

5G-A 低空通信组网与关键技术 研究报告

2026 年 3 月

前 言

近年来，低空经济作为国家战略性新兴产业，正加速融入城市治理、农林植保、物流配送、工业巡检、应急救援等多元场景，成为推动高质量发展的重要力量。2024年“低空经济”首次写入政府工作报告，2025年国家层面进一步设立低空经济发展司，并将其纳入“十五五”规划重点方向，加速推动我国低空经济迈向规模化落地新阶段。

在这一进程中，低空通信作为支撑低空活动数字化、网络化、智能化运行的核心信息基础设施，重要性日益凸显。区别于传统地面通信，低空通信需应对低空覆盖不连续、空地信号干扰复杂、终端高速移动频繁切换等挑战。当前，以5G/5G-A蜂窝网络为主体，融合直连通信、卫星通信等多种技术路径的低空通信体系正在加快构建。IMT-2020(5G)推进组组织产业界围绕覆盖增强、干扰抑制、移动性优化、终端识别与接入等关键问题，开展了大量技术创新与工程实践，积极探索包括大张角地空兼顾天线、新型组网拓扑、空地频谱协同等一系列解决方案，并通过编制低空通信测试规范，开展实验室与外场技术试验，验证了相关技术方案在城市、公园、园区等多种场景下的可行性与5G-A低空通信的覆盖和组网性能。

与此同时，国内国际低空通信标准体系同步推进，国际移动通信标准化组织 3GPP 在 Release 18 版本对无人机通信支持能力进行了标准化，我国行业标准也在基站、终端等环节加快推进。然而，低空通信当前仍处于从技术验证向规模商用过渡的关键期，面临标准落地、终端生态、跨行业融合等多重挑战。本报告通过系统梳理低空经济的发展脉络与通信需求，深入分析主流技术路线与组网策略，总结关键技术进展与产业试验成果，提出了一系列发展建议，旨在通过加强技术创新、推进标准制定、加快网络建设和强化产业合作等方式，共同推动低空通信产业的繁荣与发展，助力低空经济赋能经济社会高质量发展。

目 录

| | |
|--|----|
| 一、 研究背景 | 1 |
| 二、 低空通信典型应用场景 | 10 |
| 三、 低空通信组网方案 | 18 |
| 四、 低空通信网络关键技术 | 29 |
| 五、 低空通信标准进展 | 37 |
| 六、 低空通信产业进展 | 41 |
| 七、 发展建议 | 48 |
| 附录 1： 缩略语表格 | 52 |
| 附录 2： IMT-2020（5G）推进组 2025 年首批 5G-A 低空通信试验企业清单 | 54 |

一、研究背景

低空经济是指在低空空域内，以民用有人驾驶和无人驾驶航空器为主体，以载人、载货、传感、通信等多类载荷赋能城市治理、农林植保、灾害监测、应急救援等多场景低空飞行活动，辐射带动公共服务领域及商业经营活动融合发展的一种综合性新兴经济形态，具备应用场景多、辐射范围广、产业链条长、带动能力强等特点。

1.1 低空经济加速发展

我国高度重视低空经济发展，从空域管理、要素保障、产业培育、应用拓展等多个维度，通过发布政策文件，强化项目资金支持等多措并举，加快推动低空经济发展。在国家层面，2010年11月，国务院、中央军委颁发了《关于深化我国低空空域管理改革的意见》，是我国低空空域管理改革的纲领性文件；2021年2月，《国家综合立体交通网规划纲要》中首次提及低空经济；2022年，《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出建设多元化、智能化末端服务网络，推广无人机运输投递，发展无接触递送服务。2023年12月，中央经济工作会议将“低空经济”列入国家战略性新兴产业，强调加强低空空域资源的开发利用，加快低空基础设施建设；2024年，低空经济首次写入国家政府工作报告；党的二十届三中全会审议通过的《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的

决定》，明确提出“

发展通用航空和低空经济”；2024年12月，国家发展改革委增设低空经济发展司，负责拟订并组织实施低空经济发展战略、中长期发展规划，提出有关政策建议，协调有关重大问题。2025年10月，党的二十届四中全会审议通过《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》，明确提出打造新兴支柱产业，加快新能源、新材料、航空航天、低空经济等战略性新兴产业集群发展。2026年2月，工业和信息化部、中央网信办、中央空管办、国家发展改革委、中国民航局等五部门近日联合印发《关于加强信息通信业能力建设 支撑低空基础设施发展的实施意见》，按照“需求牵引，重点突出；集约复用，多元协同；试验先行，稳步推进；安全可控，筑牢屏障”的原则，持续提升信息通信技术、产业、网络和安全等供给能力，为低空经济发展提供坚实基础。提出到2027年，全国低空公共航路地面移动通信网络覆盖率不低于90%，多元融合感知方案进一步完善成熟，低空导航服务水平持续提升，研制不少于10项信息类基础设施标准，面向城市治理、物流运输、文旅等领域形成一批典型低空应用场景。

在地方政府层面，各级地方政府积极落实，结合地方经济社会发展特点推动低空经济发展，截至2025年3月，已有30个省、市、自治区将发展低空经济列入政府工作报告，26个省、市、自治区和82个城市出台低空经济发展规划或相关政策文件，成立了45家低空

业务范围覆盖机场运营、通用航空服务等方面。

20 余个省市设立了低空经济产业专项基金，总规模超千亿元。

目前，伴随着应用场景的持续深入和发展环境的持续优化，我国低空经济已经进入快速发展阶段，中国民航局数据显示，2023 年全国低空经济规模超 5000 亿元，2030 年有望达到 2 万亿元，低空经济发展逐步向规模化应用演进。

1.2 低空通信有力支撑低空经济高质量发展

低空经济基础设施位于低空经济产业链的上游，是支撑低空经济应用生态蓬勃发展的关键基础环节，主要包括物理基础设施和信息基础设施两大类。低空物理基础设施，也被称为“硬基建”，主要包括起降平台、机场、通航设施、能源站、维修站、货物装卸点、乘客候乘区等，为低空飞行器提供必要的物理支撑和运营保障。以低空通信网络为代表的低空信息基础设施，也被称为“软基建”，主要涵盖通信、导航、监视、数据传输、运营管理平台等，是低空经济实现数字化、网络化、智能化的核心支撑。以当前备受行业关注的无人机系统为例，无线通信技术是赋能无人机融合应用的关键技术。一方面，无人机需要与飞行员、附近的飞行器、空中交通管制员等交换飞行控制信息，以确保飞行运行安全、可靠、高效。这类通信需求通常称为**控制或非有效载荷通信**。另一方面，根据应用场景，无人机还需要及时与无人机运营企业、无人机用户或地面网

空图像、高清视频、传感器数据等类型的通信数据，这类数据也被称为**有效载荷通信**。聚焦重点行业和领域高质量发展，还需进一步夯实低空信息基础设施支撑，强化低空通信等低空经济核心技术攻关，带动技术突破和应用迭代发展，培育发展新产品新模式新业态，进一步探索多样化、可持续的低空经济价值释放路径。

为加快培育低空经济产业发展优势，以低空基础设施建设引领低空经济产业高质量发展，各地加快推进低空信息基础设施建设，例如，深圳市在 2025 年 7 月发布《深圳市低空基础设施高质量建设方案（2024—2026 年）》，提出“到 2026 年底，建成全球首个低空智能融合系统（SILAS），低空通信、导航、监视、气象监测等服务保障体系实现全覆盖”“构建低空通信网络。依托 5G、5G-A 通感一体、1.4GHz 专网、卫星通信等技术，复用与新建相结合，构建高安全性、高可靠性、低时延的空—天—地—海融合通信网络，实现起降点和运营航路全覆盖。推动通信、低空飞行服务运营商协同开展复杂场景下的实地低空通信技术测试，迭代升级低空通信技术。结合海域运输安全监管、海上应急救援、海域边防安全管控等需求，推动海上低空通信关键技术研发，建立健全海上低空通信网络，实现海域航线连续覆盖”。

1.3 支持无人机通信的无线通信技术简介

1.3.1 地面控制器与无人机直接连接通信

地面控制器与无人机直接连接通信（直连通信）是指无需中间节点中继或转发，地面控制器（如遥控器或地面站）与无人机通过无线链路建立点对点通信，实现上下行数据的传输。直连通信通常基于 2.4GHz 和 5GHz 频段的非授权（ISM）频段，基于设备厂商的私有协议实现。

与其他实现方式相比，直连通信具有以下优点：**一是**低成本和快速部署，直连通信无需部署基站或卫星等基础设施，设备研发基于未授权频段，具备较为成熟的产业生态，大大降低了设备成本和部署周期。**二是**低延迟，直连通信无需节点中继和转发，减少了数据中转环节引入的额外时延，具有较低的指令传输延迟（毫秒级），可支撑需要快速响应的场景（如紧急避障、精准操控等）。**三是**轻量化和低功耗，直连通信底层通信协议通常基于 WiFi 和蓝牙技术，继承了此类技术的低功耗特性，无人机终端受限于体积和重量，通常能耗较为敏感。

基于直连通信的无人机通信技术目前可适应多数民用无人机应用场景。但同时，直连通信技术也存在以下不足：**一是**通信距离有限，直连通信依赖视距传输（Line-of-Sight, LoS），障碍物或曲率地面会阻断信号。典型通信距离仅数公里，无法满足远程超视距任务

跨区域物流）。二是通信性能受限，由于工作在非授权频段，需要克服频率资源有限以及严重的干扰问题，有限频谱和干扰导致通信性能上限受限。三是规模扩展和无人机间协作困难，点对点架构带来了单机操作的高效率和灵活性，但通常缺乏统一的网络管理机制，难以支持大规模无人机集群通信。四是网络暴露风险，无线电信号易被截获和干扰，依赖加密算法和动态密钥保障通信安全。五是在监管层面，难以做到有效的监控和管理，无人机飞行安全难以保障。

1.3.2 基于卫星的无人机通信技术

基于卫星的无人机通信技术是指无人机通过卫星建立通信链路，实现控制链路和通信数据的传输。由于卫星部署不受地形影响，且一般具有相当高的轨道高度，适合大范围、广覆盖的通信需求以及偏远地区，且常规通信方式部署难度大、成本高时的通信需求。由于卫星作为中间通信节点的加入，涉及的通信节点包括无人机通信终端、地面信关站和卫星。

基于卫星的无人机通信具有以下优点：一是覆盖范围广，卫星相当于部署在几十至上百千米高的空中基站，信号覆盖半径通常达几十到数百公里，易于实现全球覆盖。二是易于实现偏远地区覆盖，即使在沙漠、海洋、边疆等区域，也无须布设专门的光纤等有线通信线路即可实现网络覆盖。三是高可靠性，相比与其他通信方式，

