

ריבוי אנטנות בתקשורת אלחוטית

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

מאמר זה מתאר את השיקולים השונים בבחירת אנטנות עבור מערכות תקשורת אלחוטיות מרובות משדרים / מקלטים הידועות בשם MIMO. כמו כן מובאת מעטפת הביצועים הנדרשת מן האנטנות וסוגי הגיוון המומלצים.

1. הקדמה

התקשורת האלחוטית חייבת להתגבר על שתי מגבלות בסיסיות של השכבה הפיזית: הראשונה היא העברת קצבי מידע גבוהים תוך מחסור מתמיד בתדרים והשניה היא דעיכת הקרינה עקב הסתרות והתאבכויות הורסות בהעדר קו ראייה. אחת הדרכים היעילות ביותר להתגבר על שתי מגבלות אלה היא ריבוי וגיוון של ערוצי קרינה מקבילים הידועה בשם: Diversity או MIMO Multi Input Multi Output.

שיטה זו מאפשרת:

1. שיפור היעילות הספקטרלית, כלומר העברת קצב מידע גבוה יותר $R[\text{bps}]$ ברוחב פס תדרים נתון $B[\text{Hz}]$, או הפעלת יותר משתמשים בכל פס תדרים נתון, כמעט עד חסם שנון.
2. שיפור הכיסוי המרחבי של הרשת האלחוטית, כלומר התגברות על דעיכת הספק עקב הפסדי הסתרות וריבוי נתיבים ומכאן הקטנת מספר תחנות הבסיס או נקודות הגישה והקטנת השטחים המתים.
3. שיפור האמינות והזמינות של התקשורת, הפחתת מספר הניתוקים וההפרעות ההדדיות.

מאמר זה מתמקד בשיקולים בבחירת האנטנות ובמדידתן ואינה כוללת את השיקולים הכוללים של תכנון מערכות התקשורת עם ריבוי משדרים ומקלטים. ספרות נרחבת ומעודכנת על מערכות תקשורת כאלו אפשר למצוא למשל במראי המקומות: [7], [8], [13], [14], [15].

הנחות היסוד לגבי הערוץ הן:

1. קיימות הסתרות חזקות בערוץ ובעיקר הפסדי רב-נתיב (multipath) ושינויי קיטוב. כידוע בערוץ עם קו ראייה אין יתרון משמעותי לשימוש בריבוי אנטנות.
2. ההסתרות וההפסדים קיימים בכל מרחב הערוץ ולא רק בחלקו, ובעיקר קיימות הסתרות פיזיות גם בסמוך לאנטנות. מקרה זה מתאים למיתארי Indoor, ולא למיתארי Outdoor, שבהם האנטנה מוצבת על תורן גבוה ובמרחק עשרות מטרים ממנה אין הסתרות כלל.
3. מטרת השימוש בריבוי אנטנות היא בעיקר להגדיל את הנצילות הספקטרלית, כלומר להגדיל את קצב המידע $R[\text{bps}]$ עבור רוחב סרט נתון $B[\text{Hz}]$.

העיקרון היסודי לגבי בחירת האנטנות הוא ריבוי אנטנות (עד כמה שמוכנים לשלם בעלויות החומרה ובשטח האנטנות) וגיוון מירבי מכסימלי בין האנטנות במיקום, בצורת ההצבה, בקיטוב, בעקום הקרינה וכו'. ככל שהאנטנות שונות זו מזו כך רמת הקליטה המשולבת משתפרת.

2. שיקולים בבחירת האנטנות

על סמך ההנחות שתוארו לעיל, ובעיקר במיתארי Indoor טיפוסיים, ניתן להגדיר את השיקולים בבחירת האנטנות כדלקמן:

1. קביעת מספר האנטנות (או מספר המקלטים / משדרים).
2. המרחקים הפיזיים בין האנטנות (בעיקר במונחים של אורך גל).
3. זוויות הסיבוב של האנטנות, המשפיעות על קיטוב הקרינה.
4. הכיסוי המרחבי של האנטנות (רוחב אלומה ופילוג הקרינה במרחב).
5. אנטנות "מאוזנות" מבחינה חשמלית עם רגישות נמוכה לסביבה הקרובה.

