

doi: 10.7690/bgzdh.2023.02.001

基于 ADS-B 多源数据融合的对空情报雷达探测性能分析评估系统

李宝鹏, 吴春林, 张凯旋, 朱艳慧
(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 为满足不同任务环境下对空情报雷达探测性能评估高效快捷的要求, 设计一种对空情报雷达探测性能分析评估系统。系统由数据采集硬件和性能评估软件组成, 硬件负责采集存储目标探测数据、装备工作数据和 ADS-B 数据以及区域大气环境数据等多源数据, 软件负责多源数据管理以及时空统一、航迹内插、目标关联、误差分析等数据融合处理。通过系统运行及实例分析, 结果表明: 该系统操作实施简单, 可完成对空情报雷达探测性能的客观量化与分析评估。

关键词: 对空情报雷达; 雷达性能评估; ADS-B; 评估系统; 多源数据融合
中图分类号: TJ99 **文献标志码:** A

Analysis and Evaluation System for Detection Performance of Air Intelligence Radar Based on ADS-B Multi-source Data Fusion

Li Baopeng, Wu Chunlin, Zhang Kaixuan, Zhu Yanhui
(Qingdao Branch, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to meet the requirements of efficient and fast evaluation of air intelligence radar detection performance in different mission environments, an air intelligence radar detection performance analysis and evaluation system is designed. The system is composed of data acquisition hardware and performance evaluation software. The hardware is responsible for collecting and storing multi-source data such as target detection data, equipment working data, ADS-B data and regional atmospheric environment data, while the software is responsible for multi-source data management and data fusion processing such as space-time unification, track interpolation, target association and error analysis. Through the system operation and example analysis, the results show that the system is easy to operate and implement, and can complete the objective quantification and analysis evaluation of air intelligence radar detection performance.

Keywords: air intelligence radar; radar performance evaluation; ADS-B; evaluation system, multi-source data fusion

0 引言

对空情报雷达肩负着国土防空中远程预警的重要任务, 摸清对空情报雷达具体任务背景下的探测性能, 是确保其战术性能有效发挥的关键^[1]。传统雷达性能评估方法组织实施困难、评估数据单一、投入耗费大, 不适用于不同任务背景下对现役雷达装备开展有效快捷的性能分析评估; 因此, 笔者设计一种基于 ADS-B 多源数据融合的对空情报雷达探测性能分析评估系统。该系统可采集民航目标 ADS-B 数据、雷达探测数据、雷达装备及环境数据等多信息源数据, 通过对多源数据进行融合分析处理, 以 ADS-B 目标数据为基准, 对雷达单目标、多目标以及不同高度、不同地理环境下的探测性能进行分析评估, 系统操作简单, 应用范围广, 可对现役对空情报雷达装备的战术性能评估提供决策

支撑。

1 雷达探测性能评估多源数据构成及方法

1.1 雷达探测性能评估多源数据

对空情报雷达对目标的探测, 受装备架设情况、服役时间、任务区域大气传播环境、电磁环境、任务目标、目标航迹等因素影响。将雷达装备对目标探测数据、雷达装备工作状态数据、大气环境数据和 ADS-B 数据等多信息源数据进行融合^[2-4], 客观量化分析评估雷达装备实际性能, 各信息源数据包含的主要内容如下:

1) 雷达装备对目标探测数据。

民航目标的航迹数据, 主要包括点迹数、数据记录时间、航迹属性(准向站、准备站、测站)、航次、航班号。

2) 雷达装备工作状态数据。

收稿日期: 2022-10-23; 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 2018 年武器装备军内科研科学研究项目

