

集群最优覆盖率控制的无人机通信组网设计

陈雅菲^{1,2}, 舒晓锋^{1,2}, 程传阳^{1,2}, 王 韬¹

(1. 航天金美(重庆)通信有限公司, 重庆 400000;

2. 航天科工集团 通信网络技术中心, 重庆 400000)

摘要: 无人机集群通信组网节点的连通性和稳定性是保障集群作战效益的关键, 为了使无人机组网通信铰链适应更多作战场景, 提出基于集群最优覆盖率控制的无人机通信组网节点分布式设计方法; 构建无人机节点传感信息采集模型, 采用无线传感融合跟踪识别方法实现对无人机通信组网的集群链路模型设计, 根据无人机集群节点信息素的覆盖半径实现对节点轮换调度的自适应控制, 采用集群最优覆盖为寻优目标, 根据节点通信链路的均衡效益度解析结果设计节点组网的最佳控制路由协议, 采用群体仿生优化算法实现对无人机通信组网节点的最优部署设计; 仿真结果表明, 采用该方法进行无人机通信组网节点分布部署设计, 提高了集群通信组网的数据转发均衡性和准确性, 降低了通信链路传输的干扰率, 组网能达到最大覆盖效能。

关键词: 无人机; 通信组网; 集群; 最优覆盖率; 链路均衡

UAV Communication Networking Design for Optimal Cluster Coverage Control

CHEN Yafei^{1,2}, SHU Xiaofeng^{1,2}, CHENG Chuanyang^{1,2}, WANG Tao¹

(1. Aerospace Jinmei (Chongqing) Communication Co., Ltd., Chongqing 400000, China;

2. Communication Network Technology Center, CASIC, Chongqing 400000, China)

Abstract: It is crucial for the connectivity and stability of unmanned aerial vehicle (UAV) swarm communication network nodes to ensure the effectiveness of swarm operations. To adapt the UAV networking communication hinges to more combat scenarios, a distribution method for UAV communication network nodes based on optimal cluster coverage control is proposed. Construct an information acquisition model for UAV node sensors, utilize a wireless sensor fusion tracking and identification method to design the cluster link model for UAV communication networking, and adaptively control a node rotation scheduling by the coverage radius of UAV swarm node pheromones. The optimal cluster coverage is used as the optimization objective, and the best control routing protocol for node networking is designed by analyzing the balanced benefit in node communication links. The swarm bionic optimization algorithm is employed to design the optimal deployment of UAV communication network nodes. Simulation results show that the distribution and deployment method for UAV communication network nodes improves the data forwarding balance and accuracy of the swarm communication network, reduces the interference rate of communication link transmission, and achieves the maximum coverage efficiency of the network.

Keywords: UAV; communication networking; cluster; optimal coverage; link equalization

0 引言

无人机因其低成本、快速响应及部署灵活等优势, 逐步成为信息化发展的重要平台和未来战争的新质战斗力^[1], 然而当面临环境复杂性和多样性任务时, 单机由

于机载设备数量和感知范围受限等缺陷, 通常难以满足实际任务需求^[2]。无人机集群不仅能够弥补个体能力的局限性, 并且具有显著的体系优势和战争效益, 在未来战场上, 无人机集群在执行协同攻击、协同探测、干扰压制任务等方面发挥巨大作用。

收稿日期:2025-01-09; 修回日期:2025-02-07。

基金项目:航天科工集团通信网络技术中心项目(JM03201819)。

作者简介:陈雅菲(1990-),女,博士研究生,工程师。

引用格式:陈雅菲,舒晓锋,程传阳,等. 集群最优覆盖率控制的无人机通信组网设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12):296-302.

当前, 多个国家和地区把发展无人机集群技术作为长期的战略目标^[3], 为提升无人机集群作战的性能, 关键在于增强集群中单机作战功能性和集群组网与通信控制能力^[4]。当无人机集群通信系统的稳定运行时, 网络中的无人机通过个体之间的信息共享和协作实现协同, 从而提高无人机在不同环境下的作业能力, 扩大无人机的作业范围^[5]。因此, 保障集群通信的系统稳定性, 提升无人机通信组网的节点覆盖率和连通性是保障作战效能和打击效果的关键^[6-7]。