מבחינת הפרמטרים היסודיים של כל אנטנה ניתן להגדיר את המפרט של כל אנטנה **בנפרד** על פי הרשימה הבאה:

1. תחום תדרים
2. רמת תיאום (VSWR)
3. נצילות (מביאה בחשבון את כל סוגי ההפסדים)
4. קיטוב עיקרי וקיטובים משניים
5. רוחב אלומה בצידוד ורוחב אלומה בהגבהה
6. שבח מכסימלי מוחלט (כולל תרומת שני קיטובים ניצבים)
7. שבח ממוצע על פני גזרת כיסוי מבוקשת לעיתים מגדירים את השבח המינימלי ב-90% מגזרת הכיסוי המבוקשת

כאשר משלבים את האנטנות הנפרדות למערכת MIMO שלמה מגדירים את תכונות **המערך המשולב** על פי הרשימה הבאה:

1. רמת התיאום והנצילות של כל אנטנה כאשר היא מוצבת בתוך המערך.
2. הצימוד ההדדי בין אנטנות שכנות. הכוונה היא שמשדרים באנטנה אחת ובודקים את זליגת ההספק לאנטנות האחרות.
3. הקורלציה בין עקומי הקרינה של כל האנטנות. הכוונה היא לרמת הדמיון בין הכיסוי המרחבי של האנטנות השונות.
4. שטח המערך ועוביו וגורמים פיזיים נוספים כגון שימוש בחומרים סטנדרטיים וזולים, השפעת המארז הפלסטי ונוכחות קירות או הפרעות פיזיות קרובות.

3. מעטפת דרישות טיפוסית

כאשר מדובר על ערוץ Indoor בתדרים גבוהים יחסית (כגון 2.2 – 2.7 GHz או 3.1 – 3.7 GHz או 5.1 – 5.9 GHz) מקובל לדרוש מן האלמנט הבודד את מעטפת הביצועים הבאה:

1. רמת תיאום: $VSWR = 3$ כאשר היעד הרצוי $VSWR = 2$
2. נצילות גבוהה מ-50%
3. קיטוב מעורב, כלומר לינארי עיקרי ולינארי ניצב ברמה של -6 to 0 dB
5. אלומה רחבה ככל שניתן (לפחות 120° בשני החתכים הראשיים)
6. שבח נמוך יחסית של -6 dBi to 0 dBi

ממערכת האנטנות דורשים את מעטפת הביצועים הבאה:

1. צימוד בין אלמנטים שכנים -13 to -15 dB כאשר היעד הרצוי -18 dB
2. קורלצית מעטפת בין אלמנטים שכנים $\rho < 0.4$ כאשר היעד הרצוי $\rho < 0.2$

להשגת מעטפת זו מומלץ לנקוט בשיטות הצבה כדלקמן;

1. שימוש בגיוון מרחבי, הצבת האלמנטים **במרחקים שונים** של לפחות $\lambda/4$ זה מזה.
2. שימוש בגיוון קיטובי, הצבת האלמנטים **בסיבובים שונים** זה מזה עד כמה שניתן.
3. שימוש בגיוון זוויתי, הצבת האלמנטים **בכיוונים שונים** כדי לחזק ריבוי החזרות בערוץ.
4. שימוש **בגיוון אלומות**, סינתזה של אלומות שונות עם דמיון מינימלי ביניהן.

מאמרים מקיפים המטפלים באנטנות קטנות וניידות הם: [1], [3] ומאמרי סקירה על ביצועי התקשורת במערכות מרובות אנטנות נוכל למצוא למשל במראי המקום [2], [4], [5], [12].



איור 1 מודם אלחוטי עם שתי אנטנות תיל ניצבות זו לזו (חברת ODF)



איור 2 שתי אנטנות סלולריות לרכב עשויות לאפשר Diversity



איור 3 שש אנטנות (פאנלים מודפסים) למטרת MIMO (Boxx)

4. דוגמאות תכנ מן הספרות

בספרות הענפה העוסקת במערכות תקשורת מרובות אנטנות מודגש היטב כי ריבוי אנטנות מביא תועלת רק בערוץ אלחוטי עם הסתרות חזקות, כאשר אלומות הקרינה של האנטנות רחבות ככל שניתן, ושונות זו מזו כך שהקורלציה ביניהן נמוכה. הקיבולת הספקטרלית עולה ככל שמספר המשדרים והמקלטים גדול יותר אך משיקולים הסתברתיים אפשר להוכיח כי עדיף לממש מספר זה של משדרים / מקלטים בשני צידי הערוץ.

איור 4 [4] מציג חישוב של היעילות הספקטרלית בתלות במספר אנטנות השידור ועבור סביבות ערוץ שונות. גם כאן רואים שיפור הדרגתי ביעילות הספקטרלית ככל שמספר האנטנות גדל אולם השיפור אינו לינארי ובדרך כלל, וגם משיקולי עלות, מסתפקים ב-4 עד 6 אנטנות בכל צד של הערוץ.

