# 基于 ADS-B 数据的一次雷达系统误差配准方法

## 张召悦,黄诚昊

(中国民航大学空中交通管理学院,天津,300300)

**摘要** 针对大误差一次雷达测量过程中雷达配准方法的精度提升问题,分析了一次雷达误差分布特性,以广播式自动相关监视系统的航迹数据为真值,提出了基于改进轨迹跟踪滤波的实时雷达配准方法。采用点云配准方法中随机抽样一致性的迭代最近点法,对基于期望增加模型的变结构交互式多模型算法中的偏置函数进行了改进,有效减少了随机误差在配准过程中的影响,并获得最优的偏置参数,以提升大误差一次雷达配准的精度。算例分析结果表明,该方法配准后可使所选一次雷达俯仰角平均绝对误差降低至 0.04°,方位角平均绝对误差降低至 0.07°,为雷达系统误差配准提供新方法支撑。

关键词 广播式自动相关监视;一次雷达配准;航空器轨迹滤波;点云配准

**DOI** 10. 3969/j. issn. 2097-1915. 2024. 01. 013

中图分类号 TN953 文献标志码 A 文章编号 2097-1915(2024)01-0083-07

## Research on Error Registration Method for Primary Radar System Based on ADS-B Data

## ZHANG Zhaoyue, HUANG Chenghao

( College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract** In order to improve the accuracy of the radar registration method in the process of large error primary radar measurement, taking the track data of the broadcast automatic correlation monitoring system as the true value, the characteristics of the primary radar error distribution are analyzed, and a real-time radar registration method is proposed based on the improved track tracking filter. This method is intended to improve the bias function in the variable structure interactive multi-model algorithm (EMA-IMM) based on the expected increase model by adopting the iterative nearest point method (RANSAC-ICP) of random sampling consistency in point cloud registration method, effectively reducing the influence of random errors in the registration process, obtaining the optimal bias parameters, and improving the accuracy of large error primary radar registration. The results show that the average absolute error of pitch Angle and azimuth Angle can be reduced to 0.04° and 0.07° respectively, and this provides a new method for radar system error registration.

**Key words** automatic dependent surveillance-broadcast ; primary radar registration; aircraft trajectory filtering ; point cloud registration

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB160101);中央高校基本科研业务费(3122020052)

作者简介:张召悦(1985-),男,山东宁津人,副教授,研究方向为航空设备与系统研发、民航交通信息工程。E-mail:zy\_zhang@cauc.edu.cn

**引用格式:**张召悦,黄诚昊.基于 ADS-B 数据的一次雷达系统误差配准方法[J].空军工程大学学报,2024,25(1):83-89. ZHANG Zhaoyue, HUANG Chenghao. Research on Error Registration Method for Primary Radar System Based on ADS-B Data[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(1):83-89.

一次雷达和广播式自动相关监视系统(automatic dependent surveillance broadcast, ADS-B)是 空中监视的主要手段,两者对目标监视原理不同, ADS-B只能监视合作目标,而雷达可实现合作与非 合作目标的全空域监视。虽然在民航领域一次雷达 已逐渐被二次雷达和 ADS-B 所替代,但在军用领域 及航空进近区域依旧是主要的监视手段。大部分一 次雷达在出厂前会进行系统误差的配准,但雷达的 系统误差会随着时间的推移而累积<sup>[1]</sup>,长时间使用 后需再次进行系统误差配准。因此研发一套高效的 一次雷达系统误差配准方法具有重要的现实意义。

当前主要的标校方案包括静态有源标校方案与 动态标校方案,前者采用信标机进行标校,其操作复 杂且成本较高。后者以靶标(航空器)为合作目标, 在靶标(航空器)上加装差分全球定位系统(differential global position system, DGPS)以提升航空 器的定位精度,并记录 DGPS 的定位数据作为标校 真值。该方法存在诸多不利因素,如调度靶标受航 线、空域限制,导致校准周期长、花费成本高、实施难 度大等。

