

一种新的航空自组网混合路由算法

庞松超¹ 罗长远¹ 韩东东² 庞涵滢³

(解放军信息工程大学密码工程学院 郑州 450004)¹

(第二炮兵指挥学院 武汉 430012)² (总参谋部陆航研究所 北京 101121)³

摘要 路由算法是航空自组网研究的重点和难点。针对目前对航空自组网高动态路由研究较少的现状,考虑到飞机节点高动态但局部结构相对稳定的特点,通过将ADS-B系统整合到路由表建立过程中,设计了一种基于分簇和地理位置信息的混合路由算法CGCR。应用ADS-B消息中的节点位速和飞行意向数据预测节点运动趋势,从而选择最优下一跳节点。通过扩大下一跳选择区域策略来避免路由空洞的产生。仿真结果表明,CGCR具有良好的性能。

关键词 航空自组网,混合路由,地理位置信息,路由空洞

中图分类号 TP302.1 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.5.010

Aeronautical Ad hoc Network Hybrid Routing Algorithm

PANG Song-chao¹ LUO Chang-yuan¹ HAN Dong-dong² PANG Han-ying³

(College of Cryptography Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450004, China)¹

(The Second Artillery Command College, Wuhan 430012, China)²

(Army Aviation Institute of General Staff, Beijing 101121, China)³

Abstract Routing algorithm is the key and difficult point in aeronautical ad hoc network(AANET) research. Due to the current situation of few studies in AANET routing of high dynamic and the characteristics of high dynamic but relatively stable local structure of the aircraft node, a hybrid routing algorithm based on clustering and geographic information (CGCR) was proposed by integrating the ADS-B system into the process of establishing the routing table. The algorithm uses node bit rate and flight intention data in ADS-B message to forecast node movement trend in order to select the optimal next hop. And it expands the selection area in next hop to avoid the generation of routing voids. Simulation results show that CGCR has good performance.

Keywords Aeronautical ad hoc network, Hybrid routing, Geographic information, Routing void

1 引言

当前,航空工业快速发展,特别是国家提出逐步开放低空领域后,各类飞行器的飞行密度将极速增加,通信需求也随之膨胀,现阶段的通信保障能力远不能满足未来空中交通管理(Air Traffic Management, ATM)的需求^[1]。

航空自组网(Aeronautical Ad hoc Net-Works, AANETs)是移动自组网在航空领域的应用,是一种特殊的MANET,其基本思想是^[2],将一定空域内的飞机组成一个Ad hoc网络,每个飞机节点不仅发送自身的信息,还具备为邻居节点转发数据的功能,用户数据经过飞机节点间的相互转发最终传送至地面基站并接入地面网络,以实现地-空通信,其结构如图1所示。与传统的Ad hoc网络相比,航空自组网具有网络尺度大、拓扑变化快、节点分布稀疏、信道不稳定等特点^[3]。设计适用于航空自组网的路由协议面临很大挑战。

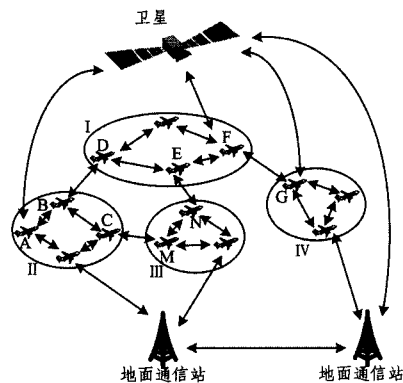


图1 航空自组网网络结构

国内外许多科研机构 and 学者对航空自组网路由开展了研究,取得了一定的成果。Ehssan等人提出MUDOR^[4],其使用飞机多普勒频移获取相对稳定路由;在此基础上通过增加

到稿日期:2015-05-15 返修日期:2015-07-25 本文受国家自然科学基金资助项目(61303074,61309013),河南省科技攻关计划资助项目(12210231003,13210231002)资助。

庞松超(1990—),男,硕士生,主要研究方向为无线网络安全,E-mail:pangsongc@163.com;罗长远(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信系统安全、装备工程等;韩东东(1990—),男,硕士,主要研究方向为信息作战;庞涵滢(1986—),女,工程师,主要研究方向为航空维修工程。

