



XXXX

低空3.5GHz双载波网络覆盖解决方案研究

魏明烁, 谢伟良

(中国电信研究院, 北京 102209)

摘 要: 低空经济作为一种新兴的综合经济形态, 引起了广泛关注。该领域在现代社会中展现出巨大的发展潜力和战略价值。然而, 低空经济的发展同样面临着诸多挑战。目前, 地面网络对低空的覆盖主要依赖于波束的上旁瓣, 这种覆盖方式难以满足低空立体、广域覆盖的需求。鉴于此, 迫切需要对低空网络的覆盖质量进行提升。在低空经济活动中, 无人机作为一种典型的应用工具, 其低空业务的执行不可避免地涉及到垂直起飞和降落过程。在此过程中, 确保无人机能够实现网络的平滑切换和稳定接入, 成为了一个关键的研究议题。利用3.5GHz频段覆盖低空, 提出双载波空地异频和双载波空地同频两种方案, 并探讨在无人机垂直起降过程中如何部署以保障其网络接入的稳定性与切换的平滑性。通过现场测试对所提方案进行了验证与分析, 两种方案均可以提升低空覆盖的性能, 同时针对无人机垂直起降提出了网络部署建议。

关键词: 低空经济; 广域覆盖; 无人机; 垂直起降

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.DXKX250080

Research on the Coverage Solution of the Dual-Carrier Network at 3.5 GHz in Low Altitude Areas

WEI Mingshuo, XIE weilang

China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China

Abstract: Low - altitude economy, as an emerging comprehensive economic form, was widely concerned. Great development potential and strategic value were demonstrated by this field in modern society. However, the development of low - altitude economy was also faced with numerous challenges. At present, the coverage of low - altitude area by the ground network mainly relied on the upper sidelobes of the beam, and this coverage method was difficult to meet the requirements of three - dimensional and wide - area coverage of low - altitude area. In view of this, it was urgent to improve the coverage quality of the low - altitude network. In low - altitude economic activities, as a typical application tool, the execution of low - altitude operations by unmanned aerial vehicles (UAVs) inevitably involved the ver-

收稿日期: 2025-02-20; 修回日期: 2025-02-26

通信作者: 魏明烁, weims@chinatelecom.cn

基金项目: 移动信息网络国家科技重大专项 5G-A 通感融合组网关键技术研究与验证 (2024ZD1300200)

Foundation Items: Research and Verification of Key Technologies for Integrated Communication and Sensing Networking in 5G-Advanced under the National Science and Technology Major Project of Mobile Information Networks (2024ZD1300200)



tical take - off and landing processes. During this process, ensuring that UAVs could achieve smooth network handover and stable access became a key research topic. In this study, the 3.5GHz frequency band was utilized to cover the low - altitude area, and two schemes, namely dual - carrier air - ground different - frequency and dual - carrier air - ground same - frequency, were proposed. Also, how to deploy during the vertical take - off and landing of UAVs to ensure the stability of network access and the smoothness of handover was explored. In this paper, the proposed schemes were verified and analyzed through field tests. Both schemes could improve the performance of low - altitude coverage. At the same time, network deployment suggestions were put forward for the vertical take - off and landing of UAVs.

Key words: Low - altitude economy, wide - area coverage, unmanned aerial vehicle, vertical take - off and landing

1 引言

随着无人机技术在传统产业的关键生产运行环节中的逐渐融合,其展现出显著的优势,包括提升作业效率、降低运营成本以及减少操作风险[1]。在民用领域,低空经济的发展不仅促进了无人机设备市场的增值,作为新型基础设施的重要组成部分,它亦在回馈并促进传统产业的全面进步。新兴商业模式,如“无人机+农业[2]”、“无人机+医疗[3]”和“无人机+物流[4]”,正在加速推动传统产业的转型[5]。未来,伴随着5G/6G(5th Generation Mobile Communication Technology/6th Generation Mobile Communication Technology, 第五代移动通信技术/第六代移动通信标准)、人工智能等前沿技术的不断发展,低空经济预计将为各个行业带来新的增长动力和机遇[6]。本研究领域的发展趋势表明,低空经济将成为推动产业创新和经济增长的重要力量。

与地面网络以下行为主的业务场景不同,低空经济领域的应用场景主要表现为以上行业业务为核心[7]。具体而言,无人机巡检及测绘等应用场景对上行回传数据量有较高的需求,同时对通信带宽的要求亦颇为严格。在4K高清视频回传方面,低空通信网络的上行边缘速率需达到25Mbps以上[8],以满足实时传输的需求。随着无人机高清视频回传标准的进一步提高,低空网络在支持无人机上行容量方面将面临更为严峻的

挑战。因此,针对低空通信网络的技术创新和性能优化,已成为推动低空经济发展的关键研究领域。

为了快速提升低空网络服务能力,需尽快开展利用现有5G网络设备低成本开展低空网络规划与建设。优化设计3D波束垂直分层技术,突破传统二维平面无线组网模式,实现空地一体三维组网。加快研究5G-A(5G-Advanced)空地一体组网创新方案以及新型空地一体天线技术,降低空地协同优化和移动性管理难度,减少空地小区之间无线干扰,解决低空覆盖碎片化难题,提升地面用户与低空用户的网络体验。同时在无人机垂直起降的过程中,需要确保无人机能够实现网络的平滑切换和稳定接入。

本文经过大量现网调研和现有基站覆盖低空测试,发现未经任何优化的网络对低空的平均覆盖率非常低,覆盖性能也无法满足需求。同时经过我们对设备厂家的充分调研,发现现有的方法是在一个站点同时部署两个AAU(Active Antenna Unit, 有源天线单元)设备,一个AAU朝向低空覆盖,另一个AAU朝向地面覆盖。但是如此会大大降低部署灵活性,同时大幅增加部署成本,且设备的增多注定意味着功耗的增大,也不符合绿色节能的宗旨。

