

כמה חתכי קרינה דרושים כדי לאפיין אנטנה ?

פרופ' עלי לויין
מכללת אפקה להנדסה תל אביב
ElyL@afeka.ac.il

אנטנות משדרות וקולטות בעוצמה שונה בכל כיוון במרחב. מדידת עוצמת הקרינה במרחב השלם היא ממושכת ויקרה ולכן בדרך כלל מסתפקים במדידת מספר קטן של חתכי קרינה מייצגים. במאמר זה ננסה לענות על השאלה המעשית כמה חתכי קרינה דרושים כדי לאפיין אנטנה.

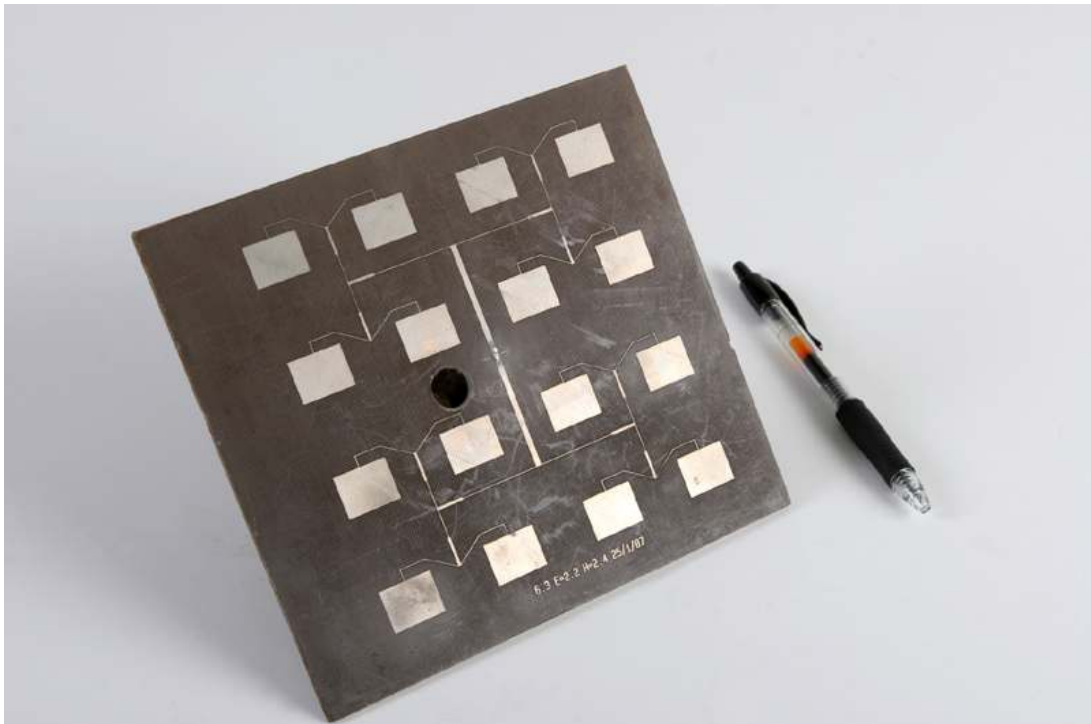
1. הקדמה

עקום קרינה radiation pattern של אנטנה הוא תיאור גרפי של ההספק המשודר או נקלט בה בתלות בזווית. כידוע, המרחב הזוויתי השלם הוא 4π סטראדיאן, אך סיבוב האנטנה נעשה במישור מסוים (או בתלות בזווית מישורית אחת). מדידת הקרינה נעשית אפוא בחתכים מסוימים cuts ולא במרחב כולו. השאלה המעשית המעסיקה לעיתים קרובות את מהנדסי הרדיו ואת מתכנני האנטנות היא כמה חתכי קרינה נדרשים כדי לאפיין אנטנות רדיו בצורה ממצה ומייצגת.

2. סיווג אנטנות

ניתן לסווג אנטנות על פי הכיסוי המרחבי שלהן לשלושה סוגים:

