

无人水下航行器

舷侧阵多目标探测技术

侯云山 蒋敏◎著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

无人水下航行器舷侧阵多目标 探测技术

侯云山 蒋敏◎著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了基于无人水下航行器舷侧阵的多目标探测技术，主要分为基于合成孔径技术的多目标探测技术和基于多输入多输出阵列处理技术的多目标探测技术两大部分。全书共 9 章，内容包括合成孔径技术概况、水下运动阵列信号处理基础、运动舷侧阵多目标检测方法、运动舷侧阵阵列扩展方位估计方法、运动舷侧阵波束域方位估计方法、运动舷侧阵极大似然频率-方位联合估计快速算法、舷侧 MIMO 阵列信号处理基础、舷侧 MIMO 阵列目标方位估计、舷侧 MIMO 阵列子空间方位估计方法、多 UUV 分布式 MIMO 多子载波信号目标估计。书中主要阐述的是该领域的新方法、新技术，并给出了详尽的仿真实验分析，有助于读者对这些新技术的学习和理解。

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。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

无人水下航行器舷侧阵多目标探测技术/侯云山, 蒋敏著. —北京: 电子工业出版社, 2014.6
ISBN 978-7-121-23353-1

I. ①无… II. ①侯… ②蒋… III. ①可潜器—水声探测—目标探测—研究
IV. ①U674.941 ②TB566

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 114309 号

责任编辑: 徐蔷薇 特约编辑: 劳娟娟

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 北京季蜂印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 14.25 字数: 200 千字

版 次: 2014 年 6 月第 1 版

印 次: 2014 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

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, 用于收集控制水下信息, 组建水下信息和作战网络。关于 UUV 有六项关键技术, 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、传感器和信号处理以及航行体设计。

本书研究的是传感器和信号处理方面的技术, 具体地说, 就是基于 UUV 舷侧阵的多目标检测和方位估计技术。在水中兵器中, 多目标检测(信号源数目估计) 和方位估计的发展直接关系到信号检测、估计和跟踪的正确率和精度, 其研究意义十分重大。水下多目标检测技术和方位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。

UUV 使用舷侧阵可以突破 UUV 顶部布阵尺寸小的限制, 扩大基阵的孔径, 从而降低工作频率, 提高多目标感知能力。但是由于 UUV 本身就是一种小型水下自航载体, 其舷侧阵的孔径也是有限的, 还是属于小尺度阵, 因此为了进一步提高 UUV 舷侧阵的多目标探测能力, 本书主要介绍如何引入合成孔径技术和多输入多输出 (MIMO) 技术来扩展舷侧阵的虚拟孔径, 提高其探测性能。水下运动阵列合成孔径技术起源于拖曳阵列, 是最近几十年发展起来的一种新技术, 它利用小孔径物理阵列的运动, 将

沿航迹方向的数据相干累加，形成较大的虚拟阵列孔径，从而提高对目标的分辨率。多输入多输出阵列处理技术是目前国内外的另一个研究热点，与传统相控阵列发射相干信号在空间形成高增益窄波束不同，它利用各发射阵元发射正交（独立）信号在空间形成宽波束，在阵列接收端利用发射波形的正交性获得波形分集增益，虚拟扩展阵列孔径，从而提高阵列系统目标检测和参数估计能力。

本书在内容安排上主要分为基于合成孔径技术的多目标探测技术（第 1~5 章）和基于多输入多输出阵列处理技术的多目标探测技术（第 6~9 章）两大部分。第一部分重点研究基于合成孔径技术来提高 UUV 舷侧阵多目标探测能力的方法，包括合成孔径技术概况、水下运动阵列信号处理基础、运动舷侧阵多目标检测方法、运动舷侧阵阵列扩展方位估计方法、运动舷侧阵波束域方位估计方法、运动舷侧阵极大似然频率-方位联合估计快速算法；第二部分重点研究基于多输入多输出阵列处理技术来提高 UUV 舷侧阵多目标探测能力的方法，包括舷侧 MIMO 阵列信号处理基础、舷侧 MIMO 阵列目标方位估计、舷侧 MIMO 阵列子空间方位估计方法、多 UUV 分布式 MIMO 多子载波信号目标估计。

