

# 基于多换能器的声学短基线 海底电缆定位方法

方守川\*<sup>①②</sup> 秦学彬<sup>②</sup> 任文静<sup>②</sup> 吴绍玉<sup>②</sup> 付建超<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>武汉大学测绘学院,湖北武汉 430079; <sup>②</sup>东方地球物理公司装备服务处测量服务中心,河北涿州 072751;

<sup>③</sup>东方地球物理公司石油物探职业教育学校,河北涿州 072751)

方守川,秦学彬,任文静,吴绍玉,付建超. 基于多换能器的声学短基线海底电缆定位方法. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 825-828, 845.

**摘要** 本文分析了当前海底电缆地震勘探电缆定位技术的应用现状,指出了走航式工作模式和超短基线的声学定位系统存在实时性不强和作业效率低等问题,提出了一种新的基于多换能器阵列的短基线海底电缆定位方法,并详细阐述了多换能器短基线声学定位系统的设计、解算方法、位置改正和非正常观测值处理等技术问题。通过系统的静态定位和实时动态定位实验情况分析认为,该方法可以替代当前海底电缆走航式和超短基线定位方法。

**关键词** 海底电缆 多换能器 短基线 声学定位 系统

**中图分类号**: P631 **文献标识码**: A

## 1 引言

近年来,全球油气的重大发现均来自于海上,特别是深水领域。海洋油气勘探的新趋势是由水深200~300m的大陆架区域向水深超过3000m的区域拓展<sup>[1]</sup>。在深海海底电缆(OBC)勘探过程中,由于放缆船航向的变化以及强大的海流影响,在放缆时海底电缆的漂移现象十分严重。当电缆到达海底时,其实际位置往往远远地偏离了设计位置,无法满足高精度地震勘探的要求。

差分GPS技术(DGPS)和高精度水声定位技术的飞速发展,为OBC勘探的精确空间测量提供了更先进的技术手段。目前OBC地震勘探中一般采用初至波定位、超短基线定位(USBL)和声学长基线定位等方法<sup>[2~5]</sup>。初至波定位方法不需要投入额外的硬件设备,只需用地震仪器采集设备放定位炮即可,但该方法影响野外地震资料采集效率。USBL定位具有水听器基阵体积小、测距测向精度高、作用距离长等特点,但该设备价格较高,系统安装后的校

准需要非常精确。长基线声学定位方法是采用走航式的工作模式获取距离测量观测值,再通过距离交会的方式实现定位<sup>[6]</sup>。该方法以其不占用放炮时间、定位精度高而被广泛地应用,但存在定位过程实时性差和作业效率低等问题。为了尽可能地保证海底电缆定位的准确性,非常有必要研究一种成本低廉,定位实时性强,能实时指导放缆且定位精度能够满足OBC石油地震勘探需要的定位技术和方法,以便于实时调整放缆船放缆时的作业船偏离设计测线的状态,提高OBC地震勘探放缆点位准确率及施工效率。为此,本文提出了一种新的基于多换能器阵列的短基线海底电缆定位方法。

## 2 方法原理

### 2.1 声学长基线定位方法

声学长基线定位采用单个声波发射机的走航式工作模式如图1所示,使用一个收发合置的水声换能器发送询问信号和接收来自固定在海底电缆上的应答器的应答信号,通过距离交会的方式进行海底

\* 河北省涿州市东方地球物理公司装备服务处测量服务中心,072751。Email:lan816@sina.com

本文于2013年9月29日收到,最终修改稿于2014年7月7日收到。

电缆的定位。其测量方程为

$$R_i = \frac{cT_i}{2} = f(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}) + \varepsilon_i \quad (1)$$

其中:  $R_i$  为第  $i$  个声学定位采集时刻定位船上换能器的航迹点和水下应答器之间的距离;  $c$  为声波在水中的传播速度;  $T_i$  为第  $i$  个声学定位采集时刻系统测量到的定位船上换能器和水下应答器之间的声波双程传播时间;  $\mathbf{X}_i = (x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  个声学定位采集时刻定位船上换能器的航迹点大地坐标;  $\mathbf{X} = (x, y, z)$  为所要定位的应答器的大地坐标;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  个声学定位采集时刻观测值的综合误差项。 $f(\mathbf{X}_i, \mathbf{X})$  的具体形式为

$$f(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (2)$$

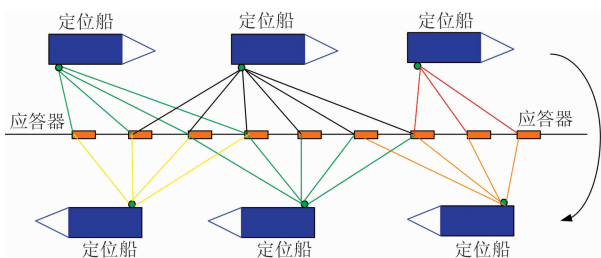


图1 走航式工作模式示意图

实际工作中,通过定位船在测线两端绕行一次,通过激发和接收声波进行双边定位测量,即可获得足够的声学观测数据  $T$ ,然后根据式(1)组成误差方程组,再通过最小二乘法计算确定检波点的实际空间位置<sup>[7,8]</sup>。

