

现代通信信号处理丛书

多采样率系统

——采样率转换和数字滤波器组

Multiratensysteme Abtastatenumsetzung
und digitale Filterbänke

|| [德] Heinz G. Gökler Alexandra Groth 著 ||

王德海 步兮瑶 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

现代通信信号处理丛书

多 采 样 率 系 统

——采样率转换和数字滤波器组

Multiratenysteme Abtastatenumsetzung
und digitale Filterbänke

[德] Heinz G. Göckler Alexandra Groth 著

王德海 步兮瑶 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

《多采样率系统——采样率转换和数字滤波器组》一书是由德国波鸿鲁尔大学的 Heinz G. Göckler 教授和 Alexandra Groth 博士所著, 是近年来德国多采样率数字信号处理领域中的一本权威著作。本书由两大部分组成: 第一部分——采样率转换, 内容涵盖了采样率转换的基础知识、与多采样率系统有关的滤波器设计以及多采样率系统的高效结构和算法; 第二部分——数字滤波器组, 这部分是对第一部分知识的延续应用, 并深入到 I 通道滤波器组的层面。全书共包括 10 章, 内容精炼新颖, 条理清楚, 而且专门针对一些复杂又不易掌握的内容, 设置了相应的 MATLAB 可视化程序和附有答案的练习题, 方便读者理解。

本书适用于高等院校电子和信息技术专业的研究生课程, 以及已经具有了必要基础知识的本科高年级学生阅读, 也可供该领域的教师和工程技术类人员使用。

Authorized translation from the German language edition, entitled Multiratenysteme: Abtastumsetzung und digitale Filterbänke, 3-935340-29-X, by Heinz G. Göckler, Alexandra Groth, published by J. Schlemmich Fachverlag, Copyright©2004.

Chinese translation copyright ©2009 by Publishing House of Electronics Industry.

This Chinese edition was published with arrangement with J. Schlemmich Fachverlag.

All rights reserved.

本书中文简体字版专有翻译出版权由 J. Schlemmich Fachverlag 授予电子工业出版社。未经许可不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2007-3817

图书在版编目 (CIP) 数据

多采样率系统——采样率转换和数字滤波器组/(德)奎克勒,(德)克劳斯著;王德海等译.—北京:电子工业出版社,2009.4

(现代通信信号处理丛书)

书名原文: Multiratenysteme Abtastumsetzung und digitale Filterbänke

ISBN 978-7-121-08464-5

I. 多… II. ①奎…②克…③王… III. 数字滤波器 IV. TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 032021 号

责任编辑: 王春宁

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市万和装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 560 千字

印 次: 2009 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 3 500 册 定价: 56.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

出版说明

随着通信技术的发展,特别是第三代移动通信技术的发展,宽带无线通信网、高速通信网、新一代信息网技术、光通信技术、个人通信技术和智能信息处理技术等已经进入了一个新的高速发展时期,对各种信号处理技术有了更高的要求。为了适应各种现代通信信息传输网络的技术要求,除了继续采用传统的数字信号处理技术外,还应在此基础上提出新的信号处理技术、算法和模型,以满足应用的需求。

随着通信智能化、大数据量、高速实时的多媒体应用需求的不断增多,处理信号的类型已经不仅局限于对常规数据的处理,还要处理大量的语音信号和视频信号等。这类信号的特点是数字化、宽频带、大数据量。信号处理技术在通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、光信息科学与技术、测控技术与仪器、移动通信、无线通信、卫星通信、光通信、网络通信、智能信息系统以及多媒体通信等领域获得广泛的应用,已经成为应用工程的关键技术之一。而目前,国内市场有关通信应用领域信号处理技术系列化的图书种类还非常匮乏,而市场对这方面的需求量又较大。因此,从这个角度出发,我们依托中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会,在专业委员会专家、教授的大力支持下,组织出版一套面向 21 世纪的《现代通信信号处理丛书》。

