



دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک-گروه مخابرات

پایان نامه کارشناسی ارشد مخابرات-میدان

تطبیق امپدانس پهن باند شبکه‌ی تغذیه در آنتن‌های میکرواستریپ

به وسیله:

حمید سعیدیان

استاد راهنما:

دکتر شاهرخ جم

زمستان ۱۳۹۰

صلى الله عليه وسلم

بسمه تعالی

تطبیق امپدانس پهن باند شبکه‌ی تغذیه در آنتن‌های میکرواستریپ

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی

به وسیله:

حمید سعیدیان

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی برق و الکترونیک گروه مخابرات

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیأت داوران با درجه: عالی

دکتر شاهرخ جم استادیار دانشکده برق و الکترونیک (استاد راهنما)

دکتر مسعود محزون استادیار دانشکده برق و الکترونیک (داور)

دکتر رضا محسنی استادیار دانشکده برق و الکترونیک (داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تقدیم به

خدایی که،

آفرید جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را و ...

روح بزرگوار مادرم،

کسی که آفتاب مهرش در آستانه قلبم همچنان پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد ...

مدرم،

به او که نمی دانم از بزرگواری اش بگویم یا مردانگی، سخاوت، سکوت، مهربانی و ...

خانواده و تمامی دوستان عزیزم

که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگی ام، مدیون حضور سبز آن هاست ...

و تمامی بیماران سرطانی ...

سپاس‌گزاری

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض می‌دانم که از استاد ارجمند جناب آقای دکتر شاهرخ جم به خاطر زحمات فراوان و کمک‌های بی‌دریغشان در انجام این پایان‌نامه به عنوان استاد راهنما کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

در پایان از مرکز تحقیقات مخابرات ایران به دلیل حمایت مالی از پروژه، مصوب در تاریخ ۹۰/۱۰/۲۵ با شماره قرارداد، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

در طراحی هر آنتن، تک المان یا چند المان، وقت و هزینه‌ی زیادی صرف تطبیق امپدانس می‌شود؛ به طور کلی دو رویکرد در مورد تطبیق امپدانس وجود دارد؛ یکی رویکرد تطبیق امپدانس گسترده که در آن با تعیین درجه‌های آزادی مناسب در ساختار آنتن به اصلاح ابعاد هندسی آن پرداخته می‌شود. رویکرد دوم، روش المان فشرده می‌باشد که در آن به جای اصلاح ساختار هندسی آنتن، تلاش می‌شود تا با استفاده از یک شبکه‌ی پسیو فشرده، بین منبع و آنتن تطبیق ایجاد شود.

امروزه آنتن‌های پچ میکرواستریپ (MPAS) به دلیل داشتن ویژگی‌های مطلوبی مانند سبکی، سادگی و ساخت آسان، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات آزمایشگاهی در مورد وابستگی پهنای باند فرکانسی به مشخصات هندسی MPA نشان می‌دهد که تغییرات در امپدانس یکی از عامل‌های غالب در محدود کردن پهنای باند آن‌ها می‌باشد. به منظور افزایش پهنای باند MPA تاکنون روش‌های متفاوتی مبتنی بر رویکردهای المان فشرده و المان گسترده (اصلاح ساختار) ارائه و توسعه داده شده است.

این پایان‌نامه به دلیل سودمندی آنتن‌های میکرواستریپ با تزویج روزنه (ACMPA) در کاربردهای بی‌سیم و تجهیزات ISM بر روی طراحی ACMPA در فرکانس $2/4\text{GHz}$ متمرکز می‌شود. همچنین، ACMPA به دلیل اینکه از نظر الکتریکی، مدار تغذیه و شیفت دهنده فاز را از پچ تشعشعی ایزوله می‌کند، در آرایه‌های فازی کاربرد زیادی دارند.

در این تحقیق ابتدا با استفاده از تأثیر ابعاد و پارامترها در عملکرد آنتن به طراحی یک ACMPA باریک باند در فرکانس $2/4\text{GHz}$ (باند S) پرداخته می‌شود. پارامترهایی از آنتن که در این تحقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرند شامل ابعاد و موقعیت خط تغذیه، شکاف تزویج صفحه‌ی زمین و پچ تشعشعی می‌باشند. فرکانس کارکرد، VSWR ورودی، درصد پهنای باند و نرخ پلاریزاسیون برای هر پیکربندی آنتن، تعیین می‌شوند.

سپس به منظور افزایش پهنای باند ACMPA طراحی شده در فرکانس $2/4\text{GHz}$ یک شبکه‌ی تطبیق امپدانس نوع خط انتقالی (رویکرد گسترده) طراحی و ساخته می‌شود. این موضوع هدف اصلی این پایان‌نامه می‌باشد. می‌توان نشان داد که با طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی تطبیق امپدانس و بسته به مرتبه‌ی تطبیق مورد نیاز می‌توان پهنای باند را حداقل $3/7$ برابر افزایش داد.