无人机通信组网节点分布式设计是建立在对节点的优化部署和通信链路的均衡设计的基础上进行。受作战环境复杂多变和无人机节点作战任务需自适应切换等因素的影响, 对通信节点的寿命、覆盖率和人机一体化控制等方面的要求越来越高^[8]。当前, 无人机通信组网节点分布式设计方法主要有基于粒子群优化算法 (PSO)^[9]、随机路由控制协议、以及 NS2/NS3 和 OMNET++ 仿真平台的节点部署模型。粒子群算法适合解决网络规模较大的问题, 但在求解精度和计算速度之间需要权衡, 相比之下, 基于蚁群优化算法 (ACO)^[10]的方法具有较强的全局搜索能力, 但在面对动态环境变化时可能表现不佳, 无人机通信组网的关键在于节点的部署和拓扑设计。利用 PSO 算法能够动态调整每个无人机的位置, 从而实现网络覆盖的最大化和连通性的提升, 通过模拟粒子群体行为, 调整每个节点的位置, 以获得最优的网络覆盖效果, 通过自适应路由协议, 网络中的节点可以动态选择最佳的通信路径, 尤其是在环境变化时, 如飞行障碍物的变化或节点数量变化时, 确保无人机集群通信的稳定性和低延迟。总而言之, 基于 PSO 算法的节点部署方法能够有效避免局部最优解的问题, 但在处理大规模节点时, 计算复杂度较高, ACO 算法在节点路径优化方面表现出色, 能够根据网络负载动态调整通信路径, 但其对环境变化的适应性较差。在仿真平台的广泛应用于模拟大规模网络, 但其计算资源消耗较大; OMNET++ 则因其灵活的模块化设计, 适用于小规模网络的精细化仿真。

通过时延控制和通信链路终端控制, 采用信道均衡调度实现节点部署设计^[10]的方法对编队拓扑总代价要求较高, 且未考虑编队控制输出鲁棒性的问题; 通过通信节点的轮换调度和无线路由交互控制实现节点优化部署控制的方法^[11]对无人机组网节点的通信覆盖性不好。基于粒子群和卷积神经网络联合方式控制的无人机通信节点路由部署设计方法和采用粒子群算法实现节点覆盖度轮换调度及卷积神经网络实现加权学习控制的方法都在通信数据转发中存在丢包率大的问题^[12-13]。

针对复杂环境中无人机集群通信链路不稳定、组网覆盖率不足的问题, 提出基于集群最优覆盖率控制的无

人机通信组网节点分布式设计方法, 以提高无人机集群通信组网稳定性和均衡控制能力方面的优越性能, 提升对复杂环境的适应能力。同时, 采用高效的通信协议 (如 802.11 s、LTE 或 5 G) 能够减少通信链路上的干扰, 并通过带宽管理优化数据传输速度, 通过协作式通信方法, 多个节点共享信息, 以增强数据传输的可靠性。

1 节点信息融合感知及集群链路模型

1.1 无人机节点信息融合感知模型

为满足无人机间通信组网节点分布式设计要求, 首先要构建无人机节点传感信息采集模型, 采用无线传感融合和感知识别的方法, 提取无人机通信组网节点的信息参数, 建立无人机通信组网动态节点分配模型。其中信道模型采用 IEEE802.15.4 MAC 协议^[14], 通过双向网络和混合网络两种模式来构建无人机通信组网的路由传输结构模型^[15], 其模型如图 1 所示。

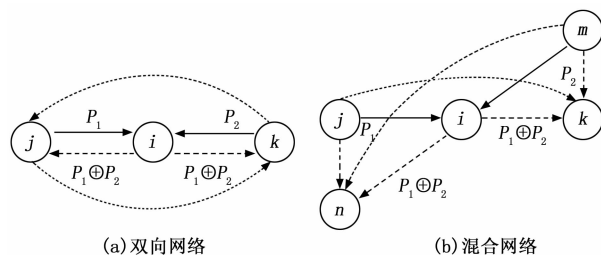


图 1 无人机通信组网的链路传输结构

图 1 中, i, j, k 分别为 Sink 节点, m, n 分别为 source 节点。根据图 1 所示的无人机通信组网的链路传输结构模型, 无人机通信组网信道采用的是 CSMA/CA 竞争有限的信道机制^[16], 组网控制的分簇节点的分组转发概率为 P_1, P_2 , 无人机通信节点 k 处的传输链路配置协议 C_R 从 $(0, CW-1)$ 中随机选择。

假设无人机通信组网的信息覆盖区域是一个边长为 M 的正方形区域, 无人机通信组网的覆盖区域为 W : 在连通域内进行网络覆盖的区域配置, 采用无线传感信息跟踪识别和信息素融合的方法^[17]将无人机通信链路中单个节点的通信覆盖的信息素分布区域设定为 $p \times q$ 。无人机通信分布区域 Q 的节点坐标为 (x_i, y_i) , 假设各个无人机终端节点释放的信息素强度相同, 通过自组网控制协议设计, 记节点 n_i 的生命周期为 L_i , 假设在执行作战任务时无人机通信组网的路由分布信道模型中, 网络路由链接可靠性分布半径为 $R = 2r$, 相对应的每个无人机节点传感信息融合分布坐标 (x_i, y_i) 的圆心可表示为 $W_i = \{x_i, y_i, r\}$, 其中 W_i 的半径表示为 r , 在通信组网节点 i 中的联合坐标为 (x, y) , 根据欧式距离的定义, 目标点 (x_1, y_1) (和源节点 (x_2, y_2)) 之间的距离 d 可以通过以下公式计算:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

