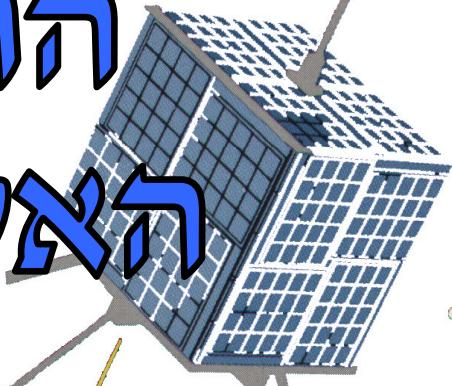


# עקרונות התקשרות האלקטרונית



## לחובי רדיו

אינגר משה  
4Z1PF

## נאן

הוסף "קידומין ומודולין אוניברסיטאות" רכבת האזב  
המעסילה פועל נועינט גערל. רעל אוניברסיטאות  
פ"עאג, צויל צויל א. ווילט כריסטיאן איזר זונק  
ונענין אוניברסיטאות אוניברסיטאות אוניברסיטאות  
לטוטליען.

הוינט האנגלי הוסף הוינט אוניברסיטאות אוניברסיטאות  
ונענין אוניברסיטאות פועל כז' פאַי אוּוניברסיטאות אוניברסיטאות  
פְּרִיאָד אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן  
כְּנֵסֶיךְ גְּדַעַת גְּדַעַת גְּדַעַת גְּדַעַת גְּדַעַת גְּדַעַת  
רְאַקְעָד אֲגָּעָה אֲגָּעָה אֲגָּעָה אֲגָּעָה אֲגָּעָה.

עיה עיר, בז' הוסף ריש אוניברסיטאות אוניברסיטאות, עיח דה אוניברסיטאות  
הוסף פְּרִיאָד אֶלְגָּעָן כְּז' אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן  
אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן.  
פְּרִיאָד אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן  
אוֹלְפִּיס אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן אֶלְגָּעָן.

אליעזר נאן  
ו-2003 נובמבר

## תוכן עניינים

5	הקדמה
6	מושגים בתחום תקשורת אלקטرومגנטית
6	הגדרת תקשורת
6	העברה מיידע
8	האפנון
9	מגבילות במערכת תקשורת
11	יצירת גלים אלקטромגנטיים
14	ספקטראום הגלים האלקטרומגנטיים
18	התפשטות גלי רדיו
18	גל משטחי
18	גל מרחב
18	גל רקייע
20	דעיכה
21	אנטנות
21	אנטנת דו-קוטב
21	עקבות קריינה
23	זווית קריינה
23	רווחב פס
24	התנגדות אופיינית
24	אנטנת היagi
25	הגבר אנטנה
26	אנטנת משטח הארקה
26	אנטנת ג/8
27	אנטנת חלון
29	קווי תמסורת
30	תאום הקו לעומס
31	אפנון
31	אפנון תנופה
32	גורם האפנון
33	פסי צד באפנון תנופה
35	רווחב פס באפנון תנופה
36	אפנון תדר
36	סטית התדר ומנת האפנון
37	פסי צד ורווחב פס באפנון תדר
38	יתרונות וחסרונות FM בהשוואה ל-AM
39	מקלטי רדיו
39	מקלט ישר
41	תכונות מקלטי הרדיו
41	ברירות המקלט
41	רגישות
42	נאמנות

43	מקלט סופרהטרודין
45	תדר בבואה
47	מקלט סופרהטרודין כפול
49	מסרי רדיו
51	קידוד השידור והקליטה
51	צרור הפעלה
51	תדר תת שמע
52	DTMF
52	DTSS
53	תקורת ספרטיבית
53	אות אנלוגי
53	אות ספרתי
53	aphael
54	קידוד
54	ממיר אנלוגי/ספרטיבי
55	זיהוי שגיאות
55	סיבית התחלת וסיבית סיום
56	מודם
	קרינה אלקטرومגנטית והשפעתה
58	על גוף האדם
62	לווייני תקשורת
62	חוקי קפלר
63	חוקי המשיכה הכבידית של ניוטון
64	זמן מחזור – זמן הקפה
65	מסלול לוויינים
65	מסלול מעגלי
65	מסלול מסונכרן עם השימוש
66	מסלול גיאוסטציוני
66	מסלול מוניה
67	עקיבה
68	טרנספונדר – מшиб
69	מערכות הלוין
	נספח א'
79	עוצמת אות - הדציביל
	נספח ב'
72	נתוני אנטנה

## הקדמה

"ראו מה זאת עשה אלוהים לנו" בمبرק זה חנוך סמואל מורס את הטלגרף הראשון בעולם, ובכך החל ב- 1844 עידן התקשורות החוטית. העברת קולות למרחוקים גדולים התאפשרה עם המצאת הטלפון בשנת 1876 על ידי אלכסנדר גראם בל, בסוף המאה ה-19 - הומצאה המרכזת האוטומטית, וכתווצאה מכך התפתחו רשתות הטלפונים בקנה מידה נרחב.

המערכת האלחוטית הראשונה של שידור-קליטה, נבנתה על ידי היינריך הרץ בשנת 1886. הרץ הצליח לקלוט את הקירינה האלקטרומגנטית המשודרת על ידו עד למרחק של 20 מטר מהմשדר. מהניסיונות שערכץ, הראה כי לקירינה זו כל התכונות של קרניין אוור: התפשטות בכווים ישראלים, החזרה, קיטוב ושבירה. בכך הוא אישש את התיאוריה של מקסול, לפיה מתפשטת הפרעה אלקטרומגנטית למרחב במחירות האור.

בשנת 1893 המציא אדיסון את שופורת הריק, זו אפשרות את שיכולו המשדר והמקלט של הרץ, ואפשר את השידור למרחוקים גדולים.

בשנת 1897 המציא מרקוני את הטלגרף האלחוטי הראשון, הוא הצליח להגדיל את טווח השידור באמצעות בלוניים ועיפונים להגברת האנטנות. יש הרים במרקוני מציא הרדיו.

שפורת הטלוויזיה הראשונה הומצאה ב-1923 על ידי זבוריקין. שנתיים לאחר מכן נערך שידור הטלוויזיה הראשון - בשחור לבן, בראשית שנות החמשים הוחל בשידורי צבע.

המצאת הטרנזיסטור ב-1948 על ידי ברדין, בראטאן ושוקלי, חוללה שינויים מפליגים בתחום התקשורות.

בגלל הממדים הזעירים, ובעיקר בכלל טכניקות של הכללה בקנה מידה רחב, התפתח השימוש בתקשורת ספרטיבית (DIGITAL) במקומות בתקשורת תקibilית (ANALOG) והתאפשר בין השאר השימוש בלוייני תקשורת להעברת שידורים למרחוקים גדולים.

**האם ניתן לחזות את התפתחות התקשורות בעתיד?**

על כך אין לנו תשובה, אנו שומעים חדשות לבקרים תחזיות מתחזיות שונות, אך יתכן והמצאה נוספת תחולל מהפיכה חדשה שלא חשבנו עליה.

## מושגים בתקשורת אלקטромגנטית

### הגדרות תקשורת

ניתן להגדיר את התקשות כתהליך שבו מועבר מידע ממוקם מסוים, המכונה מקור המידע (SOURCE) למקום אחר, המכונהיעד המידע (DESTINATION). קיימים אמצעים שונים לביצוע תהליך זה, אולם אלו נתרכז באמצעות האלקטרוניים בלבד.

### העברה מידע - סקירה כללית

תחילה נסה להגדיר את המושג מידע (בתוך התקשות). נוכל לקבל מושג על מהות המידע אם נזכיר על צורות שונות שבhn הוא מתגלה: סידרה של סמלים או אותיות, גודל פיזיקלי כגון: לחץ או טמפרטורה, המשתנה בתלות בזמן, צירופים שונים של עצמת אור או צבעים, המרכיבים תמונה טלוויזיה ועוד.

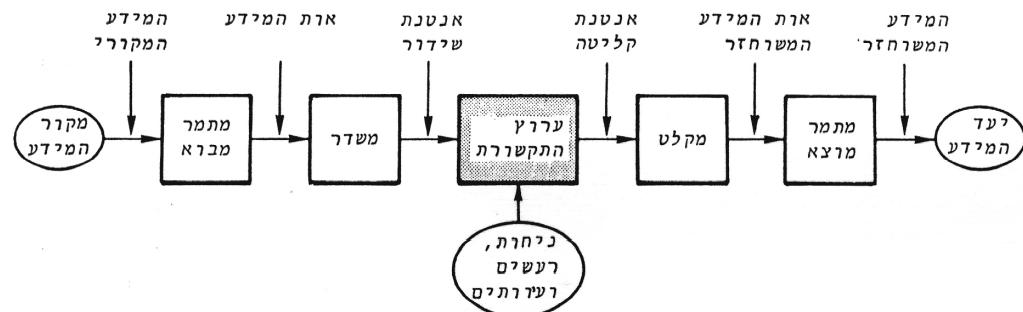
במרבית המקרים, המידע במקורו אינו חשמלי ולכן יש צורך להמיר אותו לגודל חשמלי, המכונה אותן המידע או פשוטות (SIGNAL).

ההתקנים המבצעים את ההמרה מכונים מתמירים (TRANSDUCERS). לדוגמה, המיקרופון ממיר את גלי הקול לשינויי מתח או זרם ואלה מהווים את אות החשמלי המייצג את הקול.

דוגמה נוספת היא מצלמת הטלוויזיה: היא כוללת מתמר המתרגם שינויי בבהיקות המראה המצלום לשינוי זרם, מהוים את אות הטלוויזיה.

لمתמורים אלה חשיבות רבה כשלעצמם, אולם לא נדוע בהם כאן. אנו נתחיל את הדיוון מהרגע שהמידע תורגם לאות חשמלי.

**באיור 1 מושגים העיקריים העיקריים העיקריים של מערכת תקשורת.**



איור 1- תרשים עיקורי של מרכיבי המערכת תקשורת

אם נתעלם מהמתמרים במבוא ובמוצא, נראה שמערכת התקשרות מורכבת מ-3 חלקים עיקריים :

א. משדר (TRANSMITTER).

ב. מקלט (RECEIVER).

ג. ערוץ התקשרות (TRANSMISSION CHANNEL).

תפקידו של המשדר להביא את אות המידע למצב נוח לשידור, כלומר, בהתאם אליו לתנאים מסוימים השוררים בערוץ התקשרות. לשם כך, המשדר מרכיב את אות המידע על אות אחר, המכונה גל נושא (CARRIER WAVE). פעולה הרכבה נקראת אפנון (MODULATION) ובהמשך נדוע בו בצורה מפורטת.

ערוץ התקשרות הוא המונח המצביע על הסביבה או התווך (MEDIUM) שבין המשדר למקלט. מבחנים בין ערוץ חוטי, המורכב מזוג תילים שדרכים מועבר אות המשדר למקלט, ובין ערוץ אלחוטי, המנצל את כוشرם של גלים אלקטרומגנטיים (ELECTROMAGNETIC WAVES) להטפסת באטמוספירה או בחלל.

הערוץ הקוויי יכול להיות זוג תילים, כבל משותף ציר (COAXIAL) או סיבים אופטיים. כאשר ערוץ התקשרות הוא החל החופשי, משתמשים באנטנת שידור לתיאום בין המשדר לבין הערוץ, ובאנטנת קליטה לתיאום בין הערוץ לבין המקלט.

לכל ערוץ תקשורת יש שתי השפעות חשובות על האות המשודר. בדרך כלל שתיהן לא רצויות :

הachat - ניחות (ATTENUATION) של אות המשודר, כלומר החלשת עצמהו, ככל שהוא מתקרם בתוך הערוץ.

השנייה - הכנסת רעשים (NOISE) ועיותים (DISTORTION) באות המשודר.

הרעשים עשויים להיות מעשה ידי אדם, כגון תחנות שידור נוספות הפעולות באותה סביבה, ניצוצות של מנועים הפעילים בסמוך למשדר או למקלט ועוד.

נוסף לכך, קיימים רעשים טבעיות הנובעים מהאופי האקראי (RANDOM) של תנوعת האלקטרונים במוליכים, מתהליכים חשמליים המתרחשים בשכבות שונות של האטמוספירה ועוד. רעשים אקראיים אלה אי אפשר לסלק בשום אופן.

גם אילו הצלחנו לסלק את כל גורמי הרעש בערוץ התקשרות, עדין היו נותרים העיוותים. אלו הם שינויים בתכונות מסוימות של אות המשודר, הנגרמים במהלך התקדמותו בערוץ. דוגמא לעיוותים אלה היא שינוי המופיע של אותות בעלי תדרים שונים.

לאחר המעבר דרך ערוץ התקשורות, מגיע האות המשודר אל המקלט. אותן המידע מורכב (או "רוכב") על גל נושא. תפקיד המקלט הוא להפריד את אותן המידע מתוך האות המשודר.

האות המגיע למקלט אינו זהה לאות המשודר - בגלל הנichות, הרעשים וה uninotים הקיימים בערוצ. פועלתו העיקרית של המקלט היא מיצוי האפנון (DEMODULATION) שהוא תהליך הפוך לתהליכי האפנון. מונח נוסף המתאר פעולה זו, הוא גילוי (DETECTION).

### האפנון

אין אפשרות לנו להבהיר את המידע כפי שהוא במקור, יש צורך להרכיבו על גל נושא. פועלות הרכבה נקראת בשם אפנון. בזמן האפנון מושנים את אחד הגדים האופייניים של הגל הנושא, בהתאם לערך הרגעי של אותן המידע.

קיים שלושה גדלים אופייניים לכל גל נושא :

. א. תנופה (AMPLITUDE)

ב. תדר (FREQUENCY)

ג. מופע (PHASE)

בהתאם לכך, ניתן לבצע אפנון תנופה (אט"ז), אפנון תדר (אט"ד) ואפנון מופע.

נניח כי הגל הנושא הוא סינוסי. גל זה נוח לצורכי העברת מידע: רוחב הפס של גל זה הוא הקטן ביותר. נוח לייצר את הגל (בעזרת מתנד) וקל לאפנן את הגל.

כאשר מבצעים אפנון תנופה AM (AMPLITUDE MODULATION), משתנה התנופה של הגל הנושא, בהתאם לעוצמה הרגעית של אותן המידע.

כאשר מבצעים אפנון תדר FM (FREQUENCY MODULATION), משתנה התדר של הגל הנושא, בהתאם לעוצמה הרגעית של אותן המידע.

כאשר מבצעים אפנון מופע PM (PHASE MODULATION), משתנה המופע של הגל הנושא בהתאם לעוצמה הרגעית של אותן המידע.

בכל אחת מצורות האפנון, הגל הנושא הוא בעל תדר גבוה בהרבה מזו של אותן המידע, ובמהלך האפנון מתבצעת העתקה של תדרי אותן המידע לתדרים יותר גבוהים.

מתוך הדיוון הקצר בתהליכי האפנון, ברור שהוא מסבך במידה ניכרת את מערכת התקשורות. משום כך, חייבים לחתה תשובה ברורה ומשמעות לשאלת: מדוע קיים הצורך באפנון?

למעשה קיימים מספר טעמים שכל אחד מהם מספיק כשלעצמו.

א. קריינה עיליה של גלים אלקטромגנטיים, מחייבת שימוש באנטנות שמדיחן היפותים הם לפחות עשרית מאורך הגל המקורי. אותן מידה בתחום השמע, למשל, מכילים תדרים נמוכים עד  $200\text{Hz}$  או פחות, ועשרה אורך הגל תהיה אז  $3\text{m}$  (אורך הגל מחושב על פי היחס  $\lambda = C/f$ , שבו  $C$  היא מהירות האור).

ב. הצורך בריבוי תחנות השידור - אלמלא האפון, לא ניתן היה להפעיל באותו אזור יותר מתחנת רדיו אחת. הפעלת שני משדרים או יותר, תגרום לערב דבר ולא תהיה כל אפשרות להפריד בין אותן המידוע של התחנות השונות. לעומת זאת, בחירת תדרי גל נושא שונות לתחנות שידור שונים, מאפשרת לבורר בין התחנות הנקלטות באמצעות מעגלי תהודה, המכוונים לתדרים אלה.

ג. מצומם הרעים המתווספים לאות המשודר בתוך ערוץ התקשות - לא בכל שיטה ניתן לדכא את הרעים, אך הדבר אפשרי במקרה מסוים האפון. במקרה, מדובר ברוחב במאפיין מסוים הנורר הפסד במאפיין אחר.

## מוגבלות במערכות תקשורת

ניתן לחלק את המוגבלות במערכות תקשורת לשני סוגים:

לסוג הראשון שייכות המוגבלות הטכנולוגיות: לאחר שבמערכות מורכבות אותן המידוע חייב לעבור סידרה ארוכה של שינויים (כגון: הגברה, אפון, סינון וכו'), קיימת הבעיה של שימוש המעגלים המתאימים. בשנים האחרונות אנו עדים להפתוחיות טכנולוגיות מרשים, המגבירות את הסיכויים לכך, בעיות מימוש לא יגilio את שכלול מערכות התקשות בעתיד.

אולם קיימות מוגבלות יסודיות נוספות שמקורן בטבע עצמו. שתיים הן החשובות ביותר:

מוגבלה יסודית ראשונה קשורה לקצב העברת המידע במערכת התקשות. ככל שנרצה להגבר את קצב מסירת המידע, כך נדרש להציג למערכת רוחב פס (BANDWIDTH) יותר גדול. מבחינה טכנולוגית, הגורם המכריע לגבי אפשרות השימוש איינו רוחב הפס עצמו, אלא היחס בין רוחב הפס לבין תדר הגל הנושא. ככל שיחס זה קטן יותר, כך יותר ניתן למש את מערכת התקשות. דוגמא בולטת לכך היא שידורי הטלוויזיה, שבהם אות המידע מתפרס על רוחב פס של  $7\text{MHz}$  משום כך, תדר הגל הנושא של אות הטלוויזיה חייב להיות גבוהה בהרבה מזו של גל המאופן על ידי אות שמע.

מכאן אפשר להבין, לשם שואפים אנשי המדע להגיע למערכות תקשורת, שבחן תדר הגל הנושא יהיה גבוה ככל האפשר. ביום מקדים רבים לפיתוח מערכות קשר שתפעלה בתחום תדרי האור, וכך אף יוכתרו בהצלחה, נזהה במחפה של ממש בכל הקשור למערכות תקשורת.

מגבלה יסודית שנייה נובעת מכך שאי אפשר לסלק למחרי את הרעים ממערכות תקשורת. מידת הדיקוק בהעברת המידע תלולה ביכולתנו לזהות את המידע האמתי מתוך האות הנקלט, הכולל גם רעשים.

אם במערכת תקשורת מסוימת האות הנקלט חזק בהרבה מהרעש, ניתן לשחזר את המידע בדיקוק רב, אך כאשר עוצמת הרעש היא בסדר גודל של האות הנקלט ותחום התדרים דומה בשניהם, לא תועיל כל הגברה, כי באוטה מידע שנגביר את האות הרצוי, נגביר גם את הרעש.

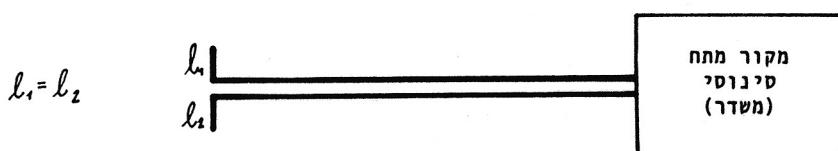
הנימוקים לצורך באופןו הוא האפשרות להקטין את הרעים. אולם דבר זה אפשרי רק על חשבו הגדלת רוחב הפס של האות המשודר. מכך אנו רואים שתי המוגבלות - רוחב הפס והרעים - קשורות זו בזו, ושיפור באחת מהן גורר הרעה בשניה.

במחקריהם האחראונים הוכח, שהינתן מערכת תקשורת בעלת רוחב פס מסוים, הפעלתה בסביבה בעלת מידת רעש נתונה - קיים גבול עליון לקצב העברת המידע דרך המערכת. גבול זה מכונה קיבול עוזץ התקשרות.



## יצירת גלים אלקטромגנטיים

איור 2 מתאר מערכת הכוללת מקור מתח סינוסי (משדר) ושני תיילים מוליכים מקבילים וקרובים. הקצה האחד של כל תייל מחובר למשדר והקצה השני מקופל.

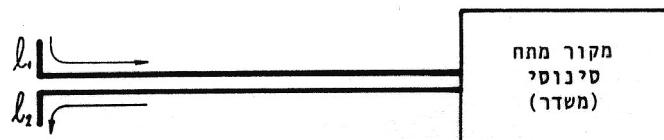


איור 2 - משדר ואנטנת דיפול

לזוג הקטעים L1-L2 קוראים בשם אנטנת דיפול (דו-קוטב). המשדר מפעיל כוחות על האלקטרונים שבתיילים, הוא מושך אלектرونים מטייל אחד ודוחף אלектرونים לטייל השני.

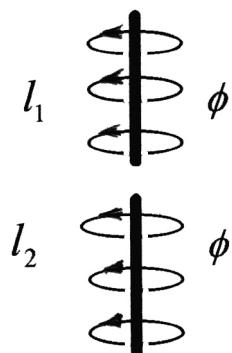
מהחר שהמתוך שספק המשדר הינו מתח מתחלה, הרי בחלק אחד של המחזור קיימת תנועת אלקטرونים מאחד הקטעים אל המשדר ומהמשדר אל הקטע השני, ואילו בחלק השני של המחזור מתחפה כיון תנועת האלקטרונים.

