

文章编号: 1672-2892(2011)01-0026-04

基于最小平方算法的被动浮标目标定位

崔旭涛^{a,b}, 何友^b, 杨日杰^b

(海军航空工程学院 a.科研部; b.信息融合研究所, 山东 烟台 264001)

摘要: 对多被动浮标的目标定位问题进行了研究, 在给定各枚浮标与目标之间距离的差值的条件下, 给出一种基于最小平方意义下的被动目标定位算法, 即在保证定位误差平方最小的条件下, 实现目标定位的方法。在对算法定位原理及定位误差研究分析的基础上, 针对近场目标和远场目标两种情况, 采用 Monte-Carlo 方法对该算法的定位性能进行了仿真; 在一定假设条件下, 仿真分析了不同距离差值量测噪声对目标位置误差、位置均方根误差及方位误差的影响, 并且对近场目标和远场目标两种情况下目标定位的性能进行了分析比较。

关键词: 浮标; 目标定位; 最小平方; 定位误差

中图分类号: TN967.7; TJ765.4

文献标识码: A

Target orientation of passive buoys based on least square algorithm

CUI Xu-tao^{a,b}, HE You^b, YANG Ri-jie^b

(a.Scientific Research Department; b.Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: Target orientation using multiple passive buoys was studied. A kind of passive target orientation algorithm based on least square algorithm was put forward under the condition of knowing the range differences between each buoy and target, namely, a method to realize target orientation while making the square of localization error least. Based on the analysis of localization rule and localization error of this algorithm, orientation performances were simulated by using Monte-Carlo for far-field and near-field cases. Under the condition of some hypothesis, the effects of different measured range differences on the target location error, location RMS error and bearing error were analyzed by simulation, and the orientation performances under two cases of far-field and near-field targets were analyzed and compared.

Key words: buoy; target localization; least square; localization error

水下目标定位是通过检测目标的辐射噪声或对主动声信号的回波信息, 来确定目标的位置参数(如方位、距离等)^[1-9]。单个被动浮标仅能接收目标噪声信号, 不能确定目标的方位和距离, 因此, 要实现目标的精确定位, 需要使用多浮标联合探测定位。来自目标的信号到达各被动浮标所需要的时间依赖于传感器与目标的几何分布及信号传播所在介质的属性。根据目标信号到达各被动传感器所需要的时间差, 可以推出目标的位置, 同样, 如假定信号传播速度不变, 则达到各传感器的时间差与各传感器之间的距离差成正比, 可以通过计算各传感器之间的距离差实现目标定位。本文针对多枚浮标被动定位问题, 根据传感器与目标位置及测量的各传感器与目标之间的距离差, 提出一种基于最小平方算法的定位技术, 以实现目标的定位。

1 定位原理

设被动浮标的数量为 N , 各浮标的坐标表示为 (x_i, y_i, z_i) , $(i=1, 2, \dots, N)$, 目标位置坐标表示为 (x_s, y_s, z_s) , 各浮标与目标坐标的矢量表示分别为 \bar{x}_i 和 \bar{x}_s , d_{ij} 表示浮标 i 与目标之间距离和浮标 j 与目标之间距离的差。目标与各浮标之间的距离表示为 $D_i = \|\bar{x}_i - \bar{x}_s\|$, 坐标原点与各浮标之间的距离表示为 $R_i = \|\bar{x}_i\|$, 同理, 目标与坐标原点之间的距离表示为 $R_s = \|\bar{x}_s\|$, 各量之间的几何关系如图 1 所示。

收稿日期: 2010-06-28; 修回日期: 2010-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572161)

由图 1 所示，各浮标之间的距离差的基本关系表示为：

$$d_{ij} = D_i - D_j, i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,N \quad (1)$$

目标定位问题是在给定 d_{ij} 噪声测量的情况下确定目标位置

坐标 \bar{x}_s ，因此， N 枚浮标中共有 $\binom{N}{2} = \frac{N(N-1)}{2}$ 个不同的距离差 d_{ij} ，然而在没有噪声的情况下，所有这些距离差可以由 $N-1$ 个距离差完全决定 ($d_{i1}, i=2,3,\dots,N$)。

