

多波束声纳图像处理关键技术的研究

程秀丽¹, 段文凯¹, 邬旋¹, 訾桂峰²

(1. 山东建筑大学 计算机科学与技术学院, 山东 济南 250101;

2. 潍坊市科学技术情报研究所, 山东 潍坊 261061)

摘要:海底地形地貌探测是海洋资源开发和工程建设的基础,多波束声纳图像是反映水下地形地貌的重要手段,对其处理技术的研究具有重要意义。文中介绍了多波束声纳图像的形成原理及其特点,分析了影响多波束声纳图像的主要因素,从回波强度数据修正、声纳图像的生成和声纳图像改正三个方面,对多波束声纳图像处理的关键技术进行了详细介绍。总结和介绍了目前国内外多波束声纳图像主要处理技术的研究现状和发展趋势,提出了研究多波束声纳图像处理技术的若干建议。

关键词:海底探测;多波束声纳图像;回波强度;声纳图像处理

中图分类号:P229;TP339

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)10-0197-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.10.048

Research on Key Technologies of Multi-beam Sonar Image Processing

CHENG Xiu-li¹, DUAN Wen-kai¹, WU Xuan¹, ZI Gui-feng²

(1. School of Computer Science & Technology, Shandong Jianzhu University,
Jinan 250101, China;

2. Intelligence Institute of Science and Technology, Weifang 261061, China)

Abstract: The detection of seabed topography is the foundation of marine resources development and engineering construction. The multi-beam sonar image is an important means to reflect the seabed topography, so the research of its processing technology is very significant. Introduce the forming principle and characteristics of multi-beam sonar image in this paper, analyze the main factors which influence the image quality, and present the key processing technologies in detail from three aspects: the echo intensity data correction, the sonar image formation and sonar image correction. The research status and development trend of the main processing technologies of multi-beam sonar image have been summarized and analyzed, and then some suggestions also have been proposed.

Key words: seabed terrain detection; multi-beam sonar image; echo intensity; sonar image processing

0 引言

多波束测深声纳系统的研制起源于20世纪60年代美国海军研究署资助的军事研究项目,由于其具有测量范围大、精度好、效率高、记录自动化、实时自动绘图等优点,成为海洋测绘的重要手段。多波束测深声纳系统在进行海底深度测量的同时记录了来自海底的回波强度信息,因而可以利用其声强信息形成海底多波束声纳图像。

多波束声纳图像是反映水下地形地貌的重要手段,对其关键处理技术的研究不仅有利于海洋资源的勘探和利用、海底目标识别与跟踪,而且也可用于水下

运载体的导航定位,海上侦查等军事用途^[1-2]。

1 多波束声纳图像形成原理及特点

多波束测深系统一般由主机系统、外围设备和后处理系统三部分组成。主机系统通过声纳探头底部的枝状发射器向水底发射声波脉冲,经水底或水中物体反射后由探头中部的换能器接收;主机系统的中央处理单元发送指令给探头并从探头接收采集信息,接收定位传感器、姿态传感器、电罗经、声速剖面仪等外围设备的数据;中央处理单元将接收到的数据传送到后处理系统,由系统的数据处理软件进行数据采集、预处

收稿日期:2013-11-13

修回日期:2014-02-19

网络出版时间:2014-07-17

基金项目:山东省自然科学基金(Y2008G02)

作者简介:程秀丽(1988-),女,河北张家口人,硕士研究生,研究方向为多波束声纳图像处理技术;导师:徐遵义,硕士研究生导师,研究方向为水下运载体辅助导航定位与三维可视化技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140717.1134.001.html>

理、图形显示及水深、图像、船姿、声速和系统安装参数等数据的存储操作。图 1 为多波束声纳系统数据采集原理示意图^[3]。

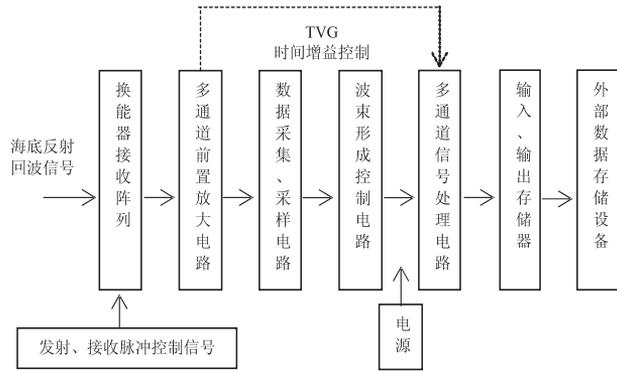


图 1 多波束声纳系统数据采集原理

多波束声纳图像形成的重要参数就是声能强度即回波强度，多波束声纳每发射一个脉冲激发，就在波束扇面与海底的交线上形成一组回波强度的时序观测量，得到多个波束脚印的回波强度（即图像数据），形成一 ping 数据；沿载体航行方向多个脉冲激发（多 ping）形成一个条带，相邻条带拼接后得到整个测区的声纳图像。

