

高等学校试用教材

通信系统原理

张树京主编

中国铁道出版社

1981年·北京

内 容 简 介

本书是根据铁路高等院校通信专业教学要求而编写的。全书分十二章。内容包括通信系统概述、信号分析、信道模型和干扰、随机过程和噪声分析、线性调制系统、角度调制系统、脉冲模拟调制系统、信道复用原理、脉冲数字调制系统、连续波数字调制系统、最佳接收原理、信息论的基本知识。

本书为通信专业试用教材，也可供从事通信工作的科研人员参考。

通信系统原理

张树京 主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：22.75 字数：566 千

1981年1月第1版 1981年1月第1次印刷

印数：0001—5,000 册 定价：2.35 元

前言

本书是根据铁路高等院校通信专业教学要求而编写的。主要是介绍各种通信系统的模型、以及分析比较各种通信系统的传输性能。它不同于专门汇编各类通信系统的手册或介绍其设计方法的工程指导书，也有别于用数理统计的方法来研究通信中的理论问题。因此，我们不取通信系统或通信理论这类名词，以免内容混淆。

本书为了要兼顾到模拟通信系统和数字通信系统两个方面，且鉴于调制是建成各种通信系统的基础，也是决定通信系统质量的关键，因此将调制和解调的内容作为本书的重点。

但这里分析调制和解调的方法，与高频电子线路的重点是不同的。本书主要分析调制和解调器的数学模型、频谱组成以及信噪比变换等问题，并不涉及具体的调制和解调线路，而后者正是高频电子线路课程的内容。

本书分十二章。内容包括通信系统概述、信号分析、信道模型和干扰、随机过程和噪声分析、线性调制系统、角度调制系统、脉冲模拟调制系统、信道复用原理、脉冲数字调制系统、连续波数字调制系统、最佳接收原理、信息论的基本知识。全书教学时数约为100小时。

本书由北方交通大学张树京主编并编写第一、三、四、五、六、七、八和十一章，齐立心编写第二和十二章，北京邮电学院杨再同编写第九和十章。

本书由上海铁道学院主审。清华大学、成都电讯工程学院、西北电讯工程学院、西安交通大学、北京工业大学、北京邮电学院、南京邮电学院以及兰州铁道学院的同志参加了审稿会议，并提出了宝贵意见，对此，我们表示感谢。

对本书中有不妥之处，切望读者批评指正。

编者

一九八〇年一月

目 录

第一章 通信系统概述	1
1.1 通信发展简史	1
1.2 通信使用的频段	3
1.3 通信系统的组成	5
1.4 衡量通信系统的质量要求	7
本章小结	8
参考资料	9
习题	9
第二章 信号分析	10
2.1 傅氏 (Fourier) 变换	10
2.2 冲激函数	13
2.2.1 单位冲激函数的傅氏变换	13
2.2.2 单位冲激函数的取样性质	16
2.2.3 频域中的冲激函数	16
2.3 卷积与相关	18
2.3.1 卷积的概念	18
2.3.2 相关的概念	22
2.4 信号的功率频谱和能量频谱	25
2.4.1 功率信号和能量信号	25
2.4.2 帕氏 (Parseval) 定理	26
2.4.3 能量频谱密度	27
2.4.4 功率频谱密度	29
2.5 信号通过线性系统	31
本章小结	36
参考资料	37
习题	37
第三章 信道模型和干扰	40
3.1 信道的定义和分类	40
3.2 恒参信道	43
3.3 变参信道	46
3.4 信道内干扰	49
3.5 热噪声	50
3.6 信噪比和噪声系数	53
本章小结	54

参考资料	55
习题	55
第四章 随机过程和噪声分析	57
4.1 概率	57
4.2 概率分布和概率密度	60
4.3 多维概率分布	63
4.4 随机过程的统计特性	65
4.5 随机过程的数字特征	67
4.6 随机过程的平稳性和遍历性	70
4.7 平稳随机过程的频谱特性	73
4.8 平稳随机过程通过线性网络	75
4.9 平稳随机过程通过乘法器	77
4.10 高斯型白噪声	78
4.11 窄带高斯噪声	81
4.12 余弦信号加窄带高斯噪声	84
本章小结	87
附录	88
参考资料	90
习题	90
第五章 线性调制系统	92
5.1 调制的功能和分类	92
5.1.1 调制功能	92
5.1.2 调制分类	93
5.2 调幅 (AM)	94
5.2.1 调幅信号的时间波形	94
5.2.2 调幅信号的频谱表示	95
5.2.3 信号功率分配	97
5.3 双边带调制 (DSB)	98
5.4 单边带调制 (SSB)	99
5.4.1 滤波法产生单边带信号	99
5.4.2 相移法产生单边带信号	101
5.4.3 混合法产生单边带信号	104
5.5 残留边带调制 (VSB)	105
5.6 线性调制的一般模型	110
5.7 相干解调	113
5.7.1 相干解调原理	113
5.7.2 同步误差	117
5.7.3 噪声性能	120
5.8 非相干解调	126
5.9 载波插入法解调	130

