

一种基于超短基线的声信标定位方法<sup>①</sup>李 想<sup>②</sup> 孙大军 张殿伦 郑翠娥

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

**摘 要** 针对在信标工作方式下常规超短基线定位方法因缺乏斜距信息无法对信标进行定位,提出了一种仅用目标方位信息来确定信标位置的方法。通过多次测量得到方位信息,建立了方位信息和目标位置的关系式,利用最小二乘法获得信标在大地坐标系下的位置。湖试实测数据处理结果表明,在观测次数  $m$  较小的情况下得到的结果其定位精度和稳定性虽然不如应答工作方式下的常规超短基线定位方法,但解决了信标工作方式下无法定位的问题。若需提高定位精度,仅要增加观测次数  $m$ 。

**关键词** 超短基线(USBL),定位,信标

## 0 引 言

随着海洋开发的发展,超短基线(ultra-short baseline, USBL)水下声学定位技术在海底油气资源开发等海洋工程中有着十分广泛的应用前景<sup>[1-5]</sup>。常规超短基线定位系统的声学组成包括两部分:接收换能器基阵和应答器。应答器具有接收和发射功能,其定位工作流程为先由测量母船向目标应答器发射询问信号,应答器检测到询问信号后再返回定位信号。而对于相类似于寻找失事飞机坠落到海底的黑匣子等应用需求时,并不能提供应答功能,只能是以声信标的方式工作。法国的 ASCA 公司已为美海军开发了利用水下全球定位系统(GPS)技术进行搜索与救援以及对抗水雷的系统,它可以利用水下的 GPS 信号确定目标的经、纬度和深度坐标<sup>[6]</sup>。该系统可用于跟踪沉在水下的飞机或潜艇中释放的移动黑匣子声波发送器,只需要不到半天的时间就能寻找到目标。当浮标在黑匣子声波发生器约 500m 之内时,能精确地探测到目标的声信号。利用目标发射信号与浮标接收信号的时延差得到浮标和目标的相对位置,同时,利用差分 GPS 接收机能精确测量出浮标的精确位置。此外,国内也对水下 GPS 进行了相关的研究,杭州 715 所成功研制出国内第一套水下高精度定位导航系统<sup>[7]</sup>。采用以上方法探测信标目标时需要布放多个浮标,系统比较复杂,且机动性也比较差。本文针对此应用需求提出了一种基于纯方位估计的声信标定位方法,由于它利用的是

超短基线的测向能力,因而可以利用现有的超短基线定位系统的接收基阵配合声信标工作。为了验证本文所提出的基于超短基线的信标定位的方法可行性,本文还利用超短基线的试验数据对该算法进行了验证和分析。

## 1 超短基线定位原理

超短基线定位系统是通过测量信号的到达方位和距离来确定水下目标位置的,而测向任务是通过测量信号到达接收基阵基元之间的相位差来实现的。一般来说,最少需要 3 个接收基元构成的平面接收阵才能够作为超短基线阵进行目标的三维定位。其定位原理几何图如图 1 所示,依基阵的两轴按右手法则取直角坐标系  $(x, y, z)$ 。

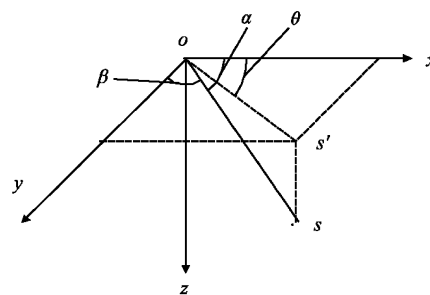


图 1 定位原理几何图

设目标位于  $S$  处,其坐标为  $(x, y, z)$ 。2 个正交的直线阵,分别置于  $x$  轴和  $y$  轴上,阵的中心为坐标原点,目标径矢为  $\overline{OS}$ ,  $R$  为目标斜距,  $R = c \cdot$

① 863 计划(2006AA09Z218)资助项目。

② 男,1979 年生,博士;研究方向:水下定位与导航;联系人,E-mail: lixiang@hrbeu.edu.cn  
(收稿日期:2008-05-05)