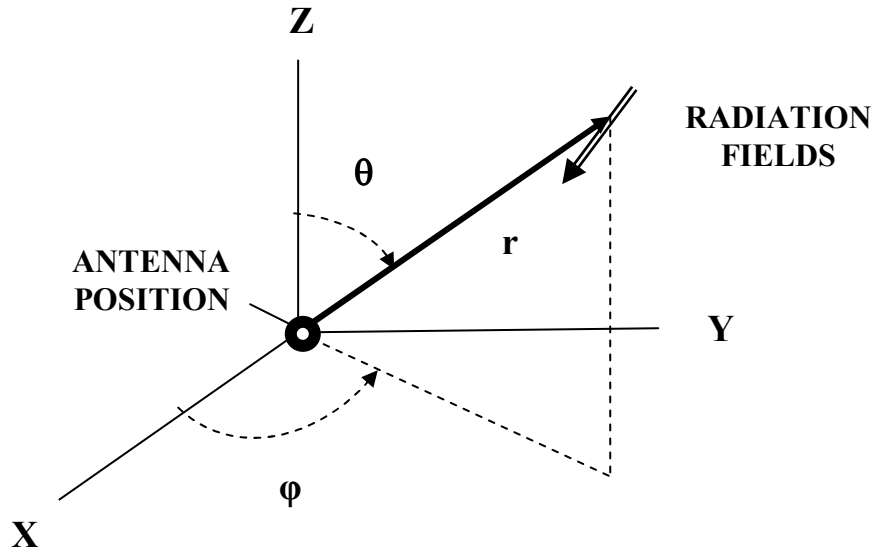
- אנטנות איזוטרופיות isotropic המקרינות במידה כמעט שווה במרחב
- אנטנות כלל כיווניות בציר אחד omni-directional
- אנטנות כיווניות directional בשני צירים



איור 1 באנטנה כיוונית כגון מערך 4×4 אלמנטים עם רוחב אלומה $20^\circ \times 20^\circ$ ניתן להסתפק במדידת עקומי קרינה בשני חתכים ראשיים (E and H)

3. מערכת קואורדינטות

מערכת הקואורדינטות המקובלת לתיאור ההצבה של האנטנה היא מישורית (x,y,z) ולתיאור שדות הקרינה היא כדורית (r,θ,ϕ) . הקשרים בין שתי מערכות הקואורדינטות מתוארים באיור 2. הזווית θ היא הזווית בין ציר Z לבין הוקטור r ואילו הזווית ϕ היא הזווית בין ציר X לבין ההיטל של r על מישור XY .



איור 2 מערכת קואורדינטות לתיאור מיקום האנטנה ושדה הקרינה

האנטנה מוצבת בנקודת הראשית $(0,0,0)$. אם האנטנה היא אלמנט זרם בודד כגון דיפול או מנונפול, נהוג להציב את האנטנה לאורך ציר Z ואז היא סימטרית בסיבוב ובקיטוב אנכי. אם האנטנה היא מיפתח מישורי, כגון שופר או מערך מודפס, נהוג להציב את המיפתח במישור XY ואז הקרינה היא בעיקר לכיוון Z והקיטוב הוא לינארי (בכיוון X או בכיוון Y) או מעגלי (ימני או שמאלי) או אליפטי. נדגיש כאן כי לכל אנטנה יש קיטוב מוגדר שהוא כיוון השדה החשמלי הרחוק. חתכי הקרינה צריכים להתחשב גם בקיטוב.

4. אנטנה כיוונית

המקרה של אנטנה כיוונית הוא הפשוט יותר מבחינת חתכי הקרינה. נתאר מיפתח המונח במישור XY בקיטוב X כמתואר באיור 3. הזווית המרחבית של אונת הקרינה הראשית היא Ω_a השקולה בקירוב למכפלת שני רוחבי האלומה בחתכי הקרינה הראשיים θ_E, θ_H :

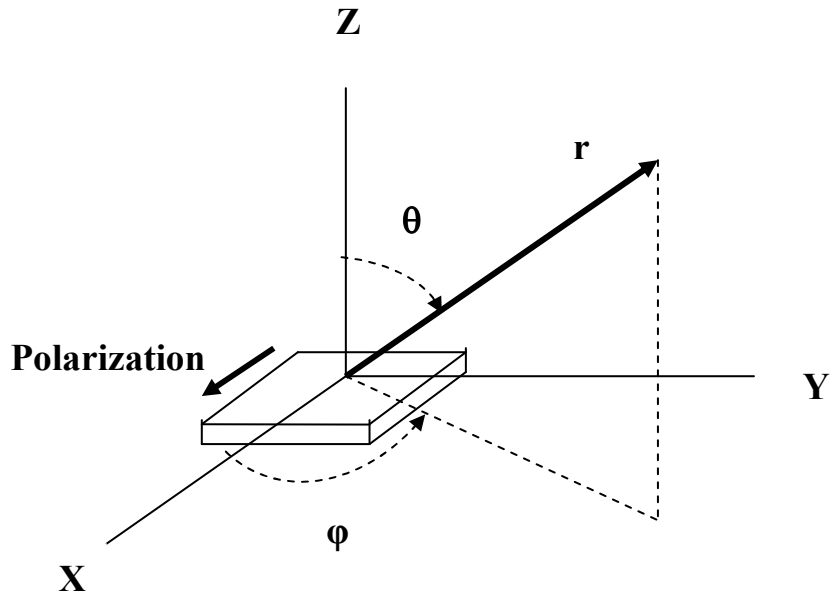
(1)	$\Omega_a \cong \theta_E \times \theta_H$ [steradian]
-----	---

