



经典译丛

CAMBRIDGE

信息与通信技术



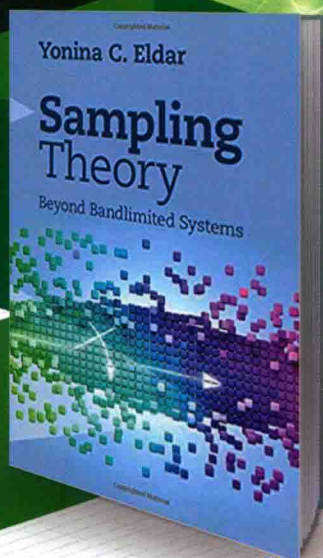
Sampling Theory: Beyond Bandlimited Systems

采样理论 ——超带限系统

Sampling Theory Beyond Bandlimited Systems

【以】 Yonina C. Eldar 著

贾敏 顾学迈 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

采样理论

——超带限系统

Sampling Theory
Beyond Bandlimited Systems

作者: Timothy Soderstrom 著

译者: 王 勇 译

科学出版社 (Science Press)

经典译丛·信息与通信技术

采样理论 ——超带限系统

Sampling Theory: Beyond Bandlimited Systems

[以] Yonina C. Eldar 著

贾敏 顾学迈 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书不仅涵盖目前较获关注的压缩感知理论的基本数学基础和关键原理及应用,而且从工程实践的角度为采样理论(奈奎斯特采样定理)和工程实践提供了全面指导。全书分三部分,首先,阐述线性代数、傅里叶分析和结合采样计算的各种代表性信号;其次,涵盖子空间和光滑先验的采样,包括非线性采样和采样率变换等基础知识;最后,讨论联合子空间的采样,基于希尔伯特空间且在一个统一框架上通过目前新兴的压缩感知技术来扩展传统采样理论,包括压缩感知领域和欠奈奎斯特采样的理论应用的详细介绍。

本书不仅是一本非常适合本科生和研究生学习的课程教材,而且对于产业界和学术界的工程师和学者,也将提供非常宝贵的参考和自学指导。

This is a simplified Chinese edition of the following title published by Cambridge University Press:

Sampling Theory: Beyond Bandlimited Systems, 9781107003392

© Cambridge University Press 2015

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and Publishing House of Electronics Industry 2018

This simplified Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this simplified Chinese edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Publishing House of Electronics Industry.

本书原版由 Cambridge University Press 出版。

本书中文简体翻译版由 Cambridge University Press 授予电子工业出版社[2018]。

未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾省)销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2016-2759

图书在版编目(CIP)数据

采样理论:超带限系统/(以)约尼纳·C.埃尔德(Yonina C. Eldar)著;贾敏,顾学迈译. —北京:电子工业出版社,2018.1

(经典译丛·信息与通信技术)

书名原文:Sampling Theory: Beyond Bandlimited Systems

ISBN 978-7-121-31291-5

I. ①采… II. ①约… ②贾… ③顾… III. ①无线电通信-数字信号处理-研究 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 072305 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:葛卉婷

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:40.5 字数:1037 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价:119.00 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)88254888,88258888。

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

本书咨询联系方式:classic-series-info@phei.com.cn。

译者简介



贾敏，哈尔滨工业大学副研究员、博士研究生导师，中国大陆首个 IEEE 女性工程师协会哈尔滨分会主席，IEEE 高级会员，IEEE 哈尔滨分会会员发展部主席。目前主要从事先进卫星通信技术及星地一体化系统、认知无线电、压缩感知理论、5G 通信系统标准及物理层关键技术研究；已发表论文 100 余篇，授权专利 26 项；获省级科学技术发明奖二等奖 1 项，军队科技进步三等奖 1 项；参与出版著作 2 部。作为负责人承担国家自然科学基金 2 项，主持省部级科研项目 18 项；参与国家重大研发计划 2 项，其他国家级项目共计 10 项。



顾学迈，哈尔滨工业大学教授、博士研究生导师，哈尔滨工业大学研究生院常务副院长，主要研究方向为压缩感知理论、卫星通信与数字通信网络；先后主持过国家自然科学基金、863 项目、航天基金项目、博士点基金项目、国防基础研究项目 20 余项；在国内外重要刊物上发表论文 100 多篇，授权专利 30 项；获国家科技进步二等奖 1 项，省部级科技进步一等奖 3 项、二等奖 3 项、三等奖 3 项；电子学会会士，获黑龙江省模范教师称号，编著教材 3 本。

