

خطی سازی تقویت کننده های توان بالای فرکانس رادیویی (RF) به روش پیش اعوجاج با تولید اعوجاج مکعبی ترانزیستورهای ماسفت

محمدیونس انصاری موحد و محمدرضا متولی کسمائی

سیگنال های اعوجاجی شود [۱] و [۲]. برای جلوگیری از این گسترده گی طیفی در خروجی تقویت کننده بالای فرکانس رادیویی، سیگنال ها باید به صورت خطی تقویت شوند؛ به بیان دیگر آنها باید در داخل کانال مخابراتی خود بمانند تا با کانال های دیگر تداخل نداشته باشند [۳]. با توجه به ظهور فناوری های جدید در حوزه مخابرات، مهم ترین و کارآمدترین راهکار برای حل این مشکل، خطی سازی تقویت کننده های توان بالاست که یکی از چالش های مهم برای مهندسی طراحی است [۴]. هنگامی که سیگنال ورودی حاوی چندین فرکانس مختلف باشد، نوعی از سیگنال های اعوجاجی مزاحم به نام سیگنال اینترمدولاسیون مرتبه سوم^۱ (۳IMD) به دلیل نزدیک بودن فرکانس آنها به فرکانس سیگنال اصلی مورد توجه قرار می گیرند. این مؤلفه ها به علت محدودیت های ساخت فیلترهای معمول، قابل حذف نیستند. همچنین در برخی از سیستم های مخابراتی، حذف یا کاهش اثر سیگنال های اینترمدولاسیون مرتبه پنجم^۲ (۵IMD) نیز مهم است [۵]. فرکانس های سیگنال های مرتبه پنجم به اندازه مرتبه سوم به سیگنال های اصلی نزدیک نیستند؛ اما در برخی از کاربردها حذف این اعوجاج کار مشکلی است. در نتیجه مطلوب آن است که بتوان بدون استفاده از فیلتر، دامنه اعوجاج این مؤلفه های اعوجاجی را نیز کاهش داد [۶].

همچنین تقویت سیگنال های ورودی با پوش ثابت مشکل ساز نیست (برای مثال برای حالت سیگنال ورودی با یک فرکانس) [۶]. از آنجا که حداکثر توان پوش سیگنال ورودی در این حالت (حالت سیگنال ورودی با یک فرکانس) برابر با توان متوسط سیگنال است، تقویت کننده با یک نقطه ثابت در مشخصه تابع تبدیل (محدوده خطی در شکل ۱) عمل می کند [۷].

معمولاً تکنیک های خطی سازی به دو دسته اصلی تقسیم می شوند. دسته ای از سیگنال خطا در ورودی (و خروجی) تقویت کننده توان برای حذف سیگنال های اعوجاج خود تقویت کننده در خروجی (و ورودی) استفاده می کنند که به تکنیک های بازخورد^۳ (و رو به جلو^۴) معروف هستند و می توانند خطی بودن تقویت کننده را به قیمت بازدهی کم و پیچیدگی بالا بهبود بخشند [۷] و [۸]. دسته ای دیگر تغییرات مناسبی در دامنه و فاز برای به دست آوردن سیگنال ورودی معکوس و در نتیجه برای مقابله با اعوجاج تقویت کننده توان ایجاد می کنند. این نوع رویکرد، پیش اعوجاج^۵ نامیده می شود که دارای بازدهی بالاتر و حاوی مدارهای ساده تری در

چکیده: در این مقاله به روش پیش اعوجاج و با تولید اعوجاج مکعبی به وسیله ترانزیستور ماسفت، مؤلفه اعوجاج مرتبه سوم (۳IMD) و پنجم (۵IMD) یک تقویت کننده غیرخطی توان بالای فرکانس رادیویی کاهش می یابد. روش پیش اعوجاج در خطی سازی تقویت کننده های توان بالای فرکانس رادیویی برای سیستم های مخابراتی کاربردهای فراوانی دارد. ساختار این روش پیچیده نیست و می تواند به سادگی برای خطی سازی تقویت کننده های غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، اعوجاجی به عنوان اعوجاج مکمل در ورودی یک تقویت کننده غیرخطی قرار می گیرد تا با جمع دو اعوجاج (یعنی اعوجاج ناشی از خود تقویت کننده غیرخطی و اعوجاج مکمل ناشی از المان غیرخطی دیگر) تقویت کننده غیرخطی را خطی کند. میزان خطی سازی با این روش اگرچه خیلی قابل ملاحظه نیست، اما همین میزان خطی سازی هم برای بسیاری از سیستم های مخابراتی کافی است. مزیت عمده این روش سادگی مدار، بازدهی بالا و توانایی خطی سازی در یک پهنای باند فرکانسی نسبتاً بزرگ است. در این مقاله مقدار خطی سازی سیگنال های اعوجاج مرتبه سوم و پنجم تقویت کننده های توان بالا نسبت به کارهای مشابه قبلی بهتر شده و نتایج به کمک نرم افزار ADS نشان داده شده اند.

کلیدواژه: تقویت کننده توان بالای غیرخطی، روش پیش اعوجاج، اعوجاج مرتبه سوم و پنجم، اعوجاج مکعبی.

۱- مقدمه

پس از توسعه سیستم های مخابراتی، نیاز به افزایش نرخ ارسال داده ها و پهنای باند بزرگ تر و دسترسی سریع تر به داده ها بیشتر شده است [۱]. همزمان با افزایش بهبود سیستم های مخابراتی مدرن، خطی سازی المان های غیرخطی بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. ناکافی بودن پارامتر خطی یک المان غیرخطی (همچون تقویت کننده) به معنای تولید پدیده اعوجاج است. یکی از المان های ذاتاً غیرخطی مهم در یک سیستم مخابراتی، تقویت کننده توان است. تقویت کننده های توان بخش مهمی در فرستنده های RF هستند و مستقیماً خطی بودن، بازدهی و هزینه سیستم را تعیین می کنند.

