטומטי ועל כך בהמשך.

(המשך בחוברת הבאה)

* * * * *

עידן ה-SDR הגיע

מחשוב אותות אנלוגיים

ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

מבוסס על פרסומי ARRL, RSGB, ויקיפדיה ומקורות נוספים באינטרנט.

(מאמר שלישי בסדרה)

דגימות

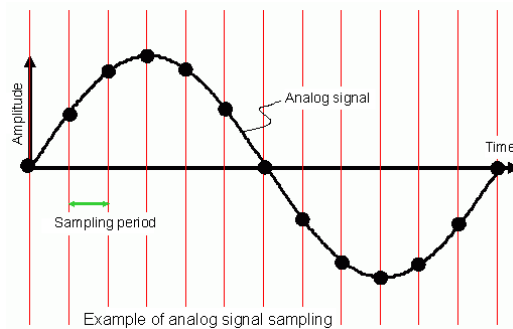
כרטיסי הקול, המשמשים כמתאם בין המחשב הדיגיטלי לעולם החיצוני האנלוגי, הינם מרכיב בסיסי במערכת ה-SDR המבוססת על גלאי QSD (Quadrature Sampling Detector). אפשר אפילו להגיד כי בחירת הכרטיס תקבע אם המערכת תעבוד או לא.

כרטיס הקול מהווה מתאם קלט/פלט מאותות אנלוגיים, הנכנסים או יוצאים אל/מאת המחשב, לאותות דיגיטליים שהמחשב מכיר ויוודע לעבד אותם. בשפה פשוטה: הם ממירים אות אנלוגי לאות דיגיטלי (Analog to Digital Converter), ולהיפך (Digital to Analog Converter) ונהוג לסמנם A/D או D/A בהתאם.

ההמרה, מאנלוגי לדיגיטלי ולהיפך, נעשית בעזרת דגימה כאשר יש לה שני פרמטרים עיקריים שהם "גודל המדגם" ו-"קצב המדגם".

"גודל המדגם" מגדיר את מספר הביטים במילה המתארת את המתח הנבדק בנקודה מסוימת של הגל אותו אנו דוגמים. ככול שהמספר גבוה יותר כך גדל הדיוק של המדידה.

"קצב הדגימה" מוגדר כמספר הדגימות לשנייה אחת. באיור הבא ישנה דוגמה של דגימת גל סינוס. ניתן לראות את נקודות הדגימה ואת המרחקים ביניהן.



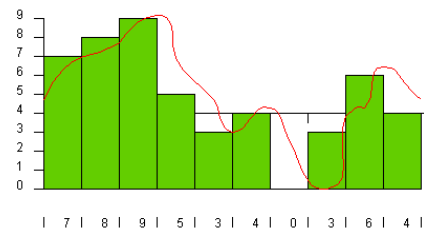
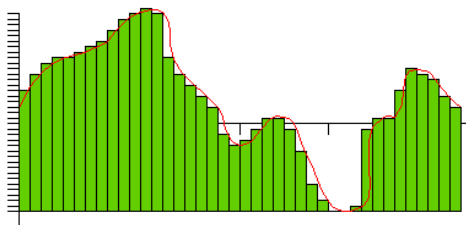
גודל הדגימה

כרטיס הקול דוגם את האות האנלוגי הנכנס והופך אותו למילים דיגיטליות בעלות מספר מסוים של ביטים. מספר הביטים נקרא "גודל הדגימה" (Sample Resolution או Sample Size)

גודל הדגימה קובע את ההבחנה (רזולוציה) בין מדידת מתח אחת למדידה הקרובה לה. מספר נמוך, של גודל הדגימה (מספר הביטים במילה), ייתן לנו דרגות מועטות וכושר הבחנה נמוך ואילו מספר גבוה ייתן לנו מספר רב של דרגות וכושר הבחנה גבוה יותר. ניתן להשוות את גודל הדגימה לסרגל מדידה אנלוגי בעל שנתות של מטר, דצימטר, ס"מ ומ"מ. ברור ששנתות של מ"מ תתנה לנו כושר הבחנה גבוה יותר.

כמדידה דיגיטלית, ככול שמספר הביטים בדגימה יהיה גדול יותר, הצעדים יהיו קטנים יותר והתמונה תהיה מדויקת יותר.

תאור דגימה גסה, של 10 ביטים, מתואר בצד ימין באיור, בצד שמאל, רואים דגימה מדויקת יותר כתוצאה משינוי בגודל הדגימה וקצב הדגימה (שעליו נדבר מאוחר יותר), אפילו שגודל הדגימה הינו 40 בלבד, רק פי 4 מהדגימה הקודמת.



כול דגימת אות אנלוגי נשמרת, בזיכרון המחשב, כמילה דיגיטלית. ככול שהמילה תהיה גדולה יותר כך תהיה ההבחנה גדולה יותר וכמו כן הנאמנות למקור. בכרטיסי הקול המסחריים הנפוצים משתמשים במילים של 16 ביטים. בכרטיסי הקול המסחריים, הטובים יותר, ובכול הכרטיסים המקצועיים משתמשים במילים של 24 ביטים. ישנם הבדלים משמעותיים בין ביצועי הכרטיסים הזולים של 16 ביטים ובין הכרטיסים היקרים יותר של ה-24 ביטים. נכון שכרטיסי ה-16 ביטים מתאימים לרוב השימושים אבל ה-SDR-QSD ושימושים מתוחכמים אחרים עשויים להרוויח הרבה משימוש בכרטיסי ה-24 ביטים.

התחום הדינמי של האותות מוגדר כתחום שבין האות המזערי והאות המירבי שניתן לטפל בהם ביחד. דוגמאות: ההבדל בין פיאניסימו ופורטיסימו במוסיקה או היחס בין האות המזערי, בכניסה למקלט רדיו, ובין האות המירבי שעדיין לא יכניס אותו לרוויה. הבחנה גבוהה תיתן ביטוי גם לאותות הנמוכים וע"י כך תרחיב את התחום הדינמי.

ההבדל, בין האות האנלוגי המקורי ובין הנתונים שנשמרו בצורה דיגיטלית, מתפרש כעיוותים ורעש. אי לכך, נשאף שמספר הביטים, במילה הדיגיטלית של המדגם, יהיה מספיק גדול כדי למנוע את אותם העיוותים והרעש. יחד עם זאת, אפילו שימוש בדגימות גדולות וקצב דגימה גבוה ישאיר תמיד הבדלים בין האות המקורי והדגימה שלו. הבדל זה מייצר רעש בלתי נמנע.

מכיוון שניתן לחשב את אי הדיוק בין האות המקורי והדגימה, הרי שאפשר לחשב את יחס האות לרעש המירבי האידיאלי (S/N) הנגרם בגלל הכרטיס עצמו מבלי להתייחס אפילו לרעש החיצוני שרק יוסיף ויגרע מהביצועים. אז כמה ביטים יספקו אותנו? מילה של 8 ביטים, כמו שהיה מקובל לפני זמן לא רב, 16 ביטים כפי שמקובל היום או 24 ביטים כמקובל היום בכרטיסי קול מקצועיים?

כושר ההבחנה (R) הוא 2 בחזקת מספר הביטים כמתואר בנוסחה $R = 2^n$ כאשר n הוא מספר הביטים. חישוב קטן ייתן לנו את התוצאה המחושבת ואת יחס האות לרעש המירבי שניתן להשיג בדגימות השונות:

8 bit –	R = 255	Max S/N 49 dB
16 bit –	R = 65,535	Max S/N 98 dB
24 bit –	R = 16,777,216	Max S/N >120 dB

אם הבחנה של 24 ביט משיגה תוצאות הרבה יותר טובות, אז למה לא משתמשים בה כברירת מחדל? את הסיבה לכך נראה, מאוחר יותר כאשר נדון בקצב הדגימה.

קצב דגימה

ההפיכה, מאנלוגי לדיגיטלי, צריכה להיעשות בעזרת דגימה בקצב המתאים לתדר המירבי בו אנחנו מעוניינים אבל איך קובעים אותו?

הרי נייקוויסט (Harry Nyquist, 7.2.1889-4.4.1976), היה מדען שוודי שעבד בארה"ב בנושא תיאורית המידע (Information Theory) והיה אחד ממניחי היסודות לתורה זו.

על פי משפט הדגימה של נייקוויסט-שאנון, כאשר דוגמים אות אנלוגי בתדר דגימה מסוים f, האות הדוגם ייצג נאמנה את האות הנדגם ויאפשר שיחזור מדויק שלו, עבור תדרים שהם לכל היותר f/2. נייקוויסט היה הבכיר בצוות שכלל גם את שאנון, ולכן f נקרא בשם "תדר נייקוויסט".

במילים אחרות: תדר השעון, הקוצב את הדגימות והמוגדר כ-"קצב דגימה", צריך להיות, כפי ש-נייקוויסט קבע, כפול מהתדר הגבוה ביותר בספקטרום התדרים שאנחנו מעוניינים בו.

אם האות הנדגם מכיל תדרים גבוהים מתדר נייקוויסט, תתרחשה טעויות דגימה. בתוצאות הדגימה יופיע מידע שהיה במקור בתדרים גבוהים אולם הפעם הוא יופיע דווקא בתדרים נמוכים. תופעה זו נקראת "התחזות" או "קיפול תדרים" (Aliasing).

אפשר, לכאורה, להשתמש במסנן חד לסינון התדרים הגבוהים מדי (גדולים מ-2f). לצורך זה נדרש מסנן אידיאלי אשר איננו ניתן למימוש מעשי. אי לכך, נהוג לדגום אותות רצויים בקצב גבוה מהנדרש על פי תדר נייקוויסט. אפילו כך, תדרים גבוהים אלה עדיין יכולים לחמוק להמשך התהליך ויפיעו כרעש ועיוותים.

