بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه مهندسی برق

طراحی و شبیه‌سازی فیلترهای قابل تنظیم فرکانس بالا با استفاده از تکنولوژی میکروماشین

مصطفی امیرپور

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

استاد راهنمای اول: پروفسور محمد نقی آذرمنش

استاد راهنمای دوم: دکتر ابراهیم عباسپور ثانی

آذر 1393

تقدیر و تشکر

در آغاز، خداوند متعال را شاکرم که نعمت دانش را بر من ارزانی داشت و صبر و شکیبایی را در من قرار داد تا بتوانم این پایان‌نامه را به نحو احسن به پایان برسانم. این پایان‌نامه را با تمام وجودم به خانواده‌ام تقدیم میکنم. بدون دلگرمی‌های مادرم و امیدهای پدرم، این پایان نامه به سرانجام نمی‌رسید.

از زحمات بی دریغ و راهنمایی‌های اساتید گرامیم، دکتر ابراهیم عباسپور ثانی و پروفسور محمد نقی آذرمنش به‌خاطر راهنمایی-های گرانقدرشان تشکر کنم. این بزرگواری برای همیشه در یادم خواهد ماند. همچنین از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر حدیدی و جناب آقای دکتر خویی به دلیل زحماتشان در این دوره صمیمانه تشکر می‌کنم. از دکتر مرتضی موسی‌زاده هم به دلیل کمک‌های راهگشایشان در طول دوره تحصیلم تشکر و قدردانی میکنم. از تمامی دوستانم و همچنین کارکنان پژوهشکده میکروالکترونیک دانشگاه ارومیه تشکر میکنم و آینده‌ای روشن توام با سلامتی را برایشان آرزومندم.

چکیده

در این پایان‌نامه طراحی و شبیه‌سازی فیلترهای میانگذر قابل تنظیم برای کاربردهای فرکانس بالا با استفاده از فن‌آوری میکروماشین ارائه شده است. طرح مدار پیشنهادی، فیلتر میانگذر چبی‌شف معکوس درجه سه، با اندازه سلف‌های ثابت و سوئیچ‌های فرکانس بالا به عنوان خازن متغیر می‌باشد. پیاده سازی مدار هم بصورت المان‌های فشرده انجام شده‌است. متغیر بودن پهنای باند و فرکانس مرکزی به صورت همزمان، قرارگیری قطب‌ها در محل مناسب، شیب تضعیف بالا برای باند قطع، توان تلفاتی پایین در باند عبور و مساحت کلی کوچک از ویژگی‌های ساختار پیشنهادی است. از دیگر ویژگی‌های مدار پیشنهادی، افزایش ضریب کیفیت سلف در فرکانس بالا برای بهبود عملکرد فیلتر است. همچنین سوئیچ‌ها بصورت دیجیتالی کنترل میشوند. فیلتر میانگذر ارائه شده در این پایان‌نامه برای سه فرکانس مرکزی و پهنای باند متفاوت طراحی و شبیه‌سازی شده است. این فیلتر برای کاربردهای Bluetooth, WiMax, WiFi در محدوده فرکانسی 2.3 –5.9 گیگاهرتز بهینه‌سازی شده‌است. فرآیند ساخت مدار با استفاده از تکنولوژی میکروماشین با دقت 2 میکرومتر ارائه شده است. فلز مورد استفاده در شبیه‌سازی مس و پروسه ساخت برای طلا بهینه‌سازی شده‌است. از دی‌اکسید سیلیکون به عنوان دی‌الکتریک سوئیچ، از پلیمر به عنوان لایه قربانی و از سیلیکون به عنوان زیرلایه اصلی استفاده شده است. همچنین بیشترین ضخامت استفاده شده برای فلز، یک میکرومتر می‌باشد.