5.10 与基带传输系统的比较	132
本章小结	134
附录	135
参考资料	137
习题	137
第六章 角度调制系统	140
6.1 角度调制的分类	140
6.2 窄带调频(NBFM)	145
6.3 宽带调频(WBFM)	148
6.3.1 单音调制时调频波的频谱表示式	148
6.3.2 频带宽度	152
6.3.3 任意信号调制时调频波的频谱表示式	154
6.4 调相波的特点	159
6.5 相干解调	161
6.6 非相干解调	167
6.7 门限效应	172
6.7.1 门限效应的物理解释	172
6.7.2 门限以下的输出信噪比	174
6.7.3 门限电平的确定	177
6.8 环路解调器	178
6.8.1 频率反馈解调器(FMFB)	178
6.8.2 锁相环解调器(PLL)	179
6.9 加重技术	181
6.10 与线性调制系统的比较	185
本章小结	187
附录	188
参考资料	189
习题	189
第七章 脉冲模拟调制系统	192
7.1 低通信号的取样定理	192
7.1.1 理想取样	192
7.1.2 自然取样	196
7.1.3 平顶取样	199
7.2 脉冲幅度调制(PAM)	201
7.3 脉冲宽度调制(PDM)	206
7.4 脉冲位置调制(PPM)	212
7.5 脉冲模拟调制系统和连续波调制系统的比较	216
本章小结	218
附录	218
参考资料	221

习题	221
第八章 信道复用原理	223
8.1 信号的正交性	223
8.2 正交调制复用(QAM)	227
8.3 频率复用(FDM)	229
8.4 时间复用(TDM)	231
8.5 复合调制系统	232
本章小结	234
参考资料	234
习题	235
第九章 脉冲数字调制系统	236
9.1 脉冲编码调制(PCM)	236
9.2 信号量化	238
9.3 信号编码	245
9.4 增量调制(ΔM)	248
9.4.1 增量调制的基本原理	248
9.4.2 过载条件和量化信噪比	249
9.5 改进的增量调制	251
9.5.1 总和增量调制($\Sigma-\Delta M$)	251
9.5.2 自适应增量调制(A ΔM)	252
9.5.3 脉码增量调制(DPCM)	253
9.6 PCM和 ΔM 的比较	254
9.7 数字信号的基带传输	255
9.7.1 奈氏(Nyquist)定理	256
9.7.2 对实际传输信道的要求	258
9.8 基带传输系统的误码特性	261
9.8.1 接收基带数字信号的方法	261
9.8.2 误码率的一般公式	262
9.8.3 最佳阈值	263
9.8.4 基带传输系统的误码率	264
9.9 PCM信号基带传输时的输出信噪比	267
本章小结	268
参考资料	270
习题	270
第十章 连续波数字调制系统	272
10.1 幅移键控(ASK)	272
10.2 幅移键控信号的非相干接收	274
10.3 幅移键控信号的相干接收	276
10.4 频移键控(FSK)	279
10.5 频移键控信号的非相干接收	281

10.6 频移键控信号的相干接收	283
10.7 相移键控(PSK)	285
10.8 绝对相移键控信号的相干接收	286
10.9 相对相移键控信号的相干接收	287
10.10 关于多元调制	291
10.10.1 多电平调幅(MASK)	294
10.10.2 多元调频(MFSK)	296
10.10.3 多元调相(MPSK)	300
本章小结	303
参考资料	304
习题	304
第十一章 最佳接收原理	307
11.1 最佳接收准则	307
11.2 匹配滤波法接收	310
11.2.1 匹配滤波器的传输特性	310
11.2.2 匹配滤波器的几点性质	315
11.2.3 用匹配滤波器组成的最佳接收机	316
11.2.4 动态滤波器	317
11.3 相关法接收	320
11.4 理想接收机	324
11.5 最佳接收机的抗干扰性能	328
本章小结	332
参考资料	333
习题	333
第十二章 信息论的基本知识	335
12.1 消息、信号和信息	335
12.2 平均信息量	336
12.3 信道的统计特性	339
12.4 仙农(Shannon)公式	342
12.5 仙农公式的应用举例	345
12.6 信源编码的概念	347
12.7 信道编码的概念	349
本章小结	353
参考资料	353
习题	354

第一章 通信系统概述

在学习通信系统原理各章内容之前有必要先对通信和通信系统有一个概括的了解和整体的概念,以便提出问题准备在后续各章内逐步得到解决。

1.1 通信发展简史

人们在长期的生产斗争和社会实践中逐步地创造和发展了语言和文字,并且利用语言和文字来表达人们的意志和感情,交流思想,传递消息等。这些活动不断频繁地进行,逐渐由低级到高级形成一门独立的学科,这就是通信。因此通信也和其它学科一样是在实践中产生的,并且随着科学技术的发展它也不断地更新和发展,成为当前国民经济和文化交流中不可缺少的一个部门。

