

一种基于长基线交汇的超短基线定位系统精度评价方法

韩云峰 李昭 郑翠娥 孙大军

A precision evaluation method of USBL positioning systems based on LBL triangulation

Han Yun-Feng Li Zhao Zheng Cui-E Sun Da-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system

物理学报.2015, 64(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094203>

300W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器

300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration

物理学报.2015, 64(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084205>

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser

物理学报.2015, 64(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064206>

增益导引-折射率反导引大模场光纤激光器抽运技术研究进展

Progress in gain-guided and index-antiguide large mode area fiber laser pump technology

物理学报.2015, 64(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024210>

780W 全光纤窄线宽光纤激光器

780 W narrow linewidth all fiber laser

物理学报.2014, 63(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134205>

一种基于长基线交汇的超短基线定位系统精度评价方法*

韩云峰 李昭 郑翠娥[†] 孙大军

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

(哈尔滨工程大学, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2014年8月9日收到; 2014年11月15日收到修改稿)

超短基线定位系统的定位精度和准确度是评价系统性能的重要指标, 通常采用固定点的定位重复度来评价定位精度, 采用其他解算方法作为真值参考评价定位准确度. 本文首先分析了以误差椭圆理论为基础的超短基线精度评价方法, 给出了理论推导公式, 证明了观测数据和理论误差椭圆的关系. 本文提出了一种基于长基线交汇的超短基线定位系统精度评价方法, 通过长基线交汇模型求解目标的真实位置评价系统的准确度. 根据该方法解算得到的待定目标位置作为真值参考, 能够反应系统误差的修正情况. 最后采用该方法进行海试数据处理, 处理结果表明该方法能够较好的反应定位精度, 进一步修正了系统偏差, 修正系统偏差后和修正前相比定位精度提高了0.2%, 具有良好的工程应用价值.

关键词: 超短基线定位系统, 定位精度

PACS: 43.30.+m, 43.60.Jn

DOI: 10.7498/aps.64.094301

1 引言

超短基线(USBL)定位系统广泛应用于水下地形勘探、声学拖体定位和海洋石油工程中, 其定位精度是设备性能的主要评价指标. 目前, 国外有多家成熟的定位系统, 包括法国IXSEA公司生产的POSIDONIA系统, 英国Sonardyne公司生产的Fusion系统和Kongsberg公司生产的HiPAP系统等, 大部分系统的声学定位精度可以达到优于0.2%斜距^[1-3]. 关于超短基线定位系统的研究均集中在如何提高定位精度上^[4-7], 例如采用宽带信号提高时延估计精度或是改变阵元间距来提高定位精度, 这些方法在理论上实现了对定位精度的提高, 但是如何评价系统的定位精度和准确度仍然存在问题. 而在系统验收时, 如何评价定位系统的精度和准确度尚没有统一的方法. 通常是在外场实

验过程中, 通过锚底声信标的方式, 采用圆航迹对锚底声信标进行定位通过定位输出的散点进行统计分析, 即分析定位结果的起伏程度. 由于海底声信标的真实位置是未知的, 只能通过统计分析其离散程度来评价目标的精度, 如何选取统计参数直接关系到评价精度的结果. 同时, 水下真实位置未知, 对待定目标的准确度无从评价^[8]. 本文针对此问题, 分析了采用误差椭圆在无系统误差情况下其精度的评价方法, 讨论了误差椭圆和统计参数之间的选取关系. 然后提出了一种采用长基线(LBL)的定位方式, 解算出目标的位置作为参考的真值位置, 评价了待定目标准确度. 根据分析结果总结出了外场实验评价超短基线定位系统精度和准确度的评价方法, 并应用在海试数据处理中, 重新处理得到的定位精度提高了0.2%, 具有良好的工程应用价值.

