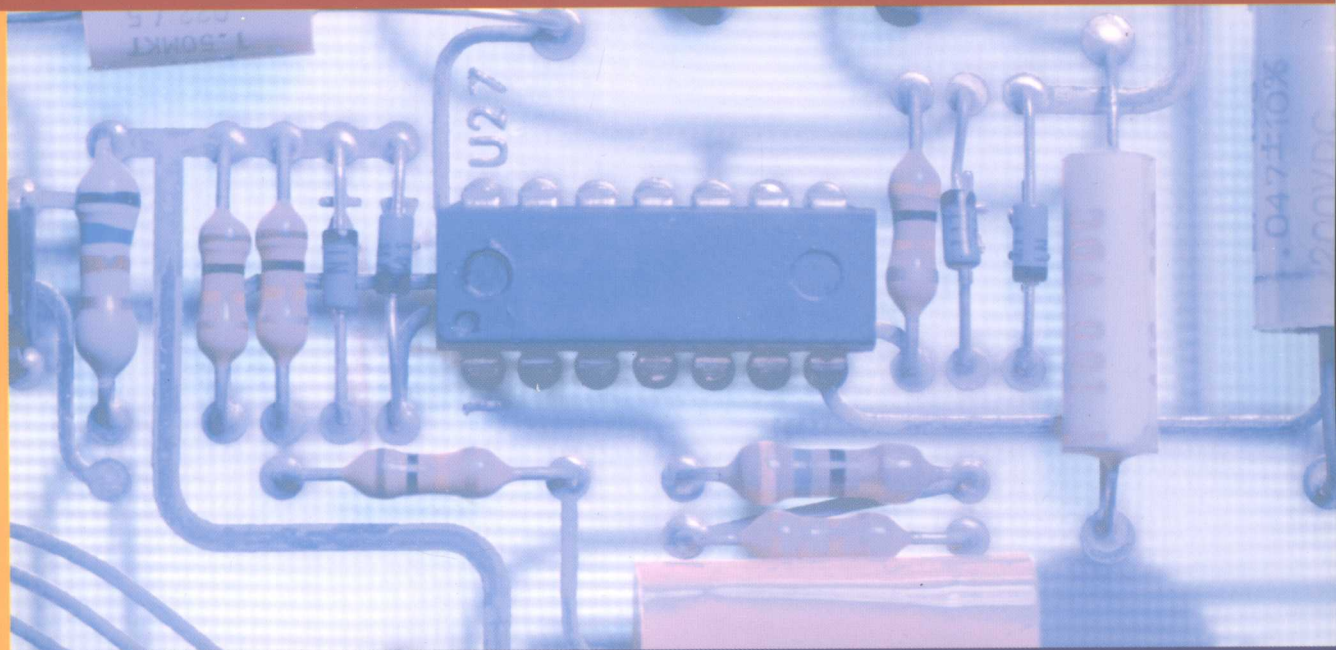


高等院校信息与通信工程系列教材

现代数字信号处理 及其应用



何子述 夏威 等编著

清华大学出版社

高等院校信息与通信工程系列教材

现代数字信号处理 及其应用

何子述 夏威 等编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了以离散时间随机过程为处理对象的数字信号处理理论和方法。全书共分9章,内容包括:离散时间信号与系统,离散时间平稳随机过程,功率谱估计和信号频率估计方法,维纳滤波原理及自适应算法,维纳滤波在信号处理中的应用,最小二乘估计理论及算法,卡尔曼滤波,阵列信号处理与空域滤波,盲信号处理。内容安排上注重概念和理论的工程应用,各章中还安排有一定的应用实例。

本书可作为电子信息工程、通信工程、自动控制、电子科学与技术等专业的研究生教材或教学参考书,也可作为相关专业工程技术人员的参考资料。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代数字信号处理及其应用/何子述等编著. —北京:清华大学出版社,2009.5
(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 978-7-302-17565-0

I. 现… II. 何… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第030562号

责任编辑:陈国新

责任校对:时翠兰

责任印制:杨艳

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

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:25.25 字 数:592千字

版 次:2009年5月第1版 印 次:2009年5月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.80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:018697-01

