

团 体 标 准

T/CAMC 0013-2025

低空装备环境感知与识别技术要求

Technical Requirements for Environmental Perception and Recognition of
Low-Altitude Equipment

征求意见稿

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国计算机自动测量与控制技术协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
4.1 感知设备要求	2
4.1.1 传感器配置	2
4.1.2 通信模块	2
4.2 数据处理与识别要求	3
4.2.1 多源数据融合	3
4.2.2 目标识别能力	3
4.3 安全与可靠性要求	3
4.3.1 冗余设计	4
4.3.2 抗干扰能力	4
4.3.3 故障处理	4
4.4 性能指标	4
5 测试与评估方法	5
5.1 测试环境与设备	5
5.1.1 实验室测试环境	5
5.1.2 现场测试环境	5
5.1.3 测试设备	5
5.2 实验室测试	5
5.2.1 功能测试	5
5.2.2 性能测试	5
5.3 现场验证	6
5.3.1 覆盖范围验证	6
5.3.2 动态目标跟踪验证	6
5.3.3 实际应用适配性测试	6
5.4 兼容性测试	6
5.4.1 数据传输兼容性	6
5.4.2 指令交互兼容性	6
5.5 评估判定规则	6

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国计算机自动测量与控制技术协会提出并归口。

本文件起草单位：福建省邮电规划设计研究院、湖南中电星河电子有限公司、齐鲁空天信息研究院、北京国科标研科技有限公司。

本文件主要起草人：赵云、赵泽文、姚东、高宏进、尚尔钧、张林虎。

低空装备环境感知与识别技术要求

1 范围

本文件规定了低空装备环境感知与识别的技术要求、测试与评估方法等内容。

本文件明确了低空装备环境感知与识别范围可包括气象环境、地理障碍物、空中交通（无人机、有人机）、地面活动等，可适用于低空飞行器、起降场（点）、管控平台等装备的环境感知与识别系统的设计、开发、测试及应用等。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 41450 无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测技术规范

GB/T 43570 民用无人驾驶航空器系统身份识别总体要求

GB/T 38948 民用无人机系统环境感知与避障系统技术要求

ISO 15964 无人机感知与避障系统

T/GDEIIA 56 垂直起降低空航空器起降场基础设施配置技术要求

MH/T 2015 低空飞行服务系统技术要求

MH/T 4044 民用无人机系统空中交通管理技术要求

MH/T 4055.2 低空飞行服务系统技术规范 第 2 部分：技术要求

MH/T 4055.3 低空飞行服务系统技术规范 第 3 部分：测试方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