最早的通信方式是比较简单的,通信内容都很单一,并且受环境距离等条件的限制不可能在比较辽阔的领域内进行广泛的通信。

真正的通信技术是从十九世纪三十年代发明电报后才开始的。它是利用导线中有无电流来区分传号和空号,然后再根据传号和空号的长短来组成点和划,并且编码成不同的电报符号。因此,发信者需要将传递的文字先翻译成电报符号,然后再利用电报机拍发出去。在收信端收到电报符号后也要先经过翻译(称为译码)才能了解报文的内容。虽然,它的手续比较麻烦,通信速度也不快,但是跟当时的通信手段比较起来的确是先进的。它可以不受环境条件和距离的限制,凡是有通信线路到达的地区都可以进行通信。因此,从那时起通信的概念就和电结合起来了,有时称为电信。实际上,它就是利用电流(或电磁波)来传递消息,这就给通信技术的发展奠定了良好的基础。

十九世纪七十年代在发明电报之后不久,人们又利用电磁感应的原理发明了电话机。这样就可以利用电流(或电磁波)不仅传递文字消息,而且也可以远距离传递语言消息,大大地加快了通信的速度和丰富了通信的内容。电报和电话是组成通信的基本内容,一直到现在还大量应用。

到十九世纪末期,人们在长期实践中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介,并在发送端用发射天线发射电磁波,而在接收端再用接收天线接收电磁波。这就精简了大量通信线路,节省投资和建设时间,并为无线通信开辟了道路。

二十世纪初开始发明电子管,它又为无线电话提供了实现的基础。当时主要是利用长波、中波和短波,并采用调幅制,因此通信质量是不高的,信号种类也局限于电话和电报两种。

本世纪二十年代开始随着科学技术的发展又相继出现广播、传真等技术,因此通信的内容就扩大了。不仅文字、语言可以作为传递消息的对象,而且包括音乐、图片、报纸在内的消息也属于通信的范畴。它们的特点是开展点对面的单向通信,因此和电报电话属于点对点

的单向或双向通信有所不同。这样一来,通信服务的对象就大为扩展,同时它在促进文化交流,宣传教育等方面的作用极为显著,成为人们日常生活中不可缺少的一个内容。

为了提高信道的利用率,从二十世纪三十年代开始研究多路复用技术,尤其是采用载波机来实现频率复用。相应地,随着通信线路的发展逐步由架空明线过渡到对称电缆和同轴电缆。载波机的复用路数也逐渐增加,这样在一对导线上可以同时提供几百甚至上万个话路。

本世纪三十年代还相继发明了电视和调频技术,后者利用超短波或微波可以传递各种信号。这就进一步扩大了通信的内容,尤其是电视的出现大大丰富了人们的文化生活内容,同时也给科学技术研究提供了有力的工具。调频技术的出现不仅提高了原来调幅制的通信质量,同时又有力地推动了移动通信的发展。它们大多用于工业城市或郊区,容易受到各种工业干扰的影响,而调频制的抗干扰能力显著优于调幅制。

另外,值得一提的是在三十年代中期出现了脉冲编码技术,它为数字通信开辟了新的广泛的领域。电报通信实际上是最早的数字通信,因为它只传递二进制数据信号。但是采用了脉冲编码技术后,我们就可以将原来的模拟信号数字化,这里包括话音数字化、图象数字化等。因此,几乎所有的通信内容都可以在数字通信系统内实现,它的优点将在第九章内详细讨论。

本世纪四十年代出现的晶体管和电子计算机也是对通信技术的发展起到决定性的作用。由于晶体管比电子管具有许多突出的优点,使得一些原来不能实用的技术可以在生产或科学研究中得到实现,例如脉冲编码技术采用电子管是无法推广使用的,但是出现了晶体管和集成电路后就不成问题了。电子计算机的发展也有类似的情况,晶体管电子计算机出现后才有可能在各门得到推广使用。由于电子计算机的功能不断发展,无论是用于计算或者用于数据处理和实时控制,它都要求有许多终端来配套。在数字终端和计算机之间要求开展数据通信,在计算中心之间还要开展计算机通信,因此它们又成为通信学科内不可分割的一部分。这样一来,通信的内容就更进一步地扩大了,它已经突破了人与人之间通信的概念,而且扩展到人与机器和机器与机器之间的通信,并将逐步成为近代通信的主要内容。因此,在近代通信领域内应该包括电报、电话、传真、广播、电视、数据等多方面的消息传递。今后还有可能进一步地扩充和发展。

最后还应提到在本世纪六十年代出现的光通信和卫星通信,它们都为大量容量的、综合性的通信系统提供了广阔的信道。尤其是卫星通信在解决国际通信中的通信质量方面作出了突出的贡献。在这同时大规模集成电路的出现也对通信技术的发展起着重要的作用,它不仅使得设备小型化,而且寿命长、可靠性高,适合于在空间通信中应用。