其中：假设 $K\{r_i\}$ 为无人机通信组网分布区域中的参考坐标点 (x, y) 能被节点 ω_i 的通信覆盖的概率^[18]，根据先验概率密度估计，得到该概率的计算公式表示为：

$$K_{wpg}(x, y, \omega_i) = \begin{cases} 1 & d(\omega_i, k) \leq r - r_u \\ u\left(\frac{-\alpha_1 \theta \beta_1}{\theta_2 \beta_2}\right) + \alpha_2 & r - r_u < d(\omega_i, k) < r + r_u \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中， r_u ($0 < r_u < r$) 为无人机通信组网节点能够实现通信传输和最低误码的半径， r 为最大覆盖半径， $d(\omega_i, k)$ 为节点之间的欧式距离， α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 表示对应无人机节点的传递概率分配系数，该系数与其特征解是正相关的， θ_i 为表示无人机节点与主机节点的相位，表示为：

$$\theta_i = r_u - r + d(\omega_i, k) \quad (3)$$

根据上述构建的无人机节点传感信息采集模型，采用无线传感融合跟踪实现无人机通信组网的全覆盖设计^[19]。无人机通信组网的链路转发节点假设为 Z ，该节点通信转发覆盖半径为 R_z ，表示以 Z 为圆心的通信覆盖区域的半径。在该半径圆内为有效覆盖区，对于节点 Z 的邻接节点，需要通过随机链路转发的均衡配置协议实现信息接收和数据转发控制确保信息覆盖。具体而言，每个通信节点的覆盖区域是一个圆形，其半径表示为该节点的通信范围，当节点之间的距离在有效通信范围内时，信息将被成功传递，从而保证网络中所有节点都能通过相邻节点或中继节点达到全覆盖，提高组网的可靠性和数据传输的稳定性。

1.2 无人机通信组网的链路均衡模型

采用无线传感融合跟踪识别方法实现对无人机通信组网的集群链路模型设计。在上述构建了无人机通信组网的信道模型的基础上，进行无人机通信组网路由节点链路模型分析^[20-22]。在节点覆盖区域 W 中，记节点 n_i 的生命周期为 L_i ，无人机通信组链路组网的节点为 Z 。通过自组织网络分布式融合处理^[23]，采用随机链路转发协议，得到无人机链路质量均衡配置的概率分配模型可表示为：

$$K_{wpg}(W_{pg}) = 1 - \prod_{\omega_i \in W_{pg}} [1 - K_{wpg}(x, y, \omega_i)] \quad (4)$$

其中： $K_{wpg}(x, y, \omega_i)$ 为无人机通信节点的区域覆盖率，无人机通信组网节点的监测点、中继节点和 Sink 根节点，采用四元组 $\{S_1, S_2, \dots, S_L\}$ 表示，无人机通信组网节点采用无向图 $G = (V, E)$ 设计，用 $d_G(u, v)$ 表示图 G 中从 u 到 v 的链路负载开销，采用 $N_2(u) = \{v \mid d_G(u, v) = 2\}$ 表示节点 u 处无人机通信组网节点联通性参数，通过频分复用技术 OFDM^[24] 构建链路均衡配置模型得到均衡配置后无人机通信节点的区域覆盖率为：

$$Q_w(\omega) = \frac{\sum K_{wpg}(W_{pg})}{p \times q} \quad (5)$$

无人机通信组网信道的选择权值 $sw(u)$ ，用一个三元组表示为：

$$\epsilon_i(i, j) = \frac{\alpha_i(i) a_{ij} b_j(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i(i) a_{ij} b_j(o_{t+1}) \beta_{t+1}(j)} \quad (6)$$

其中： $|Rev(u)|$ 表示无人机通信组网接收端 $Rev(u)$ 中节点的个数， a_{ij} 表示无人机通信组网监测节点信道偏差， b_j 表示接收端的同步帧控制参数， $Order[Rev(u)]$ 表示链路均衡的匹配排序。根据链路匹配结果和节点的优化覆盖调节实现对无人机通信组网的链路均衡控制。

2 无人机通信组网实现及关键技术

2.1 无人机通信组网实现

为了实现高效、稳定的无人机集群通信组网，需要综合考虑节点部署、网络拓扑、自适应路由及链路管理等因素。

首先构建网络拓扑，采用 Delaunay 三角剖分或 Voronoi 划分方法建立初始拓扑，确保所有无人机节点都能够形成有效的通信覆盖，通过 K 均值聚类或基于群体仿生优化算法的动态拓扑控制进行拓扑优化，减少通信链路开销，提高网络连通性；其次设计自适应路由协议，采用分布式通信组网方法，结合按需距离矢量路由 (AODV, ad-hoc on-demand distance vector) 和优化链路状态路由 (OLSR, optimized link state routing) 两种路由协议，根据无人机节点的飞行状态、信号质量、链路负载等因素动态调整数据传输路径，结合强化学习 (RL) 优化路由策略，通过历史数据训练最优路径决策，提高数据传输效率，减少丢包率；然后通过信道均衡技术分配不同任务的通信带宽，确保高优先级任务具有更好的通信资源，采用流量感知动态路由，在链路负载变化时调整数据流的分配，降低拥塞，提高网络稳定性；最后在任务调度方面基于能量感知的负载均衡算法，优先分配通信任务给剩余电量较高的无人机，以延长整体网络的工作时长，设计节能通信协议，减少不必要的通信开销，提高通信效率。同时基于传输安全性考虑，可以采取跳频技术或者给信道加密。

