

基于 ADS-B 和 WEB 的雷达精度分析系统

陈盛祝, 韩丙同, 贾少才, 曹亮

(北京无线电测量研究所, 北京 100854)

摘要: 方位角、俯仰角、距离三维精度是三坐标雷达的重要技术指标, 通常使用动态标校的方式进行标定; 为解决动态标校试验周期长、成本高、难度大、在使用维护阶段难以实施等问题, 文章介绍了一种基于广播式自动相关监视系统 (ADS-B) 的雷达精度准实时分析系统; 文章从 ADS-B 数据率、位置精度、最大可接收距离等多个方面探讨了民航航迹用于雷达动态精度分析的可行性; 采用 Django 框架设计、实现了 WEB 架构的雷达精度准实时分析系统; 并使用高精度雷达对系统进行了验证、标定、系统误差补偿; 最后, 系统在某中远程雷达上进行多个批次测试, 结果表明该方法有效且可行。

关键词: 广播式自动相关监视系统 (ADS-B); 雷达; 航迹精度; 实时分析; Django 框架; WEB 架构

A Radar Accuracy Analysis System of Based on ADS-B and WEB

CHEN Shengzhu, HAN Bingtong, JIA Shaocai, CAO Liang

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: The three-dimensional accuracy of azimuth, elevation, and range is an important technical indicator for three-dimensional radars, which is usually calibrated using dynamic calibration method, but there are the problems of long dynamic calibration period, much cost, high difficulty, and difficulty to implement during the maintenance. To solve these issues, a near real-time analysis system of radar accuracy based on automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) is introduced. The feasibility of using civil aviation flight path for radar dynamic accuracy analysis is discussed from the aspects of ADS-B data rate, aircraft position accuracy, and maximum receiver range. The Django architecture is adopted to achieve near real-time analysis system of radar accuracy based on the WEB structure, and the system is validated, calibrated, and conducted to compensate the system errors. Finally, the system is tested through a certain medium and long range radar. Experimental results demonstrate that the method is effective and feasible.

Keywords: ADS-B; radar; trace accuracy; real-time analysis; Django architecture; WEB architecture

0 引言

雷达系统误差修正值可通过雷达标校来获得, 修正值越精确, 则修正效果越好^[1]。雷达标校方法可分动态标校、静态无源标校和静态有源标校 3 种。动态标校是指雷达与目标在相对运动的状态下进行相关测量; 动态标校的优点是接近实际使用状态, 理论上能最大限度地消除系统误差。对于地面防空雷达系统, 动态标校常用飞机校飞, 利用军用飞机或无人机加装 GPS 设备记录航迹作为真值^[2], 雷达同步跟踪、记录飞机目标航迹, 试验后进行两航迹融合、分析得到精度数据。

动态标校方法因试验场地协调、雷达装备进场转运等多因素限制, 试验周期长、实施成本高、难度较大, 适用于雷达装备的生产、研制阶段。对于雷达装备在用户使用维护阶段、战损后性能快速评估则难以实施。

随着中国民航业及民航电子技术的不断发展, 从“十二五”开始, 1 090 ES 模式的 ADS-B 设备部署越来越广泛。国内雷达厂家也开始充分利用丰富的民航资源进行雷达的误差校准、精度评估等动态标校或模拟训练研究。雷达厂

家利用 ADS-B UAT、1 090 ES 数据链对不同体制雷达进行动态精度评估、校准^[3-9]。国内院校也同步开展了基于 ADS-B 技术的雷达系统误差估计方法研究^[10-16], 研究过程均未考虑 ADS-B 数据误差, 将 ADS-B 航迹数据当真值处理, 并不同程度实现工程应用。现有见刊文献中, 将 ADS-B 航迹数据当真值或采用 EXCEL 等事后处理方式, 存在 ADS-B 系统误差无数据支撑、分析实效不够等不足, 可满足一些精度要求不高的场景需求。

本论文在利用高精度雷达对 ADS-B 的航迹数据进行可用性分析的基础上, 提出一种基于 ADS-B 和 WEB 的雷达精度实时分析方法, 利用地面 ADS-B 接收机接收民航下发的位置信息进行误差补充后作为真值, 对雷达斜距、方位角、俯仰角的精度分析、标定; 采用 WEB 架构实现雷达精度准实时分析, 即插即用, 易用性强, 可为雷达日常使用、战损修复后快速精度定性评估提供有效解决方案。

1 ADS-B 原理

1.1 ADS-B 基本原理

广播式自动相关监测 (ADS-B, automatic dependent

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2023-11-20。

作者简介: 陈盛祝 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 陈盛祝, 韩丙同, 贾少才, 等. 基于 ADS-B 和 WEB 的雷达精度分析系统[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 208-214.

