



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点出版规划项目



雷达与探测前沿技术丛书

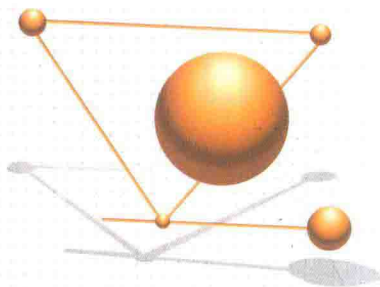
王小谟 左群声 主编

电磁矢量传感器阵列信号处理

Signal Processing for Electromagnetic Vector Sensor Arrays

万群 邹麟 陈慧 等著

- ◀ 建立几何代数共形阵列处理模型 ▶
- ◀ 剖析矢量阵列张量数据处理原理 ▶
- ◀ 揭示矢量阵列波束形成与优化机制 ▶
- ◀ 探究矢量阵列处理理论与应用推广 ▶



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目
雷达与探测前沿技术丛书

电磁矢量传感器阵列 信号处理

Signal Processing for Electromagnetic Vector
Sensor Arrays

万 群 邹 麟 陈 慧 等著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地阐述了张量和几何代数理论在电磁矢量传感器阵列信号处理技术应用中的最新成果。全书共分7章,主要内容包括基于传统长矢量的电磁矢量传感器阵列模型、张量和几何代数的基本原理与数学基础、矢量传感器阵列方向图分析与综合方法、参数估计的超复数域方法、矢量传感器阵列稳健波束形成、优化布阵与阵列校准等问题。

本书展示了作者基于超复数域理论对电磁矢量传感器阵列信号处理中方向图综合、参数估计等核心问题的全新认识,兼具理论前沿性和学术先进性。

本书可以作为高等院校信号与信息处理专业研究生的参考书,对从事张量、几何代数等超复数域理论与应用研究和阵列信号处理技术研究的广大科技工作者和工程技术人员也具有较好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电磁矢量传感器阵列信号处理 / 万群等著. —北京 :
国防工业出版社, 2017. 12
(雷达与探测前沿技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 11450 - 8

I. ①电… II. ①万… III. ①电磁传感器 - 数字信号
处理 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 328930 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 100044)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售



开本 710 × 1000 1/16 印张 11½ 字数 209 千字

2017 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 49.00 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

“雷达与探测前沿技术丛书”

编审委员会

主 任	左群声						
常务副主任	王小谟						
副 主 任	吴曼青	陆 军	包养浩	赵伯桥	许西安		
顾 问	贲 德	郝 跃	何 友	黄培康	毛二可		
(按姓氏拼音排序)	王 越	吴一戎	张光义	张履谦			
委 员	安 红	曹 晨	陈新亮	代大海	丁建江		
(按姓氏拼音排序)	高梅国	高昭昭	葛建军	何子述	洪 一		
	胡卫东	江 涛	焦李成	金 林	李 明		
	李清亮	李相如	廖桂生	林幼权	刘 华		
	刘宏伟	刘泉华	柳晓明	龙 腾	龙伟军		
	鲁耀兵	马 林	马林潘	马鹏阁	皮亦鸣		
	史 林	孙 俊	万 群	王 伟	王京涛		
	王盛利	王文钦	王晓光	卫 军	位寅生		
	吴洪江	吴晓芳	邢海鹰	徐忠新	许 稼		
	许荣庆	许小剑	杨建宇	尹志盈	郁 涛		
	张晓玲	张玉石	张召悦	张中升	赵正平		
	郑 恒	周成义	周树道	周智敏	朱秀芹		