واژگان کلیدی

تکنولوژی میکروماشین، فیلتر میانگذر، فرکانس بالا

فهرست مطالب

۱ – مقدمه ۱2

۱-۱ فن‌آوری میکروماشین ۱2

1-2 فیلتر 13

1-3 محدودیتها، نارسائیها ، رهیافت 14

1-4 کاربردها 14

1-5 اهداف پایان نامه 15

1-6 ساختار پایان نامه 15

۲ سنتز فیلتر 16

2-1مقدمه 16

۲-۲ تابع مشخصه مدارهای الکتریکی 16

2-2-1 توابع تک پورتی غیرفعال و مشخصات آنها 17

2-3 تحقق توابع تک پورتی 18

2-4 تحقق توابع تبدیل ۱9

2-4-1 تحقق غیرفعال توابع تبدیل ۱9

2-5 تقریب فیلتر 21

2-6 فیلتر پیشنهادی و شبیه‌سازی مداری 22

۳ طراحی الکترومغناطیسی و شبیه‌سازی فرکانس بالا 26

3-1 مقدمه 26

3-2 شبیه‌سازی اولیه 26

3-2-1 شبیه‌سازی سلف حلزونی 26

3-2-2 شبیه‌سازی سوئیچ خازن 34

۳-3 شبیه‌سازی نهایی 44

٤ طراحی و فرآیند ساخت میکروماشین 46

4-1 مقدمه 45

4-2 فرآیند ساخت پیشنهادی 45

5 نتیجه‌گیری و مقایسه 53

5-1 نتیجه گیری 53

5-2 کارهای آتی 54

مراجع 55

فهرست شکل‌ها

فصل 1

شکل 1–1 استانداردهای معمول همراه با فرکانس آنها 15

فصل ۲

شکل 2–1 فیلتر اولیه ارائه شده 22

شکل ۲–۲ پاسخ فرکانسی فیلتر اولیه با ضریب کیفیت بینهایت برای سلف 23

شکل 2–3 پاسخ فرکانسی فیلتر اولیه با ضریب کیفیت 2 برای سلف 23

شکل 2–4 شماتیک فیلتر پیشنهادی 25

شکل 2–5 پاسخ فرکانسی کلی فیلتر برای هر سه محدوده 25

فصل ۳

شکل 3–1 دو نمونه سلف ساخته شده به روش میکروماشین(زیر گروه ج) 28

شکل 3–2 شکل خط مستقیم آلومینیوم به همراه نمای سه بعدی 28

شکل 3–3 شبیه‌سازی سلف و ضریب کیفیت برای شکل (3–2) 29

شکل3–4 شکل سلف حلزونی مربعی به همراه نمای سه‌بعدی 29

شکل 3–5 شبیه‌سازی سلف و ضریب کیفیت برای فلز آلومینیوم 29

شکل3–6 شبیه‌سازی سلف و ضریب کیفیت برای فلز مس ۳۰

شکل 3–7 اثر تزویج برروی سلف‌های موازی 31

شکل 3–8 شکل سلف حلزونی مربعی دوطبقه به همراه نمای روبرو و 45 درجه ۳۱

شکل 3–9 شبیه‌سازی شکل (3–8) ۳1

شکل 3–10 شکل سلف حلزونی مربعی سه طبقه برای قسمت پایین گذر 32

شکل 3–11 شبیه‌سازی شکل (3–10) ۳2

شکل 3-12 شکل سلف حلزونی مربعی سه طبقه برای قسمت بالا گذر ۳3
شکل 3-13 شبیه‌سازی شکل (3-12) 33
شکل 3-14 اصول کاری سوئیچ MEMS 34
شکل 3-15 نمای کناری و روبرو یک سوئیچ Cantilever 35
شکل 3-16 سوئیچ موازی Borderside 35
شکل 3-17 سوئیچ سری Line-in 36
شکل 3-18 تاثیر گرادیان تنش در انحنای تیر 37
شکل 3-19 سوئیچ MEMS 37
شکل 3-20 سوئیچ سری و مدل مداری 40
شکل 3-21 سوئیچ سری Line-in و مدل مداری 40
شکل 3-22 شکل خازن C_1 برای محدوده 4.9 تا 5.9 گیگاهرتز 42
شکل 3-23 شبیه‌سازی شکل (3-22) 42
شکل 3-24 (الف) مدل شبیه‌سازی ولتاژ تحریک 43
شکل 3-24 (ب) نمودارهای جابجایی و استرس وارده به بازو 43
شکل 3-25 (الف) فیلتر برای محدوده 2.5 GHz – 2.3 44
شکل 3-25 (ب) فیلتر برای محدوده 2.5 GHz – 2.3 44
شکل 3-26 شبیه‌سازی برای محدوده 5.9 GHz – 4.9 45
شکل 3-27 شبیه‌سازی برای محدوده 3.7 GHz – 3.5 45
شکل 3-28 شبیه‌سازی برای محدوده 2.5 GHz – 2.3 45

