水下多缆定位建模及仿真分析

李国栋[1,2]，冯海泓[1]，黄敏燕[1]，徐海东[1]
(1. 中国科学院声学研究所东海研究站，上海 200032；2. 中国科学院研究生院，北京 100039)

摘要：阐述了水下多缆定位基本原理，建立了多缆定位模型，分析了阵形设计中影响定位精度的主要因素，并提出了有效的解决方法，最后给出了仿真结果。仿真结果表明本文提出的定位模型能够达到较高的定位精度。

关键词：阵形设计；水下定位；误差分析；地震勘探
中图分类号：TB556　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-3630(2009)-02-0113-04
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.02.004

Study and simulation of the positioning model of underwater multi-streamer

LI Guo-dong[1,2], FENG Hai-hong[1], HUANG Min-yan[1], XU Hai-dong[1]
(1. *Shanghai Acoustics Lab.*, *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200032, *China*)
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100039, *China*)

Abstract: The fundamental of Multi-streamer Positioning is described firstly. Then the positioning model is built up, and main problems related to the construction of the arrays are discussed. The effectual solutions for arrays design and simulation results are presented. Simulations show that the model is more accurate than the traditional model for underwater positioning.

Key words: arrays shape design; underwater positioning; error analysis; seismic survey

1 引 言

随着科学技术水平的不断提高，海洋石油勘探技术正向高精度、高分辨率方向发展，以期找出更薄层和更小的油气构造。

地震法是迄今为止最为有效的油气勘探方法[1-3]。为了降低成本、提高效率，地震波数据采集的趋势是采用 3M 技术，即多缆、多船、多源。地震勘探对定位导航的要求取决于地震资料处理时采用的面元尺寸。根据地震资料处理的要求，可推导出在测线纵向和横向的定位精度约为面元长度和宽度的四分之一。因此，对于高精度、高分辨率的地震勘探，对拖缆的定位精度要求很高。实时、准确和可靠地进行多缆地震作业的定位导航，是海上多缆地震勘探的一项关键技术[4-6]。

一般情况下，使用 DGPS 可以使拖船主导航很容易得达到精度指标[7]；但对水下拖缆部分，由于干扰因素多，定位难度较大[8-10]。地震勘探中，由于多缆可以使用更多的定位装置，为水下拖缆的高精度水声定位提供了可能。采用合理的声学阵形的水声定位，并结合罗盘、DGPS 浮标等其它定位方法，有望达到水下拖缆定位精度的指标要求[11-13]。

2 定位原理

图 1 为水下多缆定位原理示意图。充分考虑多缆定位的特点，尤其是定位误差的来源，采用 DGPS、声学、测深计、磁罗盘构成一个组合定位系统。在拖缆前、后两端布放 GPS 浮标，在拖缆各段布放包括声学换能器、罗盘、测深计(压力传感器)的阵元。首先由 DGPS 确定每条拖缆前、后两端的大地坐标；然后通过测深计测得拖缆各段的深度，通过声学定位初步解算出拖缆上各段相对于拖船航行方向的横向和纵向坐标，保留横向坐标值；采用罗盘数据和声学定位所求得的横向坐标值来重新

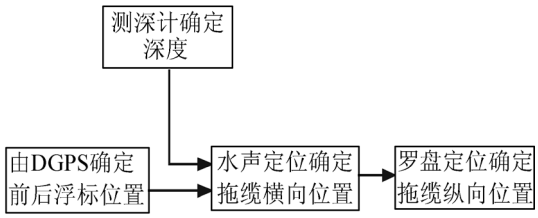

图 1　水下多缆定位原理示意图
Fig.1　The positioning principle of underwater multi-streamer

收稿日期：2008-03-07；**修回日期**：2008-07-03
基金项目：国家高技术研究发展计划资助课题(2006AA09Z310)
作者简介：李国栋(1978-)，男，辽宁营口人，博士研究生，研究方向为水声定位技术。
通讯作者：李国栋，E-mail: lihao0052@sina.com

计算拖缆上各段纵向坐标。

该系统所采用的多种定位手段中，水声学定位最为关键。图 2 为水声定位原理示意图。其中 O 为目标阵元的位置，其待估计坐标设为 $O(x, y, z)$；N 个发射阵元坐标分别为 $T_1(x_1, y_1, z_1)$，$T_2(x_2, y_2, z_2)$，$T_3(x_3, y_3, z_3)$，…，$T_N(x_N, y_N, z_N)$。系统工作于同步方式，通过测量发射阵元到目标阵元之间的声学传播时延，依据球面交汇原理，即可求得目标阵元的位置。