编辑委员会

主 编	王小谟	左群声					
副 主 编	刘 劲	王京涛	王晓光				
委 员	崔 云	冯 晨	牛旭东	田秀岩	熊思华		
(按姓氏拼音排序)	张冬晔						

总 序

雷达在第二次世界大战中初露头角。战后,美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家,总结战争期间的经验,于1950年前后出版了一套雷达丛书,共28个分册,对雷达技术做了全面总结,几乎成为当时雷达设计者的必备读物。我国的雷达研制也从那时开始,经过几十年的发展,到21世纪初,我国雷达技术在很多方面已进入国际先进行列。为总结这一时期的经验,中国电子科技集团公司曾经组织老一代专家撰著了“雷达技术丛书”,全面总结他们的工作经验,给雷达领域的工程技术人员留下了宝贵的知识财富。

电子技术的迅猛发展,促使雷达在内涵、技术和形态上快速更新,应用不断扩展。为了探索雷达领域前沿技术,我们又组织编写了本套“雷达与探测前沿技术丛书”。与以往雷达相关丛书显著不同的是,本套丛书并不完全是作者成熟的经验总结,大部分是专家根据国内外技术发展,对雷达前沿技术的探索性研究。内容主要依托雷达与探测一线专业技术人员的最新研究成果、发明专利、学术论文等,对现代雷达与探测技术的国内外进展、相关理论、工程应用等进行了广泛深入研究和总结,展示近十年来我国在雷达前沿技术方面的研制成果。本套丛书的出版力求能促进从事雷达与探测相关领域研究的科研人员及相关产品的使用人员更好地进行学术探索和创新实践。

本套丛书保持了每一个分册的相对独立性和完整性,重点是对前沿技术的介绍,读者可选择感兴趣的分册阅读。丛书共41个分册,内容包括频率扩展、协同探测、新技术体制、合成孔径雷达、新雷达应用、目标与环境、数字技术、微电子技术八个方面。

(一) 雷达频率迅速扩展是近年来表现出的明显趋势,新频段的开发、带宽的剧增使雷达的应用更加广泛。本套丛书遴选的频率扩展内容的著作共4个分册:

(1) 《毫米波辐射无源探测技术》分册中没有讨论传统的毫米波雷达技术,而是着重介绍毫米波热辐射效应的无源成像技术。该书特别采用了平方千米阵的技术概念,这一概念在用干涉式阵列基线的测量结果来获得等效大

口径阵列效果的孔径综合技术方面具有重要的意义。

(2)《太赫兹雷达》分册是一本较全面介绍太赫兹雷达的著作,主要包括太赫兹雷达系统的基本组成和技术特点、太赫兹雷达目标检测以及微动目标检测技术,同时也讨论了太赫兹雷达成像处理。

(3)《机载远程红外预警雷达系统》分册考虑到红外成像和告警是红外探测的传统应用,但是能否作为全空域远距离的搜索监视雷达,尚有诸多争议。该书主要讨论用监视雷达的概念如何解决红外极窄波束、全空域、远距离和数据率的矛盾,并介绍组成红外监视雷达的工程问题。

(4)《多脉冲激光雷达》分册从实际工程应用角度出发,较详细地阐述了多脉冲激光测距及单光子测距两种体制下的系统组成、工作原理、测距方程、激光目标信号模型、回波信号处理技术及目标探测算法等关键技术,通过对两种远程激光目标探测体制的探讨,力争让读者对基于脉冲测距的激光雷达探测有直观的认识和理解。

(二)传输带宽的急剧提高,赋予雷达协同探测新的使命。协同探测会导致雷达形态和应用发生巨大的变化,是当前雷达研究的热点。本套丛书遴选出协同探测内容的著作共10个分册:

(1)《雷达组网技术》分册从雷达组网使用的效能出发,重点讨论点迹融合、资源管控、预案设计、闭环控制、参数调整、建模仿真、试验评估等雷达组网新技术的工程化,是把多传感器统一为系统的开始。

(2)《多传感器分布式信号检测理论与方法》分册主要介绍检测级、位置级(点迹和航迹)、属性级、态势评估与威胁估计五个层次中的检测级融合技术,是雷达组网的基础。该书主要给出各类分布式信号检测的最优化理论和算法,介绍考虑到网络和通信质量时的联合分布式信号检测准则和方法,并研究多输入多输出雷达目标检测的若干优化问题。

