

一种用于航空自组织网络的空间分级路由协议

钟冬, 朱怡安, 尤涛

(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了解决现有移动自组织网络协议无法应用于航空自组织网络的问题, 提出了一种空间分级路由协议(HSRP 协议), 该协议可根据飞行流量动态改变数据链路层 HELLO 信标更新的频率, 同时具有空间半径动态修正的能力。实验表明, 该协议与 ZRP 协议相比较, 能够适应飞行器密度变化对路由协议的影响, 具有较高的分组投递率、较低的路由控制开销和平均端到端时延, 并能够很好地适应航空自组织网络的工作环境。

关键词: 航空自组织网络, 路由协议, Ad Hoc 网络, 移动计算

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2014)06-1001-06

随着机载通信技术发展, 对各类飞行器协同组网传输数据需求越来越多, 为此航空自组织网络^[1] (aeronautical Ad Hoc networks, AANET) 应运而生。AANET 是由空域内多个飞行器连接建立的移动 Ad Hoc 网络 (mobile Ad Hoc networks, MANET)^[2]。在该网络中, 飞行器之间可以互相转发来自地面站点的控制指令信息, 交换各自的飞行状态、感知信息等数据, 也可通过单跳或多跳通信接入地面 Internet 网关^[3]。AANET 中的节点通信无需固定的基础网络设施或中心控制节点, 这使得 AANET 具有无中心节点、网络规模大、拓扑变化快、链路可靠性差、时变信道和节点能力有限等特点^[4-6]。因此, AANET 与传统网络相比具有许多新的问题与挑战^[7]。其中, 组网节点传输数据的路由算法是一个关键技术, 在很大程度上决定了整个 AANET 的性能^[8]。为提高 AANET 中节点的连通性, 本文提出了一种用于 AANET 的空间分级路由协议, 以满足用户高效、可靠的通信需求。

1 空间飞行器移动状态表示参数

空间飞行器的整体移动状态可以通过空间交通

流来表示, 空间交通流将航道上飞行的飞行器视为连续的流体, 其移动状态的定性和定量特征统称为飞行器移动状态特性, 而用以描述飞行器移动状态特性的一些物理量称为飞行器移动状态参数, 这些参数的变化规律则反映了飞行器移动的基本特性。描述飞行器移动状态的 3 个重要参数分别是飞行流量、飞行速度和飞行器密度。

定义 1 飞行流量 Q 是指在给定时间段内, 通过航道某一点或某一断面的飞行器数量。其计算方法如下:

$$Q = \frac{N_{\text{num}}}{t} \quad (1)$$

式中: t 为采集点的采集时间, 在具体采集过程中通常是随机的, N_{num} 表示在采集点某段采集时间 t 内通过的飞行器数量。

定义 2 飞行速度是指单位时间内飞行器飞行的距离, 可用下式计算:

$$v = \frac{D}{t} \quad (2)$$

式中: v 表示速度, 单位为 km/h 或 m/s; D 表示飞行器飞行的距离, 单位为 km; t 表示飞行时间, 单位为 s、min 或 h。

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61303225)、陕西省自然科学基金(2013JQ8046)与西北工业大学

基础研究基金(GBKY1004)资助

作者简介: 钟冬(1971—), 西北工业大学讲师, 主要从事移动计算、物联网研究。

定义 3 飞行器密度是指单位航道长度上某一时刻正在飞行的飞行器数量。可以用下式计算:

$$k = \frac{N_{num}}{D} \quad (3)$$

式中: N_{num} 为航道内正在飞行的飞行器数量; D 为该航道的长度。

定义 4 飞行自由流速度(v_{free})是指不受速度约束的空中交通流运行速度。该速度的理论值是飞行器密度趋于零时的速度,亦即航道几乎没有飞行器时的速度。

定义 5 飞行器危险密度(k_{max})是指单位航道长度上某一时刻正在飞行的飞行器数量的最大值,此时飞行器之间的间距达到了最小值。

由公式(1)~(3)可以推导出飞行流量、飞行速度和飞行器密度三参数之间的关系为:

$$Q = \frac{Num}{t} = \frac{Num}{D} \cdot \frac{D}{t} = k \cdot v \quad (4)$$

根据公式(4)和 Greenshields 经典理论模型可以得到飞行空间上飞行流量、飞行速度和飞行器密度三参数之间的相互关系如下:

