

团 体 标 准

T/CAMC 0015-2025

低空装备天线技术要求和试验测试方法

Technical Requirements and Test Methods for Low-Altitude Equipment  
Antennas

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	III
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 设计要求	2
4.1.1 结构设计	2
4.1.2 电磁兼容性 (EMC)	2
4.2 性能指标	2
4.3 可靠性要求	3
4.3.1 环境适应性	3
4.3.2 耐久性	4
5 试验测试方法	4
5.1.1 增益测试	4
5.1.2 驻波比 (VSWR) 测试	5
5.1.3 带宽测试	5
5.1.4 极化纯度测试	6
5.1.5 辐射效率测试	6
5.2 环境适应性测试	7
5.2.1 高低温测试	7
5.2.2 振动测试	7
5.2.3 防水防尘测试	8
5.3 电磁兼容性 (EMC) 测试	8
5.3.1 辐射骚扰测试	8
5.3.2 抗扰度测试	8
6 测试设备与条件	9
7 安全与合规要求	9
7.1 数据安全	9
7.1.1 完整性校验	9
7.1.2 可用性保障	9
7.2 适航认证	10
7.2.1 认证测试项目	10
7.2.2 认证文档准备	10
7.3 隐私保护	10
7.3.1 数据脱敏要求	10
7.3.2 传输加密规范	10
7.4 成熟度评估模型	11

7.4.1 评估框架与维度 .....	11
7.4.2 评估指标定义 .....	11
7.4.3 评估流程与等级判定 .....	11
7.4.4 评估应用 .....	12

## 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：西安邮电大学、西安西测测试技术股份有限公司、四川九强通信科技有限公司、南京国博电子科技有限公司、北京国科标研科技有限公司。

本文件主要起草人：张运启、李泽新、刘四平、李继成、彭洪森、徐东、伍举、徐磊、包宽、董鹏飞、殷凯军、尚尔钧。



# 低空装备天线技术要求和试验测试方法

## 1 范围

本文件规定了低空装备天线技术要求与试验测试方法的技术要求、试验测试方法、测试设备与条件、安全与合规要求、实施与评估等。

本文件适用于低空装备的天线系统设计、制造、测试及验收，覆盖通信、导航、监视（CNS）等频段，涉及全向天线、定向天线、阵列天线等多种类型。

## 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 44662 健康管理终端设备数据采集与传输协议

MH/T 2015 低空飞行服务系统技术要求

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

YD/T 4324 无人机管理（服务）平台安全防护要求

YD/T 4733 车载通信天线技术要求和测试方法

YD/T 4757 基站天线美化罩技术要求和测试方法

T/ZGTXXH 107 地空联合覆盖天线阵列技术要求和测试方法

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**辐射效率 radiation efficiency**

天线将输入的射频功率转化为空间辐射功率的能力，以百分比表示。其计算公式为：辐射效率=（天线辐射到空间的功率/输入到天线的总功率）×100%。

### 3.2

**驻波比 voltage standing wave ratio**

全称为电压驻波比，是衡量天线与传输线匹配程度的重要指标，为传输线上电压最大值与电压最小值的比值。驻波比的取值范围大于等于1，越接近1，说明天线与传输线的匹配程度越好，射频能量在传输过程中的反射损耗越小，能量传输效率越高。

### 3.3

#### 增益 gain

天线将输入功率集中辐射到特定方向的能力，是衡量天线辐射性能的关键指标之一，通常以 dBi（相对于各向同性辐射器的增益）为单位。

## 4 技术要求

### 4.1 设计要求

#### 4.1.1 结构设计

##### 4.1.1.1 尺寸适配性

天线尺寸需严格满足低空飞行器的气动外形要求，如天线的翼展（或最大横向尺寸）应不大于飞行器长度的 5%。在设计过程中，需结合飞行器的气动布局（如固定翼的机翼布局、多旋翼的机臂布局），采用一体化设计理念，将天线巧妙集成到飞行器结构中，如嵌入机翼表面、机身侧面或机臂内部等。

