

黄胜华 徐佩霞 编著

现代通信原理

中国科学技术大学出版社

TN 911

X454

0604991

现代通信原理

徐佩霞 黄胜华 编著

中国科学技术大学出版社

1989·合肥

前 言

本书是作者在中国科学技术大学无线电电子学系多年从事本课程教学的基础上编写的，可供高等院校通信专业学生作为教材，也可作为从事通信工作的科技工作者的参考书。本书着重介绍各种现代通信方式的原理和抗噪声性能分析，而不过多涉及具体电路和设备。

全书共分十章。第一章绪论，介绍通信系统的有关概念和通信系统中的基本问题；第二章讨论信号与噪声的基本特性；第三章和第四章介绍模拟调制方式，着重分析各种模拟调制方式的抗噪声性能；第五章介绍频分复用（FDM）和时分复用（TDM）二种多路通信方式的工作原理；第六章主要讨论脉冲编码调制（PCM）、增量调制（ ΔM ）以及差分脉冲编码调制（DPCM）的基本原理，本章还介绍了矢量量化（VQ）编码的基本原理；第七章论述数字基带传输原理，主要讨论数字基带信号传输及最佳基带传输系统；第八章介绍数字调制方式的原理，并进行了抗噪声性能分析；第九章为同步原理，讨论实现载波同步、位同步、帧同步及网同步的方法；第十章介绍差错控制编码的基本概念和原理，着重介绍循环码的构成和编译码方法。为了便于学生理解和复习，各章后面都附有习题，并在书末附有部分习题答案供参考。

本书第一章至第六章和第十章（包括习题）由黄胜华编写；第七章至第九章（包括习题）由徐佩霞编写。中国科学技术大学无线电电子学系主任尤兰荪教授和中国科学院研究生院电子学部傅祖芸副教授审阅了原稿，并提出了许多宝贵的意见。作者在此

致以衷心的感谢。

在本书的编审过程中，得到有关领导和许多同志的热忱支持和帮助。在此谨致谢意。

限于作者水平，书中难免存在不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

作 者

1989年2月22日于合肥

目 次

第一章 绪 论

§ 1.1	通信系统概述	(1)
§ 1.2	模拟通信系统和数字通信系统	(2)
1.2.1	模拟信号与数字信号	(2)
1.2.2	模拟通信系统	(3)
1.2.3	数字通信系统	(4)
§ 1.3	信道对信息传输的影响	(6)
§ 1.4	通信系统中的基本问题	(9)
§ 1.5	通信系统的主要性能指标	(10)
§ 1.6	通信的发展阶段和发展方向	(12)

第二章 信号与噪声

§ 2.0	引言	(14)
§ 2.1	确定信号分析	(15)
2.1.1	离散频谱和连续频谱	(15)
2.1.2	能量谱密度和功率谱密度	(19)
2.1.3	自相关函数与互相关函数	(23)
§ 2.2	确定信号通过线性系统	(27)
2.2.1	线性系统传输特性	(27)
2.2.2	无失真系统和理想低通滤波器	(28)
2.2.3	系统的带宽和上升时间	(31)
2.2.4	线性系统输出响应的谱密度	(35)

§ 2.3	随机信号和噪声	(36)
2.3.1	随机过程的数字特征	(37)
2.3.2	平稳随机过程的数字特征	(39)
2.3.3	随机信号和噪声的功率谱	(42)
2.3.4	随机信号通过线性系统	(44)
§ 2.4	起伏噪声	(46)
2.4.1	噪声的分类	(46)
2.4.2	起伏噪声的幅度分布	(47)
2.4.3	起伏噪声的功率谱密度	(48)
2.4.4	白噪声	(49)
§ 2.5	窄带高斯噪声	(52)
2.5.1	窄带高斯噪声的表示方法	(52)
2.5.2	窄带高斯噪声的统计特性	(56)
2.5.3	等效噪声带宽	(60)
§ 2.6	正弦信号加窄带高斯噪声	(61)
§ 2.7	噪声系数和等效噪声温度	(64)
2.7.1	噪声系数	(65)
2.7.2	等效噪声温度	(66)
2.7.3	级联网络的噪声系数	(67)
	习题	(68)

