



科学专著：前沿研究

稀疏信号处理在新一代无线通信中的应用

归琳 秦启波 张凌 宫博 著

上海科学技术出版社

稀疏信号处理在新一代无线通信中的应用

归　琳　秦启波　张　凌　宫　博　著

上海科学技术出版社

图书在版编目（CIP）数据

稀疏信号处理在新一代无线通信中的应用 / 归琳等著. -- 上海 : 上海科学技术出版社, 2021.11
（科学专著.前沿研究）
ISBN 978-7-5478-5226-2

Ⅰ. ①稀… Ⅱ. ①归… Ⅲ. ①无线电通信－通信系统－信号处理－研究 Ⅳ. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第037639号

本书受“上海科技专著出版资金”资助

责任编辑　张毅颖
装帧设计　戚永昌

稀疏信号处理在新一代无线通信中的应用
归　琳　秦启波　张　凌　宫　博　著

上海世纪出版(集团)有限公司
上 海 科 学 技 术 出 版 社　出版、发行
(上海市闵行区号景路159弄A座9F－10F)
邮政编码 201101　　www.sstp.cn
印刷
开本 787×1092　1/16　印张 14.5
字数 290 千字
2021 年 11 月第 1 版　2021 年 11 月第 1 次印刷
ISBN 978－7－5478－5226－2/TN・26
定价：88.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题，请向印刷厂联系调换

内 容 提 要

随着移动互联网和物联网的蓬勃发展，虚拟现实、超高清传输、自动驾驶等前沿应用场景不断涌现。为满足它们对超高速率传输、超大流量密度、千亿级海量连接等方面的需求，迫切需要新的无线通信技术作为支撑。

本书聚焦 5G 的新传输技术，在介绍稀疏信号处理理论和大规模天线、毫米波等无线传输前沿技术的基础上，创新性地提出稀疏信号处理在信道估计、空间调制、混合预编码以及传感网数据聚合等领域的应用，为 5G 和 beyond 5G 系统的海量数据处理提供解决思路。书中扩展介绍的稀疏信号在卫星网络、水声通信等领域的应用，将有助于推动稀疏信号处理在未来天地一体通信上的研究和应用。

本书可以作为通信、信号处理、电子等相关专业本科生和研究生的参考书，也可以作为从事稀疏信号处理、无线通信研究的科研工作者与工程技术人员的参考资料。

《科学专著》系列丛书序

进入21世纪以来，中国的科学技术发展进入到一个重要的跃升期。我们科学技术自主创新的源头，正是来自科学向未知领域推进的新发现，来自科学前沿探索的新成果。学术著作是研究成果的总结，它的价值也在于其原创性。

著书立说，乃是科学研究工作不可缺少的一个组成部分。著书立说，既是丰富人类知识宝库的需要，也是探索未知领域、开拓人类知识新疆界的需要。特别是在科学各门类的那些基本问题上，一部优秀的学术专著常常成为本学科或相关学科取得突破性进展的基石。

一个国家，一个地区，学术著作出版的水平是这个国家、这个地区科学研究水平的重要标志。科学研究具有系统性和长远性，继承性和连续性等特点，科学发现的取得需要好奇心和想象力，也需要有长期的、系统的研究成果的积累。因此，学术著作的出版也需要有长远的安排和持续的积累，来不得半点的虚浮，更不能急功近利。

学术著作的出版，既是为了总结、积累，更是为了交流、传播。交流传播了，总结积累的效果和作用才能发挥出来。为了在中国传播科学而于1915年创办的《科学》杂志，在其自身发展的历程中，一直也在尽力促进中国学者的学术著作的出版。

几十年来，《科学》的编者和出版者，在不同的时期先后推出过好几套中国学者的科学专著。在20世纪三四十年代，出版有《科学丛书》；自20世纪90年代以来，又陆续推出《科学专著丛书》《科学前沿丛书》《科学前沿进展》等，形成了一个以刊物名字样科学为标识的学术专著系列。自1995年起，截至2010年“十一五”结束，在科学标识下，已出版了25部专著，其中有不少佳作，受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

