

数字通信差错控制技术

马秀莲 李廷芳 吕淑香 编译

聂 涛 审校

中 国 铁 道 出 版 社

1991 年·北京

内 容 简 介

本书是根据A·M·米切尔森 A·H·列维斯克著John Wiley & sons 1985《ERROR-CONTROL TECHNIQUES FOR DIGITAL COMMUNICATION》编译的。

本书比较全面地介绍了现代数字通信中的差错控制技术,包括纠错编码的基本内容,数学基础,各种分组码与卷积码,各种译码技术,设计要求与性能计算。本书面向实际工程应用,有许多设计范例,使读者得以有成效地设计高效能的数字差错控制系统。

本书可供从事数字通信的工程技术人员使用,也可供有关专业的高校师生学习参考。

数字通信差错控制技术

马秀莲 李廷芳 吕淑香 编译

聂 涛 审校

*

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

责任编辑 黄成士 封面设计 翟 达

中国铁道出版社发行 各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \text{ mm}$ $\frac{1}{32}$ 印张: 16.75 字数: 368 千

1991年5月 第1版 第1次印刷

印数: 1—2500册

ISBN 7-113-00949-2/TP·96 定价: 7.70 元

前 言

近十几年来,随着大规模与超大规模集成电路的商品化,以及信号处理器的迅速发展,使通信系统发生根本变化。其中最主要的变化是数字化,如数字通信,数字程控交换、光纤数字通信、数字广域与地域网的迅速发展等。这些新的系统已经得到广泛应用,不仅技术性能,而且在费用方面都远远优于模拟通信系统。

数字通信系统中的一个主要问题是控制数字信号在传输、交换、存储及处理中出现的差错。利用纠错编码对差错进行控制是一种主要与有效的方法。侧重于纠错编码的理论研究的教材与论著,国内外都有不少优秀的书籍出版。但是,面向实际工程应用的著作却很少见到。为此我们选译了美国A·M·米切尔森与A·H·列维斯克合写的这本“数字通信差错控制技术 (Error-Control Techniques For Digital Communication)”。这本书的特色是将许多设计范例,具体技术与性能效果有机地联系起来。这使工程设计人员在解决他们所面临的问题时,基本上都可以从本书获得合理的答案。但是本书保持一定的理论深度,理论与方法与必要的数学工具是了解编码信号所必需的。本书出版于1985年,基本上概括了出版前的主要成果。本书出版后曾受到工程界广泛好评,显然这与作者长期从事数字通信的工程实践有关。

本书第八、九、十章由马秀莲编译,第一、十一章及附录由吕淑香编译,李廷芳编译了其余各章。李红燕与李新民同志作了部分校阅;全书由聂涛教授校阅。限于译校者的水平,不妥之处,恳请指正。

1014571

编译者

目 录

第一章 数字信息的可靠传输	1
1.1. 通信系统设计问题	3
1.2. 数字通信系统的各个环节	4
1.3. 重要的信道模型	12
1.4. 信息论与信道容量	15
1.5. AWGN信道的调制性能	27
1.6. 将调制与编码结合以改善信号设计	38
1.7. 小结	45
第二章 差错控制编码基础与简单分组码	49
2.1. 一致校验码	49
2.2. 模 2 运算	51
2.3. 一位一致校验码	52
2.4. 乘积码	56
2.5. 二元重复码	62
2.6. 伴随式的性质	69
2.7. 二元汉明码	72
2.8. 附注	76
第三章 线性分组码代数	78
3.1. 群	78
3.2. 域	81
3.3. 矢量空间	83
3.4. 二元线性分组码	89

3.5.	再论一致校验矩阵	92
3.6.	对偶码	94
3.7.	汉明距离与权分布	96
3.8.	码的几何性质与纠错能力	98
3.9.	附注	105
第四章	二元循环码和BCH码	108
4.1.	有限域表示	108
4.2.	二元循环码的结构	122
4.3.	二元BCH码	136
4.4.	二元BCH码的编码	150
4.5.	附注	153
第五章	二元BCH码的译码技术	155
5.1.	BCH码的一致校验矩阵	156
5.2.	伴随式方程	158
5.3.	彼得森直接解法	161
5.4.	伯利坎普算法	169
5.5.	嵩忠雄算法	173
5.6.	差错与置疑译码	182
5.7.	软判决译码技术	184
5.8.	附注	192
第六章	多元BCH码与雷德-索洛蒙码	194
6.1.	多元码代数	194
6.2.	$GF(q)$ 上的最小多项式	198
6.3.	非二元BCH码	201
6.4.	雷德-索洛蒙码	209

