

اصول و مبانی سیستم‌های مخابراتی

واستفاده

1600775 1397/03/08

اصول و مبانی سیستم‌های

کتابخانه ملی

و خراسانی



دکتر سید محمد سجاد صدوق



۶۵۵

مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی

اصول و مبانی سیستم‌های مخابراتی

سیدمحمدسجاد صدوق

ویراستار: سمیه هاشمی

طراح جلد: آرمان خرمک

ناظر چاپ: صفر ممیزاد

چاپ اول: ۱۳۹۶

شمارگان: ۵۰۰

قیمت: ۲۰۰۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای دانشگاه شهید بهشتی محفوظ است.

سرشناسه	صدوق، سید محمدسجاد، ۱۳۵۷-
عنوان و نام پدیدآور:	اصول و مبانی سیستم‌های مخابراتی / سیدمحمدسجاد صدوق.
مشخصات نشر:	تهران: انتشارات شهید بهشتی، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری:	هجده، ۲۰: تصاویر؛ مصور، جلد، نمودار.
فروست:	مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی؛ ۶۵۵
شابک:	۹۷۸۹۶۴۴۵۷۳۹۱۰
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیا
یادداشت:	واژه‌نامه؛ کتابنامه؛ نمایه.
موضوع:	مخابرات -- سیستم‌ها؛ Telecommunication systems؛ مخابرات -- سیستم‌ها -- ریاضیات؛ Telecommunication systems -- Mathematics
شناسه افزوده:	دانشگاه شهید بهشتی
رده‌بندی کنگره:	۱۳۹۶ الف۴ص/۱۰۱ TK۵۱۰
رده‌بندی دیویی:	۶۲۱/۳۸۲
شماره کتابشناسی ملی:	۴۷۷۰۴۵۵

کد ناشر ۱۰۰۱۷۳۴

www.pub.sbu.ac.ir

unipress@mail.sbu.ac.ir

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 به کاررفته و ارائه دو جدول کاربردی

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

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	سیگنال معادل باند پایه	۵.۳.۴
۷۷	انرژی سیگنال میانی و ارتباط آن با سیگنال معادل باند پایه	۶.۳.۴
۸۰	عبور سیگنال باند میانی از سیستم LTI باند میانی	۷.۳.۴
۸۰	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

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

۱۲۷	فرایندهای تصادفی نرمال	۴.۶
۱۲۸	فرایندهای تصادفی ایستان	۵.۶
۱۲۸	فرایند ایستان به مفهوم اکید	۱.۵.۶
۱۲۹	فرایند ایستان به مفهوم وسیع	۲.۵.۶
۱۳۱	فرایندهای توأماً ایستان	۳.۵.۶
۱۳۱	فرایند ایستان دوری	۴.۵.۶
۱۳۲	فرایندهای تصادفی ارگودیک	۶.۶
۱۳۳	خواصیات طیفی فرایندهای تصادفی	۷.۶
۱۳۳	توان و انرژی فرایندهای تصادفی	۱.۱.۶
۱۳۶	جگالی طیفی توان فرایندهای تصادفی	۲.۱.۶
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	۱.۱۰.۶
۱۴۶	فرایندهای تصادفی میان‌گذر	۱.۱۱.۶
۱۴۹	وابستگی و استقلال فرایندهای $X_s(t)$ و $X_c(t)$	۱.۱۱.۶
۱۵۱	مسائل فصل ۶	۱.۱۲.۶

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	پیاپی‌سازی مدولاتورهای AM و DSB	۵.۷
۱۶۳	مدولاتور حاصل‌ضربی	۱.۵.۷
۱۶۴	تحقق مدولاتور دامنه با استفاده از عناصر غیرخطی	۲.۵.۷
۱۶۶	مدولاتور کلیدزنی (سوئیچینگ)	۳.۵.۷

