

DOI: 10.11991/yykj.201609015

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.u.20170924.1918.002.html>

# 水中气体目标的多波束声呐成像与检测算法

蒲定<sup>1</sup>, 张万远<sup>2</sup>, 郭骏<sup>1</sup>, 李东洋<sup>2</sup>, 王佳<sup>3</sup>

1. 中海石油深海开发有限公司 深水工程建设中心, 广东 深圳 518000

2. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

3. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072

**摘 要:** 随着海底输气管道的使用日益增多, 对输气管道泄漏的检测刻不容缓。文中提出一种基于多波束声呐的水中气体目标成像与检测算法。成像算法以 MVDR (minimum variance distortionless response) 波束形成算法为核心, 归算水体位置信息和反向散射强度信息后实现对水体目标的声呐成像。对声呐图像采用基于数学形态学的边缘检测算法检测目标边缘, 判断气体目标有无。通过水池试验结果证明, 文中提出的算法流程能够有效地实现水中气体目标的成像与检测, 具有较好的工程应用前景。

**关键词:** 多波束声呐; MVDR; 旁瓣抑制; 形态学; 边缘检测; 水体成像; 气柱检测; 图像去噪

中图分类号: P756.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2017)05-012-05

## Multi-beam sonar imaging and detection algorithm of subaqueous bubbles

PU Ding<sup>1</sup>, ZHANG Wanyuan<sup>2</sup>, GUO Jun<sup>1</sup>, LI Dongyang<sup>2</sup>, WANG Jia<sup>3</sup>

1. Deep Water Engineering Construction Center, CNOOC Deep Sea Development Co., Ltd., Shenzhen 518000, China

2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

3. College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract:** As the increase of the use of seabed gas pipeline, it is urgently necessary to detect the leakage of gas pipeline. In this paper, an imaging and detection algorithm of subaqueous bubbles based on multi-beam sonar is presented. The core of the imaging algorithm is MVDR (minimum variance distortionless response) beamforming algorithm, the water body objective is imaged by sonar method after calculating position information and backscattering intensity information. For the sonar image, the edge detection algorithm based on mathematic morphology is used to detect the edge of target and judge if the bubble exists or not. The results of the pool experiment show that the algorithm of this paper is effective for the imaging and detection of subaqueous bubble, it has an excellent engineering application prospect.

**Keywords:** multi-beam sonar; MVDR; side lobe suppression; morphology; edge detecting; water column imaging; bubble detection; image denoising

随着我国对海洋天然气资源的开发利用逐步加大, 我国对海底输气管道的使用逐渐增多。海底输气管道相比于其他输气方式具有经济、高效、输送量大、输送连续性好、管理方便、可靠性高、对环境影响小等特点。但由于海底环境复杂, 海底输气管道易受到海水和海洋浮游生物的冲击和海底地形变换的影响, 同

时输气管道也会受到自身内部气体的压力和腐蚀。海底输气管道的泄漏不仅影响到海上气田的正常生产和安全, 还会造成严重的海洋环境污染。因此, 对海底管线泄漏的检测及其重要, 通过检测尽早发现管线损坏位置及泄漏情况, 以采取预防措施和及时修复<sup>[1-3]</sup>。目前, 国内外针对海底输气管道泄漏的检测方法主要有潜水员探摸、水下机器人检测、管道检测爬机检测和声学检测等方法。潜水员探摸法的作业水深有限且效率低下; 水下机器人和管道检测爬机虽然比较成熟, 但工作效率低, 只能进行逐点检测且需要熟练的操作人员<sup>[4-6]</sup>。声学检测具有高效率、宽覆盖、测量深度深和

收稿日期: 2016-09-19 网络出版日期: 2017-09-24

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05057005); 国家自然科学基金项目 (41376103); 中央高校基本科研费专项基金项目 (HEUCFD1502)。

作者简介: 蒲定 (1984-), 男, 工程师。

通信作者: 张万远, E-mail: zhangwanyuan@hrbeu.edu.cn

不受水体能见度影响等优势。多波束声呐是近年来常用的海底管线泄漏声学检测设备之一,多波束声呐具有宽覆盖、全海深的特点且具有水体成像能力。利用其获得高精度的三维地形信息及反向强度信息可以准确判断出海底输气管道的管线状态和泄漏位置。通过其水体成像能力可以获得泄漏气体的声呐图像。为此,文中基于多波束声呐开展水中气体目标成像算法的研究,在 MVDR (minimun variance distortionless response) 波束形成<sup>[7]</sup> 成像算法的基础上对声呐图像进行形态学边缘检测,从而提取水中气体目标的轮廓。文中的研究内容能提供丰富的海底输气管道泄漏的信息,为海底输气管道泄漏修复方案的确立提供依据,具有很好的工程应用价值和广阔的市场应用前景。

