

אוניברסיטת תל אביב  
הפקולטה להנדסה  
בית הספר להנדסת חשמל

# **המעבדה המתקדמת למיקרוגלים**

קורס מס' 0512.4890

## **תדריכי ניסויים**

גרסה 10/21

25 פברואר 2021

אחראי אקדמי:  
פרופ' אליהו גרבי

מדריך:  
יואב שושני

## הקדמה

1. הקורס "מעבדה מתקדמת למיקרוגלים" מפגיש את התלמידים באופן בלתי אמצעי עם תופעות בתחום המיקרוגל, וכן עם התקנים, שיטות מדידה, ומעגלי מיקרוגל בסיסיים בתחום זה.
2. מרכיב מרכזי בניסויים השונים הוא ההשוואה בין התיאוריה לבין הניסוי, עם דגש על גישה אנליטית. בנוסף, נעשה שימוש בסימולציה נומרית לצורך אימות התוצאות וכדי להתנסות בכלי שימושי זה. קורס המעבדה כולל גם משימות תכנון וביצוע, בגישה של סינתזה הנדסית.
3. המעבדה מצוידת במכשור חדיש ויקר יחסית (כגון נתח רשת ווקטורי Keysight ENA E5063A) המאפשר תכנית לימודים עדכנית במעבדה זו. חוברת תדריכים זו מובאת במהדורה חדשה בהתאם. תיקונים, הערות והצעות של משתתפי קורס המעבדה ביחס לחוברת זו יתקבלו בברכה.
4. תכנית הקורס כוללת 12 ניסויים שמשך כל אחד מהם כשעה וחצי. בכל מפגש מעבדה של 3 שעות נערכים שני ניסויים עוקבים בזה אחר זה.
5. לכל ניסוי מוגדר יעד לימודי, רשימת קריאה ושאלות להכנה, רשימת ציוד ורכיבים, מטרת הניסוי, מהלך הניסוי, ודרישות לסיכום הלקח הנלמד.
6. הניסויים מתבצעים בזוגות, אך מטלות ההכנה וסיכום הניסויים הן אישיות.
7. ההנחיות מנוסחות בגוף שני יחיד או רבים בהתאם לאופן הביצוע (באופן אישי או בזוג, בהתאמה) והן מכוונות כמובן לתלמידות ולתלמידים כאחד.
8. במסגרת ההכנה, יש ללמוד את חומר הרקע על פי תדריך הניסוי תוך הסתייעות במקורות שונים, להשיב על שאלות ההכנה, ולהכין את מערכי הניסוי ורישום התוצאות. בפרט, יש ללמוד במסגרת ההכנה את אופן תפעול המכשירים בניסוי על פי תדריכי היצרן.
9. לפני כל ניסוי נערך בוחן קצר, כולל הרקע התיאורטי הנדרש להבנת הניסוי.
10. יש לתעד כל פעולה במעבדה בכתב יד במחברת מתאימה, ובכלל זה סכמות של מערכי ניסוי, פרטי המכשור בו נעשה שימוש, ההתקנים הנבדקים, פרמטרי המדידות ותוצאותיהם עם הפניות לקבצי המחשב המתאימים, וזאת על פי כללי GLP (Good Laboratory Practice) המקובלים בעבודה מעבדתית (ע"ע GLP).
11. במסגרת דו"ח הסיכום יש להציג את מערכי הניסוי בהם נעשה שימוש ואת כל התוצאות הגולמיות שהתקבלו באמצעותם. יש לנתח תוצאות אלו בהשוואה למודלים התיאורטיים הרלוונטיים. בנוסף, יש להשיב על שאלות הסיכום שבסוף כל תדריך.

## תודות

להכנת חוברת תדריכים זו בגרסאותיה הקודמות תרמו מדריכים שלימדו בעבר במעבדה המתקדמת למיקרוגלים, ובהם ד"ר אבי שהדי, מר רפאל יפה, ד"ר יהודה מאיר, ומר אמיר שלף.

## הוראות בטיחות

1. במעבדה זו חלות במלואן הוראות הבטיחות של האוניברסיטה ושל הפקולטה להנדסה. בפרט, יש לעיין בהנחיות הבטיחות הכלליות באתר <http://safety.tau.ac.il/information> ולפעול על פיהן. בנוסף, חלות במעבדה זו הוראות הבטיחות המפורטות בהמשך.
2. אין לעבוד לבד במעבדה למיקרוגלים. יש לוודא נוכחות במעבדה של אדם אחד נוסף לפחות.
3. בתחילת העבודה, יש להכיר מיקום מפסק המתח הראשי, מטף הכיבוי, ורשימת הטלפונים למקרה חירום (כולם ליד דלת הכניסה למעבדה).
4. אין להפעיל מכשור כלשהו במעבדה ללא אישור מדריך או אחראי מעבדה.
5. בפרט, אין להפעיל מקור קרינה כלשהו ללא נוכחות מדריך.
6. בכל מקרה שמכשיר או אביזר כלשהו (כגון שקע חשמלי) נראה לא תקין מבחינה בטיחותית, אין להשתמש בו ויש לדווח על כך מיד למדריך.
7. אין להפעיל מקורות קרינת מיקרוגל ללא עומס מתאים.
8. אין לשדר באנטנה כלשהי לתוך חלל המעבדה הספק העולה על 1 mW (0 dBm).
9. בכל מקרה יש לקצר משך זמן שידור ככל האפשר.
10. במקרה של תקלה בטיחותית, יש לנתק תחילה את אספקת המתח במפסק הראשי של המעבדה.
11. אין לבצע שינוי או תיקון במכשיר חשמלי כלשהו.
12. אין לגעת במתקן חשמלי כלשהו בידיים רטובות. במקרה שמכשיר או סביבתו לחים מסיבה כלשהי, יש להודיע על כך למדריך.
13. אין לגעת במכשירים, מערכות, אביזרים או חומרים שאינם שייכים לניסוי.
14. במקרה שרפה, הכיבוי יעשה מיידית באמצעות מטף כיבוי. בנוסף, יש להזעיק מיד את מוקד הביטחון של האוניברסיטה בשלוחה 5555 או 8222 (קידומת 03-640 בקו חוץ).
15. בסיום הניסוי יש לכבות את המכשירים הנייחים, לנתק מהחשמל את המכשירים הניידים, ולהחזיר למקומם את כל הרכיבים בהם נעשה שימוש בניסוי.
16. אין להכניס דברי אוכל או שתייה למעבדה.
17. נא להגיע לביצוע הניסויים בנעליים ולבוש מתאים (אפשר בסנדלים רכוסים אך לא בכפכפים).

## רשימת הניסויים במעבדה

### 1. הולכת גלים:

- תופעות בסיסיות בגלבו מלבני (נפיצה, קטעון, אופני התפשטות).
- גלבו מחורץ - מדידות אורך-גל ועכבת עומס.
- הדגמת תדר הקטעון בגלבו.
- המחשת תבנית גל עומד בגלבו מלבני (חריכת נייר בתנור מיקרוגל מוסב לממד אחד).

### 2. מכשירי מדידה למיקרוגל:

- דיודת גילוי למדידת הספק.
- מד תדר מהודי.
- נתח תדר: מבנה ועקרון פעולה, מדידות ספקטראליות.
- נתח רשת ווקטורי: מבנה ועקרון פעולה, תכונות, שימושים, תפעול.

### 3. רכיבי מיקרוגל פסיביים בגלבו:

- הכרת מערך רפלקטומטר – מדידת מקדמי החזרה והעברה באמצעות מצמד כיווני.
- הכרת רכיבי מיקרוגל שונים בגלבו בתחום  $X$  כגון מסנן, מצמד, איזולטור, סירקולטור.
- מדידות פרמטרי פיזור לרכיבים הנ"ל באמצעות נתח רשת ווקטורי.

### 4. מקורות מיקרוגל:

- הכרת מתנדי Gunn (או VCO), מגבר עם משוב חיובי.
- מדידות באמצעות נתח תדר: רעש פאזה, יציבות.

### 5. גלאים וערבלים:

- גלאי דיודה Schottky.
- הכרת פרמטרים של ערבול, אפיון ערבול, סוגי ערבלים.

### 6. תיאום עכבות:

- ייצוג עכבה באמצעות דיאגרמת סמית.
- תיאום עכבות באמצעות יתד אחת.
- תיאום עכבות באמצעות Magic-T ושתי יתדות.

### 7. מגברים:

- הכרת פרמטרים של מגבר, אפיון פרמטרי מגבר,  $IP_3$ , נקודת דחיסה 1dB.
- יחס אות לרעש (SNR), שרשור מגברים והשפעה על SNR.
- מדידות מגבר בגישת "קופסה שחורה".
- מגבר מיקרוסטריפ פתוח.

**8. רכיבים במעגלי מיקרוסטרופ:**

- א. מדידת פרמטרי S של רכיבי מיקרוגל פסיביים.
- ב. קו מיקרוסטרופ, מפצל, מצמד, Hybrid 90, מסנן BPF.

**9. תכנון ובניית התקנים פסיביים במיקרוסטרופ:**

- א. תכנון וסימולציות בתוכנת ANSOFT Designer או דומה.
- ב. בנייה עצמית של התקנים פסיביים באמצעות מדבקות ממתכת.
- ג. תכנון, בניית ומדידת מסננים LPF, BPF.
- ד. תכנון, בניית ומדידת מעבר זוויתי, מתאם עכבות.

**10. מדידת מקדם דיאלקטרי:**

- א. מדידת מקדמים דיאלקטריים של חומרים שונים תוך שימוש בקו מיקרוסטרופ כמהוד.
- ב. מדידת מקדמים דיאלקטריים של נוזלים ואבקות.

**11. אנטנות וקרינה:**

- א. מדידות בשדה רחוק, מדידת הגבר של אנטנת שופר.
- ב. מדידת עקומי קרינה של אנטנות שונות בקיטובים שונים.
- ג. ביקור במטווח אנטנות ממוחשב.

**12. יישומי מכ"ם:**

- א. אפקט דופלר, מדידת מהירות, שח"ם.
- ב. מדידות שח"ם של גופים שונים.
- ג. מימוש גלאי FM, מכ"ם Linear-FM.

**13. יישומי תקשורת (אופציונאלי):**

- א. שידור FM ליניארי. גילוי FM, מד תדר מהודי כגלאי FM.
- ב. ערוץ תקשורת אודיו מאופנן על גל-נושא מיקרוגל.

**ספרים מומלצים ללימוד מכין (רשימה חלקית, מקורות נוספים זמינים ברשת)**

1. S. J. Orfanidis, "Electromagnetic Waves and Antennas," Rutgers University, <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>
2. Behzad Razavi, RF Microelectronics, 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall, 2011.
3. R. E. Collin, "Foundation for Microwave Engineering," McGraw Hill, 2<sup>nd</sup> Edition, 1992 (or 3<sup>rd</sup> Edition, 2000).
4. D. M. Pozar, "Microwave Engineering," Wiley, 3<sup>rd</sup> Edition, 2005.
5. C. Balanis, "Antenna Theory, Analysis and Design," Wiley, 2<sup>nd</sup> Edition, 1997.

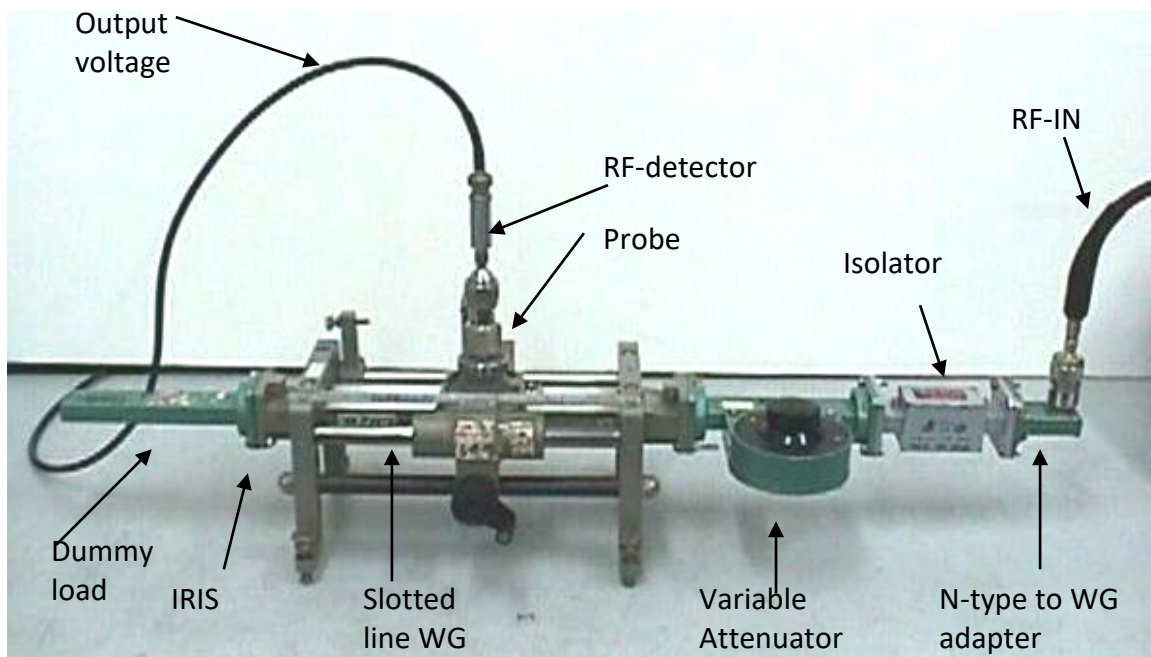
## ניסוי מס' 1 – הולכת גלים

### יעד לימודי

1. הכרת תופעות שונות במוליכי גלים, כגון אופני התפשטות, תופעת הקטעון, גל עומד, ודיספרסיה.
2. הכרת מערך המדידה באמצעות גלבו מחורץ.
3. הכרת נתח תדר ורשת נייד ושימוש בו כמד הספק.

### מבוא

בניסוי זה נכיר את הגלבו המלבני מסוג WR90 ונמדוד פרמטרי S עבורו. גלבו WR90 הוא גלבו מלבני בעל חתך רוחבי  $0.9" \times 0.4"$  (כלומר  $22.9 \times 10.2 \text{ mm}^2$ ). האופן הבסיסי  $TE_{10}$  של WR90 מתקיים לבדו בתחום 6.6-13.1 GHz. תחום העבודה המקובל עבורו הוא 8-12 GHz, המוכר בכינוי X-Band. מערך הניסוי להכרת התופעות הבסיסיות במוליך הגלים המלבני מוצג באיור מס' 1.1.



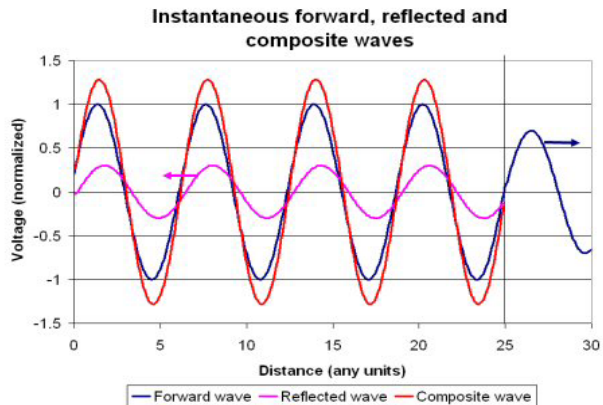
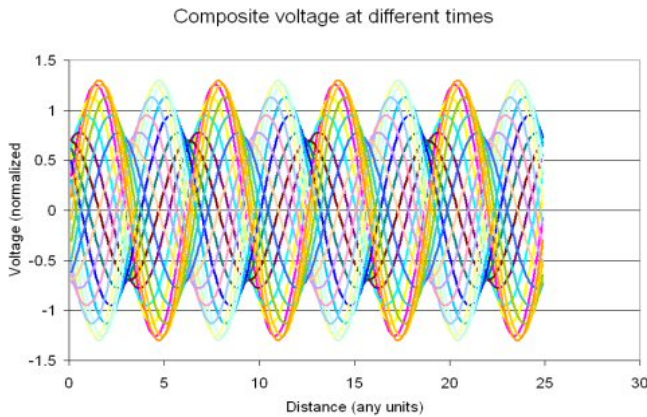
איור מס' 1.1: מערך ניסוי בסיסי למדידת התפשטות גל א"מ בגלבו מלבני

### מדידת יחס גלים עומדים (VSWR)

בניסוי זה נמדוד את יחס הגלים העומדים (יג"ע, VSWR) בגלבו מחורץ עבור עומסים שונים ובעזרתו נחשב את העכבות שלהם. נעמוד על ההבדלים ב VSWR במצבים שונים כגון קצר ונתק בקצה הקו, או מצב בו נשאף לקו מתואם. איורים מס' 1.2 א' ו-ב' מציגים בצורה איכותית היווצרות תבנית גלים עומדים כתוצאה של סיכום גל מתקדם וגל מוחזר בקו לא מתואם בזמנים שונים.

(ב)

(א)



איור מס' 1.2: (א) היווצרות תבנית גלים עומדים כסכום גל מתקדם וגל מוחזר בקו לא מתואם.

(ב) השתנות תבנית הגלים העומדים (בייצוג מתחים) בזמנים שונים.

