

广域低空基站立体覆盖规划与小区切换优化方案研究

司 鼎 张中华 吴一凡

河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：低空空域具备独特的三维信号传播特性与复杂的组网约束，机动飞行终端的动态运动状态，持续造成空域覆盖不均、小区切换紊乱等各类通信问题，传统平面组网模式难以适配广域低空的通信运行需求。本文结合空域传播规律与立体组网限制条件，搭建分层的立体覆盖规划体系，优化基站排布与空域资源配置，针对切换判决偏差、边界浮动、链路失稳等问题设计自适应优化机制，实现组网覆盖与小区切换的深度适配，完善低空立体通信组网体系。

关键词：低空通信；立体基站组网；全域覆盖；小区切换；通信优化

引言：低空产业的快速发展，让大范围空域常态化通信需求持续增长，三维空域的信号损耗规律、电磁干扰环境及终端运动特征，和传统地面通信场景存在本质区别。现有低空通信组网架构适配性不足，立体覆盖存在短板，高速移动终端引发的切换冲突、链路波动等问题，持续拉低空域通信服务质量。通过梳理低空组网的空间特性与结构性矛盾，搭建标准化立体覆盖体系，完善多场景小区切换优化策略，可有效提升低空通信网络的运行稳定性与服务质量。

1 广域低空通信立体覆盖空间特性与组网约束

1.1 广域低空空域通信传播特征

广域低空空域区别于地面二维通信场景，具备完整三维空间传播环境。空域内无线信号的传播路径更为开阔，地面建筑物、山体遮挡造成的信号衰减程度持续降低。低空不同高度层的空气介质、空间遮挡分布存在明显差异，信号会随高度变化产生差异化的损耗规律。空域范围跨度较大，远距离信号传输会产生固有路径损耗，散射与折射现象会改变信号传播的稳定状态。无密集遮挡的高空区域信号传播稳定性更强，中低空复杂环境下信号易出现波动起伏^[1]。这类独特的传播规律，直接决定低空通信覆盖无法沿用传统地面平面组网的搭建逻辑，是立体组网架构设计的核心前提。

1.2 低空场景基站立体组网空间维度约束

低空基站立体组网需要兼顾水平广度与垂直高度的双重空间限制。水平层面的广域覆盖需要平衡站点分布密度，单基站间距超5km的稀疏布局会造成空域覆盖断层，间距不足1km的密集布局会带来空间资源的冗余消耗。垂直层面0~1000m的高度跨度会划分出多层独立通信空域，不同高度空域的信号覆盖范围相互交错，形成复杂的空间覆盖结构。空域通信资源存在固定上限，频谱资源的可用容量会限制单基站的覆盖辐射能力。空

域电磁环境存在动态变化，各类无线信号的干扰分布随空间位置不断改变，对立体组网的空间布局形成硬性约束。空间维度的多重限制，大幅提升广域低空组网的规划难度。

1.3 低空移动终端运动特性对组网的影响机制

低空作业的各类移动终端具备灵活的空间运动能力，运动轨迹覆盖三维空域的各个方位。终端飞行速度、飞行高度会随时发生变动，运动状态的动态改变会持续切换所属的通信覆盖区域。终端空间位置的快速更迭，会让固定组网模式难以适配持续变化的通信接入需求。运动过程中，终端与基站的空间距离、相对角度不断改变，信号接收质量会产生持续性波动。无序的空间运动状态，会加剧通信链路的动态变化，对组网的稳定性与连续性产生直接影响，也对立体覆盖组网的动态适配能力提出更高标准。

1.4 广域低空覆盖组网现存结构性矛盾

当前广域低空组网体系存在多项适配性结构性问题。传统平面组网架构无法适配三维空域的全覆盖需求，高度层覆盖不均的问题普遍存在。固定的基站覆盖模式难以匹配终端动态运动特征，空域通信衔接存在不稳定问题。空间资源分配方式较为固化，无法根据空域通信负荷、终端分布状态完成自主调整。覆盖规划与空域通信实际需求存在错位，部分空域资源利用率偏低，部分关键空域存在覆盖能力不足的问题。这类结构性问题贯穿低空组网全过程，制约广域低空通信网络的整体服务能力，也是立体覆盖规划与通信优化工作需要解决的核心问题。

2 广域低空基站立体覆盖规划体系构建

2.1 立体覆盖规划的层级设计原则

广域低空立体覆盖规划需要跳出传统平面组网的设计思维，依托三维空域空间特征搭建专属设计准则。

层级设计以空域分层覆盖为核心导向,划分0~300m、300~600m、600~1000m三个梯度飞行高度,区分不同高度的通信服务需求,匹配差异化的组网建设标准。规划工作优先保障广域空域覆盖的完整性,弱化局部区域的过度资源投入,实现空域服务范围的均衡覆盖。层级架构搭建需要兼容空域动态通信需求,预留网络调整与优化空间,应对终端运动带来的通信状态变化。整体设计遵从空间适配、全域均衡、动态兼容的核心准则,为后续基站布局、区域统筹及资源调配提供统一的设计依据。