آنتن‌های طراحی شده با استفاده از زیرلایه‌های دو و یک طرفه‌ی FR4 با ضخامت $1/6\text{mm}$ که با استفاده از نوار دو طرفه‌ی فوم دار (با ضخامت $1/143\text{mm}$) به هم متصل می‌گردند، ساخته می‌شوند. آنتن‌های ساخته شده به منظور مقایسه با نتایج تحلیلی در یک اتاق بدون انعکاس آزمایش می‌شوند. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که روند طراحی می‌تواند به طور موفقیت آمیز به ACMPA اعمال شود.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱: فصل اول: مقدمه‌ی کلی در مورد تطبیق امپدانس پهن باند.....
۱	۱-۱: مقدمه.....
۲	۲-۱: تطبیق امپدانس پهن باند - چشم‌انداز تاریخی.....
۴	۳-۱: طبقه بندی مسائل تطبیق امپدانس.....
۵	۴-۱: تئوری Bode-Fano و رویکرد تحلیلی.....
۶	۵-۱: روش فرکانس حقیقی.....
۷	۶-۱: تطبیق پهن باند در آنتن‌ها.....
۸	۷-۱: هدف کلی پروژه.....
۱۰	۲: فصل دوم: آنتن‌های میکرواستریپ.....
۱۰	۱-۲: مقدمه.....
۱۱	۲-۲: مزایا، معایب و کاربردهای عمومی MPA.....
۱۲	۳-۲: المان پیچ.....
۱۲	۴-۲: روش‌های تغذیه‌ی آنتن میکرواستریپ.....
۱۳	۱-۴-۲: خط تغذیه‌ی میکرواستریپ.....
۱۳	۲-۴-۲: تغذیه با پروب کوآکسیال.....
۱۴	۳-۴-۲: تغذیه با تزویج روزنه.....
۱۵	۴-۴-۲: تغذیه با تزویج مجاورتی.....
۱۵	۵-۴-۲: روش تغذیه‌ی موجبری هم‌صفحه.....
۱۶	۵-۲: مدل‌سازی آنتن‌های میکرواستریپ.....
۱۶	۱-۵-۲: مدل خط انتقالی.....
۱۶	۲-۵-۲: مدل محفظه.....
۱۷	۳-۵-۲: مدل شبکه‌ی دو-پورته‌ی.....
۱۷	۴-۵-۲: مدل تمام موج.....
۱۷	۶-۲: برخی پارامترهای عمومی آنتن.....
۱۸	۳: فصل سوم: طرح مسأله و مرور کارهای گذشته.....
۱۸	۱-۳: مقدمه.....
۱۹	۲-۳: راه کارهای بهبود پهنای باند MPA.....
۱۹	۳-۳: آنتن پیچ میکرواستریپ با تزویج روزنه (ACMPA).....

۲۰.....	۱-۳-۳: ساختار ACMPA
۲۱.....	۲-۳-۳: مزایای ACMPA
۲۱.....	۳-۳-۳: پارامترهای طراحی ACMPA
۲۱.....	۴-۳: طرح مسأله
۲۲.....	۵-۳: مرور کارهای گذشته
۲۲.....	۱-۵-۳: ساخت یک ACMPA کوچک با هدف افزایش پهنای باند
۲۴.....	۲-۵-۳: ارائه‌ی یک شبکه‌ی تطبیق امپدانس با استفاده از روش‌های طراحی فیلتر
۲۵.....	۳-۵-۳: افزایش پهنای باند آنتن میکرواستریپ
۲۷.....	۴-۵-۳: ارائه‌ی روش تطبیق امپدانس جدید برای آنتن‌های پچ

۲۹.....	۴: فصل چهارم: طراحی یک آنتن میکرواستریپ با تزویج روزنه در فرکانس ۲/۴GHz
۲۹.....	۱-۴: مقدمه
۳۰.....	۲-۴: بررسی ACMPA مطرح شده در [۷۲]
۳۳.....	۳-۴: عملکرد آنتن نامی
۳۷.....	۴-۴: مدل مدار معادل
۴۰.....	۵-۴: مطالعه‌ی پارامتریک
۴۱.....	۱-۵-۴: بررسی تأثیر چند پارامتر مهم
۴۱.....	۱-۱-۵-۴: شکاف صفحه‌ی زمین
۴۲.....	۲-۱-۵-۴: پچ تشعشی
۴۴.....	۶-۴: طراحی و تنظیم
۴۶.....	۱-۶-۴: طراحی اولیه
۴۹.....	۷-۴: تنظیم برای فرکانس ۲/۴GHz
۵۳.....	۸-۴: ساخت
۵۶.....	۹-۴: نتایج اندازه‌گیری
۵۶.....	۱-۹-۴: اندازه‌گیری الگوهای تشعشی
۵۸.....	۲-۹-۴: اندازه‌گیری اتلاف بازگشتی
۶۰.....	۱۰-۴: نتیجه‌گیری

