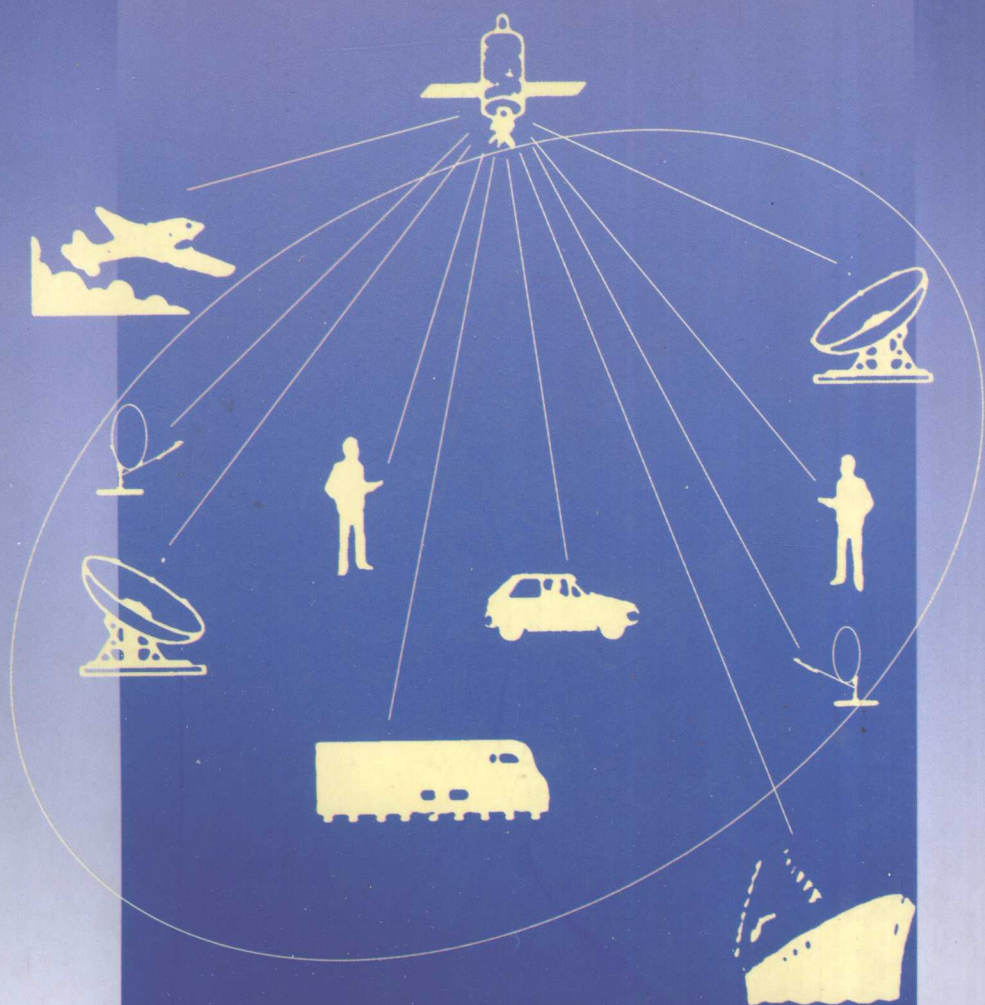


现代通信系统原理

(修订版)

王秉钧 孙学军 编著
王少勇 田宝玉



天津大学出版社

现代通信系统原理

(修订版)

王秉钧 孙学军 编著
王少勇 田宝玉

天津大学出版社

内 容 提 要

本书是在 1991 年出版的《现代通信系统原理》教材的基础上根据通信技术的最新发展和教学改革实践的需要,重新修订编写而成的。

书中比较全面系统地讲述现代通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法。全书共分 10 章,包括绪论、信号与噪声、调幅系统、角调系统、模拟信号的数字传输、数字信号的基带传输、数字信号的载波传输、信道复用和多址方式、通信网、纠错编码等。各章均有习题,并附有部分习题答案。

本书除必要的数学推导外,注重讲述物理概念,书中叙述深入浅出、通俗易懂、重点突出,便于自学。

本书可作为高等院校工科通信工程、计算机通信、信息技术和其它相近专业本科生教材,也可供从事这方面工作的广大科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统原理/王秉钧编著.-修订版.-天津:天津
大学出版社,1999.8 (2003.8 重印)
ISBN 7-5618-1158-6

I . 现… II . 王… III . 通信系统—通信理论 IV . TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 32089 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨风和
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷 河北省昌黎县人民胶印厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 23.25
字 数 581 千
版 次 1991 年 12 月第 1 版 1999 年 8 月第 2 版
印 次 2003 年 8 月第 4 次
印 数 13 001—16 000
定 价 26.00 元

