

 电子信息前沿技术丛书

Compressive Sensing for Wireless Networks

压缩感知理论及其 在无线网络中的应用

[美] Zhu Han Husheng Li Wotao Yin 著
戴凌龙 王昭诚 李云洲 译



清华大学出版社

CAMBRIDGE

 电子信息前沿技术丛书

Compressive Sensing for Wireless Networks

压缩感知理论及其 在无线网络中的应用

[美] Zhu Han Husheng Li Wotao Yin 著
戴凌龙 王昭诚 李云洲 译

常州大学图书馆
藏书章

清华大学出版社
北京

This is a simplified Chinese edition of the following title(s) published by Cambridge University Press:
Compressive Sensing for Wireless Networks ISBN 9781107018839
© Cambridge University Press 2013

This book is in copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

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 Tsinghua University Press 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 Tsinghua University Press.

版权登记号:图字 01-2014-7911

本书封面贴有 Cambridge 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 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

压缩感知理论及其在无线网络中的应用/(美)韩竹(Zhu Han),李虎生(Husheng Li),印卧涛(Wotao Yin)著;戴凌龙,王昭诚,李云洲译.—北京:清华大学出版社,2018

(电子信息前沿技术丛书)

书名原文:Compressive Sensing for Wireless Networks

ISBN 978-7-302-46874-5

I. ①压… II. ①韩… ②李… ③印… ④戴… ⑤王… ⑥李… III. ①数字信号处理—应用—无线网 IV. ①TN911.72 ②TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 328206 号

责任编辑:文 怡 王 芳

封面设计:台禹微

责任校对:李建庄

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

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:185mm×260mm 印 张:15

字 数:359 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:75.00 元

产品编号:057207-01

译者序

PREFACE

2006年,信息技术领域出现了一种令人瞩目的革命性理论——压缩感知(Compressive Sensing)。该理论由 D. Donoho(美国科学院院士)、E. Candes(Ridgelet 脊波变换和 Curvelet 变换创始人)及澳籍华裔科学家陶哲轩(2006年菲尔兹奖获得者)等人提出,是一种建立在泛函分析、逼近论、统计概率论、拓扑几何、优化与运筹学等基础上的全新信息获取与处理理论框架。与现代信息领域奠基性的“香农-奈奎斯特采样定理”不同,压缩感知理论可以充分利用信息在信号中的结构和内容,在远低于奈奎斯特频率的采样频率下,仍可精确地恢复原始信号,从而实现了信号采样向信息采样的突破,有助于更精确和更高效地获取、处理、存储、分析、融合海量数据。压缩感知理论促进了理论数学和工程应用的结合,一经提出,就在信息和信号处理等相关领域引起高度关注,并在短短几年时间里迅速成功应用于图像处理、医学成像、雷达、无线网络、生物传感、信道编码等诸多领域。

美国无线通信领域国际知名学者 Zhu Han、Husheng Li 和 Wotao Yin 在英国剑桥大学出版社出版的 *Compressive Sensing for Wireless Networks* 一书,是世界上第一本关于如何将压缩感知这一革命性理论应用于无线网络的专著。该书从统一的框架出发,从无线网络的角度全面阐述了如何将最新的压缩感知理论有效地与信道估计、超宽带系统、无线定位、多址接入、认知无线电等典型的无线网络相结合,从而更高效和准确地解决无线网络中面临的各种问题。本书将有助于不同水平的读者在了解压缩感知理论的数学背景的基础上,建立起对压缩感知理论的深入认识和理解,培养读者利用压缩感知理论更有效地解决无线网络中各种问题的能力。

该书中译本由清华大学出版社出版,是清华大学研究生课程《高等通信信号处理》的重要参考书之一。参与翻译工作的还有清华大学电子工程系研究生高镇、竺旭东、申文倩、马瑞丰、丁文伯、高昕宇、王碧钗、谢天、胡辰、谭竞搏,在此深表谢意!

