

水下舷侧阵 多目标高分辨参数估计技术

侯云山 金勇 陈建华 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

水下舷侧阵多目标高分辨 参数估计技术

侯云山 金 勇 陈建华 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书讲述基于无人水下航行器舷侧阵的多目标高分辨参数估计技术,包括基于相控阵的多目标参数估计技术和基于多输入多输出(MIMO)阵列的多目标参数估计技术。全书共分10章,包括绪论、阵列信号处理基础、宽带最大似然方位估计、窄带高分辨频率方位联合估计、MIMO阵列发射波束设计、MIMO阵列性能分析及目标方位估计、浅海目标高分辨方位估计、高分辨方位估计的水池实验、阵元非均匀高斯噪声背景下近场声源定位方法、声矢量传感器动态声源方位估计。

本书适合信息与通信工程、信号处理、水中兵器、自动控制等学科有关教师、研究生和科技人员教学、自学或进修之用。

图书在版编目(CIP)数据

水下舷侧阵多目标高分辨参数估计技术 / 侯云山, 金勇, 陈建华著. —北京: 国防工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-118-11084-5

I. ①水... II. ①侯... ②金... ③陈... III. ①可潜器—船舷—多目标(数学)—目标探测—参数分析
IV. ①U674.941

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257812 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 9½ 字数 251 千字

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 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

前言

无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)是用于水面侦查、遥控猎雷和作战等可以回收的小型水下自航载体,是一种以潜艇或水面舰艇为支援平台,可长时间在水下自主航行的无人智能小型武器装备平台。当前世界各国都在竞相发展 UUV 项目,用于搜集控制水下信息,组建水下信息和作战网络。UUV 有 6 项关键技术,即长续航力推进/能源、水下通信、大地和相关导航、任务管理/控制、传感器和信号处理、航行体设计。

本书研究传感器和信号处理方面的技术,具体来说,就是基于 UUV 舷侧阵的多目标高分辨参数估计技术。在水中兵器中,多目标参数估计的发展直接关系信号检测、估计和跟踪的正确率和精度,研究意义十分重大。水下多目标参数估计的发展方向是降低可工作信噪比、提高分辨能力、增强环境适应性、提高抗干扰能力,最终为远程多目标识别和跟踪奠定基础。

本书结合无人水下航行器舷侧阵应用背景,从理论分析、计算机仿真、水池实验等方面研究了无人水下航行器舷侧阵高分辨参数估计的关键问题,为水下多目标方位估计、水下多目标定位和跟踪及其在 UUV 中的应用提供了先进的理论、方法和有效技术。本书主要内容及安排如下:

第 1 章和第 2 章介绍研究的目的、意义,高分辨技术研究的历史和现状,以及窄带和宽带阵列模型。第 3 章研究基于马尔科夫蒙特卡罗方法的最大似然宽带 DOA 估计快速算法。第 4 章研究窄带频率—方位联合估计问题。第 5 章研究 MIMO 阵列的发射波束设计问题。第 6 章研究 MIMO 阵列高分辨方位估计问题。第 7 章建立基于简正波理论的浅海目标阵列接收模型,推导了基于该模型的确定性最大似然方位估计方法。第 8 章介绍宽带最大似然方位估计快速算法和 MIMO 阵列高分辨方位估计的水池实验研究。第 9 章研究阵元非均匀高斯噪声背景下近场声源定位方法。第 10 章研究基于声矢量传感器的动态声源方位估计技术。

