دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای احمد هرمزی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان مدل سازی تقویت کننده توان برای روش خطی سازی وفقی پیش اعوجاج در باند پایه در تاریخ ۱۳۹۰/۹/۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد الکترونیک پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر ابومسلم جان نثاری	استادیار	
استاد ناظر	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر احسان اله کبیر	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمود کمره ای	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	دانشیار	

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی احمد هرمزی

امضاء

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته **مهندسی برق- الکترونیک** است که در سال **۱۳۹۰** در دانشکده **برق وکامپیوتر** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای **دکترابومسلم جان نثاری**، از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **احمد هرمزی** دانشجوی رشته مهندسی **برق- الکترونیک** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **احمد هرمزی**

تاریخ و امضا: ۱۳۹۰/۹/۸

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک

مدل سازی تقویت کننده توان برای روش خطی سازی وفقی پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی در باند پایه

احمد هرمزی

استاد راهنما:

دکتر ابومسلم جان نثاری

پاییز ۱۳۹۰

تقدیم

این پایان نامه را تقدیم می‌کنم به خانواده دلسوز و مهربانم که در تمام مراحل زندگی یار و یاور من بوده اند.

تشکر و قدردانی

با سپاس از پروردگار متعال که به من همت داد که این پژوهش را با موفقیت به پایان برسانم.

بر خود لازم می‌دانم که از همفکری‌ها و تلاشهای بی‌دریغ استاد راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر ابومسلم جان نثاری کمال تشکر و قدردانی را انجام دهم.

قدردانی می کنم از اعضای محترم کمیته ارزشیابی آقای دکتر محمود کمره ای، آقای دکتر عبدالرضا نبوی که این پایان نامه را مورد بررسی قرار دادند.

این پایان‌نامه با حمایت مادی و معنوی مرکز تحقیقات مخابرات ایران (ITRC) انجام شده است. بدین-وسیله از حمایت‌های شایان این مرکز صمیمانه قدردانی می‌کنم

چکیده

در این پایان نامه هدف ارائه یک پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی است که توانای اصلاح عناصر غیر خطی و اثرات حافظه تقویت کننده توان را دارا بوده و در عین حال پیاده سازی بسیار ساده‌ای داشته باشد. بنابراین پیش اعوجاج دهنده بر مبنای LUT را هدف قرار دادیم. ابتدا پیش اعوجاج دهنده ML-2D LUT ارائه شده است که سرعت همگرای بسیار بیشتری نسبت به پیش اعوجاج دهنده 2D-LUT دارد. سپس به دلیل اینکه پیش اعوجاج دهنده بر مبنای 2D-LUT توانای بسیار ضعیفی در اصلاح اثرات حافظه تقویت کننده دارد، پیش اعوجاج دهنده توانمند Tapped Delay Line Lookup Table (TDL-LUT) برای اولین بار پیشنهاد شده است. در ادامه برای بهبود مصالحه میان سرعت همگرای و دقت در LUT، پیش اعوجاج دهنده TDL ML-LUT ارائه می‌شود که سرعت همگرای بسیار بیشتری نسبت به پیش اعوجاج دهنده TDL-LUT دارد. برای شبیه سازی‌ها از یک سیگنال OFDM برای استاندارد DVB-T با مدولاسیون 64-QAM در نرم افزار Matlab استفاده شده است. در نهایت شبیه سازی برای خطی سازی سه مدل واقعی رایج برای تقویت کننده توان که برای شبیه سازی در مقالات استفاده می‌شوند، انجام می‌گیرد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که پیش اعوجاج دهنده پیشنهاد شده کارآیی بهتری نسبت به پیش اعوجاج دهنده پرکاربرد چند جمله‌ای حافظه‌دار دارد و در عین حال از نظر محاسبات و پیاده سازی، ساده‌ترین پیش اعوجاج دهنده‌ای است که تا کنون ارائه گردیده است.

