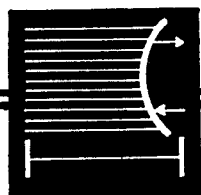


邮 电 高 等 学 校 教 材

通 信 系 统

吴纪永 张孝强 编

胡士琪 审



人民邮电出版社

内 容 提 要

本书讲述模拟与数字通信系统的基本原理及其性能的基本分析方法。全书共分九章，其中包括信号分析、噪声分析、各种调制系统原理及抗噪声性能、最佳接收原理及信息论基础知识等。讲述方法以物理概念与数学分析相结合，力求深入浅出，通俗易懂。

每章末均附有小结、思考题和习题，可供初学者自学参考。

本书为邮电高等学校通信专业《通信系统》课程的教材，也可供从事这方面工作的科技人员阅读和参考。

邮 电 高 等 学 校 教 材

通 信 系 统

吴 纪 永 张 孝 强 编

胡 士 琪 审

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北 京 东 长 安 街 27 号

河 北 省 邮 电 印 刷 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：787×1092 1/32 1985年12月第 一 版

印张：20 12/32 页数：326 1985年12月河北第一次印刷

字数：470 千字 印数：1—5,500 册

统一书号：15045·总3160-教720

定价：3.80 元

前 言

本书系邮电高等学校通信类有关专业基础课统编教材，主要介绍了各种通信系统的原理及其性能的分析方法。

全书分成两大部分。第一部分为基础理论，包括一、二、三、九章，其中简要讲述了通信的基本概念和确知信号的分析，着重介绍了分析随机信号和噪声的基本数学方法，还简介了信息论的基础知识，作为深入学习这门学科的入门。第二部分为通信系统，包括四、五、六、七、八章，着重介绍了各种通信系统的原理和抗噪性能，同时还介绍了最佳接收的基本原理。

本书按 100 学时编写，对于基础理论部分的内容可根据先修课程的情况进行取舍，学时数可酌情减少。

本书编写立足于读者自学，因而力求系统完整，说理清楚，因此亦可作为从事通信工作的科技人员参考。

本书第一、二、四、五、八章由吴纪永编写，三、六、七、九章由张孝强编写；思考题和习题由董尹令和杨震同志选编。本书主要参阅了我院祝景修、徐澄圻等同志编写的内部讲义《通信理论》及书末所列参考书。

本书由长春邮电学院胡士琪副教授审稿。在编写过程中得到了北京邮电学院倪维桢副教授、长春邮电学院曹金玉讲师、南京邮电学院林鸿绩副教授等同志的支持和帮助，在此我们对上述同志给予的热情帮助表示衷心地感谢。

限于编者水平，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者惠予批评指正。

编者

一九八四年十二月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 通信的概念.....	(1)
1.2 通信系统的基本模型.....	(2)
1.3 通信发展简史.....	(4)
1.4 通信系统的分类.....	(5)
1.5 通信系统性能的衡量.....	(7)
1.6 通信系统中的基本问题.....	(10)
1.7 本章小结.....	(12)
思考题	(13)
第二章 确知信号及其通过线性系统	(15)
2.1 信号的频谱分析.....	(16)
2.2 相关函数.....	(32)
2.3 巴什伐尔定理 能量谱和功率谱.....	(39)
2.4 确知信号通过线性系统.....	(48)
2.5 高频限带信号及其通过线性系统.....	(59)
2.6 解析信号及希尔伯特变换.....	(68)
2.7 本章小结.....	(76)
思考题	(78)
习题	(79)
第三章 信道与噪声	(87)
3.1 信道的分类.....	(88)
3.2 信道模型.....	(91)

