دانشکدهٔ فنی-گروه برق

رشته مخابرات-گرایش میدان

پایانامه جهت أخذ درجه کارشناسی ارشد

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت فیلتر مایکرواستریپی میان‌گذر جدید

بهمن محمدی

استاد راهنمای اول: پروفسور جواد نوری‌نیا

استاد راهنمای دوم: پروفسور چنگیز قبادی

تیر ۱۳۹۲

فرم شماره 9

تاریخ :

شماره :

دانشکده فنی مهندسی

بسمه تعالی

پایان‌نامه خانم / آقای محسن محمدی به شماره دانشجویی ۹۰۱۷۸۱۰۰۹ رشته کنترل صنعتی

تحت عنوان : طراحی، شبیه سازی و ساخت ملیز هارد اینرسی مبتنی لذر جدید

به تاریخ ۹۲/۱۲/۱۲ و به شماره پایان‌نامه ۹۸۲-ف و با رتبه عالی و نمره ۲۰ توسط هیئت محترم داوران ذیل مورد پذیرش قرار گرفت.

ردیف	کمیته دفاع	نام و نام خانوادگی	تاریخ و امضاء
۱	استاد راهنمای اول و رئیس هیات داوران	دکتر جواد فوری نیا	
۲	استاد راهنمای دوم	دکتر خشایار میداری	
۳	استاد مشاور (در صورت وجود)		
۴	داور خارجی	دکتر مهدی چلانداری	
۵	داور داخلی	دکتر آذرمهر	
۶	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده		

تقدیم به

پدر و مادرم

و استاد محترم

دکتر جواد نوری‌نیا

تقدیر و تشکر

در اینجا بر خود لازم دانسته که نهایت سپاس و تشکر خود را از استادان گرانقدر آقایان دکتر جواد نوری‌نیا و دکتر چنگیز قبادی که در طول دوره‌ی تحصیل و همچنین در انجام این پروژه از راهنمایی‌ها و کمک‌های بی‌دریغ آن‌ها بهره بردم، ابراز نمایم. از استاد بزرگوار آقای دکتر محمد نقی آذرمنش که در طول دوره‌ی تحصیل از علمشان بهره بردم، کمال قدردانی را دارم. همچنین لازم می‌دانم از همکاری دوست عزیزم آقای مهندس آرش ولی‌زاده شهمیرزادی نهایت قدرانی را داشته باشم.

چکیده

فیلترهای فرا پهن باند[۱]، قطعات مایکروویوی ضروری هستند که رشد سریع در این زمینه باعث توسعه انواع مختلف فیلترهای فرا پهن باند شده است. انواع مختلفی از فیلترهای فرا پهن باند مانند تشدید کننده‌های چند مدی یا فیلترهای مبتنی بر فیلترهای پایین گذر و بالا گذر پشت سر هم که دارای باندهای حذف تکی یا چندتایی است، وجود دارند. در این پروژه فیلترهای فرا پهن باند میان‌گذر با استفاده از رزوناتور چند مدی بارگذاری شده با قطعات فرعی، ساختار زمین ناقص[۲]، خط کوپلاژ ربع طول موج اصلاح شده و قطعات فرعی رادیالی دارای اندازه‌ی کوچک با دامنه‌های تیز در لبه‌های باند عبور، افت‌های درونی[۳] و بازگشتی[۴] مناسب با عرض باند نسبی بهبود یافته دارای دو باند ناچ ناشی از خط مدار باز ربع طول موج و خطوط مایکرواستریپ خمیده شده برای رفع مشکل تداخل موجود در سیستم‌های فرا پهن باند با سایر سیستم‌های مخابراتی از جمله شبکه بی‌سیم محلی[۵] و ارتباطات ماهواره‌ای ارائه شده است. فیلترهای ارائه شده نخست توسط نرم افزار HFSS[۶] شبیه‌سازی شده و مورد تحلیل پارامتری قرار گرفته و در نهایت در آزمایشگاه آنتن جهت مقایسه نتایج اندازه‌گیری وشبیه‌سازی، تست شده‌اند.

کلمات کلیدی:

باند ناچ، رزوناتور چند مده، خط کوپلاژ ربع طول موج اصلاح شده، فرا پهن باند، فیلتر میان‌گذر، قطعات فرعی رادیالی.

[۱] Ultra Wide Band (UWB)
[۲] Defected Ground Structure (DGS)
[۳] Insertion Loss
[۴] Return Loss
[۵] Wireless Local Area Network (WLAN)
[۶] Ansoft Simulation Software High Frequency Structure Simulator (HFSS)