کلید واژه: تقویت کننده توان، پیش اعوجاج دهنده، پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی، خطی‌سازی، اثرات حافظه تقویت کننده توان، LUT، مدل سازی رفتاری.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدولها ..... ج
فهرست شکلها ..... د
فصل ۱: مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۲
۱-۲- انگیزه و اهداف پروژه ۳
۱-۳- ساختار پایان نامه ۵
فصل ۲: برخی مفاهیم در مورد تقویت کنندهای توان و سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی ٦
۲-۱- مقدمه ۷
۲-۲- اثرات غیر خطی تقویت کننده های توان و معیارهای رایج سنجش عناصر غیر خطی ۷
۲-۲-۲- آزمایش دو- تون (Two-Tone test) ۱۰
۲-۲-۳- اندازه گیری غیرخطی بودن برای سیگنال های مدوله شده ۱۲
۲-۲-٤- اثرات حافظه تقویت کننده توان ۱۵
۲-۳- مروری بر تکنیک های خطی سازی ۱۷
۲-۳-۲- تکنیک های خطی سازی در سطح سیستمی ۱۹
۲-۳-۳- کارتزین فیدبک ۲۰
۲-۳-٤- فیدبک پوش ۲۱
۲-۳-۵- خطی سازهای فیدفوروارد ۲۱
۲-۳-٦- خطی سازی حذف و بازگرداندن پوش (EE&R) ۲۳
۲-۳-۷- روش خطی سازی پیش اعوجاج ۲۳
۲-۳-۸- جمع بندی تکنیک های خطی سازی ۲٦
۲-٤- جمع بندی فصل ۲۸
فصل ۳: مدل سازی رفتاری تقویت کننده های توان برای روش خطی سازی پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی ۲۹
۳-۱- مقدمه ۳۰
۳-۲- مدلهای ارائه شده برای پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی باند پایه برای تقویت کننده های توان با اثرات حافظه ... ۳۲
۳-۲-۱- مدل Look UP Table ۳۳
۳-۲-۲- مدل ولترا ۳۵
۳-۲-۳- مدل وینر (Weiner) : ۳٦
۳-۲-٤- مدل همرستین (Hammerstein) : ۳۷
۳-۲-۵- مدل وینر- همرستین (Wiener-Hammerstein) : ۳۸
۳-۲-٦- مدل چند جمله ای حافظه دار(Memory Polynomial) : ۳۹
۳-۳- روشهای پیاده سازی خطی سازی پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی ٤۰

۳-۳-۲- طراحی پیش اعوجاج دهنده همرستین ٤٢
۳-۳-۳- طراحی پیش اعوجاج دهنده از نوع چند جمله ای حافظه دار ٤٥
۳-٤- مروری بر مقالات ٤٧
۳-٥- نتیجه گیری ٥٠
فصل ٤: طراحی و شبیه سازی پیش اعوجاج دهنده ٥٢
٤-۱- مقدمه ٥٣
٤-۲- مدلهای تقویت کننده توان برای شبیه سازی ٥٣
٤-۲-۱- مدل چندجمله ای حافظه دار ٥٤
٤-۲-۲- مدل وینر موازی ٥٥
٤-۲-۳- مدل وینر- همرستین ٥٧
٤-۳- پیش اعوجاج دهنده بر مبنای LUT دوبُعدی (2D-LUT) ٥٨
٤-٤- پیش اعوجاج دهنده بر مبنای 2D-LUT چند سطحی (Multi-Level 2D-LUT) ٦٠
٤-٥- پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی TDL-LUT پیشنهادی ٦٤
٤-٥-۲- شبیه سازی پیش اعوجاج دهنده برای تقویت کننده مدل چند جمله ای حافظه دار ٧٠
٤-٥-۳- شبیه سازی پیش اعوجاج دهنده برای تقویت کننده مدل وینر موازی ٧٤
٤-٥-٤- شبیه سازی پیش اعوجاج دهنده برای تقویت کننده وینر- همرستین ٧٧
٤-٦- پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی TDL-LUT چند سطحی (TDL ML-LUT) پیشنهادی ٨٠
٤-٧- نتیجه گیری ٨٣
٥-۱- مقدمه ٨٦
فصل ٥: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها ٨٥
٥-۲- نتیجه گیری ٨٦
٥-۲-۱- ارائه پیشنهادات ٨٧
فهرست مراجع ٨٩

