میدان‌ها و امواج الکترومغناطیس

دکتر محمد حسن نشاطی

دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

نیاز دانش

پیشگفتار مولف

درس میدان‌ها و امواج از دروس تخصصی رشته مهندسی برق و پیشنیاز آن درس الکترومغناطیس است. علاوه بر آن، این درس خود نیز پیشنیاز دروس مهم دیگری مانند آنتن و مایکروویو گرایش مخابرات است. آشنایی با مبانی نظریه الکترومغناطیس مبتنی بر معادلات ماکسول و شناخت نحوه انتشار امواج در محیط‌های مختلف از یک‌طرف، بررسی و تحلیل میدانی بسیاری از ادوات عملی فرکانس بالا مانند خطوط انتقال و موجبرها از طرف دیگر، اهمیت پایه‌ای ویژه‌ای را به درس میدان‌ها و امواج در برنامه درسی این رشته مهندسی برق داده است، بطوریکه امروزه بسیاری از صاحب‌نظران و اساتید این درس را برای کلیه دانشجویان مهندسی برق الزامی می‌دانند.

کتاب حاضر بر اساس سرفصل‌های تنظیم یافته شورای عالی برنامه‌ریزی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و با هدف آشنایی با نظریه الکترومغناطیس و کاربرد آن در بررسی و طراحی ادوات موجبری مایکروویو تدوین یافته است. جهت تأکید بر مبانی این نظریه و شناخت بهتر روش‌ها، هر فصل کتاب حاوی مسائل حل‌شده زیادی است. هم‌چنین برای سنجش یادگیری و درک بهتر، تعداد زیادی مسئله در انتهای فصل طرح شده است. با توجه به حجم زیاد روابط و فرمول‌ها، این مسائل برای تقویت درک مطالب و توسعه توانایی شخص در کاربرد آن‌ها و بررسی نکات عملی در نظر گرفته شده‌اند. بسیاری از این مسائل نکات آموزنده‌ای را مطرح می‌کنند که فرصت تمرین و درک مطالب مطرح شده در متن را فراهم آورده و صرفاً جایگزینی اعداد در روابط نیستند.

مبانی تئوری نظریه الکترومغناطیس در فصل اول کتاب با معرفی معادلات ماکسول و با تأکید بر فعالیت تجربی و آزمایشگاهی دانشمندانی مانند آمپر و فاراده آغاز می‌شود. این معادلات نقطه شروع حل مسائل الکترومغناطیس هستند که منجر به معادله موج می‌شود. ماکسول با تکیه‌بر ابتکار ریاضی خود، این مجموعه معادلات را هماهنگ نمود و برای حل مسائل الکترومغناطیس معرفی کرد. او نشان داد میدان‌های الکترومغناطیس به‌صورت موج انتشار می‌یابند و انرژی حمل می‌کنند. وی اولین شخصی بود که پیش‌بینی کرد که نور نیز حرکت موجی دارد.

فصل دوم در مورد حل معادله موج در فضای نامحدود در محیط‌های متفاوت مانند عایق و رسانا است. اگرچه فرض فضای بدون مرز و امواج صفحه‌ای یکنواخت عملاً کاربرد مهمی ندارد، اما این مطالعات اصول کلی انتشار امواج و خصوصیات موج مانند سرعت انتشار، طول موج و ثابت‌های فاز و تضعیف را معرفی می‌کند. هم‌چنین آشنایی با قطبش امواج از سایر مطالب مهم این فصل است. فصل سوم در مورد توان قابل حمل امواج و قضیه پوینتینگ است، بردار چگالی توان با واحد وات بر مترمربع که حاصل‌ضرب خارجی دو بردار میدان الکتریکی و مغناطیسی است معرفی می‌شود. این بردار علاوه بر اندازه توان، جهت انتشار موج را نیز مشخص می‌کند. قضیه پوینتینگ برای امواج سینوسی زمانی نیز بررسی و مطالعه می‌شود.