##### 4.1.1.2 多频段复用

为满足低空装备在复杂任务场景下对多种功能（如通信、导航、监视）的需求，天线应支持多频段复用功能，即单一天线能够同时覆盖多个不同的工作频段。在实现多频段复用过程中，需通过合理的天线结构设计（如采用多层辐射单元、分频段匹配网络等），确保各频段之间不会产生相互干扰，每个频段的性能指标（如增益、驻波比、辐射效率）均能满足要求。

##### 4.1.1.3 材料选择

天线应优先采用轻量化、高强度、低损耗的材料。常用的材料包括碳纤维复合材料、FPC（柔性印刷电路板）等。碳纤维复合材料具有密度低（约为  $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，仅为钢材的  $1/4$ ）、强度高（抗拉强度可达  $3000\text{MPa}$  以上）、介电常数稳定等优点，适用于制作天线的辐射体和支撑结构；FPC 柔性电路板具有良好的柔韧性和可弯曲性，其厚度薄（通常在  $0.1\text{--}0.3\text{mm}$  之间）、重量轻，不会显著增加飞行器的载荷负担。在材料选择时，还需考虑材料的耐环境性能，如耐高温、耐低温、耐腐蚀、耐老化等。

#### 4.1.2 电磁兼容性（EMC）

##### 4.1.2.1 辐射骚扰限值

天线系统在工作过程中产生的辐射骚扰应控制在规定的限值范围内，需满足在  $30\text{MHz--}1\text{GHz}$  的频率范围内，天线系统的辐射骚扰限值应不大于  $30\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ （在 3 米测试距离下测量）。在天线设计阶段，需采取一系列电磁兼容设计措施，如优化天线的辐射结构；在天线生产过程中，需严格控制零部件的加工精度和装配质量。

##### 4.1.2.2 抗扰度要求

为满足天线系统抗扰度要求，可在天线系统中采用屏蔽技术（如使用金属屏蔽罩将天线的敏感部件包裹起来）、接地技术、滤波技术（在天线的输入输出端口安装滤波器，滤除外界干扰信号）以及电磁兼容布局设计等措施。

### 4.2 性能指标

详细的性能指标如表 1 所示：

表 1 性能指标表

参数	通用要求	特殊场景要求	说明
增益	全向天线增益应满足 $\geq 0\text{dBi}$	定向天线增益应满足 $\geq 8\text{dBi}$ （适用于通信距离 $\geq 50\text{km}$ 的场景）	增益是衡量天线辐射能力的重要指标，全向天线需在 $360^\circ$ 范围内均匀辐射，故增益要求相对较低；定向天线通过聚焦波束，可在特定方向上获得更高增益，以满足远距离通信需求，当通信距离要求达到 $50\text{km}$ 及以上时，定向天线增益需不低于 $8\text{dBi}$ ，确保信号能够有效传输到远距离接收端。
驻波比 (VSWR)	在 $2.4\text{GHz}/5.8\text{GHz}$ 频段，VSWR 应满足 $\leq 1.5$	在高频段（如 Ku 波段， $12\text{--}18\text{GHz}$ ），VSWR 应满足 $\leq 1.8$	驻波比反映天线与传输线的匹配程度，通用场景下， $2.4\text{GHz}$ 和 $5.8\text{GHz}$ 频段是低空装备常用的通信频段，对匹配度要求较高，故 VSWR 限制在 $1.5$ 以内；Ku 波段等高频段由于频率较高，信号传输损耗较大，且天线设计和制造难度增加，对驻波比的要求适当放宽至 $1.8$ ，但仍需保证能量传输效率，避免反射功率过大。
带宽	带宽 $\geq 20\%$ 中心频率（例如，在 $2.4\text{GHz}$ 频段，中心频率为 $2.4\text{GHz}$ ，对应的带宽应 $\geq 480\text{MHz}$ ，即工作频率范围为 $2.16\text{GHz}\text{--}2.64\text{GHz}$ ）	动态调谐带宽应满足 $\geq 30\%$	带宽决定了天线能够有效工作的频率范围，通用要求下， $20\%$ 中心频率的带宽可满足大多数低空装备在固定频段下的通信和导航需求；在一些特殊场景中，如飞行器需要在较宽的频率范围内快速切换工作频段以适应不同的任务需求或避开干扰频段时，天线需具备动态调谐功能，且动态调谐带宽需达到 $30\%$ 及以上，确保天线能够在较宽的频率范围内实现良好的匹配和辐射性能。
极化方式	采用圆极化，且 $\pm 45^\circ$ 轴比应满足 $\leq 3\text{dB}$	支持双极化兼容（水平极化和垂直极化）	圆极化天线具有抗多径干扰能力强、接收方向不敏感等优点，在低空装备通信和导航中应用广泛， $\pm 45^\circ$ 轴比 $\leq 3\text{dB}$ 可保证圆极化的纯度，减少极化失配带来的信号损耗；在一些复杂的通信场景中，如与不同极化方式的地面设备或其他飞行器进行通信时，天线需支持双极化兼容，能够根据实际需求灵活切换水平极化或垂直极化方式，确保通信链路的顺畅。
辐射效率	在全频段范围内，辐射效率应控制在 $\geq 70\%$	在高频段（如 Ku 波段），辐射效率应满足 $\geq 65\%$	辐射效率直接影响天线能量转换效率，全频段 $70\%$ 以上的辐射效率可确保天线在大多数工作频段下都能有效将输入功率转化为空间辐射功率；高频段由于电磁波波长较短，天线的尺寸较小，对辐射效率的要求可适当降低至 $65\%$ 。