再 版 前 言

本教材出版后得到了全国各兄弟院校广大师生的热烈欢迎和鼓励,并于1991、1993、1995、1997、1998年多次重印。现根据通信技术的最新发展和教学改革实践的需要,广泛征求了各校有关专家和广大任课教师及学生的意见,并在深入研究了国内外同类教材特点的基础上对原教材进行了修订。

当前,人类已进入信息化社会的新时代,通信技术正以惊人的速度向前发展。数字化、智能化、宽带化、综合化、个人化和全球一网是现代通信发展的总趋势。教材的更新一定要考虑到现代通信发展的方向。但同时要注意到《通信原理》课程是专业基础课的性质和地位。该专业基础课的基本任务主要是介绍通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法。其中心内容是讲解各种调制方式和编码方式的基本原理和基本性能(可靠性和有效性),以便为研究设计新的通信系统,掌握通信系统的发展方向和具体技术奠定基础。因此,必须保持本课程基本理论的相对稳定性,不能过多涉及更新换代十分迅速的具体技术细节。因此,本教材在修编时力求兼顾基础性、实用性、系统性和方向性,并删除了部分次要内容,增加了不少新内容,有些章节进行了重写。

本书参考学时数为80~100学时。其内容兼顾模拟通信和数字通信,但侧重数字通信。全书共分10章,可分为三大部分。第一部分包括一、二两章,是全书的基础部分,主要讲述通信系统的基本模型、基本指标和信息、信道、信道容量等基本概念,以及信号和噪声的基本理论。第二部分包括三、四两章,讲述模拟通信的基本原理和基本性能。同时也是第七章数字信号载波传输的基础。由于数字信号的模拟调制及其传输性能在数字通信中占有重要地位,因此掌握模拟调制原理和性能,对加深理解数字通信具有重要作用。第三部分包括第五、六、七、八、九、十共六章,主要讲述数字通信的基本原理、基本技术和基本性能以及信道复用、多址方式、纠错编码和通信网等内容。各章均有习题,书后并附有部分习题答案。使用本教材时可根据课程设置的具体情况及教学要求的侧重点不同进行取舍选授、灵活掌握,学时可酌情减少。

本书由王秉钧主编,并编写了第一、二、三、四、五、六各章;孙学军编写第七、九两章;王少勇编写第八章及§5.8、§5.9,田宝玉编写第十章。

参加本书审稿工作的有北方交通大学冯玉珉教授、北京邮电大学吴伟陵教授和张惠民教授、中国科技大学朱近康教授、河北大学陈永甫教授和河北工业大学吴友佩、解放军信息工程学院肖钊良、重庆邮电学院穆承德、天津理工学院杨秀峰和窦晋江、中国民航学院张广森等同志。本书由冯玉珉教授担任主审。以上同志对本书提出了许多宝贵意见。对此,我们表示诚挚的谢意。

此外,中科院院士叶培大教授审阅了本书;工程院院士周炯槃教授对本书的出版也给予了热情的关怀和支持。在此,我们表示由衷的感谢。

由于编者水平所限,书中可能存在疏漏和错误,恳请读者批评指正。

作 者

1998年10月

目 录

第一章 绪 论

1.1 通信系统模型	(1)
1.2 信息及其度量	(3)
1.3 信道与信道容量	(4)
1.3.1 信道	(4)
1.3.2 信道容量	(5)
1.4 通信系统的主要性能指标	(7)
习题	(8)

第二章 信号与噪声

2.1 信号的频谱分析	(9)
2.1.1 傅立叶级数	(9)
2.1.2 傅立叶变换	(10)
2.1.3 功率谱密度和能量谱密度	(12)
2.1.4 周期信号的功率谱密度	(15)
2.2 卷积和相关	(15)
2.2.1 卷积	(15)
2.2.2 相关	(18)
2.3 随机过程及其统计特性	(22)
2.3.1 随机过程	(22)
2.3.2 分布函数和概率密度	(23)
2.3.3 平稳随机过程	(24)
2.3.4 随机过程的数字特征	(24)
2.3.5 平稳随机过程的遍历性	(27)
2.4 随机过程的频谱特性	(28)
2.4.1 功率谱	(28)
2.4.2 功率谱与相关函数的关系——维纳—欣钦定理	(29)
2.4.3 功率谱的带宽	(31)
2.5 随机过程通过线性系统	(32)
2.6 噪声及其通过乘法器的响应	(34)
2.6.1 散粒噪声	(34)
2.6.2 热噪声	(35)
2.6.3 白噪声	(37)
2.6.4 可用功率、等效噪声温度和噪声系数	(38)
2.6.5 乘法器的噪声响应	(39)

2.6.6 等效噪声带宽	(40)
2.7 窄带噪声	(41)
2.8 正弦波加窄带高斯噪声	(43)
附录 误差函数表	(46)
习题	(48)

