

国家杰出青年科学基金资助

高等院校信息与通信工程系列教材

多抽样率数字信号处理 理论及其应用

陶然 张惠云 王越 编著

清华大学出版社





国家杰出青年科学基金资助

高等院校信息与通信工程系列教材

多抽样率数字信号处理 理论及其应用

陶然 张惠云 王越 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了多抽样率信号处理的基本原理和应用。全书共 11 章,第 1 章为概述,第 2 章至第 7 章为基础理论部分,主要内容包括:基本的抽样率变换,多抽样率系统的网络结构与实现,两通道滤波器组, M 通道滤波器组,双正交组,多维多抽样率信号处理;第 8 章至第 11 章为实际应用部分,主要内容包括:抽取和内插的分数阶 Fourier 域分析,基于多抽样率信号处理的分数阶 Fourier 的快速算法,多抽样率信号处理在 ADC 中的应用,多抽样率理论在数字通信中的应用,多抽样率信号处理在音频、视频处理中的应用。每章后附有习题。

本书既可作为信号与信息处理、通信与信息系统、信息安全与对抗等专业的高年级本科生、硕士生、博士生的教材和参考书,也可作为企、事业单位从事电子信息类等相关工作的广大技术人员的参考书。

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

多抽样率数字信号处理理论及其应用/陶然,张惠云,王越编著. 北京:清华大学出版社,2007.4

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 978-7-302-14481-6

I. 多… II. ①陶… ②张… ③王… 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(2007)第 001892 号

责任编辑:王敏稚

责任校对:白 蕾

责任印制:孟凡玉

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:北京国马印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:20.25 字 数:458 千字

版 次:2007 年 4 月第 1 版 印 次:2007 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:30.00 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:020089-01

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

在现代数字信号处理系统中,我们常常需要两个或两个以上的抽样率并进行不同抽样率之间的转换,以节省信号处理的运算量和满足不同应用场合的需要。多抽样率信号处理作为数字信号处理中的一个新的分支,在工程实践中得到越来越广泛的应用。目前已受到相关专业本科生、研究生、博士生以及工程技术人员的极大重视。

本书理论部分(第2章至第7章)详细阐述了多抽样率信号处理的基本理论,重点讨论了多抽样率信号处理中几种常用滤波器组的性质及其完全重建(PR)的条件。书中应用部分(第8章至第11章)从基础理论出发讨论了多抽样率信号处理在多个领域的应用,例如:多抽样率信号处理技术在A/D变换、数字通信、音视频处理中的应用,这些都是近年来的热点问题。另外,本书还结合分数阶Fourier变换,研究了分数阶Fourier域的抽取、内插以及多抽样率理论在分数阶Fourier变换快速算法中的应用,这是现代信号处理领域中的一个前沿课题。

本书凝结了作者多年的课程教学心得,汲取历届学习多抽样率信号处理课程的硕士生、博士生的反馈意见而编写,注重理论和实践相结合,理论阐述循序渐进,实践涵盖面广,富有启发性。为帮助读者更好地理解本书的内容,作者悉心编写了每章要点和小结。每章前指导式的要点提问统领整章核心,每章后回应式的小结建立整章脉络。书中还附有精选的习题,旨在培养读者的创新精神和实践能力;习题包括实用性强的MATLAB练习,帮助读者在计算机上实践多抽样率信号处理的理论和算法,为将理论和算法用于工程实践打下很好的基础。

在本书的编写过程中,博士生万晖、孟祥意、李炳照、高志文、杨倩等都做了大量的工作,北京理工大学05级电子工程系选修多抽样率信号处理课程的硕士生也对本书的最后成稿提供了帮助,作者在此向他们表示衷心的感谢。

