بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق _ الکترونیک

طراحی تقویت کننده کم نویز پهن باند موج میلیمتری

کامبیز هادی‌پور آبکنار

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر عبدالرضا نبوی

اسفند ۱۳۸۸

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای کامبیز هادی پور آبکنار پایان نامه ۹ واحدی خود را **با عنوان طراحی تقویت کننده کم نویز پهن باند موج میلیمتری** در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق و کامپیوتر - الکترونیک پیشنهاد می کنند.

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

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری 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 هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب کامبیز هادی‌پور اسفندانشجوی رشته مهندسی برق - الکترونیک ورودی سال تحصیلی ۸۷-۱۳۸۶ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....

K. Hadipour

تاریخ: .....

۸۸/۱۲/۵

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** است‌که در سال **۱۳۸۸** در دانشکده **مهندسی برق و کامپیوتر** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر **عبدالرضا نبوی لیشی**، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _ و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر _ 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 را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت 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 شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **کامبیز هادی پور آبکنار** 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: **کامبیز هادی پور آبکنار**

تاریخ و امضا: ۸۸/۱۲/۵

K. Hadipour

تقدیم

گرچه می دانم که اگر تمام رساله ها و مقالات جهان را به شما تقدیم کنم تا بدین وسیله گوشه ای از احساس و احترام خود را به شما عرضه داشته باشم، باز هم ناتوان خواهم ماند؛ اما ...

تقدیم به شما که راه و رسم زندگی را به من آموخته اید. تقدیم به شما که بهترینید و با شنیدن نام شما، چیزی جز روشنی و صداقت در ذهن من جای نمی گیرد.

''تقدیم به پدر و مادر عزیزم''

تشکر و قدردانی

بیش و پیش از هر چیز سپاسگزار خداوندی هستم که هرچه داشته و دارم، همه از اوست. بر آستان بی کرانش سر تعظیم فرود آورده و به پاس هر آن چه به من بخشیده است، سجده شکر به جای می آورم.

بانهایت فروتنی و تواضع از استاد راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر عبدالرضا نبوی تشکر و قدردانی می نمایم. راهنمایی های ایشان کمک بزرگی در انجام این پروژه بود. مهمتر از آن، نصیحت های ارزشمندی است که همواره آویزه گوش و چراغ راه من در زندگی ام خواهند بود. همین ها بود که تلاش بسیار و ارزش نگاه به آینده را به من آموخت. . . تشکر صمیمانه خود را به محضر ایشان تقدیم می دارم که انجام این تحقیق بدون راهنمایی و تشویق های ایشان، هرگز امکان پذیر نبود.

همچنین، از اعضای محترم کمیته ارزشیابی، جناب آقای دکتر محمود کمره ای، جناب آقای دکتر احسان اله کبیر و جناب آقای دکتر ابومسلم جان نثاری که بانهایت صبر و تامل این پایان نامه را مورد بررسی قرار داده و نکات ارزشمندی را گوشزد فرمودند، قدردانی می نمایم.

باعث افتخار من است که در طول دوران تحصیلم در دانشگاه تربیت مدرس، عضوی از آزمایشگاه میکرو الکترونیک بوده ام. حضور در این آزمایشگاه و آشنایی با دوستانی آگاه و سخت کوش، به من انگیزه ای مضاعف بخشید و مرا در محیطی قرار داد تا هر روز بر دانسته هایم از علم الکترونیک افزوده شود. از فرصت استفاده کرده و بدین وسیله از تمام دوستان خوبم در گروه میکرو الکترونیک تشکر می کنم.

در طول زندگی همواره دوستانی داشته ام بسیار عزیز و ارزشمند. دوستانی که هرگاه مایوس می شوم، گلم می کنند و هرگاه بلند پروازی می کنم، مانعم می شوند. دوستانی که همواره به بودن در کنارشان افتخار می کنم. . . نهایت بی انصافی است اگر از آن ها و دوستی بی نظیرشان یادی نکرده و از محبت های بی دریغشان سپاسگزاری ننمایم.

آخر از همه، اما نه کمتر از همه! علاقمندم که بهترین سپاس ها و درودهای خود را به پدر، مادر و خواهر عزیزم که خوشبختی امروز من از برکت حضور مهربان و حمایت بی بدیلشان است، تقدیم کنم. خانواده ای که همواره به وجود نازنینشان افتخار کرده و خواهم کرد.

چکیده

در این پروژه سه تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری برای گستره فرکانسی ۲۵-۳۵ GHz طراحی شده است. کلیه تقویت کننده های ارائه شده در این پایان نامه از یک طبقه ورودی سورس مشترک و یک طبقه شبه کسکود تشکیل شده اند تا دستیابی هم زمان به عدد نویز پایین و گین بالا ممکن شود.

