دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات گرایش میدان

بکارگیری تکنیک ترکیب توان در طراحی و ساخت یک نمونه تقویت‌کننده قدرت در باند Ka بکمک ماژولهای MMIC

نگارش: حمید کیومرثی

استاد راهنما

دکتر عبدالعلی عبدی پور

استاد مشاور

دکتر عباس محمدی

تیر ۱۳۸۶

بسمه تعالی

تـاریخ: .....

شماره مدرک

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

فـرم اطلاعات پایان‌نـامه
کارشنـاسي- ارشد و دکتـرا
کتابخـانه مرکـزي

مشخصات دانشجو	نام خانوادگی : کیومرثی	نام : حمید	شماره دانشجویی: ۸۳۱۲۳۱۱۳
	دانشکده: مهندسی برق	رشته تحصیلی: مهندسی مخابرات-میدان	گروه: مهندسی مخابرات
عنوان	بکارگیری تکنیک ترکیب توان در طراحی و ساخت یک نمونه تقویت‌کننده قدرت در باند Ka به کمک ماژولهای MMIC		
Title :	Applying Power Combining Technique For Design and Implementation of a Ka Band Power Amplifier Based on MMIC Modules		

استاد راهنما	نام خانوادگی: عبدی‌پور نام: عبدالعلی	درجه و رتبه استاد	نام خانوادگی : نام:	درجه و رتبه
استاد مشاور	نام خانوادگی : محمدی نام: عباس	درجه و رتبه دانشیار	نام خانوادگی : نام:	درجه و رتبه

دانشنامه	کارشناسی ○ ارشد ✹ دکترا ○	سال تحصیلی: ۸۶-۸۵
نوع پروژه	کاربردی ✹ بنیادی ○ توسعه ای ✹ نظری ○	

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات: ۱۰۹	تصویر: ✹	جدول: ✹	نمودار: ✹	نقشه: ○	واژه‌نامه: ○	تعداد مراجع: ۳۷	تعداد ضمائم: ✹ ۱
زبان متن	فارسی ✹ انگلیسی ○	چکیده	فارسی ✹ انگلیسی ✹					
یاداشت	لوح فشرده ✹ دیسکت فلاپی ○							
توصیفگر								
کلید واژه فارسی	باند Ka، طبقه توان، تقویت‌کننده توان متوازن، فیلتر میانگذر، تقسیم‌کننده توان ۶ دهانه‌ای							
کلید واژه لاتین	Ka Band, Power Stage, Balanced Amplifier, Band Pass Filter, Six-port Power Divider							

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی اساتید گرانقدری که حاصل عمر خویش را در اختیارم قراردادند و نادانسته‌ها، درشتی و غرور بی‌جایم را با صبر و لبخند پاسخ گفتند تشکر می‌کنم و به خصوص از اساتید گرامی جناب آقای دکتر عبدالعلی عبدی‌پور که در مراحل انجام این پروژه زحمات فراوانی متحمل شدند و بارها کوتاهی‌های مرا با حوصله و بردباری پاسخ گفتند و جناب آقای دکتر عباس محمدی که همواره مشاوری قابل اعتماد و صدیق بوده‌اند کمال سپاسگزاری را دارم.

لازم می‌دانم از همیاری و پشتیبانی جناب آقای دکتر مرادی و جناب آقای دکتر طیرانی که اگر همکاریهایشان نبود این پروژه واقعا به سرانجام نمی‌رسید، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم.

همچنین از آقایان دکتر عبدالعلی عبدی پور، دکتر عباس محمدی، دکتر محمود کمره‌ای و دکتر احد توکلی که زحمت کشیدند و در جلسه دفاع حاضر شدند صمیمانه تشکر می کنم.

Bu projəni sunuram:

Anama *ki mənə insanlari sevməni öyrətdi,*

Atama *ki mənə insanlara sayqını öyrətdi,*

Yurduma *ki mənə özgürcə yaşamağı öyrətdi .*

چکیده

در این پایان‌نامه، طراحی و ساخت یک نمونه طبقه تقویت‌کننده توان در باند Ka که شامل پیش‌تقویت‌کننده، فیلتر میانگذر و تقویت‌کننده توان متوازن می‌باشد ارایه شده است. ساختاری که در این پروژه برای تقویت‌کننده توان متوازن پیشنهاد شده است، ساختاری کاملا جدید می‌باشد. فرکانس کار تقویت کننده ساخته شده از ۲۹/۵ تا ۲۹/۹ گیگاهرتز است. در ابتدا یکی از تقویت‌کننده‌های بکار برده شده در طبقه توان و نیز فیلتر میانگذر هر کدام به تنهایی ساخته وتست شدند که نتایج شبیه‌سازی به همراه نتایج اندازه‌گیری آورده شده است. در گام بعدی ساختار ۶ دهانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد و شرایط استفاده از این ساختار به عنوان یک تقسیم‌کننده و ترکیب‌کننده همزمان 3dB بررسی می‌شود و سپس نحوه استفاده از این ساختار در تقویت کننده توان متوازن و مزیت‌های آن بر ساختارهای مرسوم توضیح داده خواهد شد. مشکل ناپایداری این ساختار هنگام بکارگیری تقویت‌کننده‌های باندپهن در ترکیب تقویت‌کننده توان متوازن و روش رفع آن نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. به دلیل فرکانس بالای کار، ملاحظات فراوانی بایستی در روند طراحی و ساخت صورت گیرد تا مدار ساخته شده پاسخ مطلوب را تولید کند. این مسئله به همراه امکانات محدود داخلی برای ساخت چنین مداراتی کار ساخت را پیچیده می‌کند. ساختار ارایه شده برای تقویت کننده توان متوازن ساختاری کاملا نو بوده و برای اولین بار است که چنین ساختاری برای تقویت‌کننده توان متوازن پیشنهاد می‌شود. طبقه تقویت‌کننده توان ساخته شده دارای P_{1dB} برابر 26.5dBm، بهره 26dB، تلف برگشتی 18dB- در دهانه ورودی و PAE حدود ۱۰ درصد در فرکانس ۲۹/۷ گیگاهرتز می‌باشد.

