

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代声学科学与技术丛书

声呐图像处理

李庆武 霍冠英 周 妍 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

声呐图像处理

李庆武 霍冠英 周 妍 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书论述了声呐图像处理的相关问题、理论和技术,共分7章。第1章主要介绍了水下声呐成像技术的发展历史和研究现状;第2章介绍了声呐成像原理;第3章论述了多波束前视声呐成像数据可视化与滤波算法;第4章首先介绍了多尺度几何变换,其次分析了侧扫声呐图像的噪声模型,研究了基于Curvelet变换的侧扫声呐图像局部自适应降噪方法;第5章论述了多尺度几何变换域侧扫声呐图像的增强方法;第6章提出了一种基于人眼微动机理的非下采样Contourlet变换域声呐图像边缘检测新方法;第7章研究了基于灰度共生矩阵和NSCT域纹理提取的无监督海底混响区底质分割方法。

本书可作为高等院校及科研院所图像处理、计算机视觉和水下探测等领域的研究生和高年级本科生的教学参考书,也可作为相关领域的科技、工程人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

声呐图像处理/李庆武,马冠英,周博著. —北京:科学出版社,2015.6

(现代声学科学与技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-044818-7

I. ①声… II. ①李… ②霍… ③周… III. ①声呐-图像处理 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第124410号

责任编辑:惠 雪/责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博/封面设计:许 瑞

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:237 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《现代声学科学与技术丛书》编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

陈伟中 陈 宇 邓明晰 侯朝焕

李晓东 林书玉 刘晓峻 吕亚东

马远良 钱梦騄 邱小军 孙 超

王威琪 谢菠荪 杨德森 杨士莪

张海澜 张仁和 张守著

前 言

海洋覆盖着整个地球面积的 71%, 是地球生命保障系统的一个基本组成部分, 是一个巨大的天然宝库, 其中蕴藏着极其丰富的矿产和生物资源. 世界各国对海洋资源的争夺日趋白热化. 我国是海洋大国, 海洋是支撑我国未来发展的重要战略空间, 建设海洋强国是中华儿女的百年梦想. 同时, 我国也是水利大国, 水能资源丰富, 累积兴建水库大坝 87 000 多座. 据不完全统计, 在 3100 多座大中型水库大坝中, 病险大坝约占 20%. 海洋安全和开发、堤坝安全探测等国防和国民经济领域的重大需求, 使得水下成像探测技术越来越受到重视. 水下成像探测技术主要包括光学成像和声呐成像. 光学成像作用距离较近, 一般在几米至几十米之间, 而且在浑水场合基本失效. 声呐成像具有作用距离远、穿透能力强等优点, 特别适用于浑水域, 因而广泛应用于海洋调查勘测、水下目标探测、港口航道疏浚、大坝缺陷检测等领域. 成像声呐主要有多波束测深声呐系统、侧扫声呐、前视声呐、合成孔径声呐等, 通常安装在舰船、潜艇、水下机器人等载体上进行水下探测.

由于水声信道的水介质及其边界具有复杂多变的特性, 再加上声波本身的透射特性, 因而成像声呐采集得到的图像往往具有噪声强、畸变严重、目标边缘模糊、分辨率低等特点, 严重影响了水下探测和作业. 为使声呐成像在水下探测中发挥更为重要的作用, 一方面可以改进现有的声呐设备, 采用更先进的信号发射、接收和处理器件与新的成像算法来提高图像质量, 例如前端混响抑制、新型波束成形、合成孔径声呐成像算法等; 另一方面, 在不改变现有设备和成像处理算法基础上, 针对声呐图像的特点, 采用合适的图像处理方法, 在很多情况下也可达到较好的效果. 近年来随着世界各国对海洋探测重视程度的提高, 掀起了对声呐图像处理研究的热潮, 相关研究包括增强显示、几何校正、降噪复原、超分辨重建、目标分割、目标跟踪、分类与识别、图像检索等方面, 涉及水声学、信号处理、模式识别与人工智能、计算机视觉等多个学科. 由于水下声呐图像的局限性, 许多光学图像的处理方法必须经过一定程度的改动才能应用于水声图像的分析、处理和识别. 目前针对水下声呐图像的处理方法主要有: 数理统计方法、形态学方法、神经网络方法、小波分析方法等, 这些方法都对声呐图像处理技术的进步起到了积极作用.

