

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشگاه تربیت مدرس رجائی

مقدمه ای بر

مخابرات دیجیتال

و کاربردهای آن

تألیف:

شهریار شیروانی مقدم

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی

سر شناسه:	شیروانی مقدم، شهریار، ۱۳۴۸
عنوان و نام پدید آور:	مقدمه ای بر مخابرات دیجیتال و کاربردهای آن / مؤلف: شهریار شیروانی مقدم
مشخصات نشر:	تهران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۸۷.
مشخصات ظاهری:	۲۲۸ ص
شابک:	۹۷۸-۹۶۴-۲۶۵۱-۱۴-۶
وضعیت فهرست نویسی:	فیفا
موضوع:	مخابرات
موضوع:	ارتباطات رقمی
شناسنامه افزوده:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
رده بندی کنگره:	TK۵۱۰۱ / ش۹م۱۳۸۷۷
رده بندی دیویی:	۶۲۱/۳۸۲
شماره کتابشناسی ملی:	۱۲۰۵۸۰۵



دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان:	مقدمه ای بر مخابرات دیجیتال و کاربردهای آن
تألیف:	شهریار شیروانی مقدم
چاپ دوم:	تابستان ۱۳۹۲
کارشناسان چاپ:	محمد معتمدی نژاد، نیره فیروزی
ناشر:	انتشارات دانشگاه شهید رجائی
لیتوگرافی:	نگین سبز
چاپ:	برهان
ویراستار ادبی:	نصرت الله شیروانی مقدم
ناظر فنی:	شهرام طهماسبی
شمارگان:	۵۰۰
قیمت:	۹۰۰۰ تومان
شابک:	ISBN: ۹۷۸-۹۶۴-۲۶۵۱-۱۴-۶

کلیه حقوق این اثر برای مؤلف و دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی محفوظ است.
نشانی: تهران، لویزان، کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۸۵، تلفن: ۲۲۹۷۰۰۶۰-۹
نمابر: ۲۲۹۷۰۰۰۳، پست الکترونیکی: publish@srctu.edu، وب سایت: <http://publish.srctu.edu>

تقدیم به:

ہمسرم

کہ بی شک بدون کمک او تالیف این کتاب به آخر نمی رسید.

و فرزندانم:

کیاکسار

و

کی ناز

جایگاه مخابرات دیجیتال و اهمیت آن بر هیچ کس پوشیده نیست و وجود سیستم‌ها و خدمات مخابراتی و ارتباطی گوناگون؛ نظیر سیستم‌های مخابراتی با سیم شهری، سیار سلولی، ماهواره‌ای، پخش رادیویی و تلویزیونی دیجیتال و شبکه‌های اطلاع‌رسانی جهانی، نشان‌دهنده‌ی جایگاه ویژه‌ی این گونه سیستم‌هاست. برنامه‌های تحقیقاتی مراکز پژوهشی، دانشگاهی و صنعتی دنیا و موضوعات مقالات علمی، و نیز پایان‌نامه‌های دانشجویان مقاطع مختلف مخابرات و الکترونیک، ما را بر آن می‌دارد تا با جدیت بیشتر مقدمات و اصول مخابرات دیجیتال را فراگیریم.

نبرد کتابی فارسی که بتواند مطالب را به زبان ساده بیان کند و ارتباطی منطقی بین موضوعات آن و نیز اصول و مفاهیم پایه‌ی آن در مخابرات دیجیتال ایجاد نماید، مقدمات ورود به این بحث و محورهای اساسی آن را فراهم سازد و نیز روابط و معیارهای ارزیابی و مقایسه‌ی آن را با اشاره‌ی اجمالی به روابط ریاضی و اثبات آنها بیان دارد، مؤلف را بر آن داشت تا این مهم را به انجام رساند. در این راستا، موضوعات مطرح شده در این کتاب حول چهار محور زیر متمرکز است:

1. مروری بر مخابرات آنالوگ و لزوم دیجیتال شدن سیستم‌ها.
 2. نظریه‌ی اطلاعات و کاربردهای آن.
 3. مدولاسیون‌های دیجیتال باند پایه (پالسی) و با حامل.
 4. تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال و انتقال دیجیتال سیگنال‌های آنالوگ.
- استقبال از چاپ نخست این کتاب، مؤلف و انتشارات دانشگاه را بر آن داشت که چاپ دوم کتاب را با اندک تغییراتی نسبت به چاپ اول آن تهیه و منتشر نماید. در چاپ دوم، اشکالات تایپی، نگارشی و محتوایی چاپ اول برطرف شده است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل سیگنال PAM در فصل چهارم و تشریح و مقایسه تکنیک‌های FDM و TDM با جزئیات بیش‌تری در فصل هفتم اضافه شده است. امید است مطالب این کتاب، که حاصل چندین سال مطالعه و تدریس درس مخابرات 2 است و به منظور استفاده‌ی دانش‌پژوهان و علاقه‌مندان به دانش مخابرات تألیف شده است، برای خوانندگان این کتاب مفید باشد. مؤلف کتاب آماده‌ی دریافت نظرات اصلاحی و پیشنهادهای ارزشمند شما، از طریق نشانی الکترونیکی sh_shirvani@srttu.edu است.

