



普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育**电子通信类**国家级特色专业系列规划教材

通信原理

蒋 青 范馨月 陈善学 编著



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

通信原理

蒋 青 范馨月 陈善学 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统介绍现代通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法。全书内容共9章,包括绪论、信号与噪声分析、模拟调制系统、信道编码、数字基带传输系统、数字频带传输系统、信道编码、数字信号的最佳接收、通信网概论。

本书内容全面、条理分明,叙述与证明简洁;注重将通信仿真分析和设计工具与教学内容有机结合,联系工程实践;结合大量实例进行说明,力求具有系统性、知识性、扩展性和前瞻性。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、信息工程、广播电视工程、电子科学与技术、微电子、光信息科学与技术等专业的高年级本科生教材,也可以供相关领域的科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/蒋青,范馨月,陈善学编著. —北京:科学出版社,2014.8

(普通高等教育“十二五”规划教材·普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材)

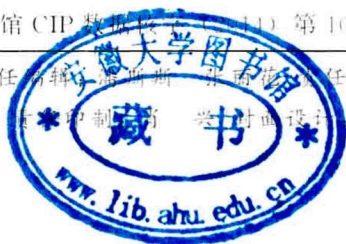
ISBN 978-7-03-040696-5

I. ①通… II. ①蒋…②范…③陈… III. ①通信理论-高等学校-教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第105363号

责任编辑:陈丽娟 封面设计:刘小梅

★ 印刷 装订 设计 迷底书装



科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京华正印创有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年8月第一次印刷 印张:26 1/2

字数:628 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

21 世纪是通信信息时代。网络、手机、计算机等与我们的生活息息相关，移动通信、互联网通信、多媒体技术、计算机技术等现代通信技术的发展速度超越了人们的想象。现代通信技术已应用到国民经济的各个领域，也在不断渗入到人们日常生活的各个方面，让我们的工作更加高效和便捷，让人们的生活更加丰富和美好，而且这种趋势还在不断向更高、更深、更广的方向发展。

本书参考学时为 72~96 学时。全书内容共分为 9 章。第 1 章主要介绍通信的基本概念、通信系统的模型和分类、主要性能指标、信道容量等。第 2 章对信号和噪声的特性进行分析，介绍随机过程的概念、统计特征、平稳随机过程和随机过程通过系统的分析。第 3 章介绍调制的概念、作用和分类，重点描述线性调制和非线性调制的基本原理。第 4 章介绍如何利用数字通信系统传输模拟信号的过程，详细推导模/数转换和数/模转换的步骤，还描述信源编码的基本原理和几种常用的变长编码方法。第 5 章介绍直接在对应的信道上传输数字信号的基带传输系统，如何设计无码间干扰的基带传输系统，有效地控制符号间的干扰，以及无码间干扰的基带系统抗噪声性能分析。第 6 章重点讨论二进制数字调制系统的原理及其抗噪声性能，另外也简单地介绍多进制数字调制系统、各种 QPSK 调制、高斯最小频移键控、正交幅度调制和正交频分复用调制。第 7 章介绍信道编码的基本原理，重点讨论了常用的线性分组码、汉明码、循环码、卷积码、交织编码和 Turbo 码。第 8 章讨论最佳接收的概念和准则，分析最佳接收机的性能。第 9 章简要介绍通信网的基本知识。

本书内容丰富，取材广泛，概念清晰，介绍深入浅出，理论联系实际，仿真结果较多，具有实际应用价值。本书的主要章节添加了仿真设计环节，使读者通过实践更好地理解抽象的理论知识，通过仿真结论进一步思考背后的原因。

本书由蒋青担任主编，负责全书的统稿、修改和审定。具体编写分工如下：蒋青编写第 1~5 章和第 9 章；范馨月编写第 6、7 章和全书的仿真设计，陈善学编写第 8 章。

