面向 FANET 的 N-UCDS 虚拟骨干网构建方法

王　聪[1]，　赵几航[2]，　吴　霞[3]，　马文峰[1]，　田　辉[1]，　于　琼[1]

（1. 陆军工程大学 野战工程学院，江苏 南京 210007；2. 31603 部队，江苏 徐州 221000；
3. 31131 部队，江苏 南京 210007）

摘要：大规模小型无人机通信网络会出现频繁的链路失效，因此有效的拓扑控制是当前飞行自组网的研究热点。为了符合大规模无人机任务多样性的场景，提出一种随机路径点-飞行信息预测移动模型，无人机节点可以通过邻居节点的飞行信息对链路持续时间进行预测。在此基础上，提出一种新的统一连通支配集（new unifying connected dominating set，N-UCDS）算法，与 UCDS 算法相比，N-UCDS 算法改进了连通支配集成员的选取方式、虚拟骨干网的构建和维护机制、支配因子的计算方法和 HELLO 报文发送间隔。仿真结果表明，该方法的算法鲁棒性有较大提升，网络构建和维护时间均减少了一个周期，网络生存时间提升了 5%，HELLO 报文开销随节点最大通信半径的增大而减小。

关键词：飞行自组网；连通支配集；虚拟骨干网；N-UCDS 算法

中图分类号：TP393；V279　　**DOI**：10.12018/j.issn.2097-0730.20220117001

FANET-Oriented Construction Method of N-UCDS Virtual Backbone Network

WANG Cong[1]，　ZHAO Jihang[2]，　WU Xia[3]，　MA Wenfeng[1]，
TIAN Hui[1]，　YU Qiong[1]

（1. College of Field Engineering，Army Engineering University of PLA，Nanjing 210007，China；
2. Unit 31603 of PLA，Xuzhou 221000，China；3. Unit 31131 of PLA，Nanjing 210007，China）

Abstract：As the communications network of large-scale small UAVs has frequent link failures，effective topology control is the current research focus of flying ad-hoc networks（FANET）. To meet the diverse scenarios of large-scale UAV missions，a random waypoint-flight information prediction mobility model is proposed in this paper，by which UAV nodes can predict the link duration through the flight information of neighboring nodes. On this basis，an N-UCDS algorithm is proposed. Compared with the UCDS algorithm，the N-UCDS algorithm improves the selection method of members of connected dominating sets，the construction and maintenance mechanism of virtual backbone networks，the calculation method of dominant factors and the transmission interval of HELLO packets. The simulation results show that the robustness of the algorithm in the proposed method is greatly improved，the time to construct and maintain the network is reduced by one cycle respectively，the network survival time is increased by 5%，and the HELLO packet overheads decrease with the increase of the maximum communication radius of nodes.

Key words：flying ad-hoc network（FANET）；connected dominating set；virtual backbone network；N-UCDS algorithm

近年来，无人机系统由于其作战效能显著、成本　　低廉、人员伤亡小和易于大批量装备等特点，成为影

收稿日期：2022-01-17
基金项目：国家自然科学基金（61771486，62001515，62103441）；江苏省博士后科研流动站计划项目（2019K090）。
第一作者：王　聪，博士，副教授，主要研究计算机网络，lgd_dolphin@139.com。
通信作者：赵几航，硕士研究生，主要研究计算机网络，lgd_zhaojihang@163.com。

响作战进程的重要因素。特别是无人机集群系统，具有可扩展性好、抗毁性强、效率高等优点，可以在战场侦察、边境巡逻、通信中继、精确打击等多种军事行动中发挥重要作用。而无人机间的可靠通信是集群系统任务协同的基础和前提。飞行自组网(flying ad-hoc network，FANET)[1-2]是构建无人机通信网络的核心技术。它不依赖于预先构建的通信基础设施，可以通过无线信道在无人机之间传输多种信息，从而形成多跳、自组织、分布式网络。

无人机通信网络具有以下特点[3]：(1) 节点高速移动。节点的移动速度可以达到30～460 km/h；(2) 大规模稀疏分布。无人机在三维空间独立运行，分布范围广；(3) 多种通信服务共存。无人机在执行多功能任务时通常需要传输多种类型的服务，不同类型的服务具有不同的QoS要求，如延迟、传输速率、吞吐量等。

由于上述特点，尤其是高速移动和稀疏分布的特性，导致无人机网络链路频繁失效，网络鲁棒性差，给网络拓扑控制带来严峻挑战。因此，有效的拓扑控制是FANET亟需解决的关键性问题之一。

拓扑控制主要解决的是无人机节点连通性和路由维护问题，主流的拓扑控制算法可分为节点功率控制算法和层次性拓扑控制算法。由于无人机节点在调节发射功率方面受诸多因素限制，因此层次性拓扑控制算法更加适用于大规模无人机集群网络。一种有效的手段是在无人机集群系统中基于连通支配集(connected dominant set，CDS)的方法构建虚拟骨干网，虚拟骨干网是指在无人机节点中选取部分无人机节点作为骨干节点，构成骨干网，维护拓扑结构。所有节点只需将消息发送给骨干网中的任意节点，就可以被转发到目的节点，构建虚拟骨干网可以减少路由开销和消息转发量。由于无人机集群具有高动态性，在FANET中骨干节点需要不断地更换，因此选取的骨干节点只能作为临时的支配节点，负责对其他节点消息的转发。