作者简介: 李宝鹏(1986—), 男, 山东人, 硕士, 讲师, 从事航空雷达对抗、雷达效能评估研究。E-mail: 843901165@qq.com。

基本要素：雷达站名称、雷达编号、雷达架设经纬度、雷达海拔高度、天线架设高度。

雷达工况：工作模式、量程、载频、天线转速、俯仰角、功率、脉冲宽度、脉冲周期。

3) 大气环境数据。

雷达站天气状况、温度、湿度、风力、气压、海况、雨雾强度。

4) ADS-B 数据。

民航目标 ICAO 代码、航班号、航次、经纬度、高度、数据时间。

1.2 雷达探测性能多源数据融合评估方法

传统的雷达装备性能测试方法常采用的是飞行检验法，利用军用飞机作为合作目标，在军用飞机上加装 GPS 模块或北斗模块用来记录飞行的航迹[5]，将记录的数据作为评估的真值与雷达装备探测数据进行比对分析。这种方法需空中兵力和空中管制的调动配合，耗费大、周期长，飞行架次批次少，真值数据样本量少，难以对所有现役雷达装备组织实施飞行检验，并且测试分析效果难以保证。

针对传统雷达性能测试评估方法存在的不足，提出了一种基于 ADS-B 多源数据融合的雷达性能评估方法。如图 1 所示，通过调用累计民航飞机 ADS-B 系统播报的经纬度、速度、高度、机型信息数据，运用动态时空误差估计、航迹实时外推等技术，与调用雷达装备同期同批目标航迹数据进行关联比对，同时引入雷达装备工作状态数据以及阵地环境数据作为评估影响因子[6]，构建多源数据性能

评估体系，完成对雷达装备的探测精度评估和威力评估。

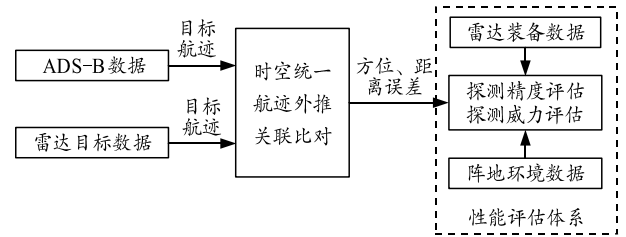


图 1 性能评估方法

2 雷达探测性能评估系统设计

2.1 总体架构

系统结构框架如图 2 所示，主要分为 ADS-B 数据采集处理、雷达装备实测数据采集处理、雷达装备性能分析评估和雷达装备性能分析用数据库 4 部分。

ADS-B 数据采集处理模块主要实现采集民航目标 ADS-B 信息(飞机的 4 维位置信息、飞机的识别信息和类别信息以及其他附加信息，如航向、空速、风速、风向和飞机外界温度等)，对民航广播信息进行滤波解析，根据民航航班 ICAO 地址分辨民航目标并形成目标航迹信息数据。

