

基于 NLS 的多机只测角误差配准算法

曲长文^{1,2} 王昌海² 徐 征²

(1. 航空电子系统综合技术重点实验室, 上海 200233;
2. 海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘 要: 多机无源融合定位中的误差配准是目前多传感器误差配准中的难点之一。当无源传感器获得的观测量存在系统误差却不进行配准时, 多机融合定位的效果将受到严重影响。针对这一情况, 在多机只测角无源定位问题中提出了一种基于非线性最小二乘(NLS)的误差配准算法。该算法将多机只测角误差配准问题转换为非线性最小二乘估计问题, 并采用高斯-牛顿法求解, 即先将非线性量测方程线性化并采用加权最小二乘进行估计, 然后进行迭代直至收敛到最优估计值。仿真结果表明, 与 EKF 配准算法相比, 当观测时间足够长时, 本文提出的 NLS 误差配准算法的定位误差可以接近克拉美罗限(CRLB), 并且对系统误差的估计精度非常高。

关键词: 无源定位; 误差配准; 非线性最小二乘; 克拉美罗限

中图分类号: TN958.97 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)04-0533-06

NLS-based Registration Algorithm for Bearings-Only Location by Multiple Airborne Observers

QU Chang-wen^{1,2} WANG Chang-hai² XU Zheng²

(1. Science and Technology on Avionics Integration Laboratory, Shanghai 200233, China;
2. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Registration for passive sensors on multiple airborne observers is one of difficult multi-sensor registration problems. The accuracy of location will be severely affected when the measurements taken by passive sensors consist of systematic biases without registration. A registration algorithm based on nonlinear least-squares (NLS) for bearings-only location by multiple airborne observers is proposed. The algorithm regards registration for multiple airborne bearings-only observers as an NLS problem, and solves it by Gauss-Newton Method. Firstly, linearize the measurement equations and estimate the parameters using the general least-squares method. Then execute the iterative procedure until the estimated parameters converge to optimal estimations. Simulation results show that, given enough measurements, the NLS-based registration algorithm proposed here can effectively estimate the systemic biases as well as the position of the target with the location error reaching the Cramer-Rao bound (CRLB) when compared with EKF-based registration algorithm.

Key words: passive location; registration; nonlinear least-squares; the Cramer-Rao bound

1 引言

面对越来越复杂、密集的空间电磁环境, 采用传统的单平台武器系统由于不能满足全面、精确、实时获取信息的要求, 已经很难独立遂行战斗任务, 为了保证战斗系统能在尽可能全面、准确和及时的信息支持下发挥

效应, 多平台信息综合成为必然的要求^[1]。机载多平台无源融合定位系统具有不发射电磁信号、生存能力强、侦察作用距离远, 具备独立实时作战能力等优点, 已经成为国内外侦察监视攻击系统的重要研究内容。尽管多机无源融合技术飞速发展, 但是由于实际系统中各种系统误差的存在, 系统实时融合效果的保障已成为机载

多平台无源融合技术领域十分棘手的问题。

目前,国内外在主动传感器的系统误差配准方面取得了较多的研究成果[2-5],而针对无源传感器尤其是多机无源传感器的误差配准技术研究较少。文献[6]采用线性统计模型研究了单无源传感器的误差配准。文献[7]在假定系统误差比较小且测角精度较高的情况下采用EKF和UKF算法对多无源传感器的系统误差进行在线配准,适合布站间距较远且目标较近的情况。文献[8]基于批处理技术的辅助变量法研究了固定双基阵纯方位角的系统误差配准问题,在目标距离无源传感器比较近的情况配准效果较好。