目前，基于CDS的方法构建虚拟骨干网广泛地应用于移动自组网(mobile ad-hoc network，MANET)、车载自组网(vehicular ad-hoc network，VANET)、FANET等自组织网络中，文献[4,5]总结了MANET、VANET、FANET三种不同的自组织网络类别的差异。一般的研究思路是首先构造极大独立集(maximal independent set，MIS)，再添加非独立点来连通极大独立集得到CDS，这样所有的节点都能在MIS中找到至少一个与之相连接的节点，但找到最小连通集已被证明是NP－hard问题[6]。基于此思路，文献[7]提出了优先选择ID和Level的两种CDS构建算法，文献[8]提出了逐层扩散消息的EECDS算法。同时部分学者提出基于生成树的分布式算法构建完整CDS，文献[9]先构造一个全网密集连接的粗糙CDS，而后通过剔除冗余连接点形成较小的CDS；文献[10]提出了一种基于连通支配集的能量高效分布式路由算法，可以有效地缓解移动自组织网络中的广播风暴问题。文献[11]提出了d-鲁棒的CDS概念，并设计了相应的算法来构造具有不稳定传输范围的无线网络；文献[12]探索了无人机群之间的智能合作，形成的FANET可在紧急情况下支持实时通信。文献[13,14]提出了一种统一连通支配集(unifying connected dominating set，UCDS)算法，UCDS算法实现简单、执行速度快、反应灵敏，当网络的拓扑发生变化时，只有局部的节点需要进行计算更新，收敛速度快，因此UCDS算法非常适应于拓扑变化较快的网络。在UCDS算法中虚拟骨干节点由支配集和连通集的成员担任，支配集成员负责普通节点的路由分发和中继转发，连通集成员负责将所有的支配集成员进行连通。UCDS算法是一种分布算法，每个节点只需要获取两跳邻居拓扑信息就可正确执行该算法，并不需要获得全网拓扑结构。文献[15,16]将UCDS算法应用于基于IP组网的未来战术通信网络，文献[17,18]将UCDS算法应用于WNW战术波形网络和战术互联网。浙江大学的徐莹莹等将UCDS算法构建虚拟骨干网应用于OLSR路由协议[19]，对消息格式、协议流程等进行了设计。但传统的UCDS算法并没有考虑到小型无人机节点具有三维运动、能量受限、拓扑变化频繁等特点。

针对上述问题，本文提出一种基于N-UCDS的FANET虚拟骨干网构建方法。首先，为了使无人机的运动轨迹符合大规模无人机集群任务多样性的场景，本文在传统移动模型的基础上提出一种随机路径点-飞行信息预测(random waypoint flight information prediction，RWP-FIP)模型，可实现无人机节点预测邻居节点的位置，预测链路可持续时间。其次，在现有UCDS算法的基础上进行改进，在不增加骨干节点数量的前提下，增多了连通集成员数量，提高了网络的鲁棒性；结合无人机电量、邻居节点个数和链路持续时间，提出一种新的支配因子计算方法，延长了网络的生存时间；最后，设计虚拟骨干网的构建和维护机制，大幅减小了每个周期骨干节点失效和新增的变化速率，同时缩短了在构建骨干网和维护骨干网阶段所需的周期；根据邻居节点位置预测信息，自适应调整HELLO报文发送间

隔，能够有效减小系统中 HELLO 报文的总开销。

1　系统模型

无人机集群从出发区域起飞，飞往目标作业区域的某一位置后开始分散作业，执行各自的既定任务，模型场景如图 1 所示。单个无人机的移动轨迹可以用一个集合表示，$\{(\boldsymbol{X}_0,\boldsymbol{X}_1,S_1),(\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,S_2),\cdots,(\boldsymbol{X}_{n-1},\boldsymbol{X}_n,S_n)\}$，其中 $\boldsymbol{X}_{n-1}=(x_{n-1},y_{n-1},h_{n-1})$ 表示起始路径点，$\boldsymbol{X}_n=(x_n,y_n,h_n)$ 表示目标路径点，S_n 表示路径点 $\boldsymbol{X}_n$ 处执行任务的悬停时间。

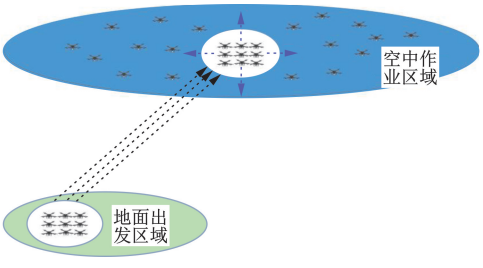

图 1　系统模型场景

假设路径点 $\boldsymbol{X}_{n-1}$ 与 $\boldsymbol{X}_n$ 在 x-y 平面上投影的位移长度 l_n 符合瑞利分布[20]，概率密度函数可表示为

$$f_{L_n}(l_n)=\frac{l_n}{\sigma^2}\mathrm{e}^{-\frac{l_n^2}{2\sigma^2}}\qquad l_n>0 \tag{1}$$

当 $\sigma=\sqrt{\frac{1}{2\pi\lambda}}$ 时，分布函数和概率密度函数可表示为

$$F_{L_n}(l_n)=P(L_n\leqslant l_n)=1-\exp(-\pi\lambda l_n^2) \tag{2}$$

$$f_{L_n}(l_n)=\frac{\partial F_{L_n}(l_n)}{\partial l_n}=2\pi\lambda l_n\exp(-\pi\lambda l_n^2) \tag{3}$$

