

中国通信学会主编通信工程丛书

数据通信系列（一）

数 据 传 输

郭梯云 刘增基 王新梅 詹道庸 杨 洽等编

人民邮电出版社

中国通信学会主编通信工程丛书

数据通信系列(一)

数 据 传 输

郭梯云 刘增基 王新梅 詹道庸 杨 洽等编

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

广益印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1986年8月第一版

印张: 20⁵/₃₂ 页数: 324 1986年8月北京第一次印刷

字数: 533千字 印数: 1—4,000册

统一书号: 15045·总3175—无6362

定价: 4.90元

丛书前言

为了帮助我国通信工程技术人员有系统地掌握有关专业的基础理论知识，提高解决专业科技问题、做好实际工作的能力，了解通信技术的新知识和发展趋势，以便为加快我国通信建设、实现通信现代化作出应有的贡献，我会与人民邮电出版社协作，组织编写这套“通信工程丛书”，陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地实际达到通信各专业工程师所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发，密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要，阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识，包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求，以及技术更新等方面，力求做到资料比较丰富完备，深浅适宜，条理清楚，对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材，不仅介绍有关的物理概念和基本原理，而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际，论证简明扼要，避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们，我们表示衷心感谢。殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议，使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

前 言

本书是由中国通信学会和人民邮电出版社组织编写的《通信工程丛书》之一。

本书所包括的主要内容限于数据传输本身所必需的基本理论与工程技术问题。全书内容大致可分为五部分：第一部分（第二章）是关于传输信道的基本特征及其对数据传输的影响，着重叙述现代通信网中常用的四种信道：电缆、无线电接力、卫星中继和光纤；第二部分（第三至第七章）是关于调制与解调的原理、实现方案和性能的讨论，包括基带传输、线性调制、频率调制、相位调制以及若干新的调制方式；第三部分（第八章）讨论载波同步、位同步和群同步的实现方法；第四部分（第九章）讨论纠正传输差错的各种技术；第五部分（第十章）介绍几种常用的数据传输系统。

本书力求兼顾理论的完整性、先进性与工程实用性两个方面。有些章节着重于原理介绍，有些章节侧重于工程应用。但是，不论哪一部分，总是力图在讲清原理的基础上介绍实际中如何应用。

书中保留了许多当前比较成熟、或长期以来行之有效的传输技术；也介绍了当前发展比较迅速、或者有发展前途的有关技术。由于当前电子技术发展迅速、电子线路更新甚快，因而书中很少涉及具体的电子器件和详细的电子电路。

阅读本书需要有一定的数学基础。书中部分公式未做详细的推导，但不会影响对其结果的理解和应用。大专院校通信专业的毕业生、或其他具有一定通信知识的工科毕业生以及从事通信工作的工程技术人员均可阅读本书。本书也可以作为通信专业在校大学生的参考书。

本书附有按英文字母顺序编排的英汉名词对照表。书中所出现

的缩写符号也可在此表中找到相应的全文。

参加本书编写的：第一章 郭梯云、刘增基；第二章与第八章 刘增基；第三章 刘增基、杨洽；第四章 詹道庸、郭梯云；第五章 杨洽；第六章 詹道庸；第七章 郭梯云；第九章 王新梅；第十章 刘增基、詹道庸、杨洽。

本书由邮电部数传通信技术研究所周润生审阅。

本书在编写过程中得到西北电讯工程学院的领导与有关同志的支持和帮助，表示感谢。

由于水平限制，书中难免有缺点或错误之处，敬希读者批评指正。

编者

目 录

第一章 概论

1.1 数据传输系统的组成及其主要指标	2
1.2 数据传输系统的主要技术问题	7
1.3 数据传输技术的应用	12

第二章 传输信道

2.1 概述	16
2.2 有线电信道	17
2.2.1 传输媒质的基本特性	18
2.2.2 现有的公共交换网	25
2.2.3 模拟话路信道对数据传输的限制	29
2.3 无线电接力信道	40
2.3.1 无线电接力信道的构成	40
2.3.2 电波传播特点	44
2.3.3 信道设备参数的确定	57
2.4 卫星中继信道	64
2.4.1 卫星中继信道的组成	64
2.4.2 工作频段与电波传播特点	71
2.4.3 卫星信道计算	74
2.5 对流层散射信道	85
2.5.1 衰落	86
2.5.2 传播损耗	88
2.5.3 信道的允许频带	89
2.5.4 天线与媒质间的耦合损耗	91
2.5.5 典型参数与应用场合	92