在国际民航组织(international civil aviation organization, ICAO)的推动下,多数民航飞机均已装备 ADS-B IN/OUT 设备并实时广播本机的位置等参 数,这些信息来自机载全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS),可靠稳定、易于选 取<sup>[2]</sup>,精度一般是普通雷达的3倍以上,可间接或直 接作为真值来配准雷达系统误差<sup>[3-4]</sup>。

当前雷达系统误差的配准研究主要集中在2个 方向:①基于雷达系统误差在空间中分布均匀假设 下的常值函数配准方法,如最大似然配准[5-6]、最小 平方准则[7]、基于傅里叶变换的方法[8]、实时质量控 制法<sup>[9]</sup>等;②基于雷达系统误差在空间中分布不均 匀假设下的配准方法,如曲面网格逼近方法[10]、拟 合分区配准[11]、基于数据驱动的配准方法[12]等。 上述方法大多忽略了随机误差对雷达系统误差配准 的影响[13],将整体误差直接进行误差分析与配准工 作,对 A/C 模式的二次雷达配准十分有效。但是一 次雷达配准时,由于存在较大的随机误差及轨迹刚 性偏转现象,传统方法无法有效提升雷达监视精度。 对此研究人员引入了卡尔曼滤波算法来减小随机误 差并进行系统误差配准,但传统卡尔曼滤波算法通 常需要加入偏置函数来抵消雷达系统误差,偏置函 数的精确性就决定了雷达系统误差的配准精度。

针对上述问题,本文基于雷达系统误差在空间 中分布均匀的假设下提出了一种基于点云的跟踪滤 波配准方法。

## 1 航迹点时空对准方法

#### 1.1 监视数据坐标转化

卡尔曼滤波作为线性滤波器,需要在笛卡尔坐标系下进行计算。因此需将极坐标系(azimuth elevation range, AER)中的雷达航迹数据与空间大地 坐标系(geographic coordinate system, GEO)中的 ADS-B航迹数据转化到同一空间直角坐标系(earth centered earth fixed, ECEF)中。

#### 1.2 航迹点时空对准

因一次雷达数据缺少关键的航班号信息,无法 直接进行系统误差配准研究,需将雷达航迹与对应 的 ADS-B 航迹相关联。如果两条航迹在一定时间 内有足够多的航迹点可被中心点聚类算法划分为同 一簇,则这两条航迹表征的是同一个目标。基于此 原理,提出了一种基于中心点聚类的航迹关联方法, 该方法以航空器航迹点的时间戳和航空器飞行高度 为粗筛选条件:

步骤 1 对将要进行中心点聚类的航迹点进行 粗筛选,以雷达设备的扫描周期  $t_{\text{period}}$  为筛选范围, 雷达航迹点高度与 ADS-B 航迹点高度的差值阈值 为  $H_{\text{lim}}$ 。假设选取的雷达航迹点时间戳为  $T_r$ ,其对 应的高度为  $H_r$ ,ADS-B 航迹点的时间戳为  $T_{a,i}$ ,其 对应的高度为  $H_{a,i}$ 。筛选 ADS-B 航迹点集中时间 戳满足 $|T_r - T_{a,i}| < t_{\text{period}}$  且飞行高度满足 $|H_r - H_{a,i}| < H_{\text{lim}}$  的航迹点。

**步骤 2** 采用中心点聚类算法,将步骤 1 通过 粗筛选的所有 ADS-B 和雷达目标点进行聚类。在 *K*-means 算法中,异常航迹点将对算法产生较大影 响,因而选取 *K*-Medoids 方法作为 ADS-B 和雷达 航迹点的航迹关联算法。

将雷达与 ADS-B 航迹点的集合作为中心点聚 类算法的输入,以不同 ADS-B 航班号的数量 K 作 为输出,使每个航迹点与其所属簇的中心航迹点距 离总和最小。随机选择 K 个航迹点作为初始中心 点,反复用其他航迹点(非中心点)代替中心航迹点, 直至迭代至最优的中心航迹点。