表 1 1 090 ES ADS-B 航迹位置信息结构格式

Bit 位	1-6	6-8	9-32	33-88	89-112
二进制	10001	101	010010000100 000011010110	[00100]0000010110011 00001101110001110000 1100101100111100000	010101110110 000010011000
十六进制	8D		4840D6	202CC371C32CE0	576098
十进制	17		5		
信息域	DF	CA	ICAO 地址	MESSAGE	PI 校验

surveillance-broadcast) 是一种空中交通监视技术, 包含自动、相关、监视功能: 自动, 即无需飞行员手动干预、操作, 也无需地面站发出询问; 相关, 即依赖全球卫星导航系统 (GNSS, global navigation satellite systems) 进行空中飞行器间的通信、感知; 监视, 即通过接收监视装置可获取民航或其他飞行器的唯一识别号、位置、高度、速度、航向、飞行操作及其他信息。

ADS-B 是利用空地、空空数据链进行空中监视和信息传递的一种新航行技术, 具有定位精度较高、数据更新快、飞行监视容量大等特点, 已成为国际民航组织 (ICAO, international civil aviation organization) 空管地面监视的主要手段之一。ADS-B 系统的主要工作流程: 装有 GNSS 系统的飞行器通过接收 GNSS 的授时信息, 并准确测量飞行器实时的位置与速度信息; ADS-B 发射装置从其他机载设备, 如惯性导航系统、多模式接收机、空气数据系统等, 获取所需的参数, 根据不同数据类型整合成不同数据包, 通过数据链路传递给地面上的 ADS-B 接收机和其他空中飞行器; ADS-B 接收装置对信号进行解析, 为使用者提供实时的空中交通状态^[17-21]。

1.2 ADS-B 数据格式

ADS-B 的传输数据链主要有 3 种: VDL-4、UAT、1090ES^{[19][22]}, 均能满足 ADS-B 应用的基本要求, 各有优缺点。其中 VDL-4 是多通道数据链路, 工作频段为 108~136.975 MHz, 每帧数据跨度达 60 s^[23]; UAT 工作频率为 978 MHz, 数据帧长为 1 s^[24-25], 适合空域内飞行量较小的场景; 1 090ES 工作频率为 1 090 MHz, 是 S 模式中的一种扩展报文模式, 数据帧长根据数据长短形式 (56 bit 或 112 bit) 有 64 μs 和 120 μs 两种长度, 数据率根据数据信息种类从 0.1~2 Hz 不等, 其中空中位置信息元包含 120 bit 数据, 数据率为 2 Hz^{[21][25-26]}。国际民航组织 ICAO 推荐使用 1 090 ES 数据链进行数据传输。

1 090 ES 数据链采用脉冲位置调制 (PPM, pulse position modulation), 单个脉冲宽度为 0.5 μs, 报文根据信息类别分长短报文两种, 数据信息结构包含 8 μs 包头和 56 个或 112 个数据脉冲^[21], 结构如图 1 所示。

ADS-B 空中航迹位置数据元信息属于 1 090 ES 长报文, 其结构格式如表 1 所示。

ADS-B 报文由 5 个信息域组成:

1) DF 域长度为 5 bit, 是下行数据链标识字段;

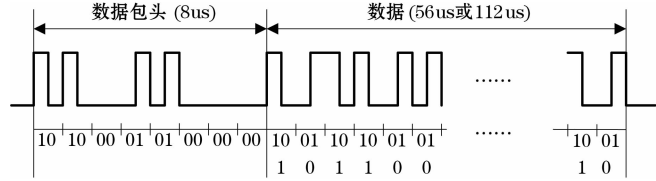


图 1 1 090 ES ADS-B 数据结构

- 2) CA 域长度为 3 bit, ADS-B 应答机转发能力;
- 3) ICAO 域长度为 24 bit, 国际民航组织定义的唯一身份识别号;
- 4) ME 域长度 56 bit, 空中位置信息字段;
- 5) PI 域长度 24 bit, 是 ADS-B 报文的奇偶校验字段。

2 1090ES ADS-B 数据可用性分析

将民航航迹用在雷达动态精度分析中, 需选择合适的民航距离、航线, 同时航迹数据的连续性、位置精度对精度分析结果有较大影响。因此, 本文对民航的 ADS-B 航迹数据的最大可接收距离、数据率及位置精度展开研究、验证。

2.1 最大可接收距离

假设飞行器和接收机间视场不存在障碍物, 且发射功率足够, ADS-B 信号最大可接收距离由地球的曲率决定, 如图 2 所示。

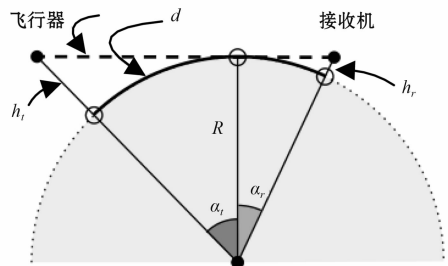


图 2 理论最大可接收距离示意

在已知接收机、飞行器高度的情况下, 最大可接收斜距可由式 (1) 进行计算。

$$sr_{\max} = \sqrt{(R+h_t)^2 - R^2} + \sqrt{(R+h_r)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh_t + h_t^2} + \sqrt{2Rh_r + h_r^2} \quad (1)$$

其中: R 是地球的半径; h_t 和 h_r 分别为飞行器和接收机的海拔高度。取地球半径 R=6 371 393 m, 不同飞行器、接收机高度下的理论最大可接收地表距离、斜距曲线如图 3 所示。

