

无线通信环境下低空无人机网络覆盖优化控制

马 垒

河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450008

摘要: 低空无人机网络覆盖受无线信道特性、无人机自身约束、外部环境干扰影响。优化核心技术包括无人机部署、通信资源分配、信道适配优化。实现路径有分层覆盖控制架构、闭环反馈控制机制、干扰协同抑制策略。性能评估体系涵盖覆盖、通信质量、系统稳定性指标,从多方面综合评估,以实现网络覆盖优化控制,提升覆盖质量与效能。

关键词: 低空无人机网络; 无线通信; 覆盖优化; 控制策略; 资源分配; 信道适配

引言: 低空无人机网络在应急通信、环境监测等领域展现出巨大应用潜力,然而无线信道特性复杂、无人机自身约束明显、外部环境干扰多样,导致其覆盖效果面临诸多挑战。为提升覆盖质量,需从部署优化、资源分配、信道适配等核心技术入手,结合分层覆盖控制架构、闭环反馈控制机制及干扰协同抑制策略等实现路径,构建科学有效的覆盖优化控制体系。本文将从核心影响因素、优化技术、控制策略实现路径及性能评估等方面,系统探讨低空无人机网络覆盖优化控制的关键问题。

1 低空无人机网络覆盖的核心影响因素

无线通信环境下,低空无人机网络的覆盖效果受到无线信道特性、无人机自身约束、外部环境干扰等多方面因素的综合影响,这些因素相互作用,直接决定了网络覆盖的完整性和通信质量。

1.1 无线信道特性是影响覆盖的基础因素

低空通信场景中,无线信道呈现出多径衰落、阴影衰落并存的特点,信号在传输过程中会因障碍物反射、散射形成多径分量,导致接收信号强度波动;同时,建筑物、树木等遮挡物会造成信号衰减,形成局部覆盖盲区。此外,信道带宽资源有限,当多个无人机节点同时工作时,易出现信道竞争,进一步影响覆盖区域的通信稳定性。

1.2 无人机自身约束对覆盖范围和持续性构成直接限制

无人机的载荷能力决定了通信设备的功率配置,发射功率不足会导致覆盖半径受限;而能量储备有限则限制了无人机的续航时间,难以实现长时间连续覆盖。同时,无人机的飞行稳定性受风速、气流等环境因素影响,位置偏移会导致覆盖区域重叠或遗漏,影响覆盖的均匀性。

1.3 外部环境干扰是覆盖优化需应对的重要挑战

低空区域存在地面通信网络、其他无人机网络等多种通信系统,这些系统与目标无人机网络之间可能存在同频干扰或邻频干扰,导致接收信噪比下降,覆盖区域的通信质量恶化。此外,复杂地形(如山地、城市密集区)会加剧信号遮挡,进一步压缩有效覆盖范围^[1]。

2 低空无人机网络覆盖优化的核心技术

2.1 无人机部署优化技术

无人机部署优化的核心目标是通过合理规划无人机的位置、高度和数量,实现覆盖区域的最大化和均匀化,减少盲区和重叠区。基于地理信息的部署规划是基础方法,通过获取覆盖区域的地形数据、障碍物分布信息,结合无人机的通信半径、信号衰减模型,确定无人机的最优部署高度和水平位置,确保信号能够有效覆盖目标区域。动态位置调整技术则针对无人机飞行过程中的位置偏移问题,通过实时定位技术(如GPS、北斗定位)获取无人机的实际位置,与预设部署位置进行对比,利用闭环控制算法调整飞行姿态,校正位置偏差。同时,基于覆盖质量反馈的自适应部署策略,通过接收节点反馈的信号强度、通信成功率等指标,动态调整无人机的部署密度,在覆盖薄弱区域增加无人机节点,在重叠区域优化节点位置,实现覆盖资源的合理配置。

2.2 通信资源分配优化技术

通信资源分配优化旨在通过合理分配频谱、功率等资源,提升信道利用率,减少干扰,保障覆盖区域的通信质量。功率分配优化是核心手段之一,根据覆盖区域的信号衰减情况,采用自适应功率调节算法,在信号衰减严重的边缘区域提高无人机的发射功率,在中心覆盖区域适当降低功率,既保证覆盖范围,又减少能量消耗和干扰。频谱资源分配则聚焦于解决信道竞争问题,通过频谱感知技术检测空闲信道资源,采用动态频谱分配算法为各无人机节点分配专属信道或共享信道,避免同

频干扰。同时，基于正交频分复用（OFDM）等技术，将信道划分为多个子信道，根据各覆盖区域的业务需求和信道质量，为不同区域分配不同带宽的子信道，实现资源的精准匹配^[2]。