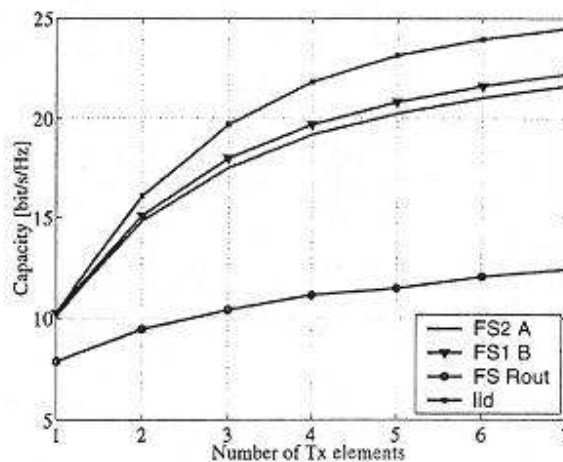


Fig. 11. Capacity as a function of number of FS antenna elements in different environments. The number of elements has been four at the MS.

איור 4 היעילות הספקטרלית המדודה בתלות במספר האלמנטים עבור סביבות ערוץ שונות [4]

מאמר מנחה מקיף במיוחד [5] סוקר את שיקולי התכנ הכלליים לאנטנות MIMO. מבין השיקולים המוצגים בו יש לציין במיוחד את החשיבות להשגת קורלציה נמוכה בין האנטנות השונות. ההמלצה הברורה היא לבחור אלמנטים קורנים עם אלומת קרינה רחבה ויעילות קרינה גבוהה ולהציב אותם בתצורה גיאומטרית מגוונת.

המרחק הדרוש בין האנטנות הוא בין חצי אורך גל עד אורך גל שלם. הצבה במרחקים גדולים יותר מאורך גל אינה מביאה תועלת, אך הצבה במרחקים הגדולים מרבע אורך גל מביאה תועלת מופחתת במידת מה. איור 5 מציג השוואה טיפוסית של היעילות הספקטרלית בתלות במרווח בין אלמנטים שכנים עבור סוגי אנטנות שונות. מאיור זה רואים היטב כי המרווח האופטימלי הוא $0.5\lambda - 0.8\lambda$ אך שיפור משמעותי מושג גם במרווח של $0.3\lambda - 0.5\lambda$.

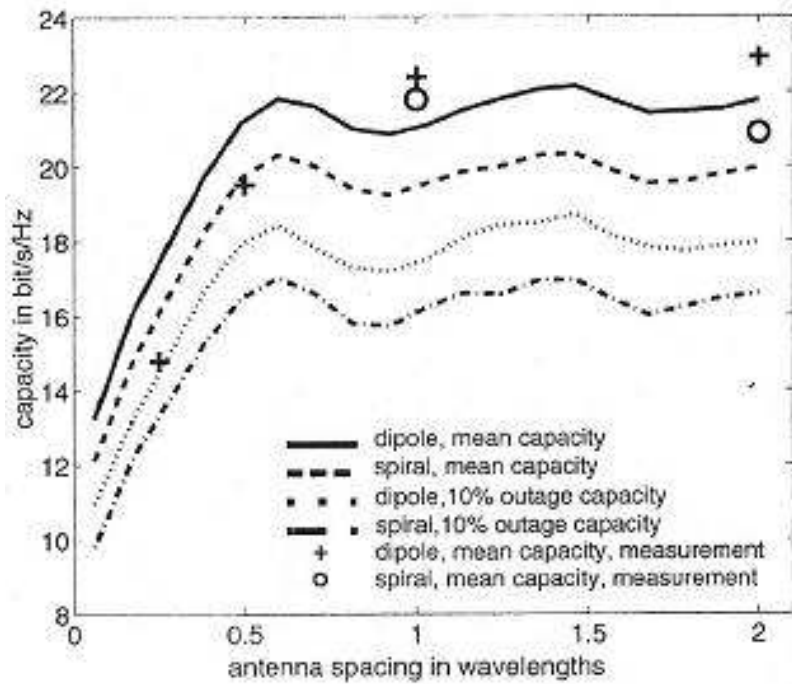
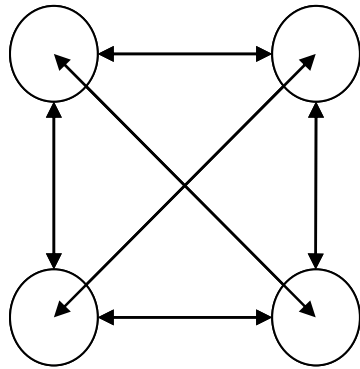


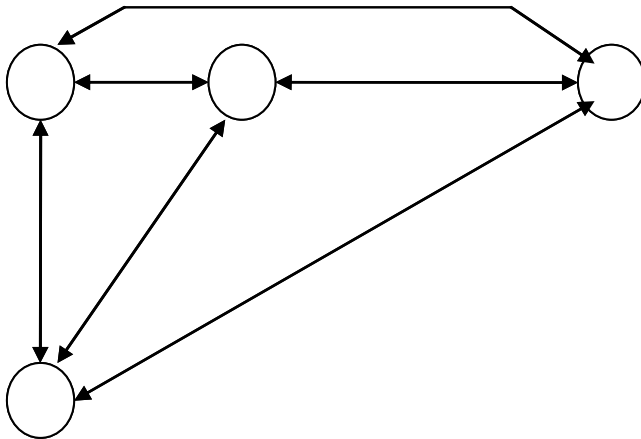
Fig. 11. Simulated and measured outage capacities for arrays of 2 dipole and spiral antennas in an indoor environment as a function of antenna spacing. Reprinted from [117] with permission (© 2002 IEEE).