对 QoS 的支持, Ehssan 等人又提出了 Qos-MUDOR^[5] 路由, 引入了最优转发请求策略; 文献[6, 7]提出了一种基于分簇结构适用于大规模异构网络的混合路由协议 LANMAR, 簇内使用主动式路由, 不同簇间使用一种距离向量路由; 贪婪周边无状态路由协议 (Greedy Perimeter Stateless Routing, GPSR)^[8] 利用地理位置信息进行路由选择, 数据转发时, 节点利用贪婪算法思想, 选择距离目的节点最近的邻节点作为下一跳, 其最大的缺点是没有考虑节点的运动因素, 不适用于高动态网络; NEWSKY 项目基于 GPSR, 通过增加最短队列原则, 提出了地理负载共享路由 (Geographic Load Share Routing, GLSR)^[9], 有效解决了 GPSR 的拥塞问题, 但仿真时仅考虑静态拓扑结构, 缺乏说服力; 堪萨斯大学提出的 AeroRP^[10] 协议以节点间的截获时间选取路由, 但没有考虑节点局部稳定性特征; 谷文哲提出了一种 ADS-B 辅助的地理路由算法 A-GR^[11], 但并没有给出有效的路由空洞解决办法; 北京航空航天大学陈灼等人提出位置网格路由 (Location Based Grid Routing, LBGR)^[12], 通过让转发分组沿历史网格传输的策略解决了高动态条件下路径的频繁重建问题, 但没有提出有效的位置信息获取、管理策略。

当前, 大部分航空器都装备了全球定位系统及先进的航电系统, 使获取实时的精确的地理位置信息变得更加简单, 这为设计适用于航空自组网的地理位置信息路由创造了良好的条件。基于地理信息路由的下一跳选择算法主要是以到目的节点的距离为选取标准的贪婪转发模式, 这种模式在节点低动态、节点密度较大时会有较好的效果; 但当节点处于高动态时就会产生下一跳选择非最佳的情况, 若节点较稀疏, 就会出现路由空洞现象, 需要采用其他机制来解决这些问题。同时, 航空自组网在局部内结构相对比较稳定, 适合采用分簇路由来提高网络的效率, 减少路由开销。

为了解决高动态路由面临的挑战, 本文提出了一种综合了基于分簇和基于地理位置信息的混合路由协议 CGCR (Cluster-Geographic-Cluster based Routing), 其基本思想是: 在簇内使用表驱动路由, 簇间由簇头发起地理位置信息路由, 路由请求到达目的节点所在的簇头时, 再转换为表驱动路由。同时提出了一种新的路由空洞解决算法。

2 航空自组网混合路由算法

2.1 基本假设与定义

首先给出两个假设:

- (1) 假设飞机的通信半径相同, 使用相同的且支持 ADS-B 的数据链, 相互之间可以直接通信;
- (2) 飞机节点已分簇完毕, 不再讨论节点的分簇问题。

定义 1 容忍时间 (Tolerate Time, TT)

假设 REQ 的发送簇头节点为 S, 候选下一跳节点 (网关或簇头) 为 M, t_0 为 S 发送 REQ 的时刻, t_1 为 S 期望接收到节点 M 返回 REP 的时刻, 定义 $T_t = t_1 - t_0$ 为节点 S 的容忍时间。即如果在容忍时间之内节点 S 没有收到节点 M 的路由应答消息是不能容忍的, 则认为此节点不是最优下一跳。

定义 2 碰撞时间 (Time to Collision, TTC)

航空自组网动态多变, 由于期望路由信息能够更快地传播到目的节点, 以减小路由重复发现的概率, 因此通过评估候

选下一跳节点向目的节点运动的趋势, 即通过计算候选下一跳节点 M 从当前位置运动到目的节点所在簇簇头节点 D 通信范围内的时间来确定下一跳的选择。由于此应用场景类似于飞机向目的节点的通信范围内运动直到碰撞其球形边界的情景, 因此定义候选下一跳节点 M 从当前位置运动到节点 D 通信范围边界的时间为碰撞时间。

根据 ADS-B 的信息, 可以得到节点 M 和节点 D 的位速信息。假设 M 的位置坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 速度向量 $\vec{v}_M = (x_m, y_m, z_m)$; D 的位置坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 速度向量 $\vec{v}_D = (x_d, y_d, z_d)$, 碰撞时间计算示意图如图 2 所示。

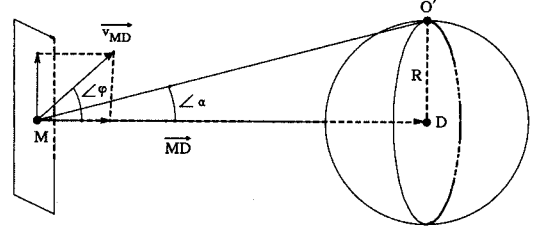


图 2 碰撞时间计算示意图

由以上假设可以计算:

$$\vec{MD} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \quad (1)$$

节点 M 和节点 D 的欧氏距离为:

$$|\vec{MD}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2)$$

节点 M 和节点 D 的相对速度为:

$$\vec{v}_{MD} = (x_d - x_m, y_d - y_m, z_d - z_m) \quad (3)$$

$\vec{MD}$ 与 $\vec{v}_{MD}$ 的夹角为:

$$\angle\varphi = \arccos \frac{\vec{MD} \cdot \vec{v}_{MD}}{|\vec{MD}| * |\vec{v}_{MD}|} \quad (4)$$