为了继续促进中国学者对前沿工作做有创见的系统总结，“十二五”期间，《科学》的编者和出版者决定对科学系列学术著作做新的延伸，将科学专著学术丛书扩展为三个系列品种，即《科学专著：前沿研究》《科学专著：生命科学研究》《科学专著：大科学工程》，继续为中国学者著书立说尽一份力。

随着中国科学研究向世界前列的挺进，我们相信，在科学系列的学术专著之中，一定会有更多中国学者推陈出新、标新立异的佳作问世，也一定会有传世的名著问世！

周光召

（《科学》杂志编委会主编）

2011 年 5 月

序　一

受归琳研究员之邀，为《稀疏信号处理在新一代无线通信中的应用》作序，得以先睹原稿，收益颇多。

此时正值我国 5G+ 产业发展如火如荼，面向 6G 的研究也已在学术界得以快速推进。无线通信代际演进的速度飞快，给无线通信技术的发展带来更高的期望。在追逐通信容量和可靠性的道路上，随着毫米波频段的启用、Massive MIMO 的大规模部署以及密集小区的网络规划，呈现出用更多通信资源的投入来换取容量和性能提升的趋势，通信信号处理面临巨大挑战。算法复杂度日益上升也使得网络整体能耗问题更为凸显。对传统奈奎斯特采样理论下的通信系统而言，如何高效获取并处理海量数据已成为一个关系网络能耗与性能的关键问题。

本书尝试从信号的稀疏特性角度入手，探索低奈奎斯特采样的技术途径，进行前期理论铺垫和关键技术验证，对可能的适用场景作出预判和分析，实现低采样和高效数据处理之间的微妙平衡。通过挖掘并证明无线通信系统不同环节存在稀疏性，以期摸索到一个闭环的稀疏特性链，从而为今后建立基于低奈奎斯特采样的通信系统提供新的设计思路。

区别于一般无线通信著作，本书关注应用场景，并结合作者前期的基金研究成果，就无线通信的一个个场景来展开案例阐述，深入浅出，便于读者阅读和理解。这确实是一部值得从事无线通信技术研究与开发，关心新一代无线通信系统后续发展的广大科技工作者、工程师、高校师生阅读的参考好书。



2021 年 5 月

序　二

如今出一本书容易，出一本好的书不容易，而要出一本经典之作更不容易。

历经数十个春秋寒暑，作者课题组在通信领域辛勤耕耘，积极开拓，获得了国家自然科学基金等多项资助。《稀疏信号处理在新一代无线通信中的应用》是在多年丰硕的科研成果基础上精心打磨而成的专著。

这本著作基于课题组的原创性研究成果，通过众多场景，全面论述稀疏信号处理技术在信道估计、空间调制、混合预编码、无线传感网数据融合等方面的应用，希望推动稀疏信号处理在无线通信及其他领域的进一步研究和应用，构建新一代无线通信系统。

这本著作的特点是将理论数学、数字信号处理方法和通信工程应用技术相结合，汇聚了无线通信、数字信号处理等领域的研究热点，尤其是聚焦5G及beyond 5G系统的新传输技术，并展望beyond 5G及6G时代的天地一体通信。

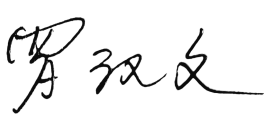
这是一本非常好的教学科研参考书，有助于教学、科研和工程技术人员充分了解稀疏信号处理及其在无线通信系统中的应用；有助于他们弄清稀疏信号处理理论与无线通信信号分析的关联和实质；有助于他们应对海量数据带来的挑战，有效解决无线通信系统中频谱效率低、通信可靠性差等难题。

最后，用一首词“少年游”（晏殊体），祝贺本书的成功出版，同时也希望读者能够喜欢这本书。

少 年 游

几经寒暑写华章，精彩满书行。十年一剑，终成书卷，文献又添香。

教学相长科研路，学子当争强。开卷有益，望君选读，不负有心郎。



2021年5月

前　言

从 1G 到 4G 时代，移动通信经历了从语音业务到高速宽带业务的飞跃式发展。随着移动互联网和物联网的蓬勃发展，5G 时代到来，虚拟现实、增强现实、超高清传输、自动驾驶等新业务不断涌现。为满足新业务对超高速率传输、超大流量密度、千亿级的海量连接等需求，新传输技术包括大规模天线、空间调制、毫米波混合预编码、非正交多址接入等相继成熟，并在学术圈和工业界受到广泛关注。