### 4.3 可靠性要求

#### 4.3.1 环境适应性

##### 4.3.1.1 工作温度

天线系统通用工作温度范围为-40℃至+70℃，在此温度范围内，天线的各项性能指标（如增益、驻波比、辐射效率、极化纯度等）应保持在规定的允许范围内。对于用于军事领域或特殊恶劣环境下的低空装备天线（军品级），工作温度范围要求更为严苛，需达到-55℃至+85℃。因此在设计过程中，需选择耐高低温的材料，并对天线进行温度循环测试和高低温存储测试。

#### 4.3.1.2 振动耐受

天线系统应能承受 20g RMS（均方根值）的振动加速度，振动频率范围为 10Hz-2kHz，在此振动条件下，天线的结构应无松动、变形、破裂等损坏现象，电气性能指标（如增益、驻波比、辐射效率等）的变化量应控制在规定的允许范围内。可采用减振结构，增加天线结构的刚度和强度；选择抗振动性能好的元器件，并采用可靠的焊接和固定工艺。

#### 4.3.1.3 防水防尘

天线的防水防尘等级应达到 IP67 标准，即完全防止灰尘进入，并在常温常压下，将天线短暂浸泡在 1 米深的水中，持续 30 分钟，天线内部不应进水，且电气性能和结构性能不受影响。天线需采用密封设计，如在天线外壳的接缝处使用密封圈进行密封，在天线的接口部位（如射频接口）采用防水接头；需严格控制密封件的装配质量，同时对天线进行防水防尘测试。

#### 4.3.2 耐久性

##### 4.3.2.1 寿命要求

在正常使用和维护条件下，天线系统的设计使用寿命应不低于 5000 小时（或等效于 3 年工作周期）。对于用于商业运营的 eVTOL 等高频次使用场景的天线，使用寿命需提升至 8000 小时（或 5 年工作周期）。寿命评估需结合材料老化特性、电气性能衰减规律等因素，通过加速老化试验验证，确保天线在设计寿命周期内，关键性能指标（如增益、驻波比、辐射效率）的衰减量不超过初始值的 15%。

##### 4.3.2.2 机械疲劳耐受

测试采用正弦波循环加载方式，在 10Hz - 2kHz 频率范围内，以 20gRMS 振动加速度进行 1000 次循环测试；同时，对天线连接部位（如与机身固定的螺栓、射频接头）施加±50N 的拉压力循环加载，共 500 次循环。测试后，天线结构应无裂纹、松动、部件脱落等损坏，电气性能指标变化量需符合本标准“振动耐受”要求中的允许范围。

