工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

低空经济场景下空域网络覆盖性能评估体系与优化方法研究

肖彤
中国移动通信集团吉林有限公司长春分公司　130000

DOI：10.32629/ems.v8i10.22593

[摘　要] 低空经济是城市立体空间开发的新兴赛道，5G/5G-A 空地一体网络是无人机、eVTOL 等低空飞行器安全运行的数字化底座。传统地面移动通信网络以水平覆盖为核心设计目标，垂直空域普遍存在波束向上覆盖不足、视距传播干扰强、高动态切换频繁等短板，难以适配差异化的低空业务需求。本文结合长春市低空经济试点建设实践，梳理不同低空业务场景的网络性能需求，提出数字孪生多目标优化、垂直分层波束重构、空地协同干扰抑制、空天地多源融合保障四项核心优化策略。选取城市核心区大型无人机编队表演场景开展实测验证，结果表明，所提优化方案能显著提升空域信干噪比、降低跨站切换频次，有效提升高密度集群场景的通信稳定性，可为低空通信网络规划与空域数字化管理提供技术参考。

[关键词] 低空经济；空域网络；5G-A；覆盖评估

一、引言

随着国内低空空域管理改革持续推进，低空经济已从概念探索走向规模化落地，无人机城市巡检、农林遥感、文旅空中表演、低空物流、载人 eVTOL 观光等应用场景持续扩容。低空飞行器运行于 0－300 米空域，与地面终端不同，其通信链路以视距传播为主，多基站间易产生跨区同频干扰，飞行器高速移动也会带来频繁切换，传统地面蜂窝网络垂直方向覆盖能力不足，直接制约低空业务的规模化推广。工信部等五部门发布的低空信息基础设施建设意见明确提出，要依托现有 5G 网络，通过波束优化、天线倾角调整、通感一体基站按需部署等方式，完善重点区域低空连续覆盖，探索空天地一体化组网方案。

长春市作为全国低空改革试点城市，依托芯、光、星、车、网产业布局，长光卫星、长光博翔等企业形成星地协同遥感与无人机作业能力；净月高新区打造东北低空经济产业集聚区，落地国内首个低空行业大模型紫东长空，建成低空飞行服务指挥中心、北斗低空网格编码体系，覆盖主城区 500 平方公里空域数字化建模，形成农林巡检、景区安防、无人机物流、大型文旅无人机表演等多元场景，是高寒地区低空经济先行示范区。当前国内低空网络研究多聚焦通用理论模型，较少结合北方高寒城市实际场景构建完整评估体系，也缺少城市广场高密度集群、森林景区遮挡空域的实测分析。现有网络优化手段多为单一参数调优，难以兼顾覆盖、干扰、切换、感知的多目标耦合关系。基于此，本文结合长春市低空产业发展现状，建立多维度空域网络性能评估体系，提出成套优化策略，为东北地区同类城市低空通信基础设施建设提供参考。

二、长春低空经济发展现状与空域网络市场需求分析

（一）长春低空产业基础与市场格局

长春拥有雄厚的光学、卫星与无人机制造产业基础，长光卫星旗下吉林一号卫星星座与本地无人机企业形成卫星遥感与无人机现场核验的闭环作业模式，广泛应用于黑土地智慧农业场景，可实现地块长势监测、病虫害识别，既减少化肥投入，也提升了农业巡检效率。

作为产业核心承载区，净月高新区已落地无人机自动机巢，常态化开展景区森林防火、河湖水位监测与城市市容巡

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

检，试点无人机与无人车协同的末端物流配送，可完成医疗样本、生鲜物资的短距离空中投递；同时引入亿航 eVTOL 载人飞行器，在净月潭开展空中观光试飞，探索低空文旅新业态。

根据长春市推动低空经济高质量发展行动计划（2024-2026 年），长春目标打造东北低空经济中心，重点布局农林遥感、城市治理、文旅低空表演、低空物流、载人空中通勤五大方向，预计集聚近 300 家低空相关企业，落地 80 余项应用场景。

