

# 海洋上空 FANET 中基于能量均衡的自适应 AODV 路由协议

张正宜

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室,北京,100876)

**摘要:** 随着对海洋价值的不断重视与无人机技术的不断增强,在海洋上空部署由 UAV 构成的飞行无线自组织网络(FAENT)具有很高的军事与民用价值。路由协议是无线移动自组织网络不可或缺的一部分。与传统 Ad hoc 网络相比,FAENT 具有节点移动速度快、拓扑变化大等特点,经典路由协议不能完全适用。本文的目的是提出基于能量均衡的自适应 AODV 路由协议 EA-AODV。改进的 AODV 路由协议充分分析了 UAV 与 FANET 的特点,共同考虑能量、拥塞程度、距离三种参数,同时引入蚁群算法以选择最合适的下一跳节点,尽可能地保持整个系统的路由长期稳定工作。使用 NS-3 对改进的协议进行网络仿真,结果表明新协议具有较高的数据包传输率与较低的开销,提升了 FANET 的性能。

**关键词:** FAENT; AODV; 蚁群算法; 能量均衡

**中图分类号:** TN92.5

## Energy-balance-based Adaptive AODV in FAENT over the Ocean

ZHANG Zhengyi

(Key Laboratory of Wireless Communication Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876)

**Abstract:** With the constant emphasis on ocean value and the continuous enhancement of UAV technology, the deployment of Ad-hoc networks consisting of UAVs(FANET) over the ocean has high military and civilian value. Routing protocols are an integral part of wireless mobile ad hoc networks. Compared with the traditional Ad hoc network, FAENT has the characteristics of fast node movement and large topology change. The classic routing protocol cannot be fully applied. The purpose of this paper is to propose the adaptive AODV routing protocol based on energy balance,EA-AODV. The improved AODV routing protocol fully analyzes the characteristics of UAV and FANET. In the new protocol, three parameters of energy, congestion degree and distance are considered together, and ant colony is introduced in order to select the most suitable next hop node and keep the routing of the entire system as long as possible. The network simulation of the improved protocol using NS-3 shows that the new protocol has higher packet transmission rate and lower overhead, which improves the performance of FANET.

**Key words:** FAENT; AODV; Ant Colony Optimization algorithm; Energy Balance

## 0 引言

海洋是中国领土的重要组成部分,有着极大的研究和实用价值。随着中国综合实力的不断增强,海上活动也越来越频繁,对海上信息的快速安全传输有着更高的要求<sup>[1]</sup>。海面上传输环境深受天气、温度、湿度等因素影响,对军事、渔民生活和科学研究造成很大不便。尽管已经采取了一些措施来尽可能减小缺陷,但海洋通信仍有噪声大、可靠性差、时延高等缺点。无人机机动性强、速度快、噪声小,信息传输几乎不受地理环境和天气状况限制,常用于海上搜救、应急救援、资源勘探等,和普通海洋通信相比拥有极大的性能优势<sup>[2]</sup>。

**作者简介:** 张正宜(1994-),女,主要研究方向:无线移动通信. E-mail: zhangzhy0324@126.com

45        多个无人机构成的网络被称为飞行自组织网络(Flying Ad-hoc Networks,FANET)。  
FANET 中, 无人机节点高速运动, 链路状态和网络拓扑快速变化<sup>[3]</sup>。Ad-hoc 网络中选择一种或者几种合适的路由协议至关重要。FANET 的特点是高效、快速、易扩展, 而经典的路由协议适用的场景往往是低速、拓扑变化缓慢的, 因此需要根据 FAENT 的特点对经典路由协议进行改进和优化。

50        经典路由协议基本由主动路由协议、按需路由协议、混合路由协议和地理路由协议四大类构成<sup>[4]</sup>。其中, 按需路由协议仅在需要时才启动路由发现过程, 数据包接收率高且开销小, 较适合节点移动速度快、拓扑变化大的自组织网络<sup>[5]</sup>。然而, 按需路由协议在大范围高动态的 FAENT 网络中, 仍具有时延相对较大、能量不均衡等问题。AODV 是最广泛应用的按需路由协议。因此本文的目的是充分分析 FANET 与 UAV 的特点, 提出一种基于能量均衡的  
55        自适应 AODV 协议。

