

低空通导监及气象技术白皮书

2025. 04

目 录

低空通导监及气象技术白皮书.....	1
摘要	1
1. 引言.....	2
1.1 背景与意义.....	2
1.2 目标与范围.....	2
2. 低空通导监及气象技术概述	4
2.1 定义与分类.....	4
2.2 发展历程与现状.....	5
2.3 主要应用领域.....	6
3. 核心技术.....	8
3.1 通信技术.....	8
3.2 导航技术.....	9
3.3 监视技术.....	11
3.4 气象技术.....	13
3.5 数据处理与分析.....	15
4. 系统架构与集成	16
4.1 系统组成.....	16
4.1.1 通信系统.....	17
4.1.2 导航系统.....	18
4.1.3 监测系统.....	20
4.1.4 气象系统.....	26

4.1.5 控制与安全系统.....	28
4.1.6 地面支持系统.....	29
4.2 系统集成与互操作性.....	30
4.3 安全与隐私保护.....	31
5. 应用场景.....	33
5.1 无人机交通管理.....	33
5.2 城市公共服务.....	34
5.3 城市空中物流.....	35
5.4 农业与环境监测.....	36
5.5 应急救援与灾害管理.....	37
6. 挑战与未来发展.....	38
6.1 技术挑战.....	38
6.2 法规与政策.....	41
6.2.1 现有政策.....	41
6.2.2 政策漏洞.....	42
6.2.3 政策优化建议.....	43
6.3 市场与商业模式.....	44
6.3.1 市场前景.....	44
6.3.2 可能的商业模式.....	45
6.4 未来发展趋势.....	46
7. 结论.....	48
7.1 总结.....	48
7.2 展望.....	49

8. 参考文献.....	51
--------------	----

摘要

《低空通导监及气象技术白皮书》由数字低空 TG7 工作组牵头编制，系统梳理了低空通信、导航、监视及气象技术的核心框架与应用场景，旨在为低空空域的安全高效运行提供技术支撑与标准化指引。随着无人机、城市空中交通及低空物流的快速发展，通导监气技术通过融合 5G、卫星通信、高精度导航及智能感知等关键技术，逐步构建起覆盖通信、定位、环境监测与空域调度的综合体系，支撑农业监测、应急救援、城市物流等多样化场景。然而，当前仍面临通信信号覆盖盲区、动态频谱管理不足、数据隐私保护等挑战。未来，技术将朝智能化、集成化与全球化方向演进，依托人工智能、边缘计算及空天地一体化网络，推动低空经济与智慧城市深度融合，并通过国际合作与标准统一，构建安全、开放、可持续的低空生态。聚焦低空空域智能化管理需求，提出技术标准与系统化解决方案。

1. 引言

1.1 背景与意义

随着无人机、低空飞行器等新兴航空设备的广泛应用,低空空域的使用变得越来越频繁,特别是在物流配送、城市空中交通、农业监测和应急救援等场景中,低空空域管理的复杂性和重要性日益凸显。当前,针对低空空域的通信、导航、监测和气象保障技术尚未形成统一的标准和系统化的方案,导致各国和地区在低空空域安全管理方面存在不一致和技术空白。因此,行业内亟需编制一份白皮书,系统梳理相关技术框架、标准和应用场景,这将有助于建立技术标准和行业规范,从而确保低空空域飞行器能够安全、高效地运行。

通过统一低空空域的通信、导航、监测及气象数据处理标准,不仅能够提升无人机、低空飞行器与地面系统之间的互操作性,还能有效降低空域管理的复杂性,避免通信干扰和空域冲突。同时,这些标准也可对相关技术的发展和创新的指明方向。在空域管理的不同场景中,如无人机交通管理(Unmanned Aircraft Traffic Management System, UTM)、低空物流、灾害应急等,通信、导航、监测及气象技术的融合应用至关重要。通过白皮书的发布,技术开发者和决策者将能够更好地理解这些技术的现状与未来趋势,从而推动新型设备和系统解决方案的研发,进一步提升低空空域管理的效率。

此外,统一标准的制定还将推动国际合作,促进各国在低空空域技术上的交流与协作。低空空域作为新兴的空域资源,其安全和发展关系到全球航空活动的整体格局。统一的标准与技术体系有助于建立全球范围的低空空域监管网络,确保各国在技术应用和政策制定方面保持协调一致,共同应对低空空域管理的挑战。

1.2 目标与范围

低空通信、导航、监测及气象技术(通导监气)白皮书的目标是为低空空域管理提供全面的技术框架与标准体系,促进低空空域的安全、高效运行,并推动相关技术的创新与应用。随着无人机、城市空中交通、低空物流等领域的迅猛发展,白皮书旨在梳理通信、导航、监测及气象保障技术,为政府监管机构、技术研发企业、行业用户提供清晰的指导和规范。同时,白皮书还希望在国际范围内建立统一的低空空域管理标准,推动全球航空业、科技界在

低空技术上的合作与协同，确保跨区域的空域安全。

白皮书的范围涵盖以下几个方面：

1、通信技术：将详细阐述适用于低空空域的无线电频段、通信协议和技术标准，确保无人机和低空飞行器能够与地面控制中心、其他飞行器实现稳定、低延迟的通信。它还将探讨多种通信方式的无缝融合（如 5G、卫星通信、专用航空频段等），以应对复杂的低空空域环境。

2、导航技术：将介绍精确的低空导航解决方案，包括全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）、惯性导航系统（Inertial Navigation System, INS）、地基增强导航（Ground-based Augmentation Systems, GBAS）和视觉导航（Vision Navigation, VN），确保低空飞行器能够在多样的地形和环境精准飞行。特别是在城市空中交通领域，导航技术的高精度和稳定性将成为重点讨论内容。

3、监测技术：将探讨空域监测技术的应用，包括雷达系统、视觉感知、自动相关监视广播(Automatic Dependent Surveillance–Broadcast, ADS-B)等技术，帮助空域管理者实时了解低空飞行器的动态位置、飞行状态以及空域使用情况。还将分析这些监测技术如何实现自动避障、空中冲突预警和实时空域调度。

4、气象技术：低空空域的气象环境变化较大，白皮书将覆盖为无人机和低空飞行器提供实时气象服务的技术，尤其是如何通过微型气象站、气象卫星、无人机自身传感器等技术，提供实时天气预报、飞行气象条件评估，帮助飞行器规避极端天气影响。

2. 低空通导监及气象技术概述

2.1 定义与分类

低空通信、导航、监视及气象技术是保障低空空域中无人机、低空飞行器等航空器安全、高效运行的核心技术体系，覆盖通信联络、飞行导航、空域监视以及气象预警等多个方面。通过协同工作，这些技术能够实现信息的高效交互与整合，提供稳定的飞行保障与空域管理支持。随着无人机、低空物流和城市空中交通的发展，通导监气技术正成为低空空域管理的基础。

1、基本概念

1) **低空通信**：指的是在低空空域中，飞行器与地面控制站、其他飞行器之间的信息传递。低空通信技术的核心是确保稳定、实时、双向的数据传输，支持飞行控制、状态反馈、任务指令等功能。常用的通信方式包括 5G、无线电频段、卫星通信和专用航空通信网络等。

2) **低空导航**：帮助飞行器在低空空域中实现精确定位和航线控制，确保其在复杂环境中安全飞行。常见的导航方式包括 GNSS、INS、GBAS（如差分 GPS）和 VN 等技术。

3) **低空监视**：主要用于空域管理者对低空飞行器的实时监控，保障飞行安全。通过监视技术，地面控制中心可以了解飞行器的位置、速度、高度等参数，并对空域进行管理，避免冲突和碰撞。主要技术包括雷达、自动相关监视广播系统、视觉感知系统和飞行数据记录系统等。

4) **气象技术**：通过气象传感器、气象雷达、无人机搭载的气象设备，飞行器能够获取实时气象数据，避免受到恶劣天气的影响。气象技术可以提供风速、气温、湿度、气压等重要信息，并为飞行计划制定提供依据。

2、技术功能分类

1) **通信技术**：包括无线电通信（如 VHF/UHF）、5G 网络、卫星通信、Wi-Fi 等，主要用于飞行器与地面及其他飞行器之间的信息传输。

2) **导航技术**：包括 GNSS、INS、GBAS、VN 等，用于提供精确的飞行定位和航向控制。

3) **监视技术**：包括雷达监控、自动相关监视广播系统、视觉识别、红外成像等，用于实时监控飞行器位置、空域情况和飞行动态。

4) **气象技术**：包括气象站、气象卫星、无人机传感器等，用于提供实时天气数据和气

象预警。

2.2 发展历程与现状

低空通信、导航、监视及气象技术的发展历程反映了科技进步对航空管理与飞行安全保障的推动作用，随着无人机和低空飞行器应用的持续增长，特别是在城市空中交通、物流配送、应急救援等领域，低空空域的技术需求变得更加迫切和复杂。在早期主要服务于传统航空业，如民航、军用航空，随着科技的进步，逐渐向低空空域应用拓展，相关技术的发展历程如下：

1、早期阶段：通信、导航和监视技术最初应用于高空和中空航空器中，主要通过无线电、地基雷达和简易气象站进行空域管理，设备体积大、成本高，低空空域的技术应用受限。随着全球导航卫星系统的普及，民航和军航开始采用精确定位系统，而监视技术主要依赖地面雷达和 ADS-B 系统。

2、无人机技术的引入：20 世纪 90 年代开始，无人机技术逐渐进入民用和商业领域，推动了低空通导监气技术的革新。随着无人机规模和应用场景的扩大，传统高空航空技术被简化、优化，以适应低空空域的小型化设备需求。特别是在导航领域，GNSS 技术结合 INS，实现了更高精度的导航。同时，地面通信设施的升级，以及卫星通信的引入，使无人机与控制中心之间的信息传输更加稳定。

3、智能化与自动化：进入 21 世纪，随着 5G、物联网、人工智能（Artificial Intelligence, AI）和边缘计算等技术的飞速发展，低空空域管理得到了全面提升。随着低空空域管理对智能化、自动化需求的不断提升，飞行器与地面系统、其他飞行器之间需要实时进行大数据量的双向通信，5G 技术的低延迟和高带宽特性，满足了这些大规模数据的实时传输需求，使得低空通信更加高效稳定，为智能化与自动化奠定了坚实基础。同时，在 AI 和边缘计算的赋能下，导航和监视技术逐渐朝着自动化和智能化方向发展，进一步提升了低空空域管理的效率 and 安全性。

4、气象技术的升级：随着无人机飞行器的广泛应用，微型气象站、气象传感器、无人机搭载的气象设备得到了快速发展。这些系统能够实时获取低空飞行环境的气象数据，如风速、气压、湿度等参数，保障飞行器在复杂气候条件下安全运行。同时，气象数据与大数据、云计算的结合，为低空空域的飞行计划和调度提供了更为精确的决策支持。

如今，低空通导监气技术正朝着标准化、智能化和全球互联互通的方向发展。低空通信方面，5G 通信网络和卫星通信逐渐成为低空飞行器的主流选择，确保了实时、高效的飞行数据传输。导航技术在 GNSS 的基础上，引入了更多的增强系统（如差分 GPS、RTK）和基于视觉的自主导航系统，进一步提高了飞行器的导航精度。监视技术则逐步融合了雷达、ADS-B、光学感知和 AI 算法，能够在复杂空域中实现动态实时监控和自动避障。气象技术也不断进步，便携式气象设备、云平台气象分析系统的广泛应用，使低空空域的气象保障更加全面。

2.3 主要应用领域

低空通信、导航、监视及气象技术在城市空中交通、物流运输、农业管理、应急救援及环境监测等多个领域的应用，不仅提升了工作效率，还增强了安全性和可持续性。

1、城市空中交通：随着城市化进程的加快和空中出行需求的增长，低空通信、导航和监视技术为城市空中交通管理（如无人机交通管理和电动垂直起降飞行器）提供了关键支持。通信技术确保飞行器与地面控制中心之间的实时数据传输，实现高效的空中交通调度；导航技术提供精确的飞行路径规划和控制，避免空域冲突；监视系统实时跟踪飞行器的动态，确保航行安全；气象技术则为飞行器提供实时气象信息，帮助其规避恶劣天气，保障飞行安全。

2、物流运输：在物流领域，低空通信、导航和监视技术为无人机配送和低空物流运输提供了高效解决方案。通信技术保障了物流无人机与配送中心之间的实时信息交互，导航技术优化了配送路径，提高了运输效率；监视系统则确保物流无人机在复杂空域环境中的安全运行。此外，气象技术能够提前预警天气变化，避免物流运输因恶劣天气中断，提升物流链的可靠性。

