

通信工程丛书

现代数字 通信技术

冯重熙 钱亚生 姚彦 编著
曹志刚 诸庆麟 等

数字通信

1

中国通信学会主编 • 人民邮电出版社

通信工程丛书

数字通信(1)

现代数字通信技术

冯重熙 钱亚生
姚彦 曹志刚 等编著
诸庆麟

中国通信学会主编

人民邮电出版社

8710657

内 容 提 要

本书共三篇，是为大专院校通信专业毕业的或已从事通信工作多年的科技工作人员学习与掌握当代数字通信基本技术，在数字通信方面补充新技术知识和扩大已有的知识面编写的。第一篇为数字终端技术，第二篇为数字传输技术，第三篇为数字信号处理在通信中的应用。前两篇为数字通信系统的基础内容，广泛应用于数字通信的各领域；第三篇可使从事数字终端、传输与交换方面的工作者，对语音信号及其他信号的数字化处理技术的发展有一定的了解。

通信工程丛书

数字通信(1)

现代数字通信技术

冯重熙 钱亚生 姚彦 曹志刚 诸庆麟 等编著

责任编辑：沈肇熙 俞天林

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：850×1168 1/32

1987年6月第一版

印张：20 20/32 页数：328

1987年6月河北第一次印刷

字数：542千字 插页：1

印数：1—4,000册

统一书号：15045·总3290—有5485

定价：4.55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

这本书是为大学毕业的或已从事通信工作多年的科技工作人员学习掌握当代数字通信技术而编写的。近十余年，随着计算机和大规模集成电路技术的急剧发展，在通信领域中，在通信终端技术、传输技术、交换技术以及通信网等方面的数字化有了极为明显的进展，其理论基础和电路技术已成为当代从事通信工程的科技人员必需掌握的内容。为了适应我国通信事业的迅速发展，为了使广大通信科技人员能尽快在现代通信技术方面补充、扩大已有知识，我们编写了这本书以供读者选用。

本书共有三篇：第一篇为数字终端技术，第二篇为数字传输技术，第三篇为数字信号处理在通信中的应用。前两篇为数字通信系统的基础内容，广泛应用于各领域，第三篇是近年发展较快的部分，可使从事通信技术的科技工作者对信号处理方面的发展有一定了解。实际上数字处理技术已逐渐渗透到终端、传输和交换领域，与此有关的读者是不少的。

本书的第一、二两章由冯重熙执笔，第三、四章分别由钱亚生和曾烈光执笔，郑君里、唐昆和华山立参加了部分编写，第五、六章分别由曹志刚和姚彦、梅顺良执笔，第七、八两章由诸庆麟、钱亚生执笔，但应指出，本书所涉及内容是和多年来清华大学无线电电子学系通信教研组所从事的科研工作以及全体同志的创造性劳动成果分不开的。由于编写时间短暂，书中难免有不妥之处，望读者指正。

冯重熙

1985. 3 于清华大学无线电电子学系

目 录

第一篇 数字终端技术

第一章 概论	(1)
1.1 编码与信号处理技术	(2)
1.1.1 语音编码	(4)
1.1.2 图象编码	(5)
1.1.3 信号处理技术	(6)
1.2 传输系统	(7)
1.2.1 数字复用等级	(7)
1.2.2 数字微波传输	(8)
1.2.3 光纤传输系统	(9)
1.3 综合业务数字网(ISDN)	(12)
第二章 语音波形编码技术	(15)
2.1 时间量化与采样定理	(17)
2.1.1 采样定理	(18)
2.1.2 带通信号的采样	(24)
2.2 幅度量化	(30)
2.2.1 量化原理	(30)
2.2.2 均匀量化	(37)
2.2.3 最佳均匀量化	(41)
2.2.4 非均匀量化特性	(44)
2.3 自适应量化	(48)
2.3.1 自适应量化原理	(50)
2.3.2 输入信号方差的估值	(54)