第三章 连续波调制

§ 3.0	引言	(75)
§ 3.1	调幅信号的波形和频谱	(76)
3.1.1	普通调幅 (AM)	(76)
3.1.2	双边带调制 (DSB)	(79)
3.1.3	单边带调制 (SSB)	(80)
3.1.4	残留边带调制 (VSB)	(86)
§ 3.2	调幅信号的解调和抗噪声性能	(89)

3.2.1	DSB、SSB、VSB 相干解调及其 抗噪声性能·····	(90)
3.2.2	AM 非相干解调及其抗噪声性能·····	(96)
3.2.3	调幅信号相干解调中同步误差的影响·····	(99)
§ 3.3	调角信号的频谱和带宽·····	(103)
3.3.1	调频波与调相波·····	(103)
3.3.2	调角信号的频谱和带宽·····	(107)
3.3.3	调角信号的产生方法和功率分配·····	(113)
§ 3.4	调角信号的解调及抗噪声性能·····	(115)
3.4.1	调角信号的解调方法·····	(115)
3.4.2	调角系统的抗噪声性能·····	(118)
§ 3.5	调频的门限效应及低门限解调方法·····	(130)
3.5.1	门限效应的物理原因·····	(130)
3.5.2	调频信号的低门限解调方法·····	(134)
	习题·····	(139)

第四章 脉冲模拟调制

§ 4.0	引言·····	(145)
§ 4.1	采样定理·····	(145)
4.1.1	低通信号采样·····	(146)
4.1.2	带通信号采样·····	(149)
4.1.3	采样恢复系统带内功率·····	(152)
§ 4.2	脉冲幅度调制 (PAM)·····	(155)
4.2.1	PAM 信号的产生及其频谱·····	(155)
4.2.2	PAM 信号的解调·····	(161)
§ 4.3	脉冲宽度调制 (PDM) 和脉冲 位置调制 (PPM)·····	(164)
4.3.1	PDM 信号·····	(165)
4.3.2	PPM 信号·····	(167)

4.3.3	PDM 信号和 PPM 信号的产生 及解调方法.....	(169)
§ 4.4	脉冲调制—连续波调制系统抗噪声性能.....	(174)
4.4.1	PAM-FM 系统.....	(175)
4.4.2	PPM-AM 系统.....	(179)
	习题.....	(183)

第五章 多路复用

§ 5.0	引言.....	(187)
§ 5.1	频分复用 (FDM).....	(188)
5.1.1	FDM 系统组成和工作原理.....	(189)
5.1.2	频分多路信号的主要特性.....	(190)
5.1.3	频分多路信号载波调制的过调制门限.....	(194)
§ 5.2	交叉干扰.....	(197)
§ 5.3	时分复用 (TDM).....	(202)
5.3.1	TDM 系统组成及工作原理.....	(202)
5.3.2	时分多路信号的帧结构.....	(204)
§ 5.4	TDM 系统信道带宽和串扰.....	(207)
5.4.1	PAM 时分复用系统最小带宽.....	(207)
5.4.2	串扰.....	(208)
§ 5.5	TDM 系统的制度增益和门限.....	(212)
§ 5.6	时频频分混合多路复用.....	(213)
	习题.....	(214)

第六章 脉冲数字调制

§ 6.0	引言.....	(218)
§ 6.1	脉冲编码调制 (PCM) 基本原理.....	(218)
§ 6.2	均匀量化与非均匀量化.....	(221)
6.2.1	均匀量化.....	(221)