2.6 短波电离层反射信道	93
2.6.1 传播路径	93
2.6.2 工作频率选择原则	95
2.6.3 多径传播	96
2.6.4 干扰	98
2.6.5 应用	98
2.7 光纤信道	99
2.7.1 光纤信道的一般组成	99
2.7.2 光源	100
2.7.3 光纤的传输特性	101
2.7.4 光探测器	105
2.7.5 中继距离	109

第三章 基带传输

3.1 概述	113
3.2 基带信号的波形与码型	116
3.2.1 随机脉冲序列的功率谱	117
3.2.2 基带脉冲的波形	122
3.2.3 常用码型	127
3.3 基带传输系统	137
3.3.1 最佳基带传输系统	139
3.3.2 二进制与多进制系统	144
3.3.3 设计步骤及举例	146
3.4 眼图	150
3.5 均衡	152
3.5.1 均衡的一般概念	153
3.5.2 线路均衡	154
3.5.3 横向均衡器	160
3.5.4 自动均衡器	167

第四章 线性调制

4.1 线性调制信号的一般表述	175
4.2 振幅调制	178
4.2.1 二进制振幅调制	178
4.2.2 多进制振幅调制	185
4.3 单边带 (SSB) 调制	188
4.4 残留边带 (VSB) 调制	194
4.5 正交振幅调制 (QAM)	199
4.6 部分响应技术	201
4.6.1 双二进制与变型双二进制部分响应	202
4.6.2 部分响应的一般原理	214
4.6.3 部分响应系统的性能	220
4.6.4 正交部分响应 (QPR)	220

第五章 数字频率调制

5.1 频移键控信号	226
5.1.1 频移键控信号的时域表示	226
5.1.2 频移键控信号的相关系数	229
5.1.3 随机频移键控信号的功率谱	231
5.2 频移键控信号的产生	237
5.3 频移键控信号的解调	239
5.3.1 相干解调法	240
5.3.2 最佳非相干解调法	245
5.3.3 普通非相干解调法	254
5.4 二进制频移键控传输系统的误码性能	256
5.4.1 相干解调系统的误码性能	256
5.4.2 分路滤波非相干解调系统的误码性能	258
5.5 多进制频移键控	260

第六章 数字相位调制

6.1 数字调相的一般原理	266
6.1.1 数字调相的一般原理	267

6.1.2	二相绝对移相信号的产生和解调	272
6.1.3	二相绝对移相调制系统的性能	274
6.2	二相相对移相调制	275
6.2.1	二相相对移相信号的产生和解调	275
6.2.2	二相相对移相调制系统的性能	279
6.3	多相调制	280
6.3.1	四相调制	282
6.3.2	八相调制	303
6.3.3	多相调制系统的性能	316

第七章 调制技术的发展及其性能

7.1	数字调制的分类	320
7.2	最小频移键控 (MSK)	325
7.3	连续相位频移键控 (CPFSK)	334
7.4	偏置键控——四相相移键控 (OK-4 PSK)	347
7.5	相关相移键控 (COR-PSK)	351
7.6	软化调频 (TFM)	354
7.7	振幅相位混合调制 (AM/PM)	372
7.8	调制性能的比较	376

第八章 同步

8.1	概述	386
8.2	锁相环的基本知识	387
8.2.1	模拟式锁相环	388
8.2.2	数字式锁相环	400
8.3	载波同步	407
8.3.1	非线性变换-滤波法	408
8.3.2	同相-正交环	412
8.3.3	反调制环	414
8.4	位同步	419
8.4.1	非线性变换-滤波法	420