本书第 1、2、7 章由河南科技大学侯云山撰写,第 8、9 章由河南大学金勇撰写,第 3、4、5、6、10 章由河南科技大学陈建华撰写。

符号定义

全文中的表达式和符号以下面定义的为准。

$(\cdot)^*$	矩阵、向量共轭运算
$(\cdot)^T$	矩阵、向量转置运算
$(\cdot)^H$	矩阵、向量共轭转置运算
$\otimes$	矩阵直积, 即 Kronecker 积
vec	矩阵列拉直
$\text{Re}\{\cdot\}$	取实部
$\text{Im}\{\cdot\}$	取虚部
$E\{\cdot\}$	求数学期望
$\text{tr}\{\cdot\}$	矩阵的迹
$\text{diag}\{\mathbf{x}\}$	一个对角矩阵, 对角线元素为向量 $\mathbf{x}$ 的元素
$\det\{\mathbf{X}\}$	矩阵的行列式
$\ \cdot\ $	Frobenius 范数
$\mathbf{I}$	单位矩阵
$\mathbf{A}, \boldsymbol{\Gamma}$	黑斜体大写英文字母、大写希腊字母表示矩阵
T, ω, f	斜体大、小写英文字母, 希腊字母, 表示变量
$\mathbf{a}, \mathbf{e}$	黑斜体小写英文字母表示向量

缩写	
DOA	Direction Of Arrival
ULA	Uniform Linear Array
UCA	Uniform Circular Array
dB	decibel
SNR	Signal to Noise Ratio
CRB	Cramér - Rao Bound
MSE	Mean Square Error
RMSE	Root Mean Square Error
MUSIC	Multiple Signal Classification
ML	Maximum Likelihood
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 高分辨阵列信号处理的发展历史及现状	2
1.3 本书主要内容	7
参考文献	8
第 2 章 阵列信号处理基础	15
2.1 宽带信号和窄带信号	15
2.1.1 窄带信号	15
2.1.2 相关系数	15
2.1.3 宽带信号	16
2.2 阵列信号模型	16
2.2.1 窄带阵列模型	16
2.2.2 宽带阵列模型	19
2.3 本章小结	20
参考文献	21
第 3 章 宽带最大似然方位估计	22
3.1 引言	22
3.2 宽带确定性最大似然方位估计方法	23
3.2.1 宽带确定性最大似然方位估计似然函数	23
3.2.2 基于遗传算法的宽带确定性最大似然方位估计算法	25
3.2.3 基于吉布斯抽样的宽带确定性最大似然方位估计 算法(GSML)	25
3.2.4 基于 Metropolis - Hastings 抽样的宽带确定性最大似然方位	

估计算法(MHML)	28
3.2.5 基于完美抽样的宽带确定性最大似然方位估计 算法(PML)	30
3.2.6 算法的性能比较分析	33
3.3 宽带随机性最大似然方位估计方法	35
3.3.1 宽带随机性最大似然方位估计似然函数	35
3.3.2 宽带确定性最大似然和随机高斯性最大似然估计等价 条件	37
3.4 宽带目标方位估计的克拉美-罗界	38
3.4.1 宽带 CRB 的推导	39
3.4.2 仿真分析	41
3.5 本章小结	42
参考文献	42
第4章 窄带信号频率方位联合估计	45
4.1 引言	45
4.2 窄带信号频率方位联合估计数学模型	46
4.3 窄带信号频率方位最大似然估计	47
4.4 窄带信号频率方位联合估计的克拉美-罗界	49
4.4.1 频率方位联合估计 CRB 的推导	49
4.4.2 仿真分析	50
4.5 窄带信号频率方位联合估计的子空间类方法	52
4.5.1 空时二维子空间类算法	52
4.5.2 基于空时旋转不变思想的联合对角化算法(JAFE)	53
4.5.3 树状结构多重子空间分类算法(FSF-MUSIC)	55
4.5.4 基于广义瑞利商理论的多重子空间分类算法(R-MUSIC) ...	59
4.5.5 子空间类法的性能分析	61
4.6 本章小结	62
参考文献	63
第5章 MIMO 阵列发射波束设计	65
5.1 引言	65
5.2 发射波束图设计数学模型	66