(3)《分布孔径雷达》分册所描述的雷达实现了多个单元孔径的射频相参合成,获得等效于大孔径天线雷达的探测性能。该书在概述分布孔径雷达基本原理的基础上,分别从系统设计、波形设计与处理、合成参数估计与控制、稀疏孔径布阵与测角、时频相同步等方面做了较为系统和全面的论述。

(4)《MIMO雷达》分册所介绍的雷达相对于相控阵雷达,可以同时获得波形分集和空域分集,有更加灵活的信号形式,单元间距不受 $\lambda/2$ 的限制,间距拉开后,可组成各类分布式雷达。该书比较系统地描述多输入多输出(MIMO)雷达。详细分析了波形设计、积累补偿、目标检测、参数估计等关键

技术。

(5)《MIMO 雷达参数估计技术》分册更加侧重讨论各类 MIMO 雷达的算法。从 MIMO 雷达的基本知识出发,介绍均匀线阵,非圆信号,快速估计,相干目标,分布式目标,基于高阶累计量的、基于张量的、基于阵列误差的、特殊阵列结构的 MIMO 雷达目标参数估计的算法。

(6)《机载分布式相参射频探测系统》分册介绍的是 MIMO 技术的一种工程应用。该书针对分布式孔径采用正交信号接收相参的体制,分析和描述系统处理架构及性能、运动目标回波信号建模技术,并更加深入地分析和描述实现分布式相参雷达杂波抑制、能量积累、布阵等关键技术的解决方法。

(7)《机会阵雷达》分册介绍的是分布式雷达体制在移动平台上的典型应用。机会阵雷达强调根据平台的外形,天线单元共形随遇而布。该书详尽地描述系统设计、天线波束形成方法和算法、传输同步与单元定位等关键技术,分析了美国海军提出的用于弹道导弹防御和反隐身的机会阵雷达的工程应用问题。

(8)《无源探测定位技术》分册探讨的技术是基于现代雷达对抗的需求应运而生,并在实战应用需求越来越大的背景下快速拓展。随着知识层面上认知能力的提升以及技术层面上带宽和传输能力的增加,无源侦察已从单一的测向技术逐步转向多维定位。该书通过充分利用时间、空间、频移、相移等多维度信息,寻求无源定位的解,对雷达向无源发展有着重要的参考价值。

(9)《多波束凝视雷达》分册介绍的是通过多波束技术提高雷达发射信号能量利用效率以及在空、时、频域中减小处理损失,提高雷达探测性能;同时,运用相位中心凝视方法改进杂波中目标检测概率。分册还涉及短基线雷达如何利用多阵面提高发射信号能量利用效率的方法;针对长基线,阐述了多站雷达发射信号可形成凝视探测网格,提高雷达发射信号能量的使用效率;而合成孔径雷达(SAR)系统应用多波束凝视可降低发射功率,缓解宽幅成像与高分辨之间的矛盾。

(10)《外辐射源雷达》分册重点讨论以电视和广播信号为辐射源的无源雷达。详细描述调频广播模拟电视和各种数字电视的信号,减弱直达波的对消和滤波的技术;同时介绍了利用 GPS(全球定位系统)卫星信号和 GSM/CDMA(两种手机制式)移动电话作为辐射源的探测方法。各种外辐射源雷达,要得到定位参数和形成所需的空域,必须多站协同。

(三) 以新技术为牵引,产生出新的雷达系统概念,这对雷达的发展具有里程碑的意义。本套丛书遴选了涉及新技术体制雷达内容的6个分册:

(1) 《宽带雷达》分册介绍的雷达打破了经典雷达5MHz带宽的极限,同时雷达分辨力的提高带来了高识别率和低杂波的优点。该书详尽地讨论宽带信号的设计、产生和检测方法。特别是对极窄脉冲检测进行有益的探索,为雷达的进一步发展提供了良好的开端。

