

单静止站纯方位目标航向估计

张晓勇, 罗来源

(西南电子通信技术研究所, 成都 610041)

摘要: 单静止站纯方位被动声纳系统是不完全可观测系统, 关于该类系统的既往研究表明, 对于匀速直线运动的目标, 利用目标方位角信息可以估计出目标的航向, 这具有重要的实际应用意义。通过对目标运动几何模型分析, 推导得到目标方位角与目标航向的关系公式, 并提出依据几何关系的目标航向估计算法。通过进行坐标变换引入最小二乘估计思想, 提高了估计方法的有效性。使用 Monte-Carlo 计算机仿真测试了算法在不同目标方位角和不同数据长度下的性能, 并与拟线性递推法和递推最小二乘法进行了比较, 结果表明该算法具有更高的估计精度和更好的适应性。

关键词: 纯方位; 航向估计; 最小二乘估计

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-06-0566-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.06.006

Target course estimation for single stationary bearing-only observation system

ZHANG Xiao-yong, LUO Lai-yuan

(Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Single stationary bearing-only passive sonar system is an incompletely measurable system. Research on this kind of system has shown that, the target course could be estimated through the directions of Arrival (DOAs) when the target is moving with constant speed and direction. It's a very useful result for target aiming analysis in practice. Started with geometric model, the relationship between target course and DOAs is deduced, and an estimation algorithm is proposed. Through coordinate transformation, the least square estimation (LSE) is used to make the algorithm more effective. Monte-Carlo simulations are carried out to test the performances of the proposed algorithm with different data lengths for different DOAs. For comparison, two other methods named Imitate Linear Recursive (ILR) algorithm and Recursive Least Square (RLS) algorithm are simulated too. Results show that the proposed method could achieve more accuracy and higher adaptability.

Key words: bearing-only; course estimation; least square estimation

0 引言

对于非测距单静止站被动声纳系统, 目标运动信息具有不完全可测性^[1-3], 仅当目标进行匀速直线运动时, 通过被动接收的声方位角信息可以计算目标的运动方向、相对距离等状态信息, 但无法进行目标定位。对于该类系统, 在声纳观测范围内出现的目标较多的情况下, 准确掌握这些信息可以有效地指导系统对关注目标进行自动筛选和选择, 从而提高系统的监测效率。

目前, 已有学者在这方面做了研究。刘忠^[1]等使用拟线性处理方法, 对系统可观测性进行分析, 通过求解系统状态方程得到目标参数, 提出一种递

推格式的目标航向估计算法(下面简记为拟线性递推法, ILR), 该方法实现简单, 但估计精度不够理想。在其处理框架下, 采用不同方法求解系统状态方程, 又得到了递推最小二乘法(RLS)以及扩展卡尔曼滤波法^[4]。这些改进的方法虽然提高了对目标航向估计的精度, 但仍存在不足, 如: 递推最小二乘法中进行矩阵求逆时有很大的病态性^[4], 而扩展卡尔曼滤波的方法对估计状态矢量的线性化导致协方差矩阵产生畸变, 容易发散^[5-6]。

本文从目标运动几何模型出发, 利用等时间间隔的前后三个目标方位角, 通过推导得到目标航向的估计公式。该方法直接依据公式进行目标航向估计, 避免了对系统状态方程的求解, 实现更为简单。为了充分利用已有信息, 本文采用坐标变换的方式引入最小二乘估计, 进一步得到一种精度较高的目标航向估计算法。

收稿日期: 2011-11-15; 修回日期: 2012-02-17

作者简介: 张晓勇(1982-), 男, 江苏海安人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理技术。

通讯作者: 张晓勇, E-mail: tianzxy@126.com

1 航向与方位角的几何关系

1.1 问题描述

不考虑目标与观测站之间的深度差，以观测站为坐标原点建立极坐标系，如图 1 所示。目标从位置 $A(\rho_A, \theta_A)$ 匀速直线运动到位置 $B(\rho_B, \theta_B)$ ，航向用角 α 表示。位置 $P(\rho_P, \theta_P)$ 、 $P'(\rho_{P'}, \theta_{P'})$ 、 $P''(\rho_{P''}, \theta_{P''})$ 分别为目标运动过程中的任意三点，且线段 PP' 与 PP'' 长度相等，即：

