

PARAMETERS ESTIMATION
AND APPLICATION
FOR ARRAY SIGNAL

阵列信号 参数估计及应用

贾维敏 姚敏立 金伟 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

013053254

TN911.7
139

内容简介


本书介绍阵列信号处理的基本原理、方法和应用。全书共分五章。第一章介绍阵列信号处理的基本概念和术语；第二章介绍阵列信号处理的数学模型；第三章介绍阵列信号处理的波束形成技术；第四章介绍阵列信号处理的自适应波束形成技术；第五章介绍阵列信号处理的波达阵技术。本书可作为高等院校电子信息工程、通信工程、信号与信息处理等专业及相关专业的教材，也可供从事阵列信号处理工作的工程技术人员参考。

阵列信号参数估计及应用

贾维敏 姚敏立 金伟 著



TN 911.7
139

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北航

C1660964

013023224

内 容 简 介

阵列信号参数估计是阵列信号处理中一个重要研究方向,在雷达、通信、声呐等众多领域有极为广阔的应用前景。本书较为深入、系统地论述了阵列信号参数估计的理论、算法及一些理论方法,重点阐述的内容包括:标量阵列和极化敏感阵列接收信号模型;基于循环平稳理论和最小冗余线阵的波达方向估计;标量阵列多维参数估计及自动配对原理;极化敏感阵列的多维参数估计和自动配对原理;阵列信号的多分辨参数估计;循环累量域 DOA 估计算法及应用等技术。

本书可供从事雷达、通信、导航、声呐与电子对抗等领域的广大技术人员学习与参考,也可作为高等院校和科研院所信息与通信工程等专业的研究生教材或参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

阵列信号参数估计及应用 / 贾维敏, 姚敏立, 金伟著. —北京: 北京理工大学出版社, 2013. 5

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7698 - 6

I. ①阵… II. ①贾…②姚…③金… III. ①信号处理 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 106964 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 12

字 数 / 203 千字

版 次 / 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

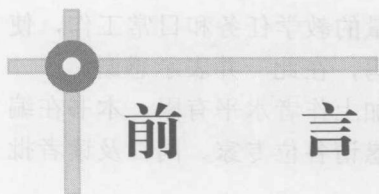
定 价 / 36.00 元

责任编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换



前 言

阵列信号参数估计根据传感器阵列输出的处于干扰环境下的信号,依据一定的方法准则,提取出感兴趣的信号参量。它作为阵列信号处理的一个重要分支,成为近年来一个发展极其活跃和迅速的研究领域,目前已广泛应用于雷达、声呐、导航、通信、地质勘探和生物医学等诸多场合。

几十年来,一维的空间谱估计技术已日趋成熟,然而现代复杂的电磁环境给信号参数估计提出了更高的要求,阵列信号参数估计已由单一的空域发展到空间、时间、频率和极化域的多维参数联合估计,多维、多分辨已成为阵列信号参数估计的一个重要发展方向。目前,关于这一方面的著作并不多,为此,我们将自己近年来的研究成果进行汇总整理,形成本书,相信它能为从事阵列信号处理与应用领域的相关科技人员及高校师生提供有益的帮助。

本书是作者多年来研究成果的总结,它较为系统、深入地论述了阵列信号参数估计涉及的基本理论及相关算法。在编写过程中,我们广泛选材,参考大量的国内外高水平期刊的文献,并尽量保证结构体系上的完整性。为同时保证本书的技术性与可读性,全书将算法基本原理与直观的实验结果相结合,运用大量仿真实例对算法进行验证说明,力求做到深入浅出,使读者能够直观、深刻地理解阵列信号参数估计的原理及应用。

