

طراحی تقویت کننده توان کلاس J با تضعیف هارمونیک‌های ناخواسته

محمد بهرامی^۱ فرزین شماع^۲ حامد عباسی^۲ رضا هواسی^۴

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق- واحد کرمانشاه- دانشگاه آزاد اسلامی- کرمانشاه- ایران

mohammadbahrani12mbm@gmail.com

۲- استادیار- گروه مهندسی برق- واحد کرمانشاه- دانشگاه آزاد اسلامی- کرمانشاه- ایران

f.shama@aut.ac.ir

۳- استادیار- گروه مهندسی برق- واحد کرمانشاه- دانشگاه آزاد اسلامی- کرمانشاه- ایران

Hamed.abbasi@iauksh.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران

r.havasi1373@gmail.com

چکیده: یکی از دغدغه‌های موجود در تکنولوژی‌های بیسیم ارسال اطلاعات با اتلاف توان کم و سرعت زیاد می باشد که به وسیله فرستنده های RF انجام می‌شود. مهم ترین بخش یک فرستنده RF، تقویت کننده توان است که باید دارای پهنای باند وسیع و بازده بالا باشد. تقویت کننده‌های توان در سیستم‌های مایکروویو و موج میلیمتری و همچنین در مخابرات، رادار، ارتباطات ماهواره ای و همچنین تصویر برداری پزشکی کاربرد دارند. با توجه به کاربردهای بیان شده، تقویت کننده های توان دارای پارامترها و مشخصه‌های متفاوتی هستند. از جمله پارامترهای مهم آن ها می توان به بازده، بازده توان افزوده، پهنای باند و خطیگی اشاره کرد. در تقویت کننده توان کلاس J ارائه شده در این مقاله جهت کاهش تلفات و بهبود توان خروجی از تطبیق امپدانس در ورودی و خروجی تقویت کننده استفاده شده است. عدم تطبیق امپدانس، باعث ایجاد هارمونیک‌های نا خواسته، افزایش تلفات توان و در نتیجه کاهش بازده می‌شود. یک فیلتر پایین گذر جهت حذف هارمونیک‌های ناخواسته در خروجی تقویت کننده و عمل تطبیق امپدانس طراحی و ارائه شده است. از جمله مشخصات بارز فیلتر ارائه شده ابعاد کوچک، باند قطع وسیع و باند گذار کوچک می باشد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که بازده توان افزوده (PAE)، بازده درین و بهره تقویت کننده توان کلاس J پیشنهادی به ترتیب برابر ۶۹٪، ۷۷٫۹٪ و ۸dB می باشد.

واژه‌های کلیدی: تقویت کننده توان، PAE، توان خروجی، تقویت کننده توان کلاس J، فیلتر پایین گذر

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.3. 93

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر فرزین شماع

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کرمانشاه - شهرک ژاندارمری - دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه - دانشکده‌ی فنی مهندسی

۱- مقدمه

در گیرنده های مخابراتی سیگنال های دریافتی از آنتن ها و در فرستنده های مخابراتی سیگنال های اعمالی به آنتن ها عموماً دارای توان مناسبی نمی باشند. با استفاده از تقویت کننده های توان می توان این سیگنال های ضعیف را تقویت کرده و برای فرآیندهای بعدی آماده ساخت. به بیان دیگر تقویت کننده ها بلوک هایی برای تبدیل سیگنال فرکانس رادیویی با قدرت کم به سیگنالی با دامنه قابل توجه و بزرگ تر، جهت ارسال و دریافت آنها روی آنتن فرستنده و گیرنده های فرکانس رادیویی هستند. پژوهشهای گسترده ای روی طراحی تقویت کننده توان از جمله تقویت کننده توان کلاس J انجام شده است. در [1]، یک تقویت کننده کلاس J با ترانزیستور GAN HEMT RF فرکانس کاری 1.6 GHz و 2.6 GHz با مشخصاتی مانند بازده مناسب و خطینگی بالا ارائه شده است. از طریق تطبیق امپدانس در هارمونیک اول و دوم، حداکثر بازده توان افزوده، بیشینه توان خروجی، و خطینگی مناسب بدست آمده است. در تقویت کننده کلاس J مذکور، توان خروجی در باند عبور در محدوده 38-39.9 dBm قرار دارد. جهت بدست آوردن بازده توان بالا، امپدانس منبع با امپدانس ورودی تقویت کننده تطبیق داده شده است. [2] طراحی و اجرای یک تقویت کننده توان کلاس-J توزیع شده (DJPA) را در فناوری 0.25 میکرومتر AlGaAs-InGaAs pHEMT ارائه می کند. طراحی بهینه یک تقویت کننده توان با استفاده از تکنیک کنترل امپدانس هارمونیک دوم و اصلی در [3] توصیف شده است. در [4]، برای طراحی تقویت کننده توان دو بانده کلاس J دوهرتی برای تنظیم امپدانس های دقیق هارمونیک اول و دوم، از شبکه تطبیق استفاده شده است. مرجع [5] یک تقویت کننده توان دوهرتی متقارن کلاس-J را که برای افزایش بازده در پهنای باند وسیع با یک سرکوبگر هارمونیک دوم ادغام شده ارائه می کند. یک تقویت کننده توان کلاس-J پهن باند با استفاده از روش مدولاسیون بار دینامیکی در [6] ارائه شده است. در این مرجع از نظر تئوری نشان داده شده است که یک تقویت کننده توان با تغییر معقول مقاومت کاملاً راکتیو بار می تواند بازده درین را برابر 70 درصد در بیش از 73 درصد پهنای باند نسبی حفظ کند. در [7]، طراحی یک تقویت کننده قدرت با خروجی 4 W و تکنولوژی گالیوم نیترا برای کاربرد در باند C و جهت ارتباط خودرو با خودرو ارائه داده شده است. در [8] نیز با استفاده از تکنیک تنظیم هارمونیک دوم یک تقویت کننده توان با راندمان مناسب در باند C ارائه شده است. بطور تئوری یک تقویت کننده کلاس J با استفاده از تئوری عملکرد آن در [9] طراحی شد. همچنین نشان داده شد در صورتی که بار تقویت کننده توان برای هارمونیک های اول و دوم خاتمه یابد، می توان به توان خروجی در یک باند پهن و پاسخ هایی با PAE بالا دست یافت. در مراجع [10] الی [12] تقویت کننده های کلاس AB را برای کاربرد در ارتباطات LTE و با استفاده از تکنیک های Load pull و Source