## 1 相关工作

Leonov 等人使用 NS-2 对主动路由协议 OLSR 和按需路由协议 AODV 在 FANET 中的性能进行详细比较<sup>[6]</sup>。实践表明 AODV 在数据包传输率、吞吐量等方面具有优势, 而 OLSR 在端到端时延和抖动两方面表现较佳。但作者并未将能量问题考虑在内。Garcia-Santiago 等人使用 NS-2 对两种按需路由协议 (AODV、DSDV) 在 FAENT 中的性能进行评估<sup>[7]</sup>。实践表明 AODV 在吞吐量、数据传输率和开销略好于 DSDV, DSDV 则具有更短的时延。但作者所模拟的网络规模较小, 无人机数量较少, 不能证明该结论在大型网络中同样适用。  
60        Litvinov 等人模拟了具有大范围、低密度特点的 FANET, 分别应用 OLSR 和 AODV 协议<sup>[8]</sup>。仿真结果显示 AODV 在吞吐量, 数据包传输率和路由开销等方面优于 OLSR, 尤其是在应  
65        对快速变化的拓扑结构时表现出优异性能, 不足之处在于相对于 OLSR, AODV 的平均时延较长。综上所述, 传统无线路由协议对于 FANET 中无线路由协议的构建具有极大的参考价值, 已经有许多学者对其性能进行分析比较, 但对于不适宜的部分并未提出有效的改进方法。

A. Junnarkar 等人研究了过去专家学者提出的 MANET 中性能增强方法, 同时为 MANET 设计了 QoS 高效的新路由协议<sup>[9]</sup>。提出的新路由协议基于蚁群优化思想, 使用节点当前位置和负载参数作为度量。模拟表明改进后的路由协议在 MANET 中表现良好。但对于不同的网络规模和不同的节点移动速度, 并没有对新路由协议进行详细评估。Nath S 等人提出了将 ACO 和萤火虫算法 (Firefly Algorithm, FA) 混合的思想, 将其用于 AODV 路由协议, 以提高 MANET 中信号传输的效率<sup>[10]</sup>。结果显示, 改进后的 AODV 协议降低了不可靠性和延迟, 在大型 MANET 网络中的性能优于传统 AODV 协议。但两种启发式算法的混合增加了  
70        路由协议的复杂度, 并且在节点密度低的网络中的表现还未可知。Kochhar R 等人在 VANET 中使用 AODV 协议, 对车辆运动的方向和速度进行分析, 采用蚁群优化算法找出车辆与车辆之间的最短路径<sup>[11]</sup>。利用 NS-2 模拟后得出结论, 基于蚁群优化的路由协议是解决 VANET 中路由问题的有力手段。不足之处在于本文考虑的参数种类较少, 而且没有考虑真实场景。  
75

综上所述, 传统的 AODV 路由协议已经不适用于当前所需的场景, 已经有学者对其进行优化和改进, 实践证明加入蚁群算法会提升 AODV 性能。但研究并没有涉及到飞行无人自组织网络的层面, 而且评判的标准比较单一, 都是以路径作为衡量法则。

## 2 系统模型与算法

### 2.1 基本蚁群优化算法

本文采用蚁群优化算法中旅行商问题模型。设有  $m$  只蚂蚁随机分布在  $n$  个城市中。在  $t$  时刻, 城市  $i$  中的蚂蚁  $k$  选择城市  $j$  为下一跳的概率  $p_{ij}^k(t)$ , 有<sup>[12]</sup>

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & j \notin allowed_k \end{cases}$$

$\tau_{ij}(t)$  表示信息素浓度。 $\eta_{ij}(t)$  为启发函数, 表示蚂蚁的期望程度, 通常有  $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ ,  $d_{ij}$  为城市  $i$  到城市  $j$  之间的距离。 $\alpha$  为信息素因子,  $\beta$  为启发函数因子, 分别反映了信息素的大小和启发函数的重要程度。 $allowed_k$  代表蚂蚁  $k$  可以访问的所有城市集。

在蚂蚁完成一次“旅行”后, 会对各节点的信息素进行更新迭代, 一般取 200 为最大迭代次数<sup>[13]</sup>。具体的值需要根据当时蚂蚁所处的系统状况而做出不同的判断。