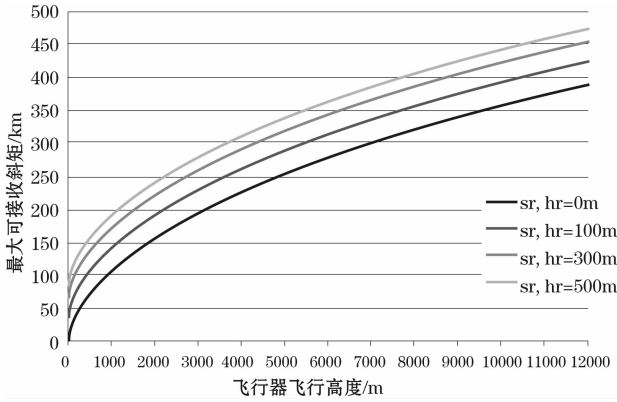


图 3 最大可接收斜距曲线

在雷达动态精度分析过程中关注的是雷达与目标之间的斜距，假设接收机高度、民航飞行高度分别为 100 m、10 km 时，理论最大接收斜距约为 392.8 km。

ADS-B 信号遵循 Friis 传输模型，接收视场中的障碍物、发射功率、接收机灵敏度、天线的方向性都会影响最大可接收斜距。因此在实际应用中，最大可接收斜距通常低于图 3 中的理论值。以灵敏度为 -93 dBm 的接收机，增益为 2.5 dBi、垂直极化的接收天线，增益为 25 dB 的低噪声放大器搭建样机测试最大可接收斜距。在海拔 100 m 的屋顶进行 24 小时监测各方向接收到的航迹点斜距，测试结果如图 4 所示。

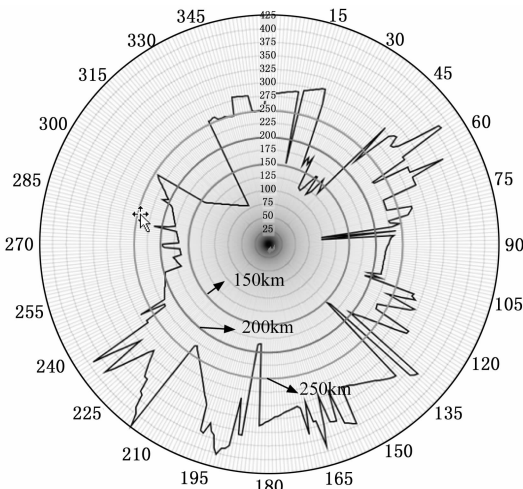


图 4 最大可接收距离测试

从图 4 可看出，各方向接收斜距测试结果受障碍物遮挡、民航航道规划影响较大，最远接收斜距可达 425 km；其中方位角从 135° 至 255° 的 120° 范围、200 km 距离有连续性较好的接收视场，在 185° 附近楼梯间遮挡对信号接收有较大影响。

2.2 航迹数据率

不同的 ADS-B 信息报文有不同的数据率，取决于飞行器是在地面静止或滑行，还是在空中飞行^[7]。其中空中飞行的航迹数据率理论值为 2 Hz，即数据间隔 0.5 s。根据

ADS-B 工作原理，ADS-B 系统对多方的信息进行采集、编码、更新下行数据包，数据更新时间不能准确测量，存在不可补偿延时^[27-28]。再加上飞行姿态的变化、接收视场障碍物遮挡、发射与接收天线增益起伏、接收机噪声或信道堵塞等多方面因素，实际航迹数据率绝大多数低于理论值，少部分数据因负的不可补偿延时会高于理论值。在不同场景对航迹数据率进行验证，并对 3 个样本进行不同数据时间间隔进行分段统计，统计结果如表 2 所示。

表 2 ADS-B 航迹信息数据率测试结果

统计类型	样本 1	样本 2	样本 3
样本数量	4 610	63 248	2 600 26
最小值/s	0.4	0.387	0.3
最大值/s	169.88	496.64	479.95
众数/s	0.51	0.5	0.5
间隔小于 0.5 s 占比/%	26.44	26.71	29.01
间隔小于 1 s 占比/%	70.41	72.29	71.38
间隔小于 2 s 占比/%	89.93	91.28	90.10
间隔小于 3 s 占比/%	94.18	94.22	94.46
95% 占比/s	3.53	3.32	3.15

从表 2 可看出航迹数据率众数为 2 Hz（间隔 0.5 s），与理论值一致。最小时间间隔为 0.3 s，与理论值有一 0.2 s 误差，其中负号表示时间提前，与文献 [28] 研究结果一致。整体数据率比传统动态检飞数据率（典型 1 Hz）略差。