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位居世界首位,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

前 言

数字信号处理是指用数字计算机或其他专用数字设备,以数值计算的方式对离散时间信号进行分析、处理。传统的数字信号处理主要是针对线性时不变离散时间系统,用卷积、离散时间傅里叶变换、 Z 变换等理论对确定信号进行处理;而现代数字信号处理,是在传统数字信号处理理论基础之上,基于概率统计的思想,用数理统计、优化估计、线性代数和矩阵计算等理论进行研究,处理的信号通常是离散时间随机过程,且系统可能是时变、非线性的。

本书是根据作者长期在电子科技大学为研究生开设《现代数字信号处理及应用》课程的教学讲义,并结合作者的科研活动和应用体会,参考国内外相关文献资料写作而成,在内容取舍和安排上有下面一些考虑。

1. 基本概念和基本理论讲清楚、讲透

对现代数字信号处理的基本概念,尽量使用通俗易懂的语言,深入浅出地进行描述,使读者易于理解、掌握;对其中的基本理论、基本公式,尽量给出严格的数学推导和理论证明,以体现理论的正确性和逻辑的严密性。

2. 注重理论算法与具体工程应用相结合

为使读者对抽象的理论易于理解,书中各章在对基本理论进行介绍的同时,给出了这些理论在实际工程中的具体应用实例,包括工程应用背景、接收信号和处理系统模型、计算过程和处理结果等。

3. 适当介绍近年来发展的新理论、新方法

随着硬件处理能力和数学理论的发展,现代数字信号处理是一门发展很快的学科,本书在内容安排上注意介绍一些近年来得到发展的新理论、新方法,如多级维纳滤波理论、谱估计中的 APES 算法、盲信号处理等。

4. 重点介绍信号的时域处理理论,集中介绍空域处理理论

本书在信号的时域处理和空域处理上是这样安排的,首先用较大篇幅将信号的各种时域处理理论阐述清楚,然后将信号的空域处理集中在第 8 章进行介绍,表述方法为:在建立空域信号处理模型后,用类比的方法直接将信号时域处理的结论引用到空域处理中。

基于上面的考虑,全书分为 9 章,各章内容安排如下。

第 1 章归纳介绍了离散时间信号与系统的相关内容;第 2 章介绍了离散时间平稳随机过程的相关理论,包括自相关矩阵的概念和性质等重要内容。第 1 章和第 2 章内容是

后续各章内容的基础。

第3章介绍了离散时间随机过程功率谱估计和信号频率估计的理论和方法；第4章阐述了维纳滤波器理论和自适应算法；在此基础上，第5章讨论了维纳滤波理论的工程应用；接着第6章讨论了有限观测样本时的最小二乘估计理论；第7章介绍了卡尔曼滤波理论。

第8章将时域信号处理理论应用于空域信号处理，介绍了阵列处理和空域滤波理论和算法；最后第9章讨论了盲信号处理的理论和算法。

本书各章安排了较多的习题和仿真实验题，以加深读者对理论的理解和掌握，同时熟悉理论在工程上的应用。讲授完本书全部内容约需60学时左右，根据不同的教学大纲和学时安排，具体讲授时可对本书各章节内容进行取舍。

本书除何子述、夏威两位主要作者外，参加写作工作的还有：程婷同志参加了第1章全部和第7章部分内容的写作；贾可新和廖羽宇同志参加了第2章和第3章的写作；邹麟同志参加了第7章部分内容和第9章部分内容的写作；谢菊兰同志参加了第8章的写作。参加稿件完善、校对和习题解答工作的还有陈客松、李会勇、黄秋钦、梁炎夏、杨怡佳、何茜、肖熠、余嘉、张旭红等同志；黄琪、杨卫平两位同志为本书绘制了全部插图；万群同志对本书的完成提供了许多建议和帮助；在此对他们的辛勤付出深表感谢！