多尺度几何分析 (multiscale geometric analysis, MGA) 是近年来在数学分析、计算机视觉、模式识别、统计分析等不同学科中分别独立发展的一种彼此极其相似的新理论. 发展 MGA 的目的是检测、表示、处理某些高维空间数据. 在高维情况下, 小波分析并不能充分利用数据本身特有的几何特征, 并不是“最优”的或者说

“最稀疏”的函数表示方法. MGA 发展的目的和动力正是致力于发展一种新的高维函数的最优表示方法. 神经科学的研究表明, 人的视觉系统对外界场景具有“稀疏编码”的能力. 一种“最优”的图像表示法应该具有多分辨、局域性和方向性等特征. 实际上, 近年来各种多尺度几何分析方法的提出, 均考虑到所对应的基函数应该具有与视觉神经元的接收场类似的支撑区间. Curvelet、Contourlet 等多尺度几何分析方法自提出以来, 在图像的去噪、增强、融合、边缘检测、特征提取等领域都得到广泛的应用, 取得了传统方法不能达到的处理效果.

为了改善声呐图像处理效果, 本书主要采用多尺度几何分析方法, 针对声呐图像可视化、去噪、增强、边缘检测和分割等问题展开了深入研究, 详细介绍了我们团队近年来在声呐图像处理领域取得的最新进展, 以及采用的理论和方法, 同时给出了这些理论和方法的实际应用效果. 这些研究成果对从事声呐图像处理研究和工程应用具有一定的借鉴作用. 本书共分 7 章, 第 1 章绪论, 主要介绍了水下声呐成像技术的发展历史、声呐图像存在的主要问题和研究现状; 第 2 章声呐成像原理, 介绍了通用主动声呐系统及侧扫声呐、合成孔径声呐、前视声呐、多波束测深声呐系统的一般工作原理; 第 3 章多波束前视声呐成像数据可视化与滤波, 根据多波束前视声呐成像机理提出基于双立方插值的多波束前视声呐数据可视化算法和采用阶梯形掩模模型对回波点成像数据进行去噪的滤波算法; 第 4 章多尺度几何变换域侧扫声呐图像的去噪, 分析了侧扫声呐图像的噪声模型, 提出了基于 Curvelet 变换的侧扫声呐图像局部自适应降噪方法; 第 5 章多尺度几何变换域侧扫声呐图像的增强, 提出了基于 Curvelet 变换的分段式非线性侧扫声呐图像增强函数; 第 6 章基于人眼微动机理的 NSCT 域水下声呐图像边缘检测, 借鉴人眼固视微动的机理, 提出一种基于人眼微动机理的非下采样 Contourlet 变换域声呐图像边缘检测新方法; 第 7 章基于灰度共生矩阵和 NSCT 域纹理提取的无监督海底混响区分割, 结合灰度共生矩阵和 NSCT 变换提取多维纹理特征, 提出了一种自动的海底底质分割方法.

本书是河海大学智能感知与图像处理研究团队在声呐图像处理领域工作的结晶. 特别感谢国家自然科学基金 (60972101、41306089、41301448)、江苏省自然科学基金 (BK20130240)、江苏省科技支撑计划 (BS2007058、BE2012096) 与常州市传感网与环境感知重点实验室的资助. 本书的部分内容借鉴了国内外一些专家和学者的最新研究成果, 得到了河海大学物联网工程学院的大力支持, 在此深表谢意!

由于我们水平有限, 加上声呐图像处理技术发展迅速, 书中不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正.

李庆武 霍冠英 周 妍

2015 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 水下声呐成像技术发展历史	2
1.2.1 侧扫声呐	3
1.2.2 合成孔径声呐	4
1.2.3 前视声呐	5
1.2.4 多波束测深声呐系统	6
1.3 声呐图像存在的主要问题及研究现状	7
1.3.1 声呐图像存在的主要问题	7
1.3.2 声呐图像处理的研究现状	8
参考文献	11
第 2 章 声呐成像原理	15
2.1 声呐技术	15
2.2 主动声呐的一般模型	16
2.3 波束形成技术	18
2.3.1 等间隔基元的直线阵	18
2.3.2 相控发射	22
2.4 成像声呐	23
2.4.1 侧扫声呐	23
2.4.2 合成孔径声呐	28
2.4.3 前视声呐	32
2.4.4 多波束测深声呐系统	36
2.5 本章小结	41
参考文献	41
第 3 章 多波束前视声呐成像数据可视化与滤波	43
3.1 多波束前视声呐成像	43
3.2 多波束前视声呐视域范围和成像几何模型	44
3.3 Gemini 720i 多波束前视声呐数据格式与二维几何模型	46
3.3.1 Gemini 720i 多波束前视声呐数据格式	46