假定第 j 枚浮标位于坐标原点，这样就有：

$$\bar{x}_j = 0, \text{ 即 } R_j = 0 \text{ 且 } D_j = R_s \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中得：

$$d_{ij} + R_s = \|\bar{x}_i - \bar{x}_s\| \quad (3)$$

将式(3)两边平方整理可得：

$$R_i^2 - d_{ij}^2 - 2R_s d_{ij} - 2\bar{x}_i^T \bar{x}_s = 0 \quad (4)$$

式中上标 T 表示转置(以下同)。

由于时间延时的测量是不精确的，因此在式(4)右边引入一误差 ε_i ，并且令其在最小平方意义上最小化来给出真实目标位置的估计。不失一般性，令 $j=1$ ，则得到：

$$R_i^2 - d_{i1}^2 - 2R_s d_{i1} - 2\bar{x}_i^T \bar{x}_s = \varepsilon_i \quad (5)$$

式(5)的 $N-1$ 个方程按矩阵的形式表示为：

$$\bar{\delta} - 2R_s \bar{d} - 2S\bar{x}_s = \bar{\varepsilon} \quad (6)$$

式中：
$$\bar{\delta} = \begin{bmatrix} R_2^2 - d_{21}^2 \\ R_3^2 - d_{31}^2 \\ \vdots \\ R_N^2 - d_{N1}^2 \end{bmatrix}, \quad \bar{d} = \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{31} \\ \vdots \\ d_{N1} \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N \end{bmatrix}。$$

由式(6)可以看出，对于未知量 \bar{x}_s 来说，当给定 R_s 时，误差 $\bar{\varepsilon}$ 为线性的；同理，对于未知量 R_s 来说，当给定 \bar{x}_s 时，误差 $\bar{\varepsilon}$ 也是线性的，因此，对于未知量中的线性误差矢量，可以提出一种最小平方的解决方法，即当给定 R_s ，在保证误差平方 $\bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon}$ 最小情况下的 \bar{x}_s 的最小平方解表示为：

$$\bar{x}_s = \frac{1}{2} S_w^* (\bar{\delta} - 2R_s \bar{d}), \quad S_w^* = (S^T S)^{-1} S^T \quad (7)$$

如果需要根据距离差先验置信度对距离差进行加权，那么在保证权重误差 $\bar{\varepsilon}^T W \bar{\varepsilon}$ 最小情况下， S_w^* 及权矩阵 W 可以分别表示为：

$$S_w^* = (S^T W S)^{-1} S^T W \quad (8)$$

$$W = (\text{diag}[D_i] R_i \text{diag}[D_i])^{-1} \quad (9)$$

式中： $\text{diag}[D_i]$ 表示以 D_i 为主对角线元素的对角矩阵； R_i 表示距离差量测的协方差矩阵。

将式(7)代入式(6)，得：

$$\bar{\varepsilon}' = \bar{\delta} - 2R_s \bar{d} - S S_w^* (\bar{\delta} - 2R_s \bar{d}) = (I - S S_w^*) (\bar{\delta} - 2R_s \bar{d}) \quad (10)$$

式中 I 表示单位矩阵。定义 $A_s = I - S S_w^*$ ，则式(10)表示为：

$$\bar{\varepsilon}' = A_s (\bar{\delta} - 2R_s \bar{d}) \quad (11)$$

将 $\bar{\varepsilon}'^T W \bar{\varepsilon}' = (\bar{\delta} - 2R_s \bar{d})^T A_s^T W A_s (\bar{\delta} - 2R_s \bar{d})$ 方程最小化，可以得出：

$$\hat{R}_s = \frac{\bar{d}^T A_s^T W A_s \bar{\delta}}{2\bar{d}^T A_s^T W A_s \bar{d}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(7)，可得：

$$\hat{\bar{x}}_s = \frac{1}{2} S_w^* \left(I - \frac{\bar{d} \bar{d}^T A_s^T W A_s}{\bar{d}^T A_s^T W A_s \bar{d}} \right) \bar{\delta} \quad (13)$$

