

低空通信网建设思路及性能保障 方案研究

Research on Construction Approaches and Performance Assurance Solutions for Low-Altitude Communication Networks

刘光海,陈佳丽,刘亚楠(中国联通研究院,北京 100048)

Liu Guanghai, Chen Jiali, Liu Yanan (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘要:

聚焦低空业务的典型通信需求,系统分析了当前主流的低空通信网络技术,包括5G/5G-A、Wi-Fi、卫星通信等,提出构建“以地面蜂窝网络为主体,融合多种通信技术”的立体组网策略,充分发挥各技术优势。在性能保障方面,重点研究了低空移动通信网的性能保障方案,包括覆盖、干扰、移动性及可靠性等的性能保障措施,并针对不同的业务提出差异化保障策略,确保低空通信网络能够高效、稳定地运行。

关键词:

5G-A; 低空网络; 组网方案; 性能

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.05.002

文章编号: 1007-3043(2026)05-0008-06

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Focusing on the typical communication requirements of low-altitude services, it analyzes the currently prevalent network technologies, such as 5G/5G-A, Wi-Fi, and satellite communication. A three-dimensional networking strategy is proposed, which centers on the cellular network and integrates multiple communication technologies to fully harness the strengths of each technology. Regarding performance assurance, it delves into the performance assurance schemes of low-altitude networks. Measures have been proposed to ensure coverage performance, interference performance, mobility performance, and reliability performance. Moreover, differentiated guarantee strategies have also been proposed to ensure the efficient and stable operation of low-altitude communication networks.

Keywords:

5G-A; Low-altitude network; Networking strategy; Performance

引用格式: 刘光海,陈佳丽,刘亚楠. 低空通信网建设思路及性能保障方案研究[J]. 邮电设计技术, 2026(5): 8-13.

0 引言

随着低空经济的快速发展,低空飞行器在物流运输、城市巡检、应急救援等领域的应用日益广泛。各类低空业务对低空通信网络的覆盖能力、可靠性和业务差异化保障提出了更高要求。

本文聚焦低空业务的典型通信需求,系统分析现有技术,提出融合5G移动通信、Wi-Fi及卫星通

信的立体组网策略,并对低空移动通信网的性能保障方案进行深入分析,旨在构建从覆盖性能、干扰控制、移动性管理及可靠性等方面得到有效保障的综合技术体系,为低空互联网的规模化部署提供理论支撑。

1 低空经济通信业务需求

通信系统作为数字低空网络的核心基础设施,支撑着低空飞行器在多元场景下的业务开展。低空飞行器对网联通信提出2类核心业务需求:飞控数传类业务需求和视频图传类业务需求。

收稿日期: 2026-04-06

a) 飞控数传类业务属于必要型业务,主要包括飞行控制和飞行状态跟踪等,其核心特征是传输小数据包,速率要求为百 kbit/s 级;对网络连续稳定覆盖、传输时延和可靠性具有较高要求,要求时延不超过 100 ms,连接可靠性达到 99.9%。此类业务的实时性与准确性直接影响飞行安全,需构建低时延、高可靠的通信链路。

b) 视频图传类业务依据对传输速率的不同需求可分为基础型业务及增强型业务,主要负责回传飞行器采集的图像及视频数据,以上行传输为主,具有“大上行”的通信特征。典型的应用视频分辨率需求为 1080P 或 4K 2 种规格,其中 1080P 视频回传业务速率标准需达到 5 Mbit/s,为基础业务要求;而 4K 视频回传业务要求速率标准达到 25 Mbit/s,为增强业务要求(见表 1)。

表 1 典型低空通信业务需求

业务类型	分辨率	色彩深度	典型帧率	编码格式	基础码率	应用场景
1080P 视频	1 920×1 080	标准:8 bit/像素点	30 fps	H.264/H.265	约 5 Mbit/s	低空物流、工业巡检
4K 视频	3 840×2 160	HDR:10 bit/像素点	30 fps/60 fps	H.264/H.265	约 25 Mbit/s	航拍娱乐

