

联合 ADS-B 的最小二乘雷达系统误差估计方法^①



原常弘^{1,2}, 郭文明², 范恩³, 李鹏飞⁴, 李晓斌⁵

¹(南方医科大学网络中心, 广州 510630)

²(南方医科大学第三附属医院, 广州 510515)

³(深圳大学信息工程学院, 深圳 518060)

⁴(陆军炮兵防空兵学院, 郑州 450052)

⁵(约瑟夫·斯特凡国际研究生学院, 卢布尔雅那, 斯洛文尼亚 1000)

通讯作者: 郭文明, E-mail: gwm@smu.edu.cn

摘要: 为了解决两坐标雷达系统误差估计问题, 提出一种联合 ADS-B 的最小二乘雷达系统误差估计方法. 提出方法首先将 ADS-B 量测从地理坐标系转换到雷达局部直角坐标系, 建立统一的配准空间; 其次以雷达航迹的采样时间为基准, 对 ADS-B 航迹进行插值, 构造新的 ADS-B 航迹; 然后采用直线拟合算法分别计算雷达航迹和 ADS-B 航迹的直线方程, 并计算两条直线的夹角, 再利用该夹角补偿雷达航迹的航向角数据; 最后采用最小二乘算法估计雷达系统误差. 实测数据实验结果表明, 与传统直线拟合方法和最小二乘方法相比, 提出方法能够更有效地估计雷达系统误差; 经过提出方法配准处理后, 雷达航迹数据的平均斜距离误差和方位角误差分别降低 71.7% 和 52.7%.

关键词: 目标跟踪; 空间配准; 最小二乘估计; ADS-B

引用格式: 原常弘, 郭文明, 范恩, 李鹏飞, 李晓斌. 联合 ADS-B 的最小二乘雷达系统误差估计方法. 计算机系统应用, 2019, 28(9): 264-270. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7104.html>

Least Squares Radar Systematic Error Estimation Algorithm By Joint ADS-B

YUAN Chang-Hong^{1,2}, GUO Wen-Ming², FAN En³, LI Peng-Fei⁴, LI Xiaobin⁵

¹(Network Center, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China)

²(The Third Affiliated Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510630, China)

³(College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

⁴(Zhengzhou Campus, PLA Army Artillery Air Defense Academy, Zhengzhou 450052, China)

⁵(Jožef Stefan International Postgraduate School, Ljubljana 1000, Slovenia)

Abstract: To solve the systematic error estimation problem for a two-coordinate radar, the least squares radar systematic error estimation method by a joint ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) device is proposed. In the proposed method, the ADS-B measurements are first transformed from geographic coordinate system to radar local rectangular coordinate system for building a unified observation space. Then, the radar track and ADS-B track are applied to calculate the corresponding straight-line equation by the line fitting algorithm, and these two equations are further utilized to calculate the angle between the two straight-lines for compensating the azimuth component of the radar track. Finally, the least squares algorithm is applied to estimate the radar systematic error. The real-data experimental results of real data illustrate that the proposed method can effectively estimate the radar systematic error compared with the traditional straight-line algorithm and the least squares algorithm. After registering the radar track by the proposed method, the average range error and the azimuth error can be reduced by 71.7% and 52.7%, respectively.

Key words: target tracking; spatial registration; least squares estimation; ADS-B

① 基金项目: 国家自然科学基金 (61703280, 61603258); 绍兴市科技计划 (2017B70056); 资源环境信息化甘肃省国际科技合作基地

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61703280, 61603258); Science and Technology Plan of Shaoxing Municipality (2017B70056); International Science and Technology Cooperation Base for Resource and Environment Informationization of Gansu Province

收稿时间: 2019-03-12; 修改时间: 2019-04-17; 采用时间: 2019-04-23; csa 在线出版时间: 2019-09-05

在雷达组网中, 雷达系统误差估计是多传感器多目标跟踪的首要问题, 与航迹关联互为前提^[1]. 雷达观测系统的测量误差主要包括两种形式的误差: 随机误差和系统误差. 随机误差可以采用各种滤波方法进行滤除^[2,3]. 系统误差是一种确定型误差, 很难通过滤波方法处理, 需要先对它进行估计, 再利用估计值对雷达量测进行补偿或配准, 才能够降低或消除其影响^[1]. 系统误差的存在会降低跟踪结果的精度, 导致跟踪均方根误差比理论值大很多; 严重时导致来自同一目标的多雷达量测关联失败, 甚至产生多条轨迹, 从而难以形成统一、准确的跟踪态势. 因此在雷达组网中, 如何解决雷达系统误差估计问题是多传感器多目标跟踪领域的重点和难点之一.