机载多平台无源定位具有目标辐射源距离远(通常为数百公里)、机载平台间距近(通常20公里以内)的特点,因此迫切需要找到适合的算法来解决机载多平台无源定位中误差配准问题。本文提出了一种基于NLS的多机只测角误差配准算法,首先将加性系统误差加入到观测量中,并将含有系统误差的非线性观测方程在目标位置的初始估计值处进行一阶近似,从而将非线性最优化问题转化为线性问题,然后采用线性最小二乘算法对目标位置和系统误差进行估计,并进行迭代直至收敛到最优估计值。最后给出系统误差条件下定位误差的CRLB并与之比较,仿真结果表明本文所提算法能够有效实现多机只测角无源定位系统的误差配准。

2 基于NLS的误差配准算法

工程中通常认为系统误差是一个缓慢时变的量,假定系统误差服从零均值高斯分布,但在观测期间内为一个确定的常量^[9]。本文采用该文献定义的系统误差形式,在二维平面内研究机载多平台只测角误差配准问题,目标为固定辐射源。系统误差对定位的影响如图1所示。

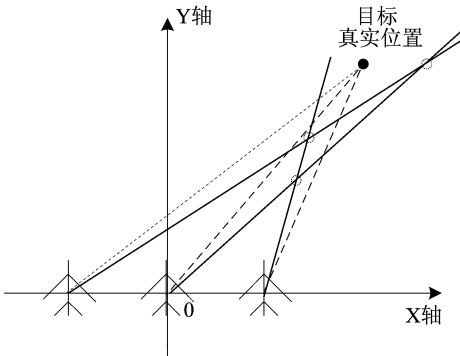


图1 系统误差对仅测角定位影响示意图

Fig. 1 Effect of systematic errors on bearing-only location

由图1可以看到由于系统误差和测量噪声的影响,即使在单目标的情况下通过两两交叉定位将会产生多个定位点,并且严重偏离目标的真实位置,若不进行配准,可能会产生可观测性问题^[8]并严重影响定位的精度。

设有 n 架飞机编队飞行,各飞机的方位角观测量中含有加性的系统误差,则第 i 架飞机在第 k 个采样时刻的方位角观测量可以描述为

$$\theta_{mi}(k) = \theta_i(k) + \Delta\theta_i(k) + \delta\theta_i(k) \quad (1)$$

其中 θ_{mi} 为方位角实际观测量, θ_i 为方位角真实值, $\Delta\theta_i$ 为系统误差, $\delta\theta_i$ 为服从零均值高斯分布的观测噪声。

方位角的真实值 θ_i 与目标和飞机的位置存在如下非线性关系

$$\theta_i(k) = f(X, X_i(k)) = \arctan \frac{x - x_i(k)}{y - y_i(k)} \quad (2)$$

其中 $X = (x, y)$ 为目标真实位置, $X_i(k) = (x_i(k), y_i(k))$ 为飞机在第 k 个采样时刻真实位置。

对于 n 架飞机的 N 次观测,式(1)可以写成如下 $n \times N$ 行非线性矩阵方程

$$\theta_m = f(X, X_i) + \Delta\theta + \delta\theta \quad (3)$$

由于 f 的非线性,式(3)中对目标位置 X 和系统误差 $\Delta\theta$ 的估计可以看作非线性最小二乘问题,非线性最小二乘的代价函数^[9]为

$$Q(X, \Delta\theta) = [\theta_m - f(X, X_i) - \Delta\theta]^T \Sigma^{-1} [\theta_m - f(X, X_i) - \Delta\theta] \quad (4)$$

其中, $\Sigma = E[\delta\theta \cdot \delta\theta^T]$ 为观测噪声的协方差矩阵。非线性最小二乘问题可以采用高斯-牛顿法求解,即先进行一阶近似将其转换为线性最小二乘问题并求解,然后进行迭代来逼近最优估计值。

2.1 观测方程的线性化

将式(2)在目标位置的初始估计值 \hat{X}_0 和飞机位置的观测量 $X_{mi}(k)$ (通过飞机的导航设备直接获取)处进行一阶泰勒近似并忽略高阶项,即

$$\theta_{mi}(k) \approx f(\hat{X}_0, X_{mi}(k)) + F_i(k)(X - \hat{X}_0) + G_i(k)\delta X_i(k) + \Delta\theta_i(k) + \delta\theta_i(k) \quad (5)$$