第三章 调幅系统

3.1 标准调幅(AM)	(53)
3.1.1 标准调幅的波形及其频谱	(53)
3.1.2 调幅波(AM)的产生	(56)
3.1.3 调幅波(AM)的功率分布和效率	(56)
3.2 抑制载波双边带调幅(DSB)	(57)
3.2.1 DSB 的波形及其频谱	(58)
3.2.2 DSB 调幅波的产生	(58)
3.3 单边带调幅(SSB)	(58)
3.3.1 滤波法产生单边带信号	(59)
3.3.2 相移法产生单边带信号	(61)
3.4 残留边带调幅(VSB)	(62)
3.5 调幅信号的相干解调	(63)
3.5.1 标准调幅和双边带信号的解调	(64)
3.5.2 单边带信号的解调	(65)
3.5.3 残留边带信号的解调	(67)
3.6 调幅信号的非相干解调	(68)
3.6.1 标准调幅信号的非相干解调	(68)
3.6.2 具有大载波单边带信号的非相干解调	(69)
3.6.3 具有大载波残留边带信号的非相干解调	(71)
3.7 本地载波同步的方法	(73)
3.8 各种调幅信号相干解调的噪声性能	(75)
3.9 AM 系统包络检波器的噪声性能	(78)
3.9.1 大信噪比情况	(79)
3.9.2 小信噪比情况	(80)
3.9.3 门限效应	(80)
3.10 各种调幅系统的比较	(81)
习题	(82)

第四章 角度调制系统

4.1 基本定义	(86)
4.1.1 调相波	(86)
4.1.2 调频波	(87)

4.1.3 FM 和 PM 之间的关系	(87)
4.2 窄带角度调制	(88)
4.2.1 窄带调频(NBFM)	(89)
4.2.2 窄带调相(NBPM)	(91)
4.2.3 窄带角调的解调方法	(92)
4.3 宽带调频(WBFM)	(92)
4.3.1 单正弦信号调频	(93)
4.3.2 调频信号的带宽	(94)
4.3.3 调频信号的功率分布	(95)
4.3.4 多频调制	(97)
4.4 宽带调相(WBPM)	(98)
4.5 宽带角调波的产生	(99)
4.6 宽带角调的解调方法	(101)
4.6.1 鉴频器解调	(101)
4.6.2 锁相环解调器	(102)
4.7 窄带角调系统的噪声性能	(104)
4.7.1 NBPM 的噪声性能	(104)
4.7.2 NBFM 的噪声性能	(105)
4.8 宽带调频(WBFM)的噪声性能	(107)
4.9 宽带调相(WBPM)的噪声性能	(111)
4.10 调频(FM)的门限效应	(113)
4.11 环路解调器	(117)
4.11.1 频率反馈解调器(FMFB)	(117)
4.11.2 锁相环解调器(PLL)	(118)
4.12 调频中的预加重和去加重	(118)
附录 贝塞尔函数表 $J_n(\beta)$	(123)
习题	(123)

第五章 模拟信号的数字传输

5.1 抽样定理	(127)
5.1.1 低通信号的抽样定理	(127)
5.1.2 与抽样有关的误差	(130)
5.1.3 带通信号的抽样	(131)
5.2 脉冲振幅调制(PAM)	(132)
5.2.1 自然抽样	(132)
5.2.2 平顶抽样(瞬时抽样)	(134)
5.3 脉冲编码调制(PCM)	(137)
5.3.1 脉码调制的基本原理	(137)
5.3.2 量化	(139)

5.3.3 压缩与扩张	(142)
5.3.4 编码	(146)
5.3.5 逐次比较型编译码原理	(148)
5.3.6 二进制 PCM 系统的噪声性能	(151)
5.4 增量调制(ΔM 或 DM)	(152)
5.4.1 预测编码的概念	(152)
5.4.2 增量调制(ΔM 或 DM)	(153)
5.4.3 ΔM 与 PCM 系统的比较	(156)
5.5 改进型增量调制	(157)
5.5.1 总和增量调制($\Delta-\Sigma M$)	(157)
5.5.2 数字压扩增量调制	(159)
5.6 增量脉码调制(DPCM)	(160)
5.7 自适应差值脉码调制(ADPCM)	(161)
5.8 语音压缩编码	(162)
5.8.1 线性预测编码	(164)
5.8.2 多脉冲线性预测编码器	(166)
5.8.3 矢量量化	(167)
5.8.4 码激励线性预测编码	(167)
5.8.5 多带激励编码	(168)
5.9 图像压缩编码	(168)
习题	(171)

第六章 数字信号的基带传输

6.1 数字基带信号的常用码型	(175)
6.2 数字基带信号的频谱分析	(179)
6.3 无码间串扰的基带传输特性	(183)
6.4 无码间串扰基带传输系统的抗噪性能	(188)
6.5 最佳基带传输系统	(190)
6.5.1 最佳接收的一般概念	(190)
6.5.2 匹配滤波器与相关器	(191)
6.5.3 发送和接收滤波器传输函数的最佳分配	(195)
6.5.4 误码率与归一化信噪比的关系	(195)
6.6 眼图和均衡	(196)
6.6.1 眼图	(196)
6.6.2 均衡	(197)
6.7 部分响应系统	(199)
6.7.1 部分响应波形	(199)
6.7.2 差错传播	(199)
6.7.3 部分响应基带传输系统的相关编码和预编码	(200)