本书的完成得到了电子科技大学研究生院、电子工程学院等部门的热情帮助和支持，作者深表感谢！

限于作者水平，书中定有不当和错误之处，恳请读者批评指正。

何子述

2008年冬于成都沙河畔

目 录

第 1 章 离散时间信号与系统	1
1.1 离散时间信号与系统基础	1
1.1.1 离散时间信号的定义与分类	1
1.1.2 离散时间信号的差分和累加	3
1.1.3 离散时间系统定义及 LTI 特性	4
1.1.4 LTI 离散时间系统响应——卷积和	4
1.1.5 离散时间信号相关函数及卷积表示	5
1.2 离散时间信号与系统的傅里叶分析	6
1.2.1 复指数信号通过 LTI 系统的响应	6
1.2.2 离散时间信号的傅里叶级数和傅里叶变换	6
1.2.3 傅里叶变换的性质	7
1.2.4 离散时间系统频率响应与理想滤波器	9
1.2.5 离散时间信号的 DFT 和 FFT	11
1.3 离散时间信号的 Z 变换	14
1.3.1 Z 变换的概念	14
1.3.2 Z 变换的性质	15
1.3.3 离散时间系统的 z 域描述——系统函数	18
1.3.4 离散时间系统的方框图和信号流图表示	19
1.4 LTI 离散时间系统性能描述	21
1.4.1 系统的记忆性	21
1.4.2 系统的因果性	21
1.4.3 系统的可逆性	22
1.4.4 系统的稳定性和最小相位系统	22
1.4.5 线性相位系统与系统的群时延	23
1.5 离散时间系统的格型结构	24
1.5.1 全零点滤波器的格型结构	24
1.5.2 全极点滤波器的格型结构	26
1.6 连续时间信号的离散化及其频谱关系	27
1.7 离散时间实信号的复数表示	29
1.7.1 离散时间解析信号(预包络)	29
1.7.2 离散时间希尔伯特变换	30

1.7.3	离散时间窄带信号的复数表示(复包络)	31
1.8	窄带信号的正交解调与数字基带信号	32
1.8.1	模拟正交解调与采集电路原理	33
1.8.2	数字正交解调与采集电路原理	33
1.8.3	基带信号的随机相位与载波同步	34
1.9	多相滤波与信道化处理	35
1.9.1	横向滤波器的多相结构	35
1.9.2	信号的均匀信道化	36
1.9.3	基于多相滤波器组的信道化原理	38
	习题	39
	参考文献	44
第2章	离散时间平稳随机过程	45
2.1	离散时间平稳随机过程基础	45
2.1.1	离散时间随机过程及其数字特征	45
2.1.2	离散时间平稳随机过程及其数字特征	48
2.1.3	遍历性与统计平均和时间平均	49
2.1.4	循环平稳性的概念	51
2.1.5	随机过程间的独立、正交、相关	52
2.2	平稳随机过程的自相关矩阵及其性质	54
2.2.1	自相关矩阵的定义	54
2.2.2	自相关矩阵的基本性质	54
2.2.3	自相关矩阵的特征值与特征向量的性质	56
2.3	离散时间平稳随机过程的功率谱密度	59
2.3.1	功率谱的定义	59
2.3.2	功率谱的性质	60
2.3.3	平稳随机过程通过 LTI 离散时间系统的功率谱	60
2.4	离散时间平稳随机过程的参数模型	62
2.4.1	Wold 分解定理	62
2.4.2	平稳随机过程的参数模型	64
2.5	随机过程高阶累积量和高阶谱的概念	67
2.5.1	高阶矩和高阶累积量	67
2.5.2	高阶累积量的性质	70
2.5.3	高阶谱的概念	70
	习题	71
	参考文献	74

