مهندسی مایکروویو پیشرفته

مبانی خطوط انتقال صفحه‌ای و کاربرد آن‌ها

تألیف :

دکتر ایاز قربانی

(دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

دکتر غلامرضا مرادی

(دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

سید مصطفی نرگسی خرم آباد

(پژوهشگر آزمایشگاه رادار دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

نیاز دانش

تقدیم به:

چشمه های جوشان محبت

جلوه های مهر و عطوفت الهی

آنان که

لذت و غرور دانستن

جسارت خواستن

عظمت رسیدن

و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیمان

مدیون حضور سبزشان است

تقدیم به خانواده های عزیزمان.

پیش گفتار

مهندسی مایکروویو با پیشرفت تکنولوژی مخابرات و نیاز روزافزون به سرعت انتقال و پهنای باند بالا و ابعاد کوچک، در نیم قرن اخیر توسعه شگرفی یافته است. کتاب حاضر حاصل چندین سال تلاش، تحقیق و تدریس دروس مایکروویو I و II توسط مولفین می‌باشد. این کتاب در ادامه کتاب مهندسی مایکروویو برای مطالعه دانشجویان تحصیلات تکمیلی مهندسی مخابرات و درس مایکروویو پیشرفته تدوین شده است.

در فصل اول این کتاب آنالیز، تحلیل و سنتز خطوط انتقال هم صفحه شامل خطوط ریزنوار[1]، خط نواری، خطوط انتقال شکافدار و خطوط انتقال موجبر هم صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در این فصل به چگونگی محاسبه پارامترهای مختلف خطوط فوق الذکر به کمک روش‌های استاتیک، روش‌های شبه استاتیک، روش‌های تجربی و روش تمام موج، اشاره خواهد شد.

خطوط تزویج شده ریزنوار و خط نواری کاربرد زیادی در طراحی و ساخت تزویج کننده‌های جهت‌دار، میکسرها، تقویت‌کننده‌ها، تغییر فاز دهنده‌ها، تضعیف کننده‌ها، مدولاتورها، فیلترها، خط تأخیر دهنده‌ها و مدارات تطبیق کننده امپدانس دارند. از اینرو در فصل دوم این کتاب چگونگی آنالیز و سنتز خطوط ریزنوار و خط نواری، خطوط انتقال شکافدار و خطوط انتقال موجبر هم صفحه تزویج شده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم وابستگی فرکانسی پارامترهای مختلف خطوط انتقال صفحه ای از جمله ضریب دی-الکتریک، امپدانس مشخصه و پهنای خط آنالیز و تحلیل شده است. در این فصل ابتدا دلیل وابستگی فرکانسی پارامترهای خطوط انتقال که دارای مولفه طولی انتشار هستند بررسی می‌شود و سپس نحوه تحلیل این وابستگی برای خطوط ریزنوار بیان می‌گردد.

در فصل چهارم تضعیف، که یکی از موانع اصلی در عملکرد صحیح خطوط انتقال می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت کلی دو نوع تضعیف در خطوط انتقال وجود دارد، گروه اول تضعیف عایقی و گروه دوم تضعیف هدایت نامیده می‌شود که در این فصل تضعیف‌های فوق الذکر در رابطه با خطوط ریزنوار، خط نواری و موجبر هم صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در این فصل اشاره‌ای کوتاه به امواج سطحی، امواج تشعشعی و چگونگی حذف آن‌ها خواهیم داشت.

در فصل پنجم مدل سازی عدم پیوستگی در مدارات ریزنوار مورد مطالعه قرار گرفته است. در هر مداری که جنبه عملی داشته باشد، تعداد زیادی از ناپیوستگی‌های به چشم می‌خورد و بنابراین در فرکانس‌های بالا لازم و ضروری خواهد بود که مدل دقیقی از رفتار فرکانسی پارامترهای مختلف این ناپیوستگی‌ها داشته باشیم که این موضوع در واقع در طراحی به کمک کامپیوتر برای آنالیز و طراحی مدارات مجتمع مایکروویو بسیار مهم خواهد بود.