Pull طراحی و ارائه شده است. یک تقویت کننده کلاس J با راندمان مناسب و در نظر گرفتن خازن غیر خطی خروجی ترانزیستور در [13] ارائه شده است. در مرجع [14] یک تقویت کننده کلاس B/J جهت جبران سازی کاهش توان خروجی در تقویت کننده کلاس J طراحی و ارائه شده است. برای ارتباط با پرند های بی سرنشین (UAV) یک تقویت کننده دوبانده با استفاده از تقویت کننده توان کلاس J با خطینگی مناسب در [15] طراحی شده است. در [16] یک تقویت کننده کلاس J با مشخصات بازده بالا و خطینگی مناسب برای استفاده در کاربرد های پهن باند طراحی شده است. در [17] با استفاده از تکنیک تنظیم فاز یک تقویت کننده توان دوهرتی (Doherty) کلاس J/F⁻¹ ارائه شده است. در این تقویت کننده با استفاده از مدار تطبیق امپدانس خروجی مقاومت مورد نیاز تقویت کننده برای عملکرد پیوسته ایجاد شده است. در [18] یک مدل جدید پیش اعوجاجگر دیجیتال برای جبران سازی همزمان غیر خطینگی تقویت کننده توان و عدم تطبیق های بهره و فاز مدولاتور تریبی، همچنین عدم تطبیق های وابسته به فرکانس در فرستنده های تبدیل مستقیم ارائه شده است. در [19] یک تقویت کننده مدار مجتمع ترکیبی میکروویو با توان 8 وات و بهره سیگنال بزرگ 50 dB در بازه فرکانسی 10/95 GHz الی 11/20 GHz برای کاربرد در ارتباطات ماهواره ای طراحی و ارائه شده است.

در پژوهش پیش رو، طراحی یک تقویت کننده توان کلاس J مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. پارامترهای خروجی تقویت کننده توان مانند، پهنای باند و حداکثر مقدار توان خروجی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت و با استفاده از نرم افزار ADS شبیه سازی می شود. اهداف اصلی این پژوهش تحلیل پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر روی مشخصات تقویت کننده توان کلاس J و همچنین حذف هارمونیک های اضافی در تقویت کننده توان ارائه شده با بکارگیری یک فیلتر میکرواستریپ پایین گذر مناسب می باشد.

۲- ویت کننده توان کلاس J

بخش زیادی از توان کل سیستم های فرستنده و گیرنده توسط بلوک تقویت کننده مصرف می شود. سیستم های ارتباطی جدید مانند 4G، 5G، WiMax از تقویت کننده های توان با پهنای باند زیاد و بازده بالا استفاده می کنند.

به صورت کلی یک تقویت کننده توان کلاس J پهنای باند وسیع و بازده حدود 78٪ را ارائه می دهد. تزریق مولفه ی هارمونیک دوم جریان به گیت ترانزیستور، موجب تغییر شکل موج گیت ترانزیستور و افزایش بازده استفاده می شود، که از لحاظ تئوری، توان خروجی، پهنای باند و بازده بیشتری نسبت به تقویت کننده های کلاس B را ایجاد می کند.

اساس کار تقویت کننده توان کلاس J کنترل هارمونیک ها در شبکه ی تطبیق خروجی است. در تقویت کننده توان کلاس J، هر دو شکل

اصلی خود حفظ کند)، قطعاً می تواند انتخاب مناسبی باشد. همچنین، برای این هدف، LPF طراحی شده باید دارای صفحهای انتقال در نزدیکی هارمونیک های دوم تا بیستم، با سطوح سرکوب بالا باشد و همچنین امپدانس های موهومی خالص را برای OMN اعمال شده برای تقویت کننده کلاس J تضمین نماید. برای طراحی LPF فوق الذکر، ابتدا رزوناتور پیشنهادی مورد بررسی قرار می گیرد و فرآیند طراحی فیلتر پایین گذر مرحله به مرحله اجرا می گردد.

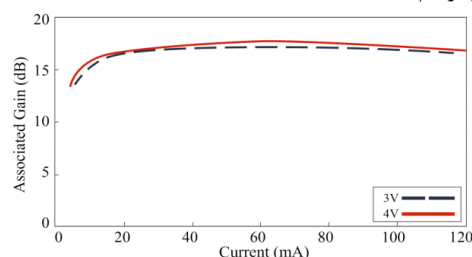
۲-۱- مراحل طراحی تقویت کننده کلاس J

در طراحی مدار پیشنهادی از ترانزیستور ATF-34143 که یک ترانزیستور با تکنولوژی P-HEMT می باشد، استفاده شده است. از مشخصات این ترانزیستور می توان به مقدار نویز پایین و هزینه کم با بسته بندی پلاستیکی با ابعاد کوچک اشاره کرد. این ترانزیستور دارای عدد نویز ۰.۵ dB و بهره ۱۷.۵ dB می باشد. در جدول (۱) حداکثر مقادیر قابل تحمل پارامتر های ترانزیستور بیان شده آورده شده است.

جدول (۱): حداکثر مقادیر قابل تحمل پارامتر های ترانزیستور ATF-34143 [۲۱]

Parameter	Symbol	Units	Absolute maximum
Drain – Source Voltage	V _{DS}	V	5.5
Gate – Source Voltage	V _{GS}	V	-5
Gate Drain Voltage	V _{GD}	V	-5
Drain Current	I _D	mA	I _{DSS}
Total Power Dissipation	P _{diss}	mW	725
RF Input Power	P _{in max}	dBm	17
Channel Temperature	T _{CH}	°C	160
Storage Temperature	T _{STG}	°C	-65 to 160
Thermal Resistance	Θ _{jc}	W / °C	165

با توجه به شکل (۱) مشاهده می شود که این ترانزیستور می تواند بهره های متفاوتی را با توجه به مقدار جریان عبوری ترانزیستور و ولتاژ اعمالی به درین داشته باشد. همانطور که قابل مشاهده می باشد به ازای تغییر جریان، بهره در محدوده ۱۳ dB الی ۱۷ dB قرار دارد. این ترانزیستور در ولتاژ ۴ ولت و جریان ۶۰ میلی آمپر می تواند تا ۱۷ dB بهره را تولید کند. لازم به ذکر است که شکل (۱) به ازای فرکانس ۲ گیگاهرتز رسم شده است.