第 3 章 功率谱估计和信号频率估计方法	75
3.1 经典功率谱估计方法	75
3.1.1 BT 法	75
3.1.2 周期图法	78
3.1.3 经典功率谱估计性能讨论	79
3.1.4 经典功率谱估计的改进	82
3.1.5 经典功率谱估计仿真实例及性能比较	84
3.2 平稳随机过程的 AR 参数模型功率谱估计	86
3.2.1 AR 参数模型的正则方程	87
3.2.2 AR 参数模型的 Levinson-Durbin 迭代算法	89
3.2.3 AR 参数模型功率谱估计步骤及仿真实例	92
3.2.4 AR 参数模型功率谱估计性能讨论	94
3.3 MA 参数模型和 ARMA 参数模型功率谱估计原理	96
3.3.1 MA 参数模型的正则方程	96
3.3.2 ARMA 参数模型的正则方程	99
3.4 MVDR 信号频率估计方法	100
3.4.1 预备知识: 标量函数关于向量的导数和梯度的概念	101
3.4.2 MVDR 滤波器原理	103
3.4.3 MVDR 频率估计算法仿真实例	106
3.5 APES 算法	106
3.5.1 APES 算法原理	106
3.5.2 APES 算法仿真实例	109
3.6 基于相关矩阵特征分解的信号频率估计	110
3.6.1 信号子空间和噪声子空间的概念	110
3.6.2 MUSIC 算法	112
3.6.3 Root-MUSIC 算法	114
3.6.4 Pisarenko 谐波提取方法	116
3.6.5 ESPRIT 算法	117
3.6.6 信号源个数的确定方法	120
3.7 谱估计在电子侦察中的应用实例	121
3.7.1 常规通信信号参数估计	121
3.7.2 跳频信号参数估计	124
习题	128
参考文献	132
第 4 章 维纳滤波原理及自适应算法	134
4.1 自适应横向滤波器及其学习过程	134

4.1.1	自适应横向滤波器结构	134
4.1.2	自适应横向滤波器的学习过程和工作过程	135
4.2	维纳滤波原理	136
4.2.1	均方误差准则及误差性能面	136
4.2.2	维纳-霍夫方程	137
4.2.3	正交原理	138
4.2.4	最小均方误差	139
4.2.5	计算实例 1: 噪声中的单频信号估计	139
4.2.6	计算实例 2: 信道传输信号的估计	142
4.3	维纳滤波器的最陡下降求解方法	144
4.3.1	维纳滤波的最陡下降算法	144
4.3.2	最陡下降算法的收敛性	145
4.3.3	最陡下降算法的学习曲线	147
4.3.4	最陡下降算法仿真实例	148
4.4	LMS 算法	149
4.4.1	LMS 算法原理	149
4.4.2	LMS 算法权向量均值的收敛性	151
4.4.3	LMS 算法均方误差的统计特性	152
4.4.4	LMS 算法仿真实例	155
4.4.5	几种改进的 LMS 算法简介	156
4.5	多级维纳滤波器理论	157
4.5.1	输入向量满秩变换的维纳滤波	157
4.5.2	维纳滤波器降阶分解原理	159
4.5.3	维纳滤波器的多级表示	161
4.5.4	基于输入信号统计特性的权值计算步骤	163
4.5.5	一种阻塞矩阵的构造方法	164
4.5.6	基于观测数据的权值递推算法	165
4.5.7	仿真计算实例	168
	习题	170
	参考文献	172
第 5 章 维纳滤波在信号处理中的应用		174
5.1	维纳滤波在线性预测中的应用	174
5.1.1	线性预测器原理	174
5.1.2	线性预测与 AR 模型互为逆系统	175
5.1.3	基于线性预测器的 AR 模型功率谱估计	177
5.2	前后向线性预测及其格型滤波器结构	178
5.2.1	前后向线性预测器(FBLP)原理	178
5.2.2	FBLP 的格型滤波器结构	180

