

空间信号协同处理 理论与技术

Cooperative Spatial Signal Processing
Theories and Key Technologies

白琳 李敏 李颖 于全 编 著

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国之重器出版工程
网络强国建设

学术中国·院士系列
未来网络创新技术研究系列

空间信号协同处理 理论与技术

Cooperative Spatial Signal Processing
Theories and Key Technologies

白琳 李敏 李颖 于全 编 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

空间信号协同处理理论与技术 / 白琳等编著. -- 北京: 人民邮电出版社, 2018.8
(学术中国. 院士系列. 未来网络创新技术研究系列)
国之重器出版工程
ISBN 978-7-115-48763-6

I. ①空… II. ①白… III. ①空间通信系统—信号处理 IV. ①TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第137098号

内 容 提 要

本书从空间信号协同传输以及 MIMO 系统的原理出发, 分别从信号的发送、接收两个方面介绍如何利用空间信号协同处理理论与技术来提升 MIMO 系统的信号传输性能以及频谱利用率。本书主要内容包括信号发送端的单用户、多用户以及中继波束成形技术, 讨论了理想信道状态信息、非理想信道状态信息以及同信道干扰情况下的波束成形设计; 信号接收端的串行干扰消除技术、格基规约技术、迭代检测译码技术以及信道估计检测双重迭代技术。

本书内容丰富, 适用于具有一定无线通信专业基础的高校研究生以及相关领域的科研工作者与工程师阅读参考。

◆ 编 著 白 琳 李 敏 李 颖 于 全

责任编辑 代晓丽

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 14.75

2018 年 8 月第 1 版

字数: 273 千字

2018 年 8 月河北第 1 次印刷

定价: 108.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈因	郑立新	马向晖	高云虎	金鑫
李巍	李东	高延敏	何琼	刁石京
谢少锋	闻库	韩夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘多	尹丽波	赵波
卢山	徐惠彬	赵长禄	周玉	姚郁
张炜	聂宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任

项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长

柳百成 中国工程院院士

闻雪友 中国工程院院士

徐德民 中国工程院院士

唐长红 中国工程院院士

黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授

黄先祥 中国工程院院士

黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长

董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员

焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

纵观无线通信几十年的发展历史，从第一代（1G）移动通信系统概念的提出到目前正在广泛研发的第五代（5G）移动通信系统，客观上频谱资源的紧缺一直是制约其发展的最大瓶颈。频谱资源对于无线通信系统就好比公路资源对于交通运输系统一样重要，如何合理有效地利用频谱资源修建好信息高速公路，一直以来都是摆在研究者以及工程师面前的重要挑战和关键问题。从第一代到第三代（3G）移动通信系统的核心技术可以依次体现为频分、时分以及码分多址技术，分别利用了频率、时间、码元等资源来提升无线通信系统的频谱利用率。在人们想方设法挖掘时、频、码资源来提高频谱利用率的同时，空间资源的合理利用以及相应多天线技术的发展已成为第四代（4G）移动通信系统以及未来 5G 的核心内容和关键组成部分。

基于多天线技术的多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）架构能在不增加额外带宽的情况下大幅度提升通信系统的频谱利用率。MIMO 系统最初在 20 世纪 70 年代就被用于通信系统，但是由于技术局限，直到 20 世纪 90 年代才被人们广泛关注。实验证明相对于传统无线通信技术在移动蜂窝系统中 $1 \sim 5 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 的频谱效率，MIMO 技术在室内传播环境下的频谱效率则可以达到 $20 \sim 40 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ，因此 MIMO 技术作为提高数据传输速率的重要手段受到人们越来越多的关注，目前 4G 以及未来的 5G 都将充分利用和发掘 MIMO 技术的潜力。本书从空间信号协同传输以及 MIMO 系统的原理出发，分别从信号的发送、接收两个方面介绍如何利用空间信号协同处理理论与技术来提升 MIMO 系统的信号传输性能以及频谱利用率。

本书首先在第 1 章概述了全书的目的以及各章节的组织结构。随后在第



2~5章就 MIMO 系统的信号发送以及波束成形技术展开讨论,并围绕这些问题,介绍单用户、多用户以及中继波束成形技术,并针对具有理想信道状态信息、非理想信道状态信息以及同信道干扰条件下 MIMO 系统讨论不同的波束成形方案。在第 6~9 章主要介绍如何在 MIMO 系统的接收端利用不同的信号检测译码技术进行空间信号协同处理,分别就串行干扰消除技术、格基规约技术、迭代检测译码技术以及信道估计检测双重迭代系统展开讨论,并对性能与复杂度进行了分析。

本书作者所在团队长期以来一直致力于无线通信与协同信号处理相关研究工作,具有承担国家级科研项目的丰富经验,对从理论到工程实践有较好的理解。本书所阐述的内容取自作者多年的研究成果与理论积累,其中的原理方法较好地结合了理论与工程实践,行文风格较为简洁。