(2) 《数字阵列雷达》分册介绍的雷达是用数字处理的方法来控制空间波束,并能形成同时多波束,比用移相器灵活多变,已得到了广泛应用。该书全面系统地描述数字阵列雷达的系统和各分系统的组成。对总体设计、波束校准和补偿、收/发模块、信号处理等关键技术都进行了详细描述,是一本工程性较强的著作。

(3) 《雷达数字波束形成技术》分册更加深入地描述数字阵列雷达中的波束形成技术,给出数字波束形成的理论基础、方法和实现技术。对灵巧干扰抑制、非均匀杂波抑制、波束保形等进行了深入的讨论,是一本理论性较强的专著。

(4) 《电磁矢量传感器阵列信号处理》分册讨论在同一空间位置具有三个磁场和三个电场分量的电磁矢量传感器,比传统只用一个分量的标量阵列处理能获得更多的信息,六分量可完备地表征电磁波的极化特性。该书从几何代数、张量等数学基础到阵列分析、综合、参数估计、波束形成、布阵和校正等问题进行详细讨论,为进一步应用奠定了基础。

(5) 《认知雷达导论》分册介绍的雷达可根据环境、目标和任务的感知,选择最优化的参数和处理方法。它使得雷达数据处理及反馈从粗犷到精细,彰显了新体制雷达的智能化。

(6) 《量子雷达》分册的作者团队搜集了大量的国外资料,经探索和研究,介绍从基本理论到传输、散射、检测、发射、接收的完整内容。量子雷达探测具有极高的灵敏度,更高的信息维度,在反隐身和抗干扰方面优势明显。经典和非经典的量子雷达,很可能走在各种量子技术应用的前列。

(四) 合成孔径雷达(SAR)技术发展较快,已有大量的著作。本套丛书遴选了有一定特点和前景的5个分册:

(1) 《数字阵列合成孔径雷达》分册系统阐述数字阵列技术在SAR中的应用,由于数字阵列天线具有灵活性并能在空间产生同时多波束,雷达采集的同一组回波数据,可处理出不同模式的成像结果,比常规SAR具备更多的新能力。该书着重研究基于数字阵列SAR的高分辨力宽测绘带SAR成像、

极化层析 SAR 三维成像和前视 SAR 成像技术三种新能力。

(2) 《双基合成孔径雷达》分册介绍的雷达配置灵活,具有隐蔽性好、抗干扰能力强、能够实现前视成像等优点,是 SAR 技术的热点之一。该书较为系统地描述了双基 SAR 理论方法、回波模型、成像算法、运动补偿、同步技术、试验验证等诸多方面,形成了实现技术和试验验证的研究成果。

(3) 《三维合成孔径雷达》分册描述曲线合成孔径雷达、层析合成孔径雷达和线阵合成孔径雷达等三维成像技术。重点讨论各种三维成像处理算法,包括距离多普勒、变尺度、后向投影成像、线阵成像、自聚焦成像等算法。最后介绍三维 MIMO-SAR 系统。

(4) 《雷达图像解译技术》分册介绍的技术是指从大量的 SAR 图像中提取与挖掘有用的目标信息,实现图像的自动解译。该书描述高分辨 SAR 和极化 SAR 的成像机理及相应的相干斑抑制、噪声抑制、地物分割与分类等技术,并介绍舰船、飞机等目标的 SAR 图像检测方法。

(5) 《极化合成孔径雷达图像解译技术》分册对极化合成孔径雷达图像统计建模和参数估计方法及其在目标检测中的应用进行了深入研究。该书研究内容为统计建模和参数估计及其国防科技应用三大部分。

(五) 雷达的应用也在扩展和变化,不同的领域对雷达有不同的要求,本套丛书在雷达前沿应用方面遴选了 6 个分册:

(1) 《天基预警雷达》分册介绍的雷达不同于星载 SAR,它主要观测陆海空天中的各种运动目标,获取这些目标的位置信息和运动趋势,是难度更大、更为复杂的天基雷达。该书介绍天基预警雷达的星星、星空、MIMO、卫星编队等双/多基地体制。重点描述了轨道覆盖、杂波与目标特性、系统设计、天线设计、接收处理、信号处理技术。

