JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1339

Vol. 15/ No. 57/2025

Research Article

High Efficiency X-band MMIC Power Amplifier for Remote Sensing Satellites

Razieh Narimani [1*] | Vali Talebzadeh[2] | Ahad Farhadi[3]

[1]Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
r.narimani@isrc.ac.ir

[2]Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
v.talebzadeh@isrc.ac.ir

[3]Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
a.farhadi@isrc.ac.ir

Correspondence
Razieh Narimani, Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran.
r.narimani@isrc.ac.ir

Main Subjects:
MMIC Power Amplifier

Paper History:
Received: xxx
Revised: xxx
Accepted: xxx

Abstract

The advancements in the space telecommunication industry and the need to design transmitters with high transmission bit rate on the one hand, and the limitation of the power consumption of satellite modules on the other hand, have made the importance of power amplifiers, as one of the main components of the transmitters with the highest power consumption, being highly efficient even more than before. Is. In this paper, we investigate a method to increase the efficiency and linearity of a two-stage class AB power amplifier using a 500nm GAN HEMT for the transmitter of a sensing satellite to send images obtained in the X frequency band. The designed amplifier has a saturation power of 49.84dBm, a gain of 23.9dB, and an efficiency of 37% in the frequency range of 10.7-11.2GHz with a drain voltage of 40V, which has a higher output power and gain compared to other similar amplifiers in this band. The linearity characteristics of this amplifier are 1dB AM/AM, 4dB/dB AM/PM, and 23dBc IM3 at the center frequency of 10.95GHz and it has a bandwidth of 36MHz.

Keywords: Power Amplifier, Satellite Transmitter, GaN HEMT Technology, Integrated Circuits.

Highlights

- Power amplifier design with high output power and efficiency.
- Power amplifier design to transmit data from a remote sensing satellite.
- Power consumption Reduction of the satellite transmitter by increasing the efficiency of the power amplifier.

Citation: R. Narimani, V. Talebzadeh, and V. Farhadi, "High Efficiency X-band MMIC Power Amplifier for Remote Sensing Satellites," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 15, no. 57, pp. 1–14, 2025, doi:10.30495/jce.2025.1993480.1339 [in Persian].

COPYRIGHTS
©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0

1. Introduction

Nowadays, HEMT transistors with ALGaN/GaN semiconductor technology are widely used in the design of power amplifiers [1]. High breakdown voltage, high-speed, high-power density, and high efficiency are the most basic advantages of HEMTs, which make them a suitable option for designing high-power amplifiers [2]. Many studies have been conducted on GaN HEMT MMICs [3].

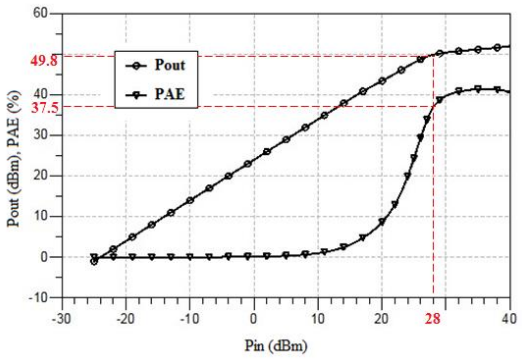
The X-band is one of the most common frequency bands for transmitting satellite images. Therefore, designing a transmitter with high power efficiency is very important due to the power consumption limitation. Many papers have studied GaN-based MMIC power amplifiers [4]. Amplifiers based on this technology have greatly contributed to reducing the size and complexity of the amplifier module while improving efficiency in space communication systems [5]. In this paper, a two-stage MMIC class AB power amplifier with an efficiency of 37% using a 500nm GaN HEMT is designed for the transmitter of a remote sensing satellite to transmit images. The proposed amplifier has an output power of 49.84 dBm with a gain of 23.9 dB at a center frequency of 10.95 GHz with a radio bandwidth of 500 MHz.

2. Proposed manufacturing technology

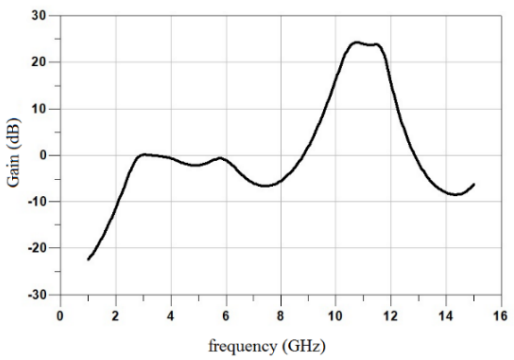
In this article, the manufacturing technology and PDK process specifications manufactured by NRC Canada have been used, which have a minimum gate length of 500 nm for GaN HEMT. The breakdown voltage for this technology is about 100 V, and the maximum operating frequency is 60 GHz. Also, the power density of 5 w/mm2 is achievable according to the substrate structure, and the capacitor used on the chip is MIM with a capacitance density of 20.19 fF/µm2. The resistor on the chip used in this technology is nichrome with a resistivity of 50 Ω/sq. The proposed drain-source bias voltage is 40 V, and the gate-source bias voltage can vary from -8 to +2 V [6].

3. MMIC Amplifier Design

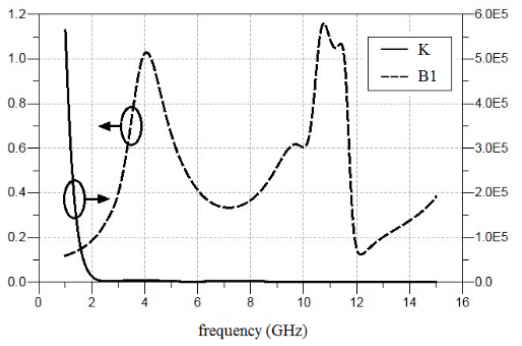
A two-stage class AB power amplifier is designed, which includes a driver and an amplifier stage. The driver consists of four transistors with dimensions of 8×70 µm, and the amplifier consists of four amplifiers with six transistors of 8×70 µm, which are connected in parallel to improve the drain-source current and high-power output. Figure I shows the characteristics of the designed power amplifier. Also, the specification is briefly explained in Table 1.