۶۱.....	۵: فصل پنجم: تطبیق امپدانس پهن باند شبکه‌ی خط تغذیه
۶۱.....	۱-۵: مقدمه
۶۲.....	۲-۵: طراحی اولیه
۶۸.....	۳-۵: نتایج شبیه‌سازی
۶۹.....	۱-۳-۵: مطالعه‌ی پارامتریک
۷۱.....	۴-۵: عملکرد ACMPA اصلاح شده
۷۵.....	۵-۵: ساخت
۷۶.....	۶-۵: نتایج اندازه‌گیری
۷۶.....	۱-۶-۵: اندازه‌گیری الگوهای تشعشی

۷۷..... ۵-۶-۲: اندازه‌گیری ائتلاف بازگشتی

۸۰..... ۶: فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۸۰..... ۶-۱: نتیجه‌گیری

۸۱..... ۶-۲: پیشنهادها

۸۳..... فهرست منابع

۹۰..... ضمایم

۹۰..... ا: مطالعه‌ی پارامتریک

۱۱۲..... ب: پارامترهای عمومی آنتن

۱۲۱..... ت: کد MATLAB

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: سه طبقه بندی برای تطبیق امپدانس.....	۴
شکل ۲-۱: مسئله‌ی تطبیق امپدانس.....	۶
شکل ۱-۲: ساختار عمومی یک MPA مستطیلی با خط تغذیه میکرواستریپ هم صفحه.....	۱۰
شکل ۲-۲: ایجاد شکاف در محل اتصال خط میکرواستریپ و پیچ به منظور تطبیق.....	۱۳
شکل ۳-۲: تغذیه‌ی پروب کواکسیال.....	۱۴
شکل ۴-۲: تغذیه با تزویج روزنه.....	۱۴
شکل ۵-۲: تغذیه با تزویج مجاورتی.....	۱۵
شکل ۶-۲: لایه‌های یک تغذیه CPW.....	۱۵
شکل ۱-۳: ACMPA مستطیلی [۵۷].....	۲۰
شکل ۲-۳: ساختار ACMPA طراحی شده در [۶۷].....	۲۳
شکل ۳-۳: RL اندازه‌گیری شده برای ACMPA طراحی شده در [۶۷].....	۲۴
شکل ۴-۳: ابعاد و هندسه‌ی ACMPA طراحی شده در [۶۸].....	۲۴
شکل ۵-۳: RL برای ACMPA طراحی شده در [۶۸].....	۲۵
شکل ۶-۳: ساختار MPA طراحی شده در [۶۹].....	۲۶
شکل ۷-۳: RL برای MPA طراحی شده در [۶۹].....	۲۶
شکل ۸-۳: سه ساختار پیشنهادی در [۷۰].....	۲۷
شکل ۹-۳: اتلاف بازگشتی برای ساختارهای ارائه شده در [۷۰].....	۲۷
شکل ۱۰-۳: طرح پیشنهادی شبکه تطبیق ارائه شده در [۷۱].....	۲۸
شکل ۱۱-۳: RL برای طرح پیشنهادی در [۷۱].....	۲۸
شکل ۱-۴: بلوک دیاگرام ACMPA [۷۳].....	۲۹
شکل ۲-۴: لایه‌های مختلف یک ACMPA.....	۳۰
شکل ۳-۴: خط تغذیه‌ی میکرواستریپ و ابعاد نامی.....	۳۱
شکل ۴-۴: مدار معادل ACMPA [۷۳].....	۳۱
شکل ۵-۴: سیستم مختصات مدل ACMPA در HFSS.....	۳۲
شکل ۶-۴: ابعاد شکاف و زیرلایه‌ی تغذیه.....	۳۲
شکل ۷-۴: شکاف صفحه‌ی زمین و میدان الکتریکی پلاریز شده در جهت X.....	۳۳
شکل ۸-۴: میدان‌ها و جریان الکتریکی پیچ.....	۳۴
شکل ۹-۴: ابعاد لایه‌های آنتن نامی.....	۳۴
شکل ۱۰-۴: $ S_{11} $ بر حسب فرکانس.....	۳۵
شکل ۱۱-۴: امپدانس ورودی آنتن نامی بر حسب فرکانس.....	۳۵
شکل ۱۲-۴: $VSWR_{in}$ آنتن نامی بر حسب فرکانس برای تعیین پهنای باند.....	۳۶