6.2.2	非均匀量化	(223)
§ 6.3	编码和解码	(229)
6.3.1	常用二进制码型	(229)
6.3.2	编码器工作原理	(231)
6.3.3	解码器工作原理	(239)
§ 6.4	PCM 系统抗噪声性能	(244)
6.4.1	量化噪声及量化信噪比	(244)
6.4.2	加性噪声及误码信噪比	(249)
6.4.3	PCM系统的带宽与信噪比互换关系	(251)
§ 6.5	时分多路 PCM 系统	(252)
6.5.1	时分多路 PCM 系统基本组成 和工作原理	(252)
6.5.2	时分多路 PCM 系统带宽	(254)
§ 6.6	增量调制 (ΔM) 基本原理	(256)
6.6.1	ΔM 系统基本组成及工作原理	(256)
6.6.2	ΔM 系统的量化误差和过载失真	(259)
§ 6.7	ΔM 系统抗噪声性能	(261)
6.7.1	量化噪声及量化信噪比	(262)
6.7.2	加性噪声及误码信噪比	(264)
6.7.3	ΔM 系统的带宽	(266)
6.7.4	ΔM 与 PCM 系统性能比较	(267)
§ 6.8	改进型增量调制	(269)
6.8.1	增量总和调制 ($\Delta-\Sigma$)	(270)
6.8.2	数字检测音节压扩增量调制	(274)
§ 6.9	差分脉冲编码调制 (DPCM)	(277)
6.9.1	DPCM 系统基本原理	(277)
6.9.2	DPCM系统的量化信噪比	(278)
§ 6.10	矢量量化 (VQ) 编码基本原理	(280)
	习题	(283)

第七章 数字基带传输原理

§ 7.0	引言	(287)
§ 7.1	基带信号的频谱分析	(288)
7.1.1	基带信号的基本码型	(288)
7.1.2	单个脉冲波形的频谱	(291)
7.1.3	基带随机脉冲序列的功率谱	(294)
§ 7.2	基带信号的传输	(301)
7.2.1	基带传输与码间串扰	(301)
7.2.2	奈奎斯特 (Nyquist) 定理	(303)
7.2.3	无码间串扰的基带传输特性	(308)
§ 7.3	加性噪声造成的误码率	(311)
§ 7.4	匹配滤波器	(315)
§ 7.5	最佳基带传输系统	(324)
7.5.1	理想信道下的最佳基带系统	(324)
7.5.2	非理想信道下的最佳基带系统	(329)
§ 7.6	眼图	(332)
§ 7.7	时域均衡原理	(334)
7.7.1	时域均衡的基本原理	(334)
7.7.2	时域均衡的实现	(339)
§ 7.8	部分响应技术	(341)
	习题	(348)

第八章 连续波数字调制

§ 8.0	引言	(354)
§ 8.1	数字调幅 (ASK) 原理	(355)
8.1.1	振幅键控信号的功率谱	(357)
8.1.2	ASK 系统的抗噪声性能	(360)

§ 8.2	正交幅度调制 (QAM)	(369)
8.2.1	全响应正交幅度调制	(370)
8.2.2	部分响应正交幅度键控	(374)
8.2.3	正交幅度键控信号的功率谱	(378)
8.2.4	正交幅度调制系统的抗噪声性能	(381)
§ 8.3	数字调频 (FSK) 原理	(382)
8.3.1	二进制 FSK 信号的功率谱	(383)
8.3.2	FSK 信号的产生和解调	(389)
8.3.3	数字调频系统的抗噪声性能	(395)
8.3.4	多进制 FSK 系统	(399)
§ 8.4	最小频移键控 (MSK)	(404)
§ 8.5	数字调相 (PSK) 原理	(411)
8.5.1	绝对相移键控和相对相移键控	(412)
8.5.2	相移键控信号的功率谱	(414)
8.5.3	PSK 信号的产生	(416)
8.5.4	PSK 信号的解调和抗噪声性能	(420)
8.5.5	偏移四相相移键控 (OQPSK)	(436)
	习题	(440)

第九章 同 步 原 理

§ 9.0	引言	(443)
§ 9.1	同步的内容和要求	(444)
§ 9.2	载波 (副载波) 同步	(446)
9.2.1	插入导频信号的载波同步	(446)
9.2.2	提取载波分量的载波同步	(448)
9.2.3	载波同步系统的性能	(457)
§ 9.3	码位同步	(461)
9.3.1	码位同步不良对误码率的影响	(462)