5.2.1 窄带发射波束图设计数学模型	66
5.2.2 宽带发射波束图设计数学模型	68
5.3 窄带阵元发射功率等强约束下发射波束图设计	69
5.3.1 梯度优化方法	69
5.3.2 内点罚函数方法	70
5.3.3 凸优化方法	72
5.3.4 发射波束设计方法性能分析	73
5.4 宽带阵元发射功率等强约束下发射波束图设计	74
5.4.1 常规最小二乘波束图匹配方法	74
5.4.2 目标互相关约束下最小二乘波束图匹配方法	76
5.4.3 最低旁瓣约束波束图设计方法	78
5.5 本章小结	79
参考文献	80
第 6 章 MIMO 阵列性能分析及目标方位估计	82
6.1 引言	82
6.2 MIMO 阵列与信号模型	82
6.3 MIMO 阵列性能分析	84
6.3.1 虚拟阵列孔径扩展	85
6.3.2 波束图改善	86
6.4 MIMO 阵列方位估计	88
6.4.1 最小方差法(MVDR)	88
6.4.2 APES 法	89
6.4.3 最大似然法(ML)	90
6.4.4 MUSIC 算法	91
6.4.5 最小二乘空间拟合快速算法(PLS)	91
6.4.6 MIMO 阵列方位估计的克拉美-罗界	95
6.4.7 MIMO 阵列方位估计性能分析	96
6.5 本章小结	98
参考文献	98
第 7 章 浅海目标高分辨方位估计	100
7.1 引言	100

7.2	简正波阵列信号模型	100
7.3	浅海目标高分辨方位估计	102
7.3.1	最大似然方法	102
7.3.2	基于广义瑞利商方法的 MUSIC 方位估计方法 (R - MUSIC)	103
7.3.3	性能分析与仿真	105
7.4	本章小结	106
	参考文献	107
第 8 章	高分辨方位估计的水池实验	108
8.1	引言	108
8.2	水池实验系统及实验技术	109
8.3	宽带最大似然快速算法的水池实验及结果	110
8.3.1	发射声源方位定标	110
8.3.2	宽带最大似然快速算法的水池实验结果	111
8.4	MIMO 阵列方位估计方法的水池实验及结果	112
8.4.1	目标回波信号产生	112
8.4.2	MIMO 阵列方位估计方法的水池实验结果	113
8.5	本章小结	114
	参考文献	114
第 9 章	阵元非均匀高斯噪声背景下近场声源定位方法	116
9.1	引言	116
9.2	近场声源阵列输出模型	117
9.3	空域非均匀高斯噪声背景下近场源最大似然定位方法	118
9.3.1	步进迭代近场源最大似然定位算法	119
9.3.2	近场源最大似然定位近似算法	120
9.3.3	克拉美 - 罗界	120
9.4	仿真实验研究	121
9.4.1	单目标克拉美 - 罗界与算法估计精度分析	121
9.4.2	双目标算法估计精度分析	123
9.5	本章小结	124
	参考文献	126

第 10 章 声矢量传感器动态声源方位估计	128
10.1 引言	128
10.2 矢量传感器模型介绍	129
10.3 改进的最大能量梯度 DOA 估计算法	130
10.4 移动声源 DOA 估计与跟踪算法	132
10.5 计算机仿真及分析	134
10.5.1 改进最大能量梯度 DOA 估计方法	134
10.5.2 基于声学矢量传感器的动态声源 DOA 估计	136
10.6 本章小结	138
参考文献	138

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

近二三十年来,水下目标隐身技术的迅速发展,使得潜艇和水面舰艇的辐射噪声及声反射强度不断减小(大约每年下降 1dB),从而导致水下航行器对其探测难度不断提高。而新型无人水下航行器(UUV)的作战范围又不断增大,由目前的 20 多千米,下阶段将提高到 50 千米以上。在线导引声呐的作用距离、分辨能力有限的情况下,迫切需要大幅度提高 UUV 的目标探测距离,以保证对远程目标的发现和可靠跟踪,实现远程精确打击。