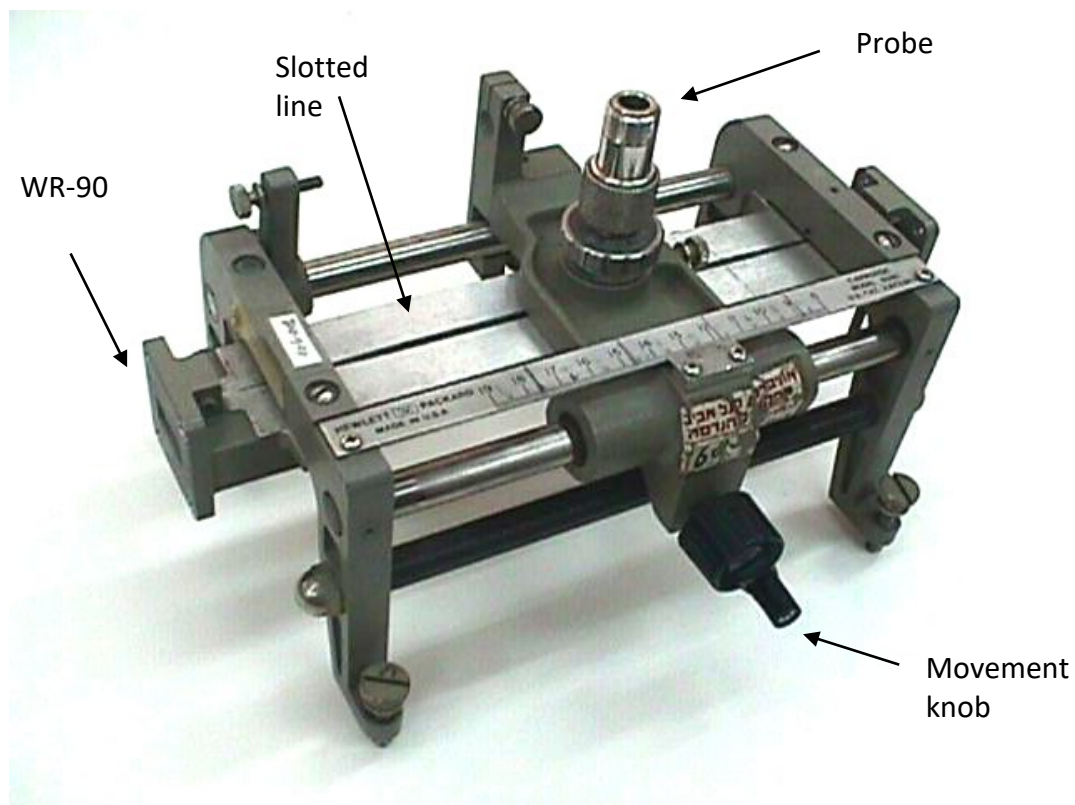
השדה האלקטרומגנטי בכל נקודה לאורך קו התמסורת מורכב מהגל הנע מהמקור ומהגל המוחזר מאי הרציפות בקו (במקרה זה העומס). האמפליטודה והפאזה של הגל המוחזר נקבעים ע"י העכבה בנקודת ההחזרה וע"י ההפסדים לאורך הקו. מקדם ההחזרה מהעומס  $\Gamma$  קובע את היחס בין הגל המתקדם והחוזר. הגל המתקדם והחוזר יוצרים גל עומד לאורך הקו. יחס גלים עומדים מוגדר על ידי יחס האמפליטודה המקסימאלית למינימאלית של המתח בקו (היחסי לשדה החשמלי בו) בתבנית הגל העומד כדלקמן:

$$SWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|}$$

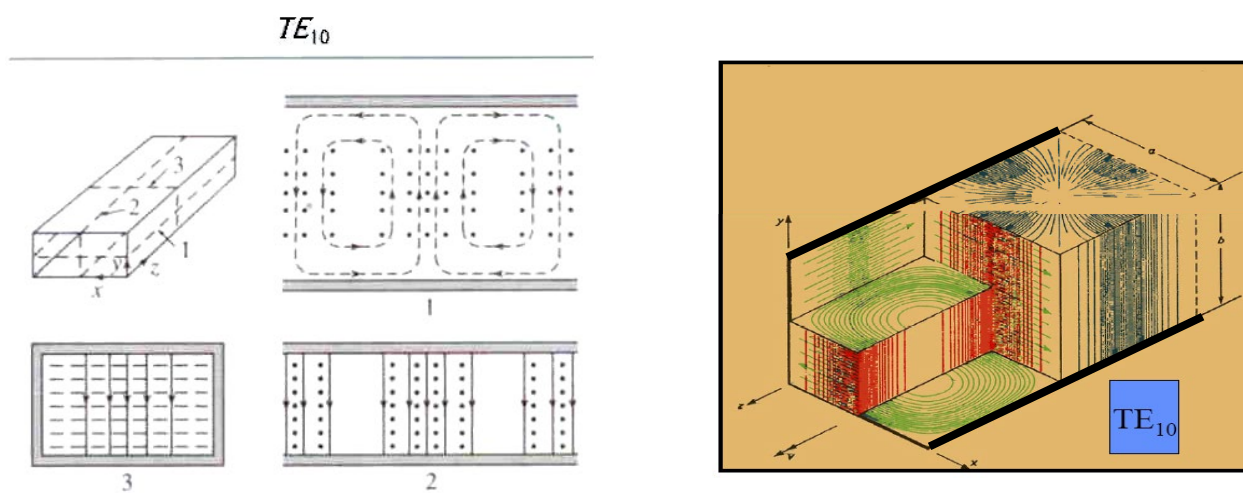
בניסוי עצמו נמדוד את "דיאגרמת האפסים" לאורך הגלבו המלבני. בידיעת יחס הנפיצה, נוכל לאמת בצורה נוספת את תדר המקור.

### הקו המחורץ

מדידת ערכי השדה של הגל העומד תתבצע על ידי קו מחורץ (Slotted line) המבוסס על גלבו מסוג WR90 כמוראה באיור מס' 1.3. מבחינת תנאי השפה ניתן לראות שעבור האופן היסודי חריץ אורכי צר בדופן הרחבה של הגלבו אינו "חותך" קווי זרם, ולכן אינו משנה משמעותית את התפלגות השדות בגלבו (כמוראה באיור מס' 1.4). אלמנטים ריאקטיביים (קיבולי והשראי) הממומשים בגלבו ע"י צמצמים מוצגים באיור מס' 1.5.

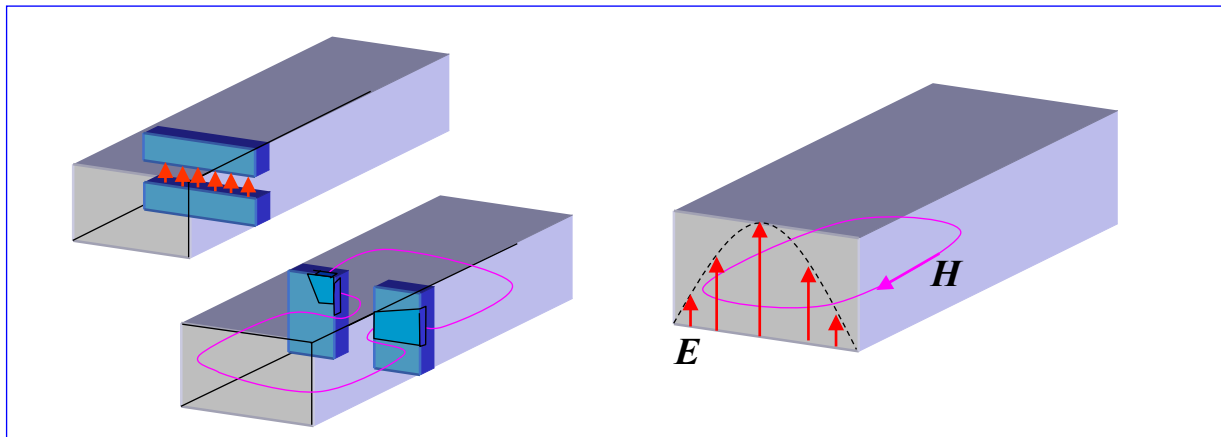


איור מס' 1.3: קו מחורץ למדידת גלים עומדים.



איור מס' 1.4: התפלגות השדות באופן היסודי בגלבו.





איור מס' 1.5: שדה חשמלי ומגנטי בגלבו מלבני (ימין), ובגלבו עם אלמנט השראי (מרכז) וקיבולי (שמאל).

על ידי שימוש בגלאי דיודה המוחדר לחריץ בעזרת גשש, ניתן לבצע מדידות של ערכי המתחים (היחסיים לשדות בגלבו) ולחשב את יחס הגלים העומדים. כיול הדיודה למטרה זו יתבצע בחלק הבא.

#### חריכת דפי נייר

בחלק זה נפעיל מגנטרון כמקור בהספק גבוה להזנת גלבו מחורץ. לתוך החריץ בגלבו נכניס מספר דפים, נפעיל את המקור, ולאחר הפסקת פעולתו נבחן את תבנית החריכה של הדפים. מתבנית הגלים העומדים שתתקבל, נוכל להסיק מהו תדר הפעולה של המגנטרון. הבסיס לניסוי יהיה תנור מיקרוגל ביתי מוסב עם מהוד חד-ממדי. מטעמי בטיחות ניסוי זה יתבצע ע"י המדריך.

#### **שאלות הכנה**

1. מהי תופעת הנפיצה באופן כללי וכיצד היא באה לביטוי במוליך גלים מלבני ?
2. באיזה מוליך גלים לא מתקיימת תופעת נפיצה ? כיצד משפיעים על כך תנאי השפה ?
3. מדוע גלבו מחורץ מתנהג בקירוב כמו גלבו מלבני רגיל ?
4. מהו היחס בין הגובה לרוחב של גלבו מסוג WR90 ? מדוע נבחר יחס זה ?
5. מהם תדרי הקטעון של ארבעת האופנים הראשונים בגלבו מסוג WR90 ?
6. באיזה מקום על חתך הגלבו יש למקם את הגלאי על מנת למדוד את עוצמתו של כל אחד מארבעת האופנים הנ"ל ? (התייחס/י לפילוגי הזרמים והשדות).
7. גלבו מלבני מסוג WR90 באורך 1 מטר מעורר בהדק אחד על ידי אות בתדר  $f_0$  עם מעטפת פולס ברוחב  $T_0$ . יש לתאר באופן איכותי כיצד יראה אות המוצא בהדק השני עבור שלושה ערכים שונים של  $f_0$  ו- $T_0$  לבחירתך.
8. טלפון סלולרי דור שלישי פועל בתדר של כ-2.2GHz. חשב את רדיוסו המינימאלי של מוליך גלים גלילי שיאפשר מעבר קרינה בתדר זה.
9. מה היתרונות והחסרונות של גלבו מלבני בהשוואה למוליך גלים קואקסיאלי ?

**ציוד ורכיבים**

1. מערך גלבו מחורץ WR90.
2. Isolator (מבדד).
3. מד מתח.
4. גלאי דיודה.
5. מחולל אות בתחום X-band.
6. מתאם גלבו-קואקס.
7. עומס בולע.
8. כבלים קואקסיאליים.
9. צמצמים (Iris) ועומסים שונים לגלבו WR90.

**תכולת הניסוי**

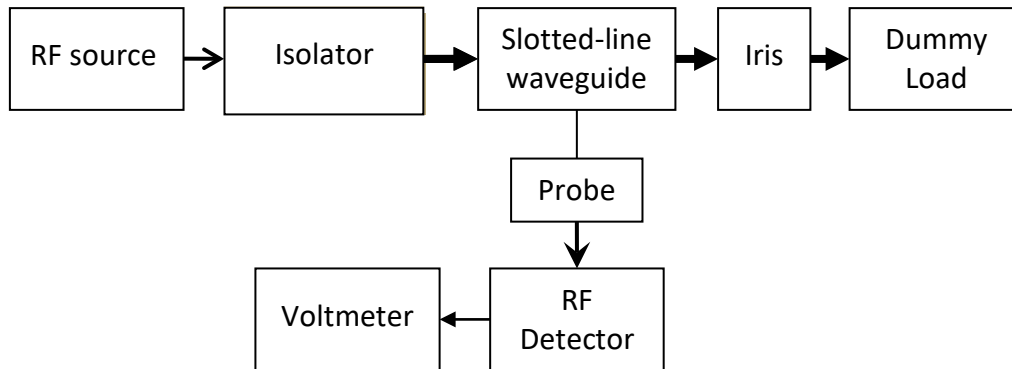
1. מדידת גל עומד בגלבו מחורץ.
2. מדידת תדרי הקטעון של האופן הבסיסי ושל האופן הבא אחריו.
3. חריכת דפים בתנור מיקרוגל מוסב "חד ממדי" למציאת תבנית הגל העומד.

**מהלך הניסוי**

1. מדידת גל עומד בגלבו מחורץ :
  - 1.1. חברו את מערך הגלבו המחורץ המוצג באיורים מס' 1.3 ו-1.6. במוצא הגלבו יש לחבר קצר תחילה.
  - 1.2. חברו דיודת גילוי מכוילת או בחון הספק אל הגשש (Probe).
  - 1.3. מדדו את מתח המוצא של דיודת הגילוי בסריקה לאורך הגלבו (יש לדגום מספיק נקודות כך שיהיה ברשותכם מחזור אחד שלם לצורך הצגה גרפית, ובנוסף את כל מיקומי נקודות המינימום והמקסימום של ההספק).
  - 1.4. חזרו על המדידה עבור קצר בתדר נוסף לבחירתכם.
  - 1.5. לאחר השלמת המדידות הנ"ל עבור קצר, יש לחזור על מדידות אלו עבור העומסים הבאים :
    - א. צמצם קיבולי עם עומס מתואם.
    - ב. צמצם השראי עם עומס מתואם.
    - ג. "נתק" (גלבו פתוח).
    - ד. עומס מתואם.

**2. מדידת תדרי קטעון :**

התמקמו על נקודה בה ניתן למדוד בבירור את ההספק הנדגם בגלבו. כעת הורידו את התדר בהדרגה עד 6 GHz תוך כדי מעקב אחרי מיקום נקודת המקסימום. רשמו את ההספק המתקבל בנקודת המקסימום כתלות בתדר.



איור מס' 1.6: מערך ניסוי למדידות בגלבו מחורץ המועמס מצמצם ועומס מתואם.

3. חריכת דפים בגלבו מלבני בתוך תנור מיקרוגל מוסב (מטעמי בטיחות פעולה זו מבוצעת ע"י המדריך):

3.1. יש להכניס 5 דפים לחריץ הגלבו כמוראה באיור מס' 1.7, ולהפעיל את התנור למשך 10 שניות.

3.2. לאחר הפסקת פעולת התנור, יש להוציא את הדפים ולאפיין את תבנית החריכה המתקבלת.



איור מס' 1.7: גלבו מחורץ המושל בתוך תנור מיקרוגל מוסב כמהוד חד ממדי.

### עיבוד וניתוח התוצאות

1. יש להתוות את תמונת הגל העומד עבור כל העומסים שנמדדו כמפורט בסעיף 1.4. יש לבצע תחילה חישוב להמרת מתח הדיודה להספק האות הנדגם, במתכונת הכיול הנלמד בניסוי מס' 2.
2. יש לחשב את אורך הגל בגלבו תוך השוואה לתיאוריה בכל המקרים שנמדדו.
3. יש לחשב את יחס הגלים העומדים SWR ואת מקדמי ההחזרה עבור העומסים שנמדדו, ולמצוא את עכבותיהם.
4. יש לחשב את תדר הקטעון של אופן היסודי, ולהשוות לתיאוריה.
5. מתבנית החריכה של הדפים, יש לחשב את אורך הגל בגלבו ואת תדר המקור של תנור המיקרוגל ולערוך השוואה עם התיאוריה (רוחב הגלבו בניסוי זה הוא  $a = 84 \text{ mm}$  בקרוב).
6. מה ההבדל בחריכה של הדפים במרכז החבילה לעומת הדפים החיצוניים? ממה נובע הבדל זה?
7. (שאלת רשות) יש להשוות את התוצאות שהתקבלו עבור הצמצם הקיבולי לתיאוריה.

## ניסוי מס' 2 – מכשירי מדידה למיקרוגל

### יעד לימודי

- הכרת מכשור מדידה והתנסות ראשונית בשימוש בסיסי בו, ובפרט:
1. בולומטר ודיודת שוטקי (Schottky) כאמצעים למדידת הספק.
  2. מד תדר מהודי.
  3. נתח תדר (Spectrum Analyzer).
  4. נתח רשת ווקטורי (Vector Network Analyzer).

### מבוא

#### גרף התאמה של הגלאי

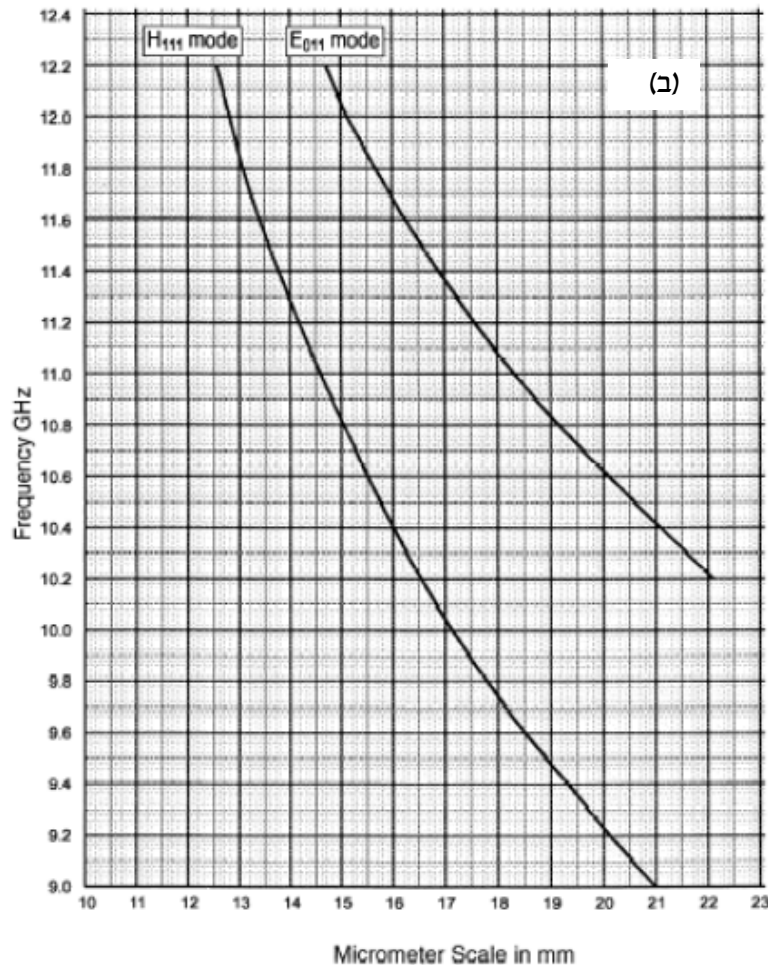
המתח המתקבל מדיודת גילוי RF תלוי באופיין מתח-זרם של הדיודה. בניסוי זה נאפיין את תחומי העבודה של גלאי הדיודה, ונמצא את הקשר בין המתח הנמדד במוצא הגלאי לבין הספק ה-RF במוליך הגלים באמצעות מד הספק מכויל.

#### מדידת תדר ואורך גל

בניסוי נבצע מדידת תדר של מקור מוליך למחצה שיחובר לקו המחורף באמצעות מד תדר מהודי. לניסוי זה שתי מטרות. האחת היא מדידת תדר המקור על ידי השימוש במד התדר המהודי. המטרה השנייה היא אימות יחס הנפיצה בגלבו מלבני. מד תדר מהודי מוצג לדוגמא באיור מס' 2.1. הוא מורכב ממהוד גלילי בעל בוכנה המאפשרת לשנות את מימד האורך של המהוד. אות RF ממוליך הגל הראשי נדגם למהוד הגלילי. על ידי שינוי ממדי המהוד תוך כדי מדידת ההספק בקצה הקו ניתן להבחין בתהודת המהוד. התהודה באה לביטוי בנפילת הספק בקצה הקו עקב בליעתו במהוד בתדר תהודה המתאים לממדי המהוד. בידעת ממדי המהוד הגלילי ניתן למצוא את תדר המקור (אם הוא נמצא בתחום התדר של המהוד). גרף כיול למד התדר המהודי מוצג לדוגמא באיור מס' 2.1. כפי שניתן לראות בגרף, הפתרון אינו יחיד מאחר שהמהוד תומך בשני אופנים בתחום התדר הרצוי (X-band). בניסוי זה נשתמש במהוד מכויל, כך שנקבל מדידת תדר מיידית בקריאת השנתות (המכוילות) של ההתקן.

#### מדידות עכבה ושימוש ב-Smith Chart

בניסוי זה נמדוד עכבה של עומס בקצה של גלבו מלבני, תוך שימוש בדיאגרמת Smith. מאחר שכבר מדדנו VSWR, ניתן לחלץ את עכבת העומס ישירות ממדידה זאת. יחס הגלים העומדים מאפשר לקבל את מקדם ההחזרה בערכו המוחלט. הערכת שינוי הפאזה כתוצאה מהעומס (יחסית לעומס קצר למשל) תתבצע בעזרת הקו המחורף ותאפשר הערכה של עכבת העומס המרוכבת. איור מס' 2.2 מציג דיאגרמת Smith בהדגשת מאפיינים עיקריים.