其中,

$$F_i(k) = \nabla_X [f(\hat{X}_0, X_{mi}(k))] = \begin{bmatrix} \frac{\hat{y}_0 - y_{mi}(k)}{(\hat{x}_0 - x_{mi}(k))^2 + (\hat{y}_0 - y_{mi}(k))^2} & \frac{x_{mi}(k) - \hat{x}_0}{(\hat{x}_0 - x_{mi}(k))^2 + (\hat{y}_0 - y_{mi}(k))^2} \end{bmatrix}$$

为式(2)关于 X 的雅克比矩阵, $G_i(k) = \nabla_{X_i} [f(\hat{X}_0, X_{mi}(k))] = -F_i(k)$ 为式(2)关于 X_i 的雅克比矩阵, $\delta X_i(k) = X_i(k) - X_{mi}(k)$ 为飞机位置的观测噪声。

式(5)可以整理为

$$Z_i(k) = F_i(k) \cdot \Delta X + \Delta\theta_i(k) + e_i(k) \quad (6)$$

其中, $Z_i(k) = \theta_{mi}(k) - f(\hat{X}_0, X_{mi}(k))$ 为飞机 i 的等效观测测量, $\Delta X = X - \hat{X}_0$ 为目标位置的估计偏差, $e_i(k) = G_i(k) \delta X_i(k) + \delta \theta_i(k)$ 为等效观测噪声。假设各飞机的观测噪声 $\delta \theta_i(k)$ 与飞机运动状态的观测噪声 $\delta X_i(k)$ 相互独立, 则等效观测噪声的协方差为

$$R_i(k) = E[e_i(k)e_i^T(k)] = G_i(k)E[\delta X_i(k)\delta X_i^T(k)]G_i^T(k) + \sigma_i^2 \quad (7)$$

其中 σ_i^2 为方位角观测噪声 $\delta \theta_i$ 的方差。实际中飞机采用 GPS 对自身位置的定位精度可以达到 10m 以内, 经作者计算, 此时飞机位置的观测噪声 $\delta X_i(k)$ 对目标定位精度的影响非常小可以忽略不计, 因此等效观测噪声的协方差可以近似为

$$R_i(k) = E[e_i(k)e_i^T(k)] \approx \sigma_i^2 \quad (8)$$

假设系统误差 $\Delta \theta_i$ 服从零均值高斯分布, 但在观测期间内变化非常缓慢, 并当作常数处理, 则式(6)可以写为

$$Z_i(k) = [F_i(k) \quad 1] \cdot \beta_i + e_i(k) \quad (9)$$

其中 $\beta_i = [\Delta X \quad \Delta \theta_i]^T$ 为待估参量。对于 n 架飞机的观测方程, 将式(9)写成矩阵形式

$$Z(k) = H(k) \cdot \beta + e(k) \quad (10)$$

其中, 等效观测测量矩阵 $Z(k) = [Z_1(k) \quad Z_2(k) \quad \dots$

$$Z_n(k)]^T, \text{ 观测系数矩阵 } H(k) = \begin{bmatrix} F_1(k) & 1 & & & \\ F_2(k) & & 1 & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ F_n(k) & & & & 1 \end{bmatrix}, \text{ 待}$$

