

邮电高等函授教材

通信系统原理

王晓涛 詹汉强 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了各种通信系统的基本原理和传输性能。全书共分十一章,其中包括振幅调制系统、角度调制系统、脉冲调制系统、数字基带传输系统、数字频带传输系统、信道中的噪声及其分析、二进制信号的最佳接收原理、信息论的基本知识等。

本书概念清楚,深入浅出,通俗易懂,语言通顺,便于自学。

本书为邮电高等函授教材,也可供高校教师和工程技术人员参考。

邮电高等函授教材

通信系统原理

王晓涛 詹汉强 编

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京第二新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

850×1168 1/32 1988年11月 第一版

印张:16¹²/₃₂ 页数:262 1988年11月北京第1次印刷

字数:434 千字 印数:1—7500 册

ISBN 7-115-03755-8/TN·159

定价:3.70元

前 言

本书是根据邮电高等函授《通信系统原理》教学大纲编写的。经邮电高等函授教材编审委员会审定，并推荐出版。

本书着重介绍各种通信系统的基本原理和传输性能，在内容上兼顾模拟通信和数字通信。考虑到函授教学的特点，在编写上着重基本原理的分析，力求深入浅出，通俗易懂，便于自学。全书共十一章，其中，第一章扼要介绍了通信系统的基本模型、要研究的主要问题和主要性能指标；第二、三章阐明连续波调制系统的基本原理并分析了它们的传输有效性；第四章对信道及信道内噪声作了常识性的介绍；第五章中给出了分析系统抗噪声性能所需的数学知识；接着第六章着重分析连续波调制系统的抗噪声性能；第七章重点阐明脉冲振幅调制系统和脉冲编码调制系统，第八、九章介绍数字基带传输系统与数字频带系统并分析它们的性能；第十章研究二进制信号的最佳接收；第十一章介绍信息论中有关信息传输的一些基本知识作为全书的结束。

本书的第一、二、三、六、七章由詹汉强编写，王晓涛编写了其余各章并负责全书的统编。

本书由南京邮电学院函授部林鸿积副教授主审，参加审稿的还有宋永仁、赵德铭、高其中、杨素清等同志。北京邮电学院函授分院倪维桢教授阅读了原稿，并提出许多宝贵意见。函授分院的顾澄宇、杨波、胡怡红等同志编写了本书习题的题解。作者在这里向他们表示衷心的感谢。

限于作者的水平，书中一定会有许多错误或不足之处，欢迎读者批评指正。

作者 1987年6月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 通信与通信系统的一般概念.....	(1)
1.2 模拟通信与数字通信.....	(3)
1.3 通信系统中的基本问题.....	(5)
1.4 通信系统的主要性能指标.....	(8)
1.5 学习本课程的几点建议.....	(10)
附录 A1.1 常用信号的频谱.....	(12)
A1.2 富氏变换的一些常用定理.....	(13)
A1.3 单位冲激函数的两个性质.....	(13)
《信号分析》复习题.....	(14)
第二章 振幅调制系统	(17)
2.1 引言.....	(17)
2.2 振幅调制 (AM)	(18)
2.3 双边带 (DSB) 调制.....	(36)
2.4 单边带 (SSB) 调制.....	(49)
2.5 残留边带 (VSB) 调制.....	(58)
2.6 各种振幅调制系统的定性比较.....	(63)
2.7 频分复用 (FDM)	(64)
本章小结.....	(67)
习题.....	(69)
第三章 角度调制系统	(75)
3.1 引言.....	(75)
3.2 调频信号和调相信号的基本性质.....	(76)
3.3 调频信号的频谱与功率.....	(86)

