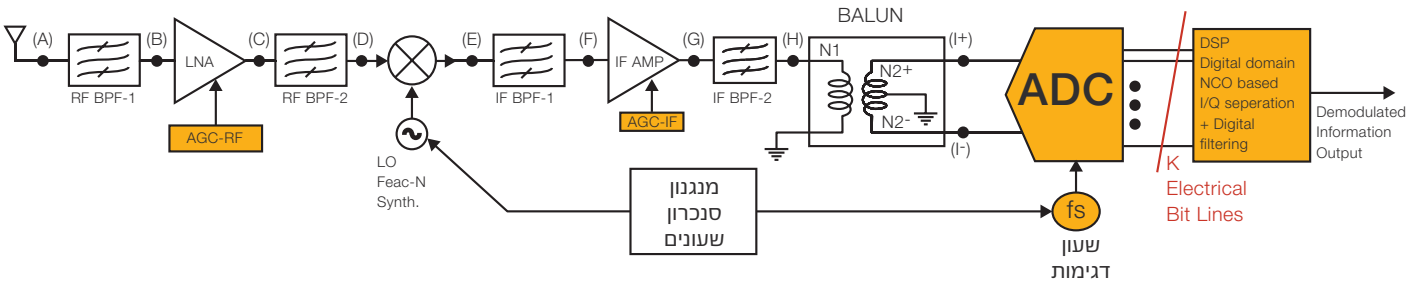
INTERLLIGENT
RF & Microwave Solutions

ידיעון הקורס

הנדסת רדיו (RF) ומיקרוגלים

136 שעות לימוד

סילבוס הקורס ומועדי פתיחה



RF Training

Test Equipment

Engineering Services

RF Ventures Incubator

RF is our Business... Signal us!

www.int-RF.com

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

תוכן העניינים

1. מבוא

הקדמה למתעניין בקורס	3
מעט רקע על עולם הנדסת הרדיו והמיקרוגלים	4
על הקורס	5
על חברת אינטרליג'נט ועל בית הספר להנדסת רדיו ומיקרוגלים	6

2. מנהלה

מועדי פתיחת מחזורי הקורס הקרובים	7
סדרי כספים: שכר לימוד, הנחות	7
מבנה הציונים, מטלות ומבחנים	8
כלים נוספים העומדים לרשות התלמידים	9

3. תכנית הלימודים

כללי	11
אינדקס נושאי הלימוד והמעבדות	11
פירוט נושאי הלימוד	13

4. פרטי הגעה והתקשרות

מיקום, חניה ופרטי התקשרות למידע נוסף	41

קורס הנדסת הרדיו אליו הנך שוקל/ת להירשם הנו קורס מעמיק ויסודי, הדורש תרגול ולימוד רב בנוסף לשעות הלימודים. אנו ממליצים בחום כי תקרא/י את ידיעון זה ובפרט את תכנית הקורס המפורטת ורשימת המטלות, על מנת לקבל פירוט תכנית ההכשרה הזו.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

מבוא

1.1 הקדמה למתעניין בקורס

מתעניין/ת יקר/ה, אנו שמחים על התעניינותך בקורס הדגל שלנו, "הכשרת מהנדסי רדיו ומיקרוגלים", המוצע ע"י בית הספר להנדסת רדיו ומיקרוגלים של חברת אינטרליג'נט. הקורס נועד להקנות לך היכרות מעמיקה ויסודית עם העולם המעשי והמרתק של הנדסת הרדיו והמיקרוגלים, במגמה לאפשר לך להיכנס "בדלת הראשית" לתעשיית הנדסת הרדיו והמיקרוגלים המפוארת של מדינת ישראל.

מדובר בקורס מעמיק, מעניין, ובמיוחד מעשי מאד, אשר בהכנתו הושקעו משאבים ניכרים. אם היינו צריכים לתאר במשפט אחד את הקורס, היינו מגדירים אותו כקורס "טירונות במקצוע הנדסת הרדיו": מדובר בקורס אינטנסיבי בו, בכל פרק, לומדים את התיאוריה לעומק ואז ניגשים להמחשתה המעשית במעבדה. הקורס מועבר ע"י מרצים עתירי ידע ניסיון, **מהמובילים בתחום זה בזירה העולמית.**

לדוגמא, בפרק העוסק במסנני RF, נלמדות הגדרות הבסיס, ולאחר מכן מעמיקים בתיאוריה הנדרשת לתכנון משפחות מסננים יסודיות (צ'בישב, בתרוורת', בסל, אליפטי וכו'). **עם סיום לימוד התיאוריה ניגשים למעבדה, לתכנון ובניית מסנן, בפועל.** אגב, שלב התכנון אינו כולל רק את קבלת ערכי הרכיבים הדרושים, אלא אף ניתן בו דגש חזק גם על שיקולים "מהחיים האמיתיים" בהם נתקל מהנדס הפיתוח בעבודה השוטפת: חישוב רגישות ביצועי המסנן לדיוק ערך הרכיבים שבמלאי, שיקולי בחירת רכיבים לקבלת גורם הטיב המרבי, שיקולי תיאום עכבות, טופולוגית העריכה, מניעת מיקרופוניה בסלילים ועוד. עם השלמת התכנון, **בונים במעבדה את המסנן** (כן, ממש מלחימים את רכיבי ה-SMT על המעגל המודפס), מודדים את היענות האמפליטודה והפאזה שלו, באמצעות צב"ד מתאים (מכשיר ה-Vector Network Analyzer במקרה זה), ובמידת הצורך משפרים את המסנן שנתקבל, "עד שיעבוד כראוי".

תלמידים אחדים, שזו הפעם הראשונה בה הם נתקלים בנו, תמהים על כך שהקורס מכיל הרבה מאד נושאים, אשר יש לכסות בתוך פרק זמן קצר יחסית, ועוד בצורה עמוקה. ובכן, אין לנו "תרופות פלא". הקורס דורש תרגול ולימוד רב גם בבית. יחד עם זאת, חומרי הלימוד שלנו מעמיקים מאד, מוסברים היטב, מקושרים היטב לתעשייה, אסתטיים ורשומים בעברית. עובדה זו מקלה על הלימוד ומסייעת בהגברת התפוקה מזמן הלימודים הנתון. הקורס אינו קל, אך שכרו בצדו.

בחוברת זו מצויים כמעט כל הפרטים הרלוונטיים לקורס, לרבות תכנית הלימודים והמעבדות, תעריפי שכר הלימוד, מועדי פתיחת מחזורי הקורס הקרובים, מטלות, מבחנים, מבנה הציונים ועוד.

לאינפורמציה נוספת, ניתן לפנות למרכז ה-RF הדרכה
או לפנות לאתר: www.Int-RF.com

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

1.2 מעט רקע על תעשיית הנדסת הרדיו

מתעניינים רבים הפונים אלינו לראשונה הם מהנדסי חשמל ואלקטרוניקה אשר לא מכבר סיימו את לימודיהם, והיכרותם עם תעשיית הנדסת הרדיו והמיקרוגלים בסיסית ביותר. מטרת הקדמה קצרה זו היא מתן תמונה כללית קצרה על מקצוע מרתק זה, תוך הסבר כללי על מהותו, דיון ב"למי מתאים העיסוק בתחום", וסקירה קצרה בנוגע לתעשיית הנדסת הרדיו והמיקרוגלים הישראלית.

מקצוע הנדסת הרדיו (RF) והמיקרוגלים (MW) הנו תחום התמחות ספציפי השייך לתחום הנדסת החשמל והאלקטרוניקה. תחום תדרי הרדיו (RF - Radio Frequency) מוגדר כתחום התדר שבין 30KHz לבין 3GHz, בעוד תחום המיקרוגל מוגדר כתחום התדר שבין 3GHz לבין 110GHz. בהכללה, עוסק המקצוע בשכבה הפיסית (או ב"ברזלים") של מערכות קליטה ושידור, ובפרט מערכות תקשורת, מכ"מ, זיהוי מרוחק (RFID), אנטנות וקרינה ועוד - הפועלות בתחום תדרי הרדיו והמיקרוגל, בין אם בתווך החלל החופשי או בכבלי תמסורת. מדובר במקצוע מרתק, מבוקש ושימושי ביותר, המהווה עולם ומלואו. חיוניות התחום הולכת וגדלה עם השנים, בפרט בשנים האחרונות בהן תחום התקני האלחוט הניידים השונים מתפתח מאד.

אנו רואים בתחום לא רק מקצוע, אלא גם תחביב. התחום מתאים לאנשים בעלי נטייה טכנית טבעית, המקבלים "ניצוץ בעיניים" כשהם מתבקשים לתכנן ולבנות, ונמשכים לעבודה בסביבת מכשור מתוחכם. בפרט, התחום מתאים לאלה שאינם חוששים מהעמקה, ואינם נרתעים "להחזיק ביד מלחם". מהנדסי רדיו רבים "מלכלכים את הידיים" בבניית, מדידת, ואף זיווד דגמי המכלולים שהם מתכננים. העבודה היא בד"כ לא רק מול מחשב (סימולאטור) אלא כוללת הפעלה של ציוד בדיקה. דבר נוסף המייחד את התחום הוא שהידע והניסיון בו נבנים לאורך שנים: בניגוד לתחומים אחרים כגון שפות תוכנה, בהם יסודות המקצוע עשויים להשתנות מהותית מפעם לפעם, תחום הנדסת הרדיו עוסק ב"פיזיקה של התקשורת", ויסודות פיזיקאליים אלו לא ישתנו כל כך מהר. עם זאת, אל תטעו: קיימת מידה רבה של חדשנות בתחום, ומרוכזים בו משאבי מחקר ניכרים.

כאמור, ההתעסקות בתחום דורשת מידה ניכרת של מומחיות. בשל כך, מהנדסי רדיו טובים נחשבים ל"יקרי ערך" בחברות בהן הם עובדים - הן במובן זה היותם "נדירים", והן במובן השכר: שכרו הממוצע של מהנדס הרדיו גבוה מהשכר הממוצע למהנדס אלקטרוניקה "רגיל" בעל אותו הוותק. רף הכניסה הגבוה למקצוע, מרתיע מהנדסים רבים. לתחום נכנסים בישראל מדי שנה מהנדסים מעטים (יחסית לכלל בוגרי הנדסת חשמל ואלקטרוניקה), מסדר הגודל של 5-6% בלבד מכלל הבוגרים. אותו "רף כניסה גבוה" נובע בין השאר מהגורמים הבאים:

- דרישות התעשייה לידע ומומחיות לצורך קבלת עבודה ראשונה בתחום, אינן טריוויאליות.
- הידע והניסיון הדרושים לצורך התקדמות בתחום (למשל לצורך הובלת צוות פיתוח) - מתקבלים בד"כ לאורך קבועי זמן ארוכים יותר לעומת קבועי הזמן בתחומי הנדסה אחרים.
- חוסר במסלולי הכשרה ראויים להכשרת מהנדסי רדיו, גורם לתחום להצטייר בעיני בוגר האוניברסיטה הממוצע כתחום לא ברור, אפרורי, מעין "כישוף שחור", המצטייר כמסובך להבנה. **במובן זה, אנו כאן כדי לשנות את המצב.**

בזירה העולמית נחשבת ישראל למדינה בה העיסוק בתחום הנדסת הרדיו הוא אחד מתחומי העיסוק בהם מצטיינת המדינה, והפיתוחים בו נחשבים למתקדמים, מחזית הטכנולוגיה. למעשה, ישראל נחשבת כיום ל"מספר שתיים בעולם" ברמת החדשנות בפיתוחי הנדסת רדיו ומיקרוגלים (אחרי דרום קוריאה, שבמקום הראשון). בישראל מועסקים כ-6,000 מהנדסי רדיו פעילים, במסגרת כ-300 גופים וחברות, החל מגופי ענק כגון צה"ל ומשרד הביטחון, רפא"ל, אלישרא, אלתא, תדיראן קשר ואינטל, ועד לחברות הזנק (סטארט אפ) העוסקות בפיתוחים שונים. בשל המצב הביטחוני, קיים צורך מתמיד מצד מערכת הביטחון בפיתוחים חדשניים בתחום, למטרות יישום מערכות קליטה, איכון וממסור מודיעיניות, מערכות קשר מתקדמות, ומערכות מכ"מ ולוחמה אלקטרונית. השוק הביטחוני והחברות המשרתות אותו במישרין, מכילים כ-50% מעובדי התעשייה בארץ, בעוד שאר העובדים מועסקים בחברות "אזרחיות", בעיקר בתחום תקשורת הרדיו.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

1.3 על הקורס

1.3.1 מהות הקורס

הקורס "הנדסת רדיו ומיקרוגלים" הינו קורס הכולל תיאוריה עם עבודה מעשית. הקורס מיועד למהנדסי חשמל ואלקטרוניקה המעוניינים בהכשרה מקיפה ומסודרת בתחום הנדסת הרדיו והמיקרוגלים במגמה לשמש בתפקידי פיתוח בתעשייה. הקורס מועבר על ידי סגל המרצים המוביל בארץ בתחום הנדסת הרדיו, מזה השנה התשיעית, ומהווה את סטנדרט התעשייה בישראל להכשרת מהנדסי רדיו ומיקרוגלים. נדגיש, כי הקורס נבנה על סמך ניסיון של אלפי שעות הוראה בעשרות מפעלים שונים בארץ בתעשיית ה-RF והמיקרוגלים, וכי תכנית הלימודים נכתבה על סמך היכרות מעמיקה עם דרישות העבודה בתעשייה זו. בקורס 9 מעבדות, וכאמור ניתן בו דגש על עבודה מעשית, במיוחד בנושא בניית מכלולים ודגמים, תפעול צב"ד וביצוע מדידות מתקדמות. במחזור קורס ממוצע, כ-30 תלמידים, מתוכם כ-60% הנשלחים להכשרה בקורס מטעם מקום העבודה, ו-40% מהנרשמים מגיעים באופן פרטי למטרת התמקצעות בתחום. בכיתת המעבדה 8 עמדות מעבדה, ובכל אחת מהן כל הציוד הנדרש לעבודה בזוג (מחולל אות, נתח תדר, ונתח רשת). בכדי לאפשר לכל אחד מהתלמידים לעבוד עם הציוד, אנו מקפידים על כך שכל אחד מהתלמידים יעבוד בעמדת מעבדה עם בן זוג אחד בלבד. לפיכך, בכדי לווסת את עומס המשתמשים בעמדות המעבדה, נערכות המעבדות בשתי קבוצות נפרדות.

1.3.2 האם הקורס צפוי לסייע במציאת עבודה בתחום?

אין אנו חברת השמה ואין אנו מתחייבים לדבר בנוגע להשמה בעבודה של בוגרי הקורס. יחד עם זאת, אנו מקבלים פניות מחברות העוסקות בהנדסת רדיו בארץ בנוגע לאיתור מהנדסי RF צעירים ממצטייני הקורסים שלנו. פעמים רבות די במכתב המלצה מאתנו בכדי להתקבל למשרה. בנוסף, בשל רמת הקורס הגבוהה, בוגרי הקורסים שלנו נהנים מיתרון יחסי ניכר על פני מהנדסים "טריים" אחרים - בהתמודדות על הקבלה למקום העבודה הראשון. הקורס שלנו מוכר וידוע, והוא נחשב כיום ל"סטנדרט התעשייה" בארץ - בכל הנוגע להכשרה יסודית של מהנדסי רדיו. לפיכך, התשובה לשאלה היא - ככל הנראה כן, הקורס צפוי להקנות יתרון יחסי ניכר במציאת עבודה בתחום, במיוחד לאלה שיקבלו מאתנו מכתב המלצה.

1.3.3 תנאי הסף הנדרשים לקבלת מכתב המלצה לעבודה

חברות רבות רואות במכתבי ההמלצה שאנו מנפקים על בוגרי הקורס - מדד חשוב לקבלה לעבודה. כגוף הכשרה מסודר ומוכר בתחום הנדסת הרדיו, חשוב לנו כי הבוגרים עליהם אנו ממליצים - אכן "יספקו את הסחורה" למעסיק. לצורך קבלת מכתב המלצה אנו דורשים להפגין רמה גבוהה של ידע. התנאי הכמותי שאנו מעמידים בפני תלמידינו בכדי לקבל מאתנו מכתב ההמלצה, הוא קבלת ציון קורס סופי של 90 ומעלה. משימה זו אינה קשה להשגה אם מקפידים להכין תרגילי הבית ללמוד היטב את הרקע התיאורטי.

1.3.4 שיטת הלימוד הייחודית

שיטת הלימוד בקורס היא שיטה ייחודית יעילה ואינטואיטיבית אשר פותחה עם השנים בחברת "אינטרליג'נט", הדומה לשיטת ההוראה במוסדות האקדמיים הטכנולוגיים ביפאן. השיטה כוללת שינון בעל פה בכל תחילת שיעור של "נושאי היסוד", ותרגול מאסיבי, ואינה מותירה לתלמידים ברירה אלא "לחוש אינטואיטיבית" את הנלמד:

- בכל מפגש - ניתנים תרגילי בית נרחבים אשר ממצים את המושא הנלמד "מכל הכיוונים האפשריים".
- בתום כל פרק מתקיימת מעבדה מעשית בנושא.
- בתום כל פרק ניתן מבחן הממצה את הנלמד בפרק.
- לפני כל מבחן מחולק "מבחן לדוגמא" פתור לצורך אימון אישי ותיאום ציפיות.
- בקורס נדרשים התלמידים ללמוד בעל פה את "12 משוואות היסוד של המקצוע".

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

1.4 על חברת "אינטרליג'נט" ועל בית הספר להנדסת רדיו ומיקרוגלים

חברת "אינטרליג'נט" מהווה מרכז למחקר, פיתוח והוראה במקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים. החברה היא חברה ישראלית פרטית, אשר נוסדה בשנת 2000 ע"י קבוצת מהנדסי RF יוצאי יחידת פיתוח של חיל המודיעין.

בחברה שלושה תחומי פעילות ראשיים:

- **בית הספר להנדסת RF ומיקרוגלים**

בית הספר המוביל והמקצועי בישראל למקצועות הנדסת הרדיו (RF) והמיקרוגלים. במסגרת פעילות בית הספר, לקחנו חלק נכבד בהעברת קורסי הכשרת מהנדסי רדיו בטכניון, וכן הכשרנו אלפי מהנדסים בתעשייה - במסגרת קורסים "מוזמנים" אשר העברנו כמעט בכל חברות ה-RF והמיקרוגלים בארץ. בבית הספר חמישה מרצים קבועים, ושלושה מרצים חיצוניים.

- **מרכז התכנון (Design Center): חטיבת פיתוח מכלולי RF ומיקרוגל**

תכנון פיתוח ובדיקות בקבלנות משנה (אאוטסורסינג), של מכלולי רדיו ומיקרוגלים שונים, מרמת ה"רעיון" ועד לאב טיפוס עובד עם תיק ייצור. במסגרת זו, פונות אלינו חברות המעוניינות לפתח מכלולים (לרוב מדובר במכלולי קליטה ושידור, או לוחמה אלקטרונית) בעלי דרישות לביצועי RF גבוהים, ואנו מתכננים ובונים את המוצר עבורן..

- **חטיבת השכרת ציוד RF ומיקרוגל**

חטיבה עסקית העוסקת בהשכרה של ציוד מעבדה (צב"ד) RF מיקרוגל וגמ"מ. הציוד המושכר מגיע תמיד עם תמיכה טכנית מלאה, ואחריות, החוסכים ללקוח זמן וכסף.

כל הקורסים המועברים בבית הספר להנדסת רדיו ומיקרוגלים, מועברים על ידי צוות מרצים מעולה אשר נבחר בקפידה. **כל המרצים מהנדסי אלקטרוניקה מנוסים** בעלי התמחות בהנדסת רדיו, גלים מילימטריים, תקשורת רדיו ספרתית, תקשורת לוויינים וסלולר. חלקם אף משמשים כמרצים במילואים ביחידות טכנולוגיות שונות בצבא.