איור 3 - מציג את כיוני הזרמים במערכת ברגע מסוים.



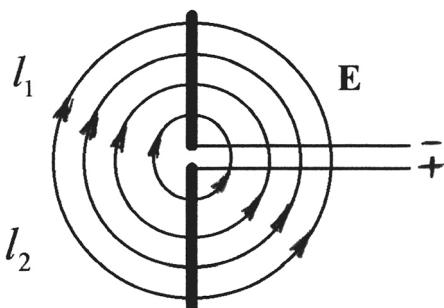
איור 3 - כיון הזרמים ברגע נתון

הזרם החשמלי הזורם במוליכים L<sub>1</sub> - L<sub>2</sub> מייצר סביבם שדה מגנטי בהתאם לחוק יד ימין.



איור 4 - השדה המגנטי  $\Phi$  סביב למוליכים

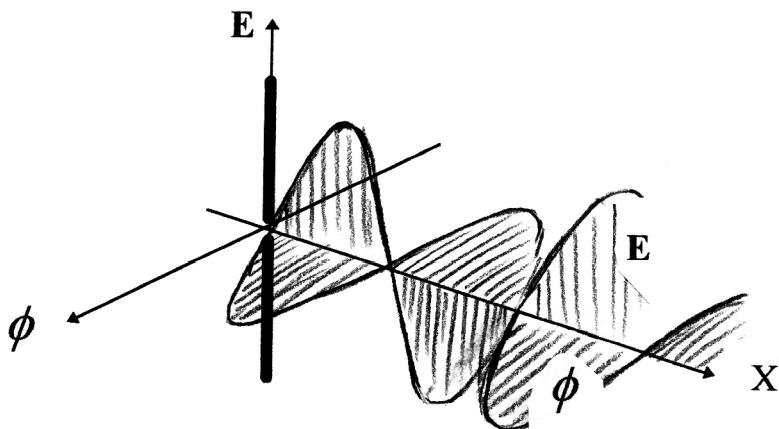
המתוך החשמלי השורר על שני המוליכים יהיה תמיד בקוטביות הפוכה זה לזה, וזאת מהתבססה שאחד המוליכים מחובר לקוטב החיובי של המקור והשני לקוטב השילילי. בכל מחצייה מחזור, מחליפן המקור את קוטביות המוליכים. בין שני מוליכים ששורר ביניהם מתכת, נוצר שדה חשמלי כפי שקרה הדבר בין לוחות קובל. איור 5 מראה את השדה החשמלי שנוצר בין המוליכים L<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>.



איור 5 - השדה החשמלי  $E$  שנוצר בין המוליכים

כיוון קובי הכוח של השדה החשמלי הם מכיוון הפוטנציאל החיובי עבר הפוטנציאל השילילי.

למעשה, משולבים שני השדות של איור 4 ו איור 5 זה בזזה, נוצר שדה חדש והוא השדה האלקטרומגנטי המכיל שני רכיבי שדה - שדה חשמלי ושדה מגנטי. שני השדות מאונכים זה לזה, השדה החשמלי E נמצא במשורר הדף והשדה המגנטי  $\Phi$  במשורר הניצב לדף. בנוסף לתמונה זו יש לזכור שמקור המתוך משנה את מתחו(וזרמו), בהתאם לפונקציית הסינוס. לכן גם השדות יהיו סינוסיים. איור 6 מציג את השדה האלקטרומגנטי כפי שהוא מתפשט מהמקור היוצר אותו (אנטנת הדיפול), עם הדגש שהשדות ניצבים זה לזה.



איור 6 - שדה אלקטرومגנטי שנוצר על ידי אנטנתה דיפול

אחד התכונות המעניינות והחוسبות של השדה האלקטרומגנטי, היא יכולתו להתרפשט למרחקים אינסופיים. התפשטות זו נעשית באטמוספירה כמו גם ברקיקנות. דוגמא טובה לכך הם קרני האור. האור הוא גל אלקטرومגנטי הדומה בצורתו ובתכונותיו לגל האלקטרומגנטי שנוצר בעזרת הדיפול. האור מגיע אלינו גם מכוכבים רחוקים מאד מרחק של מאות ואלפי שנות אור, וכך גם גלי הרדיו, גם הם גלים אלקטромגנטיים שמתפשטים למרחקים כה גדולים, כמו כן בתנאי שלא נגרום לחסימתם בדומה לקרני האור.

העמדת הפיזית של אנטנת הדיפול משנה את כיווני וקטורי השדה של הגל האלקטרומגנטי. באירועים הקודמים מולייצי האנטנה שורטטו כאשר הם ניצבים לקרקע. אילו היינו מסרטטים אותם אופקיים היה הדבר משפייע על כיוון השדות. במקרה זה השדה המגנטי היה אנכי והשדה החשמלי אופקי. מידע על כיוון השדות הוא חיוני, כיוון שיש להקפיד שאנטנת המקלט תהיה בכיוון דומה לזה של המשדר, רק במקרה כזה תהיה עצמת הקלייטה מרבית.

כדי להגדיר את כיווני השדות, משתמשים במושג הנקרא בשם קיטוב הגל.

**קיטוב הגל - כיוון וקטור השדה החשמלי של הגל האלקטרומגנטי.**

לפי הגדרה זו, תהיה האנטנה שבאיורים מקוטבת בקיטוב אנכי. סיבוב האנטנה ב-90° מעלות יגרום ליצירת גל אלקטرومגנטי בעל קיטוב אופקי. גלי אור הבאים מהשמש, הם בעלי קיטוב מעגלי, ז"א - כיוון וקטור השדה החשמלי שלהם משתנה במשך הזמן ואינו קבוע במרחב.

## ספקטום הגלים האלקטרומגנטיים

gal אלקטرومגנטי מאופיין על ידי תדר מקור המתח (המשדר) או אורך הגל.  
אורך הגל - זהו המרחק (נמדד במטרים) בין שני שיאים קרובים של gal אלקטرومגנטי.

הקשר בין אורך הגל לתדר, ניתן על ידי הנוסחה :

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

כאשר :  $f$  - תדר הגל ב-Hz.

$\lambda$  - אורך הגל ב-m.

C - מהירות התפשטות הגל ב-m/sec.

דוגמא : חשב אורך gal של תחנת שידור המשדרת בתדר 100MHz

פתרונות : מהירות התפשטות בריק  $C = 3 \times 10^8 \frac{m}{sec}$

תדר השידור  $f = 100 MHz$

לכן :

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8}{100 \times 10^6} = 3m$$

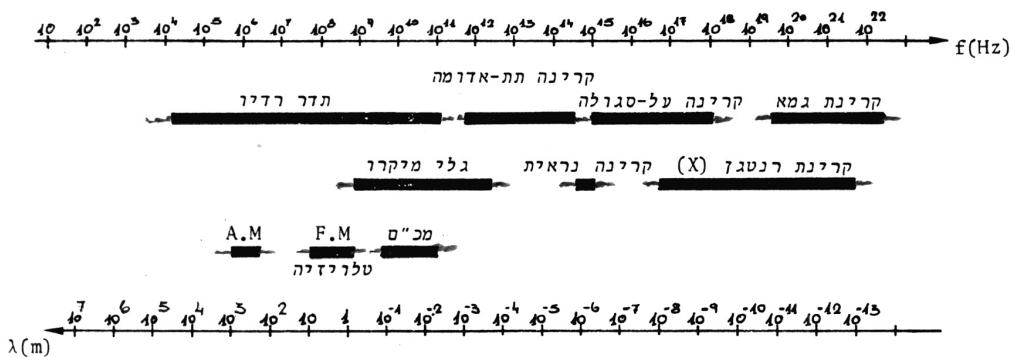
מהירות התפשטות של gal אלקטرومגנטי בחלל היא מהירות הגבואה ביותר הידועה, אין מהירות גבואה ממנה. בכל תוויך אחר, מהירות הגלים האלקטרומגנטיים תהיה נמוכה ממהירות זו.

ניתן לייצר או לפגוש בטבע גלים אלקטромגנטיים שתדירותיהם משתרעות על תחום רחב למדי, בתחום זה מתחיל בערך ב-1000 הרץ ומסתיימים בערך ב-  $10^{25}$  הרץ. בתחום זה קוראים בשם "הספקטום האלקטרומגנטי".

את הספקטום האלקטרומגנטי נהגים לחלק לתחומי תדרות מסוימים, בהתאם לטכניות בהן משתמשים לצורך ייצור או מדידת התדריות שבכל תחום (לכל תחום טכניות מסוימות).

לתחומי אלה שחלקם חופפים חלקית זה את זה, נתנו שמות כמו : תדר רדיו, גלי מיקרו, קרינה תת-אדומה, קרינה נראית וכו'.

איור 7 מתאר את ספקטרום הגלים האלקטרומגנטיים.



איור 7 - הספקטרום האלקטרומגנטי

הקו העליון באיור משמש כציר התדריות והקו התחתון כציר אורך הגל בריק. החלוקה על הצירים הנה לוגריתמית ולכון קטיעים בעלי אורך שווה על הצירים, אינם מייצגים תחומיים שווים של תדריות או אורך גל.

התחומיים השונים מיוצגים על ידי פסים שחורים, כדי להציג את העובדה שקבוצות התחומיים הללו אינם מוגדרים, הושארו גם קצות הפסים לא מוגדרים.

תחום תדרי הרדיו מחולק חלוקה נוספת, וזאת בהתאם לתכונות הגלים בתחום השוניים:

תחום תדרים	תחום אורך הגל	שם התחום
30-300KHz	$10^3 \div 10^4 m$	ת"נ (תדר נמוך) LF (LOW FREQUENCY)
300KHz-3MHz	$10^2 \div 10^3 m$	ת"ב (תדר בינוני) MF (MEDIUM FREQUENCY)
3-30MHz	$10 \div 10^2 m$	ת"ג (תדר גבוהה) HF (HIGH FREQUENCY)
30-300MHz	$1 \div 10 m$	תג"ם (תדר גבוהה מאוד) VHF (VERY HIGH FREQUENCY)
300MHz-3GHz	$10 cm \div 1m$	תא"ג (תדר אולטרה גבוהה) UHF (ULTRA HIGH FREQUENCY)
3GHz-30GHz	$1cm \div 10cm$	גלים סנטימטריים SHF (SUPER HIGH FREQUENCY)
30GHz-300GHz	$1mm \div 1cm$	גלים מילימטריים EHF (EXTREMELY HIGH FREQUENCY)

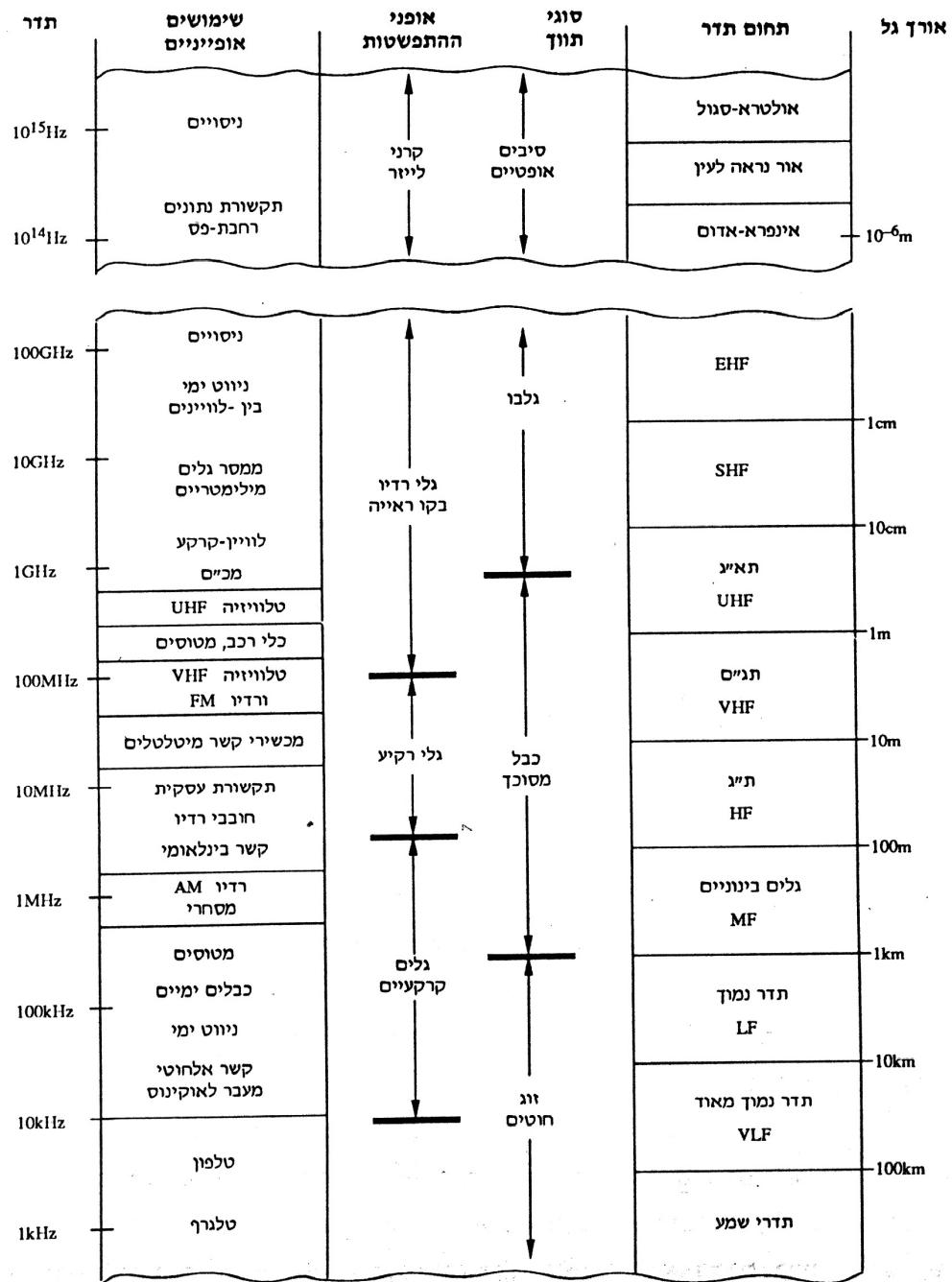
מיון זה הוא עקרוני. החלוקת השימושית היא :

גלים ארוכים	<b>20KHz - 550KHz</b>	<b>LW</b>
גלים בינוניים	<b>550KHz - 1500KHz</b>	<b>MW</b>
גלים קצרים	<b>1.5MHz - 30MHz</b>	<b>SW</b>
גלים קצרים מאוד	<b>30MHz - 300MHz</b>	<b>VHF</b>
גלים אולטרא קצרים	<b>300MHz - 3GHz</b>	<b>UHF</b>
גלים סופר קצרים	<b>3GHz</b>	<b>SHF</b> <b>על</b>

השימוש שנעשה בתדרי הרדיו השונים בא לביטוי בטבלה הבאה :

תחום גלים	שימוש
גלים ארוכים	תחנות משואה
גלים בינוניים	תקשרות אזרחית באפנון AM לטוחים קצרים
גלים קצרים	תקשרות אזרחית למרחקים ארוכים, קשר מסחרי, קשר בין מטוסים וספינות, שכניות ידיעות וקשר צבאי.
גלים קצרים מאוד	תקשרות אזרחית בתחום המדינה באפנון FM , טלוויזיה, תקשורת מסחרית, תקשורת חירום (משטרה, כיבוי אש ועוד"א)
גלים אולטרא קצרים	תקשרות מסחרית, טלוויזיה, טלפונים סלולריים ומכ"ם
גלים סופר קצרים	מכ"ם, תקשורת לוינית

הטבלה הבאה מדגימה ומסכמת גרפית את הנאמר לעיל



## התפshootות גלי רדיו

תחום גלי הרדיו משתרע בערך בין  $10^4$  הרץ לבין  $10^{10}$  הרץ, בתוכו כלולים שידורי רדיו לאזרחים, שידורי טלוויזיה, מכ"ם, קשר לוויינים ועוד.

גלי הרדיו המשודרים יכולים להתפשט במספר אופנים, החשובים שבהם הם :

- א. גל משטחי (גל קרקע).
- ב. גל מרחבבי.
- ג. גל רקייע.

### gal meshachi (30KHz-7MHz)

gal meshachi הוא gal הצמוד לפני הקרקע (או פni הים) ועוקב אחר צורת הקרקע. gal meshachi יכול לעקוף מכשולים שונים - הרים, מבנים וכו'.

gal meshachi דועך מהר מאד עקב השראת זרמים חשמליים ממנה לקרקע, מן ההשראה נובעים הפסדי אנרגיה המחלישים את עוצמת הגל במחירות, תופעה הנקראת בשם ריסון. הריסון גדול ככל שהקרקע בעלת מוליכות גרועה וככל שתדר השידור עולה.

טוח השידור של גלי משטח הוא בתוך המדינה או בתחום היבשת בלבד, וגם זאת, בהספק שידור ניכרים ביותר. עקב הריסון הגבוה בתחום התדרים הגבוהים, אין טעם לשדר באופן זה מעל לתדר של 7 מה"צ.

### gal merhab (מעל 30MHz)

gal זה מתפשט ישירות בין אנטנת המשדר לאנטנת המקלט. הקליטה באמצעות gal זה טובה, כאשר אין בדרך מכשולים כגון : הרים ומבנים גבוהים.

עקב תוכנות ההתפשטות בכווים ישרים, תחום CISCO שידור גלי רדיו באופן זה הוא עד האופק בלבד (כ— $100$  ק"מ). לכן קיימים צורך בתקנות מסר לכיסוי המדינה כולה.

gal המרחב מסוגל להתפשט בכווים ישרים ואף לחדור את היונוספירה, שכן הוא שימושי לתקשורת בין כדור הארץ ללוויינים בחלל החיצוני.

### gal Rakיע (7MHz-30MHz)

gal זה מוקן מאנטנת השידור לעבר הרקיע, ובתנאים מסוימים הוא מוחזר מהרקיע חזרה לדoor הארץ. סיבת ההחזרה של gal מהרקיע היא היינון הקיים בשכבות האטמוספירה העליונות (היונוספירה). ייינו זה נובע מהקרינה האלקטרומגנטית המגיעה מהשמש והכוכבים.

בניסויים ותצלויות מצאו כי החזרתו של gal אלקטромגנטי המשודר לעבר היונוספירה תלוי ב-3 גורמים:

- א. תדרות gal  $f$
- ב. זווית השידור שלו  $\Phi$ .
- ג. צפיפות היינון ביונוספירה.

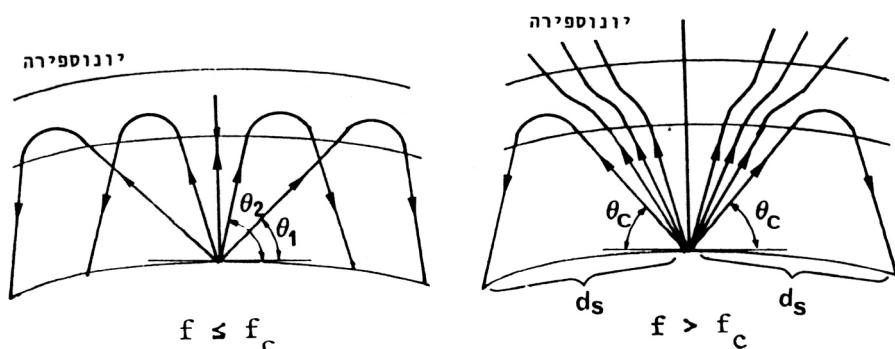
צפיפות היינון של היונוספירה תלולה בכמות כתמי השימוש, אשר מבטא את עוצמת התהיליכים הגראניים על פי השימוש ואת עוצמת הקרינה ממנה. כמו כן, היא תלולה בשעות היום והלילה. היינון גדול ביום וקטן בלילה, והוא גדול כאשר האטמוספירה חשופה יותר לקרינת השמש. לכן קשר הרדיו באופן זה יהיה טוב יותר ביום מאשר בלילה.

עבור צפיפות היינון נתונה, קיימת תדרות קריטית  $F_c$  כך ש:

- א. אם  $F < F_c$  gal מוחזר בכל זווית שידור.
- ב. אם  $F > F_c$  ההחזרה של gal מתאפשר רק עבור זווית שידור שהן קטנות מזווית שידור מסוימת  $\Phi$ .

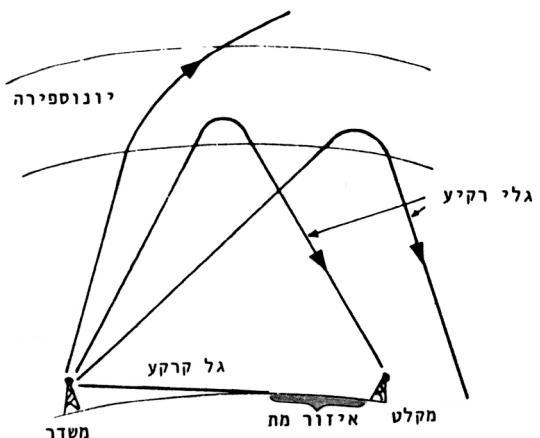
لتדרות  $F_c$  קוראים בשם "התדרות הקריטית של היונוספירה" ולזווית  $\Phi$  קוראים בשם "הזווית הקריטית של gal".

איור 8 מראה שני תרשימים. בתרשימים השמאלי תדר השידור נמוך מהתדר הקritisטי ולכן הגלים מוחזרים על ידי היונוספירה. באיוור הימני מתאפשרת ההחזרה רק החל מזווית שידור  $\Phi$ . מעבר לזו gal אינו מוחזר לפרקע, אלא חולף דרך היונוספירה לחלל.