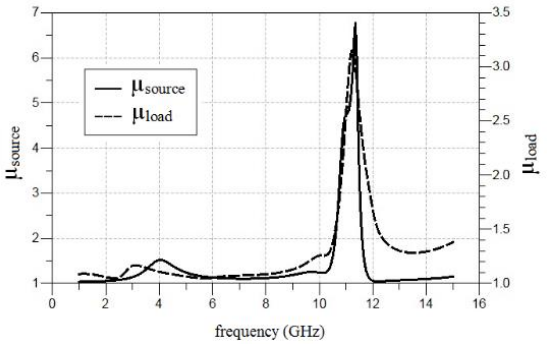
(a) Designed power amplifier P_{out} and PAE



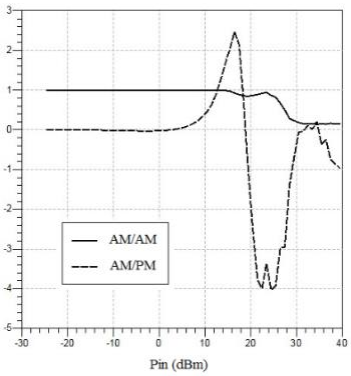
(b) Gain of the power amplifier



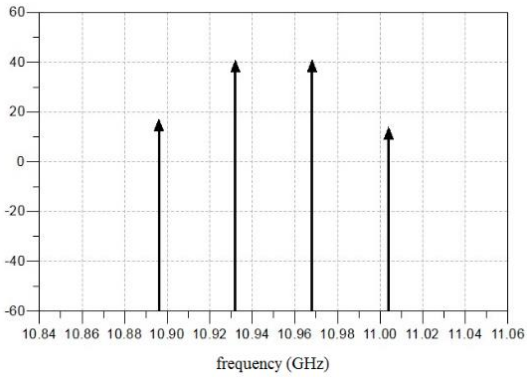
(c) Rollet's stability factor



(d) Geometric Stability factor



(e) AM/AM and AM/PM



(f) IMD in 36MHz Channel

Figure I. Characteristics of the designed power amplifier

Table 1. Specification of the power amplifier

Specification	Value
Frequency	X band (10.95 GHz)
PAE	37% @ Pin=28 dBm
Output power P1dB	49.84 dBm @ Pin=28 dBm
Small signal gain	23.97 dB @ 10.95 GHz
IMD3	-23.5 dBc @ Pin=22 dBm
AM/PM	-4.0 deg/dB
AM/AM	1 dB/dB

4. Conclusion

In this paper, a two-stage MMIC power amplifier with an efficiency of 37% using a 500nm GaN HEMT has been designed for the transmitter of a remote sensing satellite. In the design of the power amplifier, maintaining a balance between the parameters of output power, gain, and linearity of the amplifier is important and determines the design path. As the linear output power increases, the efficiency of the amplifier decreases. Comparing the characteristics of the designed power amplifier with other similar examples shows higher output power and gain, which is confirmed by the FOM parameter.

References

[1] N. Keigo, Y. Yamaguchi, T. Torii, and M. Tsuru. “A Review of GaN MMIC Power Amplifier Technologies for Millimeter-Wave Applications,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E105-C, no. 10, pp. 433-440, 2022, doi: 10.1587/transele.2022MMI0006.

[2] K. Nakatani, Y. Yamaguchi, and M. Tsuru, "A Ka-Band 40 W Output Power and 30 % PAE GaN MMIC Power Amplifier for Satellite Communication," *16th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, London, United Kingdom, 2022, pp. 285-288, doi: 10.23919/EuMIC50153.2022.9783994.

[3] M. Ayad, N. Poitrenaud, V. Serru, M. Camiade, J. Gruenenpuett, and K. J. Riepe, "A High Efficiency MMIC X-band GaN Power Amplifier," *50th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 788-791, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338001.

[4] P. Dennler, D. Schwantuschke, R. Quay, and O. Ambacher, "8–42 GHz GaN non-uniform distributed power amplifier MMICs in microstrip technology," *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259604.

[5] J. Kühn, *AlGaN-GaN-HEMT Power Amplifiers With Optimized Power-Added Efficiency for X-Band Applications*. KIT Scientific Publishing, 2011.

[6] P. Aliparast and A. Farhadi, “Design of X Band High Power Amplifier MMIC Based on AlGaN/GaN HEMT,” *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 16, no. 2, pp. 37-45, 2019 [in Persian].

Declaration of Competing Interest: Authors do not have conflict of interest. The content of the paper is approved by the authors.

Author Contributions: Razieh Narimani: Methodology, literature review, resources, writing original draft preparation; **Vali Talebzadeh:** Supervision, analytical method verification; **Ahad Farhadi:** Simulations and data analysis.

Open Access: Journal of Southern Communication Engineering is an open-access journal. All papers are immediately available to read and reuse upon publication.

E-ISSN: 2980-9231
https://sanad.iau.ir/journal/jce

مهندسی مخابرات جنوب
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1339

مقاله پژوهشی

تقویت‌کننده توان MMIC راندمان بالا در باند X برای ماهواره‌های سنجشی

راضیه نریمانی*[۱] | ولی طالب‌زاده[۲] | احد فرهادی[۳]

[۱] پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
r.narimani@isrc.ac.ir

[۲] پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
v.talebzadeh@isrc.ac.ir

[۳] پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
a.farhadi@isrc.ac.ir

نویسنده مسئول:
*راضیه نریمانی، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران،
r.narimani@isrc.ac.ir

موضوع اصلی:
طراحی تقویت‌کننده توان MMIC

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۳۰ تیر ۱۴۰۳
تاریخ بازنگری: ۱۶ مهر ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۲۴ مهر ۱۴۰۳

چکیده:

پیشرفت‌های صنعت مخابرات فضایی و نیاز به طراحی فرستنده‌هایی با نرخ بیت ارسالی بالا از یک‌سو و محدودیت توان مصرفی ماژول‌های ماهواره از سوی دیگر، اهمیت بالا بودن راندمان تقویت‌کننده‌های توان را به‌عنوان یکی از اجزای اصلی فرستنده‌ها با بیشترین توان مصرفی، بیش‌ازپیش ساخته است. در این مقاله به بررسی روشی جهت افزایش راندمان و خطینگی یک تقویت‌کننده‌ی توان دو طبقه کلاس AB با استفاده از یک 500nm GAN HEMT برای فرستنده یک ماهواره سنجشی جهت ارسال تصاویر اخذ شده در باند فرکانسی X پرداخته شده است. تقویت‌کننده طراحی شده دارای توان اشباع ۴۹/۸۴dBm، بهره ۲۳/۹dB و راندمان ۳۷٪در بازه‌ی فرکانسی ۱۰/۷-۱۱/۲GHz با ولتاژ دِرین ۴۰V است که در مقایسه با دیگر تقویت‌کننده‌های مشابه در این باند دارای توان خروجی و بهره بالاتر است. مشخصات خطینگی این تقویت‌کننده ۱dB AM/AM، ۴deg/dB AM/PM و ۲۳dBc IM3 در فرکانس مرکزی ۱۰/۹۵GHz بوده و دارای پهنای باند ۳۶MHz است.

