

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代海军兵器技术丛书

声矢量探测原理及应用

程锦房 何希盈 著

兵器工业出版社

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代海军兵器技术丛书

声矢量探测原理及应用

程锦房 何希盈 著

兵器工业出版社

内容简介

声矢量传感器技术可以同时感知声压和振速,增加了接收信息的种类和数量,拓展了后置信号处理空间,具有良好低频指向性和抑制各向同性噪声的能力,为解决水声工程中的许多问题提供了新的思路和方法,具有重要的军事、民用价值和广阔的应用前景。本书在归纳声矢量传感器信号模型的基础上,重点对单矢量水听器的目标探测与 DOA 估计、声矢量阵列信源数估计、声矢量阵列 DOA 估计算法进行了介绍,对基于四元数和张量的声矢量阵列信号处理进行了详细分析,最后研究了基于张量的舰船声矢量信号目标检测问题。

本书适合水声工程、信号和信息处理、通信与信息系统等专业领域的教师、研究生、高年级本科生和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

声矢量探测原理及应用 / 程锦房, 何希盈著. —北京: 兵器工业出版社, 2015. 3

(现代海军兵器技术丛书 / 林春生, 滕克难主编)

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978 - 7 - 5181 - 0098 - 9

I. ①声… II. ①程…②何… III. ①军用船 - 舰船噪声 - 矢量 - 探测 IV. ①0427.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 054485 号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010-68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京圣夫亚美印刷有限公司

版 次: 2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑: 陈红梅

封面设计: 正红旗下

责任校对: 郭 芳

责任印制: 王京华

开 本: 710 × 1000 1/16

印 张: 13

字 数: 227 千字

定 价: 58.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

现代海军兵器技术丛书

编审委员会

主 任：程锦房

副主任：林春生 滕克难 王德石

委 员（按姓氏笔画排序）：

田福庆 付 强 齐 欢 许 诚 严卫生

李国林 吴茂林 余湖清 张晓晖 张效民

张静远 陈 川 周穗华 郑学合 赵修平

黄俊斌 龚沈光 颜 冰

总主编：林春生 滕克难

丛书序

海军肩负着保卫国家海洋领土完整、海洋运输线安全和国家海洋权益的重大使命，先进的海军兵器是海军履行使命的基本保证。新中国建立以后，伴随着我国海军部队的发展和壮大，海军兵器从无到有，在科学原理、设计理论、制造技术、保障方法等方面得到了全方位的发展。我国海军兵器技术的发展经历了二十世纪五十、六十年代的全面仿制阶段和七十、八十年代的原理模仿与技术创新阶段，从九十年代起，进入了全面自主设计阶段，使得我国海军在役兵器的主体具备了完全的知识产权，海军兵器技术理论也逐步得到发展和完善。特别是最近十几年来，随着国家海洋权益意识的不断提高和海军转型改革的不断深入，海军兵器得到了更加迅速的发展，大量新型高技术兵器已经装备部队或者即将装备部队；不少新装备采用了新概念、新技术、新材料、新能源，海军兵器正朝着智能化、信息化、精确打击的目标发展。

随着海军大批高新技术兵器装备部队，以及兵器学科理论的发展与完善，迫切需要一套全面反映海军兵器学科基础理论、设计制造技术、保障方法的丛书，一方面方便广大海军官兵系统掌握现代海军兵器的基础理论、技术原理和使用维护方法，以便科学合理地运用兵器、充分发挥高新技术兵器的作战效能；另一方面，对海军兵器学科理论的发展做一个比较全面系统的归纳和总结，以促进海军兵器学科理论和技术方法的创新。为此，我们组织编撰了《现代海军兵器技术丛书》。该丛书以相关专业教学、科研人员近十几年来的学术积累为基础，同时广泛收集国内相关技术领域的代表性研究成果，着重论述新兴技术对海军装备的影响，结合海军装备技术