شکل (۱): مقدار بهره ترانزیستور در 2GHz [۲۱]

موج ولتاژ و جریان درین، شکل موج های نیمه سینوسی هستند. تغییر فاز ۴۵ درجه بین سیگنال های ولتاژ درین و جریان درین برای ختم هارمونیک دوم به یک امپدانس راکتیو مناسب پدید آمده است [۲]. جریان درین که در کلاس J به طور ذاتی نیمه سینوسی می باشد و همچنین ولتاژ درین از روابط زیر پیروی می کنند [۲۰ - ۲۱]:

$$i_{Dj} = \frac{I_{\max}}{\pi} + \frac{I_{\max}}{2} \cos(\theta) + \frac{2I_{\max}}{3\pi} \cos(2\theta) \quad (۱)$$

$$V_{DSj} = V_K + (V_{DD} - V_K)(1 - \cos(\theta))(1 - \alpha \sin(\theta)) \quad (۲)$$

که در آن $\theta = 2\pi ft$ فاز زاویه ای است و $I_{\max}$ حداکثر جریان درین ترانزیستور است. $1 \leq \alpha \leq 1$ یک پارامتر ثابت، V_{DD} ولتاژ تغذیه و V_K ولتاژ موثر یا زانویی ترانزیستور است.

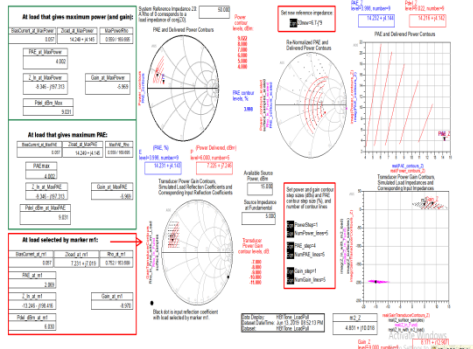
با توجه به حضور امپدانس راکتیو در هارمونیک دوم به همراه هارمونیک ذاتی خروجی، این تقویت کننده می تواند بازدهی و همچنین توان خروجی ای معادل با تقویت کننده توان کلاس B را ارائه دهد. به طور کلی، از آنجا که امپدانس های هارمونیک سوم و هارمونیک های بالاتر در مقایسه با هارمونیک دوم تأثیر کمتری بر عملکرد کلاس J دارند، امپدانس های خروجی بهینه مورد نیاز برای فرکانس اصلی و هارمونیک دوم، با داشتن حداکثر سوئیچینگ ولتاژ درین، به صورت زیر نشان داده می شود [۲]:

$$Z_{L1} = \frac{(V_{DD} - V_K)(1 + \alpha j)}{0.5 I_{\max}} = R_{optB} + j\alpha R_{optB} \quad (۳)$$

$$Z_{L2} = \frac{0.5(V_{DD} - V_K)\alpha j}{\frac{2I_{\max}}{3\pi}} = 0 - j\alpha \frac{3\pi}{8} R_{optB} \quad (۴)$$

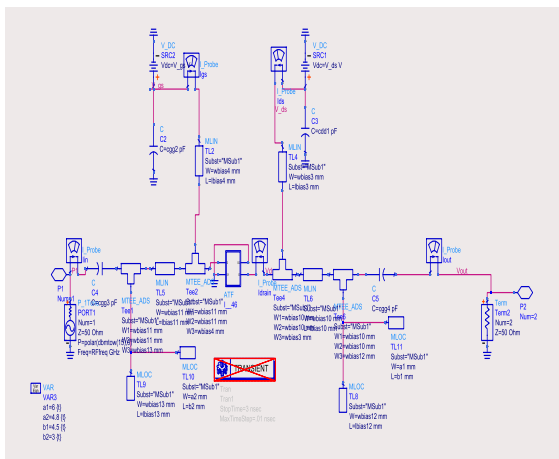
که در آن $R_{opt} = 2(V_{DD} - V_K)/I_{\max}$ امپدانس بهینه کلاس B در فرکانس اصلی است. بسیاری از کارهای پیشین مانند مرجع [۲۲] فقط کنترل هارمونیک دوم را در محاسبات خود در نظر گرفته اند. روش اصلی کنترل امپدانس خروجی تقویت کننده این است که باید این شبکه شکل کاملی از امپدانس حقیقی و موهومی در فرکانس اصلی و به شکل موهومی خالص در هارمونیک های دوم تا پنجم باشد. اخیراً فیلترها و رزوناتورهای میکرواستریپ گوناگونی برای شبکه های تطبیق امپدانس خروجی متداول در تقویت کننده های مد کلیدزنی یا سوئیچینگ پیشنهاد گردیده اند. در این شرایط، یک فیلتر پایین گذر با قابلیت سرکوب یا تضعیف مطلوب در یک باند قطع مشخص و پاسخ مناسب در باند عبور آن با کمترین ریل (یا تاخیر گروهی مسطح)، می تواند یک گزینه منطقی برای شبکه تطبیق امپدانس خروجی (OMN) برای تقویت کننده کلاس J باشد. بنابراین، برای طراحی یک OMN کوچک و کارآمد برای یک تقویت کننده کلاس J با فرکانس اساسی f_{fund} گیگاهرتز، یک LPF کوچک با فرکانس قطع بزرگتر از f_{fund} گیگاهرتز، و تلفات جایگذاری بسیار کم (در باند عبورش یعنی ناحیه ای که بهره مناسب برای تقویت کننده کلاس J را در فرکانس

برای تحلیل Load pull روش‌های مختلفی وجود دارد ولی در این تحقیق از تحلیل ارائه شده توسط نرم افزار ADS استفاده شده است. در این روش با توجه به مقادیر مختلف امپدانس ورودی و خروجی می‌توان بهترین عملکرد را از مدار دریافت کرد و به بالاترین بازده دست یافت. پاسخ منتج از این تحلیل در شکل (۴) نمایش داده شده است. با توجه به پاسخ، دیده می‌شود با تغییر امپدانس‌ها می‌توان بالاترین PAE و بهره را از مدار دریافت کرد. باید توجه داشت که مقدار امپدانس ورودی و خروجی با ۵۰ اهم تطبیق داده شده است.