در این تحقیق، اثر چگالی جریان بر روی طبقات تقویت مختلف بررسی شده و با کاهش چگالی جریان طبقه سورس مشترک ورودی از مقدار بهینه ۰/۱۵ mA/μm به مقدار ۰/۰۸ mA/μm، مصرف توان در ضمن حفظ عملکرد مطلوب، کاهش داده شده است. به علاوه، به منظور کاهش عدد نویز تقویت کننده از تکنیک های مختلفی از جمله فیدبک خازنی و تبهگنی سلفی برای تحقق تطبیق ورودی استفاده شده است. برای تامین گین هموار در گستره فرکانسی وسیع نیز، تطبیق میان طبقه ای، بار بالا برنده شنت و فیلتر میان نگذر فاق به طور هم زمان در ساختار کسکود به کار گرفته شده اند.

همچنین، در این پایان نامه دو تکنیک خطی سازی برای بهبود عملکرد خطی تقویت کننده های کم نویز ارائه شده است. در یکی از این تکنیک ها، از یک طبقه خروجی تضعیف کننده با خطینگی بالا استفاده شده و در تکنیک دیگر با کمک گونه تغییر یافته تکنیک جمع آثار مشتقات اصلاح شده، ناخطینگی هدایت انتقالی ترانزیستور سورس مشترک در طبقه شبه کسکود، برای رسیدن به IIP3 بالا، کاهش داده شده است. به منظور بررسی کارایی تکنیک های ارائه شده، از آنالیز ولترا استفاده شده است. با استفاده از این تکنیک های خطی سازی، خطینگی تقویت کننده های کم نویز طراحی شده نزدیک به ۱۰ dB افزایش داده شده، در حالی که مصرف توان این تقویت کننده ها تنها به مقدار ناچیزی افزایش پیدا کرده است.

کلید واژه: تقویت کننده کم نویز، موج میلیمتری، ساختار استفاده مجدد جریان، خطی سازی، تکنیک جمع آثار مشتقات.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست اختصارات..... ج
فهرست علایم و نشانه ها..... ج
فهرست جدول‌ها..... ه
فهرست شکل‌ها..... و

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیش گفتار..... ۱
۱-۲- ملاحظات طراحی تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتریCMOS..... ۲
۱-۳- هدف از انجام تحقیق..... ۳
۱-۴- نوآوری تحقیق..... ۴
۱-۵- ساختار گزارش..... ۴

فصل ۲- مفاهیم و ساختارهای پایه

۲-۱- مقدمه..... ۵
۲-۲- نویز..... ۵
۲-۳- پارامترهای مهم در تقویت کننده های کم نویز..... ۷
۲-۴- شاخص های بهینه بودن طراحی..... ۱۰
۲-۵- توپولوژی های مدار..... ۱۰
۲-۵-۱- ساختار پایانه مقاومتی..... ۱۲
۲-۵-۲- ساختار گیت مشترک..... ۱۲
۲-۵-۳- ساختار فیدبک مقاومتی..... ۱۳
۲-۵-۴- ساختار تبهگن سلفی..... ۱۴
۲-۵-۵- ساختار کسکود..... ۱۵
۲-۶- مثال هایی از طراحی..... ۱۶
۲-۷- جمع بندی فصل..... ۱۹

فصل ۳- خطی سازی

۳-۱- مقدمه..... ۲۰
۳-۲- اهمیت خطینگی..... ۲۰
۳-۳- پدیده های غیرخطی در تقویت کننده های کم نویز..... ۲۱
۳-۴- تکنیک های خطی سازی..... ۲۲
۳-۴-۱- خطی سازی با استفاده از تکنیک پیشخور..... ۲۲

۳-۴-۲- خطی سازی با استفاده از فیدبک ۲۳
۳-۴-۳- خطی سازی با استفاده از بایاس بهینه گیت ۲۴
۳-۴-۴- خطی سازی با استفاده از تکنیک جمع آثار مشتقات ۲۵
۳-۴-۵- خطی سازی با استفاده از تکنیک اصلاح شده جمع آثار مشتقات ۲۸
۳-۴-۶- خطی سازی با استفاده از تکنیک بهبود یافته جمع آثار مشتقات ۲۹
۳-۵- کاهش حساسیت به ولتاژ تغذیه در روش MDS ۳۱
۳-۶- جمع بندی فصل ۳۲

فصل ۴- طراحی مدار تقویت کننده کم نویز

۴-۱- مقدمه ۳۳
۴-۲- ساختار کلی تقویت کننده طراحی شده ۳۳
۴-۲-۱- چگالی جریان و بایاس طبقات ۳۴
۴-۲-۲- طراحی طبقات تقویت کننده ۳۷
۴-۳- طراحی تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری با استفاده از فیدبک خازنی ۴۰
۴-۴- طراحی تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری با خطینگی بالا ۴۴
۴-۴-۱- افزایش خطینگی به کمک طبقه خروجی با خطینگی بالا ۴۵
۴-۴-۲- افزایش خطینگی به کمک گونه بهبود یافته روش MDS ۵۰
۴-۵- جمع بندی فصل ۵۶