3、农业管理：在农业领域，通导监气技术为精准农业提供了重要支持。无人机通过通信技术与农业管理平台实时交互，传输农田监测数据；导航技术实现无人机在农田中的精准飞行，完成播种、施肥、喷洒农药等任务；监视系统帮助农户实时掌握农田状况；气象技术则为农业生产提供精准的气象预报，帮助农户合理安排农事活动，提高农业生产效率。

4、应急救援：在灾害应急和救援场景中，通导监气技术也发挥了不可替代的作用。通信技术保障了救援无人机与指挥中心之间的实时联络，导航技术为救援任务提供最优路径规划，监视系统实时跟踪救援进展，气象技术则为救援行动提供准确的气象预警，确保救援任

务的安全和高效执行。

5、环境监测：在环境监测领域，通导监气技术为生态保护、污染监测和气候研究提供了重要工具。无人机通过通信技术将环境数据实时传输至监测中心，导航技术实现无人机在复杂环境中的精准飞行，监视系统实时跟踪监测区域的变化，气象技术则为环境监测提供精准的气象数据支持，帮助科研人员更好地分析和预测环境变化。

随着技术的不断发展与应用场景的拓展，通导监气技术将会在更多领域展现其潜力与价值，为低空空域的安全管理和高效利用提供强有力的技术支撑。

3. 核心技术

3.1 通信技术

低空通信技术涵盖无线通信技术、卫星通信技术、蜂窝网络技术、网络切片、信号处理和抗干扰技术，以及数据安全和隐私保护技术等，同时还包括各种通讯设施，尤其是空空、空地、与地面节点间的通讯链路。通过多通讯链路融合，把这些设施联通起来，实现跨链路、跨协议、跨区域融合及 QoS 保障能力。借助天、空、地多种通讯网络的协同，实现各节点互联互通。为保证系统健壮性，同时兼顾负载均衡，低空通信技术需满足多种网络通信的兼容性及可扩展需求，从而确保飞行器的稳定可靠飞行。低空通信技术的核心技术涉及多方面，为无人机及其他低空飞行器提供安全、高效的通信保障。以下是每项关键技术的详细描述：

1、无线通信技术

无线通信技术是低空通信的基础，用于在无人机和地面控制站之间实现数据和命令的实时传输。常见的频段包括 900 MHz、2.4 GHz 和 5.8 GHz，这些频段支持较低延迟的双向数据传输，适合短距离或中距离的通信需求。在城市和复杂环境中，无线通信技术还需克服多路径传播和信号衰减等挑战，以确保飞行器的可靠控制。

2、5G 蜂窝通信技术

5G 技术凭借其高速率、低延迟和大连接数的特性，为低空通信带来了革命性变化。5G 网络能够支持无人机实时传输高清图像并快速调整飞行路径，尤其适用于城市空中交通、物流配送等对高效数据传输需求较高的应用场景。同时，5G 的低延迟特性显著提升了无人机与地面站之间的响应速度，为高密度区域的无人机群飞行和实时调度管理提供了强有力的技术支撑。

3、卫星通信技术

卫星通信技术在远距离或偏远地区飞行时发挥重要作用，尤其适用于没有地面基站覆盖的场景。卫星通信能够提供全球范围的通信服务，确保无人机在跨境飞行、海上巡航等任务中依然保持稳定的通信链路。还可用于应急救援、远程基础设施监控等场景，在长距离飞行和通信链路稳定性方面表现出色。

4、网络切片技术

网络切片技术能够根据任务需求灵活分配网络资源，从而显著提高通信效率。该技术允

许在同一个 5G 网络上创建多个虚拟网络，并根据不同应用场景的需求进行资源分配。对于无人机而言，网络切片可以根据任务优先级提供定制化的带宽和服务质量，确保在关键任务期间获得充足的网络资源支持。无论是需要大带宽的高清视频传输，还是低延迟的实时控制指令，都可以通过专用网络切片实现，从而满足多样化的通信需求。

5、信号处理和抗干扰技术

在低空飞行时，无线信号容易受到建筑物、树木以及其他电磁干扰的影响。信号处理技术通过自适应调制、多进多出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）技术等手段，提升了信号传输的可靠性。抗干扰技术则包括频率跳变、信号加密和动态频谱分配等方法，能够有效避免其他信号源的干扰，确保通信链路的稳定性和安全性。这些技术对于在城市复杂环境中运行的无人机尤为重要，为其提供了可靠的通信保障。

6、数据安全与隐私保护技术

随着无人机广泛应用于物流配送、基础设施监测和公共安全领域，数据的安全传输成为关键问题。数据安全技术包括加密传输、身份认证和访问控制等措施，防止无人机通信链路被恶意窃取或篡改。通过多层次的安全机制，可以确保数据在传输过程中的完整性、机密性和不可篡改性，减少信息泄露和恶意攻击的风险。

7、多频段多协议通信融合

在低空通信环境中，不同的应用场景和任务需求可能需要多种通信协议的支持，如 5G、Wi-Fi、卫星通信等。多频段多协议融合技术能够灵活切换和协调不同的通信方式，确保无人机在不同环境和飞行条件下都能保持通信的连续性和稳定性。这种技术有助于提升通信的弹性和适应性，特别是在复杂空域或跨境飞行等场景。

3.2 导航技术

低空导航技术是无人机及其他低空飞行器实现精确飞行的重要保障，其关键技术涵盖了定位、导航、路径规划、环境感知等多个方面。以下是对相关关键技术的详细描述：

1、GNSS 技术

全球导航卫星系统（如 GPS、北斗、GLONASS 和 Galileo）是低空导航的核心基础。GNSS 通过卫星信号提供全球范围内的精准定位，使无人机能够在广阔空域内保持稳定的航向和位置。这项技术支持无人机的自动飞行、路径规划以及定位和导航任务。然而，GNSS 信号容

易受到遮挡和干扰，特别是在城市环境、森林或山谷中，可能会出现信号弱或丢失的情况。

2、INS 技术

惯性导航系统是 GNSS 的重要补充，通过加速度计和陀螺仪测量无人机的加速度和角速度，推算出位置、速度和方向。由于 INS 不依赖外部信号，因此在 GNSS 信号被干扰或遮挡时，仍能提供可靠的短期导航数据。这一特性使其非常适用于复杂环境中的飞行任务，尤其是在 GNSS 不可用或信号不稳定的区域。

3、VN 技术

视觉导航技术依赖无人机上的摄像头或其他光学传感器，通过捕捉环境图像并与已知地图进行比对，计算出无人机的相对位置。这种技术适用于城市、室内和隧道等复杂环境，能够在 GNSS 信号不足或完全丢失的情况下为无人机提供定位支持。视觉导航结合了图像识别、SLAM（同步定位与建图）等技术，可以在动态环境中实现精确的路径规划和避障。

4、LiDAR 技术

激光雷达系统（Light Detection and Ranging, LiDAR）通过激光发射和反射来生成环境的高精度三维地图，帮助无人机进行精确定位、导航和避障。LiDAR 技术能够提供厘米级的精度，特别适用于地形复杂或障碍物较多的环境。无人机通过 LiDAR 扫描周围环境，可以识别障碍物、计算飞行高度，并根据地图信息进行路径规划。这种技术尤其适用于低空飞行中的环境感知和动态导航需求。

5、UWB 技术

超宽带（Ultra Wide Band，UWB）技术通过超宽带信号的发射与接收实现高精度的定位，特别适用于室内环境或其他 GNSS 难以覆盖的区域。UWB 信号抗干扰能力强，定位精度可达厘米级，广泛应用于无人机的近距离导航、室内飞行和精准着陆等场景。相比其他无线定位技术，UWB 在多径效应严重的环境中仍能保持较高的定位准确性。

6、RTK 技术

实时动态载波相位差分技术（Real-time kinematic, RTK）是一种高精度的实时差分 GNSS 技术，是 GNSS 的高精度提升方案，通过地面参考站与无人机之间的差分修正信号，能够将定位精度提升至厘米级。这种高精度定位系统适用于农业、测绘、基础设施巡检等需要精确飞行路径的应用场景。RTK 显著提高了无人机在复杂地形中的飞行稳定性和导航精度，尤其适合精准农业和精细化基础设施监控等任务。

7、地磁导航技术

地磁导航技术通过测量地球磁场的强度和方向，辅助无人机进行导航。地磁信号相对稳定，不受天气和光照等外界环境的影响，是一种低功耗的导航方式。地磁导航技术适合与 GNSS 等系统结合使用，以增强导航的稳定性和冗余性，尤其在信号干扰较大的区域可以作为有效的补充。

8、多传感器融合导航技术

多传感器融合技术通过结合 GNSS、INS、VN、LiDAR 和其他传感器的数据，提供更为精确、稳定的导航信息。通过传感器数据的互补和融合，能够克服单一导航方式的局限性，在信号干扰、遮挡或动态环境下仍能实现精准导航。例如，在城市或森林等 GNSS 信号较差的区域，多传感器融合可以保证无人机的平稳飞行和导航。

9、路径规划与避障技术

路径规划与避障技术是无人机低空导航的关键部分。基于传感器感知的环境数据，无人机能够实时生成飞行路径，并通过复杂算法计算最优路线。结合 LiDAR、视觉传感器和超声波传感器等，避障系统能够自动检测障碍物并实时调整飞行路线，确保无人机在低空环境中的安全飞行。

10、自主导航与控制技术

自主导航和控制技术使无人机能够在预设任务和未知环境中进行自适应飞行。通过 AI 和机器学习算法，无人机可以根据传感器反馈动态调整飞行策略，实现完全自主的飞行控制和任务执行。自主导航技术在无人机的智能化发展中具有重要意义，特别是在复杂任务和高风险环境下的应用，如灾害救援和基础设施巡检。

3.3 监视技术

低空监视技术在无人机交通管理、低空空域管控等领域中发挥着重要作用，尤其是在应对日益增长的无人机应用需求和潜在安全威胁时，结合主动探测、被动监听、视频取证等多种技术手段，实现与合作和非合作无人机的实时感知、定位、跟踪和状态识别。以下是几项低空监视的关键技术及其描述：

1、雷达技术

雷达（Radio Detection and Ranging, RADAR）是通过发射无线电波并接收反射信号来探测和定位目标的技术。在低空监视中，雷达广泛应用于检测和跟踪低空飞行目标，其优势在

于覆盖范围广，同时提供精确的距离、速度和方位等信息，能够在各种气象条件下有效监测无人机。传统的雷达系统在低空监视中受到遮挡物和多径效应的限制，但结合其他技术（如 ADS-B 和无线电侦测），可以有效提升监测能力。

2、4D 毫米波雷达

4D 毫米波雷达不仅提供距离、速度、方位等三维信息，还能通过雷达波的时间延迟和反射特性获取目标的高度（第四维），形成更为精细的三维图像和动态监测。相比于传统雷达，4D 毫米波雷达具有更高的分辨率和探测精度，特别适用于复杂环境下的目标识别和定位。在低空监视中，4D 毫米波雷达的优势在于可以精准区分和跟踪多个快速移动的无人机，甚至在遮挡和恶劣天气条件下也能有效工作。

3、无线电侦测技术

无线电侦测技术通过监测无人机的无线电信号（如控制信号、数据链等），识别并定位合作和非合作无人机的通信信号源。该技术能够实现对无人机的被动监测，不需要无人机主动发送任何信息，适用于非合作无人机的探测。通过信号的强度、频谱分析和方向性，可以精确定位无人机的操作员或控制站，从而有效阻止恶意无人机或不明飞行物的入侵干扰。

4、ADS-B

ADS-B 是一种基于广播的航空监视技术，允许合作无人机通过卫星导航系统获取位置信息，并将其以广播方式发送给地面站和其他飞行器。通过 ADS-B，地面监控系统能够实时接收飞行器的位置信息、速度、高度等数据，提升监视效率。虽然 ADS-B 主要应用于民航领域，但在低空无人机飞行管理中，其逐渐被用于对合作无人机的实时追踪。通过这种方式，可以有效确保空域中各飞行器之间的安全间隔，但其对非合作无人机的监测能力依然有限。