فهرست مطالب

۱ـ مقدمه ۱

۲ـ فصل دوم ۵

۲ـ۱ پارامترهای پراکندگی ۵

۲ـ۲ ضریب کیفیت ۷

۲ـ۲ـ۱ ضریب کیفیت بی‌باری المان‌های راکتیو پر اتلاف ۷

۲ـ۲ـ۲ ضریب کیفیت بی‌باری رزوناتورهای مایکرواستریپ ۶

۲ـ۲ـ۳ روابطی برای استخراج ضریب کیفیت خارجی ۱۰

۲ـ۲ـ۳ـ۱ رزوناتور دارای بار تکی ۶

۲ـ۲ـ۳ـ۲ رزوناتور دارای بار دوتایی ۱۳

۲ـ۳ رزوناتورها ۱۵

۲ـ۴ انواع فیلترهای مایکرواستریپ ۱۶

۲ـ۴ـ۱ فیلترهای مبتنی بر خط ۱۶

۲ـ۴ـ۱ـ۱ فیلترپایین‌گذر با امپدانس پله‌ای ۱۶

۲ـ۴ـ۱ـ۲ فیلتر با رزوناتور نیم‌طول موج با کوپل از انتها ۱۶

۲ـ۴ـ۱ـ۳ فیلتر با رزوناتور نیم‌طول موج با کوپل موازی ۱۷

۲ـ۴ـ۱ـ۴ فیلتر میان‌گذر خط سنجاقی ۱۷

۲ـ۴ـ۱ـ۵ فیلتر میان‌گذر اینتردیجیتال ۱۸

۲ـ۴ـ۱ـ۶ فیلتر میان‌گذر شانه‌ای ۱۹

۲ـ۴ـ۱ـ۷ فیلتر با استاب اتصال کوتاه شده‌ی یک چهارم طول موج ۱۹

۲ـ۴ـ۲ فیلترهای مبتنی بر رزوناتور رینگ ۲۰

۲ـ۴ـ۳ فیلترهای مبتنی بر رزوناتور پچ ۲۱

۲ـ۵ ساختارهای زمین ناقص ۲۲

۲ـ۵ـ۱ تکامل ساختارهای زمین ناقص ۲۳

۲ـ۵ـ۲ تعاریف و هندسه پایه ۲۵

۲ـ۵ـ۳ سلول واحد ساختار زمین ناقص ۲۶

۲ـ۵ـ۳ـ۱ ساختار زمین ناقص دمبلی شکل..... ۲۷
۲ـ۵ـ۳ـ۲ ساختار زمین ناقص مارپیچی شکل..... ۲۸
۲ـ۵ـ۳ـ۳ ساختار زمین ناقص H شکل..... ۲۸
۲ـ۵ـ۳ـ۴ ساختار زمین ناقص U شکل و V شکل..... ۲۹
۲ـ۵ـ۳ـ۵ ساختار زمین ناقص به شکل رینگ دایروی..... ۳۰
۲ـ۵ـ۳ـ۶ هندسه‌های دیگر ساختار زمین ناقص..... ۳۱
۲ـ۵ـ۴ ساختار زمین ناقص تناوبی..... ۳۱
۲ـ۵ـ۵ مدل‌سازی ساختار زمین ناقص..... ۳۳
۲ـ۵ـ۵ـ۱ مدل خط انتقال..... ۳۴
۲ـ۵ـ۵ـ۲ مدل مدار معادل LC و RLC..... ۳۴
۲ـ۵ـ۵ـ۳ مدل شبه استاتیک..... ۳۷
۲ـ۵ـ۵ـ۴ توضیحی در مورد روش‌های طراحی..... ۳۹
۲ـ۵ـ۶ کاربردهای متداول ساختار زمین ناقص در مدارات چاپی..... ۴۰
۲ـ۵ـ۶ـ۱ ساختار زمین ناقص برای فیلترهای چاپی..... ۴۰
۲ـ۵ـ۶ـ۲ ساختار زمین ناقص برای المان‌های مدارات چاپی..... ۴۰
۲ـ۵ـ۶ـ۳ ساختار زمین ناقص برای خطوط امپدانس بالا..... ۴۳
۲ـ۵ـ۶ـ۴ ساختار زمین ناقص برای فشرده‌سازی مدارات مایکروویو..... ۴۴
۲ـ۵ـ۷ فیلترهای با ساختارهای زمین ناقص..... ۴۵
۳ـ فیلترهای میان‌گذر فرا پهن باند..... ۴۸
۳ـ۱ فیلتر میان‌گذر کوپلاژ موازی..... ۴۸
۳ـ۱ـ۱ بهبود انتخاب‌پذیری فیلتر با استفاده از قطعات فرعی مدار باز در ورودی و خروجی..... ۴۹
۳ـ۱ـ۲ طراحی فیلتر میان‌گذر فرا پهن با قطعات فرعی مدار باز امپدانس متغییر..... ۵۰
۳ـ۲ فیلتر میان گذر پهن باند وسیع با استفاده از رزوناتور چند مدی..... ۵۱
۳ـ۳ فیلترهای میان‌گذر فرا پهن باند..... ۵۵
۳ـ۳ـ۱ فیلترهای میان‌گذر فرا پهن باند..... ۵۵
۳ـ۳ـ۲ تکنیک رزوناتور چند مدی..... ۵۷

۳ـ۳ـ۳ تکنیک مایکرواستریپ/موجبر هم صفحه‌ی هایبرید.....۵۹
۳ـ۳ـ۴ فیلترهای با قطعه‌ی فرعی اتصال کوتاه شده‌ی بهینه.....۶۲
۳ـ۳ـ۵ تکنیک‌های باند گپ الکترونیکی بارگذاری شده.....۶۴
۳ـ۳ـ۶ فیلترهای بالا/پایین‌گذر پشت سر هم.....۶۴
۳ـ۳ـ۷ تکنولوژی سرامیک‌های با دمای پایین و پلیمر کریستال مایع.....۶۷
۴ـ فیلترهای میان‌گذر فرا پهن باند دارای یک یا دو ناچ در باند عبور.....۷۱
۴ـ۱ فیلترهای میان‌گذر فرا پهن باند دارای ناچ.....۷۱
۴ـ۱ـ۱ فیلتر با باند ناچ با استفاده از قطعات فرعی مدار باز.....۷۱
۴ـ۱ـ۲ فیلتر با باند ناچ با استفاده از کوپلاژ ورودی/خروجی نامتقارن.....۷۲
۴ـ۱ـ۳ فیلتر با باند ناچ با استفاده از رزوناتورهای تولید ناچ مجتمع شده.....۷۴
۴ـ۲ فیلترهای میان‌گذر فرا پهن باند و میان‌گذر فرا پهن باند دارای ناچ.....۷۶
۴ـ۲ـ۱ فیلتر میان‌گذر باند گپ الکترومغناطیسی قرار داده شده در رزوناتور چند مدی و فیلتر دارای ناچ با خط کوپلاژ پارازیتی.....۷۶
۵ـفیلترهای ارائه شده در این پایان‌نامه.....۸۲
۵ـ۱ فیلترهای میان‌گذر فرا پهن باند با خطوط کوپلاژ عرضی شکل ربع طول موج و قطعه فرعی رادیالی.....۸۲
۵ـ۲ فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند با دو باند ناچ در باند عبور توسط خط مدار باز ربع طول موج و خطوط مایکرواستریپ خمیده شده.....۹۷
نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....۱۰۲
مقالات.....۱۰۳
مراجع.....۱۰۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۱ـ۱ (الف) تقسیم‌بندی‌های حوزه فرکانس‌های رادیویی/مایکروویوی [۶].....۲