位移长度的均值 $\mu(l_n)=\sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}=\sqrt{\frac{1}{4\lambda}}$，方差 $D(l_n)=\frac{4-\pi}{2}\sigma^2=\frac{4-\pi}{4\pi\lambda}$。

路径点 $\boldsymbol{X}_{n-1}$ 与 $\boldsymbol{X}_n$ 在 x-y 平面上投影位移的角度符合均匀分布[20]，每个路径点的高度符合高斯分布，无人机在目标区域飞行的高度为 $H_{\mathrm{low}}\leqslant h\leqslant H_{\mathrm{high}}$，令 $\mu_h=(H_{\mathrm{high}}+H_{\mathrm{low}})/2$；由于高斯分布的“$3\sigma$”原则，令 $\sigma_h=(H_{\mathrm{high}}-H_{\mathrm{low}})/6$。无人机在 x-y 平面上投影的位移长度与飞行高度相互独立，故两者的联合概率密度可表示为[21]

$$f_{L,H}(l,h)=\frac{6\sqrt{2\pi}\lambda l_n}{(H_{\mathrm{high}}-H_{\mathrm{low}})}\cdot \exp\left(-\frac{18\left(h-\frac{H_{\mathrm{high}}-H_{\mathrm{low}}}{2}\right)^2}{(H_{\mathrm{high}}-H_{\mathrm{low}})^2}-\pi\lambda l_n^2\right) \tag{4}$$

无人机在路径点 $\boldsymbol{X}_{n-1}$ 与 $\boldsymbol{X}_n$ 之间的实际位移长度可表示为

$$u_n=\|\boldsymbol{X}_n-\boldsymbol{X}_{n-1}\|=\sqrt{l_n^2+(h_n-h_{n-1})^2} \tag{5}$$

路径点 $\boldsymbol{X}_{n-1}$ 与 $\boldsymbol{X}_n$ 在 h 方向上的位移角度可表示为

$$\arccos\varphi=\frac{h_n-h_{n-1}}{l_n} \tag{6}$$

在每个路径点的悬停时间 S_n 符合高斯分布，每个路径点的位置 $\boldsymbol{X}_n$ 可表示为：$\boldsymbol{X}_n=(x_{n-1}+l_n\cos\theta,y_{n-1}+l_n\sin\theta,h_n)$。根据任务场景大小的不同，可通过调节参数 λ 的大小对路径点之间的位移长度均值进行设置。

2　N-UCDS 算法设计实现

2.1　UCDS 算法

UCDS 算法是一个分布式算法，每个节点在获取两跳邻居信息的基础上，产生支配集合（dominating set，DS）和连通集合（connected set，CS），最后形成 CDS，构成虚拟骨干节点。算法规则由 DS 规则、非 CS 规则、CS 规则和 CS 例外规则这 4 个规则组成。DS 规则用于产生 DS 成员，非 CS 规则用于排除一定不属于 CS 的节点，CS 规则和 CS 例外规则用于产生 CS 成员。算法的运行流程为：DS 规则→非 CS 规则→CS 规则和 CS 例外规则。

2.2　N-UCDS 算法

2.2.1　DS 规则

UCDS 算法中，DS 成员的选择主要依据支配因子。一般情况下，支配因子通过邻居节点个数确定。在小型无人机集群系统中，无人机的能量受限，所以在 DS 成员选择过程中，应充分考虑能耗对无人机网络生存时间的影响。本文重新定义支配因子。对于节点 i 而言，其邻居节点 j 的支配因子 d_{ij} 由节点 j 的一跳邻居个数 N_i、剩余电量 E_r 以及节点 i 和 j 间链路持续时间 T_{ij} 综合决定，其中 c_1、c_2、c_3 为各项的归一化系数，N 表示无人机总数量，E_{t} 表示单个无人机的总电量，$T_{\max}$ 表示链路的最大持续时间。

$$d_{ij}=c_1\frac{N_i}{N}+c_2\frac{E_r}{E_{\mathrm{t}}}+c_3\frac{T_{ij}}{T_{\max}}\qquad c_1+c_2+c_3=1 \tag{7}$$

在小型无人机的飞行中，无人机能耗包括推进和悬停能耗以及无人机通信能耗。本文假设 75% 的电

量用于推进和悬停，25%的电量用于通信，所有无人机初始时刻的电量为100%，对无人机电量消耗速率分以下4种情况讨论：(1) 无人机节点为DS成员且处于移动状态，电量消耗速率为δ_1。(2) 无人机节点为DS成员且处于悬停状态，电量消耗速率为δ_2。(3) 无人机节点为非DS成员且处于移动状态，电量消耗速率为δ_3。(4) 无人机节点为非DS成员且处于悬停状态，电量消耗速率为δ_4。

T_{ij}的计算则需要在上述移动模型的基础上，通过对邻居节点位置的预测得到。

假设无人机在路径点的初始移动速度为0，初始加速度为$\varepsilon_0>0$，当无人机的运动速度为v时，在x,y,h方向上的分速度分别为

$$v_{(x)}=\frac{l_n\cos\theta}{\sqrt{l_n^2+(h_n-h_{n-1})^2}}v=v\sin\varphi\cos\theta \quad (8)$$

$$v_{(y)}=\frac{l_n\sin\theta}{\sqrt{l_n^2+(h_n-h_{n-1})^2}}v=v\sin\varphi\sin\theta \quad (9)$$

$$v_{(h)}=\frac{(h_n-h_{n-1})}{\sqrt{l_n^2+(h_n-h_{n-1})^2}}v=v\cos\varphi \quad (10)$$