图 2 中:

$$\angle\alpha = \arctan \frac{R}{|\vec{MD}|} \quad (5)$$

当 $\angle\varphi > \angle\alpha$ 时, 按照当前的运动趋势, 节点 M 不能到达节点 D 的通信范围, 或即使到达也是在节点 D 的通信范围内停留较短的时间, 此时将 M 从候选下一跳节点中排除; 当 $\angle\varphi \leq \angle\alpha$ 时, 说明按照当前的运动趋势, 节点 M 能够到达节点 D 的通信范围并且能够停留较长的时间。综上所述, 可计算各候选下一跳节点的 TTC:

$$TTC = \begin{cases} 0, & \angle\varphi > \angle\alpha \\ \frac{|\vec{MD}| - R}{|\vec{v}_{MD}| \cdot \cos\varphi}, & \angle\varphi \leq \angle\alpha \end{cases} \quad (6)$$

2.2 地理位置信息的获取

基于地理位置信息的路由算法首先解决的是地理位置信息的获取问题。自动相关监视-广播 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)^[13] 系统是未来航空监视的发展方向 and 主要手段, 能够以安全、经济和高效的方式对空中交通和空域实行动态的和综合的管理。装备了 ADS-B 系统的飞行器可以广播详细丰富的飞行状态信息, 包括标识、位速信息、海拔以及飞行意向等其它与飞行相关的信息。同时, 装备 ADS-B 系统的飞行器可以直接从其它飞行器上获取这些数据。更为重要的是, ADS-B 系统具有数据广播频率高 (1 次/s) 及精度高的特点, 非常适用于飞机密度大及高动态的航空

区域监视^[14]。因此,选择通过机载 ADS-B 系统获取飞行器的地理位置信息,并将获取的地理位置信息整合到路由表建立过程中,如图 3 所示。

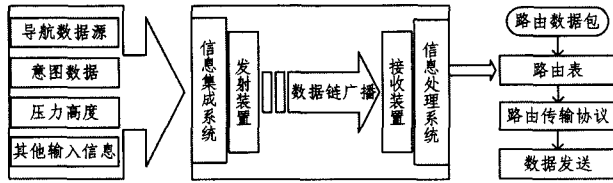


图 3 ADS-B 系统框架及整合到路由建立过程示意图

2.3 路由发现

为了解决引言中讲述的航空自组网路由协议的关键问题,本文设计了一种基于分簇和地理位置信息的航空自组网混合路由算法,即在簇内和簇间选用不同机制的路由算法,其中簇内选用表驱动路由,簇间选用基于地理位置信息的路由。本文采用文献[15]提出的基于 ADS-B 报文的航空自组网分簇算法,重点论述路由选择算法,详细的分簇算法不再论述。

2.3.1 簇内路由过程

当源节点需要发送消息时,首先查看自身缓存中的路由表是否到达目的节点的路由路径,若是则按照存储的路径发送消息,否则源节点发起一个动态的路由查找进程。源节点首先会向簇头节点发送一个路由请求报文(Request Message, REQ),REQ 报文格式如图 4 所示。

Source ID
Source Location
Destination ID
Destination Location
Path List
Void Node_Value(0)
Hop Count

图 4 REQ 报文格式

其中,Source ID 和 Destination ID 唯一地标识了源节点和目的节点的身份;Source Location 和 Destination Location 分别表示源节点地理位置信息和目的节点的地理位置信息;Path List 中缓存了路由路径上各节点的地址列表和地理位置信息;Void Node_Value 值为 0 表示此报文为正常请求报文,值为 1 表示此报文为路由空洞解决报文;Hop Count 最初设置值为 0,每经过一个节点转发增加 1,当值大于系统设置的最大值时,表明此报文难以转发,则丢弃该报文不再转发。

簇头节点收到 REQ 消息后,首先会判断目的节点是否是本簇内节点,若是,则直接转发 REQ 给目的节点;若不是,本簇内节点,则簇头会根据 REQ 中包含的目的节点的地理位置信息,发起簇间的路由请求进程。