2 低空通信主流技术分析

当前主流低空通信网络技术包括 5G/5G-A、4G、Wi-Fi、卫星通信等,几种技术的对比如表 2 所示。

基于多技术融合的系统架构设计理念,结合各网络技术的组网能力及存量资源情况,本文建议构建“以地面蜂窝网络为主体,Wi-Fi 网络为局域补充,卫星通信为广域扩展”的立体化通信组网体系。

表 2 低空通信组网技术对比

组网技术	频率资源	覆盖能力	业务能力	产业成熟度	建设成本
以 5G 为代表的移动通信设施	授权频谱,带宽较宽	统一规划,基站覆盖半径可达几千米至数百米,通过蜂窝组网实现地面连续覆盖	抗干扰能力强,能提供更好的速率保障;有端到端的 QoS 保障机制;无缝切换,不影响业务;传输时延目标为 1 ms,当前支持 20 ms	5G 模组成本较高,5G 无人机上机率较低	中
	行业专网频谱(1.4 GHz/430 MHz 等),按需申请,带宽较窄	按行业需求,局域部署	邻近区域存在多个行业专网,同频或邻频部署时,可能产生系统间干扰;带宽较窄,保障速率较低	行业定制,跨行业兼容性稍差	中
Wi-Fi 系统	非授权频谱	可实现无人机巢周边数公里局域覆盖	Wi-Fi 接入网关仅提供基本的管道功能;抗干扰能力差,速率受视距影响,无切换保证机制;安全性性能弱,易被破解	技术成熟,模组便宜	低
卫星通信	专用频谱,直连卫星频谱待定	海陆空全域通信(除极地)	传输速率较低,地球同步卫星传输时延大,单跳时延约为 0.27 s,低轨卫星时延较小,为 20~50 ms	技术成熟,终端设备价格较高;低轨卫星网络技术还在试验中	高

3 低空通信设施建设思路

低空通信网络设施建设应遵循“立体分层、多网协同,性能可靠、按需部署”的基本原则,充分利旧存量移动通信站址设施及传输资源,按需进行 5G、Wi-Fi 等必要设施的建设,迅速构建出一张能够满足场景化需求、提供普遍接入服务的低空通信网络。

3.1 地面移动蜂窝网络覆盖区域

地面移动蜂窝网络覆盖区域,优先复用以 5G 为代表的移动通信设施,实现低空立体分层基础覆盖(见图 1)。

对于 W 类空域(120 m 以下)的低空覆盖需求,可复用地面 5G/4G 现网基站的 AAU 或天线的旁瓣兼顾低空覆盖,通过低空邻区优化、局部超远覆盖高干扰排查、针对性补充覆盖等手段,可满足低空基础连接及基础视频业务需求(上行边缘速率可达 5 Mbit/s@95%)。

对于 G 类空域(300 m 以下)的低空覆盖需求,可基于地面网络资源,调整地面网波束与射频参数,实现空地协同组网兼顾覆盖,满足低空基础连接及 4K 高清视频业务需求(上行边缘速率可达 5 Mbit/s@95%,25 Mbit/s@90%)。

对于 300~600 m 的 D/E 类空域的低空覆盖需求,复用地面网无法有效满足低空业务连续性覆盖需求,需通过新增 AAU 或空地一体化天线,按需建设低空专网。