3.4	调相信号频谱的特点.....	(105)
3.5	调频信号的产生和解调.....	(109)
	本章小结.....	(118)
附录A3.1	贝塞尔函数表.....	(120)
	习题.....	(120)
第四章	信道与噪声	(124)
4.1	引言.....	(124)
4.2	信道的定义和模型.....	(125)
4.3	恒参信道对信号传输的影响.....	(130)
4.4	变参信道对信号传输的影响.....	(139)
4.5	信道内加性噪声.....	(145)
	本章小结.....	(151)
	习题.....	(152)
第五章	随机过程和噪声分析	(154)
5.1	引言.....	(154)
5.2	概率论的一些基本知识.....	(155)
5.3	随机过程和它的统计特性.....	(173)
5.4	平稳随机过程.....	(180)
5.5	平稳随机过程的功率谱密度 维纳——辛钦关系.....	(188)
5.6	高斯噪声和白噪声.....	(197)
5.7	平稳随机过程通过线性系统.....	(200)
5.8	窄带高斯噪声.....	(208)
5.9	正弦波加窄带高斯噪声.....	(220)
	本章小结.....	(224)
附录A5.1	互补误差函数.....	(226)
第六章	连续波调制系统的抗噪声性能	(238)
6.1	引言.....	(238)
6.2	双边带(DSB)调制系统的抗噪声性能.....	(239)

6.3	单边带 (SSB) 调制系统的抗噪声性能	(242)
6.4	振幅调制 (AM) 系统的抗噪声性能	(245)
6.5	调频系统的抗噪声性能	(249)
	本章小结	(260)
	习题	(261)
第七章	脉冲调制系统	(263)
7.1	引言	(263)
7.2	抽样定理	(265)
7.3	脉冲振幅调制 (PAM)	(273)
7.4	时分复用 (TDM)	(282)
7.5	脉冲编码调制 (PCM)	(284)
7.6	增量调制 (ΔM) 的基本原理	(296)
7.7	脉冲编码调制系统的抗噪声性能	(301)
	本章小结	(306)
	习题	(307)
第八章	数字基带传输系统	(311)
8.1	引言	(311)
8.2	数字信号的特点与数字通信系统的主要技 术指标	(313)
8.3	数字基带信号	(317)
8.4	数字基带信号形式的变换与波形的形成	(333)
8.5	数字基带传输系统的基本模型, 码间干扰 的概念	(341)
8.6	数字基带传输系统的理想传输函数	(345)
8.7	数字基带传输系统的误码率	(355)
	本章小结	(366)
	习题	(367)
第九章	数字频带传输系统	(372)
9.1	引言	(372)

9.2	振幅键控(ASK)	(375)
9.3	振幅键控系统的抗噪声性能	(380)
9.4	频率键控(FSK)	(390)
9.5	频率键控系统的抗噪声性能	(397)
9.6	相位键控	(402)
9.7	相位键控系统的抗噪声性能	(413)
9.8	ASK、FSK、PSK 性能的比较, 多进 制数字调制的概念	(422)
	本章小结	(427)
	附录A9.1 已调信号 $g(t)\cos(\omega_c t + \theta_0)$ 的功率谱密度 ..	(429)
	习题	(430)
第十章	二进制信号的最佳接收	(434)
10.1	引言	(434)
10.2	最佳接收的概念与最大输出信噪比准则	(435)
10.3	匹配滤波器与相关器	(439)
10.4	二进制信号的最佳接收	(448)
10.5	ASK、PSK、FSK 信号的最佳接收	(462)
10.6	理想接收机与实际接收系统的比较	(472)
	本章小结	(474)
	附录A10.1 施瓦兹不等式的证明	(475)
	习题	(477)
第十一章	信息论的一些基本知识	(484)
11.1	引言	(484)
11.2	消息、信息和信息量	(485)
11.3	平均信息量	(488)
11.4	信道容量	(492)
11.5	带宽和信噪比的互换	(496)
11.6	实际系统与理想系统的差距	(498)
	本章小结	(502)

习题.....	(502)
习题答案.....	(505)
参考资料.....	(515)