迭代公式如下:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \rho \in (0,1) \\ \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \end{cases}$$

其中  $\rho$  为信息素挥发因子, 代表信息素挥发的速度大小, 相应的  $1-\rho$  代表某条路径保持原有信息素的能力。 $\Delta\tau_{ij}(t)$  为本次遍历结束之后各路径上信息素的增量, 具体计算公式如下:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} 0, & else \\ \frac{Q}{L_k}, & if \text{Ant } k \text{ choose City } j \text{ as the next hop} \end{cases}$$

$Q$  为一次遍历之后路径上信息素值之和, 通常为常数;  $L_k$  代表蚂蚁  $k$  在完成一次“旅行”后所走的各个路径之和。可以看出两地距离越短, 路径信息素浓度的增加量就越高, 被选择的概率也就大。

### 2.2 基于能量均衡的自适应 AODV 路由协议

#### 2.2.1 系统模型

本文的 FANET 基本架构如图 1 所示

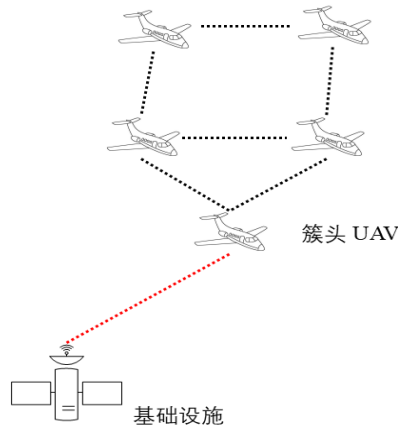


图 1 FANET 基本架构

Fig. 1 FANET Basic Architecture

将海洋上空的 FANET 网络拓扑抽象为赋权图  $G$ ，则有  $G=\{N,L\}$ ，其中  $N$  为  $G$  中所有点的集合， $L$  为  $G$  中所有边的集合。FANET 中每一个 UAV（也就是通信节点）可被看作  $G$  中的点，两个 UAV 之间的通信链路可被看作是  $G$  中的边。假设存在任意 2 个无人机  $i$  和  $j$  ( $i \in N, j \in N$ )，若存在链路  $(i,j) \in L$ ，则表示无人机  $i$  和无人机  $j$  之间存在有效的无线连接，并且无人机  $i$  和无人机  $j$  互为对方的邻居节点。

### 2.2.2 算法设计

要得到最佳传输路线而不是最短传输路线，需要对 RREQ 报文和 RREP 报文进行修改，在原有帧结构上添加节点剩余能量、路径能量和拥塞状态等信息。网络中每个节点都会不断根据报文信息计算并保存信息素。在改进的 AODV 中，需要在原有的 AODV 路由表中增添两个表项：

① 代表信息素值的 *pheromone* 表项，具体计算公式为

$$\begin{cases} \tau_{ij} = \lambda_e E_i^{re} + \frac{\lambda_{cost}}{E_{ij}^{cost}} + \frac{\lambda_{con}}{E_i^{con}} \\ \lambda_{re} + \lambda_{cost} + \lambda_{con} = 1 \\ E_i^{re} = \frac{e_i}{E_{i0}} \\ E_{ij}^{cost} = 1 - \frac{C_i}{C_0} \end{cases}$$

其中  $\tau_{ij}$  是节点  $i$  与节点  $j$  之间路径上信息素的值。 $E_i^{re}$  代表节点  $i$  上的相对能量剩余值， $e_i$  为此时节点  $i$  的绝对剩余能量， $E_{i0}$  表示节点  $i$  的能量初始值。 $E_{ij}^{cost}$  代表信息从节点  $i$  移动至节点  $j$  时在路径上消耗的能量相对值， $C_0$  是“蚂蚁”从源节点到目的节点消耗的所有能量， $C_i$  为“蚂蚁”从源节点移动到  $i$  节点时消耗的能量。 $E_i^{con}$  代表节点  $i$  上的拥塞程度，根据拥塞情况的不同可分别取 1~4 之间的整数。 $\lambda_{re}$ 、 $\lambda_{cost}$ 、 $\lambda_{con}$  为影响因子，表示三个度量对信息素的影响程度。由上述可知信息素的大小与节点上剩余能量正相关，与路径能量消耗以及拥塞程度负相关。