کلیدواژه‌ها: تقویت‌کننده توان، فرستنده ماهواره، فناوری GaN HEMT، مدارات مجتمع یکپارچه.

تازه‌های تحقیق:

- طراحی تقویت‌کننده توان با توان خروجی و راندمان بالا.
- طراحی تقویت‌کننده توان جهت کاربرد فضایی برای ارسال داده‌های یک ماهواره سنجشی.
- کاهش توان مصرفی فرستنده ماهواره با افزایش راندمان تقویت‌کننده توان.

COPYRIGHTS
©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0

۱-مقدمه

پیشرفت‌های روزافزون صنعت ارتباطات فضایی و نیاز به فرستنده‌هایی با نرخ بیت بالا از یک‌سو و محدودیت‌های توان مصرفی ماژول‌ها در ماهواره از سوی دیگر، چالش جدی برای طراحان برای برقراری لینک ارتباطی مطمئن، ایجاد نموده است. بهبود توان مصرفی و راندمان تقویت‌کننده‌های توان به‌عنوان یکی از اجزای اصلی فرستنده‌ها که بیشترین توان مصرفی را در این ماژول دارند، نقش مهمی در بهبود عملکرد فرستنده ایفا می‌نماید [۱]. درزمینهٔ طراحی تقویت‌کننده‌های توان راندمان بالا در مدارات ماکروویوی پژوهش‌های بسیاری انجام شده است [۲-۷].

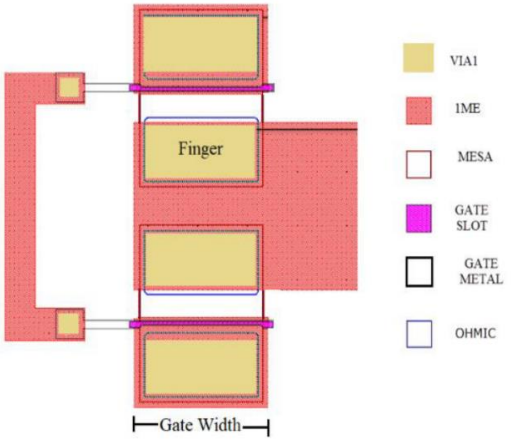
امروزه ترانزیستورهای HEMT[1] با فناوری نیمه‌هادی ALGaN/GaN به‌صورت گسترده‌ای در طراحی تقویت‌کننده‌های توان مورداستفاده قرار می‌گیرند [۸]. ولتاژ شکست بالا، سرعت بالا، چگالی توان بالا و راندمان بالا از اساسی‌ترین مزایای HEMTهاست که آن‌ها را به گزینه مناسبی برای طراحی تقویت‌کننده توان بالا تبدیل می‌کند [۹]. مطالعات زیادی در زمینه مدارات مجتمع یکپارچه (MMIC)[2]ی GaN HEMT صورت گرفته است [۱۰].

بر اساس استانداردهای ITU[3]، باند فرکانسی X یکی از باندهای فرکانسی رایج جهت ارسال تصاویر ماهواره‌ای به شمار می‌رود. طراحی یک فرستنده در این باند با راندمان توان بالا با توجه به محدودیت توان مصرفی، بسیار اهمیت دارد. در مقالات بسیاری به مطالعه در زمینه تقویت‌کننده‌های توان MMIC مبتنی بر فناوری GaN پرداخته شده است [۱۱]. تقویت‌کننده‌های مبتنی بر این فناوری، به کاهش اندازه، پیچیدگی ماژول تقویت‌کننده، بهبود راندمان و تحقق توان بالا در سیستم‌های مخابرات فضایی کمک زیادی نموده است [۱۲].

در این مقاله یک تقویت‌کننده توان دو طبقه‌ی MMIC کلاس AB با راندمان ۳۷٪ به کمک یک 500nm GaN HEMT برای فرستنده یک ماهواره سنجشی جهت ارسال تصاویر اخذ شده طراحی شده است. تقویت‌کننده پیشنهادی در فرکانس مرکزی ۱۰/۹۵GHz با پهنای باند رادیویی ۵۰۰MHz دارای توان خروجی ۴۹/۸۴dBm به همراه بهره ۲۳/۹dB است.

۲-معرفی فناوری ساخت پیشنهادی

در این مقاله برای طراحی و شبیه‌سازی تقویت‌کننده از فناوری ساخت و مشخصات پروسه PDK[4] ساخت شرکت NRC کانادا استفاده شده است که دارای مشخصه حداقل طول گیت ۵۰۰ نانومتر برای HEMT GaN است. ولتاژ شکست برای این فناوری در حدود ۱۰۰ ولت و حداکثر فرکانس کاری ۶۰ گیگاهرتز ارائه شده است. همچنین چگالی توان $5\ w/mm^2$ با توجه به ساختار بستر قابل تحقق بوده و خازن استفاده شده بر روی تراشه از نوع MIM[5] با چگالی ظرفیت خازنی $0/19fF/\mu m^2$ است. مقاومت بر روی تراشه بکار رفته در این فناوری از نوع نیکروم با مقاومت ویژه ۵۰ Ω/sq است.



شکل ۱: نمایی از ساختار ترانزیستور.
Figure 1. Structure of transistor.

[1] high-electron-mobility transistor
[2] Monolithic Microwave Integrated Circuit
[3] International Telecommunication Union
[4] Process Design Kit
[5] Metal Insulator Metal

پروسه استفاده شده جهت طراحی و شبیه‌سازی تقویت‌کننده دارای ترانزیستور با Finger و پهنای گیت[1] متغیر است. به‌طور مثال شکل ۱ با مشخصه ۱۰۰×۲ میکرومتر مشخص می‌شود که عدد ۲ مربوط به تعداد Finger و ۱۰۰ پهنای گیت را بیان می‌کند.

