

קיטוב מעורב ושבח מוחלט

פרופ' עלי לויין

מכללת אפקה להנדסה תל אביב

ElyL@afeka.ac.il

בערוצים אלחוטיים הפועלים בתנאי הסתרות והחזרות מרובות וללא קו ראייה אין משמעות מיוחדת לקיטוב האנטנות מפני שהקיטוב הנקלט הוא משתנה אקראי התלוי בערוץ. במקרים כאלו נוהגים להגדיר את ביצועי האנטנות על סמך שני קיטובים ניצבים. בפרט מגדירים את השבח המוחלט של האנטנה ע"י סיכום השבח המתקבל בכל קיטוב בנפרד.

1. הקדמה

במאמר זה נקשר בין שני מושגים שונים בתכלית זה מזה – קיטוב האנטנה ושבח האנטנה. קיטוב האנטנה מציין את כיוון השדה החשמלי ואילו שבח האנטנה מציין את כיווניות הקרינה ביחס למקורן איזוטרופי כאשר מוכפלת ביעילות.

באנטנות קטנות וניידות שבהן עירור האנטנה מתבצע על ידי מקטעי זרם המוצבים בזוויות שונות (כגון דיפולים או מונופולים עם קווים מתפתלים, לולאות, סלילים, אנטנות PIFA), קיטוב הקרינה היוצאת או נכנסת אל האנטנה הוא סכום וקטורי של הזרמים השונים. המצבים השכיחים הם:

- (1) קיים אלמנט זרם דומיננטי במסלול ישר, המייצר קיטוב לינארי.
- (2) קיימים שני אלמנטי זרם מאונכים, שווים בעוצמתם עם הפרש פאזה של 90 מעלות, המייצרים קיטוב מעגלי.
- (3) קיימים מספר אלמנטי זרם שונים, עם הפרשי פאזה שונים, המייצרים קיטוב אליפטי או קיטוב מעורב.

דיוננו הנוכחי מתמקד במקרה השלישי של אנטנה בעלת קיטוב אליפטי או מעורב (Mixed Polarization) המכונה לעיתים קרובות גם בשם: אנטנה מרובת קיטובים (Multiple Polarized Antenna). אנטנה כזאת משרתת בדרך כלל מכשירי תקשורת קטנים וניידים, בעלי כיסוי זוויתי רחב, שאינם רגישים לסיבוב.

2. סיכום הקרינה בשני קיטובים ניצבים

באנטנות הפועלות מול ערוץ עם הסתרות חזקות וריבוי החזרות ופיזורים, אין משמעות מיוחדת לקיטוב האנטנה מפני שהגלים המגיעים בסופו של דבר אל המקלט עוברים שינויי קיטוב. יתכן אף שדווקא הקיטוב הדומיננטי של האנטנה עובר הנחתה גדולה בערוץ ואילו הקיטוב המשני, הניצב, מונחת פחות והופך להיות החשוב יותר. לכן באנטנות המיועדות לתקשורת אלחוטית, משתמשים במונח "שבח מוחלט" או "שבח אבסולוטי" המבטא את כלל ההספק המוקרן ולא דווקא בקיטוב יחיד.

ניתן לומר כי הקרינה היוצאת או המגיעה אל האנטנה היא סכום של שני מרכיבי הקיטוב הניצבים. במקרה של קיטוב לינארי – סכום הקיטובים האנכי והאופקי. במקרה של קיטוב מעגלי או אליפטי – סכום הקיטובים בסיבוב ימני ובסיבוב שמאלי. בהתאם לכך גם שבח האנטנה מורכב משתי תרומות כדלקמן.

במקרה של קיטוב לינארי מעורב:

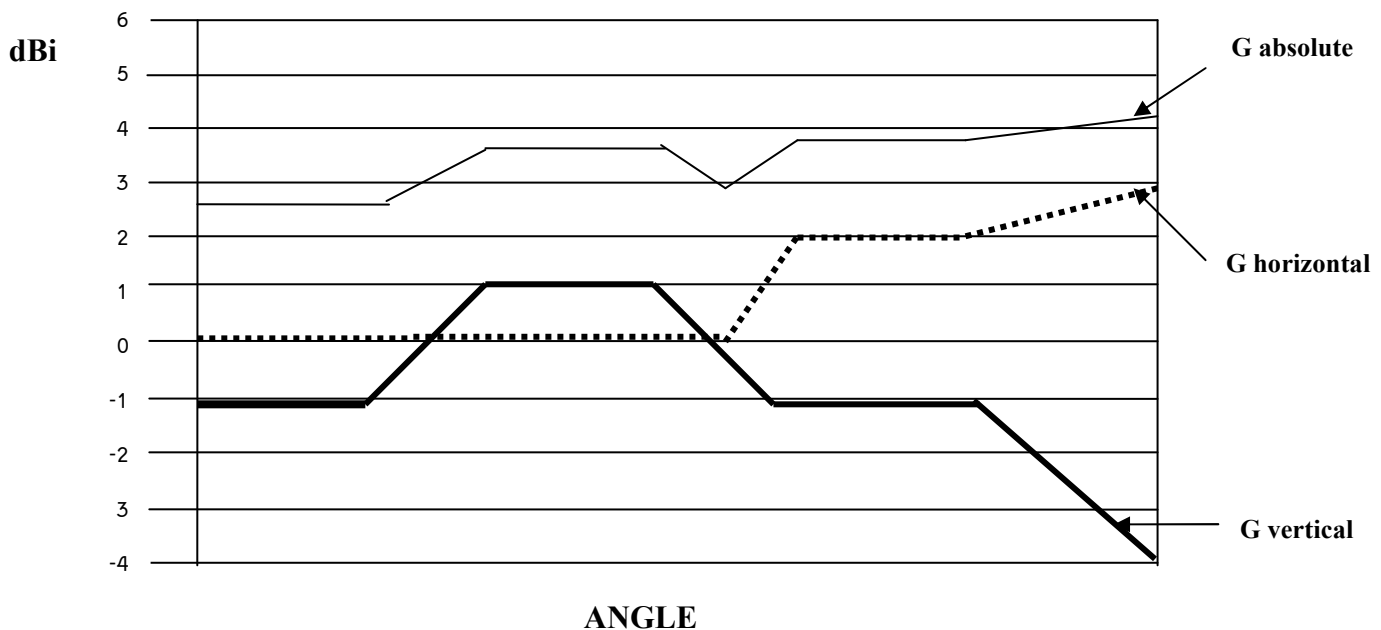
$$(1) \quad G(\text{Total}) = G(\text{Vertical}) + G(\text{Horizontal})$$

במקרה של קיטוב מעגלי / אליפטי מעורב:

$$(2) \quad G(\text{Total}) = G(\text{Right hand}) + G(\text{Left Hand})$$

כדי לחבר את עקומי הקרינה בשני הקיטובים הניצבים צריך לסכם את ההספק הנקלט, פעם אחת כאשר המשדר הוא אנכי (או מעגלי ימני) ופעם שניה כאשר המשדר הוא אופקי (או מעגלי שמאלי). הבעיה היא שעקומי קרינה ניתנים בדרך כלל בסקלה לוגריתמית (dB) אבל הסיכום צריך להיעשות בסקלה לינארית.

נתבונן באיור 1 כדי להמחיש את סיכום הקרינה בשני קיטובים לינאריים. הקו המלא העבה מראה את השבח הנמדד באנטנה כאשר מקור הגלים (המשדר) הוא בקיטוב לינארי אנכי. הקו המרוסק מראה את השבח הנמדד באנטנה כאשר מקור הגלים (המשדר) הוא בקיטוב לינארי אופקי. למעשה צריך להמיר את הקריאות לסקלה לינארית, לסכם את שתי העקומות ולקבל את השבח המוחלט (המסומן בקו מלא דק).



איור 1 סכימה המדגימה סיכום קרינה בשני קיטובים ניצבים

דרך נוחה יותר היא לקחת בכל זווית את הקריאה של הקיטוב הדומיננטי ולהוסיף אליה את תרומת הקיטוב המשני הניצב. למשל אם השבח בשני הקיטובים זהה אז מוסיפים פקטור 2 או 3 dB. אם השבח בקיטוב אחד גדול מן השני ב-3 dB אז מוסיפים פקטור 1.5 או 1.8 dB. טבלה 1 מציגה את התוספת ב-dB שיש להוסיף לקיטוב הדומיננטי בתלות בהפרש בין שני הקיטובים.