* 国家高技术研究发展计划(863计划)(批准号: 2012AA091401, 2010AA093901)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhengcuie@hrbeu.edu.cn

2 采用误差椭圆评价超短基线定位精度的方法分析

超短基线定位系统是根据测量声信号到达基阵阵元的斜距和相位差来进行定位, 根据基阵所在测量船的GPS位置和姿态信息将基阵坐标系下的定位目标转换为大地坐标系下, 其定位输出是一个空间中的定位点, 需要衡量其在各个方向上的定位精度, 其定位精度主要受随机误差和系统误差影响. 随机误差包括GPS定位误差, 姿态传感器测量误差和时延测量误差; 系统误差包括基阵中心与GPS天线修正偏差, 姿态传感器测量补偿偏差等. 其随机误差的大小决定了定位目标的精度, 系统误差的大小决定了目标偏离真值位置的大小, 即定位目标的准确度. 下面首先分析系统的定位精度评价方法.

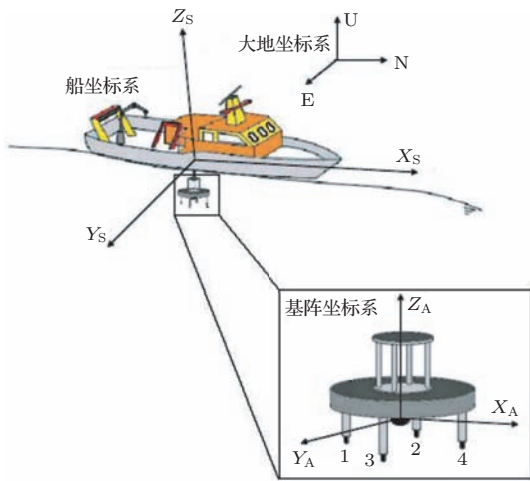


图1 坐标转换示意图

Fig. 1. Sketch of coordinate conversion.

在定位过程中, 待定目标的位置是通过一对平面点坐标给出的, 为了确定待定目标的位置, 需要通过多次测量进行定位. 文献[9, 10]给出了超短基线定位公式为[9,10].

$${}^G \mathbf{x}_t = {}^G \mathbf{x}_S + {}^G_S \mathbf{R} \cdot [{}^S_A \mathbf{R} \cdot {}^A \mathbf{x}_t - {}^S \mathbf{x}_A], \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 是列向量, 表示待定物体的空间坐标, 上标代表所在的坐标系, 下标代表待定物体. \mathbf{R} 表示两个坐标系之间的旋转矩阵. 下标 t, S, A 分别代表代表待定目标, 船和基阵. 上标 G, S, A 分别代表大地坐标系, 船坐标系和基阵坐标系. 根据基阵测量的

斜距和阵元之间的相位差能够计算出待定目标在基阵坐标系下的位置, 通过基阵在船上的安装偏差和GPS的安装位置能够将基阵坐标系下的坐标转换为大地坐标系, 从而计算出目标在大地坐标系下的位置. 大地坐标系以N轴指向北方向, E轴指向东方向; 船坐标系原点位于GPS天线, X轴指向船艏向, Y轴指向船右舷向; 基阵坐标系原点位于声学基阵中心, X轴和Y轴由阵元所在位置决定; 三个坐标系均成左手系.

${}^G \mathbf{x}_t$ 待定目标在大地坐标系下的坐标; ${}^G \mathbf{x}_S$ 测量船在大地坐标系下的坐标, 通过安装在船上的GPS测量获得; ${}^A \mathbf{x}_t$ 基阵坐标系下待定目标的坐标; ${}^S \mathbf{x}_A$ 表示GPS天线和基阵在船上的安装偏差, 和基阵在船坐标系下的坐标相同. ${}^G_S \mathbf{R}$ 表示从船坐标系转换到大地坐标系下的旋转矩阵, 其表达式为

$${}^G_S \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta - \cos \varphi \sin \theta - \sin \varphi \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \quad \cos \varphi \cos \theta - \sin \varphi \sin \phi \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 θ, ϕ, φ 表示船载姿态传感器测量的艏向的方向角, 纵摇角和横摇角.

