

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات ابتکارات
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است



گروه برق - الکترونیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش الکترونیک

عنوان پایان نامه

**طراحی، بهینه سازی و ساخت فیلتر پایین گذر مایکرواستریپ با استفاده از رزوناتور
پروانه‌ای برای کاربرد در سیستم‌های مخابراتی**

استاد راهنما:

دکتر محسن حیاتی

نگارش:

گلاره حاجیان

آذر ۹۱



دانشکده فنی مهندسی

گروه برق - الکترونیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش الکترونیک

دانشجو: گلاره حاجیان

تحت عنوان

طراحی ، بهینه سازی و ساخت فیلتر پایین گذر مایکرواستریپ با استفاده از رزوناتور

پروانه‌ای برای کاربرد در سیستم‌های مخابراتی

در تاریخ ۹۱/۹/۲۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه : دکتر محسن حیاتی با مرتبه علمی دانشیار امضاء

۲- استاد داور داخل گروه : دکتر محمد مهدی کارخانچی با مرتبه علمی استادیار امضاء

۳- استاد داور داخل از گروه : دکتر سید وهاب الدین مکی با مرتبه علمی استادیار امضاء

تقدیم بابوسه بردستان پدر و مادر عزیزم که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یاور و دلسوز و فداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

تقدیم به همسر مهربانم که در طول دوران تحصیل همراه و همگام من بوده است.

تقدیم به خواهران عزیزم

چکیده :

در این پایان‌نامه، هدف طراحی فیلتر پایین‌گذر میکرواستریپی با پهنای باند قطع وسیع می‌باشد. فیلتر ساخته شده با استفاده از رزوناتور پروانه‌ای شکل دارای فرکانس قطع 1.74 GHz می‌باشد. حداکثر تلفات ورودی فیلتر کمتر از 0.1 dB است و دارای پهنای باند قطع وسیع از 2.1 GHz تا 26.51 GHz با سطح تضعیفی بهتر از 0.01 است. باند گذر فیلتر 0.36 GHz می‌باشد که شامل محدوده‌ی فرکانسی از 1.74 GHz تا 2.1 GHz است. فیلتر طراحی شده، ساختار ساده‌ای دارد، که ساخت و تولید را تسهیل می‌سازد. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری با هم همخوانی داشته و عملکرد مناسب فیلتر را در مقایسه با ساختارهای پیشین ارائه شده، تأیید می‌نماید.

کلمات کلیدی:

- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| (Low-Pass Filter) | ۱- فیلتر پایین‌گذر |
| (Microstrip Technology) | ۲- تکنولوژی میکرواستریپ |
| (Microwave Systems) | ۳- سیستم‌های میکروویو |
| (Butterfly Shaped Resonator) | ۴- رزوناتور پروانه‌ای شکل |
| (Wide Stop-Band) | ۵- باند قطع وسیع |

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- محدوده ی فرکانسی امواج ماکروویو
۳	۲-۱- کاربردهای مایکروویو
۳	۳-۱- فیلتر پایین گذر
۶	۴-۱- تکنولوژی میکرواستریپ:
۷	۵-۱- فیلتر میکرواستریپ
۹	فصل دوم: شبکه های دو قطبی
۱۰	مقدمه
۱۰	۱-۲- متغیر های شبکه
۱۱	۲-۲- پارامترهای توصیف کننده شبکه های مایکروویو
۱۲	۳-۲- پارامترهای پراکندگی
۱۵	۴-۲- پارامتر های ادمیتانس اتصال کوتاه شده:
۱۵	۵-۲- پارامترهای امپدانس مدار باز:
۱۶	۶-۲- پارامترهای ABCD
۱۹	۷-۲- اتصال شبکه های دو قطبی
۲۰	۸-۲- اندازه گیری پارامتر های [S]
۲۱	۹-۲- تحلیل میزان کارایی فیلتر پایین گذر
۲۵	فصل سوم: تئوری ها و مفاهیم اساسی فیلترهای میکرواستریپ
۲۶	مقدمه:
۲۶	۱-۳- خطوط مایکرواستریپ
۲۶	۱-۱-۳- ساختار میکرواستریپ
۲۶	۲-۱-۳- امواج در میکرواستریپ:

۳-۱-۳- تقریب شبه TEM:	۲۶
۳-۱-۴- ثابت دی‌الکتریک موثر و امپدانس مشخصه:	۲۷
۳-۱-۵- طول موج هدایت شده، ثابت انتشار، سرعت فازی و طول الکتريکی:	۲۸
۳-۱-۶- سنتز W/h	۲۹
۳-۱-۷- تاثیر ضخامت نوار رسانا	۳۰
۳-۱-۸- پراکندگی در میکرواستریپ	۳۱
۳-۱-۹- تلفات میکرواستریپ	۳۲
۳-۱-۱۰- تاثیر محفظه	۳۳
۳-۲- خطوط کوپلاژ	۳۳
۳-۲-۱- خازن‌های مدهای زوج و فرد	۳۴
۳-۲-۲- امپدانس مشخصه و ثابت دی‌الکتریک مد زوج و فرد	۳۵
۳-۳- قطعات و ناپیوستگی‌های میکرواستریپ	۳۶
۳-۳-۱- ناپیوستگی‌های میکرواستریپ	۳۶
۳-۳-۱-۱- اتصالات پله‌ای	۳۶
۳-۳-۱-۲- اتصالات باز	۳۸
۳-۳-۱-۳- شکاف	۳۸
۳-۳-۱-۴- خم‌ها	۳۹
۳-۳-۲- قطعات میکرواستریپ	۳۹
۳-۳-۲-۱- خازن‌ها و سلف‌های فشرده	۴۰
۳-۳-۲-۲- المان‌های شبه فشرده	۴۲
۳-۳-۲-۳- رزوناتورها	۴۶
فصل چهارم: روش‌های طراحی فیلتر پایین‌گذر میکرواستریپ	۴۸
مقدمه:	۴۹

۴-۱- طراحی فیلتر پایین گذر میکرواستریپ به کمک توابع تقریب	۴۹
۴-۱-۱- تقریب مشخصه‌ی دامنه و معرفی تابع تبدیل:	۴۹
۴-۱-۲- تقریب باترورث	۵۱
۴-۱-۳- تقریب چپی چف	۵۳
۴-۱-۴- تقریب الپتیک (بیضوی)	۵۶
۴-۱-۵- تقریب گوسین	۵۷
۴-۱-۶- طراحی فیلتر های باترورث پایین گذر	۵۹
۴-۱-۷- طراحی فیلتر های چپی چف پایین گذر	۶۱
۴-۱-۸- طراحی فیلتر های الپتیک پایین گذر	۶۳
۴-۱-۹- مثالی از طراحی فیلتر باترورث	۶۴
۴-۲- شروع طراحی فیلتر از مدار میکرواستریپ	۶۹
۴-۲-۱- مطالعه ی کارهای پیشین در زمینه ی فیلتر میکرواستریپ و تعمیم و بهینه سازی آن	۶۹
۴-۲-۲- ارایه شکل جدیدی از رزوناتور و طراحی فیلتر با استفاده از آن	۷۱
فصل پنجم: مروری بر کارهای پیشین	۷۴
مقدمه	۷۵
۵-۱- طراحی فیلتر پایین گذر میکرواستریپ با استفاده از رزوناتورهای پله ای	۷۵
۵-۲- طراحی فیلتر پایین گذر میکرواستریپ با استفاده از رزوناتورهای سنجاقی	۷۶
۵-۳- طراحی فیلتر پایین گذر میکرواستریپ با استفاده از رزوناتورهای مخروطی	۷۷
۵-۴- طراحی فیلتر پایین گذر میکرواستریپ با استفاده از تکنیک لایه زمین ناقص	۷۹
۵-۵- طراحی فیلتر پایین گذر میکرواستریپ با استفاده از رزوناتورهای دایره ای	۸۱
فصل ششم: ساختار پیشنهادی	۸۳
مقدمه	۸۴
۶-۱- طراحی رزوناتور پیشنهادی	۸۴