איור 8 - תדר קritisטי והחזרות

הgal המוחזר מהיונוספירה מגיע למקלט הנמצא רחוק מתחנת השידור. המרחק בין המשדר לחזרת gal לקרקע נקרא בשם מרחק דילוג. בתחום הדילוג לא תיתכן קליטת גלי רדיו, אלא רק קרובה לתחנת השידור, שם קיימים גלי קרקע. האзор בו אין קליטה, של גלי קרקע ולא של גלי רדיו נקרא בשם אзор מת (אייר 9).



אייר 9 - מרחק דילוג ואזור מת

### דעיכה

כתוצאה משינויים רגילים ביונוספירה, יתכן כי הגלים המוחזרים לאנטנת המקלט אינם קבועים בעצמתם. התוצאה במקלט תהייה שינוי בעוצמת הקליטה, שינוי החזירים ומשתנים כל מספר שונות או דקota.

התופעה זו של השתנות עוצמת הקליטה קוראים בשם "דעיכה".

מקרה אחר בו מתקבלת דעיכה, היינו המקרה שבו מתקימת באנטנת הקליטה סיכון אוותות של gal קרקע (או gal המוחזר מגוף כלשהו) וgal רדיו, גם כאן יכולים להתקבל שינויים בעוצמת הקליטה, כתוצאה מהשינויים באורך המסלולים של שני הגלים.

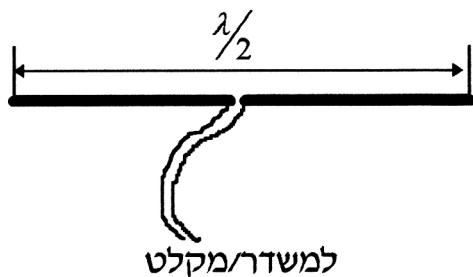
## אנטנות

אנטנה היא התקן שבאמצעותו משודרים ונקלטים גלים אלקטרומגנטיים. אנטנת שידור מיועדת להקרין למרחב את האנרגיה שה مصدر מספק לה, ואנטנת הקליטה צריכה לקלוט את האנרגיה האלקטרומגנטית ולהפכה אותה, שיאוגבר ויועבד במקלט. לאותה אנטנה תהיינה תכונות אותן תכונות, כשהפעלתן כאנטנת שידור והן כאנטנת קליטה, אלא שדרך אנטנת שידור מעבירים לעיתים הספק גבוה ואילו דרך אנטנת הקליטה עבר בדרך כלל הספק נמוך.

בחירת סוג האנטנה תיקבע בהתאם לתכונות הנדרשות מצד המשדר או המקלט. במשך השנים תוכנו אנטנות שונות בעלות תכונות מיוחדות. נסקור בהמשך את האנטנות היסודות ונכיר את תכונותיהן.

### אנטנות הדו-קוטב (הדייפול)

איור 10 - מציג את המבנה של אנטנת הדיפול



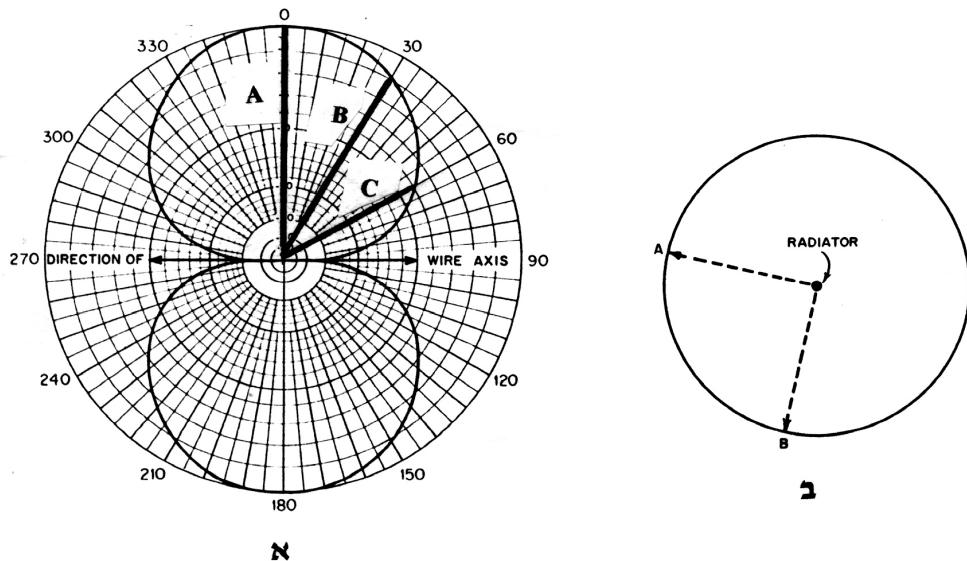
איור 10 - אנטנת הדיפול

האנטנה מורכבת מזוג מוליכים באורך מחצית אורך הגל, ממרכז המוליכים יורד קו הזיננה (הנקרא גם باسم קו העברת הספק) למשדר או למקלט. מהאיור ברור שיש להתאים את אורך האנטנה לתדר השידור, וכן לכל תדר יש צורך באנטנה בעלת אורך שונה.

### עקום הקריינה

עקום הקריינה מתאר את עוצמת הקליטה/שידור של האנטנה לכיוונים שונים.

איור 11 מתאר את עקום הקריינה של אנטנת הדיפול.



איור 11 - עקומי קרינה של הדיפול:

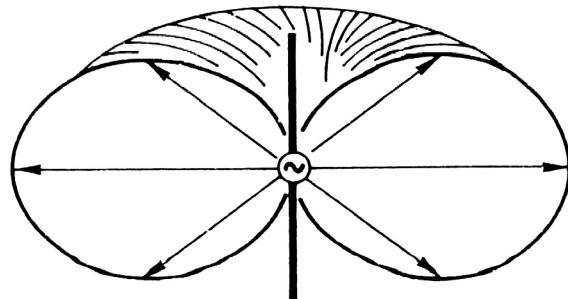
- בציר האופקי.
- בציר האנכי.

איור א' מראה כי האנטנה משדרת/קולטת באופן סימטרי ואין לה עדיפות על קלייטה מלפנים או מאחור. לעומת זאת, עוצמת הקלייטה ניצבת בינו לבין מוליכי האנטנה היא מרבית (ווקטור A). עוצמה זו יורדת ככל שנעים לעבר ווקטור B או C. עוצמת הקלייטה בכיוון מוליכי האנטנה יורדת לאפס.

ניתן לבטא את עוצמת הקלייטה בволטים או מיקרוולטים, אך הדבר לא יהיה מעשי כי נדרש לכידיל את העוקומה בכל פעם שעוצמת תחנת השידור תשנה או תנאי התפשטות הגלים תשנה, שכן מדיפים בכל המקרים לציין על העוקומה את עוצמת הקלייטה ביחידותdB. dB<sub>0</sub> מציין קלייטה בעוצמה מרבית, dB<sub>3</sub> - ירידה של 50% בהספק הקלייטה וכן הלאה (ראה נספח א').

איור ב' מראה כי לאורך ציר האנטנה היא מקירינה במידה שווה לכל הכוונים. האיור מראה במישור דו ממדי את כיווני הקרינה, מעשית עקומי הקרינה נגזרים מעוקום תלת-ממדי המתאר את התפשטות הקרינה מהאנטנה.

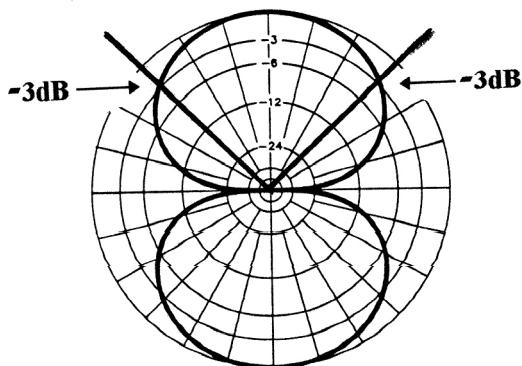
איור 12 מראה דוגמה לעוקום מרחבית של אנטנת הדיפול:



איור 12 - דיאגרמת קרינה מרחבית של הדיפול

### זווית קרינה

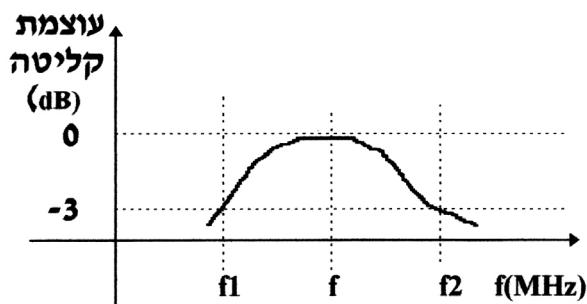
זווית הקרינה היא הזווית הכלואה בין 2 ווקטורים בהם עוצמת קליטה/שידור לא תרד מתחת ל- $-3\text{dB}$  (נקודות מחצית ההספק). קליטה של תחנות הנמצאות בתחום זווית הקרינה היא סבירה בהחלט. אם התנהה נמצאת מחוץ לזווית זו, יתכן ועוצמת הקליטה תקטן עד למצב של אי קליטת התנהה. רצוי לכן שהתחנה תימצא בטווח לציר האנטנה.



איור 13 - זווית קרינה של הדיפול

### רוחב פס

אנטנת הדיפול תוכננה לפעול בתדר מסוים, لكن נקבע אורך לחצי אורך הגל המתאים. למעשה, היא קולטת גם מעל ומתחת לתדר זה (ראה איור 14).



איור 14 - רוחב פס של אנטנה

תחום התדרים בו עוצמת הקליטה נופלת לכל היוטר ב- $3\text{ dB}$  (חצי הספק) נקרא בשם רוחב הפס של האנטנה  $\Delta f$  או  $\text{BW (BAND WIDTH)}$ .

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

## התנודות האופיינית

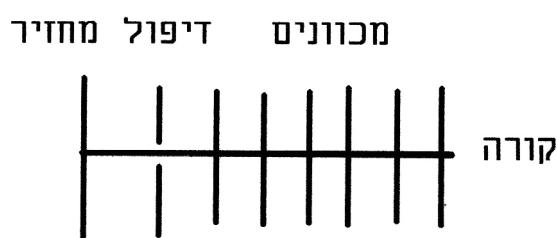
התנודות האופיינית של האנטנה מוגדרת כיחס בין המתח לזרם, בנקודות ההזנה של האנטנה, בתדר לה היא מיועדת.

התנודות האופיינית חשובה לצורך תיאום עכבות. יש לדאוג שההתנודות האופיינית של האנטנה תשווה להתנודות האופיינית של קו העברת הספק ולהתנודות הכניסה/יציאה של המקלט/ مصدر, רק אז יתקיים התנאי להעברת הספק מרבי בין הידיות השונות.

התנודות האופיינית של אנטנת הדיפול היא 73 אום.

## אנטנת היאגי

איור 15 מתאר את מבנה אנטנת היאגי.

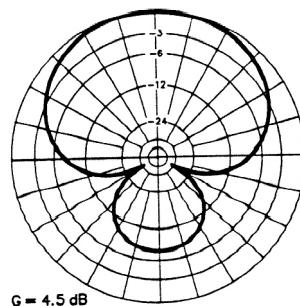


איור 15 - מבנה אנטנת היאגי

האנטנה מורכבת מרכיבים הבאים :

- (1) דיפול - חלק זה זהה לדיפול של אנטנת הדיפול. אורכו חצי אורך גל, ממנו יוצא קו העברת הספק למקלט/ مصدر.
- (2) מחיזיר - מוליך טפילי (אינו מחובר חשמלית לחלקים האחרים) הארוך בכ- 5% מהדיפול ונמצא מאחורי במרחק של כ- 0.2. תפקידו למנוע קליטת תחנות מהכיוון בו הוא נמצא.
- (3) מכונינים - מוליכים טפיליים, הקטרים מהדיפול בכ- 5% משמשים להקטנת זווית הקרינה וلتוספת הגבר.

איור 16 מתאר את עוקם הקרינה של אנטנת היאגי



איור 16 - עוקם הקרינה של אנטנת היאגי

עוקם הקרינה של אנטנתה היאgi שונה מעוקם הקרינה של הדיפול בתכונות הבאות:

- 1) זווית הקרינה צרה יותר - נובע מהימצאות המכוונים.
  - 2) נוצרו שתי אוניות שאין סימטריות, דבר שיוצר עוקמה קדמית ממנה הקליטה טובה, ואונה אחורית ממנה הקליטה גרועה.
- התכונות הניל מגדרות שני מושגים חדשים והם הגבר אנטנה ויחס הגבר פנים לאחר.

### הגבר אנטנה

מושג המראה פי כמה מגבירה האנטנה הנוכחית טוב יותר לעומת אנטנת הדיפול (נקרא גם בשם: הגבר האנטנה מעל הדיפול).

עוצמת הקליטה של האנטנה

$$Ad = \frac{\text{עוצמת הקליטה של הדיפול}}{\text{עוצמת הקליטה של האנטנה}}$$

(ברוב המקרים מעדיפים להמיר תוצאה זו ל- dB)

\* לעיתים מגדירים את הגבר האנטנה יחסית לאנטנה איזוטרופית (אנטנה איזוטרופית היא אנטנה תיאורטית המקרינה לכל הכוונים באותה עוצמה).

עוצמת הקליטה של האנטנה

$$Ai = \frac{\text{עוצמת הקליטה של אנטנה איזוטרופית}}{\text{עוצמת הקליטה של האנטנה}}$$

### יחס הגבר פנים לאחר

מושג המראה פי כמה מגבירה האנטנה טוב יותר מלפנים מאשר מאחור (FRONT TO BACK RATIO)

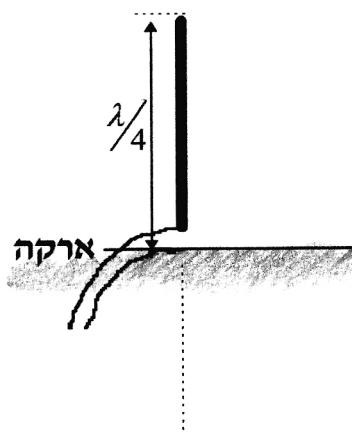
עוצמת הקליטה מלפנים

$$F/B = \frac{\text{עוצמת הקליטה מאחור}}{\text{עוצמת הקליטה מלפנים}}$$

(גם כאן מעדיפים להמיר את היחס המספרי הטהור ל- dB)

### אנטנת משטח הארץ

אנטנות הדיפול והיאギי מקרינות לכיוונים מסוימים. אם נדרשת אנטנה המסוגלת לשדר במידה שווה לכל הכוונים נבחר באנטנת משטח הארץ.



איור 17 - מבנה אנטנת משטח הארץ

אנטנה זו מורכבת ממוליך באורך  $\frac{\lambda}{4}$ . היא מורכבת בניצב לקרקע (או משטח מוליך). מבחינת השדה האלקטרומגנטי פועלת הקרקע כמראה אשר יוצרת שיקוף של המוליך. הדבר דומה לקבלת אנטנת דיפול באורך  $\frac{2\lambda}{3}$ . מוליך העברת ההספק מחוברים האחד למוליך האנטנה והשני להארקה (למוליך המשופך).

אנטנה זו מקרינה אמנים לכל הכוונים (360 מעלות) במישור הקרקע, אך אינה טובת לתקשורת עם מטוסים כי אינה מקרינה לאורך כיון המוליך. כמו כן, הגברה נמוך מהגבר אנטנת הדיפול.

אנטנה זו נוחה להרכבה על כלי רכב, כאשר משטח גג הרכב פועל כמשטח הארץ.

### אנטנת ג/8

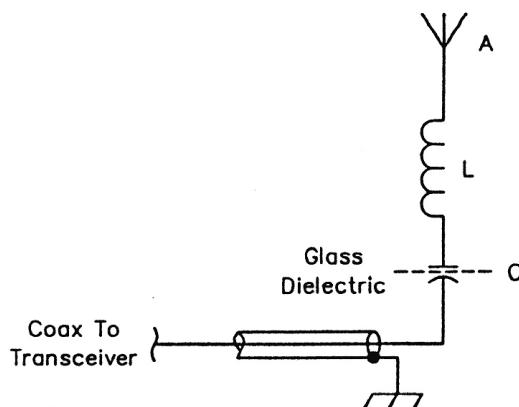
אנטנה זו היא שיפור של אנטנת משטח הארץ. היא מורכבת ממוליך שאורכו  $\frac{5\lambda}{8}$  וסליל בקצחו.

המבנה המיעוד של אנטנה זו גורם להטיית עוקום הקרינה לעבר הקרקע, דבר שמרכו את הספק השידור במישור הקרקעי ולא לעבר השמיים, שכן ניתן להגעה למרחקים שידור גדולים יותר. לאנטנה זו הגבר של B<sub>9</sub> לעומת אנטנת משטח הארץ.

## אנטנת חלון

אנטנה זו היא למעשה אנטנת משטח הארקה, המותקנת על חלון הרכב, שימושתו הקדמית או האחוריית. באופן הרכבה זה חוסכים קידוח בגג הרכב.

האיור מציג שרטוט סכמטי של אנטנה המורכבת על זוגיות הרכב.

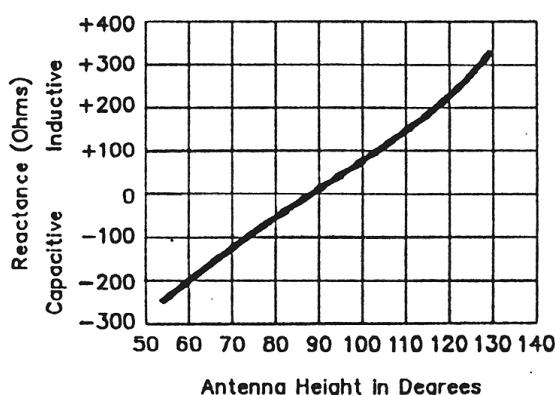


איור 18 - עקרון אנטנת החלון

מוליך הקואקס אינו מחובר ישירות לאנטנה, אלא דרך כבל C. כבל זה מתפרק על ידי הדבקת שני לוחות מתכת משנה צידי המשמש, כאשר זוכחת משמשת כחומר דיאלקטרי.

הקיבול הטיפילי שנוצר מבוטל על ידי הסליל הנמצא על גוף האנטנה, שכן קו ההזנה, רואה לפניו רק אנטנת רביע אורך גל. למעשה, ניתן לקצר את האנטנה מעבר לרבע אורך גל. אנטנה שכזו היא בעלת הייב קיבולי. כדי לפצות הייב זה יהיה צורך להגדיל את מספר ליפופי הסליל.

איור 19 מראה את הקשר בין אורך האנטנה להגובה.

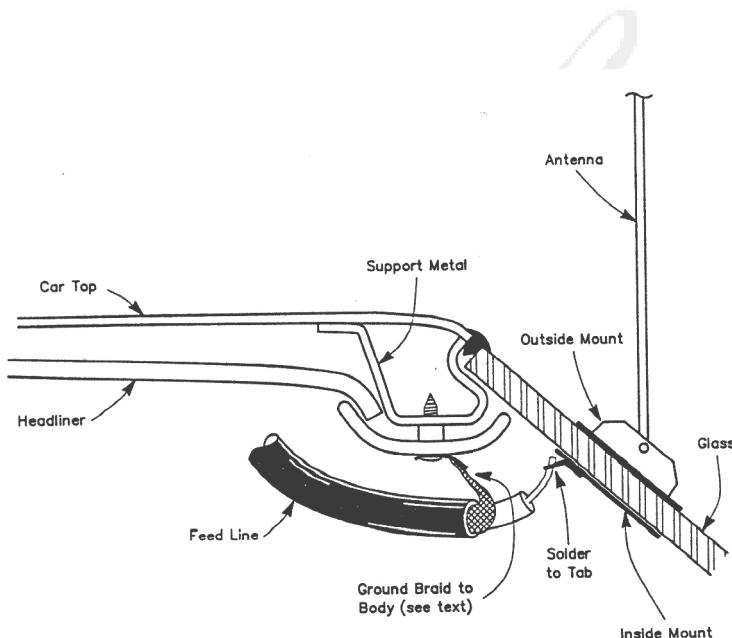


איור 19 - הייב האנטנה בתלות אורכה

אנטנה באורך מתאים של  $\lambda/4$  (90 מעלות), היא בעלת היגב של 0 אום, האנטנה מתנתקת במצב זה כאנטנה תהודהית בעלי התנוגדות השווה לעכבות האופיינית. כאשר מקצרים את מוליך האנטנה, מופיע היגב קיבולי וכאשר מאריכים אותה הופך היגב להיות השראי.

כדי להקטין את התנוגדות האנטנה לרווח, מעדייפים לקצרה. הקיבול שמוספי במבוא האנטנה דורש כMOVEDן פיצוי על ידי השראות וזאת כדי להכניס את האנטנה לתהודה. דבר זה נעשה על ידי הגדלת מספר ליפופי הסליל. ליפופים אלה צריכים לפצות גם את קיבול החיבור שבסמכת הרכיב.

איור 20 מראה כיצד מותקנת האנטנה. סיכון הקואקס מתחבר לגוף הרכיב כדי ליצור את משטח הארץ. המוליך המרכזי של הקואקס מתחבר לאחד מלוחות ה"קבלי". הלוח השני מחובר למוליך האנטנה.