译者序

数字信号处理是推动真实世界的模拟域与信息处理的数字域相切合的重要技术领域，而采样理论则是数字信号处理领域的核心技术基础。从理论上分析，在通常的带限信号的采样处理过程中，我们可以利用经典的采样理论——基本的香农-奈奎斯特采样定理来获取信息及恢复信号。但是，这是一种理论上的理想场景，通常的现实世界的信号处理过程将存在很多的实际问题和困难。比如，实际过程中，当信号具有较大带宽时，经典采样理论需要使用较高的采样率来恢复信号，这在实际的硬件设备中，可能是不可实现的；再如，在采样过程中存在的非线性失真问题以及理想的理论采样冲激函数在实际中的不可实现性。这都将让“理想”与“现实”背道而驰，迫切需要发展新理论并结合新思想来更好地解决信息处理过程中面临的实际问题。

译者在对本书进行翻译的过程中感触和收获颇多，重新回顾并深入而系统地再次学习了信号处理的全方位知识，在本书中将基本的香农-奈奎斯特采样定理进行了扩展。本书不仅涵盖了信号处理领域完备的基本理论及基础知识，同时，重点介绍了目前学术界和业界均较为关注的欠奈奎斯特采样和压缩感知理论的基本理论、原理及应用。最重要的是，本书可以从工程实践的角度为采样理论从理论到工程实践提供全面的指导及全面的解决方案。

本书分为三个部分，首先，全面阐述了线性代数、傅里叶分析和结合采样计算的各种代表性信号；其次，详细介绍了子空间和光滑先验的采样，包括非线性采样和采样率变换等基础知识；最后，讨论了联合子空间的采样，基于希尔伯特空间且在一个统一的框架上通过目前新兴的压缩感知技术来扩展传统采样理论，包括压缩感知领域和欠奈奎斯特采样的理论应用的详细介绍。本书重点强调和突出的是信号处理相关基础理论在电子信息类学科中的需求和应用，同时对于涉及工程实践的硬件设计的考虑更是贯穿始终，这也是本书的另一大特色。

随着目前万物互联网络的迫切需求，为了满足物联网中的智能器件的互联和信息的采集和处理需求，这将需要更复杂和更有效的数字信号处理系统及相关技术的融合发展。同时，未来技术发展对于解决大规模的采样问题的需求则更为迫切。经典的信号处理技术、采样理论及新兴的压缩感知理论的结合也将为采样理论提供一个新的发展视角，以及一个更好地利用信号自由度的方法。随着未来的工业需求及数字信号处理领域的发展，我们将可以预见，建立完整的数学模型及系统结构和体系是必要条件，而该技术的硬件实现的可行性将成为制约某项技术发展的瓶颈，基础理论的新研究成果需满足实际应用的需求，同时本书中涉及的基础理论的创新将对业界和市场产生深远的影响。

本书由哈尔滨工业大学电子与信息工程学院的贾敏副研究员和顾学迈教授共同翻译完成。译者在本书的翻译过程中花费了大量的时间并投入了巨大的心血。首先，特别感谢原书作者对本书在前期翻译工作的指导和支持；其次，感谢哈尔滨工业大学电子与信息工程学院和通信技术研究所在1105卫星通信实验室给译者提供的良好平台和工作条件，才得以使本书顺利问世；最后，非常感谢译者的家人、朋友、同事给予的关怀、支持和帮助！

前 言

数字信号处理(DSP)是工程领域中最具代表性的领域之一,包含很多子领域,如语音和图像处理、统计数据处理、频谱估计、生物医学应用及其他很多领域。顾名思义,DSP即在数字域对各种信号进行处理(如滤波、放大等),与模拟信号处理相比,数字域使得设计、验证和实现等环节变得非常简单。DSP作为很多技术领域的基础,是20世纪促进科学和工程发展最强大的技术之一。

