بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

بررسی و طراحی یک تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی خطی با استفاده از روش پیش‌اعوجاج

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک

مرضیه صفاری خوزانی

استاد راهنما

دکتر رسول دهقانی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق – الکترونیک خانم مرضیه صفاری خوزانی
تحت عنوان

بررسی و طراحی یک تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی خطی با استفاده از روش پیش‌اعوجاج

در تاریخ ۱۳۹۰/۱/۲۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر رسول دهقانی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر اصغر غلامی
۳- استاد داور	دکتر سید مسعود سیدی
۴- استاد داور	دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمود مدرس هاشمی

"الحمدلله الذی اسئله و یعطینی"

خداوند منان را سپاس می گویم که به من توفیق داد تا این پایان نامه را به انجام رسانم.

از استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر رسول دهقانی متشکرم که مرا در انجام این پایان نامه یاری نمودند و همواره مشوق و انگیزه دهنده به من بودند.

از خانواده‌ی عزیزم به خاطر زحمات بی‌دریغشان و حمایت‌های همه‌جانبه‌شان سپاسگزارم هر چند زبان از بیان سپاسی درخور ایشان قاصر است.

از خداوند منان آرزوی توفیق روز افزون را برای همه‌ی این عزیزان خواستارم.

مرضیه صفاری

پنجم اردیبهشت ماه سال یکهزار سیصد و نود

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز،

و خواهر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱
فصل اول:مقدمه
۱-۱ جایگاه تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی در سیستم‌های مخابراتی ۴
۱-۲ روند ارائه‌ی مطالب ۷
فصل دوم: معرفی تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی
۲-۱ ساختار کلی تقویت‌کننده‌ی توان ۹
۲-۲ پارامترهای تقویت‌کننده‌ی توان ۹
۲-۲-۱ توان خروجی ۱۰
۲-۲-۲ بازده ۱۱
۲-۲-۳ بهره‌ی توان ۱۱
۲-۲-۴ خطی بودن ۱۲
- نسبت توان کانال مجاور(ACPR) ۱۳
- اندازه ی بردار خطا(EVM) ۱۴
- نقطه تقاطع مرتبه سوم(IP3) ۱۶
۲-۳ طبقه بندی تقویت‌کننده‌های توان ۱۷
۲-۳-۱ تقویت‌کننده‌های توان خطی ۱۷
- کلاس A ۱۷
- کلاس B ۱۸
- کلاس C ۲۰
۲-۳-۲ تقویت‌کننده‌های توان سوئیچینگ ۲۱
- کلاس D ۲۲
- کلاس E ۲۳
- کلاس F ۲۵
۲-۳-۳ مقایسه ۲۷
فصل سوم: خطی سازی تقویت کننده های توان
۳-۱ اهمیت خطی‌سازی تقویت‌کننده‌ی توان ۲۹
۳-۲ روش‌های خطی‌سازی تقویت‌کننده‌ی توان ۳۲
۳-۲-۱ فیدبک دکارتی ۳۲
۳-۲-۲ فیدبک قطبی ۳۳

۳-۲-۳ پیش‌خور ۳۴
۳-۲-۴ تقویت خطی با عناصر غیرخطی (LINC) ۳۶
۳-۲-۵ حذف و بازیافت پوش(EER) ۳۷
۳-۲-۶ پیش‌اعوجاج ۳۹
- پیش‌اعوجاج دیجیتال بر پایه‌ی جدول جستجو ۴۲
. پیش اعوجاج با نگاشت مستقیم ۴۲
. پیش‌اعوجاج با بهره‌ی مختلط ۴۴
- اثر حافظه در تقویت‌کننده‌های توان ۴۵
- پیش‌اعوجاج دیجیتال بر پایه‌ی مدل کردن تقویت‌کننده‌ی توان ۴۷
فصل چهارم: خطی‌سازی یک تقویت‌کننده‌ی توان CMOS با استفاده از پیش‌اعوجاج دیجیتال برپایه‌ی چندجمله‌ای باحافظه
۴-۱ پیش‌اعوجاج دیجیتال برپایه‌ی چندجمله‌ای باحافظه با روش یادگیری غیرمستقیم ۵۳
۴-۱-۱ اصلاح ضرایب پیش‌اعوجاج B با الگوریتم وفقی LMS ۵۶
۴-۱-۲ اصلاح ضرایب پیش‌اعوجاج B با الگوریتم وفقی RLS ۵۶
۴-۲ تقویت‌کننده‌ی توان CMOS با ساختار موازی کلاس‌های AوAB ۵۷
۴-۲-۱ معرفی ساختار تقویت‌کننده‌ی توان ۵۸
۴-۲-۲ طراحی شبکه‌ی تطبیق امپدانس با استفاده از شبیه‌سازی load-pull ۶۱
۴-۲-۳ نتایج شبیه‌سازی مدار طراحی شده برای تقویت‌کننده‌ی توان ۶۳
۴-۳ نتایج شبیه‌سازی حاصل از خطی‌سازی تقویت‌کننده‌ی توان ۶۴
فصل پنجم: نتیجه گیری
۵-۱ جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری ۷۴
۵-۲ پیشنهادات ۷۹
مراجع ۸۱