6.8 扰码与解扰	(203)
习题	(204)

第七章 数字信号的载波传输

7.1 二进制数字调制原理	(208)
7.1.1 二进制数字调制信号的产生	(208)
7.1.2 二进制数字调制信号的解调	(210)
7.2 二进制数字调制信号的频率特性	(212)
7.2.1 ASK 信号的功率谱	(212)
7.2.2 FSK 信号的功率谱	(214)
7.2.3 PSK 信号的功率谱	(214)
7.3 二进制数字调制系统的噪声性能	(214)
7.3.1 ASK 系统	(214)
7.3.2 FSK 系统	(216)
7.3.3 PSK 和 DPSK 系统	(218)
7.3.4 二进制频带传输系统的简单比较	(220)
7.4 二进制数字信号的最佳接收	(221)
7.4.1 ASK 系统	(222)
7.4.2 FSK 系统	(222)
7.4.3 PSK 系统	(223)
7.5 多进制数字调制系统	(224)
7.5.1 MASK 系统	(224)
7.5.2 MFSK 系统	(225)
7.5.3 MPSK 系统	(226)
7.5.4 多进制数字调制系统的性能及应用	(231)
7.6 现代数字调制技术	(233)
7.6.1 正交振幅调制(QAM)	(233)
7.6.2 交错正交相移键控(OQPSK)	(235)
7.6.3 无符号间干扰和抖动—偏移正交相移键控(IJF—OQPSK)	(237)
7.6.4 最小频移键控(MSK)	(239)
7.6.5 正弦频移键控(SFSK)	(241)
7.6.6 平滑调频(TFM)	(243)
7.6.7 调制前高斯滤波的最小频移键控(GMSK)	(245)
习题	(247)

第八章 信道复用和多址方式

8.1 多路复用和多址技术的基本概念	(249)
8.2 频分多路复用(FDM)	(250)
8.2.1 直接法	(250)

8.2.2 复级法	(252)
8.3 正交频分复用(OFDM)和编码正交频分复用(COFDM)	(253)
8.4 时分复用(TDM)原理	(257)
8.5 数字复接技术	(260)
8.5.1 概述	(260)
8.5.2 同步复接	(263)
8.5.3 准同步复接	(264)
8.5.4 CCITT 基群复接系统	(265)
8.5.5 CCITT 高次群复接系统	(267)
8.6 多址通信方式	(268)
8.6.1 频分多址(FDMA)方式	(270)
8.6.2 时分多址(TDMA)方式	(271)
8.6.3 码分多址(CDMA)方式	(273)
8.6.4 ALOHA 方式	(273)
8.7 码分多址	(276)
8.7.1 直接序列扩频码分多址系统	(276)
8.7.2 跳频码分多址系统	(278)
8.7.3 码分多址的主要特点和关键技术	(280)
习题	(284)

第九章 通信网

9.1 概述	(285)
9.1.1 通信网的概念	(285)
9.1.2 通信网的业务	(285)
9.1.3 通信网的类型	(286)
9.1.4 通信网的发展方向	(286)
9.2 通信网理论基础	(286)
9.2.1 通信网的基本要求	(286)
9.2.2 通信网的拓扑结构	(288)
9.2.3 通信网中的交换技术	(289)
9.2.4 通信网络控制	(290)
9.2.5 通信网的约定	(294)
9.3 基本通信网	(299)
9.3.1 交换网	(299)
9.3.2 广播网	(301)
9.3.3 介质访问控制方法	(304)
9.4 现代通信网	(306)
9.4.1 ISDN	(306)
9.4.2 宽带 ISDN	(308)

9.4.3 智能网	(310)
9.4.4 个人通信网(PCN)	(311)
习题与思考题	(312)

第十章 纠错编码

10.1 概述	(314)
10.1.1 纠错编码的基本概念	(314)
10.1.2 差错控制方法	(317)
10.2 线性分组码	(320)
10.2.1 基本概念	(320)
10.2.2 几种简单的线性分组码	(324)
10.2.3 循环码	(325)
10.2.4 几种重要的线性分组码	(332)
10.3 卷积码	(335)
10.3.1 基本概念	(335)
10.3.2 卷积码的译码方法	(337)
10.4 网格编码调制(TCM)	(340)
10.4.1 TCM 编码调制器的结构	(340)
10.4.2 信号集合划分	(341)
10.4.3 编码器的设计	(342)
10.4.4 TCM 编码调制的性能	(344)
习题	(344)
部分习题答案	(348)
参考文献	(358)