提高 UUV 探测距离的有效手段之一是降低工作频率。但工作频率的降低受 UUV 传统头部平面基阵几何尺寸的限制,并由此导致空间增益降低,估计精度和分辨能力下降。为使探测系统工作频率尽量降低,同时保持空间处理增益,应首先考虑充分利用 UUV 本身资源,尽量扩大阵列尺寸。在 UUV 上加装舷侧阵是一个很好的创新思路。它可以突破水下航行器头部布阵的限制,充分利用水下航行器的长度达到扩大有效阵列孔径的目的。早在 20 世纪 50 年代,美国就已经开始研究潜装的舷侧阵声呐^[1],曾在“飞鱼”号潜艇两侧安装了长达 61m 的舷侧阵。时过 30 多年,到 80 年代中期,舷侧阵声呐的研究又重新受到重视,而且一举获得了成功。但关于在高速 UUV 上安装舷侧阵声呐的研究工作在国内外尚无报道。其主要原因是 UUV 舷侧阵在高速运动情况下会遇到强背景噪声干扰。但是在适当低速情况下,使用 UUV 舷侧阵还是可行的。西北工业大学航海学院配合中船重工 705 所昆明分部在水下航行器无级变速技术上的突破以及一些新的有源或无源声学材料不断问世和应用,使得水下航行器舷侧阵技术在新型水下航行器上应用成为可能。可以预见,水下航行器舷侧阵声呐的出现,必将是高速无人水下航行器目标探测技术的一次飞跃。

舷侧阵目标探测新技术研究,也面临着各种各样的挑战。其中,在水下航行器高速运行形成的强背景噪声影响下对目标参数的准确估计和依据空时噪声分布特征进行发射信号设计是需要解决的部分关键问题。高分辨参数估计和阵列

发射波束形成技术的研究^[2]是解决上述问题的有效途径。以往的研究表明,将高分辨技术和宽带信号运用到水下声呐系统对提高其性能有着重要的作用。例如在现役水下航行器中,瑞典的 TP200 水下航行器、法国的海鳐水下航行器都具有多目标分辨、定位和跟踪能力,意大利的 A244/s、A290 和法国与意大利联合研制的 MU90 水下航行器已经采用了宽带目标探测和跟踪技术,它们都具有较好的浅水性能和反对抗能力。我国对水下宽带高分辨的阵列信号处理也进行了积极的研究,国内一些研究人员在这方面已经做出了很多积极而有意义的探索^[3-5]。21 世纪初,MIMO 思想开始被引入到阵列信号处理领域,MIMO 阵列可以通过选择合适的发射信号空时特性以实现检测和参数估计性能的改进^[6,7]。这使得 MIMO 阵列处理技术很快受到国际学术界的关注。本书将针对水下舷侧阵的应用背景并结合其自身特点,围绕水下目标定位这一关键技术问题,重点研究基于水下舷侧阵的宽带目标最大似然方位估计快速算法和频率未知情况下的窄带目标方位估计快速算法,高效的 MIMO 阵列宽带发射波束设计方法,MIMO 阵列窄带目标方位估计快速算法和浅海目标无偏快速定位算法,以期解决空时域高效的发射波束设计和低信噪比条件下,目标方位参数的快速准确估计问题,旨在为新一代水下装备高分辨估计、多目标定位和跟踪提供先进的理论、方法和有效技术。

1.2 高分辨阵列信号处理的发展历史及现状

高分辨阵列信号处理是近二三十年迅速发展起来的一门新技术,它是数学、统计检测、参数估计理论、现代谱分析、信息论、优化理论及计算机技术等多种学科交叉的边缘学科。阵列信号处理的目的是提取信号场的特征,获取信号源的信息,主要研究问题有波束形成、参数估计(包括目标方位、载频、多普勒频率估计)、目标个数估计、源信号分离、目标分类和阵列校准等,其中目标方位估计(DOA)是最基本的问题。目前,高分辨阵列信号处理的应用范围涉及声呐、水下自导、雷达、导弹、振动、地震勘探、通信、射电天文、生物医学工程等众多领域。高分辨阵列信号处理理论得以迅速发展原因是其应用范围的不断扩大,而微电子技术及计算机技术的发展,VLSI 和微处理机的相继出现,为高分辨阵列处理技术的应用奠定了坚实的基础。可以预见,随着微电子技术的进一步发展,尤其是计算机技术的发展,高分辨阵列处理领域的研究工作将会更加活跃。