2.3.3	乘子法自适应量化器	(56)
2.3.4	乘子 $\{M_i\}$ 的制约条件	(60)
2.3.5	自适应量化的抗扰性(<i>Robustness</i>)	(61)
2.4	脉冲编码调制 (PCM)	(64)
2.4.1	脉码调制的组成	(64)
2.4.2	瞬时压扩特性	(66)
2.4.3	PCM的国际建议	(71)
2.5	差值编码 (DPCM)	(76)
2.5.1	差值编码原理	(77)
2.5.2	预测的自适应算法	(82)
2.5.3	高质量语音32kb/s DPCM	(91)
2.6	增量调制 (ΔM)	(101)
2.6.1	增量调制基本原理	(101)
2.6.2	自适应算法	(103)
	参考文献	(111)
第三章 数字终端通用集成电路.....		(114)
3.1	单片开关电容话路滤波器	(114)
3.1.1	开关电容网络的基本原理	(115)
3.1.2	PCM话路滤波器	(122)
3.2	单片PCM编解码器	(130)
3.2.1	概述	(130)
3.2.2	解码网络工作原理	(130)
3.2.3	2911APCM编解码器	(141)
3.2.4	2913与2914PCM编解码器	(148)
3.3	集成化数字压扩增量调制器	(152)
3.3.1	增量集成电路的工作原理	(152)
3.3.2	单积分增量调制电路	(157)
3.3.3	双积分复杂压扩增量调制电路	(166)
3.4	瞬时压扩增量调制ADM大规模集成单片.....	(175)
3.4.1	瞬时压扩增量调制ADM集成片的原理框图	(175)

3.4.2	快跟踪量阶自适应算法 FRC_{mni} 及其特性	(177)
3.4.3	开关电容式双积分网络	(178)
3.5	采用单片信号处理器的语言信号编码器	(181)
3.5.1	$\mu PD77P20D$ (NEC) 信号处理器单片	(184)
3.5.2	采用 $\mu PD77P20D$ 实现 $32kb/s$ ADPCM语音编码器	(190)
3.6	单片用户接口电路	(195)
3.6.1	二四线转换电路的原理及收发增益、平衡电阻的 计算	(197)
3.6.2	输入交流电阻 R_0 及输出直流电阻 R_D	(203)
3.6.3	摘挂机状态检测	(205)
参考文献		(213)
第四章	数字复接技术	(214)
4.1	前言	(214)
4.2	群路的帧结构参数	(218)
4.2.1	帧的组成	(218)
4.3	帧定位	(219)
4.3.1	帧定位码选择	(219)
4.3.2	帧定位码长选择	(220)
4.3.3	帧定位校核和帧同步保护	(225)
4.4	复接原理	(228)
4.4.1	脉冲塞入同步原理	(228)
4.4.2	帧结构及其分类	(233)
4.4.3	相位抖动分析	(236)
4.4.4	相位抖动对业务的损伤	(252)
4.4.5	脉冲塞入同步电路	(258)
4.5	复接方式	(265)
4.5.1	正码速调整	(265)
4.5.2	正/零/负码速调整	(277)
4.5.3	模型法正/零/负码速调整	(282)
4.5.4	正/负码速调整	(295)

4.5.5 各种码速调整方式的比较	(295)
参考文献	(297)
第四章附录	(298)

第二篇 数字传输技术

第五章 数字信号的基带传输	(307)
5.1 数字基带信号的码型	(307)
5.1.1 数字基带信号的码型设计原则	(307)
5.1.2 二进制	(310)
5.1.3 三元码	(316)
5.2 数字基带信号的功率谱计算	(330)
5.2.1 相同波形随机序列的功率谱	(330)
5.2.2 一般情况下的随机序列功率谱	(335)
5.3 波形传输的无失真条件	(341)
5.3.1 奈奎斯特第一准则, 抽样值无失真条件	(342)
5.3.2 奈奎斯特第二准则, 转换点无失真条件	(349)
5.3.3 奈奎斯特第三准则, 脉冲波形面积保持不变	(353)
5.4 部分响应基带传输系统	(355)
5.4.1 部分响应波形	(355)
5.4.2 部分响应基带传输系统的相关编码与预编码	(360)
5.5 数字信号基带传输的差错率	(363)
5.5.1 二进制的差错率	(364)
5.5.2 三元码和多元码的差错率	(368)
5.6 扰码和解扰	(372)
5.6.1 m 序列的产生和性质	(373)
5.6.2 扰码与解码原理	(380)
参考文献	(384)
第六章 数字信号的载波传输	(386)
6.1 载波传输概论	(386)
6.1.1 载波传输系统模型	(386)

