

# אנטנות קטנות וניידות

פרופ' עלי לוי

מכללת אפקה להנדסה תל אביב

ElyL@afeka.ac.il

אנטנות קטנות (ביחס לאורך הגל) משמשות מגוון רב של מכשירי תקשורת ניידים. באנטנות אלה אין דרישה לשבח גבוה ולעקומי קרינה מדויקים אך נודעת חשיבות רבה לריבוי תדרים ולרוחבי סרט, ליעילות קרינה גבוהה, לכיסוי מרחבי רחב ולריבוי קיטובים. במאמר זה נציג מספר סוגים של אנטנות קטנות ונסקור את שיקולי התכנון לגביהם.

## 1. הקדמה

ההגדרה המעשית המקובלת של אנטנה קטנה מבחינה חשמלית היא שגודלה יהיה בתחום  $\lambda$  0.1 – 0.2. אם נשתמש בקשר השימושי בין תדר (f) לאורך גל ( $\lambda$ ):

$$(1) \quad \lambda [\text{cm}] = \frac{30}{f [\text{GHz}]}$$

נראה כי בתחום הסלולרי 800/900/1800/1900 MHz מדובר על אנטנה באורך טיפוסי של 3-4 cm ובתחום WiFi/Bluetooth של 2.4 GHz או WiMax של 3.5/5.2 GHz מדובר על אנטנה באורך טיפוסי של 1-2 cm בלבד. באופן מעשי, ביצועי אנטנת תקשורת קטנה לשימושים ניידים נמדדים בעיקר בפרמטרים הבאים:

- תחום תדרים ורוחבי סרט
- רמת תיאום אימפדנס ויעילות
- תחום הכיסוי המרחבי
- שבח ממוצע במרחב הכיסוי המבוקש
- קיטוב עיקרי או ריבוי קיטובים

במערכות מתקדמות שבהם משתמשים בריבוי אנטנות או בריבוי ערוצים במכשיר אחד, מבקשים לדעת גם:

- הצימוד בין אנטנות (בתדר אחד או בתדרים שונים)
- רמת הגיוון / קולרציה בין אנטנות שונות

נהוג לחלק את האנטנות הקטנות לפי המבנה החשמלי שלהן, כגון: דיפולים, מונופולים, PIFA (Printed Inverted F Antenna), חריצים, לולאות, סלילים, טלאים וכו'. חלוקה אפשרית אחרת היא לפי האורך החשמלי (חצי אורך גל, רבע אורך גל או אורך קצר אחר) וחלוקה נוספת מבוססת על המימוש הפיזי (אנטנה חיצונית, אנטנה מודפסת או אנטנת שבב chip).

במאמר זה נסקור את הסוגים העיקריים של אנטנות קטנות, נציע שיקולי תכנון ונצביע על היתרונות והחסרונות של הפתרונות השונים.

## 2. מגבלת רוחב הסרט של אנטנות קטנות

חוק Chu קושר את רוחב הסרט המכסימלי של אנטנה קטנה עם הנפח שהיא ממלאת במרחב. החוק קובע כי מקדם האיכות של אנטנה Q קשור לנפח כדור ברדיוס a החוסם את האנטנה לפי:

$$(2) \quad Q > \frac{1 + 2 k^2 a^2}{k^3 a^3 (1 + k^2 a^2)} \cong \frac{1}{(ka)^3}$$

$$k = 2\pi / \lambda$$

a = radius of a sphere

כאשר  $1/Q$  מבטא את רוחב הסרט בנקודות מחצית ההספק לפי:

$$(3) \quad \text{BW (3 dB)} = 1/Q$$

אפשר לקשר בין רוחב הסרט לתאום ברמה מסוימת  $VSWR=S$  לבין רוחב הסרט בנקודות מחצית ההספק, עבור  $S < 2$ :

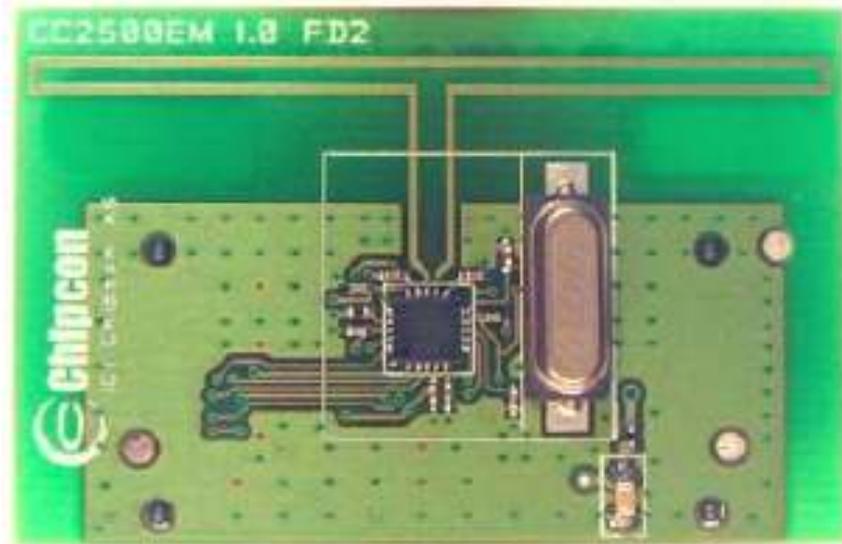
$$(4) \quad \text{BW (VSWR = S)} = \frac{S-1}{\sqrt{S}} \text{ BW (3 dB)} = \frac{S-1}{\sqrt{S}} \frac{1}{Q}$$

חוק Chu המקורי עסק באנטנה בעלת יעילות קרינה אידאלית. אם יעילות הקרינה איננה אידאלית, ברור שיש לכך השפעה מהותית על רוחב הסרט. נתאר אנטנת שידור המחוברת לקו תמסורת דרך מנחת של 3 dB כלומר יעילות הקרינה שלה היא כביכול 50%. גם אם האנטנה היא קצר או נתק מוחלט, בעוד שהגלים המגיעים אליה ומוחזרים ממנה במלואם, מונחתים פעמיים דרך המנחת ולכן מקדם ההחזרה להספק הוא 6 dB. כדי לתאר את מגבלת רוחב הסרט האמיתית צריך אפוא לקחת בחשבון גם את יעילות האנטנה.