3.3	信道噪声	(95)
3.4	概率论的基本知识	(99)
3.5	随机过程与噪声分析	(130)
3.6	本章小结	(189)
	思考题	(192)
	习题	(194)
第四章	幅度调制系统	(201)
4.1	调制的功能、分类及一般模型	(201)
4.2	常规调幅 (AM)	(207)
4.3	抑载双边带调制 (DSB/SC)	(214)
4.4	单边带调制 (SSB)	(217)
4.5	残留边带调制 (VSB)	(225)
4.6	线性调幅信号的相干解调	(231)
4.7	线性调幅信号的非相干解调	(247)
4.8	线性调制系统相干解调的抗噪声性能	(255)
4.9	线性调制系统非相干解调的抗噪声性能	(264)
4.10	本章小结	(269)
	思考题	(272)
	习题	(273)
第五章	角度调制系统	(281)
5.1	角度调制的基本概念	(281)
5.2	单音调制	(285)
5.3	窄带角度调制	(289)
5.4	单音宽带调频	(298)
5.5	多音调频	(305)
5.6	宽带调相	(308)
5.7	宽带角调制方法	(310)

5.8	角调信号的非相干解调·····	(314)
5.9	角度调制系统的抗噪声性能·····	(319)
5.10	调频系统的门限效应·····	(331)
5.11	频分复用 (FDM) ·····	(334)
5.12	本章小结·····	(337)
	思考题 ·····	(340)
	习题 ·····	(341)
第六章	脉冲调制及脉冲数字调制·····	(346)
6.1	低通信号抽样定理及实际抽样方法·····	(347)
6.2	脉冲幅度调制 (PAM) 系统 ·····	(362)
6.3	时分复用 (TDM) 的基本原理 ·····	(367)
6.4	脉冲幅度调制 (PAM) 系统抗噪声性能 ···	(375)
6.5	脉宽调制 (PWM) 系统与脉位调制 (PPM) 系 统·····	(383)
6.6	脉冲编码调制 (PCM) 系统·····	(385)
6.7	增量调制 (ΔM) 系统 ·····	(402)
6.8	其它的脉冲数字调制·····	(413)
6.9	本章小结·····	(416)
	思考题 ·····	(418)
	习题 ·····	(419)
第七章	数字调制系统·····	(425)
7.1	数字信号的基带传输·····	(426)
7.2	幅移键控 (ASK) 系统·····	(443)
7.3	频移键控 (FSK) 系统 ·····	(459)
7.4	相移键控 (PSK、DPSK) 系统 ·····	(471)
7.5	数字调制系统的抗噪声性能比较·····	(486)
7.6	数字调制系统所需信道带宽·····	(491)

7.7	多进制数字调制系统·····	(494)
7.8	本章小结·····	(501)
	思考题 ·····	(503)
	习题 ·····	(504)
第八章	最佳接收原理 ·····	(509)
8.1	最小均方误差准则和维纳(Wiener)滤波器···	(510)
8.2	最大信噪比准则和匹配滤波器·····	(522)
8.3	相关接收原理·····	(543)
8.4	理想接收机·····	(551)
8.5	本章小结·····	(577)
	习题 ·····	(580)
第九章	信息论基础知识 ·····	(587)
9.1	离散信源·····	(590)
9.2	离散信道与信道容量·····	(598)
9.3	信源编码·····	(602)
9.4	信道编码·····	(608)
9.5	连续消息的传输·····	(621)
9.6	本章小结·····	(630)
	习题 ·····	(631)
	附录·····	(637)
	参考书目·····	(644)

第一章 绪 论

1.1 通信的概念

在人类社会里，人与人之间要经常互通情报，交换消息。从一般意义来讲，这就是通信。通信就是消息的传递。研究通信系统也就是研究如何有效、可靠地把消息从甲地传递到乙地的问题。

最简单的通信方式的例子是面对面的交谈，讲话就是表达消息的一种方式。一个人通过语言向对方表达自己的意志、思想和感情，于是对方便获得了消息。这里，讲话人（发信者）是消息的来源，称为信源；话音通过空气传到对方，这传递的媒质称为信道；对方（收信者）听到后获得消息，是消息的归宿，称为信宿。这样就完成了传递消息的过程，也就构成了一个通信系统。然而，这样简单的通信方式不能满足各种通信的要求，因为单用语言不能表示所要传送的多种消息，并且也不能克服通信距离的限制。在古代，诸如烽火台、金鼓、旌旗、书信等传递消息的方式，也都是这种简单、原始的通信方式。