全书共由9章构成,第1章重点从多维参数估计、基于循环平稳理论和高阶累积量的参数估计、极化敏感阵列参数估计等方面介绍了阵列信号参数估计的研究现状,第2章从阵列结构与信号模型方面给出了阵列信号参数估计的基本知识,第3章涉及基于循环平稳理论和最小冗余线阵的波达方向估计,第4章阐述了标量阵列多维参数联合估计及配对原理,第5章给出了极化敏感阵列的多维参数联合估计及配对原理,第6章为阵列信号的多分辨参数估计,第7章和第8章分别为基于高阶累积量和循环累积量的DOA估计算法,第9章介绍了阵列信号参数估计在电子战中的应用。

在本书编写过程中,作者得到了许多帮助。宋建社教授对本书的写作



提出了许多宝贵意见。教研室同事承担了大量的教学任务和日常工作，使作者得以有更多的精力和时间进行本书的编写，在此一并表示感谢。

由于阵列信号参数估计仍在迅速发展，加上作者水平有限，本书在编写过程中难免存在一定的纰漏与不足之处，恳请各位专家、同仁及读者批评指正。



目 录

1 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 阵列信号参数估计的发展及现状.....	2
1.2.1 阵列信号多维参数估计研究现状.....	3
1.2.2 基于循环平稳理论的 DOA 估计.....	7
1.2.3 基于高阶累积量的阵列信号参数估计.....	9
1.2.4 极化敏感阵列参数估计.....	9
1.3 本书的结构与内容安排.....	12
参考文献.....	14
2 阵列结构与信号的模型	20
2.1 电磁波的极化及其表征.....	20
2.1.1 完全极化波.....	20
2.1.2 部分极化波.....	23
2.2 空间信号的特征表示.....	23
2.3 阵列结构.....	25
2.3.1 标量阵列.....	25
2.3.2 极化阵元结构.....	25
2.3.3 极化敏感阵列的几何结构.....	26
2.4 信号的接收模型.....	28
2.4.1 假设条件.....	28
2.4.2 标量阵元接收信号模型.....	29
2.4.3 极化敏感阵元信号模型.....	30
2.4.4 极化敏感阵列接收模型.....	31
2.5 阵列模型的二阶统计特性.....	33
2.6 本章小结.....	35



参考文献	35
3 基于循环平稳理论的波达方向估计	36
3.1 引言	36
3.2 一阶循环平稳和循环均值	36
3.3 循环自相关和谱相关	38
3.3.1 循环谱的物理模型	39
3.3.2 循环自相关函数和谱自相关函数的离散表示	39
3.4 信号的循环平稳特性	40
3.4.1 信号的广义循环平稳性	41
3.4.2 信号的共轭循环平稳特性	41
3.5 循环平稳特性 DOA 估计的特点	43
3.6 阵列的相关函数矩阵与最小冗余线阵	44
3.6.1 均匀线阵的共轭循环相关函数矩阵	44
3.6.2 最小冗余线阵	46
3.7 基于最小冗余线阵的共轭循环 ESPRIT 算法	47
3.7.1 MRLA-CCE 算法的 DOA 估计原理	47
3.7.2 仿真实验与分析	48
3.8 基于最小冗余线阵的共轭循环谱相关 SSF 算法	51
3.8.1 伪数据矩阵、虚拟阵列与 MRLA-SC-SSF 算法	51
3.8.2 MRLA-SC-CCE 算法的 DOA 估计原理	53
3.8.3 仿真实验与分析	54
3.9 基于最小冗余线阵的谱相关波达方向估计算法	56
3.9.1 SC-CCM 算法的 DOA 估计原理	56
3.9.2 仿真结果与分析	58
3.10 基于 AR 模型的共轭循环波达方向估计	60
3.10.1 阵列信号的模型	60
3.10.2 仿真实验与分析	63
3.11 本章小结	64
参考文献	65
4 标量阵列的多维参量联合估计	67
4.1 引言	67
4.2 标准 ESPRIT 算法的原理	67