משך 13 השנים האחרונות, השקענו את מלוא מרצנו ויכולתנו בפיתוח חומרי לימוד מסודרים, מעמיקים, אסתטיים ונאותים, המהווים ספרות טכנית מעמיקה ועדכנית (לא רק "אקדמית", אלא ממש קשורה לתעשייה).
הקורסים שלנו נחשבים היום ל"סטנדרט התעשייה" בארץ, בכל הקשור להכשרה מסודרת של עובדים מיומנים בתחום פיתוח ה-RF והמיקרוגל.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

מנהלה

2.1 מועדי פתיחה מתוכננים

קורס "הנדסת רדיו ומיקרוגלים" נפתח אחת לשני רבעונים.
להלן תכנית מועדי פתיחת מחזורי הקורס:

מתכונת הלימודים	משך הקורס	מועד אחרון לרישום מוקדם*
ערב, 17:00-22:00	20 שבועות	לנרשמים עד חודש לפני פתיחת הקורס

* לנרשמים עד מועד זה מוצעת הנחת רישום מוקדם בת 700 ₪ + מע"מ

הערות:
1. ייתכנו מפגשי השלמה אשר עשויים להאריך את משך הקורס במפגש נוסף.
2. אינטרליג'נט שומרת לעצמה את הזכות לדחות את מועדי פתיחת מחזור כל קורס בפועל עד 30 יום מהמועד המתוכנן. ניתן לעקוב אחר הפירסום באתר האינטרנט של החברה.

2.2 תנאי הקבלה לקורס

הקורס מיועד למהנדסי חשמל ואלקטרוניקה ופיסיקאים, בעלי תואר ראשון ומעלה, 0-6 שנות ניסיון ב-RF המשתייכים בין היתר לקבוצות הבאות:

- **מהנדסים "חדשים" -** חסרי ניסיון מעשי בתחום הנדסת הרדיו והמיקרוגל, אשר סיימו את לימודי התואר הראשון/השני בהנדסת חשמל ואלקטרוניקה או בפיסיקה ומעוניינים להשתלב בעבודה בתעשיית ה-RF והמיקרוגל.
- **מהנדסים מהתעשייה** - אשר במסגרת תפקידם נזקקים להבנה יסודית להכשרה מסודרת בתחום הנדסת הרדיו והמיקרוגל.
- **קבלת חריגים** - יתקבלו כחריגים לקורס הנדסאי אלקטרוניקה בעלי ניסיון בעבודה בהנדסת רדיו ומיקרוגלים, או סטודנטים מצטיינים להנדסת חשמל משנה ד', על בסיס בחינת התאמה.

הליך ההרשמה כולל הצגת עותק מדיפלומה אקדמית, תשלום דמי הרשמה,
חתימה על טופס הרשמה ומסירת תמונת פספורט.

2.3 סדרי כספים: שכר לימוד, הנחות ומלגות

2.3.1 שכר הלימוד

שכר הלימוד בקורס 10,000 ₪ + מע"מ (11,700 ₪ כולל 17% מע"מ).
- הטבה לנרשמים פרטיים: את שכ"ל ניתן לפרוס ל-12 תשלומים ללא ריבית, באמצעות כרטיס אשראי.
- לחברות: תנאי התשלום הם שוטף + 30 ממועד פתיחת הקורס.

2.3.2 הנחות ומלגות

ככלל, לא ניתנות הנחות על שכר הלימוד למעט ההנחות הבאות:
- **הנחת רישום מוקדם**

לנרשמים עד 30 יום לפני מועד פתיחת הקורס תינתן הנחה של 700 ₪ + מע"מ, כך שמחיר הקורס למשתתף יעמוד על 9,300 ₪ + מע"מ (10,881 ₪ כולל 17% מע"מ).

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

- **הנחת כמות משתתפים לנרשמים מטעם חברה**

הנחה זו מיועדת אך ורק לחברות ולגופים מוסדיים אשר שולחים מטעמם משתתפים לקורס.
לכל משתתף נוסף באותו המחזור, הנשלח מאותה החברה, תינתן הנחה של 500 ₪ + מע"מ בנוסף להנחת הרישום המוקדם, כמפורט בטבלה הבאה:

מס' משתתפים הנשלחים מאותה החברה לאותו מחזור הקורס	מחיר בסיס לראש לפני הנחת הרישום המוקדם
משתתף ראשון	10,000 ₪ + מע"מ
משתתף שני ומעלה	9,500 ₪ + מע"מ

2.3.3 דמי רישום לקורס

מתלמידים הנרשמים באופן פרטי בלבד (לא נשלחים לקורס דרך חברה) במועד הרישום לקורס, ייגבה סך של 500 ₪ (כולל מע"מ). סכום זה אינו מהווה תוספת לשכר הלימוד, אלא נכלל בו. דמי ההרשמה יגבו במזומן. דמי ההרשמה לא יוחזרו, אלא אם כן מועד פתיחת הקורס נדחה ביותר מחודש, או בוטל הקורס. תלמיד ששילם דמי הרשמה למחזור קורס מסוים, יוכל להודיע על דחיית השתתפותו בקורס למחזור אחר, עד שבוע לפני פתיחת הקורס, כשדמי הרישום יעמדו לזכותו.

2.3.4 נהלי ביטול הרשמה

על ביטול הרשמה יש להודיע בכתב על ביטול ההרשמה, למנהל מרכז ההדרכה.

- **ביטול הרשמה לפני פתיחת הקורס ועד שבועיים לאחר פתיחתו**

במקרה של ביטול הרשמה בתקופה שלפני פתיחת הקורס ועד שבועיים לאחר מכן, יוחזר שכר הלימוד במלואו למעט עלות דמי הרישום בסך 500 ₪ (כולל מע"מ).

- **ביטול הרשמה לאחר שבועיים ממועד פתיחת הקורס**

לא יינתן החזר כספי לתלמידים המבטלים את הרשמתם לקורס לאחר מעבר שבועיים מתחילתו. יחד עם זאת, תינתן לתלמידים המבטלים את הרשמתם עד 10 שבועות ממועד תחילת הקורס אפשרות חד פעמית להצטרף מחדש למחזור קורס "מהנדסי רדיו ומיקרוגלים" העוקב בלבד, ובלבד שיודיעו על הצטרפותם עד חודש לפני פתיחת הקורס העוקב. ההצטרפות תהא ללא חיוב נוסף מעבר לשכר הלימוד שכבר שולם.

2.4 מטלות, מבחנים, מבנה ציונים

אנו מחשיבים את תלמידינו כ"סטודנטים חופשיים" אשר יכולים לבחור אם להבחן. יחד עם זאת, תלמידים המבקשים לקבל ציון סופי ו/או מכתב המלצה (אשר התנאי לקבלתו הוא ממוצע ציונים סופי בן 90 ומעלה) **נדרשים לנוכחות של 80% לפחות במפגשי הקורס**, לבצע את כל ניסויי המעבדה ולהבחן בכל הבחינות.

מכיוון שביצוע מטלות אלה מסייע להטמיע היטב את החומר הנלמד, אנו ממליצים בחום גם לתלמידים אשר אינם מבקשים בהכרח לקבל ציון סופי או מכתב המלצה, לבצע את המטלות הנ"ל (ואכן לפי ניסיוננו ברוב המקרים גם תלמידים אלו מעדיפים להבחן לצורך תרגול והעמקת הידע המקצועי).

תלמידים המבקשים לקבל מאתנו מכתב המלצה, נדרשים להפגין רמה גבוהה של ידע ומקצועיות, ולקבל ציון קורס סופי בן 90 לפחות - וזאת בכדי לזכות "בזכות ולא בחסד" בהמלצתנו. נבהיר כי צוות בית הספר להנדסת רדיו ומיקרוגלים אינו לוקח בקלות ראש את נושא מקצועיות בוגריו, ושואף לנפק לתעשיה בוגרים בעלי רמה מקצועית גבוהה.

מניסיוננו, התלמידים אשר משקיעים ומעוניינים באמת להצליח, עומדים בקריטריון שהגדרנו. הלימודים מעמיקים, אך דורשים השקעה בפתרון תרגילי הבית, ותרגול וחזרה על חומרי הלימוד הרבים המחולקים בקורס.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

מתכונת הלימודים היא כדלקמן:

- בכל שיעור מחולק קובץ דפי הרקע התיאורטי של השיעור, בו מצוי באופן מפורט ונרחב סיכום ההרצאה, כולל כל הנוסחאות והפיתוחים הרלוונטים.
- בתום כל שיעור התלמידים מתבקשים לפתור את תרגילי הבית הרלוונטיים,כהכנה לקראת השיעור הבא.
- במהלך הקורס שלושה בחנים. לפני כל הבוחן, מחולק לתלמידים בוחן לדוגמא - פתור.

להלן הרכב הציונים בקורס:

המטלה	משקל
בוחן שלב א'	33.3%
בוחן שלב ב'	33.3%
בוחן שלב ג' (סיום)	33.3%
סך הכול	100%

תעודת סיום לימודים מותנית בנוכחות של 80% בכל מפגשי הקורס, מפגשי התיאוריה ומפגשי מעבדה.
השלמת שיעורים חסרים תתקיים בתקופת הלימודים בקורס בלבד.

2.5 תשתית הלימודים במרכז ההדרכה לצורך העמקת הידע בתחום ה-RF

1. ניהול הקורס
ניהול אדמיניסטרטיבי של הקורסים מתקיים בחטיבת ההדרכה ע"י רכזת הקורסים.
בכל פניה או שאלה יש לפנות להילה - רכזת הקורסים.

הודעות שוטפות, מועדי מעבדות ופרסום תוצאות בחינות ימסרו באתר www.int-RF.com

2. מרכז הידע באתר www.int-RF.com
באתר קיים מרכז ידע בתחום ה-RF אשר משרת את כל העוסקים בתחום ה-RF - כלל המהנדסים.
מרכז הידע מכיל עדכונים, מאמרים, פורומים ובעתיד גם סרטי הדרכה אשר מסייעים לכל המתעניינים בתחום והעוסקים בו.

3. פורומים מקצועיים במרכז הידע באתר www.int-RF.com
קיימים מס' פורומים מקצועיים בתחום ה-RF המיועדים לכלל העוסקים בתחום.

בפורומים ניתן לקבל תשובות מוסמכות והבהרות בנושאים הבאים:
- פורום שאלות ותשובות בנושאי הנדסת רדיו: כל השאלות הרלוונטיות בנושא (פתוח לקהל).
- פורום בוגרי קורסים: אינפורמציה כללית ואיתור בוגרים.
- פורום שאלות ותשובות בנושאי תכנון מערכת RF System: כל השאלות הרלוונטיות בנושא.
- תמיכה טכנית בנושאי צב"ד RF & MW ותפעולו: כל השאלות הרלוונטיות בנושא.

השאלות בפורום נענות בד"כ בתוך שבוע ובמקרים מסוימים בהם כאשר התשובה מורכבת, עד 2-3 שבועות.
ככלל, אנו מעודדים את התלמידים לשאול שאלות רלוונטיות בפורום ולהיעזר בנושאים שהועלו בעבר בפורום.

ככלל, אנו משרתים את כלל קהילת מהנדסי הרדיו והמיקרוגלים בישראל ולא רק את תלמידי הקורסים שלנו, באמצעות פורום השאלות באינטרנט. כל איש טכני רשאי לשאול שאלות בפורום ולקבל תשובה מנומקת ומוסמכת. התנאי שלנו למענה לשאלה בפורום הוא הזדהות מלאה של השואל (שם, משפחה ומחזור קורס ו/או חברה - אם השואל מתלמידינו).

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

4. עמדות צפייה בהרצאות - המוקלטות בוידיאו דיגיטאלי (DVD)
הרצאות הקורס צולמו במערכת וידיאו ממוחשבת, ובכיתת הלימוד קיימת עמדת צפייה ממוחשבת בה ניתן לצפות בהרצאות. תלמיד אשר מעוניין לצפות בהרצאה שהחסיר, יתאם עם רכזת הקורסים מועד צפייה בהקלטת ההרצאה המבוקשת.

5. ספריית השאלה
בבית הספר להנדסת רדיו ומיקרוגלים נמצאת ספריית השאלה לשירות תלמידי הקורסים שלנו, הספרייה מכילה את מיטב הספרים בתחום הנדסת הרדיו והמיקרוגלים. הספרים בספרייה נועדו להשאלה ללא תשלום לתלמידי הקורסים וללקוחות החברה בכלל, במקטעי תקופה בני שבועיים.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

פרק 3 – תכנית הלימודים

הקורס "הנדסת רדיו RF ומיקרוגלים" הינו קורס מעמיק ויסודי בן 136 שעות לימוד, העוסק בשכבה הפיסית (PHY) של עולם הנדסת הרדיו (RF) והמיקרוגלים. הקורס משלב ידע תיאורטי עם התנסות מקיפה בעבודה מעשית עם צב"ד (ציוד בדיקה מעבדתי) חדיש, ניסויי מעבדה אשר "מאלצים" את התלמיד להבין היטב את הנלמד, ואף תכנון מכלולים באמצעות תכנית הדמיה (סימולאטור) מתקדמת מסוג ADS. הקורס כולל לימודים תיאורטיים מעמיקים המלווים במעבדות מעשיות בהן מתנסה התלמיד בעבודה מעשית בנושאים שנלמדו בכיתה. לצורך ביצוע ניסויי המעבדה עומדת לרשות התלמידים מעבדת רדיו מתקדמת וחדישה, אשר הושקע בהקמתה מעל מיליון דולר, הכוללת צב"ד וסימולאטורים. ציודי הבדיקה המשמשים את הלומדים במעבדה הינם מהחדישים ביותר הקיימים כיום בשוק, דבר המאפשר הכנה אופטימאלית להשתלבות בשוק העבודה.

ימי התרגול במעבדות בקורס הנדסת הרדיו הינם ימי ב', ה, ו-ו'. התרגול במעבדות הוא חלק אינטגראלי מהקורס, עבור כלל תלמידי הקורס ומהווה תנאי להשלמת מטלות הקורס וקבלת תעודת סיום קורס.
את התרגול במעבדה ניתן לתאם אישית בימים שנקבעו לכך מול רכזת הקורסים. תלמידים החפצים בתרגול נוסף או חוזר יוכלו להשתמש במעבדה בימי התרגול הקבועים ועל בסיס מקום פנוי.

חומרי הלימוד המחולקים בקורס כוללים סיכומים תיאורטיים מלאים, קבצי תרגילי בית, קבצי פתרונות מוסברים ומסודרים, חוברות ניסויי מעבדה, ואף חומרי לימוד נוספים בפורמט אלקטרוני (כולל תוכנות הדמיית RF ברישיון). נדגיש, כי כל חומרי הלימוד הכתובים נמסרים לתלמידים בעברית ובתצורה אסתטית, צבעונית, ברורה ונאותה.

אינדקס הנושאים התיאורטיים הנלמדים בקורס

מס' נושא	הנושא	שעות לימוד (תיאוריה)
1	מבוא ויסודות להנדסת רדיו ומיקרוגלים	5
2	מאזן רעש בהתבוננות ספקטראלית לבנה	10
3	תופעות תדר רדיו אי ליניאריות צרות סרט	10
4	הכרת ותפעול נתח התדר, מדידות יסוד בנתח	5
5	צב"ד נוסף ועזרי מדידה	2
6	מערכות מפולגות וטכניקות לתיאום עכבות	10
7	רכיבי תדר רדיו ומיקרוגל תקניים	5
8	הכרת ותפעול נתח הרשת, מדידות יסוד בנתח	5
9	מסנני תדר רדיו ומיקרוגל	5
10	מקורות אות ומרכיבי תדר (סינטיסייזרים)	5
11	אפנוני רדיו ספרתיים וניתוח אות וקטורי (VSA)	10
12	ארכיטקטורות משדר ומקלט	7
13	רכישת אותות IF ספרתית והנדסת מערכת	10
14	אנטנות, התפשטות גלים וטכניקות Diversity	5
15	פריסה תאית (סלולרית) וטכניקות תקשורת מתקדמות	4
16	סקירת תעשיית המיקרוגל בארץ ובעולם	2
סה"כ שעות לימוד תיאוריה		100

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

אינדקס המעבדות המעשיות הנלמדות בקורס

מס' ניסוי	נושא המעבדה	שעות לימוד (מעבדה)	נושאים נלמדים
1	הכרת נתח התדר ומדידות יסוד.	4	תפעול בסיסי, שימוש בסמנים, הצגת 2 היררכיות הפיקוד האוטומאטיות "Span" ו-"Amplitude". עקיפת צימוד אוטומטי, השפעות המנחת החולייתי המשתנה והמסננים השונים בשרשרת על המדידה.
2	מעבדה במדידות רעש, רגישות וספרת רעש.	4	מדידת ספרת רעש להתקן אקטיבי בשלוש השיטות הנלמדות בקורס, תוך מתן דגשים מעשיים.
3	תופעות תדר רדיו אי ליניאריות.	4	מדידת דחיסה של מגבר, מדידת נקודות מפגש IP2 ו-IP3, הרמוניות, ומדידת תחום דינאמי.
4	הכרת נתח הרשת ומדידות יסוד.	4	תפעול בסיסי, המחשת משמעות הצגת הנתונים בפורמטים השונים, ביצוע כיולי העברה והחזרה, המחשת שגיאות תת כיול, ווידוא נאמנות למקור.
5	ניתוח רשת וקטורי ותיאום עכבות.	4	מדידת כעבה של עומס מרוכב, אשר אינו בעל מבוא קואקסיאלי (Probing), תכנון ומימוש רשת תיאום עכבות מפולגת ומקובצת לעומס הנמדד.
6	מעבדה במסנני תדר רדיו.	4	תכנון תיאורטי של מסנן BPF לתדר 60MHz, בנייתו המעשית בתצורה מקובצת ע"ג PCB, בצוע מדידות ו"Tuning" למסנן באמצעות נתח רשת.
7	מעבדה בתכנון ויישום מקורות תדר.	4	■ הצגה של תנאי ברקהאוזן להתעוררות מתנד. ■ כיוון תדר התנודות באמצעות הגבר חוג פתוח. ■ בניית מתנד וביצוע מדידות שונות עליו.
8	מעבדה בתכנון ויישום שרשרת המרת תדר / שרשרת קליטה מסוג Real-IF.	4	■ תכנון לפי מפרט ובניית שרשרת קליטה והמרת תדר, מתדר 902MHz לתדר IF בן 60MHz. ■ מדידות אי ליניאריות ורעש של שרשרת המקלט. ■ מדידות המרה מתקדמות, רעש פאזה ובבואה.
9	מעבדה בפיתוח מעגלי רדיו המבוססת על תוכנת Advanced Design System.	4	■ הכרה של סביבת העבודה ADS. ■ תכנון מנחת SMD באמצעות התוכנה. ■ עריכה של מעגל המנחת באמצעות התוכנה.
סה"כ שעות לימוד מעבדות מעשיות		36	

סה"כ תכנית הלימודים המלאה בקורס הכשרת מהנדסי רדיו (RF) ומיקרוגלים:
100 שעות תיאוריה + 36 שעות מעבדה

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 1 - מבוא להנדסת רדיו ומיקרוגלים (5 שעות לימוד תיאורטי)

1.1 מבוא להנדסת רדיו ומיקרוגלים

- גדלים מסדר ראשון לעומת גדלים מסדר שני: הבהרה "מדוע נתונים הגדלים החשובים בשפת הנדסת הרדיו" במונחי הספק או אנרגיה, ולא במונחי מתח או זרם?
- הדציבל - השפה הלוגריתמית:
  - הגדרת כופל ההספק הליניארי של מגבר הספק.
  - תזכורת מתמטית: חוקי הלוגריתמים הרלוונטיים לנושא הדציבל.
  - הגדרת הדציבל כמדד לוגריתמי של יחס, במובן הגבר הספק.
  - **פיתוח וקבלת "יסוד מקצועי מס' 1": טבלת הדציבל.**
  - הבהרת הקירוב בצעד ה-3 דציבל, ו"כלל חמשת הצעדים".
  - שיטת "גודל הייחוס והיחס" לייצוג לוגריתמי של גדלים אבסולוטיים.
  - 5 דוגמאות המחשה למעברים ליניאריים - לוגריתמיים.
  - הבהרה בנוגע לסיכום וחיסור גדלים לוגריתמיים בעלי יחידות שונות.
  - הבהרה בנוגע לתצורת החישוב הנכונה בהתייחס לסיכום הספקים, והתנאים בהם מותר לבצע סיכום אלגברי של הספק.