کلید واژه: باند Ka، طبقه توان، تقویت‌کننده توان متوازن، فیلتر میانگذر، تقسیم‌کننده توان ۶ دهانه‌ای

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ---------- ۱

۱-۲ نگاه کلی به پروژه ---------- ۲

۱-۳ صورت مسئله برای فرستنده---------- ۴

۱-۴ مروری بر روشهای ترکیب توان در باند میلی‌متری ---------- ۶

۱-۴-۱ ترکیب‌کننده هایبرید ---------- ۸

۱-۴-۲ ترکیب توان فضایی ---------- ۹

۱-۴-۳ ترکیب توان در چند سطح ----------۱۱

۱-۵ مروری بر کارهای انجام شده ----------۱۱

۱-۶ نظم پایان نامه ----------۱۳

فصل دوم: تقویت‌کننده توان متوازن

۲-۱ تقویت‌کننده توان متوازن ----------۱۴

۲-۲ روابط حاکم بر تقویت‌کننده توان متوازن----------۱۵

۲-۳ بررسی تاثیر عدم تعادل فاز و دامنه بر تقویت‌کننده توان متوازن ----------۱۸

فصل سوم: طراحی و ساخت فیلتر میانگذر در باند KA

۳-۱ مقدمه ----------۲۲

۳-۲ شبیه‌سازی سیستمی فرستنده----------۲۲

۳-۳ طراحی فیلتر میانگذر ----------۲۷

۳-۳-۱ مقدمه ----------۲۷

۳-۳-۲ هدف از طراحی، روش یراحی و محدودیتها----------۳۰

۳-۳-۳ روش تطبیق فضاها----------۳۱
۳-۳-۴ ساختار نامتقارن ----------۳۲
۳-۳-۵ ساختار شبه‌متقارن----------۳۷
۳-۳-۶ ساخت وتست فیلتر ----------۴۱
۳-۳-۷ نتیجه‌گیری ----------۴۷

فصل چهارم: تقویت‌کننده توان متوازن با استفاده از ترکیب‌کننده/تقسیم‌کننده ۶ دهانه‌ای

۴-۱ ساخت وتست تقویت‌کننده توان MMIC ----------۴۷
۴-۲ تقسیم‌کننده توان ۶ دهانه‌ای ----------۵۴
۴-۳ رفع مشکل ناپایداری تقویت‌کننده توان متوازن طراحی شده ----------۷۴
۴-۴ ساخت وتست طبقه توان----------۹۶
۴-۵ نتیجه‌گیری و پیشنهاد---------- ۱۰۴

لیست مقالاتی که در راستای پایان‌نامه چاپ شده‌اند----------۱۰۵

مراجع----------۱۰۶

پیوست: datasheet های قطعات استفاده شده در پایان‌نامه----------۱۰۹

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

نیازمندیهای انتقال اطلاعات در دنیای امروز، دسترسی به مدارات با پهنای باند وسیع و حجم کم را ضروری می‌نماید. نیاز به چنین مداراتی و اشباع شدن باندهای فرکانسی پایین، تولیدکنندگان سیستمهای مخابراتی را به سمت فرکانسهای بالا همانند Ka (از ۲۶ گیگاهرتز تا ۴۰ گیگاهرتز) سوق می‌دهد [۱]. سیستمهای میلی‌متری در مقایسه با سیستمهای مایکروویوی دارای آنتن‌ها و مدارات کوچکتر و پهنای باند وسیعتر می‌باشند و در مقایسه با سیستمهای نوری نفوذ بهتری در شرایط مه، ابر و گرد و غبار دارند و به همین دلیل نیز طراحان تمایل زیادی به طراحی سیستمها در این باند دارند. طراحی سیستمها و مدارات در باند میلی‌متری مشکلات خاص خود را دارد و بایستی با دقت فراوانی انجام شود. یکی از مسایلی که در باند میلی‌متری وجود دارد تلف بالای انتشار به دلیل تضعیف بالای باران و جذب انرژی الکترومغناطیسی توسط مولکولهای اکسیژن در این باند می‌باشد. تضعیف بالای سیگنالها در این باند باعث می‌شود که کاربردهای این باند به فواصل کوتاه تا کران بالای ۱۰۰۰ متر محدود شود که البته از این باند معمولا برای مخابره پیام در فواصل ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر استفاده می‌شود ولی از طرف دیگر این مسئله باعث امن بودن شبکه‌هایی می‌شود که در این باند کار می‌کنند. از موارد استفاده از این باند می‌توان به مخابرات بین وسایل نقلیه (IVC[1])، LMDS[2] و WLAN[3] اشاره کرد. در یک سیستم مخابراتی، طبقه انتهایی فرستنده معمولا یک تقویت‌کننده توان می‌باشد که قدرت لازم برای انتقال سیگنال را از یک نقطه به نقطه دیگر فراهم می‌کند. در سیستم‌های مخابراتی، توان ارسالی فرستنده معمولا زیاد است و نیاز به تقویت‌کننده‌هایی با توان خروجی بالا داریم. با افزایش فرکانس‌کاری قطعات نیمه هادی به سوی باند میلی‌متری، اندازه قطعات و بنابراین توانایی آنها در کار کردن باتوان‌های بالا کاهش می‌یابد. برای اینکه بتوانیم از تکنولوژی قطعات حالت جامد با توانهای بالا در باند میلی‌متری استفاده کنیم توان

