

## שידורים דיגיטליים

פתרון בעיות הקיימות בשידור וקליטת אותות רדיו אנלוגיים  
בתחומי תג"מ (VHF) ו-תא"ג (UHF)

ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

### מבוא

השיטות הדיגיטליות, לשידור קול ותמונה, מורכבות מאוד. רמת המורכבות (וכמוכן העלויות) עולים בעשרות מונים בהשוואה לנדרש בשידורים האנלוגיים. אפשר להגיד, בהשאלה מנושאים אחרים, שהמורכבות עולה בכמה סדרי גודל אפילו מעל מקלט FM משוכלל.

קצרה יריעת עיתון "הגל" לעסוק בנושא כולו ומטרת סדרת מאמרים זו להביא לידיעת הקוראים רק חלק מהבעיות הקיימות בשידורי הרדיו והטלוויזיה האנלוגיים וכיצד פותרים אותן בשידורים דיגיטליים.

סדרת המאמרים הבאה הינה מבוא לשידורים דיגיטליים בישומיהם המסחריים כאשר בפרקים האחרונים נגיע גם ליישומי תקשורת קול דיגיטלית ע"י חובבי הרדיו.

מי שימצא עניין בנושא וירצה ללמוד יותר, יוכל להכנס ל-"גוגל", להקיש "שידורים דיגיטליים" ולצלול באוקיינוס המידע. מספר אתרים מומלצים מפורטים בסוף מאמר זה.

### רקע היסטורי וטכני

כמעט כל חובב רדיו מכיר את הרקע, במלואו או בחלקו, אבל כדאי לחזור ולהזכירו.

בהתחלה היו שידורי AM בגלים ארוכים (LW) ובינוניים (MW) כאשר מאוחר יותר נוספו שידורים גם בגלים הקצרים (SW).

הגלים הארוכים והבינוניים מצטיינים בתכונת ההתפשטות באמצעות גלי קרקע כאשר המשמעות היא קליטה רציפה בשטחים נרחבים מאוד. ניתן לקלוט גלים ארוכים במרחק אלפי קילומטרים מתחנת השידור וגלים בינוניים במרחק מאות קילומטרים.

שידורים מסחריים נעשים מאתרים ניידים והמקלטים, בעבר, היו גם הם ניידים. בתקופה מאוחרת יותר נוצר קהל מאזינים נלהב שרצה להמשיך להאזין לרדיו גם בזמן ניידותם. כתוצאה מכך פותחו, כבר בשנות ה-30, מקלטי הרדיו למכוניות שעד לשנות ה-70, של המאה הקודמת, כללו לרוב גלים בינוניים כאשר בחלקם היו גם גלים ארוכים (בעיקר במקלטים שמקורם באירופה).

הכל היה טוב, יפה וזול עד שקם מתחרה לשידורי ה-AM. בשנות ה-50, של המאה הקודמת, התחילו שידורים מסחריים של FM שהיו בתחום תדרי ה-תג"מ (88-108 מ"הצ). שידורי ה-FM הצטיינו באיכות שמע משופרת (Hi-Fi) ובשידורי סטריאו (Stereo). עברו מספר שנים ומקלטי המכוניות כללו גם את תחום התדרים של ה-FM.

לכאורה הכל היה באמת טוב ויפה אבל בכל זאת ישנה בעיה, טווח ה-תג"מ מוגבל למספר עשרות קילומטרים והפתרון, שנראה כפשוט, הוא הקמת תחנות שידור לאורך מסלול הנסיעה. במספר מדינות המרחקים גדולים מאוד ונדרש מספר רב של תחנות שתשרנה בתדרים שונים. אפילו בארצנו הקטנה לכל רשתות השידור יש קבוצת תחנות נפרדות באילת, באזור הנגב, באזור המרכז, בחיפה ובאזור הצפון.

למען האמת, היו בעבר נסיונות לנצל את יתרונות הכיסוי של הגלים הבינוניים כדי למנוע את הצורך בתחנות שידור מרובות. אחת השיטות לשידורי סטריאו ב-AM, שזכתה להצלחה מסוימת, היא C-QUAM שהחומרה עבודה פותחה ע"י חברת "מוטורולה". שיטה זו מבוססת על אפנון QAM (ראה מאמרים קודמים בנושא QAM) כאשר ערוץ ה-I מאופנן ב-R+L וערוץ ה-Q מאופנן ב-R-L. חיבור וחיסור, של שני האותות, מאפשר לנו להפריד בין R ו-L, לקליטת סטריאו, או לקלוט את ערוץ I בלבד (R+L) כערוץ מונו. ראה מקורות בסוף המאמר.

נהג מצוי, הנוסע לאורך הארץ, צריך להחליף את תדרי תחנות ה-FM בהתאם לאזור בו הוא נמצא. כמוכן שהמצב הרצוי הוא שכל התחנות תהינה בתדר אחד בלבד ולא יהיה צורך בהחלפת תדרים בכלל. למעשה ניתן לבצע זאת כבר היום בשידורים דיגיטליים בשיטת SFN (קיצור של Single Frequency Network) ועל כך בהמשך.

לשימוש בתדר אחד יש גם יתרון נוסף, הוא ימחזר חלק גדול מהתדרים שבשימוש וע"י כך יעזור בפתרון בעיית "מצוקת התדרים". לתדרים שיתפנו יש ביקוש רב וגם הרשויות מעוניינות בכך מכיוון שכל תחנה נוספת משלמת תמלוגים לרשויות השונות.