风、洪水等极端天气情况影响有限，可在应急场景下提供稳定的数据传输。

同时，基于卫星的无人机通信也存在以下不足：一是高延迟，卫星通信较大的信号传输距离导致空口时延较高，且卫星与地面站之间的网络拓扑也会引入额外的网络时延，这些因素导致基于卫星的通信方式难以支撑时延敏感型无人机通信业务。二是成本高，卫星网络产业链条长，星上器件要求高，发射流程繁琐复杂，后期维护需要专门技术团队进行遥感遥测，产业生态较为封闭，终端芯片成本、模组成本高，具有较高的网络建设成本和终端成本。三是通信性能受限，信号受传输距离和大气空间电磁环境影响，支持的通信速率较低，难以满足对速率要求较高的上下行业务。

1.3.3 基于蜂窝移动通信网的无人机通信技术

基于蜂窝移动通信网的无人机通信是指无人机通过机载蜂窝通信模块接入地面已经部署的 4G/5G 基站，实现飞行控制信息和业务数据的上下行传输。具备以下优点：一是网络部署简单，覆盖范围广，可高效复用已经在全球普遍建设的现有基站，网络建设和改造成本低，可实现低成本覆盖多数人口经济生产活动所在的区域。二是高性能，蜂窝网络基于授权频段且具有成熟的干扰管理和组网管理方案，网络容量和用户速率高。三是可扩展性强，蜂窝通信具备大容量通信能力，可支持大规模无人机群体通信，高效动态管理无

性与安全性，一方面，基站、核心网等基础设施通常基于较高的建设和抗灾备标准，具备较高可靠性；另一方面，蜂窝网络支持多种端到端加密技术和完整的鉴权认证机制，可有效保障通信安全。

同时也要看到，基于蜂窝的无人机通信也存在以下不足：一是在覆盖方面，全球仍有大片无基站信号覆盖的区域，这些区域虽然人烟稀少，无常态化网络覆盖需求，但也存在边境巡检、农林植保、文化旅游等无人机应用的典型场景。二是在网络技术优化方面，绝大部分现网部署的 4G/5G 网络是针对地面使用场景进行的针对性优化，直接部署应用于无人机通信还面临着低空覆盖优化、干扰协调与管理、移动性管理增强等方面的挑战，将在下节中展开讨论。

1.4 基于现有蜂窝网络实现低空覆盖面临的挑战

由于未针对低空通信场景进行针对性的优化，基于已有 4G/5G 蜂窝网络实现低空通信的解决方案往往存在覆盖不全、干扰严重、移动性待优化等问题，难以支撑低空经济高质量发展。

在网络覆盖方面，由于现有蜂窝网络通信系统在设计之初主要为满足地面用户通信需求，天线面板被设置为朝地面倾斜。尽管可以利用波束旁瓣实现对部分低空区域的覆盖，但由于旁瓣覆盖角度有限、旁瓣间存在零陷等原因，且与地面覆盖不同，低空覆盖通常以视距（line of sight, LoS）场景为主，低空区域网络覆盖呈现“碎

片化”特征，如图 1 所示。

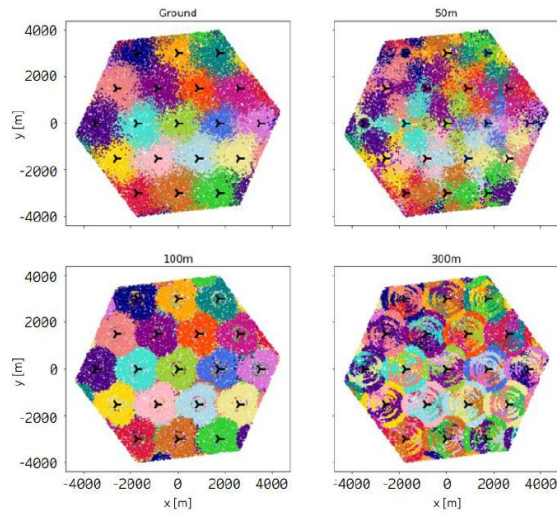


图 1 不同高度下低空覆盖示意图（颜色对应优先接入的小区，来源：爱立信）

移动性方面，低空网络的碎片化覆盖也会带来终端接入小区的频繁切换，直接套用现有的地面终端专用的切换策略和切换门限，往往会带来频繁切换的问题（即“乒乓效应”），影响无人机的接入质量和业务体验。

干扰方面，由于低空场景中无人机飞行高度通常会远高于基站天线高度，传播环境中散射体的数量远少于地面，无线信号的传播路径以 LoS 径为主，无人机在空中可以接收到来自更多小区的高强度信号，引入下行链路的小区间强干扰。同样的，在上行链路，由于 LoS 径存在，无人机也会对地面小区的上行链路造成强干扰，影响地面用户的上行链路质量。

无人机等产业的快速发展以及低空经济商业化潜力引起了移动

。国际移动通信标准化组织 3GPP（第三代合作伙伴计划）从 LTE 阶段就启动了相关的技术研究和标准化工作，初步实现了对无人机的支持能力。针对 5G-Advanced 系统，3GPP Release 18 已开展了面向 UAV（无人驾驶航空器，无人机）的 5G 无线网增强技术的标准制定，对无人机识别、飞行路径上报等新增技术特性支持的进展将在本报告第五章具体展开介绍。

二、低空通信典型应用场景

低空经济的繁荣发展对低空通信基础设施不断提出更高要求。蜂窝网络具备覆盖广、容量大、速率高三大技术优势，配合 5G 基站等的规模化建设，通过复用现有基站的站址和设备，或者对设备进行简单的软硬件配置升级，可显著降低低空通信网络的部署门槛与建设成本。这些特点使得 5G 蜂窝网络成为推动低空经济规模化发展的关键基础设施，具备支撑无人机各类创新应用的良好基础。

按照面向对象，低空通信的典型场景可分为农林植保、物流配送、工业巡检、城市治理等面向企业/行业应用（ToB）的场景以及个人航拍、视频直播等面向个人消费者（ToC）的场景。

2.1 农林植保

农林植保行业正在从传统的依赖人力手工作业向机械化、数字化的现代农业管理发展，无人机可以广泛应用于种植、喷洒、植保、

植检等多个领域，具

有高效、精准、节约的特点，可加速推动现代化农业转型，降低人工成本与农药使用量。通过多无人机协同作业，能够突破对人力依赖，实现大面积、规模化农田的快速作业，切实提升生产效率；借助 5G 网络的高速率、低延迟、大连接特性，无人机植保作业能够精准获取农田、林区的数据等信息，灵活实现远程实时监控，进一步提高植保效率。利用无人机喷洒农药和化肥，可节约时间、人力等资源成本，降低作业人员中毒风险和污染排放，提升作业安全性。2025 年全国两会期间，农业农村部部长表示，我国农业无人机保有量超 20 万架，无人机的作业面积超 4 亿亩，相应无人机能够实现打药、施肥、播种、运输、监测灾情等多种用途。



图 2 低空无人机在农林植保中的应用（以喷洒农药为例，来源：大疆官网）

规模化是机械化、现代化、智能化农业生产实现集约高效的关键。5G 蜂窝通信稳定、广覆盖的特性，契合规模化农业生产中无人

机农林植保的需求。

农林植保无人机对网络性能有较高要求：高清视频与多光谱影像实时回传需要上行速率不低于 25Mbps，林草精准测绘场景甚至需达到 100Mbps；飞行控制指令的端到端时延需低于 100ms，多机协同场景进一步要求时延降至 20ms 以内；在复杂环境中网络需保持高可靠性，避免因信号中断导致喷洒遗漏或飞行事故；此外，基站应实现地面至低空的立体覆盖，并支持无人机在高速移动中的无缝切换。5G 网络通过其上行单用户体验速率超过 100Mbps、空口时延低至 10ms 级别、借助网络切片技术与大规模天线提升链路可靠性，并结合低空覆盖方案实现农村及偏远地区的连续覆盖，能够有效满足上述农林植保无人机在规模化作业中对通信性能的严格要求。

| 性能需求 | 农林植保无人机要求 | 5G 网络对应能力 |
|--------|------------------------------------|-------------------------|
| 上行带宽 | 不低于 25 Mbps（高清视频回传），勘探测绘需 100 Mbps | 上行单用户体验速率 > 100 Mbps |
| 时延 | 控制指令端到端 < 100 ms，多机/载人场景 < 20 ms | 空口时延 10 ms 级别，端到端可达百毫秒内 |
| 可靠性 | 复杂农田环境下保持稳定连接，避免中断 | 网络切片、大规模天线等技术提升链路可靠性 |
| 覆盖与移动性 | 地面至低空立体覆盖，高速移动无缝切换 | 低空覆盖方案实现连续覆盖，支持移动性切换 |

2.2 无人机物流

相比传统物流方式，基于无人机的低空物流在降本、提速、增

多个方面逐渐展现出巨大的应用潜力和优势。

城市地面交通的拥堵和环境的复杂使得限时配送成为物流行业的难题，传统的物流配送方式对于交通不便的偏远地区在配送时效上也受到多方面限制。无人机物流通过“垂直起降+远程巡航”的复合能力，实现了“最后一公里”与“特殊场景覆盖”的双向突破，可构建更加立体的配送网络。其核心价值在于突破复杂城市环境和高原、海域、偏远地区等区域的复杂地理环境限制，由传统物流的“平面覆盖”模式升级为“空地协同”模式，大大提升高复杂路段、高时效要求、低货物载荷下的配送效率，在末端运输、特殊场景有效补充传统运输方式。丰翼开展低空物流配送试点，截至 2025 年 10 月，累计在全国开通 1237 条航线，飞行超 133 万架次，运输重量 4000 余吨，飞行总里程超 720 万公里。



图 3 低空无人机在物流中的应用（以无人机为例，来源：美团官网）

在偏远或乡村地区，传统物流方式面临道路条件不佳、配送距离长、末端成本占比高（“最后一公里”成本可达总物流成本的 50%）等痛点，配送效率和时效性低下。无人机配送可以通过直线飞行跨越复杂地形，大幅缩短配送时间并降低运输成本。在应急和医疗物资配送场景下，地面交通拥堵、响应慢易受环境和自然灾害影响，无人机配送可以轻松跨越高风险区域，实现分钟级快速投送，大幅提升急救物资的时效性。在跨区域支线运输和特殊环境（跨山、跨湖、海岛）配送场景下，无人机配送可以有效解决支线航空运力不足、陆运时间长，难以覆盖边境/海岛等特殊区域的问题，同时，亦可应对传统陆路运输受地理限制，可达性差、时效低的问题。基于无人机的物流配送方式可无视地形障碍，实现常态化、直线运输，弥补传统运输的覆盖空白，通过构建“干线一支线灵活衔接”的空中物流网络，降低对地面和传统航空的依赖。