125

② 代表概率值的 *Probability* 表项。*t* 时刻 *i* 节点上的 *Probability* 值为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha / [h(t)_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha / [h(t)_{is}]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & j \notin allowed_k \end{cases}$$

$h(t)_{ij}$  为 *t* 时刻 RREQ 在节点 *i* 跳数影响度量, 计算公式如下

$$h_{ij}(t) = 1 - \frac{H_i(t)}{H_{max}}$$

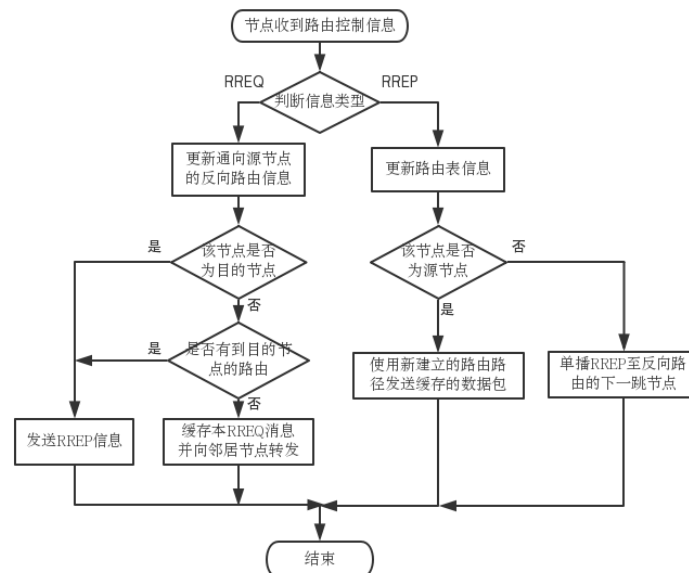
130

其中  $H_{max}$  是该 FANET 网络中路由的最大可能跳数, 一般取值为无人机的个数减一;  $H_i(t)$  则是 *t* 时 RREQ 从源节点到 *i* 节点的路径上所经过的跳数。由上述公式可得, *t* 时刻 *i* 节点选择 *j* 作为下一节点的概率与信息素正相关, 与跳数负相关。

### 2.2.3 算法实现

#### 1、路由发现过程

经典 AODV 路由发现过程如图 2 所示。



135

图 2 经典 AODV 协议路由发现过程

Fig.2 the Discovery Process of AODV

计算每个邻居节点的 *probability* 值并进行比较, 该值反映了每条线路的剩余能量与拥塞情况。通常选择 *probability* 值最大的节点作为下一跳。

140

在 RREP 向源节点移动的过程中, 每经过一个节点更新该节点路由表中的信息素。与此同时每条链路都会设置最大信息素上限  $\tau_{max}$  和最小信息素下限  $\tau_{min}$ 。更新规则为:

$$\tau_{ij}(t+1) = \begin{cases} \tau_{max}, & \varphi(t) \geq \tau_{max} \\ \varphi(t), & \text{else} \\ \tau_{min}, & \varphi(t) \leq \tau_{min} \end{cases}$$

而且有,

$$\begin{cases} \varphi(t) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \rho \in (0, 1) \\ \Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{Hop-count}, & (i, j) \in L_k \\ 0, & else \end{cases} \end{cases}$$

145 其中,  $L_k$  是编号为  $k$  的 RREQ 从源节点到目的节点所经过的路径集合,  $\Delta\tau_{ij}(t)$  为信息素增量, 若链路  $(i, j)$  不属于  $L_k$  则该值为 0, 即不增加而只蒸发信息素。Q 为整个系统的信息素总和,  $Hop-count$  为 RREQ 从源节点传输至目的节点所选择的路径中要经过的跳数。 $\rho$  为信息素挥发因子, 取值范围通常在  $[0.2, 0.5]$  之间。为了尽可能地加快收敛速度, 同时信息素挥发过快有