- 1) 如果 k 趋近 0, 则 v 趋近自由流速度 v_{free} , 达到最大速度, 此时 Q 也趋近 0;
- 2) 如果 k 在 0 到边界密度 k_b 之间逐渐增加 ($k \in (0, k_b)$) v 逐渐减小时, Q 逐渐增大;
- 3) 如果 k 增加到边界密度 k_b , v 减小到边界速度 v_b 时, Q 达到最大值 Q_{max} ;
- 4) 如果 k 在边界密度 k_b 和危险密度 k_{max} 之间继续增加时 ($k \in (k_b, k_{max})$) v 和 Q 都逐渐减小;
- 5) 如果 k 趋近危险密度 k_{max} , k 达到密度最大值, 此时 v 趋近最低速度 v_{min} , Q 趋近常量 Q_{con} 。

2 空间分层路由协议的工作原理

MANET 中的区域路由协议(ZRP)是一种混合型路由协议,同时具有主动路由协议和按需路由协议的优点。但对于 AANET 的特性 ZRP 协议已不再适用。本文对 ZRP 协议进行了改进和扩展,提出了一种空间分级路由协议(hierarchical space routing protocols, HSRP),该协议可更好地适应 AANET 的网络运行环境。

2.1 HSRP 协议的体系结构

HSRP 协议的体系结构如图 1 所示,与 ZRP 协议的不同之处在于,前者的体系结构中加入了飞行

流量感知模块和空间半径动态修正模块,采用基于最大空间半径分区的方式选择表驱动路由协议或按需路由协议。对相邻节点的感知机制也进行了改进,采用基于飞行流量的动态感知机制来更新相邻节点信息表。

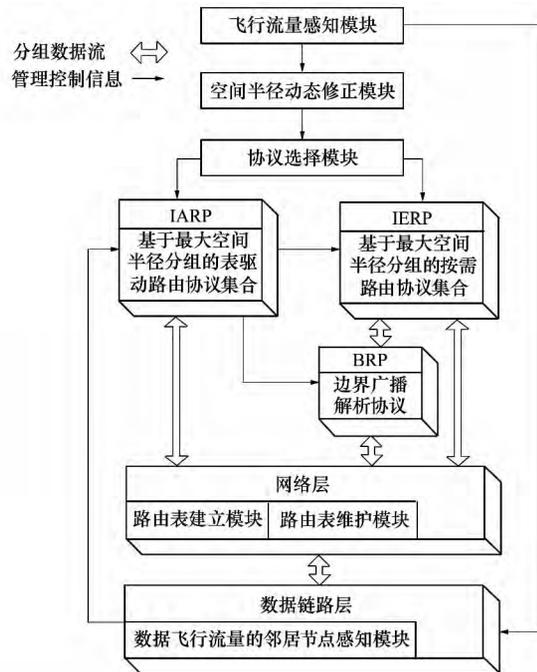


图 1 HSRP 协议的体系结构

2.2 HSRP 协议 MAC 层的设计原理

HSRP 协议 MAC 层设计的核心思想是根据飞行流量动态改变 HELLO 信标更新的频率,该设计将 HELLO 信标的时间间隔 T 设计成飞行流量 Q 的非周期函数。当网络中飞行器节点运动速度较快,飞行器密度和飞行流量较大,需要更新的邻居状态较多时,提高 HELLO 信标的更新频率,使更新时间间隔变短;当网络中飞行器节点运动速度较慢,飞行器密度和飞行流量较小,需要更新的邻居状态较少时,降低 HELLO 信标的更新频率,使更新时间间隔变长。具体计算方法如下:

$$T(i+1) = \begin{cases} T(i) + \Delta T, & \frac{Q(i)}{Q(i-1)} < \frac{1}{\varepsilon} \\ T(i) - \Delta T, & \frac{Q(i)}{Q(i-1)} > \varepsilon \\ T(i), & \text{其他} \\ \Delta T > 0, \varepsilon > 1 \end{cases} \quad (5)$$

