

文章编号: 1674-8190(2024)02-173-06

基于航迹质量评估的雷达和 ADS-B 数据融合方法

张丹妍, 史达亮, 熊伟

(中国航空工业集团有限公司 雷华电子技术研究所, 无锡 214063)

摘要: 雷达和广播式自动相关监视系统(ADS-B)的数据融合是监视“黑飞”无人机和飞鸟等目标的有效手段,然而两种传感器跟踪性能差异较大且易波动,会导致融合精度下降。提出一种基于航迹质量评估的雷达和 ADS-B 数据融合方法,首先量化评估局部航迹精度、数据更新次数和传感器测量误差对局部航迹质量的影响;其次综合计算局部航迹的质量加权因子,基于分布式融合结构完成异步航迹融合处理;最后通过仿真实验和应用对方法的可行性和有效性进行验证。结果表明:本文提出的融合方法能有效提高融合跟踪精度,在传感器跟踪性能出现波动的情况下,跟踪误差均优于传统航迹融合方法。

关键词: 航迹融合;加权融合;航迹质量;雷达;ADS-B

中图分类号: V355.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.19

Data fusion method of radar and ADS-B based on track quality assessment

ZHANG Danyan, SHI Daliang, XIONG Wei

(Leihua Electronic Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi 214063, China)

Abstract: The data fusion of radar and automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) is the effective method to surveille the 'black flights' and flying birds. However, the tracking performance of the two sensors has large differences and is easy to be fluctuated, which will bring a decline in fusion accuracy. A data fusion method of radar and ADS-B based on track quality assessment is proposed. Firstly, the effects of local track accuracy, data update times and sensor measurement errors on local track quality on corresponding assessment factors are analyzed and quantified. And then, these assessment factors are combined to calculate the quality weighting factors of the local track, and the asynchronous track fusion processing of radar and ADS-B is completed based on the distributed fusion structure. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method is verified with simulation experiment and application. The results show that the proposed fusion method can effectively improve the fusion accuracy, and the tracking errors are better than the traditional algorithms when the sensor tracking performance fluctuates.

Key words: track fusion; weighted fusion; track quality; radar; ADS-B

收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-09-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1600603)

通信作者: 张丹妍(1996-),女,硕士,助理工程师。E-mail: dyzhang_avic@163.com

引用格式: 张丹妍,史达亮,熊伟. 基于航迹质量评估的雷达和 ADS-B 数据融合方法[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 173-178.

ZHANG Danyan, SHI Daliang, XIONG Wei. Data fusion method of radar and ADS-B based on track quality assessment[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 173-178. (in Chinese)

0 引言

近年来,“黑飞”无人机和飞鸟扰航、碰撞飞机事件时有发生,已成为航空器低空飞行时的重大安全隐患^[1-2]。凭借全天候、全天时、探测范围大等突出优势,雷达已成为监视“黑飞”无人机和飞鸟等“低慢小”目标的主要手段之一。然而,随着民用航空的蓬勃发展,低空合作式航空器日益密集,特别是机场附近,对雷达主动探测和跟踪“黑飞”无人机和飞鸟造成了大量的“干扰”。广播式自动相关监视系统(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast,简称 ADS-B)通过解码机载发射机发送的数据,可以实时掌握航空器的位置、速度及航班号等信息,已成为民用航空器普遍安装的空中交通监视系统之一^[3]。充分利用雷达和 ADS-B 的互补优势,进行数据融合和综合监视可以实现对合作式航空器 360°全空域监视,同时实现对前视“黑飞”无人机和飞鸟等“低慢小”目标的重点监视。

雷达和 ADS-B 的数据融合在低空环境监测与防撞领域已经得到了应用,原常弘等^[4]、何彬兵等^[5]以 ADS-B 报告的目标位置信息作为真值,在线监测和评价雷达的测量精度;周游等^[6]通过对 ADS-B 信息和雷达数据进行时空对准,将民航目标从雷达检测中滤除掉,以尽早发现威胁目标。然而,上述文献中都将 ADS-B 数据作为目标真实飞行轨迹,忽略了 ADS-B 数据精度波动可能带来的错误关联融合问题。唐勇等^[7]将空管二次雷达与 ADS-B 进行融合以增强空中交通管制监视的完整性,但是融合处理时仅考虑传感器的测量误差,难以提高目标状态估计的精度。