5.2.3	Burg 算法及其在 AR 模型谱估计中的应用	181
5.2.4	Burg 算法功率谱估计仿真实验	184
5.3	信道均衡	184
5.3.1	离散时间通信信道模型	184
5.3.2	迫零均衡滤波器	186
5.3.3	基于 MMSE 准则的 FIR 均衡滤波器	190
5.3.4	自适应均衡及仿真实例	191
5.4	语音信号的线性预测编码	195
5.4.1	语音信号的产生	195
5.4.2	基于线性预测的语音信号处理	196
5.4.3	仿真实验	201
	习题	203
	参考文献	205
第 6 章	最小二乘估计理论及算法	206
6.1	预备知识: 线性方程组解的形式	206
6.1.1	线性方程组的唯一解	206
6.1.2	线性方程组的最小二乘解	207
6.1.3	线性方程组的最小范数解	207
6.2	最小二乘估计原理	207
6.2.1	最小二乘估计的确定性正则方程	207
6.2.2	LS 估计的正交原理	210
6.2.3	投影矩阵的概念	211
6.2.4	LS 估计的误差平方和	211
6.2.5	最小二乘方法与维纳滤波的关系	212
6.2.6	应用实例: 基于 LS 估计的信道均衡原理	213
6.3	用奇异值分解求解最小二乘问题	214
6.3.1	矩阵的奇异值分解	215
6.3.2	奇异值分解与特征值分解的关系	216
6.3.3	用奇异值分解求解确定性正则方程	216
6.3.4	奇异值分解迭代计算简介	219
6.4	基于 LS 估计的 FBLP 原理及功率谱估计	220
6.4.1	FBLP 的确定性正则方程	220
6.4.2	用奇异值分解实现 AR 模型功率谱估计	222
6.5	递归最小二乘(RLS)算法	223
6.5.1	矩阵求逆引理	223
6.5.2	RLS 算法原理	224
6.5.3	自适应均衡仿真实验	227
6.6	基于 QR 分解的递归最小二乘(QR-RLS)算法原理	229

6.6.1	矩阵的 QR 分解	229
6.6.2	QR-RLS 算法	229
6.6.3	基于 Givens 旋转的 QR-RLS 算法	231
6.6.4	利用 Givens 旋转直接得到估计误差信号	237
6.6.5	QR-RLS 算法的 systolic 多处理器实现原理	238
	习题	240
	参考文献	243
第 7 章	卡尔曼滤波	244
7.1	基于新息过程的递归最小均方误差估计	244
7.1.1	标量新息过程及其性质	244
7.1.2	最小均方误差估计的新息过程表示	246
7.1.3	向量新息过程及其性质	247
7.2	系统状态方程和观测方程的概念	248
7.3	卡尔曼滤波原理	251
7.3.1	状态向量的最小均方误差估计	251
7.3.2	新息过程的自相关矩阵	252
7.3.3	卡尔曼滤波增益矩阵	253
7.3.4	卡尔曼滤波的黎卡蒂方程	254
7.3.5	卡尔曼滤波计算步骤	256
7.4	卡尔曼滤波的统计性能	258
7.4.1	卡尔曼滤波的无偏性	258
7.4.2	卡尔曼滤波的最小均方误差估计特性	259
7.5	卡尔曼滤波的推广	260
7.5.1	标称状态线性化滤波	261
7.5.2	扩展卡尔曼滤波	262
7.6	卡尔曼滤波的应用	264
7.6.1	卡尔曼滤波在维纳滤波中的应用	264
7.6.2	卡尔曼滤波在雷达目标跟踪中的应用	266
7.6.3	α - β 滤波的概念	270
7.6.4	卡尔曼滤波在交互多模型算法中的应用	272
7.6.5	卡尔曼滤波在数据融合中的应用	277
	习题	281
	参考文献	286
第 8 章	阵列信号处理与空域滤波	287
8.1	阵列接收信号模型	287
8.1.1	均匀线阵接收信号模型	287
8.1.2	任意阵列(共形阵)接收信号模型	290