5、阵列摄像技术

阵列摄像技术通过多摄像头组成的摄像阵列，提供广视角、高分辨率的影像数据，适用于对低空飞行目标的实时监控与取证。通过先进的图像处理算法和计算机视觉技术，摄像阵列能够自动识别和跟踪无人机的飞行路径、姿态，并记录高清影像。这一技术对于视频取证、无人机的状态识别、行为分析等方面具有重要作用，尤其在城市环境或人群密集区域中，可以有效辅助低空监视任务。

6、通感一体技术

通感一体技术是指通信与感知系统的集成，通过共享频谱资源和硬件平台，提升信息获

取的效率。该技术使无人机在通信的同时进行感知，获取自身位置、速度及环境数据。这种技术的优势在于能够降低设备成本和复杂性，并且在通信过程中提供实时监控和感知能力，适用于无人机飞行监视和动态调整飞行路径。在低空监视应用中，通感一体技术可以帮助实现更加高效的空域管理和无人机跟踪。

7、主动探测与被动监听闭环系统

主动探测技术依赖雷达、4D 毫米波雷达等设备，能够主动发射探测信号，实时定位无人机的位置和状态，而被动监听技术则通过监测无人机的无线电通信信号、ADS-B 广播信息等，捕获非合作无人机的行为数据。两者结合形成监视闭环，确保对所有无人机的覆盖和实时监控。主动探测能够精准识别飞行器的物理位置，被动监听则确保对非合作无人机的隐蔽监视，从而实现全方位的安全管控。

8、视频取证与行为分析

在低空监视中，视频取证技术通过阵列摄像设备或单个高分辨率摄像机获取飞行器的实时视频数据。结合 AI 和深度学习技术，视频取证不仅能够捕捉无人机的飞行轨迹，还能够识别其行为模式、飞行状态和潜在威胁。这种技术广泛应用于城市无人机监管中，特别是在关键区域或重大事件场合，通过视频数据的分析，可以识别非法无人机活动并及时采取干预措施。

9、多传感器数据融合技术

为了实现对无人机的全方位监控，多传感器数据融合技术至关重要。通过融合雷达、毫米波雷达、无线电侦测、ADS-B 和摄像头等多种传感器的数据，能够提高目标识别的准确性和可靠性。数据融合技术可以整合不同感知技术的优点，形成更完整的无人机轨迹和行为分析，从而减少误报和漏报，提升系统的整体性能。

10、AI 驱动的实时决策与控制

在低空监视中，AI 技术通过分析多传感器数据，能够实现对无人机的实时决策与控制。AI 可以自动识别合作无人机和非合作无人机，预测其飞行路径，识别异常行为并发出警告。结合机器学习算法，AI 还可以不断优化监视策略，减少干扰，提高监视系统的反应速度和精度。在低空飞行管理中，AI 使得监控系统能够自动化运作，并且对突发情况做出迅速响应。

3.4 气象技术

低空气象监测技术通过对低空大气环境的实时监测，为飞行器提供必要的气象数据，保障飞行安全和效率。以下是对几项关键的气象监测技术的分析和描述：

1、气象雷达技术

气象雷达是气象监测中广泛使用的技术之一，主要通过发射和接收无线电波来探测大气中的降水情况。气象雷达的关键功能是通过多普勒效应测量降雨强度、风速、风向等重要气象参数。常用的气象雷达包括多普勒雷达和相控阵雷达，多普勒雷达擅长检测降水移动的速度和方向，相控阵雷达能够快速扫描大气，实时提供三维气象数据。气象雷达在低空监测中可以提供飞行器飞行路径上的风速、降水和雷暴信息，帮助无人机在恶劣天气条件下做出避让决策。同时气象雷达还能实时监测风切变、湍流等危险天气现象，对无人机安全至关重要。

2、电磁探测技术

电磁探测技术是通过捕捉大气中电磁波信号的变化来监测气象状况，特别是雷电活动。雷电是飞行器安全的重大威胁，尤其是在低空飞行过程中。电磁探测系统可以通过检测雷电放电过程中的电磁波，实时监测雷暴的产生和移动轨迹，并提供准确的雷电预警。电磁探测技术的灵敏度较高，能够在远距离检测到雷电活动，为低空飞行器提供足够的时间进行规避。同时，电磁探测技术还能用于监测大气中电荷分布的变化，帮助预测雷暴或强风的生成。

3、电场探测技术

电场探测技术主要用于检测大气中的静电场变化，通常与雷电预警系统结合使用。低空区域的雷暴活动会导致大气中的电场强度发生显著变化。电场探测仪器通过实时监测这些变化，可以预警即将形成的雷暴活动，对无人机的低空飞行非常有帮助，尤其是在雷暴密集的区域或季节。除了雷电预警，电场探测还能用于监测大气电离层的变化，可帮助无人机运营方优化通信链路，防止因大气电离层干扰导致的通信中断。

4、LiDAR

激光雷达技术在气象监测中的应用逐渐增多，尤其是在检测低层大气的风速和气溶胶分布方面。激光雷达通过发射激光束并分析其回波信号，可以高精度测量气流和污染物的分布情况。激光雷达的灵敏度非常高，能够探测到微弱的风场和湍流变化，对低空飞行器尤其是无人机的飞行路径规划至关重要。同时还可以用于检测飞行路径中的雾霾和沙尘暴，为无人机提供清晰的飞行环境信息。

5、SoDAR

声雷达（sonic detection and ranging, SoDAR）是用于监测大气边界层风速和风向的技

术，通过发射一定频率的强声脉冲并分析返回的声散射回波，能够在短距离内测量大气的热力结构和湍流情况。SODAR 技术通常用于地面监测站，结合其他气象监测手段为低空飞行器提供实时的近地风况等信息，适合用于城市建筑密集区域的无人机低空飞行。

3.5 数据处理与分析

低空数据处理与分析在无人机应用、智能交通系统、环境监测和城市管理等领域发挥着至关重要的作用。随着无人机技术的快速发展，获取的数据量急剧增加，如何有效处理和分析这些数据成为了一个关键挑战。

低空通导监及气象技术涉及的数据处理与分析，主要涵盖实时数据采集与处理、数据融合与清洗、数据存储与管理等数据处理技术，以及环境建模、趋势预测、异常检测与智能决策支持等数据分析技术。这些技术通过对多源异构数据的综合分析，提取有价值的信息，优化飞行路径，提升环境适应性，保障飞行安全，并在复杂和动态的低空环境中提供精准的决策支持。以下是低空数据处理与分析的几项关键技术：

1、数据融合技术

通过整合来自不同传感器的数据（如视觉、雷达、激光雷达、气象传感器等），提供更为全面和准确的信息。该技术采用多种算法（如加权平均、卡尔曼滤波、贝叶斯网络等），处理不同来源的数据，消除冗余信息与不确定性。数据融合不仅提高了数据的精度和系统鲁棒性，还增强了系统在复杂低空环境（如城市区域）中的适应能力，有效克服信号干扰和遮挡带来的影响。

2、实时数据流处理

实时数据流处理技术用于处理持续生成的数据流，如无人机的实时传感器数据、视频流等。通过 Apache Kafka 和 Apache Flink 等框架，支持高吞吐量的实时数据流处理，实现数据分析在数据产生瞬间完成。这项技术对于低空监测、交通管理和应急响应等场景中具有重要作用，能够实现对实时数据的即时分析和快速反应。

3、边缘计算技术

基于边缘计算及 AI 识别技术，构建低空复杂环境融合感知系统。通过开发多源数据融合感知算法，将不同时空、不同维度的多传感数据进行时-空-模多尺度融合，获取更丰富的场景信息，实现多模态异构数据的高效融合。边缘计算设备支持算力资源的分布式调度，具

备不同厂商协议适配、飞行控制、航点规划、AI 识别等核心功能，并在边缘侧实现高性能的数据处理和决策支持。处理后的数据可无缝分发至多个业务平台，实现信息的高效共享与跨平台协同。

4. 系统架构与集成

4.1 系统组成

低空通导监气系统由多种设备、模块和子系统集成而成，各部分协同工作确保了飞行器（如无人机、民航飞机等）在低空环境中的安全和效率。

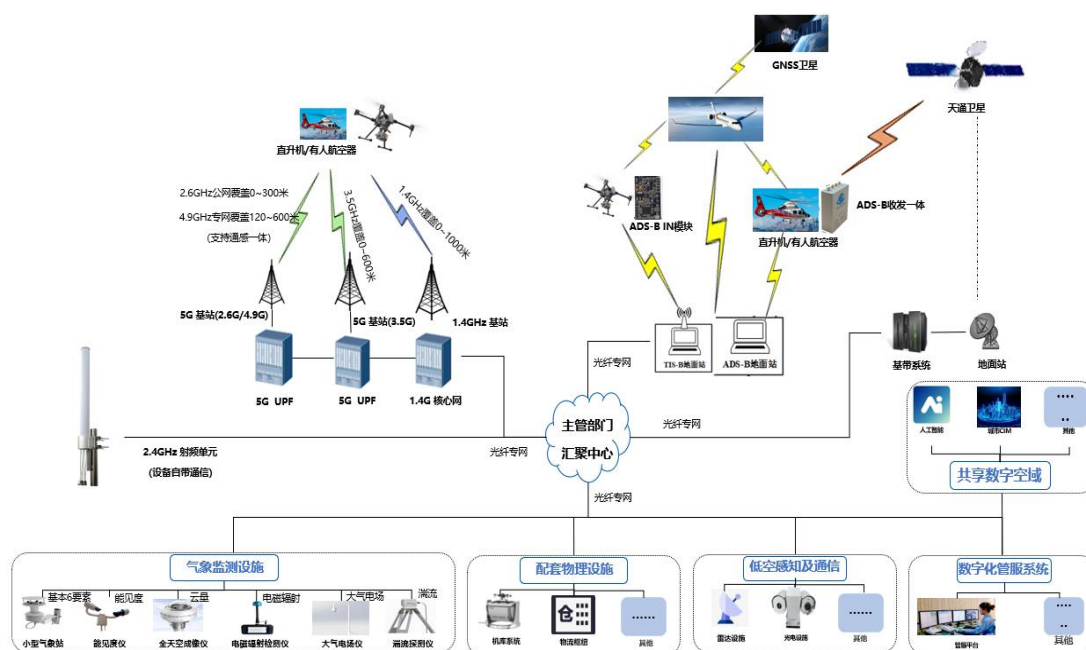


图 1. 低空通导监气系统示意图

如图 1 所示，整个系统主要包括卫星、地面站、基站、航空器、气象监测设备、低空感知设备、配套物理设施、基带系统、光纤专网、官服系统等核心设备和系统。通过这些设备和系统的协同工作，构建了低空通导监气集成化的一体化多功能系统，其中包括通信系统、导航系统、监测系统、气象系统、控制与安全系统以及地面支持系统等。下面将对各功能系统进行详细阐述。

4.1.1 通信系统

通信系统是低空通导监气系统的核心组成部分，负责实现天-空-地各层级之间的高效、实时、可靠的通信。其整体架构由卫星网络、空基网络、地面网络及融合通信网关组成，通过多通信协议的融合与动态管理，确保不同网络间的无缝集成和信息高效传递。

1. 天-空-地通信架构

通信系统采用分层架构，包括天基网络、空基网络和地面网络三部分：

天基网络：卫星与飞行器之间主要依赖视距（Line of Sight, LoS）链路通信，飞行器可与不同轨道的卫星建立通信链路，实现天-空数据传输。

空基网络：飞行器之间通过多种通信链路（如 IEEE 802.11s、LTE-Direct、ISM 频段等）实现空-空通信，部分飞行器可搭载无线电收发器或 LTE/WiFi 等异构无线接口，与其他飞行器或卫星建立通信网关。

地面网络：基于 5G、无线电和光电等异构无线接入技术，构建地面通信网络，实现飞行器与地面设施（如雷达、起降平台、气象监测设备等）之间的高效通信。

2、空空通讯链路

空空通讯链路注重实时性和可靠性，采用多种通信技术实现飞行器间的高效交互：

通信技术选择：研究并采用 IEEE 802.11s、LTE-Direct、ISM 频段（如 2.4 GHz）等多种空空通信协议，结合不同场景下的通信需求，形成统一的飞行器间通信标准。

频段与兼容性：使用公用及专有无线电频段，在需要与通航飞行器通信的场景下，确保与通航 ADS-B 系统的兼容性，实现与通航飞行器的信息交互和协同运行。

3、空地移动通讯增强链路

为保证通信网络的连续性和可靠性，增强覆盖，避免盲区或阻塞，系统采用以下措施：

在规划的低空航道上，按 5G 有效射程冗余部署增强型 5G 基站，实现地面至 600 米空域的全面覆盖，保证航线的飞行器，地面的雷达、起降平台、各类感知监控设施都能通过 5G 网络实现通讯；

