

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اصول و مبانی سیستم‌های مخابراتی

اصول و مبانی سیستم‌های مخابراتی

دکتر سیدمحمدسجاد صدوق

۱۳۹۶

تقدیم به پدر، مادر، همسر و دخترم محیا سادات

و تقدیم به شهید محسن حججی

فهرست مطالب

پانزده	پیشگفتار
هفده	نشانه‌های اختصاری
۱	فصل ۱. تعاریف اولیه
۱	۱.۱. مقدمه
۳	۲.۱. تعاریف اولیه
۳	۱.۲.۱. اطلاعات یا پیام
۳	۲.۲.۱. پیام پیوسته یا آنالوگ
۳	۳.۲.۱. پیام گسسته یا دیجیتال
۴	۴.۲.۱. سیستم مخابراتی
۴	۵.۲.۱. فرستنده
۵	۶.۲.۱. کانال مخابراتی
۵	۷.۲.۱. گیرنده
۵	۸.۲.۱. مبدل‌ها
۵	۳.۱. اثرات نامطلوب کانال
۶	۱.۳.۱. اعوجاج
۶	۲.۳.۱. تداخل
۷	۳.۳.۱. نویز
۹	فصل ۲. تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها و سیستم‌های قطعی
۹	۱.۲. مقدمه
۹	۲.۲. توابع مهم ریاضی به‌کاررفته و ارائهٔ دو جدول کاربردی

۳.۲	نمودار فیزوری و طیف خطی	۱۱
۴.۲	سری فوریه	۱۳
۱.۴.۲	تقارن هرمیتی در سری فوریه	۱۶
۲.۴.۲	تقارن هرمیتی و سری فوریه توابع حقیقی	۱۷
۳.۴.۲	نمایش مثلثاتی سری فوریه	۱۸
۵.۲	تبدیل فوریه	۱۸
۱.۵.۲	خواص تبدیل فوریه	۱۹
۲.۵.۲	تبدیل فوریه سیگنال‌های حقیقی	۲۴
۳.۵.۲	تبدیل فوریه سیگنال‌های متناوب و ارتباط میان سری فوریه و تبدیل فوریه یک تابع	۲۵
۶.۲	توان و انرژی سیگنال	۳۰
۷.۲	تابع خودهمبستگی	۳۲
۸.۲	چگالی طیف انرژی	۳۴
۹.۲	تابع خودهمبستگی متوسط زمانی	۳۵
۱۰.۲	چگالی طیف توان	۳۵
۱۱.۲	نگاهی دقیق‌تر به $\tilde{R}_x(\tau)$ برای سیگنال‌های توان	۳۸
۱۲.۲	تابع همبستگی متقابل	۴۱
۱.۱۲.۲	چند قاعده	۴۲
۱۳.۲	مسائل فصل ۲	۴۴
فصل ۳. اعوجاج و جبران‌سازی		
۱.۳	مقدمه	۴۹
۲.۳	مفهوم انتقال بدون اعوجاج	۴۹
۳.۳	انتقال بدون اعوجاج در سیگنال‌های میان‌گذر	۵۲
۴.۳	اعوجاج غیرخطی	۵۳
۱.۴.۳	به‌دست‌آوردن معیاری برای کمی‌سازی اعوجاج غیرخطی	۵۴
۵.۳	جبران‌سازی	۵۶
۱.۵.۳	تحقق فیلتر $H_{eq}(f)$ به‌وسیله فیلتر عرضی	۵۷
۶.۳	استفاده از فیلتر عرضی برای مقابله با اعوجاج چندمسیره	۵۸
۷.۳	مسائل فصل ۳	۶۳