(א)



(ב)

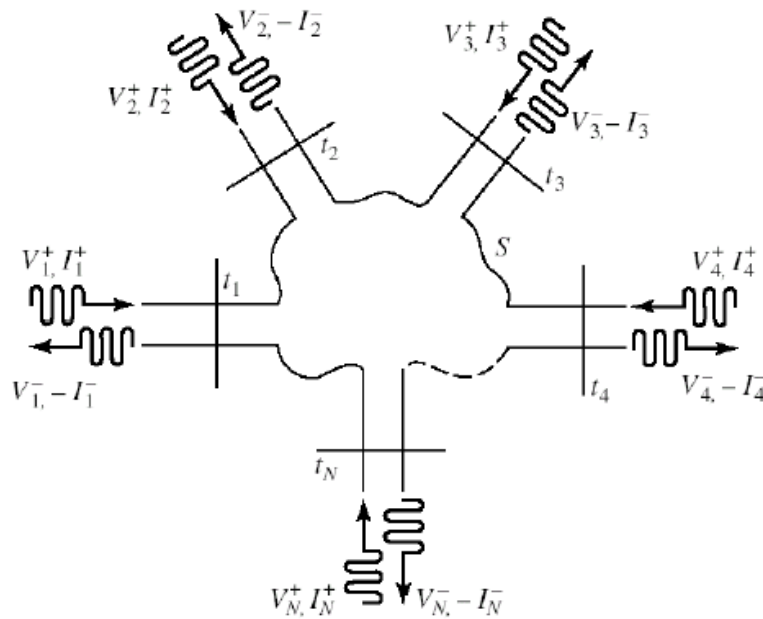
איור מס' 2.1: (א) מד תדר מהודי. (ב) גרף כיול למד תדר מהודי גלילי.

### נתח רשת וקטורי

תמונה של נתח רשת ווקטורי מתקדם (הכולל תצוגת ה Smith Chart) מוצגת באיור מס' 2.3. נתח הרשת הוא אחד המכשירים הבסיסיים והחשובים בכל מעבדת מיקרוגלים. במעבדתנו קיים נתח ווקטוריים בתדר עד 14 GHz (Agilent E5071C, Keysight ENA E5063A). מכשירים אלו מציגים מספר תצוגות בתלות בתדר כגון: מקדמי החזרה והעברה, VSWR, וכן תצוגת Smith Chart למקדמי החזרה. נתחים ווקטוריים מאפשרים מדידת פאזה. מאחר שמכשירים אילו יקרים יחסית קיימים גם נתחים סקלאריים למדידת יחסי הספק בלבד, בדרך כלל בשני הדקים.

נגדיר רשת בעלת N הדקים כמודגם באיור מס' 2.4. בהתייחס לרשת זו, ניתן להגדיר קשרים בין המתחים והזרמים ברשת על ידי מטריצות אימפדנס ואדמיטנס. דרך נוספת להציג את הרשת היא על ידי מטריצה המקשרת בין ווקטור המתחים הנכנסים לרשת לווקטור המתחים היוצאים ממנה. מטריצה זאת תוגדר כמטריצת הפיזור (Scattering) של הרשת.





איור מס' 2.4: רשת כלשהי בעלת N הדקים.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & & S_{2N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix}$$

$$V^- = S \cdot V^+ \quad S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ for } k \neq j}$$

כל איבר  $S_{ij}$  במטריצת הפיזור  $S$  מוגדר כיחס בין שני מתחים ברשת, כאשר במונה פאזור של גל המתח היוצא מהדק  $i$  ובמכנה פאזור של גל המתח הנכנס להדק  $j$  (מסומנים – או + בהתאמה). אברי האלכסון במטריצת הפיזור מייצגים את מקדם ההחזרה בכל הדק ברשת (כאשר ההדקים האחרים מתואמים), ושאר האיברים מתארים קבועי העברה בין הדקי הרשת השונים.

מטריצת הפיזור  $S$  מאפיינת את הרשת, ובפרט במקרים הבאים:

- כאשר האלכסון במטריצת הפיזור הוא אפס, כל הדקי הרשת מתואמים.
- כאשר מטריצת הפיזור סימטרית, הרשת הדדית.
- כאשר המטריצה יוניטרית, הרשת חסרת הפסדים:

$$\sum_{k=1}^N S_{ki} S_{ki}^* = 1$$

$$\sum_{k=1}^N S_{ki} S_{kj}^* = 0 \quad \text{for } i \neq j$$

יוניטריות מתקבלת כאשר מכפלה של כל עמודה או שורה בצמוד המרוכב שלה תיתן "1", ומכפלת של עמודה או שורה בעמודה או שורה (צמודה מרוכבת) אחרת תיתן "0".

נתח הרשת כולל בתוכו מקור תדר סורק שתפוקתו מועברת להדק המוצא של הנתח. כמו כן קיים הדק כניסה למכשיר, המחובר למוצא ההתקן הנמדד. קריאות ההחזרה בהדק המוצא (באמצעות מצמד כיווני) והעברה בהדק הנוסף מתבצעות ע"י גלאים (בנתח סקאלרי) או ערבלים פנימיים (בנתח ווקטורי). הן מאפשרות את מדידות פרמטרי הפיזור בערכים מוחלטים או מרוכבים, בהתאם לסוג המכשיר ולשיטת המדידה. בניסוי זה נשתמש גם במכשיר ה-FSH מתוצרת Rohde & Schwarz לצורך מדידות סקלאריות בלבד.

השלב הראשון בעבודה עם נתח הרשת הוא כיולו. הכיול ייעשה ביחס להדקים הקרובים ככל האפשר לרשת הנמדדת כדי לקבל את פרמטרי הפיזור שלה במדויק, ללא תרומת קווי תמסורת נוספים. לשם כך נבצע כיול החזרה (Reflection calibration) וכיול העברה (Transmission calibration). בתהליך הכיול המכשיר מבצע סריקה בכל תחום התדר הרצוי ומפצה על ניחות, החזרות וסטיות פאזה, ברשת המוליכה אל ההתקן הנבדק וממנו. ההדקים שעבורם בוצע כיול יהיו הדקי הייחוס במהלך המדידה. הכיול מתבצע באמצעות ערכת כיול ייעודית המכילה אבזרים לצורך דימוי מיטבי של קצר, נתק, עומס מתואם, והעברה מלאה בשני ההדקים. איור מס' 2.5 מציג ערכת כיול בסיסית.



איור מס' 2.5: ערכה בסיסית לכיול החזרות בנתח רשת ווקטורי.

### נתח תדר

בניסוי זה נתרגל שימוש בנתח תדר (Spectrum Analyzer) ובפרט לצורך אפיון מקורות תדר וניתוח תופעות ספקטראליות שונות. נתח התדר מציג תמונה של הספק האות בתלות בתדר הסריקה של המכשיר. להבדיל מנתח הרשת, שנועד למדידת פרמטרי החזרה והעברה יחסיים ברשתות שונות, נתח הרשת מודד הספק בערך מוחלט ובכך מתאים יותר לאפיון מקורות תדר ואותות שונים. עם זאת, מדידת ההספק באמצעות נתח התדר אינה מדויקת כמו זאת של הבולומטר למשל, עקב הסריקה בתחום תדר רחב (המדידה בבולומטר ודומיו דורשת זמן התיצבות, שאינו אפשרי במדידה בסריקה).



## שאלות הכנה

1. יש לתאר את המבנה ועקרון הפעולה של בולומטר ושל דיודת Schottky, לערוך השוואה בין השיטות למדידת הספק באמצעותם, ולדון ביתרונות והחסרונות של כל אחת מהן.
2. יש להסביר את המבנה ועקרון הפעולה של מד התדר המהודי. כיצד משתנים מקדמי ההחזרה וההעברה מהמהוד בסביבת תדר התהודה ?
3. יש לתאר מבנה בסיסי של נתח תדר טיפוסי באמצעות תרשים מלבנים, ולהסביר עקרון פעולתו.
4. יש להסביר את מתכונת ההפעלה של נתח תדר טיפוסי. מהם הפרמטרים העיקריים הנמצאים בשליטת המפעיל, וכיצד הם משפיעים על אופן המדידה ?
5. לרשותך מסנן YIG עם רוחב סרט קבוע אך בעל תדר מרכזי משתנה התלוי במתח הכניסה של המסנן. יש להציע סכמה ליישום התקן זה כבסיס לנתח תדר, ולציין את הייתרונות והחסרונות של מימוש אלטרנטיבי זה.
6. יש להציג תרשים מלבנים של נתח רשת ווקטורי טיפוסי ולהסביר את המבנה הבסיסי, עקרון הפעולה, ומתכונת ההפעלה שלו.
7. מה מטרת הכיול טרם המדידה בנתח רשת ווקטורי, וכיצד הוא מתבצע ?
8. למד את הוראות הכיול וההפעלה של נתח הרשת הווקטורי Agilent E5071C על פי דפי היצרן.

## ציוד ורכיבים

1. גלאי דיודה
2. מנחת מתכוון
3. מפצל הספק
4. מד מתח
5. כבלים קואקסיאליים
6. מד הספק
7. מתאמים ומחברים שונים (SMA, N-Type)
8. מחולל אותות
9. נתח תדר-רשת נייד FSH-3 מתוצרת Rohde & Schwarz
10. נתח תדר מעבדתי
11. נתח רשת ווקטורי (Agilent E5071C)

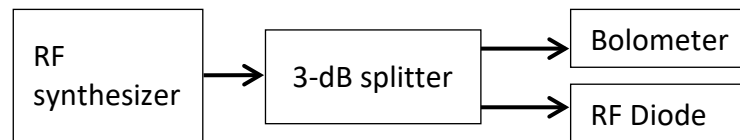
## תכולת הניסוי

1. התנסות בכיול אמצעים שונים (דיודה למדידת הספק, נתח רשת ווקטורי)
2. מדידת אופיין של מד תדר מהודי.
3. מדידה ספקטראלית של מוצא מחולל אותות.
4. מדידת פרמטרי פיזור של מחברים ומתאמים שונים.

## מהלך הניסוי

### 1. כיול דיודה למדידת הספק :

- 1.1. חברו את מערך הניסוי המוצג באיור מס' 2.6.
- 1.2. מדדו באמצעות בולומטר את ההספקים המתקבלים במוצא, בטווח שבין -40dBm עד 0dBm.
- 1.3. מדדו את המתח במוצא הדיודה באותם תנאי המדידה של הבולומטר.



איור מס' 2.6: מערך כיול דיודה למדידת הספק.

### 2. מדידות ספקטרליות של מחולל האותות :

- 2.1. חברו את מוצא מחולל האותות לנתח התדר באמצעות מנחת של 10dB.
- 2.2. מדידת תדר :
  - א. מדדו באמצעות הסמן (Marker) את התדר המרכזי ואת עוצמת האות המתקבל.
  - ב. העבירו את הנתח למצב ידני.
  - ג. הקטינו את ה-Span באופן משמעותי וצפו כיצד התמונה משתנה. צלמו את המסך כאשר לדעתכם מתקבלת מדידת התדר הברורה ביותר.
- 2.3. מדידת רמת רעש :
  - א. הקטינו את הספק אות הכניסה עד למצב בו הוא משתווה להספק רצפת הרעש במסך נתח התדר (השתמשו במנחת במידת הצורך). מה הספק האות המינימאלי המתקבל ?
  - ב. חזרו על המדידה עבור רוחבי סרט RBW שונים בנתח התדר (לפחות 4 מדידות), תוך כדי רישום של ההספק (האות והרעש) כפונקציה של RBW, וצילום המסך. האם ניכר שינוי בהספק האות המינימאלי הניתן למדידה? אם כן, כיצד הוא משתנה ביחס לרוחב הסרט ?

### 3. מדידת פרמטרי פיזור באמצעות נתח רשת ווקטורי :

- 3.1. כיילו את נתח הרשת הווקטורי (כולל הכבלים והמחברים המשמשים במערך המדידה) בעזרת ערכת הכיול, כמוסבר בנספח א'.
- 3.2. בדקו את הכיול בעזרת מדידות של מנחת ושל התקן מיקרוגל ידוע אחר (לבחירת המדריך). שמרו את הגרפים המתקבלים בעזרת תפריט Save/Recall (בחרו באפשרות Save Trace ושמרו את התוצאות בפורמט csv המאפשר פתיחה באמצעות Excel).
- 3.3. מדידות פרמטרי פיזור של התקן דו-הדקי מתבצעות באופן הבא :
  - א. חברו את הדק הכניסה של ההתקן לערוץ 1 של נתח הרשת הווקטורי ואת הדק המוצא לערוץ 2.
  - ב. בחרו את הפרמטר הנמדד לפי תפריט Meas. (במדידת  $S_{11}$  יש לתאם את שאר ההדקים).

ג. שמרו את הגרף המתקבל (לדוגמא, באמצעות תפריט Save/Recall כנ"ל).

#### 4. מדידת תדר בעזרת מד תדר מהודי :

- 4.1. חברו את מד התדר המהודי כהתקן הנבדק בנתח הרשת הווקטורי (סעיף 3.2 לעיל) למדידת  $S_{21}$ .
- 4.2. מדדו בעזרת מד התדר (ע"י שינוי מיקום הבוכנה) את התדר שמפיק נתח הרשת. מה התמונה המתקבלת על מסך נתח הרשת ?

### עיבוד וניתוח התוצאות

1. צייר את גרף הכיול של הדיודה מתוך המדידות (מתח מוצא להספק כניסה) של הגלאי, והסבר את המתקבל.
2. סמן על הגרף את התחום בו מתקיימת תגובת Square-law, והסבר את משמעותו.
3. מהו קבוע ההמרה של גלאי הדיודה ?
4. מהן היחידות של הצירים בתמונה המתקבלת על נתח התדר ?
5. כיצד שינתה הקטנת ה-Span את התמונה שהתקבלה בנתח התדר? האם התמונה מייצגת נאמנה את אות המקור ? הסבר ?
6. שרטט גרף של רמת הרעש כפונקציה של RBW. מתוך הגרף חלצו את רמת הרעש ליחידת רוחב סרט של נתח התדר. בכמה היא שונה מהרעש התרמי ומה הסיבה להבדל זה?
7. מה סיבת שינוי היחס בין האות לבין הרעש כתוצאה משינוי רוחב הסרט (RBW) של נתח התדר ?
8. איזה פרמטר של סריקת התדר במכשיר השתנה כתוצאה משינוי רוחב הסרט ומה הקשר ביניהם ?
9. הצג את מקדמי ההעברה וההחזרה הנמדדים של הרכיב שמדדתם לאימות הכיול באמצעות גרף.
10. מה הסטיות בין הקריאות של מד התדר המהודי ושל נתח הרשת שהתקבלו במדידות התדר של מוצא נתח הרשת באמצעות מד התדר המהודי ?

## ניסוי מס' 3 – התקני מיקרוגל פסיבים בגלבו

### יעד לימודי

1. התנסות במדידת פרמטרי פיזור (Scattering) והשימוש בהם.
2. הכרת התקני מיקרוגל שונים.
3. שימוש במצמד כיווני כאמצעי למדידת מקדמי העברה והחזרה סקאלריים.
4. התנסות בהפעלת נתח רשת ווקטורי.

### מבוא

בניסוי זה נכיר את ההתקנים מצמד כיווני, צומת T, מחוג (circulator), T קסם, מנחת מתכוון ומזיז מופע, המוצגים באיור מס' 3.1 ונמדוד את פרמטרי הפיזור שלהם. ההתקנים שנאפיין בניסוי זה ממומשים בגלבו, בין שהם נועדו להספקי מיקרוגל גבוהים יחסית או שהמימוש בגלבו מאפשר את פעולתם.

		
מחוג (Circulator)	צומת T	מצמד כיווני
		
מזיז מופע	מנחת מתכוון	T קסם

איור מס' 3.1: התקנים על בסיס גלבו מלבני.

### שאלות הכנה

1. ביחס לכל אחד מהתקנים הבאים, יש להסביר בקצרה את מבנה ההתקן ואת עקרון פעולתו, לרשום את מטריצת הפיזור שלו (עם איור המתאים להדקיו), ולתאר את מימושו עבור גלבו מלבני WR-90:

א. מצמד כיווני (Directional Coupler).

- ב. צמתי T במישור E ובמישור H.
  - ג. מחוגג (סירקולטור) בעל שלושה הדקים.
  - ד. T קסם (Magic-T).
  - ה. מנחת מתכוונן (Attenuator).
  - ו. מזיז מופע מתכוונן.
  2. עבור מצמד כיווני, יש להסביר את המושגים צימוד (Coupling) וכיווניות (Directivity).
  3. יש להסביר כיצד ניתן למדוד באמצעות מצמד כיווני ומד הספק מקדם החזרה של התקן חד-הדקי.
  4. להלן רשימת תכונות אידיאליות של רשתות שונות:
    - א. חוסר הפסדים.
    - ב. הדדיות.
    - ג. תיאום מושלם.
- מה המשמעות של כל אחת מתכונות אלו, וכיצד היא באה לביטוי במטריצת הפיזור?  
מהו המספר המרבי של התכונות הללו שניתן לקיים יחדיו ברשת בעלת שלושה הדקים?

### ציוד ורכיבים

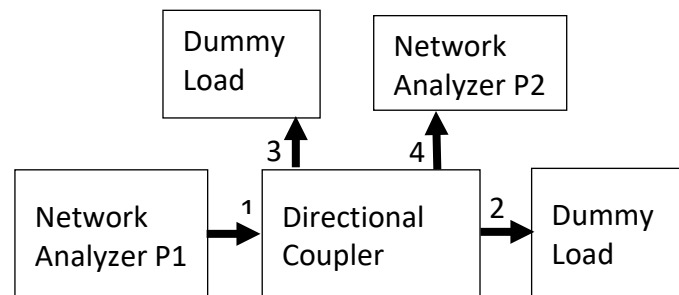
1. מחולל אותות.
2. מד הספק.
3. נתח רשת ווקטורי.
4. התקני מיקרוגל: מצמד כיווני, צמתי T, איזולטור, מחוגג, T-קסם, מנחת משתנה, מזיז מופע.
5. עומס דמה.
6. מחברים ומתאמים.

### תכולת הניסוי

מדידת פרמטרי פיזור של התקנים המוצגים באיור מס' 3.1.

### מהלך הניסוי

1. מדידת פרמטרי פיזור באמצעות נתח רשת ווקטורי:
  - 1.1. כיילו את נתח הרשת הווקטורי באמצעות ערכת הכיול (ראו ניסוי קודם).
  - 1.2. מדדו פרמטרי פיזור של ההתקנים הבאים לפי ההוראות שבהמשך (עבור התקן הדדי ניתן להשתמש בתכונת ההדדיות עם הסבר מתאים):
    - א. מצמד כיווני.
    - ב. T-קסם (בפרט יש לבדוק הפרש פאזה יחסי בין הדקי ההתקן (לדוגמא כאשר ההזנה היא בהדק E-plane עבור הדק H-plane מתואם).
    - ג. מחוגג.
    - ד. מנחת משתנה.



איור מס' 3.2: מערך למדידת פרמטרי צימוד וכיווניות של מצמד כיווני.