3.3.2	Gemini 720i 多波束前视声呐的二维几何模型	47
3.4	基于双立方插值的多波束前视声呐数据可视化算法	48
3.4.1	现有的前视声呐数据可视化算法	49
3.4.2	线性插值核函数的性能分析	52
3.4.3	基于双立方插值的多波束前视声呐数据可视化算法	57
3.4.4	插值实验及结果分析	61
3.5	针对多波束前视声呐成像数据的空间域滤波	65
3.5.1	多波束前视声呐图像的噪声特点	65
3.5.2	传统空间域滤波	66
3.5.3	常用空间域滤波掩模模型分析	69
3.5.4	针对多波束前视声呐成像数据的空间域滤波	70
3.5.5	实验与结果分析	73
3.6	本章小结	82
	参考文献	82
第 4 章	多尺度几何变换域侧扫声呐图像的去噪	85
4.1	图像去噪	85
4.2	多尺度几何分析理论及其在声呐图像处理中的应用研究	86
4.2.1	多尺度几何分析理论发展背景	86
4.2.2	多尺度几何变换	90
4.2.3	多尺度几何变换域声呐图像处理研究现状	95
4.3	水下侧扫声呐图像的特性研究	97
4.3.1	侧扫声呐图像的成像	97
4.3.2	侧扫声呐图像特性	98
4.3.3	噪声模型分析	98
4.4	Curvelet 变换域水下侧扫声呐图像的去噪	102
4.4.1	Curvelet 变换域的噪声统计建模	102
4.4.2	Curvelet 变换域的信号统计建模	103
4.4.3	Curvelet 变换域自适应去噪算法	104
4.4.4	实验结果与分析	107
4.5	本章小结	113
	参考文献	113
第 5 章	多尺度几何变换域侧扫声呐图像的增强	118
5.1	图像增强	118
5.2	直方图均衡化	119
5.3	结合方向扩散的改进直方图均衡化	121

5.4 Retinex 增强方法	124
5.4.1 单尺度 Retinex 算法	125
5.4.2 多尺度 Retinex 算法	126
5.5 Curvelet 变换增强法	127
5.6 实验结果与分析	130
5.7 本章小结	134
参考文献	135
第 6 章 基于人眼微动机理的 NSCT 域水下声呐图像边缘检测	137
6.1 视觉仿生	137
6.2 图像边缘检测	139
6.2.1 边缘检测问题的描述	139
6.2.2 边缘检测算法	140
6.3 人眼微动机理	144
6.3.1 人眼视觉系统通路	144
6.3.2 人眼固视微动与视觉适应性	144
6.3.3 视网膜动态分析与模拟	145
6.3.4 基于人眼微动的视网膜边缘检测	147
6.4 非下采样 Contourlet 变换及特性	148
6.4.1 NSCT 变换	148
6.4.2 NSCT 变换的特性	151
6.4.3 NSCT 变换系数分析	151
6.4.4 系数特征分析	153
6.5 NSCT 域水下声呐图像边缘检测	153
6.5.1 NSCT 域边缘检测原理	153
6.5.2 边缘检测算法步骤	154
6.5.3 算法特点	154
6.5.4 实验及结果分析	154
6.6 本章小结	158
参考文献	159
第 7 章 基于灰度共生矩阵和 NSCT 域纹理提取的无监督海底混响区分割	161
7.1 海底底质分析	161
7.2 纹理分析	163
7.2.1 纹理与纹理分析	163
7.2.2 常用的纹理分析方法	164
7.3 侧扫声呐图像底质纹理特征提取	165

7.3.1	基于灰度共生矩阵的侧扫声呐图像纹理特征提取	166
7.3.2	基于 NSCT 变换的侧扫声呐图像纹理特征提取	168
7.3.3	侧扫声呐图像纹理特征提取的具体步骤	168
7.4	聚类分割与聚类数目确定	169
7.4.1	K 均值聚类算法	169
7.4.2	聚类数目确定与聚类有效性评价	171
7.4.3	海底混响区无监督聚类分割的具体步骤	171
7.5	侧扫声呐图像海底混响区底质分割实验结果与分析	172
7.6	本章小结	177
	参考文献	177

