

面向低空经济的 无线覆盖扩展技术思考与展望



Reflections and Prospects of Wireless Coverage Expansion Technologies for Low-Altitude Economy

盛敏/SHENG Min, 陈旭晖/CHEN Xuhui,
马兴业/MA Xingye, 赵晨曦/ZHAO Chenxi

(西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 中国
西安 710071)
(State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250227.0944.002.html>

网络出版日期: 2025-02-27

收稿日期: 2025-01-10

摘要: 低空经济的迅猛发展对面向低空的无线覆盖扩展提出了挑战。利用现有地面和空天通信系统为低空空域提供通信覆盖, 联合智能超表面等技术辅助低空通信将是未来的研究热点。梳理了低空立体无线覆盖技术, 指出了低空经济未来的研究方向。认为低空通信将耦合感知、定位功能, 提升面向低空空域的管控和服务能力, 实现低空智能互联与智能协同, 促进低空经济的进一步发展。

关键词: 低空经济; 地对空通信; 通感一体化

Abstract: The rapid development of the low-altitude economy poses challenges to the expansion of wireless coverage for the low-altitude airspace. In the future, utilizing existing terrestrial and space-air communication systems to provide communication coverage for the low-altitude airspace and combining technologies such as intelligent reflecting surfaces to assist low-altitude communication will be the research focus. This paper combs the low-altitude three-dimensional wireless coverage technologies and points out the future research directions of the low-altitude economy. It is believed that low-altitude communication will integrate sensing and positioning functions, enhancing the management, control, and service capabilities for the low-altitude airspace. This will achieve intelligent interconnection and intelligent coordination in the low-altitude area, and further promote the development of the low-altitude economy.

Keywords: low-altitude economy; ground-to-air communication; integrated sensing and communication

引用格式: 盛敏, 陈旭晖, 马兴业, 等. 面向低空经济的无线覆盖扩展技术思考与展望 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 48-52. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501008

Citation: SHENG M, CHEN X H, MA X Y, et al. Reflections and prospects of wireless coverage expansion technologies for low-altitude economy [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 48-52. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501008

1 面向低空覆盖的技术背景及难点分析

低空经济是指以 1 000 m 以下的低空空域为载体, 将民用载人和无人飞行器的各种低空飞行业务作为牵引的综合经济形态^[1]。随着客运货运、安全监控、遥感监测等低空飞行业务的日益增多, 低空经济的发展进入了新的阶段。

1.1 低空经济发展

从 2022 年到 2035 年, 中国低空经济市场规模的年均增长率预计为 6.9%。到 2028 年, 市场规模将达到 3.7 万亿元,

而到 2035 年, 低空经济的市场规模将达到 6 万亿元。这反映了低空经济的巨大潜力, 也表明它在未来十几年内将成为中国经济增长的一个核心领域。

低空经济发展的一个关键问题是如何实现低空高效通信。2017 年 5 月, 第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 发布了 TR36.777, 旨在评估和规范 LTE 网络在支持无人飞行器 (UAV) 通信时的性能标准^[2]。2021 年 12 月, 3GPP 确定了 Release 18 标准的内容, 将提升面向低空应用场景的网络功能和覆盖能力作为 5G 演进的方向之一。这标志着 5G-Advanced (5G-A) 演进的开始。2023 年 12 月, 3GPP 确定了 Release 19 标准的内容, 将非地面网络的演进作为 Release 19 无线接入网部分的主要议题之一, 并确定 5G-A 和 6G 将

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62121001、62301382); 陕西省重点研发计划项目 (2024CY2-GJHX-82)

提供更高的下行速率、更低的延迟,以及更高精确的定位功能^[3]。这为低空经济的进一步发展提供了技术支撑。业界广泛认为,利用地面网络实现低空覆盖、空天地一体化低空网络以及通感定一体化等,是面向低空经济无线覆盖扩展技术的可行发展方向。