[1] Inter Vehicle Communication
[2] Local Multipoint Distribution System
[3] Wireless Local Area Network

خروجی این قطعات را بایستی با روشهای ترکیب توان با یکدیگر ترکیب کنیم. یکی از روشهای ترکیب توان، استفاده از تقویت‌کننده توان متوازن می‌باشد که از روشهای ترکیب توان در سطح مدار است [۲]. تقویت‌کننده توان متوازن علاوه بر ترکیب توان مزایای قابل توجه دیگری نیز دارد که در بخش‌های آینده به آنها پرداخته می‌شود. از میان پارامترهای مهمی که بایستی در تقویت‌کننده‌های توان بررسی گردند می‌توان به VSWR[1] ورودی و خروجی، بهره، PAE[2]، P_{1dB} ، IP3[3] (نقطه تقاطع مرتبه سوم) و موارد دیگر اشاره کرد [۳].

۱-۲ نگاه کلی به پایان‌نامه

در این پایان‌نامه طراحی، ساخت و تست یک تقویت‌کننده توان متوازن به کمک تقویت‌کننده‌های MMIC با ساختار کاملا جدید به همراه یک پیش‌تقویت‌کننده و فیلتر میانگذر در باند Ka (در فرکانس کار ۲۹/۵ تا ۲۹/۹ گیگاهرتز) ارایه شده است.

در تقویت‌کننده توان متوازن، توان خروجی با ترکیب توان دو تقویت‌کننده ۲ برابر می‌شود. تقسیم‌کننده و ترکیب‌کننده توان که معمولا در چنین ترکیبهایی استفاده می‌شود یک هایبرید ۹۰ درجه مانند کوپلر Branch-line می‌باشد. در حالت ایده‌ال S_{21} و S_{31} این کوپلر از لحاظ اندازه مساوی هم و از لحاظ فاز ۹۰ درجه با یکدیگر اختلاف دارند ولی درعمل به دلیل عدم تقارن ذاتی کوپلر Branch-line اندازه S_{21} و S_{31} با یکدیگر اختلاف خواهند داشت که این اختلاف، عدم تعادل دامنه[4] نامیده می‌شود و اگر پهنای باند پاسخ نیز زیاد باشد فاز این دو نیز در تمام باند فرکانسی ۹۰ درجه نخواهد بود و با ۹۰ درجه اختلاف خواهد داشت که این اختلاف نیز عدم تعادل فاز[5] نامیده می‌شود. عدم تعادل فاز و دامنه در تقسیم‌کننده و ترکیب‌کننده توان موجب می‌شود که VSWR کلی ساختار از مقدار واحد ایده‌ال افزایش یابد. نتایج شبیه‌سازی‌ها که در فصل‌های بعدی آورده خواهد شد نشان می‌دهند که اگر عدم تعادل فاز کمتر از ۲ درجه باشد، و عدم تعادل دامنه بیشتر از 0.3dB باشد، (که مقادیر معقولی با توجه به نتایج

[1] Voltage Standing Wave Ratio
[2] Power Added Efficiency
[3] Intercept Point Three
[4] Gain Unbalance
[5] Phase Unbalance

عملی می‌باشند) عدم تعادل دامنه نقش مهمتری در افـزایش VSWR ورودی و خروجـی خواهـد داشـت. عدم تقارن دامنه زمانی رفع می‌شود که از ساختاری کاملا متقارن برای ترکیب‌کننده و تقسیم‌کننده تـوان استفاده کنیم ولی مشکل چنین ساختاری نیز همفاز بودن S_{21} و S_{31} می‌باشد زیـرا شـکل کـاملا متقـارن است و دلیلی برای اختلاف فاز ۹۰درجه نخواهد بود. در این پایان نامه با توجه به اینکه پاسـخ مطلـوب در پهنای باند بسیار کمی (حدود ۱ درصد) مورد نیاز است؛ می‌توان از یک ترکیب‌کننده/تقسیم‌کننده متقارن استفاده کرد و برای رفع مشکل اختلاف فاز نیز از یک خط انتقال $\lambda/4$ در فرکانس مرکزی بهره برد.

ساختار ۶ دهانه‌ای که در این پایان‌نامه بـرای ترکیـب‌کننـده و تقـسیم‌کننـده تـوان ارایـه مـی‌شـود ساختاری کاملا متقارن نسبت به ورودی و خروجی ترکیب‌کننده توان متوازن می‌باشد که عـلاوه بـر رفـع مشکل عدم تعادل دامنه، به دلیل کم شدن پارامترهای موجود برای بهینه‌سازی، بهینه‌سازی را نیز ساده‌تر می‌کند. ساخت این ترکیب‌کننده و تقسیم‌کننده نیز ساده‌تر از ساختارهای قبلی می‌باشد زیرا نیاز به هـیچ بار داخلی یا تطبیق ندارد. در ابتدا یکی از تقویت‌کننده‌های بکار برده شده در ساختار ترکیب توان متوازن به تنهایی ساخته وتست شد که نتایج شبیه‌سازی به همراه نتایج اندازه‌گیری در بخـش‌هـای بعـدی آورده شده است. در گام بعدی ساختار ۶ دهانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد و شرایط استفاده از این ساختار بـه عنوان یک تقسیم‌کننده و ترکیب‌کننده همزمان 3dB بررسـی مـی‌شـود و سـپس نحـوه اسـتفاده از ایـن ساختار در تقویت کننده توان متوازن و مزیت‌های آن بر سـاختارهای مرسـوم توضـیح داده خواهـد شـد. مشکل ناپایداری این ساختار هنگام بکارگیری تقویت‌کننده‌های بانـدپهن در ترکیـب تقویـت‌کننـده تـوان متوازن و روش رفع آن نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. به دلیـل فرکـانس بـالای کـار، ملاحظـات فراوانـی بایستی در روند طراحی و ساخت صورت گیرد تا مدار ساخته شده پاسخ مطلوب را تولید کند. این مـسئله به همراه امکانات محدود داخلی برای ساخت چنین مداراتی کار ساخت را پیچیده می‌کند. سـاختار ارایـه شده برای تقویت کننده توان متوازن ساختاری کاملا نو بوده و برای اولین بار است کـه چنـین سـاختاری برای تقویت‌کننده توان متوازن پیشنهاد می‌شود. همانگونه که در ابتدا اشاره شد طبقه توان در این پـروژه علاوه بر تقویت‌کننده توان متوازن بایستی دارای پیش‌تقویت‌کننده و فیلتر میانگذر نیز باشد که آنها نیز به