雷达装备实测数据采集处理模块主要完成雷达装备探测的目标航迹数据、雷达装备工况数据和所在阵地电磁环境数据的采集、处理和存储。

雷达装备性能分析评估模块主要负责多源数据融合处理，实现雷达装备探测精度评估、探测威力评估和航迹质量(含跟踪精度、点迹丢失率)评估。

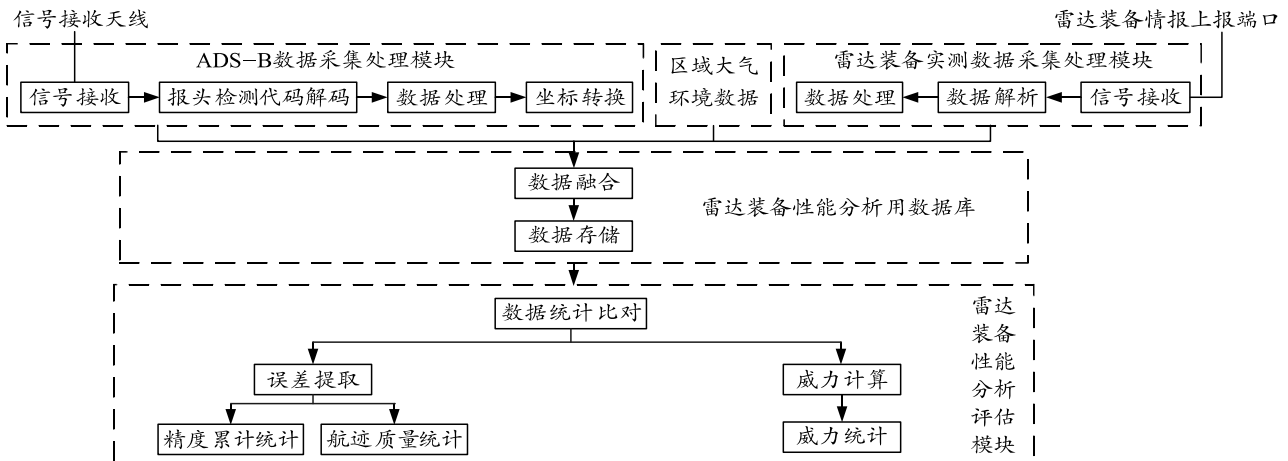


图 2 系统结构框架

2.2 主要功能模块设计

2.2.1 ADS-B 数据采集处理模块

ADS-B 数据采集处理模块主要由硬件单元和

软件单元组成，系统组成框图如图 3 所示。硬件单元包含 ADS-B 双通道数据采集单板、多通道数据融合器、微波前端接收组件和高增益板状天线等。软件单元包含民航目标与 GPS 数据初始化模块、民

航目标信号数据解析模块、民航目标数据存储模块等。系统包含多路 ADS-B 接收通道和一路冗余通道，确保对 ADS-B 信号的高质量接收，同时利用高精度 GPS 对接收的 ADS-B 报文标记精准的接收时间戳信息。

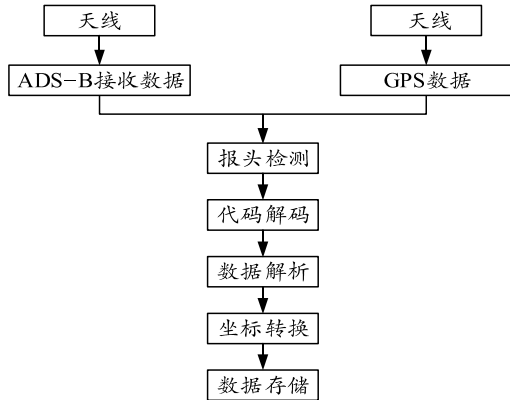


图 3 ADS-B 数据采集处理模块

2.2.2 雷达装备实测数据采集处理模块

雷达装备实测数据采集处理系统如图 4 所示，由目标航迹数据采集处理单元、工况数据采集处理单元和阵地电磁环境数据采集单元组成。目标航迹数据采集处理单元由目标航迹数据采集转接板、目标航迹数据接收模块和目标航迹数据处理存储模块组成。工况数据采集处理单元由工况数据采集转接板、工况数据接收模块和工况数据处理存储模块组成，采集记录雷达装备工作模式、工作频率、天线俯仰信息等工作数据。阵地电磁环境数据采集单元由全向天线、射频接收前端、信号接收模块、频谱分析模块和数据存储模块组成，采集记录阵地关注范围内环境电磁频谱的分布情况。