شکل ۱-۲ راه‌های پیوند فیلترهای مایکرواستریپ [۶].....۳

شکل ۲-۱ شبکه دو پورتی با متغیرهای شبکه [۶].....۵

شکل ۲ـ۲ نمایش مدارات المان‌های راکتیو پراتلاف و رزوناتورها [۶].....۸

شکل ۲ـ۳ دو ساختار معمولی کوپلاژ ورودی‌ـخروجی در فیلترهای رزوناتوری مایکرواستریپ. (الف) کوپلینگ خط وصل شونده. (ب) کوپلینگ خط کوپلاژ [۶].....۱۰

شکل۲ـ۴ مدار معادل رزوناتور ورودی‌ـخروجی دارای بار تکی [۶].....۱۱

شکل ۲ـ۵ (الف) مدار معادل رزوناتورهای کوپل شده nتایی، (ب) نمایش شبکه‌ی آن [۶].....۱۲

شکل ۲ـ۶ پاسخ فاز S_{11} برای مدار شکل ۲ـ۴ [۶].....۱۳

شکل ۲ـ۷(الف) مدار معادل رزوناتور ورودی‌ـخروجی دارای بار دوتایی؛ (ب) پاسخ دامنه S_{21} [۶].....۱۴

شکل ۲ـ۸ برخی از رزوناتورهای مایکرواستریپ اولیه (الف) رزوناتور المان فشرده (ب) رزوناتور المان شبه فشرده (امپدانس پله‌ای) (پ) رزوناتور خط یک چهارم طول موج اتصال باز (ت) رزوناتور خط یک چهارم طول موج اتصال کوتاه (ث) رزوناتور خط نصف طول موج (ج) رزوناتور رینگ (چ) رزوناتور پچ دایروی (ح) رزوناتور پچ مثلثی [۶، ۱۵].....۱۵

شکل ۲ـ۹ ساختار کلی از فیلتر پایین‌گذر امپدانس پله‌ای مایکرواستریپ [۶].....۱۶

شکل ۲ـ۱۰ فیلتر رزوناتور نیم طول موج با کوپل از انتها [۶].....۱۷

شکل ۲ـ۱۱ فیلتر رزوناتور نیم طول موج با کوپلاژ موازی [۶].....۱۷

شکل ۲ـ۱۲ فیلتر میان‌گذر خط سنجاقی [۶].....۱۸

شکل ۲ـ۱۳ ساختارهای متنوع رزوناتور سوزنی (الف) رزوناتور سوزنی نیم طول موج قراردادی (ب) رزوناتور سوزنی کوچک شده (ج) رزوناتور سوزنی اینتردیجیتال [۲۸].....۱۸

شکل ۲ـ۱۴ فیلتر میان‌گذر اینتردیجیتال [۶].....۱۹

شکل ۲ـ۱۵ فیلتر میان‌گذر شانه‌ای [۶].....۲۰

شکل ۲ـ۱۶ فیلتر میان‌گذر با استاب اتصال کوتاه شده‌ی یک چهارم طول موج [۶]..... ۲۰

شکل ۲ـ۱۷ (الف) رینگ دایره‌ای، (ب) رینگ مربعی، (ج) رینگ پیچاپیچ [۶]..... ۲۱

شکل ۲ـ۱۸ فیلتر میان گذر با رینگ دایروی [۶]..... ۲۱

شکل ۲ـ۱۹ رزوناتور پچ مایکرواستریپ [۶]..... ۲۲

شکل ۲ـ۲۰ فیلتر پچ مایکرواستریپ مربعی [۲۹]..... ۲۲

شکل ۲-۲۱ وجود باند حذف در مشخصه انتقالی ناشی از یک ساختار باند گپ الکترومغناطیسی [۳۰]..... ۲۳

شکل ۲ـ۲۲(الف) ساختار زمین ناقص تکراری دو بعدی با الگوی دایروی بر روی صفحه زمین یک خط انتقال مایکرواستریپ [۳۰]، (ب) ساختار زمین ناقص تکراری یک بعدی بر روی صفحه زمین یک خط انتقال مایکرواستریپ [۳۰]..... ۲۴

