

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002935

# 基于萤火虫算法的无人机组网多径路由算法

逯建琦<sup>1</sup> 南建国<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 西安 710038; 2. 95844 部队 酒泉 735018)

**摘要:**针对无人机自组网节点能量有限、移动快、数据多造成网络 QoS 下降的问题,提出将改进的萤火虫算法融入到多径路由中形成萤火虫多径路由算法(AOMDV-FMRA)。首先为减小速度对路径稳定度的影响,在路由发现过程中引入边界评价因子以适应拓扑变化,再根据路径上节点的负载信息,对反向路由进行选择。最后将能量评价参数映射到萤火虫算法中对收集到的路径能量信息进行处理,作为流量分配的依据。实验结果表明,与 AODV、AOMDV 相比,在节点速度快、网络流量大的环境中,算法在端到端时延、网络生存时间、投递成功率、路由开销方面,均有良好性能。

**关键词:** 无人机自组网;多径路由;边界评价因子;萤火虫算法;流量分配

**中图分类号:** TP393; TN915.02 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

## Multipath routing algorithm for UAV networking based on firefly algorithm

Lu Jianqi<sup>1</sup> Nan Jianguo<sup>1</sup> Wang Wei<sup>2</sup>

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 95844 of PLA, Jiuquan 735018, China)

**Abstract:** To solve the problem of network QoS degradation caused by the limited energy, fast movement and data of UAV Ad-Hoc network nodes, the improved firefly multipath routing algorithm (AOMDV-FMRA) was put forward. Firstly, in order to reduce the influence of speed on the path stability, a boundary evaluation factor is introduced into the route discovery process to adapt to the topology change. Then, the reverse route is selected according to the load information of the nodes on the path. Finally, the energy evaluation parameters are mapped to the firefly algorithm to process the collected path energy information as the basis for flow allocation. Experimental results show that, compared with AODV and AOMDV, in the environment of high node speed and large network traffic, the algorithm has good performance in aspects of end-to-end delay, network survival time, delivery success rate and routing cost.

**Keywords:** UAV Ad-Hoc network; multipath routing; boundary evaluation factor; firefly algorithm; flow allocation

## 0 引言

移动 Ad Hoc 网络因其不依赖于固定基础设施,组网灵活方便的特点,广泛应用于无人机集群组网中<sup>[1-2]</sup>。随着无人机和无线通信网络技术的发展,无人机组网技术的研究正受到越来越多的关注。其中路由算法作为组网环节中的重要一环,对网络效能的发挥起着至关重要的作用。

由于无人机通信范围有限,常无法做到源节点与目的节点的直接通信,因此数据包需经多次转发以实现二者的信息交流,路由算法则为其提供路径选择依据。传

统路由算法以跳数、时延为标准,随着自组网的广泛应用,在设计路径选择标准时,研究者们会针对无线自组网的应用场景,设计出不同的算法<sup>[3-5]</sup>。如针对车联网中车辆移动的不确定性以及障碍物的阻挡,路由算法的设计会考虑节点的社会属性<sup>[6-7]</sup>。针对传感器组网中节点能量有限的特点,常在路由算法中引入能耗参量,以减小数据包的转发开销<sup>[8-9]</sup>。针对无人机集群作战时飞行速度快、传输数据多的特点,本文选用以多路径路由由协议(AOMDV)为基础,对无人机组网路由算法进行设计。

传统 AOMDV 是按照最短距离选择路径,没有考虑其他影响因素。文献[10]将能量模型引入 AOMDV 的寻路机制中,提出 AOMDV\_EC。将节点能量分为 3 个等

级,当中间节点收到 RREQ 消息时,根据自身的能量水平来决定是否转发 RREQ 消息。这种方法可以节约路由发现阶段的开销,减小低能节点能量的再度损耗,但会减少发现的路径数量,当节点数较少时,可能出现路由发现失败的情况。文献[11]提出的 LET-AOMDV 算法,先根据节点位置与速度关系预测链路的持续时间,再根据节点能量消耗模型预测节点的剩余时间,最后将两者结合作为中继节点的选择标准。该算法可以提高传输路径的稳定性,减小大速率运动情况下的路由开销。但要有 GPS 的辅助,且需要的控制消息较多,网络负载增大。文献[12]提出的算法在 RREP 转发过程中通过记录路径上节点接收到的其他路径的 RREP 消息个数作为本路径与相应路径的相关因子值,并在 HELLO 消息中加入拥塞值来告知周围节点自身的拥塞度情况,减小了传输路径之间的干扰。但当节点较少时,不相关路径过少,导致网络资源的浪费;当节点过多时,路径的相关因子采集难度太大。文献[13]通过监听信道的繁忙与闲暇作为节点拥塞度的衡量,根据拥塞度参数来决定是否继续转发 RREQ 消息,最终达到实现负载均衡的目的。