1.2 面向低空覆盖的难点

现有5G移动通信系统的建设已经非常完备,但其组网结构主要面向地面覆盖设计,基站天线采用下倾角配置。现有的平面覆盖场景化波束主要面向楼宇、开阔广场和高层建筑提供覆盖,并没有专门针对低空空域的波束模式。如果直接沿用5G地面组网结构对低空进行覆盖,将存在以下问题^[4]:

1) 天线零位造成覆盖空洞。现阶段面向低空的通信覆盖,多数依靠基站天线的旁瓣信号以及多径反射信号。这些信号功率增益低、路径损耗大、覆盖性能较差。低空用户在移动过程中,很可能出现在基站的天线零位。如图1所示,低空用户完全无法收到覆盖服务,这会引发飞行故障等问题。

2) 同频干扰恶化服务水平。低空用户的飞行高度远高于天线,且与天线之间几乎没有障碍物。相比于地面通信中普遍的非视距(NLoS)信道,地对空信道大多是视距(LoS)的,如图2所示。这导致低空用户受到严重的同频干扰。数据显示,在相同的参考信号接收功率(RSRP)水平

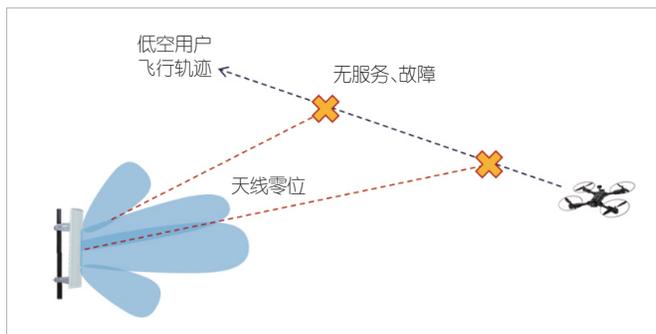


图1 天线零位引发故障示意图

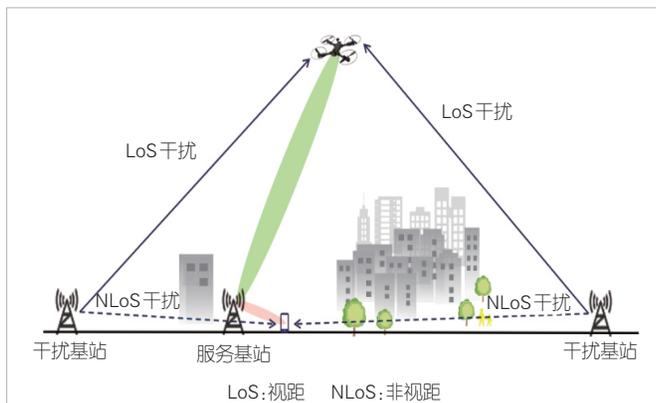


图2 地对地NLoS信道与地对空LoS信道对比示意图

下,低空用户处的信干噪比(SINR)要比地面用户平均高出10 dB^[4],低空覆盖性能遭受严重恶化。

3) 复杂邻区关系导致低空用户频繁切换,造成网络难以优化。与地面蜂窝覆盖相比,面向低空的覆盖将覆盖目标从传统的二维平面延伸为三维立体区域,使邻区关系发生变化。具体而言,面向低空覆盖时,来自不同基站扇区的波束交错重叠,低空用户同时被不同基站天线的主瓣或旁瓣信号覆盖。在这种情况下,用户关联方式将发生变化,用户接入的很可能不是距离最近的基站,加之低空用户的高动态特性,将导致用户频繁切换,从而带来巨大的信令开销。同时,邻区关系会随着低空用户飞行高度的上升变得复杂,如图3所示。传统用于地面移动通信网络的网络规划和优化方法将不再适用于低空网络。