第一章 绪 论

1.1 通信系统模型

通信是将消息从发信者传输给收信者。这种传输是利用通信系统实现的。

通信系统是指完成通信这一过程的全部设备和传输媒介,一般可概括为图 1.1-1 模型。

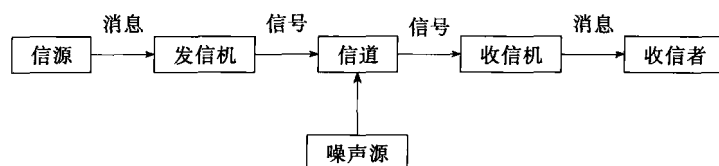


图 1.1-1 通信系统模型

图中,信源的作用是产生(形成)消息。消息有许多种形式,如符号、文字、语言、音乐、数据、图片、活动图像等。消息带有需要送给收信者的信息。因此,消息是用以载荷信息的有次序的符号序列(包括状态、字母、数字等)或连续的时间函数。前者称为离散消息,如书信、电报、数据等;后者称为连续消息,如语言、静止图片、活动图像等。这里“离散”或“连续”是指时间上的离散或连续。

发信机的作用是将消息转换为适于在信道中传输的信号。信号是消息的直接反映,是与消息一一对应的东西。因此,信号是消息的载荷者。在电信系统里,它可以由电压、电流或电波等物理量来体现。在通信系统内传输的信号,当它为时间的连续函数时,称为“连续信号”,亦称为“模拟信号”。而当载荷信息的物理量(如电信号的幅度、频率、相位等)的变化在时间上离散时,则称为离散信号。如果不仅在时间上离散,而且取值也离散,则称之为数字信号。

消息转换为信号一般要经过三个步骤,即变换、编码和调制。它们可以分别进行,也可以混合在一起进行。

所谓变换,简单地说就是将表达消息的非电量的变化变换为电量的变化。例如,电话就是利用送话器把说话时声音压力的变化变换为相应的电流变化。对于这类变换设备的一般特性,通常只要求它们是线性的,即作用与响应成正比。

所谓编码,是指在数字通信系统里,为了某种目的而对数字信号进行的某种变换。例如用来提高传输有效性的信源编码,用来提高传输抗干扰性的纠错编码及用来保密的保密编码等。进行编码的设备称为编码器。

这里将着重介绍调制,因为本书的大部分内容与调制有关。

调制在通信系统中主要用来变换信号。从消息变换过来的原始信号通常称为基带信号(或低通信号)。它的特点是频谱由零频附近开始延伸到某个通常小于几兆赫的有限值。在某

些系统中,如直流电报、实线电话和有线广播等,基带信号可以直接在信道内传输,因此将这种系统称为基带传输系统。但大量的通信系统需要通过调制将基带信号变换为更适合于在信道中传输的形式。例如无线系统中,基带信号必须变换到射频波段才能进行有效的传输。即使在有线信道,有时也需经过调制使信号频率与信道有效传输频带相适应。

总之,调制过程对通信系统是至关重要的,因为调制方式在很大程度上决定了系统可能达到的性能。概括起来,调制有如下几个目的。

1)提高频率以便于辐射 在无线通信系统中,是用空间辐射方式传输信号的。由天线理论可知:只有当辐射天线的尺寸大于信号波长的 $1/10$ 时,信号才能被天线有效地辐射。这就是说,假设用 1 米的天线,辐射频率至少需要 30 MHz。调制过程可将信号频谱搬移到任何需要的频率范围,使其易于以电磁波的形式辐射出去。

2)实现信道复用 一般说来每个被传输信号占用的带宽小于信道带宽。因此,一个信道同时只传一个信号是很浪费的,此时信道工作在远小于其传输信息容量的情况下。但不能同时传输一个以上的信号,因为这将引起信号间的干扰。然而通过调制,使各个信号的频谱搬移到指定的位置,互不重叠,从而实现在一个信道里同时传输许多信号。由于这是在频率域内实现信道的多路复用,称之为频率复用。同样,在时间域里,利用脉冲调制或编码可使各路信号交错传输,也可实现信道复用,称之为时间复用。

3)改变信号占据的带宽 在通信系统中传输的常用信号类型(音频、视频或其它)的频谱占有许多倍频程。由于频率范围这样广,传输特性将有很大变化,因此传输媒介将引入一些不可控制的对频率的选择作用。对此可以通过调制来避免,因为调制后信号频谱通常被搬移到某个载频附近的频带内,有效带宽相对于最低频率而言是很小的,是一个窄带带通信号。在很窄的频带内,传输特性的变化就不会那样大了。