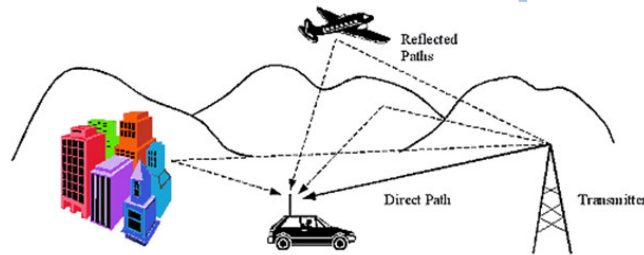
כל עוד לא קיימות רשתות SFN, יש צורך בשיטה בה המקלט מחליף בעצמו את התדרים ושומר על רצף קליטה של הרשת בה אנו מעוניינים. למעשה השיטה כבר קיימת ומיושמת כחלק ממערכת RDS (ראשי תיבות של Radio Data System). מקלטי רדיו ניידים, שמערכת RDS מותקנת בהם, סורקים כל הזמן את תחום התדרים ומחפשים את התדר בו הקליטה חזקה ביותר עבור הרשת בה אנו מעוניינים. ה-RDS הוא נושא מעניין בפני עצמו אבל אינו חלק מהמשך המאמרים. מי שמעוניין בו יוכל למצא אינפורמציה במקורות שבסוף מאמר זה.

קליטת שידורים אנלוגיים, ב-תג"מ ו-תא"ג (VHF/UHF) במיוחד במקלטים ניידים, רגישה מאוד להפרעות שמקורן בהחזרות מעצמים גדולים, אזורי כיסוי בעייתיים והפרעות מתדרים זרים (כגון רעש מקווי מתח גבוה).

ריבוי תדרי רשתות השידור יוצר בעיה נוספת והן הפרעות הדדיות. כל מי שנוסע ברכב ומאזין לשידורי FM מכיר את התופעה כאשר עוברים ליד תחנת שידור של רשת אחרת.

הפרעה, אולי המשמעותית ביותר, נובעת מהדים החוזרים מעצמים גדולים (כגון, בנינים, הרים וגבעות, מטוסים וכדומה). הפרעה זאת, המכונה "רב-נתיבית" (Multipath), מושפעת מהמיקום והתנועה היחסית בין המשדר, המקלט והגופים מהם מוחזרים האותות.

דוגמה לתופעה זו מופיעה באיור הבא:



הפרעות אלה תהינה חמורות יותר ככל שאורך הגל יהיה קצר יותר (להזכירכם שישנה מערכת המתבססת על הדים בלבד וכולנו מכירים אותה בשם מכ"מ). יישומי התקשורת, שיושפעו ביותר, הם שידורי הטלוויזיה, חלק משידורי ה-FM ותקשורת הרדיו הדו-כוונית בתחומי התג"מ וה-תא"ג.

אם בשידורי קול (Audio) הבעיה מטרידה, בשידורי טלוויזיה היא משמעותית ביותר. כל מי שעדיין עובד עם אנטנה, לקליטת שידורי טלוויזיה אנלוגיים, מכיר את "רוחות הרפאים" (Ghosts) המופיעים על המסך. זכורה לי היטב התקופה בה גרתי סמוך לנתיב נחיתה המטוסים ל-נתב"ג. כל מטוס שעבר גרם להפרעות בקליטה בטלוויזיה שהייתה מחוברת לאנטנה. באותו זמן יכולתי להבחין, בהתאם לחוזק ואופי ההפרעה, בגודל המטוס ואפילו במהירותו (מטוסי סילון לעומת מטוסי מדחף).

צירוף הבעיות וחומרתן הביאו לצורך למצוא דרך יעילה למניעתן. מסתבר שרוב הבעיות ניתנות לפתרון בעזרת מעבר לשידורים דיגיטליים תוך שימוש במעבדים/מחשבים ובטכניקות מתמטיות מתוחכמות.

### שידורים דיגיטליים

אחד המאפיינים, של השידור הדיגיטלי, הוא הנאמנות הגבוהה (למקור) של התוכן המשודר. אם עוצמת האות נמוכה, השידור לא יקלט בכלל אבל אם השידור נקלט, הוא נשמע צלול וללא הפרעות.

לצורך השגת הנאמנות, מבוצעות הרבה פעולות של עיבוד נתונים הן במשדר והן במקלט. נכון שפעולות אלה מאפשרות לנו לטפל, בנפרד או ביחד, בבעיות שהוזכרו לעיל אבל יש לזה גם מחיר. שידורים דיגיטליים אינם שידורים בזמן אמת. אם קולטים את אותו שידור בשני מקלטים נפרדים, אנלוגי ודיגיטלי,

יהיה הפרש זמן ברור ביניהם כאשר השידור האנלוגי יקלט הרבה לפני השידור הדיגיטלי. באופן מעשי, השהיה זו זניחה לעומת יתרונות האיכות של השידור הדיגיטלי.

השידורים הדיגיטליים מבוססים על שיטת ה- "רשת בתדר יחיד" (SFN – Single Frequency Network) המיושמת כבר בעולם ברשתות קול (Audio) וטלוויזיה (TV) בתחומי תג"מ ו-תא"ג. השיטה מיושמת כבר בארץ בשידורי הטלוויזיה הדיגיטלית (DVB-T).

לשימוש ב-SFN יש גם חיסרון. המקלט, הקולט ממסדר מסוים, עלול לקלוט אותות גם ממשדרים מרוחקים. אותות אלה עלולים לשבש את הקליטה ולכן פותחה שיטה לנטרול האותות העלולים להפריע. השיטה כוללת "מרווחי שמירה" ועליה נפרט בהמשך.