为了能在计算机上表示和处理模拟信号,模拟信号必须通过模数转换器(ADC)进行采样,转变成数字序列。处理完成后,采样信号通过数模转换器(DAC)转变成模拟信号。由此可见,采样理论及其应用是DSP的核心。因此,在ADC和DAC上任何技术的进步都会对其产生巨大影响。

本书的目标是从工程的角度出发,系统地介绍采样理论及其应用。尽管在信号扩展和谐波分析方面,有很多优秀的数学教材,但是我们把采样基础理论和实际工程应用及原理结合起来,目的是提供最新的工程应用教材。本书大部分章节用于介绍压缩感知和欠奈奎斯特采样这些较新的领域,这在标准的线性代数或谐波分析等书籍中并未涉及。本书自始至终都专注于阐述信号处理和通信的各种应用。本书希望读者有信号处理的基础(如滤波和卷积)。目标读者是本科四年级或研究生一年级的学生,一些有数字信号处理、傅里叶分析、线性代数背景知识的人也可阅读。本书可作为工程师、相关领域学生、工业界和学术界研究人员的参考书。同时,我们相信本书同样适合自学。

采样理论是一个广泛而深奥的问题,该研究领域可以追溯到20世纪以前。因此,在单一的教材中不可能涵盖该理论所有的进展和结果。本书的主要关注点不是证明采样具有的完美数学理论,而是连贯地引出许多重要的工程概念。我们主要关注平移不变子空间的均匀采样和确定性信号,同时对非均匀采样、Gabor和小波扩展,以及由于噪声、量化、隐式采样和其他近似导致的采样误差等主要内容进行简单介绍,这些内容已经在其他相关教材或本书最后提供的参考文献中涉及。

本书结构

这本书可以大致分为三个部分:

- 介绍性部分包括目的和意义,线性代数、傅里叶分析的发展回顾,以及信号类的研究介绍(第1章至第5章);
- 子空间采样或平滑先验,包括非线性采样和采样率转换(第6章至第9章);
- 联合子空间采样,包括对压缩感知领域和欠奈奎斯特采样的详细介绍(第10章至第15章)。

第1章简要介绍采样的概念、采样的重要性及其超越传统香农-奈奎斯特定理的必要性。第2章包含所需的线性代数背景知识的全面介绍,这是为了推导采样理论的数学表达式。此

外,我们尽力总结本书剩余部分所需的主要数学知识。对线性代数的基本理解是学习采样理论的关键,因此本章涉及的内容是非常广泛的。第3章介绍总结了线性时不变系统和傅里叶变换等重要概念。我们不仅回顾了连续时间和离散时间傅里叶变换,还在采样信号范畴下讨论了二者之间的关系。本书中我们将会在第4章介绍全书所采用的各种信号类型,同时介绍与这样的信号集相关联的一些基本数学性质。我们重点讨论著名的香农-奈奎斯特定理和其在平移不变子空间的拓展。另外,我们简要介绍 Gabor 和小波扩展,并介绍联合子空间和平滑先验。本书中主要关注平移不变(SI)空间的信号模型。因此,在第5章我们将研究与这些空间相关的一些数学性质。本书的实例包括带宽受限信号、样条函数和多种类型的数字通信信号。

在第6章,我们开始研究具体的采样定理,从考虑线性采样与子空间先验开始叙述。正如我们所展示的结果,在许多情况下,基于子空间先验知识,即使输入信号不是带宽受限或采样率低于奈奎斯特速率,从给定的采样信号中完美恢复原信号都是可以实现的。我们也考虑了信号恢复过程有限制的情况,考虑采用不同准则恢复或估计原始信号。其中,我们研究著名的 Papoulis 广义采样定理作为其框架的一种特殊情况。在第7章,我们把这些理念拓展到平滑先验,即所确知的信号在某种意义上是平滑的。在本章中所考虑的一个有趣实例是超分辨率:通过采用采样和重构的理念从几个低分辨率图像获得高分辨率图像。第8章在假设子空间先验的条件下讨论非线性采样。我们将会惊奇地看到在不增加采样速率的情况下,即使典型的非线性导致带宽的增加,在实际中遇到的许多类型的非线性信号都能够完全被补偿。尽管采样定理关注的是连续时间信号从其离散信号中的重构,但是在第9章关于采样率转换的内容中,分析了采样在完全离散时间算法设计方面起着至关重要的作用。文中讨论了信号或图像在不同速率下的几种转换方法,这样能够有效地改变一个图像或音频文件的大小。

