תכנון מגבר הספק **RF** רחב סרט בעל נצילות גבוהה בטכנולוגית גליום ניטריד

מבוא

הדרישה למגברי RF ליניאריים (RFPAs) המכסים את תחום התדרים שבין 1.5 ל -2.8 ג'יגהרץ הביא לפיתוח גישות תכנון חדשות לתכנון מגברים רחבי סרט ליניאריים ובעלי נצילות גבוהה , הפועלים באופן output back-off (OBO). האתגר הניצב לפני המתכננים הוא שיפור היעילות של מגברי הספק. חלק מהאתגר נובע מהקושי לשלוט בעכבות העמסה הרמוניות . בנוסף , הקושי במדידת צורות גל בתחום המיקרוגל מקשה על השגת עיצוב צורת גל אופטימלית . תכנון מגבר הפועל ברוחב פס גדול מוסיף עוד אתגר , הנובע מכך שההרמוניות של תדרי העבודה הנמוכים נמצאות בתוך פס התדרים של המגבר . התכנון הופך להיות מסובך עוד יותר עקב השימוש בטכניקות תכן לא מדוייקות הגורמות לאיטרציות רבות , שגוזלות זמן יקר ומגדילות את העלות .

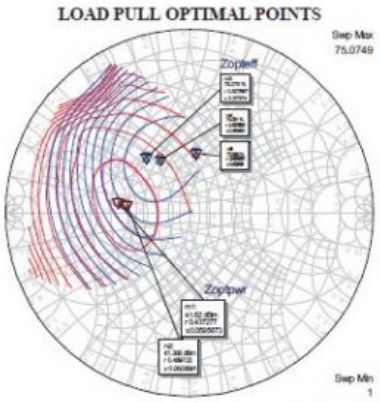
במאמר יתואר מהלך תכנון ראשוני הנעזר ב - NI AWR Design ובעיקר בתוכנת Microwave Office circuit design, וכן בטכניקות מדידה של עכבות מבוא ומוצא של רשתות מתואמות עוד לפני הפעלת המגבר . יוצגו גישות לפתרון הבעיות הכרוכות בתכנון מגבר הספק , שמטרתן להקטין את רמת אי הוודאות ולהשיג הצלחה כבר במהלך התכנון הראשון .

היעילות של גישה זו תודגם תוך שימוש במגבר מסחרי המספק 10w, הבנוי בטכנולוגית גליום ניטריד (GaN) על סיליקון עם טרנסיסטור HEMT ושימוש בתהליך 0.25 מיקרון (Qorvo T2G6000528) ומעגל מודפס של 25 mil ומבדד RO4350B .

המגבר שתוכנן השיג הספק שיאי של יותר מ +40dbm , ויעילות שיא של drain-□ גדולה מ -45% בפס העבודה . באופן עבודה back-off המגבר השיג ליניאריות של 30 dBc , ללא תיקון , ויעילות drain גדולה מ -34% כאשר הוא מוזן באות מאופנן ב- COFDM (coded orthogonal frequency-division multiplexing) 2.5 MHz , יחס PAPR (peak-to-average power ratio) של 9.5 dB בפס התדרים 2.0 – 2.5 GHz.

PAPR-

[1] שניתן לשלוט בו בסינתיזת הרשת .



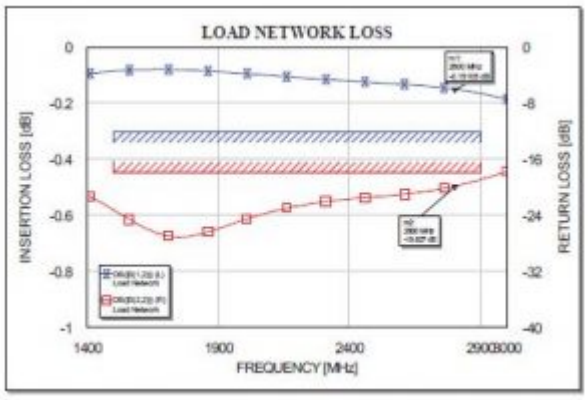
איור **1:** אנליזת העמסה בתדר היסודי באמצעות **Microwave Office** מציגה את עקומי הדחיסה הקבועה עבור **Pmax ≥4 1dBm , Effmax ≥70 percent** עבור תדר מינימלי **,** אמצעי ומירבי של פס העבודה **.** גבולות האיזור הוגדרו על ידי חיתוך **Pmax – 1 dB** ו **- Effmax – 5% , Zo reference = 50Ω**