2.3.2 簇间路由过程

为了选择最合适的下一跳,簇头节点缓存中存有根据 ADS-B 系统信息建立的邻居表,邻居表中主要保存能够直接通信的网关或者其它簇簇头的地理位置信息。

在传统的下一跳选择算法中,数据包通常转发给距离目标节点地理位置最近的节点。但航空自组网具有飞行器高速飞行的特点,必须对下一跳选择做适当改变,以提高路由的稳定性,降低路由重新发现的频率。

(1) 容忍时间内节点运动趋势估计。

容忍时间内节点运动趋势的估计是为了判断在容忍时间内候选下一跳节点是否一直在当前节点的通信范围之内。如果候选下一跳节点能够一直在当前节点的通信范围内,则当返回路由应答消息时,可以不必再次进行路由发现,而是沿着路由请求的路径直接返回路由应答,大大减少了路由发现的开销。因此运动趋势评估即是判断两个节点的相对稳定性。容忍时间运行趋势估计示意图如图 5 所示。

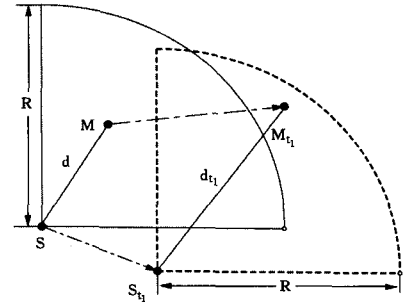


图 5 容忍时间内运动趋势估计示意图

step1 计算是否存在候选下一跳节点在目的节点的通信范围以内,若存在则直接转发 REQ,若不存在则转到 step2。

step2 节点 S 预测节点 M 在 t_1 时刻的位置 M_{t_1} 。节点 S 利用 ADS-B 消息中节点 M 的飞行意向、位置信息和速度信息来预测 M 在 t_1 时刻的位置 M_{t_1} 。其位置通过式(7)计算:

$$\begin{cases} x_{t_1} = x_{t_0} + \int_{t_0}^{t_1} v \cos\alpha \cos\beta dt \\ y_{t_1} = y_{t_0} + \int_{t_0}^{t_1} v \cos\alpha \sin\beta dt \\ z_{t_1} = z_{t_0} + \int_{t_0}^{t_1} v \sin\alpha dt \end{cases} \quad (7)$$

step3 节点 S 预测本身在 t_1 时刻的位置 S_{t_1} 。S 根据本身的飞行计划及由定位系统获得的位置和速度信息来预测 t_1 时刻的位置 S_{t_1} ,计算方法同式(1)。此时,可以计算节点 S 和节点 M 开始的距离 $d = f(S, M)$,以及节点 S 和节点 M 在 t_1 时刻的距离 $d_{t_1} = f(S_{t_1}, M_{t_1})$ 。

step4 若 $d_{t_1} > R$,则将此节点从候选下一跳节点中排除;若 $d_{t_1} \leq R$,则转到 step2。 $d_{t_1} > R$ 说明容忍时间 TT 内节点 M 已经运动出了节点 S 的通信范围,即节点 S 将不会直接收到节点 M 的路由应答消息。在这种情况下,节点 M 转发目的节点的路由应答 REP 时,将重新发起路由查找到达节点 S 的路由路径,增加了网络负载。

(2) 计算候选下一跳节点的 TTC。

根据定义 2 中 TTC 的计算方法计算候选下一跳节点的 TTC。当 $TTC=0$ 时,表示此节点按照当前的运动趋势不能到达节点 D 或只能在目的节点簇头的通信范围内停留较短时间,放弃选择为下一跳节点;当 $TTC < 0$ 时,表示此节点目前在节点 D 的通信范围以内。TTC 越小,说明此节点能在越短的时间内到达节点 D。因此选取最小非零 TTC 节点作为下一跳节点。

2.4 路由空洞的处理

如果发生 TTC 本地最小的情况,则认为产生路由空洞问题。本文设计了一种新的路由机制来避免路由进程的失败。

step1 扩大候选下一跳节点的选择范围。

如图 6 所示,射线 MO 与球面相切, MO 与 MD 的夹角为 $\angle\beta$ 。由图 6 可知:

$$\begin{aligned}\angle\beta &= \arcsin \frac{|OD|}{|MD|} \\ &= \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}} \quad (8)\end{aligned}$$