${}^S_A \mathbf{R}$ 表示从基阵坐标系转换成船坐标系的旋转矩阵, 其表达式为

$${}^S_A \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha - \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ \cos \beta \sin \alpha \quad \cos \gamma \cos \alpha - \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 α, β, γ 为声学基阵与测量船之间的安装偏差, 偏航、纵摇和横摇偏差角.

由(1)式可以看出, 观测值包括船载GPS位置, 姿态传感器输出位置和目标到达基阵的时延信息, 通过测量值可以得出待定目标的位置. 目标在基阵坐标系下的位置可以通过下式计算得到:

$${}^A \mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{cL}{d} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 τ_x 和 τ_y 分别为 x 轴和 y 轴两阵元接收信号的时延差, c 为水中声速, d 为阵元间距, L 为目标和基阵的斜距.

由于观测值是一组随机量, 通过计算得到的目标定位结果也是一个随机结果. 其结果主要受

GPS精度, 姿态传感器测量精度和时延测量精度影响, 其中的基阵角度安装偏差和位置安装偏差为系统误差, 不影响待定点的精度. 根据(1)–(4)式计算出 ${}^G\mathbf{X}_r$ 的协方差阵为

$$D_{G_{\mathbf{x}_t}} = D_{G_{\mathbf{x}_s}} + \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_1^T \sigma_\phi^2 + \mathbf{P}_2 \mathbf{P}_2^T \sigma_\theta^2 + \mathbf{P}_3 \mathbf{P}_3^T \sigma_\varphi^2 + \frac{c^2 L^2}{d^2} \begin{pmatrix} \sigma_{\tau_x}^2 & \sigma_{\tau_x} \sigma_{\tau_y} \\ \sigma_{\tau_x} \sigma_{\tau_y} & \sigma_{\tau_y}^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 &= \begin{pmatrix} -\sin \phi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \phi \cos \theta \\ -\sin \phi \sin \theta & -\sin \varphi \cos \phi \sin \theta \end{pmatrix} \\ &\quad \times [{}^S_A \mathbf{R} \cdot {}^A \mathbf{x}_t - {}^S \mathbf{x}_A], \\ \mathbf{P}_2 &= \begin{pmatrix} -\cos \phi \sin \theta & -\cos \varphi \cos \theta + \sin \varphi \sin \phi \sin \theta \\ \cos \phi \cos \theta & -\cos \varphi \sin \theta - \sin \varphi \sin \phi \cos \theta \end{pmatrix} \\ &\quad \times [{}^S_A \mathbf{R} \cdot {}^A \mathbf{x}_t - {}^S \mathbf{x}_A], \\ \mathbf{P}_3 &= \begin{pmatrix} 0 & \sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \varphi \cos \theta - \cos \varphi \sin \phi \sin \theta \end{pmatrix} \\ &\quad \times [{}^S_A \mathbf{R} \cdot {}^A \mathbf{x}_t - {}^S \mathbf{x}_A]. \end{aligned}$$

τ_x 和 τ_y 是基阵 x 轴和 y 轴测量的时延差, 测量是相互独立的, 因此互协方差为 0, 即 $\sigma_{\tau_x} \sigma_{\tau_y} = 0$. $D_{G_{\mathbf{x}_s}}$ 为 GPS 引起的定位误差, 在使用差分 GPS 的条件下可以达到厘米量级, 对待定目标的影响可忽略不计; σ_ϕ , σ_θ 和 σ_φ 为姿态传感器测量引起的误差, 能够达到分米量级; 而最后一项由时延测量误差引起, 其对最终定位结果产生的误差最大, 可以达到米量级. 由此可以看出, 待定点的协方差矩阵可以近似看成是对角阵, 其对应的误差椭圆近似于标准圆.