יש לבצע את מדידות פרמטרי הפיזור באמצעות נתח רשת ווקטורי באופן הבא:

- א. וודאו כי המכשיר מכויל לתחום התדר הרצוי.
- ב. סמנו את מספרי ההדקים וצלמו/שרטטו את הרכיב.
- ג. חברו את הדק הכניסה לערוץ 1 ואת הדק המוצא לערוץ 2.
- ד. חברו עומסים מתואמים להדקי ההתקן שאינם נבדקים.
- ה. בחרו את המדידה הרצויה לפי תפריט Measurement בנתח. לדוגמא, למדידת פאזה בחרו Phase בתפריט Format.
- ו. מדדו את פרמטרי העברה והחזרה בתחום התדרים 6-14 GHz.
- ז. שמרו את הגרפים שהתקבלו בעזרת תפריט Save/Recall (באפשרות Save Trace ושמירה בפורמט csv המאפשר פתיחה בתוכנת Excel).

### עיבוד וניתוח התוצאות

1. ציין את תחום התדרים בהם פועל כל אחד מההתקנים והסבר מנין נובעת מגבלה התדר, אם קיימת.
2. הצג את מטריצת הפיזור בתדר מרכזי עבור כל אחד מההתקנים השונים, תוך התייחסות למספרים הסידוריים של ההדקים. הצג איור של ההתקן המראה את הדקיו בהתאמה למטריצת הפיזור.
3. השווה תוצאות הניסויים לערכים הצפויים, תוך התייחסות לתכונות ההתקן. אם נמצאו הבדלים משמעותיים, נסה להסביר את מקורם.
4. עבור התקן T-קסם, השווה את הפרש הפאזה הנמדד בין ההדקים לזה הצפוי מהתיאוריה.
5. עבור המצמד הכיווני הצג את פרמטרי העברה, ההחזרה והבידוד בתלות בתדר. ממה נובעת התלות בתדר של התקן זה (לעומת שאר ההתקנים שנבדקו).
6. נתונים מחוגג כפי שמדדת בניסוי ועומס מתואם, כיצד תוכל לממש באמצעותם מבודד (Isolator)?
7. עבור המחוגג, מהו היחס הגיירו-מגנטי? כיצד התדר הגיירו-מגנטי בא לידי ביטוי במדידות שערכתם ומהו ערכו בקירוב?

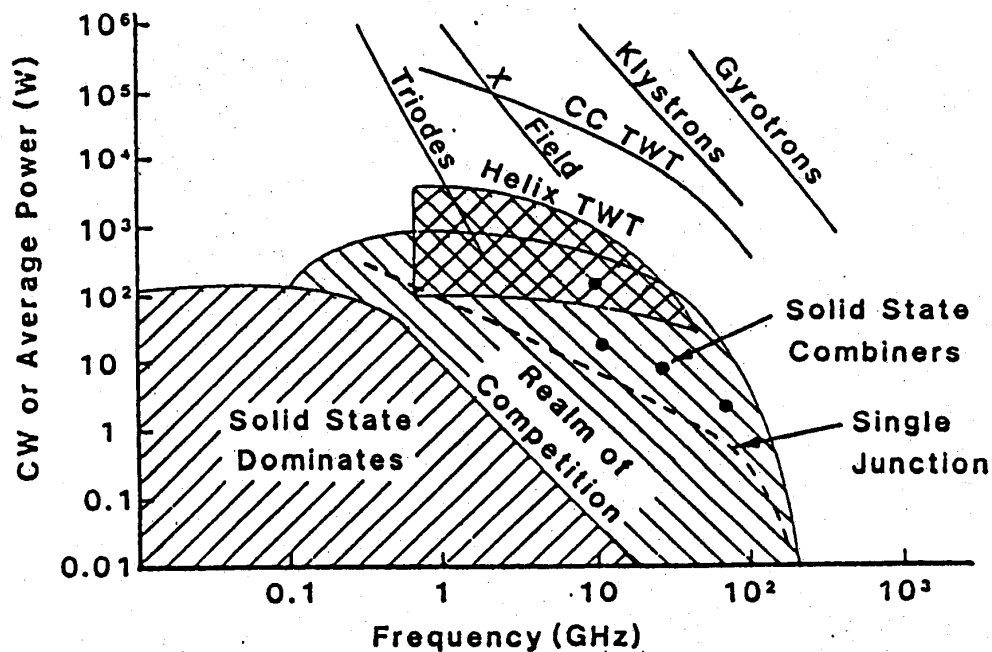
## ניסוי מס' 4 – מקורות מיקרוגל

### יעד לימודי

הכרת מקורות מיקרוגל שונים ותכונותיהם.

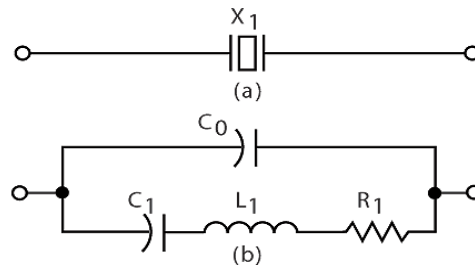
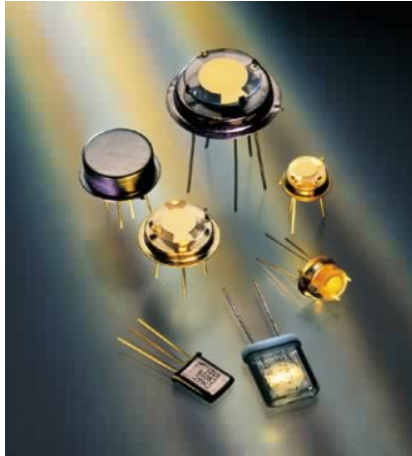
### מבוא

איור מס' 4.1 מציג מקורות מיקרוגל שונים בדיאגרמה (לא עדכנית אך עדיין מייצגת) של תחומי ההספק והתדר הטיפוסיים של השימוש בהם. שתי משפחות ההתקנים העיקריות המוצגות במפת ההספק-תדר הן התקני מצב-מוצק והתקנים שפופרתיים. התקני מצב-מוצק מוצק מוגבלים בהספק, ולכן מקורות שפופרתיים משמשים בדרך כלל ליישומים בהם נדרשים הספקים גבוהים, של קילו וואט ויותר, בתדרים של עשרות ומאות גיגה הרץ. כמו כן, קיימים מקורות גבישיים המצטיינים מבחינת דיוק ויציבות תדר, אך בדרך כלל הם משמשים כמקורות ייחוס בתדרים נמוכים.



איור מס' 4.1: מקורות תדר בחלוקה לפי תדר והספק.

בחירת מקור המיקרוגל תעשה לפי היישום. בהספקים ותדרים נמוכים יחסית, אם אין דרישה קריטית ליציבות בתדר, או ביישומי מיתוג מסוימים, ניתן להשתמש במתנד הממומש על ידי מעגל משוב טרנזיסטורי (מסוג Colpitts או Hartley למשל). כאשר דרוש דיוק תדר ברמה גבוהה יותר, ניתן להשתמש במתנד גבישי כמוראה באיור מס' 4.2. המתנד הגבישי מוגבל בתדר המרבי שלו ולכן לצורך יצירת מקור תדר מדויק בעל תדר גבוה יותר ניתן להשתמש בשיטות שונות להכפלת תדר.



איור מס' 4.2: מתנדים גבישיים מסחריים למיניהם, ומעגל תמורה אפשרי לגביש.

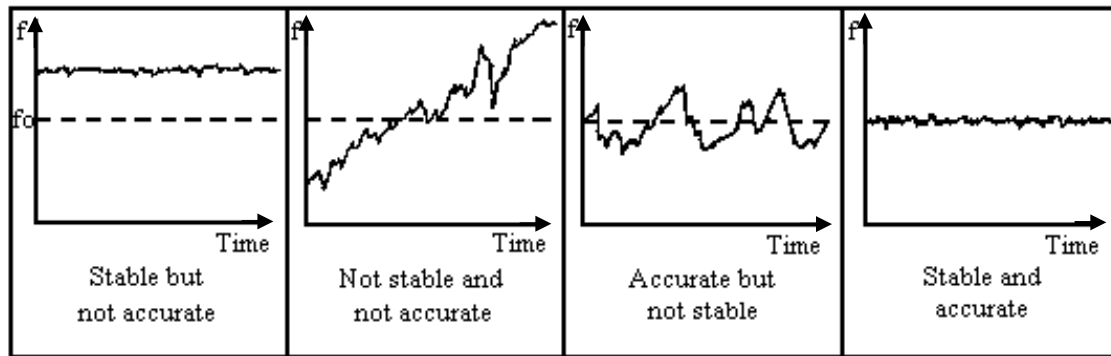
להלן נתונים כלליים המאפיינים מקורות תדר למיניהם :

דיוק (Accuracy, Residual FM) של מקור תדר מאפיין את סטיית התדר הרגעית המקסימאלית של מקור התדר יחסית לתדר אותו הוא אמור היה לספק ( $\Delta f/f$ ). נתון זה יכול להינתן במידת הסטייה ב-Hz או יחסית ב-PPM (Parts Per Million). נתון זה אינו מספיק כדי לאפיין את מקור התדר, שכן, הוא לשמור על תדר נתון לאורך תקופת זמן, תחת אילוצי טמפרטורה, שינויי מתח המקור וכן תנודות מכאניות סביבתיות. מכאן נדרש להגדיר את יציבות מקור התדר.

יציבות מקור התדר (Stability) מוגדרת כדיוק התדר הנמדד על פני מרווחי זמן נתונים. אם מרווחי הזמן קטנים – היציבות תוגדר כ"יציבות לטווח קצר" (Short-term stability), וזאת בדרך כלל עבור פעולה למשך עד כשעה אחת. עבור משך זמן בין מדידות של מספר שעות עד ימים, היציבות תוגדר כ"יציבות לטווח ארוך" (Long-term stability). בהתאם ליישום, מוגדרת היציבות הנדרשת בטווח הקצר ו/או בטווח הארוך. כך לדוגמא, ביישום כגון מכ"מ זמני העבודה (גילוי, רכישה, עקיבה וכד') קצרים ביותר, ועל כן יש לדיוק התדר ויציבותו חשיבות עליונה בטווח הקצר. לעומת זאת, ערוץ סלולארי או ערוץ תקשורת מיקרוגל הפועלים ברציפות במשך זמנים ממושכים בהם קיימת דרישת סנכרון על פני זמנים ארוכים (עקב שיטות ריבוב שונות למשל) דורשים יציבות לטווח ארוך.

בעוד היציבות מושפעת מגורמים שאינם בהכרח קבועים בזמן, ניתן להגדיר שינויים התלויים בזמן כגון סחיפה (Drift). ניתן להגדיר משך זמן כלשהו (כגון דקה אחת) שבו נעקוב אחר שינוי התדר בתלות בזמן. נבחין בתזוזות אקראיות אך גם במגמת סטייה בכיוון מסוים, אותה נאפיין כסחיפת תדר המקור במשך פרק זמן נתון. איור מס' 4.3 מציג באופן תיאורי את ההבחנה בין דיוק, יציבות וסחיפה בתדר.

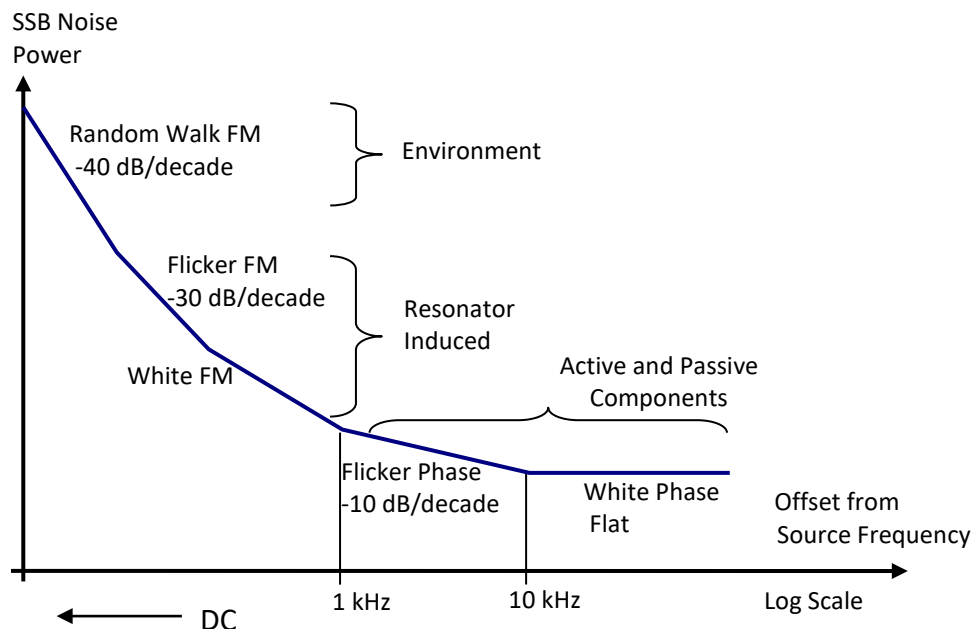




איור מס' 4.3: סיכום איכותי לסוגי מקורות בעלי נתונים שונים של דיוק, יציבות וסחיפה.

גורם משמעותי נוסף הקובע את הטיב של מקור התדר הוא רעש הפאזה של המקור. גורמי הרעש העיקריים המוצגים בגרף לוגריתמי בתלות בתדר באיור מס' 4.4 כוללים:

- Random walk FM - נקבע ע"י גורמים סביבתיים (הלם מכאני, תנודות, טמפרטורה).
- Flicker FM - נקבע על ידי רעש במהוד ורעש של התקנים אקטיביים במתנד.
- White FM - רעש רחב-סרט התלוי בגורם הטיב Q של המהוד.
- Flicker noise - רעש בהתקנים אקטיביים (עקב אי רציפויות וצמתים במוליכים למחצה).
- White (Johnson) noise - רעש תרמי ממגברים.



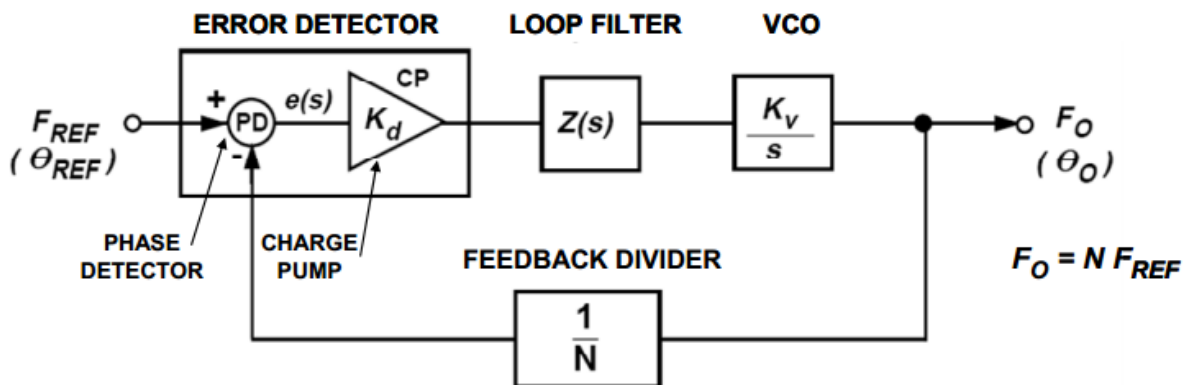
איור מס' 4.4: גורמי הרעש העיקריים ותלותם בתדר (בסקאלה לוגריתמית).

רעש הפאזה נמדד ביחידות של dBc/Hz בהיסט תדר מסוים. לדוגמא, לצורך מציאת רעש הפאזה של מקור בתדר 10 GHz בהיסט 100 kHz, נקבע רזולוציה של פילטר נתח התדר (Resolution bandwidth)

של 1 Hz. נמדוד את הספק האות ב 10.0 GHz, ואחרי כן את ההספק בתדר 10.1 GHz (נזכור שלאות סינוס אידיאלי היינו מקבלים פונקציה הולם בתדר, אך בפועל נקבל אות בעל רוחב שייקבע על ידי רעש הפאזה). היחס בין שתי מדידות הספק הוא רעש הפאזה לפס צד יחיד (Single-side band). שאלה נוספת שיש להביא בחשבון היא האם הרעש נובע מהמקור הנבדק או אולי ממכשיר המדידה עצמו? המגבלה התיאורטית לרעש הפאזה היא הרעש התרמי. עבור רוחב סרט של 1 Hz מתקבל  $N = kTB \cong -174$  dBm, המהווה חסם לרעש הפאזה בהיסט רחוק מספיק מתדר המקור.

ניתן להשתמש במתנד גבישי כמקור ייחוס עליו נעל מקור תדר גבוה יותר לצורך ייצובו, או בהכפלת תדר הגביש עד לתדר הרצוי. כלל אצבע המתייחס לתוספת רעש הפאזה כתלות בהכפלות הוא שעבור כל הכפלה תתקבל תוספת רעש של כ-6 dB (ניתן להבין זאת אינטואיטיבית אם נבצע את ההכפלה בעזרת ערבול בו אותות מתח הרעש מסתכמים בצורה ווקטורית, והספקם יחסי לריבוע המתח).

בדרך כלל, למתנדים כגון VCO לתדרים של מספר גיגה הרץ יהיו נתוני רעש פאזה נחותים משמעותית מהחסם התיאורטי המתקבל מהכפלה של תדר גביש. מכאן, לצורך אפיון חוגים נעולי פאזה המאפשרים קבלת תדרים גבוהים מיוצבים באמצעות תדרים נמוכים ומדויקים (כגון זה המוצג באיור מס' 4.5), יש להביא בחשבון פרמטרים נוספים של המקור המשולב.



איור מס' 4.5: מבנה בסיסי של חוג נעול פאזה PLL (Phased-Locked Loop).

ניתן לשפר את ביצועיו של מקור VCO כלשהו ע"י שימוש בחוג נעול פאזה PLL (Phased-Locked Loop). אות המוצא בעל התדר הגבוה שמספק ה VCO עובר מחלק תדר ומושווה לאות הייחוס בתדר נמוך. בעזרת המשוב נועל הפאזה ניתן לשפר את הדיוק והיציבות של מקור התדר גבוה ב-VCO באמצעות הייחוס למתנד הגבישי בלולאת המשוב. ערכת ה-Trainer בה נעשה שימוש במעבדה כוללת חוג PLL דומה.

בנוסף למקורות המבוססים על התקני מצב-מוצק, בניסוי זה נכיר ונאפיין ספקטראלית גם שפופרת ריק, המגנטרון המשמש בתנור המיקרוגל הביתי. מגנטרון טיפוסי מספק כ-1 kW בממוצע בתדר 2.45 GHz ביחס העסקה (Duty Cycle) של כ-50%. המגנטרון מוזן במתח גבוה של כ-4 kV ובמתח חימום קתודה צף כ-3 V. ההספק נוצר בשפופרת המגנטרון על ידי צימוד אנרגיה מאלקטרונים חופשיים הנעים בתאוצה מעגלית לגל אלקטרומגנטי הנוצר במהודים הצמודים.