شکل (۴): پاسخ Load Pull

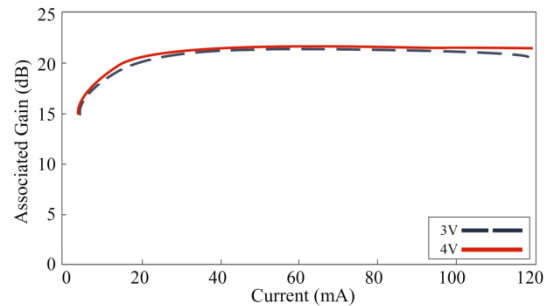
با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های خط بار، Load Pull، یک مدار تقویت کننده کلاس J مطابق شکل (۵) طراحی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود از خط ۹۰ درجه برای خطوط بایاس استفاده شده است.



شکل (۵): مدار تقویت کننده طراحی شده

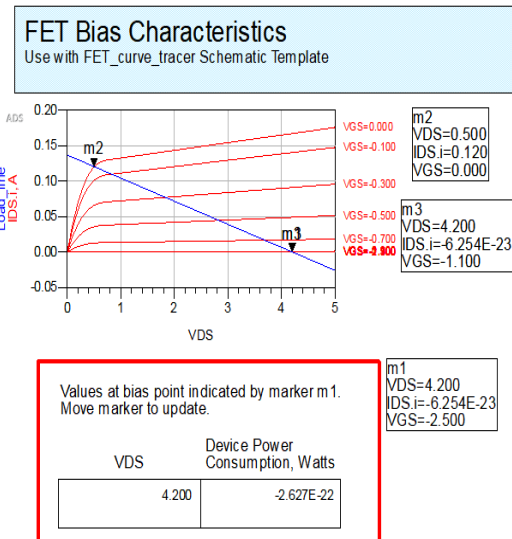
با توجه به این موضوع که در تقویت کننده‌های توان کلاس J باید هر دو شکل موج جریان و ولتاژ تقریباً به صورت نیم سینوسی باشد، شکل موج جریان و ولتاژ در درین در شکل (۶) بدست آمده است.

شکل (۲) نمودار بهره را به ازای فرکانس ۹۰۰ مگا هرتز نشان می‌دهد. در اینجا می‌بینیم که اگر در فرکانس ۹۰۰ مگا هرتز طراحی صورت گیرد، این ترانزیستور می‌تواند بهره بیشتری را تولید کند. همانطور که مشاهده می‌شود گین از ۱۵ dB شروع شده و تا ۲۲dB می‌تواند افزایش پیدا کند. که در بهترین حالت آن در ولتاژ ۴V و جریان ۶۰ mA، تا ۲۲dB بهره را تولید کرده است.



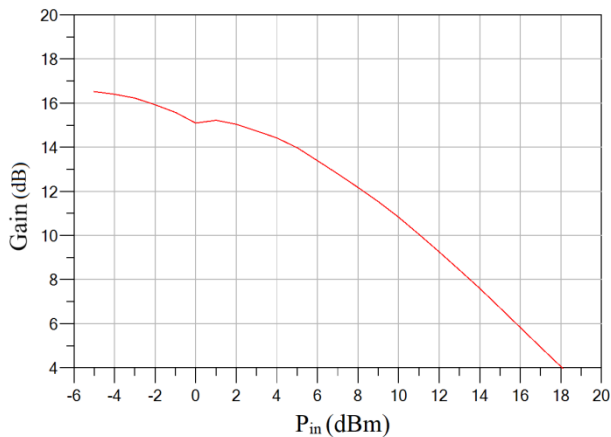
شکل (۲): مقدار گین در ۹۰۰ MHz [۲۳]

مرحله اول در طراحی مدارهای فعال فرکانس بالا بررسی نمودار خط بار آن‌ها می‌باشد که برای بدست آوردن آن، اندازه ولتاژ درین - سورس و گیت - سورس مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به امکانات موجود در نرم افزار ADS می‌توان خط بار یک ترانزیستور را به راحتی رسم کرده و تغذیه مورد نیاز برای کلاس‌های مختلف را بدست آورد. پاسخ این مدار در شکل (۳) قابل مشاهده است.

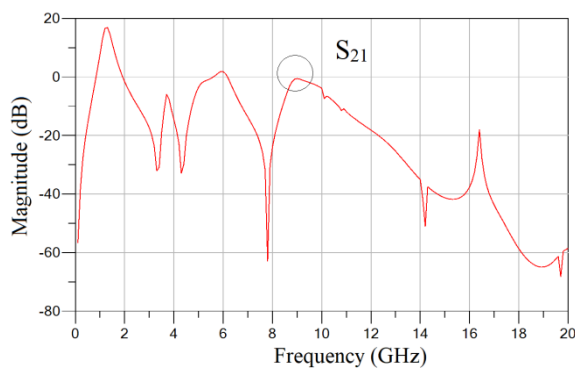


$$\begin{aligned} \text{Eqn slope} &= (m2 - m3) / (\text{indep}(m2) - \text{indep}(m3)) \\ \text{Eqn c} &= m3 - \text{slope} * \text{indep}(m3) \\ \text{Eqn Load_line} &= \text{slope} * VDS[0..] + c \end{aligned}$$

شکل (۳): پاسخ خط بار



شکل (۹): نمودار بهره تقویت کننده پیشنهادی



شکل (۱۰): نمودار پراکندگی

۲-۲- فیلتر پایین گذر

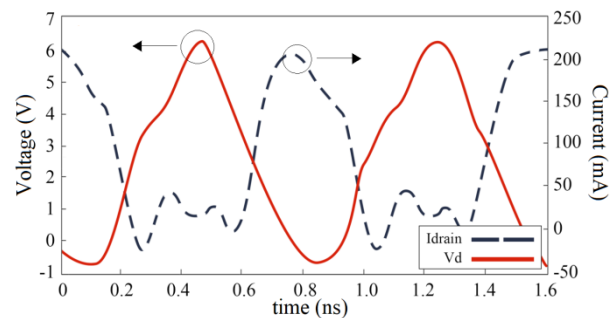
در این بخش یک فیلتر پایین گذر مناسب برای کنترل و حذف هارمونیک های خروجی تقویت کننده توان کلاس J پیشنهادی با استفاده از ترکیب رزوناتور هایی با فرکانس های قطع و صفر های انتقال متفاوت طراحی و ارائه خواهد شد.