כפי שכבר הוזכר, קצב הדגימה קובע את רוחב פס התדרים שנוכל לקלוט אותו או לשדר בו. בראשי המקלט הפשוטים המתנד המקומי הוא גבישי ולכן הוא בתדר קבוע. לא נראה לי ש-44 ק"ה הוא רוחב פס מתקבל על הדעת וצריך לחפש פתרונות להרחבתו.

הפתרון הפשוט הוא לחפש כרטיסי קול בעלי קצב דגימה גבוה. כפי שכבר הוזכר, יש מי שדאג לנו והכוונה ל-"אניני השמע" שהם שוק גדול לכרטיסי קול מקצועיים, בעלי קצב דגימה של 96 ק"ה ואפילו 192 ק"ה, ועם רוחבי פס תדרים כאלה אפשר להתחיל לחיות.

איך נבחרו תדרי הדגימה?

מסיבות היסטוריות, הקשורות כמובן לעסקי נדל"ן, במחשבים הראשונים השתמשו בקצב דגימה של 8 ק"ה שהספיק לתדרי שמע באיכות טלפונית של עד כ-3 ק"ה. במהלך הזמן וירידת מחירי הנדל"ן, העלו את קצב הדגימה ל-16 ק"ה המתאים לאיכות של שידורי AM שהם בתחום תדרים עד כ-8 ק"ה. ההמשך היה 32 ק"ה לשידורי FM, תחום תדרים עד כ-15 ק"ה, והיה צריך להיות 48 ק"ה עבור מדיות CD למוסיקה.

שימוש במכפלות של תדרי דגימה, כגון מכפלות של 8 ק"ה, מקילה מאוד על המרה דיגיטלית, של קבצי אותות שנדגמו בקצב שונה מאשר קצב השחזור, בתנאי שהם מכפלות של 8. סביר היה להניח שאכן השלב הבא יהיה באמת 48 ק"ה אבל לא כך היה.

כניסה לעידן ה-CD תדר הדגימה הועלה למה שנקבע היום לקצב ברירת המחדל, 44.1 ק"ה, המתאים כמובן לרוחב סרט עד 20 ק"ה. למה זנחו את השיטה הקודמת ועברו לשיטה חדשה? סיפור מעניין המופיע בסוף מאמר זה.

כאשר הוכנסו לשימוש כונני ה-CD למחשבים, היה טבעי שכרטיסי הקול יותאמו לקצב הדגימה שלהם, כלומר 44.1 ק"ה.

השימוש ב-44.1 ק"ה אינו חסכוני מבחינה נפח אחסון ומכיוון שמתבקשת גם המרה לקצבי דגימה נמוכים, המוכנים להסתפק בנפח אחסון קטן יותר, היה צורך ליצור חלוקות של 44.1 וכך נולדו קצבי דגימה חדשים של 22.05 ק"ה ו-11.025 ק"ה.

הסדרה הקודמת, של 8, 16, 24, 32, 48, 96 ו-192 ק"ה, ממשיכה להתקיים כאשר קצבי הדגימה הגבוהים משמשים בעיקר להקלטות קול מקצועיות.

למרות שבני האדם אינם שומעים תדרים מעל 20 ק"ה, אניני השמע המקצועיים החליטו להעלות את קצב הדגימה ל-96 ק"ה ועל כך אנחנו (משתמשי ה-SDR) חייבים להם תודה. אבל הם לא הסתפקו בכך והעלו את קצב הדגימה אפילו ל-192 ק"ה ועל כך תודתנו הכפולה. האמת היא שישנה גם סיבה פשוטה יותר, אתם זוכרים את ריבוי הרמקולים שהוזכרו בהתחלה? חיבור 7.1 דורש גודל דגימה וקצב דגימה גבוהים.

אבל למה היה צורך לעלות ל-24? כפי שכבר ציינתי לעיל, הגדלת הדגימה משפיעה על התחום הדינמי של האות והקטנת העיוותים והרעש. אי לכך, אותם אניני השמע דאגו שכרטיסי הקול, בעלי קצב דגימה מעל 96 ק"ה, יהיו גם בעלי גודל דגימה של 24 ביטים ועל כך תודתנו הכפולה והמוכפלת.

נכון שהעלאת קצב הדגימה משפיעה חזק על נפח האחסון הנדרש אבל יש לזכור שמחירי הנדל"ן, הכוונה לנפחי האחסון, יורדים בהתמדה. בסכום ששילמנו רק לפני מספר שנים, עבור "זיכרון על מפתח" של 256 ק"ב, אנחנו קונים היום את אותו אביזר אבל עם זיכרון של 4 ג"ב. אי לכך, המגמה היום היא לשפר גם את גודל המדגם וכדאי אפילו, לקראת רכישת מחשב חדש, להתחיל לחפש לוחות-אם כאשר כרטיס הקול המובנה בהם יהיה כבר בן 24 ביטים.

אגב - קצב הדגימה, בנוסף להיותו יציב, צריך להיות גם מדויק. אם דגמנו תדר שמע בקצב דגימה מסוים ונשמיע אותו בקצב דגימה שונה אפילו במקצת, תהיה הזזת תדר מורגשת. בעבר התדר נקבע ע"י מעגל RC ואילו היום ניתן למצוא מתנדי גביש הן בכרטיסים מסחריים והן בכרטיסים מקצועיים.

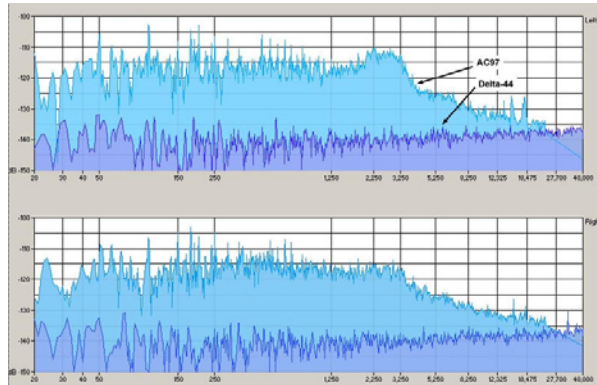
פרמטרים נוספים

כדי להשיג את הליניאריות המרבית והרעש המזערי, המשפיעים ישירות על האפשרות לקליטת אותות חלשים, כול הדגימות צריכות להתבצע בתנאים זהים ויציבים וכמובן צריכה להיות זהות מלאה בהגבר ושינויי מופע בשני ערוצי ה-IQ.

השוואה איכותית

עמוד 14 מתוך 28

כפי שתואר כבר למעלה, יש הבדלים משמעותיים בין כרטיסים מסחריים (44.1/16), כולל אלה שעל לוח האם, ובין כרטיסים מקצועיים (192/24). הכרטיס המייצג, של קבוצת 44.1/16, הוא ה-Realtek EC97 היושב על לוח האם. כרטיס Delta 44, השייך לקבוצת 96/24, מייצג את הצד העליון של קבוצתו. כאשר משווים ביניהם, בפרמטר של רעש, מקבלים את התמונה, המופיעה למטה, והמראה את ההבדלים ביניהם.



המסקנה המתבקשת ברורה...

(המשך בגיליון הבא)

* * * * *

למה דווקא 44.1 ק"ה?

כול פרמטר, שאיננו עגול בערכו המספרי, יכול להיחשב כ-"מספר מדויק" שנקבע על בסיס מדעי. לפעמים זה נכון אבל ישנם גם מקרים בהם המספר "המדויק" נוצר במקרה בלבד. דוגמה לכך הוא רוחב מסילות הברזל שנקבע לפי רוחב ישבנם של שני סוסים רומאיים (מי שלא מכיר את הסיפור שישאל את חבריו...).

המעבר, מקלטות קול (Tape) ל-CD, הווה פריצת דרך באיכות ההקלטה. בעזרת ה-CD כבר ניתן לבצע הקלטה איכותית עד קצה תחום השמיעה של האדם שהוא 20 ק"ה. לצורך זה נדרש קצב דגימה של לפחות 40 ק"ה (זוכרים את "מספר ניקויסט"?).

ל-CD יש, אפילו עדיין היום, קיבול אחסון גדול במחיר זול. כשה-CD הפך למוצר נפוץ, המחשבים הביתיים היו רק בחיתוליהם. אפילו למחשבי Mini Frame היו כוננים קשיחים עם קיבול "מצחיק". בשנת 1990 עבדתי במפעל בו השתמשו עדיין, עבור Mini Frame, כוננים קשיחים של 780 מ"ב (על ג"ב אפילו לא דברו) ובכית היה לי מחשב עם כונן קשיח של 10 מ"ב בלבד. אי לכך, לא היו כלים (מדיה) לשמירת והעברת האינפורמציה הדיגיטלית של הקלטות הקול.

אומרים ש-"הצורך הוא אבי ההמצאה" ואכן נמצא פתרון שהוא שימוש במכשירי הקלטת וידאו (VCR) שהיו כבר זמינים בשוק. לקלטות הוידאו ישנה קיבולת אחסון גדולה מאוד ואם תוכן השורות ישמשו לשמירת ה-"אחדים" וה-"אפסים" של קבצי ההקלטה, הרי שהבעיה פתורה.

בכול זאת נשארה בעיה, ה-CD יועד להיות בתקן בינלאומי ואילו מכשירי ה-VCR היו בשני תקנים, NTSC ב-ארה"ב ו-PAL באירופה. ה-NTSC עבד בשיטת 525/30 וה-PAL עבד בשיטת 625/25. קצב הדגימה המתבקש היה 48 ק"ה אבל זה לא מסתדר בצידוד ההקלטה של שני התקנים. אז מה עושים?

כול מי שקצת עסק בטלוויזיה יודע שלמעשה לא כול השורות מוצגות, חלק מהשורות משמש לסנכרון ואינו מופיע על המסך. ב-NTSC מוצגות רק 490 שורות (מתוך 525 של מסגרת מלאה) וב-PAL מוצגות רק 588 שורות (מתוך 625 של מסגרת מלאה). אם נכפול את מספר השורות הפעילות ב-fps (מספר המסגרות בשנייה, 30 ל-NTSC ו-25 ל-PAL) נקבל מספר זהה שהוא:

$$588 \times 25 \text{fps} = 490 \times 30 \text{fps} = 14.700 \text{ KHz}$$

קצב דגימה 14.7 ק"ה הינו נמוך מדי ולכן נדגום כול שורה 3 פעמים, כדי לקבל קצב דגימה גבוה מ-40 ק"ה, וכך התקבל המספר "המדעי" של 44.1 ק"ה.