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (٤-١) مقایسه روشهای مختلف DP با معیار EVM و NMSE ٧١
جدول (٤-٢) مقایسه روشهای مختلف DP با معیار EVM و NMSE ٧٥
جدول (٤-٣) مقایسه روشهای مختلف DP با معیار EVM و NMSE ٧٨
جدول (٤-٤) مقایسه سرعت همگرای TDL-LUT و TDL ML-LUT برای تقویت کننده چندجمله ای حافظه دار ٨٢
جدول (٤-٥) مقایسه سرعت همگرای TDL-LUT و TDL ML-LUT برای تقویت کننده وینر موازی ٨٢
جدول (٤-٦) مقایسه سرعت همگرای TDL-LUT و TDL ML-LUT برای تقویت کننده وینر- همرستین ٨٢

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱) بلوگ دیاگرام بلوک دیاگرام پیش اعوجاج دهنده دیجیتال ۳
شکل (۲-۱) مشخصه های AM-AM و AM-PM یک تقویت کننده توان ۸
شکل (۲-۲) اندازه گیری مشخصه های تقویت کننده توان ۹
شکل (۲-۳) طیف خروجی تقویت کننده توان در آزمایش دو-تک تون [4] ۱۲
شکل (۲-٤) طیف ورودی و خروجی یک تقویت کننده برای یک سیگنال مدوله شده WCDMA ۱۳
شکل (۲-۵) نمایش بردار خطا ۱٤
شکل (۲-٦) منابع اصلی تولید اثرات حافظه در تقویت کننده توان ۱٦
شکل (۲-۷) عدم تقارن در مولفه های IMD یک تقویت کننده توان به دلیل اثرات حافظه [4] ۱۷
شکل (۲-۸) تقسیم بندی تکنیک های خطی سازی ۱۸
شکل (۲-۹) نمای بلوکی روش خطی ساز کارتزین فیدبک ۲۰
شکل (۲-۱۰) دیاگرام بلوکی روش فیدبک پوش ۲۱
شکل (۲-۱۱) بلوک دیاگرام روش خطی سازی فیدفوروارد ۲۲
شکل (۲-۱۲) بلوک دیاگرام روش خطی سازی EE&R ۲۳
شکل (۲-۱۳) اساس کار خطی ساز پیش اعوجاج ۲٤
شکل (۲-۱٤) دسته بندی خطی سازهای پیش اعوجاج ۲٤
شکل (۲-۱۵) بلوک دیاگرام یک فرستنده همراه با پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی باند پایه ۲٦
شکل (۳-۱) مدل سازی رفتاری یک تقویت کننده ۳۱
شکل (۳-۲) اساس کار بلوک پیش اعوجاج دهنده ۳۱
شکل (۳-۳) پیش اعوجاج دهنده بر مبنای Look Up Table ۳٤
شکل (۳-٤) بلوک دیاگرام مدل وینر ۳٦
شکل (۳-۵) بلوک دیاگرام مدل همرستین ۳۸
شکل (۳-٦) بلوک دیاگرام مدل وینر-همرستین ۳۸
شکل (۳-۷) بلوک دیاگرام آموزش غیر مستقیم برای پیش اعوجاج دهنده ٤۱
شکل (۳-۸) پیش اعوجاج دهنده با آموزش غیر مستقیم برای پیش اعوجاج دهنده همرستین ٤۲
شکل (۳-۹) ساختار پیش اعوجاج دهنده از نوع آموزش غیر مستقیم برای چند جمله ای حافظه دار ٤٦
شکل (۳-۱۰) بلوک دیاگرام مدل TNTB. الف) مدل پیشرو ب) معکوس ج)موازی ٤۸
شکل (۳-۱۱) NMSE برای مدلهای TNTB ٤۹
شکل (٤-۱) منحنی مشخصات تقویت کننده مدل شده با چندجمله ای حافظه دار الف) منحنی AM-AM ب) منحنی AM-PM ۵۵
شکل (٤-۲) مدل وینر موازی برای تقویت کننده توان ۵۵