假设无人机节点之间相互交换信息的时间间隔为ΔT，可以将ΔT分为m个单位时间Δt，表示为：$\Delta T=t_n-t_{n-1}=m\Delta t$，无人机对邻居无人机任意$\Delta t$后的位置信息可通过马尔可夫预测[22]得到，将分散的时间点进行连续化，可表示为(以x轴为例，y,h轴同理)

$$x_{(n)}^{(k)}=x_{(n-1)}+v_{(n-1)(x)}k\Delta t+\frac{1}{2}\varepsilon k^2\Delta t^2 \quad (11)$$

式中$\varepsilon=(v_n-v_{n-1})/\Delta T$。每经过$\Delta T$后对加速度信息进行更新修正。

无人机在下一个ΔT时的位置信息经过马尔可夫预测，可表示为(以x轴为例，y,h轴同理)

$$x_{(n)}^{(m)}=x_{(n-1)}+v_{(n-1)(x)}\Delta T+\frac{1}{2}\varepsilon\Delta T^2 \quad (12)$$

无人机节点i与j的实时距离可表示为

$$d(i,j)=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(h_i-h_j)^2} \quad (13)$$

为简化分析，假设无人机的活动空间为$[-L,L]\times[-L,L]\times[H_{\text{low}},H_{\text{high}}]$，所有无人机通信能力相同、均采用全向通信，认为当满足$d(i,j)<d_{\max}$时，无人机节点i和j之间即可通信，无人机节点i向j传输信号的信噪比可表示为

$$\text{SNR}_{ij}=\frac{P_{ij}H_{ij}d^{-\alpha}(i,j)G_d}{N_0+U} \quad (14)$$

式中：P_{ij}表示无人机节点i向j传输信号的功率，H_{ij}表示信道的功率增益，α表示传输链路的平均路径损耗指数，G_d表示天线增益，$N_0\sim(0,N)$表示信道中的高斯白噪声，U表示其余无人机节点带来的平均信号干扰。其可表示为

$$U=\frac{3n(R^{3-\alpha}-d_{\min}^{3-\alpha})}{2R^3(3-\alpha)} \quad (15)$$

式中：$d_{\min}$表示无人机之间可能的最小距离，n表示以无人机节点为球心，在半径为R的球体内的无人机平均数量。其可表示为

$$n=\frac{N\pi(8L^2+(H_{\text{high}}-H_{\text{low}})^2)^{\frac{3}{2}}}{3L^2\times(H_{\text{high}}-H_{\text{low}})} \quad (16)$$

无人机节点i向j传输信号的成功概率可表示为

$$P(\text{SNR}_{ij}\geqslant\psi)=P\left(H_{ij}\geqslant\frac{\psi d^{\alpha}(i,j)(N_0+U)}{P_{ij}G_d}\right)=\exp\left(-\frac{\psi d^{\alpha}(i,j)(N_0+U)}{P_{ij}G_d}\right) \quad (17)$$

式中：ψ表示信噪比阈值，如果$P(\text{SNR}_{ij}\geqslant\psi)\geqslant\eta$，则表示无人机节点$i$向$j$传输信号是可靠的，其中$\eta$表示传输概率的约束门限。当$P(\text{SNR}_{ij}\geqslant\psi)=\eta$时，无人机的传输半径达到最大，可表示为[22]

$$d_{\max}=\left(-\frac{P_{ij}\ln(\eta)G_d}{\psi(N_0+U)}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (18)$$

依据无人机速度方向间的夹角以及当前的距离，预测链路的持续时间，因为无人机在两个路径点之间移动时存在加速-匀速-减速的过程，所以在预测链路的持续时间中，无人机的速度如果取当前时刻的速度，预测将不准确，故这里取无人机的平均移动速度。

无人机节点i在当前位置经历时间t后所在的位置可表示为

$$\begin{aligned}X_{i+t}&=(x_{i+t},y_{i+t},h_{i+t})=\\&(x_i+\bar{v}_it\sin\theta_i\cos\varphi_i,y_i+\\&\bar{v}_it\sin\theta_i\sin\varphi_i,h_i+\bar{v}_it\cos\varphi_i)\end{aligned} \quad (19)$$

当无人机节点i和j都处于运动或悬停状态时，k_x,k_y,k_h为两架无人机在x,y,h方向上的速度变化量，可表示为[23]

$$k_x=\bar{v}_i\sin\theta_i\cos\varphi_i-\bar{v}_j\sin\theta_j\cos\varphi_j \quad (20)$$

$$k_y=\bar{v}_i\sin\theta_i\sin\varphi_i-\bar{v}_j\sin\theta_j\sin\varphi_j \quad (21)$$

$$k_h=\bar{v}_i\cos\varphi_i-\bar{v}_j\cos\varphi_j \quad (22)$$

当两架无人机做匀速直线运动时，通信链路持续时间的计算公式为

$$(x_i-x_j+k_xT)^2+(y_i-y_j+k_yT)^2+(h_i-h_j+k_hT)^2=d_{\max}^2 \quad (23)$$

令

$$\begin{cases} a = (k_x^2 + k_y^2 + k_h^2) \\ b = 2[k_x(x_i - x_j) + k_y(y_i - y_j) + \\ \quad k_h(h_i - h_j)] \\ c = k_x^2 + k_y^2 + k_h^2 - d_{\max}^2 \end{cases} \tag{24}$$