איור 5 היעילות הספקטרלית בתלות במרחק בין האנטנות [5]

נקודת תכן משמעותית נוספת היא שרצוי לקבוע את מיקומי האלמנטים באופן לא אחיד כך שיווצרו מרחקים מגוונים של התאבכויות ככל האפשר. למשל באיור 6א רואים הצבה מרחבית אחידה של 4 אנטנות שיש ביניהן 2 מרחקים טיפוסיים ובאיור 6ב רואים הצבה מרחבית לא אחידה של 4 אנטנות שיש ביניהן 6 מרחקים טיפוסיים ולכן היא עדיפה מבחינת MIMO.



איור 6א הצבה אחידה של 4 אלמנטים עם 2 מרחקים טיפוסיים



איור 6ב הצבה לא אחידה של 4 אלמנטים עם 6 מרחקים טיפוסיים

ריבוי קיטובים נמצא כטכניקה יעילה במיוחד להקטנת הצימוד בין אלמנטים שכנים ולהקטנת הקורלציה בין עקומות הקרינה ומכאן לשיפור משמעותי בביצועי הערוץ. איור 7 מציג חישוב תיאורטי המראה את המספר האפקטיבי של ערוצי התקשורת בתלות בפיזור הזוויתי של קיטובי האנטנות. רואים שהאנטנות מוצבות עם ריבוי זווית סיבוב (קיטוב) ומכאן שמספר הערוצים האפקטיבי גדול יותר. לריבוי קיטובים יש יתרון נוסף והוא שניתן "לדחוס" את המערך לתוך שטח קטן יותר מבלי לקלקל את הצימוד בין אלמנטים שכנים. באופן מעשי, ניתן להזין אלמנט מיקרוסטרטיפ יחיד בשני קיטובים ניצבים ולקבל צימוד מסדר גודל של 20 dB ואף גבוה יותר.

במאמר מעמיק ויסודי אחר [2] השוו ביצועים של מערכות תקשורת אלחוטיות מרובות אנטנות, עם גיוון מרחבי, קיטובי ואלומתי. תאור הצבת האנטנות ועקומי הקרינה בשלושת המקרים מובא באיור 8. בניסויים שנערכו בתנאי הסתרות שונים נמצא שיפור משמעותי בביצועי הערוץ, למשל עבור Diversity Gain, בשלושת סוגי הגיוון, גם כאשר המרחק בין האנטנות היה קטן מ- 0.2λ והקורלציה היתה קטנה מ-0.7. בתנאי Indoor נמצאה עדיפות קלה לגיוון קיטובי ובמיוחד כאשר הקורלציה קטנה מ-0.2. תוצאה זו חוזרת בספרות ובדרך כלל נמצא שגיוון קיטובי נותן תוצאות טובות יותר מקיטוב מרחבי, הן מבחינת זמינות הערוץ והן מבחינת קיבולת המידע.

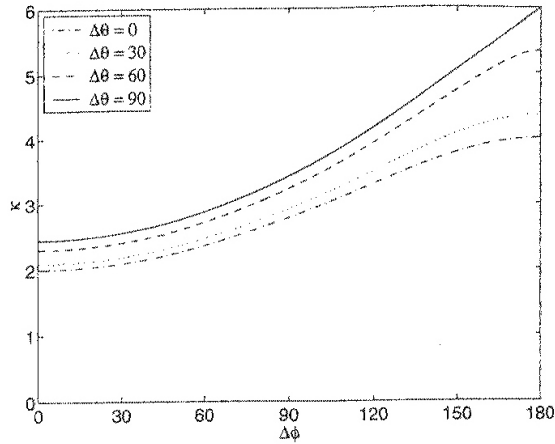


Fig. 12. Plot of the effective number of communication channels as a function of azimuthal angle spread for several different elevation angle spreads.