随着人类社会的发展，尤其电的发现及应用于通信，对传递消息提供了许多新的方式，象电话、电报、电视等。这不但使通信的内容更丰富，而且使消息几乎在任意的通信距离上迅速、准确、方便、可靠地传递。在当代社会里，用电传递消息的电通信几乎已成为“通信”一词的同义词了。本课程中所研究的通信，实际就是指“电通信”方式。

在电子计算机问世以后，特别是科学技术高度发达的今天，通信已不再局限于人与人之间进行。例如，工矿企业生产数据、科学实验数据的互相传递；地面对人造卫星、宇宙飞船发出指令，以及飞行体发回探测数据等等这一些通信都是在人与机器，或者机器与机器之间进行的。然而，无论何种通信，其实质总是把一地的消息传递到另一地，因此，它们可以建立在一个共同的基本模型加以研究和分析。

1.2 通信系统的基本模型

实际上，无论哪一种通信（这里指的是电通信）都不可能把消息直接送往信道，这是由于信道不能传递诸如语声、图象这样的原始消息。在信道传输之前，必需把消息变换成适于信道传输的电信号。这一变换通常由变换器来完成，例如送话器。而将电信号复原成相应的消息是由反变换器来实现的，例如受话器。

为了说明通信系统的一般构成方式，我们介绍一个普通的有线长途电话系统的例子。这可由图1.2-1来示意。

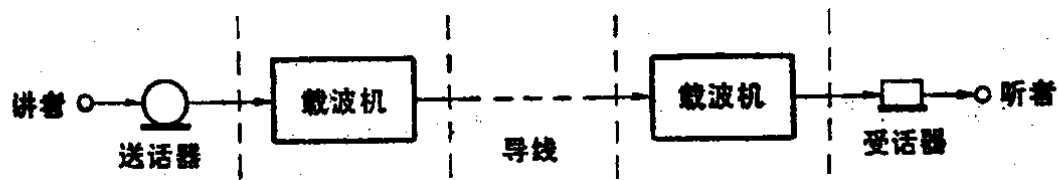


图 1.2-1 长途电话系统方框图

这个系统可分为五个部分。讲话者发出语声，语声里载荷着消息，对于消息的实质部分，我们称为信息。送话器是一只变换器，它的作用是把讲话者发出的语声消息变换成电信号。这一部分称为发信源（信息源）。它所产生的携带有信息的信号一般称为基带信号。基带信号可以直接在信道中传输，但由

于基带信号具有信息源给出的原始电信号的低通频带，所以许多情况下不适宜在信道中直接传输。为了提高信道利用率，实际大量的通信系统是建立在各种调制基础上的。调制的作用是对基带信号实行某种变换，使其成为适合于在不同信道中传输的高频信号，并且有可能实现信道多路复用或提高信号的抗干扰能力。第二部分的载波机就是起到这种变换（调制）作用的发送设备，当然它还包括如放大、滤波、均衡等其他功能。导线是传输信号的媒质，即为信道。在接收端，接收设备（载波机）的功能与发送设备正好相反，它从接收信号中恢复出相应的基带信号，这与调制过程相反的恢复过程即为解调过程。最后是受信者利用受话器把电信号变换成可理解的消息（语声），完成对应于发送端变换器（送话器）的逆变换。此时听者已能接收所传递的信息，完成了通信。