本书第 1~6 章以及第 8 章由侯云山撰写，第 7、9 章由蒋敏撰写。

本书获河南科技大学学术著作出版基金资助。在此，再次感谢悉心培养了作者的黄建国和张群飞教授，以及曾朝夕相处的博硕士同门金勇、谢达、游鸿、张立杰、马娟等人。

数学符号

如无特别说明，本书中的数学符号以下面定义为准。

A	黑斜体大写表示矩阵
a	黑斜体小写表示向量
f	斜体表示变量
A^*	共轭
a^T, A^T	转置
a^H, A^H	共轭转置
A^{-1}	求逆
A_n	矩阵 A 的第 n 列
A_{ij}	矩阵 A 的第 ij 个元素
a_i	向量 a 的第 i 个元素
$\text{CRLB}(\cdot)$	克拉美罗下界
$\exp(\cdot)$	以 e 为底的指数
\approx	近似为
\otimes	Kronecker 积
\odot	Hadamard 积
$\text{vec}(A)$	矩阵的向量堆栈
$\text{Re}\{\cdot\}$	实部
$\text{Im}\{\cdot\}$	虚部

$E\{\}$	数学期望
$\text{tr}(\mathbf{A})$	矩阵的迹
$\text{diag}\{\mathbf{a}\}$	对角矩阵, 对角线元素为向量 \mathbf{a} 的元素
$\det \mathbf{A}, \mathbf{A} $	矩阵的行列式
$\hat{\mathbf{x}}$	\mathbf{x} 的估计
\mathbf{I}	单位矩阵
\log	基为 10 的对数
\ln	自然对数
∂	偏导
$\ \mathbf{A}\ _{\text{F}}$	Frobenius 范数

目 录

第 1 章

绪论	1
1.1 概述	3
1.2 水下运动阵列信号处理基础	5
1.2.1 系统结构	5
1.2.2 基阵设计	6
1.2.3 舷侧阵信号处理特性	7
1.2.4 窄带信号	8
1.2.5 静止阵列接收数据模型	8
1.2.6 运动阵列接收数据模型	10
1.2.7 采样数据空间的划分	11
1.3 水下运动阵列合成孔径技术发展概况	13
1.3.1 合成孔径阵列的基本概念	13
1.3.2 运动合成阵列频率和方位估计的克拉美罗下界	15
1.3.3 合成孔径处理典型方法	16
1.3.4 合成孔径的其他算法和最新进展	20
1.4 本书的主要内容	23

第 2 章

运动舷侧阵多目标检测方法	29
2.1 典型的多目标检测方法	32
2.1.1 AIC 方法和 MDL 方法	32
2.1.2 EIT 方法	36
2.1.3 Eigenvector based Peak-to-Average Ratio 方法	39
2.2 基于运动舷侧阵的合成孔径联合检测-估计方法 (SATDE)	41
2.2.1 SATDE 的原理	41
2.2.2 SATDE 方法的步骤	42
2.3 性能分析	46
2.4 本章小结	50

第 3 章

运动舷侧阵阵列扩展方位估计方法	53
3.1 扩展拖曳阵测量 (ETAM) 方法	55
3.1.1 ETAM 方法的原理及步骤	55
3.1.2 最优重叠阵元数的确定	59
3.2 运动舷侧阵阵列扩展方位估计 (LPMAE) 方法	60
3.2.1 线性预测的基本原理	61
3.2.2 空域线性预测算法	62
3.2.3 LPMAE 方法	67
3.3 性能分析	69

3.4	ETAM 扩展虚拟阵数据的波束形成方法选择	75
3.5	本章小结	78

第 4 章

运动舷侧阵波束域方位估计方法		81
4.1	自适应波束形成技术概述	83
4.1.1	CBF 和 MVDR 波束形成器	84
4.1.2	自适应波束形成算法	88
4.2	强干扰环境下的波束域方位估计方法	92
4.2.1	稳健 Capon 波束形成器 (RCB)	93
4.2.2	波束域合成孔径处理方位估计方法 (BSAP)	97
4.3	性能分析	100
4.4	本章小结	104

