

טכניקות תקשורת ספרתיות ברשת אלחוטית

פרופ' יוסף פנחסי

1. הקדמה




מולטימדיה. בנוסף, אנו עדים להופעת מערכות המאפשרות קישוריות אלחוטית ברשתות מחשבים מקומיות (Wireless LAN). במקומות ציבוריים ובבתים פרטיים מותקנות "נקודות חמות" (Hot spots), שהן נתבים (Routers) אלחוטיים המאפשרים גישה לרשת תקשורת מחשבים ללא צורך בחיבור קווי. למערכות ה-WLAN, המבוססות ברובן על מפרט התקינה 802.11, ניתן השם הכולל Wireless Wi-Fi. והוקצה תחום התדר של 2.4GHz שהוא אחד מתדרי ה-ISM המוקצים לשימושים תעשייתיים, מדעיים ורפואיים. במערכות ה-Wi-Fi ניתן להעביר נתונים בקצב של עד 54MBPS, לטווח המגיע למאות בודדות של מטרים בשטח פתוח. תקשורת מסוג WPAN (Wireless Personal Area Network) מיועדת לפעול במרחב האישי, ולחסוך חיבורים פיזיים בין מערכות אלקטרוניות הפועלות במסגרתו. דוגמה לכך היא התקן ה-Bluetooth, המשמש בדיבוריות אלחוטיות של טלפון נייד, בין מחשב לאביזריו הנלווים (למשל העכבר והמקלדת), לתקשורת עם מחשב כף יד וכדומה. גם במקרה זה ערוץ התקשורת פועל בתדר של 2.4GHz לטווח קצר מאוד של מטרים בודדים. על מנת לתת מענה גם לצורך בהעברת נפחי מידע גדולים בקצב מהיר, מתקיימת בשנים האחרונות פעילות מדעית וטכנולוגית בינלאומית רבת היקף לאפיין והגדרה של ערוץ תקשורת WPAN בפס רחב לטווח

בתקשורת אלקטרונית, מידע מועבר למרחקים, בצורת אותות חשמליים, ממשדר למקלט דרך תווך המקשר ביניהם. תווכים כאלה הם, למשל, קו-תמסורת, מוליך גלים, סיב אופטי או במקרה של תקשורת אלחוטית - החלל החופשי. בתקשורת ספרתית, המידע ניתן על ידי מספר (סופי) של סימנים, אשר כל אחד מהם מיוצג על ידי אות חשמלי. שמע (Audio) או חזי (Video) הם בטבעם אותות אנלוגיים הרציפים בזמן. על מנת להעבירם בערוץ תקשורת ספרתי נדרש לדגום אותם ולהמירם לייצוג ספרתי. ייצוג כזה מאפשר עיבוד ספרתי של האותות באמצעות מחשב, אחסוןם כקובץ בהתקני זיכרון עם יכולת לגישה אקראית ביצוע פעולות של דחיסה (Compression), הצפנה (Encryption), קידוד שלהם לגילוי ותיקון שגיאות (Error detection and correction) והעברתם האמינה ברשת (Network) כמו האינטרנט, רשתות הטלקומוניקציה הקויות, האלחוטיות והתאיות (Cellular).

2. תקשורת אלחוטית

הצורך בניידות הביא להתפתחות הטכנולוגיה הקשורה בתחום התקשורת האלחוטית (Wireless). הדבר מתבטא בתחום רשתות התקשורת התאיות, כאשר הטלפונים הניידים מאפשרים כיום העברת

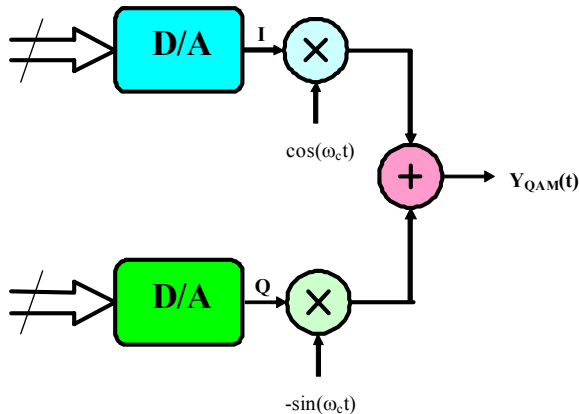
טבלה 1: השוואה בין רשתות תקשורת אלחוטיות מסוגים שונים.