فصل ٤

شکل 4-1 فرآیند ساخت 47

فهرست جدول‌ها

فصل ۱

جدول ۱-۱ قطعات و کاربردهای MEMS 13

فصل ۲

جدول 2-1 اثر تبدیل فیلتر پایین‌گذر به بالاگذر و میانگذر 22

جدول ۲-۲ مشخصات طراحی فیلتر 24

جدول 2-3 اندازه المانهای فیلتر 24

فصل ۳

جدول 3-1 مشخصه و پیکربندی سوئیچ RF MEMS 34

جدول 3-2 اندازه فیزیکی خازنها و مقایسه با شبیه‌سازی 42

فصل 4

جدول 4-1 مواد استفاده شده و محلول آنها 48

فصل 5

جدول 5-1 مقایسه فیلتر طراحی شده با چند فیلتر شناخته شده 53

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ فن آوری میکروماشین

میکروماشین عبارتست از استفاده از ابزارهای مناسب جهت ایجاد ساختارهای میکرونی برروی زیرلایه مناسب. ابزارهای مناسب معمولا به دستگاههای پیشرفته‌ای اطلاق میشود که در صنعت نیمه‌هادی جهت ساخت آی‌سی استفاده میشود. ساختار میکرونی معمولا به ساختاری سه‌بعدی یا دوبعدی اطلاق میشود که مشخصه خاصی در حوزه مورد نظر دارد و میتوان با تشخیص تغییرات این مشخصه پردازش‌های مناسبی را در حوزه الکترونیک انجام داد. استفاده از فناوری میکروماشین باعث رشد و پیشرفت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی شده است. فن‌آوری MEMS یا به عبارتی سیستم های میکروالکترومکانیکی، مهندسی مینیاتوری ایست که هدف آن ساخت سیستم‌هایی با قابلیت تشخیص در حوزه علم مکانیک و پردازش در حوزه علم الکترونیک است.

مفهوم MEMS از دهه‌ی 70 میلادی شروع به رشد کرده است و در ابتدا به عنوان سنسور فشار و شتاب و دما مورد استفاده قرار می‌گرفت. ولی در چندسال اخیر به اندازه ای رشد کرده است که دیگر ساختارهای در اندازه میکرونی و زیر میکرونی را که به نوعی به پدیده های مغناطیس، پیزو الکتریک، گرما، نور و فشار در ارتباط هستند تحت شعاع قرار داده است.

پیشرفت‌های چشمگیر سالهای اخیر در حوزه صنعت نیمه‌هادی و مهندسی مواد باعث شده است که توانایی فناوری میکروماشین در استفاده از مواد مختلف برای کاربردهای مختلف افزایش یابد. این مزایا MEMS را در بسیاری از زمینه ها در جایگاه ممتازی قرار می‌دهد ،که برخی از این زمینه ها در جدول ۱-۱ آمده است[1]. استفاده از موادی مانند سیلیکون و روش‌های ساخت سازگار با فن‌آوری مدارات مجتمع، اجزای مکانیکی سیستم‌ها می توانند با مدارات مجتمع به صورت یکپارچه ساخته شده و به صورت سیستم های روی یک تک چیپ با جهان فیزیکی تقابل کنند، محاسبات الکترونیکی انجام دهند و حتی در صورت لزوم با دیگر سیستم‌ها ارتباط برقرار کنند.

کاربرد فن آوری MEMS در حوزه ی فرکانس رادیویی راRF MEMS می‌نامند که شاخه ی جدیدی از این علم است. امروز قطعات RF MEMS شامل سوئیچ یا رله‌ها ،خازن‌های متغیر، سلف های با ضریب کیفیت بالا، فیلتر ها و نوسان سازها[1] که مهم

[1] oscillator

ترین اجزای سازنده ی سیستم های فرکانس رادیویی هستند ، به شدت از طرف مجامع علمی و صنعتی مورد توجه و استفاده قرار دارند. بارزترین مزایای این قطعات عبارتند از: کاهش توان مصرفی، مشخصه RF بسیار عالی و سازگاری ساخت با تکنولوژی مدارات مجتمع موجود[1].

جدول ۱-۱ قطعات و کاربردهای MEMS

کاربرد	قطعه‌ی **MEMS**
اندازه گیری اینرسی	شتاب سنج‌ها، ژیروسکوپ [۲]
اندازه گیری فشار	سنسورهای فشار
میکروسیال[۶]، Bio-MEMS	نازل‌های جوهرافشان [۳]، سنسورهای جریان جرم[۴]، تولید کننده‌های میکروقطره[۵] [٤]
اپتیک[۹] و مخابرات	میکروآینه‌های دیجیتال[۷]، سوئیچ‌های نوری[۸] [٥]
ارتباطات رادیویی	سوئیچ‌ها، سلف‌ها، خازن‌ها، تشدیدکننده‌ها[۱۰] [٦]
دیگر کاربردها	میکرورله‌ها[۱۱]، سنسورها [٧]

1-2 فیلتر

فیلترها مدارهایی هستند که تنها قسمتی از باند فرکانسی را از خود عبور می‌دهند و یا اینکه در طیف فرکانسی سیگنال‌های ورودی خود، تغییراتی ایجاد میکنند.[8] توانایی تغییر ویژگی‌های سیگنال ورودی در حوزه فرکانس باعث شده‌است که فیلترها به عنوان یکی از مهمترین اجزای سیستم‌های ارتباطی-مخابراتی، سیستم‌های بی‌سیم همچون فرستنده-گیرنده و بسیاری دیگر قرار گیرند. علاوه بر مسائل اندازه و بازدهی فیلتر، بحث کارایی میتواند تاثیر بسزایی برروی کارکرد سیستم ارتباطی متحرک یا ایستا بگذارد. از موارد مهم دیگری که باعث اهمیت بیشتر فیلترها میشود و تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام شده است، بحث قابلیت تنظیم