$\Delta t/2$ ,  $c$  为水中声速,  $\Delta t$  为从发送信号到接收到信号的时间差,  $\alpha$  为径矢  $\overline{OS}$  与  $x$  轴夹角,  $\beta$  为径矢  $\overline{OS}$  与  $y$  轴夹角,  $S'$  为  $S$  在  $xoy$  平面上的投影, 它与  $x$  轴的夹角  $\theta$  为目标水平方位角。限于篇幅, 这里就不进行详细的公式推导, 仅给出结论公式, 详细的推导过程见参考文献[8,9]。 $\alpha, \beta$  由式

$$\cos \alpha = \frac{x}{R} \quad (1)$$

$$\cos \beta = \frac{y}{R} \quad (2)$$

决定。

基阵的尺寸很小, 在平面波近似下,  $x$  轴相邻阵元接收信号相位差  $\phi$  和  $y$  轴相邻阵元接收信号相位差  $\psi$  可由公式

$$\phi = \frac{2\pi d \cos \alpha}{\lambda} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{2\pi d \cos \beta}{\lambda} \quad (4)$$

来表示, 式中  $\lambda$  为波长,  $d$  为阵元间距。

将(3)和(4)代入(1)和(2)得到

$$x = \frac{\lambda \phi R}{2\pi d} \quad (5)$$

$$y = \frac{\lambda \psi R}{2\pi d} \quad (6)$$

$$z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (7)$$

这样就得到了目标在基阵坐标系下的坐标, 则最终得到目标在大地坐标系下的坐标为:

$$(X_D, Y_D, Z_D)^T = (X, Y, Z)^T + R_U \cdot R_o \cdot (x, y, z)^T + R_U \cdot DX \quad (8)$$

其中  $R_U$  为从船坐标系到大地坐标系的旋转矩阵<sup>[10]</sup>, 由罗经和姿态信息得到;  $R_o$  为从基阵坐标系到船坐标系的旋转矩阵, 由基阵安装偏差角得到;  $(X, Y, Z)$  是船在大地坐标系下的位置, 可由 GPS 获得;  $DX$  为基阵中心到 GPS 天线中心的位置偏差。

因此, 实际的测量值为  $\phi$ 、 $\psi$ 、 $c$  和  $\Delta t$ 。

## 2 声信标定位方法

需要说明的是, 以下所求的应答器的坐标均为在大地坐标系下的坐标, 系统首先解算得到应答器在基阵坐标下的坐标  $(x, y, z)$ , 再融合船载 GPS 与姿态传感器的信息将其转换成大地坐标下的坐标  $(X_D, Y_D, Z_D)$ , 从而就得到了应答器在大地上的位置, 具体解算方法见公式(8)。而 GPS 输出的经纬度需要通过通用横向麦卡托(UTM)投影转换为平面直角坐标, 从而得到 GPS 天线的地理坐标, 这个转换过程属于大地测量学, 具体的转换方法可参见文

献[11]。

从上面的计算过程可以看出, 传统的超短基线定位方式就是已知两个夹角  $(\alpha, \beta)$  和斜距  $(R)$  来确定目标位置的。而当应答器处于信标工作模式时, 测量船并没有发送询问信号, 因而时间差  $\Delta t$  是未知的, 也就是斜距  $R$  是未知的。而在信标工作方式, 超短基线虽然不能得到斜距信息, 但仍然可以得到目标的方位信息, 因此下面给出一种仅用目标的方位信息来确定目标的位置的方法。

记信标与大地坐标水平面两轴夹角(可由超短基线系统测向得到)为  $\alpha'$ ,  $\beta'$ , 测量船的位置(由 GPS 得到)为  $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , 信标的大地坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 则对于第  $i$  次观测有

$$\tan \theta_i = \frac{\cos \beta'_i}{\cos \alpha'_i} = \frac{Y_i - Y_0}{X_i - X_0} \quad (9)$$

对每次观测, 联合前一次的观测可得方程组

$$\begin{cases} \tan \theta_i = \frac{Y_i - Y_0}{X_i - X_0} \\ \tan \theta_{i-1} = \frac{Y_{i-1} - Y_0}{X_{i-1} - X_0} \end{cases} \quad (10)$$