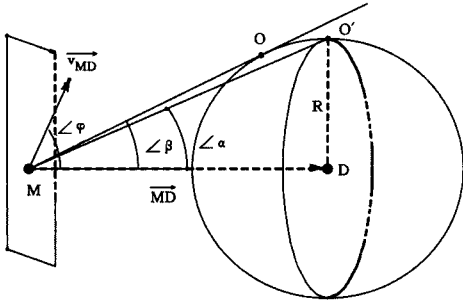


图 6 扩大下一跳选择范围示意图

在进行最优下一跳选择时,本文只考虑了 $\angle\varphi \leq \angle\alpha$ 区域内的候选下一跳节点;虽然按照当前运动趋势,区域 $\angle\beta > \angle\varphi > \angle\alpha$ 内的节点在目的节点通信范围内只会停留较短时间,但在产生路由空洞时,还是应当首先作为下一跳转发对象。因此,当产生路由空洞时,当前节点首先搜索区域 $\angle\beta > \angle\varphi > \angle\alpha$ 内的节点,并预测计算其中各节点到达目的节点的时间,选择时间最短的节点作为下一跳,并将 REQ 信息转发给此节点。如果在区域 $\angle\beta > \angle\varphi > \angle\alpha$ 内没有候选下一跳节点,则进行 step2。

step2 当扩大下一跳选择范围失败时,说明在朝向目的节点的方向上节点密度较为稀疏,形成路由空洞区域。此时,当前簇头节点会在路由请求报文 REQ 中添加标识,将报文中 Void Node_Value 值修改为 1,标识为 1 说明此报文是路由空洞解决报文。由于目的是以最大的概率跳出路由空洞区域,因此簇头节点会将此报文转发给距离自己最远的簇成员,簇成员判断该报文为路由空洞解决报文后会按照簇间地理路由算法将其转发给合适的下一跳,并将 Void Node_Value 值修改为 0,收到此报文的节点会按照正常情况进行路由。

CGCR 算法总结描述如下。

step1 源节点 S_i 路由表中若没有到达目的节点的路径,则发起动态路由查找过程并向簇首节点 S 发送一个路由请求报文 REQ。

step2 簇首节点 S 判断目的节点是否是簇内节点,若是,则直接转发 REQ;若不是,则根据地理位置信息发起路由查找过程,转到 step3。

step3 簇首节点 S 计算是否存在候选下一跳节点在目的节点的通信范围以内,若存在则,直接转发 REQ;若不存在,则转到 step4。

step4 簇首节点 S 计算自身及候选下一跳节点经过容忍时间 TT 后的位置 S_{t_1} 和 M_{t_1} ;计算节点 S 和节点 M 之间的距离 $d_{t_1} = f(S_{t_1}, M_{t_1})$ 。若 $d_{t_1} > R$,则将此节点从候选下一跳节点排除;若 $d_{t_1} \leq R$,则转到 step5。

step5 簇首节点 S 计算候选下一跳节点的 TTC ,选择具有最小非零 TTC 节点为下一跳节点,转发 REQ。若 TTC 本地最小,说明产生路由空洞,则转到 step6。

step6 簇首节点 S 启动路由空洞处理流程,若成功跳出

路由空洞,则转发 REQ;若不成功,则丢弃 REQ,并告知源节点,源节点重新发起路由查找过程。

step7 中间节点按照以上步骤依次查找下一跳节点,并将自身节点 ID 存入 REQ 队列中的 Path List;目的节点收到 REQ 后,回复路由应答消息 REP,中间节点根据 Path List 中的信息依次将 REP 返回给源节点,完成路由查找过程。

3 算法性能仿真

3.1 仿真环境设置

本文通过大量的实验对所提出的 CGCR 路由算法的性能进行了验证,并将结果与 GPSR 和 GRAA 路由协议进行了对比。在航空自组网中,由于军事航空飞机的飞行轨迹一般不确定,同时低空通用航空飞机虽然提前进行了航线规划,但在实际飞行中飞机会进行一些机动性操作,随机性比较大,因此对本路由协议进行仿真时节点移动模型选用 Gauss-Markov 模型^[16]。通用航空飞机速度较慢而军机一般速度较快,飞机的飞行速度大约为 300~800km/s,在仿真时节点速度在 85~220m/s 之间随机选取。民航飞机、军用飞机及通用航空飞行器飞行高度基本都在 15000m 以下空域,仿真区域高度设置为 15000m。飞机节点使用 UAT^[17] 数据链获得 ADS-B 报文。节点分簇算法使用基于 ADS-B 报文的航空自组网分簇算法,簇内使用表驱动的 OLSR^[18] 协议。在 Linux 系统环境下使用 NS2 仿真软件建立了动态仿真环境,具体参数设置如表 1 所列。

表 1 仿真参数表

仿真参数	取值
仿真区域大小	1000km×1000km×15km
节点移动模型	Gauss-Markov
仿真时间	3600s
天线类型	全向天线
单机通信范围	100km
MAC 协议	IEEE 802.11
传输速率	35kb/s