4)改善系统性能 以后将会看到,通信系统的输出信噪比是信号带宽的函数。根据信息论的一般原理可知,宽带通信系统一般表现有较好的抗干扰性能。也就是说将信号变换,使它占据较大的带宽,它将具有较强的抗干扰性。例如,宽带调频信号的传输带宽比调幅信号宽,因此它的抗干扰性能比调幅高。理论上可以证明,有可能用带宽来换取信噪比。带宽和信噪比的互换可由各种类型的调制来完成。

信道在此是指将信号由发信机传输到收信机的媒介或途径(通道)。信道的种类很多,概括起来有两种,即有线信道与无线信道。信道的传输性能直接影响到通信的质量。

在通信系统中,噪声来源很多,它散布在系统各点。为了分析方便,在图 1.1-1 中将噪声源集中表示在一个方框里。

收信机的作用与发信机相反,用来完成解调、解码等任务,以将信号转换为消息。

收信者是消息传输的对象,它的作用与信源相反。信源和收信者可以是人或设备。因此,有时也叫做发终端和收终端。

图 1.1-1 通信系统模型是对各种通信系统的简化概括,可以反映通信系统的共性。根据所研究的对象或关心的问题不同,还会出现一些不同形式的具体的通信系统模型。例如,结合模拟通信系统的要求,可将图 1.1-1 具体化为图 1.1-2。

可见,在模拟通信系统中,发信机简化为调制器,收信机简化为解调器,主要是强调在模拟通信系统中调制的重要作用。从原则上讲,调制和解调对信号的变换起着决定性作用,是保证通信质量的关键。至于放大、滤波、变频等过程都可以看作是理想线性的,并将它们合并到信

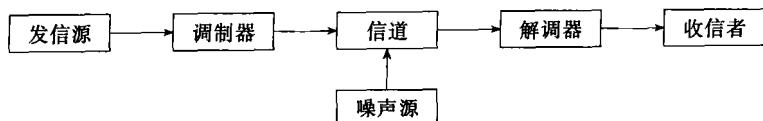


图 1.1-2 模拟通信系统模型

道中去。

对于数字通信系统,图 1.1-1 可以具体化为图 1.1-3。其中信源编码包括为提高传输有效性而采取的编码。前面提到的数字加密在此也归并到信源编码器内。信道编码是实现自动检错和纠错目的的纠错编码。

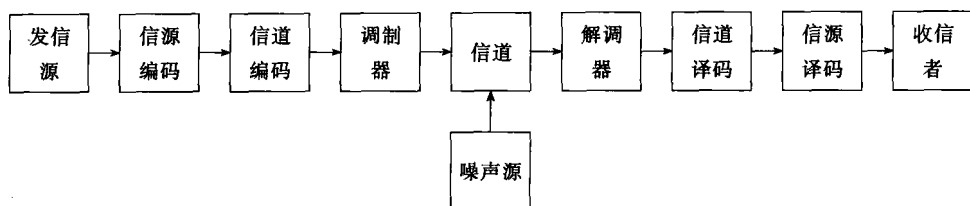


图 1.1-3 数字通信系统模型

应当指出,实际数字通信系统并非必须包括图 1.1-3 中的所有环节,如基带传输系统就不包括调制与解调环节。至于采用哪些环节,取决于具体的设计条件和要求。此外,在数字通信系统中同步系统是不可或缺的。但因它的位置往往不是固定的,因此图中没有画出。

最后应该指出,虽然本节提供的都是通信系统简化模型,但是它们往往决定着通信系统的质量。本课程主要是讨论通信系统的基本原理、技术和性能,并解决通信系统中的一些共性问题。因此,本课程的讨论可以说是围绕通信系统模型进行的。

1.2 信息及其度量

综上所述可以看出,通信系统中传输的具体对象是消息,但是通信的最终目的在于传递信息。因此,在研究具体通信系统之前需要明确信息的含义。

长期以来,信息的概念有许多种说法。据不完全统计,古今中外,关于信息的成文定义就不下 100 种,而且这些定义之间存在许多矛盾。

如前所述,在通信中,通常把文字、语言、数据、图像等等都看成是“消息”的“集合”。这些消息集合具有一定的统计特性或概率特性。因而将“信息”定义为对消息的统计特性的一种定量描述。更具体地说,当人们得到消息之前,对它的内容有一种“不确定性”。信息就是对这种不确定性的定量描述。

当人们得到消息后,若事前认为消息中所描述事件发生的可能性越小,就认为这个消息带给他的信息量越大。可见,信息的量值必然与消息所代表事件的随机性或事件发生的概率有关。从这点出发,信息论利用统计学概念对信息提出了一个度量方法,把度量信息量的物理量称为信息量,也称信息。

设消息所代表的事件出现的概率为 $P(x)$,则该消息所含有的信息量

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.2-1)$$

式中若对数底 $a=2$, 则信息量的单位为比特(bit); 若 $a=e$, 则单位为奈特(nit), $1 \text{ 奈特} = \log_2 e \approx 1.443 \text{ 比特}$; 若 $a=10$, 则单位为哈特莱。