6.5.	非二元BCH码与RS码的编码	213
6.6.	BCH与RS码的译码算法	215
6.7.	用于RS码的付里叶变换技术	235
6.8.	修正的BCH码与RS码	246
6.9.	附注	254
第七章	使用限定距离译码的线性分组码的性能	256
7.1.	二元分组码用于检错的性能	256
7.2.	用于检错与纠错的二元分组码	264
7.3.	对非二元码的推广	272
7.4.	BCH码与RS码的性能举例	279
7.5.	附注	290
第八章	卷积码导论	291
8.1.	码率为 $\frac{1}{2}$ 的系统码与树图	292
8.2.	格子图与状态图	296
8.3.	码率为 b/V 的码与视为线性滤波的编码	299
8.4.	最小距离, 译码距离与最小自由距离	304
8.5.	反馈译码	306
8.6.	卷积码的设计	314
8.7.	伴随式反馈译码的性能	321
8.8.	附注	322
第九章	卷积码的最大似然译码	323
9.1.	维特比译码, 硬判决	323
9.2.	用于AWGN信道的维特比译码	328
9.3.	卷积码的生成函数	330
9.4.	维特比译码的性能界限	334

9.5. 实际设计考虑	340
9.6. 维特比译码的性能	351
9.7. 使用维特比译码的优选卷积码	354
9.8. 附注	361
第十章 序列译码	362
10.1. 序列译码的定性说明	363
10.2. 计算问题	368
10.3. 码率与量化的影响	371
10.4. 范诺序列译码器	381
10.5. 有关设计问题与性能结果	389
10.6. 信噪比对性能的影响	394
10.7. 硬判决范诺译码器设计简述	397
10.8. 序列译码的堆栈算法	400
10.9. 附注	402
第十一章 差错控制编码在数字通信中的应用	403
11.1. AWGN信道上的相干接收	405
11.2. AWGN信道上的非相干接收	425
11.3. 复合差错信道的编码	433
11.4. 结束语	441
附录A 矩阵简介	444
附录B $GF(2)$上的不可约多项式表	451
参考文献	507

第一章 数字信息的可靠传输

本书的目的是使通信系统工程人员对差错控制技术,以及编码在设计良好的数字通信系统中的作用获得基本了解。简单地说,在所发送的数据中加入冗余,以对任何实际的通信过程中不可避免的差错进行检测或纠正。因此,编码可用来使传送给用户的数字数据满足所需的精确程度。除了编码技术以外,还有其它一些方法可以得到数字数据传输的精确程度。因此,本书可用以帮助通信系统设计人员确定是否需要采用编码技术、采用何种编码最为适宜,以满足所需的性能要求,以及计算所选用方法可以获得的性能界限。

例如,在许多通信系统中,只是增加单位信息所使用的信号能量来保证这种未编码信息传输的精确程度,而不采用编码技术。所需的能量可能要求信号的功率电平相当高,也可能功率受限,从而采用某种形式的分集传输与接收。但在许多情况中,为保证所需的精确程度,差错控制编码所用的能量比不采用编码时要小;因此,尽管增加了系统的复杂程度,采用编码仍是经济合算的。当所要求的精确程度较高与功率昂贵时,编码所带来的利益就是相当可观的。另外,信号功率的减少将使通信设备的体积、重量大为下降,这在某些应用中是相当重要的。

仙农(Claude Shannon)于1948年所发表的著名论文“通信的数学理论”^[157],奠定了信息论的科学基础,论文中的定理指出了编码通信系统可取得的性能。信息论的基本定理不仅指出通信的有效性界限,也明确了在得到这些界限