通信学科的发展,除了由于新的电子器件问世以及技术水平的提高外,还不能忽视在通信理论方面的突出成果。例如,在本世纪三十年代开始形成的调制理论为有线和无线通信奠定了理论基础,给实现频分制和时分制多路复用系统指明了方向;又如在五十年代初期形成的信息论明确地提出了通信中的主要矛盾,即通信的有效性和可靠性问题,并为最佳地解决这对矛盾提出了原则性的预见。后来在信息论的基础上又逐步地形成最佳接收理论、编码理论、信号和噪声理论等,都曾给提高通信质量和创造新的通信体制作出重大贡献。

根据以上对通信发展史的简单回顾可以看到,通信这门学科是逐渐由低级到高级,内容由简单到复杂发展成长起来的。总的来说,通信是研究传递各种消息的学科,因此电报电话只能算作狭义的通信内容,而广义的内容应该包括广播、电视、传真以及数据通信与计算机通信在内。如果将消息的含义更完整一些来理解,则和通信非常邻近的学科,例如雷达、遥

控遥测、无线电天文学，甚至生物工程学等都与信息的处理和传递有关。因此把它们综合起来就成为一门完整的信息学科，而通信学科成为其中的一个组成部分。

1.2 通信使用的频段

前面已经阐明了近代通信的内容非常丰富，使用的领域也极为广泛，它们的实现基础都是依靠不同频率的电流（或电磁波）的传输。根据传输媒介不同可以分为两大类，即依靠导线（包括架空明线和电缆）来传输信号的称为有线通信；依靠自由空间来传播电磁波的则称为无线通信。既然它们都是利用不同频率的电流（电磁波）来达到通信的目的，这里就存在着一个如何合理地选择工作频段的问题，使得通信的有效性和可靠性都能满足要求。

在选择使用频段时应该考虑各个方面的因素，例如在有线通信中应该考虑通信线路的传输特性，它的最低和最高截止频率，衰减频率特性，相移频率特性，线路参数的稳定性等；在无线通信中应该考虑各种不同波长的传播特点，以及天线尺寸的合理使用问题。关于有线信道的传输特性我们将在第三章内详细讨论，这里先对空间电磁波的传播特点作些简要介绍。

电磁波由发射天线到达接收天线的传播途径基本上可分为三种，一是靠近地面来传播的，称为地面波；二是在空间两点间传播的，称为空间波；三是依靠距离地面一百公里以外的电离层的反射来完成传播作用的，称为天波。地面波、空间波和天波各有不同的传播特点，因此和它们相对应的使用频段也不相同。例如，地面波是沿地表面传播的，因此在地面将会产生感应电流。由于地面并非良导体，故在传播过程中就会带来能量损耗。并且频率越高，由于地面的趋肤效应越显著，带来的损耗就越大。因此，地面波只适用于频率较低的长波传播，对于频率较高的电磁波传播应该利用天波。

天波的传播特点与地面波完全不同，它是利用电离层的反射作用，因此传播距离要比地面波远，并且它与天线入射角有关。所谓入射角是指入射波与地面垂线的夹角，入射角越大，传播距离就越远。另外，天波在传播过程中也会带来能量损耗，其损耗大小与电离层的电离程度有关。显然，电离层的电离程度越大，它对电磁波的吸收能力就越强，故损耗也就越大。由于电离层的电离程度与太阳的辐射强度有关，因此它的变化是很大的。例如，白天和夏天就要比夜间和冬天的电离程度大，因此损耗也大。在无线通信中将这种现象称为衰落，它是天波传播的一个特点，也是一个缺点。因为它使收到的信号电平处于强弱变化的不稳定状态之中。虽然，电磁波的波长越短，电离层对它的损耗越小。但如果波长太短，电离层就难于产生反射作用，它将穿透电离层，不再返回地面。因此频率太高、波长太短的电磁波也是不能利用天波传播的，在这种情况下应该使用空间波。

空间波的传播象光波一样也是直线传播的。依靠电磁波的绕射作用，它能越过某些障碍物。但是，由于地表面是弯曲的，因此依靠空间波传播的距离不能太远，通常是限于视线范围之内，并依靠提高天线高度来增长传播距离。另外，由于空间波是在大气层中传播，因此大气层的变化（尤其是雨、雪等自然现象）对它的传播特性影响很大。

综合上述，频率较低的电磁波宜于采用地面波传播，发射这类电磁波的天线尺寸自然比较大，传播距离也不能太远*。频率较高的电磁波宜于采用天波传播，它的传播距离最远。

* 如果沿海面传播，由于海水的导电率较好，它也可能传播较远。

但由于它存在衰落现象,因此通信质量不够稳定。另外,在地面波已经损耗殆尽,而天波尚没有返回地面的地带通常称为寂静区。在寂静区内收不到任何信号,会影响通信的可靠性。因此,在选择工作频率和设计天线入射角时应该考虑到。频率再高的电磁波宜于采用空间波传播。它只能在视距范围内进行通信,但可以采用中间接力的方法延长通信距离。另外也适合于移动通信。