3.2 仿真结果与分析

为了检验不同路由算法的性能,选取以下 3 个指标为比较因素:路由开销、数据包成功发送率、端到端时延。

1) 路由开销:该指标主要指在路由过程中产生的路由控制包总量,包括邻居发现、路由建立和保持、空洞处理过程中产生的数据包。

2) 包传送成功率:用来检测路由算法的效率,即接收端接收到的包总量与发送端发送包总量的比值,数值越大表明算法效率越高。

3) 平均端到端时延:数据分组从源节点到达目的节点耗费的平均时间。

图 7 描述了路由开销随节点数量增加而变化的情况。本文所提出的 CGCR 算法利用 ADS-B 系统所提供的信息进行分簇并建立簇头间邻居表,且在簇内使用基于表驱动的 OLSR 路由协议,不必在路由发现时进行路由广播。因此,在这 3 种路由方案中,它具有最小的控制开销,当节点数量增加时,路由开销呈线性增长。由于节点高速运动,网络拓扑结构快速变化,GPSR 和 GRAA 路由算法则需要周期性地发送广播路由来更新路由表,产生大量的路由控制包。因此,当节点密度增加时,它们的路由开销呈指数式增长。

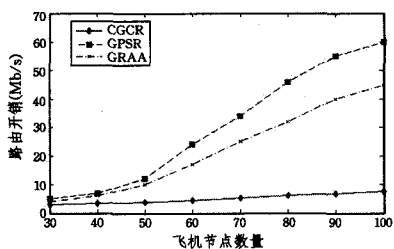


图7 节点数量对路由开销的影响

图8描述了包传送成功率随节点数量增加的变化情况。从图中可以看出,相比GPSR和GRAA,CGCR具有较高的数据包传送成功率。实际上,CGCR由于应用了ADS-B信息进行分簇并建立邻居表,节约了许多带宽,允许进行高速率的数据包传递,同时CGCR采用了有效的路由空洞解决机制,提高了包传送成功率;而GPSR和GRAA需要首先发送信标数据包进行邻居表的建立,发送的数据包具有盲目性,由此造成总体包传送成功率比较低。同时随着节点密度的增加,GPSR和GRAA的PDR下降明显,这是由于节点密度的增加带来的网络开销快速增长,占用大量带宽,使得中间节点不得不丢弃溢出的数据包。

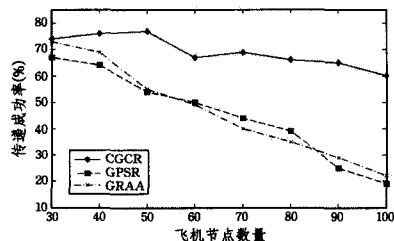


图8 节点数量对包传送成功率的影响

图9显示了节点数量对平均端到端时延的影响。当节点密度较低时,所提出的CGCR算法与GPSR和GRAA路由算法的端到端时延相差不大,这是由于此时网络负荷较小,数据流较为通畅。随着节点密度的增加,相比GPSR和GRAA,CGCR算法显示出较好的性能,这是因为随着节点数量的增加,网络开销及载荷急剧增加,大量的数据控制包缓存在节点发送队列中,引起网络拥塞;而CGCR算法虽然在下一跳选择时计算量比GPSR大,但属于同一数量级,对于高性能的计算机来说差距甚微;同时应用了ADS-B消息(更新频率1次/s),邻居表保持了新鲜性和有效性,能够高效地进行数据转发,大大减小了端到端时延。

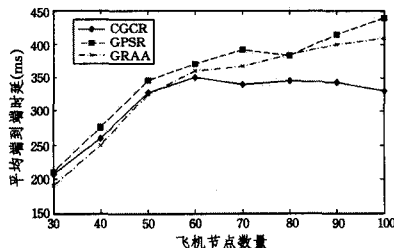


图9 节点数量对平均端到端时延的影响

结束语 本文提出了基于分簇和地理位置信息的航空自组网混合路由算法CGCR。针对航空飞行器定位精度提高的现实情况,考虑到ADS-B系统的突出优点,首先将ADS-B系统整合到节点邻居表建立及更新的过程中;其次针对航空自组网节点高动态但局部相对稳定的特点,提出了局部采用表

驱动路由,簇间采用地理位置信息路由的策略,在下一跳选择时充分考虑节点间相对稳定和下一跳节点最快到达的双重因素;再次,针对路由空洞现象,设计了扩大下一跳选择范围、传递给最远节点的方案;最后对算法性能进行了仿真分析,仿真结果表明CGCR路由算法具有更好的性能。由于航空自组网的开放特性,网络极易受到各类攻击,下一步工作将重点考虑路由的安全性,以保证路由的可靠性和可用性。

