

电磁矢量传感器阵列 参数估计及应用

王桂宝 王兰美 著



科学出版社

电磁矢量传感器阵列参数估计及应用

王桂宝 王兰美 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

电磁矢量传感器阵列参数估计是阵列参数估计的一个重要分支。与传统的标量传感器阵列相比,电磁矢量传感器阵列具有较强的抗干扰能力、稳健的检测能力、较高的系统分辨能力和极化多址能力等优点。电磁矢量传感器阵列诸多方面的性能优势,使其在雷达、导航、声纳等领域应用广泛。本书主要研究理想电磁矢量传感器阵列参数估计,阵列取向误差、幅相误差和耦合误差的校正和补偿,多种稀疏布阵的相位解模糊,四元数下的多参数估计算法等内容。

本书可供通信与信息系统、信号与信息处理、电磁场与微波技术、电子对抗、水声工程等专业高年级本科生、研究生以及相关专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电磁矢量传感器阵列参数估计及应用/王桂宝,王兰美著. —北京:科学出版社, 2018.4

ISBN 978-7-03-057321-6

I. ①电… II. ①王… ②王… III. ①电磁传感器-参数估计-研究
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 086861 号

责任编辑:宋无汗 杨 丹 张晓云/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 4 月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:327 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电磁矢量传感器阵列信号参数是阵列信号处理中的一个重要研究方向,在雷达、通信、声纳等众多领域有极为广阔的应用前景。

本书是作者多年研究成果的总结,系统深入地研究了电磁矢量传感器阵列参数估计的基本原理及相关算法,特别是针对阵列信号处理中的相位解模糊和误差校正等难点问题,结合虚拟基线方法和离线估计算法展开了研究。标量传感器阵列只能获取信号的幅度和相位信息,而电磁矢量传感器阵列能够获取信号完备的电磁矢量信息。电磁矢量传感器阵列信号参数估计方法不同于传统的标量阵列参数估计方法,电场矢量和磁场矢量叉乘得到波达方向估计是电磁矢量传感器阵列独有的参数估计方法。标量阵列旋转不变技术估计信号参数 (ESPRIT) 算法要求阵列具有平移不变的特性,而电磁矢量传感器阵列自身具有空间旋转不变结构的特点,放松了对阵列结构的要求,电磁矢量传感器阵列的 ESPRIT 算法适用于空间任意分布阵列,但要求阵列的对应通道平行且幅相一致。当对应通道不平行时存在取向误差,当幅相不一致时存在幅相误差,阵列误差的存在将导致阵列流形出现偏差,使算法的性能大大下降甚至失效,必须进行误差校正才能保证算法的性能。稀疏布阵可以提高参数的估计精度,但阵列稀疏将引起相位模糊,解模糊是阵列稀疏后必须解决的问题。本书针对电磁矢量传感器参数估计中的误差校正、相位解模糊等难点问题展开研究,并讨论四元数参数估计算法在电磁矢量参数估计中的应用。

本书内容包括四个部分。第一部分为电磁矢量传感器阵列信号处理基础,介绍有关电磁矢量传感器阵列信号处理的基础知识和研究进展,相关技术的国内外研究现状,以及极化的基本概念和电磁矢量传感器阵列信号处理的基本知识。第二部分为理想情况下的参数估计,研究理想共点电磁矢量传感器阵列参数估计方法,包括空间任意分布的电磁矢量传感器阵列、偶极子组或磁环组阵列、非均匀 L 型阵列参数估计 ESPRIT 算法,重点介绍空时欠采样环境下的宽频带电磁信号参数估计方法。第三部分为非理想情况下的参数估计,首先研究稀疏电磁矢量传感器阵列相位解模糊方法,重点研究基于相位变换的稀疏阵列相位解模糊参数估计方法和多基线干涉仪解模糊方法;然后研究电磁矢量传感器阵列存在的几种常见误差的校正与补偿算法,重点研究基于三个已知信号源、两个已知信号源和基于 Taylor 近似的取向误差校正。第四部分为新颖信号处理手段,研究基于多元代数的参数估计方法,重点研究基于四元数的 ESPRIT 算法和多重信号分类方法。

在本书的撰写过程中,参考了大量的国内外高水平著作、期刊和其他文献,努力使本书结构体系更加完整。为了保证本书的技术性和可读性,将算法和计算机仿真实验相结合,运用大量仿真实验验证算法的有效性,尽量做到深入浅出,使读者能够直观、深刻、系统地掌握电磁矢量传感器阵列参数估计的基本原理和基本方法。

