

# 移动预测的无人机自组网路由协议

李玉龙<sup>1</sup>, 黄国策<sup>1</sup>, 张衡阳<sup>1</sup>, 郑博<sup>2</sup>

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.93962部队,陕西延安,716000)

**摘要** 在无人机自组网中,针对贪婪地理路由协议采用周期性信标交换导致邻居表不能准确反映邻居节点位置的问题,提出了一种基于移动预测和链路保持时间的路由协议MP-GPSR。该协议综合考虑节点的移动位置和链路保持时间来选择下一跳,减缓了节点高速移动带来的不利影响,同时使用两跳邻居节点的位置选择下一跳来避绕路由空洞,降低了传统边界转发的路径冗余。仿真结果表明:该协议不但提高了数据分组交付率,而且降低了平均端到端时延和控制开销。

**关键词** 无人机自组网;贪婪地理路由协议;移动预测;链路保持时间;路由空洞

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.03.013

**中图分类号** TP 393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)03-0061-05

## A Routing Protocol Based on Mobility Prediction in UAV Ad Hoc Networks

LI Yulong<sup>1</sup>, HUANG Guoce<sup>1</sup>, ZHANG Hengyang<sup>1</sup>, ZHENG Bo<sup>2</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Unit 93962, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

**Abstract:** To address the problem that neighbor table of greedy geographical routing protocols can not accurately list positions of nodes, which resulted from periodic beacon exchange in unmanned aerial vehicle (UAV) ad hoc network, a mobility prediction greedy perimeter stateless routing protocol (MP-GPSR) is proposed. In the proposed protocol, the next hop is chosen according to the mobility location of neighbor nodes and link expiration time during the routing discovery phase, which slows down the adverse effect caused by the high speed moving of mode. Simultaneously choosing the next hop with the position information of the 2-hop neighbors when the routing void appears can reduce the redundancy of perimeter forwarding. Simulation result shows that the proposed protocol has high packet success delivery ratio and low average end-to-end delay as well as control consumption.

**Key words:** UAV ad hoc network; greedy geographical routing protocol; mobility prediction; link expiration time; routing void

无人机自组网<sup>[1-2]</sup>具有临时、动态、快速组网和  
大范围远程作战的优点,已受到国内外研究机构的

广泛关注。路由协议就是其中重要的研究内容之  
一,贪婪地理路由协议<sup>[3]</sup>不需要建立和维护路由,只

收稿日期:2015-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202490);航空科学基金资助项目(2013ZC15008)

作者简介:李玉龙(1990-),男,甘肃兰州人,硕士生,主要从事无人机通信网络研究.E-mail:13259746137@163.com

**引用格式:**李玉龙,黄国策,张衡阳,等.移动预测的无人机自组网路由协议[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):61-65. LI Yulong, HUANG Guoce, ZHANG Hengyang, et al. A Routing Protocol Based on Mobility Prediction in UAV Ad Hoc Networks[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(3): 61-65.

需节点准确地存储周围邻居节点的位置信息,在贪婪转发和边界转发的配合下,能够提供良好的数据传输,同时能够降低控制开销,具有良好的网络扩展性和顽健性,成为了研究的热点。

文献[4]在无人机组网环境下测试了 OLSR (Optimized Link State Routing)、AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector)和 GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing)协议,结果表明 GPSR 协议的性能要优于前两者。文献[5]在选择下一跳节点时考虑了节点的位置、速度和方向,提高了分组交付率,但没有考虑当前时刻节点是否还处于通信范围内;文献[6]用一阶线性方程来预测无人机的移动位置,一定程度上提高了节点的位置精度,但不符合无人机的运动特性;文献[7]中用链路稳定性来选择下一跳节点,造成过多的路径冗余,增加端到端时延;文献[8]采用与地面站频繁交互的方式,来提高下一跳选择的精度,但这过分依赖于基础设施。此外,无人机自组网中由于节点的稀疏性,极易出现路由空洞,文献[9]通过发送探测包形成有效的空洞迂回路径;文献[10]提出了一种路标迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法。这2种方法在低速或静态的网络中,能够有效克服路由空洞带来的不利影响,但在高速通信环境下不易实现。