## 1 水中气体目标成像算法

水中气体目标成像算法流程如图 1 所示。基于多波束声呐的气体目标成像先是对接收到的信号做预处理后做波束形成。波束形成是多波束声呐成像算法的核心,采用快拍法<sup>[8]</sup> 能利用完整的回波信号实现对水体的成像,由波束形成的波束方位角和回波到达的采样时刻可计算出水体每一处相对于声呐的深度和位置信息,通过 GPS 等辅助传感器对测得深度和位置信息进行修正和归算,得到测量目标的实际位置。通过对波束形成回波信号的计算,可以得出水中目标的散射强度。最后,利用获得的深度和位置信息与目标散射强度可以得到水中气体目标的声呐图像。

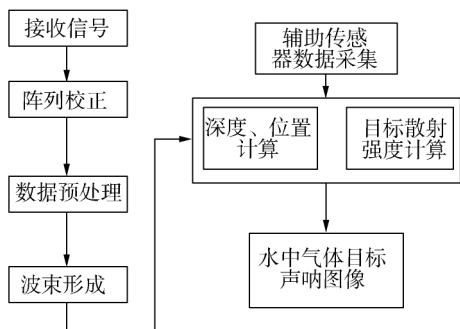


图 1 水中气体目标成像流程

### 1.1 MVDR 波束形成成像算法

波束形成算法是多波束声呐水中气体目标成像算法的核心,波束形成算法的优劣直接关系到成像的精度和准确性。时延波束形成和相移波束形成是比较成熟的常规波束形成算法,有着原理简单和使用成熟等优点。但常规波束形成也有着旁瓣泄漏、主瓣宽度较大等劣势,这使得常规波束形成在声呐成像中有成像精度低、目标易被旁瓣遮掩等不足。当声呐基阵阵元数目一定时,通过对常规波束形成采用加窗的方法可以在一定程度上获得较小旁瓣,但这往往是在牺牲主

瓣的情况下得到的。常规波束形成存在能量泄漏的缺点,易造成旁瓣干扰。这种干扰主要出现在当垂直于海底的镜面反射波或水中具有较强反射能力的目标的回波进入其他方向的旁瓣时,对该方向主瓣方向接收到的信号造成干扰。为消除旁瓣干扰、提高成像精度,文中水中目标成像采用 MVDR 波束形成算法。

MVDR 波束形成算法是基于最小方差无畸变响应的自适应波束形成算法,同许多自适应波束形成算法一样,它通过输入信号选取最佳权向量  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$ 。

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (1)$$

式中自适应权向量的选取分为块自适应和连续自适应两种方法。块自适应方法每隔若干个快拍数更新一次自适应权向量,连续自适应方法则是每有新的数据时即更新自适应全向量,文中采用连续自适应方法。对于式(1)中协方差矩阵  $\mathbf{R}_x$  的估计通常由多次快拍得到,当用于估计协方差矩阵的平稳快拍数较少时,得到的自适应权向量不稳定,使得水下气体成像不准确。为此,进一步采用 DL (diagonal loading) 算法<sup>[9]</sup> 以减小协方差矩阵的散布分布,DL 算法其原理为

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{R}_x + \delta^2 \mathbf{I}$$

式中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $\delta^2$  为加载量。

### 1.2 水中气体目标声呐成像

对水中气体目标的成像采用快拍法。快拍法成像利用多波束声呐记录的完整回波信号进行成像,完整的回波信号不仅可以实现对海底区域的成像,同样可以实现对水体的成像,因而采用快拍法实现水中气体目标的成像。

采用多波束声呐进行水中气体目标成像需要获得每一处检测点的位置数据和对应检测点处的反向散射强度数据。通过对回波信号的 DOA 和 TOA 估计,可以计算出每一检测点处相对于多波束声呐基阵的水平位置和深度;利用船姿传感器、罗经仪、GPS 等辅助传感器对位置数据进行修正,进而对检测点进行空间归位,得到每一检测点大地坐标系下的空间坐标。反向散射强度数据由主动声呐方程得到的回波强度数据通过补偿和修正得到。经过数据网格化<sup>[10]</sup>,把每一检测点处的位置数据与反向散射强度数据一一对应和数据网格化即实现对水中气体目标的成像。

