

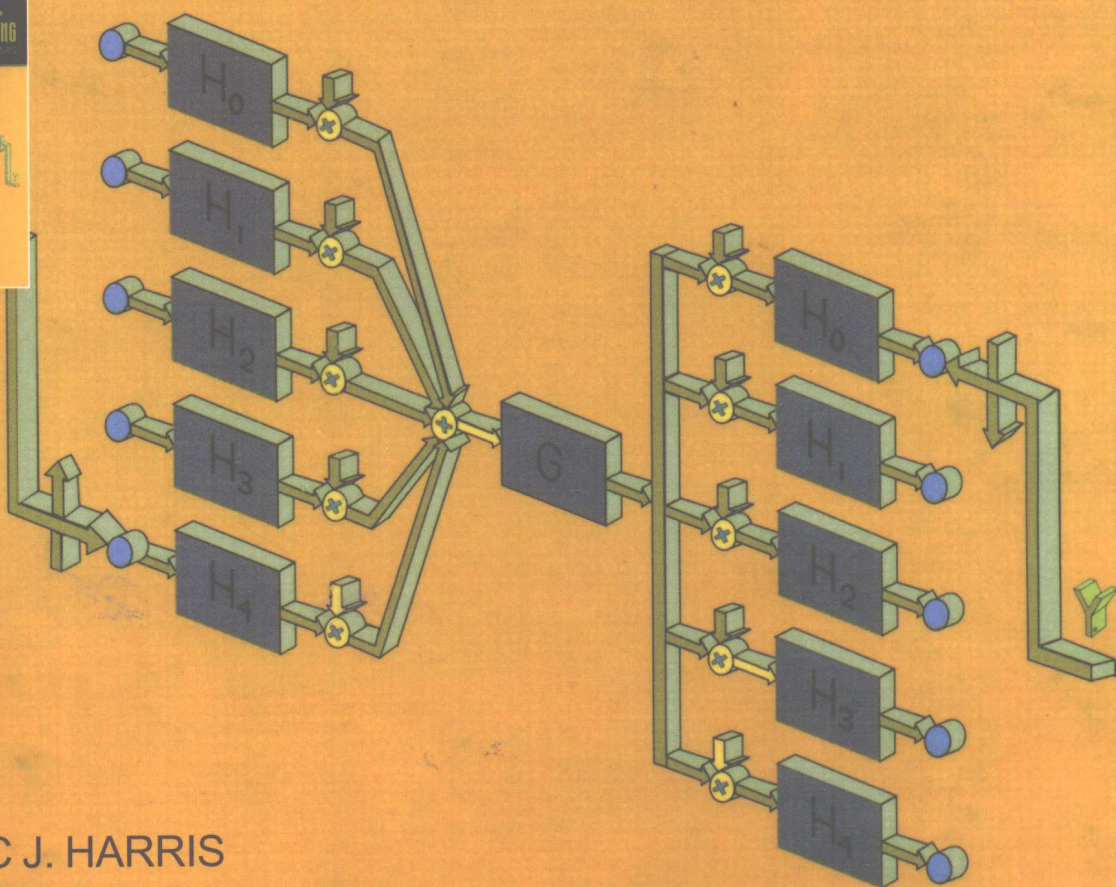
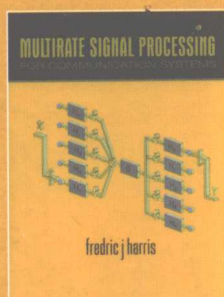
国外名校最新教材精选



通信系统中的 多采样率信号处理

Multirate Signal Processing for Communication Systems

〔美〕 弗雷德里克·J·哈里斯 著
王霞 张国梅 刘树棠 译
刘树棠 审校



FREDRIC J. HARRIS



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



 国外名校最新教材精选

Multirate Signal Processing for Communication Systems

通信系统中的 多采样率信号处理

〔美〕 弗雷德里克·J·哈里斯 著

Fredric J. Harris
San Diego State University

王霞 张国梅 刘树棠 译
刘树棠 审校



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

Fredric J. Harris

Multirate signal Processing for Communication Systems

EISBN: 978-0-131-46511-4

Copyright © 2004, Pearson Education, Inc.

Original edition published by Pearson Education, Inc. All Rights reserved.

本书原版由培生教育出版集团出版。版权所有,盗印必究。

Authorized translation from the English language edition, entitled MULTIRATE SIGNAL PROCESSING FOR COMMUNICATION SYSTEMS, 1st Edition, 0131465112 by HARRIS, FREDRIC J., published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall PTR, Copyright © 2004 Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and XIAN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS Copyright © 2008.