چکیده

یکی از اجزای اصلی در یک فرستنده‌ی مخابراتی تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی می‌باشد. از آن‌جایی که در نسل‌های جدید مخابرات بی‌سیم از مدولاسیون‌هایی نظیر OFDM استفاده می‌شود و با توجه به تغییرات شدید دامنه‌ی سیگنال ارسالی در این مدولاسیون، خطی بودن تقویت‌کننده‌ی توان اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. زیرا خطی نبودن تقویت‌کننده‌ی توان در این نوع از مدولاسیون، باعث از دست رفتن اطلاعات سیگنال و گستردگی طیف آن به باندهای فرکانسی مجاور می‌شود. از طرف دیگر چون تقویت‌کننده‌ی توان پرمصرف‌ترین بخش فرستنده است طراحی آن با بازدهی بالا برای یک فرستنده‌ی قابل حمل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تقویت‌کننده‌های توان رابطه‌ی معکوسی بین بازده و میزان خطی بودن وجود دارد و عمدتا تقویت کننده‌های توان با بازده بالا، غیرخطی‌تر هستند. بنابراین برای داشتن بازده بالا در عین خطی بودن می‌توان تقویت‌کننده را با بازده بالا طراحی کرده و سپس روش خطی‌سازی به آن اعمال نمود. با توجه به اینکه امروزه سعی بر این است که طراحی مدارها حتی الامکان در حوزه‌ی دیجیتال انجام گیرد، از میان انواع روش‌های خطی‌سازی، روش پیش‌اعوجاج دیجیتال مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است. از میان روش‌هایی که برای پیاده‌سازی بلوک پیش‌اعوجاج دیجیتال وجود دارد روش پیاده‌سازی با مدل کردن تقویت‌کننده‌ی توان روش مناسب‌تری به نظر می‌رسد. زیرا با استفاده از این روش می توان اثر حافظه را نیز در تقویت‌کننده‌های توان جبران کرد. بنابراین روشی که در این پایان‌نامه به منظور خطی‌سازی تقویت‌کننده‌ی توان استفاده شده است روش پیش‌اعوجاج دیجیتال برپایه‌ی چندجمله‌ای باحافظه با روش یادگیری غیرمستقیم می‌باشد. چندجمله‌ای باحافظه مدلی دقیق و در عین حال ساده برای مدل کردن سیستم‌های غیرخطی حافظه‌دار می باشد. هدف در این پایان‌نامه بررسی عملکرد روش مذکور بر روی تقویت‌کننده‌های توان CMOS می‌باشد. روش خطی‌سازی مذکور بر روی یک تقویت‌کننده‌ی توان CMOS با ساختار موازی کلاس‌های AوAB پیاده‌سازی شده است و در شبیه‌سازی محدودیت‌های عملی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از روش خطی‌سازی مذکور برای توان خروجی ۱۸/۱dBm و بازده افزوده‌ی توان ۲۶/۸٪ پوشش طیفی WiMAX ارضا می‌شود و مقادیر اعوجاج داخل باند و خارج از باند ناشی از غیرخطی بودن تقویت‌کننده‌ی توان به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از سنتز و پیاده‌سازی پیش‌اعوجاج دیجیتال وفقی بر روی تراشه‌ی FPGA نیز نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: ۱- تقویت کننده‌ی توان رادیویی ۲- بازده افزوده‌ی توان ۳- OFDM ۴- پیش‌اعوجاج دیجیتال برپایه‌ی چندجمله‌ای باحافظه ۵- اثر حافظه.

فصل اول
مقدمه

مخابرات بی‌سیم بدون شک سریع‌ترین رشد را در بین قسمت‌های مختلف صنعت مخابرات داراست و به همین علت توجه عمومی را به سمت خود جلب کرده است. سیستم‌های مخابرات سلولی در دهه‌ی گذشته رشد نمایی پیدا کرده است و هم‌اکنون بیش از ۲ میلیارد نفر در سطح دنیا از این سیستم‌ها استفاده می‌کنند. در واقع محصولات مخابرات بی‌سیم نظیر تلفن‌های همراه، شبکه‌های بی‌سیم محلی[۱]، سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی[۲]، سیستم‌های شناسایی رادیویی[۳] و ... در بیش‌تر کشورها به جزء جدایی‌ناپذیر زندگی روزمره تبدیل شده است. هر روزه هزاران نفر در دنیا به کاربران تلفن‌های سلولی اضافه می‌شوند به گونه‌ای که در دهه‌ی اخیردر بسیاری از کشورها تعداد تلفن‌های همراه از تعداد تلفن‌های ثابت واگذار شده بیش‌تر است. به علاوه امروزه کاربردهای جدیدی نظیر شبکه‌های حسگر بی‌سیم[۴] و استفاده از سیستم‌های کنترل از راه دور در پزشکی[۵] نیز مطرح شده‌اند. این مسائل باعث شده‌است که آینده‌ای که برای مخابرات بی‌سیم تصور می‌شود آینده‌ی بسیار روشنی باشد و سازندگان رقیب را به تولید فزاینده‌ی سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم ارزان‌تر، کاراتر و با توان مصرفی کم‌تر واداشته است.