现有方法一般假设雷达系统误差为固定值, 主要包括实时精度控制 (RTQC) 算法、最小二乘 (LS) 算法、广义最小二乘 (GLS) 算法、基于地心地固坐标系的 GLS 算法 (EFEC-GLS)、极大似然 (ML) 算法、扩维 (ED) 算法, 以及它们的改进方法^[1,4-12]. 在实际雷达组网中存在以下特点: (1) 不同雷达的系统误差一般不同, 甚至相差很大; (2) 雷达探测距离越远, 测量误差越大; (3) 由于不同雷达的采样时刻不同, 采样周期 (或采样间隔) 较大, 考虑到目标飞行速度快以及目标运动轨迹的不确定性, 导致对雷达航迹进行时间校正时, 往往会引入新的误差. 因此, 在实际中雷达量测数据包含的测量误差一般会比较大会比较大. 在这种情况下, 由于上述估计方法大多是建立在最小二乘模型上, 在计算过程中忽略了系统误差二阶或高阶项的影响, 会一定程度上降低这些方法的估计效果.

实际上, 如果已知目标的真实位置, 那么雷达系统误差估计过程将被大大简化^[13]. ADS-B (广播式自动相关) 设备以 GPS (全球定位系统) 为基础, 能够为合作目标提供精确的位置信息, 其定位精度相对雷达量测而言完全可以近似作为目标的真实位置, 而且其采样时刻更密集^[14]. 考虑到 ADS-B 的优点, 文献^[15]从图形学的角度, 提出一种基于多直线融合的雷达标定误差 (FL) 算法. 尽管 FL 方法简单实用, 但是其估计精度还有待进一步提高. 文献^[12]基于 ADS-B 量测数据, 针对雷达和 ADS-B 跟踪平台, 提出一种联合系统误差估计方法, 但是算法复杂度依然比较高.

为此, 本文针对两坐标雷达和 ADS-B 联合跟踪平台, 在文献^[15]的基础上, 考虑到传统基于 LS 模型的

系统误差估计方法对量测数据比较敏感的特点, 提出一种联合 ADS-B 的最小二乘雷达系统误差估计方法. 提出方法首先针对雷达量测和 ADS-B 量测数据的特点进行预处理, 然后利用 LS 算法估计雷达系统误差, 最后采用实测数据实验对提出方法的有效性和可行性进行验证.

1 雷达及 ADS-B 航迹数预处理

考虑到雷达航迹和 ADS-B 航迹的坐标系 (分别采用雷达局部坐标系和地理坐标系)、采样时刻不同的影响, 首先需要要对它们进行预处理.

1.1 坐标转换

由于 ADS-B 量测数据采用地理坐标, 为了对雷达和 ADS-B 的量测数据进行统一处理, 需要先将 ADS-B 量测数据转换到以雷达为中心的局部直角坐标系. 设 $(\lambda_{A,i}, \phi_{A,i}, h_{A,i})$ 是 ADS-B 量测的地理坐标, 则对应的局部坐标为:

$$[x_{A,i}, y_{A,i}, z_{A,i}]^T = D(\lambda_R, \phi_R) [P(\lambda_{A,i}, \phi_{A,i}, h_{A,i}) - P(\lambda_R, \phi_R, h_R)] \quad (1)$$

这里, (λ_R, ϕ_R, h_R) 是雷达位置的地理坐标, $D(\lambda_R, \phi_R)$ 、 $P(\lambda_R, \phi_R, h_R)$ 可以分别由下面两式计算:

$$D(\lambda_R, \phi_R) = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_R & \cos \lambda_R & 0 \\ -\sin \phi_R \cos \lambda_R & -\sin \phi_R \sin \lambda_R & \cos \phi_R \\ \cos \phi_R \cos \lambda_R & \cos \phi_R \sin \lambda_R & \sin \phi_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P(\lambda, \phi, h) = \begin{bmatrix} (N+h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \phi \sin \lambda \\ N[(1-\rho^2)+h] \sin \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $N = R_e / \sqrt{1 - \rho^2 \sin^2 \varphi}$, $\rho = \sqrt{1 - r_e^2 / R_e^2}$ 为地球的偏心率, $r_e = 6356.752$ km 为地球短轴半径, $R_e = 6378.137$ km 为地球长轴半径.