6.1.2	几种常用的数字载波调制方式及其等效基带信号	(388)
6.1.3	窄带噪声的等效基带信号	(392)
6.1.4	载波键控信号的功率谱密度	(394)
6.1.5	载波键控信号通过带通信道	(397)
6.1.6	载波键控信号的正交相干解调	(398)
6.1.7	数字载波传输的等效基带模型	(402)
6.2	多相相位键控	(403)
6.2.1	多相相位键控信号的正交展开	(404)
6.2.2	多相相位键控信号的功率谱密度	(407)
6.2.3	相位逻辑与差分编码	(412)
6.3	正交幅度键控	(429)
6.3.1	概述	(430)
6.3.2	全响应正交幅度键控	(433)
6.3.3	部分响应正交幅度键控	(441)
6.3.4	参考载波的相位含糊度及其解决办法	(447)
6.3.5	正交幅度键控信号的功率谱密度	(451)
6.4	连续相位频率键控	(456)
6.4.1	最小移频键控(MSK)	(457)
6.4.2	平滑调频(<i>Tamed FM</i> , 简称 <i>TFM</i>)	(461)
6.5	载波恢复与定时提取	(462)
6.5.1	概述	(462)
6.5.2	载波恢复	(463)
6.5.3	定时提取	(468)
6.6	限带传输	(470)
6.6.1	线性信道的最佳传输响应	(471)
6.6.2	发送谱的频域成形法	(473)
6.6.3	发送谱的时域成形法	(477)
6.6.4	在限带传输条件下各种键控方式的频谱利用率	(480)
	参考文献	(481)

第三篇 数字信号处理在通信中的应用

第七章 数字信号处理基础 (485)

7.1 定义及预备知识 (485)

7.1.1 离散时间序列的频域表示 (485)

7.1.2 离散系统 (488)

7.1.3 离散随机序列的一些特性 (491)

7.2 信号参数模型[4]..... (493)

7.2.1 三类基本信号参数模型[5] (494)

7.2.2 信号模型的参数估值(谱估计)问题 (495)

7.3 全极点(AR)模型参数的估值 (496)

7.3.1 全极点模型信号的时域、频域及相关域特性 (496)

7.3.2 相关匹配与最大熵准则 (499)

7.3.3 线性预测与反滤波 (502)

7.3.4 全极点模型参数估值的应用 (506)

7.4 莱文逊(Levinson)递推与格型网络[12]..... (509)

7.4.1 杜宾(Durbin)快速递推算法 (510)

7.4.2 格型网络(格型滤波) (513)

7.4.3 莱文逊(Levinson)算法 (517)

7.4.4 稳定性 (519)

7.5 时变时间序列的自适应处理 (522)

7.5.1 块(分帧)自适应分析 (522)

7.5.2 自适应序贯线性预测分析 (531)

7.5.3 自适应滤波及其应用 (540)

参考文献 (551)

第八章 语音压缩编码 (553)

8.1 语音信号产生的模型及其特征参数 (554)

8.2 基音周期的提取 (559)

8.3 谐波压扩的时域算法TDHS (567)

8.4 采用谐波压扩时域算法的语音编码器 (579)

8.5	线性预测声码器(LPC)及其改善质量的措施·····	(588)
8.5.1	线性预测声码器的基本方块及性能·····	(588)
8.5.2	改进激励表示的LPC声码器·····	(592)
	1. 改善LPC声码器质量的一般途径·····	(592)
	2. 余数激励声码器 (RELPC)·····	(595)
	3. 多脉冲激励声码器·····	(597)
8.5.3	谱包络失真距离量度·····	(605)
	(1)几种谱包络距离的量度·····	(606)
	(2)LPC全极点模型谱的谱距离失真量度·····	(607)
8.6	多维(矢量)量化及其在语音低数码表示中的 应用·····	(611)
8.6.1	最佳多维量化特性·····	(615)
	1. 总体最佳多维量化与局部最佳多维量化·····	(615)
	2. 最小平均失真最佳多维量化的必要条件·····	(615)
	3. 多维矢量编、译码过程·····	(616)
8.6.2	最小平均失真最佳多维量化器的设计·····	(617)
	1. 一维Lloyd-Max最佳量化器的设计及其推广·····	(617)
	2. 起始码本的假定·····	(623)
8.6.3	全搜索LPC矢量编码 (FSVQ-LPC)·····	(626)
	1. 码本设计中的一些问题·····	(626)
	2. 采用谱失真距离量度时的码本特征表示以及 最小失真搜索计算·····	(627)
	3. 质心的计算·····	(631)
	4. 用分裂法设计全搜索LPC矢量编码·····	(633)
8.6.4	简化编码运算量的码本结构化措施·····	(635)
	1. 乘积码结构—增益与谱包络码本分离·····	(635)
	2. 树状分裂码结构·····	(637)
	3. 树搜索LPC矢量编码 (TSVQ-LPC)·····	(638)
	参考文献·····	(641)