为实现无人机在上述物流配送、偏远地区运输、紧急医疗投送等场景的规模化应用，低空通信系统需满足下表关键性能指标要求。

| 网络性能 | 具体指标（典型场景） | 指标需求 |
|---------|--|------------------------------|
| 带宽（上行） | 3~5 Mbps（720p~1080p 视频回传） 100~500Kbps（仅控制类信息） | 视频回传、飞行状态上报等业务需要 上行带宽支持。 |
| 时延（端到端） | 业务链路<100 ms（常规图传/指令） | 低时延是保障飞行安全、集群协同和 紧急避障的前提。 |

| | | |
|-------|--|----------------------------|
| 可靠性 | 通信可用性>99.9% 丢包率<10 ⁻⁵ (关键控制指令) | 在城区高楼间、山区等复杂环境下仍需保持链路稳定。 |
| 立体覆盖 | 地面至 300 m (基本运营) 延伸至 1000 m (支线/跨山) | 需实现“地—空—地”连续覆盖，避免飞行盲区。 |
| 移动性支持 | 时速 100 km/h 以上切换不掉线 | 无人机高速飞行时，在基站间需无缝切换，保障安全飞行。 |
| 定位精度 | 亚米级 (精准起降、航线跟踪) | 5G 定位及通感一体技术可辅助实现。 |

2.3 工业巡检

无人机凭借其响应迅速、机动灵活、安全可靠等优势，被广泛应用于电力、矿山、港口、石油化工等领域中覆盖面积大、存在潜在隐患或人工巡检困难的区域。通过搭载高清摄像头、激光雷达或各种传感器，无人机可基于预设的巡检路径或管理人员远程操控的方式，替代或辅助人工对目标区域的工作设备、基础设施和工作环境进行监测，回传高清视频、红外热成像等环境数据，辅助提升危险区域作业安全性，大大提升巡检工作效率，确保设备、生产正常运行。截至 2024 年底，南方电网公司输电线路自主巡视超 200 万千米，无人机巡检业务占比达 77%。

行业应用中的无人机通常需要搭载可见光相机、热成像相机、激光雷达、多光谱/高光谱相机以及特定气体传感器等载荷，并且需具备自动驾驶与路径规划能力，以及一定的端侧 AI 图像识别能力，

裂纹、锈蚀、发热点），减少人工判读工作量。

同时，无人机续航需满足作业面积需要，目前可通过车载发电机，配合装备了多台套无人机自动起降机场，完成对工作区域的覆盖。

无人机对通信能力需求与具体行业应用场景和无人机端侧能力有关。例如，对于用于测绘的无人机，只有在少数场景下才需要进行测绘数据的实时传输，更多的需求是确保测绘无人机按照预定航线进行稳定飞行。又如，管线检查无人机无需时刻传输高清视频，可结合 AI 能力对存在疑似缺陷的部位进行初筛，再由工作人员结合高清视频对重点部位进行排查。简单地说，此类应用对低空通信的通信能力要求可分为以下几类：在数据速率方面，典型的上行业务如 1080P 高清视频回传要求 $\geq 5\text{Mbps}$ ，4K 视频则要求上行速率 $\geq 25\text{Mbps}$ ，部分精细巡检（如 8K 直播）需求可达 100Mbps 。对于控制类业务，速率需求通常在百 Kbps 量级。在时延方面，保障飞行控制的实时性与安全性，以及对突发状况的快速响应，通常要求端到端时延小于 50 毫秒，超高精度作业等特殊场景下，要求可能严苛至 20 毫秒以内。视频类图传业务对时延敏感性较弱，300 毫秒以下的业务数据传输的端到端时延对用户感知的影响有限。在可靠性和网络覆盖方面，面向复杂工业环境（如大型厂区、偏远山区）可能存在的图传与控制信号遮挡问题，对网络在低空区域的可达性也提出了新的更高的需求。同时，蜂窝通信的定位能力、安全性配置也能

更好匹配行业应用的需求。

2.4 视频拍摄、直播

无人机技术成熟与超高清摄影器材轻量化的双重助力，正推动无人机超高清拍摄深度融入影视制作全流程。它不仅突破了传统拍摄的诸多局限，还革新了镜头语言与制作模式，从成本、效率、创意等多方面为影视创作赋能。但传统飞控已无法满足超高清视频可靠实时回传和远程联网。低空通信网可为无人机提供了稳定可靠的大带宽网络传输链路，无人机等低空飞行器搭载超高清视频拍摄设备和机载 5G 传输模块后，通过低空通信网实时将超高清视频返回直播中心，实现超高清视频拍摄与直播。

在大型赛事、大型活动中，可部署多架搭载超高清摄像机的无人机，借助低空通信网络，同步回传不同角度的超高清画面，在低空通信网覆盖范围内实现大范围、长时间的可靠直播。也将现场画面实时传送至 XR 沉浸式空间，观众可通过相关设备获得仿若置身赛场的全景观看体验，解决了传统固定机位视角单一的问题。

拍摄影视作品或文旅宣传视频时，无人机可携带超高清拍摄设备远程飞入拍摄区域，通过低空通信网将拍摄到的超高清画面实时回传至地面导演和后期团队的终端。导演可依据回传画面远程调整无人机的飞行轨迹和拍摄参数，无需反复升空拍摄，实现远距离、长时间的实时拍摄和制作，提升节目制作效率。

三、低空通信组网方案

农林植保、无人机物流、工业巡检等典型应用场景对低空网络覆盖提出了新的要求，现有的地面蜂窝组网方式难以满足低空通信需求，我国基础电信运营企业和设备企业积极探索组网方案和产品研发，分别从基于垂直维度的覆盖拓展、组网拓扑创新、以及空地异频组网等角度推动低空通信网络覆盖质量提升。其中基于垂直维度的覆盖拓展主要是研发配置大张角天线的低空基站方案，通过拓展波束在垂直维度覆盖，提升低空覆盖质量，如下文中方案 3.1-3.3。组网拓扑创新则打破经典的蜂窝组网方式，统一低空基站扇区朝向，减少低空区域信号覆盖盲区，如下文中方案 3.4。空地异频/异载波组网方案主要思路为基于频域隔离的组网方案，综合利用大规模天线、波束赋形等多种辅助技术，提升低空网络的覆盖、容量、抗干扰等方面的能力，如下文中方案 3.5-3.7。空地同频/空地同载波方案则使用同一载波完成地面和低空的覆盖，即覆盖低空的载波同时也用于覆盖地面网，如下文中方案 3.8-3.9。按照上述分类，下文中对几类方案展开介绍。

3.1 大张角地空兼顾方案

传统地面基站大规模天线通常配置为 64TR，对应的垂直方向波束宽度（垂直方向上主瓣功率密度下降到最大值一半/ -3dB 时所对应的角度区间）为 $12^\circ/24^\circ$ ，难以满足低空通信垂直维度覆盖需求。

空通信基站采用立体超广角站型，水平维延续全数字架构保障 120° 精准扫描；垂直维则创新采用多级数模混合移相方案，通过数字基带与模拟移相器协同控制，在避免低成本振子级移相的同时，实现垂直方向 60° 、水平方向 120° 的正交双向广覆盖，在地空覆盖兼顾的场景下，低空最大覆盖高度可达 600 米以上。

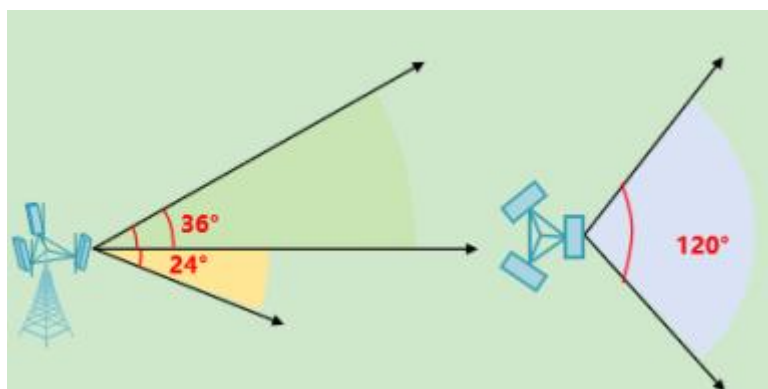


图 4 大张角天线的垂直和水平覆盖角度

3.2 莲花波束覆盖增强方案

针对 120 米以下低空短距航线等覆盖场景，可采用莲花波束覆盖增强方案，适用于地面基站为 AAU 产品形态的场景。该方案通过优化基站天线波束权值，在基本不影响原有地面覆盖的前提下，定向增强天线上旁瓣辐射，形成莲花状波束覆盖，有效增强低空覆盖。SSB 波束可采用 4+X 的波束设置，其中“4”波束指向与现有地面覆盖波束保持一致，可通过波束展宽和 SSB 功率偏置增强，保持地

面覆盖不变；“X”

为大电下倾波束，可以产生较大的上旁瓣。具备建网成本低、部署周期短的优势。

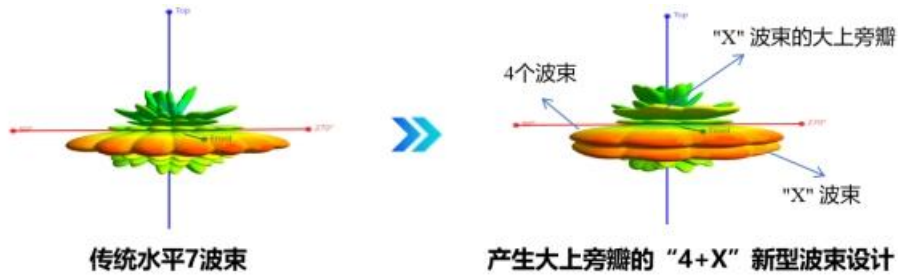


图 5 莲花波束覆盖增强方案

3.3 双翼组网方案

针对 300 米以下低空低容量覆盖场景，可采用双翼组网方案，适用于地面基站为 RRU 产品形态的场景。该方案复用现网基站的 RRU 设备，通过 1: N 选址原则选出空地一体基站，将该基站的天线直接替换为双翼辐射天线，形成主瓣对空波束与主瓣对地波束，对空波束与对地波束的 SSB 时分错开，并配合调度增强及移动性增强等技术手段，增强低空覆盖并降低干扰，以较低成本满足低空低容量场景的覆盖需求。

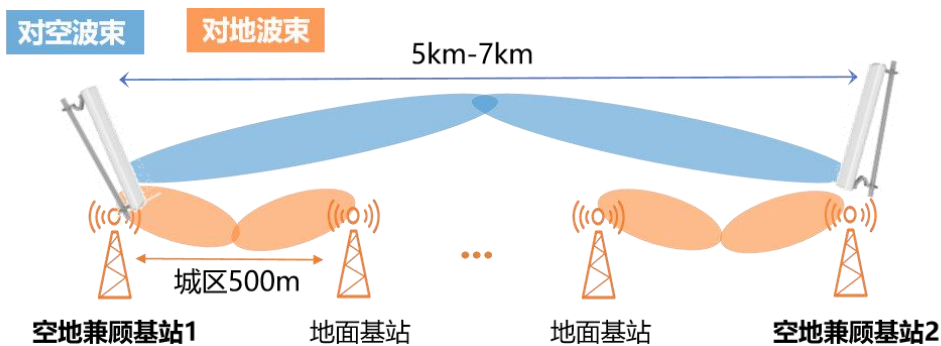


图 6 双翼组网组网方案示意图

3.4 鱼鳞组网方案

针对 600 米以下或中高容量低空覆盖场景，可采用鱼鳞组网技术，适用于基站主瓣对空场景。在每个站址上仅部署 1 个扇区，每个扇区的指向方向相同且主瓣打向低空，形成鱼鳞状覆盖，并采用追打组网方式，使得本扇区头顶区域可以通过邻站扇区实现覆盖，有效解决传统蜂窝三扇区组网干扰大、服务小区杂乱、建网成本高的突出难题。相比传统三扇区组网，鱼鳞组网具有干扰低、成本低的优势。