这套丛书从我国现代通信信号处理技术应用现状与发展情况出发,以应用为中心,全面、系统地介绍了信号处理领域所涉及的有关关键技术与热点技术,如通信中的智能信号处理、通信中的阵列信号处理、通信中的自适应信号处理、通信中的光信号处理、超宽带技术、通信中的信号检测与估值、量子通信中的量子信号处理、网络信号处理和信号处理算法的实时 DSP 实现等内容。虽然所涉及的领域还不够全面,但我们会一直努力。在确保丛书质量的前提下,不断丰富,不断完善,力求内容的先进性、实用性和系统性,突出理论与应用实践的紧密结合,引导读者将信号处理的原理、技术与应用有机地结合,力争为读者奉献一套可读性与可操作性强的系列丛书。

这套丛书将从 2006 年年初陆续推出,主要读者对象是广大从事通信信号处理技术工作的科技研发人员和工程技术人员,也适合高等院校相关学科各专业在校师生及刚刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书的过程中,得到了中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会的大力支持,参与编著和审定的各位专家都为此付出了大量的心血,可以说,没有他们的支持和帮助,就没有这套丛书的出版,对此,我们表示衷心的感谢。希望广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议,以便今后我们加以改进,为广大读者奉献更多、更好的优秀通信类图书。

联系信箱: wchn@phei.com.cn。

电子工业出版社
通信分社

致中国读者

《多采样率系统——采样率转换和数字滤波器组》自 2004 年在德国出版以来，至今还没有其他语言的版本。首先是因为德语版有益于我国学生更好地理解书中内容。其次也是由于在该专业领域内，本书的传播范围还是相对狭窄的，毕竟在中欧适用于此书的读者群较少，且还有进一步缩减的趋势。而《多采样率系统——采样率转换和数字滤波器组》更多的是面向：（1）对多采样率系统技术感兴趣，并具有一定数字信号处理基础知识的科技类高等院校（大学）的学生；（2）期望加深对多采样率系统知识了解的数字信号处理方面的工程技术人员及专家。不过，对“专业化”的追求正在日益减少。在德国，长久以来人们更关心的是股票交易，而工程技术革新所带来的新价值却无人问津。

基于上述关于多采样率信号处理的学术现状，我非常高兴本书能够被翻译成中文。这样可以使更多的学生、工程技术人员和专家了解到书中所探讨的理论、知识，也有利于扩大该研究方向在华语地区的相关专业培训，并终将在世界范围内有所发展。

本书的形成有一段漫长的历史。它源于我 26 年来在德国信息技术领域的工作经验。书中描述了一些自 20 世纪 80 年代初发展至今，已经在商业方面得到广泛应用的数字化系统。这些技术的发展说明，在事先确定了使用多采样率系统，以及正确合理地选择了采样率和信号带宽的情况下，数字系统是如何以较少甚至最少能耗来实现的。

关于多采样率信号处理的专业知识，通过我的从业经历逐渐成熟。这首先是来自企业内部的研讨班，然后是我在波鸿鲁尔大学从事的教学科研工作。自 1996 年开始，“采样率转换和数字滤波器组”作为研究生课程在波鸿鲁尔大学电子和信息技术专业系统地展开。该书第二位作者 Alexandra Groth 博士富有成效的参与工作，也为这本以教学、科研为目的的书作出了很大贡献。她编写了大量以 MATLAB 为基础的练习题及相关程序。此外，她的博士论文《多采样率系统的并行化》也成为本书的一个重要内容。

德国大学教材的形式遵循了洪堡大学的教学传统¹：教学内容和方法的基础必须在细节方面加以阐述和推导。这样，在工程技术人员的培养过程中，才能使他们把更深层次的知识理解融会贯通，即使在面对全新的未知学科时，也能找到具有创意的解决办法。而与此相反，不加解释地照本宣科，在面对非常规性问题时则显得无能为力。

综上所述，《多采样率系统——采样率转换和数字滤波器组》首先适用于电子和信息技术专业的博士、硕士课程，以及已经掌握了必要基础知识的本科高年级课程。同时对于该领域的工程技术类人员，本书一方面提供了多采样率信号处理的基本理论，另一方面还可以作为如何实践有效和节能的多采样率系统的指导参考。