9.3.2	码位同步信号的提取	(465)
9.3.3	码位同步系统的性能	(469)
§ 9.4	帧同步	(472)
9.4.1	几种帧同步方法	(473)
9.4.2	帧同步系统的性能	(480)
9.4.3	帧同步保护	(482)
§ 9.5	网同步的基本概念	(484)
	习题	(489)

第十章 差错控制编码

§ 10.0	引言	(492)
§ 10.1	差错控制编码的基本概念	(494)
§ 10.2	常用检错码	(499)
§ 10.3	汉明 (Hamming) 码	(502)
§ 10.4	循环码	(512)
	习题	(530)

附 录

附录一	英语缩写名词中文对照表	(533)
附录二	正态误差函数表	(535)
	部分习题参考答案	(540)
	参考文献	(545)

第一章 绪 论

§ 1.1 通信系统概述

通信，一般地说，就是由一个地方向另一个地方传递消息。或者说，由一个地方向另一个地方传输信息。通信的方式多种多样。其中利用电信号来运载信息的通信方式即电信，是传输信息的最有效的方式。这是因为利用电信号几乎能在任意的通信距离上实现信息的快速、准确、可靠的传输。一百多年以来，电信技术飞速发展，并以各种业务形式获得了广泛的应用。如电报、电话、传真、数据传输、可视电话等，广义地说还有广播、电视、雷达、导航、遥测遥控、计算机通信等等。用以实现人与人、人与机器、机器与机器之间的信息传输和交换。通常，人们所说的通信指的就是电信。本课程就是论述、分析通信系统的基本工作原理和性能。

各种各样的通信系统，它们的具体设备构造和业务功能会各有不同。然而经过抽象和概括，都可以用图 1.1.1 所示的模型来表示它们共同的基本组成，包括：信息源、发信变换器、信道、收信变换器、收信者等五个组成部分。具体来说：

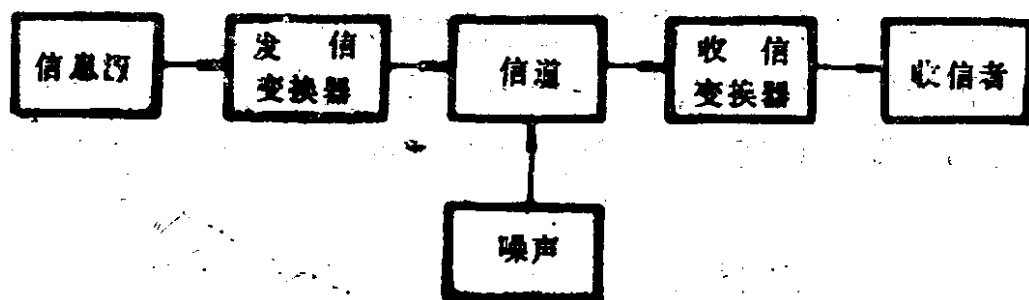


图 1.1.1 通信系统基本模型

信息源：将消息转换成电信号。电信号作为消息的表现形式携带着待传输的信息，所以常称作信息信号。

发信变换器：对信息信号实行某种变换，使其变为适于在信道中传输的信号。

信道：就是信号的传输媒质。信号经过它传送到接收端。

收信变换器：将接收到的信号反变换为信息信号。

收信者：把信息信号还原为相应的消息。

此外，还要考虑通信系统内外各种噪声干扰的影响。这些噪声来自发信设备、收信设备和传输媒质三个方面。图中将其集中在一起并归结为由信道引入。之所以这样处理是为了分析问题方便。

事实上，图 1.1.1 所示的基本模型不只是代表利用电信号的通信系统的基本组成。任何其它信号形式的通信系统都可以用这个模型来表示，只不过其中的信息信号不是电信号，而是其它形式的信号，如声音信号、光信号等。也就是说，这个模型可以概括地反映各种不同信号形式的通信系统的共性。