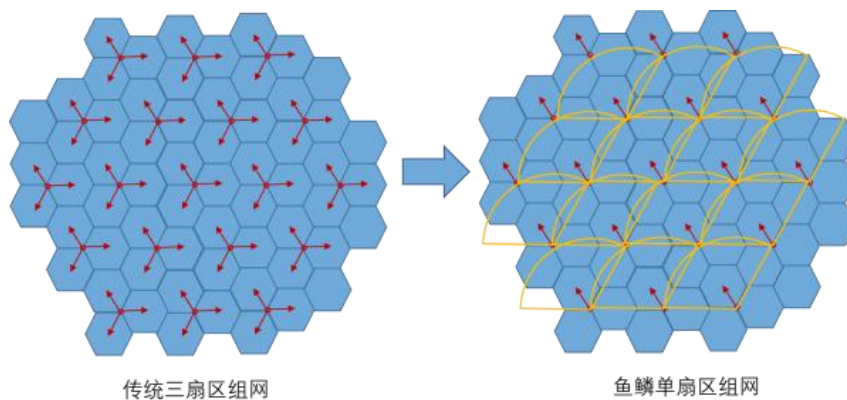


图 7 鱼鳞单扇区组网

3.5 独立载波（小区）覆盖低空方案

地面与低空用户使用同一频率组网，通常会遇到以下问题：一是无人机用户高度占优，与基站间有更多直射径，对地面用户带来底噪抬升。二是“乒乓切换”，在某些高度，单个无人机终端可测量到超 40 个小区信号，造成大量测量开销和反复切换。

使用独立载波覆盖低空，通常指使用与地面网络不同的载波实现低空覆盖，如地面 2.6GHz—低空 4.9GHz，地面 3.5GHz 前 100MHz—低空 3.5GHz 后 100MHz 等，使得无人机用户在空中保持驻留在低空载波上，避免频繁切换导致的“乒乓切换”。通过频率域隔离，有效降低地面和低空用户间干扰，减少不必要切换次数，提升网络覆盖质量。

3.6 双载波空地异频方案

双载波空地异频方案如图 8 所示。该方案中，同样按照 1:N 比例确定空地一体基站，对地基站仅激活第一载波（对地载波），而空地一体基站同时激活第一载波和第二载波（对空载波），第二载波使用 SSB 波束立体分层方案，形成空地同时覆盖。空地一体基站使用的第二载波和其余地面基站使用的第一载波异频，整体网络形成双载波空地异频组网。

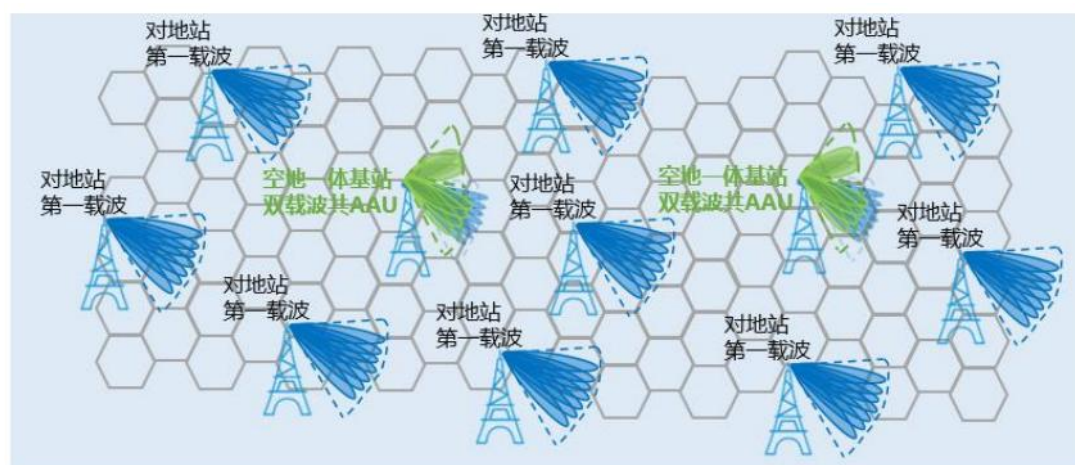


图 8 双载波空地异频方案示意图

在双载波空地异频方案中，需要少量增加第二载波开通的网络投资。由于空地网络异频隔离，因此空地相互干扰影响小。此外，空地一体基站的第一载波与周边对地基站同频，地面网络优化简单。同时空地一体基站新增第二载波，空地同时覆盖，可增加地面网络容量。

3.7 单载波空地异频方案

单载波空地异频方案如图 9 所示。地面基站均为单载波，所有地面基站使用相同的频谱资源。通过 1:N 选址原则确定空地一体基站，并将频率翻频到第二载波，从而空地一体基站使用的第二载波和其余地面基站使用的第一载波异频，整体网络形成单载波空地异频组网。

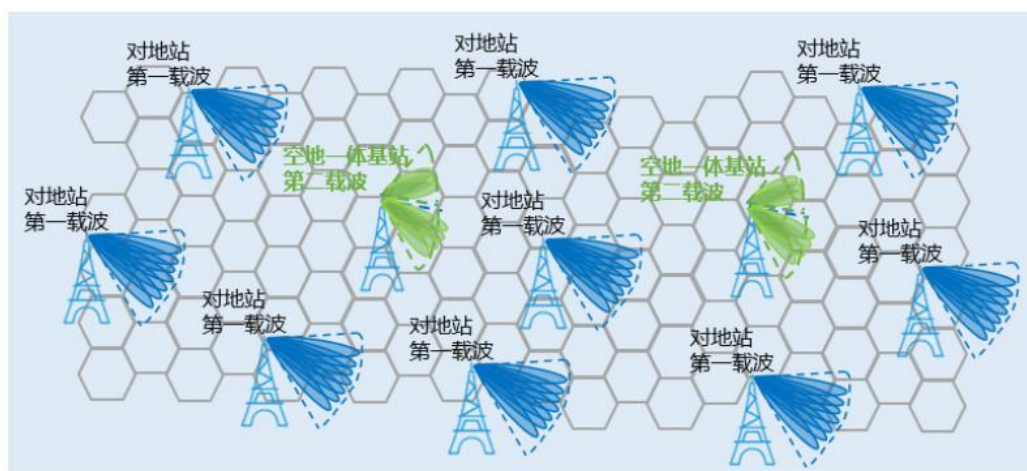


图 9 单载波空地异频方案示意图

对于空地一体基站，第二载波的对空和对地 SSB 波束配置存在多种可选的立体分层方案，每层波束的波束数量、波束方向和波束

宽度均可以根据实际网络覆盖需求灵活配置。

在单载波地空异频方案中，不需要增加额外网络投资，能有效降低部署成本。同时，由于空地网络异频隔离，因此空地相互干扰影响小。

3.8 双载波空地同频方案

双载波空地同频方案如图 10 所示。该方案中，同样通过 1:N 选址原则选出空地一体基站，对地基站和空地一体基站均采用双载波。空地一体基站在第二载波上采用 SSB 波束立体分层方案，形成空地同时覆盖。空地一体基站使用的双载波与对地基站同频，整体网络形成双载波空地同频组网。

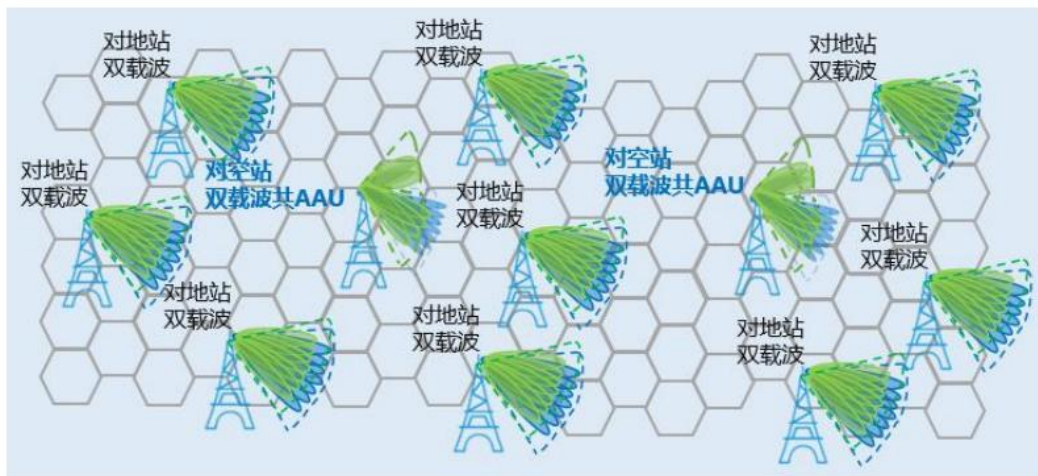


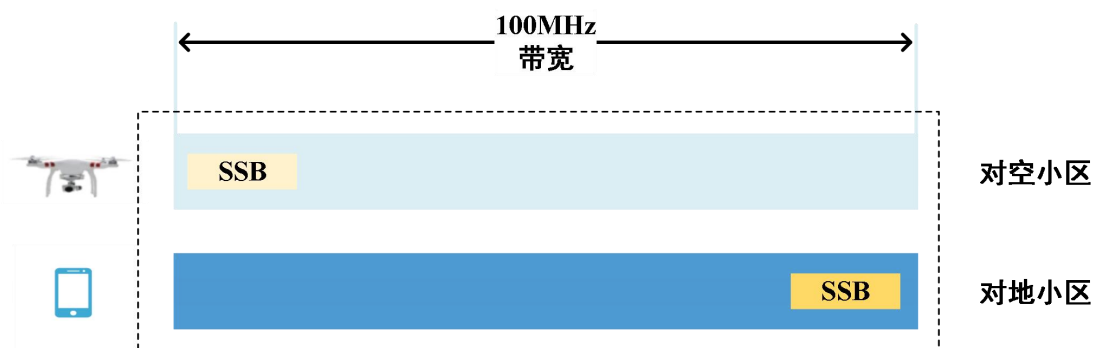
图 10 双载波空地同频方案示意图

在双载波空地同频方案中，不需要增加额外网络投资，能有效降低部署成本，与地面的同频干扰问题可基于 3.9 节介绍的虚拟分频技

术进一步优化。

3.9 虚拟分频方案

在虚拟分频方案中，对空和对地覆盖的 SSB 波束采用相同频率。由于邻区对地基站出现上旁瓣信号泄露，存在空域同频干扰问题。针对该问题，如图 11 所示，虚拟分频方案通过采用 SSB 的空、时、频资源交错技术，有效解决了同频干扰和低空覆盖碎片化问题，同时可扩展应用至更多技术方案中。由于空地一体基站的对空 SSB 和对地 SSB 采取的是时域轮流扫描的方式，因此 SSB 可在频域、时域、空域错开，如下图所示。通过同步与广播信道的空域、时域、频域交错设计，空地小区资源共享而逻辑独立，解决了空地间组网干扰和频繁切换的问题。