（二）差异化场景的空域网络需求

不同低空业务场景对通信网络的性能诉求各有侧重，这是构建空域网络评估体系的核心前提。高密度集群类场景下，大规模无人机编队作业对上行控制指令、定位数据传输、集群协同同步性要求极高，依赖低时延、高可靠通信支撑，但多机并发会带来严重上行干扰，加之周边建筑密集导致多基站视距信号叠加，易引发强干扰与乒乓切换，存在编队失控风险，对信令时延、信号覆盖强度与信干噪比都有明确的量化指标要求。山林景区类场景受植被遮挡影响，无线信号易出现非视距衰减，飞行器巡航时信号波动大、覆盖碎片化，业务以长航时巡检、安防监测为主，既需保障高清视频回传的连续覆盖，也要求基站具备空域感知能力以识别非法闯入目标，且航线跨度大、部分区域基站覆盖薄弱，需同时兼顾通信质量与目标探测能力。除此之外，常态化的农林巡检、城市网格化巡检等业务，还对网络覆盖的连续性、可靠性提出了普适性要求。当前 5G 基站以地面用户为核心设计，天线主瓣下倾，100－300 米空域垂直波束增益不足、信号衰减快、视距干扰问题突出，无法适配各类低空业务的差异化需求。随着低空飞行架次逐年增长，运营商与平台企业亟需一套标准化评估方法，用于空域网络验收、问题定位与迭代优化，这也是本文开展研究的现实动因。

三、空域网络覆盖优化策略

针对评估体系识别出的弱覆盖、强干扰、频繁切换等问题，结合长春城市建成区与山林景区的环境差异，本文提出分层递进的优化方案，涵盖数字孪生多目标优化、垂直空域波束重构、空地协同干扰抑制、多源网络融合保障四项核心策略。

（一）基于数字孪生的空域网络多目标优化框架

构建目标区域三维数字孪生空域模型，融合地形、建筑、林木分布、基站位置与无线传播模型，在虚拟空间复现真实电磁环境。将覆盖水平、信干噪比、切换次数、感知性能设为联合优化目标，采用多目标优化算法迭代调整基站天线方位角、下倾角、波束权值、小区功率等参数，通过虚拟仿真预演优化效果，减少外场反复测试的成本。针对长春冬季气候特征，在孪生模型中加入积雪、雾凇带来的传播损耗修正项，实现高寒环境下的仿真校准。整体流程先在数字孪生平台完成参数寻优，再落地到现网实施，优化完成后重新采集实测数据并回灌模型持续迭代，形成评估、仿真优化、现场实施、复测迭代的完整闭环。

（二）垂直分层波束重构优化

传统地面基站天线下倾角偏向地面，导致高空域信号增益不足。优化方案采用 SSB 波束分层配置，将波束划分为地面覆盖层与低空覆盖层，通过调整天线电调倾角，配置向上的窄波束专门服务 0－300 米空域，在不明显降低地面用户网络体验的前提下，提升垂直方向的信号增益。对于开阔城市空域，可采用多站协同波束赋形，在作业空域形成定向波束汇聚，提升集群区域的信干噪比；对于林区场景，则在林区边缘制高点部署通感一体基站，利用定向波束穿透林间空隙，减少林木遮挡带来的信号衰减，提升航线覆盖的连续性。

（三）空地协同干扰抑制与切换优化

低空视距传播带来的跨小区强干扰是低空网络的核心痛点。通过建立小区间动态干扰协调机制，对高密度无人机集群空域开展上行资源分区调度，让相邻小区错开上行时频资源，降低集群并发带来的上行干扰。同时优化低空专用切换策略，设置基于空域高度、飞行轨迹的切换触发门限，区别