طور جداگانه ساخته وتست شده‌اند و در طبقه تقویت‌کننده توان نهایی ساخته شده نیز آورده شده‌اند. فیلتر ساخته شده در راستای این پایان‌نامه از نوع فیلتر خطوط تزویج شده موازی[۱] بوده و ملاحظات فراوانی که در روند طراحی و ساخت آن به خصوص در مورد فرکانس رزونانس جعبه صورت گرفت موجب شد تا فیلتر تلف عبوری[۲] در باند عبور[۳] و حذف[٤] سیگنال در باند حذف[٥] بسیار عالی را از خود نشان دهد. در طراحی و تحلیل کل سیستم و تقسیم‌کننده و ترکیب‌کننده توان و فیلتر میانگذر از نرم افزار ADS[6] (بخش شماتیک و تمام موج) به همراه روش نگاشت فضاها[۷] [۸] کمک گرفته شده است. در تحلیل و طراحی برخی از قسمت‌ها نیز از نرم‌افزار تحلیل تمام موج Ansoft HFSS استفاده شده است. استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل تمام موج و در نظر گرفتن اکثر نکات عملی در روند طراحی و شبیه‌سازی و ملاحظات دیگری که در روند طراحی و ساخت منظور گردید منجر به تطابق بسیار خوب نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی شد. این پایان‌نامه در واقع طبقه تقویت‌کننده توان یک فرستنده می‌باشد که علاوه بر بخش ساخته شده در این پایان‌نامه دارای اسیلاتور و مخلوط‌کننده بالا برنده نیز هست که آنها نیز توسط نگارنده در راستای این پایان‌نامه ساخته شدند ولی به دلیل اینکه موضوع پایان‌نامه نمی‌باشند از ذکر آنها خودداری می‌شود. با توجه به اینکه در تقویت‌کننده توان MMIC[8] استفاده شده در این پایان‌نامه از فن‌آوری BGA[9] برای بسته‌بندی استفاده شده است، مشکلات زیادی بر سر راه مونتاژ این قطعه در داخل کشور بود و برای اینکه مونتاژ را بتوان با امکانات داخلی انجام داد یک سری ساده‌سازی‌های ابتکاری در روند مونتاژ ترتیب داده شد.

۱-۳ صورت مسئله برای فرستنده

در این پروژه اجزا مختلف یک فرستنده در باند Ka با مشخصات زیر ساخته وتست می‌شوند:

[1] Parallel Coupled Line
[2] Insertion Loss
[3] Pass Band
[4] Rejection
[5] Stop Band
[6] Advanced Design System
[7] Space Mapping Method
[8] Microwave Monolithic Integrated Circuit
[9] Ball Grid Array

- فرکانس کار: ۲۹/۵ گیگاهرتز تا ۲۹/۹ گیگاهرتز
- فرکانس IF از ۲/۵ گیگاهرتز تا ۲/۹ گیگاهرتز با سطح توان 13dBm
- توان خروجی تحویل داده شده به آنتن فرستنده $26dBm \le P_{1dB,OUT} \le 30dBm$
- تلف برگشتی در ورودی و خروجی طبقه توان بهتر از 10dB-
- PAE طبقه توان بهتر از ۱۰ درصد