以上算法虽各自在能量、稳定度方面体现出良好性能,但无法适应无人机组网中节点速度快、数据量大两个特点对 QoS 的要求。本文根据无人机集群组网的特点,将萤火虫算法融入到多径路由算法的设计中,利用多条路径对数据进行传输用于满足数据量大的需求;利用增加边界评价因子和提高路径冗余的方式减少高速运动下链路断裂的概率和断裂后路由发现的次数。实验表明与传统算法相比,本文算法在时延、投递率、开销等方面均有良好性能。

## 1 多径路由

### 1.1 多径路由定义

多径路由是指在路由发现过程中发现并记录多条路径<sup>[14-17]</sup>,相比于单径路由,多径路由可以通过增加路径冗余来提高传输效率。按照节点的相关性多径路由可分为 3 类,如图 1 所示。

其中相关多径路由是最差的多径路由应用方式,路径共享的节点和链路多,路径间的独立性差,易形成网络瓶颈。节点不相关多径路由是最理想的方式,能避免关键节点负载过大的现象出现,但在网络规模较小时,节点不相关路径往往很少。链路不相关多径路由路径之间没有共享链路,且数量相对较多,因此本文选用链路不相关多径路由加以改进。

### 1.2 多径路由使用模式

多径路由有两种使用模式,如图 2 所示。

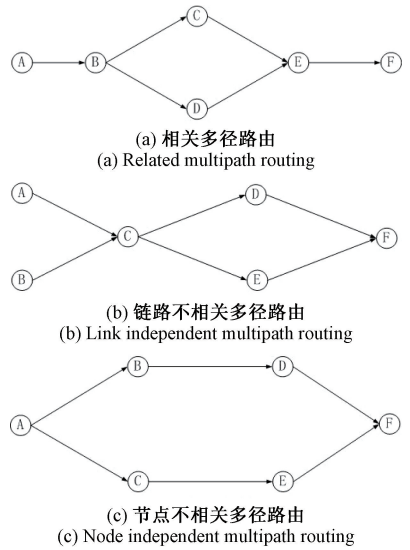


图 1 多径路由分类

Fig. 1 Multipath routing classification

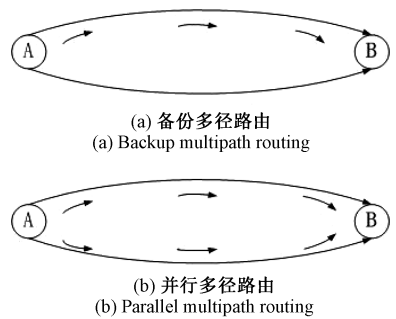


图 2 多径路由使用模式

Fig. 2 Multipath routing usage pattern

备份多径路由虽然在路由发现阶段会发现多条路径,但仅启用其中一条,其他作为备份路径。与单径路由相比,虽然在路由发现阶段需要更多时间,但如果主路径出现故障,可立即启用备份路径,减少再次进行路由发现的时间,而单径路由则需重新发起路由请求,增加发现时延。

不同于备份多径路由,并行多径路由同时启用多条路径进行数据传输,可以提高传输速度,即使部分路径出现故障,也可以继续用其他路径进行传输,但需要在目的节点处对并行路径传来的数据包进行排序。为提高数据传输率,减少网络时延,本文采用并行多径路由的模式。

## 2 萤火虫算法简介

萤火虫算法<sup>[18-20]</sup>是基于生物群智能的优化算法,通过模拟萤火虫觅食、择偶等习性产生的相互吸引光吸引移动的行为来解决最优问题。传统萤火虫算法是每个人

体都有一个决策范围,萤火虫通过决策范围内邻居萤火虫的荧光素浓度来决定下一步靠近哪一个萤火虫。人工萤火虫算法<sup>[21]</sup>(glowworm swarm optimization, GSO)是在传统萤火虫算法上发展而来的,主要包括荧光素浓度更新、移动位置更新和邻居列表更新等。

1) 萤火虫初始化

对萤火虫算法中各个参数进行初始化,如荧光素浓度、荧光素挥发度、感知半径、移动步长等。

2) 荧光素更新

萤火虫的荧光素值与上一次得到的荧光素浓度和在目标函数的位置有关,目标函数越优,对本次荧光素浓度贡献越大。在感知半径内不同萤火虫的荧光素浓度差别越大吸引力越大。

$$L_i(t) = (1 - \rho) \times L_i(t - 1) + \eta \times f(x_i(t)) \quad (1)$$

式中: $L_i(t)$ 为当前时刻第*i*只萤火虫荧光素浓度; $L_i(t-1)$ 为上一时刻荧光素浓度; $x_i(t)$ 为当前时刻萤火虫*i*的位置; $f(x)$ 为适应度评价函数; $\rho$ 为荧光素挥发系数; $\eta$ 为荧光素增强系数。