多抽样率信号处理正处于快速的发展中,加之作者水平有限,书中肯定存在误漏和不妥之处,恳请广大专家、同行和读者不吝批评指正。

编 者

2007年1月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 多抽样率信号处理的引入	1
1.2 国内外研究现状及应用	1
1.2.1 理论研究发展	2
1.2.2 应用研究发展	7
1.3 本书的主要内容	10
参考文献	13
第 2 章 抽样率变换的基本理论	25
本章要点	25
2.1 M -抽取和 L -内插	25
2.1.1 M -抽取的时域分析	25
2.1.2 M -抽取的频域分析	27
2.1.3 L -内插的时域分析	30
2.1.4 L -内插的频域分析	32
2.2 有理数倍抽样率变换	34
2.2.1 有理数倍抽样率变换的时域分析	34
2.2.2 有理数倍抽样率变换的频域分析	36
2.3 抽取和内插的块操作	42
2.4 从时变滤波的角度讨论多抽样率信号处理	43
2.4.1 从模拟域的角度理解抽样率的变换	43
2.4.2 从数字域的角度理解抽样率的变换	45
MATLAB 实现	48
本章小结	49
习题	51
参考文献	53
第 3 章 多抽样率系统的网络结构与实现	55
本章要点	55
3.1 多抽样率系统的恒等变换	55
3.1.1 $H(z)$ 与抽取和零值内插系统的等效变换	56

3.1.2 既含抽取又含零值内插的系统等效变换	57
3.2 多抽样率系统的多相结构	59
3.2.1 多相分解的三种形式	59
3.2.2 用多相结构实现 FIR 滤波器的高效结构	61
3.3 抽样率转换器的多级实现	63
3.3.1 多级实现概述	63
3.3.2 多级抽取的原理及过程	64
本章小结	67
习题	69
参考文献	72
第 4 章 两通道滤波器组	73
本章要点	73
4.1 两通道滤波器组的基本概念	75
4.1.1 两通道分析滤波器组和综合滤波器组	75
4.1.2 两通道滤波器组的多相结构	77
4.1.3 两通道滤波器组中的混叠和完全重建	78
4.2 两通道正交镜像滤波器组	82
4.2.1 标准正交镜像滤波器组	82
4.2.2 共轭正交镜像滤波器组	86
4.3 仿酉滤波器组	89
4.3.1 仿酉滤波器组的基本概念	89
4.3.2 仿酉滤波器组的格形结构	92
4.4 双正交滤波器组	95
本章小结	95
习题	99
参考文献	101
第 5 章 M 通道滤波器组	102
本章要点	102
5.1 树形结构与并行结构	102
5.1.1 树形结构的 QMFB	102
5.1.2 树形结构 QMFB 与平行结构 QMFB	105
5.1.3 树形结构 QMFB 的特点	106
5.2 平行结构 M 通道滤波器组	108
5.2.1 平行结构 M 通道滤波器组输入输出的关系	108
5.2.2 平行结构 M 通道滤波器组中的误差来源及其消除方法	111
5.2.3 平行结构 M 通道滤波器组无混叠系统与完全重建	113

5.3 调制滤波器组	122
5.3.1 复调制滤波器组	123
5.3.2 余弦调制滤波器组	126
5.4 非均匀滤波器组	130
5.4.1 完全重建的非均匀滤波器组设计	130
5.4.2 小波变换的基本理论	133
5.4.3 小波变换与非均匀滤波器组	136
本章小结	138
习题	143
参考文献	147
第 6 章 双正交组	148
本章要点	148
6.1 SISO 系统中的双正交组	148
6.1.1 双正交组的基本概念及性质	148
6.1.2 离散时间信号模型	152
6.1.3 双正交组的存在性	153
6.2 MIMO 系统中的双正交组	157
6.2.1 最大右公因子	157
6.2.2 MIMO 系统中双正交组的基本概念和性质	158
6.2.3 MIMO 系统中有限长 LBP 的存在性	162
本章小结	164
习题	165
参考文献	166
第 7 章 多维多抽样率信号处理	167
本章要点	167
7.1 多维信号处理的基础	167
7.1.1 多维信号	168
7.1.2 二维信号的矩形网络和任意网络抽样	168
7.1.3 多维信号的抽样	171
7.2 多维信号的抽样率转换	173
7.2.1 多维抽取	173
7.2.2 多维内插	176
7.2.3 抽取和插值相结合的抽样率转换	177
7.3 多维多抽样率转换系统的高效结构与实现	178
7.3.1 多维的等效变换	178
7.3.2 多维多抽样率系统的多相分解	179