האנטנה הכיוונית נמדדת אפוא בשני חתכי הקרינה הראשיים, המאונכים זה לזה ונקראים חתך E וחתך H על פי קיטוב שדה הקרינה:

$$P(\theta, \phi = 0^\circ) \quad \text{חתך במישור E}$$

$$P(\theta, \phi = 90^\circ) \quad \text{חתך במישור H}$$

המידע המופק מחתכים אלה הוא רוחב האלומה הראשית, רמת אונות הצד הקרובות והרחוקות והשבח המכסימלי (בהתייחס לאנטנת כיוול ידועה). כל חתך נמדד בקיטוב הראשי הנקרא co-pol ובקיטוב הניצב הנקרא cross-pol ולכן בסך הכל אפיון ממצה של האנטנה נמדד על ידי 4 חתכים בלבד.



איור 3 הצבת אנטנה כיוונית במישור XY וביצוע 2 חתכי קרינה

$$P(\theta, \text{ at } \phi=0^\circ) \quad \text{E-Plane Cut}$$

$$P(\theta, \text{ at } \phi=90^\circ) \quad \text{H-Plane Cut}$$

כאשר כל חתך נמדד בשני קיטובים לינאריים ניצבים

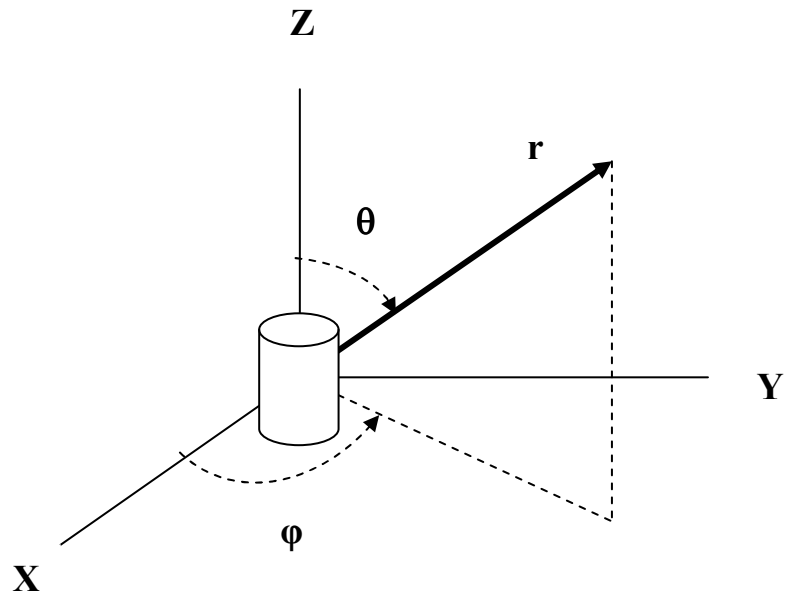
5. אנטנה כלל כיוונית בציר אחד

אנטנה כלל כיוונית בציר אחד מוצבת בדרך כלל לאורך ציר Z, כלומר הקיטוב שלה הוא אנכי בכיוון Z כמתואר באיור 4. אנטנה כזו תימדד בשני חתכים ראשיים:

$$P(\phi, \theta = \theta_0) \quad \text{חתך סיבוב}$$

$$P(\theta, \phi = \phi_0) \quad \text{חתך הגבהה}$$

המידע המופק מחתכים אלה יהיה הכיסוי המרחבי, אחידות הכיסוי ripple והשבח המכסימלי או הממוצע. כל חתך ימדד בקיטוב הראשי ובקיטוב הניצב ולכן בסך הכל ידרשו 4 חתכי קרינה.



איור 4 הצבת אנטנה כלל כיוונית בציר Z וביצוע 2 חתכי קרינה

$P(\phi, \text{at } \theta = \theta_0)$ Azimuth Cut

$P(\theta, \text{at } \phi = \phi_0)$ Elevation Cut

כאשר כל חתך נמדד בשני קיטובים לינאריים ניצבים



איור 5 באנטנה כלל-כיוונית כגון אנטנת תיל (whip) ניתן להסתפק במדידת עקומי קרינה בשני חתכים ראשיים (EL and AZ)

6. אנטנה איזוטרופית

באנטנה איזוטרופית נדרשים לפחות 3 חתכים ומקובל לסמן אותם לפי מישורי האנטנה ולא לפי מישורי הקרינה. בכל מישור נרצה לבדוק את שני הקיטובים ולכן בסך הכל ידרשו 6 חתכי קרינה.