1.2 סקירת יישומי ספקטרום הרדיו והמיקרוגל

- ההבדל בין תחום ה"רדיו" לתחום ה"מיקרוגל".
- טבלאות "כינויים אזרחיים" (לפי ITU) לתחומי תדר שונים.
- טבלאות "כינויים צבאיים" (לפי IEEE) לתחומי תדר שונים.
- האטמוספרה כעדשה מעצבת: חלוקה מקורבת של ספקטרום הרדיו לאופני התפשטות: גלי קרקע, רקיע, וגלים ישירים (RLOS). האטמוספרה כמסנן מעצב עד 30 מה"ץ.
- סקירת ספקטראלית של יישומי רדיו ומיקרוגל שונים, עם דגש על תחומי ISM.

1.3 מאפייני היסוד של תווך הרדיו בחלל החופשי

- מאפיין יסודי ראשון - התווך אינו דיספרסיבי (מהירות הפאזה קבועה) ומסקנות מתוכו:
  - המחשה חד ממדית לתווך האלחוט: חבל אלסטי מתוח המחובר לנדנד מכאני.
  - מושג אורך הגל והקשר בינו לבין תדר התנודה המחזורית.
  - הגדרת המושג "צבירת פאזה של גל הרמוני", ומושגי מישור הייחוס ומקדם המהירות.
  - **קבלת "יסוד מקצועי מס' 2": נוסחת אורך הגל וצבירת הפאזה, נק' עוגן לחישוב אורך גל.**
  - המחשה מעשית למושג אורך הגל באמצעות נתח רשת וקטורי שבעמדת המרצה בכיתה.
  - הגדרת מקדם המהירות (Velocity Factor) והקשר בינו לבין המקדם הדיאלקטרי של התווך.
  - הגדרת ה"אורך החשמלי" (Electrical length) של התקן, והיחס בינו לאורך הפיסי.
- מאפיין יסודי שני - התווך איזוטרופי (כלל כווני במרחב) ומסקנות מתוכו:
  - הבהרה בנוגע לקביעת כיוון התפשטות הגל במרחב.
- מאפיין יסודי שלישי - התווך חסר דיברגנט (משמר אנרגיה) ומסקנות מתוכו:
  - קבלת הביטוי לקרינת קורן איזוטרופי באמצעות שימוש בתכונת שימור האנרגיה.
  - מושגי יסוד מתורת האנטנות: הגבר והספק איזוטרופי שקול (EIRP), הגדרת IEEE ל-RLOS.
  - **קבלת "יסוד מקצועי מס' 3": נוסחת מאזן הנתיב בחלל החופשי של Friis, על 4 תנאי קיומה.**

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 2 - מאזן רעש בהתבוננות ספקטראלית לבנה (10 שעות לימוד תיאורטי)

2.1 מבוא לרעש תרמי לבן, בהתבוננות ספקטראלית לבנה

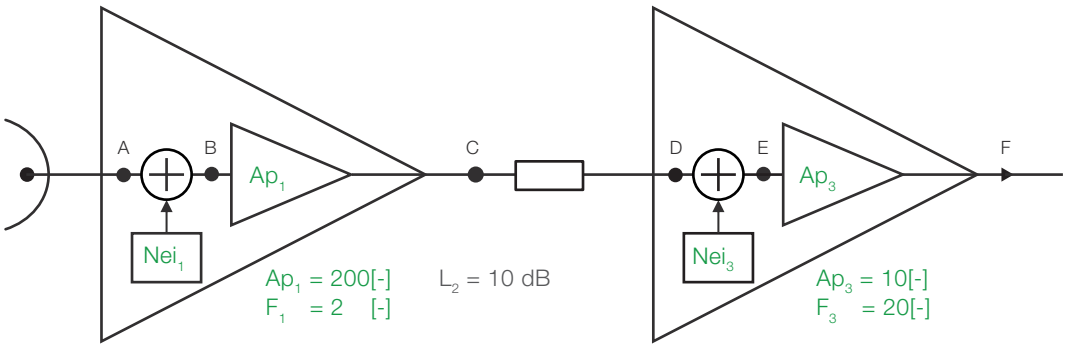
- מהותו של הרעש התרמי ועיקרון אי הוודאות של התקשורת.
- הצגת שתי נקודות מבט על רעש: התבוננות סטטיסטית, והתבוננות ספקטראלית.
- נוסחת הרעש במוליך של ואן-דר זיל (1986), וקירובה ה"לבן" לכדי נוסחת בולצמן (KTB).
- הגדרת המושגים "טמפרטורת הרעש", "טמפרטורת החדר", ו"צפיפות ספקטראלית" (PSD).
- חישוב צפיפותו הספקטראלית של "רעש שמיים", בהצגה ליניארית ולוגריתמית.
- **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 4": קשר בולצמן המוכלל.**
- הבהרה כי אין משמעות להספק רעש ללא הגדרת רוחב הפס השקול לרעש.
- תרגול תלות הספק הרעש ברוחב הפס השקול לרעש, טמפרטורת וצפיפות הרעש.
- הצגת מדד איכות הקליטה "יחס אות לרעש".

2.2 ספרת ופקטור הרעש של רכיבי RF ומיקרוגל

- הגדרת המשימה בנוגע לשימור יאל"ר בשרשרת קליטה: "להרוס ככל הפחות".
- הגדרת ספרת ופקטור הרעש כמפל יאל"ר השמיים ממבוא הרכיב ועד מוצאו.
- ניתוח ספרת הרעש של רכיב פאסיבי (מנחת, בהכללה) ותכונות הרעש המיוחדות למנחת.
- הצגה אינטואיטיבית של מפל היאל"ר במנחת ה"רואה" במבואו רעש שמיים.
- הבהרה בנוגע לכך שרכיב פאסיבי המצוי ראשון בשרשרת הקליטה, אינו מסוגל לעצב את הרעש במוצאו, אלא רק את האות הדטרמיניסטי העובר דרכו, המחשה על שרשרת מקלט.
- ניתוח ספרת הרעש של רכיב אקטיבי (מגבר, בהכללה) לפי מודל ה- IEEE לרעש במגבר.
- הצגת מודל הרעש של המנחת כמקרה פרטי של מודל הרעש של מגבר.
- הצגת והוכחת טענת לוינבוק הראשונה, בנושא מפל היאל"ר במגבר, בהצגתו לפי מודל ה-IEEE.

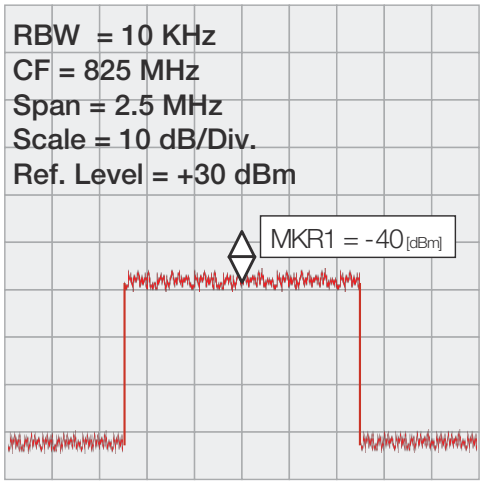
2.3 מאזן רעש בשרשרות קליטה

- שיטות חישוב ליניאריות ולוגריתמיות לפקטור הרעש בשרשרת:
  - הגדרת הגבר היתר (Over Gain) אשר מתפתח על רכיב, לפי מודל ה-IEEE למגבר רועש.
  - **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 5": נוסחת פקטור הרעש של שרשרת.**
  - פיתוח וקבלת שיטת הגבר היתר (Over-Gain) הלוגריתמית המקורבת.
- **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 6": נוסחת תפוקת הרעש ורגישות מערכת קליטה.**
- כללי תכנון שרשרת קליטה, עבור רגישות מרבית.
- ספרת רעש מערכתית והגבר יתר במערכות ממסר משיב (Transponder).

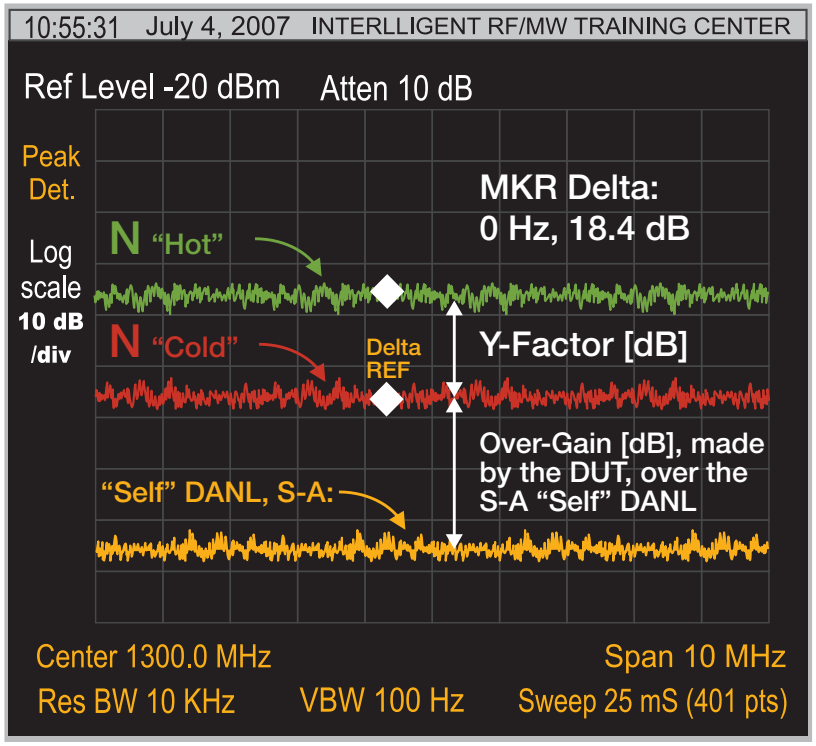


© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

2.4 מערכי מדידה מעשיים לספרת רעש ורגישות



- מדידה בנתח התדר של רעש גאוסי לבן:
  - הבעייתיות שבמדידה ישירה של רעש לבן בנתח התדר.
  - נרמול קריאת הספק רעש בנתח לרוחבי המסננים הנבחרים.
  - שימוש בסמן רעש (Marker Noise) לקריאת רעש גאוסי לבן מכוילת בנתח התדר.
- מקורות רעש מכויילים, כסטנדרטי מדידה למדידות רעש:
  - מבנה חשמלי של מקור רעש המיושם באמצעות דיודת זנר.
  - הגדרת הפרמטרים "יחס רעש עודף" (ENR) ו"Y-Factor".
  - שימוש במנחת לצורך תיאום מוצא מקור הרעש.
- הצגת וניתוח מערך למדידה מעשית של ספרת רעש לפי שיטת הרגישות:
  - הגדרת מערך המדידה (Set Up) המעשי הנדרש במדידה לפי שיטת הרגישות.
  - שימוש בנוסחת הרגישות לצורך ביצוע המדידה.
  - ניתוח גורמי שגיאה במערך המדידה.
- הצגת וניתוח מערך מדידה מעשית של ספרת רעש לפי שיטת ה- Y-Factor:
  - בחירת מקור רעש בעל ENR מתאים למדידות של מכלולים מסוגים שונים.
  - ניתוח גורמי שגיאה והשוואה לשיטת הרגישות.
- ניתוח גורמי שגיאה "סמויים מהעין" ב"מדידה ממוכנת" במד ספרת רעש.



© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 3 - תופעות תדר רדיו אי ליניאריות (10 שעות לימוד תיאורטי)

3.1 מבוא לעיוותים לא ליניאריים

- הסבר פיזיקאלי על הגורמים לאי ליניאריות במערכות אקטיביות.
- הסבר אינטואיטיבי על הבעייתיות הנגרמת במערכות קליטה ושידור, בשל עיוותים אי ליניאריים.
- סיווג עיוותים ל-AM-AM ו-AM-PM, המחשת תופעות אלה על מבני אותות במרחב האותות.

3.2 חקירת עיוותי AM-AM לפי מודל "נקודת המוצא"

- הצגה קצרה של חמש תזכורות מתמטיות אשר יקלו על הדיון באי ליניאריות צרת סרט.
- הגדרתה של אי ליניאריות "צרת סרט", והגדרתם של תחומי תדר מסדרים שונים לפי IEEE.
- הצגת והנמקת קירוב מסדר שלישי לפונקצית תמסורת המתח של מגבר: מודל "נקודת המוצא".
- בחינת תפוקת מודל "נקודת המוצא" בהזרקת 2 טונים למבוא ההתקן: הצגת טבלת תפוקות.
- מסקנות בציר התדר ובציר האמפליטודה, מן התפוקה הספקטראלית של מודל "נק' המוצא".
- **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 7": נוסחת הספקי תוצרי אי ליניאריות מסדר N.**
- הצגת תופעת החסימה (Blocking) / הקטנת הרגישות (De-Sensing) בשל אי ליניאריות.
- חידוד הבדלים בין התופעות השונות הבאות: עיוותים הרמוניים (Harmonic Distortion), ערב אפנון (אינטרמודולציה - Intermodulation), הרמוניות, חסימה, רעש, אוסילציה.
- מדדי אי ליניאריות אשר מתקבלים מתוך מודל נקודת המוצא:
  - הגדרת מדד הדחיסה $1dB_{compression\ point}$, ומשמעות מקדם הביטחון ממנו (Back-Off).
  - הגדרת נקודות מפגש מסדרים שונים, ובפרט IP2 ו-IP3.

3.3 תחום דינאמי טהור מסדר שלישי, SFDR-3

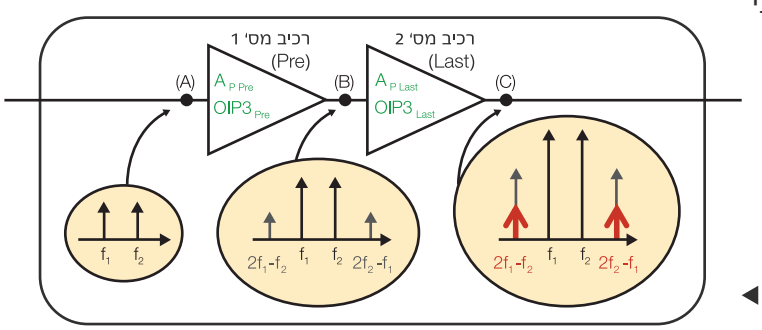
- הגדרתו של התחום הדינאמי הטהור מסדר 3, ומשמעותו המעשית.
- **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 8": נוסחת התחום הדינאמי הטהור מסדר 3.**
- "ניגוד האינטרסים" בין קצוות התחום הדינאמי: תכנון לליניאריות לעומת תכנון לרגישות מיטבית.

3.4 אי ליניאריות רחבת פס

- הצגת עיוותי אמפליטודה - פאזה (AM-PM), כעיוותים בעלי זיכרון, מודל מתמטי לעיוותים אלה.
- הצגת מדדי אי ליניאריות רחבת פס NPR, ACPR, CTB, CSO.

3.5 אי ליניאריות מערכתית בשרשרת רכיבים

- טכניקות אומדן 1dBcp מערכתי בקסקדה.
- טכניקות חישוב IIP3 / OIP3 מערכתיים:
  - **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מס' 9": נוסחת ה- OIP3 המערכתי של קסקדת רכיבים.**
  - הצגת "טריק לליניאריות": פישוט שרשרת שני רכיבים של רכיב אקטיבי שלאחריו פאסיבי (הנחשב כליניארי לחלוטין) לכדי רכיב שקול ללינאריות.
  - שיטת גורמי התיקון לחישוב OIP3 מערכתי בקסקדה.



◄ המערכת שעבורה יש לחשב OIP3 מערכתי

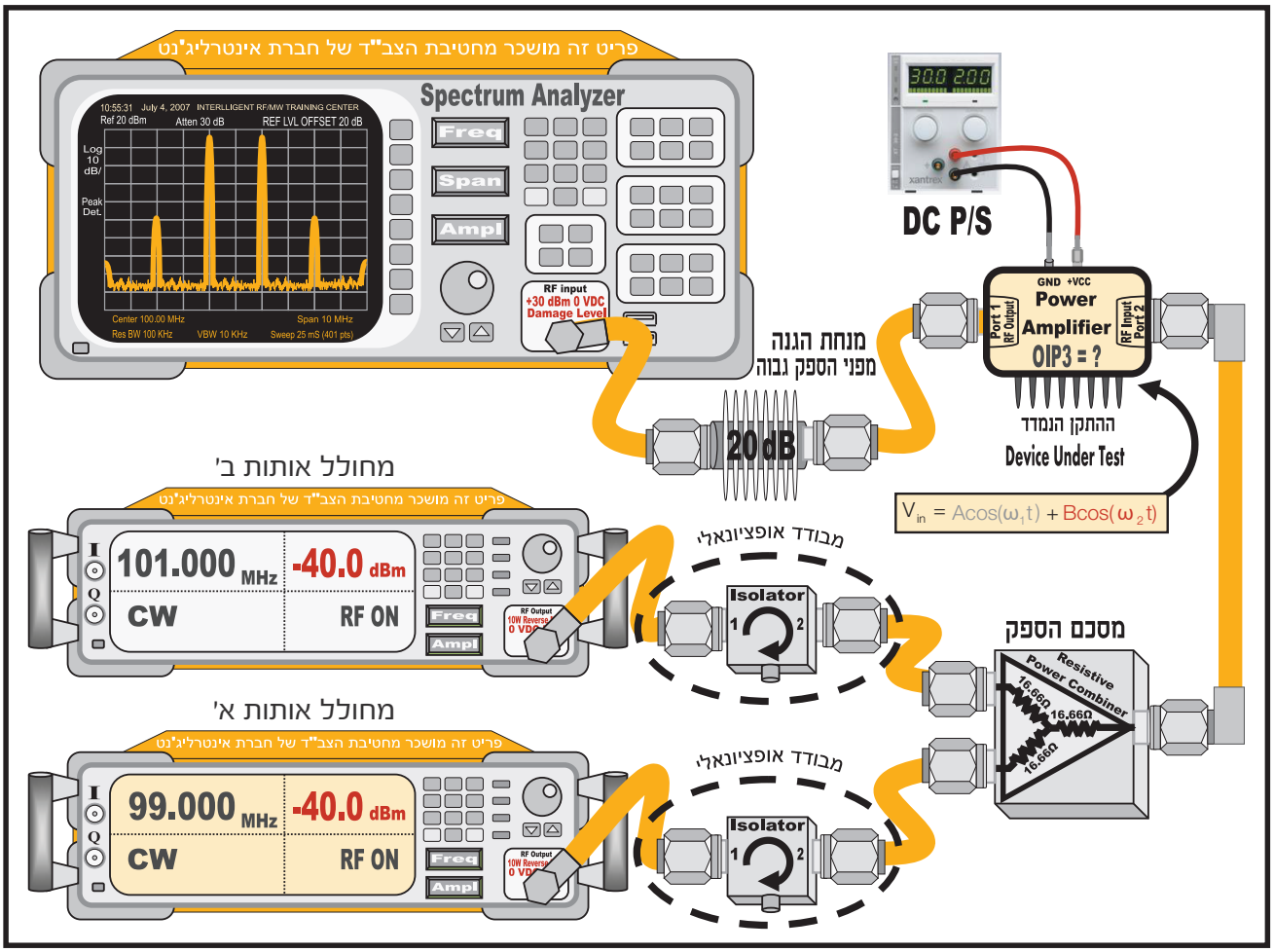
© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

3.6 סקירת טכניקות שיפור ליניאריות ("ליניאריזציה")

- סקירת טכנולוגיות Feed Forward / Pre Distortion.