7.3.3 抽样率转换系统的高效结构与实现	182
7.4 多维最大抽取滤波器组	183
7.4.1 多维最大抽取滤波器组的基本关系	184
7.4.2 多维最大抽取滤波器组的多相结构	184
7.4.3 混叠抵消和完全重建的充要条件	185
7.5 多维正交滤波器组	186
7.5.1 Cayley 变换方法	186
7.5.2 多维正交 IIR 滤波器组	188
7.5.3 多维正交 FIR 滤波器组	188
本章小结	190
习题	191
参考文献	192
第 8 章 分数阶 Fourier 变换域的多抽样率信号处理	193
本章要点	193
8.1 分数阶 Fourier 变换	193
8.2 离散分数阶 Fourier 变换的计算	195
8.3 分数阶 Fourier 变换域中的多抽样率信号处理	197
8.3.1 分数阶 Fourier 变换域的抽样定理	197
8.3.2 分数阶 Fourier 变换域的抽取与内插	201
8.4 基于多抽样率的离散分数阶 Fourier 变换	213
8.4.1 DFrFT 的等效多输入多输出线性时不变系统	213
8.4.2 DFrFT 的多相表示	217
8.4.3 分数阶 Fourier 滤波器组的应用	218
本章小结	220
习题	222
参考文献	222
第 9 章 多抽样率信号处理在 ADC 中的应用	225
本章要点	225
9.1 时间交织的高速 ADC	225
9.1.1 ADC 的工作原理	225
9.1.2 多路并行采集系统	227
9.1.3 多路时间交织的并行采集系统结构	231
9.1.4 时间交织的多路并行系统的误差分析	233
9.2 基于抽取、内插的 ADC	235
9.2.1 ADC 的基本分类	235
9.2.2 基于抽取和内插的 ADC	236

9.2.3 一般的多抽样率模拟信号处理系统	239
9.3 基于 QMF 滤波器组的 ADC	239
9.3.1 时间交织 ADC 的缺点分析	239
9.3.2 结合 QMF 滤波器的高速 ADC	240
9.3.3 等效变换下的高速 ADC	243
9.4 ADC 与 sigma-delta(Σ - Δ)调制器	243
9.4.1 sigma-delta 模拟调制器的基本概念	243
9.4.2 过采样下的 sigma-delta ADC	244
本章小结	245
习题	246
参考文献	247
第 10 章 多抽样率信号处理在数字通信中的应用	248
本章要点	248
10.1 滤波器组在多路通信中的应用	248
10.1.1 滤波器组与时分复用	249
10.1.2 滤波器组与频分复用	249
10.1.3 滤波器组与子带编码	250
10.2 滤波器组在多载波通信系统中的应用	251
10.2.1 广义正交传输模型	251
10.2.2 离散多频调制(DMT)	254
10.2.3 滤波器组实现 OFDM/OQAM 系统	258
10.2.4 滤波器组实现频域扩频(Multicarrier CDMA)	266
10.3 数字滤波器组在 MIMO 系统中的应用	270
本章小结	273
附录 A OFDM/OQAM 在连续域中的表现形式	274
习题	275
参考文献	275
第 11 章 多抽样率信号处理在音、视频处理中的应用	277
本章要点	277
11.1 图像重定尺寸滤波器在分块 DCT 域中的设计和分析	277
11.1.1 空域和 DCT 域中滤波操作的联系	278
11.1.2 DCT 域中图像重定尺寸方法	278
11.2 用于指纹特征匹配与提取的方向滤波器组	283
11.2.1 方向滤波器组	283
11.2.2 指纹特征提取	287
11.2.3 指纹特征提取实现及性能	289

11.3 一种基于 QMFB 频带分割的音频数字水印技术	291
11.3.1 数字水印简介	292
11.3.2 基于 QMFB 频带分割的音频数字水印	293
本章小结	295
习题	296
参考文献	296
索引	297

