بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق–مخابرات

طراحی و ساخت فیلترهای تغییرپذیر SIW در دو باند

مجید نوروزی عرب

استاد راهنما:

دکتر زهرا اطلس باف

زمستان ۱۳۹۰

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 نگارنده در رشته **مهندسی برق-مخابرات گرایش میدان** است که در سال **۱۳۹۰/۱۱/۱۵** در دانشکده **مهندسی برق و کامپیوتر** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر **زهرا اطلس باف** 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 **مجید نوروزی عرب** دانشجوی رشته **مهندسی برق-مخابرات گرایش میدان** مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: مجید نوروزی عرب

تاریخ و امضا: ۱۳۹۰/۱۲/۲۳

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

امضاء

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

گزارشی که در پیشِ رو دارید نسخه‌ی اولیه پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان " طراحی و ساخت فیلترهای تغییرپذیر SIW در دو باند" می باشد. این پایان نامه حاوی مطالبی درباره فیلترهای تغییرپذیر است که توجه اصلی خود را روی دسته ای از این فیلترها بر مبنای موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه که از ساختارهای فراماده بهره می برند معطوف داشته است. سعی شده در طول گزارش، پیوستگی مباحث حفظ شود. لذا در فصل های ۲ و ۳ به اصول اولیه ساختارهای موجبری مجتمع شده در زیرلایه و ساختارهای فراماده اشاره شده است. در فصل چهارم به تحقیقات و موضوعاتی که اخیراً در مورد ساختارهای موجبری بارگذاری شده با فرامواد انجام شده پرداخته شده است و با بیان تحلیل مربوط به آنها دو فیلتر تغییرپذیر ارائه شده اند. در ادامه نیز به یک نوع دیگر از فیلترهای تغییرپذیر که از ساختارهای موجبری مجتمع شده در زیرلایه همراه با فراماده مکمل بهره می برد پرداخته شده است. مطمئناً این کار دارای نقایصی است که می‌تواند با پیشنهادهای سودمند شما تکامل بیشتری یابد. از این‌رو بنده را در بهبود آن یاری دهید و پیشنهادات و نکات ارزشمند خود را به نشانی پست الکترونیک اینجانب (majid.noroozi@ieee.org) ارسال نمایید.

پیش از همه و بیش از همه برخود واجب می دانم از استاد راهنمای عزیزم سرکار خانم دکتر زهرا اطلس باف کمال تشکّر و قدردانی را داشته باشم. همچنین از تمامی دوستانم به خصوص جناب آقای مهندس فرهاد فرزامی که در طول اجرای پروژه همکاری صمیمانه ای با بنده داشته اند سپاسگزاری می‌نمایم.

مجید نوروزی عرب
دانشجوی کارشناسی ارشد – مخابرات،
دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت مدرّس،
زمستان ۱۳۹۰.

چکیده

فیلترهای مایکروویوی تغییرپذیر نقش بسیار مهمی در بهبود توانایی حال حاضر و آینده سیستم‌های بی سیم ایفا می‌کنند. وجود سیگنال های مزاحم و ناخواسته در طیف فرکانسی، که یک منبع بسیار ارزشمند و محدود است، یکی از مشکلات این سیستم هاست. برای حل این مشکل ایجاد باندهای باریک و تنظیم‌پذیر حذف در باند عبور یک فیلتر میان گذر UWBست. یک چنین فیلتر تغییرپذیری برای رادارهای پهن باند یا سیستم های جنگی الکترونیکی نیز می‌تواند مفید باشد. علاوه بر این با توجه به کاربردهای آینده رادیوی شناختی و رادار، مسلم است که فیلترهای مایکروویوی تغییرپذیر الکترونیکی نقش بسیار مهمی در سیستم های بی‌سیم ایفا می‌کنند.

از سویی دیگر فیلترهای میان گذر تغییرپذیر با قابلیت تطبیق پهنای باند عبور برای حذف نویز خارج از باند، فشرده‌سازی اجزای طیفی و حفظ رنج دینامیکی تحت شرایط مختلف دریافت سیگنال، اهمیت ویژه‌ای دارند. در ضمن عواملی چون اندازه و انعطاف‌پذیر بودن این فیلترها از مزایای بسیار مهم این فیلترها نسبت به جای‌گزین‌های قدیمی آن‌ها (بانک فیلترها) می‌باشد. مشخصاً بسط و توسعه روش های مؤثر جهت تنظیم فرکانس مرکزی و پهنای باند پاسخ فیلتر یکی از مهمترین اهداف طراحی فیلترهای تغییرپذیر است.