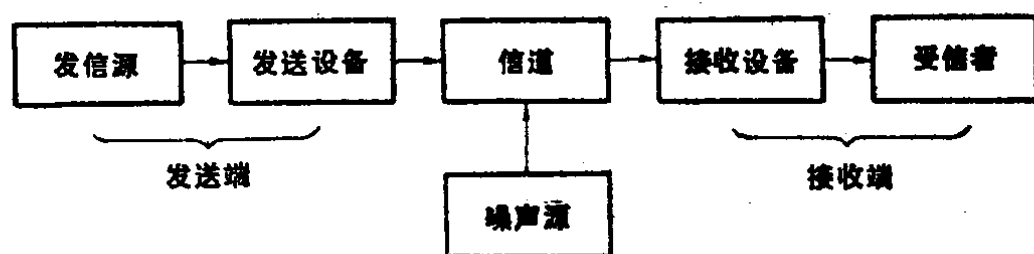


图 1.2-2 通信系统基本模型

实际通信系统形式虽然很多，但总包括这五个部分。因此其基本模型可用图1.2-2加以概括。该图与图1.2-1是对应的，只是在这里加了一个噪声源。因为在实际系统中，不可避免地会引入噪声，噪声存在于通信系统的各个环节中，变换器和反变换器、发送设备和接收设备以及信道中都会引入噪声。通常我们把所有可能产生的噪声归结在信道中存在，这样做并不影响我们对通信中主要问题的讨论，相反却对问题的深刻分析带来许多方便。

1.3 通信发展简史

人类社会由低级向高级发展，通信这门学科也同样如此。它是在人们长期实践中产生的，并且随着科学技术的发展也在不断地更新和发展。

真正有实用意义的电通信，起源于十九世纪三十年代，以莫尔斯完成的有线电报通信方式作为标志。当然，在此以前人们已经积累了有关电学和磁学的丰富知识，特别是1800年伏特发明了原始电池，更为电通信的尝试奠定了基础。

十九世纪七十年代，又由于电磁感应理论的形成和发展，发明了电话机，并开始形成了有线电话通信。不久，人们又发现了电磁波现象，于十九世纪末期利用电磁波辐射原理发明了无线电报，它是利用自由空间作为传播电磁波的媒质，并用天线来发射和接收电磁波，从而开辟了无线电通信发展的道路。

二十世纪初，电子管等器件开始出现，它又为无线电话提供了实现的基础。不久，电报和电话通信获得了迅速的发展，有了较高水平的有线通信及长波、中波和短波一类的无线通信。

本世纪二十年代开始，随着科学技术的发展和社会对通信的更迫切更高的要求，又相继出现广播、传真，随后发明了电视。这些技术大大丰富了通信的内容。这一些具体的技术发明，同时也提出了许多急待解决的通信理论问题。于是从三十年代开始，人们逐步地对通信实践中遇到的问题展开了深入的理论研究，并获得了可喜的进展。在通信理论上，从开始形成的调制理论为基础，先后又形成了“过滤和预测理论”、“香农信息论”、“纠错编码理论”、“信源统计特性理论”、“信

号与噪声理论”等等。这些理论的提出不但丰富了通信理论的本身，推动了通信理论的深入研究，同时也大大促进了通信技术的发展，使许多通信方式有了重大的突破。

上面简要的历史事实说明通信领域虽然是一个相当年轻的学科，而它的发展却是如此之迅速，大约只用了近一百年的时间，就从对电磁波传播的粗浅了解一直进展到现代的卫星通信、宇宙飞船和星际间的通信。在此之中，通信理论信息科学的研究和实践起到相当大的推动和指导作用。展望未来，可以相信，通信学科将会有更大的发展，以能更好地满足和适应现代科学技术和高度文明社会发展的需要。

1.4 通信系统的分类

先从传递消息的媒质不同来讨论通信系统的分类。我们已知通信无非是利用电磁波的传播来传递电信号的，电磁波的传播通常有两种形式，一种沿导线传播，借助导线来完成传递信息的目的。导线可以是架空明线、电缆、波导管、光缆等等，这类通信称为有线通信。另一种是电磁波在自由空间传播，借助于空间无线电波来传递信息。例如中、长、短波通信，微波通信等等，这类通信称为无线通信。

再按信息源的不同对通信系统分类。我们已知通信要传递的消息有多种多样，它们可以是语声、音乐、图象，也可以是符号、文字、数据等等。对于所有不同的消息，都可以把它们归结为离散消息和连续消息二大类型。