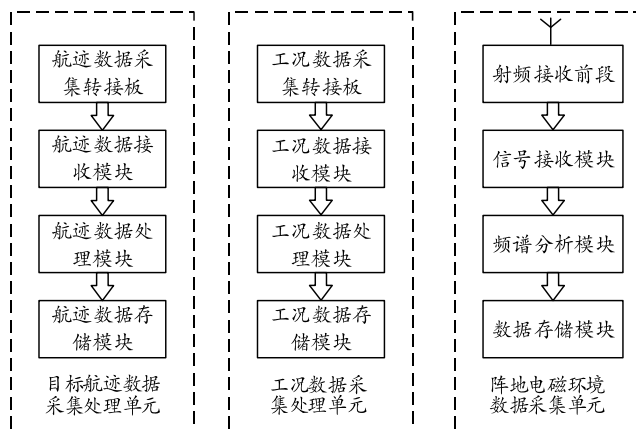


图 4 雷达装备实测数据采集处理模块组成

2.2.3 雷达装备性能分析评估模块

雷达装备性能评估体系如图 5 所示，主要分为探测精度评估和威力评估 2 大部分。雷达装备探测

精度评估包括单个目标的精度评估和雷达总体精度评估。雷达装备总体精度评估又可以分距离段、方位范围、高度层，分析雷达的方位、距离和高度测量精度。单个目标的精度评估，可通过人工干预的方式选择目标批次，进行单目标的距离、方位、高度的精度误差分析。雷达装备威力评估则是通过累积比较 ADS-B 数据和雷达航迹数据，以及引入雷达装备工况数据、阵地电磁环境频谱信息数据以及区域大气环境数据等评估影响因子，分析评估雷达装备在确定时间段、装备工况、大气环境条件下，对不同航线目标的最大探测距离以及发现概率。

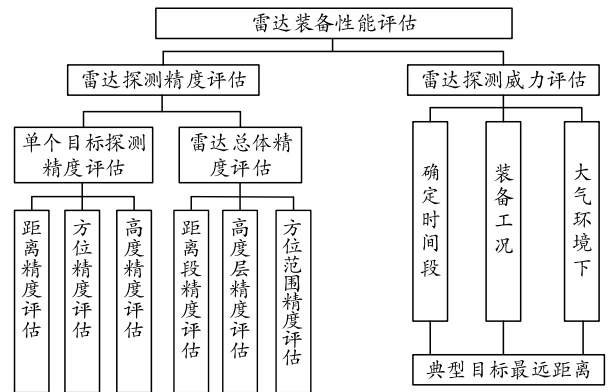


图 5 雷达性能评估体系

2.3 系统软件设计

系统软件主要由系统配置、任务编辑、数据管理、信息显示与记录和雷达性能评估模块组成，如图 6 所示，各模块的功能如下。

系统配置模块主要是阵地坐标配置、人机交互、界面显示等。

任务编辑模块主要是输入当前任务的工作时间、地点等。

数据管理模块主要是自动导入或人工录入 ADS-B 民航航班信息数据、雷达装备同期同批目标航迹数据、雷达装备工作状态数据以及阵地环境数据，同时可以对所有数据进行筛选、查询、编辑、修改。

信息显示与记录模块主要负责显示 ADS-B 信息、雷达装备点航迹信息、雷达装备工作状态数据以及阵地环境数据，主要显示记录目标参数、人机交互等信息。

雷达装备性能评估模块负责分析接收到的数据，由 ADS-B 航迹数据分析得到对应的雷达装备探测目标数据，然后对两者数据进行比对分析，评估雷达装备的精度评估和威力评估，并以报表形式进行显示和输出。

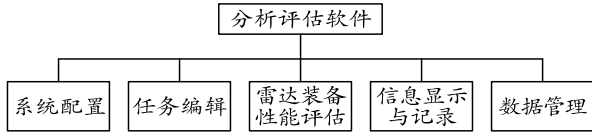


图 6 系统软件组成

3 ADS-B 与雷达目标航迹数据处理

ADS-B 与雷达多传感器目标数据融合处理是雷达探测性能评估的关键问题，在采集的目标 ADS-B 航迹数据和雷达记录的目标航迹数据中，根据数据关联算法进行同一目标航迹关联^[7-10]，对同一目标的 2 种传感器数据进行时间对准和空间位置坐标系对准，然后以 ADS-B 航迹数据为基准，分析评估雷达对同一目标的航迹数据，评估雷达的探测性能。

3.1 目标航迹时间对准方法

雷达对目标的采样周期通常比 ADS-B 的采样周期长，在同一时间段内，雷达采样的数据远小于 ADS-B 采样的数据，为方便计算处理，采用雷达数据内插法进行时间对准，以雷达采样时刻为参考基准，对 ADS-B 航迹数据进行内插^[11-12]，具体方法如下。