在本书编写过程中还得到了重庆邮电大学雷维嘉、于秀兰、王永等多位课程组同仁与学生的鼓励、帮助和支持；在出版过程中得到了科学出版社的鼎力支持，在此也深表感谢。

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2014 年

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 通信的基本概念	1
1.2 通信系统概述	8
1.2.1 通信系统的组成	8
1.2.2 通信系统的分类和通信方式	11
1.2.3 通信系统的主要性能指标	14
1.2.4 通信系统中的噪声	17
1.3 通信信道	18
1.3.1 有线信道	18
1.3.2 无线信道	20
1.3.3 信道容量	23
1.4 通信网概述	25
1.4.1 通信网的概念	25
1.4.2 通信网的组网结构	26
1.4.3 通信网的质量要求	27
1.5 通信发展概况	28
1.5.1 通信理论的发展	28
1.5.2 通信技术的发展	28
1.6 香农信道容量定理的仿真设计	29
1.7 小结	30
思考题	31
习题	31
第 2 章 信号与噪声分析	33
2.1 引言	33
2.2 确知信号分析	33
2.2.1 信号的傅里叶变换	33
2.2.2 卷积与相关函数	35
2.2.3 信号的能量谱密度与功率谱密度	37
2.2.4 自相关函数与能量谱密度和功率谱密度函数的关系	38
2.3 随机变量的统计特征	38
2.3.1 随机变量	39
2.3.2 概率分布函数和概率密度函数	39
2.3.3 通信系统中几种典型的随机变量	40

2.3.4	随机变量的数字特征	40
2.4	随机过程	44
2.4.1	随机过程的概念	44
2.4.2	随机过程的统计特征	45
2.4.3	平稳随机过程	47
2.4.4	各态历经性	48
2.4.5	平稳随机过程的自相关函数和功率谱密度	49
2.4.6	关于不相关、正交和统计独立的讨论	52
2.5	高斯随机过程	52
2.5.1	高斯过程的定义	52
2.5.2	高斯过程的性质	53
2.5.3	一维高斯分布	53
2.5.4	高斯白噪声	55
2.5.5	窄带高斯噪声	56
2.5.6	正弦波加窄带高斯噪声	60
2.6	随机过程通过系统的分析	61
2.6.1	随机过程通过线性系统	61
2.6.2	随机过程通过乘法器	63
2.7	周期平稳随机过程	65
2.8	高斯白噪声特性的仿真设计	66
2.9	小结	73
	思考题	73
	习题	74
第3章	模拟调制系统	79
3.1	引言	79
3.1.1	调制在通信系统中的作用	79
3.1.2	调制的分类	79
3.2	线性调制的原理	80
3.2.1	幅度调制	80
3.2.2	双边带调制	85
3.2.3	单边带调制	86
3.2.4	残留边带调制	90
3.2.5	线性调制系统的解调	92
3.3	非线性调制的原理	94
3.3.1	非线性调制的基本概念	94
3.3.2	调频信号的频谱和带宽	96
3.3.3	调频信号的产生与解调	99
3.4	线性调制系统的抗噪声性能分析	101
3.4.1	抗噪声性能的分析模型	101

3.4.2	相干解调的抗噪声性能	102
3.4.3	非相干解调的抗噪声性能	106
3.5	调频系统的抗噪声性能分析	110
3.5.1	解调器输入信噪比	110
3.5.2	解调器输出信噪比和信噪比增益	110
3.6	调频系统的加重技术	113
3.7	模拟调制系统的特点与应用	115
3.8	频分复用	115
3.9	模拟线性调制的仿真设计	118
3.10	小结	125
	思考题	126
	习题	126
第4章	信源编码	131
4.1	引言	131
4.2	模拟信号的数字化	131
4.2.1	抽样定理	132
4.2.2	模拟信号量化	137
4.2.3	脉冲编码调制	144
4.2.4	语言压缩编码	152
4.2.5	图像压缩编码	159
4.3	离散信源编码	160
4.3.1	信源编码的相关概念	161
4.3.2	即时码及其构成	162
4.3.3	编码效率	164
4.3.4	几种常用变长码的编码方法	167
4.4	时分复用	172
4.4.1	PCM 系统	172
4.4.2	PCM 基群帧结构	174
4.4.3	PCM 数字复接系列	176
4.5	信源编码仿真设计	177
4.6	小结	190
	思考题	191
	习题	191
第5章	数字基带传输系统	194
5.1	引言	194
5.2	数字基带信号的码型和波形	195
5.2.1	数字基带信号的码型	195
5.2.2	基带波形的形成	200
5.3	数字基带信号的频谱分析	200

