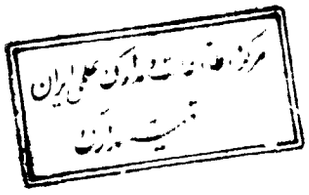
٣٣٠٢٧

۱۳۸۰ /۱۱/ ۱۰

دانشگاه صنعتی اصفهان



دانشکدهٔ برق و کامپیوتر

طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو باند عریض

پایان نامهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ مهندسی برق-مخابرات

۱۰۱۱۸

مهرداد استکی

استاد راهنما

دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

۱۳۷۸

۳۳۰۲۷

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مخابرات آقای مهرداد استکی

تحت عنوان

طراحی تقویت کننده‌های مایکروویو باند عریض

در تاریخ ۷۸/۱۲/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت

۱ ـ استاد راهنمای پایان نامه — آقای دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد

۲ ـ استاد مشاور پایان نامه — آقای دکتر سعید صدری

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — آقای دکتر دوست حسینی

تقدیر و تشکر

سپاس بی‌پایان خدایی را که جز به اراده و لطف او هیچ باری به منزل نمی‌رسد. اکنون که به لطف پروردگار، این تحقیق ناچیز را به پایان می‌برم، به‌جاست که از زحمات تمامی سرورانی که انجام این کار، جز به مدد دانش و محبتهای بی دریغ ایشان میسّر نمی شد، قدردانی کنم.

لذا از استاد راهنمای این تحقیق، جناب آقای دکتر ابوالقاسم زیدآبادی نژاد به خاطر راهنمایی‌های ارزنده و حمایتهای بی دریغ و همه جانبه ایشان، از استاد مشاور تحقیق جناب آقای دکتر سعید صدری که در طول این دوره از پیشنهادها و حمایت‌های ایشان بهره برده‌ام و همچنین از آقای دکتر دوست حسینی و جناب آقای دکتر پورآباده و همچنین از جناب آقای مهندس میوه‌چی که در جلسهٔ دفاع و داوریِ پایان نامه حضور یافتند سپاسگزاری می‌نمایم.

همچنین بجاست که از زحمات و محبت های برادر عزیزم شهرام استکی تشکر نمایم. شایسته است که از آقای محمد مهدی قطاع که زحمت تایپ و آماده سازی پایان نامه را علیرغم همهٔ مشکلات تقبل کردند نیز قدردانی کنم.

بجاست که از سرکار خانم دیباجی نیز که در طول مدت تحصیل، از راهنماییهای آموزشی ایشان بهرهٔ فراوان بردم سپاسگزاری نمایم.

کلیهٔ حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات، و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر و همسر عزیزتر از جانم ،

که همه موفقیتها و همه زندگیم را مدیون تلاش و ایثار ایشان هستم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... شش

چکیده ..... هشت

فصل یکم ۱

مقدمه‌یی بر مایکروویو ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ تاریخچهٔ علم مایکروویو ۱

۱-۳ کاربردهای مایکروویو ٤

۱-٤ تقویت‌کننده‌های مایکروویو ٥

فصل دوم ۷

طراحی تقویت کننده‌های مایکروویو ۷

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ تئوری تطبیق باند عریض فشرده ۷

۲-۳ طراحیِ تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری مایکروویو- روش تحلیلی ۱٤

۲-۳-۱ شبکهٔ تطبیق بدون افت ورودی ۱٤

۲-۳-۲ شبکهٔ تطبیق بدون افت خروجی ۲۱

۲-۳-۳ مثالهای طراحی ۲۹

۲-٤ نتیجه ۳٦

فصل سوم ۳۷

طراحی تقویت کننده‌های مایکروویو باند عریض با استفاده از اطلاعات بار در فرکانس‌های حقیقی ۳۷

۳-۱ مقدمه ۳۷

۳-۲ روش تطبیق باندعریض با استفاده از اطلاعات بار در فرکانس‌های حقیقی ۳۷

۳-۳ فرآیند بهینه‌سازی ٤۲

۳-٤ شبکهٔ تطبیق برای یک بار LCR ٤٦

۳-٤-۱ محاسبهٔ امپدانس نقطهٔ تحریکِ یک دو دهنه‌یی با استفاده از قسمت حقیقیِ امپدانس به روش برونی- جیورتز ٤۸