Heinz G. Göckler
2007 年圣诞之际，于德国波鸿

¹ 德国柏林洪堡大学（Humboldt-Universität zu Berlin）是依据创校者洪堡“研究与教学合一”的精神创立的大学。该校提倡教学与研究同时在大学内进行，而且学术自由，大学完全以知识及学术为最终目的，而非务实的人才培养。——译者注

译者序

近二十年来, 信号处理的数字化技术发展可谓突飞猛进, 其对世界的巨大推动力量使人们为之兴奋不已。为了使数字化技术实现多个系统间的更好匹配, 同时消耗更少的能源, 我们需要在系统内部不同的节点上使用不同的采样率, 此种需求使数字信号处理领域中一个崭新的分支——多采样率数字信号处理应运而生。本书就是在这样的背景下写作并出版的。

本书的主要作者 **Heinz G.Göckler** 教授是欧洲著名的信号处理专家, 他的主要研究领域包括多采样率系统、数字滤波器及其在通信技术中的应用。另一位作者 **Alexandra.Groth** 博士目前就职于飞利浦研究院, 她在多采样率数字信号处理研究方面同样享有盛名。

本书的取材, 首先来自于德国工业界内部的进修研讨项目, 同时融进 **Göckler** 教授在波鸿鲁尔大学 (**RUHR-UNIVERSITY BOCHUM**) 信息技术专业十余年教学和科研实践经验的结晶。将系统的理论知识与实际应用技术两者很好地结合起来, 形成了本书的一个鲜明的特点, 即深入浅出, 并由浅入深地引领读者循序渐进地学习。即便是对此领域一时感到陌生的读者, 也可以从第一部分 (第 1 章与第 2 章) 读懂多采样率系统中采样率转换的基础知识, 进而可以学会与多采样率系统有关的滤波器设计 (第 3 章)、高效结构和算法 (第 4 章与第 5 章), 最后, 第 6 章的精彩内容能够将读者的思路引向 **DIAMAT CATV** 系统的应用实例。本书的第二部分含第 7 章到第 10 章共四章, 详细地介绍了近年来备受关注的数字滤波器组技术, 相信会以丰富的内容与新颖的视角赢得读者的信任。

除此之外, 本书还具备两大特点:

第一, 大量的颇具新意并附有答案的练习题。鉴于本学科的难度与复杂性, 这种“练习题”与普通的“课后练习题”的概念不完全相同, 其独特之处是归纳了作者对正文内容的补充和解释。

第二, 可视化的 **MATLAB** 程序。该程序采用了 **MATLAB** 的图形用户界面 (**GUI**), 可以使读者更加直观地理解相关知识。而且, 原德语界面的程序已译成中文, 读者可登录华信教育资源网 (教育网: www.huaxin.edu.cn 或公共网: www.hxedu.com.cn) 免费注册后进行下载使用。

本书由王德海与步兮瑶共同翻译完成, 并经过彭德刚和冯进的两次审校。王德海还就原书与程序中的一些错讹与纰漏直接与作者探讨并提出修正意见, 得到了作者对翻译稿的高度认可。此外, 王小洪、田瑜、何璇、黎红、杨晨、彭然、冯喆、杨琪和张琴也对本书的翻译与审校给予了很多帮助。在此一并致谢。

由于译者水平有限, 译文中难免有不妥或错误之处, 敬请广大读者与同行不吝赐教。

如有疑问或问题, 请与本书译者王德海进行联系, 联系邮箱: dehai.wang@gmail.com

王德海 步兮瑶

2008 年 12 月

前 言

本书取材于德国工业界内部的进修研讨项目，该项目已逐步发展成为一门正规的课程，并且在波鸿鲁尔大学（Ruhr-University Bochum）的信息技术专业里经过了多年的教学和科研实践。书中既包括了工程技术人员关心的实际问题，又体现了高等教学的学术观点。

