

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ECEP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