۳-٥ طراحیِ تقویت کنندهٔ مایکروویو با استفاد از روش فرکانس حقیقی ٥۲

فصل چهارم ٥٤
طراحی تقویت کننده‌های مایکروویو چند طبقه با استفاده از روش فرکانس حقیقی ٥٤
٤-١ مقدمه ٥٤
٤-٢ روش کار فرکانس حقیقی ساده‌شده ٥٥
٤-٣ آلگوریتم محاسبهٔ بهرهٔ توان ترانسدیوسر ٥٧
٤-٣-١ مراحل محاسبات بهرهٔ توان ترانسدیوسر ٥٧
٤-٤ طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو چندطبقهٔ باند عریض ٥٨
فصل پنجم ٧٢
بررسی پایداری در طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو باند عریض ٧٢
٥-١ مقدمه ٧٢
٥-٢ شرایط پایداری نامشروط ٧٢
٥-٣ طراحی تقویت‌کنندهٔ مایکروویو باند عریض با استفاده از ترانزیستور بالقوه ناپایدار ٧٥
٥-٣-١ استفاده از شبکهٔ فیدبک ٧٥
٥-٤ مزایا و معایب فیدبک منفی در تقویت‌کننده‌های مایکروویو ٧٧
٥-٥ طراحی اولیهٔ شبکهٔ فیدبک موازی ٧٨
فصل ششم ٨٠
بررسی مسائل نویز در تقویت‌کننده‌های باند عریض ٨٠
٦-١ مقدمه ٨٠
٦-٢ نویز در شبکه‌های دودهنه‌یی ٨٠
٦-٣ عدد نویز ٨١
٦-٤ طراحی تقویت‌کنندهٔ مایکروویو باندعریض براساس حداکثر بهرهٔ توان قابل دسترسی باعدد نویز مفروض ٨٣
٦-٥ طراحی تقویت‌کنندهٔ مایکروویو باندعریض به‌ازای یک بهرهٔ قابل دسترسی تعیین شده و حداقل عددنویز ٨٥
نتیجه‌گیری و پیشنهادها ٨٩
پیشنهادهایی برای ادامه پروژه ٩٠
پیوست یکم ٩١
پ-١-١ پاسخ باترورث و چبی‌شف ٩١
پ١-٢ پاسخ چبی‌شف ٩١
پ١-٣ پاسخ باترورث ٩٤
پ١-٤ تبدیل پایین‌گذر به میان‌گذر ٩٥
پیوست دوم ٩٧
پ-٢-١ تبدیل امپدانس با استفاده از شبکه‌های T و Π سلفی و خازنی ٩٧
فهرست مراجع ١٠٠

چکیده

بحث طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو، درسالهای اخیر بدلیل وجود ماهواره‌های فراوان، یکی از کاربردی‌ترین زمینه‌های مایکروویو بوده‌است. با وجودی که تئوری روشهای طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو باند باریک بصورت تحلیلی، کاملاً توسعه یافته است، ولی تئوری تحلیلی برای طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو باندعریض، تنها با فرض یکطرفه بودن ترانزیستور و در اختیار داشتن مدل سیگنال کوچک آن، قابل استفاده است. برای طراحی دقیق تقویت‌کننده‌های مایکروویو، در نظر گرفتنِ اثر دوطرفه بودن ترانزیستور لازم است. بنابراین، استفاده از روش تحلیلی طراحی، در حال حاضر عملاً ممکن نخواهد بود.

در این پایان‌نامه، پس از بررسی کوتاه روشهای تحلیلی و استفاده از قضیه تطبیق باند عریض، طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو باند عریض بر اساس قضیه فوق مطرح می‌شود. سپس با استفاده از روش فرکانس حقیقی، طراحی تقویت‌کننده‌های باند عریض بررسی خواهدشد. در این روش با فرض اولیهٔ ضرائبی مجهول از امپدانس متعادل‌کننده در طرف بار و استفاده از تابع بهرهٔ توان ترانسدیوسر و بهینه کردن این ضرائب با روشهای عددی، تقویت‌کننده طراحی می‌شود.

با توجه به اینکه طراحی با استفاده از روش فرکانس حقیقی، تنها برای تطبیق بار و منبع حقیقی میسر می‌باشد، بنابراین روش فرکانس حقیقیِ ساده‌شده معرفی می‌گردد تا علاوه برهمهٔ مزایای روش فرکانس حقیقی، تطبیق بار مختلط به منبع مختلط نیز میسر باشد. سپس مسائل پایداری و نویز در طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو بررسی می‌شود. در پایان با بکارگیری روش فرکانس حقیقی ساده شده، یک تقویت‌کنندهٔ مایکروویو طراحی می‌گردد.