上述三种度量单位中应用最广泛的单位是比特。它代表出现概率为 $1/2$ 的消息所含有的信息量。在通信系统中, 当所传送的消息是两个等概率的消息之一时, 任一消息所含有的信息量为 1 比特。二进制数字通信系统中, 经常遇到的就是这种情况。在实际场合, 常把一位二进制数字称为 1 比特, 而不管这两个符号的出现概率是否相等。

除了上述单个消息所含有的信息量外, 实际上信源(或消息源)总是由若干个可能发生的消息所组成。设有 n 个消息, 概率分别为 $P_1(x)$ 、 $P_2(x)$ 、 $\dots$ 、 $P_n(x)$, 那么可以证明每一消息的平均信息量

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i(x) \log_2 P_i(x) \quad (1.2-2)$$

式(1.2-2)与统计热力学中熵的定义式类似。所以, 在信息论中, 通常将它称为信源的熵, 单位为 bit/符号。

1.3 信道与信道容量

1.3.1 信道

前面把信道定义为发信机和收信机之间用以传输信号的传输媒介或途径。但是, 在通信系统的分析研究中, 为了简化系统的模型和突出重点, 常常根据所研究的问题, 把信道范围适当扩大。除了传输媒介外, 信道还包括有关的部件和电路, 如天线与馈线、功率放大器、放大器与滤波器、混频器、调制器与解调器等。这种范围扩大的信道称为广义信道, 相应地把仅指传输媒介的信道称为狭义信道。

对通信系统进行分析时常用的一种广义信道是所谓调制信道。调制信道是从研究调制与解调角度定义的, 其范围从调制器的输出端至解调器的输入端, 如图 1.3-1 所示。从调制解调的角度来看, 调制器的作用是产生已调信号, 解调器的作用是将已调信号恢复为原来的调制信号。至于调制器输出端至解调器输入端之间的一切部件和媒质, 只是起把已调信号由调制器输出端传输到解调器输入端的作用。因此可将其视为传输已调信号的一个整体——调制信道。

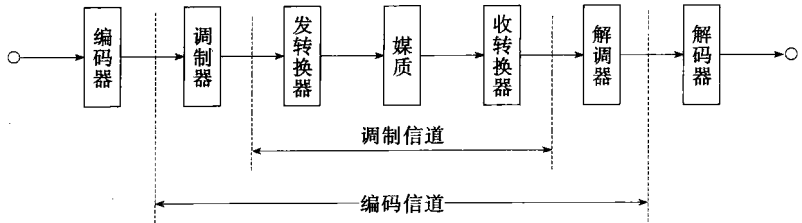


图 1.3-1 调制信道与编码信道

调制信道一般可以看成是一个输出端上叠加有噪声的时变线性网络。若信道参量不随时间变化(恒参信道), 则线性时变网络可以用线性时不变网络代替。信道传输函数 $H(\omega, t)$ 变为

$H(\omega)$ 。图 1.3.2(a)表示调制信道的一般模型,今后在分析通信系统性能时经常用到。其中 $n(t)$ 代表信道噪声。这里是把信道内各处的噪声集中用一个作用在输出端的噪声源表示。

在数字通信系统中,如果仅研究编码和解码问题,可得到另一种广义信道——编码信道。编码信道的范围是从编码器输出端至解码器输入端(见图 1.3-1)。这是因为从编码和解码角度来看,编码器是把信源产生的消息信号转换为数字信号;反之,解码器是将数字信号恢复原来的消息信号;而编码器输出端至解码器输入端之间的一切环节只是起了传输数字信号的作用,所以可以把它看成一个整体——编码信道。当然,根据研究问题的不同,还可以定义其它广义信道。

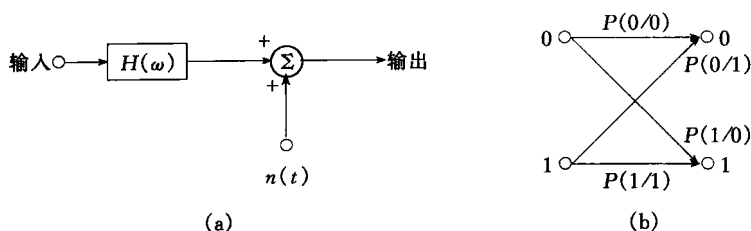


图 1.3-2 调制信道与二进制编码信道模型

(a)调制信道的一般模型;(b)二进制编码信道模型

在数字通信系统中,由于噪声和信道带宽有限,在传输中不可避免地会出现差错。如信道输入是二进制数字信号的情况。当输入数字符号为 1 时,信道的输出可能因传输差错而变成 0;反之亦然。因此,对编码信道而言,最主要的是数字信号经信道传输后是否出现差错及出现差错可能性的大小。所以编码信道的作用可用信道转移概率描述。图 1.3-2(b)为常见的二进制无记忆编码信道模型。其中一组条件概率 $P(b/a)$ 的含义是:当输入为 a 符号时,输出为 b 的概率。其中 a, b 可取 1 和 0。这组条件概率描述了信道的基本统计特性。显然, $P(0/0)$ 和 $P(1/1)$ 为正确转移概率; $P(1/0)$ 和 $P(0/1)$ 为错误转移概率。