通信需求的爆炸性增长对移动网络传输数据的能力提出更高要求。为了高效获取并处理海量数据，近年来以压缩感知为代表的稀疏信号处理技术被引入无线通信领域。压缩感知是典型的稀疏信号处理技术，通过挖掘信号的稀疏特性，以远低于奈奎斯特采样率的频率进行采样，精确重构原始信号，从而有效降低系统开销。何谓信号的稀疏性，指的是信号大部分系数幅度的绝对值等于或者接近零。信号的稀疏性在新一代无线通信系统中广泛存在，例如：毫米波信道具有稀疏性；物联网中同时在线的设备数具有稀疏性；空间调制系统同时激活的天线数具有稀疏性；无线传感网的故障具有稀疏性……这一系列稀疏性的存在为稀疏信号处理在新一代无线通信系统中得以应用提供了前提条件。

本书紧跟通信学科前沿，汇聚了 5G，beyond 5G 等领域的新无线传输技术，剖析了新一代无线通信诸多场景的稀疏性来源，全面阐述稀疏信号处理在信道估计、空间调制、混合预编码、无线传感网数据融合等方面的应用，勾勒出它在新一代无线通信系统中的应用前景，并扩展介绍了其在卫星网络、水声通信等领域的应用。

国内外有关稀疏信号处理在无线通信中应用的相关书籍偏少。本书聚焦最新的无线传输技术，向广大读者详细介绍稀疏信号处理在新一代无线通信系统中的应用，以期培养他们利用稀疏信号处理技术高效解决无线通信中各种问题的能力。著者长期从事宽带无线通信、通信信号处理等领域的研究工作，本书内容基于自己多年的研究工作和国内外相关领域的最新研究成果，旨在推动新无线传输技术的有效部署，推动无线通信的快速发展，以及推动稀疏信号处理在未来天地一体通信上的研究和应用。

本书共分 10 章。第 1 章阐述著写此书的目的以及全书的框架；第 2 章

介绍无线通信系统以及大规模天线、毫米波、空间调制等先进无线通信技术；第 3 章回顾稀疏信号处理理论的发展历程，并重点介绍压缩感知工具；第 4 章介绍稀疏信号处理在超宽带通信、频谱感知、非正交多址接入等领域中的应用；第 5 章介绍稀疏信号处理在信道估计中的应用，涉及单天线、大规模天线、毫米波等系统；第 6 章介绍稀疏信号处理在空间调制中的应用；第 7 章介绍稀疏信号处理在毫米波混合预编码中的应用；第 8 章介绍稀疏信号处理在无线传感网中的应用；第 9 章介绍稀疏信号处理在水声通信以及空间信息网中的应用；第 10 章探讨稀疏信号处理在实际应用中存在的若干问题。

上海交通大学电子系研究生闻琛、张跃明、涂玉良、祁蒙、王春阳等为本书做了不少整理和校对工作，罗汉文教授和程鹏给予著者诸多建议和帮助。在此，向他们表示衷心的感谢！

希望本书能够给高等院校通信、信号处理、电子等相关专业的本科生、研究生以及稀疏信号处理、无线通信等领域的科研工作者与工程技术人员提供借鉴和帮助。

鉴于著者水平所限，书中难免有不当之处，殷切希望广大读者批评指正。

目　录

第 1 章　绪论 …… 1
§1.1　理论基础 …… 1
§1.2　应用前景 …… 2
§1.3　目标 …… 3
参考文献 …… 3

第 2 章　无线通信系统及关键技术概述 …… 5
§2.1　无线通信系统 …… 5
2.1.1　蜂窝系统 …… 5
2.1.2　超宽带系统 …… 9
2.1.3　无线传感网 …… 11
§2.2　先进无线通信关键技术 …… 13
2.2.1　Massive MIMO 技术 …… 14
2.2.2　空间调制 …… 16
2.2.3　非正交多址接入技术 …… 17
2.2.4　毫米波技术 …… 22
§2.3　小结 …… 24
参考文献 …… 24