۲-۳- رزوناتور w شکل

با استفاده از خم کردن خطوط میکرواستریپ یک رزوناتور w شکل جهت حذف هارمونیک های میانی بین ۲.۵ GHz الی ۶ GHz با حداقل سطح تضعیف ۲۰ dB مشابه شکل (۱۱) ارائه شده است. پاسخ رزوناتور ارائه شده در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

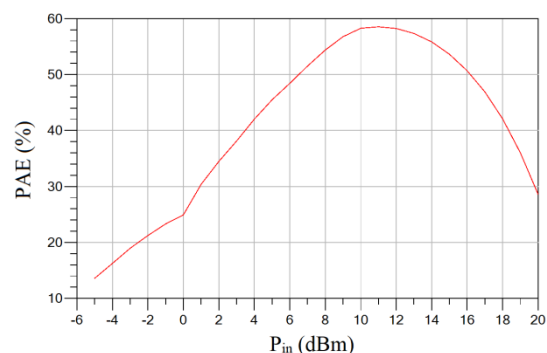


شکل (۱۱): رزوناتور w شکل طراحی شده

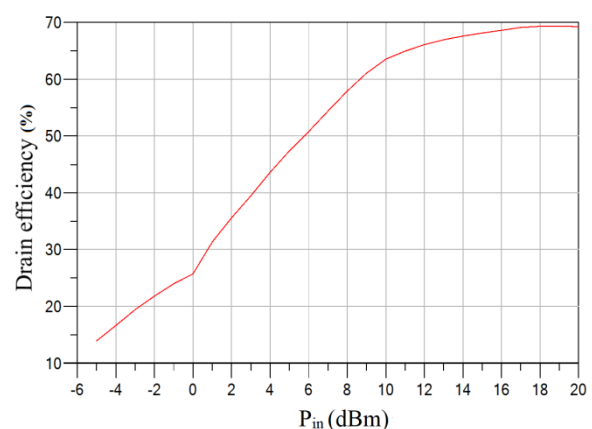


شکل (۶): شکل موج جریان و ولتاژ درین

در تقویت کننده های توان پارامترهای بازده توان افزوده، بازده درین، بهره و توان خروجی اهمیت بسیار زیادی دارند. تقویت کننده طراحی شده دارای بازده توان افزوده در حدود ۵۸٪، شکل (۷)، بیشینه مقدار بازده درین در حدود ۶۹٪، شکل (۸)، و بهره در حدود ۸.۵ dB، شکل (۹) می باشد. در انتها نمودار پراکندگی تقویت کننده ارائه شده در شکل (۱۰) ارائه شده است. با توجه به پاسخ آن می توان مشاهده کرد که پاسخ مناسبی در باند تقویت کننده وجود دارد، ولی هارمونیک ها تضعیف نشده اند.



شکل (۷): پاسخ PAE (بازده توان افزوده)



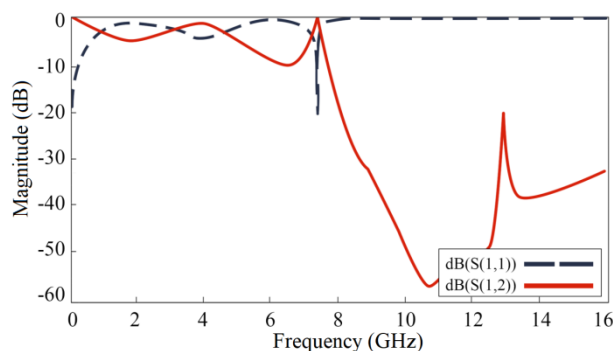
شکل (۸): پاسخ بازده توان درین

۲-۵- رزوناتور مربعی شکل

جهت تضعیف بیشتر از ۲۰ dB هارمونیک های موجود در فرکانس های بیشتر از ۸ GHz از دو رزوناتور مربعی شکل نشان داده شده در شکل (۱۵) استفاده شده است. پاسخ فرکانسی این رزوناتور در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که مشخص می باشد این رزوناتور یک صفر انتقال در فرکانس ۱۰,۹ GHz با تضعیف مناسب ۵۸ dB را ایجاد می کند.



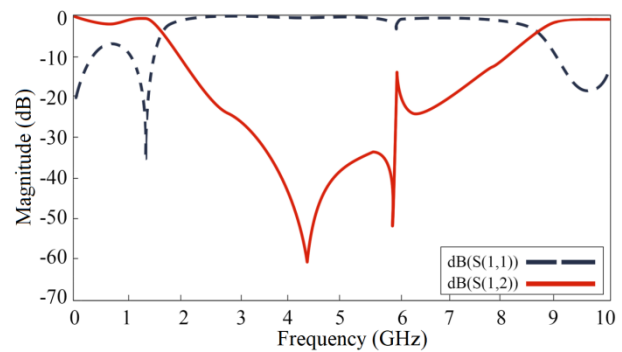
شکل (۱۵): رزوناتور مربعی شکل طراحی شده



شکل (۱۶): پاسخ رزوناتور مربعی شکل

۲-۶- فیلتر پیشنهادی

برای بدست آوردن یک فیلتر با پاسخ فرکانسی با باند قطع وسیع و باند گذار کوچک رزوناتور های طراحی شده به شکل یکپارچه در یک ساختار مشابه شکل (۱۷) ارائه می شود. پاسخ فرکانسی فیلتر پایین گذر ارائه شده در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود هارمونیک های موجود در محدوده ۱,۸ GHz الی ۲۰ GHz با حد اقل سطح تضعیف ۲۰ dB توسط فیلتر ارائه شده حذف شده است. با توجه به مشاهده پاسخ فرکانسی در باند عبور تلفات جایگذاری و بازگشتی دارای مقادیر کوچکی می باشد که نشان دهنده تلفات توان کم در باند عبور فیلتر ارائه شده می باشد. با نگرش به ساختار انتخاب شده برای رزوناتور ها ابعاد فیلتر ارائه شده بسیار کوچک می باشد. با توجه به ابعاد کوچک، باند قطع وسیع، تلفات جایگذاری و بازگشتی کم، فیلتر مورد نظر را می توان در ساختار تقویت کننده توان کلاس J ارائه شده برای کنترل و حذف هارمونیک ها استفاده کرد.