§ 1.2 模拟通信系统和数字通信系统

1.2.1 模拟信号与数字信号

通信系统可以传递的消息是多种多样的，如文字、符号、数据、语声、图象等等。所有各种各样的消息可以分为两大类，即连续消息和离散消息。所谓连续消息是指消息的状态是连续变化的，如语声、图象等。连续消息也称作模拟消息。而离散消息的状态是离散的，可数的。如文字、符号、数据等。由消息转换得到的电信号即信息信号，相应地也分为两大类：模拟信号与数字信号。

模拟信号：电信号的某一参量对应于模拟消息而连续取值。如话筒产生的话音电压信号，电视摄像管产生的图象电流信号

等。模拟信号通常是时间连续函数，但也有的是时间离散函数。模拟信号无论时间上是连续还是离散，取值一定是连续的。

数字信号：电信号的某一参量携带着离散消息，因而取值是离散的。如电报信号、数据信号、遥控指令等。当然，模拟消息也可以转换成数字信号。数字信号与模拟信号的不同点在于，数字信号不直接或不完全与消息相对应。

模拟信号和数字信号都可以在信道中传输。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，我们把通信系统相应地分为两类：模拟通信系统和数字通信系统。

1.2.2 模拟通信系统

模拟通信系统传输的是模拟信号。如电话、广播、电视等都属于模拟通信系统。我们可以用图 1.2.1 所示的模型来概括表示各种模拟通信系统的基本组成。与图 1.1.1 相比，这里用调制器和解调器具体表示了发信变换器和收信变换器。发信变换器和收信变换器还包括其它电路，但调制器和解调器是其关键部分。

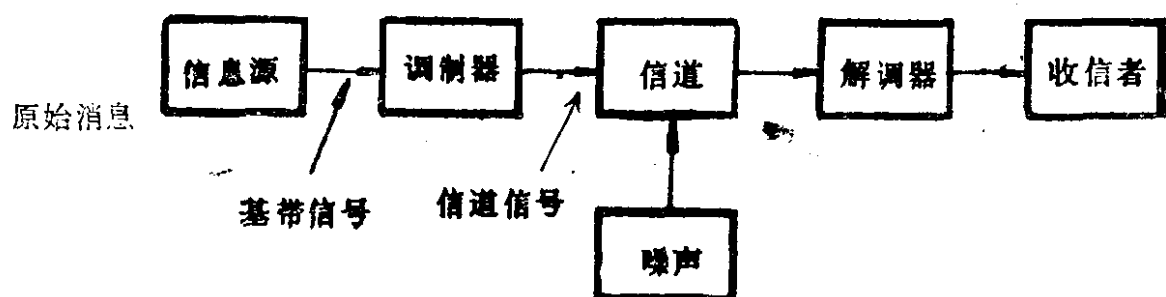


图 1.2.1 模拟通信系统模型

如前所述，信息源的作用是实现原始消息到信息信号的变换。收信者则实现其反变换。由于信息信号大多具有低通型频谱（从直流到几兆 Hz），属于基带信号的范畴，不宜直接进行远距离传输。因此，必须经过调制将其频谱搬移到较高的载波频率附近再送入信道进行传输。我们把经过调制后的信号称作已调信号或信道信号。而把调制前的信息信号称作调制信号。显然，对于

模拟通信系统，调制信号为模拟基带信号。调制的另一个重要作用是提高系统抑制噪声干扰的能力。不同的调制方式其抗噪声的能力不同。各种不同性能的通信系统正是建立在各种不同调制方式的基础上的。另外，只有通过调制才可能实现信道的多路复用，即在同一个信道中同时传输多路信息信号。由以上所述可以看出，调制在通信系统中所起的重要作用。

接收端的解调是调制的逆变换，即从已调信号中恢复信息信号。收音者再把信息信号还原为原来的消息。

模拟通信系统的信道信号是模拟信号，其频带一般都比较窄。因此，模拟通信系统的信道频带利用率较高。但抗干扰能力差则是其主要缺点。所以，常常将模拟信号转换为数字信号，简称模/数转换 (A/D)，然后进行数字通信，以求得到更好的通信质量。

1.2.3 数字通信系统

在数字通信系统中，传输的是数字信号。电报、数据传输、数字微波通信、计算机通信等，都是数字通信系统的实例。数字通信系统的基本模型如图 1.2.2 所示。从模型图可以看出，数字