发展热点，全面阐述海军兵器的新理论、新技术、新发展；丛书内容涉及舰炮、鱼雷与反潜武器、水雷与反水雷、导弹等多种海军兵器；丛书编撰注重学科理论和技术原理的阐述，同时兼顾内容的系统性，力争使丛书兼备较高的学术水平和较好的实用性。

本丛书可供海军兵器论证、设计、制造、使用和维护领域的技术人员和管理人员阅读参考，也可用作相关高等院校专业师生的教学参考书。

《现代海军兵器技术丛书》编委会

2015 年 2 月

前言

水下目标辐射噪声检测技术，特别是低噪声目标检测技术是世界各国极为重视的研究领域。矢量水听器技术是 20 世纪下半叶出现的获取水下噪声信号的新方法，它不但可以测量声场中最常见的标量物理量——声压，而且可以直接、同步测量声场同一点处流体介质质点振速矢量在笛卡儿坐标系下的 x , y , z 轴向投影分量；更为重要的是，矢量水听器具有良好低频指向性和抑制各向同性噪声的能力，从而为解决水声工程中的许多问题提供了新的思路和方法，较好地解决了以往仅依靠信号处理和提高阵增益检测低噪声目标的问题，在军事、海洋工程等方面具有广阔的应用前景，备受关注。

本书以声矢量为研究对象，研究了矢量水听器信号检测和处理方面的相关问题。全书共分为 8 章。第 1 章主要对声矢量传感器发展及现状、声矢量信号模型和舰船辐射噪声检测进行了归纳总结；第 2 章对单矢量水听器的波束形成、线谱增强和 DOA 估计方面进行了研究；第 3 章对声矢量阵列信源数估计问题进行了探讨；第 4 章介绍了声矢量阵列的几种 DOA 估计算法；第 5 ~ 7 章分别利用四元数和张量理论研究了声矢量阵列的 DOA 估计和波束形成；第 8 章对基于张量的舰船声矢量信号目标检测进行了探讨。

本书主要特色：

(1) 结构完整。近年来国内外虽然发表了许多有关矢量水听器方面的论文，但本书不仅总结了声矢量信号模型，而且对相关领域进行了深入的研究，尤其在信源数估计、目标检测等方面做了大量扎实有效的工作。

(2) 理论新颖。自 20 世纪下半叶以来，研究人员开始将一维信号处理逐渐延伸到多维信号处理的领域中，尤其是在阵列信号处理领域。本书将

四元数和张量等理论运用于单矢量水听器的 DOA 估计、声矢量阵列的信号源数估计和 DOA 估计等领域，取得了良好的效果。

(3) 内容丰富。本书不仅扼要地介绍了矢量水听器一个多世纪的发展历程，而且对其研究现状进行了认真归纳。书中不仅有对声矢量信号的理论推导，也有仿真分析和实验验证，内容深入浅出。

全书由程锦房、何希盈主笔。何光进、张炜、李楠、肖大为、马伯乐、张超然、许杰、钱富、刘毅、秦一平等进行了大量的研究工作，并组织了相关实验，为本书的撰写提供了第一手素材和理论研究成果；他们也分别参与了有关章节的撰写工作。

本书适合水声工程、信号和信息处理、通信与信息系统等专业领域的教师、研究生、高年级本科生和工程技术人员参考使用，对其他领域的科研人员也有一定的借鉴作用。由于本书涉及理论较多，而且许多理论仍在不断发展之中，如有不当之处，欢迎读者批评指正。

作者

2014 年 11 月 10 日

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 声矢量传感器发展及现状	1
1.1.1 声矢量传感器的发展	1
1.1.2 国内外研究现状	2
1.2 声矢量信号模型	7
1.2.1 长向量模型	7
1.2.2 四元数模型	8
1.2.3 张量模型	9
1.3 舰船辐射噪声检测	11
第2章 单矢量水听器目标探测与 DOA 估计	13
2.1 单矢量水听器波束形成	13
2.1.1 算法原理	14
2.1.2 噪声抑制能力	17
2.2 基于矢量相干积累的线谱增强算法	19
2.2.1 信号模型	19
2.2.2 算法原理	20
2.2.3 实验分析	21
2.3 基于波达方向矩阵的方位频率联合估计	26
2.3.1 算法原理	26
2.3.2 仿真分析	28
2.4 PARAFAC 模型及 DOA 估计	30
2.4.1 PARAFAC 模型的构建	30
2.4.2 算法原理	32
2.4.3 仿真分析	34