3) 邻居萤火虫

萤火虫*i*会一直存在一个探测范围,当萤火虫*n*存在于这个区域内,才会被发现。在萤火虫移动之前,会建立一个邻居集合,萤火虫*n*要进入萤火虫*i*的邻居集合需要满足2个条件:①萤火虫*n*要在萤火虫*i*的决策域内。②萤火虫*n*的荧光素浓度要大于萤火虫*i*。邻居萤火虫集合  $N_i(t)$  公式如下:

$$N_i(t) = \{n: \|x_i(t) - x_n(t)\| \leq R_i \cap L_i(t) < L_n(t)\} \quad (2)$$

式中: $n$ 为邻居萤火虫; $R_i$ 为萤火虫*i*的最大决策域。

4) 选择概率

在萤火虫*i*的邻居集合中往往存在着多只萤火虫,萤火虫*i*按照轮盘赌法则从中选择一个合适的萤火虫朝其运动,邻居集合内萤火虫被选择的概率为:

$$P_{ij} = \frac{L_j(t) - L_i(t)}{\sum_{n \in N_i(t)} [L_n(t) - L_i(t)]} \quad (3)$$

5) 萤火虫位置更新

随着萤火虫的移动,萤火虫位置也在不断更新,假设萤火虫移动步长为*s*,则位置更新如下:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + s \left[ \frac{x_n(t) - x_i(t)}{\|x_n(t) - x_i(t)\|} \right] \quad (4)$$

### 3 改进的多径路由算法

无人机自组网在没有任何辅助基础设施的环境中工作,路由算法成为影响其组网效果的重要因素。与单径路由相比,多径路由算法通过增加路径的冗余度提高传

输效率,其中路径选择与流量分配关系着多径路由性能的好坏。

#### 3.1 路由参数模型

1) 拥塞度参数

节点拥塞度能从侧面反映出节点短时间内的数据处理能力,将拥塞度引入路由算法中,主要是针对网络的负载均衡。一方面可以保证数据包不会通过当前队列缓存大的节点,从而降低排队时延;另一方面可以防止某些节点能量消耗过快。我们利用跨层协同设计思想,通过监视 MAC 层的平均非空闲带宽来估计节点的负载轻重程度。计算如下:

$$B_{\text{occupy}} = \frac{T_{\text{occupy}}}{T} \times CDR \quad (5)$$

式中: $B_{\text{occupy}}$ 表示信道的非空闲带宽; $T$ 表示统计所采用的时间段长度; $T_{\text{occupy}}$ 表示在单个统计时间段内的非空闲时间; $CDR$ 为信道数据率。为减小  $B_{\text{occupy}}$  的抖动,本文采用加权平滑的方法:

$$B_{\text{occupy}}(t) = \alpha \times B'_{\text{occupy}}(t) + (1 - \alpha) \times B_{\text{occupy}}(t - 1) \quad (6)$$

式中: $B_{\text{occupy}}(t)$ 为当前时刻经过平滑后的非空闲带宽; $B'_{\text{occupy}}(t)$ 为未经平滑的非空闲带宽; $B_{\text{occupy}}(t - 1)$ 为上一统计时刻的非空闲带宽;平滑系数  $\alpha \in [0, 1]$ 。

2) 边界评价因子

为减少时延,算法大多选择跳数少的路径,但若下一跳节点处于通信边缘,则容易出现链路断裂,增加再次进行路由发现的时延,减小投递成功率,如图3所示。

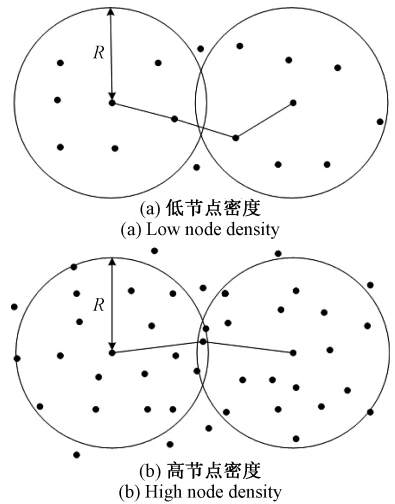


图3 边缘效应

Fig. 3 Edge effect

图3所示是低节点密度和高节点密度下的最短路径,从图3可知,在低节点密度网络中,平均链路长度小于节点通信范围;高节点密度网络中,平均链路长度接近

于节点的通信范围,导致边缘效应加重,链路保持时间缩短。针对此问题,算法建立边界评价因子模型,用于衡量节点之间的位置关系。公式如下:

$$M = lg\left(1 + \frac{l}{R}\right) \quad (7)$$

式中: $l$  为节点之间的距离; $R$  为节点的最大通信范围。

### 3) 能量评价参数

能量是制约无人机作战持久性的重要参数,将能量评价参数作为流量分配的标准,可以避免传统算法中平均分配的盲目性,有效延长网络生存周期,提高网络能量均衡性。为避免出现路径中节点能量差异过大的情况,本文将能量方差加入到能量评价参数的计算中去。计算公式如下:

$$E_k = c_1 \times \bar{E}_i + c_2 \times \sigma_k^2 \quad (8)$$

式中: $E_k$  为路径  $k$  的能量评价参数; $c_1, c_2$  为权衡系数; $\bar{E}_i$  为路径  $k$  中间节点的剩余能量均值; $\sigma_k^2$  为路径  $k$  中间节点能量方差,计算公式如式(9)。

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}_i)^2 \quad (9)$$

## 3.2 路由发现

1) 当源节点  $i$  要向目的节点  $j$  发送数据包时,检查本地路由表是否有通向节点  $j$  的路由信息,若有则发起路由,路由算法终止;若无,执行步骤 2)。

2) 源节点  $i$  向周围节点发送路由搜寻萤火虫  $F_s$ 。相比于 AOMDV 算法中的 RREQ, 搜寻萤火虫携带着路径上节点的拥塞度参数之和。

3) 当搜寻萤火虫经过中间节点  $n$  时,节点  $n$  上的管家萤火虫根据接收到的信号强度判断两节点之间的距离,计算边界评价因子,若结果大于阈值则拒绝该萤火虫,若小于,进行步骤 4)。

4) 若前一时刻有相同序号的搜寻萤火虫经过,则比较前后萤火虫经过的跳数,若小于等于前一时刻萤火虫经过跳数则允许其通过,管家萤火虫记录反向路径的拥塞度参数;若大于前一时刻跳数则只记录反向路径的拥塞度参数,不允许搜寻萤火虫通过。

5) 若前一时刻没有相同序号的搜寻萤火虫通过,则记录拥塞度参数,更新搜寻萤火虫携带的信息,完毕后允许搜寻萤火虫前往下一节点。

6) 当搜寻萤火虫到达目的节点  $j$  后, $j$  发送应答萤火虫,相比于 AOMDV 算法中的 RREP, 应答萤火虫会记录沿途节点的能量情况。

7) 当应答萤火虫按照回溯路径到达中间节点后,根据先前记录的拥塞参数情况,管家萤火虫为先到的应答萤火虫分配拥塞度小的上游路径。

8) 源节点  $i$  收到目的节点的应答萤火虫后,记录来自不同邻居节点的应答萤火虫所经过的路径,其中 2 条

作为传输路径,其余作为备用路径。具体过程如图 4 所示。

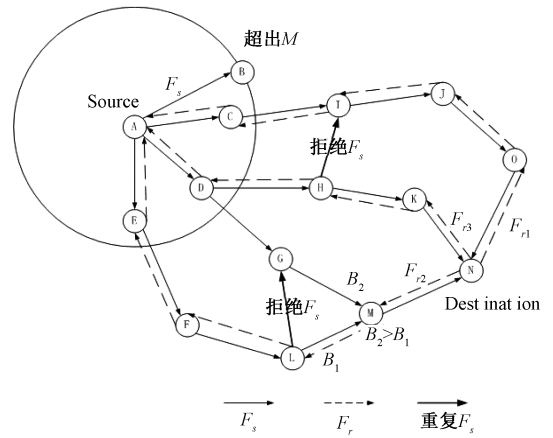


图 4 路由发现示意图

Fig. 4 Route discovery diagram

从图 4 可知,当源节点发出搜寻萤火虫  $F_s$  后,4 个节点  $B, C, D, E$  对与源节点之间距离进行判断,超出边界评价因子的节点  $B$  拒绝搜寻萤火虫,节点  $C, D, E$  对报文进行更新后,允许  $F_s$  通过。根据判定规则,节点  $I, G$  拒绝到达晚且跳数大的  $F_s$ 。目的节点  $N$  收到  $F_s$  后按照反向路由,发送应答萤火虫  $F_r$ ,当应答萤火虫经过节点  $M$  时,管家萤火虫根据记录的拥塞度参数大小,为其分配路径  $L \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow A$ ,源节点收到 3 个  $F_r$  后,建立 3 条正向路由,根据路径能量情况为路径分配流量。

## 3.3 路由建立

如果说拥塞度的大小决定着萤火虫行进的方向,能量的多少则决定了萤火虫移动的数量。在路由发现过程中,路径的选择考虑到跳数和拥塞的影响,在跳数和拥塞相近的几条路径中,如何分配数据流,对提高传输效率、延长网络寿命起着重要作用,本文根据路径的能量参数为路径分配流量。