低空装备 low altitude equipment

运行于低空空域的各类设备总称，包括低空飞行器、起降场（点）基础设施、低空管控平台及配套感知设备等。

3.2

环境感知 environmental perception

通过传感器、雷达、光电设备等感知装置，获取低空环境中气象、地理障碍物、空中交通、地面活动等信息，并进行去噪、校准、格式等初步技术处理。

3.3

目标识别 target recognition

基于环境感知数据，通过算法对目标进行分类（如区分无人机、有人机、建筑物）、身份确认（如解析设备 ID、航班号）及状态判断（如正常飞行/异常入侵）的技术过程。

4 技术要求

4.1 感知设备要求

感知设备应满足功能完整性、性能稳定性及环境适应性等要求，具体内容如下：

4.1.1 传感器配置

传感器需覆盖低空环境全要素监测，不同类型传感器技术参数应符合表 1 的规定：

表 1 传感器技术参数表

传感器类型	细分品类	技术参数要求
雷达系统	一次雷达	水平探测半径满足 $\geq 500\text{m}$ ，垂直探测高度满足 $\geq 300\text{m}$ ；距离误差满足 $\leq 5\text{m}$ ，方位角误差满足 $\leq 0.5^\circ$ ；抗电磁干扰强度满足 $\geq 30\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ (控制在 80MHz-2GHz 频段)
	二次雷达	支持 ADS-BIn/Out 功能；识别距离满足 $\geq 800\text{m}$ ，身份信息解析成功率满足 $\geq 98\%$ ；数据更新频率满足 $\geq 1\text{Hz}$ 。
	毫米波雷达	探测距离满足 $\geq 200\text{m}$ ，距离精度满足 $\leq 0.3\text{m}$ ；角度分辨率满足 $\leq 1^\circ$ ；支持对速度满足 0-30m/s 目标的稳定跟踪。
光电设备	可见光相机	分辨率满足 $\geq 1920 \times 1080$ ；针对翼展满足 $\geq 1\text{m}$ 无人机，探测距离满足 $\geq 500\text{m}$ ；帧率满足 $\geq 25\text{fps}$ ，支持自动对焦。
	红外相机	分辨率满足 $\geq 640 \times 512$ ；针对热源目标（如发动机）探测距离满足 $\geq 300\text{m}$ ；工作温度范围 -20°C - 50°C 。
	激光雷达	波长：905nm（近距）/1550nm（远距）探测距离满足 $\geq 300\text{m}$ ；点云密度满足： $\leq 200\text{m}$ 距离时， ≥ 10 点/ m^2 ，200-300m 距离时， ≥ 5 点/ m^2 。
气象传感器	风速传感器	测量范围 0-60m/s；采样频率满足 $\geq 1\text{Hz}$ ；误差范围控制在 $\pm 0.5\text{m}/\text{s}$ 。
	温度传感器	测量范围 -40°C - 60°C ；采样频率满足 $\geq 0.5\text{Hz}$ ；误差范围控制在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。
	降水传感器	测量范围 0-50mm/h；分辨率满足 $\leq 0.1\text{mm}$ ；支持雨、雪类型识别，识别准确率达到 $\geq 95\%$ 。
	能见度传感器	测量范围 50-10000m；误差达到 $\leq 10\%$ （能见度 500-10000m 时）采样频率控制在 $\geq 0.5\text{Hz}$ 。
地理信息传感器	GPS/北斗双模定位	静态定位精度满足 $\leq 1\text{m}$ ，动态定位精度满足 $\leq 3\text{m}$ ；冷启动时间控制在 $\leq 30\text{s}$ ；支持抗多路径干扰。
	激光雷达（地形建模）	地形建模误差控制在 $\leq 0.1\text{m}$ （点云密度 ≥ 10 点/ m^2 时）支持坡度 0-60° 地形的完整建模。

4.1.2 通信模块

通信模块需保障感知数据实时传输，技术要求如下：

- a) 网络适配, 支持 5G-A、卫星通信、物联网协议; 5G-A 下行速率应满足 $\geq 1\text{Gbps}$, 上行速率应满足 $\geq 100\text{Mbps}$, 端到端时延应控制在 $\leq 10\text{ms}$; 卫星通信支持双向数据传输, 速率应满足 $\geq 100\text{kbps}$ (无地面网络场景);
- b) 数据传输, 支持感知数据 (如雷达点云、图像) 加密传输 (采用 AES-256 加密算法); 数据传输丢包率应控制在 $\leq 0.1\%$ (网络带宽 $\geq 100\text{Mbps}$ 时);
- c) 兼容性, 支持与不同品牌管控平台、飞行器的通信接口适配 (如支持 WebSocket、TCP/IP 协议等)。

4.2 数据处理与识别要求

4.2.1 多源数据融合

多源数据融合包括但不限于如下内容:

- a) 融合算法, 需支持卡尔曼滤波 (用于动态目标位置预测, 滤波误差应控制在 $\leq 0.5\text{m}$)、贝叶斯估计 (用于多传感器数据可信度评估, 融合后数据可信度应满足 $\geq 95\%$);
- b) 融合周期, 数据融合周期应控制在 $\leq 100\text{ms}$, 确保实时性;
- c) 数据预处理, 需对原始传感器数据进行去噪 (如采用高斯滤波算法)、校准、格式统一, 预处理需满足耗时 $\leq 50\text{ms}$ 。