对迭代完成的 K 个航迹点簇进行分析,判断 T,时刻该雷达点归属的航迹簇,并检验该簇中 ADS-B 航迹点是否都属于同一个航班号,若检验结 果为真,则将该雷达航迹点与对应的 ADS-B 航迹形 成关联关系。

步骤 3 引入航迹关联百分比(track match percentage, TMP)概念, 如果某一时刻  $T_r$ , 第 i 条

雷达航迹的航迹点和第*j*条 ADS-B 航迹的航迹点 可被中心点聚类算法分为同一簇,则第*i*条雷达航 迹中存入1个第*j*条 ADS-B 航迹的航班号,一段时 间内求出第*i*条雷达航迹中存入的各个航班号的占 比即为 TMP,TMP(*i*,*j*)=max{TMP(*i*,*n*),*n*=1, 2,…,*n*}。当 TMP(*i*,*j*)≥85%时,则认为第*j*条 ADS-B 航迹与第*i*条雷达航迹为关联状态。

**步骤 4** 由于雷达数据和 ADS-B 数据更新周 期不同,对雷达系统误差分析时,应将两者的航迹数 据进行时间戳同步,获得相同时刻标度下的航迹数 据。由于 ADS-B 数据的更新频率约为雷达数据更 新频率的 2~4 倍,因此以雷达数据的时间戳为基 准,对 ADS-B 的航迹数据进行插值,完成航迹数据 的时间戳同步。3 次样条插值法的插值次数较低, 待定系数易求解,插值速度较快,且在局部拟合中插 值函数的光滑性较好,故选择该方法<sup>[14]</sup>。

### 1.3 雷达误差分布模型

雷达数据和 ADS-B 数据进行时空对准后,将 ADS-B 航迹数据转化至以雷达为中心的极坐标系 中,计算雷达与 ADS-B 数据的测角误差(误差统计 为直方图)。对测角误差直方图进行分析,结果见图 1。测角的整体误差(随机误差+系统误差)并不呈 现为正态分布,文献[15]发现该误差服从某一自由 度的 t 分布。但整体贴合度依旧不高,因此结合雷 达系统误差和随机误差的混合影响因素,考虑采用 混合高斯分布模型反映直方图的特征;

$$p(x) = \sum_{k=1}^{K} \alpha_{k} N(\mu_{k}, \Sigma_{k}), \sum_{k=1}^{K} \alpha_{k} = 1$$
(1)

式中: $N(\mu_k, \Sigma_k)$ 为正态分布; $\alpha_k$ 为混合高斯分布的 权值;K为单高斯模型数量。在图 1 中可以看出, 混合高斯分布模型对雷达测角误差直方图有较好的 拟合效果。整体误差呈现混合高斯分布,反映出雷 达误差存在多个误差源,传统的配准方法忽略了随 机误差而重点考虑系统误差的方法,在大误差一次 雷达的配准研究中并不适用。



将误差源分离,并对不同误差源采用不同的配 准方法较为合理,因此本文提出了一种改进的轨迹 跟踪滤波配准方法。轨迹跟踪滤波算法可减小大误 差一次雷达测量过程中随机误差对修正雷达系统误 差的影响,减小雷达航迹中因随机误差而产生的航 迹波动,而点云配准算法则可预先计算轨迹跟踪滤 波算法中的偏置函数或补偿函数,进而提升跟踪滤 波算法在进行雷达配准时系统误差的配准精度。

## 2 改进的雷达轨迹跟踪配准算法

#### 2.1 偏置函数的确定

为确定卡尔曼滤波算法进行误差配准时最优偏 置函数,本文将点云配准算法中的迭代最近点法 (iterative closest point,ICP)引入卡尔曼滤波算法 中,ICP算法通过不断迭代寻找雷达观测数据与 ADS-B参考数据之间最小平均误差的刚性变换矩 阵,从而获得最优的偏置函数。

