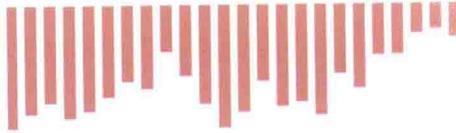


侧扫声呐图像目标分割

CESAO SHENGNA TUXIANG MUBIAO FENGE

■ 霍冠英 李庆武 周 妍 著 ■



HEUP 哈尔滨工程大学出版社



侧扫声呐图像目标分割

CESAO SHENGNA TUXIANG MUBIAO FENGGE

■ 霍冠英 李庆武 周 妍 著 ■



 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书在简述侧扫声纳的工作原理、分析侧扫声纳图像存在的主要问题的基础上,围绕侧扫声纳图像目标分割的主题,就侧扫声纳图像灰度畸变校正、统计特性研究、目标边缘检测及基于活动轮廓模型的侧扫声纳图像分割等问题展开了深入的研究,重点介绍了水平集方法在侧扫声纳图像目标分割中的最新进展。

本书可作为高等院校及科研院所声纳图像处理、水下目标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

侧扫声纳图像目标分割/霍冠英,李庆武,周妍著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.4
ISBN 978-7-5661-1478-5

I. ①侧… II. ①霍… ②李… ③周… III. ①声纳—
图像—研究 IV. ①U666.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 057080 号

责任编辑 马佳佳

封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 9.75
字 数 252 千字
版 次 2017 年 4 月第 1 版
印 次 2017 年 4 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

◀ 前 言 Preface

作为全球生态系统中最重要的一部分,海洋覆盖着整个地球表面积的 70% 以上,是一个远未被开发的富饶的天然宝库,其中蕴藏着极其丰富的生物、矿产等各种资源。随着世界各国陆地资源的日益短缺和全球经济、军事环境的不断变化发展,海洋资源成为世界各国争夺的焦点,海洋资源的开发利用也变得尤为重要。我国属于海洋大国,海岸线长达 1.8 万公里,海域跨越热带、亚热带和温带,所管辖的领海、大陆架和专属经济区等海域十分广阔,其中蕴藏着丰富的油气、天然气、石油等资源,还有大量的天然气水合物资源。当前,我国处于民族复兴的关键历史时期,正在由陆权国家向海权和陆权并重的国家转变,挺进海洋是历史发展的必然,关系到我国海洋权益、经济发展和国家安全等核心利益,也是建设海洋强国、实施“一带一路”战略的迫切需求。海洋开发和安全等民生、国防领域的重大需求,使得水下成像探测技术越来越受到重视。目前水下成像探测技术主要有基于水声传感器阵列的声呐成像探测和基于光学传感器的光学成像探测两种途径。水下声呐成像探测距离远、穿透能力强,不易受水质影响,特别适用于浑水域,在水下远距离的目标定位和导航中更具优势,因而在海洋测绘、水下地质地貌勘测、水下目标搜索、水雷探测、坝基检测等领域得到了广泛应用。代表性的声呐成像设备有侧扫声呐、前视声呐、多波束测深声呐系统等。

侧扫声呐能够在能见度为零的水下提供分辨率较高的水下环境图像,因此被广泛应用于海洋测绘、水下搜救、水雷检测、管线测量等领域。对于水下目标探测,侧扫声呐在民用上可以搜寻失事飞机、船只残骸及失事人员,定位海底管线及探测突出的礁石、海底矿石,在军用上可以发现沉底水雷等军事目标。侧扫声呐安装在拖鱼上对海底斜距成像,一般白色代表回波信号较强,暗色代表回波信号较弱,硬



的、凸起的目标回波较强,形成目标高亮区,由于凸起目标对声波的遮挡,会同时产生没有回波的长阴影区,目标区和阴影区两者左右相邻(右舷图像,对于左舷图像反之)且在一条水平线上,粗糙不平的海底及存在于海底附近的各种散射体对声波的散射回波形成了图像中大面积的海底混响区。侧扫声呐图像目标识别行之有效的方法是阴影法和目标回波法,不同形状的目标,声波从不同角度照射时得到的声影形状是不同的,阴影或目标的形状特征是目标判读识别的关键。在对侧扫声呐图像中的可疑目标进行识别及测量之前,分割是至关重要的步骤之一,通常需要将侧扫声呐图像分割为目标高亮区、阴影区及海底混响区三类。然而,由于水声信道及其边界(海底、海面)的复杂多变性、成像方法及系统参数设置等因素的影响,侧扫声呐图像斑点噪声突出、灰度及几何畸变严重。得到阴影和目标边缘真实准确的分割结果对于促进声呐图像的准确解译至关重要。然而,噪声强烈、灰度畸变造成侧扫声呐图像分割更为困难,声呐图像分割作为声呐图像解译的关键和难点,得到了重点关注。