در اینجا لازم می‌دانم از زحمات پدر عزیزم که با دقت و حوصله‌ی فراوان ویراستاری ادبی کتاب را بر عهده گرفتند قدردانی نمایم. همچنین از برادرم، مهیار شیروانی مقدم که شکل‌ها و نمودارهای کتاب را تهیه و رسم نمودند، سپاسگزارم.

موفق و پیروز باشید

شهریار شیروانی مقدم

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: مروری بر سیگنال‌ها و سیستم‌ها و مخابرات آنالوگ

- 1-2- تقسیم بندی سیگنال‌ها 5
- 1-1-2- سیگنال‌های حقیقی، موهومی خالص و مختلط 5
- 2-1-2- سیگنال‌های زوج و فرد 6
- 3-1-2- سیگنال‌های متناوب و غیر متناوب 6
- 4-1-2- سیگنال‌های ارادی و تصادفی 7
- 5-1-2- سیگنال‌های انرژی و توان 7
- 6-1-2- سیگنال‌های پیوسته، گسسته و دیجیتال 8
- 2-2- تقسیم بندی سیستم‌ها 8
- 1-2-2- سیستم‌های خطی و غیر خطی 9
- 2-2-2- سیستم‌های تغییر ناپذیر و تغییر پذیر با زمان 9
- 3-2-2- سیستم‌های سببی (علی) و غیر سببی (غیر علی) 9
- 4-2-2- سیستم‌های با حافظه و بدون حافظه 10
- 5-2-2- سیستم‌های وارون پذیر و وارون ناپذیر 10
- 6-2-2- سیستم‌های پایدار و ناپایدار 10
- 3-2- طبقه بندی سیستم‌های مخابراتی 10
- 4-2- معیارهای ارزیابی سیستم‌های مخابراتی 11
- 5-2- بلوک دیاگرام کلی یک سیستم مخابراتی 12
- 6-2- مُدولاسیون و لزوم آن 13
- 7-2- انواع مُدولاسیون آنالوگ و مقایسه‌ی کارایی آنها 15
- 8-2- پرسش‌ها و تمرینات فصل 2 17
- 1-8-2- پرسش‌ها 17
- 2-8-2- تمرینات 18

فصل سوم: بخش های اساسی یک سیستم مخابراتی دیجیتال

- 1-3- مزایای سیستم های دیجیتال نسبت به سیستم های آنالوگ 21
- 2-3- بلوک دیاگرام کلی یک سیستم مخابراتی دیجیتال 22
- 3-3- تشریح بخش های مختلف یک سیستم مخابراتی دیجیتال 23
- 1-3-3- منبع اطلاعات 24
- 2-3-3- کد کننده و دیکد کننده ی منبع 24
- 3-3-3- کد کننده و دیکد کننده ی کانال و در هم نهی اطلاعات 26
- 4-3-3- رمز نگار و رمز گشا 27
- 5-3-3- مدوله کننده و دمدوله کننده 27
- 6-3-3- کانال انتقال مخابراتی 28
- 4-3- پرسش های فصل 3 29

فصل چهارم: نظریه ی اطلاعات و کاربردهای آن

- 1-4- مفهوم ریاضی اطلاعات 32
- 2-4- آنتروپی منبع گسسته 34
- 1-2-4- آنتروپی منبع بدون حافظه 34
- 2-2-4- آنتروپی منبع با حافظه 38
- 3-4- کدینگ و اهداف آن 42
- 4-4- روش های کد بندی منابع گسسته 43
- 1-4-4- کد بندی با طول ثابت 44
- 2-4-4- کد بندی با طول متغیر 45
- 1-2-4-4- کد بندی شانون 47
- 2-2-4-4- کد بندی شانون - فانو 49
- 3-2-4-4- کد بندی هافمن 50
- 4-2-4-4- الگوریتم *Lempel – Ziv* 52
- 5-4- کد بندی کانال و روش های مقابله با اثرات تخریبی کانال 55
- 1-5-4- کدهای قالبی 59
- 1-1-5-4- تعاریف پایه ای مهم در کدهای تصحیح خطا 59

63	..... کدهای قالبی خطی 4-5-1-2
65	..... کد گشایی کدهای قالبی خطی 4-5-1-3
73	..... کدهای چرخشی 4-5-1-4
74	..... کدهای چرخشی بررسی اضافات (CRC) 4-5-1-5
75	..... کدهای BCH 4-5-1-6
76	..... کدهای RS 4-5-1-7
76	..... کدهای کانولوشنی 4-5-2
78	..... نگاهی به رمزنگاری 4-6
80	..... کانال انتقال گسسته 4-7
82	..... انواع آنروپی در یک سیستم مخابراتی 4-7-1
84	..... آنروپی انتقالی و سرعت انتقال اطلاعات 4-7-2
87	..... رابطه ی ظرفیت کانال شانون - هارتلی 4-7-3
91	..... پرسش ها و تمرینات فصل 4 4-8-8
91	..... پرسش ها 4-8-1
93	..... تمرینات 4-8-2

فصل پنجم: انتقال داده ها در باند پایه (مدولاسیون پالسی باند پایه)

97	..... انواع مدولاسیون پالسی 5-1-1
99	..... طرح های سیگنال دهی 5-2-2
102	..... بلوک دیاگرام کلی یک سیستم مخابراتی PAM و تشریح بخش های مختلف آن 5-3
104	..... تداخل بین نمادی (ISI) 5-4-4
105	..... شرط نایکوئیست برای حذف تداخل بین نمادی 5-4-1
105	..... شکل پالس مناسب و پهنای باند PAM 5-4-2
109	..... توابع خودبستگی و چگالی طیفی توان سیگنال PAM 5-5
111	..... رابطه ی احتمال خطا در سیستم PAM 5-6
115	..... تکرار کننده در سیستم PAM 5-7
115	..... تکرار کننده های خطی (آنالوگ) 5-7-1
116	..... تکرار کننده های بازساز (دیجیتال) 5-7-2