فصل ۵- نتایج شبیه سازی ها

۵-۱- مقدمه ۵۷
۵-۲- نتایج شبیه سازی تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری با فیدبک خازنی ۵۷
۵-۳- نتایج شبیه سازی تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری با خطینگی بالا ۶۲
۵-۳-۱- خطی سازی تقویت کننده کم نویز با استفاده از طبقه خروجی با خطینگی بالا ۶۲
۵-۳-۲- خطی سازی تقویت کننده کم نویز با استفاده از گونه تغییر یافته روش MDS ۶۶
۵-۴- جمع بندی فصل ۷۷

فصل ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- مقدمه ۷۸
۶-۲- جمع بندی ۷۸
۶-۳- کارهای آینده ۷۹

فهرست مراجع ۸۱

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۸۵

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۸۸

فهرست اختصارات

Abbr.	Complete word
Abs	**Abs**olute Value
BW	**B**and **w**idth
CMOS	**C**omplementary **M**etal **O**xide **S**emiconductor
CP-1 dB	**1dB C**ompression **P**oint
DS	**D**erivative **S**uperposition
FF	**F**ast NMOS **F**ast PMOS
FOM	**F**igure **O**f **M**erit
FS	**F**ast NMOS **S**low PMOS
HDMI	**H**igh **D**efinition **M**edia **I**nterface
IDS	**I**mproved **D**erivative **S**uperposition
IIP3	**3**rd order **I**nput referred **I**ntercept **P**oint
IMD	**I**nter **M**odulation **D**istortion
ITRS	**I**nternational **T**echnology **R**oadmap for **S**emiconductors
KCL	**K**irchoff's **C**urrent **L**ow
LNA	**L**ow **N**oise **A**mplifier
MDS	**M**odified **D**erivative **S**uperposition
MIMO	**M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput
mm-wave	**M**illi**m**eter **wave**
PCNO	**P**ower **C**onstrained **N**oise **O**ptimization
PVT	**P**rocess, **V**oltage & **T**emperature variations
RF	**R**adio **F**requency
SF	**S**low NMOS **F**ast PMOS
SNR	**S**ignal to **N**oise **R**atio
SOI	**S**ilicon **O**n **I**nsulator
SS	**S**low NMOS **S**low PMOS
TT	**T**ypical NMOS **T**ypical PMOS
UWB	**U**ltra **W**ide**b**and
VSWR	**V**oltage **S**tanding-**w**ave **R**atio
WPAN	**W**ireless **P**ersonal **A**rea **N**etwork

فهرست علایم و نشانه ها

عنوان	علامت اختصاری
فرکانس گذر	f_t
ماکزیمم فرکانس نوسان	f_{max}
فرکانس گوشه	f_c
هدایت درین برای ولتاژ درین_سورس صفر	g_{d0}
هدایت گیت وابسته به فرکانس	g_g
چگالی نویز جریانی القا شده گیت	$\overline{i_{ng}^2}$
چگالی نویز جریانی درین	$\overline{i_{nd}^2}$
ضریب همبستگی نویز القایی گیت و درین	c
مقاومت صفحه ای پایانه گیت	$R_{\square}$
پهنای کانال	W
طول کانال	L
مقاومت گیت ترانزیستور	R_g
ضریب نویز	F
عدد نویز	NF
گین	G
ضریب پایداری اشترن	K
ضریب بازگشت ورودی	S_{11}
جداسازی معکوس	S_{12}
بهره	S_{21}
ضریب بازگشت خروجی	S_{22}
زیمنس (واحد هدایت انتقالی)	S
ضریب نویز حرارتی کانال	γ
مقاومت منبع	R_s
هدایت انتقالی سیگنال کوچک	g_{m1}
مشتق مرتبه اول هدایت انتقالی سیگنال کوچک	g_{m2}
مشتق مرتبه دوم هدایت انتقالی سیگنال کوچک	g_{m3}
خازن گیت در واحد سطح	C_{ox}
فرکانس فاق	f_n
قابلیت حرکت الکترون ها	μ_n
مقاومت کانال	R_{ch}
ثابت نویز القایی گیت	δ