ولتاژ بایاس درین-سورس پیشنهاد شده در این پروسه ۴۰ ولت و ولتاژ بایاس گیت-سورس از ۸- تا ۲+ ولت می‌تواند متغیر باشد. از مشخصه‌های دیگر این پروسه می‌توان به ضخامت زیرلایه (۷۵ میکرومتر)، ثابت دی‌الکتریک (۱۰) در ترانزیستور و ثابت دی‌الکتریک (۶.۵) برای خازن و نیز میزان رسانایی هادی ($4.1\ e^7 s/m$) اشاره کرد [۱۳].

۳-پارامترهای تقویت‌کننده توان

هدف از طراحی تقویت‌کننده در این مقاله، راندمان بالا، پایداری خوب و خطی بودن فاز در کنار یک بهره مناسب است [۱۴]. برخی از پارامترهای مهم تقویت‌کننده‌ها در ادامه تشریح شده است.

۳-۱-راندمان

راندمان (PAE)[2] نسبت توان خروجی مؤثر و توان ورودی DC است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (۱)$$

که در آن Pout و Pin به ترتیب توان خروجی و ورودی سیگنال رادیویی و PDC توان DC سیگنال ورودی است [۱۵].

۳-۲-پایداری

پایداری تقویت‌کننده تابعی از پارامترهای اسکترینگ آن بوده و نشان‌دهنده مقاومت آن در برابر نوسان است. ضریب پایداری رولت که بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود، می‌بایست بزرگتر یا مساوی یک باشد (K≥1) تا تقویت‌کننده بدون قید و شرط پایدار باشد [۱۳].

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2 S_{12} S_{21}} \geq 1 \quad (۲)$$

پارامترهای فوق نیز با معادلات زیر بیان می‌شوند:

$$\Delta = |S_{11} S_{22} - S_{21} S_{12}| < 1 \quad (۳)$$

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 > 0 \quad (۴)$$

$$B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2 > 0 \quad (۵)$$

شرط k≥1، شرط لازم برای پایداری بوده و برای داشتن پایداری باید شروط |Δ|<1، یا B1>0 یا B2>0 در کنار K≥1 برقرار باشند. به‌عنوان یک جایگزین ساده‌تر، پارامترهای μ_{Source} و μ_{load} به کمک روابط ۶ و ۷ در نظر گرفته شده و فاکتورهای پایداری هندسی نامیده می‌شوند.

$$\mu_{source} = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \Delta(S_{11}^*)| + |S_{21} S_{12}|} \geq 1 \quad (۶)$$

$$\mu_{load} = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - \Delta(S_{22}^*)| + |S_{21} S_{12}|} \geq 1 \quad (۷)$$

[1] Gate Width
[2] power added efficiency

AM/AM-۳-۳ و AM/PM

در تقویت‌کننده‌های توان، جهت سنجش خطینگی پارامتر AM/PM مورد سنجش قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده انحراف فاز نامطلوب خروجی ناشی از تغییرات دامنه ورودی است. علاوه بر این، نسبت تغییرات دامنه خروجی به دامنه ورودی نیز AM/AM نامیده می‌شود[۱۶].

IMD3-۴-۳

IMD3[1] یک پارامتر خطی برای اندازه‌گیری اختلاف دامنه سیگنال اصلی و هارمونیک سوم آن در تست دو تُن است. در این حالت خاصیت حافظه‌دار بودن تقویت‌کننده منجر به رفتار غیرخطی شده و در فرکانس‌های $2f_1-f_2$ و $2f_2-f_1$ اندازه‌گیری می‌شود [۱۷]. بیشترین اختلاف نشان‌دهنده عملکرد بهتر تقویت‌کننده است.

بهره-۵-۳

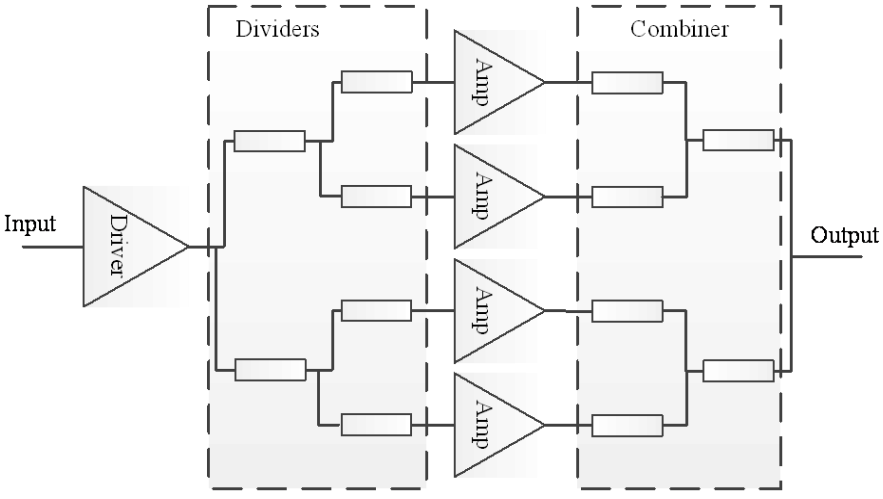
بهره یک تقویت‌کننده توان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (۸)$$

این رابطه بیان‌گر وجود یک رابطه خطی بین ورودی و خروجی تقویت‌کننده بوده و مادامی‌که عوامل غیرخطی ساز تأثیرگذار شوند، برقرار است [۱۶] .

MMIC طراحی تقویت‌کننده-۴

هدف از طراحی، داشتن یک تقویت‌کننده باند X برای ارتباطات ماهواره‌ای (۱۰/۷-۱۱/۲GHz) است. با توجه به محدودیت توان مصرفی المان‌های یک ماهواره، وجود بهره خوب در کنار راندمان بالا، نیاز اصلی در طراحی فرستنده‌های فضایی است. در این مقاله، از تکنولوژی ۵۰۰nm AlGaN/GaN HFET، برای طراحی تقویت‌کننده توان MMIC دو طبقه‌ای استفاده شده است. شکل۲ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده توان MMIC پیشنهادی را نشان می‌دهد.