为便于计算机处理，需对图像进行格网化，每个格网代表一个回波采样，即为图像的一个像素。由于声强采样的不均匀性，针对格网内声强值个数采取相应的声强抽样方法，确保每个格网都有唯一的声强值。最后完成回波强度的量化，选取适当的灰度级将回波强度值转换为灰度值^[4-5]。

经过抽样和量化，形成了多波束声纳图像。图像中每个像素对应两组参量：一组为图像参量，即像素的位置以及对应的灰度值；另一组为地理参量，即像素中心对应的地理坐标和声强。如果存在深度采样点，像素内还对应深度。

多波束声纳图像受到设备、海洋环境、测量条件等影响，具有以下特点^[6]：

(1) 图像数据动态采集：船在航行过程中进行波束的发射和接收，实时记录采集到的数据；

(2) 图像数据量庞大：图像数据量取决于测区海水的深度和测船的航行速度，如 Simrad 公司的 Atlas Fansweep 20 多波束系统每次可获得多达 4 096 个成像数据；

(3) 图像分辨率较低：多波束图像的分辨率主要取决于格网化的情况，由于海底测量范围大，一个像素一般以米为数量级；

(4) 图像处理难度大：由于回波信号受到海洋环境噪声、声波的散射和混响、声能传播损失、海底地形等多方面因素的影响，因此提取的多波束图像质量和精确度受到很大影响，为后续的应用带来一定难度。

2 国内外研究现状

随着多波束测深系统的问世，对多波束测深数据的研究工作一直在继续。国外对这方面的研究起步较早，对多波束数据的分析处理建立了一定理论和方法，也取得了很多研究成果。国内对多波束数据的研究随着海洋开发也逐步受到重视，由于回波强度数据量庞大，对这部分数据的采集和研究相对较少，对多波束声纳图像的处理技术也少有文献。近些年，逐渐开始了相关研究。

多波束测深系统对回波强度数据的处理主要基于海底地形为平坦的假设，处理后的回波强度数据并不能真实准确反映海底地形地貌。针对海底地形存在起伏变化的特点，通过计算海底坡面的坡度角，可以得到波束的实际入射角^[7]。根据波束的实际入射角对波束照射区面积作校正，1994 年 Hammerstad 提出了波束照射区面积(AE)的改正方法，在入射角 $\theta < 5^\circ$ 时，AE 与入射角无关，只与发射、接收波束的宽度有关； $\theta \geq 5^\circ$ 时，AE 是三者的函数关系。随着研究的深入，又提出了针对不同范围入射角，回波强度的计算公式： $\theta \geq 25^\circ$ 时，服从 Lambert 法则； $0^\circ < \theta < 25^\circ$ 时，回波强度随入射角线性变化； $\theta \approx 0^\circ$ 时，回波强度值为常数。除海底地形的影响外，声场变化的影响主要根据信号随机性的统计特征，取多个回波信号的平均值为实际的回波强度^[2]。

由回波强度数据生成声纳图像的过程中，首先要进行数据的滤波，可以采用的方法有高通滤波、中值滤波、梯度倒数加权平均滤波等，其中中值滤波效果明显，比较适合声纳数据的滤波处理^[6]；除了一般的图像滤波方法外，对回波强度数据的滤波还可以借鉴深度数据滤波的方法进行处理。完成回波强度数据的滤波后，要确定其采样位置，目前基本一直沿用 Neil C. Mitchell 提出的波束振幅投影法，该方法受地形起伏的影响相对较小^[8]。最后，实现回波强度数据的拼接，得到整个测区的声纳图像，可采用的方法有平差滤波、基于加权最小二乘法的条带拼接等。针对这些方法匹配效率的问题，有学者提出了一种伪灰度双模板匹配的数据拼接方法，在一定程度上提高了图像拼接效率^[9]。