۶۵	نمونه برداری از سیگنال های باند محدود	فصل ۴
۶۵	مقدمه	۱.۴
۶۶	سیگنال باند محدود	۲.۴
۶۶	قضیه نمونه برداری	۱.۲.۴
۶۷	عکس قضیه نمونه برداری (بازسازی سیگنال نمونه برداری شده)	۲.۲.۴
۶۹	اثبات عکس قضیه نمونه برداری (بازسازی سیگنال نمونه برداری شده)	۳.۲.۴
۷۱	نمایش و خواص سیگنال های باند میانی و باند پایه	۳.۴
۷۱	سیگنال باند پایه	۱.۳.۴
۷۱	سیگنال باند میانی	۲.۳.۴
۷۲	تبدیل هیلبرت	۳.۳.۴
۷۴	سیگنال معادل باند پایه	۴.۳.۴
۷۵	نگاهی دیگر به سیگنال معادل باند پایه	۵.۳.۴
۷۷	انرژی سیگنال باند میانی و ارتباط آن با سگینال معادل باند پایه	۶.۳.۴
۸۰	عبور سیگنال باند میانی از سیستم LTI باند میانی	۷.۳.۴
۸۰	تعریف سیستم باند میانی	۱.۷.۳.۴
۸۲	مسائل فصل ۴	۴.۴
۸۵	احتمال و متغیرهای تصادفی	فصل ۵
۸۵	مقدمه	۱.۵
۸۵	احتمال	۲.۵
۸۵	فضای نمونه ای	۱.۲.۵
۸۶	پیشامد	۲.۲.۵
۸۶	اصول اساسی احتمال	۳.۲.۵
۸۸	احتمال شرطی	۴.۲.۵
۸۹	قانون بیز	۵.۲.۵
۹۰	قانون احتمال کل	۶.۲.۵
۹۱	استقلال دو پیشامد تصادفی	۷.۲.۵
۹۱	مفهوم کلی متغیر تصادفی	۳.۵
۹۲	متغیر تصادفی گسسته	۴.۵
۹۲	تابع جرم احتمال	۱.۴.۵

۹۲	تابع توزیع تجمعی	۲.۴.۵
۹۴	امید ریاضی	۳.۴.۵
۹۴	واریانس و گشتاورها	۴.۴.۵
۹۵	توزیع‌های گسسته پرکاربرد	۵.۵
۹۷	نامساوی چبیشف	۶.۵
۹۷	متغیرهای تصادفی گسسته توأم	۷.۵
۹۹	متغیر تصادفی پیوسته	۸.۵
۱۰۰	تابع چگالی احتمال	۱.۸.۵
۱۰۰	تابع توزیع تجمعی	۲.۸.۵
۱۰۱	تابع چگالی احتمال توأم	۳.۸.۵
۱۰۲	امید ریاضی و واریانس یک متغیر تصادفی پیوسته	۴.۸.۵
۱۰۲	کواریانس	۵.۸.۵
۱۰۳	تابع مشخصه	۶.۸.۵
۱۰۴	تبدیل متغیرهای تصادفی	۷.۸.۵
۱۰۵	توزیع‌های پیوسته پرکاربرد	۹.۵
۱۱۰	قضیه حد مرکزی و قانون اعداد بزرگ	۱۰.۵
۱۱۰	قضیه حد مرکزی	۱.۱۰.۵
۱۱۱	قانون ضعیف اعداد بزرگ	۲.۱۰.۵
۱۱۱	مسائل فصل ۵	۱۱.۵
۱۱۵	فصل ۶. سیگنال‌ها و فرایندهای تصادفی	
۱۱۵	مقدمه	۱.۶
۱۱۵	تعریف و مفهوم فرایند تصادفی	۲.۶
۱۱۷	خصوصیات آماری فرایندهای تصادفی	۳.۶
۱۱۷	توابع توزیع تجمعی و چگالی احتمال	۱.۳.۶
۱۱۸	توابع توزیع تجمعی و چگالی احتمال توأم	۲.۳.۶
۱۱۹	تابع متوسط، تابع خودهمبستگی و تابع اتوکواریانس	۳.۳.۶
۱۲۲	واریانس، ضریب خودهمبستگی و تابع همبستگی متقابل	۴.۳.۶
۱۲۶	مفاهیم تعامد، ناهمبستگی و استقلال در فرایندهای تصادفی	۵.۳.۶
۱۲۶	فرایندهای تصادفی مختلط و تعریف توابع همبستگی برای آن‌ها	۶.۳.۶