فصل یکم
مقدمه‌یی بر مایکروویو

۱-۱ مقدمه

در این فصل به اهمیت مایکروویو[۱] و برخی کاربردهای آن پرداخته می‌شود. امواج مایکروویو امواجی هستند که گسترهٔ فرکانس آنها از حدود ۱ گیگاهرتز تا ۴۰ گیگاهرتز است. در بیشتر کاربردهای تکنولوژیکی مایکروویو، از فرکانس‌های ۱ تا ۴۰ گیگاهرتز استفاده می‌شود. معمولترین باندهای مایکروویو بکار رفته، در جدول (۱-۱) آمده‌اند. نمودار طیف الکترومغناطیس شکل (۱-۱) نشان می‌دهد که حد پایینی ناحیهٔ مایکروویو با ناحیهٔ فرکانس‌های رادیو وتلویزیون همجوار است. در حالی‌که حدبالای آن، مجاور با طیف‌های حرارتی فروسرخ و نور مرئی است. بنابراین ، مهندسین مایکروویو، اغلب از مفاهیم و روش‌های مربوط به این دومقولهٔ شناخته شده، استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، از روش‌های نوری در طراحی آنتن‌ها و عدسی‌های مایکروویو استفاده می‌شود، در حالیکه طراحی مدارهای مایکروویو معمولاً شامل مفاهیم مربوط به قضایای شبکه‌های ac می‌شود.

۱-۲ تاریخچهٔ علم مایکروویو

در سال ۱۸۶۵، جیمز کلرک ماکسول[۲] ، مقالهٔ نظریهٔ دینامیکی الکترومغناطیسی را منتشر کرد. دراین مقالهٔ جالب توجه و مقالهٔ بعدی خود با عنوان الکتریسیته و مغناطیس، ماکسول رسماً نظریهٔ الکترومغناطیسی

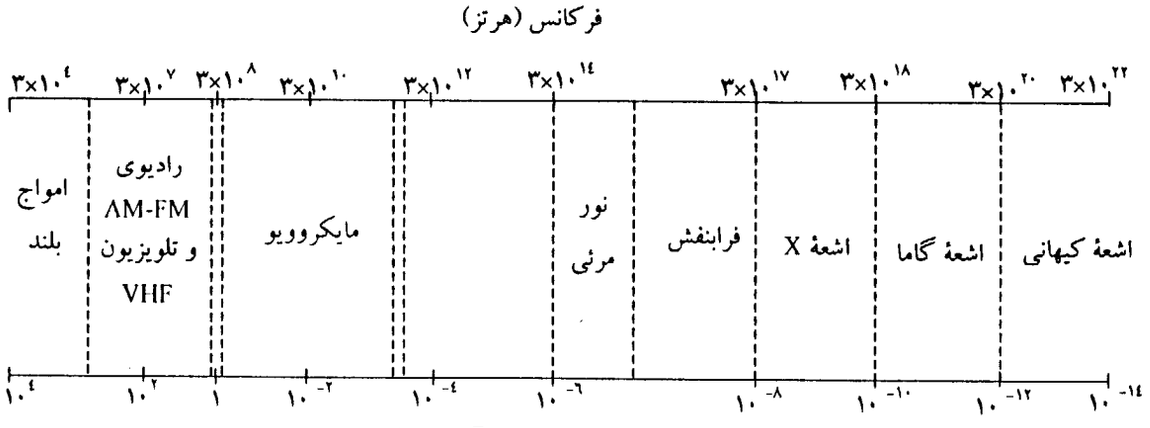
۱- Microwave

۲-James Clerk Maxwell

نور را تشریح کرد. در اوایل سال ۱۸۸۰، هاینریش هرتز[۱] به کمک چند آزمایش مبتکرانه، نظریهٔ امواج الکترومغناطیسی ماکسول را اثبات نمود. نخستین کاربرد عملی امواج الکترومغناطیس در حیطهٔ مخابرات که شخصی به نام گولیمو مارکنی[۲] از ایتالیا در ۱۸۹۵ توانست سیگنال‌های رادیویی را تا بیش از یک مایل[۳] انتقال دهد.

