

## 航空自组网负载均衡地理路由策略

郑博, 张衡阳, 王宝良, 赵玮

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 针对贪婪周边无状态路由 (GPSR, greedy perimeter stateless routing) 协议在航空自组网中存在难以适应高动态网络环境、易导致网络拥塞等问题, 提出一种基于 TTE (time to enter the communication range of the destination) 的多路径流量分配负载均衡地理路由 (LBGR, load balancing geographic routing) 协议。该协议将 TTE 作为路由决策依据, 具体包括分组转发策略、多路径流量分配策略和局部最优化处理策略等 3 种机制。进一步采用排队论对多路径流量分配策略进行了建模分析, 得出了平均队长、平均等待队长、平均等待时间等性能指标的数学表达式。最后利用 OMNeT++ 仿真平台对 LBGR 协议的性能进行了仿真验证, 结果表明相比 GPSR 等协议, LBGR 协议在分组传输成功率和端到端时延方面有较大幅度的提升, 能够有效适应高动态航空环境。

**关键词:** 航空自组网; 贪婪地理路由协议; 负载均衡; 多路径; 多队列; 局部最优化

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Load balancing geographic routing strategy for aeronautical ad hoc networks

ZHENG Bo, ZHANG Heng-yang, WANG Bao-liang, ZHAO Wei

(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In aeronautical ad hoc networks, the traditional greedy perimeter stateless routing (GPSR) protocol poses several issues. For example, it is difficult to adapt to the highly-dynamic network environment, and it is prone to cause congestions. In order to address the problems, a TTE (time to enter the communication range of the destination)-based load balancing geographic routing (LBGR) protocol was presented. Taking TTE as the main routing decision metrics, this protocol included the TTE-based packet forwarding scheme, multi-path traffic allocation scheme, and local optimum handling scheme. Furthermore, the multi-path traffic allocation scheme employing the queueing theory was modeled, and the mathematical expressions of some metrics were derived, such as the mean queue size, mean number of packets waiting in the queue, and mean waiting time. Finally, the analysis of the OMNeT++ simulations shows LBGR protocol has advantages over GPSR and some other protocols in terms of the packet delivery ratio and end-to-end delay, and is more suitable for the highly-dynamic aeronautical environment.

**Key words:** aeronautical ad hoc network, greedy geographical routing protocol, load balancing, multi-path, multi-queue, local optimum

### 1 引言

航空自组网是移动 ad hoc 网络 (MANET, mobile ad hoc network) 在航空通信领域的应用, 其

基本思想是, 一定范围内的航空飞行器之间可以互相转发控制指令信息, 交换各自的飞行状态、感知信息等数据, 并自动地连接建立起一个 MANET<sup>[1-4]</sup>。航空自组网采用动态组网、动态路由

收稿日期: 2016-06-04; 修回日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61202490); 航空科学基金资助项目 (No.20150896010)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61202490), The Aeronautical Science Foundation of China (No.20150896010)

和无线中继等技术,将航空飞行器互连互通,具备自组织、自修复的能力和快速、高效组网的优势,可满足特定条件下军、民航通信的需求,是对现有航空通信网的补充和发展,具有重要的理论研究意义和实际应用价值。目前,该领域代表性的研究与应用项目主要有 AANET<sup>[5]</sup>、ATENAA<sup>[6]</sup>、NEWSKY<sup>[7]</sup>、SANDRA<sup>[8]</sup>和 iNET<sup>[9]</sup>等。

路由协议是航空自组网的一项关键技术,主要解决数据分组实时、可靠传输的问题。基于路由表的先验式和反应式路由协议大多是通过路由探测分组的全网性或部分泛洪广播来获得链路状态,从而建立和存储端到端的路由表。然而在航空高动态环境下,端到端的路由会因节点的高速移动、战损失效而中断,需要不断地进行路由表的重建和维护,控制开销大。贪婪地理路由协议在整个数据传输过程中不需要泛洪探测分组,不需要建立、维护和存储端到端的基于链路状态的路由表,只要求网络中每个节点准确地感知和存储周围邻居节点的位置信息即可<sup>[10]</sup>。数据分组的转发按照贪婪转发策略分布式进行,控制开销小,网络可扩展性强。因此,贪婪地理路由协议在航空自组网中颇受关注,成为研究热点之一。

然而,传统贪婪地理路由协议——贪婪周边无状态路由<sup>[11]</sup>应用于高动态、大尺度、稀疏型航空自组网存在以下 3 方面的问题: 1) 随着我国低空空域的开放,航空节点呈现出典型的三维空间分布,而 GPSR 协议的应用环境为地面二维场景; 2) GPSR 协议完全以向目的节点的前进距离为依据来选择下一跳节点,没有考虑航空节点的高动态性; 3) GPSR 协议在选择下一跳节点时没有考虑节点的负载状况,数据分组在一定时间内沿着同一路径传输,当业务量较大时,将产生较大的排队时延,甚至造成分组丢弃,严重影响数据传输的实时性和可靠性。

针对以上问题,本文提出一种适用于三维高动态航空自组网的负载均衡地理路由协议,具体包含基于 TTE 的分组转发策略、多路径流量分配策略以及局部最优化处理策略 3 种机制。该协议的主要特点在于: 1) 将 TTE 作为路由选择的标准,以适应网络拓扑的高动态变化; 2) 根据各邻居节点的 TTE 值将流量在不同邻居节点间按反比分配,实现负载均衡,克服网络拥塞; 3) 针对网络中节点密度低的情况,采取“存储—携带”机制来解决局部最优化

问题。

## 2 相关工作

近年来,贪婪地理路由协议在各类三维空间网络中的应用引起了研究人员的广泛关注。文献[12~16]对贪婪地理路由协议在三维无线传感器网络(3-D WSN, 3-dimensional wireless sensor network)中的应用进行研究: 文献[12]提出了一种多跳 Delaunay 三角剖分(MDT, multihop delaunay triangulation)路由,利用虚拟 Delaunay 三角剖分来解决 3-D WSN 中的空洞问题; 文献[13]提出了一种基于贪婪嵌入思想的气泡路由(bubble routing)算法,将 3-D WSN 分解为一系列的空心球体细胞(HSC, hollow spherical cell); 文献[14]首次对高亏格三维曲面 WSN 中的可扩展路由算法进行了研究,利用图嵌入方法将网络分解为亏格 0 成分; 文献[15]和文献[16]进一步针对多种高亏格三维曲面 WSN 提出了可扩展、分布式路由算法。