在此,我特别感谢为本书的整理及校对而辛勤工作的学生们,包括李田、吴杰、万瑞敏、汤秋缘、李东泉、韩超、窦胜跃、祝丽娜等,同时,感谢国家自然科学基金项目(编号:91338106,61231011,61231013)对本书的资助。

最后,我十分感谢家人对作者工作的大力支持和理解。

作者



目 录

第 1 章 绪论	001
参考文献.....	004
第 2 章 信号发送与波束成形技术概述	007
2.1 信号发送基础	008
2.1.1 单天线系统的容量极限	008
2.1.2 突破容量极限——多天线系统	009
2.1.3 多天线技术应用模式	010
2.2 MIMO 波束成形技术	011
2.2.1 单用户波束成形技术	011
2.2.2 多用户波束成形技术	012
2.3 MIMO 中继波束成形技术	018
2.3.1 从点对点系统到中继系统	018
2.3.2 从单天线中继系统到多天线中继系统	020
2.3.3 多天线中继系统的研究热点	021
2.4 本章小结	022
参考文献.....	022



第 3 章 理想条件下 MIMO 中继系统波束成形	025
3.1 MIMO 系统波束成形方案	026
3.2 MIMO 中继系统波束成形方案和性能分析	028
3.2.1 波束成形方案	029
3.2.2 性能分析	032
3.3 仿真结果	036
3.4 本章小结	039
3.5 附录	040
3.5.1 定理 3-1 的证明	040
3.5.2 定理 3-3 的证明	044
参考文献	046
第 4 章 非理想 CSI 条件下 MIMO 中继系统波束成形	049
4.1 非理想 CSI 条件下 MIMO 系统的波束成形方案	050
4.2 非理想 CSI 条件下 MIMO 中继系统波束成形方案及性能	053
4.2.1 波束成形方案	053
4.2.2 性能分析	057
4.3 仿真结果	058
4.4 本章小结	061
4.5 附录	062
参考文献	069
第 5 章 存在 CCI 条件下 MIMO 中继系统波束成形	071
5.1 存在 CCI 条件下 MIMO 系统波束成形方案	072
5.2 存在 CCI 条件下 MIMO 中继系统波束成形方案	075
5.2.1 研究背景	075
5.2.2 波束成形方案	076
5.3 仿真结果	081
5.4 本章小结	085
5.5 附录	085
参考文献	090



第 6 章 串行干扰消除与列表检测法	095
6.1 MIMO 信号检测基础	096
6.1.1 MIMO 系统基础	096
6.1.2 经典 MIMO 信号检测	099
6.2 串行干扰消除技术	102
6.2.1 QR 分解	103
6.2.2 ZF-SIC 检测	104
6.2.3 MMSE-SIC 检测	107
6.2.4 仿真结果	108
6.3 基于串行干扰消除的列表检测算法	110
6.3.1 列表检测	111
6.3.2 排序与检测	113
6.3.3 子检测	116
6.3.4 性能分析	119
6.3.5 仿真结果	120
6.4 本章小结	122
参考文献	122
第 7 章 基于格基规约的检测技术	125
7.1 基于格基规约的天线阵信号组合概述	126
7.2 基于格基规约的 MIMO 系统检测	128
7.2.1 基于格基规约的线性检测	129
7.2.2 基于格基规约的 SIC 检测	131
7.2.3 两基底系统的格基规约方式	134
7.2.4 两基底系统的高斯格基规约	138
7.2.5 LLL 算法和 CLLL 算法	143
7.2.6 性能评价	148
7.2.7 仿真结果	156
7.3 格基法列表检测	159
7.3.1 算法描述	160
7.3.2 格基法检测	161



7.3.3	格基规约域中列表的生成	162
7.3.4	表长的影响	163
7.3.5	复杂度分析	166
7.3.6	格基法列表检测的构成	167
7.4	本章小结	176
	参考文献	176
第 8 章	高性能低复杂度迭代信号检测与译码技术	179
8.1	迭代信号检测与译码接收机结构	180
8.1.1	MIMO 系统模型	180
8.1.2	MIMO 传统检测技术	181
8.1.3	MIMO-IDD 技术	182
8.2	基于比特级滤波的检测译码技术	186
8.2.1	基于 LR 的比特级 MMSE 滤波器设计	186
8.2.2	整体扰动列表生成	187
8.3	基于随机采样的检测译码技术	189
8.3.1	系统模型	189
8.3.2	基于非 IDD 系统的随机抽样检测	189
8.3.3	基于 IDD 系统的随机抽样检测	191
8.3.4	高效抽样取整方法	191
8.4	MMSE 检测	192
8.4.1	比特级 MMSE 检测	192
8.4.2	部分比特级 MMSE 检测	193
8.5	仿真结果及性能分析	195
8.6	本章小结	197
	参考文献	197
第 9 章	低复杂度双重迭代接收机	199
9.1	信道估计技术	200
9.1.1	信道估计概述及分类	200
9.1.2	半盲信道估计技术	201
9.2	迭代信道估计技术	203