经典阵列信号处理方法一般指的是传统波束形成方法^[8],但是其缺点是无论信噪比有多高,对于一个波束宽度内的多个空间目标都是不可分辨的,即存在

Rayleigh 限制^[9],要想提高分辨率,必须增大阵列孔径,但是这往往又受到实际条件的制约。因此,人们又对常规波束形成法提出了各种改进,其中以 Burg 的最大熵法(Maximum Entry Method, MEM)^[10]和 Capon 的最小方差法(Minimum Variance Method, MVM)^[11]最为典型。它们与其他参数模型法一起构成了现代谱分析的雏形,现代谱分析具有经典方法无可比拟的高分辨性能。理论上,阵列信号处理(空域信号处理)与时域信号处理是两个平行的分支,两者之间存在对应关系,阵列处理方位估计问题对应者时域处理中的正弦波频率估计问题,阵列处理中的加权求和型波束形成对应着时域信号处理的经典傅里叶变换,将现代谱方法应用于阵列信号处理,使得阵列的分辨率突破了传统的瑞利限的限制,形成了一类高分辨阵列处理新理论。虽然就现在看来,这两种方法仅仅是对传统波束形成法的修正,也属于经典阵列信号处理,但是已经标志了高分辨技术开始取得一定的成果。

高分辨是指区分或识别两个甚至多个目标的能力,这些目标的待估计参数值非常接近,如角度、载频或 Doppler 频移,高分辨方位估计意味着对感兴趣的目标方位进行精确估计。自从 Schmidt 在 1979 年提出具有里程碑意义的多重信号子空间分类法(MUSIC)^[12]以后,高分辨方法层出不穷,其中具有代表性的有 Kumaresan 和 Tufts 提出的 Mini-Norm^[13]方法,Paulraj 和 Roy 等提出的旋转子空间不变(ESPRIT)法^[14],Barabell 提出的针对均匀线列阵的 ROOT-MUSIC 法^[15],Viberg 等人于 1991 年提出的可解相干源的加权子空间拟和算法(WSF: Weighted Subspace Fitting)^[16],黄建国、徐朴提出的贝叶斯方法^[17]等。在这些高分辨方法中,以 MUSIC 方法为代表的子空间类方法倍受关注,子空间类方法也称为特征结构法,它利用奇异值分解((SVD)、特征值分解(EVD)、QR 分解以及 Gram-Schmidt 正交化等数学运算,不仅物理概念明晰,而且当信号不完全相关时可以得到渐近无偏的估计量,在信噪比门限以上,估计量的方差接近最大似然估计量的方差。这些窄带高分辨方法的提出及广泛研究,大大丰富了高分辨阵列处理的内容,使之形成相对独立的一门学科。20 世纪 80 年代末以后,已有一些学者从现代谱分析的角度系统总结了高分辨的理论和方法,著名的专著参见文献[18-20],其中以 Kay 的 *Modern Spectral Estimation* 最为突出。

与高分辨方位估计相比,多维空间谱估计问题是更加贴近实际的一个问题,多参数联合估计是窄带高分辨参数估计的一个重要方向,如目标的方位和俯仰角的联合估计^[21]、频率和方位的联合估计^[22]、多普勒频率与角度联合估计^[23]等。由于多参数联合估计方法需要估计高维参数,因此方法的运算量很大,目前的研究方向主要集中在如何减少方法的计算复杂度上,已取得了相当大的进展^[24-28]。

目标参数估计的性能是由克拉美-罗界(Cramer-Rao Bound, CRB)和最大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)^[29-34]来评价的,最大似然估计包括确定性最大似然估计和非确定性最大似然估计,它们都是有效方法。当一个高分辨方法的性能达到最大似然估计的性能时,这种方法就是最佳的,因此它和CRB都具有重要的理论意义。由于最大似然估计算法是基于多维搜索的算法,计算量很大,研究人员通过采用梯度搜索^[35]遗传算法^[36]以及马尔科夫蒙特卡洛方法^[37-38]等方法,有效减少了最大似然方法的运算量,使最大似然算法的工程实际应用成为可能。