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۵-۱) اثرات تغییرات پروسه بر پارامترهای تقویت کننده در دمای ^{o}K ۲۹۰ .....۵۸
جدول (۵-۲) اثر تغییرات دما بر پارامترهای تقویت کننده کم نویز برای مدل TT ۵۹
جدول (۵-۳) اثر تغییرات هم زمان دما و گوشه های پروسه بر روی تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی (بدترین حالت) ۵۹
جدول (۵-۴) اثرات تغییرات پروسه بر پارامترهای تقویت کننده در دمای ^{o}K ۲۹۰ .....۶۰
جدول (۵-۵) اثر تغییرات دما بر پارامترهای تقویت کننده کم نویز برای مدل TT ۶۱
جدول (۵-۶) اثر تغییرات دما و گوشه های پروسه بر روی تقویت کننده طراحی شده (بدترین حالت)...۶۱
جدول (۵-۷) اثرات تغییرات پروسه بر پارامترهای تقویت کننده در دمای ^{o}K ۲۹۰ .....۶۶
جدول (۵-۸) اثر تغییرات دما بر پارامترهای تقویت کننده کم نویز برای مدل TT ۶۶
جدول (۵-۹) اثر تغییرات دما و گوشه های پروسه بر روی تقویت کننده طراحی شده (بدترین حالت)...۶۶
جدول (۵-۱۰) اثرات تغییرات پروسه بر پارامترهای تقویت کننده در دمای ^{o}K ۲۹۰ .....۶۸
جدول (۵-۱۱) اثر تغییرات دما بر پارامترهای تقویت کننده کم نویز برای مدل TT ۶۸
جدول (۵-۱۲) اثر تغییرات دما و گوشه های پروسه بر روی تقویت کننده طراحی شده (بدترین حالت)۶۸
جدول (۵-۱۳) اثر تغییرات دما بر پارامترهای تقویت کننده کم نویز برای مدل TT ۷۳
جدول (۵-۱۴) اثرات تغییرات پروسه بر پارامترهای تقویت کننده در دمای ^{o}K ۲۹۰ .....۷۴
جدول (۵-۱۵) اثر تغییرات دما و گوشه های پروسه بر روی تقویت کننده طراحی شده (بدترین حالت)۷۴
جدول (۵-۱۶) مقایسه تقویت کننده های کم نویز طراحی شده در این تحقیق با کارهای برجسته موجود در گستره فرکانسی ۲۵-۳۵ GHz ۷۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱) منابع عمده نویز در ترانزیستور ماسفت ۷
شکل (۲-۲) منحنی توان خروجی بر حسب توان ورودی برای هارمونیک های اول و سوم ۸
شکل (۲-۳) توپولوژی های طبقه ورودی ۱۱
شکل (۲-۴) تقویت کننده با فیدبک مقاومتی ۱۳
شکل (۲-۵) ساختار تبهگن سلفی ۱۴
شکل (۲-۶) تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری طراحی شده در مرجع ۱۵
شکل (۲-۷) تقویت کننده کم نویز ارائه شده در مرجع [۲۵]..... ۱۷
شکل (۲-۸) تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری ارائه شده در مرجع [۲۶]..... ۱۸
شکل (۲-۹) تقویت کننده کم نویز ارائه شده در مرجع [۲۷]..... ۱۸
شکل (۳-۱) تکنیک حذف پیشخور ۱۹
شکل (۳-۲) تقویت کننده فیدبک مقاومتی با ساختار معکوس کننده ۲۴
شکل (۳-۳) نمای یک تقویت کننده کم نویز خطی شده با استفاده از بایاس بهینه گیت ۲۴
شکل (۳-۴) نمای یک تقویت کننده کم نویز خطی شده با استفاده از روش DS ۲۶
شکل (۳-۵) استفاده از ترانزیستور دوقطبی به عنوان ترانزیستور کمکی در روش DS ۲۶
شکل (۳-۶) خطی سازی با استفاده از روش DS اصلاح شده ۲۸
شکل (۳-۷) ضرایب مرتبه سوم سری توانی ۲۸
شکل (۳-۸) نقطه تقارن ذاتی موجود در اعوجاج مرتبه دوم ترانزیستور ماسفت ۳۰
شکل (۳-۹) استفاده از زوج PMOS-NMOS در روش IDS ۳۰
شکل (۳-۱۰) حذف اعوجاج مرتبه دوم در تکنیک MDS ۳۱
شکل (۳-۱۱) استفاده از دو ترانزیستور کمکی برای رفع حساسیت خطی سازی به ولتاژ گیت_سورس..۳۲
شکل (۴-۱) مراحل طراحی تقویت کننده کم نویز..... ۳۳
شکل (۴-۲) f_T و f_{max} به عنوان تابعی از جریان درین در واحد عرض گیت (بر حسب میکرون) برای تکنولوژی های CMOS معمولی و SOI ۳۵
شکل (۴-۳) (a) نتایج شبیه سازی عدد نویز می نیمم در ۱۰ GHz به عنوان تابعی از جریان درین در واحد عرض گیت (بر حسب میکرون) برای ماسفت نوع n در تکنولوژی های مختلف (b) عدد نویز می نیمم به عنوان تابعی از چگالی جریان درین در فرکانس های مختلف برای یک ماسفت 80×1μm×130nm در تکنولوژی 130 nm..... ۳۵
شکل (۴-۴) عدد نویز می نیمم به عنوان تابعی از چگالی جریان برای ماسفت های نوع n با پهنای 80×1μm در تکنولوژی های 90nm و 130nm..... ۳۵
شکل (۴-۵) f_T و NF_{min} در فرکانس های مختلف به عنوان تابعی از جریان درین در فرکانس های