陕西省版权局著作权合同登记号 图字 25-2008-215 号

本书封面贴有 Pearson Education 出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统中的多采样率信号处理/(美)哈里斯(Harris, F. J.)著;王霞,张国梅,刘树棠译. —西安:西安交通大学出版社,2008.12

(国外名校最新教材精选)

书名原文:Multirate Signal Processing for Communication Systems

ISBN 978-7-5605-2948-6

I. 通… II. ①哈… ②王… ③张… ④刘… III. 通信系统-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(2008)第 214164 号

书 名 通信系统中的多采样率信号处理
著 者 (美)弗雷德里克·J·哈里斯
译 者 王霞 张国梅 刘树棠
策划编辑 赵丽平
责任编辑 鲍媛

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安交通大学印刷厂

开 本 787mm×1 092mm 1/16 印张 24 字数 576 千字
版次印次 2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-2948-6/TN·112
定 价 49.80 元

读者购书、书店添货如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

谨以此书献给我的父母，
Edith 和 Seymour Harris，
我的妻子，Penelope，
我的孩子，Danielle 和 Robyn，
以及我的孙子，Justin。
此书还将献给与我一起畅游于
知识海洋中的我所有的学生和同事。

“一知半解危害不浅；
彼埃利亚泉水如不痛饮就别只尝一点：
浅酌只能使我们懵懂，
痛饮才能让我们清醒。”

——亚历山大·蒲柏(1688—1744)
《论批评》

译者序

多采样率数字信号处理(Multirate Digital Signal Processing)是自 20 世纪 70 年代开始发展起来的数字信号处理领域的一门重要技术,因其能灵活地转换采样率,已成为信号处理学科中的重要内容。从 20 世纪 80 年代初开始,多采样率数字信号处理技术已在工程实践中得到了广泛的应用,如通信系统、语音、图像压缩、数字音频系统、统计和自适应信号处理等,通过采样率的转换来降低信号处理的计算复杂度和数据存储量,从而高效率地完成信号的存储、传输和处理等。如今,随着软件无线电的兴起,多采样率数字信号处理已成为软件无线电中的关键技术之一。

本书作者 Fredric J. Harris 教授,在美国 SDSU(圣地亚哥州立大学)通信系统与信号处理学院长期从事有关数字信号处理和通信系统的教学和研究工作。“多采样率信号处理”便是 Harris 教授所讲授的一门研究生课程,而本书的大部分内容则一直包含在这一课程的教学。书中许多部分都反映了作者在长期从事多采样率信号处理的教学和研究工作中所形成的独特见解和观点,如递归全通滤波器的有关内容。他以独特的视角阐明了线性时变(LTV)或周期性时变(PTV)系统令人惊奇的特性。

本书通过精选的内容,借助各种图形图表以及多采样率信号处理的大量实际应用实例,清晰而直观地为我们展现了多采样率信号处理的独特魅力。本书有两大特色:一是许多问题的阐述都是基于工程实际应用背景,与工程应用紧密联系;二是擅于借助图形图表以及对图形图表的解释来说明复杂的问题。正如作者所言,他是一条腿在学术界而另一条腿在商业界,在知识的殿堂和工业需求中遨游。本书不仅给出了大量的应用实例,而且在每章末尾都附有若干习题,并紧扣章节给出了参考文献,以方便读者能进一步地深入研究。

本书的第 1 章至第 8 章由王霞翻译,其余章节由张国梅翻译。本书是在西安交通大学信息与通信工程系刘树棠教授的悉心指导和帮助下完成的。在本书翻译初稿完成后,刘树棠教授在认真审读完后给出了详细的修改意见和建议,对本书中译本的最后完成起到了重要作用。在此致以衷心地感谢。此外,在本书的翻译过程中还得到了西安交通大学信息与通信工程系殷勤业教授和任品毅副教授的关心和帮助,在此表示衷心地感谢。最后,向本书的责任编辑鲍媛表示衷心地感谢,没有他们的帮助,本书将难以完成。

原书中有少量输入和排版的疏漏,在翻译过程中做了改动。由于译者的水平有限和不可避免的主观片面性,翻译不当或表述不清之处在所难免,恳请广大读者及专家批评指正。

前 言

数字信号处理(DSP)已经成为大学本科电气工程课程纲目中内容的精髓主体。从这个主体可以引出若干个有关方面形成相关的课目,诸如通信系统、信源编码、多媒体娱乐、雷达、声纳、医用和实验室仪器仪表以及其它,等等。多采样率信号处理就是这些主要方面中的一个。多采样率信号处理是处理在信号流程内一个或多个地方嵌入了采样率变化的这些概念、算法和结构等内容的主要部分。

在某个特定信号处理任务的解决方案中需要包含多采样率信号处理,其原因有二。

其一是降低实现的代价;其二是改进实现的性能。我个人认为,还有其三,那便是:运用一些灵巧的想法去解决问题,颇为有趣。当我们完成一个多采样率 DSP 设计时,我们总禁不住面带微笑,并洋洋得意地想:“伙计,这太棒了!”