本书内容建立于以下基本原理，即数字信号处理系统全部为多采样率系统，因此信号会以不同的采样率显现在系统内部的处理过程中。为了更好地理解此书，读者应具有数字信号处理方面的基础知识（如 z 变换及其他相关知识等）。

如本书标题所示，书中内容及据此所设置的相关课程皆由两大部分组成：第一部分——**采样率转换**；第二部分——**数字滤波器组**。本书第一部分详细介绍了采样率转换过程的基础知识，并对此进行了推导和演绎。这常常用来解释：为什么某个被提及的方案可行，而另一个不可行。在学习过程中，我们首先要充分理解那些相关联的基础知识，这样，在面对建立于此的未知问题时，才能迎刃而解。但是只介绍一些基本原理，如多相表示和调制表示，显然是远远不够的。因此，为了促进该领域的创新与发展，本书更着重于实践中的具体应用，而且书中也穿插了大量全新练习题（并内附答案），以方便读者自学。书中第2章涉及了采样率按整数因子以及按有理数因子增加、减少时，在时域和频域中创造性的应用。尽管异步采样率转换在实践中早已被普遍应用，但在该研究领域的相关书籍并不多，而本书则对此进行了详细的阐述。作为第一部分中描述最关键系统理论的第2章，在其最后部分通过简介和概述，解释了多采样率系统的转置（参看参考文献[24, 27, 55]）和对偶原理的基础概念。

第3章深入地介绍了在多采样率数字信号处理中，如何把数字滤波器的特性曲线按技术指标分类，通过对这类滤波器的设计，最终尽可能地使该多采样率系统降低能耗。此外，本章还对该重要设计的操作过程做了一个全面概括。不过要注意的是，这里忽略了参数及信号量化的影响。

对于前面介绍过的有关改变采样率的系统理论，它的高效实现方法（系统结构）在第4章进行了具体介绍。其中只有对输出信号所需的必要值进行计算，才能力求最低的系统运算功率。第5章补充说明了，通过把一个FIR多采样率系统合理地划分成为众多子系统级联的形式，从而使系统运算功率得到进一步的降低。

第二部分是第一部分知识的延续应用，并深入到 I 通道滤波器组的层面（参看1.2节）。这里的重点是FMUX和FDMUX滤波器组，以及它们的级联形式，并且所有的通道都有相同的带宽 B （均匀滤波器组）。此外，在带有冗长部分和不相干部分的信号的有效编码过程及传输过程中，解释了级联互补滤波器组的应用（参看参考文献[136, 141]）。

不过，若没有一系列强有力的合作及支持，本书是不能如此顺利完成的。这里首先要感谢波鸿鲁尔大学信息技术专业的两位女士：Tauber女士为全书制作了专业的Latex文件并进行了多次修改；Sommer女士则精心绘制了大量插图、图表。在文字和图片方面也长期得到了学生们的大力支持；Andreas Kribus为本书的初稿付出了大量心血；Janine Buchwald负责了文字工作；Daniel Alfsmann参与了书中布局及确定关键字索引的工作。当然也不能忘记本系的学生们，他们的多种反馈和笔记为本书提供了大量的资料。

书中丰富的MATLAB习题及可视化程序，也是通过以下学生与作者们的紧密合作才得

以呈现：Andreas Kribus，从始至终，伴随着他的创造性，尽心尽力地投入到本书的工作中，直到他的学业结束。Jan Pelzl 对所有程序进行了系统地规划整理，其间也得到了 Nils Hüttebräuker 和 Sebastian Schmidt 的帮助。最后由 Daniel Alfsmann 完成了后期的校对工作，并修改了一些书中内容与程序不一致的地方。

在此，我们衷心感谢以上各位长期以来为本书出版所付出的辛勤劳动。我们还要感谢 Gennaro Evangeista 博士，在这次富有成效的合作工作中，他为“异步采样率转换”这部分内容作出了决定性的贡献。此外，我还想感谢我的夫人 Iris Göckler，特别是在我写作遇到困难的时候，她给予了我这个不称职的丈夫很多宽容和理解。最后要感谢出版社的 J.Schlembach 博士为本书的顺利出版提供了大力支持。