### 3. סוגי אנטנות קטנות

#### 3.1 אנטנות תיל ישר

מבחינת צורת העירור, אנטנות תיל שהן למעשה מקור זרם מהוות את הסוג הנפוץ ביותר. באנטנת חצי אורך גל (דיפול) שתי הזרועות הן מאוזנות ולכן האנטנה מתאימה במיוחד להזנה ממקור סימטרי, כגון קו תמסורת דו גידי או שבב מאוזן. דוגמה לאנטנת דיפול זעירה, משולבת במעגל מודפס (Chipcom) מוצגת באיור 1.



איור 1 אנטנת דיפול מאוזנת משולבת במעגל מודפס (Chipcom)

אנטנת המונופול, שאורכה רבע אורך גל, כוללת משטח אדמה כלשהו יוצר שיקוף והשלמה לחצי אורך גל. איור 2 מציג אנטנת מונופול דו-תדרית לטלפון סלולרי ברכב, כאשר גג הרכב מהווה את משטח האדמה היוצר את השיקוף. הפעולה הדו-תדרית 800-900/1800-1900 MHz מושגת על ידי המהלך הסלילי המוטבע במרכז האנטנה.

דוגמה אחרת לאנטנת מונופול ישרה בתדר גבוה עם משטח אדמה קטן יחסית מובאת באיור 3. התנגדות הקרינה הטיפוסית של אנטנת המונופול היא עשרות אוהם ( $37 \Omega$ ) לאנטנת מונופול דקה וישרה מעל משטח אדמה אינסופי) והגודל הנדרש של משטח האדמה הוא לפחות רבע אורך גל. איור 4 מציג אנטנת מונופול שטוחה עם פתיחה הדרגתית המתאימה לתחום תדרים רחב במיוחד 2 – 6 GHz.



**איור 2 אנטנת מונופול דו-תדרית לטלפון סלולרי ברכב**

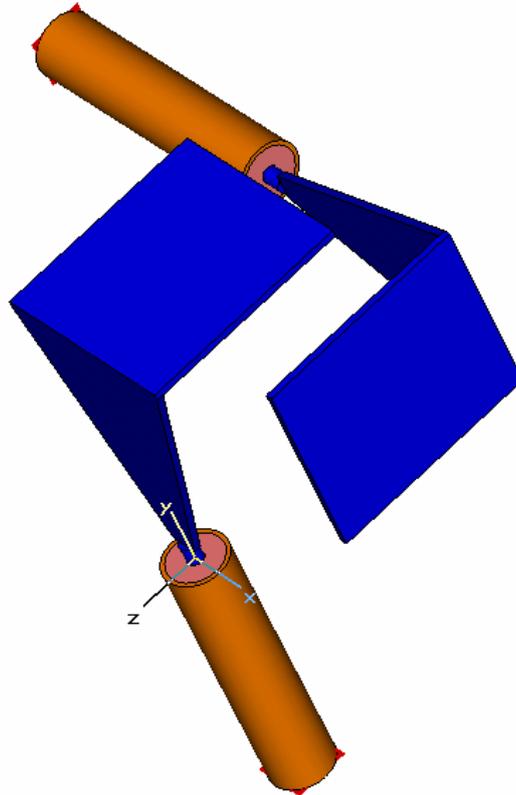


איור 3 אנטנת מונופול מעל אדמה בתדר 8 GHz



איור 4 אנטנת מונופול שטוחה עם פתיחה הדרגתית לתחום התדרים 2 – 6 GHz

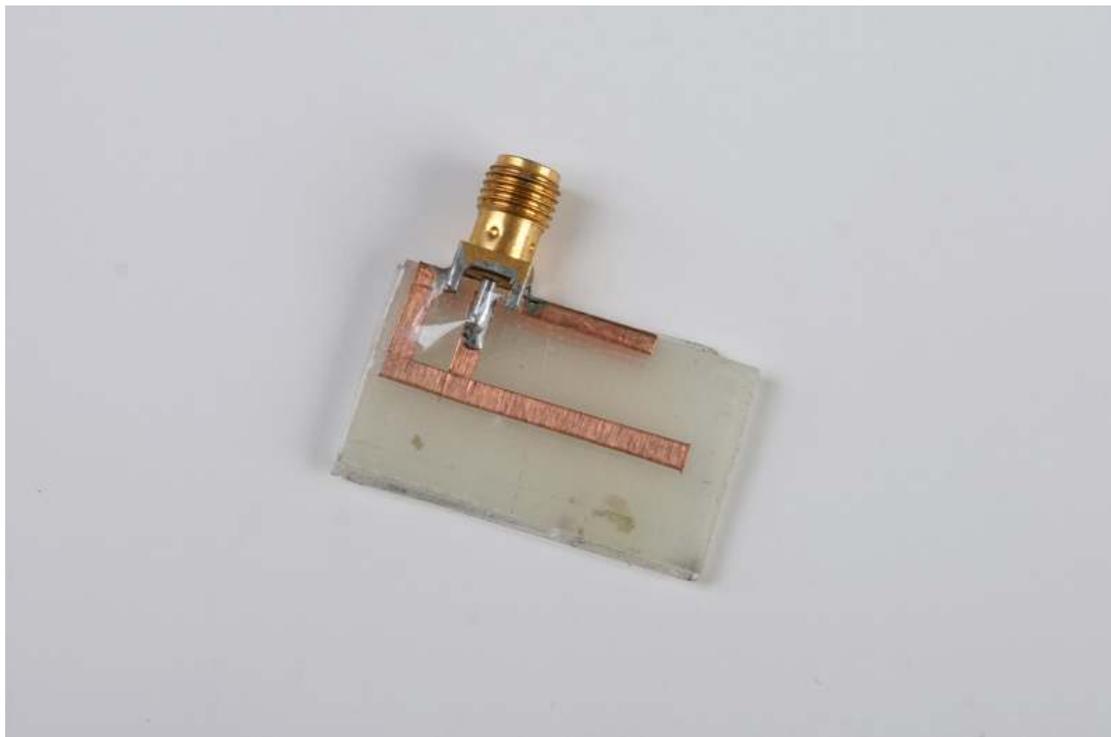
במקרים רבים, מעוניינים להקטין את השטח הפיזי של האנטנה כדי להכניס אותה לתוך מארז נתון וכן על מנת לנצל מספר אנטנות בו זמנית (MIMO) כדי להתגבר על הפרעות הערוץ ולהגדיל את היעילות הספקטרלית. הקטנת השטח הפיזי יכולה להיעשות על ידי פיתול מהלך הזרם במישור חד-ממדי או על ידי קיפול האנטנה במישור תלת-ממדי. דוגמה מעשית של הצבת שני מונופולים מקופלים עם גיוון קיטובי ניכר מובאת באיור 5.