ההפרש בין הקיטוב הראשי לקיטוב המשני	התוספת שיש לתת לקיטוב הראשי כדי למצוא את השבח המוחלט
0 dB	3.0 dB
1 dB	2.6 dB
2 dB	2.1 dB
3 dB	1.8 dB
4 dB	1.5 dB
5 dB	1.2 dB
6 dB	1.0 dB
7 dB	0.8 dB
8 dB	0.6 dB
9 dB	0.5 dB
10 dB	0.4 dB

טבלה 1 תוספת התרומה של הקיטוב המשני כדי לקבל שבח מוחלט

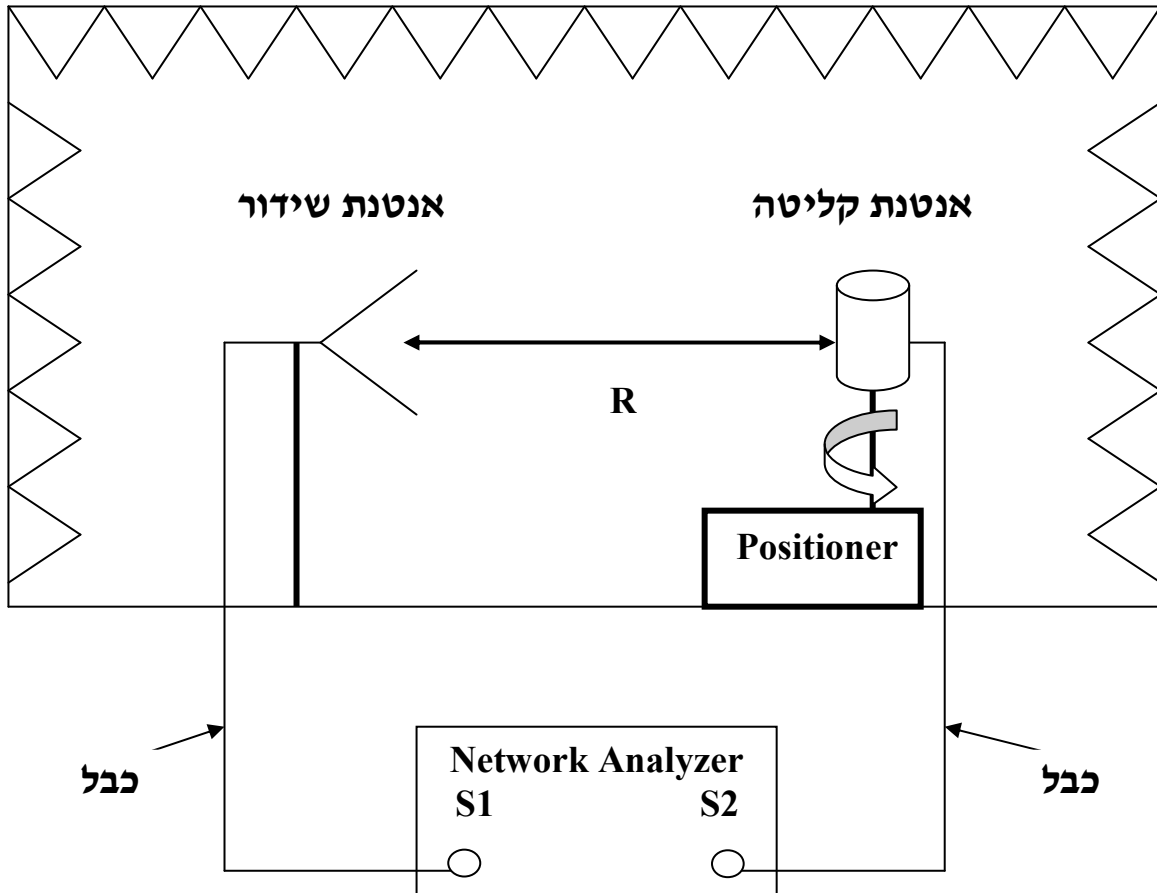
3. מדידת עקומי הקרינה בשני קיטובים ניצבים

נתאר מדידת קרינה בין משדר ומקלט כמתואר באיור 2. האנטנה הנבדקת היא האנטנה הקולטת ומוודדים את עקומי הקרינה שלה פעם אחת כאשר המשדר מוצב בקיטוב ראשי (לינארי או מעגלי) ופעם שניה כאשר המשדר מוצב בקיטוב משני (לינארי או מעגלי). כדי לכייל את הקריאות במונחים של שבח, מחליפים את האנטנה הנבדקת באנטנת ייחוס מדויקת שהשבח שלה ידוע.