شکل ۲ـ۲۳ هندسه‌ها و طبقه‌بندی تعدادی از ساختارهای زمین ناقص پایه [۳۰]..... ۲۵

شکل ۲ـ۲۴ هندسه‌ی ساختارهای زمین ناقص مختلف: (الف) دمبلی شکل، (ب) شکل مارپیچ، (پ) H شکل، (ت) U شکل، (ث) دمبل با سر پیکانی، (ج) رینگ هم مرکز، (چ) رزوناتورهای رینگ جدا از هم، (ح) اینتردیجیتال، (خ) متقاطع شکل، (د) دمبل با سر دایروی، (ذ) سرهای مربعی متصل شده با شکاف‌های U شکل، (ر) دمبل با حلقه باز، (ز) فراکتال، (س) نصف دایره، (ش) V شکل، (ص) L شکل، (ض) خطهای پرپیچ و خم، (ط) دمبل با سر U شکل، (ظ) دو تا U با ضلع برابر، (ف) شکاف‌های مربعی که با شکاف باریک در کناره‌ها به هم وصل شده‌اند [۳۰]..... ۲۶

شکل ۲-۲۵(الف) ساختار زمین ناقص دمبلی شکل با شکاف مستطیلی با ابعاد a وb و گپ g که با خط انتقال مایکرواستریپ پنجاه اهم ساخته شده بر روی یک زیرلایه به ضخامت ۶۲ میل تاکونیک با ثابت دی‌الکتریک ۱۰ ($\varepsilon_r = 10$) و خط مایکرواستریپ با عرض ۱/۴۶ میلی‌متر ($w = 1.46mm$) مجتمع شده است. (ب) پارامترهای پراکندگی شبیه‌سازی شده برای ساختار زمین ناقص در (الف) با $g = 0.2mm$ برای تمام مقادیر a و b [۳۰]..... ۲۶

شکل ۲ـ۲۶ دید از بالای ساختار زمین ناقص مارپیچی شکل که با خط انتقال مایکرواستریپ پنجاه اهم ساخته شده بر روی زیرلایه‌ی راجرز با ضخامت ۳۱ میل، ثابت دی‌الکتریک ۲/۲، $a = b = 5, w_1 = g = 0.4$، $w = 2.4$ و $s = 0.2$ (تمام ابعاد میلی‌متر است) مجتمع شده است [۳۰]..... ۲۸

شکل ۲ـ۲۷(الف) دید از بالای ساختار زمین ناقص H شکل که با خط انتقال مایکرواستریپ پنجاه اهم ساخته شده بر روی زیرلایه‌ی از تی دوروید با ضخامت ۰/۳۸۱ میلی‌متر، $\varepsilon_r = 2.2$ و $D = 0.5mm, L_1 = L_2 = 2.5mm, L_3 = 6.2mm$ با فرکانس رزونانس در ۸/۱ گیگا هرتز مجتمع شده است. (ب) پارامترهای پراکندگی شبیه‌سازی شده‌ی ساختار زمین ناقص با سرهای مربعی و دایروی بر روی زیرلایه‌ی یکسان با همان فرکانس رزونانس و مقایسه با پارامترهای پراکندگی ساختار زمین ناقص H شکل [۳۰].....۲۹

شکل ۲ـ۲۸(الف) دید از بالای سه ساختار زمین ناقص نصفه رینگ که با خط انتقال مایکرواستریپ پنجاه اهم ساخته شده بر روی زیرلایه‌ی تاکونیک با ضخامت ۱/۵۷۵ میلی‌متری با ثابت دی‌الکتریک ۲/۲ ($\varepsilon_r = 2.2$) مجتمع شده است؛ (ب) دید از بالای دو ساختار زمین ناقص نصفه رینگ که با خط انتقال مایکرواستریپ پنجاه اهم ساخته شده بر روی همان زیرلایه مجتمع شده است؛ (ج) سطح مقطع عرضی یک خط انتقال مایکرواستریپ که با ساختار زمین ناقص رینگ هم مرکز با یک صفحه‌ی فلزی در پشت آن با فضای میانی پر شده از دی‌الکتریک مجتمع شده است؛ (د) مشخصات انتقال اندازه‌گیری شده‌ی یک خط مایکرواستریپ با ساختار زمین ناقص رینگ هم مرکز با یک صفحه‌ی فلزی در پشت آن با فاصله‌ی متغییر از ساختار زمین ناقص و فضای میانی پر شده با هوا [۳۰].....۳۰

شکل ۲ـ۲۹(الف) دید از بالای یک ساختار زمین ناقص دمبلی شکل یکنواخت پنج سلوله یک بعدی که بر روی زمین یک خط مایکرواستریپ پنجاه اهم با زیرلایه‌ی تاکونیک به ضخامت ۱/۵۷۵ میلی‌متر و ضریب گذردهی ۱۰ ساخته شده است؛ (ب) پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده برای ساختار زمین ناقص متناوب یکنواخت در شکل (الف)؛ (ج) دید از بالای ساختار زمین ناقص دمبلی شکل غیر یکنواخت پنج سلوله یک بعدی که بروی زمین یک خط مایکرواستریپ پنجاه اهم با همان زیرلایه؛ (د) پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده برای ساختار زمین ناقص متناوب غیر یکنواخت در شکل (ج) [۳۰].....۳۲

شکل ۲ـ۳۰ چیدمان ساختار زمین ناقص دمبلی شکل صفحه‌ای دو بعدی که با خط مایکرواستریپ بر روی یک زیرلایه با ضخامت ۰/۷۵ میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک ۴/۶ مجتمع شده است [۳۰].....۳۳

شکل ۲ـ۳۱(الف) دید از بالای یک شکاف ساده‌ی ساختار زمین ناقص متناوب هفت سلوله با طول $d = 10.7mm$، عرض $w = 0.51mm$ و فاصله‌ی مرکز تا مرکز گپ‌ها $p = 1.52mm$ که با خط مایکرواستریپ پنجاه اهم ساخته شده بر روی زیر لایه دروید به ضخامت $25mil$ با $\varepsilon_r = 10.2$ مجتمع شده است؛ (ب) مدار معادل شکاف ساختار زمین ناقص در (الف) بر اساس مدل خط انتقال [۳۰، ۳۳].....۳۵