本书的完成,历时 3 年。特别感谢西安电子科技大学李军教授和美国金门大学 Aileen 教授推荐出版。感谢张锐戈、游娜、林吉平、陈智海、王瑶、惠哲、杨乐、徐晓健、邹明杲、王欢等研究生为本书付出的辛勤劳动。撰写过程中参考了大量的著作和论文,在此对其著译者表示感谢。本书得到了国家自然科学基金项目(61772398、61201295),陕西省自然科学基金项目(2016JM6068),陕西省教育厅专项科学研究项目(17JK0156)和陕西理工大学信息与控制工程院士工作室建设项目资助。陕西理工大学王桂宝高工撰写第 1、2、4、6 章及第 5 章的部分内容,约 22 万字,西安电子科技大学王兰美副教授撰写第 3 章及第 5 章的部分内容,约 10.7 万字,王兰美拟订全书内容并审校全稿。

由于作者水平有限,加上该领域仍处于迅速发展和不断完善当中,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2018 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 阵列信号参数估计研究的历史和现状	4
1.2.1 波达方向估计算法的研究现状	4
1.2.2 阵列多参数估计的研究现状	5
1.2.3 相位解模糊技术的研究现状	6
1.2.4 阵列误差校正技术	7
1.3 本书研究内容	8
参考文献	9
第 2 章 电磁矢量传感器阵列信号处理基础	15
2.1 电磁波的传播	15
2.2 电磁波的极化	19
2.2.1 极化	19
2.2.2 极化的物理意义	19
2.2.3 极化的分类	20
2.3 电磁波极化的表征	23
2.4 天线的极化及其表征	29
2.4.1 天线极化的定义	29
2.4.2 电偶极子天线方向图	31
2.4.3 短偶极子天线	31
2.4.4 共轭极化和正交极化	31
2.4.5 极化匹配	32
2.4.6 极化匹配系数	32
2.4.7 任意极化的产生	32
2.5 电磁矢量传感器阵列	33
2.5.1 定义	33
2.5.2 几种常见的电磁矢量传感器	33
2.5.3 电磁矢量传感器阵列的常见几何结构	34
2.6 本章小结	35

参考文献	35
第 3 章 理想共点电磁矢量传感器阵列参数估计方法	37
3.1 参数估计方法现状	37
3.2 信号模型简介	38
3.3 空间任意分布电磁矢量传感器阵列 ESPRIT 算法	42
3.3.1 算法综述	43
3.3.2 子空间分解	44
3.3.3 旋转不变关系矩阵的估计	44
3.3.4 方向余弦估计方法	45
3.3.5 改进的方向余弦估计方法一	46
3.3.6 改进的方向余弦估计方法二	50
3.3.7 改进的方向余弦估计方法三	54
3.3.8 信号俯仰角和方位角的估计	55
3.3.9 信号极化参数的估计	56
3.3.10 仿真实验	56
3.4 利用偶极子组或磁环组估计信号到达角和极化状态	58
3.4.1 引言	58
3.4.2 信号模型	59
3.4.3 电磁信号参数估计算法	60
3.4.4 仿真实验	62
3.5 非均匀 L 型电磁矢量传感器阵列到达角估计方法	63
3.5.1 信号模型	64
3.5.2 到达角的迭代搜索估计算法	65
3.5.3 仿真实验	67
3.6 空时欠采样环境下的宽频带电磁波信号参数估计	68
3.6.1 引言	68
3.6.2 信号模型	69
3.6.3 频率估计	72
3.6.4 到达角与极化参数的估计	73
3.6.5 仿真实验	76
3.7 基于高阶累积量的多参数联合估计算法	78
3.7.1 阵列结构和数据类型	78
3.7.2 电磁信号参数估计算法	79
3.7.3 参数配对方法	80
3.7.4 参数估计方法	80