1) 根据应答萤火虫携带的路径上的能量信息,源节点根据式(8)计算路径  $k$  的能量评价参数  $E_k$ 。

2) 按照能量评价参数,求得路径  $k$  的荧光素浓度:

$$L_k(t+1) = (1 - \rho) \times L_k(t) + \eta \times J[f(E_k(t+1))] \quad (10)$$

其中, $J[f(E_k(t+1))]$  为路径  $k$  的适应度函数值,也是路径  $k$  在  $t+1$  时刻的荧光素浓度增量。

$$J[f(E_k(t+1))] = e^{E_k(t+1)} \Delta l \quad (11)$$

其中, $\Delta l$  为荧光素浓度增量常数。

3) 假设数据包比特数为  $l$ ,信号传输最大距离为  $r$ ,则信号在中间节点的发射能耗和接收能耗如下:

$$\begin{cases} E_T = l \times E_{elec} + lr^2 \\ E_R = l \times E_{elec} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $E_{elec}$  为信号在发射电路和接收电路上的能耗;  $\epsilon$  是常数, 一般取  $\epsilon = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$ 。源节点根据应答萤火虫经过的路由跳数, 对完成这一次转发任务的转发能耗进行估算。

$$E_{trans} = hop \times (E_T + E_R) \quad (13)$$

4) 根据荧光素浓度和转发能耗对各路径的被选概率进行计算:

$$P_k = \frac{L_k(t) - e^{E_{trans}}}{\sum_{n \in N_i(t)} [L_n(t) - e^{E_{trans}}]} \quad (14)$$

式中:  $N_i(t)$  为经过路由发现后得到的路径集合。根据路径被选概率的大小选择 3 条路径作为传输路径。

5) 比较 3 条路径的荧光素浓度, 选取浓度大的 2 条路径进行数据传输, 另一条路径作为备用路径, 传输萤火虫携带数据包向荧光素浓度大的路径移动, 初始阶段按照以下规则进行流量分配。

$$S_{k_1}(T) = Data\_stream \times \frac{L_{k_1}(0) - e^{E_{trans}}}{L_{k_1}(0) + L_{k_2}(0) - e^{E_{trans}} - e^{E_{trans}}} \quad (15)$$

其中,  $S_{k_1}(T)$  为在第 1 个周期  $T$  内为路径  $k_1$  分配的数据流;  $Data\_stream$  为总数据流, 传输能耗与路径荧光素浓度差距越大, 对萤火虫的吸引力越强。

6) 随着传输萤火虫的移动增多, 路径荧光素浓度逐渐下降, 对传输萤火虫的吸引力下降, 流量分配要及时作出调整, 当  $|L_{k_1}(nT) - L_{k_2}(nT)| > M$  时, 改变数据流的分配策略:

$$S_{k_1}(nT + T) = S_{k_1}(nT) + s \times [L_{k_1}(nT) - L_{k_2}(nT)] \quad (16)$$

式中:  $M$  是决策域;  $s$  是步长, 与待传输的数据包数量有关;  $S_{k_1}(nT+T)$  为下一周期分配给路径  $k_1$  的数据流。

### 3.4 路由维护

节点  $i$  上的管家萤火虫周期性向周围节点广播 Hello 数据包来检测链路的连通性, 如果周围节点的管家萤火虫接收到了该节点的 Hello 数据包, 则将将该节点加入邻居列表, 如果在规定周期内未接收到该节点的 Hello 数据包, 则将将该节点从邻居列表中删除。一旦管家萤火虫发现由于节点移动导致原本建立传输的链路断裂, 则向上游节点发送 RERR 数据包, 源节点接收到 RERR 数据包后, 将失效的主路径删除, 启用备用路径。若 3 条路径都失效, 则源节点重新发送搜寻萤火虫, 再次进行路由发现。

## 4 仿真

为证明算法的有效性, 本文将改进算法与按需距离

矢量路由协议 (AODV)、AOMDV 放入同一环境中进行实验, 通过在端到端时延、网络生存时间、分组投递率、路由开销方面的对比, 验证算法的有效性。

节点移动采用 WayPoint 随机模型, 移动速度为 20~60 m/s, 节点移动范围为 4 000 m×4 000 m, 节点通信距离为 500 m, 节点数目为 100, CBR 源为 30, MAC 模型采用 IEEE 802.11, 链路带宽 2 Mbit/s, 采用 512 byte 的定长数据包, 数据包发送速度在 2~10 packets/s 范围内, 仿真时间 600 s,  $M=0.275$ 。