איור 20 - התקנת האנטנה ברכב

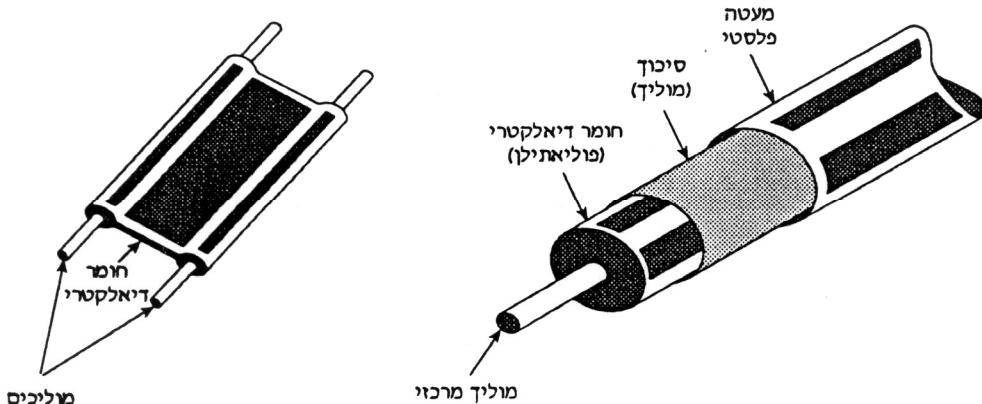
## קווי תמסורת

קו תמסורת הוא כבל, המעביר אות חשמלי (חילופין) בתדרות גבוהות. תפקידו להעביר את האנרגיה מה مصدر אל האנטנה, או מהאנטנה אל המקלט בצורה היעילה ביותר.

כל קו תמסורת מכיל 2 מוליכים, אשר יכולים להופיע בשתי צורות:

- קו תמסורת פתוח (שני המוליכים נמצאים במקביל זה לזה).
- קוויים משותפי ציר (קוואקסיאליים).

איור 21 מציג את שני סוגי הקוויים



איור 21 - קווי תמסורת

בכבל משותף ציר, המוליך החיצוני בנוי בצורה רשת עדינה של מוליכי נחושת. רשת זו עוטפת את המוליך הפנימי, בין המוליך החיצוני למוליך הפנימי נמצאת חומר בידוד - לרוב חומר פלסטי. בידוד זה קיים גם בכבל מסווג מוליכים מקביליים.

החומרים המבדדים - הדיאלקטרי - הוא בעל חשיבות רבה במבנה הכלבל. הזרם והמתוח החשמליים זורמים בחוטי הנחושת של הכלבל, אך השدة אלקטرومגנטית נוצר ומתקדם בחומר המבדיך בלבד (שזה אלקטرومגנטית איננו מתקיים בחומר מוליך). לכן, טיבו של המבדיך יקבע את ההנחתה של הכלבל.

כבל בו ניזוק המבדיך, עקב לחות, כניסה מים לתוכו או פגיעה מקרינה אולטרארה סגולית, אינו טוב יותר לשימוש, גם אם חוטי הנחושת עדין במצב טוב. חל איסור מוחלט לחבר שני כבלי תמסורת זה לזו בהלחמה. הלחימה אמנים יוצרת רצף חשמלי בין חוטי הנחושת, אך אין רצף במבדיך, דבר שגדיל משמעותית את ההנחתה של הגלים האלקטרומגנטיים באזור החיבור.

לכבל מקבילי הפסדי אנרגיה נמכרים יותר מאשר לקו הקואקס, אך לעומת זאת, לקואקס שתי תכונות חשובות: הוא אינו מקרין אנרגיה לסביבה עקב הסיכון העטוף אותו והוא קולט רעשים סביבתיים.

לקו תמסורת יש עכבה אופיינית, כאמור, קיים יחס מסוים וקבוע בין עצמת גל המתח לעוצמת הזרם, עכבה אופיינית זו אינה תלולה באורך הקו. בקו הקואקס היא בדרך כלל בין 50 ל- 100 אום. הערך הנפוץ ביותר עבור מערכות קליטה ושידור הוא 50 אום, עבור מערכות תלוויזיה וטלוויזיה בכבלים 57 אום.

### תיאום העומס לקו

כל קו תמסורת גורם הפסדי הספק. אנו שואפים שהפסדים אלה יהיו מזעריים. ההספק הנמסר מהמשדר לאנטנת השידור מתבטא בגל מתקדם, המגיע דרך קו התמסורת אל האנטנה. חלק מההספק עשוי לחזור מהאנטנה, דרך הקו, אל המשדר. דבר זה מתבטא ב"גל חוזר". ככל שהgel החוזר חזק יותר, העברת ההספק ייעילה פחות. הדבר עלול אף להזיק לדרגות ההספק של המשדר, מצב זה נקרא חוסר תיאום.

כדי להשיג העברת הספק יעילה, צריך להתקיים תיאום עכבות, כאמור, קו התמסורת צריך "לראות" בסופו עכבה השווה לעכבה האופיינית שלו, ועכבה זו צריכה להיות שווה גם לעכבות המוצאה של המשדר. אם קיימים תיאום, הgel המתקדם נבלע כולו בעומס, והספק הgel החוזר אפס.

## אפנון

מידע השמע משתמש בתחום התדרים הנמוכים מאד - מ- 20 הרץ עד 20 קילוהרץ. תדרים כה נמוכים אינם ניתנים לשידור ואין אפשרות לבנות עборם אנטנות שידור. גם אם הדבר היה אפשרי, הרוי שנייה היה לשדר תחנה אחת בלבד על פני כדור הארץ, מפני שתchanת זו תופסת את כל הספקטרים.

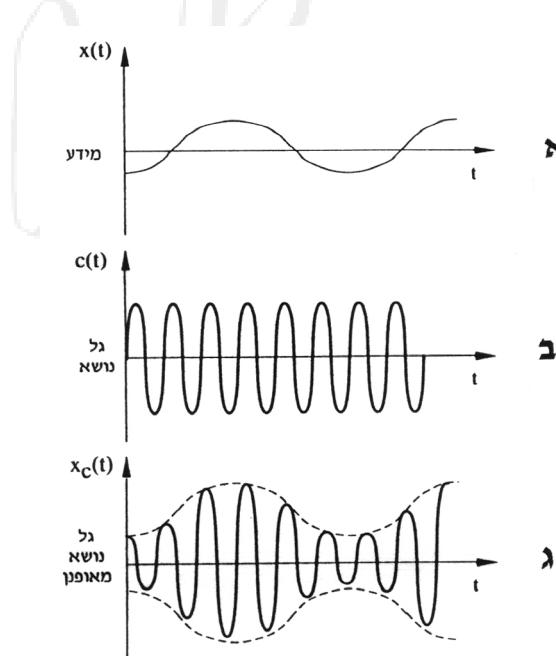
כדי להתגבר על הבעיה הניל', מרכיבים את מידע השמע על תדר גובה יותר - תדר רדיו. פועלות ההרכבה נקראת אפנון והמעגל העושה פועלה זו נקרא בשם אפנו.

קיימות מספר אפשרויות של אפנון המידע על תדר הרדיו. נתאר את השכיחים ביותר.

### אפנון תנופה AM (Amplitude Modulation)

באפנון תנופה מרכיבים את מידע השמע (או כל מידע אחר כמו: מידע ספרתי, טלוויזיה וכו') על תדר גובה - תדר רדיו. אופן הרכבת המידע הוא כזה, שתנופת

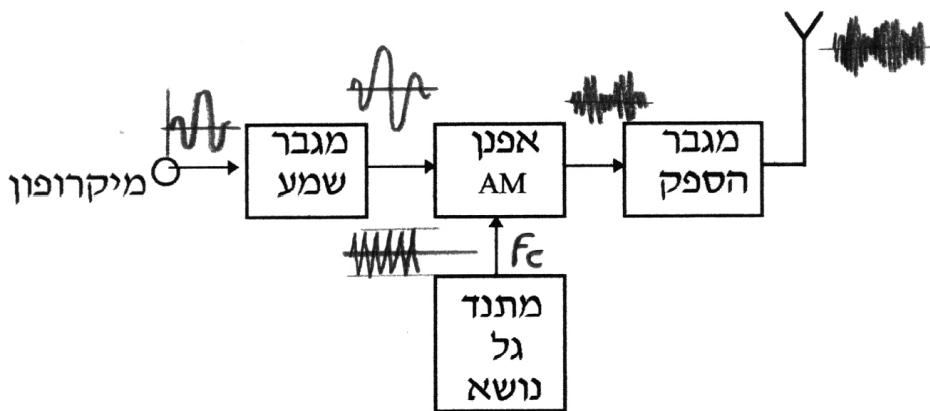
מתוך תדר הרדיו משתנית בהתאם למידע. איור 19 מתאר את אפנון התנופה. מידע השמע שבאיור אי' הוא בעל תדר נמוך  $F_m$ . לעומתו, תדר הרדיו שבאיור ב' הוא בעל תדר גבוה. גל זה יקרא בשם גל נושא Fe. תפקידו יהיה לשאת את המידע מהմסדר למקלט. לאחר האפנון מתקיים איור ג' של הגל המאופנן, בו מושעת הגל הנושא משתנית לפי המידע.



איור 22 - צורת הגל באפנון תנופה עם אות מידע סינוסי

הקו הדמיוני המחבר את השיאים של הגל המאופן, צורתו כצורת מתח המידע. קו דמיוני זה נקרא בשם מעפטת.

איור 23 מציג תרשים מלבנים של עקרוני של משדר באפנו תנופה.

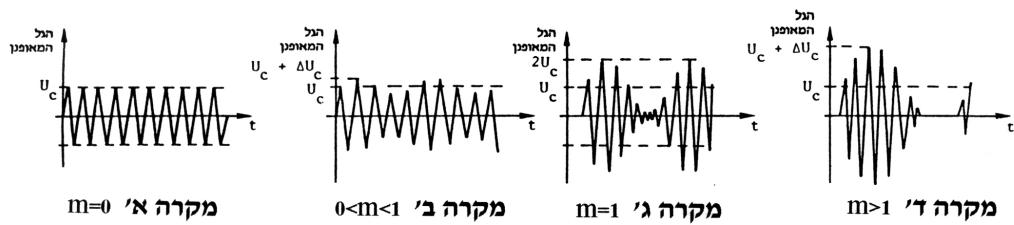


איור 23 - תרשים מלבנים של משדר AM

המיקרופון במשדר ממיר את גלי הקול (אנרגייה אקוסטית) למתח חשמלי. מתח זה, בתדר שמע, מוגבר על ידי מגברי שמע ומוון ליחידת האפנון. האפנון מקבל בכניסתו האחורה מתח חילופין סינוסי בתדר גבוה, שנוצר ביחידת המתנד. בМОץ האפנון מתקבל המתח המאופן, אותו יש להגבר ולהמיר להספק, כדי שנitin יהיה להזרים זרם במוליכי האנטנה וליצור באפן זה גלים אלקטромגנטיים.

### גורם האפנון

שינויי בעוצמת מידע השמע, למשל על ידי שינוי הגבר מגברי השמע, גורם לשינוי במעטפת הגל המאופן. (איור 24).



איור 24 - גל AM במקדמי אפנון שונים

מגדירים את גורם האפנון (MODULATION FACTOR) , הנקרא גם בשם עומק האפנון, כיחס שבין  $\Delta Uc$  ל-  $Uc$  , מסמנים יחס זה באות  $m$  .

$$m = \Delta Uc / Uc$$

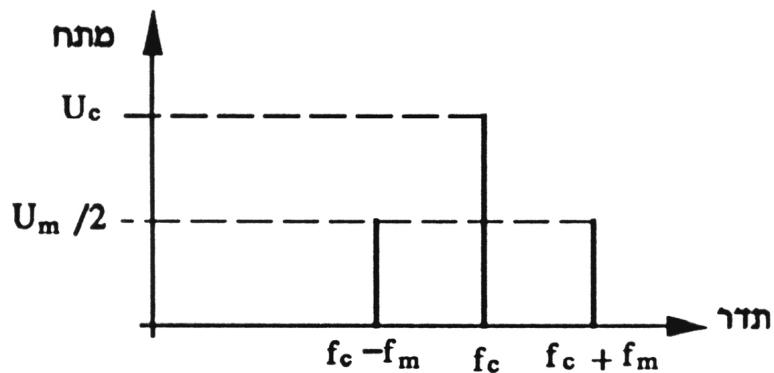
נוהג לבטא את גורם האפנון באחוזים, למשל.  $M = 0.3$  - פירושו - גורם אפנון של 30 אחוז.

האיור מראה צורת מעטפת של ארבעה מקרים שונים של מקדם האפנון. מקירה ד' הוא המקירה הביעית ביותר. במקירה זה הוגבר אותן השמע לכך שעמוק האפנון עבר את תחום ה- 100% , התוצאה היא קטיפה לפרקי זמן קצרים של הגל הנושא, דבר זה מתבטא בעיותה המיידע שיתקבל במקלט הקוליט.

כדי להימנע מלහיגע לאפנון של 100% עובדות תחנות ה-AM באפנון ממוצע של 30% בלבד.

### פסי צד באפנון תנופה

נניח שנთנו גל נושא שה坦ופה שלו היא  $Uc$  , והתדר שלו -  $f_c$  , מאפננים גל זה על ידי אותו שמע (סינוס) שה坦ופה שלו  $Um$  , והתדר שלו  $f_m$  . אפשר להראות בדרך מתמטית, שהትוצאה היא שלושת סינוס, כמתואר באירור הבא :



איור 25 - ספקטרום אות AM

תיאור כזה נקרא ספקטרום או תיאור ספקטורי. הציר האופקי הוא תדר ולא זמן. כל קו נקרא רכיב ספקטורי או מרכיב ספקטורי, והוא מסמלאות סינוס בתדר המסומן מתחתיו. האורך הקוו מצין את התנופה של הרכיב. במקרה זה ישנו שלושה רכיבים : רכיב אחד הוא הגל הנושא, בתנופה  $Uc$  ובתדר  $f_c$  . שני צידיו מופיעים שני רכיבים שתנופתם  $Um/2$  , המבטאים את אותן השמע. הם מרוחקים למרחק שווה  $Fm$  מהרכיב המרכזי. אחד מהם הוא בתדר  $f_c + Fm$  והשני בתדר  $f_c - Fm$  . כל אחד משני מרכיבים אלה נקרא פס צד (sideband).

**תרגיל דוגמא:**

מאפננים גל נושא בתדר  $200\text{kHz}$  על ידי שני אותות שמע - האחד בתדר  $500\text{Hz}$  והשני בתדר  $5\text{kHz}$

. א. חשב את התדרים של פסי הצד.

. ב. סרטט את הספקטרום של הגל המאופן.

**פתרון**

. א. פסי הצד של האות בתדר  $500\text{Hz}$

$$200,000\text{Hz} - 500\text{Hz} = 199,500\text{Hz}$$

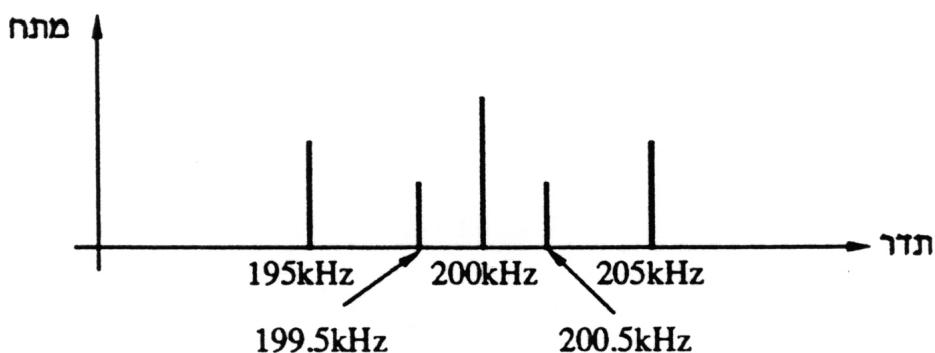
$$200,000\text{Hz} + 500\text{Hz} = 200,500\text{Hz}$$

פסי הצד של האות בתדר  $5\text{kHz}$

$$200,000\text{Hz} - 5,000\text{Hz} = 195,000\text{Hz}$$

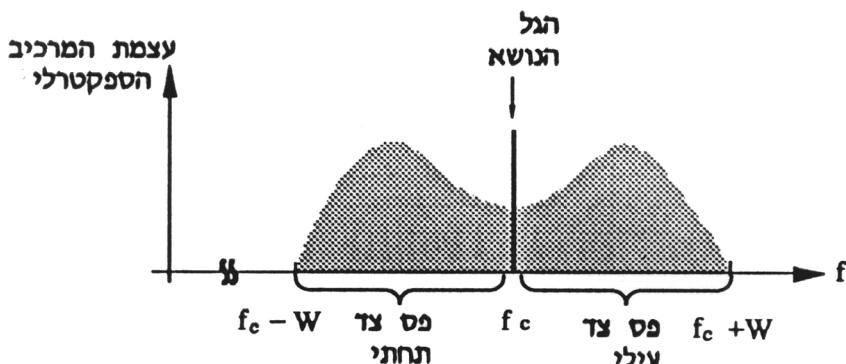
$$200,000\text{Hz} + 5,000\text{Hz} = 205,000\text{Hz}$$

. ב.



איור 26 – ספקטרום הגל המאופן

אותות רבים, למשל - אות דיבור, אינם בעלי תדר אחד, וגם אינם בעלי תדרים מסוימים.אותות אלה משתרעים ברציפות על תחום תדרים די רחב. ספקטראום של אות כזה נקרא ספקטראום רציף, והוא מתואר (לאחר האפנון) באIOR 23. האות כאילו "מורוח" ברצף תדריות על כל התחום, ולכן אי אפשר לתארו בעזרת פסי צד בודדים. שים לב, שבכל זאת ישנה סימטריה משני צידי הגל הנושא, כלומר, לכל רכיב ספקטורי שמשמאלי ל- $f_c$  יש "בן-זוג" למרחוק שווה מימין ל- $f_c$  (שניהם "בני הזוג" הם בעלי עוצמה שווה).



AIOR 27 - ספקטראום אות AM

### רווח הפס באפנון תנופה

רווח הפס של אות המשודר, הוא תחום התדרים, שבו משתרעים פסי הצד. מננותוך פסי הצד ברור שרווח הפס צריך להכיל פעמיים את תחום השמע, פעם כפנס צד עליון ופעם כפנס צד תחתון. לכן, רוחב הפס הכלול באפנון תנופה שווה לכפלים רוחב הפס של אות השמע.

תחום תדרי השמע משתרע עד  $20 \text{ KHz}$ . לכן רוחב הפס החדש לשידור אות זה יהיה  $40 \text{ KHz}$ . רוחב פס כה גדול אינו מעשי בגל הסיבות הבאות:

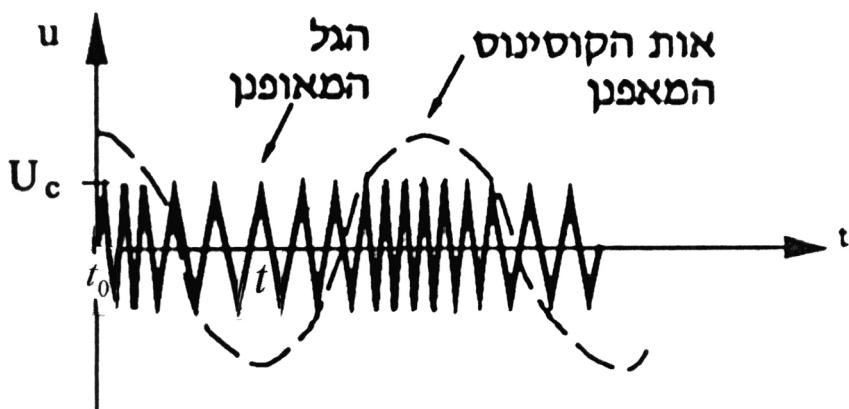
א. ככל שרוחב הפס במקלט גדול יותר, רמת הרעש הנקלט רב יותר.

ב. מספר התחנות שנינן יהיה לשדר על הספקטראום יהיה קטן. בשידורים לקהל הרחב בתחום הגלים הבינויים ( $530 \text{ KHz} - 1600 \text{ KHz}$ ). נקבע שרוחב הפס של מידע השמע (לפני האפנון) יהיה עד  $4.5 \text{ KHz}$ . לכן רוחב הפס לאחר האפנון יהיה  $9 \text{ KHz}$  בלבד.

בתקשורת מסחרית, בה אין צורך להעביר את המידע באיכות גבוהה, רוחב הפס של המידע הוא רק  $2.2 \text{ KHz}$  ולכן רוחב הפס המשודר יהיה  $4.4 \text{ KHz}$  בלבד.

## אפנון תדר

באפנון תנופה (AM) משנים את התנופה של הגל הנושא בהתאם לעוצמת השמע. לעומת זאת, באפנון תדר (FM) משנים את התדר של הגל הנושא בהתאם לעוצמת אות השמע. אפנון תדר מתואר באיוור הבא:



איור 28 - אפנון תדר

באיור רואים שתנופת הגל המאופן היא קבועה -  $U_c$ , רק התדר הרגעי שלו משתנה לפי מתח אות השמע. הגל "מצטופף" ו"מתרחב" לסירוגין. גל "צפוף" - פירושו תדר גבוה, וגל "מרוחך" - פירושו תדר נמוך יותר.

שים לב להתאמה בין מתח השמע לתדר הגל המאופן: ברגע  $t_0$  מתח השמע בשיאו, אז גם תדר הגל המאופן מרבי. ברגע  $t$ , ערך מתח השמע הוא הערך הנמוך ביותר, ואז תדר הגל המאופן מזערני.