## 1 MP-GPSR 协议设计

### 1.1 移动位置预测

#### 1.1.1 问题描述

由于周期性信标交换所提供的邻居节点位置信息不准确,转发节点  $S$  将选择节点  $O$  作为下一跳节点,但并不知道节点  $O$  已经移出其通信范围而导致通信暂时性的中断,而且这种通信中断在面向无连接的网络协议中对上游节点来说是暂盲的,有必要设计一种预测机制,能够及时反映邻居节点位置变化。见图1。

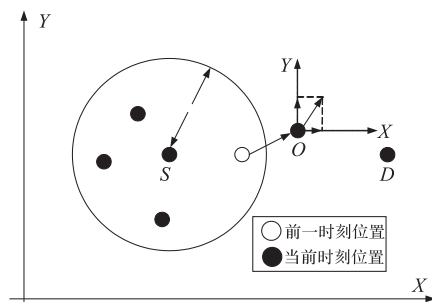


图1 节点运动图

Fig.1 Node movement figure

#### 1.1.2 网络建模

为方便分析,假设:无人机节点通过 GPS 获取自己的位置和速度信息等;通信半径为  $R$ ;飞行在同一高度,即在 2-D 空间描述无人机的运动。

定义:用图  $G=(U,E)$  来描述无人机自组网; $Q=[0,S] \times [0,S]$  表示节点的运动区域; $U=(u_1, u_2, \dots, u_n)$  表示节点的集合,  $u_i$  表示第  $i$  个节点;  $(u_i, u_j) \in E$  表示第  $i$  个节点与第  $j$  个节点的距离小于  $R$ ,即存在通信链路;  $\forall u_i \in U, (x_i, y_i) \in Q$  表示第  $i$  个节点所处的位置;  $v_i$  表示第  $i$  个节点的速度且与  $X$  轴的夹角为  $\theta_i$ ;用文献[11]中的高斯马尔科夫移动模型来描述节点的移动方式,将 2 次信标交换的时间间隔离散化,即  $\Delta T = t_n - t_{n-1} = k\Delta t$ ,  $\Delta t$  为时间步长,  $k$  为时间分段的数量,  $t_n$  时刻节点  $i$  通过信标交换得知邻居节点  $j$  的速度为  $v_j(t_n)$ ,方向角为  $\theta_j(t_n)$ ,位置为  $(x_j(t_n), y_j(t_n))$ ,则在  $(t_n + m\Delta t)$  时刻节点  $j$  的速度和方向角为:

$$\begin{cases} v_j(t_n + m\Delta t) = \beta v_j(t_n + (m-1)\Delta t) + \\ (1-\beta)\bar{v} + \sqrt{1-\beta^2} v_j(t_n + (m-1)\Delta t) \\ \theta_j(t_n + m\Delta t) = \beta \theta_j(t_n + (m-1)\Delta t) + \\ (1-\beta)\bar{\theta} + \sqrt{1-\beta^2} \theta_j(t_n + (m-1)\Delta t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $1 \leq m \leq k$ ;  $\beta$  为相关记忆参数,表示当前时隙与前一时隙在速度和方向上的相关性,取值为  $[0,1]$ ,通过调节  $\beta$ ,可以调节相关性的强弱;  $\bar{v}$  和  $\bar{\theta}$  表示周期内平均速度和平均方向角,通过式(1)可以预测节点在周期间隔内任意时刻的速度和方向角,进而可以由式(2)计算节点  $j$  在  $(t_n + m\Delta t)$  时刻所处的位置:

$$\begin{cases} x_j(t_n + m\Delta t) = x_j(t_n) + \sum_{\rho=1}^m v_j(t_n + \rho\Delta t) \Delta t \cos \theta_j(t_n + \rho\Delta t) \\ y_j(t_n + m\Delta t) = y_j(t_n) + \sum_{\rho=1}^m v_j(t_n + \rho\Delta t) \Delta t \sin \theta_j(t_n + \rho\Delta t) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)和(2)以及前一周期邻居节点的位置速度信息,可以预测出周期间隔内所有邻居节点在当前时刻所处的位置,剔除已经移出通信范围的节点,为下一跳的选择提供依据。