在 DSP 方面建立的传统概念与在模拟处理中所建立的是一样的。在这两个域中,都学会并应用了像卷积、傅里叶变换、传递函数、零点和极点等概念。如要区分这两类途径,我们在讨论这些概念的 DSP 版本中冠以修饰词“离散的”。这两种途径如此相似的原因是:它们两者都着重于线性时不变(LTI)系统;因为对这类系统的分析和综合都很成熟。

多采样率信号处理给设计人员提供了一种重要手段,而这点对于传统的 DSP 设计者来说是不具备的,因为他们首先考虑的是如何运用 DSP 技术来模仿模拟系统。我们都知道,这两个域(即连续和离散域)之间的接口是采样过程。在传统的 DSP 看法中,选取采样率要满足奈奎斯特准则,但是对问题本身来说却是次要的。在多采样率信号处理中,信号处理链中采样率的选取和变化是最主要的考虑和选项。变化采样率的选项为 DSP 设计人员提供了额外的手段。具备嵌入采样率变化的离散系统以线性时变(LTV)或周期性时变(PTV)为特征。大多数人很少有在连续域中具有 LTV 特性滤波器的经历,因此当我们学会并利用它们时,它们的独特性质将会让我们感到既兴奋又惊奇!

在信号处理流程内变化采样率的能力会展现出一系列优越的处理策略并让性能得到增强。本书的一个永恒主题就是展现使用这些处理技巧的各种观点。首先要陈述的观点是:一个处理任务总是应该在最低的采样率(相对于信号带宽)下完成,这就是关注的信号分量的奈奎斯特率。我们知道,一个惯常的处理任务是通过滤波来减小信号带宽,然后降低采样率以与减小了的带宽相匹配的。我们首先的处理策略是交换滤波和采样率变化的次序,以便处理是在降低了的输出样本率而不是在高的输入样本率下进行。这种交换能被允许的条件称为“Noble Identity”。在减小带宽之前降低采样率会产生输入频谱的混叠。事实上,多采样率信号处理允许并支持这种故意的混叠,经由后续处理可以将这种混叠展开。实际上,与多采样率信号处理相关的大多数技巧和性能改善都与因采样率变化而招致的频谱混叠有关。把故意混叠作为信号处理方法的一部分似乎违反直觉!特别是在数据采集过程中,我们一再被告诫不要将信号混叠。同时,认为这种混叠能被倒置过来的主张似乎更加令人生疑!但是,事实上当

混叠是在一种特定结构中发生时就能做到,而这种结构在多采样率处理方法中能确保获得。我们还能通过采样率变化有意将一个信号从一个中心频率混叠到另一个中心频率。这种选取包括将一个信号通过降低采样率从某个中间中心频率混叠到基带,以及通过提高采样率将一个信号从基带混叠到某个中间的中心频率。

本书意图

这本书的用意是要为多采样率信号处理的独特能力给出一种清晰而直观的描述。

本书通过提供精选的内容,再辅以自由使用各种图表所支撑的大量实例一起说明多采样率处理选项中时域和频域表示来达到这一目的。为了有利于探讨多采样率系统的内涵与细节也提出了几种有用的观点和看法。其中之一就是当描述一个多采样率系统时,由于采样率是变化的,因此我们不用样本率为参考基准(这与惯常的 DSP 做法相反),而用信号符号率或信号带宽作为基准,因为在处理过程中这是保持不变的单一参数。书中包括了多采样率系统的许多实际应用以帮助读者明了能用它们去解决现实问题的新颖途径。全书始终都会不时提到对一些传统设计方法的评价以及另一些可供改进的选择。由于需要,本书陈述的有些内容与其它的有关多采样率处理的教材所陈述的必定是相类似的,而其它部分内容则反映了本人的独自见解和经历。有几个特别部分的内容在本书中给予了较大的篇幅,而这些在其它教材中仅稍微被提到。特别是关于递归全通滤波器这一章比传统的所占的份量要丰富得多而值得对它多费些笔墨。

本书的大部分内容一直都用于我的研究生课程“多采样率信号处理”。这些内容的若干重要部分也已融入我的本科生课程“调制解调器设计”,以及一系列短时课程和现代通信系统处理同步方法的介绍中。在我的本科生课程“数字信号处理”,以及我们的本科生“实时数字信号处理”课程中甚至还能发现少量的多采样率滤波器的内容。本书能用于高级 DSP 概念的本科生课程,或者多采样率信号处理的研究生课程。有些部分内容也能用于辅助通信系统设计和调制解调器设计等各式各样的课程。并且,在 DSP 编程实验室中还可用作实际应用的资源。