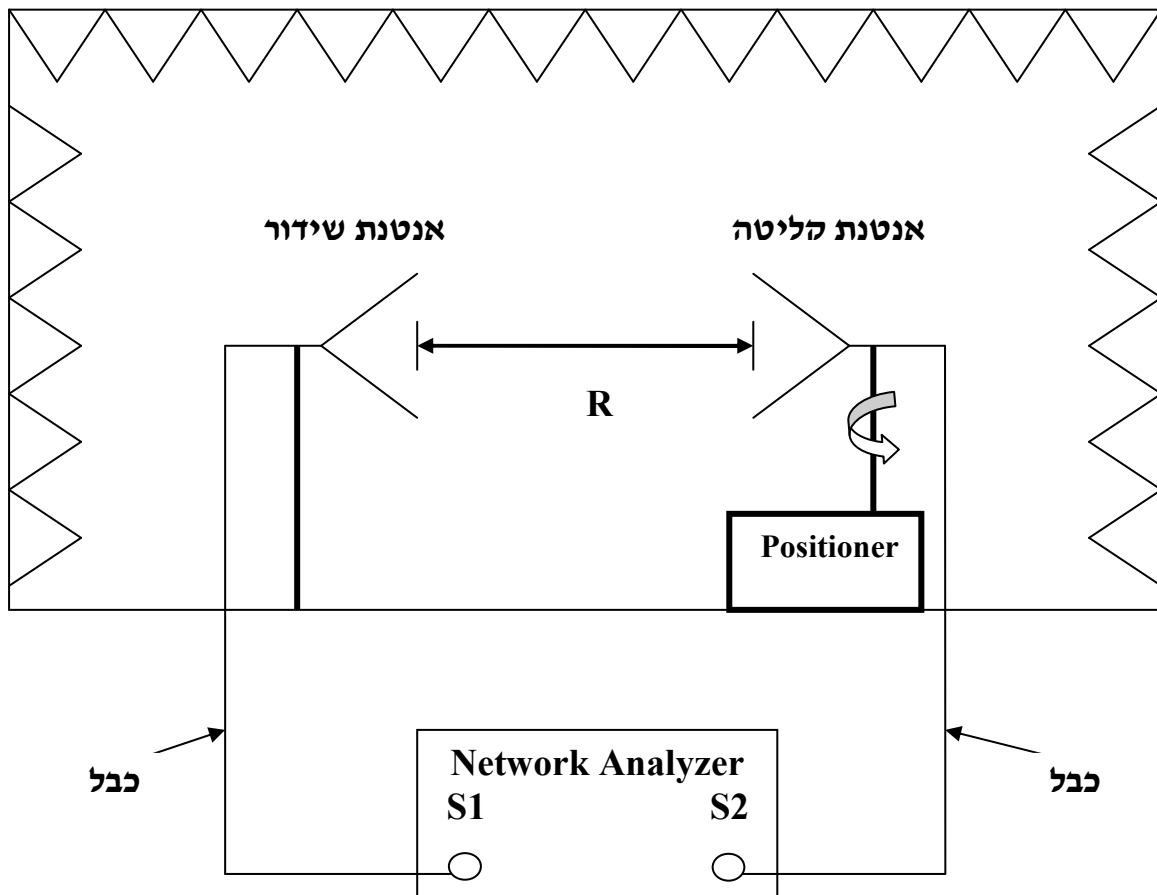
$P(\phi, \theta = 0^\circ)$	חתך xy
$P(\theta, \phi = 0^\circ)$	חתך xz
$P(\theta, \phi = 90^\circ)$	חתך zy

המידע המופק מחתכים אלה יהיה אחידות הכיסוי המרחבי והשבח המכסימלי או הממוצע בחתכים הראשיים.



