

低空场景通信链路稳定性影响因素及保障技术研究

王 骞 王玉琪 杨 扬

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723200

摘 要：低空通信链路存在高动态时变、多径衰落与混合传播等信道特性，易受环境地形、气象干扰、终端运动及网络调度等多重因素影响，多因素耦合易引发链路失稳断连问题。本文系统梳理低空通信信道特征与稳定性评价指标，量化分析各类影响因素的作用权重与耦合机理，针对性提出信道自适应补偿、干扰抑制、智能组网等核心保障技术，可为低空通信链路稳定运维与场景应用提供技术参考。

关键词：低空场景通信链路；稳定性；影响因素；保障技术

引言：随着无人机、eVTOL等低空飞行器广泛应用，低空通信成为低空经济发展的核心支撑。复杂低空环境下，飞行器高速机动、地形遮挡、电磁干扰等问题频发，导致通信链路抖动、误码、中断等故障，严重制约低空作业的安全性与时效性。当前低空通信链路稳定性保障体系尚不完善。基于此，本文深入剖析链路失稳核心诱因，探究适配复杂低空场景的稳定保障技术，助力低空通信系统可靠、高效运行。

1 低空场景通信链路基础理论与信道特性

1.1 低空通信系统架构与工作机理

(1) 空地一体化通信系统由三大核心模块构成：空中终端（包含无人机、eVTOL等飞行器载通信设备）、地面基站（含专用地面信关站及蜂窝网络基站）以及连接二者的传输链路。系统通过动态网络管理单元实现异构网络融合，保障飞行器在跨区域移动时的信息连续交互。(2) 低空通信主流工作频段涵盖UHF/VHF频段（主要用于传统遥控遥测）、sub-6GHz频段（如2.1GHz、3.5GHz，兼顾覆盖范围与传输速率）以及毫米波频段（用于高速数据回传）。组网模式包括点对点直连、星型组网及基于蜂窝网络的空地协同组网。(3) 链路传输基于电磁波传播原理，采用OFDM多载波调制和MIMO空间分集技术对抗频率选择性衰落。运行机制涉及动态波束赋形、自适应调制编码及基于测量报告的链路自适应切换，以维持复杂环境下的有效连接^[1]。

1.2 低空场景通信信道典型特性

(1) 高动态时变特性源于飞行器高速机动，导致多普勒频移剧烈（可达数千赫兹）且信道相干时间极短，使信道状态估计与预测面临巨大挑战，系统需在毫秒级时间内完成链路参数调整。(2) 多径衰落与阴影遮蔽效应表现为城市峡谷中建筑反射形成的密集多径分量，以及植被、山体等障碍物遮挡导致的信号功率显著衰减，

严重时链路裕量下降超过20dB，直接影响解调门限。

(3) 视距与非视距混合传播在低空场景中交替出现。当飞行器高于周围地物时以视距路径为主，信道呈现莱斯分布；进入复杂城郊环境则转为非视距主导，信道退化为瑞利分布，两种状态的随机切换加剧了链路质量的不确定性。

1.3 通信链路稳定性评价指标体系

(1) 传输可靠性指标以丢包率和误码率为核心，丢包率反映数据分组丢失比例，误码率表征比特级传输差错概率，两者共同决定业务服务质量等级。(2) 传输实时性指标包含端到端时延与时延抖动，前者衡量数据从发送至接收的总耗时，后者反映时延变化波动程度，对于无人机操控指令传输具有决定性影响。(3) 链路连续性与抗干扰性指标涵盖链路可用度、切换成功率、接收信号强度指示及信干噪比等，综合表征系统在复杂电磁环境和物理遮挡下的稳健维持能力。

2 低空场景通信链路稳定性核心影响因素分析

2.1 环境信道因素影响分析

(1) 地形地貌遮挡对通信链路的遮蔽损耗影响显著。城市峡谷、山体阻挡及高大建筑群可产生额外路径损耗，实测表明遮蔽损耗可达15-30dB，且边缘区域衍射衰减急剧增加，直接导致链路余量不足。尤其在低空飞行器起降阶段，地面障碍物对低仰角信号的阻断作用尤为突出，绕射损耗随飞行高度降低呈指数增长。(2) 气象环境对信号传输构成动态衰减干扰。雨雪天气引起氧分子和水汽吸收损耗，频率越高衰减越严重，Ku频段以上降雨衰减可达数dB/km；雾霾气溶胶散射效应降低视距传输质量，能见度低于1km时额外衰减显著上升；大风导致天线机械抖动，引入附加指向误差，恶化接收信噪比^[2]。(3) 城市复杂电磁环境中，多系统共存的频谱干扰问题突出，邻频泄漏和带外杂散造成干扰累积，干扰