将目标在单个采样间隔内视为匀速运动，选择参考点雷达采样时刻 $t_{A,i}$ 前后相邻的 ADS-B 量测点 $Z_{B,j}$ 、 $Z_{B,j+1}$ 进行数据内插，两点的采样时刻 $t_{B,j}$ 、 $t_{B,j+1}$ 与参考点雷达的采样时刻 $t_{A,i}$ ，满足 $t_{B,j} < t_{A,i} < t_{B,j+1}$ 关系，插值按照式(1)计算：

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_{B,i} &= x_{B,j} + \hat{v}_{x,i}(t_{B,j+1} - t_{A,i}) \\ \hat{y}_{B,i} &= y_{B,j} + \hat{v}_{y,i}(t_{B,j+1} - t_{A,i}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中：

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}_{x,i} &= (x_{B,j+1} - x_{B,j}) / (t_{B,j+1} - t_{B,j}) \\ \hat{v}_{y,i} &= (y_{B,j+1} - y_{B,j}) / (t_{B,j+1} - t_{B,j}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3.2 目标航迹空间对准方法

ADS-B 的目标数据采用的是地理坐标系，雷达采用的是以雷达位置为中心的局部坐标系，需把 ADS-B 目标数据由地理坐标系转换到雷达为中心的局部坐标系。设 ADS-B 数据的地理坐标为 $(\lambda_{B,i}, \phi_{B,i}, h_{B,i})$ ，雷达所在位置的地理坐标为 (λ_A, ϕ_A, h_A) ，则 ADS-B 数据对应的局部坐标为：

$$\begin{aligned} [x_{B,i}, y_{B,i}, z_{B,i}]^T &= D(\lambda_A, \phi_A) * \\ & [P(\lambda_{B,i}, \phi_{B,i}, h_{B,i}) - P(\lambda_A, \phi_A, h_A)] \end{aligned} \quad (3)$$

$D(\lambda_A, \phi_A)$ 和 $P(\lambda_A, \phi_A, h_A)$ 的计算方式如下：

$$D(\lambda_A, \phi_A) = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_A & \cos \lambda_A & 0 \\ -\sin \phi_A \cos \lambda_A & \sin \phi_A \sin \lambda_A & \cos \phi_A \\ \cos \phi_A \cos \lambda_A & \cos \phi_A \sin \lambda_A & \sin \phi_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P(\lambda, \phi, h) = \begin{bmatrix} (N+h)\cos\phi\cos\lambda \\ (N+h)\cos\phi\sin\lambda \\ N[(1-\rho^2)+h]\sin\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $N = R_e / \sqrt{1 - \rho^2 \sin^2 \phi}$ ； $\rho = \sqrt{1 - r_e^2 / R_e^2}$ 为地球偏心率，其中， r_e 为地球短轴半径， R_e 为地球长轴半径。

3.3 航迹误差计算分析

3.3.1 单目标航迹误差及离散分析计算

1) 第 j 航次目标点迹一次差：

$$\Delta X_{ji} = X_{ji} - B_{ji}$$

式中： X_{ji} 为第 j 航次中的第 i 个点迹采样值(雷达读出值)； B_{ji} 为第 j 航次中的第 i 点迹标准值(ADS-B 推算值)。

2) 第 j 航次目标航迹一次差均值：

$$\Delta \bar{X}_j = \sum_{i=1}^{N'_j} \Delta X_{ji} / N'_j$$

式中 N'_j 为第 j 航次中采样点。

3) 第 j 航次目标航迹一次差的标准差：

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{N'_j} \sum_{i=1}^{N'_j} (\Delta X_{ji} - \Delta \bar{X}_j)^2}$$