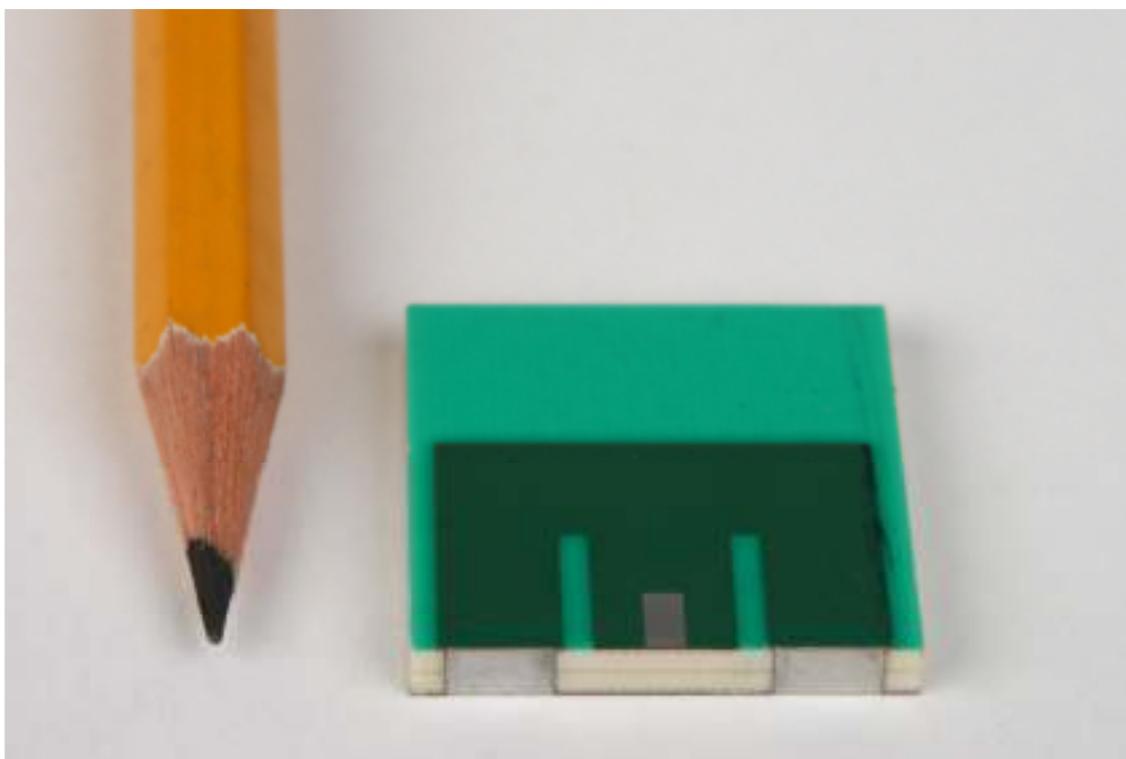
**איור 5 שני מונופולים צמודים עם גיוון קיטובי (איירספאן)**

### 3.2 אנטנת PIFA

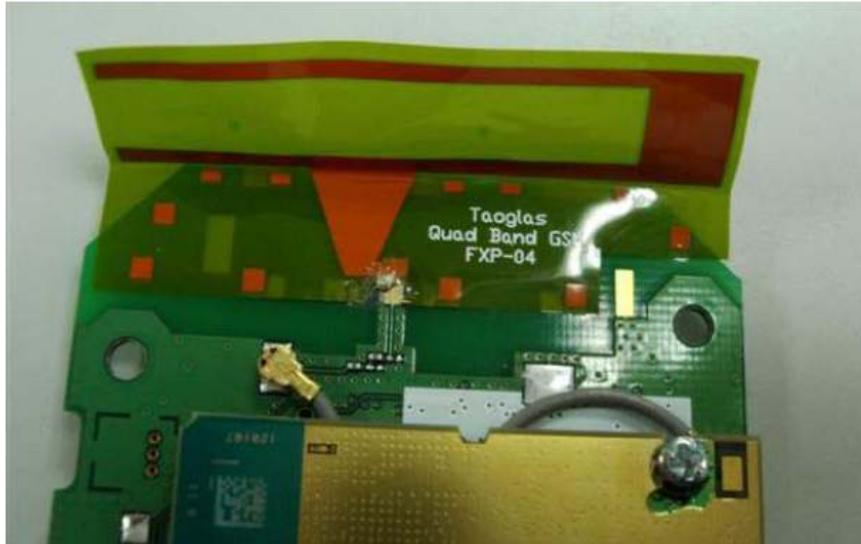
אנטנת מונופול נפוצה במיוחד היא אנטנת PIFA (Printed Inverted F Antenna) שבה תיל באורך רבע אורך, עם משטח אדמה מוזן בנקודה אופטימלית לאורך התיל. באנטנה זו, המודגמת באיור 6, ניתן להשיג התנגדות כניסה אופטימלית על ידי בחירה נכונה של נקודת ההזנה, במיוחד כאשר התנגדות הכניסה מושפעת מנוכחות קרובה של גופים מתכתיים או דיאלקטריים. דוגמה לאנטנת PIFA מישורית עם משטח אנכי המחובר למשטח האדמה מובאת באיור 7. דוגמה אחרת לאנטנת PIFA הבנויה על מצע דיאלקטרי גמיש ומולחמת למעגל מודפס, מובאת באיור 8.