סינתזת הרשת

למגברי PAPR צרי סרט יש יתרון מכיון שעכבת העומס האופטימלית משתנה אך במעט בטווח תדרי העבודה , ולכן תכנון הרשת פחות מורכב . אך לא תמיד תיאום עבור חלק קטן מפס העבודה הוא פשוט . למעשה בדיקת עכבות המקור והמוצא צריכות לעתים להיות מבוקרות באופן מדוייק בנקודת גאמא יחידה , ולכן מתקבלים ביצועים נחותים ביחס לביצועים האופטימליים אם למוקד (locus) הרשת חסרה עכבת העומס . בקרה מדוייקת של עכבות קצה הרמוניות עבור דרגות F ו- F1 הנן מורכבות והתהליך הופך למסובך יותר מאשר תכנון ממוצע של מגבר הספק .

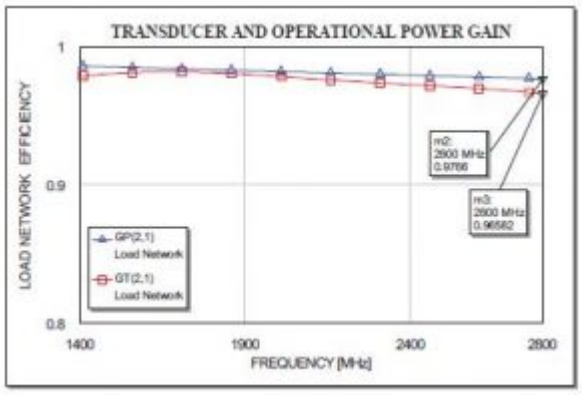
לכן , במקרה של מגבר רחב סרט -במיוחד אם נדרשים ביצועים גבוהים- הרשת הממומשת נדרשת לבקר את העכבה בכל פס התדרים המלא . לאחר הגדרת העכבה האופטימלית ואיזורי המטרה , רשת העומס מחושבת תוך כדי שימוש בטכניקת תדירות אמיתית (SRFT) [3]. הדבר נעשה כדי לתכנן רשת של אלמנט משולב אידיאלי , ואז להמירה לפורמט של עומס מבוזר מדורג [4] לפני ביצוע סימולציות אלקטרומגנטיות (EM) של הרשת . בדוגמא זו , תוצאות הסימולציה הא”מ תואמות באופן קרוב לניבוי המבוסס על מודל המעגל , אך עבור טופולוגיות תיאום פחות קונבנציונליות המצב יכול להיות שונה . באופן כללי , סימולצייה אלקטרומגנטית נתפסת כשלב חשוב בהקטנת אי הוודאות בתהליך התכנון .

אחת מגישות התכנון נעזרת בייצוג העכבה האופטימלית על ידי מחולל בעל שני הדקים (port 1), ולאחר מכן אפשר להסתכל על תכן תיאום הרשת כעל בעייה של הקטנת הפסדי חוסר תיאום הקיימים בין ערך העומס המרוכב הזה לבין סיים של 50Ω בכל תדרי העבודה של המגבר . את חוסר התיאום הזה ניתן להעריך בקצה שליד (port 2-□ 50Ω) של הרשת , (ראה איור 2a).



איור **2a:** הפסדי עומס הרשת ותיאום כפונקציה של התדר , של רשת העומס המבוזרת

היות וזו רשת פסיבית , למעגל התיאום העומס יש שבח הספק קטן מ-1, והוא שווה ליעילות הנקבעת על ידי הפסדי הפיזור הפנימיים בלבד . שבח ההתמרה הקטן הוא מכפלת היעילות בהשפעת ההפסד עקב החזרים במבוא . גדלים אלה מיוצגים כאחוזי יעילויות באיור 2b.



איור **2b :** שבח המתמר **GT** כפונקציה של התדירות המבטא את יעילות עומס הרשת של הרשת המבוזרת המחושבת . הספק העבודה **GP** מוצג בגרף להשוואה .

שבח המתמר חושב עבור מחולל שהעכבה שלו מבוססת על עכבת עומס המטרה כפי שהיא נראית על ידי ה - DRAIN של ההתקן . למרות שהמוצא הותאם

עבור הספק ונצילות מירביים ולא להחזרים קטנים ,DRAIN-□ הגורם השני נמצא בהתאמה קרובה עם ההקטנה בהספק לאור ההשפעה שיש למימוש לא מושלם של עכבת עומס המטרה . באופן זה גרף שבח המתמר מציג באופן טוב את האיכות הכללית של תיאום המוצא .