4) 第 j 航次目标航迹一次差的均方根：

$$U_j = \sqrt{((N'_j - 1) / N'_j) S_j^2 + \Delta \bar{X}_j^2}$$

3.3.2 多目标航迹误差及离散分析计算

1) 多航次目标航迹均方根误差：

$$U = \sqrt{\frac{1}{N'_j} \sum_{j=1}^{F'_N} N'_j U_j^2}$$

式中 F'_N 为航次数。

2) 多航次目标航迹系统误差：

$$\Delta \bar{X} = \sum_{j=1}^{F'_N} N'_j \Delta \bar{X}_j / N'$$

3) 多航次目标航迹随机误差：

$$S = \sqrt{\frac{N'}{N' - 1} (U^2 - \Delta \bar{X}^2)}$$

4 系统运行及实例分析

雷达探测记录数据分析处理界面如图 7 所示。“关键字”检索栏可对录入系统的航迹数据根据关

关键词进行检索，“是否处理”信息栏显示的是雷达与 ADS-B 航迹数据是否已经进行了目标关联处理。“实装目标数据记录”信息栏显示的是雷达记录的某个航次的航迹数据，“对应的 ADS-B 数据记录”信息栏显示的是实装目标数据中雷达记录的某个航次对应的 ADS-B 航迹数据。一次性数据记录分析

结果信息栏显示的是数据处理后同一个目标的雷达探测和 ADS-B 播报的航迹数据，以及雷达装备的距离、高度、方位误差数据。右侧上方窗口显示的是航次信息、雷达装备、环境因素等信息，下方窗口显示的是雷达与 ADS-B 的距离、方位、高度的测量值曲线及雷达测量误差曲线。



图 7 探测数据分析处理界面

以雷达站 A 所属的雷达 6 探测的航班 CDC8639 为例，该航班为准向站飞行，雷达探测时间为 10: 01: 42 至 10: 11: 03，共采集了 11 个目标点迹。系统采集的该航班对应时间段的 ADS-B 数据，共有 572 个点迹。经过分析处理后得到，雷达 6 对该航班的探测距离误差、方位误差、高度误差，其中距离误差分析结果如图 8 所示，雷达的距离探测误差在 -990~1 010 km 之间，方位和高度误差可通过点击对应模块进行查询，在这里不再展示。

度、方位精度、高度精度、最大探测距离、发现概率。其中，距离多航次系统误差为 0.49，多航次随机误差为 949.41，多航次均方根误差为 949.41。其他结果通过点击对应模块进行查询，这里不再展示。

序号	方位(°)	装备测量距离(km)	ADS-B距离(km)	时间	一次差(m)
1	313.60643	2387.49388	2388.48388	2021-01-27 10:01:42	-990.0035
2	313.56059	2392.74197	2393.75197	2021-01-27 10:02:17	-1009.99609
3	313.4972	2400.32158	2401.31158	2021-01-27 10:03:04	-989.99865
4	313.41851	2409.8306	2410.84060	2021-01-27 10:04:04	-1009.99671
5	313.33799	2419.79714	2420.78714	2021-01-27 10:05:03	-989.99663
6	313.25707	2429.7967	2430.80670	2021-01-27 10:06:03	-1009.99975
7	313.17707	2439.82428	2440.81428	2021-01-27 10:07:03	-989.99872
8	313.09833	2449.70421	2450.71421	2021-01-27 10:08:03	-1009.9972
9	313.0187	2459.5619	2460.84619	2021-01-27 10:09:03	-1284.28955
10	312.94288	2469.59707	2470.60707	2021-01-27 10:10:03	-1009.99887
11	312.86403	2479.78438	2480.77438	2021-01-27 10:11:03	-990.00183

图 8 探测距离误差分析数据

选择准向站的 CCA175、UEA1890、CDC8639 3 个航班，对雷达 6 的雷达装备性能进行统计分析。如图 9 所示，雷达对 3 个航班的总观测点数为 32，系统自动统计分析得到多目标航迹探测的距离精



图 9 探测数据分析处理主界面