



高新科技译丛

天线技术系列

 Springer

寄生天线阵列 在无线MIMO系统中的应用

Parasitic Antenna Arrays for Wireless MIMO Systems

[希腊] Antonis Kalis Athanasios G. Kanatas
Constantinos B. Papadias

著

曾勇虎 符淑芹 云雷 范秋虎
戴幻尧 黄振宇

译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

寄生天线阵列 在无线 MIMO 系统中的应用

Parasitic Antenna Arrays for Wireless MIMO Systems

Antonis Kalis

[希腊] Athanasios G. Kanatas 编

Constantinos B. Papadias

曾勇虎 符淑芹 云雷 译
范秋虎 戴幻尧 黄振宇

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2016-074号

图书在版编目(CIP)数据

寄生天线阵列在无线 MIMO 系统中的应用 / (希)安东尼斯·卡利斯, (希)阿萨纳西奥·G. 坎纳塔, (希)康斯坦丁·B. 帕帕蒂斯著; 曾勇虎等译. —北京: 国防工业出版社, 2017.5

书名原文: Parasitic Antenna Arrays for Wireless MIMO Systems

ISBN 978-7-118-11388-4

I. ①寄... II. ①安... ②阿... ③康... ④曾... III. ①天线阵-应用-移动通信-通信系统-研究 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 139453 号

Translation from English language edition Parasitic Antenna Arrays for Wireless MIMO Systems by Antonis Kalis, Athanasios G. Kanatas and Constantions B. Papadias. Copyright@ Springer Science Business Media New York 2014 All Rights Reserved

※

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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 14 字数 248 千字

2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 96.00 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

谨献给：

Sylvia, Marialena, and Erina, A. K.

Dora, Nelly, and Vivia, A. G. K.

Anna, Billy, and Dimitri, C. B. P.

译者序

多输入/多输出(Multiple Input/Multiple Output, 多输入/多输出), MIMO) 无线通信传输技术能够在现有的带宽和功率条件下, 成倍的提升无线通信系统的容量及频谱效率, 极大地推动了无线通信系统的发展, 已成为移动通信的核心技术之一, 并受到了人们的广泛关注和深入研究。

然而, 为了使 MIMO 信道实现多路多流信号传输, 需要 MIMO 系统的天线阵列保证各个阵元之间的去相关性, 这要求阵列的阵元间距足够大; 同时, 系统天线阵列的每一个天线都需要通过自己的射频线路馈给信号, 增加了系统的成本和硬件复杂度。上述要求导致了 MIMO 系统在尺寸、成本和功率上受到很大的限制。

由 Antonis Kalis、Athanasios G. Kanatas 和 Constantinos B. Papadiasv 等人编写、Springer 出版社出版的《寄生天线阵列在无线 MIMO 系统中的应用》一书, 旨在通过寄生天线阵列以及多元阵列 MIMO 两大技术的结合, 将寄生天线阵列应用于 MIMO 通信中, 从而解除系统成本和硬件复杂度给 MIMO 系统带来的限制。

本书给出了一种研究 MIMO 通信问题的新思路, 即在 MIMO 通信中不再坚持天线阵列的每个天线都与射频链路建立一对一的链接关系, 而是建立射频信号与其基带信号的一对一映射, 然后可以直接利用数字信号处理器在基带信号域进行所有的智能处理。为了能够应用这种新的 MIMO 形式, 在 MIMO 链路中使用了寄生天线阵列。而已有的研究表明, 配合先进的数字模拟混合处理技术, 寄生天线阵列可以应用于 MIMO 通信中。