在 5G 覆盖不足的区域，适当适量地布设额外的补充控制链路或数字链路，增加飞行器与地面的补充通讯链路，采用公有或专有无线电频段及相应信道协议，与 5G 网络形成冗余配置，确保飞行器与地面设施间的通信链路不中断。

4、融合通信网关

融合通信网关是整个通信系统的关键设备，基于软件定义网络（Software Defined Network, SDN）模式，软件定制封装，实现以下功能：

多通信协议转换：支持多种通信协议的转换与融合。

多链路规划与动态配置：根据网络状态动态调整链路规划和路由策略。

网络资源管理：通过 SDN 控制功能，实现网络资源的统一管理和网络行为的规范管控。

无缝集成与跨层协议设计：通过跨层协议设计，确保天基网络、空基网络和地面网络之间实现无缝通信，提升异构网络间的信息交换效率和链路可靠性。

通过融合通信网关的统一管控，通信系统实现了天-空-地网络的高效集成网络架构和标准网络化，确保了通信网络的高可靠性、实时性和安全性。系统充分考虑了异构网络的复杂性，通过动态路由、多链路融合、多通信协议转换、路由软件协议转换、动态配置通讯等功能，优化了信息传输效率，为低空飞行器的安全运行提供了坚实的技术保障。

4.1.2 导航系统

导航系统是低空通导监气系统的核心组成部分，其主要功能是为航空器、无人机等飞行设备提供高精度、高可靠性的导航定位服务。通过卫星导航、差分定位、视觉辅助定位等多种技术手段，导航系统能够实现厘米级的高精度定位，为飞行器的路径规划、自主飞行、避障等任务提供技术支持。

北斗卫星导航系统是中国着眼于国家安全和经济社会发展需要，自主建设运行的全球卫星导航系统，是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要时空基础设施，其由空间段（各类轨道卫星）、地面段（主控站、监测站等地面站）和用户段（搭载北斗芯片、模块、天线的终端产品、应用系统与应用服务）组成。低空航空器、无人机对定位、导航的精度要求很高，在通用北斗卫星导航系统的基础上，可以增加北斗高精度定位增强站、高精度定位播发平台以及地面视觉信标辅助定位设施等核心设备，建立北斗卫星高精度导航定位系统，通过多源数据融合和实时处理，确保飞行器在复杂环境下的精准导航与安全运行。

1、北斗高精度定位增强站

北斗高精度定位增强站是北斗高精度定位系统的重要组成部分，通过 RTK 技术，能够

实现厘米级甚至更高的水平精度定位，增强北斗卫星导航系统的定位精度和可靠性。高精度定位增强站通过在空间上建立固定基准站，由基准站接收北斗卫星及其他全球卫星导航系统的原始观测信号，并在基准站与需要测量位置的接收机之间进行距离的比较，对信号进行修正，从而提高定位精度。此外，高精度定位增强站还会通过地面参考站收集并广播卫星信号误差数据，进一步提升定位精度。这些信息通过地基增强基准站网实时传输至高精度定位播发平台，为用户提供厘米级的高精度定位服务。高精度定位增强站的部署形成覆盖广泛的地面基准站网络，确保在复杂环境下的高精度定位需求得到满足。

表 1 北斗高精度定位基站参考参数

接收机性能规格	
频点	GPSL1/L2C/L2P(Y)/L5、BDSB1I/B2I/B3I/B1C/B2a、GLONASSG1/G2、GalileoE1/E5a/E5b、QZSSL1/L2/L5
通道	432 通道，基于 NebulasII 芯片
伪距观测精度	10.0cm
载波相位观测精度	1.0mm
RTK 定位精度	水平 0.8cm+1ppm 高程 1.5cm+1ppm
时间精度	20ns(*不包含 RF 线缆或者天线导致的延迟)
定位数据	NMEA-0183
差分数据	RTCM3.0、RTCM3.2、RTCM3.3
存储格式	RINEX、自定义
数据刷新频率	1Hz、2Hz、5Hz、10Hz、20Hz
接收数据可用率	≥98%（可用的数据/采集的数据）
数据完整率	≥98%（采集数据/应采集数据）
天线特性	
频率范围	GPSL1/L2/L5、BDSB1I/B2I/B3I/B1C/B2a/B2b、GLONASSL1/L2/L3GALILEOE1/E5a/E5b/E6、QZSSL1/L2/L5/L6
阻抗	50Ω
极化方式	右旋圆极化
天线轴比	≤3dB

水平面覆盖角度	360°
输出驻波	≤ 2.0
最高增益	7dBi
相位中心误差	$\pm 1\text{mm}$

2、高精度定位平台

高精度定位平台是北斗高精度导航系统的数据处理和分发核心，负责接收、处理和分发高精度定位数据。平台由解算平台和播发平台两部分组成。解算平台接收地基增强基准站网传输的数据，进行分析和处理，计算出卫星信号的误差修正信息（差分改正数）。无人机终端通过移动网络实时上报 GGA 坐标位置数据至平台，播发平台根据航空器、无人机上报的 GGA 坐标位置数据，将最近基站生成的差分数据实时播发至用户终端，终端根据收到的实时差分数据进行修正坐标信息，为无人机、航空器等飞行设备提供厘米级的高精度定位服务。通过这一流程，平台实现了对卫星导航信号的增强和优化，确保飞行器在复杂环境下的精准导航。

3、地面视觉信标辅助定位设施

视觉辅助定位技术是对常规 GNSS 与惯性导航定位技术的一种有力的补充，对于提高无人机导航定位系统的抗干扰能力具有重要的支撑作用。地面视觉信标辅助定位设施主要是指增加地面二维码（增加设施）、建筑物纹理及其准确 3D 坐标（高精 3D 地图）等固定参照物，为无人机提供视觉定位辅助，通过确定的固定参照系精确定位值的方式，协助飞行器机载算法定位。无人机搭载的机载算法可以通过拍摄的图像信息与地理信息系统（GIS）中的先验数据相结合，精确定位自身的位姿（位置和姿态）。这种技术能够有效弥补卫星导航信号在遮挡、干扰等复杂环境下的不足，显著提升导航系统的可靠性和鲁棒性。

4.1.3 监测系统

监测系统是低空通导监气系统的重要组成部分，主要用于对低空空域内的飞行器（包括无人机、航空器等）进行实时探测、识别、跟踪和取证，确保低空空域的安全与秩序。通过多种探测手段和技术手段的结合，监测系统能够实现对低空飞行器的全面感知和精准定位，为低空交通管理、安防监控、应急响应等提供强有力的技术支持。

监测系统的核心功能包括：

1、目标探测：通过主动探测和被动监听技术，实时感知低空空域内的飞行器，获取其位置、速度、高度等关键信息。

2、目标识别：通过信号特征分析、视频图像识别等手段，对目标飞行器进行类型识别和身份验证。

3、目标跟踪：利用多源数据融合和 AI 算法，对飞行器进行持续跟踪，掌握其动态行为。

4、视频取证：通过高清视频设备，获取目标飞行器的实时影像，为后续分析和执法提供证据支持。

监测系统由主动探测设备、被动监听设备和视频取证设备三大类组成，各类设备协同工作，构建起多层次、全方位的监测体系。

1、主动探测设备

主动探测设备通过发射电磁波信号并接收目标反射信号，实现对低空飞行器的精准探测。

(1) 通感一体设备

通感一体设备将通信和感知功能融合在同一系统中，在保障高效数据传输的同时，实现对周围环境的精准监测与理解。通过共用硬件和频谱资源，设备可以在提供高速、低延迟的通信服务的同时，利用感知技术实现目标检测、定位、跟踪等功能。为低空领域无人机物流、空中交通管理、环境监测等多样化应用提供了前所未有的技术支持与效率提升。

设备参数参考如下：

传输速率：极限峰值速率与 5G 标准中基本持平。

感知距离：采取高频段，移动（4.9G）；电信（毫米波 26G，）。感知距离 1km 以内，
可以完全覆盖 600m 空域。

感知精度：分米级。

(2) 城市探测雷达

城市探测雷达采用先进的基于 DBF 的一维同时多波束体制，具备探测多旋翼无人机、固定翼无人机、穿越机等多种飞行器的能力，可实时获取目标的位置(距离、方位、俯仰、经度、纬度、高度等)、运动态势(速度)、回波强度、RCS、目标类型、威胁等级等多维信息，并将系统状态及目标航迹等信息通过预定输出接口协议发送至光电、指控等。同时产品预留输入接口协议，便于进行远程控制或构建雷达组网。

表 2 低空探测雷达指标参数参考

参数名称	指标
------	----

波束扫描方式	俯仰同时多波束方位机械扫描
工作频段	Ku
频点可调	是
探测威力	$\geq 5\text{km}(\text{RCS}=0.01 \text{ m}^2)$
距离盲区	$\leq 150\text{m}$
方位覆盖范围	360°
俯仰覆盖范围	$\geq 60^\circ$
距离测量精度	$\leq 5\text{m}$
方位测量精度	$\leq 0.3^\circ$
俯仰测量精度	$\leq 0.3^\circ$
同时探测的目标数量	≥ 500 批

(3) 4D 成像毫米波雷达

4D 成像毫米波雷达传感器，能够测量目标的距离、速度、水平角度以及垂直高度四个维度的信息，通过反射波获取目标的点云图数据实现目标的跟踪和监视。毫米波雷达传感器最高水平分辨率是 1° ，在探测 100 米~300 米空域范围时，无人机反射波的面积较小，可能只是一个点，而不是点云图数据，做不到成像，但是可实现目标跟踪；当探测 100 米以内的范围时，可获取到无人机较多的点云数据，理论上可实现无人机目标跟踪和目标成像。

表 3 4D 成像毫米波雷达指标参数参考

项目	分项	参数
视场角 FOV	方位角	100°
	俯仰角	30°
角分辨率	方位角	1.20°
	俯仰角	1.60°
探测距离	中距	118m
	长距	253m
	超长距	450m
距离分辨率	中距	0.50m
	长距	0.90m

	超长距	1.05m
径向速度 Doppler		-44~+88m/s
速度分辨率		0.08m/s

2、被动监听设备

被动监听设备主要是通过接收目标飞行器自身或反射的电磁波信号,实现对目标的无源探测、定位、跟踪和识别。

(1) 无线电侦测设备

无线电侦测设备通过天线阵列对空域内的无线电环境进行监控,24 小时不间断地采集防御区内的无线电信号,并将采集到的信号传送至信号处理单元,精确解调破解出无人机信号,然后发出预警信号。无源侦测技术具有较高的隐蔽性,解决了低空无人机的侦测、识别、定向、预警等低空安防难题。

表 4 无线电侦测设备指标参数参考

参数名称	指标
频率范围	支持 100MHz--6000MHz 工作频率（重点解析频段包括 433MHz、900MHz、1.4GHz、2.4GHz、5.8GHz 等无线信号）
探测角度	方位 0-360°，俯仰 0-90°
探测范围	≥2km
定位精度	≤10m
同时探测数量	≥30 架
精准识别功能	区分同品牌、同型号、不同 ID 的无人机；能识别并区分相同频段的多架无人机
信息显示功能	能在系统软件界面上显示识别出的无人机品牌、型号、ID 号、无人机的方位、距离、经纬度位置信息

(2) ADS-B 监视设备

ADS-B 监视是将卫星导航技术和通信技术相结合,航空器通过 ADS-B 机载设备,不断向外广播自身位置信息,并由地面站设备接收解析后提供精确的航空器定位信息,实现对目标识别和航迹跟踪。

ADS-B 地面基站包括全向收发天线、GNSS 天线、接收通道、发射通道、信号处理单元、外部接收单元和 RTK 信号处理单元。其中射频接收通道包含低噪声放大,本振、混频、中

放、解调、基带成形等单元。输入通道完成天线输入信号滤波、低噪声放大（LNA）等处理。经过低噪放的输入信号经过模式控制电路切换为 3dB 功分器到对应的接收解调处理单元，并最终完成对应的信号解调输出。发射通道包含射频本振、基带调制、功率放大等功能单元。