۱۲۷	فرایندهای تصادفی نرمال	۴.۶
۱۲۸	فرایندهای تصادفی ایستاد	۵.۶
۱۲۸	فرایند ایستاد به مفهوم اکید	۱.۵.۶
۱۲۹	فرایند ایستاد به مفهوم وسیع	۲.۵.۶
۱۳۱	فرایندهای توأم ایستاد	۳.۵.۶
۱۳۱	فرایند ایستاد دوری	۴.۵.۶
۱۳۲	فرایندهای تصادفی ارگودیک	۶.۶
۱۳۳	خصوصیات طیفی فرایندهای تصادفی	۷.۶
۱۳۳	توان و انرژی فرایندهای تصادفی	۱.۷.۶
۱۳۶	چگالی طیفی توان فرایندهای تصادفی	۲.۷.۶
۱۳۷	عبور فرایندهای تصادفی از سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان	۸.۶
۱۴۳	فرایندهای تصادفی سفید و نویز حرارتی	۹.۶
۱۴۳	فرایند تصادفی سفید	۱.۹.۶
۱۴۴	نویز حرارتی	۲.۹.۶
۱۴۵	پهنای باند نویز معادل	۱۰.۶
۱۴۶	فرایندهای تصادفی میان‌گذر	۱۱.۶
۱۴۹	وابستگی و استقلال فرایندهای $X_c(t)$ و $X_s(t)$	۱.۱۱.۶
۱۵۱	مسائل فصل ۶	۱۲.۶
۱۵۵	فصل ۷. مدولاسیون دامنه	
۱۵۵	مقدمه‌ای بر مدولاسیون	۱.۷
۱۵۶	مدولاسیون دامنه (AM معمولی)	۲.۷
۱۵۷	بررسی مدولاسیون دامنه در حوزه فرکانس	۱.۲.۷
۱۵۹	تحلیل توان ارسالی در مدولاسیون AM	۲.۲.۷
۱۶۱	مدولاسیون دوکناربندی با حامل حذف‌شده (DSB)	۳.۷
۱۶۱	طیف سیگنال DSB	۴.۷
۱۶۳	پیاده‌سازی مدولاتورهای AM و DSB	۵.۷
۱۶۳	مدولاتور حاصل ضربی	۱.۵.۷
۱۶۴	تحقق مدولاتور دامنه با استفاده از عناصر غیرخطی	۲.۵.۷
۱۶۶	مدولاتور کلیدزنی (سوئیچینگ)	۳.۵.۷

۱۶۸	آشکارسازی سیگنال‌های AM و DSB	۶.۷
۱۶۸	آشکارساز پوش برای مدولاسیون AM	۱.۶.۷
۱۶۹	آشکارساز هم‌زمان AM و DSB (حاصل‌ضربی)	۲.۶.۷
۱۷۲	یادآوری تبدیل هیلبرت	۷.۷
۱۷۴	مدولاسیون دامنه با باند کناری حذف‌شده	۸.۷
۱۷۵	مدولاسیون تک‌کناری (SSB)	۱.۸.۷
۱۷۹	مدولاسیون VSB	۲.۸.۷
۱۸۰	نمایش سیگنال VSB در حوزه‌ی زمان	۳.۸.۷
۱۸۲	تولید و آشکارسازی سیگنال‌های SSB	۹.۷
۱۸۲	مدولاتور تغییر فاز	۱.۹.۷
۱۸۳	مدولاتور SSB ویور	۲.۹.۷
۱۸۶	آشکارساز حاصل‌ضربی برای سیگنال SSB	۱۰.۷
۱۸۸	مسائل فصل ۷	۱۱.۷

۱۹۳	فصل ۸. مدولاسیون زاویه‌ای	
۱۹۳	مقدمه	۱.۸
۱۹۴	زاویه‌ی لحظه‌ای، فاز لحظه‌ای و فرکانس لحظه‌ای	۲.۸
۱۹۴	مدولاسیون PM	۳.۸
۱۹۴	شکل موج مدوله‌شده PM در حوزه‌ی زمان	۱.۳.۸
۱۹۵	مدولاسیون FM	۴.۸
۱۹۵	شکل موج مدوله‌شده FM در حوزه‌ی زمان	۱.۴.۸
۱۹۶	ساخت مدولاتور و دمدولاتور PM و FM از روی هم	۵.۸
۱۹۸	چند تفاوت عمده میان مدولاسیون‌های خطی و نمایی	۶.۸
۱۹۹	مدولاسیون PM و FM باند باریک	۷.۸
۲۰۲	تحلیل مدولاسیون‌های PM و FM برای سیگنال‌های پیام تک‌آهنگ	۸.۸
۲۰۲	مدولاسیون PM و FM باند باریک و تک‌آهنگ	۱.۸.۸
۲۰۴	مدولاسیون PM و FM غیرباند باریک و تک‌آهنگ	۹.۸
۲۰۴	پیش‌نیاز ریاضی: توابع مولد بسل	۱.۹.۸
۲۰۵	ادامه‌ی بحث درباره‌ی مدولاسیون زاویه‌ای باند باریک	۲.۹.۸
۲۰۶	تحلیل دقیق‌تر رابطه (۳۷.۸) و بحث درباره‌ی توابع بسل	۱۰.۸