第一章 绪 论

1.1 通信与通信系统的一般概念

学习《通信系统原理》课程，首先应该搞清楚，什么是通信？简单地说，通信就是把消息从一地传送到另一地。

实现通信的方式很多，古代的烽火台、金鼓、旌旗；现在的信函、电报、电话、传真、电视……等均属于通信的范畴。然而，随着现代科学技术的发展，人们对传送消息的要求越来越高，在各种各样的通信方式中，利用“电”来传送消息的通信方式（简称为电通信）用得越来越广泛。这是因为，电通信能使消息几乎在任意的通信的距离上实现迅速而可靠地传送。因此，在自然科学中涉及“通信”这一术语时，一般就是指电通信。就广泛的意义上来说，光通信也属于这一类，因为光也是一种电磁波。

消息从一地传至另一地要通过一定的传输媒质。按传输媒质的不同，通信可以分为两大类：有线通信和无线通信。有线通信使用导线作为传输媒质。这里的导线可以是架空明线、各种电缆、波导以及光导纤维等。图 1.1 中画出了一个有线载波电话通信的示意图。其中，电话机完成话音信号与音频电信号间的转换，而载波机则实现音频电信号与导线上传输的载波电信号之间的变换。当然，实际载波电话要比这里讲的复杂得多。所谓无线通信，它不需要架设导线，而是借助于宇宙空间作为传输媒质，也就是，利用无线电波在空间的传播来传送消息。图 1.2 中给出了无线电话通信的示意图。由图可知：发话人的话音信号仍然可用电话机变成电的话音信号，而发射机和发射天线把话音信号转换成相应的高频电磁波，然后通过宇宙空间发往另一地（通称为接收端）；

在接收端，接收天线及接收机将收到的高频电磁波进行一定处理和变换，还原成话音信号。

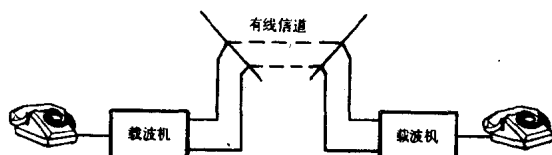


图 1.1 有线载波电话通信示意图



图 1.2 无线电话通信示意图

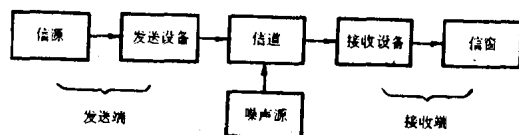


图 1.3 通信系统的一般模型

由上面的叙述可知：不论是有线通信，还是无线通信，为了实现信息的传递和交换，都需要一定的技术设备和传输媒质。通常就把完成通信任务所需要的一切技术设备和传输媒质所构成的总体称为通信系统。通信系统的一般模型如图 1.3 所示。下面简单地说明其中各部分的作用。

信源：即原始电信号的来源，它的作用是将消息转换成相应的电信号。常见的信源设备有：电话机、话筒、摄像机、电子计

算机以及各种数字终端设备等。

发送设备：它对信源所产生的原始电信号进行各种处理和变换，以便使它变换成适合于信道中传输的形式。一般来说，由于信源供给的原始电信号不适宜在信道中直接传输，所以要由发送设备对它进行必要的处理和变换。这些处理和变换包括：调制、放大和滤波等。在数字通信系统中还包括编码功能。

信道：就是发送设备和接收设备之间用于传输信号的传输媒质，这将在第四章中叙述。

接收设备：它所起的作用与发送设备相反，是对接收的信号进行必要的处理和变换，以便恢复出相应于发端的原始信号。接收设备应具有的功能是：放大、滤波和解调等。在数字接收设备中，还应包括译码的功能。

信宿：即原始信号的最终接收者。它的作用是把接收设备恢复出来的原始电信号转换成相应的消息。信宿可以是人，也可以是各种终端设备（包括计算机）。

噪声源：信号在信道中传输时，不可避免地会混入噪声，此外，通信系统的其它各部分也会产生噪声。也就是说，图中噪声部件是信道中的噪声和通信系统其它部分所产生的噪声的集中表示。这样表示并不影响通信过程中主要问题的研究，而且对分析问题还带来了不少方便。