参考文献

- [1] Gilbert T. Future Aeronautical Communication Infrastructure Technology Investigation [M]. BiblioGov, 2013
- [2] Besse F, Pirovano A, Garcia F. Interference Estimation in an aeronautical ad hoc network[C]// IEEE 30th Digital Avionics Systems Conference. 2011
- [3] Gu Wen-zhe, Li Jin-lin, Sun Qi-bo, et al. A Cluster-based Hybrid Routing Protocol for Aeronautical Ad hoc Networks[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology. 2012, 1(4): 264-271
- [4] Sakhaee E, Jamalipour A, Kato N. Aeronautical Ad Hoc Networks[C]// IEEE WCNC. 2006
- [5] Ehssan S, Abbas J, Nei K. Muhipath Doppler Routing with QoS Support in Pseudo-linear Highly Mobile Ad Hoc Networks[C]// IEEE ICC. Istanbul, Turkey, 2006
- [6] Mario G, Hong X Y, Pei G Y. Landmark Routing for Ad Hoc Wireless Networks[C]// IEEE GLOBECOM. San Francisco, CA, USA, 2000
- [7] Pei G Y, Mario G, Hong X Y. LANMAR: Landmark Routing for Large Scale Wireless Ad Hoc Networks with Group Mobility [C]// IEEE ACM Mobi-Hoc. Boston, Massachusetts, USA, August 2000
- [8] Medina D, Hoffmann F, et al. Routing in the Internet[C]// 2010 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference. 2010; 11-13
- [9] Medina D, Hoffmann F, Rossetto F, et al. A crosslayer geographic routing algorithm for the airborne internet[C]// Proc of IEEE ICC. Cape Town, South Africa; IEEE, 2010; 88-93
- [10] Peters K, Jabbar A, Cetinkaya E K, et al. A geographical routing protocol for highly-dynamic aeronautical networks[C]// Proc of IEEE WCNC. Cancun, Mexico; IEEE, 2011; 492-497
- [11] Gu Wen-zhe. Research on QoS Routing Technology of Aeronautical Ad hoc Networks[D]. Beijing: University of Posts and Telecommunications, 2013 (in Chinese)
谷文哲. 航空自组网 QoS 路由技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013
- [12] Chen Zhuo, Liu Kai, Zhang Jun. Study on a novel location-based routing algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 901-906 (in Chinese)
陈灼, 刘凯, 张军. 一种新的基于位置信息的路由算法研究[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 901-906
- [13] ADS-B List of Application Concepts and Abbreviations (AN-Conf/11-WP/6) [C]// Proceedings of ICAO's Eleventh Air Navigation Conference. Montreal; ICAO, 2003; 7 (in Chinese)
自动相关监视-广播 (ADS-B) 应用概念、缩略语一览表 (AN-

Conf/11-WP/6)[C]//国际民航组织第11次航行会议论文集.
蒙特利尔:国际民航组织,2003;7

- [14] Zhou Qi, Gu Wen-zhe, Li Jing-lin, et al. A Topology Aware Routing Protocol Based ADS-B System for Aeronautical Ad Hoc Networks[C]//2012 8th International Conference Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). Shanghai, China, 2012; 21-23
- [15] Zhang Hai, Li Gang, Chen Guang-xiao, et al. An ADS-B based clustering algorithm in aviation Ad-Hoc networks[J]. Application of Electronic Technique, 2013, 39(7): 89-92 (in Chinese)
张海, 李纲, 陈广晓, 等. 基于 ADS-B 报文的航空自组网簇算法[J]. 电子技术应用, 2013, 39(7): 89-92
- [16] Broyles D, Jabbar A, Sterbenz J P G. Design and Analysis of a

3-DGauss-markov Mobility Model for Highly-dynamic Airborne Networks[C]//International Telemetering Conference. Las Vegas, NV, 2009

- [17] Huang Fei, Zhang Jun, Zhu Yan-bo, et al. Modeling and simulation of an aeronautical subnetwork based on universal access transceiver[C]//Asia Simulation Conference-7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing IC-SC2008. 2008; 541-544
- [18] Zheng Wei-ming. Research and Simulation of OLSR routing protocol[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011 (in Chinese)
郑伟明. OLSR 路由协议研究及仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2011

(上接第 46 页)