针对声呐图像目标分割的难题,学者们提出了多种分割方法,研究较多的方法主要可归为以下几类:基于边缘检测的分割、阈值分割、基于数学形态学的分割、基于分形理论的分割、聚类分割、基于 MRF 模型的分割、基于水平集的分割。基于边缘检测的分割具有边缘定位精度较高的优点,但是对噪声也较为敏感,因此需要合适的降噪预处理和边缘连接等后处理。当图像质量较差时,算法检测到的边缘通常是断裂的,如何更好地将检测到的不连续的边缘片段组合成具有整体意义的闭合轮廓,是基于边缘检测的分割需要考虑的问题。阈值分割计算简单、速度快,当不同区域的灰度差别较大时,效果较好。但是当灰度值相差较小或者灰度值有较大重叠时分割的效果较差,同时由于只考虑像素本身的灰度值,对噪声较敏感,当噪声较强时,需要和其他方法结合使用,以考虑更多的空间特征。聚类分割通过像素自身的灰度值及其邻域的统计参数得到描述像素局部特征的特征向量,对特征向量进行聚类得到分割结果。聚类方法应考虑数据分布的影响,当数据不符合联合正态分布时,聚类方法的效果难免略有偏差。基于 MRF 模型的分割是一种能够有效利用像素结构信息的分割算法,该算法假定待分割图像的像素只与其邻域内的像素相关,通过对标记场和观测场进行建模,在贝叶斯框架下基于 MAP 等准则产生分割结果。MRF 的先验模型中,势函数根据标号对图像分割过程中的不一致性进行惩罚,没有考虑边缘等信息对其的影响,因此很难在促进分割结果区域一致

性的同时较好地保持边缘。

主动轮廓模型(Active Contour Model, ACM)能够检测得到亚像素精度的目标边界,易于引入目标形状、强度分布等先验信息,且能够得到完整平滑的目标信息,因此被广泛应用于目标轮廓检测和图像分割。根据主动轮廓的表达和求解方式,主动轮廓模型可以分为参数主动轮廓模型和基于水平集的几何主动轮廓模型。水平集的引入使几何主动轮廓模型获得了极大的成功,基于几何主动轮廓模型的分割也因此常被称为基于水平集方法的分割或者水平集分割,成为当前研究极为活跃的分割方法。图像分割是病态问题,从贝叶斯理论角度来看,分割的关键在于结合图像本身的特征,引入合理的先验知识,从而提出有意义的能量泛函,分割的结果应符合原图像特征并满足先验约束,就这一点而言,基于 MRF 模型的分割、基于水平集方法的分割更具代表性。其中,基于水平集方法的分割具有集成各种约束的开放性、易同其他方法结合的灵活性,比如可在分割中引入统计模型、纹理特征、运动信息或形状先验信息,可以结合边缘约束以提高分割边界的准确性,将阈值分割或者聚类分割的结果作为初始分割,结合正则化处理进一步消除孤立的小区域,等等。由于单一分割方法的效果不尽理想,本研究主要基于水平集方法的灵活性,综合处理边缘信息、区域特征、先验约束以同时提高分割结果的准确性和完整性。同时,针对水平集求解运算量较大的不足,探索降低水平集求解复杂度的有效方法,以推广其实用性。

为了改善侧扫声呐图像的目标分割效果,本书主要采用水平集方法,针对侧扫声呐图像的目标分割问题展开了深入的研究,详细地介绍了作者所在团队近几年来在侧扫声呐图像分割领域取得的最新进展、研究所采用的理论和方法,同时给出了这些理论和方法的实际应用效果。这些研究成果对于侧扫声呐图像分割研究和工程应用具有一定的借鉴作用。本书共分 6 章:第 1 章绪论,主要介绍了侧扫声呐的成像原理、工作方式及其特性,进而重点分析了侧扫声呐图像分割面临的主要困难,并简要说明了当前针对侧扫声呐图像分割这一难题的研究现状。第 2 章介绍了侧扫声呐图像的自适应灰度增强方法、基于人眼视觉感知机制,以及构建 Curvelet 变换域多通道图像增强结构,提出了一种基于 Curvelet 变换的侧扫声呐图像自适应灰度增强方法(第 2 章方法),实现侧扫声呐图像的自适应增强。第 3 章介绍了散射模型与侧扫声呐图像的统计特性,给出了侧扫声呐图像的海底混响服从瑞利分布的理论依据,同时分析了其他典型概率分布的合理性并给出了各概率分布