为避免因位姿初始值选择不当导致 ICP 算法 陷入局部最优的情况,引入随机抽样一致性算法 (random sample consensus,RANSAC)进行粗匹 配。RANSAC 算法通过不断选择随机点对,并记录 最优的匹配点对集合,获得可靠的变换矩阵作为 ICP 算法中的位姿初始值。

基于点云配准算法获得偏置函数主要分为 5 步:①确定一段历史数据中的雷达航迹点(待配准点 云)与 ADS-B 航迹点(基准点云);②确定 RANSAC 算法的迭代次数、两点的阈值距离、内点的占比,采 用 RANSAC 算法将雷达航迹与 ADS-B 航迹进行 粗配准,输出初始变换矩阵;③将 RANSAC 粗配准 后输出的变换矩阵作为 ICP 算法的初始值,ICP 配 准中通过 K-D 树查找雷达航迹与 ADS-B 航迹之间 的对应点,并迭代求解目标函数;④最终输出 ICP 精配准后的位姿变换矩阵,将得到的位姿变换矩阵 作为粗偏置函数;⑤将一段历史数据中所有的 ADS-B 航迹与雷达航迹按上述方法求解粗偏置函 数,并存入集合,利用遗传算法求解偏置函数集合中 最优的偏置函数。

#### 2.2 跟踪滤波算法

在进行机动目标跟踪滤波时,为快速适应机动 目标,需实时切换不同的运动模型,然而单模型的运 动模式是固定的,不具备实时调整的可能性,因此使 用固定结构交互式多模型算法时,建立多个模型并 存储在模型集合中,每个模型代表一种飞机的运动 模式。为了保证跟踪模型可以更加匹配机动目标, 需要在模型集合中储存大量飞机运动模型,然而这 势必会导致跟踪精度的降低[16]。

因此,需选取变结构交互式多模型算法来对雷 达探测目标进行跟踪滤波,减少随机误差带来的影 响。该算法的关键在于能够动态地调整模型的结构 和参数,以适应目标在不同模式之间跳变的情况。 因此,本文采用基于期望增加模型的变结构交互式 多模型算法(expected-mode augmentation for multiple-model estimation, EMA),来抑制雷达航迹中 的随机误差。

假设飞机运动模型集为 M,通过扩展期望模型,找到更好的描述目标运动状态的运动模型 C,使得模型集  $E = M \cup C$ ,模型 E 称为期望模型集。一般模型集  $M_k$  是随着时刻的变化而变化的,通过应用模型自适应算法,新的模型集为:  $M_k = E_k \cup (M_{k-1} - E_{k-1}), M_k$  为k 时刻的模型集,  $E_k$  为k 时刻的扩展期望模型集,  $M_{k-1}$  为k-1 时刻的模型集。

模型集自适应分为两部分,第一部分为模型之间的切换,模型切换过程中假设 M 中各模型之间的相互转换服从齐次的马尔科夫过程;第二部分为期望模型扩展,期望模型扩展将生成一个新的期望模型来代替原有的期望模型。

模型集自适应步骤如下:

步骤1 计算有效模型的模型概率和似然函数。

假设在 k-1 时模型组  $M_{k-1}^{i}$  的中心模型为  $m_{k-1}^{i}$ ,边界模型为  $M_{k-1}^{e}$ , $m_{k-1}^{a}$  为 k-1 时刻的扩展 期望模型。计算 k 时刻模型集  $M_{k-1}$  的每个模型的 似然函数  $\Lambda_{k}^{i}$  和条件概率  $u_{k+1}^{l}$ :

$$\Lambda_{k}^{l} = p\{z(k) \mid m_{l}(k), M_{k-1}, Z^{k-1}\}$$
(2)

$$u_{k|k}^{l} = p\{m_{k}^{l} \mid M_{k-1}, Z^{k}\} = \frac{\Lambda_{k}^{l} u_{k|k-1}^{l}}{\sum \Lambda_{k}^{n} u_{k|k-1}^{n}} \quad (3)$$