(2) 《战略预警雷达信号处理新技术》分册系统地阐述相关信号处理技术的理论和算法,并有仿真和试验数据验证。主要包括反导和飞机目标的分类识别、低截获波形、高速高机动和低速慢机动小目标检测、检测识别一体化、机动目标成像、反投影成像、分布式和多波段雷达的联合检测等新技术。

(3) 《空间目标监视和测量雷达技术》分册论述雷达探测空间轨道目标的特色技术。首先涉及空间编目批量目标监视探测技术,包括空间目标监视相控阵雷达技术及空间目标监视伪码连续波雷达信号处理技术。其次涉及空间目标精密测量、增程信号处理和成像技术,包括空间目标雷达精密测量技术、中高轨目标雷达探测技术、空间目标雷达成像技术等。

(4)《平流层预警探测飞艇》分册讲述在海拔约 20km 的平流层,由于相对风速低、风向稳定,从而适合大型飞艇的长期驻空,定点飞行,并进行空中预警探测,可对半径 500km 区域内的地面目标进行长时间凝视观察。该书主要介绍预警飞艇的空间环境、总体设计、空气动力、飞行载荷、载荷强度、动力推进、能源与配电以及飞艇雷达等技术,特别介绍了几种飞艇结构载荷一体化的形式。

(5)《现代气象雷达》分册分析了非均匀大气对电磁波的折射、散射、吸收和衰减等气象雷达的基础,重点介绍了常规天气雷达、多普勒天气雷达、双偏振全相参多普勒天气雷达、高空气象探测雷达、风廓线雷达等现代气象雷达,同时还介绍了气象雷达新技术、相控阵天气雷达、双/多基地天气雷达、声波雷达、中频探测雷达、毫米波测云雷达、激光测风雷达。

(6)《空管监视技术》分册阐述了一次雷达、二次雷达、应答机编码分配、S 模式、多雷达监视的原理。重点讨论广播式自动相关监视(ADS-B)数据链技术、飞机通信寻址报告系统(ACARS)、多点定位技术(MLAT)、先进场面监视设备(A-SMGCS)、空管多源协同监视技术、低空空域监视技术、空管技术。介绍空管监视技术的发展趋势和民航大国的前瞻性规划。

(六) 目标和环境特性,是雷达设计的基础。该方向的研究对雷达匹配目标和环境的智能设计有重要的参考价值。本套丛书对此专题遴选了 4 个分册:

(1)《雷达目标散射特性测量与处理新技术》分册全面介绍有关雷达散射截面(RCS)测量的各个方面,包括 RCS 的基本概念、测试场地与雷达、低散射目标支架、目标 RCS 定标、背景提取与抵消、高分辨力 RCS 诊断成像与图像理解、极化测量与校准、RCS 数据的处理等技术,对其他微波测量也具有参考价值。

(2)《雷达地海杂波测量与建模》分册首先介绍国内外海面环境的分类和特征,给出地海杂波的基本理论,然后介绍测量、定标和建库的方法。该书用较大的篇幅,重点阐述地海杂波特性与建模。杂波是雷达的重要环境,随着地形、地貌、海况、风力等条件而不同。雷达的杂波抑制,正根据实时的变化,从粗犷走向精细的匹配,该书是现代雷达设计师的重要参考文献。

(3)《雷达目标识别理论》分册是一本理论性较强的专著。以特征、规律及知识的识别认知为指引,奠定该书的知识体系。首先介绍雷达目标识别的物理与数学基础,较为详细地阐述雷达目标特征提取与分类识别、知识辅助的雷达目标识别、基于压缩感知的目标识别等技术。

(4)《雷达目标识别原理与实验技术》分册是一本工程性较强的专著。该书主要针对目标特征提取与分类识别的模式,从工程上阐述了目标识别的方法。重点讨论特征提取技术、空中目标识别技术、地面目标识别技术、舰船目标识别及弹道导弹识别技术。

