

קשר בשיטות

חד = פ - ס - מ - ה - ו ?

רס"נ מ'כאל בן-יוסף

מבין החיפוש למציאת שיטות כאלו יש להזכיר במיוחד את הניסויים שתכליתם להגדיל בהרבה את התדר — ולעבור לתחום „גלי-המיקרו” (גלים קצרים ביותר). אמנם, בגלים אלה התפשטות הגל אפשרית רק לטנחים קצרים-יותר; אך פיתוחם של אנטנות יעילות, תחנות-מסר וכן צורות קרינה מיוחדות המושתתות על עקרון הפיזור (Scattering) בשכבות עליונות אפשרו להגדיל בהרבה את הטנחים בתחום-גלים זה; וכן ישנו בגלי-המיקרו היתרון הנוסף והחשוב — האפשרות להעביר ברוחניות כמות גדולה של אינפורמציה. בנוסף לאלה מתרבים עתה גם חיפוש פתרונות באמצעות לויני-תקשורת, אשר יוכלו להעביר אינפורמציה רבה למרחקים עצומים.

מלון זוטא

אורך גל	— המרחק שהגל עובר במחזור אחד. ככל שאורך הגל קטן יותר, יהיה מספר המחזורים שהגל עושה במשך שניה אחת גדול יותר — ולהיפך.
תדר	— מספר המחזורים שהגל עושה בשניה אחת.
הרץ	— היחידה לפיה קובעים את מספר המחזורים ר"ס. הרץ אחד מסמן מחזור (או תנועה אחת) בשניה.
קה"צ	— קילו-הרץ — 1,000 מחזורים בשניה.
מה"צ	— מגה-הרץ — 1,000,000 מחזורים בשניה.
גלי-רדיו	— גלי הרדיו שהקרנו מן האנטנה והמוחזרים לקרקע על-ידי שכבה מסוימת באט-מוספירה; הם מצויים בתחום של 2 עד 30 מה"צ בערך.
אפנון תנופה (את"נ)	— שיטת אפנון בה משנים את תנופת הגל (עצמתו) בהתאם לאינפורמציה (בדיבור לפי הלחץ של גלי-הקול; בהעברת תמונות — לפי עצמת האור המשודרת).

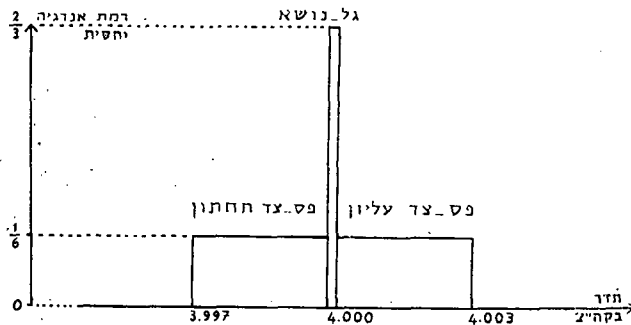
בכל זאת נשאר מספר רב של סוגי תקשורת הפועלים רק בתחום התדרים הגבוהים (ת"ג); דהיינו, בין 2 ל-30 מה"צ. בין אלה אפשר לציין את הקשר בין אניות לחוף, בין מטוסים לקרקע ואותן מערכות-קשר צבאיות המצריכות ניידות, גמישות ואי-תלות בשינויים העלולים לחול (בתנאי שעות-היממה, או עונות, מסוימות — או אף כתוצאה ממחזורי-תופעות רבי-שנתי) בטנחי התפשטות הגלים. היות ותחום-תדרים זה עמוס ביותר (וכל מי שסובב במקלט שבביתו את כפתורי-התחנות שלו בתחום „הגלים הקצרים” יינכח בכך עד מהרה), היה הכרח למצוא שיטה שתצמצם את רוחב הפס המשודר — ועל-ידי

הצורך בשיטות-תקשורת חדישות

בשנים האחרונות חלה התפתחות עצומה בתחום האלקטרוניקה: אנו עדים להצלחות רבות בהמצאת התקנים אלקטרוניים חד-שימי, ישומים שונים של המצאות אלו וכן שכלולם של אמצעים שהיו מקובלים עד כה.