4.3	多维 ESPRIT 算法	69
4.4	基于复特征值的二维 DOA 估计	70
4.4.1	阵列结构及信号模型	70
4.4.2	基于复特征值的配对方法	72
4.4.3	仿真实验与分析	73
4.5	基于标记子空间的信号频率和二维波达方向的联合估计	75
4.5.1	阵列结构与信号模型	75
4.5.2	标记子空间配对技术	76
4.5.3	仿真结果与分析	77
4.6	本章小结	80
	参考文献	80
5	极化敏感阵列信号的多维参数估计	82
5.1	引言	82
5.2	基于单个信号子空间的配对技术	83
5.2.1	阵列结构与数据模型	83
5.2.2	基于单个信号子空间的配对技术	85
5.2.3	计算机仿真与分析	86
5.3	基于时空极化导向矢量的阵列信号多维参数联合估计	89
5.3.1	信号模型	89
5.3.2	时空极化导向矢量的自动配对算法	90
5.3.3	仿真结果与分析	91
5.4	多维参数估计方法的讨论	94
5.5	本章小结	95
	参考文献	95
6	阵列信号的多分辨参数估计	97
6.1	引言	97
6.2	极化敏感阵列的多分辨参数估计	98
6.2.1	空间多分辨 ESPRIT 的基本原理	98
6.2.2	频率的多分辨估计	100
6.2.3	极化敏感阵列的多分辨参数估计	102
6.2.4	仿真结果与分析	103
6.3	电磁矢量传感器的多分辨估计	105



4 阵列信号参数估计及应用

6.3.1	单电磁矢量传感器	105
6.3.2	信号模型	106
6.3.3	二维 DOA 和极化参数的多分辨估计	107
6.3.4	计算机仿真	109
6.4	本章小结	110
	参考文献	110
7	基于高阶累积量的多维参数估计	112
7.1	引言	112
7.2	空间高阶累积量及其在阵列信号处理中的特点	113
7.2.1	空间高阶累积量的定义及性质	113
7.2.2	空间四阶累积量的几何意义	115
7.3	阵列扩展的原理	116
7.4	基于高阶累积量的阵列信号多维参数联合估计	118
7.5	基于最小冗余线阵的共轭扩展的 DOA 算法	121
7.5.1	信号模型	121
7.5.2	共轭扩展的估计算法	121
7.5.3	最小冗余线阵的共轭扩展算法	123
7.6	计算机仿真与结果分析	125
7.7	累积量域二维波达方向估计算法	126
7.7.1	DOA 矩阵方法简介	126
7.7.2	二维波达方向估计新算法 VDOA Matrix 算法	129
7.7.3	仿真实验	133
7.8	本章小结	135
	参考文献	135
8	循环累积量域 DOA 估计算法及智能天线中的应用	138
8.1	引言	138
8.2	无线多径信道与阵列信号模型	138
8.2.1	信道参数及其影响	138
8.2.2	无线多径信号的阵列模型	141
8.2.3	智能天线基本理论	143
8.3	循环累积量域 DOA 估计算法	147
8.3.1	阵列模型和基本假设	148



8.3.2 高阶循环累积量的定义及其性质	149
8.3.3 空间特征的循环累积量域估计算法	150
8.3.4 仿真实验与分析	152
8.3.5 几点说明	154
8.4 本章小结	155
参考文献	156
9 阵列信号参数估计在电子战中应用	161
9.1 引言	161
9.2 电子战与综合电子战的概念	162
9.2.1 电子战定义及作战对象	162
9.2.2 综合电子战概念	163
9.3 雷达对抗技术	164
9.3.1 雷达侦察的原理与作用	164
9.3.2 雷达侦察接收机功能及发展趋势	165
9.3.3 雷达侦察的关键技术	167
9.4 通信对抗技术	168
9.4.1 通信对抗的定义和基本任务	168
9.4.2 通信侦察的特点	169
9.4.3 通信侦察的关键技术	170
9.4.4 通信测向和定位技术的作用及发展趋势	171
9.5 阵列信号参数估计在电子战中的应用	173
9.5.1 电子侦察的作用及信号特点	173
9.5.2 阵列信号多参数估计在分选识别中的应用	174
9.5.3 阵列信号处理在无源测向定位中的应用	175
9.6 结束语	177
参考文献	180