对多波束声纳图像的处理方法除了一般的数字图像处理方式（图像的平滑、增强、锐化等）外，还要考虑多波束声纳图像的形成方式和特点，有针对性地改善图像质量。对于中央波束的镜面效应，可以先将中央波束区一定角度范围内的数据剔除，通过对其他边缘波束进行高斯加权平均来将中央波束和周围波束回波强度值相统一^[10]；还有学者提出通过分析中央波束区和周围波束回波强度数据、面积、声线传播距离的平均

值之间的关系,经过实验推测得到一个用于数据修正的经验公式^[11]。对于图像灰度分布不均匀的问题,Reed 等通过计算每航向列的平均灰度和整个图像平均灰度对图像进行改正,在此基础上,考虑每航向列的灰度异常和噪声,计算改正系数,得到灰度分布较为均匀的图像^[10]。声纳图像中的灰度异常值可以通过滤波来消除,滤波方法常用的有中值滤波、小波滤波、同态变换滤波等,滤波效果与实际需要和图像自身特性有关。有学者提出了一种基于加权最小二乘估计的数据归一化方法,可以有效抑制灰度异常值对图像的影响^[12-14]。

3 多波束声纳图像处理的关键技术

多波束测深系统在测量时,受到海洋环境、海洋噪声等多方面因素影响,由原始多波束图像数据生成的多波束声纳图像并不一定能真实准确地反映海底实际地形,需要对图像数据进行预处理与修正,提高图像的准确性和图像质量。

3.1 影响回波强度的主要因素

声波在水中传播时,声能的变化由声能方程描述^[15]:

$$EL = SL - 2TL + BS - NL + DI_r \quad (1)$$

式中,EL 为回波信号级;SL (Source Level) 为声波的发射强度;TL (Transmission Loss) 为传播过程中声能的损失;BS (Backscatter Strength) 为反向散射强度(回波强度);NL (Noise Level) 为海洋噪声造成的损失;DI_r (Directivity Index) 为声波的指向性指数。

BS 取决于海底底质类型、地形起伏程度和波束脚印面积^[16]:

$$BS = BS_B + 10 \lg AE; BS_B = BS_0 + 20 \lg \cos \theta \quad (2)$$

式中,AE 为波束脚印面积(与入射角相关);BS_B 为单位面积反向散射强度;BS₀ 反应海底粗糙程度; θ 为波束入射角,不同的 θ 下,BS_B 表达式不同。

由式(1)、(2)可以得到影响 BS 的直接物理量:波束脚印面积、波束入射角。影响这些量的主要因素包括:信号传播损失,海洋环境噪声,海底地质类型(对声波的吸收),海底地形的粗糙程度,声波的散射与混响,声速剖面。

3.2 回波强度数据的修正

多波束系统的数据处理软件会对回波强度数据作初步处理:信号传播损失主要由海水对声波的吸收和声波的球面扩展损失造成,多波束系统对衰减的信号进行时间增益补偿;由于信号传播损失与声波实际传播距离相关,通过声线弯曲改正可以得到准确的声波传播距离;为了得到与入射角无关的反映海底地形特征的回波强度纯量,需要进行 Lambert 法则改正,由声

速剖面 SVP 和波束发射时刻的入射角,根据 Snell 法则计算出波束到达海底的入射角,从而消除式(2)中的 $20 \lg \cos \theta$ 项,得到回波强度纯量 BS₀^[17-18]。

对回波强度数据的修正除了系统数据处理软件进行的时间增益补偿(TVG)、声线弯曲改正、Lambert 法则改正,还需要考虑海底地形对波束入射角与波束照射区面积的影响、声场变化特征等的影响,建立相应的数学模型对回波强度数据做进一步改正。

3.2.1 参照海底地形修正波束入射角

对回波强度的处理中,一般认为海底地形是平坦的,但地形的起伏波动是必然存在的,忽略海底地形的粗糙程度,得到的波束入射角会存在较大偏差。因此,需要通过计算海底坡面的坡度角来得到实际地形下的波束入射角,坡度的计算精度主要取决于测深精度^[2,19]。

3.2.2 波束照射区面积改正

波束在海底的投影区域称为波束照射区,海底平坦时,该区域面积与波束入射角相关,受到海底坡面的影响,实际投影面积会随坡度变化,所以要参照航迹方向和航迹正横方向下坡面角度对波束照射区面积进行改正。经过对波束入射角和波束照射区面积的修正后,可以得到更为准确的反映海底地形特征的回波强度纯量。