3.7 מערכי מדידה מעשיים לאי ליניאריות

- הצגת סדר פעולות נכון בחיבור מגבר נמדד:
  - חיבור עומס, חיבור מתח, הפעלת מקור האות.
  - הסבר על חשיבות סדר הפעולות ומניעת פגיעה בצב"ד.
- הצגת מערך למדידת OIP3, "מתכון" מדידה נאמנה למקור בנתח התדר, ניתוח גורמי שגיאה:
  - חישוב OIP3 על פי "נוסחת המודדים".
  - הטמעה החוצה של מנחת ההגנה על הצב"ד.
  - השוואת ביצועי שני מערכי בדיקה דומים, במובן רגישות לשגיאות מדידת הצב"ד.
- הצגת מערך מדידת 1dBcp, "מתכון" מדידה נאמנה למקור בנתחי תדר ורשת, ניתוח גורמי שגיאה.
- מערכים למדידות רחבות סרט: NPR, CTB, CSO ו-ACPR.
- מערך בדיקה לאי ליניאריות ברכיבים פאסיביים (Passive Intermodulations).



© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

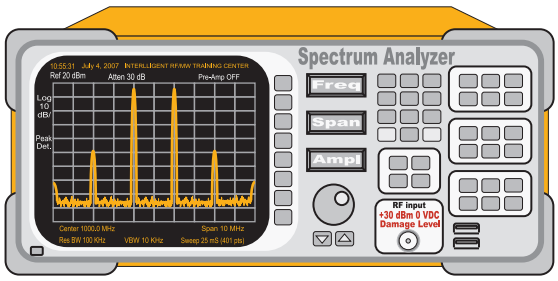
נושא 4 - נתח התדר (Spectrum Analyzer) (5 שעות לימוד תיאורטי)

4.1 מבוא לניתוח תדר (Spectrum Analysis)

- תכונות נתחים מסוג "סופר הטרודין" לעומת נתחי FFT.
- סקירת סוגי המדידות אפשריות באמצעות נתח תדר סופר הטרודיין.

4.2 מבנה נתח תדר סופר הטרודין

- מבנה הבלוקים של נתח תדר (סופר הטרודין):
  - הצגת מבנה הבלוקים העקרוני של נתח תדר סופר הטרודין.
  - ניתוח משוואת ההמרה (Tuning Equation) והסבר המניע להמרה מעלה בדרגה הראשונה.
  - הצגת העדפת תכנון השרשרת לטובת הליניאריות, ע"ח ספרת הרעש.
  - הצגה של כ"א מהבלוקים בשרשרת: מסנן ה-LPF הראשון ומטרותיו, המנחת המשתנה החולייתי, מכלול ערבל ההמרה, מתנד מקומי ו-YTF.
  - בנק מסנני ההפרדה (RBW):
    - השפעת מסנן ההפרדה על כושר הפרדת התדר.
    - משמעות משפחת מימוש המסנן, והשפעותיה.
    - השפעת מסנן ההפרדה על זמן הסריקה (ב-Span נתון).
    - השפעת מסנן ההפרדה על רצפת הרעש (DANL).
    - מסנני הפרדה ספרתיים (FFT) לרוחבי פס צרים.
  - גלאי המעטפת הראשון (IF to BaseBand):
    - מבנה גלאי המעטפת הראשון.
    - ניתוח תפוקת גלאי המעטפת הראשון.
    - משמעות יחס מסנן הפרדה למסנן חוזי (RBW / VBW Ratio).
  - בנק מסנני החוזי ("מסנני וידיאו" / VBW):
    - מהותו ומטרותיו של מסנן החוזי.
    - משמעות יחס מסנן הפרדה למסנן חוזי (RBW / VBW Ratio).
    - השפעת מסנן החוזי על הספק רצפת הרעש המוצג (DANL), ועל שונותו.
    - השפעת מסנן הוידיאו על זמן הסריקה (בעבור Span נתון).
    - השפעות מסנן החוזי על מדידת אותות סטציונריים ועל מדידת אותות משתנים בזמן.
    - הבהרת ההבדל שבין פונקציית המיצוע (Averaging) לבין סינון החוזי.
  - גלאי התצוגה (Display Detector):
    - סיווג גלאים: שיא חיובי, שיא שלילי, גלאי טבעי (דגימה).
    - השפעת גלאי התצוגה על הספק הרעש המוצג ושונותו.
    - דוגמאות לשימוש האופייני בגלאים השונים למיניהם.

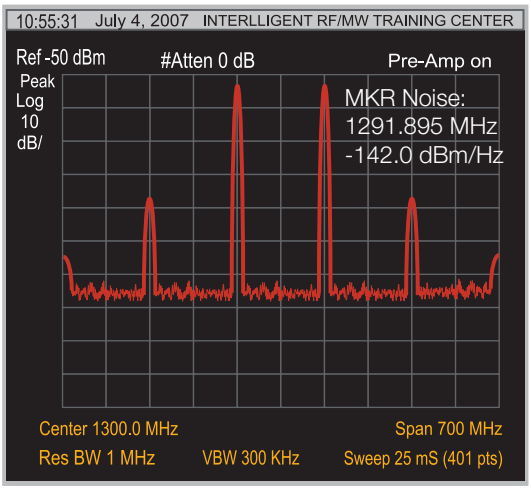


4.3 צימוד אוטומאטי (Auto Coupling)

- חלוקת בקרות לבקרות ראשוניות, משניות ושלישיות.
- היררכיות פיקוד סדורות בנתח התדר - היררכיית Span:
  - הצגת ההיררכיה Span ← RBW ← VBW ← ST.
  - היחס בין Span, RBW, VBW לזמן הסריקה.
  - "מריחת אות ימינה" (אילוץ זמן סריקה קצר).
- היררכיות פיקוד סדורות בנתח התדר - היררכיית הפיקוד הראשית Reference Level:
  - הצגת סדר ההיררכיה: RL ← ATT ← DANL.
  - היחס שבין ערך המנחת לבין צפיפות רצפת הרעש המוצגת (DANL) והתחום הדינאמי.
  - אבחון תופעות אי ליניאריות המתקבלות מערך מנחת נמוך מדיי.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

4.4 מדידות יסוד בנתח התדר



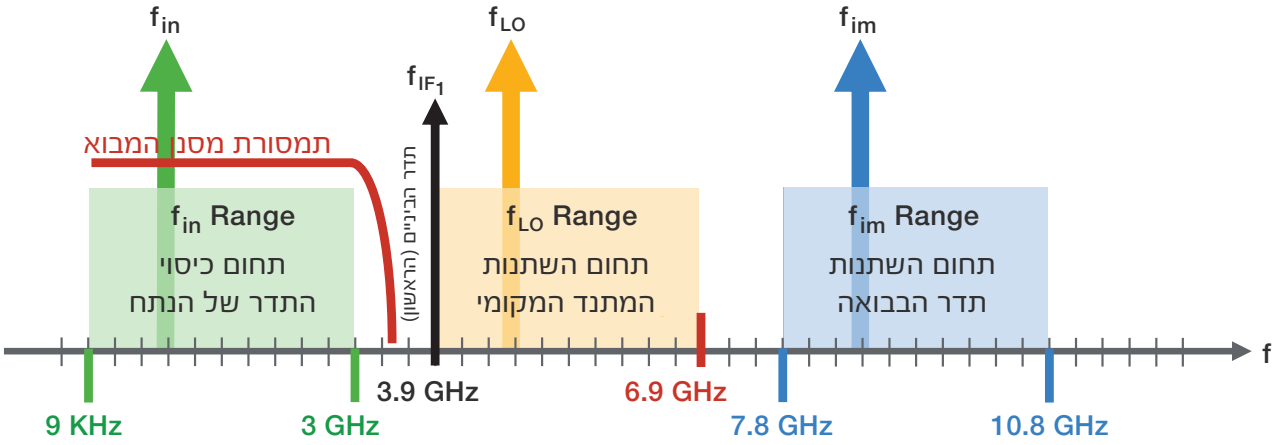
- מדידות אבסולוטיות: עוצמה ותדר.
- מדידות יחסיות ושימוש בסמן הפרש.
- מדידות יחסיות לעומת אבסולוטיות.
- מדידות רעש: הגבר יתר, השפעת מנחת המבוא.
- מדידת הספק אותות דמויי רעש (Channel Power).
- מדידות אי ליניאריות ועיוותים באמצעות נתח התדר.
- מדידות בציר הזמן: "Zero Span".
- ההבדל בין מדידת "Zero Span" למדידה באוצילוסקופ.
- מדידות מיוחדות באמצעות פונקציות Maximum Hold.

4.5 תפעול מעשי של נתח התדר

- הגנת מבוא מפני מתח ישר (DC-Block) ומפני יתר עוצמה (Limiter).
- הימנעות מהשגיאה הנפוצה, של החשבת אות הכיול (בתדר אפס) כאות מבוא.
- קביעת תצורת התצוגה האופטימאלית עבור המדידה הדרושה.
- בחירת תחום תדר בעל רצפת רעש רציפה: בחירת תחום תדר להצגה אשר אינו כולל נקודות גבול של המרת "Prescale" - ככל האפשר.
  רצפת רעש אחידה (ולא מדורגת) בתחום המדידה.
- שיקולי קביעת רוחבי פס הפרדה וחוזי מיטביים למדידה.
- אופן השימוש בסמן רגיל (Marker) ובסמן הפרש (Marker Delta).
- קביעת מנחת המבוא לתחום דינאמי מיטבי ומניעת היענות שווא (Spurious).
- קבלת נתח רשת סקלרי תוך שימוש בנתח תדר ומחולל אותות סורק (Sweeper).
- כיול אוטומטי ובדיקות עצמיות.

4.6 מדידות מתקדמות בנתח תדר

- הרחבת תחום כיסוי תדר תוך שימוש בערבל הרמוני (Harmonic Mixer) חיצוני.
- מערכי מדידת רעש פאזה (Phase Noise) בנתח תדר.
- מדידה ספקטראלית מתוזמנת (Time Gated Spectrum Analysis).



© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 5 - צב"ד נוסף ועזרי מדידה (2 שעות לימוד תיאורטי)

5.1 מד ההספק

- מבנה מד הספק וגלאי, הגדשת חוסר הסלקטיביות בתדר, וההבדלים ממדידה בנתח תדר.
- סווג ומבנה גלאים: גלאי שיא, גלאי להספק ממוצע.
- משמעות רוחב פס החוזי של הגלאי.
- כיול ואיפוס מד הספק וגלאי, משמעות Cal-Factor.
- קבלת גדלים ומדדים ממד ההספק: PAR, CCDF.
- אלמנטים פגיעים במד הספק ונהלי הגנה על מד הספק.
- נוהל בדיקת מד הספק לקביעת תקינותו.
- מדידת הספק CW במד הספק, והשוואה לנתח התדר.
- מדידת אותות פולס ואותות רחבי פס.
- "מדידה מטעה" של נקודת דחיסה 1 דב' במד ההספק והשוואה לנתח התדר.

5.2 כבלי RF/MW ומוליכי גלים תקניים

- היכרות עם כבלי RF ומיקרוגל קואקסיאליים:
  - אופן פעולתו של קו תמסורת קואקסיאלי.
  - הקשר שבין סוג הבידוד לבין מקדם המהירות.
  - מדוע 50Ω? פשרה בין כושר העברת הספק לניחות.
  - מאפייני מפרט של כבלי RF ומיקרוגל.
  - תדר הקיטעון של הכבל, ותלותו באורך החשמלי שבין המוליכים.
  - המאפיינים הנדרשים מכבלי RF ומיקרוגל משובחים לתדר גבוה ובפרט עבור צב"ד.
  - הצגת טבלת סוגי כבלי RF ומיקרוגל נפוצים בתעשייה.

- היכרות עם מוליכי גלים ("גלבו") תקניים:
  - סקירת סיבות לשימוש במוליכי גלים, לעומת שימוש בכבלים קואקסיאליים.
  - אופן פעולתו של מוליך גלים, הסבר על "מוסכמת האופן הראשון".
  - מתאמי Waveguide to Coax.
  - כיול גלבו: לוחית רבע גל והעתקת קצר לנתק.
  - הצגת טבלת סוגי מוליכי גלים תקניים ושימושיים בעולם המיקרוגל.

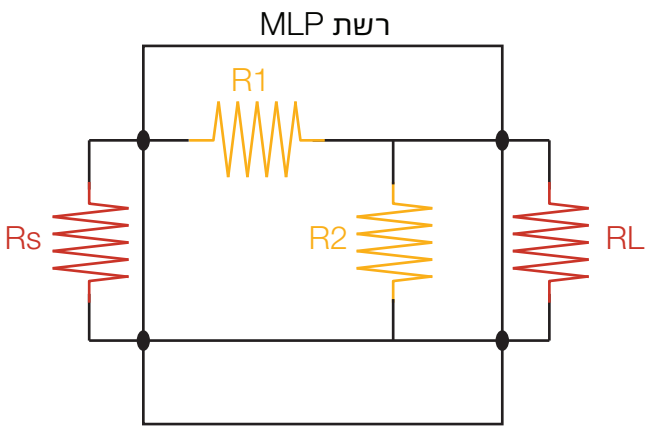
5.3 מחברים ומתאמים שימושיים

- פרמטרים בהם נמדד מחבר ומתאם לתחום ה-RF והמיקרוגל.
- השפעת הגיאומטריה של המחבר על ביצועי ה-Return Loss המשתקף ממנו: מדוע מתאמי זווית עגולים בעלי RL טוב יותר ממתאמים בעלי כיפוף חד.
- מחברים נפוצים לתחום ה-RF/MW: SMA, N, BNC.
- מחברים מיוחדים לבדיקות: UFL, MCX, MMCX, SMB
- מחברים ומתאמים לתדר גבוה:
  - שימוש בבידוד אוויר לעומת בידוד דיאלקטרן.
  - סווג מחברים לתחומי תדר, יישום, עכבה והפסדים: V", "K", 1.85mm, 3.5mm, 2.4mm, APC-7".

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 6 - מערכות מפולגות וטכניקות לתיאומי עכבות (8 שעות לימוד תיאורטי)

6.1 מבוא למערכות מפולגות ולתיאום עכבות



- הצורך בתיאום עכבות: חקירת התנאי לתמסורת הספק מרבית בין מקור לעומס.
- מנגנוני תיאום עכבות סקלאריים (תיאום התנגדויות):
  - תיאום סקלארי ע"י שנאי.
  - תיאום סקלארי ע"י רשת נגדים (Minimum Loss Pad) ותכנון רשת MLP.
- תזכורת בנושא צבירת פאזה דרך התקן מעבר.
- הגדרתה של מערכת מקובצת (Lumped) ושל מערכת מפולגת (Distributed).

6.2 גלים וקווי תמסורת

- קריאה מודרכת: פיתוח משוואות הטלגרף מתוך משוואות מקסוול, בהנחת TEM.
- הגדרתה של עכבה אפיינית של קו תמסורת, והגדרת מקדמי ההעברה וההחזרה המרוכבים.
- השפעת ממדיו החשמליים של קו התמסורת הקואקסיאלי על העכבה האופיינית.
- קריאה מודרכת: פיתוח משוואות ההעתקה הקומפורמית ממישור העכבה למישור מקדם ההחזרה, והצגת ההעתקה בדיאגרמת סמית'.
- **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 10": נוסחת מקדם ההחזרה ותנועות יסוד בדיאגרמת סמית'.**
- שימוש בדיאגרמת סמית כבדיאגרמה של עכבות ושל מתירויות, הכרת הדיאגרמה הכפולה.
- הצגת מדדי תיאום סקלאריים: RL ו-VSWR, הצגת השימושיות של VSWR כבמדד כפלי בשרשראות דלות הפסדי מעבר, והבהרת אופן השימוש ב-RL כבמדד לוגריתמי אינטואיטיבי..
- מושג הפסדי חוסר התיאום, וחישוב הפסדי חוסר תיאום בהינתן מקדם ההחזרה.
- קריאה מודרכת: משמעותו של מקדם דיאלקטרי מרוכב ושל טנגנס ההפסדים.

6.3 פרמטרי פיזור (Scattering Parameters / "S" Parameters)

- הצגת מטריצת פרמטרי הפיזור ("מטריצת ABCD") של רכיב ליניארי כללי.
- קבלת גדלים מסדר שני מתוך פרמטרי הפיזור בעלי הסדר הראשון.
- חישוב פרמטרי פיזור של קסקדת רכיבים, בהינתן פרמטרי הפיזור של כל אחד מהם.
- עקרון המדידה העקיפה ושיטת ההטמעה החוצה (De-Embedding).

6.4 מנגנוני תיאום עכבות מפולגים

- הצגת שנאי רבע גל ותכונותיו.
- תיאום מפולג לרכיב עם פרמטרי פיזור נתונים, לעכבה האופיינית הממשית תוך שימוש בגדם אחד.
- תיאום מפולג לרכיב עם פרמטרי פיזור נתונים, לעכבה האופיינית הממשית, שימוש בגדם כפול.
- תכנון רשת תיאום "Trans-Impedance" מפולגת כללית לרכיב בעל פרמטרי פיזור נתונים.
- הצגת חסם Bode-Fano על רוחב פס התיאום לעומת "עומק" (במובן RL) התיאום.

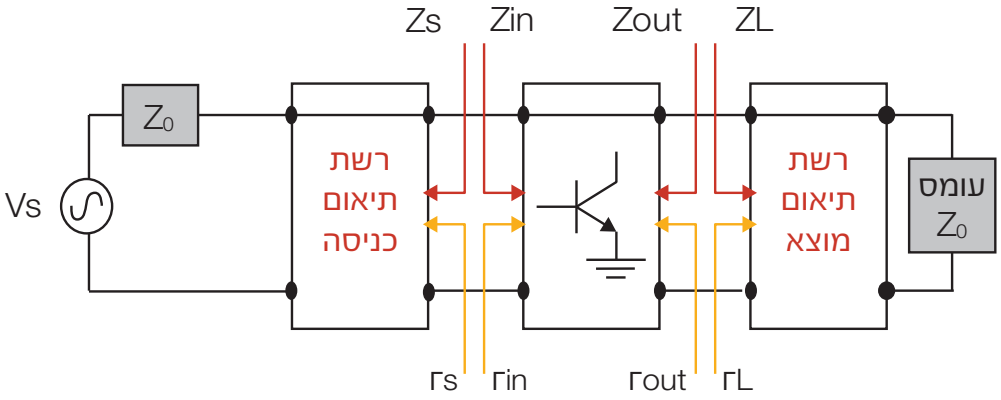
© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

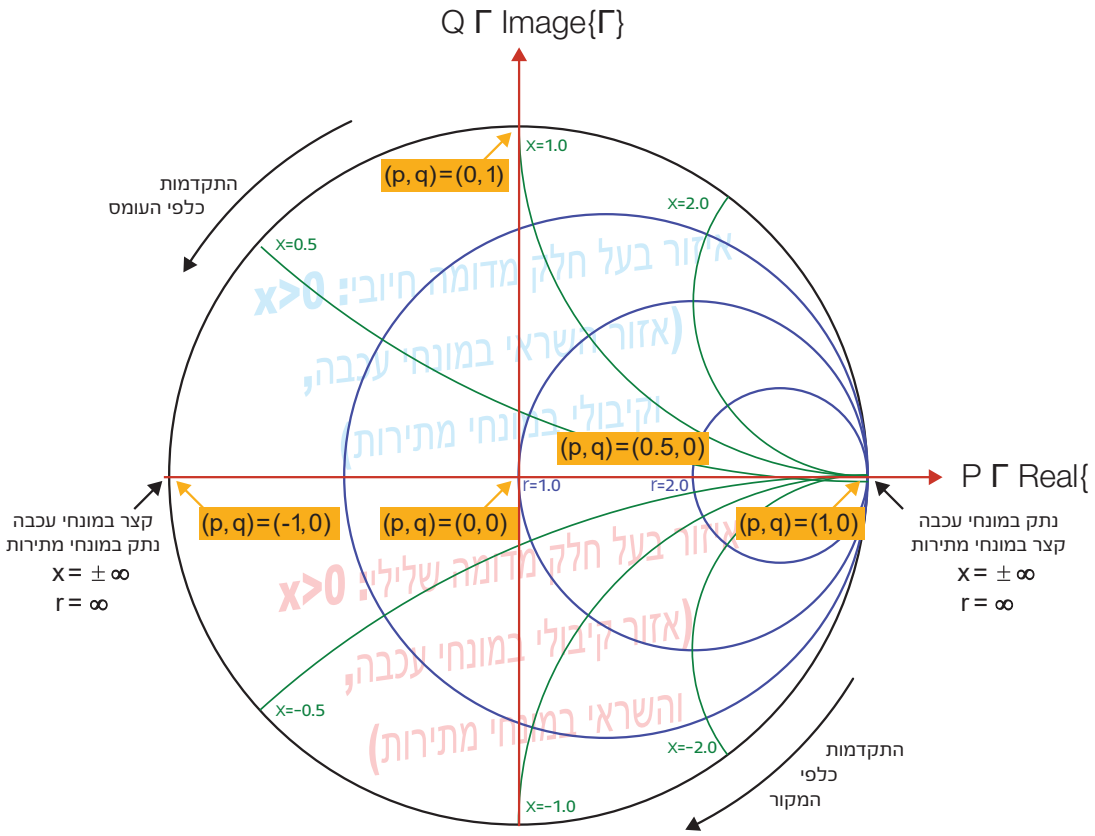
6.5 מנגנוני תיאום עכבות מקובצים

- התמרות ריצ'רד בין רכיבים מפולגים לרכיבים מקובצים.
- תכנון רשתות תיאום מסוג T ומסוג Π לפי דיאגראמת סמית' - לרכיב עם פרמטרי פיזור נתונים.
- תכנון רשתות תיאום מסוג T ומסוג Π לפי חישוב אנליטי, לרכיב עם פרמטרי פיזור נתונים.