بازتاب و انتقال امواج الکترومغناطیس بین محیط‌هایی از جنس متفاوت در مطالعهٔ بسیاری از پدیده‌های فیزیکی اهمیت زیادی دارد. بازتاب امواج از سطح اجسام فلزی و سطح آب دریا، هم‌چنین انتقال با تغییر جهت و یا شکست امواج، نظیر آنچه در منشورها و عدسی‌های نوری اتفاق می‌افتد، ازجمله این پدیده‌ها هستند. ساده‌ترین حالت این مسائل، بازتاب و انتقال امواج صفحه‌ای یکنواخت از مرزهای صفحه‌ای است. این مطالب مباحث فصل چهارم کتاب است که با معرفی قانون اسنل برای موج بازتاب و انتقال شروع شده و هم‌چنین پدیده‌های جالب و مهم انتقال کامل و بازتاب کامل بررسی می‌شوند.

علاوه بر اصول میدان‌های الکترومغناطیس، در این کتاب سیستم‌هایی معرفی می‌شوند که به شکلی انرژی موج را در یک ناحیه از فضا و در جهت خاص و مورد نظر کاربر متمرکز می‌کنند. این سیستم‌ها که موجبر (waveguide) نامیده می‌شوند، امواجی را بنام امواج **هدایت شده** (guided waves) انتشار می‌دهند که در عمل کاربرد زیادی دارند. برای ورود به این مباحث و در فصل پنجم کتاب، ابتدا معادلات اساسی موج در سیستم‌های یکنواخت معرفی و دسته‌بندی امواج به انواع TM، TE و TEM ارائه می‌شود. در این فصل ساده‌ترین نوع موجبر، موجبر صفحه‌ای بینهایت معرفی و مشخصات انتشار امواج مختلف بررسی و روابط هر یک استخراج می‌شود. ، نشان داده می‌شود که محدود ساختن فضا با صفحات رسانا و انتشار موج در این نوع محیط‌ها باعث ایجاد فرکانس قطع و انتشار مُدهای مختلف خواهد شد.

فصل ششم در مورد نظریه و کاربرد خطوط انتقال است. این سیستم‌های هدایت موج از دو رسانا تشکیل شده و امواج TEM را هدایت می‌کنند که مهم‌ترین نوع آن خط هم‌محور است. با بررسی روش میدانی خطوط انتقال، مدار معادل یک جزء کوچک از خطوط انتقال نیز استخراج می‌شود. آشنایی با خط انتقال به‌عنوان عنصر مداری و کاربرد خطوط انتقال در مدارهای تطبیق سایر مطالب این فصل است. هم‌چنین آشنایی با مفاهیم مهمی مانند تلفات بازگشتی، تلفات تعبیه و تلفات انتقالی که در اندازه‌گیری مشخصات عناصر مایکروویو اهمیت زیادی دارند، معرفی می‌شوند. با توجه به محاسبات وقت‌گیر خطوط انتقال روش ترسیمی به کمک نمودار اسمیت نیز از سایر بخش‌های مهم این فصل است.

فصل هفتم و هشتم در مورد موجبرهای مستطیلی و دایره‌ای است. این موجبرها به‌عنوان هدایت‌کننده امواج TE و TM هستند که در سامانه‌های مایکروویو کاربرد زیادی دارند. با حل معادله موج در این ساختارها، مُدهای مختلف انتشار و مشخصات هر یک از آنتن‌ها و ترتیب مُدهای انتشار موجبر تعیین می‌شود. هم‌چنین خصوصیات مُد اصلی و توان حمل شده موجبر به‌تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. فصل نهم در مورد انتشار امواج الکترومغناطیس و آشنایی با آنتن و مشخصات آن است. آشنایی با آرایه‌های ساده جهت شکل‌دهی الگوی تشعشع، معرفی خصوصیات آنتن در حالت گیرندگی و معرفی معادلات فریس در انتقال امواج الکترومغناطیس بین آنتن فرستنده و گیرنده از سایر مطالب مهم این فصل است.