- شکل ۴-۱۳: الگوی تشعشعی برای آنتن نامی در فرکانس ۲/۲۸۳۸GHz..... ۳۶
- شکل ۴-۱۴: ابعاد مورد نیاز برای بدست آوردن پارامترهای MPA..... ۳۷
- شکل ۴-۱۵: مدل مدار معادل ACMPA در ADS..... ۳۹
- شکل ۴-۱۶: $VSWR_{in}$ بر حسب فرکانس برای مدل مدار معادل با استفاده از ADS..... ۴۰
- شکل ۴-۱۷: ابعاد شکاف و سایر متغیرهای دیگر..... ۴۱
- شکل ۴-۱۸: امپدانس ورودی بر حسب طول شکاف..... ۴۱
- شکل ۴-۱۹: $VSWR$ ورودی بر حسب عرض شکاف..... ۴۲
- شکل ۴-۲۰: متغیرهای پیچ..... ۴۲
- شکل ۴-۲۱: فرکانس کارکرد بر حسب طول پیچ..... ۴۳
- شکل ۴-۲۲: امپدانس ورودی بر حسب عرض پیچ..... ۴۳
- شکل ۴-۲۳: بُرد FR4 دو طرفه، شکاف صفحه‌ی زمین و چسب دوطرفه‌ی فوم دار..... ۴۷
- شکل ۴-۲۴: اتلاف بازگشتی بر حسب فرکانس..... ۴۹
- شکل ۴-۲۵: $VSWR$ ورودی بر حسب فرکانس..... ۴۹
- شکل ۴-۲۶: الگوهای تشعشعی آنتن مرجع..... ۵۰
- شکل ۴-۲۷: اتلاف بازگشتی بر حسب فرکانس برای آنتن مرجع..... ۵۱
- شکل ۴-۲۸: $VSWR$ ورودی بر حسب فرکانس برای آنتن مرجع..... ۵۱
- شکل ۴-۲۹: امپدانس ورودی بر حسب فرکانس برای آنتن مرجع..... ۵۲
- شکل ۴-۳۰: اتصال دهنده SMA روی برد دوطرفه‌ی FR4 لچیم می‌شود..... ۵۴
- شکل ۴-۳۱: اتصال دهنده SMA 7845 و ابعاد پایه‌ها و هادی داخلی آن..... ۵۴
- شکل ۴-۳۲: نحوه‌ی استفاده از چسب دوطرفه‌ی فوم دار به جای لایه‌ی هوا..... ۵۵
- شکل ۴-۳۳: آنتن مرجع ساخته شده..... ۵۵
- شکل ۴-۳۴: ساختار پایه برای اندازه‌گیری الگوی تشعشعی آنتن مرجع..... ۵۶
- شکل ۴-۳۵: نحوه‌ی قرار گیری AUT و منبع برای بدست آوردن الگوهای تشعشعی..... ۵۷
- شکل ۴-۳۶: الگوهای تشعشعی آنتن مرجع در فرکانس ۲/۴GHz..... ۵۸
- شکل ۴-۳۷: اتلاف بازگشتی اندازه‌گیری شده برای آنتن مرجع..... ۵۹
- شکل ۴-۳۸: مقایسه‌ی اتلاف بازگشتی واقعی و شبیه سازی برای آنتن مرجع..... ۵۹
- شکل ۵-۱: آنتن میکرواستریپ با تغذیه هم صفحه..... ۶۳
- شکل ۵-۲: مدل مداری یک شبکه‌ی تطبیق امپدانس n-طبقه [۶۶]..... ۶۴
- شکل ۵-۳: مدل مداری ACMPA اصلاح شده [۶۶] و [۷۳]..... ۶۴
- شکل ۵-۴: ACMPA اصلاح شده و پارامترهای شبکه‌ی تطبیق..... ۶۵
- شکل ۵-۵: اتلاف بازگشتی بر حسب فرکانس برای آنتن جدید به همراه شبکه‌ی تطبیق..... ۶۸
- شکل ۵-۶: نتایج اتلاف بازگشتی برای چهار مطالعه‌ی پارامتریک..... ۷۰
- شکل ۵-۷: الگوهای تشعشعی ACMPA اصلاح شده در فرکانس ۲/۳۹۳۹ GHz..... ۷۱
- شکل ۵-۸: اتلاف بازگشتی بر حسب فرکانس برای ACMPA اصلاح شده..... ۷۲
- شکل ۵-۹: $VSWR$ ورودی بر حسب فرکانس برای آنتن مرجع..... ۷۲
- شکل ۵-۱۰: مقایسه بهره و راندمان ACMPA اصلاح شده و آنتن مرجع..... ۷۳
- شکل ۵-۱۱: امپدانس ورودی ACMPA اصلاح شده..... ۷۴

- شکل ۵-۱۲: مقایسه‌ی اتلاف بازگشتی ACMPA اصلاح شده و آنتن مرجع (شبیه سازی)..... ۷۵
- شکل ۵-۱۳: VSWR ورودی برای ACMPA اصلاح شده و آنتن مرجع ۷۵
- شکل ۵-۱۴: ACMPA اصلاح شده (نمونه ساخته شده)..... ۷۶
- شکل ۵-۱۵: الگوهای تشعشعی ACMPA اصلاح شده..... ۷۷
- شکل ۵-۱۶: اتلاف بازگشتی اندازه‌گیری شده برای ACMPA اصلاح شده ۷۸
- شکل ۵-۱۷: مقایسه‌ی اتلاف بازگشتی واقعی و شبیه‌سازی برای ACMPA اصلاح شده ۷۸
- شکل ۵-۱۸: مقایسه‌ی اتلاف بازگشتی اندازه‌گیری شده برای آنتن مرجع و ACMPA اصلاح شده ۷۹