误差椭圆描述的是在无系统误差条件下, 观测值服从正态分布, 通过函数关系求得待定点的统计分布, 其待定点服从二维正态分布. 在不存在系统误差的情况下, 误差椭圆给出的是真位置为中心的散点分布, 仅能描述随机误差对真位置的离散程度, 不能给出与真位置的偏差大小. 由于观测值是服从正态分布的, 在其影响下得到的这组平面上的散点分布就是二维正态分布, 其分布的联合分布密度为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi EF} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{E^2} + \frac{y^2}{F^2} \right) \right],$$

其中 E 和 F 是 x 和 y 方向上的中误差. 用平行于 xOy 的平面截该分布曲线, 将截线投影到平面 xOy

上, 得到一族同心的椭圆, 其方程为

$$\frac{x^2}{E^2} + \frac{y^2}{F^2} = k^2,$$

其中 k^2 为一常数, 当 k 取不同的值时, 得到的同心误差椭圆不同. 当 $k = 1$ 时的误差椭圆称为标准误差椭圆. 通过概率密度函数可以算出, 落在标准误差椭圆内的概率为 39.35% [11].

标准误差椭圆用来评价空间点的点位精度, 待定点落在标准误差椭圆内的概率为 39.35%. 从(5)式可以看出超短基线定位系统待定点的输出近似为标准圆, 因此在实际评价中, 首先估计出离散点的中心作为真实位置, 然后以真实位置为圆心不同半径画圆, 当有 39.35% 的点落在圆内的圆半径即为误差椭圆的近似半径. 采用这种方式可以简单有效的估计出系统的定位精度, 给工程应用提供极大的方便.

3 一种基于长基线交汇的超短基线定位系统精度评价方法

上述讨论的是超短基线定位系统的定位精度评价方法, 通过观测值单次测量输出定位散点来评价待定点的精度. 而待定点的另一个重要评价标准是准确度, 即待定目标偏离真位置的大小. 由于每一次观测值是独立的, 而待求目标是同一个点, 因此可以采用最小二乘法对待定点的位置进行估计. 采用最小二乘方法通过多次观测量的冗余度来提高定位点的精度, 其估计精度远远大于超短基线方式解算的定位精度, 因此可以用其估值作为目标真值作为参考, 评价待定目标的准确度 [11, 12]. 每次定位结果列出的观测方程为

$$\| {}^G \mathbf{x}_s - {}^G \mathbf{R} \cdot {}^S \mathbf{x}_A - {}^G \mathbf{x}_t \| = L, \quad (6)$$

其中 L 为声学基阵和待定点的斜距, 其他物理意义和(1)式相同.

(6)式中的观测方程仅考虑测距误差, 其精度由系统测量决定. 设实验中共进行了 N 次测量, 得到了 N 个斜距信息 L_1, L_2, \dots, L_N , 第 i 次测量可以列出误差方程为

$$v_i = \frac{\Delta X_i}{S_i} \hat{x} + \frac{\Delta Y_i}{S_i} \hat{y} - l_i, \quad (7)$$

其中 v_i 为斜距测量的误差项. 设待定目标的计算初值为 \mathbf{x}_0 , $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}, \hat{y})^T$ 为待求目标的修正量, 目标

计算真值为 ${}^G\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_0 + \hat{\mathbf{x}}$. (7) 式中各项计算公式如下:

$$\begin{aligned} (\Delta X_i, \Delta Y_i)^T &= {}^G\mathbf{x}_S - {}^G\mathbf{R} \cdot {}^S\mathbf{x}_A - \mathbf{x}_0, \\ S_i &= \left\| {}^G\mathbf{x}_S - {}^G\mathbf{R} \cdot {}^S\mathbf{x}_A - \mathbf{x}_0 \right\|, \\ l_i &= S_i - L_i. \end{aligned}$$

根据观测值列出的 N 个误差方程的方程组为

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_1}{S_1} & \frac{\Delta Y_1}{S_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\Delta X_i}{S_i} & \frac{\Delta Y_i}{S_i} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\Delta X_N}{S_N} & \frac{\Delta Y_N}{S_N} \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_i \\ \vdots \\ l_N \end{bmatrix} = \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}. \quad (8) \end{aligned}$$

为求待定目标的位置, 即满足 $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min$, 其中 \mathbf{P} 为每次测量的观测边构成的权阵. 实际测量中没有待定点的真位置, 故这里采用观测边的先验方差构成权阵, 其边长测量精度为 σ^2 . 设单位权方差 σ_0^2 , 得到权阵的表达式为 $\mathbf{P} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2} \mathbf{I}_{N \times N}$, \mathbf{I} 为 N 阶单位阵.