将(10)式化简得到:

$$(\tan \theta_{i-1} - \tan \theta_i) \cdot X_0 = Y_i - Y_{i-1} - \tan \theta_i \cdot X_i + \tan \theta_{i-1} \cdot X_{i-1} \quad (11a)$$

$$(\tan \theta_i - \tan \theta_{i-1}) \cdot Y_0 = \tan \theta_i \cdot \tan \theta_{i-1} \cdot (X_i - X_{i-1}) + \tan \theta_i \cdot Y_{i-1} - \tan \theta_{i-1} \cdot Y_i \quad (11b)$$

方程(11a)可记为:

$$A \cdot X_0 = L_x \quad (12a)$$

方程(11b)可记为:

$$B \cdot Y_0 = L_y \quad (12b)$$

则当利用  $M (M \geq 2)$  点观测求解时根据最小二乘有

$$X_0 = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L_x \quad (13)$$

$$Y_0 = (B^T \cdot P \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot P \cdot L_y \quad (14)$$

即可解得信标在大地坐标系下的水平坐标  $(X_0, Y_0)$ , 设俯仰角为  $\varphi$  则有

$$\begin{cases} \cos \varphi \cdot \cos \theta = \cos \alpha' \\ \cos \varphi \cdot \sin \theta = \cos \beta' \end{cases} \quad (15)$$

$$\cos \varphi = \sqrt{\cos^2 \alpha' + \cos^2 \beta'} \quad (16)$$

目标到测量船的距离在水平面的投影为

$$r = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2} \quad (17)$$

则目标到测量船的斜距和深度可求得为

$$R = \frac{r}{\cos \varphi} \quad (18)$$

$$h = \sqrt{R^2 - r^2} \quad (19)$$

这样由(13)、(14)、(18)和(19)式就可求得信标在大地坐标系下的位置,(18)式给出了目标到测量船的斜距。从此推导过程中可以看到方程的建立和求解都是线性的,用的是最常规的最小二乘,因此不会给系统带来较大的计算量。

以下对系统的定位误差做一下分析。对公式(9)两端求导并整理得到

$$(-\operatorname{tg} \theta_i) dX_0 + dY_0 = (X_i - X_0) \sec^2 \theta_i d\theta_i + dY_i - \operatorname{tg} \theta_i dX_i \quad (20)$$

式中  $dX_0$ 、 $dY_0$  为信标在大地坐标系中的位置误差; $dX_i$ 、 $dY_i$  为由 GPS 得到的测量船的位置误差; $d\theta_i$  为水平方位角的测量误差。

由(20)式可以看出,信标的定位误差主要与测量船的位置误差以及水平方位角的测量误差有关。测量船的位置由 GPS 给出,要保证定位精度需选取高精度的 GPS 测量设备,由于 GPS 定位系统属成型设备,其精度已给出,因此系统定位误差主要取决于水平方位角的测量误差,从(3)式和(4)式可以看出,水平方位角的测量误差取决于基元间相位测量误差。相位测量误差主要与信噪比有关,提高信噪比能有效地减少噪声对测量值的影响,如何采取有效措施来提高接收机的输入信噪比是提高系统性能的关键。

### 3 试验数据处理及分析

由于此基于超短基线的信标定位与常规超短基线相比就是少了斜距信息,因此可以用常规超短基线的试验数据进行分析。在国家 863 计划支持下,课题组研制了长程超短基线声学定位系统,并做了多次试验对系统的定位精度以及稳定性进行考核。

船在海上航行时必然受波浪的影响,船在波浪中的运动有横摇、纵摇、首尾摇、垂荡(升沉)、横荡和纵荡六种,其中影响较大的是横摇、纵摇和垂荡。超短基线定位系统若要获得高精度的定位结果,必须要得到船的精确姿态信息。为此试验配备了挪威 Seatex 公司生产的 MRU-06 型高精度姿态测量设备 1 套和 Seapath200 三合一定位系统 1 套来获得高精度的船姿态数据。本系统还需要通过 GPS 定位系统提供船在地理坐标系下精确位置。GPS 定位技术不仅提供了坐标转换所需的参考坐标信息,也为解算水下目标位置提供了精确有效的观测点位置,使海上校准试验得以实现。采用 Leica 公司的 RTK-GPS(徕卡 500 型)系统进行测量船水面定位,由一个 RTK(基站)和一个流动站组合而成,可以实现厘米级的高精度定位。