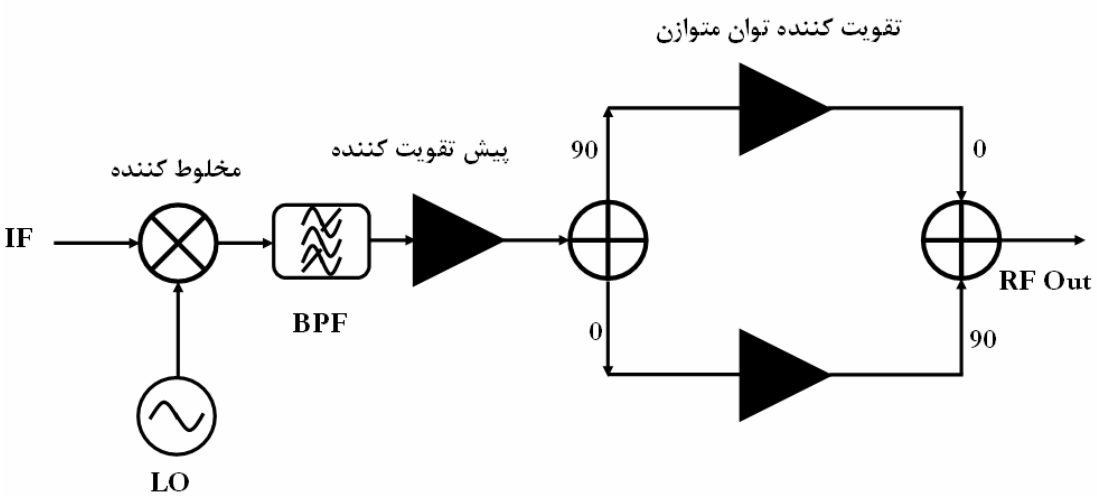
مهمترین نکته‌ای که در انتخاب ساختار و قطعات بایستی دقت کرد، امکان خرید و مونتاژ قطعات می‌باشد. تقویت‌کننده توان MMIC در این پروژه قبلا خریداری شده بود و بنابراین طراحی‌ها بر اساس این قطعه با شماره قطعه FMM5804VY صورت گرفت. با توجه به اینکه P_{1dB} این تقویت‌کننده برابر 24dBm می‌باشد و توان خروجی فرستنده بایستی 26dBm می‌باشد، بایستی از روش ترکیب توان در انتهای طبقه توان بهره جست تا سطح توان خروجی تقویت‌کننده توان را بتوان به میزان 3dB افزایش داد. مخلوط‌کننده بالابرنده از نوع زیرهارمونیک[1] با شماره قطعه HMC264LC3B انتخاب شد تا با دو برابر کردن فرکانس LO نیاز به نوسانساز محلی در فرکانس بالا (۲۷ گیگاهرتز) مرتفع گردد و LO در فرکانس ۱۳/۵ گیگاهرتز طراحی گردد. به دلیل تحقیقاتی بودن پروژه و محدود بودن بودجه، مخلوط‌کننده مورد استفاده از نوع ارزان بوده و دارای تلف تبدیلی بیش از 10dB می‌باشد. برای حذف فرکانس تصویر ۲۴/۳ گیگاهرتز که طبق رابطه ۱-۱ پس از مخلوط‌کننده تولید می‌شود، از یک فیلتر میانگذر استفاده خواهد شد.

$$2 \times LO \pm IF = \begin{cases} 29.7GHz \\ 24.3GHz \end{cases} \qquad (۱-۱)$$

با توجه به datasheet مخلوط‌کننده، سطح توان LO ورودی در فرکانس ۱۳/۵ گیگاهرتز بایستی برابر 4dBm- باشد؛ بنابراین نوسانساز کنترل شده با ولتاژ با شماره قطعه HMC401QS16G انتخاب می‌شود اگر تلف عبوری فیلتر را 2dB و تلف عبوری مخلوط‌کننده را 15dB در نظر بگیریم، با توجه به توان ورودی 13dBm، سطح توان پس از فیلتر میانگذر برابر 4dBm- می‌باشد؛ بنابراین برای رساندن سطح

[1] Subharmonic Mixer

توان خروجی به 26dBm، طبقه توان بایستی دارای 30dB بهره باشد. بهره تقویت‌کننده توان مورد استفاده در این پروژه، 15dB می‌باشد؛ پس طبقه توان علاوه بر تقویت‌کننده توان متوازن بایستی دارای یک پیش‌تقویت‌کننده نیز باشد تا بهره مورد نیاز تامین گردد. با توجه به موارد ذکر شده در بالا، ساختار کلی فرستنده به صورتی که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، پیشنهاد می‌گردد. با توجه به تغییراتی که در طراحی تقویت‌کننده توان متوازن با ساختار جدید داده شد، فیلتر میانگذر در طرح جدید به بعد از تقسیم‌کننده توان انتقال داده شد.



شکل ۱-۱ ساختار کلی فرستنده

۱-۴ مروری بر روش های ترکیب توان در باند Ka

تقویت توان در موج میلی متری به طور سنتی با تقویت‌کننده‌هایی که بر پایه تیوب هستند همچون کلایسترون و تیوب موج رونده یا TWT صورت می گیرد. این تقویت‌کننده ها به دلیل توانایی در تولید توان و بهره بالای خروجی به صورت گسترده‌ای در کاربردهای رادار و مخابرات مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما این تقویت‌کننده ها معایبی نیز دارند. تقویت‌کننده‌هایی که توان خروجی آنها در حد وات بوده و در محدوده موج میلی‌متری کارکرده و بر پایه لامپ باشند گران قیمت، سنگین، و دارای زمان تحویل طولانی می‌باشند. به دلیل مشکلات ذکر شده و با توجه به اندازه و قیمت پایین‌تر؛

تقویت‌کننده‌های حالت جامد به عنوان جایگزینی مناسب برای تقویت‌کننده‌های بر پایه لامپ در باند میلی متری و مایکروویو شناخته شده اند.

ترکیب توان در سطح تراشه، مدار و فضا صورت می‌گیرد و هر روش می‌تواند به تنهایی یا همراه با روشهای دیگر به کار رود. در روش ترکیب در سطح تراشه که در داخل قطعه صورت می‌گیرد؛ سعی می‌شود تا سطح قطعه برای تولید توان خروجی بالا افزایش یابد. ترکیب‌کننده‌های توان در سطح مدار، از چندین قطعه و مدار برای افزایش سطح توان خروجی استفاده می‌کنند [۲].

ترکیب توان فضایی از نظر اینکه ترکیب توان در فضا صورت می گیرد با دو روش قبلی فرق دارد. در این روش هر قطعه بایستی به یک آنتن نصب گردد. این روش مزایایی دارد که در روشهای قبلی قابل حصول نبود از جمله این مزایا می توان به حذف تلفات شبکه توزیع و پیچیدگی آن و تشکیل سطوح توان بالا در فضا به جای سطح مدار شاره کرد [۴].