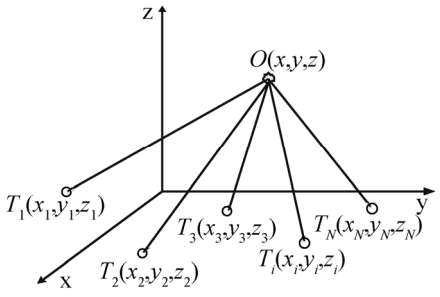

图 2 水声定位原理示意图

Fig.2 The sketch map of underwater acoustics positioning

设发射阵元 T_i (x_i, y_i, z_i)到达接收阵元 O 的传播时间为 t_i，定位原理表示为：

$$(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2=c^2t_i^2 \quad (1)$$

$$i=1, 2, \ldots, N$$

其中，c 为海水中声传播速度。

式(1)构成一个球面，4 个发射阵元构成 4 个如式(1)所示的球面。四个球面交汇，即可唯一确定空间未知量 $O(x, y, z)$。在本设计中，发射基阵近似在一个平面上，其对 z 坐标的定位误差较大，因此目标阵元的深度信息(z 坐标值)是通过压力传感器直接获得的，也就是说目标深度信息先验已知，上述的定位模型蜕化为“圆交汇模型”，采用 3 个阵元交汇，可唯一确定二维平面内的目标位置。

3 水下多缆定位模型

结合用户需求，考虑如下情况：拖缆数为 16 根，缆间距 100m，拖缆长度为 6km，缆上阵元间距 100m。由于拖缆前 3km 和后 3km 具有对称性，这里只给出前 3km 声学定位阵形设计结果，如图 3 所示。图中，“道”为各个拖缆上离浮标距离相等的阵元所在的列，“阶”为收发合置阵元所在的道以及接下来所有的接收阵元所在的道。

在图 3 的定位模型中，收发合置阵元布放在同一道上，每隔几道接收阵元布放一道收发合置阵元。收发合置阵元和接下来的数道接收阵元组成一

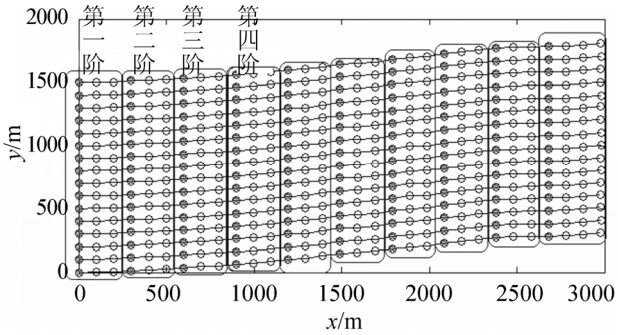

图 3 定位阵形示意图(前 3000m)

Fig.3 The sketch map of the positioning lineup(The former 3km)

阶，接收阵元的阶数由收发合置阵元的发射功率和整体阵形中的频率分配来确定。这里将前 3km 阵形分为 10 阶，前 9 阶每阶中包括 3 道阵元，最后一阶包括 4 道阵元，每一阶中第一道所有阵元均为收发合置阵元，其余道所有阵元均为接收阵元。定位方法为：第一阶发射阵元坐标位置通过加装的 GPS 进行实时高精度定位，其余每一阶收发合置阵元坐标位置由上一阶收发合置阵元和本阶相邻收发合置阵元来确定，本阶内接收阵元坐标位置由本阶收发合置阵元和上一阶收发合置阵元确定。

4 阵形误差分析

系统直接误差来源有：GPS 定位误差、时延测量误差、罗盘测角误差和声速测量误差。除了这些直接误差来源，影响系统整体定位精度的因素还包括定位阵形。由于定位模型采用的是逐阶定位的方式，不同定位阵形对误差的积累方式是不同的，因此分析阵形对系统定位精度的影响至关重要。

4.1 边缆的影响

如果采用的定位阵形是直线阵，其仅对阵前方小区域范围内的阵元定位精度高，再加上拖缆阵形的偏移，导致处于声学阵形边缘缆上的阵元定位精度低于中部阵元的定位精度。并在下一阶定位时将这一低精度的结果向下一级传播，最终导致系统整体定位精度下降。

假设由 16 条缆组成的直线阵，第 1 条缆和第 16 条缆处于阵形最边缘，第 8 条缆和第 9 条缆处于阵形中间。为了清楚地观察边缆和中心缆的误差情况，这里给出第 1 条缆和第 8 条缆的定位误差仿真结果，如图 4 所示。其中仿真条件为：GPS 的定位误差服从均值为 0、标准差为 2m 的高斯分布，时延测量误差服从 0.1ms~0.3ms 之间均匀分布，罗盘测角误差服从−0.5°~0.5°之间均匀分布。本文中的仿真研究都是根据这一条件进行的。