کلید واژه: موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه، فرامواد، فیلترهای تغییرپذیر بر مبنای موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه و تشدید کننده های تعبیه شده در زیرلایه، منحنی های پاشندگی، مدل مدار معادل، پارامترهای سازندگی، نفوذپذیری نسبی عرضی منفی و ....

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۹
۱-۱- پیشگفتار ۹
۱-۲- تاریخچه ۹
۱-۳- هدف پژوهش و سازماندهی پایان نامه ۹

فصل ۲- موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه ۱۲
۲-۱- مقدمه ۱۲
۲-۲- تاریخچه موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه ۱۴
۲-۳- خواص موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه ۱۶
۲-۴- تحلیل موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه ۱۷
۲-۴-۱- تحلیل با استفاده از مفهوم امپدانس سطحی ۱۸
۲-۴-۲- عرض معادل موجبر مجتمع شده در زیرلایه ۲۱
۲-۴-۳- تلفات SIW ۲۲
۲-۴-۴- فرکانس قطع ۲۳
۲-۴-۵- ساختار SIW مناسب ۲۳
۲-۴-۶- نمونه هایی از عناصر پیاده سازی شده بر روی SIW ۲۴

فصل ۳- فراماده، تحقق عملی و کاربردهای آن ۲۵
۳-۱- مقدمه ۲۵
۳-۲- آشنائی با فراماده ۲۵
۳-۳- قوانین الکترومغناطیس و خواص انتشاری در محیط فراماده ۲۸
۳-۳-۱- ضریب شکست موثر منفی ۲۸
۳-۳-۲- انتشار در محیط فراماده ۲۸
۳-۳-۳- مدل‌سازی فراماده ۲۹
۳-۳-۴- معکوس شدن قانون اسنل: شکست منفی ۳۰
۳-۳-۵- فراماده با ضریب شکست صفر ۳۰
۳-۳-۶- شرط آنتروپی (شرط انرژی) ۳۱
۳-۴- تحقق عملی ۳۲
۳-۴-۱- سیم نازک (فراماده با گذردهی الکتریکی منفی ENG) ۳۲

۳-۴-۲- تشدید کننده با حلقه شکافدار یا SRR (فراماده با نفوذپذیری منفی: MNG) ۳۳
۳-۴-۳- فراماده DNG متشکل از سیم نازک و SRR ۳۵
۳-۴-۴- ساختارهای متفاوت SRR و فراماده ۳۶
۳-۵- استخراج پارامترهای محیطی فراماده با استفاده از قانون علیت ۳۸
۳-۵-۱- الگوریتم استخراج پارامترهای محیطی ۳۹
۳-۵-۱-۱- مدلسازی یک تیغه بزرگ با یک سلول تشکیل دهنده آن ۳۹
۳-۵-۱-۲- محاسبه امپدانس و قسمت موهومی ضریب شکست ۳۹
۳-۵-۱-۳- تعیین قسمت حقیقی ضریب شکست ساختار فراماده ۴۰
۳-۵-۱-۴- تعیین ثابت انتشار ساختار فراماده ۴۰
۳-۶- بررسی ساختارهای مختلف براساس نحوه استخراج پارامترهای محیطی ۴۰
۳-۷- کاربردهای فراماد ۴۴

فصل ۴- فیلترهای تغییرپذیر بر مبنای ساختارهای موجبری مجتمع شده در زیرلایه و تشدید کننده های حلقه شکافدار تعبیه شده در زیرلایه ۴۵

۴-۱- مقدمه ۴۵
۴-۲- موجبر بارگذاری شده با SRR ۴۶
۴-۲-۱- تحلیل موجبر بارگذاری شده با SRR ۴۸
4-2-2- چالش های تحلیل موجبر بارگذاری شده با SRR ۵۱
۴-۲-۳- تحلیل موجبر بارگذاری شده با SRR از طریق حل معادلات موج در آن ۵۲
۴-۲-۴- تحلیل موجبر بارگذاری شده با SRR با مدل خط انتقال ۶۰
4-2-5- موجبر بارگذاری شده با انواع تشدید کننده های تک محوره ۶۲
۴-۳- حلقه های شکاف دار تعبیه شده در زیرلایه ۶۶
۴-۴- ساختار SIW بارگذاری شده با ESRR و تحلیل آن ۶۸
۴-۴-۱- بارگذاری SIW با ESRR های با فرکانس تشدید متفاوت ۷۰
۴-۵- فیلتر پهن باند SIW مبتنی بر ESRR ها ۷۰
۴-۵-۱- ساختار ESRR ۷۱
۴-۵-۲- ساختار SIW بارگذاری شده با ESRR ۷۳
۴-۶- فیلتر تغییرپذیر ناچ ۷۶
۴-۶-۱- سلول واحد ۷۷
۴-۶-۲- ساختار فیلتر تغییرپذیر ناچ ۷۸
۴-۷- فیلتر تغییرپذیر SIW مبتنی بر ساختارهای فراماده مکمل ۸۱
۴-۸- توصیف مدل خط انتقال در ساختارهای معمولی راستگرد ۸۲
۴-۹- ساختار چپگرد براساس مدل خط انتقال ۸۲
۴-۱۰- فیلتر تغییرپذیر SIW بر مبنای ساختار مکمل فراماده ۸۹
۴-۱۱- تحلیل فیلتر پهن باند ۹۲