时, 编码所起的作用。对某些应用来说, 各种数字编码是为了得到最佳的通信性能, 构成发送波形的有效方法。

仙农的这篇论文, 以统计的形式将以前哈特莱(Hartley)^[61]、维纳(Wiener)^[178]、卡切尔尼可夫(Kotel'nikov)^[86]在通信问题上的工作加以统一。长期以来, 人们错误地认为噪声对通信的精确程度是一种不可避免的限制, 仙农的论文对此进行了尖锐的反驳。仙农证明, 由噪声功率、带宽与信号功率等信道特性, 可以导出一个被称为信道容量的参数 C , 它是通过这条信道传输可正确接收的信息率上限。这个结果说明, 只要信息传输速率低于 C , 采用足够长的编码传输信号, 在原理上就能得到差错概率为任意小的信息传输。噪声只是限制了可以获得的信息传输速率, 但不能限制可以获取的精确程度。在仙农的早期工作之后, 通信理论中的许多研究都是围绕他的基本工作进行, 试图加以扩展与改善, 并在实际的通信系统设计问题中, 寻求完全实现这些结果的办法。差错控制编码就是研究方向中的一个中心部分。

在本书中, 介绍了自从仙农的先驱性工作之后, 所得到的最重要的一些差错控制编码技术。它们都是在实际的通信系统中, 最有成效的一些方法。本章中介绍现代数字通信系统中的各个主要环节, 与后面将要用到的一些信道模型。然后, 启发性地讨论信息论, 重点是信道编码定理。对于有效地使用差错控制编码技术来说, 并不需要详细地了解信息论。但是, 了解信道编码定理的意义, 并熟悉其基本原理是相当重要的。信道编码定理给出了一个数字通信系统有效性的基本限制, 从而可用来衡量所设计系统的有效性。

随后, 对基本的数字调制与解调技术加以回顾。所给出的各种性能曲线表明, 甚至对于各种最好的实际信号方案来

说，也比信道编码定理指出的性能界限差得多。在以后几章内将可看到，合理地选择调制与编码技术，在许多应用中都可显著地改善通信效率。对设计一个数字通信系统的合理的分析方法，也进行了讨论，它可以使主要的通信功能得到综合的优化。

1.1 通信系统设计问题

数字通信系统设计者的任务是按用户所需的信息传输速率与精确程度，提出一个经济合算的系统，将信息由发端传送给收端。设计中的关键参数是传输带宽、信号功率，以及所选方案实现的复杂度。信息传输速率与精确程度，通常按用户需要确定。

传输带宽常被所使用的具体传输媒介限定。例如，电话电路的额定带宽是 3 kHz，这是由长期的工程实践形成的。按照政府对频谱使用的管理，地面无线电路与卫星链路也确定了各种信道的标准带宽。但在另一些情况中，带宽限制并不是一个敏感问题。例如，深空中飞行器之间的链路的带宽是可以任取的；因为，链路少与频带很宽，以致无需考虑用户之间的频谱占用的牵涉问题。

设计人员对信号功率与实现复杂度通常有较大的控制，而对这两者作各种可能的权衡与折衷正是设计任务的中心课题。这两个因素对设计者来说，都可以表示为费用。例如，在许多系统中，信息传输所需的精确程度都可以用使用足够的功率来克服产生差错的信道干扰来获得。另一个办法是采用差错控制编码来增加系统性的冗余度；但是，这增加了系统的复杂度，特别是译码的操作部分。冗余度的增加，带来传输带宽的增加，因此，权衡时也要考虑到带宽。实际上，