**איור 6** אנטנת PIFA קווית לתדר 2.4 GHz



**איור 7** אנטנת PIFA מישורית לתדר 2.4 GHz (ODF)



**איור 8** אנטנה סלולרית רב תדרית משולבת במעגל מודפס (Taoglas)

### 3.3 אנטנת סליל

אנטנת תיל אינה חייבת להיות קו זרם ישר אלא יכולה לקבל צורות שונות של מהלכים ופיתולים, כדי להקטין את גודלה הפיזי הכולל. ברור שהקטנת האנטנה על ידי פיתולים מקטינה את שטחה האפקטיבי ופוגעת ביעילות ובאלומת הקרינה. אחת הדרכים היעילות להקטנת האנטנה היא לממש אותה בצורת סליל ישר או בעל קוטר משתנה, עם או בלי משטח אדמה. סליל קצר עם משטח אדמה מודגם באיור 9. יצויין כי סליל ממלא היטב את המרחב ולכן מבחינת חוק Chu, נוטה להשיג רוחב סרט גדול יותר עבור שטח נתון. סליל מרובע המורכב מ-4 מקטעי זרם, לתחום GPS, מודגם באיור 10. בדוגמה זו משיגים הקטנה נוספת של האנטנה על ידי ליפוף הסליל סביב גליל קרמי עם מקדם דיאלקטרי גבוה.