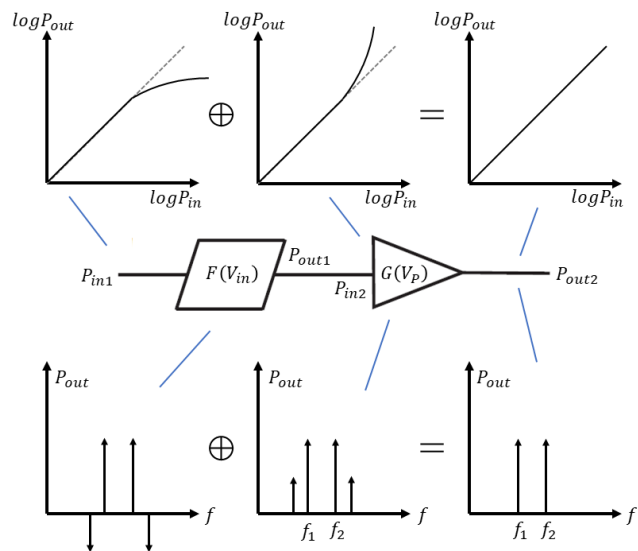
سیگنال های مخابراتی می توانند هر دو مدولاسیون فاز و دامنه را داشته باشند؛ لذا هر عامل غیرخطی در تقویت کننده توان بالای فرکانس رادیویی می تواند باعث ایجاد اعوجاج و گسترش طیف سیگنال ارسالی و تولید

این مقاله در تاریخ ۱۰ شهریور ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۲۶ آبان ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد. این تحقیق توسط دانشگاه قم پشتیبانی شده است.

محمدیونس انصاری موحد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه قم، قم، ایران، (email: younessansarey@gmail.com).

محمدرضا متولی کسمائی (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه قم، قم، ایران، (email: motavallireza@gmail.com).

1. 3rd-Order Intermodulation Distortion
2. 5th-Order Intermodulation Distortion
3. Feedback
4. Feedforward
5. Predistortion



شکل ۳: عملکرد سیستم پیش اعوجاج با نمایش مشخصه تابع تبدیل و طیف مدار تولیدکننده اعوجاج مکمل و تقویت کننده غیرخطی.

$$v_{out}(t) = c_1 v_{in}(t) + c_2 v_{in}^2(t) + c_3 v_{in}^3(t) \quad (2)$$

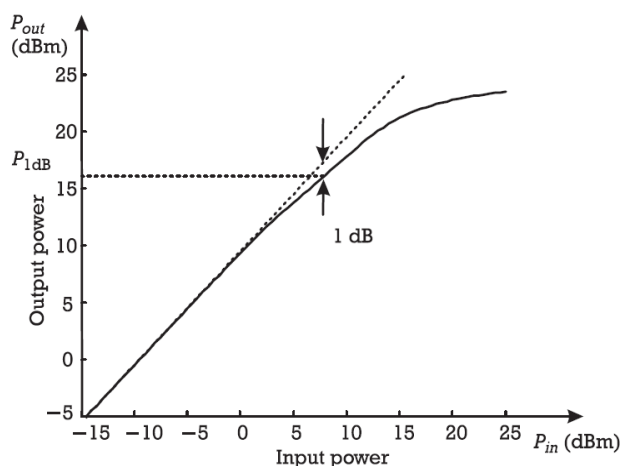
در (۲) مؤلفه های زوج در نظر گرفته نشده اند. از آنجا که تابع انتقال یک تقویت کننده، تابعی فرد است، مؤلفه های زوج در مقایسه با مؤلفه های فرد بسیار کوچک و قابل اغماض هستند. اساس کار تکنیک پیش اعوجاج در شکل ۲ نشان داده شده که در آن المان تولیدکننده اعوجاج در ورودی تقویت کننده قرار می گیرد تا با جمع دو اعوجاج، تقویت کننده غیرخطی را خطی کند. به بیان دیگر ثابت های بزرگ تر از درجه اول در (۲) حذف شده و یا اثرشان بسیار ناچیز خواهد بود. سیگنال ورودی قبل از اعمال به تقویت کننده غیرخطی به مداری اعمال می شود که مشخصه غیرخطی آن عکس مشخصه غیرخطی تقویت کننده است. بدین ترتیب اعوجاج سیگنال خروجی تقویت کننده غیرخطی کاهش می یابد و بنابراین مجموعه مدار تولیدکننده اعوجاج مکمل و تقویت کننده غیرخطی، مشخصه خطی و یا نزدیک به خطی خواهد داشت [۱۵].

شکل ۳ عملکرد تکنیک پیش اعوجاج را به همراه مشخصه تابع تبدیل و طیف فرکانسی خروجی نشان می دهد [۵]. مطابق شکل می توان بیان کرد که اگر V_{in} مدل تابع ریاضی تقویت کننده غیرخطی و $F(V_{in})$ مدل المان تولیدکننده اعوجاج باشد، در این صورت ولتاژ خروجی $G(F(V_{in}))$ یک تابع خطی از ولتاژ ورودی V_{in} خواهد بود.

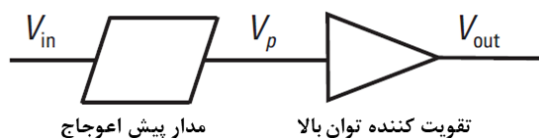
در قسمت بالای شکل ۳ انحراف از حالت تقویت کننده غیرخطی به وسیله اعوجاج مکمل تولید شده توسط المان غیرخطی دیگر حذف می شود و بهره تقویت کننده با افزایش توان و یا دامنه سیگنال ورودی به طور خطی افزایش می یابد. در قسمت پایینی شکل ۳ مشاهده می کنیم که ضمن افزایش خطی سیگنال و یا سیگنال های اصلی و همزمان با آن، اعوجاج حاصل از سیگنال های مرتبه سوم اینترمدولاسیون تولید شده در خروجی تقویت کننده غیرخطی در حالت ایده آل حذف شده و یا اثر آن کاهش می یابد.