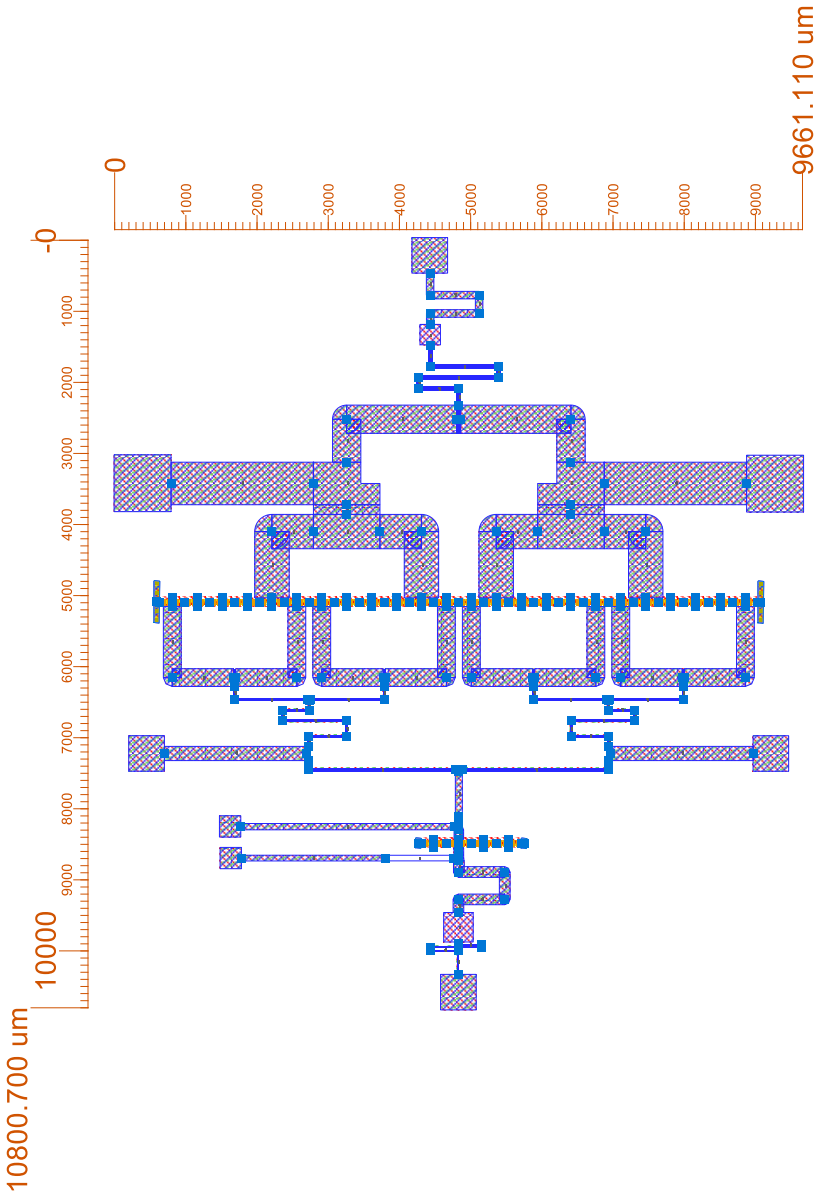


شکل ۲: بلوک دیاگرام تقویت‌کننده توان
Figure 2. Block diagram of power amplifier

در این پژوهش، یک تقویت‌کننده توان دو طبقه کلاس AB طراحی شده است که شامل طبقه‌ی درایور و تقویت‌کننده می‌شود. درایور از چهار ترانزیستور با ابعاد ۸×۷۰μm و تقویت‌کننده نیز از چهار آمپلی‌فایر با شش ترانزیستور ۸×۷۰μm تشکیل شده است که برای بهبود جریان دِرِین-سورس و خروجی توان بالا به‌صورت موازی به هم متصل می‌شوند.

[1] third-order intermodulation distortion

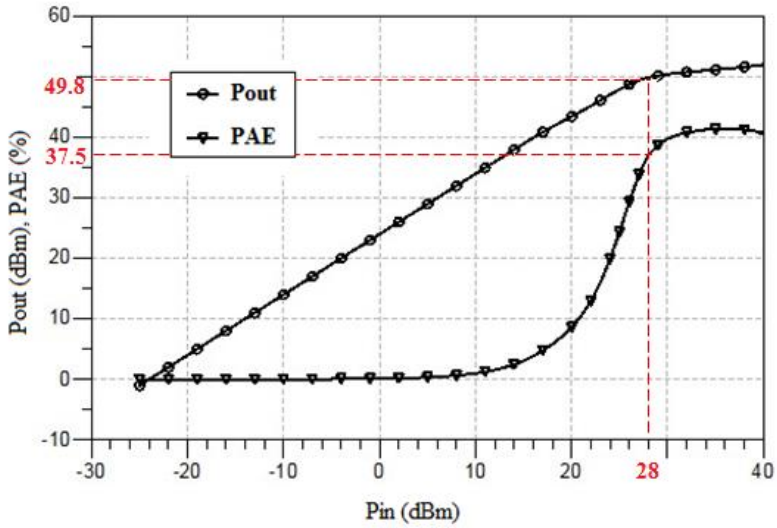
در هنگام طراحی می‌بایست پارامترهای P1dB، بهره، پایداری وPAE مورد بررسی قرار بگیرد که در این طراحی، به کمک نرم‌افزار Advanced Design System Momentum (ADS) و Design Kit GaN500 تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های موردنیاز انجام شده است. ابعاد نهایی طرح حدود ۹/۷×۱۰/۸میلی‌متر و مساحت تقریبی آن $۱۰۴mm^2$ است.



شکل ۳: تقویت‌کننده توان طراحی شده
Figure 3. Designed power amplifier

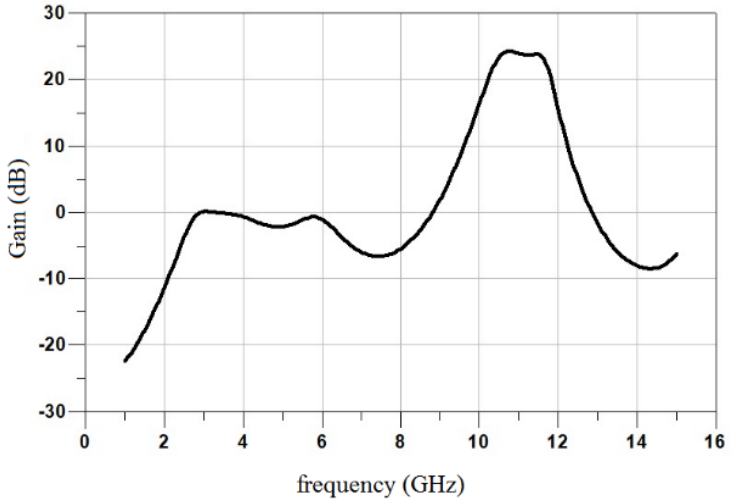
در هر دو طبقه، ولتاژ درِین ۴۰V و ولتاژ گیت ۲/۲V- اعمال‌شده و برای دستیابی به توان خروجی بالاتر در تقویت‌کننده‌ی اصلی، ترانزیستورها در ناحیه خطی بایاس شده‌اند. استفاده کمتر از قطعات نیز در طبقه درایور و تقویت‌کننده موجب کاهش توان مصرفی نهایی تقویت‌کننده می‌شود. شکل ۳ طرح و ابعاد MMIC طراحی شده را نشان می‌دهد.