绪论

1.1 引言

阵列信号处理是现代信号处理的一个重要分支,随着信号处理技术应用领域的不断扩大,人们对空域信号处理研究的兴趣逐渐增大,相应地,将时域、频域信号处理的一些研究成果扩展到空域上来,便有了空间谱的概念。空间谱在阵列信号处理中是一个重要的概念,与时域频谱表示信号在各个频率上的能量分布相对应,空间谱则可解释为信号在空间各个方向上的能量分布。

阵列信号处理是将多个传感器布设在空间的不同位置组成传感器阵列,并利用这一阵列对空间信号场进行接收(多点并行采样),利用各个信号在空间位置上的差异,最大程度增强所需要的信号(SOI, Signal of Interest),目的是提取阵列所接收的信号及其特征信息(参数),同时抑制干扰和噪声或不感兴趣的信息(SNOI, Signal Not of Interest),以获取信号的时域和空域等多维信息,达到检测信号和提取其参数的目的^[1]。与单个传感器相比,传感器阵列具有波束控制灵活、信号增益高、干扰抑制能力强、空间分辨率高、能精确估计多个信号参数等优点。阵列信号处理系统是以阵列信号处理算法为核心的数字信号处理,阵列系统的多信号处理能力、参数提取的高分辨、高精度和抗干扰能力等优点,很大程度上都依赖于合适的阵列信号处理算法。

传感器阵列的传感器有各种各样的形式,具体表现为雷达、无线通信和射电天文学中的天线、声呐中的水听器、地震中的地震探测器和医学应用中的超声波探测器和X射线检测器等,近几十年来在雷达、通信、声呐、地震和生物医学等众多军事及国民经济领域中发展十分迅速。

阵列信号处理最主要的两个研究方向是自适应空域滤波(自适应阵列处理)和空间谱估计。自适应阵列处理技术的产生要早于空间谱估计,而且已得到了广泛的应用。空间谱估计技术与自适应阵列技术有其内在的联系并相互促进。空间谱估计侧重于研究由多传感器阵列所构成的处理系统对感兴趣的空间信号的多种参数进行准确估计的能力,其主要目的是估计信号的空域参数,根



据设计阵列的不同,还可以同时估计信号时域参数和极化参数等,这在雷达、通信和声呐等许多领域的重要任务。理论上,该技术可以大大改善在系统处理带宽内空间信号的角度估计精度、分辨力及其他相关参数精度,因而在现代电子战中有着极为广阔的应用前景。

所谓极化敏感阵列,是指在空间上按一定结构分布的,极化方式不完全相同的多个极化敏感单元组成的阵列。依据功能的不同,可以将其分为发射极化敏感阵列和接收极化敏感阵列两大类。考虑到本书主要关心的是空间电磁辐射源的定位定向问题,因此下面的讨论将仅限于接收极化敏感阵列。

与传统的标量传感器阵列(指所有阵元的极化方式均相同的传感器阵列)不同,极化敏感阵列不仅能够获取入射信号极化的强度信息,还能够获取极化的方向信息。换句话说,极化敏感阵列能够获取入射信号极化的矢量信息,即具有极化分集能力。这一突出的特点为信息的获取与传输提供了新的可资利用的手段。正因如此,我们可以不夸张地说,极化敏感阵列及其信号处理技术的引入,必将使传统的信息获取与传输系统产生革命性的变革。

