

基于误差修正的传感器阵列水声定位算法

刘利军[†] 韩焱 杨明

(中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

摘要 本文分析了海洋环境中定位精度下降的根源,提出了一种基于误差修正的传感器阵列自主定位算法,并进行了计算机仿真和数据分析,结果表明该算法对于提高传感器阵列自主定位精度是有效的。

关键词 定位精度, 误差修正, 传感器阵列, 定位算法

An algorithm for underwater acoustic localization of sensor array based on error correction

LIU Li-Jun HAN Yan YANG Ming

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University,
Taiyuan 030051)

Abstract This article analyzes the source of localization inaccuracy in the marine environment, proposes a kind of self-dependent sensor array localization algorithm based on the error correction, and has carried on the computer simulation and the data analysis. The result indicates that the algorithm is effective in increasing the sensors array independent localization accuracy.

Key words Localization accuracy, Error correction, Sensors array, Localization algorithm

1 引言

水声定位技术的广泛应用,推动了海洋勘探、海洋试验、海域防御等领域的发展,而且高精度的水声定位技术一直是本领域研究的热点。在海洋试验中,由于海洋环境(如海浪、潮汐等)的影响,漂浮在一定海域范围内传感器阵列中各阵元的位置会发生变化,而试验数据的

信息重建精度与传感器阵元位置密切相关,提高它们的定位精度成为解决海洋试验数据信息重建的关键问题。由于GPS定位精度^[1]的局限性,利用GPS对传感器阵元进行定位无法满足高精度定位系统的要求,水下声速沿深度方向存在一定的梯度变化,文献[2]提出了一种声线修正方法,对于提高定位精度效果明显,但

2006-07-12 收稿; 2007-10-26 定稿

作者简介: 刘利军(1981-),男,湖北汉川人,硕士研究生,主要从事信号与信息处理及信息重建的研究。

韩焱(1957-),男,教授,博士生导师。

杨明(1970-),男,副教授,博士研究生。

[†] 通讯联系人 E-mail: liulijun810527@163.com

仍满足不了高精度信息重建中传感器阵元定位精度达到厘米级的要求。本文通过分析导致水声定位系统定位精度下降的根源, 提出了一种基于海水中声速误差和测时误差的误差修正定位算法, 且计算机仿真和数据分析表明, 本算法可以有效提高传感器阵列的自主定位精度。

2 定位系统的工作原理

根据传感器阵列采集数据信息重建的精度要求和总体实验方案论证, 传感器阵列自主定位系统的工作原理是: 浮标和传感器阵元由无线电收发装置和水声收/发系统组成, 其中传感器阵列中有 4 个阵元上装有水声收发设备, 将其作为定位基站, 其余的阵元上只有水听器。传感器阵列自主定位时, 作为基站的 4 个传感器阵元以一定的周期轮流发送无线电编码信号、时统信号和水声定位信号, 在时间周期上保证一个基站发射信号时, 其它传感器阵元已经接收完另一个基站发出的声定位信号, 避免水声信号之间的干扰。通过测量传感器阵元之间的声波传输时间和声速, 从而解算出传感器阵元之间的相对位置信息。解算过程是先求得作为基站的传感器阵元位置, 再利用它们的坐标解算出其余传感器阵元的相对位置。

3 定位系统误差根源分析

声波在海水中的传播速度与海水的温度、盐度和深度等因素有关, 水中声速的近似公式^[3]为:

$$v = 1449 + 4.6T + 0.055T^2 + (1.39 - 0.012T)(S - 35) + 0.017d \quad (1)$$

其中, v 为海水中声速, 单位为 m/s; T 为温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; S 为盐度, 以千分比表示; d 为深度, 单位为 m。对 (1) 求全微分并化简得:

$$\Delta v = (5.02 + 0.11T - 0.012S) \Delta T + (1.39 - 0.012T) \Delta S + 0.017 \Delta d \quad (2)$$