当带宽被严格限定或费用昂贵，并且不允许加大消息的传输时间时，就难以采用编码来增加信息的精确程度，而增加信号功率就可能是唯一的办法。这些问题，后面将详细讨论。

1.2 数字通信系统的各个环节

图1.1示出一个单向数字通信系统的框图，下面讨论各个环节的作用。

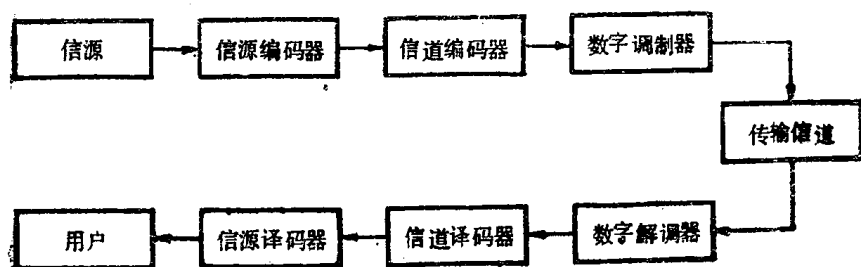


图1.1 数字通信系统框图

1.2.1. 信 源

信源可以是模拟的或离散的。模拟信源给出时间连续的信号，离散信源的输出是离散符号的序列。语音信号、雷达输出信号、照片扫描后的数据都是模拟信源信号例子。电传打印终端的计算机数据文件与报文，则是离散信源的例子。

通常，用取样及模数转换器将模拟信号表示为数字符号的序列。一般希望用最少的数字符号来表示模拟信号，以尽可能有效地使用数字通信系统。就是说，在传输之前，尽可能多地消除信源信息中的冗余。将任意信源有效地转换为数字消息的方法，叫做信源编码技术。对信源编码感兴趣的读者，可以参阅[6,175]。

在本书中，我们假定信源是数字的，它们的输出是统计独立的、等概率出现的离散符号流。具体说，假定它们是二元的数字，称为比特，每个比特取二种数值的概率是相同的，并且与其它比特无关。信源以固定速率每秒产生 R_s 个比特，这个速率叫做信源的信息率。通信系统按 R_s 的速率及用户所可允许的比特差错概率或比特差错率的上限，将信源的数据传送至用户。单位信息比特的能量以 E_b 表示，则信号所需的功率 S 将是 $S = E_b R_s$ 。

1.2.2. 信道编码器

信道编码器完成信源数据在进入调制之前所需的全部数字操作。在最简单的情况中，不需要加入冗余，并且在实际的物理信道传输时使用二元信号，这时就没有信道编码器。倘若使用多元信号，即使不需增加冗余，也需要设编码器进行所必要的二元至多元的符号变换。例如，当使用八元信号时，编码器将三个相继的信源比特为一组换成一个八元符号，其速率降为 R_s 的三分之一。

如果使用二元差错控制编码，则编码器以 R_s 的速率接收信息比特，加入冗余，产生一个速率较 R_s 高的 R_c 编码数据。对分组码来说，编码器接收相续 k 个比特为一组的信息比特，并加入 $n - k$ 个比特的冗余。所生成的 n 个比特组叫做一个码字或码组。因此，编码器发出的速率是 $R_c = R_s(n/k)$ 。将无因次的比值 $R = k/n$ 叫做码率。对于 $M = 2^m$ 的 M 元差错控制编码来说， m 是一个大于1的整数。编码器按 km 个比特为一组来接收信息比特，并输出 n 个 M 元符号为一组。同样，码率为 $R = k/n$ 。

对于卷积码（也叫连环码）来说，编码器所接收的是连续的信息比特流。采用二元气码时，它输出的是一个速率更高

的比特流。信息流每次进入编码器为 b 个比特, b 通常在 $1 \sim 6$ 之间。编码器对输入的 b 个比特, 以及某几次先于 b 输入的比特, 进行运算并产生 V 个比特的输出, 这里 $V > b$ 。因此, 码率为 b/V 。每次编码运算时, 相继信息比特以 b 个比特为一段, 参预运算的段数 k , 叫做编码约束度 (其它不同定义可见本书8.3.节)。可将卷积码的编码器想象为一个具有存贮过去 $k-1$ 个符号的数字滤波器。常见的二元卷积码, 其 $b=1$ 、 $V=2$ 或 3 , k 在 $4 \sim 7$ 之间; 但在一些特殊的应用中, 编码约束度可取 $30 \sim 70$ 的范围。

卷积码用于多元传输时, 每次进入 b 个比特, 编码器输出 V 个 M 元编码符号, 这里 $M=2^m$ 与 $mV > b$ 。对于 16 元 ($m=4$) 传输信号, 码率 $1/2$ 的编码器的典型参数为 $b=4$ 、 $V=2$ 与 $k=2$, 每符号 4 个比特。

