

طراحی و ساخت تقویت کننده توان ۸ وات با بهره و بازدهی بالا در باند X با استفاده از ترانزیستورهای GaN-HEMT به صورت Die برای کاربرد در ارتباطات ماهواره‌ای

حمیدرضا موذن^۱ رقیه کریمزاده بائی^۲ امیرحسین احمدی^۳
۱- دکتری- پژوهشکده فناوری ارتباطات-پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات-تهران-ایران
hr.moazzen@itrc.ac.ir
۲- استادیار- پژوهشکده فناوری ارتباطات-پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات-تهران-ایران
rkbaee@itrc.ac.ir
۳- دکتری- پژوهشکده فناوری ارتباطات-پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات-تهران-ایران
ah.ahmadi@itrc.ac.ir

چکیده: در این مقاله، طراحی و ساخت تقویت کننده مدار مجتمع ترکیبی مایکروویو (HMIC^۱) با توان بیش از ۸ وات و بهره سیگنال بزرگ بیش از ۵۰ dB در بازه فرکانسی ۱۰/۹۵ GHz تا ۱۱/۲۰ GHz برای کاربرد در ارتباطات ماهواره‌ای ارائه می‌شود. به منظور دستیابی به بازدهی بالا در این تقویت کننده، دو طبقه انتهایی تقویت کننده با استفاده از ترانزیستورهای GaN-HEMT، به صورت ماژول‌های جداگانه با طراحی سفارشی، ساخته شده‌اند. به منظور بررسی تکرارپذیری، ۱۶ ماژول ۸ وات ساخته و تست شده‌اند؛ که تمامی آن‌ها، توان خروجی ۸ وات و بازدهی بیش از ۵۵ درصد را فراهم نمودند. به منظور دستیابی به بهره بیش از ۵۰ dB، از ICهای آماده به عنوان طبقات بهره، استفاده شده است. در نهایت، عملکرد تقویت کننده ساخته شده با استفاده از سیگنال مدوله شده QAM با نرخ ۱۰ MSym/s مورد ارزیابی قرار گرفته و توان متوسط ۶ وات با بازدهی بیش از ۳۳٪ در فرکانس ۱۱ GHz به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: تقویت کننده توان، مخابرات ماهواره‌ای، بازدهی توان افزوده، باند X

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.3.83

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رقیه کریمزاده بائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - انتهای خیابان کارگر شمالی - پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)

۱- مقدمه

اندازه‌گیری‌های انجام شده است. در بخش ۴ نتیجه‌گیری این مقاله ارائه می‌گردد.

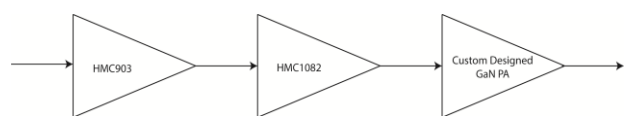
۲- طراحی طبقات تقویت کننده

هدف از این طراحی، فراهم آوردن تقویت کننده با توان خروجی بیش از ۸ وات است که مشخصات موردنیاز برای آن، در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول (۱): مشخصات تقویت کننده مورد نیاز

Frequency Range	10.95 GHz-11.20 GHz
Large Signal Gain	≥ 50 dB
Output Power	≥ 39 dBm
Size	$< 25\text{mm} \times 35\text{mm}$

در یک تقویت کننده ی توان، بازدهی کلی تقویت کننده بیشترین وابستگی را به طبقه آخر داشته و طبقات ماقبل آن، به ترتیب، نقش کمتری در بازدهی کلی دارند. از این رو، به منظور داشتن تقویت کننده با بازدهی بالا، لازم است که اتمام ویژه‌ای به بازدهی طبقات انتهایی داشته باشیم. به این منظور، برای طراحی تقویت کننده مورد نظر، طبقه آخر و ماقبل آن را با استفاده از ترانزیستورهای GaN به صورت Die‌های تطبیق نیافته به صورت Custom Design (CD) طراحی می‌کنیم تا بتوانیم بازدهی بالایی را فراهم نماییم. برای فراهم آوردن بهره لازم، از تقویت کننده‌های آماده به صورت MMIC استفاده می‌نماییم. طبقات در نظر گرفته شده برای این تقویت کننده در شکل (۱) نمایش داده شده است که از دو طبقه MMIC از شرکت Analog Devices و یک تقویت کننده دو طبقه GaN که با استفاده از ترانزیستورهای TGF2023-2-01 و TGF2023-2-02 از شرکت Qorvo طراحی خواهند شد، تشکیل شده است.



شکل (۱): طبقات در نظر گرفته شده برای تقویت کننده

براساس طراحی، مشخصات طبقات مختلف زنجیره تقویت کننده نشان داده شده توسط شکل (۱)، در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مشخصات طبقات تقویت کننده

	Technology	Small Signal Gain	Saturated Output Power
HMC903 [16]	GaAs	18 dB	> 16 dBm
HMC1082 [17]	GaAs	22 dB	> 25 dBm
CD-GaN PA (To be designed)	GaN	20 dB	> 39 dBm

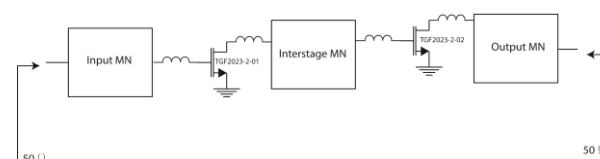
تقویت کننده‌های توان بزرگ‌ترین مصرف کننده انرژی در فرستنده‌های رادیویی هستند. همین مساله موجب می‌شود تا در فرستنده‌هایی مانند فرستنده‌های موجود در ترانسپوندرهای ماهواره، که منابع انرژی در آن‌ها محدود و یا گران قیمت بوده و میزان آن‌ها در وزن محموله بسیار تعیین کننده است، بازدهی انرژی تقویت کننده‌های توان، اهمیتی ویژه یافته و تلاش‌های بسیاری برای افزایش آن صورت پذیرد [۱-۴]. همین مساله موجب شده است که از گذشته‌ی دور، $TWTA^2$ ها که علی‌رغم داشتن مشخصه غیرخطی قابل ملاحظه، دارای بازدهی انرژی تا ۷۰٪ هستند، در ماهواره‌ها استفاده شوند. در سال‌های اخیر با ظهور تکنولوژی GaN با مشخصاتی نظیر ولتاژ شکست بالا، چگالی جریان زیاد، خازن‌های پارازیتی کم و رسانایی حرارتی زیاد، دستیابی به توان مایکروویو با استفاده از ادوات حالت جامد و با بازدهی بالای انرژی، بیش از پیش میسر شده است [۵-۸]. این تحول موجب گشته است که روند استفاده از تقویت کننده‌های حالت جامد GaN در ماهواره‌ها با توجه به هزینه و ابعاد کمتر نسبت به $TWTA$ ها و بازدهی مناسب‌تر نسبت به تکنولوژی‌های قدیمی‌تر مانند GaAs رشد پیدا کند [۹-۱۱].

