

高等院校信息与通信工程系列教材

数字无线传输（第2版）

李式巨 姚庆栋 赵民建 编著

清华大学出版社



内 容 简 介

本书是有关数字无线电传输原理的基础理论书。全书共分 12 章,内容包括无线电信道的性质、衰落信道、数字调制、AWGN 信道最佳接收、同步原理、差错控制、自适应信号处理、全数字接收与软件无线电、扩频与多载波 CDMA、分集与自适应天线、多用户通信与接入及语音压缩编码等,书中对数字无线电传输原理作了深入浅出的介绍和讨论。

本书是通信和电子系统专业的研究生教材,也可作为高年级大学生选修课的参考书以及工程技术人员的参考和自学用书。读者可从本书中得到数字无线传输的系统的理论知识。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

数字无线传输/李式巨,姚庆栋,赵民建编著. 2 版. —北京:清华大学出版社,2007.1
(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 978-7-302-13611-8

I. 数… II. ①李… ②姚… ③赵… III. 数字传输系统—无线电通信—高等学校—教材
IV. TN919.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 091682 号

责任编辑:陈国新 顾 冰

责任校对:时翠兰

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市化甲屯小学装订二厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24.75 字 数:564 千字

版 次:2007 年 1 月第 2 版 印 次:2007 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:36.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:013718-01

教师反馈表

感谢您购买本书！清华大学出版社计算机与信息分社专心致力于为广大院校电子信息类及相关专业师生提供优质的教学用书及辅助教学资源。

我们十分重视对广大教师的服务，如果您确认将本书作为指定教材，请您务必填好以下表格并经系主任签字盖章后寄回我们的联系地址，我们将免费向您提供本书的相关教学资源。

您需要教辅的教材：			
姓名：			
院系：			
院/校：			
您所教的课程名称：			
学生人数/学期：	_____人/_____	_____年级	学时：_____
您目前采用的教材：	作者：_____ 书名：_____ _____		
您准备何时用此书授课：			
联系地址：			
邮政编码：		联系电话	
E-mail：			
您对本书的意见/建议：			系主任签字
			盖章

我们的联系地址：

清华大学出版社 学研大厦 A602, A604 室

邮编：100084

Tel: 010-62770175-4409, 3208

Fax: 010-62770278

E-mail: liuli@tup.tsinghua.edu.cn; hanbh@tup.tsinghua.edu.cn

高等院校信息与通信工程系列教材编委会

主 编：陈俊亮

副 主 编：李乐民 张乃通 邬江兴

编 委 （排名不分先后）：

王 京 韦 岗 朱近康 朱世华

邬江兴 李乐民 李建东 张乃通

张中兆 张思东 严国萍 刘兴钊

陈俊亮 郑宝玉 范平志 孟洛明

袁东风 程时昕 雷维礼 谢希仁

责任编辑：陈国新

出版说明

信息与通信工程学科是信息科学与技术的重要组成部分。改革开放以来,我国在发展通信系统与信息系统方面取得了长足的进步,形成了巨大的产业与市场,如我国的电话网络规模已占世界首位,同时该领域的一些分支学科出现了为国际认可的技术创新,得到了迅猛的发展。为满足国家对高层次人才的迫切需求,当前国内大量高等学校设有信息与通信工程学科的院系或专业,培养大量的本科生与研究生。为适应学科知识不断更新的发展态势,他们迫切需要内容新颖又符合教改要求的教材和教学参考书。此外,大量的科研人员与工程技术人员也迫切需要学习、了解、掌握信息与通信工程学科领域的基础理论与较为系统的前沿专业知识。为了满足这些读者对高质量图书的渴求,清华大学出版社组织国内信息与通信工程国家级重点学科的教学与科研骨干以及本领域的一些知名学者、学术带头人编写了这套高等院校信息与通信工程系列教材。

该套教材以本科电子信息工程、通信工程专业的专业必修课程教材为主,同时包含一些反映学科发展前沿的本科选修课程教材和研究生教学用书。为了保证教材的出版质量,清华大学出版社不仅约请国内一流专家参与了丛书的选题规划,而且每本书在出版前都组织全国重点高校的骨干教师对作者的编写大纲和书稿进行了认真审核。