本书是作者们的集体智慧, 书中将各位作者的工作集合起来, 提出了无线 MIMO 通信的一个新的研究领域, 即寄生天线阵列在无线 MIMO 系统中的应用。在无线 MIMO 链路中应用寄生天线阵列, 具有两方面的显著优势: 一方面, 可以减少链路中的射频链路数量, 从而大大降低系统的硬件复杂度和费用开销; 另一方面, 寄生天线阵列利用阵元间的互耦效应来实现多波束形成, 可以大大减小阵列中各阵元之间的间距。这解除了现有 MIMO 系统的尺寸、费用以及硬件复杂度等限制, 从而为小尺寸紧凑型无线通信设备的应用奠定了基础。书中坚信, 寄生天线阵列将会变成促进 MIMO 无线通信设备小型化的关键技术方法, 并从理论层面对寄生天线阵列应用于无线 MIMO 通信中的性能进行了分析, 同时通过

试验进行了验证。

本书的作者们是寄生天线阵列在无线 MIMO 中应用领域的早期先驱者,并在该领域做了大量的工作,例如第 4 章的作者 Vlasis Barousis 和第 8 章的作者 Elpiniki Tsakalaki 的博士后工作就是在该领域开展的。书中的大量内容,如天线与信号处理相结合的概念分析、波束空间域 MIMO 架构、MIMO 信道模型等,可以为通信、天线设计以及 MIMO 通信领域的工程技术人员和科研人员提供非常有益的参考。

本书由曾勇虎、符淑芹、云雷、范秋虎联合翻译,其中前言、第 1 章以及第 2 章由曾勇虎,第 3、4 章由符淑芹翻译,第 5、6 章由云雷翻译,第 7、8 章由范秋虎翻译。全书的统稿工作由符淑芹完成,校对由戴幻尧完成。本书的翻译出版工作得到了实验室主任汪连栋研究员的大力支持,杜震、黄振宇参与了本书的翻译和校对工作,阎了了对本书的翻译工作提出了很多具有建设性的意见,在此一并表示感谢。

在翻译过程中,我们尽量忠实于原书,但对于其中明显的错误直接进行了更正。由于本书涉及的技术领域较新,译者水平有限,疏漏甚至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

CEMEE 国家重点实验室

2017 年 2 月

前 言

出版背景与目的

基于在无线发射机和接收机端使用多个天线而形成的 MIMO 系统,在过去的 15 年来一直是一个研究热点。尽管对 MIMO 的研究已经在从信道特征、时空编码体系、低反馈技术到多用户、多节点以及多天线(甚至巨型天线)配置技术等多个方面取得了巨大进步, MIMO 系统却仅在无线手持式终端和传感器节点上刚刚得到应用。这主要是由于设备所受的物理、成本和功率上的限制造成的:终端的小型化必然会使终端上的能够确保彼此去相关的天线数量减少,而天线的去相关性是使 MIMO 信道能够实现多路多流传输信号的关键特性;同时每一个天线都需要拥有自己的射频线路进行信号馈给,增加了终端的成本;而必不可少的联合基带信号处理与射频线路一起,大大增加了设备的耗电量,造成设备电量的快速消耗。

本书给出了一种研究 MIMO 通信问题的新形式,即不再坚持 MIMO 通信中每个天线都要与一条射频链路建立一对一链接关系的限制,这种 MIMO 形式有违传统的 MIMO 和阵列处理方式,但建立了射频信号与其基带信号之间一对一的映射关系,从而采用该形式可以直接利用一个数字信号处理器在基带信号域进行所有的信号处理。为了能够在通信中应用这种新的 MIMO 形式,我们利用了寄生天线阵列。寄生天线阵列是一种常用于固定模拟电视接收的老技术,但我们为其配备了先进的数字模拟混合处理技术,从而使其可以适用于 MIMO 通信。在天线阵列中,相邻天线阵元之间会产生互耦,天线阵元中的主动激励将使其相邻阵元受到感应,结果是其中一些天线阵元(所谓的无源阵元)会产生辐射,这一基本物理现象使得上述 MIMO 形式的实现成为可能。正如贯穿于全书中的观点,充分利用天线阵元间的互耦效应,可以在自由空间实现空间复用/分接技术,其性能可与传统的 MIMO 系统相比拟。尽管这些技术还处于起步阶段,并且需要一种谨慎、复杂、典型的调制样式和特定的拓扑结构,却具备绝对的优势,这些技术可以使给定尺寸的设备拥有更多的天线阵元,同时使整个天线阵列的射频链路显著减少(甚至有可能只需要一条射频链路)。