117	8-5- کد بندی خط
118	1-8-5- اهداف کد بندی خط
120	2-8-5- انواع کد خط
120	1-2-8-5- کد باینری زوجی
121	2-2-8-5- کد دو قطبی (AMI)
122	3-2-8-5- کد HDBn
123	4-2-8-5- کد mBnT
123	5-2-8-5- مقایسه ی کدهای خطاً باینری زوجی، AMI، HDBn و mBnT
125	6-2-8-5- برخی دیگر از کدهای خط
125	1-6-2-8-5- کد PST
125	2-6-2-8-5- کد BnZS
126	3-6-2-8-5- کدهای Wal1 و Wal2
126	4-6-2-8-5- کد S
126	5-6-2-8-5- کد CMI
127	6-6-2-8-5- کد nB1X
127	9-5- همزمانی ساعت در سیستم های PAM
128	10-5- روش های بازبانی سیگنال ساعت
130	11-5- نمودار چشمی
131	12-5- پرسش ها و تمرینات فصل 5
131	1-12-5- پرسش ها
132	2-12-5- تمرینات

فصل ششم: مدولاسیون دیجیتال با حامل

135	1-6- مقدمه
137	2-6- بلوک دیاگرام کلی یک سیستم مخابراتی با مدولاسیون دیجیتال با حامل
138	3-6- آشکارسازی بهینه و محاسبه ی احتمال خطا
142	4-6- آشکارسازی بهینه با استفاده از مدار همبستگی
144	5-6- احتمال خطا در آشکار سازی بهینه ی مدولاسیون های دیجیتال با حامل

144	.....	1-5-6	مدولاسیون $ASK(OOK)$
146	.....	2-5-6	مدولاسیون PSK
147	.....	3-5-6	مدولاسیون FSK
149	.....	6-6	احتمال خطا در آشکار سازی ناهمدوس مدولاسیون های دیجیتال با حامل
149	.....	1-6-6	آشکار سازی ناهمدوس در مدولاسیون ASK
149	.....	2-6-6	آشکار سازی ناهمدوس در مدولاسیون $DPSK$
150	.....	3-6-6	آشکار سازی ناهمدوس در مدولاسیون FSK
151	.....	7-6	مقایسه ی کارایی مدولاسیون های دیجیتال با حامل در حالت باینری
151	.....	1-7-6	پهنای باند لازم
151	.....	2-7-6	توان مورد نیاز
152	.....	3-7-6	مصونیت در مقابل خرابی های کانال انتقال
152	.....	4-7-6	پیچیدگی تجهیزاتی
153	.....	8-6	روش های مدولاسیون M سطحی
153	.....	1-8-6	بلوک دیاگرام کلی گیرنده در روش های M سطحی
155	.....	2-8-6	روش گرام - اشمیت و بلوک دیاگرام کلی گیرنده
156	.....	3-8-6	طرح سیگنال دهی $MPSK$
159	.....	4-8-6	طرح سیگنال دهی ترکیبی $(MASK / MPSK)$
160	.....	5-8-6	طرح سیگنال دهی $MFSK$
161	.....	9-6	نکاتی چند در انتخاب و کاربرد مدولاسیون های دیجیتال با حامل
163	.....	10-6	پرسش ها و تمرینات فصل 6
163	.....	1-10-6	پرسش ها
164	.....	2-10-6	تمرینات

فصل هفتم: تولید و انتقال دیجیتال سیگنال های آنالوگ

167	.....	1-7	بلوک دیاگرام کلی انتقال دیجیتال سیگنال های آنالوگ
168	.....	2-7	نمونه برداری سیگنال های آنالوگ
171	.....	1-2-7	اثر اعوجاج روزه ای
171	.....	2-2-7	باند محدود نبودن سیگنال و نویز

172	..... ایده آل نبودن فیلتر درون یابی
172	..... کوانتیزاسیون
177	..... سیستم مدولاسیون PCM
178	..... سیستم مدولاسیون Δ
179	..... مقایسه ی سیستم های مدولاسیون PCM و Δ
181	..... مالتی پلکسینگ با تسهیم فرکانسی (FDM) و زمانی (TDM)
182	..... مقایسه ی کارایی سیستم های مالتی پلکسینگ با تسهیم فرکانسی و زمانی
183	..... پرسش ها و تمرینات فصل 7
183	..... پرسش ها
184	..... تمرینات

فصل هشتم: مسائل تکمیلی و تمرینات نرم افزاری

187	..... حل چند مسأله ی نمونه
196	..... مسائلی برای تمرین بیشتر
205	..... تمرینات نرم افزاری

211 مراجع

213 پیوست 1- فهرست علائم اختصاری

217 پیوست 2- جدول تعیین تابع Q

219 واژه نامه ی انگلیسی به فارسی

اهمیت چشمگیر و روز افزون مخابرات به عنوان عاملی جهت برقراری ارتباط و تبادل پیام‌ها و نیز پلی جهت انتقال و اتصال دانش و فرهنگ و تمدن‌ها بر هیچ کس پوشیده نیست. با پیشرفت‌ها و تحولات عظیم در فناوری‌های مخابراتی نظیر: سیستم‌های مخابراتی ماهواره‌ای، سیار، پخش رادیویی و تلویزیونی و سیستم‌های ارتباطی از طریق فیبر نوری و ده‌ها مورد دیگر، این فناوری بر کوتاه کردن فاصله‌ی فیزیکی بین مبدأ و مقصد دست یافته و امکان برخورداری از خدمات مختلف مخابراتی را در جای‌جای این دنیای پهناور فراهم کرده و کره‌ی زمین را به دهکده‌ی جهانی تبدیل نموده است.