第一章 概 论

自1937年提出脉码调制 (PCM) 原理到1960年世界上第一台 PCM 电话终端机用于市内电话网改造, 共用了二十几年时间。这一新的通信手段能冲破传统的模拟制通信, 充分表明它具有强大的生命力。尽管在当时还没有、也不可能有像今天所认识到和预计到的那样: 通信网的将来发展只有全数字化 (即末端到末端的数字化) 才能适应知识密集型社会的发展, 但是已经明显地知道数字传输具有信号再生功能这一点, 将使模拟制通信相形见绌。进入七十年代以来, 世界上先进国家已完全掌握了在各种传输介质 (微波、各种电缆、卫星、光纤等) 中传输数字信号的技术, 这就为在八十年代, 能按数字化通信所需传输形式来逐步改造和建设局以上数字程控交换机相连接的传输电路创造了条件。但是更为重要的是数字传输和数字交换能以统一的数字信号形式进行, 这给通信网建设带来极大的经济效益, 再也不必在交换结点上为适应数字交换而花费大量资金在接口的 A/D、D/A 变换设备上。因此在八十年代各国都相继投入大量资金来改建通信电路使其逐步成为综合数字网 (IDN), 即除用户线以外, 进入本地局交换机以后的传输、交换, 都将以数字形式进行。这为发展各种电话与非话音业务开辟了道路, 因为数字传输电路对各种各样信息都具有很好的透明性, 它不但可以适应今天已有的信息, 而且对将来迅速发展的各种业务信息也必将是透明的, 它与程控数字交换机结合在一起可以方便地实现各种业务的处理与交换。可以预料, 到八十年代末期, 将会出现综合业务数字网 (ISDN) 的发展高潮, 它不但将实现从末端到末端的数字化, 而且将使用新型的综合性末端, 即将不是以电话单机、传真机。计

计算机终端、电传机等等分立的设备为末端，而是以综合的新介质（*new Electronic Media*）与综合业务数字局相连接。它的用户信令系统将彻底改造成为独立的传输电路以适应新业务的发展。

其所以能高速出现通信上的这个大变革，除了社会的进步，需要有相应的通信系统为之服务外，从技术上讲，主要是微电子技术的大发展，促使复杂的技术问题能以极低的代价来解决，这就是LSI的伟大贡献。它使计算机能普及到千家万户，同时也为通信网的发展带来了革命性变革。这一影响，将向更高阶段持续发展。

在电子学领域里，通信应该算做一个传统的、古老的学科，但是又可以说通信是一个最新的领域，因为现代通信的基础只是近二十几年来才逐渐形成的，通信的传输系统、终端设备、组网方法与体制、交换系统等等所用的新概念、新方法、新技术，无一不是这些年来才建立的。在这样短的时间里，能实现一种崭新的、复杂的通信网络系统，确实是史无前例的。面临这一变革，学科上、技术上的改造与学习任务十分紧迫，编写本书的目的就是企图向读者介绍数字通信技术方面的一些新的概念、原理与发展。在这一章，只引入一些重要概念，其他内容将在第二至第八章里分三大部分依次讲述。

1.1 编码与信号处理技术

通信网中的主要信息源，在当前是电话，在将来，虽说非语音业务，如传真、计算机数据、电传、可视业务等，会有较大的发展，但在通信网中的电话业务不但不会减少，而且关于语音信号的编码技术将会不断加强和发展。

在国际电报电话咨询委员会（CCITT）的推动下，于七十年代，PCM技术的应用已有大的发展，该委员会的工作是建立了国际标准的体制以及制定了接口标准。这不但使许多厂家生产的产品有了统一的标准，也促使使用部门敢于去使用新的数字装备。在七十

年代中期,开始在LSI技术的发展基础上用CMOS和NMOS工艺相继作出了单片的话路滤波器和编译码集成电路。在八十年代初期进而将话路滤波器和编译码器又合成一个单片,而这些单片完全符合CCITT制定的标准:采用8kHz采样,编八位码,有A律和 μ 律两种压扩律,其功耗为40mW。因此当前标准的群路电话终端,都是以单片、单话路编译码器实现的,其体积、功耗成量级地降低,而可靠性则相应地成量级地提高,已广泛用于各种通信系统的电话信号的A/D变换部分,而且64kb/s的单话路编码比特率已是将来ISDN中的标准单元。

通信网中高质量PCM编码技术不仅用于电话信号,在其他模拟信号的数字化上也采用,例如广播声频信号,现在有二种模拟带宽:7kHz和15kHz,对它们用12位编码可以分别编成192kb/s和384kb/s的比特率,它们的数据率都是64kb/s的倍数。