本书来源于我们团队的集体智慧,通过对寄生天线在 MIMO 通信中的应用这一领域中相关文章的收集整理,我们认为目前已有足够的理论和试验数据支撑此书的撰写。该领域不仅仅是一个较新的领域,还是一个相对较窄的领域,目前从事这方面研究的人员并不多,但我们相信,本书将为促进更多的人从事该领域的研究起到催化作用。我们坚信,如果能够给予适当的关注,寄生天线阵列将会变成促进 MIMO 无线通信设备小型化的关键技术方法,从而使通信容量在频谱带宽一定的情况下显著增大。

本书综述

本书内容分为 8 章。

第 1 章回顾了阵列天线和多天线系统在无线通信领域的使用历史,并列举了传统 MIMO 系统的主要优点。然后,重点给出了 MIMO 系统的局限性并论述了关于 MIMO 网络的重要理论信息研究成果。让读者接受这样的观点:对于在移动设施上使用寄生阵列天线,互耦是好事,而非坏事。

第 2 章回顾了天线的基本概念,给出了智能天线采用的多种信号处理技术之间的关联,并探讨了 MIMO 通信对重新认识天线设计模型和信号处理技术的需要。详细论述了出现在寄生天线阵列中的互耦效应,以及为完成 MIMO 发射这一挑战性的目标,天线设计、射频控制和 MIMO 处理是如何并行进行的。寄生天线阵列,特别是其中的电控无源阵列天线,本身具有的超强的波束形成能力,保障了 MIMO 发射的实现。

第 3 章给出了波束空间 MIMO (Beamspace - MIMO, BS - MIMO) 的概念以及 MIMO 发射的理论模型。强调了 MIMO 系统的波束空间表示法的重要意义,并详细阐述了单射频 MIMO 的架构。此外,还引入了天线自由度 (Aerial Degrees of Freedom, ADoF) 的概念,并验证了 ADoF 对电控无源阵列天线 (ESPAR) 的可用性。同时本章论述了天线的几何布局对 ADoF 的影响,并致力于通过改变无线信道条件来实现自适应/可重构的发射或接收基函数,给出了单射频 BS - MIMO 系统在信道条件已知和未知情况下的性能评估结果。

第 4 章重点关注了 MIMO 发射技术,用于解决单射频寄生天线阵列在 MIMO 系统中的应用问题,虽然本章也考虑了复值负载,但主要以寄生天线阵元的电抗负载计算为基础,然而事实表明,采用复值负载可以显著提高 ESPAR 天线的波束形成能力以及相应的频谱效率。同时本章分析了一种负载计算的随机算法,并对天线性能评估的结论进行了探讨。重点对假设为纯虚值负载的负载架构进行了研究。

前几章讨论了 MIMO 发射技术,而第 5 章阐述了如何进行 MIMO 接收,以及

在接收机端采用单射频阵元寄生天线阵列的条件下,如何实现复用增益。MIMO接收的主要原理是基于快速虚拟旋转的定向接收天线,这种天线能够在每个符号间隔周期内进行多次旋转。传统 MIMO 接收机依靠多个有源器件来获得空间复用,而通过天线旋转所实现的空间复用与此类似。相比单个接收机天线,旋转天线获得的传输容量要高得多。

第 6 章主要对用于 MIMO 发射和接收的实际寄生天线阵列进行了有效设计和建模。阐明了书中的设计方法用于 BS - MIMO 时,与其他方法相比的本质区别,这种区别主要来源于 BS - MIMO 应用的不同约束条件。此外,进一步深入探讨了天线阵列设计的具体实现问题以及主要的应用约束,包括了一些需要重点关注的问题:实际的天线阵元在手持式设备中的使用,这些阵元与简单的单极子天线和偶极子天线不同;可控阵元在需求方面的基本限制,如开关速度和热损耗;为达到期望阻抗值而采用的可重构负载架构的实现问题;用户对辐射方向图的影响等。