## 2 水中气体目标的检测

基于多波束声呐的成像算法可以有效地获得水中气体目标的声呐图像,文中通过对图像进一步处理,更直观地显示气体检测结果。为了获取更为直观的气体目标、突出气体形态,对多波束声呐的图像

做边缘检测处理,获取目标轮廓,以达到对图像分析和识别的目的。

常规线性边缘检测算子有着原理简单、使用广泛、成熟等特点,但这些传统算子(如 Prewitt、Roberts 算子)在检测精度和抗噪能力上往往不能兼得<sup>[11]</sup>。而 LOG、Canny 等算子,在抗噪性能和检测精度上取得很好的折中,但算法更复杂,运算更耗时<sup>[12]</sup>。水声信号处理与雷达和光学信号处理相比其中一大特点就是易受干扰、信噪比低。基于多波束声呐的水中气体目标成像得到的声学图像相比于光学图像也存在着同样的问题,水下声学图像的噪点较多,目标轮廓不连续、不完整,相邻的目标之间也往往存在细小的连接,因此常规的线性边缘检测算子在处理水下声学图像时有着很大的局限性。而基于数学形态学<sup>[13]</sup>的边缘检测能通过灵活选取结构元素<sup>[14]</sup>,通过腐蚀、膨胀及其组合的开运算和闭运算能够很好地检测目标边缘。

## 2.1 数学形态学

数学形态学是使用一定大小和形状的结构元素对图像进行检测,提取出符合结构元素特征的部分,以达到对图像的分析和处理的目的。数学形态学的基本运算是膨胀运算和腐蚀运算,以及由它们组合的开运算与闭运算。

膨胀和腐蚀互为对偶运算,是数学形态学的基本运算。假定结构元素为  $B$ ,图形为  $A$ ,则二值图像形态学的膨胀表达式为

$$A \oplus B = \cup \{A + b : B\}$$

二值图像形态学的腐蚀表达式为

$$A \ominus B = \cap \{A - b : B\}$$

对于灰度图像形态学的膨胀与腐蚀则是把二值图像中的交并运算变为极大、极小值运算。

由于数学形态学的膨胀和腐蚀运算互为对偶运算而非逆运算,则对图像先腐蚀后膨胀为开运算:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

对图像先膨胀后腐蚀为闭运算:

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$$

## 2.2 基于数学形态学的边缘检测算法

由于原图形  $A$ 、膨胀后图像  $A \oplus B$  和腐蚀后图像  $A \ominus B$  存在以下关系:

$$A \oplus B > A > A \ominus B$$

则利用以上关系可得到 3 种形式的边缘检测算子。

由膨胀图像减去原图像的膨胀型边缘检测算子:

$$\text{Grad}_1 = A \oplus B - A$$

此算子得到的边缘为外边缘。

由原图像减去腐蚀图像的腐蚀型边缘检测算子:

$$\text{Grad}_2 = A - A \ominus B$$

此算子得到的边缘为内边缘。

由膨胀图像减去腐蚀图像的膨胀腐蚀型边缘检测算子:

$$\text{Grad}_3 = A \oplus B - A \ominus B$$

文中基于数学形态学的边缘检测算法流程如图 2 所示。

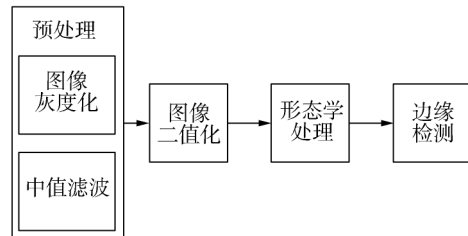


图 2 数学形态学边缘检测流程

其内容主要包括:

1) 对多波束声呐成像结果进行预处理。其中包括对声呐图像的灰度化,使其转化为 256 阶灰度图像,便于后续图像处理;声呐图像由于混响、海洋噪声等噪声的影响,信噪比较低,需对图形进行中值滤波。

2) 采用大津法<sup>[15]</sup>选取合适阈值,把步骤 1) 预处理后的图像二值化。

3) 通过选取适当的结构元素,对二值化图像做形态学处理。形态学的开运算可以去除图像中的细小连接,除去图像中微小凸起及细小噪声;形态学闭运算可以除去目标内部空洞,连续目标边缘。通过开运算与闭运算的组合使用,对二值图像进行处理,分离图像中相邻目标的细小连接,光滑目标边缘,去除图像中的噪点。

4) 选取合适的结构元素与形态学边缘检测算子,对步骤 3) 处理后的图像进行边缘检测。

与传统的线性边缘检测算法相比,形态学边缘检测以结构元素为基本运算单元对图像做非线性运算,其能够通过灵活选取结构元素处理图像,使边缘检测更加灵活且形态学能进行并行运算,有运算速度快的优点。