5.3.1	数字基带信号的数学描述	200
5.3.2	数字基带信号的功率谱密度	202
5.4	数字基带信号的传输与码间串扰	204
5.4.1	码间串扰	204
5.4.2	码间串扰的数学分析	205
5.5	无码间串扰的基带传输特性	206
5.5.1	无码间串扰的理想低通滤波器	208
5.5.2	无码间串扰的滚降系统	209
5.6	部分响应系统	211
5.6.1	部分响应系统的特性	212
5.6.2	部分响应系统的实现	213
5.7	无码间串扰基带传输系统的抗噪声性能分析	216
5.8	眼图与时域均衡	219
5.8.1	眼图	219
5.8.2	时域均衡	221
5.9	数字基带传输系统仿真设计	223
5.10	小结	233
	思考题	234
	习题	234
第 6 章	数字信号的载波传输	238
6.1	引言	238
6.2	二进制数字调制原理	238
6.2.1	二进制幅移键控	238
6.2.2	二进制频移键控	242
6.2.3	二进制相移键控	246
6.3	二进制数字调制系统的抗噪声性能	252
6.3.1	2ASK 的抗噪声性能	252
6.3.2	2FSK 的抗噪声性能	256
6.3.3	2PSK 和 2DPSK 的抗噪声性能	260
6.3.4	二进制数字调制系统的性能比较	261
6.4	多进制数字调制系统	263
6.4.1	多进制幅移键控	264
6.4.2	多进制频移键控	266
6.4.3	多进制相移键控	267
6.5	现代数字调制技术	276
6.5.1	偏移四相相移键控调制	276
6.5.2	$\pi/4$ -DQPSK 调制	278
6.5.3	最小频移键控调制 (MSK)	279
6.5.4	高斯最小频移键控调制	282

6.5.5 正交幅度调制	286
6.5.6 正交频分复用调制	290
6.6 数字频带传输系统特性仿真设计	293
6.7 小结	303
思考题	304
习题	305
第7章 信道编码	309
7.1 引言	309
7.2 信道编码的基本原理	310
7.2.1 信道编码的检错和纠错能力	310
7.2.2 信道编码的译码方法	310
7.3 线性分组码	311
7.3.1 线性分组码的编码	312
7.3.2 线性分组码的译码	314
7.3.3 汉明码	315
7.3.4 循环码	318
7.3.5 线性分组码的应用	320
7.4 卷积码	321
7.4.1 卷积码的解析表示	321
7.4.2 卷积码的图形描述	323
7.4.3 卷积码的维特比译码	325
7.4.4 卷积码的应用	328
7.5 其他几种常用的差错控制编码方法	328
7.5.1 交织编码	328
7.5.2 Turbo 码	329
7.6 信道编码仿真设计	330
7.7 小结	335
思考题	336
习题	337
第8章 数字信号的最佳接收	339
8.1 最佳接收准则和接收机	339
8.1.1 接收数字信号的统计特性	339
8.1.2 最佳接收准则	341
8.1.3 匹配滤波器	346
8.1.4 相关法接收	351
8.1.5 理想接收机	352
8.2 最佳接收系统的性能	354
8.2.1 基带系统的性能	356
8.2.2 频带调制系统的性能	356

8.3	最佳基带传输系统	359
8.3.1	理想信道下的最佳基带传输系统	359
8.3.2	非理想信道下的最佳基带传输系统	363
8.4	匹配滤波器工作原理仿真	365
8.5	小结	370
	思考题	370
	习题	370
第9章	通信网概论	374
9.1	引言	374
9.2	电话网	375
9.2.1	电话网的基本组成	375
9.2.2	我国电话网的结构	376
9.2.3	国内、国际长途电话网	378
9.2.4	电话网的编号计划	379
9.2.5	电话网的性能要求	379
9.3	智能网	380
9.3.1	智能网的概念	380
9.3.2	智能网的结构	380
9.3.3	智能网与现有通信网的关系	380
9.4	数据通信网	381
9.4.1	数据通信网的分类	381
9.4.2	数据通信网的构成	382
9.5	数字数据网	382
9.5.1	数字数据网的基本概念	382
9.5.2	DDN 的网络结构	382
9.6	综合业务数字网	383
9.6.1	综合业务数字网的概念	383
9.6.2	ISDN 的网络结构	383
9.6.3	ISDN 的网络功能体系结构	384
9.6.4	ISDN 的用户/网络接口	385
9.6.5	ISDN 的信道与用户/网络接口	386
9.6.6	宽带综合业务数字网	386
9.7	同步网	387
9.8	电信管理网	388
9.9	下一代网络	390
9.9.1	下一代网络概述	390
9.9.2	基于软交换的下一代网络	391
9.9.3	现有网络向 NGN 的演进	393
9.10	小结	394