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

于地面终端的切换规则，减少飞行器在多站重叠空域的乒乓切换。针对临时大型活动场景，可采用临时小区扩容、空域资源预留的方式，保障活动期间的集群通信资源充足。

（四）空天地多源网络融合保障

针对林区深处地面基站覆盖不足的区域,采用 5G 地面网络、北斗定位与卫星通信备份相结合的融合组网方式。以地面 5G 作为主链路，卫星通信作为应急备份链路，当无人机飞入弱覆盖林区时，自动切换至备份链路，保障控制指令不中断。同时依托紫东长空低空大模型，将网络性能数据、飞行器轨迹、空域环境数据统一接入低空管理平台，实现网络状态实时感知与故障智能预警。

四、典型场景工程案例验证

作为城市核心建成区的典型场景，文化广场地处长春市中心，周边高层建筑密集，曾承办 2025 架无人机编队灯光秀活动，属于典型的短时高密度低空集群场景。活动飞行高度集中在 80－120 米，空域开阔无植被遮挡，但周边数十个 5G 基站形成多重视距链路，上行干扰问题突出。优化前实测显示，空域部分网格信干噪比偏低，少量边缘位置存在控制信令抖动，存在编队同步失控的风险。

针对该场景的网络性能问题，首先运用本文构建的评估体系，对广场上空三维空域开展网格化采样评估。从各维度结果来看，通信维度上，优化前 100 米高度空域的 SS-RSRP 均值为-92dBm，但 SINR 均值仅 1.8dB，多基站视距信号叠加造成严重干扰；业务承载维度上，并发无人机数量超过 1200 架后上行丢包率快速上升，跨站切换频次较高；感知维度上，高密度场景下多目标识别的虚警率有所上升。综合评估得分为 64 分，核心短板集中在空域干扰与上行容量不足。

针对识别出的核心问题，依托数字孪生仿真平台开展多目标优化，导入广场周边建筑三维模型与基站参数，调整周边 4 个宏站的天线波束权值，增设低空专用 SSB 波束，同步实施小区间上行资源动态协调，为表演空域预留上行时频资源，并优化低空切换参数。优化后复测数据显示，100 米高度空域的 SINR 提升至 4.1dB，空域 95%区域满足 SS-RSRP≥-89dBm；2000 架规模无人机并发测试中，上行丢包率稳定低于 0.08%，跨站切换次数下降 62%，综合评估得分提升至 86 分。在实际无人机灯光秀活动期间，网络全程无通信中断，编队同步运行稳定，充分验证了该评估体系及波束优化、干扰抑制策略在城市高密度低空集群场景的有效性。

五、结论与展望

本文立足长春市低空经济试点建设实践，结合东北高寒城市的环境特征与多元业务发展需求，针对城市密集空域、山林景区等不同低空应用场景的差异化网络诉求，形成了基于数字孪生的多目标优化、垂直分层波束重构、空地协同干扰抑制、空天地多源融合组网的成套优化方法。经城市核心区高密度无人机编队场景的工程实测验证，该体系能够精准定位三维空域的覆盖、干扰与感知短板，所提优化策略可有效提升低空网络通信质量与空域感知能力，在高寒气候下的城市密集场景具备良好的工程落地价值，同时可为山林景区等其他典型低空场景的网络规划建设提供方法参考。

[参考文献]

[1]尹卓航,余子潇.基于通感一体化网络的城市低空数赋治理研究[J].物联网技术,2025,15(12):111-115.

[2]刘牧洲,张成岩,周晶,姚赛彬,蒋振伟,代锋利.聚焦低空监管与应用创新中国联通加速构建低空智能网联体系[J].通信世界,2025,(6):29-30.

[3]王晓军,李益锋,王贞凯,罗安宁,李海生,黄伟程.浅析移动通信通感技术在低空经济中的应用[J].长江信息通信,2025,38(3):15-19.

[4]唐烨.通感基站在低空经济中的作用[J].电信快报,2025,(3):11-13.

[5]黄明韩,刘林.5G-A 发展重点及变现路径[J].中国科技信息,2025,(5):117-119.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.