## 2.2 多换能器短基线声学定位系统设计

如图2所示,多换能器短基线定位系统由主控机和4个以上换能器组成。换能器的阵形为四边形,分别安装在定位船的不同位置,它们之间的距离一般不超过50m。GPS天线和换能器分别安装在船体甲板上、下方,并且GPS天线中心距离换能器中心有一段偏心距离,所以换能器坐标可由GPS天线坐标及其与换能器的相对位置关系计算。然而计算结果会受到船体横摇(倾斜变化)、纵摇(平衡变化)、偏离(船艏向变化)运动的影响,所以必须使用MRU(Motion Reference Unit,姿态传感器)测量船体的横摇和纵摇、使用电罗经测量船艏向并进行改正。

以GPS天线相位中心为原点,根据基阵相对于

船坐标系的固定关系,经过GPS天线天顶坐标系统中三维姿态改正和天顶坐标系统到WGS-84坐标的改正,计算出换能器的坐标。多换能器短基线定位系统的测量方式是由一个换能器发射,所有换能器接收,得到至少4个斜距观测值,根据换能器的坐标和斜距观测值就能计算出应答器的位置。一般同时只需3个观测值就可计算应答器的位置,而且同走航工作模式相比,不需要绕行即可获得更具有对称性的观测值,不仅缩短了作业船的工作时间,而且成本低廉、效率高。根据该系统能够得到冗余观测值,但可计算出最优估计值。

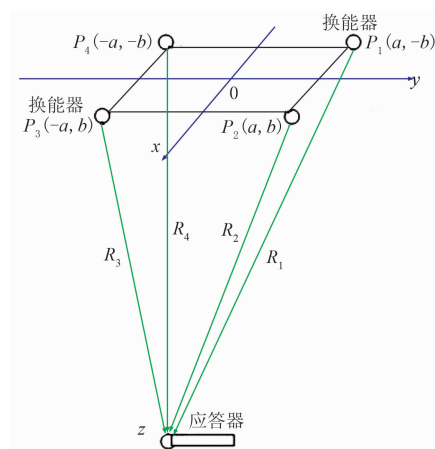


图2 多换能器短基线定位系统示意图

## 2.3 多换能器联合定位解算方法

多换能器联合定位采用由一个换能器发射,所有换能器接收的工作模式,其中激发换能器发送询问信号,而接收换能器接收来自固定在海底电缆上的应答器的应答信号,其测量方程可定义为

$$R_j = cT_j = f(\mathbf{X}_j, \mathbf{X}) \quad (3)$$

其中:  $R_j$  为第  $j$  个换能器的航迹点和水下应答器之间的距离;  $c$  为声波在水中的传播速度;  $T_j$  为第  $j$  个换能器测量到的其与水下应答器之间的单程声波传播时间;  $\mathbf{X}_j = (x_j, y_j, z_j)$  为第  $j$  个换能器的坐标。

设海底应答器的坐标为  $\mathbf{X}(x, y, z)$ ,有四个换能器安装在定位船上边长为  $2a$  和  $2b$  的矩形顶点(图2)。不考虑射线弯曲时,换能器到应答器的距离的平方分别为

$$\begin{cases} R_1^2 = (x - a)^2 + (y + b)^2 + z^2 \\ R_2^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 + z^2 \\ R_3^2 = (x + a)^2 + (y - b)^2 + z^2 \\ R_4^2 = (x + a)^2 + (y + b)^2 + z^2 \end{cases} \quad (4)$$

则解为

$$\begin{cases} x = \frac{(R_4^2 - R_1^2) + (R_3^2 - R_2^2)}{8a} \\ y = \frac{(R_4^2 - R_3^2) + (R_1^2 - R_2^2)}{8b} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得到四个可能的深度值

$$\begin{cases} z_1 = \sqrt{R_1^2 - (x-a)^2 - (y+b)^2} \\ z_2 = \sqrt{R_2^2 - (x-a)^2 - (y-b)^2} \\ z_3 = \sqrt{R_3^2 - (x+a)^2 - (y-b)^2} \\ z_4 = \sqrt{R_4^2 - (x+a)^2 - (y+b)^2} \end{cases} \quad (6)$$