---

۱ Wireless Local Area Network(WLAN)
۲ Global Positioning System(GPS)
۳ RF Identification(RFID)
۴ Wireless sensor networks
۵ Remote telemedicine

انتخاب تکنولوژی به منظور پیاده‌سازی مدارات مجتمع آنالوگ و فرکانس بالا به‌کار رفته در سیستم‌های مخابراتی یکی از مواردی‌ست که در سال‌های اخیر دستخوش تغییراتی شده است. به طورکلی کیفیت عملکرد، هزینه و زمان مورد نیاز برای ارائه به بازار، سه پارامتری هستند که در انتخاب تکنولوژی در صنعت فرکانس بالا تعیین‌کننده می‌باشند. در گذشته تکنولوژی‌هایی که برای مدارات فرکانس بالا مورد استفاده قرار می‌گرفتند عبارت بودند از: GaAs و Silicon Bipolar. در حالیکه تکنولوژی GaAs دارای مزایایی نظیر بالا بودن حاصلضرب ولتاژ شکست در فرکانس قطع و سلف‌ها و خازن‌های با کیفیت بالا می‌باشد، تکنولوژی Bipolar قادر است فشرده‌سازی بیش‌تری را همراه با هزینه‌ی پایین‌تر فراهم آورد. در نتیجه در بیش‌تر موارد از این تکنولوژی به منظور پیاده‌سازی مدارهای آنالوگ و دیجیتال استفاده می‌شد.[۱] اما با ادامه‌ی روند کاهش ابعاد ترانزیستورها در تکنولوژی CMOS که مزایای زیادی را برای مدارات دیجیتال در سه دهه‌ی گذشته فراهم آورده است، بسیاری از مدارات فرکانس بالا که در گذشته تنها با استفاده از تکنولوژی‌های GaAs و Bipolar محقق می‌شدند نیز امکان پیاده‌سازی با استفاده از این تکنولوژی را یافته‌اند. پیاده‌سازی مدارات فرکانس بالا با استفاده از تکنولوژی CMOS دارای مزایای زیادی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به کاهش هزینه‌ی ساخت مدارات فرکانس بالا به دلیل عدم نیاز به پروسه‌ی جدا و کاهش زمان رسیدن محصول به بازار در اثر استفاده از یک پروسه برای تمامی مدارات مجتمع اشاره کرد. [۲]

با گسترش روز افزون مخابرات سیار، اهمیت طراحی تمامی بخش‌های فرستنده-گیرنده‌ی یک سیستم مخابراتی به صورت مجتمع بر روی یک تراشه بیش‌تر شده است. به چنین سیستمی SoC[۱] گفته می‌شود که شامل تمامی مدارات آنالوگ، دیجیتال و فرکانس بالای یک سیستم مخابراتی می‌باشد. در واقع مهم‌ترین دستاورد استفاده از تکنولوژی CMOS برای مدارات آنالوگ و فرکانس بالا امکان تحقق چنین سیستم‌هایی‌ست که باعث کاهش هزینه‌ها و کاهش توان مصرفی در سیستم‌های مخابراتی قابل حمل می‌گردند. سیستم‌های SoC به لطف این امکان در سال‌های اخیر از رشد چشمگیری برخوردار بوده‌اند.

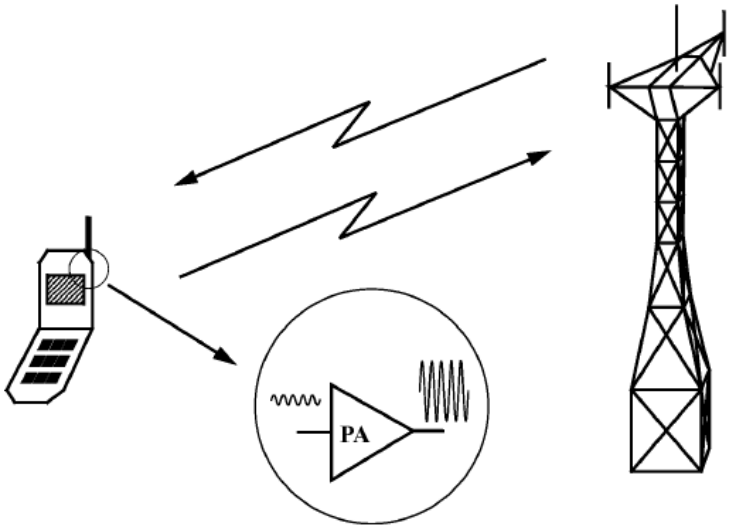
البته استفاده از تکنولوژی CMOS برای کاربردهای آنالوگ و فرکانس بالا موانعی نیز بر سر راه خود دارد چرا که این تکنولوژی از ابتدا برای مدارات دیجیتال طراحی شده است و برخی از از خصوصیات آن برای مدارات آنالوگ و فرکانس بالا مناسب نمی‌باشد. تعدادی از این خصوصیات منفی عبارتند از: جریان‌دهی پایین عناصر اکتیو، کیفیت پایین عناصر پسیو ساخته شده در پروسه نظیر سلف‌ها و خازن‌ها و محدودیت‌های ولتاژ تغذیه که توسط مدارات دیجیتال تحمیل می‌شوند. اما با وجود این مشکلات طراحان آنالوگ موفق به حل آن‌ها شده‌اند و امروزه تکنولوژی CMOS به طور وسیع در پیاده‌سازی مدارهای فرکانس بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۲و۳]