4.2.2 目标识别能力

目标识别需覆盖空中、地面、障碍物三类目标, 具体要求如下:

4.2.2.1 空中目标识别

空中目标识别包括但不限于如下内容:

- a) 无人机识别, 通过 RemoteID 模块解析设备 ID、位置、高度信息, 解析成功率应控制在 $\geq 99\%$; 支持对常见无人机型号的分类识别, 分类准确率应控制在 $\geq 98\%$;
- b) 有人机识别, 通过 ADS-B 信号解析航班号、起降机场、飞行计划信息, 解析成功率应控制在 $\geq 98\%$; 支持对轻型运动飞机、直升机的分类识别, 分类准确率应控制在 $\geq 97\%$ 。

4.2.2.2 障碍物识别

障碍物识别包括但不限于如下所示:

- a) 固定障碍物, 支持对建筑物 (高度应满足 $\geq 5\text{m}$)、山脉 (坡度应满足 $\geq 30^\circ$)、高压线路 (直径控制在 $\geq 0.1\text{m}$) 的识别, 识别准确率应达到 $\geq 99.5\%$;
- b) 移动障碍物, 支持对地面车辆 (速度控制在 $\geq 5\text{km/h}$)、行人 (身高满足 $\geq 1.2\text{m}$)、鸟类 (翼展满足 $\geq 0.3\text{m}$) 的识别, 识别准确率应控制在 $\geq 95\%$;
- c) 误报率, 各类障碍物识别误报率应控制在 $\leq 0.1\%$ (每 1000 次检测误报不超过 1 次)。

4.2.2.3 气象预警

气象预警包括但不限于如下所示:

- a) 当风速 $\geq 10\text{m/s}$ (5 级风)、降水 $\geq 10\text{mm/h}$ (中雨)、能见度 $\leq 500\text{m}$ 时, 系统需在 100ms 内生成预警信号;
- b) 预警信号需包含预警类型 (如“大风预警”)、影响范围、建议措施 (如“飞行器悬停”), 并推送至管控平台与关联飞行器。

4.3 安全与可靠性要求

4.3.1 冗余设计

冗余设计包括但不包括如下所示：

- 定位冗余，采用 GPS+北斗双模定位，当主定位模块（如 GPS）信号丢失时，备用模块（北斗）需在 50ms 内切换，切换后定位精度仍符合 4.1.1 要求；
- 雷达冗余，主雷达（一次雷达）失效时，备用雷达（毫米波雷达）需在 100ms 内启动，应覆盖主雷达 80%以上的探测范围；
- 电源冗余，关键感知设备（如雷达、光电设备）需配置双电源供电，当主电源中断时，备用电源（如锂电池）可维持设备连续工作 ≥ 4 小时。

4.3.2 抗干扰能力

抗干扰能力包括但不限于如下所示：

- 电磁兼容性，在 80MHz-2GHz 射频电磁场辐射（强度 30V/m）、1kHz 脉冲群干扰（电压 1kV）环境下，设备运行稳定性应满足 $\geq 99.9\%$ （连续工作 1000 小时故障次数应 ≤ 1 次）；
- 环境抗干扰，在小雨（降雨量 ≤ 5 mm/h）、中雪（降雪量 ≤ 2 mm/h）、雾霾（能见度 ≥ 200 m）环境下，传感器性能衰减应控制在 $\leq 10\%$ ；在 -20°C - 50°C 温度、10%-95%湿度（无凝露）环境下，设备可正常工作。

4.3.3 故障处理

故障处理包括但不限于如下所示：

- 异常检测，支持对传感器数据丢失、数据误差超范围（如雷达距离误差应控制在 > 10 m）、设备断电等异常实时检测，检测响应时间应控制在 ≤ 50 ms；
- 告警机制，当异常发生时，触发声光告警（如告警声级 ≥ 80 dB，告警灯光为红色闪烁，频率 1Hz），并向管控平台推送告警信息（包含异常类型、位置、时间等）；
- 备用方案，启动备用模块（如切换备用传感器）或应急措施（如暂停非关键感知功能），备用方案启动时间应控制在 ≤ 200 ms，保障系统核心功能不中断。