另外，第 1 章所提及的关于 MATLAB 习题及可视化程序，可以从下面网址上下载获得：http://www.dsv.rub.de/imperia/md/content/lehre/audifi_matlab.zip¹。

H.Göckler, A.Groth
2004 年复活节，波鸿

¹ 此下载地址为更新后的德语原版程序地址，原书中的地址已失效。——译者注

缩略语及公式符号

缩 略 语¹

AAF	(模拟或数字) 抗混叠滤波器
ADU (德)	模/数转换器
AIF	抗镜像滤波器
ASIC	特定用途集成电路
AU (德)	采样率转换器
BSV (德)	块信号处理
(C) HBF	(复数) 半带滤波器
DAU (德)	数/模转换器
DFT	离散傅里叶变换
DSP	数字信号处理
DSV (德)	数字及离散信号处理
DTFT	离散时间傅里叶变换
(F) FT	(快速) 傅里叶变换
FB	滤波器组
FDM	频分复用
FDMUX	频率解复用器 (适用于频分复用信号)
FKA, GKA	定点及浮点运算
FMUX	频率复用器 (适用于频分复用信号)
IA (德)	冲激响应
iff	当且仅当
LPTV	线性周期时变
LSB	最低有效位
LTI (LSI)	线性非时变 (线性非时移)
MIMO	多输入/多输出 (系统)
MSB	最高有效位
OFDM	正交频分复用
PCM	脉冲编码调制
PP	多相
PR	完全重构

¹ (德) 表示德语专业词汇的缩略语。——译者注

PU	仿酉
QAM	正交振幅调制
QMF	正交镜像滤波器
SBC	子带编码器
SFG (德)	信号流程图
SISO	单输入/单输出 (系统)
SSV (德)	串行或顺序信号处理
TDM	时分复用
TMUX	复用转换器
ÜF (德)	传输函数 (系统函数)
VLSI	超大规模集成电路
WB, WL	字宽, 字长
zT	z 变换

惯用操作符号²

$\mathcal{Z}\{ \}$	z 变换 (zT)
$\mathcal{L}\{ \}$	拉普拉斯变换 (LT)
$\mathcal{F}\{ \}$	傅里叶变换 (FT)
$\mathcal{F}_*\{ \}$	离散时间傅里叶变换 (DTFT)

重要公式符号

b	当 $f \geq 0$ 或 $\Omega \in [0, \pi]$ 时所对应的带宽
B	当 $-\infty < f < \infty$ 或 $\Omega \in [-\pi, \pi]$ 时所对应的带宽
$\delta_0(t)$	Dirac 脉冲
$\delta(n)$	单位脉冲
f_c^3	截止频率 (通用的)
$f_i = 1/T_i$	输入端的采样率 = 1/采样周期
f_m^4, f_0	中心频率, 信号频率
$f_n = 1/T_n$	奈奎斯特采样率
$f_o = 1/T_o$	输出端的采样率

² 即 “Paraunitary”。——译者注

³ 截止频率在本书 (德语) 原文中为 “Grenzfrequenz”, 并被缩写为 “ f_g ”, 为了使国内的读者更易于理解, 所以这里沿用了习惯上的缩写形式 “ f_c ”。——译者注

⁴ 中心频率在本书 (德语) 原文中为 “Mittenfrequenz”, 并被缩写为 “ f_c ”, 为了与习惯上的 “截止频率 f_c ” 相区分, 所以这里采用了 “ f_m ” 的缩写形式。——译者注