表 5 ADS-B 监视设备指标参数参考

参数名称	指标
最大作用距离	$\geq 350\text{KM}$
目标处理能力	单通道接收机目标处理能力大于 800 批目标/秒（均匀分布）
工作频率	$1090\text{MHz} \pm 1\text{MHz}$
动态范围	不小于 75dB
处理延时	设备处理延时不大于 50ms 且延时波动不大于 30ms
数据格式解析能力	数据输出格式符合 RTCA DO - 260、RTCA DO - 260A 和 RTCA DO - 260B 要求，能解析的下行数据链包括 DF0 ~ DF24 所有格式数据，并可以根据用户实际要求配置是否接收；同时具备远程升级支持解析更高版本格式的能力

3、视频取证设备

视频取证设备通过高清视频成像技术，实现对低空飞行器的实时监控和取证。

(1) 阵列摄像设备

亿像素阵列计算摄像机由多个细节 4K/8K 摄像模组阵列式拼接构成，通过多个细节摄像模组进行跨尺度映射融合，基于计算摄像理论，采用非结构化动态光场智能成像、多维多尺度融合光场重建、大范围动态场景智能处理三大技术，最终呈现亿像素级别的超高清视频流。

表 6 阵列摄像设备指标参数参考

参数名称	指标
摄像模组数量	19 个
单个摄像模组分辨率	标准 4K（830 万像素）
图像传感器类型	1/1.8" 逐行扫描图像传感器
总像素数量	1.5 亿像素
细节摄像模组焦距	35mm
全景融合视频分辨率	23040×6480

总水平视场角	68.9°
总垂直视场角	19.4°
单个摄像模组光圈	最大光圈为 2.0
视频压缩编码	支持 H.264/H.265
输出视频总码率	可调
图像处理功能	支持 3D 数字降噪、透雾、畸变校正、强光抑制、自动白平衡调整、背光补偿等图像增强功能
终端兼容性	支持 PC 端、拼接大屏等多类型终端
多用户操作功能	支持多用户同时对输出视频进行缩放、平移、框选放大、一键复原等操作

(2) 光电追踪设备

光电追踪设备内置高清可见光透雾网络摄像机加激光红外补光器,内置智能目标检测与跟踪算法,实现可见光、低照度、恶劣雾霾天气、夜间等全天候 24 小时不间断目标识别并跟踪,适用于室外及恶劣环境下需要高清图像效果的全天候视频监控场合,它可以为低小慢防御提供可靠的 360 度高清视频图像整体解决方案。

表 7 光电追踪设备指标参数参考

光电追踪设备指标参数			
目标自动跟踪	目标发现		雷达做方位引导
	目标锁定@跟踪		自动或手动
	作用距离 (能见度 $\geq 20\text{Km}$; 20℃, 湿度: 40%)		无人机: 0.35M*0.35M
	可见光	探测	$\geq 2000\text{M}$
		识别	$\geq 1000\text{M}$
		自动跟踪	$\geq 2000\text{M}$
	红外	探测	$\geq 1000\text{M}$
		识别	$\geq 1000\text{M}$
		自动跟踪	$\geq 1000\text{M}$
	水平范围		360°连续无限位旋转

	水平速度	水平键控速度：0°~80°/s
	垂直范围	-90°~+90°
接口	通讯接口	1 个 RJ4510M/100M 自适应以太网口
	电源接口	通用电源压接口

4.1.4 气象系统

气象系统由多种先进设备组成,包括小型气象站、大气电场仪、选频式电磁辐射监测仪、多普勒测风激光雷达、能见度仪和全天空成像仪,旨在实现对低空及地面气象要素的全方位监测,为飞行器安全运行提供精准气象数据支持。

1、小型气象站

小型气象站是高度集成化、模块化、智能化为一体的轻便易用的自动气象观测装备,可作为低空航路气象观测的重要补充。小型气象站对风向、风速、雨量、温度、湿度、大气压强等气象要素进行全天候现场精确测量,实现更小网格维度的精细化气象数据采集,提供精准实时的气象数据。

表 8 小型气象站参数参考

参数名称	指标
风速	0~60m/s, 分辨率 0.1m/s, 最大允许误差 $\pm 0.3\text{m/s}$ ($\leq 10\text{m/s}$), $\pm 3\%$ (>10m/s)
风向	0~360°, 分辨率 0.1°, 最大允许误差 $\pm 3^\circ$
温度	-50℃~60℃, 分辨率 0.1℃, 最大允许误差 $\pm 0.3^\circ\text{C}$
湿度	0~100%RH, 分辨率 0.1% RH, 最大允许误差 $\pm 3\%\text{RH}$ (0~90%RH), $\pm 4\%\text{RH}$ (90~100%RH)
气压	450hPa~1100hPa, 分辨率 0.1hPa, 最大允许误差 $\pm 0.5\text{hPa}$

2、大气电场仪

大气电场强度是大气学的基本参数,而雷暴云在地面产生的电场一直是用来衡量雷暴强弱的重要参数。地面大气电场仪是一种通过监测地面电场的实时变化,实现对带电云层活动状况进行监测的设备。由于雷暴路径经常不规则改变,雷达测站和闪电定位测站的布站基线较大,对于特定的点来说,单纯依靠闪电定位数据和雷达数据预测雷电天气的发展,具有较

大的误报风险。雷暴发生的最根本原因是雷电荷量，只要能够准确监测到本地大气电场的变化，并加以识别，可预测本地正在生成的雷暴或远处正在逼近雷暴的来临，大大提高雷电预警准确率。

表 9 大气电场仪参数参考

参数名称	指标
测量范围	-50kV/m~~+50kV/m(可扩展)
分辨率	20V/m
准确度	优于 95%
响应时间	≤1S

3、选频式电磁辐射监测仪

选频式电磁辐射监测仪能对环境中的电磁辐射实现快速准确测量，选配便携式校准器，可快速方便对仪器进行现场校准，确保仪器运行可靠。本项目通过电磁辐射监测仪，测量飞行器飞行的电磁环境。一是试验研究复杂电磁环境下飞行器抗干扰措施，二是确保飞行器飞行过程中电磁场对飞行器的影响在可控范围内。

地面手持式电磁扫描设备，主机测量的频率范围 100KHz ~ 6GHz，可以用于移动通信基站、中短波广播、FM 广播、电视、输变电工程、雷达、无线通信及工科。

4、多普勒测风激光雷达

多普勒测风激光雷达是一种基于相干多普勒测速原理的非接触式遥测激光雷达系统,可针对特定空域上空风场进行精细化扫描，可提供全天候、全方位、实时高精度风场信息，保障飞行器的起降安全，同时配合沿途的小型气象站，可以精细地刻画出航线沿路的三维立体风速风向信息，切实保障航路飞行安全。

表 9 多普勒测风激光雷达参数参考

参数名称	指标
有效风速观测范围	45m - 3000m
最大测量范围	≥3000m
风速精度	0.1m/s
空间分辨率	15m/25m/30m/75m/100m

5、能见度仪

能见度仪可进行与气象能见度相关的测量，传感器由光发射器、光接收器及微处理控制

器等主要部件组成。发射器发射红外脉冲光，接收器同时检测大气中气溶胶粒子前向散射的脉冲光强度，所有测量信息由微处理控制器搜集并通过专门的数学模型算法转化为气象光学视程 Meteorological Optical Range（MOR）。

表 10 能见度仪参数参考

参数名称	指标
测量范围	5m~10km
准确度	±2%(≤2km)
分辨率	1m
输出间隔	60s

6、全天空成像仪

全天空成像仪是一种全自动、全色彩天空成像设备，能把实时获取的图像信息和气象数据传输到后端计算中心，数据经质控、AI 图像识别模型处理后，将实时图像数据、云的覆盖率、透光率及附加的天气数据通过多种形式提供给用户终端，实现对区域上空云量的观测。

表 10 全天空成像仪参考

参数名称	指标
传感器	2000 万像素，高品质 CMOS 感光模组
主码流分辨率与帧率	60Hz: 30fps
准确度	±2% (≤2km)，分辨率 1m
输出间隔	60s

4.1.5 控制与安全系统

控制与安全系统是保障低空飞行器安全运行的核心保障，通过多种先进设备和智能算法实现飞行控制、通信保障、安全防护和状态监控，确保飞行器在复杂环境下的安全高效运行。

1、飞行控制器

飞行控制器是无人机和低空飞行器的核心控制模块，负责处理飞行器的导航、通信、监测数据，并执行自动化任务，确保飞行器的高效运行和任务精准完成。

2、融合通信终端：

融合通信终端实现对高低轨卫星、1.4G 专网、运营商通信网等多种通信方式的融合，

数字低空工作组

为低空飞行器提供统一的通信硬件接口和软件协议，保障通信畅通和信息安全，及时传递控制指令和任务数据，确保无人机系统正常运行。

3、防碰撞系统

防碰撞系统结合 ADS-B、雷达、视觉传感器的多源数据，通过智能算法实现飞行器的自主避障和碰撞预警，能有效降低飞行风险，保障飞行安全。

4、自我诊断与健康监控系统

自我诊断与健康监控系统通过多种传感器实时监控飞行器的关键部件状态，及时预警故障和异常情况，确保飞行器在各项指标范围内正常运行，最大限度提升飞行安全性。

4.1.6 地面支持系统

地面支持系统是低空飞行器运行的重要支撑，通过地面控制站、无人机机场、空地一体化数据仓、融合感知终端、中继通信站等设施设备，提供远程监控、自动化运营、数据处理和通信中继等综合支持，保障低空飞行器的高效运营和安全管理。

1、地面控制站

提供无人机和飞行器的远程监控与操控功能，整合通信链路、导航、监测、气象和任务规划等功能，并配备图形化用户界面，实现对飞行器的全面管控。

2、无人机机场

一种集成低空通信、充电、自动起降功能的地面设施，支持无人机的自动化运营和管理，为低空飞行器提供便捷的起降和充电服务。

3、空地一体化数据仓

集成高清摄像机、微型气象站、边缘计算等模块，构建“通、导、监、算”一体化的数据仓，支持无人机起飞降落、充电换电、保养运维等全流程低空飞行活动。

4、融合感知终端

多源数据融合感知设备，实现无线电频谱、雷达、光电等多模态异构感知数据的融合，构建“固移结合”的低空立体融合感知设施体系，提升低空环境的感知能力。

5、中继通信站

在低空复杂环境中通过地面或空中的中继站（如无人机中继），提升信号传输距离和覆盖范围，确保通信链路的稳定性和可靠性，为低空飞行器提供强有力的通信支持。

4.2 系统集成与互操作性

在低空通信、导航、监测及气象设备的系统中，确保飞行器（如无人机、通航飞机等）能够在复杂环境中实现高效、安全、可靠运行，系统的集成与互操作性是核心保障。

1、系统集成的核心要素

系统集成的目标是将不同类型的通信、导航、监测、气象及起降设施设备模块汇聚到一个统一的系统中，确保各模块协同工作，对不同技术、硬件和软件接口进行整合，形成统一的架构。其核心要素包括一下几部分：

1) 通信系统集成

包含多种通信方式，如无线电通信（VHF/UHF）、蜂窝网络（4G/5G）、卫星通信以及专用数据链。通过中央管理模块协调通信方式，确保不同通信技术能够无缝衔接。当无人机从有蜂窝信号覆盖区域进入无信号区域时，系统可自动切换到卫星链路，维持通信的连续性。

2) 导航系统集成

集成 GNSS、INS、GBAS（如差分 GPS）和 VN 等技术，实现飞行器在不同环境中的精确定位。系统兼顾各种导航系统的精度差异，通过融合算法（如卡尔曼滤波）提高位置确定的准确性。例如，当 GNSS 信号丢失时，INS 可以继续提供位置推算。

3) 监测系统集成

监测系统包括雷达、摄像头（多光谱、红外等）、边缘计算设备等，用于实时环境感知与态势监控。监测系统与飞行控制系统集成，提供实时数据用于决策。例如，雷达感知飞行器周围的空中障碍物，将信息反馈给避障系统。

4) 气象设备集成

气象站、LIDAR、气象雷达等设备提供实时的天气数据（如风速、温度、大气压力等），并实时传输给飞行控制系统，帮助飞行器根据气象条件调整飞行路径或进行预警。

5) 一体化起降设施集成

采用装配式和集约化设计，高度集成无人机自动起降机巢、微型气象站、边缘计算等模块，构建“通、导、监、算”一体化起降设施，支持无人机起飞降落、充电换电、保养运维等低空飞行活动，满足低空经济发展中的高密度、高频次、高复杂性的无人机规模化运行需求，同时适用于智能交通领域的多元化应用场景。