شکل ۲ـ۳۲(الف) مدار معادل LC یک ساختار زمین ناقص دمبلی شکل تکی؛ (ب) فیلتر پایین‌گذر مدل باترورث تک قطبی [۳۰]..... ۳۶

شکل ۲ـ۳۳ (الف) مدار معادل RLC ساختار زمین ناقص دمبلی شکل تک سلوله؛ (ب) مدار معادل نوع پی ساختار زمین ناقص دمبلی شکل تک سلوله [۳۰، ۳۴]..... ۳۷

شکل ۲ـ۳۴ مراحل پشت سر هم برای طراحی ساختار زمین ناقص با روش شبه استاتیک [۳۰]..... ۳۸

شکل ۲ـ۳۵(الف) طرح جریان برهم‌زده شده‌ی در اطراف پیرامون نقص ایجاد شده با استفاده از شبیه‌ساز الکترومغناطیسی تجاری؛ (ب) نمایش طرح مدار معادل نوار [۳۰، ۳۵]..... ۳۸

شکل ۲ـ۳۶ (الف) گپ مایکرواستریپ و مدار معادل آن؛ (ب) مایکرواستریپ عرضی و مدار معادل آن [۳۰، ۳۵]..... ۳۹

شکل ۲ـ۳۷ مدار معادل سلول واحد ساختار زمین ناقص دمبلی شکل بر اساس روش شبه استاتیک [۳۰، ۳۵]..... ۳۹

شکل ۲ـ۳۸ طرح یک فیلتر پایین‌گذر سه قطبه ساخته شده با دو سلول ساختار زمین ناقص با ضلع $a = 5mm$، گپ رابط $g = 5mm$ بر روی زیرلایه با ضخامت $31mil$ با ثابت دی‌الکتریک ۲/۲ و همچنین با استفاده از (الف) اتصال تی با انتهای مدار باز برای داشتن کاپاسیتانس موازی با عرض $W = 5mm$ و $L_T = 10mm$؛ (ب) اتصال عرضی با انتهای مدار باز [۳۰، ۳۴]..... ۴۱

شکل ۲ـ۳۹ (الف) نتایج پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده برای فیلتر پایین‌گذر ساختار زمین ناقص ساخته شده در شکل ۲ـ۳۳(الف)؛ (ب) نتایج پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده برای فیلتر پایین‌گذر ساختار زمین ناقص ساخته شده در شکل ۲ـ۳۳(ب) [۳۰، ۳۴]..... ۴۲

شکل ۲ـ۴۰ (الف) طرح یک فیلتر میان‌گذر خط کوپل‌شده ساخته شده بر روی زیرلایه‌ی درواید به ضخامت ۱/۲۷ میلی‌متر و ثابت گذردهی ۲/۲ با ساختار زمین ناقص شماره‌ی ۱ برای حذف تیز و ساختار زمین ناقص شماره‌ی ۲ برای حذف باند عبور ناخواسته؛ (ب) نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فیلتر میان‌گذر خط کوپل‌شده در (الف) [۳۰]..... ۴۲

شکل ۲ـ۴۱ طرح یک داپلکسر ساخته شده بر روی زیرلایه‌ی به ضخامت ۱/۵۷۵ میلی‌متر با ضریب گذردهی ۱۰ با ابعاد $a_1 = b_1 = 5mm, g = 0.2mm, a_2 = b_2 = 2mm, L_2 = 5mm$ [۳۰]..... ۴۳

شکل ۲ـ۴۲ (الف) طرح یک تقسیم کننده‌ی توان غیر برابر ویلکینسون با نسبت ۴ به ۱ با یک خط مایکرواستریپ 158Ω با ساختار زمین ناقص با عرض $W_3 = 0.4$ که بر روی زیر لایه به ضخامت $31mil$ و ثابت گذردهی ۲/۲ ساخته شده است. ابعاد ساختار زمین ناقص $a = b = g = 6mm, c = 0.4mm$ است [۳۰]. (ب) طرح یک کاپلر خط انشعابی $10dB$ با 90° که یک خط مایکرواستریپ ساخته شده با ساختار زمین ناقص بر روی زیرلایه درویدبه ضخامت $31mil$ و ثابت گذردهی ۲/۲ مجتمع شده است. ابعاد ساختار زمین ناقص $a = b = 6mm$ و $c = 13mm$ ، $d = 2mm, g = 0.5mm$ و فاصله‌ی مرکز تا مرکز سلول‌های واحد برابر ۸ میلی‌متر است [۳۰]..... ۴۴

شکل ۲ـ۴۳ ساختارهای زمین ناقص مایکرواستریپ نمونه؛ (الف) ساختار زمین ناقص L شکل؛ (ب) ساختار زمین ناقص دمبلی شکل بارگذاری شده با فلز [۶]..... ۴۵

شکل۲ـ۴۴ ساختارهای زمین ناقص موجبر هم‌صفحه‌ی نمونه؛ (الف) ساختار زمین ناقص L شکل؛ (ب) ساختار زمین ناقص دمبلی شکل بارگذاری شده با فلز [۶]..... ۴۵