由此可以得出目标的位置坐标、距离原点的距离及方位分别为：

$$\hat{\bar{x}}_s = \frac{1}{2} S_w^* \left(I - \frac{\bar{d} \bar{d}^T A_s^T W A_s}{\bar{d}^T A_s^T W A_s \bar{d}} \right) \bar{\delta}; \quad \hat{R}_s = \|\hat{\bar{x}}_s\|; \quad \hat{\theta}_s = \arccos \left(\frac{\hat{x}_s}{\|\hat{\bar{x}}_s\|} \right) \quad (14)$$

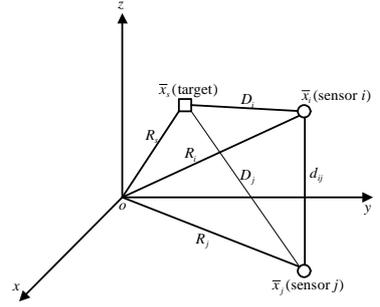


Fig.1 Geometry relationship of coordination and range of sensors and target

图 1 传感器与目标坐标及距离量之间的几何关系

2 误差分析

为了保证对目标位置 \bar{x}_s 的精确定位, 需要满足 $\|\bar{x}_s - \hat{x}_s\|$ 最小, 即在给定距离差 \bar{d} 的情况下, 满足:

$$\bar{\varepsilon} = \min_{\bar{x}_s} \|\bar{\varepsilon}\| = \|\bar{d} - \hat{d}(\bar{x}_s)\| \quad (15)$$

式中: \bar{d} 表示测量的距离差矢量; $\hat{d}(\bar{x}_s)$ 表示根据给定目标位置 \bar{x}_s 得到的距离差矢量。下面根据定位算法的定位原理来分析定位产生的误差。

将目标距离原点的距离 \hat{R}_s 代入式(5)可得:

$$\varepsilon_i = R_i^2 - 2\bar{x}_i^T \hat{x}_s + \hat{R}_s^2 - (d_{i1}^2 + 2\hat{R}_s d_{i1} + \hat{R}_s^2) = \|\bar{x}_i - \hat{x}_s\|^2 - (\hat{R}_s + d_{i1})^2, i = 2, 3, \dots, N \quad (16)$$

式中: \hat{x}_s 和 \hat{R}_s 分别表示估算得到的目标位置坐标及距离; \bar{x}_i 表示第 i 枚浮标位置坐标; d_{i1} 表示测量的距离差。

$\hat{d}_{i1} = \|\bar{x}_i - \hat{x}_s\| - \hat{R}_s$ 表示由估计的目标位置 \hat{x}_s 所推出的距离差。这样式(15)可以表示为:

$$\varepsilon_i = (\hat{R}_s + \hat{d}_{i1})^2 - (\hat{R}_s + d_{i1})^2 = (2\hat{R}_s + d_{i1} + \hat{d}_{i1})(d_{i1} - \hat{d}_{i1}) \quad (17)$$

假如延时估计中的噪声相对于浮标之间距离相对较小时, 则误差可以近似为:

$$\varepsilon_i \approx 2(\hat{R}_s + \hat{d}_{i1})(d_{i1} - \hat{d}_{i1}) = 2\hat{D}_i(d_{i1} - \hat{d}_{i1}) \quad (18)$$

当目标距离相对于浮标之间距离相对较大时, 则误差可以近似为:

$$\varepsilon_i \approx 2\hat{R}_s(d_{i1} - \hat{d}_{i1}) \quad (19)$$

3 仿真分析

设被动浮标搜潜系统由 9 枚浮标构成, 浮标位置坐标分别为 (0,0,0), (0,0,100), (0,0,200), (100,0,0), (100,0,100), (100,0,200), (0,100,0), (0,100,100), (0,100,200)。假定距离差 d_{i1} , ($i = 2, 3, \dots, 9$), 量测噪声为零均值, 方差为 σ^2 的高斯白噪声, 近场目标坐标为 (200,160,170), 远场目标坐标为 (1200,1360,1110), 下面通过 Monte-Carlo 方法对目标在近场和远场 2 种情况下目标定位统计性能进行研究。