其中, ΔT 、 ΔS 和 Δd 分别为传感器阵元之间温度变化量、盐度变化量和深度变化量。由 (2) 式可知, 海水的温度、盐度、深度以及其变化量都会对声速产生一定的影响, 而且温度的影响最大。因此水听器发出的声波经海水传播至水听器, 传播速度是一个变化的量, 这样声速的变化就会引入定位误差, 再加上声波到达时间的测时误差, 会使定位精度大大降低。为了提高定位精度, 必须从引入误差的根源出发, 建立修正模型对计算结果进行修正, 以满足定位系统的精度要求。

4 定位算法

该定位系统算法包括作为基站的传感器阵元自主定位算法和其余传感器阵元相对定位算法两部分, 而且前者对后者的定位精度有一定的制约关系。声速误差和测时误差的引入, 使系统定位精度降低, 利用误差修正的定位算法可以有效提高定位精度。

4.1 基于误差修正的基站传感器阵列单元自主定位算法

算法原理为: 4 个作为基站的传感器阵元 P_0, P_1, P_2, P_3 布局如图 1 所示, 以 P_0 为基准点, 通过建立坐标系和数学模型, 来确定其它基站的相对位置而实现基站阵列单元之间的自主定位。设水声信号传输的速度为 v , 声信号从传感器阵元 i 到 j 的传输时间为 $t_{ij} (i = 1, 2, 3, j = 0, 1, 2, 3)$ 。在很短的一个定位周期内, 假定传感器阵元之间无位置变化, 由作为基站的传感器阵元布设的几何位置关系有如下

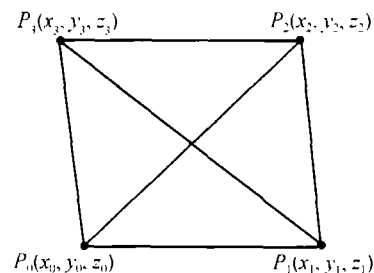


图 1 作为基站的传感器阵元自主定位示意图

方程组:

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 = t_{ij}^2 v^2 \dots (i > j) \quad (3)$$

在上述方程组中, 为便于求解, 建立如下坐标系: 以 P_0 站为坐标原点, $\overrightarrow{P_0 P_1}$ 向量所在直线方向为 X 轴方向, $\overrightarrow{P_0 P_2}$ 和 $\overrightarrow{P_0 P_1}$ 所构成的平面为 XOY 平面, 根据逆时针旋转, 过 P_0 点垂直于 $\overrightarrow{P_0 P_1}$ 方向为 Y 轴方向, 过 P_0 点垂直于 XOY 平面指向水面为 Z 轴方向, 根据所建立的坐标系有: $x_0 = y_0 = z_0 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0, z_2 = 0$, 利用方程组 (3) 求得: $x_1 = vt_{10}$,

$$x_2 = \frac{v(t_{10}^2 + t_{20}^2 - t_{21}^2)}{2t_{10}},$$

$$x_3 = \frac{v(t_{10}^2 + t_{30}^2 - t_{31}^2)}{2t_{10}},$$

$$\Delta x_1 = t_{10} \Delta v + v \Delta t,$$

$$\Delta x_2 = \frac{t_{10}(t_{10}^2 + t_{20}^2 - t_{21}^2) \Delta v + v(t_{10}^2 + 2t_{20}t_{10} + t_{21}^2 - 2t_{21}t_{10} - t_{20}^2) \Delta t}{2t_{10}^2}$$

$$\Delta x_3 = \frac{t_{10}(t_{10}^2 + t_{30}^2 - t_{31}^2) \Delta v + v(t_{10}^2 + 2t_{30}t_{10} + t_{31}^2 - 2t_{31}t_{10} - t_{30}^2) \Delta t}{2t_{10}^2}$$

$$\Delta y_2 = \frac{vt_{20}(v\Delta t + t_{20}\Delta v) - x_2\Delta x_2}{y_2}$$

$$\Delta y_3 = \frac{(t_{20}^2 + t_{30}^2 - t_{32}^2)v\Delta v + (t_{20} + t_{30} - t_{32})v^2\Delta t - x_3\Delta x_2 - x_2\Delta x_3 - y_3\Delta y_2}{y_2}$$

$$\Delta z_3 = \frac{vt_{30}(v\Delta t + t_{30}\Delta v) - x_3\Delta x_3 - y_3\Delta y_3}{z_3}$$