## 3 水池试验数据处理

### 3.1 水池试验装置设置

为验证算法的有效性,在消声水池设置气体目标,使用 HT-300PA 型便携式多波束声呐记录试验数据,并用文中算法对数据进行处理。图 3 为有气体目标时水池试验示意图,气泡使用氮气瓶控制压力产生,通过有开口的气体软管导入水中,水中除气泡群外还有一使气孔下沉的砝码和边长为 50 cm 的正方体铁块作为参考目标。

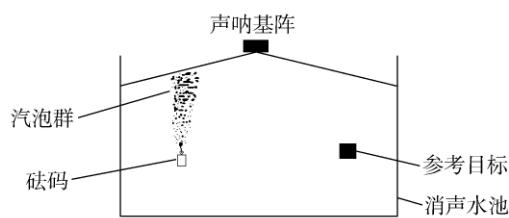


图3 水池试验示意

### 3.2 水池试验数据处理

经过对水池试验数据的处理,文中算法对水下气柱成像与检测结果较为理想,获得满意的处理结果。

如图4为采用文中的基于MVDR波束形成的成像算法对水池试验数据进行处理,所成图像为水池沿测深条带方向的一个切面。图5为基于FFT波束形成的成像结果。图4中由于采用MVDR波束形成算法对干扰进行了抑制,其成像精度高、气泡群目标清晰且不易被其他目标的旁瓣遮掩,水体背景成像平滑。而图5中的目标成像精度相对较低,且成像结果受旁瓣影响较大,目标成像受其他方向干扰影响。

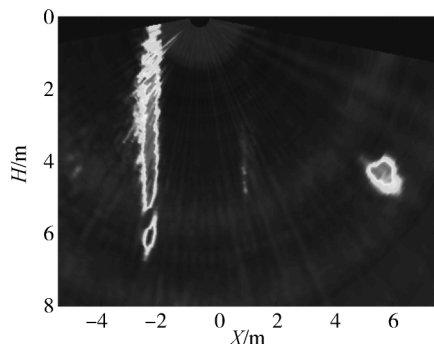


图4 基于MVDR波束形成的成像结果

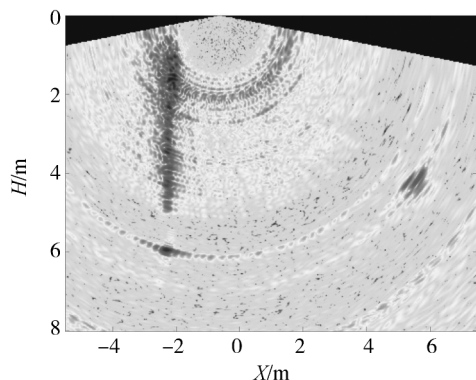


图5 基于FFT波束形成的成像结果

图6、7分别为无气体目标时和有气体目标时的检测结果,通过检测结果可以清楚地判断气体目标的有无。图8、9分别为基于Prewitt算子和Roberts算子检测预处理后灰度图像的边缘,其检测结果边缘不连续,目标不明显,且其运算速度较慢。文中的

边缘检测算法在检测过程中通过中值滤波、形态学运算处理,能很好地去掉图像中的噪声,填补目标小的空洞。在形态学处理的二值图像的基础上进行的边缘检测,其检测结果边缘连续性好、目标边缘较为平滑、能够较好地分离临近的目标,且形态学具有并行处理的优势,检测速度快。