参数的估计方法,最后通过实验来检验比较几种典型的概率分布的最佳拟合。第4章介绍了基于改进 Canny 算子的侧扫声呐图像边缘检测,针对声呐图像斑点噪声强的特点,提出了一种基于改进 Canny 算子的声呐图像边缘检测方法(第4章方法)。依据斑点噪声的乘性模型和瑞利分布,在非下采样 Contourlet 变换域进行局部自适应降斑。计算降斑后图像的梯度值,并对梯度幅值进行非极大值抑制得到模极大值点。将模极大值点分成强边缘点、弱边缘点与非边缘点三类,基于类间方差最大自适应确定区分三类的双阈值。最后通过双阈值处理与弱边缘连接得到较完整的边缘图。第5章介绍了统计模型与边缘信息结合的变分水平集侧扫声呐图像分割,提出了一种统计模型和边缘信息相结合的变分水平集分割方法(第5章方法)。通过均值聚类实现初始分割以结合声呐图像不同区域的统计模型,由改进 Canny 算子提取边缘信息,将统计模型、边缘信息和平滑约束集成在同一能量泛函中,基于水平集方法求解泛函,实现声呐图像目标区、阴影区及背景混响区的分割。第6章介绍了基于非局部均值降斑和边缘约束 RSF 主动轮廓模型的侧扫声呐图像分割。基于边缘信息、局部特征和水平集方法(第6章方法),提出了一种鲁棒、快速的侧扫声呐水平集图像分割方法,该方法综合了非局部均值降斑 NLMSF、基于 k 均值聚类的粗分割和边缘约束的 RSF 模型精细分割。NLMSF 能够很好地去除斑点噪声,为得到最终干净、准确的分割结果奠定了基础。降斑之后, k 均值聚类通常可以提供较好的初始分割,有利于减少迭代次数,从而节省时间。通过在 RSF 模型中引入边缘约束,可以更好地应对灰度不均,避免陷入局部最优并加快收敛。

本书是河海大学智能感知与图像处理研究团队在侧扫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(41306089, 60972101)、江苏省自然科学基金(BK20130240)与常州市传感网与环境感知重点实验室的资助,以及河海大学物联网工程学院的大力支持,在此深表谢意!

由于作者水平有限,加上侧扫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和来信交流,作者邮箱:huoquanying@hhu.edu.cn。

著 者

2017年2月

◀ 目 录 Contents

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 侧扫声呐成像	2
1.3 侧扫声呐图像目标分割	6
1.4 本书的章节安排	11
参考文献	13
第2章 侧扫声呐图像的自适应灰度增强	17
2.1 引言	17
2.2 Curvelet 变换理论	19
2.3 侧扫声呐图像自适应增强	23
2.4 实验结果与分析	28
2.5 本章小结	37
参考文献	37
第3章 散射模型与侧扫声呐图像的统计特性	40
3.1 引言	40
3.2 声呐成像的散射模型与瑞利分布	41
3.3 其他概率分布模型	45
3.4 概率分布模型拟合比较	48
3.5 本章小结	54
参考文献	55



第4章 基于改进 Canny 算子的声呐图像边缘检测	57
4.1 引言	57
4.2 边缘检测与 Canny 算子	58
4.3 NSCT 变换及其优势	62
4.4 基于瑞利统计模型的 NSCT 域降斑	70
4.5 基于类间方差最大的自适应双阈值确定	73
4.6 改进 Canny 算子的声呐图像边缘检测方法的步骤	74
4.7 实验结果与分析	75
4.8 本章小结	80
参考文献	80
第5章 统计模型与边缘信息结合的变分水平集侧扫声呐图像分割	83
5.1 引言	83
5.2 活动轮廓模型与水平集方法	85
5.3 统计模型与边缘信息结合的变分水平集声呐图像分割	96
5.4 实验结果与分析	104
5.5 本章小结	111
参考文献	112
第6章 基于非局部均值降斑和边缘约束 RSF 主动轮廓模型的侧扫声呐 图像分割	118
6.1 引言	118
6.2 背景技术	122
6.3 基于非局部均值降斑和边缘约束 RSF 模型的分割方法	126
6.4 实验结果与分析	130
6.5 本章小结	145
参考文献	145

第1章 绪论



1.1 研究背景

海洋覆盖着整个地球表面积的 70% 以上,是一个远未被开发的、富饶的天然宝库,作为全球生态系统中最重要的一部分,其中蕴藏着极其丰富的生物、矿产等各种资源^[1]。随着世界各国陆地资源的日益短缺和全球经济、军事环境的不断变化发展,海洋资源成为世界各国争夺的焦点,海洋资源的开发利用也变得尤为重要^[2,3]。目前在世界各国的政治、经济、军事等领域中,海洋都具有决定性的战略地位,影响着世界的格局。因此,在海洋大开发的新时代,实施海洋开发战略,发展海洋工程技术,是一个关系长远发展的重要且紧迫的问题,它已成为当前科技革命中的尖端技术之一。