求解 (8) 式列出的误差方程, 得到待定目标的修正量为

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{l}. \quad (9)$$

单位权方差估值为

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{N - 2}. \quad (10)$$

待定目标的协方差阵为

$$\mathbf{D}_{G_{\mathbf{x}_r}} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1}. \quad (11)$$

由 (9), (10), (11) 式可以看出, 待定目标的精度取决于测距精度和测量次数, 通过多次测量的斜距进行交汇求解这种方式能够有效的提高待定目标的精度, 其精度可以达到厘米量级, 因此这种方式能够有效的检验系统误差的修正结果. 同时解算中不需要知道基阵的安装角度偏差, 只需要实时测量基阵在 GPS 坐标系下的位置即可. 如果定位散

点的估计位置和解算位置偏差结果较大, 可以重新进行校准以检验结果的正确性. 同时通过待定点估计位置和这种方法的解算位置来评价定位的准确性.

4 实验数据分析

下面通过一组海试试验数据的实际处理过程对上面给出的超短基线定位系统的精度和准确度评价方法进行详细讨论.

2013年4月, 在台湾东面进行了哈尔滨工程大学自研的超短基线系统定位精度测试. 实验中声信标采用沉块锚于海底, 声信标布放深度为 2000 m. 超短基线系统安装于科学号考察船上, 海试过程中测量船提供船载 GPS(广义差分) 和姿态传感器 (IXSEA Octans) 数据, 船以 4 kn 航速, 3500 m 半径绕声信标进行航行. 航行过程中实时定位测量声信标的位置, 共进行了 1317 次测量, 测量结束后统计定位结果.

图 2 给出了测量船的航行轨迹和散点定位图. 图 2(a) 蓝色曲线为船的航行轨迹, 红色点为待声信标的定位点. 图 2(b) 中给出了定位散点的放大图, 绿线是根据定位结果统计的近似误差椭圆, 有 39.35% 定位点落在绿色圆内, 误差椭圆半径为 27.4 m, 定位精度为 0.68%. 声信标大地坐标中心坐标位置及校准参数如表 1 和表 2 所示. 同样对上述数据采用长基线交汇方式进行求解, 计算得到的声信标大地坐标和上述超短基线计算偏差如表 1 所示.

表 1 声信标大地坐标位置

Table 1. Beacon position in geodetic coordinates.

	北向坐标 X/m	东向坐标 Y/m
超短基线计算声信标坐标	2437962.4	491988.7
长基线解算声信标坐标	2437951.3	492003.8
两种方法计算偏差	-11.1	15.1

表 2 基阵安装偏差校准结果

Table 2. Calibration results of array installation.

	船向安装 偏角/rad	纵摇安装 偏角/rad	横摇安装 偏角/rad
基阵安装偏差	12.0686	-1.7783	-3.1047

从表 1 中可以看出, 采用长基线方式解算和超短基线计算的结果水平偏差较大, 统计图 2 中所示的定位散点 X 方向和 Y 方向的分布发现, 定位散

点没有呈现正态分布, 统计分布如图3所示. 综合表1和图3所示的统计分布可以发现, 系统中存在一定的系统误差未进行修正. 通过试验后的数据复查发现, 超短基线声学基阵的安装偏差修正存在问题.

重新对数据进行处理, 得到的校准参数如表4所示, 校准后计算的声信标定位散点如图4所示.

示, X 方向和 Y 方向概率分布如图5所示.