f_p^5	通带截止频率
f_s	阻带截止频率
$f_{\text{sn}} = 1/T_{\text{sn}}$	次级奈奎斯特采样率
f_u, f_v	其他的采样率
$k \in \mathbb{Z}$	离散频率参数
$L \in \mathbb{N}$	内插因子
$M \in \mathbb{N}$	抽取因子
$n, m \in \mathbb{Z}$	离散时间参数
$\bar{p}, p \in \mathbb{N}_0$	基本区间内的相位延迟
$p' \in \mathbb{Z}$	任意类型的相位延迟
$p(t)$	连续时间信号采样的 Dirac 脉冲波峰
$\omega_M(n)$	离散采样函数
$\mathbf{A}, \mathbf{A}^T$	矩阵, 转置矩阵
$\mathbf{b}, \mathbf{b}^T$	向量, 转置向量
$x(n), x(t)$	实数信号
$\underline{x}(n), \underline{x}(t)$	复数信号
$\underline{x}(t)$	连续时间信号
$\underline{x}(n)$	离散时间信号
$\underline{x}_s(t)$	用连续时间形式表示的离散时间信号 ($t \in \mathbb{R}$)
$\underline{x}_s(n)$	无采样率转换的被离散采样信号
$\underline{X}(z)$	复数信号的 z 变换 (zT)
$\underline{X}(e^{j\Omega})$	复数信号的离散时间傅里叶变换 (DTFT)
$\underline{\mathbf{H}}^\dagger, \underline{\mathbf{H}}^H$	矩阵 $\underline{\mathbf{H}}$ 的共轭转置以及埃尔米特转置
$\underline{\tilde{\mathbf{H}}}$	矩阵 $\underline{\mathbf{H}}$ 的仿共轭矩阵 (Paraconjugate Matrix)
$z_\bullet = e^{sT_\bullet}$	与采样率 $f_\bullet = 1/T_\bullet$ 相关的 z 变换变量
$\Omega^{(s)} = 2\pi f / f_\bullet$	离散系统的归一化频率变量; 采样率 $f_\bullet$
$\forall \dots$	适用于全部...的情况
$\mathbb{N}$	自然数的集合
$\mathbb{N}_0$	自然数的集合并且包括 0
$\mathbb{Z}$	整数的集合
$\mathbb{Q}$	有理数的集合
$\mathbb{C}$	复数的集合
$\mathbb{R}$	实数的集合
$\mathbb{I}$	虚数的集合

5 通带截止频率在本书(德语)原文中为“Durchlasseckfrequenz”, 并被缩写为“ f_d ”, 为了使国内的读者更易于理解, 这里沿用了习惯上的缩写形式“ f_p ”。——译者注

目 录

第一部分 采样率转换

第 1 章 导论	2
1.1 采样率转换概述	2
1.2 采样率转换的目的	3
1.3 可视化程序	4
第 2 章 采样率转换	6
2.1 离散时间信号	6
2.1.1 离散时间信号的离散采样过程	6
2.1.2 多相表示	11
2.1.3 调制表示	18
2.2 练习题：多相表示	20
2.3 抽取—降低采样率	22
2.3.1 下采样过程中的时域特性	22
2.3.2 下采样过程中的频域特性	24
2.3.3 完整的抽取器	28
2.3.4 抗混叠滤波器的尺度设定	30
2.3.5 对带通信号进行的抽取操作	31
2.3.6 线性周期时变 (LPTV) 系统	38
2.3.7 基于下采样器的等效变换模式	39
2.4 练习题：降低采样率	42
2.5 内插—增加采样率	43
2.5.1 上采样过程中的时域特性	45
2.5.2 上采样过程中的频域特性	46
2.5.3 完整的内插器	46
2.5.4 抗镜像滤波器的尺度设定	50
2.5.5 通过内插操作得到带通信号	52
2.5.6 基于上采样器的等效变换模式	54
2.6 练习题：增加采样率	55
2.7 同步采样率转换	57
2.7.1 有理数采样率转换	58
2.7.2 数字移相器	61
2.7.3 基于上采样器和下采样器的等效变换模式	64
2.7.4 上采样器和下采样器级联系统的一览表	70
2.8 练习题：有理数采样率转换	70