**步骤 2** 判断是否进行模型切换。若同时满足 式(6)~式(7),则模型从  $m_{k-1}^i$  切换到模型  $m_k^j$ ,同 时需要初始化新的模型组:

$$\Lambda_k^j = \max_{m_i \in M_{k-1}} \{\Lambda_k^i\}$$
(4)

$$p\{m_{j} | Z^{k}\} = \max_{m_{i} \in M_{k-1}} \{p\{m_{i} | Z^{k}\}\}$$
(5)

式中: $m_j \in M_{k-1}^e$ 。

由于目标飞机具有随机的运动模式,而期望是 由已知的模式求得的。所以,期望模型只能进行近 似运算,通过对当前有效模型组进行概率加权得到 期望模型 m<sup>*i*</sup><sub>*k*</sub><sup>[17]</sup>。

$$m_k^a \approx \sum_{m_k^i \in M_k} m_k^i u_{k|k}^i$$
(6)

将 RANSAC-ICP 点云配准获得的最优偏置函数 b,代入单一模块的 Kalman 滤波器中。

x(k)=Fx(k-1)+b+w(k-1)
 式中:x(k)为系统的状态向量;F为状态转移方程;
 b为偏置函数;w(k-1)为过程噪声。

## 3 算例分析

为验证上述算法的性能,本文进行了仿真实验 和实测验证。图2为雷达误差配准的流程图。



图 2 雷达误差配准流程图

#### 3.1 仿真验证

为验证本算法的可靠性,采用计算机仿真的方 法对本文文献[6]、文献[7]和 Alpha-beta 滤波器的 算法进行对比。ADS-B 数据源于华东某地区的实 测数据,雷达仿真数据通过 ADS-B 航迹数据增加刚 性偏移量产生。为保证实验的可靠性,建立 2 组仿 真场景,分析算法的性能。

3.1.1 场景 1:二次雷达 A/C 模式的监视场景

X 方向添加系统误差 200 m,Y 方向添加系统 误差 200 m,Z 方向添加系统误差 400 m。X、Y、Z 方向分别添加均值为 50 m 的高斯噪声。图 3 为该 场景的仿真结果。







X 方向添加系统误差 200 m,Y 方向添加系统 误差 200 m,Z 方向添加系统误差 400 m。X 方向 添加均值为 50 m 的高斯噪声,Y 方向添加均值为 100 m 的高斯噪声,Z 方向添加均值为 100 m 的高 斯噪声。添加随机生成的旋转误差 0.2°~0.3°。图 4 为该场景的仿真结果。

各方法计算效率分别为:文献[6]为 0.20 s,文 献[7]为 2.08 s,α-β 滤波为 0.035 s,本方法 1.88 s。 此处的计算时间为处理约 90 条轨迹所花费的时间。

在场景1的仿真结果中,4种配准方法在配准的精度上都具有较好的表现,尤其是文献[6]、文献 [7]中的方法,在对 A/C 模式二次雷达的配准中,都 具有较高的配准精度。本文提出的方法在测距精度 上略低于前2种方法,但在测角精度上具有较好的 配准效果。





在场景2的仿真结果中,文献[6]、文献[7]和 Alpha-beta滤波器在配准的精度上均有降低,尤其 是文献[6]中的方法因其不具备滤波器功能,在出现 大误差场景时精度出现大幅度降低。文献[7]中的 方法在大误差的场景下,精度也出现了降低,主要归 因于大误差的场景往往伴随着雷达轨迹出现刚性偏转,对刚性偏转无法较好的配准。本文提出的配准 方法能在大误差的场景下依旧保持较高且稳定的配 准精度,主要得益于卡尔曼滤波器中偏置矩阵的优 化与卡尔曼滤波器本身对于噪声轨迹的优化。