应用于航空自组网中贪婪地理路由协议的研究工作可归纳为以下 3 个方面。

1) 针对航空环境改进贪婪转发策略中下一跳节点的选择标准,为了适应高动态网络拓扑变化或增强链路稳定性,将节点的运动特征作为下一跳节点的选择依据。AeroRP(aeronautical routing protocol)将交叉时间(TTI, time to intercept)作为路由选择依据,有效解决了基于位置的贪婪转发策略在航空环境中存在的问题<sup>[9]</sup>。但该协议局限于二维场景,且目的节点仅限于静止的地面站点。FGPA(fountain-code based greedy position-assisted)路由选择离开通信范围时距离目的节点最近的节点,作为下一跳节点,以此增强链路稳定性<sup>[17]</sup>。MPGR(mobility prediction based geographic routing)在对节点进行移动预测的基础上,将各邻居节点与目的节点之间的距离,以及与转发节点之间的连通时长,作为下一跳节点的综合判断依据<sup>[18]</sup>。GRAA(geographic routing protocol for aircraft ad hoc network)根据节点的三维地理位置和速度信息,将一段时间后距离目的节点最近作为下一跳节点的选择依据<sup>[19]</sup>。RGR(reactive-greedy-reactive)协议结合了 AODV 和贪婪转发策略,在通常情况下采用 AODV 协议构建路由,由于网络拓扑的动态变化,当转发节点

寻找下一跳节点发现链路已断开时, 采用贪婪转发策略转发分组<sup>[20]</sup>。文献[21]通过在路由建立过程中增加稳定性标准, 提出了改进的 RGR (modified-RGR) 协议。

2) 为了克服网络拥塞, 采用负载均衡策略。GLSR (geographic load share routing) 将分组的前进距离与排队时延的比值定义为前进速率, 并以前进速率作为下一跳节点的选择标准, 以此来实现负载均衡<sup>[22]</sup>。但该协议主要针对节点速率较低的航空场景, 难以适应节点速率达到 3 马赫的高动态网络。DGLAR (dynamic geographic load aware routing) 协议在路由选择时同时考虑节点的相对移动速度和数据拥塞情况, 定义了一种新的路由度量机制, 而且其动态路由因子可根据网络应用环境进行调节<sup>[23]</sup>。但动态路由因子的具体取值只能通过经验判断, 难以依靠具体理论获得。

3) 结合航空环境改进空洞处理算法, 如 optimized-RGR 协议, 其空洞处理策略是当贪婪转发策略找不到合适的下一跳节点时, 将分组转发给向目的节点运动速度最快的节点<sup>[24]</sup>; MPGR 采用了两跳边界转发的空洞处理模式<sup>[18]</sup>。

随着贪婪地理路由协议在各类网络中的广泛应用, 为克服网络拥塞、减少节点能耗、提高网络寿命, 研究人员对多路径负载均衡贪婪地理路由协议进行了深入的研究, 代表性的工作主要有: DGR (directional geographical routing) 协议将单一的业务流按照不同的传输方向分为多条子流, 并采用轮询调度的方式进行分组传输<sup>[25]</sup>; GBR (greedy-based backup routing) 协议在选择主用路径的基础上, 通过计算链路寿命选择本地备份路径<sup>[26]</sup>; ELGR (energy-efficiency and load-balanced geographic routing) 协议根据节点剩余能量与队列长度的比较进行路由决策<sup>[27]</sup>; TPGF (two-phase geographical greedy forwarding) 路由通过路径发现和路径优化这 2 个阶段来选取路由<sup>[28]</sup>; GEAM (geographic energy-aware non-interfering multipath) 路由和 RD-GMR (radio-disjoint geographic multipath routing) 协议都考虑了多条路径之间的干扰问题<sup>[29,30]</sup>。但以上协议都是针对静态或低动态网络提出的。在航空自组网中, 由于网络拓扑变化比较剧烈, 贪婪地理路由协议中的邻居节点表需要频繁更新, 这些协议难以满足应用需求。

### 3 负载均衡地理路由协议

#### 3.1 问题描述

在 GPSR 等传统贪婪地理路由协议中, 通常采用的贪婪转发策略 MND (most nearest to destination) 选择离目的节点最近且比自身距离目的节点更近的邻居节点作为下一跳节点。在图 1(a)所示场景中, 节点  $i$  需要把分组最终发送给目的节点  $d$ , 如果选择邻居节点  $n_1$  为下一跳节点, 则分组的前进距离可表示为

$$x_{n_1} = \delta_{i,d} - \delta_{n_1,d} \quad (1)$$

其中,  $\delta_{i,d}$  表示节点  $i$  和目的节点  $d$  之间的大圆弧距离。将节点  $i$  的所有邻居节点的集合记为  $\Omega_i$ 。如果节点  $i$  和节点  $n_k$  之间存在通信链路, 则将该链路记为  $(i, n_k)$ 。对于节点  $n_k \in \Omega_i$ , 将其链路  $(i, n_k)$  上的分组队列记为  $Q_{in_k}$ 。根据 MND 策略, 如果分组的前进距离满足

$$x_{n_1} = \max_{n_k \in \Omega_i} \{x_{n_k}\}, \quad x_{n_k} > 0 \quad (2)$$

则节点  $i$  选择节点  $n_1$  为下一跳节点, 并将分组放入队列  $Q_{in_1}$  中等待传输。MND 策略的问题在于: 一是仅把向目的节点的前进距离作为下一跳节点的选择标准, 没有考虑航空高动态场景下节点运动特征等因素; 二是数据分组只沿最优路径传输, 没有考虑网络拥塞情况, 这样就会导致网络负载不均衡, 严重时会造成分组丢失, 影响数据传输的实时性和可靠性。