امروزه تقویت کننده‌های مدار مجتمع یک پارچه مایکروویو (MMIC^۳) با تکنولوژی GaN و توان‌های متفاوت و باندهای کاری مختلف توسط شرکت‌های پیشرو در این زمینه، تولید شده و به صورت تجاری در دسترس هستند [۱۲]. این شرکت‌ها ترانزیستورهای GaN به صورت Die‌های تطبیق نیافته را نیز عرضه می‌کنند که قابلیت طراحی سفارشی تقویت کننده‌ها را برای باندهای فرکانسی و توان‌های مختلف به وجود می‌آورند [۱۳-۱۵]. اگرچه MMIC‌های تولید شده دارای مشخصات بازدهی و توان خروجی قابل توجهی هستند، اما به دلیل وجود مصالحه میان عرض باند و بازدهی در طراحی این MMIC‌ها، برای کاربردهای خاص و عرض باندهای محدود، استفاده از این MMIC‌ها، بهترین انتخاب نیست. هدف این مقاله دستیابی به تقویت کننده توان ۸ وات با بازدهی بالا در بازه فرکانسی ۱۰/۹۵ GHz تا ۱۱/۲۰ GHz برای کاربرد در ماهواره است که این کاربرد، نیازمند بازدهی انرژی هرچه بیشتر تقویت کننده طراحی شده است. به منظور دستیابی به بازدهی انرژی بیشتر نسبت به تقویت کننده‌های MMIC موجود، استفاده از Die‌های تطبیق نیافته راه‌حلی مناسب است. در این مقاله، طراحی تقویت کننده با استفاده از این روش، به منظور دستیابی به بازدهی بیش از MMIC‌های موجود در بازه فرکانسی ۱۰/۹۵ GHz تا ۱۱/۲۰ GHz هدف قرار می‌گیرد.

ساختار مقاله به این صورت است: در بخش ۲، مشخصات تقویت کننده موردنیاز بیان شده و ساختار کلی تقویت کننده مشخص می‌شود. همچنین، نحوه طراحی طبقات GaN به تفصیل در این بخش بیان می‌شود. بخش ۳ بیان‌گر نحوه ساخت تقویت کننده و نتایج

۱-۲- طراحی طبقات تقویت کننده CD-GaN

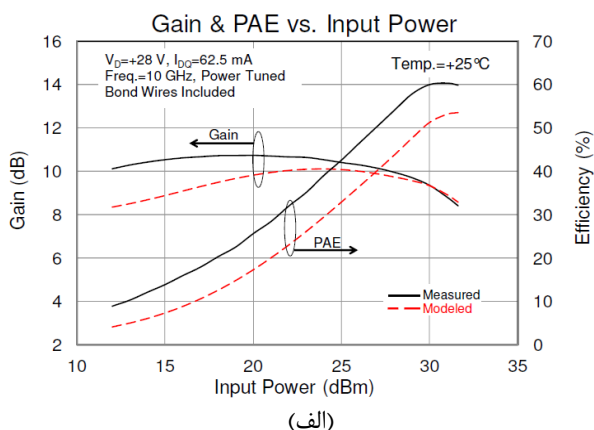
طبقات تقویت کننده CD-GaN در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند. ترانزیستورهای TGF2023-2-01 و TGF2023-2-02 به ترتیب دارای توان‌های خروجی نامی ۶ وات و ۱۲ وات هستند. ولتاژ کاری در این ترانزیستورها را می‌توان بسته به کاربرد از محدوده ۱۲ تا ۳۲ ولت انتخاب نمود. در این مقاله، به منظور طراحی تقویت کننده‌های GaN از مدل غیرخطی فراهم شده توسط شرکت Modelithics برای این ترانزیستورها استفاده می‌کنیم. در برگه داده‌های^۴ این ترانزیستورها، اطلاعاتی از مدل و میزان تطابق آن با نتایج اندازه‌گیری موجود است. نزدیک‌ترین نتایج گزارش شده در برگه داده‌های ترانزیستور TGF2023-2-02 به فرکانس کاری مورد نظر ما، نتایج گزارش شده در فرکانس 10 GHz است. این نتایج از برگه داده‌ها در شکل (۳) آورده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، توان اشباع تقویت کننده در این فرکانس با ولتاژ درین ۲۸ ولت، بیش از 40 dBm است. نکته قابل تامل در این نمودارها، اختلاف جریان مصرفی در مدل و اندازه‌گیری و به تبع آن، اختلاف در بازدهی اندازه‌گیری شده و بازدهی پیش‌بینی شده توسط مدل است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، بازدهی اندازه‌گیری شده بیشتر از میزان بازدهی بدست آمده از مدل می‌باشد.



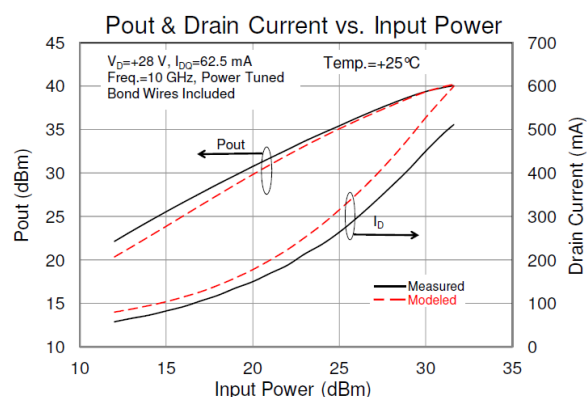
شکل (۲): طبقات تقویت کننده CD-GaN.

از آن‌جا که توان خروجی قابل دست‌یابی ترانزیستورها با افزایش فرکانس کاهش پیدا می‌کند، به منظور ایجاد حاشیه اطمینان لازم، ولتاژ درین طبقه آخر را ۳۲ ولت انتخاب می‌کنیم. در آنالیز Load-Pull، تلاش بر این بوده است که به صورت محافظه‌کارانه، توانی بیش از ۳۹ dBm از طبقه آخر دریافت شده و خروجی توان طبقه ماقبل تیز برای راه‌اندازی طبقه آخر با در نظر گرفتن تلف بین طبقات کافی باشد. در انجام آنالیز Load-Pull لازم است که نقطه بایاس ترانزیستور از پیش تعیین گردد. برای انتخاب ولتاژ گیت نیز از ولتاژ پیشنهادی سازنده ترانزیستورها، یعنی منفی ۳ ولت استفاده می‌کنیم. با انتخاب این ولتاژ در حالت بایاس، ترانزیستور در آستانه روشن شدن (کلاس B) قرار می‌گیرد [۱۹].