信道是通信系统中不可缺少的一部分,其特性对信号传输有很大的影响。信道种类繁多,是后续专业课研究的重点内容之一。限于篇幅,这里只对后面分析问题要用到的概念做简要介绍。

1.3.2 信道容量

根据香农信息论,对于连续信道,如果信道带宽为 B ,并且受到加性高斯白噪声的干扰,则信道容量的理论公式为

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (\text{b/s}) \quad (1.3-1)$$

式中, N 为白噪声的平均功率; S 是信号的平均功率; S/N 为信噪比。信道容量 C 是指信道可能传输的最大信息速率(即信道能达到的最大传输能力)。虽然上式是在一定条件下获得的(要求输入信号也为高斯信号才能实现上述可能性),但对其他情况也可作为近似式应用。

香农公式的严格证明比较复杂,已超出本书范围。根据上述公式可以得出以下重要结论:

①任何一个信道,都有信道容量 C 。如果信源的信息速率 R 小于或等于信道容量 C ,那么在理论上存在一种方法使信源的输出能以任意小的差错概率通过信道传输;如果 R 大于 C ,则无差错传输在理论上是不可能的。

②给定的信道容量 C 可以用不同的带宽和信噪比的组合来传输。若减小带宽,则必须发送较大的功率,即增大信噪比 S/N 。或者,若有较大的传输带宽,则同样的 C 能够用较小的信号功率(即较小的 S/N)来传送。这表明宽带系统表现出较好的抗干扰性。因此,当信噪比太小而不能保证通信质量时,常采用宽带系统,用增加带宽来提高信道容量,以改善通信质量。这就是通常所谓用带宽换功率的措施。但应指出,带宽和信噪比的互换过程并不是自动的,必须变换信号使之具有所要求的带宽。实际上这是由各种类型的调制和编码完成的。调制和编码过程就是实现此带宽与信噪比之间互换的手段。

③当信道噪声为高斯白噪声时,式(1.3-1)中的噪声功率不是常数而与带宽 B 有关。若设单位频带内的噪声功率为 n_0 (W/Hz),则噪声功率 $N = n_0 B$,代入式(1.3-1)后可得

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (1.3-2)$$

带宽 B 趋于 ∞ 时,有

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \approx 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (1.3-3)$$

由此可知,当 S 和 n_0 一定时,信道容量虽然随带宽 B 增大而增大,然而当 $B \rightarrow \infty$ 时, C 不会趋于无限大,而是趋于常数 $1.44 \frac{S}{n_0}$ 。

④由于信息速率 $C = 1/T$, T 为传输时间,代入式(1.3-1)则可得

$$I = T B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.3-4)$$

可见,当 S/N 一定时,给定的信息量可以用不同的带宽和时间 T 的组合来传输。和带宽与信噪比互换类似,带宽与时间也可以互换。

例 1.3-1 已知彩色电视图像由 5×10^5 个像素组成。设每个像素有 64 种彩色度,每种彩色度有 16 个亮度等级。设所有彩色度和亮度等级的组合机会均等,并统计独立。(1)试计算每秒传送 100 个画面所需的信道容量;(2)如果接收机信噪比为 30 dB,为了传送彩色图像所需信道带宽为多少? [注: $\log_2 x = 3.32 \lg x$]。

解: (1) 信息/像素 = $\log_2 (64 \times 16) = 10$ b

信息/每幅图 = $10 \times 5 \times 10^5 = 5 \times 10^6$ b

信息速率 $R = 100 \times 5 \times 10^6 = 5 \times 10^8$ b/s

因为 R 必须小于或等于 C , 所以信道容量

$$C \geq R = 5 \times 10^8 \text{ b/s}$$

(2) 令 $S/N = 1000$, 代入式(1.3-1)得

$$B_{\min} = \frac{C}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)} = \frac{C}{3.32 \lg \left(1 + \frac{S}{N} \right)} = \frac{5 \times 10^8}{3.32 \lg 1001} \approx 50 \text{ MHz}$$

例 1.3-2 设有一个图像要在电话线路中实现传真传输。大约要传输 2.25×10^6 个像素,每个像素有 12 个亮度等级。假设所有亮度等级都是等概率的,电话电路具有 3 kHz 带宽和 30 dB 信噪比。试求在该标准电话线路上传输一张传真图片需要的最小时间。

解: 信息/像素 = $\log_2 12 = 3.32 \lg 12 = 3.58$ b

信息/每幅图 = $2.25 \times 10^6 \times 3.58 = 8.06 \times 10^6$ b