## סטיית התדר המרבית ומונת האפנון

באפנון תנופה, התנופה של הגל המאופן עולה ויורדת. לעומת זאת, באפנון תדר - התדר סוטה כלפי מעלה וככלפי מטה, לפי עוצמת אות השמע. כאשר משודר אות השمع חזק ביותר, סטיית התדר היא מרבית. סטיית התדר המרבית ( $\Delta f$ ) היא גודל קבוע, שאין לחזור ממנו. לדוגמה: סטיית התדר המרבית בשידורי FM של "קול ישראל" היא 57 קילוהרץ.

מנת האפנון -  $m_f$  (MODULATION INDEX) היא היחס בין סטיית התדר המרבית לבין תדר אות השמע  $f_m$ .

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m}$$

**שאלה**

בשידורי FM לאזרחים, משלדים את מידע השמע בתחום תדרים של 50Hz- 75KHz. חשב את מנת האפנון אם סטיית התדר המרבי היא 75KHz.

**תשובה**

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{75}{15} = 5$$

**פסי צד ורוחב פס באפנון תדר**

ניתוח מתמטי של גל מאפנון אפנון תדר, מלמד שבניגוד לאפנון תנופה, שם מספר פסי הצד היה שניים, הרי כאן, באפנון תדר נוצרים אינסוף פסי צד, מעל ומתחת לתדר הגל הנושא. המרחק בין כל שני פסי הצד סמוכים הוא תדר המידיע.

לחישוב רוחב הפס הכלול בשידור, מבאים בחשבון רק את פסי הצד הדרושים להעברת 98% מההספק של הגל המאופן.

רווח הפס המעי נקבע בנוסחה :

$$BW = 2 \times (m_f + 1) \times f_m$$

כאשר :  $f_m$  - תדר אות השמע המרבי

$m_f$  - מנת האפנון.

$BW$  - רוחב הפס.

**שאלה**

חשב את רוחב הפס המעי של שידור רדיו אזרחי שבו תדר השמע המרבי הוא 75KHz.

**תשובה**

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{75}{15} = 5$$

$$BW = 2 \times (m_f + 1) \times f_m = 2 \times 6 \times 15 = 180KHz$$

**יתרונות וחסרונות של שיטת FM בהשוואה לשיטת AM**

הchiefון הבולט של שיטת FM הוא רוחב הפס הגדל, הדרושים בה. כמו כן, אם האות הנקלט חלש - איקות השמיעה גרוועה למדוי.

היתרונות של שיטת FM הם :

- א. מעגלי המשדר פשוטים יותר.
- ב. אפשר להשיג נצילות גבוהה יותר במשדר.
- ג. יחס האות לרעש גבוה יותר (רק אם האות הנקלט חזק).

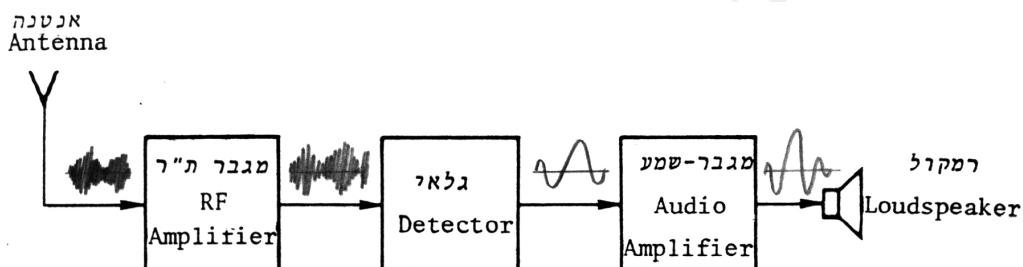
הסיבה לעדיפות ביחס האות לרעש היא, שמעגלי מקלט FM משפרים את יחס האות לרעש, ככלומר - יחס האות לרעש בموقع המקלט (רמקול) גבוה יותר מיחס האות לרעש במבוא של המקלט (מפניה שהמקלט אינו רגיש לשינויי תנועה, אלא רק לשינויי תדר, וכך הוא מסלק השפעת רעשים שונים). זה נכון רק אם יחס האות לרעש במבוא המקלט אינו נמוך מידי, אחרת - יחס האות לרעש גרווע אף יותר מאשר בשיטת AM.

## מקלטי רדיו

עד עתה דנו בשתי שיטות אפנון נפוצות: אפנון תנופה ואפנון תדר. רוב שידורי הרדיו לקהל הרחב, למזרע המקצועי והמסחרי, פועלים באחת משתי שיטות אלה. אותן המידע מורכב על הגל הנושא במשדר, ומשוחזר באמצעות המקלט.

### מקלט ישיר

איור 29 מתאר תרשימים מלכניים של מקלט רדיו פשוט ביותר - מקלט ישיר. אף כי המקלט ישיר אינו שימושי, נאריך בדיוון עליו כדי להבהיר מושגים בסיסיים במקלטים.



איור 29 - תרשימים מלכניים עקרוני של מקלט ישיר

תהליך שיחזור המידע הוא כדלקמן: לאנטנת המקלט מגיעים גלים אלקטромגנטיים, המשודרים מתחנות שידור שונות. גלים אלה משרים באנטנה מתחאים נומכים בתדרים גבוהים - תדרי רדיו, ובקיצור ת"ר (Radio Frequency). תדרים אלה הם תדרי האותות המאופנים של המשדרים השונים. מהאנטנה עוברים אותות הת"ר אל מגבר הת"ר. מגבר זה בורר את התחינה הרצiosa לנו בין כלל התחנות ומוגביר את עוצמתו הת"ר שבמובאו. ההגברה דרושה, כי עוצמת האות בMOVEDIA מגבר הת"ר היא בסדר גודל של מיליו-וולטם, או פחות מכך, וכדי להפעיל את הדרגה הבאה במקלט ישיר, יש להגבר את האות.

מוגבר הת"ר מגיעאות הת"ר אל הגלאי (DETECTOR). תפקיד הגלאי, לגנות את אות המידע המאופן. פעולה הגלאי (DETECTION, DEMODULATION) הפוכה לפעולת האפנון. בMOVEDIA הגלאי מופיע את המידע (אות השמע). מאחר שעוצמת אות השמע אינה מספקת להפעלת הרמקול, מוגבר אותה זה בוגבר שמע (Audio Frequency) ובקיצור AF.

בוגברי ת"ר קיימים מעגלי תהודה מכוננים, הן בMOVEDIA והן בMOVEDIA. מעגלי תהודה אלה ניתנים לכיוון בעורת סלילים או קבלים משתנים. תפקידם לברור

את התחנה הרצiosa מכלל התחנות שנקלטו על ידי האנטנה. בעת חיפוש תחנה, מסובבים את כפטור בורר התחנות. למעשה, מכונים את תדר התהודה לתדר הנושא הרצוי לקליטה.

**מעגלי התהודה מאופיינים על ידי שני גורמים:**

א. **תדר התהודה.**

ב. **רווח הפס.**

מעגלי התהודה במקלט היישר מכונים לתדר הנושא של התחנה הנקלטה. רוחב הפס שלהם צריך להיות שווה לרוחב הפס של תחנת השידור (ראה את נושא ספקטרום התדרים ופסי הצד בפרק הקודם), למעשה אין זה כך.

רווח הפס  $BW$  של מעגל תהודה, שווה ליחס בין תדר התהודה שלו  $f_c$  לבין גורם הטיב  $Q$ .

$$BW = \frac{f_c}{Q}$$

מעגל תהודה שגורם הטיב שלו ( $Q$ ) קבוע ותדר התהודה שלו ניתן לשינוי, לדוגמה בתחום 530kHz - 1600kHz, רוחב הפס ( $BW$ ) משתנה בערך פי 3 (מפניה שהתדר  $f_c$  משתנה פי 3). לכן, אם תוכנן מקלט רוחב פס של 9kHz עבר קליטת תחנה בתדר 530kHz (לפי התקן), הרי בתדר 1600kHz יגדל רוחב הפס לכדי  $27\text{kHz} = 3^2$ . מצב זה הוא בלתי סביר, מחשש שרוחב פס כה גדול יגרום לקליטה בו-זמנית של שלוש תחנות שונות המשדרות זו לצד זו. בעיה חמורה זו טיפול במקלטי רדיו משוכלים יותר, עליהם נדון בהמשך.

## תכונות מקלט הרדיו

מקלטי הרדיו מאופיינים על ידי נתוניים טכניים שונים, כדי שנוכל להשוות בין מקלטים שונים. שלישת הנתוניים הטכניים החשובים ביותר הם: ברירות, רגישות ונאמנות. על אלה נוספים עוד מספר רב של נתונים, שלא נטפל בהם במסגרת זו.

### ברירות המקלט (SELECTIVITY)

הברירות היא כושר המקלט להפריד את התחנה הרצויה מכל התחנות הנקלטות על ידי האנטנה.

המקלט משמש כמסנן מעביר פס, שרוחבו צריך להיות זהה לרוחב הפס של האות המאופן. המקלט היישר הוא בעל תכונת ברירות גורעה ביותר מפני שרוחב הפס שלו משתנה מתחנה לתחנה.

בדפי הנתוניים של המקלט יופיע נתון זה באופן :

$$\text{Selectivity} = 9\text{KHz} (-3\text{dB})$$

$$\text{Band Width} = 9\text{KHz} (-3\text{dB}) \quad \text{או}$$

רוחב הפס נמדד בין נקודות מחצית ההספק, ז"א  $-3\text{dB}$ .

### רגישות (SENSITIVITY)

רגישות המקלט היא כושרו לקלוט במבוא גל מאופן, בעל עוצמה נמוכה ולהפיק במויצאו הספק תקני מסוים. למעשה, משקפת הרגישות את ההגבר הכלול של המקלט.

הגדרת/regishot תהייה שלמה, רק אם נציין שהספק התקני במויצא, הוא צולו או רובו, הספק של אות מידע ולא של רעשים או אותות בלתי רצויים אחרים. לפיכך, יש לכלול בהגדרת/regishot את היחס הדרוש של אות לרעש.

בדפי הנתוניים של המקלט יופיע נתון זה بصورة :

$$\text{Sensitivity} = 0.5\mu V(20\text{dB} \frac{S}{N})$$

מקלט זה הוא בעל רגישות של חצי מיקרוולט, כאשר האות הנמדד ( $S$ ) הוא בעוצמה של  $20\text{dB}$  מעל הרעש ( $N$ )

**אמנות (FIDELITY)**

יכולתו של המקלט לשמר על צורת מיעטפת האפנון של מתח המבוא שלו, מורה על מידת נאמנותו.uschורת המקלט במוחא המקלט שונה מצורת המיעטפת של אות המבוא, הרוי המקלט מעות. ככל שהשוני בין השתיים גדול יותר, הנאמנות גרוועה יותר. להבטחת נאמנות מקלט, דרישות תכונות דומות אלה שהוגדרו בקשר למגברי תדר שמע:

1) היענות תדר טובה של מגברי ת"ר.

2) היעדר עיוותים לא ליניארים של מגברי ת"ר ומגברי השמע.

הנאמנות תליה בין היתר, גם ברוחב הפס של המగברים המכוננים (מגברי ת"ר). אם רוחב הפס שלהם צר, דבר שmbtich דווקא ברירות טובה, עלולה מיעטפת האפנון להיות מעוותת. לעומת זאת, רוחב פס רחב מאפשר נאמנות טובה, אך מקלקל את הברירות.

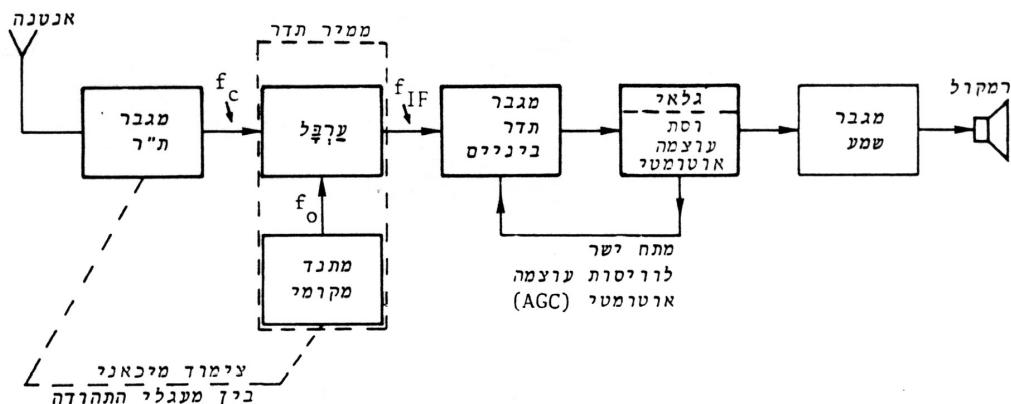


## מקלט סופרהטרודין

ניתוח עקרו פועלתו של המקלט הישיר, מלמד שברירותו אינה מספקת להפרדה בין תחנות שידור הקרובות זו לזו. ההגברה ורוחב הפס משתנים במידה רבה בתחום העבודה של המקלט.

חסרונות המקלט הישיר נובעים מושית הגברת אותן ת"י. מגבירים את אותן הנקלט מהאנטנה בתדר בו הוא נקלט.

התגברו על חסרונות אלה על ידי בניית מקלט שעיקר הגברתו מבוצע בתדר מסוים וקבוע, ללא תלות בתדר התחנה שרצוים לקלוט. לשם כך, משנים את התדר הנקלט באנטנה לתדר אחר, קבוע מראש, מבלי שינוי תדר הגל הנושא ישפיע על צורת מעטפת האפנון. מקלט מסוג זה נקרא בשם מקלט סופרהטרודין (Superheterodyne), שתרשימי המלבני מוצג באירור 30.

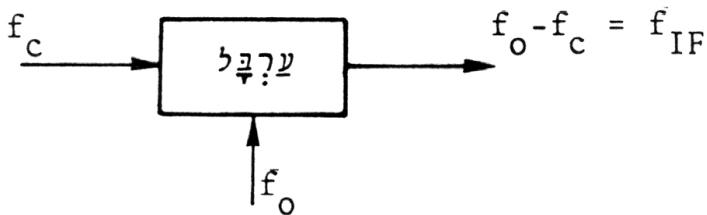


איור 30 - מבנה עקרוני של מקלט סופרהטרודין

معال תוזה הכלול ביחידת מגבר הרדיו בורר את התדר הרצוי ( $F_e$ ) מכלל האותות הנקלטים באנטנה. אמנס לمعال זה אותן חסרונות שהוזכרו במקלט הישיר, אך נתגבר עליהם בהמשך המعال.

בעזרת ממיר התדר, המורכב מיחידות הערבול והמתנד המקומי, ממירים את תדר הנושא  $F_e$  לתדר קבוע הנקרא בשם תדר ביניים  $F_{IF}$  (Intermediate Frequency). ממיר התדר ימיר תמיד כל תחנה נקלטת, לאוتو תדר ביןיים. לצורך זה מוצמדים פיזיות,معال המתנד המקומי עםمعال התוזה במبدأ האנטנה.

הערבל היינו רכיב לא ליניארי, המוציא ביציאה מתח בתדר השווה להפרש תדרי הכניסות.



איור 31 - פועלות הערבול

תדר מוצא הערבול הוא קבוע עבור כל התחנות, אותו נגביר בעזרת מגברי תדר ביןיים (מגברי TAB'ם). למגברים אלה הגבר ורוחב פס אשר קובעים את תוכנות המקלט. ההגבר קבוע את רגישותו ורוחב הפס את ברירותו. תדרי הביניים שנבחרו הם: 455kHz עבור מקלטים הפועלים בתחום הגליים הביניים 10.7MHz עבור מקלט FM הפועלים בתחום הגליים קצריים מאד.

לאחר הגברת האות הנקלט בעזרת מגברי TAB'ם, יש צורך לגנות את המידע הטמון בתדר הרדיו. תפקיד זה מוטל על מעגל הגלי. מעגל זה שונה במבנהו בין מקלט AM למקלט FM. במקלט AM תפקידו לגנות את מעטפת האות הנקלט ובמקלט FM תפקידו להמיר את שינוי תדר האות הנקלט לשינוי מתח שמע.

אות השמע המתתקבל ממוצא הגלי מוגבר על ידי מגברים לתדר שמע, הכוונים מגברי מתח ומגברי הספק, ומזינים את הספק מוצאים לרםkol.

הספק המוצא מהרמקול אינו קבוע, הוא משתנה בהתאם לעוצמת האות באנטנה. עבור אות חזק, הנבע מתחנה שעוצמתה גבוהה, נקלט תפוקה גבוהה ברמקול, ולהיפך. עבור תחנה שהספקה נמוכה, יהיה גם השפק השמע מהרמקול נמוך. שינויים אלה בתפוקת הרמקול יורגושו בעיקר כאשר המקלט היינו נייד כגון מקלט ברכב נושא, או מקרה בו אנו תרים אחרית תחנה מסוימת על סקלט המכשיר. כדי להתגבר על בעיית שינוי העוצמה ברמקול, הוכנס לכל המקלטים מעגל שתפקידו לוסת אוטומטית את העוצמה. זהו מעגל בקרת ההגבר האוטומטי AGC (Automatic Gain Control).

מעגל AGC בודק את האות במוצא הגלי. אם חלים שינויים בעוצמתה הממוצעת, הוא ימיר אותם למתח ישיר אשר יוחזר כמשוב, וישנה את הגבר מגברי TAB'ם. אם עוצמתה התchanha הנקלטת חזקה, יורד הגבר של מגבר TAB'ם ולהיפך. הדבר מבטיח מוצא כמעט אחיד עבור שינויים בעוצמתה הקליטה באנטנה.

מקלט הסופרהרודין נבנה כדי להתגבר על בעיות הרגישות והברירות המשתנים במקלט הישיר, קלמר, שינוי התchanha הנקלטת גורם לשינוי רגישות וברירות. במקלט הסופרהרודין, שינוי התchanha אין משנה את תדר הביניים מפני שתדר המתנד המקומי משתנה אף הוא וההפרש בין לביון תדר הנקלט נשאר קבוע. על ידי כך נשארת ברירות המקלט איחודית על פני תחום הקליטה כולם.

### תדר בבואה

תפקיד הערבל להפיק במויצאו אותן בתדר השווה להפרש בין תדרי המבוא שלו. למעשה הדבר אינו כה פשוט.

נכון תדר מתנד מקומי ל-  $f_{IF}$ . נניח שתדר הביניים של המקלט הוא  $455\text{kHz}$ . כאשר נבוא לבחון מהו התדר באנטנה אשר יוצר את תדר הביניים הרצוי, נקבל שתי תשובות :

$$\text{א. } f_{c1} = 1.455\text{MHz}$$

מן פניהם שמתתקיים

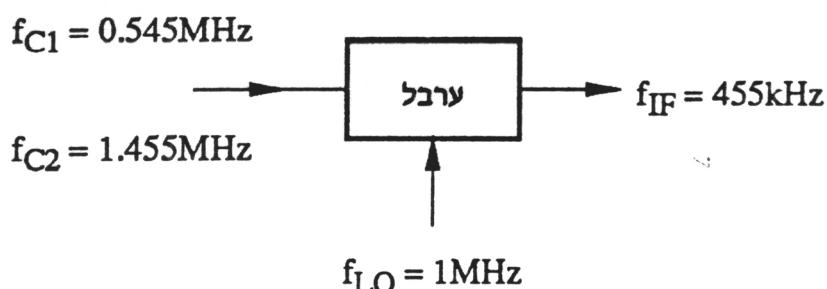
$$f_{IF} = 455\text{kHz} = 1455\text{kHz} - 1\text{MHz}$$

$$\text{ב. } f_{c2} = 545\text{kHz}$$

מן פניהם שמתתקיים

$$f_{IF} = 455\text{kHz} = 1\text{MHz} - 545\text{kHz}$$

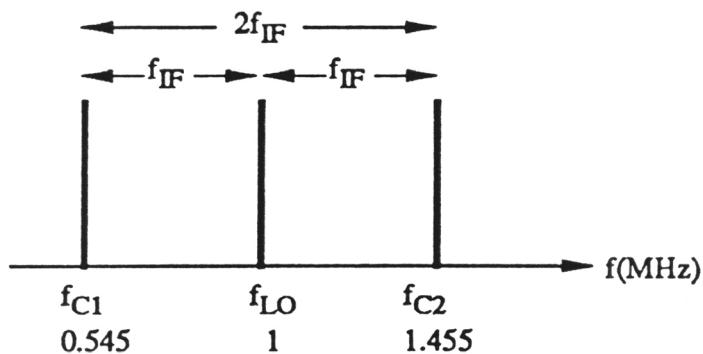
המסקנה : עבור תדר מתנד מקומי מסוים, קיימות שתי תחנות אשר עברו הרמה, על ידי ממיר התדר, ויווצרות מהערבל בתדר הביניים של  $455\text{kHz}$  (ראה איור 32)



איור 32 - אוטות המבוא והמויצא לערבול הנטען בדוגמה

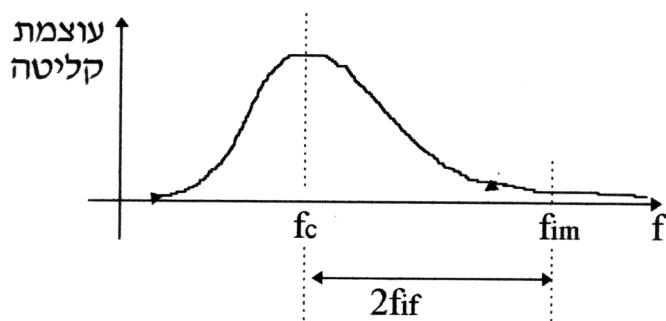
במויצא הערבל מתקבלים שני אוטות בתדר הביניים, שמקורם ב-שני תדרי ת"יר שונים, ככלומר, משתי תחנות שידור שונות. כל אחד מהאותות נושא מידע שונה, ולכן במויצא הערבל יתקבל ערבוב של שני אוטות המידע, תופעה שאינה רצiosa.