فصل ۵- نتیجه گیری ۹۶

۵-۱- پیشنهادها ۹۶
واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی ۹۷
واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی ۹۹
پیوست ۱۱۷

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
فرکانس قطع	f_c

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مشخصات ۴ زیرلایه ۱۳
جدول ۴-۱: شرایط لازم برای انتشار ۶۴
جدول ۴-۲: پارامترهای هندسی مربوط به سلول واحد و ساختار SIW ۷۸
جدول ۴-۳: پارامترهای هندسی مربوط به سلول واحد ۹۰
جدول ۴-۴: پارامترهای هندسی مربوط به فیلتر پهن باند ۹۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: منحنی تغییرات تلف خطوط مایکرواستریپ ساخته شده روی عایق های گوناگون [36]. ۱۳
شکل ۲-۲: ساختار یک نمونه موجبر با دیواره های ستونی. ۱۴
شکل ۲-۳: ساختار انتقال از خط مایکرواستریپ به موجبر مجتمع شده در زیرلایه [39]. ۱۵
شکل ۲-۴: توزیع جریان مود غالب، TE_{10}، در یک موجبر مستطیلی [41]. ۱۷
شکل ۲-۵: معادل سازی مود غالب TE0n در یک موجبر مستطیلی با دو موج صفحه ای. ۱۹
شکل ۲-۶: نمای بالایی ساختار SIW در روش تحلیل بر اساس مفهوم امپدانس سطحی. ۱۹
شکل ۲-۷: مدار معادل ساختار SIW در روش تشدید عرضی. ۲۰
شکل ۲-۸: مدل سازی فضای میان دو ویا برای محاسبه تلفات نشتی SIW. ۲۲
شکل ۲-۹: محدوده های مختلف ساختار SIW [50]. ۲۳
شکل ۳-۱: شکست معمولی (case 1) و شکست منفی (case 2) ۲۶
شکل ۳-۲: تقسیمبندی مواد براساس علامت μ و ε [63]. ۲۶
شکل ۳-۳: بردارهای میدان الکتریکی، مغناطیس، پوئین تینگ و موج. ۲۹
شکل ۳-۴: مواد با ε و μ نزدیک به صفر (مشخص شده با دایره)، ۳۱
شکل ۳-۵: (الف) آرای‌های از سیمهای نازک رسانا. ۳۳
شکل ۳-۶: (الف) آرایه‌های از SRR ۳۵
شکل ۳-۷: (الف) فراماده با واحد سلولی متشکل از سیم نازک و SRR ۳۶
شکل ۳-۸: SRR با تزویج لبه‌ای [63]. ۳۶
شکل ۳-۹: Broadside SRR [63]. ۳۶
شکل ۳-۱۰: SRR امگا شکل [63]. ۳۷
شکل ۳-۱۱: (الف) ساختار SRR، (ب) ساختار CSRR. ۳۸
شکل ۳-۱۲: ساختار thin wire. ۴۱
شکل ۳-۱۳: ضریب شکست ساختار thin wire ۴۱
شکل ۳-۱۴: پارامترهای ساختار thin wire ۴۲
شکل ۳-۱۵: ساختار SRR. ۴۳
شکل ۳-۱۶: ضریب شکست ساختار SRR ۴۳
شکل ۳-۱۷: پارامترهای ساختار SRR ۴۴
شکل ۴-۱: ساختار SRR مورد استفاده. ۴۶
شکل ۴-۲: موجبر مربعی بارگذاری شده با SRR (a = 6 mm)، ۴۷
شکل ۴-۳: ستاپ عملی. ۴۷
شکل ۴-۴: نتایج اندازه گیری پاسخ انتقال ($|S_{12}|$) ستاپ عملی شکل ۴-۳. ..... ۴۸