对于 600 m 以上的 D/E 类空域低空覆盖需求,以卫星通信方案为主,同时积极探索开发新型高增益、大张角、低零陷 AAU/天线的地面基站解决方案。

3.2 地面蜂窝网络未覆盖的偏远区域

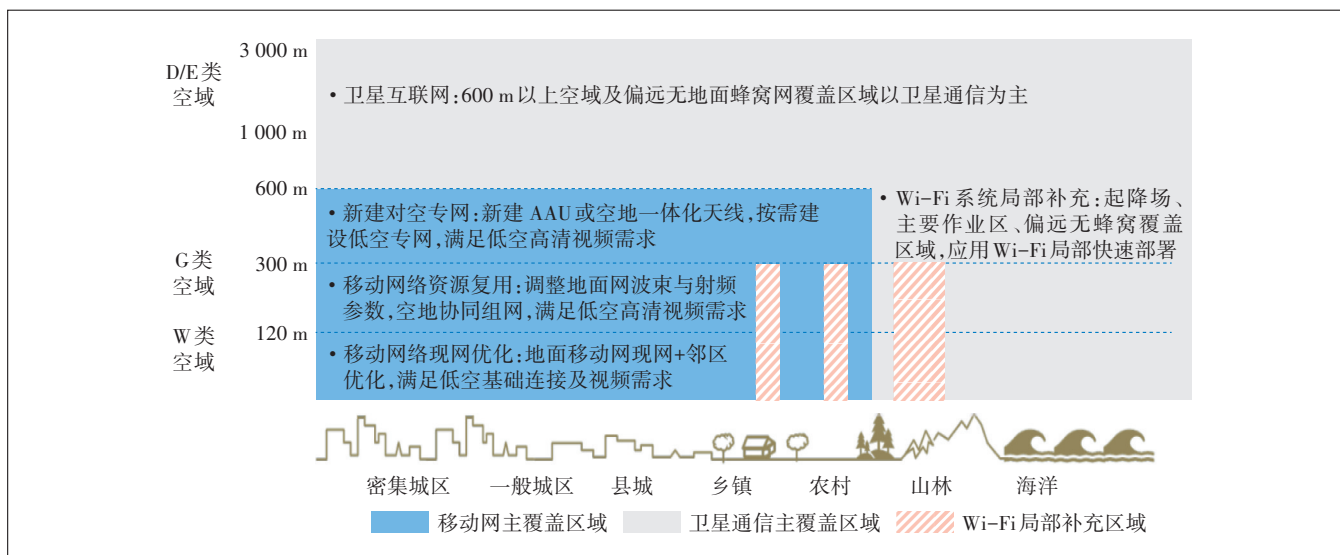


图1 分层组网方案

针对地面蜂窝网络未覆盖的偏远区域,对于长期的低空业务需求,可通过新建5G/5G-A网络、Wi-Fi系统等方案提供持续而稳定的低空覆盖;对于临时性、突发性低空业务需求,可充分利用Wi-Fi系统灵活、低成本的特点,构建低空通信网络覆盖。未来,在偏远区域,卫星互联网方案将成为主导模式,局部辅以地面网络。

3.3 有关键业务需求与高通信保障要求的重点区域

在起降场、主要作业区等具有关键业务需求与高通信保障要求的重点区域,可同时部署Wi-Fi系统。多系统按需补充覆盖,提供冗余备份,当某一系统出现故障或通信质量下降时,其他系统可迅速接管业务,提高通信服务可靠性。

4 低空通信网性能保障方案

低空通信网络需要满足低空终端在目标空域内随时随地接入网络、随时随地发起飞控数传或视频图传等通信业务的基本需求,且在低空飞行器飞行过程中,要求对低空通信网络的覆盖性能、干扰性能、移动性能、可靠性性能等做好保障。本章重点研究以移动通信网为主的低空通信网的性能保障方案。

4.1 覆盖性能保障

传统移动通信网络主要为地面用户服务,基站的天线/AAU通常以一定的下倾角照射地面。这就导致在未针对低空覆盖进行专门优化的区域,空中的移动通信网络信号主要来自于地面基站的天线旁瓣,功率较弱且方向性差。低空空域缺乏主导无线小区覆盖,且不

同基站旁瓣信号相互交织、干扰,使低空空域信号杂乱,在稍高空域难以形成连续覆盖。

为解决上述问题,需要通过新建对空小区,或调整部分地面小区波束的方式,提供专门对空波束覆盖,形成低空立体蜂窝结构,满足一定高度空域内信号的连续覆盖。

同时,参考大网业务保障标准,对不同类型的低空业务需求设定相应的区域保障满足度:必要型业务需求(如下行控制信令等)区域保障满足度需达到99%,基础型业务需求(如上行1080P视频)区域保障满足度需达95%,增强型业务需求(如上行4K视频)区域保障满足度为90%。