由于时间仓促,加上译者水平有限,文中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

戴凌龙 王昭诚 李云洲

2017年12月于清华园

作者简介

Zhu Han(韩竹),美国德克萨斯州休斯敦大学电气与计算机工程系、计算机科学系教授,IEEE Fellow,IEEE 通信协会杰出讲师。1997年在清华大学电子工程系获得学士学位,1999年和2003年在美国马里兰大学获得硕士和博士学位。2000—2002年在马里兰州日耳曼敦捷迪讯通信(JDSU)公司担任研发工程师,2003—2006年在马里兰大学担任助理研究员,2006—2008年在爱达荷州博伊西州立大学任助理教授。研究领域包括无线资源分配与管理、无线通信与网络、博弈论、大数据分析、安全、智能电网等。2010年获美国国家科学基金会(NSF)杰出青年奖,2011年获IEEE通信协会Fred W. Ellersick奖,2015年获EURASIP Journal on Advances in Signal Processing最佳论文奖,2016年获IEEE通信系统领域Leonard G. Abraham奖,多次在IEEE学术会议中获得最佳论文奖。

Husheng Li(李虎生),美国田纳西大学电子工程与计算机科学系副教授。先后于1998年和2000年在清华大学电子工程系获得学士和硕士学位,2005年在美国普林斯顿大学获得博士学位。2005—2007年在美国加利福尼亚州圣迭戈市高通公司任高级工程师。2007年加入田纳西大学电子工程与计算机科学系,担任助理教授,2013年晋升为副教授。研究领域主要包括统计信号处理、无线通信、网络、智能电网、博弈论等。2005年获EURASIP Journal of Wireless Communications and Networks最佳论文奖,2010年获IEEE全球通信会议(GLOBECOM)最佳演示奖,2011年获IEEE国际通信大会(ICC)最佳论文奖,2012年获IEEE智能电网会议最佳论文奖。

Wotao Yin(印卧涛),美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)数学系教授。2001年在南京大学数学与应用数学系获得学士学位,2003年和2006年在哥伦比亚大学工业工程与运筹学系获得运筹学硕士和博士学位。2004—2006年在普林斯顿的西门子研究所担任实习研究员。博士毕业后,分别于2006—2012年和2012—2013年在美国莱斯大学计算与应用数学系担任助理教授和副教授,2013年至今在美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)数学系担任教授。研究领域包括大规模并行计算、优化理论、稀疏优化的理论、算法与应用。2008年获得美国国家科学基金会(NSF)杰出青年奖,2009年获得斯隆研究奖(Alfred P. Sloan Fellow),2016年获第七届世界华人数学家大会晨兴应用数学金奖。

译者简介

戴凌龙,重庆人,2011年博士毕业于清华大学,现为清华大学电子工程系副教授、博士生导师。研究方向为宽带无线传输理论与技术。目前担任国际期刊 IEEE TCOM/TVT/CL 编委、IEEE JSAC/JSTSP/WCOM 客座编委。已出版英文著作 1 种,以第一或通讯作者发表 IEEE 期刊论文 60 余篇,获国家发明专利授权 15 项。先后于 2013 年、2014 年、2017 年 3 次获通信领域顶级国际会议 IEEE ICC 最佳论文奖,并获 2011 年清华大学优秀博士毕业生、2013 年全国优秀博士学位论文提名奖、2015 年 IEEE Transactions on Broadcasting 年度唯一最佳论文奖、2016 年中国通信学会科学技术二等奖(排名 1)、2017 年 IEEE 通信学会亚太地区杰出青年学者奖、2017 年国家优秀青年科学基金。

王昭诚,江西泰和人,教授,1991 年博士毕业于清华大学。研究领域涉及宽带无线通信、毫米波通信、可见光通信和数字电视。作为负责人承担科技部“973 计划”“863 计划”和自然科学基金等资助项目;获授权欧美发明专利 34 项(其中 23 项作为第一发明人),授权中国发明专利 30 项;发表 SCI 收录论文 130 篇;出版英文专著两本,入选 IEEE 数字和移动通信系列丛书,由 Wiley-IEEE Press 发行。研究成果获国家科学技术进步奖一等奖 1 项、省部级或学会协会奖 4 项、IEEE Transactions on Broadcasting 年度唯一最佳论文奖 1 项、国际会议最佳论文奖 3 项。