## מרווחי שמירה

מרווחי השמירה (Guard Intervals) מיועדים לטיפול בהפרעות הנובעות מהתפשטות רב נתיבית (Multipath) ומהפרעות של תחנות שידור באותה הרשת שהיא בתדר אחד (SFN).

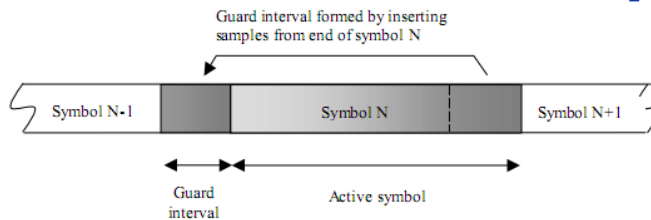
נחזור ונתבונן באיור הקודם. ניתן להבחין כי המרחק הקצר ביותר, בין מסלולי ההתפשטות, הוא המסלול הישיר (Direct Path). כל מה שיגיע אחריו יהיה הד מאחד האובייקטים שבשטח או אותות מתחנות שידור אחרות ברשת ה-SFN של הערוץ.

המידע, המיועד לשידור, מעובד לסימבולים המשוגרים בקבוצות הניתנות לשליטה (ראה מאמרים קודמים על "סימבולים") כאשר אפשר לשלוח את הסימבולים ברצף ואפשר לשלוח אותם עם רווחים ביניהם.

מכיוון שההחזרות והאותות מהתחנות האחרות ברשת מכילים סימבולים מאחריים/מעוכבים, הם עלולים לשבש את הסימבולים שנשלחו אחריהם. כדי למנוע זאת, משאירים "מרווחי שמירה" בין סימבול אחד לשני. במשך מרווח זה, הנעשה בהתאמה מלאה בין המשדר והמקלט, המקלט נחסם לחלוטין וכך גם כל ההדים וההחזרות.

ההנחה הבסיסית לתכנון טווח השמירה היא שאם תגענה החזרות מאוחר יותר, לאחר "מרווח השמירה", הן תהינה ברמה כל כך נמוכה שלא תשבשנה את קליטת הסימבולים שישודרו בהמשך.

באיור הבא ניתן לראות כיצד משולב "מרווח השמירה" בין סימבול אחד לזה שעוקב אחריו:



ניתן לראות, בבירור, את מרווח השמירה בין סימבול N-1 לסימבול N (קטע כהה). המקלט יודע שבפרק הזמן, של מרווח השמירה, הוא חייב להתעלם מהאותות הנקלטים. מה קורה במשדר? האם הוא מפסיק לשדר במרווח הבטיחות? התשובה היא: לא.

כדי שיהיה תאום מלא, בין המקלט למשדר, הם חייבים להיות מסונכרנים ביניהם לגבי "שעון הזמן" של המעבד. סנכרון זה מחייב שידור רציף ולכן צריך להמשיך ולשדר גם במשך מרווח השמירה. עובדה זו מחייבת למלא את המרווח עם אינפורמציה כל שהיא אפילו אם לתוכן שלה אין משמעות.

כפי שכבר הוזכר, ניתן לשלוח את האותות הדיגיטליים בכל סדר המתאים לצרכינו. הפעם ניקח את הקטע הסופי של הסימבול המשודר, באורך של מרווח השמירה, ונתקע אותו בתוך מרווח השמירה ועל ידי כך נבטיח את רצף השידור.

עכשיו יכולה להישאל השאלה הבאה: מה אורכו של מרווח הביטחון? נהוג מרווח ביטחון של 25% ממסגרת שידור (Frame) הכוללת את הסימבול המשודר ומרווח הביטחון העוקב.

כאן נוצרת בעיה חדשה. נניח לרגע שהסימבול ארוך מאוד וההדים מתחילים להגיע תוך כדי קליטתו ויוצרים הפרעות.

אי לכך, יש צורך להשתמש בסימבולים קצרים אבל אז יורד, בצורה חדה, קצב זרימת האינפורמציה. לשמחתנו יש פתרון לבעיה והוא השימוש ב-FDM ועל כך בקטע הבא.

## FDM

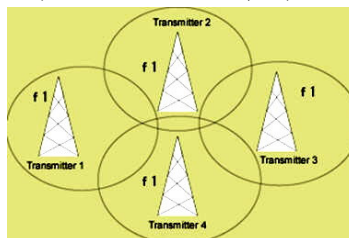
Frequency Division Multiplexing (בקיזור FDM) פירושו "ריבוב תדרים".

משמעות הדבר שבמקום לשדר על גל נושא אחד, נוכל לפצל את השידור להרבה גלים נושאים שמספרם תלוי ביישומים השונים.

להזכירכם ששידורי סימבולים קצרים מאפשרים למנוע מהדים להשתרבו לתוך קליטת הסימבולים. אם נשדר על מספר רב של גלים נושאים הרי שנוכל לחלק ביניהם גם את האינפורמציה וע"י כך להוריד את קצב השידור, של כולל גל נושא בנפרד, ולהשתמש בסימבולים קצרים יותר ועל ידי כך לאפשר צפיפות רבה בין גל נושא למשנהו. הפרמטרים של שידורי FM לציבור (שיטת DAB שתתואר במאמר הבא) מפורטים בטבלה הבאה:

Mode	I	IV	II	III
Number of carriers	1536	768	384	192
Carrier separation	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Active symbol duration	1 ms	500 ms	250 ms	125 ms
Guard interval duration	246 $\mu$ s	123 $\mu$ s	62 $\mu$ s	31 $\mu$ s

אורך המסגרת של הסימבול (הסימבול עצמו ומרווח השמירה) קובע גם את המרחקים בין תחנות ה-SFN. אם עובדים ב-Mode I, המרחק, בין התחנות, יהיה כ-70 ק"מ בהתאם לאיור הבא:



הפיצול, לגלים נושאים מרובים, נעשה בעזרת "התמרות פורייה" שהן פונקציות מתמטיות המופעלות, הן בשידור והן בקליטה, בעזרת מעבדים המיועדים לכך. נושא זה כבד בפני עצמו ולא כאן המקום לדון בו.