---

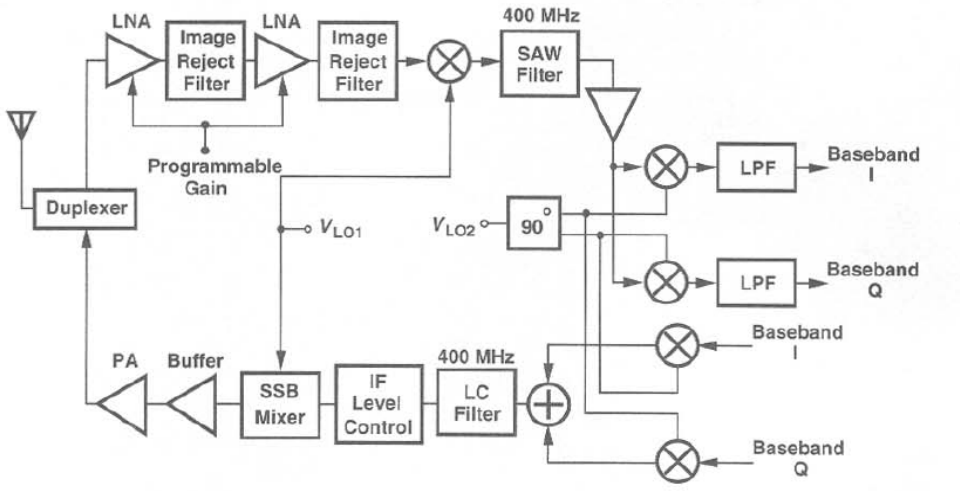
[۱] System on Chip

۱-۱ جایگاه تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی در سیستم‌های مخابراتی

یکی از اجزای اصلی و اجتناب ناپذیر یک فرستنده‌ی مخابراتی تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی[۱] می‌باشد. تقویت‌کننده‌ی توان در واقع آخرین بخش یک فرستنده‌ی مخابراتی‌ست که توان سیگنال را تا سطح توان لازم برای تحویل به آنتن تقویت می‌کند. شکل‌های ۱-۱ و ۱-۲ جایگاه و نقش تقویت‌کننده‌ی توان را در سیستم‌های مخابراتی نشان می‌دهند.



شکل ۱-۱- نقش تقویت‌کننده‌ی توان در یک سیستم مخابرات سلولی.



شکل ۱-۲- ساختار یک فرستنده-گیرنده‌ی GSM وجایگاه تقویت‌کننده‌ی توان در آن[۱].

در سیستم‌های مخابراتی قابل حمل مصرف توان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین در این سیستم‌ها مطلوب این است که اندازه و وزن آن‌ها حتی‌الامکان پایین باشد که در واقع در چنین سیستم‌هایی اندازه و وزن باتری