8.4.2	同相-中相位同步环	424
8.4.3	早-迟积分位同步环	429
8.4.4	几种位同步环路的比较	433
8.5	群同步	435
8.5.1	起止式同步	435
8.5.2	用特殊字符建立群同步	437
8.5.3	群同步性能的估算	439
8.5.4	标志字的设计	446
8.6	扰乱与解扰	446

第九章 差错控制

9.1	错误图样及信道模型	451
9.1.1	差错类型和错误图样	452
9.1.2	二进制对称信道 (BSC)	453
9.1.3	修正二进制对称信道 (GBSC)	454
9.2	差错控制的基本思想和分类	455
9.2.1	差错控制方式的分类	456
9.2.2	常用检错码	460
9.3	线性分组码	464
9.3.1	基本概念	464
9.3.2	伴随式和检错	468
9.3.3	汉明重量与汉明距离	469
9.3.4	汉明码及其译码	471
9.4	循环码	472
9.4.1	循环码的基本概念	472
9.4.2	BCH 码	480
9.4.3	纠突发错误循环码	483
9.4.4	循环码的译码	486
9.5	卷积码	495
9.5.1	基本概念	495

9.5.2	卷积码的描述	497
9.5.3	扩散卷积码	504
9.6	检错重传	508
9.6.1	发送等候方式 (SWARQ)	510
9.6.2	往返重传N(退N)方式(GBNARQ)	511
9.6.3	选择性重传方式 (SNARQ)	513
9.6.4	HEC 方式	515
9.7	差错控制系统设计的基本步骤	518
9.7.1	用户要求	518
9.7.2	差错控制系统的适用性与编码增益	520
9.7.3	差错控制方式的选择	521
9.7.4	码的选择及其主要参数的确定	524

第十章 数据传输系统举例

10.1	模拟话路信道中的调制解调器	530
10.1.1	CCITT 关于话路频带 MODEM 的建议	531
10.1.2	一种 600/1200 波特的通用调制解调器	536
10.1.3	一种 4800/2400 波特的通用调制解调器	541
10.2	话路调制解调器的微处理器实现	551
10.2.1	话路通用调制解调器的组成	551
10.2.2	用微处理器实现调制解调器的主要措施	554
10.2.3	话路通用调制解调器的微处理器实现	560
10.3	短波信道的数据传输系统	575
10.3.1	多进制传输	576
10.3.2	多路并传	577
10.3.3	时频调制结合跳频	579
10.4	对流层散射数据传输系统	589
10.4.1	分集接收	590
10.4.2	时频相调制系统	597

附录A 随机脉冲序列的功率谱密度.....	606
附录B Q 函数与补误差函数.....	609
附录C.....	612
英汉名词对照表.....	613

第一章 概 论

通信的目的是传输含有信息的信息。信息有多种形式，语音、文字、数据、符号、图象等等都是信息。原始的数据信号有两种基本形式：一种是模拟的，另一种是数字的。模拟数据信号（如某些物理量的测量结果，模拟计算机的输出）是在某一数值范围内可以连续取值的信号。数字数据信号（如数字计算机的输出，数字仪表的测量结果）是只取有限个离散值的数字序列。由于数字数据更便于存储、处理和传输，而模拟数据经过取样、量化和编码，可以转换成数字数据，因而模拟数据的传输，在今天，只是在特定条件下（如简化设备）才被采用。本书所说的数据，指的是具有离散形式的并由字母、符号、数码等表示的信息。而在研究具体的传输问题时，我们常常把数据限定为数字计算机和其他数字设备输出的二进制代码。

