

热液硫化物现场调查中超短基线异常定位数据的快速剔除^{*}

吴学文, 包更生, 张恺

(国家海洋局第二海洋研究所 海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 热液硫化物现场调查所需的船舶动力定位系统给水下定位数据带来较大的噪声干扰, 而调查的现场决策与后续研究均对水下定位数据提出更高的要求。针对现有的 Posidonia 6000 超短基线水下定位系统, 快速有效地剔除受干扰的异常定位数据对热液硫化物调查研究具有积极的意义。本文从超短基线解算过程数据(x, y, z 三维分量)入手, 根据现场作业水深、滑轮偏角, 建立异常定位数据的三维剔除模型; 根据三维各自的时间系列分布图, 采用合理的数据结构与算法, 实现对异常定位数据的交互式剔除。本研究成果能快速有效地剔除异常定位数据, 为热液硫化物调查的现场决策和各搭载传感器的后续资料研究提供更准确的水下定位数据。

关键词: 热液硫化物; 水下定位; 超短基线; 模型; 交互式剔除

中图分类号: P715.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)04-0165-05

An effective method to eliminate the abnormal positioning data of USBL in the hydrothermal sulfide field investigation

WU Xue-wen, BAO Geng-sheng, ZHANG Kai

(Key Lab of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The noise from dynamic positioning system of a vessel interferes with the data of ultra short base line (USBL) underwater positioning system in hydrothermal sulfide field investigation, while in situ decision-making and continuing research demand much better underwater positioning data. It is therefore necessary to eliminate abnormal positioning data rapidly and effectively for the existing Posidonia 6000 USBL. This study takes the USBL procedure data (x, y, z) as elimination objects, sets up (x, y, z) elimination models according to field water depth and the block angle, and uses reasonable data structure and algorithm to realize interactive elimination according to maps between (x, y, z) and time series. With the models and interactive elimination, abnormal USBL positioning data can be eliminated effectively, and much better underwater positioning data can be provided for in situ decision-making of hydrothermal sulfide investigation and continuing research.

Key words: hydrothermal sulfide; underwater positioning; ultra short base line (USBL); model; interactive elimination

海底热液活动广泛发育于大洋中脊、弧后盆地、弧前和岛弧等海底构造活跃的区域^[1], 能够改变洋壳组分, 影响海洋化学组成, 形成具有相当经济价值的热液硫化物矿区, 并能为热液生物群落的生存提供能量, 具有重要的科学和经济意义^[2], 是世界各国科学组织研究的前沿和重点。我国热液硫化物的调查起步较晚, 但成果丰富, 2005 年中国首个环

球航次在东太平洋海隆、大西洋洋中脊热液活动区成功地抓取到热液硫化物; 2007 年在西南印度洋成功发现了首个热液活动区和热液喷口, 标志着我国热液硫化物调查上了一个新的台阶^[3]。

目前国内对热液硫化物调查的主要平台是“大洋一号”调查船, 其主要调查方法是利用光学拖体搭载相关传感器在重点区域沿设定测线进行拖曳,

收稿日期: 2009-04-08; 修订日期: 2009-05-15。卢冰编辑

基金项目: 国家自然科学基金(40476031); 国家海洋局青年海洋科学基金(2009314); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项资助(JG200804)

作者简介: 吴学文(1979—), 男, 湖北省蕲春县人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋地球物理研究。E-mail: samwu5198@sina.com

^{*}感谢中国大洋 20 航次全体调查队员和船员对超短基线现场作业给予的帮助; 感谢陶春辉研究员抽出时间审阅全文, 并提出指导性意见。

通过海底摄像以及各搭载传感器的数据分析找出经过热液活动区的时间段,依据超短基线的水下定位数据圈定热液活动区的分布位置,结合水下定位数据和水文资料实施定点取样作业。