由于两坐标雷达仅能获取目标的斜距离和方位角信息, 后续有些步骤还需要在雷达极坐标系处理数据, 因此需要将 ADS-B 量测数据从雷达直角坐标转换成极坐标. 设 $(r_{A,i}, \theta_{A,i}, h_{A,i})$ 和 $(x_{A,i}, y_{A,i}, z_{A,i})$ 分别是 ADS-B 量测在雷达局部坐标系中的极坐标和直角坐标, 则

$$\begin{cases} r_{A,i} = \sqrt{x_{A,i}^2 + y_{A,i}^2 + z_{A,i}^2} \\ \theta_{A,i} = \arctan(x_{A,i}/y_{A,i}) \\ h_{A,i} = z_{A,i} \end{cases} \quad (4)$$

这里主要是针对两坐标雷达量测的斜距离和方位

角进行配准,因而只需要对雷达量测和 ADS-B 量测的斜距离和方位角进行处理.为了后续处理方便,仍需进一步将雷达量测和 ADS-B 量测转换到平面直角坐标系,设 (x'_i, y'_i) 和 (r_i, θ_i) 分别为雷达量测或 ADS-B 量测的极坐标和直角坐标,则

$$\begin{cases} x'_i = r_i \sin \theta_i \\ y'_i = r_i \cos \theta_i \end{cases} \quad (5)$$

在下文中,涉及的雷达量测或 ADS-B 量测的直角坐标均是通过式(5)计算得到.

1.2 时间配准

在实际中,雷达和 ADS-B 对目标进行个跟踪时,采样时刻只是近似周期的.一般地,ADS-B 采样时刻比雷达更密集.图1给出实际中雷达和 ADS-B 跟踪同一批目标的采样时刻,可以看出 ADS-B 采样间隔比雷达更小、更密集.为了方便进一步对雷达数据处理以及更准确地估计雷达系统误差,这里以雷达航迹数据的采样时刻序列 $\{t_{R,i}\}_{i=1}^M$ 为基准,对 ADS-B 航迹数据进行插值,通过计算得到的插值序列作为新的 ADS-B 航迹数据,用于估计雷达系统误差.

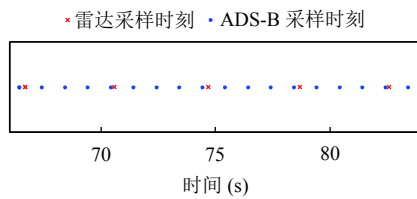


图1 雷达和 ADS-B 的采样时刻

在具体插值过程中,由于 ADS-B 采样间隔小,近似 1s/次,为此可以假设目标在单个采样间隔做匀速运动,采用与雷达采样时刻 $t_{R,i}$ 相邻的两个 ADS-B 量测 $z_{A,j}$ 、 $z_{A,j+1}(t_{A,j} < t_{R,i} < t_{A,j+1})$ 计算插值:

$$\begin{cases} \hat{x}_{A,i} = x_{A,j} + \hat{v}_{x,i}(t_{A,j+1} - t_{R,i}) \\ \hat{y}_{A,i} = y_{A,j} + \hat{v}_{y,i}(t_{A,j+1} - t_{R,i}) \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} \hat{v}_{x,i} = (x_{A,j+1} - x_{A,j}) / (t_{A,j+1} - t_{A,j}) \\ \hat{v}_{y,i} = (y_{A,j+1} - y_{A,j}) / (t_{A,j+1} - t_{A,j}) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $t_{A,j}$ 、 $t_{A,j+1}$ 为对应 $z_{A,j}$ 、 $z_{A,j+1}$ 的采样时刻.

1.3 雷达方位角误差补偿

考虑到系统误差估计算法对量测误差比较敏感,为了更准确地估计雷达系统误差,这里首先估计雷达方位角误差的粗值,然后对雷达方位角数据进行补偿.