如图2所示,基于中国联通低空试验网的大量实测数据分析,可得出如下结论。

a) 若满足必要型业务需求,即实现下行业务1 Mbit/s@99%的保障满足度,要求 $SS-SINR \geq -7$ dB,考虑额外预留3 dB下行干扰余量,要求 $SS-SINR \geq -4$ dB。

b) 若满足基础型业务需求,即实现上行业务5 Mbit/s@95%保障满足度,要求 $SS-RSRP \geq -97$ dBm,考虑额外预留2 dB上行干扰余量,则要求 $SS-RSRP \geq -95$ dBm。

c) 若满足增强型业务需求,即实现上行业务25 Mbit/s@90%保障满足度,要求 $SS-RSRP \geq -92$ dBm,考虑额外预留2 dB上行干扰余量时,要求 $SS-RSRP \geq -90$ dBm。

4.2 干扰性能保障

与地面移动通信环境中终端与基站之间多为反

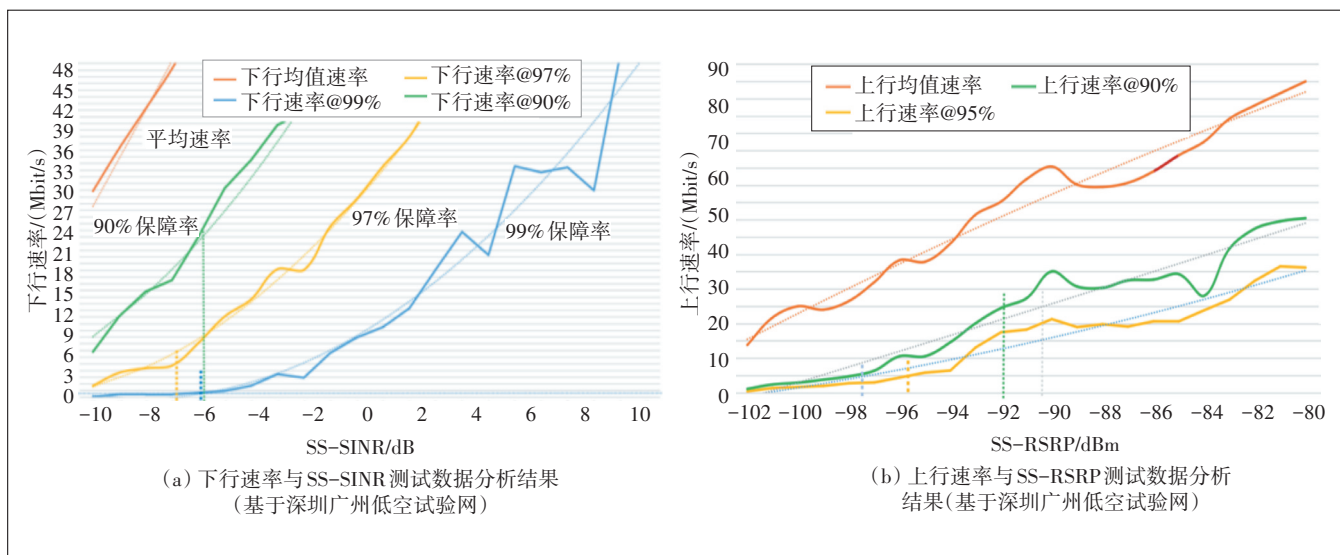


图2 业务保障所需信号的SS-SINR和SS-RSRP门限分析

射、绕射的非视距(NLOS)传播路径不同,低空飞行器所处位置较高,可同时与多个地面基站形成没有遮挡的视距(LOS)直射路径,传播损耗小,使得同一飞行器终端会收到主服小区及多个邻区的下行信号,使得低空飞行器所受下行干扰较强、信号信噪比较低,下行业务速率难以保障。与此同时,低空用户上行发射功率被周边多个邻区接收,造成对地面基站严重的上行干扰。针对上述干扰问题,可采取如下解决方案。

a) 频率隔离。如图3所示,低空网络采用与地面网络异频的专用载波。通过这种方式,可有效避免空地波束之间的同频干扰。然而这一方案更适合地面网络频率资源较为充裕的场景,随着地面网络负荷增高,地面网络会逐步扩容,部署与对空载波同频的第二载波。此时,空地之间的同频干扰会逐步加剧。