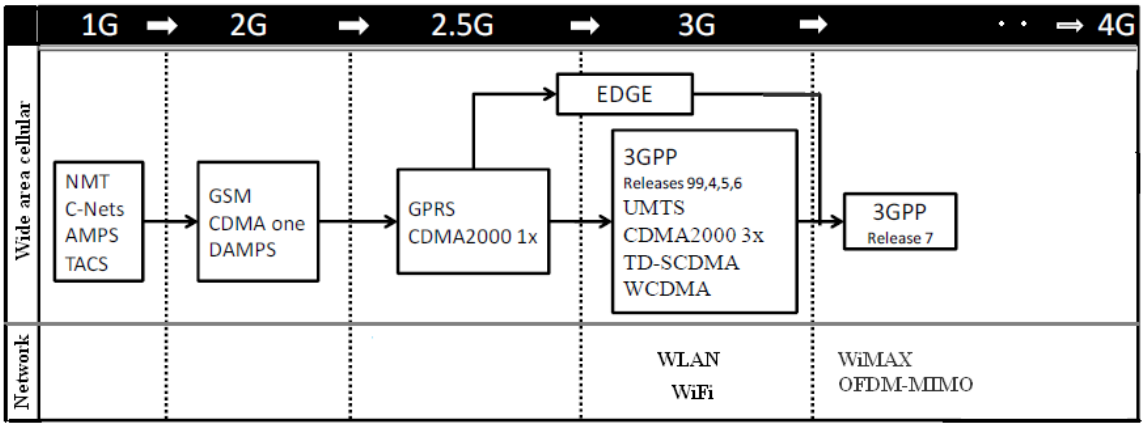
[۱] RF Power Amplifier

نقش تعیین کننده‌ای را در اندازه و وزن کل سیستم دارا می‌باشد. بنابراین در سیستم‌های مخابراتی قابل حمل اندازه، وزن و طول عمر باتری استفاده شده در آن‌ها از جمله پارامترهای مهمی هستند که باید در نظر گرفته شوند. هرچقدر ولتاژ تغذیه‌ی مورد نیاز برای چنین سیستم‌هایی کم‌تر باشد اندازه و وزن باتری و در نتیجه اندازه و وزن کل سیستم کم‌تر خواهد بود. این عوامل سبب می‌شوند که در سیستم‌های مخابراتی قابل حمل به دنبال بازده توان هرچه بیش‌تر این سیستم‌ها باشیم. بازده توان یک سیستم مخابراتی نشان دهنده‌ی میزان قابلیت سیستم در انتقال اطلاعات در کم‌ترین توان مصرفی ممکن می‌باشد. از آن‌جایی که تقویت‌کننده‌ی توان پرمصرف‌ترین بخش در یک فرستنده-گیرنده‌ی مخابراتی محسوب می‌شود، بازده آن نقش تعیین کننده‌ای در بازده کل سیستم خواهد داشت. بنابراین طراحی تقویت‌کننده‌ی توان با بازدهی بالا به ویژه در یک فرستنده‌ی قابل حمل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر چون تقویت‌کننده‌ی توان آخرین بخش یک فرستنده‌ی مخابراتی‌ست تاثیر آن بر روی کیفیت سیگنال ارسالی نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

در نسل‌های اول و دوم مخابرات بی‌سیم نظیر AMPS[۱] و GSM[۲] (که به ترتیب از مدولاسیون‌های FM[۳] و GMSK[۴] استفاده می‌کنند) سیگنال ارسالی دامنه‌ی ثابتی دارد. بنابراین در این سیستم‌ها نیازی به خطی بودن تقویت‌کننده‌ی توان نیست و می‌توان سیگنال مورد نظر را بدون هیچ مشکلی با بازده توان بالا ارسال نمود. ولی با توجه به اینکه در مخابرات بی‌سیم تمامی سیستم‌های مخابراتی از یک محیط مشترک برای انتقال داده استفاده می‌کنند، به منظور افزایش مقدار اطلاعاتی که در یک پهنای باند خاص فرستاده می‌شود، نیاز به استانداردهایی با بازده طیفی[۵] بالاتری احساس می‌شد. (منظور از بازده طیفی یک سیستم مخابراتی میزان توانایی سیستم در جا دادن هرچه بیش‌تر داده در یک پهنای باند خاص می‌باشد). بنابراین نسل‌های سوم و بالاتر مخابرات بی‌سیم مطرح شدند. شکل ۱-۳ سیر تحولی نسل‌های مخابرات بی‌سیم را نشان می‌دهد.

---

۱ Advanced Mobile Phone System
۲ Global System for Mobile Communications
۳ Frequency Modulation
۴ Gaussian Minimum Shift Keying
۵ Spectral efficiency

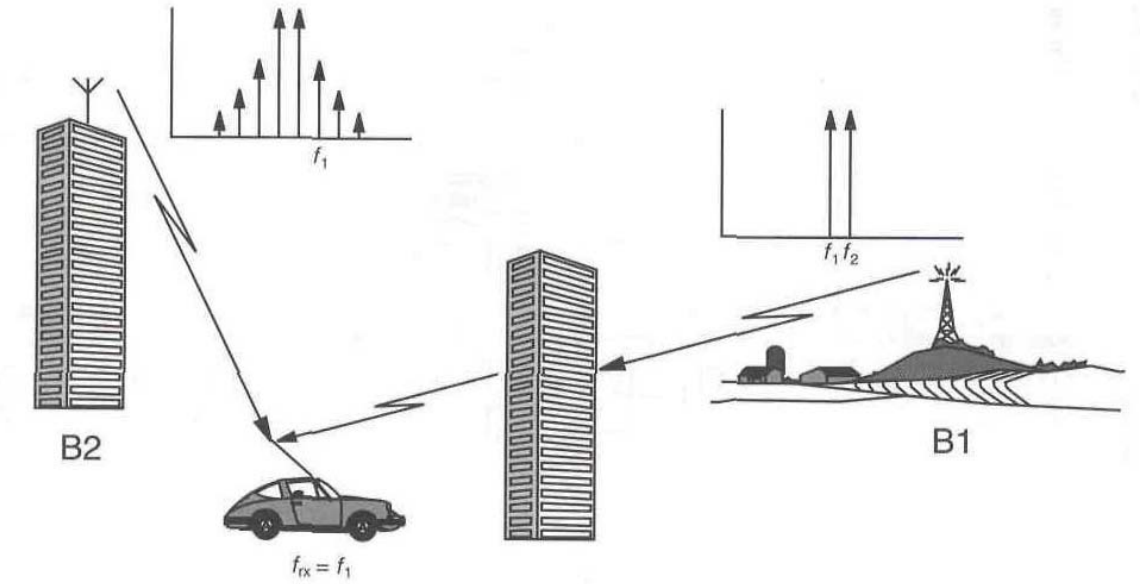


شکل ۱-۳- سیر تحولی نسل‌های مخابرات بی‌سیم[۴].