本文选取在吉林市松花湖所取得的试验数据进行分析。图 2 所示为超短基线定位结果。图 2 中蓝色轨迹为测量船的航迹,红色散点为超短基线得到的应答器的位置,由于本文中所给结果都是由一组试验数据的处理得到,在后面的图中为了比较的方便,就不再画测量船的轨迹了。

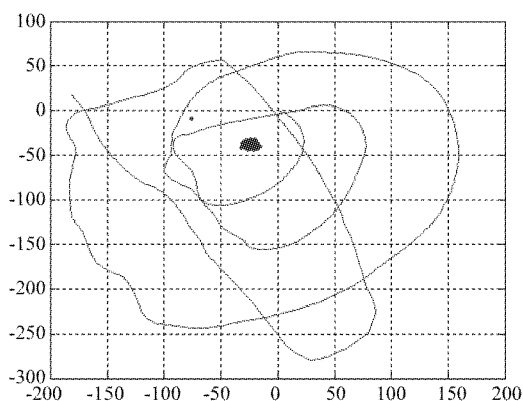
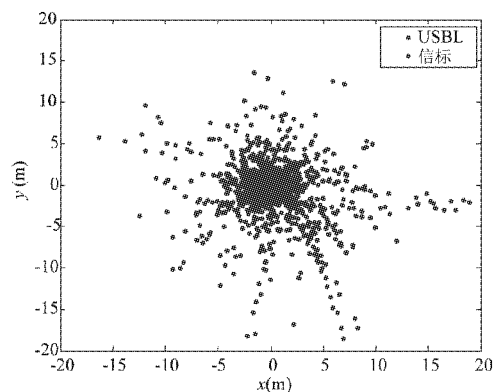
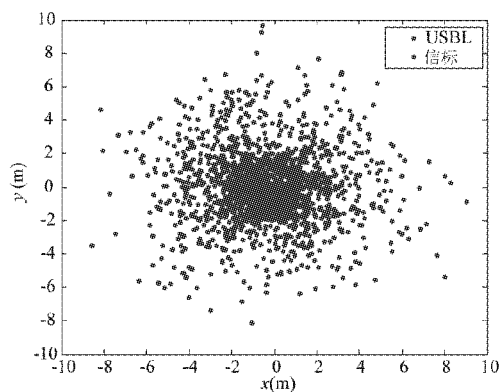


图 2 超短基线定位结果



(a)  $m=2$  定位结果



(b)  $m=10$  定位结果

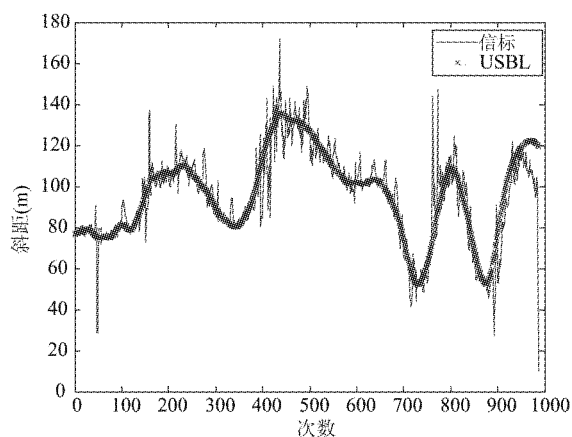
图 3 水平面定位结果比较

图 3、图 4 和图 5 为方位信息进行求解的方法与常规超短基线定位方法的试验结果比较。由于基于方位信息进行定位求解的方法需要联合前  $m$  次的观测值一起求解,从直观上看  $m$  的选择会影响定位精度。因此下面给出了基于两种  $m$  不同选择时的定位结果与常规超短基线定位结果的比较,图 3 至图 5 中(a)图为  $m = 2$ , (b)图为  $m = 10$  对应的结果。