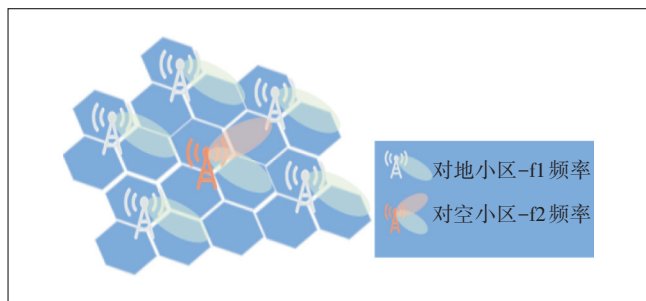


图3 空地频率隔离方案

b) 波束空间隔离。如图4所示,通过加大空地波束之间的夹角,尽量降低对空波束和对地波束的重叠度与耦合度。例如,采用大仰角对空专用AAU,或在

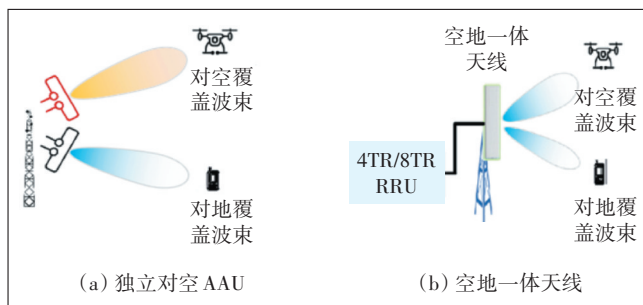


图4 波束空间隔离方案

空地一体化天线中增大空地波束间的张角等。此方案可明显降低空中小区对地面小区的下行干扰,以及地面小区对空中小区的上行干扰;而空中小区对地面用户的上行干扰仅稍有改善。

c) 运用空地多小区协同覆盖、联合调度等技术,如地空小区间的干扰协调(ICIC/eICIC)、波束协同赋形、协作多点传输(CoMP)等。

d) 应用低空终端的差异化功控技术,即适度降低低空终端的总体发射功率,从而降低空中飞行器对地面用户的上行干扰。

在实际应用中,可根据不同场景的需求,适时、协同地选择并运用上述解决手段,将空地干扰控制在可接受的水平。

4.3 移动性能保障

飞行器在低空环境易同多个基站之间形成视距(LOS)传输路径,导致低空场景下常存在多小区重叠覆盖的问题,使得低空终端在飞行过程中易频繁触发

小区间切换、重选,甚至会发生切换失败、脱网等异常事件,严重影响业务感知。为应对上述移动性问题,可采取如下解决方案。

首先,要做好合理化覆盖。通过合理选择低空覆盖站址,结合仿真对低空站点进行优化配置,包括对空波束的俯仰角及方向角的参数优化;同时,对周边地面基站实施协同参数调优,折中重叠覆盖率与弱覆盖比率,降低异常事件发生概率。

其次,要配置合理化移动策略。针对低空用户的特殊移动特性,设计专用默载或差异化移动性策略。通过合理建立低空小区间及地空小区间的同频/异频切换策略,设计系统间重选策略和门限参数,引导低空终端遵循“地到空易、空到空易、空到地难”的整体策略有序移动。

a) 地空同频组网场景。在低空覆盖目标区域内,针对低空用户可配置一系列差异化的移动策略,具体如下。

(a) 减少同频切换触发机率。区域内的对空小区、地面小区针对低空用户配置较高的A3事件偏置量(A3-offset)、切换迟滞参数和触发时间阈值(TimeTo-Trigger)。通过将上述参数值设定为高于常规地面用户的基准值,建立同频切换的冗余抑制机制,有效降低非必要切换触发概率,提升信令交互效率。

(b) 降低向低空小区切换难度。针对目标低空小区的邻区列表,实施小区特定偏置量(Cell Individual Offset,CIO)的差异化配置策略:对低空邻区配置负向CIO偏置($CIO < 0$),通过降低该邻区的有效接收电平评估值,实现“地到空易、空到空易”;同时结合基于地理围栏的切换区域划分技术,实现低空用户在不同高度层的平滑迁移。