برای نزدیک کردن مقادیر شبیه سازی به واقعیت از تست دو تن (دو فرکانس مختلف) استفاده می کنیم. فرض بر این است که سیگنال ورودی حاوی دو سیگنال ولتاژ سینوسی شکل با دامنه های برابر و فرکانس های مختلف f_1 و f_2 باشد

$$v_{in}(t) = v_{m1}(t) \cos \omega_1 t + v_{m2}(t) \cos \omega_2 t \quad (3)$$



شکل ۱: نمودار توان خروجی به توان ورودی تقویت کننده توان بالا (تابع تبدیل).



شکل ۲: ساختار کلی روش پیش اعوجاج.

مقایسه با مدارهای دسته اول است. با تولید مشخصه اعوجاجی در ورودی تقویت کننده غیرخطی که مکمل مشخصه اعوجاجی تقویت کننده غیرخطی است و جمع این دو اعوجاج، خطی بودن سیگنال خروجی تقویت کننده غیرخطی و در نتیجه سیستم مخابراتی تضمین می شود [۸]. از این تکنیک همچنین در سیستم های GSM^۱ تحت عنوان روش پیش اعوجاج آنالوگ/دیجیتال استفاده می شود [۹] و [۱۰].

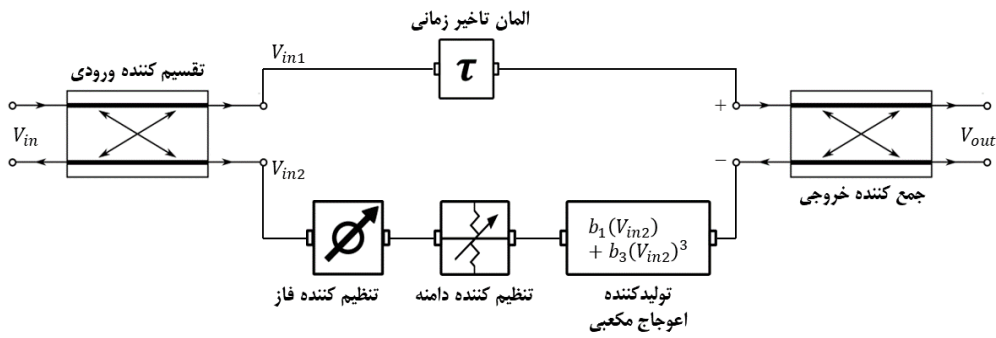
البته این امکان نیز وجود دارد که مکمل مشخصه اعوجاجی در خروجی تقویت کننده غیرخطی قرار گیرد و سپس جمع این دو اعوجاج، همدیگر را حذف کنند؛ اما این روش پیش اعوجاج کمتر مورد توجه قرار می گیرد، زیرا با توجه به توان خروجی نسبتاً بالای تقویت کننده، ساخت المان های مربوطه هزینه بیشتری دارد و نیز در این حالت اتلاف توان غیر قابل اجتناب در خروجی تقویت کننده منجر به کاهش قابل ملاحظه بازدهی سیستم تقویت کننده می شود. لذا اکثر سیستم های استفاده کننده از تکنیک پیش اعوجاج از تولید مکمل اعوجاجی در ورودی تقویت کننده غیرخطی و نه در خروجی آن بهره می برند [۱۱] و [۱۲].

۲- اساس کار تکنیک پیش اعوجاج

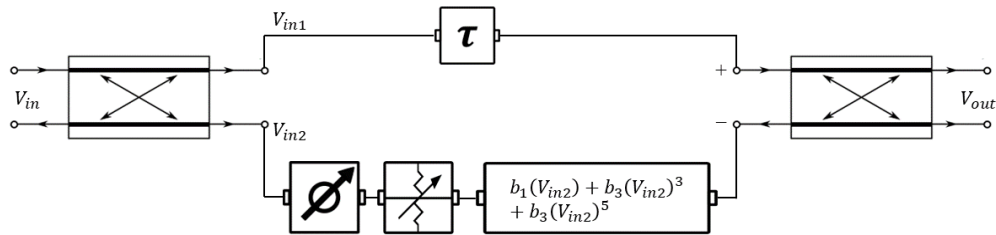
سیگنال خروجی یک تقویت کننده غیرخطی را می توان بر حسب ورودی آن به صورت زیر بسط داد [۱۳]

$$v_{out}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n v_{in}^n(t) \quad (1)$$

که $v_{out}(t)$ سیگنال خروجی و $v_{in}(t)$ سیگنال ورودی می باشد. همچنین c_n ثابت های بهره چندجمله ای هستند، بدین ترتیب که c ثابت بهره ولتاژ مستقیم DC، c_1 ثابت بهره خطی ولتاژ (برای سیگنال های با بهره کوچک) و c_2, c_3, \dots ثابت های بهره غیرخطی (مربعی، مکعبی و ...) هستند که موجب انحنای در مسیر خطی مشخصه تابع تبدیل تقویت کننده توان بالا در دامنه های ورودی بزرگ می شوند [۱۴]. رابطه (۱) برای پنج مؤلفه اول عبارت است از



شکل ۴: ساختار کلی اعوجاج مکعبی (به عنوان اعوجاج مکمل).



شکل ۵: ساختار اعوجاج مکمل مرتبه سوم و پنجم.

می‌توان (V) را به صورت زیر نیز نوشت

$$v_r(t) = b_1 \alpha T_1 v_{in}(t) + b_r \alpha^r T_1^r v_{in}^r(t) \quad (۸)$$

از آنجا که تولیدکننده اعوجاج مکعبی در سیستم پیش‌اعوجاج در ورودی تقویت‌کننده توان بالا قرار دارد، این سیگنال‌ها توان پایینی دارند و در نتیجه می‌توان از اتلاف ناچیز المان تأخیر زمانی صرف نظر کرد (اگرچه این سیگنال‌ها در نویز کل سیستم سهیم هستند). سیگنال خروجی که از تفریق و یا جمع دو سیگنال $v_r(t)$ و $v_1(t)$ به دست می‌آید برابر است با

$$v_{out}(t) = C_1 v_1(t) - T_r v_r(t) \quad (۹)$$

جایگذاری (۶) و (۸) در (۹) نتیجه می‌دهد

$$v_{out}(t) = (C_1 C_r - T_r b_1 \alpha T_1) v_{in}(t) - T_r b_r \alpha^r T_1^r v_{in}^r(t) \quad (۱۰)$$