第10章至第15章介绍欠奈奎斯特采样和压缩感知理论。第10章介绍了联合子空间(UoS)模型,该模型是欠奈奎斯特采样范例的基础。这个模型适用于能描述的非线性信号类型,比如未知延迟和振幅的脉冲流、未知载波频率的多频带信号等。UoS模型中研究最多的实例之一是适当子空间的稀疏向量。这个模型是压缩感知理论快速发展的基础,第11章将对此进行详细介绍。其中的内容参考了 M. Davenport, M. Duarte, Y. C. Eldar 和 G. Kutyniok 合著的 *Compressed Sensing* (剑桥出版社 2012 年出版) 中的“压缩感知概述”一章。第12章讨论的是基本稀疏模型到块稀疏的扩展,块稀疏能描述更一般的有限维度联合。本章也将讨论在没有子空间先验知识时如何从子采样数据中获取子空间。平移不变空间联合及在不同参数设置下的低复杂度检测器的应用将在第13章介绍。多频带信号将会在第14章介绍。多频带信号的傅里叶变换由不同频段组成,并分布在一个宽的频率范围。即使在未知载波频率和未达到与最大频率相关的高奈奎斯特速率的情况下,我们分析了各种不同方法,这些方法允许信号使用与实际占有频段成比例的欠奈奎斯特采样速率采样。随着对这些理论及概念的发展,我们也从实际需要出发,研究多频带信号欠奈奎斯特采样感知的硬件平台实现方法。第15章关注脉冲流的欠奈奎斯特采样,脉冲流将会在雷达、超声波和多径信道识别应用中使用,同时介绍了在雷达和超声波问题中的硬件原型实例。

附录涵盖本书各部分的基本参考资料。附录 A 总结矩阵代数相关的主要结果,附录 B 回顾概率论和随机过程的基本概念。

本书中有些定理没有给予详细证明。如果没有证明过程,我们提供可找到的参考文献以供读者学习。此外,本书重点强调的是解决问题的主要思路,而不是数学的严谨性。

MATLAB 实现及实例

本书包含的很多实例能帮助作者进行更深入、更直观的理解，借助实例说明要点，探索多种方法和各种相关问题的折中。数值结果有时也用来说明文中没有突出的要点。数值实验都是在 MATLAB 标准工具箱中进行编程实验的。

在每一章的结尾提供的习题，能够进一步扩展和证明各种概念，提供练习机会。其中一些习题是用于定理的证明推导。所有习题的顺序与每章知识的介绍顺序一致。

教学

本书可作为本科高年级或研究生的教材。它源于以色列理工大学所讲的“广义采样方法”和关于本研究主题的很多导论与相关的教程。

电子工程专业的学生经常对全书所用的线性代数向量空间望而却步。我们习惯于滤波、卷积和有限维矩阵的操作。然而，这个领域的很多结果来源于希尔伯特空间。一旦能理解这个空间，产生的结果一定会自然和简单。正如我们将看到的，合理解这些概念也会让硬件实现变得简单和高效。因此，真正理解和欣赏线性代数是值得的。于是，本书从提供所需要的线性代数的基本知识开始撰写。当在以色列理工大学讲授这门课程时，在学习采样定理之前，我们用前几周的时间深入学习线性代数。在我们看来，在教学初期回顾线性代数是必要的。尽管所有工科学生都能基本掌握线性代数，但是这些课程通常都是从矩阵的角度讲解的。在这里多提倡的较抽象的观点对于本书章节间的讲解是必要的，这对于学生来讲始终是全新的。

傅里叶分析这一章中的基本结果通常会被忽略。特别是，容易忽略的离散-连续关系对于采样结果的得出非常关键，这一点需要引起注意。

本书旨在灵活地展示书中的其余部分。本书介绍的采样理论覆盖在全书中，本书可以用于各种课堂教学，在课堂上可以介绍主要的结果，同时依靠本书所列的填补证明、例子和应用的更多细节。另外，可以选择只学习某些子章节。