思考题..... 395

参考文献..... 396

附录一 英文缩写词对照表..... 397

附录二 贝塞尔函数表 $J_n(x)$ 400

附录三 误差函数、互补误差函数表..... 401

附录四 常用数学公式..... 402

习题参考答案..... 403

第 1 章 绪 论

21 世纪是通信信息时代,现代生活的每个方面都依赖通信。例如,用信用卡购物,商店的出纳员在一个小机器上划卡,几秒钟后,不管信用卡是哪个银行发行的,或是那个银行的总部在什么地方,也不管这次交易是在什么地方进行的,支付会得到核实,信用卡账户自动进行了付款。今天,在这个文明世界的绝大多数地方,都可以使用几种主要的信用卡。即使是在最偏僻乡镇的小零售店中,也可以发现信用卡机的身影。它们通过强大的、快速的、安全的通信信息与卡的发行银行相连。可见,通信对现代社会的重要性是不言而喻的。

本章主要介绍通信的基本概念、通信传输系统模型和通信传输网等基础知识。

1.1 通信的基本概念

1. 基本概念

人们常将信息的传递和交换,俗称通信,包括异地间人与人、人与机器、机器与机器进行信息的传递和交换。通信的目的是获取信息。信息是人类社会和自然界中需要传递、交换、存储和提取的抽象内容。例如,打一次电话,甲告诉乙所不知道的消息,则甲发出了信息;而乙在电话中得知了原来不知道的消息,则乙得到了信息。由于信息是抽象的内容,为了传送和交换信息,必须通过语言、文字、图像和数据等将它表示出来,即信息通过消息来表示。

用文字、符号、数据、语言、音符、图片、图像等能够被人的感觉器官所感知的形式,把客观物质运动和主观思维活动的状态表达出来就成为消息。消息中包含信息,是信息的载体。得到消息,从而获得信息。同一个信息可用不同的消息形式来载荷。例如,球赛进展情况可用电视图像、广播语言和报纸文字等不同消息来表述。而一个消息也可载荷不同的信息,它可能包含非常丰富的信息,也可能只包含很少的信息。因此,信息与消息是既有区别又有联系的。

在各种实际通信系统中,往往为了克服时间或空间的限制而进行通信,必须对消息进行加工处理。把消息变换成适合信道传输的物理量,这种物理量称为信号,如电信号、光信号、声信号、生物信号等。信号携带着消息,它是消息的运载工具。信号携带信息,但不是信息本身。同样,同一信息可用不同的信号来表示。同一信号也可表示不同的信息。信息、消息和信号是既有区别又有联系的 3 个不同的概念。

总之,通信中消息的传送是通过信号来进行的,如电压、电流信号等。信号是消息的载荷者。在各种各样的通信方式中,利用“电信号”来承载信息的通信方式称为电通信,这种通信具有迅速、准确、可靠等特点,而且几乎不受时间、空间、地点和距离的限制,因而得到了飞速发展和广泛应用。如今,在自然科学中,“通信”与“电通信”几乎是同义词。在本书中,通信均指电通信。

2. 信号的分类和描述

1) 信号的分类

信号的分类方法有很多,可以从不同的角度对信号进行分类。例如,信号可以分为确知信号与随机信号、周期信号与非周期信号、功率信号与能量信号、模拟信号与数字信号等。下面简要介绍这些信号的概念。

(1) 确知信号与随机信号。确知信号是指能够以确定的时间函数表示的信号,它在定义域内任意时刻都有确定的函数值。例如,电路中的正弦信号和各种形状的周期信号等。

在事件发生之前无法预知信号的取值,即写不出明确的数学表达式,通常只知道它取某一数值的概率,这种具有随机性的信号称为随机信号。例如,半导体载流子随机运动所产生的噪声和从目标反射回来的雷达信号(其出现的时间与强度是随机的)等都是随机信号。所有的实际信号在一定程度上都是随机信号。

(2) 周期信号与非周期信号。周期信号是每隔一个固定的时间间隔重复变化的信号。周期信号 $f(t)$ 满足下列条件:

$$f(t) = f(t + nT), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots; \quad -\infty < t < \infty \quad (1-1-1)$$