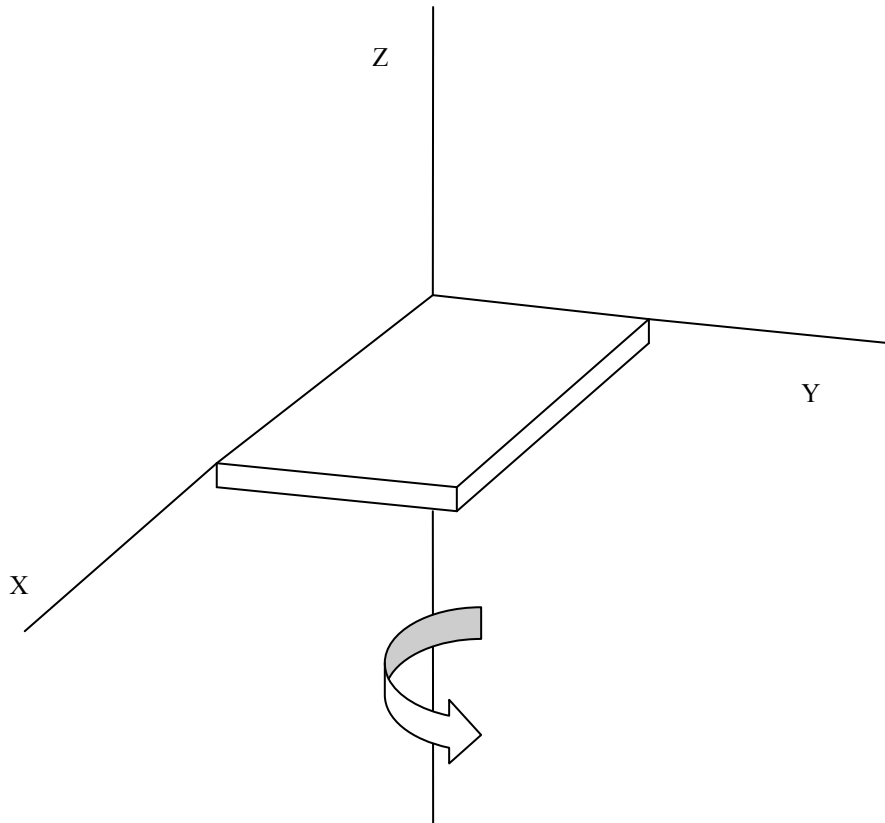
איור 6 אנטנה איזוטרופית כגון 3 דיפולים ניצבים
(American Research Antennas) ניתן לאפיין
ע"י שלושה חתכים (xy, xz, zy) ובשני קיטובים

בתא אל-הד המצויד במסובב אנטנות בציר אחד (בדרך כלל באזימוט) נוכל לבצע את 6 חתכי הקרינה על ידי כך שנציב את האנטנה הנבדקת ב-3 מישורים ונחזור על המדידה עבור 2 קיטובים של אנטנת השידור הקבועה, כמתואר באיור 7.