עכשיו יכולה להישאל השאלה: האם לא חורגים מרוחב הסרט המקורי? והתשובה היא: לא. נכון שיש לנו הרבה גלים נושאים אבל המרווחים ביניהם צרים מאוד כפי שמתואר בטבלה לעיל.

למעשה יש כאן אפילו צמצום ברוחב הסרט. בשידורי טלוויזיה דיגיטלית (DVB-T) משדרים, בשיטה זו, 4 ערוצים נפרדים בפס תדרים ששימש לערוץ אחד בלבד (בארץ 8 מ"הצ).

לשיטה זו יש גם בונוס: נניח שישנה הפרעת CW בתחום התדרים שבשימוש. אם היינו משדרים בגל נושא אחד, כול השידור היה נפגע. בשידורי FDM יפגע רק גל נושא אחד וגם הוא יתוקן כפי שנראה בהמשך.

### הגנה בעזרת תיקון שגיאות

"מרווחי השמירה" שומרים מהדים וקליטה מתחנות הרשת אבל לא מגינים מכלל הפרעות האחרות. כדי לטפל בהן נדרש כלי נוסף שהוא קידוד המאפשר תיקון שגיאות המזוהות ככאלה ע"י המקלט.

שיטה זו נקראת "תיקון שגיאות מקודם" (Forward Error Correction) הידוע בקיצורו FEC.

לכל סימבול מצורף קוד המעובד מנתוני הסימבול עצמו. במקלט מפיקים את אותו קוד, מהסימבול הנקלט, ומשווים אותו לקוד שנקלט יחד עם הסימבול. אם שניהם מתאימים, ממשיכים הלאה. אם אין התאמה, ניתן לשחזר ולתקן את הסימבול הנקלט.

נכון שהוספת הקוד בשידור ופענוחו בקליטה מהווים תקורה גבוהה יחסית ודרישה לזמן עיבוד אותות נוסף אבל התוצאות מצדיקות את העומס הנוסף.

תורת ה-FEC אינה פשוטה ומחייבת ידע מתמטי עמוק כולל הכרת האלגוריתם של ויטרבי (Viterbi) שלא ניתן לפרטו במסגרת מאמר זה. כאן נסתפק בעצם העובדה שהשיטה עושה את העבודה והמעוניינים במידע נוסף יוכלו לעיין במקורות בסוף מאמר זה.

## עלעול או Interleaving

אי אפשר להמנע, בכל זאת, מהתייחסות נוספת ל-FEC והאלגוריתם של ויטרבי. מסתבר שהפרעות מסוימות, המופיעות ברצף של סימבולים, לא תמיד ניתנות לתיקון בעזרת האלגוריתם שנוכר.

הפיתרון שנבחר הוא כעין "בלבול" בסדר הסימבולים בשידור והחזרתם למקומם הנכון במקלט. הזכרנו מקודם שסדר משלוח הסימבולים ניתן לבחירה ועכשיו נוכל לנצל אפשרות זו.

אז איך יוצרים את ה-"בלבול" ומחזירים את הסימבולים לסדר? עושים זאת ע"י פעולת העלעול.

מכניסים את הסימבולים לתאים, המתוארים בטבלה הבאה, כאשר המספרים מתארים את סדר הסימבולים המאוחדים בצורה אנכית בעמודות:

0	8	16	24	32
1	9	17	25	33
2	10	18	26	34
3	11	19	27	35
4	12	20	28	36
5	13	21	29	37
6	14	22	30	38
7	15	23	31	39

בהמשך, הסימבולים ישודרו בהתאם להופעתם בשורה האופקית. לדוגמה: ראשית תשודר השורה הראשונה לפי הסדר של 0, 8, 16, 24 ו-32. אחריה תשודר השורה השניה לפי הסדר של 1, 9, 17, 25, 33 וככה הלאה שאר השורות.

הסימבולים נקלטים ונאגרים בשורות האופקיות שבטבלה וכאשר הטבלה מתמלאת הם מועברים בצורה אנכית (בהתאם לסדרם המקורי) לעיבוד האותות.

## סיכרון

הזכרנו מקודם את הסנכרון הדרוש, בין המשדר והמקלט, לתאום השעון של המעבד במקלט. פעולה זו פשוטה יחסית וניתן לבצע ע"י גזירת הפולסים המרכיבים את הסימבולים.

## מה בהמשך המאמרים?

בהמשך, תתואר שיטת ה-COFDM (קיצור של Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing), שיסודותיה תוארו בפרק זה והקודמים לו.

## מקורות לפרק זה

מקור מומלץ הוא האתר [www.godigital.co.il](http://www.godigital.co.il) שבו נמצאים מאמרים גם בשפה העברית.