### 4.1 不同负载下的性能对比

实验 1, 固定节点移动速度, 增加数据包的发送速率, 比较在不同网络负载下的端到端时延、分组投递率和网络生存时间, 如图 5 所示。

从图 5(a) 可以看出, 负载较轻时, 3 种算法的网络时延都很低, 随着数据流的增大, 路径上节点负载加重, 节点缓存队列增加, 导致平均端到端时延增大。相比之下, 本文算法时延低于另 2 种算法, 主要原因如下: 1) 本文算法采用并行多径路由的运行模式, 2 条路径同时传输, 相比于单径路由, 可以有效降低一条路径的传输压力; 2) 算法在反向路由的选取过程中结合节点的负载情况, 选取拥塞度小的路径, 减小了数据包在节点处的排队时延。

从图 5(b) 可以看出, 随着流量的增加, 3 种算法的投递成功率呈下降趋势, 主要因为网络拥塞度增大使得部分节点缓存已满而丢弃新来数据包或因数据包等待时间超出有效时间而造成数据分组的丢失。负载较小时, 缓存空间空闲大, 3 种算法投递成功率基本相同, 均保持在 0.9 以上。随着流量增大, FMRA 算法的优势愈加明显, 由于 AODV 与 AOMDV 均选择最短路径, 容易造成广泛度大的节点成为瓶颈节点, 而 FMRA 则在跳数的基础上选择队列缓存小的路径, 能有效避免选择瓶颈节点, 减缓投递成功率的下降趋势。

从图 5(c) 可以看出, 流量负载的增加会加速节点能量的消耗, 两种传统算法由于没有考虑能量参数, “热点”问题突出, 导致部分节点能量消耗过快。在路由建立的过程中, FMRA 算法中的能量参数的方差可以避免选取网络中的“热点”, 再根据路径能量情况合理地进行流量分配, 最后结合后续能量的变化适应性地对分配策略进行调整, 达到延长低能节点存活时间的效果。

### 4.2 不同速度下的性能对比

实验 2, 固定网络负载, 增加节点速度, 比较在不同的节点速度下 3 种算法的时延、分组投递率和路由开销, 结果如图 6 所示。

从图 6(a) 可以看出, 当速度小于 30 m/s 时, FMRA 算法时延略大于传统算法, 是由于边界评价因子的存在

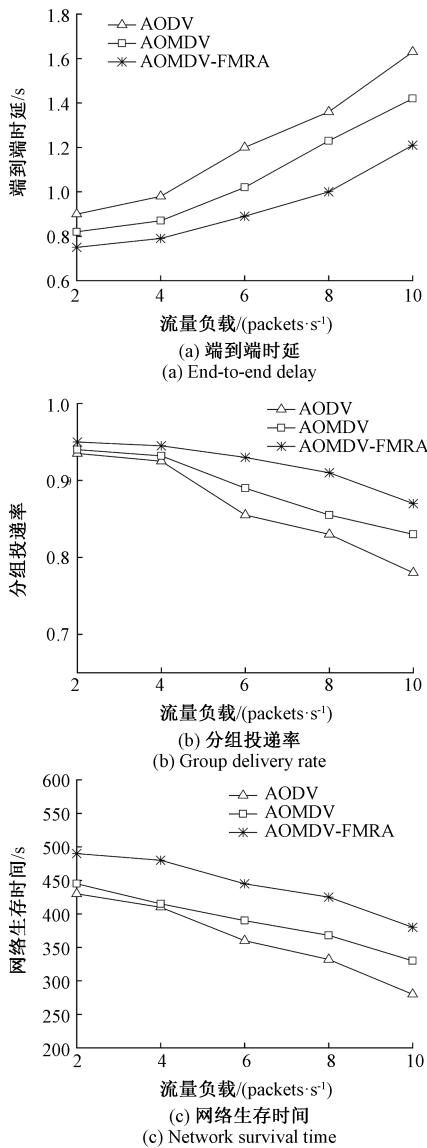


图 5 实验 1:不同负载下的实验结果

Fig. 5 Experiment 1: Results under different loads

导致 FMRA 算法路径跳数略高于传统算法,增加额外的转发时延。随着速度的增加,节点频繁地驶入驶出,一旦路径上链路出现断裂,需要重新进行路由发现过程,增加发现时延,且速度越大增加越明显。边界评价因子可以让源节点避免选用处于通信边缘的节点,在一定速度范围内减小链路断裂的概率,因此当速度大于 40 m/s 时,FMRA 在时延方面显示出良好性能。

从图 6(b)可以看出,节点移动速度对投递率影响显著,在移动速度小于 30 m/s 时,链路断裂概率小,因此 3 种算法投递率基本相同,均保持在 0.9 以上。随着节点速度增加,3 种算法的分组投递率不断下降。相比之下,FMRA 中的边界评价因子可以有效延缓投递率的下降速度,同时由于减少了重新进行路由发现的控制分组,降低