因此本文提出的方案,在不增加设备的情况下,利用现有的地面3.5GHz网络,剩余的100MHz带宽资源,实现与地面公共网络异频或

者同频部署。不增加部署灵活性而且不增加建网成本，能够实现对低空的专网覆盖。

在本文后续部分，我们将对所提出的低空网络覆盖方案进行理论层面的深入分析，并通过实地测试来验证其性能与可行性，旨在为低空网络的部署提供科学依据和具体建议。第二章将详细阐述我们提出的低空覆盖方案，包括其设计原理和技术细节。第三章将呈现我们在商业网络环境中进行的现场测试结果，并对这些结果进行详尽的分析，以评估方案的实际效果。最终，第四章将总结本文的研究成果，并给出相应的结论。

2 低空覆盖方案

2.1 低空覆盖频率方案

在中国电信的公共网络频谱部署中，主要采用了3.5GHz、2.1GHz、1.8GHz以及800MHz等频段。其中，3.5GHz频段作为5G网络的主要容量层，其主要覆盖范围为城市核心区域及经济较为发达的县城。2.1GHz频段则被用于4G及5G网络，其部署重点在于县域、乡镇、农村地区以及部分城市的热点区域[9]。1.8GHz频段作为4G网络的容量层，其覆盖范围包括城市区域、县域、乡镇以及经济较为发达的农村地区。而800MHz频段，作为4G及5G网络的基础覆盖层，已经经历了5G网络的重耕，并优先在农村地区进行了

网络建设。如图1所示。

在800MHz频段，存在带宽资源的局限性，其容量受限，难以满足低空通信对于大上行数据传输的需求。对于2.1GHz频段，由于清频过程复杂，难以为此低空网络应用分配专用频谱资源。而1.8GHz频段目前专用于4G网络，若转向低空通信应用，则需进行网络重耕。然而，鉴于1.8GHz频段现网承载的较高负荷，在短期内难以实现为低空通信提供专用频谱的覆盖。

相较而言，3.5GHz频段具备较宽的带宽资源，其容量能够充分满足低空通信的需求，并且具备开通双载波的能力，从而构建专门针对低空覆盖的网络[10]。目前，地面3.5G网络中开通双载波的区域较为稀少，因此低空网络可以利用剩余的100MHz带宽资源，实现与地面公共网络异频或者同频部署。据此，本研究建议考虑利用中国电信现有的3.5GHz频段设备，以实现低空区域的专门覆盖。此方案不仅能够有效利用现有资源，而且有助于提高低空网络的服务能力。

2.2 低空覆盖波束方案

鉴于3.5GHz频段的大带宽特性[11]，本研究所提出的方案旨在利用100MHz的带宽资源实现对空覆盖的专用网络。此外，3.5GHz频段的七个SSB（Synchronization Signal Block，同步信号块）波束具备调整和优化的灵活性[12]。具体而言，

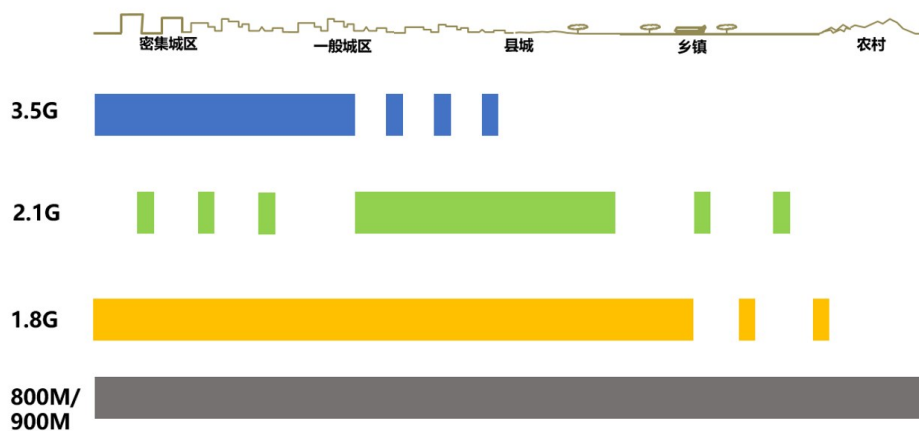


图1 中国电信的网络频率



本方案涉及对 3.5GHz 频段的七个 SSB 波束进行波束分层处理，形成三波束与四波束的组合结构。其中，上层的三波束定向于空中，旨在为低空用户提供覆盖服务。而下层的四波束则指向地面，旨在服务于地面用户群体。该波束配置的具体布局如图2所示。

进一步提出了两种不同的部署策略，分别为双载波异频部署和双载波同频部署，具体示意图分别展示于图3和图4。在图3所示的双载波异频部署方案中，实施了一种策略，即仅在对地基站激活第一个载波，而对空基站则激活两个载波。在此配置下，第一个载波专用于地面覆盖，而第二个载波则实现地面与低空的同时覆盖。值得注意的是，对空基站的对空载波与对地基站的对地载波之间采用异频部署策略。相对地，图4展示的是双载波同频部署方案，其中对地基站和对空

基站均激活双载波。在此方案中，第一个载波同样专用于地面覆盖，而第二个载波则承担地面与低空的覆盖任务。在此部署中，对空基站的对空载波与对地基站的对地载波采用同频部署方式。

通过对现有 3.5GHz 地面 5G 网络的调研分析，发现未经任何优化的网络对低空的平均覆盖率仅为 38.1%。同时，SINR（Signal to Interference plus Noise Ratio，信号与干扰加噪声比）为 -3.7dB，而上行边缘速率不足 5Mbps。据此可以得出结论，现有的地面通信网络在未经调整的情况下，难以满足低空业务的需求。同时无人机的垂直起降过程，需要满足平滑的切换和稳定的接入，这对于网络部署时的要求也是比较严格。