3.2.3 声场变化对声波信号的影响

由于受到海洋水文的影响,进行多波束声纳测量的船体会发生漂移与姿态的变化;海洋生物体、海底地质特征及地形的影响,导致接收到的回波信号具有一定的随机性,得到的声纳图像不能准确反映海底地形地貌。所以在实际处理中,需要消除随机信号对回波信号的影响,获取较为真实的回波强度。

3.3 回波强度数据的预处理及成图

对回波强度数据完成修正之后,为生成声纳图像还需要对回波强度数据进行预处理,包括回波强度采样位置的确定、回波强度数据的拼接以及数据的内插等。

多波束测量得到时间序列的声强分布,为了绘制图像,需要确定振幅对应的投影点位置,所以要将时间序列的声强分布转换为横向距离序列,得到回波强度的采样位置,实现位置归算。得到的回波强度位置(即波束脚印位置)由于受到船体运动及海洋环境的影响,还需要对其进行位置校正,可以参照船在同时刻的姿态数据,如船的俯仰、横摇、纵摇等参数,修正回波强度位置,得到更精确的波束脚印位置。

多波束系统采用条带式扫描进行数据采集,在地理坐标下依次将条带中不同 ping 数据、相邻条带间的数据进行拼接,得到整个区域的图像数据。为了保证

数据的完整性,相邻条带间的数据都存在一定范围的重叠,在地理坐标下可以实现条带数据的拼接,对重合区域的回波强度值进行重新计算,消除重叠区两侧数据差异,实现数据的平滑过度。

回波强度数据经过滤波、位置归算和数据拼接后,还需考虑其分布问题。导致回波强度数据分布不均匀的因素主要有:多波束系统的测量模式导致波束在海底的实际投影位置之间的距离不是常数,是随深度变化的;滤波可能导致回波强度数据的缺失;底部检测决定回波强度数据的有效性。为了得到等间距均匀分布的回波强度,参照波束投影点的位置对数据进行内插。图 2 为像素点对应的横向坐标和回波强度值示意图^[20]。

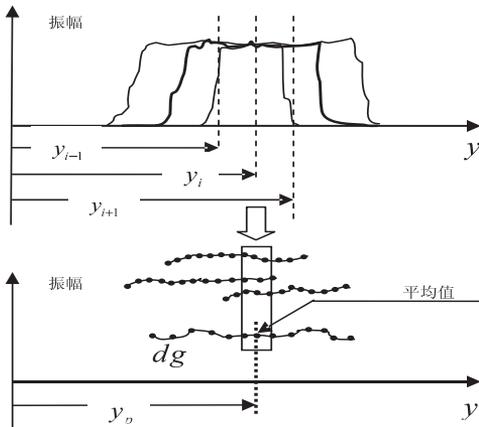


图 2 像素点对应的横向坐标和回波强度值

3.4 声纳图像的处理

获得多波束声纳图像后,需要对声纳图像进行

一系列预处理来提高图像质量。回波强度数据由于受到各种海洋环境(海洋噪声、海洋混响等)的影响,所以在成图前首先要对数据进行滤波。选取滤波方法时要考虑到回波强度数据量庞大,尽可能提高滤波速度。针对多波束声纳图像自身的特点,还需要改善中央波束的镜面效应、图像的灰度分布情况(消除条带间图像的灰度不均匀、对航迹线方向灰度异常值进行归一化处理),以及图像的平滑、增强、锐化等基本的数字图像处理过程。

由于受镜面反射的影响,声纳图像在中央波束区部分存在较大程度的失真现象,正负几度范围内的反射强度较大,在图像中表现为一条沿航迹线上的突出明亮条带。为了将中央波束区的回波强度值和周围波束的回波强度值相统一,需要对中央波束区的回波强度进行残差处理,从而得到更能真实反映海底地形变化的回波强度数据。

经过对回波强度的修正和预处理之后,声纳图像质量得到一定程度提高,但受到复杂的海洋环境、多波束系统波束束控造成的误差和数学修正模型误差等因素的影响,导致声纳图像仍存在灰度不均匀现象,包括条带间图像的灰度不均匀、灰度异常值的存在等,所以需要分析各种影响因素,通过相应的方法改善图像灰度效果^[16]。