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۸	جدول ۱-۱: روش‌های تطبیق امپدانس (باریک باند و پهن باند).....
۱۱	جدول ۱-۲: ویژگی‌های MPA.....
۱۱	جدول ۲-۲: کاربردهای عمومی MPA.....
۲۳	جدول ۱-۳: نتایج ACMPA طراحی شده در [۶۷].....
۳۷	جدول ۱-۴: مشخصه‌های ACMPA نامی.....
۳۸	جدول ۲-۴: مقادیر مدار معادل برای آنتن نامی.....
۴۷	جدول ۳-۴: مقایسه‌ی پارامترهای میکرواستریپ.....
۴۸	جدول ۴-۴: ابعاد لازم برای طراحی اولیه.....
۵۰	جدول ۵-۴: ابعاد لازم برای طراحی آنتن مرجع.....
۵۲	جدول ۶-۴: مقایسه آنتن نامی و آنتن مرجع.....
۶۰	جدول ۷-۴: مقایسه‌ی پارامترهای آنتن مرجع (اندازه‌گیری و شبیه‌سازی).....
۶۵	جدول ۱-۵: پارامترهای مورد نیاز از آنتن مرجع به منظور طراحی شبکه‌ی تطبیق امپدانس.....
۶۷	جدول ۲-۵: پارامترهای امپدانس برای شبکه‌ی تطبیق ارائه شده.....
۷۰	جدول ۳-۵: مطالعه‌ی پارامتریک، بررسی تأثیر طول و عرض پارامترهای امپدانس شبکه‌ی تطبیق.....
۷۳	جدول ۴-۵: پارامترهای ACMPA اصلاح شده.....
۷۳	جدول ۵-۵: مقایسه‌ی عملکرد ACMPA اصلاح شده با آنتن مرجع (فصل ۴).....
۷۹	جدول ۶-۵: مقایسه نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای ACMPA اصلاح شده.....

فهرست نشانه‌های اختصاری

ACMPA	Aperture Coupled Microstrip Patch Antenna
ADS	Advanced Design System
BW	Bandwidth
BW%	Bandwidth Percentage
dB	Decibel
EM	Electromagnetic
FDTD	Finite Difference Time Domain
FR4	Flame Resistant 4
GPS	Global Positioning System
G	Gain
GHz	Giga Hertz
H	Height
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ISM	Industrial Science Medical
L	Length
MHz	Mega Hertz
mm	millimeter
PCB	Printed Circuit Boards
PEC	Perfect Electric Conductor
RF	Radio Frequency
RL	Return Loss
RFT	Real Frequency Technique
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WLAN	Wireless Local Area Network
W	Width
Z_0	Characteristic Impedance

فهرست نمادها

Z_0	Characteeristic Impedance
Z_L	Load Impedance
Z_{in}	Input Impedance
RL	Return Loss
S_{11}	S parameter from port 1 to port 1
λ	Wavelength
λ_g	Dielectric guided wavelength
λ_0	Free space wavelength
$\tan \delta$	Dielectric loss tangent
f	frequency
f_r	Resonant frequency
f_0	Center frequency
f_c	Cut off frequency
f_H	Upper frequency
f_L	Lower frequency
C	Speed of light 2.998×10^8 m/s
ϵ_{eff}	Effective dielectric constant
ϵ_0	Dielectric constant of free space
ϵ_r	Relative Dielectric constant
W	Patch or conductor width
H	Substrate height
L	Patch or conductor length
Γ	Refelection coefficient
L_{eff}	Effective length
ΔL	Length extension
T	Conductor thickness

فصل اول

مقدمه‌ی کلی در مورد تطبیق امپدانس پهن باند

۱-۱: مقدمه

بدون شک معادلات ماکسول پایه و اساس بسیاری از توانمندی‌های فنی بشر است. امروزه می‌توانیم معادلات ماکسول را در قالب‌های بسیار متفاوتی تشخیص دهیم. در مجموع ۲۰ معادله به صورت ۴- تایی وجود دارد که بسیار شبیه یک سیستم چهار بعدی برداری می‌باشند. این بیست معادله توسط Oliver Heaviside و Gibbs در قالب ۴ معادله‌ی پر کاربرد معرفی و سپس، این چهار معادله به صورت نمادهای برداری نشان داده شدند. درست است که ماکسول اعتبار زیادی به ارتباط و یگانگی الکتریسیته و مغناطیس بخشید و نظریه خود را استوار کرد اما در این موفقیت نباید زحمات افراد بزرگی چون Carl Friedrich Gauss, André Marie Ampère, Michael Faraday و دیگران را نادیده گرفت. افرادی مثل Heinrich Hertz, Nikola Tesla, J. C. Bose, Alexander Popov, Thomas Edison و دیگران از جمله کسانی بودند که روابط ریاضی را برای پیدایش فیزیکی این قبیل مسایل ارائه کردند. دو رکن اساسی برق و مخابرات (ارتباط سیمی و بی‌سیم)، که بر روی بسیاری از جنبه‌های زندگی بشر تأثیر گذاشته‌اند، مرهون زحمات پیشگامان اولیه در این عرصه بوده است. در هر دوی این ارتباطها نیاز طبیعی، انتقال مؤثر توان از منبع به بار می‌باشد. این مسئله را به طور خلاصه می‌توان تحت عنوان تطبیق امپدانس بیان کرد. می‌دانیم که اگر بار و منبع صرفاً مقاومتی باشند می‌توان با برابر قرار دادن مقاومت‌های بار و منبع به این هدف رسید. در مواقعی هم که عناصر راکتیو در مدار وجود دارد، شرایط برای انتقال مؤثر توان با تطبیق امپدانس مزدوج، به منظور حذف راکتانس، حاصل خواهد شد.