شکل ۴ مشخصه‌های Pout و PAE را به‌عنوان تابعی از Pin در فرکانس ۱۰/۷GHz نشان می‌دهد. در شرایطی که توان سیگنال ورودی 28dBm است، P1dB و PAE به ترتیب ۴۹/۸dBm و ۳۷٪ به‌دست‌آمده است. بر این اساس برای ماکزیمم توان خطی، راندمان ۳۷٪ است. با افزایش توان سیگنال ورودی به ۴۰dBm، ۴۰/۵PAE٪ و توان خروجی اشباع شده ۵۱/۸۶dBm است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با توجه به مینیمم توان ورودی موردنیاز برای درایو کردن تقویت‌کننده، مقدار PAE تا رسیدن به حد مطلوب ورودی، صفر است.



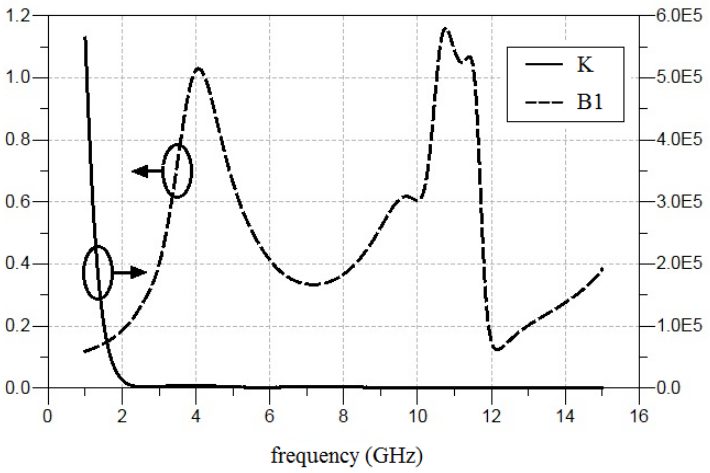
شکل ۴: P_{out} و PAE تقویت‌کننده طراحی شده
Figure 4. Designed power amplifier P_{out} and PAE

از سوی دیگر با توجه به موازی کردن چند ترانزیستور با یکدیگر در هر طبقه، بهبود راندمان در توان‌های ورودی بالاتر خود را نشان می‌دهد. شکل ۵ بهره تقویت‌کننده در فرکانس مرکزی ۱۰/۹۵GHzرا نشان می‌دهد. بر این اساس پهنای باند رادیویی تقویت‌کننده موردمطالعه ۵۰۰MHz و بهره ۲۳/۹۷dB قابل حصول است.

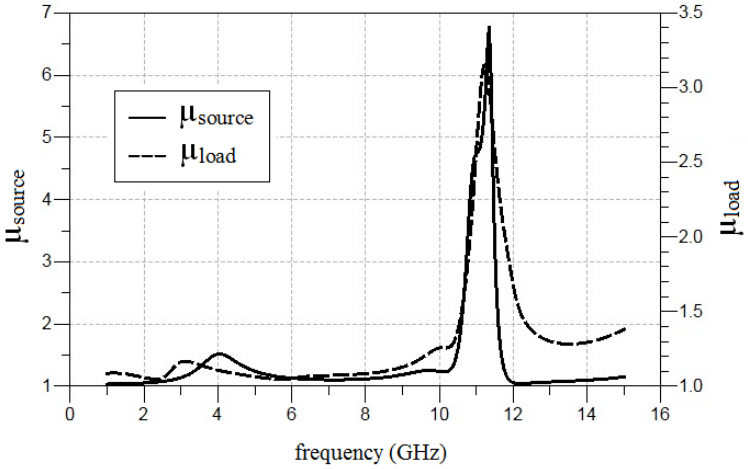


شکل ۵: بهره تقویت‌کننده
Figure 5. Gain of power amplifier

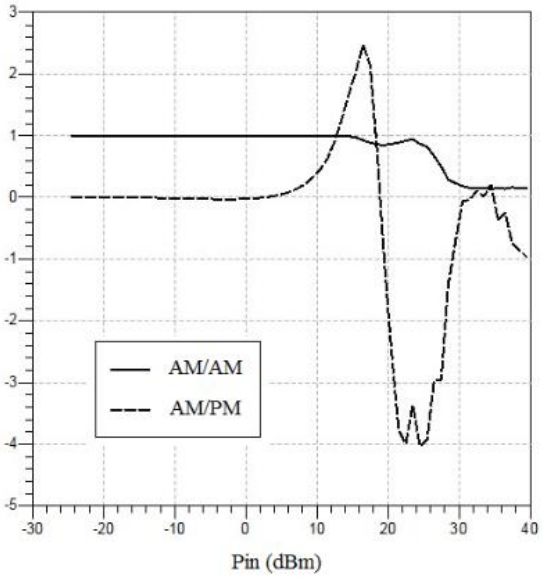
پایداری تقویت‌کننده نیز یکی دیگر از الزامات طراحی است که به آن اشاره شده است. ضریب پایداری رولت (K) و پایداری هندسی (μ_{Source} و μ_{load}) بیش از یک هستند که به معنای پایدار بودن تقویت‌کننده توان طراحی شده در کل محدوده فرکانسی است. این پارامترهای پایداری در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.