نتایج آنالیز Load-Pull به روش توازن هارمونیک، برای این ترانزیستور در فرکانس ۱۱/۱ GHz در جدول (۳) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با توان ورودی ۳۰ dBm، توان خروجی در حدود ۴۰/۵ dBm با PAE بیش از ۵۸٪ در دسترس است.



(الف)



(ب)

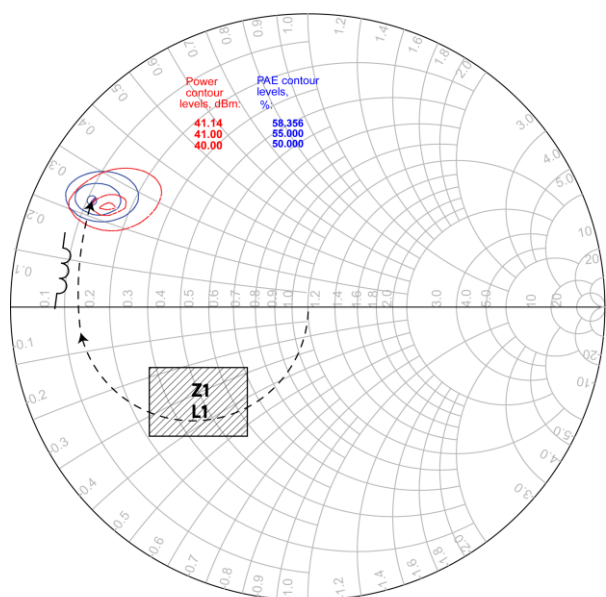
شکل (۳): (الف) مقایسه نتایج مدل غیرخطی و اندازه‌گیری بهره و بازدهی توان افزوده بر حسب توان ورودی و (ب) توان خروجی و جریان مصرفی بر حسب توان ورودی ترانزیستور TGF2023-2-02 [18]

جدول (۳): نتایج Load-Pull با استفاده از آنالیز توازن هارمونیک

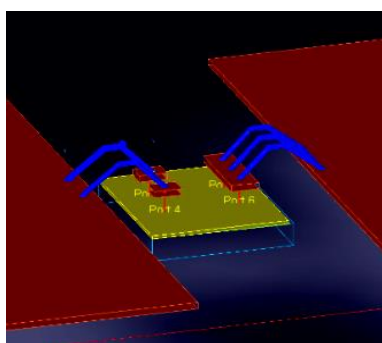
برای ترانزیستور TGF2023-2-02 در فرکانس ۱۱/۱ GHz

Parameter	Value
Drain-source voltage	32 V
Available source power	30 dBm
Source impedance	1.2 +j0.3
Optimum load impedance for maximum efficiency	5.5 +j11.7
Output power @ maximum PAE	40.9 dBm
Maximum PAE	58.5 %
Input impedance @ maximum PAE	1.46 -j0.34

همان‌طور که گفته شد، به منظور دست‌یابی به بازدهی انرژی بالا، بر خلاف [۲۰] و [۲۱] که در آن‌ها از ترانزیستورهای با ابعاد یکسان به صورت دو طبقه استفاده شده است، برای راه‌اندازی طبقه آخر (فراهم آوردن توان ۳۰ dBm) از ترانزیستور TGF2023-2-01 که دارای کمترین تعداد سلول (یک سلول) در این سری از ترانزیستورها است، استفاده می‌کنیم. با توجه به این که ابعاد این ترانزیستور نیمی از ابعاد ترانزیستور طبقه آخر است، با ولتاژ درین ۳۲ ولت، توان اشباع آن حدود ۳ dB کمتر از توان اشباع طبقه آخر، یعنی در حدود ۲۸ dBm است که فاصله زیادی با توان مورد نیاز دارد و این به معنی بازدهی کم



شکل (۴): دوائر Load-Pull و همچنین نحوه تطبیق امپدانس خروجی طبقه دوم



شکل (۵): نحوه شبیه‌سازی ترانزیستور TGF2023-2-02 به همراه Bond Wireها در محیط ممان نرم‌افزار ADS

۲-۳- طراحی مدار تطبیق میانی

به جهت صرفه‌جویی در ابعاد و همچنین کاهش تلفات، از تطبیق جداگانه خروجی طبقه اول و ورودی طبقه دوم به ۵۰ اهم پرهیز شده و سعی شده است که این دو با کمترین فضای ممکن به یکدیگر تطبیق داده شوند. به منظور تطبیق امپدانس میان ورودی طبقه دوم و خروجی طبقه اول، بایستی مدار تطبیقی طراحی شود که امپدانس ورودی طبقه دوم را به امپدانس بار بهینه برای بیشترین بازدهی طبقه اول تبدیل نماید. نحوه حرکت از امپدانس ورودی طبقه دوم به سمت بار بهینه طبقه اول در شکل (۶) نمایش داده شده است. علاوه بر آن، در این شکل، امپدانس محقق شده برای بار طبقه اول نیز در فرکانس ۱۰/۹۵ GHz تا ۱۱/۲۰ GHz نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است که امپدانس محقق شده قدری با امپدانس بهینه به دست آمده از Load-Pull تفاوت دارد که این امر با استفاده از تنظیم مدار تطبیق برای بهبود بازدهی و توان خروجی کلی، محقق شده است.

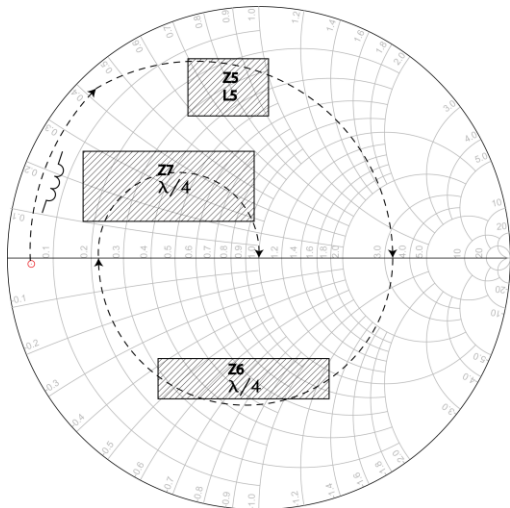
این ترانزیستور در توان خروجی ۳۰ dBm موردنیاز برای راه‌اندازی طبقه آخر، است که می‌تواند بازدهی تقویت‌کننده دو طبقه را کاهش دهد. به منظور افزایش بازدهی طبقه راه‌انداز در فراهم نمودن توان خروجی ۳۰ dBm، از قابلیت انعطاف‌پذیری ولتاژ کاری این ترانزیستور استفاده می‌کنیم. جدول (۴) نتایج Load-Pull این ترانزیستور را برای ولتاژ ۱۲ ولت و توان ورودی ۲۰ dBm نمایش می‌دهد.