当目标坐标分别为 (200,160,170) (目标相对于浮标阵的距离较近), (1200,1360,1110) (目标相对于浮标阵的距离较远) 时, 根据最小平方意义下的定位方法及式(14)中的位置计算公式进行仿真, 得到在近场和远场 2 种情况下, 目标真实位置与估算位置之间的误差、真实距离与估算距离之间误差随距离差量测噪声 $\sigma = 0.1 \sim 1$ 变化的曲线, 如图 2 和图 3 所示。从图中可以看出, 目标定位误差及距离误差随量测噪声方差的增大而增大, 并且随着目标距浮标阵距离的增大, 定位误差及距离误差也增大。

对于目标定位性能的评估, 引入均方根(RMS) 误差, 定义为:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\text{error}^2 + \text{variance}} \quad (20)$$

式中: error 表示定位误差, variance 表示目标位置方差。针对近场和远场 2 种目标情况, 根据式(14)和式(20)进行仿真, 得到位置 RMS 误差随距离差量测噪声 $\sigma = 0.1 \sim 1$ 变化的曲线, 如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出, 目标定位 RMS 误差随量测噪声方差的增大而增大, 并且随着目标距浮标阵距离的增大, 定位 RMS 误差也随之增大。

当目标坐标分别为 (200,160,170) (目标相对于浮标阵的距离较近), (1200,1360,1110) (目标相对于浮标阵的距离较远) 时, 根据最小平方意义下的定位方法及式(14)中的方位计算公式进行仿真, 得到在近场和远场两种情况下, 目标真实方位与估计方位之间的误差随距离差量测噪声 $\sigma = 0.1 \sim 1$ 变化的曲线, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 目标方位误差随着距离差量测噪声的增大而增大, 并且随着目标距浮标阵距离的增大, 方位误差减小。

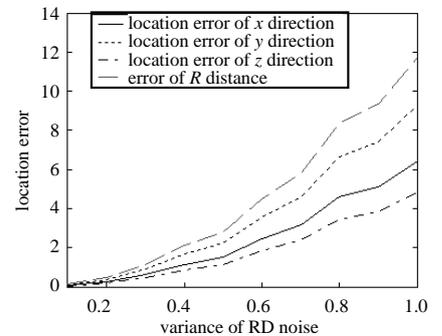


Fig.2 Relationship curve between position error and noise variance(near field situation)

图 2 位置误差随噪声方差变化曲线(近场情况)

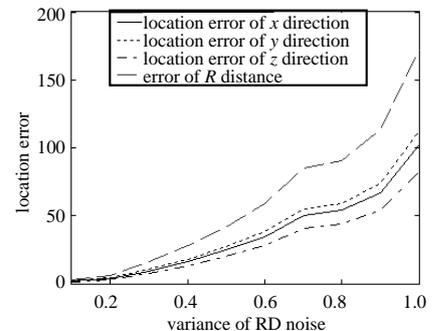


Fig.3 Relationship curve between position error and noise variance (far field)

图 3 位置误差随噪声方差变化曲线(远场情况)

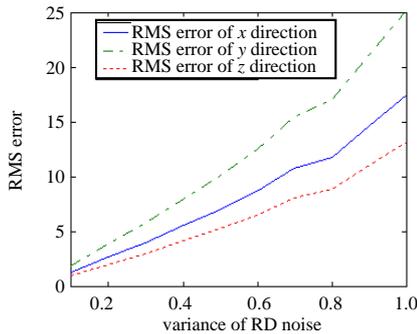


Fig.4 Relationship curve between RMS error and noise variance(near field)