在现场作业中,为了消除涌浪、风和流等不利因素的影响,保证拖体在重点区域沿设定测线进行拖曳,母船需开启船舶动力定位系统。“大洋一号”的动力定位系统由位于船首的全回转推进器(作业时需伸出船底 1.8m)、船中后部左右侧的侧向推进器和船尾的主推进器组成。当船舶动力定位系统以较大的功率作业时,位于船中部的 Posidonia 6000 超短基线定位系统(作业时船底换能器阵需伸出 1.2m)就受到推进器噪音的干扰(图 1),而热液硫化物调查具有区域较小、需要现场决定靶区的特点。快速有效地剔除超短基线受干扰的异常定位数据,对热液硫化物调查的现场决策和各搭载传感器的后续资料研究都具有积极的意义。

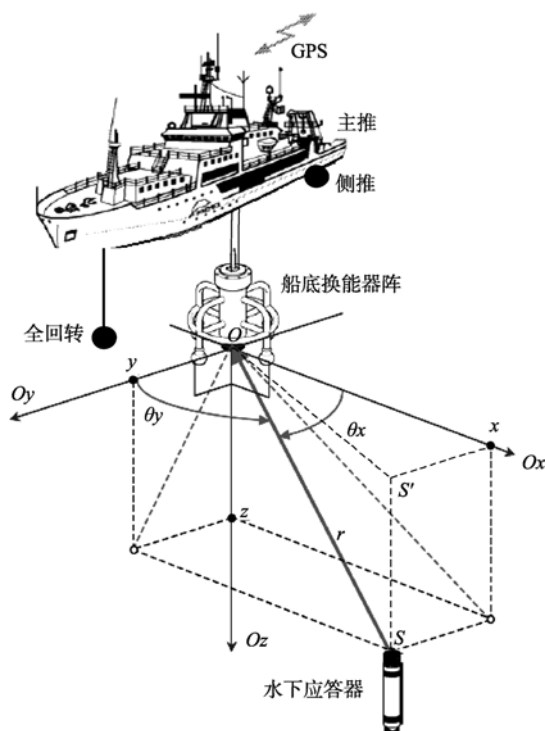


图 1 超短基线定位原理几何示意图

Fig. 1 Geometry sketch map of USBL positioning theory

1 超短基线工作原理

超短基线定位系统通过测量从水下应答器(简称目标)到船底换能器阵(简称基阵)的声波传播时间(简称测时)来计算目标的斜距 r ,通过测量从目标到达基阵各水听器的声波相位差(简称测相)来计算目标的俯仰角和方位角,从而确定目标相对基阵的相

对位置 (x, y, z) ;最后通过 (x, y, z) 和基阵的 GPS 大地坐标换算出目标的大地坐标。

以“大洋一号”已装备的 Posidonia 6000 超短基线为例,设船底换能器阵(由位于中心的发射器和位于四周垂直相交的 4 个水听器组成)为原点 O ,水下应答器位于 S 处,在“北东地”直角坐标系中的坐标为 (x, y, z) ,目标径矢为 OS , S' 为 S 在 xOy 平面上的投影, OS 与 x 轴的夹角为目标水平方位角, OS 与 OS' 的夹角为目标垂直俯仰角, θ_x 为径矢 OS 与 x 轴夹角, θ_y 为径矢 OS 与 y 轴夹角,如图 1 示,由几何关系容易得到:

$$\cos\theta_x = x/r \quad (1)$$

$$\cos\theta_y = y/r \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

由于基阵的尺寸很小 ($d \ll r$),可按近似平面波场来处理,则有:

$$\phi = 2\pi d \cos\theta_x / \lambda \quad (4)$$

$$\varphi = 2\pi d \cos\theta_y / \lambda \quad (5)$$

其中, λ 为波长; d 为基阵的阵元间距; ϕ 为 x 轴相邻基元接收信号相位差; φ 为 y 轴相邻基元接收信号相位差。

由(1)、(4)式可得(6):

$$x = (\lambda/2\pi d) r \phi \quad (6)$$

由(2)、(5)式可得(7):

$$y = (\lambda/2\pi d) r \varphi \quad (7)$$

由(3)、(6)、(7)可得(8):

$$z = \frac{\sqrt{(2\pi d)^2 - \lambda^2(\phi^2 + \varphi^2)}}{2\pi d} r \quad (8)$$