所提出的波束方案与部署方案在理论层面上旨在有效解决低空覆盖不足的问题。为了验证该方案的实际效果，在商用网络环境中进行了现场

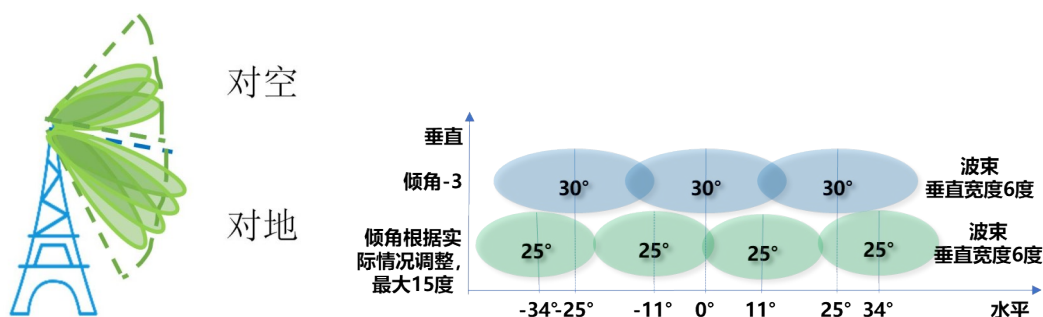


图2 3.5GHz 4+3 波束分层方案

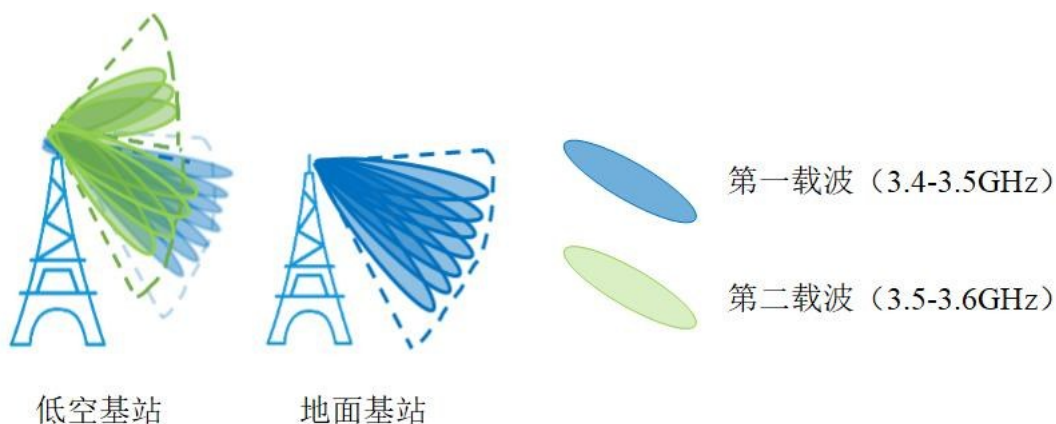


图3 双载波异频方案

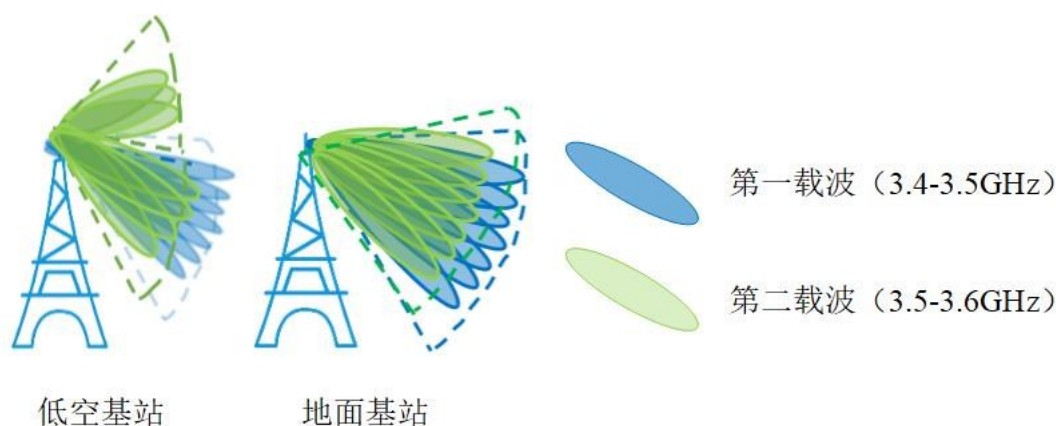


图4 双载波同频方案

测试，并进行了详尽的数据分析。通过这一过程，旨在得出关于方案有效性的实证结论。

3 外场测试和分析

3.1 测试环境

采用无人机开展飞行网络测试。具体而言，于3.5GHz网络连续覆盖区域内，综合考量城市的实际状况，在试点区域中选取现网3.5GHz基站数量2% - 3%的基站作为对空基站。为确保测试结果具有代表性和稳定性，所选对空基站遵循均匀分布原则，站间距基本维持一致，详细分布情况见图5。

为全面评估同频与异频方案的性能，分别针

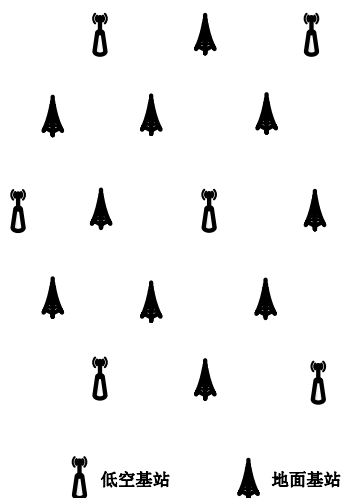


图5 低空网络组网方案

对这两种方案展开测试。在100米、200米以及300米高度处，均实施了两种方案的组网测试，以获取不同高度条件下的准确数据。为确保遍历所有测试基站，精心设计了水平与垂直折返的测试路线，具体路线详见图6。

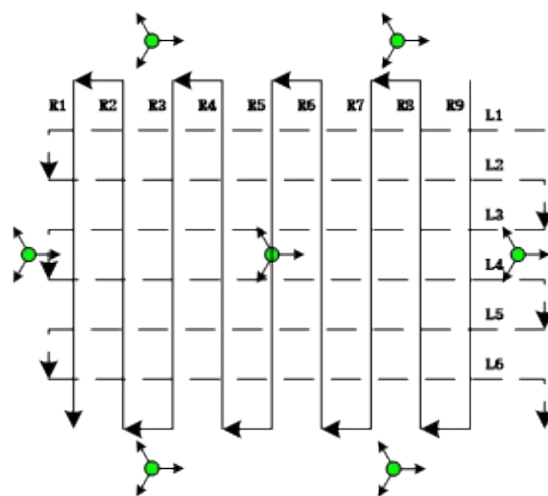


图6 低空组网测试飞行路径

依据图6所示，飞行测试路径的规划应确保全面覆盖特定测试高度下的整个测试区域。具体而言，在东西向与南北向，飞行测试路径需呈均匀分布状态，且同一方向上相邻两条飞行测试路径之间的间距不得超过1km。同时，为保证测试的完整性与准确性，需至少规划一条飞行测试路径从测试基站正上方通过，且东西向和南北向各自的飞行测试路径数量均应不少于7条。



