



国防科技图书出版基金



“十二五”国家重点出版规划丛书

无线通信前沿技术丛书

李少谦 周亮 主编

该书由国家自然科学基金(61471090)、973计划项目(2013CB329001)、863计划项目(2012AA011402)、国家科技重大专项(2009ZX03003-001-01)等项目联合资助

多天线

空间调制技术

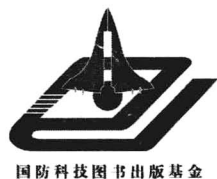
● 李少谦 肖悦 杨平◎ 著

Multiple Antenna Spatial
Modulation Techniques



国防工业出版社

National Defense Industry Press



该书由国家自然科学基金(61471090)、973 计划项目(2013CB329001)、863 计划项目(2012AA011402)、国家科技重大专项(2009ZX03003-001-01)等项目联合资助

多天线空间调制技术

Multiple Antenna Spatial Modulation Techniques

李少谦 肖悦 杨平 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

多天线空间调制技术 / 李少谦, 肖悦, 杨平著.

—北京: 国防工业出版社, 2015. 8

(无线通信前沿技术丛书)

ISBN 978-7-118-10251-2

I. ①多… II. ①李… ②肖… ③杨… III. ①无线
电通信—调制技术 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 171904 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 5½ 字数 147 千字

2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜				
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新		
秘书长	杨崇新				
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳			
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣	
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力	
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军	
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南	
	傅惠民	魏炳波			

序 言

随着宽带无线通信在军用、民用领域的飞速发展,为实现高速可靠的大数据空中传输,发展兼顾频谱效率和传输性能的新型无线技术成为无线通信物理层研究的当务之急。空间调制是一种新型的多输入多输出多天线传输技术,采用天线的激活状态作为数字调制的新手段,使发射天线的索引信息成为一种额外数据携带的方式。空间调制不仅能够简化多天线结构,降低实现成本,还能满足军用和民用无线通信系统多样化的链路配置要求,充分利用空间信道资源,实现高速可靠传输,是一类非常有前景的多天线传输技术。

空间调制从近年被提出开始,就受到了业界研究人员的高度关注。其涉及的多天线新传输理论和方法成为物理层的研究热点。然而,空间调制是近年来提出的新技术,相关理论与算法研究尚在进行之中;虽然很多研究团队已经发表了关于空间调制的科研论文,但尚未有系统介绍空间调制的论著出版。

本书作者的课题组是国际上较早开展空间调制研究的课题组之一,致力于空间调制多天线传输技术的理论攻关、技术拓展和应用推广。本书是作者近年来在空间调制技术方向研究成果的提炼和整理,部分研究成果填补了该领域的空白。

本书是国际和国内首部研究无线通信系统中的多天线空间调制技术的论著。

本书对宽带无线通信系统中的多天线空间调制技术进行了系统的阐述和研究,包括多天线空间调制技术的基本概念、应用背景、研究现状、空间调制和检测方法、性能分析、无线传输。链路中信号检测与参数设计、自适应技术、广义空间调制技术,以及空间调制在多载波和单载波无线通信系统中的应用等。

本书体系完整、层次清晰、图文并茂,并提供了示例,保证了全书

的学术性、系统性和可读性。本书的读者对象是从事无线通信技术与系统研究和开发的科研人员与工程技术人员,以及高校通信类的研究生和本科高年级学生。相信本书的出版,将为我国宽带无线通信领域新传输技术的研究及应用起到积极的作用,并进一步促进我国无线通信的持续高速发展。

李少谦

2015年3月

前 言

实现高速可靠的海量数据传输,是无线通信发展的趋势和目标。在无线通信发展的历史上,从时分复用、码分复用到多人多出、正交频分复用,每种新型技术的诞生和运用,都极大程度地推动了无线通信的发展。为实现吉比特的宽带传输目标,发展新的无线传输技术,是无线通信研究人员的首要任务。

空间调制是近年来新兴的一种多人多出传输技术,它采用天线的激活作为数字调制手段,使发射天线的索引信息成为一种额外数据携带的方式。空间调制技术不仅能够简化多天线结构,降低实现成本,还能满足军用和民用无线通信系统多样化的链路配置要求,充分利用空间信道资源,实现高速可靠传输,是一类非常有前景的物理层传输技术。作为一种宽带无线信息传输技术,多天线空间调制技术能应用于高速、高效、强抗干扰能力的无线通信系统中,在很多领域具有广泛的应用前景。