2.2 无人机通信组网关键技术

在实现无人机集群通信组网的过程中，首要解决的是自适应拓扑管理与高效的路由协议设计。由于无人机集群面临动态环境的挑战，节点的快速移动、飞行障碍物变化以及电量不足等因素，导致传统静态拓扑无法满足通信需求，需要采用动态拓扑控制技术，确保在任何时刻网络的连通性，同时，为了应对复杂环境中的数据传输问题，设计低延迟、高可靠性的自适应路由协议，

并结合群体仿生优化算法来提升路由选择的效率和网络的稳定性。

随着无人机集群通信对任务执行的高效性和长时间运行的需求, 抗干扰与低功耗通信技术成为另外一项关键技术。复杂电磁环境中的干扰可能严重影响通信链路的稳定性, 需要智能干扰规避算法, 以及基于人工智能的频谱管理与调度技术, 确保通信的稳定性和安全性。同时, 为了实现无人机之间的协同任务与信息共享, 设计高效的数据融合与协同感知算法, 确保多个节点能够在带宽受限的情况下高效传输任务信息, 同时维持整个网络的稳定运行。

3 无人机通信组网节点分布设计优化

3.1 节点部署的最佳控制路由算法设计

在构建了无人机通信组网的链路均衡模型的基础上构建无人机通信组网节点分布式设计模型。本文提出基于集群最优覆盖率控制的无人机通信组网节点分布式设计方法, 根据无人机集群节点信息素的覆盖半径实现对节点轮换调度的自适应控制^[25]。节点加权通信链路拓扑结构配置可以通过如下公式来计算, 每个节点的通信能力根据节点的权重、距离和通信带宽等参数进行调整:

$$z = \sum_{k=0}^{N-1} k p_k = \sum_{k=0}^{N-1} k \binom{N-1}{k} p_{2D}^k (1 - p_{2D})^{N-1-k} = \sum_{k=0}^{N-1} k \binom{N-1}{k} (\pi R^2 / A)^k (1 - \pi R^2 / A)^{N-1-k} = (N-1)(\pi R^2 / A) \quad (7)$$

式中, k 为无人机的数据传递参数, R 为无人机通信组网网络覆盖面积, p_{2D} 为故障节点生成概率:

$$p_{2D} = \frac{e^{-\beta \cdot d_{2D}}}{1 + e^{-\alpha \cdot d_{2D}}} \quad (8)$$

其中: d_{2D} 是二维平面中节点间的距离, α 和 β 为衰减系数。

采用集群最优覆盖为寻优方法, 根据无人机之间的相互通信的链路传输带宽, 得到在 t 时刻的无人机姿态信息度为 $Bel(x_t) = p[x_t | d_{0,\dots,t}]$, 第 N 个节点的簇间分配时隙为:

$$S_t = \{s_t^j(x_t^j, w_t^j); i = 1, 2, \dots, N\} \quad (9)$$

$$S_t = \frac{1}{1 + e^{-\gamma \cdot (x_t - y_t)}} \quad (10)$$

其中: S_t 为节点在时隙 t 的带宽分配, 并且会影响节点传输速率, x_t 为簇间和簇内通的时隙带宽, γ 是调节因子, w_t 为相应的 x_t 的权值向量, $d_{0,\dots,t}$ 为 0 到 t 的时刻的载波参数。更新工作空间中间节点信息素对于 $t = 0, 1, \dots, k$, 对应的无人机通信组网节点载波测量值 $Z_k = \{z_0, z_1, \dots, z_k\}$, 用 x_k 表示组网交互编队控制所需的姿态信息参数, 估计值为 $\{x_k, y_k, \theta_k\}$ 。从而得到节点部署的路由控制系统模型描述为:

$$x_k = f\{x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}\} \quad (11)$$

式中, u_k 为无人机编队运动状态参数的输入数据, 比如俯仰角、横滚角等数据, w_k 表示过程干扰噪声。根据上述分析, 根据节点通信链路的均衡效益度解析结果设计节点组网的最佳控制路由协议, 采用群体仿生优化算法进行节点部署的寻优设计。

3.2 群体仿生寻优算法实现原理

群体仿生寻优算法是一类模仿自然界生物群体行为的优化算法, 在优化问题中具有广泛应用, 核心思想是通过模拟个体之间的协作与竞争行为, 搜索最优解。在无人机通信组网节点部署问题中, 群体仿生寻优算法能够高效地搜索节点的最佳部署位置, 从而提高网络覆盖率和减少干扰。