式中, T 为 $f(t)$ 的周期,是满足式(1-1-1)的最小时段。

非周期信号是不具有重复性的信号。

(3) 功率信号与能量信号。如果一个信号在整个时间域 $(-\infty, +\infty)$ 内都存在,因此它具有无限大的能量,但其平均功率是有限的,称这种信号为功率信号。

设信号 $f(t)$ 为时间的实函数,通常把信号 $f(t)$ 看成随时间变化的电压或电流,则当信号 $f(t)$ 通过 1Ω 电阻时,其瞬时功率为 $|f(t)|^2$,而平均功率定义为

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

一般地,平均功率(在整个时间轴上平均)等于 0,但能量有限的信号称为能量信号。

设能量信号 $f(t)$ 为时间的实函数,通常把能量信号 $f(t)$ 的归一化能量(简称能量)定义为由电压 $f(t)$ 加于单位电阻上所消耗的能量,即

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (1-1-3)$$

(4) 模拟信号与数字信号。按照信号参量的取值方式及其与消息之间的关系,可将信号划分为两类,即模拟信号与数字信号。模拟信号是指代表消息的信号参量(幅度、频率或相位)随消息连续变化的信号。若代表消息的信号参量是幅度,则模拟信号的幅度应随消息连续变化,即幅度取值有无限多个。但在时间上可以连续,也可以离散。图 1-1 所示为时间连续和时间离散的模拟信号。数字信号是指它不仅在时间上离散,而且在幅度取值上也离散的信号。图 1-2 所示的二进制数字信号就是以“1”和“0”两种状态的不同组合来表示不同的消息。

模拟信号和数字信号可以通过一定的方法实现相互转换,如语音编码器可以将模拟语音信号转化为数字语音,语音译码器可以将数字语音转化为模拟语音。通常使用的 A/D 和 D/A 转换器就是实现模拟信号和数字信号之间的相互转换。

2) 信号的特性

信号的特性表现为它的时间特性和频率特性。

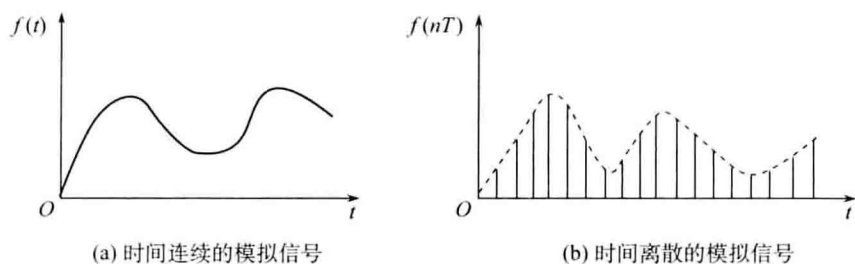


图 1-1 模拟信号

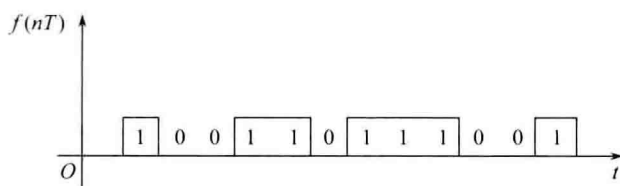


图 1-2 数字信号

确知信号和随机信号都可用它们的时域特性和频域特性来表示。时域特性表示信号电压或电流随时间的变化关系。频域特性指任意信号总可以表示为许多不同频率正弦信号的线性组合,这些正弦信号所包含的频率范围,称为该信号的频谱,通常用函数 $F(\omega)$ 表示时域信号 $f(t)$ 的频谱。称信号 $f(t)$ 的绝对带宽为频谱 $F(\omega)$ 的带宽,单位为赫兹(Hz)。

例 1-1-1 设有一个信号为

$$f(t) = 3\sin\omega_1 t + \sin 3\omega_1 t \quad (1-1-4)$$

式中, $\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_1$ 。信号 $f(t)$ 的信号特征如图 1-3 所示,图 1-3(a)为信号 $f(t)$ 的时域图,图 1-3(b)为 $f(t)$ 对应的频谱图,其频谱从 f_1 (Hz) 延续到 $3f_1$ (Hz),其带宽为 $2f_1$ (Hz)。