4.4 性能指标

感知系统整体性能需符合表 2 的规定：

表 2 感知系统性能参数表

性能指标	要求	测试条件
响应时间	从感知到数据输出延迟 ≤ 200 ms。	传感器满负荷工作（同时采集雷达、光电、气象数据）。
覆盖范围	雷达综合探测半径满足 ≥ 500 m；激光雷达有效覆盖面积 $\geq 78500 \text{ m}^2$ （半径 500m）。	无遮挡开阔区域
数据完整性	传输丢包率满足 $\leq 0.1\%$ ；存储完整性控制在 $\geq 99.99\%$ 。	连续传输 10000 条感知数据
识别准确率	空中目标识别准确率达到 $\geq 98\%$ ；障碍物识别准确率应控制在 $\geq 99\%$ 。	包含 100 个空中目标、200 个障碍物的测试场景。
系统稳定性	至少连续工作 72 小时无故障；平均无故障时间（MTBF）至少满足 ≥ 1000 小时。	模拟城市低空复杂环境。

5 测试与评估方法

5.1 测试环境与设备

5.1.1 实验室测试环境

实验室测试环境包括但不限于如下所示：

- a) 环境舱，可模拟风速 0-20m/s、温度-20℃-50℃、降水 0-20mm/h 的气象条件；
- b) 场景模拟平台，可搭建包含建筑物模型（高度 5-30m）、植被模型（高度 1-10m）、无人机模型（翼展 0.5-2m）的静态场景，以及可移动车辆模型（速度 0-30m/s）的动态场景；
- c) 测试仪器，包括信号发生器（模拟电磁干扰）、高精度定位仪（误差控制在 $\leq 0.1\text{m}$ ）、数据分析仪（记录传输延迟与丢包率等）。

5.1.2 现场测试环境

选择三类典型低空场景，每类场景面积应满足 $\geq 1\text{km}^2$ ，具体要求如下：

- a) 城市场景，人口密集、建筑物密集（如高度应满足 $\geq 20\text{m}$ 的建筑 ≥ 20 栋），周边有高压线路、通信基站等电磁干扰源；
- b) 山区场景，海拔差应满足 $\geq 500\text{m}$ ，植被覆盖率应满足 $\geq 60\%$ ，包含山谷、陡坡等地形；
- c) 物流航线场景，固定物流航线（如长度满足 $\geq 10\text{km}$ ），包含 3 个起降点，日均无人机起降应满足 ≥ 50 架次。

5.1.3 测试设备

测试设备相关内容包括但不限于如下所示：

- a) 待测试感知系统，包含完整的传感器、通信模块、数据处理单元；
- b) 参考设备，高精度雷达（如距离误差应满足 $\leq 0.5\text{m}$ ）、专业气象站、无人机跟踪系统（定位精度应控制在 $\leq 0.3\text{m}$ ），用于验证待测试系统数据准确性。

5.2 实验室测试

5.2.1 功能测试

功能测试内容包括但不限于如下所示：

- a) 传感器功能测试，逐一启动雷达、光电、气象、地理信息传感器，检查是否正常采集数据（如雷达是否生成点云、气象传感器是否输出风速数据），功能覆盖率需达到 100%；
- b) 数据融合测试，同时启动所有传感器，如输入 100 组包含冗余、冲突的数据（如雷达与光电设备对同一目标的位置偏差应控制在 $\geq 10\text{m}$ ），验证融合算法是否消除冲突，融合后数据与参考设备数据偏差应控制在 $\leq 1\text{m}$ ；
- c) 目标识别测试，在场景模拟平台中放入多个测试目标（如 20 个无人机、10 个有人机模型、20 个障碍物等），启动识别功能，记录识别准确率与误报率。

5.2.2 性能测试

性能测试内容包括但不限于如下所示：

- a) 响应时间测试，通过数据分析仪记录从传感器采集数据到系统输出处理结果的时间，至少可连续测试 100 次，计算平均值，需控制在 $\leq 200\text{ms}$ ；