假设目标做直线运动,采用最小二乘拟合计算雷达航迹和 ADS-B 航迹对应的直线方程:

$$\begin{cases} \hat{l}_R : y_{R,i} = \hat{a}_R x_{R,i} + \hat{b}_R \\ \hat{l}_A : y_{A,i} = \hat{a}_A x_{A,i} + \hat{b}_A \end{cases} \quad (8)$$

然后计算两直线的夹角,并将该夹角作为雷达方位角误差估计的粗值:

$$\Delta \hat{\theta}_{R,0} = \arctan \left| \frac{\hat{a}_R - \hat{a}_A}{1 + \hat{a}_R \hat{a}_A} \right| \quad (9)$$

最后利用该粗值补偿雷达航迹的方位角数据:

$$\theta'_{R,i} = \theta_{R,i} + \Delta \theta_{R,0} \quad (10)$$

2 基于最小二乘的雷达系统误差估计

设雷达航迹数据和 ADS-B 航迹数据经过预处理后, $(r_{R,i}, \theta_{R,i})$ 和 $(r_{A,i}, \theta_{A,i})$ 分别表示 t_i 时刻目标 T 在雷达极坐标系中的雷达量测和 ADS-B 量测的极坐标, $(x'_{R,i}, y'_{R,i})$ 和 $(x'_{A,i}, y'_{A,i})$ 分别为它们在雷达直角坐标系中直角坐标, Δr_R 、 $\Delta \theta_R$ 分别是雷达的斜距离系统误差和方位角系统误差.如果忽略随量测误差的影响,根据(5)式可以得到:

$$\begin{cases} x'_{R,i} = (r_{R,i} - \Delta r_R) \sin(\theta_{R,i} - \Delta \theta_R) \\ y'_{R,i} = (r_{R,i} - \Delta r_R) \cos(\theta_{R,i} - \Delta \theta_R) \end{cases} \quad (11)$$

因为 Δr_R 、 $\Delta \theta_R$ 是微量,若忽略它们的二阶项,式(11)可以简化为:

$$\begin{cases} x'_{R,i} = r_{R,i} \sin \theta_{R,i} - \Delta r_R \sin \theta_{R,i} - \Delta \theta_R r_{R,i} \cos \theta_{R,i} \\ y'_{R,i} = r_{R,i} \cos \theta_{R,i} - \Delta r_R \cos \theta_{R,i} + \Delta \theta_R r_{R,i} \sin \theta_{R,i} \end{cases} \quad (12)$$

考虑到 ADS-B 系统误差相对雷达系统误差非常小,这里忽略 ADS-B 系统误差,将其近似作为目标位置的真实位置,即:

$$\begin{cases} x'_{A,i} = r_{A,i} \sin \theta_{A,i} \\ y'_{A,i} = r_{A,i} \cos \theta_{A,i} \end{cases} \quad (13)$$

由 $(x'_{R,i}, y'_{R,i})$ 和 $(x'_{A,i}, y'_{A,i})$ 的几何关系可知:

$$\begin{cases} r_{R,i} \sin \theta_{R,i} - \Delta r_R \sin \theta_{R,i} - \Delta \theta_R r_{R,i} \cos \theta_{R,i} = r_{A,i} \sin \theta_{A,i} \\ r_{R,i} \cos \theta_{R,i} - \Delta r_R \cos \theta_{R,i} + \Delta \theta_R r_{R,i} \sin \theta_{R,i} = r_{A,i} \cos \theta_{A,i} \end{cases} \quad (14)$$

通过恒等式变形可以得到:

$$\begin{cases} r_{R,i} \sin \theta_{R,i} - r_{A,i} \sin \theta_{A,i} = \Delta r_R \sin \theta_{R,i} + \Delta \theta_R r_{R,i} \cos \theta_{R,i} \\ r_{R,i} \cos \theta_{R,i} - r_{A,i} \cos \theta_{A,i} = \Delta r_R \cos \theta_{R,i} - \Delta \theta_R r_{R,i} \sin \theta_{R,i} \end{cases} \quad (15)$$