第 3 章　稀疏信号处理理论 …… 27
§3.1　稀疏表示理论 …… 27
3.1.1　稀疏表示理论的提出 …… 28
3.1.2　信号稀疏性 …… 29
3.1.3　字典构造 …… 30
3.1.4　稀疏分解 …… 33
§3.2　压缩感知理论 …… 33
3.2.1　压缩感知概述 …… 34
3.2.2　测量矩阵设计 …… 37
3.2.3　重构算法设计 …… 39
§3.3　结构化压缩感知理论 …… 44
3.3.1　分布式压缩感知 …… 45
3.3.2　动态压缩感知 …… 46

3.3.3 张量压缩感知 …… 48
§3.4 小结 …… 49
参考文献 …… 50

第 4 章 稀疏信号处理典型应用 …… 52
§4.1 无线通信系统的稀疏性分析 …… 52
§4.2 低速率模数转换 …… 54
4.2.1 随机解调系统 …… 54
4.2.2 调制宽带转换系统 …… 56
§4.3 频谱感知 …… 57
4.3.1 频谱感知技术 …… 58
4.3.2 基于压缩感知的宽带协作频谱感知 …… 60
§4.4 超宽带系统 …… 63
4.4.1 超宽带系统的稀疏性分析 …… 63
4.4.2 基于压缩感知的超宽带系统信道估计 …… 64
4.4.3 基于压缩感知的超宽带信号检测 …… 66
§4.5 非正交多址接入 …… 68
4.5.1 非正交多址接入中的稀疏性分析 …… 68
4.5.2 上行免调度非正交多址接入系统多用户检测 …… 69
§4.6 小结 …… 72
参考文献 …… 72

第 5 章 稀疏信号处理在信道估计中的应用 …… 75
§5.1 无线信道稀疏性 …… 75
5.1.1 单表征域稀疏性 …… 75
5.1.2 多表征域稀疏性 …… 77
§5.2 传统信道估计方法 …… 78
5.2.1 最小二乘法准则 …… 79
5.2.2 最小均方误差准则 …… 80
§5.3 单天线稀疏信道估计 …… 81
5.3.1 时不变场景 …… 81
5.3.2 时变场景 …… 84
§5.4 Massive MIMO 稀疏信道估计 …… 90
5.4.1 多天线联合信道估计 …… 91
5.4.2 多天线导频优化 …… 92
§5.5 毫米波稀疏信道估计 …… 95
5.5.1 毫米波系统模型 …… 95

5.5.2 毫米波波束训练 …… 96
5.5.3 基于压缩感知的毫米波信道估计 …… 100
§5.6 小结 …… 103
参考文献 …… 103

第 6 章 稀疏信号处理在空间调制中的应用 …… 107
§6.1 空间调制技术基本原理 …… 107
6.1.1 空间调制系统模型及其稀疏特性 …… 107
6.1.2 性能分析及对比 …… 109
§6.2 空间调制信号检测算法 …… 111
6.2.1 最大似然检测算法 …… 111
6.2.2 最大比合并检测算法 …… 112
6.2.3 球形译码检测算法 …… 112
6.2.4 基于压缩感知理论的检测算法 …… 113
§6.3 广义空间调制信号检测算法 …… 114
6.3.1 广义空间调制简介 …… 114
6.3.2 基于块排序最小均方误差检测算法 …… 116
6.3.3 基于贝叶斯压缩感知检测算法 …… 117
6.3.4 性能分析 …… 120
§6.4 空间调制技术的扩展形式 …… 122
6.4.1 扩展形式简介 …… 122
6.4.2 广义空间散射调制简介 …… 124
6.4.3 广义空间散射调制检测算法 …… 126
6.4.4 广义空间散射调制性能分析 …… 128
§6.5 小结 …… 130
参考文献 …… 130