除此之外，进一步对无人机的垂直起降过程展开测试，旨在探究无人机于垂直起飞与降落阶段能否稳定接入网络，维持不掉线状态，进而评估其在垂直起降过程中的业务保持能力。在测试时，将终端业务配置设定为普通优先级。测试位置选取在测试小区天线的法线方向，以及分别顺时针和逆时针偏转60度的方向上，以500m为步长，共选取9个测试点，其中第一个测试点设置为尽可能靠近基站处。具体测试点位如图7所示。

低空通信网络测试系统配置如表1所示。由于3.5G 32TR设备天线垂直3dB包络为12~13度，为3.5G 64TR天线垂直3dB包络（24~25度）的一半，采用3.5G 32TR AAU设备试点的区域需格外地面网络改造后的空地覆盖性能。对空基站开通第二载波后，建议不降低第一载波发射功率，以不影响地面网络原有覆盖。可以根据实际情况

打开第二载波的SSB PowerBoosting功能。

表1 低空通信网络测试系统配置

参数	3.5G 设备
设备形态	64TR/32TR AAU
信道带宽	200MHz
帧结构	TDD/2.5ms 双周期
子载波宽度	30kHz
循环前缀（CP）	Normal CP
编码调制方式	下行：256QAM 上行：256QAM
第一载波输出功率	200W
第二载波输出功率	120W

3.2 测试结果

双载波异频方案与双载波同频方案的测试结果如图8与图9所示。测试涵盖了100m、200m和300m 高度，呈现出不同高度下两种方案的性能表现。

图8呈现了不同高度条件下无人机异频组网

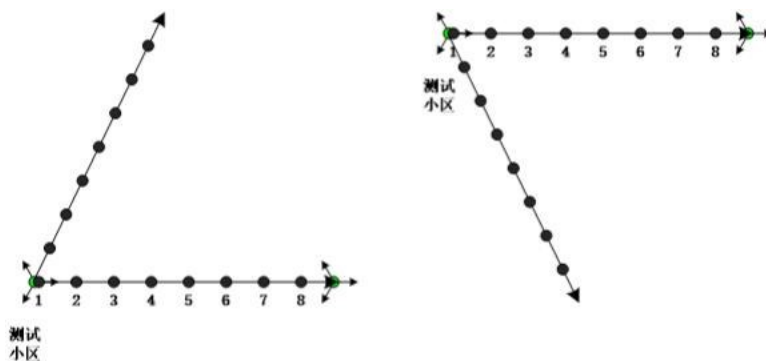


图7 无人机垂直起降测试点位示意图

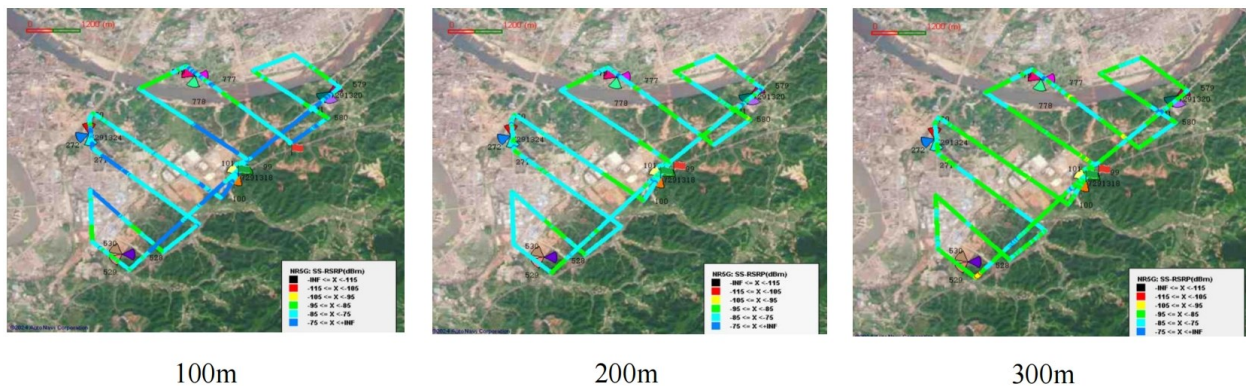


图8 双载波异频方案测试结果

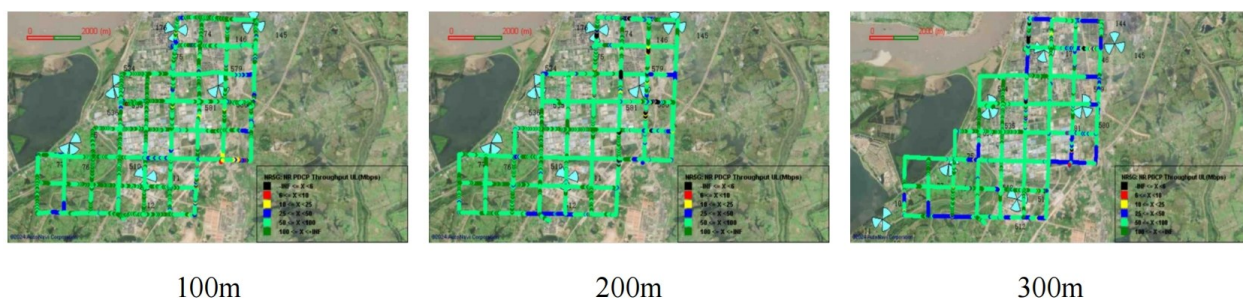


图9 双载波同频方案测试结果

测试的RSRP (Reference Signal Receiving Power, 参考信号接收功率) 结果。通过对测试数据的详细分析与统计可知, 在100米、200米和300米高度下, 其平均覆盖率分别达到了97.99%、96.12%以及88.72%, 表明三种高度下的覆盖效果均较为理想。图9则展示了不同高度下无人机同频组网测试的RSRP结果, 经分析统计, 在100米、200米和300米高度时, 平均覆盖率分别高达91.98%、85.19%以及76.16%, 同样显示出三种高度下良好的覆盖效果。