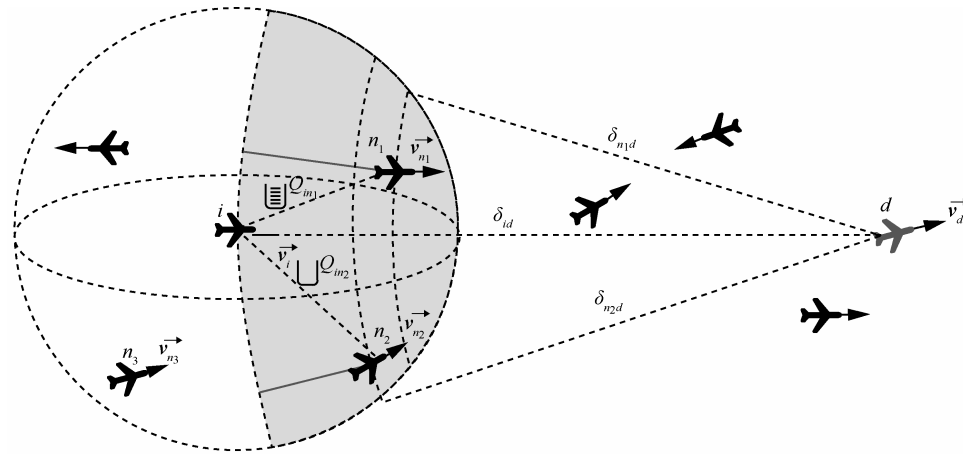
为此, 本文提出的 LBGR 协议一方面以航空飞行器的运动特征为依据选取下一跳节点, 另一方面将流量在所有满足条件的邻居节点中动态合理分配, 实现负载均衡。例如, 在图 1(b)所示的场景中, 节点  $i$  根据所有邻居节点与目的节点的相对运动特征选取下一跳节点, 并把流量在满足条件的邻居节点  $n_1$ 、 $n_2$  和  $n_3$  中按比例分配, 进行多路径传输。

为了便于开展研究, 本文给出以下假设条件。

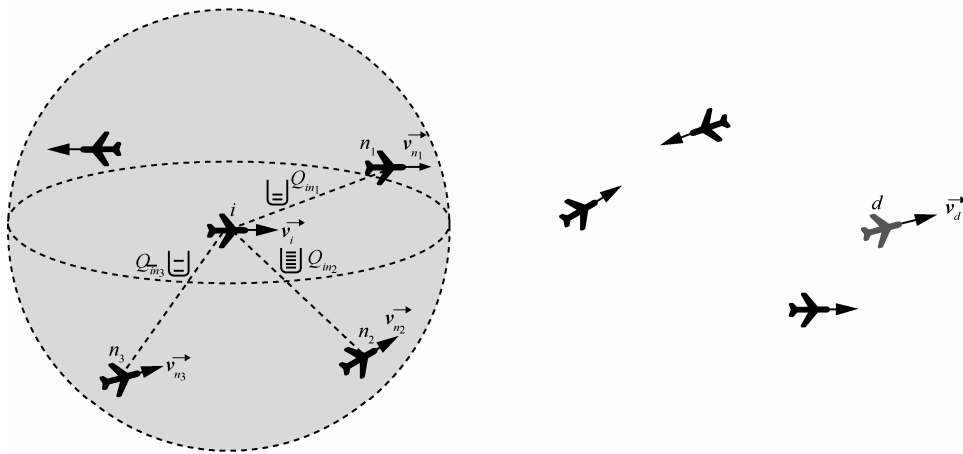
1) 所有节点的位置在三维网络场景中随机均匀分布, 并随机运动。

2) 所有节点的通信范围都是以  $R$  为半径的球体, 即当 2 个节点间的距离小于  $R$  时, 二者间可建立双向通信链路, 当其距离大于  $R$  时, 链路断开。

3) 所有分组具有相同的长度和传输速率, 按 Poisson 流到达节点, 节点对分组的服务时间服从负指数分布。



(a) 基于前进距离的贪婪转发策略场景



(b) 基于相对运动和负载均衡的转发策略场景

图 1 传统贪婪地理路由和 LBGR 协议场景

### 3.2 协议设计思想

LBGR 协议的核心思想是将 *TTE* 作为路由选择的主要依据, 即在所有邻居节点中优先选择 *TTE* 值最小且比自身 *TTE* 值更小的节点作为下一跳节点来转发分组。该协议具体包含 3 种机制: 基于 *TTE* 的分组转发策略、多路径流量分配策略, 以及局部最优化处理算法, 其工作流程如图 2 所示。网络中各节点采用周期性 HELLO 策略来构建和维护邻居节点表, 存储各邻居节点的速度和位置信息; 采用位置服务算法获取目的节点的速度和位置信息; 利用航空飞行器的 GPS 设备获取自身的速度和位置信息。LBGR 协议根据目的节点、各邻居节点, 以及自身的速度和位置信息, 计算各邻居节点及自身的 *TTE* 值, 从而判断是否有小于自身 *TTE* 值的邻居节点。如果有, 根据多路径流量分配机制, 将分组转发给下一跳节点。如果所有邻居节点的 *TTE* 值都大于节点自身的 *TTE* 值, 这种情况称为局部最优

化 (local optimum) 现象, 类似于传统贪婪地理路由协议中的空洞现象。在这种情况下, 采用容延容

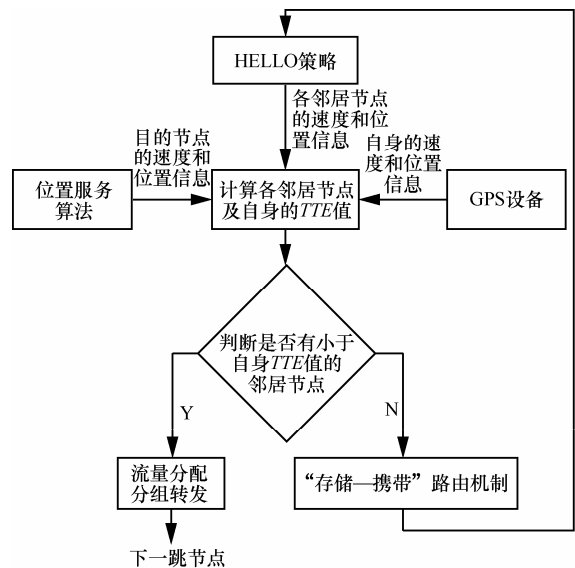


图 2 LBGR 协议工作流程

断网络 (DTN, delay/disruption tolerant network) 的“存储—携带”路由机制, 将待发送分组存入缓存区, 在动态场景中等待下一个 HELLO 周期再判断是否遇到 *TTE* 值更小的邻居节点。