祝愿《高等院校信息与通信工程系列教材》为我国培养与造就信息与通信工程领域的高素质科技人才,推动信息科学的发展与进步做出贡献。

北京邮电大学

陈俊亮

2004年9月

第2版前言

随着全球通信数字化、网络化、宽带化与个人化的推进,以及超大规模集成电路技术的发展,自《数字无线传输》(浙江大学出版社,1992年)一书出版以来,十多年间,数字无线传输领域发生了巨大的变化。基于FFT的OFDM技术成功地应用与无线传输系统对抗多径干扰,MIMO技术成倍地提高了系统的容量,Turbo码、LDPC码等信道编码理论与技术将实际系统的容量推到香农极限,软件无线电技术使数字无线传输平台变得通用……,为了反映和跟踪这一领域内的迅速变化,适应教学和科研的需求,对《数字无线传输》修订出版。

本书第1章、第2章由姚庆栋编写,第8章由赵民建编写,其余各章由李式巨编写(部分章节保留第1版梁惠君、戴文琪编写的内容)。李式巨对全书的内容和文字进行统一组织和处理。

本书编写过程中参考了浙江大学信息与通信系统专业有关的博士论文,论文的作者分别是康桂华博士、徐志江博士和林丽莉博士,在此表示感谢。

本书主要是作为研究生的学习参考书,介绍数字无线传输中的理论问题,也可以作为这方面专业人员的参考书以及感兴趣的大学高年级学生的课外学习用书。由于编者学识限制及所从事研究工作的局限,欢迎读者对书中缺点和错误批评指教。

编 者

2006年8月

第 1 版前言

数字无线通信经过 20 世纪 70 年代的研究,到了 80 年代国际上已向实用化发展。在科研上我国大致和国际上有着十年左右的差距,而生产上的差距要更大一些。改革开放以来,我们在教学改革及进行较大规模的研究生培养工作的基础上,在数字无线通信领域中开展了研究,并开设了研究生的有关课程,编写了讲义。该讲义经过 2 年的使用,并吸收了各方面意见进行修改,现在编成了这本教材。我们希望能对人才培养及该领域的科研和产品的开发作一点贡献。我们衷心希望我国在这个领域的科研和生产能够经过一段时间的努力逐步赶上国际上前进的步伐。

数字无线通信的发展是在香农(Shannon)信息论指导下发展的,各种具体数字无线通信系统和具体无线电信道关系十分密切。在各种具体系统发展中逐步形成这个领域的合理利用频谱且具有抗干扰能力的数字信号的调制解调理论,对付无线衰落信道的码间干扰的分集、前向纠错、自适应均衡、扩频等理论和技术措施,以及信源的信息压缩编码的理论和技術等方面。本书绪论中概括了这些脉络的梗概,而各章是以此脉络安排的。

本书虽由三位作者执笔,实际上各章节都包含着研究室许多同志的工作和劳动,许多研究生和大学本科生的论文工作也都反映在内。我们不能一一列举他们的姓名和工作,在此对他们表示真诚的感谢。我们还要感谢和我们科研协作的邮电部第四研究所、南京无线电厂、邮电部杭州通信设备厂和浙江省电信器材厂等单位,由于这些单位在实际工作上的支持,我们才能对许多理论问题有比较深入的体会。