3.7.5 改进方法	81
3.7.6 计算复杂度分析	82
3.7.7 仿真实验	82
3.8 偶极子对圆阵信号参数估计算法研究	84
3.8.1 均匀圆形阵列信号接收模型和算法	85
3.8.2 改进的最小二乘法	89
3.9 本章小结	92
参考文献	92
第 4 章 稀疏电磁矢量传感器阵列相位解模糊	94
4.1 相位解模糊的现状	94
4.2 阵列信号测向原理	95
4.2.1 比相法 (干涉法)	95
4.2.2 基于正交子空间理论的高分辨测向算法	96
4.3 多基线干涉仪的解模糊方法	98
4.3.1 中国余数定理	98
4.3.2 多基线干涉仪的解模糊方法	100
4.4 同心圆环阵列 DOA 和极化参数联合估计算法	105
4.4.1 信号模型	105
4.4.2 信号参数估计算法	107
4.4.3 仿真实验	110
4.5 稀疏同心半圆环阵列高分辨参数估计算法	113
4.5.1 信号模型	113
4.5.2 极化参数估计	115
4.5.3 到达角估计算法	116
4.5.4 仿真实验	119
4.6 基于虚拟多基线的解模糊算法	127
4.6.1 算法模型	127
4.6.2 虚拟基线变换解模糊算法	129
4.6.3 仿真实验	133
4.7 基于非均匀 L 型阵列的参数估计算法	140
4.7.1 阵列模型	141
4.7.2 参数估计算法	142
4.7.3 仿真实验	144
4.8 本章小结	146
参考文献	147

第 5 章 电磁矢量传感器阵列误差校正方法	151
5.1 误差校正的现状	151
5.2 信号模型	152
5.3 电磁矢量传感器幅相误差校正方法	152
5.3.1 幅相误差模型	152
5.3.2 通道幅相误差估计	153
5.3.3 通道增益误差估计	156
5.3.4 通道相位误差估计	158
5.3.5 仿真实验	160
5.4 三极子幅相误差校正	166
5.4.1 数学模型	166
5.4.2 误差校正方法	167
5.4.3 仿真实验	169
5.5 阵列旋转三极子误差校正	175
5.5.1 数学模型	176
5.5.2 误差校正算法	176
5.5.3 仿真实验	178
5.6 电磁矢量传感器取向误差自校正方法	181
5.6.1 取向误差数学模型	181
5.6.2 三个参数已知的校正源方法	182
5.6.3 改进的三个参数未知的校正源方法	183
5.6.4 仿真实验	184
5.7 利用两个参数未知的信号源进行误差校正	185
5.7.1 误差矩阵的求解	185
5.7.2 仿真实验	187
5.8 基于 Taylor 近似的取向误差校正	188
5.8.1 Taylor 近似误差矩阵的求解	198
5.8.2 仿真实验	190
5.9 阵列旋转的取向误差校正	192
5.9.1 取向误差的数学模型	192
5.9.2 信号波达方向的估计	193
5.9.3 取向误差的估计与校正	194
5.9.4 仿真实验	195
5.10 电磁矢量传感器耦合误差校正	197
5.10.1 引言	197

5.10.2	耦合误差的数据模型	198
5.10.3	耦合误差矩阵的估计	199
5.10.4	阵列输出响应的补偿	201
5.10.5	校正源的参数选择	202
5.10.6	仿真实验	202
5.11	本章小结	204
	参考文献	204
第 6 章	电磁矢量传感器四元数高分辨参数估计算法	207
6.1	四元数理论	207
6.2	四元数在电磁矢量传感器阵列信号处理中的应用	210
6.3	电磁对均匀线阵参数估计算法	211
6.3.1	信号接收模型	211
6.3.2	参数估计算法	213
6.3.3	计算复杂度分析	214
6.3.4	仿真实验	216
6.4	基于四元数 ESPRIT 算法的电偶极子对 L 型阵列信号多参数 估计算法	219
6.4.1	阵列模型	220
6.4.2	四元数 ESPRIT 算法	222
6.4.3	仿真实验	224
6.5	基于四元数的均匀圆阵信号多参数估计算法	229
6.5.1	信号接收模型	229
6.5.2	参数估计算法	232
6.5.3	仿真实验	234
6.6	基于四元数的电磁偶极子对圆柱阵列的多参数估计算法	238
6.6.1	信号模型	239
6.6.2	基于四元数模型的 DOA 和极化参数估计	241
6.6.3	仿真实验	243
6.7	四元数和长矢量 ESPRIT 算法性能分析	247
6.8	本章小节	248
	参考文献	249

