

# 面向低空经济的5G-A无线通信覆盖增强与干扰抑制技术研究

杨龙哲 胡 进 魏雪红

河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450003

**摘要：**低空经济快速发展催生无人机物流、低空安防等多元场景，对通信覆盖、时延及抗干扰能力提出严苛要求，传统通信技术存在覆盖断层、干扰突出等瓶颈。本文聚焦5G-A无线通信技术，系统研究覆盖增强与干扰抑制关键技术，结合实测与仿真验证通感一体、智能超表面等技术的有效性，提出适配低空场景的资源调度策略，为低空经济通信网络的稳定高效运行提供技术支撑与实践参考。

**关键词：**低空经济；5G-A无线通信；覆盖增强；干扰抑制

引言：作为数字经济新增长点，低空经济的规模化发展依赖高质量无线网络保障。当前，低空场景对通信的立体覆盖、低时延、高可靠需求与现有网络性能之间存在突出矛盾，传统基站覆盖不足、多径干扰等问题制约其发展。5G-A凭借大带宽、低时延、广连接优势，成为破解上述瓶颈的核心技术。本文围绕5G-A覆盖增强与干扰抑制技术展开研究，助力低空经济各应用场景落地见效。

## 1 低空经济通信需求与挑战分析

### 1.1 低空经济典型应用场景

低空经济目前典型应用大致分以下四种：（1）无人机物流：以顺丰、京东末端配送为代表，聚焦城市“最后一公里”配送需求，需在楼宇密集环境中实现精准起降与物资转运，通信信号强度  $\geq -85\text{dBm}$ ，抗干扰能力  $\geq 30\text{dB}$ ，数据回传时延  $\leq 50\text{ms}$ ，依赖稳定通信保障订单追踪与飞行控制。（2）低空安防：通过空域实时监测实现违规飞行预警，通信信号强度  $\geq -90\text{dBm}$ ，多目标并发感知能力  $\geq 50$ 架/平方公里，响应时延  $\leq 100\text{ms}$ ，保障安防指令快速响应。如横琴粤澳深度合作区电子围栏应用。（3）城市空中交通（UAM）：以深圳eVTOL试飞为典型，面向载人通勤等场景，通信时延  $\leq 10\text{ms}$ ，安全指数  $\geq 99.999\%$ ，抗干扰能力  $\geq 40\text{dB}$ ，对通信的安全性与实时性要求严苛，需支撑飞行器间协同避障与地面管控指令高效传输。（4）智慧农林作业：如植保无人机集群喷洒，多架设备协同完成大面积农田作业，通信信号强度  $\geq -88\text{dBm}$ ，编队同步时延  $\leq 20\text{ms}$ ，数据回传时延  $\leq 30\text{ms}$ ，需通过通信实现编队同步与作业数据回传，适应复杂地形下的连续作业需求。

### 1.2 低空经济应用对通信网络性能的要求

（1）覆盖范围：需实现600米高度内立体覆盖，兼顾低空近地作业与中低空通航需求，消除楼宇、地形遮挡导致的覆盖盲区，保障全域连续通信<sup>[1]</sup>。（2）性能指标：上行速率  $\geq 500\text{Mbps}$ ，满足4K高清视频实时传输；时延  $\leq 10\text{ms}$ ，保障飞控指令即时响应；可靠性  $\geq 99.999\%$ ，确保极端场景下通信不中断，筑牢安全底线。

### 1.3 现有发展技术瓶颈

（1）传统基站覆盖高度不足：现有基站以150米以下地面覆盖为主，难以满足中低空飞行需求，600米高度区域信号衰减严重，存在明显覆盖断层。（2）多径干扰问题突出：低空信号易受建筑物反射、地形起伏影响产生多径传播，导致信号叠加失真，降低通信质量，尤其在城市密集区与复杂地形环境中更为显著。（3）移动性管理难题：无人机高速移动引发基站频繁切换，易出现“乒乓”效应，导致通信链路短暂中断，无法满足飞控等低时延业务的连续传输需求。（4）频谱资源竞争激烈：地面与低空业务共享现有频谱资源，随着低空飞行器数量激增，同频干扰加剧，频谱利用率不足，进一步制约通信性能提升。

## 2 面向低空经济的5G-A无线通信覆盖增强技术

### 2.1 通感一体（ISAC）技术

通感一体技术的核心是通过基站发射信号的反射回波实现多维感知，利用信号飞行时间差、相位差与角度差，精准完成目标测距、测速与测角，实现通信与感知功能的硬件共用、频谱共享，无需额外部署专用感知设备，大幅降低低空监测与通信一体化组网成本。该原理打破了传统通信与感知设备分离的模式，让基站同时具备“通信链路搭建”与“空域态势感知”双重能力。