离散消息是指消息的状态是可数的或离散型的，离散消息又称数字消息。连续消息则是非离散型的，消息状态是连续变化的，连续消息又称模拟消息。前者如电报消息，后者如语声

消息。

据前所知，为了传递消息，各种消息需要转换成电信号，由电信号载荷着对应的消息。因此，电信号也相应地可划分为两大类，一类称作数字信号，它与数字消息之间有单一对应关系。另一类称作模拟信号，它与模拟消息之间有单一对应关系。数字信号在时间上和取值上都是离散的，而模拟信号则在时间上和取值上都是连续变化的。通常我们把传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统，而把传输数字信号的通信系统称为数字通信系统。

应当指出，并非模拟信号一定得在模拟通信系统中传输，如有必要，也可在数字通信系统中传输。不过，此时应先把模拟信号变换成数字信号，即作所谓模拟—数字变换。经数字通信系统传输后，在接收端再进行相反的变换，即数字—模拟变换，以还原出模拟信号。数字电话通信就是以数字方式传输语音模拟信号的例子。同样，数字信号也并非一定得在数字通信系统中传输，只要对模拟通信系统或数字通信设备加以适当的改造，数字信号也可在为数众多的模拟通信系统中传输。

虽然可称为数字通信方式的电报通信出现在电话之前，但长期以来发展得十分缓慢；数字通信设备也远远落后于模拟通信，这是与当时生产力的发展状况相适应的。六十年代以来半导体器件、大规模甚至超大规模集成电路工艺技术等日新月异的发展，给数字通信提供了极其有利的条件。同时，由于现代电子计算机和各种数据处理机的广泛应用及电子计算机网络的逐步形成，数据传输量急剧增加，对数字通信方式也提出了更高更迫切的要求，从而数字通信已成为当今的现代通信手段的一个重要方面。

数字通信所以较模拟通信更能适应现代通信技术越来越高

的要求，是由于它具有以下一些优点：

第一，数字通信系统有较强的抗干扰能力，通过再生技术可以消除噪声的积累，利用信道编码技术对数字信号在传输过程中因干扰而产生的差错，不但可以发现，而且可以纠正，所以数字通信是改善信息传输可靠性的一个重要途径；

第二，便于使用现代计算技术及计算机来处理、存储、交换数字信号，使通信系统变得更通用、灵活；

第三，数字信号便于保密处理，易于实现保密通信；

第四，由于数字集成电路，特别是中、大规模集成电路技术日益成熟，设备易于设计制造，也更趋于小型化。

但是，数字通信也有它的不足之处，它要比模拟通信占据数倍甚至数十倍宽的系统频带，其频带利用率是比较低的。可以认为数字通信的许多优点正是以牺牲系统频带为代价而获得的。另外，由于数字通信尚处在发展阶段；而模拟通信已有较长的发展历史，我们现有的通信系统大部分还是模拟通信系统为主，因此继续解决和提高模拟通信系统的数量和质量，仍有着重要的现实意义。

1.5 通信系统性能的衡量

在设计及评价一个通信系统时，必然涉及通信系统的性能指标问题。离开通信系统的性能指标，几乎无法设计系统或评价一个通信系统的优劣。然而，通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题，它将涉及信息传输的有效性、可靠性、适应性、经济性、标准性以及维护使用等等。如果把所有因素都考虑进去，则系统设计工作和系统性能的评述都将很难进行。但在名目繁多的各项实际要求中，起着主导的、决定作用的主要

有两个，即通信系统传输信息的有效性和可靠性。有效性是通信系统传输信息的数量上的表征，而可靠性是通信系统传输信息的质量上的表征，按照人们的愿望，通信系统信息传输的有效性和可靠性越高越好，然而，有效性和可靠性恰恰是通信系统中两个相互矛盾的问题，很难同时得到满足，通常只能依据实际要求取得相对的统一。例如，在满足一定可靠性指标下，尽量提高信息的传输速度；或者在维持一定有效性下，使信息传输质量尽可能地提高。模拟通信系统，常用有效传输频带来衡量该系统的信息传输有效性。如果某信道允许传输频宽已知时，它被每路信号的有效传输频带除，就可以确定信道允许同时传输的路数。这个数目越大，则这个通信系统的信息传输有效性就越高。