2.3 ADS-B 位置精度

ADS-B 的位置精度由机载 GNSS 的定位精度、GNSS 位置测量到 ADS-B 信号发射间的延迟时间、信号发射到信号接收间的延时决定，可用式 (2) 表示。

$$\sigma = \sigma_{GNSS} + V\tau_{nt} + V\tau_r \quad (2)$$

其中： σ_{GNSS} 为 GNSS 定位精度，通常可取 10 m^[29]； V 为民航飞行速度； τ_{nt} 为 GNSS 位置测量时间到 ADS-B 报文发射时间的延时，根据 ADS-B 工作原理，ADS-B 系统对多方的信息进行采集、编码、更新下行数据包，数据更新时间不能准确测量，因此 τ_{nt} 为不可补偿延时； τ_r 为 ADS-B 报文发射到信号接收的延时，主要由接收距离决定。

有文献对不可补偿延时进行研究，文献 [30] 指出在精度等级 NAC_p 大于等于 10，即 GNSS 精度优于 10 m 时，ADS-B 延时时间小于 0.4 s（95%）；文献 [28] 指出有一 0.2~0.4 s 的不可补偿延时，但没有数据支撑。

本文采用一部高精度雷达对 ADS-B 位置精度进行摸底测试，测量数据见表 3。

对 11 个航迹数据进行统计分析，得 ADS-B 精度可达距离误差 30 m、方位角误差 0.033°、俯仰角误差 0.05°，其中距离起伏 10 m、方位角起伏 0.017、俯仰角起伏 0.023°。通过对雷达误差来源的分析，ADS-B 误差在雷达测距和测角上都会带来误差，测距误差的量级与 ADS-B 距离误差的量级相当，测角误差随着距离的增大而减小。

用高精度雷达对 ADS-B 系统误差进行标定需要足够样本量、临近背离等多样化航迹数据支撑。目前因高精度雷达

表 3 ADS-B 精度模拟测试数据表

航班 ID	距离/(km)	距离误差/(m)	方位/(°)	方位角误差/(°)	俯仰/(°)	俯仰角误差/(°)
780782	70,55	-18,35	184,150	-0.005,0.03	3.04,3.65	-0.03,0.0
780431	117,54	-20,20	218,122	-0.02,0.03	1.73,3.55	-0.05,0.01
781E42	58,55	-17,0	172,156	-0.02,0.016	3.7,3.9	0.018,0.032
780FDC	104,77	-20,30	210,162	-0.015,0.05	2.4,1.4	0.012,0.042
780F11	144,56	-30,34	220,150	-0.02,0.02	1.75,3.30	-0.04,0.04
780F55	110,108	-20,10	204,195	-0.02,0.02	1.28,1.38	0.03,0.09
781642	73,77	-13,-3	-128,121	-0.02,0.02	3.85,3.55	0.03,0.07
78105D	170,227	-30,5	142,146.6	-0.02,0.005	2.25,1.36	0.05,0.09
7815B2	82.5,87	-55,18	176,156	-0.02,0.04	1.46,1.33	0.01,0.06
7811A7	140,220	-20,10	136,148	-0.02,0.02	2.9,0.7	0.06,0.08
7807D5	56,72	-15,5	155,126	-0.05,0.01	3.1,1.4	-0.005,0.015

资源调配、多法线角度试验转场等诸多客观条件约束, 采集足够样本量、多航道、长航时航迹数据难度较大。

但从现有样本分析结果可看出 ADS-B 航迹精度无法满足雷达的测距精度分析, 但可以满足大部分中远程雷达的测角精度分析需求。

3 雷达精度实时分析系统设计

为满足雷达精度分析设备的通用性、便捷性, 系统设计过程将显示与分析功能进行独立, 即精度分析主机采用模块化设计, 可实现民航 ADS-B 航迹数据、雷达目标数据的采集、解析、存储; 采用 B/S 架构进行数据可视化, 避免“一机一用”, 有利于敏捷化保障; 也可为远程执行精度分析、云分析提供扩展。

3.1 系统硬件组成

基于 ADS-B 的雷达精度实时分析系统主要由精度分析主机、显示终端及天线组成, 如图 5 所示。

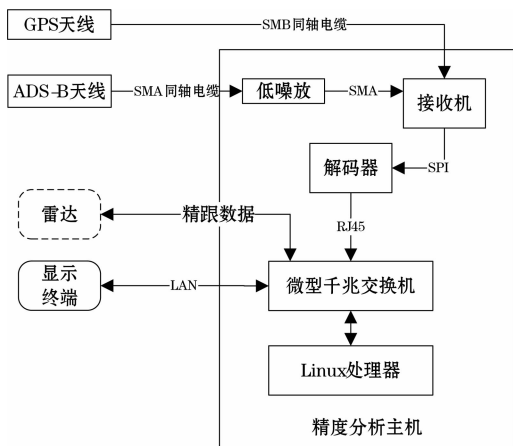


图 5 系统组成框图

其中精度分析主机集成有窄带低噪声放大器、ADS-B 接收机、解码器、微型服务器、微型千兆交换机; 外置 ADS-B 接收天线、GPS 接收天线分别通过同轴电缆及 SMA、SMB 连接器接到解析主机; ADS-B 接收机与解码器间采用 SPI 并行总线进行传输以保证数据的高数传输; 解码后的 ADS-B 明文数据、雷达数据采用网口进行传输。

3.1.1 ADS-B 接收机

选用高动态范围、高接收灵敏度的接收机, 其主要性能如下:

- 1) 接收频率: 1 090 MHz;
- 2) 接收机动态范围: -93 dBm 到 +10 dBm;
- 3) 支持多种报文输出: DF17、S 模式;
- 4) 可以接收、解析 GPS 时标信息;
- 5) 供电: 5 V、电流 720 mA。

因 ADS-B 数据包不带位置测量时刻信息, 系统在 ADS-B 接收机采用 GPS 接收模块进行授时, 对接收到的 ADS-B 数据包进行时间标定; 系统对 GPS 的 PPS 脉冲进行 1 000 分频, 经延时补偿后得到精度较高的毫秒脉冲, 精度可达 50 ns, 在民航巡航速度 (200 m/s~300 m/s) 下 GPS 时间标定误差可忽略不计。

3.1.2 低噪声放大器

低噪声放大器用于 ADS-B 前级微弱信号放大、带外信号抑制, 有效提高信噪比, 主要指标如下:

- 1) 增益: 21 dB;
- 2) 频率: 中心频率 1 090 MHz, 带宽 10 MHz;
- 3) 带外抑制: -75 dB@±50 MHz。

3.1.3 ADS-B 天线

天线选用架装便捷的全向天线, 指标如下所示。

- 1) 中心频率: 1 090 MHz;
- 2) 增益: 2.5 dBi;
- 3) 驻波: ≤1.5;
- 4) 极化方式: 垂直全向;
- 5) 尺寸: 35 mm * 248 mm (Φ * L)。

3.1.4 解码器与处理器

解码器负责将 ADS-B 数据进行解码; Linux 服务器用于数据存储、分析、数据可视化服务。为实现模块化集成, 选用 Linux 单板 ARM 计算机, 主要指标如下所示:

- 1) 处理器: 1 GHz, 2 000 MIPS 1 GHz ARM Cortex-A8;
- 2) 可编程实时单元子系统;
- 3) 内存 SDRAM: 512 MB DDR3L 8 MHz;

4) 内存 4 GB, 8 biteMMC;

3.2 软件设计

系统软件基于 Nginx、uWSGI、Django 架构搭建, Nginx 作为方向代理服务器, 负责静态资源处理、动态请求转发以及结果的回复; uWSGI 作为 Web 服务器, 负责接收 Nginx 请求转发并处理后发给 Django 以及接收 Django 返回信息转发给 Nginx; Django 作为应用框架, 收到请求后处理数据并响应结果给 uWSGI 服务器; Socket、UDP 分别对应 ADS-B 接收机和雷达数据通信。系统软件框图如 6 所示。

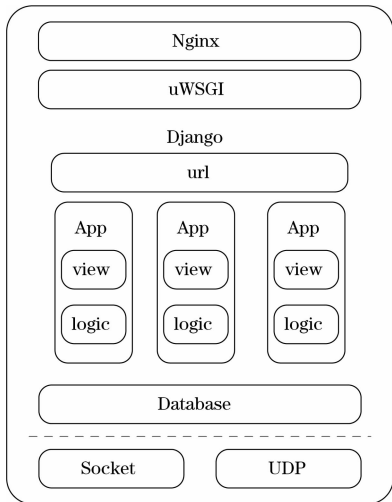


图 6 系统软件框架

Django 是基于 MVC 的 WEB 框架; 其中模型 (Model) 是 WEB 应用的核心, 进行核心数据业务逻辑判断、数据库存储; 视图 (View) 对数据进行显示; 控制 (Control) 实现人机的交互。

3.2.1 Django 数据层

系统根据数据分析业务需求在数据层使用 Django 的模型在后台执行数据库代码, 每一个模型对应 SQLITE3 数据库中的一张表, 方便航迹数据进行增删改查。

参数配置模型: 存储系统空域筛选边界、网络端口、系统运行状态等参数配置信息;

本站信息模型: 存储系统运行时的日期、本站经度、纬度、高度信息;

民航信息模型: 存储系统接收到的民航 ICAO 信息或雷达目标批号、关联本站信息;

航迹点迹数据模型: 存储系统接收到的航迹点迹经度、纬度、高度、方位角、俯仰角、斜距、关联民航信息。

ADS-B 接收套间字和雷达数据 UDP 接收独立脚本进程使用 Django Model 模型进行数据库操作。

3.2.2 前端页面

系统软件采用前后端分离模式, 后端负责数据采集、逻辑处理, 前端负责人机交互。系统人机交互界面主要由参数设置、航迹 PPI 显示及精度分析图表等组成, 如图 7 所示。