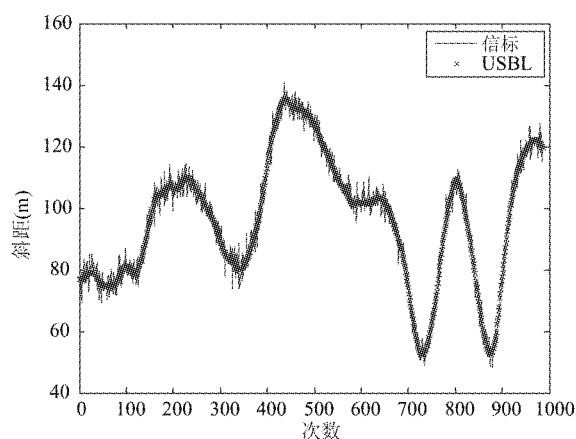
图 3 所示为应答器在水平面内的定位结果。蓝色散点为常规超短基线定位结果,红色散点为利用纯方位信息定位的结果。在这两张图中,常规超短基线定位的结果是不变的,经过统计采用常规超短基线定位方法得到的定位结果其在  $x$  轴和  $y$  轴上的

标准差分别为 1.9m 和 3.6m,利用纯方位信息当  $m = 2$  时其标准差分别为 4.3m 和 6.7m,当  $m = 10$  时标准差分别为 3.1m 和 4.3m,可以很明显的看到  $m = 10$  对应的定位结果的收敛性比  $m = 2$  要好得多。

图 4 所示为应答器到测量船的斜距。红色为超短基线根据应答时间测得的,精度很高;蓝色曲线为利用方位信息估计得到的。可以看到当  $m = 2$  时,与常规超短基线测得的斜距相比有比较多的毛刺,除去这些毛刺后就与常规超短基线测得的斜距重合了,这说明斜距估计基本正确;而当  $m = 10$  时其斜距估计精度大为改善,但仍然较应答法测得的斜距精度稍差。



(a)  $m = 2$  时斜距结果

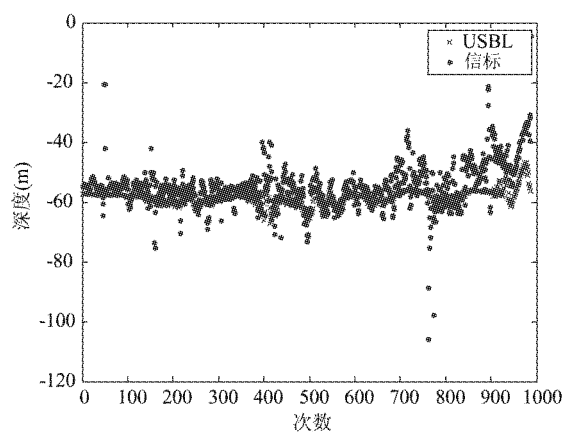


(b)  $m = 10$  时斜距结果

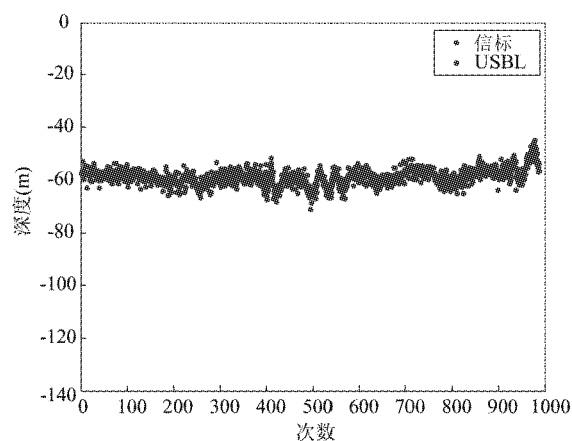
图 4 斜距比较

图 5 是应答器的深度值比较。蓝色是常规超短基线测得的结果,红色点为利用方位信息估计得到的应答器的深度。深度都是通过斜距和水平面的位置计算得到的,因而可以看到对于斜距估计误差较大(对应着斜距曲线上的尖脉冲)时其深度估计误差也较大。图 4 中斜距的一个大的下尖峰导致了图 5 中深度值的突变。经过统计,采用常规超短基线得到的深度标准差为 2.62m,利用方位信息估计得到