第 3 章 声矢量阵列信源数估计	38
3.1 几种经典的信源数估计算法	38
3.1.1 AIC 算法和 MDL 算法	39
3.1.2 盖尔圆方法	41
3.2 声矢量阵列核一致信源数估计算法	43
3.2.1 算法原理	43
3.2.2 仿真分析	47
3.3 声矢量阵列指数拟合检验信源数估计算法	48
3.3.1 算法原理	48
3.3.2 仿真分析	55
3.4 声矢量阵列特征子空间投影信源数估计算法	56
3.4.1 算法原理	56
3.4.2 仿真分析	58
第 4 章 声矢量阵列几种 DOA 估计算法	60
4.1 基于 JADE 算法的盲 DOA 估计	60
4.1.1 JADE 盲分离算法	60
4.1.2 仿真实验	61
4.2 有限快拍下的小尺度矢量阵 ESPRIT 算法	67
4.2.1 信号模型	67
4.2.2 算法原理	68
4.2.3 仿真实验	70
4.3 矩阵空域预滤波 MUSIC 算法	75
4.3.1 矩阵空域预滤波原理	75
4.3.2 矩阵空域预滤波 MUSIC 算法	75
4.3.3 仿真研究	76
第 5 章 基于四元数的声矢量阵列 DOA 估计	80
5.1 四元数基础	80
5.1.1 定义	80
5.1.2 运算法则	81
5.2 声矢量阵列两种常规 DOA 估计算法	83
5.2.1 声矢量阵列数据模型	83

5.2.2 常规 MUSIC 算法	84
5.2.3 常规 MVDR 算法	85
5.3 声矢量阵四元数 MUSIC 算法	87
5.3.1 振速分量四元数 MUSIC 算法	87
5.3.2 声压振速联合四元数 MUSIC 算法	88
5.3.3 算法分析	88
5.3.4 实验仿真	89
5.4 声矢量阵列双四元数 MUSIC 算法	94
5.4.1 算法原理	94
5.4.2 算法分析	95
5.4.3 实验分析	98
5.5 声矢量阵列四元数 MVDR 算法及改进	104
5.5.1 算法原理	104
5.5.2 实验分析	105
5.6 声矢量阵列波束域双四元数 DOA 估计	108
5.6.1 算法原理	108
5.6.2 实验分析	109
第 6 章 基于张量的声矢量阵列波束形成	112
6.1 张量及 PARAFAC 基础	112
6.1.1 张量的定义	112
6.1.2 PARAFAC 模型	115
6.1.3 PARAFAC 模型的可辨识性	117
6.1.4 PARAFAC 模型参数求解方法	118
6.2 声矢量阵列常规波束形成	119
6.3 基于张量的声矢量阵列常规波束形成	121
6.3.1 算法原理	121
6.3.2 性能分析	121
6.3.3 仿真分析	125
6.4 基于张量的声矢量阵列 MVDR 波束形成	127
6.4.1 算法原理	127
6.4.2 仿真分析	129

