

ICS 49.100

CCS V 82

# 团 体 标 准

T/GFQX XXXXX—202X

## 低空空域感知地面系统设计要求

Design requirements for low-altitude airspace sensing ground system

(征求意见稿)

202X—XX—XX 发布

202X—XX—XX 实施

中国国防工业企业协会  
国家国防标准创新基地

发布



# 目 次

前 言 .....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 缩略语.....	1
5 设计依据.....	2
5.1 功能要求 .....	2
5.2 性能要求 .....	2
5.3 可靠性要求 .....	2
5.4 安全性要求 .....	2
5.5 定位及通信要求 .....	3
5.6 环境适应性要求 .....	3
5.7 电磁兼容性要求 .....	3
6 设计准则.....	3
6.1 先进性与继承性原则 .....	3
6.2 通用化与标准化原则 .....	3
6.3 可靠性与安全性原则 .....	3
6.4 经济性与可维护性原则 .....	4
6.5 人机工程与环境适应性原则 .....	4
7 设计流程.....	4
8 设计内容.....	5
8.1 总体设计 .....	5
8.2 分系统设计 .....	6
9 设计验证.....	14
9.1 数据安全试验 .....	14
9.2 核心功能验证 .....	14

T/GFQX XXXX—XXXX

## 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。

本文件由湖南经纬航通信息技术有限公司提出。

本文件由中国国防工业企业协会、国家国防标准创新基地联合归口。

本文件起草单位：湖南经纬航通信息技术有限公司、成都美行瑞空科技有限公司、沈阳美行科技股份有限公司。

本文件主要起草人：钟进、易显、刘国兴，赖克、焦迎东、刘英华、谢巍、刘秋平。



# 低空空域感知地面系统设计要求

## 1 范围

本文件规定了低空空域感知地面系统的设计依据、设计准则、设计内容、设计流程及设计验证。  
本文件适用于低空空域感知地面系统的设计。

## 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 2423.1—2008 电工电子产品环境试验
- GB/T 2423.56—2006 电工电子产品环境试验
- GB 9254—2008 信息技术设备的无线电骚扰限值和测量方法
- GB/T 17626.3—2016 电磁兼容试验和测量技术射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 17626.6—2013 电磁兼容试验和测量技术射频场感应的传导骚扰抗扰度
- GB/T 20988—2007 信息安全技术信息系统灾难恢复规范
- GB/T 22239—2019 信息安全技术网络安全等级保护基本要求
- GB/T 31168—2014 信息安全技术云计算服务安全能力要求
- GB/T 32401—2015 VHF/UHF频段无线电监测接收机技术要求及测试方法
- GB/T 35018—2018 民用无人驾驶航空器系统分类及分级
- GB/T 38152—2019 无人驾驶航空器系统术语
- GB 42590—2023 民用无人驾驶航空器系统安全要求
- GJB 5617—2006 电磁频谱监测系统通用要求
- GJB 5800—2006 通信信号侦察频谱监测设备通用要求
- GJB 9492—2018 军用宽频段电磁信号监测分析仪技术要求
- GM/T 0034—2014 基于SM2密码算法的证书认证系统密码及其相关安全技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**低空空域感知地面系统** low-altitude airspace sensing ground system

专门部署于地面、面向 3000 m 以下低空空域，具备“飞行器信号捕获、多类型目标定位、跨平台数据交互”核心能力的一体化专用系统，其服务对象覆盖多类型低空航空器，包括民航支线客机、通航飞机等有人航空器，以及无人机、eVTOL、动力伞、滑翔机等无人/轻小型航空器。

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

- ADS-B——广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)
- BDS——北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System)
- eVTOL——电动垂直起降航空器 (Electric Vertical Take-off and Landing)
- LoRa——远距离低功耗无线通信 (Long Range Radio)

MQTT——消息队列遥测传输协议 (Message Queuing Telemetry Transport)

Remote ID——无人机的远程识别 (RemoteIdentification)

RMS——均方根 (Root Mean Square)

RTK——实时动态差分定位技术 (Real-Time Kinematic)

TCP——传输控制协议 (Transmission Control Protocol)

VDC——直流电压 (Volt Direct Current)

## 5 设计依据

### 5.1 功能要求

低空空域感知地面系统应满足下列功能要求:

- a) 具备对 70 MHz 至 6 GHz 频段内航空器无线电信号的侦测能力;
- b) 支持民航、通航、军航、无人机、eVTOL、动力伞、滑翔机等多类型飞行器的信号识别;
- c) 实现与空中交通管制系统、低空飞行服务站等系统或平台的数据交互, 提供飞行器位置、速度、高度等实时信息;
- d) 支持对 Remote ID、LoRa、ADS-B、北斗报文等多种制式无线电信号的监测和分析;
- e) 支持从不同制式通信数据中提取飞行器综合信息 (位置、速度、身份识别、飞行状态等);
- f) 具备 RTK 定位增强服务能力;
- g) 支持蜂窝网络及卫星通信多种通信方式, 实现数据实时传输;
- h) 具备智能电源管理功能, 支持动态负载调整、低功耗模式及故障诊断与隔离。

### 5.2 性能要求

低空空域感知地面系统应满足下列性能要求:

- a) 频谱侦测分辨率不大于 1 kHz, 灵敏度不大于-130 dBm, 幅度精度不大于 $\pm 2$  dB, 采样率不小于 100 MS/s;
- b) 扫频速度需满足在 1 GHz 频段内完成一次完整扫描的时间不大于 1 s;
- c) 从信号接收完成到进行初步处理 (如信号分类、特征提取等) 的延迟应不大于 100 ms;
- d) 满足低空飞行器高速移动不小于 100 m/s 时的动态监测需求;
- e) 同时监测和分析不小于 100 个信号;
- f) 数据处理后飞行器位置精度不大于 5 m, 速度精度不大于 0.1 m/s;
- g) 飞行位置报及飞行状态信息更新频率不小于 1 s;
- h) 系统存储容量不小于 4 TB, 支持 30 d 连续空域感知数据存储;
- i) 供电系统输入电压范围 18 VDC~32 VDC, 设备待机功耗不大于 5 W。

### 5.3 可靠性要求

低空空域感知地面系统应满足下列可靠性要求:

- a) 频谱侦测时对连续波信号误报率小于 5%, 对脉冲信号脉冲宽度不小于 10  $\mu$ s 的误报率小于 5%;
- b) 多信号处理时各信号识别准确率大于 95%, 强干扰下识别准确率降低幅度小于 15%;
- c) 信号特征提取准确率不小于 95%, 信号分类准确率不小于 95%, 已知信号识别时间不大于 50 ms, 未知信号初步分类和告警时间不大于 200 ms;
- d) 同时处理大于 100 个信号时性能下降不超过 10%;
- e) 数据交互时数据完整性不小于 99.9%, 数据准确性不小于 99.5%。

### 5.4 安全性要求

低空空域感知地面系统应满足下列安全性要求：

- a) 集成多因素认证系统，支持用户名/密码、数字证书、硬件令牌等多种认证方式的组合；
- b) 具备基于角色的访问控制模型，按用户/设备角色分配数据访问与操作权限；
- c) 数据存储采用 AES-256 或国密 SM4 算法进行全盘加密，结合密钥管理系统定期更新密钥；
- d) 数据传输采用 TLS 1.3 协议进行端到端加密，防止数据泄露与篡改。

## 5.5 定位及通信要求

低空空域感知地面系统应满足下列定位及通信要求

- a) 位置增强服务系统的定位精度：单点定位水平不大于 1.5 m (RMS)，高程定位精度不大于 2.5 m (RMS)；RTK 定位水平不大于 0.8 cm+1 ppm (RMS)，高程定位精度不大于 1.5 cm+1 ppm (RMS)；
- b) 通信系统 4G 网络下行速率不小于 50 Mbps、上行速率不小于 20 Mbps，5G 网络下行速率不小于 1 Gbps、上行速率不小于 100 Mbps，Wi-Fi 2.4 GHz 频段速率不小于 300 Mbps、5 GHz 频段速率不小于 1 Gbps。

## 5.6 环境适应性要求

低空空域感知地面系统应满足下列环境适应性要求：

- a) 工作温度范围为 - 40℃~ 70℃；
- b) 外壳防护等级不低于 IP 65；抗盐雾腐蚀不小于 96 h；
- c) 电气安全应满足过压、欠压、反接保护要求。

## 5.7 电磁兼容性要求

低空空域感知地面系统应满足下列电磁兼容性要求：

- a) 传导发射与辐射发射满足通用限值，避免干扰其他通信系统；
- b) 抗干扰能力应满足在 200 V/m 场强射频干扰下，输出电压波动不大于 ±1%。

## 6 设计准则

### 6.1 先进性与继承性原则

低空空域感知地面系统应满足下列先进性与继承性原则：

- a) 继承 ADS-B、北斗定位等成熟技术的应用经验，可兼容低轨卫星通信等新技术，确保系统技术领先性与稳定性；
- b) 支持动态升级，可扩展支持未来新制式信号（例如新型无人机 Remote ID）的监测能力。

### 6.2 通用化与标准化原则

低空空域感知地面系统应满足下列通用化与标准化原则：

- a) 数据交互应采用 XML、JSON 等标准格式，支持 TCP/IP、MQTT 等通用协议，确保与不同系统的兼容性；
- b) 接口设计应符合国际通用标准，如 RJ45 以太网接口、USB 3.0 物理接口，便于设备集成与维护。

### 6.3 可靠性与安全性原则

低空空域感知地面系统应满足下列可靠性与安全性原则：

- a) 通信系统应采用冗余设计，蜂窝网络与卫星通信双链路热备，主备切换时间不能影响数据传输连续性；

- b) 数据传输与存储应采用 AES-256 加密算法，实现端到端安全防护，符合国家信息安全等级保护要求。

### 6.4 经济性与可维护性原则

低空空域感知地面系统应满足下列经济性与可维护性原则：

- a) 硬件选型应采用国产化器件，降低成本同时保障供应链安全；
- b) 系统支持远程诊断与故障隔离，故障模块可热插拔更换，维护中断时间满足用户预期，减少运维成本。

### 6.5 人机工程与环境适应性原则

低空空域感知地面系统应满足下列人机工程与环境适应性原则：

- a) 设备结构设计考虑便携性与安装便利性，控制设备重量，支持地面固定与车载移动两种部署模式；
- b) 适应极端环境工况，抗振性能较好，确保运输与运行过程中的设备完好性。