正如我们在介绍本书结构时所概述的，本书可顺理成章地分成三个部分。第一部分提供基本模块的全面概述，目的是为了理解和扩展后续知识。这些章节仅仅提供作为参考。在本课程中，大部分的材料都可以忽略，可以仅仅关注容易被学习本课程的同学忽视的必要概念。例如，在以色列理工大学讲这门课程的时候，我们将线性代数和平移不变子空间分为 4 学时，其中 1 学时主要涉及子空间采样，2 学时重点介绍平滑先验和插值方法，最后 1 学时关注非线性采样。剩下的六周课程关注的是压缩感知和欠奈奎斯特采样，其中，利用每一周的时间分别讲解第 10 章、第 11 章、第 13 章和第 14 章，剩下的两周将介绍第 15 章及其应用。

或者采用下面这种安排，一学期时长的课程可以关注第 5 章至第 9 章的核心知识，如果时间允许，可以选择性地讲解第 10 章至第 15 章的知识作为补充。这些章节的大部分内容都相互独立。

本书也可以用于较多关注压缩感知和欠奈奎斯特采样的最新研究领域的课程。在这种情况下，课程可以从简短地介绍线性代数和平移不变子空间的概念开始，然后讨论本书的最后一个单元，即详细讨论及讲解第 10 章至第 15 章。

致谢

如果没有许多人在撰写各阶段的帮助，本书是不可能完成的。在我的学术生涯中，周围有很多支持和鼓励我的朋友和同事。非常感谢我的同事，我也很喜欢与他们共事，从他们身上我学到了关于采样定理和压缩感知的诸多知识，以及更广泛的研究和教学方法。我也很感激我的朋友和家人，虽然不能与他们分享我在工程和数学上的激情和兴趣，但是他们却能提供给我充足的机会，在生活中的其他方面提醒我，给我足够的支持去继续钻研并分散我在整个工作过程中的障碍点上的注意力。

我很感谢以色列理工大学参加该课程的学生，是他们对课程笔记的反馈才慢慢演变成这本书。我的博士生 Tomer Michaeli，是该课程在广义采样方法的第一个助教，并且负责本书第一部分的例子和仿真。他在本书的不同部分提供了许多新的观点和见解。真诚地感谢他为这个项目付出的时间和精力。我的几个研究生和该课程的学生在本书第二部分的例子和仿真中提供了帮助。第二部分主要关注压缩感知和欠奈奎斯特采样。特别地，我想感谢 Kfir Aberman, Tanya Chernyakova, Deborah Cohen, Tomer Hammam, Etgar Israeli, Ori Kats, Saman Mousazadeh 和 Shahar Tsiper，因为他们都参与了这些章节例子的撰写。我还想感谢 Douglas Adams, Omer Barllan, Zvika Ben-Haim, Yuxin Chen, Kfir Cohen, Pier Luigi Dragotti, Tsvi Dvorkind, Nikolaus Hammler, Moshe Mishali, Tomer Peleg, Volker Pohl, Danny Rosenfeld, Igal Rozenberg, Andreas Tillmann 和 Lior Weizman，因为他们参与了很多章节的校对并提供了重要的反馈，感谢 Kfir Gedalyahu, Moshe Mishali, Ronen Tur, Noam Wagner 分享他们论文的 MATLAB 仿真。感谢现在和之前的研究生通过他们的研究结果为本书所做的贡献。在这个过程中也给我机会去向他们每个人学习。我为书中的错误和不当之处及对于任何值得注意的被省略的主题道歉。

感谢我的几位朋友和同事在早期并持续对我工作的支持。Arye Yeredor 和 Weinstein 激发了我在数字信号处理的最初兴趣，教会我寻找简单和直观地解释最复杂算法的价值。Al Oppenheim 激发了我在采样理论上的兴趣，激发了本书所展现的采样理论的抽象的线性代数视角，感谢他多年以来的支持和他灌输给学生的研究创意和激情。几位同事支持我走进了采样理论的世界。特别感谢 Michael Unser, P. P. Vaidyanathan, Akram Aldroubi, Ole Christensen, Hans Feichtinger, John Benedetto, Stephane Mallat, Abdul Jerri 和 Ahmed Zayed，他们欢迎我走进采样及其应用领域，帮助我完成数学教学。采样理论研究团队是很热情并受人欢迎的团体，我很荣幸能成为其中的一员。