RDS – ניתן למצוא אינפורמציה באתרי האינטרנט שאחד מהם הוא:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_Data\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_Data_System)

בספר הבא RDS: The Radio Data System שנכתב ע"י Dietmar Kopitz, Bev Marks

ופרטים נוספים באתר הבא: <http://www.rds.org.uk/rds98/rdsbooks.htm>

פרטים נוספים, על QAM, באתר <http://en.wikipedia.org/wiki/C-QUAM>

FEC וקוד Viterbi - [http://en.wikipedia.org/wiki/Forward\\_error\\_correction](http://en.wikipedia.org/wiki/Forward_error_correction)

\* \* \* \* \*

# שידורים דיגיטליים

## COFDM וישומו בתקשורת

ערוך ע"י אבנר דרורי 4X1GE

מעובד ממידע הקיים באתרי ויקיפדיה ו-godigital

### מבוא

מטרת סדרת מאמרים זו להביא לידיעת הקוראים נושאים, שהם כבדים ומסובכים בפני עצמם, בצורה מופשטת ולפעמים אפילו תוך דילוג על פרטים מסוימים. כול מי שמעוניין להרחיב את ידיעותיו יכול לעשות זאת ע"י שימוש באתרי האינטרנט שחלקם מפורט בסוף המאמר.

בפרקים הקודמים, של סדרה זו, למדנו על הבעיות של שידורים אנלוגיים, בתחומי ה-תג"מ ומעלה, וכיצד ניתן להתגבר עליהן.

הטכניקות, שהוזכרו, היו:

- המרה וכיווץ של אותות אנלוגיים לדיגיטליים (MP2, MP3 וכדומה)
- ריבוב (Multiplexing) של ערוצי שמע/וידאו וערוצי נתונים/בקרה דיגיטליים.
- יצירת סימבולים
- עלעול (Interleaving)
- יצירת מרווחי שמירה
- יצירת קוד תיקון שגיאות מקודם (FEC)
- אפנון בשיטת QAM.
- ביזור הגלים הנושאים תוך שימוש בעיבודים מתמטיים (התמרות פורייה)

כול הטכניקות הנ"ל חוברו לשיטה אחת של OCFDM שהיא ראשי תיבות של:

### Orthogonal Coded Frequency Division Multiplexing

למעשה אנחנו כבר אמורים להבין את המשמעות של השם הארוך.

"Orthogonal" - הכוונה לשיטת האפנון של QAM המתבססת על קטורים הניצבים (אורתוגונאליים) זה לזה.

"Coded" - הכוונה ל יצירת קוד תיקון שגיאות מקודם (FEC).

"FDM" - הכוונה לביזור גלים נושאים תוך שימוש בעיבודים מתמטיים (התמרות פורייה).

### מערכות שידור וקליטה

כפי שכבר ציינתי, שיטת ה-COFDM מיושמת בתחומי התדרים של תג"מ ומעלה.

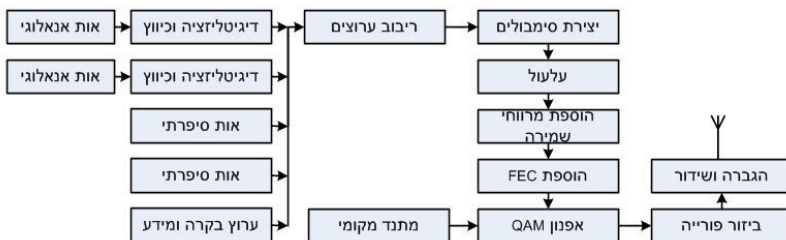
למעשה היא מיושמת גם בתקשורת מחשבים. אמנם רשתות התקשורת משתרעות על מרחקים קצרים יחסית אבל העברת האינפורמציה מבוצעת בתחומי התדרים של גיגה-הרצים ולכן היא סובלת מאותן הבעיות של התקשורת בתדרים נמוכים יותר.

שיטה זו מיושמת גם ב-ת"ג, הכוונה ל-DRM, ועל כך במאמרים נוספים.

המשדרים והמקלטם, המתוארים בצורה מופשטת בתרשימי המלבנים שלהם, מתאימים עקרונית לרוב היישומים.

### משדרים

#### מערכת שידור דיגיטאלית



האותות האנלוגיים עוברים דיגיטליזציה וכיווץ. נושא הדיגיטליזציה תואר בסדרת המאמרים על ה-SDR ואין כוונה להרחיב על כך. הכיווץ עצמו עלול להיות בעייתי ועליו ארחיב כאשר נגיע ליישומים.

נושא רוחב הסרט עולה תמיד כאשר מדברים על ריבוב ערוצים ונשאלת השאלה: איך מצליחים להכניס מספר ערוצים לאותו רוחב פס ששירת ערוץ אחד בלבד? התשובה פשוטה: כול הערוצים האנלוגיים, שהיו זוללי רוחב סרט, כווצו בצורה אכזרית והשאירו מקום להוספת אינפורמציה. כמה אכזרית? את זה נראה בהמשך.

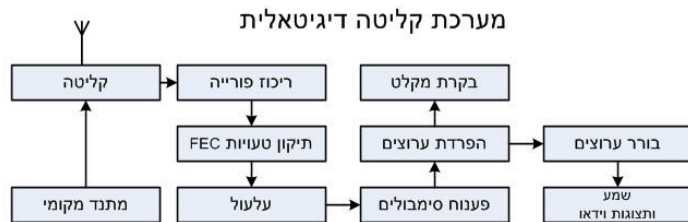
בהמשך גם נראה שאפשר להכניס, ברוחב סרט של ערוץ שמע אנלוגי אחד מספר ערוצי שמע ומספר שידורים ספרתיים כגון שקופיות ולוחות שידורים. בנוסף, אפשר להוסיף ערוץ בקרה בו משדרים למקלט על הצורך לעבור לקליטה אחרת (MODE) וגם על כך נרחיב בהמשך.

השלב הבא הוא ריבוב של כול ערוצי הכניסה לזרם של פולסים כאשר בשלב הבא הופכים אותם לסימבולים.