فصل ششم راجع به تقسیم‌کننده توان است. تقسیم‌کننده‌های توان در فرکانس‌های مختلف نقش عمده‌ای در رساندن سیگنال به بخش‌های مختلف یک سیستم ایفا می‌نمایند. در فرکانس‌های پایین

[1] Microstrip

برای تقسیم توان از عناصر مقاومتی استفاده می‌شود، در حالی که در فرکانس‌های بالاتر از خطوط انتقال، کابل‌های هم‌محور، موجبرها و خطوط انتقال صفحه‌ای کمک گرفته می‌شود. بنابراین در این فصل علاوه بر مروری بر انواع تقسیم‌کننده‌های توان، تقسیم‌کننده توان ویلکینسون، هایبرید، تزویج موازی و لنج مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

در فصل هفتم فیلترهای مورد استفاده در باند فرکانسی مایکروویو مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. چنانکه می‌دانیم در فرکانس‌های بالا عناصر فشرده به عناصر توزیعی تغییر می‌یابند. از اینرو در این فصل علاوه بر بررسی فیلترهای پایین‌گذر مبنا، چگونگی تبدیل فیلتر پایین‌گذر به میان‌گذر و بالاگذر ارائه خواهد شد. همچنین در این فصل تبدیل ریچارد و کرودا و موارد استفاده آن‌ها بررسی شده و نهایتاً طراحی فیلترهای پایین‌گذر، بالاگذر، میان‌گذر و میان‌نگذر ریزنوار به کمک مبدل‌های ادمیتانس و امپدانس مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

فصل هشتم به مدار پرکاربرد تغییردهنده فاز اختصاص دارد. این مدار در آنتن‌های آرایه فازی کاربرد فراوانی دارد. در ترکیب کننده‌های توان، وجود تغییر دهنده فاز سبب می‌شود که خروجی مدارات مختلف با فاز مناسبی با هم جمع شوند و این امر اثر سازنده‌ای بر تقویت توان دارد. در این فصل، ابتدا ساختارهای ساده تغییردهنده فاز معرفی می‌شوند و سپس تغییردهنده فاز خط سوییچ شونده و تغییردهنده فاز شیفمن معرفی می‌شود. همچنین شبیه‌سازی، روش ساخت و نتایج اندازه‌گیری نمونه‌هایی از این تغییردهنده فاز ارائه می‌شود.

امید است این کتاب بخشی از نیاز دانشجویان و علاقمندان حوزه مخابرات میدان در زمینه مایکروویو را برآورده سازد. با توجه به این که هیچ اثری از کاستی مبرا نیست از اینرو مولفین را از نظرات و انتقادات سازنده خود بی‌بهره نگذارید.

در پایان بر خود می‌دانیم از تمام عزیزانی که در گردآوری و تدوین کتاب همکاری داشته‌اند اعم از دانشجویان تحصیلات تکمیلی، فارغ‌التحصیلان و محققین آزمایشگاه تحقیقاتی سیستم‌های راداری دانشگاه صنعتی امیرکبیر به خصوص خانم مهندس ناهید اصانلو، خانم مهندس تهمینه نیرومند و خانم مهندس ساریسا کاوه نسب تشکر و قدردانی نماییم و برای ایشان توفیق روز افزون از درگاه خداوند متعال خواستاریم.