近年来，我广泛从事于采样理论在各种各样的领域的应用研究，能与工作在各个领域的睿智且专业的同事合作我感觉很幸运。他们有巨大的灵感来源和支持，使研究成为一个有趣的和有益的体验。特别感谢 Amir Beck, Emmanuel Candes, Israel Cidon, Oren Cohen, Alex Gershman, Andrea Goldsmith, Alex Haimovich, Arye Nehorai, Guillermo Sapiro, Anna Scaglione, Moti Segev, Shlomo Shamai 和 Joshua Zeevi。感谢我在斯坦福大学休假时的优秀助理——统计系的 Emmanuel Candes 和电子工程系的 Andrea Goldsmith，他们在这本书中进行了有趣、刺激和有意思的讨论。以上所提到的很多同事是我私下的好友，我们不只是分享研究的热情。我还想提一下在以色列理工大学的同事 Gitti Frey, Idit Keidar, Ayellet Tal 和 Lihi Zelnik-Manor，当我在家庭生活和高要求的工作生涯之间进行平衡时，他们让我的头脑保持清醒。我更感谢多年来我所有的同事，从他们身上我学到了很多研究方法，尤其是信号处理方面。在过去的十年，以

色列理工大学电子工程系提供了一个令人兴奋和激励的研究和教学的环境。

2013年，我们在以色列理工大学电子工程系建立了 SAMPL 实验室——采样、重构、建模和处理实验室。本书中的欠奈奎斯特采样技术原型和许多其他的欠奈奎斯特采样项目都是在这个实验室中开发的。能得到有天赋的工程师的支持，我感到极其幸运。特别感谢 Yoram Or-Chen, Alon Eilam, Rolf Hilgendorf, Alex Reysenson, Idan Shmuel 和 Eli Shoshan。如果没有 Peretz Lavie(以色列理工大学校长)、Gadi Schuster(学术事务所的副主席)、Moti Segev, Joshua Zeevi, Gadi Eisenstein 的支持，不可能建立这个实验室。实验室中的硬件和实验受到了合作单位美国国家仪器公司、通用电气和安捷伦科技公司的支持。我们感激并认可他们的支持和合作。非常感谢我的行政助理 Sasha Azimov 过去两年的帮助。

非常感谢文字编辑 Lindsay Nightingale 对本书细节的关注，感谢负责本书监督生产的 Vania Cunha，感谢支持和监督本项目的来自剑桥大学出版社的 Phil Meyler。

特别感谢我的父母，从我小时候他们就鼓励我为梦想努力，通过生活提供给我价值观念：我的母亲灌输给我生活的热情，传递给我能量去追求目标，对于生活中的问题积极寻求解决方法；我的父亲灌输给我对知识的热爱，追求完美和卓越，给我不断的忠告和鼓舞；我的公婆把我带入到他们的家庭，并融入进去成为他们中的一员，他们以我的成就为荣。我真心地感谢我的父母和公婆对我大家庭的持续的爱和支持。

我最深的谢意和无限的爱献给我的丈夫 Shalomi 和孩子 Yonatan, Moriah, Tal, Noa, Roei，他们也许不会读这本书，但是跟他们在一起，生活是令人兴奋和充实的。他们让我在写作编辑后能安心休息，并给我很多理由让我开心。他们无限的爱和鼓励、情感上的支持，以我为荣，这些让我的生活充满幸福，使一切付出都值得。Shalomi 一直陪伴在我身边，提供给我无限的支持、有用的建议和鼓励。他给我依靠的肩膀，给我指引正确的方向和价值。他给我继续改善各个方面的灵感和动力，确保我们的家庭除工作外有丰富的价值和活动。生命旅程中，我们一直是伙伴，远超工程和研究的世界。感谢他们有耐心地和我一起迎接这本书的挑战！我把这本书献给他们！