在运算时间效能上, Alpha-beta 滤波的方法在 测距精度上稍弱于其他 3 种配准方法, 但在运算时 间效能上, Alpha-beta 滤波器作为一种构造简单的 滤波器, 在时间性能上大幅度领先于其他方法, 更加 适合于工程应用。文献[7]的方法大部分时间用于 实时计算变换矩阵 H, 而本文提出的方法通过历史 轨迹数据率先进行了最优偏置矩阵的计算, 因此本 文提出的方法比文献[7]方法花费的时间短。

### 3.2 实测分析

本次实测使用的雷达精度参考标准如下:方位 角精度为 0.3°,测高误差为 800 m,测距误差为 60 m,是一种大误差的一次雷达。该雷达测角误差较 大,且探测的目标距离在 100 km 左右,因此俯仰角 度的轻微误差都会导致几百米的测高误差。

本实验首先对该雷达的历史数据进行分析,利 用 RANSAC-ICP 算法获得卡尔曼滤波算法的最优 偏置函数,同时复现文献[6]、文献[7]、α-β滤波器 的雷达配准算法与本算法作对比。其中文献[7]采 用了一种实时动态的卡尔曼滤波算法,采用变换矩 阵 H 来进行偏置或状态补偿。文献[6]采用了最大 似然估计来进行雷达系统误差的配准。Alpha-beta 滤波器计算效率高,是一种偏向工程的配准方法。 图 5 为某一时段的实测雷达数据配准结果。





在俯仰角的配准中,不具备滤波器功能的文献 [6]与滤波性能较低的 α-β 滤波器配准结果并不理 想。这是因为该雷达的大误差主要反映在俯仰角测 量精度较低,导致俯仰角噪声和随机误差较大。而 基于卡尔曼滤波算法的2类方法都保持了理想的配 准结果,其归因于卡尔曼滤波算法对于随机误差具 有较好的抑制作用。

在方位角的配准中,本文方法与文献[7]方法相 比,具有更好的配准精度,这是因为文献[7]中获得 的变换矩阵 H 来自同一时段下周围航空器的航迹 偏移数据,该小数据量的估计方法,提升了配准方法 的实时性,但牺牲了配准方法的准确性。本文方法 一部分基于文献[7]的思想,利用卡尔曼滤波降低随 机误差对雷达配准的影响,同时又对此算法提出改 进,提前对雷达的历史数据进行分析,借助点云配准 思想来确定最优的偏置矩阵,在配准过程中实时性 与准确性都优于传统卡尔曼滤波算法。

#### 3.3 结果分析

对该型号雷达收到的大量雷达航迹实验验证的 结果见表1。处理效率为每处理100条轨迹所花费 的时间。

实测分析符合雷达精度的参考标准。从表1中 可以得出 α-β 滤波器虽然计算速度最快,但同时也 损失了一部分精度作为代价。文献[6]的优势在于 不需要历史数据做支撑,可直接投入雷达配准的应 用中,但在大误差一次雷达的配准中修正精度和修 正速度均低于本文的方法。文献[8]的修正方法在 修正波动较小的方位角时,修正效果较好,且计算速 度较快,但因不具备滤波器功能,在波动较大的俯仰 角修正时,得不到较好的修正结果。通过本文提出 的方法修正后该雷达俯仰角精度提升至 0.04°,方 位角精度提升至 0.07°,相较于文献[7]、文献[6]和  $\alpha$ - $\beta$ 滤波器的方法,精度得到较好的提升。同时与 同类型的文献[7]方法相比,具有较高的计算效率。 因此本文提出的方法在配准大误差一次雷达时,具 备更好的配准效果。