- ۶-۲- طراحی فیلتر پایین‌گذر با استفاده از رزوناتور پروانه‌ای به کمک شاخه‌های شعاعی ۸۸
- ۶-۳- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامترهای فیلتر پایین‌گذر ساخته شده با استفاده از رزوناتور پروانه‌ای: ۹۳
- ۶-۴- نتیجه‌گیری ۹۵

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- طیف های میکروویو/RF	۲
شکل ۲-۱- منحنی پاسخ فیلتر پایین گذر ایده آل	۴
شکل ۳-۱- منحنی پاسخ فیلتر پایین گذر واقعی	۴
شکل ۴-۱- مدار RC مربوط به یک فیلتر پایین گذر	۵
شکل ۵-۱- ساختار- کلی میکرواستریپ	۶
شکل ۶-۱- نمایی از یک فیلتر پایین گذر LC و معادل میکرواستریپی آن	۷
شکل ۷-۱- ساختار های مختلف میکرواستریپ برای پیاده سازی یک سلف.	۸
شکل ۱-۲- شبکه ی دو قطبی	۱۰
شکل ۲-۲- نمایی از یک شبکهء دو پورتی و سیگنال های تابیده و بازتابیده شده.	۱۲
شکل ۳-۲- پارامترهای ABCD- برای برخی از شبکه های دوقطبی مفید	۱۷
شکل ۴-۲- شکل (a) ارتباط به صورت موازی (b) ارتباط به صورت سری (c) ارتباط به صورت کاسکود	۱۹
شکل ۵-۲- V.N.A مدل 85047A	۲۱
شکل ۶-۲- منحنی پاسخ یک فیلتر پایین گذر ایده آل بر اساس پارامترهای پراکندگی	۲۱
شکل ۷-۲- منحنی پاسخ یک فیلتر پایین گذر واقعی بر اساس پارامترهای پراکندگی	۲۲
شکل ۱-۳- برش عرضی خطوط میکرواستریپ کوپل شده.	۳۳
شکل ۲-۳- مدهای شبه TEM جفت خطوط کوپلاژ شده: الف- مد فرد، ب- مد زوج.	۳۴
شکل ۳-۳- ناپیوستگی های میکرواستریپ الف- اتصال پله ای، ب- اتصال باز، پ- شکاف، ت- خم.	۳۷
شکل ۴-۳- سلف های فشرده الف- خط با امپدانس بالا، ب- خط meander، پ- مارپیچی دایره ای، ت- مارپیچی مربعی، ث- مدار معادل.	۴۰
شکل ۵-۳- خازن های فشرده: الف- خازن اینتردیجیتال، ب- خازن MIM، پ- مدار معادل خازن.	۴۲
شکل ۶-۳- خط با امپدانس بالا و طول کوتاه	۴۳
شکل ۷-۳- خط با امپدانس پایین و طول کوتاه	۴۴
شکل ۸-۳- الف- استاب اتصال باز، ب- استاب اتصال کوتاه	۴۵