基于模拟自然界中的群体行为, 每个个体代表一个解, 通过不断调整其位置来寻找最优解, 并考虑个体的历史最佳位置和全局最佳位置, 逐步收敛到最优解。通过速度更新公式和位置更新公式来调整个体的位置可表示为:

$$\begin{aligned} v_i^{(t+1)} &= w \cdot v_i^{(t)} + c_1 \cdot r_1 \cdot [p_{best,i} - x_i^{(t)}] + c_2 \cdot r_2 \cdot [g_{best} - x_i^{(t)}] \\ x_i^{(t+1)} &= x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $v_i^{(t)}$ 和 $x_i^{(t)}$ 分别为个体的速度和位置, $p_{best,i}$ 为个体的历史最佳位置, g_{best} 为全体的全局最佳位置。通过不断更新速度和位置, 集群逐渐收敛到最优的节点部署方案。

在群体仿生寻优算法中, 适应度函数用于评估每个节点部署方案的质量。适应度函数考虑了通信覆盖率和干扰度等因素, 其形式如下:

$$F(x) = \alpha \cdot C_{coverage}(x) - \beta \cdot C_{interference}(x) \quad (13)$$

其中: $C_{coverage}(x)$ 为节点部署方案 x 的通信覆盖度, $C_{interference}(x)$ 为通信干扰度, α 和 β 为权重系数。

为提高算法的收敛速度和适应性, 本文采用改进型 PSO 算法 (Hybrid PSO), 结合强化学习 (RL) 优化搜索方向, 个体位置更新规则:

$$v_i(t+1) = w v_i(t) + c_1 r_1 (P_{best,i} - x_i) + C_2 r_2 \quad (14)$$

采用 Q-learning 机制, 根据历史信息调整搜索方向, 并通过适应度动态调整惯性权重 w , 加速收敛并避免局部最优。算法实现的具体步骤具体如下:

1) 初始化种群: 在算法的初始阶段, 随机生成一组候选解, 代表不同的节点部署方案, 其中每个解对应一个无人机的位置分布。

2) 适应度评估: 对每个候选解, 根据其覆盖能力、通信链路的稳定性和网络的连通性等因素进行适应度评估, 适应度函数值越高, 表示该方案越接近最优解。

3) 选择操作: 根据适应度值选择最优的个体, 优质的个体有更大的机会进入下一代种群。

4) 交叉操作: 通过交叉操作将两个父代个体的特征结合, 生成新一代的子代个体, 这一过程模拟了自然选择中的基因重组过程。

5) 变异操作: 在一定概率下, 对个体进行变异, 修改其特征, 以增加解空间的探索性, 避免陷入局部最优。

6) 终止条件: 当算法达到预设的最大迭代次数, 或者适应度值收敛时, 算法终止, 并返回当前最优解。

3.3 无人机通信组网节点部署寻优

利用多无人机的节点组网和路由探测方法, 建立各无人机通信组网的节点部署寻优模型, 通过自组网交互编队进行组网节点的路由设计, 采用群体仿生优化算法, 构建无人机组网寻优控制模型参数, 寻优参数分布集为 $z_k = h(x_k, M, v_k)$, x_k 表示通信范围, M 为环境地图, v_k 表示无人机保持期望的编队信息素。 Bel 表示节点间的置信度, 用于衡量数据传输的可靠性, 用于调整通信节点之间的信任关系和传输稳定性, 具体为:

$$Bel = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot \text{信号质量}}} \quad (15)$$

在群个体寻优中, 引入信息素作为引导参数, 得到无人机编队通信组网的置信度表达式为:

$$Bel(x_t) = p[x_t | z_t, u_{t-1}, z_{t-1}, \dots, u_0, z_0] \quad (16)$$

其中: x_t 为跟随节点的信息浓度, u_0, z_0 为期望路线移动的寻优状态参数, 根据接收到的领导节点的状态信息进行跟随控制^[26]得到领导节点与跟随节点的前向置信度概率密度函数表达式为:

$$Bel(x_t) = \frac{p(z_t | x_t, u_{t-1}, z_{t-1}, \dots, z_0) p(x_t | u_{t-1}, \dots, z_0)}{p(z_t | u_{t-1}, d_0, \dots, d_{t-1})} \quad (17)$$

其中: $p(z_t | u_{t-1}, d_0, \dots, d_{t-1})$ 为节点周期性地广播其状态信息的先验概率密度, 通过建立特定的通信拓扑模型, 得的通信网节点传输数据 z_t 与其过去的测量值 z_{t-1} 相互独立, 仅和 x_t 相关, 即:

$$p(x_t | z_t, u_{t-1}, \dots, z_0) = p(x_t | x_{t-1}, u_{t-1}) \quad (18)$$

则有:

$$Bel(x_t) = \frac{p(z_t | x_t) p(x_t | u_{t-1}, \dots, z_0)}{p(z_t | u_{t-1}, d_0, \dots, d_{t-1})} = \eta p(z_t | x_t) \int p(x_t | x_{t-1}, u_{t-1}) Bel(x_{t-1}) dx_{t-1} \quad (19)$$