则

$$T = F(\bar{v}_i, \theta_i, \varphi_i, \bar{v}_j, \theta_j, \varphi_j, X_i, X_j, T_i, T_j, S_i, S_j) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{25}$$

式中：$\bar{v}_i, \theta_i, \varphi_i, \bar{v}_j, \theta_j, \varphi_j$ 表示此时无人机节点 i 和 j 的速度信息；X_i, X_j 表示此时无人机节点 i 和 j 的位置信息；如果处于运动状态，T_i、T_j 表示无人机节点 i 和 j 到达下一个路径点所需要的时间，如果处于悬停状态，S_i、S_j 表示无人机节点 i 和 j 的剩余悬停时间。得到无人机节点 i 与 j 的通信链路持续时间 T_{ij} 计算方法如算法 1 所示。

算法 1　无人机节点 i 与 j 的通信链路持续时间 T_{ij}

Input：$\bar{v}_i, \theta_i, \varphi_i, \bar{v}_j, \theta_j, \varphi_j, X_i, X_j, T_i, T_j, S_i, S_j$
Output：T_{ij}
Case 1. 节点 i 处于运动状态，节点 j 处于运动状态：
假设 $T_i < T_j$，反之同理。
if($T \leqslant T_i$)$T_{ij} = T$
if($T > T_i$)
$T = F(0, 0, 0, \bar{v}_j, \theta_j, \varphi_j, X_{i+\min(T_i, T_j)}, X_{j+\min(T_i, T_j)}, 0, T_j - \min(T_i, T_j), \mu_s, 0)$
$T_{ij} = \min(T_i, T_j) + \min(T, \mu_S)$
Case 2. 节点 i 处于运动状态，节点 j 处于悬停状态：

假设 $T_i < S_j$	假设 $T_i \geqslant S_j$
if($T \leqslant T_i$)$T_{ij} = T$	if($T \leqslant S_j$)$T_{ij} = T$
if($T > T_i$)$T_{ij} = S_j$	if($T > S_j$)$T_{ij} = S_j$

Case 3. 节点 i 处于悬停状态，节点 j 处于运动状态：与 Case 2 同理。
Case 4. 节点 i 处于悬停状态，节点 j 处于悬停状态：$T_{ij} = \min(S_i, S_j)$

2.2.2　CS 规则和 CS 例外规则

本文将 UCDS 算法规则中的 CS 规则和 CS 例外规则进行合并，提出了一种新的 CS 规则。在 UCDS 算法中，所有的非 DS 成员节点都需要执行 CS 规则和 CS 例外规则来判断自身是否可以成为 CS 成员，然后将计算的结果封装在 HELLO 报文中，广播给距自己最近的 DS 成员，由 DS 成员进行判断并选取 CS 成员。而在 N-UCDS 算法中，当一个节点被选取成为 DS 成员后，它将自动执行新的 CS 规则，依据两跳邻居节点信息进行判断和计算，并直接指定哪些邻居候选连通集（connected set candidate，CS'）节点为 CS 成员。这样在不影响算法正确性的前提下，节省了一个周期时间，加快了拓扑收敛时间，使其更适用于无人机网络。具体的 N-UCDS 算法规则如下：

（1）DS 规则。节点 i 指派节点 i 与其所有邻居节点 j 中具有最高 d_{ij} 的节点为 DS 成员。

（2）非 CS 规则。如果节点 i 是非 DS 成员，且任意两个邻居 j 和 k 都能相互连接，则节点 i 为普通节点。

（3）CS 规则。对于 DS 成员节点 j，将邻居节点为 CS'成员的节点 i 根据支配因子 d_{ji} 的高低进行排序，对节点 i 存在邻居节点 k（$j \neq k$，且如果节点 k 已被记录，则直接下一个节点 k 进行判断），有① 如果节点 k 为 DS 成员，节点 j 与 k 的共同邻居中有一个 CS 成员，则对下一个节点 k 进行判断；② 如果节点 k 为非 DS 成员，节点 i 与该节点 k 有一个共同的 DS 邻居节点，则对下一个节点 k 进行判断；③ 如果 j 和 k 的 DS 邻居集不相交，则 j 指定节点 i 为 CS 成员，并对节点 k 进行记录，然后对下一个节点 k 进行判断。

2.3　虚拟骨干网构建和维护机制

为保证 N-UCDS 算法能够正确执行，需要规定算法的运行流程。因为节点间需要进行信息同步，故所有的无人机节点周期性地发送 HELLO 包进行邻居发现和链路感知，同时确保节点间的链路是基于双向对称的，因此节点可随时掌握一二跳邻居信息。初始状态时，需要构建无人机虚拟骨干网；当无人机开始移动后，需要维护虚拟骨干网。虚拟骨干网构建和维护机制如表 1 所示。