ایاز قربانی
ghorbani@aut.ac.ir
غلامرضا مرادی
ghmoradi@aut.ac.ir
سید مصطفی نرگسی
mostafanargesi@aut.ac.ir

فهرست مطالب

فصل ۱

تحلیل خطوط انتقال

مقدمه ۱۵
۱-۱ انواع خطوط انتقال و پارامترهای مهم آنها ۱۵
۱-۱-۱ کابل‌های هم محور ۱۵
۱-۱-۱-۱ پارامترهای اولیه کابل هم محور ۱۶
۱-۱-۱-۲ چگونگی محاسبه مدهای مرتبه بالا در خطوط انتقال هم محور ۱۷
۱-۱-۲ موجبرهای دایروی و مستطیلی ۲۰
۱-۱-۳ خطوط مسطح ۲۰
۱-۱-۴ فضای آزاد ۲۱
۱-۲ مدهای خطوط انتقال ۲۲
۱-۲-۱ مد TEM ۲۲
۱-۲-۲ مد TE ۲۲
۱-۲-۳ مد TM ۲۳
۱-۲-۴ مد هایبرید HE ۲۳
۱-۳ امپدانس ورودی خط انتقال ۲۳
۱-۴ طبقه بندی خطوط انتقال ۲۶
۱-۴-۱ خط بدون افت ۲۶
۱-۴-۲ خطوط کم افت ۲۶
۱-۴-۳ خطوط فرکانس پایین ۲۷
۱-۴-۴ خطوط فرکانس بالا ۲۸
۱-۵ ضریب انعکاس در خطوط انتقال ۲۸
۱-۶ پارامترهای پراکندگی ۳۱
۱-۷ منبع فعال و توان قابل دسترس ۳۵
۱-۸ پارامترهای ABCD ۳۶
۱-۹ مدل T و π یک خط انتقال بدون افت ۳۹
۱-۹-۱ مدل π و T خط امپدانس بال ۴۱
۱-۹-۲ مدل π و T خط امپدانس پایین ۴۱

۱-۱۰ ریز نوار ۴۱
۱-۱۰-۱ تحلیل و آنالیز خطوط ریزنوار ۴۳
۱-۱۰-۱-۱ اثبات وجود مؤلفه طولی در ریزنوار ۴۳
۱-۱۰-۱-۲ روش‌های متداول برای تحلیل خطوط ریزنوار ۴۵
۱-۱۰-۱-۲-۱ تحلیل شبه ساکن خطوط ریزنوار ۴۶
۱-۱۰-۱-۲-۲ تبدیل همدیس در محاسبه خط ریزنوار ۵۱
۱-۱۰-۲ روابط مورد استفاده در آنالیز و سنتز ریزنوار ۵۵
۱-۱۰-۲-۱ روابط تجربی برای آنالیز و سنتز خطوط ریزنوار ۵۶
۱-۱۰-۲-۱-۱روابط آنالیز ۵۶
۱-۱۰-۲-۱-۲ روابط سنتز ۵۷
۱-۱۰-۲ تعیین پارامترهای خطوط ریزنوار به کمک روش‌های عددی ۵۹
۱-۱۰-۲-۱روش عناصر محدود ۶۰
۱-۱۰-۲-۲روش ممان ۶۰
۱-۱۰-۲-۳ روش تفاضل جزئی ۶۲
۱-۱۰-۲-۳-۱ الگوریتم روش تفاضل محدود ۶۳
۱-۱۰-۲-۳-۲ معادلات بیضوی دوبعدی ۶۳
۱-۱۰-۲-۳-۳ فرم بندی توابع چند متغیر ۶۴
۱-۱۰-۲-۳-۴ حل معادلات بیضوی به روش تفاضل‌های محدود ۶۴
۱-۱۰-۲-۳-۵ فرم تفاضل محدود برای معادله لاپلاس ۶۵
۱-۱۰-۲-۳-۶ بکارگیری روش FD در مسائلی که دارای مرزهای انحناء دار هستند ۶۸
۱-۱۰-۲-۳-۷ فرم تفاضل محدود معادله لاپلاس در مختصات استوانه‌ای ۶۹
۱-۱۰-۲-۳-۸ ساختارهای ناهمگن ۷۰
۱-۱۰-۲-۹ روش‌های افزایش همگرایی در جواب‌های معادلات تفاضل محدود ۷۲
۱-۱۰-۳ خط نواری ۷۷
۱-۱۰-۴ خطوط موجبر هم صفحه ۸۱
مسائل حل شده ۸۴
مسائل حل نشده ۸۷
مراجع ۸۸