جدول (۴): نتایج Load-Pull با استفاده از روش توازن هارمونیک برای ترانزیستور TGF2023-2-01 در فرکانس ۱۱/۱ GHz

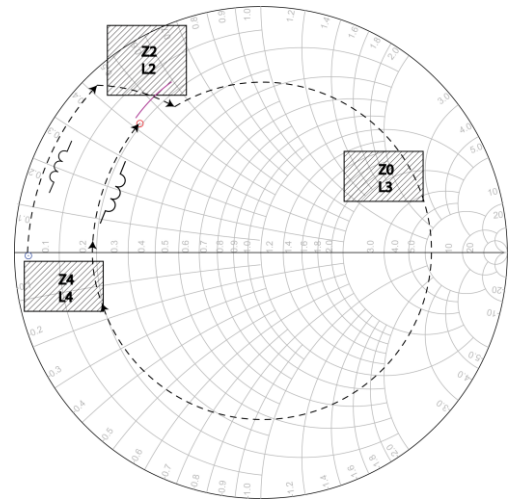
Parameter	Value
Drain-source voltage	12 V
Available source power	20 dBm
Source impedance	2.5 +j0.6
Optimum load impedance for maximum efficiency	9.7+j21
Output power @ maximum PAE	30 dBm
Maximum PAE	59.8 %
Input impedance @ maximum PAE	2.49-j0.64

۲-۲- طراحی مدار تطبیق خروجی طبقه دوم

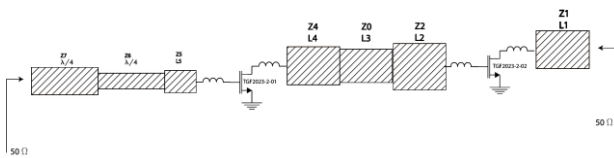
طراحی مدار تطبیق روی زیرلایه Rogers RT\Duroid 5870 با ضخامت ۰/۲۵۴mm انجام می‌شود. در شکل (۴) دوائر Load-Pull طبقه دوم و همچنین نحوه تطبیق خروجی نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، دوائر بهینه بازدهی و توان با یکدیگر تفاوت دارند. از آنجا که در این طراحی، بازدهی اهمیت ویژه‌ای دارد، خروجی طبقه آخر را به دایره بهینه بازدهی، تطبیق می‌کنیم. به منظور این تطبیق از یک خط انتقال با امپدانس پایین، Z_1 و طول L_1 به علاوه‌ی اندوکتانس ایجاد شده توسط BondWireها استفاده می‌کنیم. نحوه حرکت در نمودار اسمیت نمایش داده شده است. برای درین و گیت ترانزیستور این طبقه، به ترتیب ۳ و ۲ عدد BondWire لحاظ می‌کنیم. کلیه مدارهای تطبیق در محیط ممان نرم‌افزار ADS (به همراه BondWireها) شبیه‌سازی می‌شوند. به عنوان نمونه نحوه شبیه‌سازی مدار تطبیق ورودی و خروجی ترانزیستور TGF2023-2-02 به همراه BondWireها در محیط ممان، در شکل (۵) به صورت سه‌بعدی نمایش داده شده است. تطبیق تحقق یافته برای خروجی این ترانزیستور در بازه فرکانسی ۱۰/۹۵ GHz تا ۱۱/۲۰ GHz نیز در شکل (۴) نمایش داده شده است و همان‌طور که دیده می‌شود به خوبی داخل دوائر بیشترین بازدهی قرار گرفته است.



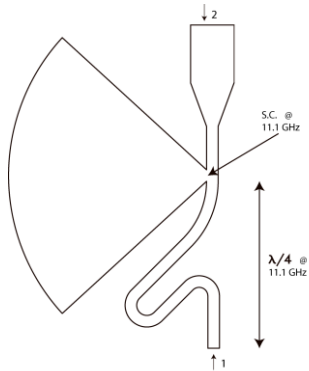
شکل (۷): نحوه تطبیق ورودی



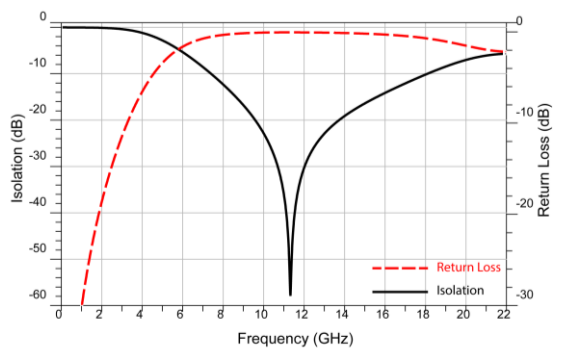
شکل (۶): امپدانس ورودی طبقه دوم، نقطه بهینه امپدانس بار طبقه اول، نحوه تطبیق میانی و امپدانس بار محقق شده برای ترانزیستور طبقه اول



شکل (۸): مدارهای تطبیق ورودی، خروجی و میانی تقویت کننده CD-GaN



(الف)



(ب)

شکل (۹): (الف) Bias Tee و (ب) پاسخ آن در تقویت کننده CD-GaN

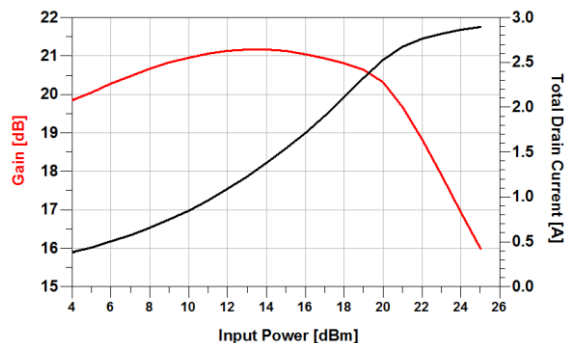
۴-۲ طراحی مدار تطبیق ورودی

در فرایند طراحی مدار تطبیق ورودی، لازم است تا مداری طراحی شود که امپدانس ورودی ترانزیستور طبقه اول را به ۵۰ اهم تبدیل نماید. نحوه‌ی این تطبیق در شکل (۷) نمایش داده شده است. ساختار کلی مدارهای تطبیق طراحی شده در شکل (۸) نمایش داده شده است. لازم است که در مدار تطبیق ورودی، میانی و خروجی، خازن‌های DC-Block نیز قرار گیرند. در این طراحی از خازن‌های سری موج‌میلیمتری شرکت ATC استفاده می‌نماییم که در بازه فرکانسی ۱۰ GHz تا ۱۲ GHz دارای افت بازگشتی بیشتر از ۳۰ dB و تلف عبوری کمتر از ۰/۲ dB است. این خازن بر روی خطوط ۵۰ اهم در قبل از مدار تطبیق ورودی، در مدار تطبیق میانی و همچنین پس از مدار تطبیق خروجی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که این خازن‌ها در شبیه‌سازی مدارهای تطبیق نیز (با استفاده از داده‌های s2p) لحاظ می‌شوند.