信号源数目的估计是高分辨估计研究的重要内容,也是制约高分辨方法实际应用的“瓶颈”。由于许多高分辨估计算法都依赖于信号源数目,当信号源数目估计不正确时,就可能严重影响高分辨估计算法的性能,这一问题在低信噪比时更为突出。目前,对于窄带信号,已有较多的信号源数目估计方法^[39-53],最为典型的是基于Akaike信息论准则(AIC)^[39,40]和Schwartz的最小描述长度(MDL)准则^[41,42]的方法、反馈判决法^[43]和盖氏圆半径法^[49]。但问题远远没有得到解决,信号源数目的估计将是今后高分辨估计研究的重要问题。

20世纪90年代以后,研究工作者从更广泛角度研究高分辨阵列处理问题,将高分辨阵列处理与其他学科交叉,尤其是与信息论密切结合,提出了新的理论和方法,并在21世纪得到了进一步发展,主要包括波束域高分辨处理^[54]、宽带阵列处理、宽带波束域处理、高阶统计量处理、MIMO阵列处理等。这些新理论以各自的优势引起许多研究工作者密切关注,将是目前和今后相当长一段时间内阵列信号处理研究的热点问题。

宽带处理是阵列信号处理的重要研究方向,美国国防科技基础研究和计划和新发表的“水下信号处理的过去、现在和未来”都强调“水下信号处理正向宽频带和低频率方向发展”,随后,信号处理的综述性文章“统计信号处理和阵列信号处理的研究热点”^[55]也将水下宽带处理列入阵列处理的重要方向。1985年,Wang和Kaveh首次提出了宽带高分辨估计的相干信号子空间处理方法(CSS)^[56],其基本思想是阵列流型的聚焦(FOCUS)变换。CSS类方法可以分辨相干信号,分辨门限低,性能良好,因此受到了研究者的普遍关注。在CSS方法的基础上,很快提出了空间重采样法^[57]、插值阵法^[58]、阵列流型内差法^[59]、二维DFT变换^[60]、双边相关信号子空间变换^[61]等宽带处理方法。这些方法尽管从不同的角度提出,适用范围也有所区别,但本质上都体现了聚焦的思想,都有等效的聚焦矩阵。这些方法形成了宽带处理的聚焦类方法,也称为CSS类方法。实现CSS的途径是聚焦变换,聚焦矩阵的选择和构造直接影响CSS类的性能,许多研究者对此问题进行了广泛研究,提出了不同准则约束条件下的聚焦矩

阵构造方法,主要工作体现在文献[62-67]中。由于CSS类方法本质上是用窄带模型在聚焦后构成低秩模型来近似宽带结果,因而其估计结果易受信号短时谱不确定性影响,宽带信号直接处理方法^[68-71]通过在每个阵元引出 L 个延时抽头得到二维的时-空阵列信号,建立了宽带阵列信号的低秩模型,克服了CSS类算法的不足,但是该方法需要对 $ML \times ML$ (M 为阵元数, L 为延时单元数)矩阵进行特征分解,运算量比CSS类算法大得多,实现非常困难。

CSS类算法和宽带信号直接处理方法基于接收信号的子空间分解进行方位估计,在白噪声和大采样的条件下估计性能优越。但在实际中广泛存在的非白噪声和实时处理条件下,由于噪声子空间扩展到信号子空间,算法的性能严重下降^[72]。Bohme J. F. 和 Chen J. C. 等人分别推导了针对远场和近场宽带源DOA估计的最大似然方法^[73,74]。MLE依赖精确的数据模型,宽带MLE一般基于离散傅里叶变换(DFT)得到的频域阵列模型,但是对于有限采样数据,DFT循环移位所产生的边缘效应是不能被忽略的,因此只能得到渐进的宽带最大似然估计^[75](Approximated ML, AML)。Gershman A. B. 等人针对雷达声呐中的具体应用,提出了适合于宽带多项式相位信号的最大似然估计方法^[76]。在小样本和非高斯噪声条件下,MLE估计性能优于子空间类方法,可以得到较高的估计精度,但是运算量相当繁重。以上文献都针对单元的情况给出了MLE的近似解,对于多元情况,文献[77]提出了通过数值迭代方法实现MLE的近似解,运算量很大。MLE可以给出方位估计的最优解,具有很好的理论研究价值。如何进一步简化计算,将这种优良的估计方法用于实际问题,仍是极具挑战性的工作。