则经过误差修正后的坐标位置为: $x'_1 = x_1 - \Delta x_1, x'_2 = x_2 - \Delta x_2, y'_2 = y_2 - \Delta y_2, x'_3 = x_3 - \Delta x_3, y'_3 = y_3 - \Delta y_3, z'_3 = z_3 - \Delta z_3$. 即: $P_0(0, 0, 0), P_1(x'_1, 0, 0), P_2(x'_2, y'_2, 0), P_3(x'_3, y'_3, z'_3)$.

4.2 基于误差修正的非基站传感器阵元定位算法

当基站位置解算之后, 尚需要进一步确定布置在基站周围的传感器阵元的位置, 借助基站的位置对传感器阵元进行定位, 可以得到传感器阵元的相对位置. 定位原理如下图 2 所

$$y_2 = \sqrt{(vt_{20})^2 - x_2^2},$$

$$y_3 = \frac{(t_{30}^2 + t_{20}^2 - t_{32}^2)v^2 - 2x_2x_3}{2y_2}$$

$$z_3 = \pm \sqrt{t_{30}^2 v^2 - x_3^2 - y_3^2}$$

由计算结果可知, z_3 存在两个值, 为了对其符号进行确定, 实验过程中我们将基站 3 浮标下的水听器连线的长度比其它基站的都短, 即其它基站上的水听器在水中的深度比 3 号基站深, 这种情况下, 我们可以取 z_3 的值为正值, 即 $z_3 = \sqrt{t_{30}^2 v^2 - x_3^2 - y_3^2}$.

假定各基站阵元的特性相同, 测时误差为 Δt , 声速误差为 Δv , 分别对上面所计算的结果求全微分并化简得:

示, P_m 为第 m 个传感器阵元 ($m = 4, 5 \dots, N$), 采用四个基站对传感器阵元进行定位, 得如下

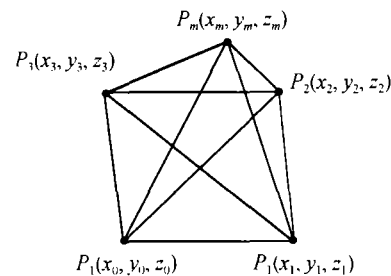


图 2 传感器阵元定位原理图

方程组：

$$\begin{cases} (x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2 + (z_0 - z_m)^2 = (t_{0m}v)^2 \\ (x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2 + (z_1 - z_m)^2 = (t_{1m}v)^2 \\ (x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2 + (z_2 - z_m)^2 = (t_{2m}v)^2 \\ (x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2 + (z_3 - z_m)^2 = (t_{3m}v)^2 \end{cases} \quad (4)$$

线性化并化简得：

$$\begin{cases} 2x_1x_m + 2y_1y_m + 2z_1z_m - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + (t_{1m}v)^2 - (t_{0m}v)^2 = 0 \\ 2x_2x_m + 2y_2y_m + 2z_2z_m - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + (t_{2m}v)^2 - (t_{0m}v)^2 = 0 \\ 2x_3x_m + 2y_3y_m + 2z_3z_m - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 + (t_{3m}v)^2 - (t_{0m}v)^2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

即： $X_m A = L$ (6)

其中： $X_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}$ $A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}$

$$L = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 + (t_{0m}v)^2 - (t_{1m}v)^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 + (t_{0m}v)^2 - (t_{2m}v)^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 + (t_{0m}v)^2 - (t_{3m}v)^2 \end{bmatrix}$$