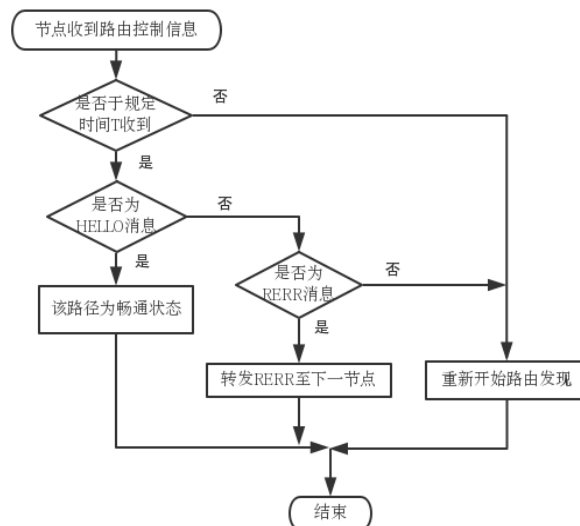
$$\rho(t+1) = \begin{cases} c\rho(t), & \rho(t) \leq \rho_{\max} \\ \rho_{\max}, & else \end{cases}$$

150

其中  $c$  为衰减常数, 通常大于 1, 此处可取  $c=1.1$ 。 $\rho_{\max}=0.5$ , 为允许的最大挥发值。

## 2、路由维护过程

经典 AODV 中路由维护过程如图 3 所示。



155

图 3 经典 AODV 协议路由维护阶段流程图

Fig.3 the Maintenance Process of AODV

在改进的 AODV 中, 若节点  $i$  在所规定的最长时间仍没有接收到来自节点  $j$  的 HELLO 消息, 则意味着路径  $(i, j)$  无法使用。此时更新节点  $i$  的路由表, 将其中与  $j$  节点对应的表项置为 0, 同时向邻节点广播 RERR 信息。随后, 节点  $i$  需要缓存即将发送给  $j$  的数据包队列, 并根据路由表中的信息分别计算剩余可用链路的转发概率, 找出拥有合适的次优转发概率  $P_{sub}$  的链路。若与  $P_{sub}$  最佳转发概率  $P_{opt}$  相差过大, 则向源节点发送错误信息 RERR, 源节点收到后会重新进行路由发现过程。

160

## 3 仿真模拟

### 3.1 基本参数设置

165

使用网络模拟器 NS-3 来模拟无人机的移动与通信。本文基本参数如表 1。



表 1 模拟参数

Tab. 1 Simulation Parameter

参数	值
Simulation Tool	NS-3(3.26)
Simulation Area	2000×2000(m <sup>2</sup> )
Number of UAVs	50
Simulation Time	1500s
Propagation Model	Free Space Loss Model
Mobility Model	RWP
Radio Frequency	2.437Ghz
Transmission Range	500m
Transport Protocol	UDP
Data Packet size	512Bytes
MAC	IEEE 802.11
UAV speed	30m/s

### 3.2 结果分析

在 FANET 中分别模拟基于蚁群算法的 AODV 协议 Ant-AODV 与本文所提出的 EA-AODV 协议，从数据包传输率、端到端时延、平均开销三方面对二者性能进行分析