由于这门学科涉及范围很广,作者水平有限。衷心希望读者能提出宝贵的意见,使我们能在教学和科研工作中得到提高。

姚庆栋

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字通信的发展	1
1.2 数字信号传输的波形	1
1.2.1 语音和电视信号的数字化	2
1.2.2 数字波形的形成	2
1.2.3 具有滚降幅频特性的形成滤波器	6
1.2.4 系统的各部分频率特性分配	7
1.3 调制解调的一般理论	7
1.3.1 Shannon 的信道极限	7
1.3.2 调制信号的信号空间表示方法	8
1.4 信道的表述方式	11
1.4.1 恒参信道和变参信道	11
1.4.2 信道的系统函数和相关函数	12
1.4.3 频率非选择性信道和频率选择性信道	13
1.5 信源和信道的编码	14
1.5.1 信源压缩编码	14
1.5.2 信道编码	17
1.6 本书内容安排	20
第 2 章 衰落信道	22
2.1 衰落信道的数字模型	22
2.1.1 无衰落信道的线性恒参网络表示	22
2.1.2 衰落	22
2.1.3 衰落信道的数学模型	23
2.2 地面视距微波信道	28
2.3 散射信道	31
2.4 高频无线电信道	36
2.4.1 传输中的相位起伏	36
2.4.2 幅度衰落	37
2.5 移动通信信道的多径衰落	38
2.5.1 移动通信信道的多径衰落	38

2.5.2	多普勒频移的效应	39
2.5.3	多径时延差	41
2.6	数字电视地面广播信道	42
2.7	数字信号经过衰落信道解调后的误码率	43
2.7.1	瑞利衰落信道对数字通信误码率的影响	43
2.7.2	多径时差选择性衰落引起的误码率	44
2.7.3	低码率码元期间衰落信号变化产生的误码	45
2.7.4	突发的统计	47
	参考文献	48
第3章	数字调制	49
3.1	带通信号	49
3.2	稳态随机带通过程	51
3.3	信号的正交分解	52
3.3.1	Gram-Schmidt 法构造正交信号函数集	52
3.3.2	Karhunen-Loeve 变换	53
3.4	数字调制信号	54
3.4.1	无记忆调制	54
3.4.2	有记忆线性调制	57
3.4.3	有记忆非线性调制	58
3.5	格状编码调制	63
3.6	数字信号功率谱	67
3.6.1	无记忆线性调制信号功率谱	67
3.6.2	CPM 信号功率谱密度	69
3.6.3	CPFSK 的功率谱密度	71
3.6.4	有记忆线性调制信号的功率谱密度	72
	参考文献	75
第4章	AWGN 信道最佳接收	76
4.1	白高斯噪声恶化的最佳接收机	76
4.1.1	相干解调	76
4.1.2	匹配滤波解调	78
4.1.3	最佳检测	79
4.1.4	最大似然序列检测算法	81
4.2	无记忆调制最佳接收机性能	83
4.2.1	二进制调制误码率	83
4.2.2	M 进制正交信号误码率	85
4.2.3	M 进制 PAM 误码率	86

4.2.4	M 元 PSK 的误码率	88
4.2.5	差分 DPSK 性能	90
4.2.6	QAM 误码率	92
4.3	CPM 信号最佳接收	93
4.3.1	CPM 信号的相位树图	93
4.3.2	相关器输出度量计算	95
4.3.3	CPM 信号的性能	95
4.4	AWGN 信道中随机相位信号的最佳接收	97
4.4.1	二进制信号最佳接收	97
4.4.2	M 进制正交包络检波性能	99
	参考文献	102
第 5 章 同步原理		103
5.1	概述	103
5.1.1	信号参数估计	103
5.1.2	似然函数	104
5.2	载波恢复	105
5.2.1	最大似然载波相位估计	105
5.2.2	面向判决环	106
5.2.3	非面向判决环	108
5.3	符号定时估计	115
5.3.1	面向判决的最大似然定时估计	115
5.3.2	非面向判决定时估计	116
5.4	载波相位和符号定时的联合估计	117
5.5	扩频系统的同步	119
5.5.1	概述	119
5.5.2	时延锁定同步法	120
5.6	OFDM 同步技术	126
5.6.1	OFDM 系统同步概述	126
5.6.2	OFDM 系统定时算法	127
5.6.3	OFDM 载波频偏估计	132
	参考文献	135
第 6 章 差错控制		137
6.1	类型代数分组码	137
6.1.1	预备知识	137
6.1.2	BCH 码	140
6.2	Reed-Solomon 码	144