2、互操作性

互操作性是指不同系统和模块之间的兼容性和协同工作能力,确保各设备能够通过标准化协议和接口进行信息交换与联动控制,从而实现系统的无缝协作。

1) 多协议适配

不同系统(如通信、导航、监测系统)可能采用不同的通信协议。例如,导航模块使用的 NMEA 协议与飞行控制系统可能采用的 MAVLink、TCP/IP 等协议需兼容。系统需支持多协议通信,通过网关或协议转换模块,确保不同系统之间的数据交换无缝进行。

2) 硬件互联互通

在复杂环境中,飞行器上需要集成多种传感器和设备,这些设备通常来自不同供应商,可能具有不同的硬件接口(如 USB、UART、CAN 等)。通过使用统一的硬件接口标准(如通用串行总线或无线接口),确保所有设备可以无障碍连接到飞行器的主控制器或地面站。

3) 数据融合与处理

低空飞行需要多种传感器同时工作,如 GNSS、雷达、气象设备等,每种传感器的数据格式不同。系统通过数据融合算法,将多源数据整合为统一的数据流,提高感知的准确性和可靠性。例如,雷达和 GNSS 结合,可以在不同环境下提供更精确的位置信息和障碍物感知能力。

4.3 安全与隐私保护

在低空通信、导航、监测及气象设备系统中,安全与隐私保护是确保系统在复杂飞行环境中可靠运行的关键要素。通信链路必须通过端到端加密,以防止中间人攻击和数据泄露,保障信息在传输过程中保持机密性和完整性。多重身份验证(如数字证书、双因素认证)则确保只有经过授权的设备和人员能够接入系统,避免非法访问或控制。数据隐私保护通过数据最小化原则与脱敏处理来减少敏感信息暴露风险,确保飞行器和监控区域内的个人隐私得到保护。访问控制和权限管理进一步确保数据只能被授权用户访问和修改,防止未经授权的操作。为了提升系统的物理安全,设备设计需具备防篡改功能,并通过加固硬件和安全启动等手段抵御物理攻击。在网络安全方面,采用防火墙、入侵检测与防御系统,监测并阻止潜在的恶意行为,同时通过网络隔离、DDoS 防护和加密技术降低安全风险。通过这些多层次的安全与隐私保护措施,系统能够在保障飞行任务安全的同时,有效保护敏感数据和用户隐

私不被外部威胁所侵害。

5. 应用场景

5.1 无人机交通管理

无人机交通管理成为现代智能交通系统的一部分，帮助城市应对日益复杂的交通问题，凭借其灵活机动、高空覆盖的优势，能够有效辅助交通监控、事故处理、交通疏导等多个方面，显著提高交通管理的效率和准确性。

1、交通监控

无人机可以对大型城市的交通流量进行实时监测，特别是在高峰时段或交通繁忙的路段。无人机通过高空巡逻，能够覆盖更大范围的道路，采集交通流量数据并将其实时传回交通管理中心，帮助交通管理部门全面了解路况。在动态变化的交通环境中，相比传统的固定摄像头和传感器，无人机具备更高的灵活性，能够迅速调整监控区域，实时更新的路况数据帮助交通管理部门快速响应拥堵。

根据深圳市公安局的年度工作报告以及新闻媒体报道，深圳市在 2020 年试点使用无人机进行交通流量监测，特别是在高峰时段和大型活动期间。无人机覆盖了 10 余条主要干道和 5 个交通繁忙的路口，每天采集的实时交通数据超过 100GB。通过无人机的实时监测，深圳市交通管理部门在 2020 年成功优化了 15 个交通信号灯的配时方案，将高峰时段的平均拥堵时间减少了约 12%。在 2021 年春节期间，无人机对深圳湾大桥和福田高铁站周边的交通进行了全天候监控，实时数据帮助管理部门快速疏导了超过 5000 辆滞留车辆。

2、事故应急响应

当发生交通事故时，无人机可以快速到达现场，传回实时影像，帮助交通指挥中心迅速了解事故情况，评估损失并做出应对决策。这一过程极大缩短了应急响应的时间，帮助管理部门快速疏导交通，减少事故带来的交通拥堵。同时无人机还可以辅助进行事故现场的高精度三维建模，为事故调查提供详细的资料。

根据杭州市公安局年度工作报告及媒体报道，2021 年 8 月，杭州市某高速公路发生一起多车连环追尾事故，杭州市公安局交警支队迅速派出无人机赶赴现场。无人机在 10 分钟内到达事故地点，传回了实时影像，并完成了事故现场的高精度三维建模。通过无人机提供的实时数据，交警指挥中心在 30 分钟内完成了事故原因的初步分析，并制定了交通疏导方案，将二次事故的发生率降低了 20%。2021 年全年，杭州市交警支队使用无人机处理了超

过 50 起重大交通事故，平均应急响应时间缩短了 15%，事故现场清理效率提升了 25%。

5.2 城市公共服务

无人机在城市公共服务场景中凭借其高效、灵活的特性，能够解决许多传统手段无法快速应对的城市管理问题。

1、应急救援

无人机可以在灾害发生后迅速抵达现场，传回实时视频和图像，协助救援人员评估灾情，规划救援路线，缩短救援时间，在交通拥堵或道路损毁的情况下，还能通过空中投送急救物资，将人民生命和财产损失降到最低。

例如 2021 年 7 月 20 日，河南省郑州市遭遇特大暴雨，导致严重洪涝灾害，多个地区积水严重，交通中断，大量人员被困。在灾害发生后，应急管理部迅速调派了多支无人机救援队伍赶赴郑州，利用搭载高清摄像设备和热成像设备的无人机进行灾情评估和救援行动。这些无人机在 24 小时内完成了对受灾区域的初步评估，传回实时视频和图像，帮助救援人员迅速掌握受灾区域的积水深度、道路损毁情况以及被困人员的位置。在郑州市中牟县，无人机发现了一处被洪水围困的村庄，该村有 30 余名村民被困。无人机迅速标记被困人员的位置，并将数据传送给救援指挥部，救援队伍通过无人机提供的路线成功到达村庄，将所有被困人员转移至安全区域。此外，在郑州市巩义市米河镇，无人机向被困群众投送了超过 100 公斤的救援物资。通过无人机的快速响应和精准数据支持，救援队伍将原本需要 4 小时完成的救援任务缩短至 2 小时，大幅提高了救援效率。

2、城市安全监控

无人机可以充当“空中巡逻员”，执行高空监视任务。借助无人机上的高清摄像头、红外传感器和 AI 分析技术，能够实时监控人流密集区、交通要道以及重点安保区域的情况，及时发现并预警潜在的安全威胁，如火灾、交通事故、非法集会等。相比传统地面摄像头，无人机具备灵活移动的优势，能够覆盖更广的区域，快速响应突发事件。

根据深圳市公安局的年度工作报告以及新闻媒体报道，深圳市警方在 2021 年引入无人机进行城市安全监控，特别是在大型活动和节假日中使用无人机巡逻。据统计，无人机在 2021 年全年共参与了 1200 余次安保任务，覆盖了 200 多个重点区域。通过无人机的实时监控和数据分析，警方成功预警了多起潜在的安全威胁，全年刑事犯罪率较 2020 年下降了约

15%。

5.3 城市空中物流

无人机在城市空中物流中的应用正在迅速发展，为传统物流模式提供了高效、便捷的解决方案，尤其在快递配送、医疗物资运输和紧急应急服务等场景中发挥了重要作用。随着城市交通拥堵日益严重，无人机凭借其灵活的部署能力和不受地形限制的特点，能够避开地面拥堵，大幅缩短配送时间，提升物流效率，成为空中物流的重要补充。

1、无人机快递配送

无人机快递配送是城市空中物流中的最典型应用。无人机通过预设的航线，将包裹从配送中心快速送至客户手中。相比于传统的地面物流，无人机可以利用空中路径直线飞行，减少交通阻塞的影响，大幅提升城市内“最后一公里”配送的速度。城市无人机配送系统通常结合智能仓储和自动化技术，能够实时优化配送路线，根据天气、空域管制等动态调整路径，确保货物高效送达。

根据顺丰速运官方案例报告，自 2018 年起，顺丰速运在深圳、赣州等地开展无人机配送试点项目。截至 2022 年，顺丰无人机已累计完成超过 10 万次配送任务，覆盖了 100 多个偏远村庄。在深圳市，顺丰无人机将部分地区的快递配送时间从平均 40 分钟缩短至 15 分钟，配送效率提升了 60%。

2、医疗物资运输

在紧急情况下，地面交通无法通行或需要避开拥堵区域时，无人机能够在短时间内将急救药品、血液样本、疫苗等重要医疗物资快速送达目的地。这种高效的运输方式在疫情期间、救灾现场和医疗资源匮乏地区，显著缩短了救援物资的到达时间，提高了医疗响应能力。

根据中国国家卫生健康委员会案例报告 2020 年四川省凉山彝族自治州试点医疗无人机项目，成功将急救药品和血液样本从县城医院运送至偏远山区的卫生所，配送时间从 4 小时缩短至 30 分钟，服务覆盖了 10 个乡镇。

3、无人机应急物流

在突发事件如自然灾害或重大事故后，地面交通可能受到严重影响，无人机能够迅速投入使用，承担起紧急物资的输送任务，如食物、水、药品等，为灾区提供及时的救援支持。

在 2020 年武汉疫情期间，多家无人机企业（如亿航智能和京东物流）联合当地政府部门

门，利用无人机为医院运送医疗物资。数据显示，无人机每天运送的医疗物资总量超过 500 公斤，包括防护服、口罩、药品等。通过无人机的快速投送，医院物资短缺问题得到了显著缓解，医疗物资的平均配送时间从 4 小时缩短至 1 小时，接种率提高了 15%。2022 年 9 月，四川省泸定县发生地震后，无人机被用于向受灾严重的偏远地区投送救援物资。无人机在 24 小时内完成了对 10 个受灾村庄的物资投送任务，投送总量超过 2000 公斤，包括饮用水、食品和药品。

5.4 农业与环境监测

无人机凭借高空灵活飞行能力和多种传感器的集成，能够迅速获取大面积农田和自然环境的实时数据，帮助农民和环境管理者进行精准决策和有效管理。

1、农业领域

无人机主要用于作物监测、土壤分析、植保作业以及农田规划等方面。通过搭载多光谱、热红外和高清摄像头，能够对农作物的生长状况进行全面监测，识别出肉眼难以察觉的作物病虫害、缺水、营养不良等问题。

根据中国农业科学院 2020 年项目报告，2020 年中国农业科学院在黑龙江农垦总局开展了无人机监测试点。通过搭载多光谱传感器的无人机，研究人员对 5000 公顷的水稻田进行了全面监测，识别出 120 公顷受病虫害影响的区域。通过精准施药，农药使用量减少了 30%，水稻产量提高了约 8%。2022 年，巴西农业部在巴西南部的农田中使用无人机进行土壤分析。无人机搭载高分辨率摄像头和热成像设备，对 2000 公顷的农田进行了 3D 建模和土壤湿度分析。通过无人机数据，农民优化了灌溉计划，将用水量减少了 20%，同时提高了作物产量。

2、环境监测

无人机为生态保护、污染检测、资源管理等任务提供了高效的解决方案。无人机能够搭载多种传感器，实时监测空气、水体、土壤等环境参数，帮助环境监测人员快速评估大范围区域内的环境质量。

根据国家林业和草原局 2021 年工作报告，2021 年，国家林业和草原局在四川省卧龙自然保护区使用无人机监测大熊猫栖息地。无人机拍摄的高分辨率图像帮助研究人员识别出 150 公顷受人类活动影响的栖息地，为生态保护提供了科学依据。2022 年，荷兰环境监测

机构在莱茵河沿岸使用无人机搭载水质传感器，对 100 公里的河流进行了污染监测。无人机检测到 2 处水污染点，并及时通知了相关部门进行治理，将污染影响范围减少了 40%。

5.5 应急救援与灾害管理

无人机在应急救援与灾害管理场景中的应用极大地提升了响应速度和救援效率，由于无人机能够在灾害发生后迅速部署，并且不受地形限制，成为应急救援中不可或缺的工具，特别是在自然灾害和紧急事故场景中发挥了关键作用。

1、灾后评估

无人机能够在第一时间飞往灾区上空，利用高清摄像头、热成像仪和其他传感器，实时拍摄并传回灾区的影像资料，帮助救援人员全面了解灾害影响的范围，评估受损情况，并识别优先救援的区域。