图10、图11与图12分别呈现了双载波异频方案和双载波同频方案测试结果中的RSRP、SINR以及上行边缘速率。经分析可知, 相较于未作任何调整的情形, 双载波异频方案测试结果

中的RSRP、SINR以及上行速率均有显著提升。其中, SINR提升幅度为5.95dB~10.04dB, 上行速率提升幅度达31.42Mbps~42.16Mbps。同时, 随着高度的增加, 该方案对应性能呈相对降低趋势, 这主要归因于无人机与基站之间的距离增大。此外, 双载波同频方案测试结果中的RSRP、SINR以及上行速率相较于未调整情况同样有显著提升。具体而言, SINR提升幅度在3.52dB~6.98dB之间, 上行速率提升幅度则在34.67Mbps~38.38Mbps区间。

在双载波方案的研究中, 对双载波同频方案与双载波异频方案进行了对比分析。经测试数据表明, 在异频方案下, 不同高度的平均RSRP、SINR以及上行边缘速率, 相较于同频方案, 分

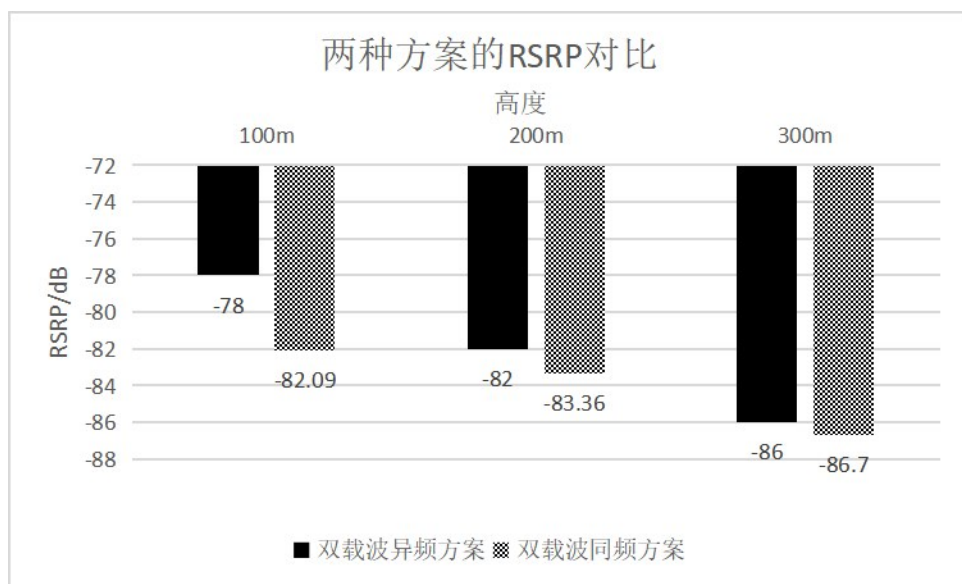


图10 两种方案测试结果RSRP对比

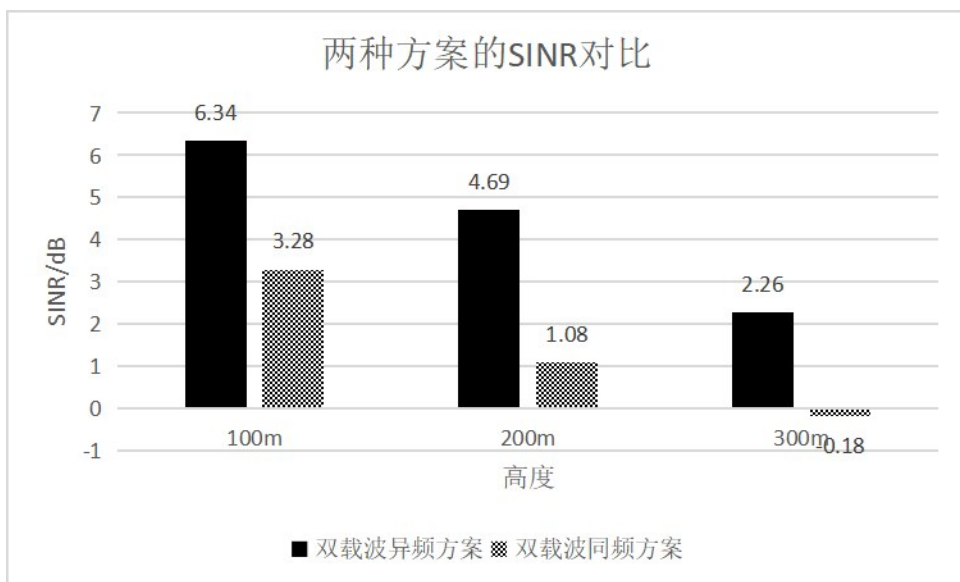


图 11 两种方案测试结果SINR 对比

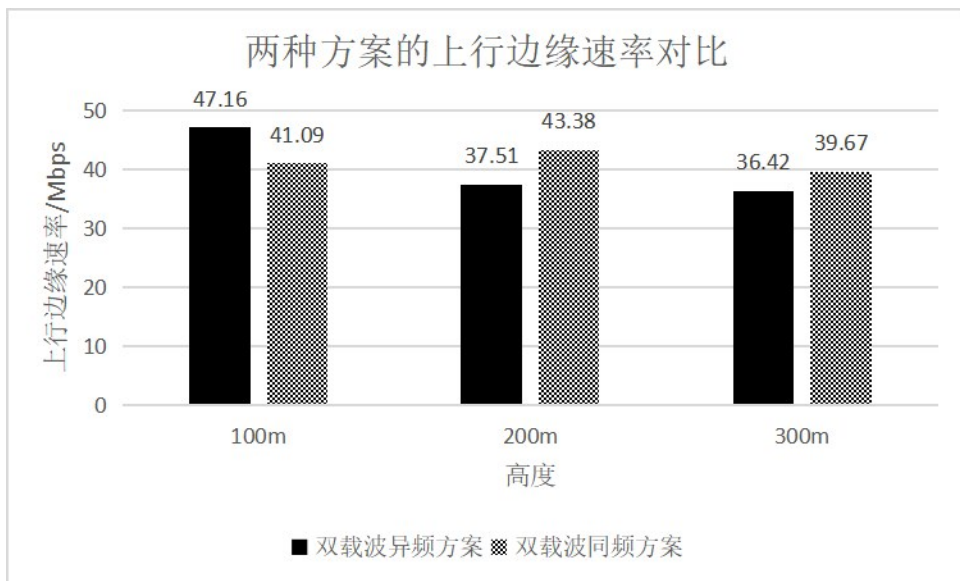


图 12 两种方案的上行边缘速率对比

别提升了 2.05dB、9.11dB 以及 6.07Mbps。基于上述测试结果，相较于双载波同频方案，双载波异频方案在低空网络性能提升方面表现更为显著，可实现更高的低空覆盖率。这主要归因于双载波同频部署时，不可避免地会产生一定程度的同频干扰[13-15]，进而导致低空区域在整体覆盖中占比较低，同时低空用户的网络性能也会受到负面影响。

为评估低空的空域覆盖能力，对无人机垂直起降过程中的业务保持能力进行了测试。实验设定低空用户的 5QI (Quality of Service Class Identifier, 服务质量等级标识) 为 7，普通用户的 5QI 为 6；同时，在基站侧针对 5QI 为 7 的低空用户，配置了特殊的移动性策略，以保障低空用户的占比。测试结果如图 13 和图 14 所示。分析测试数据可知，在法线方向与法线偏 60 度方向上，随着

测试点位与基站距离的增加，占用测试小区的比例呈下降趋势，而切换至测试小区的高度则逐渐升高。

此外，依据测试结果，呈现出两种典型场景，具体可参照图 15 和图 16。第一种场景下，如图 15 所示，塔顶上空由测试小区的上旁瓣予以覆盖，于塔顶（A0 点位）处，平均 RSRP 为 -76.4dBm，平均 SINR 为 9.4dB，上行平均速率高于 85Mbps，下行平均速率高于 310Mbps；第二种场景表现为，塔顶上空由周边低空邻区信号覆盖，如图 16 所示，塔顶（AB1 点位）的平均 RSRP 为 -80.5dBm，平均 SINR 为 3.5dB，上行平均速率高于 57Mbps，下行平均速率高于

230Mbps。值得注意的是，塔顶区域的低空主要由旁瓣覆盖，其信号强度相较于邻站的主瓣信号可能较弱。

针对不同场景的典型点位也展开了深入分析。以图 15 和图 16 为参照，在站顶区域，选取 A0 点位作为场景一下的塔下点位进行研究。该点位所处的塔顶区域由本小区上旁瓣予以覆盖，在垂直起降过程中，能够实现 100% 接入低空测试小区。而 A1 点位作为场景二的塔下点位，其塔顶区域则由周边低空邻区信号进行覆盖，在垂直起降过程中，接入其他低空小区的比例为 60%，接入测试小区的比例为 40%。在非站顶区域，场景一的 A3 点位在垂直起降过程中，呈现