6.2.1	RS 编码	144
6.2.2	RS 译码	146
6.3	低密度校验码	149
6.3.1	LDPC 码构造	150
6.3.2	LDPC 码的译码	154
6.4	卷积码	155
6.4.1	卷积码的结构和描述	155
6.4.2	卷积码的解析表示	156
6.4.3	卷积码状态图、网格图和重量分布	159
6.4.4	卷积码的最佳译码——维特比算法	160
6.4.5	维特比算法的差错概率	162
6.4.6	卷积码的其他译码算法	165
6.4.7	递归系统卷积码	170
6.5	交织	171
6.6	Turbo 码	173
6.6.1	Turbo 编码	173
6.6.2	Turbo 码译码的 MAP 算法	174
	参考文献	177
第 7 章	自适应信号处理	179
7.1	概述	179
7.2	自适应滤波器的基本原理	179
7.3	最小均方算法	182
7.3.1	LMS 算法原理	182
7.3.2	递推最小均方算法的收敛	184
7.3.3	梯度噪声及过量均方误差	185
7.4	在码间干扰和加性白噪声下的最佳解调	186
7.5	时域均衡器	189
7.5.1	线性均衡器	189
7.5.2	判决反馈均衡器	192
7.5.3	分数间隔抽头抽样的均衡器	195
7.5.4	均衡器级数的选择	197
7.6	快速收敛自适应滤波	198
7.6.1	最小二乘准则	198
7.6.2	递推最小二乘 Kalman 算法	199
7.6.3	线性预测和格型滤波器	201
7.7	自恢复(盲)均衡	206
7.7.1	基于最大似然准则的盲均衡	206

7.7.2 随机梯度算法	209
7.7.3 基于二阶和高阶信号统计量的盲均衡算法	212
参考文献	213
第8章 全数字接收与软件无线电	215
8.1 引言	215
8.2 软件无线电的结构	216
8.2.1 一般软件无线电接收机的结构	216
8.2.2 硬件平台结构	217
8.2.3 软件无线电系统结构	218
8.3 软件无线电多波段接收和带通抽样	222
8.3.1 软件无线电中的正交抽样	223
8.3.2 基于正交抽样的全波段数字化方法	224
8.3.3 一阶带通抽样	227
8.3.4 高阶带通抽样	229
8.3.5 Σ - Δ 抽样	234
8.4 多速率处理和抽样率转换	235
8.4.1 有理数倍多速率信号处理	236
8.4.2 正实数倍抽样率变换	244
8.4.3 时变 CIC 滤波的抽样率转换	248
8.4.4 多通道信号抽取	252
8.5 软件无线电多模式系统	255
8.5.1 软件无线电的接收机结构	256
8.5.2 突发模式 MPSK 线性调制接收机算法	258
8.5.3 突发模式 GMSK 非线性调制接收机算法	265
参考文献	272
第9章 扩频与多载波 CDMA	274
9.1 概述	274
9.2 扩展频谱系统模型	274
9.2.1 直接序列扩频	274
9.2.2 跳频扩频	276
9.3 扩频序列	277
9.3.1 m 序列	277
9.3.2 Gold 序列	279
9.3.3 Kasami 序列	280
9.3.4 Walsh-Hadamard 正交序列	281
9.4 AWGN 信道上的 DS-CDMA 的误码率	282

9.5 多载波 CDMA	284
9.5.1 概述	284
9.5.2 MC-CDMA 系统模型	285
9.5.3 MC-CDMA 性能分析	287
9.5.4 VSF-OFCDM	288
9.5.5 二维扩频 VSF-OFCDM	289
9.6 OFDM 信道估计	290
参考文献	294
第 10 章 分集与自适应天线	295
10.1 分集接收	295
10.1.1 空间分集	295
10.1.2 频率分集	296
10.1.3 角度分集	298
10.1.4 极化分集	299
10.1.5 时间分集	299
10.1.6 时空发射分集	300
10.1.7 宽带多径分集与 Rake 接收	301
10.2 合并技术	303
10.2.1 最佳选择分集	303
10.2.2 最大比值合并	304
10.2.3 等增益合并	308
10.3 分集对数字通信性能的改善	310
10.3.1 分集对误码率的影响	310
10.3.2 分集合并减少时延扩展	310
10.4 自适应天线	311
10.4.1 概述	311
10.4.2 阵列天线输入向量	312
10.4.3 线阵波束形成	314
10.4.4 面阵波束形成	315
10.4.5 自适应天线(智能天线)	316
10.5 MIMO 系统	317
10.5.1 确定性的 MIMO 双向传播信道模型	318
10.5.2 随机 MIMO 信道模型及奇异值分解	319
参考文献	321
第 11 章 多用户通信与接入	323
11.1 多址技术	323