איור 7 מס' ערוצים אפקטיבי בתלות במרווח הסיבוב של האנטנות [5]

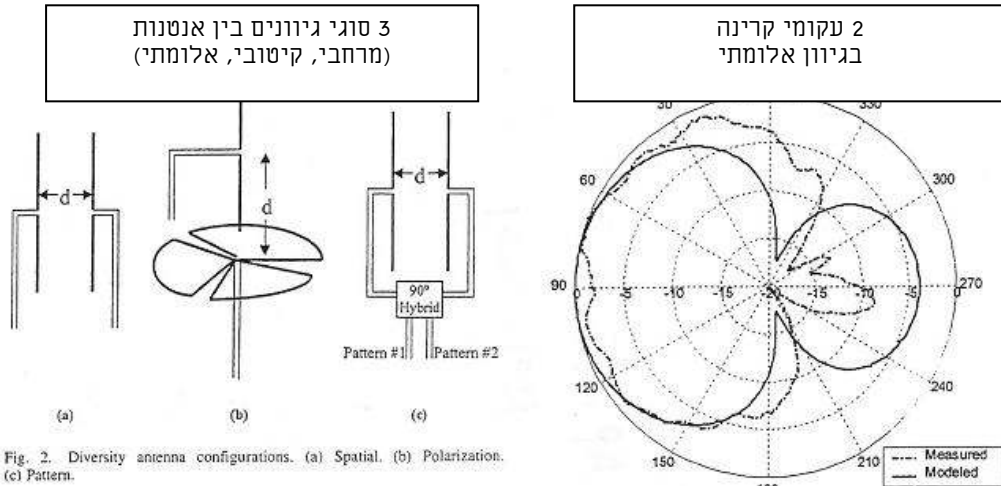


Fig. 2. Diversity antenna configurations. (a) Spatial. (b) Polarization. (c) Pattern.

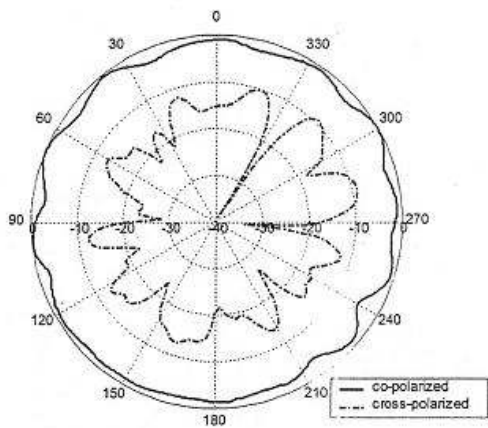


Fig. 3. Normalized measured co- and cross-polarized azimuth (E -plane) patterns for the big wheel antenna. Mean copolarized to mean cross-polarized is approximately 13 dB. Maximum copolarized to maximum cross-polarized is approximately 9 dB.

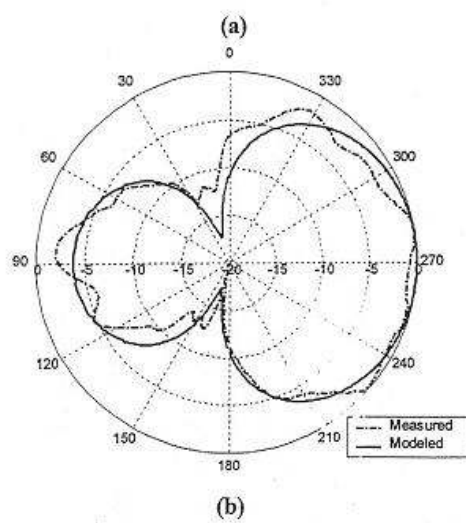


Fig. 4. Normalized measured and modeled patterns for the pattern diversity antenna configuration of Fig. 2(c) with antenna spacing $d = 0.25$ wavelength: (a) pattern 1 and (b) pattern 2.

2 עקומי קרינה
בגיוון קיטובי

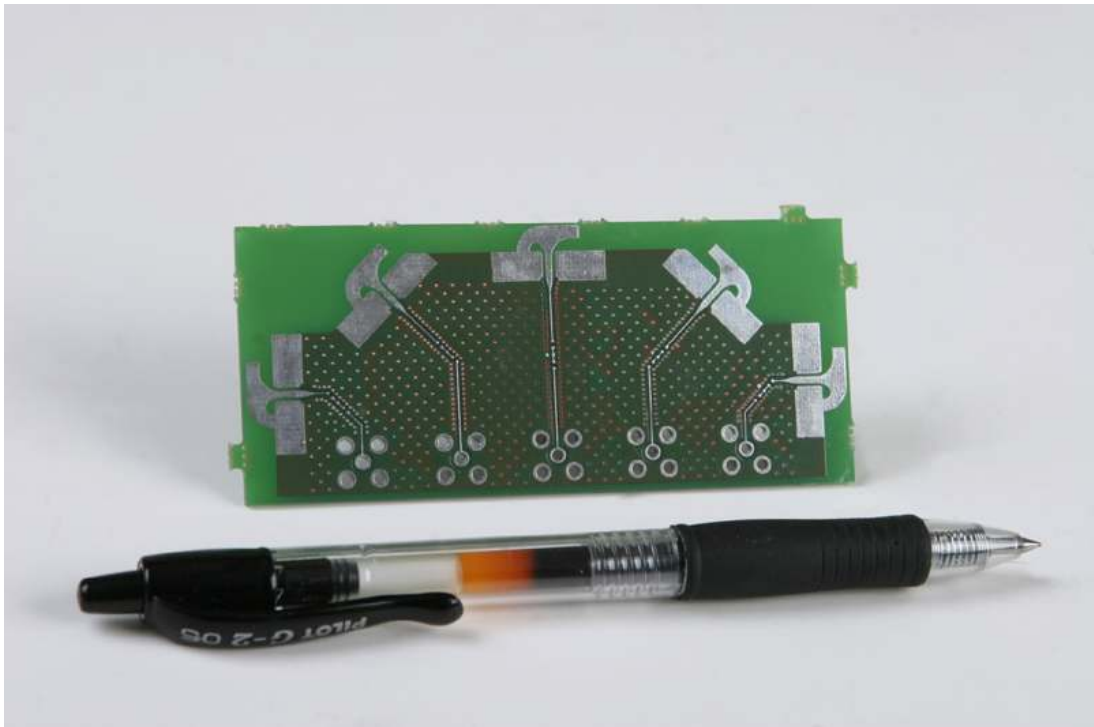
איור 8 תיאור 3 סוגי גיוון (מרחבי, קיטובי, אלומתי) ועקומות הקרינה עבור גיוון קיטובי ועבור גיוון אלומתי [2]