表 1　虚拟骨干网构建和维护机制

构建与维护
初始构建：
Step1. 初始状态时节点均为 CS'成员，每个节点首先根据 DS 规则指派 DS 成员；
Step2. 当节点被指派为 DS 成员后，根据 CS 规则，计算哪些邻居节点是 CS 成员；
Step3. 当节点不属于 DS 成员时，根据非 CS 规则判断本节点是否为普通节点；
Step4. 当本节点不是普通节点时，检查是否有邻居 DS 成员指定自身为 CS 成员；
Step5. 如果有则节点为 CS 成员；
两跳邻居拓扑结构发生变化时进行维护：
//循环
Step1. CS'成员根据非 CS 规则判断本节点是否为普通节点；
Step2. 如果 CS'成员 i 没有邻居 DS 成员，则指派邻居 CS'成员 j 中支配因子 d_{ij} 最大的节点为 DS 成员；
Step3. 如果 DS 成员 i 和其所有邻居节点 j 都有其他 DS 邻居节点（除节点 i 以外），则节点 i 变为 CS'成员；
Step4. 如果有则节点为 CS 成员；

在 UCDS 算法中，无人机节点 HELLO 报文的发送间隔是固定不变的，这会导致大量的网络资源浪费和无人机能量浪费。针对这个问题，本文基于邻居节点位置预测，自适应调整 HELLO 报文发送

间隔。在链路质量稳定时，HELLO 报文发送间隔加大；在无人机间距离接近最大通信距离时，缩短 HELLO 报文发送间隔，便于无人机节点快速获取邻居节点信息的变化。具体方法如下：

在 N-UCDS 算法中 DS 成员和 CS 成员作为骨干节点，HELLO 报文发送间隔固定为 ΔT，其余节点依据距其最近 DS 成员的距离自适应调节 HELLO 报文发送间隔。对于无人机非骨干节点 i 和距节点 i 最近的 DS 成员节点 j 而言：如果 $d(i,j) < \tau d_{\max}$，则节点 i 的 HELLO 报文发送间隔固定为 $\omega_1 \Delta T$，否则节点 i 的 HELLO 报文发送间隔固定为 $\omega_2 \Delta T$。

3 仿真分析

3.1 参数设置

假设无人机集群在初始空间内呈随机分布，需要对虚拟骨干网进行构建，而后各无人机在目标区域进行移动和作业，需要对虚拟骨干网进行维护，仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

初始空间分布	200 m×200 m×[80 m,120 m]
仿真场景	5 km×5 km×[80 m,120 m]
节点数目	100
节点速度/(m·s^{-1})	0～20
节点通信距离/m	1 000～2 000
仿真时间/s	1 000
位移长度参数 λ	10^{-6}
悬停时间均值 μ_s/s	10
HELLO 报文发送间隔 ΔT/s	1
HELLO 报文发送间隔参数 ω_1	1.5
HELLO 报文发送间隔参数 ω_2	0.8
HELLO 报文发送间隔距离判定参数 τ	0.8
电量消耗速率参数 δ_1	0.1
电量消耗速率参数 δ_2	0.06
电量消耗速率参数 δ_3	0.07
电量消耗速率参数 δ_4	0.03
支配因子归一化系数 c_1	0.5
支配因子归一化系数 c_2	0.25
支配因子归一化系数 c_3	0.25

3.2 实验结果与分析

图 2 表示无人机节点在不同最大通信距离的情况下，系统网络达到稳定后，DS、CS 以及 CDS 的成员数量变化情况。仿真结果可以看出，随着无人机节点最大通信距离的增加，各集合成员数量都在下降，同时 N-UCDS 算法和 UCDS 算法所产生的骨干节点数量大致相等，但 N-UCDS 算法产生的 DS 成员数明显少于 UCDS 算法，CS 成员数明显多于 UCDS 算法。较少的支配集合成员和较多的连接集合成员可以使得网络具有更强的鲁棒性，可以有效地应对网络波动带来的影响。

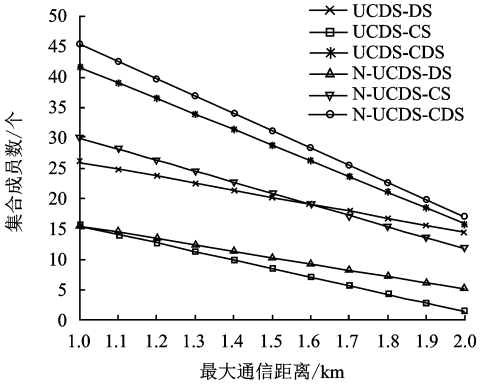

图 2 节点不同最大通信距离时集合成员数情况

图 3 表示无人机节点在不同最大通信距离的情况下，系统网络达到稳定后，DS 和 CDS 成员每个周期数量变化的平均情况。在 FANET 中无人机节点具有高动态性，拓扑变化快，导致链路易失效，为了维护网络的运行只能频繁地更换骨干节点，这会带来巨大的开销，甚至使得系统网络瘫痪。仿真结果可以看出，随着无人机节点最大通信距离的增加，DS 和 CDS 成员每个周期平均变化数量在不断下降，尤其是 N-UCDS 算法中 DS 的数量变化情况远远小于 CDS 算法，这是因为在 N-UCDS 算法中提出了新的骨干网维护机制，在保证网络连通性的前提下，并不像 UCDS 算法在每次两跳邻居拓扑结构发生变化后都执行骨干网构建机制，而是在特定的条件下才对骨干网进行重构，降低了网络的敏感性，减少了骨干更新所带来的网络消耗。