شکل ۲ـ۴۵ پاسخ فرکانسی معمولی ساختارهای زمین ناقص با چندین باند حذف [۶]..... ۴۶

شکل ۲ـ۴۶ مدار معادل کلی برای ساختارهای زمین ناقص [۶]..... ۴۷

شکل ۳ـ۱ ساختار خط مایکرواستریپ کوپلاژ موازی با پارامترهای مربوطه [۱۶]..... ۴۸

شکل ۳ـ۲ نمودار S_{21} برای مقادیر مختلف L ($g = 0.1mm$) [۱۶]..... ۴۸

شکل ۳ـ۳ نمودار S_{21} برای مقادیر مختلف g ($L = 10.7mm$) [۱۶]..... ۴۹

شکل ۳ـ۴ ساختار فیلتر کوپلاژ موازی با قطعات فرعی مدار باز [۳۶]..... ۵۰

شکل ۳ـ۵ نمودار S_{21} برای مقادیر مختلف L_2 ($g = 0.25mm, L_1 = 10.7mm$) [۳۶]..... ۵۰

شکل ۳ـ۶ خطوط مایکرواستریپ کوپلاژ موازی سه‌تایی و دوتایی. (الف) شکل ساختار؛ (ب) نمودار S_{11} و S_{21} برای مقادیر $L = \lambda_g / 4, W = 0.27mm, W_2 = 0.5mm, W_1 = 0.15mm$ [۳۷]..... ۵۱

شکل ۳ـ۷ قطعه‌ی فرعی مدار باز امپدانس متغییر. (الف) طرح ساختار؛ (ب) نمودار به ازای مقادیر مختلف W_2/W_1 [۳۷]..... ۵۱

شکل ۳ـ۸ فیلتر فرا پهن باند با قطعات فرعی مدار باز با امپدانس متغییر. (الف) طرح ساختار؛ (ب) نمودار S_{11} و S_{21} [۳۷]..... ۵۲

شکل ۳-۹ رزوناتور چند مدی (الف) هندسه ساختار (ب) مدار معادل خط انتقالی [۳۸ـ۳۹]..... ۵۲

شکل ۳-۱۰ نمودار فرکانس‌های رزونانسی نرمالیزه شده بر حسب R برای رزوناتور دو مدی با $\theta_2 = 2\theta_1$ [۳۸].....۵.۳

شکل ۳-۱۱ نمودار فرکانس های نرمالیزه شده بر حسب R برای رزوناتور سه مدی با $\theta_2 = \theta_1$ [۳۸].....۵۴

شکل ۳-۱۲ فیلتر میان‌گذر پهن باند وسیع با استفاده از رزوناتور چند مدی. (الف) ساختار نهایی؛ (ب) شبکه خط انتقال معادل از (الف)؛ (ج) پاسخ فیلتر [۳۹].....۵۴

شکل ۳ـ۱۳ (الف) بلوک دیاگرام نمونه‌ی فرستنده سیستم‌های با توان مصرفی پایین [۴۲]؛ (ب) بلوک دیاگرام نمونه‌ی گیرنده سیستم‌های با توان مصرفی پایین [۲]؛ (پ) توزیع طیفی سیستم فرا پهن باند [۴۳]؛ (ت) تعریف کمیته‌ی فدرال ارتباطات برای محدوده‌ی پوششی سیستم‌های فرا پهن باند [۴۰]؛.....۵۶

شکل۳ـ۱۴ باندهای فرکانسی فرا پهن باند و دیگر سیستم‌های بی‌سیم [۴۵].....۵۷

شکل۳ـ۱۵ یک نمونه فیلتر رزوناتوری چند مدی‌ی فرا پهن باند با مشخصات آن. (الف) ساختار فیلتر؛ (ب) تلفات عبور شبیه‌سازی شده در باند عبور به عنوان تابعی از کوپلینگ ورودی/خروجی که موردی ایده‌آل برای محدوده‌ی پوششی تعریف شده توسط کمیته‌ی فدرال ارتباطات برای سیستم فرا پهن باند است [۴۶].....۵۸

شکل ۳ـ۱۶ فیلتر فرا پهن باند با چهار مد [۴۷] که در بازه‌ی فرکانسی ۳/۱ تا ۱۰/۶ گیگاهرتز کار می‌کند. (الف) تصویر فیلتر؛ (ب) پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده [۴۷].....۵۹

شکل ۳ـ۱۷(الف) طرح اولیه‌ی یک فیلتر فرا پهن باند تک طبقه‌ی فشرده (نوارهای زرد رنگ سیم‌های رابط هستند)؛ (ب) مشخصات پاسخ فرکانسی آن [۴۸].....۶۰

شکل ۳ـ۱۸ فیلتر فرا پهن باند با ساختار مایکرواستریپ‌ـموجبر هم صفحه‌ی ترکیبی. (الف) ساختار فیلتر؛ (ب) پاسخ پارامترهای پراکندگی [۴۹].....۶۱

شکل ۳ـ۱۹ فیلتر فرا پهن باند با استفاده رزوناتور ربع طول موج موجبر هم صفحه. (الف) ساختار فیلتر؛ (ب) پاسخ پارامترهای پراکندگی و (ج) تأخیر گروه [۵۰].....۶۲

شکل ۳ـ۲۰ مدل مداری کلی برای یک فیلتر نمونه میان‌گذر فرا پهن باند بر اساس قطعه‌ی فرعی اتصال کوتاه شده‌ی بهینه بدون کوپلینگ عرضی بین خطوط تغذیه‌ی پورت‌های ورودی/خروجی [۴۴].....۶۳

شکل ۳ـ۲۱ فیلتر فرا پهن باند با صفرهای انتقال ناشی از قطعه‌ی فرعی اتصال کوتاه شده‌ی بهینه (الف) ساختار فیلتر و (ب) پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده [۵۲].....۶۳

شکل ۳ـ۲۲ فیلتر فرا پهن باند با استفاده باند گپ الکترونیکی به وسیله‌ی قطعات فرعی اتصال کوتاه بهینه (الف) تصویر فیلتر ساخته شده؛ (ب) پارامتر پراکندگی اندازه‌گیری شده [۵۲]..... ۶۴