בדוגמה המעשית המובאת באיור 3 נמדדה אנטנת מונופול בחתך אזימוט בקיטוב לינארי אנכי (הגרף העליון / הירוק) ובקיטוב לינארי אופקי (הגרף התחתון / האדום). לצורך כיול הציר האנכי נמדדה אנטנת ייחוס עם שבח $G = 12$ dBi ונמצא כי הקריאה המכסימלית שלה היתה $Pr = -42$ dB. מכאן ניתן להסיק בקלות כי שבח של $G = 0$ dBi מתקבל עבור קריאה של $Pr = -54$ dB.

השבח המכסימלי בקיטוב ראשי הוא $G = 2$ dBi (בזווית 0°). בזווית זו השבח בקיטוב הניצב נמוך ב-10 dB כלומר מוסיף 0.4 dB ולכן השבח המוחלט בזווית זו הוא $G = 2.4$ dBi.

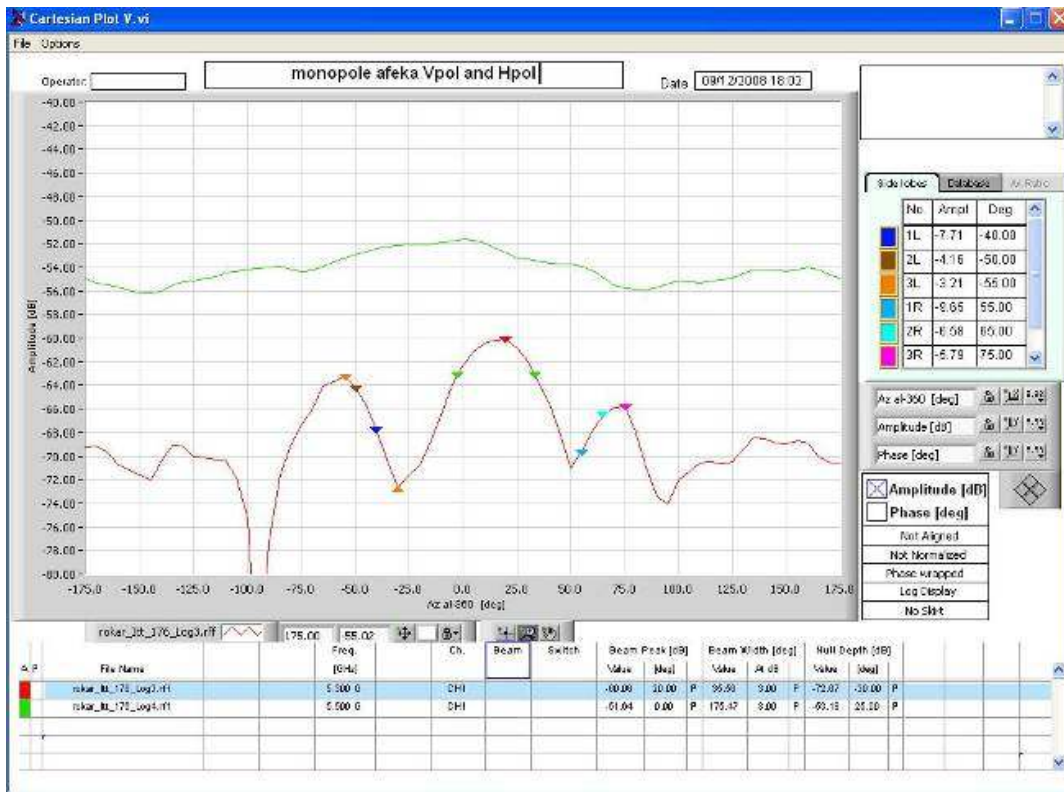
התרומה המכסימלית של הקיטוב הניצב מתקבלת בזווית 20° . בזווית זו השבח בקיטוב העיקרי הוא $G = 1 \text{ dBi}$ והשבח בקיטוב הניצב נמוך ב- 7 dB כלומר מוסיף 0.8 dB ולכן בזווית זו השבח המוחלט הוא $G = 1.8 \text{ dBi}$.