李云洲,2004 年 7 月毕业于清华大学,获得通信与信息系统工学博士。2011 年晋升为清华大学信息技术研究院研究员。长期从事无线通信中的理论研究、新标准技术研究及原型系统实现。自 2000 年以来,先后参加了 3G-WCDMA、LTE、IEEE 802.16m、LTE-Advanced、IEEE 802.11ac 标准技术与系统开发,工作以来作为项目负责人或主要完成人参加 10 余项国家重点项目,共发表论文 120 余篇,其中包含 40 余篇 SCI 论文,获得授权和受理专利 30 余件,向 3GPP LTE、IEEE 802.16m、IEEE 802.11 提交提案 30 余篇。近年来,入选教育部新世纪优秀人才支持计划,担任通信学会的信息通信测试技术专委会、云计算和大数据应用专委会首届委员。当前主要研究方向包括无线大数据、5G、车联网。

第 1 章 引言	1
1.1 动机和目标	1
1.2 纲要	3
第 2 章 无线网络概述	6
2.1 无线信道模型	6
2.1.1 电波传播	6
2.1.2 干扰信道	10
2.2 无线网络分类	11
2.2.1 3G 及 B3G 蜂窝通信网	12
2.2.2 WiMAX 网络	14
2.2.3 WiFi 网络	16
2.2.4 无线个域网	19
2.2.5 无线 Ad hoc 网	23
2.2.6 无线传感网	26
2.3 先进无线通信技术	29
2.3.1 OFDM 技术	29
2.3.2 多天线系统	31
2.3.3 认知无线电	32
2.3.4 调度和多址接入	34
2.3.5 无线定位	35
第 3 章 压缩感知理论框架	38
3.1 背景	38
3.2 传统采样与压缩感知	42
3.3 稀疏表示	43
3.4 CS 编码与解码	45
3.5 示例	50

第 4 章 稀疏最优化算法	53
4.1 最优化理论简介	54
4.2 稀疏最优化模型	56
4.3 经典的求解方法	57
4.4 收缩操作	59
4.5 近似点线性算法	61
4.5.1 前向后向算子分裂	61
4.5.2 示例	62
4.5.3 收敛速率	64
4.6 对偶算法	64
4.6.1 对偶化	64
4.6.2 增广拉格朗日方法	65
4.6.3 布拉格曼方法	66
4.6.4 布拉格曼迭代和去噪	68
4.6.5 线性布拉格曼方法和增广模型	69
4.6.6 处理复数据和变量	71
4.7 交替方向乘子法	72
4.7.1 框架	72
4.7.2 ADM 在稀疏优化的应用	74
4.7.3 在分布式优化中的应用	77
4.7.4 分散最优化的应用	79
4.7.5 收敛速率	79
4.8 (块)坐标最小化和梯度下降	79
4.9 同伦算法与参数二次规划	81
4.10 延拓、变换步长及线性搜索	83
4.11 用于稀疏优化的非凸方法	84
4.12 贪婪算法	86
4.12.1 贪婪追踪算法	86
4.12.2 迭代支集检测	87
4.12.3 硬门限	88
4.13 恢复低秩矩阵的算法	89
4.14 如何选择算法	89
第 5 章 基于压缩感知的模数转换器	92
5.1 传统模数转换器基础	92
5.1.1 采样定理	92
5.1.2 量化	94
5.1.3 实际实现	95