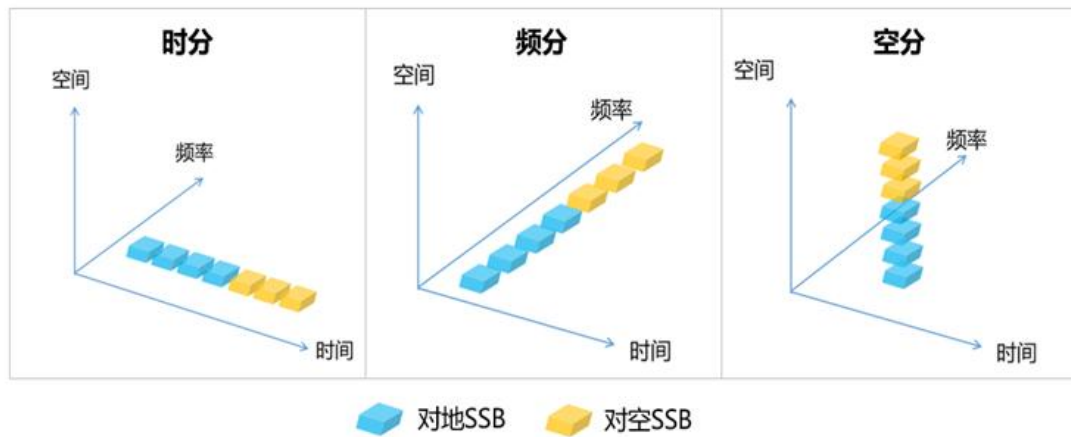


图 11 虚拟分频方案示意图

3.10 小结

未来低空覆盖方案的选择需根据具体场景、预算、频谱和现网条件综合权衡。例如，若需快速低成本增强低空覆盖，可基于已有基站结合莲花波束和双翼组网以满足低高度、低容量低空覆盖场景；大规模新建或改造低空专网时，鱼鳞组网在降低干扰和成本方面优势明显；追求极致垂直方向覆盖可选用大张角天线方案，但硬件成本较高；要彻底规避干扰，独立载波方案效果最佳但需要消耗额外频谱资源；若需平衡成本与干扰，双载波或单载波异频方案是折中选择，其中单载波方案更节省投资；若必须在同频下组网，虚拟分频方案可通过智能资源调度抑制干扰。总体而言，低空网络建设遵循“优先复用地面网、按需新建低空网”的思路，组网方案需全面考量覆盖、容量、成本、干扰及部署复杂度等多个维度。

| 方案类别 | 方案名称 | 核心方案 | 适用场景 | 成本 | 对现网影响 | 主要优势 | 主要挑战 |
|------------|----------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 垂直覆盖 拓展 | 3.1 大张角地空兼顾方案 | 采用立体超广角天线,垂直波束宽度达 60°, 实现垂直维广覆盖。 | 地空兼顾; 高度>600 米。 | 较高(需部署新设备) | 中等(需替换或新增 AAU) | 覆盖高度高, 地空一体连续覆盖能力强。 | 设备成本较高, 部署涉及硬件更换。 |
| | 3.2 莲花波束覆盖增强方案 | 优化波束权值, 增强天线上旁瓣辐射, 形成莲花状波束。 | 120 米以下低空。 | 低 | 小(软件升级, 不影响地面主瓣) | 部署快, 成本低, 基本不影响原有地面覆盖。 | 覆盖高度有限, 主要依赖旁瓣, 增益和容量相对有限。 |
| | 3.3 双翼组网方案 | 替换为双翼辐射天线, 形成独立的主瓣对空与对地波束, SSB 时分错开。 | 300 米以下低空低容量场景。 | 低(复用现网 RRU, 仅换天线) | 中等(需更换天线并调整参数) | 复用现网设备, 成本低, 干扰可控。 | 容量较低, 适用于需求不高的场景。 |
| 组网拓扑 创新 | 3.4 鱼鳞组网方案 | 所有基站单扇区同向朝低空, 形成鱼鳞状覆盖, 邻站覆盖头顶盲区。 | 600 米以下中高容量场景。 | 较低(扇区数减少) | 对于采用新建设备覆盖低空的场景, 对现网影响小 | 干扰低, 建网成本低, 解决传统组网服务小区杂乱问题。 | 需全网统一规划部署。 |
| 空地异频 组网 | 3.5 独立载波覆盖低空方案 | 为低空分配独立载波(如 4.9GHz), 与地面网络频域隔离。 | 通用低空覆盖场景。 | 高(需要额外的频谱资源) | 小(频域隔离, 干扰小) | 避免空地同频干扰和“乒乓切换”。 | 消耗频谱资源, 成本高。 |
| | 3.6 双载波空地异频方案 | 选定基站同时激活对地(载波 1)和对空(载波 2)异频载波。 | 需同时提升地面容量的场景。 | 中等(需增加第二载波投资) | 较小(空地异频干扰小, 地网优化简单) | 空地干扰小, 并能增加地面网络容量。 | 需要额外的载波 |
| | 3.7 单载波 | 将选定基站的频率翻频 | 低成本异频隔 | 低(无额外载 | 中等(导致部分 | 无需新增频谱投 | 会造成局部地面 |

| 方案类别 | 方案名称 | 核心方案 | 适用场景 | 成本 | 对现网影响 | 主要优势 | 主要挑战 |
|--------|---------------|---------------------------------|---------------|------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | 地空异频方案 | 至第二载波,与其余地面基站异频。 | 离需求。 | 波投资) | 区域地面异频组网) | 资,成本低,空地干扰小。 | 网络的异频切换,优化复杂度增加。 |
| 空地同频组网 | 3.8 双载波空地同频方案 | 选定基站双载波与全网同频,第二载波采用立体波束覆盖空地。 | 频谱资源紧张的场景。 | 低(无额外频谱投资) | 大(存在同频干扰风险,需精细优化) | 节省频谱,投资成本低。 | 面临较大的同频干扰挑战,对波束管理和抗干扰算法要求高。 |
| | 3.9 虚拟分频方案 | 空地对地 SSB 同频,但通过空、时、频资源交错技术隔离干扰。 | 同频组网下的干扰抑制场景。 | 低(主要靠软件升级) | 中等(需升级软件并同步参数) | 在共享频谱下逻辑隔离空地资源,解决同频干扰和覆盖碎片化。 | 增加了系统的信令和调度复杂度。 |

四、低空通信网络关键技术

4.1 无人机终端识别与接纳控制

4.1.1 基于专用 SIM 卡+专用 QCI 的无人机终端识别与接纳控制

采用基于专用 SIM 卡+专用 QCI 的无人机终端识别与接纳控制技术时，不依赖 4G/5G 核心网、低空基站或无人机终端升级支持 R17/R18 UAV 标准协议。该技术方案为无人机分配专用 SIM 卡，指专用号段或 SIM 卡专用接入 ID（Access Identity），无人机终端设备在注册、附着网络时，网络根据专用 SIM 卡的 IMSI 等信息验证和识别其是否归属于无人机签约数据，实现无人机终端精准识别，确认无人机终端合法性、决策是否允许其接入，并结合预设的专用 SIM 卡与专用 QoS 等级标识（QCI）的绑定关系分配相应业务的 QCI 等级，保障通信服务质量。

该技术方案利用核心网的认证机制验证 SIM 卡合法性后自动配置专用 QCI 参数，并通过动态负载监测、优先级管理和地理围栏等接纳控制策略，确保无人机通信的安全接入、网络资源合理分配及关键业务的质量保障，从而构建可识别、可管控、有 QoS 保证的无人机蜂窝网络接入体系。

该技术方案通过“硬件身份（SIM）+软件策略（QCI）”双重机制，实现无人机终端的可信识别与资源保障。

4.1.2 基于 CAG 专网的无人机终端接纳控制

基于 CAG 专网的低空无人机终端接纳控制技术，通过构建 CAG

人机终端身份的识别和接纳控制，利用 PLMN、CAG ID 小区标识等信息，控制无人机终端可接入低空网络，而不允许地面终端接入低空网络，从而实现低空网络与地面公网的隔离，避免频谱竞争，确保低空网络的强隔离与资源独占。此外，结合核心网 CAG 策略，确保仅授权无人机终端可接入 CAG 专网或切片资源，还可以通过动态 QCI 分配与网络切片技术，为不同优先级无人机业务（如物流配送、应急通信）提供差异化的带宽、时延保障。

4.1.3 基于 UE UAV 签约信息的无人机终端识别与接纳控制

在网络架构层引入无人机业务专用网元 UASNF（Unmanned Aerial System Network Function），构建起网络与无人机业务侧之间的关键枢纽。通过在网络侧设置无人机标识，网络对无人机类设备的识别与管控能力得到提升。UASNF 负责统筹对无人机设备及业务的鉴权、授权等关键流程，并将相关结果对外开放，实现与其他管理系统的信息交互与协同工作。

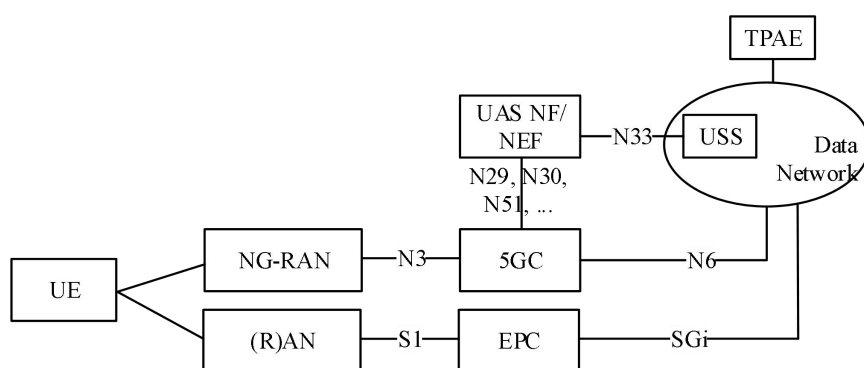


图 12 无人机的 5GS 和 EPS 的架构

网联无人机的鉴权授权流程，在保障飞行安全与业务合规性方面

起核心作用。在无人

机启用 UAS 服务连接之前，通信网络通过设定特定流程 USS UAV Authentication&Authorization (UUA)，对无人机进行全面、严格的认证和授权。这一过程涉及对无人机身份信息、飞行权限、业务类型等多方面的验证。只有通过 UUA 流程验证的无人机，才被允许接入网络并开展相关业务。在一些对安全要求极高的领域，如电力巡检无人机作业，只有经过严格鉴权授权的无人机，才能进入特定的电力设施区域进行巡检，确保电力设施的安全以及巡检数据的准确性。