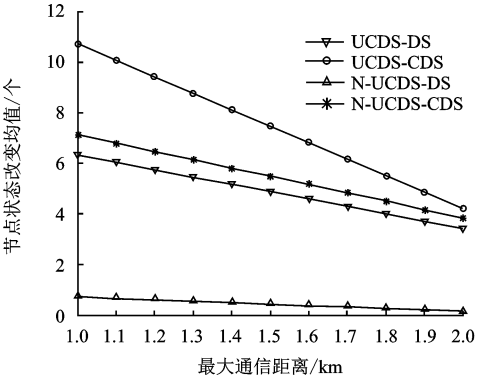

图 3 节点不同最大通信距离时节点状态改变均值情况

图 4 为在无人机节点最大通信距离为 1 500 m 的情况下，随着仿真时间的推移，100 个无人机的剩余电量均值情况。在小型无人机的飞行中，本文假设

75%的电量用于无人机的推进和悬停耗能，25%的电量用于无人机的通信耗能。仿真结果可以看出，相较于运行 UCDS 算法，运行 N-UCDS 算法的无人机集群系统，电量消耗速度会有所减小，这提高了无人机可执行任务的时间，也增加了网络生存时间。

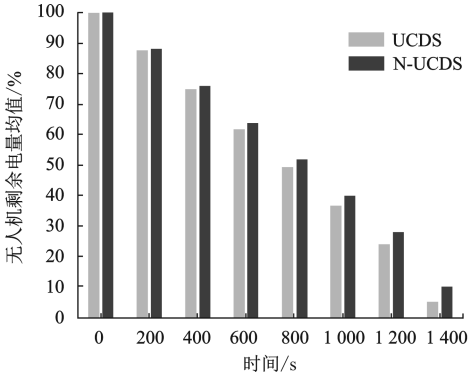

图 4　时间推移下无人机剩余电量均值情况

图 5 展示了在初始构建骨干网和维护骨干网时，UCDS 和 N-UCDS 算法所需要的周期数。仿真结果显示，N-UCDS 算法不论在初始构建骨干网阶段和维护骨干网阶段，相较于 UCDS 算法都节省了一个周期的时间。这是因为在 UCDS 算法选取 CS 的过程中，所有的 CS'成员都需要执行 CS 规则和 CS 例外规则来判断自身是否可以成为 CS 成员，然后将相应的信息封装在 HELLO 报文中广播给距自己最近的 DS 成员，然后由 DS 成员进行判断并选取 CS 成员。而在 N-UCDS 算法中，当一个节点成为 DS 成员后，它将自动执行 CS 规则，依据两跳邻居节点信息进行计算并直接指定哪些 CS'邻居节点为 CS 成员，这样在不影响算法正确性的前提下，节省了一个周期时间，加快了拓扑的收敛时间，使其更适用于无人机网络。

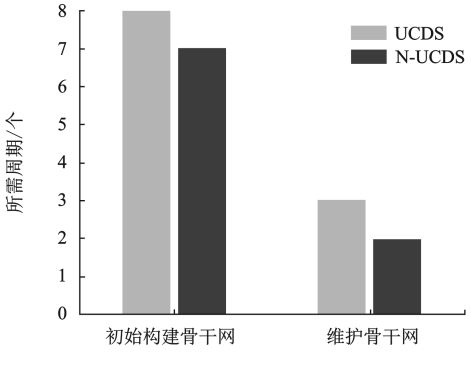

图 5　构建和维护骨干网所需周期数

图 6 表示随着仿真时间的推移，100 个无人机节点在不同最大通信距离的情况下，N-UCDS 算法产生的 HELLO 报文总数和在任意通信半径情况下 UCDS 算法产生的 HELLO 报文总数的对比。仿真结果表明，N-UCDS 算法产生的 HELLO 报文总数小于 UCDS 算法产生的 HELLO 报文总数，同时随着无人机节点最大通信距离的增大，HELLO 报文总数在不断减少。这是因为在 N-UCDS 算法中，无人机节点会根据参数 τ，ω_1，ω_2 的设置自适应地调节 HELLO 报文发送间隔，使得 HEELO 报文的发送总量下降，减小了网络开销，减少了无人机能量消耗。

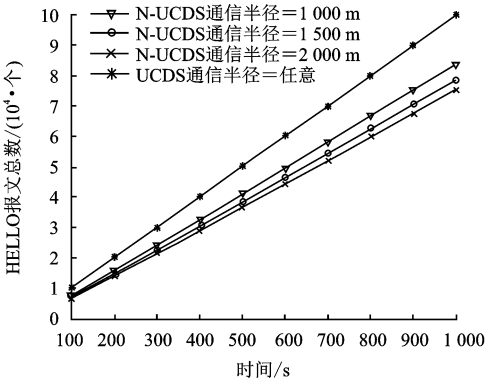

图 6　时间推移下 HELLO 报文的总量情况

4　结论

本文提出了一种基于 N-UCDS 的 FANET 虚拟骨干网构建方法。首先针对大规模无人机任务多样性场景，提出了随机路径点-飞行信息预测移动模型。在该模型中，无人机节点可以预测邻居节点的位置，并计算邻居链路持续时间，为 FANET 虚拟骨干网构建提供支撑。其次在 UCDS 算法的基础上，本文提出了一种改进的 N-UCDS 算法。所做的工作包括：修改了连通支配集成员的选取方式，减少了支配集成员数量，增加了连通集成员数量，提高了网络的鲁棒性；设计了虚拟骨干网的构建和维护机制，大幅降低了每个周期骨干节点失效和新增的变化速率，同时缩短了在构建骨干网和维护骨干网阶段所需的周期；针对微小型无人机能量受限，结合无人机电量和链路持续时间，重新定义了支配因子，并给出了计算方法，延长了网络的生存时间；结合邻居节点位置预测信息，自适应调整 HELLO 报文发送间隔，减小了系统中 HELLO 报文的总开销。

参考文献：

[1]　贾永楠，田似营，李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报，2020，41(S1)：4-14.
JIA Yongnan，TIAN Siying，LI Qing. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2020，41(S1)：4-14.