جدول (۱-۱) : باندهای فرکانسی معمول در مایکروویو

حرف نشان‌دهنده	گسترهٔ فرکانس
باند L	۱ تا ۲ گیگاهرتز
باند S	۲ تا ٤ گیگاهرتز
باند C	٤ تا ۸ گیگاهرتز
باند X	۸ تا ۱۲ گیگاهرتز
باند K_u	۱۲ تا ۱۸ گیگاهرتز
باند K	۱۸ تا ۲٦ گیگاهرتز
باند K_a	۲٦ تا ٤۰ گیگاهرتز



(شکل ۱-۱) طیف امواج الکترومغناطیس

۱-Hertz

۲-Guglielmo Marconi

۳-mile

در سال ۱۸۹٦ شخصی به نام لرد ریلی[۱] از جنبهٔ نظری ثابت کرد که امواج الکترو مغناطیسی می‌توانند داخل لوله‌های فلزی توخالی (موج‌بَرها) انتشار یابند. تقریباً در همان زمان، الیور لاج[۲] از نظر عملی، انتشار در موج‌برها را در مؤسسهٔ سلطنتی لندن به نمایش گذاشت. فرکانس‌های آزمایش شده در تجارب لاج، ۱/۵ و ٤ گیگاهرتز گزارش شده‌اند. در این زمان بدلیل نبودن مولدهای مایکروویوِ قابل اطمینان، بررسی انتقال امواج مایکروویو برای حدود ۳۰ سال آینده به دست فراموشی سپرده شد. در سال ۱۹۱۹ در اثر تلاش‌های بارکهاوزن[۳] و کورتز[٤] در زمینهٔ نوسان‌سازهای شبکهٔ مثبت و کارهای هال[٥] در مورد ماگنترون[٦]های با حفرهٔ هموار در سال ۱۹۲۱، منابع قابل طمینان مایکروویو به صورت واقعیت در آمدند. در سال ۱۹۳٦ لامپی با توان خروجی ۲۰ وات در ۳ گیگاهرتز توسط دانشمندان انگلیسی ساخته شد. سال بعد از آن برادران واریان در استانفورد، ایدهٔ مدولاسیون سرعت[۷] را در یک پرتو الکترونی پدید آوردند. این کشف به اختراع لامپ کلیسترون[۸] منتهی شد که هنوز هم به عنوان یک منبع خوب، توان مایکروویو به‌کار می‌رود.

در سال ۱۹۳۹ گروهی از پژوهشگران انگلیسی به رهبری راندال[۹] و بوت[۱۰]، با استفاده از اصول تشدید کننده‌های حفره‌یی، به یک نوسان‌ساز مایکروویو جدید یعنی ماگنترون حفره‌یی دست یافتند. در این ماگنترون با اعمال میدان مغناطیسی ۱۰۰ اُرستد و ولتاژ ۱٦۰۰۰ ولت، نتیجهٔ جالب توجه توان ٤۰۰ وات در ۳ گیگاهرتز بدست آمد. ساخت لامپ‌های مایکروویو در دههٔ ۱۹۳۰ به دلیل جنگی که در اروپا جریان داشت، سرعت زیادی گرفته بود. احداث آزمایشگاه‌های تابش(radiation) در دانشگاه MIT که به دلیل رویدادهای مربوط به جنگ دوم جهانی سرعت گرفته بود در سال ۱۹٤۰ به پایان رسید که به بسیاری از پیشرفت‌های مهم در حیطهٔ نظری و تجربی مایکروویو منتهی شد. در پایان جنگ جهانی دوم، این آزمایشگاه منحل شد و حاصل کار دانشمندان آن، در یک مجموعهٔ بیست و هفت جلدی آزمایشگاه تابش MIT است که منبع اطلاعاتی معتبری در رشتهٔ مایکروویو به‌شمار می‌آید.

۱- Rayleigh

۲- Oliver Lodge

۳- Barkhausen

٤- Kurz

٥- Hull

٦- Magnetron

۷- Velocity Modulation

۸- Klystron

۹- Randall

۱۰- Boot

اوایل دهۀ ۱۹۶۰ شاهد ظهور دو عرصۀ جدید در دانش مایکروویو بود. یکی منابع حالت جامد مایکروویو و دیگری مدارهای مجتمع مایکروویو که در [۱و۲] دربارۀ آن بحث شده است. کوشش‌های نخستین در این زمینه توسط گان[۱]، رید[۲]، دی لوچ[۳] و چند تن دیگر، به ساخت موفقیت‌آمیز نوسان‌سازهایی از نوع اثرِ گان و ایمپت منجر شد. تحقیق در زمینه‌هایی مانند ترانزیستورهای مایکروویو هنوز ادامه دارد. در [۳] گزارش تاریخی و جالبی از پیشرفت‌های بسیار در تکنولوژی مایکروویو آمده‌است.