第 5 章

运动舷侧阵极大似然频率-方位联合估计快速算法		107
5.1	合成孔径极大似然频率-方位联合估计方法	109
5.2	基于完备抽样的合成孔径极大似然频率-方位联合估计快速算法 ..	112
5.2.1	马尔可夫链蒙特卡罗方法	113
5.2.2	PS-ML	115
5.2.3	性能分析	119
5.3	基于蚁群算法的合成孔径极大似然频率-方位联合估计快速算法	122
5.3.1	蚁群算法概述	122

5.3.2	ACO-ML	125
5.3.3	性能分析	129
5.4	本章小结	132

第 6 章

舷侧 MIMO 阵列信号处理基础		137
6.1	概述	139
6.2	MIMO 阵列结构和信号模型	140
6.2.1	MIMO 阵列发射信号	141
6.2.2	MIMO 阵列接收信号	142
6.2.3	匹配滤波和波束形成	144
6.3	UUV 舷侧 MIMO 阵列目标探测系统	147
6.4	多 UUV 分布式 MIMO 探测目标回波模型	150
6.5	本章小结	154

第 7 章

舷侧 MIMO 阵列目标方位估计		159
7.1	概述	161
7.2	UUV 舷侧 MIMO 阵列模型与虚拟孔径扩展	162
7.2.1	UUV 舷侧 MIMO 阵列信号模型	163
7.2.2	UUV 舷侧 MIMO 阵列虚拟孔径扩展	164
7.3	MIMO 阵列方位估计	170
7.3.1	MIMO 阵列旋转不变子空间方位估计 (MIMO-ESPRIT) 方法	170

7.3.2	MIMO 阵列 Capon 方位估计 (MIMO-Capon) 方法.....	176
7.3.3	水池试验验证.....	177
7.4	本章小结.....	180

第 8 章

舷侧 MIMO 阵列子空间方位估计方法.....		183
8.1	阵列信号模型.....	185
8.2	基于多输入多输出阵列的子空间方位估计方法 (MIMO-SBEM)	186
8.2.1	子空间缩放 MUSIC (SSMUSIC) 方法.....	186
8.2.2	MIMO-SBEM 方法.....	188
8.3	性能分析.....	190
8.4	本章小结.....	193

第 9 章

多 UUV 分布式 MIMO 多子载波信号目标估计.....		195
9.1	概述.....	197
9.2	高斯包络多子载波信号.....	198
9.3	目标位置和速度估计及其克拉美罗下界.....	200
9.3.1	目标位置和速度的最大似然估计方法.....	200
9.3.2	目标位置和速度估计的联合克拉美罗下界.....	201
9.3.3	多子载波信号模糊度函数.....	204
9.4	仿真性能分析.....	206
9.5	本章小结.....	213

第 1 章

绪 论

- 1.1 概述
 - 1.2 水下运动阵列信号处理基础
 - 1.3 水下运动阵列合成孔径技术发展概况
 - 1.4 本书的主要内容
-

1.1 概述

21 世纪是世界各国开发海洋资源的世纪,世界各国竞相发展海军探测海洋环境和争夺海洋资源。中国东临太平洋,南接印度洋,海岸线曲折漫长,海域辽阔多姿,领海内岛礁星罗棋布,资源富饶,几千年以来中华儿女用生命和汗水守卫着祖国的神圣海洋疆土。从鸦片战争到 21 世纪的今天,觊觎我国海疆企图争夺我国海洋资源者甚多。如何发展海军装备,提高战斗力来守护我国的海疆不被侵犯,海洋资源不被掠夺,是摆在中华民族面前的一个重要问题。

无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)作为探测、开发、建设和守卫海洋资源的一个重要装备,在水下发挥着重要作用,是掌握制海权、捍卫国家权益和开发海洋资源的重要环节。当今世界上,不论是西方发达国家还是我们周边各国,都认为在现在和将来的海洋开发和争夺中,水下航行器将发挥特别重要的作用,纷纷不惜投入大量人力和财力,研究开发适应于水下航行器的新技术,研制新型水下航行器系统和设备,以强化对海洋的控制力,为将来争夺海洋资源做好准备。

要做好海洋区域的守卫工作,就必须具备对一定海域范围内出现的目标的准确探测和精确打击能力。随着各国海洋力量的迅速发展,所需要控制海域面积的不断增大,对于水下航行器的控制范围和控制能力提出了更高的要求。另外,近几十年水下目标隐身技术飞速发展,水面舰艇和潜艇的辐射噪声及声反射强度不断减小(大约每年下降 1dB),使得水下航行器对其进行准确探测的难度不断增大。在这样的形势下,我们迫切需要大幅