شکل ۳ـ۲۳ فیلتر فرا پهن باند با استفاده از پشت سرهم قرار دادن یک فیلتر میان‌گذر پهن‌باند و یک فیلتر باند نگذر پهن‌باند (الف) ساختار فیلتر؛ (ب) پارامتر پراکندگی اندازه‌گیری شده [۵۵]..... ۶۵

شکل ۳ـ۲۴ فیلتر فرا پهن باند با استفاده از ریزنوار معلق. (الف) دید از بالای فیلتر؛ (ب) دید از پایین فیلتر؛ (ج) پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده [۵۶]..... ۶۶

شکل ۳ـ۲۵ ساختار سه بعدی برای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند فشرده [۵۸] که از سه لایه‌ی فلزی جدا شده با زیرلایه‌ی پلیمر کریستال مایع با ضخامت h_1 و h_2. پورت‌های ورودی/خروجی در لایه‌ی بالایی قرار دارند که لایه‌ی فلزی زیر آن به عنوان زمین استفاده شده است..... ۶۷

شکل ۳ـ۲۶ توزیع میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده‌ی تمام موج. (الف) در ۶/۰ گیگاهرتز (داخل باند) و (ب) در ۱۲/۰ گیگاهرتز (خارج از بلند) [۵۸]..... ۶۸

شکل ۳ـ۲۷ (الف) پارامترهای پراکندگی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده؛ (ب) تأخیر گروه اندازه‌گیری شده یک فیلتر فرا پهن باند شش قطبه [۵۸]..... ۶۹

شکل ۳ـ۲۸ (الف) ساختار سه بعدی فیلتر با رزوناتور T تکی؛ (ب) فیلتر سرامیکی با دمای پایین ساخته شده؛ (ج) نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی [۶۰]..... ۷۰

شکل ۴ـ۱ فیلتر فرا پهن باند دارای ناچ با استفاده ازساختار مایکرواستریپ/موجبر هم‌صفحه‌ی هایبرید با قطعات فرعی مدار باز تعبیه شده. (الف) ساختار فیلتر و (ب) نتایج اندازه‌گیری [۷۰]..... ۷۱

شکل ۴ـ۲ فیلتر فرا پهن باند دارای ناچ با استفاده از ساختار قطعات فرعی اتصال کوتاه بهینه با قطعات فرعی مدار باز در خطوط مایکرواستریپی واصل. (الف) ساختار فیلتر و (ب) نتایج اندازه‌گیری [۷۱]..... ۷۲

شکل ۴ـ۳ فیلتر فرا پهن باند دارای ناچ با استفاده از خطوط کوپلاژ ورودی/خروجی نامتقارن. (الف) ساختار کوپلاژ ورودی/خروجی نامتقارن؛ (ب) پارامترهای پراکندگی برای ساختار کوپلاژ ورودی/خروجی نامتقارن؛ (ج) ساختار فیلتر و (د) نتایج اندازه‌گیری [۷۲]..... ۷۳

شکل ۴ـ۴ (الف) ساختار سه بعدی ساختار تولید ناچ فیلتر موردنظر؛ (ب) نتایج شبیه‌سازی‌های تمام موج با تغییر ابعاد گپ [۶۱]..... ۷۴

شکل ۴ـ۵ (الف) ساختار سه بعدی فیلتر فرا پهن باند با چند باند ناچ؛ (ب) تصویر فیلتر ساخته شده؛ (ج) پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده؛ (د) تأخیر گروه اندازه‌گیری شده [۶۱]..... ۷۵

شکل ۴ـ۶ فیلتر فرا پهن باند با رزوناتور چند مدی دارای باند گپ الکترومغناطیسی. (الف) طرح ساختار؛ (ب) مدار معادل خط انتقالی [۶۷]..... ۷۶

شکل ۴ـ۷ پاسخ فرکانسی $|S_{21}|$. (الف) خط کوپلاژ و فیلتر با کوپل ضعیف؛ (ب) فیلتر با ماکزیمم کوپل [۶۷]..... ۷۷

شکل ۴ـ۸ (الف) طرح فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند با ناچ فرکانسی، (ب) مدار معادل ارائه شده [۱۳]..... ۷۸

شکل ۴ـ۹ چگال جریان‌های سطحی برای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند با ناچ فرکانسی. (الف) در فرکانس مرکزی باندگذر پایین فیلتر میان‌گذر ($f=5.5GHz$)؛ (ب) در فرکانس مرکزی باند ناچ فیلتر میان‌گذر ($f=7GHz$) [۱۳]..... ۷۹

شکل ۴ـ۱۰ بررسی تأثیر L_5 بر عملکرد $|S_{21}|$ فیلتر [۱۳]..... ۸۰

شکل ۴ـ۱۱ نتایج پاسخ فرکانسی $|S_{21}|$ ناشی از شبیه‌سازی الکترومغناطیسی ساختار موردنظر بر اساس تابعی از تغییرات L_7 [۱۳]..... ۸۰

شکل ۴ـ۱۲ نتایج پاسخ فرکانسی $|S_{21}|$ ناشی از شبیه‌سازی الکترومغناطیسی ساختار موردنظر بر اساس تابعی از تغییرات w_6 [۱۳]..... ۸۰

شکل ۴ـ۱۳ نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی پارامترهای پراکندگی به همراه تأخیر گروه [۱۳]..... ۸۱

شکل ۵ـ۱ هندسه‌ی فیلتر موردنظر. (الف) دید از روبه‌رو؛ (ب) دید از بالا؛ (ج) دید از پایین..... ۸۲