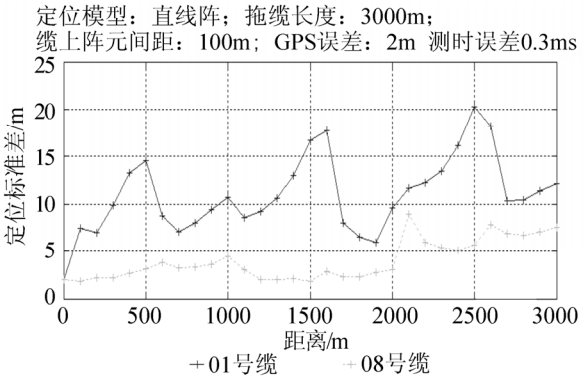

图 4　中间缆与边缆的误差比较

Fig.4　The contrast of error between the center streamer and the border streamer

由图 4 可看出，边缆上阵元的定位误差相比中心缆上阵元的定位误差最大差了近 10m。因此，不应人为地将 16 条缆划分为几个相对独立的声学阵形，这样增加边缆数量会大大增大定位误差。

考虑到边缆对定位精度的影响是通过收发合置阵元的定位向下传递的，为了改进系统定位精度，即采用同道边缆相邻收发合置阵元对边缆上收发合置阵元进行修正的方法来减小边缆低定位精度对整体定位精度的影响，即在对一道收发合置阵元定位时，先由上一阶收发合置阵元来确定这道除边缆以外的所有阵元坐标，而边缆上的阵元坐标由上一阶收发合置阵元和同道相邻缆阵元共同确定。

4.2　发射阶数的影响

在每阶阵元定位中都将引入声信号时延测量误差，在一阶中时延测量误差对各道阵元的定位精度影响近似相等，下一阶进行定位是在上一阶基础上再次引入这一声信号时延测量误差。这样，随着阶数的增加，声信号时延测量误差对阵元定位误差的影响逐步加大。因此，减少发射阶数可以有效地减少声信号时延测量误差积累的次数，从而降低声信号时延测量误差对系统定位精度的影响。但在实际阵中，发射阶数受到发射功率的限制，不能无限制地减少，因此应该在满足系统定位精度指标要求的情况下选择合适的发射阶数。

4.3　本缆发射阵元的影响

考虑到实际应用时同一根缆上的发射阵元和接收阵元是油封在管内的，所以同一根缆上两个阵元之间的斜距信息利用与否有待研究。但同一根缆上的发射阵元所处的位置具有特殊性，通过仿真发现其参与系统定位可以大大提高系统的定位精度。

4.4　定位误差的方向效应

对二维水平面内的定位误差进行分析。图 5 为对四个典型阵元的 200 次重复仿真结果，可以看出，边缆上阵元的纵向定位误差与横向定位误差大体相当，中间缆上阵元的纵向定位误差大于横向定位误差，并且随着阶数的增加这一现象表现得越明显。因此，通过罗盘对每个阵进行偏移角度测量，求出同缆上相邻两阵元的角度差 $\Delta\theta$，再计算出同缆相邻两阵元的横向距离差 Δx，通过公式 $\Delta y=\Delta x*\tan\Delta\theta$ 求得同缆相邻两阵元的纵向距离差 Δy，进而通过上一阵元纵向坐标加这一纵向距离差 Δy 算出新的纵向坐标 y。引入罗盘数据能在一定程度上改善系统的定位精度，并且可以提高系统的可靠性。

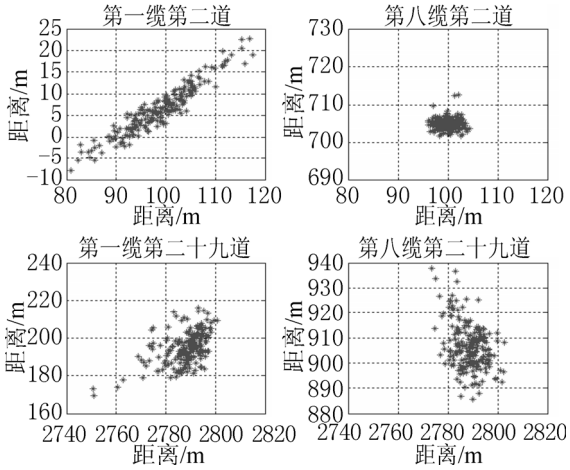

图 5　四个典型阵元 200 次定位仿真结果

Fig.5　The simulated result of the typical arrays by 200 times

5　定位精度仿真结果

根据图 3 的定位阵形，采取由 GPS、声学阵元、磁罗盘等构成的组合定位方法，并加入边缆修正，仿真得到系统的整体定位精度如图 6 所示。图 6 给出了 16 条拖缆前 3km 的定位标准差，由于前 3km 和后 3km 采用相同的定位方法，可以达到相同的定位精度，所以图 6 可以代表系统 6km 的定位精度。图 6 可看出，各缆定位误差是随着距离的增大而增大，在 3km 附近误差最大。本文所采取的定位模型及修正方法能保证6km长的拖缆定位误差小于6m。