超短基线实际的测量值为斜距 r 和相位差 ϕ 、 φ 。斜距 r 通过回波测距测得,具有很高的精度;目标的相对坐标 (x, y, z) 是其最终的水下大地坐标惟一的制约因素,其精度主要取决于相位差 ϕ 、 φ 的测量。

水下定位异常数据的剔除,通常采用直接对最终水下大地坐标经纬度进行处理,其手段有二。1)直接在经纬度平面分布图上剔除其外围的散点,这存在两个问题:其一,由于存在较多不同时间段的异常点刚好落在另一时段的密集区内而导致剔除不彻底;其二,“外围”边界是个很模糊的概念,难以找到准确依据加以确定(图 2)。2)通过拟合或滤波等手段对异常点进行剔除,也存在两方面问题:一方面是不同的测线的受干扰程度不同,需人为不断地修改拟合参数或滤波参数;另一方面是所有异常点都参与运算,相当于用异常数据来剔除异常数据。

本文从现场作业中寻找更多的依据、采用更易

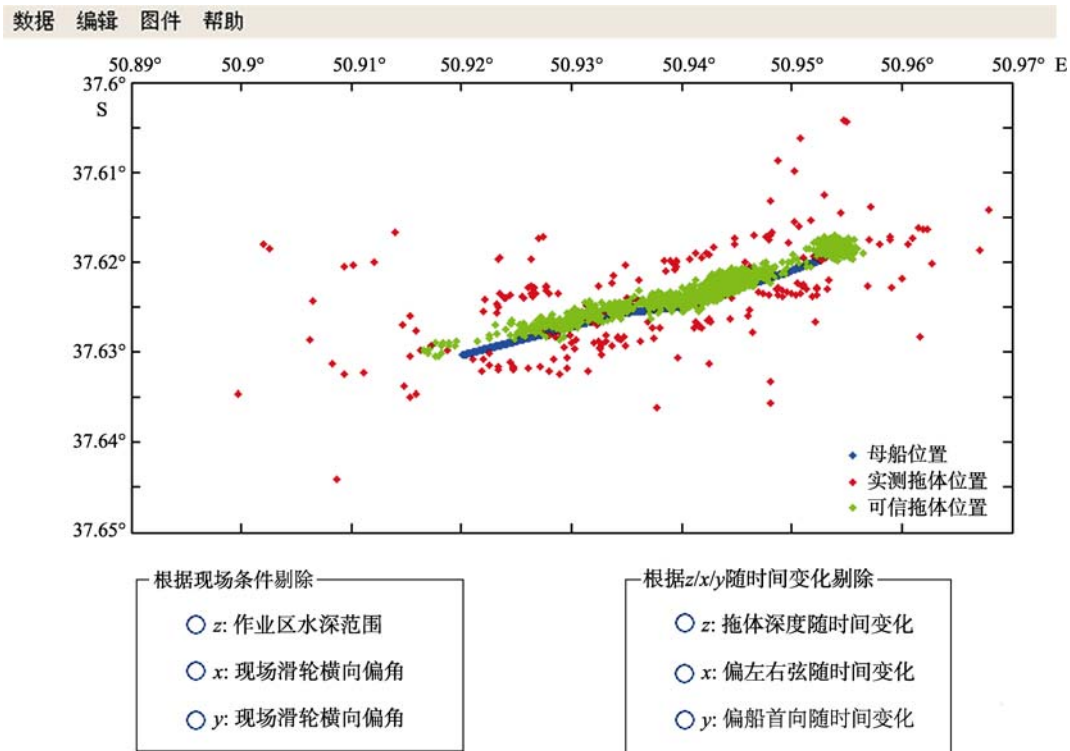


图2 交互式剔除完成后数据比较

Fig. 2 Position data comparison after interactive elimination

于操作的方法来实现对异常定位数据的快速剔除。其基本思路是回避对最终大地坐标的直接判断, 选用更为直观的过程数据 x , y , z 作为判断对象。从两个方面对异常数据进行剔除: 一方面从现场作业的水深范围、滑轮偏向记录中, 抽象出水下定位异常数据的三维剔除模型, 依据模型可快速批量地剔除异常定位数据; 另一方面依据 x , y , z 三维各自的时间系列分布图, 采用合理的数据结构与算法, 实现对异常定位数据的交互式剔除, 以满足更精细更全面剔除水下定位异常数据的要求。