شکل ۴-۵: یک آرایه بی نهایت از موجبر مربعی بارگذاری شده با SRR. ۴۹
شکل ۴-۶: ثابت های فاز نرمالیزه شده برای ماده SRR و ماده دست چپی. ۵۰
شکل ۴-۷: پاسخ انتقال اندازه گیری شده برای موجبر دایروی ۵۱
شکل ۴-۸: (الف) موجبر بارگذاری شده با تیغه SRR. (ب) سلول واحد سازنده آن. ۵۲
شکل ۴-۹: انتشار در موجبر بارگذاری شده با تیغه SRR. ۵۳
شکل ۴-۱۰: موجبر صفحه موازی معادل. ۵۴
شکل ۴-۱۱: حالات مختلف انتشار امواج الکترومغناطیس در یک موجبر بارگذاری شده. ۵۷
شکل ۴-۱۲: (الف) ضریب انتقال توان ۵۹
شکل ۴-۱۳: (الف) نمایش خط انتقالی یک موجبر مستطیلی، (ب) مدل معادل یک موجبر مستطیلی .. ۶۰
شکل ۴-۱۴: (الف) مدار معادل خط انتقالی یک موجبر پر شده با یک ماده مغناطیسی تک محوره، ۶۱
شکل ۴-۱۵: نحوه قرار گرفتن تشدید کنندهها. (الف) طولی، (ب) عرضی.. ..... ۶۲
شکل ۴-۱۶: چهار حالت ممکن برای موجبر بارگذاری شده. ۶۳
شکل ۴-۱۷: منحنی های پاشندگی مربوط به موجبر بارگذاری شده با تشدید کننده های مغناطیسی؛. ۶۵
شکل ۴-۱۸: منحنی های پاشندگی مربوط به موجبر بارگذاری شده با تشدید کننده های الکتریکی؛. ... ۶۵
شکل ۴-۱۹: تشدید کننده حلقه شکافدار تعبیه شده در زیرلایه دی الکتریکی همراه با شرایط مرزی .. ۶۷
شکل ۴-۲۰: مدار معادل سلول واحد ESSR و پاسخ فرکانسی مربوط به آن. ۶۸
شکل ۴-۲۱: SIW بار گذاری شده با تشدید کننده های تعبیه شده در زیرلایه. ۶۹
شکل ۴-۲۲: سلول واحد ساختار ESSR. ۷۲
شکل ۴-۲۳: (الف) مدار معادل سلول واحد ESSR و (ب) مقایسه پاسخ فرکانسی ۷۲
شکل ۴-۲۴: پارامترهای سازندگی مربوط به سلول واحد. ۷۳
شکل ۴-۲۵: ساختار SIW بارگذاری شده با ESRR. ۷۵
شکل ۴-۲۶: (الف)پارامترهای سازندگی مربوط به سلول واحد (ب) پاسخ فرکانسی ۷۶
شکل ۴-۲۷: سلول واحد ESRR. ۷۷
شکل ۴-۲۸: پارامترهای سازندگی به دست آمده از سلول واحد تحت تابش موج صفحه ای. ۷۷
شکل ۴-۲۹: هندسه فیلترتغییرپذیر ناچ. ۷۹
شکل ۴-۳۰: مدار بایاس مربوط به بارگذاری دیودهای ورکتور. ۷۹
شکل ۴-۳۱: پارامترهای سازندگی ESRR ها ۸۰
شکل ۴-۳۲: پاسخ فرکانسی مربوط به شبیه سازی فیلتر تغییرپذیر ناچ. ۸۰
شکل ۵-۱: توپولوژی فیلتر تغییرپذیر CSRR که با ورکتور بارگذاری می شود [91]. ۸۲
شکل ۵-۲: سلول دو بعدی برای ساختار راستگرد [93]. ۸۲
شکل ۵-۳: سلول دو بعدی برای ساختار چپگرد [93]. ۸۳
شکل ۵-۴: مدل مداری ساختار چپگرد همگن [95]. ۸۳
شکل ۵-۵: مدل مداری معادل ساختار ترکیبی راستگرد-چپگرد ایدهآل [95]. ۸۵
شکل ۵-۶: نمودار پاشندگی براساس مدل خط انتقال. ۸۶