پس از جنگ جهانی دوم، مخابرات دیجیتال و تحولات متعاقب آن، وسایل ارتباطی مفیدی را معرفی نموده است و آرزوی دیرینه‌ی بشر را برای برقراری ارتباط و انتقال پیام‌ها، محقق ساخته و هر روز بر تنوع ابزارها، قابلیت‌ها و خدمات ارتباطی و نیز کمیّت و کیفیت آنها افزوده است. در بسیاری از سیستم‌های موجود و نیز به تقریب در تمام کشورهای جهان، درصد بالایی از سیستم‌ها و زیر سیستم‌های مخابراتی و الکترونیکی به صورت دیجیتال و یا در حال تبدیل شدن از آنالوگ به دیجیتال هستند. در کشور ما نیز بخش عمده‌ی سیستم‌های ارتباطی، در کاربردهای نظامی و غیر نظامی (مدنی)، به صورت دیجیتال و یا در مرحله گذار از آنالوگ به دیجیتال هستند. در این راستا، لازم است که این گونه سیستم‌ها شناخته شوند و قابلیت‌ها و توانایی‌ها و نیز برتری آنها نسبت به سیستم‌های آنالوگ مورد مطالعه و توجه و نگرش بیش‌تر واقع شوند. از این رو ضروری است که در بررسی‌ها و مطالعات، سه مقوله‌ی اساسی زیر مدّ نظر قرار گیرند:

1. تولید سیگنال‌های دیجیتال و چگونگی تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال با استفاده از نمونه برداری زمانی و کوانتیزاسیون.
2. پردازش سیگنال‌های دیجیتال، نظیر: فشرده سازی اطلاعات، کنترل، تشخیص و تصحیح خطا، و محرمانه نمودن اطلاعات و مصون نگه داشتن ارتباطات در مقابل استراق سمع و استفاده‌ی غیر مجاز.
3. انتقال دیجیتال با بهره‌گیری از روش‌های باند پایه یا مدولاسیون‌های با حامل.

در همین راستا، کتاب "مقدمه ای بر مخابرات دیجیتال و کاربردهای آن"، جهت آشنایی با ارتباطات دیجیتال و موضوعات مرتبط با آن و ایجاد بستری برای بررسی ها، مطالعات و تحقیقات بیشتر، می تواند آغازی مناسب باشد.

موضوعات مطرح شده در این کتاب، حول پنج محور زیر متمرکز است:

1. مروری بر مخابرات آنالوگ و لزوم دیجیتال شدن سیستم ها.
 2. نظریه ی اطلاعات و کاربردهای آن.
 3. مُدولاسیون های دیجیتال باند پایه.
 4. مُدولاسیون های دیجیتال با حامل.
 5. تبدیل سیگنال های آنالوگ به دیجیتال و انتقال دیجیتال سیگنال های آنالوگ.
- کتاب حاضر مشتمل بر هشت فصل و دو پیوست است. در فصل دوم ضمن مروری بر سیگنال ها و سیستم ها و مخابرات آنالوگ، نکات و پارامترهای کلیدی این سیستم ها مطرح گردیده و در نهایت مُدولاسیون های مختلف آنالوگ (AM ، PM و FM) از نظر پهنای باند، توان مورد نیاز، پیچیدگی تجهیزاتی و نویز پذیری، مقایسه شده اند.

در فصل سوم، نخست مزایای سیستم های دیجیتال نسبت به سیستم های آنالوگ ارائه و ضمن نمایش بلوک دیاگرام کلی یک سیستم مخابراتی دیجیتال، بخش های مختلف آن به طور اجمال تشریح شده است. در پایان فصل سوم انتظار می رود که خواننده لزوم دیجیتال شدن سیستم های مخابراتی را بپذیرد.

فصل چهارم اختصاص به نظریه ی اطلاعات و کاربردهای عمده ی آن دارد. در این فصل با مدل سازی ریاضی اطلاعات و تعریف اطلاعات متوسط موجود در نمادهای یک منبع گسسته، به کاربردهای آن از قبیل: کد بندی منبع، کد بندی کانال و رمز نگاری اشاره شده است. بحث کد بندی منبع با تمرکز بر روی چهار روش کدینگ شانون، شانون - فانو، هافمن و $Lempel - Ziv$ ، و کد بندی کانال، با تمرکز بر روی کدهای قالبی و کانولوشنی، دارای تفصیل بیشتری هستند. در پایان این فصل یک کانال انتقال گسسته مدل شده و رابطه ی ظرفیت کانال شانون - هارتلی به صورت تابعی از پهنای باند و نسبت سیگنال به نویز، ارائه شده است.