شکل (۱۲): پاسخ رزوناتور w شکل

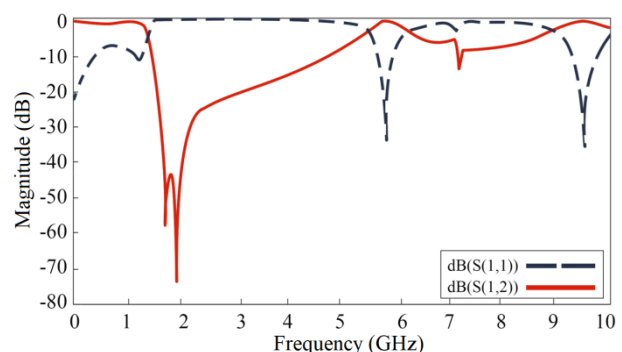
با توجه به پاسخ فرکانسی این رزوناتور دیده می شود که دو صفر مهم در فرکانس های ۴,۴ GHz و ۶ GHz ایجاد شده که باعث تضعیف هارمونیک های ناخواسته در محدوده فرکانسی این صفرهای انتقال می شود.

۲-۴- رزوناتور چند طبقه

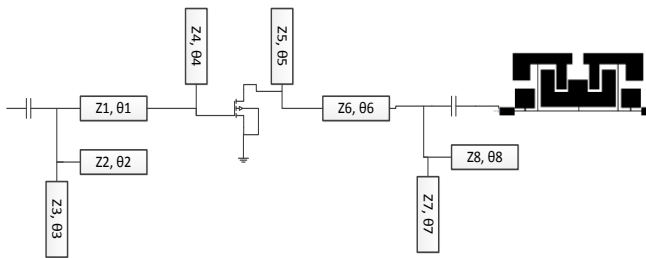
جهت کم کردن باند گذار از عبور به قطع و تیز کردن پاسخ، یک رزوناتور پله ای همانند شکل (۱۳) ارائه می شود. پاسخ رزوناتور پله ای در شکل (۱۴) ارائه شده است. همانطور که در پاسخ فرکانسی مشخص می باشد، دو صفر مهم و نزدیک به باند عبور در فرکانس های 1.8GHz و 2GHz با سطوح تضعیف ۵۸ dB و ۷۵ dB ایجاد شده است.



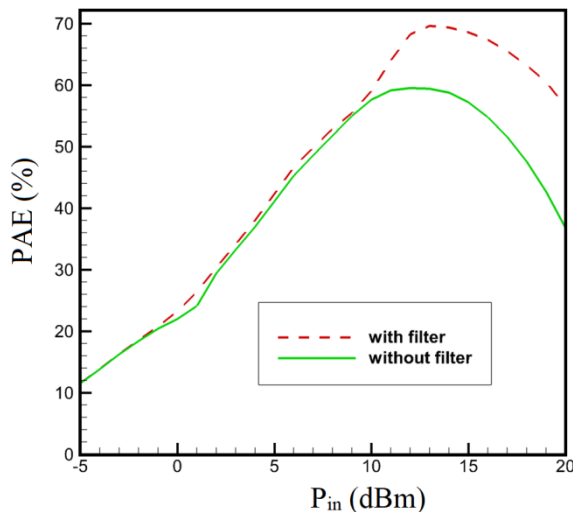
شکل (۱۳): رزوناتور پله ای طراحی شده



شکل (۱۴): پاسخ رزوناتور پله ای

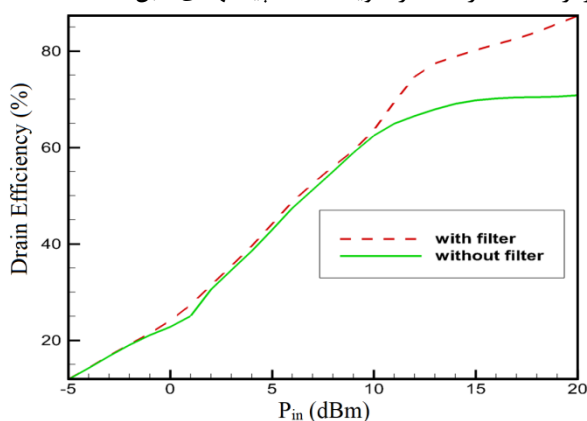


شکل (۲۰): تقویت کننده طراحی شده کلاس به صورت بلوک
دیاگرامی همراه با فیلتر پایین گذر



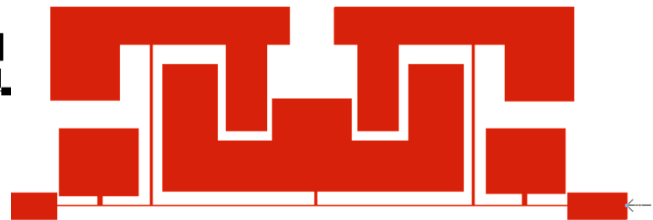
شکل (۲۱): مقایسه نمودار PAE قبل و بعد از فیلتر پایین گذر

همانطور که مشخص است، حذف هارمونیک‌های اضافی موجب بهبود PAE شده است و باعث شده است تا اینکه مقدار آن به ۶۹٪ برسد. در شکل (۲۲) مقایسه نمودار بازده درین قبل و بعد از استفاده فیلتر پایین گذر ارائه شده در ساختار تقویت کننده پیشنهادی قابل مشاهده است.