מדע האלקטרוניקה יצא מומן מהתחום הצר של שידור גלי רדיו וקליטתם, למטרות של תקשורת ובידור. אותו תחום שלמענו פותחה האלקטרוניקה בתחילה; כיום מקיף הוא שטחי-חיים וצרכים נרחבים ביותר. אולם התקשורת נשארה בכל זאת אחד החשובים שבשימושי האלקטרוניקה. (במובנה הטכני, תקשורת היא המעבירה אינפורמציה ממקום אחד למשנהו). בד בבד עם ההתקדמות הכלכלית והטכנולוגית של העולם גדלה הדרישה לאמצעי תקשורת רבים יותר ולהגדלת קיבולם — דהיינו, גדל הצורך להעביר אינפורמציה רבה יותר בפחות זמן. דרישה זו מעמידה את המתכננים של אמצעי התקשורת בפני קשיים עצומים. החמור בקשיים אלה הנו התחום המוגבל בו אפשר להעביר אינפורמציה ממקום אחד לשני בעזרת גלים אלקטרו-מגנטיים.

בכדי להעביר אינפורמציה באמצעות גלי-צליל — גלי קול, מוסיקה או צורות אחרות של גלי-צליל — שלא באמצעות מוליכים פסיים (כדוגמת הטלפון) אלא דרך החלל, יש צורך להפוך גלי-צליל אלה לגלים אלקטרו-מגנטיים או גלי-רדיו אותם אפשר להקריין באמצעות אנטנה. את הגלים האלה ניתן ליצור באורכי-גל או בתדרים שונים. תחום הגלים בו אפשרית מבחינה תיאורטית, התפשטות גלי-הרדיו הוא אמנם רחב ומגיע מעשרת אלפים הרץ (כלומר, עשרה קילו-הרץ) ועד למעלה משלושים מיליארד הרץ (או — למעלה משלושים אלף מגה-הרץ); אך לתדרים השונים תכונות-התפשטות שונות. בתדרים הנמוכים אפשרית ההתפשטות על גבי הקרקע או מעל פניהם בלבד; וכדי להגיע לטנחים גדולים דרושים הספקים עצומים; ואילו בתדרים גבוהים מאוד (מעל ל-30 מה"צ) הכרחי שיהיה קו-ראיה בין שתי האנטנות; ככל שעולה התדר נעשית דרישה זו חמורה יותר — כי אורך הגל הולך וקרב לאורכם של גלי האור. ועל כן, כדי לקיים קשר לטנחים גדולים, הכרחי להשיג תמש בגלי-רדיו בתחום הצר של 2 עד 30 מה"צ. בתחום זה מרוכז כיום ברובה „התעבורה” האזרחית וכן זו הצבאית; והצפיפות שבתחום זה גדולה כל כך, עד כי נעשו צעדים דרסטיים להגביל את השימוש בו — דבר אשר הביא ממילא להתפתחות שיטות תקשורת חדשות.



כך לאפשר למספר רב יותר של תחנות לשדר באותו התחום. אם כן, הדרישות שהועמדו בפני השיטה החדשה היו: צמצום רוחב הפס המשודר — ודיוק רב יותר בתדר המשודר, כדי למנוע הפרעות לתחנות שכנות. נמצא כי הכנסת שיטת החד-פס* (הכונה — לפס-הצד) מספקת דרישות אלו היטב, ואף הביאה, כפי שניכר בהמשך הדברים, לשיפור בעצמת האות המשודר.

החד-פס — מהו?