در فصل پنجم، مُدولاسیون های پالسی باند پایه، با تمرکز بر روی مُدولاسیون دامنه ی پالس (PAM)، جهت انتقال داده ها در باند پایه، بررسی شده است. در این فصل موضوعاتی از قبیل: طرح های سیگنال دهی، تداخل بین نمادی (ISI) و چگونگی حذف آن، احتمال خطا در PAM ، توابع خودبستگی و چگالی طیفی توان سیگنال PAM ، تکرار کننده ها در انتقال باند

پایه، کد بندی خط و اهداف و انواع آن، همزمانی ساعت در سیستم های *PAM* و چگونگی سنجش نویز، *ISI*، لحظات مناسب نمونه برداری و ... با استفاده از نمودار چشمی، ارائه گردیده است.

فصل ششم به مُدولاسیون دیجیتال با حامل و موضوعات مرتبط پرداخته است. در این فصل با ارائه ی بلوک دیاگرام کلی یک سیستم مخابراتی دارای مُدولاسیون دیجیتال با حامل، سه روش اساسی مُدولاسیون دامنه (*ASK*)، فاز (*PSK*) و فرکانس (*FSK*) مطرح گردیده و رابطه ی احتمال خطا در هر یک از این مُدولاسیون ها، چه در روش های آشکار سازی همزمان و چه غیر همزمان، آورده شده است. روش های مُدولاسیون M سطحی، جهت دستیابی به پهنای باند کم تر (در مُدولاسیون های دامنه و فاز) و یا توان مصرفی کم تر (در مُدولاسیون فرکانس) ارائه و در نهایت مقایسه ای بین سه روش پایه، در دو حالت باینری و چند سطحی، عرضه شده است.

فصل هفتم اختصاص به نحوه ی ایجاد سیگنال های دیجیتال و نیز چگونگی انتقال دیجیتال سیگنال های آنالوگ دارد. در رابطه با این موضوع، نمونه برداری و انواع آن و اثراتی همچون اثر تاخوردگی، اعوجاج روزه ای و ایده آل نبودن فیلترها، مطرح شده است. در قدم دوم از فرآیند دیجیتال نمودن سیگنال آنالوگ، کوانتیزاسیون و استانداردهای مطرح آن مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی اجمالی دو نوع مُدولاسیون *PCM* و Δ ، اشاره ای به انتقال دیجیتال سیگنال های آنالوگ شده و بین این روش ها مقایسه ای صورت گرفته است. در انتهای این فصل، روش های مالتی پلکسینگ با تسهیم زمانی (*TDM*) و مالتی پلکسینگ با تسهیم فرکانسی (*FDM*) تشریح و مزایا و معایب هر یک آورده شده است. همچنین، این دو نوع تکنیک از پنج نظر با یکدیگر مقایسه شده اند.

در پایان فصل ها، تمرین ها و پرسش هایی آورده شده است، که ضمن ایجاد یک انسجام موضوعی، در دریافت مطالب مورد مطالعه و جمع بندی اهداف مطرح شده در هر یک از این فصل ها، موجب می شود که عمده ی مطالب هر فصل با جزئیات بیشتری در تمرینات برجسته شود. علاوه بر این، در فصل آخر (فصل هشتم)، تعدادی مسأله و حل بعضی از آنها آمده است، که هدف مؤلف، ارائه ی برخی از مفاهیم و موضوعات مخابرات دیجیتال، در قالب این مسائل است. علاوه بر این، برای تحقق نرم افزاری و شبیه سازی یازده موضوع مرتبط با مخابرات دیجیتال، تمرینات نرم افزاری مناسبی طرح شده و در فصل هشتم گنجانده شده است که هدف، تحقق آنها در بسته نرم افزاری *MATLAB* است.

پس از هشت فصل کتاب، دو پیوست دیده می شود که پیوست اول، در بر گیرنده ی علائم اختصاری به کار رفته در کتاب و پیوست دوم، با معرفی دو تابع Q و erf جهت محاسبه ی احتمال خطا، شامل جدول تعیین تابع Q است.

در خاتمه، مراجع و منابعی که در تدوین این کتاب مورد استفاده قرار گرفته است معرفی شده است. منابع متعددی در این زمینه به زبان انگلیسی به چاپ رسیده و تعداد محدودی از آنها نیز به فارسی ترجمه شده است که هر یک از آنها ویژگی های خود را دارد و برخی از آنها نیز به یک یا چند موضوع توجه خاص تری نموده و شرح بیشتری داده اند. منابع اشاره شده در پایان کتاب، معتبرترین منابع و مراجع مورد استفاده در دانشگاه های معروف دنیاست که موضوعات آنها با سرفصل درس مخابرات 2 دوره های کارشناسی و کارشناسی ارشد مخابرات و سایر دروس مرتبط همخوانی دارد. همچنین برای آشنایی خوانندگان با معادل های انگلیسی واژه های به کار رفته در این کتاب، واژه نامه ی انگلیسی به فارسی تهیه و آورده شده است.