我国属于海洋大国,海岸线长达 1.8 万公里,海域跨越热带、亚热带和温带,所管辖的领海、大陆架和专属经济区等海域十分广阔。我国海域蕴藏着丰富的油气、天然气、石油等资源,还有大量的天然气水合物资源,即“可燃冰”。我国滨海砂矿资源种类达 60 种以上,探明储量达 15.25 亿吨,多金属结核矿区已获得 7.5 万平方公里,其储量约有 5 亿多吨^[4]。我国正处于民族复兴的关键历史时期,正在由陆权国家向海权和陆权并重的国家转变,挺进海洋是历史发展的必然,关系到我国海洋权益、经济发展和国家安全等核心利益,也是建设海洋强国、实施“一带一路”战略的迫切需求。同时,我国也是水利大国,水能资源相当丰富,兴建各种水库大坝 87 000 多座,据不完全统计,在 3 100 多座大中型水库大坝中,约有 20% 的病险大坝,而小型水库大坝中也有 40% 左右的是处于病险状态的^[5]。存在隐患的病险堤坝是造成汛期重大险情的主要因素之一,如果能够利用水下成像探测技术对水下坝体和坝底、水下地形和地貌变化进行监控,及时报警维修、实施加固处理等措施,



则可以大大减少险情隐患,同时也使堤坝除险加固更有针对性。

目前水下成像探测技术主要有基于水声传感器阵列的声呐成像探测^[2,6-9]和基于光学传感器的光学成像探测^[10,11]两种途径。水下声呐成像探测距离远、穿透能力强,不易受水质影响,特别适用于浑水域,在水下远距离的目标定位和导航中更具优势,因而在海洋测绘、水下地质地貌勘测、水下目标搜索、水雷探测、坝基检测等领域得到了广泛应用^[2,3,8]。然而,由于水声信道中水体及其边界的复杂多变性,声波本身的传播损失和透射、散射特性,导致采集得到的声呐图像往往空间分辨率和对比度较低、噪声干扰严重、边缘轮廓模糊不清^[12-15]。水下声呐图像存在的以上这些问题,给水下图像的人工判读和自动解译带来了极大的困难,如何提高水下声呐图像的清晰度和对比度,实现较为理想的声呐图像分割和目标检测,对水下目标探测与定位、海上资源勘探与管道敷设、堤坝安全检测与修复、水库清淤与航道疏浚等国防民生领域的应用具有重要的研究意义。



1.2 侧扫声呐成像

声呐(sonar)一词是第二次世界大战期间产生的,它由声音(sound)、导航(navigation)和测距(ranging)3个英文单词的字头构成。声呐通过声波来实现水下探测和定位,所有能产生声波或回波的水下物体均可用声呐探测,比如,水下鱼群、暗礁、潜艇、水雷等,因而在国防民生和军事等领域得到了广泛的应用^[2,3]。声呐通过探测水下目标发出的声波或反射的回波来判断目标的存在,估计其具体位置,识别其类型,并跟踪其运动轨迹,从而实现水下目标的探测、识别与跟踪。此外,还可利用声呐测得的水深和航速等信息数据对船只、潜艇等进行导航^[16]。

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。按声呐工作原理可以分为主动从系统中发射声波的主动声呐和利用接收换能器被动接收目标发出的声波信号的被动声呐。当前,水下声呐成像设备主要有侧扫声呐(包括合成孔径声呐)、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^[17]。其中,侧扫声呐又称为旁视声呐,在海洋测绘、海洋资源开发、地质与矿产勘测、水下目标探测与工程实施等方面得到了广泛的应用。20世纪60年代初,英国海洋研究所首先推出了第一款实用型侧扫声呐设备,随后不同类型的侧扫声呐系统被不断开发研制出来,如,美国 Northrop Grumman 公司研制的 AN/AQS-14A 型高速拖曳侧扫声呐,USA-WESMAR 公司生产的 SHD700SS 型、USA Fishers