شکل (٤-٣) منحنی مشخصات تقویت کننده مدل شده با وینر موازی الف) منحنی AM-AM ب) منحنی AM-PM ٥٦
شکل (٤-٤) مدل وینر- همرستین تقویت کننده ٥٧
شکل (٤-٥) منحنی مشخصات تقویت کننده مدل شده با وینر- همرستین الف) منحنی AM-AM ب) منحنی AM-PM ٥٨
شکل (٤-٦) بلوک دیاگرام پیش اعوجاج دهنده 2D-LUT پیشنهاد شده در [6]. ٥٩
شکل (٤-٧) بلوک دیاگرام پیش اعوجاج دهنده پیشنهاد شده ML-2D LUT ٦١
شکل (٤-٨) چگالی طیف توان خروجی تقویت کننده ٦٣
شکل (٤-٩) مقایسه سرعت همگرای دو مدل 2D-LUT و ML-2D LUT ٦٤
شکل (٤-١٠) بلوک دیاگرام پیش اعوجاج دهنده TDL-LUT پیشنهاد شده ٦٧
شکل (٤-١١) فلوچارت اجرای برنامه پیش اعوجاج دهنده ٦٩
شکل (٤-١٢) چگالی طیف توان خروجی تقویت کننده چندجمله ای حافظه دار ٧٠
شکل (٤-١٣) الف) نمودار فلکی خروجی تقویت کننده بدون پیش اعوجاج دهنده. ب) نمودار فلکی خروجی تقویت
کننده با پیش اعوجاج دهنده TDL-LUT ٧١
شکل (٤-١٤) نمودر AM-AM برای سه جای مختلف از سه روش خطی ساز. الف) روش LUT ب) روش 2D-LUT
ج) روش TDL-LUT ٧٢
شکل (٤-١٥) چگالی طیف توان خروجی تقویت کننده وینر موازی برای چند پیش اعوجاج دهنده ٧٤
شکل (٤-١٦) نمودار فلکی خروجی تقویت کننده برای چهار حالت الف) بدون DP . ب) با پیش اعوجاج دهنده LUT.
ج) با پیش اعوجاج دهنده 2D-LUT. د) با پیش اعوجاج دهنده TDL-LUT ٧٥
شکل (٤-١٧) نمودر AM-AM برای سه حالت مختلف از سه روش خطی ساز. الف) روش LUT ب) روش 2D-LUT.
ج) روش TDL-LUT ٧٦
شکل (٤-١٨) چگالی طیف توان تقویت کننده وینر- همرستین برای پیش اعوجاج دهنده های مختلف ٧٨
شکل (٤-١٩) نمودار فلکی خروجی تقویت کننده برای چهار حالت الف) بدون DP . ب) با پیش اعوجاج دهنده LUT.
ج) با پیش اعوجاج دهنده 2D-LUT. د) با پیش اعوجاج دهنده TDL-LUT ٧٩
شکل (٤-٢٠) نمودار AM-AM برای سه حالت مختلف برای پیش اعوجاج دهنده وینر- همرستین ٨٠
شکل (٤-٢١) بلوک دیاگرام پیش اعوجاج دهنده TDL ML-LUT ٨١