利用电信号把数据从一个地方送到另一个地方的过程，称为数据传输。数据通信包括数据传输和数据在传输前后的处理（如数据集中、数据交换等）。

半个世纪以来，在电信领域中，电话业务一直占主导地位，它属于人与人之间的通信。近年来，数据业务的发展非常迅速，它是机器与机器、机器与人之间的通信。

电子计算机的发展对通信的发展起了巨大的推动作用。计算机和通信的紧密结合，可以构成灵活多样的通信系统，也可以构成强有力的信息处理系统，这将对社会的发展产生深刻的影响。数据通信是电子计算机日益广泛应用的必然产物。计算机与它的终端之间需要数据通信，计算机与计算机之间更需要数据通信。此外，在遥测、遥控、遥感、雷达、自动控制等系统中都要使用电子计算机，

因而它们都离不开数据通信。

1.1 数据传输系统的组成及其主要指标

如图 1.1 所示,数据传输系统包括三大部分:传输信道、发送设备与接收设备。系统的任务是把数据按规定的准确度和速度,从一地传送到另一地。系统的输入是待传输的数据,它们来自数据源(终端设备或带有通信接口的计算机),通常是二进制的数字序列,又叫做比特流。

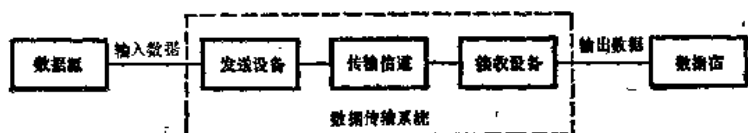


图 1.1 数据传输系统的组成

传输信道提供两地之间的电通路。它可能是由电缆或光纤等构成的有线线路,也可能是由地面微波接力或卫星中继等构成的无线线路,还可能是有线与无线线路的结合。传输信道给数据信号提供通路,又会使信号产生畸变和带来噪声与干扰,其结果是使得数据在传输后产生差错。传输信道还会限制信息传输速率。

在发送设备中,要把输入数据变换为适合于通过信道传输的信号波形,这一变换过程称为调制。调制的主要作用之一是使发送信号的频谱与信道的频带相匹配,并提高数据在传输过程中的抗干扰能力。

在接收设备中,要完成与发送端相反的变换。信道输出的是带畸变的信号与干扰噪声的混合波形,接收设备对这种混合波形进行处理,从中恢复出数据,这一过程称为解调。通过解调所再生的数据,不可避免地包含着差错。差错有多有少,在正常情况下,它不应该超过规定的数值。

在讨论数据传输的主要技术问题之前,需要明确一个传输系统

的好坏用哪些指标去衡量。从工程实践中提出的主要技术指标有传输速率、差错率、可靠性与经济性等等。

一、传输速率

传输速率是衡量系统传输能力的主要指标。它有以下几种不同的定义：

1. 码元传输速率 携带数据信息的信号单元叫做码元。每秒钟通过信道传输的码元数称为码元传输速率，记作 r_s ，单位是波特(Bd)，简称波特率。码元传输速率又称调制速率。

2. 比特传输速率 每秒钟通过信道传输的信息量称为比特传输速率，记作 r_b ，单位是比特/秒(b/s)，简称比特率。

3. 消息传输速率 每秒钟从数据源发出的数据比特数(或字节数)称为消息传输速率，单位是比特/秒(或字节/秒)，简称消息率，记作 r_m 。

码元传输速率与比特传输速率具有不同的定义，不应混淆，但是，它们之间有确定的关系。对二进制来说，每个码元的信息含量为一比特，因此，二进制的码元传输速率与比特传输速率在数值上是相等的。对于 M 进制来说，每一码元的信息含量为 $\log_2 M$ 比特，因此，如果码元传输速率为 r_s 波特，则相应的比特传输速率为