为了比较全面地将通信中所使用的频段有所了解,下面列出表1.2—1作为参考。但根据具体情况和科学技术的不断发展也可以灵活运用。表中对频率和波长的转换关系可应用熟知的公式

$$\lambda = v/f \quad (1.2-1)$$

式中 λ ——波长;

f ——频率;

v ——在自由空间中电磁波的传播速度,它接近于光速 3×10^8 米/秒。

通信使用的频段

表1.2—1

频 段	符 号	名 称	波 长	主 要 用 途
30—300赫	ELF	特低频	10^4 — 10^3 公里	海底通信,电报
0.3—3千赫	VF	音 频	10^3 — 10^2 公里	数据终端,实线电话
3—30千赫	VLF	甚低频	10^2 —10 公里	导航,电报电话,频率标准
30—300千赫	LF	低 频	10—1 公里	导航,电力通信
0.3—3兆赫	MF	中 频	10^3 — 10^2 米	广播,业余无线电通信,移动通信
3—30兆赫	HF	高 频	10^2 —10 米	国际定点通信,军用通信,广播
30—300兆赫	VHF	甚高频	10—1 米	电视,调频广播,移动通信
0.3—3千兆赫	UHF	超高频	10^2 —10 厘米	电视,雷达,遥控遥测
3—30千兆赫	SHF	极高频	10—1 厘米	卫星和空间通信,微设接力
30—300千兆赫	EHF	特高频	10—1 毫米	射电天文,科学研究

这里简要作些说明。民用广播占两个频段,即MF和HF频段,它们都是采用调幅制。如果是采用调频广播,因为它的频带宽,故占用VHF频段。电视也是占用两个频段,即VHF和UHF频段,目前VHF有12个频道,UHF可有70个频道,伴音都采用调频。长距离无线通信(尤其是国际定点通信)过去占用HF频段,但它的通信质量不高,近代都改用微波接力或卫星通信,因此它们占用SHF频段。移动通信过去采用调幅制,占用MF频段,近代改为调频制,占用VHF频段,它要求的通信距离不长。海底通信使用的频率最低(ELF频段),它是利用电磁波在水中传播的有利条件,虽然频率低,也能远距离传输。

在有线通信方面,直流电报的使用频段最低,其次是实线电话。它们都不经过任何调制,因此属于基带信号传输。在开展数据传输业务的情况下,可以利用一个话音频带来传送300~9600波特*的数据信号。当采用频分制多路复用时随着载波机复用能力的提高,它所输出的复用信号频谱范围可以从VLF扩展到VHF频段。近代采用时分制脉冲编码多路复用系统,它的信号频谱甚至扩展到UHF频段。

由于甚低频(VLF)信号的频率稳定度很高,适合于作导航或频率标准用。雷达需要方向性好,可采用UHF频段。在这个频段内容易做到方向性好而且尺寸合适的天线。光通信所用的频段已经超出EHF频段的范围。

* 波特是传送符号的单位,详见本章1.4节。

最后还要指出，表1.2—1所示的频段划分还是比较粗糙的，更进一步的频率分配工作在国际上有专门的组织，即国际电信联盟（ITU）来完成；在国内也有相应的部门，即国家无线电管理委员会，它们来协调各种用途的频率分配。

1.3 通信系统的组成

通信的目的就是为了交换消息（单向或双向），因此一个通信系统最概括的组成可用图1.3—1来表示。

这里发信源是指消息的产生来源，并且将消息转换成电信号。例如，它包括电话机、电报机、话筒、摄像机等。由于数据通信的开展，各种数字终端以及计算机本身也都可看作是发信源。根据前面所述，各种不同发信源所发出的信号可能是各种各样的，

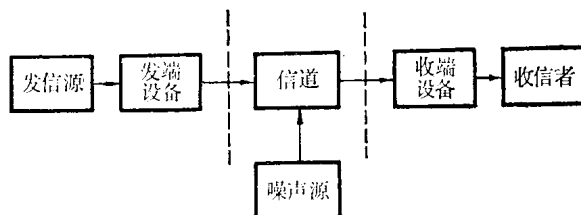


图1.3—1 通信系统的组成

但不外乎是模拟信号或者是数字信号两类，而且它们大多数是带有随机性的，因此可称为随机信号。但是为了分析方便起见，通常将它们当作确知信号来处理。

发端设备包括很多内容，所要完成的功能也很多，例如调制、放大、滤波、发射等，在数字通信系统内还包括编码在内。但这里着重强调一下调制的作用。由发信源发出的信号通常称为基带信号，它的特点是频谱由零频附近开始。基带信号可以直接在信道内传输，并将它称为基带传输系统。虽然它是最简单的通信系统，但应用的场合很有限，并且对信道的利用率也不高。这类通信系统，如直流电报、实线电话和有线广播等。