$$d_{PP'} = d_{PP''} \quad (1)$$

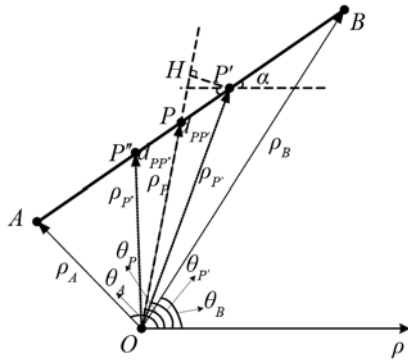


图 1 目标运动几何关系
Fig.1 Geometric model of moving target

1.2 几何关系

作 $P'H \perp OP$ ，则在 $Rt\Delta OHP'$ 和 $Rt\Delta PHP'$ 中，有

$$\rho_P = \rho_{P'} \cos(\theta_P - \theta_{P'}) + \rho_{P'} \sin(\theta_P - \theta_{P'}) \cot(\theta_P - \alpha) \quad (2)$$

$$d_{PP'} = \frac{\rho_{P'} \sin(\theta_P - \theta_{P'})}{\sin(\theta_P - \alpha)} \quad (3)$$

同理，可以得到

$$d_{PP''} = \frac{\rho_{P''} \sin(\theta_{P''} - \theta_P)}{\sin(\theta_{P''} - \alpha)} \quad (4)$$

由式(1)~(4)进行整理得到

$$\tan \alpha = \frac{\sin(\theta_{P''} - \theta_P) \sin \theta_{P'} - \sin(\theta_P - \theta_{P'}) \sin \theta_{P''}}{\sin(\theta_{P''} - \theta_P) \cos \theta_{P'} - \sin(\theta_P - \theta_{P'}) \cos \theta_{P''}} \quad (5)$$

由于三点位置的任意性，可以改写为更为一般的形式：

$$\tan \alpha = \frac{2 \tan \theta_i \tan \theta_{i+2} - \tan \theta_{i+1} \tan \theta_{i+2} - \tan \theta_i \tan \theta_{i+1}}{\tan \theta_i + \tan \theta_{i+2} - 2 \tan \theta_{i+1}} \quad (6)$$

其中： θ_i 、 θ_{i+1} 、 θ_{i+2} 分别是时刻 t_i 、 t_{i+1} 、 t_{i+2} 观测到的目标方位角，且 $t_{i+1} - t_i = t_{i+2} - t_{i+1}$ 。

由式(6)可知，通过目标运动过程中观测间隔相等的任意三个相邻方位角就可以估计目标航向。

1.3 特殊情况

1.3.1 方位角相等的情况

当目标航向(或其延长线)通过坐标原点时，在

观测过程中接收到的目标方位角保持不变，不存在图 1 中的三角关系，不能使用式(6)计算目标航向。此时，目标航向为

$$\alpha = \pm \theta_i \quad (7)$$

1.3.2 航向为 $\pm 90^\circ$ 的情况

此时可以得到：

$$\tan \theta_{i+2} - \tan \theta_{i+1} = \tan \theta_{i+1} - \tan \theta_i \quad (8)$$

即式(6)中的分母为 0，虽无意义，但由于正切函数的取值范围包含无穷大，使用该式仍然可以得到目标航向的估计值。

2 航向估计算法

2.1 基本估计算法

对于目标方位角采样序列 $\{\tilde{\theta}_i, i=1, 2, \dots\}$ ，使用样本均值估计目标航向的正切值：

$$\tan \hat{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tan \alpha_i) \quad (9)$$

其中： N 为参与估计的样本数， $\tan \alpha_i$ 由式(6)得到。

2.2 最小二乘估计算法

对式(6)进行如下变换^[6]：

$$\begin{cases} x_i = \tan \theta_i + \tan \theta_{i+2} - 2 \tan \theta_{i+1} \\ y_i = 2 \tan \theta_i \tan \theta_{i+2} - \tan \theta_{i+1} \tan \theta_{i+2} - \tan \theta_i \tan \theta_{i+1} \\ K = \tan \alpha \end{cases} \quad (10)$$

则有

$$y_i = K \cdot x_i \quad (11)$$

即：航向角的正切值是新坐标平面上由点 (x_i, y_i) ， $i=1, 2, \dots$ 组成的直线的斜率。在含有噪声的情况下，这些点 (x_i, y_i) 不再严格处于一条直线上，而是分布在以 K 为斜率的直线附近。