---

[۲] gyroscope
[۳] ink jet nozzle
[۴] mass flow sensor
[۵] micro droplet generator
[۶] micro-fluidics
[۷] digital micro mirror
[۸] optical switch
[۹] optic
[۱۰] resonator
[۱۱] micro relay

فیلترهاست. سیستمهای مدرن ارتباطی معمولا دارای چیدمان پیچیده‌ای از عملکرد فرکانسی و طیف تحت پوشش هستند. این نوع سیستمها نیازمند ساختارهایی هستند که بتوانند در این طیف فرکانسی عملکرد مناسبی داشته باشند. فیلترهای قابل تنظیم که میتوانند در چندین باند فرکانسی عملکرد داشته باشند، از جمله این ساختارها هستند. بسته به نوع تحقق فیلتر، با تغییر یکی از مشخصه های پهنای باند عبور یا فرکانس مرکزی یا هردو میتوان به فیلتر قابل تنظیم دست یافت.

1-3 محدودیتها، نارسائیها ، رهیافت

قابلیت تحقق فیلترهای مولتی باند یا قابل تنظیم، به شدت به توپولوژی آن وابسته است. فیلترهایی که بصورت غیرفعال تحقق می‌یابند دارای المان‌های پسیو هستند. تغییر پهنای باند عبور یا فرکانس مرکزی فیلترغیرفعال با تغییر اندازه المانهای مدار انجام میشود. تحقق المان‌های مداری با اندازه‌ی متغیر به دو صورت امکان پذیر است. اول تغییر پیوسته اندازه المان و دوم تغییر گسسته. مشکل اول تغییر اندازه بصورت پیوسته در محدوده تنظیم کوچک آن است. مشکل دوم از ضریب کیفیت پایین المانهای متغیر پیوسته نسبت به المانهایی با اندازه ثابت ناشی میشود. در روش تغییر گسسته، اندازه المانها ثابت است ولی با استفاده از سوئیچ های سری یا موازی همواره مقادیر تازه‌ای به مدار اضافه یا کم میشود. مشکل این روش در سایز بزرگ مدار نمایان خواهد شد.

با توجه به اینکه در این پایان‌نامه فیلتر با تکنولوژی میکروماشین طراحی و شبیه‌سازی میشود، پس باید محدودیت‌های این تکنولوژی در نظر گرفته شود. تحقیقات فراوانی بروی المانهایی با قابلیت تغییر اندازه پیوسته در تکنولوژی میکروماشین انجام گرفته است[9]، ولی حداقل در این پایان‌نامه محدوده‌ی تغییرات المانها به اندازه‌ای است که قابلیت تحقق بصورت تغییر پیوسته وجود ندارد.

یک رهیافت خوب برای نارسائیهای موجود، استفاده از توپولوژی‌هایی است که هم بتوان با تکنولوژی میکروماشین طراحی کرد و هم بتوان گستره فرکانسی مورد نظر را پوشش داد. از طرفی کارایی کلی مدار هم در سطح قابل قبولی قرار بگیرد و سطح کلی مدارشبیه‌سازی شده بزرگ نباشد.

1-4 کاربردها

فیلترهای مولتی باند جایگاه ویژه‌ای در سیستمهای ارتباطی دارند. بطوریکه امروزه کارکرد یک دستگاه ارتباطی قابل حمل مانند تلفن همراه بدون فیلتر مولتی باند امکان پذیر نیست. به هر میزان که فیلتر قابلیت تنظیم بالا و گستره فرکانسی بالایی داشته باشد، سیستم موردنظر میتواند کارکردهای متنوعی داشته باشد و انعطاف‌پذیری بالایی از خود نشان دهد. درکنار این مسئله، امروزه با استفاده از تکنولوژی میکروماشین میتوان این انعطاف‌پذیری را با کارایی بالا همراه دانست.

Allocated frequencies

Standard	Frequencies	Spectrum Type
UMTS FDD	850 MHz, 900 MHz, 2.0, 1.9/2.1, 2.1, and 1.7/2.1 GHz	Licensed
UMTS-TDD	450, 850 MHz, 1.9, 2, 2.5, and 3.5 GHz[4] 2 GHz	Licensed (Cellular, 3G TDD, BRS/IMT-ext, FWA) Unlicensed (see note)
CDMA2000 (inc. EV-DO, 1xRTT)	450, 850, 900 MHz 1.7, 1.8, 1.9, and 2.1 GHz	Licensed (Cellular/PCS/3G/AWS)
EDGE/GPRS	850 MHz, 900 MHz, 1.8 GHz, and 1.9 GHz	Licensed (Cellular/PCS/PCN)
iBurst	1.8, 1.9, and 2.1 GHz	Licensed
Flash-OFDM	450 and 870 MHz	Licensed
Bluetooth/BLE	2.4 GHz	Unlicensed ISM
Low Rate WPAN (802.15.4)	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	Unlicensed ISM
WiFi (802.11)	2.4, 3.6, 4.9, 5.0, 5.2, 5.6, 5.8, 5.9 and 60 GHz[5]	Unlicensed ISM
WiMax (802.16e)	2.3, 2.5, 3.5, 3.7, and 5.8 GHz	Licensed
Wireless USB, UWB	3.1 to 10.6 GHz	Unlicensed Ultrawideband
VEmesh*	868 MHz, 915 MHz, and 953 MHz	Unlicensed ISM
EnOcean*	868.3 MHz	Unlicensed ISM