فـصل ۱ : مقدمه

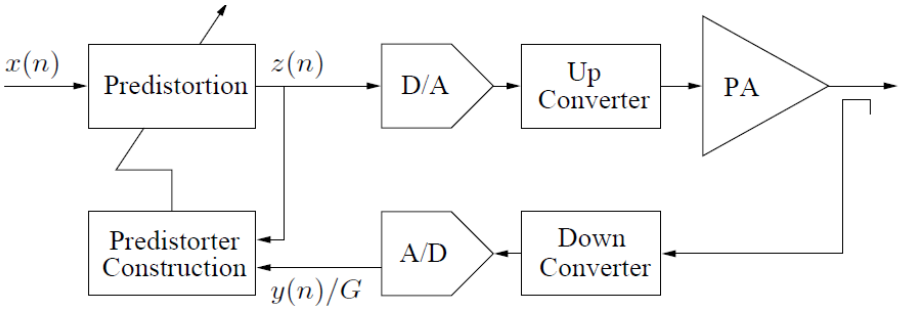
۱-۱- پیشگفتار

تقویت کننده های توان از اجزای ضروری سیتم های مخابراتی می‌باشد که بطور ذاتی غیر خطی هستند. عناصر غیر خطی تقویت کننده های توان باعث به وجود آمدن اعوجاج های درون باند و بیرون باند سیگنال اطلاعات می شود. اعوجاج بیرون باند باعث گسترش طیف[1] خروجی می‌شود که اختلال در کانال های مجاور و تجاوز از محدودیت ماسک استاندارد را به دنبال دارد و اعوجاج درون باند باعث خراب شدن نرخ خطای بیت[2] (BER) می شود. برای کاهش عناصر غیر خطی می توان تقویت کننده را در نقطه ای به دور از نقطه‌ی اشباع بایاس کرد یا در اصطلاح backed off گرفت تا در ناحیه خطی، کار کند. استاندارد های جدید مخابراتی مانند دسترسی چند گانه تقسیم کد پهن باند (WCDMA) و OFDM[3] دارای نسبت پیک توان به میانگین توان (PAPR[4]) زیادی هستند که نشان دهنده نوسانات بزرگ در پوش سیگنال است. زیاد بودن PAPR بدین معناست که برای برآورده کردن خطینگی مورد نیاز استاندارد مخابراتی، تقویت کننده باید در فاصله دورتری از نقطه اشباع بایاس شود که این امر باعث کاهش شدید بازدهی تقویت کننده به کمتر از ۱۰٪ [1] می شود. با توجه به تعداد زیاد ایستگاه های رادیویی در سطح دنیا، بهبود بازدهی تقویت کننده های توان می تواند تاثیر بسزای در کاهش هزینه مصرف برق و سیستم های خنک کننده، داشته باشد. وجود یک مصالحه میان خطینگی و بازدهی توان کاملا شناخته شده است [2] . از سوی دیگر، پهنای باند زیاد این سیگنال ها (معمولا در رنج 20 MHz یا بیشتر)، باعث می‌شود تا تقویت کننده توان از خود اثرات حافظه نشان دهد. عناصر غیر خطی و اثرات حافظه تقویت کننده های توان باعث می شوند تا سیگنال خروجی تقویت‌کننده دچار اعوجاج شود. بنابراین، برای اینکه خطینگی مورد نیاز استاندارد برآورده شود لازم است تا از یک تکنیک خطی‌سازی برای تقویت‌کننده استفاده شود.

در میان تمامی تکنیک های خطی سازی، تکنیک پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی[5] یکی از کارآمد ترین و اقتصادی‌ترین تکنیک هاست[3] . تکنیک پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی در باند پایه و مستقل از فرکانس نهای

[1] Spectral regrowth
[2] Bit error rate
[3] Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
[4] Peak to Average Power Ratio
[5] Digital predistortion

سیستم فرستنده یعنی فرکانس رادیویی است [4]. این مزیت باعث شده تا تحقیقات بسیاری برای بهینه سازی این تکنیک انجام شود. این روش درشکل (۱-۱) نشان داده شده است. در این روش یک بلوک پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی در باند پایه قرار می گیرد. این بلوک تابع غیر خطی برابر با عکس تابع غیر خطی تقویت کننده تولید می کند. در نتیجه به صورت ایدآل، ترکیب سری پیش اعوجاج دهنده و تقویت کننده یک سیستم خطی خواهد بود و سیگنال اصلی با یک گین ثابت تقویت می شود.



شکل (۱-۱) بلوگ دیاگرام بلوک دیاگرام پیش اعوجاج دهنده دیجیتال

به کمک روش خطی سازی پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی می توان تا نقطه اشباع تقویت کننده از تقویت کننده توان استفاده کرد و به میزان قابل ملاحظه ای بازدهی آن را بالا برد، در حالی که سیگنال خروجی خطینگی خوبی داشته باشد. در واقعیت، مشخصه غیر خطی تقویت کننده به دلیل عواملی چون تغییرات دمای و کهنه شدن اجزاء، تغییر می کند. بنابراین سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی باید توانای تطبیق پذیری با این تغییرات را داشته باشد.

۱-۲- انگیزه و اهداف پروژه

با افزایش پهنای باند سیگنالها مانند WCDMA و OFDM، تقویت کننده های توان به خصوص تقویت کننده‌های توان ایستگاه های رادیویی، اثرات حافظه از خود نشان می دهند. این اثرات حافظه به دلیل ثابت‌های دمای عناصر اکتیو و اجزاء تشکیل دهنده شبکه بایاس (که با تغییر فرکانس رفتارشان تغییر می کند) به وجود می آیند [5]. اثرات حافظه باعث می شود که خروجی هرلحظه تقویت کننده نه تنها به ورودی همان لحظه بلکه

به ورودی های ماقبل نیز وابسته باشد [6]. به عبارت دیگر، تقویت کننده توان یک سیستم غیر خطی با حافظه می‌شود. از سوی دیگر، توانای خطی سازی یک سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی بدون حافظه برای یک تقویت کننده با حافظه، بسیار محدود است [7] و [8]. بنابراین سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی باید با حافظه باشد. می توان ویژگی های یک سیستم خطی ساز پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی کارآمد را به صورت زیر بیان کرد:

- توانای جبران سازی اثرات حافظه تقویت کننده توان
- دقت در ایجاد عکس مدل بدست آمده از رفتار غیر خطی تقویت کننده توان
- سادگی عملیات بدست آوردن عکس مدل غیر خطی تقویت کننده توان
- امکان خطی سازی گستره بیشتری از تقویت کننده های توان
- سادگی در پیاده سازی

یک بخش اساسی و بسیار مهم یک سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی، مدل سازی رفتاری تقویت کننده است [3]. در مدل سازی رفتاری، سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی با گرفتن دیتا های ورودی و خروجی تقویت کننده، مشخصه غیر خطی تقویت کننده را مدل می کند. یکی از مشکلات مهم سیستم های پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی، مدل سازی رفتاری است [3]. در واقع می توان گفت که کار سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی، بدست آوردن عکس مدل رفتاری تقویت کننده و اعمال آن به سیگنال ورودی است. از سوی دیگر، تمام ویژگی های که برای یک سیستم پیش اعوجاج دیجیتالی کارآمد ذکر شد را، مدل رفتاری پیش اعوجاج دهنده مشخص می‌کند.

در یک دهه گذشته تلاش های زیادی برای ارائه یک سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی با حافظه وکارآمد با ویژگی های ذکر شده در بالا صورت گرفته است [9,10,11,12,4]. اما هر یک از سیستم های ارائه شده در یک و یا چندتا از ویژگی های ذکر شده در بالا ضعف دارد. در این پایان نامه، تلاش ما بر این است که یک مدل رفتاری توانمند برای سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی باند پایه ارائه دهیم تا توانای اصلاح عناصر غیر خطی و اثرات حافظه تقویت کننده را داشته باشد. در این پژوهش تمرکز ما بر این است که مدلی ارائه دهیم تا علاوه بر دقت بالا ، پیاده سازی بسیار ساده‌ای داشته باشد و نهایتاً، پیش اعوجاج دهنده بر مبنای مدل پیشنهادی، تمام

ویژگی‌های یک پیش اعوجاج دهنده کارآمد را داشته باشد.

۱-۳- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در چهار فصل تنظیم شده است. در فصل اول مقدمه ای در مورد خطی سازی و اهمیت آن گفته شد، سپس انگیزه و اهداف انجام پروژه بیان شد. در فصل دوم برخی مفاهیم در مورد تقویت کننده توان، از جمله عناصر غیر خطی تقویت کننده و معیار های سنجش آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس توضیحات مقدماتی در مورد تکنیک های خطی سازی داده خواهد شد. چند تکنیک خطی سازی مهم مورد بررسی قرار گرفته و نقاط ضعف و قوت آنها بیان شده و در نهایت روش خطی سازی پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم پس از توضیح مدل سازی رفتاری، به بررسی چند مدل رفتاری مهم و پرکاربردی که تا کنون ارائه شده می‌پردازیم و نقاط ضعف و قوت این مدلها توضیح داده می‌شود در نهایت دو مثال از نحوه تخمین پارامترهای مدلهای همرستین و چندجمله‌ای حافظه دار ارائه می‌شود و چند مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل چهارم ابتدا سه مدل رایج تقویت کننده توان که برای شبیه سازی استفاده می‌شوند معرفی می‌شود. سپس مدل LUT دوبُعدی (2D-LUT) و مدل پیشنهادی LUT دوبُعدی-چندسطحی (ML-2D LUT) توضیح داده می‌شود. در ادامه مدلهای پیشنهادی TDL-LUT و TDL ML-LUT ارائه خواهد شد و نهایتاً با انجام شبیه سازی برای خطی سازی سه مدل رایج تقویت کننده توان، عملکرد مدلهای پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات نیز در فصل پنجم آمده است.