### 1.2 链路保持时间预测

通过高斯马尔科夫移动模型,可以预测出邻居节点任意时刻的位置,但是仅靠地理位置信息来选择下一跳节点并不可靠,节点的高速移动性,使得链路极不稳定,为此引入链路保持时间 LET (Link Expiration Time, LET)<sup>[12]</sup>来联合选择更可靠的下一跳节点。任意 2 个相邻节点的距离小于传输半径时,就确认为保持链接。假设根据式(1)和(2)预测节点  $i$  和  $j$  此时的速度、方向角和位置分别为  $v_i$  和

$v_j$ 、 $\theta_i$  和  $\theta_j$ 、 $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$ , 则链路生存时间  $LET_{ij}$  由式(3)可得:

$$LET_{ij} = \frac{\sqrt{(a^2 + c^2)R^2 - (ad - bc)^2} - (ab + cd)}{a^2 + c^2} \quad (3)$$

式中:  $a = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j$ ;  $b = x_i - x_j$ ;  $c = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j$ ;  $d = y_i - y_j$ 。由式(3)可知, 如果已经保持链接的 2 个节点的速度和方向一致, 那么  $LET_{ij}$  为无穷大, 即一直保持链接; 如果  $LET_{ij} < 0$ , 则认为 2 个节点不链接; 如果  $LET_{ij} > 0$  且数值越大, 则表示链路的生存时间越长。

### 1.3 联合机制选择下一跳

假设节点  $i$  在  $t_n$  时刻通过信标交换更新了邻居节点的位置,  $I_i$  表示节点  $i$  的邻居节点的集合, 在  $(t_n + m\Delta t)$  时刻要发送数据, 则通过以下几步来选择下一跳节点:

1) 对于  $\forall u_j \in I_i$  由式(1)和式(2)计算得邻居节点  $u_j$  在  $(t_n + m\Delta t)$  时刻的位置为  $(x_j(t_n + m\Delta t), y_j(t_n + m\Delta t))$ ;

2) 用式(4)计算邻居节点  $u_j$  与节点  $u_i$  的距离  $d$ , 并判断是否超出了通信范围  $R$ , 如  $d > R$ , 则从邻居表中剔除节点  $u_j$ ;

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

3) 用式(4)计算邻居节点  $u_j$  与目的节点  $u_d$  的距离  $D_j$ ,  $D$  为与目的节点最近的距离:

$$D = \min_{j \in I_i} D_j \quad (5)$$

4) 用式(3)计算邻居节点  $u_j$  与源节点  $u_i$  链路保持时间  $LET_{ij}$ ,  $LET$  为最长链路保持时间:

$$LET = \max_{j \in I_i} LET_j \quad (6)$$

5) 联合机制选择下一跳: 根据步骤 3) 和 4) 已经得到了处在通信范围内的节点  $u_j$  与目的节点  $u_d$  的距离  $D_j$  以及与发送节点  $u_i$  的链路保持时间  $LET_{ij}$ , 将两者联合共同选择最小  $NH$ (Next Hop) 值的下一跳邻居节点:

$$NH = \min_{j \in I_i} NH_j = \begin{cases} D_j + \frac{\rho}{LET_{ij}}, & D_j < D_i \\ \infty, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $1 \leq \rho \leq R$ , 表示链路保持时间  $LET$  在选择下一跳节点时所占的权重。

### 1.4 路由空洞处理

如图 2 所示, 当转发节点  $S$  的通信范围内没有邻居节点到目的节点  $O$  的距离比自己更近时, 出现了路由空洞。为方便分析, 假设: 节点  $S$  到目的节点  $O$  的距离为  $D$ , 且  $D > R$ ; 节点  $S$  有  $n$  个邻居节点, 随机分布于节点  $S$  的通信范围内, 则:

区域  $SXZY$  的面积  $K$  为:

$$K = \frac{\pi R^2}{2} - R^2 \arcsin \frac{R}{2D} + 2D^2 \arcsin \frac{R}{2D} - \frac{1}{4} R \sqrt{2D^2 - R^2} \quad (8)$$

邻居节点  $u_j$  处于区域  $SXZY$  的概率  $P_j$  为:

$$P_j = \frac{K}{\pi R^2} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{2D} \quad (9)$$

所有邻居节点处于区域  $SXZY$  的概率, 即节点  $S$  遇到路由空洞的概率  $p$  为:

$$P = \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R}{2D} \right)^n \quad (10)$$