令 $Z_i = \begin{bmatrix} r_{R,i} \sin \theta_{R,i} - r_{A,i} \sin \theta_{A,i} \\ r_{R,i} \cos \theta_{R,i} - r_{A,i} \cos \theta_{A,i} \end{bmatrix}$, $\beta = [\Delta r_R, \Delta \theta_R]^T$, $H_i = \begin{bmatrix} \sin \theta_{R,i} & r_{R,i} \cos \theta_{R,i} \\ \cos \theta_{R,i} & -r_{R,i} \sin \theta_{R,i} \end{bmatrix}$, 则式(15)用矩阵的形式

可以进一步表示为:

$$Z_i = H_i \beta \quad (16)$$

针对雷达航迹 M 个不同的量测数据, 根据(16)式可得:

$$[Z_1, Z_2, \dots, Z_M]^T = [H_1, H_2, \dots, H_M]^T \beta \quad (17)$$

令 $H = [H_1, H_2, \dots, H_M]^T$, $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_M]^T$, 则式(17)可以进一步表示为:

$$Z = H\beta \quad (18)$$

由于式(18)是超定的, 可以采用最小二乘估计方法^[16]求解可得:

$$\beta = (H^T H^{-1}) H^T Z \quad (19)$$

3 实测数据实验

为了验证提出方法的性能, 采用实测数据对三种系统误差方法进行比较, 包括基于直线拟合的系统误差估计方法(FL)、基于最小二乘的系统误差估计方法(LS)、以及基于直线拟合的最小二乘系统误差估计方法(FL-LS)。

实测数据来源于空中同一批合作目标的雷达航迹和 ADS-B 航迹的量测数据, 目标在空中近似做直线运动, 如图 2 所示。其中, 雷达航迹包括 27 个采样点, ADS-B 航迹包括 105 个采样点。为了估计雷达系统误差, 首先将 ADS-B 航迹数据从地理坐标系转换到雷达的局部坐标系, 并将雷达航迹数据从雷达极坐标系转换到雷达直角坐标系。

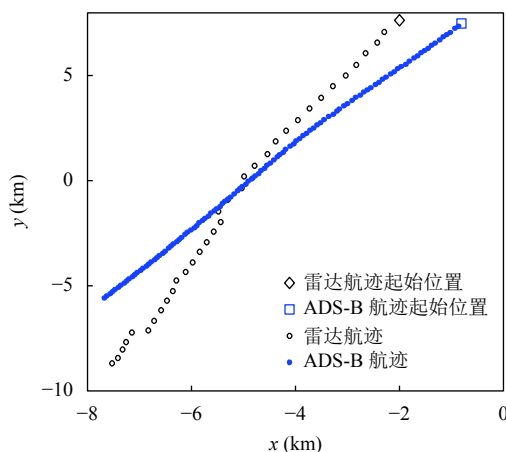


图 2 雷达和 ADS-B 航迹数据

经过转换后的雷达航迹和 ADS-B 航迹的量测数据如图 2 所示。由图 2 可知, 尽管存在系统误差, 但是

雷达航迹和 ADS-B 航迹的量测数据都近似分布于所对应直线的两侧, 特别是 ADS-B 航迹。这是因为 ADS-B 数据集以 GPS 为基础, 定位精度高, 能够满足雷达对系统误差估计的要求^[15]。因此, 可以通过计算雷达航迹和 ADS-B 航迹对应直线的夹角, 将其作为雷达方位角系统误差估计的粗值, 用于补偿雷达航迹数据的方位角。由图 2 可以看出, ADS-B 航迹采样时刻比雷达更密集。为了对雷达航迹进行配准, 需要以雷达航迹数据的采样时刻为基准, 计算 ADS-B 航迹在对应时刻的插值, 再利用计算得到的插值序列构建新的 ADS-B 航迹数据, 用于估计雷达系统误差。经过插值处理后, 新的 ADS-B 航迹与雷达航迹的采样时刻相同, 采样点数也为 27 个。

图 3 给出经过时间插值的新 ADS-B 航迹和雷达航迹数据, 以及对新 ADS-B 航迹数据和雷达航迹数据的拟合直线。经过直线拟合后, 可以计算得到两条直线的夹角为 161.7 mrad, 用于补偿雷达航迹数据的方位角, 经过方位角补偿后的新雷达航迹数据也如图 3 所示。由图 3 可知, 对于雷达航迹和 ADS-B 航迹, 都近似分布于拟合直线的两侧, 经过方位角补偿的雷达航迹数据在平面直角坐标系中更接近 ADS-B 航迹。