(c) 设计基于偏置量抑制的空地切换控制策略。在低空小区的地面邻区配置中,采用零偏置($CIO = 0$)的保守配置策略,实现“空到地难”。

b) 地空异频组网场景。对于地空异频组网场景,低空用户在空中小区之间移动仍为同频切换,可继续采用前述同频切换策略;低空用户在空中小区切换则为异频切换,切换策略设计如下。

(a) 从地面小区到对空小区移动,推荐基于A2+A4的低优先级到高优先级异频切换策略。A2事件门限($RSRP_Thresh_A2$)可设置为适当高于常规值的保守值,以抑制过早触发;A4事件门限($RSRP_Thresh_A4$)则参照低空小区覆盖性能保障目标,设定为保障

目标业务速率(如5 Mbit/s@95%或25 Mbit/s@90%)所需的最低接收电平值。另外,也可以基于A5事件的复合判决策略,实现等效的优先级提升效果,构建“地到空易”的切换策略。

(b) 从对空小区到地面小区移动,推荐基于A2+A5的高优先级到低优先级异频切换策略。A2和A5_1门限可适当配置较低的宽松值,确保切换触发灵敏度;A5_2门限配置较高的值,可参考低空小区覆盖性能保障目标,设定为保障上行业务速率的临界电平,实现“空到地难”。

空闲态的重选配置策略可参考切换策略,实现连接态与空闲态策略的一致性。

通过上述分层策略的协同实施,可构建低空用户移动性管理的“三维空间走廊”:在水平维度实现空中小区间的高效切换,在垂直维度形成地对空切换的快速通道,以及空对地切换的准入壁垒,最终形成“空域驻留稳定、跨域迁移有序”的立体化移动性保障体系。

4.4 可靠性性能保障

低空业务(如无人机物流、城市空中交通等)对网络可靠性的要求显著高于传统地面网络。低空飞行器飞控数传类业务对网络覆盖提出业务信息的连续稳定、及时可靠传输等需求。此类业务一方面要求时延敏感型控制指令的传输时延控制在100 ms以内;另一方面需实现传输可靠性 $\geq 99\%$ (常规业务)和99.9%(安全关键业务)的分级保障,为低空端到端通信性能保障带来挑战。为提升网络可靠性,可采取如下解决方案。

a) 基站设备级容错设计。通过实施多层级冗余架构设计,包括主控传输单元的冷备份机制、基带处理模块的N+1冗余配置、电源系统的双路供电冗余以及关键硬件的可靠性强化设计,构建了故障隔离与自愈能力。该架构可在单点设备失效情况下维持核心业务连续性,通过故障域隔离技术降低服务中断概率,提升系统可用性指标。

b) 网络覆盖协同优化机制。采用多频段协同组网策略,基于智能波束赋形技术的自优化网络(SON)算法,可在单站点失效时自动触发邻区波束重构,结合站点密度优化实现空间冗余覆盖。

c) 传输链路冗余架构。回传链路可按需进行光纤、微波、卫星等多模传输冗余体系;传输设备层面实施板卡级1+1主备保护、交叉连接矩阵的多节点冗余配置,可实现传输链路故障的毫秒级切换,保障业务

连续性。

d) 跨系统异构备份方案。建立 5G NR/LTE/Wi-Fi/卫星通信的异构网络互备体系,在单一通信制式失效时,可确保关键业务的传输可靠性。

5 业务差异化保障体系

如前文所述,低空业务分为飞控数传类业务与视频图传类业务。不同的业务对低空通信网络的需求在数据传输速率、可靠性、稳定性等方面存在显著差异。为有效保障各类业务的差异化需求,可以采用针对性保障策略,具体如下。

a) QoS 保障。针对低空用户级保障需求,可基于专用默认承载(如 5QI7/QCI7)等进行用户识别,移动网针对不同专用默认承载用户进行调度优先级、差异化移动性策略、差异化功控策略等的相关配置。通常可以配置较高的调度优先级来为低空用户提供优于普通用户的速率保障,配置 Packet Delay Budget 等相关参数满足端到端时延要求,配置 prioritisedBitRate(如 kbps512)等相关参数满足一定的保障速率要求,以及关闭 DRX 功能等。针对飞控业务级保障需求,可通过飞控服务器 IP 地址及飞控业务特征 AI 识别,为飞控业务建立 5QI3 等 GBR 专载,提供更低时延(如 50 ms)及最小速率保障。