כדי להעביר אינפורמציה באמצעות גלי-רדיו, יש הכרח „להל-כיש“ אינפורמציה זו על גבי גלי-הרדיו (דהיינו, לשנות את גל הרדיו בהתאם לאותה אינפורמציה שברצוננו לשדר); תהליך זה נקרא בשפה המקצועית אפנון („מודולציה“, בלעז). אחת הדרכים לבצע זאת היא אפנון-תנופה (את“נ). קיימות גם דרכים אחרות להשגת תכלית זו — בעיקר שיטה כגון אפנון תדר; אך מאחר ששיטה זו נהוגה בעיקר בתחום תדרים שמעל ל-30 מה“צ — לא נעסוק בה כאן.

כאשר אנו משנים את תנופת הגל בהתאם לאינפורמציה שבר-צוננו לשדרה, נוצרים שלושה רכיבים*: הגל-הנושא ושני פס-הצד; הגל-הנושא הוא גלי-הרדיו שאיננו מכיל שום אינ-פורמציה, המשמש „סבל“ בלבד (ומכאן גם שמו — „גל-נושא“). ואילו האינפורמציה, אותה יש ברצוננו להעביר, מפורזת בשני פסים זהים הנמצאים משני עבריו של הגל-הנושא. ברור גם שלגל-הנושא דרושה אנרגיה, הן בשביל להגיע אל המקלט והן כדי לשאת את האינפורמציה (שגם היא בצורת אנרגיה). לרוע מזלנו חלוקת האנרגיה בשעת שידור היא כזו שרק שליש אחד מסך-הכל האנרגיה המשודרת נמצא בשני פס-הצד גס-יחד; ואילו יתר שני השלישים נמצאים בגל-הנושא. מאחר ששני פס-הצד זהים לחלוטין מבחינת כמות האינפורמציה הכלולה בהם, והם שונים רק בתדריהם ביחס לגל-הנושא, הרי שרק החלק השישי מכלל האנרגיה מכיל את האינפורמציה שרצינו לשדרה, ואילו יתר חמש השישיות „נלוים“ אליו בניגוד לרצוננו. הצורך למעלה מדגים את מהות הגל המאופנן — הן מבחינת פיזור התדרים והן מבחינת חלוקת האנרגיה.

לפי הסבר זה, ברור שבשביל להעביר את האינפורמציה הדרו-שה אין צורך אלא לשדר פס-צד אחד. ואמנם — כפי שהשם חד-פס מרמז — הרי זהו בדיוק עקרון השיטה. פעולת החד-פס משיגה ומשפרת ברומונית שני דברים: א. רוחב הפס המשודר מוקטן בחצי; ב. העצמה המשודרת מוגדלת כתוצאה ישירה מביטולם של הגל-הנושא והפס השני, אשר נשאו עמם אנרגיה שאינה נחוצה להעברת המידע***. לאמיתו-של-דבר — השיטות המקובלות כיום אינן מבטלות את הגל-הנושא לגמרי, כי אם מקטינות אותו עד לעצמה אפסית כמעט. כדי לקלוט אות חד-פס יש צורך בכך שהמקלט יוכל להחזיר את הגל-הנושא לעצמתו המקורית. תהליך זה חייב להיעשות בדייקנות רבה ביותר, כדי שאפשר יהיה להבין את האות המשודר. בעיה זו של דיוק התדר היא הסיבה העיקרית למבנהו המורכב ולמחירו הגבוה של מכשיר החד-פס בהשוואה לצידוד את“נ.

* (S.S.B.) Single Sideband

** קומפוננטים.

*** מידע — מונה שנתחדש למושג „אינפורמציה“.

מקובל, וכן לעובדה ששיטה זו, על אף יתרונותיה הגדולים, עדיין לא נכנסה לשימוש הרחב אף-על-פי שהתיאוריה של השיטה כבר ידועה שנים רבות.