6.5 基于张量的声矢量阵列联合加权波束形成	130
6.5.1 算法原理	130
6.5.2 仿真分析	131
第7章 基于张量的声矢量阵列 DOA 估计	133
7.1 声矢量阵列的 PARAFAC 模型	133
7.1.1 声矢量阵的多平行子阵模型	133
7.1.2 声矢量阵 PARAFAC 模型	134
7.2 基于 TALS 的声矢量阵列方位频率联合估计	135
7.2.1 可辨识性分析	135
7.2.2 方位频率联合估计	136
7.2.3 仿真分析	137
7.3 基于高阶奇异值分解的声矢量阵列 MUSIC 算法	141
7.3.1 基于四阶相关张量高阶奇异值分解的信号子空间估计 ..	141
7.3.2 MUSIC 算法的改进	143
7.3.3 仿真实验	144
7.4 声矢量阵列张量域 ESPRIT 算法	147
7.4.1 算法原理	147
7.4.2 色噪声背景下 ESPRIT 算法	148
7.4.3 算法的实数化过程	150
7.4.4 仿真分析	151
7.5 声矢量阵列信号张量子空间拟合算法	153
7.5.1 算法原理	153
7.5.2 仿真分析	156
第8章 基于张量的舰船声矢量信号目标检测	158
8.1 基于张量的舰船声矢量信号维纳滤波算法	158
8.1.1 声矢量阵列三阶张量模型	158
8.1.2 算法原理	160
8.2 声矢量阵列三阶张量低秩近似滤波算法	165
8.2.1 算法原理	165
8.2.2 四阶累积量切片的引入	168
8.2.3 性能分析	169

8.3 声矢量阵列检测器及性能分析	174
8.3.1 最大最小特征值比值检测统计量	174
8.3.2 仿真分析	175
参考文献	178
索引	191

第1章 绪 论

1.1 声矢量传感器发展及现状

1.1.1 声矢量传感器的发展

声矢量传感器是指能测量声场同一点处流体介质质点运动的矢量信号,如位移、振速和振动加速度的装置,而用于水下声信号测量的这类传感器也通称为矢量水听器^[1]。在空气声学中,声矢量传感器可以用于战场警戒、探测直升机和隐形飞机,噪声源识别和声强、声功率测量等^[2]。在水声学中,矢量水听器主要应用水声警戒声呐、水雷声引信、拖曳线列阵声呐、舷侧阵共形阵声呐、多基地声呐、分布式传感器网络等。

声矢量传感器技术在最近几十年间备受水声界的关注,不仅是由于矢量水听器可以同步共点地获得声场的标量和矢量信息,增加了信息种类和数量,拓展了后置信号处理空间,更重要的是它在低声频和次声频段具有良好的指向性^[3],从而为解决水声工程中的许多问题提供了新的思路和方法。矢量水听器一般由声压水听器和质点振速水听器组成。振速水听器是矢量水听器的关键,用来测量水下声场矢量信息(声压梯度、质点振速、加速度或位移)。因此,质点振速传感器是矢量水听器的核心部件。一般来讲,矢量传感器主要按照质点振速传感器的类型来划分,大体上可以分为惯性式和声压梯度式两种类型^[1-2]。惯性式是指将对振动敏感的传感器(如加速度计)安装在刚性的球体、圆柱体或椭球体等几何体中,当有声波作用时,刚性体会随流体介质质点同步振动,其内部的振动传感器拾取相应的声质点运动信息,因此亦称为同振式。声压梯度式多是利用空间两点处声压的有限差分原理来近似得到声压梯

度,这可以通过反相串并联的线路连接在传感器内部实现,而声压梯度与介质质点的加速度之间的关系由欧拉(Euler)公式确定,通过计算间接得到介质质点振动信息^[4]。

矢量水听器作为水下声学测量设备,起源可追溯至 19 世纪末,但第一个真正意义的矢量传感器在 1942 年由美国贝尔电话实验室发明。在矢量水听器的制作方面,以压电敏感元件为核心的矢量水听器占据着统治地位。随着技术的发展,一些新工艺和新材料开始应用于制作矢量水听器,如将压阻原理和 MEMS(微机电系统)技术应用于矢量水听器,Howard 和 Thomas 等人利用 MEMS 技术于 1996 年制作出了两种 8cm^3 的微型振速传感器(见图 1-1)。光纤矢量水听器是一种利用光纤干涉仪作为核心的光纤传感系统,不仅具有普通压电矢量水听器的优点,而且易于成阵、抗电磁干扰强,是解决低频声目标探测与定位的有效手段^[5]。一直到目前,仍然有许多科技工作者尝试将新的材料和技术应用于矢量水听器。