נכון שהיום משתמשים רק ב-CD/DVD לשמירת מידע דיגיטלי של אותות שמע ווידאו והשימוש ב-VCR הפך לקוריוז היסטורי, אבל ה-44.1 ק"ה נשאר, ב-"כפר הגלובלי" שלנו, כתקן מקובל גם לקצב הדגימה של כרטיסי הקול.

* * * * *

עידן ה-SDR הגיע כרטיסי קול לשימוש תקשורת רדיו ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

מבוסס על פרסומי ARRL, RSGB, ויקיפדיה ומקורות נוספים באינטרנט.

(מאמר רביעי בסדרה)

תכונות של כרטיסי הקול.

כרטיסי הקול, המשמשים כמתאם בין המחשב הדיגיטלי לעולם החיצוני האנלוגי, הינם מרכיב בסיסי במערכת ה-QSD-SDR. אפשר אפילו להגיד כי בחירת הכרטיס תקבע אם המערכת תעבוד או לא.

כמעט בכול מחשב יש היום כרטיס באיכות מסחרית לשימושי קול (Audio) הן לשמיעה והן להקלטה. לכרטיסים ישנם, בדרך כלל, ערוץ סטריאו אחד לשמיעה וערוץ סטריאו אחד להקלטה כאשר בכול ערוץ ישנן יציאות/כניסות המכילות קוים של "ימין" ו-"שמאל" (L+R). בנוסף, ישנה גם כניסת מונו למיקרופון כאשר קו ה-L (טבעת Ring), של מחבר המיקרופון, משמש להזנת מתח. בעוד שאת ערוצי השמיעה ניתן לבחור ולהפעיל במקביל, בדרך כלל ניתן לברור ולבחור ערוץ הקלטה אחד בלבד.

לתכונות התפקודיות, של כרטיסי הקול, שייכים בעיקר גודל הדגימה וקצב הדגימה. לתכונות הזיודיות שייכים המבנה המכאני וצורת החיבור למחשב, כמות הכניסות והיציאות, סוג המחברים וכמובן קלות הגישה אליהם.

מאוחר יותר גם נראה שיש קשרי גומלין בין התכונות, התפקודיות והזיודיות, מאחר ורוב הכרטיסים, בעלי התכונות המשופרות יותר באים בזיוד שונה ממה שאנחנו רגילים לו.

כרטיסי הקול מופעלים בעזרת Drivers הכוללים גם תוכנת הפעלה מזערית המאפשרת את בחירת ערוצי השמע ושליטה על עוצמת הקול של כול אחד מהם. לכרטיסים המשופרים יותר, המקצועיים, ישנן אפילו תוכנות תמיכה כבדות.

כרטיסי הקול עברו, במהלך השנים, שינויים רבים הן באיכותם והן בזיודם.

במחשבים החדשים ישנן גם יציאות של 2.1, 5.1 ו-7.1. הכוונה להשמעה סביבתית (Surround) כאשר הספרה 1 מציינת את מספר המקולי הבס והמספרים אחרים, השונים מ-1, מצביעים על מספר הרמקולים הסביבתיים. ההשמעה הסביבתית אינה ישימה לנושא תקשורת הרדיו אבל, למרות זאת, דווקא לכרטיסים אלה ישנן תכונות משופרות שעוזרות בעיבוד אותות ה-IQ.

כרטיס הקול מהווה מתאם קלט/פלט מאותות אנלוגיים, הנכנסים או יוצאים אל/מאת המחשב, לאותות דיגיטליים שהמחשב מכיר ויודע לעבד אותם. בשפה פשוטה: הם ממירים אות אנלוגי לאות דיגיטלי (Analog to Digital Converter), ולהיפך (Digital to Analog Converter) ונהוג לסמנם A/D או D/A בהתאם.

ההמרה, מאנלוגי לדיגיטלי ולהיפך, נעשית בעזרת דגימה כאשר יש לה שני פרמטרים שהם "גודל המדגם" ו-"קצב המדגם".

"גודל המדגם" מגדיר את מספר הביטים במילה המתארת את המתח הנבדק בנקודה מסוימת של הגל אותו אנו דוגמים. ככול שהמספר גבוה יותר כך גדל הדיוק של המדידה. היום משתמשים במילים של 16 ביט, עבור כרטיסי קול ברמה מסחרית, ומילים של 24 ביט לכרטיסים מקצועיים יותר.

"קצב הדגימה" מוגדר כמספר הדגימות לשנייה אחת. "קצב הדגימה" המקובל היום, הוא 44.1 ק"ה אבל ישנם כבר כרטיסי קול מסחריים משופרים בעלי קצב דגימה של 96 ק"ה וכרטיסים מקצועיים בהם קצבי הדגימה הוא 192 ק"ה.

"גודל מדגם" ו-"קצב דגימה" גבוהים משרתים שני מטרת: אפשרות לדגום תדרים גבוהים יותר ואפשרות להציג תמונה נאמנה יותר של האותות הנקלטים, כלומר פחות עיוותים ורעשים לא רצויים.

הסבר מפורט, על "גודל המדגם" ועל "קצב הדגימה" ניתן כבר בפרק הקודם בסדרה.

בהמשך אתייחס לכרטיסים במספר, כדוגמת 44/16 או 192/24, הכולל את קצב הדגימה וגודל המדגם.

מהאמור לעיל ניתן להבין שלכרטיסי הקול ישנן איכויות שונות ("מסחרי" ו-"מקצועי") המשפיעות, כמובן, גם על המחיר. למרות שאיכות הכרטיס המובנה הפשוט ביותר (זה שעל לוח האם) עונה היום כמעט לכול הדרישות של חובבי המוסיקה, עדיין יש כאלה שזה לא מספיק להם. מסתבר שאניני שמע, "משוגעים למוסיקה", דורשים ביצועים טובים יותר, חיבור מספר מקורות (מיקרופונים/כלי נגינה) במקביל ושליטה על כול אחד מהם בנפרד

(Mixer), ריבוי רמקולים, תוכנות תמיכה טובות יותר (Drivers, Mixers) ונוחיות גישה למחברים. למזלנו הרב הביצועים, של הכרטיסים המשופרים והמקצועיים, וזמינותם מהווים תמיכה רצינית לקידום מערכות ה-SDR QSD העובדות עם אותות IQ.

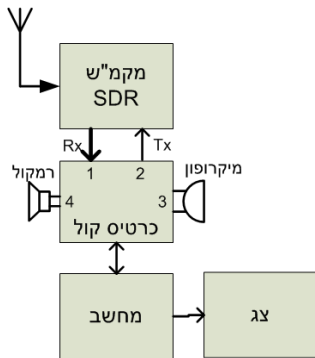
תכונות נוספות, המושפעות בעיקר מאיכות הכרטיסים, הן יחס האות לרעש והתחום הדינמי. שניהם משתפרים ככול שגודל המדגם וקצב הדגימה גבוהים יותר.

ישנם הרבה סוגים של כרטיסים וכדי לדעת באיזה כרטיס לבחור צריך להכיר את תכונותיהם. נושא זה נדון לאחרונה בהרחבה באתרי האינטרנט וברוב התקופונים של חובבי הרדיו בעולם, עכשיו הגיע גם תור התקופון שלנו.

שימושים במקלטי SDR-QSD

התאמת כרטיסי הקול מחייבת סקירת כול התכונות שלהם תוך בדיקת השפעתם על היישומים של ה-SDR-QSD ונתחיל בדבר הפשוט ביותר: כמה ערוצים נדרשים למערכת, הן למקלט בלבד והן ל-מקמ"ש?

בכול ערוץ ישנם שני מוליכים המיועדים להעביר את אותות ה-IQ מראש המקלט לכרטיס הקול או, כפי שנראה בהמשך המאמרים, מכרטיס הקול למשדר. בנוסף, יידרש ערוץ נוסף לרמקול/אוזניות, עבור המקלט וערוץ מיקרופון נוסף עבור ה-מקמ"ש.



כפי שמתואר באיור משמאל, לכרטיס הקול נדרשים עד ארבעה ערוצים (1, 2, 3, 4).

ערוץ 1 משמש להעברת האותות מראש המקלט, דרך כרטיס הקול, אל המחשב. אותות אלה מכילים מידע המורכב מתחום רחב מאוד של תדרים וכול החמצה, אפילו של שינוי זעיר באמפליטודה של צורת הגל הנדגם, עלולה לגרום לעיוותים ורעש.

אי לכך נדרשים, לערוץ זה, תכונות משופרות ורצוי אפילו כאלה של כרטיסי קול ברמה מקצועית (192/24) או, לפחות, רמה מסחרית מעולה (96/24). יחד עם זאת, בשעת הדחק אפשר לנסות לעבוד גם עם כרטיס מסחרי רגיל (44/16), במקרה זה ההצלחה אינה מובטחת.

שאר שלושת הערוצים משמשים את ערוץ השידור (2), את המיקרופון (3) ואת הרמקול (4). שלושתם מטפלים באותות בתחום השמע ולכן אפשר להשתמש, עבורם, בכרטיסי 44/16.

יש לזכור שלמרות שאותות המיקרופון והרמקול מחוברים ישירות לכרטיס הקול, הם תמיד עוברים עיבוד נוסף במחשב.

אם מדובר רק על מקלט לתקשורת דיגיטלית, מספיק ערוץ 1 בלבד.

אם מדובר על מקמ"ש לתקשורת דיגיטלית, כגון PSK31, אפשר לוותר על המיקרופון והרמקול ומספיקים שני ערוצים (1, 2). כפי שהוזכר לעיל, בשעת הדחק אפשר לנסות עדיין להשתמש, למטרה זו, בכרטיס המובנה במחשב.