度提高水下航行器的作用距离,以确保对多目标的高分辨检测和可靠跟踪,实现对敌方目标的精确打击。如何提高水下航行器的工作效能,获得有效的高分辨的目标参数,是摆在科研工作者面前的难题。

由于传统的水下航行器的接收发射基阵都安装在航行器顶部,受到水下航行器顶部几何尺寸的限制,整个基阵所获得自导系统空间增益有限,对目标的检测和估计能力也受到很大的限制。通过降低工作频率来提高水下航行器的自导作用距离虽然有效,但是工作频率的降低必将使得基阵的孔径变大,因此应考虑充分利用水下航行器本身的资源,尽量扩大阵列尺寸。在水下航行器上加装舷侧阵则是一个很好的创新思路,它将突破航行器顶部尺寸大小的限制,充分利用航行器纵向方向长度,达到有效扩大基阵的阵列孔径,提高对目标的探测能力。

然而,尽管在水下航行器上安装舷侧阵在一定程度上扩大了阵列的有效孔径,但是受水下航行器本身尺寸大小的限制,通过安装舷侧阵的方式所获得的有效阵列孔径依然非常有限。对于水下航行器而言,要想显著地改善探测距离及方位分辨力,需要获得比实际物理孔径大得多的阵列。因此,我们考虑引入近 20 年来得到迅速发展的合成孔径技术和多输入多输出技术。合成孔径技术利用水下航行器的运动特点,将水下航行器随运动获得的空间位置信息积累起来,通过一定的处理方式来获得大孔径阵列,从而获得了高分辨的目标探测能力。多输入多输出阵列处理技术则利用各发射阵元发射正交(独立)信号在空间形成宽波束,在阵列接收端利用发射波形的正交性获得波形分集增益,虚拟扩展阵列孔径,从而提高阵列系统目标检测和参数估计能力。

目前,开展无人水下航行器舷侧阵远程多目标探测技术研究属于前沿研究课题,既具有创新性,又具有挑战性。本书内容是在国家自然科学基金

金、教育部高等学校博士点基金和西北工业大学基础研究基金等项目资助下所取得的部分研究成果的总结。本书紧密结合水下探测与跟踪系统的工作特点，从实际工程应用的角度出发，对基于无人水下航行器舷侧阵的远程多目标探测技术进行了深入的研究。

1.2 水下运动阵列信号处理基础

1.2.1 系统结构

水下航行器舷侧阵目标检测系统主要分为被动目标检测系统和主动目标检测系统。被动目标检测系统接收目标辐射噪声和叠加在其上的背景干扰，并进行处理，从而发现目标并进行参量估计，指令系统根据接收机提供的有关信息，输出操纵航行器的指令来跟踪目标。舷侧被动目标检测系统的基本结构^[1]如图 1-1 所示。

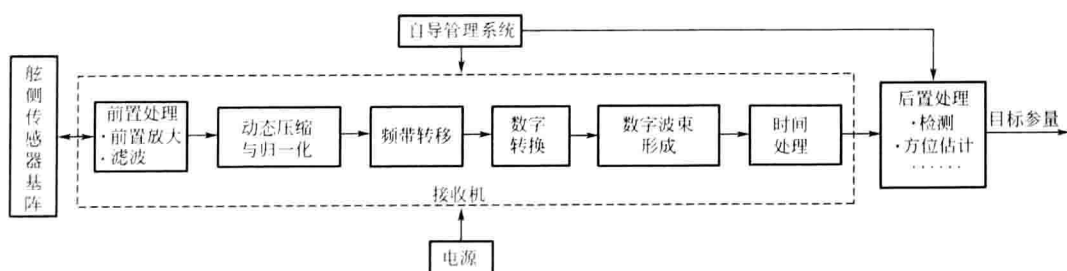


图 1-1 舷侧被动目标检测系统基本结构

图 1-1 中的舷侧基阵由若干换能器组成，它的作用是将目标辐射噪声和叠加在其上的背景干扰的声能转化为电能，供目标检测系统进行处理。接收机由预处理、数据采集、信号处理、数字波束形成、时间处理等功能