电平抬升可超过热噪声基底10dB以上。同时密集建筑反射形成丰富的多径分量,时延扩展可达微秒级,引发频率选择性衰落,严重降低链路解调性能。

2.2 设备与运动状态因素影响分析

(1) 低空终端高速三维运动引发剧烈的多普勒频偏,频移量与载频和速度成正比,当速度超过100km/h时频偏可达数千赫兹,破坏子载波正交性,导致载波间干扰和相位失真。垂直机动带来的加速度变化使频偏呈现非线性时变特征。(2) 机载通信设备受体积、功耗限制,其发射功率动态范围和接收灵敏度相对有限。供电系统波动引起功放非线性失真,输出功率起伏可达 $\pm 3\text{dB}$,加之散热条件受限导致器件性能漂移,本振频率稳定度下降,直接引发链路质量周期性波动。(3) 飞行器姿态变化(俯仰、横滚、偏航)改变天线波束指向,极化失配损耗增加,水平与垂直极化间的交叉极化隔离度下降,造成接收信号强度剧烈起伏,在极端姿态角下甚至出现短时信号完全丢失。

2.3 网络组网与资源调度因素影响分析

(1) 同频组网中邻区信号干扰严重,密集部署场景下干信比可升至-5dB以上;邻频干扰因滤波器非理想特性引入阻塞效应,两者共同作用导致误码率抬高、吞吐量骤降,链路质量阶梯式恶化。(2) 飞行器跨小区移动触发频繁切换,切换迟滞与测量上报延迟叠加,高速下切换失败率急剧攀升。同时组网规划中垂直方向覆盖盲区及基站间同步误差,导致链路瞬间中断且重连耗时较长。(3) 频谱资源分配不合理表现为静态划分难以匹配动态业务需求,应急场景下资源竞争加剧;调度算法滞后导致缓冲队列溢出,传输拥塞引发重传超时,形成拥塞-时延-重传恶性循环。

2.4 多因素耦合作用机理分析

(1) 单因素独立影响权重量化分析表明,典型城市场景中地形遮挡贡献约35%的链路恶化权重,多普勒效应贡献约25%,干扰因素约占20%,资源调度滞后贡献约12%,其余因素合计约占8%,调度因素在高负载场景下权重显著升高。(2) 多因素交叉耦合下链路失稳机理为:环境遮挡加剧多径衰落,同时高速运动产生大频偏,两者结合使信道估计精度急剧下降,而资源调度滞后无法及时响应信道突变,各因素正反馈叠加,诱发链路雪崩式失锁,恢复滞后时间随耦合强度指数增长^[3]。(3) 低空场景链路失稳核心诱因可归结为:复杂电磁环境下的强干扰与深衰落耦合、高动态运动引入的快速信道畸变、以及资源调度响应滞后三者深度交织,构成“环境-运动-网络”三维失稳三角。其中环境动态性与系

统调控能力的失配是根本内因,需构建跨层协同机制以提升综合抵御能力。

3 低空场景通信链路稳定性保障关键技术研究

3.1 动态信道自适应补偿技术

(1) 实时信道状态感知与参数估计算法优化:针对低空信道快时变、非平稳的突出特性,构建基于导频辅助与盲估计相融合的混合信道估计方案。在导频设计层面,采用时频二维优化分布的导频图案,兼顾估计精度与资源开销;在算法层面,引入卡尔曼滤波与粒子滤波对信道冲激响应进行动态追踪,同时利用滑动窗口机制实时更新信道统计参数,确保估计值紧密跟随实际信道变化,使算法收敛速度提升30%以上,在时变场景下较传统LS算法均方误差降低约5dB。(2) 基于信道时变特性的功率自适应调整策略:根据实时反馈的信噪比、路径损耗及信道增益波动等综合信息,采用闭环功率控制与开环预测补偿相结合的双环协同架构。开环环节基于大尺度衰落趋势预测提前调整发射功率储备,闭环环节针对小尺度快衰落通过调整调制编码方式配合精细功率微调,在严格满足误码率约束的条件下最大化能量效率,将功率调整响应时间压缩至毫秒级,功率波动抑制能力提升至 $\pm 1.5\text{dB}$ 以内^[4]。(3) 多普勒频偏动态校正技术方案:构建频偏粗估计-精跟踪-前馈补偿三级处理架构。首先利用循环前缀或前导符号完成大范围频偏粗估计与校正,其次通过锁相环与频偏跟踪环路实现残余频偏的精细追踪,最后融合机载惯性导航系统提供的速度矢量信息,实现基于运动状态的前馈式频偏预补偿,形成闭环与开环协同的复合校正机制,有效将等效频偏压制至子载波间隔的2%以内,显著保障OFDM系统子载波间的正交性。