(七)数字技术的发展,使雷达的设计和评估更加方便,该技术涉及雷达系统设计和应用等。本套丛书遴选了3个分册:

(1)《雷达系统建模与仿真》分册所介绍的是现代雷达设计不可缺少的工具和方法。随着雷达的复杂度增加,用数字仿真的方法来检验设计的效果,可收到事半功倍的效果。该书首先介绍最基本的随机数的产生、统计实验、抽样技术等与雷达仿真有关的基本概念和方法,然后给出雷达目标与杂波模型、雷达系统仿真模型和仿真对系统的性能评价。

(2)《雷达标校技术》分册所介绍的内容是实现雷达精度指标的基础。该书重点介绍常规标校、微光电视角度标校、球载BD/GPS(BD为北斗导航简称)标校、射电星角度标校、基于民航机的雷达精度标校、卫星标校、三角交会标校、雷达自动化标校等技术。

(3)《雷达电子战系统建模与仿真》分册以工程实践为取材背景,介绍雷达电子战系统建模的主要方法、仿真模型设计、仿真系统设计和典型仿真应用实例。该书从雷达电子战系统数学建模和仿真系统设计的实用性出发,着重论述雷达电子战系统基于信号/数据流处理的细粒度建模仿真的核心思想和技术实现途径。

(八)微电子的发展使得现代雷达的接收、发射和处理都发生了巨大的变化。本套丛书遴选出涉及微电子技术及与雷达关联最紧密的3个分册:

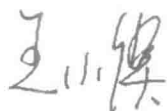
(1)《雷达信号处理芯片技术》分册主要讲述一款自主架构的数字信号处理(DSP)器件,详细介绍该款雷达信号处理器的架构、存储器、寄存器、指令系统、I/O资源以及相应的开发工具、硬件设计,给雷达设计师使用该处理器提供有益的参考。

(2)《雷达收发组件芯片技术》分册以雷达收发组件用芯片套片的形式,系统介绍发射芯片、接收芯片、幅相控制芯片、波速控制驱动器芯片、电源管理芯片的设计和测试技术及与之相关的平台技术、实验技术和应用技术。

(3)《宽禁带半导体高频及微波功率器件与电路》分册的背景是,宽禁带材料可使微波毫米波功率器件的功率密度比Si和GaAs等同类产品高10倍,可产生开关频率更高、关断电压更高的新一代电力电子器件,将对雷达产生更新换代的影响。分册首先介绍第三代半导体的应用和基本知识,然后详

细介绍两大类各种器件的原理、类别特征、进展和应用:SiC 器件有功率二极管、MOSFET、JFET、BJT、IBJT、GTO 等;GaN 器件有 HEMT、MMIC、E 模 HEMT、N 极化 HEMT、功率开关器件与微功率变换等。最后展望固态太赫兹、金刚石等新兴材料器件。

本套丛书是国内众多相关研究领域的大专院校、科研院所专家集体智慧的结晶。具体参与单位包括中国电子科技集团公司、中国航天科工集团公司、中国电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所、北京无线电测量研究所、电子科技大学、西安电子科技大学、国防科技大学、北京理工大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学等近 30 家。在此对参与编写及审校工作的各单位专家和领导的大力支持表示衷心感谢。



2017 年 9 月

阵列信号处理在雷达、声纳、通信、地质勘查、射电天文、生物医学等诸多领域已经得到了广泛的应用。空间中的电磁信号是矢量的,完备的电磁信号由三个电场分量和三个磁场分量构成。然而,现有的传统阵列配置的标量天线,只利用了其中的一维信息,即复幅度,而未能接收并处理富含更多信息的信号极化特性。因此,传统阵列在未来应用要求更高的环境中面临以下的挑战:抗干扰能力差,当干扰信号和期望信号空间到达角接近时不能从极化特征上加以区分,可能引起极化失配;不具有较高的分辨能力(利用极化状态进行联合估计),即极化多址能力。