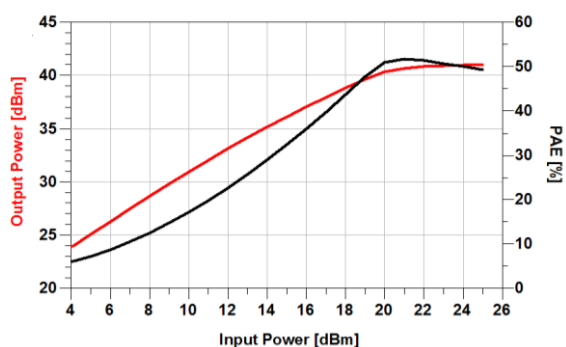
۵-۲ طراحی بایاسینگ و پایداری

ولتاژهای گیت و درین طبقات ترانزیستور بایستی به نحوی اعمال شوند تا اثری بر مدارهای تطبیق طراحی شده، نداشته باشند. به این منظور لازم است تا یک مدار دو دهانه (Bias Tee) طراحی شود به نحوی که در بازه فرکانس کاری دارای اُفت عبوری زیاد بوده و دهانه‌ای از آن که به مدارات تطبیق متصل می‌شود، مدار باز باشد. به این منظور از یک استاب پروانه‌ای برای ایجاد یک اتصال کوتاه و از یک خط ربع طول موج استفاده می‌شود که در شکل (۹) نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، Bias Tee طراحی شده در محدوده فرکانس کاری تعریف شده دارای ایزولاسیون بیش از ۳۰ dB بوده و افت بازگشتی آن از دهانه‌ای که به مدار تطبیق متصل می‌شود، کمتر از ۰/۱ dB است.

در نرم افزار ADS با استفاده از مدل غیرخطی ترانزیستورهای مورد استفاده و آنالیز توازن هارمونیک شبیه سازی شده است. نتایج نهایی شبیه سازی مجموعه تقویت کننده های CD-GaN در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): (الف) نتایج شبیه سازی بهره کلی و جریان مصرفی بر حسب توان ورودی و (ب) توان خروجی و بازدهی توان افزوده بر حسب توان ورودی مجموعه تقویت کننده های CD-GaN

۳- ساخت زنجیره کلی تقویت کننده

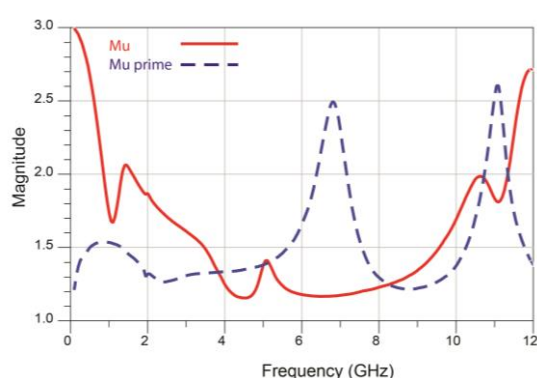
شکل (۱۲)، نمای بدون درب از جعبه طراحی شده برای تقویت کننده را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، بخشی برای قرارگیری طبقات تقویت کننده GaN تعبیه شده است. از آنجا که مجموع بهره طبقات تقویت کننده بیش از ۵۰ dB است، لازم است که به منظور جلوگیری از ایجاد حلقه با بهره واحد و نوسان احتمالی، دیواره هایی میان طبقات قرار گیرد تا مسیر هوایی خروجی به ورودی را مسدود نماید. ابعاد روزنه های ایجاد شده در دیواره ها به منظور عبور خط میکرواستریپ به نحوی انتخاب شده اند که روی عملکرد خط تأثیر نداشت و در عین حال عبور موج در فرکانس کاری تقویت کننده از آن ها با افت بیش از ۴۰ dB همراه باشد. در ادامه، روند ساخت و تست تقویت کننده CD-GaN آورده شده است و در نهایت نتیجه تست کل زنجیره تقویت کننده بیان می گردد.

از آن جا که ایزولاسیون Bias Tee طراحی شده در فرکانس های پایین تر از فرکانس کاری مقداری کم است، از این مدار می توان به منظور نقطه دسترسی برای تغییر پاسخ مدار تطبیق در فرکانس های غیر از فرکانس کاری استفاده نمود. با استفاده از نقاط دسترسی ایجاد شده به کمک Bias Tee، تقویت کننده دو طبقه طراحی شده به عنوان یک دو دهانه در نظر گرفته شده است. همچنین مجموعه تقویت کننده ها با استفاده از مقاومت های SMD با مقدار ۵۰ اهم که به صورت سری در مسیر بایاس گیت ها قرار گرفته اند و همینطور خازن های حذف نویز با مقدار ۲۷ pF که قبل از Bias Tee، مسیر تغذیه درین ها و گیت های طبقات را به زمین متصل می کنند، پایدار گشته است. برای بررسی پایداری تقویت کننده طراحی شده از پارامترهای μ و μ' که به ترتیب به صورت فرمول (۱) و (۲) تعریف می شوند، استفاده می کنیم.