第 7 章 稀疏信号处理在混合预编码中的应用 …… 133
§7.1 传统预编码方案 …… 133
7.1.1 数字预编码 …… 133
7.1.2 模拟预编码 …… 134
§7.2 混合预编码方案 …… 134
7.2.1 经典混合预编码 …… 135
7.2.2 自适应连接混合预编码 …… 136
7.2.3 多相移器混合预编码 …… 137
§7.3 预编码设计中的稀疏性 …… 138
§7.4 点到点传输系统混合预编码设计 …… 138

7.4.1 基于波束控制的混合预编码设计 …… 140
7.4.2 基于码本的稀疏预编码设计 …… 141
§7.5 多用户系统混合预编码设计 …… 143
7.5.1 基于解耦的低复杂度设计方案 …… 145
7.5.2 基于基带预编码的粗设计与再优化方案 …… 146
7.5.3 基于压缩感知的自适应连接混合预编码设计方案 …… 149
7.5.4 基于交替优化的预编码设计方案 …… 150
7.5.5 性能分析 …… 152
§7.6 小结 …… 154
参考文献 …… 154

第 8 章 稀疏信号处理在无线传感网中的应用 …… 157
§8.1 无线传感网的常规数据聚合方案 …… 157
§8.2 无线传感网的数据稀疏性分析 …… 158
§8.3 中心式网络的数据聚合方案 …… 160
8.3.1 压缩数据采集方案 …… 160
8.3.2 其他压缩聚合方案 …… 166
§8.4 分布式网络的数据聚合方案 …… 169
8.4.1 基于压缩网络编码的分布式数据存储方案 …… 169
8.4.2 空时压缩网络编码方案 …… 174
§8.5 小结 …… 178
参考文献 …… 178

第 9 章 稀疏信号处理在其他领域的应用 …… 181
§9.1 水声通信 …… 181
9.1.1 水声信道特点 …… 181
9.1.2 水声通信系统模型 …… 183
9.1.3 水声通信稀疏信道估计 …… 185
§9.2 空间信息网络 …… 188
9.2.1 空间信息网络拥塞概述 …… 189
9.2.2 基于压缩感知的拥塞监测 …… 190
9.2.3 拥塞恢复性能分析 …… 192
§9.3 小结 …… 193
参考文献 …… 193

第 10 章 稀疏信号处理的若干问题讨论 …… 196
§10.1 稀疏度未知 …… 196

10.1.1 稀疏度估计 …… 196
10.1.2 稀疏度自适应 …… 197
§10.2 基失配 …… 198
10.2.1 问题描述 …… 198
10.2.2 解决方案 …… 200
§10.3 噪声影响 …… 202
10.3.1 背景噪声 …… 203
10.3.2 脉冲噪声 …… 204
§10.4 小结 …… 205
参考文献 …… 205

索引 …… 207

第1章
绪　论

进入21世纪以来,互联网、移动通信、云计算和智能家居等产业兴起,带来了信息量的井喷。为保证信息的完整性,现有采样系统一般需要保证采样频率为信号最高频率两倍以上。这样就导致用来传输信息的信号带宽不断增加,对高采样率线性系统的要求进而不断提升。为了高效获取并处理海量数据,学者开始关注信号的稀疏特性,利用稀疏信号处理技术减少需要采集的数据量、信号处理时间、传输时间等系统成本[1]。所谓稀疏特性,即信号在某个维度只有少量非零元,或者系数绝对值的幅值服从幂率衰减特性。对稀疏信号而言,可以通过用少数特征向量的线性组合很好地逼近原始信号。

自然界中,一部分信号自身即具备稀疏特性,如无线信道的冲激响应、超宽带信号的时域波形等。更多情况下,信号需要经过基变换后才具备稀疏特性,如语音和图像信号在经过傅里叶变换、离散余弦变换或小波变换后才具有稀疏特性。