考虑上述因素,需要设计新的覆盖方案以满足低空覆盖的特殊要求。

2 低空立体无线覆盖结构

利用5G移动通信系统现有的地面基础设施建设向低空进行通信覆盖扩展,是一种成本较低且可行的方式。尽管如此,仍需要重新思考立体覆盖结构和波束成形技术。

2.1 立体覆盖结构

由于基站发射功率有限,基站扇区波束的水平波束宽度和垂直波束宽度相互制约,因此可将基站每个扇区的波束轮廓建模成四棱锥。考虑到每个基站在水平方向部署多个扇区,可以利用基站波束对低空空域进行立体填充,形成“鱼鳞”组网^[5]、三棱柱网络^[6]等。鱼鳞组网中所有基站波束对准相同方向,为相邻小区正上方的空域提供覆盖,可使组网成本降1/3(与蜂窝结构相比)^[5]。三棱柱网络利用剖分将空域划分为多个三棱柱立体小区,多个基站波束共同对小区进行立体填充,基站扇区利用率较高。以同步信号RSRP(SS-RSRP) > -90 dBm为信号覆盖门限,可以在重叠覆盖率小于26%的前提下使空域信号覆盖率达到90%以上^[6],以实现低重叠无空洞覆盖。

2.2 波束成形技术

如果利用地面系统实现面向低空的覆盖扩展,基站则无法对正上方的空域进行波束覆盖^[7],也就无法直接复用地面基站波束,因此需要引入新的波束成形技术。波束成形技术设计需要兼顾以下几个方面:

1) 水平和垂直维度。受限于发射功率,扇区波束的水平宽度和垂直宽度相互制约,一旦需要覆盖的空域高度增

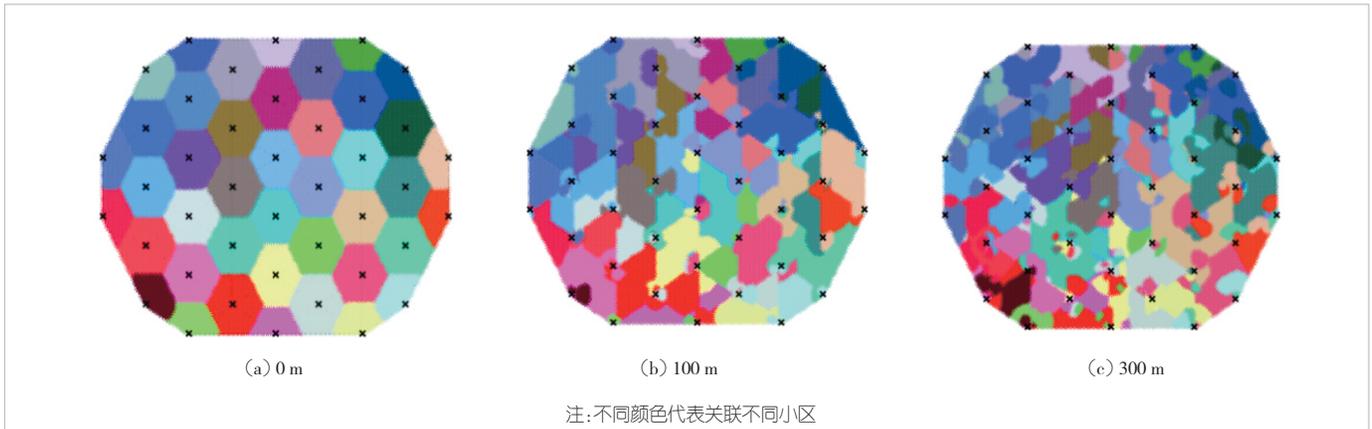


图3 低空用户处于不同飞行高度的邻区关系对比

加,提高垂直波束宽度势必会降低基站在水平方向的覆盖性能,因此需要利用波束轮廓特征实现波束自主赋形。

2) 波束灵活性与兼容性。在面向低空覆盖扩展的同时,地面的覆盖性能需要维持在理想水平,此时波束会在不同模式之间切换,因此需要具有高度的灵活性。同时,所设计的波束也要满足各种业务的技术需求,如感知、定位需求等,因此波束的兼容性也需要纳入考虑。

3) 信号覆盖与速率覆盖。为实现全域无空洞覆盖,不同基站扇区的波束间很可能会出现交叠。这会在低空用户处引起强烈的同频干扰,降低数据传输速率。因此,所设计的波束需要在信号覆盖和速率覆盖之间找到合适的折中。

