

מאזן תקשורת בערוץ תקשורת רדיו

מאת: פרופ' יוסי פנחסי 4Z4VC

E-mail: yosip@ariel.ac.il

Web site: www.ariel.ac.il/sites/yosip/

1. תקשורת אלחוטית

מערכות תקשורת רדיו, כמו גם מערכות חישה מרחוק ומכ"מ הן מערכות אלחוטית בהן מועבר המידע בחלל החופשי ללא קן תמסורת פיזי המקשר בין המשדר למקלט. המידע נישא על גל אלקטרומגנטי, מתחום תדרי הרדיו והמיקרוגל, המפורטים בטבלה 1. בטבלה מופיעים גם תדרים אשר הוקצו לשימוש תעשייתי, מדעי ורפואי ונקראים תדרי ISM (ראשי תיבות של Industrial, Scientific, Medical). מערכות הפועלות בתחומי תדר אלה משדרות וקולטות את הגלים האלקטרומגנטיים באמצעות אנטנות. הספק הגל האלקטרומגנטי הנפלט מאנטנת השידור, מתפשט במרחב החופשי. רק חלק קטן מאד ממנו נאסף על ידי אנטנת הקליטה ומגיע למקלט. ערכו של ההספק הנקלט הוא פונקציה של הספק ותדר השידור, מאפייני האנטנות, הטווח וגם הסביבה בה מתפשט הגל האלקטרומגנטי. על מנת להעריך את מאזן הערוץ (Link budget) בין משדר למקלט פותחו מודלים אשר חלקם מבוססים על ניסויים.

במאמר זה אסקור את הפרמטרים העיקריים המאפיינים אנטנה במטרה להציג ביטויים מערכתיים לחישוב מאזני ערוץ תקשורת המאפשרים הערכה של טווחי התקשורת כפונקציה של מאפייני הערוץ. זו ההזדמנות לאלה מבין החובבים המבקשים להעמיק בנושא גם מהצד המתמטי-פיזיקאלי של התפשטות שדות אלקטרומגנטיים במרחב החופשי.

טבלה 1: הספקטרום האלקטרומגנטי המשמש לתקשורת ומכ"מ.

BAND	IEEE	FREQUENCY	WAVELENGTH	ITU-ISM
Extremely Low Frequency	ELF	3 - 30Hz		
Super Low Frequency	SLF	30 - 300Hz		
Ultra Low Frequency	ULF	300 - 3,000 Hz	1,000 - 100 Km	
Very Low Frequency	VLF	3 - 30 KHz	100 - 10 Km	
Low Frequency	LF	30 - 300 KHz	10 - 1 Km	
Medium Frequency	MF	300 - 3,000 KHz	1 - 0.1 Km	
High Frequency	HF	3 - 30 MHz	100 - 10 m	6.765-6.795MHz 13.553-13.567MHz 26.957-27.283MHz
Very High Frequency	VHF	30 - 300 MHz	10 - 1 m	40.66-40.70MHz
Ultra High Frequency	UHF	300 - 3,000 MHz	1 - 0.1 m	433.05-434.79MHz 902-928MHz
	L	1 - 2 GHz		
	S	2 - 4 GHz		
Super High Frequency	SHF	3 - 30 GHz	10 - 1 cm	2.400-2.500GHz
	C	4 - 8 GHz		5.725-5.875GHz
	X	8 - 12 GHz		
	Ku	12 - 18 GHz		
	K	18 - 26.5 GHz		24-24.25GHz
	Ka	26.5 - 40 GHz		
Extremely High Frequency	EHF	30 - 300 GHz	1 - 0.1 cm	
	V	40 - 75 GHz		61-61.5GHz
	W	75 - 110 GHz		
	F	90 - 140 GHz		122-123GHz
	D	110 - 170 GHz		244-246GHz