估参量 $\beta = [\Delta X \quad \Delta \theta_1 \quad \Delta \theta_2 \quad \dots \quad \Delta \theta_n]^T$, 等效观测噪声向量 $e(k) = [e_1(k) \quad e_2(k) \quad \dots \quad e_n(k)]^T$ 。由于各飞机的运动状态及方位角的测量均是独立进行, 因此等效观测噪声的协方差为

$$R(k) = E[e(k)e^T(k)] = \text{diag}(R_1(k), R_2(k), \dots, R_n(k)) \quad (11)$$

2.2 NLS 参数估计

设 n 架飞机的 N 次等效观测值为 $Z = [Z(1) \quad Z(2) \quad \dots \quad Z(N)]^T$, 观测系数矩阵为 $H = [H(1) \quad H(2) \quad \dots \quad H(N)]^T$, 等效观测噪声向量为 $e = [e(1), e(2), \dots, e(N)]^T$ 。由于不同时刻间的测量噪声不相关且服从高斯分布, 所以等效观测噪声的协方差矩阵可以表示为分块矩阵的形式, 即

$$R = E[e \cdot e^T] = \text{diag}(R(1), R(2), \dots, R(N)) \quad (12)$$

式(10)改写为

$$Z = H \cdot \beta + e \quad (13)$$

从而待估参量 β 的加权最小二乘估计及协方差为

$$\hat{\beta} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} Z \quad (14)$$

$$\text{cov}(\hat{\beta}) = (H^T R^{-1} H)^{-1} \quad (15)$$

当 N 较大时, 采用上式的运算量比较大, 为此可以利用式(16)和式(17)提高算法的运算速度

$$H^T R^{-1} H = \sum_{k=1}^N H^T(k) R^{-1}(k) H(k) \quad (16)$$

$$H^T R^{-1} Z = \sum_{k=1}^N H^T(k) R^{-1}(k) Z(k) \quad (17)$$

若各飞机的方位角观测精度相等并且相互独立, 则等效观测噪声的协方差矩阵可以写成 $R = \sigma^2 I$ 的形式, 则 β 可用最小二乘进行估计

$$\hat{\beta} = (H^T H)^{-1} H^T Z \quad (18)$$

估计出 $\hat{\beta}$ 后, 目标位置的估计值更新为

$$\hat{X} = \hat{X}_0 + \Delta \hat{X} \quad (19)$$

然后将目标位置的估计值 \hat{X} 替换 \hat{X}_0 代入式(13)~式(19)进行迭代, 直至收敛。

2.3 NLS 初始化

采用高斯-牛顿法求解 NLS 问题需要给定一个目标位置的初始估计值 \hat{X}_0 , 如式(5)所示。目标的初始估计通常可以根据先验信息指定, 或者利用交叉定位给出一个粗略的估计, 如图 1 所示。对于多机交叉定位, 则可以根据多个测角方程采用最小二乘或总体最小二乘的方法^[10]对目标位置进行初始估计。具体做法可以参考文献[11]。

3 参数估计精度及 CRLB

3.1 NLS 参数估计精度

将均方误差 (MSE) 作为 NLS 配准算法的参数估计精度指标, 均方误差定义为

$$MSE = E[(\beta - \hat{\beta})^T (\beta - \hat{\beta})] \quad (20)$$

对于经过线性化的系统 (如式(10)所示) 和近似为零均值的等效观测噪声 e , NLS 为近似无偏估计^[12], 即 $E[\hat{\beta}] \approx \beta$, 从而式(20)可以进一步推导得到式(21)

$$\begin{aligned} MSE &\approx E[(E[\hat{\beta}] - \hat{\beta})^T (E[\hat{\beta}] - \hat{\beta})] \\ &= \text{tr}[\text{cov}(\hat{\beta})] = \text{tr}[(H^T R^{-1} H)^{-1}] \end{aligned} \quad (21)$$

注意, 由于式(21)表示的是 $\hat{\beta}$ 的估计精度, 若仅考虑目标位置的定位精度, 则是 $\text{cov}(\hat{\beta})$ 左上角 2×2 分块矩阵的迹。