2.2 高低空协同基站布局空间排布设计

高低空协同组网是立体覆盖规划的核心环节,依托空域高度差异完成基站的空间排布搭建。低空基站侧重中低高度空域的信号覆盖,聚焦近地作业空域的通信服务,填补近地空域的通信服务空白^[2]。高空基站承担大范围空域的辐射覆盖任务,拓展通信网络的服务半径,支撑广域空域的远距离通信传输。高低空站点采用差异化排布方式,依据空域信号损耗规律调整站点布设间距与覆盖角度。分层排布模式可以拆解三维空域的覆盖压力,化解单一高度层基站全覆盖的建设难题,筑牢立体组网的空间布局基础。

2.3 多基站立体覆盖重叠区域统筹设计

多基站立体组网会天然形成大量空域重叠覆盖区域,无序的重叠分布会引发信号干扰、链路紊乱等问题。重叠区域规划需要梳理各基站的信号辐射边界,划分清晰的空域服务范围,规避信号交叉冲突。规划设计针对不同重叠程度的空域,调整基站信号覆盖阈值,弱化多余信号辐射带来的负面干扰。结合空域终端活动密度,优化重叠区域的通信服务优先级,合理分配网络接入权限。科学的统筹设计可以盘活多基站组网优势,将重叠覆盖的负面问题转化为空域通信冗余保障能力。

2.4 广域范围盲区补齐的规划设计思路

广域低空空域受空间结构、信号损耗、站点排布等因素影响,会产生零散分布的通信盲区。盲区补齐工作以全域覆盖为目标,精准定位各类隐蔽空域、边缘空域的信号空白区域。针对小范围零散盲区,通过微调现有基站覆盖参数、偏转信号辐射角度完成覆盖补全。针对大范围连片盲区,优化局部基站排布结构,增设适配空域环境的补充通信站点。差异化的补齐思路可以精准解决空域覆盖断层问题,提升广域低空通信网络的覆盖完整度。

2.5 立体覆盖网络资源匹配规划设计

立体组网的稳定运行需要依托合理的网络资源匹配模式,解决空域资源分配不均的问题。资源规划结合不

同空域的通信负荷、终端活动频次,动态调配频谱、链路等核心网络资源。降低低活跃空域的资源闲置占比,向高负荷空域倾斜优质通信资源。摒弃固定化的资源分配模式,适配三维空域通信状态的动态变化。科学的资源匹配规划能够提升立体组网的运行质量,最大化发挥广域低空通信网络的服务效能。

3 广域低空小区切换关键影响因素与问题剖析

3.1 低空高速移动场景小区切换触发条件特征

低空飞行终端具备灵活的空间移动属性,飞行状态的动态变化会重塑小区切换的触发逻辑。地面通信场景的切换触发多依托稳定的信号阈值判定标准,低空场景的判定条件存在明显差异化特征^[3]。终端飞行速度提升会压缩信号检测与判定的时间周期,信号质量的快速波动会缩短单一小区的有效驻留时长。空间位置的持续变动会改变终端与基站的相对传输状态,触发阈值的有效区间会随飞行高度、飞行方位发生偏移。各类动态变量让低空切换触发更具随机性,固定阈值判定方式难以适配复杂空域的接入状态,触发时机容易出现超前或滞后的偏差。

3.2 立体组网下小区切换边界动态变化规律

立体组网架构打破了地面通信固定的小区边界形态,空域小区覆盖范围具备动态浮动特性。不同高度层的信号损耗差异,会让同一基站的水平覆盖半径产生层级分化。空域电磁环境的实时变动,会持续改写各小区的信号辐射边缘范围。终端在三维空域完成升降、平移飞行时,所处的小区边界会持续更迭。边界动态浮动让低空通信不存在稳定的切换界面,传统静态边界规划模式无法适配立体空域的组网形态,大幅增加切换预判的实施难度。

3.3 多基站信号交织下切换冲突产生机理

广域低空立体组网存在大量信号交织区域,密集的信号覆盖叠加会催生各类切换冲突问题。多个基站的信号强度在重叠空域趋于接近,信号质量无明显层级差异。终端通信接入过程中会出现判定标准模糊的情况,无法精准锁定最优服务小区。复杂的信号交织环境会诱发频繁的切换试探行为,无效切换行为占用网络通信资源。信号层级区分不清晰、空域覆盖边界模糊的叠加影响,是各类切换冲突问题产生的核心诱因。