اگر در (۱۰) داشته باشیم

$$C_1 C_r = T_r b_1 \alpha T_1 \quad (۱۱)$$

در این صورت عبارت خطی حذف خواهد شد. این کار با انتخاب مناسب دو توزیع‌کننده جهت‌دار ورودی (تقسیم‌کننده) و خروجی (جمع‌کننده) و ضریب تضعیف و فازهای ایجادشده از المان تأخیری انجام می‌شود. بنابراین سیگنال خروجی $v_{out}(t)$ با احتساب (۱۱) تبدیل می‌شود به

$$v_{out}(t) = -T_r b_r \alpha^r T_1^r v_{in}^r(t) \quad (۱۲)$$

رابطه (۱۲) یک اعوجاج مکعبی است. اگر دو توزیع‌کننده جهت‌دار A و B به نسبت مساوی، عمل تقسیم و جمع را در ورودی و خروجی انجام دهند، در این صورت (۱۱) و (۱۲) به ترتیب تبدیل می‌شوند به

$$b_1 \alpha = 1 \quad (۱۳)$$

و

$$v_{out}(t) = \frac{-b_r \alpha^r}{r} v_{in}^r(t) \quad (۱۴)$$

شکل ۵ ساختار کلی مدار تولیدکننده اعوجاج مکعبی برای مرتبه سوم و پنجم را نشان می‌دهد. با تعمیم (۸) به المان مرتبه پنجم می‌توان اعوجاج مرتبه پنجم تولیدشده توسط تقویت‌کننده غیرخطی را نیز حذف کرد. یعنی اگر به جای (۸) داشته باشیم

پس ولتاژ ورودی تقویت‌کننده (یا ولتاژ خروجی المان مکمل) برابر است با

$$v_p(t) = b_1 v_{in}(t) + b_r v_{in}^r(t) + b_\delta v_{in}^\delta(t) = b_1 [v_{in_1}(t) \cos \omega t + v_{in_r}(t) \cos \omega_r t] + b_r [v_{in_1}(t) \cos \omega t + v_{in_r}(t) \cos \omega_r t]^r + b_\delta [v_{in_1}(t) \cos \omega t + v_{in_r}(t) \cos \omega_r t]^\delta \quad (۴)$$

ولتاژ خروجی تقویت‌کننده طبق رابطه تابع تبدیل آن به دست می‌آید

$$v_{out_r}(t) = c_1 v_{in_1}(t) + c_r v_{in_r}^r(t) = c_1 \{b_1 [v_{in_1}(t) \cos \omega t + v_{in_r}(t) \cos \omega_r t]\} + c_r \{b_r [v_{in_1}(t) \cos \omega t + v_{in_r}(t) \cos \omega_r t]^r\}^r \quad (۵)$$

۳- تولید اعوجاج مکعبی با ترانزیستور ماسفت

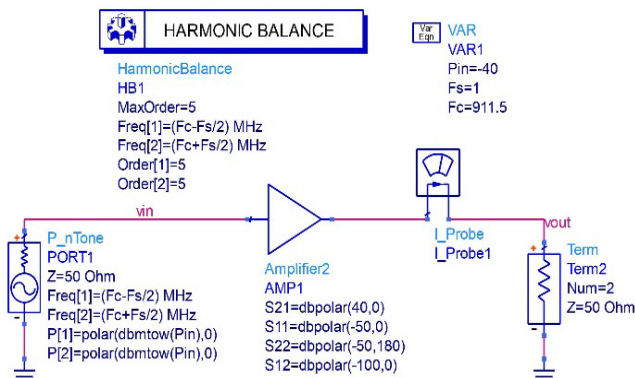
هدف اعوجاج مکعبی، حذف و یا به عبارتی کاهش اعوجاج درجه سوم تولیدشده توسط تقویت‌کننده‌های غیرخطی با استفاده از جمع فازی مناسب است. کاهش سیگنال‌های اعوجاج درجه سوم توسط تکنیک پیش‌اعوجاج قابل ملاحظه نیست، اما همین کاهش کم در عمل برای بسیاری از سیستم‌های مخابراتی گره‌گشاست.

ساختار کلی مدار اعوجاج مکعبی در شکل ۴ نشان داده شده است. سیگنال ورودی فرکانس رادیویی پس از ورود به یک توزیع‌کننده جهت‌دار به دو شاخه تقسیم می‌شود. سیگنال یکی از شاخه‌ها به المان غیرخطی تولیدکننده اعوجاج مکعبی به همراه تضعیف‌کننده دامنه و تغییردهنده فاز (برای تنظیم دامنه و فاز) و شاخه دیگر به المان تأخیر زمانی (برای جبران تأخیر زمانی شاخه دیگر و ترکیب دو سیگنال به‌طور همزمان) داده می‌شود. دو سیگنال ورودی جمع‌کننده $v_1(t)$ و $v_r(t)$ به ترتیب برابر هستند با

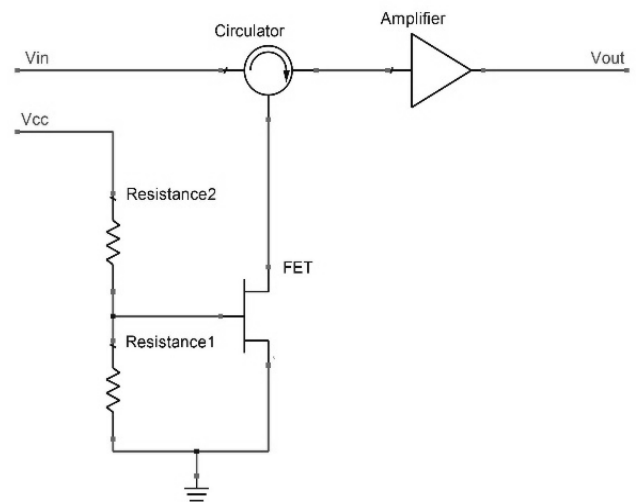
$$v_1(t) = v_{in_1}(t) = c_1 v_{in}(t) \quad (۶)$$