建立可信的无人机标识管理体系是实现高效管控的重要基础。对于具备传统 CAA 级 UAV ID 的无人机，为其设置专门用于 5G 网络的标识，并将两类标识进行紧密关联管理。通过这种方式，无论是在无人机管理部门进行飞行监管，还是在通信网络侧进行资源分配与调度，都能够基于统一、可信的标识体系，准确获取无人机的相关信息，实现对无人机的全生命周期、全方位的精准管理。

针对典型无人机业务，通信网络在适配过程中，提供了无人机飞行业务的授权申请流程。同时，支持无人机与通过同一通信网络连接的无人机控制器，或者通过公网及其他方式连接的无人机控制器之间配对的授权。在应急救援场景中，多架无人机需要协同作业，通信网络为每架无人机的飞行业务进行授权，确保其在救援区域内的飞行安全与任务执行。同时，对无人机与各自控制器之间的配对进行授权，保障控制指令能够准确、及时地传输，实现无人机集群的高效协同作业，提升应急救援的效率与效果。

基于 UE UAV 签约信息的无人机终端识别技术，5G 核心网、基

应支持 R17/R18 UAV 标准协议，进行基于 UE 签约信息的无人机终端识别机制，无人机终端上报无人机签约能力、在核心网及无人机管理平台完成注册，实现无人机设备的签约和识别。

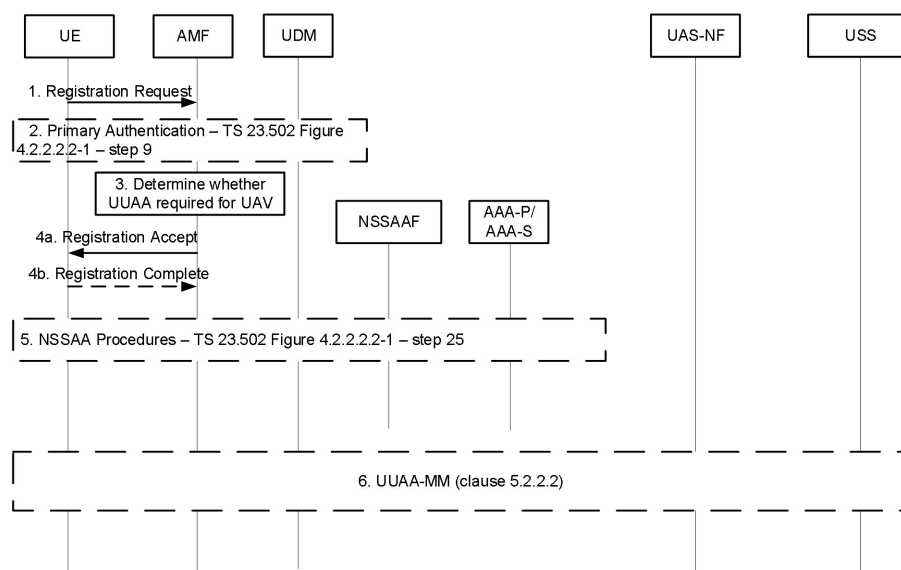


图 13 UUA 注册流程

其典型的签约流程如下：

1. 无人机终端发送 **Registration Request** 消息，携带 **CAA-level UAV ID** 和 **USS** 地址信息；

2. 无人机终端执行主鉴权过程；

3. 5G 核心网根据本地信息，比如 UAV 签约信息等，来判断是否需要执行 **UUA** 流程。

4. 5G 核心网给无人机终端发送 **Registration Accept** 消息，携带 **pending UUA-MM indication** 信息，执行完 **Registration** 流程。

5. 5G 核心网和无人机终端间执行网络切片特定认证与授权（**NSSAA**）流程；

6.5G 核心网和无人机终端间执行无人机系统服务供应商无人机授权/认证 UUAA-MM 流程

7.地面终端尝试接入 5G 低空网络。

4.2 低空通信干扰抑制关键技术

无人机通信场景相比传统地面通信增加了垂直维度，由二维平面空间上升至三维立体空间，不仅存在无人机用户间干扰，还会由于组网方式差异，产生对地基站和对空基站以及无人机用户和地面用户之间的交叉干扰。针对无人机通信场景中的干扰抑制方案，按照实施的维度可以分为：空域、时域、频域、功率域，按照实施的主体则可以分为基站侧、终端侧以及基站终端协同三种方式。

基于大规模 MIMO 和波束赋形的干扰抑制方案是一种典型的基站侧空域干扰抑制算法。通过在基站侧配置大规模天线阵列，配合波束赋形算法，在垂直及水平面形成窄波束，实现对目标无人机用户的精准对准，实现目标用户和其余空中-地面用户在空间上的有效隔离，从而有效降低小区内和小区间干扰。

第三章中介绍的单载波空地异频、双载波空地异频、虚拟空地分频等，均是通过为地面和无人机用户在频域设置一定的保护频带，实现无线信号的有效隔离，进而降低系统间干扰。

功率域干扰抑制方案以降低无人机用户对地面基站和空中同频

邻区的干扰为目标，基于无人机用户识别技术，通过识别无人机终端并配置与地面终端不同的功率控制策略，实现基于终端侧的干扰抑制。例如，地面终端的功率控制通常采用开环功率控制，不需要接收端（基站）的反馈，发射端根据自身测量结果控制发射功率。无人机专用功率控制方案中主要包括对以下参数的差异化配置：UE-specific 路损补偿参数、UE-specific P0 参数、邻小区干扰控制参数、闭环功率控制参数等。

此外，还有对空基站间协同，空一地基站间协同等，通过空一时一频一功率域的智能协作，实现资源的合理调度和配置，降低系统内干扰，提升速率、可靠性等性能指标。

4.3 低空通信移动性管理关键技术

低空场景信号扩散传播，小区重叠覆盖多，易导致频繁切换的问题。为避免用户在地面与低空小区间不必要的切换，可采用以下移动性增强技术，包括：可设计基于无人机终端个性化的移动性策略，如识别无人机终端，配置无人机差异化切换频点优先级、切换门限、切换迟滞等；引入基于高度的测量增强、飞行路径上报等技术，基站可根据无人机的飞行轨迹、飞行高度和干扰情况等信息选择更合理的目标小区；采用基于波束跟踪的切换增强，使得无人机尽可能驻留在低空小区或低空波束等。

4.4 无人机碰撞规避关键技术

随着无人机在物流、巡检、农业、安防等领域的广泛应用，空域中无人机数量迅速增长，导致空中交通环境日益复杂。无人机在飞行过程中面临与其他无人机、有人驾驶航空器、地面障碍物等发生碰撞的风险。一旦发生碰撞，不仅会造成设备损失，还可能危及人员安全和公共财产，甚至影响空域管理秩序。因此，建立高效、可靠的无人机碰撞规避机制已成为保障无人机安全运行的核心需求。无人机飞行的避撞主要包括策略性避撞和战术性避撞。

- 策略性避撞

策略性避撞包括飞行前路径规划、飞行中路径调整以及飞行中的持续监控，旨在通过提前规划和动态调整，最大限度地避免无人机之间的冲突。这一过程主要依托于无人机交通管理系统（UTM）和蜂窝网络基础设施来实现。

在飞行前，无人机运营者需向 UTM 系统提交飞行计划，系统会根据其他无人机的飞行路径和空域限制进行空间和时间上的冲突检查。经 UTM 批准飞行后，将会下发批准的飞行路线和飞行时间。同时，UTM 可能在飞行过程中根据天气、空管等其他因素修改飞行路线，并通过网络及时下达给无人机。

为了监督无人机严格按照预先批准的飞行计划进行飞行，在飞

行过程中无人机需要及时发送包含无人机 ID、位置、速度等信息。UTM 通过监控节点获得无人机飞行的地理位置航点和时间戳，从航行规划维度避免碰撞。3GPP Release 18 引入了无人机业务开放机制，使 UTM 系统能够通过蜂窝网络实时监控无人机。同时，无人机通过 5G 网络使用网络远程身份识别（NRID）传输其身份和位置或基于 Sidelink 直接发送无人机 ID 信息（BRID），便于监管机构进行跟踪和验证无人机是否严格遵守预先批准路径飞行。

- 战术性避撞

随着无人机飞行业务的发展，在高密度空域中策略性避撞可能无法完全规避无人机同时飞过同一空域，规避所有冲突。战术性避撞是一种实时避撞机制，可以起到补充的作用。战术性避撞对无人机定义了 Well Clear 空间，无人机通过通信和雷达监测到其他无人机闯入自身的 Well Clear 空间后，随即触发战术性避撞。

目前战术性避撞主要依赖传统的 ADS-B 和航空应答机系统，具有地址空间不足、通信效率较低等问题。3GPP Release 18 设计了基于 NR Sidelink 的战术避撞技术，可以提高战术性避撞的效率和可靠度。该技术支持无人机之间通过发送 ID、位置、运动轨迹等信息，及时发现可能的 Well Clear 空间入侵。在给无人机控制员提供航行建议（如爬升或下降）的同时，还可以采用 NR Sidelink 链路入侵无人机协商碰撞规避策略。该技术具备如下优势：

- 低延迟、不依赖网络，适用于网络覆盖不足区域
- 支持自同步和临时组网，适合动态环境
- 能够支持规避动作，如爬升、下降或侧向移动

为了保障无人机飞行安全，预计监管机构将会同时部署策略性和战术性避撞机制。无人机碰撞规避不仅是低空经济安全运营的基础，也是实现无人机产业规模化、智能化发展的关键。

五、低空通信标准进展

5.1 国际标准进展

自 2017 年开始，3GPP 就如何将 UAV/UAS 融入蜂窝移动网络开展了研究工作。在 R15 阶段，重点评估 LTE RAN 服务 UAV 能力，并形成技术报告 TR36.777 《Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles》。在 R16 阶段，SA1 完成了关于 UAS 对远程识别和跟踪的潜在需求和用例、以及基于无人机远程识别提供的服务的研究，形成 TR22.825 《Study on Remote Identification of Unmanned Aerial Systems (UAS)》和 TR22.125 《Unmanned Aerial System (UAS) support in 3GPP》。

在 R17 阶段，SA2 完成架构和系统设计，以支持 UAS 命令和控制功能，包括无人机和无人机控制器的识别和跟踪、实现 UTM 和无人机以及无人机控制器之间的鉴权和认证、建立 UAV 控制器和 UAV 之间以及和 UAS 交通管理 (UTM) 之间必要的连接，包括视距连接和非视距连接。SA2 还考虑了如何识别未经授权无人机以及如何向

TR23.754 《Study on supporting Unmanned Aerial Systems (UAS) connectivity, Identification and tracking》和 TS 23.256 《Support of Uncrewed Aerial Systems (UAS) connectivity, identification and tracking; Stage 2》。SA1 研究 5G 满足 UAV 业务的指标需求，并形成 TR22.829 《Enhancement for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)》和 TS22.261《New Services and Markets Technology Enablers (SMARTER)》。