شکل ۵-۷: مدار معادل و نمودار پاشندگی برای حالت تعادل[95]. ۸۷
شکل ۵-۸: یک شبکه LC معادل با یک ساختار ترکیبی ایدهآل با طول l [97]. ۸۸
شکل ۵-۹: نمودار پاشندگی برای CRLH TLهای متعادل ۸۹
شکل ۵-۱۰: ساختار فراماده مورد استفاده. ۹۰
شکل ۵-۱۱: (الف) ساختار فیلتر پهن باند، (ب) سلول واحد MTM-SIW. ۹۱
شکل ۵-۱۲: نتایج مربوط به شبیه سازی و اندازه گیری فیلتر پهن باند. ۹۲
شکل ۵-۱۳: مدل مدار معادل مربوط به سلول واحد MTM-SIW شکل ۵-۱۱ (ب). ۹۳
شکل ۵-۱۴: منحنی های پاشندگی به دست آمده از سلول واحد MTM-SIW ۹۴
شکل ۵-۱۵: مدار بایاس فیلتر SIW بارگذاری شده با فرمواد به همراه دو دیود ورکتور. ۹۴
شکل ۵-۱۶: (الف) مدار ساخته شده از فیلتر ۳ بانده، (ب) نتایج شبیه سازی و اندازه گیری فیلتر به ازای ولتاژ بایاس 20 V، (ج) نتایج شبیه سازی و اندازه گیری فیلتر به ازای ولتاژ بایاس 10 V. ۹۵

فصل ۱ – مقدمه

۱ ۱ –پیشگفتار

در این فصل قصد داریم تا با رویکردی توصیفی و فارغ از هرگونه فرمول و رابطه ریاضی موضوعات مورد بحث را به صورت مختصر فهرست کنیم. در ابتدا به تاریخچهٔ مختصری از فیلترهای تغییرپذیر می‌پردازیم و در ادامه به موضوعاتی می پردازیم که از ابتدای این فیلترها تا کنون بیشتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند. در ضمن سعی شده به صورت مختصر هدف پژوهش ترسیم شود. در انتها به توصیف ساختار پایان نامه می پردازیم.

۱ ۲ –تاریخچه

سیستم‌های مخابراتی حال حاضر نیاز به فیلترهای تغییرپذیری دارند که ضمن رعایت مشخصات فیزیکی نظیر داشتن ابعاد و وزن کوچک، کم هزینه بودن و ... بتوانند مشخصاتی نظیر تلفات کم در باند عبور، تضعیف قابل توجه در باند ممنوعه (معمولاً بزرگتر از 20 dB) و قابلیت انتخاب دقیق را نیز برآورده کنند. به طور کلی برای تولید فیلترهای تغییرپذیر الکترونیکی به عناصر سوئیچ کننده و تنظیم کننده فعالی مانند دیودهای p-i-n نیمه‌هادی و ورکتوری، سیستم‌های مایکروالکترومکانیکی فرکانس رادیویی (RF MEMS) یا دیگر عناصر سوئیچ کننده که بر مبنای نوع ماده کار می‌کنند، نظیر ورکتورهای فروالکتریک، نیاز داریم که بتوانند با ساختار فیلتری پسیو مجتمع شوند. از آنجایی که فیلترهای مایکرواستریپی به راحتی می‌توانند ضمن رعایت کوچک بودن اندازه، این نوع مجتمع سازی را نیز فراهم نمایند توجهات روزافزونی به فیلترهای تغییرپذیر/ تنظیم پذیر بر مبنای تکنولوژی مایکرواستریپ معطوف شده است. این فیلترها را می‌توان به انواع مختلفی دسته بندی کرد؛ از جمله فیلترهای میان گذر شانه‌ای تغییرپذیر [9]–[1]، فیلترهای تغییرپذیر RF MEMS [17]–[10]، فیلترهای تغییرپذیر فراپهن باند [19]–[18]، فیلترهای تغییرپذیر دوبانده [20]، فیلترهای تنظیم پذیر باند ممنوعه [25]–[21]، فیلترهای تغییرپذیر/ تنظیم پذیر دو مدی [30]–[26] و فیلترهای میان گذر تغییرپذیر بر مبنای استفاده از خطوط تأخیردار سوئیچ شونده [38]–[37].

۱ ۳ –هدف پژوهش و سازماندهی پایان نامه

همان طور که در ادامه خواهیم دید موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه[1] (SIW) نسبت به خطوط انتقال مایکرواستریپ و موجبرهای مستطیلی به دلیل تلفات پایین‌تر و قابلیت مجتمع شدن با مدارهای

