

基于 Tikhonov 正则化的多站测时差定位方法^{*}

纪彦星 潘江怀

(1. 91404 部队 秦皇岛 066000)(2. 江苏自动化研究所 连云港 222006)

摘 要 论文针对多站测时差定位中,由于传感器布局不合理等因素所引起的定位估计结果不稳定、发散甚至无效的情况,提出了一种基于 Tikhonov 正则化的稳健定位方法,该方法对各站的布局要求不高,能有效兼顾定位参数估计的分辨率和方差,实现了对观测方程中随机观测噪声的有效抑制,具有较好的工程应用价值,数值模拟结果表明,定位结果相比传统算法精度和稳定性更高。

关键词 测时差; 无源定位; Tikhonov 正则化; 稳健估计; 定位方法

中图分类号 TN911.7 **DOI**:10.3969/j.issn.1672-9730.2016.04.015

Multi-station TDOA Localization Algorithm Based on Tikhonov Regularization

Ji Yanxing PAN Huaijiang

(1. No. 91404 Troops of PLA, Qinhuangdao 066000)(2. Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222006)

Abstract Aiming at the invalidation of localization caused by the irrationality of the sensor distribution in multi-station, a new robust localization algorithm based on Tikhonov regularization is proposed. The new method gives attention both to the resolution and the square error of the estimation results, restrains the uncertain part while keeps the certain part of the observation noise, and guarantees the validation of new method on multi-station TDOA localization even the the sensor distribution irrationally. It has a high value of engineering application. The results of numerical simulation show that, the positioning result has higher accuracy and stability compared with traditional algorithm.

Key Words TDOA, passive localization, Tikhonov regularization, robust estimation, localization algorithm

Class Number TN911.7

1 引言

多站时差(Time Difference of Arrive, TDOA)定位法是一种定位精度较高的无源定位方法,它是运用辐射源信号到达不同测量站的时间差进行对目标定位的,时差定位又称双曲线定位,由一个主站和多个辅站组成,每个站独立测量辐射源信号的到达时间,辅站将其测得的时间信息传给主站,由主站计算信号到达两个测量站的时差信息,每两个站的时差就确定了一对以此两站为焦点的双曲线,多个双曲线相交就确定了目标的空间位置。多站

时差定位法由于其定位精度高、隐蔽性高在电子情报支援系统中获得了广泛应用^[1~4],同时也是民用蜂窝系统终端定位的主要算法^[5]。

目前,国内外许多学者对多站时差定位进行了较多研究,获得了一些研究成果^[6~11],但是已有的多站时差定位算法缺点在于,当传感器布局不合理时,由于观测数方程可观测性较低,目标定位方程矩阵的病态性比较严重,其引起的估计结果不稳定、发散甚至无效,其本质是一种病态的不适定问题。正则化方法是求解不适定问题的普遍方法,其采用与原不适定问题相“近邻”的适定问题的解去

^{*} 收稿日期:2015 年 10 月 7 日,修回日期:2015 年 11 月 26 日

作者简介:纪彦星,男,高级工程师,研究方向:水面舰艇作战系统试验。潘江怀,男,高级工程师,研究方向:空间配准、最优估计。

逼近原问题的解,能有效解决病态性所引起的估计不稳定,鉴于此,本文提出了一种基于 Tikhonov 正则化的稳健定位方法,该方法对各站的布局要求不高,能有效兼顾定位参数估计的分辨率和方差,实现了对观测方程中随机观测噪声的有效抑制,确保了定位估计的精度和稳定性,并通过仿真实例进行了验证。

2 多站测时差定位算法

多站时差定位要确定辐射源在三维空间中的位置,需要有三条基线形成的三对双曲面。这就要求要有至少四个观测站同步完成目标信号到达时间差的测量。对于目标辐射的信号,到达四个站可得到三个相对时延差值,一般来说都定义一个主接收站,与其中一个副接收站测出时延差值,再以主接收站和副接收站的两个站连线作为轴线可得一个旋转双曲面,两个旋转双曲面相交得到一条交线,此交线再和第三个双曲面相交,得到一个定位交点,此交点即为目标的位置。定位示意图如图 1 所示。