模拟通信系统的信息传输可靠性常用系统输出端的信噪比来衡量。我们已知，在通信过程中，不可避免地有噪声混入系统。这样，在收方收到的不但有信号，而且有噪声，是信号与噪声的混合物。噪声相对于信号的大小，直接影响通信质量。因此用系统输出端的信号平均功率与噪声的平均功率之比——信噪比来衡量该系统的信息传输可靠性。显然，信噪比高，通信质量好，反之质量就差。信噪比低到一定程度会使通信失效。对一般的电话通信，如果信噪比能在40分贝以上，则可保证听清95%以上的通话内容。对一般的电视，如果信噪比能在40~60分贝，就可将画面细节看清楚。系统输出端的信噪比与信道中噪声情况有关，与系统采用哪种调制方式也有着密切的关系。这部分内容将从第四章开始详细介绍。通过后面章节的学习，还可知道，通信系统的信息传输有效性的提高，往往是由可靠性的下降换取的，反之亦然。这体现了信息传输有效性与可靠性之间的矛盾。

对数字通信系统而言，其性能指标从信息传输的角度综合考虑，仍然是信息传输的有效性和可靠性。

对某一给定的系统，通常用码元传输速率（传码率） R_B 来衡量系统的信息传输有效性。传码率定义为每秒钟传送的码元数目，单位为波特（Boud），简写为B。以二进制数字通信系统为例，码元的状态只有“0”和“1”两种，例如每秒传输2400个码元，则该系统的码元传输率 $R_B=2400B$ 。假定“0”和“1”码元在时间上是等长的，且等于T秒，则此时的传码率为 $R_B=\frac{1}{T}B$ 。例如，55型电传机中五单位电码码元间隔 $T=20$ 毫秒，则该电传机的传码率为 $\frac{1}{T}=50B$ 。

如果数字通信系统传输的不是二进制而是N进制码元，一般情况下都把它折算到二进制码元，再评价此系统的信息传输有效性。

设N进制的数字通信系统，每秒传N进制的码元数为 R_{NB} ，则折算到二进制，此系统的码元传输率 R_{2B} 为

$$R_{2B}=R_{NB} \cdot \log_2 N (\text{波特})$$

上式表明了二进制码元速率和N进制码元速率的转换关系。码元传输速率也称传码率或数码率。

数字通信中，传输速率还可以用信息传输速率（又称传信率）来表述。它定义为每秒传送的信息量，单位是比特/秒（bit/s），记为 R_b 。对传输二进制码元来说，每个二进制码元就含有1比特信息量，所以传信率也即每秒钟所传输的二进制码元数。

传码率和传信率都是用来衡量数字通信系统的有效性的。但要注意二者之间既有联系又有区别。只有在二进制情况下，传码率才与传信率在数值上相等，只是单位不同。但是对于多

进制情况就不一样，比如 N 进制码元速率 R_{NB} 与 R_b 之间有如下数值关系：

$$R_b = R_{NB} \log_2 N (\text{比特/秒})$$

由上式可见，若采用多进制码元传输，则可以提高传信率。

在数字通信中，信息传输可靠性用差错率来衡量。差错率也有两种表示方法：(1)误码率，(2)误信率（或称误比特率）。

所谓误码率是指收方接收到的错误码元数在发方发出总码元数中所占的比例，或者说，误码率是码元在传输系统中错误传输的概率，记为 P_e 。

$$P_e = \frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传输总码元数}}$$

所谓误信率是指收方错误接收到的信息量在传输信息总量中所占的比例，或者说是所传码元的信息量在传输系统中被丢失的概率，记为 P_b 。

$$P_b = \frac{\text{错误接收比特数}}{\text{传输总比特数}}$$

根据每一个二进制码元含有一比特信息量，可知在二进制情况下，误码率与误信率是相等的。

1.6 通信系统中的基本问题

通信系统的主要任务是可靠而有效地传输信息。现在我们就从信息传输的观点来看通信系统应当研究哪些基本问题。

前面我们已建立了通信系统的基本模型，对于模拟通信系统正如该模型所表明的那样，在信息传输的过程中包含着两种重要的变换。一种是发送端连续消息与载荷信息的基带信号之