5.2	随机解调 ADC	97
5.2.1	信号模型	97
5.2.2	结构	98
5.3	宽带调制转换器 ADC	99
5.3.1	结构	99
5.3.2	与随机解调器的对比	100
5.4	Xampling	101
5.4.1	统一子空间	101
5.4.2	结构	101
5.4.3	X-ADC 及硬件实现	102
5.4.4	X-DSP 及子空间算法	103
5.5	其他结构	105
5.5.1	随机采样	105
5.5.2	随机滤波	105
5.5.3	随机延迟线	106
5.5.4	其他各类相关文献	106
5.6	小结	108
第 6 章	压缩感知信道估计	109
6.1	引言和动机	109
6.2	多径信道估计	110
6.2.1	信道模型和基于训练的算法	110
6.2.2	压缩感知信道估计	111
6.3	OFDM 信道估计	113
6.3.1	系统模型	114
6.3.2	压缩感知 OFDM 信道估计器	115
6.3.3	数值算法	117
6.3.4	数值仿真	119
6.4	水声信道估计	123
6.4.1	信道模型	123
6.4.2	压缩感知算法	124
6.5	随机域估计	125
6.5.1	随机域模型	126
6.5.2	矩阵完成算法	128
6.5.3	仿真结果	130
6.6	其他信道估计方法	132
6.6.1	盲信道估计	132
6.6.2	自适应算法	133
6.6.3	组稀疏方法	133

6.7 小结	133
第7章 超宽带系统	134
7.1 UWB 系统简介	134
7.1.1 UWB 发展历程及应用	134
7.1.2 UWB 特点	135
7.1.3 UWB 的数学模型	135
7.2 UWB 信号的压缩	136
7.2.1 发射端压缩	136
7.2.2 接收端压缩	137
7.3 UWB 信号的重构	139
7.3.1 块重构	140
7.3.2 Bayesian 重构	142
7.3.3 与计算有关的问题	144
7.4 UWB 通信中的直接解调	146
7.4.1 收发机结构	146
7.4.2 解调	147
7.5 小结	148
第8章 定位	149
8.1 定位简介	149
8.2 压缩感知理论的直接应用	150
8.2.1 通用原理	150
8.2.2 WLAN 中的定位	151
8.2.3 认知无线电中的定位	152
8.2.4 动态压缩感知	156
8.3 压缩感知理论的非直接应用	157
8.3.1 UWB 定位系统	157
8.3.2 空时压缩感知	159
8.3.3 联合压缩感知和 TDOA	161
8.4 小结	163
第9章 多址接入	164
9.1 简介	164
9.2 多用户检测简介	165
9.2.1 CDMA 系统模型	165
9.2.2 多用户检测与压缩感知的比较	166
9.2.3 多用户检测的各种算法	166
9.2.4 最优多用户检测器	166

9.3 蜂窝系统中的多址接入	169
9.3.1 上行	169
9.3.2 下行	173
9.4 传感器网络中的多址接入	174
9.4.1 单跳	174
9.4.2 多跳	175
9.5 小结	177
第 10 章 认知无线网络	178
10.1 简介	178
10.2 文献综述	179
10.3 基于压缩感知的协作频谱感知	180
10.3.1 系统模型	180
10.3.2 CSS 矩阵完成算法	181
10.3.3 CSS 联合稀疏重构算法	183
10.3.4 讨论	186
10.3.5 仿真结果	186
10.4 动态方法	193
10.4.1 系统模型	193
10.4.2 动态重构算法	194
10.4.3 仿真结果	196
10.5 与定位的结合	199
10.5.1 系统模型	199
10.5.2 频谱感知和定位的联合算法	200
10.5.3 仿真结果	202
10.6 小结	204
参考文献	205

引 言

采样不仅是一个具有有趣历史的优美的研究课题,而且在信号处理、通信及其应用的核心理论和技术中具有很高的实用价值和影响。传统的对信号或图像进行采样的方法必须遵循被广泛接受并使用的经典 Shannon-Nyquist 采样定理:采样速率必须至少是信号带宽的两倍(这就是所谓的 Nyquist 速率)。1928 年,Harry Nyquist 在其奠基性论文 *Certain topics in telegraph transmission theory* 中提出了采样定理^[1],1949 年,Claude E. Shannon 在其经典论文 *Communication in the presence of noise* 中对其进行了证明^[2]。然而,随着更高分辨率和更多形态等需求的日益增加,传统的无线信号处理硬件和软件正面临着重大的挑战,特别是对于无线通信而言。