- شکل ۳-۹- الف- رزوناتور با المان‌های فشرده، ب- رزوناتور با المان‌های شبه‌فشرده، پ- رزوناتور با خط اتصال باز ربع- طول موج، ت- رزوناتور با خط اتصال کوتاه ربع- طول موج، ث- رزوناتور حلقوی، ج- رزوناتور پیچ دایره‌ای، چ- رزوناتور پیچ مثلثی..... ۴۶
- شکل ۴-۱- پاسخ باترورث یک فیلتر نوعی ۵۱
- شکل ۴-۲- توزیع قطب‌ها برای پاسخ باترورث ۵۲
- شکل ۴-۳- پاسخ چپی چف فیلتر پایین‌گذر ۵۳
- شکل ۴-۴- نمایش توزیع قطب‌ها برای پاسخ چپی چف ۵۵
- شکل ۴-۵- تابع تبدیل الپتیک برای یک فیلتر پایین‌گذر ۵۷
- شکل ۴-۶- نمایش تابع بیضوی نسبی ۵۷
- شکل ۴-۷- پاسخ گوسین- الف) دامنه- ب) تأخیر گروه ۵۸
- شکل ۴-۸- فیلتر پایین‌گذر تمام قطب با الف) ساختار شبکه‌ی نردبانی و ب) دوگان آن ۶۰
- شکل ۴-۹- فیلتر پایین‌گذر الپتیک با الف) مدار رزونانس موازی در شاخه سری- ب) مدار رزونانس سری در شاخه موازی ۶۴
- شکل ۴-۱۰- فیلتر نرمالیزه شده باترورث الف) مدار LC- ب) پارامترهای S به عنوان پاسخ ۶۵
- شکل ۴-۱۱- فیلتر آنورمالیزه شده باترورث با فرکانس قطع 3GHZ و مقاومت 50Ω ۶۷
- شکل ۴-۱۲- فیلتر میکرواستریپ با رزوناتور پله‌ای، طراحی شده از روی فیلتر LC آنورمالیزه شده ۶۷
- شکل ۴-۱۳- فیلتر پایین‌گذر میکرواستریپ با استفاده از چهار رزوناتور سنجاقی سریال شده [۳۱] ۷۰
- شکل ۴-۱۴- پاسخ فرکانسی فیلتر پایین‌گذر میکرواستریپ با استفاده از چهار رزوناتور سنجاقی سریال شده ۷۰
- شکل ۴-۱۵- فیلتر پایین‌گذر میکرواستریپ با استفاده از شش رزوناتور سنجاقی سریال شده. [۳۱] ۷۰
- شکل ۴-۱۶- پاسخ فرکانسی فیلتر پایین‌گذر میکرواستریپ با استفاده از شش رزوناتور سنجاقی سریال شده ۷۱
- شکل ۴-۱۷- الف) ساختار رزوناتور پیشنهادی- ب) پاسخ رزوناتور ۷۲
- شکل ۴-۱۸- الف) ابعاد فیلتر طراحی شده- ب) پاسخ فیلتر ۷۳
- شکل ۵-۱- فیلتر مرجع [۳۲]- الف) فیلتر پایین‌گذر با رزوناتور پله‌ای، بدون خطوط کوپل شده با آن- ب) پاسخ- فیلتر قسمت ج) فیلتر با خطوط کوپل شده- د) پاسخ فیلتر قسمت ۷۶

شکل ۵-۲- رزوناتور hairpin	۷۶
شکل ۵-۳- فیلتر مرجع - [۳۳]. الف) روش به کار رفته برای ساخت فیلتر با استفاده از رزوناتور سنجاقی - ب) پاسخ شبیه‌سازی فیلتر ساخته شده	۷۷
شکل ۵-۴- ساختار پیشنهادی مرجع - [۳۴]	۷۸
شکل ۵-۵- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شدهء [۳۴].	۷۸
شکل ۵-۶- ساختار پیشنهادی مرجع [۳۵].	۷۸
شکل ۵-۷- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شدهء مرجع [۳۵].	۷۸
شکل ۵-۸- ساختار پیشنهادی مرجع - [۳۶]	۷۹
شکل ۵-۹- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شدهء مرجع - [۳۶]	۷۹
شکل ۵-۱۰- ساختار پیشنهادی مرجع - [۳۷]	۸۰
شکل ۵-۱۱- نتایج شبیه‌سازی‌های مداری و الکترومغناطیسی مرجع [۳۷].	۸۰
شکل ۵-۱۲- ساختار پیشنهادی مرجع [۳۸].	۸۰
شکل ۵-۱۳- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شدهء مرجع [۳۸].	۸۱
شکل ۵-۱۴- فیلتر مرجع [۳۹]. الف) ابعاد فیلتر ساخته شده با استفاده از رزوناتور دایره‌ای - ب) پاسخ فیلتر	۸۱
شکل ۵-۱۵- فیلتر مرجع [۴۰]. الف) ابعاد فیلتر ساخته شده با استفاده از رزوناتور دایره‌ای - ب) پاسخ فیلتر به همراه عکس فیلتر	۸۲
شکل ۶-۱- ساختار رزوناتور پروانه‌ای	۸۴
شکل ۶-۲- نتایج شبیه‌سازی ساختار پروانه‌ای شکل	۸۵
شکل ۶-۳- مدار معادل ساختار پیشنهادی	۸۵
شکل ۶-۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی الکترومغناطیسی رزوناتور به همراه شبیه‌سازی مدل LC	۸۶
شکل ۶-۵- تغییر پاسخ فیلتر بر حسب تغییرات θ	۸۶
شکل ۶-۶- تغییر پاسخ فیلتر بر حسب تغییرات $W2$	۸۷
شکل ۶-۷- تغییر پاسخ فیلتر بر حسب تغییرات d	۸۷
شکل ۶-۸- تغییر پاسخ فیلتر بر حسب تغییرات d'	۸۸