针对传统基站低空覆盖断层问题，新增覆盖扩展机

制,该机制依据感知模块获取的低空目标位置、运动轨迹等数据,由系统动态调整基站波束的方向、增益与覆盖范围,实现“目标在哪、波束跟哪”的自适应覆盖,通过波束三维调控将覆盖高度拓展至600米,同时规避建筑、地形遮挡带来的信号衰减,保障飞行目标全程通信链路稳定<sup>[2]</sup>。

中兴通讯通过在横琴粤澳深度合作区部署的5G-A通感一体基站,实现1km范围内空域目标的全面覆盖,感知精度达到亚米级,可精准捕捉无人机飞行轨迹、高度变化等关键参数,为区域低空安防电子围栏系统提供了核心技术支撑,有效解决了低空目标“看不见、管不住”的痛点,验证了技术在跨境低空管控场景的实用性。

## 2.2 智能超表面(RIS)技术

智能超表面由武汉瑞斯通信部署的30×30个可独立调控电磁单元构成,通过软件施加电压驱动CMOS开关芯片,调控2-bit反射电磁相位,改变入射信号传播特性、重构传播路径。针对低空通信中信号被建筑、地形遮挡的问题,RIS可搭建“信号桥梁”,让信号通过反射绕开障碍物,实现复杂环境信号补盲覆盖,相当于“可灵活调节的智能反射镜”。

该技术适用于城市峡谷、山区等复杂环境,此类区域遮挡严重、多径干扰突出。在湖北试点的楼宇间隙、山区沟壑等信号薄弱区域部署RIS,可精准补盲低空通信覆盖盲区,支撑无人机物流末端配送、山区农林作业等场景的连续通信。

武汉瑞斯通信实测验证显示,600米高空场景中,部署前信号强度-85dB、通信速率15Mbps、丢包率8.2%;部署后信号强度提升至-73dB(提升12dB),通信速率达60Mbps(近3倍),丢包率降至1%以下,完全满足低空高清视频回传、飞控指令传输等业务需求,弥补传统基站高空信号衰减缺陷,为中低空飞行提供稳定通信保障<sup>[3]</sup>。

## 2.3 动态频谱共享(DSS)技术

动态频谱共享(DSS)技术,通过实时监测地面与低空业务的负载变化、频谱利用率,采用智能算法动态分配频谱资源。当处于低空业务高峰期时(如无人机集群作业),系统自动向低空倾斜频谱资源;反之,将频谱资源归还地面网络,实现“按需分配、动态调剂”,最大化提升频谱资源利用率,缓解地面与低空业务的频谱竞争矛盾。

在多场景实验中,使用动态频谱共享技术后,低空业务吞吐量提升40%,可同时支撑20架无人机集群的并发通信;同时,通过精准的资源隔离与干扰抑制技术,对地面4G/5G用户业务体验的影响控制在5%以内,实现了

低空与地面业务的“共存共赢”,为频谱资源紧张场景下的低空通信规模化发展提供了有效解决手段。

## 2.4 毫米波与太赫兹融合组网

28GHz/39GHz毫米波频段具备超大带宽优势,适合部署在城市商圈、交通枢纽等低空业务热点区域,采用“高低频段协同”策略,可为密集区域无人机物流配送、城市空中交通起降点等场景提供万兆级高速通信;0.1-1THz太赫兹频段凭借超短波长、窄波束特性,适用于无人机编队协同、近距避障指令交互等短距离高可靠传输场景,保障核心指令低时延、高可靠传输。

该融合组网方案面临两大核心挑战:一是大气吸收损耗,毫米波与太赫兹信号传播中易受水汽、尘埃吸收,导致信号衰减严重,影响远距离覆盖;二是设备成本较高,太赫兹器件研发与量产难度大,基站部署及运维成本远超传统频段设备,制约技术规模化应用。

针对上述问题,采用分布式MIMO与智能反射面协同技术:通过多基站分布式部署提升信号分集增益,降低大气损耗影响;借助智能反射面增强信号、优化传播路径,进一步拓展覆盖范围。同时,分布式架构可降低单基站功率要求,减少硬件成本,通过技术协同突破频段缺陷与成本瓶颈,实现融合组网高效落地<sup>[4]</sup>。

## 3 面向低空经济的5G-A无线通信干扰抑制与资源调度策略

### 3.1 干扰来源

同频干扰:低空经济通信与地面移动通信共享5G-A核心频段,这就导致地面用户与低空终端在下行链路中易产生同频干扰。由于低空终端飞行高度较高、覆盖范围更广,其接收的地面基站信号与其他终端信号相互叠加,导致信号信噪比下降,尤其在城市低空业务密集区域,同频干扰会显著降低高清视频回传、飞控指令传输的稳定性。

邻区干扰:受基站部署密度与天线辐射特性影响,相邻基站的旁瓣信号易形成重叠覆盖区域。低空终端高速移动过程中,频繁穿越不同基站覆盖范围,易同时接收多个邻区基站信号,引发邻区干扰。这种干扰会增加信号解调难度,导致通信链路误码率上升,甚至影响基站切换的稳定性。