شکل 1-1 استانداردهای معمول همراه با فرکانس آنها

طیف معمول فرکانسی مورد استفاده در شکل 1-1 آمده است.[10] در این پایان‌نامه استانداردهای WiFi(802.11)-Bluetooth-WiMax(802.16e) به عنوان استانداردهای تحت پوشش مورد استفاده قرار گرفته‌اند و فیلتر ارائه شده برای این فرکانسها بهینه‌سازی شده است.

1-5 اهداف پایان نامه

اهدافی که در انجام این پایان نامه پیگیری خواهند شد عبارتند از: طراحی فیلتر با قابلیت تغییر فرکانس مرکزی و پهنای باند برای سه حوزه WiFi(802.11)-Bluetooth-WiMax(802.16e)، طراحی برای حداکثر تضعیف 3dB در باند عبور، طراحی برای فرآیند ساخت ساده، استفاده از RF Switch به عنوان خازن بجای Capacitive Bank و طراحی برای کمترین میزان سلف مورد استفاده.

1-6 ساختار پایان نامه

در فصل اول به مقدمه‌ای در مورد فناوری میکروماشین، فیلترها و کاربردهای آن‌ها پرداختیم. در فصل دوم به مبحث فیلترها از دیدگاه طراحی مدار پرداخته شد. در این فصل رهیافت‌های مختلف برای طراحی فیلتر، انواع توابع مشخصه و نحوه تحقق آنها و در نهایت ارائه فیلتر پیشنهادی به همراه شبیه‌سازی‌های مداری پوشش داده شد. نکته‌ای که وجود دارد این است که بدون دانش ریاضی و تحلیل مداری، نمی‌توان فیلتر مورد نیاز را طراحی کرد. فصل سوم طراحی و چیدمان کلی مدار جهت ساخت از دید الکترومغناطیسی است. در این فصل، ابتدا ساختارهای اساسی سلف حلزونی و سوئیچ خازنی بررسی و شبیه‌سازی میشوند. سپس به تحلیل ساختار پیشنهادی با مشخصات آلومینیوم انجام میشود. در انتها نیز با ارائه‌ی شبیه‌سازی‌های مختلف برای دو فلز

آلومینیوم و مس، نتایج حاصل از محاسبه و شبیه‌سازی ارائه میشود. فصل چهارم به پروسه ساخت میکروماشین می‌پردازد. تلاش برای ارائه پروسه طراحی ساده، از ویژگی‌های این فصل است. فصل پنجم به نتیجه‌گیری و مقایسه مشخصه‌های فیلتر طراحی شده با ساختارهای قبلی اختصاص دارد. در این فصل، سعی شده است که تا حد امکان مقایسه با ساختارهایی صورت گیرد که نتایج شبیه‌سازی دارند.

فصل ۲

فیلتر

2-1 مقدمه

هر مسئله الکترومغناطیس دارای سه بخش ورودی، خروجی و فضای وسط است. در حالت خاص، فضای واسط مدار الکتریکی است. اگر یکی از دو عامل ورودی یا مدار مجهول باشد، مسئله از نوع طراحی می‌باشد. دو ویژگی مهم مسائل طراحی در یکتا نبودن جواب و امکان عدم وجود جواب است. مسائل طراحی به سه روش تجربی، سعی و خطا و حل معکوس مسئله حل میشوند. سنتز، یک نوع حل معکوس است و براساس نظریه‌های قاعده‌مند ریاضی می‌باشد. [8]

به دلیل اینکه فیلترها هم نوعی مدار الکتریکی هستند و برای یک خروجی مشخص طراحی میشوند، باید از روش سنتز فیلترها برای بدست آوردن مدار الکتریکی متناسب با خروجی تحلیل شوند. به همین دلیل در این فصل به مبحث فیلترها، انواع توابع مشخصه و روشهای تحقق آنها، انواع تقریب فیلترها و ارائه فیلتر مورد نظر پرداخته میشود.

۲-۲ تابع مشخصه مدارهای الکتریکی

برای سنتز مدارها، ابتدا باید با توابع مشخصه آنها و سپس چگونگی استفاده از آنها در تحقق فیلترها آشنا شویم. برای آشنایی با توابع تبدیل هم ابتدا باید توابع امپدانسی و ادمیتانسی و نحوه ارتباط آنها با توابع تبدیل را بررسی کنیم.