אם מדובר על קליטת שמע בלבד, נזדקק רק לשני ערוצים (1, 4).

אם מדובר על מקמ"ש שמע, נזדקק לכול ארבעת הערוצים.

בסיכום - הגענו לארבעה ערוצים אפשריים כאשר, למעשה, לפחות ערוץ 1 חייב להיות באיכות מעולה.

מאמור לעיל רואים שהשימוש ב-SDR-QSD מחייב לפחות שני כרטיסי קול נפרדים בעלי 2 ערוצים כול אחד או, לחילופין, כרטיס קול שיש לו לפחות ארבעה ערוצים. בשתי האפשרויות חייב להיות לפחות ערוץ אחד עם תכונות משופרות של גודל דגימה וקצב דגימה.

לכרטיסי קול מקצועיים יש יתרונות נוספים של מספר מסלולי כניסה ויציאה ומחברים בעלי גישה נוחה ועל כך בהמשך.

כפי שהוזכר מקודם, כרטיסי הקול מופיעים בצורות ובאיכויות שונות ובהמשך נתייחס לסוגי הכרטיסים וצורת הרכבתם/חיבורם למחשב.

כרטיס קול מובנה בלוח האם

הכרטיס הבסיסי, הנפוץ ביותר, הוא זה המורכב ישירות על לוח האם. ברוב המחשבים נמצא את ה- Realtek AC97 של 44.1/16, שני פרמטרים שאפשר להתחיל לעבוד איתם אבל הם בהחלט לא מספקים. יש לשער כי,

בעקבות דרישת הלקוחות, יופיעו בקרוב מחשבים עם כרטיסי קול משופרים כבר על לוח האם. יחד עם זאת יש לזכור שכרטיס AC97 עדיין עושה עבודה מצוינת במיוחד כאשר מדובר בתדרי שמע. מכיוון שנהיה זקוקים במילא לפחות לשני ערוצים (ערוץ שמע וערוץ ראש המקלט) או אפילו ארבעה (2 ערוצים נוספים למיקרופון ולמשדר של ה-SDR-SDR), הייתי משתמש בכרטיס הקיים לערוצי השמע ומוסיף לו כרטיס דו-ערוצי (משופר של 96/24 או אפילו מקצועי של 192/24) בעל ביצועים מתאימים יותר למערכת.

כרטיסי PCI



כרטיסים אלה, המורכבים בחריצי ה-PCI שבתוך המחשב, ניתנים להשגה בכול מגוון רמות האיכות החל מכרטיסים זולים של 44.1/16 וגמור בכרטיסים יקרים של 96/24. המשותף, לרוב כרטיסי ה-PCI, הם המחברים המותקנים על חזית הכרטיס המורכבת בגב המחשב. הכרטיס, שבתמונה משמאל, הוא מדגם Creative Audigy SE.

המייחד כרטיסים אלה והכרטיסים המובנים היא תכונתם לגרום ל- "כאב גב" לכול אלה שצריכים להחליף אמצעי קלט/פלט ומגששים היכן לחבר אותם. נכון שיש מארזים המאפשרים להעביר את החיבורים לחזית המחשב אבל עדיין לא פתרנו את הבעיה במלואה.



הפתרון המתבקש הוא קניה או בניה של לוח חיבורים הכולל מספר יציאות, במקביל, ובורר לבחירת כניסות נפרדות. אני מניח שאפשר לקנות כאלה אבל הבניה כול כך פשוטה שהחלטתי לעשות זאת בעצמי, ראה דוגמה באיור משמאל. בצד ימין שקעי היציאה, המחוברים במקביל, ובצד שמאל שקעי כניסה ניתנים לבחירה.

כאשר מדובר על כרטיסי קול לאיני שמע, 192/24, הסיפור כבר אחר. לרובם ישנה קופסת הרחבה חיצונית המחוברת בכבל ארוך לכרטיס הקול. קופסאות הרחבה אלה מכילות מחברים המותאמים במיוחד לממשק לצידוד נגינה ומגברי שמע להופעות לציבור. אי לכך, לצורך חיבורם למערכות SDR-QSD, נדרשות קופסאות התאמה מיוחדות הניתנות לבניה עצמית (ע"י קנית קיט) או רכישת קופסאות מורכבות.

כפי שכבר הזכרתי מקודם, נדרשים שני ערוצי SDR-QSD בנוסף לערוצי השמע. שימוש במספר כרטיסי קול, במחשב אחד, עלול להיות בעייתי מאחר ולא כול הכרטיסים חיים בשלום אחד עם השני. בכול תוכנת תקשורת יישומית (כגון EchoLink, Skype, GoogleTalk או אפילו תוכנות צפייה בסרטים) ישנה, לכאורה, אפשרות לבחור איזה כרטיס קול ישרת את אותה תוכנה אבל לא תמיד זה מצליח. אם תכנסו ל-גוגל ותקישו 2 Sound Cards in one computer, תקבלו רשימה שתמצאו בה אלפי שאלות ומספר דומה של תשובות (כולל בעברית), דבר המעיד שזה לא כול כך פשוט. כרטיס ה-96/24 שלי אימץ לעצמו את השמע של הסרטים, בהם אני צופה מהמחשב, ולקח לי קצת זמן עד שעשיתי סדר בעניינים.

למזלנו ונוחיותנו דווקא לכרטיסי ה-96/24 וה-192/24, המקצועיים יותר, יש שניים או יותר ערוצים. לכרטיס הקלאסי Delta 44, הנראה בתמונה למטה, יש אפילו 4 ערוצים ואז אפשר לוותר בכלל על כרטיס הקול (המובנה בלוח האם) ולמנוע התנגשויות אפשריות.



כרטיס קול Delta 44

זה המקום לציין בעיתיות מסוימת המלווה את כול כרטיסי הקול המותקנים בתוך המחשב. כול מה שנמצא במארז המחשב מפיק ומקריץ רעשים ובמיוחד ספק הכוח. כאשר עוסקים באותות שהם על סף הרעש הרי שכול רעש נוסף, הנקלט בכרטיס הקול, רק עלול להזיק.

כרטיסי USB



בעבר היינו ממלאים את בטן המחשב עם מספר רב של כרטיסים אבל היום מחברים, כמעט את כול הרכיבים הסביבתיים, בעזרת USB וכרטיסי הקול אינם יוצאים מהכלל. ממדיהם הקטנים של

מקלטי ומשדרי ה-SDR-QSD, ממש קורא לשימוש במחשבים ניידים ואז כרטיסי ה-USB הם הפתרון האידיאלי. הכרטיס, בתמונה משמאל, הוא מדגם Creative Audigy 2 NX שתכונותיו 96/24.

נכון שכרטיס קול כזה יקר יותר מכרטיס PCI אבל הוא גם יותר נוח לשימוש, לפחות מבחינת חיבורי הקלט/פלט.

לשימוש בכרטיסי USB ישנם כמה יתרונות נוספים שהם: ריחוק ממקורות הרעש של המחשב, אפשרות שימוש במחשבים ניידים וחיבור מספר כרטיסי קול ללא התנגשויות הדדיות.

כרטיסי PC

הכוונה לכרטיסי ההרחבה של מחשבים ניידים, שפעם קראו להם PCMCIA. הכרטיסים בגודל של כרטיס אשראי וניתן לחברם ולהוציאם ללא צורך בכיבוי המחשב.



ישנם היום גם כרטיסי PC בעלי ביצועים של 196/24, ראה דוגמה באיור מצד שמאל, המסוגלים אפילו להזין מערכות קול של 7.1 רמקולים. נחמד לבא, עם המחשב הנייד, לאירוע מוזיקלי כשהזמרים והתזמורת ארוזים במחשב וכול מה שצריך לעשות זה רק להתחבר למערכת ההגברה. הכרטיס משמאל הוא Creative Audigy 2 ZS.

אינני פוסל כרטיסים אלה אולם לא הייתי בוחר בהם, עבור SDR-QSD, מאחר וקיימים כרטיסי USB זמינים שניתן להשתמש בהם הן למחשבים ניידים והן למחשבים שולחניים.

אגב – כול הדוגמאות הנ"ל מופיעות להמחשה בלבד ואין להתייחס אליהן כהמלצה בלעדית עבור מערכות SDR-QSD. לפני שבוחרים כרטיסים, במיוחד המשופרים שבהם, יש לסרוק את האינטרנט ולחפש התייחסות לגבי איכותם ושימותם במערכות SDR-QSD.

חלונות ויסטה

לא לכול כרטיסי הקול יש דרייברים עבור ויסטה ואפילו אם יש כאלה, הם יכולים להיות שונים, מ-XP, עבור הכרטיסים השונים. מכיוון שהעתיד יהיה בויסטה, שימו לב שעל הכרטיס, או אריזתו, ישנו הסימון המתאים. אם אין סימון, זה עדיין לא פוסל, את הכרטיס, אבל כדאי לברר זאת.



ולסיכום

אם נמשיך להתייחס למקלט ה-SDR-QSD בלבד, הרי שלצורך פרויקט לימודי אפשר להשתמש גם בכרטיס המסחרי (44.1/16), אפילו אם הוא על לוח האם, כאשר מחבר Line In משמש ככניסה לאותות ה-IQ מהמקלט ומחבר Audio Out לחיבור אוזניות או רמקול. לקליטת תקשורת דיגיטלית, כגון PSK 31, אין צורך אפילו ביציאת שמע.

אם רוצים לשפר את הביצועים של המקלט, אפשר לחבר כרטיס נוסף, פנימי או חיצוני, בעל ביצועים משופרים של 96/24 או אפילו 192/24.

כאשר רוצים לעבוד בתקשורת שמע מלאה, לא תהיה ברירה אלא להתקין כרטיס קול נוסף שישרת גם את קליטת ושידור ה-SDR-QSD. במקרה זה רצוי, ואפילו חובה, לבחור כרטיס בעל ביצועים משופרים.