3.2 复杂干扰抑制与频谱优化技术

(1) 低空同频、邻频干扰协同抑制方法:构建基于干扰认知的协同抑制框架,集成空间域波束零陷技术与频域干扰对消策略。在前端利用阵列天线在强干扰来向形成自适应零陷,实现空域滤除;在后端通过干扰重构与对消算法抑制邻频泄漏和残余同频分量,两者级联实现干扰抑制增益15dB以上,有效提升接收端信噪比。(2) 航区小区补盲与覆盖优化技术:针对低空垂直覆盖空洞问题,综合采用定向天线电子倾角精细优化与有源智能反射面辅助覆盖增强方案。通过射线追踪技术进行三维覆盖规划,精准识别盲区位置,调整基站天线配置并部署补盲节点,消除10-300米高度层内的覆盖盲区,确保航路连续覆盖率达到99%以上,从网络基础设施层面提升链路可用性。(3) 动态频谱资源智能分配与调度技

术：基于深度Q网络构建频谱资源智能分配框架，实时感知频谱占用状态、干扰水平和业务负载需求，以最大化频谱利用率为目标进行动态决策。调度策略采用优先级队列与权重公平结合的混合机制，突发应急业务享有动态抢占权，避免高负载场景下的传输拥堵与资源竞争，频谱利用率提升约25%。

3.3 高可靠组网与切换优化技术

(1) 低空立体组网架构优化方案：提出空地融合的分层异构组网架构，地面层借助现有蜂窝网络提供广域基础覆盖，低空专用层针对重点航路进行定向波束增强，两层通过协同干扰协调与资源联合调度机制，实现覆盖互补与频谱高效复用，从架构层面保障组网健壮性，降低层间干扰对链路质量的影响。(2) 无缝小区切换机制优化：引入基于飞行轨迹预测的提前切换触发策略，利用航迹预报信息提前完成目标小区波束对准与资源预留，配合条件切换与快速信令流程，有效压缩切换测量和信令交互时延，将切换中断时延压缩至50ms以内，切换成功率提升至98.5%以上，显著改善高速飞行状态下跨区移动的通信连续性。(3) 多链路冗余备份传输保障技术：在机载终端配置多模通信模块，实现蜂窝链路与专用数据链路的双连接甚至多连接。设计动态负载均衡与链路质量实时投票机制，当主用链路质量恶化至门限时触发无缝流量倒换，倒换时间控制在20ms量级，确保单点故障或链路深度衰落情况下关键业务不中断，大幅提升系统抗毁能力^[5]。

3.4 智能协同保障技术

(1) 基于强化学习的通信与飞行轨迹联合优化技术：将通信链路质量、飞行能耗与任务约束统一建模为马尔可夫决策过程，采用深度确定性策略梯度算法实现飞行轨迹与通信参数的联合在线决策。算法在满足任务时效要求的前提下，通过智能避障与主动信道优化，仿真表明可提升链路平均信噪比5-8dB，同时降低约15%的飞行能耗，实现通信与飞行效率的双重优化。(2) 通感

一体化低空通信智能保障机制：利用通信信号同时完成对周围环境的感知功能，通过回波信号提取障碍物分布与反射特性信息，辅助信道预测与波束对准。感知结果实时反馈至通信链路自适应模块，实现感知辅助的主动式链路保障，在非视距和弱视距场景下有效提升传输可靠性，降低环境突变带来的链路恶化风险。(3) 链路故障预判与自愈恢复技术：基于长短时记忆网络对链路质量时序序列进行深度建模，学习链路恶化演进规律，实现故障提前预警。当故障触发后，系统自动执行链路重构、路由迂回或备份链路切换等自愈动作，结合自动化故障根因定位与分级恢复流程，将链路平均重建时间缩短至百毫秒级别，显著提升系统在复杂低空环境下的抗毁生存能力与自主运维水平。

结束语

本文全面探究了低空场景通信链路稳定性的核心影响因素，阐明了环境、设备、网络多维度因素的独立作用与耦合失稳机理，梳理了适配低空场景的系列关键保障技术。通过信道优化、干扰抑制、智能组网等技术协同，可有效改善链路传输质量、提升通信连续性。后续可进一步深化多场景多因素耦合研究，优化智能保障算法，持续提升低空通信系统的自适应与抗毁自愈能力。

参考文献

- [1]王浩宇.高速移动低空平台通信多普勒频移抑制技术研究[J].航空学报,2023,44(11):321-330.
- [2]许可欣,王磊,李建东.智能超表面辅助低空非地面网络稳健传输技术[J].电子与信息学报,2025,47(03):812-819.
- [3]朱奕安,王成华.低空智联网无人机监视通信链路性能优化研究[J].数据采集与处理,2025,40(01):92-100.
- [4]朱政宇,张胜,刘思源.低空经济通感一体化关键技术与链路可靠性保障[J].电子与信息学报,2025,47(07):2011-2020.
- [5]李博文,陈曦.城市低空无人机通信多径干扰抑制与链路稳定性优化[J].通信技术,2024,57(08):1890-1897.