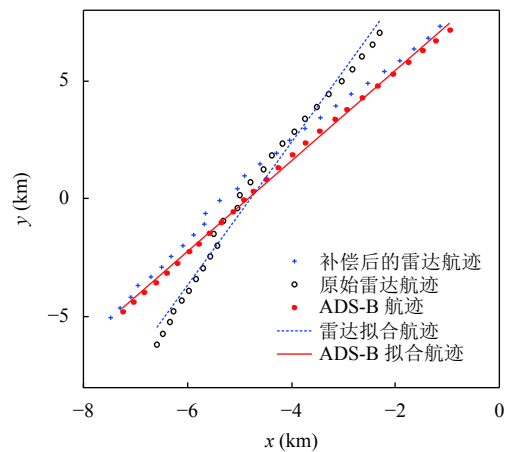


图 3 预处理后的雷达和 ADS-B 航迹数据

图 4 是采用系统误差配准后的雷达航迹。由图 4 可知, 采用 FL、LS 以及 FL-LS 三种估计方法配准后的雷达航迹都十分接近 ADS-B 航迹, 证明三种系统误差估计方法都是有效的。为了更好地说明三种方法的性能, 图 5 列举了第 5 至第 9 个采样时刻的三种雷达航迹的量测数据。从图 5 可知, 按照到 ADS-B 航迹点距离从小到大依次是分别是经由 FL-LS、LS 和 FL 配

准后的雷达航迹, 从而说明 FL-LS 方法的估计精度最高, 其次是 LS 方法, 最后是 FL 方法.

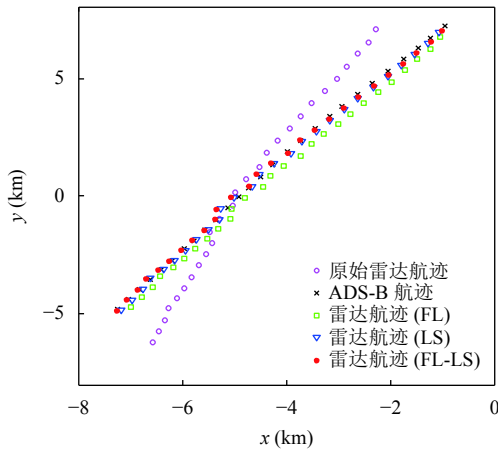


图4 配准后的雷达航迹

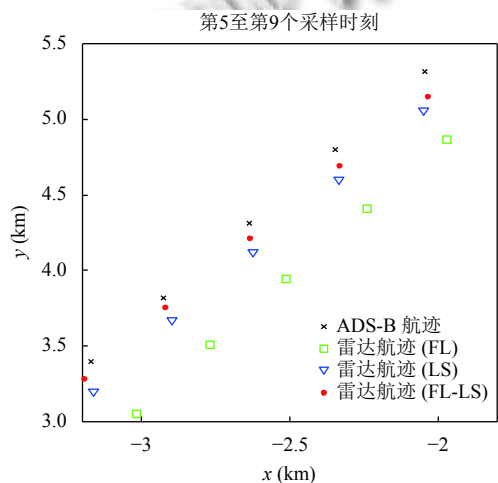


图5 部分配准后的雷达航迹

为了更直观地比较三种方法的性能, 图6和图7分别给出三种配准后雷达航迹在每一时刻斜距离估计误差和方位角估计误差. 由图6可知, 在大部分采样时刻, FL-LS方法的斜距离配准效果要优于LS方法和FL方法, 而LS方法又要优于FL方法. 类似地, 由图7也可以得到同样的结论, 方位角配准性能从低到高依次是: FL方法、LS方法和FL-LS方法. 三种估计方法均较大地降低了方位角误差. 特别地, 尽管FL方法方位角估计结果比LS方法略差, 但已十分接近, 从而也说明从图形学的角度分析和估计雷达系统误差也是一种简单、有效的方法, 为以后进一步分析雷达系统误差估计问题提供了一种很好的解决思路.