5. סוגי אנטנות מומלצים

בחירת האנטנות מושפעת כמובן מן הדרישות החשמליות. עבור רוחבי סרט צרים יחסית עד 10% (כגון 2.4 – 2.5 GHz או 5.1 – 5.4 GHz) אפשר להשתמש במקרני מיקרוסטריפ. כדאי להרחיב את האלומה על ידי הקטנת רוחב האלמנט או שימוש במצע דיאלקטרי עליון או תחתון. כמו כן אפשר להשתמש בדיפולים מאוזנים (עקום קרינה רחב בהגבהה) או במונופולים (עקום קרינה צר יותר בהגבהה) או בלולאות.

עבור רוחבי סרט גדולים יחסית עד 20% (כגון 2.2 – 2.7 GHz או 5.1 – 5.9 GHz) אפשר לבנות אלמנט מיקרוסטריפ מרובה תדרים או להשתמש באנטנות ספירליות או לתכנן אנטנות הדרגתיות רחבות סרט במיוחד, אך ברוב המקרים מעדיפים להשתמש במקרן PIFA Printed Inverted F Antenna שהוא אלמנט קטן יחסית, עם אלומה רחבה, מרובה קיטובים ונוח במיוחד לאינטגרציה לתוך PCB. לעיתים ניתן להשתמש במקרן PIFA עם ריבוי קווים ולהשיג ריבוי תדרים וקיטובים. יש להדגיש כי אנטנת PIFA היא קטנה ולכן ניתן להשיג צימוד הדדי נמוך בין אלמנטים שכנים. ידוע גם כי אנטנת PIFA יכולה בתנאים מסוימים להגיע ליעילות מעל 80% ולקרן באופן כמעט איזוטרופי. הצירוף של אנטנה יעילה, רחבת אלומה, רב קיטובית, עם פוטנציאל לצימוד נמוך, הופכת את ה-PIFA לאנטנה מועדפת כמעט ברוב תכנוני ה-MIMO.

אנטנות מיקרוסטריפ ואנטנות חריץ מתאימות במיוחד למימוש כאשר קיים משטח אדמה אינטגרלי והאנטנות פועלות רק בחצי מרחב. אנטנות דיפול ומונופול ללא משטח אדמה, מתאימות במיוחד למימוש בגזרה רחבה Omni Directional. מובן כי ייתכנו פתרונות ביניים של PIFA או חריצים מעל משטח אדמה.



איור 9 חמש אנטנות PIFA למטרות MIMO (חברת אמימון)

6. היבטים של מדידת האנטנות

מראה מקום [12] מציג מרחב גדול של שיקולים בתכנון מערכות MIMO ומדגיש את הפרמטרים העיקריים שיש לקחת בחשבון בתכנון האנטנות: יעילות גבוהה, מבנה קומפקטי המאפשר לדחוס כמה אנטנות לתוך שטח קטן, צימוד נמוך בין אנטנות שכנות וגיוון מכסימלי באלומות הקרינה השקול לקורלציה נמוכה בין האנטנות.

השאלה הגדולה המתעוררת בהקשר זה היא מהן המדידות הקריטיות המאפשרות להשוות בין פתרונות שונים ולבחור את הפתרון האופטימלי. מצד אחד קיימת מדידה פשוטה ומהירה של הצימוד ההדדי. מצד שני קיימת מדידה מסובכת ויקרה של עקומי קרינה מרובים שמהם ניתן לחלץ את הקורלציה. מסקנת המחבר היא שברוב המקרים שבהם מדובר על ערוץ מרובה הסתרות, מדידת הצימוד מהווה אינדיקטור טוב לקורלציה (ולאיכות הערוץ). לכן כדאי להשקיע בעיקר בהורדת הצימוד בין מקרנים שכנים.