#### 1、数据包传输率(Packet Delivery Ratio,PDR)

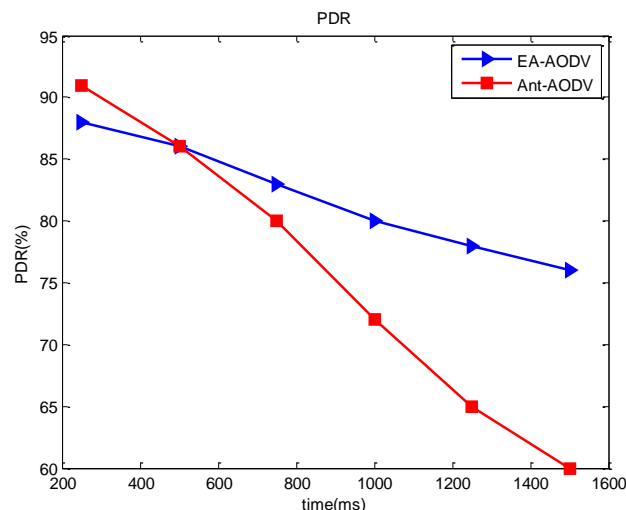


图 4 EA-AODV 与 Ant-AODV 在 FAENT 中的 PDR

Fig.4 the PDR of EA-AODV and Ant-AODV in FANET

仿真结果如图 4 所示。由图可知, Ant-AODV 与 EA-AODV 在时间较短时均有良好表现, 传输率能够达到 90%左右, 随着时间的不断增大, 传输率均呈下降趋势。其中 EA-AODV 的传输率下降较缓慢, 在 1500s 后的传输率仍为 75%, 而 Ant-AODV 的传输率降低速度较快, 在仿真结束时为 62%左右。这是因为经过长时间工作后, Ant-AODV 中部分链路则因频繁被使用而处于阻塞或者能量不足状态, 必须不断重新开始路由发现过程; 而 EA-AODV 协议考虑了能量与阻塞程度, 尽可能地保证了网络的均衡性。时间越长, EA-AODV 所表现出的稳定性和可靠性越明显。

#### 2、端到端时延(End to End Delay,EED)

仿真结果如图 5 所示。由图可知, 随着时间的增大, 两种协议的端到端时延也在不断增

大。仿真时间较短时, Ant-AODV 的端到端时延一度略优于 EA-AODV, 这是因为最开始链路均为畅通状态, 无需进行频繁的路由发现过程。随着时间的增大, EA-AODV 的端到端时延持续小于 Ant-AODV, 且趋向稳定, 可以预见在未来 EA-AODV 的时延将维持在 0.125sec 左右。Ant-AODV 的时延则随着时间而不断上升。

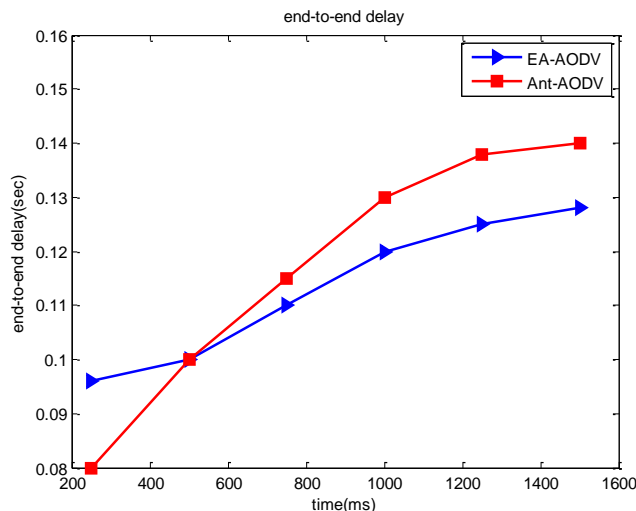


图 5 EA-AODV 与传统 AODV 在 FAENT 中的端到端时延  
Fig.5 the EED of EA-AODV and Ant-AODV in FANET

### 3、路由开销(Overheads)

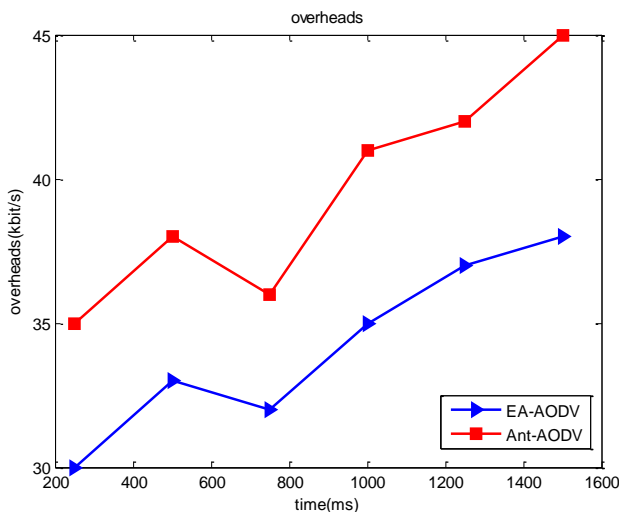


图 6 EA-AODV 与传统 AODV 在 FAENT 中的路由开销  
Fig.6 the Overheads of EA-AODV and Ant-AODV in FANET