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

海洋覆盖着整个地球面积的 71%，是地球生命支持系统的一个基本组成部分，是一个巨大的天然宝库，其中蕴藏着极其丰富的矿产和生物资源^[1]。世界各国对海洋资源的争夺日趋白热化^[2,3]。我国是海洋大国，海域跨越热带、亚热带和温带，大陆海岸线长达 18000 多千米，领海、专属经济区和大陆架等管辖海域广阔，海洋渔业资源丰富。近海石油资源量约 2.4×10^{10} t，天然气资源量 1.4×10^{13} m³，还有天然气水合物资源。滨海砂矿资源储量 3.1×10^9 t。海洋能源理论蕴藏量 6.3×10^8 kW。此外，在国际海底区域我国还拥有 7.5×10^4 km² 多金属结核矿区^[4]。海洋测绘是一切海洋开发活动的基础，对于实施海洋开发战略，实现建设小康社会的战略目标具有重要意义。同时，我国也是水利大国，水能资源丰富，累积兴建水库大坝 87000 多座，据不完全统计，在 3100 多座大中型水库大坝中，病险大坝约占 20%，小型水库大坝中约有 40%也是病险的^[5]。堤坝隐患是造成汛期重大险情的主要因素之一，如果能够获得水下坝体和坝底、水下地形、地貌变化起伏的图像并进行维修、加固处理等措施，则可以使隐藏的险情大为减少，同时也使除险加固更有针对性。

海洋测绘、水下目标探测需要采用合适的水下成像技术。当前，水下成像技术主要包括光学成像和声呐成像^[6]。光学成像分辨率较高，但作用距离较近，一般在几米至几十米之间，而且在浑水场合基本失效。声呐成像具有作用距离远、穿透能力强等优点，特别适用于浑水域，因而在水下地质地貌勘测、水下丢失物寻找、水雷探测（含锚雷、沉底雷和泥沙掩埋的沉底雷）、坝基检测等领域得到了广泛应用^[2,3,7]。然而，水声信道的水介质及其边界具有复杂多变的特性，声波本身的传播损失和透射、散射，导致采集得到的声呐图像往往具有对比度低、斑点噪声强和目标边缘模糊等特点^[8-10]，这给声呐图像的人工判读和自动解译带来了极大的困难，不利于声呐成像在水下目标探测与定位、堤坝安全检测与修复、海上资源勘探与管道敷设、水库清淤与航道疏浚等国防民生领域发挥更为重要的作用。

针对声呐图像的特点进行图像处理，可以将水下场景信息更加清晰、真实地呈现在声呐操作员面前，提高人工判读的准确性，降低目标漏判、误判的概率；通过对声呐图像进行边缘检测和分割，获得区域一致性好、边缘定位准确的自动分割结果，是水下作业与目标识别的关键步骤，对声呐图像的自动准确解译至关重要，有

助于进一步发挥声呐成像在水下目标探测等领域的重要作用。

1.2 水下声呐成像技术发展历史

声波是人类迄今为止已知的唯一能在水中远距离传播的能量形式,因此声波作为在水中进行探测和通信的主要手段,在海洋监测、海洋工程、海上军事作战、海洋科学研究等方面发挥着不可替代的作用^[1]。而声呐是利用声波作为信息载体的探测设备。声呐 (sonar) 一词是第二次世界大战期间产生的,它是由声音 (sound)、导航 (navigation) 和测距 (ranging) 3 个英文单词的字头构成的。

早在 1490 年,意大利著名艺术家和工程师达·芬奇就曾说过:“如果使船停航,将一根长管的封口端插入水中,而将开口放在耳旁,便能听到远处的航船。”这表明人们在几百年前就已发现,水对声波的吸收能力是较小的,可利用声波来探测水下的物体。可以说,达·芬奇所说的听测管即是现代被动声呐的雏形,只不过这种听测管过于原始,既不能探测到水下目标的方位,灵敏度又很低。