考虑到“黑飞”无人机和飞鸟等目标机动性强,低空探测环境复杂多变以及传感器性能波动等因素,简单的数据融合方法可能会导致融合后目标跟踪精度下降甚至恶化。针对上述问题,本文提出一种基于航迹质量评估的雷达和 ADS-B 数据融合方法,首先对影响传感器局部航迹质量的各个因素进行分析并量化为相应的评估因子,然后通过综合计算局部航迹质量加权因子对雷达和 ADS-B 进行航迹融合处理,最后通过仿真实验和实际工程应用对该方法的可行性和有效性进行验证。

1 雷达和 ADS-B 的分布式融合结构

雷达和 ADS-B 的融合处理通常采用典型的分布式传感器融合结构,这种分布式结构具有较高的稳定性和可靠性,并能有效压缩计算量,因而成为融合跟踪的首选方案^[8]。

在分布式多传感器融合系统中,各传感器的采样速率、测量误差、目标跟踪误差等参数不尽相同,传统的融合处理方法难以获得较好的融合效果。Alczuk 等^[9]通过伪量测的方法引入伯努利变量对异步系统同步化后完成多传感器数据融合,但方法实时性差、计算量大;Lin H L 等^[10]、Tang T 等^[11]分别对带相关噪声和丢包补偿的异步采样系统通过迭代状态方程的方法进行同步化,并对局部航迹进行协方差加权融合,方法处理简便、实时性好,但是未考虑目标多传感器局部航迹质量的不确定性。

雷达和 ADS-B 的目标探测方式不同,数据处理方式不同,系统测量误差、数据更新周期等也都存在差异。如果同一目标的两条局部航迹中有一条航迹质量较差、跟踪误差较大,则可能会导致融合后的目标跟踪精度反而不如融合前的另一条局部航迹。

为解决上述问题,本文综合考虑两种传感器的测量误差、数据更新周期以及局部航迹跟踪误差不同对融合结果产生的影响,根据传感器局部航迹质量计算加权因子,在融合处理中心通过迭代状态方程实现系统同步,完成异步航迹融合运算,以提高航迹融合的准确性和稳定性。

完成航迹融合处理后,可以得到 3 类目标航迹,分别是融合航迹、未能融合的 ADS-B 航迹以及未能融合的雷达航迹。其中,未能融合的雷达航迹就是在雷达探测范围内但未安装 ADS-B 设备的目标航迹,可以认为这些目标就是研究者想要重点监视的“黑飞”无人机和飞鸟目标。

由于无人机的旋翼转动和飞鸟的翅膀扇动会对雷达回波产生不同的调制效果,从而产生不同的微多普勒特征,对这些特征进行建模和提取可以进一步实现对无人机和飞鸟目标的分类和识别^[1]。

雷达和 ADS-B 的融合处理流程图如图 1

所示。

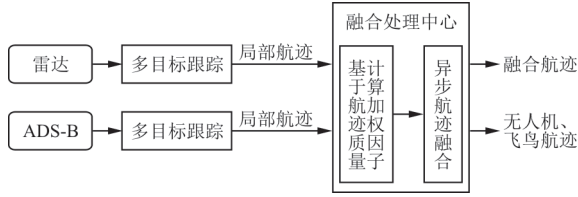


图 1 雷达和 ADS-B 融合处理流程图

Fig. 1 The fusion process flowchart based on radar and ADS-B

2 基于航迹质量评估的异步航迹融合

2.1 基于航迹质量评估的加权因子计算

雷达和 ADS-B 的局部航迹质量可以通过局部航迹精度、航迹更新次数和传感器测量误差等因素进行评估,对这些因素进行分析并量化为相应的评估因子,综合计算得到局部航迹的质量加权因子。

1) 基于局部航迹精度的评估因子

局部航迹精度一般采用 Kalman 滤波产生的目标状态协方差来衡量,状态协方差越小,说明目标状态估计值和真实值越接近,局部航迹精度越高。考虑到“黑飞”无人机和飞鸟等“低慢小”目标机动性强,精确跟踪的难度大,同时雷达跟踪精度会随着目标距离增加、环境杂波增强等因素影响而显著降低,本文采用一种机载多普勒雷达目标跟踪算法^[12]来对雷达探测数据进行跟踪滤波,提高跟踪精度^[13]。