2021 年 3 月，日本福岛县附近海域发生里氏 7.3 级地震，导致多地房屋受损，道路中断。日本国土交通省迅速部署了多架无人机对灾区进行航拍评估。无人机在 1 小时内完成了对受灾最严重区域的初步航拍，拍摄了超过 500 张高分辨率图像。通过分析这些图像，救援人员迅速识别出 200 余处受损建筑物，并评估了道路和桥梁的损毁情况。相比传统人工评估，无人机评估的速度提高了 80%，为后续救援行动提供了关键数据支持。

2、搜索与救援

在广泛的搜索区域或复杂的地形中，传统的地面搜救可能会耗费大量时间和人力，而无人机可以快速覆盖大范围区域，通过红外传感器、热成像技术探测受困人员的热源，尤其是在夜间或能见度较低的环境中，大大提高了搜救效率，缩短了黄金救援时间。

2023 年 2 月，土耳其南部发生 7.8 级强烈地震，造成大量人员被困。土耳其应急管理部门与国际救援团队合作，部署了多架搭载热成像传感器的无人机进行搜索。在安塔基亚市，无人机在 20 分钟内发现了 3 处被困人员的热源信号，救援队伍随后成功救出 12 名受困者。相比传统地面搜索，无人机的搜索效率提高了 40%，黄金救援时间缩短了 2 小时。

6. 挑战与未来发展

6.1 技术挑战

随着无人机、低空物流和城市空中交通的迅猛发展，低空通信、导航、监视及气象技术得到了进一步的提升，但在实际应用中仍面临诸多技术挑战。

1、通信技术挑战

1) 信号覆盖与干扰

在城市环境中，无人机通信容易受到建筑物和其他障碍物的干扰，导致信号衰减或中断。此外，频谱资源的有限性和电磁环境的复杂性使得通信系统的抗干扰能力面临严峻考验。例如，城市中的高楼大厦可能阻挡无线信号，导致通信盲区；而密集的无线设备（如 Wi-Fi、蜂窝网络等）可能产生信号干扰，影响无人机通信的稳定性。

2) 频谱资源管理

无人机的通信依赖于无线电频谱，一些场景下可能需要动态分配频谱资源，以适应不同场景下的通信需求，但目前频谱资源的管理技术尚不完善，频谱资源有限且分配复杂，限制了无人机通信的效率和可靠性。如何高效利用频谱资源，避免与其他无线设备的冲突，也是通信技术中的重要课题。

3) 抗干扰能力

在复杂的电磁环境中，无人机通信系统需要具备更强的抗干扰能力，以确保数据传输的稳定性和可靠性。例如，无人机可能需要采用抗干扰技术（如频谱扩散、纠错编码等）来提高通信链路的鲁棒性，但这些技术的实现成本较高，且可能增加系统的复杂性。

2、导航技术挑战

1) 高精度定位

无人机在低空飞行时需要高精度的导航系统来确保飞行安全和任务执行。特别是在复杂地形或高密度飞行场景下，导航系统的精度和可靠性尤为重要。例如，无人机可能需要在复杂的城市环境中精确避开障碍物，但目前导航技术的精度仍难以满足所有场景的需求。

2) 抗多路径效应

全球导航卫星系统在城市环境中容易受到多路径效应的干扰，导致定位精度下降。如何提升 GNSS 的抗多路径能力是导航技术中的关键问题。例如，无人机在城市中飞行时，GNSS

信号可能被高楼大厦反射或折射，导致定位误差增大。如何提升 GNSS 的抗多路径能力是导航技术中的关键问题。

3) 复杂地形适应性

在山区、森林等复杂地形中，无人机需要具备更强的导航能力，以应对信号遮挡和地形变化带来的挑战。例如，无人机可能需要结合 INS 和 GNSS，以提高定位精度和可靠性，但这些技术的集成和优化仍需进一步研究。

3、监视技术挑战

1) 实时数据处理

高密度无人机飞行时，监视系统需要处理大量实时数据，这对系统的数据处理能力和响应速度提出了更高要求。例如，监视系统需要实时分析无人机的位置、速度和航向等信息，以避免空中冲突，但目前的数据处理技术尚无法完全满足高密度飞行的需求。

2) 空域监控

在城市低空环境中，无人机的密集飞行增加了空域监控的难度。如何避免空中冲突，确保飞行安全，是监视技术中的重要课题。例如，监视系统需要快速识别和处理潜在的碰撞风险，但目前的空域监控技术仍存在延迟和误报的问题。

3) 高密度飞行管理

在高密度飞行场景下，监视系统的实时性和准确性直接影响无人机的飞行效率和安全性。例如，监视系统需要实时跟踪和管理数百架无人机的飞行状态，但目前的技术仍难以完全满足这一需求。

4. 气象技术挑战

1) 实时气象数据准确性

气象数据的准确性对无人机的飞行安全至关重要，尤其是在复杂环境和恶劣天气条件下。例如，无人机在强风或暴雨中飞行时，需要实时获取风速、风向和降雨量等气象数据，以调整飞行策略，但目前的气象监测技术仍难以完全满足这一需求。

2) 环境因素影响

城市建筑和其他环境因素可能影响气象数据的采集和分析，导致数据偏差。例如，高楼大厦可能阻挡气象传感器的信号，导致气象数据的不准确性，这对无人机的飞行安全构成了潜在威胁。

3) 恶劣天气应对

在强风、暴雨、低温等恶劣天气下，无人机需要可靠的气象信息支持，以确保飞行安全和任务执行。例如，无人机可能需要根据实时气象数据调整飞行高度和速度，但目前的气象监测技术尚无法完全满足这一需求。

5. 技术整合与标准化

1) 统一标准缺失

当前无人机行业缺乏统一的技术标准，导致设备兼容性和信息共享面临挑战。不同制造商的无人机可能采用不同的通信协议和导航系统，这限制了无人机系统的整体性能和可靠性。如何制定和推广统一标准是技术整合中的重要问题。

2) 设备兼容性

不同制造商的设备之间可能存在兼容性问题，影响无人机系统的整体性能和可靠性。例如，无人机可能需要与其他设备（如地面站、导航系统等）协同工作，但兼容性问题可能导致系统故障或性能下降。

3) 信息共享

在多无人机协同作业中，信息共享的效率和安全性直接影响任务执行的效果。例如，无人机可能需要实时共享位置、状态和任务数据，但目前的信息共享技术尚无法完全满足这一需求。

6. 安全与隐私问题

1) 通信安全

无人机任务中的通信安全是不可忽视的问题。例如，无人机的通信链路可能被黑客攻击或窃听，导致任务数据泄露或无人机被恶意控制。如何防止通信链路被截获或干扰，确保数据传输的安全性，是技术中的重要课题。

2) 数据泄露

无人机在执行任务时可能采集敏感数据，如何防止数据泄露，确保数据的机密性，是安全技术中的关键问题。例如，无人机可能采集到用户的隐私信息（如位置、视频等），如何保护这些数据不被滥用是技术实施中的重要挑战。

3) 隐私保护

在无人机监控过程中，如何保护个人隐私，避免侵犯公民隐私权，是技术实施中的重要挑战。例如，无人机可能拍摄到未经授权的区域或人员，如何限制无人机的监控范围和数据

采集权限是技术中的重要问题。

总之，无人机在低空通信、导航、监视及气象技术的应用中面临诸多技术挑战，这些问题需要通过技术创新和标准制定来解决。只有克服这些技术难题，无人机才能更好地服务于应急救援、物流运输、农业监测等多样化场景，推动无人机行业的进一步发展。

6.2 法规与政策

低空通信、导航、监视及气象技术的应用受到严格的法规和政策监管，以确保低空空域的安全、高效和有序运行。各国政府和航空监管机构针对低空飞行制定了详细的法规，飞行器的适航标准、空域划分和飞行许可制度是其中的核心内容。

6.2.1 现有政策

低空空域的开放需要遵循特定的许可流程，尤其是在无人机等低空飞行器日益普及的背景下，各国纷纷出台法规明确规定了无人机的使用范围、飞行高度和操作区域，以避免与民航、军事等其他航空器发生冲突。

通信与导航频谱的分配也受到相关政策的严格监管，各国无线电管理部门对不同用途的频段做了明确划分，确保低空通信不会与其他频段产生干扰，同时促进不同通信方式的兼容性和协调性。

针对低空空域内的监视与气象数据，各国政策要求飞行器运营商及相关服务提供商必须遵循数据隐私和安全法规，确保监测数据的合法采集、存储和使用，以保护个人隐私和国家安全。

国际层面，各国政府和国际航空组织如国际民航组织也在积极推动低空空域管理的国际协调与标准化，以促进跨境飞行和国际合作。

1、无人机管理法规

美国联邦航空管理局 (FAA)： FAA 是全球无人机管理的先行者，制定了严格的无人机操作规定。例如，FAA 要求所有无人机操作员必须通过知识测试并获得执照，同时规定了无人机的飞行高度（不得超过 400 英尺）、飞行区域（禁止在机场附近或人口密集区飞行）以及操作限制（如夜间飞行需额外许可）。

欧盟 U-Space 计划： 欧盟通过 U-Space 计划推动低空空域的标准化管理，规定无人机

必须接入统一的空域管理系统，实时报告位置和状态，以避免与其他航空器冲突。

中国《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》：该条例明确了无人机的分类管理、飞行许可制度以及空域使用规则，规定了无人机在不同空域的飞行权限，并要求无人机必须配备电子围栏等安全设备。

2、频谱管理政策

国际电信联盟 (ITU)：ITU 负责全球无线电频谱的分配与协调，为低空通信技术提供了统一的技术标准和频段划分。例如，ITU 为无人机通信分配了特定频段 (如 24 GHz 和 57 GHz)，以避免与其他无线设备的干扰。

美国国家电信和信息管理局 (NTIA)：NTIA 对无人机通信频谱进行了详细规划，规定了不同用途的频段 (如控制链路、数据传输等)，并制定了频谱共享规则，以提高频谱利用率。

3、数据隐私与安全法规

欧盟《通用数据保护条例》 (GDPR)：GDPR 对无人机采集和使用个人数据提出了严格要求，规定无人机运营商必须获得用户同意才能采集敏感数据，并对数据存储和传输的安全性负责。

中国《个人信息保护法》：该法律要求无人机运营商在采集和使用个人数据时必须遵循合法、正当、必要原则，并采取技术措施保护数据安全。

4、国际协调与标准化

国际民航组织 (ICAO)：ICAO 积极推动低空空域管理的国际协调，制定了《无人机系统国际标准和建议措施》 (ICAO Doc 10016)，为全球无人机管理提供了统一的技术标准和操作规范。

联合国欧洲经济委员会 (UNECE)：UNECE 通过“全球低空空域管理框架”推动各国在低空空域管理方面的合作，促进了技术标准和政策的统一。

6.2.2 政策漏洞

1、空域管理的协调性不足

区域间政策差异：目前各国的低空空域管理政策存在较大差异，例如欧盟的 U-Space 计划强调空域的数字化管理，而美国则更注重飞行许可的严格审批。这种差异导致跨境飞行

的协调困难，增加了无人机运营商的合规成本。

军民空域冲突：在一些国家，低空空域的使用权限尚未完全开放，军用和民用空域的划分不够清晰，导致无人机飞行许可申请流程复杂且耗时。

2、频谱资源分配的灵活性不足

频段供需失衡：随着无人机数量的快速增长，现有的频谱资源已难以满足需求。例如，24 GHz 频段在城市环境中容易受到干扰，而 57 GHz 频段的覆盖范围有限，导致频谱资源分配的灵活性不足。

频谱共享机制不完善：目前的频谱共享机制尚未完全成熟，无人机与其他无线设备（如 5G 网络、Wi-Fi 等）之间的频谱冲突问题尚未得到有效解决。

3、数据隐私与安全保护不足

数据采集范围不明确：部分国家的法规对无人机采集数据的范围和用途缺乏明确规定，导致数据滥用风险增加。例如，无人机可能采集到未经授权的区域或人员的隐私信息，但相关法规对此的约束力度不足。