## 7 设计流程

低空空域感知地面系统设计流程见图 1。

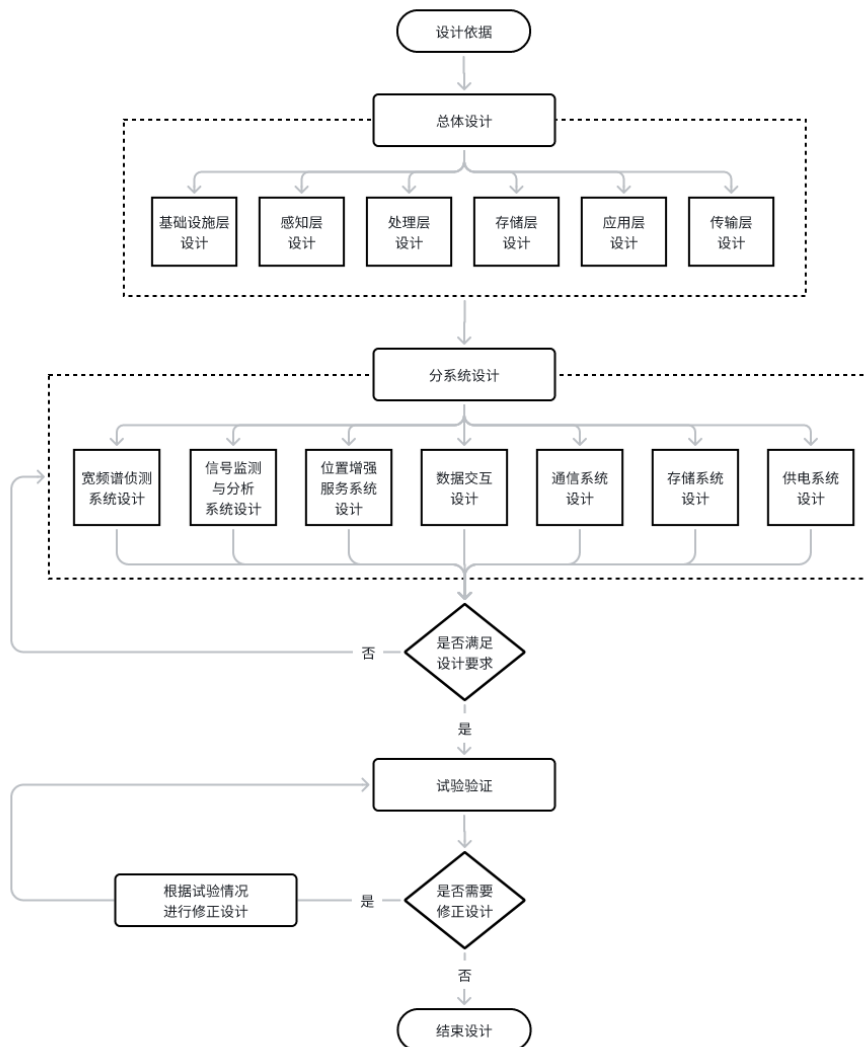


图 1 低空空域感知地面系统设计流程图

## 8 设计内容

### 8.1 总体设计

#### 8.1.1 概述

低空空域感知地面系统整体采用感知层、处理层、传输层、存储层、应用层及基础设施层的六层分层架构进行设计，各层级职责相互解耦，能够有效降低硬件模块升级的耦合性，并支持功能的灵活扩展。系统总体架构设计见图 2。

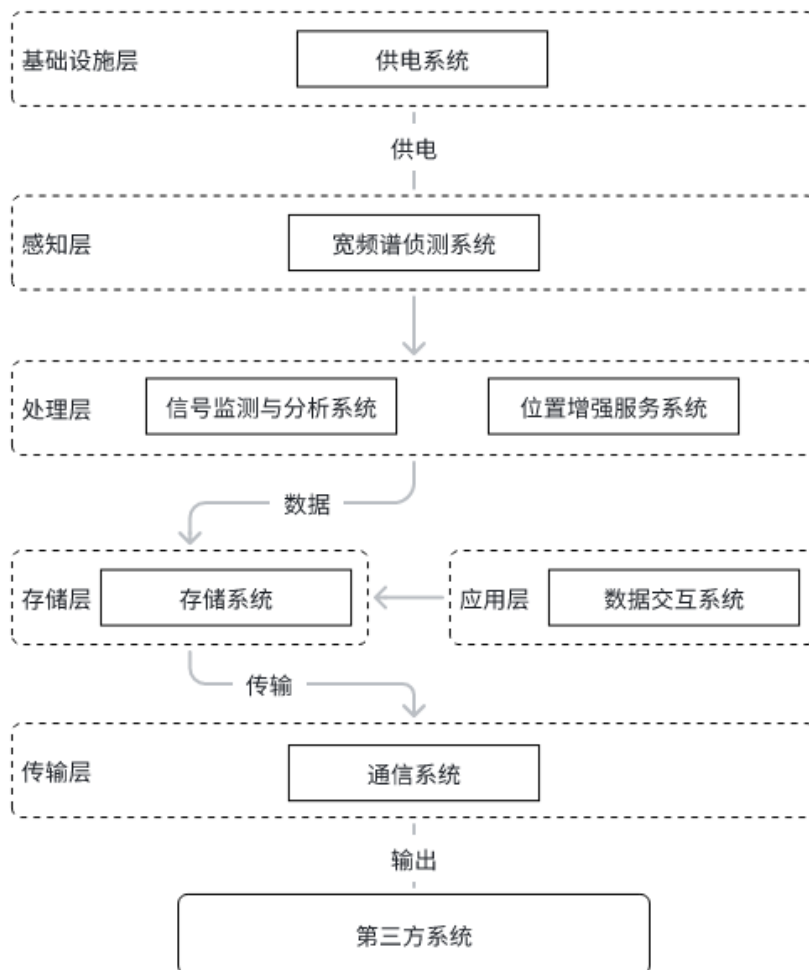


图 2 低空空域感知地面系统架构图

#### 8.1.2 感知层设计

感知层设计应满足以下要求：

- 核心功能：通过宽频谱侦测系统捕获航空器无线电信号（覆盖民航、通航、无人机等多类型），并将捕获的原始信号传输至处理层信号监测与分析系统，作为后续信号处理的输入源。
- 硬件组成：宽频带接收模块，含天线阵列、射频前端及信号调理电路；
- 技术参数：扫描速度不大于 1 s/ GHz（1 GHz 频段内完成扫描），捕获灵敏度不大于-100 dBm。