##### 4.3.2.3 电气性能稳定性

要求天线在经过 1000 小时的恒温恒湿试验（温度+55℃、相对湿度 95%）后，驻波比变化不超过 0.3，增益衰减不超过 1dB，极化纯度（轴比或交叉极化鉴别度）变化不超过 2dB。天线的射频接口需具备良好的插拔耐久性，在正常插拔操作（插拔力 5N-15N）下，插拔寿命不低于 500 次，插拔后接口的接触电阻应不大于 50mΩ。

### 5 试验测试方法

#### 5.1 性能测试

##### 5.1.1 增益测试

### 5.1.1.1 测试环境

在暗室(电磁屏蔽效能应满足 $\geq 80\text{dB}@30\text{MHz}-18\text{GHz}$ )或无反射开阔场(场地衰减误差应控制在 $\leq \pm 2\text{dB}$ )中进行,测试环境温度控制在 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 45%-75%。

### 5.1.1.2 测试设备

包括矢量网络分析仪(频率范围覆盖天线工作频段,测量精度应控制在 $\pm 0.1\text{dB}$ )、标准增益天线(已知增益误差应控制在 $\leq \pm 0.2\text{dB}$ ,如喇叭天线)、射频电缆、天线转台(角度精度应控制在 $\pm 0.1^{\circ}$ )。

### 5.1.1.3 测试步骤

测试步骤包括但不限于如下所示:

- a) 搭建测试系统,将标准增益天线与被测天线分别安装在天线转台上,两者间距满足远场条件
- b) (距离 $D \geq 2D^2/\lambda$ ,其中 $D$ 为被测天线最大尺寸, $\lambda$ 为测试频率对应的波长);
- c) 连接矢量网络分析仪,分别测量标准增益天线与被测天线在相同测试频率、相同极化方式下的接收功率 $P_1$ (标准天线)和 $P_2$ (被测天线);
- d) 根据公式计算被测天线增益: $G_2 = G_1 + (P_2 - P_1) + (L_1 - L_2)$ ,其中 $G_1$ 为标准天线增益, $L_1$
- e)  $L_1$ 、 $L_2$ 分别为标准天线和被测天线的电缆损耗;
- f) 对天线工作频段内的至少5个特征频率点(如频段起点、中点、终点及2个中间点)进行测试,取平均值作为最终增益结果。

### 5.1.1.4 合格判据

测试结果需满足对应天线类型(全向/定向)的增益要求,测试误差需控制在 $\pm 0.5\text{dB}$ 以内。

## 5.1.2 驻波比(VSWR)测试

### 5.1.2.1 测试设备

矢量网络分析仪(支持S参数测量,驻波比测量范围1-65,精度应控制在 $\pm 0.01$ )、射频匹配负载(驻波比 $\leq 1.05$ )、测试电缆(驻波比 $\leq 1.1$ )。

### 5.1.2.2 测试步骤

测试步骤包括但不限于如下所示:

- a) 对矢量网络分析仪进行校准(采用SOLT校准法,校准频段覆盖天线工作频段);
- b) 将被测天线通过测试电缆与矢量网络分析仪的测试端口连接,确保连接牢固,无松动;
- c) 在天线工作频段内,以10MHz为步进频率,测量天线的S11参数(反射系数),并自动转换为驻波比数值;
- d) 记录各频率点的驻波比数值,确定最大驻波比及对应的频率点。