随着宽带高分辨算法研究的深入,人们更关心算法的实际应用问题,迫切希望采用宽带算法来解决实际中的问题,对宽带阵列校正和高分辨算法的试验研究已经进行了初步的工作。明尼苏达大学建立了一个八元宽带阵列,首次对宽带方位估计进行了实验研究,同时提出了联合校正聚焦和多通道均衡滤波两种宽带阵列校正方法^[78,79],对空气中两个带宽10%的带宽源,CSS类算法和空间重采样法都取得了满意的实验结果。美国ARL实验室(Army Research Lab)对宽带算法的实时实现和实际性能中的性能进行了研究^[80,81],应用相干处理方法(CSS)对地面目标进行了方位估计和跟踪。实验表明,相对于窄带处理方法,CSS算法有效的提高了估计的精度和统计稳定性。此外, Lee J. J. ^[82], Gazor S. ^[83], Do-Hong T. ^[84] 和 Fudge G. L. ^[85] 等人也提出了各自得宽带阵列校正方法,解决了宽带模型失配中的一些问题。以上介绍的实验部分可以实时实现,但是宽带阵列的校正非常复杂,校正过程的运算量常常大于算法本身的运算量,而且随着频带变宽和阵元数的增加,在线处理就变得越来越困难,可见宽带算法不仅要求理论先进,性能优越,而且在实现上要求计算简单,数值稳定。如何简化

计算和降低运算量,是实际应用当中需要解决的一个主要问题。

基于常规相控阵列的水下目标感知系统,各阵元发射相干信号,形成指向性波束聚集能量照射目标,目标散射的起伏和水声信道对信号衰落和畸变的影响非常明显,受到传统相控阵列处理方法的制约,其多目标远程高分辨探测能力有限。2000年以后,人们开始逐步将 MIMO 技术引入雷达信息处理领域中。MIMO 雷达作为一种新体制的雷达受到国内外学者的广泛关注,正在逐渐成为新的学术研究热点^[86-93]。与传统相控阵雷达相比,MIMO 雷达可获得更加优越的性能^[86,87],如改善目标检测性能^[88]、获得高分辨目标定位能力^[89]、提高目标方位分辨能力^[90-91]、显著增强目标参数辨识能力^[92]、可进行灵活的波束图设计^[93]等,代表了下一代雷达的主要发展方向之一。按照天线阵列构型,MIMO 雷达可分为两类,一类是发射、接收天线分布很远,利用扩展目标模型获得空间分集的 MIMO 雷达^[86],2004 年,E. Fishler^[94]等人提出了 MIMO 雷达的概念,描述了可适用于常规雷达、多基地雷达以及波束形成器的信号模型;文献[95]则充分利用发射机与接收机之间的分置特性研究目标散射体的空间差异,主要分析了 MIMO 多基地雷达的检测性能,文献[96]分析了 MIMO 雷达对慢移动目标具有更高的检测敏感性,文献[97,98]研究了 MIMO 雷达的高分辨定位性能和目标定位精度。另一类是发射接收天线紧置,利用波形分集的 MIMO 雷达^[87],这种 MIMO 雷达可实现发射信号和波束图的优化设计^[99-103],获得更高的阵列自由度^[104],从而进行灵活的雷达时间能量管理^[105],增强目标参数辨识能力^[106],提高目标方位分辨能力^[90,91]。文献[107,108]以克拉美-罗界为基准,研究了 MIMO 雷达发射信号设计对参数估计性能的影响,此外,文献[109,110]分析了 MIMO 雷达收发联合空时自适应高维信息处理方法获得精确的参数估计结果和优越的抗干扰杂波能力。