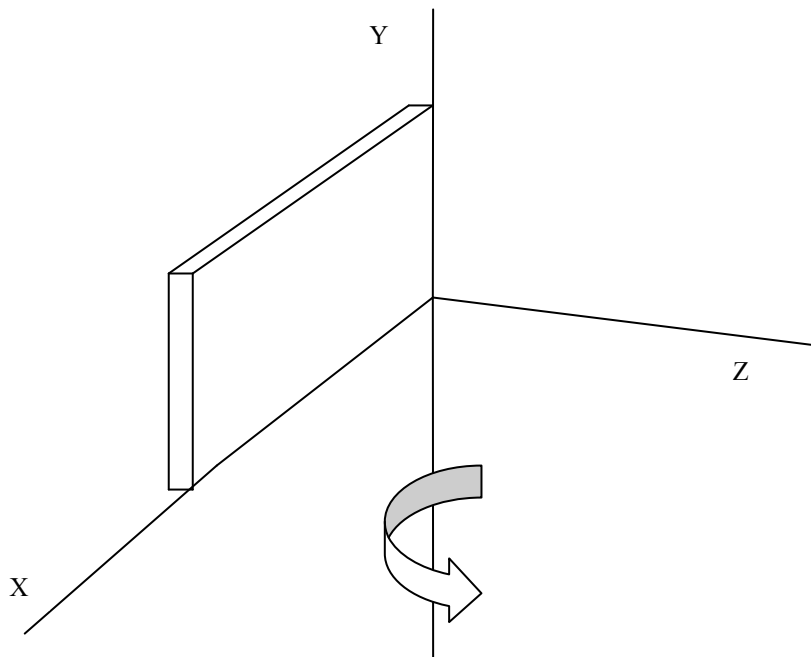


איור 7 מערך למדידת עקומי קרינה

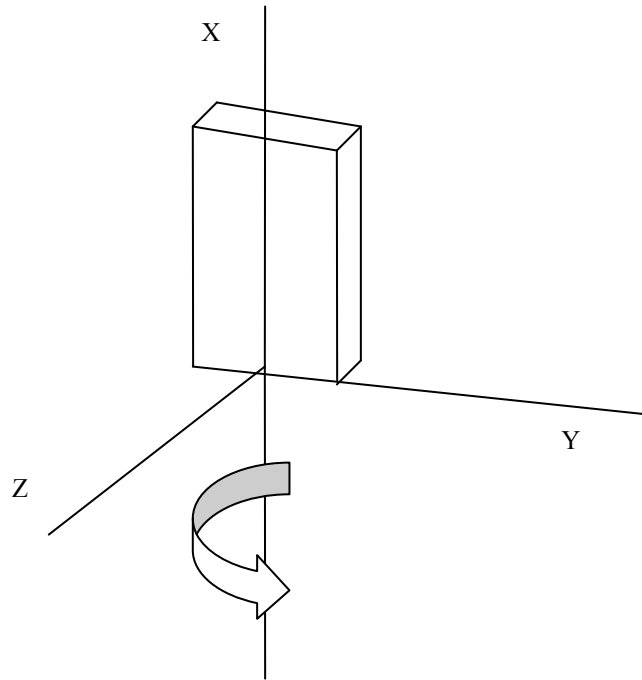
ההצבה של האנטנה הנבדקת בשלושה מישורים שונים (כאשר כל סריקה נעשית באזימוט) מוצגת באיור 8.



א. חתך קרינה במישור xy (סביב ציר z)



ב. חתך קרינה במישור xz (סביב ציר y)



ג. חתך קרינה במישור zy (סביב ציר x)

איור 8 הצבת אנטנה איזוטרופית וביצוע 3 חתכי קרינה:

א. חתך xy סביב ציר z

ב. חתך xz סביב ציר y

ג. חתך zy סביב ציר x

כאשר כל חתך נמדד בשני קיטובים לינאריים ניצבים

לסיכום, איפיון ממצה של רוחב האלומה, אונות הצד, אחידות הכיסוי המרחבי והשבח המכסימלי או הממוצע, נעשה בעזרת 4-6 חתכי קרינה ראשיים בשני הקיטובים המאונכים.

7. מדידת יעילות

ביצוע חתכי קרינה ספורים אינו מצביע בהכרח על יעילות האנטנה. כיווניות אנטנה Directivity מוגדרת לפי:

$$(2) \quad D = 4\pi \frac{P(\theta, \phi) \max}{Prad}$$

כאשר Prad הוא כל ההספק המוקרן ע"י האנטנה ושבח האנטנה Gain מוגדר לפי:

$$(3) \quad G = 4\pi \frac{P(\theta, \phi) \max}{Pin}$$

Pin הוא ההספק המגיע לאנטנה מהגנרטור. יעילות האנטנה Efficiency היא:

$$(4) \quad \eta = \frac{Prad}{Pin} = \frac{G}{D} = G \text{ (dBi)} - D \text{ (dBi)}$$

כדי למצוא את היעילות או את הכיווניות צריך למדוד את כלל ההספק המוקרן כלומר לבצע חתכי קרינה רבים במספר מתאים של נקודות דגימה ולסכם אותם. באופן מעשי החתכים הנוחים ביותר לביצוע הם חתכי הגבהה בין 90° לבין 90° עבור זוויות סיבוב שונות, הנעשים בעזרת מסובב כפול Elevation Over Azimuth. מספר החתכים תלוי ברמת ההשתנות הזוויתית של הקרינה והוא נע בתחום שבין 24 חתכים (כלומר כל 15° בסיבוב) עד 72 חתכים (כלומר כל 5° בסיבוב). ברור שעבור אנטנות מיוחדות אפשר למפות את הקרינה ברמת הפרדה גבוהה בהרבה.

לדוגמה: אם כל חתך הגבהה מכיל 90 דגימות (כל 2° בהגבהה) ונרצה 36 חתכים (כל 10° בסיבוב), עבור 2 קיטובים ועבור 4 תדרים, הרי כמות המספרים הנדרשת תהיה: $M = 90 \times 36 \times 2 \times 4 \cong 26,000$. לדוגמה: אם כל חתך הגבהה מכיל 36 דגימות (כל 5° בהגבהה) ונרצה 18 חתכים (כל 20° בסיבוב), עבור 2 קיטובים ועבור 6 תדרים, כאשר נעשה רישום מקבילי של אמפליטודה ופאזה, הרי כמות המספרים הנדרשת תהיה: $M = 36 \times 18 \times 2 \times 6 \times 2 \cong 16,000$. בכל מקרה מדובר בטבלאות גדולות מאד המצריכות זהירות רבה בעיבוד הנתונים. מדידת יעילות מהירה במיוחד מתבצעת במטווח אנטנות הכולל קשת או כיפה של גלאים, הקולטים את השידור בו זמנית במרחב זוויתי גדול ומסכמים את ההספק המשודר, ללא צורך במתקן סיבוב. מוצר מסחרי של חברת satimo.com זוכה לפופולריות רבה אצל יצרני אנטנות אלחוטיות.