فاکتورهای زیادی وجود دارند که مشخص می‌کنند که آیا ترکیب توان ما موفقیت آمیز بوده است یا خیر. مهمترین فاکتور راندمان ترکیب توان[1] می‌باشد. برای یک ترکیب‌کننده N کاناله که توان هر قطعه Pn باشد، η (راندمان ترکیب توان) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\eta = \frac{P_{Total}}{\sum_{n} P_n} \times 100\%$$

این فاکتور به صورت عمده به قطعات فعال استفاده شده در ترکیب و نیز ساختار ترکیب‌کننده بستگی دارد. زیرا اختلاف در ساخت قطات فعال موجب تغییرات فرکانسی و فاز توان خروجی قطعات می‌گردد که به نوبه خود η را پایین می‌آورد. یک ترکیب کننده N کاناله کاملا متقارن زمانی بیشینه راندمان خود را دارد که تمام قطعات استفاده شده در آن یکسان باشند تا سیگنالهای ورودی به بخش ترکیب توان از نظر فرکانس، دامنه و فاز یکسان باشند. اگر این مقادیر بایکدیگر تفاوت داشته باشند تلفات ترکیب قابل ملاحظه ای خواهیم داشت.

[1] Power Combining Efficiency

ترکیب توان در سطح مدار خود به دو دسته بزرگ تقسیم می‌شود. دسته اول ترکیب‌کننده‌های محفظه تشدید هستند که از موجبرهای مکعبی و استوانه‌ای برای ترکیب توان استفاده می‌کنند و دسته دوم ترکیب کننده‌های غیر تشدیدی هستند که ترکیب‌کننده هایبرید یا باینری جز این گروه می‌باشد [۵].

۱-۴-۱ ترکیب‌کننده توان هایبرید

ترکیب‌کننده‌های هایبرید برخلاف ترکیب‌کننده‌های تشدیدی بین منابع توان ایزولاسیون ایجاد کرده و مشکلات ناپایداری و اثرات قطعات بر یکدیگر را که از ملزومات کار با چند قطعه می‌باشد کمینه می‌کنند. در ساختار ترکیب توان در این روش، تقویت‌کننده‌های منفرد توسط محیط هدایتی تشکیل یافته از ترکیب‌کننده‌های دوراهه با هم ترکیب می‌شوند. این روش ترکیب توان به عنوان ترکیب توان هایبرید یا باینری شناخته شده است و قادر به تولید توان در سطوح متوسط در فرکانسهای مایکروویو و باند میلی‌متری می‌باشد.

اگر در ترکیب توان توسط شبکه باینری که در بالا ذکر شد تعداد کل قطعات برابر $N = 2^K$ بوده و K تعداد طبقات باشد. توان ترکیب‌شده کل خروجی برابر $P_{Out} = 2^K P_0 L^K$ می‌باشد. P_0 در اینجا توان خروجی یک قطعه منفرد و L تلف عبوری[1] هر طبقه می‌باشد. پارامتری به نام راندمان شبکه ترکیب به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{NP_0} = \frac{2^K P_0 L^K}{2^K P_0} = L^K = L^{\log_2(N+1)} \qquad (۱-۱)$$

همانگونه که ملاحظه می‌شود راندمان شبکه ترکیب با افزایش هر طبقه به صورت هندسی کاهش می‌یابد و به دلیل افزایش تلف عبوری با فرکانس، که به طور تقریبی با تابع $\sqrt{f}$ افزایش می‌یابد، این مشکل در فرکانسهای بالاتر پیچیده‌تر می‌گردد. تلف عبوری ترکیب‌کننده هایبرید کران بالایی برای تعداد تقویت‌کننده‌هایی که می‌توانند با این روش ترکیب شوند مشخص می‌کند. متاسفانه همانطوری که بیان

[1] Insertion Loss

گردید این تلف با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد و بنابراین روش هایبرید، بخصوص در فرکانسهای بالا، روش خوبی برای ترکیب تعداد زیادی از تقویت‌کننده‌ها نمی‌باشد. از انواع متداول کوپلر هایبرید می‌توان کوپلر Wilkinson، کوپلر Branchline و کوپلر Ratrace را نام برد که بسادگی با خطوط مایکرواستریپ در باند میلی‌متری تحقق می‌یابند.

مزایای ترکیب توان هایبرید عبارتند از:

۱. طراحی سرراست بوده و ساخت آن ساده است.

۲. دارای پتانسیل پهنای‌باند بالا (بیشتر از ۵ درصد) می‌باشد، پهنای‌باند کلی بستگی به پهنای‌باند قطعات مورد استفاده و اختلاف فاز و دامنه بین دهانه‌های کوپلر دارد.

۳. ایزولاسیون بین دهانه‌ها زیاد بوده و بنابراین اثرات متقابل قطعات روی یکدیگر کم می‌باشد. ایزولاسیون بین دهانه‌ها به کوپلر هایبرید بستگی داشته و عموما در حد 20dB می‌باشد.

معایب ترکیب‌کننده‌های هایبرید عبارتند از:

۱. اندازه ترکیب‌کننده در مقایسه با ترکیب‌کننده‌های قبلی بزرگ است.

۲. بدلیل تلفات کوپلر، کران بالای فرکانس برای کوپلر هایبرید موجبری در حدود 140GHz می‌باشد. گرچه کوپلر موجبری دی‌الکتریکی می‌تواند تا فرکانس 300GHz به کار برده شود.

۳. دارای تلف مسیر می‌باشد.

۱-۴-۲ ترکیب توان فضایی

اگر اجزای فعال توسط مدارهای خط انتقال باهم ترکیب شوند تعداد عناصری که می‌توانند ترکیب شوند محدود بوده و بنابراین توان خروجی نیز محدود خواهد شد. این مسئله به دلیل تلفات خط انتقال و ساختار می‌باشد که با تعداد عناصر رابطه غیرخطی دارد و دلیل دیگر این مسئله، افزایش پیچیدگی مدار است.