压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论是一种涉及信号处理、统计、优化等跨学科领域,并包括无线通信在内的诸多应用领域的新兴理论和技术^[3]。该理论利用信号具有的稀疏性或者在某些变换域上是可压缩的这一事实,可以以远低于 Nyquist 率的采样速率从少量的非相干观测值中重构原始信号。越来越多的实验证据表明,无线通信应用中的多种信号是稀疏的,压缩感知理论已成为下一代无线网络设计的一个重要组成部分。

本书的目的是制定一个统一的视角,有效地将 CS 的想法在各种无线网络场景中采用。本书涵盖了信号处理、优化、信息论、通信、网络等领域中的诸多问题,具有显著的跨学科特征。本书的主要目标是让工程师和研究人员理解压缩感知理论和工具的基本原理,并应用于无线网络和其他领域。此外,本书另一个重要目标是回顾压缩感知理论中最近的最先进的技术,并为工业界的工程师提供无线通信领域上的新视角。

1.1 动机和目标

压缩感知是一种通过使用比 Nyquist 采样方法少得多的观测值对稀疏信号进行编码的全新信号处理模式。由于它有可能彻底改变许多传感方式,压缩感知理论受到科研人员和

工程师的密切关注。例如,在一个认知无线电系统中,为了提高频谱的利用率,首先需要将已占用的频谱和未占用的频谱分离出来,这就是频谱感知的问题,而解决该问题就可以利用压缩感知技术。然而,与许多伟大的技术类似,压缩感知的理论突破与其实际应用,尤其是无线网络中的应用,之间存在一定的差距。这促使我们编写这样的一本书,通过同时陈述相关的理论、模型、算法和应用,来缩小这个差距。本书有两个主要目标:第一,介绍压缩感知的基本概念和典型步骤;第二,说明压缩感知在实际应用中的有效性,这将有希望激发压缩感知在其他领域的未来应用。

在过去的几十年中,无线通信和网络已经出现了前所未有的增长,并且以远快于人们预测的速度迅速普及深入到人们的日常生活中。例如,蜂窝无线网络有望成为在未来数十年内主要的、无处不在的通信手段。蜂窝网和无线局域网(WLAN)广泛的成功促使人们开发更先进的无线系统,以在任何时间、任何地点提供语音以外的其他多种信息服务,如远程办公、视频会议、交互式媒体、实时网络游戏等。对这些无线服务的巨大的潜在需求,要求我们仔细设计未来的网络。资源有限、无线信道的恶劣影响、干扰等许多技术难题仍有待解决。

今天,随着更高分辨率和更多形态等需求的日益增加,传统的无线信号处理硬件和软件正面临着重大的挑战,因为传统的信号采集和处理所必须遵循的黄金准则——Nyquist 速率,对于许多无线应用而言已经过高。如何有效地获取、存储、融合、处理这些数据已成为一个关键性问题。解决这一问题的绝大部分现有方案是先密集采样,然后再进行压缩。然而,这种先过采样后丢弃无效信息的处理方式浪费了处理时间、功耗、和/或其他宝贵的物理资源。

自 2004 年以来,信号采集和处理领域涌现了一种全新的范式——压缩感知(Compressive Sensing, CS)。从 D. Donoho^① 发表 *Compressed sensing* 以及 E. J. Candes^②、J. Romberg、T. Tao^③ 等的一些开创性著作开始,压缩感知这一集成了数据采集、压缩、降维和优化的全新理论,已经引起了人们极大的研究兴趣。压缩感知理论包括三个关键组成部分:信号稀疏性、非相干感知和信号恢复。该理论宣称,只要待测量的信号是稀疏的(sparse),或者在某一变换(transform)或字典(dictionary)下变得稀疏,则该信号中的信息可被编码到一个小数量的非相干观测值中,且原始信号可通过易于处理计算的方式进行精确恢复。