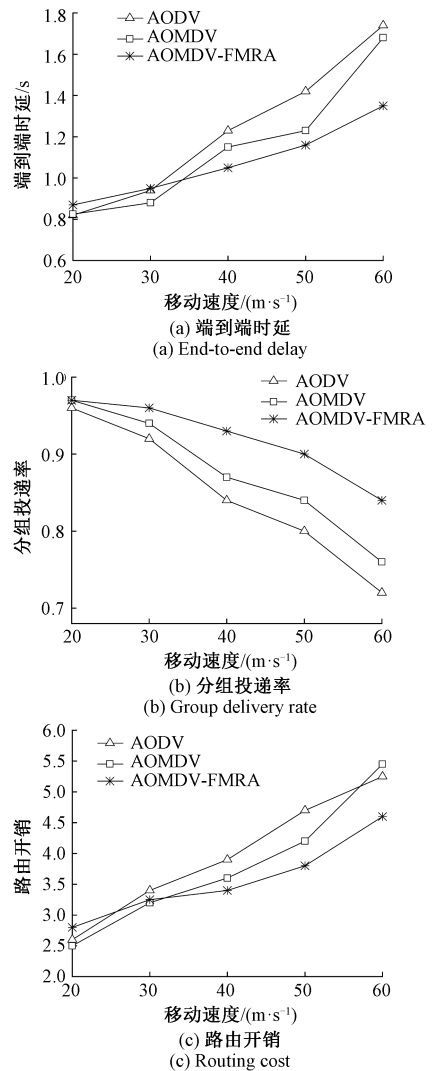


图 6 实验 2:不同速度下的实验结果

Fig. 6 Experiment 2: Results at different speeds

了节点缓存的占用率,因此投递率明显高于传统算法。当速度超过 50 m/s 时,由于速度过大,链路断裂概率升高,导致 3 种算法投递率下降速度加快。

从图 6(c)可以看出,当速度较低时,FMRA 算法的路由开销高于传统算法,是因为 FMRA 算法需要额外的控制信息分组。随着速度增加 3 种算法的路由开销逐渐上升,在速度介于 40~50 m/s 时,多径路由算法开销明显低于 AODV,主要是因为多径路由一次路由发现可发现多条传输路径,当某条路径出现问题后,可以启用备份路径,减少路由发现次数。由于 FMRA 算法不选择处于通信边缘的节点,因此路径对节点移动的适应性更强,所以开销最低。当速度过快时,由于备份路径也有很大概率出现断裂,多径路由会产生额外的路径发现开销,因此路由开销上升趋势大于 AODV。

## 5 结 论

针对无人机组网特点,本文提出的 AOMDV-FMRA 算法在路由发现过程中引入的拥塞度参数、边界评价因子,可以有效降低投递时延、提高路径稳定性;在路由建立的过程中将能量评价参数和萤火虫算法结合起来实现流量的分配,能够增加网络存活周期。仿真结果表明,在大网络负载和高速移动的情况下,本文算法在端到端时延、网络生存时间、分组投递率、路由开销方面均显示出良好性能,具有一定价值。

## 参考文献

- [ 1 ] 徐赞新,袁坚,王钺,等. 一种支持移动自组网通信的多无人机中继网络[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011,51(2):150-155.  
XU Z X, YUAN J, WANG Y, et al. UAV relay network to provide communications in mobile ad hoc networks [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011,51(2):150-155.
- [ 2 ] SIVAKUMAR A, TAN C. UAV swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone[C]. International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010: 1157-1164.
- [ 3 ] MA X, ZHANG J, YIN X, et al. Design and analysis of a robust broadcast scheme for VANET safety-related service[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012,61(1):46-61.
- [ 4 ] 马颖,祁浩,樊维涛. 具有能量补给的无线传感器网络能量感知路由算法[J]. 西安工业大学学报,2012, 32(7):527-530.  
MA Y, QI H, FAN W T. Energy aware algorithm for wireless sensor networks with power harvesting [J]. Journal of Xi'an Technological University,2012,32(7): 527-530.
- [ 5 ] 郭稳涛,李兵,何怡刚. 基于社会活性和副本限制的 DTN 路由算法[J]. 电子测量与仪器学报,2017, 31(7):1047-1052.  
GUO W T, LI B, HE Y G. Social activity and copy-limited based DTN routing algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7):1047-1052.
- [ 6 ] 吴大鹏,孔晓龙,张洪沛,等. 社会属性感知的间断连接无线网络数据转发策略[J]. 通信学报,2015, 15(1):38-47.  
WU D P, KONG X L, ZHANG H P, et al. Social attributes aware data forwarding strategy in intermittently

connected wireless networks [J]. Journal on Communications,2015, 15(1):38-47.