6.6 תיאומים מאוזנים (דיפרנציאליים)

- מעבר בין פרמטרי פיזור "רגילים" (Single ended) לפרמטרי פיזור מאוזנים.
- תכנון רשתות תיאום מקובצות לפי חישוב אנליטי, בעבור רכיב מאוזן נתון.
- שימוש ב-Balun לתיאום דיפרנציאלי מועתק לכדי תיאום מקובץ.

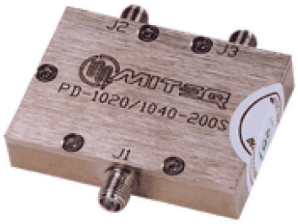




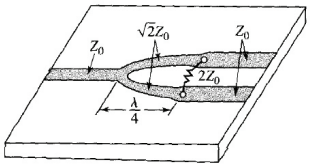
© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 7 - רכיבי תדר רדיו ומיקרוגל תקניים (5 שעות לימוד תיאורטי)

7.1 רכיבים פאסיביים



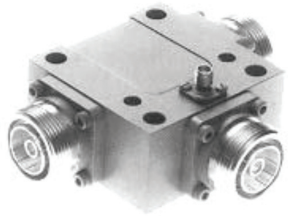
- מנחתי הספק וסיומות מתואמי עכבות:
  - סקירת שימושי המנחת והסיומת.
  - מימוש ע"י רשת נגדים מסוג T ומסוג Π.
  - מימוש מנחתים משתנים בדידים ורציפים.
  - מימוש מנחתי הספק ומשמעות כיווניות הזנתם.
  - תכונת אי הפחתת הרעש מתחת לרצפה הטרמית.
  - המנחת כרשת לתיאום התנגדויות (עכבה ממשית).



- מסכמי / מפצלי הספק:
  - הגדרת סיכום קוהרנטי וסיכום בלתי קוהרנטי.
  - סיכום הספקי אותות RF אקראיים בת"ס.
  - מודל המפצל / מסכם חסר ההפסדים.
  - המפצל ההתנגדותי ומימושו.
  - ניתוח מטריצת התמסורת, סתירת הדרישות בין הדרישה למינימום הפסדים לבין דרישת תיאום העכבות.

- המצמד הכיווני (Directional Coupler):
  - הגדרת המצמד וסקירת שימושיו.
  - כיווניות, ניחות מעבר, הפסדי צימוד ובידוד של מצמד.
  - הפסדי המצמד לעומת הפחתת המצמד - בנתיב הראשי.
  - מימוש כיווניות המצמד במערכת מפולגת.

- מבודדים ומחוגגים (Isolators & Circulators):
  - הגדרת המחוגג והמבודד (כמקרה פרטי של מחוגג).
  - מימוש מחוגג ע"י חומרים פרומגנטיים.
  - סקירת שימושי מבודדים ומחוגגים:
    - הגנות יג"ע.
    - פיצול נתיבי קליטה / שידור.

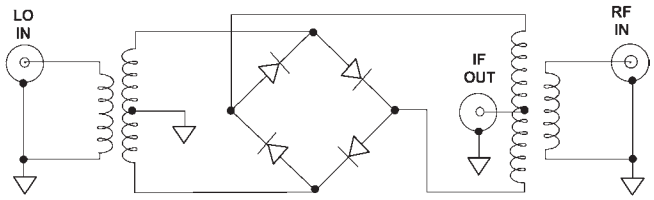


- Baluns:
  - הגדרתו של רכיב מאוזן ולא מאוזן.
  - המוטיבציה לשימוש בהתקנים מאוזנים.
  - הגדרה ומדדים של Balun.
  - מימוש Balun מקובץ ומפולג.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

7.2 ערבלי המרה (Mixers)

- מימוש ערבל בעל דיודה אחת, וערבל דיודי מאוזן.
- מימוש ערבל בתצורת גשר טרנזיסטורי FET.
- סימטריה בין פורטים, שימוש בפורט מוצא כבמבוא.
- תוצרי אי ליניאריות המתקבלים בערבל.
- השפעת צורת גל המת"מ על ביצועי ההמרה.
- תלות ליניאריות הערבל וניחות ההמרה בהספק המת"מ.
- בידוד וזליגות בין הפורטים, Spur Chart.
- ערבלים מדכאי בבואה.
- שיקולי תיאום עכבות בסביבת ערבל.

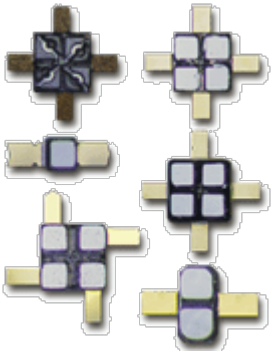


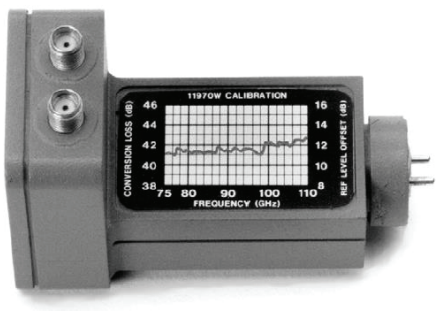
7.3 מתגי RF

- סקירת יישומי מתג RF ופרמטרים כלליים של מתג RF.
- מתגי PIN לעומת מתגים מכאניים: מתי נשתמש בכל סוג?
- מימוש מתג RF על ידי דיודת PIN:
  - טופולוגיות תקניות של מתגי PIN: SP1T, SP2T.
  - מימושים תקניים של מתגי PIN: Reflective, Absorptive, Terminated.
  - קביעת נקודת העבודה DC של הדיודה במקדם חיובי.
  - הבהרה בנושא התלות שבין מתח המקדם לבין ליניאריות המתג במובן 1dBcp.
  - התאמת פרמטרי הדיודה להספק הנדרש לעבור דרך המתג.
  - זמן תגובה (זמן מיתוג) של דיודת PIN, וטכניקות לסילוק מהיר של מטען חשמלי מהצומת.
  - מימוש אפנן פולסים מהיר ובחירת דיודות PIN ופריפריה מתאימים ל-PRF הנדרש.
  - שיקולי תיאום עכבות וצימוד DC בסביבת הדיודה.
  - תלות ביצועי המתג בטמפרטורה בהפעלת מתג PIN.

7.4 מגבלים (Limiters)

- סקירת יישומי מגבל RF ופרמטרים כלליים של מגבל RF.
- פונקצית תמסורת המתח-זרם של מגבל, ותלות התוצרים הלא ליניאריים בפונקציה זו.
- מימוש מגבל באמצעות 2 דיודות: בחירת פרמטרי הדיודות בהתאם להספק הזליגה הנדרש.
- שיקולי תכנון מערכתיים בסביבת מגבל.

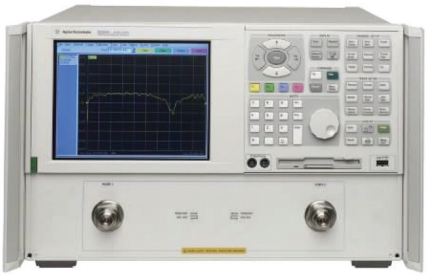




© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

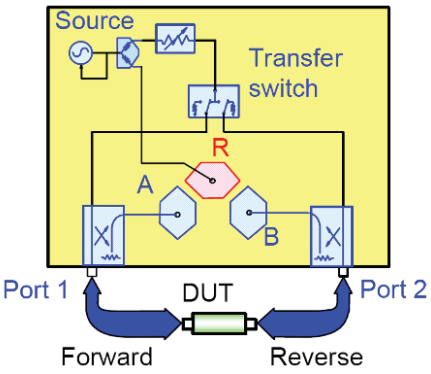
נושא 8 - נתח הרשת ומדידות וקטוריות (5 שעות לימוד תיאורטי)

8.1 מבוא לניתוח רשת (Network Analysis)



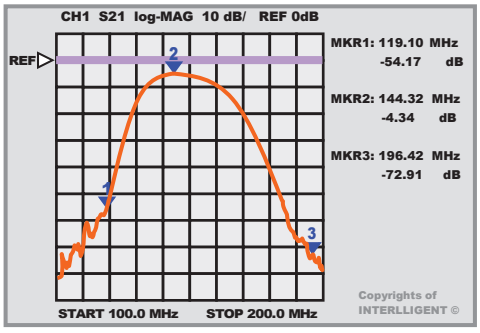
- הבהרת המושג "רשת חשמלית", ומהותו של נתח הרשת.
- הגדרתם של פרמטרי הפיזור (S-Parameters) של הרשת.
- סקירת מדידות אשר ניתן לבצע באמצעות נתח רשת.
- סיווג נתחי רשת לסקלאריים ולוקטורים, והשוואה ביניהם.
- מבנה בלוקים וארכיטקטורת מדידה של נתח סקלארי.
- ההבדל בין "גלאי" (Detector) לבין "מקלט" (Receiver).

8.2 ארכיטקטורות ומבני בלוקים של נתחי רשת וקטוריים



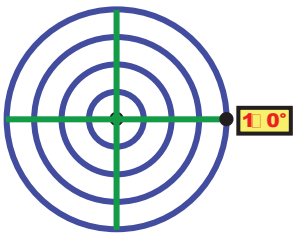
- סיווג נתחי רשת וקטורים לפי תצורת יחידת הפרדת האותות:
  - מבנה נתחי Transmission / Reflection.
  - מבנה נתחי Full S-Parameters.
- נתחי רשת וקטורים עם מנחת משתנה (Step Attenuator).
- נתחי רשת וקטורים עם גישה ישירה למקלטים:
  - המניעים למתן גישה ישירה למקלטים.
  - מבנה Configurable Test Set.
  - נתחי רשת בעלי 4 מקלטים.

8.3 נתוני הרכשה פיסיקאליים ותצורות הצגתם



- הגדרת כיווניות המדידה במונחי S-Parameters.
- נתוני הרכשה פיסיקאליים המתקבלים במקלטי נתח הרשת:
  - עבור מדידות העברה (Transmission / SXY).
  - עבור מדידות החזרה (Reflection/ SXX).
- הצגות סטנדרטיות (Formats) לנתוני הרכשה מעובדים:
  - גודל לוגריתמי / ליניארי (LOG / LIN MAG).
  - גדף פולארי (Polar Plot / Smith Chart).
  - השהיית חבורה (Group Delay).
  - נתוני עיבוד מיוחדים וסוגי הצגות נוספים.

8.4 כיול, ווידוא טיב הכיול - בנתח רשת וקטורי (VNA Calibration)

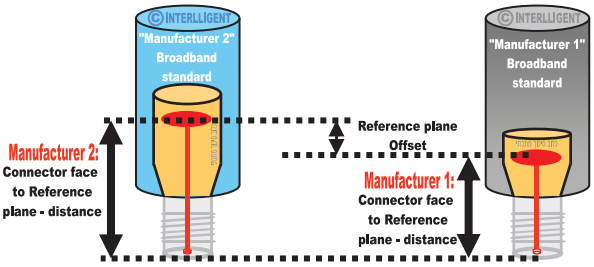


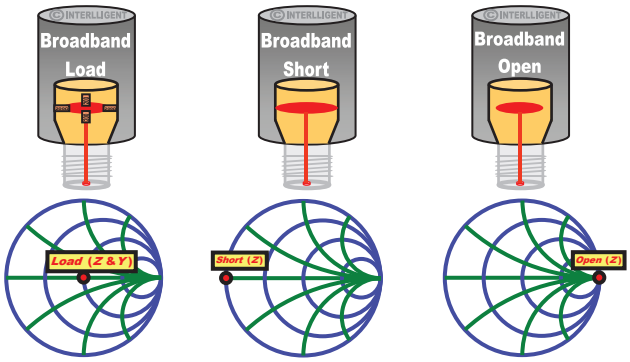
- מהות תהליך ה"כיול" ומניעים להכללת התקנים כגון כבלי מדידה ומנחתי הגנה במערך המדידה.
- הגדרת "מישור ייחוס הכיול" (Calibration Reference Plane).
- היחס בין תחום התדר עליו מכיילים (Span) לבין צפיפות נקודות הכיול.
- תכולת קיט כיול רחב פס.
- כיולי העברה (Transmission / SXY):
  - סטנדרט כיול ההעברה (Thru).
  - ווידוא כיול העברה באמצעות גרף פולארי.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

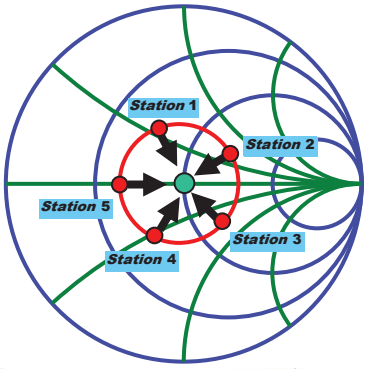
- תיקון שגיאת מדידה בהתקני Non-insertible Devices.
- מהות שלב ה"בידוד" (Isolation) האופציונאלי בכיולי העברה.

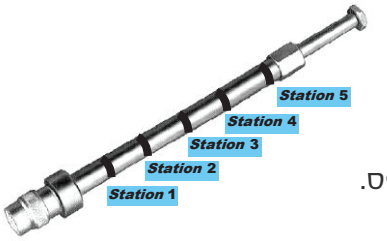
- כיולי החזרה פשוטים ורחבי פס (Broadband Reflection / SXX Calibration):
- מהות כיול ההחזרה, הגדרת מישור הייחוס באמצעות 3 נקודות בדיאגראמת סמית'.
- מבנה 3 הסטנדרטים לכיול ההחזרה בקיט כיול רחב פס (Open, Short, Match).
- תאימות מרחק סף המחבר (Connector Face) למישור ייחוס הסטנדרט - בין הסטנדרטים.
- הבעייתיות בשימוש בסטנדרטי קצר ונתק אשר מקורם בקיטי כיול שונים.
- טעינת נתוני קיט הכיול לנתח הרשת.
- ווידוא כיול החזרה בדיאגראמת סמית'.
- אבחון סטנדרטי כיול לא תואמים ("בננות" המתקבלות בדיאגראמת סמית').
- אבחון שגיאת "תת כיול" (Under-Cal).
- קיזוז "בננות" בדיאגרמת סמית' והפיכתן לנקודות התמצאות.
- שימוש במפתח Torque לחזרתיות.
- הבעייתיות בכיולי החזרה דרך מנחת הגנה.
- סדרי גודל מעשיים של Return Loss אשר בפועל ניתן למדוד באמצעות כיול רחב פס.



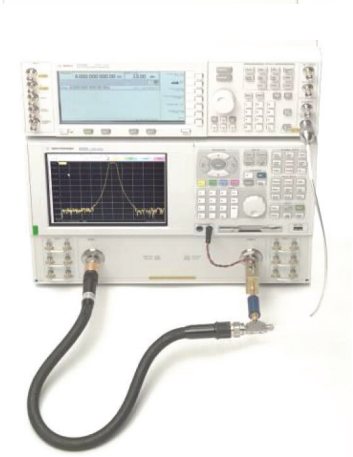


- כיולי החזרה באמצעות Sliding Load:
- מהות העומס המחליק (Sliding Load), הצורך במיצוע נק' התיאום בדיאגרמת סמית'.
- מבנה העומס המחליק.
- רוחב פס הכיול המתקבל.
- תהליך כיול עם עומס מחליק.
- סדרי גודל מעשיים של Return Loss אשר בפועל ניתן למדוד תוך כיול צר פס.
- נוהל ווידוא כיול צר פס.





- כבלי מדידה הנדרשים לעבודה תקינה וחזרתית בנתח רשת:
- מאפייני כבלי מדידה מקצועיים.
- מחברים מיוחדים לכבלי מדידה.
- מתאמי הגנה (Savers) למחברים.



8.5 מדידות יסוד בנתח הרשת

- מדידת הגבר אות קטן, ווידוא המדידה.
- מדידת פרמטרים של התקן בעל אורך חשמלי ארוך.
- מדידת אי ליניאריות במצב "Power Sweep".
- מדידת מקדם החזרה מרוכב ובדיקת רשתות תיאום עכבות.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

8.6 מדידות מתקדמות בנתח הרשת

- מדידה עקיפה (תוך הגנה מוחלטת על נתח הרשת) של עכבת המוצא של מגבר, תוך שימוש בשיטת "De-Embedding" (נקראת גם "Load Pulling").
- מדידת התקנים ממירי תדר באמצעות נתח רשת וקטורי.
- מדידת צבירת, תיאום ועקיבת פאזה (Phase Matching & Tracking).

8.7 גורמי שגיאה נפוצים במדידות VNA

- אבחון כיול לקוי תוך ווידוא בפורמט וקטורי, אבחון שגיאות המתקבלות מקיט כיול לא תקין.
- היחס בין תחום המדידה (Span), מספר נקודות הכיול (Number of Points) ואורך ההתקן. אבחון שגיאות "תת כיול" (Under Cal) הנובעות משינוי Span.
- אבחון שגיאות היסט דופלר (Doppler Shift) בין הפורטים בהתקן ארוך.
- אבחון דחיסה של מקלט נתח הרשת או של ההתקן הנמדד.

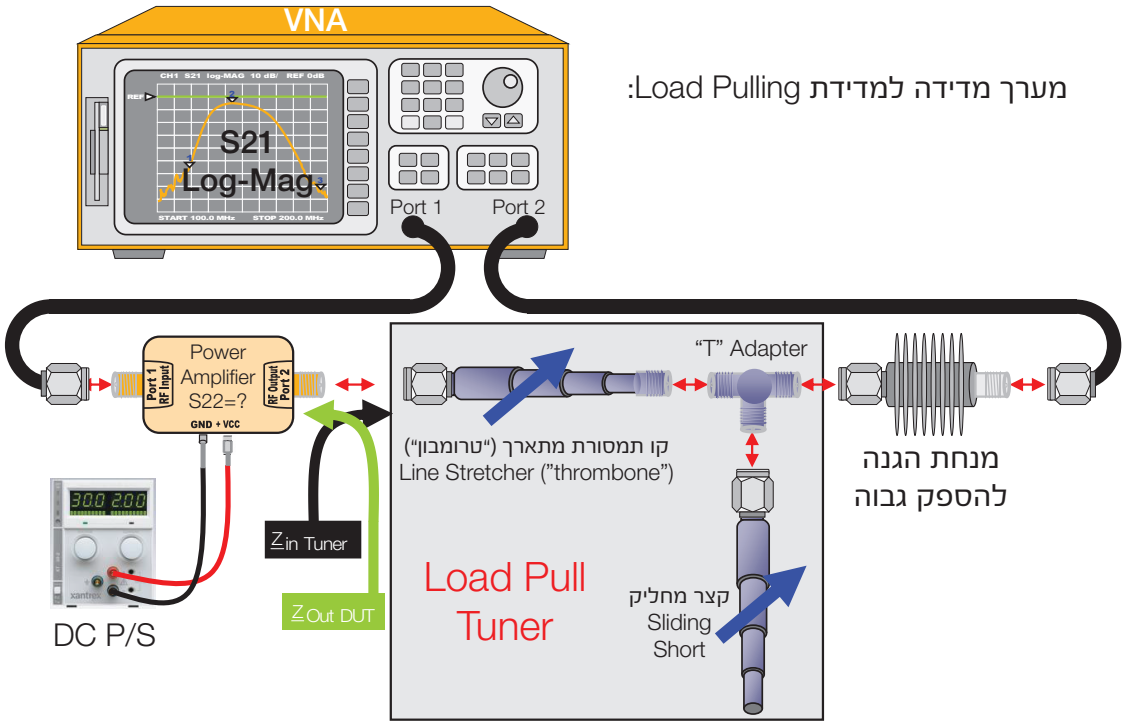
8.8 שמירת תקינות והגנה על נתח הרשת הוקטורי

- תקלות אופייניות בנתח הרשת הנובעות מהפעלה לא תקינה.
- נוהל ביצוע "בדיקות חיוניות" לתקינות נתח רשת - עם הפעלתו (בד"ח VNA).
- נהלי חיבור מנחתי הגנה ו- DC-Blocks להגנה על הציוד.
- אמצעי הגנה מפני חשמל סטאטי.