实际上，大量的通信系统是建立在各种调制的基础上的，例如调幅、调频或脉冲调制等。调制的根本任务是将基带信号变换为更适合于在不同信道内传输的信号，并且有可能实现信道多路复用或者提高抗干扰能力。尤其是在无线通信系统内要想有效地发挥天线的辐射能力，要求天线的有效长度必须不小于 $1/4$ 波长。根据式（1.2—1）所示，波长与频率呈倒量关系，因此要想保持天线尺寸在可能实现的范围内就必须减小工作波长，亦即提高发射频率。这也是基带信号必须先经过调制，将频率搬高后才能送入信道去传输的一个理由。即使在有线信道内也有类似经过调制后才能使信号频率和信道有效传输频带相适应的情况。

信道的种类也很多，但概括起来只有两种，即有线信道和无线信道。前者例如架空明线、对称电缆、同轴电缆等；后者则包括所有可以传播各种信号频率的波段。它们都是作为通信系统中的传输媒介，其传输性能的好坏直接影响到通信质量，详细分析将在第三章内进行。

这里再说明一下噪声源的意义。信道中产生噪声的来源很多，而且也很分散。例如，在各种电子器件内有噪声，导线内也会产生噪声，此外还包括来自宇宙空间的各种噪声。在图1.3—1内把它们都集中在一起，并且加在信道上，这是表示在信号传输过程中随时随地有可能叠加噪声的影响。实际上，信道中除了有噪声以外，还有各种干扰。例如，工业干扰、电台干扰、雷电磁暴等干扰，它们有的是具有脉冲性质，对它们的分析有一定的困难。但由于干扰出现的随机性和假定它们是大量出现时也可以将脉冲干扰当作随机噪声来处理，这样并不会使分析结果带来很大错误。关于噪声的分析将在第三章和第四章内要作专门讨论。

至于接收端设备和收信者则是完成与发送端设备和发信源相反的任务，这里不必再加以

说明。当然，这里所谓的收信者也不一定是人，可以是其它各种终端设备。

图1.3—1是各种通信系统的概括说明。如果结合模拟通信系统的要求，则可将图1.3—1具体化为图1.3—2。

所谓模拟通信是指在该通信系统内所传输的是模拟信号。这里将发送端设备简化为调制器，接收端设备简化为解调器，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，只有调制和解调对信号的变换起着决定性的作用，并且它们是保证通信质量

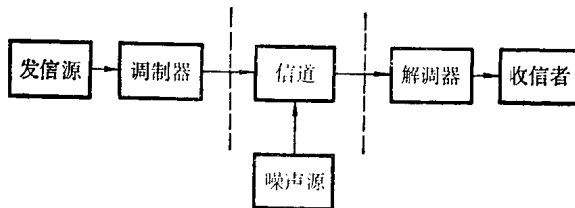


图1.3—2 模拟通信系统的模型

的关键。至于像放大、滤波、变频等过程都可以看作是理想线性的，并将它们合并到信道中去。由于这里突出了通信系统中的主要部分，而将其它次要部分都忽略掉，因此可称为模拟通信系统的模型，实际上它代表最简化的模拟通信系统。

数字通信系统的模型画于图1.3—3，它要比图1.3—2稍为复杂一些。

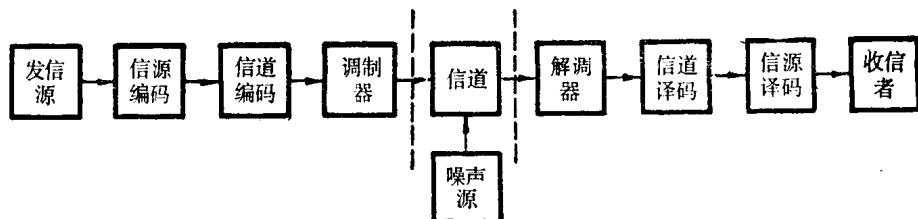


图1.3—3 数字通信系统的模型

所谓数字通信是指在该通信系统内所传输的是二进(元)或多进(元)制数字信号。这里的特点是，在实现调制之前先要经过二次编码，即信源编码和信道编码。相应地在接收端于解调后要有二次译码。

所谓信源编码是指将原来不适于在数字通信系统内传输的信号变换为比较理想和有效的数字信号。例如，将原来属于模拟信号的话音数字化就是信源编码器的任务；又如发信源是并行输出的计算机，则需要通过并串变换形成串行数据后才能进行数字通信，这也是信源编码器的任务。此外，如数据扰乱，数话加密，编码电视比特压缩等也都是在信源编码器内完成的。简单地说，信源编码器就是实现信号处理的功能，使得处理后的信号更适宜于在数字通信系统内传输。