ازآنجایی که توابع مشخصه بصورت مختلط هستند، دارای دو بخش مستقل از هم می‌باشند. از طرفی چون ناشی از مدارهای واقعی هستند، پس حقیقی، پایدار و عِلّی می‌باشند. این قیود باعث میشوند که هردو بخش به هم وابسته بوده و یکی را از دیگری منتج دانست[8]. این دو بخش را میتوان بصورت یکی از حالتهای زوج-فرد، حقیقی-موهومی یا دامنه-فاز تقسیم کرد. حال به

بررسی هر کدام از موارد یادشده می‌پردازیم. اگر تابع تبدیل را در حوزه لاپلاس به دو بخش فرد و زوج تقسیم کنیم، روابط زیر را میتوان بدست آورد.

$$F(s) = M(s)$$

$$M(s) = 0.5 \times$$

حال اگر تابع $F(s)$ را بصورت کسر گویا بنویسیم، در این حالت خواهیم داشت:

$$F(s) = \frac{A(s)}{B(s)} =$$

که در رابطه (2-3) $M_1(s)$ قسمت زوج صورت و $N_1(s)$ قسمت فرد صورت است. مخرج تابع هم به همین‌گونه است. رابطه (2-3) نشان میدهد که بخش زوج و فرد یک تابع تبدیل چگونه به هم وابسته هستند.

بحث فوق در مورد حالت‌های حقیقی- موهومی و دامنه-فاز هم صادق است. یعنی یکی به دیگری وابسته است. دراینجا فقط به روابط نهایی اشاره میشود.

$$F(j\omega) =$$

$$\rightarrow \begin{cases} A^2(\\ \varphi(\\ R(\\ X(\end{cases}$$

نکته‌ای که وجود دارد این است که می توان با داشتن یک بخش از تابع مشخصه مدار واقعی، بخش دیگر را از آن بدست آورد. حال با داشتن هر دو بخش، تابع تبدیل کل بدست می‌آید. توضیحات تکمیلی درباره این مبحث به طور تفصیلی در مراجع [8] و [11] آمده است.

2-2-1 توابع تک پورتی غیرفعال و مشخصات آنها

توابع تبدیل توابعی دو پورتی هستند. برای اینکه نحوه تحقق آنها را بررسی کنیم ابتدا باید با توابع تک پورتی و مشخصات آنها آشنا شویم، سپس نتایج را به توابع دوپورتی تعمیم دهیم. تابع تک پورتی غیرفعال(پسیو) سامل المانهای مقاومت، خازن، سلف و

القائ متقابل است. برای آنکه بتوان یک تابع مختلط $F(s)$ را حداقل توسط یک مدار غیرفعال تحقق داد، باید شرایط حقیقی-مثبت بودن را در آن بررسی کرد. شرایط حقیقی-مثبت بودن به شرح زیر است:

الف) $F(s)$ حقیقی است، اگر s حقیقی باشد؛

ب) برای $\text{Re}[s] \geq 0$, $\text{Re}[F(s)] \geq 0$ باشد.

شرط حقیقی-مثبت بودن را شرط لازم و کافی برای توابع امپدانس و ادمیتانس تک پورتی مدارهای غیرفعال می‌گویند[8]. ازآنجایی که بررسی دو شرط فوق برای توابع پیچیده سخت می‌باشد، شرائط معادلی برای آن ر نظر گرفته شده است. این شرائط معادل را با معیار روث و قضیه اشتورم-لیوول بررسی میکنند. بحث مفصل در مورد این بخش در [8] آمده است. آنچه که از بحث فوق میتوان دریافت، این است که اگر یک تابع مشخصه در دست باشد، ابتدا با موجود بودن حداقل یک مدار برای آن را بررسی کرد. این بررسی توسط شرایط حقیقی-مثبت بودن انجام میشود.

توابع تک پورتی جهت تحقق و بررسی به چهار قسمت تقسیم میشوند: بدون اتلاف-بدون خازن-بدون سلف-خطوط انتقال. با توجه به اینکه فیلتر موردنظر میانگذر خواهد بود، به بررسی حالت بدون اتلاف اکتفا میکنیم. مدارهای بدون اتلاف دارای سه خاصیت زیر می‌باشند:[8]

الف) توابع تک پورتی آنها فرد و موهومی‌است؛

ب) صفر و قطب‌های تابع برروی محور موهومی قرار دارد و بصورت ساده و با مانده مثبت است. از طرفی چون فرد می‌باشد، حتما یک صفر یا قطب در مبدا خواهید داشت؛

ج) صفر و قطبهای تابع بصورت ساده و یک درمیان روی محور موهومی قرار دارند.