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \Delta S_{11}^*| + |S_{12} S_{21}|} \quad (1)$$

$$\mu' = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - \Delta S_{22}^*| + |S_{12} S_{21}|} \quad (2)$$

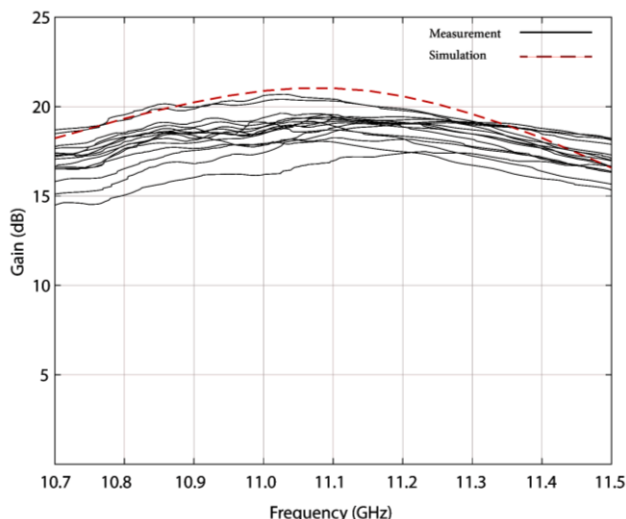
که در روابط فوق $\Delta = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}$ دترمینان ماتریس پراکندگی تقویت کننده است. پارامترهای μ و μ' به ترتیب بیانگر نزدیک ترین فاصله دوایر پایداری خروجی و ورودی یک دو دهانه به مرکز نمودار اسمیت هستند که بزرگتر از ۱ بودن آن ها نشان دهنده پایداری مطلق یک دو دهانه است [۲۲]. در شکل (۱۰)، این پارامترها برای تقویت کننده دو طبقه پس از پایدارسازی نمایش داده شده است. همانطور که دیده می شود، مقادیر هر دو نمودار در تمامی فرکانس ها، همواره بیش از یک است که پایداری مطلق تقویت کننده طراحی شده را تضمین می نماید.



شکل (۱۰): نتایج پایداری تقویت کننده دو طبقه طراحی شده

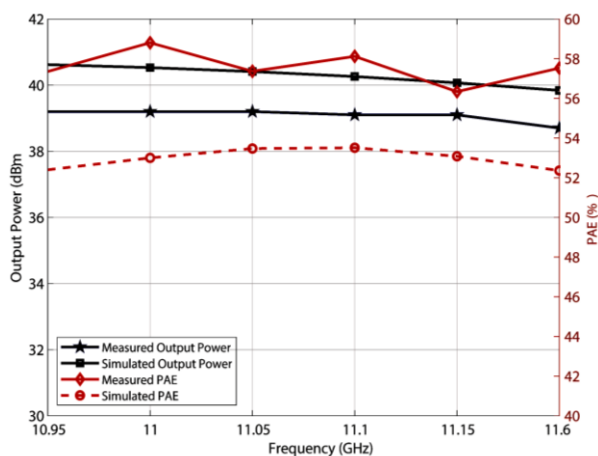
۲-۶- تحلیل غیر خطی تقویت کننده دو طبقه

همانطور که گفته شد، به منظور بررسی عملکرد تقویت کننده دو طبقه طراحی شده با استفاده از ترانزیستورهای Die، این تقویت کننده



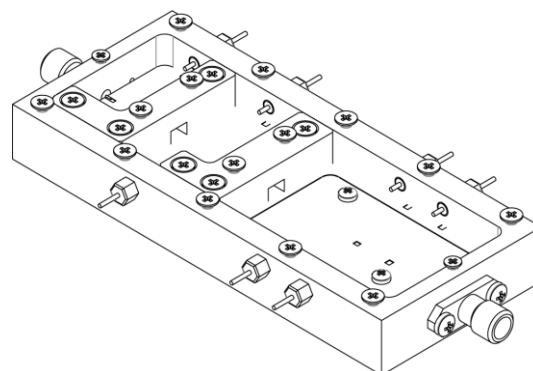
شکل (۱۴): بهره سیگنال کوچک ۱۶ تقویت کننده CD-GaN ساخته شده

در شکل (۱۵) توان خروجی و PAE یکی از نمونه‌های ساخته شده تقویت کننده GaN نمایش داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، توان خروجی بیش از ۸ وات با PAE بیش از ۵۶٪ در بازده فرکانسی مدنظر در دسترس است. لازم به ذکر است که این توان و بازدهی در سایر نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شد. نکته قابل توجه در این شکل، بازدهی بیشتر در اندازه‌گیری نسبت به شبیه‌سازی است. این تفاوت در اثر عدم تطابق مدل ترانزیستورها با واقعیت، رخ داده است و با توجه به شکل (۳) قابل توجیه است.



شکل (۱۵): توان خروجی و PAE تقویت کننده CD-GaN

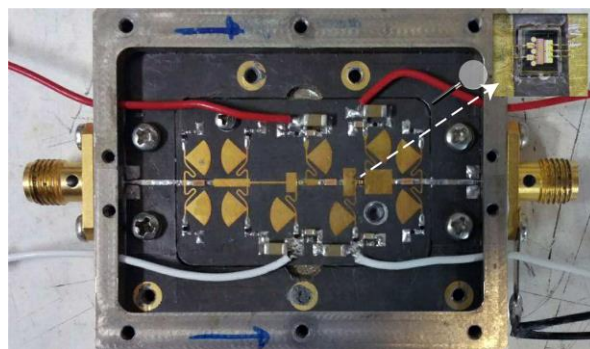
در جدول (۵)، تقویت کننده CD-GaN ساخته شده با تقویت کننده‌های تجاری شرکت Qorvo با فرکانس کاری و توان خروجی مشابه مقایسه شده است. مطابق هدف‌گذاری انجام شده، بازدهی تقویت کننده CD-GaN بیش از ۱۵٪ از تقویت کننده‌های تجاری بیشتر است.



شکل (۱۲): جعبه طراحی شده برای فرارگیری طبقات تقویت کننده

۳-۱- ساخت و تست تقویت کننده CD-GaN

به منظور بررسی تکرارپذیری، شانزده نمونه از تقویت کننده CD-GaN طراحی شده بر روی حاملی از جنس آلیاژ CuMo پیاده‌سازی و تست شد. فرآیند باندینگ^۵ و اتصال ترانزیستورهای Die به مدارات تطبیق به صورت نیمه اتوماتیک صورت گرفته است. نمونه‌ای از تقویت کننده‌های ساخته شده بر روی فیکسچر تست به منظور اندازه‌گیری مشخصات تقویت کننده CD-GaN و خارج از زنجیره کلی تقویت کننده، در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. چهار Bias Tee در گیت‌ها و درین‌های ترانزیستورها به منظور بایاس نمودن تقویت کننده استفاده شده‌اند. علاوه بر آن، از سایر Bias Teeهایی که در شکل دیده می‌شوند، به منظور پایدارسازی تقویت کننده استفاده شده است. به منظور تست تقویت کننده‌های پیاده‌سازی شده، از فیکسچر یکسانی که حامل CuMo داخل آن جای گرفته و ورودی و خروجی آن به صورت SMA هستند، استفاده شده است.