压缩感知是一种在工程领域具有大量潜在应用价值的全新理论工具,目前还没有专门为工程师出版的关于该理论的专著。然而,压缩感知理论在无线通信的应用是非常重要的,并且有可能彻底改变某些传统的设计理念。这促成了本书出版最重要的动机:为工程师武装压缩感知理论的基本知识,并展示该理论在无线网络领域的强大潜力。理解文献中大部分的压缩感知理论需要有较好的数学背景,但本书是以工程师的标准撰写的。因此,本书的大部分内容适合那些希望开阔视野的读者,对在应用领域从事与采样问题相关工作的工程师和研究人员也是非常有用的。

感谢 Richard Baraniuk、Stephen Boyd、Rick Chartrand、Ekram Hossain、Kevin Kelly、

① 译者注: D. Donoho 为美国科学院院士。

② 译者注: E. J. Candes 为 Ridgelet、Curvelet 创始人。

③ 译者注: T. Tao (陶哲轩)为 2006 年菲尔兹奖获得者,2008 年被评为世界上最聪明的科学家。

Yingying Li、Lanchao Liu、Jia Meng、Lijun Qian、Stanley Osher、Zaiwen Wen、Zhiqiang Wu、Ming Yan 和 Yin Zhang 等博士的支持和鼓励。同时,也感谢 Lanchao Liu、Nam Nguyen、Ming Yan 和 Hui Zhang 的帮助,以及 Ray Hardesty 先生的文本编辑工作。最后,还要感谢美国国家科学基金会项目(ECCS-1028782)、ARL、ARO 基金项目(W911NF-09-1-0383)和 NSF 基金项目(DMS-0748839)的支持。

1.2 纲要

为了实现上述目标,本书首先(第2章)对无线网络的基本知识进行了介绍。本书主要分为两个部分:第一部分(第3~5章)讨论压缩感知的基本理论框架。在讨论不同的无线网络中如何利用压缩感知理论之前,我们必须研究设计方法的选择这一至关重要的问题。这部分给出了应用于设计、分析和优化无线网络的多种不同CS技术,介绍了CS的基本概念、定理和应用,同时讨论了理论分析和数值算法,并给出了几个实例。最后,这部分讨论了当前最先进的基于CS的模数转换器(Analog-to-Digital Converters, ADC)。第二部分(第6~10章)通过一些现有的实现方法讨论压缩感知在无线网络中的应用。为了在无线通信中有效利用压缩感知,本部分详细讨论了基于CS的多种实际应用。虽然CS可用于更多的领域并解决更多的问题,由于时间和精力有限,我们主要探讨了本书所涵盖的无线网络中的某些应用,但希望这能激励读者在未来的研究中发掘更多的应用。本部分也描述了设计一个合适的CS模型和问题建模的过程,以帮助有兴趣的工程师在他们的研究中使用压缩感知这一新理论和技术。本书其余章节的概要如下。

第2章:无线网络概述

本章对蜂窝无线、WLAN、WMAN、WPAN、WRAN 等不同的无线网络技术和相关的标准进行了综述,讨论的范围包括无线网络的基本组成部分、功能和潜在应用。进一步,本章也讨论了合作通信(Cooperative Communications)、网络编码(Network Coding)、认知无线电(Cognitive Radio)等先进的无线技术,并研究了Ad Hoc网络、无线传感器网络(Sensor Networks)、网状网络(Mesh Networks)和车载网络(Vehicular Networks)等典型的无线网络。本章还讨论了协议栈中不同层在实际实现时所面临的相关技术挑战。

第3章:压缩感知理论框架

本章综述了CS的基本概念、步骤和理论结果。CS是一种利用非相干的线性观测值恢复稀疏信号的方法。本章对CS相关的初步条件和符号进行了设置和定义,以便今后使用。本章还介绍了一个典型CS过程所涉及的基本要素。本章最后还给出了保证成功的CS编码和解码所需要的条件。