در ترکیب توان مداری مشاهده می‌شود که با افزایش یک قطعه به مجموعه ترکیب توان، طول خط انتقال و نیز تعداد مدارهای ترکیب‌کننده و تقسیم‌کننده بایستی افزایش یابد. با توجه به اینکه تلفات خط انتقال و مدارهای ترکیب با هم جمع می‌شوند، مزیت استفاده از ترکیب توان مداری با افزایش تعداد طبقات کاهش و سرانجام از بین می‌رود.

بر خلاف ترکیب توان مداری که تعداد تقویت‌کننده‌ها و راندمان ترکیب طبق رابطه (۱-۱) با یکدیگر رابطه غیر خطی دارند، در ترکیب توان فضایی این رابطه خطی است و برای ساختارهای ترکیب توان فضایی که به خوبی طراحی شده باشند راندمان ترکیب توان در حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که برای تعداد کم تقویت‌کننده‌ها و بنابر این توان خروجی کم، ترکیب توان مداری موثرتر است ولی با افزایش تعداد تقویت‌کننده‌ها بایستی از ساختار ترکیب توان فضایی استفاده شود. مورد دیگری که با توجه به مطالب قبلی می‌توان دریافت اثر فرکانس بر انتخاب نوع ترکیب توان است بدین ترتیب که با افزایش فرکانس، نقطه‌ای که در آن ترکیب توان فضایی ساختار بهتری نسبت به ترکیب توان مداری می‌شود در تعداد تقویت‌کننده کمتری اتفاق می‌افتد [۶].

آرایه‌های فعال برای ترکیب فضایی یا شبه نوری دارای دو توپولوژی کلاسیک کاشی[1] و سینی[2] می‌باشند. نتایج تجربی که در زمینه ترکیب توان فضایی بدست آمده‌اند چه در آزمایشگاه و چه در صنعت بسیار عالی می‌باشند به گونه‌ای که در برخی کاربردها با لامپ‌های خلا می‌توانند رقابت کنند [۷]. از آن جمله به ترکیب‌کننده ۱۲۰ واتی باند X ، آرایه ۲۵ واتی با ساختار کاشی در باند Ka می‌توان اشاره کرد. البته جالب‌ترین و بحث‌انگیزترین کاری که در این زمینه توسط محققان دانشگاه ساندر صورت گرفته است سیستمی است که از آرایش سینی استفاده کرده و از ۲۷۲ تقویت کننده MMIC تشکیل یافته است. نتایج اندازه‌گیری این سیستم نشان هنده توان خروجی ۳۵ وات در فرکانس ۶۱ گیگاهرتز با بهره سیگنال کوچک 60dB وپهنای باند ۴ گیگاهرتز بود [۸ و ۹].

[1] Tile
[2] Tray

۱-۴-۳ ترکیب توان در چند سطح

در عمل برای رسیدن به توان بالا در خروجی بایستی از روشهای مختلف ترکیب توان در سطوح مختلف استفاده کرد. در روشهای ترکیب چند سطحی ترکیب توان در سطح تراشه اولین طبقه را تشکیل می‌دهد؛ سپس از ترکیب‌کننده‌های محفظه تشدید به عنوان طبقه دوم و در طبقه سوم از ترکیب‌کننده‌های غیرتشدیدی همچون کوپلرهایبرید 3dB استفاده می‌شود و بالاخره آخرین طبقه مربوط به ترکیب‌توان فضایی می‌باشد. اولین کار در این زمینه توسط Yen و Chang انجام شد. در این کار در فرکانس 92.6GHz توان خروجی ۶۳ وات بدست آمد [۵].

۱-۵ مروری بر کارهای انجام شده

کار بر روی تقویت‌کننده‌های توان متوازن تقریبا از زمانی که تقویت‌کننده و تقسیم‌کننده/ترکیب‌کننده توان موجود بوده است شروع شده است. در این قسمت بنا بر این نیست که روند تکاملی تقویت‌کننده‌های توان متوازن را از ابتدا تا حال بررسی کنیم و تنها به ذکر چند نمونه از کارهای انجام شده در این زمینه اکتفا می‌کنیم. در سال ۱۹۹۹ محققانی از دانشگاه سانتا باربارا با استفاده از تقویت‌کننده‌های MMIC تقویت‌کننده توان متوازنی را در باند W (فرکانس ۷۸ گیگاهرتز) ساختند [۱۰]. این تقویت‌کننده توان متوازن از دو تقویت‌کننده MMIC با تکنولوژی HBT ساخته شده بود که برای ترکیب و تقسیم توان از ترکیب‌کننده و تقسیم‌کننده توان Wilkinson استفاده می‌کرد و چون خروجی‌های Wilkinson هم فاز هستند برای ایجاد اختلاف فاز ۹۰ درجه بین دهانه‌های آن از خطوط مایکرواستریپ استفاده می‌شد. این تقویت‌کننده توان خروجی 10.7dBm و بهره 7.9dB در فرکانس ۷۸ گیگاهرتز تولید می‌کرد. یکی دیگر از کارهایی که در اینجا به آن اشاره می‌کنیم در سال ۲۰۰۰ در دانشگاه جان هاپکینز صورت گرفت [۱۱]. مشخصه مهم این تقویت‌کننده توان متوازن باندپهن بودن آن با بهره قابل استفاده از ۲۰ گیگاهرتز تا ۴۰ گیگاهرتز بود. در این پروژه برای رسیدن به یک چنین پهنای باند زیادی از دو طبقه تقویت‌کننده توان متوازن با تقویت‌کننده‌های P-HEMT و کوپلرهای لانژ با هدف بهبود VSWR ورودی و خروجی استفاده