و

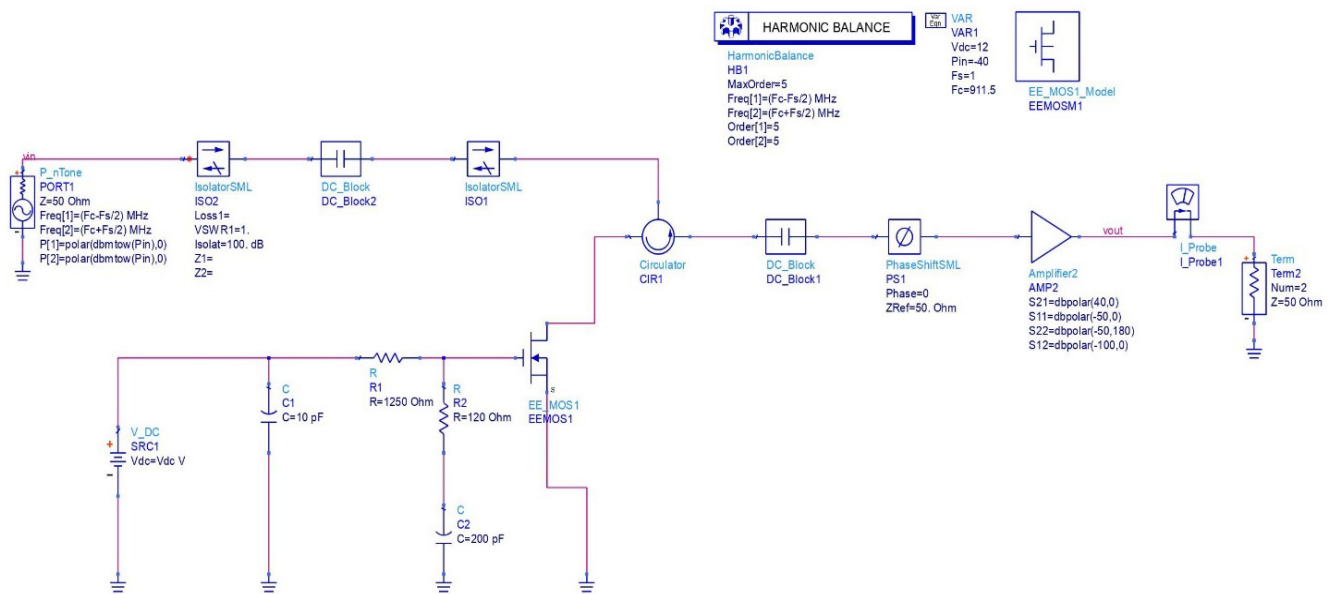
$$v_r(t) = b_1 v_{in_r}'(t) + b_r (v_{in_r}'(t))^r = b_1 (\alpha v_{in_r}(t)) + b_r (\alpha v_{in_r}(t))^r \quad (۷)$$



شکل ۷: شکل مدار تقویت کننده توان غیرخطی.



شکل ۶: تولید کننده اعوجاج مکعبی با ترانزیستورهای ماسفت.



شکل ۸: مدار تقویت کننده خطی شده با روش پیش اوجاج.

سر دیگر سیرکولاتور وصل است، عبور می کند و در نتیجه سیگنال برگشتی همراه با اعوجاج در خروجی سیرکولاتور ظاهر می شود.

۴- نتایج شبیه سازی

مدار شبیه سازی شده با اعمال سیگنال ورودی حاوی دو تن در فرکانس های ۹۱۱ و ۹۱۲ مگاهرتز تست شده است. شکل های ۷ و ۸ به ترتیب شماتیک تقویت کننده غیرخطی به طور مستقل (قبل از عمل خطی سازی) و شماتیک مدار پیش اوجاج طراحی شده با نرم افزار ADS^۱ را نشان می دهند.

شکل ۹ طیف خروجی سیگنال های اصلی و اینترمدولاسیون مرتبه سوم و پنجم تقویت کننده غیرخطی مورد استفاده در مدار پیش اوجاج را به طور مستقل و شکل ۱۰ همین طیف را بعد از عمل خطی سازی نشان می دهد. طیف های شکل ۹ و ۱۰ با تنظیم یکسان توان های خروجی هر دو مدار رسم شده است. در شکل ۱۱ و ۱۲ نیز توان های خروجی سیگنال های اصلی و اینترمدولاسیون مرتبه سوم و پنجم برای حالت قبل و بعد از عمل خطی سازی بر حسب توان ورودی مقایسه شده اند.

$$v_r(t) = b_1(\alpha v_{inr}(t)) + b_r(\alpha v_{inr}(t))^r + b_o(\alpha v_{inr}(t))^o \quad (15)$$

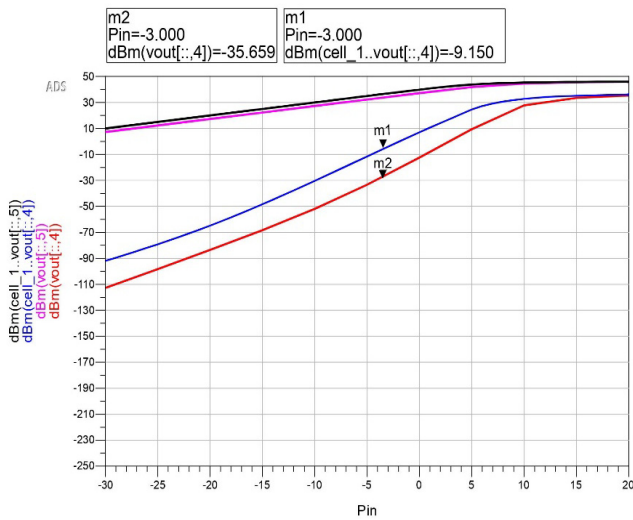
در این صورت سیگنال خروجی تبدیل می شود به

$$v_{out}(t) = -T_r b_r \alpha^r T_1^r v_{in}^r(t) - T_r b_o \alpha^o T_1^o v_{in}^o(t) \quad (16)$$