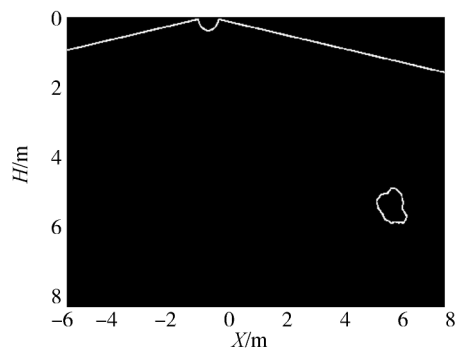


图6 无气体目标的检测结果

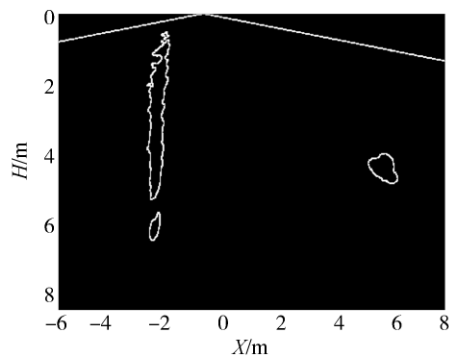


图7 有气体目标的检测结果

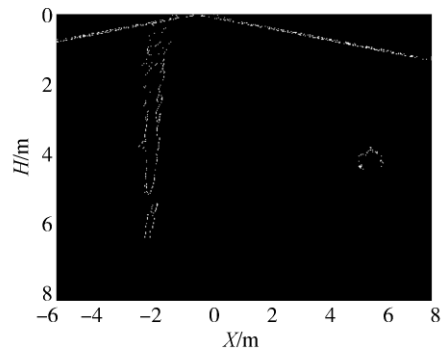


图8 基于Prewitt算子的边缘检测

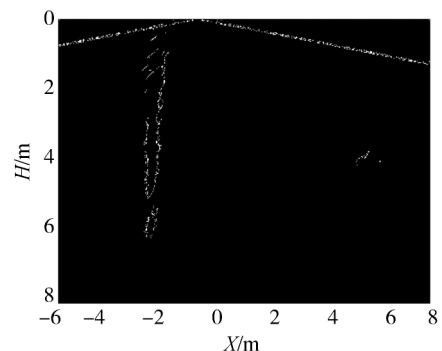


图9 基于Roberts算子的边缘检测

## 4 结论

基于多波束声呐的水中气体目标成像与检测算法,通过使用多波束声呐采集到的完整回波信号完成对水中气体目标的成像,在成像算法中采用了MVDR波束形成算法削弱旁瓣干扰;在检测中,采用基于形态学的边缘检测方法提取目标边缘。试验得出以下结论:

1) 该波束形成算法成像精度较高、成像更清晰,能很好地完成气体目标的成像;

2) 基于形态学的边缘检测方法,其运算速度快,处理结果目标边缘清晰、连续性好;

3) 文中算法能很好地应用到海底管道漏气等气体目标的检测,有很强的实用价值;

4) 基于文中算法,下一步需要对泄漏气体多帧声呐图像进行帧间特征提取,检测泄漏气体的运动形态。

## 参考文献:

- [1] 王东,任帅,田旺和,等.海底油气管道检测方法及安全评估[J].管道技术与设备,2014(2):19-21.
- [2] 季英业,张伟,原向东,等.深水溢油事故处置可视化监控系统[J].中国水运,2014,14(7):102-103,108.
- [3] 张宇航,王策,阿斯汉,等.海底管道泄漏检测研究进展[J].当代化工,2014,43(12):2645-2647,2651.
- [4] 肖治国,李成钢.海底管道水下机器人检测技术[J].中国石油和化工标准与质量,2014(3):18.
- [5] 李东升.小管道超声智能检测爬机及测试技术研究[D].

南京:南京理工大学,2002:1-15.

- [6] WENDELBOE G, FONSECA L, ERICKSEN M, et al. Detection of heavy oil on the seabed by application of a 400 kHz Multibeam echo sounder [C] // Proceedings of the 32nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. Vancouver, Canada, 2009: 791-816.
- [7] 汪晋宽,宋昕.鲁棒自适应阵列信号处理[M].北京:电子工业出版社,2009:39-69.
- [8] 刘晓.基于多波束测深声呐的成像技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012:11-13.
- [9] CARLSON B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 1988, 24(4): 397-401.
- [10] 王立新.多波束测深系统地貌信息获取与显示[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011:27-29.
- [11] 师文,朱学芳,朱光.基于形态学的MRI图像自适应边缘检测算法[J].仪器仪表学报,2013,34(2):408-414.
- [12] 孟婷婷,余谅,李寿敏,等.一种基于改进的形态学算子的边缘检测算法[J].计算机工程与科学,2011,33(8):112-116.
- [13] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology [M]. New York: Academic, 1982: 50-56.
- [14] HARALICK R M, STERNBERG S R, ZHUANG Xinhua. Image analysis using mathematical morphology [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1987, 9(4): 532-550.
- [15] 李了了,邓善熙,丁兴号.基于大津法的图像分块二值化算法[J].微计算机信息,2005,21(14):76-77.

## 本文引用格式:

蒲定,张万远,郭骏,等.水中气体目标的多波束声呐成像与检测算法[J].应用科技,2017,44(5):12-16.

PU Ding, ZHANG Wanyuan, GUO Jun, et al. Multi-beam sonar imaging and detection algorithm of subaqueous bubbles [J]. Applied science and technology, 2017, 44(5): 12-16.