### 3.3 基于 *TTE* 的分组转发策略

1) 邻居节点与目的节点之间的相对速度

如图 3 所示, 在三维坐标系中, 节点 *i* 的下一跳节点 *n<sub>k</sub>* 在当前时刻的位置坐标为  $(x_{n_k}, y_{n_k}, z_{n_k})$ , 目的节点 *d* 的位置坐标为  $(x_d, y_d, z_d)$ 。节点 *n<sub>k</sub>* 的运动速度  $\vec{v}_{n_k}$ 、节点 *d* 的运动速度  $\vec{v}_d$  可分别表示为

$$\vec{v}_{n_k} = v_{n_k} \cos \theta_{n_k} \sin \varphi_{n_k} \vec{i} + v_{n_k} \sin \theta_{n_k} \sin \varphi_{n_k} \vec{j} + v_{n_k} \cos \varphi_{n_k} \vec{k} \quad (3)$$

$$\vec{v}_d = v_d \cos \theta_d \sin \varphi_d \vec{i} + v_d \sin \theta_d \sin \varphi_d \vec{j} + v_d \cos \varphi_d \vec{k} \quad (4)$$

其中,  $v_{n_k}$  和  $v_d$  分别表示节点 *n<sub>k</sub>* 和 *d* 的速率,  $\theta_{n_k}$  和  $\theta_d$  分别表示  $\vec{v}_{n_k}$  和  $\vec{v}_d$  在 *xoy* 平面上的投影与 *x* 轴正方向的夹角,  $\varphi_{n_k}$  和  $\varphi_d$  分别表示  $\vec{v}_{n_k}$  和  $\vec{v}_d$  与 *z* 轴正方向的夹角。

节点 *n<sub>k</sub>* 与节点 *d* 的相对速度为

$$\vec{v}_{re} = \vec{v}_{n_k} - \vec{v}_d \quad (5)$$

其相对速率可表示为

$$\begin{aligned} v_{re} &= \left| \vec{v}_{re} \right| \\ &= [(v_{n_k} \cos \theta_{n_k} \sin j_{n_k} - v_d \cos \theta_d \sin j_d)^2 + \\ &\quad (v_{n_k} \sin \theta_{n_k} \sin j_{n_k} - v_d \sin \theta_d \sin j_d)^2 + \\ &\quad (v_{n_k} \cos j_{n_k} - v_d \cos j_d)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

2) 进入目的节点通信范围的时间 *TTE*

节点 *n<sub>k</sub>* 与节点 *d* 之间的相对位置向量可表示为

$$\vec{l}_{n_k,d} = (x_{n_k} - x_d) \vec{i} + (y_{n_k} - y_d) \vec{j} + (z_{n_k} - z_d) \vec{k} \quad (7)$$

则节点 *n<sub>k</sub>* 与节点 *d* 之间的距离可表示为

$$\Delta d_{n_k,d} = \left| \vec{l}_{n_k,d} \right| = \sqrt{(x_{n_k} - x_d)^2 + (y_{n_k} - y_d)^2 + (z_{n_k} - z_d)^2} \quad (8)$$

$\vec{l}_{n_k,d}$  与  $\vec{v}_{re}$  之间的夹角可表示为

$$\begin{aligned} \theta_{\vec{l}_{n_k,d}, \vec{v}_{re}} &= \arccos \frac{\vec{l}_{n_k,d} \cdot \vec{v}_{re}}{\Delta d_{n_k,d} v_{re}} \\ &= \{(x_{n_k} - x_d)(v_{n_k} \cos \theta_{n_k} \sin j_{n_k} - v_d \cos \theta_d \sin j_d) + \\ &\quad (y_{n_k} - y_d)(v_{n_k} \sin \theta_{n_k} \sin j_{n_k} - v_d \sin \theta_d \sin j_d) + \\ &\quad (z_{n_k} - z_d)(v_{n_k} \cos j_{n_k} - v_d \cos j_d)\} \cdot \\ &\quad \left\{ \sqrt{(x_{n_k} - x_d)^2 + (y_{n_k} - y_d)^2 + (z_{n_k} - z_d)^2} \right\}^{-1} \end{aligned}$$

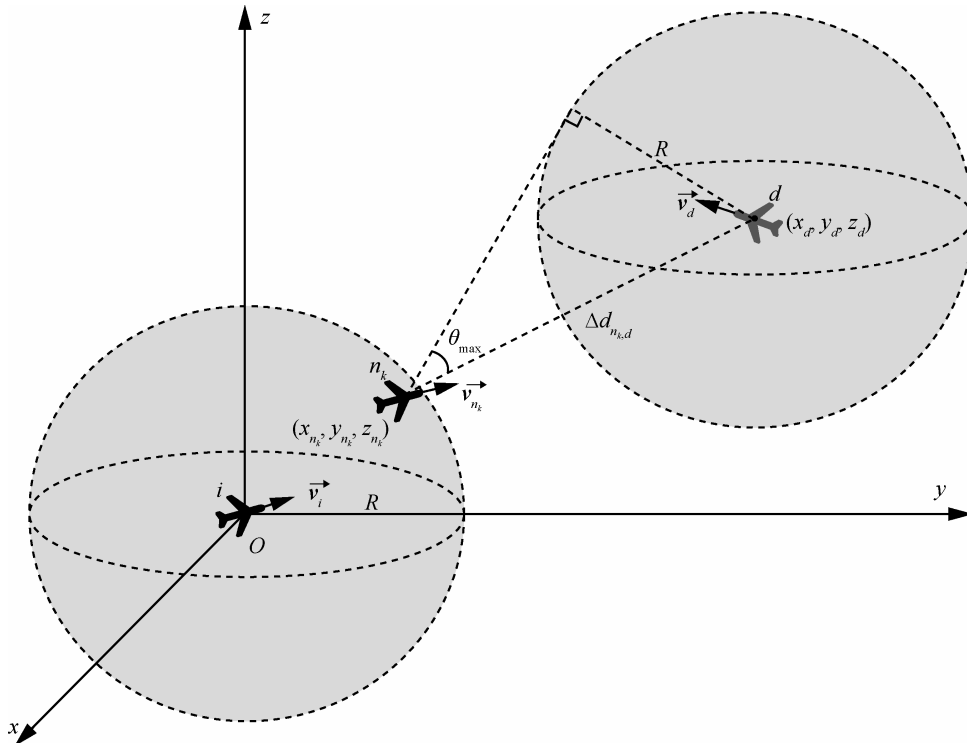


图 3 邻居节点 *n<sub>k</sub>* 与目的节点 *d* 之间的相对运动

$$[(v_{n_k} \cos \theta_{n_k} \sin j_{n_k} - v_d \cos \theta_d \sin j_d)^2 + (v_{n_k} \sin \theta_{n_k} \sin j_{n_k} - v_d \sin \theta_d \sin j_d)^2 + (v_{n_k} \cos j_{n_k} - v_d \cos j_d)^2]^{-1} \quad (9)$$