图 1-3(b)中,每一条谱线代表一个正弦分量,谱线的高度代表这一正弦分量的振幅,谱线的位置代表这一正弦分量的角频率。

可见,信号的频率特性和时间特性都包含了信号携带的信息量,也能表示出信号的特点,

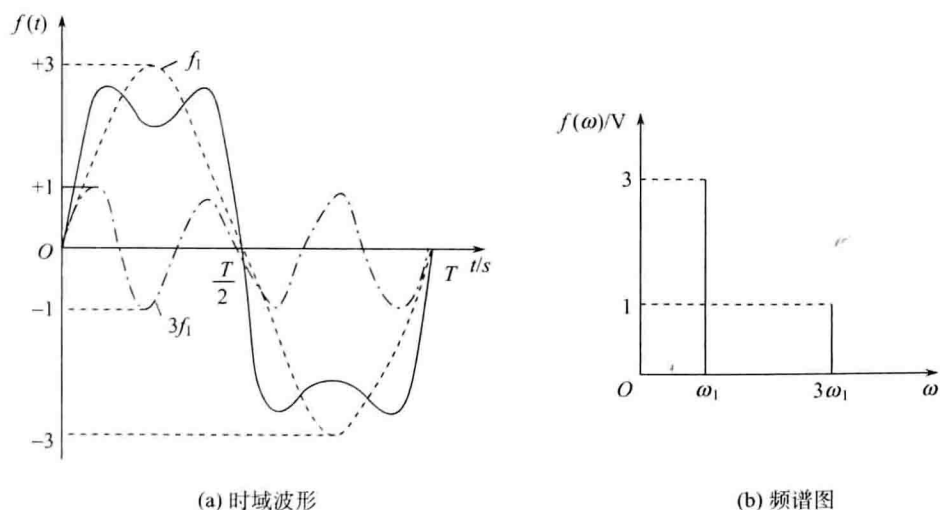


图 1-3 $f(t)$ 的信号特征图

所以信号的频率特性和时间特性之间必然有密切的联系。

根据傅里叶变换的原理,任何一个周期为 T 的周期信号 $f(t)$,只要满足狄利克雷条件,则可展开为傅里叶级数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t] \quad (1-1-5)$$

式中, $\omega_0 = 2\pi/T$ 为基波角频率。

$f(t)$ 的均值(直流分量)为

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (1-1-6)$$

$f(t)$ 的第 n 次余弦波的振幅为

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (1-1-7)$$

$f(t)$ 的第 n 次正弦波的振幅为

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (1-1-8)$$

并且,由图 1-3(b)可知,周期信号的频谱是离散谱。

例 1-1-2 已知 $f(t)$ 为如图 1-4(a)所示的方波周期信号,试分析其信号特性。

解 $f(t)$ 按式(1-1-5)用傅里叶级数对其展开后为

$$f(t) = \frac{4A}{\pi} (\sin\omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \frac{1}{7} \sin 7\omega_0 t + \cdots)$$

$\uparrow \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \uparrow$
 基波 3 次谐波 5 次谐波 7 次谐波

可作出 $f(t)$ 的频谱示意图如图 1-5 所示,可见周期信号的频谱是离散谱。

图 1-4(b)为 $f(t)$ 的基波、图 1-4(c)为 3 次谐波、图 1-4(d)为 5 次谐波、图 1-4(e)为 7 次谐波等。把这些谐波相加,又可以反过来合成为方波。例如,图 1-4(f)是基波与 3 次谐波和 5 次谐波合成的结果,图 1-4(g)是基波和 3 次谐波……直到 9 次谐波合成的结果,图 1-4(h)是基波和 3 次谐波……直到 27 次谐波合成的结果。可见,含有的高次谐波次数越多,合成后的波形越逼近原来的方波。

对于非周期信号,不能用傅里叶级数直接表示,但非周期信号可看成 $T \rightarrow \infty$ 的周期信号。这样,周期信号的频谱分析可以推广到非周期信号,但由于 $T \rightarrow \infty$,必有 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \rightarrow 0$,离散的谱线变成了无限密集连续频谱。所以对于非周期信号,其频谱将是连续的频谱,则傅里叶级数就变成了傅里叶积分,可表示为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1-1-9)$$