2. עקום הקרינה של האנטנה

בתקשורת רדיו אלחוטית, מוזן האות החשמלי (מתח וזרם) המופק מהמסדר באמצעות קו תמסורת לאנטנה (בעברית נקראת האנטנה – משושה), ההופכת אותו לגל אלקטרומגנטי המתפשט בחלל החופשי. נתייחס לתווך כריק בו המקדם הדיאלקטרי (Vacuum permittivity) הוא $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{12} \text{ F/m}$ והחדירות המגנטיות (Vacuum permeability) שלו היא $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. באנטנת הקליטה מעורר שדה זה אות חשמלי, אשר מועבר בקו תמסורת למבוא המקלט, כמתואר סכמתית באיור 3. במרחק גדול מספיק מהאנטנה ("שדה רחוק"), השדה האלקטרומגנטי הוא מסוג TEM (Transverse Electro-Magnetic), אשר השדה החשמלי שלו (שממדיו [V/m]) מתואר בתחום התדר על ידי פאזור בעל חזית גל כדורית:

$$\tilde{\mathbf{E}}(r, \theta, \phi) = \underbrace{\left[\hat{\theta} \cdot V_\theta(\theta, \phi) + \hat{\phi} \cdot V_\phi(\theta, \phi) \right]}_{\mathbf{v}(\theta, \phi)} \cdot \frac{e^{-jk \cdot r}}{r}$$

זהו וקטור הנתון בקואורדינטות כדוריות, כאשר $0 \leq \theta \leq \pi$ היא הזווית בהגבהה (Elevation), $0 \leq \phi \leq 2\pi$ היא זווית הצינור (Azimuth) ו- r הוא המרחק מהאנטנה. קבוע ההתפשטות (Propagation constant) של הקרינה בחלל החופשי הוא:

$$k = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

כאן f היא תדירות הקרינה ב- [Hz] ו- $\lambda = c/f$ אורך הגל שלה ב- [m] (כאשר מהירות האור בריק כיוון ווקטור השדה החשמלי הוא "קיטוב" (Polarization) של השדה $(c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cong 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s})$. למשל אנטנה אנכית (Vertical) משדרת בקיטוב אנכי. בשדה רחוק ניתן לייחס את השדה המגנטי (שממדיו [A/m]) לשדה החשמלי על ידי הביטוי:

$$\tilde{\mathbf{H}}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{\eta_0} \left[-\hat{\theta} \cdot V_\phi(\theta, \phi) + \hat{\phi} \cdot V_\theta(\theta, \phi) \right] \cdot \frac{e^{-jk \cdot r}}{r}$$

כאשר $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \cong 376.73 \Omega$ היא עכבת המרחב החופשי (Free-space impedance). בהכפלה וקטורית בין השדה החשמלי והמגנטי מתקבל וקטור Poynting:

$$\mathbf{S}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \tilde{\mathbf{E}}(r, \theta, \phi) \times \tilde{\mathbf{H}}^*(r, \theta, \phi) \right\} = \hat{\mathbf{r}} \cdot \frac{1}{2\eta_0} \underbrace{\left[|V_\theta(\theta, \phi)|^2 + |V_\phi(\theta, \phi)|^2 \right]}_{|\mathbf{v}(\theta, \phi)|^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

כוון הווקטור הוא ניצב לשדה לכוון ווקטורי שני השדות החשמלי והמגנטי והוא מציין את כוון התפשטות השדה ושטף ההספק המתקבל במרחק r מהאנטנה ביחידות של $[\text{W/m}^2]$. ההספק הכולל המוקרן מהאנטנה מתקבל על ידי אינטגרל על פני כל המרחב:

$$P_t = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \mathbf{S}(r, \theta, \phi) \cdot \hat{\mathbf{r}} r^2 \sin(\theta) d\theta d\phi =$$

$$= \frac{1}{2\eta_0} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \underbrace{\left[|V_\theta(\theta, \phi)|^2 + |V_\phi(\theta, \phi)|^2 \right]}_{|\mathbf{V}(\theta, \phi)|^2} \underbrace{\sin(\theta) d\theta d\phi}_{d\Omega}$$

בביטוי האחרון מזהים את צפיפות ההספק ליחידת זווית מרחבית (Radiation intensity):

$$\frac{dP_t}{d\Omega} = \frac{1}{2\eta_0} |\mathbf{V}(\theta, \phi)|^2 = \frac{1}{2\eta_0} \left[|V_\theta(\theta, \phi)|^2 + |V_\phi(\theta, \phi)|^2 \right]$$

הנתונה ב- [W/sr]. בעקום הקרינה (Radiation pattern) של האנטנה מציגים את הערך המנורמל של צפיפות ההספק ליחידת זווית מרחבית בצורה קוטבית (Polar), כפונקציה של זוויות הציוד ϕ וההגבהה θ . לדוגמה, עבור אנטנת דיפול (Dipole) שאורכה חצי-אורך גל מתקבל:

$$\mathbf{V}(\theta, \phi) = \hat{\theta} \cdot \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right]}{\sin(\theta)}$$