3.2.3 数据交互

精度分析页面通用浏览器以固定时间间隔向后端应用

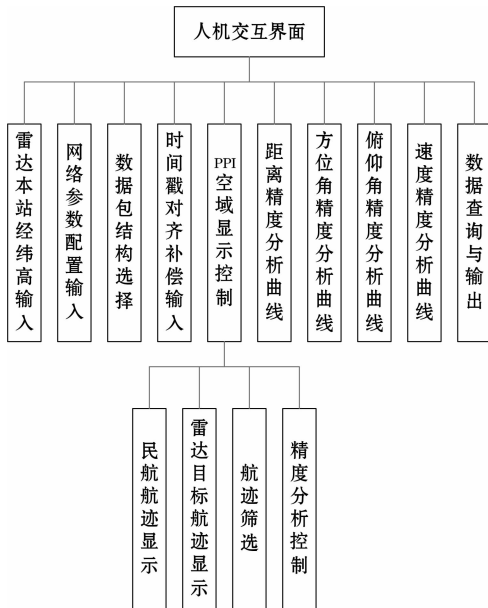


图 7 软件界面功能框图

发起 Ajax 请求, 获取目标航迹批显数据、前一个处理周期精度分析数据, 并进行页面刷新。

3.3 ADS-B 数据解析

系统开机后自动启动 ADS-B 数据接收脚本, 默认使用系统 GPS 的经度、纬度、海波高度作为雷达本站的站址, 从数据库读取系统默认的近界、远界、左右边界等空域参数配置信息, 对接收到的 ADS-B 数据进行解析、识别、解析, 对民航航迹数据进行提取。

ADS-B 接收的是 WGS-84 坐标系下的位置信息, 为方便后续进行一次差精度分析, 在解析数据时将航迹点迹经纬度值转换成以雷达本站为原点的雷达局部坐标系坐标数据, 形成民航 ID、时间戳、经度、纬度、高度、方位角、俯仰角、斜距数据包, 存储到数据库中。具体解析流程如图 8 所示。

3.4 精度分析

3.4.1 雷达数据预处理

雷达在目标探测、跟踪、数据处理过程中, 因环境或者系统内部多种因素综合影响, 雷达测量的航迹数据中常出现若干与目标真实位置偏离较大的数据, 即野值。野值会严重影响雷达航迹与 ADS-B 航迹一次差的统计、分析。系统采用 3σ 准则对雷达航迹进行野值剔除处理。雷达系统中斜距、方位角、俯仰角三坐标数据是相互关联的, 某一时刻一个维度的数据出现野值, 则另两个维度的数据通常也会出现野值。系统数据预处理过程中对雷达斜距维度的数据进行野值剔除:

1) 计算精度分析时间段内的均值:

$$(\hat{a}, \hat{e}, \hat{r}) = \frac{1}{M} \left[\sum_{i=1}^M (a_i, e_i, r_i) \right] \quad (3)$$

2) 计算标准差为:

$$\sigma_{(a,e,r)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M ((a_i, e_i, r_i) - (\hat{a}, \hat{e}, \hat{r}))^2}{M-1}} \quad (4)$$

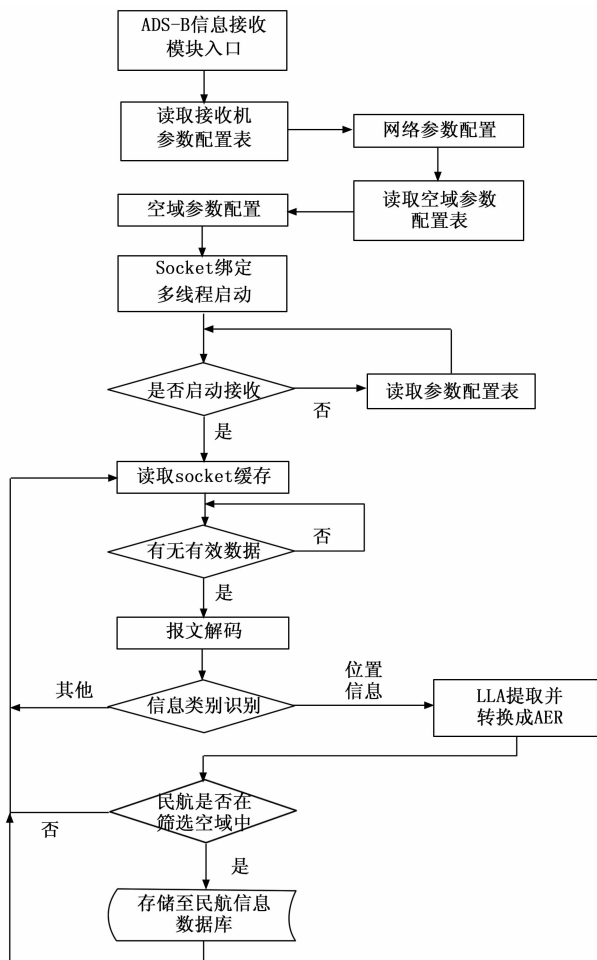


图 8 ADS-B 数据接收、解析流程图

3) 根据 3σ 准则, 当 $(a_i, e_i, r_i) > 3\sigma_{(a,e,r)}$ 时, (a_i, e_i, r_i) 为野值, 进行剔除;