- b) 数据完整性测试，如连续传输 10000 条感知数据，统计丢包数量与存储丢失数量，丢包率应控制在 $\leq 0.1\%$ 、存储完整性应控制在 $\geq 99.99\%$ ；
- c) 冗余切换测试，人为断开主定位模块（GPS）、主雷达电源，记录备用模块切换时间，需分别控制在 $\leq 50\text{ms}$ 、 100ms 。

5.2.3 环境适应性测试

环境适应性测试内容包括但不限于如下所示：

- a) 气象适应性测试，在环境舱内模拟风速如 5m/s 、 10m/s 、 20m/s ，温度如 -20°C 、 0°C 、 50°C ，降水可 5mm/h 、 10mm/h 、 20mm/h ，每种条件下测试 30 分钟，记录传感器性能衰减率，需控制在 $\leq 10\%$ ；
- b) 电磁抗扰测试，通过信号发生器在 80MHz - 2GHz 频段施加 $30\text{dB}\mu\text{V/m}$ 辐射干扰，测试 1 小时，记录系统故障次数，需控制在 ≤ 1 次。

5.3 现场验证

现场验证需在城市、山区、物流航线三类场景各开展 72 小时连续测试，步骤如下：

5.3.1 覆盖范围验证

在测试场景内布设多个参考点（如距离待测试系统 100m 、 200m 、 \dots 、 1000m ），通过参考雷达验证待测试系统的探测覆盖情况，记录雷达综合探测半径，需满足 $\geq 500\text{m}$ ；通过激光雷达点云数据统计有效覆盖面积，需满足 $\geq 78500\text{ m}^2$ 。

5.3.2 动态目标跟踪验证

协调多架无人机（如飞行速度 5m/s 、 10m/s 、 15m/s ）、多辆地面车辆（如速度 10km/h 、 30km/h 、 50km/h ）在测试场景内运动，通过参考跟踪系统验证待测试系统的跟踪成功率，需控制在 $\geq 99\%$ ；记录异常目标（如超速无人机）的预警响应时间，需满足 $\leq 100\text{ms}$ 。

5.3.3 实际应用适配性测试

实际应用适配性测试包括但不限于如下所示：

- a) 与管控平台对接，将感知系统数据接入当地低空交通管控平台，测试数据传输成功率（需控制在 $\geq 99.9\%$ ）、指令响应时间（需满足 $\leq 100\text{ms}$ ）；
- b) 与飞行器联动，将气象预警信号推送至多架无人机，验证飞行器是否按预警建议调整策略（如悬停、返航），联动成功率需控制在 $\geq 98\%$ 。

5.4 兼容性测试

5.4.1 数据传输兼容性

将待测试系统与不同品牌无人机、地面站连接，传输 1000 条感知数据（如雷达点云），记录数据解析成功率，需控制在 $\geq 99.9\%$ ，验证数据格式（JSON/XML）是否兼容，兼容率需达到 100%。

5.4.2 指令交互兼容性

从不同品牌地面站向待测试系统发送 100 条控制指令（如“启动雷达”），记录指令响应成功率，需控制在 $\geq 99\%$ ；响应时间需满足 $\leq 100\text{ms}$ 。

5.5 评估判定规则

测试结果需满足以下所有条件，方可判定为合格：

- a) 实验室测试中，功能测试通过率应为 100%，性能测试（如响应时间、数据完整性、冗余切换）全部符合 4.4 要求，环境适应性测试性能衰减率应控制在 $\leq 10\%$ ；
- b) 现场验证中，不同类场景的覆盖范围、动态目标跟踪成功率、应用适配性均符合要求；
- c) 兼容性测试中，数据解析成功率应控制在 $\geq 99.9\%$ ，指令响应成功率应控制在 $\geq 99\%$ ；
- d) 测试过程中无重大故障（如系统宕机超过 5 分钟、关键数据丢失不应超过 1%）。