شکل ۶: ضریب پایداری رولت
Figure 6. Rollet's stability factor



شکل ۷: فاکتورهای پایداری هندسی
Figure 7. Geometric Stability factor

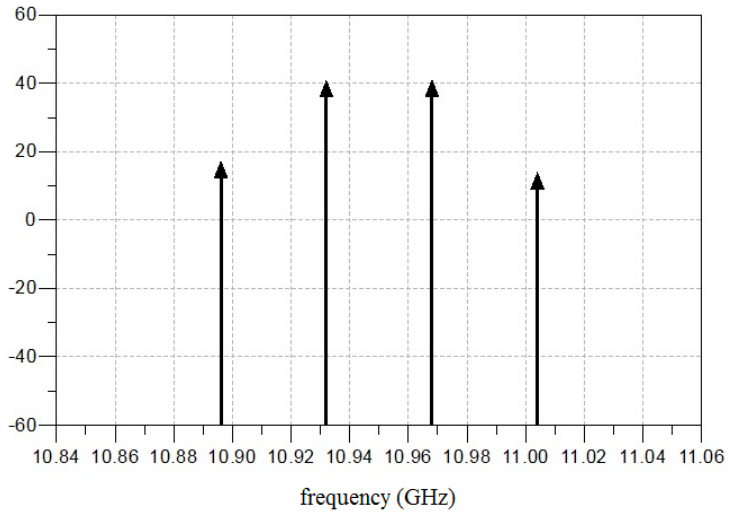


شکل ۸: AM/AM و AM/PM
Figure 8. AM/AM and AM/PM

شکل ۸ مشخصه‌های AM/AM و AM/PM را بر اساس توان سیگنال ورودی نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، کمترین مقدار AM/PM برابر ۴deg/dB- است و معادل توان ورودی ۲۴/۵dBm است که با نزدیک شدن مقدار AM/PM به صفر تغییرات فاز نسبت به دامنه کمتر شده و موجب مطلوب‌تر شدن طراحی می‌گردد. برای دیگر سیگنال‌های ورودی، AM/PM بیشتر است و درنتیجه تقویت‌کننده در مقادیر مختلف فاز، خطی است.

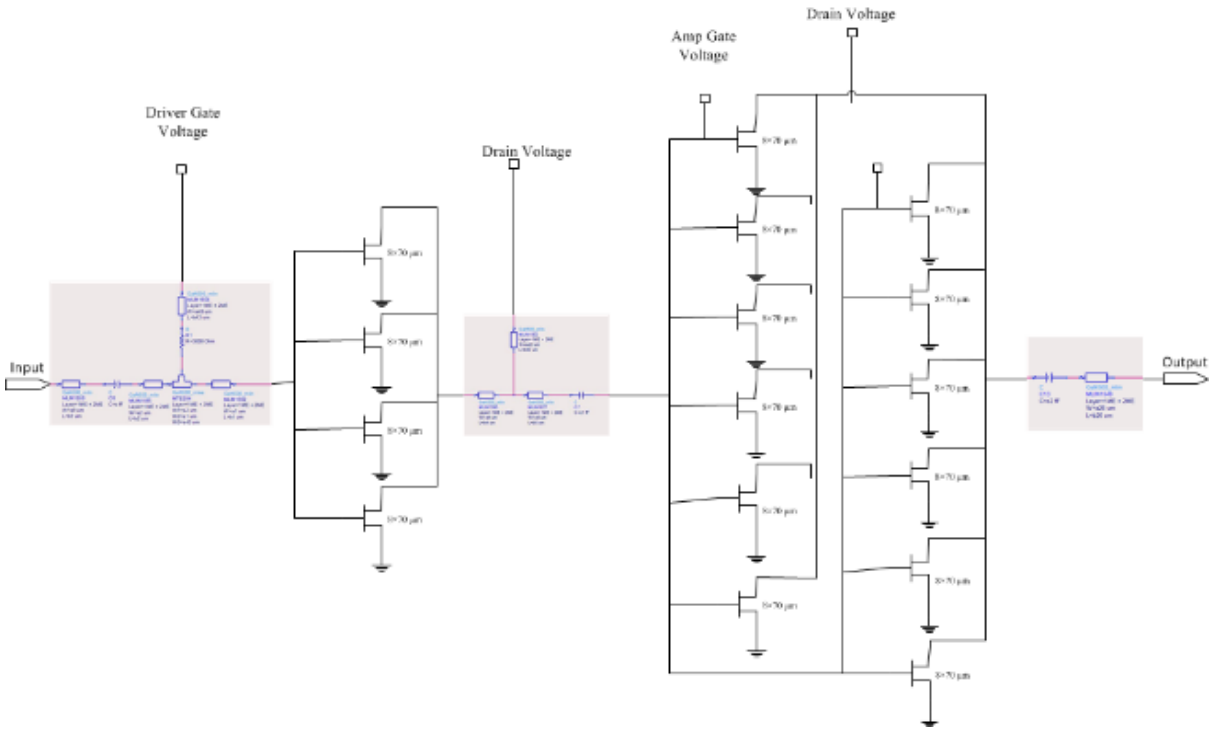
مشخصات IMD3 در کانال با پهنای باند ۳۶MHz با توان سیگنال ورودی ۲۸dBm در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل‌های ۱۰ و ۳ نیز به ترتیب شماتیک و طرح تقویت‌کننده را نشان می‌دهند. ابعاد نهایی MMIC طراحی شده در این مقاله، ۱۰/۸×۹/۶۶۱mm با مساحت ۱۰۴/۳۴mm^2 است.



شکل ۹: IMD در کانال 36MHz

Figure 9. IMD in 36MHz Channel



شکل ۱۰: شماتیک MMIC طراحی شده

Figure 10. Shematic of desined power amplifier

جدول ۱: مشخصات تقویت‌کننده توان
Table 1. Specification of the power amplifier

Specification	Value
Frequency	X band (10.95 GHz)
PAE	37% @ Pin=28 dBm
Output power P1dB	49.84 dBm @ Pin=28 dBm
Small signal gain	23.97 dB @ 10.95 GHz
IMD3	-23.5 dBc @ Pin=22 dBm
AM/PM	-4.0 deg/dB
AM/AM	1 dB/dB

مشخصات تقویت‌کننده توان طراحی شده در جدول ۱ به‌طور خلاصه آمده است.

یکی دیگر از پارامترهایی که در بررسی تقویت‌کننده به آن پرداخته می‌شود، عدد شایستگی (FOM) در جدول است که از رابطه ۹ محاسبه‌شده [۱۸] و برای تقویت‌کننده طراحی شده ۱۱۰/۲ است. در این رابطهPout توان خروجی، f0 فرکانس مرکزی برحسب گیگاهرتز و PAE راندمان تقویت‌کننده است.

$$FOM = P_{out}\left(dBm\right) + Gain\left(dB\right) + 20\log(f_0) + 10\log\left(PAE\right) \quad (۹)$$

در جدول ۲ مقایسه مختصری از تقویت‌کننده‌های طراحی شده با تقویت‌کننده موردبحث در این مقاله نشان داده شده است.