## שאלות הכנה

- א. מהו רעש פאזה, כיצד הוא בא לביטוי בספקטרום האות, ואיך ניתן למדוד אותו ?
- ב. מהו רעש תרמי ? כיצד הוא תלוי בגורמים אחרים ומה צפיפות ההספק הספקטראלית שלו ?
- ג. יש לתאר מבנה ועקרון פעולה של מתנד Gunn. מהם אופני התנודה השונים שלו ?
- ד. יש לתאר מבנה ועקרון של מתנד גבישי.
- ה. יש למצוא דפי נתונים של מתנד גבישי בתדר  $< 100 \text{ MHz}$  ושל מקור כלשהו בתדר  $\sim 10 \text{ GHz}$ , להסביר את הפרמטרים הנתונים ולציין את ההבדלים ביניהם מבחינת דיוק ויציבות תדר.
- ו. יש לתאר מבנה ועקרון פעולה של VCO כלשהו, ולציין אפשרויות נוספות למימוש VCO.
- ז. יש לתאר מבנה ועקרון פעולה של חוג נעול מופע PLL. מה תפקיד המשוב וכיצד הוא משתלב עם VCO ?
- ח. יש לתאר מבנה ועקרון פעולה של מתנד דיאלקטרי (DRO) ולציין כיצד ניתן לשלוט בתדר המוצא שלו.
- ט. יש לתאר מבנה והסבר עקרון פעולה של שפופרת מגנטרון טיפוסית. מה מתארות דיאגרמות Hartree ו-Rieke ? איזה הספק שיאי ניתן להשיג במגנטרון יחסותי (relativistic magnetron) ?
- י. כיצד ניתן לשלוט על התדר במתנד Gunn ?
- יא. מהו הפרמטר THD (Total Harmonic Distortion) וכיצד ניתן למדוד אותו ?

## ציוד ורכיבים

1. Gunn oscillator.
2. VCO.
3. DRO.
4. מחולל אותות.
5. מקור שפופרתי.
6. ערכת Trainer.
7. מחברים ומתאמים.
8. כבלים קואקסיאליים.
9. ספק מתח.
10. נתח תדר.
11. מד מתח.

## תכולת הניסוי

1. מדידת ספקטרום אות המוצא של מקור מיקרוגל.
2. מדידת ספקטרום של מתנד Gunn בתלות במתח ההזנה.
3. מדידת תדר VCO בתלות במתח.
4. אפיון ספקטרום של מוצא מחולל אותות.

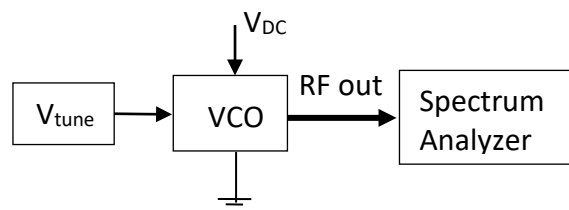
מקורות המיקרוגל הנמדדים עשויים להתחלף מניסוי לניסוי, לפי שיקול דעת המדריכים והאפשרויות במעבדה. בהתאם לכך, יש לבצע את הסעיפים הרלוונטיים בלבד בתדריך הניסוי.

## מהלך הניסוי

1. מתנד מבוקר מתח (VCO) או מקור תדר תלוי מתח אחר, כדוגמת DRO:
  - 1.1. חברו את המקור לנתח תדר באמצעות מנחת מתאים.
 

עבור VCO: חברו את הדקי ההזנה למקור מתח בערך הנקוב. חברו את כניסת מתח הכוונון של ה-VCO ( $V_{\text{tune}}$ ) לספק מתח. חברו מד מתח לצורך מדידת מתח הכוונון.

עבור DRO: חברו אותו למקור מתח מתאים על סמך דרישות ההתקן.
  - 1.2. שנו את מתח הכוונון ומדדו את תדר המוצא עבור מתחים שונים (אין לעבור את המתח המרבי המותר של ה-VCO).
  - 1.3. מדדו את רעש הפאזה של ה-VCO במתחי כוונון שונים באמצעות נתח תדר.
  - 1.4. כבו את מקור המתח והמתינו דקות אחדות להתקררות ה-VCO. חזרו על מדידה במתח מסוים (מתוך המתחים שמדדתם בהרצה הראשונה). האם מתקבל ספקטרום זהה לקודם?
  - 1.5. בחרו מתח כניסה ומדדו את ההספקים המתקבלים בתדר היסודי ובהרמוניות שלו.



איור מס' 4.1: מערך לאפיון VCO.

2. מתנד Gunn:
  - 2.1. חברו מתנד Gunn לנתח תדר באמצעות איזולטור. כוונו את מתח ההפעלה שלו ל-7 V עם הגבלת זרם ל-300 mA (יש לוודא עם המדריך).
  - 2.2. שנו מיקום בוכנת התדר בדיודה ורשמו את שינוי תדר המוצא.
  - 2.3. מדדו את רעש הפאזה של מתנד ה-Gunn.
  - 2.4. כבו את ספק המתח והמתינו להתקררות ההתקן. הפעילו מחדש ובדקו אם התדר המרכזי השתנה. אם כן, בכמה?
  - 2.5. מדדו הספקים המתקבלים בתדר היסודי ובהרמוניות שלו.
3. מחולל אותות או מקור מיקרוגל שפופרתי:
  - 3.1. מדדו באמצעות נתח תדר את הספקטרום המתקבל באמצעות מנחת מתאים. שנו את התדר במחולל ומדדו כיצד הוא משתנה. מדדו את ההספק במוצא כתלות בתדר וציינו את ההרמוניות המתקבלות.
  - 3.2. מדדו את רעש הפאזה של המחולל או המקור.
  - 3.3. כבו את הספק והמתינו להתקררות ההתקן. הפעילו מחדש ובדקו אם התדר השתנה. אם כן, בכמה?

- 3.4. מדדו את יציבות התדר כתלות בזמן ע"י בחירת תחום תדר צר ומדידה במצב Max-hold.
- 3.5. חברו מנחת והגדילו את הספק המוצא של המחולל. מדדו הספק בהרמוניות השונות. כיצד מתפתחות ההרמוניות במוצא המחולל ?

#### 4. מתנד גבישי :

- 4.1. חברו את מוצא המקור בערכת ה-Trainer לנתח התדר, בחרו תדר עבודה דרך הבקרה מהמחשב.
- 4.2. שנו את תדר העבודה ורשמו את שינוי תדר המוצא.
- 4.3. מדדו את רעש הפאזה של המתנד ואת עוצמתו.
- 4.4. כבו את ההתקן והמתינו לקירורו. הפעילו מחדש ובדקו אם התדר השתנה. אם כן, בכמה ?
- 4.5. מדדו את ההספקים המתקבלים בתדר היסודי ובהרמוניות שלו.

### עיבוד וניתוח התוצאות

#### מדידות VCO או DRO :

1. (ל VCO בלבד) יש להציג את אופיין תדר-מתח של ה-VCO הנמדד.
2. מהו רעש הפאזה שהתקבל? השווה לנתוני יצרן.
3. יש להסביר הבדלים בתוצאות אם התקבלו במדידות חוזרות.
4. יש להשוות בין הספק ההרמוניה לבין נתוני יצרן. מהו ערכו של הפרמטר THD ?

#### מדידות Gunn :

5. יש להסביר את השינוי המתקבל עקב סיבוב בוכנת ההתקן. מהי הסיבה לשינוי התדר ?
6. מהו רעש הפאזה המתקבל ?
7. מהם הדיוק והיציבות של מתנד ה-Gunn שנמדד?
8. האם תדר ה-Gunn השתנה לאחר כיבוי והדלקת ספק המתח ? בכמה ? מה סיבת השינוי ?
9. מהו ערך ה-THD המתקבל עבור מתנד ה-Gunn?

#### מדידת מחולל האותות (או מקור שפופרתי) :

10. מהם רעש הפאזה וערך ה-THD של המחולל לפי המדידות ולפי נתוני היצרן ?
11. מהם הדיוק ויציבות התדר המתקבלים ?
12. מהו ההתקן המייצר את התנודות במחולל האותות ? כיצד בנוי התקן זה ומה עקרון פעולתו ?

#### מדידת המתנד הגבישי :

13. מהם רעש הפאזה וערך ה-THD של המתנד, ומה הדיוק והיציבות שלו ?

#### סיכום :

14. יש לערוך השוואה בין מקורות המיקרוגל השונים שנמדדו בהיבטים של דיוק, רעש פאזה, יציבות תדר, וערכי THD.

## ניסוי מס' 5 – גלאים וערבלים

### יעד לימודי

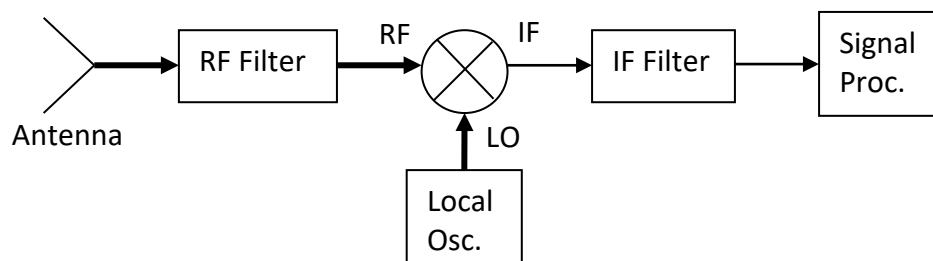
1. הכרת דיודת Schottky כהתקן לא לינארי בתדרי מיקרוגל.
2. שימוש בדיודה כגלאי RF.
3. הכרת מודלים ופרמטרים של ערבלים שונים.

### מבוא

עסקנו עד כה במעגלים שבהם מקור תדר יחיד פועל באופן יחיד. במקרים רבים מעגלי מיקרוגל כוללים רכיבים לא ליניאריים דוגמת מגברים, מכפלים, דיודות וערבלים. כתוצאה מכך נוצרים במערכת אותות נוספים כהרמוניות של התדרים היסודיים במערכת וכן אינטרמודולציות ביניהם. בעזרת נתח התדר נוכל לזהות אותות נוספים אלו ולאפיין אותם. בהתאם לעניין, אותות נוספים אלו עשויים להיות רצויים (כגון בערבול) או פריזיטיים במערכת (שאז נשאף לבטלם)

### שאלות הכנה

1. במה נבדל צומת Schottky מצומת PN ? מה הגורם לחוסר הלינאריות של הצומת ?
2. כיצד ניתן להשתמש בדיודה במעגל של ערבול בסיסי ? יש להסביר את פעולת הדיודה במעגל בהסתמך על האופיון הלא לינארי של הזרם בתלות במתח שלה.
3. במה נבדל גלאי (Detector) מערבול (Mixer) ?
4. יש למצוא דף נתונים של ערבול מסחרי כלשהו והסבר את הפרמטרים המוצגים בו, בפרט IP3.
5. יש להסביר עקרון פעולה של מקלט Super-heterodyne. מה תפקיד הערבול בהתייחס למקלט המתואר בדיאגרמת הבלוקים שבאיור מס' 5.1. מדוע נדרש מסנן אחרי הערבול ?
6. מהו ערבול מאוזן ובמה הוא נבדל מערבול בסיסי ?
7. כיצד ניתן לממש ערבול מאוזן באמצעות T-קסם ?
8. תאר מבנה ופעולה של IQ mixer. מה תפקידו של מעגל ה-Hybrid בערבול זה ?



איור מס' 5.1: סכמת בלוקים של מקלט סופר-הטרודיין בסיסי.

**ציוד ורכיבים**

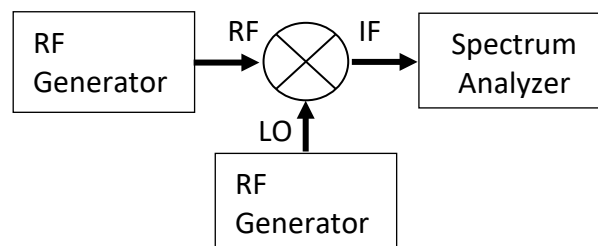
1. ערבל.
2. מחולל אותות.
3. דיודת גילוי.
4. ערכת Trainer.
5. צומת T-קסם.
6. מחברים ומתאמים.
7. כבלים קואקסיאליים.
8. נתח תדר.

**תכולת הניסוי**

1. שימוש בדיודה כגלאי וכערבל.
2. מדידת ספקטרום מוצא של ערבל.
3. מדידת פרמטרי ערבל.

**מהלך הניסוי**אפיון ערבל

1. חברו את הדק ה-LO של הערבל למחולל RF ואת הדק ה-RF למחולל RF אחר. את הדק ה-IF חברו לנתח תדר, כמוראה באיור מס' 5.2. הציבו הספק כניסת LO בתחום דרישת היצרן, והספק כניסת RF הנמוך ממנו ב-10 dB לפחות (לפי הנחיות המדריך). הציגו באמצעות נתח התדר את ספקטרום אות ה-IF. השתמשו בערבל והמקור בערכת Trainer, ואחר כך בערבל ומחולל אחר.
2. שנו את תדרי ה-LO וה-RF. מה השינויים המתקבלים במוצא ה-IF בתדרי כניסה שונים?
3. הגדילו את הספק אות ה-RF עד למצב בו ניתן להבחין באינטרמודולציה מסדר שלישי, ותעדו את ספקטרום המוצא כתלות בהספק המבוא (שמרו את התוצאות עבור 7 הספקים שונים). רשמו את התדר בו מופיעה האינטרמודולציה ואת הספקי המקורות וההרמוניות. הגדילו את הספק האות והציגו אינטרמודולציות מסדרים גבוהים יותר.
4. חזרו על הסעיפים הקודמים עבור ערבל מאוזן, או עבור ערבל אחר לפי הנחיית המדריך.



איור מס' 5.2: מערך למדידת ספקטרום מוצא של ערבל.

שימוש בדיודת גילוי כערבל

5. חברו דיודת גילוי למקור RF במתכונת מערך הכיול שבניסוי מס' 1. אפננו את המקור במעטפת פולסים, והציגו את מוצא הגלאי על אוסצילוסקופ. מהם זמני העלייה והירידה המתקבלים ?
6. חברו שני מקורות RF שונים בהדקים E ו-H של T-קסם. בשני ההדקים הסימטריים חברו דיודת גילוי בהדק אחד ועומס מתואם בשני. הציבו הספק כניסת LO בתחום דרישת היצרן, והספק כניסת RF הנמוך ממנו ב-10 dB לפחות. הציגו באמצעות נתח התדר את ספקטרום אות ה-IF.
7. שנו את תדרי הכניסה. תארו והסבירו את השינויים המתקבלים במוצא הדיודה.

**עיבוד וניתוח התוצאות**

1. יש לתאר את הספקטרום שהתקבל במוצאי הערבלים במדידות, ולהסביר מקורם של הקווים השונים. מהו יחס העוצמות בין הקו הספקטראלי הדומיננטי לבין הקווים האחרים ? יש לרשום את התדרים בו מופיעות האינטרמודולציות והספקי המקורות וההרמוניות.
2. אילו קווים ספקטראליים רצויים לפעולת הערבל ביישומים שונים ?
3. מהם החסרונות של ערבל המבוסס על דיודה יחידה?
4. יש להשוות בין ביצועי הערבל בארכיטקטורות השונות. בפרט התייחס לנצילות ההמרה (היחס בין הספק המוצא להספק במבוא) ולנקיון הספקטראלי במוצא הערבל (היחס בין ההספק בתדר הרצוי לכלל הספקטרום במוצא).
5. באיזה סכמה של ערבל התקבל הבידוד הטוב ביותר בין הדקי ה-LO וה-RF ? מה הצורך בבידוד זה ביישומים שונים ?
6. מה משמעות הפרמטר  $IP_3$  ומה ערכו עבור הערבלים שמדדתם ?
7. יש להתוות את אופיין הערבל (הספק האינטרמודולציה מסדר ראשון כתלות בהספק אות המבוא). נא לציין את מיקום ה- $IP_3$  על אופיין הערבל.



## ניסוי מס' 6 – תיאום עכבות

### יעד לימודי

1. הכרת תופעות חוסר תיאום וגלים עומדים במערכות מפולגות.
2. הבנת הצורך בתיאום עכבות.
3. התנסות בשיטות שונות לתיאום עכבות, ובפרט :
  - א. תיאום בעזרת יתד אחת בעומק ומיקום הניתנים לכיוון (Slide-screw tuner).
  - ב. תיאום בעזרת T-קסם עם שתי סיומות קצר (מראות) הניתנות לכיוון (E-H tuner).
4. שימוש בדיאגרמת סמית.

### מבוא

הצורך בתיאום עכבות נובע בין השאר מהסיבות הבאות :

1. העברת הספק מקסימאלי לעומס ומניעת איבוד הספק מוחזר.
2. מניעת החזרת אנרגיה לכיוון המקור שעלולה לגרום לפגיעה בו.
3. מניעת גלים עומדים במערך היכולים לגרום לשיבוש פעולת מערכת ועיוות האות.
4. שימוש מיטבי בפס ספקטראלי רחב.
5. בטיחות קרינה.

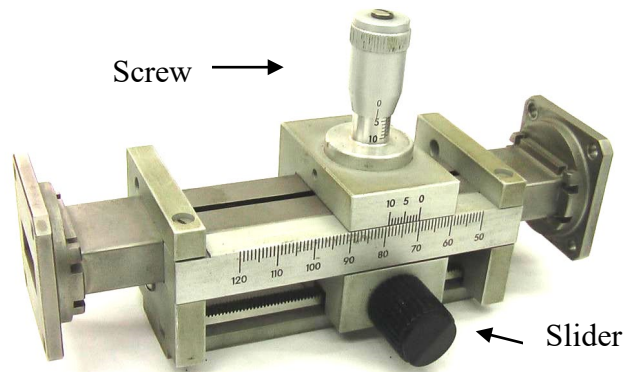
שיטה מוכרת לביצוע תיאום עכבות היא באמצעות יתדות (Stubs). מימוש היתד מותאם לסוג מוליך הגלים (גלבו, כבל קואקסיאלי, מיקרוסטרפ וכיו"ב) כמוראה באיור מס' 6.1, אך עקרון התיאום דומה. מספר היתדות במערך התיאום קובע את מספר דרגות החופש ומכאן את רוחב הסרט המתואם ואת ההחזרה בתחום המתואם. שנאים לתיאום עכבות ממומשים עם אלמנטים מקבילים או טוריים, וכן גם בשינוי רציף (Tapered transmission line).



איור מס' 6.1: דוגמאות להתקני תיאום של שתי יתדות בקו קואקסיאלי ושלוש יתדות בגלבו.

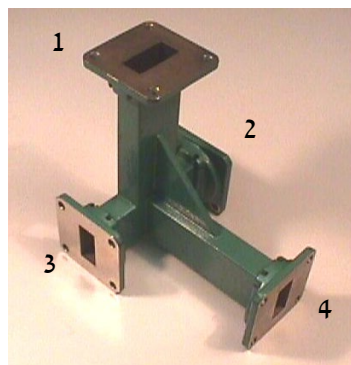
בניסוי זה נשתמש בשני אמצעים לתיאום עכבות, האחד הוא Slide screw tuner (כמוראה באיור מס' 6.2) והשני הוא T-קסם ביישום של E-H tuner.

השימוש ב-Slide-screw tuner שקול לתיאום קו תמסורת על ידי יתד יחיד. גם כאן ננסה למצוא את המרחק מהעומס למיקום היתד ואת עומק היתד שיביאו לתיאום מלא בתדר הרצוי.