考虑使用最小二乘法得到斜率 K 的估计值 \hat{K} ：

$$\hat{K} = \frac{2U}{\sqrt{4U^2 + (V-W)^2} + (V-W)} \quad (12)$$

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i \cdot y_i), V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2), W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^2)$$

进一步，得到航向角

$$\hat{\alpha} = \text{atan}(\hat{K}) \quad (13)$$

其中， $\text{atan}(\cdot)$ 为反正切函数。

由此，可以得到进行目标航向最小二乘估计的方法步骤为：

- (1) 由目标方位角采样序列 $\{\tilde{\theta}_i, i=1, 2, \dots\}$ ，根据式(10)计算点集 $\{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots\}$ ；
- (2) 由式(12)计算斜率估计值 \hat{K} ；
- (3) 由式(13)得到航向角的估计值 $\hat{\alpha}$ 。

3 仿真分析

设定目标初始位置为(-100km,100km), 运动速度为 10kn, 目标方位角观测时间间隔为 10min, 噪声方差为 0.01^2 , 参与估计的数据长度从 400 点变化到 4000 点(步进为 200 点), 对每种数据长度进行 200 次 Monte-Carlo 仿真, 并与拟线性递推法^[3]和递推最小二乘法^[4]进行比较。当目标航向分别为 160° 和 20° 时的估计性能如图 2~5 所示, 各图中拟线性递推法用圆圈表示, 递推最小二乘法用星号表示, 本文提出的基于几何关系的最小二乘估计算法用三角形表示。

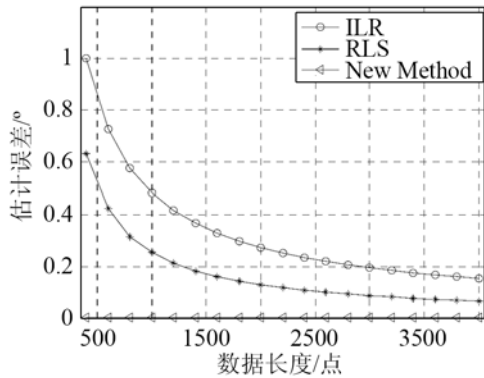


图 2 航向为 160° 时三种不同方法的估计误差
Fig.2 Estimation errors of three different methods when target course is 160°

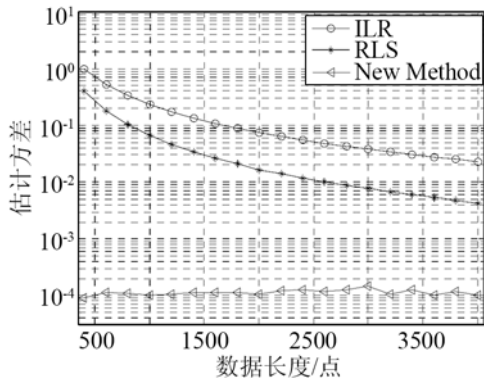


图 3 航向为 160° 时三种不同方法的估计方差
Fig.3 Estimation variances of three different methods when target course is 160°

图 2 中, 拟线性递推法的估计误差最小为 0.15° , 递推最小二乘法的估计误差最小为 0.065° , 且两种方法的估计误差随数据长度的增加而下降; 而基于几何关系的最小二乘估计算法的最大估计误差小于 1.5×10^{-3} , 且随数据长度的变化不明显。

图 3 中, 拟线性递推法的估计方差最小为 0.023 , 递推最小二乘法的估计方差最小为 0.0043 , 且两种方法的估计方差随数据长度的增加而下降;

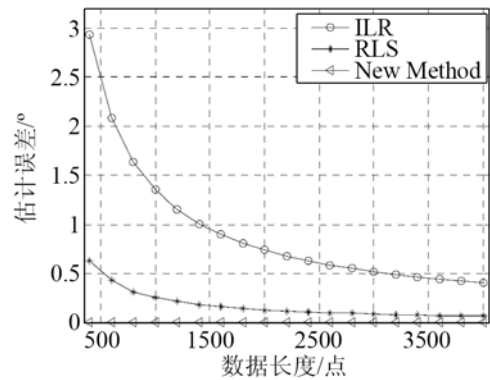


图 4 航向为 20° 时三种不同方法的估计误差
Fig.4 Estimation errors of three different methods when target course is 20°