20 世纪初,大型船只只有简单的无线电通信设备,而没有对海观测的雷达,更没有用于水下目标探测的声呐。1912 年 4 月 10 日,英国当时刚刚研制成功的一艘 46000t 级的新邮轮“泰坦尼克号”,满载 2208 名乘客与乘务员,从英国的南安普敦港出发,于 4 月 14 日航行到加拿大纽芬兰岛南部海域被一座浮动冰山撞沉,结果导致 1500 余人遇难。这是当时世界上最大的一起海难事件,引起了全球性的震动,使科学界对声呐的研制开始广泛关注。5 天之后,有个叫理查森的英国人提出了用空气声进行回声定位的建议。1 个月以后,他又提出了相仿的水声回声定位方案,这便是世界上第一个主动声呐方案。所谓主动声呐,就是一种自己向水中发射声波,并根据水中物体的回波来达到各种探测目的(比如定位)的水声设备。可惜的是,理查森并没有能实现他的方案,因为当时还没有能在水下朝着既定方向发射声波的设备。

1914 年 7 月,第一次世界大战爆发。在战争期间,德国展开了“无限制潜艇战”,利用新发明的 U 形潜艇,击沉了协约国的大量军舰和商船。比如一艘 U 形潜艇仅在 75min 内,便用鱼雷击沉了 3 艘装甲巡洋舰。探测水下潜艇的任务迫在眉睫。协约国立即投入许多人力和物力,进行探测方法和设备的研究。磁学的、光学的、热学的方法都试过了,但效果均不理想。实践证明,最有效的是声学方法。于是,各种声呐系统竞相问世。1916 年,法国著名物理学家保罗·朗之万和年轻的俄国电气工程师康斯坦丁·基洛夫斯基合作发明了回声定位声呐,用他们的设备可以在水下探测到 200m 之外的一块装甲板的回波。

第一次世界大战结束后不久,用于船舶导航的新型设备——回声测深仪诞生了。实际上,它是人们在研制探潜回声定位系统的过程中所得到的副产品。此后,由

于电子技术的发展,水声换能器性能的改善,特别是对于声波在海水中传播规律的深入了解,使声呐技术不断地向前迈进。

第二次世界大战的爆发,开创了声呐发展的新时期。从那时开始,一系列新型的主、被动声呐纷纷问世。参战各国的舰艇都相继装备了能够适用于作战的声呐。1945年,英国潜艇“冒险者”号首创纪录,在水下完全依据声呐探测到的信息,对于同样处于水下的德国潜艇发动了攻击。此后,作为水下观测的重要耳目,声呐的地位日益巩固。

第二次世界大战以后,水声学和声呐技术有了显著的发展,无论是军用还是民用,都更注重水声物理与水声工程的结合,即从机理上探索水声信号在海洋中传播的规律,并寻求可以利用这些规律的技术设计和工程实现方法^[3]。

20世纪50年代后期至60年代初期,声呐设计者逐步把数字信号处理技术引入声呐系统。声呐信号的数字化处理,使得声呐的面貌发生了根本性的变化。数字信号便于传输、存储和加工,有可能使声呐设计者为声呐员设计出更好的人机界面,从而提高声呐的性能。

总的来说,声呐可以分成多个门类。按工作方式可分为主动声呐、被动声呐;按载体可分成舰艇用声呐、潜艇用声呐、航空吊放声呐及岸用声呐;按工作任务又可分为预警声呐、导航声呐、通信声呐、猎雷声呐、剖面声呐和图像声呐等。图像声呐是一种功能通用的声呐,既可以通过声呐图像进行目标识别来给出预警信息,也可以通过声呐图像分析目标的表面结构对目标进行检测。当前,水下声呐成像主要有侧扫声呐、合成孔径声呐、前视声呐及多波束测深声呐系统等,这些声呐均为主动声呐,既具有共同点,又因扫描方式不同、布阵方式不同及数据处理和显示信息不同,具有不同的特点^[12]。

1.2.1 侧扫声呐

大多数国外水下机器人都安装有侧扫声呐,它是进行海底绘图的最理想工具。侧扫声呐具有较高的分辨率,不仅可以绘制出海底的地形地貌图,而且可以对沉于海底的沉船、失事飞机、沉物进行成像,并且可以用来进行海底探雷。侧扫声呐技术的出现可以追溯到第二次世界大战后期,但直到20世纪50年代末才用于民用,60年代末侧扫声呐的概念开始为全世界所接受。在军用领域,美国Northrop Grumman公司研制的AN/AQS-14A型高速拖曳侧扫声呐,于1995年装备于美国海军,它既可以完成实时目标定位,又可以提供便携式后分析系统和计算机辅助检测、分类的功能。该公司的侧扫/合成孔径声呐/激光扫描仪三位一体的猎雷系统集成了侧扫声呐具有的测绘速率高和双频合成孔径声呐有利于探测掩埋雷的优点。在民用领域,有代表性的产品是GeoAcoustics公司生产的Model SS981, USA-WESMAR公司生产的SHD700SS型、USA Fishers SSS~100kHz/600kHz侧扫声呐。上述产品