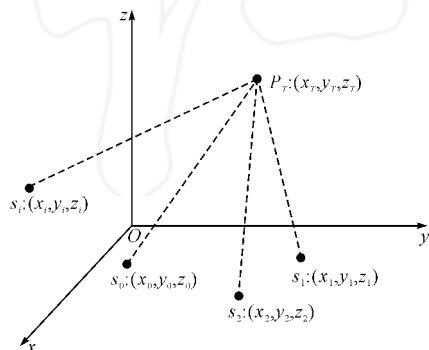


图 1 三维空间时差定位示意图

假设观测站 s_0 为参考站,即相对于观测站 s_i ,当 $i=0$ 时表示主站, $i=1, \dots, n$ 表示副站,用 r_i ($i=0, 1, \dots, n$) 表示目标到第 i 个站的空间距离,而 $(i=0, 1, \dots, n)$ 表示目标到副站与主站之间距离差,因此可以有如下距离差方程:

$$\begin{cases} r_0^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \\ r_i^2 = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta r_i = r_i - r_0 = c \cdot \Delta t_i; i=1, 2, \dots, n$$

其中: r_0 表示目标到主站的距离, r_i 表示目标到辅站的距离,假定目标的位置为 (x, y, z) , (x_0, y_0, z_0) 为主站传感器在地理坐标系的坐标, (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个传感器在地理坐标系的坐标, Δr_i 表示辐射源到主站与其到辅站之间的距离差, Δt_i 表示辐射源信号到主站与其到辅站之间的时差, c 是信号传播的速度。

对上述方程组进行展开化简可得:

$$(x_0 - x_i)x + (y_0 - y_i)y + (z_0 - z_i)z = k_i + r_0 \Delta r_i \quad (2)$$

其中, $k_i = \frac{1}{2} (\Delta r_i^2 + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) - (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2))$, $i=1, 2, \dots, n$ 。写成矩阵形式可得

$$AX = Z \quad (3)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & z_0 - z_1 \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 & z_0 - z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0 - x_n & y_0 - y_n & z_0 - z_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} k_1 + \Delta r_1 \cdot r_0 \\ k_2 + \Delta r_2 \cdot r_0 \\ \vdots \\ k_n + \Delta r_n \cdot r_0 \end{bmatrix}.$$

则式(3)的最小二乘解为

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (4)$$

定义目标定位参数 X 的信息矩阵为

$$J = A^T A \quad (5)$$

3 目标定位参数估计的病态分析

最小二乘算法求解目标定位的条件是信息矩阵 J 可逆,即 A 列满秩。当 A 的列线性相关或弱相关时,方程求解是病态的。

1) 常见的病态场景

当各副站相距较近时,各副站与主站的位置差近似相等,即有 $(x_0 - x_1, y_0 - y_1, z_0 - z_1) \approx (x_0 - x_i, y_0 - y_i, z_0 - z_i)$,会导致矩阵 A 的列向量具有相关性,从而使得信息矩阵 J 存在病态。

2) 病态性的评估

一般地,通过条件数对方程病态性进行评估。对于式(4),小扰动引起的估计相对系统误差有如下关系:

$$\frac{\|\delta X\|}{\|X\|} \lesssim \text{cond}\{A\} \left(\frac{\|\delta A\|}{\|A\|} + \frac{\|\delta Z\|}{\|Z\|} \right) \quad (6)$$

当 A 非奇异时, A 条件数定义如下:

$$\text{cond}\{A\} = \max_i |\eta_i(A)| / \min_i |\eta_i(A)| \quad (7)$$

可见,系数矩阵 A 的特征值越分散, $\text{cond}\{A\}$ 越大,目标定位 X 的相对误差越大。因此,为降低解向量的相对误差主要应考虑缩小 $\text{cond}\{A\}$ 。

4 基于 Tikhonov 正则化的定位估计方法

式(3)的 LS 估计结果式(4)是最优线性无偏估计,具有方差最小的性质,但在参数估计存在病态性的情况下式(4)的估计质量变差,甚至结果不

可靠,较大的方差使得式(4)成为事实上的有偏估计。当出现观测方程病态时,可通过正则化的思想对秩亏参数估计模型附加约束条件——全部或部分参数加权平方和极小可得最小范数解,即增加约束,补充先验信息,将病态问题转化为可稳健估计问题,使解稳定。

对于式(3)估计问题,可增加其相应的正则化估计准则为

$$\|A\hat{X}-Z\|^2+\alpha\Omega(\hat{X})=\|H\hat{X}-Z\|^2+\alpha\hat{X}^TR\hat{X}=\min$$

(8)