SSS - 100 kHz/600 kHz 侧扫声呐, Edge Tech 公司研制的全频谱调制(FM)多脉冲型 MP - X 侧扫声呐, Datasonics 公司生产的 SIS - 1500CHIRP 型侧扫声呐等^[18]。我国的侧扫声呐研发始于 20 世纪 70 年代,从早期的单侧悬挂式侧扫声呐、双侧单频拖曳式侧扫声呐到双侧双频拖曳式侧扫声呐等,经历了一系列的发展阶段。其中,中科院声学研究所成功开发并生产了一款 CS - 1 型侧扫声呐系统,其主要性能指标已达到世界先进水平。

侧扫声呐在载体的两侧各布设一条换能器阵列,工作频率相同,分别负责左右侧海底的扫描。换能器收发合置,在载体航行方向波束很窄(1° 或小于 1°),以保证有较高的航向分辨力;在垂直于航向的方向上波束较宽(大于 30°),因此可照射两舷侧很宽的区域^[17]。单波束侧扫声呐工作示意图如图 1.1 所示,图中,1 代表波束内侧的声路径距离,2 代表垂直波束角大小,3 代表波束外侧到达的最远距离,4 代表单侧扫描的海底宽度,5 代表侧扫声呐的拖鱼深度,6 代表左舷和右舷通道分离的距离,7 代表水平波束宽度。

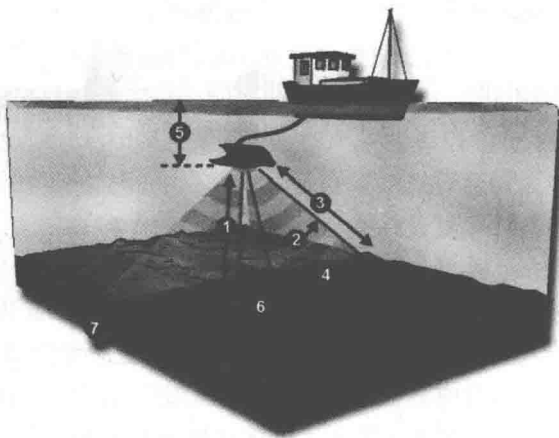


图 1.1 单波束侧扫声呐波束扫描示意图

侧扫声呐系统的换能器基阵一般安装在水下拖曳体的两侧。侧扫声呐工作时向两侧海底发射单频矩形脉冲或者线性调频脉冲,每次发射后,便转为接收状态,从各个方位接收扫描回波信号,连续记录海底或者目标返回脉冲的传播时间及脉冲幅度,构成显示器上的一行线^[17]。图 1.2 给出了侧扫声呐回波强度的示意图^[19]。如图所示,第 1 点表示换能器发射脉冲,到达的第 2 点是位于声呐正下方的海底,因入射方向垂直于海底,所以回波是很强的正反射波。而从第 4 点开始水底表面发生向上突起的变化,并且在第 6 点处到达最高峰,所以 4 ~ 6 点之间的回



波较强。由于第4点到换能器的距离相对最远,而第6点最近,所以第6点的回波先返回到换能器,然后是第5点,再到第4点,此时斜距远近不能反映真实的平距远近。第6点与第7点间的水底被遮挡,没有回波,表现在图像上为阴影区。第8点与第9点间的水底也被遮挡,没有回波,产生阴影区。