第 7 章给出了在 AIT 的 B - WISE 实验室进行的对前述章节中概念验证试验的结果,主要对第 6 章中描述的单射频 BS - MIMO 发射方式应用于 ESPAR 天线的构想进行了验证。试验中,2.6GHz 的原型机工作于已知的无线电环境中,ESPAR 天线为次发射机。还讨论了测量到的 ESPAR 天线对第一接收机的干扰,并提出了一种新的印刷寄生天线阵列结构,该阵列结构由一个有源阵元和四个寄生阵元组成。

最后,第 8 章主要阐述了寄生天线阵列技术的扩展应用和未来前景,进一步分析了更一般情况下的多有源多无源 (Multi - Active Multi - Passive, MAMP) 天线拓扑结构,分析了多信道条件下 MAMP 天线在可重构 MIMO 发射中的使用情况。自适应 MAMP 系统的目标是最大限度地减小 MIMO 的各态历经性和中断率范围,当负载状态变化时,能够依靠不完全信道知识使通信效率达到最优。此外,本章还给出了多用户分集系统的通信场景,描述了一种新的寄生天线辅助波束变换阵列架构,在采用多用户分集机制的蜂窝系统的下行链路中,能增强其方向选择性,仿真结果表明,相比传统的天线选择,上述增强型分集综合系统提高了多用户网络的平均吞吐量,特别是在人口稀少的用户覆盖区域和针对小尺寸的用户终端。

致 谢

感谢所有在阵列处理、MIMO 通信以及天线设计领域做出贡献的研究人员，他们的工作启发了有关寄生天线阵列在 MIMO 通信中应用的思考。特别是，本书的作者们，他们是该领域的早期先驱者，感谢他们参与本书的撰写工作。特别感谢 Philippos Tragas 先生，感谢他对本书的技术指导和在本书编辑过程中提供的帮助。同时感谢我们的博士后学生 Osama Alrabadi、Vlasis Barousis 和 Elpiniki Tsakalaki，谢谢他们在这个很大程度上未经证实的领域开展自己的博士后研究工作，我们坚信他们博士后论文的成功完成极大地帮助了本领域技术状态的发展。最后，感谢欧洲委员会 FET 项目 CROWN 对我们工作的资助，感谢 Athens Information Technology 经过下属 Broadband Wireless & Sensor Networks (B - Wise) Lab 举办了有关寄生天线阵列在 MIMO 通信中的应用的早期会议，这些会议对寄生天线阵列应用于 MIMO 通信在理论和试验方面都做出了很多努力。

目 录

第 1 章 天线阵列:传统模式和新兴方法	1
1.1 天线阵列历史回顾	1
1.1.1 辐射方向图	1
1.1.2 模拟天线阵列	2
1.1.3 数字天线阵列	3
1.1.4 MIMO 系统	4
1.1.5 混合模拟/数字阵列	5
1.2 经典 MIMO 系统	8
1.2.1 MIMO 链路	8
1.2.2 MIMO 网络	10
1.3 超越经典 MIMO 模式	14
参考文献	15
第 2 章 寄生天线阵列:天线展望	18
2.1 智能天线设计中的壁垒	18
2.2 天线基本概念	20
2.2.1 天线作为电路设备	20
2.2.2 天线作为电磁辐射器	23
2.2.3 天线阵列及互耦	25
2.3 通信系统中的天线	28
2.3.1 无线信道中的天线	28
2.3.2 MIMO 基础知识	30
2.4 互耦的祝福	32
2.5 架起两个不同领域的桥梁	35
参考文献	37
第 3 章 波束空间 MIMO 及自由度	38
3.1 引言	38
3.2 传统 MIMO 系统的波束空间域建模	40
3.3 一种新的单射频波束空间 MIMO 架构(BS - MIMO)	43