11.2	多址方式的容量	324
11.3	码分多址与多用户检测	326
11.3.1	CDMA 信号与信道模型	327
11.3.2	最佳多用户接收	328
11.3.3	次最佳多用户接收	330
11.3.4	非线性次最佳多用户接收	334
11.3.5	检测器的性能特征	337
11.4	随机接入方式	338
11.4.1	ALOHA 随机接入方式	339
11.4.2	载波侦听多路接入 CSMA 吞吐量	341
11.4.3	CSMA/CD 吞吐量	343
11.4.4	CSMA/CA 的 Markov 链模型分析吞吐量	345
11.4.5	虚拟信道多址的其他方式	349
	参考文献	350
第 12 章	语音压缩编码	352
12.1	概述	352
12.2	ADPCM 基本原理	353
12.2.1	自适应量化器	354
12.2.2	预测器的结构	356
12.2.3	自适应预测	358
12.2.4	ADPCM 系统抗误差衰减因子	358
12.2.5	自适应极点预测系数算法修正	360
12.3	子带编码 SBC	361
12.4	线性预测编码	365
12.4.1	线性预测分析基本原理	365
12.4.2	语音信号模型参数	365
12.4.3	线性预测编码器	367
12.5	码激励线性预测语音编码	368
12.5.1	码激励线性预测语音编码模型	368
12.5.2	两级码书结构的 CELP 编码器	370
12.5.3	残差激励线性预测 RELP	372
12.6	语音向量量化编码	373
12.6.1	基本原理	373
12.6.2	向量量化树状搜索方式	374
12.6.3	RELP-VQ 编码举例	375
	参考文献	375

第 1 章

绪 论

1.1 数字通信的发展

20 世纪 70 年代由于大规模集成电路和数字信号处理技术的发展,给数字通信实用化创造了条件,信息理论中指出的在一定信道条件下有效和可靠地传送信息已能在数字通信系统上实现。到了 80 年代,国际上工业先进的国家开始了从模拟通信转向数字通信的过渡时期,从光纤通信开始,卫星和数字微波通信也迅速跟上,我国自 80 年代后期也进入到这个过渡时期。到了 90 年代移动通信也开始转向数字通信。90 年代后期美国开始电视广播的地面传输向数字电视广播的过渡,我国也在制定数字电视的标准,并在一些城市进行电缆和地面传输的试验。目前音频数字广播也在各国研究范围之内。

20 世纪 60 年代末美国开发出计算机 ARPA 网。早期的无线电通信是点对点的通信,60 年代后期军用无线电和计算机的 ARPA 网都要求无线电传输能互联成网,无线电接入网络在这时开始研究。80 年代后个人计算机(PC)开始发展并且迅速普及,90 年代后期互联网(internet)迅速普及,又由于便携式个人计算机的发展,通过移动通信的入网也在发展,第三代移动通信除了能支持多媒体通信,也可以支持计算机在移动条件下入网,并且无线局域网也在研究中,因此作为物理、链路层和网络层的无线数字传输和无线接入是研究中的一个重点。

进入 21 世纪,模拟通信通过向数字通信的过渡,通信各领域已形成数字通信为主的局面。目前正在研究的宽带无线传输,能把语音、文字、多媒体通信结合在一起,并把通信、计算机和广播等网络经有线和无线媒体融合在一起。