اگرچه تلاش فراوانی شده است که مطلب کامل و بدون اشکال تایپی باشد، اما بدون شک دارای نواقص و کاستی‌هایی نیز هست. نگارنده از پیشنهادت اساتید، صاحب‌نظران، دانشجویان عزیز و خوانندگان محترم استقبال می‌نماید. علاقه‌مندان می‌توانند نظرات اصلاحی خود را با پست الکترونیکی به این‌جانب ارسال کنند. امیدوارم این تلاش ناچیز موجب رضای حق‌تعالی و مورد استفاده دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز قرار بگیرد.

در پایان لازم است مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشجویان گرایش مخابرات دانشگاه فردوسی مشهد که با طرح دیدگاه‌ها، ارائه نقطه نظرات و طرح سؤال در شکل‌گیری و غنای علمی این اثر نقش مؤثری داشته‌اند، ابراز نمایم. از آقای مهندس رجب محمد بگنجی فارغ‌التحصیل دوره کارشناسی ارشد که در حل مسائل و از آقای مهندس محمد علیجانی قادیکلائی دانشجوی دوره دکتری مخابرات دانشگاه فردوسی مشهد که در نمونه‌خوانی و ویراستاری ادبی همکاری داشته‌اند تشکر می‌کنم. هم‌چنین از فرزندم مهندس محمد محسن نشاطی که در تدوین کتاب همکاری مؤثری داشته، از مسئولین محترم انتشارات نیاز دانش آقایان شمس و شیرازی که مقدمات چاپ کتاب را فراهم نموده و از سرکار خانم رفیعی به جهت صفحه‌آرایی کتاب تشکر و قدردانی می‌کنم. از همسر و فرزندم الهه به جهت صبر و شکیبایی در طول تهیه این اثر سپاسگزارم.

محمدحسن نشاطی
دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد
مشهد مقدس- تابستان ۹۴
neshat@ieee.org

فهرست مطالب

فصل ۱ معادلات ماکسول ۱۱

۱-۱ میدان‌های ساکن ۱۲
۱-۱-۱ میدان الکتریکی ساکن ۱۲
۱-۱-۲ میدان مغناطیسی ساکن ۱۳
۱-۲ میدان‌های الکترومغناطیس ۱۳
۱-۲-۱ قانون القاء فاراده ۱۳
۱-۲-۲ معادله پیوستگی ۱۵
۱-۲-۳ معادلات ماکسول ۱۶
۱-۲-۴ جریان جابجایی ۱۹
۱-۲-۵ شرایط مرزی میدان‌های الکترومغناطیس ۲۰
۱-۳ میدان‌های الکترومغناطیس سینوسی ۲۵
۱-۴ میدان‌های نیمه ساکن ۲۷
۱-۴-۱ تقریب نیمه ساکن میدان‌های الکترومغناطیس ۲۷
۱-۴-۲ محاسبات میدان‌های نیمه ساکن ۲۹

فصل ۲ امواج صفحه‌ای یکنواخت الکترومغناطیس ۳۵

۲-۱ معادلهٔ موج ۳۶
۲-۱-۱ معادلهٔ موج غیر همگن ۳۶
۲-۱-۲ معادلهٔ موج همگن ۳۷
۲-۱-۳ معادلهٔ موج در محیط عایق ۳۷
۲-۲ امواج صفحه‌ای یکنواخت ۳۸
۲-۲-۱ موج صفحه‌ای یکنواخت در محیط عایق کامل ۳۸
۲-۲-۲ مؤلفه‌های میدان‌های الکترومغناطیس امواج صفحه‌ای ۴۰
۲-۳ امواج صفحه‌ای یکنواخت با تغییرات زمانی سینوسی ۴۵
۲-۳-۱ بسط روابط کرل ماکسول برای میدان‌های سینوسی ۴۵
۲-۳-۲ موج صفحه‌ای یکنواخت با تغییرات زمانی سینوسی ۴۶
۲-۳-۳ انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت در محیط‌های بدون اتلاف ۴۹
۲-۳-۴ انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت در محیط‌های با اتلاف ۵۲
۲-۳-۵ اثر پوستی و عمق پوستی ۵۷
۲-۴ انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت در جهت دلخواه ۶۱
۲-۵ قطبش امواج صفحه‌ای ۶۷
۲-۵-۱ قطبش خطی ۶۷
۲-۵-۲ قطبش دایره‌ای ۶۸