目 录

第 1 章	概述	1
1.1	标准采样	1
1.2	非带限信号采样	4
1.3	本书概要与展望	5
第 2 章	线性代数基础	7
2.1	信号展开：一些例子	7
2.2	向量空间	9
2.2.1	子空间	10
2.2.2	子空间性质	10
2.3	内积空间	12
2.3.1	内积	12
2.3.2	正交	13
2.3.3	内积空间上的微积分	15
2.3.4	希尔伯特空间	15
2.4	线性变换	16
2.4.1	子空间的线性变换	17
2.4.2	可逆性	19
2.4.3	直和分解	19
2.4.4	共轭	22
2.5	基底展开	25
2.5.1	集合变换	26
2.5.2	基底	27
2.5.3	Riesz 基	28
2.5.4	Riesz 积展开	31
2.6	投影算子	34
2.6.1	正交投影算子	36
2.6.2	斜投影算子	37
2.7	变换的伪逆运算	40
2.7.1	定义和定理	40
2.7.2	矩阵	42
2.8	框架	43
2.8.1	框架的定义	43
2.8.2	框架展开	45
2.8.3	典型双重框架	46
2.9	习题	48

第3章	傅里叶分析	52
3.1	线性时不变系统	52
3.1.1	线性与时不变	53
3.1.2	冲激响应	54
3.1.3	因果性与稳定性	56
3.1.4	LTI 系统的特征函数	57
3.2	连续时间傅里叶变换	58
3.2.1	CTFT 定义	58
3.2.2	CTFT 的性质	58
3.2.3	CTFT 例子	59
3.2.4	Fubini 定理	61
3.3	离散时间系统	61
3.3.1	离散时间冲激响应	62
3.3.2	离散时间傅里叶变换	62
3.3.3	DTFT 性质	63
3.4	连续-离散表示	65
3.4.1	泊松求和公式	66
3.4.2	采样相关序列	68
3.5	习题	69
第4章	信号空间	72
4.1	结构基础	72
4.1.1	采样空间与重构空间	72
4.1.2	实际的采样定理	73
4.2	带限采样	74
4.2.1	香农-奈奎斯特定理	74
4.2.2	调制采样	75
4.2.3	混叠	77
4.2.4	正交基的理解	80
4.2.5	更通用的采样空间	83
4.3	移不变空间采样	83
4.3.1	移不变空间	84
4.3.2	样条函数	85
4.3.3	数字通信信号	87
4.3.4	多生成器	90
4.3.5	加细函数	92
4.4	Gabor 和小波展开	93
4.4.1	Gabor 空间	94
4.4.2	小波展开	96
4.5	子空间并集	100
4.5.1	信号模型	102

4.5.2	并集的分类	103
4.6	随机和平滑度先验	105
4.7	习题	108
第5章	移不变空间	112
5.1	SI 空间中的 Riesz 基	112
5.1.1	Riesz 基条件	113
5.1.2	例题	114
5.2	Riesz 基展开	117
5.2.1	双正交基	117
5.2.2	展开系数	119
5.2.3	其他的基展开	120
5.3	统一分区特性	124
5.4	SI 空间的冗余采样	126
5.4.1	冗余带限采样	127
5.4.2	样本丢失	129
5.5	多信号生成器	130
5.5.1	Riesz 条件	131
5.5.2	双正交基	132
5.6	习题	135
第6章	子空间先验采样	137
6.1	采样和重构过程	137
6.1.1	采样设置	137
6.1.2	采样过程	138
6.1.3	无约束恢复	139
6.1.4	预定义恢复核函数	139
6.1.5	设计目标函数	141
6.2	无约束重构	143
6.2.1	几何解释	143
6.2.2	等采样和先验空间	144
6.3	广义空间采样	147
6.3.1	直和条件	148
6.3.2	唯一恢复	149
6.3.3	计算斜投影算子	153
6.3.4	基展开的说明	157
6.4	唯一无约束恢复	159
6.4.1	一致性恢复	159
6.4.2	恢复误差	160
6.5	非唯一恢复	163
6.5.1	LS 恢复	163