§1.1　理论基础

在相当长的时间内,人们通过正交变换寻找信号的稀疏表示。法国数学家傅里叶提出的傅里叶变换(Fourier transform, FT)揭示了时域和频域之间的内在联系,成为处理各种平稳信号的重要工具。在傅里叶变换的基础上,N. Ahmed等人于20世纪70年代提出了离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT),将空间域的信号经过正交变换映射到系数空间,降低了变换后系数的直接相关性,能有效压缩信号[2]。然而,傅里叶变换、离散余弦变换等传统的变换方法,均需根据信号自身的特点,将信号分解在一组完备的正交基上,从而在这些变换域上表达原始信号。对给定信号而言,这类变换方式的表示形式是唯一的,一旦信号的特征与基函数不完全匹配,所获得的分解就不一定是信号的稀疏表示。

考虑到正交变化的局限性,S. G. Mallat于1993年提出稀疏表示理论,利用过完备字典对原始信号进行变换。字典的列向量称为原子,一般要求原子的个数大于信号的维度,原子的选择没有任何限制,只需要贴合被逼近信号的结构。原子数越多,越容易找到贴合信号结构的表示,但同时会带来计算量过大的问题。所以为了平衡计算复杂度和稀

疏表示性能,从信号高效稀疏表示的角度出发,一般去掉性质相似的原子,寻找最佳的原子线性组合用以表示原始信号。稀疏表示理论可以自适应地根据信号本身的特点灵活选取原子,用尽量少的原子来准确地表示原始信号[3]。

2004 年,压缩感知(compressive sensing, CS)由 D. Donoho,E. J. Candès 和 T. Tao 等人提出[4-5],稀疏信号处理再次引起学者的广泛关注。传统信号获取流程经历采样、压缩、传输。通常,信号采样后会扔掉大部分数据,那为什么不直接采集少量数据进行传输呢?压缩感知的优势正在于此,它将采样过程和压缩过程相融合,采样率由信号的结构和特征决定,而不再由原始信号的带宽决定。压缩感知作为一种新的采样理论,打破了奈奎斯特采样(Nyquist sampling)定理的局限。它通过挖掘信号的稀疏特性,以远小于奈奎斯特采样定理给定的采样率,对信号进行随机采样,获取信号的离散样本,然后通过非线性重构算法高精度重建原始信号[6]。

§1.2 应用前景

稀疏表示理论和压缩感知理论是稀疏信号处理的基本理论,在信息论、图像处理、雷达通信、地球科学、光学成像、模式识别、生物医学工程等学科受到高度关注。近几年,为了应对新一代无线通信系统的海量数据,稀疏信号处理被逐渐应用到无线通信系统中。

随着移动互联网和物联网业务的快速发展,数据爆发性增长令传输速率、系统容量、频谱效率(spectrum efficiency)等面临严峻挑战。为了满足各种极具挑战性的性能需求[7],一方面需要有先进的空口传输技术提升频谱利用率和传输性能,例如大规模多输入多输出(massive multiple-input multiple-output, Massive MIMO)技术[8]可同时提供多天线赋形增益和多用户复用增益,空间调制(spatial modulation, SM)技术[9]将额外的数据信息承载在激活天线的索引上,有效提高频谱效率;另一方面需要增加更多的频谱资源,提升传输速率和系统容量,例如将频谱资源扩展到毫米波频段[10],通过频谱感知技术感知并利用空闲的频谱资源。

面向新一代无线通信场景,稀疏性广泛存在于不同的对象中,例如无线信道、激活的设备、激活的天线等。具体来看,对无线信道而言,随着信号带宽、符号周期的增大以及大规模天线的引入,无线信道在时延—多普勒—角度域上分辨率越来越高,由于不是每个可分辨空间都有显著路径,因此信道呈现明显的稀疏性。通过挖掘无线信道的稀疏性,可以将稀疏信号处理用于估计信道状态信息(channel state information, CSI),利用少量的导频符号高精度恢复信道系数,有效降低系统导频开销,提高信道估计精度。在物联网场景中,每平方千米的范围内存在数万个用户设备,但是同一时刻仅有少量设备激活,因此激活的设备存在明显的稀疏性。利用该稀疏特性,可以将稀疏信号处理用于上行免调度系统的数据检测,提高检测精度。此时,用户不需要发送接入请求,减少了传输时延,节约了信令开销。在空间调制系统,发端根据输入比特信息选择性激活部分天