如图 3 所示, 节点  $n_k$  若要进入节点  $d$  的通信范围, 其相对速度  $\vec{v}_{re}$  与  $\vec{l}$  之间的最大夹角  $\theta_{max}$  可表示为

$$\begin{aligned} \theta_{max} &= \arcsin \frac{R}{\Delta d_{n_k,d}} \\ &= \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_{n_k} - x_d)^2 + (y_{n_k} - y_d)^2 + (z_{n_k} - z_d)^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

定义  $TTE$  为

$$TTE \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 0, & \theta_{\vec{v}_{re}} > \theta_{max} \text{ 且 } \Delta d_{n_k,d} > R \\ \frac{\Delta d_{n_k,d} - R}{v_{re}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

若  $TTE=0$ , 表明节点  $n_k$  背离节点  $d$  运动, 将无法进入节点  $d$  的通信范围, 因此, 节点  $n_k$  不会被选为下一跳节点。若  $TTE < 0$ , 表明当前时刻节点  $n_k$  正处于节点  $d$  的通信范围, 因此相对于  $TTE > 0$  的节点, 节点  $n_k$  将被优先选为下一跳节点。

#### 4 多路径流量分配机制建模分析

LBGR 协议采用的流量分配方案是所有  $TTE$  值小于转发节点的邻居节点都参与流量分配, 将一个 HELLO 周期内的总流量根据各邻居节点的  $TTE$  值按反比分配, 即  $TTE$  值较小的邻居节点分配的业务量较大, 而  $TTE$  值较大的邻居节点分配的业务量较小。假设到达节点  $i$  的分组是参数为  $\lambda$  的 Poisson 流, 令  $\{n_1, n_2, \dots, n_s\}$  表示参与节点  $i$  流量分配的下一跳节点的集合, 则分配给的所有下一跳节点的分组仍然是 Poisson 流, 其中第  $k$  个节点的分组到达率为

$$\lambda^{(k)} = \lambda \frac{\sum_{i=1}^s TTE_{n_i} - TTE_{n_k}}{\sum_{i=1}^s TTE_{n_i}}, 1 \leq k \leq s \quad (12)$$

设每个节点发送缓存区大小为  $K$ , 当缓存区有空位置时, 新到达的分组就进入系统排队等待服务, 当缓存区被全部占用时, 丢弃新到达的分组。网络中所有分组按照“先到先服务”(first-come, first-served) 的原则接受服务, 每个分组所需的服务时间独立, 服从参数  $\mu$  的负指数分布, 且到达与

服务是彼此独立的。实质上该多队列模型可以分为  $s$  个独立的 M/M/1/K 混合制排队系统<sup>[31]</sup>, 如图 4 所示。定义  $\rho^{(k)} = \frac{\lambda^{(k)}}{\mu}$  为第  $k$  个排队系统的交通强度。

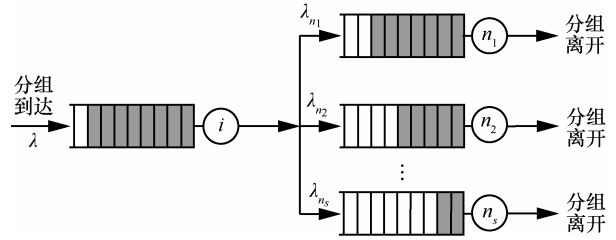


图 4 流量分配多队列模型

令随机变量  $N^{(k)}(t)$  表示在任意时刻  $t$  第  $k$  个排队系统中的分组数, 则随机过程  $\{N^{(k)}(t), t \geq 0\}$  为  $E = \{0, 1, 2, \dots, K\}$  上的生灭过程。

引理 1<sup>[31]</sup> 对于第  $k$  个排队系统, 令  $p_j^{(k)} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{N^{(k)}(t) = j\}$ , 有

$$p_j^{(k)} = \rho^{(k)j} p_0^{(k)} \quad (13)$$

其中,  $p_0^{(k)} = \left( \sum_{i=0}^K \rho^{(k)i} \right)^{-1}$  为当第  $k$  个排队系统平衡时任意时刻队长为 0 的概率, 即系统空闲概率。

因此, 第  $k$  个队列中有  $j$  个分组的概率为

$$p_j^{(k)} = \begin{cases} \frac{(1 - \rho^{(k)}) \rho^{(k)j}}{1 - \rho^{(k)K+1}}, \rho^{(k)} \neq 1, 0 \leq j \leq K \\ \frac{1}{K+1}, \rho^{(k)} = 1, 0 \leq j \leq K \end{cases} \quad (14)$$

由于 M/M/1/K 是损失制, 第  $k$  个排队系统损失的概率为

$$p^{(k)} = p_K^{(k)} = \rho^{(k)K} p_0^{(k)} \quad (15)$$

单位时间内平均损失的分组数为

$$\overline{\lambda_e^{(k)}} = \lambda^{(k)} p_K^{(k)} \quad (16)$$

单位时间内平均进入排队系统的分组数为

$$\lambda_e^{(k)} = \lambda^{(k)} (1 - p_K^{(k)}) \quad (17)$$

平均等待队长为

$$\overline{N_q^{(k)}} = \sum_{i=1}^K (i-1) p_i^{(k)} = p_0^{(k)} \sum_{i=1}^K (i-1) \rho^{(k)i} \quad (18)$$

经推导, 可得

$$\overline{N_q^{(k)}} = \begin{cases} \frac{K(K-1)}{2(K+1)}, & \rho^{(k)} = 1 \\ \frac{\rho^{(k)2}}{1-\rho^{(k)}} - \frac{(K+\rho^{(k)})\rho^{(k)K+1}}{1-\rho^{(k)K+1}}, & \rho^{(k)} \neq 1 \end{cases} \quad (19)$$

令  $N_c^{(k)}$  表示第  $k$  个排队系统平衡时正在被服务的分组数, 则

$$P\{N_c^{(k)} = 0\} = p_0^{(k)}, P\{N_c^{(k)} = 1\} = \sum_{j=1}^K p_j^{(k)} \quad (20)$$