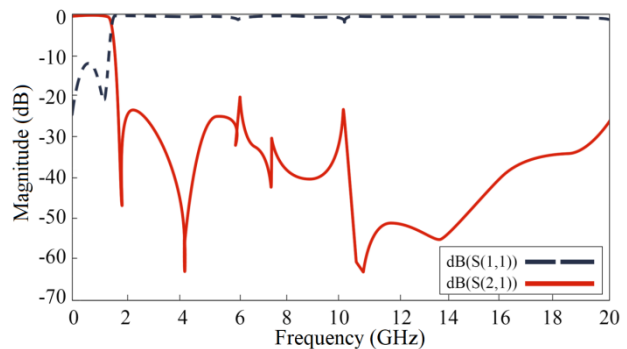


شکل (۲۲): مقایسه نمودار بازده درین قبل و بعد از فیلتر

همانطور که مشخص است بازده درین تقویت کننده پیشنهادی با فیلتر طراحی شده در مقایسه با ساختار تقویت کننده بدون فیلتر بطور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا کرده و به مقدار ۷۷٫۹ درصد رسیده است که



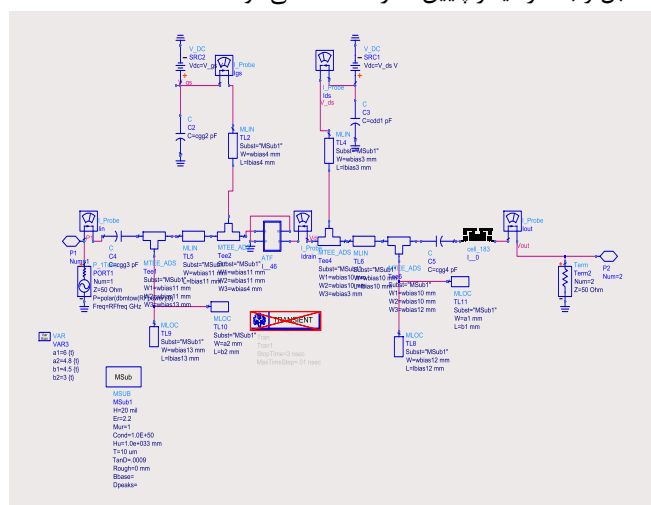
شکل (۱۷): فیلتر طراحی شده



شکل (۱۸): پاسخ فیلتر طراحی شده

۳- نتایج شبیه سازی قسمت شماتیک با فیلتر پایین گذر

پس از دو مرحله قبل یعنی طراحی تقویت کننده کلاس J و طراحی فیلتر مورد نظر جهت حذف هارمونیک‌های اضافی، در بخش سوم و پایانی، فیلتر طراحی شده در قسمت خروجی تقویت کننده کلاس J قرار خواهد گرفت. این کار باعث حذف هارمونیک‌های اضافی و بهبود عملکرد مدار می‌شود. در شکل (۱۹) تقویت کننده کلاس J طراحی شده با فیلتر پایین گذر نشان داده شده است. در شکل (۲۰) تقویت کننده طراحی شده کلاس J به صورت بلوک دیاگرامی همراه با فیلتر پایین گذر ارائه شده قابل مشاهده است. در شکل (۲۱) نمودار PAE قبل و بعد از فیلتر پایین گذر مشاهده می‌شود.



شکل (۱۹): تقویت کننده کلاس J طراحی شده با فیلتر پایین گذر

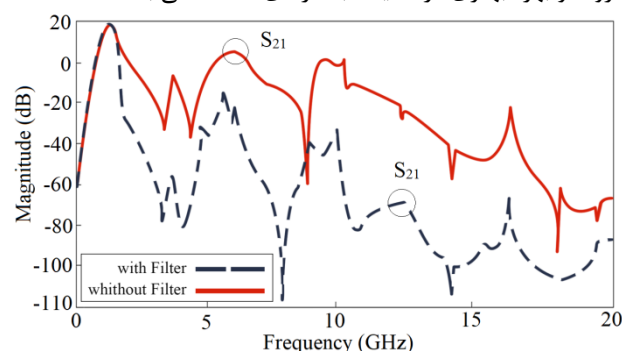
۴- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا یک تقویت کننده توان کلاس J طراحی و شبیه سازی شد سپس یک فیلتر پایین گذر با مشخصات خوبی چون پهنای باند قطع عریض، باند گذار کوچک، ابعاد کوچک، تلفات جایگذاری و بازگشتی کم برای قرار گرفتن به عنوان یک مدار کنترل و حذف هارمونیک در خروجی تقویت کننده توان اولیه با استفاده از رزوناتور های W شکل، پله ای و مربعی طراحی شد. با ترکیب تقویت کننده توان و فیلتر پایین گذر ارائه شده نشان داده شد پارامتر های تقویت کننده توان از جمله بازده توان افزوده، بهره و بازده درین به طور چشمگیری بهبود پیدا کرد. در انتها تقویت کننده توان کلاس J پیشنهادی با مراجع مقایسه شد و مشاهده شد از لحاظ پارامتر های بازده درین و بازده توان افزوده به پاسخ بهتری رسیده شده است. با توجه به پاسخ های مطلوب ارائه شده مدار پیشنهادی کاندید بسیار مناسبی برای استفاده در مدار های میکروویو و سیستم های مخابراتی می باشد.

مراجع

- [1] Seyed Alireza. Mohadeskasaei, et al. "Design of broadband, high-efficiency, and high-linearity GaN HEMT Class-J RF power amplifier", Progress In Electromagnetics Research, Vol. 72, pp.177-186, 2017 .
- [2] Amirreza. Alizadeh, and Ali. Medi, "Distributed class-J power amplifiers", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 65, No.2, pp.513-521, 2016.
- [3] Yunsik. Park, et al. "A highly efficient power amplifier at 5.8 GHz using independent harmonic control", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 27, no.1, pp. 76-78, 2016.
- [4] Zhenxing. Yang, et al. "Design of Concurrent Dual-Band Continuous Class-J Mode Doherty Power Amplifier With Precise Impedance Terminations", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 29, No. 5, pp. 348-350, 2019.
- [5] Chaoyi. Huang, He. Songbai, and You. Fei, "Design of broadband modified class-J Doherty power amplifier with specific second harmonic terminations", IEEE Access, Vol. 6, pp. 2531-2540, 2017.
- [6] Raul. Amirpour, et al. "Enhancement of the broadband efficiency of a class-J power amplifier with varactor-based dynamic load modulation", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 27, No.2, pp. 180-182, 2017.
- [7] A. Z. Markos, K. Bathich, D. Gruner, O. Bengtsson, and G. Boeck, "A 4W GaN power amplifier for C-band application", in German Microw. Symp.Dig., pp. 118-121, Mar. 2010.
- [8] P. Colantonio, et al., "A C-band high-efficiency second-harmonic-tuned hybrid power amplifier in GaN technology", IEEE Trans. Microw. TheoryTechn., vol. 54, no. 6, pp. 2713-2722, Jun. 2006.
- [9] R. Wu, J. Lopez, Y. Li, and D. Y. C. Lie, "A highly efficient 1-Watt broadband class-J SiGe power amplifier at 700 MHz", IEEE 12th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 69-72, 2012.