	Wireless Personal Area Network	Wireless Local Area Network	Wireless Metropolitan Area Network
	Bluetooth	Wi-Fi	WiMAX
			
IEEE standard	802.15	802.11	802.16
Power	2.5mW	100mW	1-2W
Carrier	2.402-2.4835GHz	2.4-2.4835GHz 5.15-5.35GHz	3.4-3.6 GHz 5.725-5.850 GHz
Number of channels	79	48 – data 4 – pilot	2,048
Modulation		OFDM	OFDMA
Sub-carrier spacing	1MHz	0.3125MHz	
Sub-carrier modulation	GMSK	QAM	QAM
Bit rate	723.1 KBPS	54 MBPS	70 MBPS
Range	Up to 10m	Up to 100m	1-10Km

מתקבל האות:

$$s_m(t) = I_m \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q_m \cdot \sin(2\pi f_c t) = \sqrt{I_m^2 + Q_m^2} \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_m)$$

כאשר m מספר טבעי $m = 1, 2, \dots, M$. הערכים של I_m ו- Q_m נקבעים לפי הפריסה של הפאזורים במרחב האותות הדו-ממדי.



איור 1: אפן Quadrature.

רוחב הסרט של מפתוח QAM הוא פעמיים קצב הופעת הסימנים. היות שהסימנים משודרים בקצב הנמוך פי $r = \log_2 M$ מקצב שידור הסיביות R_b , ניכרת הצרה של רוחב סרט השידור ככל שמגדילים את מספר הסימנים, על פי הנוסחה:

$$BW_{QAM} = 2 \cdot R_{Symbol} = 2 \cdot \frac{R_b}{r} = \frac{2}{\log_2 M} \cdot R_b$$

4. שיטת ה-OFDM

שיטת אפנון המשלבת בין מפתוחי QAM בתדרי נושא שונים היא ה-OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). באפנון כזה, משודרים בו זמנית, למשך זמן T , אותות QAM ב- K תדרי נושא (טונים) שונים. כל אחד מאותות ה-QAM מייצג סימן מתוך L סימנים אפשריים בעלי $\log_2 L$ סיביות כל אחד. מספר הסיביות המשודר בו זמנית הוא לכן $r = K \log_2 L$ ומספר כל הסימנים האפשריים בכלל התדרים הוא:

$$M = 2^r = 2^{K \log_2 L} = L^K$$

קצב שידור הסיביות הוא לכן:

$$R_b = \frac{K \cdot \log_2 L}{T} = K \cdot \Delta f \cdot \log_2 L$$



המרווח Δf בין התדרים נקבע כשווה לקצב החלפת הסימנים בכל תת-נושא, כלומר ל- $\Delta f = 1/T$. בצורה זו, קיימת אורתוגונליות בין האותות המשודרים ב- K תדרי התת-נושא (Sub-carriers). האות המשודר מהמשדר למשך זמן T נתון על ידי סיכום של אותות ה-QAM בכל אחד מהתדרים:

$$s_m(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ I_m(k) \cdot \cos\left[2\pi\left(f_c + \frac{k}{T}\right)t\right] - Q_m(k) \cdot \sin\left[2\pi\left(f_c + \frac{k}{T}\right)t\right] \right\} = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \underbrace{\left[I_m(k) + jQ_m(k) \right]}_{x_m(k)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}kt} \cdot e^{j2\pi f_c t} \right\} = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} \underbrace{X_m(k)}_{x_m(t)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}kt} \cdot e^{j2\pi f_c t} \right\}$$

מוגבל של עשרות מטרים. זאת במטרה להגיע ליכולת קישור אלחוטית בין מערכות אלקטרוניות שונות, בכלל אלה אמצעי תקשורת ומחשבים, מכשירי חשמל ואביזרי בידור ומדיה הפועלים בבית מגורים "חכם", משרד או מפעל. מאמץ מקביל מתקיים למימוש ערוץ תקשורת אלחוטי רחב פס להעברת תקשורת לבתי צרכנים, טכנולוגיה הקרויה WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ומבוססת על התקן 802.16. השוואה בין מאפייני רשתות התקשורת השונות מובאת בטבלה 1.