作为一名既精通 DSP 技术又非常了解现代通信系统的成员,其乐趣之一便是能同时在知识的殿堂和提供当今社会经济动力的顶级商业中心中任意遨游。我一直庆幸参与过许多系统的开发,它们都要求具备高性能和低成本的 DSP 解决方案。这些系统包括实验室仪器仪表、有线调制解调器、卫星调制解调器、声纳系统、雷达系统、无线系统以及日用娱乐产品等等。在每个领域我都伸了一条腿,一只是在学术界,而另一只则是在商业界。我面临着来自这两个领域的人们所提出来的丰富而又类型各异,令我感兴趣的问题。从商业界关注的难题所提出来的问题与从学术界所呈现的是完全不同的。

我的一些非常有创造性的成果都是被在工业领域中那些有睿智和远见的人们提出来的问题所催生,并同时受到挑战。学术环境给我提供了接近这些聪明而有前途的学生们的机会,我能与他们分享学习和理解在多采样率数字处理中某个已确立的知识基础,并同时开拓和扩展该基础所带来的欢乐。这本书中反映出的大多数知识点都是在商业层面上的具体任务中为解决问题而汇集出的深刻见解经过锤炼,进而再与这些好奇的、有追求的学生们在学术上相互切磋而培育成的。

本书结构

全书共分为 13 章。第 1 章是有关多采样率信号处理导论,将日用 CD 播放器中 1:4 的增采样器作为一个广泛应用的例子展示出。第 2 章叙述在时域和频域的采样和重采样过程。第 3 章给出 FIR 滤波器的性能参数与该滤波器的抽头数(或长度)之间的关系,同时也对窗口设计法和等波纹(或 Remez)设计方法作出比较。要研究带内波纹和阻带恒定旁瓣电平的影响,以及为了控制阻带旁瓣电平也将介绍设计过程中的各种变通。第 4 章提供一些特殊的滤波器,如平方根奈奎斯特滤波器和半带滤波器。有关对这些特殊滤波器适用的标准和改进设计方法的讨论也会给出。

第 5 章陈述利用多采样率滤波器系统的例子,阐明应用并说明广泛应用的范围。

第 6 章给出重采样低通和带通 FIR 滤波器,在此要用 Noble Identity 以交换重采样和滤波的操作次序。本章还将讨论增采样、减采样以及级联增减采样滤波器。第 7 章描述多相内插器和实现任意采样率变化的滤波器,还将研究 Farrow 滤波器,以及内插并同时实现基于混叠转换的滤波器。第 8 章介绍了正交镜像滤波器和二分半带 FIR 滤波器。第 9 章覆盖 M 路调制器和解调器信道组,也会讨论联合内插和信道组的结构形式。

第 10 章包括作为对线性相位滤波器近似的非均匀相位和等波纹相位实现的递归全通滤波器,其中包括有半带、 M 路滤波器组、重采样结构和任意带宽非重采样结构等几种结构形式都将给予陈述并用图例阐明。第 11 章给出 CIC(Cascade Integrator Comb)滤波器及其重采样模式(Hogenauer 滤波器)。第 12 章讨论低阶插补零值(zero-packed)增采样滤波器的级联形式;这类滤波器呈现出具有窄过渡带的周期性频谱。第 13 章给出多采样率滤波器已明显出现的应用领域。

每章末尾都附有若干习题,它们都是针对本章的一些重要概念而拟就的。这些题也能用作读者测试对内容的掌握和理解程度。紧跟习题的是参考文献目录,方便读者了解相关领域以进行进一步的深入研究。

致谢

我们能够比前驱者看得更加远些,因为我们是站在他们的肩上。另外,由于我们所做的工作以及我们周围人们所做的一切,每一天都会呈现出一种新的视野。经由与我们的同行们、学生们和资助人想法的交流和切磋,将研究的视野朝前不断地扩展,将帷幕逐渐提升。我非常珍惜拥有一群人,我与他们分享着研究和获取知识的极大乐趣,并与他们建立了永恒的友谊。我很乐意例举出他们当中的一些人,但是请原谅,列出的顺序只是涉及本人一闪即逝的美好回忆,而并无先后之分。

在我的研究工作中,英国伦敦 Imperial College(帝国大学)的 Tony Constantinides 一直对我有特别的影响。我与 Tony 是在 Brisbane(布里斯班,澳大利亚)一次会议上首次见面的,从此就开始了我们之间的终生友谊和工作关系。正是通过 Tony 我得到了对有关递归多相半带滤波器的肯定,然而我却不得不放下这种有价值的滤波器结构。正是芬兰 Temple University(坦布雷大学)的 Markku Renfors,他第一次与我接触是通过关于 M 路递归多相滤波器方面一篇经典性论文。那篇论文给我带来了一连串的想法、论文、学生课题和商业产品。多年以后,在 Santorini 的一次会议上见到了 Markku。作为同行,我们很快便亲热起来,并一直享受着我们之间太不寻常的学术和个人的邂逅相遇。类似的情况,Ron Crochiere 通过他与 Lary