למעשה, כל שני תדרים באנטנה שהפרשים שווה לכפלים תדר הביניים, יוצרים צמד של ת"יר רצוי ות"יר לא רצוי. התדר הנמוך מבין השניים הוא תדר התחנה הרצiosa והתדר הגבוה, הלא רצוי נקרא בשם תדר בבואה ( IMAGE FREQUENCY ). איור 33



איור 33 - תדר המתנד המקומי ותדרי הקליטה

תפקיד הנחתת תדר הבבואה מוטל על מעגל התהודה שבמבוא המקלט. כדי שהדבר יעשה לשביות רצוננו, יש לדאוג שרוחב הפס של מעגל זה יהיה צר יותר מאשר  $2f_{IF}$ , דבר שיבטייח שתדר הבבואה יימצא מחוץ לעקום ההיענות של מעגל מבוא המקלט.



איור 34 - ניחות תדר הבבואה על ידי מעגל המבוֹא

## מקלט סופרהטרודין כפול

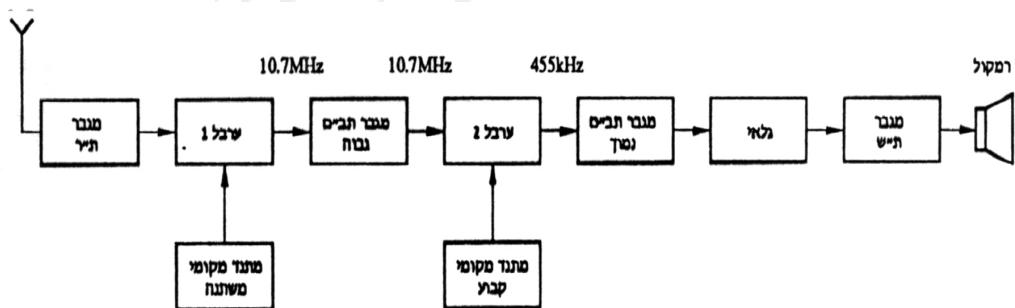
החסרון הבולט של מקלט הסופרהטרודין, הוא קליטה בו-זמנית של שתי תחנות, התחנה הרצiosa ותחנת הבבואה. עקרוניית, ניתן לדכא את תדר הבבואה בעורת מעגל המבוא של המקלט. כדי שההנחה תהיה משמעותית, יש להרחיק את התחנות זו מזו. פוללה זו נעשית על ידי בחירת תדר ביןים גבוה.

תדר ביןים גבוה מאפשר דיכוי טוב יותר של תדר הבבואה, אך גורם עקב לכך להורדת הבירות של המקלט עקב הגדלה ברוחב הפס של מגברי התב"מ וזאת מפני שרוחב הפס  $BW$  נמצא ביחס ישיר לתדר.

$$BW = \frac{f_{IF}}{Q}$$

כדי להתגבר על בעיה זו, הבירות הנמוכה, משתמשים במקלט מסוג סופרהטרודין כפול.

מקלט הסופרהטרודין, בעל המרת התדר הכפולה, מאפשר לנצל את שני היתרונות הרצויים: תדר ביןים גבוה לדיכוי טוב של תדר הבבואה, ותדר ביןים נמוך לקבלת רוחב פס צר, ולכן - בירות טובות. לקבלת התכונות ידרשו שתי מערכות של מגברי התב"מ: האחת בעלת תדר גבוהה, והשנייה בעלת תדר נמוך. באירור הבא מוצגים תרשימים מלכונים של מקלט מסוג זה.



איור 35 - מקלט עם המרת תדר כפולה

מעגל המתנדד המקומי המשנה וערבל 1 מאפשרים בריית התחנה הרצiosa. עקב תדר הביניים הגבוה שמתתקבל ערבל 1 (10.7MHz לדוגמה). דיכוי תדר הבבואה על ידי מעגל המבוא באנטנה יהיה פשוט, מפני שהמרחב בין שני התדרים יהיה גדול מאד -  $2f_{IF} = 21.4MHz$

תדר הביניים הגבוה מאפשר דיכוי טוב של התדר הבלתי רצוי, אך רוחב הפס של מעגלים אלה גדול מאד, לכן ברירותם נמוכה. בעזרת ערבל 2 ומבחן מקומי קבוע, מוריידים את התדר של  $10.7\text{MHz}$  לתדר ביןיים של  $455\text{KHz}$ . עקב התדר הנמוך, קטן גם רוחב הפס של המגברים ולכן ברירותם גדולה.

לערבל שני מבואות בעלי תדרים קבועים. לכן תדר המבחן השני הוא קבוע. ברוב המקרים זהו מבחן גיבשי שתידרו עבור הדוגמא הניל:

$$f_{IF} = 10.7\text{MHz} + 0.455\text{MHz} = 11.155\text{MHz}$$

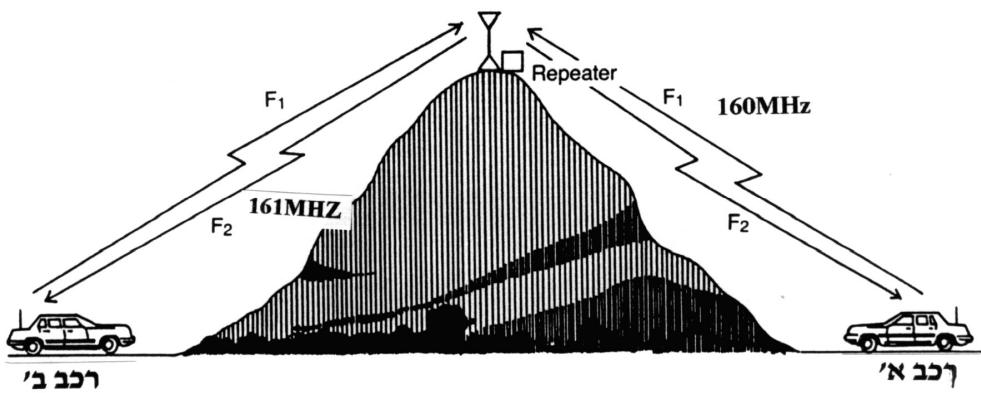
## מסרי רדיו

קשר רדיו בתחום תדרים מעל 30 מה'ץ יתכן, בתנאי שאנטנת המשדר תראה את אנטנת המקלט. בתחום זה הגלים מתפשטים כגלי מרחב.

היתרון של עבודה בתחום תדרים זה הוא הספק שידור דריש, שהוא נמוך מאוד, ואנטנות קטנות, דבר שמאפשר בניית מכשירים ניידים ונישאים.

כדי להתגבר על בעיית טווח השידור, עקב הימצאות הרים ובני מגורים גבוהים, בין אנטנת המשדר למקלט, נהגים להשתמש במסרי רדיו. מסר רדיו היינו משדר/מקלט, הפועל אוטומטית, אשר ממוקם במקום גבוה, ויחולש על כל הסביבה. מיקום אנטנת הממסר צריכה להיות כזו, שהיא "תראה" בו-זמנית את שתי האנטנות של שני המכשירים הרוצים להתקשר זה עם זה דרך הממסר.

המסר פועל כמווזך. מקלטיו קולט את אות הרדיו שמשדר משדר א'. את שקולט מקלט הממסר, הוא משדר מיידית על ידי המשדר שנמצא בקרבתו. אות זה שמשודר מאנטנת הממסר הגבוהה, הגיע למקלט ב' (איור 36).



איור 36 - תחנת מסר רדיו

משדר הממסר א' אין יכול לשדר על תדר הקליטה של המקלט א' מחשש שהספק מוצאו הגבוה, יוזן למבוא המקלט ויגרום לו נזק. בנוסף יחסם המקלט על ידי השדה האלקטרומגנטי חזק של המשדר. לכן, תדר השידור ותדר הקליטה של הממסר אינם זמינים. לצורך הדוגמא, המקלט קולט בתדר 160MHz, המידע שנקלט עובר למשדר, אך משודר בתדר 161MHz. השוני בתדרים מבטיח שלא תהיה חסימת המקלט על ידי תדר המשדר.

מהמבנה של תחנת הממסר, ברור שגם מקלט/מصدر א' ו-ב' חייבים להכיל תדרי קליטה ושידור שונים. במקרה הניל, תדר השידור שלהם יהיה  $160\text{MHz}$  ותדר הקליטה  $161\text{MHz}$ .

תקלה בתחנת הממסר לא מאפשרת קשר בין מכשירים א' ו-ב' גם אם הם יימצאו באותו ראייה, זאת עקב תדרי שידור/קליטה שונים זה מזה. במקרה כזה, יש לעبور במכשירי הקשר לעזר שידור אחר (עורך SIMPLEX), בו תדרי השידור והקליטה זהים. במקרה כזה, טווח השידור יהיה מוגבל ותלו依 בתנאי הקרקע.



## קידוד השידור והקליטה

עקב ריבוי תחנות שידור ומזכקת תדרים, הוקצו למספר רב של משתמשים, ערוץ שידור אחד. כדי למנוע האזנה בין קבוצות משתמשים, הנמצאים על אותו התדר, נבנו במכשורי הקשר מערכות קידוד שונות.

### צורך הפעלה

שיטת זו שימושית בעיקר לצורך הפעלת מסר רדיו. שידור רדיו ללא צורך הפעלה לא יפעיל את המסר.

בשיטת השידור זה שודר תדר קבוע, דוגמא 1750 הרץ, לפרק זמן קצר של כ- 1 שנייה בתחילת השידור. תדר זה מפעיל את מסר הרדיו ומאפשר לאחר מכן לתחנה השידור לשדר דרך המסר באופן דיבור או אפנון ספרתי.

משדר הרדיו חייב להכיל מעגל המופעל לפרק זמן קצר, מייד לאחר לחיצה על לחץ השידור.

מקלט הרדיו חייב להכיל מעגל, המזהה את תדר הצורך. רק אם התדר "חוקי", יפתח הערזק לתקשות.

### תדר תת-שמע (PL)

בשיטת צורך הפעלה, משודר ה"קווד" לפתחת הערזק רק לרגע קצר מהפעלת לחץ השידור. לשיטה זו חסרונות, בעיקר בתנאי קשר גורעים בהם אובד לעיתים הקשר עם התחנה המשדרת. מרגע אי-בודוק הקשר לראשונה, תיפסק הקליטה עד לרגע שהמשדר ישדר פעם נוספת את צורן ההפעלה, וזה יקרה ברוב המקרים, רק לאחר שחרור לחץ השידור ולחיצה נוספת עליו.

כדי להתמודד עם בעיה זו, הוחלף צורך הפעלה בתדר קבוע המשודר לאורך כל זמן השידור. תדר זה הוא תדר נוסף לתדרי המידע שימושיים בערזק. אין אלו שומעים אותו, כי הוא נבחר כתדר שנמצא מተדרי השמע שמסוגל המקלט להעביר לרמקול.

**קיימים מספר תדרים תקניים שהם בין 67.0 הרץ ל- 250.3 הרץ (ראה טבלה)**

שיטת זו נקראת על ידי חברת מוטורולה בשם PL (Private Line). המונח המקצועי הכללי עבורה היא CTCSS (Continuous Tone Coded Squelch System).

משדר הרדיו מכיל בתוכו מתנד קבוע לאחד מተדרי ה-PL. המקלט חייב להכיל מעגל פענוח, המאפשר קליטה רק ברגע קליטת תדר ה-PL.

67.0	82.5	97.4	114.8	136.5	162.2	192.8	233.6
71.9	85.4	100.0	118.8	141.3	167.9	203.5	241.8
74.4	88.5	103.5	123.0	146.2	173.8	210.7	250.3
77.0	91.5	107.2	127.3	151.4	179.9	216.1	
79.7	94.8	110.9	131.8	156.7	186.2	225.7	

איור 37 - טבלת תדרי PL תקニים

**DTMF**

הינה מערכת הצפנה וגילוי, אשר ממירת תווים לרצף של שני תדרים (Dual Tone). ברוב המקרים התווים הם אלה המוכרים לנו על לוח לחיצי הטלפון.

(Hz)	1209	1336	1477	1633
697	1	2	3	A
770	4	5	6	B
852	7	8	9	C
941	*	0	#	D

איור 38 - תדרי ה-DTMF התקניים

בשיטה זו לחיצה על לחץ "5" יגרום לשידור שני תדרים 770Hz ו-133Hz בו-זמנית. הצנת המספר "5" בשני תדרים אלה, תתגלה במקלט אך ורק אם יש לו מפענה מתאים.

קביעת רצף מתאים של תווים מצד המשדר, ופענוחם במקלט, מאפשרפתיחה ערזץ התקשורות להעברת המידע.

נוהג לקבוע רצף תווים עבור כל זוג משתמשים או רשות משתמשים. לעיתים קוראים למערכת כזו בשם (Digital Code Squelch) DCS.

**(Dual Tone Squelch System) DTSS**

בשיטה זו קולט המקלט, אך ורק אם הוא קלט אוסף של שלושה קודים ספורתיים, הזחים לאלה שהוצפנו בתוכו. לאחר זיהוי הקוד נכנס המקלט לפעולה, המקלט ימשיך בקלטתו כל עוד הוא מזזה בכניסתו את קוד ה-DTSS, העلمות הקוד לפרק זמן שועלה על שתי שניות יגרום להפסקת הקליטה. לאחר פרק זמן זה יש להפעיל מחדש על ידי שידור וקליטתאות הדת-ה-DTSS.

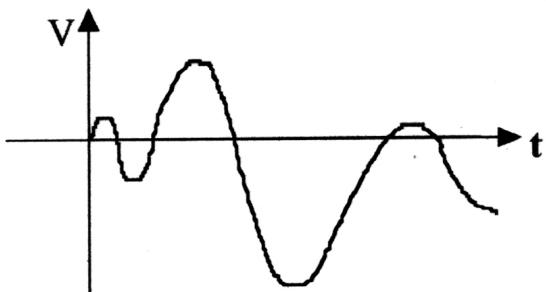
שיטת זו דומה לשיטת ה-DCS, אך בתכנון זה הוחלט על שלושה קודים ספורתיים. ובתקן ה-DCS קיימת אפשרות לקבוע את גודל ה"מילה" כרצוננו.

## תקשורות ספרתיות

אותות המידע המוזנים למבוא המשדר יכולים להיות אנלוגיים או ספרתיים.

### אות אנלוגי

אות אנלוגי הוא אות שהתיאור הגרפי שלו בתלות בזמן הוא פונקציה רציפה. זאת זה יכול לקבל אינסוף ערכים במשך הזמן. האיוור מציג אות אנלוגי של מתח בМОץם מיקרופון כתלות בזמן.



איור 39 - מתח בМОץם מיקרופון

### אות ספרתי

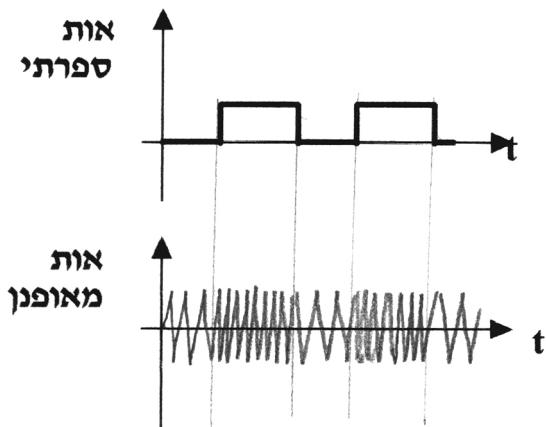
אות ספרתי היינו אות שבכל רגע נתון יכול לקבל ערך כלשהו מתוך אוסף סופי של ערכים נתונים. כדוגמא לאות ספרתי, אפשר לראות את האות הבינארי לו יש שני ערכים אפשריים "0" ו-"1".

תפקיד מערכת התקשורות - להעביר את האות הספרתי מהמשדר למקלט, עם מספר סימנים שוגויים מזער.

### אפנון

אות אנלוגי, ניתן לאפנון באופנים שונים כמו אפנון תנופה, אפנון תדר וכו'.

אות ספרתי ניתן אף הוא לאפנון באופנים שונים. באיוור הבא דוגמא אופיינית של אפנון אות ספרתי בשיטת FSK (Frequency Shift Keying). באפון זה משנים את תדר הנושא בין שני ערכים. לדוגמה: 1MHz עבר ערך של "1" לוגי ו-1.1MHz עבר ערך של "0" לוגי.



איור 40 - אפנון אות ספרתי בשיטת FSK

### קידוד

פעולת הקידוד מתבצעת רק על אותות ספרתיים. הקידוד ממיר קבוצה מסוימת של סימנים לקבוצה אחרת. המרה זו מתבצעת לצורך מצום המידע השゴוי הנקלט.

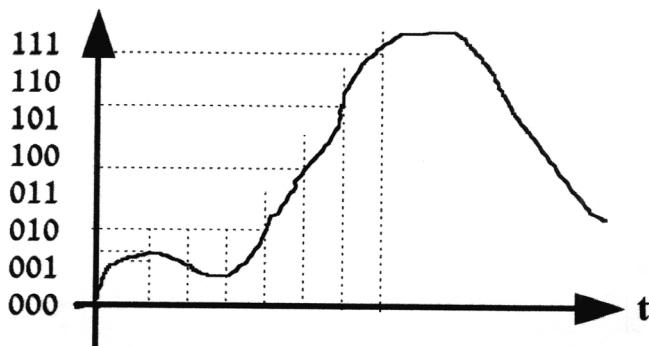
כדוגמה לשיטות קידוד שונות, ניתן לראות את הצפנים השונים כגון: צופן BCD, ציקלי, EXCESS-3 ועוד (ראה ספר "אלקטרוניקה לחבלני משטרה").

### ממיר אנלוגי/ספרתי

כל אות אנלוגי ניתן להמיר לאותות ספרטיים בעזרת ממיר P/A. אופן ההמרה נעשה בעזרת צופן הנקבע על ידי המציג. צופן זה חייב להיות ידוע גם למפענה כדי שיוכל להמירו בכיוון ההפוך, מאות ספרתי לאות אנלוגי.

איור 41 מציג דוגמא כיצד ניתן להמיר אות אנלוגי לאותות ספרטיים, לפי קוד BCD, לפי קצב דגימה נתון בזדקים את רמת האות האנלוגי. לכל רמת אות קבועים מילהBINARITY מתחילה. השידור נעשה על ידי שידור טורי (זה אחריו זה) של המילים הבינאריות.

### ערך ספרתי



איור 41 - המרת אות אנלוגי לספרתי

## זהוי שגיאות

ניתן להוסיף סיבית נוספת לערכימ הספרטיים ששורדו. סיבית זו, הנקראת סיבית הזוגיות (או האי-זוגיות) מאפשרת זיהוי של שגיאה באות הנקלט. הטבלה הבאה מראה כיצד מושגים סיבית הזוגיות לקוד 3 EXCESS. סיבית זו הנמצאת מימין למילה הבינארית נקבעת כך שמספר ה"1"ים במילה יהיה תמיד זוגי.

סיבית הזוגיות	קוד 3 EXCESS	ערך עשרוני
0	0011	1
1	0100	2
0	0101	3
0	0110	4
1	0111	5
1	1000	6
0	1001	7

איור 42 - עקרון סיבית הזוגיות

בעת קליטת המידע, בודקים במקלט אם כל מילה התקבלה עם סיבית הזוגיות הנכונה. ניתן לעשות זאת בצורה פשוטה על ידי בדיקת כמהות ה"1" במילה. אם מספר זוגי, סביר להניח שהמידע התקבל תקין. אם מספרו אינו זוגי, לבתו קיימת שגיאה בקלטת.

סיבית הזוגיות אינה מאפשרת זיהוי של שיבוש שבו שובשו מספר זוגי של "1" ו-"0". סיבית זו גם אינה מסוגלת לתקן את המילה שנקלטת, היא מסוגלת רק להתריע על ליקוי בקלטת.

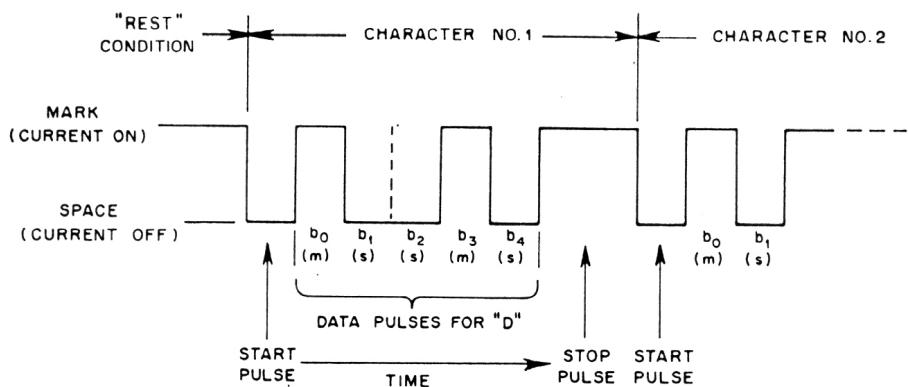
ניתן להתגבר על החסרונות שהוזכרו על ידי שימוש הרעיון, אך דיון בשיטות אלה הם מעבר לרמת ספר זה.