### 8.1.3 处理层设计

处理层设计应满足以下要求：

- a) 功能：通过信号监测与分析系统对感知层信号进行处理（分类、解析），融合位置增强服务系统生成的高精度位置信息，将处理后的信号特征数据同步至数据交互系统；
- b) 硬件组成：高性能 DSP 处理器、FPGA 加速模块、差分数据处理单元；
- c) 技术参数：多制式信号解析准确率不小于 95%，处理延迟不大于 50 ms，RTK 实时差分定位精度为平面  $\pm(0.8\text{ cm} + 1 \times 10^{-6} \times D)$ ，高程  $\pm(1.5\text{ cm} + 1 \times 10^{-6} \times D)$ 。

### 8.1.4 应用层设计

应用层设计应满足以下要求：

- a) 功能：通过数据交互系统实现与第三方系统的标准化数据共享；
- b) 硬件组成：通信接口卡（支持 TCP/IP、MQTT 协议）、协议转换模块（实现 XML/JSON 格式转换）；
- c) 技术指标：数据转换延迟不大于 20 ms，并发连接数不小于 100。

### 8.1.5 传输层设计

传输层设计应满足以下要求：

- a) 功能：通过通信系统的双链路传输机制，实现内部各层数据传输及与外部第三方系统的通信；
- b) 硬件组成：交换机、5G 模块、卫星通信模块；
- c) 技术指标：内部总线速率不小于 1 Gbps（保障处理层与存储层 / 应用层数据实时交互），外部传输速率 5G 链路不小于 1 Gbps，卫星链路不小于 64 kbps（天通一号）。

### 8.1.6 存储层设计

存储层设计应满足以下要求：

- a) 功能：通过存储系统安全存储信号处理结果、位置轨迹数据；
- b) 硬件组成：SSD 阵列不小于 4 TB 容量（支持动态扩容至 10 TB）、RAID 控制器；
- c) 技术指标：顺序读不小于 500 MB/s，顺序写不小于 400 MB/s，支持 30 d 连续数据存储。

### 8.1.7 基础设施层设计

基础设施层设计应满足以下要求：

- a) 功能：通过供电系统为全系统提供稳定电力，支持智能管理与冗余备份；
- b) 硬件组成：宽电压输入（18VDC~32VDC）、备用电源（锂电池组，支持不小于 30 min 应急供电）；
- c) 技术指标：顺序读不小于 500 MB/s，顺序写不小于 400 MB/s，支持 30 d 连续数据存储。

## 8.2 分系统设计

### 8.2.1 宽频谱侦测系统

#### 8.2.1.1 侦测范围设计

侦测范围设计要求如下：

- a) 配置宽频带射频前端，集成可覆盖 70 MHz 至 6 GHz 的超宽带天线与低噪声放大器，实现全频段信号接收；
- b) 针对 ADS-B（1090MHz）、航空器 VHF（118-137 MHz）、无人机 Wi-Fi（2.4 GHz/5.8 GHz）等关键频段，设计专用窄带滤波器，提升特定频段的信号接收灵敏度。

#### 8.2.1.2 频谱扫描设计

频谱扫描设计要求如下：

- a) 采用高速数字中频处理技术，配置 1 kHz 步进的频率合成器，确保频率分辨率不大于 1 kHz；
- b) 设计并行扫频架构，通过多通道同时扫描不同子频段，结合时分复用技术，实现 1GHz 频段内 1 s 内完成一次完整扫描；
- c) 优化信号处理流程，采用 FPGA（现场可编程门阵列）进行实时预处理，加速信号从接收到初步处理。

### 8.2.1.3 接收通道设计

接收通道设计要求如下：

- a) 配置高动态范围 ADC（模数转换器）与自动增益控制电路，结合低噪声前端设计，实现不小于 100 dB 的动态范围；
- b) 采用超低噪声放大器与低损耗滤波器，降低接收链路噪声系数，确保灵敏度不大于 -130 dBm；
- c) 设计幅度校准电路，通过定期校准补偿链路损耗，控制幅度精度在  $\pm 2$  dB 以内；
- d) 选用低相位噪声的本地振荡器，并优化锁相环设计，确保载波偏移 10 kHz 处相位噪声不大于 -100 dBc/Hz。

### 8.2.1.4 采样带宽设计

接收通道采用以下设计方法：

- a) 配置高速 ADC（模数转换器）芯片，结合多通道并行采样技术，实现不小于 50 MHz 的实时带宽；
- b) 采用过采样技术提升有效采样率，确保采样率不小于 100 MS/s，满足信号无失真采集。