表4 基阵安装偏差重新校准结果
Table 4. Recalibration results of array installation.

	艏向安装 偏角/rad	纵摇安装 偏角/rad	横摇安装 偏角/rad
基阵安装偏差	12.3686	-1.6053	-3.0047

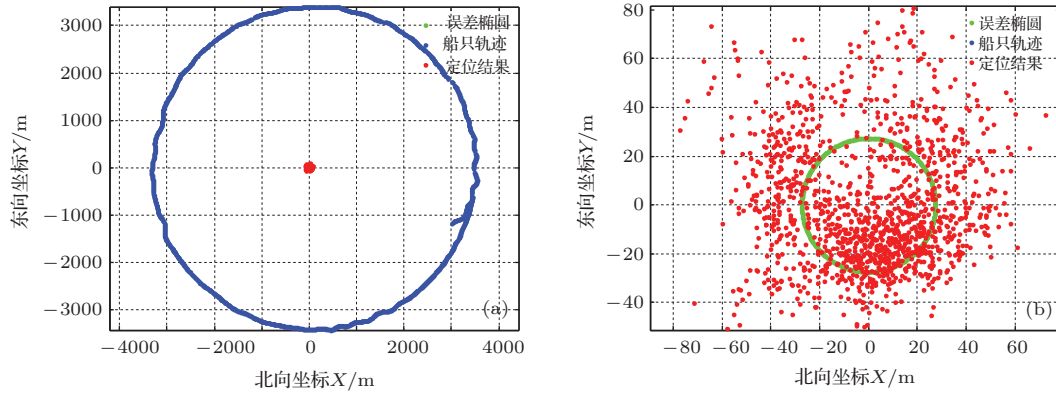


图2 (网刊彩色) 测量船的航行轨迹及定位散点图

Fig. 2. (color online) Trajectory and positioning scatter.

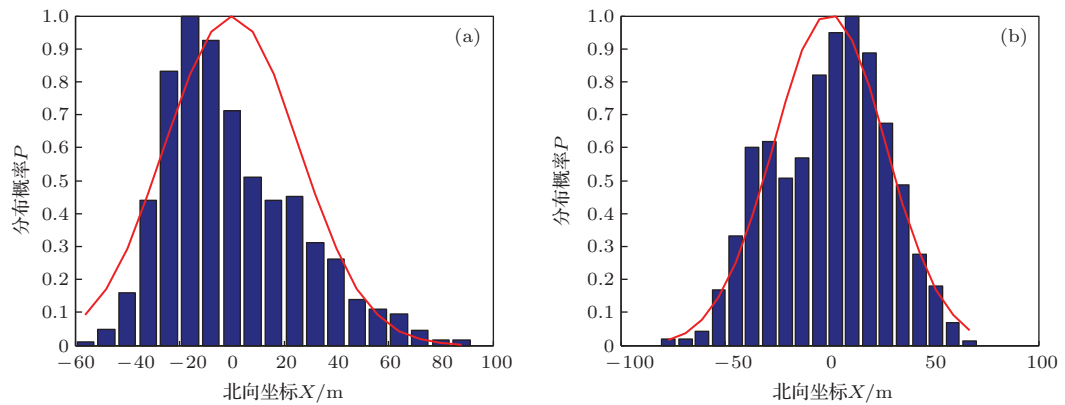


图3 X 方向和 Y 方向概率分布图

Fig. 3. Histogram of X and Y Coordinate.