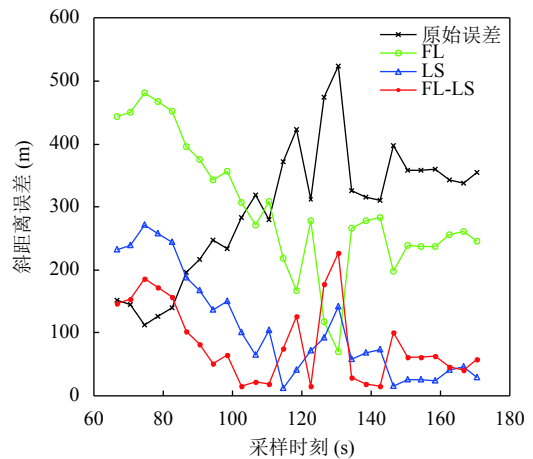


图6 斜距离误差

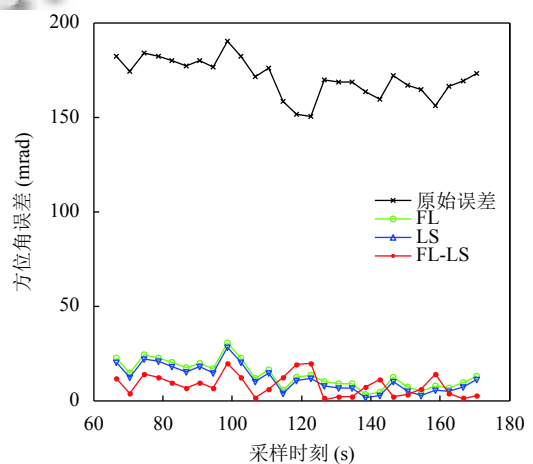


图7 方位角误差

最后, 表1给出了三种系统误差估计的结果, 表2给出配准后雷达航迹的平均误差 (以 ADS-B 航迹数据为真值). 与上述系统误差性能的分析结果类似, 由表2可知, 无论是在斜距离还是方位角上, 三种估计方法的性能从高到低依次是 FL-LS 方法、LS 方法和 FL 方法. 针对方位角误差, 三种系统误差估计方法都能较大地提高雷达航迹的方位角的精度. 为了定量说明配准后雷达航迹的精度情况, 分别定义斜距离配准性能指标和方位角配准性能指标:

$$\begin{cases} \eta_r = \frac{\varepsilon_{r0} - \varepsilon_r}{\varepsilon_{r0}} \times 100\% \\ \eta_\theta = \frac{\varepsilon_{\theta0} - \varepsilon_\theta}{\varepsilon_{\theta0}} \times 100\% \end{cases} \quad (20)$$

其中, ε_r 、 ε_{r0} 分别为配准后雷达航迹的斜距离平均误差和配准前雷达航迹的平均误差, ε_θ 、 $\varepsilon_{\theta0}$ 分别为配准后雷达航迹的方位角平均误差和配准前雷达航迹的方

位角平均误差, η_r 、 η_θ 定义为配准性能指标。

在此基础上, 表 3 给出了三种估计方法的配准性能指标情况, 从而能够定量地分析它们的配准性能。由表 3 可知, 经过配准处理后, FL-LS 方法、LS 方法能够较大地降低雷达航迹的斜距离平均误差, 且 FL-LS 方法优于 LS 方法, 斜距离平均距离误差降低了 71.7%。FL 方法对雷达航迹的斜距离平均误差改善不明显, 效果不好, 仅降低 0.2%。另外, 三种方法都能较大地降低雷达航迹的方位角平均误差, 其中 FL-LS 方法最好, 其次是 LS 方法, 最后是 FL 方法。FL 方法对雷达航迹的方位角平均误差降低了 52.7%。因此, 无论是对斜距离还是方位角, FL-LS 方法的配准性能均是最好。

表 1 系统误差估计结果 (单位: m、mrad)

方法	FL	LS	FL-LS
斜距离系统误差	296.8	382.9	297.4
方位角系统误差	160.3	161.8	9.7

表 2 雷达航迹的平均误差 (单位: m、mrad)