בוצעה גם אנליזה של רשת העומס תוך שימוש בשבח המרה GT כמדד להפסדי אי -תיאום של רשת העומס בין הטרנסיסטור ועומס ממשי טהור של 50Ω (איור 2b). היעילות שחושבה עבור רשת העומס היא 96.6 ב -2800 MHz, וזה נמצא בתיאום קרוב לערך שחושב על פי הפסדי ההחזרה באותה תדירות . לצרכי השוואה חושב שבח העבודה GPבהנחת הפסדי התנגדות טהורה ברשת , והתקבלה נצילות של 97.7%. למרות שהפסדי הפיזור האלה לא כוללים באופן ישיר הפסדי החזרה , הערך שלהם בכל זאת תלוי בעכבת הסיים כיון שהם משפיעים על פילוג הזרם והמתח ברשת , וכך הם משפיעים על הפסדי הנחושת וההפסדים הדיאלקטריים בהתאמה .

השגת תיאום אופטימלי רחב סרט בעזרת הטרנסיסטור הזה היה יחסית פשוט מכמה סיבות . הראשונה – יחס טרנספורמציה נמוך (בערך 2:1) בכל תחום תדרי העבודה . הסיבה השניה - עכבת העומס עבור הספק מקסימלי אופטימלי Pmax היתה מרוכזת , והסיבה השלישית היא שהעכבה השתנתה עם הגדלת התדירות במוקד המסתובב עם כיוון השעון . כפי שצויין קודם , יחס הטרנספורמציה הנמוך יחסית היה קריטריון יעיל להעדפת התקן זה , מסוג GaN ביישום RFPA רחב סרט זה .

רשת המקור

הבקרה על שינויי עכבת המקור בפס העבודה הושגה באמצעות שימוש ברשת מסנן מעביר פס , שיתרונו הנוסף הוא הקטנת ההגבר בתדירויות נמוכות , תדירויות שבהן ההגבר הפנימי האינהרנטי של הטרנסיסטור הוא גבוה מאוד . רשת זו , שנועדה לתיאום עכבת המקור , תורמת גם ליציבות המגבר בתחום התדרים הנמוכים . יחס הטרנספורמציה של העכבות הוא 15:1 ולכן דרושה רשת משוכללת יותר . אפשר לשלב רשתות תיאום עם שיפוע חיובי מחושב או יכולת השוואה במעגלי תיאום המקור אך דבר זה לא נעשה בתכנון זה .

את היציבות של ה - RFPA ניתן להשיג על ידי שימוש בנגד מיצב המחובר בטור לזוג קבל -נגד הסמוך להדק המבוא , ולאחריו נגד טורי . למרות שזו במידת מה גישה מחמירה , האנליזה הראתה שהטרנסיסטור הוא בעל נטיה לאי יציבות בפס תדרי העבודה ולכן הוקרב קצת שבח כדי להשיג

יציבות בלתי תלויה בתדרים שמ - 1 MHz ועד מעל 6 GHz, התדר שבו הטרנסיסטור מאבד את השבח (F_{max}).