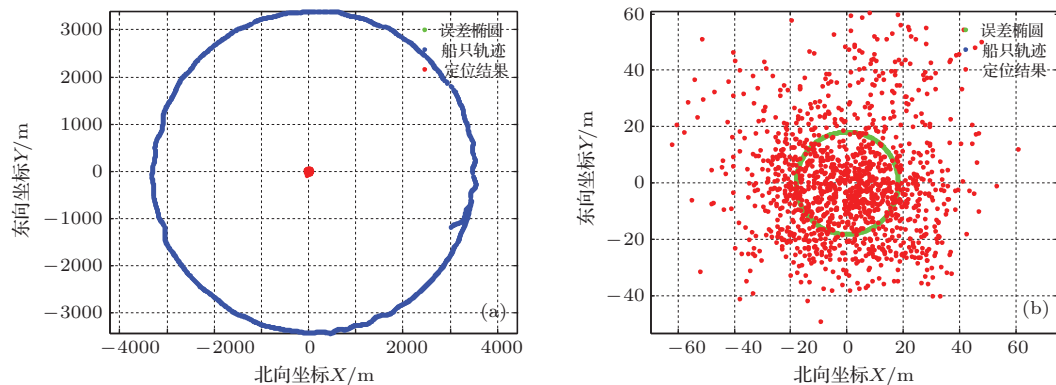


图4 重新校准后测量船轨迹和定位散点图

Fig. 4. Trajectory and positioning scatter after calibration.

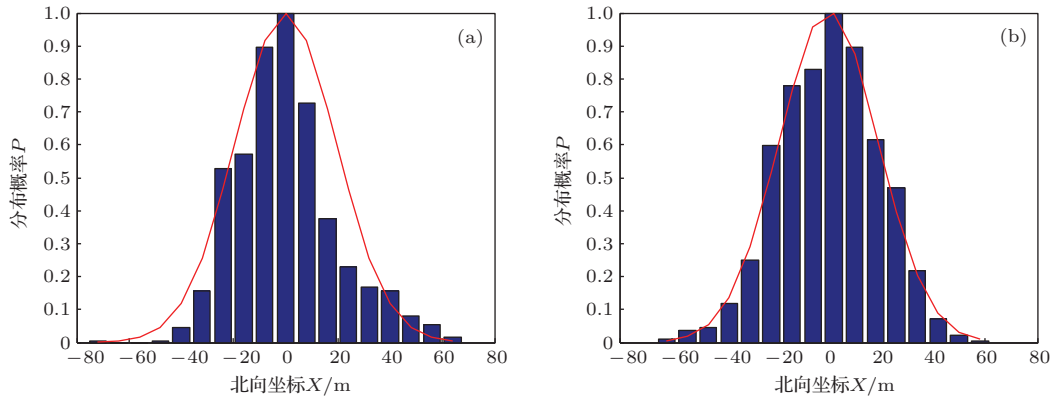


图5 X方向和Y方向概率分布图

Fig. 5. Histogram of X and Y coordinate.

经过重新计算后, 统计得到的误差椭圆半径为 18.2 m, 定位精度为 0.46%. 经过计算后两种方式解算的偏差变小, X 方向和 Y 方向分布呈正态分布. 从上述计算结果可以看出, 通过长基线交汇计算的结果能够反映出系统误差修正的情况, 在一定程度上反映了系统定位的准确度, 结合散点的概率分布, 采用统计误差椭圆的方法能够综合评价系统的定位精度, 其统计结果包括系统误差和随机误差共同影响, 可以方便快捷的计算出待定点的定位精度.

5 结 论

本文介绍了现阶段超短基线系统的发展概况, 针对现场没有统一的精度评价方法为背景, 分析了以误差椭圆理论为基础的超短基线精度评价方法, 通过理论推导得出观测数据和理论误差椭圆的关系, 即误差椭圆与实测散点中 39.35% 的点构成的标准圆近似相等. 本文提出了一种基于长基线交汇的超短基线定位系统精度评价方法, 通过长基线交汇模型求解目标的真实位置评价系统的准确度. 采用该方法解算得到的目标位置定位精度高, 解算结果作为真值参考能够反映出系统误差的修正情况. 本文给出了根据实验数据如何评价超短基线系统的定位精度和以长基线解算方式作为参考的准确度评价方法, 可以此作为今后工程中验收精度和准确性的标准; 同时解算结果能够指导进一步修正系统误差, 校验系统中存在的问题, 具有良好的工程应用价值.