图 1.3 概括地描述了通信系统的组成，它反映了通信系统的共性，人们通常把它称为通信系统的一般模型。今后，根据我们所要研究的对象和所关心的问题的不同，还会得出比较具体的其它形式的通信系统模型。对通信系统原理的研究，通常就是以通信系统的模型为基础而展开的。

1.2 模拟通信与数字通信

大家知道，通信系统中待传输的消息是各式各样的，它可以

是符号、文字、语音或图象等等。为了实现信息的传输和交换，需要把所传送的消息转换为相应的电信号(以下简称信号)，通常，这些信号是以它的某个参量来表示消息的。按照信号参量的取值方式以及它与消息之间的关系，我们把信号分为两类，即模拟信号与数字信号。模拟信号的某个参量如振幅可以取连续的无限多个值，并且直接与所传送的消息相对应。例如，话筒输出的话音信号、电视摄像机输出的电视图象信号等都属于模拟信号。数字信号是指不仅在时间上是离散的，而且在幅度上也是离散的信号，例如，脉冲编码调制的数字电话信号。

显而易见，我们根据通信系统中所传送的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分成模拟通信系统与数字通信系统。也就是，信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统，信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。

应当指出，模拟通信与数字通信是按照信道中所传送的信号差异来区分的，而不是根据信源输出的信号来划分的。因为，数字通信系统也可以利用来传送模拟信号，只不过，需要在发送端先把模拟信号变换成数字信号，这种变换称为模/数转换，即 A/D 转换，然后用数字通信方式进行传输，当然，在这种系统中，接收端需要把数字信号变换成模拟信号，这种变换称为数/模转换，即 D/A 转换，最后我们就可以还原成原始的模拟信号。

目前，不论是模拟通信或是数字通信，在实际的通信业务中都得到了广泛应用。不过，近年来，数字通信发展十分迅速，它在整个通信领域中所占的比重有日益增长的趋势。这是因为，它与模拟通信相比，数字通信更能满足对通信技术越来越高的要求。归纳起来，数字通信具有如下的优点：

(1) 抗噪声性能好。数字通信传送的信号是数字信号，它的取值为有限个，因此，在有噪声的情况下，接收端易于识别。尤其在远距离传输过程中，各中继站可以对数字信号波形进行整形再生而消除噪声的积累。此外，还可以采用各种差错控制编码方

法，使抗噪声性能进一步得到提高。

(2) 便于使用现代计算机技术对所传输的信息进行处理。接口也容易解决。

(3) 数字信号易于进行加密，有利于实现保密通信。

(4) 设备重量轻，功耗低，制造简单。数字通信系统中绝大部分部件采用数字电路。近年来，由于生产技术的迅速发展，几乎所有的数字电路都实现了集成化，大规模集成电路也已普遍应用。因而数字通信的设备容易做到体积小，功耗低，制造简单，可靠性高。

当然，数字通信也有一定的缺点，即它所占用的系统带宽要比模拟通信宽。以电话为例，一路模拟电话通常占据4千赫带宽，但一路数字电话可能要占据20千赫到60千赫的带宽。

由上面的介绍中可知，虽然数字通信和模拟通信相比具有一系列的优点，然而这是以占据较宽的频带为代价的。因此可以预期，在最近若干年内，模拟通信和数字通信这两种通信方式还会同时存在下去。在那些频带十分紧张而对通信质量没有特殊要求的场合，仍将沿用模拟通信。然而，当有待传输的数据量较多，传输可靠性和保密性要求较高时，往往宁可牺牲一些系统带宽而采用数字通信。当然，在那些带宽比较富裕的场合，例如，毫米波通信、光通信等系统中，无疑会选择数字通信方式。