מסורטט באיור 1. בעקום כזה ניתן לזהות את האלומה הראשית (Main beam) בעלת מקסימום העוצמה בזווית של $\theta = 90^\circ$ (במאונך לאנטנה). כאן המקום לציין, שעקום הקרינה מייצג גם את "שדה הראייה" של האנטנה, כאשר היא משמשת בקליטה. הזווית המרחבית של אלומת השידור מוגדרת:

$$\Omega_t = \frac{P_t}{\left. \frac{dP_t}{d\Omega} \right|_{MAX}}$$

אנטנה המשררת לכל המרחב נקראת כלל-כיוונית (Omni-directional). אנטנה איזוטרופית (Isotropic) משררת לכל הכיוונים בעוצמה שווה. זו אנטנה שאינה קיימת במציאות אשר הזווית המרחבית של השידור שלה היא כשל כדור שלם:

$$\Omega_t = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin(\theta) d\theta d\phi = 4\pi \text{ sr}$$

שטח המפתח היעיל של האנטנה (Effective aperture area) מוגדר כשטח שקול שממנו נפלטת הקרינה או שאליו היא נקלטת. הספק השידור שייאסף על ידי אנטנת קליטה בעלת שטח מפתח A_r יהיה:

$$P_r = \mathbf{S}(r, \theta, \phi) \Big|_{MAX} \cdot \hat{\mathbf{r}} A_r$$

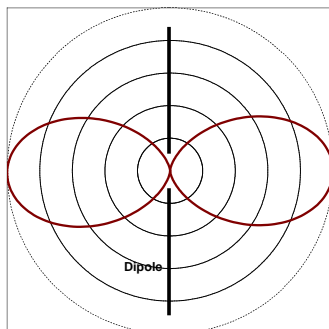
קיים קשר קבוע בין שטח המפתח היעיל של האנטנה ובין זווית האלומה שהיא משררת והוא:

$$\Omega_t \cdot A_t = \lambda^2$$

קשר זה מתקיים בשידור ובקליטה. על פי נוסחה זו, השטח האפקטיבי של אנטנה איזוטרופית למשל הוא $\lambda^2/4\pi$. השטח האפקטיבי של אנטנות "צלחת" המבוססות על מחזור פרבולי (Dish antennas) שווה בקירוב לשטח המחזור. נזכיר כי הדיון כולו נערך במסגרת של הנחת שדה רחוק (Far-field), כאשר המרחק מהאנטנה מקיים:

$$d > \frac{A_t}{\lambda} = \frac{\lambda}{\Omega_t}$$

באנטנה איזוטרופית למשל, שדה רחוק מתקבל במרחק $d > \lambda^2/(4\pi)$.



איור 1: עקום הקרינה של אנטנת Dipole באורך של חצי אורך גל.

3. כיווניות, שבח ו-EIRP

אנטנה כיוונית מרכזת את הקרינה באלומה צרה. אם האלומה היא בצורת קונוס סימטרי (Pencil beam), הזווית θ_{beam} בחתך המישורי שלה (Beamwidth) ניתנת באמצעות הזווית המרחבית:

$$\Omega_t = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{beam}/2} \sin(\theta) d\theta d\phi = 2\pi \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_{beam}}{2}\right) \right] = 4\pi \sin^2\left(\frac{\theta_{beam}}{4}\right)$$

מדד לריכוז ההספק באלומה ניתן בכיווניות (Directivity) של האנטנה, המוגדרת:

$$D_t = \frac{4\pi}{\Omega_t} \geq 1 = 0dBi$$

זהו גודל חסר ממדים, אשר מבטא את הגידול בצפיפות ההספק באלומה המשודרת מאנטנה כיוונית ביחס לזו האיזוטרופית (אשר הכיווניות שלה היא $D_t = 1 = 0dBi$). הפסדים באנטנה הנובעים מהתנגדות אהמית שלה, מעיוותים במבנה, פיזורי הספק בחומרים מתכתיים ודיאלקטריים המרכיבים אותה וכדומה, גורמים לכך שלא כל ההספק המוזן לאנטנה אכן משודר ממנה כקרינה אלקטרומגנטית. נצילות האנטנה $0 < \eta < 1$ מבטאת את החלק היחסי של ההספק, שאכן משודר ממנה כקרינה אלקטרומגנטית במרחב. על מנת להתחשב בהפסדים אלה, הוגדר שבח האנטנה (Antenna gain) כמכפלה:

$$G_t = \eta \cdot D_t = \eta \cdot \frac{4\pi}{\Omega_t} = \eta \cdot \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_t$$