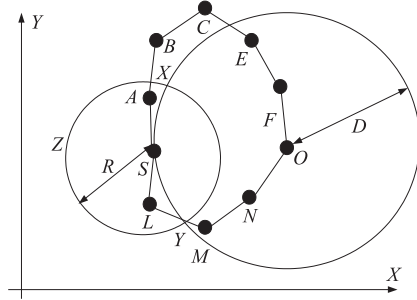


图 2 路由空洞

Fig.2 Routing void

由式(10)可以看出邻居节点数目越多, 通信半径越大, 则遇到路由空洞的概率越小。本文根据两跳邻居节点的信息, 采取间接扩大通信半径的方法来处理路由空洞问题, 有助于选择合适的下一跳节点尽快恢复到贪婪转发模式。节点  $S$  根据邻居表信息发现邻居节点  $L$  的邻居节点  $M$  到目的节点的距离比自己更近, 将选择节点  $L$  作为下一跳节点, 这样数据包沿着更优的路径 ( $S-L-M-N-O$ ) 进行转发, 有效避免了标准边界转发模式沿着路径 ( $S-A-B-C-D-E-F-O$ ) 转发而产生的路径冗余, 减小了端到端时延。

## 2 MP-GPSR 协议描述

### 2.1 邻居发现机制

通过周期性信标交换, 建立邻居表。MP-GPSR 协议的信标格式为:  $P$ , 位置;  $V$ , 速度;  $P_{next}$  两跳节点位置;  $T$ , 发送时间。包括自身的位置、速度、两跳邻居节点的位置和发送时间等信息。节点在收到信标后, 对邻居表进行更新。

### 2.2 MP-GPSR 贪婪转发模式

当节点  $u_i$  以贪婪模式转发数据包时, 具体算法步骤如下: ①点  $u_i$  收到数据包时, 首先判断目的节点是否是自己。如果是, 转到④; ②节点  $u_i$  查找邻居信息表, 根据式(1)和(2)对邻居节点位置进行预测, 更新邻居节点的位置速度信息; ③根据联合选择机制选择下一跳节点, 如果通过计算发现没有满足

条件的邻居节点,说明节点遇到了路由空洞,转到⑤;④数据发送完成;⑤贪婪转发失败,MP-GPSR协议转到两跳边界转发模式。

### 2.3 MP-GPSR 两跳边界转发模式

当贪婪转发失败时,MP-GPSR协议将启动两跳边界转发模式。当节点 $u_i$ 处于边界转发模式时,具体算法步骤如下:①收到数据包时, $u_i$ 首先判断自己是否是目的节点。如果是,转到5);②节点 $u_i$ 查找邻居信息表,根据式(1)和(2)时对邻居节点速度位置信息进行预测,更新邻居节点的信息;③根据式(4)计算每个邻居节点到目的节点的距离。如果存在邻居节点到目的节点的距离小于 $u_i$ 到目的节点的距离,边界转发完成,转到⑥;④ $u_i$ 根据式(4)计算两跳邻居节点到目的节点的距离,选择距离目标节点最近的两跳邻居节点作为转发方向,如果没有任何两跳邻居的信息,转到⑦;⑤数据发送完成;⑥结束两跳边界转发模式,转到贪婪转发模式;⑦启动标准边界转发模式。

## 3 仿真分析

在NS2网络仿真平台上搭建了无人机自组网模型。仿真评估了MP-GPSR路由协议中的性能,并与GPSR和AODV协议在相同的运动场景条件下从数据分组交付率、平均端到端时延和控制开销方面进行比较。

在此网络模型中,采用高斯马尔科夫移动模型。依据文献<sup>[14]81-83</sup>设定无人机的速率分布于[30-180]m/s,MP-GPSR信标周期取5s,仿真具体参数设置见表1。

表1 仿真参数设置

Tab.1 Settings of simulation parameters in UAV Ad Hoc networks

参数名	数值
场景大小/km	2 000×2 000
通信范围/km	350
MAC层类型	IEEE 802.11
发送功率/W	50
分组类型	CBR
传输速率/kbps	50
节点数	50
天线类型	OmnAnten
传播类型	TwoRayGround
信道类型	WirelessChannel
信标发送周期/s	3,5