مختلف به عنوان تابعی از جریان درین در واحد عرض آن برای ماسفت نوع n و ساختار کسکود در تکنولوژی 90nm ۳۶
شکل (۴-۶) ساختار کسکود معمولی ۳۷
شکل (۴-۷) ساختار استفاده مجدد جریانی ۳۸
شکل (۴-۸) ساختار استفاده مجدد جریانی با تطبیق بین طبقه ای ۳۸
شکل (۴-۹) بر طرف کردن مشکل فیدبک از خروجی با افزودن سلف L_{d1} ۳۹
شکل (۴-۱۰) نمای تقویت کننده کم نویز با استفاده از فیدبک خازنی در ورودی ۴۰
شکل (۴-۱۱) مدار تطبیق ورودی تقویت کننده کم نویز شکل (۴-۱۰) ۴۴
شکل (۴-۱۲) نمای تقویت کننده کم نویز خطی شده با استفاده از طبقه خروجی با خطینگی بالا..... ۴۵
شکل (۴-۱۳) مدار معادل سیگنال کوچک بخش ورودی ۴۵
شکل (۴-۱۴) شبکه های تضعیف کننده نوع (a) π و (b) T ۴۶
شکل (۴-۱۵) نمای طبقه خروجی تقویت کننده کم نویز ۴۷
شکل (۴-۱۶) تقویت کننده کم نویز معرفی شده در بخش (۴-۴-۲)..... ۵۰
شکل (۴-۱۷) مدار معادل سیگنال کوچک بخش ورودی تقویت کننده ۵۱
شکل (۴-۱۸) تقویت کننده کم نویز خطی شده با کمک تکنیک MDS ۵۲
شکل (۴-۱۹) تقویت کننده کم نویز خطی شده به کمک گونه بهبود یافته تکنیک MDS ۵۳
شکل (۴-۲۰) مدار معادل ترانزیستورهای M_2 و M_4 جهت تحلیل عملکرد خطی ۵۴
شکل (۴-۲۱) دیاگرام برداری برای اجزای IMD3 (a) روش DS معمولی (b) روش DS اصلاح شده ۵۵
شکل (۴-۲۲) مدار بخش خروجی تقویت کننده پس از اضافه کردن ترانزیستور PMOS ۵۶
شکل (۵-۱) منحنی های بهره و عدد نویز تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی ۵۷
شکل (۵-۲) منحنی ضرایب بازگشت ورودی و خروجی و جداسازی معکوس تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی ۵۸
شکل (۵-۳) منحنی های IIP3 و نقطه فشردگی 1 dB تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی ۵۸
شکل (۵-۴) منحنی بهره و عدد نویز تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی پس از کاهش چگالی جریان طبقه اول ۵۹
شکل (۵-۵) منحنی ضرایب بازگشت ورودی و خروجی و جداسازی معکوس تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی پس از کاهش چگالی جریان طبقه اول ۶۰
شکل (۵-۶) منحنی های IIP3 و نقطه فشردگی 1 dB تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی پس از کاهش چگالی جریان طبقه اول ۶۰
شکل (۵-۷) مقایسه نتایج شبیه سازی های تقویت کننده کم نویز با فیدبک خازنی قبل (منحنی های خط چین) و بعد (منحنی های تو پر) از کاهش چگالی جریان طبقه اول ۶۱
شکل (۵-۸) منحنی بهره و عدد نویز تقویت کننده کم نویز معرفی شده در بخش (۴-۴-۱)..... ۶۳
شکل (۵-۹) منحنی ضرایب بازگشت ورودی و خروجی و جداسازی معکوس تقویت کننده کم نویز معرفی شده در بخش (۴-۴-۱)..... ۶۳