پیشنهاد می شود که علاقه مندان به سایر موضوعات مخابرات دیجیتال و دانشجوین کارشناسی ارشد مخابرات، فصل 4 را به عنوان پیش نیاز دروسی نظیر: کدینگ منبع، کدینگ تصویر و ویدئو، نظریه ی اطلاعات و کدینگ 1 و 2، رمز نگاری، و انتقال داده ها، و فصل های 5، 6 و 7 را برای دروس تئوری پیشرفته مخابرات، مباحثی در مخابرات دیجیتال، مخابرات ماهواره ای، مخابرات سیار، مخابرات طیف گسترده، سیستم های انتقال دیجیتال و انتقال داده ها، مطالعه نمایند. همچنین برای ورود به مباحث و موضوعاتی نظیر تولید و پردازش سیگنال های دیجیتال، پردازش صوت و پردازش تصویر، مطالب فصل 7 کتاب می تواند راه گشا و مفید باشد.

فصل دوم

مروری بر سیگنال ها و سیستم ها و مخابرات آنالوگ

در این فصل با تقسیم بندی سیگنال ها و سیستم ها و طبقه بندی سیستم های مخابراتی، معیارهای ارزیابی مرسوم، جهت سنجش کارایی و مقایسه ی سیستم های مخابراتی، ارائه می شود. همچنین با معرفی بلوکی بخش های اصلی یک سیستم مخابراتی، وظیفه ی هر یک از بخش ها و عوامل مهم تأثیر گذار در عملکرد یک سیستم مخابراتی بررسی می گردد. در این فصل با تمرکز بر روی مخابرات آنالوگ و مقایسه ی کارایی روش های ارسال و دریافت آنالوگ اطلاعات، انواع مدولاسیون آنالوگ مطرح می شود و زمینه را برای معرفی و بررسی سیستم های دیجیتال مهیا می سازد.

1-2- تقسیم بندی سیگنال ها

سیگنال های مخابراتی و الکترونیکی از قبیل: ولتاژ و جریان، کمیت هایی هستند که بر حسب زمان یا مکان تغییر می کنند. اطلاعات در این تابع تک مقداری از زمان یا مکان، که سیگنال نامیده می شود، قرار دارد و مقدار تابع می تواند یک عدد حقیقی یا مختلط باشد. جهت نمایش سیگنال می توان از جدول ها (که در زمان ها یا مکان های تعریف شده ای مقدار تابع را می دهند) و نمودارهای نمایش تابع و توابع ریاضی (برای بیان رابطه ی بین تابع و متغیر مستقل) استفاده نمود. در ذیل شش طبقه بندی اساسی سیگنال ها آورده می شود.

1-1-2- سیگنال های حقیقی، موهومی خالص و مختلط

اگر سیگنال $x(t)$ به ازای تمام مقادیر t دارای مقادیر حقیقی باشد، از نوع حقیقی و اگر به ازای تمام مقادیر t دارای مقادیر موهومی باشد، موهومی خالص است. اگر به ازای بعضی یا تمام مقادیر t ، سیگنال دارای مقدار مختلط باشد، از نوع مختلط است. به عنوان مثال، سیگنال های $x_1(t)$ ، $x_2(t)$ و $x_3(t)$ به ترتیب حقیقی، موهومی خالص و مختلط هستند.

$$x_1(t) = t^2 + 1$$

$$x_2(t) = j \cdot \cos(2\pi \cdot t)$$

$$x_3(t) = \cos(t) + j \cdot \sin(t)$$

2-1-2- سیگنال های زوج و فرد

سیگنال $x(t)$ را یک سیگنال زوج گویند اگر به ازای تمام مقادیر t و $-t$ متعلق به مجموعه ی جواب، رابطه ی زیر برقرار باشد:

$$x(t) = x(-t) \quad (1-2)$$

و سیگنال $x(t)$ را یک سیگنال فرد گویند اگر به ازای تمام مقادیر t و $-t$ متعلق به مجموعه ی جواب، داشته باشیم:

$$x(t) = -x(-t) \quad (2-2)$$

در صورتی که سیگنالی در هیچ یک از دو شرط بالا صدق ننماید، نه زوج- نه فرد است. در حالت کلی می توان چنین سیگنالی را به صورت مجموع دو سیگنال زوج $x_e(t)$ و فرد $x_o(t)$ نوشت.

$$x_e(t) = \frac{x(t) + x(-t)}{2} \quad (3-2)$$

$$x_o(t) = \frac{x(t) - x(-t)}{2} \quad (4-2)$$

$$x(t) = x_e(t) + x_o(t) \quad (5-2)$$

به عنوان مثال، سیگنال های $x_1(t)$ ، $x_2(t)$ و $x_3(t)$ به ترتیب زوج، فرد و نه زوج- نه فرد هستند.

$$x_1(t) = \sqrt{t^2 + 1}$$

$$x_2(t) = \sin(5t)$$

$$x_3(t) = t + \cos(2t) + \log(t^3 + 1)$$

2-1-3- سیگنال های متناوب و غیر متناوب

اگر سیگنال $x(t)$ به ازای تمام مقادیر t دارای خاصیت زیر باشد، متناوب نامیده می شود.

$$x(t) = x(t + T) \quad (6-2)$$

کوچک ترین مقدار مثبت و غیر صفر T که شرط فوق را ا قناع می کند دوره ی تناوب اصلی نامیده می شود. اگر برای سیگنالی، هیچ مقدار از T را که در رابطه ی بالا صدق کند نتوان یافت، آن سیگنال را یک سیگنال غیر متناوب گویند.