[1] Substrate Integrated Waveguide

مسطح دارای مزیت بوده و مورد توجه قرار گرفته‌اند. بر همین اساس عناصر مبتنی بر موجبرهای مستطیلی و خطوط انتقال مایکرواستریپ به صورت موجیرهای مجتمع شده در زیرلایه تحقق یافته اند [53]- [61]. در همین راستا تلاش‌های بسیار زیادی در زمینه پیاده‌سازی فیلترهای باندگذر بر مبنای موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه صورت پذیرفته است که از مزایای این فیلترها می‌توان به توپولوژی ساده آنها و همچنین مشخصات فرکانسی مناسب‌شان اشاره کرد [64]، [74]. از همین رو در این پایان نامه به بررسی و تحقق فیلترهای تغییرپذیر بر مبنای ساختارهای موجبری مجتمع شده در زیرلایه می‌پردازیم. گام اول یافتن یک تشدیدکننده مناسب است که ضمن تزویج صحیح با موجبر مجتمع شده در زیرلایه، امکان تنظیم مشخصات آن از طریق یک عنصر کنترلی نظیر یک دیود ورکتور را نیز فراهم آورد. به همین منظور از فراموا‌د استفاده می کنیم که رفتار فیزیکی آنها به خوبی بررسی شده اند و به دلیل ابعاد هندسی کوچک شان پروفایل نهایی قابل قبولی برای کل مدار می توانند فراهم آورند؛ ضمن آنکه بارگذاری این ساختارها با دیودهای ورکتور به منظور کنترل مشخصات فرکانسی مدار مورد نظر نیز در موارد مختلف و کاربردهای گوناگون از جمله فیلترهای تغییرپذیر بررسی شده است، [62]. بنابراین به امید بهره‌مندی از مزایای هر دو ساختار موجبر مجتمع شده در زیرلایه و فراموا‌د سعی بر تحقق فیلترهای باند گذر و باند ممنوعه تغییرپذیر داریم. در اینجا ذکر این نکته ضروری می نماید که اگرچه فیلترهای باندگذر مختلفی بر مبنای دو ساختار فوق ارائه شده اند، [74]، اما بارگذاری دیودهای ورکتور و در واقع افزودن یک مکانیزم کنترلی به این نوع فیلترها، تا آنجاییکه مؤلف می داند، مورد مطالعه قرار نگرفته اند.

بدین منظور در فصل ۱ ابتدا به بررسی کلیات ساختارهای SIW و مزایای استفاده از آن ها پرداخته‌ایم. فصل ۲ نیز به معرفی فراموا‌د، تحقق عملی و کاربردهای آن‌ها اختصاص یافته است.

در راستای تحقق فیلترهای تغییرپذیر SIW از دو نوع فراماده متفاوت استفاده کرده‌ایم: اول از تشدیدکننده‌های حلقه شکافدار تعبیه شده[1] در زیرلایه و دوم از یک فراماده مکمل که پارامترهای فیزیکی مؤثر آن قابلیت تنظیم پذیری آسان ساختار را فراهم می‌آورد. فراماده اول یعنی ESRRها به خوبی با ساختارهای SIW سازگارند. در واقع ESRRها به عنوان جایگزینی برای تشدیدکننده‌های حلقه شکافدار[2] (SRRها)، که زیاد در طراحی و پیاده سازی فیلترهای باندگذر و باند ممنوعه مورد استفاده قرار می گیرند، مطرح شده‌اند چرا که استفاده از SRRها در ساختارهای SIW به دلایلی که در ادامه بیان خواهیم کرد امکان پذیر نیست. برمبنای این تشدیدکننده‌ها دو فیلتر تغییرپذیر ارائه کرده‌ایم. اول فیلتر تغییرپذیر با باندگذر متغیر که شبیه سازی مربوط به آن رفتار قابل تنظیم آن را نشان می‌دهد و در ادامه فیلتر تغییرپذیر ناچ که در باند گذر خود یک باند ممنوعه قابل تغییر دارد و شبیه سازی، تحلیل و اندازه گیری مربوط به هر دو فیلتر در فصل ۳ آمده اند. هر دو طراحی بر اساس کار مشابهی که در مورد یک موجبر بارگذاری شده با SRR انجام گرفته ارائه شده‌اند. بر این اساس در ابتدای فصل ۴ با معرفی، تحلیل

[1] Embedded Split Ring Resonator (ESRR)
[2] Split Ring Resonator (SRR)

و ارائه چالش‌های مربوط به یک موجبر بارگذاری شده با SRR پرداخته‌ایم و با گذار از موجبر مستطیلی به ساختار موجبر مجتمع شده در زیرلایه و انتخاب تشدیدکننده‌های تعبیه شده در زیرلایه، به جای SRRها به تحلیل یک موجبر SIW بارگذاری شده با ESRRها پرداخته‌ایم. با ایده گرفتن از این ساختار و تحلیل مربوط به آن، دو فیلتر تغییرپذیر اشاره شده را طراحی می‌کنیم.