۱۶۸	۶.۷	آشکارسازی سیگنال‌های AM و DSB
۱۶۸	۱.۶.۷	آشکارساز پوش برای مدولاسیون AM
۱۶۹	۲.۶.۷	آشکارساز هم‌زمان DSB و AM (حاصل‌ضربی)
۱۷۲	۷.۷	یادآوری تبدیل هیلبرت
۱۷۴	۸.۷	مدولاسیون دامنه با باند کناری حذف‌شده
۱۷۵	۱.۸.۷	مدولاسیون تک‌کناربندی (SSB)
۱۷۹	۲.۸.۷	مدولاسیون VSB
۱۸۰	۳.۸.۷	نمایش سیگنال VSB در حوزه زمان
۱۸۲	۹.۷	تئیه آشکارسازی سیگنال‌های SSB
۱۸۲	۱.۷	مدولاتور تغییر فاز
۱۸۳	۱.۹.۷	مدولاتور SSB ویور
۱۸۶	۱۰.۷	آشکارساز حاصل‌ضربی برای سیگنال SSB
۱۸۸	۱۱.۷	مسائل فصل ۷
۱۹۳	۸	فصل ۸. مدولاسیون زاویه‌ای
۱۹۳	۱.۸	مقدمه
۱۹۴	۲.۸	زاویه لحظه‌ای، فاز لحظه‌ای و فرکانس لحظه‌ای
۱۹۴	۳.۸	مدولاسیون PM
۱۹۴	۱.۳.۸	شکل موج مدوله‌شده PM در حوزه زمان
۱۹۵	۴.۸	مدولاسیون FM
۱۹۵	۱.۴.۸	شکل موج مدوله‌شده FM در حوزه زمان
۱۹۶	۵.۸	ساخت مدولاتور و دمدولاتور PM و FM از روی هم
۱۹۸	۶.۸	چند تفاوت عمده میان مدولاسیون‌های خطی و نمایی
۱۹۹	۷.۸	مدولاسیون PM و FM باند باریک
۲۰۲	۸.۸	تحلیل مدولاسیون‌های PM و FM برای سیگنال‌های پیام تک‌آهنگ
۲۰۲	۱.۸.۸	مدولاسیون PM و FM باند باریک و تک‌آهنگ
۲۰۴	۹.۸	مدولاسیون PM و FM غیرباند باریک و تک‌آهنگ
۲۰۴	۱.۹.۸	پیش‌نیاز ریاضی: توابع مولد بسل
۲۰۵	۲.۹.۸	ادامه بحث درباره مدولاسیون زاویه‌ای باند باریک
۲۰۶	۱۰.۸	تحلیل دقیق‌تر رابطه (۳۷.۸) و بحث درباره توابع بسل

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
۲۱۸	۲.۱۳.۸. مقایسه مقاومت مدولاسیون دامنه و مدولاسیون زاویه‌ای در برابر اعوجاج
۲۲۰	غیرخطی
۲۲۲	۱۴.۸. روش‌های تولید امواج FM و PM
۲۲۲	۱.۱۴.۸. روش تولید FM با استفاده از VCO
۲۲۴	۲.۱۴.۸. مدولاترهای PM غیرمستقیم
۲۲۵	۱.۲.۱۴.۸. مدولاتر 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 مخابرات اند. 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 به‌خوبی 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 است که نویسنده علاقه داشت در زمان تحصیل در دوره کارشناسی مهندسی برق مطالعه کند؛ متنی که با به کارگیری این 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 کمربنده پرداخته نشود. از این رو، پیش از طرح مباحث پیشرفته، ابتدا پیش‌نیازهای ریاضی و تحلیلی ارائه شده است. ترتیب ارائه مطالب به‌گونه‌ای است که مباحث از مفاهیم ساده‌تر و پایه‌ای شروع شده و به تدریج مفاهیم پیشرفته‌تر به‌همراه اثبات‌های ریاضی و تحلیلی مطرح شده است. به‌زعم نویسنده، چنین رویکردی موجب ساده‌تر شدن 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 ارائه‌شده 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 عزیز 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 آذرمه سنجر و 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، محمد علیپور، بهنام مهدوی، حسام اسکندری، علی عبدی، محمد کریمی و محمدجواد صابر و خانم‌ها سارا اکبرزاد، نازنین مجیدی و زهرا احدی، برای همکاری با نویسنده در تایپ دست‌نوشته‌ها، ترسیم برخی از شکل‌ها و درج عناوین 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