于是正在被服务的平均分组数为

$$\overline{N_c^{(k)}} = \sum_{i=1}^K p_i^{(k)} = \rho^{(k)}(1-p_K^{(k)}) \quad (21)$$

因此, 平均队长为

$$\overline{N^{(k)}} = \overline{N_q^{(k)}} + \overline{N_c^{(k)}} = \begin{cases} \frac{K}{2}, & \rho^{(k)} = 1 \\ \frac{\rho^{(k)}}{1-\rho^{(k)}} - \frac{(K+1)\rho^{(k)K+1}}{1-\rho^{(k)K+1}}, & \rho^{(k)} \neq 1 \end{cases} \quad (22)$$

令  $q_j^{(k)}$  表示第  $k$  个排队系统中, 到达且能进入排队系统的分组看到有  $j$  个分组的平稳概率, 则

$$q_j^{(k)} = \frac{p_j^{(k)}}{1-p_K^{(k)}}, j = 0, 1, \dots, K-1 \quad (23)$$

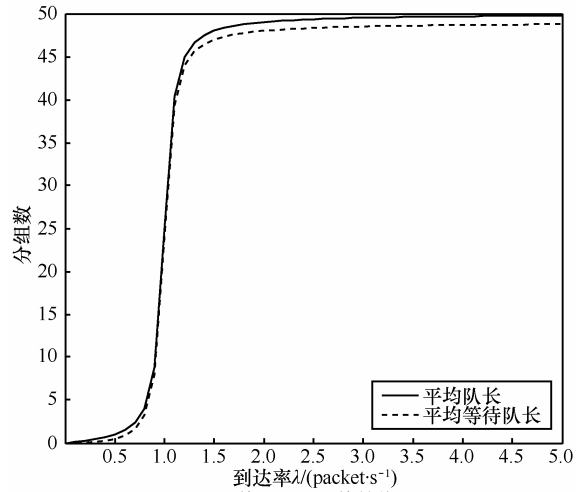
于是统计平衡下分组的等待时间分布函数为

$$W_q^{(k)}(t) = P\{W_q^{(k)} \leq t\} = \begin{cases} q_0^{(k)}, & t = 0 \\ 1 - \sum_{j=1}^{K-1} q_j^{(k)} \left\{ \sum_{i=0}^{j-1} \frac{(\mu t)^i}{i!} e^{-\mu t} \right\}, & t > 0 \end{cases} \quad (24)$$

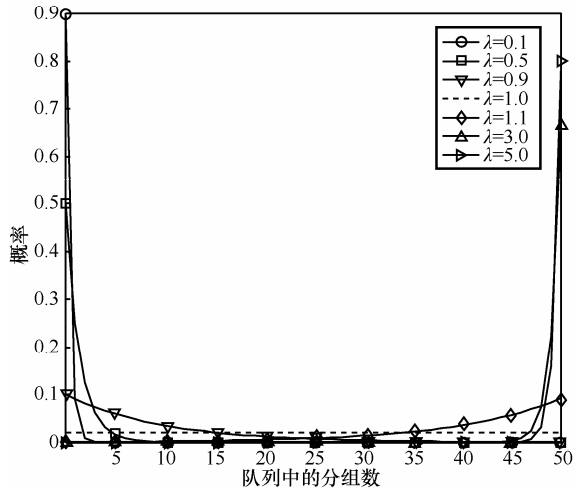
平均等待时间为

$$\overline{W_q^{(k)}} = \sum_{j=1}^{K-1} \frac{j}{\mu} q_j^{(k)} \quad (25)$$

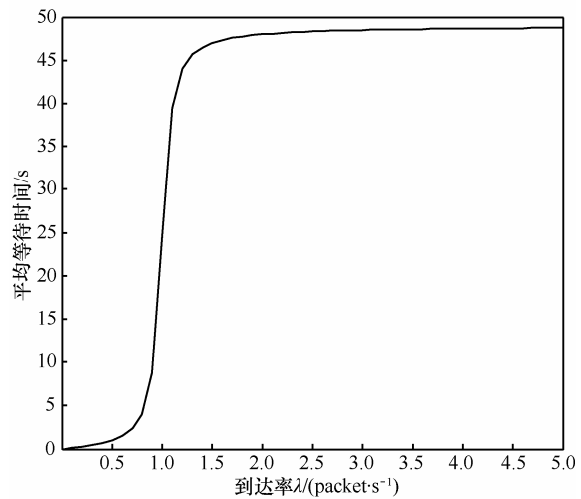
对于第  $k$  个排队系统, 假设  $K=50$ 、 $\mu=1$ , 当分组到达率  $\lambda^{(k)}$  由 0 增大到 5 时, 平均队长、平均等待队长、队列中有  $j$  个分组的概率和平均等待时间的数值计算结果如图 5 所示。由图 5 可知, 随着分组到达率的增大, 平均队长、平均等待队长和平均等待时间都增大, 队列中有  $j$  个分组的概率向多分组趋势转移, 这表明采用多路径流量分配机制能够有效减少分组排队等待时间、缓解网络拥塞。



(a) 平均队长、平均等待队长



(b) 队列中有  $j(0 \leq j \leq K)$  个分组的概率



(c) 平均等待时间

图 5 第  $k$  个排队系统性能指标的数值计算结果

### 5 仿真实验

下面利用 OMNeT++ 仿真平台对 LBGR 协议的性能进行仿真评估。对以下 5 种协议的性能进行对

比分析：GPSR 协议<sup>[11]</sup>、DGR 协议<sup>[25]</sup>、GLSR 协议<sup>[22]</sup>、基于 TTE 的贪婪地理路由（TTE-based GGR，TTE-based greedy geographic routing）协议（即只采用基于 TTE 的贪婪转发策略，而未采用多路径流量分配机制），以及 LBGR 协议。在节点数量为 10~100、节点运动速率为 300~1 200 m/s 的情况下，分别仿真评估 3 种协议的性能。具体仿真参数设置如表 1 所示。仿真结束后，对协议的平均分组传输成功率和平均端到端时延 2 项性能指标进行对比分析，其中，每个数值为 10 次仿真结果的平均值。