图 4 RMS 误差随噪声方差变化曲线(近场)

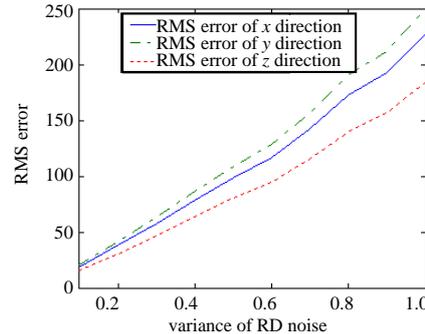


Fig.5 Relationship curve between RMS error and noise variance(far field)

图 5 RMS 误差随噪声方差变化曲线(远场)

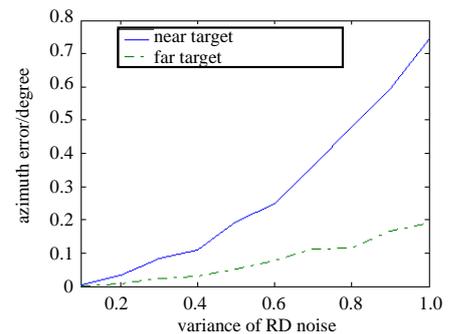


Fig.6 Relationship curve between orientation error and noise variance

图 6 方位误差随噪声方差变化曲线

4 结论

本文研究了在给定各枚浮标与目标之间距离差值条件下的多浮标被动定位问题,给出了基于最小平方意义下的目标定位算法,推导出目标定位的解析表达式,仿真分析了在近场目标和远场目标两种情况下,该定位算法的定位性能。研究表明,目标位置误差、位置 RMS 误差、方位误差与距离差值噪声大小成正比;目标位置误差、位置 RMS 误差与目标距离远近成正比;方位误差与目标距离远近成反比。通过对近场目标和远场目标 2 种情况下的性能对比分析,可以看出该方法随着目标距传感器距离的增加,定位性能随之减弱。

参考文献:

- [1] Schmidt R O. A new approach to geometry of range difference location[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1972, AES-8(6):821-825.
- [2] Delosme J M, Morf M, Friedlander B. A linear equation approach to locating sources from time-difference-of-arrival measurements[C]// Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing. 1980:818-824.
- [3] Poirot J L, McWilliams G V. Application of linear statistical models to radar location techniques[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1974, AES-10(6):830-834.
- [4] Foy W M. Position-location solutions by Taylor series estimation[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1976, AES-12(2):187-194.
- [5] Abel J S, Smith J O. The spherical interpolation method for closed-form passive source localization using range difference measurements[C]// Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing. 1987.
- [6] Chau H C, Robinson A Z. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences[J]. IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing, 1987, ASSP-35:1223-1225.
- [7] 蒋晗中, 凌国民, 陈伏虎. 一种新的被动融合定位方法[J]. 声学与电子工程, 2005(2):17-20. (JIANG Hanzhong, LING Guomin, CHEN Fuhu. A New Passive Fusion Localization Method[J]. Acoustic and Electronic Engineering, 2005(2):17-20.)
- [8] 曾辉, 曾芳玲. 空间三站时差定位的模糊及无解问题[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(2):139-142. (ZEN Hui, ZENG Fangling. Ambiguity and non-solution problems of 3-D tri-station TDOA location systems[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(2):139-142.)
- [9] 周德, 高勇. 非视距被动声定位与跟踪方法[J]. 信息与电子工程, 2009, 7(1):4-8. (ZHOU De, GAO Yong. Research on the NLOS Acoustic Passive Localization and Target Tracking[J]. Information and Electronic Engineering, 2009, 7(1):4-8.)

作者简介:



崔旭涛(1980-), 男, 山东省烟台市人, 博士, 主要研究方向为信号处理、电子技术应用. email:cxtwlb@163.com.

何友(1956-), 男, 吉林省磐石市人, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理、信息融合.

杨日杰(1963-), 男, 山西省大同市人, 博士, 教授, 主要研究方向为水声信号处理.