## סיבית התחלה וסיבית סיום

שיגור רצוף של מילים בינהיות יכול לגרום לאיבוד סճרונו לצד המקלט. כדוגמא לכך: האם ברצף הנקלט ...0011101011001.. ידוע היכן מתחילה מילה והיכן היא מסתיימת? כדי להתגבר על בעיה זו יש להגדיר متى מתחילה המידע ומתי הגיעו לסיומו. אותן STOP (סיבית התחילה) ו- START (סיבית סיום) נוספו לכל מילה משודרת, סיביות אלו יאפשרו מצד המקלט לזהות כל מילה בנפרד. גם אם התקבלה מילה שגوية, או אות שנקלט עם רעש רב, נדע במדויק היכן מתחילה כל מילה והיכן היא מסתיימת.

איור 38 מציג דוגמא של המילה הבינארית 00101001 המתאימה לאות S בקוד בודו, השימושי להעברת אותות טפרינטער, כולל סיבית התחלה וסיבית סיום. כדי להבחין בין סיבית התחלה לסיום, יש אפשרות לקבוע זמן שונה לשניהם או רמות ספרטניות שונות. כל אלה בהתאם לתקן השידור המוסכם. באירן מוצג פולס הסיום ככפול זמן פולס התחלה. כמו כן, פולס התחלה הוא ברמת מתח נמוכה לעומת פולס הסיום שהוא ברמה גבוהה גביהה.

הרמת הלוגיות "1" ו-"0" מציניות MARK ו- SPACE בהתאם.



איור 43 - סיביות STOP , START בקורס בודו

## מודם - MODEM

עד שנות החמישים, השתמשו בשידור ספרתי בשיטת OOK (ON/OFF KEYING) בשיטה זו משודר תדר גל נושא בזמן הופעת MARK ("1" לוגי), ואין משודר דבר בזמן SPACE. שיטה זו אינה טובה, כי בשעה שאין שידור עדין המקלט קולט רעשים והפרעות. הפתרון היה לעבור לשיטת FSK (Frequency Shift Keying) שיפורה משמעותית את האמינות.

בשיטת FSK מוצאים זוג תדרים לאוותות ה-MARK ו-SPACE . תדר ה-MARK נקבע כגבוה ויורדים בתדר השידור בעות שידור ה-SPACE.

תוקן נוסף השימוש לשידור ספרתי הוא שיטת (Audio Frequency Shift Keying) AFSK. בשיטה זו מספקים לשידר, בębוא המיקרופון, אותות שמע (Audio) תדר שמע אחד עברו ה-MARK ותדר שמע שונה עברו ה-SPACE. שני תדרים אלה מאופנים על תדר הנושא של המשדר באחד מהאפנונים המוכרים.

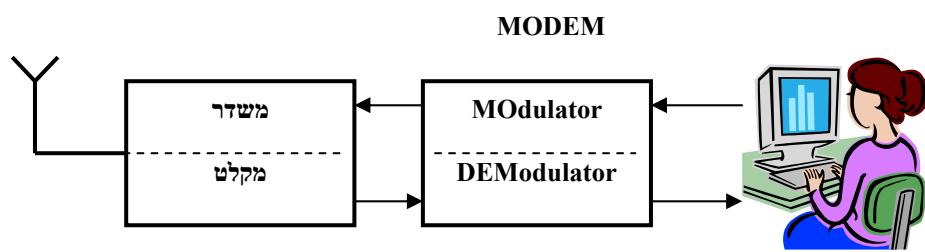
זוג תדרים אופייניים לאוון שידור זה הוא 2125 Hz עבור ה-MARK ו- 2975Hz עבור ה-SPACE . סטיית התדר בין שני התדרים היא 850 הרץ.

אותות ה-AFSK מסופקים לשידר על ידי יחידה הנקראת בשם מודם - MODEM (Modulator + Demodulator). המודם מורכב משני מעגלים - מעגל האפן (MODULATOR) הפעיל בזמן שידור, ומעגל הגלאי (DEMODULATOR) הפעיל בזמן קליטה.

מעגל האפן מקבל בכניסתו אות ספרתי, המתחבṭא ב-"1" ו-"0" לוגי וממיר אותו לזוג תדרי שמע המסופקים למבוא המיקרופון של המשדר.

מעגל הגלאי, מקבל אותות שמע, שני תדרים המתאימים לתדרי ה-MARK ו- SPACE, מהרמקול של מקלט הרדיו וממיר אותם ל"1" ו-"0" לוגי. פונCTION המילה הלוגית לאותות, סימנים או פקודות לוגיות. מתבצע על ידי מעגל נוסף, מפענח או מחשב.

איור 44 המציג את אופן חיבור המודם למשדר/מקלט:



איור 44 – חיבור מודם למחשב

## קריינה אלקטромגנטית והשפעתה על גוף האדם

האם קריינה אלקטромגנטית מזיקה לגוף האדם?

בתקופה الأخيرة, אנו שומעים וקוראים בתקשורת האלקטרונית והכתובה, על נזקים שיכולים מכשירים חשמליים ואלקטרוניים לגורם לגוף האדם. כתבות ומאמרים אלה אינם מדיקים ואיןם מרחיבים, מפני שהם מיועדים רק להרחב שאינו מڪצועי וAINO קרוב למושגים הטכניים.

זו תקופה ארכואה, שידוע לבעלי המקצוע, שדה מגנטי בתדר נמוך, כמו זה הנובע ממקורות תדר הרשת של 50 הרץ, יכולם להזיק. בתי ספר ומגרשי משחקים, אין מקום קרוב לקווי מתח גבוה של חברת חשמל. חל אייסור לישון על סדין חשמלי כאשר זה בפעולה, במיוחד לנשים הרות, לא בגל ההיבט הבטיחותי מהתחשומות, אלא בגל הקריינה המגנטית שזה מקרי. מחקר גילה שאחוז היילודים חולין הולוקסיה של נשים שיישנו בזמן הריון, על סדין חשמלי, גבוהה משמעותית מאותה אוכלוסייה שלא ישנה על סדין חשמלי. חלקו האחורי של מקלט הטלוויזיה וצג המחשב, מקריניות קריינה מגנטית מסוכנת. אין לשבת אחורי מכשירים אלה, גם אם נמצאים אחורי קיר בחדר סמוך. שדה בעוצמה של 3 מיליגאוס נחשב כמסוכן לאורך זמן.

ומה ביחס לשדה אלקטромגנטי? כזה הנפלט ממכשירי הקשר או הטלפונים הסלולריים.

הקריינה האלקטרומגנטית ממוקמי"ש הכולל אנטנת גומי (Rubber duck) . תלואה בגורם רבים שהשפעתם על מערכת השידור לא תמיד ברורה, כגון : נצלות אנטנת הגומי, האדמה שאינה אפקטיבית די הצורך ומוליכות היד החזיקה את המכשיר.

עבור תחום ה  $150\text{MHz}$  ציפויות ההספק המותרת לחסיפה הוא  $1 \text{mW/cm}^2$  ( $6.5 \text{mW/inch}^2$ ) ערכיהם אלה נקבעו על ידי מכון התקנים האמריקאי ANSI. האחראי על התקינה עבור התעשייה והממשלה בארה"ב. ( ANSI - American ( National Standards Institute

ציפויות ההספק מחושבת לפי הספק מוצא המshedר לאנטנה וחלוקתו בשטח המקרי של האנטנה. אם למשדר הספק של 10 וואט והוא מקרין את הספקו על שטח של 1 סמ"ר, אז ציפויות ההספק תהיה :

$$\frac{10\text{W}}{1\text{cm}^2} = 10\text{W/cm}^2$$

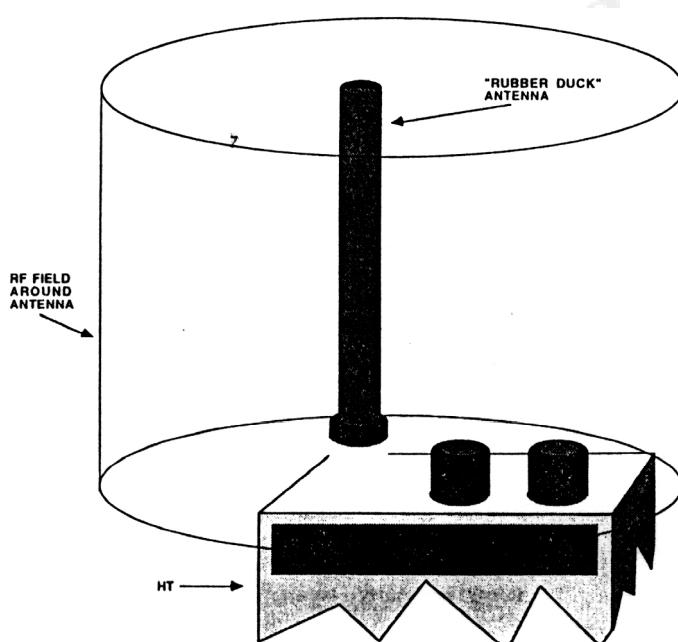
מהו ההספק שמקירינה אנטנת גומי?

לצורך החישוב, נניח אנטנה שאורכה 15 סנטימטרים. נבחן את הקירינה קרוב לאנטנה ונניח שהאנטנה מקירינה במידה שווה לכל הכווןים (לא לנצח - ראה איור 45).

כאשר : R - רדיוס בגליל

H - גובה בגליל.

S - שטח המעטפת.



איור 45 - השדה האלקטרומגנטי סביב לאנטנה

בעזרת הנוסחה ניתן לחשב את צפיפות ההספק במרחק R מהאנטנה, על ידי חלוקת הספק המשדר בשטח בגליל.

איור 40 מציג את צפיפות ההספק כפונקציה של המרחק מהאנטנה. במרחק 3 אינץ' ממאנטנה (כ- 7.5 ס"מ), השדה הוא  $9mW/inch^2$ . שדה זה הוא מעל הערך המותר של  $6.5mW/inch^2$  רק במרחק גדול מ- 5 אינץ', אנו יורדים מתחת לערכים המרביים המותרים בתקן.

הערך המוחש עבור מרחק של 3 אינץ' עבור אנטנת גומי מעולה היינו  $8.84mW/inch^2$ . אנטנה מעשית אינה כה אידיאלית. לצורך חישוב תיאורטי, נניח שהאנטנה היא בעלת הנחתה של  $B^2$  מתחת אותה אנטנה תיאורטית שעבורה עשינו את החישוב עד עתה.

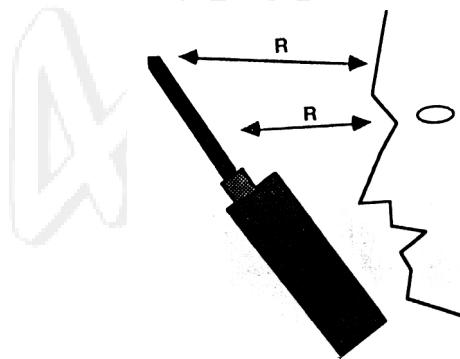


איור 46 - צפיפות החסיפה כפונקציה של המרחק מהאנטנה

ערך של  $B_{p2}$  מורייד את עוצמת הקרינה במקדם של 1.6. במקרה זה, במרחק של 3 אינץ' ירד שטף החסיפה ל-  $5.5mW/inch^2$ . ערך זה כבר נמדד מתקן ANSI. לכן לפי ערכים אלה, נראה אלו נמצאים בטוח השטף הבוטה.

איור 42 מראה את אופן החזקת מכשיר הקשר. ניתן לחזור על החישוב, כאשר המרחק R לא 3 אינץ', אלא כפי שנוהג כל אחד מעתנו, לאחزو את המכשיר.

עד עתה בוצעו החישובים עבור משדר שהחסיפה 1 ווט. אם המשדר יהיה בעל הספק גבוהה יותר, נניח 5 ווט, המקרה יהיה גרווע פִי חמש.



איור 47 - מצב החזקת מכשיר הקשר

הчисובים הנ"ל הם מתוך הנחות תיאורתיות. למעשה אנו מחזיקים את המכשיר קרוב יותר לראשינו, ועוד גרווע מכך, קרוב לעיניים. נזק לעיניים הוא נזק בלתי הפיך, לא כפגיעה פיזית בעור, אשר נרפא לאחר זמן, נזק לעיניים הוא לא תקנה.

הפגיעה בעין נובעת מוגדל גלגל העין, זה קרוב לסדרי גודל של אורכי הגל המשודרים ממיכשי הרקע והטלפונים הסולריים. העין פועלת במקרה זה כאנטנת קליטה. האנרגיה הנקליטה בה גורמת לחימומה ולנזק שהזוכר.

אחרי הכל, ברור שהבעיה מורכבת יותר מאשר חישובים ארכיטקטוניים פשוטים. התשובה לקיים נזק כזה או אחר על ידי קירובים מתמטיים, נותן מספרים שיש להתייחס אליהם בהתאם :

א. הרחק את האנטנה מהגוף עד כמה שאפשר.

ב. השתמש בהספק שידור מוגרי, עד כמה שניתן.

ג. שדר שידורים קצרים (על ידי כך, קטן הספק השידור הממוצע, לאורך זמן).

הדיון עד עתה היה עבור תדר 150MHz. לפי ANSI, צפיפות ההספק המרבי המותר של  $1mW/cm^2$ , נכון עבור תחום התדרים 100MHz - 300MHz.

עבור תחום התדרים מעל 300MHz, גבול צפיפות ההספק המותר הוא  $10mW/cm^2$

בתחום שבין 300MHz ל- 3000MHz הגבול קבוע על ידי הנוסחה  $f/300$ , כאשר  $f$  נתון ב- MHz.

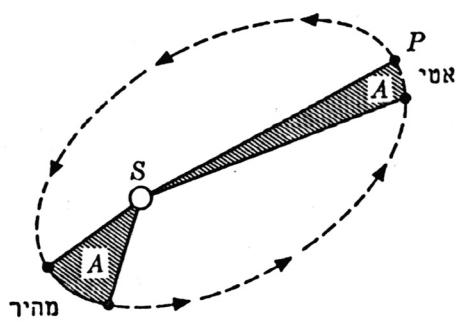
לדוגמא : עבור תדר של 900MHz (תדר השידור של ציוד הקשר המשטרתי והטלפונים הסלולריים) צפיפות ההספק המותר הוא :

$$\frac{900}{300} = 3mW/cm^2$$

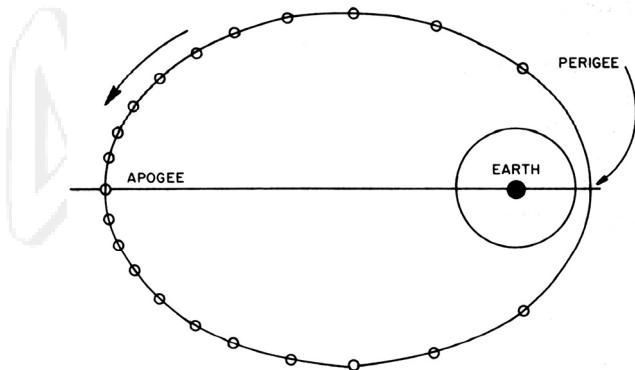
## לווייני תקשורת

### חוקי קפלר

1. מסלולו של כוכב לכט הוא אליפסה שבאחד ממרכזיה נמצאת השמש.
2. כל כוכב - לכט נעה בדרך צואת שהקו המקשר אותו אל השמש (קו זה קרי רדיוס - וקטור) עובר על פני שטחים שווים ברווחי זמן שווים, ללא הבדל מה אורכם.



איור 48 - החוק השני של קפלר



איור 49 - דיאגרמה מסלול אליפטי של 12 שעות הקפה. על המסלול מצוינים מיקומי הלוין במרוחים של חצי שעה. קרוב לאפוגי הלוין נוע蔵 חסית לאט.

### חוק המשיכה הכבידית של ניוטון

כל פרודת חומר בתבל מושכת כל פרודת חומר אחרת בכוח הנמצא ביחס ישיר למכפלת מסות הפרודות וביחס הפוך לריבוע המרחק שביניהן.

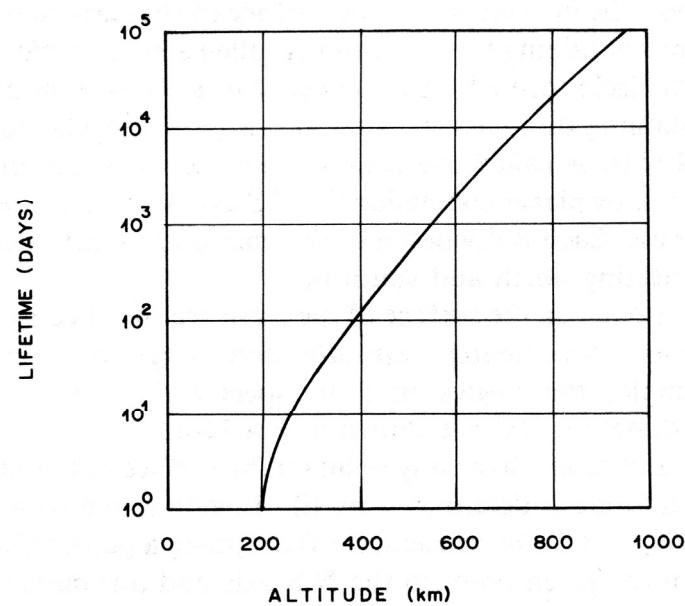
$$F = G \frac{m_1 * m_2}{r^2}$$

$$G = 6.67 * 10^{-8} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^2 / \text{gr}^2$$

$$G = 6.67 * 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{Kg}^2$$

הלוין מושפע ממספר כוחות נוספים לכוח הגרביטציה של כדור הארץ. לדוגמה: לכוח הגרביטציה של השמש, הירח, כוכבים אחרים וחיכוך עם האטמוספירה.

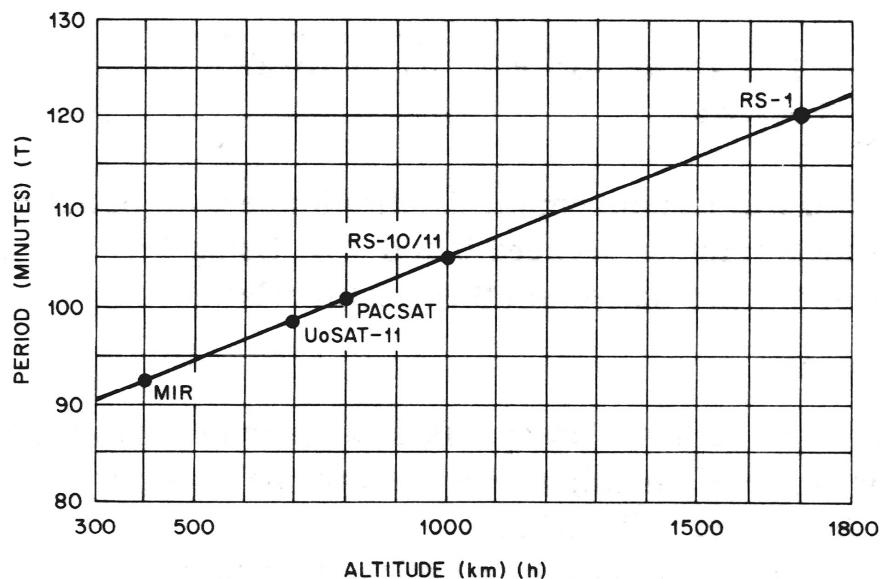
איור 50 מציג אורך חיים של לוין במסלול מעגלי כפונקציה של גובהו בהתייחס להערות הניל.



איור 50 - זמן חיים של לוין במסלול מעגלי

### זמן מחזור – זמן הקפה

איור 51 מראה את הקשר שבין זמן הקפה של לוויין וגובהו עבור לוויינים במסלול מעגלי נמוך.

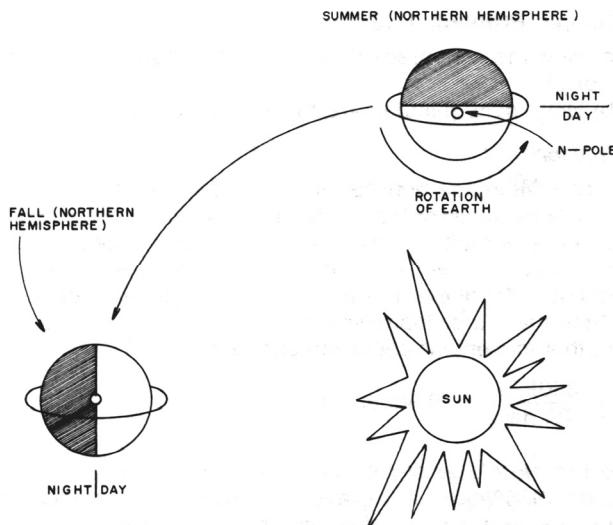


איור 51 - זמן מחזור כפונקציה של גובה הלוויין במסלול מעגלי נמוך

## מסלול לוויין

### מסלול מעגלי (Circular orbits)

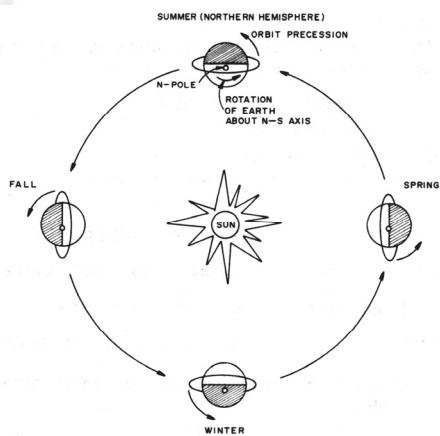
זהו מסלול שמיישר התנועה שלו קבוע בחלל כאשר כדורי הארץ נסביב לשמש.