با توجه به شرایط فوق، تابع امپدانس مدارهای بدون اتلاف بصورت زیر خواهد بود:

$Z_{LCM}($

$Y_{LCM}($

2-3 تحقق توابع تک پورتی

دراین بخش به روشهای تحقق غیرفعال توابع (2-6) و (2-7) می‌پردازیم. هدف از ارائه روشهای تحقق، بدست آوردن ضرایب k در روابط (2-6) و (2-7) می‌باشد. هرکدام از این ضرایب با توجه به نوع تحقق، یکی از المانهای مدار را مشخص می‌کند. درحالت کلی چهار نوع روش برای تحقق المانهای غیرفعال وجود دارد: فوستر 1، فوستر 2، کائر 1، کائر 2. اساس روش فوستر 1، بسط تابع امپدانس ازروی قطبهای آن است و المانهای موازی بصورت سری تحقق می‌یابند. فوستر 2 تابع ادمیتانس را از روی قطبها بصورت المانهای سری بصورت موازی تحقق می‌دهد. کائر 1 قطب یا عدد ثابت را در بینهایت حذف میکند و خازن موازی یا سلف و مقاومت سری پدید می‌آورد. کائر 2 قطب یا عدد ثابت را در مبدا حذف میکند و برخلاف کائر 1، خازن سری با سلف و مقاومت موازی ایجاد میکند.

روابط حاکم بر روشهای تحقق به‌ترتیب فوستر 1، فوستر 2 در زیر آمده است:

$$Z_{LC}(s) = k$$

$$Y_{LC}(s) = k$$

در روش کائر 1، صورت و مخرج تابع مشخصه را از بزرگترین درجه تا کوچکترین درجه مرتب میکنیم. سپس با تقسیم متوالی تا صفر شدن باقیمانده المان استخراج میکنیم. در روش کائر 2، صورت و مخرج بطور صعودی مرتب میشوند و این تقسیمات ادامه میابد. جزئیات بیشتر در[8] آمده‌است.

2-4 تحقق توابع تبدیل

توابع تک پورتی حالت خاصی از توابع دو پورتی یا توابع تبدیل هستند. فیلترها هم نوع خاصی از توابع تبدیل هستند. ابتدا با خصوصیات توابع تبدیل آشنا میشویم، سپس ارتباطی بین توابع دوپورتی و تک پورتی برقرار میکنیم تا نحوه تحقق توابع دوپورتی را بررسی کنیم.

توابع تبدیل از چند جهت قابل دسته‌بندی هستند. اول، ساختار مدار است. انواع ساختارها عبارتنداز نردبانی، ضربدری، نوع L و نوع Bridge-T. با توجه به مواردی که در بخش‌های بعدی ارائه خواهند شد، فقط به بررسی نوع نردبانی خواهیم پرداخت. دوم، تنوع المانها است که عبارتنداز: LC-RL-RC-RLC که هرکدام ویژگی خاص خود را دارند. در این پایان‌نامه فقط به بررسی نوع LC

خواهیم پرداخت. سوم، تعداد بار انتهایی است. برای تحقق مدار باید مشخص شود که بار منبع و مقاومت بار صفر است یا غیر صفر یا بینهایت. بحث مفصل در [8] آمده است.

2-4-1 تحقق غیرفعال توابع تبدیل

تابع تبدیل یک مدار دودهانه‌ای به پارامترهای داخلی و خارجی مدار وابسته است. منظور از پارامترهای داخلی و خارجی، امپدانس یا ادمیتانس دیده شده از ورودی یا خروجی است. برای مثال، تابع تبدیل مداری با دو بار انتهایی بصورت رابطه (2-10) خواهد بود.

$$H(s) = \frac{}{\frac{1}{R_L}}$$

به‌دلیل پیچیده بودن روابط برای تابع تبدیل با دوبار انتهایی، از روابط توان استفاده میشود. خلاصه روابط به شرح زیر است.

1-توان ورودی: توانی که به ورودی مدار تحویل داده میشود:

$$P_{in}(jw) = R$$

2-توان منبع: حداکثر توان ورودی که به شرط مزدوج شدن امپدانس ورودی با امپدانس منبع حاصل میشود:

$$P_s(jw) = \frac{|V_s}{}$$

3-ضریب انعکاس:

$$|\Gamma(jw)|^2 =$$

4-رابطه بین امپدانس ورودی و ضریب انعکاس:

$$Z_{in}(s) = R_s$$

5- رابطه بین تابع تبدیل و ضریب انعکاس:

$$\Gamma(s)\Gamma(-s) =$$

برای تحقق تابع تبدیل H(s) بصورت LC نردبانی و با دو بار انتهایی، مراحل زیر را انجام میدهیم:

۱- با استفاده از رابطه (۲-۱۵) H(s) را تفکیک میکنیم و $\Gamma(s)$ را بدست می‌آوریم.

۲- با (۲-۱۴) امپدانس ورودی را بدست می‌آوریم.

۳- سپس با استفاده از روشهایی تحقق مداری فوستر ۱، فوستر ۲، کائر ۱، کائر ۲ ضرایب k را بدست می‌آوریم. توجه شود که امپدانس باید از سمت چپ تحقق یابد و آخرین المان همان مقاومت بار است که بصورت موازی قرار می‌گیرد.