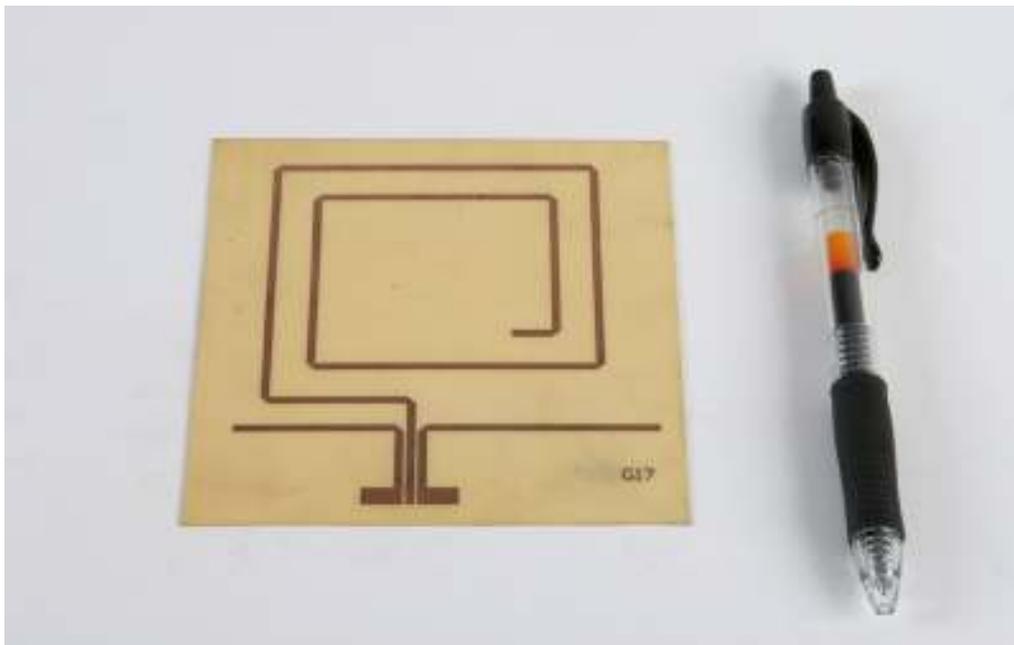


**איור 9** אנטנת סליל עם משטח אדמה לתדר 10 GHz

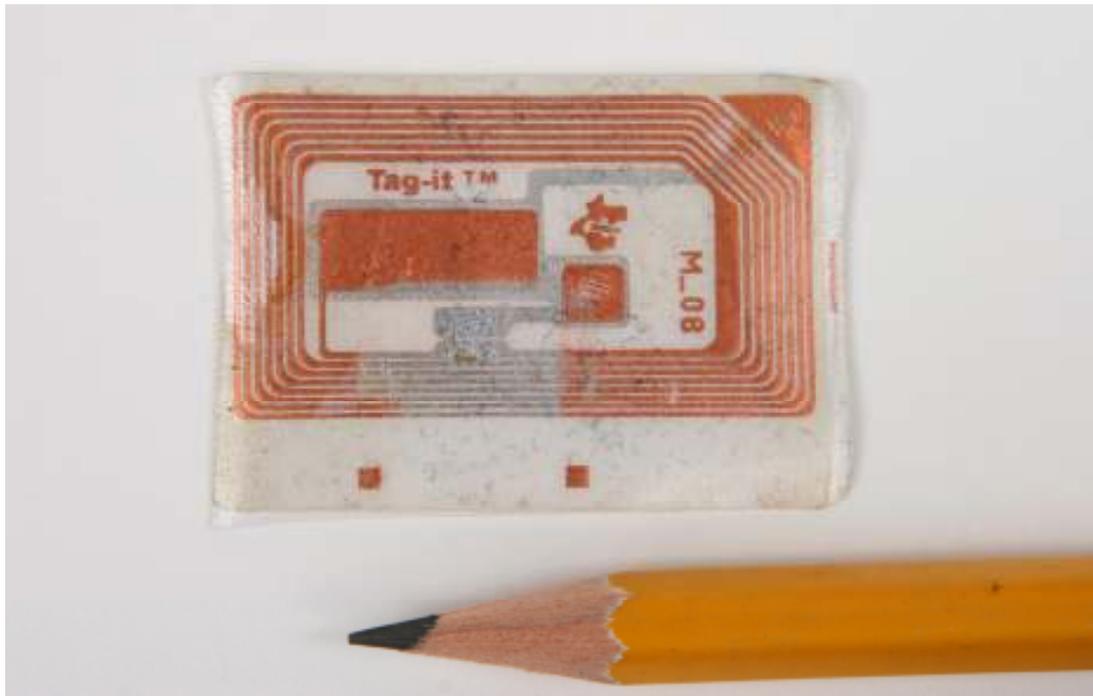


**איור 10** אנטנת סליל מרובע Quad Helix עבור GPS (Sarantel)

איור 11 מציג אנטנת סליל מישורית עם משטח אדמה המותאמת ליישום סלולרי כאשר היא מודבקת על שמשת רכב. איור 12 מציג אנטנת סליל מישורית אחרת עם מספר ליפופים, המהווה תג זיהוי בעזרת גלי רדיו RFID בתדר 13.56 MHz.