2 超短基线异常定位数据的现场三维剔除模型

如图1示, 相对坐标中 x 表示目标沿母船左右舷方向偏离基阵距离(右舷为正), y 表示目标沿船首向偏离基阵距离(船首为正), z 表示目标沿垂向偏离基阵距离(向下为正)^[4-5]。(8)式 z 同时受 r 、 ϕ 、 φ 三个实测值制约, 任何一个测量值受干扰均会影响 z 值, 使其在时间系列图偏离前后相邻的未受干扰定位点的 z 值(图3), 可将 z 作为三维分量的第一判断对象; x 、 y 均只涉及到测距结果 r 和测相结果 ϕ 、 φ 中的一个, 考虑在现场作业中对母船进行倒车作业的需要, 给 y 方向的判断带来困难, 所以将 x 作为三

维分量的第二判断对象; 只要 z 、 x 中有一个分量异常则可判定该定位点为异常定位数据。

2.1 z 方向剔除模型

在确定重点区域、实施拖体测线作业之前, 应对该测线的水深情况有较详细的了解。测线最小水深 d_{\min} 、最大水深 d_{\max} 、拖体沿测线近底观测时拖体离底高 σ 都不难从现场作业时得知, 这就给 z 的判断提供了依据, 若解算出的 z 落在 $(d_{\min}-\sigma, d_{\max})$ 区间外, 则可认为该定位点为受干扰的异常定位数据, 必须剔除。

2.2 x 方向剔除模型

拖体作业时, 使用铠装同轴缆或万米光缆均需将缆通过母船尾部 A 架上的滑轮, 通过绞车来控制拖体离底高度, 可从滑轮偏角抽象出 x 方向剔除模型(图4): 绞车放缆长记为 τ 、A 架滑轮沿左右舷的偏角范围记为 (α, β) , 假设将缆在水下状态视为一直线, 依据模型可算出 x 的范围 $(\tau \sin \alpha, \tau \sin \beta)$ 。

滑轮的实际偏角在现场作业中无准确实时的数据, 可从现场安全巡视记录上获取滑轮沿左右舷的最大偏角。假若 x 值超出模型计算范围 $(\tau \sin \alpha, \tau \sin \beta)$, 即将该定位点视为受干扰的异常数据进行剔除。