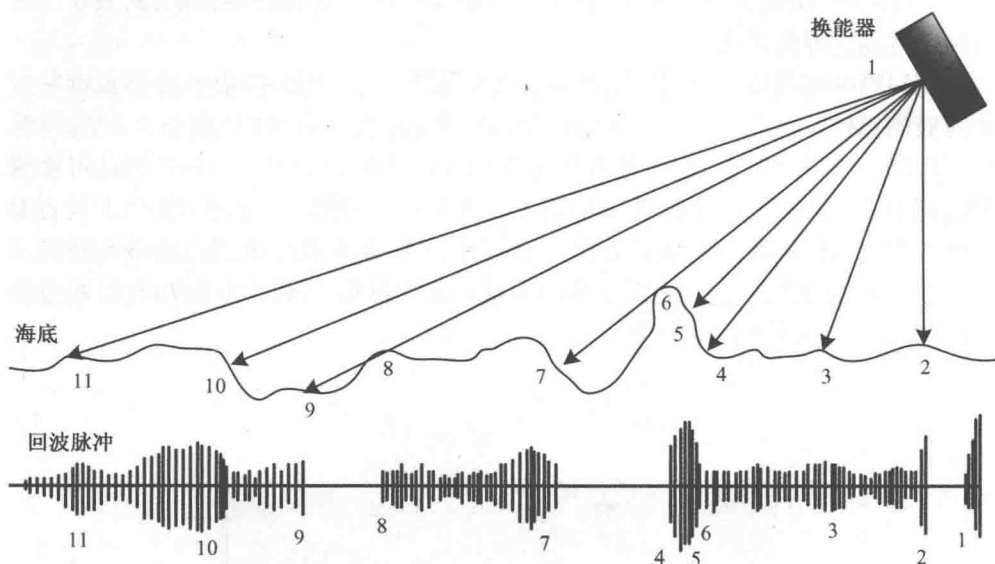


图 1.2 侧扫声呐回波强度示意图

随着水下声呐载体的不断移动,声呐阵在前进过程中不断发射、接收处理,记录逐行排列,在显示器的每一行扫描线上逐行显示出每次发射返回的回波数据,各个回波到达的时刻分别对应各点的位置,即像素坐标,回波的幅度对应各点的亮度,即像素灰度值。由此,在显示器上逐行排列显示出各个发射周期的接收回波数据,就生成了一幅二维水下声呐图像^[19]。侧扫声呐在采用灰度显示时,一般暗色代表回波较弱,白色代表回波较强,也可采用伪彩色显示^[17]。图 1.3 给出了失事直升机(图的左上方)搜救时得到的海底侧扫声呐图像,其中图 1.3(a)对应灰度显示,图 1.3(b)对应伪彩色显示。图 1.3(a)中,最中间的亮线为发射线(零位线),是换能器基阵起始发射的声脉冲信号在显示器上的记录,零位线是量取拖鱼至目标距离的基准线;零位线的两侧各有一条距离基本不变的海面线(当侧扫声呐换能器副瓣较小时,不易出现海面线),同时还各有一条起伏的海底线,提供计算海底目标高度时所需要的拖鱼至水底的高度,还提供拖鱼垂直下方的水底隆起脊状及洼凹盆状微地貌形态高度变化^[14]。

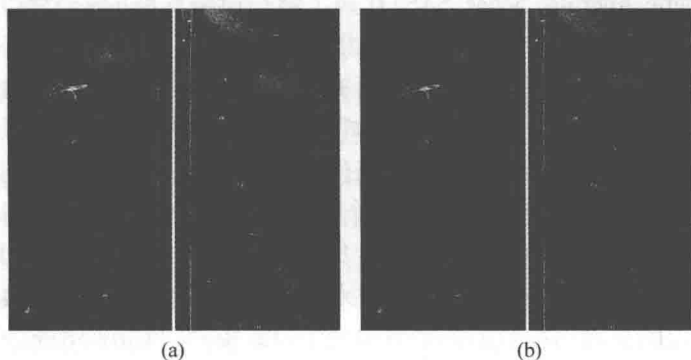


图 1.3 侧扫声呐图像灰度显示和伪彩色显示示意图

(a) 灰度显示侧扫声呐图像; (b) 伪彩色显示侧扫声呐图像

由于侧扫声呐显示的是地貌图像,因此希望做到远近亮度均匀。如果不采用增益补偿措施,显示的图像在远距离端将会很暗,这是因为距离越远,传播损失越大,信号越弱。比较简单的增益补偿方法是按照球面扩展加介质吸收随距离变化规律直接进行时变增益控制(Time-Variant Gain, TVG)。由于侧扫声呐得到的海底混响强度不仅同底质类型、粗糙度相关,还与声波的掠射角相关,更为细致的方法是同时考虑换能器的指向性和海底散射的角度规律进行回波强度校正。

波束角的水平宽度决定了侧扫声呐在航行上的分辨率,为提高航向的分辨率,侧扫声呐较多采用水平宽度较小的单波束(两侧各一),如 Starfish, Klein 3000 等,利用线阵的自然指向形成垂直于线阵方向的波束。单波束侧扫声呐对航速有较严格的要求,航速较低时,因波束在远距离上跨度较大,各行的数据不完全独立,会有一些交叠,数据处理时必须考虑这种相关性;当航速较高时,又容易发生海区漏扫,显示的数据不能充分反映海底的连续性^[17]。为提高载体速度同时避免漏扫,可采用多波束方案,即采用多个水平窄波束接收,而发射则用一个较宽的水平波束(也可相控发射多个窄波束以获得发射指向性增益)。采用多波束之后,同样条件下航速可提高 M 倍(M 为接收波束数)。采用多波束技术的侧扫声呐的典型代表是 Klein 5000 及其改进型 Klein 5900,其中 Klein 5000 两侧各有 5 个波束,相控发射 5 个波束,同时预成 5 个接收波束。