所谓信道编码是指在原来的数字信号序列中引进某些作为误差控制用的数码，以实现自动检错和纠错的目的。因此，通过信道编码器后的数码序列要加长，亦即提高数字信号传输可靠性是用降低传输速率的办法来换取的。关于信号传输中有效性和可靠性的矛盾在今后各章内还要反复提到，并且在第十二章内将引用信息论的观点来加以阐明。

图1.3—3内的信源编码和信道编码并不是每个数字通信系统都必须的。这要根据实际需要来确定，或者两者都要，或者只要一个，甚至两者都不要。如果将它们简化后就与模拟通信系统的模型差不多了。不过这里应强调两点，即图1.3—3采用的是数字调制和解调，它们与模拟调制和解调有所区别；另外一点是在数字通信系统中同步系统是不可缺少的，在图1.3—3中虽然没有画出，但绝对不能忽略。至于模拟通信系统可以不要同步，即采用非同步方式工作。即使是采用同步方式工作，它对同步系统的要求也不如数字通信系统那样严格。因此，总的来说，数字通信系统的组成要比模拟通信系统更复杂，这是在比较两种通信

制式时应该考虑到的。

最后应提到, 虽然图1.3—2和1.3—3是通信系统最简化的模型, 但是它们往往决定着通信系统的质量。因此, 通信系统原理这门课程也可以说是围绕着通信系统的模型来提出问题和分析问题的。解决通信系统中一些共性的问题对实际工作具有指导意义。

1.4 衡量通信系统的质量要求

通信系统组成后必然要提到通信质量问题, 到底怎样来衡量通信系统的质量呢?

这里所谓通信质量是指整个通信系统的性能, 不是指某个局部。另外, 对通信系统的质量要求也很多, 例如包括电气性能、工艺结构、操作维修等, 但我们这里主要是讨论通信系统的电气性能。

从信号传输的角度来分析, 通信系统的质量最主要的是有效性和可靠性。所谓传输信号的有效性就是指在给定的信道内能够传输更多的信息内容; 而所谓传输信号的可靠性是指在给定的信道内接收到信息的准确程度。在实际的通信系统内这两个要求经常是有矛盾的, 亦即传输信号的有效性提高会影响到传输信号的可靠性下降, 反之亦然。例如, 上面提到的信道编码器是在原来的数字信号序列中引进一些监督码元, 以实现自动检错和纠错, 因此它可以使传输信号的可靠性提高。但是, 由于监督码元的加入使信号长度增加, 因此信号传输的速率就要降低, 亦即传输信号的有效性要下降。在处理这对矛盾时我们经常是用牺牲一方来换取另一方的办法来解决, 因此必须根据具体情况而定。

现在分别对模拟通信系统和数字通信系统提出具体的质量要求。

在模拟通信系统中, 信号传输的有效性通常可用有效传输频带来衡量。当给定信道的容许传输带宽后它被每路信号的有效传输带宽来除, 就可确定信道容许同时传输的最大通路数目, 这就称为多路频率复用。显然, 信道复用的程度越高, 则信号传输的有效性就越好。

例如, 在频分制多路载波通信系统内使用同轴电缆作为传输线路, 则它的容许传输带宽可以容纳10800路话音信号的有效传输频带 (通常每路话音带宽用3千赫来计算), 因此它的传输有效性就要比使用架空明线高得多。另外, 信号的有效传输带宽还与调制方式有关, 例如调频波的频带就要比调幅波宽得多, 因此在同样的传输线路上传输调频波的有效性就不如调幅波。

模拟通信系统的传输可靠性通常可用整个通信系统的输出信噪比来衡量。由于信道内存在噪声, 因此接收到的波形实际上是信号和噪声的混合物, 它们经过解调后同时在通信系统的输出端出现。因此, 噪声对模拟信号的影响可用信号功率与噪声功率之比 (在同一点上) 来衡量, 这就是输出信噪比。显然, 信噪比越高, 通信质量就越好, 信息内容的准确性也就越高。例如, 在商用电话通信时要求输出信噪比保持在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。在收看电视节目时输出信噪比就要求达到40到60分贝, 才能将画面的细节看清楚。输出信噪比一方面与信道内噪声大小和信号功率有关, 同时又和调制方式有很大关系。不同的调制方式采用不同的解调器, 而后者对处理噪声的能力是大不相同的。例如, 在调频系统内采用鉴频器就具有抑制噪声的能力, 因此输出信噪比可以提高; 而在调幅系统内采用包络检波器来解调就没有提高输出信噪比的能力, 因此调频通信系统的传