通过计算 4 个深度的平均值可得到应答器的深度, 即

$$z = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 z_i \quad (7)$$

解出的位置是相对于船体坐标系的。为了获得应答器地理坐标系下的坐标, 必须结合作业船参考点处给出的地理坐标以及测量船的当前方位, 通过归位计算, 即可获得应答器的地理坐标。

#### 2.4 非正常观测值处理

在实际声学定位采集过程中, 由于受环境因素的影响, 声学定位系统输出的距离观测值存在非正常观测值或粗差, 从而严重影响最后的定位结果。

为解决上述存在的非正常观测值问题, 在考虑短时间(<30s)内, 风浪等环境因素、船速、航向和声学短基线阵列姿态相对稳定的假设条件下, 给出一种基于多项式拟合的粗差剔除及数据拟合算法。构建时间长度小于 10s 的观测数据区域, 并建立如下多项式模型

$$R = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 + \dots + a_m(t - t_0)^m \quad (8)$$

其中:  $R$  为距离观测值;  $a_i (i=1, 2, \dots, m)$  为模型系数;  $t_0$  和  $t$  分别为拟合模型的参考时刻和观测时刻。

数据区域内观测数据是否存在粗差, 可在模型拟合后对模型在各观测时刻残差平方和进行  $\chi^2$  检验, 即

$$\Gamma_k = \frac{\bar{v}_k^T \mathbf{P}_{v_k} \bar{v}_k}{\sigma_0^2} \sim \chi^2(n_k - m) \quad (9)$$

式中:  $\bar{v}_k$  为观测值改正数向量;  $\mathbf{P}_{v_k}$  为观测值向量权矩阵;  $\sigma_0^2$  为先验观测值标准方差;  $n_k$  为第  $k$  个预处理数据区内的样本数目;  $m$  为多项式阶次。

若检验通过, 则说明数据不含粗差, 拟合模型可用于下一时刻数据的粗差检验; 若检验不通过, 将最新的观测数据加入缓冲区序列中, 并剔除最旧数据, 形成新的缓冲区拟合模型应用于检验。缓冲区数据通过  $\chi^2$  检验后, 当下一时刻观测数据到来后, 先用拟合模型推算当前时刻预报值, 并与实际观测值比较, 若两者差值小于 3 倍的中误差, 则认为该观测值不存在粗差, 并将其填入缓冲区尾端, 并删除第一个观测数据。以此滑动处理, 实现整个观测序列数据的动态滤波。

图 3 是抽取了部分野外声学距离观测数据进行预处理的效果图。可以看出, 滑动数据区域内多项式滤波法较好地实现了粗差的剔除。从图中还可以看出, 该方法正确地描述了序列的变化趋势, 由于该模型是时间的函数, 据此可实现声学定位观测值的内插, 进而实现实时定位。

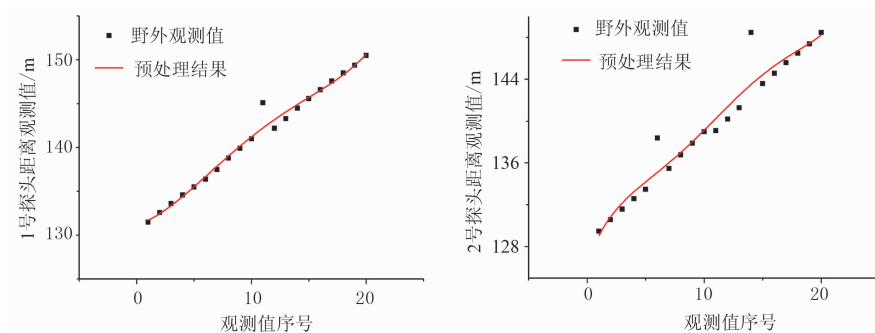


图 3 距离观测值预处理效果

上述建模过程中, 数据缓冲区内时间长度和模型阶数影响着模型精度。时间长度需结合航向、姿态变化参数来确定; 阵列姿态变化显著, 则需要较短时间长度; 否则可设置较长时间长度。模型阶数与

之类似, 高阶模型可以实现局部最佳逼近, 但可能造成局部异常被视为正确观测数据; 低阶模型尽管可以反映整体变化趋势, 但会造成正常的观测数据被检测为异常。通常, 模型阶数取 2~3 即可。