- شکل ۶-۹- ساختار قطعه‌ی پله‌ای ۸۸
- شکل ۶-۱۰- رزوناتور پیشنهادی به همراه ساختار ضد هارمونیک و مدار معادل آن ۹۰
- شکل ۶-۱۱- نتایج شبیه سازی پارامترهای S رزوناتور پیشنهادی به همراه ساختار ضد هارمونیک ۹۰
- شکل ۶-۱۲- رزوناتور پیشنهادی به همراه دو واحد ساختار ضد هارمونیک دیگر ۹۱
- شکل ۶-۱۳- نتایج شبیه سازی پارامترهای S رزوناتور پیشنهادی به همراه دو واحد ساختار ضد هارمونیک دیگر .. ۹۱
- شکل ۶-۱۴: ساختار نهایی فیلتر طراحی شده با استفاده از رزوناتور پروانه ای ۹۲
- شکل ۶-۱۵- فیلتر ساخته شده با استفاده از رزوناتور پروانه ای ۹۲
- شکل ۶-۱۶- نتایج پارامترهای S شبیه سازی و اندازه گیری شده‌ی فیلتر ساخته شده ۹۳
- شکل ۶-۱۷- تأخیر گروه در باند عبور برای فیلتر ساخته شده ۹۴

فهرست جداول

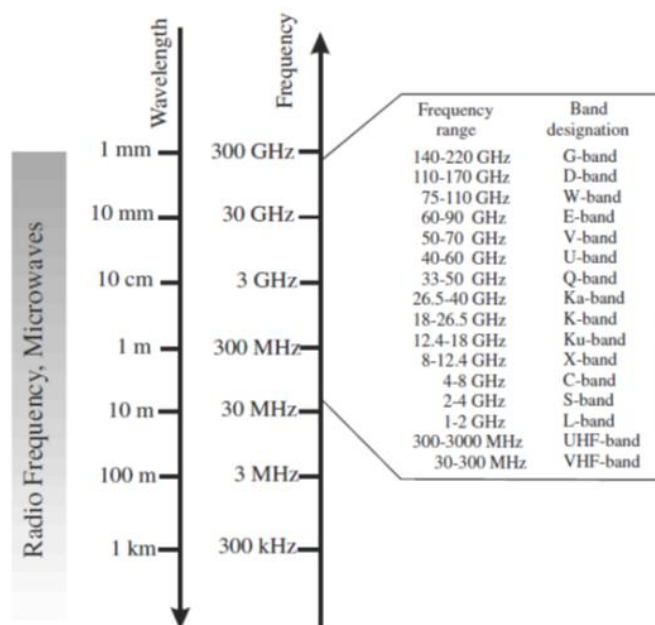
عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- تبدیل پارامترهای شبکه دوقطبی به یکدیگر	۱۸
جدول ۱-۴- مقادیر المانهای فیلترهای نمونه ی پایین گذر باترورث	۶۱
جدول ۲-۴- مقادیر المانهای فیلتر پایین گذر چپی چف ($g_0=1.0$, $\Omega_c=1$ rad/s)	۶۲
جدول ۳-۴- داده های طراحی فیلتر پایین گذر الپتیک با ریپل باند عبور $LAr=0.1$ dB ، $\Omega_c=1$ rad/s و Ω_s های متنوع	۶۸
جدول ۱-۶- مقایسهی بین این فیلتر و کارهای پیشین	۹۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱ محدوده ی فرکانسی امواج ماکروویو