	测距平均 绝对误差/	俯仰角 平均绝对	方位角 平均绝对	处理
	m	误差/(°)	误差/(°)	X4=/8
参考精度	60.00	0.30	0.30	
实测精度	51.56	0.24	0.18	
文献[7]	58.44	0.09	0.07	2.23
文献[6]	55.26	0.19	0.07	0.22
α-β滤波	53.69	0.18	0.13	0.04
本方法	52.81	0.04	0.07	2.07

表1 各方法修正精度结果对比

## 4 结语

针对一次雷达系统误差配准问题,本文首先采 用中心点聚类对雷达数据和 ADS-B 数据进行航迹 匹配,其次分析雷达误差的分布特征,发现雷达误差 呈现混合高斯分布的特性,验证了雷达误差由多种 误差源构成。同时针对传统卡尔曼滤波配准方法忽 略了偏置函数或补偿函数的问题,本文提出了改进 EMA-IMM 的配准方法。该方法利用 RANSAC-ICP 算法来确定最佳的卡尔曼滤波偏置函数或补偿 函数。研究结果表明,该算法可以提高大误差一次 雷达监视定位的精度,具有实际的工程应用价值。 后续的研究将集中于 ADS-B 数据的精度分析,以满 足高精度雷达标定需求。

#### 参考文献

- [1] 姜佰辰,孙璐,周伟,等. 基于 AIS 的对海雷达多目
   标联合误差估计方法[J].火力与指挥控制,2017,42
   (9):25-29,33.
- [2] RTCA DO-260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcast (TIS-B) [S]. Washington DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2009.

- [3] 张召悦. 空管监视技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [4] 张涛,唐小明,金林. ADS-B用于高精度雷达标定的 方法[J]. 航空学报,2015,36(12):3947-3956.
- [5] LIN X, BAR-SHALOM Y, KIRUBARAFEB T. Multisensor Multitarget Bias Estimation for General Asynchronous Sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 899-921.
- [6] SHANG J, YAO Y. Approach of System Error Registration for Two-Station Coast Radars for Sea Surface Monitoring[J]. The Journal of Engineering, 2019 (21): 7721-7725.
- [7] 吴振亚, 王明辉, 张瑞平, 等. 一种基于 ADS-B 的雷 达误差实时融合校正算法[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 102-106,115.
- [8] 何友,宋强,熊伟.基于傅里叶变换的航迹对准关联 算法[J].航空学报,2010,31(2):356-362.
- [9] LI P, FAN E, YUAN C. A Specific Iterative Closest Point Algorithm for Estimating Radar System Errors
   [J]. IEEE Access, (8): 6417-6428.
- [10] SU C, LI Z. A Meshing Strategy for a Quadratic Isoparametric FEM in Cavitation Computation in Nonlinear Elasticity[J]. Journal of Computational & Applied Mathematics, 2017 (330):630-647.
- [11] 董云龙,黄高东,李保珠.一种非均匀系统误差的雷达分区校准方法[J]. 电光与控制,2020,27(3): 69-74.
- [12] 刘颢,蒲宇清,王海鹏,等. 基于数据驱动的雷达系 统误差估计方法[J]. 指挥与控制学报,2021,7(2): 107-112.
- [13] 刘熹,尹浩,吴泽民,等.无先验关联的雷达系统误差协同配准算法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2013,40(5):6-32.
- [14] SUN M, LAN L, ZHU C G, et al. Cubic Spline Interpolation with Optimal End Conditions[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2023(425):115039.
- [15] 董云龙,黄高东,李保珠,等. 基于 AIS 辅助信息的 对海雷达系统误差分析[J].现代雷达,2020,42(5): 17-23.
- [16] LV R Y, CAI Y Z, DONG, X X. An Adaptive Nonlinear Filter With Missing Measurements Compensation for Manoeuvring Target Tracking [J]. IET Control Theory and Applications, 2022(16): 514-529.
- [17] 林东,王布宏,王振昊.重放攻击下雷达组网系统的目标跟踪性能[J].空军工程大学学报(自然科学版), 2018,19(4):54-58.

(编辑:徐敏)