כול מי שמעוניין להעמיק בנושא יוכל למצוא אין סוף מאמרים באינטרנט כאשר אפשר להתחיל במאמר מורחב, שפורסם ב-RST מחודש מאי 2007, ומומלץ מאוד לעיין בו. מומלץ, בנוסף, לעיין ב-ויקיפדיה בערכים הקשורים לכרטיסי קול ועיבוד נתונים.

(המשך יבוא).

* * * * *

עידן ה-SDR הגיע תצוגה פנוראמית ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

מבוסס על פרסומי ARRL, RSGB, ויקיפדיה ומקורות נוספים באינטרנט.

(מאמר חמישי בסדרה)

למה נדרשת תצוגה פנוראמית?

"תצוגה פנוראמית", או בשמה האחר "תצוגה ספקטראלית", היא תצוגה גרפית בזמן אמת, כאשר ציר ה-X הוא ציר התדרים וציר ה-Y הוא ציר עוצמת הקליטה.

תצוגה זו היא משאת נפשם, של כול אלה שעוסקים באיתור תחנות שידור כגון שירותי מודיעין ואכיפת החוק וכמובן גם חובבי הרדיו.

חיפוש תחנות, במקלט רגיל, נעשה ע"י סיבוב הכפתור והאזנה. סקירת תחום תדרים, במצב זה, נמשכת זמן ארוך ובינתיים מופיעות ונעלמות תחנות שלא היינו מודעים לקיומן.

אם מקלט רדיו רגיל משול ל-"חיפוש מטבע מתחת לפנס נייד", הרי תצוגה פנוראמית מאפשרת "חיפוש הרבה מטבעות לאורך רחוב מואר לאורכו באור יקרות". המטבעות האלה, המייצגות תדרי שידור, מפוזרות לאורך הרחוב ובמבט אחד אפשר לראות את כולן וללקט את המטבע שהכי קורצת לנו. ככול שהרחוב ארוך יותר, כלומר פס התדרים יותר רחב, כך נוכל לראות יותר מטבעות/תחנות פזורות לאורכו.

תצוגה פנוראמית מאפשרת לנו לראות, במבט אחד וללא סיבוב כפתור, את כול התחנות המשדרות בתחום תדרים מסוים. בנוסף לקיומן, אפשר אפילו להבחין בסוג השידור. קל מאוד להבחין באותות CW ו-AM. עם קצת אימון אפשר לזהות גם SSB ואפילו Pile Up של תחנות.

אפשרות זו מקילה במידה רבה על איתור שידורים ויודעי דבר אומרים שעל כול קשר בודד במקלט רגיל, בזמן נתון, אפשר לקיים 5 קשרים במקלט עם תצוגה פנוראמית.

אם זה כול כך טוב אז למה כולם לא משתמשים בזה? ישנן שתי סיבות עיקריות והן: חוסר ידע, מחד, ומחיר גבוה, מאידך. אפילו מי שכבר מכיר את זה, יהסס הרבה זמן לפני שהוא יקנה מקלט חדיש עם תצוגה פנוראמית, כגון Icom IC-7800 שתמונתו מצורפת ותג המחיר שלו US\$10,999.99. אפילו בשער ה-\$ הקיים היום, המחיר עדיין גבוה מאוד. נכון שיש מקלטים זולים יותר אבל גם הם שייכים לקבוצת המכשירים היקרים.



יחד עם זאת, אני יכול להבטיח לכם שמי שהשתמש כבר בתצוגה פנוראמית, לא ימהר לחזור להשתמש במקלט רגיל.

כדי להרחיב את קשת המשתמשים בתצוגה פנוראמית, צריך לתת פתרון לשתי הבעיות המונעות שימוש באמצעי זה. אני מקווה שמאמר זה ייתן תשובה מסוימת לבעיית הידע אבל, יחד עם זאת, מסתבר שגם לבעיית המחיר יש פתרון.

במחיר ממש מגוחך, פחות מ-100 ש"ח, אפשר להוסיף תצוגה פנוראמית לכול מקלט קשר או מקמ"ש. נכון שצריך גם מחשב, הכולל כרטיס קול משוכלל, אבל אני מאמין שלכול חובבי רדיו רציני ישנו כבר היום מחשב בתחנה.

בהמשך אתייחס להיסטוריה, לטכנולוגיה ולחדשנות בנושא.

היסטוריה

הצורך במקלטי תצפית/סקירה (Surveillance) התעורר במיוחד לצורכי מודיעין צבאי אבל במהירה התחבבו מקלטים אלה על כול העוסקים בתקשורת. כמו גם במכשירים אחרים, גם כאן החליפו מכשירים חדשים את הישנים שנמכרו כציוד עורפים והגיעו גם לידיהם של חובבי הרדיו.

מקלט תצפית, הידוע גם כ-"נתח ספקטרום" (Spectrum Analyzer), היה למעשה מקלט סופר-הטרודיין רגיל עם כמה הבדלים ממקלט המשמש לשמע.

המתנד המקומי חייב להשתנות במהירות גבוהה (עשרות סקירות לשנייה) ולאפשר שינוי תדר בתחום רצוי (עשרות עד מאות ק"ה). רוחב הפס, של תדרי הביניים והמסננות, צריך להיות צר מאוד (עשרות עד מאות הרצים) כדי להשיג הבחנה טובה בין תחנות שידור קרובות ואולי אפילו לראות את פסי הצד ולהקיש מהם על אופי השידור.

תפוקת הגלאי, של המקלט, הועברה לציר ה-Y של תצוגת המסך שהייתה על שפופרת CRT. אותה שפופרת קיבלה, לציר ה-X, את אותו אות ששינה את התדר של המתנד המקומי.

מה שינה את התדר של המתנד המקומי? בהתחלה זה היה בעזרת קבל משתנה (Wobbler), שסובב ע"י מנוע, ומצב הקבל נמסר למסך מפוטנציומטר שהיה מחובר לציר הקבל. הפתרון לא היה כול-כך אלגנטי ובמהירה עברו לשינוי תדר בעזרת מתנדים מבוקרי שפופרות תגובה (Reactance Tube) או קבל מבוקר מתח (Varicap). בשני הפתרונות השונים הושג תחום סקירה צר יחסית והמהפכה הגדולה הייתה כאשר התחילו להשתמש בסינטסיזרים כמתנד מקומי. אותו אות שפיקד על הסינטסיזר הועבר, כמובן, גם לציר ה-X של התצוגה.

מכיוון שהמכשירים שימשו כעזר למקלטים (מתאם) לצורך איתור אותות שידור, הם כונו בשם מתאם פנוראמי (Panoramic Adaptor) או, בקיצור Panadaptor אחת החברות הידועות, של יצרני הציוד, נקראה פשוט בשם Panoramic. להלן מספר תמונות של מכשירים היסטוריים:

1942 Panoramic SA-1 and SB-1 Radio Spectrographs



1943 Panoramic SA-3 Panoramoscope



אותו מתאם פנוראמי הוצמד גם למקלט האגדי SX-28, של הליקרפטרס, כפי שרואים אותו באיור הבא, תחת השם S-35:



Hallicrafters S-35 Panoramic Receiver

כמובן שהיו שיפורים במשך השנים ולהלן מכשיר משופר יותר.

Panoramic Radio SB-8b Panalyzor



This picture shows about a half-second composite of jumping modulation waveforms from AM broadcast signals in the evening. Pip on the right is a local station. Bottom coax is to antenna.

לכול המתאמים, הייתה בעיה משותפת והיא חוסר האיזון בין ההבחנה ובין התצוגה.

אם רוצים הבחנה טובה צריך מהירות סקירה איטית ואז המסך (CRT) לא שמר על התצוגה. נכון שהיו CRT ששמרו על זמן צפייה ארוך (P31) אבל זה היה עדיין רחוק משלימות. על הבחנה של הרצים בודדים, או אפילו על ק"ה בודדים, אפשר היה רק לחלום.

לפני כ-30 שנה הופיעו המחשבים הביתיים והמעבדים נכנסו לשימוש בכול מקום אפשרי. גידול מהירות המעבדים איפשר ביצוע פעולות שעד אז לא היה ניתן לבצע אותם. ה-DSP הפך לטכנולוגיה השולטת בעיבוד אותות והצגתם על מסך המחשב או על מסך יעודי של ציוד ייחודי. מאז השימוש ב-DSP, המקלטים הם "מקלטי תחום" ולא "מקלטי תדר". קליטה, של אות בודד, מתבצעת ע"י טיפול ייחודי בתוך התחום הנקלט.

ישנם היום נתחי ספקטרום בעלי ביצועים מעולים וכמובן תג המחיר שלהם גבוה מאוד. לדוגמה מכשיר של חברת Rhode-Schwartz מדגם R&S®FSU שלהלן תמונתו:



ביצועיו המרשימים הם :

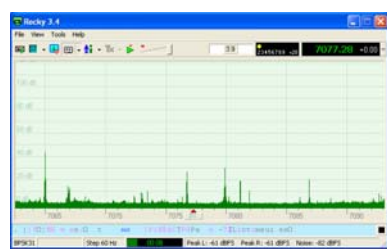
- Frequency range 20 Hz to 3.6 GHz, 8 GHz, 26.5 GHz, 43 GHz, 46 GHz, 50 GHz and 67 GHz
- Displayed average noise level -158 dBm (1 Hz)
- Phase noise typ. - 133 dBc (1Hz) at 10 kHz
- TOI typ. +25 dBm
- Resolution bandwidth **1 Hz to 50 MHz**
- Displayed average noise level with preamplifier FSU-B24: typ. - 168 dBm (1Hz) at 20 GHz, typ. - 155 dBm (1Hz) at 50 GHz

את המחיר אתם יכולים לשער ונראה לי שמכשיר זה אינו נפוץ בתחנות חובבים ברחבי העולם והישועה לא תבוא מכיוון זה.