3 低空立体无线覆盖方法

3.1 多基站协同覆盖技术

低空覆盖邻区关系复杂、同频干扰强烈,采用多基站协同覆盖是提升低空覆盖性能的可行方法之一。相比于单基站覆盖,多基站协同覆盖可以叠加来自不同基站的信号,共同为低空节点提供通信覆盖。这将显著增强低空节点的接收信号强度,同时有效降低小区内波束重叠引起的干扰。值得注意的是,由于低空用户干扰分布难以确定,邻区关系复杂,低空协同覆盖将不再局限于地面协同覆盖方式中的邻近基站协同。此外,多基站协同还可以有效降低低空节点接入小区的切换频率。低空节点具有高动态性,随着飞行任务的进行,往往会出现频繁的小区切换。多基站协同可以构建虚拟小区,减少小区数量,从而降低低空节点的接入切换频率,提高低空通信服务的连续性和稳定性。

3.2 空天地一体化网络技术

尽管利用地面蜂窝网络实现低空覆盖扩展具有较高的可

行性,但这种方式受限于地面网络部署范围,在偏远地区网络覆盖程度低,且受自然因素的影响较大。对此可以考虑利用空天网络面向低空进行端到端传输覆盖,作为地面向低空覆盖扩展的补充。空天网络包含高空平台和卫星网络,基于3GPP Release 17标准开发的新空口(NR)接口技术,可以实现面向低空的终端直连,不受地形地貌的限制,为低空节点提供随时随地的按需通信覆盖。

对于活动高度不同、业务需求不同的飞行器,可考虑将地面网络与空天网络结合,形成面向低空的空天地一体化网络。地面网络与空天网络两者优势互补,互为备份,为低空提供分层分域的多维多频泛在覆盖,实现全场景的按需接入。如图4所示,对于120 m以下的空域,可利用地面网络

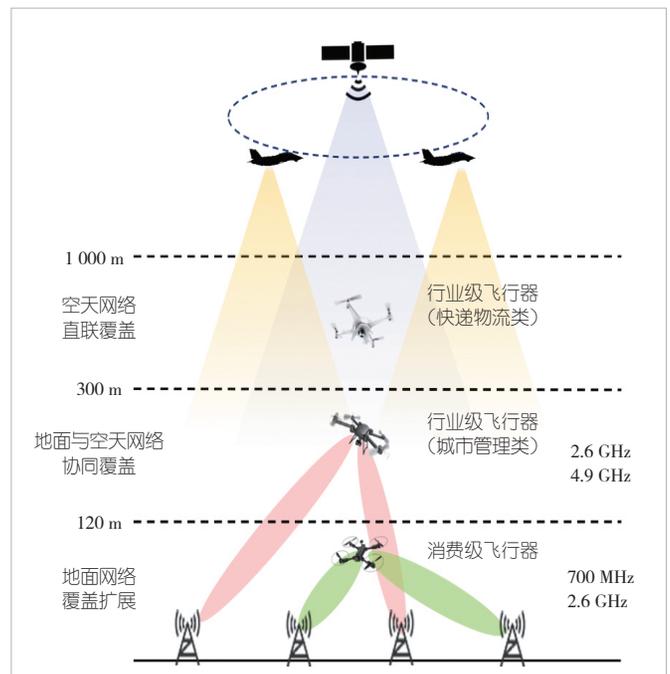


图4 空天地一体化低空覆盖场景示例

提供700 MHz和2.6 GHz的通信覆盖；对于120~300 m的空域，可采用地面网络2.6 GHz、4.9 GHz和空天网络协同覆盖；对于300 m以上的空域，可直接利用空天网络进行直联覆盖，实现全空域全场景的多维多频按需覆盖。这将有效促进低空经济的规范化、标准化以及进一步发展。