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着电子与信息技术的飞速发展,电磁环境日益复杂,电磁辐射源在空、频、极化域密集多变,这对信息系统的信息获取和信号处理能力提出了新的要求。对目标和辐射源进行精确的测向定位是现代战争特别是电子战中重要的作战环节之一,以前这一任务主要是由雷达完成的。但是,一般雷达大都采用主动方式工作,很容易暴露并受到电子干扰甚至是反辐射导弹的攻击,其生存能力正受到越来越严重的威胁,因此提高雷达的生存能力已成为战争防御的首要问题,无源探测技术的研究和发展在现代战争中尤为重要。无源探测系统兼具自身隐蔽性和远距离探测等优点,可以有效地监视敌方作战指挥中心、武器以及军队的布置和调配。无源探测系统自身不发射电磁波,被动接收空间信源自身发射的信号,如应答机、通讯机、雷达或有源干扰等电子设备发射的信号;或接收第三方电磁波经目标反射后的信号,如广播电台、电视台和电视卫星等信号的反射信号,因此隐蔽性能好。同时无源探测系统没有回波反射的过程,这使其在雷达作用距离以外就能发现目标,因此无源探测系统具有更大的侦察距离。

无源测向技术不仅是战争中一种必要的侦察手段,而且其在国民经济中的应用也十分广泛,如移动通信、地震探测、生物医学、天文观察、野生珍稀动物跟踪、救灾指挥、交通引导等。移动通信系统中需要对移动终端进行定位,从而为用户提供驾驶导航信息或对持机者和车辆跟踪调度,给用户带来极大的便利,此外用户在野外遇到意外情况还可以进行紧急呼救,为救援工作提供了重要的信息。快速准确地对地震震源定位对于震灾预报、抗灾减灾和灾后救援工作具有重大意义,对于地球内部结构、板块运动、地震活动等地震学问题的研究也至关重要。对野生珍稀动物的定位跟踪,为野生动物学家观察研究野生动物的生活习性提供了极大的方便。掌握野生动物的踪迹对珍稀野生动物保护组织者也是十分必要的,便于他们能够及时有效地对野生动物进行救治和保护。在生物医学上传感器阵列也被应用到对肿瘤的定位中,精确地对肿瘤患处进行定位是进一步展开医学治疗的前提和必要条件,据此医生才能有的放矢地对患者进行治疗。

作为空域信号处理的主要手段,阵列信号处理技术在无源测向领域得到了广泛应用,发展极其迅速。阵列信号处理是将多个传感器设置在空间的不同位置来组成传感器阵列,通过对多通道接收机输出的数据进行处理,利用各个信号在空间

位置上的差异,最大限度地增强所需要的信号,抑制干扰和噪声,最终达到提取与空间各个信号源特征相对应的信息的目的。这些信息包括:空间信号源的方向、数目、频率、相位、调制形式等。其中,估计空间信号源的方向是人们广泛研究的内容之一,目前阵列测向已有大量的研究成果见于各种文献和报道。

阵列天线测向系统就是一种重要的被动侦察装备,相对于主动工作的雷达系统,它除了具有抗截获、抗干扰,可靠摧毁等优点,还具有测向精度高、体积重量小,成本低等优点,因此近些年来得到重视,相应的研究成果层出不穷,相应的装备也不断涌现。

阵列测向系统在雷达、声纳、导航、通信、航海、地理定位、军事武器等众多应用领域有着十分重要的作用^[1,2]。应用较广泛的测向算法包括传统的测向技术和现代的空间谱估计技术。

传统的测向技术包括比幅法和比相法,能够实现宽频带、全方位测角,其中基于干涉仪的测向方法精度最高,并且具有适应性强、能够实现共形天线阵列的优点^[3-5]。相位干涉仪技术被广泛应用于辐射源方位估计领域,鉴相是干涉仪的核心技术^[6]。相位干涉仪测向方法是通过测量平面波信号到达两个天线阵元的相位差来判断辐射源的入射方向,算法实现的稳定性高、系统结构简单并且便于工程实现。在实际应用中,干涉仪法会受到入射信号波长及基线长度的限制,系统的测向误差与基线长度成反比,因此长基线可以保证系统的测向精度,但当基线长度大于辐射信号的半波长时,就会产生模糊多值问题^[7,8],这与测向精度形成一对矛盾。因此,为达到基于干涉仪测向系统的精度要求,测向解模糊技术的研究和发展具有重要意义。