מתאם פנוראמי

מרבית חובבי הרדיו משתמשים במקלטי קשר עצמאיים או המהווים חלק מ-מקמש"ים. מקלטים, אפילו אם הם ישנים, עושים עבודה טובה וכול מה שחסר להם היא התצוגה הפנוראמית.

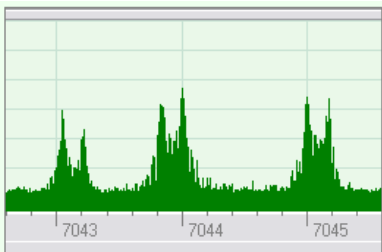
המתאם הפנוראמי הוא, למעשה, מקלט חד תחומי שניתן לחברו לתפוקת אחד ממגברי הביניים, "לתפוס טרמפ" על כול הדרגות הקודמות ולחסוך, ע"י כך, הרבה מאוד כסף.



אם נשתמש במקלט פשוט, כגון מקלט SDR, נקבל על מסך המחשב את התצוגה הבאה :

התצוגה היא של תוכנת Rocky 3.4 שפותחה ע"י VE3NEA Alex Shovkolyas. התוכנה מיועדת למקלטי SDR, ידידותית למשתמש ובעלת תכונות המסייעות לתקשורת.

להלן דוגמת אות שהופיע בתצוגה, והסברים בצידה. התמונה נלקחה מהאתר של אלכס <http://www.dxatlas.com/Rocky>. תמונות נוספות תופענה במאמר הבא שיעסוק בהרחבה בתוכנה עצמה.



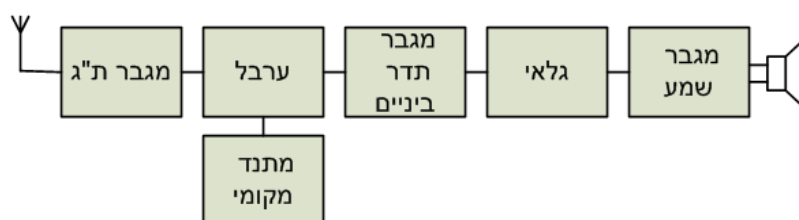
בצילום רואים תצוגת שלוש תחנות המשדרות RTTY כאשר המרחק, בין השיאים, הוא בהפרש של 170 הרץ.

היכן בדיוק לחבר את המקלט? את זה נראה להלן.

מקלטי קשר

רוב מקלטי הקשר, לפחות עד השנים האחרונות, היו בטכנולוגיות הסופר-הטרודיין.

המקלט הבסיס מורכב ממתנד מקומי, ערבל, מגבר תדר ביניים (IF), גלאי ומגבר שמע כמתואר באיור הבא :

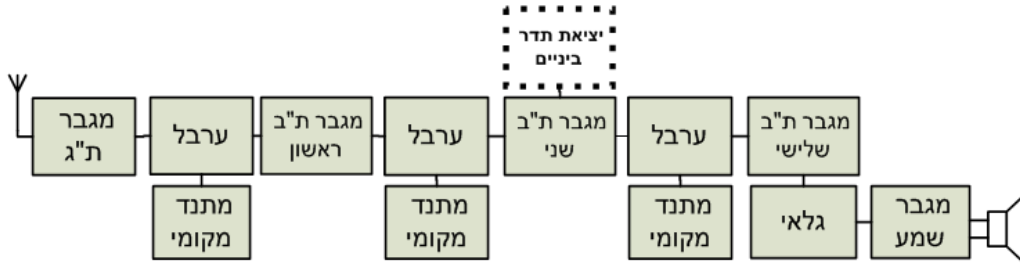


מקלטי קשר משוכללים יותר מכילים, בנוסף, מגברי תדר גבוה (RF) ומספר מגברי תדר ביניים בתדרים וברוחבי פס שונים.

מקלט קשר משוכלל מכיל, בדרך כלל, שלוש דרגות של מגברי IF. הדרגה הראשונה היא בתדר גבוה ורחבת פס מעבר לתחומים המעניינים אותנו כאשר, בנוסף, רמת האות עדיין אינה בעוצמה המספיקה לעיבוד נוסף. הדרגה השנייה היא בתדר נמוך יותר, ברוחב פס העשוי לעניין אותנו ועוצמה המאפשרת עיבוד נוסף. הדרגה השלישית היא, ברוב המקרים, בתדר של 455 ק"ה ורוחב הפס שלה עד 6 ק"ה מהמרכז (רוחב כולל של 12 ק"ה). התחום, של הדרגה השלישית, צר מדי לצורכי חיפוש תחנות משרדות.

אי לכך, יהיה צורך להבטיח שתהיה יציאה, של תפוקת ה-IF השני, מהמקלט.

ניקח לדוגמה את המקלט של מקמ"ש נפוץ שתרשים המלבנים שלו, כולל יציאת IF שני, מתואר באיור הבא:



התרשים מאפיין את מרבית המקלטים כאשר השוני הוא במספר מגברי הביניים ובתדרים שלהם. פרוט תדרי הביניים, של מכשירי קשר שונים, נמצא בטבלה הבאה:

היצרן	דגם ה- מקמ"ש	תדר IF ראשון (מ"ה)	תדר IF שני (מ"ה)	תדר IF שלישי (ק"ה)
Kenwood	TS-850	73.05	8.83	455
Yaesu	FT-1000	73.62	8.215	455
Icom	IC-775	69.016	9.016	455

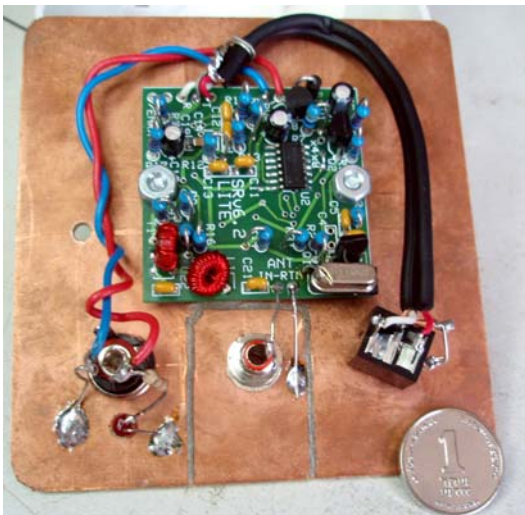
תדרי ה-IF אמנם קרובים אחד לשני אבל להבדל ביניהם תהיה חשיבות רבה כאשר נדבר על החומרה הדרושה לתצוגה פנוראמית.

יש מכשירים שיציאה זו כבר קיימת, כמו ב-Kenwood TS-850, אבל באחרים יהיה צורך להכין אותה. את פרטי ההתאמה, למקלטים השונים, ניתן למצוא באינטרנט בפורומים העוסקים ב-SDR.

מקלט פנוראמי

כפי שכבר הוזכר, המתאם הפנוראמי הוא מקלט רדיו לכול דבר ועניין אלא שתפוקתו אינה שמע אלא תצוגה גרפית. האם הוא חייב להיות סופר-הטרודיין?

התשובה היא: בהחלט לא.



מקלט SDR, שהוא מקלט תחומי, עדיף מכול הבחינות. אפשר להשתמש במקלט לתחום תדרים אחד כאשר ניתן לקנות קיט (כגון Softrock40, במחיר של \$14 כולל דמי משלוח ארצה) לתחום המכסה את תדרי ה-IF השני כשההבדל הוא רק בתדר הגביש של המתנד המקומי. יש לציין, כאשר מזמינים את הקיט, לאיזה תדר ביניים המקלט מיועד. את גודלו הפיזי, של המקלט, ניתן לשפוט מהתמונה הבאה:

מקלט זה מופעל בעזרת תוכנת Rocky שדוגמאות ממנה כבר ראינו.

(המשך בחוברת הבאה)

עידן ה-SDR הגיע תצוגה פנוראמית (המשך) ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

מבוסס על פרסומי ARRL, RSGB, ויקיפדיה ומקורות נוספים באינטרנט.

(מאמר ששי בסדרה)

חזרה קצרה

עד עתה ראינו שבעזרת מחשבים עדכניים ותוכנות עיבוד אותות (DSP) אפשר להגשים פעולות שעד היום היה ניתן ליישם רק באמצעים פיזיקאליים. לדוגמה: אם בעבר בנינו מסננים מסלילים וקבלים, היום ניתן ליישם זאת בעזרת פונקציה מתמטית בתוכנת המחשב.

שלב עיבוד הנתונים, בעזרת מיקרו-מעבדים, קיים היום בכול שטחי הטכנולוגיה ואין סיבה לא להשתמש בהם גם בצידוד קשר. מיקרו-מעבדים משמשים כבר זמן רב בבקרת הצידוד אבל לאחרונה גם בעיבוד האותות עצמם (DSP). בהמשך אתייחס רק לאותם הנושאים הקשורים ליישומים בעזרת המחשב הביתי.

מכיוון שהמחשב הוא כלי סיפרתי ואותות הכניסה והיציאה הם אנלוגיים, אנו זקוקים לאמצעי המרה כגון ממירים אנלוגיים לספרתיים (A2D) וממירים מספרתי לאנלוגי (D2A). ממירים אלה הם, למעשה, כרטיסי הקול שבמחשב שתוארו כבר במאמרים הקודמים. דבר זה מאפשר לנו, כמשתמשים, לנצל צידוד שכבר קיים בדינו. למען האמת, אם מתקשרים באותות ספרתיים בלבד, כגון כתב או תמונה, אין אפילו צורך בממירי D2A.

בפרקים הקודמים ראינו שהמקלטים המקובלים הם מקלטים המיועדים לתדר בודד. לעומתם, מקלטי ה-SDR הם בראש ובראשונה מקלטי תחום תדרים. תצוגת המחשב היא ספקטראלית ורק בשלב השני בוחרים ומבדדים את האות שאותו אנחנו רוצים לקלוט.