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Origin of Multirate Signal Processing	1
1.2 Developments and Applications of Multirate Signal Processing	1
1.2.1 Major Developments	2
1.2.2 Major Applications	7
1.3 Outline of the Book	10
References	13
Chapter 2 Basic Multirate Operations	25
Questions	25
2.1 Decimation and Interpolation	25
2.1.1 Time-Domain Analysis of Decimation	25
2.1.2 Frequency-Domain Analysis of Decimation	27
2.1.3 Time-Domain Analysis of Interpolation	30
2.1.4 Frequency-Domain Analysis of Interpolation	32
2.2 Rational Sampling Rate Conversion	34
2.2.1 Time-Domain Analysis of Rational Sampling	34
2.2.2 Frequency-Domain Analysis of Rational Sampling	36
2.3 Block Operation	42
2.4 Time-Varying Filtering Approach for Multirate Signal Processing	43
2.4.1 Analog-Domain Approach for Sampling Rate Conversion	43
2.4.2 Digital-Domain Approach for Sampling Rate Conversion	45
MATLAB Implement	48
Summary	49
Problems	51
References	53
Chapter 3 Efficient Structure and Implementation of Multirate System	55
Questions	55
3.1 Noble Identities of Multirate System	55
3.1.1 Noble Identities for Decimation and Interpolation	56

3.1.2 Noble Identities for Multirate System	57
3.2 The Polyphase Structures	59
3.2.1 The Polyphase Representation	59
3.2.2 Efficient Polyphase Structures with FIR Filter	61
3.3 Multistage of Sampling Rate Conversion	63
3.3.1 Introduction of Multistage Implementation	63
3.3.2 Multistage Principle and Implementation	64
Summary	67
Problems	69
References	72
Chapter 4 Two-Channel Filter Banks	73
Questions	73
4.1 Fundamentals of Two-Channel Filter Banks	75
4.1.1 Analysis and Synthesis Filter Banks	75
4.1.2 The Polyphase Structures	77
4.1.3 Aliasing Cancellation and Perfect Reconstruction	78
4.2 Quadrature Mirror Filter Banks	82
4.2.1 Quadrature Mirror Filter Banks	82
4.2.2 Conjugate Quadrature Mirror Filter Banks	86
4.3 Paraunitary Filter Banks	89
4.3.1 Introduction of Paraunitary Filter Banks	89
4.3.2 Lattice Structures of Paraunitary Filter Banks	92
4.4 Biorthogonal Filter Banks	95
Summary	95
Problems	99
References	101
Chapter 5 M-Channel Filter Banks	102
Questions	102
5.1 Tree Structures and Parallel Structures	102
5.1.1 Tree Structures of QMFB	102
5.1.2 Tree Structures and Parallel Structures of QMFB	105
5.1.3 Properties of Tree Structures	106
5.2 M-Channel Filter Banks of Parallel Structures	108
5.2.1 Representation of Input-Output Signals	108
5.2.2 Distortion and Aliasing Cancellation Methods	111
5.2.3 Alias-Free System and Perfect Reconstruction	113

5.3	Modulated Filter Banks	122
5.3.1	DFT Modulated Filter Banks	123
5.3.2	Cosine Modulated Filter Banks	126
5.4	Non-Uniform Filter Banks	130
5.4.1	Perfect Reconstruction	130
5.4.2	Introduction of Wavelets	133
5.4.3	Wavelets and Non-uniform Filter Banks	136
	Summary	138
	Problems	143
	References	147
Chapter 6	Biorthogonal Pair	148
	Questions	148
6.1	Biorthogonal Pair in Single-Input-Single-Output System	148
6.1.1	Definition and Properties of Biorthogonal Partners	148
6.1.2	Discrete-Time Signal Models	152
6.1.3	Existence of Biorthogonal Partners	153
6.2	Biorthogonal Pair in Multiple-Input-Multiple-Output System	157
6.2.1	Greatest Right Common Divisor	157
6.2.2	Definition and Properties of Biorthogonal Partners in MIMO System	158
6.2.3	Existence of FIR LBP	162
	Summary	164
	Problems	165
	References	166
Chapter 7	Multidimensional Multirate Signal Processing	167
	Questions	167
7.1	Fundamentals of Multidimensional Multirate Signal Processing	167
7.1.1	Multidimensional Signal	168
7.1.2	Sampling Geometry of 2-D Signal	168
7.1.3	Sampling of Multidimensional Signal	171
7.2	Sampling Rate Conversion of Multidimensional Signals	173
7.2.1	Multidimensional Decimation	173
7.2.2	Multidimensional Interpolation	176
7.2.3	Multidimensional Sampling Rate Conversion	177
7.3	Efficient Structures of Multidimensional Multirate System	178
7.3.1	Multidimensional Noble Identities	178