虽然对高分辨阵列处理已进行了大量研究,提出了不少新理论和性能良好的算法,形成了具有丰富内容的新兴学科,但仍有许多问题有待解决。随着高分辨阵列处理的发展,许多新概念、新理论有待深入研究,尤其是将高分辨理论应用于实际时,必须突破有关关键技术。一是低信噪比和短数据问题。在信噪比较低时,高分辨算法的性能会急剧下降。提高算法在短数据、低信噪比条件下的性能是高分辨阵列处理的研究重点,也是实现中远距离、弱信号检测与估计必须解决的问题。二是实时性问题。现代战争中,水下环境千变万化,战机稍纵即逝,在复杂的对抗环境中,为了确保水下装备的有效攻击和精确打击,实时性是必须解决的问题。三是相干源问题。相干源问题在水下信号处理中经常遇到,如浅海中的多途效应、目标回波分辨、转发式干扰信号等。相干信号会导致高分辨子空间类方法的分辨性能严重下降,使水声系统无法正常工作。四是宽带处

理。宽带信号包含有目标信号的丰富的信息,宽带处理具有很多优点,但宽带处理研究尚不够深入,有关算法需要改善。五是抗混响。混响是水声装备主动工作时的工要干扰之一,混响具有非平稳性和相关性,在近距离时,混响会严重影响水声系统以及高分辨阵列处理算法的性能,尽管已提出了多种抗混响的方法,但问题仍没有得到很好的解决。六是主动阵列发射波束设计问题。为了充分利用发射信号的空时特征,MIMO 阵列需要高效、准确设计发射信号自相关矩阵,此项技术是 MIMO 阵列处理技术工程应用的关键问题之一。

以上问题是高分辨阵列处理必须解决的若干关键问题。这些问题相互联系、相互作用,增加了理论及应用研究的复杂性。研究阵列处理新理论、新法,从不同的角度突破其中的关键问题,并应用到水下目标高分辨估计、水下多目标定位和跟踪技术是阵列处理研究的重要课题。

1.3 本书主要内容

本书结合无人水下航行器舷侧阵应用背景,从理论分析、计算机仿真、水池实验等方面研究了无人水下航行器舷侧阵高分辨参数估计的关键问题,为水下多目标方位估计、水下多目标定位和跟踪及其在 UUV 中的应用提供了先进的理论、方法和有效技术。主要内容及安排如下:

第1章介绍了本文研究的目的意义及高分辨技术研究的历史和现状。

第2章介绍了窄带、宽带信号的定义和表示,推导了窄带和宽带阵列模型及假设条件,为下文分析做了必要的准备。

第3章研究了基于马尔科夫蒙特卡罗方法的最大似然宽带 DOA 估计快速算法;提出了基于吉布斯抽样,Metropolis - Hastings 抽样和完美抽样的最大似然宽带 DOA 估计快速算法,对上述几种快速算法的均方误差统计性能进行了分析;分析了确定性最大似然和随机性最大似然的等价条件,研究了宽带高分辨方位估计的克拉美 - 罗界。

第4章研究了窄带频率 - 方位联合估计问题;仔细研究了典型的频率方位联合估计算法,对其统计性能进行了比较和分析;提出了基于广义瑞利商理论在未知频率条件下的方位估计快速算法,推导出多个信号源频率 - 方位联合估计的克拉美 - 罗界,给出了 CRB 的一种闭式解;对 CRB 进行了分析,揭示了其物理意义。

第5章研究了 MIMO 阵列的发射波束设计问题,研究了发射能量约束和空间能量分布约束条件下的窄带发射信号自相关矩阵的设计方法;提出了基于凸优化方法的宽带发射信号自相关矩阵设计方法,解决了宽带信号自相关矩阵设