۱-۳ کاربردهای مایکروویو

مایکروویو در جامعۀ امروزی کاربردهای زیادی دارد. گسترۀ وسیع این کاربردها از ارسال سیگنال تلویزیونی در سرتاسر قاره‌ها تا پختن غذا در ظرف چند دقیقه و خشک کردن کاغذ و لباس را دربرمی‌گیرد. با گسترش مخابرات ماهواره‌یی، مخابرات سیار، ایستگاه‌های رلۀ مایکروویو و رادارهای تجارتی و نظامی، تکنولوژی مایکروویو به یک صنعت بسیار مهم از نظر اقتصادی و استراتژیک تبدیل شده است. دو کاربرد مهم مایکروویو، مخابرات نقطه‌به‌نقطه و رادار هستند. در این‌جا می‌توان پرسید که استفاده از فرکانس‌های مایکروویو در این موارد چه مزایایی دارد؟ قابلیت تمرکز امواج رادیویی تابعی از اندازه‌ی آنتن و طول موج مورد نظر است. برای آنتنی با اندازۀ ثابت، این قابلیت تمرکز با کاهش طول موج افزایش می‌یابد. مثلاً پهنای یک پرتو رادیویی از یک آنتن سهمی به قطر یک متر در یک گیگاهرتز حدود پنجاه درجه است، درحالی‌که در ده گیگاهرتز تنها پنج درجه می‌باشد. برای برقراری یک ارتباط خوب بین دو نقطه، سیگنال باید دقیقاً متمرکز شده و سپس به‌سوی آنتن گیرنده، هدف‌گیری شود. چون فرکانس‌های مایکروویو این توانایی را دارند، برای ارتباط نقطه به نقطۀ بی‌سیم ایده‌آل هستند. طیف مایکروویو باندوسیعی از فرکانس‌ها را در بر می‌گیرد که از آن در انتقال اطلاعات به‌خوبی استفاده می‌شود. بنابر نظریۀ مخابرات، مقدار اطلاعاتی که می‌توان انتقال داد، مستقیماً با فرکانس کار متناسب است. بنابراین، فرکانس‌های مایکروویو نسبت به فرکانس‌های رادیویی و تلویزیونی، کانال‌های مخابراتی بیشتری را می‌توانند در خود جای دهند. بنابراین و با توجه به نیاز فزاینده به انتقال اطلاعات، نیاز به تقویت‌کننده‌های مایکروویو نیز بیش از پیش احساس می‌شود.

کاربرد عمدۀ دیگر مایکروویو در سیستم‌های رادار است. این سیستم‌ها در ردیابی هواپیماها، هدایت موشک‌هایی با سرعت ماورای صوت، مشاهده و ردگیری توده‌های هوا و کنترل ترافیک پرواز در فرودگاه‌ها، به‌کار می‌روند. قابلیت تمرکز دقیق در موج منتشرشده، همان ویژگی است که استفاده از مایکروویو را در رادار تا این اندازه سودمند می‌سازد. ویژگی‌های گرمایی توان مایکروویو در گسترۀ وسیعی

۱- J.B.Gunn

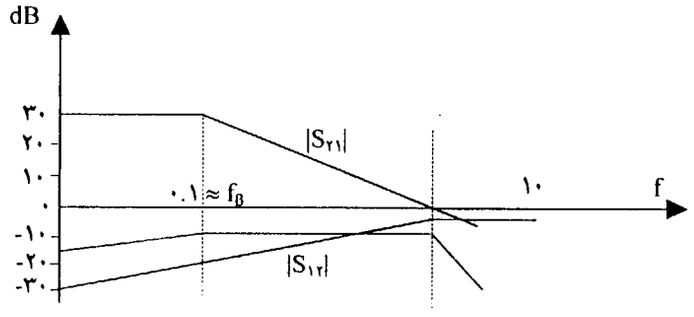
۲- W.T.Read

۳- B.C.Deloach

از کاربردهای تجاری وصنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. اجاق مایکروویو مثال آشنایی در این زمینه است. کاربردهای دیگر مایکروویو در پزشکی، علم مواد، فیزیک ذرات پر انرژی و نجوم است.