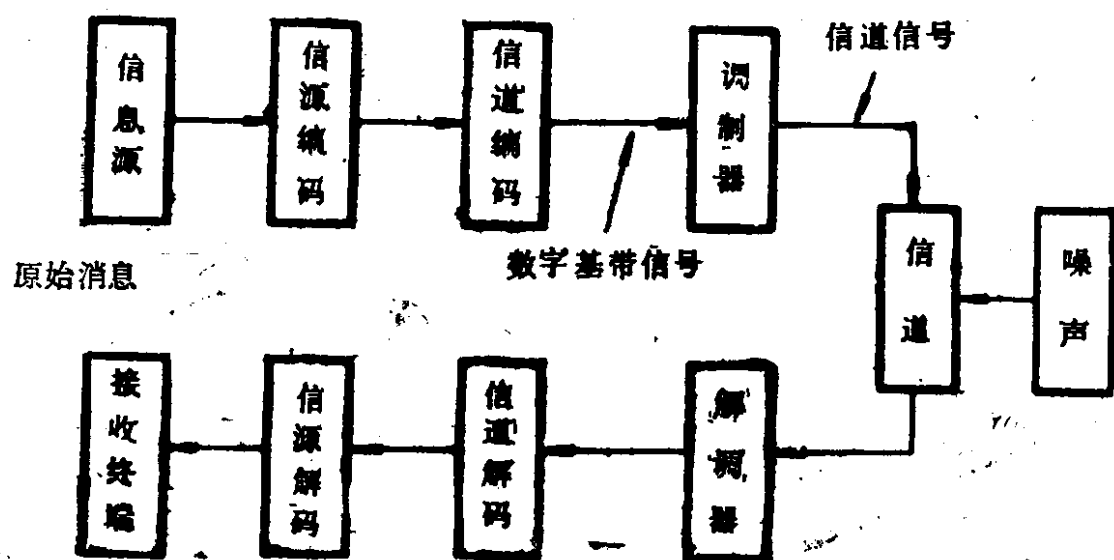


图 1.2.2 数字通信系统模型

通信系统同样也有从原始消息到信息信号和从数字基带信号到信道信号这两种变换和反变换过程。除此之外，数字通信系统还有如下组成部分：

信源编码：信源编码的主要任务是提高数字信号传输的有效性。具体说，就是用适当的方法降低数字信号的码速率以压缩频带。另外，如果信息源是数据处理设备，还要进行并-串变换以便进行数据传输。而如果待传送的是模拟信号，则还要进行模数转换（A/D）。信源编码的输出就是信息码。接收端信源解码则是信源编码的反变换。

信道编码：信道编码的任务是提高数字信号传输的可靠性。其基本作法是，在信息码组中按一定的规则附加一些码，以使接收端根据相应的规则检查或纠正接收码组中的（部分）误码。信道编码也称差错控制编码。接收端信道解码是其相反过程。

另外，根据需要有时还要进行加密编码。接收端则相应地进行解密。

同步：同步就是建立系统收发两端相对一致的时间关系。只有这样，接收端才能确定每一位码的起止时刻，并确定接收码组与发送码组的正确对应关系。否则，接收端无法恢复发送的信息信号。因此，同步是数字通信系统正常工作的前提。应当指出，模拟通信中的时分多路脉冲调制系统，电视系统，以及连续波调制采用相干解调时，也都有同步的问题。

在数字通信系统中，调制信号是数字基带信号。调制后的信号同样称作已调信号或信道信号。有时也可不经调制而直接传输数字基带信号，这种传输方式称作数字基带传输。

数字通信和模拟通信相比，主要有以下突出的优点：（1）抗干扰能力强。因为数字信号通过中继再生可以消除噪声的积累。（2）可采用差错控制编码，从而提高数字信号传输的可靠性。（3）保密性强。可采用具有复杂规律的加密算法对传输的数字信号进行加密。（4）便于计算机存储和处理。特别是，数字通信与