3.3.1	系统方程	43
3.3.2	发射机功能	44
3.3.3	接收机功能	45
3.4	寄生天线阵列的天线自由度	47
3.4.1	用于任意 ESPAR 平面布局的 Gram - Schmidt 方法	48
3.4.2	五元圆周 ESPAR 分析示例	49
3.5	单射频链路 BS - MIMO 系统在信道未知条件下的性能评估	54
3.5.1	设计约束与发射方向图	54
3.5.2	基于谱效率的性能评估	55
3.6	自适应基方向图计算与信道确知 BS - MIMO 系统性能评估	59
3.6.1	三维基方向图计算	59
3.6.2	二维基方向图计算	62
3.6.3	真实信道条件下的性能评估	63
3.7	讨论	66
	附录 A:式(3.25)的证明	67
	参考文献	69
第4章	发射机技术	73
4.1	引言	73
4.2	一大创举:基于心形方向图的单射频 MIMO 发射	75
4.3	波束空间域的单射频 MIMO 发射	77
4.3.1	三元线性平面寄生天线的波束空间域	77
4.3.2	基于随机算法的负载估计	80
4.4	用于单射频 MIMO 发射的 ESPAR 负载架构	85
4.4.1	基于单射频链路和寄生天线切换的空间复用	85
4.4.2	基于单射频链路和电抗辅助寄生阵元的空间复用	88
4.4.3	基于单射频链路的发射分集	95
4.5	小结	97
	附录 A:式(4.8)的证明	98
	参考文献	99
第5章	接收机技术	101
5.1	引言	101
5.2	基本概念	102
5.2.1	旋转天线	102
5.2.2	虚拟旋转天线	104
5.2.3	方向图调制	106

5.2.4	信道容量	108
5.3	频谱混叠	111
5.3.1	离散时间描述	111
5.3.2	相邻信道干扰	113
5.3.3	采样问题	114
5.4	有源天线与寄生天线之间的比较	121
5.5	小结	124
	参考文献	124
第 6 章	波束域 MIMO 寄生天线阵列的设计与实现	126
6.1	引言	126
6.2	BS - MIMO 寄生天线阵列设计与实现	127
6.2.1	概述	127
6.2.2	寄生天线阵列的高效建模方法	127
6.2.3	设计方法	129
6.2.4	可变电抗负载的硬件实现技术	131
6.2.5	可变负载的设计与测量	133
6.2.6	天线测量结果	137
6.3	更为实用的便携化天线设计	140
6.4	小结	143
	参考文献	143
第 7 章	设想的无线传输验证	145
7.1	引言	145
7.2	使用单个射频前端的 BS - MIMO	146
7.2.1	MIMO 试验台	146
7.2.2	发射机	147
7.2.3	接收机	149
7.2.4	MIMO 发射	151
7.2.5	MIMO 接收	153
7.2.6	小结	154
7.3	使用 ESPAR 天线的认知传输	154
7.3.1	系统组成	155
7.3.2	空间叠加场景 1	155
7.3.3	空间叠加场景 2	159
7.3.4	小结	160
7.4	用于 LTE 空间叠加的五元寄生天线	161

7.4.1	寄生天线阵列设计	161
7.4.2	小结	166
7.5	讨论	167
	参考文献	167
第8章	多有源多无源天线系统及应用	169
8.1	多端口网络模型	170
8.2	电抗控制自适应天线系统的 MIMO 应用	172
8.2.1	自适应 MAMP 天线系统说明	173
8.2.2	自适应负载	176
8.2.3	仿真结果	179
8.3	多用户分集系统的波束切换寄生阵列	186
8.3.1	系统模型	188
8.3.2	增强型选择合并的天线架构	189
8.3.3	增强型选择结合天线设计实例和性能评估	193
8.4	小结	200
	参考文献	201
	术语表	205