跨境数据传输问题：在国际无人机飞行中，数据的跨境传输可能涉及不同国家的隐私保护法规，但目前缺乏统一的跨境数据传输标准，增加了合规难度。

4、技术发展与政策更新的不匹配

政策滞后性：随着无人机技术的快速发展，现有法规往往无法及时跟上技术进步的步伐。例如，目前的法规对自动避障、人工智能等新技术的支持不足，限制了无人机的智能化应用。

缺乏动态监管机制：低空空域的动态管理需要实时监测和快速响应，但目前的监管机制多为静态管理，难以适应高密度无人机飞行的实时需求。

6.2.3 政策优化建议

1、推动国际政策协调

各国应加强在低空空域管理、频谱分配和数据隐私保护方面的国际合作，制定统一的技术标准和操作规范，以促进跨境无人机飞行和技术创新。

2、完善频谱管理机制

通过动态频谱分配和智能频谱共享技术，提高频谱资源的利用率，同时加强频谱监测和干扰防护能力，确保低空通信的稳定性和可靠性。

3、强化数据隐私与安全保护

通过立法明确无人机数据采集的范围和用途，加强对敏感数据的保护措施，并建立跨境数据传输的统一标准，以降低隐私泄露风险。

4、加强政策与技术的协同创新

政府和企业应加强合作，推动低空空域管理技术的创新与应用，例如通过人工智能和大数据技术实现空域的动态管理，同时加快政策更新速度，确保法规与技术发展同步。

随着低空飞行技术的快速发展，未来法规和政策将在推动技术创新与保障空域安全之间寻求平衡。通过加强国际合作、完善频谱管理、强化数据隐私保护以及推动政策与技术的协同创新，可以更好地平衡技术创新与空域安全之间的关系，为低空空域的高效利用和无人机的广泛应用提供有力支持。

6.3 市场与商业模式

低空通信、导航、监视及气象技术的市场前景广阔，随着无人机、城市空中交通、物流配送、应急救援等行业的快速发展，这些技术的应用场景不断拓展，市场需求持续增长。

6.3.1 市场前景

1、无人机行业的驱动

随着无人机技术的成熟和应用范围的扩大，无人机在物流配送、农业监测、应急救援、影视拍摄等领域的需求持续增长。

无人机的普及对低空通信、导航和监视技术提出了更高的要求，例如实时通信、高精度导航和动态空域监控，推动了相关技术的市场扩展。

2、城市空中交通的兴起

城市空中交通作为未来交通的重要组成部分，需要低空通信和导航技术的支持。低空导航系统和通信网络的建设将为城市空中交通的运营提供基础保障，市场潜力巨大。

3、物流配送与应急救援的需求

低空物流配送（如无人机快递）对实时气象数据和空域监控的需求不断增加，以确保飞行安全和效率。

应急救援领域（如灾害监测、医疗物资运输）对低空技术的依赖也在增强，推动了相关

技术的市场扩展。

6.3.2 可能的商业模式

无人机交通管理和城市空中交通的兴起推动了对低空通信和导航技术的需求, 通信服务提供商和导航系统开发商通过提供定制化解决方案, 逐步建立了与无人机运营商的合作模式。比如专门为无人机提供的 5G 通信网络和卫星通信技术, 已成为热门的商业服务。监视系统和气象技术则主要面向空域监管机构、无人机运营商和商业物流公司, 通过提供实时的空域监控和气象数据支持, 确保飞行安全和效率。

低空领域的产业链日益复杂, 涵盖设备制造、软件开发、数据服务、维护与支持等多个环节, 不同类型的企业形成了从硬件到软件、再到数据分析的多层次生态系统。各大公司还通过与政府和公共部门的合作, 抢占低空空域管理市场, 提供智慧空域管理平台、无人机调度和数据分析等综合服务, 推动了新的市场机会。

1、订阅服务模式

实时监控与气象数据服务: 通信和监视系统提供商可以通过订阅制为无人机运营商提供实时空域监控和气象数据, 帮助用户优化飞行路径和规避风险。

导航与通信服务: 为无人机提供定制化的导航和通信服务, 例如基于 5G 网络的低空通信解决方案, 用户按需支付服务费用。

2、按需收费模式

动态空域管理: 根据飞行任务的复杂性和空域使用需求, 向无人机运营商收取动态空域管理费用。

数据增值服务: 为用户提供额外的气象数据、飞行数据分析和优化建议, 按数据量或服务内容收费。

3、硬件销售与集成服务

设备制造与销售: 通信、导航、监视及气象设备的制造商可以通过销售硬件设备(如低空通信终端、导航模块、气象传感器)获得收入。

系统集成服务: 为无人机运营商提供全套技术解决方案, 包括硬件安装、软件开发和系统集成, 收取集成服务费用。

4、政府与公共部门合作模式

空域管理平台：与政府和公共部门合作，提供智慧空域管理平台，帮助监管机构实现低空空域的动态管理。

无人机调度与数据分析：为政府应急救援和城市管理提供无人机调度服务和大数据分析支持，推动公共事业的数字化转型。

随着低空技术和应用场景的不断拓展，未来商业模式将更加多元化，尤其是在无人机配送、智能城市管理、农业监测等垂直行业中的商业机会将进一步扩大。

6.4 未来发展趋势

低空通信、导航、监视及气象技术在未来的发展将呈现出智能化、集成化和全球化的趋势，这些趋势将推动低空空域的高效利用和无人机等低空飞行器的广泛应用。

1. 智能化

智能化技术将在低空领域大放异彩，随着人工智能、边缘计算和大数据分析的不断进步，这些技术将更深度地集成到无人机和低空交通管理系统中，实现更自动化、智能化的决策和操作。

自主飞行能力：无人机将能够自主识别航线、避障、监测气象条件，并根据实时数据自动调整飞行参数。例如，基于 AI 的自主避障系统可以实时感知环境并优化飞行路径，提升飞行安全性和效率。

智能气象预测：通过大数据分析和气象模型，无人机可以实时获取气象数据并预测天气变化，从而优化飞行计划，避免恶劣天气的影响。

智能空域管理：低空交通管理系统将通过 AI 算法实现空域的动态分配和飞行器的智能调度，提高空域利用率和飞行效率。

2. 集成化

集成化趋势将加速低空通信、导航、监视及气象技术的融合，形成统一的管理平台，实现多技术的无缝衔接。

综合管理平台：通信、导航、监视和气象技术将通过综合系统提供统一的飞行管理服务，确保无人机、空中出租车等飞行器在不同空域和应用场景中的顺畅运行。例如，集成化的低空管理系统可以实时监控飞行器的位置、状态和气象条件，提供全面的飞行支持。

设备与服务的整合：低空技术服务商将提供从硬件设备到软件服务的全套解决方案，例

如为无人机运营商提供通信终端、导航模块、气象传感器以及数据分析服务，形成完整的生态系统。

3. 全球化

全球化是低空技术发展的另一个重要趋势，国际民航组织和各国政府正在推进低空空域的全球标准化管理，推动各国空域管理系统的互操作性与协调性。

跨境飞行与物流：未来，跨境无人机飞行、全球物流配送和国际应急救援等应用场景将日益普及。例如，无人机可以实现跨国物流运输，为偏远地区提供紧急物资支持。

全球通信网络：随着 5G、卫星互联网等通信基础设施的完善，全球覆盖的低空通信网络将使无人机等低空飞行器实现全球无缝连接，推动全球无人机经济的蓬勃发展。

国际合作与标准化：国际民航组织将推动低空空域管理的国际协调与标准化，制定统一的技术标准和操作规范，为跨境飞行和国际合作提供支持。

4. 技术融合与服务升级

低空技术将与 5G、AI、大数据等技术深度融合，推动服务模式的智能化和个性化。

动态空域管理：基于实时数据分析的动态空域管理平台可以通过优化飞行路径和资源分配，提高低空空域的使用效率。

数据驱动的服务：低空技术服务商可以通过分析历史飞行数据和气象数据，为用户提供飞行风险评估和优化建议，提升服务附加值。

7. 结论

7.1 总结

低空通信、导航、监视及气象技术作为低空空域安全运行的核心支撑体系，已在技术框架、系统架构和应用场景方面取得显著进展。本白皮书系统梳理了低空通导监气技术的基本概念、现状、技术和应用场景，下面再回顾一下几个关键内容：

技术体系层面

1、通信技术：通过 5G、卫星通信与网络切片技术，实现了低空飞行器与地面系统的实时交互，但城市楼宇遮挡导致的信号覆盖盲区、频谱资源动态分配机制及复杂电磁环境下的抗干扰能力仍需突破。

2、导航技术：融合 GNSS、INS、LiDAR 等多源感知，支撑厘米级定位与复杂环境适应性，但城市峡谷中的多路径效应、动态地形（如山区、森林）导航精度不足仍是技术难点。

3、监视技术：借助毫米波雷达、ADS-B 与 AI 驱动决策，构建了空域动态监控体系，但高密度飞行场景（如物流枢纽空域）下的实时数据处理效率与空域冲突预警能力亟待提升。

4、气象技术：通过微型气象站、激光雷达与大数据分析，实现了精细化气象服务，但雷暴、低空风切变等极端天气预测精度不足，城市热岛效应干扰数据采集的问题仍需优化。

应用场景层面

1、城市空中交通与无人机物流

基于通导监气技术的动态路径规划与空域实时调度，已应用于深圳、上海等试点城市，实现无人机日均飞行架次超 3000 架，物流配送时效提升 40%以上。

电动垂直起降飞行器（eVTOL）通过融合气象预警与高精度导航，构建“空中走廊”，目标 2030 年覆盖 80%一线城市核心区域。

2、农业监测与环境保护

多光谱无人机结合 RTK 定位，精准识别病虫害与土壤墒情，黑龙江农垦项目显示农药使用量减少 30%，粮食增产 8%。

生态监测中，无人机搭载 LiDAR 与热成像传感器，完成自然保护区 3D 建模与非法活动追踪，巡逻效率较人工提升 15 倍。

3、应急救援与灾害管理

在河南洪灾、土耳其地震等场景中，抗干扰通信链路与时气象预警系统将物资投送响应时间缩短至 30 分钟以内，救援效率提升 50%。

无人机集群通过边缘计算实现灾区快速三维建模，支持 72 小时内完成 100 平方公里灾情评估。

挑战与政策层面：

1、技术整合

当前通导监气技术的整合面临标准化缺失与设备兼容性问题，需建立全球统一的技术框架，推动跨系统协同工作，提升整体运行效率。

2、频谱资源与隐私保护

频谱资源的动态分配机制尚未完善，需探索更高效的频段管理方案，避免频谱冲突与干扰。同时，数据隐私保护与跨境飞行协调机制尚不完善，亟需国际协作与政策创新，确保数据安全与合规性。

安全防护体系

当前安全防护体系需进一步强化，包括端到端加密技术、抗物理攻击能力与 AI 驱动的威胁检测能力。例如，通过端到端加密技术，确保通信数据的安全性；通过 AI 技术，实时监测空域中的潜在威胁，提升整体安全性。

7.2 展望

随着 5G、卫星通信、人工智能、大数据和边缘计算等先进技术的不断融合，低空通导监气技术将会更加智能化和集成化，为全球低空经济和智能空域管理带来更广阔的市场机会。

1、智能化与自主化

AI 深度赋能：通过机器学习优化导航路径与避障算法，实现飞行器全自主决策；边缘计算与实时数据流处理将支撑毫秒级空域动态调度。

通感一体演进：通信与感知硬件深度融合，构建“感知-决策-控制”闭环，提升复杂环境下的系统鲁棒性。

2. 全域集成与生态协同

空天地一体化网络：5G/6G 通信、低轨卫星与高空平台协同组网，实现全球无缝覆盖；

数字低空工作组

多源数据融合平台将打通气象、交通与城市管理数据壁垒，形成数字孪生空域。

垂直行业深度融合：物流、农业、应急等领域将衍生定制化解决方案，例如跨境无人机物流网络、城市立体交通走廊与生态监测网格化体系。

3. 全球化标准与可持续治理

国际标准体系构建：ICAO、ITU 等组织将推动通导监气技术接口、数据协议与安全规范的全球统一，支撑跨境飞行与多国联合空域管理。

绿色低碳转型：新能源飞行器与低功耗感知设备的普及，结合气象数据驱动的能耗优化算法，助力碳中和目标实现。

4. 新兴场景与价值重构

城市空中交通商业化：电动垂直起降飞行器与无人接驳系统将重塑城市交通格局，预计2035年全球市场规模超万亿美元。

低空数字经济崛起：通导监气数据衍生新型服务模式，如空域资源交易平台、气象风险保险与飞行数据资产化，催生万亿级市场生态。

低空通导监气技术的成熟不仅是技术演进的结果，更是政策创新、产业协同与国际合作的综合体现。未来十年，该领域将进入爆发期，成为智慧城市、绿色经济与全球供应链升级的核心基础设施，为人类社会开启“三维空间”智能化新时代。