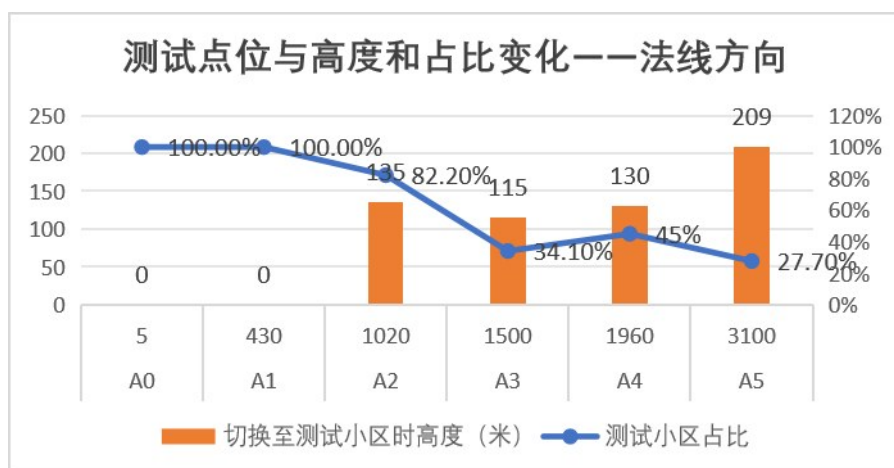


图 13 垂直起降法线方向测试结果

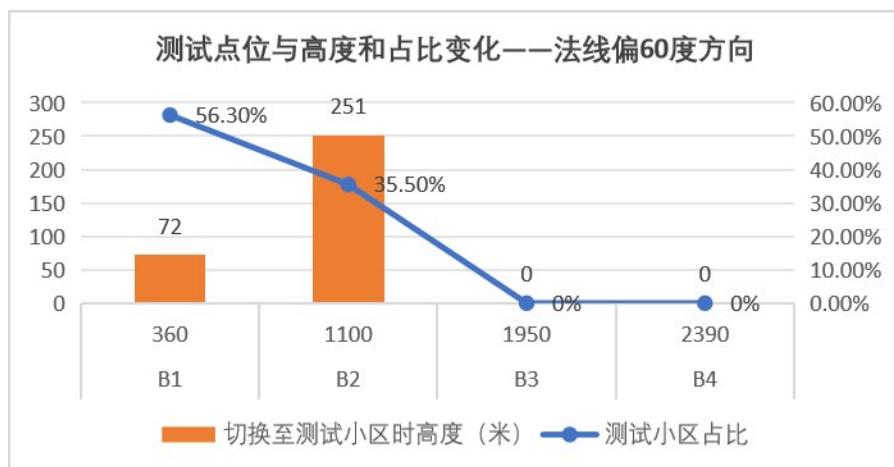


图 14 垂直起降法线偏 60 度方向测试结果

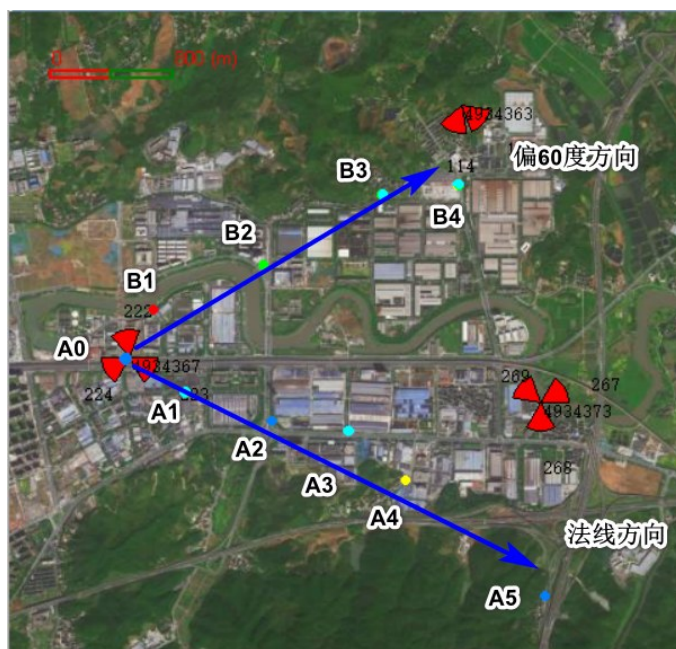


图15 无人机垂直起降场景一



图16 无人机垂直起降场景二

出在地面小区、测试小区以及周边其他低空小区之间平滑切换的状态。场景二的A4点位在大部分情况下，会接入周边低空小区。相关点位的具体表现及切换情况，均直观呈现于图17之中。

4 结束语

在本研究中，所有测试结果均基于商用5G网络获取。首先，对低空网络的现状与存在问题展开深入剖析，研究发现其存在低空覆盖严重不

足、空地协同优化难度较大等问题。随后，进一步分析中国电信的频率特性，确定适用于低空覆盖的3.5GHz频率。在此基础上，提出3.5GHz波束优化方法，即将波束划分为4+3的两层结构，分别用于对空和对地覆盖。同时，提出双载波异频部署与双载波同频部署两种网络部署方式，并基于此进行理论分析与现场测试验证。此外，还对低空小区立体空域的覆盖能力进行评估，以确保无人机在起降过程中能够稳定接入网络开展