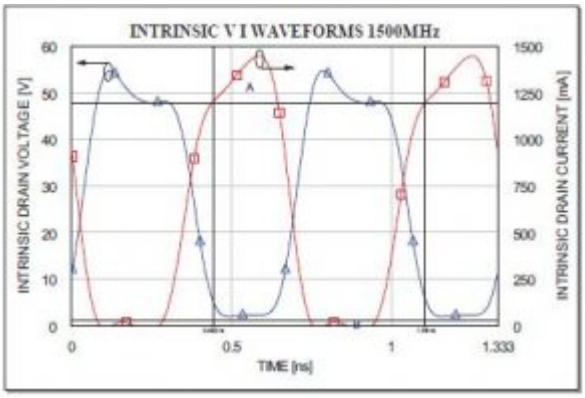
הנדסת צורת גל

כדי לבצע אנליזה של ה - RFPA השתמשו גם בהנדסת צורת גל [5], הן ב- load-pull tuner וגם בצורה יותר מבוקרת ברשת ממשית. המודלים האחרונים של ההתקן מאפשרים גישה אל צמתי הזרם והמתח של מחולל הזרם הפנימי. דבר זה מאפשר צפיה בצורות הגל ובשיאי הזרם והמתח, וגם בקו העומס הדינמי DLL, ונתונים אלה מאפשרים אנליזה של ההידוק ואופן העבודה של המגבר. לפני שצמתים אלה הפכו לנגישים האופציה היחידה היתה לנטר את צורות הגל במישור המארז, גישה שמוגבלותיה ברורות לאור ההשפעות הפרזיטיות של המארז. (ביטול הרשת הפרזיטית היה אפשרי רק אם הטופולוגיה וערכי הרכיבים היו ידועים, וכן אם ההשפעה החשמלית שלהם נוטרלה על ידי ביטולה במהלך הסימולציה). למרות שניתנה תשומת לב לבקרת עכבת העומס עבור ההרמוניה השניה, ניתוח צורת הגל כפי שמופיע באיור 3 מראה שהעכבה להרמוניה שלישית לא דרשה אופטימיזציה נוספת. צורות גל אלה מראות מתח שיא של יותר מ -60 וולט, וזרם שיא של יותר מ -1500 מיליאמפר ב-1500 מגהרץ, וגדלים אלה הם בגבולות הערכים הנקובים של הרכיב. מה שיותר מאלף, במונחים של יעילות הביצוע הוא התנהגות קרובה לאידיאלית ב – CLASS F עם זרם בצורה של חצי גל מיושר בדיוק ב - 180 מעלות עם צורת גל המתח, וחפיפה קטנה ביותר בין הזרם למתח. בניתוח שהתבסס על DLL, צורת הגל הוגדרה בשלושה איזורים: איזור A שבו הזרם והמתח מקסימליים, איזור B שבו המתח מקסימלי והזרם מינימלי, ואיזור המעבר. באמצעות השימוש בטכניקה זו צורות הגל בוקרו בהצלחה. חישוב לאורך מחזור אחד הראה כי צורת גל זו נשמרה באיזור A או B למשך 63.8% מהזמן, וזמן המעבר היה רק 36.2%.

איור **3a: DLL** המתקבל על ידי שמוש בצמתי מתח וזרם פנימיים בתדר **1500Mhz** בעירור גל רציף .

אישוש המגבר

לצורך אישוש הגישה ודיוקה יוצר המגבר על מצע דיאלקטרי Rogers (4350B 20 mil dielectric (εr = 3.48)). המעגל הורכב על מקבע (jig) המבוסס על 3 חלקים המכילים את רשת המקור (INMAT), רשת העומס (OUTMAT) ויחידה מרכזית מנחושת שעליה הורכב ההתקן, שהמקור שלו הולחם כמוראה באיור 4 (a).



איור **:3b** צורות מתח וזרם פנימיות שהתקבלו תוך שימוש באותם צמתים עם איזורים מתואמים מוגדרים על ידי איזורים מוצללים . הספק המוצא הוא **10** וואט .

מדידות פסיביות

לפני הרכבת המגבר השלם נמדדו עכבות מעגלי INMAT ו - OUTMAT כפי שהוצגו להדקי הטרנסיסטור , לצורך תיאום בין הערכים שהתקבלו מן המודל לערכים המדודים . המדידות הראו התאמה מצויינת בין עכבת המודל והעכבה הנמדדת בכל תחום תדרים בין 1000-3000 מגהרץ ללא כיוונון , כפי שניתן לראות באיור 4 (b). מדידות נוספות של מעגלים אלה בוצעו בתדרים בין 20 MHz עד 10 GHz ועדיין התקבלה התאמה טובה מאוד בין הערכים שחושבו עבור המודל לבין הערכים שנמדדו , כפי שניתן לראות באיור 5. בעזרת מקבע (JIG) שניתן להסרה , ניתן למדוד את העכבה ש "ראה" ההתקן באופן ישיר ומדוייק . המקבע חוסך את הצורך בשימוש בפרובים מכניים מסובכים שמשפיעים על המדידה כיון שהם מוסיפים למעגל ערכים חשמליים פרזיטיים , בעיקר השראת פיזור בנקודת המגע . המקבע אינו זהה לגרסה שתשולב בייצור המגבר , אך השימוש בו נתפס כשלב חשוב בתהליך התכנון ותומך בגישה של מניעת אי וודאות