1.2 阵列信号参数估计的发展及现状

自20世纪70年代后期以来,国内外研究人员已经成功地将现代信号检测和估计理论以及先进的数字信号处理技术应用于测向领域,提出了概念全新的高精度和高分辨测向技术,即空间谱估计技术。空间谱估计技术之所以较传统的测向技术具有更高的精度和更高的分辨率,原因就在于其天线阵列将接收信号的数据样本空间做了扩张。具体地说,利用空间谱估计技术,其阵列输出数据蕴涵了待估计参数矢量空间的一组完备基,因此信号样本空间以最大可能包含了待估计参数矢量。在各种测向技术中,空间谱估计技术的样本最接近总体,因此,其参数估计较传统的测向技术具有更好的性能。信号子空间(Signal Subspace)高分辨阵列处理方法以Schmidt(1979年)提出的MUSIC(Multiple Signal Classification)算法为代表^[2],这类方法的核心是子空间的概念。它把维数大于信号个数的观测空间划分为噪声子空间和信号子空间,利用噪声子空间和信号子空间的正交性,通过数据矩阵的奇异值分解或协方差矩阵的特征分解,构造空间谱,用谱峰搜索求解信号参数。这引起了国内外众多专家学者的研究兴趣,他们从算法结构、性能分析、信号源个数判别、通道不一致性校正、抗多径效应和色噪声环境等各方面做了深入和广泛的研究,取得了大量较为成熟的研究成果,并且都已研制出实验系统。但这类算法需要进行谱峰搜索,运算量较大,且其处理精度受搜索步长的影响,尤其在二维方向估计时,运算量

很大,使算法难以对信号进行实时处理;R.Roy(1990)提出了基于子空间旋转不变原理的 ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)算法[3],把二维问题分解为两个独立的一维问题,避免了 MUSIC 算法的谱峰搜索,大大减少了运算量,但该算法需要对两个互补的参数集进行正确的配对,且阵列需要三个平行的子阵;最近提出了用于均匀圆阵的 UCA-ESPRIT 算法和用于均匀矩形阵(URA)的二维 ESPRIT 算法,它们都可提供闭环形式的二维角估计,对方位角和仰角估计可实现自动配对,且整个处理过程绝大多数都采用高效的实值计算。因此,如何推广该性能优良的二维 ESPRIT 算法,使之适用于更多的阵列,是当前亟待解决的问题之一。

上述方法都是针对窄带信源设计的,对宽带信号不适用。针对宽带信源来波方向估计,文献[4]提出了用宽带聚焦和相干信号子空间法实现宽带信源一维角估计,它需要的快拍数较短,而且具有较低的信噪比门限,可是该方法要求构造聚焦矩阵和预先估计来波方向,且预估计值的误差会大大增加估计的偏差。

在通信应用中,存在大量的循环平稳信号(信号的自相关函数是周期的),Gardner 在文献[5]中详细介绍了循环平稳信号,并给出了基于信号源的循环平稳条件下的测向算法。这一算法的优点是在比较宽松的条件下,能估计多于阵元数的信号,实现不同循环频率信号的分离,但其不足是计算循环平稳所需的运算量较大,噪声带来的影响对 DOA 估计性能影响较大。

1.2.1 阵列信号多维参数估计研究现状

高分辨测向是阵列信号处理的一个重要研究方向。随着阵列信号处理技术的迅速发展,出现了大量优秀的阵列信号处理算法^[6-8]。其中以多重信号分类(MUSIC)算法和旋转不变子空间(ESPRIT^[3,9])算法最为突出,突破了过去谱估计算法中阵列口径对参数估计性能的瑞利限制,成为高分辨算法研究中的一个重要里程碑。这类算法的一个共同特点就是通过对阵列接收数据的特征分解,将接收数据划分为两个相互正交的子空间:一个是与信号源的阵列流型空间一致的信号子空间,另一个则是与信号子空间正交的噪声子空间。MUSIC 算法利用这两个子空间的正交性来估计信号的 DOA,可以分辨处于阵列孔径所对应一个波束内的多个目标信号。而 ESPRIT 算法利用了信号子空间的旋转不变特性估计信号参数,避免了 MUSIC 算法因谱峰搜索而带来的大量计算,同时一定程度上降低了算法对硬件的要求。常用的子空间类高分辨参数估计方法还有 MUSIC 和 ESPRIT 的改进方法、最小范数法和加权子空间拟合法等。