۲-۵-۳ قطبش بیضوی ۷۰
۲-۵-۴ بررسی قطبش موج صفحه‌ای با استفاده از فازور میدان‌ها ۷۲
۲-۶ سرعت فاز و سرعت گروه امواج الکترومغناطیس ۷۵
۲-۶-۱ سرعت فاز ۷۵
۲-۶-۲ سرعت گروه ۷۶
۲-۶-۳ رابطهٔ کلی بین سرعت فاز و سرعت گروه ۷۷

فصل ۳ توان و انرژی امواج الکترومغناطیس ۸۷

۳-۱ توان بار الکتریکی در میدان‌های الکترومغناطیس ۸۷
۳-۲ قضیهٔ پوینتینگ ۸۹
۳-۲-۱ منبع جریان به‌عنوان مصرف کنندهٔ توان ۹۱
۳-۲-۲ منبع جریان به‌عنوان مولد میدان‌های الکترومغناطیس ۹۱
۳-۲-۳ قضیهٔ پوینتینگ برای میدان‌های ساکن ۹۲
۳-۳ توان لحظه‌ای و متوسط توان امواج متناوب ۹۹
۳-۳-۱ متوسط توان امواج متناوب ۹۹
۳-۳-۲ قضیهٔ پوینتینگ برای امواج سینوسی ۱۰۰
۳-۳-۳ بردار پوینتینگ برحسب فازور میدان‌های سینوسی ۱۰۲
۳-۴ قضیهٔ پوینتینگ برحسب فازور میدان‌ها ۱۰۳
۳-۵ سرعت انتقال انرژی امواج الکترومغناطیس ۱۰۵

فصل ۴ بازتاب و انتقال امواج الکترومغناطیس ۱۱۱

۴-۱ بازتاب امواج صفحه‌ای یکنواخت از مرز دو ناحیهٔ عایق و رسانای کامل ۱۱۲
۴-۱-۱ تابش عمودی ۱۱۲
۴-۱-۲ تابش مایل ۱۱۶
۴-۲ بازتاب و انتقال امواج صفحه‌ای در مرز دو ناحیهٔ عایق کامل ۱۲۲
۴-۲-۱ تابش عمودی ۱۲۲
۴-۲-۲ امپدانس موج میدان کل ۱۲۸
۴-۲-۳ تابش عمودی بر محیط‌هایی شامل چند عایق ۱۲۹
۴-۲-۴ تابش مایل بر مرز دو عایق کامل ۱۳۳
۴-۲-۵ بازتاب کامل ۱۴۲
۴-۲-۶ انتقال کامل ۱۴۷
۴-۳ بازتاب و انتقال امواج صفحه‌ای از مرز دو ناحیه با رسانایی محدود ۱۵۰
۴-۳-۱ توان تلف شده رسانا ۱۵۲

فصل ۵ امواج الکترومغناطیس هدایت‌شده ۱۶۵

۵-۱ هدایت‌کننده‌های موج ۱۶۵
۵-۲ معادلات اساسی موج در سیستم‌های یکنواخت ۱۶۷
۵-۳ بسط روابط کرل ماکسول در مختصات مستطیلی ۱۶۸
۵-۴ دسته‌بندی امواج هدایت‌شده ۱۷۰
۵-۴-۱ امواج الکتریکی عرضی ۱۷۰
۵-۴-۲ امواج مغناطیسی عرضی ۱۷۲
۵-۴-۳ امواج الکترومغناطیسی عرضی ۱۷۳
۵-۴-۴ امواج هدایت‌شده بین دو صفحهٔ بینهایت ۱۷۴
۵-۴-۱ امواج TM موجبر صفحه‌ای بینهایت ۱۷۵
۵-۴-۲ امواج TE موجبر صفحه‌ای بینهایت ۱۸۱
۵-۴-۳ امواج TEM موجبر صفحه‌ای بینهایت ۱۸۴
۵-۴-۴ سرعت فاز، سرعت گروه و سرعت انتقال انرژی ۱۸۶
۵-۵ تجزیهٔ امواج TE و TM ۱۸۹
۵-۶ تلفات هدایت‌کننده‌های موج ۱۹۲
۵-۶-۱ تلفات عایق بین صفحات موجبر صفحه‌ای ۱۹۲
۵-۶-۲ تلفات صفحات رسانا موجبر صفحه‌ای ۱۹۴