利用最小二乘估计解方程组 (6) 得到传感器位置坐标为：

$$\hat{X}_m = A^{-1}L$$

对方程组 (6) 求全微分得：

$$\Delta X_m A = L_1 \quad (7)$$

其中， $\Delta X_m = \begin{bmatrix} \Delta x_m \\ \Delta y_m \\ \Delta z_m \end{bmatrix}$ ， $A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}$ ，

$$L_1 = \begin{bmatrix} (x_1 - x_m) \Delta x_1 + (y_1 - y_m) \Delta y_1 + (z_1 - z_m) \Delta z_1 + v^2 (t_{0m} - t_{1m}) \Delta t + v (t_{0m}^2 - t_{1m}^2) \Delta v \\ (x_2 - x_m) \Delta x_2 + (y_2 - y_m) \Delta y_2 + (z_2 - z_m) \Delta z_2 + v^2 (t_{0m} - t_{2m}) \Delta t + v (t_{0m}^2 - t_{2m}^2) \Delta v \\ (x_3 - x_m) \Delta x_3 + (y_3 - y_m) \Delta y_3 + (z_3 - z_m) \Delta z_3 + v^2 (t_{0m} - t_{3m}) \Delta t + v (t_{0m}^2 - t_{3m}^2) \Delta v \end{bmatrix}$$

在则 L_1 中，根据建立的坐标系，可知 $\Delta y_1 = 0$, $\Delta z_1 = 0$, $\Delta z_2 = 0$, 解得： $\Delta \hat{X}_m = (A)^{-1} L_1$ 。

经过误差修正后，得到非基站传感器阵元的精确的解算位置为： $X_m = \hat{X}_m - \Delta \hat{X}_m$ 。

由非基站传感器阵元的解算公式可知，非基站传感器阵元定位精度与基站传感器自主定位精度密切相关，因此进一步优化误差修正定位算法，既能提高基站阵元的定位精度，又能有效提高目标定位精度。

5 仿真结果

假设试验区域内所建立的坐标系下 4 个基站的实际坐标分别为： $P_0(0, 0, 0)$, $P_1(200m, 0, 0)$, $P_2(193m, 210m, 0)$, $P_3(-3m, 205m, -6m)$ ，第 m 个非基站传感器阵元的实际坐标为 $P_m(85m, 125m, -30m)$ 。该区域内海水的温度为 $T=13^\circ C$ ，盐度为 $S = 19$ (千分比)，水深为 10m，海水的垂直温度变化量 $\Delta T=1^\circ C$ ，盐度变化量 $\Delta S=1$ (千分比)，声波在海水中传播的最大深度变化量 $\Delta d=30m$ ，假定硬件引入的测时误差相同，在仿真过程中，引入时间测量误差为零均值，方差为 σ_t^2 的高斯随机误差，进行了 1000 次的仿真试验。在仿真曲线中，A—未经过误差修正的定位精度仿真曲线，B—本文算法的定位精度仿真曲线。定位精度是衡量定位系统好坏以及算法有效性的重要指标，故用定位结果的均方根误差 $RMSE = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$ 来表示定位精度，其中 (x', y', z') 表示传感器阵元的实际坐标， (x, y, z) 表示算法的仿真结果。

(1) 各传感器阵元引入 $\sigma_t=0.5ms$ 的高斯随机误差时，基站传感器阵元自主定位和其余传感器阵元定位修正前后的定位精度曲线分别如图 3 和图 4；

(2) 各传感器阵元引入 $\sigma_t=0.2ms$ 的高斯随机误差时，基站传感器阵元自主定位和其余传感器阵元定位修正前后的定位精度曲线分别如图 5 和图 6。