现代空间谱估计技术的代表性算法是基于特征分解的子空间类参数估计算法,称为超分辨算法^[9,10]。这些超分辨算法能够突破常规波束形成法所受到的瑞利限制的限制,可以分辨同一波束宽度内的多个信号,因而受到人们的普遍关注。

空间谱是阵列信号处理领域的一个重要概念,它表示信号能量在空间中各个方向上的分布密度,通过获取信号的空间谱就能准确得到信号的波达方向。空间谱估计技术因其超分辨的参数估计性能以及广阔的应用前景而引起了学者们的强烈关注,以多重信号分类 (multiple signal classification, MUSIC) 算法和旋转不变技术估计信号参数 (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT) 算法为代表的子空间类算法是典型的空谱估计技术。MUSIC 算法是利用信号子空间和噪声子空间的正交关系进行信号参数的估计,是一种渐进无偏估计的高分辨子空间方法,它开启了现代超分辨波达方向 (direction of arrival, DOA) 估计的研究并促进了子空间类算法的发展。然而 MUSIC 参数估计算法需要巨大的运算量和存储量,在实际应用中受到一定限制。ESPRIT 算法也是一种基于子空间分解的算法,利用阵列结构的平移不变特性,可以直接计算出信号参数,不像

MUSIC 算法要进行区域搜索,它解决了运算量和存储量方面的问题,同时得到了和 MUSIC 算法相当的估计精度。

标量传感器阵列系统的阵元仅能获取空间电磁信号的一个场分量信息,阵元输出为反映信号强度和相对相位的复幅度,可以利用的信息主要体现在相邻阵元间的空间相位延迟,因此标量阵列信号处理为空域信号处理。基于标量天线的阵列信号处理技术也受到阵列空域孔径的限制,难以对波达方向接近的信号进行有效辨识。空间电磁信号是矢量信号,完备的电场和磁场信息为六维的复矢量。能够获取电磁信号的全部信息或部分信息的传感器称为电磁矢量传感器,电磁矢量传感器阵列是一种能够获取电磁信号极化信息的新阵列,电磁矢量传感器阵元比普通阵元提供了更完备的电磁信息,为阵列性能的提高奠定了物理基础。电磁矢量传感器阵列既能获取空间电磁信号的极化信息,也能利用阵元的空间分布进行空域采样获得空间电磁信号的空域信息。和普通阵列相比,电磁矢量传感器阵列具有优越的系统性能:较强的抗干扰能力、稳健的检测能力、较高的分辨能力以及极化多址能力,这些优越的性能使电磁矢量传感器阵列在军事、民事方面具有重要的应用价值和广泛的应用前景,电磁矢量传感器阵列信号处理已经成为阵列信号处理的研究热点。电磁波极化信息的开发和利用,将有效地提高信息系统在抗干扰、目标识别、探测、跟踪等方面的能力。

国外已有公式研发出商用电磁矢量传感器产品^[11,12],这为电磁矢量传感器阵列在实际工程中的应用奠定了物质基础,从而使电磁矢量传感器阵列信号处理的理论和方法得到了飞速发展。

关于矢量传感器阵列参数估计,国内外学者利用子空间类方法做了大量的研究工作^[13,14]。这些方法应用的前提条件是矢量传感器各通道的特性完全相同。但实际阵列往往存在幅相、取向及耦合等误差,此时阵列流形与理想阵列流形产生了偏差,从而导致了基于理想阵列流形的子空间类方法的高分辨性能显著下降,必须进行有效的校正^[15,16]。

阵列信号参数估计算法中,除了考虑估计精度和分辨率这两个关键问题,解相位模糊也是一个非常重要的问题。子空间类算法的模糊问题与阵列天线的方向图没有直接关系,子空间类算法模糊发生的原因在于阵列流形上出现了线性相关的导向矢量,因而称这种模糊为“流形模糊”。可见流形模糊与阵列流形自身的特性有关。

阵列结构决定阵列流形。阵列拓扑结构设计(也称为天线组阵)是阵列信号处理理论研究中的一个重要问题。这个问题的研究具有重要的现实意义。例如,阵列作为通信系统,设计者对系统的经济性更为关心;对于阵列天线来讲,每个阵元所对应的成本不仅仅是天线阵元本身的成本,每个阵元后边还有复杂的接收系统,信号处理系统等,因此,如果经过阵列结构的设计优化,能减少阵元以及相应的接收