איור מס' 6.2: Slide-screw tuner לתיאום עכבות בגלבו מלבני.

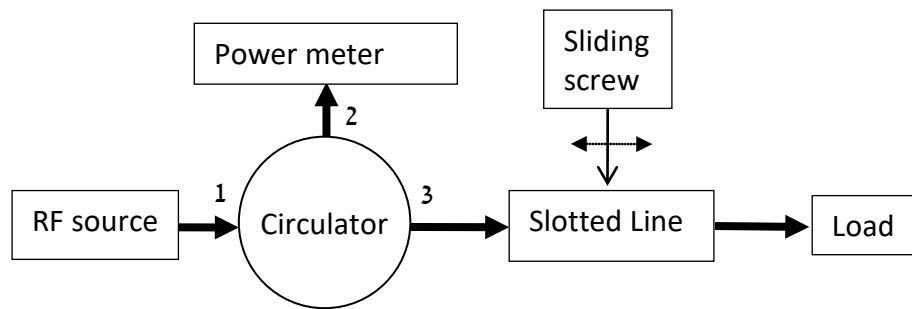
נשתמש ב-T הקסם כמוראה באיור מס' 6.3 כדי לממש מערך תיאום על ידי שני יתדות. לשם כך נתקין בהדקים 2 ו-3 סיומות קצר ניידות, ובהדקים 1 ו-4 יחוברו המקור והעומס בהתאמה.



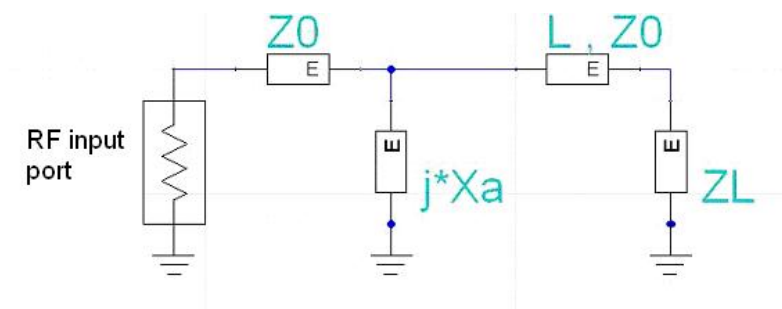
איור מס' 6.3: סימוני ההדקים בהתקן T קסם לצורך תיאום עכבות.

## שאלות הכנה

1. בניסוי זה נשתמש בהתקן Slide-screw tuner כמוראה באיור מס' 6.2 לצורך תיאום עומס שיותקן בקצהו. התיאום מתבצע על ידי שינוי מיקום ועומק הבורג (היתד) בגלבו. בהתייחס לסכמה המוצגת באיור מס' 6.4:
  - א. יש לפתח ביטוי לעכבה המשוקפת לכניסה בתלות בעכבת העומס ובמיקום וריאקטנס הבורג, בהתאם לתרשים התמורה שבאיור מס' 6.5.
  - ב. האם ניתן לתאם כל עכבת עומס לגלבו באמצעות התקן זה?

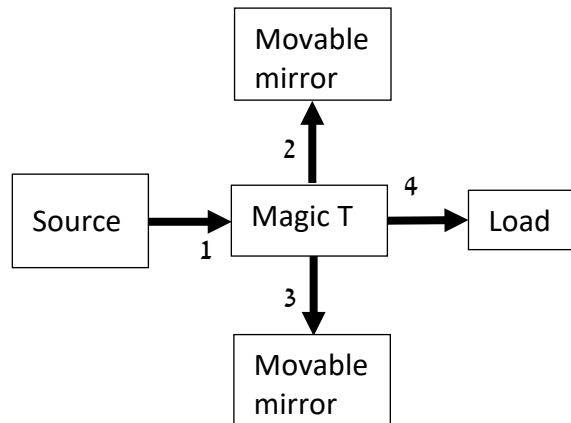


איור מס' 6.4: מערך לתאום עכבות באמצעות יתד אחת הניתנת להזזה.



איור מס' 6.5: מעגל תמורה ל-Slide-screw tuner.

2. בשיטה אחרת לתיאום עכבות נעשה שימוש בשתי יתדות קבועות המרוחקות מרחק קבוע  $z_0$  מזו (Double-stub tuner) כך שניתן לשלוט באורכן בלבד ולא במיקומן (להבדיל מהשימוש ביתד יחיד משתנה במיקום ובאורך). האם ניתן לתאם בשיטה זו כל עומס בתדר יחיד? אם כן, באילו תנאים?
3. מערך לתיאום באמצעות T-קסם ושתי סיומות קצר (מראות) הניתנות להזזה (E-H tuner) מוצג באיור מס' 6.6:
- א. האם שיטה זו שקולה לתיאום באמצעות שני יתדות?
- ב. פתח ביטוי לעכבה המשוקפת לכניסה בהדק 1 בתלות בעכבת העומס בהדק 4 ובמיקומי המראות ביחס להדקים 2 ו-3, כלומר האורכים  $l_2$  ו- $l_3$ . בסס את הפיתוח על מטריצת הפיזור (S-matrix) של T-קסם אידיאלי, שבו מותקנים קצרים בהדקים 2 ו-3 במרחקים שונים  $l_2$  ו- $l_3$  מההדקים.
- ג. מצא ערכי  $l_2$  ו- $l_3$  הנדרשים לתיאום עומסים שונים לבחירתך על גבי דיאגרמת סמית.
- ד. האם ניתן לתאם כל עומס באמצעות התקן זה?
4. השווה את שיטות התיאום שלעיל לשיטת התיאום באמצעות שלוש יתדות (Triple-stub tuner).



איור מס' 6.6: מערך לתאום עכבות באמצעות T-קסם ושתי מראות הניתנות להזזה (E-H tuner).

### רשימת ציוד

1. מערך גלבו מחורץ.
2. מד הספק.
3. עומסים שונים.
4. נתח רשת ווקטורי.
5. יתדות לתיאום, Slide-screw tuner.
6. צומת T-קסם ושתי מראות מתכוונות.
7. מחברים ומתאמים.
8. כבלים קואקסיאליים.

### תכולת הניסוי

1. תיאום עכבות של עומסים שונים.
2. תיאום באמצעות יתד אחת (Slide-screw tuner).
3. תיאום באמצעות T קסם ושתי מראות הניתנות להזזה (E-H tuner).

### מהלך הניסוי

1. בניסוי זה נתאם את העומסים הבאים :

- גלבו פתוח בקצה.
- צמצם השראי ולאחריו עומס מתואם.
- צמצם קיבולי ולאחריו עומס מתואם.

2. תאום עכבות בעזרת בורג מתכוונן:

א. יש לחבר את מערך הניסוי לפי איור מס' 6.4 עבור כל אחד מהעומסים, או לחלופין לחבר לנתח הרשת. עיי שינוי מיקום הבורג ועומקו יש להגיע למצב של תיאום. במקום מקור ה-RF הנפרד והסירקולטור

ניתן להשתמש בנתח רשת ווקטורי. בתצוגת דיאגרמת סמית יש לקבוע span של 10 MHz סביב תדר כלשהו ב-X-Band לבחירתכם.

- ב. רשמו את מקדם ההחזרה כאשר הבורג מחוץ להתקן (ללא תיאום) וחלצו את עכבת העומס.
- ג. עיי שינוי מיקום הבורג ועומקו נסו לתאם את העומס בתדר העבודה הרצוי.
- ד. עיי שינוי תדר העבודה, מצאו את רוחב הסרט עבור מקדם החזרה קטן מ-1.0.
- ה. אחרי שהגעתם למצב של תיאום מיטבי, מדדו את מקדם ההחזרה (שמרו את התוצאות) כפונקציה של מיקום הבורג (לפחות 5 מדידות) ועומקו (לפחות 5 מדידות).
- ו. מצאו נקודות תיאום נוספות בהן מתקבל מינימום הספק חוזר. האם ניתן להצביע על קשר בין המרחק ביניהן לבין פרמטרי הגלבו ?

### 3. תאום עכבות בעזרת E-H tuner :

- א. חברו את מערך הניסוי כמוראה באיור מס' 6.6. השתמשו במצמד ודיודת גילוי בין המקור לבין כניסת T-קסם, או בנתח הרשת.
- ב. נסו להשיג תיאום על ידי שינוי מיקומי המראות.
- ג. אחרי שהגעתם למצב של תיאום מיטבי, מדדו את מקדם ההחזרה (שמרו את התוצאות) כפונקציה של מיקום המראות (לפחות 5 מדידות).
- ד. עיי שינוי תדר העבודה, מצאו את רוחב הסרט עבור מקדם החזרה קטן מ-1.0.
- ה. מצאו נקודות תיאום נוספות בהן מתקבל מינימום הספק חוזר.

### עיבוד וניתוח התוצאות

1. עבור כל ניסיון תיאום, יש להתוות גרף של מקדם ההחזרה בתלות במיקום האלמנטים המשמשים לתיאום (בורג, מראה וכיו"ב) עבור שלושה מיקומים לבחירתך (ש אחד מהם מיטבי).
2. חשב את עכבת העומס לפני ואחרי התיאום.
3. בכמה גדל ההספק הנמסר לעומס עם תיאום עכבות לעומת המצב ללא תיאום עבור כ"א מהעומסים ?
4. במקרים בהם הצלחתם לתאם, מהו רוחב הסרט עבורו מתקבל תיאום סביר ? (לדוגמא, החזרה קטנה מ-10 dB). הסבירו כיצד חשבתם פרמטר זה מהמדידות, וציינו חריגות אם התקבלו במדידות.
5. תאר את מהלך התיאום בעזרת Slide-screw tuner במונחים של תאום בעזרת יתד אחת. על מה משפיע עומק הבורג ועל מה משפיע מיקומו ?
6. בניסויים בהם התקבלו כמה נקודות תיאום, כיצד קשורים המרחקים ביניהן לפרמטרי הגלבו ?
7. הסבר את מהלך התיאום בעזרת E-H tuner בהסתמך על הביטוי למקדם ההחזרה שפתחת בדו"ח המכין, והשווה את תוצאות הניסוי לחישובים.
8. השווה בין שיטות התיאום מבחינת טיב התיאום, מורכבותו ומגבלותיו.

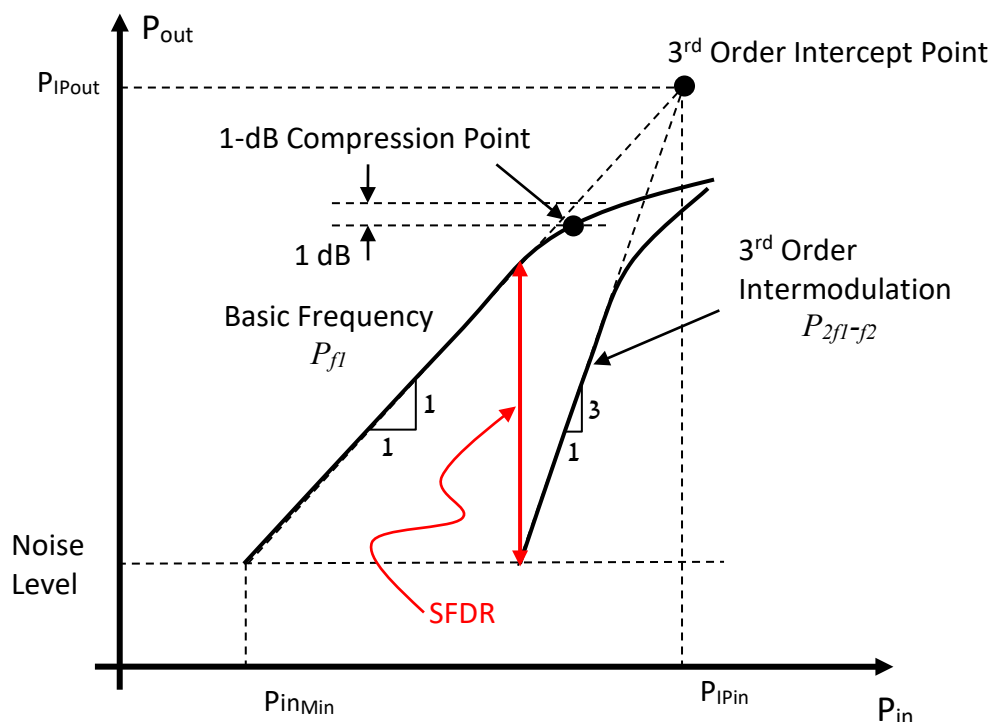
## ניסוי מס' 7 – מגברים

### יעד לימודי

1. הכרת פרמטרים אופייניים של מגברים.
2. הכרת סוגים שונים של מגברים למיקרוגל.
3. הכרת מבנה המגבר כמערכת מפולגת אקטיבית.

### מבוא

בניסוי זה נמדוד באמצעות נתח רשת ווקטורי פרמטרים שונים של מגברי RF ובפרט הגבר, רוחב סרט, עקום הענות, ונקודת דחיסה (1-dB compression point). תופעת הרוויה במגבר נובעת מכך שרכיבים אקטיביים מוגבלים מבחינת ההספק שביכולתם להפיק במוצאם. כאשר המגבר פועל בתחום הליניארי, הגברו קבוע. כשהספק אות הכניסה גדל, המגבר נכנס לתחום שבו שבו הספק אות המוצא אינו מוגבר עוד באותו יחס כמו עבור "אות קטן". הנקודה בה ההגבר פוחת בשיעור של 1 dB ביחס להגבר אות קטן נקראת 1 dB compression point. הפחתה גדולה יותר בהגבר תתרחש מעבר לנקודת הדחיסה, המוגדר כתחום הרוויה של המגבר (כמוראה באיור מס' 7.1). הספק כניסה גבוה יותר עלול אף לגרום לנזק למגבר.



איור מס' 7.1: הספק מוצא של מגבר בתלות בהספק הכניסה ופרמטרים אופייניים.

כפי שראינו בדיון קודם על ערבליים (Mixers), אינטרמודולציות נוצרות על ידי רכיבים לא ליניאריים ויוצרות אותות נוספים בתדרי סכום והפרש של תדרי האותות הקיימים וההרמוניות שלהם. בניסוי זה

נתעניין בעיקר באינטרמודולציות מסדר שלישי, המתקבלות בתדרים  $2f_1 - f_2$ , כאשר  $f_1$  ו- $f_2$  הם תדרים כלשהם המרכיבים את ספקטרום אות הכניסה ברוחב הסרט הנתון. האינטרמודולציה מסדר שלישי מאופיינת בכך שהתדר המתקבל בה מופיע בתוך רוחב סרט אות הכניסה, ועל כן אינו מסווג (כמו תדרי ההרמוניות הגבוהות למשל). כמו כן, תפוקת האינטרמודולציה מסדר שלישי גדלה ביחס להספק הכניסה בשיפוע תלול פי שלוש (ב-dB) ביחס לאות היסודי בו אנו מעוניינים, כמוראה באיור מס' 7.1. עם זאת, האינטרמודולציה מסדר שלישי מבצבצת מעל רעש הרקע בהספקי כניסה גבוהים משמעותית מאשר האות היסודי, ועל כן קיים תחום דינמי שבו האות היסודי מופיע לבדו במוצא. תחום זה מכונה SFRD (Spurious-free dynamic range) כמוראה באיור מס' 7.1. בהספק גבוה יותר מתקבלת נקודת מפגש בהמשכה הלינארית של קווי ההגבר של האות היסודי ושל האינטרמודולציה מסדר שלישי. נקודה זו (בדרך כלל מדומה, שכן היא מחוץ לתחום הלינארי) מכונה  $IP3$ , 3<sup>rd</sup> order intercept point, כמוראה באיור. בדרך כלל רצוי שנקודה זו תהיה מרוחקת ככל האפשר כדי להפחית בעיוות האות במוצא. בפועל, המגבר נכנס לרוויה בהספקים נמוכים יותר, כך שנקודת הדחיסה (1-dB compression point) עשויה להיות נמוכה בכ-10 dB ויותר מאשר נקודת ה- $IP3$ .

## שאלות הכנה

- יש להסביר בקצרה את המושגים הבאים, ולהציע כיצד למדוד אותם:
  - הגבר (Gain)
  - נקודת דחיסה (1-dB compression point)
  - אינטרמודולציה (Intermodulation)
  - נקודת ה- $IP3$
  - ספרת רעש NF (Noise Figure)
- אילו הבדלים מוכרים לך בין מימושי מגברים בתדר גבוה ונמוך (לדוגמא 10GHz ו-1kHz בהתאמה)? יש לתאר את שיקולי התכנון והמימוש הידועים לך, ולהציג סכמות חשמליות להמחשה.
- יש למצוא דף נתונים של מגבר כלשהו לתדר מיקרוגל ( $>1$  GHz) ולהסביר את משמעות הפרמטרים העיקריים המצויינים בו.
- מה סדר הפעולות הרצוי לדעתך בהפעלת מגבר טרנזיסטורי בתחום המיקרוגל? יש להתייחס בפרט לסדר חיבור מתחי ההפעלה השונים, וחיבורי המוצא והמבוא של המגבר.
- יש לפתח ביטוי לספרת הרעש הכוללת המתקבלת עבור קסקדה של מגברים שכל אחד מהם בעל הגבר וספרת רעש ידועים.
- נתונים שני מגברים, האחד בעל הגבר 20dB וספרת רעש 6, והשני בעל הגבר 10dB וספרת רעש 3, אותם יש לחבר בקסקדה. מצא את ההגבר וספרת הרעש בשתי האפשרויות לסדר החיבור ביניהם. מה משמעות התוצאה שהתקבלה?

## רשימת ציוד

1. מגבר מיקרוסטרף פתוח.
2. נתח רשת ווקטורי.
3. נתח תדר.
4. מחולל RF.
5. מחברים ומתאמים.
6. כבלים קואקסיאליים.

## תכולת הניסוי

1. מדידת הגבר.
2. מדידת IP3.
3. מדידת 1-dB Compression Point.
4. מדידת יחס אות לרעש SNR וספרת רעש בשרשרת מגברי RF.