在整个无人机通信组网节点覆盖区域中, 任何一个区域为其中一个无人机通信节点所覆盖则认为是全部被覆盖, 对于无人机通信组网覆盖区域 A , 衡量最优特征的适应度函数可以表示为:

$$F = \alpha \cdot A_1 - \beta \cdot A_2 \quad (20)$$

其中: A_1 为无人机通信有效覆盖面积, A_2 是通信干扰度, α 和 β 是权重系数。

在无人机通信组网优化过程中, 首先基于适应度函数的计算结果, 结合各部署节点的状态信息 (如位置坐

标、通信链路质量、带宽需求、剩余能量及任务优先级) 进行编队信息参数计算。通过欧几里得距离计算相邻无人机的相对位置, 结合 Delaunay 三角剖分或 Voronoi 划分方法构建初始拓扑结构。利用流量均衡算法动态分配带宽, 并基于能量利用率优化任务调度。最终, 采用群体智能优化算法 (PSO/ACO) 计算最优部署位置, 确保无人机集群通信网络的高效覆盖与稳定运行, 实现集群最优覆盖率控制。

4 仿真测试

构建无人机通信组网节点分布的仿真模型, 模型建立在 NS3 和 Matlab 仿真工具上。采用 MAVLink 协议帧格式无人机组网通信的数据封装, 通信链路采用 Dronekit 控制真实无人机的开源 Python 库, 在协同仿真平台的网络模拟端采用 NS3interface 接口来完成信息转发, 建立网络节点与无人机实例节点的对应关系, 飞行自组网将配置采用 802.11 g 的 WIFI 网络传输, 飞控固件为 ArduCopter。

无人机组网通信节点的数据采样周期为 50 Hz, 无人机集群分布的大小区域覆盖为 $A = 300 \times 300 \text{ m}^2$, 节点数为 $N = 20$, 仿生寻优的执行步长为 50 000 个时间步长, 单个节点的信息浓度覆盖半径为 $R = 500 \text{ m}$, 仿真模拟时间设定为 10 s, 实验环境的路标坐标系分布见表 1。

表 1 实验环境路标坐标系

路标	概率中心	实测中心	误差间距
1	(-120.5, 42.3)	(-124, 39)	4.13
2	(14.6, 226.5)	(14, 231)	5.20
3	(84, 94)	(84, 98)	5.38
4	(158.4, 225.6)	(162, 287)	5.28
5	(176, -74.3)	(182, -73)	6.12
6	(246.1, 131.2)	(258, 2, 130.4)	5.41

根据上述仿真环境和参数设定, 进行无人机通信组网的链路传输优化设计和节点部署, 得到仿真节点分布如图 2 所示, 其中 SN 为无人机编队通信组网中 Sink 节点, V_0 为监听节点。

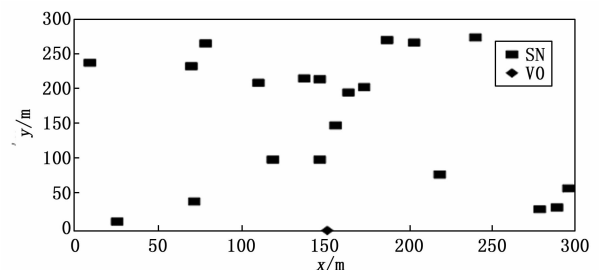


图 2 无人机通信组网的初始节点分布

根据图 2 的节点配置, 进行无人机通信组网的数据

传输的链路均衡分析, 得到组网 3 个通道的链路输出冲激响应如图 3 所示。

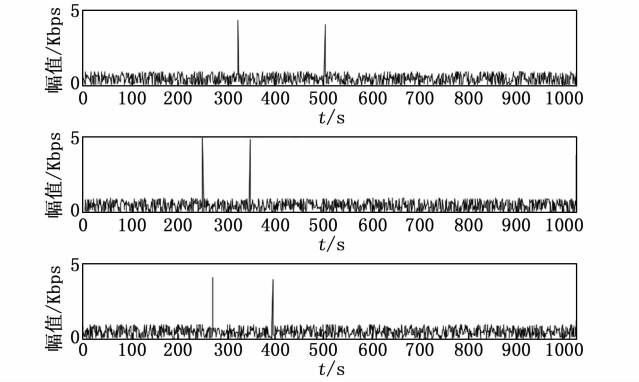


图 3 3 通道链路冲激响应

由图 3 得知, 在初始组网模式下, 受到链路不均衡以及多径干扰等因素的影响, 导致无人机通信组网通信链路传输出现失衡产生尖峰, 采用本文方法实现对无人机通信组网的集群链路模型设计后, 得到输出冲激响应如图 4 所示。