### 8.2.1.5 信号侦测与分析设计

#### 8.2.1.5.1 信号侦测

信号侦测采用以下设计方法：

- a) 针对连续波信号，设计基于能量检测的实时监测算法，结合信号特征匹配，确保 1 s 内准确检测并识别，同时通过噪声抑制技术将误报率控制在小于 5%；
- b) 对于脉冲信号，开发脉冲宽度识别模块，设定 10  $\mu$ s 阈值触发检测，结合脉冲重复周期分析，实现 2 s 内完成检测与识别，通过脉冲去交织算法降低误报率至小于 5%；
- c) 采用多信号分离算法（如盲源分离），结合自适应滤波技术，实现对大于 10 个不同频率、强度信号的同时处理与区分，通过机器学习模型优化识别逻辑，确保各信号识别准确率大于 95%；
- d) 集成自适应抗干扰模块，采用跳频跟踪与波束成形技术，抑制强干扰信号，确保目标信号侦测与识别准确率降低幅度小于 15%，同时设计硬件防护电路。

#### 8.2.1.5.2 信号分析

信号分析采用以下设计方法：

- a) 开发实时频谱分析模块，通过快速傅里叶变换与峰值检测算法，实时提取信号频率、功率、带宽等参数，可通过图形化界面显示；
- b) 构建调制方式特征库，采用模式识别算法，对 AM（调幅）、FM（调频）、PM（调相）、ASK（幅移键控）、FSK（频移键控）、PSK（相移键控）等常见调制方式进行分类识别，通过特征参数比对提升识别准确率。

## 8.2.2 信号监测与分析系统

### 8.2.2.1 多制式支持设计

### 8.2.2.1.1 概述

支持对多种无线电信号监测和分析，包括但不限于 Remote ID、LoRa、ADS-B、北斗报文。

### 8.2.2.1.2 Remote ID 信号监测

Remote ID 信号监测采用以下设计方法：

- a) 通过配置 2.4 GHz/5.8 GHz 双频段接收模块，结合宽带射频前端覆盖常见 Remote ID 频段；
- b) 采用多目标跟踪算法（如卡尔曼滤波），通过信号到达时间差定位技术，实现同时侦测并跟踪大于 20 架次无人机的 Remote ID 信号；
- c) 设计高速数据解析电路，确保信息更新频率不小于 1 s；
- d) 开发 Remote ID 协议解析模块，提取信号中的飞行器 ID、位置、高度、类别、注册号等关键信息，并通过可视化界面展示。

### 8.2.2.1.3 LoRa 信号监测

LoRa 信号监测采用以下设计方法：

- a) 通过配置可切换频段的射频模块，可覆盖 433 MHz、470 MHz、868 MHz、915 MHz 等常见 LoRa 频段；
- b) 设计信道带宽自适应调整电路，支持 125 kHz、250 kHz、500 kHz 带宽切换；
- c) 开发扩频因子识别算法，通过相关运算匹配扩频码，实现 7-12 扩频因子的识别；
- d) 构建编码率检测模型，基于比特错误率分析识别 4/5、4/6、4/7、4/8 编码率，确保 50 kbps 数据速率的稳定接收。

### 8.2.2.1.4 ADS-B 信号监测

ADS-B 信号监测采用以下设计方法：

- a) 通过配置 1090 MHz 专用接收通道，结合带通滤波器与高增益天线，增强信号接收能力；
- b) 设计信号同步电路，匹配 ADS-B 标准数据更新率（0.5-10s/次），确保信号连续捕获；
- c) 开发 ADS-B 报文解析模块，解码 OUT 信息中的位置、速度、识别号、高度、航向等关键数据，并进行校验纠错。

### 8.2.2.1.5 北斗信号监测

北斗信号监测采用以下设计方法：

- a) 通过配置北斗 RDSS 专用接收模块，覆盖 B1I（1561.098 MHz）、B2I（1615.68 MHz）、B3I（1268.548 MHz）频段，结合窄带滤波技术提升信号抗干扰能力；
- b) 设计带宽可调电路，支持 2 MHz-4 MHz 信号带宽，匹配北斗短报文信号特性；
- c) 开发调制方式识别模块，通过相位检测区分 BPSK（B1I、B3I）和 QPSK（B2I）调制信号；
- d) 配置低速率解调电路，支持 100 bps-1000 bps 数据速率，解析短报文中的发送方 ID、位置、时间戳、文本内容等信息。

## 8.2.2.2 数据处理能力设计

### 8.2.2.2.1 信号分类识别

信号分类识别采用以下设计方法：

- a) 构建信号特征提取模型，自动提取频率、带宽、调制方式、信号强度等特征，结合特征库匹配确保提取准确率不小于 95%；

- a) 开发多制式信号分类器，基于决策树与支持向量机融合算法，实现不同制式信号类型的快速分类，确保分类准确率不小于 90 %；
- b) 设计未知信号检测模块，通过异常特征识别与阈值触发机制，对未知信号进行初步分类和告警，控制初步分类和告警时间不大于 200 ms；
- c) 针对已知信号制式，预存特征模板并采用快速匹配算法，确保识别时间不大于 50 ms。

