 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8117

Research on Low-altitude Network Deployment Strategies of Operators

Shaohua Huang

China Unicom Guangdong Branch, Guangzhou, Guangdong, 510510, China

Abstract

The low-altitude economy is developing rapidly under the vigorous promotion of the state, and major telecommunications operators are actively exploring low-altitude economy as a new growth point for revenue. How to Deploying low-altitude networks poses a challenge for operators. Recent studies and experiments have successfully tested and verified the coverage capability of 3.5G NR technology at low altitudes, particularly in scenarios involving drones and other low-altitude communication needs., The study explores the coverage capabilities of 5G networks operating on the 4.9 GHz frequency band, utilizing link budget analysis to assess both outdoor and indoor scenarios., and then builds a comprehensive evaluation model from the dimensions of perception capability, cost, and industrial chain to evaluate and analyze different network construction methods. Finally, it outputs deployment strategy suggestions for low-altitude networks based on different business needs and network conditions. It assists operators in constructing low-altitude networks that offer extensive coverage, high performance, and cost-efficiency for the development of low-altitude business.

Keywords

Low-altitude network; cost; Millimeter wave.

运营商低空网络部署策略研究

黄少华

中国联通广东省分公司，中国 · 广东 广州 510510

摘　要

随着国家政策的大力支持和市场规模的不断扩大，低空经济正快速发展。各大电信运营商积极探索低空经济，将其作为收入的新增长点。如何部署低空网络，是运营商面临的难题。本研究首先测试验证了3.5G NR在低空的覆盖能力，通过链路预算分析了4.9G NR和毫米波的覆盖能力，再从通感能力、成本、产业链等多个维度构建综合评价模型，对不同建网手段进行系统评估分析。最终，输出基于不同业务需求和网络现状的低空网络部署策略建议。助力运营商构建面向低空业务发展、覆盖优良、性能卓越、成本低廉的低空网络。

关键词

低空网络；成本；毫米波

1 引言

2024 年全国两会首次将低空经济纳入政府工作报告，标志着其作为新增长引擎的重要性。31 个省级政府（包括自治区、直辖市）相继发布关于发展低空经济的文件，围绕应用场景、技术创新、产业链条出台相关政策和奖补措施，为低空经济提供了有力的支持。在此背景下，各大电信运营商积极探索低空经济作为收入的新增长点。如何部署覆盖优、成本低的低空网络，是运营商面临的难题。

目前对低空网络部署策略还处于摸索阶段，对运营商的整体部署策略研究还存在不足。张琳等发表的论文主要针对地面与空中网络的不同 QI 配置及参数展开分析。杨旭伟等发表的论文对 4.9G 覆盖低空展开分析。

【作者简介】黄少华（1973–），男，中国湖南桃江人，硕士，工程师，从事广东联通无线配套建设及管理研究。

2 低空网络主要解决方案分析

鉴于运营商低空经济业务尚处于起步阶段，其部署低空网络的关键在于充分发挥既有地面通信网络的优势，制定合理的制式策略，以构建一张成本低、覆盖优且支持网络演进的低空网络。下面对低空网络主要解决方案进行分析：

2.1 波束赋形提升垂直覆盖角度

波束赋形基于波的相长干涉与相消干涉原理，通过调整天线阵列的相位和幅度，在频率相同的两列波叠加时，使信号发射至叠加区域的振动增强，进而提升信号的接收质量与覆盖范围。

以 3.5G NR 64TR 的 AAU 为例。通过 Massive MIMO 波束赋形技术的加持，使得 AAU 发射信号在垂直方向上最大可以实现 4 层子波束的设置，AAU 垂直覆盖倾角达

到 -2° ~13° 。利用 AAU 的垂直方向大张角的特点，为利旧现网 AAU 兼顾覆盖地面和低空网络提供基础。

2.2 地空同频覆盖方案分析

2.2.1 方案介绍

低空与地面共用现网 64TR 的 AAU 硬件射频，通过软件调整波束倾角，使上旁瓣覆盖低空区域，下旁瓣覆盖地面区域，低空与地面采用相同频率的载频，且地面与空中的载频 SSB 频点保持对齐。