نسل‌های جدید مخابرات بی‌سیم نظیر WCDMA[۱] و WiMAX[۲] دارای بازده طیفی بالاتر ولی در عین حال تغییرات زیاد در دامنه‌ی سیگنال ارسالی می‌باشند. به عنوان مثال استاندارد WiMAX و برخی از استانداردهای WLAN(مانند 802.11a و 802.11g) از مدولاسیون OFDM[۳] استفاده می‌کنند. در این مدولاسیون رشته داده‌ی ورودی به چندین رشته سمبل با نرخ سمبل بسیار پایین‌تر تقسیم می‌شود و هر رشته سمبل که خود با یکی از انواع مدولاسیون‌های دیجیتال مدوله می‌شود، توسط یک زیرحامل فرستاده می‌شود. بنابراین داده ها را می‌توان با نرخ بسیار بالایی انتقال داد. ولی از سوی دیگر به علت وجود چندین فرکانس حامل در مدولاسیون OFDM، این مدولاسیون از تغییرات شدیدی در دامنه‌ی سیگنال ارسالی برخوردار است و در اصطلاح میزان PAPR[۴] آن بالاست. بنابراین در این سیستم‌های مخابراتی لازم است که تقویت‌کننده‌ی توان خطی باشد. در صورت خطی نبودن تقویت‌کننده‌ی توان در چنین سیستم‌هایی سیگنال ارسالی دچار اعوجاج می‌شود که این امر باعث از دست رفتن اطلاعات سیگنال و گستردگی طیف آن به باندهای فرکانسی مجاور می شود. به عنوان مثال شکل ۱-۴ را در نظر بگیرید. در صورتی که گیرنده قرار باشد سیگنال با فرکانس f_1 را از ایستگاه B_1 دریافت کند، ولی به علت غیر خطی بودن تقویت‌کننده‌ی توان ایستگاه B_2، سیگنال ناخواسته‌ای با همین فرکانس توسط ایستگاه B_2 هم فرستاده شود، تداخل ایجاد می‌شود و باعث خراب شدن اطلاعاتی می‌شود که توسط گیرنده دریافت می‌گردد.

---

۱ Wideband Code Division Multiple Access
۲ Worldwide Interoperability for Microwave Access
۳ Orthogonal Frequency Division Multiplexing
۴ Peak to Average Power Ratio



شکل ۱-۴- تاثیر غیرخطی بودن تقویت‌کننده‌ی توان بر عملکرد سیستم مخابراتی.

حال مشکل این‌جاست که در تقویت‌کننده‌های توان رادیویی بین بازده و میزان خطی بودن تقویت‌کننده بـده بستان وجود دارد به گونه‌ای که عمدتا تقویت‌کننده‌های توان با بازده بالاتر، غیرخطی‌تـر هسـتند. یـک روش مناسـب برای حل این مشکل و داشتن بازده بالا در عین خطی بودن این است که تقویت کننده را با بازده بالا طراحی کـرده و سپس روش خطی سازی به آن اعمال نمود.

تاکنون روش‌های مختلفی برای خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های توان ارائه شـده اسـت کـه عبارتنـد از: فیـدبک دکارتی، فیدبک قطبی، تقویت خطی با عناصر غیرخطی، حذف و بازیافت پوش، پیش‌خور و پـیش‌اعوجـاج. از میـان این روش‌ها روش پیش‌اعوجاج به علت امکان پیاده‌سازی در حوزه‌ی دیجیتال مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است.

۱-۲ روند ارائه‌ی مطالب

در این پایان‌نامه هدف طراحی یک تقویت‌کننده‌ی CMOS با بازده مناسب و میزان خطـی بـودن قابـل قبـول برای استفاده در سیستم‌های مخابراتی نسل سوم و بالاتر می‌باشد. بدین منظور یک روش خطی‌سازی مناسـب انتخـاب می‌گردد و سپس مناسب بودن آن برای استفاده در استاندارد WiMAX مورد بررسی قرار می‌گردد.

برای رسیدن به این هدف ابتدا در فصل دوم ساختار کلی یک تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی معرفی می‌گـردد سپس به معرفی پارامترهایی که در طراحی یک تقویت‌کننده‌ی توان باید مورد توجه قرار گیرند پرداخته می‌شود و در نهایت کلاس‌های مختلف کاری تقویت‌کننده‌های توان و ویژگی‌های هر کدام مورد بررسی قرار می‌گیرند.

سپس در فصل سوم اهمیت خطی‌سازی تقویت‌کننده‌ی توان به طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد و پس از آن انواع روش‌هایی که تاکنون برای خطی‌سازی تقویت‌کننده‌های توان ارائه شده‌اند و مزایا و معایب هرکدام بررسی می‌گردند.