#### 8.2.2.2.2 多信号运行处理

多信号运行处理采用以下设计方法：

- a) 采用分布式处理架构与并行计算技术，支持同时监测和分析不小于 100 个信号；
- b) 设计信号隔离电路，结合自适应滤波与干扰抑制算法，确保不同信号间交叉干扰不大于 -60 dB；
- c) 优化资源调度算法，动态分配计算资源，确保同时处理不小于 100 个信号时性能下降不超过 10 %；
- d) 开发多源数据融合引擎，采用卡尔曼滤波与加权融合算法，从不同制式通信数据中提取飞行器综合信息，结合误差补偿模型确保融合后位置精度不大于 5 m、速度精度不大于 0.1 m/s；
- e) 设计数据关联算法，通过位置、时间戳、信号特征多维度匹配，准确关联同一飞行器的多源信息，确保关联准确率不小于 95 %；
- f) 采用数据校验与冗余存储机制，结合纠错编码技术，保障信号处理过程中数据完整性不小于 99.9 %。

#### 8.2.2.2.3 测量结果展示设计

测量结果展示采用以下设计方法：

- a) 开发实时数据可视化模块，集成频谱绘图引擎与曲线生成算法，支持频谱图、信号强度随时间变化曲线等图形化展示；
- b) 设计数据表格生成器，按信号类型、时间、参数等维度组织数据，实现表格化展示；
- c) 支持数据实时刷新与历史回溯，确保展示内容与测量结果同步。

#### 8.2.2.2.4 数据记录设计

数据记录采用以下设计方法：

- a) 配置大容量存储模块，结合数据压缩算法，支持至少 30 d 的数据存储；
- b) 开发自动备份程序，设定 24 h 为备份周期，通过冗余存储机制防止数据丢失；
- c) 集成数据查询与导出引擎，支持按时间、信号类型等条件筛选，导出格式兼容 Excel、CSV 等通用格式。

### 8.2.3 位置增强服务系统

#### 8.2.3.1 定位增强设计

##### 8.2.3.1.1 高精度定位

实现高精度定位，采用以下设计：

- a) 针对单点定位，优化伪距测量算法，结合电离层与对流层误差模型进行修正，确保水平精度不大于 1.5 m (RMS)、高程精度不大于 2.5 m (RMS)；
- b) 针对 RTK 定位，采用载波相位差分技术，结合实时差分数据，实现水平精度不大于 0.8 cm + 1 ppm (RMS)、高程精度不大于 1.5 cm + 1 ppm (RMS)。

### 8.2.3.1.2 定位增强

定位增强采用以下设计：

- a) 设计基准站数据接收模块，支持与地面基准站网络的通信，接收并解析 RTCM SC-104 格式的差分数据；
- b) 配置多通道接收电路，最大支持 1507 通道，提升信号捕获能力；
- c) 优化定位初始化算法，采用快速捕获与跟踪技术，冷启动时间不大于 30 s，热启动时间不大于 5 s，RTK 初始化时间不大于 5 s；
- d) 集成高精度时间同步模块，通过北斗授时信号校准本地时钟，确保授时精度达到 20 ns RMS；
- e) 开发失锁重捕算法，结合历史轨迹预测与信号增强技术，控制失锁重捕时间不大于 2 s。

### 8.2.3.2 实时处理与校正设计

#### 8.2.3.2.1 实时处理

实现定位数据实时输出，采用以下设计：

- a) 采用 FPGA+DSP（数字信号处理器）并行处理架构，加速定位数据的解算与校正，控制从数据采集到位置输出的延迟不大于 200 ms；
- b) 优化数据处理流水线，减少中间环节耗时，提升实时性。

#### 8.2.3.2.2 校正算法

校正算法采用以下设计：

- a) 集成卡尔曼滤波算法，结合多源数据融合，动态修正定位误差；
- b) 开发自适应滤波模型，根据环境变化调整滤波参数，优化校正效果。

#### 8.2.3.2.3 定位性能

保障定位性能，采用以下设计：

- a) 开发环境自适应算法，针对城市峡谷、山区、密林等场景优化信号跟踪策略；
- b) 集成多路径抑制技术，减少反射信号干扰，控制定位精度衰减不超过 30 %；
- c) 设计冗余定位模块，主模块故障时自动切换至备用模块，减少服务中断时间；
- d) 开发故障预警系统，通过状态监测提前发现潜在故障并告警，确保位置信息可用性不小于 99.5 %。

### 8.2.4 数据交互系统

#### 8.2.4.1 数据交互设计

##### 8.2.4.1.1 概述

为实现与外部系统的高效数据交互，需设计标准化数据交互框架，集成多协议接口与数据转换模块，支持飞行器位置、飞行状态、地理信息、安全告警等多类型数据的传输。

##### 8.2.4.1.2 数据格式统一

数据格式统一采用以下设计方法：

- a) 制定数据格式转换规则，通过 XML/JSON 解析器与二进制编码器，实现数据在标准格式间的自动转换；

- b) 设计数据格式校验模块，验证格式规范性，确保与外部系统的兼容性。

#### 8.2.4.1.3 通信协议兼容

通信协议兼容采用以下设计方法：

- a) 集成协议转换网关，实现 TCP/IP、UDP/IP（用户数据报协议/网际协议）、HTTP、HTTPS、MQTT 等协议的统一接入与转换；
- b) 开发协议适配层，针对不同外部系统自动匹配对应协议，减少接口开发复杂度。

#### 8.2.4.1.4 数据完整性

保障数据完整性，采用以下设计方法：

- a) 设计数据冗余校验机制，通过 CRC 校验与哈希校验（如 SHA-256）双重验证，确保数据完整性不小于 99.9 %；
- b) 开发数据纠错算法，对传输错误数据进行修复，控制数据准确性不小于 99.5 %。