וגם הוא נתון ב-dBi. נדגיש שהאנטנה הכיוונית, כרכיב פסיבי, אינה "מגבירה" את ההספק המוזן אליה. המושג שבח בהקשר הזה מציין עד כמה מרכזת האנטנה את ההספק לכיוון נתון ביחס לשידור לכל המרחב. בדיון להלן נוניח את ההפסדים באנטנה, ונניח שהנצילות שלה היא $\eta \cong 1$. זווית מפתח הקרינה θ_{beam} ניתנת להצגה באמצעות השבח:

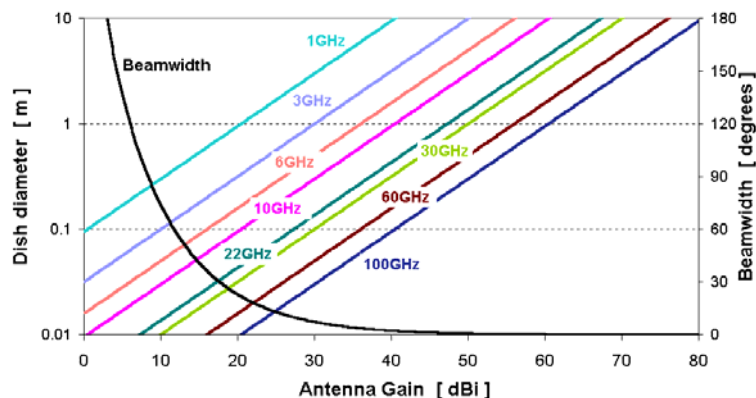
$$G_t = \frac{4\pi}{\Omega_t} = \frac{1}{\sin^2\left(\frac{\theta_{beam}}{4}\right)}$$

הגרפים שבאיור 2 מתארים את ההגבר וזווית מפתח השידור של אנטנות בעלות "צלחת" בקטרים שונים. ה-EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) מוגדר כמכפלת השבח בהספק המוזן לאנטנה:

$$EIRP = G_t \cdot P_t$$

זהו ההספק שנדרש להזין אנטנה איזוטרופית, המשרדת לכל הכיוונים, על מנת לקבל את אותה צפיפות ההספק המתקבלת מאנטנה כיוונית בעלת שבח G_t באלומה הראשית שלה.

לדוגמה, האנטנה המשמשת לקליטת שידורי הטלוויזיה בתחום ה-UHF מסוג Yagi-Uda¹ היא בעלת שבח של $G_t = 12\text{dBi} \cong 15.85$. זווית האלומה שלה היא $\theta_{beam} \cong 58.2^\circ$. אם משתמשים בה לשידור ומזינים אותה בהספק של $P_t = 1\text{W}$, מתקבל $EIRP = 15.85\text{W}$, שנובע מהעובדה שהאנטנה היא כיוונית ומרכזת את ההספק המוזן אליה לכ- 6.31% מהמרחב.



איור 2: שבח אנטנת צלחת כפונקציה של ממדי המחזר.

¹ S. Uda: "On the wireless beam of short electric waves", JIEE, March 1926, 273-282
 S. Uda: "High angle radiation of short electric waves", Proc. IRE 15, (1927), 377-385
 H. Yagi: "Beam transmission of ultra short waves", Proc. IRE 16, (1928), 715-740