نشان دهنده حذف هارمونیک های ناخواسته موجود در پاسخ بوسیله فیلتر طراحی و قرار داده شده در ساختار می باشد. در شکل (۲۳) نمودار پراکندگی ساختار تقویت کننده توان J پیشنهادی قبل و بعد از قرار دادن فیلتر در ساختار آورده شده است. همانطور که قابل ملاحظه می باشد در باند قطع مقدار هارمونیک ها بطور قابل قبولی بیشتر تضعیف شده اند این در حالی است که مقدار تلفات جایگذاری در باند عبور بسیار اندک و قابل چشم پوشی می باشد. جدول ۲ مقایسه ای بین پارامتر های تقویت کننده طراحی شده با تقویت کننده های طراحی شده پیشین را نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده می شود تقویت کننده توان کلاس J ارائه شده دارای بازده، بازده توان افزوده و بهره بهتری در مقایسه با کارهای گذشته می باشد.



شکل (۲۳): نمودار پراکندگی قبل و بعد از قرار دادن فیلتر در ساختار تقویت کننده توان کلاس J پیشنهادی

جدول (۲): مقایسه نتایج تقویت کننده توان ارائه شده با مراجع

مرجع	بازده توان افزوده (%)	بهره (dB)	بازده درین (%)	تکنولوژی	کلاس تقویت کننده
[۵]	NA	11.8-13.5	44-55	GaN	Class J
[۶]	40-50	10.5-15	NA	GaN	Class J
[۷]	18	8	40	GaN	Class AB
[۸]	46	8	60	GaN	PA- HT
[۹]	60	11	68.9	SiGe	Class J
[۱۰]	48	18	50	LDMOS	Class AB
[۱۱]	68	19	NA	GaN	Class AB
[۱۲]	NA	11-15	64-76	GaN	PA- HT
[۱۳]	NA	8.6-10.2	56-70	GAN	Class J
[۱۴]	65	11.8	60-70.1	GAN	Class B/J
[۱۵]	NA	15	53.5	GaN	Class J
[۱۶]	16	13.7	18	NA	Class J
[۱۷]	NA	7.5-11.4	52.4-65.6	GaN	Class J/F ⁻¹
کار پیشنهادی بدون فیلتر	58	8.5	69	GaAs	Class J
کار پیشنهادی با فیلتر	69	8	77.9	GaAs	Class J

- IET Microwaves, Antennas & Propagation, 13(11), 1860-1865
- [23] Agilent Technology Datasheet, "Low Noise Pseudomorphic HEMT in a Surface Mount Plastic Package ATF-34143".
- [10] S. A. Mohadeskasaei, X. Zhou, S. M. M. Demneh, and S. U. Abdullahi, "A 10watt class-AB pulse power amplifier", IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 1-4, 2016.
- [11] M. Iqbal, and A. Piacibello, "A 5W class-AB power amplifier based on a GaN HEMT for LTE communication band", 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 1-4, 2016.
- [12] J. Xia, X. W. Zhu, and L. Zhang, "A linearized 2-3.5GHz highly efficient harmonic-tuned power amplifier exploiting stepped-impedance filtering matching network", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 24, No. 9, 602-604, Sep. 2014
- [13] Wenjie. Feng, Wenbin Wu, Xin Yu Zhou, Wenquan Che, and Yongrong Shi. "Broadband high-efficiency quasi-class-J power amplifier based on nonlinear output capacitance effect", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs., Vol. 69, no. 4, pp. 2091-2095, 2022.
- [14] Y. Latha, Asha. Mary, and Rawat. Karun, "Design of ultra-wideband power amplifier based on extended resistive continuous class B/J mode", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs., Vol. 69, no. 2, pp. 419-423, 2021.
- [15] Morales-Fernandez, Ainhoa, Monica Fernandez-Barciela, Fernando Isasi-Vicente, Fernando Martin-Rodriguez, and Paul J. Tasker. "Dual-Band class J power amplifier at 2.45 and 5.8 GHz for UAVs communications", IEEE Access, Vol. 10, pp. 48673-48680, 2022.
- [16] Sridhar, Nagisetty, Chinnaiyan Senthilpari, R. Mardeni, Wong Hin Yong, and T. Nandhakumar. "A low power, highly efficient, linear, enhanced wideband Class-J mode power amplifier for 5G applications", *Scientific Reports* Vol. 12, no. 1, pp.8101, 2022.
- [17] Jia Xing. Sun, Lin. Feng, Li. Bo, Sun. Houjun, and Chen. Wenhua, "Continuous Class-J/F⁻¹ Mode Asymmetrical Doherty Power Amplifier With Extended Bandwidth and Enhanced Efficiency", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 71, no. 11, pp. 4814 – 4825, 2023.
- [۱۸] مجدی نسب، الهام. جان نثاری، ابومسلم. "جبران سازی همزمان غیرخطی تقویت کننده توان و عدم تطبیق های مدولاتور تربیعی بر مبنای مدل غیرخطی چند جمله ای های ژاکوبی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۹، شماره ۳، صفحات ۹۳-۱۰۳، ۱۴۰۱
- [۱۹] موذن، حمیدرضا. کریم زاده بائی، رقیه. احمدی. امیرحسین. "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 ماهواره ای"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۹، شماره ۳، صفحات ۸۳-۹۲، ۱۴۰۱
- [20] A. Alizadeh, S. Hassanzadehyamchi, A. Medi and S. Kiaei, "An X-Band Class-J Power Amplifier With Active Load Modulation to Boost Drain Efficiency", in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 67, no. 10, pp. 3364-3377, Oct. 2020, doi: 10.1109/TCSI.2020.2991184.
- [21] A. Alizadeh, S. Hassanzadehyamchi and A. Medi, "Integrated Output Matching Networks for Class-J/J-1 Power Amplifiers", in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 66, no. 8, pp. 2921-2934, Aug. 2019, doi: 10.1109/TCSI.2019.2912007
- [22] C. Liu, & Q. F. Cheng, (2019). Highly efficient broadband class-J power amplifier using modified multisection quarter-wave lines and short-circuited stubs.