חומר טכני נרחב על טכניקות מדידה מודרניות של אנטנות קטנות ניתן למצוא במראי מקום: [6],[9],[10],[11]. נביא כאן את ההיבטים העיקריים הרלבנטיים לנושא הנדון והם: מדידת יעילות, מדידת קורלציה ומדידת צימוד הדדי.

למדידת יעילות אנטנה יש צורך לבצע עשרות רבות של חתכי קרינה מפני שחתכי קרינה בודדים אינם מצביעים בהכרח על יעילות האנטנה. כיווניות אנטנה Directivity מוגדרת לפי:

$$(1) \quad D = 4\pi \frac{P(\theta, \phi) \max}{Prad}$$

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

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

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

$$(3) \quad \eta = \frac{Prad}{Pin} = \frac{G}{D} = G \text{ (dBi)} - D \text{ (dBi)}$$

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.

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 המוצג באיור 10 זוכה לפופולריות רבה אצל יצרני אנטנות אלחוטיות.

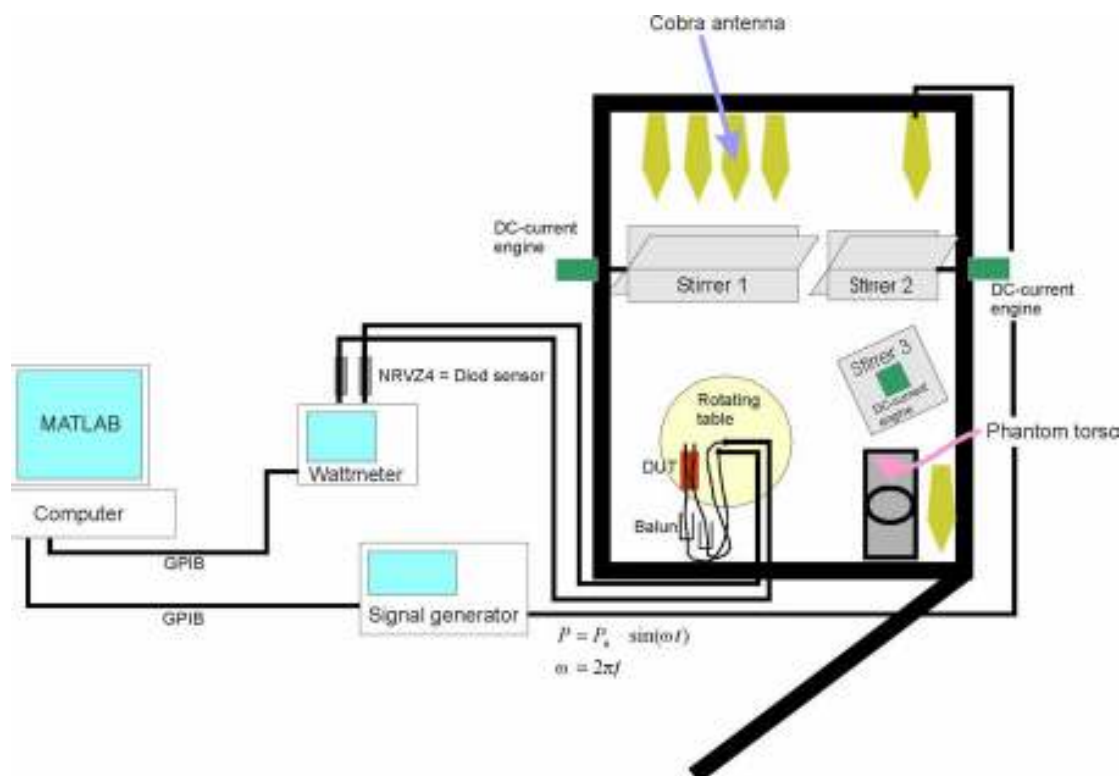


איור 10 מטווח אנטנות SATIMO המורכב מקשת גלאים

בקרב אנשי המקצוע רווחת הדעה שקורלצית 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.

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 [9]-[11].

מדידת צימוד הדדי היא לכאורה תהליך פשוט ביותר של מדידת מטריצת S בנתח רשת. הבעיה היא שאם מציבים את האנטנות בחלל חופשי הן אינן מייצגות את מצבן בערוץ התקשורת. לכן מומלץ לבצע את מדידות הקורלציה והצימוד בתא הדהוד קטן המדמה את הערוץ Reverberation Chamber כמודגם באיור 11. בתא זה מתקינים מערבלים עם החזרות משתנות. רצוי לסובב את האנטנות על גבי שולחן מסתובב (כאשר האנטנות אינן על ציר הסיבוב). המדידות המתקבלות הן בעלות אופי סטטיסטי ולא דטרמיניסטי כפי שאכן קיים בערוץ.