以矢量形式存在的空间电磁波,其完备的电场和磁场信息为六维的复矢量。能够反映高于一个维度电磁波信息的传感器称为电磁矢量传感器(Electromagnetic Vector Sensor),由矢量传感器组成的阵列称为矢量传感器阵列(Vector Sensor Arrays)。利用该阵列不仅可以获得来波的方向信息,还可以甄别其极化差异。20世纪90年代至今,国内外对于矢量传感器阵列展开了大量研究,它已经成为阵列信号处理领域中的一个重要分支。

电磁矢量传感器的架构最早由 Compton 于 1981 年提出。1991 年, Nehorai 对矢量传感器进行了系统性的建模,1994 年又对其进行了完善。后来, Nehorai、Compton、Li、Wong、Zoltowski 等人围绕矢量阵列模型展开了大量研究,明确了矢量传感器阵列不仅能很好地拓展传统的 MUSIC 和 ESPRIT 等经典算法,还具有其他的一些独具优势的对应形式,进而把矢量阵列的应用引入了声音测量和地震勘探等领域。

由于矢量阵列接收的数据具有内在的高维特性,上述的方法都是沿用矩阵的思路(即用长矢量表示接收的数据)来解决的。随着信号处理向高维发展,几何代数、张量、多元数等超复数域的引入已成为新的发展趋势。它们能够更好地利用接收数据的高维结构,使得分辨性能和计算量都有所改善,并可得到一些不同于上述传统处理框架和方法的特性。

本书基于作者在张量和几何代数(第3章)、矢量传感器阵列建模(第3章和第5章)、方向图分析与综合(第4章)、参数估计(第5章)、波束形成(第6章)和阵列布阵(第7章)上的研究成果,对该领域新的发展趋势与应用进行了较为全面地展示。书中的主要内容均为本书作者近5年的最新研究成果,逾10

篇论文已经被 SCI 期刊和 EI 会议收录和发表。

本书旨在介绍矢量传感器阵列信号处理,特别是采用了新数学工具的参数估计方法。首先,介绍了极化、矢量传感器等基本概念,然后引入数学工具讨论了其对矢量阵列的处理方法。具体安排如下:

第 1 章介绍了矢量传感器阵列的特点、应用及研究现状等基本情况。第 2 章和第 3 章介绍了本书的一些基本理论。其中,第 2 章阐述了电磁波极化的基本概念、电磁矢量传感器阵列的接收模型。第 3 章介绍了两种高维数据常用的处理方法——张量和几何代数,其中基于作者研究及其拓展的几何代数共形阵列处理部分,国内的书籍中尚未发现相关的内容的介绍。第 4 章~第 7 章对参数估计、波束形成、阵列校正等问题进行了讨论。其中,第 4 章和第 5 章的几何代数方法是作者近 5 年在剑桥大学、电子科技大学研究期间的研究成果,第 5 章的张量方法和第 7 章的阵列校正部分是作者近 3 年在电子科技大学期间的研究成果。上述最新的研究成果覆盖了本书 70% 以上的内容。

本书编写,离不开高宇飞博士、谢伟博士、肖洪坤硕士、韩伟硕士、郝恩义硕士、卢铭迪硕士的积极参与和帮助,也得到了国防工业出版社张冬晔编辑多方面的协助和支持,在此向他们致以衷心的感谢。

这本专著包含作者对本领域最新科学研究状况的把握和认识,并将相关工作的新成果和新进展进行了较为充分和系统的展示,力求反映所属领域的基本理论和新近进展,做到学科先进性和工程适用性的统一。

我们希望这本专著,既能为广大科学工作者与工程技术人员的知识更新、继续学习、实际工作提供适合的和有价值的进修、自学或应用材料,也能为广大在校研究生的学习提供内容先进、论述系统的参考书。我们同时要感谢使用本书的广大科技工作者和工程人员的热情支持,敬请各位业界人士斧正!