一维空间谱估计虽然具有优良的高分辨性能,但这些方法假设所有到达信



号的频率相同且已知,即只适用于同频信号或同频带信号的一维参数估计,不适合于空间信号处在宽频段内且频率未知的实际电子侦察环境。要将高分辨阵列处理技术应用到实际的电子侦察中,必须寻找新的方向,走测频测向一体化的路。宽频段来波信号频率、仰角、方位角和极化等多维参数估计,是电子战和电子侦察领域的一个新的研究方向,旨在研究一种用于电子侦察的估计入射到天线阵上的高宽频段来波信号频率和方向的方法,以实现测频测向一体化,这也是电子侦察系统综合化发展的趋势。

目前,在进一步研究空间谱估计技术的同时,国内外已有众多的专家学者投入到高分辨率阵列处理空间信号多维参数估计研究,并且已取得了一定的理论研究成果。空间一维谱估计技术的出现是测向技术的革命,空间信号频率与到达方向二维参数估计的研究是发展适用于未来电子战信号环境的新一代测频测向系统的理论基础。空间信号频率与二维到达方向三维参数估计技术的出现将使未来的新一代电子侦察测频测向系统更完善,信号定位更准确。它不仅将测频测向二者集成一体,简化了设备,节约了成本,而且整体性能也得到了改善。

在实际密集的无线电侦察信号中,仅靠一维 DOA 往往难以有效地分辨来波信号,因此,多维参数的估计更适合于实际应用环境。近些年来,多维参数估计方法在阵列信号处理领域中日益受到重视,成为一个非常活跃的研究领域,国内也有众多学者开展这方面的研究^[10-13]。阵列信号多维参数估计技术大多数是采用 ESPRIT 和 MUSIC 算法,其中最具代表性的是二维 MUSIC 算法^[14],这种方法可以产生渐近无偏估计,但它要进行二维谱峰搜索,运算量较大,并且还没有像 Root-MUSIC 这样的简化方法,因此,如果没有一个初始值,就不可能在实际中得到应用,而要得到一个初始值,仍然需要先使用其他的二维估计方法。而 ESPRIT 算法通过构造旋转不变子空间结构可以直接得到参数的闭式解,因此,多维参数估计中大部分是将多维参数分解为多个一维 ESPRIT 算法,即一维 ESPRIT 算法的推广^[15-21],这些方法可以估计入射信号频率、二维波达方向。将信号分辨集中在距离域(时域)、多普勒域(频域)和空域(角度域),当多个信号在某一域中不能良好分辨时,它们常可以在其他域中进行分辨,从而提高对密集复杂无线电信号的侦察能力。

实际上,空间电磁信号是矢量信号,极化是所有矢量波共有的属性,随着极化技术的应用日益广泛,利用传感器阵列获取信号的极化信息成为阵列信号的又一研究热点问题。如果传感器能够获得电磁信号的全部或部分(至少高于一维)信息,这样的传感器称为极化敏感传感器,由极化敏感传感器构成的阵列则称为极化敏感阵列。利用极化敏感阵元获取空间电磁信号的极化信息,阵

元的空间分布又可以得到空间电磁信号的空域信息,所以,极化敏感阵列信号处理既包括空域处理,又包括极化域处理。当极化信息单独开发利用时,极化域不像其他域那样可以单独提供分辨力,然而当极化信息与其他信息联合处理时,则可以提高其他参数的分辨率^[22]。极化敏感阵列信号处理不仅能够估计信号的到达角,还可以获得信号的极化参量,即在空间-极化联合域对信号进行分辨。当两个信号在空间角度不足以将其分辨时,利用极化信息能够改善系统的空间分辨力,并且两信号极化状态差异越大,空间分辨力的提高越明显。因此,极化信息和空间信息联合处理使得极化敏感阵列具有较高的系统分辨力。