1.3 通信系统中的基本问题

在1.1节中，我们已经介绍过通信系统的一般模型。在本节中，我们将从消息传输的观点出发，进一步阐明模拟通信系统和数字通信系统所要研究的基本问题。

前面我们已经提到，在通信系统的发送设备中，对信号要进行多种处理。然而，对于模拟通信来说，最重要的是如何实现调制和解调。这是因为由信源产生的原始信号通常具有较低频率的

频谱分量，一般不宜直接在信道中进行传输。因此，在发端一定要设法把它转换成适合于信道传输的频率，这一处理过程就叫做调制。经过调制后的信号称为已调信号，这种已调信号应具有两个基本特性：(1) 携带原有消息。(2) 适合于在信道中传输。与此对应，模拟通信系统接收设备中最重要的处理功能是解调，它是从已调信号中恢复出原始信号（或消息）。

根据以上分析，为了突出主要问题，对于模拟通信来说，我们可以把图 1.3 改成图 1.4 的形式，这就是模拟通信系统的模型。由于发端调制前的原始信号和收端解调后恢复的信号都具有频率较低的频谱分量，通常把它们称为基带信号，用 $f(t)$ 来表示，其相应的频谱用 $F(\omega)$ 来表示。也就是说，信源供给的基带信号经调制器后，将其调制在射频上，使其变成了已调的频带信号，用 $\varphi(t)$ 表示，其相应的频谱为 $\Phi(\omega)$ 。经信道传输，在接收端再经解调器，把频带信号恢复出基带信号。

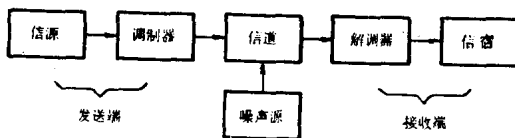


图 1.4 模拟通信系统的模型

由此可知，模拟通信系统所要研究的基本问题有：

- (1) 调制和解调的原理；
- (2) 已调信号的特性；
- (3) 信道与噪声特性及其对信号传输的影响；
- (4) 在有噪声的条件下，系统的抗噪声性能。

对于数字通信系统来说，它的发送设备中除了调制功能外，一般还包括另一个重要部件，这就是编码器，这是因为信源输出的原始信号不一定是数字信号而是模拟信号，这时就需要借助编码器实现模/数（ A/D ）转换。此外，即使原始信号为数字信号，

出于提高抗噪声性能或加强保密性的需要,也要进行一定的变换;这一切都是通过编码来实现。总之,编码的作用是把信源供给的原始信号变换成所要传输数字基带信号。与之相对应的接收设备中,除了解调功能外,还应有译码器部件,以便把解调后的数字基带信号变换成信宿所能接收的信号形式。

此外,数字通信系统中还存在一个同步问题,这是由于数字通信系统所传输的是有一定节拍的数字信号,因而,接收端必须保持与发送端相同的节拍,节拍一致就是同步,否则,收发步调不一致而造成混乱,使接收性能变坏。

综上所述,数字通信系统可以用图 1.5 来描述。不过图中未标出同步部分,因为同步的位置无法在框图中用固定的形式来表示。

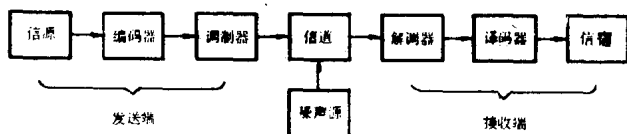


图 1.5 数字通信系统的模型

有必要指出,实际的数字通信系统并不一定象图 1.5 中所示的那样同时包括所有的环节,例如,当信源输出的原始信号已经是所需要的数字基带信号时,有可能省去编码和译码两个环节。此外,图 1.5 中的调制和解调看起来与图 1.4 中模拟通信系统的调制和解调一样,但其实质是不同的,因为数字基带信号的调制和解调与模拟基带信号的调制和解调是不同的,它们带有自己的一定特点。为了能够区别,把图 1.5 中的调制称为数字调制,其解调称为数字解调。