Rabiner 合著的经典著作“Multirate Digital Signal Processing”帮助我形成了许多想法,这些都培育了我在多采样率滤波器方面一些概念和观点。谢谢 Ron 评审了本书的初稿,并被很快通过审查而深感宽慰。我总是很乐意见到 Ron 并与他一起共享时光。在运动场所,我几乎天天都能与 Bernie Sklar 交流看法而获取极大的乐趣。Bernie 先前供职于 Aerospace Corporation,现在任职于 Communication Engineering Service。Bernie 提供给我很多在通信系统方面要解决的问题,让我磨练我应用 DSP 的本领。与 Bernie 的交往很像是与一位舞技高超的舞伴跳舞,两个人都为相遇而振奋和陶醉。另一位舞伴是 Xilinx 的 Chis Dick,他主要研究应用类多采样率 DSP。Chis 和我在 Adelaide(阿德莱德,澳大利亚)一次会议上相遇,其时他任职于 Latrobe University。我们之间的共同兴趣和爱好一直成为一种特殊友谊的核心,以至于我们的太太都对我们说,当我们爬进我们共同的 DSP 巢穴去从事 DSP 魔法时,我们是令人厌烦的一对。BYU 的 Michael Rice 是另一位特殊的人物,与他交往我一直在磨锐我的应用 DSP 技艺。

最初通过专业方面的接触,伴随着专业上的尊敬和钦佩而形成友谊,在与这些人们的交往中让我拥有另一片特殊的天地。其中包括 Don Steinbrecher,一位非常富有创见性的人物,他的一点点才智都牢固地置于我的未来。Itzhak Gurantz(先前供职于 Comstream 和 Rockwell,现在任职于 Entropic)是一位非常聪明的人物。他多次提出一些迷人的问题,这些问题将我引入到我从未想到要涉猎的境地。Ralph Hudson(在 Hughes Aircraft 我与 Ralph Hudson 共处一间办公室,其间我从 SDSU 获准休假)和 David Lynch(他动员我访问 Hughes)都是具有超出常人视角和能力的聪明人。这些人多年我都未曾见到过,但是他给我填满了大量的问题。从这些问题中我才能够逐渐获得一些深刻见解,如果没有他们,我根本就不会有这些见解。我们曾在一起共事的,并从他们那里学到不少东西的几位是 Pranish Sinha, Ragavan Sreen, Anton Monk 和 Ron Porat 等。

第三部分我感到不得不感谢的是那些最初作为师生关系交往而现在作为朋友和同事而继续来往的一些人。我想只将名单限于现在和以前那些继续与我一起从事多采样率信号处理领域研究的学生们。Maximilien d'Orege de Lantramange 和 Michael Orchard 是最为出类拔萃的。现在我们天天都在应用问题方面交换意见的 Dragan Vuletic 和 Wade Lowdermilk 是紧随其他前面杰出的学生们(如 Bob Bernardi 和 Christain Bettwieser)之后正在升起的新星;并且这根线由 Benjamin Egg 而连绵不断,他是作为领头的一名新研究生。在 35 年的教学生涯中,我接触到许多有才智的学生。我希望他们也像我一样喜欢并享受我们的相遇。我深知许多名字都从我的致谢名录上漏掉了。如果你觉得这冒犯了你,请勿见怪。请把这归咎于一时疏忽,而不是刻意省略。

弗雷德里克·哈里斯
圣地亚哥州立大学,加利福尼亚

目 录

译者序

前言

第 1 章 为什么要采用多采样率滤波器

1.1 光盘 4:1 过采样	(2)
1.2 抗混叠滤波	(5)
参考文献	(8)
习题	(8)

第 2 章 重采样过程

2.1 采样序列	(12)
2.1.1 重采样序列的调制特性描述	(15)
2.2 什么是多采样率滤波器	(16)
2.2.1 重采样器的特性	(18)
2.2.2 重采样滤波器举例	(21)
2.3 多采样率滤波器的应用前景	(22)
2.4 奈奎斯特与采样过程	(26)
参考文献	(28)
习题	(28)

第 3 章 数字滤波器

3.1 滤波器的性能参数	(34)
3.2 加窗处理	(36)
3.3 Remez 算法	(43)
3.3.1 等波纹与 $1/f$ 波纹设计	(49)
3.3.2 可接受的带内波纹电平	(52)
参考文献	(60)
习题	(61)

第 4 章 有用的滤波器种类

4.1 奈奎斯特滤波器和平方根奈奎斯特滤波器	(66)
4.2 通信路径	(68)
4.3 采样余弦抽头器	(71)
4.3.1 根升余弦旁瓣电平	(72)
4.3.2 阻带衰减的改进	(73)