上述码率、组长与编码约束度在编码设计中是一些关键的参数。码率的倒数表征所需扩展的带宽; 组长或编码约束度与码率表征所需编码, 特别是所需译码运算的复杂程度。在1.4节中, 我们将用这些参数进一步说明一些常用码的性能。

1.2.3. 数字调制器

调制器的作用是使编码器的输出与传输信道匹配。进入调制器的是二元或 M 元的编码符号, 调制器的输出是适于在物理的传输媒介上传输的波形; 这些传输媒介总是模拟的。在许多需要使用编码的系统中, 其调制与解调技术及其设备都难以更动。在另一些情况中, 调制技术已经固定, 但解调方式可以更动。而在有些应用中, 有可能将调制及解调系统与编码技术综合设计, 以得到全面优化。

传统上, 将调制与解调部分看成是不宜更动的, 并把它

们的作用纳入信道的范围之中。但是,只有将调制与解调的作用与编译码技术结合考虑时,才能设计出最好的高效系统。在1.6节中,将详细讨论。

对二元调制来说,调制器将二元数字0或1分别转换为持续时间 T 的波形 $s_0(t)$ 或 $s_1(t)$ 。 M 元调制时, M 种可能的编码符号由调制器分别转换为 $s_0, s_1(t) \cdots, s_{M-1}(t)$ 的 M 种波形。对于二元波形,常用的调制方式有相移键控(PSK)、差分相移键控(DPSK)与频移键控(FSK)。基本的多元调制方式有 M 元PSK(MPSK)、 M 元DPSK(MDPSK)与 M 元FSK(MFSK)。其中每个波形 $s_i(t)$, $i=0, 1, 2, \cdots, M-1$ 的额定带宽都近似等于 $1/T$ 。但对于扩频信号,其中每个波形的带宽都远大于 $1/T$,可能超过几个数量级。以二元PSK的扩频信号为例,其中波形 $s_0(t)$ 是由一串在时间宽度较窄的二元PSK脉冲所组成,而 $s_1(t)$ 由与 $s_0(t)$ 互补的一串脉冲组成。这些窄脉冲叫做码片。扩频信号可用在多址通信,它具有抗电子干扰的能力。读者可以参阅[70]、[31]与[68],以更多地了解扩频通信。

在1.5节中,将进一步讨论调制与解调问题。

1.2.4. 传输信道

为了使接收信息持有一定的精确程度,显然,需要适当的发送功率。但是,并不能任意增加传输信道发送侧的功率。例如,电话网中的信号电平已被有关部门确定其标准。在无线通信系统中,虽然有较大的选择发送功率电平的灵活性,但受实际物理与经济条件的限制。发送功率的增加,将致使发送设备的尺寸、重量与费用的增加。因此,发送功率是系统考虑中的一个重要因素。

带宽是一个与可获得性能有关的另一个关键设计参数,

它限制了信道所使用调制波形的速率。所使用的传输媒介，在一定程度上对带宽的选取有所影响。在有线与无线电话中，信道带宽的标准分别为 3 与 6 kHz。因此，难以在这些系统中增加带宽。而在某些无线频谱部分，则受到资源安排方面的限制。

噪声是限制通信系统的最普遍因素。热噪声在电路中总是存在的，例如在接收设备前端所存在的热噪声。但在某些无线频谱中所存在其它噪声。也需注意。例如闪电所产生的高电平脉冲噪声，对性能影响很大，通过传输线路耦合，对有线通信系统也有影响。交换设备中的暂态与维护中电路的中断，都会使电话网产生脉冲噪声。脉冲噪声与热噪声对出现差错的影响是不同的。热噪声是宽带的，其功率电平本质上是稳定的，并具有高斯概率密度分布的幅度统计特性。因此，差错的出现是独立的。由高斯分布可以直接导出差错率。而脉冲噪声是短暂的较强脉冲伴随着较长时间的寂静。因此，它引起的差错具有短暂的突发及较长时间不出现的特点。

由高斯噪声信道与突发差错信道出发，它们所需的编码技术是相当不同的。但是，通常是在高斯噪声为背景的前提下选择调制与编码方案，然后结合突发差错的具体特性去采用适当的编码技术。在第11章内，我们将详细讨论。