仿真结果如图 6 所示。由图可知, 随着时间的增大, EA-AODV 与 Ant-AODV 的开销均呈上升趋势, 其中 EA-AODV 的路由开销始终较小, 且相对较稳定; Ant-AODV 的路由开销较高且变化较快。可以预见随着时间的增大, Ant-AODV 的路由开销将处于较大值且持续上升, 而 EA-AODV 的路由开销则会维持在 36kbit/s 左右。原因在于时间较大时使用 AODV 的 FANET 中链路能量不均衡, 个别线路的拥塞程度较高, 重新进行路由发现的频率较大, 增大了控制信息的发送数量; EA-AODV 采取能量均衡策略, 减小了重发次数。



## 4 结论

无人机具有轻便灵活、成本低等优点,被广泛用于海洋勘测、人员搜救等场合,同时也给 FANET 带来了一些挑战,一种合适路由协议至关重要。本文提出了一种适用于 FAENT 的基于能量均衡的自适应 AODV 路由协议。首先对蚁群优化算法进行简要介绍,提出了蚁群算法与 AODV 协议结合的思想。随后阐述了改进后的协议的基本原理。改进后的路由协议在路由发现阶段不仅引入了蚁群优化算法,而且将能量与拥塞程度考虑在内;在路由维护阶段提出了次优解与能量阈值的思想。最后使用 NS-3 对 Ant-AODV 协议与 EA-AODV 进行仿真,仿真结果表明 EA-AODV 在 FANET 中具有较好的数据包接收率与较低的开销,端到端时延也相对减小。

## [参考文献] (References)

- [1] Kim H, Mokdad L, Ben-Othman J. Designing uav surveillance frameworks for smart city and extensive ocean with differential perspectives[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 98-104
- [2] 徐栋, 杨敏, 王新胜,等. 无人机组网技术在海洋观测中的应用研究[J]. 海洋科学, 2018, 42(1):45-51
- [3] Oubbati O S, Atiquzzaman M, Lorenz P, et al. Routing in Flying Ad Hoc Networks: Survey, Constraints, and Future Challenge Perspectives[J]. IEEE Access, 2019, 7: 81057-81105
- [4] Shobana M , Karthik S . A performance analysis and comparison of various routing protocols in MANET[C]// Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering (PRIME), 2013 International Conference on. IEEE, 2013.
- [5] 陈立, 杨瑞娟, 潘平俊,等. Ad Hoc 高动态路由协议仿真与研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5):111-115.
- [6] Leonov A V, Ryabchevsky V O. Performance Evaluation of AODV and OLSR Routing Protocols in Relaying Networks in Organization in Mini-Uavs Based FANET: Simulation-Based Study[C]//2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). IEEE, 2018: 1-6
- [7] Garcia-Santiago A, Castaneda-Camacho J, Guerrero-Castellanos J F, et al. Evaluation of AODV and DSDV routing protocols for a FANET: Further results towards robotic vehicle networks[C]//2018 IEEE 9th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS). IEEE, 2018: 1-4
- [8] Leonov A V, Litvinov G A. About Applying AODV and OLSR Routing Protocols to Relaying Network Scenario in FANET with Mini-UAVs[C]//2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2018: 220-228
- [9] A. Junnarkar and A. B. Bagwan, Novel Quality of Service (QoS) Improvement Routing Protocol for MANET Using Ant Colony Optimization[C]//2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA), Pune, 2017, 1-6
- [10] Nath S, Banik S, Seal A, et al. Optimizing MANET routing in AODV: An hybridization approach of ACO and firefly algorithm[C]// Second International Conference on Research in Computational Intelligence & Communication Networks. 2017
- [11] Kochhar R , Mandoria H L . Performance study of VANET using ant based routing algorithms[C]// International Conference on Computing for Sustainable Global Development. IEEE, 2015
- [12] Dorigo M, Stützle T. Ant colony optimization: overview and recent advances[M]//Handbook of metaheuristics. Springer, Cham, 2019: 311-351
- [13] Leonov A V. Modeling of bio-inspired algorithms AntHocNet and BeeAdHoc for flying ad hoc networks (FANETS)[C]//2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2016, 2: 90-99.