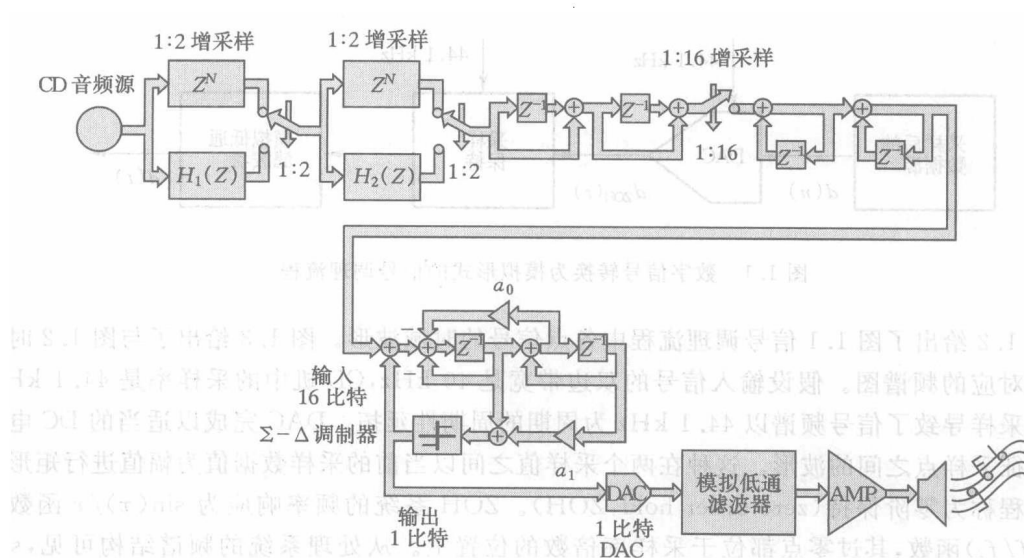
4.4 半带滤波器	(77)
参考文献	(81)
习题	(81)
第5章 利用重采样滤波器的系统	
5.1 采样率与带宽之比较大时的滤波	(86)
5.1.1 部分和累加器:对偶形式	(89)
5.1.2 基带内窄带噪声的产生	(93)
5.1.3 载频处窄带噪声的产生	(94)
5.2 多采样率滤波器的工作量	(96)
参考文献	(99)
习题	(99)
第6章 多相 FIR 滤波器	
6.1 信道器	(102)
6.1.1 带通滤波器的变换	(107)
6.2 分离混叠	(111)
参考文献	(117)
习题	(117)
第7章 重采样滤波器	
7.1 内插器	(120)
7.1.1 简单 $1:M$ 内插器	(120)
7.2 内插器的结构	(125)
7.2.1 多相分解	(126)
7.3 带通内插器	(128)
7.4 有理数比例的采样	(131)
7.5 任意重采样比	(133)
7.5.1 最邻近点样本间的内插	(134)
7.5.2 两相邻值的内插	(141)
7.6 法罗滤波器	(144)
7.6.1 经典内插器	(144)
7.6.2 多项式近似	(147)
7.6.3 法罗滤波器	(149)
参考文献	(152)
习题	(153)
第8章 半带滤波器	
8.1 半带低通滤波器	(158)
8.2 半带高通滤波器	(159)
8.3 半带滤波器的窗口设计	(160)
8.4 半带滤波器的 Remez 算法设计	(161)

8.4.1 半带 Remez 算法的设计技巧	(162)
8.5 希尔伯特变换的带通滤波器	(164)
8.5.1 希尔伯特变换滤波器的应用	(164)
8.6 利用低通半带滤波器的内插	(166)
8.7 二分半带滤波器	(169)
参考文献	(172)
习题	(173)
第 9 章 多相信道器	
9.1 解调器信道组	(176)
9.2 任意输出样本率	(178)
9.2.1 设计选择比较	(186)
参考文献	(195)
习题	(196)
第 10 章 递归多相滤波器	
10.1 全通递归滤波器	(200)
10.1.1 全通滤波器性质	(201)
10.1.2 实现一阶全通网络	(206)
10.2 双路全通递归滤波器	(209)
10.2.1 双路半带滤波器:非均匀相位	(209)
10.2.2 双路半带滤波器:线性相位	(215)
10.3 非均匀和等波纹相位双路滤波器比较	(217)
10.4 半带滤波器的通带和阻带响应	(223)
10.5 变换半带到任意带宽	(224)
10.5.1 低通到低通变换	(224)
10.5.2 低通到带通变换	(227)
10.6 递归半带滤波器的多采样率考虑	(231)
10.7 双路全通滤波器的希尔伯特变换滤波器变异	(237)
10.8 M 路递归全通滤波器	(240)
10.9 迭代半带滤波器	(243)
10.9.1 最终比较	(245)
参考文献	(246)
习题	(246)
第 11 章 级联积分器梳状滤波器	
11.1 无乘法运算的滤波器	(250)
11.2 二进制整数和溢出	(255)
11.3 多级 CIC	(257)
11.4 Hogenauer 滤波器	(260)
11.4.1 累加器比特宽度	(262)