7.3.2	Multidimensional Polyphase Representation	179
7.3.3	Efficient Structures and Implementation	182
7.4	Multidimensional Maximally Decimated Filter Banks	183
7.4.1	Basic Representation	184
7.4.2	Polyphase Structure	184
7.4.3	Aliasing Cancellation and Perfect Reconstruction	185
7.5	Multidimensional Orthogonal Filter Banks	186
7.5.1	Cayley Transform	186
7.5.2	Multidimensional Orthogonal IIR Filter Banks	188
7.5.3	Multidimensional Orthogonal FIR Filter Banks	188
	Summary	190
	Problems	191
	References	192
Chapter 8	Multirate Digital Signal Processing in Fractional Fourier Domain	193
	Questions	193
8.1	Fractional Fourier Transform	193
8.2	Computation of Discrete Fractional Fourier Transform	195
8.3	Multirate Signal Processing in Fractional Fourier Domain	197
8.3.1	Sampling Theory in Fractional Fourier Domain	197
8.3.2	Decimation and Interpolation in Fractional Fourier Domain	201
8.4	Discrete Fractional Fourier Transform Based on Multirate Signal Processing	213
8.4.1	Multirate System For Implementation of DFrFT	213
8.4.2	Polyphase Representation of DFrFT	217
8.4.3	Application of Filter Banks in Fractional Fourier Domain	218
	Summary	220
	Problems	222
	References	222
Chapter 9	Applications of Multirate Signal Processing in ADC	225
	Questions	225
9.1	Time-Interleaved High Speed ADC System	225
9.1.1	Working Principle of ADC	225
9.1.2	Multi-Channel Parallel Data Acquisition System	227
9.1.3	Structure of Multi-Channel Data Acquisition System	231
9.1.4	Error Analysis of Multi-Channel Data Acquisition System	233
9.2	ADC Incorporating Interpolation and Decimation	235

9.2.1 Basic ADC Classify	235
9.2.2 Interpolation and Decimation in ADC	236
9.2.3 General Structure of Multirate Data Acquisition System	239
9.3 ADC Incorporating QMF Banks	239
9.3.1 Analysis of Time-Interleaved ADC System	239
9.3.2 High Speed ADC Using QMF Banks	240
9.3.3 Noble Identities of High Speed ADC	243
9.4 ADC and Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) Modulator	243
9.4.1 Principles of Sigma-Delta Modulation	243
9.4.2 Oversampling of Sigma-Delta ADC	244
Summary	245
Problems	246
References	247
Chapter 10 Applications of Multirate Signal Processing in Digital Communications	248
Questions	248
10.1 Filter Banks in Multi-Channel Communications	248
10.1.1 Filter Banks in Time Division Multiplexed	249
10.1.2 Filter Banks in Frequency Division Multiplexed	249
10.1.3 Filter Banks in Subband Coding	250
10.2 Filter Banks in Multi-Carrier Communications System	251
10.2.1 General Orthogonal Transmission Model	251
10.2.2 Discrete Multitone Modulation(DMT)	254
10.2.3 Filter Banks in OFDM/OQAM System	258
10.2.4 Filter Banks in Multicarrier CDMA	266
10.3 Filter Banks in Multiple-Input-Multiple-Output System	270
Summary	273
Appendix A The Representation of OFDM/OQAM Systems in Continuous-time Domain	274
Problems	275
References	275
Chapter 11 Applications of Multirate Signal Processing in Audio and Video Technology	277
Questions	277
11.1 Design and Analysis of an Image Resizing Filter in the Block-DCT Domain	277