b) 基于切片的 5G 虚拟专网。在有数据隔离、专网专用等需求时,或在高网络负荷场景下,可以采用切片技术,在一定区域内(相关低空基站、小区)为特定低空用户或低空用户群体配置专用切片 ID,提供专用或优先 PRB 资源,实现更高的业务感知保障和数据安全保障。在此基础上可以为低空网络配置专用的 DNN 数据网络标识,引导低空终端接入,实现数据分流和专门的策略管理。

6 结束语

本文深入研究了 5G 移动通信、Wi-Fi 及卫星通信等多种搭建低空通信网的关键技术,构建了“以地面蜂窝网络为主体,融合多种通信技术”的立体通信体系,有效满足了低空飞行器在不同高度层、不同场景下的差异化通信需求。

在低空通信网性能保障方面,本文重点研究了低空通信网络的覆盖性能、干扰性能、移动性能、可靠性性能。此外,本研究还提出了基于用户识别的业务保障机制、基于网络切片的资源隔离技术以及基于业务

特征识别的保障策略,进一步保障了各类业务的差异化需求。

未来,随着新技术的不断发展和完善,低空智能网联通信保障体系将更加成熟和高效,为低空经济的规模化发展奠定坚实的通信基础。

参考文献:

- [1] MAMAGHANI M T, HONG Y. On the Performance of Low-Altitude UAV-Enabled Secure AF Relaying with Cooperative Jamming and SWIPT[J]. IEEE Access, 2019(7):153060-153073.
- [2] MENG HUA, YI WANG, ZHENGMING ZHANG, et al. Outage Probability Minimization for Low-Altitude UAV-Enabled Full-Duplex Mobile Relaying Systems[J]. 中国通信:英文版, 2018, 15(5):9-24.
- [3] 刘光海,李福昌,肖天,等. 低空移动通信网络组网方案研究[J]. 邮电设计技术, 2025(1):14-20.
- [4] 周立松,许鸿辉,李文彬,等. 低空无线网络规划[J]. 信息通信技术, 2024, 18(5):41-47.
- [5] 张琳,张涛. 5G 公网兼顾低空覆盖方案及性能测试[J]. 邮电设计技术, 2024(1):54-60.
- [6] 刘光海,李一,肖天,等. 5G 网络移动性能优化研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(10):1-5.
- [7] 张兰,冯登超,王晓宁,等. 低空领域下的异构网络性能研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(9):131-134.
- [8] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: 3GPP TR 38.901[S/OL]. [2026-01-07]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [9] 3GPP. Study on New Radio(NR)to support non-terrestrial networks: 3GPP TR 38.811[S/OL]. [2026-01-07]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [10] 周宏宇,李朝阳. 低空地空通信覆盖分析与仿真[J]. 信息通信, 2017(3):171-172.
- [11] 原野. 5G 无人机泛低空覆盖组网技术的应用研究[J]. 移动信息, 2025, 47(2):46-47.
- [12] 杨旭伟,顾均,陈凯,等. 5G 低空覆盖专网方案设计及实践[J]. 江苏通信, 2024, 40(5):18-22.
- [13] 冯盾,田宁,陆强,等. 5G 无人机泛低空覆盖组网关键技术研究[J]. 数字通信世界, 2023(3):17-20.
- [14] YANAN XU, JIANXIN QIN, PENGCHENG HE, et al. Application of UAV in Road Safety in Intelligent Areas[J]. 地理研究(英文), 2019, 2(4):15-21.
- [15] 赛迪顾问股份有限公司. 中国低空经济发展研究报告(2024)[R/OL]. [2026-01-07]. <http://hkjj.zua.edu.cn/info/1017/2824.htm>.

作者简介:

刘光海,正高级工程师,硕士,主要研究方向为无线新技术及网络智能运营;陈佳丽,工程师,硕士,主要研究方向为无线新技术及无线网建设策略;刘亚楠,高级工程师,硕士,主要研究方向为无线新技术及无线网建设策略。