3.2 系统误差条件下的 CRLB

本文只讨论系统误差在观测期间内为常量时参数估计误差的 CRLB。假设等效观测噪声 $e(k)$ 是零均值的高斯噪声, 根据文献[8, 13], 待估参量 $\hat{\beta}$ 的 CRLB 为

$$CRLB = [H^T R^{-1} H + J]^{-1} \quad (22)$$

其中, H 为代入目标真实位置的系数矩阵, J 为先验信息矩阵。设飞机 i 的系统误差服从零均值, 先验方差为 $\sigma_{\theta_i}^2$ 的高斯分布, 并令

$$J_{\theta} = \text{diag}(\sigma_{\theta_1}^{-2}, \sigma_{\theta_2}^{-2}, \dots, \sigma_{\theta_m}^{-2}) \quad (23)$$

则

$$J = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & 0 & \\ & & J_{\theta} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式(22)中左上角 2×2 的分块矩阵是我们感兴趣的目标定位误差下限, 可以根据文献[10]中分块矩阵求逆的公式可以推得

$$\begin{aligned} \text{CRLB}_X = & \left[\sum_{k=1}^N F^T(k) R^{-1}(k) F(k) - \sum_{k=1}^N F^T(k) R^{-1}(k) \cdot \left(J_{\theta} + \sum_{k=1}^N R^{-1}(k) \right)^{-1} \right. \\ & \left. \cdot \sum_{k=1}^N R^{-1}(k) F(k) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (25)$$

如果无法获得系统误差的先验信息, 即 $\sigma_{\theta_i}^2 \rightarrow \infty$, 则 $J=0$, 由式(22), CRLB 变为 $[H^T R^{-1} H]^{-1}$, 与式(21)比较, 这意味着当未知系统误差先验信息时, NLS 的参数估计精度可达到 CRLB, 且

$$\begin{aligned} \text{CRLB}_{X \max} = \lim_{\sigma_{\theta_i}^2 \rightarrow \infty} \text{CRLB}_X = & \left[\sum_{k=1}^N F^T(k) R^{-1}(k) F(k) - \sum_{k=1}^N F^T(k) R^{-1}(k) \cdot \right. \\ & \left. \left(\sum_{k=1}^N R^{-1}(k) \right)^{-1} \cdot \sum_{k=1}^N R^{-1}(k) F(k) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (26)$$

若不存在系统误差, 即 $\sigma_{\theta_i}^2 \rightarrow 0$, 则式(22)变为

$$\text{CRLB}_X = \left[\sum_{k=1}^N F^T(k) R^{-1}(k) F(k) \right]^{-1} \quad (27)$$

此时目标定位误差下限仅与目标和飞机的运动状态及测量噪声有关。

4 仿真分析

仿真 1: 考察 NLS 配准算法的定位精度、系统误差的估计精度受观测时间的影响。

假设三架飞机编队飞行, 对地面固定有源目标进行无源定位。三架飞机均沿 y 轴正方向以 $v=0.15 \text{ km/s}$ 的速度作匀速飞行, 设初始坐标分别为 $(0,0)$ 、 $(-15\text{km}, 0)$ 、 $(15\text{km}, 0)$, 目标的坐标设为 $(200\text{km}, 300\text{km})$ 。假设三架飞机的系统误差服从零均值高斯分布, 且先验的标准差分别设为 $\sigma_{\theta_1}=5^\circ$ 、 $\sigma_{\theta_2}=4^\circ$ 、 $\sigma_{\theta_3}=3^\circ$, 在观测期间内系

统偏差为常数, 分别设为 $\Delta\theta_1=-5^\circ$ 、 $\Delta\theta_2=4^\circ$ 、 $\Delta\theta_3=3^\circ$ 。设观测噪声服从零均值的高斯分布, 且标准差分别为 $\sigma_1=0.8^\circ$ 、 $\sigma_2=1^\circ$ 、 $\sigma_3=1.2^\circ$ 。观测的采样周期为 $T_s=1\text{s}$, 观测时间在 50s 到 1000s 之间变化, 采用 Monte-Carlo 仿真 500 次。仿真结果如图 2 ~ 图 5 所示。