假设 s 表示传感器类别,雷达和 ADS-B 的局部航迹在时刻 k 的位置和速度精度评估因子 $\sigma_{p,s}$ 和 $\sigma_{v,s}$ 可按如下公式分别计算:

$$\sigma_{p,s} = \alpha_1 P_s(x, x) + \alpha_2 P_s(y, y) + \alpha_3 P_s(z, z) \quad (1)$$

$$\sigma_{v,s} = \alpha_4 P_s(v_x, v_x) + \alpha_5 P_s(v_y, v_y) + \alpha_6 P_s(v_z, v_z) \quad (2)$$

式中: $P_s(x, x)$ 为局部航迹 x 方向位置协方差; $P_s(v_x, v_x)$ 为局部航迹 x 方向速度协方差,其他协方差的含义以此类推; $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 为各个协方差的权重调节系数。

2) 基于航迹更新次数的评估因子

雷达和 ADS-B 数据更新周期存在较大差异,

雷达数据更新周期一般为 2~12 s,而 ADS-B 数据更新周期一般小于 1 s,这就会导致两者的航迹更新次数相差较大。而航迹更新次数越多,航迹的稳定性就越高,因此在融合时应该赋予更新次数较多的航迹更大的权重。

假设在融合时刻 T 时,雷达和 ADS-B 局部航迹的更新次数为 C_s ,则航迹更新次数评估因子为

$$U_s = \frac{C_s}{T} \quad (3)$$

3) 基于测量误差的评估因子

ADS-B 的位置和速度测量误差 $\epsilon_{p,A}$ 、 $\epsilon_{v,A}$ 分别来源于接收报文信息中的位置精度类别 N_p 和速度精度类别 N_v 。由于机载 GPS 接收机计算得到的数据不确定度具有很大的波动性,从而造成 ADS-B 报文中的精度类别可能与实际情况不相符。根据文献^[14],在 99% 概率容限下,ADS-B 的实际位置测量误差可以取为

$$\epsilon_{p,A} = \frac{E}{2.448} \quad (4)$$

式中: E 为 ADS-B 的估计位置不确定度,与 N_p 有一一对应关系。

同时,雷达的位置和速度测量误差 $\epsilon_{p,R}$ 、 $\epsilon_{v,R}$ 可根据传感器探测精度转换得到, k 时刻雷达的位置测量误差为

$$\epsilon_{p,R} = \left[\sqrt{R_a^{xx}} \quad \sqrt{R_a^{yy}} \quad \sqrt{R_a^{zz}} \right]^T \quad (5)$$

式中: R_a^{xx} 、 R_a^{yy} 和 R_a^{zz} 分别为 k 时刻目标 x 、 y 和 z 方向的转换量测误差,具体计算可参见文献^[15]。

4) 局部航迹的质量加权因子

基于上述三种评估因子,传感器局部航迹的质量加权因子可以定义为

$$w_{p,s} = \beta_1 \times \frac{1}{\sigma_{p,s} \sum_{s_i} 1/\sigma_{p,s_i}} + \beta_2 \times \frac{1}{\epsilon_{p,s} \sum_{s_i} 1/\epsilon_{p,s_i}} + \beta_3 \times \frac{U_s}{\sum_{s_i} U_{s_i}} \quad (6)$$

$$w_{v,s} = \beta_1 \times \frac{1}{\sigma_{v,s} \sum_{s_i} 1/\sigma_{v,s_i}} + \beta_2 \times \frac{1}{\epsilon_{v,s} \sum_{s_i} 1/\epsilon_{v,s_i}} + \beta_3 \times \frac{U_s}{\sum_{s_i} U_{s_i}} \quad (7)$$

式中: $\beta_1 \sim \beta_3$ 为各个因子的归一化调节系数。

2.2 异步航迹加权融合

利用航迹质量加权因子对雷达和 ADS-B 的局部航迹进行融合,首先将异步的两种航迹进行时间同步。假设雷达和 ADS-B 分别在 T_1 和 T_2 时刻对局部航迹进行更新,在公共时刻 T_3 ,进行雷达和 ADS-B 航迹数据融合。雷达和 ADS-B 的局部航迹从更新时刻到融合时刻的时间差分别为

$$\begin{cases} \Delta T_R = T_3 - T_1 \\ \Delta T_A = T_3 - T_2 \end{cases} \quad (8)$$