צידוד חד-פס וצידוד את“נ

בתחום-התדרים שבו פועלים צידוד חד-פס מזה וצידוד את“נ מזה, הגורם החשוב ביותר המשפיע על טנח השידור הוא עצמת האות המשודר. השואה תיאורטית לפי חישובים, שאומתה הלכה למעשה, מראה לנו שמשדר חד-פס יגיע לאותם הטנחים כמו משדר את“נ כשהספקו רבע מזה של משדר את“נ; במלים אחרות — משדר חד-פס בעל עצמה של 100 ואט יתן את אותן התוצאות כמו משדר את“נ של 400 ואט. ברור שיש בזה יתרון עצום, המתבטא לא רק באנרגיה הנחסכת אלא גם במשקל הצידוד ובממדיו. השואה בין שני משדרים צבאיים של חיל-האוויר האמריקאי, אשר פותחו שניהם על-ידי חברת „קולנס“ בשנים האחרונות, תראה לנו את היתרונות הגדולים של משדר החד-פס הן מבחינת העצמה המשודרת והן מבחינת משקל המכשיר, נפחו וצריכת-האנרגיה שלו.

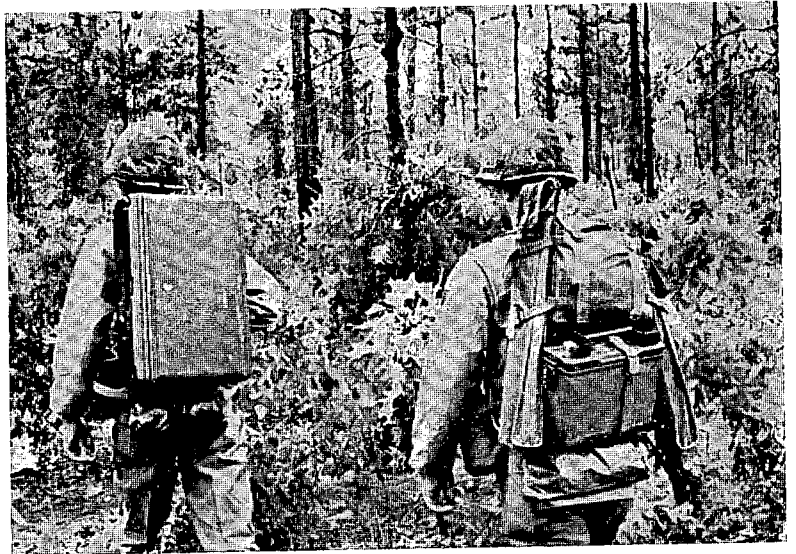
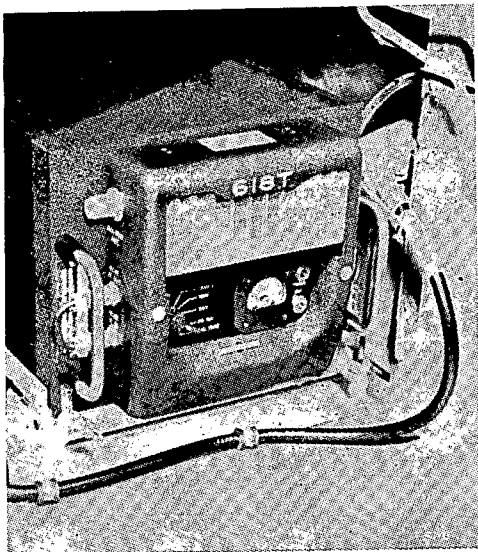
תכונות	חד-פס AN/ARC = 58	את“נ AN/ARC = 38	יחס בין חד-פס לאת“נ
הספק נקוב	1000 ואט	100 ואט	1:40
הספק אפקטיבי	4000 ואט	100 ואט	1:1.25
משקל	74 ק"ג	59 ק"ג	1:1.09
נפח	0.109 מ ³	0.1 מ ³	1:1.43
הספק נצרך	1480 ואט	1030 ואט	

השואה זו מוכיחה כי למרות שההספק האפקטיבי של משדר החד-פס גדול פי 40, הרי באשר ליתר הנתונים עולה הוא אך במעט על משדר האת“נ.