业务干扰:低空经济场景中,飞控指令、应急预警等高优先级业务与高清视频回传、数据统计等普通业务共享通信资源,易出现优先级冲突引发的业务干扰。若资源分配不合理,普通业务的大量数据传输占用核心资源,导致高优先级业务传输时延增加,严重时威胁飞行安全,凸显业务差异化调度的必要性。

### 3.2 干扰抑制技术

**空域滤波：**基于MassiveMIMO大规模天线阵列的波束零陷技术，通过智能算法精准计算干扰信号的来波方向，在干扰源方向形成波束抑制零点，同时强化对目标低空终端的波束增益。该技术可实现“精准覆盖、定向抗干扰”，从空间维度隔离干扰信号，避免对地面用户和邻区终端的影响。

在1.8GHz频段、干扰功率-70dBm、目标终端信噪比10dB的实验条件下，经实验室与实地场景仿真验证，基于MassiveMIMO的空域滤波技术干扰抑制比达25dB，可将同频干扰和邻区干扰导致的误码率降低一个数量级，确保在干扰密集环境下，低空终端仍能维持稳定的通信链路，满足飞控指令等关键业务的传输要求。

**功率控制：**采用基于Q-learning的强化学习动态发射功率调整机制，基站实时采集通信链路质量、干扰水平、业务优先级等数据，通过智能迭代学习优化发射功率参数。针对低空终端不同飞行高度和距离，动态适配功率输出，在保障通信质量的前提下，将对周边终端的干扰降低至最小化。

在飞行高度50-500m、移动速度 $\leq 120\text{km/h}$ 、干扰强度-85dBm的实验条件下，经实验验证，该功率控制算法收敛速度快，仅需不到50次迭代即可完成最优功率参数配置，能够快速响应低空终端的高速移动和环境变化，避免因功率调整滞后导致的干扰加剧或信号衰减问题，适配低空业务的动态性需求。

**非正交多址（NOMA）：**通过功率域复用技术，在同一时频资源上为多个不同优先级的低空终端分配差异化功率，高优先级的飞控业务占用更高功率资源，普通业务以较低功率叠加传输。利用串行干扰消除技术实现信号分离，打破正交多址技术的资源分配限制，大幅提升频谱利用率。

在时频资源10MHz、终端并发数20-50个、信噪比5-15dB的实验条件下，实验数据显示，非正交多址（NOMA）技术应用于低空通信场景时，频谱效率显著提升，通信容量增益提升达30%以上，可同时支撑更多低空终端并发接入，有效缓解低空业务规模化发展带来的资源紧张问题<sup>[5]</sup>。

### 3.3 智能资源调度算法

**算法定义与所用算法：**本文采用基于强化学习的智能资源调度算法，定义为以网络吞吐量最大化为核心目标、端到端时延最小化为约束，适配低空通信场景的自适应资源分配算法。其原理是构建强化学习调度框架，将业务优先级、链路质量、干扰水平作为状态输入，资源分配方案作为动作输出，通过迭代优化形成适配场景变化的调度策略，平衡业务资源需求，保障高优先级业务传输质量。

**数字孪生验证：**在深圳宝安低空经济数字孪生仿真平台完成验证，该平台还原真实场景，模拟不同业务负载、飞行轨迹下的通信状态，验证了算法的可行性与稳定性。实验结果显示效果显著：基站切换成功率从传统85%提升至98%，减少通信卡顿与指令丢失；网络资源利用率提升35%，高峰时段支撑更多终端并发，低谷时段合理释放资源，提升整体网络运行效率。

#### 结束语

本文围绕低空经济通信需求与技术瓶颈，系统研究了5G-A无线通信覆盖增强与干扰抑制技术，验证了通感一体、智能超表面等覆盖增强技术及空域滤波、功率控制等干扰抑制技术的有效性，提出的智能资源调度算法显著提升了网络性能。研究虽解决了核心技术难题，但仍存在毫米波组网成本高、极端环境适配性不足等局限，未来将聚焦多技术融合优化，进一步降低部署成本、提升通信可靠性，为低空经济高质量发展提供更有力的技术支撑。

#### 参考文献

- [1]冯榜伟.无线通信环境下低空无人机网络覆盖优化控制[J].长江信息通信,2025,38(02):16-18.
- [2]陈照.一种铁路5G-R无线通信网络覆盖规划方法[J].今日制造与升级,2023,(03):75-77.
- [3]李宁,王颖.基于联合估计的无线通信网络干扰抑制算法[J].计算机仿真,2023,40(12):337-340.
- [4]冯宇,许超,李威.基于5G新空口的感知通信一体化多波束系统[J].现代电子技术,2024,47(02):13-15.
- [5]叶威,高树亮.面向5.5G的通信感知一体化[J].信息技术,2021,15(05):27-33.