在 R18 阶段，SA2 开展如何通过现有的 3GPP 系统支持无人机 remote ID 广播、检测和规避 Detection and Avoid (DAA) 和 C2 通信等的研究，相关研究结果发布在 TR 23.700，涉及的相关协议包括 TS23.256、TS23.502、TS23.503。RAN 工作组重点对于干扰检测和控制、移动性增强、无人机识别、波束管理等方面开展研究和标准化工作，并更新 TS38.306，TS38.331，TS38.300，TS38.101-1，TS38.413，TS38.423 等文档。

与 LTE 相比，NR 为飞行器实现了更多样化的应用，具有更低的控制延迟和更高的多媒体服务数据速率。虽然先进的 NR 功能通常比基本的 LTE 性能有所提升，但显然仍需要进一步改进，因为 NR 系统在最初设计时并未考虑飞行器。此外，必须考虑空中 UE 可能产生的干扰问题，以免干扰为地面 UE 设计的网络的运行。在 NR Rel-18 阶段，确定了 NR 系统适配无人机应用议题工作阶段的研究内容，将测量上报的增强方案、支持基于订阅的空中终端识别的信令和无人机识别广播的增强功能等标准化，并对 TS 38.300、TS 38.306、TS 38.321、TS 38.331、TS 38.101-1、TS 38.413、TS 38.423 和 TS 38.473 进行更

新。Rel-18 阶段对无人机方面的标准研究总结如下：

移动性和干扰报告：支持事件触发的高度报告（即事件 H1 和 H2）以及由多个小区触发的用于干扰报告的测量事件（即测量事件 A3、A4 和 A5）的核心功能从 LTE 移植到了 NR。高度报告功能得到增强，最大高度增加到 10km。通过引入新的事件 A3H1、A3H2、A4H1、A4H2、A5H1 和 A5H2，增加了对高度相关测量报告触发的支持，这些事件使 A3、A4 和 A5 事件具有高度相关性。此外，高度相关事件可以配置为仅在相同类型的高度相关事件触发时才触发，例如，具有 H1 阈值的高度相关 A3 事件，以实现高度区域的划分。最终，通过引入伴随高度范围和滞后的 `ssb-ToMeasure` 配置列表，增强了测量对象（MO）以支持高度相关的 SSB（即 `ssb-ToMeasure`）。

飞行路径信息：飞行路径信息报告从 LTE 移植而来，NR 支持所有核心的无人机 LTE 功能。增强功能通过基于 UE 辅助信息(UAI)的飞行路径可用性指示来实现，包括初始飞行路径可用性、添加新航点或删除过时航点、航点位置和时间戳增量触发。此外，可以通过发送空的飞行路径使飞行路径无效。切换期间支持从源到目标 gNB 的飞行路径传输。

广播远程识别（BRID）和检测与规避（DAA）：NR sidelink 可通过 NR sidelink mode 2 用于 A2X 通信。对于 NR sidelink 通信，支持两种资源分配模式，分为 mode 1 和 mode 2。在 mode 1 中，sidelink 资源分配由网络提供。在 mode 2 中，UE 自主决定资源池中的 SL 传输资源。sidelink 资源池可配置为支持用于 BRID 和 DAA（即 A2X）的空中 UE 传输。该资源池可指示仅支持 BRID、仅支持 DAA，或同

时支持 BRID 和 DAA。

空中 UE 特定的 NS 值：为符合带外发射（OOBE）要求，NR 支持空中 UE 特定的 NS 值。

基于订阅的空中 UE 识别：空中 UE 的订阅信息可由 AMF 通过 NGAP 提供给 NG-RAN 节点。此外，source NG - RAN 节点可在发送给 target NG-RAN 的 XnAP 消息中包含空中 UE 订阅信息。

UE 能力：UE 能力消息指示 UE 对 Release18 无人机增强功能的支持情况，并且进一步要求支持高度事件触发，即事件 H1 和 H2，以及多小区测量报告触发。对先前章节中讨论的其余功能（例如飞行路径信息报告）的支持是可选的。基于订阅的空中 UE 识别也因其其在 LTE 中的应用而得到支持。

5.2 行业标准最新进展

在中国通信标准化协会组织下，TC5WG9 开展《5G 数字蜂窝移动通信网 支持无人机通信的无线接入网总体技术要求（第一阶段）》标准制定，已完成报批。《5G 数字蜂窝移动通信网 支持无人机通信的基站设备技术要求（第一阶段）》、《5G 数字蜂窝移动通信网 支持无人机通信的基站设备测试方法（第一阶段）》、《5G 数字蜂窝移动通信网 支持无人机通信的终端设备技术要求（第一阶段）》、《5G 数字蜂窝移动通信网 支持无人机通信的终端设备测试方法（第一阶段）》等系列标准正在编制中，2 本技术要求均已通过征求意见稿。前期，TC5WG9 和 TC5WG6 分别组织了《面向无人机系统的 5G 无线网增强技术研究》《面向低空无人机应用的新一代移动通信系统

术研究》等研究报告编制。TC5WG12 正在开展

《移动通信核心网支持无人机系统总体技术要求》标准的编制，TC5WG9 正在开展《5G 数字蜂窝移动通信网 支持无人机通信的模组技术要求（第一阶段）》标准的制定，TC13WG2SWG1 正在开展《5G+工业互联网 无人机应用场景需求》行标编制，探索 5G+无人机在垂直行业应用。

六、低空通信产业进展

6.1 设备研发与解决方案创新

① 华为技术有限公司

华为针对 5G 网络主流的 700MHz、2.1GHz、2.6GHz、3.5GHz、4.9GHz 以及 26GHz 毫米波频段，积极开展低空通信相关基站产品的技术研究、产品研发和组网探索工作。

技术研究层面：在传统的 5G 基站基础上，针对低空通信场景特点，系统开展了大波束扫描、大张角地空一体天线、对空干扰规避等关键技术和解决方案研究，确保了现有 5G 基站具备由地面通信向低空通信的演进能力。

产品研发层面：针对低空通信的需求开发了 2.1GHz 8T 低空一体天线、4.9GHz 128T 大张角 AAU 模块以及 26GHz 毫米波通感一体 AAU 模块等新产品，同时针对存量的 700MHz、2.1GHz、2.6GHz、3.5GHz 等基站产品，开发了软件升级版本以增强低空通信功能。

组网探索层面：针对现有 5G 主力频段的 700MHz、2.1GHz、3.5GHz 及 2.6GHz、4.9GHz 频段进行了低空组网分析。700MHz、2.1GHz 频段可采用空地一体化天线来支持地对空的同频覆盖；3.5GHz 频段可以采用开第 2 载波或新增模块的方式实现低空同频或异频覆盖；在 2.6GHz 频段，可以通过地面网天线权值优化等方式，满足 120 米下低空短距航线等场景业务需求；4.9GHz 频段，低空同频或异频组网均可满足低空通信需求。

②中兴通讯股份有限公司

中兴通讯面向低空网络下同频组网、重叠覆盖度高、立体干扰复杂场景，积极探索基于智能组网的协同干扰控制创新解决方案。

技术研究层面，提出“通感算控”一体化低空物联网方案，通过搭建“通信网+感知网+边缘算力+控制平台”四位一体网络架构，支持百架级无人机并发调度，轨迹预测精度达米级。针对空地协同组网和干扰，创新研发多种解决方案。

在产品研发方面，中兴通讯发布了自发自收通感一体 AAU，垂直张角 65°，可实现 0—600 米高度地空一体感知和通信能力。

在组网探索方面，中兴通讯联合中国电信推出了 Cluster DRS (Dynamic Radio Sharing) 解决方案，依据无人机的飞行轨迹和业务的特点，5G 商用网络动态生成以无人机为中心的基站簇，簇内多小

区间实现空域波束共享；簇间灵活降低干扰，稳定保障无人机高清视频的实时回传体验。基于 4.9GHz 128TR 通感基站+AI 边缘平台，配合中国移动在全国 25 个省市部署超过 80 个 5G-A 低空通感一体化试点。

6.2 技术试验推动

结合我国低空经济发展现状和最新进展，2025 年 IMT-2020 (5G) 推进组广泛征求基础电信运营企业、系统设备商、终端和芯片企业等行业意见，深入研究 5G 低空通信的组网方案与关键技术，面向低空通信覆盖新场景和无人机识别、移动性优化、干扰抑制等关键技术，组织产业界编制《5G-A 技术研发试验 低空通信测试规范 第 1 部分：基站设备与组网测试规范》和《5G-A 技术研发试验 低空通信测试规范 第 2 部分：终端与系统互操作测试规范》等 2 本低空通信测试规范。

2025 年 9 月至 11 月 IMT-2020 (5G) 推进组组织开展了实验室和外场测试，华为、中兴、中国信科、诺基亚贝尔等系统厂商，联发科、紫光展锐、翱捷科技等芯片厂商参加了测试，充分验证无人机识别、eMBB/RedCap 类型终端支持、干扰抑制、资源分配和移动性增强等低空通信关键技术，以及低空网络组网性能，相关结果已于 2025 年中国 5G 发展大会发布。

6.3 基础电信企业应用示范

① 中国电信

中国电信打造“1+1+3+N”低空经济能力体系，构建以“一张低空智联网+一个低空数字底座+三大核心能力（通感融合、智能调度、安全可信）+N类应用场景”为核心的体系。集中优势资源，全力推进全国范围内低空通信基站的布局与优化。网络建设方面，采用2.1GHz和3.5GHz的5G基站利旧方案，有效解决低空覆盖难题。在宁德主城区和寿宁下党乡，首批规划建设19个站点共49个扇区，通过对3.5GHz站点新增第二载波，成功实现主城区150平方公里以及下党乡低空300米高度以下区域的泛低空5G-A通信专网覆盖。5G低空专网通过特定5QI实现专属QoS保障，经测试，数传时延低于25ms，图传时延低于200ms。应用创新方面，在深圳建成最大规模密集城区5G-A低空通感网，支撑低空物流、安防、航路保护，并助力深圳市血液中心打造“5G+无人机血液运输智能空港平台”。

②中国移动

中国移动打造“四驱两翼”低空经济能力体系，通过终端、网络、平台及应用四轮驱动，以及AI与安全双翼护航，全面赋能低空经济高质量发展；发布业界首个低空智联网技术体系白皮书，引领低空信息技术及产业发展。在低空通信方面，中国移动创新鱼鳞组网、双翼组网、莲花波束覆盖增强等技术，大幅降低低空干扰、提升低空覆盖率，依托700MHz、2.6GHz、4.9GHz等中低频协同，形成面向低空不同场景及高度的分层分域、高性价比的立体覆盖体系，