对可视电话的低质量图像,一般分辨率为225行,4:3的长宽比。这样一帧画面有 $300 \times 225 = 67.5k$ 个像素点(pixel/frame)。若每秒传25帧,则每秒要传1.6M个像素点;若每像素点编八位码,则传输数据率为13.5Mb/s。根据像素点要求和灰度等级要求可以计算出所需图像的传输比特率。

从PCM编码比特率看,信号质量要求愈高所需的比特率愈高,各种信号源的编码比特率可参见表1-1。

表 1-1 各种信号源的编码比特率

信号源	信号带宽 kHz	采样率 kHz	比特率	
			比特/采样	信息比特率 b/s
电 话	4	8	8	64 k
广播声频	7	16	12	192 k
	15	32	12	384 k
	1000	2000	4	8448 k
可视电话	6000	12000		34M
FDM群路	312~552	576	14	8448 k

编码比特率在通信中直接影响传输所占带宽，而传输所占带宽又直接反应通信的经济性，因此，近些年来为压缩传输所占频带而压缩编码比特率的编码技术在国内外受到极大重视，并已取得不少成效，尤其是近年VLSI以及数字信号处理技术的发展，使复杂的压缩数据率的算法已具备了硬件实现的可能性与现实性。

1.1.1 语音编码

脉码调制和增量调制属简单的调制方式，应用也较广泛，尤其是PCM 64kb/s编码器已广泛用于公共通信网中，其通话质量可达4.5级（五分制标准），并可保证原话路通道的透明性。自适应增量调制（ADM）编码速率可以在32kb/s~16kb/s，语音质量也较好，因其有强抗误码能力而广泛用于军事通信网以及航天通信系统中，误码在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 条件下仍可保持相当的话音清晰度。当前，自适应差值脉冲编码的电路复杂性虽较简单增量调制编码大许多，但由于其传输信号质量标准可达4.3级，接近64kb/s PCM的质量，因此CCITT已于84年建议以它作为国际通用的32kb/s编码标准，它可以实现与64kb/s的无差错的多次转接，应用在ISDN网中将带来极大经济效益。子带编码（SBC）、自适应差分脉码调制—语音信号谐波压扩的时域算法（ADPCM-TDHS）和矢量编码等等，都是有前途的编码方法，可以进一步压缩比特率。

编码技术的另一领域是参量编码，它从语音信号中提取特征参量，然后在通信的另一端用这些参量重建语音信号。这类方法实现的编码器一般叫作声码器。声码器所重建的语音质量都低于3级，多用于特殊通信中，其比特率可以作到2.4kb/s以下。常用的有线性预测声码器、通道声码器、共振峰声码器等等。近年用矢量化方法可以将比特率压缩到几百比特/秒。以上情况可见表1-2。

对于语音压缩编码的极限可以这样估计：语音中最基本的组成单元可以认为是音素，英语中音素有128~256个，而按通常说话速

表 1-2

各种编码方法的比较

编 码 器	比 特 率	SNR或质量评定
●波形编码		
脉码调制(PCM), (CCITT建议方式)	64kb/s	38 d B
自适应差值编码(ADPCM)	32kb/s	35 d B
瞬时压扩脉码调制(PCM)	40kb/s	30 d B
连续可变斜率增量调制(CVSD)	32kb/s	24 d B
	32kb/s	30 d B
	16kb/s	18~20 d B
子带编码(SBC)	16kb/s	20~25 d B
	8 kb/s	16~18 d B
时域谐波压扩ADPCM(ADPCM-TDHS)	16kb/s	25~30 d B
●参量编码		
通道声码器(Channel Vocoder)	1200/2400/4800b/s	相当好
共振峰声码器(Format Vocoder)	600/1200b/s	差
线性预测声码器(LPC)	1200/2400/4800b/s	好
声激励声码器(Voice Excited Vocoder)	9600b/s	很好

度, 每秒平均发出10个音素, 此时信息率为

$$I = \log_2 (256)^{10} = 80b/s$$

如果把发语音看成是以语音速率发报文, 对英语讲, 每一个字母为七单元码, 即 7 比特; 每分钟发125个英文单字可认为达到了通信语音速率。若每个单字平均由 7 个字母组成, 则信息率

$$I = 7 \times 7 \times 125/60 = 100b/s$$

因此可以认为极限的压缩率为80~100b/s, 当然这时只能传句子内容, 至于讲话者的音质、情绪等重要信息已全部丧失。

1.1.2 图像编码

随着信息化社会的进展, 人们对图像通信系统的要求日益增加, 在通信网中开发出经济的、可行的图象通信系统的可能性已日趋成熟, 这主要归功于LSI以及信号处理技术的发展所带来的实用