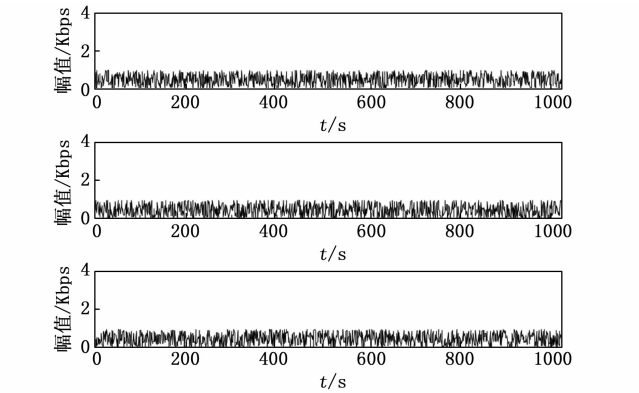
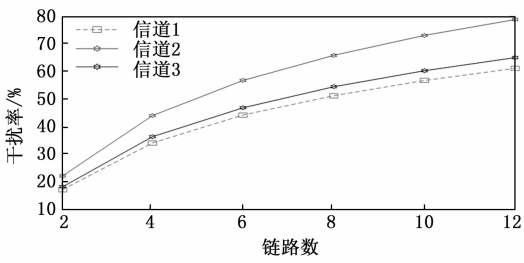


图 4 3 通道链路输出冲激响应

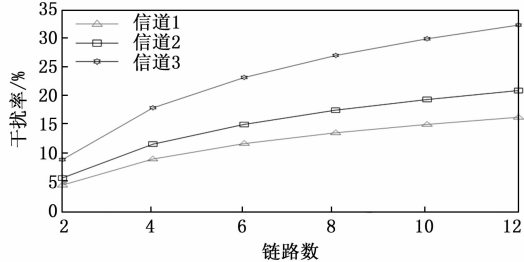
由图 4 得知, 本文方法对无人机通信组网节点进行优化部署后, 冲激响应的干扰得到有效抑制, 链路均衡性较好。测试本文方法实现无人机通信组网节点分布式设计后的干扰率, 得到对比结果如图 5 所示。

对比图 5 结果得知, 随着通信组网转发链路数的增大, 无人机通信数据传输的干扰率逐渐增大, 采用本文方法, 3 个通道的最大干扰率分别为 32%, 20% 和 17%, 相比传统方法最大干扰率分别是 80%, 62% 和 57% 有显著的改进。采用本文方法和传统方法, 测试无人机通信组网节点的覆盖效能和传输误码率, 得到对比结果如图 6 所示。测试在不同无人机节点规模的丢包率, 对比结果见表 2。

分析图 6 和表 2 结果得知, 相比传统方法, 本文通过无人机通信组网的集群链路均衡设计, 在较少的集群组网条件下实现最优覆盖, 提高了无人机集群组网的覆盖率, 降低了传输误码率, 随着节点规模的增大, 丢

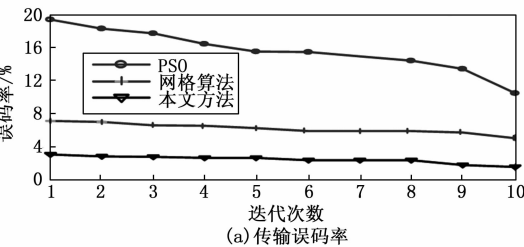


(a)改进前

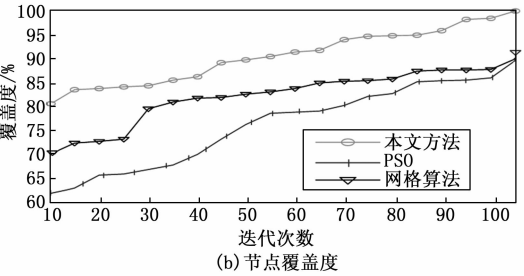


(b)改进后

图 5 干扰率测试



(a)传输误码率



(b)节点覆盖率

图 6 无人机通信组网节点分布设计效能对比

表 2 不同集群规模下的丢包率对比测试 %

节点数	本文方法	PSO	网格算法
10	9.7	18.1	38.4
20	8.8	16.6	38.3
30	8.5	16.4	36.9
40	7.9	15.7	34.7
50	7.7	15.4	34.3
60	7.4	14.6	34.3
70	7.3	14.3	30.2
80	7	12.5	26.8
90	6.6	12.1	26.2
100	5.9	11.2	25.4

包率降低, 但本文改进方法能在最小节点数目下实现更小的丢包率, 从而有效改善了无人机通信组网的稳定性和可靠性。

5 结束语

研究复杂环境下无人机通信组网节点分布式设计方法, 提高集群通信链路和通信节点的连通覆盖能力, 再优化作战效能。本文提出基于集群最优覆盖率控制的无人机通信组网节点分布式设计方法。采用双向网络和混合网络两种模式构建无人机通信组网的路由传输结构模型, 构建链路均衡配置模型, 实现无人机通信组网的全覆盖设计, 采用群体仿生优化算法进行节点部署的寻优。以链路转发数据冲激响应均衡性、抗干扰能力、通信组网覆盖能力、通信误码率以及丢包率等参数为测试指标进行性能验证和仿真测试。研究得出, 采用本文方法实现无人机通信组网节点分布式设计, 链路传输的均衡性较好, 冲激毛刺得到有效抑制, 通信组网的有效覆盖度较高, 传输误码较低, 抗干扰能力较强, 有效降低了丢包率。