11.4.2 削减累加器宽度	(263)
11.5 CIC 内插器举例	(271)
11.6 CIC 积分器中的相干和不相干增益	(273)
参考文献	(279)
习题	(280)
第 12 章 级联和多级滤波器结构	
12.1 内插 FIR(IFIR)滤波器	(284)
12.1.1 内插 FIR 举例	(285)
12.2 基于半带滤波器的频谱屏蔽滤波器	(288)
12.3 基于互补滤波器的频谱屏蔽滤波器	(292)
12.4 比例带宽滤波器组	(294)
12.4.1 减半剖分	(294)
12.4.2 比例带宽滤波器	(295)
参考文献	(300)
习题	(300)
第 13 章 通信系统应用	
13.1 常规数字下变频器	(304)
13.2 混叠的数字下变频器	(307)
13.2.1 IF 亚采样举例	(308)
13.3 数字解调器中的定时恢复	(313)
13.3.1 背景知识	(314)
13.3.2 现代定时恢复	(316)
13.4 调制解调器的载波恢复	(319)
13.4.1 背景知识	(320)
13.4.2 现代载波恢复	(321)
13.5 数字式控制的采样数据延迟	(325)
13.5.1 递归全通滤波器延迟线	(325)
13.6 内插成形滤波器	(331)
13.7 $\Sigma-\Delta$ 抽取滤波器	(342)
13.7.1 $\Sigma-\Delta$ 滤波器	(344)
13.8 FM 接收机和解调器	(350)
13.8.1 FM 频带信道器	(351)
13.8.2 FM 解调器	(354)
13.8.3 立体声解码	(355)
参考文献	(357)
习题	(358)
术语表	(361)

第 1 章

为什么要采用多采样率滤波器



在滤波器处理中为什么要改变采样率呢？这有两个原因：一是处理性能，二是系统成本。多采样率系统能以更好的性能保证处理任务的实现；与此同时，与传统滤波器相比，在保证处理性能下能够降低系统成本。多采样率滤波器是嵌入在信号处理系统中支持采样率变化的数字滤波器。有时，采用多采样率滤波器是信号处理中很自然的环节；在有些情况下，采样率的变化是为了更好地利用多采样率滤波器的成本优势。全书将会对此给出一些实例，在这一章先列举以下几个例子。

1.1 光盘 4:1 过采样

多采样率系统应用的一个完美例子是光盘(CD)播放机中的信号调理。CD播放机将存储在CD上的数字化音乐转换为便于收听的模拟音频信号。图1.1给出了将数字信号转换为模拟信号的标准信号调理所需要的操作流程。它需要三个串行环节的处理，DAC部分将串行数字采样序列转换为相对应的模拟信号，采样和保持部分抑制多比特转换中由于比特流变化而造成的模拟信号中的短时脉冲干扰波形，而平滑滤波器则抑制通带外的频谱分量。

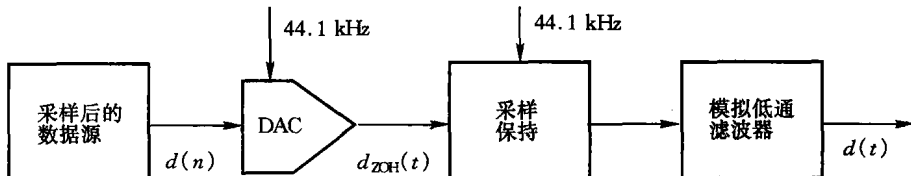


图 1.1 数字信号转换为模拟形式的信号调理流程

图1.2给出了图1.1信号调理流程中各点信号的时域波形。图1.3给出了与图1.2时域信号相对应的频谱图。假设输入信号的双边带宽是40 kHz，CD机中的采样率是44.1 kHz，信号的采样导致了信号频谱以44.1 kHz为周期的周期性延拓。DAC完成以适当的DC电平值来表征采样点之间的波形。这种在两个采样值之间以当前的采样数据值为幅值进行矩形拟合的过程称为零阶保持(zero-order hold, ZOH)。ZOH系统的频率响应为 $\sin(x)/x$ 函数或 $\text{sinc}(\pi f/f_s)$ 函数，其过零点都位于采样率倍数的位置上。从处理系统的频谱结构可见，sinc函数中的零点刚好位于周期复制频谱的中心点上，从而抑制了复制的频谱。尽管sinc函数的旁瓣削弱了残留频谱部分，但sinc函数的主瓣也会使所期望的基带频谱发生失真。