8.9 ארכיטקטורות ומבני בלוקים של נתחי רשת סקלאריים

- מבנה בלוקים של מערך מדידה נתח סקלארי.
- ההבדלים העיקריים שבין נתח סקלארי לווקטורי.
- סווג גלאים: AC, DC, אפנון אות הבדיקה למטרת קריאת אותות עם רעש מופחת.
- שיפור תחום דינאמי בנתח סקלארי על ידי מיצוע.
- מבנה יחידת הפרדת האותות וכיולי נתח רשת סקלארי.

מערך מדידה למדידת Load Pulling:



© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 9 - מסנני תדר רדיו ומיקרוגלים (5 שעות לימוד תיאורטי)

9.1 מבוא למסנני רדיו ומיקרוגלים

- סקירת שימושי מסננים / דיפלקסרים.
- הגדרת המסנן כבלוק ליניארי בעל יכולת עיצוב הגבר ו/או צבירת פאזה.
- סיווג מסננים לסוגים (Types) תקניים, ולמשפחות (Kinds) תקניות.
- תיאור המסנן על ידי פונקציית תמסורת "מועמסת", והפיכתה לעקומות בודה.

9.2 פרמטרים יסודיים של מסנן RF

- סוג המסנן (Filter Type) ומשפחת המסנן (Filter Kind).
- רוחב פס העברה / חסימה בין נקודות מחצית ההספק.
- רוחב פס העברה / חסימה שקול לרעש (Noise Equivalent BW).
- גורם הטיב (Quality Factor) לפי הגדרות ה- IEEE, ובמובן לורנץ.
- ניחות המעבר (Insertion Loss).
- מידת התיאום / הפסדי ההחזרה (Return Loss / VSWR).
- גליות תחום המעבר (Passband Ripple).
- השהיית חבורה (Group Delay) אבסולוטית.
- שונות השהיית החבורה בתחום המעבר (Passband Group Delay Variation).
- צבירת הפאזה האבסולוטית והיחסית.
- גורם התצורה (Shape factor).
- עקיבת הפאזה (Phase Trace).
- המחשת השפעת הפרמטרים הנ"ל על מערכות RF מודרניות.

9.3 סיווג מסנני RF למשפחות LPF מנורמלות

- משמעות המונח "מסנן LPF מנורמל", והצגת "פרמטרי g" בשתי טופולוגיות (רשת T ורשת Π).
- הגדרת וניתוח פונקצית תמסורת LPF מנורמלת למסננים הבאים:
  - משפחת מסנני צ'בישב (Chebyshev).
  - משפחת מסנני בתרוורת' (Butterworth).
  - משפחת מסנני בסל (Bessel).
  - משפחת המסננים האליפטיים (Elliptic).
- סקירת שימושים בעבור משפחות המסננים הנ"ל.

9.4 שיטת ניחות המעבר (Insertion Loss Method) לתכן מסננים

- חקירת הקשר בין מקדם ההחזרה המשתקף ממסנן LPF מנורמל חסר הפסדים לניחות מעברו.
- חישוב אנליטי של מקדמי טבלת "פרמטרי g" בעבור מסנני בתרוורת', בסל, וצ'בישב.
- התמרות קורודה ממסנן LPF מנורמל למסנן מסוג תקני אחר כלשהו, בתדרים נתונים.
- שימוש בהתמרות ריצ'רד לצורך יישום המסנן כמערכת מפולגת.

9.5 טכנולוגיות מימוש מסננים

- מימוש מסנני LC והתמרתם למימוש בקווי תמסורת.
- תכנון לרגישות מינימאלית לערכי רכיבים.
- מגרעות ויתרונות השימוש בסלילי אויר: מיקרופוניה, השראה הדדית ואפקט HPF פרזיטי.
- מסנני מהוד (Resonator) דיאלקטריים.
- מסננים מיכאניים (Cavity).
- מסנני גל שטח אקוסטי (SAW): תנודה מיכאנית, חסמי הנחתה תיאורטיים, צבירת פזה בתווך פיאזואלקטרי, רגישות SAW לטמפרטורה, שימוש כקורלטור פאסיבי.
- מסננים גבישיים ומסנני YIG.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 10 - מקורות אות ומרכיבי תדר (5 שעות לימוד תיאורטי)

10.1 מדדים של מקור אות CW לתחום RF / מיקרוגל

- הצגת המדד "דיוק התדר הנומינאלי" ומשמעותו.
- הצגת המדד "הזדקנות" (Aging) ומשמעותו.
- משמעות רעש הפאזה של מקור אות הרמוני, וכימותו ב"שפה" של SSB, DSB, Integrated.
- השפעת הכפלת תדר בפקטור נתון על רעש הפאזה החד צדדי (באותו היסט נתון).
- היחס שבין רעש הפאזה לבין התדר הרגעי ולבין ה-Jitter של האות בציר הזמן.
- מדדים לניקיון ספקטראלי (THD, הרמוניות ותת-הרמוניות, תוצרי לוואי - Spurs).

10.2 טכנולוגיות מימוש מתנדים

- ניתוח מקורות ייחוס:
  - תנאי התנודות של ברקהאוזן.
  - ניתוח חוג המשוב במישור לפלאס, תלות תדר התנודה מתוך חוג המשוב.
  - מתנדים מתצורות הרטלי וקולפיץ.
- טכנולוגיות ליצירת מקורות ייחוס:
  - מתנדי גביש ואפיין גביש קוורץ אלקטרומיכני, מהות תהודה טורית ומקבילית.
  - מתנדי גביש מפוצים מסוג TCXO, OCXO.
  - מתנדים מבוססי מהוד (Cavity) ושעוני מהוד אטומיים.

10.3 לולאות נעולות פאזה / מרכיבי תדרים

- מבנה בלוקים עקרוני והסבר אינטואיטיבי על אופן פעולתו של מרכיב תדרים.
- דיוק התדר הנומינאלי של המערכת ותלותו בסטנדרט הייחוס.
- ההבדלים בין 2 סוגי הנעילות האפשריות: נעילת תדר ונעילת פאזה.
- המחשה אינטואיטיבית לכך שמערכת מסדר 1 תינעל פאזה רק בתדר הטבעי של ה-VCO.
- המחשה אינטואיטיבית להבדלים שבין מערכת מסדר ראשון למערכת מסדרים גבוהים, במובנים:
  - הקשר שבין סדר החוג (סדר פונקציית תמסורת הפאזה של החוג) לסדר מסנן החוג.
  - מסנן החוג כאינטגרטור המאפשר נעילת פאזה בתדרים שונים מהתדר הטבעי של ה-VCO.
  - מסנן החוג כבלוק סילוק רעש המאפשר שיפור ביצועי רעש פאזה, באזור הסמוך לגל הנושא.
  - מסנן החוג כאלמנט המביא בשל משך זמן טעינתו להארכת "זמן הנעילה" בעת שינוי תדר.
- מרכיבי תדרים מסוג Integer N:
  - משוואת קביעת התדר.
  - אופן מימוש מחלקי התדר R,N.
  - מבנה גלאי הפאזה (PFD), מימוש אנלוגי ומימוש ספרתי (משאבת מטענים, Charge Pump).
  - קיומו של רעש גרנולארי (Idling Noise) בגלאי הפאזה במימושו הספרתי, והשפעת רעש זה בתצורת "Reference Spurs" על מסיכת (Mask) אות המוצא של מערכת הסינתיסייזר.
  - הצגת פונקצית התמסורת במישור לפלאס של כל אחד מהבלוקים במערכת.
  - המחשה אינטואיטיבית לניגוד שבין ביצועי רעש הפאזה לבין הרזולוציה (צעד התדר).
- מסיכת המוצא של מרכיב תדרים על פי "נוסחת Leeson".

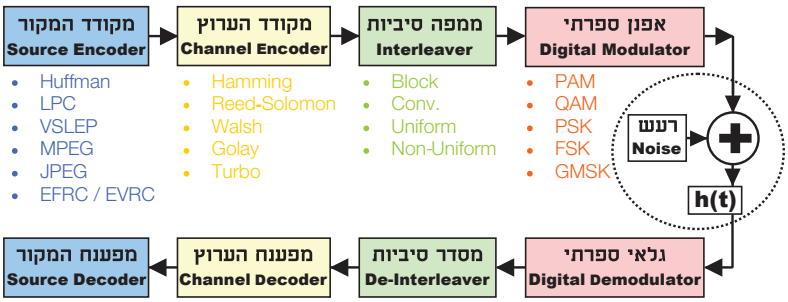
10.4 מערכות תדר מתקדמות

- מרכיבי תדרים מסוג Fractional N:
  - הרעיון שבמחלק שאינו שלם, ושיפור רעש הפאזה המתקבל בזכותו.
  - משוואת קביעת התדר.
  - מסיכה ספקטראלית אופיינית.
- מבנה עקרוני של מרכיב תדרים דיגיטאלי (DDS).

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 11 - אפנוני רדיו ספרתיים וניתוח אות וקטורי (VSA) (10 שעות לימוד תיאורטי)

11.1 יסודות כלליים בתקשורת ספרתית



- משאבי מע' תקשורת הרדיו הספרתית.
- מדדי ביצועים "מקצה לקצה" בתקש"ס.
- סכימת בלוקים של מע' רדיו תקש"ס.
- פירוט תפקידי הבלוקים בשרשרת:
  - מקור מידע: אינפורמציה, הסתברות ואנטרופיה.
  - מקודד מקור: מהות, משפט הדחיסה חסרת העיוות של שאנון.
  - מקודד ערוץ: המחשת קידוד בלוק וקידוד הרכבה (קונבולוציה).
  - שוזר ביטים (Interleaver): מהות, המחשת התמודדות עם דעיכות.
  - תפקיד האפנן הספרתי.

11.2 הגדרתם וניתוחם של מבני אותות תקניים במרחב אותות (BB)

- הגדרת מרחב האותות פס בסיס (Base-Band) ותכונותיו.
- המחשת "קריאת" מבני אותות במרחב האותות - ומשמעותם בציר הזמן.
- ניתוח של מבני אותות תקניים (אותות דטרמיניסטיים) במרחב האותות:
  - הגדרת מבני אותות תקניים מהמשפחות M-PAM, M-QAM, M-PSK, M-FSK.
  - קריאת מנת הממדים (Aspect Ratio) של מבנה האותות, מתוך ייצוגו במרחב האותות.
  - קריאת הספק פס בסיס מנורמל לכ"א מהסימבולים, ממבנה מרחב האותות.
  - קבלת הספק פס הבסיס המנורמל השיאי, חישוב הספק פס הבסיס הממוצע, וקבלה מתוכם של היחס בין הספק השיא להספק הממוצע בפס בסיס (BB PAR).

11.3 הצגת רעש גאוסי מתווסף במרחב אותות (BB) וקריטריוני החלטה

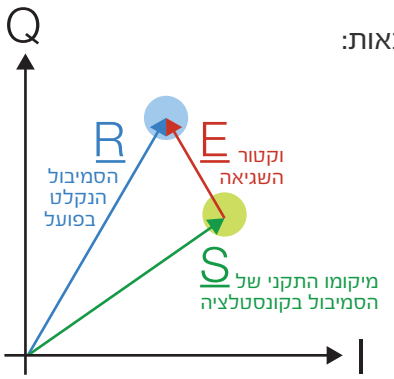
- תזכורות מתמטיות מ"אותות אקראיים ורעש":
  - פונקצית צפיפות פילוג (PDF), פונקצית צפיפות פילוג מצטברת (CDF), ופונקצית צפיפות פילוג מצטברת משלימה (CCDF) - של משתנה אקראי רציף.
  - מומנטים ראשונים של משתנה אקראי ומשמעותם הפיסיקאלית (ממוצע DC, הספק).
  - המשתנה האקראי הגאוסי: הגדרת פונקצית צפיפות פילוגו, נרמול משתנה אקראי גאוסי כללי, פונקצית Q(t) (Complementary error function) והשימוש בטבלאות שלה, היחס בין ספקטרום הרעש לבין הצגתו הסטטיסטית, משמעותה של ניצבות בווקטור גאוסי.
  - ייצוג רעש גאוסי לבן ורעש גאוסי צר סרט במרחב האותות.
  - הגדרת קריטריון ההחלטה MAP ומשמעותו במרחב האותות כ"קירבה מרבית לאות תקני".
  - חישוב SER של מבנה אותות מלבני דטרמיניסטי אליו מתווסף רעש גאוסי.
  - קבלת BER מתוך SER של מבנה אותות, אופטימיזציה ע"י הקצאת ביטים לפי קוד Gray.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

11.4 בחירת גלי נושא ומסנני ערוץ

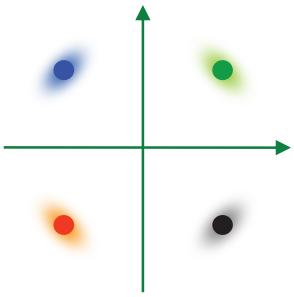
- בחירת גלי נושא, בהתאם לרוחב הפס הנדרש, וע"פ יחס PAR נדרש.
- בחירת מסנני ערוץ, והשפעת מאפייניהם על רוחב הפס המשודר.
- קונסטלציות מינימאליות, והבעייתיות של מגברי Class AB בחציית ראשית צירי מרחב האותות.

11.5 הצגת תהליכי עיוות במרחב האותות

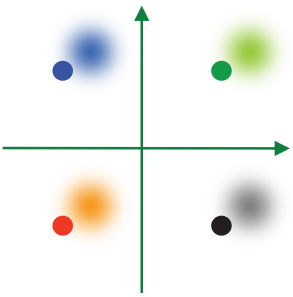


- זיהוי "הצורה האופייניות" במרחב האותות של כל אחת מהתופעות הבאות:
  - רעש גאוסי מתווסף.
  - עיוותי אי ליניאריות AM-AM.
  - הכפלה במת"מ בעל רעש פאזה ניכר.
  - זליגת גל נושא דרך רכיבי האפנן.
  - קבלת הפרעה מתדר סמוך במקלט.
  - חוסר איזון בין רכיבים ניצבים (IQ Imbalance).
- מדדי עיוות מוכללים במרחב האותות
  מדד העיוות הכוללני EVM:
  - הגדרת EVM לפי סימבול ולפי מבנה אותות כולל.
  - חישוב EVM כללי ונוסחת ה-EVM הכללית.
  - **פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 11": נוסחת ה-Total EVM.**

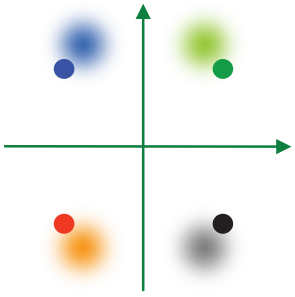
"מריחה" בשל רעש פאזה (Phase Noise)



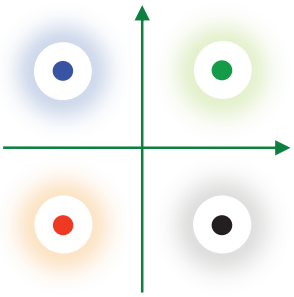
זליגת גל נושא (לאפנן או לגלאי)



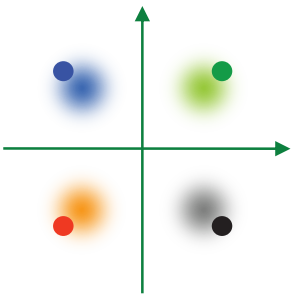
חוסר איזון בין רכיבים ניצבים (IQ)



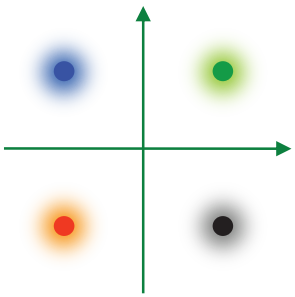
התוספות הפרעה בתדר סמוך לתדר גלי



דחיסה, או מעבר דרך אלמנט לא לינארי



התווספות ("טבילה") של רעש אקראי



© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 12 - ארכיטקטורות משדר ומקלט (7 שעות לימוד תיאורטי)

12.1 מבוא לארכיטקטורות מקלט

- הגדרת משימת המקלט, במובן שערוך אופטימאלי של אות הקליטה.
- מדדי ביצועים של מקלט: רגישות הקליטה וספרת הרעש, ליניאריות ותחום דינאמי, ברירות וסלקטיביות, דחיית היענות שווא, דחיית הקרנת מת"מ מהאנטנה.
- ארכיטקטורת המקלט הישיר ובעיותיה.

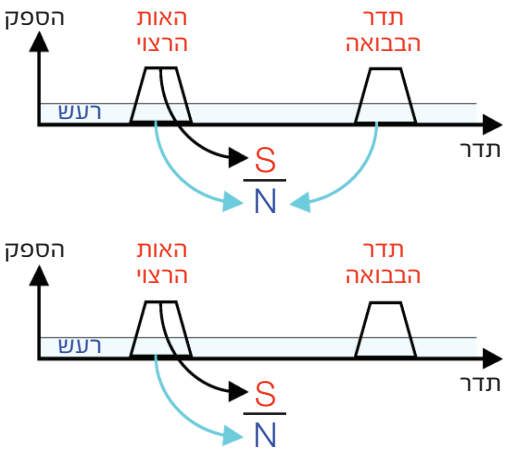
12.2 המרת תדר באמצעות ערבל

- המוטיבציה הכללית ליישום מערכות המרת תדר: תלות הפסדי כבלי תמסורת בתדר, תלות ממדי האנטנה בתדר השידור / קליטה, סכנת התנודות המתקבלת מריכוז הגבר גבוה בתחום תדר נתון. המוטיבציה ביישום מקלטים בהם הביצועים אינם תלויי תדר הקליטה.
- המרת תדר באמצעות ערבל אידיאלי: הגדרת הערבל האידיאלי ככופל מתח בציר הזמן, בחינת תפוקת הערבל האידיאלי בהזרקת 2 אותות הרמוניים למבואותיו, משפט המרת התדר.

12.3 שרשראות קליטה מסוג Real IF (סופר הטרודיין)

- תכונות המקלט הישיר, מניעים ליישום מקלטי סופר הטרודיין.
- מבנה מקלט Real IF (סופר הט') בעל המרה אחת: מוטיבציה, הגדרת תדר הבבואה.
- סיווג מקלטי Real IF למערכות המרה מסוג א' ומסוג ב', הגדרתן ע"י דיאגראמה ספקטראלית.
- מערכות מסוג א': מרחק תדר הבבואה הפוטנציאלי והמעשי .
- מערכות מסוג ב' - סיווג ממיר התדר לשני תתי סוגים: מערכת המרת תדר מסוג ב' "תקינה": קבלת מרחק הבבואה בפועל ע"י דיאגראמה ספקטראלית, מערכת המרת תדר מסוג ב' "בעייתית": קבלת מרחק הבבואה ע"י דיאגראמה ספקטראלית עם קיפול סביב האפס.
- מציאת תדר בבואה של מערכת מסוג ב' מהסוג הבעייתי.
- שיקולי בחירת תדרים במקלט סופר הטרודיין, לרבות זליגת מת"מ וההרמוניות שלו ל-IF.
- מערכות Zero IF והשוואתן ל-Real IF, מקלט סופר הטרודיין כפול.