## מהלך הניסוי

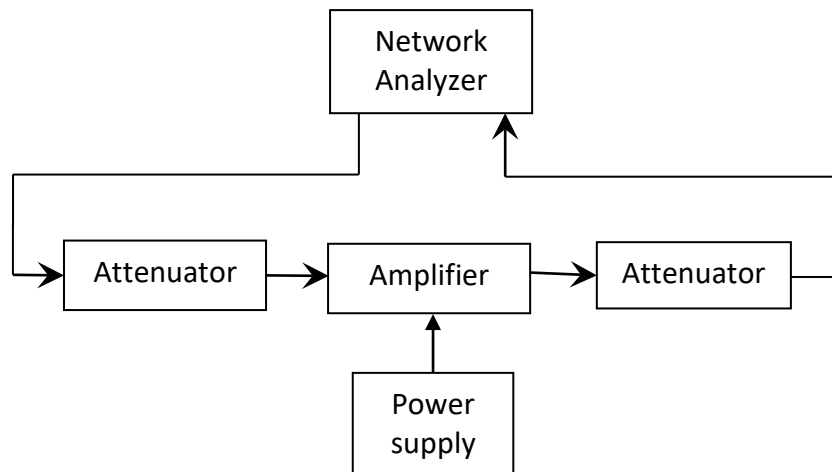
### 1. מדידות המגבר:

- 1.1. בחרו שני מנחתים בערכים של 10dB לפחות. מדדו את תגובת התדר שלהם בעזרת נתח הרשת.
- 1.2. הרכיבו את מערך הניסוי לפי איור 7.2. יש להקפיד במשך כל הניסוי על חיבור מנחתים של 10 dB לפחות במוצא נתח הרשת ובמוצא המגבר כמוראה באיור למניעת פגיעה בהם.
- 1.3. כווננו את נתח הרשת הווקטורי למצב Frequency Sweep. התוו את תגובת התדר של המגבר עבור הספקי כניסה שונים בטווח 50dBm - עד 10dBm (לפחות 5 מדידות מייצגות).
- 1.4. מהו רוחב הסרט של המגבר הנבדק? מהו התדר המרכזי של פעולתו?
- 1.5. העבירו את הנתח למצב Power Sweep, והציבו טווח הספק המתאים למגבר. מדדו את אופיין ההגבר של המגבר כתלות בהספק. חלצו מהגרף שהתקבל את נקודת ה-1-dB compression. מתוך הגרף מצאו גם את ההגבר בתחום הלינארי.
- 1.6. חברו את המגבר לנתח התדר לפי איור מס' 7.3. כווננו את שני תדרי הכניסה לתחום בו ההגבר קבוע בקרוב (לפי המדידה הקודמת). הגדילו בהדרגה את הספק הכניסה עד להופעת אינטרמודולציה מסדר שלישי ומצאו את נקודת ה-IP3.
- 1.7. הציגו את ספקטרום המוצא שהתקבל בסעיף הקודם וציינו את מרכיבי תכולתו הספקטראלית.

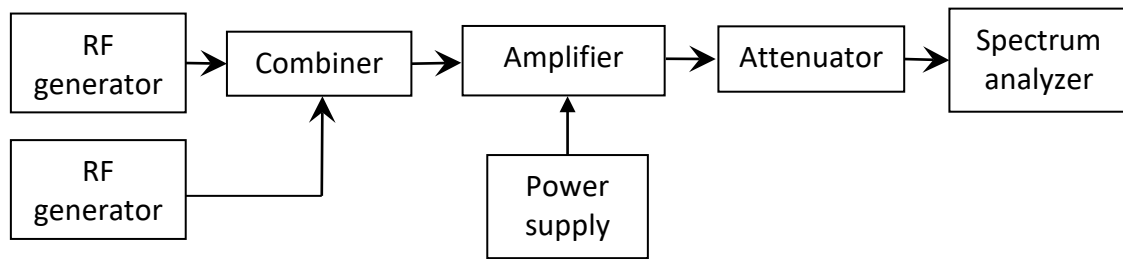
### 2. מדידת SNR:

- 2.1. חברו את כניסת המגבר למחולל RF ואת מוצאו לנתח תדר עם מנחתים כנ"ל. מדדו את הספק האות ואת הספק הרעש במוצא המגבר ובכניסתו. חשבו את יחסי האות לרעש וספרת הרעש של המגבר.





איור מס' 7.2: מערך למדידת הגבר באמצעות נתח רשת וקטורי.



איור מס' 7.3: מערך למדידת IP3 של מגבר.

### עיבוד וניתוח התוצאות

- יש להתוות את תגובות התדר של המגבר הנמדד בהספקי הכניסה השונים שבדקתם. נא להסביר את השוני בין הגרפים שהתקבלו.
- יש להציג את אופיין  $P_{in}-P_{out}$  של המגבר במתכונת איור מס' 7.1. מתוך הגרף יש לחלץ את ההגבר בתחום הליניארי ואת נקודת הדחיסה 1 dB.
- עבור איזה הספק כניסה מינימאלי הופיעה לראשונה אינטרמודולציה מסדר שלישי? באיזה תדר? נא לחשב את נקודת IP3 והציגו אותה על הגרף שקבלתם בסעיף הקודם (שאלה 2 לעיל).
- באילו תדרים הופיעו הרמוניות בספקטרום המוצא כאשר הכנסתם שני אותות בתדרים שונים?
- יש לחשב את ה-SNR בכניסה ובמוצא של המגבר, ומכאן למצוא את ספרת הרעש של המגבר.
- יש למצוא עבור המגבר את אופיין  $P_{in}-P_{out}$ , נקודת דחיסה 1 dB, הגבר בתחום הליניארי, תגובת התדר של המגבר, נקודת IP3, וספרת רעש SNR, ולהשוותם לנתונים הידועים של מגבר זה.

## ניסוי מס' 8 – רכיבים במעגלי מיקרוסטרופ

### יעד לימודי

1. הכרת טכנולוגיית מיקרוסטרופ.
2. הכרת רכיבי מיקרוגל פסיביים שונים במימוש מיקרוסטרופ.

### מבוא

בניסוי זה נמדוד ונאפיין רכיבים מסוג SMT (Surface Mount). חלקם משתייכים למשפחת התקני MIC (Microwave Integrated Circuits), הנמצאת בתווך בין שני טיפוסים שונים של התקנים: האחד של התקנים בדידים המזוודים בקופסאות סגורות (Connectorized) ומחוברים על ידי מוליכי גלים מסוג קואקס או גלבו לרכיבים שכנים, והשנייה של המעגלים המונוליטיים MMIC (Monolithic MIC).

היתרון בעבודה עם התקנים מזוודים הוא העדר צימוד פרזיטי בין הרכיבים השונים במעגל, אך חסרונם בנפח ומשקל עודפים, וכן במחירים הגבוה. טכנולוגיות MMIC מאפשרת הכללת מערכים מיניאטוריים שלמים שבהם משולבים יחדיו רכיבים אקטיביים ופסיביים, ויתרונותיה ברורים. עם זאת, נדרש ליישומה ידע רב תחומי הכולל בנוסף להנדסת מיקרוגלים גם פיסיקה וטכנולוגיה של מוליכים למחצה, תהליכי עיבוד מכאני מיקרוני, זיווד, סימולציות אלקטרומגנטיות תלת-ממדיות ופיזור חום. על כן זו משימה מורכבת ביותר לייצר מערכי מיקרוגל שלמים בטכנולוגיית MMIC ובדרך כלל עושים זאת לייצור התקנים מוכללים ותתי מכלולים. עם זאת, בחזית הטכנולוגיה נמצאים כיום מקלטים-משדרים זמינים מסחרית בתדרי גמ"מ במחירים ברי תחרות.

### שאלות הכנה

1. מצא בספרות נוסחאות לניתוח ולתכנון (אנליזה וסינתזה, בהתאמה) לחישוב עכבת קו מיקרוסטרופ כפונקציה של ממדי הקו, המקדם הדיאלקטרי של החומר, והתדר. יישם את נוסחאות האנליזה לצורך ניתוח של קו מיקרוסטרופ קיים לבחירתך, ומציאת עכבתו האופיינית ומהירות הגל בו. את נוסחאות הסינתזה יישם לצורך תכנון קו מיקרוסטרופ חדש על פי העכבה האופיינית הנדרשת.
2. לכל אחד מההתקנים הבאים תאר מימוש אחד לפחות בטכנולוגיית מיקרוסטרופ, הסבר בקצרה את אופן פעולת ההתקן, והצג מטריצת פיזור שלו עם איור המתאים להדקיו:

א. קו תמסורת

ב. מצמד כיווני

ג. מפצל וילקינסון

ד. היבריד  $90^\circ$  Hybrid

ה. מתאם עכבות בתדר יחיד.

ו. מתאם עכבות רחב סרט.

ז. מסנן מעביר פס BPF.

ח. מצמד "מרוץ עכברים" טבעתי (Rat-race coupler).

## רשימת ציוד

1. רכיבי מיקרוגל ממומשים במיקרוסטרופ:

- א. מצמד
- ב. מפצל וילקינסון
- ג. Hybrid 90°
- ד. מסנן BPF
2. נתח רשת ווקטורי
3. מד זחית (קליבר)
4. מד התנגדות
5. מחברים ומתאמים
6. כבלים קואקסיאליים

## תכולת הניסוי

מדידת פרמטרי פיזור של התקני מיקרוגל פאסיביים הממומשים בטכנולוגית מיקרוסטרופ.

## מהלך הניסוי

מדידת פרמטרי פיזור של התקני מיקרוסטרופ:

1. כיילו את נתח הרשת לפי 2-port calibration.
2. מדדו את מידות ההתקן הרלוונטיות (למשל רוחבי ואורכי הקווים), ואת הרכיבים הפסיביים שעליו אם קיימים. בנוסף, יש לאתר את סוג המצע הדיאלקטרי ולמצוא את עוביו.
3. מדדו את פרמטרי הפיזור (S parameters) של ההתקנים הבאים, תוך כדי ציון מספר ההדק הרלוונטי ושרטוט ההתקן (חזרו על הכיול במידת הצורך, והניחו הדדיות אם אפשר):

- א. מצמד
- ב. מפצל וילקינסון
- ג. Hybrid 90°
- ד. מסנן BPF

## עיבוד וניתוח התוצאות

1. נתחו כל אחד מההתקנים שנמדדו על פי ההנחיות הבאות:
  - 1.1. יש להציג איור של ההתקן עם מספרי סידוריים של ההדקים.
  - 1.2. לפי הגרפים שנמדדו, יש להציג עבור כל התקן את פרמטרי S של ההתקן בתלות בתדר. מהו תחום תדרי הפעולה המתאים להתקן שנמדד? הסברי.

- 1.3. יש להציג את מטריצת הפיזור בתדר המרכזי של ההתקן.
- 1.4. עבור כל התקן, יש להשוות בין פרמטרי ההעברה וההחזרה שהתקבלו במדידות לבין הצפוי על פי התיאוריה ולהסביר ממה נובעים ההבדלים (אם קיימים).
2. עבור ה-Hybrid 90°, יש לחשב בקירוב מסדר ראשון את המקדם הדיאלקטרי של המצע לפי תוצאות המדידות בתלות בתדר ולפי ממדי ההתקן.
3. עבור מפצל Wilkinson, יש להסביר כיצד ניתן למדוד את ערך הנגד שבין שני ענפי היציאה, ומדוע הוא מותקן שם. יש למצוא על פי המדידות את ערך נגד זה והשווה לערך הצפוי.

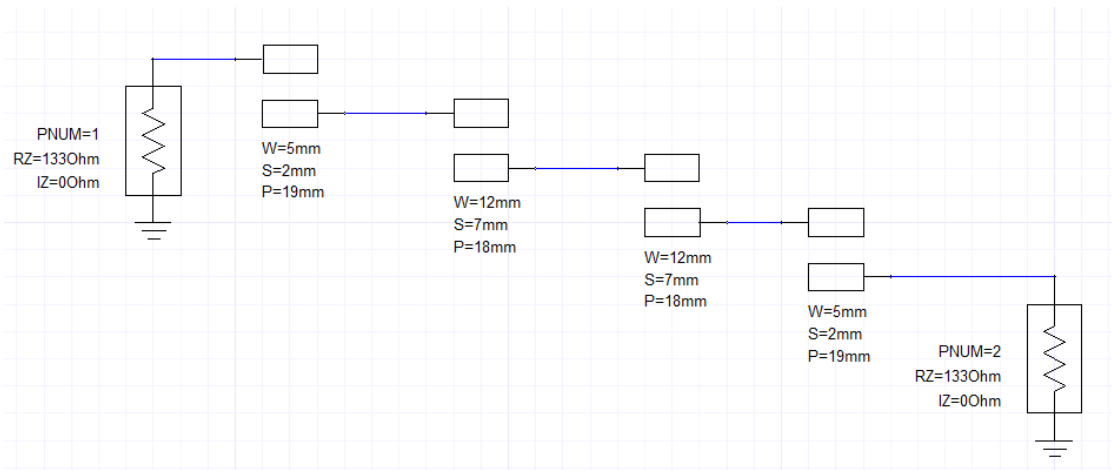
## ניסוי מס' 9 – תכנון ובניית התקנים פסיבים במיקרוסטרף

### יעד לימודי

התנסות מעשית בתכנון ובניית התקני מיקרוגל פסיביים במיקרוסטרף, באמצעים פשוטים יחסית.

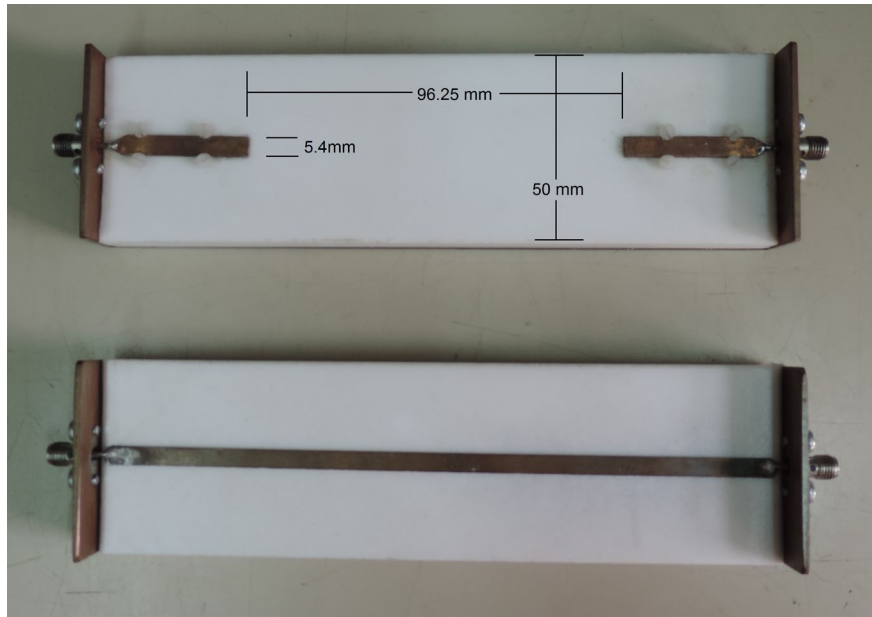
### שאלות הכנה

1. מהם תפקידיו של המצע הדיאלקטרי בקו מיקרוסטרף ?
2. אלו פרמטרים הקשורים להתקדמות הגל האלקטרומגנטי בקו מיקרוסטרף מושפעים מהמצע הדיאלקטרי ?
3. יש לממש את המסנן הבא בתוכנת סימולציה לבחירתך (מומלץ Ansoft Designer). המצע הוא טפלון, ועוביו 9.5 מ"מ כמתואר באיור מס' 9.1 :



איור מס' 9.1 – תכנון מסנן בעזרת Ansoft Designer

- יש לערוך סימולציה של פרמטרי הפיזור של ההתקן. איזה סוג מסנן התקבל ?
- יש לחשב את העכבות האופייניות והאורכים החשמליים של הקווים בשרטוט ללא הקו הנוסף המצומד להם, בתדר 3 GHz. יש להסביר איכותית את אופן פעולת ההתקן תוך התייחסות לפרמטרים אלו.
4. יש לבחור אחד מסוגי המסננים הבאים : LPF, Notch Filter, HPF או BPF (שונה מהקודם). לרשותך מצע דיאלקטרי באורך של כ-9 סנטימטרים המוראה באיור מס' 9.2. חומר המצע הוא טפלון, ועוביו 9.5 מ"מ. יש לתכנן מימוש למסנן שבחרתם במיקרוסטרף (על פי נתוני מצעים דיאלקטריים הזמינים במעבדה, ובהתאם ליכולת הביצוע בפועל), לבצע סימולציה למסנן הנבחר בתוכנה לבחירתך (כגון CST, Ansoft Designer, Matlab וכיו"ב), ולהסביר איכותית את פעולת ההתקן.
  5. לחילופין, יש לתכנן בגישה דומה מערך כלשהו לבחירתך לתיאום עכבות לקטע קו שעכבתו  $100 \Omega$ . המימוש יתבצע ע"י גזירת מקטעי הקווים מסרט מתכת והדבקתם בתווך שבין שני מחברי SMA במתקן התשתית (התאום יתבצע בשני הדקי קטע קו זה).



איור מס' 9.2: תשתית מעגל המיקרוסטריפ עליו ניתן לממש את ההתקן המתוכנן בהדבקת טייפ מתכתי.

### רשימת ציוד

1. תשתית להתקן מיקרוסטריפ עם אפשרות החלפת המצע הדיאלקטרי.
2. מדבקות אלומיניום.
3. נתח רשת ווקטורי.
4. מחברים ומתאמים.
5. כבלים קואקסיאליים.

### תכולת הניסוי

1. תכנון באמצעות סימולציה ובנייה בפועל של התקן פסיבי כלשהו בעל שני הדקים במימוש פשוט דמוי מיקרוסטריפ. אפשרויות לדוגמא לבחירת ההתקן הן מסנן (LPF, Notch Filter, HPF או BPF) או מתאם עכבות.
2. ההתקן יבנה כתוספת על תשתית קו מיקרוסטריפ קיים באמצעות מדבקות מתכתיות.
3. עריכת השוואה בין יעדי התכנון לבין הביצועים בפועל.

### מהלך הניסוי

1. בנו את התקן אותו תכננתם בעבודת ההכנה.
2. מדדו את הפרמטרים הרלוונטיים באמצעות נתח הרשת הווקטורי.
3. נסו לשפר ביצועים על ידי כיוונונים ניסיוניים.

### עיבוד וניתוח התוצאות

1. השווה את התוצאות שקיבלתם במדידות לתכנון התיאורטי שהצגתם בדוח המכין.
2. האם התקבלו פערים משמעותיים בין המודל לבין הביצוע ? אם כן, נסה להסביר את מקורם.

## ניסוי מס' 10 – מדידת מקדם דיאלקטרי

### יעד לימודי

מדידה ושערוך של מקדם דיאלקטרי קומפלקסי עבור חומרים שונים.

### שאלות הכנה (ניתן להיעזר בנספח המופיע באתר)

1. המקדם הדיאלקטרי של החומר מייצג באופן מקרוסקופי מוכלל אפקטים שונים ברמה האטומית והמולקולארית בחומר. יש לתארם בקצרה ולהסביר את האופן בו הם משתקפים בייצוג המקרוסקופי.
2. מה השוני והדמיון בין מוליכות חשמלית לבין ההפסדים הדיאלקטריים (החלק המדומה של המקדם הדיאלקטרי). יש לתאר את מודל Drude לחישוב המקדם הדיאלקטרי של מוליכים.
3. יש למצוא בספרות את המקדמים הדיאלקטריים בתדרי מיקרוגל עבור החומרים הבאים: אויר, דלרין (Delrin), טפלון (Teflon), פרספקס (Perspex).
4. יש להסביר מהו מהוד, וכיצד ניתן לממש מהוד באמצעות מוליך גלים.
5. יש להסביר את פרמטרי המהוד - תדר התהודה וגורם הטיב – ולתאר כיצד ניתן למדוד אותם.
6. יש להסביר כיצד העמסה דיאלקטרית קטנה יחסית עשויה לשנות את תגובת המהוד. מצא/י נוסחה מתאימה, והסבר/י באילו הנחות השתמשת.
7. עבור מהוד גלבו מלבני המלא בחומר דיאלקטרי, יש לפתח נוסחה למציאת פרמטרי המהוד בידיעת המקדם הדיאלקטרי וטנגנס ההפסדים של חומר המילוי.
8. כיצד משפיע החומר ממנו עשוי הגלבו על פרמטרי המהוד?
9. כיצד משפיע המקדם הדיאלקטרי של חומר הממלא גלבו מלבני על תדרי הקטעון באופנים השונים?