מעלעלים את הסימבולים, מוסיפים להם מרווחי שמירה וקודי תיקון שגיאה מקודם ומגיעים לשלב האפנון (בשיטת QAM). מפעילים את התמרת פורייה על הגל הנושא, מגבירים את התוצאה ומשדרים אותה. ראו להזכיר כי המגבר חייב להיות ליניארי כפי שאנו מכירים משידורי SSB.

## מקלטים

המקלט עושה את הפעולות ההפוכות לאלה שעושה המשדר. מבוצעים קליטת שידורי רדיו/טלוויזיה, עיבודים שונים ובסופו של דבר בוחרים את הערוץ הנדרש ושימעים אותו או צופים בו.



המקלט בנוי בטכנולוגיות של SDR המוכרות לנו ממאמרים קודמים.

כאן כדאי להזכיר את ערוץ הבקרה, המשודר עם ערוצי המידע, ומפעיל את בקרת המקלט לשינוי פרמטרים כפי שיתואר בהמשך.

## יישומי COFDM

כפי שכבר הוזכר, שיטת ה-COFDM מיושמת בשימושים שונים כגון שידורי שמע, טלוויזיה ותקשורת בין מחשבים. המבדיל ביניהם הוא בבחירת הפרמטרים של כול שלב המתואר בתרשים המלבני.

ישנם יישומים (כגון שידורי טלוויזיה) בהם ניתן לשנות פרמטרים תוך כדי עבודה. כדי לשדר טלוויזיה HD (High Definition) נדרש רוחב סרט כפול מזה של שידור רגיל. בשידורים אלה (DVB-T), בהם ניתן לשדר 5 ערוצי טלוויזיה רגילים, אפשר להחליף שני ערוצים רגילים בערוץ HD אחד וכול זאת ע"י שידור קוד, בערוץ הבקרה, המורה למקלט לעבור לקליטת HD.

מקודם הוזכרו גם ערוצים ספרתיים ועכשיו הזמן להתייחס אליהם. בערוצים אלה משודרות שקופיות המתייחסות לערוץ הנבחר ומוצגות בהן, אם יש במקלט צג מתאים, פרטי התוכנית כגון שם הקונצרט או תקציר החדשות.

בדרך כלל משודר גם לוח השידורים של כול אחד מהערוצים. הצופה יכול לבחור, בלוח השידורים, את הערוץ והתוכנית כאשר בקרת המקלט תדאג להביא אותם, לצופה, בשעה היעודה.

## DAB – שידורי שמע דיגיטליים (Digital Audio Broadcasting)

עד עכשיו עסקנו בתיאור מגבלות השידורים האנלוגיים (בתחומי ה-תג"מ ומעלה) ועל יתרונות השידורים הדיגיטליים. עכשיו הגיע הזמן לראות כיצד זה מיושם בשטח ודוגמה טובה לכך הם שידורי ה-DAB.

המטרות העיקריות של המעבר לשידורים דיגיטאליים, היו שידורי אותות שמע באיכות גבוהה יותר מזו של שידורי אנלוגיים ב-FM, יותר תחנות באותו רוחב פס, חסינות בפני רעשים, מניעת הפרעות בין ערוצים והפרעות הנובעות מהתפשטות רב נתיבית (כאשר הפרעה זו משפיעה על קליטה בכלי רכב ניידים במהירויות גבוהות).

## היסטוריה

בדיקת הרעיון התחילה בגרמניה, בשנת 1981, במסגרת מוסד מחקר, ובשנת 1985 השיטה הודגמה בפני כנס WARC שהתקיים באותה שנה בג'נבה.

במערכות גדולות, כמו שידורים לציבור, מעורבים גופים שונים שהם תחנות שידור, מפעילי רשתות שידור, יצרנים גדולים של ציוד אלקטרוניקה בידורית-ביתית, ארגוני מחקר וכדומה. כדי לקדם נושא משותף עליהם להתאגד ולאחד כוחות. כך נוצר איגוד Eureka שמטרתו לקדם נושאים הקשורים לשידורי רדיו.

האיגוד עוסק בנושאים שונים וביניהם ה-DAB. פרויקט זה מספרו היה 147, במניין הפרויקטים, ולכן הוא ידוע גם בשם Eureka 147.

פתוח ה-DAB החל בשנת 1987 ובמסגרתו פותח גם קידוד הכיווץ (codec – Coder-Decoder) הידוע בשם MP2 (השם המלא הוא MPEG-1 layer-2).

בחירת ה-codec, האפנון וקוד תיקון השגיאות נעשה בשנת 1990 ובשנת 1993 החלו שידורי הדגמה באנגליה. בשנת 1995 החלו שידורים ניסיוניים במספר ארצות באירופה.

אנגליה הייתה המדינה הראשונה לשימוש נרחב ב-DAB. בשנת 1999 החלו במכירת מקלטים ובשנת 2001 כבר היו למעלה מ-50 תחנות שידור מסחריות. הצפי היה שבשנת 2009 יהיו מקלטי DAB ב-40% מהבתים שבאנגליה.

הפעלת ה-DAB נעשתה לאחר מסע של "קידום מכירות" שגבל בשטיפת מוח. הציפיות היו גבוהות מאוד וכגודל הציפיות כך היה גם גודל האכזבות. הערכת כשלה דווקא במקומות בהם היא הייתה צפויה לעלות על מערכת השידור האנלוגית.