#### 8.2.4.1.5 数据交互实时性

保障数据交互实时性，采用以下设计方法：

- a) 采用低延迟传输协议（如 MQTT-SN），结合数据压缩技术减少传输量；
- b) 优化路由选择算法，选择最短路径传输数据，确保从数据生成到接收方获取的延迟不大于 200 ms<sup>+</sup>。

### 8.2.4.2 接口标准化设计

#### 8.2.4.2.1 接口类型

接口类型采用以下设计：

- a) 配置标准化物理接口模块，集成 RJ 45 以太网接口与 USB 3.0 控制器，遵循接口电气规范；
- b) 开发逻辑接口封装层，基于 SOAP、RESTful API 等标准协议设计接口，确保逻辑接口的一致性。

#### 8.2.4.2.2 接口认证与授权

接口认证与授权采用以下设计：

- a) 集成 OAuth 2.0 认证服务器与 API 密钥管理模块，实现接入系统的身份认证；
- b) 设计权限控制列表（ACL），基于角色分配接口访问权限，防止未授权访问。

#### 8.2.4.3 接口性能设计

##### 8.2.4.3.1 接口稳定性

接口稳定性采用以下设计：

- a) 开发接口容错机制，对异常请求进行拦截与处理，返回标准化错误信息；
- b) 配置接口负载均衡器，分散访问压力，结合冗余设计确保接口可用性不小于 99.9 %；
- c) 优化网络传输协议栈，采用拥塞控制算法减少数据丢包，确保丢包率不大于 0.1 %。

##### 8.2.4.3.2 接口吞吐量

满足接口吞吐量要求，采用以下设计：

- a) 采用并行数据传输架构，结合千兆以太网接口与流量控制算法，确保吞吐量不小于 1 Gbps；
- b) 优化数据缓冲机制，减少数据阻塞，支持多飞行器并发数据交互。

#### 8.2.4.3.3 连接数量

满足连接数量要求，采用以下设计：

- a) 设计连接池管理模块，动态分配连接资源，支持同时与不小于 100 个外部系统或设备建立连接；
- b) 采用连接复用技术，减少连接建立开销，提升并发处理能力。

#### 8.2.4.3.4 接口可靠性

满足接口可靠性要求，采用以下设计：

- a) 采用双机热备架构，结合心跳检测与自动切换机制，确保平均无故障时间不小于 10,000 h；
- b) 开发快速故障定位模块，通过日志分析与状态监测缩短故障修复时间，确保平均修复时间不大于 1 h。

### 8.2.5 通信系统

#### 8.2.5.1 通信能力设计

通信能力采用以下设计：

- a) 支持蜂窝网络接入，集成多模基带芯片，支持 4G (LTE-FDD/TDD)、5G (NR) 及 Wi-Fi (802.11a/b/g/n/ac/ax) 制式，通过软件定义无线电 (SDR) 技术实现多制式兼容；
- b) 遵循 3GPP NTN 标准，设计协议转换模块，实现 LTE 与卫星通信协议的互通，支持蜂窝网络与卫星链路的平滑切换。
- c) 支持天通卫星通信，配置 S 频段卫星接收/发射模块，集成高增益相控阵天线，支持天通一号卫星通信系统，开发语音编码、短信处理与低速率数据传输模块，确保数据传输速率不小于 64kbps；
- d) 支持低轨卫星通信，预留 Ku 频段 (12-18 GHz)、Ka 频段 (26.5-40 GHz) 射频接口，兼容虹云工程、鸿雁星座等国内低轨卫星系统。

#### 8.2.5.2 通信性能设计

满足不同通信制式的传输性能，采用以下设计：

- a) 优化通信协议栈，减少协议开销，控制 4G 时延不大于 100 ms、5G 时延端到端不大于 20 ms，用户面不大于 10 ms、Wi-Fi 时延不大于 50 ms、天通卫星时延不大于 500 ms、低轨卫星时延不大于 200 ms；
- b) 采用信道编码与交织技术，降低误码率，确保 4G 不大于  $10^{-6}$ 、5G 不大于  $10^{-9}$ 、Wi-Fi 不大于  $10^{-6}$ 、天通卫星不大于  $10^{-5}$ 、低轨卫星不大于  $10^{-6}$  的误码率指标；
- c) 设计连接保持机制，通过心跳检测与快速重连技术，控制掉线率不大于 0.1%；
- d) 开发智能切换算法，基于信号强度与质量评估，确保 4G/5G、Wi-Fi 与蜂窝网络、卫星与地面网络的切换成功率不小于 99.9%；
- e) 优化天线增益与覆盖范围设计，确保地面蜂窝网络覆盖半径不小于 30 km，卫星通信通过波束覆盖实现可用性不小于 99.9%。

#### 8.2.5.3 冗余与容错设计

冗余与容错采用以下设计：

- a) 设计蜂窝网络与卫星通信双链路并行传输架构，通过链路质量监测与快速切换机制，确保主链路失效时切换时间不大于 50 ms，数据包丢失率不大于 0.1%；

- b) 集成自适应波束成形与跳频技术 (FHSS)，动态调整波束方向与工作频率，提升抗压制干扰能力至不小于 60 dB。

## 8.2.6 存储系统

### 8.2.6.1 存储容量设计

存储容量采用以下设计：

- a) 配置大容量存储阵列，单地面单元采用不小于 4TB 的 SSD (固态硬盘)，支持 RAID 扩展技术动态扩容至 10 TB；
- b) 开发数据生命周期管理模块，自动压缩与归档历史数据，优化存储空间利用，确保支持至少 30 d 连续空域感知数据存储。