۲۱۳	۱۱.۸	مدولاسیون FM دوآهنگ و چندآهنگ
۲۱۳	۱.۱۱.۸	مدولاسیون FM دوآهنگ
۲۱۴	۲.۱۱.۸	مدولاسیون FM چندآهنگ
۲۱۵	۱۲.۸	تخمین پهنای باند سیگنال FM
۲۱۵	۱.۱۲.۸	تخمین پهنای باند FM تک‌آهنگ
۲۱۷	۲.۱۲.۸	تخمین پهنای باند FM در حالت کلی
۲۱۸	۱۳.۸	مقایسه میان مدولاسیون دامنه و مدولاسیون زاویه‌ای
۲۱۸	۱.۱۳.۸	مقایسه تأثیر نویز در مدولاسیون دامنه و مدولاسیون زاویه‌ای
	۲.۱۳.۸	مقایسه مقاومت مدولاسیون دامنه و مدولاسیون زاویه‌ای در برابر اعوجاج
۲۲۰		غیرخطی
۲۲۲	۱۴.۸	روش‌های تولید سیگنال‌های FM و PM
۲۲۲	۱.۱۴.۸	روش مستقیم تولید FM با استفاده از VCO
۲۲۴	۲.۱۴.۸	مدولاتورهای FM و PM غیرمستقیم
۲۲۵	۱.۲.۱۴.۸	مدولاتور FM غیرمستقیم
۲۲۹	۱۵.۸	روش‌های آشکارسازی سیگنال FM
۲۳۰	۱.۱۵.۸	تبدیل FM به AM به وسیله مشتق‌گیر
۲۳۰	۲.۱۵.۸	آشکارساز انتقال فاز
۲۳۲	۱۶.۸	مسائل فصل ۸
۲۳۷		پاسخ گزیده‌ای از مسائل
۲۴۹		منابع
۲۵۱		واژه‌نامه انگلیسی-فارسی
۲۵۵		واژه‌نامه فارسی-انگلیسی
۲۵۹		نمایه

پیشگفتار

مخاطبان این کتاب دانشجویان دوره کارشناسی مهندسی برق و نیز دانشجویان دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابراتند. مفاهیم پایه و اساسی در تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها و کاربردهای این مفاهیم در طراحی و تحلیل مهندسی سیستم‌های مخابراتی آنالوگ در این کتاب بحث و بررسی می‌شود. هرچند منابع بسیاری درباره مبانی سیستم‌های مخابراتی موجودند و برخی از آن‌ها نیز به خوبی به فارسی ترجمه شده‌اند، با این حال، اگر نویسنده بر این باور نبود که به رویکردی متفاوت و جدید در تدریس مبانی سیستم‌های مخابراتی نیاز است، قطعاً این کتاب را به نگارش در نمی‌آورد. به عبارتی، هدف از نگارش این کتاب تهیه متنی بود که نویسنده علاقه داشت در زمان تحصیل در دوره کارشناسی مهندسی برق مطالعه کند؛ متنی که با به کارگیری آن دانشجویان رشته مهندسی برق بتوانند خیلی سریع و با زبانی ساده و با رویکردی متفاوت مفاهیم اصلی و مبانی شاخه مخابرات را درک کنند، بدون اینکه از ظرافت‌های ضروری و لازم در مبانی ریاضی یا اثبات‌های تحلیلی برای انتقال مفاهیم اساسی، که ناگزیر با نظریه مخابرات آمیخته است، چشم‌پوشی شده باشد.