4. נוסחת Friis לערוץ תקשורת במרחב החופשי

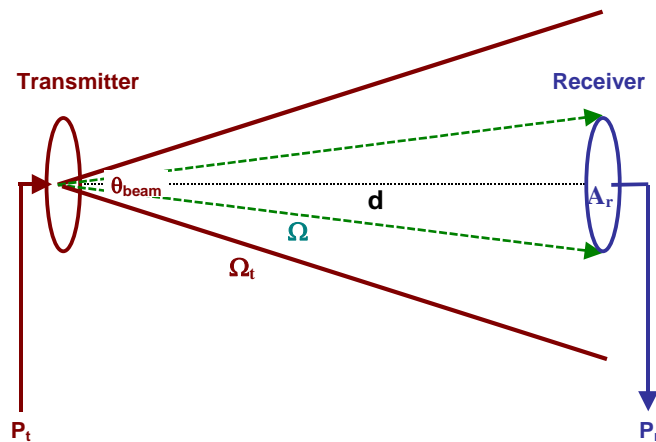
נתייחס לערוץ תקשורת אלחוטי, המתואר באיור 3. אנטנת השידור, בעלת שבה G_t , מוזנת בהספק שידור P_t . האנטנה משרדרת את ההספק בזווית מרחבית $\Omega_t = 4\pi/G_t$. במרחק d ממנה, מוצבת בשדה הרחוק אנטנת קליטה בעלת שבה G_r ושטח מפתח אפקטיבי של $A_r = \lambda^2/\Omega_r = \lambda^2/(4\pi) \cdot G_r$. האנטנה הקולטת אוספת את הספק הקרינה שמכילה הזווית מרחבית:

$$\Omega = \frac{A_r}{d^2} = \frac{\lambda^2}{4\pi d^2} \cdot G_r$$

ההספק המועבר למקלט הוא לכן:

$$P_r = \frac{\Omega}{\Omega_t} \cdot P_t = G_r \cdot \underbrace{\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2}_{\text{Free-space loss}} \cdot \underbrace{G_t \cdot P_t}_{\text{EIRP}}$$

זוהי נוסחת Friis² למאזן תקשורת (Link budget), בערוץ שבו מתקיים קו ראייה (Line of Sight - LOS) בין אנטנת השידור לאנטנת הקליטה. על פי תוצאה זו, הפסדי החלל החופשי (Free-space loss) עולים עם ריבוע המרחק. הכפלת המרחק מפחיתה את ההספק המגיע למקלט ב-6dB. זוהי נוסחה פשוטה, אשר אינה מתחשבת בבליעה בתווך, במאפייני האטמוספירה ורכיביה, בתנאי מזג האוויר, בהחזרים מהקרקע או מהיונוספירה, בריבוי נתיבים (Multi-path) במעבר השידור בין האנטנות ובתופעות של שבירה ועקיפה. היא אינה מתאימה, למשל, לתאר תקשורת המתקיימת באזור עירוני הצפוף במבנים, או תקשורת ארוכת טווח אל מעבר לאופק המתקיימת בתחום ה-HF ומבוססת על החזרה מהיונוספירה. בהמשך נערכן את הנוסחה כך שתתאים לתיאור תקשורת במתארי רב-נתיב.



איור 3: תיאור סכמתי של ערוץ תקשורת אלחוטי.

² H. T. Friis: "A note on a simple transmission formula", Proc. IRE 34, (1946), 254-256

5. מאזן תקשורת במתארי רב-נתיב

באופן מעשי, האות המוקרן מאנטנת השידור מגיע לאנטנת הקליטה במספר נתיבים כתוצאה מהחזורים מגופים ועצמים נייחים, המפוזרים או נעים בשטח. הדבר כולל גם החזורים מהקרע ובמקרים מסוימים, למשל שידורים בתדרי ה-HF, גם מהקרקע. לעתים אף לא קיים קו ראייה בין האנטנות, והערוץ מבוסס רק על החזרות כאלה, כפי שקורה למשל במתאר עירוני, הצפוף במבנים. ריבוי נתיבים (Multi-path) מביא לכך שלאנטנה מגיעות אלומות מכיוונים שונים, המתאבכות על פני האנטנה. התאבכות בונה מביאה לעלייה בהספק הנקלט, והתאבכות הורסת לדעיכה (Fading) בעוצמת הקליטה, העלולה לגרום לאובדן התקשורת.