גם שידורי הרדיו והטלוויזיה מצויים בתהליך מעבר לאופן ספרתי (ראה טבלה 2). רדיו ספרתי יתבסס על ה-DAB (Digital Audio Broadcasting), שבאמצעותו יועבר שמע איכותי בתחום תדרי ה-UHF (174-240MHz), בתחום ה-L (1,452-1,492MHz) ובאמצעות לוויין בתחום תדרי ה-S. בטלוויזיה נעשה שימוש בתקני ה-DVB (Digital Video Broadcasting) להעברת חווי באיכות HDTV (High-Definition Television). שידורי רדיו וטלוויזיה כמו גם שרתי Internet מועברים כיום לבתים גם באמצעות לווייני תקשורת DBS (Direct Broadcast Satellite) בתחום ה-Ku. במערכות אלה, הנקראות גם Direct-To-Home, נכללים גם אפשרויות של Video-On-Demand, או בקיצור VOD, באמצעותו יכול הצרכן לבקש לצפות בתוכנית נבחרת.

טבלה 2: תקנים לשידורים ספרתיים של שמע (DAB) וחווי (DVB).

	DAB Eureka 147	DVB-T
		
Release	1995	1997
Carrier	174 – 240 MHz 1,452 – 1,492 MHz	470 – 862 MHz
Channel spacing	1.712 MHz	8 MHz
Number of OFDM sub-carriers	192, 384, 768, 1,536	1,705 (2K mode) 6,817 (8K mode)
Sub-carrier spacing		4,464 Hz (2K mode) 1,116 Hz (8K mode)
Sub-carrier modulation	DQPSK	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Bit rate	576 – 1,152 KBPS	4.98 – 31.67 MBPS (typically 24MBPS)
Typical source coding	192 KBPS MPEG2 Audio layer 2	4 MBPS MPEG2

3. שיטות אפנון ספרתיות

בתקשורת ספרתית מועבר המידע באמצעות שפה הכוללת M סימנים, כאשר בדרך כלל כל סימן הוא מילה ב- r סיביות, כך ש- $M = 2^r$. במקרה כזה נדרשים M אותות שונים לייצוג הסימנים. אותות אלה משודרים ומפוענחים באמצעות ה-Modem (ראשי תיבות MODulator-DEModulator).

אחת השיטות המקובלות להעברת תקשורת ספרתית במפתוח רב סימני היא ה-QAM. שיטה זו משלבת בין אפנון של המשרעת והמופע של גל נושא ולכן נקראת Quadrature Amplitude Modulation. היא מבוצעת באמצעות אפנון I/Q המתואר באיור 1. במוצא האפנון

טבלה 3: תקני 802.11 של IEEE לרשתות WiFi.

	802.11.a	802.11.b	802.11.g	802.11.n
Release	1999	1999	2003	2008-9
Carrier	5.15-5.25GHz 5.25-5.35GHz 5.725-5.875GHz	2.4-2.4835GHz	2.4-2.4835GHz	2.4 / 5 GHz
Modulation	52-OFDM 48 - data 4 - pilot	OFDM	52-OFDM 48 - data 4 - pilot	OFDM
Sub-carrier spacing	0.3125MHz		0.3125MHz	
Sub-carrier modulation	BPSK (6, 9 MBPS) QPSK (12, 18 MBPS) 16-QAM (24, 36 MBPS) 64-QAM (48, 54 MBPS)	BPSK (1 MBPS) QPSK (2 MBPS) CCK (5.5, 11 MBPS)	BPSK (6, 9 MBPS) QPSK (12, 18 MBPS) 16-QAM (24, 36 MBPS) 64-QAM (48, 54 MBPS)	
Bit rate	54 MBPS	11 MBPS	54 MBPS	248 MBPS 2x2 MIMO
Bandwidth	20 MHz	20 MHz	20 MHz	40 MHz
Indoor distance	35m	38m	38m	70m



פרופסור יוסף פנחסי

פרופ' יוסף פנחסי (50) הוא דקן הפקולטה להנדסה במרכז האוניברסיטאי אריאל, בשומרון. כמו כן הוא ראש המרכז למחקר וטכנולוגיה ביטחוניים (Homeland

security), עומד בראש החוג לתקשורת וטכנולוגיות מידע של התאגדות מהנדסי חשמל ואלקטרוניקה ומשמש המזכיר של האגודה הישראלית למדעי הפלסמה.

תחום התמחותו של פרופ' יוסף פנחסי הוא בנושאים של עירור קרינה אלקטרומגנטית ושימושיה לתקשורת אלחוטית, חישה מרחוק והדמיה. מחקריו עוסקים בפיתוח תיאוריות במרחב התדר לניתוח אינטראקציות רחבות סרט ומפולגות בין שדה אלקטרומגנטי ותווך, כפי שהן מתבטאות במקורות קרינה רבי עוצמה, לייזרים ומייזרים ובהתפשטות קרינה בחומרים דיאלקטריים, במוליכי גלים, בקווי תמסורת ובאטמוספירה. במסגרת זו, הוא בוחן את השפעות התווך על הביצועים של מערכות תקשורת ומכ"ם אלחוטיות הפועלות בתחום תדרים רחב, כולל גלים מילימטרים ותת-מילימטרים (Tera-Hertz) ופיתח טכניקות פאסיביות ואקטיביות לגילוי מרחוק של עצמים מוסתרים.