图3为节点移动速率与分组交付率的关系图。当无人机速率较低时,AODV协议的分组交付率较高,随着移动速率的增大,高动态的网络拓扑使得

AODV协议很难建立可靠的路径传输,分组交付率下降幅度较大。相比之下,GPSR协议依据邻居节点位置选择下一跳,整体性能优于AODV协议,但随着节点移动速度的增加,维护的邻居表并不能准确反映邻居节点位置,导致了分组交付率的下降。但是MP-GPSR协议的分组交付率一直较高,这是因为移动预测机制维护了较准确的邻居节点位置信息,联合机制选择了更加可靠的下一跳节点,有效提高了数据传输的成功率,减缓了节点高速移动带来的影响。

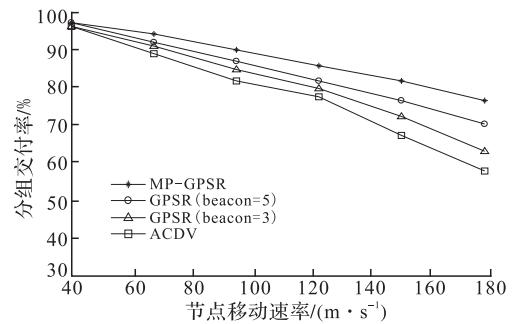


图3 分组交付率

Fig.3 Packet delivery ratio

如图4所示,每种协议的平均端到端时延随着节点移动速度的增大而增加。当速度小于100m/s时,GPSR协议由于遇到路由空洞导致了路由跳数的额外增加或数据转发失败,其平均端到端时延大于AODV协议;当速度大于100m/s时,AODV协议和GPSR协议难以适应高度动态变化的网络拓扑,频繁的链路中断和数据重传使得平均端到端时延均有大幅度的增加。相比之下MP-GPSR协议的性能优越,这是因为联合机制选择的最可靠下一跳有效减少了数据包的丢失,两跳边界转发模式大幅度减小了遇到路由空洞的概率,使得MP-GPSR协议以更少的跳数更高的成功率进行数据转发,明显的降低了平均端到端时延。

如图5所示,随着节点移动速率的增大,各协议的控制开销也越来越大。对于GPSR协议,周期性的信标交换是其主要的路由开销部分,信标周期小的控制开销更大。当节点移动速率较低时,网络拓扑结构相对稳定,AODV协议的控制开销低于GPSR协议;但随着节点移动速度的增大,AODV协议由于高动态的网络拓扑导致路由路径失败,不得不重新启动路由发现机制,控制开销大幅度增加。GPSR协议信标周期长的随着节点移动速率的增大,分组交付率下降比较严重,其控制开销增加的幅度明显大于信标周期短的。MP-GPSR协议由于采用移动预测,修正了邻居节点的位置,使得它可以采用更长的信标周期,并且联合机制选择了更可靠的

下一跳节点,大幅度提高了分组交付率,其控制开销一直保持较低水平。

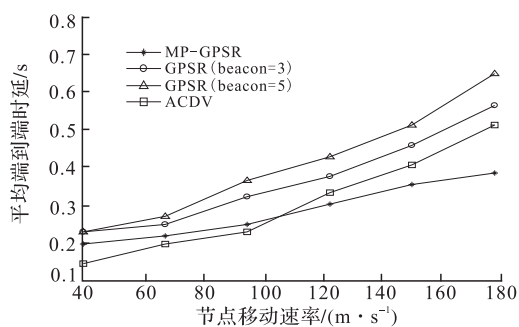


图4 平均端到端时延

Fig.4 Average end-to-end delay

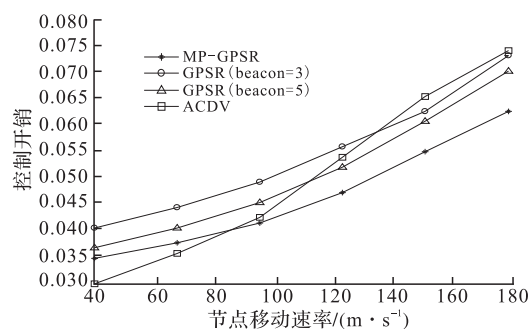


图5 控制开销

Fig.5 Control consumption

## 4 结语

本文提出了一种基于移动预测和链路保持时间的路由协议 MP-GPSR。通过 GPSR、AODV 协议仿真结果对比,该协议在一定的速度范围内,能够有效提高数据分组交付率,减小平均端到端时延和控制开销,一定程度上减缓了节点移动和路由由空洞带来的不利影响,适用于网络拓扑高动态变化的无人机自组网。但是,本文中并没有考虑节点的拥塞控制,这将是下一步的研究重点。