**איור 11** אנטנה סליל מודפסת לטלפון סלולרי (מודבקת על שמשת הרכב)

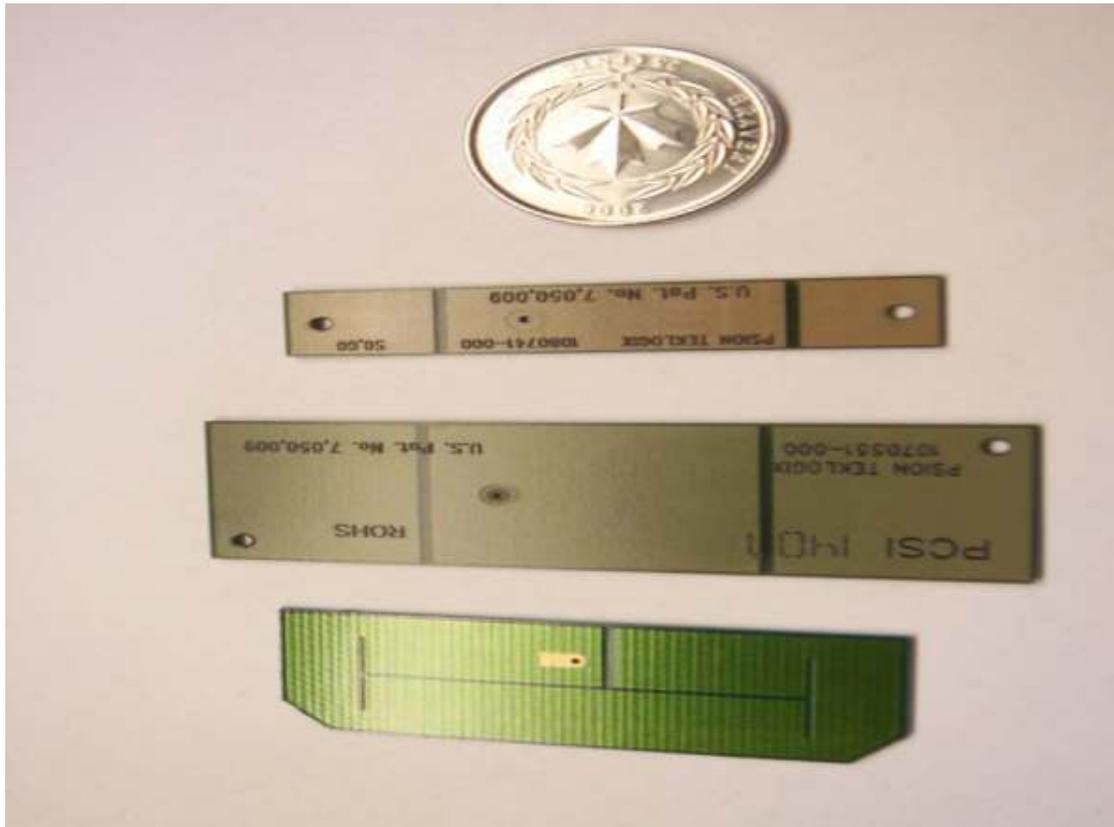


**איור 12** תג RFID בתדר 13.56 MHz (Texas Instruments)

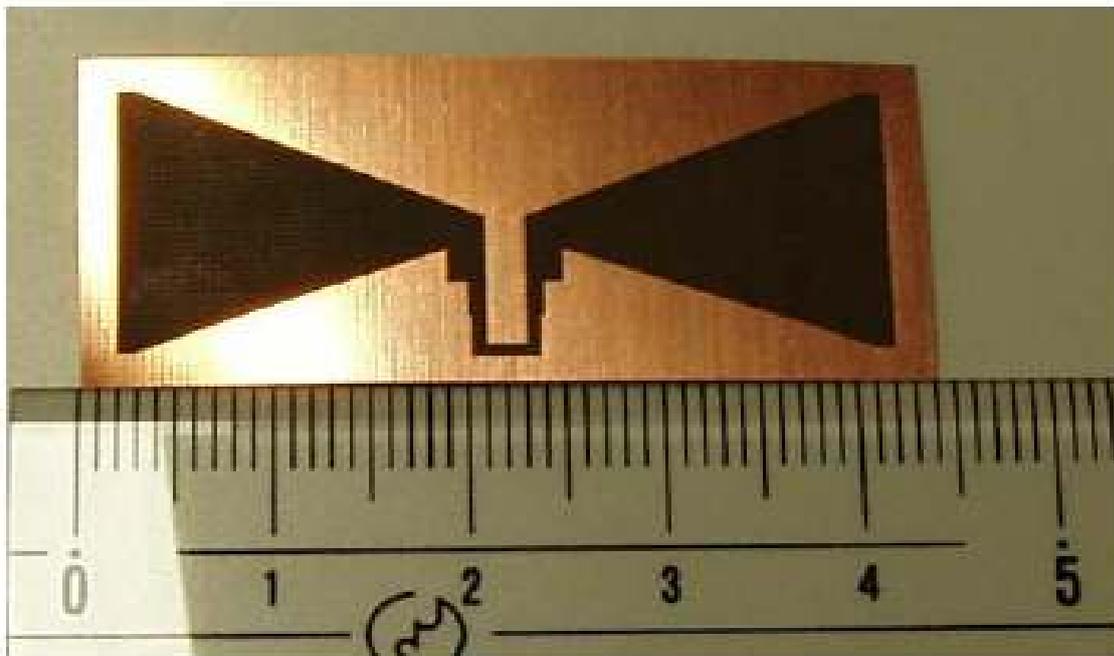
### 3.4 אנטנת חריץ

אנטנת חריץ מהווה מקור מתח (מיפתח של שדה חשמלי) אך מבחינת הביצועים החשמליים אינה שונה באופן מהותי מאנטנת זרם. החריץ יכול להיות צר, או רחב, בעל רוחב קבוע או משתנה, וכמובן עם מהלך ישר או מפותל. איור 13 מציג אנטנות חריץ אחדות עם ריבוי קורנים המתאימות לריבוי תדרים. איור 14 מציג אנטנת חריץ מישורית עם פתיחה הדרגתית, המזכירה במידה רבה את המונופול ההדרגתי שתואר באיור 4.

אנטנות חריץ אמורות לכווץ את השדה החשמלי לתוך שטח קטן. מצד אחד, הן מצליחות לעבוד ברוחב סרט קטן יחסית של מספר אחוזים, מצד שני, הן אמורות להיות פחות מושפעות מנוכחות גופים בסביבה הקרובה ולהשפיע פחות על אנטנות שכנות.



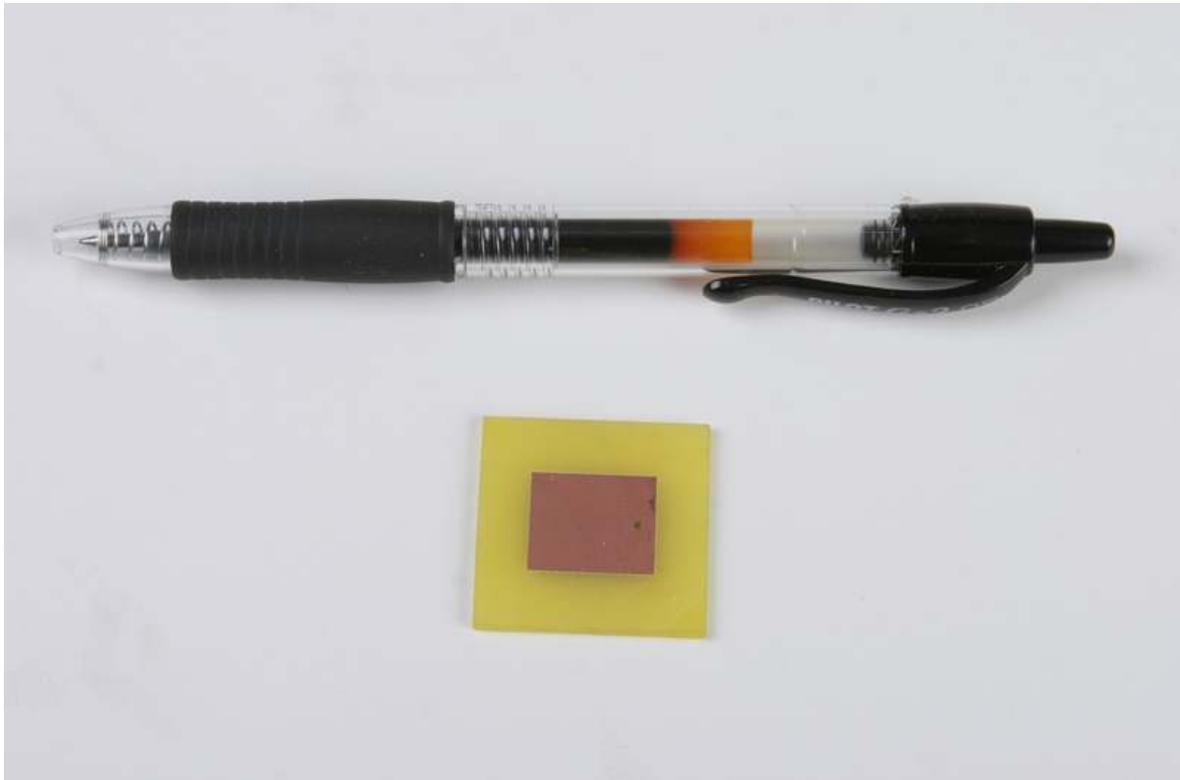
**איור 13 אנטנות חריץ כפול לטלפון סלולרי (Psion)**



**איור 14 אנטנת חריץ מאוזנת עם פתיחה הדרגתית**

### 3.5 אנטנות מיקרוסטריפ

אנטנות מיקרוסטריפ, המורכבות ממשטח מתכתי ריבועי, מלבני או עגול, המוצב מעל משטח אדמה תחתון, הן בגודל טיפוסי של 0.1-0.4 אורכי גל, וזאת בתלות בעיקר במשטח הדיאלקטרי המפריד בין משטחי המתכת. האנטנה המוצגת באיור 15 מורכבת מלוח דיאלקטרי דק המופרד ממשטח האדמה באמצעות מרווח אוויר ולכן גודלה הטיפוסי הוא  $0.3-0.4\lambda$ . רוחב הסרט שלה הוא אחוזים בודדים ועקום הקרינה שלה מכסה את המרחב הקדמי ברוחב אלומה טיפוסי של  $70^\circ \times 80^\circ$ . מכאן שהיא אינה מתאימה במיוחד ליישומים ניידים שבהם רוצים כיסוי מרחבי גדול ככל האפשר כדי לבטל את רגישות הקליטה לסיבוב האנטנה. האנטנה המוצגת באיור 16 בנוייה על מצע קרמי עם מקדם דיאלקטרי גבוה מאד (בסביבות 40) ולכן גודלה הפיזי הוא קטן מאד ביחס לאורך הגל. באנטנה זו קיימת תופעה חשובה ומייצגת והיא שמשטח האדמה משפיע מאד על ביצועי האנטנה (תדר מרכזי, התנגדות קרינה, שבת, רוחבי אלומה וקיטוב).