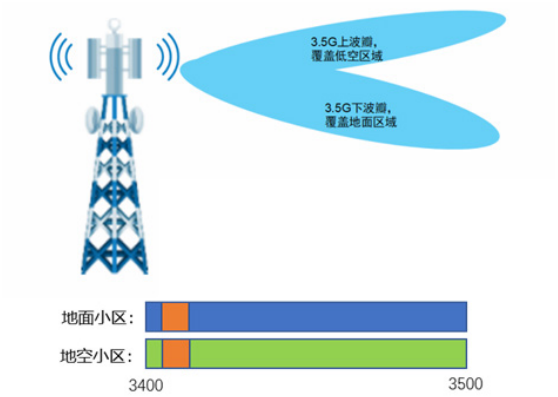


图 1 地空载波同频站点示意图

2.2.2 结果分析

经过测试分析，采用地空同频部署方案后，低空区域出现信号杂乱、信号强度高但质量较差、网络频繁切换以及低速率占比高的情况。地面大网覆盖效果下降，用户体验质量降低。

低空测试。低空测试显示了良好的覆盖性能，其中 SS-RSRP 的平均值为 -79.18dBm，SS-RSRP ≥ -90dBm 占比 100%。低空网络信号质量较差：SS-SINR 均值为 -1.83dB，且 SS-SINR < -3dB 的占比为 34.63%。低空网络上行速率测试结果较低：平均速率为 48Mbps，其中上行速率小于 10Mbps 的采样点占比为 24.07%。

低空网络存在严重的重叠覆盖问题，异常事件频发：测试期间，测试终端共占用了 76 个小区的信号，服务小区切换次数高达 475 次。电平差在 6dB 以内的邻区数量普遍达到 6 至 12 个，上下行干扰严重，导致频繁切换、RRC 重建事件高发。共发生异常事件 113 次，其中 RRC 重建 71 次。

地面大网的影响。波束优化方案实施后，测试区域地面的网络基础接入、掉话、切换等关键指标保持平稳，但用户数量、流量以及体验速率均出现下降。其中，用户数下降 3.79%，上行流量下降 3.34%，下行流量下降 4.06%；用户上行速率下降 0.19Mbps（相对下降 8.2%），用户下行速率下降 2.88Mbps（相对下降 3%）。

2.3 地空同频、SSB 错频覆盖方案分析

2.3.1 方案介绍

低空与地面共用现网 64TR 的 AAU 硬件射频，通过软件调整波束倾角，使上旁瓣覆盖低空区域，下旁瓣覆盖地面区域；低空与地面的载频采用相同频率，而地面与空中的载频 SSB 频点则采用错频配置。将覆盖低空的小区 SSB 频点由 7783 调整为 7788（频点间隔 7.2MHz）。示意图如下：

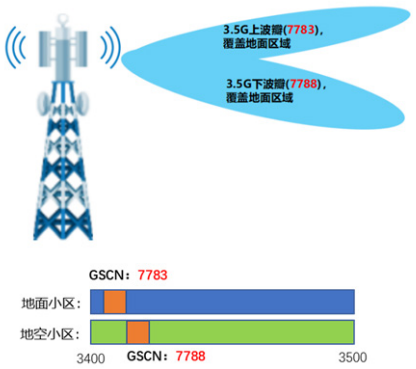


图 2 地空载波同频 SSB 错频站点示意图

2.3.2 测试分析

经测试，低空区域的广播信道 SINR 得到显著改善，但低速率占比的提升并不明显，同时上行平均速率出现了一定程度的恶化。对地面大网的上、下行速率均有一定负面影响。

低空测试。低空广播信道 SINR 得到大幅改善：测试终端的 SS-SINR 均值提升 7.57dB，SS-SINR 低于 -3dB 采样点占比改善 19.62PP，SS-SINR 低于 -3dB 的采样点占比仅 0.8%。

低空上行平均速率下降但低速率得到改善：测试终端的平均速率下降 4.95Mbps，相对下降 7.59%。测试终端上行低速率占比小幅改善，低于 10M 占比改善 2.02PP。

地面大网的影响。通过 SSB 错频，地面网络测试的体验速率相较于同频同 SSB 方案出现下降。测试终端上行体验速率下降了 0.4Mbps，相对下降 11%；用户下行体验速率下降了 19.6Mbps，相对下降 19%。其主要原因是上行干扰抬升、远点用户增加。

2.4 地空异频覆盖方案分析

2.4.1 方案介绍

低空与地面共用现网 64TR 的 AAU 硬件射频，软件调整波束倾角，上旁瓣覆盖低空，下旁瓣覆盖地面，低空与地面开通相同频率的载频，低空与地面大网采用不同的频段进行覆盖。