其中

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1-1-10)$$

式(1-1-9)和式(1-1-10)分别称为傅里叶反变换和傅里叶正变换,两式称为 $f(t)$ 傅里叶变换对,表示为

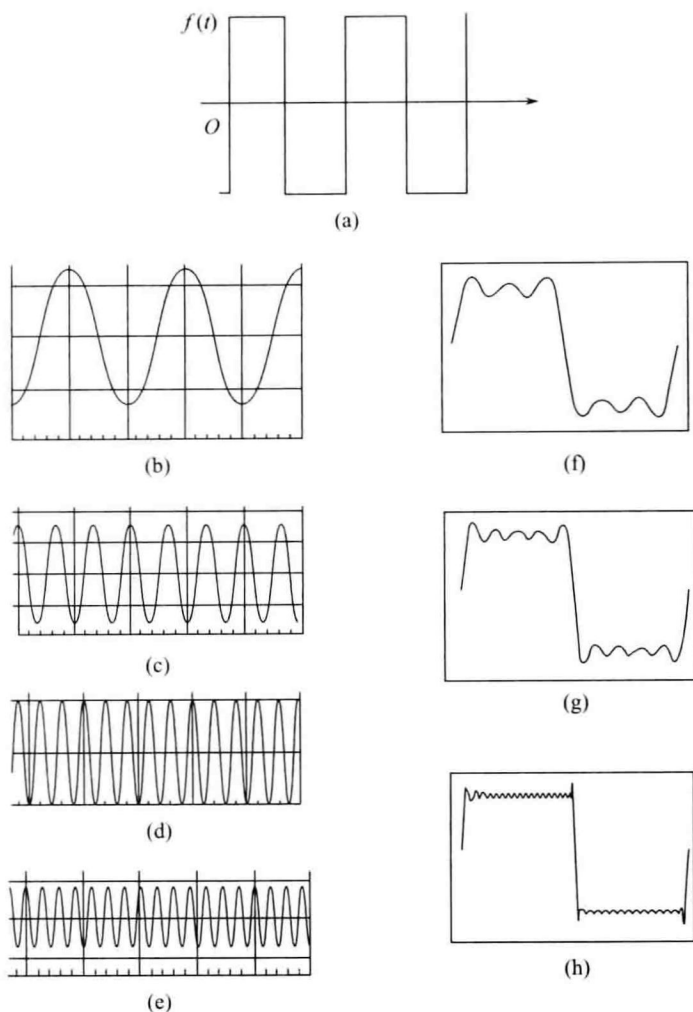


图 1-4 周期方波的分解与合成过程

$$f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$$

式(1-1-9)和式(1-1-10)可简记为

$$\begin{cases} f(t) = F^{-1}[F(\omega)] \\ F(\omega) = F[f(t)] \end{cases} \quad (1-1-11)$$

由傅里叶变换可以得到信号时域和频域之间的一些重要特性。熟悉这些特性对后面理解信号的性质是非常有益的。图 1-6 反映了通信系统中几种典型信号的时域和频域之间的关系。

由图 1-6 可见：①连续非周期的时间函数对应的频谱也是连续非周期函数；②离散非周期序列对应的频谱是周期性的连续函数；③连续周期函数对应的频谱是非周期的离散序列函数。