شکل (۱۳): یک نمونه از تقویت کننده CD-GaN ساخته شده بر روی فیکسچر تست

در شکل (۱۴) بهره سیگنال کوچک ۱۶ ماژول تقویت کننده‌های ساخته شده CD-GaN نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در این شکل و شکل‌های آتی، اثر فیکسچر حذف شده است. همانطور که دیده می‌شود، به غیر از یکی از نمونه‌ها، پاسخ فرکانسی تمامی تقویت کننده‌ها از روند مشابه شبیه‌سازی پیروی می‌کند. عمده‌ترین دلیل تفاوت مقادیر بهره تقویت کننده‌ها با یکدیگر و همچنین شبیه‌سازی، خطای Wire Bonding به صورت نیمه اتوماتیک است.

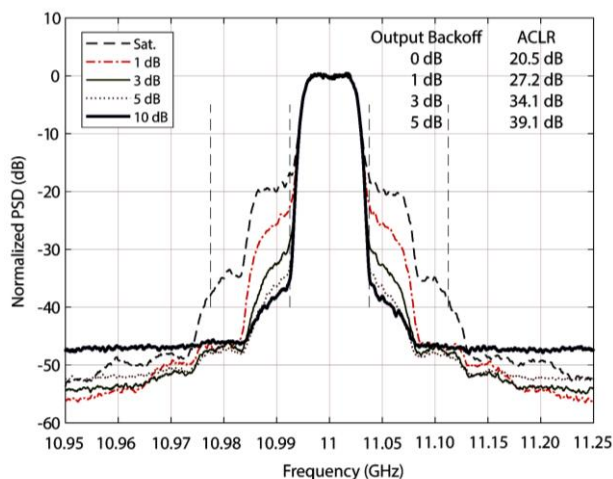
جدول (۵): مقایسه تقویت کننده CD-GaN با تقویت کننده TGA2760-SM و TGA2704-SM شرکت Qorvo

Work	Technology	Number of Stages	Frequency Range	Saturated Power	Small Signal Gain	PAE
TGA2760-SM [23]	GaAs-GaN	3	10-11.7 GHz	16 W	30 dB	36%
TGA2704-SN [24]	GaAs	2	9-11 GHz	7W	21 dB	40%
CD-GaN PA (This Work)	GaN	2	10.95-11.2 GHz	8 W	19 dB	55%

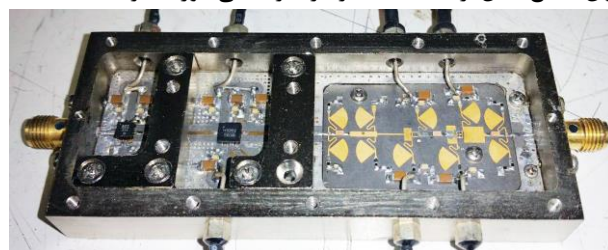
بدون استفاده از خطی ساز، توان خروجی ۶ وات با بازدهی بیش از ۳۳ درصد و ACLR بهتر از ۲۰ dB در دسترس است.

۲-۳- تست کلی زنجیره تقویت کننده

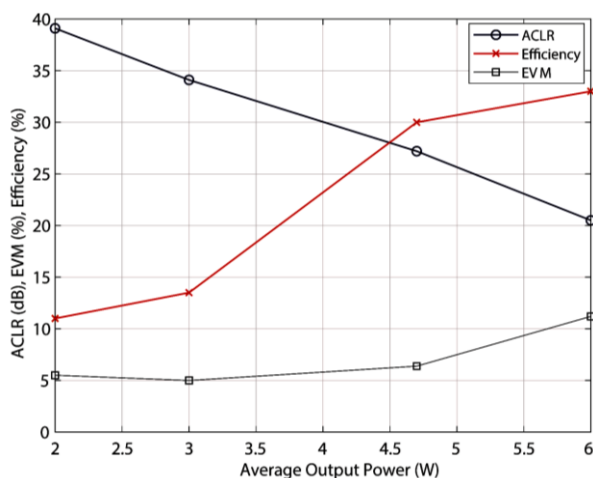
پس از تکمیل تست تقویت کننده های GaN و قرار دادن آن در جعبه زنجیره تقویت کننده، مشخصات این تقویت کننده مورد تست قرار گرفت. این زنجیره در شکل (۱۶) نمایش داده شده است. بهره سیگنال کوچک و همچنین توان خروجی اشباع زنجیره تقویت کننده در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۱۷) مشاهده می شود، این تقویت کننده دارای بهره سیگنال کوچک بیش از ۵۷ dB و توان اشباع بیش از ۳۹ dBm در بازه فرکانسی مورد نظر است.



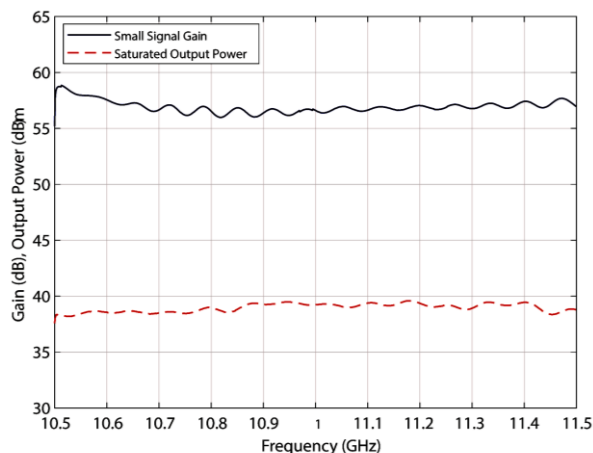
شکل (۱۸): طیف خروجی تقویت کننده با سیگنال ورودی QAM با نرخ سمبل 10 MSym/s



شکل (۱۶): زنجیره کلی تقویت کننده ساخته شده



شکل (۱۹): بازدهی، ACLR و EVM بر حسب توان خروجی متوسط تقویت کننده



شکل (۱۷): بهره سیگنال کوچک و توان خروجی اشباع تقویت کننده

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی و ساخت تقویت کننده توان ۸ وات در بازه فرکانسی ۱۰/۹۵ GHz تا ۱۱/۲۰ GHz را برای کاربرد در ارتباطات ماهواره ای مدنظر قرار دادیم. از آنجائیکه در این کاربرد، بازدهی تقویت کننده یکی از ویژگی های اساسی می باشد، ایده این مقاله برای دستیابی به بازدهی بالا، طراحی دو طبقه آخر تقویت کننده با استفاده از ترانزیستورهای GaN تطبیق نیافته Die به صورت سفارشی برای

به منظور بررسی میزان خطی بودن تقویت کننده، سیگنال QAM با نرخ سمبل ۱۰ MSym/s و با شکل پالس RRC^۶ و $\alpha=0.25$ به زنجیره تقویت کننده اعمال شد. نتایج طیف خروجی (نرمالیزه شده) تقویت کننده در توان های مختلف خروجی در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن ۱۵ MHz فاصله میان کانال ها، ACLR^۷ کانال های مجاور نیز محاسبه شده و در شکل قابل ملاحظه است. در شکل (۱۹) بازدهی، EVM^۸ و ACLR اندازه گیری شده بر حسب توان متوسط خروجی نمایش داده شده است. همانطور که دیده می شود،

کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۹.