[2]　贾高伟，王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述[J].

系统工程与电子技术，2021,43(1):99-111.
JIA Gaowei, WANG Jianfeng. Research review of UAV swarm mission planning method[J]. Systems Engineering and Electronics,2021,43(1):99-111.

[3] ZHENG B, LI Y, CHENG W, et al. A multi-channel load awareness-based MAC protocol for flying ad hoc networks[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology. Xi'an: IEEE, 2019: 379-384.

[4] ALKHATIEB A, FELEMBAN E. Performance evaluation of ad-hoc routing protocols in (FANETs)[C]//2019 International Conference on Advances in the Emerging Computing Technologies (AECT). Bangkok: IEEE,2020:1-6.

[5] 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.
FU Youbin, KANG Qiaoyan, WANG Jianfeng, et al. Communication protocols for UAV flying ad-hoc network[J]. Journal of Command and Control, 2021,7(1): 89-96.

[6] GURUPRAKASH C D, MALLIKARJUNASWAMY B P. Algorithmic aspects for total connected dominating sets in mobile ad-hoc wireless networks[J]. International Journal of Information Technology and Computer Science, 2012, 4(2):34-40.

[7] ALZOUBI K M, WAN P J, FRIEDER O. Distributed heuristics for connected dominating sets in wireless ad hoc networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2002, 4(1): 22-29.

[8] ZENG Y Y, JIA X H, HE Y X. Energy efficient distributed connected dominating sets construction in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing. Vancouver:ACM,2006:797-802.

[9] WU J, LI H. A dominating-set-based routing scheme in ad hoc wireless networks[J]. Telecommunication Systems, 2001,18(1/2/3):13-36.

[10] MAO W F,FENG W, ZHANG G Q, et al. Connected dominating set-based energy-efficient distributed routing algorithm[C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology. Beijing: IEEE, 2019: 302-309.

[11] LIANG X Y, LIANG J R, ZHANG W G. Constructing d-robust connected dominating sets in wireless sensor networks with unstable transmission ranges[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(1):398-415.

[12] WANG B W, SUN Y J, DO-DUY T, et al. Adaptive D-hop connected dominating set in highly dynamic flying ad-hoc networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering,2021,8(3):2651-2664.

[13] YOUNG C D, AMIS A D. UCDS: Unifying connected dominating set with low message complexity, fault tolerance, and flexible dominatingfactor[C]//Military Communications Conference. Baltimore: IEEE, 2011: 1357-1362.

[14] YOUNG C D, AMIS A D. Unifying connected dominating set using localized two hop information with a flexible dominating factor:US8724516[P]. 2014-05-13.

[15] 唐龙,王峰. 基于UCDS的战术网络拓扑构建研究[J]. 通信技术，2015,48(9):1037-1043.
TANG Long, WANG Feng. Tactical network topology construction based on UCDS[J]. Communications Technology, 2015,48(9):1037-1043.

[16] 张晶,彭大展. 基于IP组网的未来战术通信波形研究[J]. 无线电通信技术，2014,40(3):17-21.
ZHANG Jing, PENG Dazhan. Research on future tactical radio waveform of IP-based network[J]. Radio Communications Technology, 2014,40(3):17-21.

[17] 李广辉. 基于WNW战术波形网络的拓扑控制及路由优化研究[D]. 北京:北京交通大学，2016.
LI Guanghui. Topology control and routing optimization of TACTICAL waveform network based on WNW[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2016.

[18] 马换. 战术互联网分簇式媒体接入控制协议关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学，2018.
MA Huan. Research on key technologies of tactical internet cluster-based media access control protocol[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2018.

[19] 徐莹莹，雷鸣，赵民建，等. OLSR路由协议中基于UCDS算法构建虚拟骨干网的实现方法：中国，CN109714260A[P]. 2019-05-03.
XU Yingying, LEI Ming, ZHAO Minjian, et al. An implementation method for constructing a virtual backbone network in an OLSR routing protocol based on a UCDS algorithm:CN109714260A[P]. 2019-05-03.

[20] LIN X Q, GANTI R K, FLEMING P J, et al. Towards understanding the fundamentals of mobility in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013:12(4):1686-1698.

[21] AMER R, SAAD W, MARCHETTI N. Mobility in the sky: Performance and mobility analysis for cellular-connected UAVs[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020,68(5):3229-3246.

[22] JIANG M L, ZHANG Q X, FENG Z Y, et al. Mobility prediction based virtual routing for ad-hoc UAV network[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Waikoloa:IEEE, 2019:1-6.

[23] UDDIN M A, MAMUN-OR-RASHID. Link expiration time-aware routing protocol for UWSNs[J]. Journal of Sensors, 2013,10:1-9.