模拟平滑滤波器必须满足一些信号调理的要求。第一点，滤波器要完成DAC电路中不完善的滤波处理，抑制剩余的频谱残量。通常完成这一任务的滤波器阶数很高($N \geq 10$)，因而滤波器的价格很贵。并且这—一个高阶滤波器还要求从20 kHz处开始有一个窄的过渡带，并且在24 kHz外要有80 dB的衰减，而对于DAC，阻带的衰减要达到96 dB。第二点，滤波器需要矫正 $\sin(x)/x$ 频谱结构中的带内失真，这可以在信号带宽内通过采用与sinc函数的倒数相匹配的通带响应来实现。第三点，滤波器在通带边沿附近不能引入严重的群时延失真，要求滤波器能与立体声音频信号在幅度与相位上相匹配。最后，滤波器的价格要极其低，也就是说要少于0.5美元。如果你还对上面所列要求沾沾自喜的话，那么你很快就会明白对模拟滤波器来说这些要求是不可能实现的。

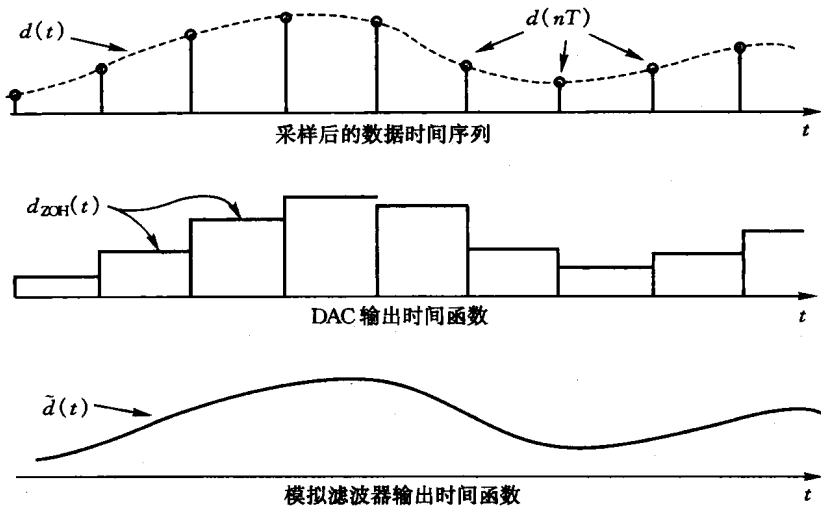


图 1.2 输入与输入样本、DAC 输出、滤波后的输出信号

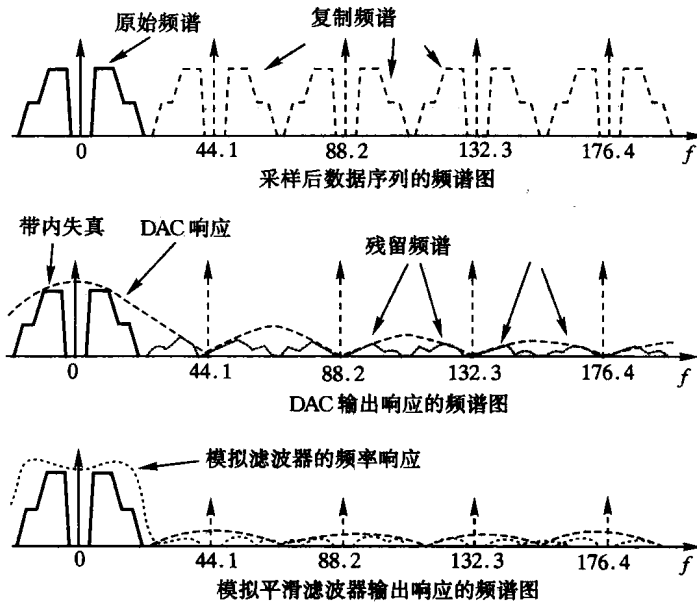


图 1.3 采样后输入、DAC 输出和滤波器输出的频谱图

当我们遇到不能解决的问题时,我们可以运用一些 Star Trek 式狂热者公认为 Kobyashi Maru Scenario(Wrath of Khan)的小技巧。遇到不能解决的问题,要将它变为你可以解决的形式,从而解决它。图 1.4 给出了将数字信号巧妙通过信号调理转换为模拟表征的改进型结构,并且该系统处理的成本并不高。

图 1.5 给出了改进型信号调理流程中各点处信号的时域波形,图 1.6 给出了与图 1.5 时域信号相对应的信号频谱图。在改进型的信号处理中,我们通过 1:4 的增采样在数字域中将输入序列的采样率从 44.1 kHz 提升到了 176.4 kHz。增采样后的信号送入到数字低通滤波