در انتهای همین فصل نیز با بیان مدل خط انتقال برای ساختارهای راستگرد، چپگرد و ترکیبی راستگرد/ چپگرد فیلتر تغییرپذیر دیگری را مورد بررسی قرار داده‌ایم. مزیت اصلی این فیلتر که از یک فراماده مکمل بهره می‌برد، همچنانکه در این فصل به تفصیل به آن می پردازیم، سادگی آنست. در واقع فیلترهای SIW بسیاری وجود دارند که از فراماد مکمل نظیر تشدیدکننده‌های حلقه شکافدار مکمل[1] (CSRR) بهره می برند، اما ایجاد مکانیزم تنظیم پذیری در آن ها با مشکل مواجه بوده است. برای مثال اولین فیلتر تغییرپذیری که از CSRRها استفاده می کند، مجبور به استفاده از دو ویای اضافی است و تحقیق دیگری که نیاز به این دو ویای اضافی را حذف می کند از CSRRهای باز[2] (OCSRR) بهره می‌برد که چون تشدید کننده‌ها از نوع باز هستند استراتژی خاصی برای ورکتورها باید در نظر گرفت. در هر حال به نظر می‌آید که این تمهیدات و شرایط از آن جهت هستند که توپولوژی ساختار CSRR برای بارگذاری با ورکتور مناسب نمی‌باشد چرا که پارامترهای کمی برای کنترل رفتار فرکانسی ساختار CSRR وجود دارند. بدین منظور برای تحقق فیلتر تغییرپذیر SIW بر مبنای ساختارهای مکمل فراماد، از ساختار مکملی استفاده کرده ایم که از درجه آزادی بیشتری برخوردار است. به عبارت دیگر این فراماده پارامترهای فیزیکی بیشتری دارد که رفتار کلی ساختار را کنترل می‌کند. در بخش نهایی این فصل به معرفی این فراماده پرداخته و با ذکر یک مقدمه به تحلیل ساختار SIW بارگذاری شده با مکمل این فراماده پرداخته‌ایم.

[1] Complementary Split Ring Resonator (CSRR)
[2] Open Complementary Split Ring Resonator (OCSRR)

فصل ۲ – موجبرهای مجتمع شده در زیرلایه[1]

۲ ۱– مقدمه

جهت تحقق سیستم های مخابراتی و اندازه گیری در فرکانس های مایکروویو و امواج میلیمتری نیاز به تکنولوژی هایی داریم که با هزینه کم قابلیت تولید انبوه را داشته باشند. عناصر اکتیو عموماً به صورت تراشه روی سطح مدار چاپی قرار می‌گیرند. جهت ساخت عناصر پسیو، موجبرهای مستطیلی به دلیل تلفات کم، ضریب کیفیت بالا و توانایی انتقال توان های بالا نسبت به سایر موجبرها و خطوط انتقال دارای مزیت هستند. اما این موجبرها قابلیت مجتمع شدن با عناصر اکتیو را به صورت مسطح ندارند. بنابراین ترکیب عناصر مسطح و غیر مسطح (نظیر موجبرهای مستطیلی) مورد توجه قرار می‌گیرند. تاکنون جهت دستیابی به روش های مناسب برای ایجاد اتصال بین عناصر مسطح و موجبرهای مستطیلی تلاشهای فراوانی صورت پذیرفته است. برای این منظور عناصری جهت ارتباط دادن موجبرهای مستطیلی با خطوط انتقال مسطح نظیر مایکرواستریپ، خط انتقال نواری و CPW طراحی شده اند [33]- [35]. طراحی و ساخت این عناصر به دلیل اختلاف در ابعاد موجبرهای مستطیلی با خطوط مایکرواستریپ که نسبت به آنها کوچک هستند، مشکل است. عناصر پسیوی که روی موجبرهای مستطیلی پیاده سازی می‌شوند، دارای حجم بزرگ و هزینه ساخت بالایی هستند که منجر به پرهزینه و حجیم گشتن مدارهای مجتمع شده عناصر مسطح- غیر مسطح می‌گردد. از طرفی این اتصالات غالباً نیاز به عملیات هماهنگ سازی و تنظیم مکانیکی دقیق جهت تولید انبوه دارند که خود منجر به افزایش هزینه ساخت می‌گردد. از سویی دیگر در این مبدلها خطوط انتقال مسطح معمولاً لازم است به شکل خاصی بریده شوند که در فرکانس های امواج میلیمتری میسر نیست. نحوه قراردادن موجبر مستطیلی روی سطح مدار چاپی نیز از دیگر مشکلات ساخت چنین عناصری است. نهایت اینکه استفاده از موجبرهای مستطیلی در طراحی مدارهای مجتمع شده عناصر اکتیو- پسیو به دلیل هزینه ساخت و حجم زیاد مناسب نیست.