12.4 שיקולי רעש מומר במערכות המרת תדר



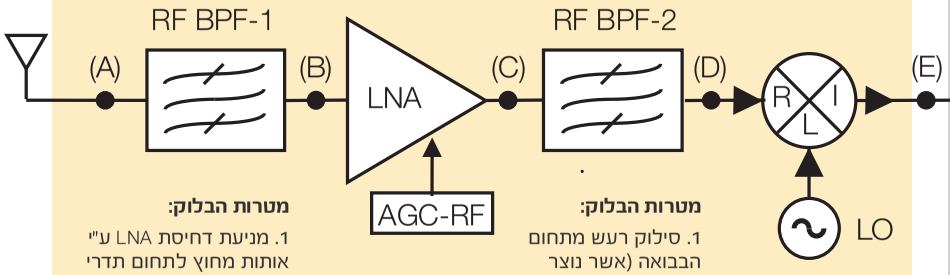
- המרה אופטימאלית לרעש SSB.
- שיקולי NF וליניאריות בתכנון מקלט: תכנון "מסנן, מגבר, מסנן".
- הגדרות רעשי SSB, DSB, NF פוטנציאלי ומעשי, תפקידי כ"א מהמסננים בשרשרת ההמרה.
- חישוב תוספת ספרת הרעש בשל רעש בבואה.
- הבהרה: המסנן הראשון בשרשרת אינו משפיע על עיצוב צפיפות הרעש שבמוצאו.

12.5 מדידות מעשיות של התקנים ממירי תדר

- הבעייתיות במדידות אבסולוטיות במכלולי המרת תדר.
- מדידת הגבר המרה באמצעות מחולל אות ונתח תדר.
- מדידת הגבר המרה באמצעות נתח רשת סקלארי.
- מדידות "Frequency offset mode" באמצעות נתחי VNA.
- מדידת פרמטרי ליניאריות של מכלול ממיר תדר.
- מדידת ספרת הרעש של מכלול ממיר תדר.
- תיאור אי הליניאריות של ערבל ע"י טבלת תוצרים (Spur Chart).

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

מקטע ממיר התדר מטה מסוג Real IF:
המרה מטה ("המרת מרחק") מתדר המשימה f_{RF} לתדר f_{IF} קבוע



מטרת הבלוק:

המרת תדר מטה, מתדר המשימה fRF, לתוצר המרחק, שבתדר fIF.

הערות:

1. בפועל מנפק הערבל במוצאו אינסוף תוצרים (בשל אי ליניאריות), ובנוסף קיימות בו גם זליגות בין הפורטים.
2. המתנד המקומי "צובע" את משימת ההמרה ברעש הפאזה שלו ובניקיון הספקטראלי שלו.

מטרות הבלוק:

1. סילוק רעש מתחום הבבואה (אשר נוצר ב-LNA) ממבוא הערבל, ובכך צמצום תוספת ספרת הרעש המתקבלת בשל המרת רעש מתחום הבבואה ל-IF.
2. "תרומה" (ביחד עם RF-BPF-1 לשיפור יחס דחיית תדר הבבואה המערכתי (IRR).

הערה:

למרות ששני מסנני ה-RF מכוונים לאותו תדר (או תחום תדרי) המעבר, מסנן זה הוא בד"כ סלקטיבי יותר מהמסנן RF BPF-1, כיוון שקיים עליו הגבר יתר, וניתן להרשות בו ניחות מעבר משמעותי יותר מבמסנן הראשון.

מטרת הבלוק:

יצירת הגבר יתר (O.G.) על המשך השרשרת, ע"מ שספרת הרעש המערכתית תשאף בקירוב לכדי ספרת הרעש של ה-LNA בתוספת ניחות מעבר המסנן RF BPF-1.

הערות:

1. בתכנונים מעשיים (במיוחד לתקש"ס) קיימת בד"כ אפשרות לשינוי הגבר ע"י חוג AGC. ההגבר מווסת ע"י VVA הממוקם אחרי (ע"מ שלא לפגוע בספרת הרעש) בלוק ההגבר (הקבוע).
2. המגבר עלול לייצר במוצאו רעש ניכר גם בתחום הבבואה, אשר אלמלא יסולק ע"י RF-BPF-2 יומר בערבל לתחום ה-IF.

מטרות הבלוק:

1. מניעת דחיסת LNA ע"י אותות מחוץ לתחום תדרי הקליטה הרצוי.
2. "תרומה" (ביחד עם RF-BPF-2) לשיפור יחס דחיית תדר הבבואה המערכתי (IRR).

הערות:

1. כרכיב פאסיבי ראשון, ניחות המעבר במסנן נצבר לספרת הרעש המערכתית. לפיכך, רצוי שהמסנן יהיה בעל ניחות מעבר מינימאלי. הדבר מאלץ בפועל מימוש עם מינימום חוליות (מסנן מסדר נמוך). בשל כך, מסנן זה בד"כ פחות סלקטיבי מ-RF-BPF-2, עליו קיים הגבר יתר (ולכן ניתן להרשות בו ניחות מעבר גבוה יותר).
2. כרכיב פאסיבי ראשון בשרשרת, אין המסנן מעצב את הרעש במוצאו (אשר נשאר רעש שמיים לבן כמו במבוא), אלא רק את האות הדטרמיניסטי העובר דרכו.

מקטע המקלט הישיר:
סינון וגילוי האות המתקבל סביב תדר ה-IF הקבוע

מטרות הבלוק:

1. סילוק זליגות ותוצרי אי ליניאריות מוצא הערבל, אשר ללא קיום מסנן זה עלולים היו להביא לדחיסת מגבר ה-IF.
2. "תרומה" (ביחד עם IF-BPF-2) לקביעת סלקטיביות המקלט ("רוחב פס הביצועים" לפיו נמדד היאל"ר, אשר אמור להתאים לרוחב המשימה).

הערות:

1. מסנני ה-IF אינם מסוגלים לטפל בדחיית תדר / רעש בבואה, אלא בסילוק תוצרים לא רצויים ובקביעת סלקטיביות הערוץ. הטיפול בבבואה נעשה במסנני ה-RF בלבד.
2. רוחב מסנן זה בד"כ רחב או שווה לרוחב מסנן ה-IF השני.

מטרות הבלוק:

1. קביעת הליניאריות המערכתית: הגבר תחום ה-IF בכדי ליצור הגבר יתר על שארית השרשרת.

הערות:

1. בד"כ מדובר במגבר הספק בעל ליניאריות גבוהה.
2. בתכנונים מעשיים (במיוחד לתקש"ס) קיימת בד"כ אפשרות לשינוי הגבר ע"י חוג AGC. ההגבר ב-IF מווסת ע"י VVA הממוקם לפני (ע"מ שלא לפגוע בליניאריות) בלוק ההגבר.

מטרות הבלוק:

1. מסנן "Anti-Aliasing": נועד לסלק ממבוא הגלאי (בד"כ ADC) תוצרי אי ליניאריות ורעש רחב סרט המיוצרים במגבר ה-IF, וכן לדחות אותות מערוצים סמוכים למשימה העלולים "להתקפל" בשל הדגימה לתוך הספקטרום המעובד.
2. קביעת סלקטיביות המקלט ("רוחב פס הביצועים" שבו נמדד היאל"ר, כלומר רוחב הערוץ הנקלט בפועל). רוחב זה נקבע ביחד עם מסנן ה-IF הראשון.

הערות:

1. מסנני ה-IF אינם מסוגלים לטפל בדחיית תדר / רעש בבואה, אלא בסילוק תוצרים לא רצויים ובקביעת סלקטיביות המקלט. הטיפול בבבואה נעשה במסנני ה-RF בלבד.
2. מסנן ה-IF הוא בד"כ המסנן הצר ביותר בשרשרת.

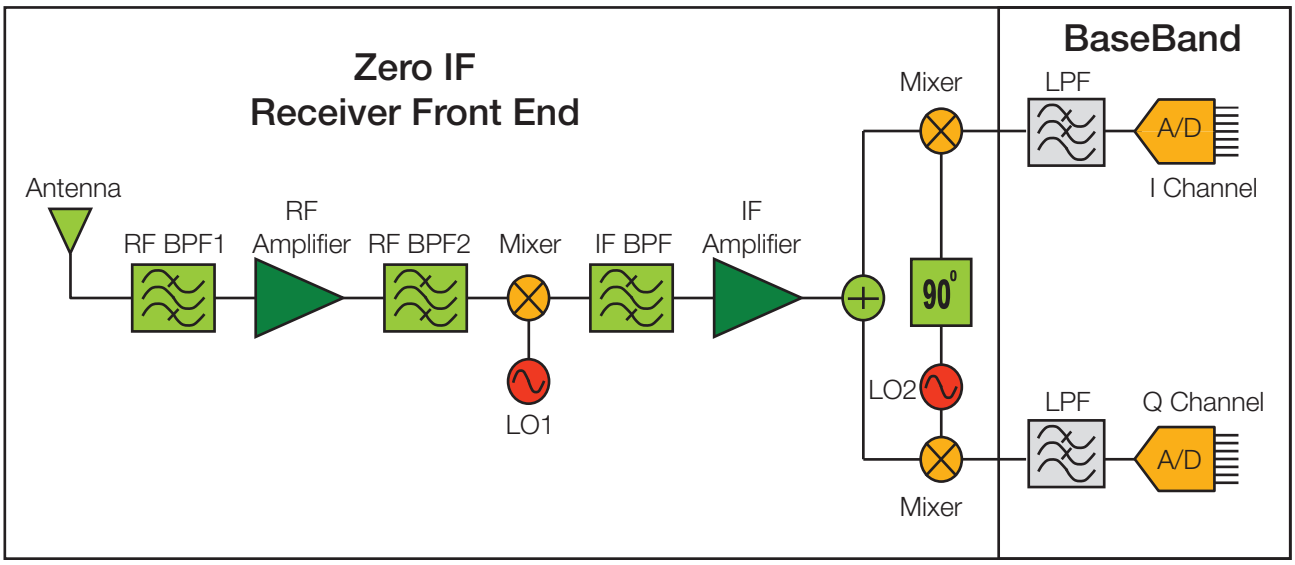
© כל הזכויות שמורות לחברת אינטליג'נט בע"מ

12.6 צבירת רעש פאזה במסלולי המרת תדר (במשדר ובמקלט)

- השפעת רעש הפאזה של המתנד המקומי על ביצועי הסלקטיביות (במובן ACPR).
- סנכרון בין מקורות LO בערבלי המרה בשרשרת בעלת שתי המרות ומעלה.

12.7 תכנון משדר

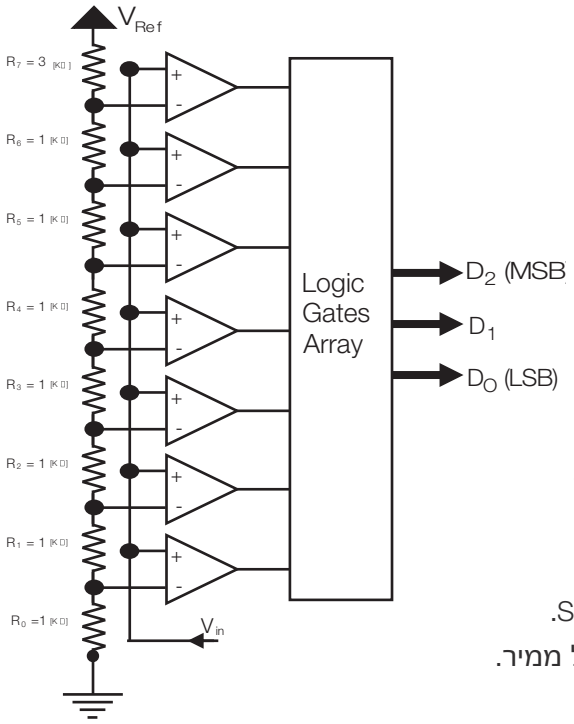
- שיקולי ליניאריות ורעש מערכתיים.
- משדרי Real IF לעומת משדרי Zero IF.
- שיקולי בחירת תדרים במקלט סופר הטרודיין, לרבות זליגת מת"מ וההרמוניות שלו ל-RF.
- צבירת רעש פאזה וסנכרון מתנדים מקומיים.



© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 13 - רכישת IF ספרתית והנדסת מערכת (8 שעות לימוד תיאורטי)

13.1 יסודות רכישה ספרתית



- מבוא בנושא עיבוד אות:
  - תכונות דגימה תיאורטית ע"י כפל ברכבת הלמים.
  - דגימה ע"י רכבת פולסים מרובעים (Sample & Hold ro Order Hold).
  - משפט הדגימה של ניקוויסט, ודגימת Shannon.
  - קבלת הספקטרום הדיגיטאלי של אות דגום: אזורי נייקוויסט.
  - חישוב תדרים "מסוכנים" שיש לדחות ממבוא הדוגם.
  - יתר דגימה ותת דגימה, אינטרפולציה ודצימציה.
  - התמרת פורייה רציפה ומהירה (FFT).
- פונקציית תמסורת מתח-קוד של ADC אידיאלי.
- מבנה ותאור אופן פעולת ADC ליניארי מסוג Flash ("מבנה Thermometer").
- מבנה ותאור אופן פעולת ADC ליניארי מסוג PipeLine.
- מבנה ותאור אופן פעולת ADC ליניארי מסוג Sigma - Delta.
- הגדרת "ביצועים דינאמיים" לעומת "ביצועים סטאטיים" של ממיר.
- סקירת ממירי ADC מהירים לתקשורת בתעשייה.

13.2 יחס אות לרעש-כימות (SQNR) בממירי Flash / Pipeline ADC

- מהותו של רעש כימות:
  - הגדרת רעש הכימות (קוונטיזציה).
  - הבהרה בנושא "מדוע רעש הכימות הוא רעש לבן".
  - חישוב הספק רעש הכימות הנאגד בתחום אזור נייקוויסט הראשון.
  - תלות צפיפות הספק רעש הכימות בתדר הדגימה ובמספר הביטים.
- חישוב הספק האות הדטרמיניסטי הנרכש:
  - הצגת אופן חישוב הספק אות עם מתח שיא לשיא בעוצמה של "Full Scale".
  - תלות ההספק הממוצע של האות הנרכש ביחס השיא לממוצע שלו (PAR / Crest Factor).
  - דוגמא לחישוב הספק ממוצע נרכש בעבור אות הרמוני ובעבור אות משולש.
  - שיקולים וכללי אצבע לבחירת מקדם ביטחון (Back-Off) מרמת ה-"Full Scale".
- חישוב יאל"ר הכימות (SQNR) המתקבל במצב "דגימת נייקוויסט" (אוגדן רעש בכל אזור ניקוויסט הראשון):
  - חישוב תיאורטי של יאל"ר הכימות, המרבי האפשרי (SQNRMax), בדגימת נייקוויסט.
  - תלות יאל"ר הכימות המרבי האפשרי (בערכו התיאורטי) במקרה זה במספר ביטי החומרה.
  - יאל"ר הכימות המעשי בדגימת נייקוויסט:
- הצגת גורמי מימוש אשר מרעים את ה-SQNR המעשי לעומת התיאורטי.
- הכללת השפעת גורמים אלה ב"מקדם המימוש" (Implementation Constant).
- הגדרת הפרמטר "מספר הביטים היעילים" (ENOB).

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

13.3 רכישת יתר דגימה (Over Sampling Acquisition)

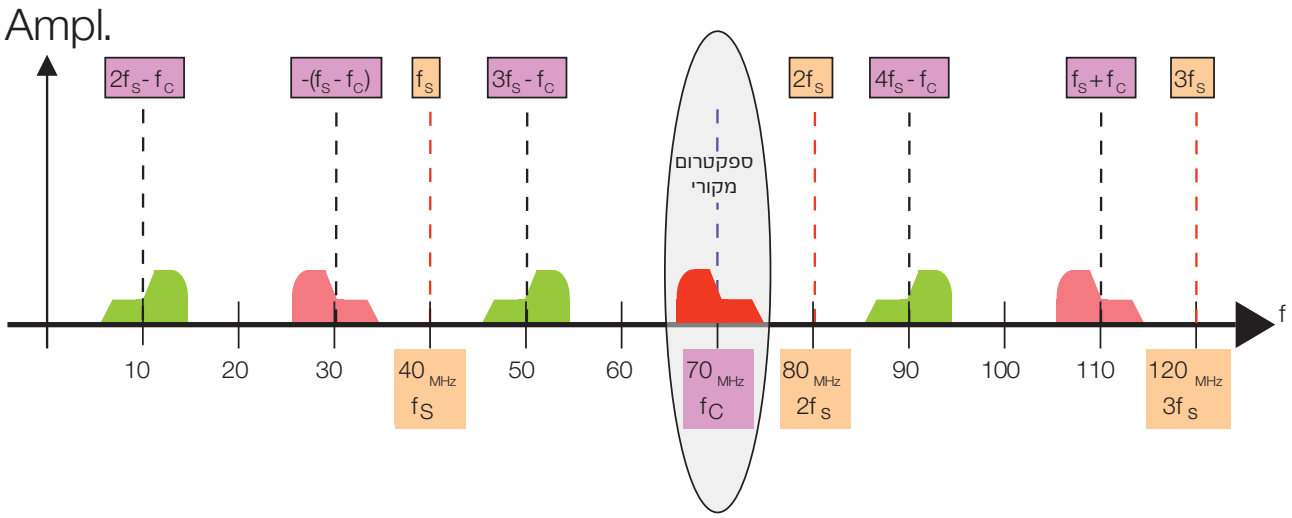
- הגדרת יתר דגימה במובן נייקוויסט ובמובן שאנון.
- השפעת תדר הדגימה על צפיפות רעש הכימות במוצא הדוגם באזור נייקוויסט הראשון.
- סינון ספרתי במעבד ה-DSP בתחום המשימה בלבד ושיפור SQNR.
- הגדלת מספר הביטים השקולים ע"י יתר דגימה.
- פיתוח וקבלת "נוסחת יסוד מקצועית מספר 12": נוסחת ה- ENOB הכללית.
- הקלות בתכנון מסנן ה-Anti Aliasing בזכות יתר הדגימה.

13.4 תהליכי עיוות נוספים בממירי Flash / Pipeline ADC

- השפעת רעש הפאזה (Jitter) של שעון הדגימה על ה-SQNR הנרכש בפועל:
  - פיתוח נוסחת המעבר בין ציר תיאור רעש פאזה בציר התדר לבין תיאורו בציר הזמן (Jitter).
  - הגדרת הפרמטר "שגיאת זמן מפתוח" (Aperture Jitter).
  - תלות יאל"ר הכימות המרבי האפשרי (בערכו התיאורטי) בפרמטר זה, ובתדר האות הנדגם.
- היווצרות אותות לוואי (Spurs) בממירים מהירים:
  - תוצרי לוואי הנגדמים בשל אי ליניאריות דיפרנציאלית (DNL) בממיר.
  - תוצרי לוואי הנגדמים בשל אי ליניאריות אינטגראלית (INL) בממיר.
  - עוותי רכישת אות קטן והתקבלות של אותות לוואי בעטיים.
  - הקטנת תוצרי לוואי בשל DNL ע"י הרעשה מכוונת (Dithering).
  - הרמוניות ותת הרמוניות של אות ה-IF הנרכש.
- ביצועי רעש משולבים: נוסחת ה-SQNR המעשי הכללית (אשר כוללת השפעות Jitter, DNL).