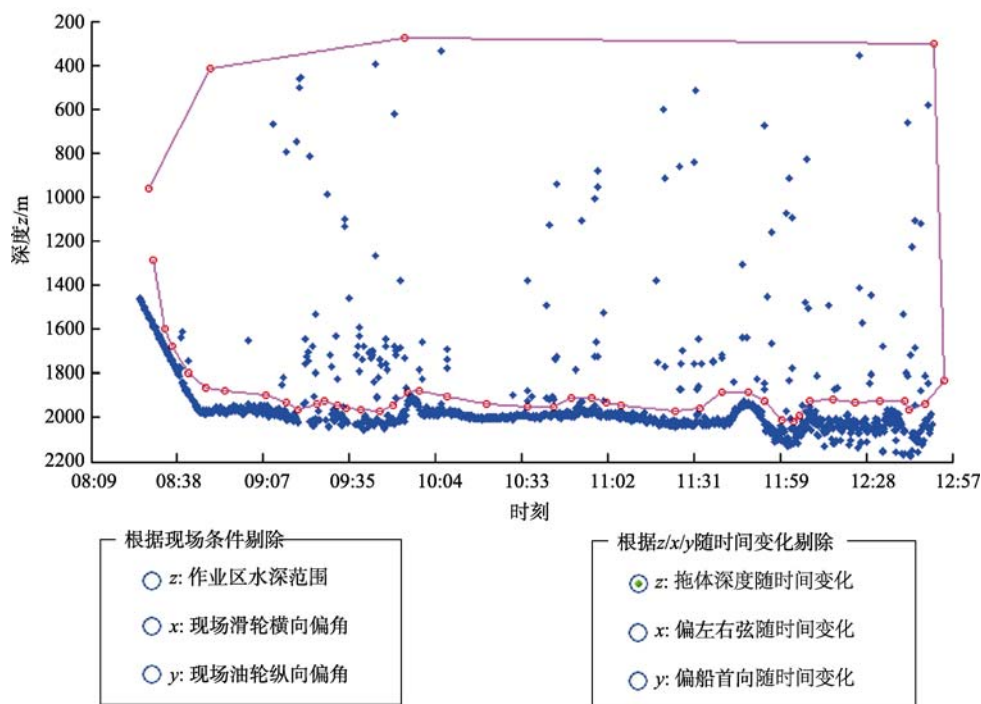


图3 交互式剔除操作截屏

Fig. 3 Interactive elimination printscreen

2.3 y 方向剔除模型

y 方向剔除模型的滑轮偏角范围(ξ, ζ)指 A 架滑轮沿船首向的偏角(图 4), 其模型同 x 方向剔除模型相似, 依据模型可算出 y 的范围($\tau \sin \xi, \tau \sin \zeta$)。

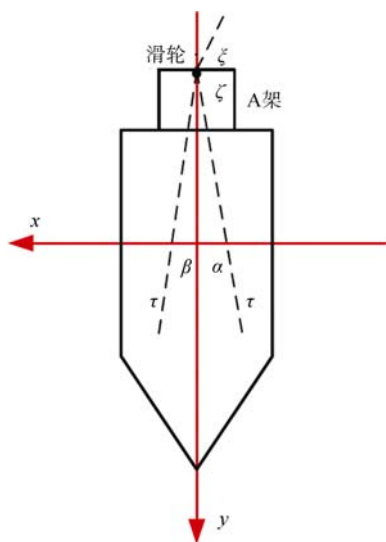


图4 x、y 方向剔除模型

Fig. 4 Elimination model of (x, y) direction

考虑到现场作业时, 有沿测线倒车的需要。倒车的过程增加了外部干扰因素, 导致 y 方向模型数据剔除的操作性不强, 可作为模型的验证模型。假若按 y 模型计算应该剔除的异常定位点刚好落在现场母船倒车时间段内, 则说明三维剔除模型可靠。

多次现场剔除结果与验证模型相符表明三维剔除模型可靠。

3 超短基线异常定位数据交互式剔除的实现

依据作业的现场情况提出的三维剔除模型可用于未发现热液硫化物的非重点测线的批量数据快速剔除, 对重点测线单纯通过上面三种模型剔除显然还不够, 可在此基础上进行拟合或滤波等处理, 从而达到精细剔除。这种方法在现场的数据处理中存在参阅资料多、不易检查、效率不高的不足, 且对人员的数据处理能力有较高要求。本文针对 Posidonia 6000 水下定位数据开发的异常点交互式剔除软件, 可弥补这些不足, 方便各专业自主处理水下定位数据的原始记录文件, 以满足其搭载传感器的不同精度要求。

交互式剔除的基本思想是通过人来判断定位数据是否应该剔除, 并通过表述来剔除这些数据。只要选取更易于判断的对象, 采用人性化的表述方式, 该方法能更彻底、更快速有效地剔除异常定位数据。回避对水下目标最终的大地坐标经纬度进行判断, 以(x, y, z)三维各自的时间系列分布图作为判断对象更易于对异常点的判断, 受干扰的异常定位数据的三维分量中至少有一个在时间系列分布图上明显偏

离前后相邻的未受干扰定位点。在表述方式上, 本文采取直接在时间系列分布图上用鼠标圈出任意多边形(左键取点, 右键自动闭合多边形), 圈在多边形内的点为异常定位数据点(图 3), 自动被剔除。