第4章:稀疏最优化算法

目前,已有多种算法可以从线性观测值中恢复稀疏信号和低秩矩阵。一般而言,这些算法可以分为基于优化的算法和基于非优化的算法这两类。本章重点强调了第一类基于优化的算法,并简要讨论了第二类基于非优化的算法。在描述相关算法时,我们重点关注总体背景和基本原理,而省略了一些详细的分析,并提到相关的文献。我们对所讨论算法的优点和缺点也进行了讨论,以帮助读者选择合适的算法来解决自己的问题。

第5章：基于压缩感知的模数转换器

宽带模拟信号已把现代模数转换系统推到了其性能极限。然而,在许多应用中,以 Nyquist 速率进行采样的效率是比较低的,因为我们感兴趣的信号在其对应的整个带宽内可能仅包含了少量的主要频率,虽然这些主要频率的位置可能是未知的。本章讨论了文献中对这一问题可能的解决办法。首先,本章研究了基于 CS 的 ADC 及其在 60GHz 毫米波通信中的应用。然后,本章描述了随机解调器(Random Demodulator),该解调器通过先把信号与高速伪噪声序列相乘,然后在整个频谱上对主要频率进行涂片的方法解调原始信号。接下来,本章研究了宽带调制转换器(Modulated Wideband Converter),它首先将模拟信号与一组周期波形相乘,然后对该结果进行低通滤波,并以比 Nyquist 频率低数个量级的低速率进行均匀采样,通过这些采样点可在某些充要条件下实现完美的信号恢复。最后,本章研究了一种模拟 CS 的设计方法——Xampling,该方法可对带限模拟信号以远低于 Nyquist 频率的采样率进行采样而不会丢失信息。

第6章：压缩感知信道估计

在通信领域,CS 主要用于稀疏信道估计及其与此相关的应用。本章基于多径信道的等效基带表示是稀疏的这一事实,重点突出了 CS 信道估计的基本概念。本章研究了采用 CS 技术的 OFDM、MIMO 等主流信道。然后,本章在一个标准的比特交织编码的 OFDM 发送机中采用了一种基于置信传播的信道估计方案,该方案可联合进行稀疏信道估计和数据解码。接下来,本章研究了如何使用 CS 和矩阵完成(Matrix Completion)的盲信道估计。最后,从压缩感知信道估计的角度研究了水声信道这一特殊的信道。

第7章：超宽带系统

超宽带(Ultra-wideband, UWB)由于其在短距离通信和定位等方面的广泛应用已被深入研究。但是, UWB 接收机的设计由于极窄的脉冲宽度而变得非常困难。同时,窄脉冲和低占空比也提供了 UWB 信号在时域上的稀疏性,这有利于应用 CS。本章首先给出了一个简单的 UWB 信号模型,然后综述了利用 CS 增强 UWB 信号接收能力的不同方法。本章还讨论了基于波形模板的方法和贝叶斯 CS 方法这两个研究实例。

第8章：定位

精确的定位(比如厘米或毫米量级的精度)在诸如机器人外科手术等许多应用中是非常有用的。一般而言,这可以通过对某对象发送出且在多个基站接收到的窄脉冲进行分析来实现。定位精度对接收脉冲的精确定时捕获提出了严峻的挑战。本章将首先讨论利用 UWB 脉冲的精确定位方法。与前一章不同的是,本章的重点是对基站接收到的相关信号进行 CS 算法处理。本章将首先介绍定位的通用模型和方法。然后,本章将介绍贝叶斯 CS 的框架,并解释利用先验分布传送相关信息的基本原理。此外,本章还将介绍如何在到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)等定位算法中融入 CS 以进一步提高定位精度的一般原理。

第9章：多址接入

无线通信中一个重要的任务是多址接入,即如何解决多用户并发信号的冲突问题。传统的研究假设所有用户都处于激活状态,然后使用多用户检测技术。然而,在许多实际系统中,比如无线传感器网络,只有小部分随机的用户会同时发送信号。本章将研究数据业务稀疏的多址接入,其任务是完成激活用户的鉴别和数据包的恢复。由于激活用户的稀疏性,本