式中, α 为正则化参数或平滑因子, R 是正则化矩阵, $\Omega(\hat{X})$ 是稳定函数。

对全部参数进行约束,选取稳定函数 $\Omega(\hat{X})$ 为

$$\Omega(\hat{X})=\hat{X}^TR\hat{X}$$

(9)

对部分参数进行约束,选取稳定函数 $\Omega(\hat{X})$ 为

$$\Omega(\hat{X})=\hat{X}^TR\hat{X}=\begin{cases} \begin{pmatrix} \hat{X}_0 \\ \hat{X}_1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} R_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_0 \\ \hat{X}_1 \end{pmatrix} = \hat{X}_0^T R_0 \hat{X}_0 \\ \begin{pmatrix} \hat{X}_0 \\ \hat{X}_1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_0 \\ \hat{X}_1 \end{pmatrix} = \hat{X}_1^T R_1 \hat{X}_1 \end{cases}$$

(10)

虽然上述两种方法得到改进的参数估计模型不同,但其参数估计模型以及几何意义的表达均具有统一性。

正则化法中求解泛函极小值的问题可看作为下列两种椭圆约束条件下的最小二乘问题:

- 1) 对给定解的约束条件 $\|\hat{X}\| \leq \rho, \rho > 0$ 的情况下极小化偏差 $\|A\hat{X}-Z\|$;
- 2) 观测误差 δ 一定且满足约束条件 $\|A\hat{X}-Z\| \leq \delta$ 时求参数极小化解的模 $\|\hat{X}\|$ 。

5 仿真验证

仿真条件:设主站位置为(0,0,0.1),三个辅站的位置分别为(20,20,0)、(-20,25,0)、(15,20,0),单位均为 km。测时误差为 30ns,布站误差为 10m,测时误差之间的相关系数为 0.5,目标高度为 10km。在 $x:-100\text{km} \sim 100\text{km}$, $y:-100\text{km} \sim 100\text{km}$ 的区域内仿真验证。

对比图 2 和图 3 的 GDOP 网格图可以看出改进算法的定位精度明显比原始算法的精度大幅提高;对比图 4 和图 5 的 GDOP 等高线图也可以看出

改进算法的定位精度明显比原始算法的精度大幅提高,很好地解决了多站时差定位问题;图 6 为改进算法提高的 GDOP 等高线图。通过与传统算法比较可以看出,改进的算法无论精度在时差定位可观测行较差的区域(如与三站接近共线的区域)效果提高的更为明显。