总结以上对多波束回波强度数据的处理过程与主要方法。多波束图像数据的处理流程大致如图 3 所示。

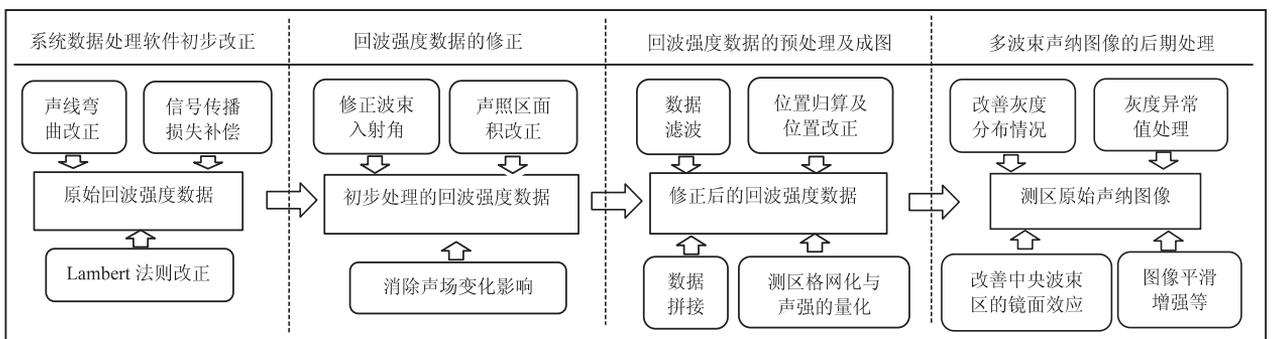


图 3 回波强度数据处理流程图

4 结束语

目前,对多波束回波强度数据的分析和处理基本停留在对回波强度数据本身的研究上,通过分析各种影响回波强度数据的因素,建立相应的改正模型,如考虑海底地形对波束入射角的影响、波束照射区面积的改正等,改正模型比较固定,不同方法的改正效果也基本相当。除此之外,还可以参照测船在同时刻的姿态数据,如俯仰、横摇、纵摇对波束脚印的位置进行校正,

提高回波强度数据的精确性。随着研究的深入,对声纳图像的修正方式也有待进一步发展,近几年逐渐出现了将多波束深度数据与回波强度数据相结合的方式,提出了基于回波时间将深度数据匹配到声纳数据中,以提高声纳图像的精度和分辨率,但具体匹配方法和建立的模型并不完整,目前仅用于验证声强数据的准确性,尚未形成完善的理论方法^[5,16]。由此可以考虑利用精度更高的多波束深度数据来校正多波束声纳图像,将深度值转换为图像的灰度值,同时建立深度数

据与回波强度之间的数学模型,利用深度数据对声纳图像作修正,提高图像的准确性。除此之外,改善声纳图像的灰度不均匀也是有待深入研究的问题。

参考文献:

- [1] 唐秋华,陈义兰,周兴华,等.多波束海底声像图的形成及应用研究[J].海洋测绘,2004,24(5):9-12.
- [2] Brown C J, Blonde P. Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping [J]. Applied Acoustics,2009,70(10):1242-1247.
- [3] 丁继胜,刘忠臣,周兴华,等.多波束测深声纳系统的工作原理[J].海洋测绘,1999(3):15-22.
- [4] Keeton J A, Searle R C. Analysis of simrad EM12 multibeam bathymetry and acoustic backscatter data for seafloor mapping, exemplified at the mid-Atlantic ridge at 45°N [J]. Marine Geophysical Researches,1996,18(6):663-688.
- [5] Chenadec G L, Boucher J M. Sonar image segmentation using the angular dependence of backscattering distributions [C]//Proc of oceans. [s. l.]:IEEE,2005:147-152.
- [6] 赵建虎,刘经南.多波束测深及图像数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
- [7] 唐秋华,周兴华,丁继胜,等.多波束反向散射强度数据处理研究[J].海洋学报,2006,28(2):51-55.
- [8] Mitchell N C. Processing and analysis of simrad multibeam sonar data [J]. Marine Geophysical Researches,1996,18:729-739.
- [9] Urick R J. Principles of underwater sound for engineers [R]. [s. l.]:Mc Graw-Hill,1967.
- [10] 张会娟,阳凡林,李峰,等.多波束声纳图像整体灰度不

均匀及中央波束区反射异常校正方法[J].全球定位系统,2012,37(1):25-27.