## 参考文献(References):

- [1] Unmanned System Integrated Roadmap FY2013-2038[R]. USA: Department of Defense, 2013.
- [2] Ilker Bekmezci, OzgurKoray Sahingoz, Samil Temel. Flying Ad-Hoc Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013(11): 1254-1270.
- [3] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks. [C]//International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, Massachusetts: USA, 2000:243-254.
- [4] M T Hyland, B E Mullins, R O Baldwin, et al. Simulation-based Performance Evaluation of Mobile Ad Hoc Routing Protocols in A Swarm of Unmanned Aerial Vehicles.[C]//The 21st International Conference on Advanced Information

Networking and Applications Workshops. Ontario, Canada, 2007:249-256.

- [5] 石祥滨, 王锋. 无人机自组网多媒体数据传输路由算法研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(2): 33-36. SHI Xiangbin, WANG Feng. A Routing Algorithm for UAV Ad Hoc Networks Multimedia Data Transmission[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2012, 29(2): 33-36. (in Chinese)
- [6] Yi Li, Marc St-Hilaire, Thomas Kunz. Improving Routing in Network of UAVs via Scoped Flooding and Mobility Prediction[J]. Wireless Days, 2012(2): 220-225.
- [7] Zhongliang Zhao, Denis Rosario, Torsten Braun, et al. Topology and Link Quality-aware Geographical Opportunistic [C]//9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). 2013:1522-1527.
- [8] Routing in Wireless Ad-hoc Network[C]//Wireless Communication and Mobile Computing Conference, 2013: 1522-1527.
- [9] SeUng Hyeon, Ki-Il Kim, Sang Woo Yang. A New Geographic Routing Protocol for Aircraft Ad Hoc Networks [C]//29th Digital Avionics Systems Conference. Salt Lake City: USA, 2010: 2.E.2-1-2.E.2-8.
- [10] 彭玉旭, 郭月, 胡立辉. WMSN 中一种有效的地理路由空洞迂回算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(12): 58-62. PENG Yuxu, GUO Yue, HU Lihui. Efficient Bypassing Hole Scheme for Geographic Routing in Wireless Multimedia Sensor Networks [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(12): 58-62. (in Chinese)
- [11] 张衡阳, 王玲, 刘云辉. 路标迭代提取和剔除的自适应空洞处理算法[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2744-2751. ZHANG Hengyang, WANG Ling, LIU Yunhui. Route-Sign-Based Adaptive Void Handling Geographical Routing Algorithm [J]. Journal of Software, 2009, 20(10): 2744-2751. (in Chinese)
- [12] Dan Broyles, Abdul Jabbar, James P.G Sterbenz. Design and Analysis of A 3-D Gauss-Markov Mobility Model for Highly-Dynamic Airborne Networks[C]// International Telemetering Conference. San Diego: USA, 2010: 2043-2048.
- [13] Rozita Aboki, Erfan Shaghaghi, Parand Akhlaghi, et al. Predictive Location Aided Routing in Mobile Ad Hoc Network [C]//11th Malaysia International Conference on Communications, Kuala Lumpur: Malaysia, 2013:57-61.
- [14] 季晓光, 李屹东. 美国长航时无人机 RQ-4“全球鹰”[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011. JI Xiaoguang, LI Yidong. The United States Long-endurance Unmanned Aerial Vehicle RQ-4"Global Hawk"[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011: 81-83. (in Chinese)
- [15] 吕娜, 徐德民, 王文艺. 编队协同中的 Ad Hoc 网络 MAC 协议[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(1): 56-59. LÜ Na, XU Demin, WANG Wenyi. A MAC Protocol Analysis of Formation Cooperation Based on Wireless Ad Hoc Networks [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(1): 56-59. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)