参数	值
仿真场景大小	500 km×500 km×20 km
移动模型	Random Waypoint（暂停时间为 0）
分组长度	1 000 byte
节点发送缓存区大小	5×10 <sup>4</sup> byte
HELLO 周期	10 s
传输层协议	UDP
仿真运行时间	10 min
节点通信距离	50 km
分组发送速率	24 kbit/s
信道传输速率	2 Mbit/s
MAC 协议	IEEE 802.11b
信号传播损失模型	Friis

节点数量变化对协议性能的影响如图 6 所示。由图 6(a)和图 6(b)可知，当节点数量增多时，5 种协议的性能都是先提高后下降，这是因为当节点密度较低时，会出现网络分割和局部最优化现象，造

成分组丢失，并产生较大的传输时延；而当节点密度大于 30 时，由于相应的控制开销增大，占用了一定的信道资源，也会使分组传输成功率降低、端到端时延增大。相比较而言，GPSR 和 TTE-based GGR 协议的性能受节点数量变化影响较大，而 LBGR、DGR 和 GLSR 协议的性能较为稳定。

节点运动速率变化对协议性能的影响如图 7 所示。由图 7(a)和图 7(b)可知，随着节点运动速率的增大，3 种协议的传输成功率都降低、端到端时延都增大，这是因为节点运动速率的增大造成网络拓扑的剧烈变化，同样的 HELLO 周期导致邻居节点表更新维护不及时，引起通信暂盲现象。其中，GPSR 协议性能受速率变化的影响最为严重，其次是 DGR 协议，而 LBGR、TTE-based GGR、GLSR 协议性能受影响不大，因为这 3 种协议正是为航空场景设计的，也说明基于 TTE 的分组转发策略能够较好适应高动态网络环境。

由图 6 和图 7 可知，在本文设定的仿真环境下，总体而言，LBGR 协议性能最优，其次是为民用航空跨洋飞行场景提出的、以分组前进速率为路由选择依据的、兼备负载均衡能力的 GLSR 协议，再次是只以 TTE 为依据贪婪转发分组、不具备负载均衡能力的 TTE-based GGR 协议，第四是采用轮询调度负载分配机制的 DGR 协议，最后是原始的 GPSR 协议。