شکل (۵-۱۰) منحنی های IIP3 و نقطه فشردگی 1 dB تقویت کننده کم نویز معرفی شده در بخش (۴-۴-۱) ۶۳
شکل (۵-۱۱) منحنی بهره و عدد نویز تقویت کننده کم نویز بعد از افزودن طبقه خروجی ۶۴
شکل (۵-۱۲) منحنی ضرایب بازگشت ورودی و خروجی و جداسازی معکوس تقویت کننده کم نویز بعد از اضافه کردن طبقه خروجی ۶۴
شکل (۵-۱۳) منحنی های IIP3 و نقطه فشردگی 1 dB تقویت کننده کم نویز بعد از اضافه کردن طبقه خروجی ۶۵
شکل (۵-۱۴) مقایسه پارامترهای تقویت کننده های کم نویز قبل (منحنی های خط چین) و بعد (منحنی های توپر) از اضافه کردن طبقه تطبیق خروجی ۶۵
شکل (۵-۱۵) منحنی بهره و عدد نویز تقویت کننده کم نویز معرفی شده در بخش (۴-۴-۲)..... ۶۷
شکل (۵-۱۶) منحنی ضرایب بازگشت ورودی و خروجی و جداسازی معکوس تقویت کننده کم نویز معرفی شده در بخش (۴-۴-۲)..... ۶۷
شکل (۵-۱۷) منحنی های IIP3 و نقطه فشردگی 1 dB تقویت کننده کم نویز معرفی شده در بخش (۴-۴-۲) ۶۸
شکل (۵-۱۸) منحنی بهره و عدد نویز تقویت کننده کم نویز خطی شده با تکنیک MDS ۶۹
شکل (۵-۱۹) منحنی ضرایب بازگشت ورودی و خروجی و جداسازی معکوس تقویت کننده کم نویز خطی شده با تکنیک MDS ۶۹
شکل (۵-۲۰) ضریب بازگشت خروجی تقویت کننده کم نویز قبل و بعد از اضافه کردن مقاومت R_{sub} ..۶۹
شکل (۵-۲۱) منحنی g_{m3} ترانزیستور اصلی و کمکی و منحنی $g_{m3\text{-}total}$ ۷۰
شکل (۵-۲۲) منحنی های IIP3 و نقطه فشردگی 1 dB تقویت کننده کم نویز خطی شده با تکنیک MDS ۷۰
شکل (۵-۲۳) منحنی بهره و عدد نویز تقویت کننده کم نویز خطی بعد از اضافه کردن ترانزیستور PMOS ۷۱
شکل (۵-۲۴) منحنی ضرایب بازگشت ورودی و خروجی و جداسازی معکوس تقویت کننده کم نویز خطی بعد از اضافه کردن ترانزیستور PMOS ۷۲
شکل (۵-۲۵) منحنی های IIP3 و نقطه فشردگی 1 dB تقویت کننده کم نویز خطی بعد از اضافه کردن ترانزیستور PMOS ۷۲
شکل (۵-۲۶) مقایسه پارامترهای تقویت کننده قبل و بعد از اعمال تکنیک خطی سازی ۷۳
شکل (۵-۲۷) بررسی اثر تغییر ابعاد ترانزیستورها بر روی نتایج شبیه سازی ها قبل و بعد از تغییر ۷۵
شکل (۵-۲۸) بررسی اثر تغییر منبع تغذیه بر روی نتایج شبیه سازی ها قبل و بعد از تغییر ۷۶
شکل (۵-۲۹) بررسی اثر تغییر ولتاژ بایاس ترانزیستورهای اصلی ترارسانا بر روی خطینگی تقویت کننده کم نویز ۷۶

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیش گفتار

انتقال، ذخیره و پردازش اطلاعات از عمده ترین نیرو محرکه های پیشرفت علمی در سال های اخیر بوده است. در این میان، تکنولوژی ارتباطات به سوی جایگاه برجسته ای در حرکت است. رشد انفجاری صنعت بی سیم، دسترسی جهانی به اینترنت و افزایش تقاضا برای انتقال اطلاعات با سرعت و نرخ داده بالا، پتانسیلی قوی برای توسعه صنعت الکترونیک جهانی فراهم نموده است.

برای انتقال داده به سیستم های فرستنده_گیرنده نیاز است. به طور خلاصه، ملاحظات نسل بعدی این سیستم ها برای کاربردهای مخابراتی و رادار، توان پایین، ابعاد کوچک، وزن کم، قیمت ارزان، کارایی مطلوب و قابلیت اطمینان بالاست [۱]. در سیستم های مخابراتی، گیرنده مسئول بازیابی اطلاعات ارسالی از سیگنال ضعیف دریافتی که در معرض نویز و تداخل است، می باشد. گیرنده باید گین بالا و عدد نویز پایینی داشته باشد. همچنین باید قابلیت حذف کانال های مجاور و فرکانس های تصویر و تداخل را نیز دارا باشد.

یکی از مهمترین واحدها در قسمت گیرنده، تقویت کننده کم نویز[1] است که برای تقویت سیگنال های دریافتی از آنتن به کار می رود. برای یک تقویت کننده کم نویز لازم است تا در حالی که کمترین میزان نویز و اعوجاج را اضافه می کند، توان سیگنال را به میزان قابل قبولی تقویت نماید تا بازیابی سیگنال در طبقات بعدی سیستم امکان پذیر باشد.

در سیستم های مخابراتی حجم انتقال اطلاعات به صورت مستقیم با پهنای باند و لگاریتم نسبت سیگنال به نویز[2] متناسب است. در نتیجه، سیستم های پهن باند قادرند در بازه زمانی مشخص، اطلاعات بیشتری را نسبت به سیستم های باند باریک منتقل کنند[۲]. تقاضا برای پهنای باند بیشتر، نیاز به نرخ داده بالا و ترافیک طیفی منجر به مهاجرت به باندهای فرکانسی بالاتر شده است. به همین دلیل، سیستم های با باند گسترده نظیر سیستم های فرا پهن باند[3] و سیستم های موج میلیمتری[4] در سال های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته اند.