به عنوان مثال، سیگنال $x_1(t)$ متناوب با دوره تناوب 2 و $x_2(t)$ غیرمتناوب است.

$$x_1(t) = \sin(\pi.t)$$

$$x_2(t) = t^3 + 2t + 1$$

4-1-2- سیگنال‌های ارادی و تصادفی

سیگنال ارادی، سیگنالی است که مقدار آن در همه‌ی زمان‌ها مشخص است و می‌توان آن را به صورت تابع معینی از زمان مدل‌سازی نمود و نمایش داد. در مقابل، سیگنال تصادفی، سیگنالی است که قبل از وقوع آن، اطمینانی وجود ندارد. به عنوان مثال، فاز یک مولد فرکانس می‌تواند تصادفی و بین صفر و 360 درجه متغیر باشد. همچنین نویز، یک سیگنال تصادفی است.

5-1-2- سیگنال‌های انرژی و توان

در صورتی که سیگنال $x(t)$ نشانگر ولتاژ یا جریان باشد و مقاومت الکتریکی برابر 1^{Ω} فرض شود، طبق رابطه‌ی زیر، توان لحظه‌ای سیگنال $x(t)$ برابر است با مربع دامنه‌ی سیگنال:

$$p(t) = |x(t)|^2 \quad (7-2)$$

همچنین انرژی کل سیگنال $x(t)$ و توان متوسط آن به ترتیب برابر است با:

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad (8-2)$$

$$\bar{P} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt \quad (9-2)$$

اگر و فقط اگر شرط زیر برقرار باشد، سیگنال را از نوع انرژی نامند:

$$0 < E < \infty, \quad \bar{P} = 0 \quad (10-2)$$

به عبارتی توان متوسط این نوع سیگنال، صفر و انرژی آن یک عدد محدود است.

اگر و فقط اگر شرط زیر برقرار باشد، سیگنال را از نوع توان گویند:

$$E = \infty, \quad 0 < \bar{P} < \infty \quad (11-2)$$

سیگنال‌های انرژی و سیگنال‌های توان با هم ناسازگارند. یعنی یک سیگنال نمی‌تواند هم سیگنال انرژی و هم سیگنال توان باشد. برای سیگنال‌های متناوب از نوع توان، مقدار توان متوسط به صورت زیر، در یک دوره تناوب T_0 ، قابل محاسبه است.

$$\bar{P} = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} |x(t)|^2 dt \quad (12-2)$$

به عنوان مثال، سیگنال $x_1(t)$ از نوع انرژی و سیگنال $x_2(t)$ از نوع توان است.

$$x_1(t) = A.e^{-\alpha.t}u(t), \quad \alpha > 0$$

$$x_2(t) = \cos(t) + 3\cos(2t)$$

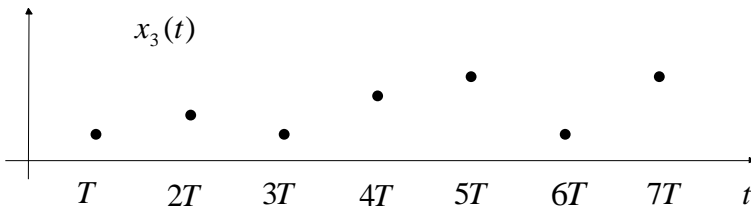
1-2-6- سیگنال های پیوسته، گسسته و دیجیتال

سیگنال پیوسته (آنالوگ) تابع پیوسته‌ای از زمان است و دامنه‌ی این سیگنال نیز پیوسته است. هنگامی که یک موج فیزیکی مانند موج صوتی یا ارتعاش مکانیکی به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود سیگنال آنالوگ به وجود می‌آید. از طرف دیگر سیگنال گسسته فقط در زمان های گسسته تعریف می‌شود. به عبارت دیگر سیگنال های گسسته به صورت یک رشته از نمونه‌ها هستند، به طوری که دامنه‌ی این نمونه‌ها می‌تواند هر مقداری را بپذیرد. هنگامی که هر نمونه از سیگنال گسسته کوانتیزه شود (یعنی فقط مجموعه‌ی محدودی از مقادیر گسسته را اختیار کند) و سپس کد بندی شود، به سیگنال حاصله یک سیگنال دیجیتال گفته می‌شود. برای سیگنال های دیجیتال، هم محور زمان و هم محور دامنه، گسسته است.

به عنوان مثال، سیگنال های $x_1(t)$ ، $x_2(t)$ و $x_3(t)$ (شکل 1-2)، به ترتیب آنالوگ، گسسته و دیجیتال هستند.

$$x_1(t) = \log(\cos^2 t) + t$$

$$x_2(t) = 5n^3 + \sqrt{2n} \quad n \in \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$$



شکل 1-2. نمونه ای از یک سیگنال دیجیتال چهار سطحی

2-2- تقسیم بندی سیستم ها

در مخابرات، سیستم را می‌توان به عنوان یک پدیده در نظر گرفت که منجر به تبدیل و یا انتقال سیگنال های الکتریکی، نوری یا الکترومغناطیسی می‌شود. هر سیستم دارای یک سیگنال ورودی $x(t)$ و یک سیگنال خروجی $y(t)$ است که رابطه‌ی ریاضی آنها به صورت رابطه‌ی (13-2) تعریف می‌شود.

$$y(t) = f[x(t)] \quad \forall t \quad (13-2)$$

سیستم‌ها را از نظر خواص کارکردی می‌توان به انواع زیر تقسیم نمود:

2-2-1- سیستم‌های خطی و غیر خطی

سیستمی را خطی گویند که خاصیت مهم جمع آثار را دارا باشد، یعنی در صورتی که:

$$y_1(t) = f[x_1(t)] \quad , \quad y_2(t) = f[x_2(t)] \quad \text{باشد، آنگاه:} \\ f[a_1 \cdot x_1(t) + a_2 \cdot x_2(t)] = a_1 \cdot y_1(t) + a_2 \cdot y_2(t) \quad (14-2)$$

سیستمی که نتواند اصل جمع آثار را اقناع نماید، غیر خطی است.