### 3 定位实验

2011年10月23日在陕西省汉中市红寺湖进行了多换能器联合定位系统野外联调、硬件及软件的稳定性及定位精度的测试。测试时,在定位船的前后左右分别安装了四个换能器(图4),用四台主控机同时对2个应答器进行定位。

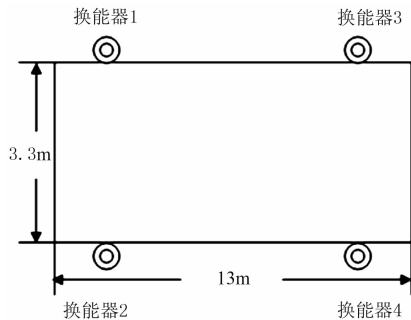


图4 换能器安装示意图

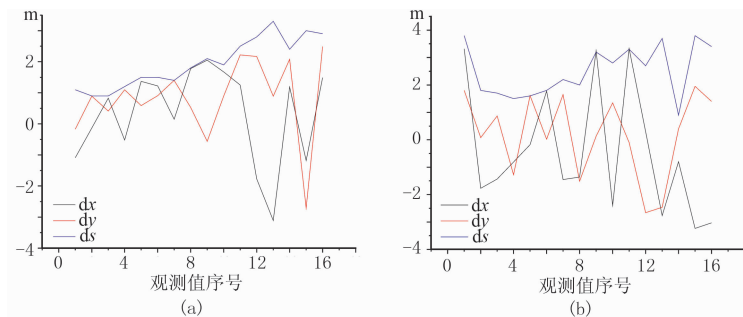


图5 多换能器定位与走航式定位结果比较

(a)1-1号应答器坐标差统计; (b)1-3号应答器坐标差统计

会态势(图形条件)造成的误差,所以图6所示动态定位应答器与固定在浮体上的GPS测得的坐标差 $dx$ 和 $dy$ 在4m范围内,应答器定位的准确性和稳定性达到了预期要求。

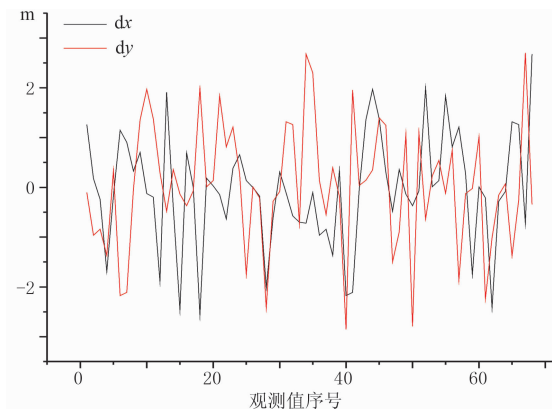


图6 动态实时定位与GPS测量结果比较

#### 3.1 静态定位

在湖里抛下组号为1-1和1-3两个应答器,首先使用走航式的方法测量出两个应答器的坐标作为理论坐标,然后使用多换能器联合定位方法再次测量计算出两个应答器的坐标,得到两种不同方法在一系列观测值序号的应答器坐标差值 $dx$ 和 $dy$ 及偏差距离 $ds$ 。从图5可以看出,多换能器联合定位与走航式定位结果差值在4m以内。

#### 3.2 动态实时定位

为了验证应答器动态环境下的定位效果,进行了应答器动态实时定位试验。在100m长的绳子上捆绑一个应答器,测量船拖动绳子跟船一起运动,使用多换能器联合定位进行实时定位。由于多换能器联合定位系统的定位精度主要受到以下类别的误差因素影响:测距误差(主要是由声学信号的测试和解码等因素引起);换能器阵列的姿态测量误差;换能器阵列的位置测量误差;声速误差以及解算时的交

## 4 结论

通过理论分析和野外作业对试验数据处理比较分析,可以得出以下结论:多换能器联合定位系统静态定位过程中,应答器能够进行可靠定位,测试的定位精度在4m以内,测试的结果基本满足要求。在动态定位过程中,测试结果表明该方法能够确定应答器的动态位置变化,实时性强,而且定位结果准确可靠,能够满足深海OBC地震勘探电缆放缆施工的要求。另外,同超短基线定位系统相比,多换能器联合定位系统成本低廉,操作简便容易;换能器体积小,安装简单,是一种可以替代海底电缆现有走航式定位和超短基线定位的一种方法。

(下转第845页)