的深度标准差为 2.62m,利用方位信息估计得到



(a)  $m = 2$  时深度结果



(b)  $m = 10$  时深度结果

图 5 深度比较

的深度标准差要比常规超短基线得到的结果差一些,当  $m = 2$  时为 7.36m,当  $m = 10$  时为 3.38m,可见随着观测次数的增多,其深度估计的精度也相应的提高。

## 4 结 论

常规超短基线定位都是先由测量船向目标应答器发送询问信号,应答器在检测到该询问信号后再回复定位信号。由此应答方式,定位系统可以获得较高精度的斜距信息,而在信标工作方式时此信息也是个待求量。本文提出了一种基于超短基线的信标定位方法,该方法简单、计算量小,在  $m$  不是很大的情况下以方位信息进行求解的方法得到的定位结果其定位精度和稳定性虽不如常规超短基线定位方法,但是它解决了在缺乏斜距信息情况下常规超短基线定位方法无法定位的问题,这对于类似寻找飞机失事后掉入海底的黑匣子等需求至关重要。而对于此种需求它本身的定位精度要求也不是特别高,目前本系统所能到达的精度要求已经可以满足其要求。若需要高精度定位时,可以采用多次观测联合估计,即取大的  $m$ 。但随  $m$  的增加,解方程所需耗费的资源会急剧的增加,试验数据处理结果也证明了该方法的可行性。目前该算法还处于初步探索阶段,需要更深入的研究和完善。

## 参考文献

[ 1 ] Marthiniussen R, Faugstadmo J E, Jakobsen H P. HAIN: an

integrated acoustic positioning and inertial navigation. In: Proceedings of OCEANS '04 MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, Kobe, Japan, 2004. 3. 1620-1628

- [ 2 ] Kussat N H, Chadwell C D. Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle using GPS and acoustic measurements. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2005, 30(1): 153-164
- [ 3 ] Yamada T, Ando M, Tadokoro K, et al. Error evaluation in acoustic positioning of a single transponder seafloor crustal deformation measurements. *Earth, Planets and Space*, 2002, 54(9): 871-881
- [ 4 ] Posidonia-Transponder User's Manual. <http://www.oceano.co.uk/tech-info>, 2008
- [ 5 ] 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(05): 23-26
- [ 6 ] Randazzo N, Bechaz C. Scientific application of advanced underwater positioning techniques. In: Proceedings of Oceans 2005 Europe Brest, France, 2005.2. 1171-1173
- [ 7 ] 马晓民.水下 GPS 系统的设计与仿真.海洋测绘,2001(4):41-44
- [ 8 ] 田坦.水下定位与导航技术.北京:国防工业出版社,2007. 27-45
- [ 9 ] 喻敏.长程超短基线定位系统研制:[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学水声工程学院,2006
- [ 10 ] 刘焱雄,彭琳,吴永亭等.水下超短基线定位系统校准方法研究.武汉大学学报,2006,31(7):610-612
- [ 11 ] 徐绍铨等.GPS 测量原理及应用.武汉:武汉大学出版社,2003

# A beacon positioning method based on USBL

Li Xiang, Sun Dajun, Zhang Dianlun, Zheng Cuie

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

## Abstract

In consideration of the problem that working on the beacon mode, an ultra-short baseline system (USBL) can not position the targets for lack of range information, the paper presents a new location method that only uses target bearing information to locate the beacon. The formula between bearing information and target position parameters is given. The least square method is used to obtain beacon position parameters in the geodetic coordinate system through multiple measurements. The results of processing the data from the Songhua Lake measurements indicate that the presented method can overcome the shortcoming of the general methods on the beacon working mode to position the beacon. Although the position precision and the robustness of the proposed method are inferior to the general methods on the responder working method when measurements number  $m$  is small, but it can solve the positioning problem on the beacon working node. With the increase of  $m$ , the position precision will be improved.

**Key words:** ultra-short baseline(USBL), positioning, beacon