6.5.2	极小极大恢复	164
6.6	有约束恢复	166
6.6.1	最小误差恢复	167
6.6.2	有约束 LS 恢复	170
6.6.3	有约束极小极大恢复	172
6.7	恢复算法的统一表达	173
6.8	多路采样	175
6.8.1	恢复方法	175
6.8.2	Papoulis 广义采样	176
6.9	习题	182
第7章	平滑先验采样	184
7.1	无约束恢复	184
7.1.1	平滑先验	184
7.1.2	LS 恢复	185
7.1.3	极小极大恢复	187
7.1.4	举例	188
7.1.5	多通道采样	191
7.2	有约束恢复	193
7.2.1	LS 算法	193
7.2.2	极小极大遗憾算法 (minimax-regret solution)	194
7.2.3	LS 算法与极小极大算法的比较	197
7.3	随机先验采样	200
7.3.1	混合维纳滤波器	201
7.3.2	有约束重构	203
7.4	采样方法小结	206
7.4.1	方法小结	206
7.4.2	统一观点	207
7.5	噪声下的采样	208
7.5.1	有约束恢复问题	209
7.5.2	LS 算法	210
7.5.3	正则化 LS 算法	211
7.5.4	极小极大 MSE 滤波器	211
7.5.5	维纳混合滤波器	212
7.5.6	不同类型滤波器的小结	213
7.5.7	带限插值	214
7.5.8	无约束恢复	216
7.6	习题	218
第8章	非线性采样	220
8.1	非线性采样	220

8.1.1	非线性模型	220
8.1.2	Wiener-Hammerstein 系统	221
8.2	逐点采样	222
8.2.1	带限信号	222
8.2.2	再生核函数希尔伯特空间	224
8.3	子空间保持非线性	227
8.4	等先验和采样空间	229
8.4.1	迭代恢复	230
8.4.2	线性化方法	235
8.4.3	可逆性条件	237
8.4.4	Newton 算法	238
8.4.5	算法对比	240
8.5	任意采样滤波器	242
8.5.1	恢复算法	242
8.5.2	唯一性条件	243
8.5.3	算法收敛性	246
8.5.4	举例	248
8.6	习题	250
第 9 章	重复采样	252
9.1	带限信号采样率转换	253
9.1.1	整数因子插值	253
9.1.2	整数因子抽取	255
9.1.3	比例因子速率转换	258
9.1.4	任意因子的速率转换	259
9.2	样条插值	261
9.2.1	插值公式	262
9.2.2	与带限插值的比较	264
9.3	密集网格插值	265
9.3.1	子空间先验	265
9.3.2	平滑先验	270
9.3.3	随机先验	271
9.4	基于投影的重复采样	272
9.4.1	正交投影重复采样	273
9.4.2	斜投影重复采样	278
9.5	速率转换方法小结	283
9.5.1	计算量问题	283
9.5.2	抗混叠问题	284
9.6	习题	284
第 10 章	子空间并集	287
10.1	引例	287

10.1.1	多带采样	288
10.1.2	时延估计	289
10.2	并集模型	291
10.2.1	定义和性质	291
10.2.2	并集分类	293
10.3	并集采样	296
10.3.1	唯一稳定采样	296
10.3.2	速率要求	298
10.3.3	Xampling: 压缩采样方法	299
10.4	习题	301
第 11 章	压缩感知理论基础	303
11.1	压缩感知理论概述	303
11.2	稀疏模型	304
11.2.1	范数向量空间	305
11.2.2	稀疏信号模型	306
11.2.3	低秩矩阵模型	311
11.3	感知矩阵	311
11.3.1	零空间条件	312
11.3.2	受限等距特性(RIP)	317
11.3.3	相关系数(coherence)	322
11.3.4	不确定性关系	327
11.3.5	感知矩阵结构	332
11.4	恢复算法	334
11.4.1	ℓ_1 恢复	335
11.4.2	贪心算法	338
11.4.3	组合算法	342
11.4.4	分析法与综合法比较	343
11.5	恢复保障	344
11.5.1	ℓ_1 恢复: 基于 RIP 的结论	344
11.5.2	ℓ_1 恢复: 基于相关性的结论	350
11.5.3	实例最佳保障(instance-optimal guarantees)	352
11.5.4	cross-polytope 和 phase 转换	353
11.5.5	贪心算法的保障	354
11.6	多重测量向量	356
11.6.1	信号模型	356
11.6.2	恢复算法	358
11.6.3	性能保障	363
11.6.4	无限测量向量	364
11.7	小结和扩展	367
11.8	习题	368