در نهایت در فصل چهارم ابتدا روش خطی‌سازی پیش‌اعوجاج دیجیتال بر پایه‌ی چندجمله‌ای باحافظه که از میان روش‌های معرفی شده در فصل سوم روش مناسب‌تری به نظر می‌رسد به طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس ساختار یک تقویت‌کننده CMOS با بازده نسبتا بالا معرفی می‌گردد و روش طراحی تقویت کننده‌ی توان و شبکه‌ی تطبیق امپدانس خروجی آن ارائه می‌گردد و در نهایت روش خطی‌سازی مذکور برروی تقویت‌کننده‌ی توان CMOS طراحی شده اعمال می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی برای ورودی 16QAM-OFDM مطابق با استاندارد WiMAX ارئه می‌گردد. در شبیه‌سازی مذکور تاثیر محدویت‌های عملی از جمله محاسبات ممیز ثابت در حوزه‌ی دیجیتال بررسی می‌گردند. همچنین نتایج حاصل از سنتز و پیاده سازی پیش‌اعوجاج دیجیتال وفقی بر روی تراشه‌ی Spartan3-xc3s4000l FPGA[1] نیز ارائه می‌گردد.

در فصل پایانی نیز جمع‌بندی مطالب، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌گردند.

[1] Field-Programmable Gate Array

فصل دوم
معرفی تقویت کننده‌ی توان رادیویی

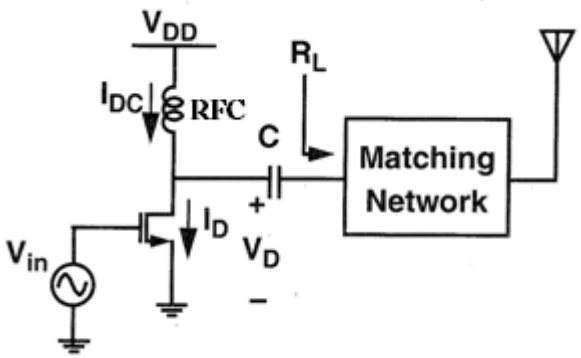
تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی آخرین بخش فرستنده‌ی یک سیستم مخابراتی قبل از آنتن می باشد که توان سیگنال ارسالی را تا سطح توان لازم برای تحویل به آنتن تقویت می‌کند. تقویت‌کننده‌های توان معمولا پرمصرف‌ترین بخش فرستنده-گیرنده در یک سیستم مخابراتی می‌باشند بنابراین بازده آن‌ها تاثیر زیادی بر بازده کل سیستم مخابراتی دارد به همین دلیل در اکثر موارد، بازده در کنار میزان توان خروجی مهم ترین پارامتری است که در طراحی تقویت‌کننده‌های توان مورد توجه قرار می‌گیرد. البته چون تقویت‌کننده‌ی توان آخرین بخش یک فرستنده‌ی مخابراتی‌ست، از تاثیر آن بر کیفیت سیگنال ارسالی نباید غافل شد. در این فصل ابتدا به معرفی ساختار کلی تقویت کننده‌های توان می پردازیم سپس پارامترهایی را که لازم است در طراحی این تقویت‌کننده‌ها مورد توجه قرار گیرند معرفی می‌کنیم و در نهایت ساختار انواع کلاس های کاری تقویت‌کننده‌های توان را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۱ ساختار کلی تقویت‌کننده‌ی توان

شکل ۲-۱ ساختار کلی یک تقویت کننده‌توان رادیویی را نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، در تقویت‌کننده های توان رادیویی برای اینکه بتوان در ولتاژهای تغذیه ی پایین توان لازم را به آنتن ۵۰ اهمی تحویل داد و در نتیجه برای داشتن سوئینگ ولتاژ مورد نیاز در خروجی، اتصال تغذیه به ترانزیستور خروجی

از طریق یک سلف که به آن "چوک فرکانس رادیویی"[۱] (RFC) گفته می شود، استفاده می گرددکـه امپـدانس آن در فرکانس کار مدار بسیار بزرگ است. بدین ترتیب ولتاژ درین ترانزیستور می تواند تقریبا از ۰ تا $۲V_{DD}$ تغییر کند.

برای داشتن توان بیش‌تر در آنتن، معمولا از شبکه‌ی تطبیق امپدانس بین تقویت‌کننده و بار اسـتفاده مـی‌شـود. شبکه ی تطبیق، مقاومت بار را به مقدارکم تری تبدیل می کند به طوریکه سوئینگ محدود ولتاژ در تقویت کننـده‌ی توان بتواند باز هم توان لازم در خروجی را فراهم کند. [۵]



شکل ۲-۱- ساختار کلی یک تقویت‌کننده‌ی توان رادیویی[۵]

۲-۲ پارامترهای تقویت‌کننده‌ی توان

پارمترهای مهم در یک تقویت کننده ی توان رادیویی در دو گروه کلی جـای مـی گیرنـد. برخـی از آن هـا مانند توان خروجی توسط استانداردی که تقویت کننده برای آن طراحی شده است مشخص می شوند بنـابراین دارای محدودیت در بیش ترین یا کم ترین مقدار هستند. گروه دوم مانند بازده توسط اسـتاندارد مشـخص نمـی شـوند ولـی نشان دهنده‌ی چگونگی عملکرد تقویت کننده هـای تـوان مـی باشـند[۵].در ادامـه بـه معرفـی ایـن پارامترهـا پرداختـه می‌شود.