### 5.1.2.3 合格判据

最大驻波比需满足“性能指标”中对应频段的要求(如2.4GHz/5.8GHz频段 $\leq 1.5$ ,Ku频段 $\leq 1.8$ )。

## 5.1.3 带宽测试

### 5.1.3.1 测试方法

基于驻波比测试结果，以“驻波比 $\leq 1.5$ ”（通用场景）或“驻波比 $\leq 1.8$ ”（高频段场景）为阈值，确定天线的有效工作频率范围。

#### 5.1.3.2 带宽计算

带宽=（上限频率-下限频率）/中心频率 $\times 100\%$ ，其中中心频率为天线设计的中心工作频率。

#### 5.1.3.3 特殊场景测试（动态调谐带宽）

对于支持动态调谐的天线，需通过信号发生器模拟调谐控制信号，在调谐范围内逐点测量驻波比，确定“驻波比 $\leq 1.8$ ”的频率范围，计算动态调谐带宽。

#### 5.1.3.4 合格判据

通用场景带宽 $\geq 20\%$ 中心频率，动态调谐场景带宽 $\geq 30\%$ 。

### 5.1.4 极化纯度测试

#### 5.1.4.1 圆极化天线（轴比测试）

圆极化天线相关内容如下所示：

- a) 测试环境与设备同“增益测试”，额外配备极化旋转装置（精度应控制在 $\pm 0.5^\circ$ ）；
- b) 将圆极化天线（轴比 $\leq 1.2\text{dB}$ ）作为发射端，被测天线作为接收端，调整两者极化方向一致；
- c) 旋转被测天线的极化方向（ $0^\circ - 360^\circ$ ），测量不同角度下的接收功率，计算轴比（轴比=最大功率/最小功率，单位 dB）；
- d) 重点测试 $\pm 45^\circ$ 极化方向的轴比数值。

#### 5.1.4.2 线极化天线（交叉极化鉴别度测试）

线极化天线相关内容如下所示：

- a) 以极化天线（交叉极化鉴别度 $\geq 30\text{dB}$ ）为发射端，调整其极化方向为水平（或垂直）；
- b) 被测天线极化方向先与发射端一致（同极化），测量接收功率  $P_1$ ；再将被测天线极化方向旋转  $90^\circ$ （交叉极化），测量接收功率  $P_2$ ；
- c) 交叉极化鉴别度= $P_1 - P_2$ （单位 dB）。

#### 5.1.4.3 合格判据

圆极化天线 $\pm 45^\circ$ 轴比 $\leq 3\text{dB}$ ，线极化天线交叉极化鉴别度应控制在 $\geq 25\text{dB}$ 。

### 5.1.5 辐射效率测试

#### 5.1.5.1 测试方法

采用“辐射近场扫描法”或“传输矩阵法”，在暗室中进行。

#### 5.1.5.2 测试步骤

测试步骤包括但不限于如下所示：

- a) 搭建近场扫描系统，包括近场探头（空间分辨率 $\leq \lambda/10$ ）、扫描架（定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ）、矢量网络分析仪；

- b) 扫描被测天线的近场电场分布，通过傅里叶变换将近场数据转换为远场辐射特性；
- c) 计算天线的辐射功率（通过远场方向图积分）和输入功率（通过矢量网络分析仪测量），代入辐射效率公式（辐射效率=辐射功率/输入功率×100%）。

### 5.1.5.3 合格判据

全频段辐射效率应控制在 $\geq 70\%$ ，高频段（如 Ku 波段）应控制在 $\geq 65\%$ 。

## 5.2 环境适应性测试

### 5.2.1 高低温测试

#### 5.2.1.1 测试设备

高低温试验箱（温度范围 $-60^{\circ}\text{C}$ ~ $+100^{\circ}\text{C}$ ，温度波动度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，湿度范围 20%~98%）。

#### 5.2.1.2 测试流程

测试流程包括但不限于如下所示：

- a) 低温工作测试，将天线放入试验箱，降温至 $-40^{\circ}\text{C}$ （军品级 $-55^{\circ}\text{C}$ ），保温 2 小时，期间通电测试天线电气性能（增益、驻波比、辐射效率）；
- b) 高温工作测试，升温至 $+70^{\circ}\text{C}$ （军品级 $+85^{\circ}\text{C}$ ），保温 2 小时，同样通电测试电气性能；
- c) 温度循环测试，在 $-40^{\circ}\text{C}$ （军品级 $-55^{\circ}\text{C}$ ）与 $+70^{\circ}\text{C}$ （军品级 $+85^{\circ}\text{C}$ ）之间循环 5 次，每次循环包括升温（速率 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）、高温保温（1 小时）、降温（速率 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）、低温保温（1 小时），循环后测试天线结构和电气性能。