آنچه این اثر را از آثار مشابه متمایز می‌کند اتخاذ روش آموزشی تا حدی متفاوت و جدید نسبت به روش مرسوم پیشین در مراجع متعارف برای آموزش مفاهیم پایه‌ای سیستم‌های مخابراتی است. تا حد امکان سعی شده است به حاشیه‌های غیرضروری و گاهی گمراه‌کننده پرداخته نشود. از این رو، پیش از طرح مباحث پیشرفته، ابتدا پیش‌نیازهای ریاضی و تحلیلی ارائه شده است. ترتیب ارائه مطالب به گونه‌ای است که مباحث از مفاهیم ساده‌تر و پایه‌ای شروع شده و به تدریج مفاهیم پیشرفته‌تر به همراه اثبات‌های ریاضی و تحلیلی مطرح شده است. به زعم نویسنده، چنین رویکردی موجب آسان‌شدن فرایند یادگیری مفاهیم پایه‌ای و اصلی در سیستم‌های مخابراتی می‌شود. در پایان هر فصل، تمرین‌هایی ارائه شده است که هدف آن‌ها کمک به یادگیری مفاهیم اصلی ارائه شده در کتاب است. پاسخ‌گرفته‌ای از مسائل در پایان کتاب آورده شده است. همچنین نکات مهم و کاربردی در هر فصل ارائه شده و اثبات‌های تحلیلی، هر جا که لازم بوده، آورده شده است.

کتاب حاضر افزون‌بر آنکه پاسخگوی نیازهای دانشجویان درس «اصول سیستم‌های مخابراتی» (یا همان درس مخابرات ۱) در همه گرایش‌های دوره کارشناسی مهندسی برق است، به نیازهای فراتر از این دوره، یعنی فراگیری مبانی نظری متغیرها و فرایندهای تصادفی برای فعالیت‌های پژوهشی در دوره کارشناسی ارشد و دکتری در زمینه مهندسی مخابرات گرایش سیستم، نیز پاسخی کاملاً مناسب

می‌دهد. به‌طور دقیق‌تر، فصل‌های ۵ و ۶ کتاب اگرچه برای دانشجویان دوره کارشناسی قابل استفاده است و جزء سرفصل‌های مصوب درس « اصول سیستم‌های مخابراتی » نیز به‌شمار می‌آید، برای دانشجویان دوره کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم نیز مفید است. فصل ۶ کتاب دربرگیرنده مباحث پیشرفته‌ای از فرایندهای تصادفی است که مخاطب آن عمدتاً دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری در شاخه مخابرات سیستم هستند. از آنجا که مفاهیم پایه‌ای ارائه‌شده در این کتاب شیوه کارکرد سیستم‌های متعارف مخابراتی مانند مدولاسیون‌های AM و FM را تشریح می‌کند، این کتاب به‌نوعی پیش‌نیاز ورود به مباحث مربوط به مخابرات دیجیتال است و، از این‌رو، مطالعه آن، پیش از ورود به مباحث یادشده، توصیه می‌شود.

کتاب حاضر زاینده کلاس‌های درس اصول سیستم‌های مخابراتی نویسنده در دانشگاه شهید بهشتی است و متن و محتوای آن طی هفت سال گذشته به‌تدریج کامل شده است. شایسته است در اینجا از همه همکاران، دوستان و دانشجویان عزیزی که طی این مدت با حمایت و تشویق اینجانب آماده‌سازی و چاپ این کتاب را ممکن ساختند صمیمانه تشکر و قدردانی کنم. از همکاران انتشارات دانشگاه شهید بهشتی به‌ویژه سرکار خانم آذر مه‌سنجری، معاون انتشارات دانشگاه، برای همکاری ارزنده‌شان با نویسنده در انتشار کتاب صمیمانه قدردانی می‌شود. از دانشجویان دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی، آقایان وحید فضل‌الله‌زاده، حسن عباسی، محمود علیپور، بهنام مهدوی، حسام اسکندری، علی عبدی، محمد کریمی و محمدجواد صابر و خانم‌ها سارا اکبرزاده، نازنین مجیدی و زهرا احدی، برای همکاری با نویسنده در تایپ دست‌نوشته‌ها، ترسیم برخی از شکل‌ها و نیز غلط‌گیری نسخه‌های اولیه متن صمیمانه سپاسگزارم؛ و به‌ویژه از سرکار خانم نازنین مجیدی که در آماده‌سازی نهایی متن و به‌انجام‌رساندن کار همکاری مؤثری داشته است قدردانی می‌کنم. از همسر صبورم که همواره پشتیبان و مشوق فعالیت‌های علمی و پژوهشی اینجانب بوده است نهایت سپاسگزاری را دارم.