多天线空间调制技术的具体特征在于:首先,空间调制与传统技术相比,具有单射频链的特殊结构,其发射机和接收机的复杂度较为简单,从而有利于实现具有更强抗干扰能力的大规模天线系统和分布式无线传输系统;其次,空间调制可以看作是一种更高维度的空域抗干扰调制技术,它采用索引域和数字调制域两个维度的方式对输入信息进行调制,从而在军用通信的设计中,有利于对这两个维度的信息进行不等纠错能力的编码和调制,以保障最低通信和兼顾高速通信;最后,空间调制为分布式多天线无线通信系统提供了灵活多变的组网方式,又极大程度提升了分布式无线通信系统的顽存性,使安全可靠的大容量通信成为可能。

本专著是作者的课题组在分析了大量国际上空间调制相关论文、专利,掌握了国际研究水平和动态的基础上,结合课题组在空间调制

领域大量创新性探索性研究成果而形成的。部分研究成果填补了该领域的空白,具有坚实的理论基础和科研项目、发明专利、发表论文的支撑。本书是作者近年来在空间调制技术方向研究成果的提炼和整理,旨在对宽带无线通信系统中的多天线空间调制技术进行系统的阐述和研究。

本书共分为6章。第1章介绍了空间调制的基本原理,容量、性能分析,以及各种演化技术。第2章介绍了空间调制的信号检测算法。第3章介绍了存在部分反馈前提下的空间调制链路自适应技术。第4章介绍了联合空分复用、空间分集的广义空间调制技术。第5章介绍了多载波空间调制系统。最后,第6章介绍了基于单射频频的空间调制单载波系统。

本书第1、4章由李少谦执笔,第5、6章由肖悦执笔,第2、3章由杨平执笔。全书由李少谦统稿和审阅。全书是作者长期从事多天线和空间调制宽带无线通信传输技术研究的成果提炼。曾经或正在电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室学习的博士生肖丽霞、马千里,硕士生周彬、唐骞、李磊、余旖、龚赛丹、谭佳、张云娇、冯树苓、王顺顺、尹露、王宇、朱媛媛、刘晓波等对本书的理论和关键技术进行了广泛而深入的研究,作者在此向他们表示衷心的感谢。

本专著内容获得了国家自然科学基金(61471090)、973计划项目(2013CB329001)、863计划项目(2012AA011402)、国家科技重大专项(2009ZX03003-001-01)等项目资助。

专著的出版获得国防科技图书出版基金资助。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

2015年5月

目 录

第 1 章 空间调制基本原理	1
1.1 传统多天线技术	2
1.1.1 空间分集	2
1.1.2 空间复用	4
1.1.3 空分多址	6
1.1.4 波束成形	6
1.2 空间调制技术	7
1.2.1 基本原理	7
1.2.2 数学模型	9
1.2.3 性能分析	11
1.2.4 空间调制的信道容量	15
1.3 空间调制演化技术	17
1.3.1 空移键控	17
1.3.2 空时键控	18
1.3.3 广义空间调制	20
参考文献	21
第 2 章 空间调制信号检测	24
2.1 经典检测算法	24
2.1.1 最大似然检测	24
2.1.2 球形译码检测	25
2.1.3 匹配滤波检测	27
2.1.4 归一化匹配滤波检测	27
2.2 低复杂度的近最优检测	30

2.2.1	改进的球形译码	30
2.2.2	基于概率排序的匹配滤波	35
2.2.3	基于距离排序的检测	39
2.3	基于软输出的检测	45
2.3.1	传统最大似然软输出检测	45
2.3.2	改进的最大似然软输出检测	47
2.3.3	传统匹配滤波的软输出检测	48
2.3.4	改进的匹配滤波软输出算法	50
	参考文献	52
第3章	空间调制链路自适应	53
3.1	链路自适应原理	53
3.2	自适应空间调制	55
3.2.1	算法原理	56
3.2.2	高效算法	61
3.3	空间调制天线选择	76
3.3.1	算法原理	77
3.3.2	经典选择算法	77
3.3.3	空间调制天线选择	79
3.4	空间调制比特映射	86
3.4.1	空间调制映射预处理	86
3.4.2	分析及仿真	91
	参考文献	94
第4章	广义空间调制	96
4.1	广义空间调制	96
4.1.1	基本原理	96
4.1.2	数学建模	97
4.1.3	信号检测	98
4.2	分集的广义空间调制	105
4.2.1	基本原理	105