در حالی که سایر سیستم های رقیب که نرخ داده بالایی دارند (نظیر سیستم های فرا پهن باند و سیستم های چند ورودی _ چند خروجی[5])، نرخ انتقال اطلاعاتشان در حد چند صد Mb/s است، سیستم های موج میلیمتری می توانند به نرخ داده چند Gb/s دست یابند. از سوی دیگر، در مقایسه با سیستم های موج میلیمتری، سیستم های UWB از محدودیت سطح توان مجاز و سیستم های MIMO از محدودیت در حداکثر تعداد آنتن های قابل استفاده رنج می برند.

[1] Low Noise Amplifier (LNA)
[2] Signal to Noise Ratio (SNR)
[3] Ultra wideband (UWB)
[4] mm-wave
[5] MIMO

از سیستم های موج میلیمتری در مخابرات ماهواره ای، رادارهای با برد کم و وضوح بالا، واسط های چند رسانه ای بی سیم با وضوح بالا[1]، شبکه های بی سیم خانگی[2]، ایستگاه های ارتباطی بی سیم[3] و ... استفاده می شود [۳]. به دلیل کاربرد بسیار خوب سیستم های موج میلیمتری در مخابرات با برد کوتاه، طراحی مدارات موج میلیمتری به موضوع خوبی جهت تمرکز تحقیقات تبدیل شده است.
در این تحقیق، طراحی گونه ای از تقویت کننده های کم نویز با باند گسترده، تحت عنوان "تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری" مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۲- ملاحظات طراحی تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری CMOS

به طور کلی طراحی تقویت کننده های کم نویز با چالش های متعددی مواجه است. الزامات طراحی تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری با باند گسترده را می توان به شرح زیر خلاصه کرد [۱]:

۱. داشتن گین بالا و یکنواخت: در هر مدار فعالی، گین در فرکانس های بالا به علت خازن های گیت_درین و گیت_سورس افت می کند. این اثرات باعث می شوند که با افزایش فرکانس، گین کاهش یابد و نهایتا در فرکانس گذر f_T، ترانزیستور دیگر به عنوان یک تقویت کننده کار نمی کند. بنابراین وجود تکنیک هایی برای جبران کاهش گین ضروری خواهد بود.

۲. رسیدن به حداقل عدد نویز: به طور کلی با افزایش فرکانس عدد نویز افزایش می یابد. به علاوه، در فرکانس های موج میلیمتری، به علت افزایش اثرات پارازیتیک و بستر پر تلف در پروسه های CMOS دیجیتال، با عدد نویز بالایی مواجه خواهیم بود. در نتیجه، دستیابی به عدد نویز پایین از چالش های طراحی تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری خواهد بود.

۳. حداقل کردن همه انواع ناخطینگی‌ها: با افزایش فرکانس، به علت افزایش اثرات خازن های پارازیتیک، علاوه بر ناخطینگی‌های مرتبه سوم، ناخطینگی‌های مرتبه دوم نیز از طریق فیدبک در کاهش میزان IIP3 تقویت کننده نقش خواهند داشت. بنابراین به تکنیک هایی احتیاج خواهد بود که به طور همزمان باعث حذف یا کاهش مقدار این ناخطینگی‌ها شوند.

۴. فراهم کردن تطبیق امپدانس مناسب در دهانه های سیگنال: با توجه به تغییر امپدانس ورودی تقویت کننده با فرکانس، فراهم کردن تطبیق مناسب در ورودی و خروجی تقویت کننده، که با تغییر فرکانس تغییر نکند، یکی از ضرورت های طراحی است.

[1] Wireless HDMI
[2] WPAN (Wireless personal area network)
[3] Wireless docking stations

۵. پایداری بی قید و شرط: از آن جایی که با افزایش فرکانس ایزولاسیون معکوس بین ورودی و خروجی کاهش یافته و در نتیجه احتمال نوسان افزایش می یابد، طراحی تقویت کننده ای که به صورت بی قید و شرط در باند مورد نظر پایدار باشد، یکی دیگر از چالش های طراحی خواهد بود.

۶. مصرف توان کم: با توجه به گرایش روز افزون به ابعاد کوچکتر و وزن کمتر، مصرف توان کم از الزامات طراحی هر مدار الکترونیکی به خصوص در سیستم های فرستنده_گیرنده بی سیم خواهد بود.

برآورده سازی همزمان موارد مذکور محدودیت های زیادی را بر طراح تحمیل می کند. در فصل های بعد در مورد هر یک از موارد فوق و راهکار پاسخگویی به آن ها، بیشتر صحبت خواهیم کرد.