4) 重复步骤 1) ~3), 直到该段雷达数据均满足 3σ 准则; 对野值剔除后的雷达数据进行线性内插处理, 获得时间序列连续的雷达航迹数据集。

3.4.2 ADS-B 航迹数据预处理

ADS-B 航迹数据与雷达航迹数据不同步, 在对已匹配航迹进行精度分析处理时将其统一到同一时间刻度上。由前文 2.2 章节分析得出的, ADS-B 航迹数据率典型值为 2 Hz, 比雷达航迹数据率低, 需将 ADS-B 航迹数据进行外推、内插处理, 保持与雷达航迹数据时间同步; 系统实现过程对比了拉格朗日多项式插值、三阶样条插值、线性插值、一阶样条插值, 综合考虑民航航迹稳定、机动少、算法资源消耗、算法误差及精度分析的实时性, 最终选取线性内插。

3.4.3 一次差分析

根据可行性分析过程的数据分析结果显示, 95% 的 ADS-B 航迹地址包时间间隔在 3.3 s 以内, 综合考虑精度分析的实时性及数据处理的有效性, 系统中精度分析时间间隔取 3.5 s。

结合固有 ADS-B 不可补偿延时特点、基于高精度雷达的

精度测试分析结果, 系统在 ADS-B 航迹数据中引入 0.15 s 典型延时补偿, 即 ADS-B 航迹数据时间戳前移 0.15 s。

服务器收到精度分析 Ajax 请求后, 根据待分析航迹 ID 列表从数据库中查询出航迹点迹集, 按时间戳进行对齐后进行一次差, 得到距离、方位角、俯仰角 3 个维度的一次差精度数据, 将数据返回浏览器进行显示解析。

4 系统验证与展望

系统样机在处于调试阶段、未经过检飞标定试验标校的中远程雷达上进行精度分析。将 ADS-B 接收天线与 GPS 天线架装到雷达控制舱顶部, 开机后通过自动获取 GPS 经度、纬度及海拔高度信息, 并设置为本站站址, 将目标空域左右边界设置为雷达天线法线角 $\pm 60^\circ$ 空域; 选择合适民航航迹进行雷达目标跟踪, 并进行航迹锁定、精度分析。

跟踪分析了 4 个批次民航目标, 精度分析结果如表 4 所示。

表 4 ADS-B 精度模拟测试数据表

航班 ID	距离误差/m	方位误差/ $^\circ$	俯仰误差/ $^\circ$
780E53	52	-1.45	0.48
781BE6	48	-1.42	0.49
7813C1	43	-1.44	0.54
78145B	56	-1.41	0.51

从表 4 可得, 以补偿后 ADS-B 航迹当真值进行雷达精度一次差分析, 4 个批次数据精度一致性较好, 可初步评估该雷达的距离、方位角、俯仰角 3 个维度误差分别为 50 m、 -1.43° 、 0.5° ; 该精度数据的准确性需雷达按传统动态标校方式标定后进一步验证。

试验过程中也验证了, 雷达周边的障碍物、民航航道资源对雷达精度实时分析的实施有较大影响, 建议在视场开阔、民航资源较丰富的场地开展多批次、多种飞行轨迹精度分析, 进一步提高精度数据可信度。

系统亦可通过升级差分 GPS 模块、多站接收定位等方式进一步提升系统精度。

5 结束语

针对雷达在使用维护阶段难以实施动态标校进行精度分析、威力检测的难点, 本文设计了一款 WEB 架构的雷达精度准实时分析系统, 充分利用丰富的民航 ADS-B 数据资源对雷达进行精度分析。系统对精度分析过程关注的可接收距离、数据率及系统固有精度进行了研究, 采用高精度雷达对系统固有误差进行摸底测试, 给予误差补偿后, 具有较高的角度精度; 距离精度虽不完全满足雷达动态标校需求, 但仍可满足大多数中远程雷达距离精度定性分析要求。系统即插即用, 便于雷达使用人员自行完成精度分析, 在雷达日常使用维护、战损修复后快速执行雷达性能定性评估, 具有较好地工程应用价值。

参考文献:

[1] 张 良, 靖季洛. 固态有源相控阵雷达的幅相误差影响分析及

- 其校准方法研究 [J]. 现代雷达, 1995, 17 (6): 54-60
- [2] 朱华统, 杨元喜, 吕志平. GPS 坐标系统的变换 [M]. 武汉: 测绘出版社, 1994.
- [3] 林 盛, 刘军伟, 徐 伟. 一种基于 ADS-B 的雷达系统误差标定方法 [J]. 船舶电子对抗, 2018, 41 (2): 45-48.
- [4] 杨蓓蓓, 张洪川. 一种基于 ADS-B 的雷达性能测试方法 [J]. 雷达与对抗, 2015, 35 (2): 12-15.
- [5] 姚 渊. 一种基于 ADS-B 信号的二次雷达精度评估方法 [J]. 装备制造技术, 2019 (4): 24-27.
- [6] 孙国政, 王索建, 董 扬. 基于 ADS-B 数据的雷达精度测量方法 [J]. 总体工程, 2011, 33 (2): 18-21.
- [7] 姚小勇. 利用 ADS-B 精度比对发拟合相控阵雷达大角度误差曲线 [J]. 电子技术与软件工程, 2023 (2): 138-141.
- [8] 王忠强. 基于 ADS-B 的雷达系统误差校准算法研究. 系统仿真技术 [J]. 2016, 12 (1): 30-34.
- [9] 葛 勇, 赵起超, 方诗麟. 基于 ADS-B 技术的雷达精度评估方法及应用 [J]. 通信电源技术, 2019, 36 (5): 66-67.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 原常弘. 联合 ADS-B 的雷达系统误差配准技术研究 [D]. 广州: 南方医科大学, 2020.
- [13] 王 锐, 谢 恺. 基于 ADS-B 的目标指示雷达模拟训练系统关键技术 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40 (5): 77-79.
- [14] 刘 浩, 吴国庆. 基于 ADS-B 的目标指示雷达战术性能测试方法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2015, 43 (5): 793-796.
- [15] 摆卫兵, 刘 毅, 李卓伦. 基于 ADS-B 技术的地空导弹雷达校飞系统设计 [J]. 现代电子技术, 2022, 45 (23): 28-32.
- [16] 孟 军, 马彦恒, 董 建, 等. 一种基于 ADS-B 的雷达跟踪精度计算方法 [J]. 中国测试, 2013, 39 (1): 110-113.
- 及其在数字图像水印中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2022, 27 (1): 252-261.
- [13] 张 捷, 田 聪, 段振华. 基于污染变量关系图的 Android 应用污点分析工具 [J]. 软件学报, 2021, 32 (6): 1701-1716.
- [14] 陶小燕, 闫春钢, 刘关俊. 基于 WFT-net 验证合理性的动态数据精炼策略 [J]. 计算机科学, 2021, 48 (7): 99-104.
- [15] 柳鹏凯, 王 鑫, 刘宝珠, 等. DB4Trans: 数据库内置知识图谱嵌入模型训练引擎 [J]. 计算机学报, 2022, 45 (9): 1969-1982.
- [16] 盖金晶, 郑 尚, 于化龙, 等. 一种跨项目缺陷预测的源项目训练数据选择方法 [J]. 南京师大学报 (自然科学版), 2022, 45 (1): 110-117.
- [17] 张 轶, 翟盛华, 陶海红. 单星定位中采用混沌映射的干扰源位置识别方法 [J]. 航空学报, 2022, 43 (7): 342-353.
- [18] 周玉鑫, 毕美华, 滕旭阳, 等. 基于混沌映射的 OFDM-PON 物理层加密及系统性能增强算法 [J]. 光学学报, 2021, 41 (16): 33-40.
- [19] 刘西林, 吴永飞, 肖翔宇, 等. 实离散分数 Krawtchouk 变换
- [17] 张成龙. 1090ES 模式下 ADS-B 接收机解码系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [18] 纪 宸. ADS-B 数据处理系统设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [19] 张登茂. 基于 ADS-B 的飞行器航迹处理及显示系统的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [20] 王 斌. 基于 Web 技术的 ADS-B 数据处理系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [21] JUNZI SUN. The 1090 Megahertz Riddle [M]. Netherlands: TU Delft OPEN Publishing, 2020.
- [22] 何桂萍, 徐亚军. ADS-B 数据链的比较及特性研究 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2010, 21 (4): 3-6.
- [23] ACP/WGM-8. VDL MODE 4 IMPLEMENTATION MANUAL [S]. Montreal: ICAO, 2006.
- [24] ACP WG-C. Implementation Manual for the Universal Access Transceiver (UAT) [S]. Montreal: ICAO, 2005.
- [25] DO-260A. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcast (TIS-B) [S]. Washington: RTCA, 2003.
- [26] 李自俊. ADS-B 广播式自动相关监视原理及未来的发展和应用 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2008, 19 (5): 11-14.
- [27] DO-242A. Development of intent information changes to revised minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast [C] // Washington: RCTA, 2022.
- [28] 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.
- [29] Besada Portas J A, Garcia Herrero J, de Miguel Vela G. Radar bias correction based on GPS measurements for ATC applications [J]. IEE Proc-Radar Sonar Navigation, 2002, 149 (3): 137-144.
- [30] 程 擎. ADS-B 延时时间计算方法的可行性分析 [J]. 计算机应用, 2012, 32 (9): 2664-2666.
- [20] 欧 明, 陈龙江, 吴家燕, 等. 一种基于离散余弦变换-惩罚最小二乘回归的区域高分辨率电离层 TEC 地图重构方法 [J]. 电波科学学报, 2022, 37 (3): 419-425.
- [21] 刘清源, 刘瑞佳, 王 健, 等. 基于边缘计算的泛在电力物联网群组密钥管理算法研究 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (7): 48-56.
- [22] 李锦青, 刘泽飞, 满振龙. 基于生成对抗网络的密钥生成方法及其在微光图像加密中的应用 [J]. 兵工学报, 2022, 43 (2): 337-344.
- [23] 娜茜泰, 高 飞, 翁 智, 等. 非完整约束多智能体系统基于屏障控制函数的分布式协同控制 [J]. 控制理论与应用, 2022, 39 (4): 663-670.
- [24] 解春雷, 杜润梅. 一类半线性退化抛物方程在边界控制函数作用下的近似能控性 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2021, 59 (3): 563-567.