2.9	异步采样率转换	72
2.9.1	混合系统模式	73
2.9.2	数字系统模式	75
2.10	转置和对偶	78
2.10.1	线性时不变 (LTI) 系统	78
2.10.2	复数 LPTV 系统	79
2.10.3	多采样率系统	81
2.10.4	关于转置的概述	82
2.11	小结	83
第 3 章	滤波器的设计方法	85
3.1	采样率转换器的技术指标	85
3.1.1	滤波器通带技术指标	86
3.1.2	滤波器阻带技术指标	87
3.2	滤波器设计方法概述	95
3.2.1	数字 FIR 滤波	96
3.2.2	准连续 FIR 内插	113
第 4 章	高效的结构	120
4.1	评估多采样率系统的准则	120
4.1.1	运算功率	120
4.1.2	吞吐率	121
4.1.3	使多采样率系统的效率最佳	122
4.2	基于直接型滤波器的采样率转换器	123
4.2.1	FIR 抗混叠滤波器	123
4.2.2	FIR 抗镜像滤波器	125
4.2.3	运算模块的多重使用	127
4.2.4	用于采样率转换的 IIR 滤波器	128
4.3	基于多相滤波器的采样率转换器	129
4.3.1	S/P 和 P/S 转换器	129
4.3.2	多相抽取器	132
4.3.3	多相内插器	136
4.3.4	基于多相滤波器的有理数采样率转换器	139
4.3.5	并行化操作	146
4.3.6	进一步降低能耗的可能	149
4.4	练习题: 同步 L/M -采样率转换器	153
4.5	异步采样率转换器	155
4.5.1	同步采样率转换器	155
4.5.2	准连续内插器	156
4.5.3	基于时变系数的密集 FIR 结构	157
4.6	小结	158

第 5 章 高效的算法	160
5.1 多级采样率转换	161
5.1.1 公式和作用原理	161
5.1.2 单级和双级采样率转换器的比较	162
5.1.3 实例：双级抽取器	165
5.1.4 采样率转换的高效结构	170
5.2 练习题：双级内插器	173
5.3 多采样率滤波器	178
5.3.1 公式和作用原理：窄带低通滤波器	178
5.3.2 单采样率和多采样率滤波器的能耗比对	180
5.3.3 MATLAB 实例：多采样率低通滤波器	182
5.3.4 其他滤波器类型的扩展	185
5.3.5 多采样率滤波的高效结构	189
5.4 练习题：宽带多采样率低通滤波器	192
5.5 基于内插冲激响应的滤波器	195
5.5.1 公式和作用原理：窄带低通滤波器	196
5.5.2 FIR、IFIR 和多采样率滤波器的能耗比较	197
5.5.3 实例：IFIR 低通滤波器	199
5.5.4 其他滤波器类型和任意频率响应的扩展	203
5.5.5 高效的 IFIR、FRM 和 IIIR 系统	207
5.6 异步采样率转换系统	209
5.6.1 最佳化 L -内插器的结构	210
5.6.2 总系统的设计选择	210
5.6.3 设计方法和公式	213
第 6 章 DIAMANT CATV 系统的应用举例	217
6.1 目标任务	217
6.2 信道转换器	218
6.3 组转换器	219
6.4 系统的最佳化操作	220

第二部分 数字滤波器组

第 7 章 导论和分类	222
第 8 章 最大抽取 M 通道滤波器组	225
8.1 并行和多相结构	225
8.1.1 临界采样分析滤波器组	225
8.1.2 临界采样合成滤波器组	228
8.1.3 临界采样 SBC 滤波器组	230
8.1.4 失真和混叠函数	231
8.1.5 仿酉 SBC 滤波器组	235