فصل ۶ نظریهٔ خطوط انتقال ۲۰۷

۶-۱ نظریه الکترومغناطیس خطوط انتقال ۲۰۸
۶-۱-۱ معادلات ماکسول خطوط انتقال ۲۰۹
۶-۱-۲ ولتاژ و جریان خطوط انتقال ۲۱۰
۶-۱-۳ میدان‌های الکترومغناطیس امواج TEM ۲۱۲
۶-۱-۴ معادلات خطوط انتقال ۲۱۳
۶-۱-۵ مدار معادل گستردهٔ خط انتقال ۲۱۵
۶-۱-۶ محاسبهٔ عناصر مدار معادل خط انتقال ۲۱۵
۶-۱-۷ محاسبهٔ عناصر مدار معادل با استفاده از انرژی ذخیره شده و تلف شده خط ۲۱۸
۶-۲ حل معادلات خطوط انتقال ۲۲۰
۶-۲-۱ امواج ولتاژ و جریان خط بدون اتلاف ۲۲۰
۶-۲-۲ حل معادلات خط انتقال برای تغییرات زمانی سینوسی ۲۲۱

۶-۲-۲ امپدانس مشخصه و ویژگی‌های آن ۲۲۶
۶-۲-۳ خط انتقال منتهی به بار ZL ۲۲۷
۶-۲-۴ نسبت موج ساکن ۲۳۲
۶-۲-۵ نمودار توزیع ولتاژ و جریان ۲۳۳
۶-۲-۶ اندازه‌گیری امپدانس بار مجهول ۲۳۷
۶-۲-۷ توان جاری خطوط انتقال ۲۳۹
۶-۲-۸ توان قابل دسترس ۲۴۲
۶-۲-۹ تلفات شبکه‌های خط انتقال ۲۴۵
۶-۳ خط انتقال به‌عنوان عنصر مداری ۲۴۷
۶-۳-۱ خط اتصال کوتاه ۲۴۸
۶-۳-۲ خط اتصال باز ۲۴۹
۶-۳-۳ خط ربع طول موج ۲۵۱
۶-۳-۴ خط نصف طول موج ۲۵۱
۶-۴ نمودار اسمیت ۲۵۴
۶-۴-۱ ساختار نمودار اسمیت ۲۵۴
۶-۴-۳ اندازه‌گیری بار مجهول با نمودار اسمیت ۲۶۵
۶-۴-۴ محاسبات خطوط انتقال با اتلاف با نمودار اسمیت ۲۶۷
۶-۵ مدارهای تطبیق امپدانس ۲۷۰
۶-۵-۱ مدار تطبیق با قطعه فرعی سری ۲۷۱
۶-۵-۲ مدار تطبیق با قطعه فرعی موازی ۲۷۵
۶-۵-۳ مدار تطبیق با دو قطعه فرعی ۲۸۰
۶-۵-۴ مدار تطبیق با خط ربع طول موج ۲۸۶
۶-۶ تشابه انتشار موج صفحه‌ای یکنواخت و انتشار موج خطوط انتقال ۲۸۹