#### 5.2.1.3 合格判据

高低温工作时，电气性能符合“性能指标”要求；温度循环后，结构无损坏，电气性能变化量 $\leq 10\%$  初始值。

### 5.2.2 振动测试

#### 5.2.2.1 测试设备

电磁振动台（最大加速度 50gRMS，频率范围 5Hz~3kHz）、振动控制仪（支持随机振动、正弦振动）、加速度传感器（精度应控制在 $\pm 0.5\%$ ）。

#### 5.2.2.2 测试流程

测试流程包括但不限于如下所示：

- a) 将天线按照实际装机方式固定在振动台台面上，安装加速度传感器（贴于天线关键结构部位，如射频接口、固定支架）；
- b) 进行正弦振动测试，在 10Hz~2kHz 频率范围内，以 20gRMS 加速度扫频（扫频速率 1oct/min），持续 30 分钟；
- c) 进行随机振动测试，在 10Hz~2kHz 频率范围内，功率谱密度（PSD）为  $0.1\text{g}^2/\text{Hz}$ ，持续 60 分钟；
- d) 测试期间及测试后，检查天线结构完整性，并测试电气性能。

#### 5.2.2.3 合格判据

结构无松动、变形、破裂，电气性能变化量符合“振动耐受”要求（增益变化 $\leq 1\text{dB}$ ，驻波比变化

≤0.3)。

### 5.2.3 防水防尘测试

#### 5.2.3.1 防尘测试 (IP6X)

防尘测试相关内容如下所示：

- a) 测试设备，沙尘试验箱（滑石粉浓度  $2\text{kg}/\text{m}^3$ ，风速  $1\text{m}/\text{s}$ - $2\text{m}/\text{s}$ ）；
- b) 流程，将天线放入试验箱，持续防尘测试 8 小时，测试后检查天线内部是否有灰尘进入；

#### 5.2.3.2 防水测试 (IPX7)

防水测试相关内容如下所示：

- a) 测试设备，防水试验箱（水深  $\geq 1\text{m}$ ，水温  $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ）；
- b) 流程，将天线完全浸入水中（水面高于天线顶部 200mm 以上），持续 30 分钟，期间保持天线射频接口密封；
- c) 测试后取出天线，擦干表面水分，检查内部是否进水，并测试电气性能。

#### 5.2.3.3 合格判据

防尘测试后内部无可见灰尘，防水测试后内部无进水，电气性能无异常。

## 5.3 电磁兼容性 (EMC) 测试

### 5.3.1 辐射骚扰测试

#### 5.3.1.1 测试环境

开阔测试场（符合 CISPR 22 标准，场地衰减误差应控制在  $\leq \pm 2\text{dB}$ ）或半电波暗室。

#### 5.3.1.2 测试设备

电磁干扰 (EMI) 接收机（频率范围 30MHz-1GHz，测量精度  $\pm 0.5\text{dB}$ ）、双锥天线（30MHz-300MHz）、对数周期天线（300MHz-1GHz）。

#### 5.3.1.3 测试步骤

测试流程包括但不限于如下所示：

- a) 将天线与信号源连接（输出功率为天线额定输入功率），置于测试转台；
- b) 接收天线置于距离被测天线 3m 处（高度 1m-4m 可调节），在 30MHz-1GHz 频段内扫描，测量被测天线的辐射骚扰场强；
- c) 记录各频率点的最大骚扰场强。

#### 5.3.1.4 合格判据

辐射骚扰限值应满足  $\leq 30\text{dB} \mu\text{V}/\text{m}$ （3m 测试距离，30MHz-1GHz）。

### 5.3.2 抗扰度测试

#### 5.3.2.1 辐射电磁场抗扰度测试

辐射电磁场抗扰度测试内容如下所示：

- a) 测试环境，电波暗室（场均匀性 $\pm 3\text{dB}$ ，测试体积  $1\text{m}\times 1\text{m}\times 1\text{m}$ ）；
- b) 测试设备，信号发生器（80MHz-18GHz）、功率放大器（输出功率 $\geq 100\text{W}$ ）、双脊喇叭天线
- c) （80MHz-18GHz）；
- d) 流程，将天线与接收设备连接（处于正常工作状态），在暗室中施加  $200\text{V/m}$ （连续波）的辐射电磁场，频率范围 80MHz-18GHz，扫频速率  $1\%/s$ ；
- e) 测试期间监测天线的接收信号质量（如误码率应控制在 $\leq 10^{-6}$ ）及电气性能。