$$r_b = r_s \log_2 M \quad (\text{b/s}) \quad (1.1-1)$$

式中 M 为大于等于 2 的整数。

消息传输速率与比特传输速率的关系是

$$r_m = \eta r_b \quad (\text{b/s}) \quad (1.1-2)$$

式中 η 是传输效率。

通常在传输数据的过程中，总要加入一些多余度，这些多余的比特携带的不是数据信息，而是为数据可靠传输服务的信息，因而，传输效率 η 总是小于 1 的。

需要传输的比特率有高有低，范围非常宽，低的每秒几比特，

高的达每秒几百兆比特，甚至千兆比特。通常把 300 b/s 以下的比特率称为低速，300~2400 b/s 的比特率称为中速，2400 b/s 以上的比特率称为高速。一般在面向终端的局部网中，多采用低速和中速传输，而在计算机网中，为了快速交换和传输信息，需要用每秒几兆~几十兆的高速传输。

提高传输速率受信道特性和设备复杂性的限制。CCITT 建议，通过话路（通带为 300~3400 Hz）传输的比特速率为 600 N b/s，其中 N 为 1~18 的整数。在所建议的速率中，优先选用的速率为 600, 1200, 2400, 3600, 4800, 7200 和 9600 b/s。如果利用数字电话信道(PCM)传输数据，则每路的比特传输速率可达 56 kb/s 或 64 kb/s。

二、差错率

差错率是衡量传输质量的重要指标之一。

1. 码元差错率 指在传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例(平均值)，简称误码率。当统计的码元数很大时，它与理论上的码元差错概率很接近，故用同一符号 p_e 表示。

2. 比特差错率 指在传输的比特总数中发生差错的比特数所占的比例(平均值)。当统计的比特数很大时，它与理论上的比特差错概率很接近，故用同一符号 p_{eb} 表示。 $p_{eb}=10^{-4}$ ，意味着，平均每传送 10,000 个比特，要发生一个比特的差错。在二进制传输中，码元差错率即是比特差错率，而在多进制传输中，通过一定的转换运算，可以由码元差错率求得比特差错率。

3. 码组差错率 指在传输的码组总数中发生差错的码组数所占的比例(平均值)。码组差错率与比特差错率也存在一定的关系。

数据传输的使用者最关心的是比特差错率。对比特差错率的具体要求，决定于不同的应用场合。在传送人的书信（即电报）时，允许的比特差错率约为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，而传送计算机数据时，一般要求

比特差错率小于 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 。

为了使差错率满足使用要求，在数据传输系统的各个部分需要采取一系列的措施，这些将在下一节进行讨论。

三、可靠性

可靠性是衡量传输系统质量的一个重要指标。传输系统的可靠性常用可靠度与中断率来衡量。

1. 可靠度 指在全部工作时间内系统正常工作时间所占的百分数，记作 p_r 。

2. 中断率 指在全部工作时间内传输中断时间所占的百分数，记作 e ，显然 $e = 1 - p_r$ 。

传输中断的原因可能是设备发生了故障，也可能是传输媒质（如电波传播）发生了问题。因此，应该明确区分设备可靠性与传输媒质可靠性，并把总的可靠性指标在两者之间作合理的分配。

设备可靠性决定于很多因素。它不仅与工艺基础和元器件的质量有关，与设计者的理论水平和实践经验有关，而且还与使用维修人员的技术水平、维护条件和责任心有关。因此，从设计传输系统的角度考虑，除采用先进合理的技术，选用高可靠的元器件和设备以外，还应该使设备的使用与维修尽可能简单。在设备比较复杂的系统中，设置故障检测系统是实现故障诊断的好方法。另外，在允许的条件下，对某些关键设备，甚至整个传输系统给予备份，也是提高可靠性的有效措施。

提高传输设备对环境的适应性也是提高可靠性的一个方面。当环境条件（如温度、湿度、震动、冲击等）在一定范围内变化时，系统应保持正常工作。在一般情况下，野外设备的环境条件劣于室内设备，移动设备的环境条件劣于固定设备。

传输媒质可靠性主要决定于传输媒质的特性，在选择信道和设计计算信道设备参数时须予以充分注意。其详细讨论见第二章。

顺便指出，可靠性也是数据网设计中要考虑的主要问题。网络