איור 11 מבנה סכמטי של תא הדהוד Reverberation Chamber [6]

7. סיכום

אנטנות מתאימות ליישומי MIMO צריכות להיות: קטנות וקומפקטיות, מתואמות לאימפדנס הכניסה של מכשיר הרדיו, בעלות יעילות גבוהה מ-50%, בעלות אלומת קרינה רחבה ושבח נמוך יחסית, בעלות קיטוב מעורב ולא רגישות לנוכחות גופים אחרים בסביבתן הקרובה.

כאשר משלבים את האנטנות במערך MIMO צריך לוודא שרמת התיאום נשמרת לפחות ברמה של $VSWR < 3$, שרמת הצימוד ההדדי בין אלמנטים שכנים היא בתחום -15 to -20 dB ושקורלצית המעטפת בין עקומי הקרינה היא בתחום שבין 0.2 עד 0.4.

מבין שיטות הגיוון העיקריות: גיוון מרחבי, גיוון קיטובי, גיוון אלומתי עדיף לבחור בגיוון מרחבי עם מרווחים של $0.2\lambda - 0.8\lambda$ בתוספת גיוון באוריינטציה של האלמנטים התורמת לגיוון הקיטובי.

מתברר שמדידת הצימוד ההדדי בין האלמנטים, שהיא מהירה ופשוטה לביצוע, מהווה אינדיקטור מייצג לרמת הקורלציה בין האלמנטים. מדידת קורלציה כמו גם מדידת יעילות הן מדידות מורכבות ויקרות הדורשות מיפוי שדה הקרינה המלא בחתכים רבים, או לחילופין שימוש במערכת מדידה אוטומטית המסוגלת למפות את שדה הקרינה השלם במהירות. דא עקא שמדידת הצימוד צריכה להיעשות בתנאים קרובים לתנאי הערוץ ולא בחלל חופשי. לכן במעבדות מתקדמות שונות משתמשים בתא הדהוד Reverberation Chamber כדי לבצע את המדידות עם דימוי של הערוץ האלחוטי המלא.

8. מראי מקום

- [1] A.K. Skrivervik, J.F. Zurcher, O. Staub and J.R. Mosig, PCS Antenna Design: The Challenge of Miniaturization. *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, Vol 43, No.6, August 2001, pp. 12-26.
- [2] C. B. Dietrich, K. Dietze, J. R. Nealy and W. L. Stutzman, Spatial, polarization and pattern diversity for wireless handheld terminals, *IEEE Trans. AP-49*, September 2001, pp. 1271-1281.
- [3] H. Morishita, Y. Kim and K. Fujimoto, Design Concept of Antennas for Small Mobile Terminals and The Future Perspective, *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, Vol 44, No. 5, October 2002, pp. 30-43.
- [4] K. Sulonen, P. Suvikunnas, L. Vuokko, J. Kivinen and P. Vainikainen, Comparison of MIMO Antenna Configurations in Picocell and Microcell Environments, *IEEE Journal on selected areas in communications*, Vol 21, June 2003, pp. 703-712.
- [5] M.A. Jensen and J.W. Wallace, A Review of Antennas and Propagation for MIMO Wireless Communications, *IEEE AP-52*, November 2004, pp. 2810-2824.
- [6] V. Plicanic, Antenna Diversity Studies and Evaluation, MSc Thesis, Lund University, 2004.
- [7] A. El Zooghby, *Smart Antenna Engineering*, Artech House, 2005.
- [8] S. Barbarossa, *Multiantenna Wireless Communications Systems*, Artech House, 2005.
- [9] Y.C. Vardaxoglou and J.R. James, Mobile Handset Antennas, Chapter 36 in: Volakis J.L. (Editor) *Antenna Handbook*, McGraw Hill, 2007.

- [10] W. Wiesbeck and C. Kuhnert, Propagation Models and Antennas for MIMO, Chapter 57 in: Volakis J.L. (Editor) *Antenna Handbook*, McGraw Hill, 2007.
- [11] P. S. Kildal, Multipath Techniques of Handheld / Terminal Antennas, Chapter 58 in: Volakis J.L. (Editor) *Antenna Handbook*, McGraw Hill, 2007.
- [12] R. Vaughan, Design and Evaluation of Antennas for Communications with Diversity / MIMO, **IEEE AP symposium**, Tutorial Series, June 2007.
- [13] S.R. Saunders and A. Aragon Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, John Wiley, second edition 2007.
- [14] Z.N. Chen (Editor) *Antennas for Portable Devices*, John Wiley, 2007.
- [15] K. Fujimoto and J.R. James, *Mobile Antenna System Handbook*, Artech House, second edition, 2008.