על פי מודל ההתפשטות הידוע בשם Okumura-Hata³, בערוץ תקשורת אלחוטי הכולל ריבוי נתיבים בין המשדר למקלט, ההספק הנקלט כפונקציה של הטווח d נתון על ידי הנוסחה האמפירית הבאה:

$$P_r = G_r \cdot \underbrace{\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{1}{d^\gamma}}_{\text{Path-loss}} \cdot \underbrace{G_t \cdot P_t}_{\text{EIRP}}$$

במודל זה, המכונה גם Log-distance בשל ירידת ההספק ב-dBm באופן לוגריתמי במרחק, המעריך γ המופיע בביטוי להפסדי הנתיב הוא בתחום $2 \leq \gamma \leq 6$, בהתאם למתאר בו מתנהלת התקשורת. על פי נוסחת Friis למאזן תקשורת המתקיימת בחלל החופשי בקו ראייה וללא חזורים $\gamma = 2$. כלומר הפסדי הנתיב גדלים באופן היחסי לריבוע המרחק. בתנאים מסוימים של החזרה מהקרקע מתקבל $\gamma = 4$. ערכו של γ נמצא במדידות הפסדי נתיב שבוצעו בתנאי סביבה שונים כמפורט בטבלה 2.

רגישות (Sensitivity) מקלט מוגדרת באמצעות הספק סף P_{th} הנדרש במבוא שלו לקבלת יחס אות לרעש מינימאלי המאפשר עדיין את פענוח המידע. מתחת להספק זה, יחס האות לרעש נמוך מידי ולא ניתן לקיים תקשורת. את המרחק המקסימאלי בין המשדר למקלט לקיום תקשורת מחשבים מתוך מאזן הערוץ בקצה הטווח:

$$d_{\max} = \left[\frac{G_r}{P_{th}} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \cdot \underbrace{G_t \cdot P_t}_{\text{EIRP}} \right]^{\frac{1}{\gamma}}$$

ככל שערוץ התקשורת מיועד לפעול לטווחים ארוכים יותר, יש להגביר את ה-EIRP של השידור. צפיפות ההספק ליחידת שטח (Irradiance) ביחידות של $[W/m^2]$ המתקבלת במקרה זה במרחק $d < d_{\max}$ מאנטנת המשדר מחושבת על ידי חלוקת ההספק הנקלט P_r בשטח המפתח $A_r = \lambda^2 / (4\pi) \cdot G_r$ של אנטנת הקליטה:

$$\frac{P_r}{A_r} = \frac{1}{4\pi \cdot d^\gamma} \cdot \underbrace{G_t \cdot P_t}_{\text{EIRP}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \frac{P_{th}}{G_r} \cdot \left(\frac{d_{\max}}{d}\right)^\gamma$$

³ Y. Okumura, E. Ohmori, K. Fukuda: "Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service", Review of the Electrical Communications Laboratory 16, No. 9-10, September-October 1968, 825-873

M Hata: "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", IEEE Trans. Vehicular Technology VT-29, (1980), 317-325

מתוך הנוסחה האחרונה ניכר שצפיפות ההספק המתקבלת במרחק נתון מאנטנת השידור עולה באופן יחסי לטווח המקסימלי המתוכנן לתקשורת בחזקת γ . המסקנה הנובעת מכך היא שעל מנת להקטין את החשיפה לקרינה מאנטנות סלולריות למשל, עדיף לקבוע לתחנות הבסיס כיסוי של תא שטח קטן יותר, דבר שיאפשר להקטין את הספק השידור שלהן (ואגב, גם את זה המשודר מהטלפון הנייד) ובכך להקטין את צפיפות ההספק ליחידת שטח בתוך התא. במתאר תקשורת עירוני לדוגמה, עבורו $\gamma = 4$, הקטנת רדיוס הכיסוי לחצי, תוריד את צפיפות ההספק ליחידת שטח במרחק נתון מאנטנת השידור פי $2^4 = 16$, כלומר בכ- 12dB.

טבלה 2: מעריך המרחק בביטוי להפסדי נתיב במתארי תקשורת שונים.

Environment	Path-loss exponent
Free-space line-of-sight	2
Urban	2.7 – 3.5
Shadowed urban	3 – 5
In-building line-of-sight	1.6 – 1.8
In-building obstructed	4 – 6
Factory obstructed	2 – 3
Store	2.2
Soft partitioned office	2.4

6. סיכום

מאמר ארוך זה, סקר את מאפייני הגלים האלקטרומגנטיים והאנטנות המשדרות וקולטות אותם. במסגרת זו, פותחו נוסחאות המאפשרות להעריך את ההספק המגיע למקלט בערוץ בו קיים קו ראייה (נוסחת Friis). נדגיש שוב שנוסחא זו מתאימה לתדרים מעל ל- 50MHz ואינה מתחשבת בריבוי החזרים כתוצאה מרב-נתיב או מהשפעות של התווך בו מתפשט הגל האלקטרומגנטי.