参考文献

- [1] Morgado M, Oliveira P, Silvestre C, Fernandes V J 2013 *Control Systems Technology, IEEE Transactions On* **22** 322
- [2] Willemenot E, Morvan P Y, Pelletier H, Hoof A 2009 *OCEANS 2009-EUROPE* Bremen, 11–14 May 2009, p1
- [3] Vincenzo C, Francesco D C, Piaggio C E, Andrea C 2013 *OCEANS 2013-Bergen, 2013 MTS/IEEE Bergen*, 10–14 June 2013, p1
- [4] Yu M, Hui J, Feng H, Zhang X 2006 *The Ocean Engineering* **1** 13
- [5] Zheng C, Sun D, Zhang D 2007 *Journal of Naval University of Engineering* **2** 2
- [6] Wang D, Han F, Lai X, Gou Z, Fu X 2011 *Marine Sciences* **2** 15
- [7] Yu M, Hui J 2010 *Signal Processing (ICSP), 2010 IEEE 10th International Conference on* Beijing, 24–28 Oct. 2010, p2357
- [8] Zheng C, Li Z, Sun D 2013 *OCEANS 2013-San Diego, 2013 MTS/IEEE San Diego*, 23–26 Sep. 2013, p1
- [9] Li Z, Zheng C, Sun D 2013 *OCEANS 2013-San Diego, 2013 MTS/IEEE San Diego*, 23–26 Sep. 2013, p1
- [10] Zheng C E 2008 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [郑翠娥 2008 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]
- [11] 2013 *Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment* (Wuhan: Wuhan University Press) pp25–57, 106–157 (in Chinese) [2013 误差理论与测量平差基础. 武汉: 武汉大学出版社, 第 25—57, 106—157 页].
- [12] Cui X Z, et al. 2012 *The Principle of Generalized Surveying Adjustment* (Wuhan: Wuhan University Press) pp31–95 (in Chinese) [崔希璋等 2012 广义测量平差 (武汉: 武汉大学出版社) 第 31—95 页]

A precision evaluation method of USBL positioning systems based on LBL triangulation*

Han Yun-Feng Li Zhao Zheng Cui-E[†] Sun Da-Jun

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

(*Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 9 August 2014; revised manuscript received 15 November 2014)

Abstract

Ultra short baseline (USBL) positioning system is widely used in underwater geophysical field survey, acoustic tow fish positioning, and sea oil engineering. The precision and accuracy are important technical indexes. Normally, people often care about how to improve the precision of position, but there is no unified method about how to evaluate the precision and accuracy. In most experiments, a beacon as target is moored on the seafloor using buoyancy, and survey positions of the beacon repeatedly in a circle track. The waviness of positioning results is used to evaluate the precision, which is analyzed by a statistical method. This paper analyzes the precision evaluation method based on error ellipse, gives the theoretical formulations, and proves the relationship between observation data and error ellipse. This paper also proposes a precision evaluation method of USBL positioning systems based on long baseline (LBL) triangulation, using the obtained result as the true position to evaluate the accuracy of USBL which can offer suggestions to find system error. Using multiple observations to increase redundancy, the precision is far greater than USBL positioning method. Estimated positions can be used as the true ones to serve as a reference in evaluating the accuracy. If the deviation between estimated positions using the USBL and LBL methods is larger than expected, the system needs to be recalibrated. Finally, this paper processes the data from sea experiment. The actual sea trial is processed using the LBL method proposed in this paper. Result shows that the precision of a fixed target is well reflected and the system error is modified further, and thus improves the positioning precision of 0.2%. Result also shows that this method may be of a great application value.

Keywords: USBL positioning system, positioning precision

PACS: 43.30.+m, 43.60.Jn

DOI: [10.7498/aps.64.094301](https://doi.org/10.7498/aps.64.094301)

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2012AA091401, 2010AA093901).

[†] Corresponding author. E-mail: zhengcui@hrbeu.edu.cn