利用上述时间差取代滤波器中固定的时间步长,可以得到雷达和 ADS-B 的局部航迹在融合时刻的位置预测值 $X_{p,R}$ 和 $X_{p,A}$,以及速度预测值 $X_{v,R}$ 和 $X_{v,A}$ 。将雷达和 ADS-B 的局部航迹按照对应的加权因子进行加权融合,得到融合后目标的状态估计值为

$$X_p = \omega_{p,R} X_{p,R} + \omega_{p,A} X_{p,A} \quad (9)$$

$$X_v = \omega_{v,R} X_{v,R} + \omega_{v,A} X_{v,A} \quad (10)$$

3 实验结果分析

通过雷达和 ADS-B 数据融合的仿真实验结果以及实际工程应用效果,验证本文提出的基于航迹质量评估的雷达和 ADS-B 数据融合方法的可行性和有效性。

3.1 仿真实验

仿真实验中采集了真实的 ADS-B 航迹数据,通过对航迹数据进行多项式拟合得到平滑轨迹作为目标真实的飞行轨迹^[16]。假设雷达距离测量误差为 15 m,方位角测量误差为 0.2° ,俯仰角测量误差为 0.4° ,速度测量误差为 3 m/s。ADS-B 测量误差依据报文数据的位置精度类别值 N_p 和速度精度类别值 N_v 确定。雷达采样周期设置为 2 s,ADS-B 采样周期为 1 s,蒙特卡洛仿真次数为 50 次。

1) 独立跟踪与融合后的跟踪性能对比

分别使用雷达和 ADS-B 对同一目标进行跟踪,其独立跟踪形成的局部航迹与融合航迹如图 2 所示,可以看出:当目标距离较远时,由于测量误差增大、探测概率降低等影响,雷达的跟踪效果明显变差。而 ADS-B 稳定接收精度较高的报文数据,能保持全过程较准确地跟踪,这就导致两种传感器的局部航迹质量会存在较大的差异。

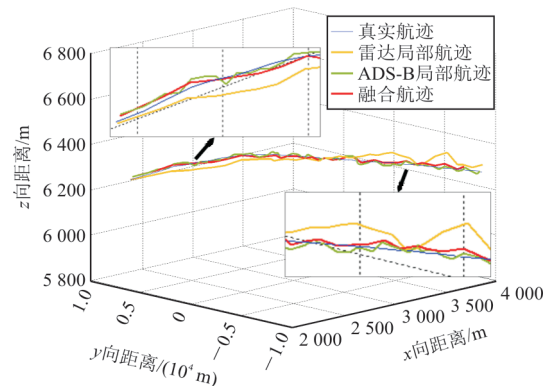


图 2 独立跟踪与融合后的跟踪效果对比
Fig. 2 Tracking result before and after fusion

融合前后航迹的跟踪误差对比如表 1 所示,可以看出:雷达和 ADS-B 独立跟踪目标形成的局部航迹精度相差较大,航迹融合后目标跟踪精度有明显提高,与雷达局部航迹相比,位置精度平均提升 69.7%,速度精度提升 66.3%;与 ADS-B 局部航迹相比,融合航迹位置精度平均提升 4.3%,速度精度提升 21.5%,表明在传感器性能相差较大时,航迹融合依然能有效提升目标跟踪的准确性。

表 1 融合前后跟踪误差对比
Table 1 Comparison of the tracking error before and after fusion

航迹	x 向位置 误差/m	y 向位置 误差/m	z 向位置 误差/m	径向速度误 差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
雷达独立跟踪局部航迹	24.57	35.24	27.00	7.16
ADS-B 独立跟踪局部航迹	8.11	11.71	7.43	3.07
融合航迹	7.93	11.13	7.06	2.41

2) 融合方法跟踪误差对比

将本文融合方法与凸组合融合方法^[17](方法 1)、修正加权平均融合方法^[14](方法 2)进行性能比较,分别对实验采集的 52 组 ADS-B 目标数据进行仿真分析,三种方法对所有目标的平均跟踪误差对比如表 2 所示。

表 2 三种方法平均跟踪误差对比
Table 2 Average tracking error comparisons of three methods

方法	x 向位置 误差/m	y 向位置 误差/m	z 向位置 误差/m	径向速度误 差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
本文方法	13.98	13.14	10.05	2.60
方法 1	16.30	15.20	14.46	3.50
方法 2	20.37	19.78	29.39	6.03

从表 2 可以看出:本文方法的融合结果整体优于另外两种方法,相较于方法 1 和方法 2,本文方法的目标融合跟踪位置精度平均提升 19.1% 和 46.5%,速度精度平均提升 25.7% 和 56.9%。