فصل ۲

روش‌های آنالیز و سنتز خطوط ریز نوار و خط نواری تزویج شده

مقدمه ۸۹
۲-۱ روش‌های موجود برای آنالیز و سنتز خطوط ریزنوار تزویج شده ۸۹
۲-۱-۱ محاسبه پارامترهای خط تزویج شده ریزنوار با استفاده از ضرایب تزویج ۹۱
۲-۱-۲ روش مبتنی بر خازن‌های استاتیک (روش تحلیلBryant-Weiss) ۹۳
۲-۱-۳ روش محاسبه خازن مد فرد و زوج ۹۵
۲-۱-۴ محاسبه پارامتر خط ریزنوار تزویج شده با استفاده از امپدانس خطوط تکی (روش اخترزاد) ۹۷
۲-۲ خط نواری تزویج شده ۱۰۱
۲-۲-۱ خط نواری با تزویج برودساید ۱۰۲

مسائل حل شده ۱۰۶
مسائل حل نشده ۱۰۸
مراجع ۱۰۹

فصل ۳

وابستگی فرکانسی ضریب دی الکتریک و امپدانس مشخصه در خطوط ریزنوار

مقدمه ۱۱۱
۳-۱ پاشندگی در خطوط ریزنوار ۱۱۱
۳-۱-۱ روابط تقریبی برای برآورد پاشندگی در خطوط ریزنوار ۱۱۴
۳-۱-۲ معادلات موجود برای بیان اثر پاشندگی در خطوط ریزنوار ۱۱۵
۳-۱-۲-۱ روش جتسینگر ۱۱۵
۳-۱-۲-۲ روش Edwards و Owens ۱۱۸
۳-۱-۲-۳ روش Schneider ۱۱۹
۳-۳ نقش مهمّ فرکانس انحنا در خاصیّت پاشندگی خطوط ریزنوار ۱۲۱
۳-۳-۱ نظریه Kirschning و Jansen ۱۲۵
۳-۳-۲ روش Yamashita ۱۲۶
۳-۳-۳ روش Koboyashi ۱۲۶
۳-۳-۴ نظریه Hammerstad و Jensen ۱۲۸
۳-۳-۵ نظریه Pramanick و Bhartia ۱۲۹
۳-۳-۶ مقایسه نظریه‌های آورده شده ۱۲۹
۳-۴ وابستگی ضریب دی الکتریک به ضخامت هادی ۱۳۱
۳-۵ وابستگی پهنای خط ریزنوار به فرکانس ۱۳۲
۳-۶ وابستگی فرکانسی امپدانس مشخصه در مدارات ریزنوار ۱۳۳
۳-۶-۱ وابستگی امپدانس مشخصه به فرکانس با استفاده از تئوری مدل موجبری هم صفحه ۱۳۳
۳-۶-۲ وابستگی امپدانس مشخصه به فرکانس به کمک برازش منحنی ۱۳۵
۳-۷ بررسی پاسخ فرکانسی امپدانس خطوط ریزنوار تزویج - موازی ۱۳۶
۳-۷-۱ نظریه کرشینگ ۱۳۶
مسائل حل شده ۱۴۳
مسائل حل نشده ۱۴۳
مراجع ۱۴۴

فصل ۴

تضعیف در خطوط ریزنوار، خط نواری و موجبر هم صفحه

مقدمه ۱۴۵
۴-۱ انواع تضعیف در خطوط انتقال هم صفحه ۱۴۵
۴-۱-۱ تضعیف هادی در خطوط ریزنوار ۱۴۶
۴-۱-۱-۱ محاسبه افت هادی در خطوط ریزنوار با استفاده از عمق نفوذ ۱۴۶
۴-۱-۱-۲ محاسبه افت هادی در خطوط ریزنوار با استفاده از فاکتور Q ۱۴۷