۱-٤ تقویت کننده‌های مایکروویو

هدف اصلی در طراحی تقویت کننده‌های مایکروویوباند عریض، غلبه بر تغییرات $|S_{21}|$ و $|S_{12}|$ برحسب فرکانس و بدست آوردن بهرهٔ هموار[1] در باند مورد نظر است. برای نمونه، در شکل (۱-۲) دیده می‌شود که $|S_{21}|$ با افزایش فرکانس با شیب ٦dB/octave ، کاهش می‌یابد و $|S_{12}|$ با افزایش فرکانس با شیب ٦dB/octave افزایش می‌یابد و $|S_{12}S_{21}|$ در ناحیه‌یی از باند فرکانسی، ثابت است. بنابراین، جبران تغییرات $|S_{21}|$ برای داشتن بهرهٔ ثابت در تقویت کننده‌های مایکروویو الزامی است. اگر تقویت کننده، باند باریک باشد (پهنای باند کمتر از ۱۰٪ فرکانس میانی باشد)، تغییرت $|S_{21}|$ و $|S_{21}|$ محسوس نخواهد بود و معمولاً طراحی به ازای فرکانس مرکزی باند مورد نظر انجام می‌شود. ولی در تقویت کننده‌های باند عریض، بهره بایستی در یک محدودهٔ گسترده از باند فرکانسی ثابت باشد بنابراین لازم است که در این محدوده، تغییرات $|S_{21}|$ و $|S_{12}|$ جبران شود. با طراحی بهینهٔ متعادل کننده‌ها، امکان کاهش تغییرات $|S_{21}|$ و $|S_{12}|$ وجود خواهد داشت.



(شکل۱-۲) : تغییرات $|S_{12}|$ ، $|S_{21}|$ و $|S_{12}S_{21}|$ به ازای تغییرات فرکانس

در فصل دوم، طراحی تقویت کننده‌های مایکروویو به روش تحلیلی و با بکارگیری قضیهٔ تطبیق باند عریض فشرده[2] بررسی می‌شود. در این فصل، طراحی متعادل کننده‌های مایکروویو با فرض یکطرفه[3] بودن ترانزیستور و مشخص بودن المان‌های داخلی و مدل ترانزیستور مایکروویو ممکن است.

در فصل سوم، طراحی تقویت کننده‌های مایکروویو با بکارگیری تکنیک فرکانس حقیقی[1] و روش‌های عددی بررسی می‌شود. با استفاده از این روش، می‌توان یک بار مختلط را به یک منبع اهمی منطبق

۱- flat

۲- Lumped Broadband Matching Theory

۳- Unilateral

کرد. برای طراحی متعادل‌کننده‌ها با روش فرکانس حقیقی، نیازی به یکطرفه بودن ترانزیستور و مشخص بودن المان‌های داخلی و مدل ترانزیستور مایکروویو نخواهد بود و طراحی بر اساس پارامترهای پراکندگی[۲] ترانزیستور انجام می‌شود.

در فصل چهارم، طراحی تقویت‌کننده‌های مایکروویو با استفاده از روش فرکانس حقیقی ساده‌شده[۳] انجام می‌شود به گونه‌یی که می‌توان یک بار مختلط را به یک منبع مختلط منطبق کرد. با بکارگیری روش فرکانس حقیقی ساده شده می‌توان تقویت‌کننده‌های مایکروویو چندطبقه را طراحی کرد.

در فصل پنجم، پایداری تقویت‌کننده‌های مایکروویو بررسی می‌شود. یکی از روش‌های پایداری تقویت‌کننده‌های مایکروویو، استفاده از فیدبک منفی است. وقتی که پهنای باند مورد نیاز یک تقویت‌کنندهٔ مایکروویو زیاد باشد (بیش از یک دهه) جبران کردن بهره، با استفاده از شبکه‌های تطبیق به‌تنهایی، در بیشتر موارد طراحی عملی نیست. بنابراین از تکنیک‌های فیدبک منفی استفاده می‌شود و ابتدا ترانزیستور را پایدار نامشروط کرده و سپس طراحی با آن انجام می‌شود.

در فصل ششم، مسائل مربوط به نویز در تقویت‌کننده‌های مایکروویو بررسی می‌شود. در این فصل، طراحی تقویت‌کنندهٔ مایکروویو به ازای یک عدد نویز مشخص انجام شده و ماکزیمم بهره بدست می‌آید. همچنین به ازای یک بهرهٔ مشخص، مینیمم عدد نویز تقویت کننده محاسبه می‌شود.

۱- Real Ferequency Method

۲-Scattering Parameters

۳-Simplified Real Ferequency Method