شکل ۵ـ۲ فیلتر با شکاف‌های موجود در زمین و (الف) خط انتقال مایکرواستریپ عرضی شکل معمولی؛ (ب) خط کوپلاژ عرضی شکل؛ (ج) خط کوپلاژ عرضی شکل و جفت قطعه‌ی فرعی رادیالی بزرگ‌تر..... ۸۴

شکل ۵ـ۳ پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی شده برای انواع ساختارهای فیلتری نشان داده شده در شکل ۳ـ۲..... ۸۴

شکل ۵ـ۴ تأثیر مقادیر مختلف L_1 (طول انگشت ساختار خط کوپلاژ عرضی شکل) بر پاسخ فرکانسی فیلتر مورد نظر..... ۸۶

شکل ۵ـ۵ تأثیر مقادیر مختلف L_{R2} بر روی پاسخ فرکانسی فیلتر موردنظر..... ۸۶

شکل ۵ـ۶ تصویر فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند ساخته شده..... ۸۷

شکل ۵ـ۷ نتایج پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند موردنظر.....۸۷
شکل ۵ـ۸ تأخیر گروه شبیه‌سازی شده برای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند موردنظر.....۸۷
شکل ۵ـ۹ هندسه‌ی فیلتر موردنظر. (الف) دید از روبه‌رو؛ (ب) دید از بالا؛ (ج) دید از پایین.....۸۹
شکل ۵ـ۱۰ فیلتر دارای نقص در صفحه‌ی زمین و (الف) رزوناتور عرضی شکل ساده؛ (ب) خط کوپلاژ عرضی شکل؛ (ج) خط کوپلاژ عرضی شکل و قطعه‌ی فرعی مستطیلی شکل؛ (د) خط کوپلاژ عرضی شکل و یک زوج قطعه‌ی فرعی رادیالی.....۹۰
شکل ۵ـ۱۱ پاسخ فرکانسی ساختارهای مختلف فیلتر نشان داده شده در شکل ۵ـ۱۰ و فیلتر فرا پهن باند میان‌گذر موردنظر.....۹۱
شکل ۵ـ۱۲ مشخصات افت بازگشتی برای مقادیر مختلف قطعات فرعی رادیالی شکل که در جدول ۵ـ۴ لیست شده‌اند.....۹۲
شکل ۵ـ۱۳ تصویر فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند ساخته شده.....۹۳
شکل ۵ـ۱۴ نتایج پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند موردنظر.....۹۳
شکل ۵ـ۱۵ هندسه‌ی فیلتر مایکرواستریپ موردنظر. (الف) دید از بالا؛ (ب) دید از پایین (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند).....۹۴
شکل ۵ـ۱۶ ساختارهای مختلف که در مطالعه‌ی شبیه‌سازی‌ها استفاده شدند.....۹۵
شکل ۵ـ۱۷ پاسخ فرکانسی ساختارهای مختلف فیلتر که در شکل ۵ـ۱۶ نشان داده شده است و فیلتر فرا پهن باند مورد نظر.....۹۵
شکل ۵ـ۱۸ (الف)ساختار فیلتری که در بررسی شبیه‌سازی‌ها استفاده شده؛ (ب) پاسخ فرکانسی آن در مقایسه با فیلتر مورد نظر.....۹۶
شکل ۵ـ۱۹ (الف) تصویر فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند مورد نظر ساخته شده؛ (ب)نتایج پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده.....۹۷
شکل ۵ـ۲۰ هندسه‌ی فیلتر مایکرواستریپ موردنظر. (الف) دید از بالا؛ (ب) رزوناتور عرضی شکل با قطعه‌ی فرعی مدار باز؛ (ج) دید از پایین.....۹۸

شکل ۵ـ۲۱ پاسخ فرکانس شبیه‌سازی شده‌ی فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند با دو باند ناچ در باند عبور به ازای مقادیر مختلف w_3 ..... ۹۹

شکل ۵ـ۲۲ پاسخ فرکانس شبیه‌سازی شده‌ی فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند با دو باند ناچ در باند عبور به ازای مقادیر مختلف L_{13} ۱۰۰

شکل ۵ـ۲۳ تصویر فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند ساخته شده با دو باند ناچ در باند عبور ۱۰۰

شکل ۵ـ۲۴ نتایج پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی شده برای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند موردنظر با دو باند ناچ در باند عبور ۱۰۱

شکل ۵ـ۲۵ تأخیر گروه شبیه‌سازی شده برای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند موردنظر با دو باند ناچ در باند عبور ۱۰۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۲ـ۱ المان‌های مداری و مشخصات مدارهای معادل در شکل ۲ـ۳۲ برای ابعاد مختلف یک ساختار زمین ناقص دمبلی شکل [۳۰]..... ۳۶

جدول ۲ـ۲ خلاصه‌ی از تاریخچه‌ی ساختارهای زمین ناقص [۳۰]..... ۴۷

جدول ۵ـ۱ ابعاد نهایی فیلتر طراحی شده..... ۸۴

جدول ۵ـ۲ مقایسه‌ای فیلتر میان‌گذر فرا پهن باند موردنظر با فیلترهای ارائه شده در منابع دیگر..... ۸۸

جدول ۵ـ۳ ابعاد نهایی فیلتر طراحی شده..... ۹۱

جدول ۵ـ۴ چهار مقدار نمونه برای ابعاد قطعات فرعی رادیالی..... ۹۲

جدول ۵ـ۵ ابعاد نهایی فیلتر طراحی شده. ۹۹