۱-۲: تطبیق امپدانس پهن باند - چشم انداز تاریخی

شروع تکنولوژی تطبیق امپدانس به ۷۰ سال قبل برمی گردد. دو ابزار بسیار مهم و اساسی تطبیق پهن باند در سال ۱۹۳۹ معرفی شدند. یکی تئوری دارلینگتون^۱ (۱۹۳۹) که در آن یک تابع امپدانس مجموعه‌ی دلخواه از عناصر مقاومتی و راکتیو (واکنشی)، می تواند به وسیله‌ی یک شبکه‌ی راکتیو ختم شده به یک مقاومت 1Ω بیان شود [۱]. بدیهی است که اگر مقاومت 1Ω با هر امپدانس دیگری جایگزین شود تئوری دارلینگتون اشتباه خواهد بود، در این صورت است که مسئله‌ی امپدانس‌های سازگار^۲ در سال ۱۹۹۷ توسط Youla [۲] مطرح شد. ابزار مهم دیگری که در سال ۱۹۳۹ برای اولین بار بیان شد، نمودار اسمیت بود که نخستین بار به وسیله‌ی اسمیت برای تحلیل خط انتقال [۳] ارائه شد. این نمودار امپدانس‌های نیم صفحه‌ی راست^۳ (RHP) صفحه‌ی مختلط را به یک دایره‌ی واحد نگاشت می‌دهد. کاربرد نمودار اسمیت به مرور زمان پیشرفت کرد و بعدها از آن به عنوان یک ابزار مهم در تطبیق امپدانس مورد استفاده قرار گرفت.

تئوری تحلیلی تطبیق پهن باند در سال ۱۹۴۵ توسط Bode با بیان یک محدودیت پهنای باند- بهره^۴ برای مسئله‌ی تطبیق منفرد^۵ (با بار RC موازی) به وجود آمد [۴]. نظریه‌ی تحلیلی نیازمند دانستن محدودیت‌های پهنای باند- بهره می‌باشد؛ به هر حال، این راه حل تنها برای مسائل تطبیق منفرد با بارهای ساده‌ی RLC یا RC قابل استفاده و نیازمند مدل‌های دقیق بار می‌باشد.

در سال ۱۹۴۸ Fano نظریه‌ی پهنای باند- بهره‌ی Bode را برای پهن باند کردن یک مسئله‌ی تطبیق منفرد با بار RC موازی با استفاده از بنا نهادن نظریه فیلتر (تطبیق مقاومتی یا اتلاف الحاقی^۶) گسترش داد [۵]؛ Fano این نظریه را به کمک تئوری دارلینگتون ایجاد کرد. نظریه‌ی Fano در مورد تطبیق منفرد بعدها توسط Matthaei در سال ۱۹۵۶ [۶]، Plotkin و Nahi در سال ۱۹۶۲ [۷]، Mellor در سال ۱۹۷۵ [۸] و Chen در سال ۱۹۷۶ [۹]، گسترش یافت. همچنین نظریه‌ی Fano در مورد تطبیق مزدوج^۷ نیز توسط Fielder در سال ۱۹۶۱ [۱۰]، Levy در سال ۱۹۶۴ [۱۱]، Youla در سال ۱۹۶۴ [۱۲]، Wohlers در سال ۱۹۶۵ [۱۳]، Chen در سال ۱۹۸۸ [۱۴]، Gudipati و Chen در سال ۱۹۹۵ [۱۵] پیشرفت‌های قابل توجهی یافت.