都采用了双频技术,可安装在拖鱼上,也可安装在自主式水下潜水器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 上. 此外, EdgeTech 公司研制的全频谱调制 (FM) 多脉冲型 MP-X 侧扫声呐,可增加高速扫查时的海底覆盖率. 其他产品还有德国 GEOMAR 公司的 DTS-1 型,也采用了双频技术 (75kHz 和 410kHz); Datasonics 公司生产的 SIS-1500CHIRP^[14] 型侧扫声呐.

我国从 20 世纪 70 年代开始组织研制侧扫声呐,经历了单侧悬挂式、双侧单频拖曳式、双侧双频拖曳式等发展过程. 目前已有多个高等院校和科研机构取得阶段性的成果. 其中,由中国科学院声学研究所研制并定型生产的 CS-1 型侧扫声呐,其主要性能指标已达到世界先进水平.

目前,侧扫声呐的研究主要包括 2 个方面:相干声呐的研究、数据处理软件的开发 (声图的自动化判读与识别、水下目标的精确判定等).

1.2.2 合成孔径声呐

合成孔径声呐 (synthetic aperture sonar, SAS) 代表了侧扫声呐发展的一个新方向,实际上也是侧扫声呐的一种^[12]. 合成孔径声呐的原理研究从 20 世纪 60 年代开始. 美国 Raytheon 公司于 1967 年提出关于 SAS 可行性的报告, Walsh 于 1969 年申请了第一个 SAS 专利. 但是 20 世纪 60 年代至 70 年代 SAS 发展缓慢,这其中既有技术实现上的困难,又有对 SAS 技术上是否可行的认识问题. 在 SAS 研究领域,有两个主要问题被认为影响了其技术的发展:第一个是水声信道问题,水声环境一般比较恶劣 (如随时变化的信道),不同回波信号的相干性是个问题. 特别是浅海水声环境条件不理想,同空气中电磁波工作环境相比,是更为复杂的媒质. 当时的主流观点认为,水声信道太不稳定,不适合合成孔径处理. 另一个问题是声波传播速度比电磁波慢得多,由于方位模糊问题,使得信号空间采样率较低,大大限制了 SAS 载体的运动速度,进而限制了测绘速率的提高.

在 SAS 研究处于低潮时期,仍有一些学者坚持不懈地探索. Williams 于 1976 年,Christoff 等于 1982 年, Gough 和 Hayes 等于 1989 年,进行了一系列水声传播实验,其结果表明,水声信道的影响并不像预想的那么严重,尽管水声信道是随时间变化的,但水声回波信号在较短时间内仍具有较好的相干性,水声信号的相干性能够满足合成孔径成像的要求. 声传播速度慢导致的信号空间采样率低和限制 SAS 载体运动速度等问题,可以通过多子阵的办法来弥补.

合成孔径成像在雷达领域取得的成功,推动了合成孔径声呐技术的发展. 由于合成孔径成像的相似性, SAS 可借鉴 SAR 中的技术成果, SAR 中的成像算法可用于 SAS 中. 受 SAR 成功的鼓舞,一些国家自 20 世纪 80 年代以来进行了较多的水声传播和合成孔径声呐成像试验. 进入 20 世纪 90 年代, SAS 研究开始活跃起来,并出现了实验样机系统. 一些 SAS 系统的作用距离从几十米到几百米,甚至到

十几千米远, 分辨力也从米、分米到厘米量级. 欧洲 SAMI SAS 于 1996 年进行了海上试验, 获得了较远距离上的大面积范围海底测绘图. 法国的新型合成孔径声呐 IMBAT 3000 是商用型的, 主要用于水下地形地貌勘测和石油开采. 美国在该领域投资很大, 研究成果也处于领先地位. 美国雷声公司和 DTI 公司从 1994 年起合作研制了两型合成孔径声呐系统——DARPA 和 CEROS, 分别用于探测水雷和近水域埋藏的爆炸物. 美国 DTI 公司最新推出分辨力 10cm 的 PROSAS 系统, 是一个商用型产品, 可以安装在 AUV 或 ROV(remote operated vehicle, 无人遥控潜水器) 上.