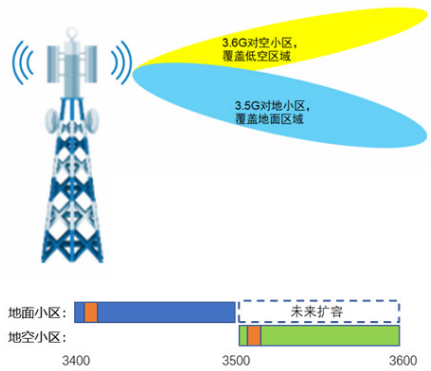


图 3 地空载波异频示意图

2.4.2 结果分析

该方案的整体覆盖和上行速率均良好，但仍存在少量重叠覆盖和越区覆盖的问题。短期内，低空覆盖小区对地面影响较小；未来随着地面二载波扩容，低空受地面干扰将逐步增强，性能亦会随之下降。

低空测试。低空网络覆盖状况良好：测试显示，SS-RSRP 均值达到 -77.95dBm，且 SS-RSRP ≥ -90dBm 的采样点占比高达 100%。低空网络信号质量较优：测试结果表明，SS-SINR 均值达到 11dB，且 SS-SINR ＞ -3dB 的采样点占比为 100%。低空网络上行速率表现良好：测试数据显示，上行平均速率达到 103.9 Mbps，且上行速率≥ 25Mbps 的采样点占比高达 99.32%。

地面大网的影响。地空异频覆盖实施后，对大网的影响较小，地面网络的覆盖、用户速率及信号质量均变化不大。地面网络的用户上行 SS-SINR 提升 0.16dB，MR 弱覆盖采样点比例提升 0.19%，用户上行体验速率提升 0.22Mbps。

2.5 新建 3.5G 方案分析

2.5.1 方案介绍

前述三种方案均基于利旧现网 AAU 实施，而新建射频方案则是构建一套独立的 AAU 系统，可实现机械下倾角的灵活调控，根据实际需求进行向上覆盖，且对现网影响较小。软件上地面与低空采用不同载频。

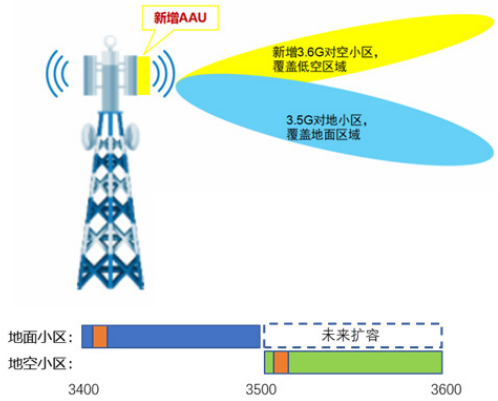


图 4 新建 3.5G 的地空载波站点示意图

2.5.2 结果分析

通过测试数据分析，采用新建 3.5G 专网进行低空覆盖的方案，地面与空中的信号覆盖强度、质量及用户速率均达到较高水平。

低空测试。覆盖良好：测试的 SS-RSRP ≥ -105dBm 采样点占比达到 87.8%。信号质量较好：测试的 SS-SINR >-3dB 采样点占比达到 99.97%。上行速率较好：测试的上行平均速率 82Mbps，上行速率≥ 20M 采样点占比达到 62%。

地面大网的影响。低空终端与地面用户的空口资源相互独立，地面的覆盖、信号质量及用户速率均与原地面网络保持一致。随着地面网络用户的增加，地面网络需要开通第二载波，将对低空网络带来干扰。

2.6 成本和造价分析

基于不同频段对低空网络的不同部署方案，对由建设成本和运营成本构成的 7 年总拥有成本（TCO）进行综合评估。经分析，通过新建毫米波部署低空网络的 7 年 TCO 最高，达到 48.9 万。通过共用 3.5G 现网射频资源，且低空载频与现网同频，无需新增成本。