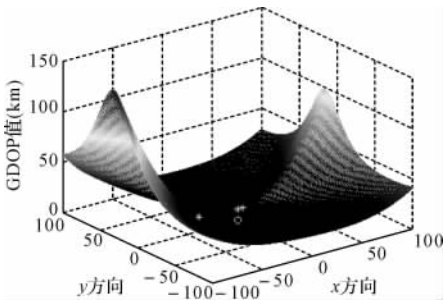


图 2 传统算法定位的 GDOP 网格图

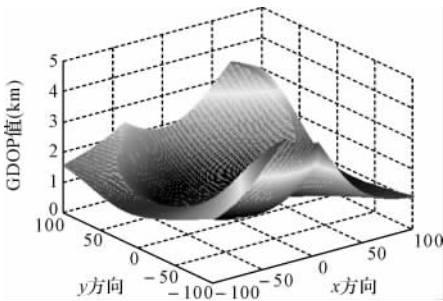


图 3 本文算法定位的 GDOP 网格图

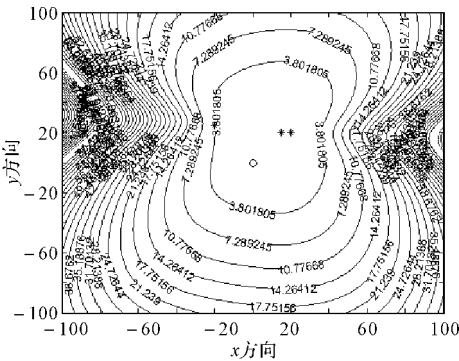


图 4 传统算法定位的 GDOP 等高线

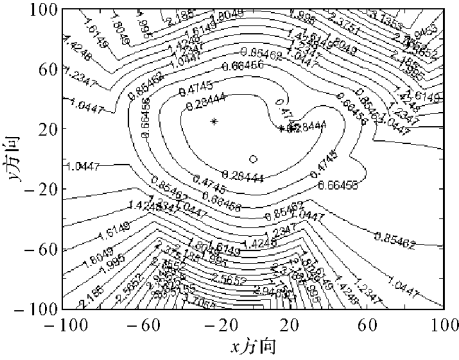


图 5 本文算法定位的 GDOP 等高线

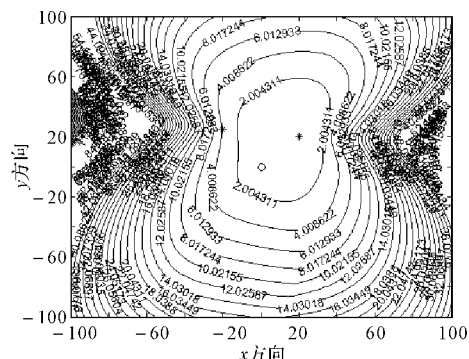


图6 本文算法所提高定位的 GDOP 等高线

6 结语

本文针对多站测时差定位中,由于传感器布局不合理等因素引起的定位方程矩阵病态性所引起的定位估计结果不稳定、发散甚至无效的情况,提出了一种基于 Tikhonov 正则化的稳健定位方法,该方法对各站的布局要求不高,能有效兼顾定位参数估计的分辨率和方差,实现了对观测方程中随机观测噪声的有效抑制,具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 孙仲康,郭福成,冯道旺,等.单站无源定位跟踪技术[M].北京:国防工业出版社,2008:30-35.
- [2] Hua, Y., W. Wen-Quan, L. Zhong. Observer trajectory optimization of maneuvering target for bearings-only tracking[C]//Proceedings of International Conference of Information Science and Management Engineer-

ing (ISME). Xi'an, 2010: 207-211.

- [3] CHEN Zhangxin, WAN Qun, WEI Hewen, et al. A Novel Subspace Approach for Hyperbolic Mobile Location[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(3): 569-573.
- [4] 陈玲,李少洪.可消除定位模糊的无源时差定位算法[J].北京航空航天大学学报,2005,31(1):89-93.
- [5] 范平志.蜂窝网无线定位[M].北京:国防工业出版社,2002:50-55.
- [6] 叶朝谋,俞志强.三维时差定位系统的模糊及无解分析[J].现代电子技术,2009,23(5):22-24.
- [7] 郭云飞.纯方位角目标跟踪理论与应用研究[D].杭州:浙江大学,2007:20-25.
- [8] 李宗华,郭福成,周一宇,等.测量 TOA 和 DOA 的单站无源定位跟踪可观测条件[J].国防科技大学学报,2004,26(2):30-34.
- [9] 谢细全,王琴,谢成祥,等.DOA 和 TOA 的单站无源定位可观测性分析[J].电光与控制,2007,14(2):47-49.
- [10] Xu Tianyuan, Liu Shunlan. Single Observer Passive Location using Phase Rate of Change with the extended kalman particle filter [C]//ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 2009: 65-68.
- [11] Wang Qiang, Guo Fucheng, Zhou Yiyu. A Single Observer Passive Location Method and Accuracy Analysis using Phase Difference Rate of Change Only[C]//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, IEEE Press, 2008:1030-1033.

(上接第 25 页)

- [2] 杨遵.无人作战飞机自主控制体系结构与航路规划研究[D].西安:空军工程大学,2007.
- [3] 曹璐.UCAV 侦察/打击一体化自主控制关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2011.
- [4] 美军计划在 2019 年之前将基于无人机的战斗空中巡逻圈数量增加百分之五十[N].每防务快讯,2015-08-21.
- [5] 美导弹防御局研发激光无人机项目[N].每防务快讯,2015-08-24.
- [6] 美海军计划在 9 月份对“特里同”无人机展开作战评估试验[N].每防务快讯,2015-08-26.
- [7] 俄罗斯正在开发的新型无人机可捕杀 F-35 战机[N].

每防务快讯,2015-09-01.

- [8] DARPA 研发“小精灵”无人机用于分布式空中作战[J].每防务快讯,2015-09-02.
- [9] 无人机蜂群作战将成为未来军事作战的新趋势[N].每防务快讯,2015-09-28.
- [10] 俄媒称目前仅美以有真正攻击无人机中俄还在追赶[J].每防务快讯,2015-12-18.
- [11] 郭昊,周德云,张堃.无人作战飞机空战自主机动决策研究[J].电光与控制,2010,17(8):28-32.
- [12] 任宏光,刘颖.无人作战飞机侦察打击一体化武器系统发展[J].飞航导弹,2009(6):47-49.