在国家高技术研究发展计划 (863 计划) 的支持下, 我国从 1997 年启动了合成孔径声呐研究. 经过 8 年的发展, 我国在 SAS 理论及关键技术方面取得了很大进展, 先后研制出湖试和海试合成孔径声呐成像系统, 完成了一系列试验, 达到了与国际同步的发展水平^[11].

1.2.3 前视声呐

前视声呐也可称为扇扫声呐, 属于主动声呐的一种, 一般安装在船舶或者水下机器人的前端. 在水下作业中, 前视声呐不仅可以探测海中的状况, 而且可以对目标进行定位, 判断目标的大小以及形状信息. 比如在打捞沉底物的过程中, 可以利用前视声呐对沉底物进行定位, 之后根据声呐图像中物体的形状信息来进行判别. 特别是对于一些在水下工作的机器人来说, 前视声呐就相当于它的眼睛, 前视声呐不仅起到避障的作用, 而且当它遇到感兴趣的目标时, 可以利用前视声呐对其进行跟踪.

前视声呐成像速度快, 既能在高速的运动状态下快速成像, 又能针对高速运动中的目标快速成像. 随着前视声呐系统的发展, 其功能性、分辨率相继提高, 使用起来越来越方便, 因此在水下探测、定位导航、水下目标识别与跟踪、轨迹测量等场合得到了广泛的应用. 现在的前视声呐主要分为机械扫描式和多波束两种; 从成像维数又可分为二维成像和三维成像.

虽然前视声呐的起步较晚, 但研究成果显著, 相关产品较为丰富. 当前代表行业内最高水平的用于避碰功能的前视高分辨声呐的知名厂商主要有: 美国的 Reason 公司, 其代表产品型号为 7128; 美国的 BlueView 公司, 其代表产品型号为 P900 系列; 美国的 FarSounder 公司, 其代表产品型号为 FS-3DT 和 FS-3ER; 英国的 Tritech 公司, 其代表产品型号为 Super SeaKing DST 和 Eclipse; 英国的海洋电子有限公司 (Marine Electronics Ltd.), 其代表产品型号为 Dolphin 3040V/H 及 Dolphin 6201; 加拿大的 Imagenex 科技公司, 其代表产品型号为 837. 而挪威 Kongsberg 公司研制的 SM2000 是一种小巧、轻便和实用性广的多波束前视声呐系统, 它采用 200kHz 高频声呐探头, 产生 128 个波束, 其成像效果具有很高的分辨率, 因而能够探测到

非常小的目标 (类似锚、水雷等); 德国 ELAC 公司生产的 SeaBeam3012 深水多波束测深系统, 工作频率 12kHz, 最大探测深度 11000m, 最大 205 个波束, 具有实时性强、姿态稳定、浅水自动对焦等特点; 美国 Reason 公司生产的 SeaBat8125 是已成商品化的宽频带、宽扇区、聚焦式多波束前视声呐, 特别适用于江河、湖泊、港湾及浅海的高分辨率、高精度航道水深测量及碍航物测量。

目前, 国内相对成熟的高分辨率前视声呐产品较少, 但是与此相关或是类似的研究工作 (如探雷声呐, 用于水下地形测绘的多波束声呐等) 一直在进行。

1.2.4 多波束测深声呐系统

多波束测深系统是在回声测深仪的基础上发展起来的。顾名思义, 多波束测深系统能一次给出与航向垂直的垂面内几十甚至上百个海底被测点的水深值, 或者一条一定宽度的全覆盖水深条带, 所以它能精确地、快速地测出一定宽度内水底地貌的大小、形状和高低变化, 从而比较可靠地描绘出海底地形地貌的精细特征。多波束测深技术是高精度海底地形探测手段, 它诞生于 20 世纪 70 年代, 迅速发展于 80 年代, 主要经历萌芽阶段、生产定型实测阶段、大规模生产阶段。

1. 萌芽阶段 (20 世纪 50 年代 ~1964 年)