פרופ' יוסי פנחסי כתב את הספרים "היסודות הפיזיקליים של התקשורת האלקטרונית" ו"תקשורת ספרתית ומודמים", בהם מוצגים היסודות התיאורטיים וההיבטים הפיזיקליים הקשורים בעיבוד והעברה של אותות במערכות תקשורת, כמו גם טכניקות שידור וקליטה בערוץ תקשורת אלחוטי, תוך דיון מעמיק במנגנוני רעש מאזני תקשורת במתארים שונים ומגבלות תחום דינמי בערוץ כזה.

כאשר m מספר טבעי $m = 1, 2, \dots, M$. נגדיר את סדרת K המספרים המרוכבים $X_m(k) = I_m(k) + jQ_m(k)$ נוזהה הסכום:

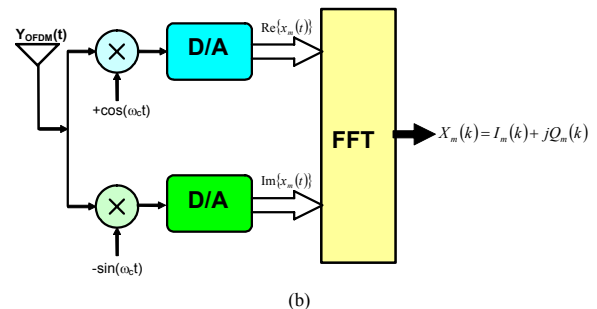
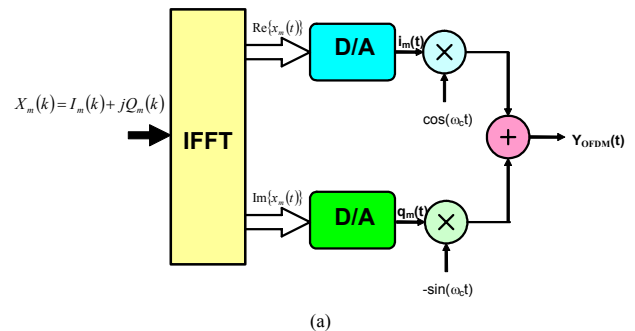
$$x_m(t) = \sum_{k=0}^{K-1} X_m(k) \cdot e^{jk \frac{2\pi}{T} t}$$

כהתמרת Fourier בדידה הפוכה (Inverse Discrete Fourier Transform - IDFT) של הסדרה $X_m(k)$. נציב זאת בביטוי לאות המשודר ונקבל:

$$s_m(t) = \underbrace{\text{Re}\{x_m(t)\}}_{i_m(t)} \cdot \cos(2\pi f_c t) - \underbrace{\text{Im}\{x_m(t)\}}_{q_m(t)} \cdot \sin(2\pi f_c t)$$

מביטוי זה ניתן לראות שניתן לממש משדר ומקלט OFDM תוך שימוש במעבד אות המבצע התמרות Fourier מהירות (FFT) בפס בסיס ואפן I/Q בתדר הנושא f_c כמתואר באיור 2. רוחב הסרט של האפנון הוא בקירוב:

$$BW_{OFDM} \cong (K+1) \cdot \Delta f = \underbrace{\frac{K+1}{K \cdot \log_2 L}}_r \cdot R_b$$



איור 2: אפנון OFDM: (a) משדר, (b) מקלט.

שיטת ה-OFDM נמצאה יעילה להעברת מידע בערוצי תקשורת אלחוטיים בהם צפויות דעיכות כתוצאה מרב-נתיב (Multi-path fading). הדעיכה מתרחשת באופן סטטיסטי בתדרים בו מתקבלת התאבכות הורסת של אותות המגיעים במסלולים שונים. יחס האות לרעש הנמוך גורם בתנאים אלה לשגיאות, אשר קידוד מתאים יאפשר את תיקון מתוך המידע המגיע מהתדרים האחרים. אי לכך אומץ ה-OFDM כשיטת אפנון תקנית ברשתות מקומיות (Wireless LAN) לתקשורת מחשבים (WiFi) המבוססות על תקני ה-802.11 של IEEE כמפורט בטבלה 3.