机、信号处理系统的数量,有巨大产能的通信生产商,将产生巨大的效益。

在信息技术高度发展的今天,研究具有更高精度、更高分辨力、更好的系统误差稳健性能的电磁矢量传感器阵列的多参数(到达角、极化、频率等信息)估计方法以及误差校正算法具有重要的理论意义和工程应用价值。

基于以上原因,本书以电磁矢量传感器阵列研究对象,系统深入地研究了电磁矢量传感器阵列信号参数估计和误差校正及其在滤波技术中的应用。电磁矢量传感器阵列信号参数估计主要研究利用电磁矢量传感器阵列的一系列采样数据对信号空间到达角和极化状态角进行联合估计的问题;电磁矢量传感器阵列误差校正主要研究如何估计误差的大小并将其进行补偿的阵列参数估计算法,典型的校正方法包括有源校正方法^[17,18]和自校正方法^[19,20]。

1.2 阵列信号参数估计研究的历史和现状

阵列信号处理的发展史最早可以追溯到 20 世纪 40 年代的自适应天线组合技术,使用锁相环进行跟踪。理论研究则是自 20 世纪 60 年代开始,至今已有五十多年的发展历史,主要经历了以下三个阶段^[21-23]。第一个阶段为 20 世纪 60 年代,进行自适应波束控制的理论研究,包括相控阵天线、波束天线控制等理论的研究,其里程碑式的工作是 Howells^[24]于 1965 年提出的自适应陷波的旁瓣对消器, Widrow 等^[25]于 1967 年提出的最小均方自适应算法,以及 Capon^[26]于 1969 年提出的恒定增益指向最小方差波束形成器。第二个阶段为 20 世纪 70 年代,进行了自适应零点控制理论的研究,包括自适应滤波技术、自适应置零技术和自适应旁瓣对消等理论,其里程碑式的工作是 Applebaum^[27]在 1976 年提出的使信干噪比最大化的反馈控制算法。第三个阶段为 20 世纪 80 年代,主要集中在空间谱估计理论的研究,包括特征空间正交谱估计、最大似然谱估计、最大熵谱估计等。随着研究的继续和不断深入,阵列信号处理理论也逐渐成熟和完善,相关的研究成果不断得到报道。

1.2.1 波达方向估计算法的研究现状

阵列信号处理的一个基本问题是空间信号 DOA 估计的问题,也是雷达、声纳等许多领域的重要任务之一。DOA 估计的基本问题就是确定同时处在空间某一区域内多个感兴趣的信号的空间位置(即各个信号到达阵列参考阵元的方向角,简称波达方向)。对信号 DOA 估计的研究由来已久,在最近几十年才进入了一个迅速发展时期。

波束的形成实质上也是一个波达方向估计问题,只不过它们都是非参数化的波达方向估计。常规波束形成法虽能有效地估计出信号的波达方向,但这些估计的分辨率取决于阵列长度。而阵列长度确定后,其分辨率也就被确定,也就是说分辨

率受到阵列天线物理孔径的限制,即阵列天线的“瑞利限”,该方法无法分辨出属于同一个波束宽度的多个信号,即对属于同一个波束空间信号的波达方向估计失效,只能通过增加阵列天线的阵元数来增加阵列的孔径,减小相应波束的宽度,从而使方位角度的分辨率得到提高。然而在实际的应用中,依靠增加阵列孔径来增加角度分辨率往往是不现实的,因此如何突破阵列物理孔径的限制就成了学者们研究的重点问题,从而推动了 DOA 估计技术的进一步发展^[28]。

空间谱估计技术就是利用阵列天线及其信号处理系统提取目标信号并对其参数进行精确的估计,由于该技术能够突破阵列孔径“瑞利限”的限制,有效地估计出一个波束空间不同方向的信号参数,因此也称为“高分辨谱估计”技术。空间谱估计技术有效地提高了信号的波达方向估计及其他参数的估计性能,因此在声纳、雷达、通信以及测向等系统中得到了广泛的应用。典型的超分辨 DOA 估计方法是著名的 ESPRIT 算法,它属于特征结构的子空间方法。