下一步将一方面继续研究本体间的各种合并关系及其范畴论解释, 特别是推出和共极限在本体合并中的应用及其合并算法; 另一方面将同时研究基于范畴论的本体演化。

参考文献

- [1] Awodey S. Category Theory [M]. Oxford University Press, 2006; 265-290
- [2] Hitzler P, Krötzsch M, Ehrig M, et al. What is Ontology Merging? - a Category Theoretic Perspective Using Pushouts[C]//Proc. First International Workshop on Contexts and Ontologies: Theory, Practice and Applications (C&O). AAAI Press, 2005; 104-107
- [3] Yu Shan-shan, Li Shi-xian, Su Jin-dian. Hylomorphisms with Parameters and Its Associated Calculational Laws [J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 50(3): 502-618 (in Chinese)
余珊珊, 李师贤, 苏锦钿. 一种带参数的 Hylomorphisms 及其计算律[J]. 计算机研究与发展, 2012, 50(3): 502-618
- [4] Yu Shan-shan, Li Shi-xian, Su Jin-dian. Final Coalgebraic Semantics for Behavioral Equality of Objects[J]. Computer Science, 2012, 39(2): 182-190 (in Chinese)
余珊珊, 李师贤, 苏锦钿. 对象行为等价的终结共代数语义[J]. 计算机科学, 2012, 39(2): 182-190
- [5] Yu Shan-shan, Li Shi-xian, Su Jin-dian. Formal Semantics of Object Oriented Methods Based on Coalgebras[J]. Computer Science, 2011, 38(8): 142-146 (in Chinese)
余珊珊, 李师贤, 苏锦钿. 一种基于共代数的面向对象形式语义[J]. 计算机科学, 2011, 38(8): 142-146
- [6] Su Jin-dian, Yu Shan-shan. Bialgebraic Structures of Abstract Data Types and its Calculational Laws[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(8): 1787-1803 (in Chinese)
苏锦钿, 余珊珊. 抽象数据类型的双代数结构及其计算定律[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(8): 1787-1803
- [7] Su Jin-dian, Yu Shan-shan. Corecursive operations with parameters and the associated calculational laws [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(12): 2672-2690 (in Chinese)
苏锦钿, 余珊珊. 带参数的共递归操作及其计算定律[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(12): 2672-2690
- [8] Healy M J. Category Theory as a Mathematics for Formalizing

Ontologies[M]//Theory and Applications of Ontology: Computer Applications. 2010; 487-510

- [9] Zhang Yuan, Li Shi-xian. Research on Formal Categorical Ontologies[J]. Computer Science, 2006, 33(9): 1-3 (in Chinese)
章远, 李师贤. 基于范畴论的形式化本体研究[J]. 计算机科学, 2006, 33(9): 1-3
- [10] Ye Dan-dan, Wang Hai-tao. Web Ontology Description Research Based on Category Theory[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 34(3): 146-148, 151 (in Chinese)
叶丹丹, 汪海涛. 基于范畴论的 Web 本体论描述研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(3): 146-148, 151
- [11] Bench-Capon T J M, Malcolm G. Formalising Ontologies and Their Relations[C]//Proc. 10th Database and Expert Systems Applications (DEXA'99). 1999; 250-259
- [12] Zimmermann A, Krötzsch M, Euzenat J, et al. Formalizing Ontology Alignment and its Operations with Category Theory[C]//Proc. of the Fourth International Conference (FOIS 2006). 2006; 277-288
- [13] Abbas M A, Berio G. Creating Ontologies Using Ontology Mappings: Compatible and Incompatible Ontology Mappings[C]//Proc. Web Intelligence/IAT Workshops. 2013; 143-146
- [14] Goguen J. Three Perspectives on Information Integration[C]//Semantic Interoperability and Integration, Dagstuhl Seminar Proceedings 04391. 2005
- [15] Kent R E. Semantic Integration in the Information Flow Framework[C]//Semantic Interoperability and Integration, Dagstuhl Seminar Proceedings 04391. 2005
- [16] Cafezeiro I, Haeusler E H. Semantic Interoperability via Category Theory[C]//26th International Conference on Conceptual Modelling-ER Auckland. New Zealand, 2007; 197-202
- [17] Pierce B. Basic Category Theory for Computer Scientists[M]. The MIT Press, 1991
- [18] Bench-Capon T J M, Malcolm G. Formalising Ontologies and Their Relations[C]//Proc. 10th Database and Expert Systems Applications (DEXA'99). 1999; 250-259
- [19] Kalfoglou Y, Schorlemmer M. Ontology Mapping: the State of the Art[J]. Knowl. Eng. Rev., 2003, 18(1): 1-31
- [20] Lucanu D. A Logical Foundation for the OWL Languages[C]//Proc. First International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods (ISoLA 2004) Volume TR-2004-6. 2004; 135-142