- [ 7 ] 刘辉元,董春阳,黄琼. 基于 VANETs 下的决策树多副本机会路由协议[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2016,28(6):769-776.  
LIU H Y, DONG C Y, HUANG Q. Multiple copies of VANETs based on decision-tree for opportunistic routing protocol[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016,28(6):769-776.
- [ 8 ] YU R, ZHANG Y, SONG L Y, et al. Joint optimization of power, packet forwarding and reliability in MIMO wireless sensor networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(6):760-770.
- [ 9 ] 徐新黎,皇甫晓洁,王万良,等. 基于无线充电的 Sink 轨迹固定 WSN 路由算法[J]. 仪器仪表学报,2016, 37(3):570-578.  
XU X L, HUANGFU X J, WANG W L, et al. Wireless charging routing algorithm in WSN with a path-fixed Sink[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016, 37(3):570-578.
- [ 10 ] 刘桂兰,余本功. 一种基于能量消耗策略的 AOMDV 改进协议[J]. 计算机技术与发展,2017,27(3): 61-64.  
LIU G L, YU B G. An improved protocol of AOMDV based on strategy of energy consumption [J]. Computer Technology and Decelopment,2017, 27(3):61-64.
- [ 11 ] 李健,黄廷辉,崔更申,等. 基于链路生存时间的 AOMDV 协议的研究[J]. 计算机应用与软件,2015, 32(9):131-135.  
LI J, HUANG T H, CUI G SH, et al. Research on link expiration time-based AOMDV routing protocol [J]. Computer Applications and Software, 2015, 32(9): 131-135.
- [ 12 ] 施利利,卢先领. 适用于 WSNs 的拥塞自适应多径路由算法[J]. 传感器与微系统,2014,33(8):141-157.  
SHI L L, LU X L. Congestion adaptive multipath routing algorithm for WSNs [J]. Transducer and Microsystem Technologies,2014,33(8):141-147.
- [ 13 ] WANNAWILAI P, SATHITWIRIYAWONG C. AOMDV with sufficient bandwidth aware [C]. 2010 IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology (CIT),2010:305-312.
- [ 14 ] AUGUSTIN B, FRIEDMAN T, TEIXEIRA R. Measuring multipath routing in the Internet [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2011,19(3):830-840.
- [ 15 ] 杨吟君,汪学明. SMR 路由协议的改进与仿真分析[J]. 计算机工程,2012,38(18):77-79.

YANG Y J, WANG X M. Improvement and simulation analysis of SMR routing protocol [ J ]. Computer Engineer, 2012,38(18):77-79.

[16] REDDEPPA R L, RAGHAVAN S V. SMORT: Scalable multipath on-demand routing for mobile ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks,2007, 5(2):162-168.

[17] 李波,潘进,李国朋,等.基于 NS2 的 AOMDV 路由协议的改进与性能仿真[J]. 计算机应用与软件,2010, 27(2):56-62.

LI B, PAN J, LI G P, et al. Improvement and performance simulation of AOMDV routing protocol based on NS2[J]. Computer Applications and Software,2010, 27(2):56-62.

[18] YANG X S. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithm[M]. Frome: Luniver Press,2008:81-96.

[19] 冯艳红,刘建芹,贺毅朝.基于混沌理论的动态种群萤火虫算法[J]. 计算机应用,2013,33(3):796-799,805.

FENG Y H, LIU J Q, HE Y CH. Chaos-based dynamic population firefly algorithm [ J ]. Journal of Computer Applications,2013,33(3):796-799,805.

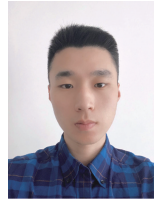
[20] 刘长平,叶春明.一种新颖的仿生群智能优化算法:萤

火虫算法 [ J ]. 计算机应用研究, 2011, 28 ( 9 ): 3295-3297.

LIU CH P, YE CH M. Novel bioinspired swarm intelligence optimization algorithm: Firefly algorithm[J]. Application Research of Computers, 2011, 28 ( 9 ): 3295-3297.

[21] KRISHAND K N, GHOSE D. Glowworm swarm optimisation for simulataneous capture of multiple local optima of multimodal funcnctions[J]. Swarm Intelligence, 2009,3(2): 87-124.

### 作者简介



逯建琦,2018 年于空军工程大学获得学士学位,现为空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为无人机组网路由算法。  
E-mail:834495526@qq.com

**Lu Jianqi** received his B. Sc. degree from Air Force Engineering University in 2018.

Now he is a M. Sc candidate at Air Force Engineering University. His main research interest includes UAV networking routing algorithm.