虽然这里主要考虑加性噪声，但许多实际信道还具有其它一些导致出现差错的因素。例如，有些信道存在时间较大的色散，致使接收到的符号流相继受影响。这种影响一般叫做符号间串扰。有线信道内，信道传输带宽的非线性相移是产生色散的主要原因。

各种原因产生的符号间串扰是数字通信系统中“自身噪声”的一种形式，增加信号功率并不能消除其影响。因此，

信噪比 (SNR) 较大时, 并不能减少符号间串扰, 只有直接减少时间色散, 才能使差错率减少。差错控制编码对此不是一种有效的方法, 对电话信道来说, 自适应均衡^[98,139]是一种有效的技术。

在许多无线电信道上, 时间色散是信号在不同距离的多径传播所直接产生的。例如, 在 $3 \sim 30\text{MHz}$ 的高频(HF)段, 视距外的通信是由电离层的各层对信号的折射来进行的, 电离层的这种结构致使所发送的 HF 信号以多种传播模式到达远处的接收点; 一般, 每种模式路径时延不同。

无线信道上的多径传播使信号产生衰落现象。其原因是电离层的状态是动态的, 各层中的离子不断运动, 各层间也相对运动。因此, 在接收到的多径信号中, 含有许多起伏分量, 它们的相位随机变动。这种使接收信号的幅度随机起伏, 称为衰落。此外, 接收信号的瞬时相位也出现起伏。多径的这种机理是产生时间色散, 以及衰落具有时变性质的原因。这种无线信道常叫做多径衰落信道。具有这种性质的信道, 还有超过视距的利用电离与对流层散射传播的甚高频(VHF, $30 \sim 300\text{MHz}$) 段、特高频(UHF, $300 \sim 3000\text{MHz}$) 段, 以及用于卫星通信的超高频(SHF, $3000 \sim 30000\text{MHz}$) 段。

在某些情况下, 自适应均衡技术可以有成效地用在无线信道上^[3,114]。但是, 衰落过程大大增加了使用均衡技术的复杂程度。因为它要求均衡器必须准确地与信号的幅度及相位的快速连续变化一致, 而不是按静态的相位特性来调整。因此, 在无线信道中使用均衡技术时, 需要使用更复杂的算法, 并仍是一个重要的研究课题。

当衰落不能为自适应均衡所解决时, 可以采用一些有效的差错控制技术。当信道进入深衰落时, 信号衰减很大, 从

而出现突发成片的差错。由于传播的随机性, 突发持续时间与无差错持续时间是随机的。但从无线系统使用的频率与传输路径, 可以对这些统计参数进行预测。在第11章, 将讨论突发差错信道中的差错控制编码问题。

1.2.5. 数字解调器

解调器从传输信道接收信号波形, 进行计算并将所估计的传输数据交给用户。这里, 传输信道的定义中包括高频接收设备。解调器对收到的波形, 在每个传输符号间隔上进行运算, 产生二元或多元符号中的一个比特或一组比特。

在最简单的情况下, 解调器只是确定所收到的符号是二元传输中的0或1, 还是多元传输中 $0, 1, \dots, M-1$ 中的哪一个。这种情况叫做硬判决解调。我们用符号差错率或符号差错概率表示在一个长的时间内, 符号在传输过程中的平均差错率。显然, 对二元传输来说, 这就是比特差错率或比特差错概率。将多元符号换成二元表示, 同样可用比特差错率进行统计。对使用差错控制编码的系统来说, 将这种差错率叫做未编码差错率或信道差错率, 以对译码后统计的差错率加以区别。

对于二元传输来说, 如果解调器的输出是经过量化的 Q 个电平, 当 $Q = 2$ 时是硬判决解调; $Q > 2$ 是软判决解调。对 $Q = \infty$ 的极限情况, 解调器输出是不经过量化的, 这相当于模拟的匹配滤波器的输出。对多元传输, $Q > M$ 是软判决。量化相当于损失了部分信息, 而软判决则减少了所损失的部分, 后面将会看到, 软判决适用于某些差错控制技术。

1.2.6. 信道译码器

对分组码来说, 信道译码器从解调器给予的一组 n 个符