8.1.3	均匀矩形阵接收信号模型	291
8.1.4	均匀圆阵接收信号模型	292
8.2	空间谱与 DOA 估计	293
8.3	基于 MUSIC 算法的信号 DOA 估计方法	295
8.3.1	MUSIC 算法用于信号 DOA 估计	295
8.3.2	仿真实例	297
8.4	信号 DOA 估计的 ESPRIT 算法	298
8.4.1	ESPRIT 算法用于信号 DOA 估计的原理	298
8.4.2	仿真实例	300
8.5	干涉仪测向原理	301
8.5.1	一维相位干涉仪测向原理	301
8.5.2	二维相位干涉仪	302
8.6	空域滤波与数字波束形成	303
8.6.1	空域滤波和阵方向图	303
8.6.2	数字自适应干扰置零	306
8.7	基于 MVDR 算法的 DBF 方法	308
8.7.1	MVDR 波束形成器原理	308
8.7.2	QR 分解 SMI 算法	309
8.7.3	MVDR 波束形成器实例	311
8.7.4	LCMV 波束形成器简介	312
8.7.5	LCMV 波束形成器的维纳滤波器结构	314
8.8	空域 APES 数字波束形成和 DOA 估计方法	315
8.8.1	前向 SAPES 波束形成器原理	316
8.8.2	仿真实例	320
8.9	多旁瓣对消数字自适应波束形成方法	321
8.9.1	多旁瓣对消数字波束形成原理	321
8.9.2	多旁瓣对消的最小二乘法求解	323
8.10	阵列信号处理中的其他问题	325
8.10.1	相关信号源问题	325
8.10.2	宽带信号源问题	329
8.10.3	阵列校正与均衡问题	332
	习题	333
	参考文献	338
第 9 章	盲信号处理	340
9.1	盲信号处理的基本概念	340
9.1.1	盲系统辨识与盲解卷积	340
9.1.2	信道盲均衡	341
9.1.3	盲源分离与独立分量分析(ICA)	341

9.1.4	盲波束形成	342
9.2	Bussgang 盲均衡原理	342
9.2.1	自适应盲均衡与 Bussgang 过程	343
9.2.2	Sato 算法	345
9.2.3	恒模算法	345
9.2.4	判决引导算法	347
9.3	SIMO 信道模型及子空间盲辨识原理	348
9.3.1	SIMO 信道模型	348
9.3.2	SIMO 信道模型的 Sylvester 矩阵	350
9.3.3	SIMO 信道的可辨识条件和模糊性	351
9.3.4	基于子空间的盲辨识算法	352
9.4	SIMO 信道的 CR 盲辨识原理及自适应算法	355
9.4.1	CR 算法	355
9.4.2	多信道 LMS 算法	357
9.5	基于阵列结构的盲波束形成	360
9.5.1	基于奇异值分解的降维预处理	360
9.5.2	基于 ESPRIT 算法的盲波束形成	362
9.6	基于信号恒模特性的盲波束形成	363
9.6.1	SGD-CMA 算法	364
9.6.2	RLS-CMA 算法	364
9.6.3	解析恒模算法简介	366
	习题	368
	参考文献	370
	索引	373
	常用符号表	384

第 1 章 离散时间信号与系统

本章将介绍离散时间信号与系统的相关基本理论,这些内容是本书后续章节的基础。首先给出离散时间信号与系统的概念,讨论离散时间信号的傅里叶变换、离散傅里叶变换(DFT)、Z变换和离散时间系统性能描述;然后介绍线性时不变离散时间系统的格型结构形式;接着给出离散时间实信号的复数表示,即离散希尔伯特变换;随后讨论窄带信号的正交解调实现方法;最后将对多相滤波器组的概念和信道化原理进行阐述。

1.1 离散时间信号与系统基础

1.1.1 离散时间信号的定义与分类

1. 离散时间信号的定义

信号是承载信息的工具。例如,交通灯信号,它传递的信息是“红灯停绿灯行”。信号在数学上可以表示成一个或几个独立变量的函数^[1]。根据自变量是否连续取值,可将信号分为连续时间信号(continuous-time signal)和离散时间信号(discrete-time signal)。连续时间信号是指自变量可以连续取值的信号,工程上,经常将连续时间信号称为模拟信号。离散时间信号则是指信号值仅在某些离散时刻有定义,而在其他时间无定义的信号。离散时间信号也常被称为离散时间序列(discrete-time sequence)。

和离散时间信号概念相关的一个概念是数字信号(digital signal),如果将离散时间信号的信号值用有限位数的二进制数来表示,则称这样的离散时间信号为数字信号。在不考虑有限位二进制数引入的量化误差时,可认为数字信号就是离散时间信号。