- 2009,19(1):153-183.
- [5] Zou H, Lu X, Dai Q et al. Nonexistence of cross-term free time-frequency distribution with concentration of Wigner-Ville distribution. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2002, 45(3):174-180.
- [6] 陈颖频, 彭真明. 基于分数域广义平滑伪 Wigner-Ville 分布的地震信号时频分析. *中国地球物理*, 2012, 504-505.  
Chen Yingpin, Peng Zhenming. Seismic signal time-frequency analysis based on generalized smoothing pseudo Wigner-Vile distribution in fractional domain. *GCS*, 2012, 504-505.
- [7] Alieva T, Bastiaans M J. Wigner distribution and fractional Fourier transform. *IEEE ISSPA*, 2001, 168-169.
- [8] Wang Z W, Wang X L, Xiang M et al. Reservoir information extraction using a fractional Fourier transform and a smooth pseudo Wigner-Ville distribution. *Applied Geophysics*, 2012, 9(4): 391-398.
- [9] Dragonman D. Fractional Wigner distribution function. *J Opt Soc Amer*, 1996, 13(3):474-478.
- [10] Olcay A et al. Joint fractional signal representations. *Journal of the Franklin Institute*, 2000, 337(4): 365-378.
- [11] 陈■. 自适应与分数阶非平稳信号处理的研究[博士学位论文]. 辽宁大连:大连理工大学, 2003, 69-83.
- [12] Lutfiye D, Orhan A. Short-time Fourier transform: Two fundamental properties and an optimal implementation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(5):1231-1242.
- [13] Chen Y, Peng Z. A novel method of the optimal STFr-FT and its application in seismic signal processing. *International Conference on Computational Problem-Solving*, 2012, 328-331.

(本文编辑:刘勇)

### 作者简介



张晓燕 1988 年生;2011 年毕业于电子科技大学电子科学与技术专业,获学士学位;2014 年毕业于电子科技大学电子与通信工程专业,获硕士学位;主要从事信号与信息处理、时频分析与地震储层预测研究。

(上接第 828 页)

### 参考文献

- [1] 潘继平, 张大伟, 岳来群. 全球海洋油气勘探开发状况与发展趋势. *中国矿业*, 2006, 15(11):1-4.  
Pan Jiping, Zhang Dawei and Yue Laiqun. Status quo of global offshore oil and gas exploration and development and its trends. *China Mining Magazine*, 2006, 15(11):1-4.
- [2] 曾湘轶, 杨文艳. 浅析海底电缆地震采集作业二次定位系统. *石油地球物理勘探*, 2001, 36(2):220-226.  
Zeng Xiangyi and Yang Wenyan. Brief analysis of secondary positioning system in seismic sea-bottom cable acquisition. *OGP*, 2001, 36(2):220-226.
- [3] 姜瑞林. 海底电缆地震采集系统——初至波二次定位成果的质量评价. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(6):670-674.  
Jiang Ruilin. Seismic data acquisition using ocean bottom cable; quality evaluation of first-break secondary positioning result. *OGP*, 1999, 34(6):670-674.
- [4] 吴学兵, 刘志田, 宁靖. 海洋石油勘探水听器二次定位新方法研究. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(5):23-26.  
Wu Xuebing, Liu Zhitian and Ning Jing. A novel method study of hydrophone second positioning for oil exploration of ocean bottom cable. *Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition)*, 2006, 30(5):23-26.
- [5] 冯凯, 陈刚, 罗敏学. 二次定位技术的应用. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(3):346-349.  
Feng Kai, Chen Gang and Luo Minxue. Application of secondary positioning technique. *OGP*, 2006, 41(3):346-349.
- [6] 任文静, 樊俊明. BPS 声学二次定位系统在石油勘探中的应用. *物探装备*, 2009, 19(增刊):54-57.  
Ren Wenjing and Fan Junming. Acoustic positioning technology in petroleum exploration. *EGP*, 2009, 19(S):54-57.
- [7] 易昌华, 方守川, 秦学彬. OBC 二次定位系统定位算法研究. *物探装备*, 2008, 18(6):351-353, 366.  
Yi Changhua, Fang Shouchuan and Qin Xuebin. Study on positioning algorithm of OBC secondary positioning system. *EGP*, 2008, 18(6):351-353, 366.
- [8] 郭发滨, 张卫红. 姿态传感器在水深测量中的应用. *海洋测绘*, 2004, 24(5):56-58.  
Guo Fabin and Zhang Weihong. The application of dynamic motion sensor in echo sounding. *Hydrographical Surveying and Charting*, 2004, 24(5):56-58.

(本文编辑:宜明理)

### 作者简介



方守川 高级工程师, 1973 年生; 1996 年本科毕业于中国地质大学(武汉)工程测量专业, 目前博士就读于武汉大学测绘学院。现在东方地球物理公司装备服务处测量服务中心主要从事物探测量、GPS 应用和海上综合导航技术等方面的研究。