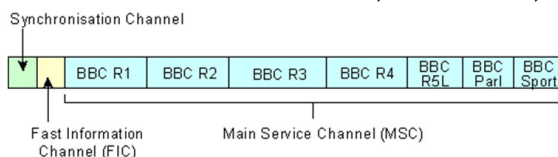
כתוצאה מכך, בשנת 2005 החליטו הארגונים המפקחים על הנושא לאמץ את codec השמע של AAC+ (ראשי תיבות של Advanced Audio Coding) ולהחליף את שיטת תיקון השגיאות המוקדם. השיטה החדשה נקראת בשם DAB+ ופרטים על כך בהמשך.

ה-DAB היה, למעשה, הפרויקט הראשון שנעשה בו שימוש ב-COFDM וההצלחה בו הייתה אמורה לשמש כקיש קפיצה לפרויקטים נוספים ואכן כך זה היה.

## יתרונות בניצול ספקטרום התדרים

השידורים הדיגיטאליים מאפשרים ניצול יעיל ומשמעותי יותר, של ספקטרום התדרים, מאשר השידורים האנלוגיים. עובדה זו לא מוצתה עדיין מאחר ואין תוכניות להפסיק את השידורים האנלוגיים ורוב הערוצים, הן של ה-FM והן של הטלוויזיה, משודרים עדיין במקביל בשתי השיטות.

ניתן להוכיח, בעזרת חישובים מתמטיים, שאפשר להשיג נצילות ספקטרום העולה פי 17 על שידורי FM רגילים. נכון שחיוב זה הוא תיאורטי בלבד אבל במציאות משדרים כ-7 ערוצי דיבור בתוספת מספר ערוצי נתונים דיגיטליים (טקסט ושקופיות) וערוצי בקרה. ראה דוגמה של שידורי ה-BBC:



## היתרונות הכולטים של ה-DAB

טכנולוגית השידור, של ה-AM וה-FM, ותיקות, מבוססות ומחירי המוצרים זולים. הפעלת שידורים דיגיטאליים הייתה חייבת להיות בעלת יתרונות בולטים, לגבי הטכנולוגיות הקיימות, כדי שתתפוס את מקומה הראוי.



## פשטות השימוש

ה-DAB מתכוונן אוטומטית לכול התחנות הזמינות ומציג אותן על גבי מסך. בנוסף, הוא מסוגל להציג מידע כתוב (טקסט) הקשור לתוכן השידור או לנתונים אחרים כגון תחזית מזג אוויר ועדכוני תעבורה מקומיים. ב-DAB מוצגים גם לוחות השידורים וניתן לבחור תוכנית מבוקשת והמקלט יעבור אליה בהתאם לבחירה. ישנם מקלטים בהם קיימת אפשרות להגדיר תחנות זמני שידור לצורך שמירה ושמיעה מאוחרת יותר.

## יותר תחנות זמינות

כפי שכבר תואר לעיל, באותו תחום תדרים ניתן לשדר יותר ערוצים. השימוש ב-SFN (להזכירכם – שימוש בתדר אחד באותה רשת) מאפשר קליטת מספר גדול של תחנות בעיקר באזורים כפריים. לדוגמה: ה-DAB הופעל בדרום נורווגיה בשנת 2006 ובין לילה קפץ מספר התחנות הזמינות מ-6 ל-21.

## עלות הבעלות

מכיוון שבמסדר אחד אפשר לשדר מספר גדול של ערוצים, צפוי שמחיר האחזקה, בסופו של דבר, יהיה זול יותר.

## איכות הקליטה

השיטה מכילה אמצעים מובנים לביטול התופעות השליליות של רעשים ודעיכה בקליטה, כתוצאה מריבוי נתיבי ההתפשטות במיוחד במקלטים ניידים, תופעות שהשידור האנלוגי סובל מהן. בקליטת שידורים דיגיטליים, אין תופעת הרחש האופיינית לקליטת FM בעוצמות שדה נמוכות. לעומת זאת, בשידורים דיגיטליים בעוצמות שוליות הקליטה נשמעת כ-"בוץ מבעבע" (bubbling mud) וגם על כך בהמשך.

## פחות הפרעות פיראטיות

סיבוך התקנת משדרי DAB, לעומת הקלות בהפעלת משדרי FM, מהווה כעין מחסום בפני שידורים פיראטיים. בערים גדולות בעולם (לצורך זה גם בני-ברק נחשבת כעיר גדולה...) ישנן תחנות פיראטיות רבות הגורמות להפרעות בקליטת שידורי FM. באותם מקומות, ה-DAB הוכיח חוסן להפרעות מסוג זה.

## רוחב פס משתנה

שידורי מלל שאינם מוזיקליים, כגון חדשות, דווחי תנועה ומזג-אוויר יכולים להסתפק בשידורי מונו המסתפקים ברוחב פס צר בהרבה מאשר תכנים מוזיקליים המשודרים בסטריאו. דבר זה מאפשר להכניס יותר ערוצי מלל בתוך ה-DAB ולנצל, את מה שנחסך, עבור ערוצים מוזיקליים נוספים. למען האמת, כדי לחסוך ברוחב פס, ישנם ערוצי DAB המשדרים מוזיקה גם בערוצי מונו, כעין חזרה לשידורים ההיסטוריים של ה-AM.

## הביקורתיות על ה-DAB

### איכות השמע

היעדים המקוריים, של המעבר לשידורים דיגיטליים, היו השגת איכות שמע מעולה, יותר ערוצי שידור, חוסן מפני הפרעות ומניעת הפרעות כתוצאה מקרינה רב-נתיבית, בעיות ששידורי ה-FM האנלוגיים סובלים מהם.