2.3 信道适配优化策略

信道适配策略通过动态调整通信参数，适应无线信道的时变特性，提升通信链路的稳定性，间接保障覆盖效果。信道编码与调制方式自适应是关键技术，通过实时监测信道质量（如信噪比、误码率），动态切换编码方式（如卷积码、LDPC 码）和调制阶数（如 QPSK、16QAM），在信道条件较好时采用高阶调制提升传输速率，在信道条件较差时采用低阶调制和强编码提高抗干扰能力。链路切换优化技术则针对无人机移动导致的链路中断问题，通过预测无人机的运动轨迹和信道变化趋势，提前建立备用通信链路，当当前链路质量下降到阈值时，快速切换至备用链路，避免覆盖中断。同时，采用链路聚合技术，将多个可用信道或链路捆绑使用，提升链路传输容量和可靠性，保障覆盖区域的通信连续性。

3 低空无人机网络覆盖控制策略的实现路径

3.1 分层覆盖控制架构

在低空无人机网络覆盖控制策略中，采用分层覆盖控制架构是实现精细化管理、提升覆盖效能的关键路径。该架构通过三级协同机制，将复杂覆盖问题分解为不同层级的优化任务：全局控制层作为顶层规划单元，基于覆盖需求预测、地理环境建模及频谱资源普查等数据，统筹确定无人机节点总量、部署拓扑结构及频谱分配方案，确保整体覆盖满足任务要求；区域控制层作为中间协调单元，通过实时监测局部区域的信号强度、干扰水平及覆盖重叠度等指标，动态调整区域内无人机的三维位置、飞行轨迹和功率分配，消除局部盲区并抑制覆盖冗余；节点控制层作为底层执行单元，针对单个无人机节点，结合瞬时信道状态信息（CSI）和干扰特征，自适应优化发射功率、天线波束赋形及调制编码策略（MCS），实现信道容量最大化。三层架构通过信息垂直交互形成闭环控制系统，既保障了宏观覆盖规划的科学性，又赋予了微观参数调整的实时性。

3.2 闭环反馈控制机制

闭环反馈控制机制是低空无人机网络达成覆盖动态优化的核心支撑，凭借持续的数据交互与策略迭代，不断精进覆盖成效。（1）在数据采集环节，无人机节点与接收终端协同作业，运用高精度传感器与信号监测模块，全面收集信道质量参数、信号强度分布以及干扰源特征等关键信息，为后续分析提供详实依据。（2）策

略生成阶段，依托先进的智能算法模型，深度融合采集到的数据与预设的覆盖优化目标，通过多维度运算与分析，精准制定出无人机部署调整方案、资源分配策略以及参数适配指令，确保策略的科学性与针对性。（3）行动实施阶段，无人机节点与控制中心紧密配合，依据生成的策略方案，迅速且精准地调整无人机的飞行位置、通信参数等关键要素，将优化策略转化为实际行动。

（4）效果评估环节，将行动实施后的实际覆盖效果数据进行回传分析，与预期目标进行细致比对，以此验证优化方案的有效性，并为后续新一轮的优化调整积累经验，形成持续优化的良性循环，保障覆盖控制能快速适应环境变化，稳步提升覆盖质量^[3]。

3.3 干扰协同抑制策略

（1）在低空无人机网络中，干扰协同抑制策略是保障通信覆盖质量的核心手段之一，其通过多维度技术协同实现干扰的精准管控。针对外部干扰，系统首先部署分布式频谱感知阵列，利用能量检测、循环平稳特征分析等技术，实时监测干扰信号的频谱分布、功率谱密度及调制类型等关键参数，并结合地理信息系统（GIS）定位干扰源方位。基于感知结果，采用动态频率规划算法，通过跳频扩频（FHSS）或认知无线电（CR）技术实现频谱资源智能避让；对于顽固干扰源，则启动功率自适应调整机制，在保证覆盖需求的前提下动态压缩发射功率，降低干扰耦合概率。（2）针对内部同频干扰，通过建立无人机集群协同通信协议，采用分布式资源分配算法，基于信道质量指示（CQI）和干扰温度模型，实现频谱资源的时空复用优化。同时，引入多输入多输出（MIMO）波束成形技术，通过空域滤波将信号能量聚焦于目标覆盖区域，配合零陷技术（Null Steering）在干扰方向形成信号凹陷，既提升覆盖边缘区域的信噪比，又有效抑制对非授权区域的越界干扰，最终实现频谱效率与覆盖质量的双重提升。