* 分贝是信噪比的单位。

输可靠性往往比调幅系统好。但是，调频系统的传输有效性不如调幅系统，这里又出现了传输可靠性与有效性之间的矛盾。

在数字通信系统内情况稍为复杂一些。由于数字通信系统内都是传输离散的数字信号，因此传输有效性可用信号（或符号）传输速率来衡量。如果数字信号采用的是二进制信号，则信号传输速率（简称传信率）可用比特/秒（bit/s）作单位。比特是一种计算信息量的单位，它的详细定义将在第十二章内给出，在这里可理解为二进制脉冲的数量。例如，传信率是4800比特/秒可理解为每秒内传送4800个二进制脉冲数。显然，传信率越高，信号传输的有效性就越好。如果采用的是多进制数字信号，这时信号传输速率可用波特（Baud）作单位。这里每个波特就是指传输一个多进制数字信号。例如，传信率是75波特可理解为每秒内传送75个多进制数字信号。显然，波特和比特是可以相互转换的，它们的转换关系如下：

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (1.4-1)$$

式中 R_b ——二进制信号的传信率，单位是比特/秒；

R_B ——多进制信号的传信率，单位是波特；

M ——多进制数*。

显然，当 $M=2$ 时 $R_b=R_B$ ，但在一般情况下 $M>2$ ，故 $R_b>R_B$ 。

数字通信系统内的传输可靠性可用误码率来衡量，它代表接收到的数字信号出现错误的程度。如果数字信号是采用二进制，则误码率可定义为

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1.4-2)$$

相应地，在多进制数字通信系统内误码率就可定义为

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1.4-3)$$

这里码元就代表多进制数字信号。

可见，在 P_b 和 P_e 之间也有相互转换关系，但它与译码方法、选用码型等都有关，因此比较复杂。在一般情况下总是 $P_b < P_e$ ，只有在二进制数字通信系统内 $P_b = P_e$ 。

在数字通信系统内误码率越低就说明数字信号传输的可靠性越高，因此通信质量越好。例如，在有线信道内通常要求误码率小于 10^{-6} ，亦即在传输 10^6 个数字信号中只容许出现一个错误信号，显然这样的要求是很高的。在无线短波信道内，由于存在着衰落和多径效应等特点，信道特性对于数字信号的传输非常不利，通常要求误码率在 10^{-3} 以下。

到这里为止，我们只是简单地给出了对模拟和数字通信系统的质量要求，在后续各章内还要进行具体的分析和比较。

本章小结

（1）近代通信的内容是非常丰富的，它已经突破了人与人之间通信的概念，而是进入了人与机器或机器与机器之间通信的时代，成为现代化社会的一个重要组成部分。

（2）通信使用的频段也是逐渐由低频到高频范围开拓的，而在各频段内的业务内容也在不断地补充和发展。探索新的频率资源成为通信工作者的任务之一，这就促使通信学科的进一步发展。

* M 总是2的整数倍，并取 $M=2^k$ ，这里 k 是正整数。

(3) 研究通信系统模型是本门课程的基本分析方法, 它突出了影响通信质量的关键性部件。在这里强调了调制和解调在通信系统中的重要作用, 当然对数字通信来说编码和译码也是很重要的。

(4) 我们从信号传输的有效性和可靠性两方面来衡量通信质量的好坏。根据模拟通信系统的情况提出有效传输频带(或复用程度)和输出信噪比的质量要求, 而在数字通信系统中提出传信率和误码率的质量要求。

(5) 本章着重介绍有关通信和通信系统的一些基本概念和定义, 定量的分析将在后续各章内介绍。

参 考 资 料

- (1) W.D.Gregg: 《Analog and Digital Communication》, John Wiley and Sons, New York, 1977.
- (2) 北京邮电学院《数据传输原理》(上), 人民邮电出版社, 1978.

习 题

1-1 试计算下列各种频率在自由空间的波长。

- (1) 80赫(用千米作单位);
- (2) 15千赫(用千米作单位);
- (3) 1400千赫(用米作单位);
- (4) 27.255兆赫(用米作单位);
- (5) 175.25兆赫(用米作单位);
- (6) 531.25兆赫(用厘米作单位);
- (7) 4千兆赫(用厘米作单位)。

1-2 若规定535~1605千赫频段为民用AM广播电台专用, 每个电台需要占用10千赫有效频带, 试问最多能同时收听到多少电台的节目?

1-3 若规定88~108兆赫频段为FM广播电台专用, 每个电台需要占用180千赫有效频带, 试问最多同时能收听到多少电台的节目?

1-4 若规定54~72、76~88和174~216兆赫(VHF)频段以及470~806兆赫(UHF)频段为电视广播专用, 每个电台需要占用6兆赫有效频带, 试问在每个频段内最多能容纳多少个电视节目?

1-5 若用100千赫频率发送导航信号, 收发相距80公里, 试问收到的信号与发端信号相比较相位差多少?

1-6 已知8进制数字信号的传输速率为1600波特, 试问变换成二进制信号时的传输速率为多少比特/秒?

1-7 已知二进制信号的传输速率为2400比特/秒, 试问变换成4进制数字信号时的传输速率为多少波特?