4.2.2	编码原理	107
4.2.3	信号检测	110
4.2.4	低天线维度设计	111
4.2.5	高天线维度设计	114
	参考文献	121
第5章	空间调制多载波系统	123
5.1	多载波系统	123
5.2	空间调制多载波模型	125
5.3	空间调制多载波信号检测	126
5.3.1	最大似然检测	127
5.3.2	球形译码检测	127
5.3.3	低复杂度的球形译码	129
5.3.4	链路仿真	130
5.4	分布式空间调制多载波	133
5.4.1	系统原理	133
5.4.2	干扰消除检测	135
5.4.3	低复杂度检测	137
5.4.4	链路仿真	137
	参考文献	140
第6章	单射频空间调制系统	141
6.1	空间调制单载波	141
6.2	频域检测设计	142
6.2.1	线性均衡	142
6.2.2	判决反馈均衡	145
6.2.3	近最大似然均衡	146
6.2.4	空间调制单载波链路仿真	148
6.3	时域检测设计	150
6.3.1	最大似然检测	151
6.3.2	并行干扰抵消检测	151

6.3.3	M 算法最大似然检测	153
6.3.4	复杂度分析	154
6.3.5	时域检测链路仿真	155
	参考文献	157

Contents

1	Basic Principle of Spatial Modulation	1
1.1	Traditional Multi – antenna Technology	2
1.1.1	Spatial Diversity	2
1.1.2	Spatial Multiplexing	4
1.1.3	Space Division Multiple Address	6
1.1.4	Beamforming	6
1.2	Spatial Modulation Technique	7
1.2.1	Basic Principles	7
1.2.2	Mathematical Model	9
1.2.3	Performance Analysis	11
1.2.4	Channel Capacity of Spatial Modulation	15
1.3	Evolution of Spatial Modulation Technology	17
1.3.1	Space – shift Keying	17
1.3.2	Space – time Keying	18
1.3.3	Generalized Spatial Modulation	20
	References	21
2	Spatial Modulation Signal Detection	24
2.1	Classical Detection Algorithm	24
2.1.1	Maximum Likelihood Detection	24
2.1.2	Sphere Decoding Detection	25
2.1.3	Matched Filter Detection	27
2.1.4	Normalized Matched Filter Detection	27
2.2	Near Optimal Detection of Low Complexity	30

2. 2. 1	Improved Sphere Decoding	30
2. 2. 2	Datched Filtering Based on Probability Soring	35
2. 2. 3	Detection Based on Distance Sorting	39
2. 3	Detection Based on Soft – output	45
2. 3. 1	Traditional Soft – output Maximum Likelihood Detection	45
2. 3. 2	Improved Soft – output Maximum Likelihood Detection	47
2. 3. 3	Traditional Soft – output Matched Filter Detection	48
2. 3. 4	Traditional Soft – output Matched Filter Detection	50
References		52
3	Adaptive Spatial Modulation Link	53
3. 1	Principle of Link Adaptation	53
3. 2	Adaptive Spatial Modulation	55
3. 2. 1	Principle of Algorithms	56
3. 2. 2	Efficient Algorithms	61
3. 3	Antenna Selection of Spatial Modulation	76
3. 3. 1	Principle of Algorithms	77
3. 3. 2	Classical Selection Algorithm	77
3. 3. 3	Antenna Selection of Spatial Modulation	79
3. 4	Bit Mapping of Spatial Modulation	86
3. 4. 1	Preprocessing for Spatial Modulation Mapping	86
3. 4. 2	Analysis and Simulation	91
References		94
4	Generalized spatial modulation	96
4. 1	Generalized spatial modulation	96
4. 1. 1	Basic principles	96

4. 1. 2	Mathematical Modeling	97
4. 1. 3	Signal Detection	98
4. 2	diversity Generalized spatial modulation	105
4. 2. 1	Basic principles	105
4. 2. 2	Coding Principles	107
4. 2. 3	Signal Detection	110
4. 2. 4	Low – dimensional antenna design	111
4. 2. 5	High – dimensional antenna design	114
	References	121
5	SM – OFDM Systems	123
5. 1	Multicarrier system	123
5. 2	Multicarrier Model of Spatial Modulation	125
5. 3	Multicarrier Signal Detection of Spatial Modulation	126
5. 3. 1	Maximum Likelihood Detection	127
5. 3. 2	Sphere Decoding Detection	127
5. 3. 3	Low – dimensional Sphere Decoding	129
5. 3. 4	Link Simulation	130
5. 4	Distributed SM – OFDM Systems	133
5. 4. 1	System Principles	133
5. 4. 2	Detection Algorithm of Carrier frequency offset compensation	135
5. 4. 3	Low – complexity Detection	137
5. 4. 4	Link Simulation	137
	References	140
6	Single RF SM System	141
6. 1	Single – carrier System of Spatial Modulation	141
6. 2	Design of frequency – domain Detection	142
6. 2. 1	Linear equalization	142
6. 2. 2	Decision Feedback Equalization	145