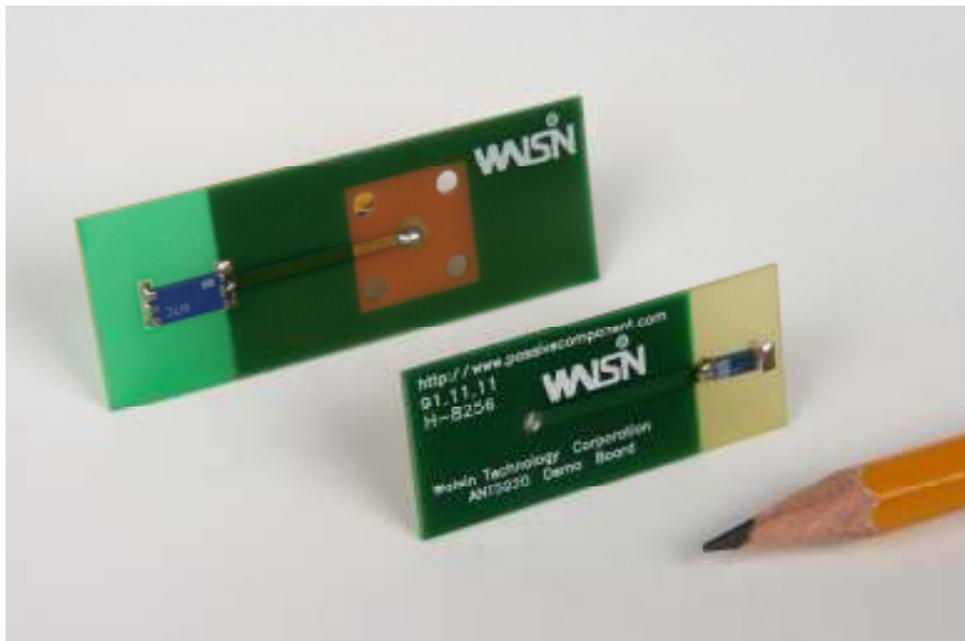
**איור 15** אנטנת מיקרוסטריפ לתדר 5.4 GHz (משטח האדמה אינו מופיע בתמונה והוא חלק מהלוח המודפס)



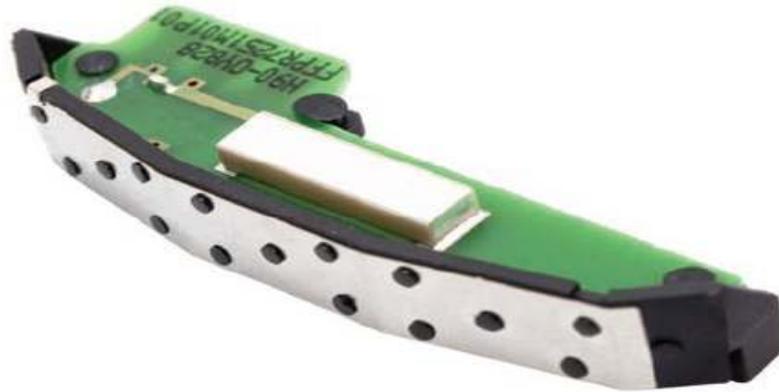
**איור 16** אנטנת מיקרוסטריפ 15 X 15 mm למקלט GPS

### 3.6 אנטנות שבב

כפי שנאמר לעיל, שימוש בחומרים דיאלקטריים ופיתול מהלך הזרם באנטנה יכולים להקטין את השטח הפיזי במידה רבה. תכונות אלו מנוצלות עד תום בסוג חדש יחסית של אנטנות קטנות הממומשות על גבי שבב דיאלקטרי זעיר chip כמו גם באיורים 17-18. אנטנות השבב מצטיינות בגודל פיזי קטן וברגישות מעטה לסביבתן הקרובה. מאידך, הן בדרך כלל בעלות נצילות נמוכה יחסית ושבח ממוצע נמוך יחסית.



**איור 17** אנטנות שבב CHIP לתדר 2.4 GHz (WNSN)



**איור 18** אנטנה סלולרית 4 תדרית על גבי שבב (Pulse)

#### **4. שיקולי תכנון לאנטנות קטנות**

בבואנו לתכנן ולשלב אנטנות קטנות במארז אלקטרוני נייד כלשהו, עלינו לזכור בראש ובראשונה כי אנטנות קטנות רגישות במיוחד לשטח ולנפח הגיאומטרי שבהן הן מותקנות ולנוכחות גופים מתכתיים או דיאלקטריים סמוכים. במארז הכולל לוח-אם מודפס PCB קורה לעיתים קרובות כי גודל הלוח ומשטר האדמות שלו משפיעים במידה רבה על ביצועי האנטנות המחוברות אליו. ראוי אפוא למתכנני הציוד להקדיש תשומת לב מיוחדת למיקום האנטנות הקטנות ולשתף את מתכנני האנטנות בשלב מוקדם ככל האפשר של התיכון ההנדסי.