### 8.2.6.2 读写性能设计

满足读写性能，采用以下设计：

- a) 采用 NVMe (非易失性内存主机控制器接口规范) 协议 SSD，结合 RAID0 阵列提升读写速度，确保顺序读写速率不小于 500 MB/s，随机读写延迟不大于 1 ms；
- b) 集成北斗时间同步模块，通过硬件脉冲与时间报文校准存储系统时钟，控制时间戳误差不大于 1ms。

### 8.2.6.3 系统冗余设计

存储系统冗余采用以下设计：

- a) 配置双 SSD RAID1 镜像阵列，通过实时数据同步实现主备存储切换，结合故障检测电路确保切换时间不大于 50ms，数据丢失率不大于 0.001%；
- b) 开发异地备份模块，通过卫星通信 (LEO/GEO) 或蜂窝网络，在每日凌晨 2 点~4 点进行空域感知数据的云端实时备份，防止本地数据丢失。

## 8.2.7 供电系统

### 8.2.7.1 电源输出设计

电源输出采用以下设计：

- a) 设计宽电压输入电路，支持 18 VDC~32 VDC 输入，集成 POE 供电模块，通过稳压电路与滤波网络控制输出电压波动不大于  $\pm 2\%$ ，纹波系数不大于 1%；
- b) 配置高效功率转换电路，选用大功率开关电源芯片，确保峰值功率不小于 50 W、持续功率不小于 30 W，满足全负载运行需求；
- c) 设计至少 2 路独立输出通道，每路配置动态负载调整电路与过流/过压保护模块 (响应时间不大于 10  $\mu$ s)，适配通信设备、宽频谱侦测等不同子系统；
- d) 开发优先级控制逻辑，按通信链路大于宽频谱侦测大于其他设备的优先级分配电力，主通道失效时通过快速切换开关自动切换至备用通道，切换时间不大于 50 ms。

### 8.2.7.2 智能电源管理设计

#### 8.2.7.2.1 动态负载调整

动态负载调整采用以下设计：

- a) 集成负载监测传感器与动态功率分配算法，实时调整各通道功率输出，响应时间不大于 100 ms，转换效率不小于 90%；

- b) 开发低功耗模式控制模块，设备待机时自动关闭非必要电路，将待机功耗控制在不大于 5 W。

#### 8.2.7.2.2 故障诊断与隔离

故障诊断与隔离采用以下设计：

- a) 配置电压、电流、温度监测电路，结合异常检测算法，触发本地 LED 报警与远程卫星/蜂窝链路推送告警信息；
- b) 设计模块化电路与热插拔接口，故障模块自动隔离，支持现场热插拔更换，控制维护中断时间不大于 5 min。

### 9 设计验证

#### 9.1 数据安全试验

数据安全试验按以下国家信息安全标准及设计要求进行：

- a) 数据加密与完整性验证：验证数据传输和存储过程中的加密有效性及数据完整性保护机制。依据 GB/T 22239—2019 中“数据完整性”、“数据保密性”条款，验证数据传输加密算法（例如 SM4）、存储加密机制及校验码生成规则；
- b) 访问控制试验：验证用户权限分级管理、身份认证及日志审计功能的有效性，保障数据访问安全。参照 GB/T 31168—2014，测试用户权限分级管理、身份认证（例如 PKI 体系）及日志审计功能；
- c) 数据备份与恢复：验证在异常场景下数据冗余备份策略的可靠性及数据恢复能力。按照 GB/T 20988—2007，验证机载数据在异常断电、存储介质故障等场景下的冗余备份策略及恢复成功率（应不小于 99.99%）；
- d) 抗数据篡改试验：验证数据防篡改机制对恶意攻击的抵御能力，确保数据真实性与不可篡改性。依据 GM/T 0034—2014，模拟恶意篡改攻击，验证数据防篡改机制（例如数字签名、区块链存证）的有效性。

#### 9.2 核心功能验证

##### 9.2.1 宽频谱侦测试验

宽频谱侦测试验采用以下方法：

- a) 频率范围验证：验证设备对目标频段信号的感知覆盖能力及频率测量精度。使用信号发生器在 70 MHz 至 6 GHz 频段内发射测试信号，设备检测覆盖率不小于 99%，频率测量精度不大于 ±1 ppm；
- b) 多信号处理能力：验证设备在多信号并发场景下的信号识别准确性和抗干扰能力。同时输入 10 个不同频率、强度的信号，设备识别准确率不小于 95%，误报率小于 5%。

##### 9.2.2 数据交互试验

数据交互试验采用以下方法：

- a) 实时性测试：验证设备与外部系统数据交互的实时性和数据完整性。与低空飞行服务平台进行数据交互，端到端延迟不大于 200 ms，数据完整性不小于 99.9%；
- b) 兼容性测试：验证设备对不同通信协议的兼容适配能力。分别与采用 TCP/IP、MQTT 协议的系统对接，数据解析成功率 100%。

##### 9.2.3 位置增强服务试验

位置增强服务试验采用以下方法：

- a) 定位精度测试：验证系统高精度定位功能的指标达标情况。在开阔场地进行静态定位，RTK 定位水平精度不大于 0.8 cm，符合设计指标；
  - b) 失锁重捕测试：验证系统在卫星信号短暂丢失后快速恢复定位的能力。遮挡卫星信号 10 s 后移除遮挡，系统重捕时间不大于 2 s，定位数据恢复正常。
-