9.3 双重迭代接收机	204
9.3.1 双重迭代接收机结构设计	204
9.3.2 基于双重迭代接收机的迭代信道估计与信号检测方法	206
9.3.3 正交分离度准则	207
9.3.4 最小误码准则	208
9.4 仿真结果及性能分析	210
9.5 本章小结	213
参考文献	213
通用符号表	215
中英文对照	217
名词索引	221



第1章 绪论

随着以无线通信和移动互联网技术为载体的现代信息产业的飞速发展，人们对信息量的需求呈现井喷式增长，这也使得以电磁波为载体的无线通信技术不断取得革命性的突破。纵观无线通信的发展历史，从第一代（1G）移动通信系统概念的提出到目前正在广泛研发的第五代（5G）移动通信系统^[1-3]，客观上频谱资源的紧缺一直是制约其发展的最大瓶颈。在人们想方设法挖掘时、频、码资源来提高频谱利用率的同时，空间资源的合理利用以及相应多天线技术的发展已成为第四代（4G）移动通信系统以及5G的核心内容和关键部分。



作为多天线技术的典型应用之一，多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）技术能在不增加带宽的情况下成倍提高通信系统的频谱利用率。在 20 世纪 70 年代就有人提出将 MIMO 技术用于通信系统，但是对 MIMO 技术在无线通信中的应用产生巨大推动的工作则是由 AT&T 贝尔实验室的学者在 20 世纪 90 年代完成的^[4-8]。1996 年，贝尔实验室的 G. J. Foschini 提出了空间复用技术——分层空时码（Bell Laboratories Layered Space-Time, BLAST）^[5]，1998 年贝尔实验室研究出了 V-BLAST，实验室的结果已能达到 $20 \sim 40 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 的频谱利用率^[6]。而使用传统无线通信技术在移动蜂窝中的频谱效率仅为 $1 \sim 5 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ ，在点到点的固定微波系统中也只有 $10 \sim 12 \text{ bit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。此之后的理论分析可以进一步证明，在独立同分布的高斯信道条件下，MIMO 系统的容量将随着天线数近似呈线性增长。由于 MIMO 技术能够以较少的频谱资源传输更多的信息，它作为提高数据传输速率的重要手段受到人们越来越多的关注。目前，4G 的物理层采用了 MIMO 技术，而大规模 MIMO 技术将在 5G 中得到应用。

本书将从信号的发送、接收两个方面介绍如何利用最优的空间信号协同处理理论与技术来发掘 MIMO 系统的空间资源从而提升信号传输性能以及频谱效率。

本书分为 9 章内容。



第1章为绪论，概述了本书的目的以及本书各章的组织结构。

第2~5章为本书的前半部分，主要介绍如何在MIMO系统的发送端利用不同的波束成形技术进行空间信号协同处理，以在发送端提升信号发送质量。

第2章从多天线系统的容量出发，讨论了多天线技术3种主要的应用模式，即空间复用、空时编码和波束成形，并重点针对波束成形技术，分别研究了单用户波束成形技术和多用户波束成形技术。最后，从点对点的MIMO系统延伸到了MIMO中继系统。

第3章考虑在理想条件下（即当拥有理想信道状态信息且没有同信道干扰时），如何以提高系统的可靠性为目标，设计最优的波束成形方案并进行性能分析。由于MIMO中继系统波束成形技术是对点对点MIMO系统波束成形技术的扩展，因此，本章首先简要介绍了MIMO系统波束成形技术，为后文中关于MIMO中继系统波束成形技术的工作提供参照。

第4章考虑在非理想信道状态信息条件下，如何以提高系统的可靠性为目标，设计最优的波束成形方案并进行性能分析。首先，本章简要介绍了非理想信道状态信息条件下点对点MIMO系统波束成形技术，为本章关于MIMO中继系统波束成形技术的分析提供参照；接着，以最大化目的端信噪比为目标函数，推导出非理想信道状态信息条件下MIMO中继系统最优的波束成形方案，并分析了其性能上限；最后，通过仿真验证了设计的波束成形方案的优越性和性能分析的有效性。

第5章考虑存在同信道干扰条件下，如何以提高系统的可靠性为目标，设计波束成形方案并进行性能分析。为了进行对比分析，首先给出了存在同信道干扰条件下点对点MIMO系统最优波束成形方案；然后以最大化目的端信噪比为目标函数，推导出了存在同信道干扰条件下MIMO中继系统的最优波束成形方案；最后，通过仿真验证了设计的波束成形方案的优越性和性能分析的有效性。

第6~9章为本书的后半部分，主要介绍如何在MIMO系统的接收端利用不同的信号检测译码技术进行空间信号协同处理，以提升接收信号质量，并降低接收机复杂度。

第6章首先对接收信号检测技术进行简要介绍，并阐述信号检测技术在MIMO系统中的应用原理与方法。首先概述了MIMO系统的信号检测基本原理，并讨论了两种经典的MIMO信号检测方法，即最大似然信号检测法与线性信号检测法；为了设计一种性能接近最大似然检测法、复杂度接近线性检测法的高性能低复杂度MIMO信号检测方法，介绍了连续干扰消除技术，并分析了其性