3.3 低空节点协同覆盖技术

低空节点协同可以在资源受限的场景下保障每个节点都能够得到服务。例如，基础设施部署较少的区域可能无法为所有低空节点提供直接覆盖，而低空节点通过协同动态组网，可实现基站到任意低空节点的多跳覆盖。在此基础上可进一步引入智能化决策机制，通过中心式的智能决策生成网络拓扑。例如，按照业务需求、信号强度等特征确定低空节点分簇方式，并实现低空节点拓扑的动态调控，从而实现更高效、更可靠的低空通信。随着低空飞行器及智能化的持续发展，未来各类飞行器将会搭载智能处理器，以实现低空节点的通算一体化。通过实时处理通信数据、智能分配通信资源和算力，可显著提高节点协同效率，从而为对时效性要求更高的低空飞行业务提供有力支撑。

4 地对空覆盖扩展实践效果及不足

目前中国运营商及相关企业都在着力建设面向低空覆盖的试验基地。我们联合中国移动成都产业研究院在四川省自贡市建立了地对空覆盖扩展试验基地。该基地包含10座实验级5G独立组网(SA)基站和7座公共基站，采用5G NR体制和2.6 GHz n41频段。依托试验基地，我们对300 m以下的立体空域进行了信号覆盖测试，测试结果表明，以SS-RSRP>-90 dBm为信号覆盖门限，全域信号覆盖率>94%。

尽管目前在地对空覆盖实测中可以实现良好的低空信号覆盖率，但仍存在几点不足。

1) 目前测试基地多建立于城郊，且测试所用终端较少，所受地面基站同频信号影响较小。在未来实际应用阶段，低空网络主要应用于城市场景，地面同频基站及低空用户增多。在这种情况下，如何保证和实测中相同的信号覆盖水平仍是一大挑战。

2) 低空飞行业务对高速数据传输和实时性要求较高。实现信号覆盖仅是面向低空通信的第一步。在确保信号覆盖的基础上，保障低空飞行航线指定区域的高速数据传输是未来发展的重中之重。

3) 低空通信不能完全依靠专网，这是因为它的修建和维护成本过于高昂。面向低空覆盖的网络需要和对地覆盖网络融为一体，通过智能基站动态调整覆盖模式，

实现低空/地面用户的无感切换、流畅服务。

5 低空经济未来的研究方向

5.1 低空通信与智能超表面

智能超表面(RIS)是由大量可编程元件组成的平面，每个元件可以被独立地编程调节，从而实现入射信号幅度和相位的智能调控^[8]。RIS可分为反射式RIS(R-RIS)、透射式RIS(T-RIS)以及同时透射及反射式RIS(STAR-RIS)，可针对不同应用场景辅助低空通信。

1) 密集城市场景：密集城市场景中楼宇林立，波束受遮挡严重，难以实现有效的直接覆盖。对此，可考虑在大厦侧墙上部署R-RIS，反射并增强来自地面和空天网络的信号波束，同时动态调整反射系数，消除来自其他基站波束的同频干扰，提高低空覆盖的有效性。

2) 城郊场景：城郊场景下能够部署R-RIS的载体较少，但由于信号遮挡不严重，因此可直接将T-RIS与地面基站天线结合，利用T-RIS的透射特征，操控电磁波的辐射特性，协同空天直连覆盖，实现不受现有波束模式限制的灵活低空覆盖。

3) 混合场景：对于覆盖需求种类多的场景，如同时面向低空及高层楼宇覆盖，可考虑将楼宇侧墙玻璃替换为STAR-RIS，通过灵活调整STAR-RIS的透射系数和反射系数，实现低空空域及高层楼宇室内的同时覆盖。

RIS具有低成本、低能耗、易部署的优点，相比于部署大量的基础设施和大规模天线阵列，通过部署大量低成本的、元件规模大的RIS来等效超大规模天线，可获得更高分集增益，实现更高能量效率、频谱效率的低空通信，并有助于提升感知定位精度。