软件设计的总体目标: 1) 不改变 Posidonia 6000 显控记录软件 ABYSS 记录的原始文件及其提取数据文件, 每次编辑完成后, 自动生成测线的编辑工程文件、剔除后的有效定位数据文件; 2) 支持对定位数据点的剔除、每步剔除后可即时获得剔除前后相关数据的对比图; 3) 支持对执行过剔除操作的数据的恢复, 对于误剔除的数据可采用相同操作对数据进行选择性的恢复; 4) 支持原始数据提取批处理功能, 支持按“三维剔除模型”剔除异常定位数据的批处理功能。

Posidonia 6000 的原始记录文件是按设定的定位周期为单位, 每周期内包括多个固定字段的 ASCII 文件。可参阅随厂的操作手册^[4-5]对原始记录文件进行数据抽取。本软件主要提取原始记录中每组定位数据的“日期、GMT 时间、母船经纬度、拖体经纬度、 x 、 y 、 z 、斜距 DTG(r)”信息, 采用文件头说明及数据行的 ASCII 方式写出原始记录的提取数据文件。采用数组来存储提取数据, 通过对每组定位数据尾追加标记字段(BOOL 型), 用以表征该组数据是否为受干扰的异常数据。通过交互式剔除操作对追加的标记字段赋值。交互式剔除算法核心是利用面积进行判断(落在多边形外的点与多边形各边构成的三角形面积之和大于该多边形面积^[6]),

并利用多边形的包络矩形来提高运算速度(位于包络矩形外的点必定落在多边形外)。

结合 x 、 y 、 z 三维模型剔除、交互式剔除, 按上述数据结构与算法, 实现了“超短基线快速后处理”软件设计功能(图 2、图 3)。软件主菜单中的“数据”主要完成单一、批量、同一测线的原始记录数据的数据提取工作; “编辑”主要提供: 1) 重复编辑历史数据的入口, 2) 实现数据剔除与数据恢复的转换; “图件”提供提取各种图件, 方便对原始数据的评价、交互式剔除结果的比较分析(图 2 仅为其中的一项); “帮助”提供软件的使用说明和版本信息。通过 z 、 x 、 y 三维的交互式剔除达到要求后, 保存退出, 软件自动写出两个文件, 其一为工程文件, 即在所有原始数据列后添加“是否为异常点列”, 方便对同一数据不同研究目的的多次交互式剔除; 其二为结果文件, 即写出所有可信的水下定位数据。

4 结论

本文从超短基线水下定位的过程数据(x, y, z)入手, 从两个方面(现场作业条件的三维剔除模型、交互式剔除)对水下定位异常数据进行快速的剔除。在现有的条件和目前既定的作业方式(船舶动力定位同步作业)下, 本文做到对超短基线水下定位数据的“去伪存真”; 通过这些有限的准确的水下定位数据, 可利用合适的数学手段对定位数据较少的时间段进行插值, 以满足热液硫化物现场调查对水下定位的较高要求。

参考文献

- [1] RONAP A, SCOTT S D. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization new perspectives[J]. *Economic Geology*, 1993(88): 1935-1976.
- [2] TIVEY M K. Generation of seafloor hydrothermal vent fluids and associated mineral deposits [J]. *Oceanography*, 2007(20): 50-65.
- [3] TAO CHUNHUI, HUANG WEI, LIN JIAN, et al. Geochemical and mineralogical characteristics of sulfide chimneys from the first active hydrothermal vent field on the Southwest Indian Ridge AOGS 2008. Busan.
- [4] IXSEA OCEANO SAS. Posidonia6000 User Manual[P/CD]. [2003]. <http://www.ixsea-oceano.com>
- [5] IXSEA OCEANO SAS. Posidonia features and benefits [EB/OL]. [2009]. <http://www.ixsea.com/en/products/14/posidonia.html>.
- [6] BARBER C B, DOBKIN D P, HUHDANPAA H T. The Quickhull Algorithm for Convex Hulls[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1996, 22(4): 469-483.