由于极化技术在雷达等领域的应用日渐广泛,近十几年来,极化敏感阵列信号的处理引起学者们的广泛研究兴趣^[11-13,23-26]。极化敏感阵列信号处理的内涵包含三个方面:极化敏感阵列信号滤波、极化敏感阵列信号检测和极化敏感阵列信号参量估计。和普通阵列相比,极化敏感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。极化敏感阵列的诸多优点导致其具有重要的军事和民事应用价值,本书只关注极化敏感阵列信号的参量估计。

关于阵列信号的多维参数估计,MUSIC方法需要谱峰搜索而在多维估计中受到限制。典型的多维参数估计为多个一维ESPRIT算法的推广,即构造多个旋转不变的子空间结构,其中待估计参数为旋转矩阵^[18]。求解方法大致归纳为以下几类:

1. 子空间拟合

利用子空间拟合方法来实现多维参量估计,无须谱峰搜索和配对,但求解旋转矩阵的过程涉及一个多维的非线性优化问题^[27],计算过程比较复杂,运算量较大,难以满足实时性要求。

2. 特征值与特征向量的对应关系

用一维ESPRIT算法分别求得各旋转矩阵,其对角线元素的排列顺序是任意的。文献[15]利用矩阵分解中特征值与特征向量的对应关系——DOA矩阵方法,实现二维波达方向的自动配对估计;文献[28]在文献[15]的基础上将平行阵的第一个阵元增加了多个时延,利用DOA矩阵方法实现了信号频率和二维波达方向的联合估计,并且利用时域与空域的等效性使该方法具有虚拟阵元的功能。但在该配对方法中,旋转矩阵不能有相同的对角元素,否则因参量兼并而无法得到正确的配对关系。

3. 矩阵束具有相同的特征向量

文献[17]将一维ESPRIT算法扩展到二维,利用两矩阵束具有相同的特



征向量,当用同一酉矩阵使矩阵束三角化时,则上三角矩阵的主对角线元素具有相同的排列顺序,且主对角元素构成旋转矩阵,实现了二维角度的高分辨联合估计。在该方法中,参数的估计与配对仅使用了特征向量信息。

面对越来越复杂的电磁信号环境,无线电侦察信号中很容易出现同频或同向的信号,因此,仅根据信号的频率和波达方向往往难以有效地分辨入射信号,提取电磁信号更多的特征信息成为电子侦察技术的又一重要研究问题。

4. 特征值比值的自动配对方法

文献[29]采用交叉偶极子的极化敏感阵列将信号的二维波达方向和极化参量的估计分解为多个一维的ESPRIT参数估计,利用特征值比值方法使得多维参量自动配对。文献[30]是在[29]基础上通过增加时间延迟得到频率、二维波达方向和极化的联合估计。特征值比值的配对方法随着估计参量维数的增加,配对过程也越复杂,并且不能够存在相同特征值比值的情况,否则无法得到唯一的配对关系。从所用信息来看,特征值比值的配对方法只利用矩阵分解中的特征值。

上述这些多维参数估计中所用阵元只能接收电磁矢量信号的一维或两维信息,而完整的电磁信号为六维矢量(三维电场和三维磁场)。文献[31, 32]和[26]分别独立提出了电磁矢量传感器的概念,该传感器能够测量完整的三维电场和三维磁场信息。文献[33]采用单电磁矢量传感器获得电磁信号完整的六维矢量,根据电场、磁场与玻印廷矢量的正交关系得到二维波达方向和阵列的导向矢量,求得二维波达方向和极化的联合估计,不需要参数的配对过程,但参数的估计精度受到限制,当使用多个电磁矢量传感器以提高参数的估计精度时,仍然存在参数的自动配对问题。在这些算法中,经典的ESPRIT算法被推广到了时域-角度域-极化域,基本思想是利用自动配对算法确定同一信号的多维参量联合估计,因此,利用ESPRIT算法估计多维参数的核心是自动配对算法。