فـصل ۲ : برخی مفاهیم در مورد تقویت کنندهای توان و سیستم پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا اثرات غیر خطی تقویت کننده توضیح داده می‌شود. عناصر غیر خطی که باعث ایجاد اعوجاج درون باند و بیرون باند سیگنال می‌شوند، بررسی می‌شود. سپس معیارهای سنجش میزان غیر خطی بودن تقویت کننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، تکنیک های خطی سازی به صورت مختصر توضیح داده می-شود و چند تکنیک مهم و پر کاربرد مورد بررسی قرار می‌گیرد و مزایا و معایب آنها بیان می‌شود. در نهایت روش خطی سازی پیش اعوجاج دهنده دیجیتالی که موضوع این پایان نامه است مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲- اثرات غیر خطی تقویت کننده های توان و معیارهای رایج سنجش عناصر غیر خطی

یک سیگنال مدوله شده را در نظر بگیرید که دامنه و فاز آن حاوی اطلاعات باشد، بنابراین داشتن اطلاعات در مورد اعوجاج اعمال شده به دامنه و فاز سیگنال، برای ما لازم است. اولین اندازه گیری مفید برای مشاهده اعوجاج ایجاد شده توسط اثرات غیر خطی تقویت کننده توان، مشخصه AM-AM و AM-PM است. تبدیل AM-AM، به عنوان نگاشتی ازدامنه سیگنال ورودی[۶] به دامنه سیگنال خروجی تقویت کننده تعریف می شود. تبدیل AM-PM بعنوان نگاشتی از دامنه سیگنال ورودی به تغییرات فاز سیگنال خروجی نسبت به ورودی، تعریف می‌شود [13]. در عمل، اگر یک تقویت کننده توان با رفتار غیر خطی و بدون حافظه را در نظر بگیریم آنگاه $V_{in}(t)$ ورودی باند گذر[۷] به صورت معادله (۲-۱) باشد:

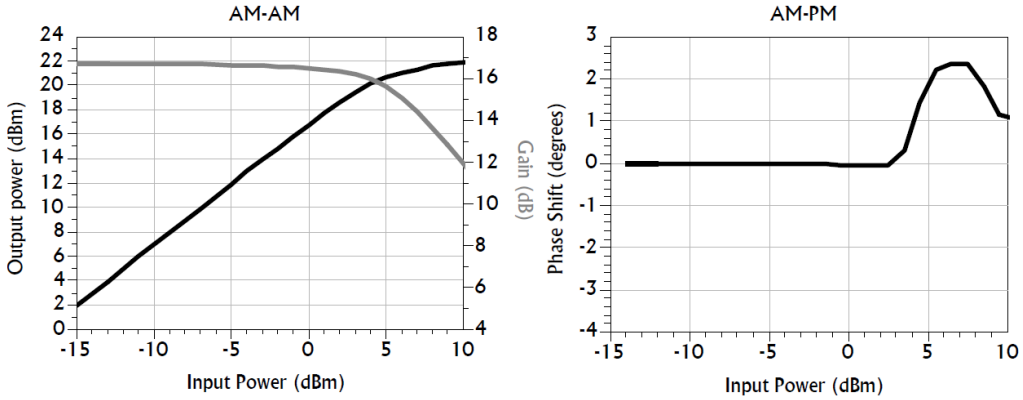
$$v_{in}(t) = A(t)\cos[\omega_c t + \varphi(t)] \qquad (۱-۲)$$

سیگنال خروجی دارای اعوجاج $V_{out}(t)$ به صورت زیر خواهد بود:

[6] baseband
[7] bandpass

$$v_{out}(t) = G[A(t)]\cos[\omega_c t + \varphi(t) + \phi[A(t)]] \qquad (۲-۲)$$

سیگنال خروجی یک شکل موج سینوسی در فرکانس حامل(ω_c) است که دامنه آن یک تابع غیر خطی از دامنه ورودی G[A(t)] و فاز آن نیز یک تابع غیر خطی از دامنه ورودی Φ[A(t)] است. شکل (۲-۱) یک مثال از مشخصه های AM-AM و AM-PM را نشان می دهد. در شکل (۲-۱) می توان اعوجاج ایجاد شده توسط تقویت کننده توان، در فاز و گین سیگنال خروجی را در توان های بالای ورودی ملاحظه کرد.



شکل (۲-۱) مشخصه های AM-AM و AM-PM یک تقویت کننده توان

در شکل (۲-۲) تعدادی از معیارهای معمول برای اندازه گیری رفتار غیر خطی تقویت کننده شامل نقطه اشباع، نقطه فشردگی 1 dB و back –off ورودی و خروجی (IBO و OBO) نشان داده شده است. نقطه فشردگی 1dB ، به مقداری از توان خروجی گفته می شود که اختلاف میان گین خطی و گین واقعی (غیرخطی تقویت کننده) به 1dB می رسد.