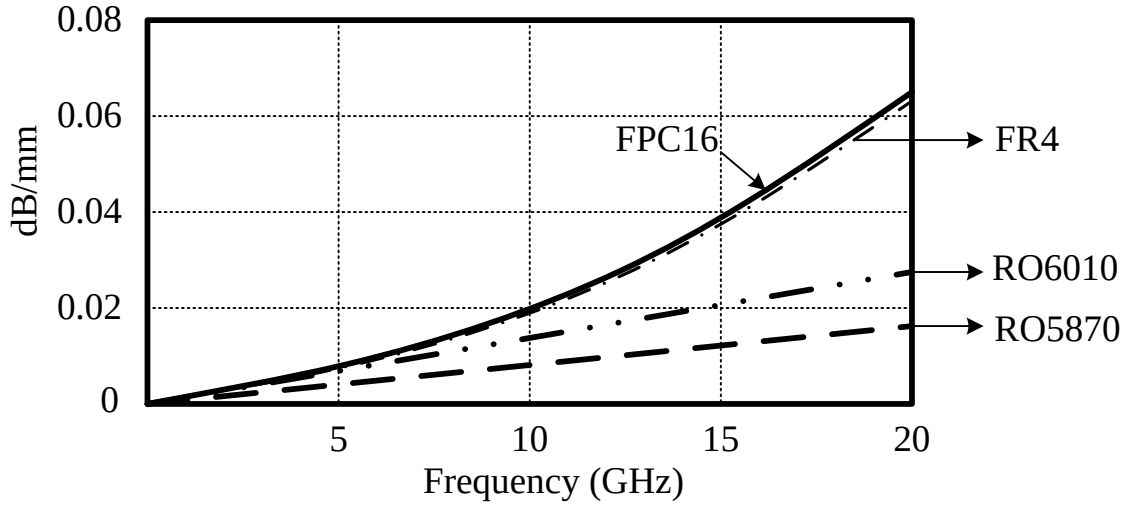
خطوط مایکرواستریپ و سایر خطوط انتقال مشابه نیز به علت تلفات تشعشعی بالا در ناپیوستگی ها (خمش ها و شاخه ها) و همچنین تزویج بین خطوط مجاور در فرکانس های بالا مناسب نیستند. این خطوط انتقال به علت تلفات تشعشعی بالا و رسانایی بالا و همچنین تلفات عایقی از نظر عملکرد در سطحی پایین تر از موجبرهای مستطیلی قرار دارند. با افزایش فرکانس اثر این تلفات از اهمیت بالاتری برخوردار می‌شود به نحوی که خطوط مایکرواستریپ بسته به نوع کاربرد در فرکانس های بالاتر از محدوده 3-20 GHz دیگر قابل استفاده نیستند. شکل 2-۱ تلف حاصل از اندازه گیری چند نمونه خط مایکرواستریپ با پهنای خط مشخص که روی زیرلایه هایی با عایق های گوناگون ساخته شده اند را نشان می‌دهد [36]. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، تلف این خط انتقال با افزایش فرکانس به

[1] Substrate Integrated Waveguide

شدت افزایش می‌یابد و برای کم تلف ترین عایق که RO5870 نام دارد، در فرکانس 15 GHz به 0.01dB/mm می‌رسد و برای عایق FR4 که عایقی رایج در ساخت بسیاری از مدارهای مجتمع شده است، به مقداری بیش از 0.04dB/mm در همین فرکانس می‌رسد. با افزایش بیشتر فرکانس میزان تلفات از این نیز بیشتر می‌گردد و منجر به غیر قابل استفاده شدن این نوع خط انتقال در این فرکانس ها می‌گردد. در بردهای کامپیوتر نیز که انتقال داده بین حافظه و پروسسورها توسط خطوط مایکرواستریپ صورت می‌پذیرد، این موضوع اهمیت دارد و با افزایش سرعت پالس های ساعت دیگر خطوط مایکرواستریپ پاسخگوی نیازهای آینده نیستند.

جدول ۲-۱: مشخصات ۴ زیرلایه

زیرلایه	ثابت دی الکتریک	پهنای خط (mm)
FR4	4.55	1.565
FPC16	5.4	2.6
RT Duroid 5870	2.33	1.467
RT Duroid 6010	10.2	0.588



شکل ۲-۱: منحنی تغییرات تلف خطوط مایکرواستریپ ساخته شده روی عایق های گوناگون [36].

برای رهایی از چنین مشکلاتی به موجبرهایی با تلفات پایین و ضریب کیفیت بالا نیاز داریم که قابلیت مجتمع شدن در زیرلایه را نیز داشته باشند. چنین موجبرهایی به ما این امکان را می‌دهند تا از طراحی و ساخت عناصری حجیم و پیچیده جهت طراحی مدارهای مجتمع شده عناصر اکتیو- پسیو رهایی یابیم.