¹ Darlington's Theorem

² Compatible impedances

³ Right Half-Plane

⁴ Gain- bandwidth limitation

⁵ Single matching

⁶ Insertion loss

⁷ Double matching

شایان ذکر است در سال ۱۹۵۳ تحقیقاتی در زمینه‌ی تطبیق با اتلاف (Lossy) توسط LaRosa شروع شد که برای این کار یک تضعیف کننده‌ی منطبق مقاومتی بین منبع و بار قرار داده شد [۱۶]. تحقیقات در این مورد در سال ۱۹۵۶ توسط Westman [۱۷]، در سال ۱۹۷۵ توسط Gilbert [۱۸]، در سال ۱۹۸۴ توسط Liu و Ku [۱۹]، در سال ۱۹۸۸ توسط Zhu و همکارانش [۲۰]، در سال ۲۰۰۵ توسط Chu و Allstot [۲۱]، در سال ۲۰۰۶ توسط Allen و Arceo [۲۲] و در سال ۲۰۰۸ توسط Allen [۲۳] ادامه یافت.

از سال ۱۹۵۶ با استفاده از بهینه‌سازی (برنامه‌ریزی غیر خطی) که یکی از تکنیک‌های کمینه سازی توابع اسکالر غیر خطی می‌باشد، تحقیقاتی در زمینه‌ی بهینه سازی شبکه با استفاده از برنامه‌نویسی FORTRAN II آغاز شد و همچنان با پیشرفت‌های زبان‌های برنامه‌نویسی و الگوریتم‌های بهینه سازی، ادامه دارد. در مورد بهینه‌سازی تطبیق امپدانس نیز برای ارائه‌ی یک شبکه‌ی تطبیق بهینه تحقیقاتی انجام شده است و همچنان ادامه دارد.

در سال ۱۹۶۱ یک طراحی گرافیکی مقدماتی از شبکه‌های تطبیق امپدانس پهن باند توسط Jasik [۲۴] با استفاده از نمودار اسمیت انجام شد. سپس با استفاده از نموداری بنام کارتر (یک نگاشت دو طرفه همانند نمودار اسمیت است ولی خطوط با اندازه‌ی ثابت امپدانسی و Q نشان داده می‌شوند) بیان شد، در سال ۲۰۰۵ Glover با استفاده از این نمودار به کاهش Q بار (افزایش پهنای باند) پرداخت [۲۵].

روش تحلیلی پهنای باند-بهره که پیش از این بیان شد برای مشخص کردن شبکه تطبیق امپدانس نیازمند دانستن مدل بار می‌باشد و به منظور توصیف آن از یک تابع انتقال گویا با صفر و قطب تکین در صفحه مختلط فرکانسی استفاده می‌شود. به همین دلیل جز در مسائل ساده بسیار مشکل خواهد بود. در سال ۱۹۷۷ پروفیسور Carlin روشی عددی با نام روش فرکانس حقیقی (RFT) پیشنهاد داد که یک رویکرد جدید در رابطه با توصیف بار با استفاده از نمونه‌های فرکانس حقیقی روی محور $p=j\omega$ می‌باشد و نیازی به مدل بار ندارد. در این روش هدف اصلی بهینه کردن بهره‌ی توان مبدل^۲ می‌باشد [۲۶].

در سال ۱۹۸۱ یک رویکرد سراسر متفاوت نسبت به روش تحلیلی و عددی برای تطبیق منفرد پهن باند به عنوان یک مسئله‌ی مینیمم فاصله در فضای کران دار توابع تحلیلی، به ویژه برای مشخص کردن شبکه‌های پسیو با پارامترهای پراکندگی^۳ توسط Helton مطرح شد [۲۷]. این روش که تحت

¹ Quality factor

² Transformer power gain

³ Scattering parameters

عنوان "H-Infinity and Hyperbolic Geometry" مطرح شد بیشتر در تقویت کننده‌ها به کار می‌رود.

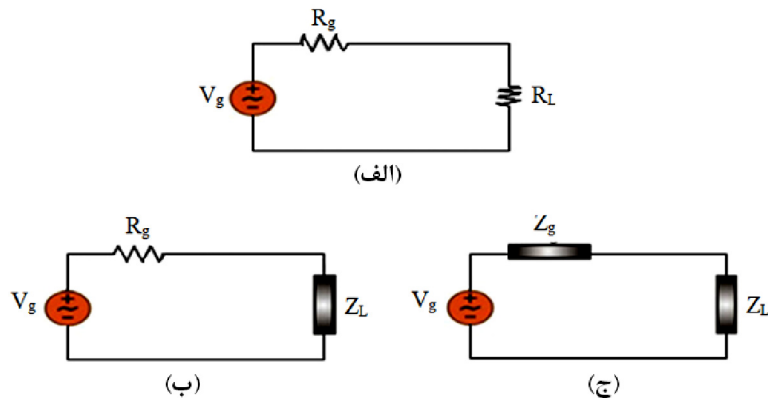
در سال ۱۹۸۵ روش‌های جستجوی شبکه‌ای اصولی^۱ مطرح شدند یکی از این رویکردهای سیستماتیک بر اساس طراحی یک شبکه تطبیق امپدانس نردبانی می‌باشد [۲۸]. این رویکرد که بنام رویکرد شبکه‌ای نیز معروف است در آن می‌توان یک ترکیب اصلاح شده از المان‌های فشرده و گسترده را به منظور تطبیق پهن باند استفاده کرد.