8. מדידת קורלציה

בשנים האחרונות קיים ענין רב בריבוי אנטנות לתקשורת אלחוטית, שכל אחת מהן משדרת או קולטת בכיסוי זוויתי רחב עם גיוון מרחבי או קיטובי. באנטנות אלו חשוב שיהיה שוני משמעותי בעקומי הקרינה בין האנטנות השונות, כלומר שתהיה קורלציה נמוכה ביניהן. מדידת קורלציה בין אנטנות היא נושא חדשני שעדיין לא זכה לתקינה אחידה. ברור שצריך לבצע מיפוי מרחבי שלם של כל אנטנה במספר רב של חתכים ולבדוק את הדמיון ביניהן.

נניח שאפיינו את הקרינה המרחבית של שתי אנטנות על ידי טבלת מספרים שיש בה m נקודות דגימה בציר הסיבוב ו- n נקודות דגימה בציר ההגבהה ובסך הכל $M=n \times m$. את עקום הקרינה של כל אנטנה ננרמל כך שהקרינה המכסימלית בכל טבלה תהיה 1 (בסקלה מוחלטת, לא לוגריתמית). ההספק בריבוע המוקרן בכל אנטנה הוא:

$$(5) \quad P_1^2 = \sum P_i^2(\theta, \phi)$$

$$(6) \quad P_2^2 = \sum P_j^2(\theta, \phi)$$

הקורלציה בין האנטנות (במובן המעטפת, שאינה מתחשבת בפאזה) היא:

$$(7) \quad \text{Correlation (1,2)} = \frac{\sum P_i P_j}{\sqrt{P_1^2 \times P_2^2}}$$

נדגים את חישובי קורלציית המעטפת בין 4 אנטנות אשר עקומי הקרינה שלהן מוצגים בטבלה 1. כל אנטנה מתוארת כאן לצורך הפשטות על ידי $M=16$ מספרים בלבד אבל באופן מעשי, כפי שהראינו קודם, M יכול להגיע בקלות לעשרות אלפים.

ELEVATION	1	1	1	1
	1	1	1	1
	1	1	1	1
	1	1	1	1

AZIMUTH

אנטנה 1 - איזוטרופית

ELEVATION	0.1	0.3	0.3	0.1
	0.3	1	1	0.3
	0.3	1	1	0.3
	0.1	0.3	0.3	0.1

AZIMUTH

אנטנה 2 - כיוונית

ELEVATION	0.3	0.3	0.3	0.3
	1	1	1	1
	1	1	1	1
	0.3	0.3	0.3	0.3

AZIMUTH

אנטנה 3 - Omni-directional

ELEVATION	1	0.3	0.3	1
	0.3	0.1	0.1	0.3
	0.3	0.1	0.1	0.3
	1	0.3	0.3	1

AZIMUTH

אנטנה 4 - מקרינה בעיקר לצדדים

טבלה 1 עקומי קרינה של 4 אנטנות כאשר כל עקום קרינה נדגם ב-16 נקודות

נחשב את ריבוע ההספק של כל אנטנה :

$$P_1^2 = 16 \times 1^2 = 16$$

$$P_2^2 = 4 \times 1^2 + 8 \times 0.3^2 + 4 \times 0.1^2 = 4.76$$

$$P_3^2 = 8 \times 1^2 + 8 \times 0.3^2 = 8.72$$

$$P_4^2 = 4 \times 1^2 + 8 \times 0.3^2 + 4 \times 0.1^2 = 4.76$$

ואת הקורלציות ביניהן :

$$\text{Correlation (1-2)} = (4 \times 1 \times 1 + 8 \times 1 \times 0.3 + 4 \times 1 \times 0.1) / \sqrt{(16 \times 4.76)} = 0.78$$

$$\text{Correlation (1-3)} = (8 \times 1 \times 1 + 8 \times 1 \times 0.3) / \sqrt{(16 \times 8.72)} = 0.88$$

$$\text{Correlation (1-4)} = (4 \times 1 \times 1 + 8 \times 1 \times 0.3 + 4 \times 1 \times 0.1) / \sqrt{(16 \times 4.76)} = 0.78$$

$$\begin{aligned} \text{Correlation (2-3)} &= (4 \times 1 \times 1 + 4 \times 1 \times 0.3 + 4 \times 0.3 \times 0.3 + 4 \times 0.3 \times 0.1) \\ &/ \sqrt{(4.76 \times 8.72)} = 0.89 \end{aligned}$$

$$\text{Correlation (2-4)} = (8 \times 1 \times 0.1 + 8 \times 0.3 \times 0.3) / \sqrt{(4.76 \times 4.76)} = 0.32$$

$$\begin{aligned} \text{Correlation (3-4)} &= (8 \times 0.3 \times 0.3 + 4 \times 1 \times 0.1 + 4 \times 1 \times 0.3) \\ &/ \sqrt{(8.72 \times 4.76)} = 0.49 \end{aligned}$$