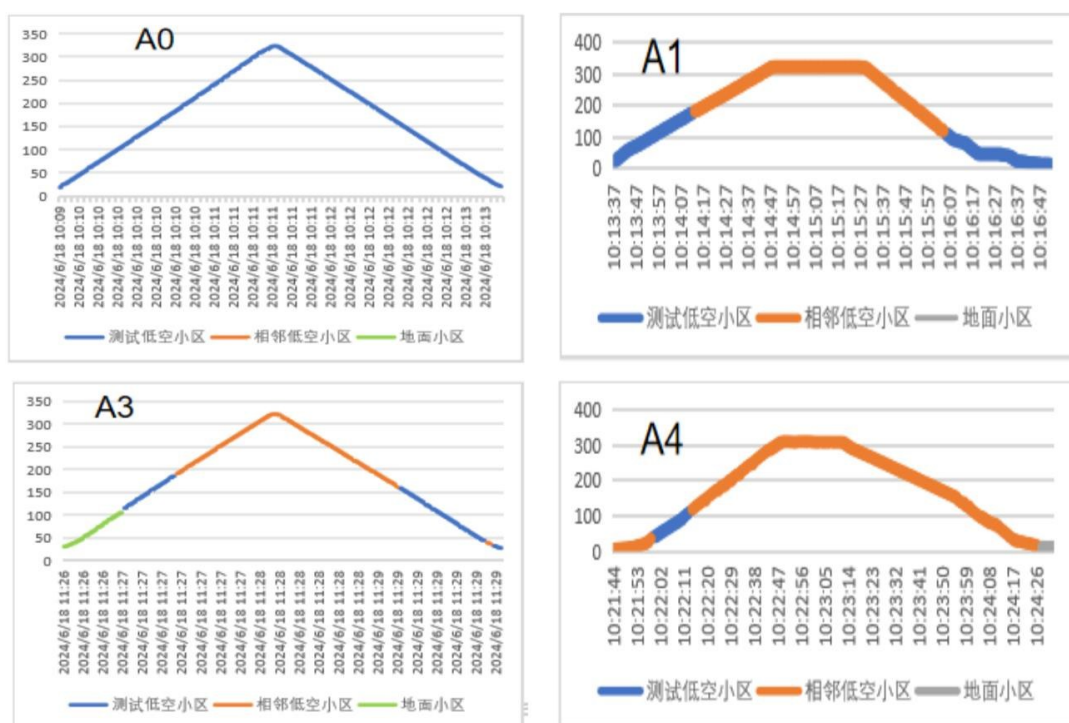


图17 垂直起降两种场景的典型点位分析

业务。

本研究在商用网络环境下开展实际测试，此为无人机于商用网络中的首次测试，具有开创性意义。研究分别针对基于4+3波束方案的异频组网模式与同频组网模式进行测试。结果显示，所提出的波束方案能显著提升低空覆盖效果，异频组网模式下，低空上行速率提升31.42Mbps~42.16Mbps；同频组网模式下，低空上行速率提升34.67Mbps~38.38Mbps。此外，对无人机垂直起降的测试结果表明，塔顶上空的覆盖情况存在两种可能：一是由本站上旁瓣进行覆盖，二是由相邻低空基站进行覆盖。基于此，建议在站点选址时进行合理规划，尽量避免天线直接对打，力求实现低空基站塔顶空域由本站覆盖，防止邻区低空站越区覆盖。同时，通过为低空用户配置合理的5QI移动性策略，可使无人机在垂直起降过程中，于地面小区、测试低空小区以及相邻低空小区之间实现平滑切换。

通过现场测试，已验证本文所提出的方案在

提升低空覆盖效果方面具有显著成效。然而，鉴于低空经济场景的多样性和复杂性，此次测试内容无法涵盖所有应用场景。因此，后续研究有必要对其他场景以及用户行为展开深入探索。本文将持续聚焦低空网络覆盖领域，深入研究并解决同频组网中可能出现的严重干扰问题，以及低空越区覆盖导致的用户频繁切换问题。