随着数字电路和数字计算机技术的发展,数字计算机已广泛应用于信号的处理,而计算机只能处理离散时间信号,因此在将日常的连续时间信号(如语音等)送给计算机处理之前,应将其转换为离散时间信号。

离散时间信号可以通过对一个连续时间信号在时间上采样(sampling)而获得,通常采样时间间隔是均匀的。以采样时间间隔 T_s 对连续时间信号 $f_c(t)$ 采样,得到的序列可表示为 $\{f_c(nT_s), n=0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$,进一步地,还可将该序列用一个变量为 n 的函数描述为

$$f_d(n) = f_c(nT_s), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1.1)$$

$f_d(n)$ 便是得到的离散时间信号。图 1.1.1 描述了上述由连续时间信号获得离散时间信号的过程。后文中若非特别说明,自变量为 n 的信号均为离散时间信号。

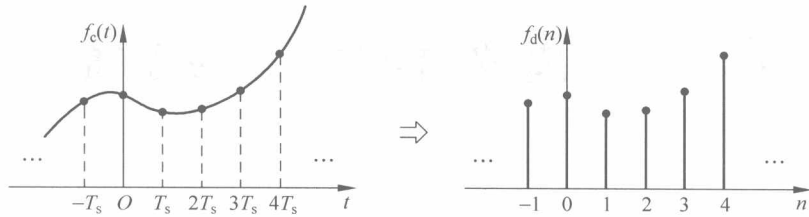


图 1.1.1 对连续时间信号采样得到离散时间信号

2. 离散时间信号的分类

根据不同的信号特征可获得多种信号分类方法。下面为从不同的角度观察信号, 所得出的一些常用的信号分类。

1) 确定信号与随机信号

确定信号(deterministic signal)是指可以用一个确定的数学表达式来描述的离散时间信号。它的特点是信号在任意时刻的值是确定的或是可预知的, 如信号 $f(n) = e^{-n}$ 。

随机信号(random signal)是指信号不能用一个确切的数学表达式描述, 信号各时刻的值是一个随机变量。对这类信号只能借助统计方法研究其特征, 如概率密度函数、均值、方差、相关函数等。

2) 实信号与复信号

实信号(real signal)是指可用一实数函数来描述的离散时间信号。如信号 $f(n) = 3n + 4$, 任意时刻的值为一实数。

复信号(complex signal)是指该信号是离散时间的复函数, 即取值可以是复数。如信号 $x(n) = A(n)\cos\phi(n) + jA(n)\sin\phi(n)$ 便是由实时间信号 $A(n)$ 和 $\phi(n)$ 构成的。当然, 若令 $a(n) = A(n)\cos\phi(n)$, $b(n) = A(n)\sin\phi(n)$, 该信号也可视为由实时间信号 $a(n)$ 和 $b(n)$ 构成。

3) 离散时间周期信号与非周期信号

对离散时间信号 $f(n)$, 若存在一非零的最小正整数 N , 使得等式 $f(n+N) = f(n)$ 对任意时间 n 均成立, 那么称 $f(n)$ 是周期信号(periodic signal), 否则为非周期离散时间信号。 N 称为信号 $f(n)$ 的基本周期, 简称周期。如对离散时间信号 $f(n) = \cos\omega_0 n$, 有

$$f(n+N) = \cos(\omega_0 n + \omega_0 N)$$

仅当 $\omega_0 N = 2k\pi$ (k 是整数), 即 $N = 2k\pi/\omega_0$ 时, 有

$$f(n+N) = f(n)$$

故仅当 ω_0 为 2π 的有理数倍时, N 才可能为正整数, 即信号 $f(n) = \cos\omega_0 n$ 才是周期的。由此可见, 与连续时间正弦信号不同, 离散时间正弦信号不一定是周期的。

4) 能量信号和功率信号

对离散时间信号 $f(n)$, 其瞬时功率定义为

$$p(n) \triangleq |f(n)|^2 \quad (1.1.2)$$

信号的能量和平均功率分别定义为