۴-۱-۱-۳ محاسبه افت هادی در ریزنوار با استفاده از روش اختلال ۱۴۸
۴-۱-۱-۴ محاسبه افت هادی با استفاده از قانون اندوکتانس افزایشی ویلر ۱۴۹
۴-۱-۱-۵ محاسبه مقاومت سطحی برای خطوط ریزنوار ۱۵۲
۴-۱-۱-۶ تلفات عایق(دی الکتریک) در خط ریزنوار ۱۵۷
۴-۱-۱-۷ افت تشعشعی در خطوط ریزنوار ۱۶۰
۴-۱-۱-۸ انتشار امواج سطحی ۱۶۱
۴-۱-۱-۸-۱ تکنیکهای ممکن برای کاهش امواج تشعشع ۱۶۱
۴-۱-۱-۹ تضعیف در خطوط ریزنوار تزویج شده با استفاده از قانون ویلر ۱۶۲
۴-۱-۲ تضعیف در خطوط نواری ۱۶۳
۴-۱-۲-۱ تلفات عایق(دی الکتریک) در خط نواری ۱۶۳
۴-۱-۳ تضعیف در خطوط موجبر هم صفحه ۱۶۴
۴-۱-۳-۱ تلفات عایق(دی الکتریک) در خطوط موجبر هم صفحه ۱۶۵
مسائل حل شده ۱۶۵
مسائل حل نشده ۱۶۹
مراجع ۱۶۹

فصل ۵

مدل سازی ناپیوستگی در مدارات ریزنوار

مقدمه ۱۷۱
۵-۱ ناپیوستگی‌های مهم ۱۷۲
۵-۱-۱ خط ریزنوار مدارباز ۱۷۳
۵-۱-۱-۱ طول اضافی معادل اثر انتهایی ۱۷۵
۵-۱-۱-۲ حد بالای l_{eo} ۱۷۶
۵-۱-۱-۳ شبیه‌سازی خطوط ریزنوار مدار باز ۱۷۷
۵-۱-۲ شکاف ۱۸۲
۵-۱-۲-۱ شبیه‌سازی شکاف سری ۱۸۴
۵-۱-۳ مدارات اتصال‌کوتاه ریزنوار ۱۸۴
۵-۱-۳-۱ شبیه‌سازی خط اتصال‌کوتاه ریزنوار ۱۸۶
۵-۱-۴ خم ۹۰ درجه یا گوشه ۱۸۶
۵-۱-۴-۱ شبیه‌سازی خم ۹۰ درجه ۱۹۰
۵-۱-۴-۲ خم‌های تطبیق‌یافته (تکنیک‌های جبران‌سازی) ۱۹۰
۵-۱-۴-۲-۱ شبیه سازی خم‌های تطبیق‌یافته (تکنیک‌های جبران‌سازی) ۱۹۲
۵-۱-۵ تغییرات پله‌ای در پهنای خطوط ریزنوار ۱۹۴
۵-۱-۵-۱ پله ریزنواری متقارن ۱۹۴
۵-۱-۵-۲ شبیه‌سازی پله متقارن ۱۹۶
۵-۱-۶ شکاف باریک عرضی ۱۹۶
۵-۱-۷ اتصال تی ۱۹۸
۵-۱-۷-۱ شبیه‌سازی اتصال تی ۲۰۰
۵-۱- ۸ اتصال صلیبی ۲۰۲