השימוש בתוכנה ה-SDR מתאים הן למקלט מלא והן למקלט תדר IF לצורך הוספת מתאם פנוראמי למקלט רדיו קיים והמלצתי האישיה להתחיל דווקא במתאם זה. (ראה מאמר קודם)

ישנן היום מספר תוכנות, המיועדות לכך, אבל בהמשך אתייחס לתוכנת Rocky שהוזכרה כבר מקודם. התוכנה פותחה ע"י Alex Shovkolyas VE3NEA שממשיך, מדי פעם, להוציא מהדורות מעודכנות.

כול נושא ה-SDR נמצא בשלבי התפתחות מהירים ולעיתים קרובות התוכנות אינן מכסות את כול פיתוחי החומרה. אי לכך, לפעמים קיימות גרסאות שונות, של אותה תוכנה, כדי לענות על דרישות מקלטים שונים.

ישנן גם תוכנות אחרות, כגון Power SDR או WinRadio אבל בחרתי להציג את תוכנת Rocky גם בגלל פשטות ההפעלה שלה וגם, בעיקר, התאמתה לצידוד של SoftRock40 שהוא צידוד זול ומומלץ מאוד לכול מי שמתחיל את צעדיו בשטח ה-SDR.

בעזרת התוכנה אפשר לקלוט את אופני השידור הנפוצים של CW, SSB ו-BPSK31.

אלכס הוא אחד מה-"משוגעים לדבר" ומומלץ ביותר להיכנס לאתר שלו, לקרוא מה שכתוב שם ולהוריד את המהדורה האחרונה של תוכנת Rocky (מהדורת 3.5 בעת כתיבת המאמר) עבור הצידוד שברשותכם. כתובת האתר היא <http://www.dxatlas.com/rocky>.

לפני שאתם מתקינים את התוכנה, כדאי לקרוא וללמוד את מה שנכתב תחת הכותרת Using Rocky ו-Advances Topics שמהם שאבתי חומר למאמר זה.

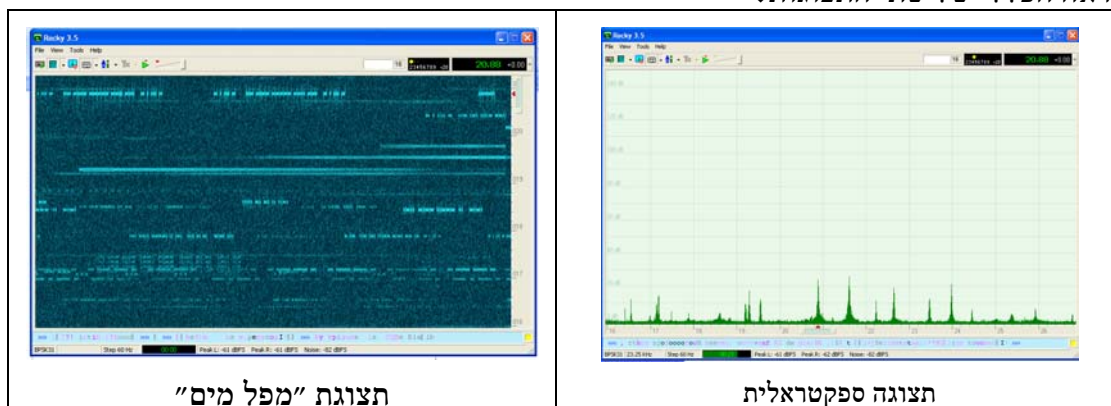
התוכנה עצמה מאפשרת גם הדמיה, של קליטה, תוך שימוש בקבצי נתונים שהוקלטו מראש. דבר זה מאפשר תרגול התוכנה גם לאלה שטרם בנו את הצידוד (מי שמעוניין בקבצים אלה יוכל לקבלם ממני).

כול הזמן התייחסתי לקליטה בלבד אבל התוכנה מאפשרת גם הפעלת שידור של מקמ"שי SoftRock, המבוקרים ע"י תוכנה זו, אבל זה כבר סיפור אחר.

תצוגות

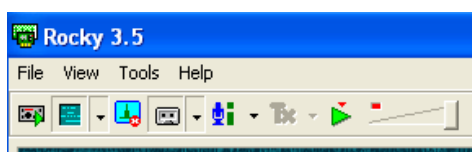
לתוכנה ישנם שני אופני תצוגה, תצוגה ספקטראלית רגילה ותצוגת "מפל מים". אני מניח שתצוגה ספקטראלית מוכרת לרוב הקוראים אבל כאשר מדובר ב-SDR, דווקא "מפל המים" היא התצוגה היותר נוחה לשימוש.

להלן המראה הכללי של שתי התצוגות:



תצוגת "מפל מים"

תצוגה ספקטראלית



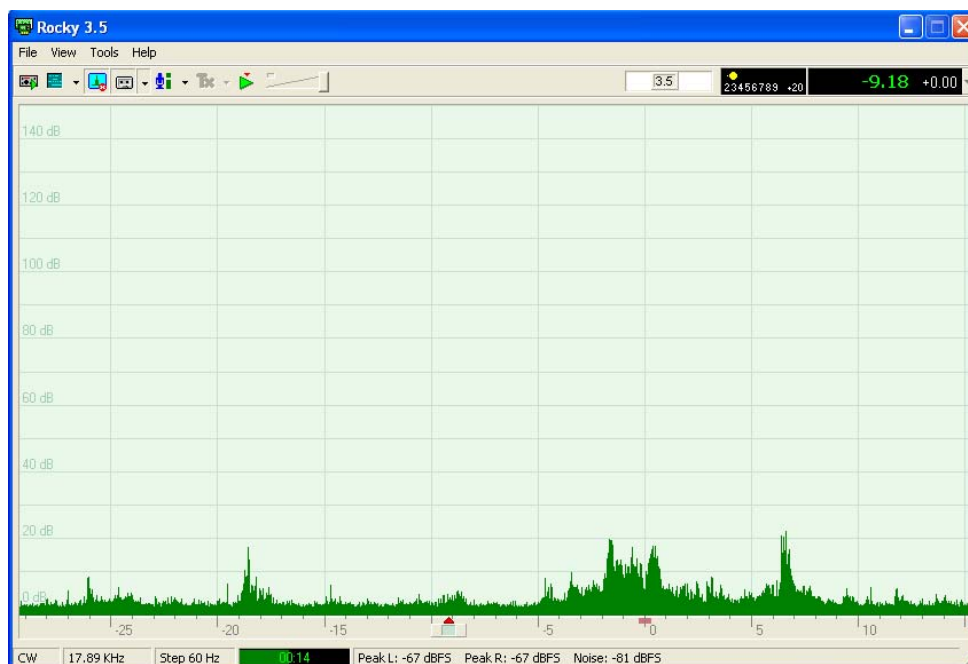
הכותרת, של שתי התצוגות, זהה. בצד שמאל נראה את קבוצת הפקודות והצלמיות המופיעים בפינה השמאלית העליונה של התצוגה. בעזרת הפקודות והצלמיות ניתן לבצע התקנה (סוג כרטיס הקול לקליטה, סוג כרטיס הקול לתפוקה, אות הקריאה לשידור וכדומה), לבחור את אופן הפעולה, ושאר הגדרות.

כאשר מדובר ב-"כרטיס קול לקליטה", יש לזכור שנדרש כרטיס שיהיה בעל ביצועים משופרים (96/24). לצורך לימוד ותרגול התוכנה בלבד, ע"י שימוש בקבצים מוקלטים מראש, אפשר לוותר עליו ולהשתמש רק בכרטיס הקול המותקן על לוח האם.

קלות ההשגה, של התוכנה החינמית, והאינטואיטיביות של ההתקנה וההפעלה מאפשרים לוותר, במסגרת מאמר זה, על פירוט יתר של הוראות ההפעלה.

תצוגה ספקטראלית

תצוגת מסך מלא נראית כך:

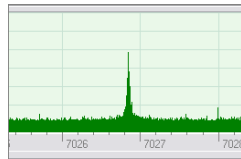


ציר ה-X, בתצוגה זאת, מכויל בתדרי הקליטה שצריך להגדירם בהתאם לתחום התדרים שבשימוש. ניתן, בעזרת הצלמית המופיעה בצד ימין של הכותרת, לצופף או לרווח את התדרים. אם רוצים לראות את האותות בכול התחום, מצופפים את התדרים. אם רוצים לראות מה קורה בתחום צר יותר (כגון תחום CW), מרווחים את התדרים.

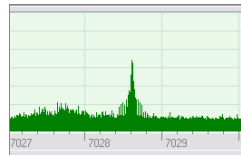
בחירת האות, מתוך התחום הרחב, נעשית בעזרת העכבר. מצביעים על האות, מקליקים על המקש השמאלי ואז מתבצעת נעילה על האות של אותו התדר.

מפעיל מאומן מסוגל להבחין באופן השידור בהתאם לצורת האותות המופיעים בתצוגה. כמוכן שנדרש ניסיון שרוכשים אותו ע"י לימוד ועל ידי עבודה מעשית.

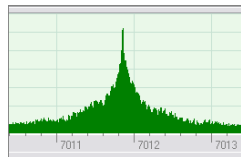
רואים, על המסך, אותות העולים מעל הרעש. אם נפרוס את התדרים נוכל אפילו להבחין בסוגי האותות שיש להם צורות ייחודיות בהתאם לתכונותיהם. להלן מספר תצוגות וההסבר בצידן:



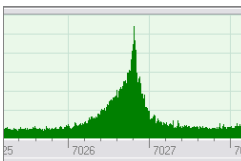
אותות CW איטיים ונקיים.
מפעיל מנוסה אולי יכול לקלוט אפילו תוך מעקב אחרי הקפיצות של האות.



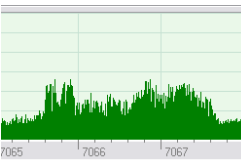
אותות CW במהירות גבוהה. רואים ברור את פסי הצד של המפתוח המהיר.