تلاش بسیار شد تا متن بدون ایراد باشد، با این‌حال، متن خالی از ایراد نیست. کتاب حاضر به دانشجویان و دانش‌پژوهان رشته مهندسی برق و علاقه‌مندان به شاخه مهندسی مخابرات پیشکش می‌شود.

سیدمحمدسجاد صدوق

تیر ۱۳۹۶

نشانه‌های اختصاری

AM	Amplitude Modulation
CDF	Cumulative Distribution Function
DC	Direct Current
DSB	Double Sideband
DSB-SC	Double Sideband Suppressed Carrier
FM	Frequency Modulation
i.i.d	independent and identically distributed
LO	Local Oscillator
LSSB	Lower Single Sideband
LTI	Linear Time-Invariant
PDF	Probability Density Function
PM	Phase Modulation
PMF	Probability Mass Function
PSD	Power Spectral Density
RF	Radio Frequency
RV	Random Variable
SNR	Signal to Noise Ratio

SSB Single Sideband
SSS Strict-Sense Stationary
THD Total Harmonic Distortion
USSB Upper Single Sideband
VCO Voltage-Controlled Oscillator
VSB Vestigial Sideband
WLLN Weak Law of Large Numbers
WSS Wide-Sense Stationary

فصل ۱

تعاریف اولیه

۱.۱. مقدمه

بشر از بدو خلقت موجودی اجتماعی و نیازمند به تعامل و برقراری ارتباط با همنوعان و اطرافیان خود بوده است. یکی از مصادیق تعامل بشر با همنوعان و محیط پیرامون خود اطلاع‌رسانی و پیام‌رسانی است. پیام‌رسانی در شکل اولیه خود با به‌کارگیری از طبل و با برافروختن آتش برای جلب توجه و اطلاع‌رسانی صورت می‌گرفت. این نیاز ذاتی موجب شد استعداد بشر در این زمینه به‌کار گرفته شود و به تدریج شکوفا شود به طوری که، در سال ۱۸۳۸، ساموئل مورس نخستین پیام تلگرافی خود را بر روی یک خط شانزده کیلومتری ارسال کرد و به این ترتیب دورانی جدید آغاز شد [۱]. حدود چهل سال پس از آن، یعنی در سال ۱۸۷۶، الکساندر گراهام بل تلفن را اختراع کرد [۲]. اختراع اولیه گراهام بل به تدریج تکمیل شد (و این روند همچنان ادامه دارد) تا اینکه در سال ۱۹۱۵ نخستین مکالمه تلفنی بین‌قاره‌ای برقرار شد.

اکنون، پس از گذشت یک قرن و نیم، مخابرات و در یک دید کلی تر فناوری اطلاعات و ارتباطات به یکی از ملزومات و بخش‌های ناگسستنی در زندگی روزمره بشر تبدیل شده است. خدمات نوین مخابراتی بی‌سیم و چندرسانه‌ای تقریباً به صورت روزمره به بازار مصرف عرضه می‌شود و نیاز بشر به خدمات مخابراتی با کیفیت و با نرخ ارسال و دریافت بالاتر رو به افزایش است. تلفن‌های همراه و شبکه‌های ارتباطی بی‌سیم از بارزترین نمادهای اقبال به سیستم‌های مخابرات بی‌سیم به حساب می‌آیند. باید توجه داشت که پیشرفت‌های شگرف در صنعت مخابرات، از یک سو، به میزان قابل توجهی مرتبط با پیشرفت‌های مداوم در فناوری الکترونیک و میکروالکترونیک است و، از سوی دیگر، مدیون یافته‌های نظری دانشمندان آن حوزه است. به عبارتی، پیشرفت‌های مربوط به حوزه ساخت قطعات الکترونیکی و روش‌های پردازش سیگنال ارائه‌شده در حوزه نظری دو رکن اساسی در پیشرفت سیستم‌های نوین مخابراتی به حساب می‌آیند.