3.4 广域低空远距离连续切换的链路稳定性问题

广域空域的大范围飞行作业,需要终端完成跨区域、跨小区的持续性切换操作。长距离飞行路径会串联多个不同基站的覆盖空域,切换频次会随飞行里程持续增加。每一次切换操作都会带来通信链路的短暂重构,

链路重构过程会带来信号质量波动。长距离飞行过程中的多次链路更迭,会放大通信抖动、链路中断的风险。空域远距离传输的信号损耗本身更为显著,连续切换带来的链路波动,进一步削弱低空通信的持续服务能力,制约广域低空通信的稳定运行水平。

4 广域低空基站小区切换优化方案设计

4.1 动态自适应切换判决机制设计

传统固定阈值判决模式难以应对低空空域复杂多变的通信状态,无法适配终端高速运动带来的信号动态波动。动态自适应切换判决机制依托空域实时通信状态搭建全新判定逻辑,摆脱固化参数的约束体系。机制设计结合终端飞行速率、空域信号损耗、空间位置变化速率等多重维度信息,灵活调整切换判决阈值。针对低速平稳飞行状态,适度放宽判定标准,减少不必要的切换行为。针对高速机动飞行状态,提前启动判决流程,弥补信号检测滞后带来的判定偏差。动态化的判决逻辑可以精准适配各类低空飞行场景,提升切换时机的精准度。

4.2 立体组网小区切换优先级匹配优化

三维立体组网存在多层小区信号交叉覆盖的状态,无序的小区接入选择容易引发切换混乱问题^[4]。切换优先级匹配优化针对空域多小区共存的场景,搭建差异化的小区接入评判体系。优化设计结合小区信号传输质量、空域资源剩余容量、终端飞行轨迹适配度等核心要素,完成小区优先级排序。让通信状态更稳定、资源更充足的小区优先承接终端接入需求。规避弱信号小区、高负荷小区的无效接入匹配,减少切换冲突与链路卡顿问题,规范空域小区切换的接入秩序。

4.3 连续切换过程链路衔接机制优化

广域低空长距离飞行产生的高频次连续切换,容易引发链路抖动、衔接断层等通信问题。链路衔接机制优化聚焦切换全过程的通信稳定,重构链路重构与衔接的运行逻辑。优化方案完善切换前后的链路预检测流程,提前排查目标小区的通信承载能力。调整链路断开与重建的时序逻辑,缩短通信链路的重构耗时。弱化单次切换对整体通信链路的干扰影响,缓解多次切换叠加产生的稳定性隐患,保障长距离飞行过程中通信服务的连续性。

4.4 广域大范围低空场景切换协同优化策略

广域低空通信覆盖范围辽阔,局部小区独立优化模

式无法适配全域通信运行需求。大范围切换协同优化策略打破单小区的优化局限,联动全域基站资源完成统筹优化。策略设计依托空域组网布局特征,梳理跨区域小区的切换关联关系。统一大范围空域的切换运行标准,协调边缘空域、交界空域的小区切换资源调配。化解广域空域边缘区域、跨片区切换的适配短板,提升全域切换运行的整体稳定性。

4.5 覆盖与切换协同适配的整体优化逻辑设计

立体覆盖规划与小区切换运行存在深度关联,单一维度优化无法彻底解决低空通信痛点。整体优化逻辑立足组网全局,打通空域覆盖规划与切换运行的关联通道。以科学的基站覆盖布局为基础,匹配适配的切换运行机制,让组网结构优化成果服务切换流程升级。依托切换运行过程中暴露的空域适配问题,反向微调覆盖布局与资源分配模式。形成双向联动的优化闭环,从根源上改善低空空域覆盖不均、切换紊乱的各类问题,完善广域低空立体通信组网的运行体系。

结束语

广域低空空域特殊的信号传播规律与空间组网条件,对立体通信组网建设形成诸多限制,空域覆盖残缺、资源分配失衡以及小区切换不稳定等问题,长期影响低空通信运行品质。通过搭建适配三维空域环境的立体覆盖规划体系,完善切换判决逻辑、链路衔接形式与全域协同调度模式,促使网络覆盖架构与切换机制形成良好适配关系,稳步提升广域低空通信网络的运行稳定性与综合服务水平。

参考文献

- [1]李世辉,罗敏妍,黄婷.面向300m以下低空场景的联通5G基站负倾角部署与立体覆盖规划[J].广东通信技术,2026,46(4):23-26.
- [2]李厚根.基于多场景覆盖模型的无线基站规划勘察精准选址方法研究[J].通信电源技术,2026,43(1):153-155.
- [3]李昕昊,李宵杰,张翼,等.低空立体覆盖网络中的关键技术:网络规划与优化[J].中兴通讯技术,2026,32(2):9-17.
- [4]黄建洪,查子颖,张铮洋,等.移动通信基站覆盖不同区域站址的最优规划[J].萍乡学院学报,2023,40(3):103-106,111.