为了比较传感器性能波动对三种融合方法的影响,选取其中 3 组精度类别不同的数据做进一步分析,三组数据的精度类别如表 3 所示。

表 3 三组数据的精度类别

Table 3 Navigation Accuracy Categories of three data sets

数据组	N_p	N_v
数据 1	10	2
数据 2	9	1
数据 3	5	0

三种融合方法对三组数据的跟踪结果如表 4 所示,可以看出:当对精度类别较高的数据 1 进行航迹融合时,本文方法融合效果略优于另外两种方法;当 ADS-B 数据质量下降,即对数据 2 和数据 3 进行融合时,三种方法的跟踪误差均有不同程度的增大,其中方法 2 的跟踪误差上升最多,本文方法依然能保持最优的融合效果。在传感器数据精度波动时,本文方法能稳定保持较高的融合准确性。

表 4 数据精度波动时三种方法跟踪误差对比

Table 4 Tracking error comparisons of three methods when the data accuracy fluctuates

方法	数据 1			
	x 向位置 误差/m	y 向位置 误差/m	z 向位置 误差/m	径向速度误差/ $(m \cdot s^{-1})$
本文方法	2.60	3.32	2.23	0.87
方法 1	9.01	14.21	6.69	1.66
方法 2	2.81	3.83	14.61	1.01
方法	数据 2			
	x 向位置 误差/m	y 向位置 误差/m	z 向位置 误差/m	径向速度误差/ $(m \cdot s^{-1})$
本文方法	8.69	9.08	6.70	2.72
方法 1	17.99	19.89	19.35	4.17
方法 2	16.96	20.49	27.87	4.16
方法	数据 3			
	x 向位置 误差/m	y 向位置 误差/m	z 向位置 误差/m	径向速度误差/ $(m \cdot s^{-1})$
本文方法	18.74	31.32	18.30	1.53
方法 1	20.44	33.06	20.85	2.00
方法 2	25.50	39.27	22.73	2.06

3.2 工程应用

为了验证本文方法在实际工程应用中的可行性和有效性,采用毫米波雷达实测的无人机和民航客机数据与 ADS-B 设备接收的民航客机数据进行实验分析。首先对采集的实测数据进行预处理,然后分别使用机载多普勒雷达目标跟踪算法和标准卡尔曼滤波算法建立雷达和 ADS-B 的局部航迹,接着将局部航迹送往融合处理中心使用本文提出的基于航迹质量评估的异步航迹融合算法进行航迹融合处理,实验中航电输出效果如图 3 所示,其中航迹编号 1 和 2 为试飞的无人机,编号 3 是在雷达探测范围的 MU2985 民航客机,编号 4 为雷达探测范围外的民航客机 JNA701,可以看出:本文所提的融合方法有助于实现对低空合作和非合作式目标的综合监视。

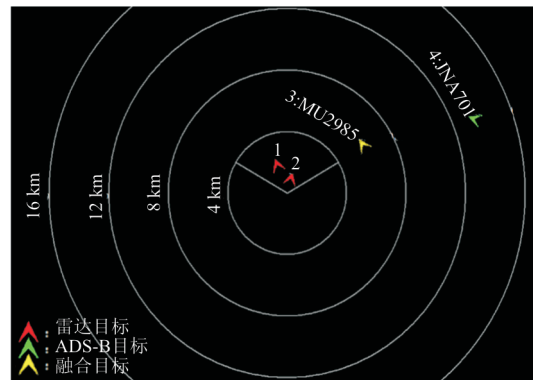


图 3 工程应用的航迹融合效果

Fig. 3 The track fusion effect of engineering application

4 结论

1) 通过本文提出的基于航迹质量评估的雷达和 ADS-B 数据融合方法,综合局部航迹精度、数据更新次数和传感器测量误差评估航迹质量,计算加权因子完成雷达和 ADS-B 的异步航迹融合,有效解决了多传感器性能差异大及传感器自身数据精度波动情况下的融合精度下降问题。