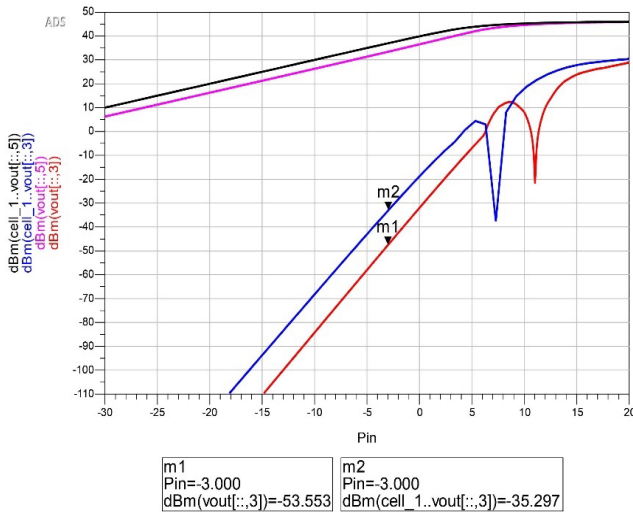
که ترکیبی از اعوجاج مرتبه سوم و پنجم می باشد.

برای تحقق اعوجاج حاوی مرتبه سوم و پنجم می توان از تقویت کننده های غیرخطی استفاده کرد. برای اهداف عملی به راحتی می توان با استفاده از فیلترهای مناسب یکی از اعوجاج های درجه سوم یا پنجم را انتخاب کرد. در منابع علمی روش های مختلفی برای خطی سازی تقویت کننده های توان بالا با تولید اعوجاج مکعبی وجود دارد که از جمله آن روش ها استفاده از ترانزیستور ماسفت نوع N است [۱۶] تا [۱۸]. علاوه بر نمونه های موجود در استفاده از ترانزیستور ماسفت از مدار شکل ۶ نیز می توان برای کاهش دامنه سیگنال های اعوجاجی مرتبه سوم و پنجم استفاده کرد که سادگی مدار آن و همچنین قابل ملاحظه بودن کاهش این سیگنال های مزاحم (نسبت به موارد مشابه) از ویژگی های آن است.

در این مدار از سیرکولاتور جهت ادغام سیگنال های اصلی و اینترمدولاسیون استفاده می شود. سیگنال ورودی فرکانس رادیویی وارد شده به سیرکولاتور از شاخه درین المان غیرخطی ترانزیستور که به



شکل ۱۱: مقایسه توان تابع تبدیل سیگنال‌های اصلی و اینترمدولاسیون مرتبه سوم دو مدار تقویت کننده خطی شده با پیش‌اعوجاج و تقویت کننده غیرخطی مستقل.



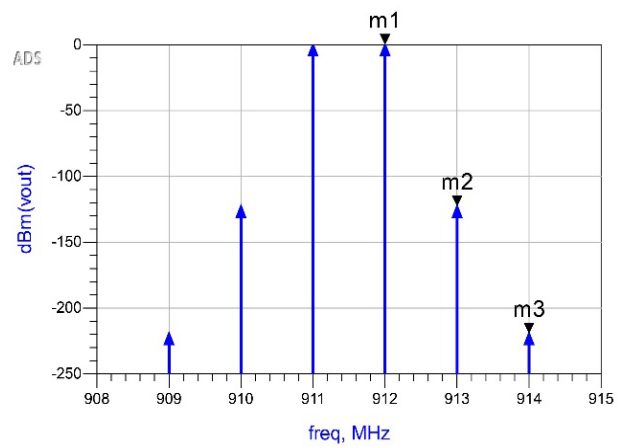
شکل ۱۲: مقایسه توان تابع تبدیل سیگنال‌های اصلی و اینترمدولاسیون مرتبه پنجم دو مدار تقویت کننده خطی شده با پیش‌اعوجاج و تقویت کننده غیرخطی مستقل.

شکل ۱۳ دامنه سیگنال‌های اعوجاجی مرتبه سوم و پنجم را قبل و بعد از خطی‌سازی با هم در یک نمودار مقایسه کرده و کاهش این سیگنال‌های اعوجاجی را نشان می‌دهد.

در جدول ۱ میزان کاهش سیگنال‌های اینترمدولاسیون مرتبه سوم و پنجم در حالت قبل و بعد از خطی‌سازی مقایسه شده است. همچنین در جدول ۲ این میزان کاهش سیگنال‌های مزاحم (یا به عبارت دیگر میزان خطی‌سازی) با رفرنس‌های دیگر مقایسه شده است.

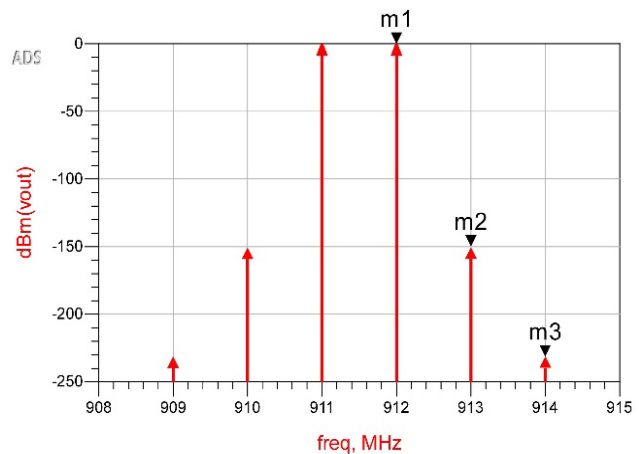
کاهش سیگنال‌های اینترمدولاسیون مرتبه سوم (۳IMD) نسبت به [۹]، ۱۲٫۵ dB یعنی ۷۰٪ و نسبت به [۱۰]، ۱۰٫۵ dB یعنی ۲۸٫۱٪ بهتر شده است. کاهش سیگنال‌های مذکور در [۱۰] نسبت به [۹]، ۲ dB یعنی ۶٪ تصحیح شده است.