侧扫声呐的方位向(航向)角度分辨率为 $\Delta\theta = \lambda/L$ (声波波长/基阵尺寸),如果目标距离为 R ,则在目标处的方位向空间分辨率为 $\Delta x = \lambda R/L$,方位向空间分辨率随距离降低^[2,3]。为提高方位向分辨率,或者增大基阵尺寸(即基阵孔径),或者增加信号频率。前者受到平台的限制,后者则受到声波衰减特性的限制。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^[17]。借鉴合成孔径雷达技术,SAS利用小尺寸基阵沿着方位向匀速直线运动来虚拟大孔径基阵,从而提高方位向分辨率,其方位向空间分辨率是基阵的实际长度的一半,与声呐的工作频率和作用距离无关,因而可以对远距离目标实现高分辨成像,且可采用较低的工作频率以提高探测距离^[2,17]。成像算法、运动补偿、自聚焦是SAS能否提高图像质量的关键技术,相关研究取得了很大的进展^[17]。近年来出现了多款商用SAS,如Edgetech 4400, HISAS 1030, PROSAS等。图1.4分别给出了SAS(采用PROSAS技术)和普通侧扫声呐对海底的岩石进行成像的对比,可以明显看出前者的分辨率得到了显著提高,目标更清晰。

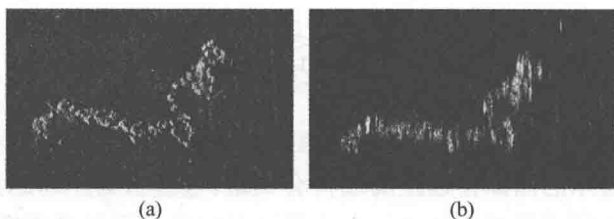


图 1.4 合成孔径声呐和普通侧扫声呐成像分辨率对比示意图

(a) 合成孔径声呐成像; (b) 普通侧扫声呐成像



1.3 侧扫声呐图像目标分割

侧扫声呐安装在拖鱼上对海底斜距成像,一般白色代表回波信号较强,暗色代表回波信号较弱,硬的、凸起的目标回波较强,形成目标高亮区,由于凸起目标对声波的遮挡,会同时产生没有回波的长阴影区,目标区和阴影区两者左右相邻(右舷图像,左舷图像反之)且在一条水平线上,粗糙不平的海底及存在于海底附近的各种散射体对声波的散射回波形成了图像中大面积的海底混响区^[8,17,20]。侧扫声呐图像目标识别行之有效的办法是阴影法和目标回波法,可由目标阴影长度计算出目标高度,阴影或目标的形状特征是目标测量、判读识别的关键^[8,20]。在对侧扫声呐图像中的可疑目标进行识别及测量之前,分割是至关重要的步骤之一,通常要将侧扫声呐图像分割为目标高亮区、阴影区及海底混响区三类^[20]。

由于水声信道及其边界(海底、海面)的复杂多变性、成像方法及系统参数设置等因素的影响,侧扫声呐图像常存在以下问题^[1,20-25]。

1. 噪声干扰强烈

声呐用于目标探测时,背景干扰有混响、海洋环境噪声和舰船自噪声。起伏不平的海底和海面,以及海洋中存在的杂乱分布的散射体对声波的散射作用共同构成了全部混响,其中海底混响经常是最主要的背景干扰,造成声呐图像斑点噪声突出。潮汐、涌浪引起的压力波和湍流引起的压力脉动,地震活动、风动海面、降雨、分子热运动及海洋生物的群体活动导致的海洋噪声、机械噪声、螺旋桨噪声及水动力噪声均可能对声呐图像造成干扰。

2. 灰度畸变严重

声波在传播过程中的能量扩散、波束指向性、掠射角等因素的影响造成侧扫声呐记录的灰度与实际的反向散射强度存在偏差,产生灰度畸变。成像系统通常采用时间增益控制来补偿声波按球面扩展加介质吸收造成的随距离衰减,但由于很难和衰减过程完全一致,效果并不十分理想,还有可能会造成新的畸变。

3. 几何畸变复杂

成像方式、船速变化、偏航、换能器姿态变化等因素导致侧扫声呐图像存在几何畸变,扭曲了海底地貌。侧扫声呐是斜距成像,声图上的扫描线反映的是换能器至海底的倾斜距离,因此在声图上产生横向比例不统一,引起目标横向变形。船速时快时慢,使得方位向采样不均匀,造成声图纵向比例的不一致,产生纵向变形。偏航会引起重叠或漏扫,换能器的上下沉浮会使斜距改正复杂化。

得到阴影和目标边缘真实准确的分割结果对于促进声呐图像的准确解译至关重要,然而,噪声强烈、灰度畸变造成侧扫声呐图像分割更为困难,声呐图像分割作为声呐图像解译的关键和难点,得到了重点关注。为了实现较为准确的分割,通常需要对侧扫声呐图像进行斜距校正、灰度均衡、图像降噪等必要的预处理。