2) 通过多组实测数据仿真实验证明,相比传统数据融合方法,本文方法融合后位置和速度精度均有明显提升。

3) 经过毫米波雷达和 ADS-B 设备实际工程应用验证,本文提出的融合处理方法能有效解决合作式航空器和“黑飞”无人机及飞鸟的综合监视问题。

参考文献

- [1] 陈小龙, 陈唯实, 饶云华, 等. 飞鸟与无人机目标雷达探测与识别技术进展与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 803-827.
CHEN Xiaolong, CHEN Weishi, RAO Yunhua, et al. Progress and prospects of radar target detection and recognition technology for flying birds and unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Radars, 2020, 9(5): 803-827. (in Chinese)
- [2] CHEN W S, LIU J, LI J. Classification of UAV and bird target in low-altitude airspace with surveillance radar data [J]. The Aeronautical Journal, 2019, 123: 191-211.
- [3] PAN Yan, LI Shining, LI Bingqi, et al. When UAVs coexist with manned airplanes: large-scale aerial network management using ADS-B [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2019, 30(10): 3714.
- [4] 原常弘, 郭文明, 范恩, 等. 联合 ADS-B 的最小二乘雷达系统误差估计方法[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(9): 264-270.
YUAN Changhong, GUO Wenming, FAN En, et al. Least squares radar systematic error estimation algorithm by joint ADS-B [J]. Computer Systems and Applications, 2019, 28(9): 264-270. (in Chinese)
- [5] 何彬兵, 汪在华. 基于 ADS-B 的雷达数据采集评估系统设计[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(4): 427-432.
HE Binbing, WANG Zaihua. Design of a radar data acquisition and evaluation system based on ADS-B [J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(4): 427-432. (in Chinese)
- [6] 周游, 任伦, 李硕. 基于 ADS-B 的警戒搜索雷达空情过滤方法[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(1): 21-23, 31.
ZHOU You, REN Lun, LI Shuo. Method of warning search radar air situation filtering based on ADS-B [J]. Fire Control Radar Technology, 2018, 47(1): 21-23, 31. (in Chinese)
- [7] 唐勇, 何东林, 朱新平. 广播式自动相关监视与二次雷达的数据融合及应用[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 159-162.
TANG Yong, HE Donglin, ZHU Xiping. ADS-B/SSR data fusion and application [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2018, 37(2): 159-162. (in Chinese)
- [8] SHI Yifang, ULLAH I, SONG T L, et al. Multisensor distributed out-of-sequence-tracks fusion with track origin uncertainty [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106226.
- [9] ALCZUK Z, DOMZALSKI M. Asynchronous distributed state estimation for continuous-time stochastic process [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2013, 23(2): 327-329.
- [10] LIN H L, SUN S L. Distributed fusion estimator for multi-sensor multirate systems with correlated noises [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems, 2018, 48(7): 1131-1139.
- [11] TANG T, SUN S L. Distributed fusion estimation for multisensor multirate systems with packet dropout compensations and correlated noises [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems, 2021, 51(9): 5762-5772.
- [12] 熊健, 左芝勇, 熊杰. 一种改进的机载多普勒雷达目标跟踪算法[J]. 电讯技术, 2019, 59(9): 1026-1030.
XIONG Jian, ZUO Zhiyong, XIONG Jie. An improved airborne Doppler radar target tracking method [J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(9): 1026-1030. (in Chinese)
- [13] 刘通, 王飞, 严忠平. 基于 IMM KF 算法的 ADS-B 监视应用目标跟踪[J/OL]. 航空工程进展: 1-6 [2023-09-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.v.20230917.1310.002.html>.
LIU Tong, WANG Fei, YAN Zhongping. ADS-B surveillance application target tracking based on IMM KF algorithm [J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering: 1-6 [2023-09-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.v.20230917.1310.002.html>. (in Chinese)
- [14] 沈笑云, 唐鹏, 张思远, 等. ADS-B 统计数据的位置导航不确定类别质量分析[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3128-3136.
SHEN Xiaoyun, TANG Peng, ZHANG Siyuan, et al. Quality analysis of navigation uncertain category for position based on ADS-B statistical data [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3128-3136. (in Chinese)
- [15] SUCHOMSKI P. Explicit expressions for debiased statistics of 3D converted measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1): 368-370.
- [16] MUELLER R K. Quality of reported NACP in surveillance and broadcast services systems [C] // 2009 IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [17] 周峰, 梁禄扬, 林平. 协方差交叉融合的惯性/卫星/雷达组合导航研究[J]. 航天控制, 2021, 39(4): 22-27.
ZHOU Feng, LIANG Luyang, LIN Ping. Research on INS/GNSS/RADAR integrated navigation with covariance intersection fusion [J]. Aerospace Control, 2021, 39(4): 22-27. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)