5.2 通信感知定位一体化

目前，面向低空空域的管控和服务能力不足，这无疑限制了低空经济的发展。通过整合通信、感知、定位功能，网络可以在提供通信服务的同时收集周边环境的信息。这有助于降低网络部署难度，减小设备体积，并增强用户体验，提升定位精度。感知和定位功能赋能通信系统，实现高指向大增益通信。通信感知定位一体化关键技术研究涉及协议体系架构设计、天线设计等方面，需要兼顾通信、感知、定位业务需求及功能实现。在协议体系架构方面，可以复用5G核心网功能网元及架构，新增感知定位模块，并通过验证用户隐私设置，确保感知定位服务的合规性。在天线设计方面，需要兼顾异频天线的融合和天线的轻量

化。在此基础上,有望依托集中和分布协同、分布式自治网络实现空天地协同的高效通感定一体化。

6 结束语

低空经济正处于关键技术突破及技术标准化的重要阶段。低空经济相关的飞行业务具有特殊性,对数据传输速率和实时性需求较高。这面向低空的覆盖扩展技术提出了挑战。本文介绍了利用现有地面通信系统向低空提供覆盖扩展的相关技术,例如协同覆盖、空天地一体化网络等,并梳理了低空通信与智能超表面结合、通感定一体化等研究方向,以支撑低空通信的后续研究。中国移动等运营商已建立5G-A低空专网,开展面向低空覆盖扩展的演示验证,部分网络已投入实际应用。无线通信系统服务对象的主体仍是地面用户,因此,在保障低空通信的同时,确保地面用户拥有高质量服务仍是无线通信系统的首要任务。因此,如何实现低空专网和现有5G网络的兼容仍需要深入研究。3GPP未来发布的Release 19正式标准以及后续版本标准将进一步规范面向低空的覆盖扩展技术。

参考文献

- [1] 中国政府网. 首次写入政府工作报告——“低空经济”加速起飞 [EB/OL]. (2024-04-02) [2024-11-25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202404/content_6943071.htm
- [2] 3GPP. Study on enhanced LTE support for aerial vehicles (Release 15): 3GPP TR 36.777, V0.0.1 [S]. 2017
- [3] 3GPP. Radio resource control (RRC) protocol specification (Release 18): 3GPP TS 38.331, V18.0.0 [S]. 2024
- [4] 福建移动. 中国移动(成都)产业研究院, 华为技术有限公司, 等. 基于5G通信技术的无人机立体覆盖网络白皮书 [R]. 2021
- [5] 中国移动. 低空智联技术体系白皮书 [R]. 2024
- [6] 盛敏, 雷松涛, 刘俊宇, 等. 基于三角剖分优化的地对空无空洞协同覆盖方法: CN113596856B [P]. 2022-05-17
- [7] LIU J Y, SHENG M, LI J D, et al. Ground-to-air wireless coverage extension for 6G: a triangular prism structure-based approach [J]. Science China information sciences, 2024, 67(12): 224301. DOI: 10.1007/s11432-024-4221-x
- [8] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial [J]. IEEE

transactions on communications, 2021, 69(5): 3313-3351. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3051897

作者简介



盛敏, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 空天地一体化综合业务网全国重点实验室主任, 科技部6G总体专家组成员, IEEE西安分会副主席, 中国电子学会会士, 国家级创新团队负责人, 青年女科学家团队负责人, 国家精品在线课程负责人, 担任《IEEE Wireless Communications》《China Communications》等多个期刊的编委会委员; 主要从事空间信息网络、移动通信网络、异构网络融合、无线自组织网络等领域的研究工作; 获国家技术发明奖二等奖2项、省部级一等奖3项。



陈旭晖, 西安电子科技大学在读博士研究生; 研究方向为空地一体化网络性能分析、低空网络组网等。



马兴业, 西安电子科技大学在读本科生; 研究方向为低空网络组网。



赵晨曦, 西安电子科技大学副教授、硕士研究生导师, 空天地一体化综合业务网全国重点实验室成员, 中国通信学会高级会员, 中国电子学会会士; 主要从事空地一体化网络组网及资源调度、低能耗移动通信网络资源调度、移动通信网络边缘缓存、多智能体强化学习等方面的研究工作。