شد و در نهایت توان خروجی 12dBm در نقطه فشردگی بهره و RL[1] در کل باند در حدود 10dB بدست آمد. در سال ۲۰۰۰ در دانشگاه ملی سئول[۲] (پایتخت کره جنوبی) تقویت کننده توان متوازن بسیار باندپهنی (از ۶/۵ گیگاهرتز تا ۳۱/۵ گیگاهرتز) ساخته شد که از کوپلرهای لانژ با ساختار CPW[3] استفاده می‌کرد و بهره 15dB در کل باند را نشان می‌داد [۱۲]. لازم به ذکر است که ضریب کوپلینگ کوپلرهای لانژ در این پروژه در باند فرکانسی مورد نظر $3.8\pm1dB$ بود. وای چیون چیو کار جالبی را در سال ۲۰۰۳ انجام داد [۱۳]. او در پروژه خود تقویت‌کننده توان متوازنی ساخت که برای تقسیم و ترکیب توان از کوپلر Branch-line سه شاخه‌ای (به جای کوپلر دو شاخه‌ای مرسوم) استفاده می‌کرد و در عین حال ازساختارهای DGS[4] بهره می‌برد. فرکانس کار این تقویت‌کننده از ۱/۸ گیگاهرتز تا ۳ گیگاهرتز و توان خروجی آن 27dBm بود. در سال ۲۰۰۳ در دانشگاه آلبرت انشتین آلمان تقویت‌کننده توان متوازنی در فرکانس ۲ گیگاهرتز گزارش شد که در آن با توجه به فرکانس پایین کار از هایبریدهای ۹۰ درجه SMD[5] بعنوان ترکیب‌کننده و تقسیم‌کننده استفاده می‌شد[۱۴]. در این پروژه توان خروجی هر کدام از تقویت‌کننده‌های منفرد ۲ وات با بهره 13dB و توان خروجی تقویت‌کننده توان متوازن ۳/۱ وات با بهره 12dB بود. برای افزایش بهره یک طبقه پیش‌تقویت‌کننده با تقویت‌کننده توان متوازن سری شد و بهره به 23dB رسید. تقویت‌کننده متوازن باند پهن دیگری البته این بار برای استفاده در کاربردهای کم نویز در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه میشیگان گزارش شد [۱۵]. بهره این تقویت‌کننده در بازه فرکانسی ۳ گیگاهرتز تا ۱۶ گیگاهرتز $20\pm3dB$ بود وهمانند دیگر موارد باند پهن، تقسیم‌کننده و ترکیب‌کننده توان این تقویت‌کننده از نوع کوپلر لانژ با ساختار CPW بود. به عنوان آخرین نمونه، در مرجع [۱۶] فرستنده‌ای با ساختاری مشابه با ساختار فرستنده این پایان‌نامه در باند Ka با P_{1dB} برابر 26.5dBm ساخته شده است. مواردی که ذکر شد مربوط به پروژه‌هایی بود که در آنها کار خاصی صورت گرفته و پاسخ خاصی نسبت به

[1] Return Loss
[2] Seoul National University
[3] Coplanar Waveguide
[4] Defected Ground Structure
[5] Surface Mount Device

موارد معمولی بدست آمده بود. موارد بسیاری نیز بخصوص در شرکتها از ترکیب توان توسط تقویت‌کننده توان متوازن صورت می‌گیرد که ارزش مقاله شدن را نداشته‌اند و بالطبع در اینجا آورده نشده‌اند.

۱-۶ نظم پایان نامه

بعد از این مقدمه ابتدا در فصل دوم، روابط حاکم بر تقویت‌کننده توان متوازن اریه شده و تاثیر میزان عدم تعادل فاز و دامنه در ترکیب‌کننده و تقسیم‌کننده توان در عملکرد تقویت‌کننده توان متوازن با استفاده از شبیه‌سازی سیستمی در نرم‌افزار ADS بررسی می‌شود. در فصل سوم، ابتدا کل فرستنده با استفاده از روش توازن هارمونیکی[1]، شبیه‌سازی سیستمی شده و نتایج اندازه‌گیری مخلوط‌کننده بالابرنده و نوسانساز ساخته شده ارایه می‌گردد و سپس به طراحی و ساخت فیلتر میانگذر در باند Ka پرداخته شده و پاسخ‌های فیلتر متقارن و نامتقارن مقایسه می‌شوند. در فصل چهارم که فصل اصلی پایان نامه نیز می‌باشد، ابتدا طراحی و روش ساخت تقویت‌کننده توان MMIC مورد استفاده در پروژه و نتایج اندازه‌گیری آورده می‌شوند. در بخش بعدی این فصل تقسیم‌کننده توان ۶ دهانه‌ای معرفی می‌شود و نحوه بکارگیری این تقسیم‌کننده توان به طور همزمان به عنوان هم تقسیم‌کننده توان 3dB و هم ترکیب‌کننده توان 3dB بررسی می‌شود و سپس ساختار تقویت‌کننده توان متوازن با استفاده از این تقسیم‌کننده توان تحقق داده می‌شود. در بخش ۴-۳، ایده اصلی ارایه می‌گردد و با استفاده از فیلترهای میانگذر با پهنای باند کم در بازوهای تقسیم‌کننده توان مشکل ناپایداری ساختار مرتفع می‌گردد. طراحی فیلتر میانگذر با پهنای باند کم نیز که در ساختار تقسیم‌کننده استفاده می‌شود در این فصل آورده می‌شود. در نهایت در بخش ۴-۴ ساخت وتست طبقه تقویت‌کننده توان به همراه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ارایه می‌گردد.

[1] Harmonic Balance