1989 年, Roy 等提出了 ESPRIT 算法,该算法是基于信号子空间的一类算法。ESPRIT 算法利用阵列子阵间结构不变的特性,根据信号子空间理论推导出信号子空间的旋转不变特性,从而获得空域信号的波达方向。ESPRIT 算法避免了空间谱的搜索过程,运算复杂度大大降低,DOA 估计的速度得到了提高。因此 ESPRIT 算法具有存储量小、计算复杂度低和稳健性好的特点,很好地解决了 MUSIC 算法在实践中存在的问题。以 ESPRIT 算法为代表的还有 LS-ESPRIT^[29] 算法、TLS-ESPRIT 算法^[30]、MI-ESPRIT^[31] 算法等。ESPRIT 类算法对阵列结构有要求,并且应用范围有一定的局限性。

1.2.2 阵列多参数估计的研究现状

阵列多参数估计技术是从一维测向即空间谱估计技术发展起来的。通常研究的多维参数估计包括:二维 DOA 估计、DOA 与频率联合估计、DOA 和极化联合估计等。

二维 DOA 估计一般采用 L 型阵列、交叉十字阵列和面阵实现二维参数的估计。二维 DOA 估计方法包括最大似然法方法^[32,33]、二维 ESPRIT 方法^[34,35]、传播算子方法^[36,37]、高阶累积量方法^[38]和波达方向矩阵法^[39]等。

对极化参数估计的研究始于 20 世纪 80 年代。Schmidt^[40]在 1981 年利用信号极化信息改善了到达角估计性能;Ferrara 等^[41]在 1983 年研究了 MUSIC、最大似然等方法估计信号到达角的性能;Wax 等^[42]则提出了用最大似然法估计信号到达角和极化。Li 等^[13,43-45]将 ESPRIT 算法推广到极化-角度域,解决了不同情形下极化敏感阵列的多参数估计问题,还解决了利用交叉偶极子阵和电磁偶极子阵估计二维到达角和极化参数的问题^[43,44],研究了电偶极子和电流环输出之间相对不变性的电磁矢量传感器阵列 ESPRIT 算法^[13]。与此同时,Wong 等^[46]提出将单个

电磁矢量传感器看作一个无角度模糊子阵,利用空域 ESPRIT 算法实现稀疏电磁矢量传感器阵列窄带信号源二维到达角和极化参数的估计。Wong 等^[47]利用 MUSIC 算法来估计信号到达角和极化状态,并提出空间-极化波束空间的概念。Wong 等^[15]利用类 ESPRIT 算法研究了矢量传感器任意分布且空间位置未知情形下信号到达角和极化参数的估计问题,给出了闭式解。Gonen 等^[48]基于四阶累积量提出了一种用最小约束实现到达角和极化参数的联合估计算法,该算法仅考虑了一维到达角的情况。徐有根等^[49,50]探讨了基于四阶累积量的二维到达角和极化的联合估计问题,还研究了相干信号源波达方向和极化参数的联合估计。Wang 等^[51,52]研究了稀疏布阵情景下的到达角和极化参数估计算法。徐有根等^[53]和王建英等^[54,55]研究了基于 ESPRIT 的频率、二维到达角和极化参数的联合估计。王激扬等^[56]研究了基于四阶累积量的频率、二维到达角和极化的联合估计算法。

Wu 等^[57]和黄家才等^[58]针对近场源信号 DOA 估计展开了相应的研究工作, Chevalier 等^[59]和王建英等^[60]研究了高阶累积量域的电磁矢量传感器阵列 DOA 与极化联合估计,分别提出了 MUSIC 及 ESPRIT 类参数估计算法。针对电磁矢量传感器的实用性问题, Nehorai 等^[61]提出了一种拉伸式电磁矢量传感器以减轻传感器分量间的互耦;文忠等^[62]和雄维族等^[63]分别针对非平稳信号和分布源信号的 DOA 与极化联合估计问题开展了相关研究。

近几年来,电磁矢量传感器阵列信号处理领域出现了一些新的发展动向,人们开始将张量和多元代数等多维代数工具用于电磁矢量传感器阵列 DOA 和极化的联合估计之中,以期能更充分地挖掘电磁矢量传感器阵列输出信号在空-时-极化域上的多维结构^[64,65]。Miron 等^[66]首先提出了利用高阶张量运算实现复数 MUSIC 算法;Roemer 等^[67]将 ESPRIT 算法拓展到张量域,提出了一种基于张量结构化最小二乘的高维 ESPRIT 算法;Wang 等^[64,65,68,69]研究了基于线阵、L 阵、圆阵和圆柱阵的四元数 ESPRIT 算法。在利用多元数进行阵列信号处理方面,Miron 等分别将四元数和双四元数用于双分量及三分量矢量传感器阵列 DOA 估计之中,提出了四元数 MUSIC 算法和双四元数 MUSIC 算法^[70,71];龚晓峰等^[72-74]针对全电磁矢量传感器阵列,提出了采用四四元数运算完成 DOA 估计,并提出了一种基于平移不变交叉偶极子阵列的四元数 ESPRIT 算法。