בקרב אנשי המקצוע רווחת הדעה שקורלציות המעטפת בין אנטנות MIMO צריכה להיות נמוכה מ-0.2. הקורלציה תלויה בעיקר במרחק בין האנטנות ובסיבוב היחסי ביניהן וברור שלא תמיד ניתן להשיג ערך קורלציה כזה נמוך. נדגים מקרה מובהק של קורלציה נמוכה בין שתי אנטנות לפי טבלה 2.

	0.9	0.9	0.1	0.1
ELEVATION	0.9	0.9	0.1	0.1
	0.9	0.9	0.1	0.1
	0.9	0.9	0.1	0.1

AZIMUTH

אנטנה 5 – מקרינה בעיקר שמאלה

	0.1	0.1	0.9	0.9
ELEVATION	0.1	0.1	0.9	0.9
	0.1	0.1	0.9	0.9
	0.1	0.1	0.9	0.9

AZIMUTH

אנטנה 6 – מקרינה בעיקר ימינה

טבלה 2 עקומי קרינה של 2 אנטנות כאשר כל עקום קרינה נדגם ב-16 נקודות

נחשב את ריבוע ההספק של כל אנטנה :

$$P_1^2 = P_2^2 = 8 \times 0.9^2 + 8 \times 0.1^2 = 6.56$$

ואת הקורלציה ביניהן :

$$\text{Correlation (5-6)} = (8 \times 0.9 \times 0.1 + 8 \times 0.9 \times 0.1) / \sqrt{(6.56 \times 6.56)} = 0.22$$

כמו כן יש לציין כי קורלצית המעטפת היא מקרה פשוט יחסית ולעיתים נדרשות קורלציות מורכבות יותר הלוקחות בחשבון גם את הפאזה היחסית של הקרינה בכל זווית וגם את קיטוב האנטנות. הגדרות מפורטות יותר ניתן למצוא במראי מקום [4]-[5].

9. סיכום

כדי לקבל אומדן טוב על קרינת אנטנה **כיוונית** או **כלל-כיוונית** בציר אחד ניתן להסתפק ב-4 עקומות קרינה (בשני חתכים ראשיים ובשני קיטובים ניצבים). באנטנה **איזוטרופית** עדיף למדוד 6 עקומות קרינה (בשלושת מישורי האנטנה ובשני קיטובים ניצבים). מדידת יעילות של אנטנה דורשת ביצוע מספר רב של חתכי קרינה ונעשית בדרך כלל במטווחי אנטנות מיוחדים.

בשנים האחרונות התעורר עניין רב במדידת קורלציה במערכות תקשורת אלחוטיות הפועלות באמצעות ריבוי אנטנות. למדידת קורלציה בין אנטנות נדרש למפות את הקרינה המרחבית של כל אנטנה ולבצע עיבוד מתימטי מורכב של התוצאות. במאמר זה הוצג הרעיון המרכזי של מדידה זו בלוי דוגמאות מוחשיות.

10. מראי מקום

- [1] *Antenna Engineering Handbook* (editor J. L. Volakis), chapter 36: Y.C. Vardaxoglou and J.R. James, Mobile Handset Antennas, McGraw Hill, 2007.
- [2] *Antenna Engineering Handbook* (editor J. L. Volakis), chapter 39: L.L. Nagy, Automobile Antennas, McGraw Hill, 2007.
- [3] *Antenna Engineering Handbook* (editor J. L. Volakis), chapter 50: W.D. Burnside, I.J. Gupta and T.H. Lee, Indoor Antenna Measurements, McGraw Hill, 2007.
- [4] *Antenna Engineering Handbook* (editor J. L. Volakis), chapter 57: W. Wiesbeck and C. Kuhnet, Propagation Models and Antennas for MIMO, McGraw Hill, 2007.
- [5] *Antenna Engineering Handbook* (editor J. L. Volakis), chapter 58: P.S. Kildal and C. Orlenius, Multipath Techniques for Handset / Terminal Antennas, McGraw Hill, 2007.