### 5.3.2.2 静电放电（ESD）抗扰度测试

静电放电（ESD）抗扰度测试内容如下所示：

- a) 测试设备，静电放电发生器（放电电压 0-30kV，接触放电/空气放电模式）；
- b) 流程，对天线外壳、射频接口等部位进行接触放电（ $\pm 8\text{kV}$ ）和空气放电（ $\pm 15\text{kV}$ ），共 10 次/极性；
- c) 测试后检查天线是否出现功能失效、结构损坏。

### 5.3.2.3 合格判据

辐射电磁场抗扰度测试中，信号误码率应控制在 $\leq 10^{-6}$ ，电气性能无异常；ESD 测试后，天线功能正常，无永久性损坏。

## 6 测试设备与条件

测试设备与技术指标详见下表 2：

表 2 设备与技术指标表

设备类型	技术指标（建议满足）	备注
矢量网络分析仪	频率范围 10MHz-110GHz，动态范围 $\geq 120\text{dB}$ 。	
频谱分析仪	分辨率带宽 $\leq 1\text{Hz}$ ，相位噪声 $\leq -135\text{dBc/Hz}$ 。	
远场测试系统	测量精度 $\pm 0.3\text{dB}$ ，支持自动化数据采集。	
暗室	本底噪声 $\leq -110\text{dBm}$ （2.4GHz 频段）	

## 7 安全与合规要求

### 7.1 数据安全

#### 7.1.1 完整性校验

天线传输的数据需附加基于 SM3 密码杂凑算法的消息认证码（MAC），校验数据在传输过程中是否被篡改。每帧数据的校验值需与数据一同传输，接收端通过重新计算校验值并与传输的校验值比对，若不一致则判定数据损坏，拒绝接收并请求重传。校验过程耗时不超过 5ms。

#### 7.1.2 可用性保障

加密模块需具备故障冗余设计,当主加密模块出现故障时,备用加密模块需在 500ms 内自动切换,保障数据加密功能不中断。同时,天线系统需具备密钥备份与恢复机制,支持通过加密的密钥管理服务器进行密钥备份,当密钥丢失或损坏时,可通过授权流程恢复密钥。

## 7.2 适航认证

### 7.2.1 认证测试项目

需完成适航认证所需的专项测试,包括天线电磁辐射对航空器导航系统的干扰测试、天线结构强度测试、雷电防护测试等。

### 7.2.2 认证文档准备

需提交完整的适航认证文档,包括天线设计报告、测试报告、符合性声明、维修手册,文档需通过适航审定部门的审核。

## 7.3 隐私保护

### 7.3.1 数据脱敏要求

#### 7.3.1.1 脱敏对象与规则

天线传输的涉及个人隐私的数据需进行脱敏处理。面部图像需采用模糊化处理或遮挡处理;个人身份信息需采用部分字符替换,联系方式需隐藏中间 4 位数字。脱敏处理需在数据离开天线信号处理单元前完成,确保传输至地面的 data 已脱敏。

#### 7.3.1.2 脱敏效果验证

需通过隐私保护效果测试,测试人员采用图像识别技术(如人脸识别算法)尝试识别脱敏后的面部图像,识别准确率需低于 10%;采用数据解析工具尝试还原脱敏后的个人身份信息,还原成功率需低于 5%。

### 7.3.2 传输加密规范

#### 7.3.2.1 TLS 协议应用

通信链路需采用 TLS 1.3 及以上版本的传输层加密协议,禁用不安全的加密套件,优先选择支持国密算法的加密套件。TLS 握手过程需采用证书认证方式,天线端需内置由权威 CA 机构颁发的数字证书,证书有效期不超过 3 年,证书过期前需支持在线更新,更新过程需通过加密通道进行。