امواج الکترومغناطیسی شامل میدان های الکتریکی و مغناطیسی هستند که توسط آنتن با طول مناسب می توانند در فضا (حتی در خلاء) منتشر شوند. این امواج اولین بار در سال ۱۸۶۵ توسط جیمز کلارک ماکسول پیش بینی شد و در سال ۱۸۸۷ هانریش هرتز موفق شد آنها را مشاهده کند. مهمترین خاصیت این امواج این است که می توانند (صرف نظر از فرکانس آنها) با سرعتی تقریباً معادل با سرعت نور، یعنی ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر در ثانیه حرکت کرده و برای انتقال سیگنال های اطلاعات مورد استفاده قرار گیرند. امواج الکترومغناطیسی که دارای رنج فرکانسی از ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز می باشند در محدوده ی امواج ماکروویو^۱ قرار می گیرند. این رنج فرکانسی منطبق بر طول موج های از ۱ متر تا ۱ میلی متر (در فضای آزاد) می باشد. امواج الکترومغناطیسی ای با طول موج از ۱ تا ۱۰ میلیمتر را امواج میلیمتری می گویند، زیرا طول موج های آنها در رنج میلیمتر می باشد. بیشتر کاربردهای صنعتی مایکروویو در محدوده ی ۱ گیگا هرتز تا ۴۰ گیگا هرتز است. در شکل ۱-۱ طیف امواج الکترومغناطیسی و تقسیم بندی باندهای فرکانسی متداول برای امواج رادیویی و مایکروویو آمده است [۱].



شکل ۱-۱: طیف های مایکروویو/RF

۲-۱ کاربردهای مایکروویو

در سال‌های اخیر استفاده از محدوده‌ی فرکانسی مایکروویو کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. در واقع روز به روز با ورود تجهیزات نوین و با ایجاد تحول در تکنولوژی ساخت ادوات رادیویی به دلایل مختلفی از جمله جلوگیری از تداخل طیفی ناچار به استفاده از باندهای فرکانسی بالاتر هستیم. این تنها مزیت استفاده از فرکانس‌های بالاتر نیست، زیرا با بالا رفتن فرکانس‌های کاری، نرخ تبادل‌های ارتباطی نیز بالاتر رفته و حجم اطلاعات بیشتری را می‌توان در یک فاصله زمانی معین مخابره نمود. مطالب ذکر شده از علل اصلی برای استفاده از فرکانس‌های ماکروویو بوده است، که برخی از کاربردهای این محدوده‌ی فرکانسی عبارتند از:

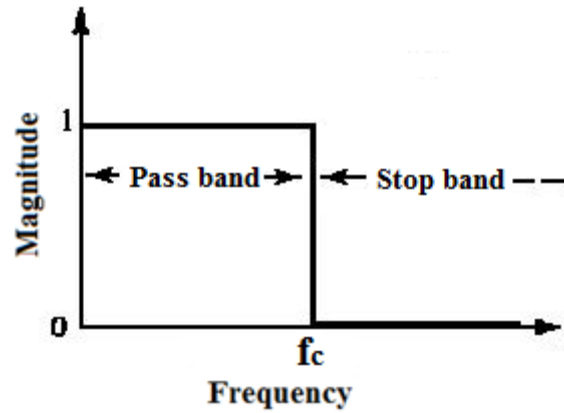
- مهندسی رادار^۲ (آشکار سازی و ردیابی رادیویی) به عنوان یکی از رشته‌های مهندسی مایکروویو دامنه‌ی وسیعی یافته است. سیستم‌های راداری مختلفی مانند رادار ردگیری موشک، رادار کنترل آتش، رادار هواشناسی، رادار کنترل ترافیک فرودگاه و غیره ساخته شده است.
- استفاده از مایکروویو در صنعت گرمادهی که در این زمینه می‌توان به اجاق مایکروویو و استفاده از امواج مایکروویو برای شیمی درمانی اشاره کرد.
- استفاده از مایکروویو در ستاره شناسی رادیویی.
- مهندسی مایکروویو در پژوهش‌های بنیادی، برای درک ساختارهای اتمی و مولکولی به کار می‌رود و بسیاری کاربردهای دیگر.