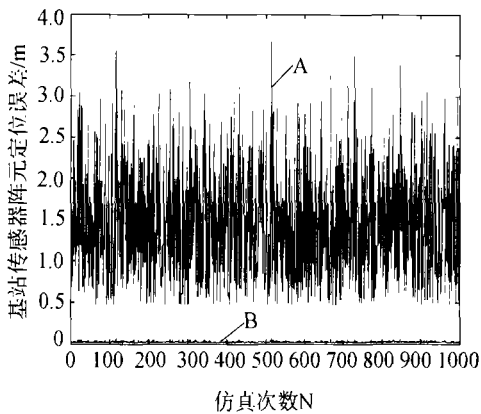


图3 $\sigma_t=0.5\text{ms}$ 时基站传感器阵元定位精度仿真曲线

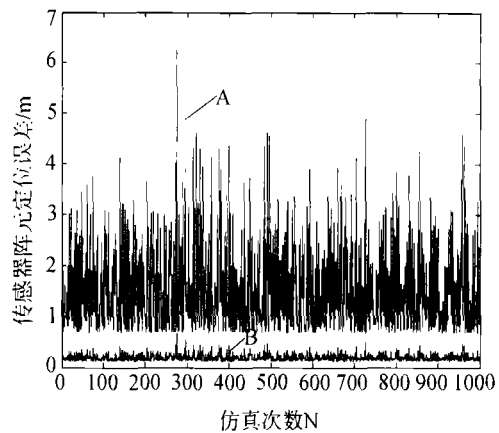


图6 $\sigma_t=0.2\text{ms}$ 时基站外传感器阵元定位精度仿真曲线

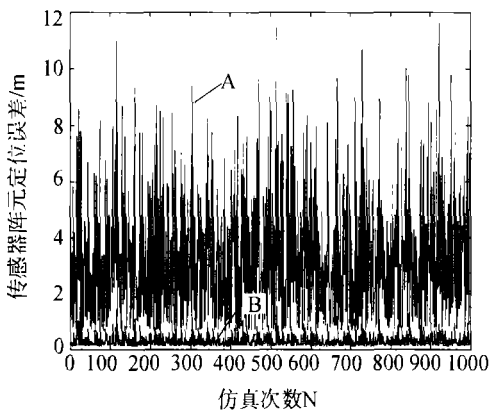


图4 $\sigma_t=0.5\text{ms}$ 时基站外传感器阵元定位精度仿真曲线

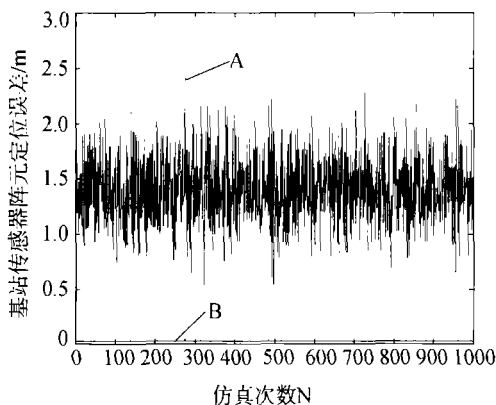


图5 $\sigma_t=0.2\text{ms}$ 时基站传感器阵元定位精度仿真曲线

图3和图5,图4和图6比较可以看出,减小时间测量误差可以有效提高所有传感器阵元的定位精度,在同一时间测量误差下,基站传感器阵元的自主定位精度对其它传感器阵元的定位精度有很大影响,因此,进一步优化误差修正模型可以有效提高整个定位系统的定位精度。仿真结果表明,基于误差修正的传感器阵列自主定位算法的定位精度比未经修正的定位精度有很大提高。

6 结论

本文的仿真结果和数据分析表明,基于误差修正的传感器阵列自主定位算法可以很好地解决外界环境因素引入的误差干扰,能够有效地提高定位精度。

参 考 文 献

- [1] Peyret, Francois.Betaille, David.Hintzy, Gaetan. High-precision Application of GPS in the field of real-time equipment positioning. Automation in Construction, 2000, 9(3): 299-314.
- [2] 王燕, 梁国龙. 一种适用于长基线水声定位系统的声线修正方法. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(5): 32-34
- [3] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术. 哈尔滨工程大学出版社, 2000, 247-256