1.2.3 相位解模糊技术的研究现状

在波达方向估计中,大的阵列孔径往往能够得到高的估计精度和高的角度分辨率。但是当孔径大于信号的半波长时,测向的过程中将会出现相位模糊问题,因此测向解模糊技术的研究具有非常重要的意义。目前相位解模糊用到的主要方法有:长短基线法^[75]、参差基线法^[76]、虚拟基线法^[77]。国内外学者也对相位解模糊做过研究,并取得了很多有价值的成果^[78-82]。

曲志星等^[83]提出了利用虚拟短基线解长基线模糊的方法,利用长基线提高系统的测向精度。Young-Soo 等^[84]研究了虚拟阵列扩展解模糊问题。Padmini等^[85]利用均匀圆阵解决了宽带源波达方向估计的频率方向模糊问题。Lo 等^[86]给出了由相位延迟引起的模糊和二阶模糊的充分必要条件。郭跃^[87]利用多个不同载频抑制虚假谱峰,从而提取真实谱峰,解决了波达方向估计中虚假谱峰的问题。司锡才等^[88]研究了基于 MUSIC 算法的解模糊方法,先用 MUSIC 算法做一次粗略搜索以获得低精度到达角,然后在新的角度搜索范围内做二次精确估计。司伟建等^[89]研究了阵元间隔大于信号半波长一半时产生多值模糊的原因,并提出了解决多值模糊问题的方法。Wang 等^[90]研究了基于同心圆环阵列的 DOA 和极化参数估计算法,通过解模糊方法不但扩展了阵列孔径而且还大大地提高了到达角的估计精度。Wong 等^[91]采用 ESPRIT 算法研究了几种新颖的能够产生两个平移不变性的稀疏阵列结构,该稀疏阵列的所有阵元都能实现最大噪声消除进而充分利用阵列全部的物理孔径信息。

1.2.4 阵列误差校正技术

简单有效且具有高鲁棒性的阵列误差校正方法是阵列高分辨算法走向工程应用的关键,早期的阵列误差校正方法是通过对阵列流形直接进行离散测量、内插、存储来实现的,但该类方法实现的代价较大,且不能保证较高的校正精度。20 世纪 90 年代后,学者们通过对阵列扰动进行建模,将阵列误差校正问题转化为一个参数估计问题。参数类误差校正方法可以分为有源校正法^[92-94]和自校正法^[95-97]两大类。

有源校正法需要已知远场辅助信源的精确方位信息,通过这个辅助信源来对阵列误差参数进行离线估计;自校正法则无须在空间设置方位精确的辅助信源,只需根据阵列参数模型及来波方向等信息建立优化函数,通过优化函数进行迭代,从而实现对阵列参数的估计。两种校正算法各有利弊,有源校正法运算量小,但对辅助阵元的方位有较高的要求,当考虑阵列幅相、互耦等多种误差因素时,需要多个已知的辐射源,因此系统的物理实现往往受到限制;自校正法可以完成多参数的实时估计,但运算量大,迭代过程的全局收敛性难以保证。

王鼎等^[98]基于均匀线阵利用互耦矩阵的对称带状 Toeplitz 性质,提出了一种阵列耦合误差和幅相误差的有源校正方法。Ng 等^[99]提出了一种利用多个已知校正源信号来估计误差校正矩阵的有源校正方法,待估计的误差校正矩阵包含未知的增益、相位、互耦系数及传感器位置等信息,该算法可以实现阵列耦合、增益和相位误差的校正。贾永康等^[100]提出了一种适用于任意阵列形式的有源校正方法,该方法可以对同时存在的阵元位置、幅度及相位误差进行估计。魏平等^[101]采用 MUSIC 代价函数来建立优化函数,通过直接求解法和对消误差法来对阵列误差