未来，低空经济智能化与通感融合的发展趋势愈发明显，还需继续研究通感一体的低空网络，毫米波在未来低空通感中会扮演很重要的角色，由于毫米波具有波束窄，杂波干扰小，感知精度高的特点，低空感知最适合使用毫米波频段实现，这将为低空网络质量的进一步提升提供新的契机，进而有力推动低空经济的繁荣发展。

参考文献：

- [1] Z. Kuanget al., "Movable-Antenna Array Empowered ISAC Systems for Low-Altitude Economy,"[C] 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), Hangzhou, China, 2024, pp. 776-781, doi:



- 10.1109/ICCCWorkshops62562.2024.10693833.
- [2] P. Gupta, S. Gopal, M. Sharma, S. Joshi, C. Sahani and K. Ahalawat, "Agriculture Informatics and Communication: Paradigm of E-Governance and Drone Technology for Crop Monitoring,"[C] 2023 9th International Conference on Smart Computing and Communications (ICSCC), Kochi, Kerala, India, 2023, pp. 113-118, doi: 10.1109/ICSCC59169.2023.10335058.
- [3] P. Abeygunawardana, N. Gamage, L. De Alwis, S. Ashan, C. Nilanka and P. Godamune, "E-Medic - Autonomous Drone for Healthcare System,"[C] 2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS), Greater Noida, India, 2021, pp. 994-999, doi: 10.1109/ICCCIS51004.2021.9397104.
- [4] M. -C. Lai, D. Liu and W. -D. Tsay, "Functional Deployment of Drone Logistics,"[C] 2020 IEEE 2nd Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS), Tainan, Taiwan, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECBIOS0299.2020.9203635.
- [5] A. G. Foina, R. Sengupta, P. Lerchi, Z. Liu and C. Krainer, "Drones in smart cities: Overcoming barriers through air traffic control research,"[C] 2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS), Cancun, Mexico, 2015, pp. 351-359, doi: 10.1109/RED-UAS.2015.7441027.
- [6] J. Schwalb, V. Menon, N. Tenhundfeld, K. Weger, B. Mesmer and S. Gholston, "A Study of Drone-based AI for Enhanced Human-AI Trust and Informed Decision Making in Human-AI Interactive Virtual Environments,"[C] 2022 IEEE 3rd International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS), Orlando, FL, USA, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICHMS56717.2022.9980625.
- [7] 于金杨,张吉,李晶,等.空地一体通信网络构筑低空经济底座[J].信息通信技术与政策,2024,50(11):11-17.
Yu Jinyang, Zhang Ji, Li Hao, etc Building a Low altitude Economic Base for Air Ground Integrated Communication Network [J]. Information and Communication Technology and Policy, 2024, 50 (11): 11-17
- [8] 缴翼飞.中国5G应用进入规模化发展关键期有望满足低空经济等场景需求[N].21世纪经济报道,2024-10-16(006).DOI: 10.28723/n.cnki.nsjbd.2024.004011. Jiao yifei, China's 5G applications have entered a critical period of large-scale development and are expected to meet the needs of low altitude economy and other scenarios [N]. 21st Century Business Herald, October 16, 2024 (006). DOI: 10.28723/n.cnki.nsjbd.2022.040011
- [9] 周阅天,胡春雷,魏明烁,等.5G 2.1 GHz 40 MHz FDD 带宽增强的覆盖与组网能力研究[J].邮电设计技术,2022,(05):47-51.
Zhou Yuetian, Hu Chunlei, Wei Mingshuo, et al. Study on Coverage and Networking Capability Enhancement of 5G 2.1 GHz 40 MHz FDD Bandwidth [J]. Postal and Telecommunications Design Technology, 2022, (05): 47-51
- [10] M. Wei, Y. Zhao, Y. Zhou, C. Hu and W. Xie, "Comparison and Analysis of Coverage Capabilities of 2.1GHz 40M FDD and 3.5GHz 100M TDD in Indoor Coverage Scenarios of Outdoor Stations,"[C] 2022 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), Suzhou, China, 2022, pp. 238-243, doi: 10.1109/ICSIP55141.2022.9886826.
- [11] M. Wei, X. Xu, H. Guo, Y. Zhou and C. Hu, "Research Based on High and Low Frequency Cooperative through Carrier Aggregation for Deep Coverage Enhancement,"[C] 2022 IEEE 14th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), Chongqing, China, 2022, pp. 128-133, doi: 10.1109/ICAIT56197.2022.9862779.
- [12] Liu Xiaofeng, Shen Zukang, Wang Xinhui. 5G Wireless Enhanced Design and International Standard[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2020:344.
- [13] 周阅天,胡春雷,侯佳,等.20 MHz动态频谱共享的组网性能分析与验证[J].移动通信,2021,45(02):13-17+32.
Zhou Yuetian, Hu Chunlei, Hou Jia, et al. Network performance analysis and verification of 20 MHz dynamic spectrum sharing [J]. Mobile Communications, 2021, 45 (02): 13-17+32
- [14] 夏晨阳.无线通信网络中的干扰管理与优化策略[J].产品可靠性报告,2024,(12):64-65. Xia Chenyang Interference Management and Optimization Strategies in Wireless Communication Networks [J]. Product Reliability Report, 2024, (12):64-65.
- [15] 王磊.关于高效蜂窝网络干扰处理的研究[J].长江信息通信, 2024, 37(11): 210-214. DOI: 10.20153/j. issn. 2096-9759.2024.11.063. Wang Lei Research on Efficient Cellular Network Interference Handling [J]. Changjiang Information and Communication, 2024, 37 (11): 210-214. DOI: 10.20153/j. issn.2096-9759.2024.11.063

[作者简介]



谢伟良, 1976年, 男, 北京大学博士学位, 现任中国电信研究院移动与终端技术研究所副所长, 中国电信集团公司首席专家, 教授级高工, 享受国务院政府特殊津贴, 现任国家科技重大专项项目负责人, 曾获中国专利银奖、中国通信学会一等奖、中国安全生产协会一等奖、中国通信产业技术创新年度人物等奖项, 主要研究无线通信和移动网络。

魏明烁，1996年，男，中国传媒大学硕士学位，就职于中国电信研究院，中级工程师，科研人员。主要研究方向为5G

网络，无线通信，动态频谱共享，天线技术，低空通感一体等。