表 1 不同建设方式造价表

频段	建设方式	7 年 TCO				
		CAPEX（万）	OPEX（万元 / 年）			合计
			租金	电费	小计	
900M	新建射频	8.5	0.4	0.5	0.9	14.8
1.8G	新建射频	9.4	0.4	0.6	1.0	16.4
2.1G	新建射频	10.5	0.4	1.0	1.3	19.8
3.5G	载频同频、SSB 同频	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	载频同频、SSB 错频	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	射频利旧、载频异频	6.1	0.0	0.0	0.0	6.1
	新建射频、载频异频	23.2	0.4	1.9	2.2	38.8
4.9G	新建射频	30	0.4	2.0	2.4	46.8
毫米波	新建射频	40	0.4	0.9	1.3	48.9

备注：建设成本和运营成本参考某省经验值

2.7 综合对比分析

综合对比不同建设手段的成本、低空网能力、对地面网影响以及产业链的成熟度情况。各种建设策略均存在差异化的优劣势表现。低频射频因垂直倾角较小，存在覆盖盲区；3.5G 无论是利旧现网射频还是新增射频，均会对地面网络产生干扰；4.9G 和毫米波对地面网络的干扰影响较小，但造价相对较高。

3 低空网络策略建议

鉴于不同建设手段的造价、产业链成熟度、覆盖能力存在差异，以及低空经济对网络需求尚处于起步阶段，建议低空网络应根据业务需求和网络现状，采取差异化的部署策略。在确保总体拥有成本（TCO）最优化的同时，满足业务发展的需求，并确保不影响现有网络的效能。低空网络部署策略建议如表 3 所示。

4 结语

低空网络需结合业务需求和网络现状，差异化地选择部署策略。目前，共用 3.5G 现网射频、实现低空载频同频是较为经济的解决方案。毫米波是未来低空网络部署的重要手段，但当前毫米波的牌照未发放，仍需推动毫米波产业链的发展，同时也要加大毫米波试点测试，积累经验助力运营商打造一张效能高、用户体验好、投资成本低的 5G 低空精品网。

表 2 不同建设方综合对比

频段	建设方式	成本（万元）	低空网				地面网	产业链
			通信（覆盖）			感知能力		
			强度	盲区	干扰		影响	
900M	新建射频	15	强	有	弱	否	低	成熟
1.8G	新建射频	16	强	有	弱	否	低	成熟
2.1G	新建射频	20	强	有	弱	否	干扰	成熟
3.5G	SSB 同频	0	中	无	强	否	干扰	成熟
	SSB 错频	0	中	无	强	否	干扰	成熟
	载频异频	6	中	无	强	否	干扰	成熟
	新建射频	39	中	无	中	否	干扰二载	成熟
4.9G	新建射频	47	中	无	无	是	无	起步
毫米波	新建射频	49	弱	无	无	是	无	牌照未发

表 3 低空网络部署方案对比

业务需求		现网情况	方案策略建议
需求	规模		
通信	少量	3.5G 单载波	3.5G 地空异频
		3.5G 双载波 / 无 3.5G 区域	新建 4G 中频
	较大	3.5G 单载波	3.5G 地空异频
		3.5G 双载波 / 无 3.5G 区域	新建 3.5G 对空
通感	-		4.9G 或毫米波

参考文献

[1] 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.

[2] 杨旭伟。5G低空覆盖专网方案设计及实践。江苏通信，2024（10），19-22.

[3] 段慧成等。关于5G基站SSB波束场景化应用研究。长江信息通信，2021（08），130-133.

[4] 孙怡婷, 丁杰, 范凌. 5G建网初期SSB波束设置策略[J]. 移动通信, 2022, 46(2): 85-88+100.

[5] 王晓海. 毫米波通信技术的发展与应用[J]. 电信快报, 2007, 7(10): 18-19.

[6] 王绍江. 5G毫米波智能波束管理[J]. 无线通信, 2018, 18(11): 7-8.

[7] 庞明慧, 台鑫, 吕崇玉, 等. 面向5G无人机通信场景的传播路径概率预测模型[J]. 电波科学学报, 2023, 38(1): 54-62.

[8] 3GPP.Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz:3GPP TR 38.901[S/OL].[2023-07-10]. ftp://ftp.3gpp.org/Specs/

[9] 王婷.全国首个4.9GHz频段5G低空全域覆盖专网落地无锡[N].人民邮电报，2023-06-16.

[10] 李贝。5G 网络 SSB 1+X波束技术应用研究。电信科学。2022（1）。150-158

[11] 尤肖虎，潘志文，高西奇等. 5G移动通信发展趋势与若干关键技术[J].中国科学:信息科学，2014,44(5):551—563.