[۸] روح‌اله فقهی، طراحی، تحلیل الکتریکی و حرارتی و ساخت تقویت‌کننده رادیویی توان بالا با استفاده از ترانزیستورهای HEMT-GaN و

تکنیک دو برابرکننده π T، دکتر، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۷.

- [9] Y. Kobayashi and S. Kawasaki, "X-band, 15-W-class, highly efficient deep-space GaN SSPA for PROCYON mission", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 52, No. 3, pp. 1340-1351, 2016.
- [10] Y. Kobayashi, A. Tomiki and S. Kawasaki, "Annual deep-space flight operation verification of X-band GaN SSPA", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, no. 2, pp. 930-938, 2018.
- [11] R. Giofrè, P. Colantonio, L. Gonzalez, L. Cabria and F. De Arriba, "A 300W complete GaN solid state power amplifier for positioning system satellite payloads", in 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2016.
- [12] A. Moore and J. Jimenez, GaN RF Technology for dummies, John Wiley & Sons, 2015.
- [13] M. Forouzanfar and M. Joodaki, "Systematic design of hybrid high power microwave amplifiers using large gate periphery GaN HEMTs", AEU-International Journal of Electronics and Communications, Vol. 84, pp. 225-233, 2018.
- [14] R. Feghhi and M. Joodaki, "Realization of a broadband hybrid X-band power amplifier based on π T-doubler technique", AEU-International Journal of Electronics and Communications, Vol. 104, pp. 119-127, 2019.
- [15] A. Ahmadi, H. Moazzen, R. Karimzadeh Bae, P. Sojoodi Sardrood, "A high-efficiency 50 W X-band GaN power amplifier in hybrid MIC technology", International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, Vol. 31, pp. 1-13, 2020.
- [16] Analog Device HMC903LP3E Datasheet <https://www.analog.com/en/products/hmc903-die.html#product-overview>.
- [17] Analog Device HMC1082 Datasheet <https://www.analog.com/en/products/hmc1082.html>.
- [18] Qorvo TGF2023-2-02 Datasheet, <https://www.qorvo.com/products/p/TGF2023-2-02>, Rev C, Sept. 2013.
- [19] S. C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, 2nd ed., Artech House, 2006.
- [20] F. Rautschke, D. Maassen, S. Vehring and G. Boeck, "A hybrid two stage 20-W GaN HEMT Ku-band power amplifier for very small aperture terminals", in 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), 2018.
- [21] D. Maassen, F. Rautschke, F. Ohnimus, L. Schenk, U. Dalisda and G. Boeck, "70W GaN-HEMTKu-Band Power Amplifier in MIC Technology", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 65, No. 4, pp. 1272-1283, 2016.
- [22] G. Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design, 2nd ed., New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [23] Qorvo TGA2760-SM Datasheet, <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2760-SM>, Accessed May 2020.
- [24] Qorvo TGA2704-SM Datasheet <https://www.qorvo.com/products/p/TGA2704-SM>, Accessed January 2020.

باند فرکانسی موردنظر است. همچنین، برای دست‌یابی به بازدهی هرچه بیشتر، در طراحی تقویت‌کننده دو طبقه، از ترانزیستور با ابعاد کوچک‌تر و همچنین ولتاژ درین کمتر نسبت به طبقه آخر، به عنوان راه‌انداز طبقه‌ی آخر استفاده شد. شازده نمونه از این تقویت‌کننده ساخته شدند که با استفاده از فیکسچر تست، مشخصات همه آن‌ها اندازه‌گیری شد که از تمامی آن‌ها توان بیش از ۸ وات با بازدهی بیش از ۵۵٪ دریافت شد. تقویت‌کننده پیشنهادی، ۱۵٪ بازدهی بیشتری نسبت به تقویت‌کننده‌های تجاری دارد. در ادامه، به منظور دست‌یابی به بهره مدنظر، تقویت‌کننده طراحی شده به همراه MMIC‌هایی به عنوان طبقات بهره، داخل یک جعبه ساخته و تست شدند. در نهایت، مشخصه EVM و ACLR زنجیره تقویت‌کننده ساخته شده، با استفاده از سیگنال مدوله شده QAM با نرخ ۱۰ MSym/s اندازه‌گیری گردید.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مادی و معنوی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران) کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] H. Moazzen, A. Mohammadi and R. Mirzavand, "Multilevel outphasing system using six-port modulators and doherly power amplifiers", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 90, No. 2, pp. 361-372, 2017.
- [2] A. Mohammadi and F. M. Ghannouchi, RF transceiver design for MIMO wireless communications, Springer Science & Business Media, 2012.
- [۳] پیمان علی پرست و احد فرهادی، "طراحی یک تقویت‌کننده توان فرکانس رادیویی یکپارچه باند X مبتنی بر فناوری AlGaIn/GaN HEMT"، نشریه انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال شانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۸.
- [۴] اکرم شیخی و علی سجادی، "طراحی، شبیه‌سازی و ساخت تقویت‌کننده توان کلاس E پهن باند با تکنیک جبران راکتانس دوگانه و کنترل هارمونیک‌های دوم و سوم"، نشریه انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هجدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰.
- [5] R. S. Pengelly, S. M. Wood, J. W. Milligan, S. T. Sheppard and W. L. Pribble, "A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 60, No. 6, pp. 1764-1783, 2012.
- [6] D. W. Runton, B. Trabert, J. B. Shealy and R. Vetry, "History of GaN: High-power RF gallium nitride (GaN) from infancy to manufacturable process and beyond", IEEE Microwave Magazine, Vol. 14, No. 3, pp. 82-93, 2013.
- [۷] محمد سروری، سید محمد رضوی، مهدی فروزنفر "بهبود بازدهی تقویت‌کننده توان ترانزیستوری GaN HEMT در باند فرکانسی L با استفاده از روش ردیابی پوش"، ششمین کنفرانس ملی پژوهش‌های

زیرنویس‌ها

-
- ¹ Hybrid Microwave Integrated Circuit
 - ² Traveling Wave Tube Amplifier (TWTA)
 - ³ Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC)
 - ⁴ Data sheet
 - ⁵ Bonding
 - ⁶ Root Raised Cosine
 - ⁷ Adjacent Channel Leakage Ratio
 - ⁸ Error Vector Magnitude