۱-۳: طبقه بندی مسائل تطبیق امپدانس

به طور کلی تطبیق امپدانس بین هر منبع و بار دلخواه را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم‌بندی کرد، که به صورت خلاصه در شکل ۱-۱ نشان داده شده‌اند:

- مسئله‌ی تطبیق مقاومتی^۲ - منبع و بار هر دو مقاومتی و نابرابر باشند.
- مسئله‌ی تطبیق منفرد - منبع مقاومتی و بار مختلط باشند.
- مسئله‌ی تطبیق مزدوج - منبع و بار هر دو مختلط باشند.

در اینجا فرض می‌کنیم که ولتاژ منبع V_g ، R_g و مقاومت یا امپدانس داخلی آن به ترتیب R_g یا Z_g و همچنین مقاومت یا امپدانس بار نیز به ترتیب R_L یا Z_L باشد.



شکل ۱-۱: سه طبقه بندی برای تطبیق امپدانس: (الف) تطبیق مقاومتی (ب) تطبیق منفرد (ج) تطبیق مزدوج

در حالت اول تطبیق به سادگی و با برابر قرار دادن مقاومت بار و منبع حاصل می‌شود. در حالی که تطبیق منفرد و تطبیق مزدوج کمی پیچیده‌تر هستند. تطبیق منفرد شایع‌ترین مورد در سناریوی

¹ Systematic grid search

² resistive matching

طراحی مدار RF و آنتن است. از آنجا که در این مورد بار (مثل آنتن) مختلط و منبع مقاومتی است، حذف رآکتانس لازم خواهد بود. علاوه بر این اگر مقاومت منبع و بار برابر نباشد، نیاز به دست‌کاری شبکه برای انتقال بیشتر توان می‌باشد (با فرض تک فرکانس بودن و باریک باند بودن). تطبیق دوبل بیشتر در کاربردهای RFID^۱ (فرکانس رادیویی تشخیصی)، که در آن‌ها یک تراشه به آنتن متصل می‌شود، استفاده می‌شود. چرا که امپدانس خروجی تراشه‌ها معمولاً مختلط است.

۴-۱: تئوری Bode-Fano و رویکرد تحلیلی

اولین گام اساسی از لحاظ نظری برای تطبیق امپدانس پهن باند توسط Bode برداشته شد [۴]. این کار با در نظر گرفتن یک بار ساده (ترکیب موازی یک مقاومت و یک خازن) با استفاده از تطبیق منفرد انجام شد. اساس روش Bode یک رویکرد تحلیلی است که نیازمند یک تقریب مداری از امپدانس بار می‌باشد که از اطلاعات صفحه فرکانس مختلط استفاده می‌کند؛ این روش تنها برای مدارهای با بار ساده، که مدل کردن آن‌ها راحت‌تر است، استفاده می‌شود. این رویکرد، روشی را برای ساخت یک شبکه‌ی تطبیق خوب بیان نمی‌کند. ولی به هر حال، یک ابزار ریاضی را برای مقایسه عملکرد شبکه‌ی تطبیق طراحی شده از لحاظ داشتن یک پهنای باند مشخص به صورت عباراتی از بهره و ضریب انعکاس به طراح می‌دهد. این روش در آینده توسط Fano [۵] و Youla [۱۲] مورد بررسی قرار گرفت.

در ارتباط با این موضوع، یک مورد خاص و مهم، استفاده از تئوری قدرتمند دارلینگتون [۱] (سیدنی دارلینگتون بیشتر در ساختار ترانزیستوری "زوج دارلینگتون" مشهور است) می‌باشد که به کمک Fano بر روی کاری که اخیراً به وسیله Bode انجام شده بود، صورت گرفت؛ که در آن با استفاده از تئوری دارلینگتون مسئله‌ی تطبیق امپدانس پهن باند به مسئله طراحی فیلتر تبدیل می‌شد. این تئوری بیان می‌کند که هر تابع امپدانس که به طور فیزیکی قابل تحقق باشد می‌تواند به یک شبکه‌ی بدون اتلاف ختم شده^۲ به یک مقاومت 1Ω تجزیه شود (این کار به وسیله‌ی یک مبدل در یک شبکه‌ی راکتیو انجام می‌شود). این در حالی است که مقاومت منبع هم می‌تواند توسط یک مبدل (ترانسفورماتور) به مقاومت 1Ω تبدیل شود، بنابراین مسئله‌ی تطبیق امپدانس به مسئله‌ی طراحی فیلتر تبدیل می‌شود. همان طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، این مسئله نوعی طراحی فیلتر جزئی^۳ در ارتباط با طراحی شبکه اولیه می‌باشد، در حالی که شبکه‌ی دوم پیش از این به واسطه‌ی کاربرد قضیه‌ی دارلینگتون کشف شده بود. شایان ذکر است که هنر طراحی فیلتر در آن

¹ Radio frequency identification

² Terminated

³ Partial filter design