#### 7.3.2.2 隐私数据访问控制

天线系统需具备隐私数据访问权限管理功能,仅授权用户可访问未脱敏的原始数据,授权采用基于角色的访问控制(RBAC)模型,不同角色分配不同的访问权限。用户访问隐私数据时,需进行身份认证(如用户名密码认证+动态口令认证),并记录访问日志,日志需保存至少 1 年。

#### 7.3.2.3 实施任务与时间节点

实施任务与时间节点包括但不限于如下所示:

- a) 完成载人飞行器和 UAM 场景的天线需求分析,基于第一阶段技术成果,研发适配的高安全、高容量天线样品,开展适航认证测试和 UAM 场景专项测试;

- b) 与载人飞行器制造商、UAM 运营企业合作，开展装机验证，在城市低空航线，进行实际运营测试，优化天线在复杂城市电磁环境下的性能；
- c) 建立全场景天线供应链体系，覆盖原材料采购（如高性能碳纤维、加密芯片）、生产制造、测试认证、运维服务，推动标准成为低空装备天线行业通用标准，实现适配天线在载人飞行器和 UAM 场景的市场占有率不低于 60%。

## 7.4 成熟度评估模型

### 7.4.1 评估框架与维度

从设计、测试、运维三个核心维度构建成熟度评估模型，每个维度分为 1-5 级（1 级为最低成熟度，5 级为最高成熟度），评估采用“定性+定量”结合的方式，定性评估技术方案的完整性、合规性，定量评估关键指标的达成情况。

### 7.4.2 评估指标定义

#### 7.4.2.1 设计维度

包括需求分析完整性（是否覆盖所有应用场景需求）、技术方案合规性、创新度、可制造性（是否便于批量生产，生产良率目标应控制在 $\geq 95\%$ ）、可扩展性。

#### 7.4.2.2 测试维度

包括测试项目覆盖率、测试设备精度（测试设备是否符合计量要求，精度误差应控制在 $\leq \pm 1\%$ ）、测试数据完整性、测试结果重复性（相同条件下多次测试结果的偏差应控制在 $\leq \pm 5\%$ ）、第三方认证情况等。

#### 7.4.2.3 运维维度

包括故障诊断能力（是否支持远程故障监测、诊断准确率应控制在 $\geq 90\%$ ）、维修便利性（维修所需时间应满足 $\leq 2$  小时，维修成本应控制在 $\leq$ 天线总成本的 20%）、备件供应能力（备件到货时间应满足 $\leq 48$  小时）、生命周期管理，用户反馈处理。

### 7.4.3 评估流程与等级判定

#### 7.4.3.1 评估准备

成立由行业专家（如航空航天工程师、电磁兼容专家、适航认证专家）、整机厂商代表、用户代表组成的评估小组，制定评估方案（含评估指标权重、评分标准），收集天线设计文档、测试报告、运维记录等评估材料。

#### 7.4.3.2 维度评分

评估小组按照评分标准对设计、测试、运维三个维度分别打分，每个维度满分 100 分，根据得分确定维度成熟度等级（1 级：0-20 分，2 级：21-40 分，3 级：41-60 分，4 级：61-80 分，5 级：81-100 分）。

#### 7.4.3.3 综合判定

综合三个维度的成熟度等级，若三个维度均达到 3 级及以上，且至少有一个维度达到 4 级，判定天线整体成熟度为“合格”；若三个维度均达到 4 级及以上，且至少有一个维度达到 5 级，判定为“优秀”；若任一维度低于 3 级，判定为“不合格”，需制定整改计划并重新评估。

#### 7.4.4 评估应用

成熟度评估结果作为天线产品选型、批量生产许可、市场推广的重要依据。对于“优秀”等级的天线，优先推荐给整机厂商和 UAM 运营企业；对于“不合格”等级的天线，限制其市场准入，待整改后重新评估；评估结果每半年更新一次，确保天线技术持续优化，符合行业发展需求。