فصل ۷ موجبرهای مستطیلی ۳۰۱

۷-۱ امواج مغناطیسی عرضی در موجبر مستطیلی ۳۰۱
۷-۱-۱ مؤلفه‌های امواج TM موجبر مستطیلی ۳۰۴
۷-۱-۲ فرکانس قطع مُدهای TM ۳۰۵
۷-۱-۳ ترتیب انتشار مُدهای TMmn ۳۰۶
۷-۲ امواج الکتریکی عرضی TE ۳۰۸
۷-۲-۱ مؤلفه‌های میدان امواج عرضی الکتریکی ۳۰۹
۷-۲-۲ ترتیب انتشار مُدهای TEmn ۳۱۰
۷-۳ مُد اصلی کار موجبرهای مستطیلی ۳۱۲
۷-۳-۱ مؤلفه‌های میدان مُد اصلی ۳۱۲
۷-۳-۲ توان مُد اصلی ۳۱۳
۷-۳-۳ خطوط میدان مُد اصلی ۳۱۶
۷-۳-۴ جریان صفحات در مُد اصلی ۳۱۷
۷-۳-۵ توان موجبر مستطیلی در سایر مُدها ۳۱۸
۷-۴ تلفات موجبرهای مستطیلی ۳۲۲
۷-۴-۱ تلفات عایق موجبر ۳۲۲
۷-۴-۲ تلفات صفحات رسانا ۳۲۲
۷-۵ محفظه‌های تشدید مستطیلی ۳۲۹
۷-۵-۱ امواج TM محفظه تشدید مستطیلی ۳۳۰
۷-۵-۲ امواج TE محفظه تشدید مستطیلی ۳۳۱
۷-۵-۳ مُد اصلی تشدید کنندهٔ مستطیلی ۳۳۲
۷-۶ ضریب کیفیت محفظه تشدید مستطیلی ۳۳۳
۷-۶-۱ ضریب کیفیت محفظه تشدید در مُدهای TE_{10p} ۳۳۳
۷-۶ تحریک موجبرها ۳۴۰
۷-۶-۱ تحریک موجبر با خط هم‌محور ۳۴۰
۷-۶-۲ تحریک موجبر با حلقهٔ جریان ۳۴۳
۷-۷ تشابه موجبرها و خطوط انتقال ۳۴۴
۷-۷-۱ مدار معادل خط انتقال موجبر برای امواج TM ۳۴۴
۷-۷-۲ مدار معادل خط انتقال موجبر برای امواج TE ۳۴۶
۷-۸ ناپیوستگی در موجبرها ۳۴۸
۷-۸-۱ دیافراگم‌های القایی ۳۴۸
۷-۸-۲ دیافراگم‌های خازنی ۳۵۰
۷-۸-۲ دیافراگم‌های تشدید ۳۵۱

فصل ۸ موجبرهای دایره‌ای ۳۶۱

۸-۱ معادلات اساسی موج در مختصات استوانه‌ای ۳۶۱
۸-۱-۱ بسط روابط کرل ماکسول ۳۶۱
۸-۱-۲ امواج الکتریکی و مغناطیسی عرضی در مختصات استوانه‌ای ۳۶۳
۸-۱-۳ حل معادلهٔ عددی موج در مختصات استوانه‌ای ۳۶۴
۸-۲ امواج مغناطیسی عرضی موجبر استوانه‌ای ۳۶۵
۸-۲-۱ انتشار امواج TM ۳۶۵
۸-۲-۲ مؤلفه‌های میدان امواج TMmn ۳۶۸
۸-۳ امواج الکتریکی عرضی در موجبر استوانه‌ای ۳۶۸
۸-۳-۱ انتشار امواج TE ۳۶۸
۸-۳-۲ مؤلفه‌های میدان امواج TEmn ۳۷۰
۸-۳-۳ ترتیب مُدهای انتشار موجبر دایره‌ای ۳۷۱

۸-۳-۴ مُد اصلی موجبرهای دایره‌ای---۳۷۲
۸-۴ تلفات موجبرهای دایره‌ای---۳۷۶
۸-۴-۱ تلفات عایق موجبر---۳۷۶
۸-۴-۲ ضریب تلفات رسانا در مُد اصلی---۳۷۶
۸-۴-۳ ضریب تلفات رسانا در مُدهای TEmn---۳۷۷
۸-۴-۴ ضریب تلفات رسانا در مُدهای TMmn---۳۷۷
۸-۵ مُدهای TE خط انتقال هم‌محور---۳۸۲
۸-۶ محفظه‌های تشدید استوانه‌ای---۳۸۴
۸-۶-۱ مُدهای TMmnp محفظه تشدید استوانه‌ای---۳۸۴
۸-۶-۲ مُدهای TEmnp محفظه تشدید استوانه‌ای---۳۸۵
۸-۶-۳ نمودار مُدهای محفظه تشدید استوانه‌ای---۳۸۶
۸-۷ ضریب کیفیت محفظهٔ تشدید استوانه‌ای---۳۸۸
۸-۷-۱ ضریب کیفیت مُدهای $TE_{0\cdot1p}$---۳۸۸