### רשימת ציוד

1. תשתית להתקן מיקרוסטריפ עם אפשרות החלפת המצע הדיאלקטרי.
2. חומרים דיאלקטריים שונים.
3. נתח רשת ווקטורי.
4. גלבו מלבני הניתן למילוי דיאלקטרי.
5. מחברים ומתאמים.
6. כבלים קואקסיאליים.

### תכולת הניסוי

1. מדידת מקדמים דיאלקטריים של חומרים שונים באמצעות מהוד מיקרוסטריפ.
2. מדידת מקדמים דיאלקטריים של חומרים שונים באמצעות גלבו מלבני.

## מהלך הניסוי

מדידה באמצעות מהוד מיקרוסטריפ:

1. התקינו את המצעים הדיאלקטריים הבאים בתוך התקן המיקרוסטריפ, ומדדו את מקדמי ההחזרה וההעברה הווקטוריים (משרעת ופאזה) בתלות בתדר כאשר מחובר קצר להדקו השני של המהוד, עבור המילויים הבאים:
  - 1.1. אויר
  - 1.2. דלרין (Delrin).
  - 1.3. טפלון (Teflon).
  - 1.4. פרספקס (Perspex).
  - 1.5. חומר בעל הפסדים גבוהים.
  - 1.6. חול יבש.
  - 1.7. חול לח.
2. מדדו את המידות הפיזיות הרלוונטיות של ההתקן.

מדידה לפי תדר קטעון של גלבו מלבני:

3. חברו את הגלבו המלבני המלא בחומר דיאלקטרי למתאם גלבו-קואקס. השאירו את צידו השני פתוח.
4. חברו את מתאם הגלבו-קואקס לערוץ 1 של נתח הרשת הווקטורי ומדדו את מקדם ההחזרה בתלות בתדר. מצאו את תדר הקטעון.
5. מדדו את המידות הפיזיות הרלוונטיות של ההתקן.

## עיבוד וניתוח התוצאות

1. עבור מהוד המיקרוסטריפ, יש לחשב את המקדם הדיאלקטרי המרוכב ואת טנגנס ההפסדים של חומרי המצע, תוך כדי השוואה למצופה מהתיאוריה. הסבר/י מהם התנאים והמגבלות של המדידה.
2. יש לחשב את הניחות של קו התמסורת ולהסביר כיצד הוא קשור לפרמטרי המהוד.
3. האם המקדם הדיאלקטרי האפקטיבי בקו התמסורת מתאים למקדם הדיאלקטרי שחושב בסעיף הקודם? הסבר/י.
4. עבור גלבו מלבני, יש לחשב את המקדם הדיאלקטרי של חומר המילוי על פי ממדי הגלבו ותדר הקטעון שנמדד.
5. האם הבחנת באחד המקרים בתלות של המקדם הדיאלקטרי בתדר? אם כן, פרטי.
6. יש ציין ולהסביר את מגבלות המדידה והשערוך בשיטות השונות.



## ניסוי מס' 11 אנטנות וקרינה

### יעד לימודי

1. הכרת מושגים בתורת האנטנות.
2. התנסות במדידות בסיסיות של אנטנות וקרינה.

### שאלות הכנה

1. מה ההבחנה בין שדה-קרוב לשד-רחוק ביחס לאנטנה ? כיצד הבחנה זו מוערכת כמותית ?
2. מהו עקום הקרינה של אנטנה ? כיצד ניתן למדוד אותו ?
3. נסמן ב- $D(\theta, \phi)$  את כיווניות האנטנה, כאשר הזוויות  $\theta, \phi$  הן קואורדינטות כדוריות. כיצד מוגדרת כיווניות זו, וכיצד היא באה לביטוי בעקום הקרינה ?
4. הגדר את המושג הגבר  $G$  עבור אנטנה. הסבר את משמעות ההגבר תוך שימוש בפרמטר של צפיפות הספק ליחידת זווית מרחבית  $S(\theta, \phi)$  ביחס לשידור של הספק כניסה זהה באנטנה כלל כיוונית.
5. מהו המפתח האפקטיבי (Effective aperture) של האנטנה וכיצד הוא מוגדר לאנטנת שופר הפועלת באופן היסודי שלה, עבור שני מישורי השידור הראשיים (E ו-H) ?
6. מהן אונות צד (Side-lobes) ? כיצד ניתן לקבוע את רוחב אלומת השידור עבור האונה הראשית (Main lobe) ?
7. ברשותך שתי אנטנות זהות. כיצד ניתן למצוא את הגבר האנטנה על פי מדידות במרחב חופשי בהתבסס על נוסחת Friis ?
8. תאר התפשטות גל מישורי בקיטוב קווי (ניצב ואופקי), קיטוב מעגלי (ימני ושמאלי), וקיטוב אליפטי (ימני ושמאלי), מנקודות המבט של המשדר והמקלט.
9. מה חשיבות הקיטוב בהקשר של אנטנות? אם ברשותנו שתי אנטנות זהות מבחינת קיטוב, האם ניתן לשדר באופן יעיל מהאחת לשנייה במקרים הבאים :
  - א. קיטוב האנטנות ליניארי, והוא באותו כיוון בשתי האנטנות.
  - ב. קיטוב האנטנות ליניארי, והאחת מוטה בזווית 90 מעלות ביחס לשנייה.
  - ג. קיטוב האנטנות מעגלי ימני, והוא באותו כיוון בשתי האנטנות.
  - ד. קיטוב האנטנות מעגלי ימני, ואחת מסובבת 90 מעלות ביחס לשנייה.
  - ה. שתי האנטנות בקיטוב מעגלי, אבל אחת בקיטוב ימני והשנייה בקיטוב שמאלי.
10. מהם קיטובי הגלים במקרים הבאים :

$$\vec{H}(\vec{r}) = (j-1)\hat{x}e^{-jk_z z}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = (2\hat{y} + j\hat{x})e^{-jk_z z}$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = [(1+j)\hat{x} + (1-j)\hat{z}]e^{jk_y y}$$

11. בהתייחס לאנטנת שופר, מהם כיווני H-plane ו- E-plane ביחס למפתח האנטנה ? בהינתן מידות השופר, חשב את כיווניות האנטנה (מצא נוסחה מתאימה בספרות). בהנחת נצילות של 60%, מהו הגבר האנטנה הצפוי לאנטנה זו ?
12. יש למצוא ביטוי לעקום הקרינה של אנטנת שופר במישורי E ו-H כאשר אופן התנודה המעורר את הגלבו בכניסת האנטנה הוא  $TE_{10}$  וניתן להניח שהוא נשמר במפתח.
13. [רשות] יש לערוך סימולציה לאנטנת שופר בתוכנה לבחירתך (כגון CST). אופן התנודה המעורר את הדק כניסת האנטנה הוא  $TE_{10}$ . יש להציג עקומי קרינה במישורי E ו-H. כיצד משפיעים ממדי אנטנת שופר על ההגבר שלה ? בהינתן ממדי האנטנה, מה תחום התדר המתאים עבורה ?

### רשימת ציוד

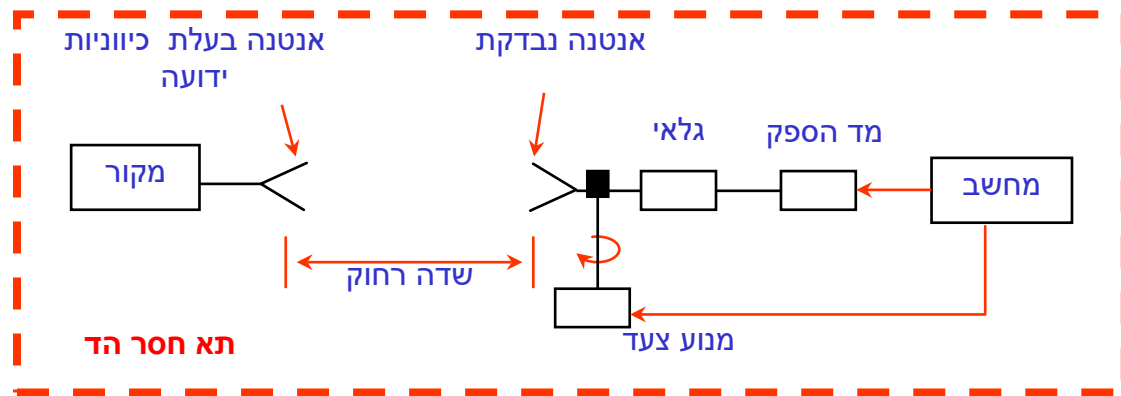
1. מקור RF.
2. חצובות לאנטנות.
3. אנטנות שונות.
4. אוסצילוסקופ.
5. מד הספק RF.
6. מחברים ומתאמים.
7. כבלים קואקסיאליים.

### מטרות הניסוי

1. מדידות פילוג בשדה רחוק והגבר של אנטנת שופר.
2. מדידות עקומי קרינה של אנטנות שונות.

### מהלך הניסוי

1. מדידת הגבר של אנטנת שופר :
  - 1.1. מדדו את הגודל הפיזי של אנטנת השופר.
  - 1.2. איור מס' 11.1 מתאר מערך מדידה ממוחשב למדידת עקום קרינה. בניסוי תחברו מערך דומה, אך ללא מחשב ומנוע הצעד. בניסוי יותקנו אנטנות שופר זהות לשידור ולקליטה על גבי חצובות. סריקת הזווית תתבצע ידנית. מקור השידור ומדידת ההספק עשויים להיות נפרדים או מוכללים בנתח רשת סקאלרי או ווקטורי.
  - 1.3. המדידה בניסוי תתבצע בחלל המעבדה או בפרוזדור ולא בתא חסר הד. נסו להעריך את שגיאת המדידה הכרוכה בכך.



איור מס' 11.1: מערך מדידת עקום קרינה לאנטנה (בניסוי תתבצע סריקת זווית ידנית).

- 1.4. כווננו את האנטנה הקולטת אל ציר האנטנה המשדרת.
- 1.5. שדרו הספק ידוע במרחקים שונים בין האנטנות בשדה קרוב ובשדה רחוק (כ-20 מדידות). מדדו את ההספק המגיע לאנטנה הקולטת.
- 1.6. מדדו את עקומי קרינה של האנטנות הבאות (אנטנת הקליטה נשארת זהה בכל הסעיפים):
  - א. אנטנת שופר (כולל מדידה בודדת של Cross polarization) – בשני קיטובים (H ו-E).
  - ב. אנטנת שופר בגודל אחר (בקיטוב לבחירתך).
  - ג. עבור אותה אנטנה (סעיף ב') יש למדוד בתדר נוסף לבחירתכם בקיטוב אחד כלשהו.

#### עיבוד וניתוח התוצאות

1. בעזרת נוסחת Friis יש למצוא מהמדידות את הגבר אנטנת השופר המתקבל במרחקים שונים.
2. מהו הטווח ממנו ניתן להניח שדה רחוק? השווה את התוצאה הניסיונית לנוסחת השדה הרחוק.
3. יש לשרטט את עקומי קרינה של האנטנות שנמדדו בניסוי, ולחשב מהן את הפרמטרים הרלוונטיים כגון כיווניות, הגבר, רוחב אלומה, קיטוב, ורמת אונות הצד (ככל שניתן).
4. יש להשוות את תוצאות המדידות עם הצפוי תיאורטית.
5. יש להשוות בין האנטנות בהתייחס לתוצאות שנמדדו, בהתייחס לפרמטרים שמדדת בסעיף 3, ולהראות את הזיקה בין פרמטרי האנטנה השונים (כגון הגבר לעומת רוחב אלומה, אונות צד וכו').

## ניסוי מס' 12 יישומי מכ"ם

### יעדים לימודיים

1. הכרת אפקט דופלר.
2. הכרת מימוש פשוט של מכ"ם דופלר.
3. מימוש גלאי FM.
4. הכרת פיזור ספקטרום ומכ"ם Linear-FM.
5. הכרת המושג שח"ם, שטח חתך מכ"ם (Radar Cross Section, RCS).

### שאלות הכנה

1. יש להסביר בקצרה את אפקט דופלר, ולפתח נוסחה המקשרת בין תדר דופלר למהירות המטרה עבור משדר ניח ומטרה נעה במהירות  $v$ .
2. מערך הניסוי של מכ"ם דופלר מוצג באיור מס' 12.1. הסברי כיצד הוא פועל (ובפרט את השימוש שנעשה במקרה זה בחוסר האידיאליות של המחוגג).
3. מהו שטח חתך מכ"ם (שח"ם) ?
4. מצאי נוסחאות לשח"ם של כדור, גליל, ומחזיר פינתי (corner reflector), בתלות בממדיהם.
5. תארי מבנה והסבר עקרון הפעולה של מכ"ם Linear-FM.
6. הצגי נוסחה למציאת המרחק עבור מכ"ם פולסים.
7. פתחי נוסחה למציאת המרחק במכ"ם Linear-FM כתלות בתדר ההפרש  $f_{IF}$ , המתקבל מהפרש התדרים בין האות המשודר לאות המוחזר.
8. עבור רוחב סרט  $B = 4 \text{ GHz}$ , תדר אפנון  $f_m = 100 \text{ Hz}$  ומרחק אופייני של  $d = 20 \text{ cm}$ , מהו תדר ההפרש  $f_{IF}$  המתקבל ?
9. הסברי כיצד מתאפשר גילוי FM באמצעות מד תדר מהודי ודיודה. התייחסי לאופיין מתח-תדר של מד התדר המהודי שמדדת בניסוי קודם.

### רשימת ציוד

1. אנטנת שופר
2. דיודה
3. מחוגג
4. רפלקטור פינתי
5. עצמים מתכתיים שונים כגון גליל, כדור ותיבה.
6. מד הספק
7. אוסצילוסקופ
8. מחולל אותות בתדר מיקרוגל עם כניסת FM.

9. מחולל אותות בתדרי IF.

10. מד תדר מהודי.

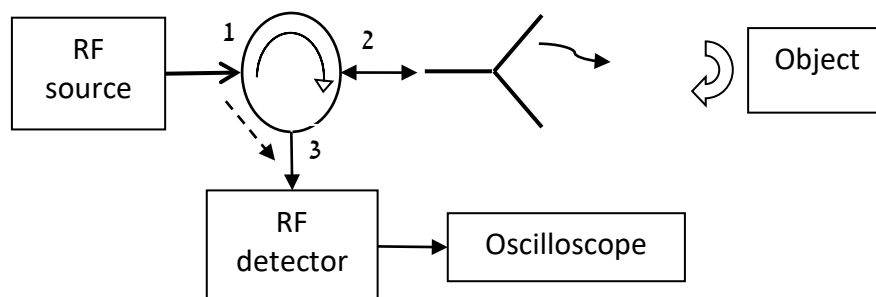
### מטרות הניסוי

1. מדידת מהירות עצם בעזרת אפקט דופלר.
2. גילוי FM.
3. מדידת שח"ם של גופים שונים.
4. מדידת מרחק לעצם בעזרת מכ"ם Linear-FM.

### מהלך הניסוי

1. אפקט דופלר:

- 1.1. חברו את מערך הניסוי לפי איור מס' 12.1.
- 1.2. הזיזו את הרפלקטור הפינתי לאורך המסילה במהירות קבועה, בשני הכיוונים (אל המכ"ם וממנו).
- 1.3. מדדו את המהירות במצבים השונים בעזרת שעון עצר.
- 1.4. מדדו את תדר אות הדופלר המתקבל באוסצילוסקופ במצבים השונים.
- 1.5. חזרו על המדידות עבור מהירויות שונות.
- 1.6. הפכו את כיוון הרפלקטור הפינתי כך שהחוד שלו יופנה אל המכ"ם, וחזרו על המדידות.



איור מס' 12.1: מערך ניסוי מכ"ם דופלר.

2. שח"ם:

- 2.1. מדדו את ההספק הנמסר מהמקור לאנטנה (החליפו את האנטנה במד ההספק). לאחר המדידה חברו את האנטנה חזרה.
- 2.2. החליפו את הדיודה במד הספק למדידת ההספק החוזר הנקלט באנטנה.
- 2.3. מדדו את ההספק המוחזר בתלות במרחק מהגופים המתכתיים הבאים:
  - רפלקטור פינתי בכיוון קדמי ובכיוון אחורי.
  - כדור.
  - גליל.

**3. גילוי FM :**

- 3.1. חברו מחולל IF לכניסת ה-FM של מחולל RF וכוונו אותו לאות סינוס בתדר 1kHz.
- 3.2. חברו את מוצא מחולל ה-RF להדק אחד של מד התדר המהודי. את ההדק השני של מד התדר המהודי חברו דרך דיודה לאוסצילוסקופ.
- 3.3. כוונו את תדר התהודה של המהוד לתדר המרכזי של מחולל ה-RF וצפו במתרחש באוסצילוסקופ (במידת הצורך בצעו שינויים קלים בתדר התהודה על לקבלת אות ברור באוסצילוסקופ).
- 3.4. שנו את צורת אות המחולל לצורות שונות (כגון גל ריבועי וגל משולש) וצפו במתרחש.

**4. מכ"ם Linear-FM :**

- 4.1. במערך המתואר באיור 12.1, נשתמש במחולל ה-RF (ללא שימוש בכניסת ה-FM של המחולל).
- 4.2. החזירו את דיודת הגילוי במקום מד ההספק.
- 4.3. כוונו את מחולל האותות ה-RF לגל שן מסור לסריקת תדר בתחום 8-12 GHz (לחיצה על כפתור Start במחולל תעביר אותו למצב סריקה), זמן הסריקה יוגדר ע"י המדריך.
- 4.4. בצעו את הפעולות הבאות :
  - א. הציבו את הרפלקטור במרחק מסוים מהאנטנה.
  - ב. מדדו את המרחק באמצעות סרט מדידה.
  - ג. מדדו את תדר ההפרש המתקבל באוסצילוסקופ. השתמשו בפונקציית ה-MathFFT של הסקופ (בתפריט Math) לקבלת ספקטרום האות. יש להציג על המסך רק את האות הרצוי ולהציג את הספקטרום עם תדר מרכזי השווה לתדר של כ-3KHz שחושב בשאלות ההכנה 7 ו-8, עם Span של 10kHz.
  - ד. חזרו על המדידה עבור מספר מרחקים שונים (יש לבצע גם מדידה במרחק אפס לצורך כיוול).

**ניתוח התוצאות**

1. על פי הפרש התדר של הסחת הדופלר שנמדד, חשב את מהירות הרפלקטור תוך השוואה למהירות המדודה במקרים השונים.
2. מהם גורמי השגיאה בניסוי מכ"ם הדופלר ?
3. מצא/י שח"ם של הגופים השונים שנמדדו, והשווה/י לתוצאות החישובים התיאורטיים שבדוח המכין.
4. תארו/י את המתקבל בניסוי גילוי ה-FM. האם התקבל עיוות באות ? לאילו מהאותות ? מדוע להם ?
5. עבור מכ"ם Linear-FM, הצג/י את המרחקים המדודים והמחושבים. הערך/י את דיוק המדידה ואת הגורמים המשפיעים עליו.
6. כיצד משפיע קצב הסריקה על ביצועי מכ"ם Linear-FM ?