سیگنال‌های اینترمدولاسیون مرتبه پنجم (۵IMD) نسبت به سیگنال‌های مرتبه سوم (۳IMD) در فاصله دورتری از سیگنال‌های اصلی (یا سیگنال‌های مطلوب) قرار دارند و در نتیجه حذف و یا کاهش آنها با فیلترهای مناسب امکان‌پذیر است. از این جهت معمولاً در عمل کاهش سیگنال‌های ۵IMD در اولویت اول نیست. همچنین روش ارائه شده در این مقاله نسبت به روش‌های دیگر تکنیک پیش‌اعوجاج ساده‌تر و در نتیجه هزینه ساخت آن نیز به مراتب کمتر است.



m1 freq=912.0 MHz dBm(vout)=-1.903E-5	m2 freq=913.0 MHz dBm(vout)=-122.730
m3 freq=914.0 MHz dBm(vout)=-219.405	

شکل ۹: طیف خروجی سیگنال‌های اصلی و اینترمدولاسیون مرتبه سوم و پنجم تقویت کننده غیرخطی مورد استفاده در مدار پیش‌اعوجاج (قبل از خطی‌سازی).

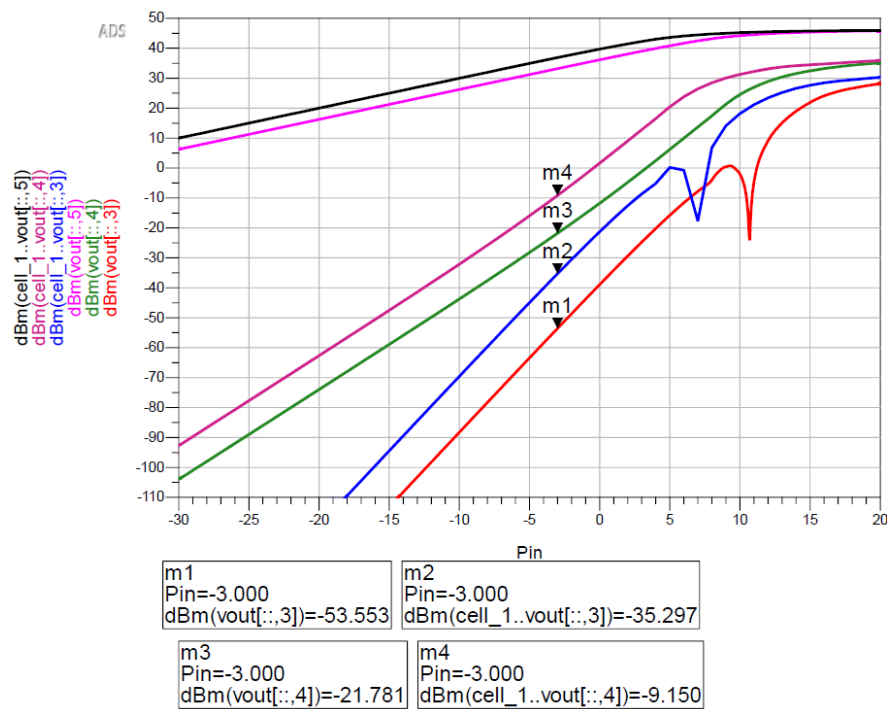


m1 freq=912.0 MHz dBm(vout)=-1.705	m2 freq=913.0 MHz dBm(vout)=-149.259
m3 freq=914.0 MHz dBm(vout)=-236.365	

شکل ۱۰: طیف خروجی سیگنال‌های اصلی و اینترمدولاسیون مرتبه سوم و مرتبه پنجم تقویت کننده غیرخطی مورد استفاده در مدار پیش‌اعوجاج (بعد از عمل خطی‌سازی).

در شکل ۱۱ سیگنال‌های اینترمدولاسیون مرتبه سوم تقویت کننده غیرخطی و در شکل ۱۲ سیگنال‌های اینترمدولاسیون مرتبه پنجم تقویت کننده غیرخطی برای توان‌های خروجی یکسان قبل و بعد از عمل خطی‌سازی با هم مقایسه شده‌اند. کاهش و یا به اصطلاح خطی‌سازی سیگنال‌های مزاحم (۳IMD) باید به گونه‌ای باشد که توان مفید قابل ملاحظه‌ای از دست نرود؛ لذا سعی شده که توان‌های خروجی هر دو مدار در محدوده اشباع تقریباً یکسان تنظیم شود.

همان طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود به ازای کاهش ۱٫۱۳ dB و ۱٫۷۳ dB از سیگنال‌های اصلی، ۲۶٫۵۰ dBc و ۱۸٫۲۵ dBc از سیگنال‌های ۳IMD و ۵IMD کاسته شده است. توجه شود که این میزان خطی‌سازی در توان -۳ dBm که توان بالایی در ناحیه خطی می‌باشد، حاصل شده است.



شکل ۱۳: مقایسه توان تابع تبدیل سیگنال‌های اصلی و اینترمدولاسیون مرتبه سوم و پنجم دو مدار تقویت کننده خطی شده با پیش‌اعوجاج و تقویت کننده غیر خطی مستقل.

جدول ۱: مقایسه کاهش سیگنال‌های اینترمدولاسیون مرتبه سوم و پنجم در حالت قبل و بعد از خطی سازی.

	P_{out}	$P_{\nabla IMD}$	$P_{\Delta IMD}$
بدون پیش‌اعوجاج	۴۷ dBm	-۹٫۱ dBm	-۳۵٫۲ dBm
با پیش‌اعوجاج	۴۷ dBm	-۳۵٫۶ dBm	-۵۳٫۵ dBm
تصحیح سیگنال‌ها	۴۷ dBm	۲۶٫۵ dBm	۱۸٫۲ dBm

جدول ۲: مقایسه تصحیح سیگنال‌های اینترمدولاسیون مرتبه سوم در این مقاله نسبت به کارهای دیگر.