下一步, 将在无人机通信组网平台搭建设计以及通信时延优化等方面进一步研究, 提升无人机作战应用场景的适应能力。

参考文献:

- [1] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展 [J]. 航空学报, 2020, 41 (4): 20-45.
- [2] 潘振华, 夏元清, 鲍泓, 等. 无人智能集群系统决策与控制研究进展 [J]. 中国图象图形学报, 2024, 29 (11): 3195-3215.
- [3] 钟剑峰, 王红军. 基于 5G 和无人机智能组网的应急通信技术 [J]. 电讯技术, 2020, 60 (11): 1290-1296.
- [4] 王肖飞, 李冬, 丁伟锋, 等. 反无人机集群作战研究 [J]. 飞航导弹, 2020 (9): 48-51.
- [5] RASTGOFTAR H, ATKINS E. Safe multi-cluster UAV continuum deformation coordination [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 640-655.
- [6] 曲逸帆. 基于强化学习的四旋翼无人机编队控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [7] 张兆宁, 孙英然. 基于路径检测的航空器动态滑行路径优化模型 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (11): 53-59.
- [8] 朱许, 张博涵, 王正宁, 等. 基于深度强化学习的无人机集群编队避障控制 [J]. 飞行力学, 2025, 22 (2): 1-8.
- [9] 姜玉莲, 汪依莎, 王海伟. 时变通信网络下多无人机系统分布式编队避障控制 [J]. 长春工业大学学报, 2024, 45 (4): 289-298.
- [10] 张家歌. 基于 ROS-OMNeT++ 的无人机集群自组网协议的研究与仿真 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
- [11] 付有斌, 康巧燕, 王建峰, 等. 无人机飞行自组网通信协议 [J]. 指挥与控制学报, 2021, 7 (1): 89-96.
- [12] LI S H, LIU H X, FU W S. An improved predictive functional control method with application to PMSM systems [J]. International Journal of Electronics, 2017, 104 (1): 126-142.
- [13] 张海南, 游晓明, 刘升. 动态进化与交互学习机制融合的蚁群算法 [J]. 信息与控制, 2020, 49 (3): 297-305.
- [14] 姬晓辉, 孙泽宇, 阎奔, 等. 基于联合节点行为策略的 WSN 覆盖控制算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (16): 99-107.
- [15] 秦明峰, 胡丽格. 一种基于伪距残差加权的最小二乘定位算法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (12): 44-48.
- [16] 徐东辉, 刘思佚, 张文博, 等. 基于改进简单加权法的多制式通信切换策略 [J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (1): 41-49.
- [17] 林洁, 吴洁, 刘艳, 等. 信号序列预测和缓冲区间算法下光纤通信网络时延自动控制 [J]. 集成电路与嵌入式系统, 2024, 24 (9): 56-61.
- [18] 刘佳榆, 余华, 徐舒. 基于通道特征选择的加权响应目标跟踪 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (12): 253-258.
- [19] LIU Y. Enhanced stability of aerial refueling process of UAV based on fuzzy PID [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2646 (1): 1529-1545.
- [20] ZHU H J, LIU C H, LI M, et al. Unmanned aerial vehicle passive detection for internet of space things [J]. Physical Communication, 2021, 49: 958-965.
- [21] TONG B D, CHEN W, SHI Y H. Fractional order darwinian pigeon-inspired optimization for multi-UAV swarm controller [J]. Guidance, Navigation and Control, 2022, 2 (2): 175-192.
- [22] WANG Z, LAM H K, XIAO B, et al. Event-triggered prescribed-time fuzzy control for space teleoperation systems subject to multiple constraints and uncertainties [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 29 (9): 2785-2797.
- [23] HUANG F, ZHANG W, CHEN Z, et al. RBFNN-based adaptive sliding mode control design for nonlinear bilateral teleoperation system under time-varying delays [J]. IEEE Access, 2019 (7): 11905-11912.
- [24] ZHENG Z, TONG S, WANG E, et al. Robust consensus tracking control for multi-unmanned-aerial-vehicle (UAV) system subjected to measurement noise and external disturbance [J]. Drones, 2025, 9 (1): 61-71.
- [25] WU Q L, ZHU Q D. Fixed-time fault-tolerant attitude tracking control for UAV based on fixed-time extended state observer [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2024, 96 (6): 838-844.
- [26] 逯建琦, 南建国, 王伟. 基于萤火虫算法的无人机组网多径路由算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34 (9): 69-76.