针对声呐图像分割的难题,学者们提出了多种分割方法,这些方法大致可分为以下几类:阈值分割^[25-28]、基于聚类的分割^[29-32]、基于边缘检测的分割^[33,34,38,39]、基于MRF(Markov Random Field,马尔可夫随机场)模型的分割^[20,40-43]、基于主动轮廓模型(也称为活动轮廓模型)的分割。

阈值分割的关键在于选择正确的阈值,阈值的确定依赖于直方图和阈值选取准则。由于背景混响较强,声呐图像的一维直方图通常不是理想的双峰形状,直接对原图或其去噪图像进行阈值分割均较为困难。通过对直方图施加先验约束得到简化的属性直方图,由于舍弃了通常的直方图中的一些干扰成分,属性直方图的双峰得以凸显,此时再采用最大熵准则可得到较为准确的分割阈值^[25]。将一维属性直方图推广到二维情形,并基于最大熵值法确定分割阈值,由于同时利用了像素的邻域空间信息,可以取得比一维属性直方图最大熵方法更好的分割结果^[26]。由于二维属性直方图最大熵分割通常需要遍历搜索最佳阈值,计算量大且耗时,通过引

入智能雁群优化算法搜索最大二维熵值点,分割速度得以显著提高^[27]。分形模型能够较好地模拟自然界的纹理特征从而区分人工目标,采用滑动窗口计算每个像素的分形维数以得到分维分布图,分维分布图的直方图双峰较为明显,易于求取阈值,也可避免直接对原直方图进行阈值分割的困难^[28]。

基于聚类的分割将图像空间中的像素用对应的特征空间点表示,在特征空间中进行聚类,然后将聚类结果映射回原图像以得到分割结果。特征提取和聚类算法设计是聚类分割的关键。在中值滤波的基础上,基于像素自身的灰度值及其邻域均值构成特征向量以进一步克服强噪声的影响,然后针对声呐图像对比度低、图像模糊的特点采用模糊 C 均值聚类可得到噪声鲁棒的分割结果^[29]。由分形维数和区域灰度均值或者区域绝对粗糙度和区域灰度均值构造的二维特征向量能够在抑制噪声的同时较好地表征声呐图像不同类型区域的平坦度,结合 k 均值聚类可得到目标区域^[30]。UWT(Undecimated Wavelet Transform,非抽样小波变换)具有较好的噪声抑制性能和多尺度分析能力,基于 UWT 提取多尺度特征向量,结合 PCA(Principal Component Analysis,主成分分析)降低特征向量的维数以进一步抑制噪声等干扰,最后采用 k 均值聚类可得到误分割相对较少的分割结果^[31]。为抑制强背景噪声,利用二维经验模态分解将声呐图像分解为若干个固有模态函数图像和 1 个余量图像,抑制噪声较多的高频固有模态函数图像,然后再同余量图像加权合成得到噪声较少的二维经验模态分解图像,结合由 GMRF(Gauss Markov Random Field,高斯马尔可夫随机场)模型描述的多阶纹理特征图像,采用矢量距离标准进行模糊 C 均值聚类可以提高分割算法的噪声鲁棒性和适应性^[32]。

基于边缘检测的分割针对灰度的不连续性,通过检测不同区域的边界来实现对图像的分割。常用的边缘检测算子有 Sobel 算子、Canny 算子、LoG 算子等,它们具有边缘定位精度较高、运算速度较快的优点,但是对噪声更为敏感,直接用于声呐图像边缘检测难以取得较好的效果。由于小波变换具有良好的时频局部化特性和多尺度分析能力,采用小波变换对声呐图像进行降噪处理,然后再由 Sobel 算子进行边缘检测可得到噪声残留较少的边缘检测结果^[33]。Canny 算子包含了非极大值抑制、双阈值处理与弱边缘连接等其他算子不具备的处理环节,是公认的边缘检测较优算子,由中值滤波去除高频噪声,进一步由形态学开运算和闭运算去除孔状小区域,最后再基于 Canny 算子进行边缘检测以提高声呐图像边缘检测的完整性和噪声鲁棒性^[34]。由于引入了方向参量,较之小波变换、Curvelet 变换^[35]、Contourlet 变换^[36]等多尺度几何变换具有各向异性和多方向性的优点,对边缘轮廓具有优异的稀疏表示能力。基于 Contourlet 变换提出的 NSCT(Nonsubsampled Contourlet Transform,非下采样轮廓波变换)^[37]与 Curvelet 变换、Contourlet 变换相比,多尺度分析时没有下采样,消除了频谱混叠,提供了更为丰富的时频局部化信