方法	未配准	FL	LS	FL-LS
斜距离平均误差	296.8	296.1	107.3	84.1
方位角平均误差	170.8	115.2	114.5	80.8

表 3 配准性能指标

方法	未配准	FL(%)	LS(%)	FL-LS(%)
斜距离平均误差	—	0.2	63.8	71.7
方位角平均误差	—	32.6	33.0	52.7

4 结束语

本文首先分析了传统系统误差配准方法的优点和不足。在此基础上, 针对两坐标雷达系统误差估计问题, 提出一种联合 ADS-B 的最小二乘雷达系统误差估计方法。在提出方法中, 首先对雷达航迹和 ADS-B 航迹的量测数据进行预处理, 包括通过坐标转换建立统一的配准空间, 采用插值方法构造新的 ADS-B 航迹, 以及对雷达航迹数据的航向角进行补偿。经过预处理后, 能够一定程度上降低雷达量测数据的误差。然后, 采用最小二乘算法估计雷达系统误差。通过实测数据实验结果证明, 相对传统直线拟合方法和最小二乘方法, 提出方法能够更有效、更准确地估计雷达系统误差。经过提出方法配准处理后, 雷达航迹数据的平均斜距离误差和方位角误差分别降低了 71.7% 和 52.7%。

在下一步工作中, 我们将考虑目标运动、以及雷达和 ADS-B 采样时间的不确定等因素, 并结合实测数据, 对 ADS-B 的雷达系统误差估计问题进一步分析和研究, 从而更准确地估计雷达系统误差。特别是针对目标非直线航迹数据的情况, 对本文提出方法进行改进, 以提高方法的鲁棒性。

参考文献

- 何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论与应用. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- Fan E, Xie WX, Liu ZX. Maneuvering target tracking using fuzzy logic-based recursive least squares filter. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014, 2014: 53. [doi: 10.1186/1687-6180-2014-53]
- Li XB, Fan E, Shen SG, *et al.* Fuzzy probabilistic data association filter and its application to single maneuvering target. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016, 2016: 102. [doi: 10.1186/s13634-016-0401-8]
- Zheng ZW, Zhu YS. New least squares registration algorithm for data fusion. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1040–1016.
- 董云龙, 何友, 王国宏, 等. 基于 ECEF 的广义最小二乘误差配准技术. 航空学报, 2006, 27(3): 463–467. [doi: 10.3321/j.issn:1000-6893.2006.03.023]
- 张宇, 王国宏, 陈垒, 等. 多目标雷达组网实时系统偏差稳健估计研究. 电光与控制, 2013, 20(2): 5–7, 27. [doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2013.02.002]
- 修建娟, 王光源, 何友. 机动目标自适应跟踪与系统误差配准. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(2): 19–23.
- Qi L, He Y, Dong K, *et al.* Multi-radar anti-bias track association based on the reference topology feature. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(3): 366–372.
- Qi L, Dong K, Liu Y, *et al.* Anti-bias track-to-track association algorithm based on distance detection. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 11(2): 269–276.
- 齐林, 刘瑜, 任华龙, 等. 空基多雷达航迹抗差关联算法. 航空学报, 2018, 39(3): 221–229.
- 董凯, 王海鹏, 刘瑜. 基于拓扑统计距离的航迹抗差关联算法. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 50–55. [doi: 10.11999/JEIT140244]
- Karniely H, Siegelmann HT. Sensor registration using neural networks. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(1): 85–101. [doi: 10.1109/7.826314]
- 宋文彬. 基于合作目标与非合作目标的一体化空间配准新

- 算法. 电讯技术, 2013, 53(11): 1422–1427. [doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2013.11.005)]
- 14 McCallie D, Butts J, Mills R. Security analysis of the ADS-B implementation in the next generation air transportation system. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2011, 4(2): 78–87. [doi: [10.1016/j.ijcip.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2011.06.001)]
- 15 李鹏飞, 郝宇, 费华平, 等. 基于多直线融合的雷达误差标定算法研究. *雷达科学与技术*, 2017, 15(6): 682–686. [doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.019)]
- 16 埃伯哈德·蔡德勒. 数学指南: 实用数学手册. 李文林, 译. 北京: 科学出版社, 2018.

www.c-s-a.org.cn

www.c-s-a.org.cn