יתרונות החד-פס

ההבדלים העיקריים בין החד-פס לאת“נ הגם כפי שראינו: ביטולו של הגל-הנושא באת“נ המכיל אנרגיה רבה; הצורך ברוחב-תדרים צר יותר; עצמה משודרת חזקה יותר. נקודות-השואה אלו יש בהן תועלת הן לכל-אחד המשתמש בצידוד החד-פס והן לתקשורת-הרדיו בכללותה.

היתרון למשתמש — ברור; שהרי באמצעות מכשיר יותר קטן וקל יוכל להשיג טנחים גדולים יותר, ובאמינות יתרה. אך לא נופל מזה היתרון המושג לגבי תקשורת-הרדיו בכללותה. צמצום התדרים המשודרים יביא לידי כך שאפשר יהיה לחלק



משמאל: מכשיר חד-פס, T-618, בעל הספק של 400 ואט; מקובל בעיקר בחיל-האוויר האמריקאי. מימין: AN/PRC 47 הנמצא בשלב הפיתוח וישרת את כוחות-היבשה; הספקו — 100 ואט. משקלו הקל יחסית (כ-35 ק"ג) מאפשר את נשיאתו ע"י שני חיילים ואף את הצנחתו.

הסיכור שבבנית המכשירים הנו בעיה מתמדת. עקב האחזקה הטכנית החייבת להיות ברמה גבוהה ביותר.

לסיכום

ציוד חד-פס מהווה אמצעי-תקשורת יעיל בתחום התדרים הגבוהים (בין 2 ל-30 מה"צ); עצמתו הגדולה לעומת ממדין והאנרגיה הנצרכת, מאפשרים בנית מכשירים שאפשר להת-קינם בכלי-רכב — ועל-ידי כך להשיג טנחים אשר כיום כמעט ואינם ניתנים להשגה מתוך כלי-רכב.

הצמצום ברוחב הפס המשודר יאפשר הכנסת מספר רב יותר של תחנות לאותו תחום; ואילו דיוק-התדר הרב בו מצטיינים מכשירי החד-פס יקטין עד למינימום את הזמן הדרוש בכדי לעבור מתחנה אחת לשניה. בכל התכונות האלו יש לראות, בנוסף לשיפור תנאי התקשורת בקנה-מידה בינלאומי, גם יתרון גדול באמצעי התקשורת לכל צבא חדיש, הבנוי ללחימה בתנאי ניידות, המתבטא בהשגת טנחים גדולים יותר, שיפור אמינות הקשר וגמישות רבה יותר בחלוקת התדרים ובהעברה מתדר לתדר.

את תחום-התדרים העומד לרשותנו בין תחנות רבות יותר — ועל-ידי כך להגדיל את אפשרויות התקשורת. כבר דובר לעיל בענין הצורך בדיוק רב של התדרים המשודרים בחד-פס, ודיוק זה מאפשר אף כיוון מהיר ונוח של המכשיר, מעבר מהיר מתדר אל תדר וכן את צמצום "פסי-המגן" (דהיינו — הרוח שבין תדר של תחנה אחת לזה של שכנתה, בכדי למנוע הפרעות גומלין ביניהן); כך שבסופו-של-דבר נוכל להכניס לפחות שתי תחנות חד-פס במקום תחנת את"נ אחת.

מגבלות של החד-פס

המגבלות העיקריות של ציוד חד-פס הן המחיר הרב של המכשירים והמבנה המורכב של הציוד. שני הדברים נגרמים בעיקר על-ידי הדרישה לדיוקו של התדר, החייב להיות בסדר-גודל של 0.2 עד 2 חלקי-מיליון — בעוד שבשיטות המקובלות מסתפקים בדיוק של 50 עד 200 חלקים למיליון. דיוק-תדר זה מושג בדרך-כלל על-ידי גביש אחד המשמש את המשדר והמקלט גם יחד — ועל-ידי שיטות-בקרה מורכבות השומרות על כך שכל המעגלים במכשיר יפעלו בהתאם ליציבות התדר של הגביש. אם המחיר הגבוה מהווה מגבלה חד-פעמית, הרי