به عنوان مثال، سیستم با رابطه‌ی $y(t) = 2x(t)$ خطی و دو سیستم با روابط

$$y(t) = x(t) + 5 \quad \text{و} \quad y(t) = x^2(t) + 3x(t) \quad \text{غیر خطی هستند.}$$

2-2-2- سیستم‌های تغییر ناپذیر و تغییر پذیر با زمان

سیستمی را تغییر ناپذیر با زمان نامند که اعمال یک تغییر زمانی در سیگنال ورودی آن سبب

ایجاد همان تغییر زمانی در سیگنال خروجی شود. به عبارت دیگر:

$$y(t - t_0) = f[x(t - t_0)] \quad \text{آنگاه:} \quad y(t) = f[x(t)] \quad \text{اگر:} \quad (15-2)$$

هر سیستمی که این خاصیت را نداشته باشد، سیستم تغییر پذیر با زمان است.

به عنوان مثال، سیستم با رابطه‌ی $y(t) = \cos(x(t)) + 5$ را تغییر ناپذیر با زمان

و سیستم با رابطه‌ی $y(t) = t \cdot x(t)$ را یک سیستم تغییر پذیر با زمان می‌نامیم.

2-2-3- سیستم‌های سببی (علی) و غیر سببی (غیر علی)

سیستمی را علی (یا فیزیکی) گویند که خروجی آن در هر لحظه از زمان فقط به مقادیر

ورودی در همان لحظه و لحظات قبل از آن بستگی داشته باشد. به صورت ریاضی داریم که:

$$y(t_0) = f[x(t); t \leq t_0]; \quad -\infty < t, t_0 < \infty \quad (16-2)$$

سیستم‌های غیر علی سیستم‌هایی هستند که شرط فوق را اقناع نمی‌کنند. با این تعریف،

خروجی یک سیستم علی ناشی از ورودی در همان زمان و زمان‌های قبل از آن است و به

زمان‌های بعد بستگی ندارد. در دنیای واقعی، سیستم‌های غیر علی را می‌توان با استفاده از تأخیر

زمانی و ذخیره‌سازی، محقق نمود. به عنوان مثال، سیستم با رابطه‌ی $y(t) = x(t) + x(t-1)$

علی و سیستم با رابطه‌ی $y(t) = x(t+1) + 2$ غیر علی است.

2-2-4- سیستم های با حافظه و بدون حافظه

سیستمی را بدون حافظه گویند که در هر لحظه، خروجی سیستم تنها به مقدار ورودی سیستم در همان لحظه بستگی داشته باشد. در صورتی که در هر لحظه از زمان، خروجی سیستم به مقدار ورودی سیستم در زمان های قبل و یا بعد وابسته باشد، سیستم با حافظه نامیده می شود. از میان عناصر مداری، مقاومت یک سیستم بدون حافظه و خازن یک سیستم با حافظه است. به عنوان مثال، سیستم با رابطه $y(t) = k \cdot x^2(t) + 1$ بدون حافظه و سیستم با رابطه $y(t) = x(t-1) + x(t)$ با حافظه است.

2-2-5- سیستم های وارون پذیر و وارون ناپذیر

در صورتی که برای یک سیستم بتوان سیستم دیگری را به گونه ای تعریف کرد که با پشت سر هم قرار دادن این دو سیستم، خروجی نهایی شبیه ورودی شود، سیستم دوم را وارون سیستم اول گویند. در صورتی که بتوان برای سیستمی، یک سیستم وارون به دست آورد آن را وارون پذیر گویند. به عنوان مثال، متعادل ساز در گیرنده، وارون کانال انتقال است.

2-2-6- سیستم های پایدار و ناپایدار

سیستمی را پایدار گویند که به ازای ورودی کراندار (محدود)، خروجی نیز کراندار باشد. اگر به ازای ورودی کراندار (محدود)، خروجی بی نهایت شود سیستم ناپایدار است. سیستم با رابطه $y(t) = x^3(t) + 100$ پایدار و با رابطه $y(t) = t \cdot x(t)$ ناپایدار است.

2-3- طبقه بندی سیستم های مخابراتی

با توجه به تقسیم بندی های بخش قبل، یک سیستم مخابراتی نیز می تواند در هر یک از شش حالت گفته شده، از نظر خطی بودن، تغییر پذیری با زمان، علی بودن، با حافظه بودن، وارون پذیری و پایداری، طبقه بندی شود. طبقه بندی دیگری که می توان برای سیستم های مخابراتی داشت، از چهار جنبه ی زیر است:

الف - شکل موج سیگنال، که سیستم های مخابراتی را به دو دسته ی آنالوگ و دیجیتال تقسیم می نماید.

ب - پهنای باند فرکانسی سیگنال، که سیستم های مخابراتی را به سه دسته ی باند باریک، باند پهن (طیف گسترده) و فرا پهن باند تفکیک می کند.

ج - مقدار فرکانس مرکزی، که دو حالت باند پایه و با حامل را ایجاد می کند.