۳-۱ فیلتر پایین گذر^۳

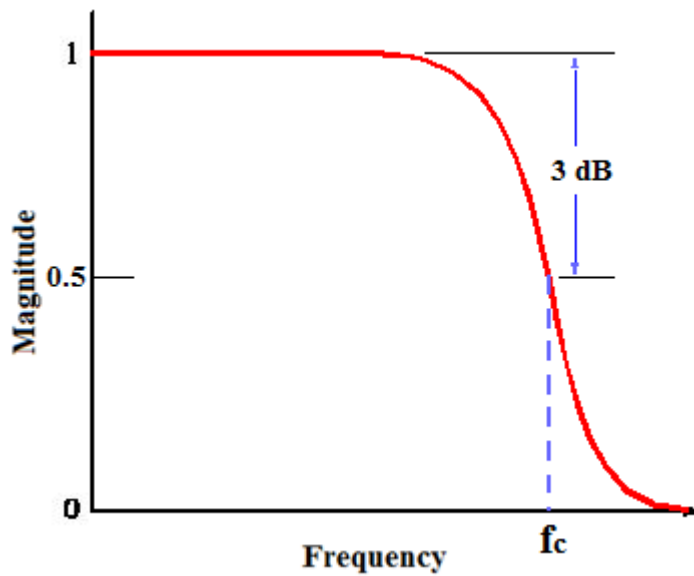
فیلترها از پرکاربردترین ادوات در تمامی زمینه‌های مهندسی می‌باشند که به منظور تضعیف و یا حذف بخشی از سیگنال، مورد استفاده قرار می‌گیرند. فیلترهای پایین گذر نیز به نوبه خود از مهمترین فیلترها می‌باشند. همان گونه که از نامشان پیداست، فرکانس‌های کمتر از فرکانس قطع خود را عبور داده و به فرکانس‌های بالاتر اجازه عبور نمی‌دهند. در شکل ۱-۲ منحنی پاسخ یک فیلتر پایین گذر ایده آل را مشاهده می‌کنید.

در عمل، گذر از ناحیه عبور به ناحیه قطع آنی نیست و منحنی در این مرحله، مقداری شیب دارد. در شکل ۱-۳ منحنی پاسخ یک فیلتر پایین گذر واقعی مشاهده می‌شود. بنا به تعریف، فرکانس قطع در یک فیلتر پایین گذر، فرکانسی است که در آن، بهره سیگنال خروجی به $0/5$ و یا در مقیاس دسی بل به -3 برسد.

2-RADAR: Radio Detection and Ranging
3-Low pass filter



شکل ۱-۲: منحنی پاسخ فیلتر پایین گذر ایده آل



شکل ۱-۳: منحنی پاسخ فیلتر پایین گذر واقعی

برای طراحی و پیاده سازی فیلتر، روش‌ها و تکنولوژی‌های مختلفی وجود دارد. یکی از متداول‌ترین آن‌ها، به خصوص در فرکانس‌های پایین، استفاده از عناصر مداری فشرده^۴ معمولی RLC می‌باشد. در شکل ۱-۴ یکی از ساده‌ترین ساختارهای فیلتر پایین گذر که از اتصال سری دو عنصر مقاومت و خازن به دست می‌آید، دیده می‌شود.