۲-۲-۱ توان خروجی

توان خروجی یک تقویت‌کننده‌ی توان، توان متوسط سیگنالی‌ست که توسط تقویت کننده، به بار که معمولا آنتن با امپدانس داخلی ۵۰Ω است تحویل داده می‌شود. محدوده‌ی توان تحویلی به آنتن توسـط اسـتاندارد مشـخص می‌شود که به عنوان نمونه برای استاندارد WiMAX بین ۱۷dBm و ۳۵dBm است[۵].

[۱] Radio Frequency Choke

۲-۲-۲ بازده

بازده یک تقویت‌کننده‌ی توان به دوصورت مشخص می شود. بازده درین(یا کلکتور) و بازده افزوده‌ی توان. بازده درین عبارتست از نسبت توان تحویلی به بار به توان کشیده شده از منبع.

$$\eta_{drain} = \frac{P_{out}}{P_{supply}} \qquad ۱-۲$$

و بازده افزوده‌ی توان[۱] (PAE) عبارت است ازنسبت تفاوت توان خروجی و ورودی تقویت کننده‌ی توان، به توان کشیده شده از منبع. (که استفاده از آن رایج‌تر است)

$$PAE = \frac{(P_{out} - P_{in})}{P_{supply}} \qquad ۲-۲$$

بازده توسط استاندارد مشخص نمی‌شود ولی اغلب مهم‌ترین پارامتر تقویت کننده‌ی توان است که همانگونه که از تعریف آن مشخص است، هر چه قدر مقدار آن بیش‌تر باشد عملکرد تقویت کننده‌ی توان از نظر میزان توان تلفاتی بهتر خواهد بود. بنابراین معمولا در طراحی تقویت کننده‌های توان سعی می شود که بازده تا حد ممکن بالا باشد.

۲-۲-۳ بهره‌ی توان

بهره‌ی توان یک تقویت‌کننده عبارتست از نسبت توان خروجی تقویت کننده به توان ورودی آن.

$$PowerGain = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad ۳-۲$$

در مباحث مربوط به طراحی تقویت‌کننده‌های رادیویی سه نوع بهره‌ی توان تعریف می‌شود که عبارتند از:

۱- بهره‌ی توان کار[۲]: که به همان صورت رابطه‌ی ۲-۳ تعریف می‌شود.

۲- بهره‌ی توان موجود[۳]: هنگامی تعریف می‌شود که هم در ورودی و هم در خروجی تقویت‌کننده تطبیق امپدانس داشته باشیم بنابراین حداکثر انتقال توان را به بار خواهیم داشت. این بهره‌ی توان به صورت رابطه ی ۲-۴ تعریف می شود:

$$G_A = \frac{P_{avn}}{P_{avs}} \qquad ۴-۲$$

---

[۱] Power Added Efficiency
[۲] Oprating power gain
[۳] Available power gain

که در آن P_{avn} حداکثرتوانی‌ست که به بار تحویل داده می‌شود و P_{avs} حداکثر توانی‌ست که در ورودی به تقویت‌کننده تحویل داده می‌شود.

۳- بهره‌ی توان مبدل[۱]: هنگامی تعریف می‌شود که فقط در ورودی تطبیق امپدانس داشته باشیم که به صورت رابطه‌ی ۲-۵ تعریف می‌شود:

$$G_T = \frac{P_{out}}{P_{avs}} \qquad ۵-۲$$

پارامتر بهره‌ی توان توسط استاندارد مشخص نمی شود ولی مقدار آن توسط ماکزیمم توان خروجی طبقه ی قبل و محدوده ی توان خروجی که توسط استاندارد مشخص شده محدود می شود. به عنوان مثال برای یک تقویت کننده‌ی توان نوعی با توان خروجی ۲۰ تا۳۰dBm مقدار بهره توان لازم حدود۲۰ تا ۳۰dB است.

۲-۲-۴ خطی بودن

استانداردهای مختلف از مدولاسیون های مختلفی نظیر OQPSK[۲]، GFSK[۳]، GMSK و OFDM استفاده می‌کنند که از دید طراحی تقویت کننده ی توان به دو دسته ی مدولاسیون با دامنه ی ثابت و مدولاسیون با دامنه ی متغیر تقسیم می شوند.برای مدولاسیون‌های با دامنه‌ی ثابت مانند GFSK و GMSK که اطلاعات سیگنال در فاز آن منتقل می‌شود نیازی به خطی بودن تقویت‌کننده‌ی توان نیست. ولی برای مدولاسیون‌های با دامنه‌ی متغیرکه در واقع اطلاعات سیگنال در دامنه منتقل می‌شود، مانند OQPSK (که با فیلتر raised-cosine فیلتر شده است) وOFDM لازم است که تقویت‌کننده‌ی توان خطی باشد تا تغییرات دامنه به همان شکل ورودی به خروجی منتقل شود.

یکی از راه های بررسی میزان خطی بودن یک تقویت‌کننده‌ی توان بررسی مشخصه‌ی توان خروجی بر حسب توان ورودی آن است که منحنی فشردگی[۴] تقویت‌کننده نامیده می‌شود و به صورت شکل۲-۲ است.

---

[۱] Trancducer power gain
[۲] Offset Quadrature Phase-Shift Keying
[۳] Gaussian Frequency-Shift Keying
[۴] Compression curve