معمولا بیش از یک $Z_{in}(s)$ بدست می‌آید. تابعی درست است که آخرین المان تحقق یافته با مقاومت بار مطابقت داشته باشد.

2-5 تحقق فیلتر

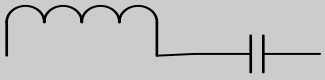
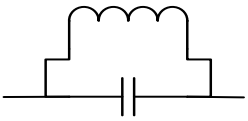
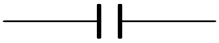
فیلترها به دو گروه انتخابگر فرکانس و عمومی تقسیم میشوند. فیلترهای انتخابگر بصورت پایین‌گذر، بالاگذر، میان‌گذر و میان‌نگذر طراحی میشوند. فیلترهای عمومی برای تصحیح دامنه پاسخ فرکانسی، رفع اعوجاج دامنه، تصحیح تاخیر و رفع اعوجاج فاز و شکل‌دهی سیگنالهای دیجیتال کاربرد دارند[8]. فیلترها درحالی ایده‌آل غیر عِلّی هستند و قابلیت تحقق مداری را ندارند. برای تحقق مداری فیلترها، از تقریب آنها استفاده میشود. هدف از این تقریب عِلّی کردن پاسخ فرکانسی است. بسته به کاربرد، دامنه یا فاز تابع تقریب زده میشود.

برای تحقق فیلترها، ابتدا توسط چند معادله، مشخصاتی از فیلتر را بدست میآوریم و ازآنها تابع تبدیل مدار بدست میآید. سپس با روشهای گفته شده، تابع تبدیل تحقق میابد. نکته مهمی که وجود دارد این است که فیلترها را ابتدا بصورت پایین گذر تحقق میدهند، سپس با تغییراتی آنها را به حالت مورد نظر تبدیل میکنند.

مهمترین نوع فیلترها با توجه به روش تحقق آنها به این صورت دسته بندی میشوند: باتروورث-چبی شف-چبی شف معکوس-کائر-بیضوی-بسل-گوسی-شبه بیضوی. دربین فیلترهای یادشده، چبی‌شف معکوس به دلیل اینکه قطبهایش در بینهایت قرار ندارند، شیب تضعیف بالایی دارد. حال به بررسی فیلتر چبیشف معکوس می‌پردازیم:

$$T_n(\omega) = \cos$$
$$T_{n+1}(\omega) = 2$$
$$T_0(\omega) = 1$$

رابطه (2-16) چندجمله‌ای چبیشف، (2-17) رابطه بازگشتی چندجمله‌ای چبیشف و (2-18) دو جمله اول رابطه بازگشتی را نشان میدهند. برای بررسی ویژگیهای دیگر و همچنین اثبات روابط فوق به [8] مراجعه شود. تقریب چبی‌شف معکوس برای فیلتر پایین‌گذر به‌صورت زیر است:

معادل میان‌گذر	معادل بالا گذر	معادل پایین گذر
		
		

جدول 2–1: اثر تبدیل فیلتر پایین‌گذر به میانگذر و بالاگذر

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{}{1}$$

$$R_s = 10\log\left($$

رابطه (2–19)، تقریب چبیشف معکوس را برای فیلتر پایین‌گذر ارائه میدهد که در آن n درجه فیلتر، ω_c فرکانس قطع، ε تنظیم کننده میزان ریپل در باند قطع است. مقدار ریپل در باند قطع نیز از رابطه (2–20) بدست میآید. برای طراحی فیلتر میانگذر با مشخصات خاص، ابتدا فیلتر پایین گذر نرمالیزه را طراحی میکنند، سپس با تغییراتی فیلتر پایین‌گذر را به میانگذر یا بالاگذر تبدیل میکنند. اثر تبدیل پایین‌گذر به میانگذر و بالاگذر در جدول (2–1) آمده است. نکته مهم در اندازه سلف و خازنهاست که با تغییر نوع فیلتر، اندازه آنها هم با توجه به روابطی تغییر میکند. بحث جامع در این زمینه در مراجع [8] و [11] آمده است.

2–6 فیلتر پیشنهادی و شبیه‌سازی مداری

نمونه اولیه فیلتر چبی‌شف معکوس میانگذر مرتبه سه با فرکانس مرکزی 2.4 گیگاهرتز و پهنای باند 200 مگاهرتز و مقاومتهای انتهایی 50 اهم در شکل (2–1) آمده است. همانگونه که مشخص است، فیلتر از دو رزونانس سری در شاخه سری و دو رزونانس سری در شاخه موازی تشکیل شده است. شاخه های موازی قطب های فیلتر را در فرکانس مورد نظر ایجاد میکنند و باعث ایجاد تضعیف در باند قطع میشوند. وجود قطب‌ها باعث افزایش شیب تضعیف میشود که این یکی از برتری‌های این نوع فیلتر است.