	P_{out}	تصحیح سیگنال‌های ۳IMD	درصد تصحیح ۳IMD
مرجع [۹]	۳۹ dBm	۱۴ dBc	۵٫۶
مرجع [۱۰]	۳۴ dBm	۱۶ dBc	۹
مقاله در دسترس	۴۷ dBm	۲۶٫۵ dBc	۲۸٫۱-۷۰

۵- نتیجه گیری

طراحی ساختار مدارهای خطی سازی تقویت کننده‌های توان بالای RF با تکنیک پیش‌اعوجاج پیچیده نیست. میزان خطی سازی توسط این روش خیلی قابل ملاحظه نیست، اما همین میزان خطی سازی برای بسیاری از سیستم‌ها کافی است. در این مقاله با استفاده از تولید اعوجاج مکعبی ترانزیستورهای ماسفت، عمل خطی سازی یک تقویت کننده توان بالای RF با استفاده از حالت دو تن (یعنی دو فرکانس متفاوت) با اختلاف یک مگاهرتز انجام و مدار مربوطه طراحی و شبیه سازی شده است. امکان سنجی تئوری به صورت تجربی از طریق تست سیگنال دو تن تأیید می‌شود. در نتایج شبیه سازی ضمن مقایسه با کارهای مشابه قبلی، مؤلفه‌های اعوجاج مرتبه سوم (۳IMD) و مرتبه پنجم (۵IMD) به ترتیب به میزان ۲۶٫۵۰ dBc و ۱۸٫۲۵ dBc کاهش یافته‌اند که نشان دهنده افزایش خطی سازی تقویت کننده غیر خطی است.

مراجع

- [1] B. Andžej, V. Barzdenas, and A. Vasjanov, "Linearization as a solution for power amplifier imperfections: a review of methods," *Electronics*, vol. 10, no. 9, Article ID: 1073, May 2021.
- [2] P. L. Gilabert, J. R. Pérez-Cisneros, G. Montoro, M. Lavín, and J. García, "Digital predistortion linearization of a GaN HEMT push-pull power amplifier for cable applications with high fractional bandwidth," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 69, no. 2, pp. 516-527, Jun. 2023.
- [3] W. T. Tsai, C. Y. Liou, Z. A. Peng, and S. G. Mao, "Intermodulation distortion analysis for power amplifier with various collector voltages," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Radio-Frequency Integration Technology, RFIT'18*, 3 pp., Melbourne, Australia, 15-17 Aug. 2018.
- [4] S. Wang, P. M. Ferreira, and A. Benlarbi-Delai, "Physics informed spiking neural networks: application to digital predistortion for power amplifier linearization," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 48441-48453, 2023.
- [5] C. B. Haskins, *Diode Predistortion Linearization for Power Amplifier RFICs in Digital Radios*, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Apr. 2000.
- [6] C. S. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 2006.
- [7] J. Pedro and N. Carvalho, *Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits*, Artech House, 2003.
- [8] S. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Book, 2nd Edition, Artech, 2006.
- [9] Q. Cai, W. Che, and K. Ma, "A linear GaN power amplifier using novel transistor based analog predistortion method," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications, IMWS-AMP'16*, 4 pp., Chengdu, China, 20-22 Jul. 2016.
- [10] Q. Cai, W. Che, K. Ma, and M. Zhang, "A simplified transistor based analog predistorter for a GaN Power amplifier," *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 3, pp. 326-330, Mar. 2018.
- [11] F. G. Minenna, Y. Elskens, and F. Doveil, "The traveling-wave tube in the history of telecommunication," *The European Physical Journal H*, vol. 44, 36 pp., 2019.
- [12] J. Carvers, "Amplifier linearization using a digital predistorter with fast adaptation and low memory requirements," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 39, no. 4, pp. 473-382, Nov. 1990.
- [13] N. B. Carvalho and J. C. Pedro, *Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits*, Artech, 2003.
- [14] N. Safari, P. Fedorenko, J. S. Kenney, and T. Roste, "Spline-based model for digital predistortion of wide-band signals for high power

محمد یونس انصاری در سال ۱۴۰۱ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را دانشگاه قم دریافت نمود. نامبرده از پائیز ۱۴۰۱ مشغول به تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد دانشگاه قم بوده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند انواع اعوجاج‌ها در سیستم‌های مخابراتی، خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های توان بالای فرکانس رادیویی، کنترل و هوشمندسازی سیستم‌های مخابراتی می‌باشد.

محمد رضا متولی کسمائی در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی خود را از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد و دکتری را در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۸ به ترتیب در رشته‌های مهندسی الکترونیک و مهندسی الکترونیک فرکانس‌های بالا از دانشگاه‌های بوخوم و دیسبورگ آلمان دریافت نمود. نامبرده در حین تحصیل در آلمان با برخی از شرکت‌های آلمانی در انجام برخی پروژه‌های مرتبط با رشته برق نیز همکاری داشته است. از سال ۱۳۹۰ ایشان عضو هیأت علمی گروه مخابرات دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارهای الکترونیکی به کمک تقویت‌کننده‌های عملیاتی، تقویت‌کننده‌های توان بالای RF، خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های توان بالا و کاربرد آنها در سیستم‌های مایکروویو و ماهواره.

amplifier linearization," in *Proc. IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp.*, pp. 1441-1444, Honolulu, HI, USA, 03-08 Jun. 2007.

- [15] M. Xiao, *Novel Predistortion Techniques for RF Power Amplifiers*, Ph.D. Dissertation Thesis University of Birmingham, Oct. 2009.
- [16] P. Kenington, *High Linearity RF Amplifier Design*, Book, Artech House, 2000.
- [17] S. Bhardwaj, S. Moallemi, and J. Kitchen, "A review of hybrid supply modulators in CMOS technologies for envelope tracking PAs," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 38, no. 5, pp. 6036-6062, May 2023.
- [18] J. A. G. Aguilar, C. V. Rosales, and E. T. Cuautle, "Automated driving of GaN chireix power amplifier for the digital predistortion linearization," *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 6, pp. 1887-1891, Jun. 2021.