8.1.6 总结	241
8.2 完全重构滤波器组	241
8.2.1 延时链完全重构系统	242
8.2.2 基本的完全重构 FIR 系统	242
8.2.3 仿酉系统的特性	244
8.3 练习题：并行结构的滤波器组	246
8.4 复数调制均匀滤波器组	247
8.5 临界采样复用转换器滤波器组	251
第 9 章 高效的运算结构	255
9.1 降低能耗的措施	255
9.1.1 并行结构	255
9.1.2 多相滤波器	256
9.1.3 复数调制多相滤波器组	256
9.2 练习题：高效运算的分析滤波器组	259
第 10 章 树形结构的 M 通道滤波器组	262
10.1 最大抽取完全重构 SBC 和 TMUX 滤波器组	263
10.2 基于复数调制滤波器单元的频率解复用器	263
10.2.1 复数调制多相方向滤波器	264
10.2.2 DFT 多相方向滤波器的矩阵表示	269
10.2.3 FDMUX 树形结构的具体构造	273
附录 A 对第一部分中采样率转换内容的补充	274
A.1 作为 BSV 系统的基于最小延时的有理数采样率转换器	274
附录 B 对第二部分中滤波器组内容的补充	278
B.1 标准 QMF SBC 滤波器组 ^[27]	278
B.2 频域因式分解：最小相位 FIR 滤波器的设计方法 ^[62]	280
B.3 仿酉系统	282
附录 C 习题答案	284
C.1 多相表示	284
C.2 降低采样率	286
C.3 增加采样率	288
C.4 有理数采样率转换	291
C.5 同步 L/M -采样率转换器	294
C.6 双级内插器	300
C.7 宽带多采样率低通滤波器	305
C.8 并行结构的滤波器组	313
C.9 高效运算的分析滤波器组	317
参考文献	325

第一部分 采样率转换

第1章 导 论

1.1 采样率转换概述

为了引入采样率转换的概念，我们首先来考虑一个连续的正弦信号 $s(t) = \sin(2\pi f_0 t)$ ，它的频率为 $f_0 = f_A/12$ 。以 $f_A = 12f_0$ 的采样率对这个连续信号 $s(t)$ 进行采样，会得到一个无穷的等距序列 $s(nT)$ ，在采样过程中它可由不同的零相位形式得出，如图 1.1 所示。

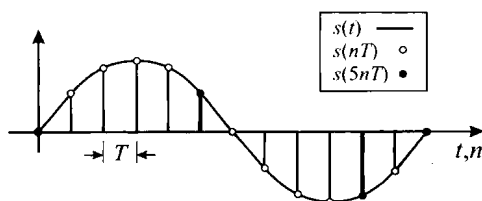


图1.1 连续的正弦信号 $T = 1/f_A$

如果对上面得到的离散信号 $s(nT)$ ，以采样率 $f'_A = f_A/5 = 12f_0/5 > 2f_0$ 来进行采样，则可以得到 $M=5$ 种不同的序列 $s(5nT)$ ，可见 $s(5nT)$ 的形式取决于采样器的零相位。上述采样过程被称为**抽取**（Decimation），即通过采样率（ f_A ）的降低而减少了采样样本（Samples）的个数。相反，采样率的增加，如 $s(5nT) \rightarrow s(nT)$ ，被称为**内插**（Interpolation），即在已有采样样本之间，还需要增加新的采样样本，以满足计算的需要。因此存在着两种不同的采样率变化方式：增加采样率（内插）和降低采样率（抽取）。当然，还有一种可能是将上述两种操作级联。

根据输入和输出信号的采样率源于同一个脉冲时钟（振荡发生器），它们的关系可以通过一个有理数时间常数来确定，又抑或根据这两个采样率是源于不相干的两个脉冲时钟，我们可以称为同步（见图 1.2）和异步（见图 1.3）采样率转换。上述的区分是必要的，因为对这两种操作的处理有着显著的差异。

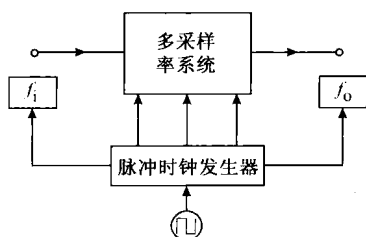


图1.2 同步采样率转换

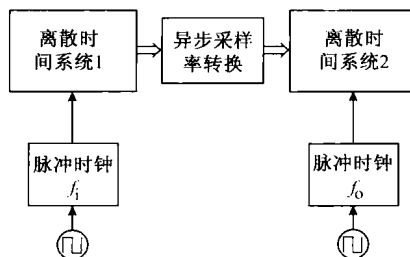


图1.3 异步采样率转换