通信的制式和设备与信道关系十分密切,尤其是数字通信设备,用于不同信道的设备是很不相同的。各种无线电信道由于传播参数随着时间而变化以及多径干扰的影响,都可以看成变参网络。在这种信道中,要有效地传送数字信号,设备就要复杂得多,就需要研究各种高效调制、解调、分集、均衡和误码控制等方法,以对付这种变参网络给数字通信带来的不利影响。并且各种信道的带宽及其特性决定着通信的最高码率。

本书介绍数字无线传输的基本理论,在通信的物理层、链路层以及网络的接入等方面进行讨论。书中并不讨论某一种具体的数字无线通信设备,而是从总的原理和方法上进行讨论,这就是本书的目的。

1.2 数字信号传输的波形

从话筒得到的语音信号和摄像机得到的视频信号都是模拟信号。在数字通信中,要把这些模拟信号转换成为数字信号,现在都是用二进制数字信号。

1.2.1 语音和电视信号的数字化

模拟信号的数字化经过两个步骤：一是抽样，二是量化。抽样是把时间上连续的信号转换成为时间上离散的信号序列。可以应用 Nyquist 原理来进行抽样，即模拟信号应以不低于其最高频率成分的两倍频率抽样，在以后复原成模拟信号时才不会引起失真。目前通信标准话音频带定为 300~3400Hz，用 8kHz 频率抽样。标准电视信号中的亮度成分以 13.5MHz 频率抽样，两个色差信号以 6.75MHz 频率抽样。

量化时每一个样元量化成的二进制码比特(bit, 简称为 b)数按照听觉视觉的分辨率确定。话音每一个样元量化成 13b 或 14b 的二进制数，经过 A 律或 μ 律进行非线性压缩变换成为 8b 二进制数字。因此，话音信号的数码率为 64kb/s。电视图像信号样元称为像素，其亮度和色度成分都量化成为 8b 的二进制数字，电视信号的数码率为 216Mb/s。

数字信号常常以多个话路组织成群进行传输，以 64kb/s 信道作为一个基本话路，30 个话路加上同步公务信路构成 2.048Mb/s 的一次群。以后按 4 倍数的码率倍增上去组成码率为 8.448Mb/s 的 120 话路的二次群，码率为 34.368Mb/s 的 480 话路的三次群，码率为 139.264Mb/s 的 1920 话路的四次群，码率为 564.992Mb/s 的 480 话路的五次群等等。各种群路在具有合适带宽的有线和无线信道中传输，经过传输，接收后分出低次群，最后取出话路。这种群路的组成方法的话路高次群是低一次群的 4 倍，但是码率不是整数 4 倍，由于公务和同步信号的安排，比 4 倍略大一些，因此在传输中从一个高次群取出低次群，或由几个低次群构成高次群不十分方便。目前在高码率传输上 ITU 的标准按照同步组织：STM1 码率为 155.52Mb/s，STM2 码率为 622.08Mb/s，STM3 码率为 1244.16Mb/s，STM4 码率为 2488.32Mb/s。

移动通信信道传输条件差，信道带宽较窄，话音采取压缩编码方法。GSM 系统中话音码率从 64kb/s 压缩到 13kb/s，CDMA 系统中话音码率从 64kb/s 压缩到 9.6kb/s。

上述的标准电视信号数码率为 216Mb/s，传输时要求宽带信道。目前都按照 MPEG-2 标准压缩到 4~5Mb/s 在有线无线信道中广播传输。高清晰度电视信号码率是标准电视信号的 4~6 倍，也都按照 MPEG-2 标准压缩到 19~20Mb/s 广播传输。

1.2.2 数字波形的形成

数字信号在信道中传输，需要一定的带宽。为了经济利用频带资源，希望信号占用的频带尽可能地窄一些，这就和数字化后的数码信号在信道中传输所采用的波形有关。现在先介绍数字传输系统中波形形成的概念，一个数字通信系统可用图 1-1 所示的框图表示。