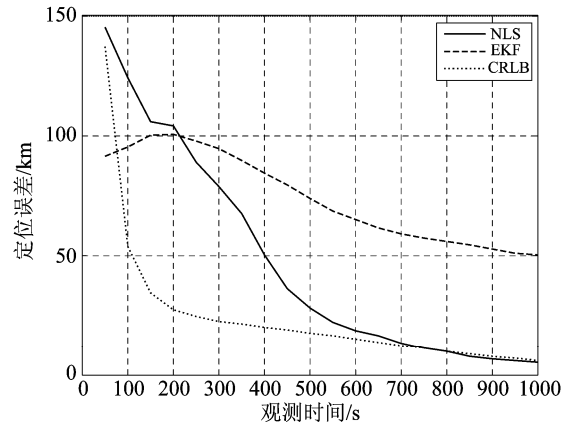


图 2 定位精度随观测时间的变化曲线图

Fig. 2 Variation of the location error versus measurement time

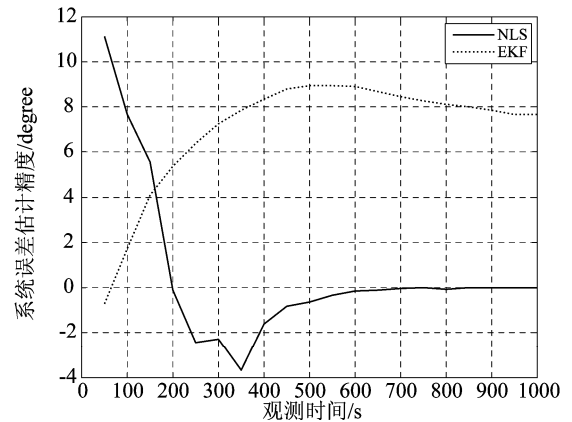


图 3 飞机 1 的系统误差估计精度曲线

Fig. 3 Estimation accuracy of airborne observer 1's systematic error

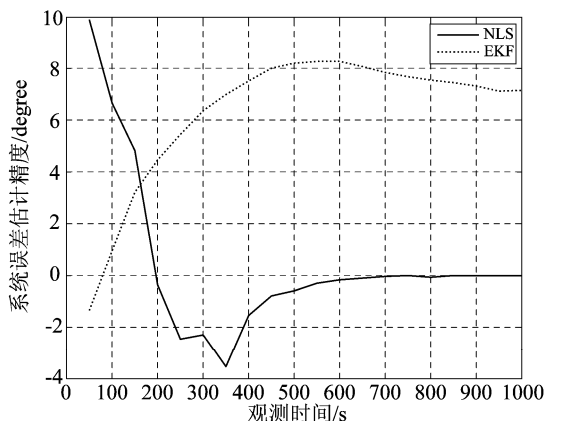


图 4 飞机 2 的系统误差估计精度曲线

Fig. 4 Estimation accuracy of airborne observer 2's systematic error

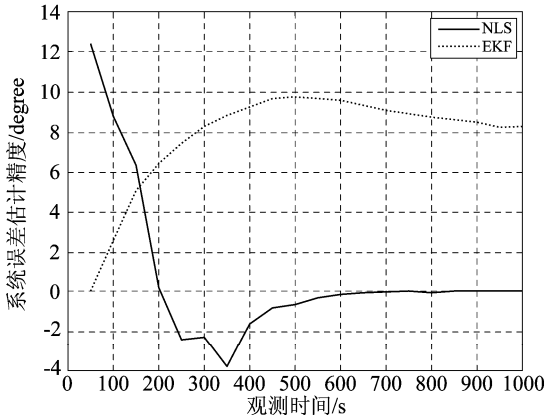


图5 飞机3的系统误差估计精度曲线

Fig.5 Estimation accuracy of airborne observer 3's systematic error

图2为分别采用NLS配准算法和EKF配准算法进行配准的定位误差曲线,并与定位误差下限 $CRLB_x$ 进行对比。由图2可以看到,在此仿真条件下,随着观测时间增加,NLS配准算法和EKF配准算法的定位误差都不断降低。NLS配准算法在观测时间大约700s之后定位误差基本与 $CRLB_x$ 重合,当观测时间为1000s时定位精度可以达到5km,如果继续增加观测时间,定位精度可以达到1km以下;与之相比,EKF配准算法的定位误差收敛较慢,定位精度即使在观测时间达到1000s时仍有大约50km的误差。