איור 52 - האירור מראה לוויין שמיישר מסלולו קבוע בחלל. המבט הוא מעניין צופה הנמצא על כוכב הצפון.

### מסלול מסונכרן עם השמש (Sun synchronous orbits)

מיישר מסלול הלויין עושה סיבוב של 360 מעלות בשנה. במסלול זה הלויין עובר באותו מקום באותו שעת כל יום. מסלול זה מאפשר העברת מידע ונתקנים באופן נח ביותר.



איור 53 - מסלול מסונכרן עם השמש

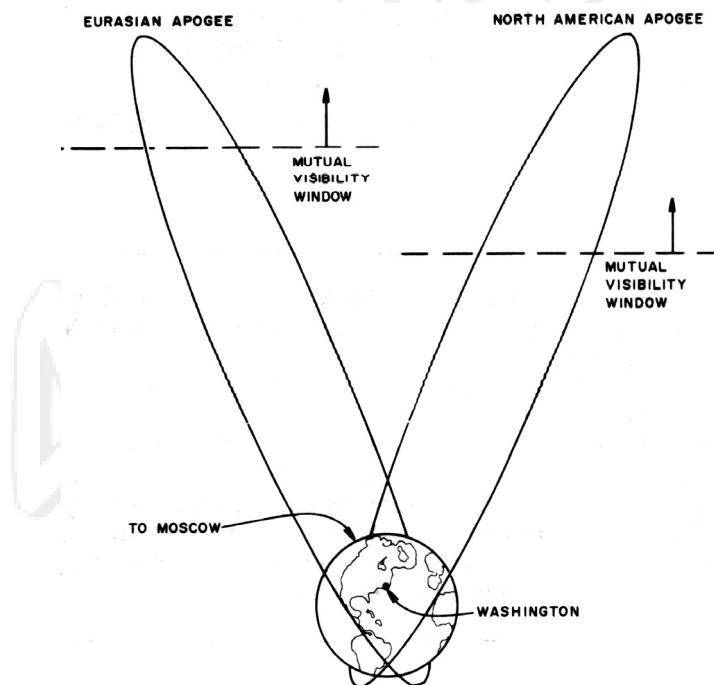
## מסלול גיאוסטטציוני ( Geostationary orbit)

לווין מסוג זה נע מעל קו המשווה במסלול מעגלי ( מהירות קבועה ), ותנועתו ממערב למזרח בגובה 35800 קילומטר. קיבל שהמהירות הזוויתית שלו תהיה שווה לזו של כדור הארץ (זמן מחזור של 24 שעות). לווין כזה נראה עומד מעל הראש ללא תזוזה.

מספר יתרונות ללווין תקשורת במסלול כזה. אין אפקט דופלר ואין צורך בעקביבה אחריו.

## מסלול מוניה ( molniya )

כאשר  $i = 63.4^{\circ}$  יישאר קבוע ה- eccentricites argument of perigee אם יהיה 0.6-0.7 וזמן המחזור 8-12 שעות נקבל מסלול עם כמה תכונות מיוחדות.



אייר 54 - מיקום ייחסי של שני מסלולי מוניה במצב האפוגיאה. למעשה מישור המסלול נשאר קבוע בחלל כאשר כדור הארץ מסתובב. באיור שני מסלולים האחד מעל וושינגטון והשני מעל מוסקבה.

## עקיבה

הטבלה מראה דוגמה של פלט מחשב עבור עקיבה של אוסקר 13

### **AMSAT-OSCAR 13**

**Ground Station:** Lat = 39°N, Long = 77°W, Ht = 0 km  
Minimum Elevation = 0 degrees

Day # 358 - - Friday, December 23 - - 1988

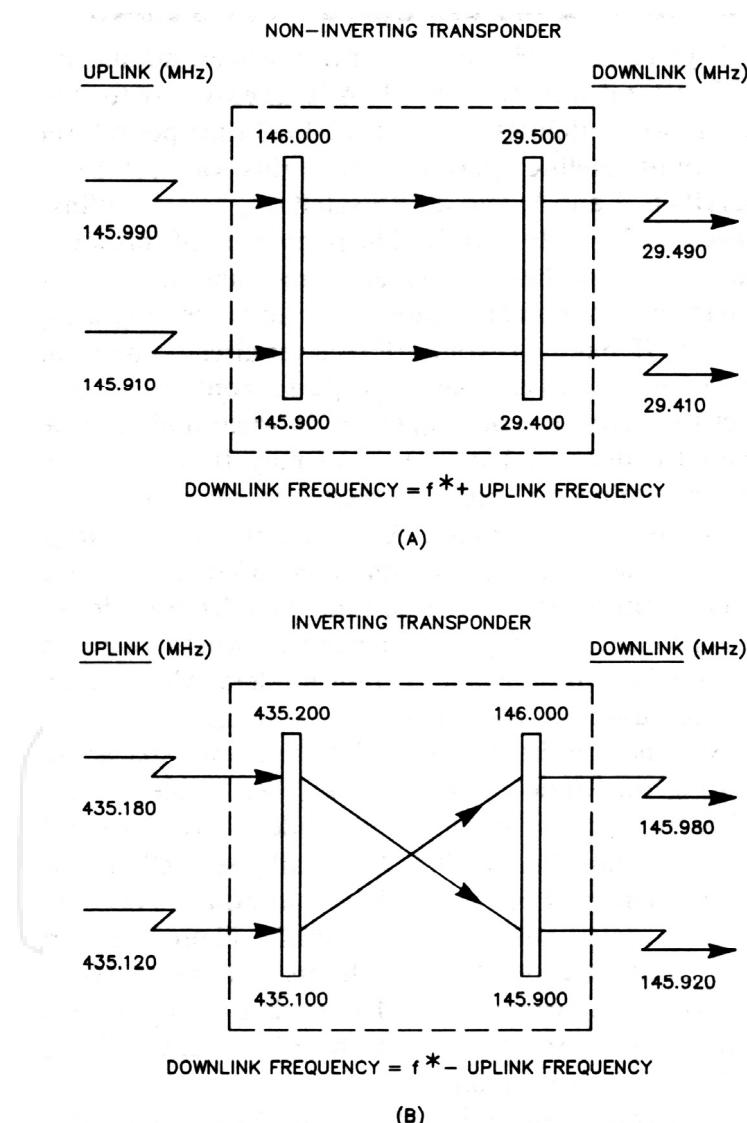
UTC HHMM	AZ deg	EL deg	DOPPLER Hz	RANGE km	HEIGHT km	LAT deg	LONG deg	PHASE <256>
1145	167	5	—	23325	18353	-29.8	62.7	34
1200	166	11	-1867	25068	20664	-25.2	62.5	40
1215	165	16	-1733	26686	22773	-21.1	63.1	45
1230	166	21	-1596	28176	24694	-17.5	64.2	51
1245	166	26	-1462	29541	26438	-14.3	65.7	57
1300	168	30	-1332	30784	28017	-11.4	67.5	62
1315	170	33	-1206	31910	29438	-8.7	69.5	68
1330	173	37	-1083	32922	30711	-6.2	71.6	73
1345	175	40	-966	33823	31843	-3.9	73.9	79
1400	179	42	-851	34617	32838	-1.6	76.2	85
1415	183	45	-739	35308	33701	0.5	78.7	90
1430	187	47	-630	35896	34437	2.5	81.1	96
1445	192	49	-523	36384	35049	4.5	83.6	101
1500	197	51	-416	36773	35540	6.4	86.2	107
1515	202	52	-311	37063	35911	8.3	88.7	113
1530	208	53	-206	37255	36164	10.1	91.3	118
1545	213	54	-100	37348	36300	11.9	93.8	124
1600	219	55	7	37341	36320	13.7	96.4	129
1615	225	55	116	37233	36224	15.5	98.9	135
1630	231	55	226	37022	36011	17.3	101.4	141
1645	237	54	340	36705	35680	19.2	103.8	146
1700	243	54	456	36279	35231	21.0	106.2	152
1715	248	53	577	35741	34661	22.9	108.5	157
1730	254	53	703	35084	33967	24.8	110.8	163
1745	259	52	835	34305	33148	26.8	112.9	168
1800	264	51	973	33396	32198	28.9	114.9	174
1815	269	51	1119	32351	31114	31.0	116.7	180
1830	273	50	1276	31160	29890	33.3	118.3	185
1845	278	49	1442	29813	28520	35.6	119.6	191
1900	283	49	1621	28300	26996	38.1	120.5	196
1915	287	49	1815	26606	25310	40.8	120.9	202
1930	293	49	2027	24714	23451	43.7	120.6	208
1945	298	50	2258	22606	21407	46.8	119.2	213
2000	305	51	2511	20262	19166	50.0	116.2	219
2015	313	54	2784	17663	16715	53.3	110.6	224
2030	326	57	3066	14801	14045	56.3	100.8	230
2045	348	60	3300	11720	11160	57.5	84.5	236
2100	30	58	3243	8692	8115	53.9	61.2	241
2115	75	30	1933	6887	5126	39.9	36.4	247

בשורה הראשונה מופיעים נתוניים של התחנה הקולטת. קו אורך, קו רוחב וגובה התחנה מעל פני הים.

הנתוניים שהתקבלו הם עבור תחום של 24 שעות מ- 00:00 UTC (Time step 15 דקות) ב- 23/dec/1988 המידע הוא במרווחי זמן של 15 דקות.

## טראנספונדר - "משיב"

הטראנספונדר של הלוין פועל כתחנת מסר של הקרקע. הוא קולט בפס תדרים אחד, מגביר את האותות ומשדר אותן בפס תדרים אחר. איור 55 מראה שתי אפשרויות לבניית הטראנספונדר.



איור 55 - משיב ללא המרת מוצג ב - A ואילו ב - B עם המרת

## מערכות הלוויין

בנוסף לאנטנות והטרנספונדרים מכיל הלוויין מערכות נוספות כדוגמת:

**מערכת הכוח:** המערכת מכילה תא שימוש, מצברים, מיצבי מתח ועוד. תפקידה לספק אנרגיה חשמלית למערכות השונות של הלוויין.

**מערכת בקרת המיקום:** מכילה אמצעים להנעת הלוויין בשלושה ציריהם לצורך הפניות הצדדים המתאימים אל כדור הארץ לצורך שיידור וקליטה, ועל המשמש לצורך טיענת המצברים ע"י אנרגית השימוש ותאי- השימוש.

**מערכת הטלמטריה:** משמשת למידידה ושידור נתונים שונים על מצב הלוויין ומערכותיו כדוגמת: טמפרטורה, מצב הספקים (מתח וזרם), זוויות הלוויין ביחס לכדור הארץ ועוד.

**מערכת פיקוד:** המערכת כוללת פקודות מתחנות פיקוד הנמצאת על פני כדור הארץ, הפקודות הן לצורך ביצוע שינויים בערכות השונות של הלוויין.

**מערכת הבקרה התרמית:** תפקידה לבקר ולהבטיח שטמפרטורת הרכיבים והמערכות השונות תהיה בתחום הרצוי כשהלוויין נמצא במסלולו.

נספח א'

## עוצמת אות - הדציביל

עוצמת אות של תדר רדיו נמדדת בדרך כלל ביחידות הספק, למשל ווט. לא נוח להשתמש ביחידת זו, שכן אנו עוסקים בטוווח גדול מאד של עוצמות - ממאות ואטים ועד מיקרוואטום. לכן הוגדרה יחידה שימושית שנקראת  $dBm$ .

ה-  $dBm$  היא עשירית הלוגריתם של יחס עוצמת האות ל-  $1mW$ .

$$P(dBm) = 10 \log \frac{P(mW)}{1(mW)}$$

במערכות תקשורת, נהוג למדוד את עוצמת האות על ידי מידידת מושיעתו ביחידות מיליולט. גם במקרה זה נהוג להמיר את יחידת המידידה לדציביל. הפעם מוכפל הלוגריתם ב- 20. כיוון שההספק ייחסו לריבוע המתח:

$$V(dBmV) = 20 \log \frac{V(mV)}{1(mV)}$$

במקרים מסוימים נוח להתייחס לעוצמת האות ביחס ל-  $1\mu V$ . במקרה זה:

$$V(dB\mu) = 20 \log \frac{V(\mu V)}{1(\mu V)}$$

מכיוון שהיחס בין  $mV$  ל-  $\mu V$  הוא 1000, קל מאד לעבור מגודל שנמדד ביחידות  $dBmV$  לגודל שנמדד ביחידות  $dB\mu V$ . יש להוציא 60 לגדל שנמדד ב-  $dBmV$  כדי לקבלו ב-  $dB\mu V$ .  $(20 \log 1000 = 60)$

$$V(dB\mu V) = V(dBmV + 60)$$

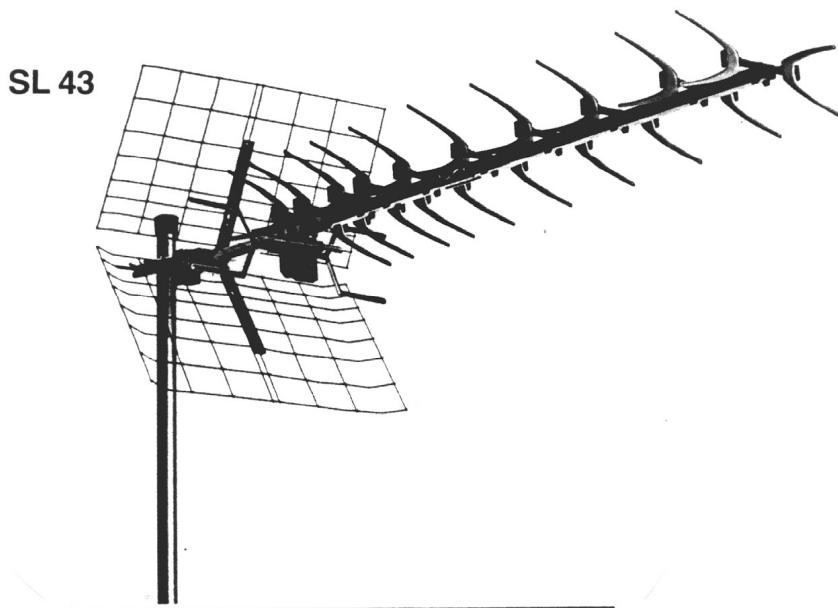
Power Ratio	Voltage and Current Ratio			Power Ratio	Voltage and Current Ratio		
			Decibels				Decibels
1.0233	1.0116	0.1		19.953	4.4668	13.0	
1.0471	1.0233	0.2		25.119	5.0119	14.0	
1.0715	1.0351	0.3		31.623	5.6234	15.0	
1.0965	1.0471	0.4		39.811	6.3096	16.0	
1.1220	1.0593	0.5		50.119	7.0795	17.0	
1.1482	1.0715	0.6		63.096	7.9433	18.0	
1.1749	1.0839	0.7		79.433	8.9125	19.0	
1.2023	1.0965	0.8		100.00	10.0000	20.0	
1.2303	1.1092	0.9		158.49	12.589	22.0	
1.2589	1.1220	1.0		251.19	15.849	24.0	
1.3183	1.1482	1.2		398.11	19.953	26.0	
1.3804	1.1749	1.4		630.96	25.119	28.0	
1.4454	1.2023	1.6		1000.0	31.623	30.0	
1.5136	1.2303	1.8		1584.9	39.811	32.0	
1.5849	1.2589	2.0		2511.9	50.119	34.0	
1.6595	1.2882	2.2		3981.1	63.096	36.0	
1.7378	1.3183	2.4		6309.6	79.433	38.0	
1.8197	1.3490	2.6		$10^4$	100.000	40.0	
1.9055	1.3804	2.8		$10^4 \times 1.5849$	125.89	42.0	
1.9953	1.4125	3.0		$10^4 \times 2.5119$	158.49	44.0	
2.2387	1.4962	3.5		$10^4 \times 3.9811$	199.53	46.0	
2.5119	1.5849	4.0		$10^4 \times 6.3096$	251.19	48.0	
2.8184	1.6788	4.5		$10^5$	316.23	50.0	
3.1623	1.7783	5.0		$10^5 \times 1.5849$	398.11	52.0	
3.5481	1.8836	5.5		$10^5 \times 2.5119$	501.19	54.0	
3.9811	1.9953	6.0		$10^5 \times 3.9811$	630.96	56.0	
5.0119	2.2387	7.0		$10^5 \times 6.3096$	794.33	58.0	
6.3096	2.5119	8.0		$10^6$	1 000.00	60.0	
7.9433	2.8184	9.0		$10^7$	3 162.3	70.0	
10.0000	3.1623	10.0		$10^8$	10 000.0	80.0	
12.589	3.5481	11.0		$10^9$	31 623	90.0	
15.849	3.9811	12.0		$10^{10}$	100 000	100.0	

איור 56 - טבלת המרה לדציבלים

נספח ב'

## נתוני אנטנה

הפרק העוסק בגלים אלקטромגנטיים ונטנות, מכיל מספר רב של מושגים. מושגים אלה שימושיים בධ'י הנתונים של יצורי האנטנות. לצורך הדגמה, מוצג כאן חלק עיקרי של דף נתונים של חברת המייצרת אנטנות לתחום הטלוויזיה. נבחן את האנטנה שמספרה הקטולוגי SL43.



דף הנתונים מכיל את צילום האנטנה. טבלת נתונים וגרפים המראים את ביצועי האנטנה. הטבלה והגרפים משווים זו כנגד זו ארבעה סוגים של אנטנות.

SPECIFICATIONS:		GROUP: D			
Channels CCIR	Frequency range (MHz)	21-62		470-806	
Type		SL15D	SL23D	SL43D	SL91D
Number of elements		15	23	43	91
Gain (max.)	dB	10	12	14	16.5
Front to back ratio	dB	26	27	28	30
Beam angle hor.	°	50-40	54-33	49-28	40-21
Beam angle vert.	°	75-51	69-47	56-35	46-21
Output impedance	Ω	75	75	75	75
Mechanical length	cm	68	71	126	227
Windload (785 N/m <sup>2</sup> )	N	48	59	87	147
ORDER NUMBER		563.1	573.1	583.1	593.1

מבט על הטבלה מלבד שלחברה ארבעה סוגיים של אנטנות מאותו הדגם SL15D עד SL91D . השוני הראשון בין הדגמים הוא במספר האלמנטים בכל אנטנה. מספר האלמנטים של דגם SL43 הוא 34.

הגבר של אנטנה זו (Gain) הוא 41 דציבר. הגבר זה הוא הגבר מרבי. מהעיקומות המצוירות ניתן ללמוד באיזה תדר זה קורה וכי怎 יורד ההגבר בתדרים האחרים.

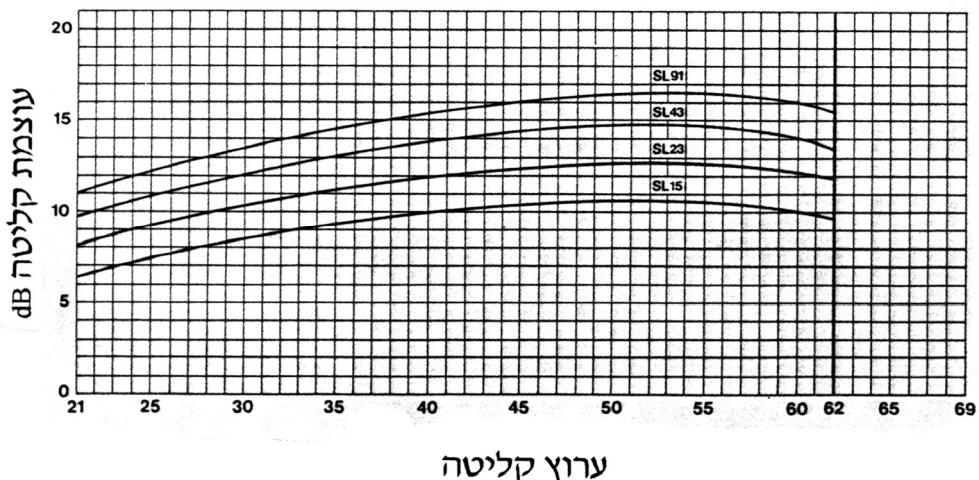
יחס הגבר פנים לאחור (Front To Back Ratio) של אנטנה זו הוא 28dB.

זווית הקרינה של האנטנה מסופק בשני נתונים. זווית קרינה אופקית בין 28 מעלות ל- 49 מעלות (כנראה תלוי הקליטה) וזוויות קרינה אנכית בין 35 מעלות ל- 56 מעלות. אלו הן זוויות קרינה צרות, המבטיות כווניות טוביה מאי.

עכבות אופינית 75 אום.

שני נתונים מכניים חשובים, מופיעים לאורך מכני 126 ס"מ, ועמידה בעוצמת רוח היוצרת כוח של עד 87 ניוטון או 8.9 ק"ג כוח.

נתונים אלה אינם נתונים תומנה מלאה על כל תחום הקליטה של האנטנה שהוא בין 470 מה"ץ ל- 806 מה"ץ, או כפי שנחוג לחלק את התדרים לאפיק שידור, מאפיק 21 ועד לאפיק 62. הגרפים הבאים משלימים את התמונה.



הציר האנכי מצין את עוצמת הקליטה ב-Bp והציר האופקי את האפיק הנקלט. מבט על אנטנה מדגם SL43 מראה שעוצמת הקליטה המרבית היא בערך 55, כאן מתקבל ההגבר המרבי של 14dB. הגבר זה יורד לכ- 10dB בקצת תחום הקליטה, אפיק 21.