- [11] 王煜.多波束声纳图像入射角效应和镜面反射区异常的改正[D].青岛:山东科技大学,2011.
- [12] 马飞虎,鄂栋臣,赵建虎,等.多波束声强振幅滤波方法比较研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2010,35(9):1082-1085.
- [13] 孙文川,肖付民,金绍华,等.加权最小二乘估计的多波束声强数据归一化方法[J].测绘科学技术学报,2012,29(4):262-266.
- [14] 田晓东.声纳图像滤波方法的比较分析[J].声学与电子工程,2007(1):22-25.
- [15] 朱小辰,刘雁春,夏伟,等.基于回波时间的多波束测深与声纳数据匹配方法[J].海洋测绘,2010,30(1):25-28.
- [16] Lurton X, Dugelay S, Augustin J M. Analysis of multibeam echo-sounder signals from the deep seafloor [C]//Proc of oceans engineering for today's technology and tomorrow's preservation. Brest:IEEE,1994:213-218.
- [17] Buelens B, Williams R, Sale A, et al. Model inversion for mid-water multibeam backscatter data analysis [C]//Proc of oceans. [s. l.]:IEEE,2005:431-435.
- [18] Becker K. Effect of various surface-height-distribution properties on acoustic back-scattering statistics [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering,2004,29(2):246-259.
- [19] 金绍华,翟京生,刘雁春,等. Simrad EM 多波束反向散射强度数据精处理研究[J].测绘科学,2010,35(2):106-108.
- [20] 郝燕玲,韩庆楠,徐聪.伪灰度双模板匹配的多波束数据拼接算法[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(7):927-931.

(上接第 196 页)

- GL programming guide [M]. 李军,徐波,译.第 7 版.北京:机械工业出版社,2010.
- [2] Chen Bo, Cheng H H. Interpretive OpenGL for computer graphics [J]. Computers & Graphics,2005,29(3):331-339.
- [3] Baek N, Lee Hwanyong. OpenGL ES 1.1 implementation based on OpenGL [J]. Multimedia Tools and Applications,2012,57(3):669-685.
- [4] Al-Salman A S, Al-Qahtani F. GLAL: an OpenGL arabization library [J]. Software Practice and Experience,2005,35(14):1393-1407.
- [5] 许文馨,左昕,安琪,等.标准符合性测试的国内外比较及对策分析[J].现代商贸工业,2013,25(1):155-157.
- [6] 向润.黑盒测试方法探讨[J].软件导刊,2009,8(1):33-34.
- [7] 赵瑞莲.软件测试方法研究[D].北京:中国科学院研究生

院(计算技术研究所),2001.

- [8] 杨建光,梅大成.黑盒测试方法和综合策略的研究[J].计算机光盘软件与应用,2012(4):121-122.
- [9] 石君友,纪超,李海伟.测试性验证技术与应用现状分析[J].测控技术,2012,31(5):29-32.
- [10] 刘新建.标准验证工作的思考[J].中国标准化,2012(1):81-84.
- [11] 马城城,田泽,黎小玉.基于 GPU FPGA 芯片原型的 Vx-Works 下驱动软件开发[J].计算机技术与发展,2013,23(7):84-86.
- [12] 李炎琨.基于 VMM 验证方法的研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
- [13] 伍小荟.面向软件可靠性的性能测试方法研究与应用[D].上海:上海交通大学,2012.
- [14] 夏启明.软件测试及评价的复用策略研究及其实现[D].武汉:武汉大学,2010.

多波束声纳图像处理关键技术的研究

作者: [程秀丽](#), [段文凯](#), [邬旋](#), [訾桂峰](#), [CHENG Xiu-li](#), [DUAN Wen-kai](#), [WU Xuan](#), [ZI Gui-feng](#)

作者单位: [程秀丽, 段文凯, 邬旋, CHENG Xiu-li, DUAN Wen-kai, WU Xuan \(山东建筑大学 计算机科学与技术学院, 山东 济南, 250101\)](#), [訾桂峰, ZI Gui-feng \(潍坊市科学技术情报研究所, 山东 潍坊, 261061\)](#)

刊名: [计算机技术与发展](#) 

英文刊名: [Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期): 2014(10)

引用本文格式: [程秀丽, 段文凯, 邬旋, 訾桂峰, CHENG Xiu-li, DUAN Wen-kai, WU Xuan, ZI Gui-feng](#) [多波束声纳图像处理关键技术的研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(10)