جدول ۲: مقایسه چند تقویت‌کننده توان
Table 2. Comparison of several power amplifiers

Frequency Range	Technology	Gain (dB)	Vd (V)	Pout (dBm)	PAE (%)	FOM	Ref.
10GHz	GaN MMIC	20.4	20	40	55	98	[3]
X Band	GaN MMIC	14	21	36.4	57	88	[4]
9.5-10.5 GHz	GaN MMIC	8	32	42.55	50	88	[5]
9.8 GHz	GaN MMIC	12	30	34.77	71	85.6	[6]
X Band	GaN MMIC	11	30	47	50	95	[7]
10.95 GHz	GaN MMIC	23.9	40	49.84	37	110.2	here

همان‌طور که در جدول قابل‌مشاهده است، تقویت‌کننده طراحی شده دارای عدد شایستگی بالایی نسبت به نمونه‌های دیگر در یک بازه فرکانسی مشخص (باند X)، دارای توان خروجی بیشتر و بهره بالاتری است. در این تقویت‌کننده توان خروجی ۴۹/۸۴dBm به ازای توان ورودی ۲۸dBm به همراه بهره ۲۳/۹dB به‌دست‌آمده است.

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله یک تقویت‌کننده توان دو طبقه‌ی MMIC با راندمان ۳۷٪ به کمک یک 500nm GaN HEMT برای فرستنده یک ماهواره سنجشی جهت ارسال تصاویر اخذ شده طراحی شده است. در طراحی تقویت‌کننده توان حفظ موازنه بین پارامترهای توان خروجی، بهره و خطینگی تقویت‌کننده اهمیت داشته و مسیر طراحی را مشخص می‌نماید. به‌طوری‌که با افزایش توان خطی خروجی، راندمان تقویت‌کننده کاهش می‌یابد. مقایسه مشخصات تقویت‌کننده توان طراحی شده با نمونه‌های مشابه دیگر بیان‌کننده توان خروجی و بهره بالاتر است که پارامتر FOM مؤید این مسئله است.

مراجع

[1] L. Kang, W. Chen, and A. Wu, "A Reconfigurable S-/X-Band GaN MMIC Power Amplifier," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 6, pp. 547-550, June 2022, doi: 10.1109/LMWC.2022.3141230.

[2] K. Fukunaga, T. Sugitani, Y. Yamaguchi, D. Tsunami, M. Hangai, and S. Shinjo, "X-band 100 W-class Broadband High Power Amplifier Using High Power Density GaN-HEMTs," *IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)*, Hiroshima, Japan, 2020, pp. 67-69, doi: 10.1109/RFIT49453.2020.9226232.

[3] A. Zai, Dongxue Li, S. Schafer, and Z. Popovic, "High-efficiency X-band MMIC GaN power amplifiers with supply modulation," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, Tampa, FL, USA,

2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/MWSYM.2014.6848545.

[4] A. Margomenos *et al*., "X band highly efficient GaN power amplifier utilizing built-in electroformed heat sinks for advanced thermal management," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Seattle, WA, USA, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/MWSYM.2013.6697330.

[5] H. Uchida, H. Noto, K. Yamanaka, M. Nakayama, and Y. Hirano, "An X-band internally-matched GaN HEMT amplifier with compact quasi-lumped-element harmonic-terminating network," *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6258359.

[6] M. Litchfield, M. Roberg, and Z. Popović, "A MMIC/hybrid high-efficiency X-band power amplifier," *IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications*, Austin, TX, USA, 2013, pp. 10-12, doi: 10.1109/PAWR.2013.6490172.

[7] J. Kamioka, Y. Tarui, Y. Kamo, and S. Shinjo, "54% PAE, 70-W X-Band GaN MMIC Power Amplifier With Individual Source via Structure," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1149-1152, Dec. 2020, doi: 10.1109/LMWC.2020.3031273.

[8] N. Keigo, Y. Yamaguchi, T. Torii, and M. Tsuru. "A Review of GaN MMIC Power Amplifier Technologies for Millimeter-Wave Applications," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E105-C, no. 10, pp. 433-440, 2022, doi: 10.1587/transele.2022MMI0006.

[9] K. Nakatani, Y. Yamaguchi, and M. Tsuru, "A Ka-Band 40 W Output Power and 30 % PAE GaN MMIC Power Amplifier for Satellite Communication," *16th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, London, United Kingdom, 2022, pp. 285-288, doi: 10.23919/EuMIC50153.2022.9783994.

[10] M. Ayad, N. Poitrenaud, V. Serru, M. Camiade, J. Gruenenpuett, and K. J. Riepe, "A High Efficiency MMIC X-band GaN Power Amplifier," *50th European Microwave Conference (EuMC)*, Utrecht, Netherlands, 2021, pp. 788-791, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338001.

[11] P. Dennler, D. Schwantuschke, R. Quay, and O. Ambacher, "8–42 GHz GaN non-uniform distributed power amplifier MMICs in microstrip technology," *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259604.

[12] J. Kühn, *AlGaN-GaN-HEMT Power Amplifiers With Optimized Power-Added Efficiency for X-Band Applications*. KIT Scientific Publishing, 2011.

[13] P. Aliparast and A. Farhadi, "Design of X Band High Power Amplifier MMIC Based on AlGaN/GaN HEMT," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 16, no. 2, pp. 37-45, 2019 [in Persian].

[14] S. Masuda *et al*., "Over 10W C-Ku band GaN MMIC non-uniform distributed power amplifier with broadband couplers," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Anaheim, CA, USA, 2010, pp. 1388-1391, doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517992.

[15] C. Campbell, C. Lee, V. Williams, M. -Y. Kao, H. -Q. Tserng, and P. Saunier, "A Wideband Power Amplifier MMIC Utilizing GaN on SiC HEMT Technology," *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium*, Monterey, CA, USA, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSICS.2008.38.

[16] S. Kassim and F. Malek, "Microwave FET amplifier stability analysis using Geometrically-Derived Stability Factors," *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIAS.2010.5716171.

[17] T.J. Rouphael, *Wireless Receiver Architectures and Design: Antennas, RF, Synthesizers, Mixed Signal, and Digital Signal Processing*. Academic Press, 2014.

[18] H. Pandey, "Power Amplifire gain," Available: http://www.scribd.com.