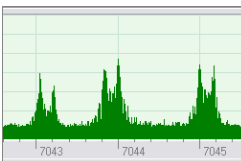
אותות CW עם נקישות מפתוח כבדות.



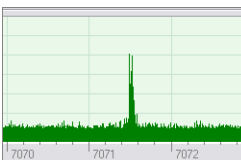
אותות CW עם צ'ירפ (Chirp). רואים שפסי הצד, הנגרמים ע"י המפתוח, אינם סימטריים.



אותות SSB שניתן לזהותם בקלות בגלל רוחב הסרט שלהם שהוא 3 ק"ה.

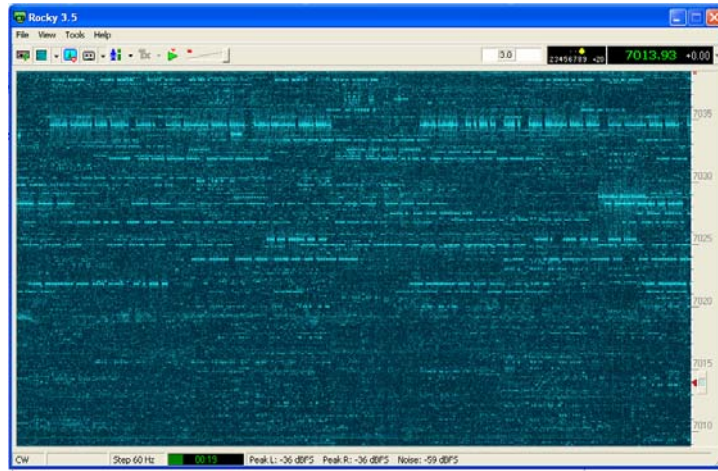


לאותות RTTY יש שני שיאים במרחק 170 הרץ ביניהם. על המסך רואים שלושה שידורים נפרדים.



ה-PSK31 הוא מפתוח-תזוזת- מופע בקצב של 31.25 באוד. שני המרכיבים הספקטראליים שלו נמצאים במרחק 31.25 הרץ אחד מהשני אבל עדיין ניתן להבחין ביניהם בברור.

תצוגת "מפל מים"



ציר ה-X הוא ציר הזמן ותצוגת המסך נעה, כול הזמן, מימין לשמאל (כעין מפל מים אופקי). ציר ה-Y הוא ציר התדר והאותות, הנמצאים בתדרים שונים, מופיעים כשינויי עצמת תאורה. קל מאוד להבחין בשידורי ה-CW המופיעים כקווים אופקיים מקוטעים. כול מה שעליכם לעשות, הוא להגדיר את תחום ה-CW ולצפות באותות.

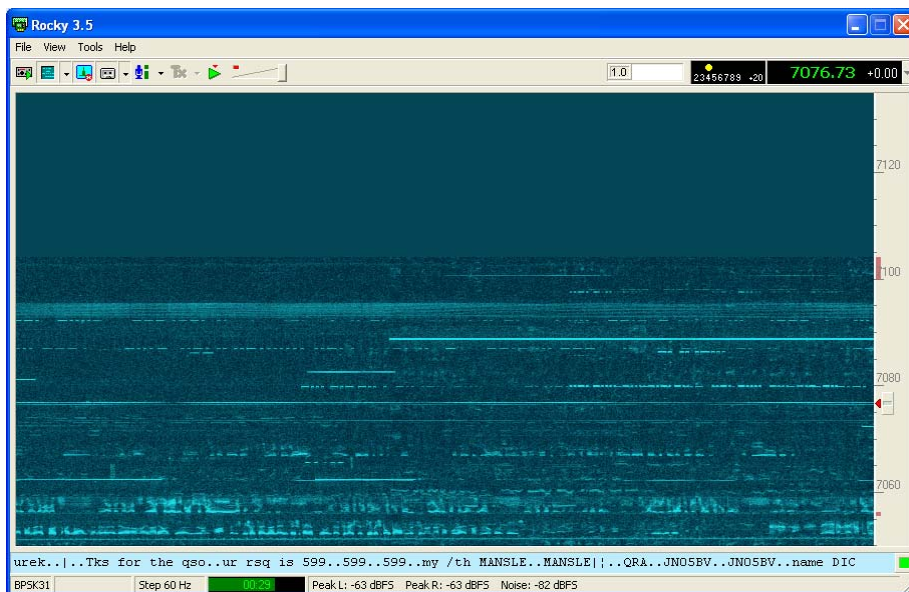


יודעי ה-CW יכולים לקרוא בקלות את הקווים והנקודות ואם ברצונם לשמוע את האותות, קליק מקש שמאלי על הקו והרי אתם גם שומעים אותם.

לאחר שראינו כבר שאפשר לנתח את האותות, תקליקו על קו CW נקי ויפה ואחר כך על קווי CW רחבים יותר. תוכלו להבחין בקלות בין שידור נקי ובין שידור עם נקישות מפתוח.

לפי הידוע לי, תוכנת ה-Rocky עדיין אינה מסוגלת לפענח ולהציג קליטת אותות CW. יחד עם זאת, מכיוון ואנו עוסקים במחשבים, לא אופתע אם באחת מהגרסאות הבאות תופיע התכונה הזאת למרות שקשה יותר לפענח שידור CW, מאשר שידור PSK, מאחר ושידור CW ידני אינו אחיד ויציב כמו שידור PSK.

קליטת ה-PSK נעשית בקלות בתצוגת "מפל מים". מחפשים קוים ישרים ורציפים, כפי שמתואר בתצוגה הבאה, ומקליקים עליה במקש שמאלי:

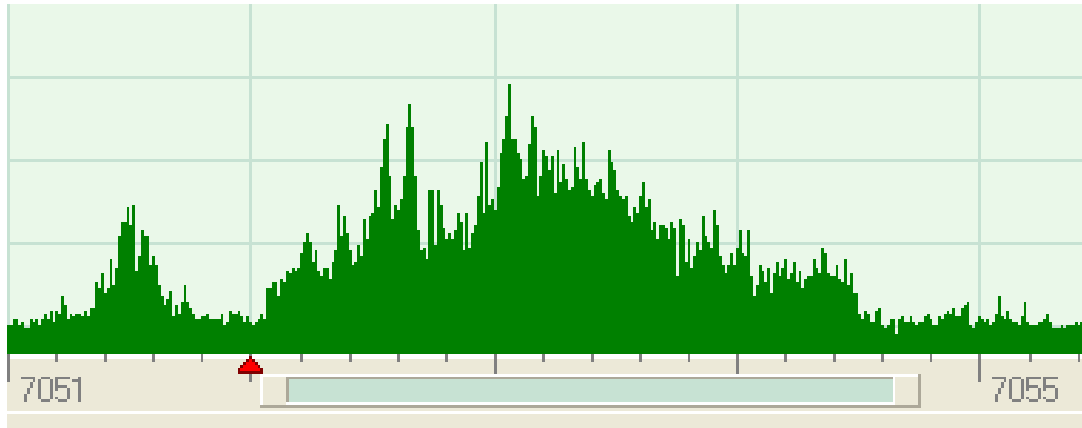


את הפענוח נקבל בשורה תחתונה כדוגמת התצוגה הבאה:

..Tks for the qso..ur rsq is 599..599..599..my /th MANSLE..MANSLE|...QRA..JN05BV..JN05BV..name DICK..DI

לצערי הטקסט אינו נשאר כקובץ אבל אני מאמין שגם בתוכנה זו, או באחרות, ישנה (או תהיה) גם האפשרות לשמירת קבצי הטקסט הנקלטים והמשודרים.

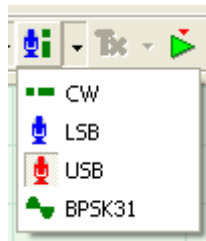
לעומת קליטה של אותות ספרתיים (CW, PSK), שקל לקלוט על "מפל המים", את אותות ה-SSB קל יותר לקלוט (לפחות לדעתי) על תצוגה ספקטראלית. מחפשים אותות, המשתרעים על תחום של כ-3 ק"ה, ומבצעים כוונון עדין כדי לשמוע את הקולות בברור. אותות SSB נראים כך:



הספקטרום, של אות ה-SSB, משתרע מ-7052 ק"ה עד בערך 7054.5 ק"ה, תחום מכובד לאות SSB.

אגב – את תמונה הזאת צילמתי מתצוגה, של שיחה בגרמנית, שנשמעה יפה ברמקול.

למרות שלא הזכרתי זאת מקודם, הרי גם כאן נדרשת, כמו בכול מקלט אחר, הגדרה מוקדמת של סוג האות הנקלט. הקלקה על הצלמית המתאימה ויפתח לנו מסך המאפשר בחירה:



איזון אותות I/Q

אחד התנאים, לקליטה רגישה וסלקטיבית המתבססת על אותות I/Q, הוא איזון מוחלט של האותות הנפרדים תוך שמירה על זווית של 90° ביניהם. בתנאי איזון טובים, ישנה אפשרות לקלוט אותות אפילו הם מתחת לסף הרעש.

את מבנה החומרה, שהם המקלט וכרטיס הקול, אי אפשר לשנות אבל ניתן לבצע איזון, מדי פעם, בעזרת מקור אות (מחולל אותות חיצוני) ושינויי פרמטרים בתוכנה.

במקום פעולה זו, שאיננה פשוטה ומהווה מטרד, אלכס (מפתח התוכנה) פיתח אלגוריתם (בעזרת מספר שורות תוכנה) המבצע איזון אוטומטי, ממוחשב ומתמשך, המתבסס על אותות נקלטים חזקים, המופיעים בתצוגה הספקטראלית, במקום מחוללי האותות החיצוניים.

האיזון המתמשך עובד לאיטו והמקלט צריך להיות מופעל, במשך שעות ארוכות, כדי לשפר את הביצועים.

שיטה זאת עובדת והתוצאות, לפי דיווחים כתובים, הן מעולות.

(המשך בחוברת הבאה)

* * * * *