缩 略 词

DoF	Degrees of Freedom 自由度
EM	Electromagnetic 电磁
PIFA	Printed Inverted F Antenna 印制倒 F 天线
MIMO	Multiple Input - Multiple Output 多输入多输出
ULA	Uniform Linear Array 均匀线阵
UCA	Uniform Circular Array 均匀圆阵
ESPAR	Electronically Steerable Parasitic (or Passive) Array Radiators 电控寄生(无源)阵列天线
DMN	Decoupling and Matching Network 解耦和匹配网络
RF	Radio Frequency 射频
i. i. d	Independent and identically distributed 独立同分布
AoD	Angle of Departure 发射角
AoA	Angle of Arrival 到达角
PAS	Power Azimuth Spectrum 角度功率谱
SDMA	Space Division Multiple Access 空分多址
SAS	Switched Antenna System 开关天线系统
SPA	Switched Parasitic Antennas 开关寄生天线
QoS	Quality of Service 服务质量
SNR	Signal - to - Noise Ratio 信噪比
ADC	Analog to Digital Converter 模数转换器
DAC	Digital to Analog Converter 数模转换器
DSP	Digital Signal Processor 数字信号处理器
PIN	Positive - Intrinsic - Negative “正 - 本征 - 负”光电二极管
SMD	Surface Mount Device 表面贴装元器件
MEMS	Micro - Electro - Mechanical Systems 微机电系统
PCB	Printed Circuit Board 印刷电路板

BLAST	Bell Laboratories layered Space - Time 贝尔实验室分层空时
MUSIC	Multiple Signal Classifier 多重信号分类
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique 旋转不变技术信号参数估计
SPSA	Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation 同时扰动随机逼近
BPSK	Binary Phase Shift Keying 二进制相移键控
PARC	Per Antenna Rate Control 每天线速率控制
SISO	Single Input - Single Output 单输入单输出
COMP	Cooperative Multipoint 协同多点
LTE	Long - Term Evolution 长期演进
TRL	Through - Reflect - Line 直通 - 反射 - 延迟线
SAR	Specific Absorption Rate 吸收辐射率
GPS	Global Positioning System 全球定位系统
SIMO	Single Input - Multiple Output 单输入多输出

第 1 章 天线阵列:传统模式和新兴方法

1.1 天线阵列历史回顾

“天线阵列”是指多个天线按照一定的拓扑结构组成的设备,阵列中的天线能够相互协作以提高无线通信的质量或实现目标定位和测向等功能^[1-3]。

基于天线阵列的应用方式,其演变历程可大体分为三个历史时期,主要包括:

- (1) 模拟天线阵列时期(始于 20 世纪 20 年代晚期);
- (2) 数字/智能天线阵列时期(始于 20 世纪 60 年代晚期);
- (3) MIMO 阵列时期(始于 20 世纪 90 年代中期)。

本书中主要讨论天线阵列领域出现的新技术,称其为“基于数模混合处理的寄生天线阵列”,该技术可支持空间复用等应用,同时我们认为这是天线阵列发展的第四个历史时期。为了阐明这个观点,本章将简要回顾天线阵列的演变历程。

1.1.1 辐射方向图

在阐述天线阵列的不同演变阶段之前,有必要介绍一下天线辐射的基本机理。在所谓的阵列远场中,阵列的辐射方向图由下式决定

$$P(\varphi, \theta) = \sum_{k=1}^L I_k a_k(\varphi, \theta) \quad (1.1)$$

其中, I_k 为流经第 k 个天线阵元的电流; $a_k(\varphi, \theta)$ 为第 k 个天线阵元在方位角 φ 和俯仰角 θ 处的响应; L 为总的天线阵元个数。

其中阵列响应(也称为阵列因子)是阵列的自身特征,主要依赖于其阵元特

C. B. Papadias (✉)

Athens Information Technology (AIT), Broadband Wireless & Sensor Networks (B-WiSE)

Research Group, 19.5km, Markopoulo Avenue, Peania 19002, Attiki, Greece

希腊阿提卡大区派阿尼亚市马可波罗大道 19.5 公里,雅典理工学院,宽带无线及传感器网络研究中心 19002

e-mail: cpap@ait.gr