13.5 סקירת שיקולי הנדסת מערכת

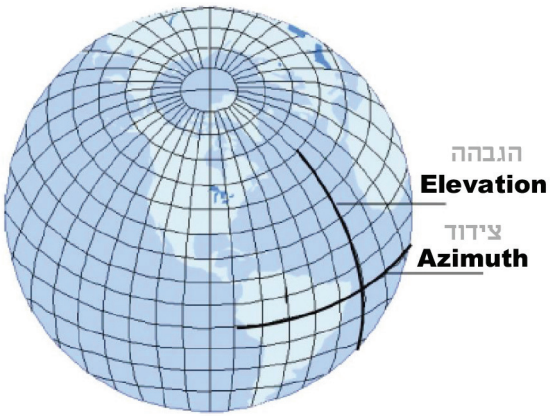
- בחירת ADC מתאים בעבור EVM ו-SNR מערכתיים נדרשים.
- בחירת Balun מתאים למבוא הממיר, וקביעת עכבת המבוא הרצויה לממיר.
- שיקולי ליניאריות מערכתיים ונקשר בינם לבין עכבת המבוא לממיר.
- קביעת סך כל הגבר מסלול הקליטה, בהתאם לרמת ה-Full Scale של הממיר ולרגישות הנדרשת.
- הצגת שיקולים ופשרות בנושא בחירת תדר IF, תדר דגימה ומסנן IF:
- בחירת תדר דגימה המתאים לתדר ה-IF, לרוחב פס המשימה, ורעש הפאזה של השעון.
- הגדרת דרישות ממסנן ה-IF האחרון (Anti Aliasing) לפי תדר הדגימה ותדר ה-IF.



© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

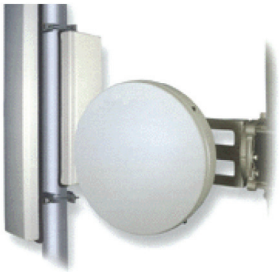
נושא 14 - אנטנות, התפשטות גלים וטכניקות Diversity (5 שעות לימוד תיאורטי)

14.1 מושגי יסוד מתורת האנטנות



פרמטרים כלליים של אנטנות ומושגי קרינה:

- הגדרת מושג ה"קרינה" האלקטרומגנטית.
- סיווג שדה הקרינה לשדה קרוב ולשדה רחוק.
- העכבה האפיינית של תווך הריק ("האתר").
- הגדרת נצילות אנטנה ("נצילות קרינה").
- הזנה ותאום של אנטנה:
  - יחס גלים עומדים של אנטנה.
  - שימוש בדיאגרמת סמית לצורך תאום עכבות.
  - תאום אנטנה: מעגלי תאום עכבות, גדמים (Stubs).
  - מתאם קו מאוזן לקו לא מאוזן (Balun).

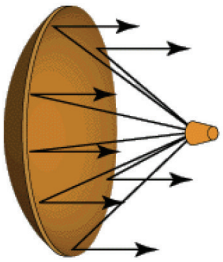


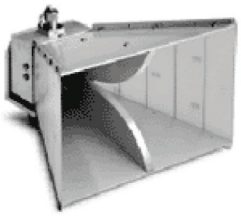
כיווניות ושבח של אנטנה:

- האנטנה האיזוטרופית כאנטנת ייחוס.
- הגדרת השטח היעיל של אנטנה.
- קריאת עקומי קרינה של אנטנות.
- הגדרת שבח ("הגבר") האנטנה הכיוונית.

קיטוב:

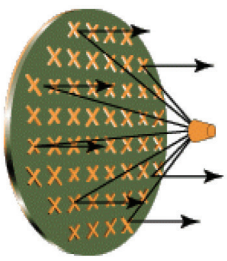
- הגדרת המושג "קיטוב של אנטנה".
- הצגת קיטוב נתון כמקרה פרטי של קיטוב אליפטי.
- ייצוג של קיטוב ע"י קטורי ג'ונס ומטריצות טנזור.
- יצירת קיטוב נתון ע"י זוג קיטובים ליניאריים.
- הפסדי קיטוב בין אנטנת השידור לאנטנת הקליטה.
- חומרים מקטבים (פולרואידים).
- השפעת התווך (בתחומי תדר שונים) על קיטוב האות הנקלט.





אנטנות נפוצות:

- ניתוח **אנטנת הדיפול** בשדה רחוק.
- ניתוח **אנטנת היאגי** בשדה רחוק.
- ניתוח **אנטנת השופר** בשדה רחוק.
- דיון ב**אנטנת המחזיר הפרבולי** ("צלחת"):
  - ניתוח פעולת המשטח המחזיר, הקבלה לאופטיקת קרניים.
  - חישוב הגבר אנטנה כפונקציה של אורך הגל ושטח יעיל.
  - אנטנות עם פוקוס מרכזי ואנטנות עם פוקוס מוטה.

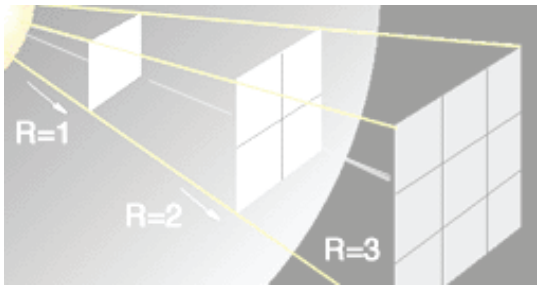


אנטנות חכמות:

- טכנולוגיות הטיית אלומה: מיתוג אלומות לעומת הסטת פאזת קורנים.
- יצירת עקום קרינה רצוי ע"י מערך קורנים מוסטי פאזה.
- דוגמא: מכ"מ הטיית אלומה אלקטרונית.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

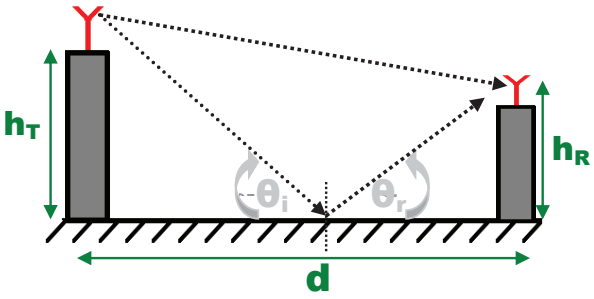
14.2 השפעת האטמוספרה על התפשטות גלי רדיו דרכה

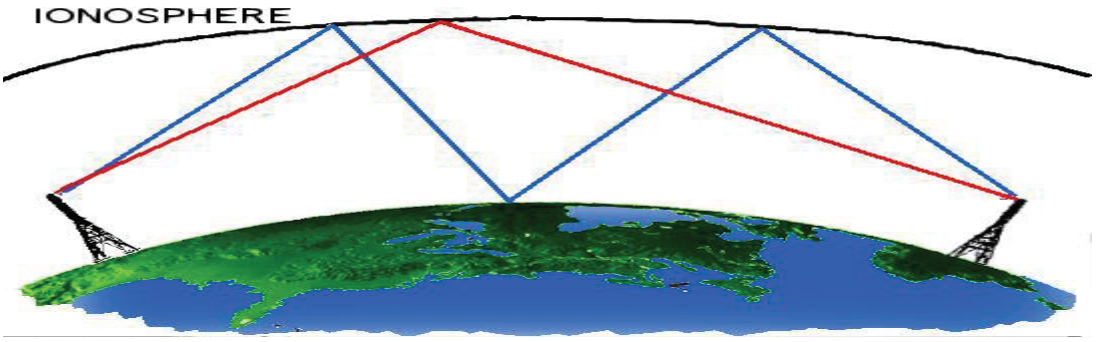


- חלוקה מקורבת לאופני התפשטות לפי תחום תדר:
  - גלי קרקע.
  - גלי רקיע.
  - גלי מרחב (RLOS).
- הרחקת אופק הרדיו מן האופק הגיאומטרי:
  - שבירת גלים בין שכבות אטמוספריות, ו"כיפוף" קרניים.
  - הגדרת האופק הגיאומטרי, וקבלת נוסחא לחישובו.
  - הגדרת אופק הרדיו, וקבלת נוסחא לחישובו.
- בליעות אטמוספריות:
  - הצגת תדרים נקודתיים בתחום התדר DC-100 GHz, בהם מתקבלות ב"אטמוספרה תקנית" בליעות ניכרות.

14.3 ערוצי רב נתיב (Multi Path Channels)

- הצגת מאזן הנתיב (link Budget) בערוץ מעשי כסכום של "מאזן פריס" ושל "הגבר רב נתיב".
- ניתוח מאזן קשר בערוץ דו נתיבי:
  - הגדרתם של אזורי פרנל (Frensel Zones).
  - קבלת תגובת הזמן ותגובת התדר של ערוץ דו נתיבי בעל גיאומטריה נתונה.
  - חישוב הגבר הערוץ בתדר נתון, כפונקציה של מרחק הקשר.
- הצגת פרמטרים של ערוץ רב נתיבי:
  - תגובת ההלם של הערוץ, בציר הזמן.
  - זמן הקוהרנטיות של הערוץ.
  - השהיית פיזור (Delay Spread).
  - רוחב פס קוהרנטיות (Coherence Bandwidth).
  - אקספוננט ניחות הערוץ (Path Loss Exponent).
  - הגדרת פרמטר "המרחק הקריטי" של ערוץ רב נתיבי.
- הצגת הערות הרב נתיבי בשתי נקודות מבט שקולות:
  - הצגה בציר הזמן של ערוץ רב נתיבי כבלוק בעל זיכרון .
  - הצגה בציר התדר של ערוץ רב נתיבי כמסנן בעל הגבר סלקטיבי בתדר.
- הצגת תוצאות ניסיוניות למקדמי ניחות, זמני קוהרנטיות וזמני פיזור של סביבות שונות.





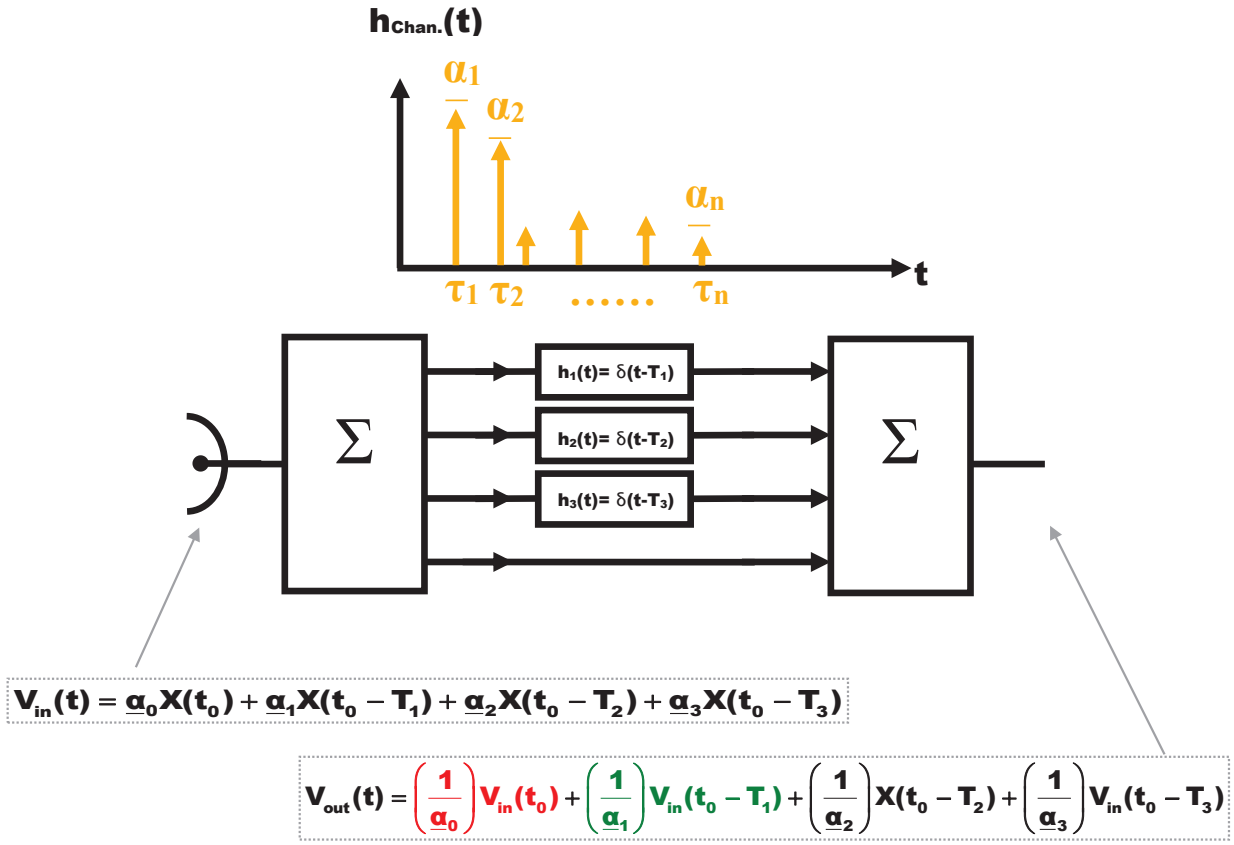
© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

14.4 מודלים לדעיכות ולחישובי זמינות ערוץ

- אפקט דופלר והשפעתו על הספקטרום הנקלט.
- משמעות "דעיכה זמנית" במובן עוצמת קליטה המוצגת בציר הזמן ובציר התדר.
- סיווג דעיכות למהירות ולאיטיות.
- הגדרת שולי דעיכות וזמינות עורק.
- מודלים קלאסיים להצגת דעיכות וזמינות ערוץ:
  - מודל "ערוץ ריילי", וחישוב זמינות עורק בו.
  - מודל "ערוץ רייס" וחישוב זמינות עורק בו.

14.5 התמודדות עם רב נתיב ודעיכות ע"י טכניקות שונות (Diversity)

- הצגת טכנולוגיות שונות (Diversity) מהסוגים הבאים:
  - שונות זמן:
    - התמודדות עם דעיכות קצרות ע"י שימוש בשוזר ביטים (Interleaver) במשדר.
    - התמודדות עם דעיכות קצרות ע"י שימוש בקוד תיקון שגיאות סדרתי.
    - התמודדות עם התאבכות הורסת במקלט ע"י יישום מקלט "מגרפה" (Rake).
  - שונות מרחב:
    - הצגת טכניקת "Selective Combiner" לבחירה בין אנטנות במקלט.
    - שימוש בשונות קיטוב בעורקי מיקרוגל מנקודה לנקודה.
  - שונות תדר:
    - שימוש בשונות תדר בעורקי מיקרוגל מנקודה לנקודה.



INTERLLIGENT RF & Microwave Solutions
© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים

נושא 15 - פריסה תאית ומערכות תקשורת מתקדמות (5 שעות לימוד תיאורטי)

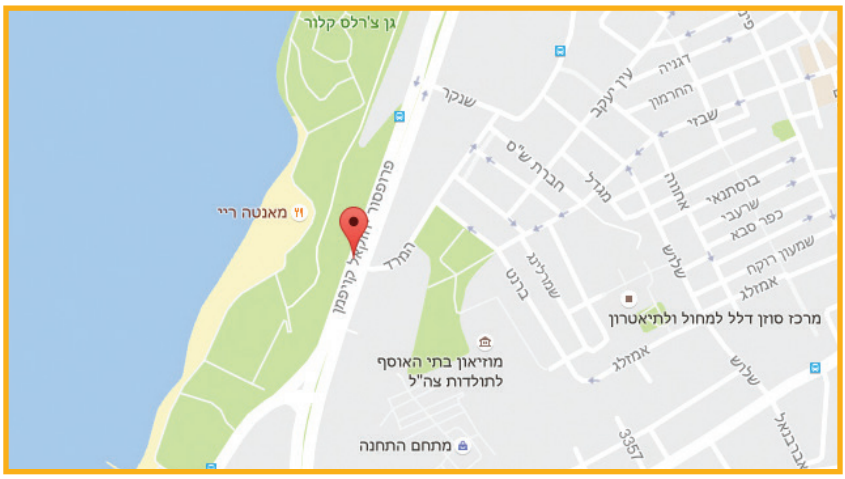
15.1 מבוא למערכות תקשורת בפריסה תאית

- הרעיון הסלולרי: הצגת מערכת ממסר לעומת מערכת ממחזרת ערוצים.
- מיחזור תדרים ותאי שטח:
  - הגדלת קיבולת משתמשים על ידי מיחזור תדרים בתאי שטח שונים.
  - הצגת גורמי מיחזור "חוקיים" אשר יביאו לפריסה גיאומטרית חזרתית של תאי שטח.
- חישוב יחס אות להפרעה במקלט הנייד במערכת תאית ממחזרת תדר:
  - הצגת מדד הביצועים "יחס אות להפרעה" (C/I).
  - הסבר מדוע ניתן להשתמש במדד זה כביחס אות לרעש.
  - הצגת "המיקום הבעייתי ביותר" במובן ביצועי קליטה במקמ"ש הנייד.
  - חישוב הספק אות תחנת הבסיס ("המשימה") הנקלט במקלט הנייד במקרה זה.
  - חישוב הספק סך ההפרעות הנקלטות במקלט הנייד במקרה זה.
  - חישוב C/I במקרה הבעייתי ביותר בנייד, מסקנות בנוגע ליחס בין ה- C/I לבין מקדם המיחזור.
- בעיות של תחרות הספקים במערכות תקשורת תאיות:
  - הסבר הגורמים לבעיית תחרות הספקים.
  - טכניקות לפתרון בעיות תחרות הספקים:
    - שימוש בהקצאות תדרים דינאמיות.
    - חלוקת תא לסקטורים והרחקת מרחק ההפרעה הקרובה.
    - השפלת אנטנות (Antenna Tilting).
    - שימוש ברפיטרים באזורים בעייתיים.
- תקני סלולר נייד נפוצים:
  - הצגת תקני טלפוניה ניידת בטבלת השוואה.
  - סקירת מגמות טכנולוגיות בתחום הסלולר.

15.2 טכניקות שידור מתקדמות

- שידורים פרוסי תדר (Spread Spectrum):
  - התמודדות עם ערוץ רב נתיבי ועם הפרעות על ידי שידור פרוס תדר.
  - סווג שידורים פרוסי תדר לקטגוריות: Frequency Hopping ו-Direct Sequence.
  - הגבר עיבוד (Processing Gain) בשידור פרוס תדר ותלותו ביחס הפריסה.
- שידורי OFDM:
  - הגדרתם ומשמעות בציר הזמן של גלי נושא ניצבים.
  - התמודדות אותות OFDM עם ערוץ רב נתיב ועם אותות חוסמים צרי סרט.
  - יצירת (אפנון) אותות OFDM ע"י תהליך FFT.
  - יחסי שיא לממוצע (PAR / Crest Factor) ב-OFDM, תלות היחס במספר גלי הנושא.
  - דוגמא למבנה OFDM של מערכות WLAN.
  - דוגמא למבנה OFDM של מערכות Wi-Max.
- שידורי UWB:
  - הצגת הרעיון בשידורי UWB.
  - מסיכות ספקטראליות וקצבי נתונים בטכנולוגיית UWB.
- רדיו מוגדר תוכנה (SDR):
  - ארכיטקטורה כללית של מקלט רדיו מוגדר תוכנה.
  - אתגרים וחסמים טכנולוגיים ברדיו מוגדר תוכנה.

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים



מיקום

משרדי חברת INTERLLIGENT ומרכז ה-RF ממוקמים בקומה ה-11 בבנין "בית הטקסטיל" ברח' קויפמן 2, תל אביב. בנין "בית הטקסטיל" נמצא במתחם בניני המשרדים ובתי המלון ממול הדולפינריום בתל אביב, ממערב לשכונת נווה צדק.

חניונים

באזור מספר חניונים לשירות הבאים ברח' המרד, רח' שנקר ורח' לוי.
"חניון הדולפינריום" הינו הגדול באזור וממוקם ממול לבנין "בית הטקסטיל" ברח' קויפמן.
הכניסה לחניון (בנסיעה מצפון לדרום) ע"י פניה ימינה בצומת קויפמן ושנקר.

למידע נוסף

ניתן לפנות לחטיבת ההדרכה בטלפון: 1-700-70-8200 | 03-5160763
www.int-RF.com

INTERLLIGENT
RF & Microwave Solutions

© כל הזכויות שמורות לחברת אינטרליג'נט בע"מ
מרכז ה-RF של ישראל - בית הספר למקצועות הנדסת הרדיו והמיקרוגלים