数字输入序列 $\cdots a_2, a_1, a_0, a_1, a_2 \cdots$ 可用 $\{a_k\}$ 表示，其中二进制码 a_k 为符号 1 或 0。在波形调制中二进制调制 a_k 常用双极性信号+1 和-1 表示，例如可用后面图 1-2(b)的波形表示 1，把它反过来表示-1。多进制调制 a_k 可用多进制码表示，例如四进制码可用后面图 1-2(b)的具有不同幅度(+2, +1, -1, -2)的波形表示。理论分析上可把输入到数字通信系统的信号序列表示为

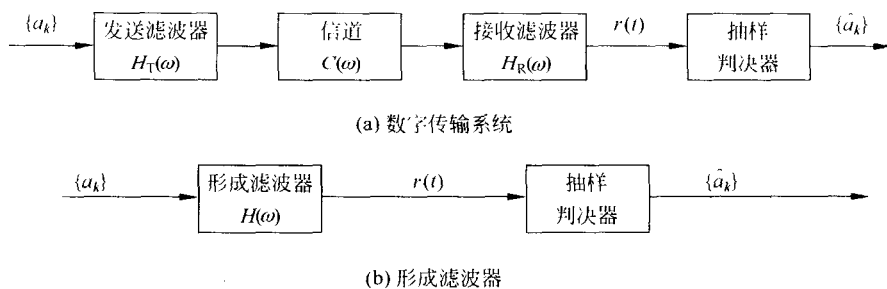


图 1-1 数字通信系统的波形形成

$$\sum_k a_k \delta(t - kT) \quad (1.2.1)$$

式中： $\delta(t - kT)$ 是位置在时间轴 $t - kT$ 时的 δ 函数。发送设备、信道、接收设备都作为线性网络，分别用传递函数 $H_T(\omega)$ 、 $C(\omega)$ 和 $H_R(\omega)$ 表示，数字信号经过这些传输环节后成为信号 $r(t)$ ，经过抽样判决后恢复成为输入数字序列 $\{a_k\}$ 的估计值 $\{\hat{a}_k\}$ ，当传输中噪声、干扰和失真小的时候，这个估计值就是输入数字序列 $\{a_k\}$ 。在理论分析上把数字信号 $\{a_k\}$ 转换成为 $r(t)$ 叫做数字波形形成。把发送设备、信道、接收设备的特性综合成为一个等效网络，称为形成滤波器，其传递函数为

$$H(\omega) = H_T(\omega)C(\omega)H_R(\omega), \quad \omega = 2\pi f \quad (1.2.2)$$

形成滤波器的冲击响应为

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1.2.3)$$

因此，在抽样判决前接收到的信号为

$$r(t) = \sum_k a_k h(t - kT) \quad (1.2.4)$$

先考虑一种理想情况，波形形成滤波器具有理想低通滤波器特性，其归一化幅频特性和相频特性如图 1-2(a)所示。

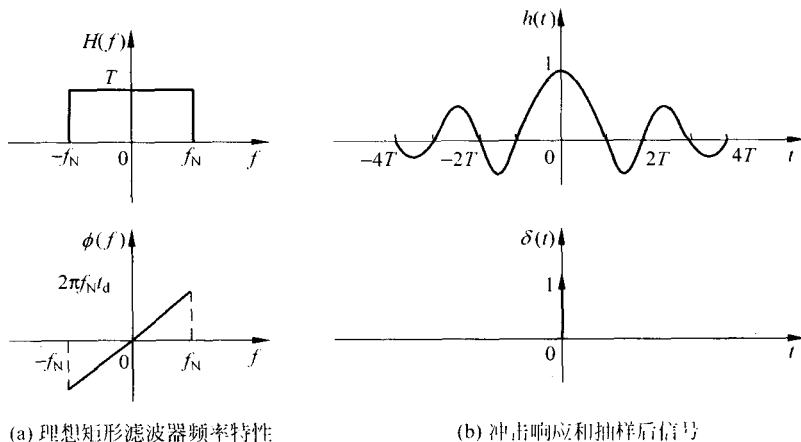


图 1-2 理想矩形频率特性形成滤波器