章将把多址接入问题建模为一个 CS 问题,并给出多用户信息的重构算法。特别地,在重构算法中还将融入离散未知变量的有关特征。进一步,本章还将信道编码集成到基于 CS 的多址接入方案中。最后,本章将结合实测数据,介绍 CS 在智能电网中先进计量设施(Advanced Metering Infrastructure,AMI)中的应用。

第 10 章: 认知无线网络

在宽带认知无线电(Cognitive Radio,CR)网络中,频谱感知是实现动态频谱共享的一个关键任务。对于传感器网络而言,事件检测对于整个网络的性能是至关重要的。然而,这需要解决几个主要技术挑战: 宽带处理要求的采样率非常高、每个 CR 或传感器的功率和计算能力等资源受限、无线信道的频率选择性衰落、向数据融合中心上报信息时可能产生的故障、共存的认知无线网络或者传感器的信号泄露所造成的干扰等。本章对文献中采用的 CS 算法、联合稀疏恢复、矩阵完成等进行了综述。本章对系统的动态特性也进行了研究。然后,本章研究了基于分散共识优化算法的分布式解决方案。接着,通过利用贝叶斯 CS 框架发挥 CS 降低采样要求的优势,显著降低计算复杂度。此外,由于认知节点或传感器并不需要重构完整的信号,因为它仅对检测主用户(Primary Users,PU)是否存在感兴趣,这也可以用来降低复杂度。最后,本章介绍了联合的频谱感知和定位问题。

总之,本书侧重于教会工程师如何使用 CS,搭建工程师与 CS 理论技术之间相互连接的桥梁。另一方面,本书也有助于数学家从工程师的设计和问题解决中获得反馈。这种连接对双方都是有帮助的,且有助于填补双方差距的空白。本书的上述目标主要是通过从工程的角度阐释 CS 理论、集中阐述 CS 在无线通信中的应用实现。

无线网络概述

无线网络是指通过非有线的方式来实现多个节点相互连接的电信网。无线网络在过去几十年里经历了前所未有的增长,并预期在未来将继续迅猛发展。无缝移动性和覆盖范围可以确保随时随地的各种无线连接。在本章中,将介绍一些基本类型的无线网络,并为读者提供一些必要相关背景的最新进展。

无线网络携带信息的媒介是电磁波,例如无线电波。因此,无线信道的随机波动会严重影响无线网络的性能。在本章的 2.1 节中进一步介绍信道的相关背景知识,其中包括电波频带、不同网络场景下使用的无线信道模型及干扰信道。

现有的无线标准有很多种,这里将按照覆盖范围的大小顺序来依次描述,从蜂窝无线网络开始介绍。2.2.1 节概述第三代(3G)无线蜂窝网络标准的关键要素和技术。对于无线城域网,基于 IEEE 802.16 标准的 WiMax 标准在 2.2.2 节中讨论。无线局域网(如 WLAN、WiFi)指的是移动用户可以通过无线的方式连接到局域网络,相关背景在 2.2.3 节中介绍。无线个人区域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)指的是以个人工作空间为中心的用于无线互联设备的个人区域网。IEEE 802.15 标准指定了在蓝牙、ZigBee、超宽带中使用的关键技术,这些在 2.2.4 节中探讨。没有任何基础设施的网络(如 Ad Hoc 网络、传感器网络)分别在 2.2.5 节和 2.2.6 节中讨论。

最后,我们在 2.3 节中简要介绍多种先进的无线技术,例如 OFDM、MIMO(包括空时编码、波束成形等)、认知无线电、定位、调度和多址接入,并详细解释这些技术的应用动机、维持相应基本功能时所遇到的设计挑战以及在实现方面的最新进展。

2.1 无线信道模型

2.1.1 电波传播

不同于固定、可预测的有线信道,无线信道具有极大的随机特性,并且较难分析,因此无