۵-۱-۸-۱ شبیه‌سازی پیوند صلیبی ۲۰۳
۵-۲ اثرات وابسته به فرکانس ناپیوستگی ۲۰۴
۵-۳ توصیه‌هایی مهم برای محاسبه پارامترهای ناپیوستگی ۲۰۵
۵-۳-۱ ناپیوستگی به صورت مدار باز ۲۰۵
۵-۳-۲ شکاف‌های سری ۲۰۵
۵-۳-۳ اتصال‌کوتاه ۲۰۶
۵-۳-۴ گوشه‌های با زاویه ۹۰ درجه ۲۰۶
۵-۳-۵ ناپیوستگی به صورت پله در پهنای خط ۲۰۷
۵-۳-۶ شکاف عرضی ۲۰۷
۵-۳-۷ اتصال تی ۲۰۸
۵-۳-۸ اتصال تی صلیبی ۲۰۹
مسائل حل شده ۲۱۰
مسائل حل نشده ۲۱۵
مراجع ۲۲۷

فصل ۶

تقسیم کننده‌های توان

مقدمه ۲۱۹
۶-۱ تقسیم کننده‌های توان T ۲۱۹
۶-۲ تقسیم‌کننده‌های مقاومتی ۲۲۲
۶-۳ تقسیم کننده توان ویلکینسون ۲۲۴
۶-۳-۱ آنالیز تقسیم کننده توان ویلکینسون با استفاده از تکنیک فرد یا زوج ۲۲۴
۶-۳-۱-۱ تحلیل با استفاده از مد زوج ۲۲۵
۶-۳-۱-۲ تحلیل با استفاده از مد فرد ۲۲۷
۶-۳-۲ تقسیم کننده توان N دهانه‌ای ویلکینسون با توان‌های خروجی غیر مساوی ۲۲۹
۶-۴ کوپلرهای چند حفره‌ای موجبری ۲۳۸
۶-۴-۱ کوپلرهای چند حفره ای با پاسخ نیوتن ۲۳۹
۶-۴-۲ کوپلر چند حفره‌ای با پاسخ چبی شف ۲۴۰
۶-۵ کوپلرهای هایبرید ۲۴۲
۶-۵-۱ محاسبه ماتریس ABCD یک خط انتقال مدار باز ۲۴۳
۶-۵-۲ محاسبه ماتریس ABCD یک خط انتقال اتصال کوتاه ۲۴۵
۶-۵-۳ ماتریس ABCD یک خط انتقال $\frac{\lambda}{۴}$ با امپدانس مشخصه $Z_{۰}$ ۲۴۶
۶-۵-۴ تحلیل کوپلر هایبرید ۲۴۶
۶-۵-۴-۱ پارامترهای ABCD کوپلر هایبرید در مد زوج ۲۴۶
۶-۵-۴-۲ پارامترهای ABCD کوپلر هایبرید در مد فرد ۲۴۸
۶-۵-۵ شبیه‌سازی کوپلر هایبرید ۲۵۲
۶-۶ معادلات کمکی در طراحی خطوط انتقال موازی تزویج شده ۲۵۲
۶-۷ کوپلرهای تزویج موازی ۲۵۷

۶-۸ کوپلر متوالی ۲۵۸
۶-۹ کوپلر لنج ۲۶۰
۶-۱۰ کوپلر ۱۸۰ درجه ۲۶۶
مسائل حل شده ۲۶۸
مسائل حل نشده ۲۷۲
مراجع ۲۷۲