3. 信息的度量

通信的目的在于信息的传递和交换。信息一词在概念上与消息的意义相似，但它的含义却更普遍化、抽象化。信息可被理解为消息中包含的有意义的特定内容。这就是说，不同形式

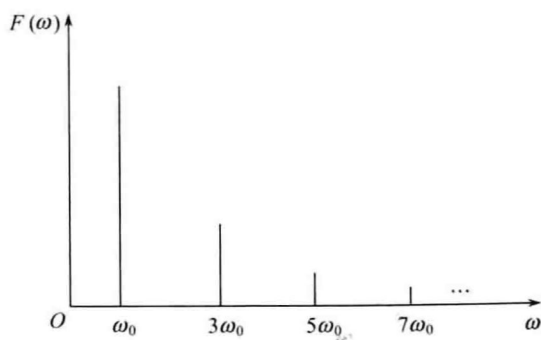


图 1-5 周期方波的频谱示意图

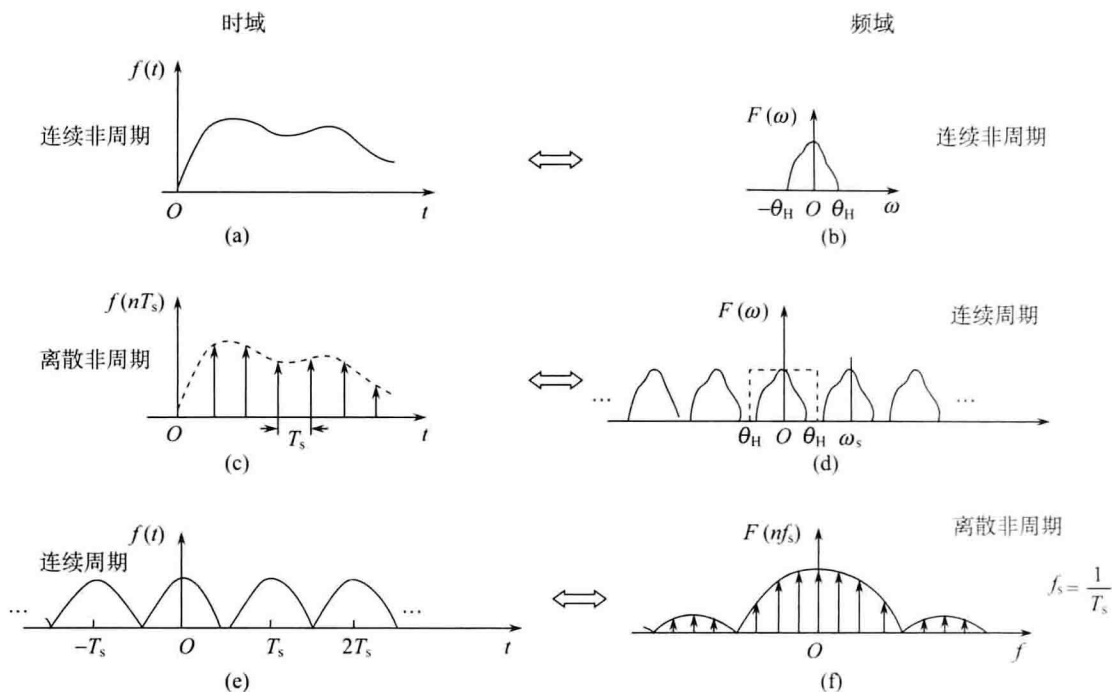


图 1-6 信号的时域和频域之间的关系

的消息,可以包含相同的信息。例如,分别用语音和文字发送天气预报,所含的信息内容相同。

人们在通信中获得消息之前,对它的特定内容有一种“不确定性”,而一个消息之所以会含有信息,也正是因为它具有不确定性。一个不具有不确定性的消息是不含有任何信息的,而通信的目的就是消除或部分消除这种不确定性。例如,在得知硬币的抛掷结果前,对于结果会出现正面还是反面是不确定的,通过通信,可以得知硬币的抛掷结果,消除了不确定性,从而获得了信息。因此,信息是对事物运动状态或存在方式的不确定性的描述。

用数学语言来讲,不确定性就是随机性,具有不确定性的事件就是随机事件。因此,可运用研究随机事件的数学工具——概率来测度不确定性的。将消息用随机事件表示,而发出这些消息的信源则用随机变量来表示。例如,抛掷一枚硬币的实验可以用一个随机变量来表示,而抛掷结果可以是正面或反面,这个具体的消息则用随机事件表示。

把某个消息 x_i 出现的不确定性的。大小定义为该消息 x_i 所携带的信息量,用 $I(x_i)$ 表示。在信息论中, $I(x_i)$ 与消息 x_i 出现的概率 $P(x_i)$ 的关系式为

$$I(x_i) = \log_a \frac{1}{P(x_i)} = -\log_a P(x_i) \quad (1-1-12)$$

式中, $I(x_i)$ 代表两种含义:①当事件 x 发生以前,表示事件 x 发生的不确定性;②当事件 x 发生以后,表示事件 x 所含有(或所提供)的信息量。

信息量的单位由对数底 a 的取值决定。若对数以 2 为底,则单位是“比特”(bit — binary unit 的缩写);若以 e 为底,则单位是“奈特”(nat — nature unit 的缩写);若以 10 为底,则单位是“哈特”(Hart — Hartley 的缩写)。通常采用“比特”作为信息量的实用单位。

例 1-1-3 掷两粒骰子,当其向上面的小圆点数之和是 3 时,该消息所包含的信息量是多少? 当小圆点数之和是 7 时,该消息所包含的信息量是多少?

解 (1) 两粒骰子向上面的小圆点数之和为 3 的有 (1, 2) 和 (2, 1) 两种可能,总的组合数