לעומת זאת, בארצות האירופאיות המובילות ביישום ה-DAB (אנגליה, דנמרק, נורווגיה ושווייץ) קליטת שידורי הסטריאו נשמעים באיכות נמוכה בהרבה משידורי ה-FM האנלוגיים. הסיבה לכך הוא קצב הדגימה (Bit Rate) של האותות המשודרים. מסתבר שהקידוד, בשיטת MPEG Layer 2, הבלתי יעילה, דורשת קצב דגימה גבוה.

במאמר, שנכתב ע"י אחד ממהנדסי ה-BBC, נאמר שצריך קצב דגימה של 256 קב"ש (קילו ביט לשנייה), עבור שידורי סטריאו. עדיין אפשר לרדת ל-224 קב"ש מבלי שזה יתבטא באיכות. במקרים חריגים, בהם ישנה הדירות באותות הימין והשמאל, אפשר לרדת ל-192 קב"ש אבל אז כבר שומעים זיופים.

יחד עם זאת, לשידורי מונו אפשר להסתפק גם ב-96 קב"ש.

בשנת 2006 ה-BBC הוריד את קצב הדגימה (של אחד מערוצי השידור שלו) מ-192 ל-160 קב"ש. כמובן שהציבור התלונן וה-BBC התנצל, תוך זאת כשידורים ניסיוניים בלבד וחזר ל-192 קב"ש.

למרות שהציבור האנגלי מתלונן, הוא עדיין מאמין בשידורים הדיגיטאליים (במיוחד לאחר שטיפת המוח שעבר וההשקעות שלו ברכישת מקלטים). בסקרים שנעשו, באנגליה בה קצב הדגימה נמוך, נמצא כי הציבור עדיין מאמין ב-DAB אבל 92% מהם רוצים שאיכות השמע תשופר, לפחות שתהיה טובה כמו שידורי ה-FM.

### שידורים מוסיקליים במונו

מספר עולה של תחנות משרד תוכניות מלל ומוסיקה במונו אפילו בתנאים הדורשים שידורי סטריאו. לעומת זאת, הטלוויזיה (אפילו הדיגיטלית) ושידורי ה-FM משרדים את אותם התכנים בסטריאו.

### איכות הקליטה

הקליטה ב-DAB יכולה להיות גרועה אפילו באזורים בהם אמורה להיות קליטה טובה. הסיבה לכך שקוד תיקון השגיאות המקודם (FEC) הינו חלש ואינו מטפל היטב בשגיאות. במקרים אלה הקליטה נשמעת כקולות של "בוץ מבעבע". ליקוי זה תוקן עם המעבר ל-DAB+ כפי שנראה בהמשך.

### DAB+

בנובמבר 2006 פורסם תקן חדש לשידורים בשם DAB+. תקן זה מבוסס על קידוד שמע של HE-AAC הידוע גם בשם AAC+. הונסס לשימוש קוד תיקון השגיאות של Reed-Solomon שהינו הרבה יותר יעיל מקודמו. בנוסף, ניתן לשרד ולקלוט גם ב-Surround.

התקן החדש של HE-AAC יעיל פי 3-4, מהתקן הישן של MPEG-I level II, וב-64 קב"ש אפשר להשיג תוצאות טובות יותר מאשר ב-192 קב"ש ב-DAB. אי לכך, אפשר יהיה לשרד פי 4-3 תחנות באותו רוחב פס ולהשיג איכויות טובות בשמע. יתכן אפילו להשיג את שני הדברים ביחד.

מקלטי ה-DAB הישנים לא יכולים לקלוט את שידורי ה-DAB+ אולם המקלטים החדשים יכולים לקלוט את שני סוגי השידור.

ה-DAB ימשיך להיות בשימוש במשך מספר שנים עד שיוחלט על סיום השידורים שלו לטובת ה-DAB+.

### DAB בישראל

חברת בזק החלה, בשנת 1996, בניסיונות של רשת SFN ממשרדים הנמצאים בגבעתיים, חיפה, באר-שבע, ירושלים, איתנים וחדרה.

משרד התקשורת, בעקבות החלטה של משרד האוצר להוצאת מכרז בנושא, הורה לבזק להפסיק את השידורים הניסיוניים כבר בשנת 2007.

בשנת 2008 הוצא מכרז להקמת רשת ארצית לשידורי DAB+. הרשת צריכה לספק 36 ערוצי רדיו בקצב 48 או 64 קב"ש ואחר כך חמישים וארבעה ערוצים. הרשת אמורה להתחיל בכסוי של 80%, משטח המדינה, ובהמשך להגיע לכיסוי של 95%.

סגירת המכרז נדחתה מספר פעמים בשל מיעוט מתעניינים והוא נכשל, בסופו של דבר, כשהתברר בסוף חודש מרץ 2009 שלא הוגשו הצעות. בכך נסתם הגולל, על התוכנית להפעלת שידורים כאלה בישראל, לתקופה בלתי ידועה.

### המאמר הבא

DRM - Digital Radio Mondiale - רדיו דיגיטלי חובק עולם

### מקורות לפרק זה

מקור מומלץ, למידע על שידורים דיגיטאליים, הוא האתר [www.godigital.co.il](http://www.godigital.co.il) שבו נמצאים מאמרים גם בשפה העברית. מאמר בנושא ה-DAB נמצא באתר [http://www.godigital.co.il/radio\\_intro.htm](http://www.godigital.co.il/radio_intro.htm)

מידע נוסף באתר של ויקיפדיה [http://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_Audio\\_Broadcasting](http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Audio_Broadcasting)

מאמר של ה-BBC - [http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper\\_21/paper\\_21.shtml](http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper_21/paper_21.shtml)

\* \* \* \* \*