根据以上所述,数字通信系统要研究的基本问题有:

- (1) 数字调制和数字解调原理;
- (2) 数字基带信号及数字频带信号的特性;

(3) 信道与噪声的特性及其对数字信号传输的影响;

(4)* 抗噪声编码和译码;

(5)* 同步问题。

本课程将围绕着上面所提出的模拟通信和数字通信系统的基本问题进行论述。不过根据教学大纲的要求以及课程的分工,打*号的问题将留在“差错控制编码”、“数字通信原理”等课程中再作深入研究。

1.4 通信系统的主要性能指标

设计或评价一个通信系统时,往往要涉及通信系统的性能指标,否则就无法衡量通信系统质量的优劣。

通信系统的性能指标,内容很广泛,这里只从信号传输的角度来看,通信系统最主要的性能指标是:传输有效性和传输可靠性。所谓传输有效性是指在给定的信道带宽条件下,能够传输更多的消息;而所谓传输可靠性是在给定信道内接收到消息的准确程度。在实际的通信系统中,这两个性能指标往往是矛盾的,也即传输有效性的提高会导致传输可靠性的下降,反之亦然。因此,在实践中我们通常须根据具体情况和要求,采用折衷的方案进行设计。

下面,我们就模拟通信系统和数字通信系统的具体指标分别加以说明。

在模拟通信系统中,系统的传输有效性,通常用每路信号的有效传输带宽来衡量。这是因为,当信道允许的带宽给定后,每路信号的有效传输带宽越窄,信道内允许同时传送的信号路数越多,这种系统的传输有效性就越好。而信号的有效传输带宽与调制方式有关,例如,在传输一个消息(或节目)时,调频波的带宽要比调幅波的带宽宽得多,因此,调频通信系统的传输有效性不如调幅通信系统。

模拟通信系统的传输可靠性，通常可以用整个通信系统的输出信噪比来衡量。由于系统内存在着噪声，因而接收到的波形实际上是信号和噪声的混合物，它们经过解调器解调后同时在通信系统的输出端出现。因此，噪声对模拟通信系统的影响一般用输出端的有用信号功率与噪声功率之比来衡量，这就是输出信噪比。显然，一个系统输出信噪比越高，收到消息的准确性越高，通信质量就越好。例如，在电话通信时，要求系统输出信噪比保持在40分贝以上，此时话音清晰度可以保证听清95%以上的讲话内容。在收看电视节目时，系统信噪比要求达到40至60分贝才能将画面的细节看清楚。这里应该指出，输出信噪比一方面与接收的信号功率和系统的噪声功率有关，另一方面又和采用的调制方式有很大关系。这是因为，对于不同的调制方式，接收端采用不同的解调器，而各种解调器抑制噪声的能力是大不相同。例如，在调频通信系统中采用鉴频器进行解调调频信号，它具有较强的抑制噪声的能力。因此，该系统的输出信噪比较高，而调幅通信系统中常采用包络检波器来解调调幅信号，这种系统的输出信噪比较低。综合比较可知，调频通信系统的传输可靠性一般比调幅通信系统的好。当然，调频通信系统传输可靠性高是牺牲有效带宽而换取的。

大家知道，在数字通信系统中传输的是数字信号，在第八章将会知道，数字信号实际上可以看成是代表消息的一组脉冲组成的，每一个脉冲称为码元。若码元能取两个不同的值，则称为二进制码元，相应的数字信号，称为二进制信号。同样道理，若码元能取 N 个不同的值，则称 N 进制码元，相应的数字信号称为 N 进制信号。显然，数字通信系统的传输有效性可以由码元传输速率来衡量。码元传输速率又称码元速率，简称传码率，它被定义为：单位时间所传送的码元数目，显而易见，当码元的进制相同的，传码率越高，单位时间内传送的码元数越多，系统的传输有效性越好。

需要指出的是，按照信息论的观点，不同进制数的码元所携