覆盖航线超过 400 条，在深圳、上海等地打造末端外卖配送、跨海干线运输、城市支线转运等城市低空物流标杆，完成无人机配送从工具到运力再到服务的升级。在通感一体方面，中国移动创新构建 4.9GHz+毫米波中高频协同的通感一体技术体系，攻关共生化系统设计、协作化信号处理、自动化组网方案等核心技术，构建最大规模的 4.9GHz+毫米波通感一体试验网，实现城市低空泛在感知，已在 22 省部署超 700 站。同时，融合无线电探测、光电、雷达等技术，对接生态伙伴 25 家、打造多源融合样板，在机场安防、核心重保等多场景开展应用。在合肥等地，率先基于 5G-A 通感一体网络，融合雷达、TDOA 等多种感知手段，打造多源融合探测感知方案，实现站高到 600 米高度低延时、高可靠的连续无缝低空监管。在应用创新方面，发布十大典型应用场景，在城市治理、安全生产、交通物流等领域率先形成示范，涉及 31 省 195 个城市。

③中国联通

中国联通在 5G/5G-A 低空通信领域整体布局可归纳为顶层设计、网络建设、平台与终端创新、应用场景落地等维度。在顶层设计方面，公司提出“五位一体”低空智联网架构，融合通信网、导航网、感知网、算力网与气象网，旨在实现低空飞行“看得见、叫得到、管得住、飞得稳”的核心目标。在网络基础设施方面，已在河南安阳建成全国最大 5G SA 对空通信网络，在江苏南京打造全国

联网,并在北京、深圳设立三大低空综合实验场;

依托 5G-A 通感一体基站,实现 300 米以下空域连续覆盖。在终端创新方面,中国联通研究院聚焦轻量化网联终端,发布低空智联卡,支持 RedCap 模组(2025 年价格降至 10 美元以下),降低终端功耗 20%(相比 4G),推动低成本接入。在应用场景方面,已在全国落地 20 余类低空应用,涵盖城市治理、警务消防、应急通信及医疗物流等领域,如中国联通在数字中国建设峰会上展示的“15 分钟血液配送”方案,效率提升超 60%。

④中国广电

中国广电积极探索低空智联网,利用 4.9GHz 频段开展低空通信和感知关键技术验证。2025 年 11 月,中国广电在多基站连片组网场景下验证了 4.9GHz 低空通信专网方案,实现无人机全程驻留在 4.9GHz 低空专网。验证了的用户目标、动态化、高密度低空活动下的可靠服务能力。测试结果表明,低空通信专网方案能有效杜绝地面与低空用户及网络间的信号干扰,提升网络覆盖质量,为无人机数据回传与飞行控制构建了独立通道,并通过切换协同和干扰协同等创新技术,解决低空通信面临的碎片化覆盖和频繁切换等难题。

6.4 最新频谱、管理政策等

6.4.1 国内低空频率政策

5G-A 技术基于 5G 技术，其现有频率使用主要基于我国对 5G 的频率规划和管理要求。国家无线电管理机构为 5G 技术规划了 700MHz、800MHz、900MHz、1800MHz、2100MHz、2600MHz、3500MHz 和 4900MHz 频段。此外，我国已发布 26GHz 毫米波频段用于 5G 相关使用指南、并在未来拟发 26GHz 毫米波频段用于移动通信技术的频谱规划。

国内低空经济中无线电频率的使用主要依据工业和信息化部发布的《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》（工信部无〔2023〕252 号）及相关配套政策：通过地面公众移动通信系统频率实现遥控、遥测、信息传输功能的民用无人驾驶航空器通信系统无线电台，应当依法使用允许在我国境内提供服务的地面公众移动通信系统及专用于民用无人驾驶航空器的用户识别卡（SIM 卡），设备射频技术指标要求按照地面公众移动通信系统终端技术指标要求执行。通过卫星通信系统频率实现遥控、遥测、信息传输功能的民用无人驾驶航空器通信系统无线电台，应当依法使用允许在我国境内提供服务的相关卫星固定业务动中通系统、卫星移动业务通信系统。具体使用频率范围、设备射频技术指标要求按照《建立卫星通信网和设置使用地球站管理规定》《对地静止轨道卫星动中通地球站管理办法》《卫星移动通信系统终端地球站管理办法》等相关无线电管理规定执行。

6.4.2 全球低空频率政策

无人机技术和低空经济在全球范围内得到了显著的发展和重视。全球主要国家和地区采取多种措施，推进频谱资源高效利用，支持技术创新和行业发展。

其中，美国、欧洲和日本等地在低空经济频谱规划方面表现出显著的前瞻性和创新性。例如，美国 FAA 和 FCC 针对无人机通信制定了具体的频率使用规则和业务规则，引入了动态频率管理系统（Dynamic Frequency Management System, DFMS），确保无人机与地面基站之间的安全通信。欧洲则通过《欧洲无人机战略 2.0》强调人工智能、机器人技术和移动通信等关键技术的应用，同时积极参与全球统一的频段规划。日本也积极推动技术研发与应用，加强基础设施建设，并为无人机空中频率使用制定战略规划。

澳大利亚、韩国以及阿联酋和沙特等地同样重视低空经济的发展，并采取措施支持无人机技术的创新和应用。这些国家既顺应技术发展趋势，也参考国际规划，确保本国频率分配与国际标准和规范相协调。

从全球范围来看，使用 IMT（国际移动通信）频率实现低空通信是一个主要方向。IMT 频率不仅能够满足无人机通信和数据传输的需求，还能促进低空经济与通信技术的融合发展，为低空经济的发展提供更好的基础条件。

七、发展建议

2025 年 10 月，《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五

《“十四五”规划纲要的建议》中提出打造新兴支柱产业，加快新能源、新材料、航空航天、低空经济等战略性新兴产业集群发展。当前，低空经济发展如火如荼，无人机外卖、巡检、物流等创新应用不断涌现，以移动通信为代表的低空通信技术与各类应用融合创新活跃，持续提升生产效率，有力推动对经济社会高质量发展。但同时也要看到，作为低空经济的关键信息基础设施，低空通信发展依然面临技术标准不够健全，产业生态不够成熟，低空网络建设投入还需强化，与行业应用融合不够深入等发展挑战，还需进一步凝聚产业各方力量，从技术创新、标准推进、产业协同、网络建设等多个方面着手，共同推动低空通信产业繁荣发展。

（一）技术创新引领，筑牢低空通信发展基础。强化对于低空覆盖增强、低空组网、干扰抑制和资源分配、移动性增强等关键技术创新研发，提出针对市区生活场景、工业园区、林草边区等场景化多样化解决方案，更加匹配实际网络需求。积极探索 5G 移动通信系统高精度定位、通信感知一体化等技术在无人机应用中的融合创新，进一步挖掘 5G 技术潜力。持续开展技术试验与验证，充分验证新技术、新方案的可行性与性能，加速技术迭代成熟和解决方案落地。

（二）推进标准制定，培育低空通信产业生态。一方面，强化与 3GPP 国际标准协同，加快低空通信系列行业标准制定，为支持

端、芯片等产品研发提供有力保障。另一方面，在制定行业标准时要充分考虑我国产业发展实际，分阶段推进支持无人机通信的新技术特性标准化，逐步推进相关核心芯片研发。此外，鼓励终端芯片企业加快开发支持 R18 标准的产品，为无人机企业提供更多更丰富产品选择。

（三）加快网络建设，有力支撑低空经济发展。因地制宜，持续推进支持低空通信的网络建设，结合区域特色产业选择合适的网络建设方案。不同区域里具有不同的典型应用，不同的应用对低空网络需求各异。针对不同地区的特点，灵活组合公网、专网等技术，采取“小步快跑、持续迭代”的策略，做好与当地低空空域划设、飞行服务站建设、无人机监管平台部署同步考虑。面向性能需求不高但对覆盖有一定要求的区域，要充分利用现网基础，深入研究灵活可操作、低成本的基于现网部署基站的低空通信技术方案，为低空网络快速部署奠定基础。面向高性能低空网络需求，要加快新型基站设备研发和组网方案研究，保障高质量网络能力供给。

（四）强化产业合作，深入挖掘低空经济价值。移动通信产业界要进一步强化与无人机服务商、行业应用开发商交流合作，结合行业应用的差异化需求，通过专网、网络切片等方式按需提供对应的网络能力。共同探索“网络+平台+应用”的一体化解决方案，通过按连接服务、按数据流量、按作业成果（如巡检公里数）等灵活

计费模式，创新运营模式。终端和芯片企业要强化与无人机生产企业、行业应用方的对接，加快产品研发，推动移动通信技术在无人机行业的融合应用和赋能。

附录 1:

缩略语表格

| 缩略语 | 中文 | 英文全称 |
|--------|------------|---|
| 5QI | 5G QoS 标识符 | 5G QoS Identifier |
| AAU | 有源天线单元 | Active Antenna Unit |
| A2X | 空对空/空对地通信 | Aerial-to-Everything |
| AMF | 接入和移动性管理功能 | Access and Mobility Management Function |
| BRID | 广播远程识别 | Broadcast Remote ID |
| CAA | 民航局 | Civil Aviation Authority |
| CAG | 封闭接入组 | Closed Access Group |
| DAA | 检测与规避 | Detection and Avoidance |
| eMBB | 增强型移动宽带 | enhanced Mobile Broadband |
| eVTOL | 电动垂直起降飞行器 | electric Vertical Take-Off and Landing |
| gNB | 5G 基站 | next Generation NodeB |
| ISM | 工业、科学和医疗频段 | Industrial, Scientific and Medical band |
| LoS | 视距 | Line-of-Sight |
| NG-RAN | 下一代无线接入网 | Next Generation Radio Access Network |
| NGAP | NG 接口应用协议 | NG Application Protocol |
| NS | 子载波间隔配置集 | Numerology Set |
| OOBE | 带外发射 | Out-Of-Band Emission |
| PCI | 物理小区标识 | Physical Cell Identity |

| | | |
|--------|-----------|--------------------------------|
| PUSCH | 物理上行共享信道 | Physical Uplink Shared Channel |
| QCI | QoS 等级标识 | QoS Class Identifier |
| RB | 物理资源块 | Resource Block |
| RedCap | 轻量化 5G 终端 | Reduced Capability |
| RRU | 射频拉远单元 | Remote Radio Unit |
| SIM | 用户识别模块 | Subscriber Identity Module |
| SSB | 同步信号块 | Synchronization Signal Block |
| TR | 发射接收通道数 | Transmit-Receive |
| UE | 用户设备 | User Equipment |
| UAI | UE 辅助信息 | UE Assistance Information |
| UAV | 无人驾驶航空器 | Unmanned Aerial Vehicle |
| UAS | 无人机系统 | Unmanned Aerial System |
| UTM | 无人机交通管理系统 | Unmanned Traffic Management |
| XnAP | Xn 接口应用协议 | Xn Application Protocol |

附录 2:

IMT-2020 (5G) 推进组 2025 年首批 5G-A 低空通信试验企业清单
(排名不分先后)

华为技术有限公司

中兴通讯股份有限公司

大唐移动通信设备有限公司

上海诺基亚贝尔股份有限公司

联发博动科技（北京）有限公司

北京紫光展锐通信技术有限公司

翱捷科技股份有限公司