در این تحقیق برای طراحی مدار تقویت کننده کم نویز از تکنولوژی CMOS استفاده شده است، زیرا علی رغم این که قابلیت تحمل توان[1] در CMOS ضعیف است و مدل نویزی فرکانس بالا برای ترانزیستورهای CMOS از دقت بالایی برخوردار نیست، این تکنولوژی نسبت به سایر تکنولوژی های مورد استفاده ارزان تر بوده و از قابلیت تجمیع بالاتری برخورداراست [۲]. به علاوه با کوچکتر شدن تکنولوژی، عملکرد نویزی و پهنای باند CMOS های نانومتری بهبود یافته است.

با این حال استفاده از پروسه های CMOS دیجیتال برای طراحی تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری مشکلاتی را بر طراح تحمیل می کند که از جمله آن ها می توان به موارد زیر اشاره کرد [۴]:
به دلیل هدایت انتقالی پایین، ترانزیستور گین کمتری در باند مورد نظر دارد؛ بنابراین فضای کمتری برای اشکالات مدلسازی و عدم تطابق ها وجود خواهد داشت. به علاوه بستر هادی، تلفات پارازیتیک اضافه می کند که این خود مدلسازی قطعات فعال و غیر فعال را پیچیده می نماید. از سوی دیگر، در اثر مجاورت بیشتر، اثرات خازنی در اینجا افزایش یافته و در نتیجه فرکانس رزونانس خودی[2] قطعات غیرفعال کاهش می یابد. همچنین در مقایسه با بسترهای عایق، ضریب کیفیت المان های تطبیق، خطوط اتصال و نوسان گرها، در پروسه های CMOS دیجیتال کمتر است.

۱-۳- هدف از انجام تحقیق

هدف از این تحقیق، طراحی یک تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری برای فرکانس های ۲۵ تا ۳۵ GHz با تغییرات گین کمتر از ±۰/۲۵ dB و با استفاده از تکنولوژی 0.13µm CMOS است. از دیگر مشخصات تقویت کننده کم نویز مورد نظر، دارا بودن گین بیش از ۱۰dB، عدد نویز کمتر از ۵dB، خطینگی بالاتر از ۰dBm، جداسازی ورودی_خروجی بالا و مصرف توان کم (کمتر از ۲۵ میلی وات) است.

[1] Power handling
[2] Self resonance frequency

این تقویت کننده کم نویز می تواند در رادارهای با وضوح بالا، در ارتباطات یک نقطه به چند نقطه[1] و یا در پایانه های زمینی VSAT[2] مورد استفاده قرار بگیرد است.

بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد تقویت کننده کم نویز و ارائه ساختار مطلوب برای آن از جمله اهداف اولیه این تحقیق بوده است. همچنین پس از بررسی کارهایی که پیش از این در زمینه تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری ارائه شده است، تحقق راهکارهایی به منظور بهینه سازی عملکرد نویزی، بهبود عملکرد خطی و افزایش همواری گین تقویت کننده کم نویز، به عنوان دیگر اهداف این تحقیق انتخاب شدند.

۱-۴- نوآوری تحقیق

طراحی مدارات موج میلیمتری CMOS از جمله مواردی است که پیش از این کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق یک تقویت کننده کم نویز موج میلیمتری طراحی شده و مسائل و مشکلات طراحی در فرکانس های بالا مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. بررسی اثر چگالی جریان ترانزیستورها بر روی عملکرد تقویت کننده و استفاده از آن در کاهش توان مصرفی در ضمن حفظ عملکرد مطلوب، و نیز بررسی راهکاری جهت کاهش عدد نویز تقویت کننده از جمله مواردی است که در این گزارش در مورد آن ها تحقیق شده است. به علاوه، در این پایان نامه دو تکنیک مداری جدید برای افزایش خطینگی تقویت کننده های کم نویز پیشنهاد و با ارائه محاسبات تئوری و نتایج شبیه سازی ها در مورد کارایی آن ها بحث شده است.

۱-۵- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در شش فصل تنظیم و نگارش شده است. پس از بیان مقدمه و اهداف تحقیق در فصل اول، در فصل دوم به بررسی مفاهیم پایه، پارامترهای تقویت کننده های کم نویز، ساختارهای متداول تقویت کننده های کم نویز موج میلیمتری و مزایا و معایب هر یک از آن ها خواهیم پرداخت. از آن جایی که قسمت عمده ای از کار طراحی، به بررسی راه های بهبود عملکرد خطی تقویت کننده های کم نویز اختصاص یافته است، در فصل سوم تکنیک های خطی سازی که پیش از این مورد استفاده قرار گرفته اند، بررسی خواهند شد. در دو فصل چهارم و پنجم مدار های طراحی شده، به همراه استراتژی طراحی، محاسبات تئوری و نتایج شبیه سازی ها ارائه خواهند شد و مقایسه ای با کارهایی که پیش از این در این حوزه انجام شده است، صورت خواهد گرفت. نهایتا در فصل ششم جمع بندی کوتاهی از آنچه در این پایان نامه بیان شده است، آورده شده و پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارائه خواهد شد.

[1] Point to Multipoint Communication
[2] Very Small Aperture Terminal