图3~图5为分别采用NLS配准算法和EKF配准算法进行配准的各飞机系统误差估计精度(估计精度表示为估计值减去真实值)曲线,可以看到在此仿真条件下,NLS配准算法在观测时间大约400s之后,对系统误差的估计值逐步收敛,在700s之后已非常接近系统误差的真实值;而EKF配准算法不能估计出系统误差,无法达到误差配准的目的。

在仿真中作者发现,影响EKF配准算法的定位精度和系统误差估计精度的主要原因在于EKF对初始估计过于敏感,尤其受初始协方差估计的影响更大。尽管可以通过交叉定位对目标位置进行估计,但初始协方差却常常需要根据经验给出,而文献[7]给出的初始协方差估计方法由于实际中无法获得目标的真实位置并不可行。若根据初始位置估计给出理想的初始协方差,则EKF配准算法性能与NLS配准算法相近。

仿真2:考察NLS配准算法的定位精度受观测噪声的影响。设观测噪声服从零均值的高斯分布,且标准差分别为 $\sigma_1 = k \times 0.8^\circ$, $\sigma_2 = k \times 1^\circ$, $\sigma_3 = k \times 1.2^\circ$,其中 $0.1 \leq k \leq 3$ 为观测噪声系数。观测时间为800s,其他条件同仿真1。

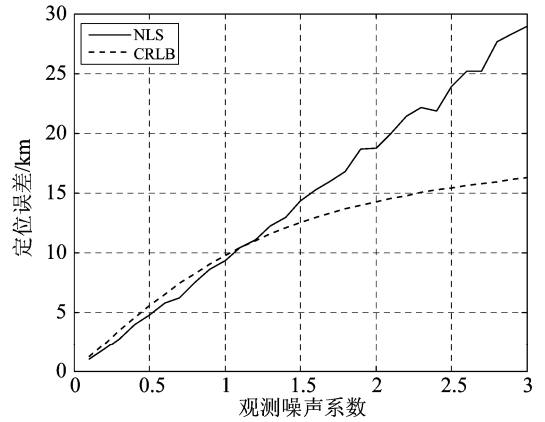


图6 定位精度随观测噪声的变化曲线图

Fig.6 Variation of the location error versus measurement noise

图6为NLS配准算法的定位精度受观测噪声影响的曲线图,可以看到在此仿真条件下,当观测噪声系数 $k < 1.1$ 时,NLS配准算法的定位精度可以达到 $CRLB_x$;当观测噪声系数继续增大时,NLS配准算法的定位误差也逐渐偏离 $CRLB_x$,非线性估计问题的门限效应^[14]在 $k \approx 1.5$ 之后比较明显,目标位置的估计也越来越不可靠。因此本文所提算法比较稳健,在观测噪声较大时仍能取得比较好的定位效果。

5 结束语

本文根据经典估计理论,针对多机只测角误差配准问题提出了NLS误差配准算法,并给出存在系统误差时CRLB表达式以评价该算法的优劣。该算法思路直观,理论依据充分,能够解决目前多机只测角误差配准中目标距离远、观测站布站间距近和观测噪声比较大的问题。仿真结果表明,在本文的背景条件下,当角度测量噪声在 2° 以内,观测时间足够长(约700个观测采样周期)时,本文所提算法能够较为准确估计出角度系统误差,从而有利于消除系统误差影响,提高定位精度。然而本文所提算法具有运算量大、观测数据需求量大和实时性差的缺点,因此如何对算法进行改进也是下一步必须解决的问题。