4 低空无人机网络覆盖优化控制的性能评估

4.1 覆盖性能指标

在低空无人机网络覆盖优化控制的性能评估体系中，覆盖性能指标是量化评估覆盖质量的核心维度，其通过多维参数综合刻画覆盖的完整性与空间分布均匀性。具体而言，覆盖概率作为核心指标之一，通过计算目标区域内满足最小接收信号强度（如信噪比门限或误码率阈值）的覆盖面积与区域总面积的比值，直观反映网络对目标区域的完整覆盖能力，该值越接近1表明覆盖完整性越高。覆盖盲区面积占比则从反面揭示覆盖缺陷程度，通过统计未达到通信质量要求的区域面积占比，

定位覆盖空洞的分布特征与严重程度,为后续优化提供精准导向。覆盖重叠度作为资源利用效率的关键指标,通过量化多无人机节点覆盖区域的交叠面积与总覆盖面积的比值,评估空间频谱资源的复用程度——适度重叠可提升覆盖鲁棒性,但过度重叠将导致频谱效率下降与能量浪费,因此需通过协同控制策略将其约束在最优区间,以实现覆盖质量与资源效率的平衡优化。

4.2 通信质量指标

在低空无人机网络覆盖优化控制的性能评估体系中,通信质量指标是衡量网络服务效能的核心维度,其重点聚焦于覆盖区域内的通信可靠性及传输效率两大关键特性。误码率作为衡量信道传输准确性的核心参数,通过量化接收信号中错误码元占比,直接反映物理层传输的保真度。在优化控制机制作用下,需将误码率严格压制在通信协议规定的容限范围内,以确保数据传输的完整性,避免因比特错误引发的业务中断或信息失真。通信延迟则表征数据从发送端至接收端的全链路时延特性,涵盖电磁波传播时延、节点处理时延及协议栈排队时延等分量,其数值大小直接决定实时通信业务的响应灵敏度,尤其对无人机集群协同、远程操控等时延敏感型应用具有决定性影响。吞吐量作为评估链路传输能力的核心指标,通过统计单位时间内成功交付的有效载流量,直观反映频谱资源与计算资源的利用效率,是衡量覆盖优化策略对业务承载能力支撑效能的重要依据。

4.3 系统稳定性指标

(1) 在低空无人机网络覆盖优化控制的性能评估体系中,系统稳定性指标是衡量覆盖控制策略长效性与鲁棒性的核心维度,其通过多维参数综合刻画网络在动态环境下的持续服务能力。覆盖持续时间作为评估能量利用效率与部署合理性的关键指标,指无人机网络在无需人工干预补充能量或调整拓扑结构的前提下,维持目标区域有效覆盖的连续时长。该指标不仅反映无人机电池续航能力与能量管理策略的协同优化水平,更直接关联部署方案的地理适应性——合理的节点间距与飞行高度设计可显著延长覆盖持续时间,减少因能量耗尽导致的

覆盖中断风险。(2) 参数调整频率则表征系统对环境变化的响应灵敏度与控制开销的平衡关系,通过统计单位时间内无人机节点执行位置调整、功率动态分配、调制编码方式切换等控制动作的次数进行量化。过高的调整频率会加剧信令开销与计算资源消耗,甚至引发控制信道拥塞;而过低的调整频率则可能导致覆盖质量劣化。因此需通过自适应控制算法将调整频率维持在动态平衡区间。干扰抑制效果通过对比于干扰协同抑制策略实施前后的信噪比(SNR)改善幅度进行量化评估,该指标直接反映波束成形、功率控制等协同抑制技术的实际效能,是验证干扰管理策略有效性的核心依据^[4]。

结束语

低空无人机网络覆盖优化控制是一个融合多学科技术的复杂系统工程,涉及无线信道特性分析、无人机自身约束应对、外部环境干扰抑制等核心影响因素,需综合运用无人机部署优化、通信资源分配优化、信道适配优化等核心技术,依托分层覆盖控制架构、闭环反馈控制机制、干扰协同抑制策略等实现路径,从覆盖性能、通信质量、系统稳定性等多维度进行性能评估。通过持续优化控制策略,可有效提升低空无人机网络覆盖的完整性、均匀性、可靠性与稳定性,为低空经济、应急管理、智能物流等领域的创新发展提供坚实的技术支撑,推动低空无人机网络向更高效、更智能、更可靠的方向演进。

参考文献

- [1]郭洋,高原,程绍驰,王晓楠.低空单层无人机网络覆盖优化控制策略[J].西南交通大学学报,2024,59(4):890-897.
- [2]谢华,韩斯特,尹嘉男,纪晓辉,杨逸晨.城市低空无人机飞行计划协同推演与优化调配方法[J].航空学报,2024,45(19):263-285.
- [3]杭小飞,汪滋润.泛低空5G专网中无人机巡检应用研究与实践[J].江苏通信,2024,40(3):28-32.
- [4]王珏.低空经济背景下噪声控制系统的优化设计[J].现代制造技术与装备,2024,60(S1):129-131.