בהנחה שתדרי העבודה ורוחבי הסרט מוכתבים מראש לפי היישומים השונים, יש חשיבות רבה להגדרת הצימוד בין התדרים השונים, בין אם מדובר בסלקטיביות של אותה אנטנה ובין אם מדובר בצימוד בין אנטנות שכנות. חשוב להדגיש כי תדרי העבודה של האנטנה רגישים לשינויים הנגרמים מנוכחות גופים קרובים ובמיוחד לנוכחות ידיים או ראש של בני אדם. לכן תכנון יציב לטווח ארוך לוקח בחשבון את השינויים האפשריים בביצועי האנטנה לפי המיקום והסביבה שבה היא עתידה לפעול וכן את סטנדרטי הבטיחות הנדרשים לגוף האדם.

באנטנות קטנות וניידות מבקשים להשיג כיסוי מרחבי גדול ככל האפשר של האנטנות, כלומר שבח ממוצע נמוך יחסית של  $-3$  to  $-6$  dBi. הדגש מושם אפוא על רמת תיאום טובה ועל יעילות קרינה גבוהה. ערכים סבירים לרמת תיאום טובה הם  $VSWR = 2$  to  $3$  וליעילות טובה הם  $40\%$  to  $60\%$ .

בדרך כלל, באנטנות קטנות, הקיטוב הוא מעורב. במערכות תקשורת ללא קו ראייה זהו יתרון חשוב מפני שהחזרות המרובות בערוץ משנות את הקיטובים, כך שאין עדיפות לקיטוב מוגדר ונקי. לכן גם השבח המבוקש הוא בדרך כלל השבח המוחלט המוגדר על ידי צירוף של ההספקים הנקלטים בשני קיטובים מאונכים. המדידה המתאימה היא אפוא צירוף ההספקים הנקלטים באנטנה הנבדקת, עבור שידור בקיטוב אנכי ועבור שידור בקיטוב אופקי.

$$(5) \quad G(\text{absolute}) = G(\text{vertical}) + G(\text{horizontal})$$

במערכות תקשורת מתקדמות הפועלות עם ריבוי אנטנות, חשוב להשיג מגוון גדול יחסית של תכונות הקרינה בין האנטנות השונות. מגוון זה יכול להיות בדרך של מיקום שונה של האנטנות, או סיבוב יחסי של האנטנות או על ידי גיוון בעקומי הקרינה. הפרמטרים הקובעים את ביצועי המערכת הם הצימוד ההדדי בין אנטנות שכנות, כאשר ערך מתאים הוא Coupling -15 dB to -20 dB וקורלציה נמוכה בין עקומי הקרינה Envelope Correlation 0.1 to 0.3. בשנים האחרונות הוברר יותר ויותר כי התנהגות אנטנות בערוצים ללא קו ראייה הינה בעלת אופי מקרי וסטטיסטי. לכן ראוי לבחון את ביצועי האנטנה (כגון צימוד הדדי וקורלציה) בריבוי מצבים ולבחור את האנטנות האופטימליות לפי ממוצעים וסטיות תקן. הדרך הנכונה יותר לבחון אנטנות קטנות היא על סמך ביצועיה בתנאי ערוץ מדומים או אמיתיים ולא דווקא במטווח אנטנות עם קו ראייה בין המשדר והמקלט.

ניתן לשלב אנטנות קטנות על לוח מודפס קיים, בהנחה שמקצים לאנטנות את השטח הדרוש לפעולתן התקינה, כך שמחיר הייצור שלה הוא אפסי. מאידך, ניתן להתקין אנטנות פנימיות או חיצוניות נפרדות המחוברות דרך קווי תמסורת שונים אל המשדר/מקלט. מלבד השיקול הכלכלי המובן מאליו של קנייה לעומת ייצור עצמי צריך לקחת בחשבון את היקף העבודה הנדרשת להתאמת אנטנה קיימת אל המיתאר הפיזי שבו היא נדרשת לעבוד.

## 5. סיכום

### שיקולי תכנון עיקריים

- שטח ונפח נתונים
- נוכחות גופים קרובים וביחוד מעגלים מודפסים
- השפעת גוף האדם ועמידה בתקני בטיחות
- תדרים ורוחבי סרט נדרשים
- כיסוי מרחבי רחב
- ריבוי קיטובים

### ביצועים עיקריים נדרשים

- רמת התיאום בתדרים השונים
- יעילות הקרינה
- שבח ממוצע בתחום הכיסוי המבוקש
- רמת הצימוד בין אנטנות שכנות
- קורלציה נמוכה במערכים מרובי אנטנות

- [1] H. Schantz, *The Art and Science of Ultra Wide Band Antennas*, Artech House, 2005.
- [2] Z. N. Chen and M.Y. Wahchia, *Broadband Planar Antenna Design and Applications*, John Wiley, 2006.
- [3] R.C. Hansen, *Electrically Small, Superdirective, and Superconducting Antennas*, Wiley InterScience, 2006.
- [4] B. Allen et al (Editors), *Ultra Wide Band Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging*, John Wiley, 2006.
- [5] Volakis J.L. (Editor) *Antenna Handbook*, McGraw Hill, 2007.
- [6] A. Petosa, *Dielectric Resonator Antenna Handbook*, Artech House, 2007.
- [7] R. Waterhouse (Editor) *Printed Antennas for Wireless Communications*, John Wiley, 2007.
- [8] S.R. Saunders and A. Aragon Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, John Wiley, second edition 2007.
- [9] Z.N. Chen (Editor) *Antennas for Portable Devices*, John Wiley, 2007.
- [9] J. Raines, *Folded Unipole Antenna*, McGraw Hill, 2007.
- [10] S. Hernandez, *Multiband Integrated Antennas for 4G Terminals*, Artech House, 2008.
- [11] C.A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley, 2008.
- [12] P.S. Hall and Y. Hao, *Antennas and Propagation for Body Centric Wireless Communications*, Artech House, 2008.
- [13] K. Fujimoto and J.R. James, *Mobile Antenna System Handbook*, Artech House, second edition, 2008.