فصل ۷

فیلترهای مایکروویو

مقدمه ۲۷۵
۷-۱ تقسیم بندی فیلترها ۲۷۶
۷-۱-۱تقسیم بندی بر اساس توپولوژی فیلتر و نحوه آرایش عناصر آن ۲۷۶
۷-۱-۲تقسیم‌بندی براساس منبع انرژی ۲۷۶
۷-۱-۳ تقسیم بندی فیلترها بر اساس پاسخ فرکانسی ۲۷۷
۷-۱-۴ تقسیم بندی فیلترها بر اساس روش سنتز ۲۷۷
۷-۱-۵ تقسیم بندی فیلترها بر مبنای عناصر مدار ۲۷۹
۷-۲ روش‌های طراحی فیلتر ۲۷۹
۷-۲-۱ طراحی فیلتر به روش افت عبوری ۲۷۹
۷-۳ پاسخ فرکانسی فیلترها ۲۸۰
۷-۳-۱ پاسخ فرکانسی فیلتر باترورث ۲۸۰
۷-۳-۲ پاسخ فرکانسی چبی شف ۲۸۱
۷-۳-۳ طراحی فیلتر پایین گذر ۲۸۱
۷-۳-۴ تبدیل فیلتر پایین گذر به فیلترهای بالا گذر، میان گذر و میان نگذر ۲۸۴
۷-۳-۴-۱ تبدیل فیلتر پایین‌گذر به بالاگذر ۲۸۵
۷-۳-۴-۲ تبدیل فیلتر پایین‌گذر به میان‌گذر ۲۸۶
۷-۴ فیلترهای باند باریک مایکروویو ۲۸۷
۷-۵ فیلترهای باند وسیع مایکروویو ۲۸۷
۷-۵-۱ فیلترهای باند وسیع با استابهای ربع- طول موج ۲۸۸
۷-۵-۲ تبدیل ریچارد و کورودا (خطوط $\frac{\lambda}{8}$) ۲۸۸
۷-۵-۳ مبدلهای ادمیتانس و امپدانس ۲۹۷
۷-۵-۴ فیلتر پایین گذر با استفاده از مدارات توزیعی ۲۹۹
۷-۵-۵ فیلترهای تزویج شده ۳۰۲
۷-۵-۱ طراحی فیلترهای میان گذر تزویج شده با استفاده از مبدل‌های ادمیتانس ۳۰۷
۷-۵-۶ فیلترهای میان گذر و میان نگذر ۳۱۴
۷-۵-۶-۱ فیلترهای میان گذر با استفاده از تشدید کننده‌های خازنی ۳۱۶
مسائل حل شده ۳۱۸
مسائل حل نشده ۳۲۹
مراجع ۳۳۱

فصل ۸

تغییر دهنده‌های فاز

مقدمه ۳۳۳
۸–۱ انواع تغییردهنده فاز ۳۳۴
۸–۱–۱ تغییردهنده فاز آنالوگ ۳۳۵
۸–۱–۲ تغییردهنده فاز دیجیتال ۳۳۵
۸–۲ تغییردهنده فاز چندبیتی ۳۳۵
۸–۳ تغییردهنده‌های فاز سوییچ خطوط ۳۳۶
۸–۴ تغییردهنده فاز خط بار شده ۳۴۰
۸–۵ تغییردهنده‌های فاز شبکه سوییچ شده ۳۴۴
۸–۶ تغییرفازدهنده‌های انعکاسی ۳۴۷
۸–۷ تغییردهنده فاز شیفمن ۳۵۱
۸–۷–۱ تغییردهنده فاز شیفمن ساده ۳۵۵
۸–۷–۲ تغییردهنده فاز شیفمن دوبل ۳۵۷
۸–۷–۳ تغییردهنده فاز شیفمن موازی ۳۵۹
۸–۷–۴ طراحی تغییر دهنده فاز شیفمن ساده ۳۶۱
۸–۸ طراحی مدارات کنترلی ۳۶۵
۸–۸–۱ دیود پین ۳۶۶
۸–۸–۱–۱ طراحی خطوط انتقال ۳۶۷
۸–۸–۲ سوییچ SPST ۳۶۹
۸–۸–۲–۱ سوییچ SPST سری ۳۶۹
۸–۸–۲–۲ سوییچ SPST موازی ۳۷۲
۸–۸–۳ سوییچ SPDT ۳۷۳
مراجع ۳۷۵
پیوست ۱ ..... ۳۷۷
پیوست ۲ ..... ۳۸۷
پیوست ۳ ..... ۳۸۹
پیوست ۴ ..... ۳۹۱
پیوست ۵ ..... ۳۹۳
پیوست ۶ ..... ۳۹۵
فهرست راهنما ۴۰۵
واژه نامه ۴۰۷