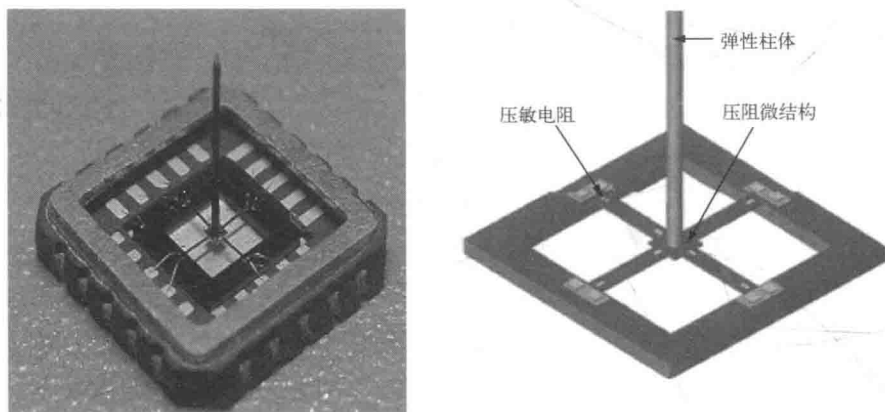


图 1-1 MEMS 矢量水听器微结构图

1.1.2 国内外研究现状

矢量水听器与具有相同低频指向性的声压传感器阵列相比,具有体积小、重量轻等优点,因此非常适合于对体积和重量要求较高的水下平台。20 世纪 90 年代前后出现了可实际应用的高性能矢量水听器,矢量水听器逐渐从实验室走向工程应用。如:美国海洋物理实验室制作了一个由 16

个阵元组成的垂直三维 DIFAR (Direction Frequency Analysis and Recording) 声矢量阵, 阵元间隔为 15m, 并于 1991 年 7 月进行了海上试验^[6]。另外, 英国、日本和法国等也相继开展了矢量水听器的制作与应用研究。

20 世纪 50 年代, 美国率先将其应用于声呐浮标, 主要型号有 AN/SSQ-53 型和 AN/SSQ-77B 型, 如图 1-2 所示。其中 AN/SSQ-53 型声呐浮标的工作频带为 5Hz ~ 2.4kHz, 能在 1000ft 海深工作 8h, 具有水下探测、定位和目标分类等功能。20 世纪 90 年代, 美国海洋信息技术研究所在加利福尼亚附近海域利用 Swallow 浮体和矢量水听器垂直线阵对海洋环境的次声频段(0.6 ~ 20Hz)进行了测量, 其中线阵阵元间距 150m, 布放在 400 ~ 1300m 的深度上^[7]。目前, 美国已将小型化的矢量水听器应用于大孔径拖曳阵和线阵上(见图 1-3), 可以测量 3Hz ~ 7kHz 的水声信号。2006 年, Wilcoxon 公司为 PLUSNet 计划研制的 Bluefin-21 无人潜航器(UUV), 尾部拖曳一条 21 基元低频(小于 1kHz)矢量水听器阵列进行定向试验, 阵列长 100m 左右, 其中 46m 为拖曳缆, 8m 减振缆, 30m 声学模块, 15m 尾端浮标, 如图 1-4 所示。2010 年, 为实现对鲸鱼的定位, 美国加利福尼亚大学斯克利普斯学院 Aaron Thode 教授提到利用声压阵列结合矢量水听器构成的拖曳线列阵^[8]。由于矢量水听器是拾取振速的传感器, 为减少机械振动和流噪声, 设计了如图 1-5 所示的复合拖曳阵列, 将单个矢量水听器置于其中。