## 6 结束语

本文为三维高动态航空自组网设计了一种多路径流量分配的负载均衡地理路由协议。针对贪婪

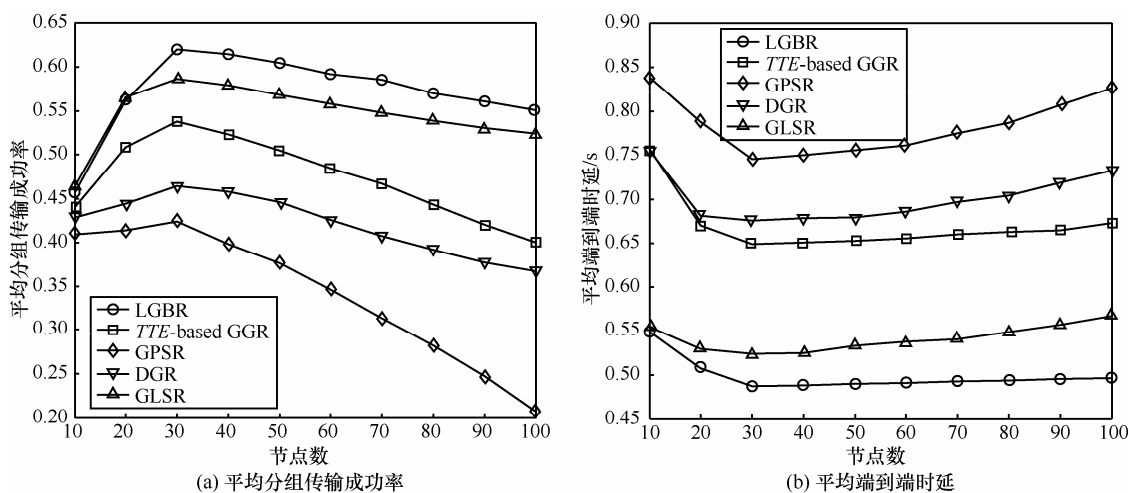


图 6 当节点运动速率为 600 m/s 时，节点数量变化对协议性能的影响

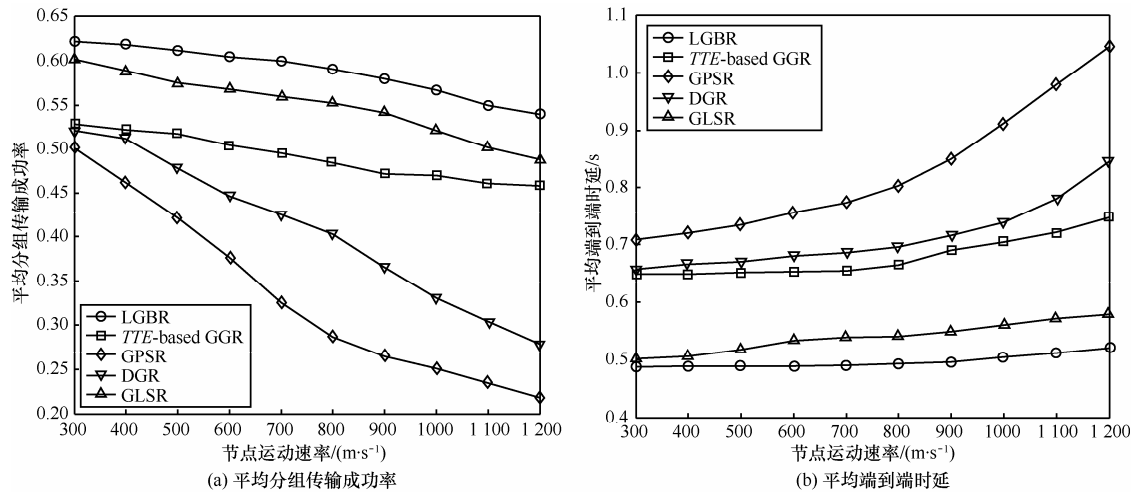


图 7 当节点数量为 50 时, 节点运动速率变化对协议性能的影响

地理路由协议应用于航空自组网中出现的难以适应高动态网络环境、易造成网络拥塞等问题, 该协议一方面将“进入目的节点通信范围的时间”作为主要路由决策依据, 取代了贪婪地理路由协议“距离目的节点最近”的路由选择标准, 提高了高动态网络环境下路由选择的有效性和可靠性; 另一方面将流量在多个节点间合理分配, 实现了负载均衡, 有效克服了网络拥塞现象。仿真实验结果表明, 提出的协议能够有效提高分组传输成功率, 降低分组端到端时延, 提高数据传输的实时性和可靠性。该协议对本领域的研究与应用具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] CHENG B N, BLOCK F J, HAMILTON B R, et al. Design considerations for next-generation airborne tactical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 138-145.
- [2] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O K, TEMEL S. Flying ad hoc networks (FANETs): a survey[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1254-1270.
- [3] 梁一鑫, 程光, 郭晓军, 等. 机载网络体系结构及其协议栈研究进展[J]. 软件学报, 2016, 27(1): 96-111.  
LIANG Y X, CHENG G, GUO X J, et al. Research progress on architecture and protocol stack of the airborne network[J]. Journal of Software, 2016, 27(1): 96-111.
- [4] 郑博, 张衡阳, 黄国策, 等. 航空自组网的现状与发展[J]. 电信科学, 2011, 27(5): 38-47.  
ZHENG B, ZHANG H Y, HUANG G C, et al. Status and development of aeronautical ad hoc networks[J]. Telecommunication Sciences, 2011, 27(5): 38-47.
- [5] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. The global in-flight Internet[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(9): 1748-1757.
- [6] KARRAS K, KYRITSIS T, AMIRFEIZ M, et al. Aeronautical mobile ad hoc networks[C]//14th European Wireless Conference. Prague, Czech Republic, 2008: 3972-3977.
- [7] SCHNELL M, SCALISE S. NEWSKY: a concept for networking the sky for civil aeronautical communications[J]. Space Communications, 2007, 21(3-4): 157-166.
- [8] PLASS S, HERMENIER R, LUCKE O, et al. Flight trial demonstration of seamless aeronautical networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 119-128.
- [9] ROHRER J P, JABBAR A, CETINKAYA E K, et al. Highly-dynamic cross-layered aeronautical network architecture[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2742-2765.
- [10] CADGER F, CURRAN K, SANTOS J, et al. A survey of geographical routing in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 621-653.
- [11] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]//ACM 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCOM). New York, 2000: 243-254.
- [12] LAM S S, CHEN Q. Geographic routing in d-dimensional spaces with guaranteed delivery and low stretch[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(2): 663-677.
- [13] XIA S, JIN M, WU H, et al. Bubble routing: a scalable algorithm with guaranteed delivery in 3D sensor networks[C]//IEEE SECON. 2012: 245-253.
- [14] YU X, YIN X, HAN W, et al. Scalable routing in 3D high genus sensor networks using graph embedding[C]//IEEE INFOCOM. 2012: 2681-2685.
- [15] YU T, et al. SINUS: a scalable and distributed routing algorithm with guaranteed delivery for WSNs on high genus 3D surfaces[C]//IEEE INFOCOM. 2013: 2175-2183.
- [16] WANG C, JIANG H B, YU T L, et al. SLICE: enabling greedy routing in high genus 3-D WSNs with general topologies[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(4): 2472-2484.
- [17] ZHU Y, HUANG Q Y, LI J D, et al. Design and evaluation of airborne communication networks[C]//Seventh IEEE International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). 2015: 277-282.
- [18] LIN L, SUN Q B, WANG S G, et al. A geographic mobility prediction routing protocol for ad hoc UAV network[C]//IEEE Globecom Workshops, 2012.
- [19] HYEON S, KIM K, YANG S. A new geographic routing protocol for

- aircraft ad hoc networks[C]//IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Salt Lake City, UT, USA, 2010.
- [20] SHIRANI R, HILAIRE M S, KUNZ T, et al. Combined reactive-geographic routing for unmanned aeronautical ad-hoc networks[C]//8th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Limassol, Cyprus, 2012: 820-826.
- [21] LI Y, SHIRANI R, ST-HILAIRE M, et al. Improving routing in networks of UAVs: reactive-greedy-reactive[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2012, 12(18):1608-1619.
- [22] MEDINA D, HOFFMANN F, ROSSETTO F, et al. A geographic routing strategy for north atlantic in-flight Internet access via airborne mesh networking[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(4): 1231-1244.
- [23] 刘智, 徐楨, 航空高动态网络负载感知路由算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1697-1701.  
LIU Z, XU Z. Geographic load aware routing algorithm for highly dynamic airborne networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(12): 1697-1701.
- [24] BIOMO J D M M, KUNZ T, ST-HILAIRE M. Routing in unmanned aerial ad hoc networks: a recovery strategy for greedy geographic forwarding failure[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Istanbul, Turkey, 2014: 2236-2241.
- [25] CHEN M, LEUNG V C M, MAO S, et al. Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(17): 3368-3383.
- [26] YANG W J, YANG X Y, YANG S S, et al. A greedy-based stable multi-path routing protocol in mobile ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(4): 662-674.
- [27] WANG G D, WANG G, ZHANG J. ELGR: an energy-efficiency and load-balanced geographic routing algorithm for lossy mobile ad hoc networks[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(3): 334-340.
- [28] SHU L, ZHANG Y, YANG L T, et al. TPGF: geographic routing in wireless multimedia sensor networks[J]. Telecommunications Systems, 2010, 40(1-2): 79-95.
- [29] LI B Y, CHUANG P J. Geographic energy-aware non-interfering multipath routing for multimedia transmission in wireless sensor networks[J]. Information Sciences, 2013, 249(16): 24-37.
- [30] DONG P, QIAN H Y, ZHOU K, et al. A maximally radio-disjoint geographic multipath routing protocol for MANET[J]. Ann Telecommun, 2015, 70(5-6): 207-220.
- [31] ZUKERMAN M. Introduction to queueing theory and stochastic teletraffic models[J]. Eprint Arxiv, 2010.

#### 作者简介:



郑博 (1982-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 空军工程大学讲师, 主要研究方向为移动 ad hoc 网络、机载通信网络等。



张衡阳 (1978-), 男, 湖南祁东人, 博士, 空军工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为移动 ad hoc 网络、无线传感器网络、航空数据链、机载通信网络等。



王宝良 (1962-), 男, 河南开封人, 空军工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为航空数据链。



赵玮 (1993-), 男, 陕西西安人, 空军工程大学硕士生, 主要研究方向为移动 ad hoc 网络。