以上方法中所用的信息是以二阶统计量为工具的阵列信号参数估计,这些方法有三个基本假设:线性、高斯性和平稳性,而电子侦察中的大部分信号是非线性、非高斯和非平稳的,这种情况下仅根据二阶统计量对侦察信号进行参数估计,在实际应用中受到限制,由此开发以信号特征为基础的参数估计方法,如基于高阶统计量的非高斯信号处理、基于时频分布和小波分析的非平稳信号处理、基于循环统计量的循环平稳信号处理等。以二阶统计量为基础的信号处理方法对加性噪声敏感,需要知道噪声统计特性的先验信息,而高阶统计量对高斯噪声具有自然盲特性,能够在高斯色噪声中提取非高斯信号的能力,使得基于高阶统计量的方法在高斯白、有色噪声环境下均有很好的参数估计性能。

随着信号处理技术应用领域的不断扩大,以高阶统计量为信号特征的非高斯信号处理和以循环统计量为基础的循环平稳信号处理迅速成为现代信号处理的重要分支。

1.2.2 基于循环平稳理论的 DOA 估计

循环平稳理论是近些年来信号处理领域兴起的热点研究问题之一,已在雷达、声呐、通信及电子侦察等各方面引起人们的广泛重视^[34,35]。在雷达、通信等大多数实际应用场合,由于信号受人工周期信号的调制,其统计特性往往表现出周期性,可用循环平稳特性来描述和研究它。循环平稳特性一方面反映了信号的非平稳性,相对传统方法能更准确地反映信号的本质特性,从而大大改善信号处理器的性能;另一方面,与一般非平稳信号相比,循环平稳信号具有频谱冗余特性,因而具有潜在的抗干扰能力^[36]。由于不同循环平稳信号的循环频率集(Cyclic Frequency Set)不同,干扰和噪声一般不具有这种相关性,因此在做循环相关或谱相关时,干扰和噪声将被滤除,利用这一信息可以在强干扰和低信噪比条件下有效地提取信号的特征参量。

从 20 世纪 50 年代末期开始,循环平稳信号处理技术的发展经历了大致三个阶段,分别是起步阶段、应用基础理论奠基阶段和应用发展阶段。50 年代末期到 80 年代末期是循环平稳信号处理技术的起步阶段,人们的研究主要集中在对循环平稳信号特性的认知上,即如何表征循环平稳信号^[37,38]。Bennett 在 1958 年发表的论文^[39]中首次用“cyclostationary”一词来描述非平稳随机过程所具有的统计特征。当时,还有其他研究人员用不同的术语来描述上述特征,如 periodically stationary (周期平稳)、periodically correlated (周期相关)、periodically nonstationary (同期非平稳)等,参见文献 [37~39]。虽然当时用来描述该类随机过程的术语不同,但至少人们已经认识到该类随机过程隐含周期性(periodicity)。基于对循环平稳随机过程统计特征参数周期性的认识,人们开始寻求对循环平稳信号的特征表示方法。主要有三种,分别是 FSR(Fourier series representation)、HSR(harmonic series representation)和 TSR(translation series representation)。实际上,循环平稳信号处理技术发展到现在,这三种表示方法已经被逐渐淘汰,应用更多的是 W. A. Gardner 提出的谱相关表示方法^[40]。谱相关理论首次揭示了循环平稳信号的本质特征——谱相关特性,即将信号瞬时谱在频率上分别上下搬移一定值后得到的两个信号谱具有相关性,搬移的频率差值就是信号的循环频率。

谱相关理论不仅深刻地揭示了循环平稳信号的本质特征,更奠定了循环平稳信号处理的理论基础,为循环平稳信号处理技术的发展提供了方向和动力。