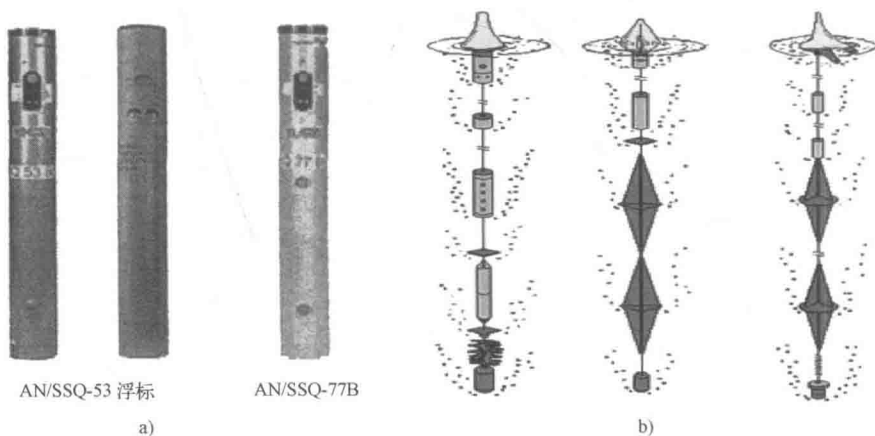


图 1-2 DIFAR 矢量水听器浮标阵列

a) 浮标封装; b) 工作示意图

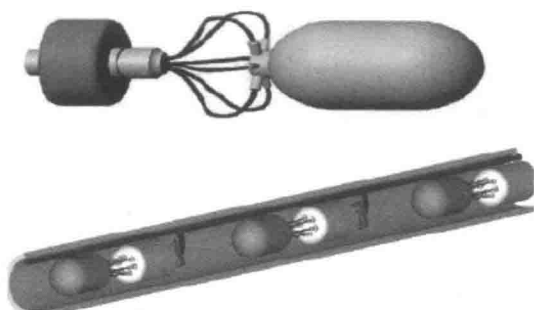


图 1-3 美国用于拖曳阵的小型矢量水听器

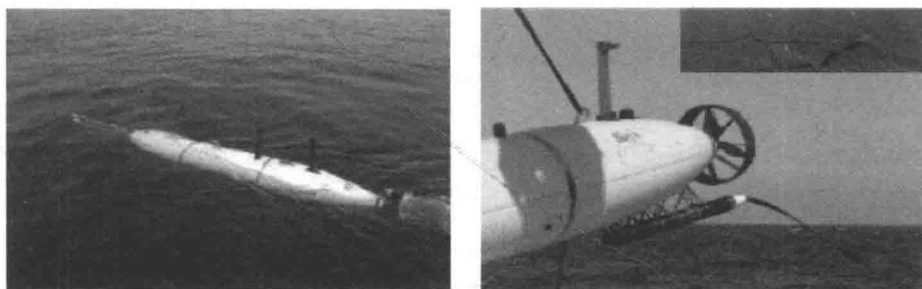


图 1-4 Bluefin 21 号测量系统

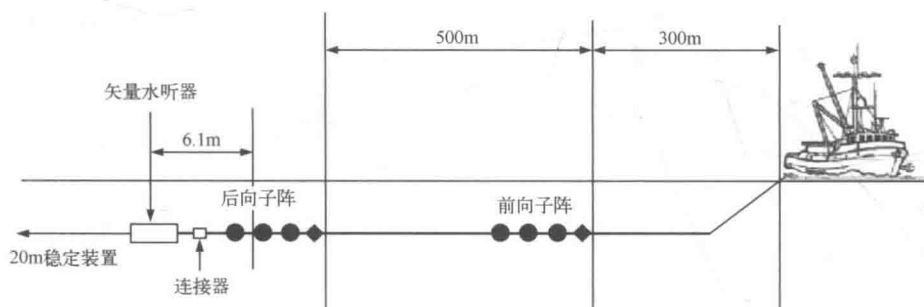


图 1-5 复合拖曳阵列

20 世纪七八十年代，苏联开始将矢量水听器应用于海洋环境噪声的研究。图 1-6 给出了他们的矢量水听器测量系统工作示意图。其间，相关研究人员就已开始在潜艇上安装矢量拖曳水听器阵列。1978 ~ 1998 年，苏联用这套装置在太平洋和印度洋及其周边海域做了大量的外场试验，对舰船辐射噪声和海洋环境噪声的矢量特性做了详细的分析，并实现了单个