参考文献

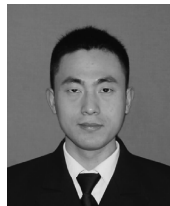
- [1] 赵杰,江晶,周样晶,韩正国.基于序贯最小二乘的多传感器误差配准方法[J].传感器与微系统,2007,26(8):99-101.
Zhao Jie, Jiang Jing, Zhou Yangjing, Han Zhengguo. RLS-based registration algorithm for multi-sensors [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(8): 99-101. (in Chinese)

- [2] Zhou Y F, Leung H. An exact maximum likelihood registration algorithm for data fusion [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(6):1560-1572.
- [3] 李教, 敬忠良, 王安. 多平台多传感器多源信息融合中的时空对准研究[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2002, 3(5):56-60.
Li Jiao, Jing Zhongliang, Wang An. Temporal and spacial alignment development in multi-sensor multi-platform and multi-object Source information fusion[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2002, 3(5):56-60. (in Chinese)
- [4] 陈非, 敬忠良, 姚晓东. 空基多平台多传感器时间空间数据配准与目标跟踪[J]. *控制与决策*, 2001, 16(增刊):808-811.
Chen Fei, Jing Zhongliang, Yao Xiaodong. Time and spacial registration and target tracking for multiple airborne mobile platforms and sensors[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(Suppl):808-811. (in Chinese)
- [5] Zhou Y F, Leung H, Blanchette M. Sensor alignment with earth-centered earth-fixed (ECEF) coordinate system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2):410-418.
- [6] Poirot J L, McWilliams G V. Application of linear statistical models to radar location techniques [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, 10(6):830-834.
- [7] 赵杰, 江晶, 盖旭刚. 多无源传感器的在线配准[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(8):1894-1898.
Zhao Jie, Jiang Jing, Gai Xugang. Online registration of multiple passive sensors[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(8):1894-1898. (in Chinese)
- [8] 徐本连, 王执铨. 双基阵纯方位目标的可观测性研究及跟踪性能改进[J]. *控制与决策*, 2005, 20(9):1017-1021.
Xu Benlian, Wang Zhiquan. On the observability problem for bistatic bearings-only target tracking and its performance improvement[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(9):1017-1021. (in Chinese)
- [9] HatemHmam (full name), Kutluyil Dogancay (full name). Passive localization of scanning emitters [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(2):944-951.
- [10] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004. 69, 403-410.
Zhang Xianda. *Matrix analysis and applications* [M]. Beijing: Publishing House of Tsing Hua University, 2004. 69, 403-410. (in Chinese)
- [11] 王鼎, 吴瑛, 田建春. 基于总体最小二乘算法的多站无源定位[J]. *信号处理*, 2007, 23(4):611-614.
Wang Ding, Wu Ying, Tian Jianchun. Multi-station passive location based on TLS algorithm[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(4):611-614. (in Chinese)
- [12] Torrieri D J. Statistical theory of passive location systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, 20(2):183-198.
- [13] Motti Gavish (full name), Eli Fogel (full name). Effect of bias on bearing-only target location[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(1):22-26.
- [14] Weiss A J, Weinstein E. Fundamental limits in passive time delay estimation—part I :narrow-band systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1983, 31(2):472-486.

作者简介



曲长文(1963-),男,山东济南人,2004年于海军工程大学博士学位,现为海军航空工程学院博导、教授,主要研究方向为雷达信号处理、电子对抗、SAR雷达技术等。E-mail:qcwby@sohu.com



王昌海(1986-),男,山东烟台人,海军航空工程学院硕士生,研究方向为无源定位跟踪技术。
E-mail:wchwchh@sina.com



徐征(1985-),男,山东青岛人,海军航空工程学院博士生,研究方向为无源定位跟踪技术。
E-mail:xuzheng85@126.com