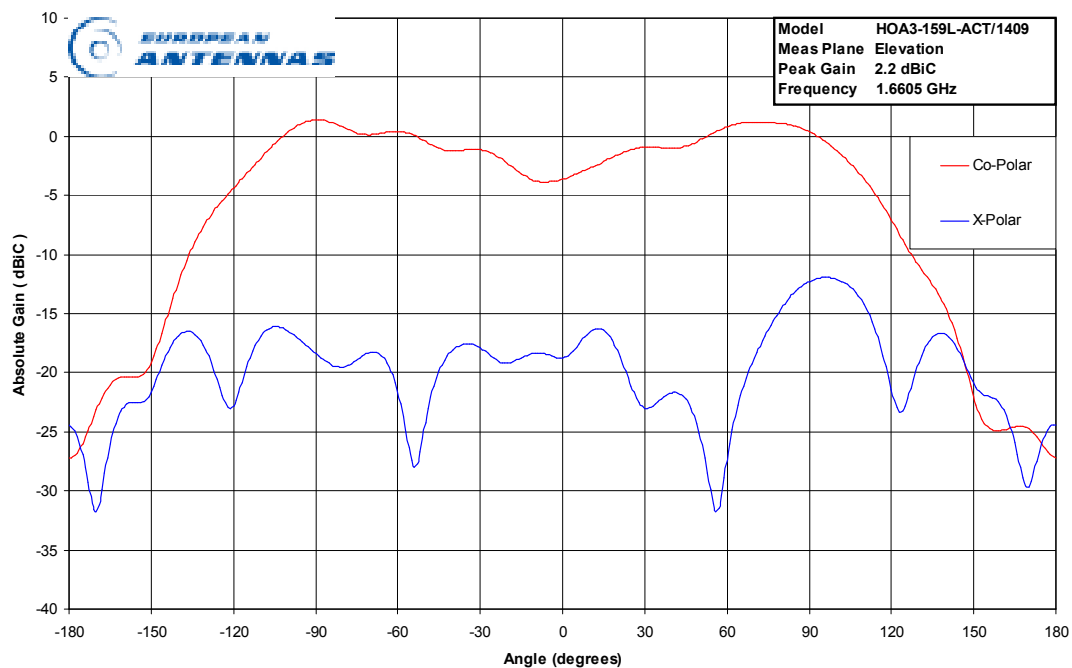
איור 2 סכימת המדידה של עקום קרינה

בדוגמה המעשית המובאת באיור 4 נמדדה אנטנת סליל בחתך הגבהה בקיטוב מעגלי ימני (הגרף העליון / האדום) ובקיטוב מעגלי שמאלי (הגרף התחתון / הכחול).

השבח המכסימלי בקיטוב ראשי הוא $G = 2.2 \text{ dBic}$ (בזווית -90°). בזווית זו השבח בקיטוב הניצב נמוך ב- 20 dB כלומר תרומתו זניחה. בזווית 90° השבח בקיטוב הראשי הוא $G = 0 \text{ dBic}$ והשבח בקיטוב הניצב נמוך ב- 12 dB כלומר תרומת הקיטוב הניצב היא 0.3 dB .



איור 3 דוגמה למדידת אנטנה בשני קיטובים לינאריים ניצבים (מכללת אפקה ת"א)



איור 4 דוגמה למדידת אנטנה בשני קיטובים מעגליים ניצבים (European Antennas)

4. סיכום

באנטנות הפועלות בערוצי תקשורת ללא קו ראייה, שבהם קיימות הסתרות והחזרות מרובות, הקיטוב הנקלט הוא משתנה אקראי התלוי בערוץ. במקרה כזה אין משמעות מיוחדת לקיטוב האנטנה המשדרת ולקיטוב האנטנה הקולטת אלא רצוי דווקא קיטוב מעורב. השבח הרלבנטי לגבי ערוצים כאלו הוא השבח המוחלט המורכב מסכום התרומות של שני קיטובים ניצבים. תופעה זו היא אחת מן הסיבות המסבירות את "פרדוקס מטווח האנטנות" על שם לוין, לפיו אנטנות המציגות עקומי קרינה חלקים ונקיים במטווח האנטנות פועלות פחות טוב בסביבה חיצונית, ואילו אנטנות הנחזות כפחות טובות במטווח האנטנות, מגלות עדיפות בסביבת העבודה האמיתית.

5. מראי מקום

- [1] Volakis J.L. (Editor) *Antenna Handbook*, chapters 1, 26, 36. 39, 50, 57 and 58, McGraw Hill, 2007.
- [2] C.A. Balanis (Editor) *Modern Antenna Handbook*, chapters 1,10, 20 and 22, John Wiley, 2008.



איור 5 בתחנת בסיס מרובת אנטנות משתמשים בדרך כלל בקיטובים מעורבים