6　结 论

本文完成了水下多缆定位系统的定位模型建立，并分析了阵形设计对系统整体定位精度的影响，针对边缆的影响提出了有效的边缆修正方法，针对定位误差的方向效应提出了采用磁罗盘修正纵向定位精度的方法。系统整体定位精度仿真结果表明本文所采取的定位模型及修正方法能保证长度为 6km 的拖缆定位误差小于 6m。

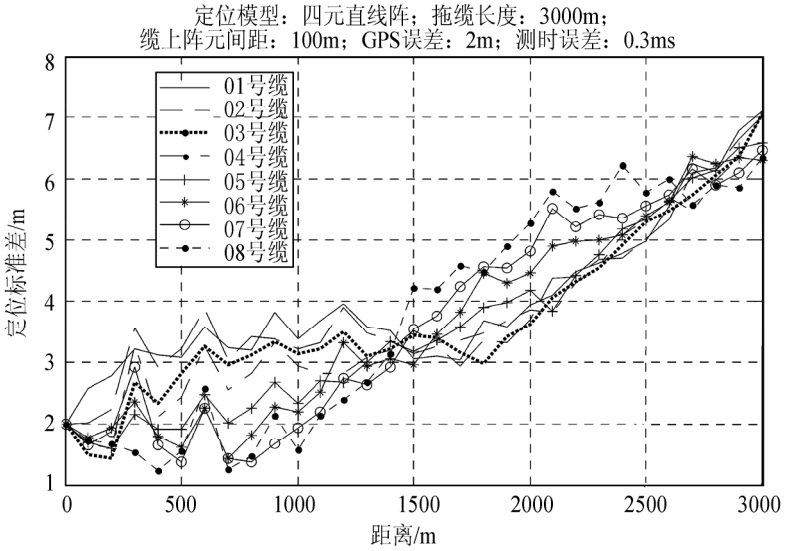

图 6 系统整体定位精度仿真结果

Fig.6 The simulated result of system positioning precision

参 考 文 献

[1] Musser J A, Burnham M. Streamer positioning and spread stabilization for 4D seismic[A]. Expanded Abstracts of 76thAnnual International SEG Meeting[C]. 2006, 6-9.

[2] Phil Christie, David Nichols, Tony Curtis, Leif Larsen. Raising the standards of seismic data quality[J]. Oilfield Review, 2001, (2): 16-31.

[3] Martin Widmaier, Andrew Long, Barbara Danielsen, Stian Hegna, Recent experience with 4D marine seismic acquisition[J]. EAGE, 2005, **23**: 77-80.

[4] Jiaming Wu, Allen T. Chwang, A hydrodynamic model of a two-Part underwater towed system, Ocean Engineering, 2000, **27**: 495-472.

[5] Douglas C. Gilbert. Seismic Streamer Position And Estimation[J]. IEEE. 1981: 1077-081.

[6] Harold T. Vincent II, Models, algorithms,and measurements for underwater acoustic positioning[D]. University of Rhode Island, 2001: 75-89.

[7] Zinn N, Rapatz P J V. Reliability analysis in marine seismic networks[J]. The Hydrographic Journal, 1995, **76**(4): 43-57.

[8] Gikas V, Cross P. A, Asiama-Akuamaoa A. A rigorous and integrated approach to hydrophone and source positioning during multi-streamer offshore seismic[J]. The Hydrographic Journal, 1995, **77**(7): 90-96.

[9] Ouair Y E, Stronen L K. Value creation from 4D seismic at the Gullfaks Field: achievements and new challenges[J]. Expanded Abstracts of 76thAnnual International SEG Meeting, 2006, 3: 250-254.

[10] Waite A D. Sonar for practising engineers[M]. John Wiley & Sons, Ltd. 2002: 50-62.

[11] 张宝成，徐雪仙. 长基线四点接收水声跟踪系统定位计算公式及性能分析[J]. 声学技术, 1990(1): 19-23.

[12] 汪开军，汪鸿振. 水下拖缆姿态与振动分析[J]. 声学技术，1996, **15**(1): 15.

[13] 徐亮，汪鸿振. 水下拖缆隔振段隔振机理研究[J]. 声学技术，1996, **15**(1): 16.