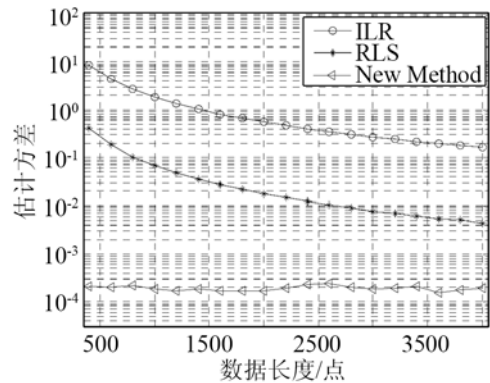


图 5 航向为 20° 时三种不同方法的估计方差
Fig.5 Estimation variances of three different methods when target course is 20°

而基于几何关系的最小二乘估计算法的最大估计方差小于 1.5×10^{-4} , 且随数据长度的变化不明显。

图 4 中, 拟线性递推法和递推最小二乘法的估计误差都有所增加, 其最小值分别为 0.40° 和 0.066° , 而基于几何关系的最小二乘估计算法的估计误差并未发生明显改变, 最大估计误差小于 2×10^{-3} , 同样, 受数据长度的影响不明显。

图 5 中, 拟线性递推法和递推最小二乘法的估计方差明显增加, 其最小值分别为 0.16 和 0.0044 , 而基于几何关系的最小二乘估计算法的估计方差无明显改变, 最大估计方差小于 2.4×10^{-4} , 且基本不受数据长度的影响。

从上述仿真对比分析可以看出: 本文提出的基于几何关系的最小二乘估计算法, 其性能在估计偏差和估计方差方面均明显优于拟线性递推法和递推最小二乘法, 且基本不受参与估计的数据长度以及航向角取值的影响。

4 结论

目标航向对于非测距单静止站被动声纳系统

进行目标自动筛选、威胁评估等应用具有重要意义。通过对目标运动几何关系分析, 推导得到一种仅依靠接收的目标方位角采样序列进行目标航向估计的方法, 并且利用坐标变换, 得到一种新的最小二乘估计算法。仿真实验表明, 该算法的估计性能较拟线性递推法和递推最小二乘法有较大优势。此外, 该算法的估计性能还具有受数据长度以及实际航向角取值影响小的优点, 应用范围较广。

参 考 文 献

- [1] 刘忠. 单静止站纯方位系统的可观测性与目标参数估计算法[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(5): 20-23.
LIU Zhong. Observability analysis and target parameter estimation algorithm for stationary single observer bearings-only system[J]. Journal of naval university of engineering, 2001, 13(5): 20-23.
- [2] 许志刚, 盛安冬. 二维单站纯方位运动目标跟踪的可观测性[J]. 兵工学报, 2007, 28(5): 617-620.
XU Zhigang, SHENG Andong. Observability for two-dimensional single observer tracking based on bearing-only measurements[J]. ACTA Armamentarii, 2007, 28(5): 617-620.
- [3] 李洪瑞, 盛安东. 连续纯方位系统的可观测性分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(11): 1446-1450.
LI Hongrui, SHENG Andong. Analysis on the observability for continuous bearings-only system[J]. ACTA Armamentarii, 2009, 30(11): 1446-1450.
- [4] 赵骁飞. 单站纯方位无源探测定位的若干技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文. 2007, 50-64.
ZHAO Xiaofei. Research of some technologies on bearing-only system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007, 50-64.
- [5] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009, 52-56.
HE You, XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei, et al. Radar data processing with applications (Second edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009, 52-56.
- [6] 刘健, 刘忠. 纯方位目标运动分析的无偏最小二乘估计算法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(2): 262-265, 327.
LIU Jian, LIU Zhong. Study on algorithm of unbiased least square estimator for bearings-only target motion analysis[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, 34(2): 262-265, 327.
- [7] 胡来招. 数字瞬时测频——频率推算法测频[J]. 电子对抗, 2005(2): 43-49.
HU Laizhao. Digital instantaneous frequency estimation-frequency calculating method[J]. Electronic warfare, 2005(2): 43-49.