多波束测深系统萌芽阶段可追溯到 20 世纪五六十年代美国海军研究署资助的军事研究项目。1956 年夏季, 在美国的 Woods Hole 海洋研究所召开的一次学术研讨会上首次大胆地提出了多波束测深的构想, 以获得详细海底地形以及声呐设计的相关物理特性。

2. 生产定型实测阶段 (1964~1979 年)

1964 年 2 月, 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 在 Surveyor 号船上进行了窄波束回声测深仪 (NBES) 的海上试验。1976 年随着数字化计算机的发展及控制硬件技术应用到窄波束回声测深仪中, 第一台多波束扫描测深系统, 即 SeaBeam 系统诞生, 可同时产生 16 个波束, 安装于法国国家海洋勘探中心 (CNEXO) 的 Jean Charcot 号船并进行了实时测深试验, 经改进后, 于 1979 年第一台 SeaBeam 系统被安装在 NOAA 的 Surveyor 号船。

3. 大规模发展阶段 (1979 年至今)

随着第一台多波束装备使用, 特别是 20 世纪 80 年代初, 美国东北部海洋研究集团 (NECOR) 成立后, 多波束的研究与发展制造进入了大规模的发展阶段。许多制造公司都开始进入这一领域, 研制开发出了不同型号的浅水和深水多波束测深系统。从技术的发展来看, 从在测量船上进行简单的数据采集, 在陆上进行处理显示开始, 发展到集数据采集、综合、处理和显示于一体的多波束测深系统; 从单纯的幅

度检测到分裂波束相位差的高精度估计方法处理边缘波束等;从 16 个波束测深发展到 32 个波束,甚至有的可以形成多达 1440 个波束,而且用于水深测量的发射脉冲也被同步应用于侧扫图像,并可接收到每次扫海多达 4096 个回声振幅数据;从简单地测深发展到测深与成像合一的产品。

4. 多波束测深系统发展展望

多波束的发展离不开高性能计算机技术、高精度定位技术和数字化传感器以及其他相关高新技术的迅速发展。从 20 世纪 90 年代开始,多波束开始向着高精度、智能化、多功能的组合式测深和侧扫成像系统方向发展。多波束测深声呐系统(如 SeaBeam3050、Seabat7150、EM302)一般兼有测深声呐和侧扫声呐两种功能,因此也称为多波束测深侧扫声呐^[1]。

1.3 声呐图像存在的主要问题及研究现状

1.3.1 声呐图像存在的主要问题

声呐和雷达工作原理非常相似,然而,水介质中声传播的复杂性和声波本身的特性,使得声呐采用的技术要比雷达复杂,尽管如此,效果仍不甚理想。声呐在用于目标(水声学中,目标指潜艇、鱼雷、水雷、突出的礁石等物体)探测时,会受到海洋环境噪声、舰船自噪声及混响信号的干扰,其中混响是主要的背景干扰^[13]。由声学理论可知,声波在传播途中遇到障碍物或目标时,会在物体表面激发起次级声源,它们向周围介质中辐射次级声波,习惯上这些次级声波可统称为散射波。其中,返回声源方向的那部分波,称为目标(障碍物)回波。大目标前方的次级波称为反射波,目标后面影区内的次级波称为绕射波,对于小目标(目标的线度远小于声波波长),向各空间各方向辐射的次级波称为散射波,反射是次要的;对于线度大小可与声波波长相比的目标,反射、绕射和散射都将起作用^[13]。除了目标本身的反射、散射外,海水中存在着大量的散射体,如海洋生物、湍流、不均匀温度水团等,它们对声波产生散射信号,这些散射信号在接收机叠加形成海水体积混响;海底既是声波的有效反射体,也是声波的有效散射体,海底的起伏不平整、海底表面的粗糙度及海底附近的各种散射体对声波的散射作用,形成海底混响;由于风浪的作用,海面总是处于起伏不平的状态,另外,风浪产生大量气泡,在海面附近形成具有一定温度的气泡层,这些共同产生海面混响^[13]。各种混响在接收机端进行叠加,从而导致声呐图像斑点噪声突出、目标边缘模糊。

通常,为保证获取图像的分辨率,无论是侧扫声呐还是前视声呐,成像声呐的中心频率都在几百千赫以上。但是海水介质对声波能量的吸收随其中心频率的增长以平方次增长,并伴有传播中的体积扩散,这就使高频声波在海水中损失掉很多