万群于清水河畔

2017 年 3 月

第 1 章 绪论	001
1.1 电磁矢量传感器阵列的特点	001
1.2 电磁矢量传感器阵列的研究方向和应用	003
1.2.1 电磁矢量传感器阵列的研究方向	003
1.2.2 电磁矢量传感器阵列的应用	004
1.3 国内外相关研究现状	005
1.4 本书结构与安排	010
第 2 章 矢量传感器阵列与接收信号模型	011
2.1 电磁信号特性及其现有表示方法	011
2.1.1 电磁波的极化特性	011
2.1.2 电磁波的极化表征	011
2.2 电磁波极化域——空域联合表征	013
2.3 电磁矢量传感器阵列的测量与接收模型	014
2.3.1 电磁矢量传感器阵列的信号获取	015
2.3.2 电磁矢量传感器阵列的接收模型	016
第 3 章 超复数域理论基础	019
3.1 概述	019
3.2 张量代数简介	020
3.2.1 张量的基本概念	020
3.2.2 张量的代数运算	021
3.3 几何代数简介	023
3.3.1 几何代数基础	024
3.3.2 三维矢量空间几何代数及其矩阵	026
3.3.3 三维复空间几何代数及其矩阵	029
3.3.4 几何代数矩阵的右特征值分解	031
3.4 小结	032
第 4 章 矢量传感器阵列方向图分析与综合	033
4.1 概述	033

4.2	矢量传感器阵列方向图分析	033
4.2.1	传统阵列流形矢量传感器阵列的方向图	033
4.2.2	共形阵列信号模型的特殊性	034
4.3	传统的矢量阵列传感器阵列方向图分析方法	036
4.4	基于几何代数的分析方法	040
4.5	矢量传感器阵列方向图综合	052
4.5.1	基于凸优化理论的方向图赋形	052
4.5.2	交集逼近的方向图综合方法	054
4.6	最优极化方向图综合算法	062
4.6.1	问题描述	062
4.6.2	算法描述	063
4.6.3	仿真实验及性能分析	064
4.7	小结	066
第5章 矢量传感器阵列参数估计		068
5.1	概述	068
5.2	基于传统方法的估计及其性能分析	068
5.2.1	极化域-空域 MUSIC 联合谱估计	068
5.2.2	基于 ESPRIT 二维角度与极化参数估计	072
5.2.3	单矢量传感器 DOA 估计	074
5.3	基于张量代数的参数估计及其性能分析	076
5.3.1	基于 CPD 算法的矢量传感器参数估计	076
5.3.2	基于 Tucker 分解算法的矢量传感器参数估计	080
5.3.3	基于张量分解的 L 阵的二维来波方向估计	082
5.4	基于三维几何代数空间的参数估计及其性能分析	095
5.4.1	G3 框架下的麦克斯韦方程组	095
5.4.2	阵列接收信号的 G3 - MODEL	096
5.4.3	G3 - MUSIC 算法	098
5.4.4	仿真实验	101
5.4.5	一种改进的 G3 模型及其参数估计方法	102
5.5	小结	108
第6章 矢量传感器阵列稳健波束形成		109
6.1	概述	109
6.2	稳健最小方差波束形成	110
6.2.1	最小方差波束形成准则	110
6.2.2	稳健最小方差波束形成方法	115

6.2.3	仿真与分析	116
6.3	小结	120
第7章	矢量传感器阵列优化布阵与阵列校正	121
7.1	矢量传感器阵列优化布阵	121
7.1.1	概述	121
7.1.2	优化布阵实例	122
7.2	阵列误差校正	124
7.2.1	概述	124
7.2.2	传感器阵列误差校正	126
7.3	针对部分校正分布式电磁矢量传感器阵列的稳健 DOA 估计算法	132
7.3.1	问题描述	133
7.3.2	算法描述	135
7.3.3	仿真实验	138
7.4	小结	140
参考文献		141
主要符号表		155
缩略语		157