فصل ۹ تشعشع امواج الکترومغناطیس ۳۹۹

۹-۱ معادلهٔ موج غیر همگن---۴۰۰
۹-۱-۱ توابع پتانسیل میدان‌های متغیر با زمان---۴۰۰
۹-۱-۲ حل معادلهٔ موج تابع پتانسیل برداری مغناطیسی---۴۰۲
۹-۲ سیستم‌های ساده تشعشع---۴۰۵
۹-۲-۱ دو قطبی الکتریکی المان جریان---۴۰۵
۹-۲-۲ دو قطبی مغناطیسی کوتاه---۴۰۷
۹-۳ مشخصات آنتن‌ها---۴۰۹
۹-۳-۱ الگوی تشعشع راه دور---۴۰۹
۹-۳-۲ آنتن همه‌جهته---۴۱۲
۹-۴ بهرهٔ سمت‌گرایی آنتن---۴۱۲
۹-۴-۱ زاویهٔ فضایی---۴۱۲
۹-۴-۲ چگالی توان و توان کل تشعشع یافته آنتن---۴۱۳
۹-۴-۳ شدت تشعشع---۴۱۳
۹-۴-۴ سمتگرایی آنتن---۴۱۵
۹-۴-۵ مقاومت تشعشع و مدار معادل آنتن---۴۱۷
۹-۴-۶ بهرهٔ توان و بازدهٔ تشعشع آنتن---۴۱۸
۹-۴-۷ مشخصات تشعشع دو قطبی مغناطیسی---۴۲۰
۹-۵ آنتن‌های سیمی---۴۲۳
۹-۵-۱ توزیع جریان دوقطبی خطی---۴۲۴
۹-۵-۲ اصل حاصلضرب الگوی تشعشع---۴۲۶
۹-۵-۳ میدان‌های تشعشع دوقطبی خطی---۴۲۷
۹-۵-۴ الگوی تشعشع دوقطبی خطی---۴۲۷
۹-۵-۵ دوقطبی کوتاه---۴۲۸
۹-۵-۶ دوقطبی نصف طول موج---۴۲۹
۹-۵-۷ تک‌قطبی ربع طول موج---۴۳۰
۹-۵-۸ طول مؤثر آنتن دوقطبی---۴۳۱
۹-۵-۹ خلاصهٔ مشخصات آنتن‌های دو قطبی خطی---۴۳۳
۹-۶ آنتن‌های آرایه‌ای---۴۳۵
۹-۶-۱ آرایهٔ آنتن با دو عنصر---۴۳۶
۹-۶-۲ آرایه با الگوی تشعشع عرضی---۴۴۰
۹-۶-۳ آرایه با الگوی تشعشع طولی---۴۴۱
۹-۷ آنتن‌های گیرنده---۴۴۴
۹-۷-۱ ولتاژ مدار باز آنتن گیرنده---۴۴۵
۹-۷-۲ ضریب عدم تطبیق قطبش---۴۴۵
۹-۷-۳ دهانهٔ موثر آنتن گیرنده---۴۴۷
۹-۷-۴ دهانهٔ موثر و سمت‌گرایی آنتن---۴۴۹
۹-۷-۵ دهانهٔ مؤثر و زاویهٔ فضایی پرتو اصلی---۴۵۱
۹-۷-۶ آنتن‌ها در لینک مخابراتی و رابطهٔ انتقال فریس-۴۵۱
۹-۷-۷ توان موثر همه‌جهتهٔ یک آنتن---۴۵۲
۹-۷-۸ ولتاژ موثر در ورودی گیرنده و میدان الکتریکی آنتن---۴۵۳
۹-۷-۹ سیستم‌های مخابرات ماهواره‌ای---۴۵۴

پیوست‌ها---۴۶۳
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی---۴۸۵
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی---۴۸۹
نمایه---۴۹۳