2.3 空间半径动态修正原理

在 ZRP 协议中,当节点的路由区域半径设置为

最优时,可有效优化路由控制开销,从而提高 ZRP 协议的路由性能。而在 HSRP 协议中,动态修正空间半径的目的在于降低 AANET 中路由控制的开销。其核心算法的设计思想是通过采集飞行流量的变化,周期性地增大或减小中心节点的空间半径,使 IERP 的路由控制开销和 IARP 的路由控制开销比值趋近于 1。此时路由效果最佳,路由空间半径为

$$h(i+1) = \left\{ \begin{array}{l} h(i) + \Delta h, \frac{Q(h(i))}{Q(h(i-1))} < \frac{1}{\varepsilon}, h(i) \in (h_{Q_{\max}}, h_{\max}) \\ h(i) - \Delta h, \frac{Q(h(i))}{Q(h(i-1))} > \frac{1}{\varepsilon}, h(i) \in (h_{Q_{\max}}, h_{\max}) \\ h(i) - \Delta h, \frac{Q(h(i))}{Q(h(i-1))} < \frac{1}{\varepsilon}, h(i) \in (h_{\min}, h_{Q_{\max}}) \\ h(i) + \Delta h, \frac{Q(h(i))}{Q(h(i-1))} > \frac{1}{\varepsilon}, h(i) \in (h_{\min}, h_{Q_{\min}}) \\ h(i), \text{其他} \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: $Q(h(i))$ 表示在第 i 个估计时间间隔内测量的飞行流量,此时节点的空间半径值为 $h(i)$; $Q(h(i-1))$ 表示在第 $(i-1)$ 个估计时间间隔内,空间半径为 $h(i-1)$ 时的飞行流量; $h_{Q_{\max}}$ 表示飞行流量达到最大值 Q_{\max} 时的空间半径。

2.4 基于最大空间半径分区的空间生成算法

在 HSRP 协议中,使用 2.2 和 2.3 小节中的机制会使节点空间半径大小不统一,从而出现一个较大路由空间同时覆盖几个较小路由空间的情况,此时较易出现冗余的路由信息。过多冗余路由信息会增大 HSRP 协议的路由控制开销。为了解决此问题,本节给出了一个基于最大空间半径分区的算法。该算法可对飞行空间中的飞行器节点按空间分级,以实现冗余路由信息的消除,并管理控制报文的优化。算法执行过程中会选择空间半径最大的节点作为管理节点。在具体计算过程中,每个节点通过周期性地广播链路状态分组来获得临近节点的空间半径信息,并将自身的空间半径值与其他节点的空间半径值进行比较,选出具有最大空间半径的节点作为管理节点,其他节点作为普通节点加入该空间;如果节点的空间半径相同,则选择节点序号最小的节点作为管理节点(节点序号在全网范围内是唯一的),并标记这个具有相同半径值的节点为备选管理节点。此过程将会不断重复,直到空间内所有节点都加入该空间。

最佳路由空间半径。其修正方法如下:

设 $h \in (h_{\min}, h_{\max})$ 其中 h_{\min} 为最小空间半径, h_{\max} 为最大空间半径。 ε 为大于 1 的整数, Δh 为大于 0 的自然数。在第 i 个估计时间间隔内测量飞行流量的大小,较优空间半径的估计值可由(6)式计算得到:

初始空间及其管理节点生成以后,管理节点将在 $h-1$ (生存期 $TTL=h-1$) 跳范围内向新建空间的其他节点广播链路状态分组(其中包含管理及备选管理节点的信息),空间内其他节点收到分组后,会根据分组更新自己的路由信息表,并进一步将该分组转发给其他节点。

在已建空间的维护过程中,本算法需要管理节点和备选管理节点周期性地广播链路状态分组,来实现空间内路由信息的维护,而空间内的普通节点只需要向管理和备选管理节点回送自己的链路状态信息,并停止自身对空间半径的修正即可。

该算法既可解决上述路由空间覆盖的问题,也可减少网络中链路状态分组的数量,从而能降低 IARP 协议的路由控制开销。管理节点的变换,只发生在下述 3 种情况:①管理节点的空间半径发生了变化;② 2 个管理节点互相处于对方的通信范围内;③节点不属于任何空间,自己生成空间。

空间生成算法的具体执行过程如下:

输入 飞行流量信息: Q ; 节点状态信息: S

输出 节点空间描述信息: SPD

开始

步骤 1

用基于最大空间半径分区的算法生成初始空间;

步骤 2

If 还有节点未加入任何空间
 Then 节点自己建立一个新的空间,并充当该空间的管理节点;
 步骤 3
 If 有节点在不同空间内转移
 Then
 If 节点是普通节点
 Then 改变空间内普通节点的数量;管理节点的选举不受任何影响;
 If 节点是管理节点
 Then 依据最大空间半径的原则,与新空间的管理节点竞争管理节点的角色;
 步骤 4
 If 一个管理节点空间半径发生改变
 Then 该管理节点将与备选管理节点或其他管理节点重新竞争管理节点的角色。
 结束

3 空间分层路由协议的性能分析

为了进一步验证 HSRP 协议的性能,本文采用仿真验证的方法对 HSRP 协议与 ZRP 协议的性能进行了比对。其中网络仿真环境采用 NS2 网络仿真软件来构造,飞行器移动模型采用自主开发的 AVMSim 飞行流仿真器进行仿真。对协议性能的估算和仿真结果的分析,采用了分组投递率、平均端到端时延、归一化路由开销等指标。实验中具体使用空间半径为两跳和三跳的 ZRP 协议与 HSRP 协议进行比对。为了过滤偶然因素,每组实验重复 20 次,对实验结果取平均值。

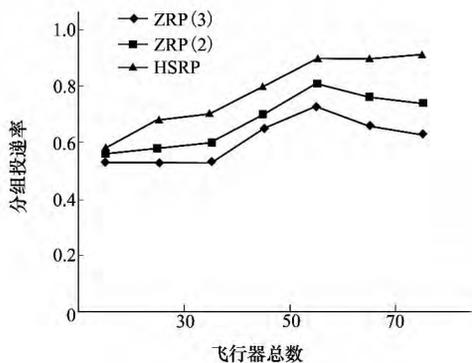


图 2 分组投递率比对

图 2 给出了分组投递率的比对。本文提出的

HSRP 协议的投递率明显高于 ZRP 协议。当飞行器总数低于 40 时,ZRP 和 HSRP 路由协议的投递率都较低,原因在于航道上的飞行器密度较小,飞行器的飞行速度受制约程度小,网络拓扑结构变化快,源节点找不到下一跳节点的概率高。当飞行器总数增至 40~60 之间时,飞行器密度随之增加,2 种路由协议的投递率都有所提高。飞行器的飞行速度开始受到相邻节点的影响逐渐减小,网络拓扑结构的稳定性增加,投递率也随之增加。当飞行器总数超过 60 以后,ZRP 协议的分组投递率迅速下降,明显低于 HSRP 协议,此阶段飞行器密度变大间距变小,此时 ZRP 协议的区域半径是个定值,不能自适应调节,而 HSRP 协议能够动态改变空间半径的大小优化路由由信息,因此能够有效提高分组的投递率。

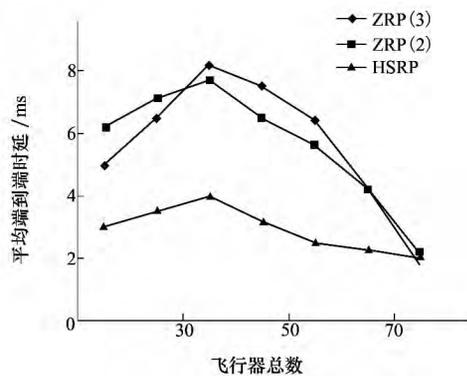


图 3 端到端时延比对

图 3 给出了飞行器总数与平均端到端时延的关系,由于 HSRP 协议具有半径动态修正的机制,较易找到理想的下一跳转发节点,因此 HSRP 协议相比 ZRP 协议具有较低的时延。而在 ZRP 协议中 IARP 部分采用表驱动路由方式可以获得较小的时延,IERP 部分采用按需路由方式获得的时延相对较大,在飞行器总数处于 35~75 之间时,ZRP 协议半径为 2 时的平均端到端时延要小于半径值为 3 时的时延,说明此时以按需路由方式为主,而处于其他总数范围时半径值为 3 时的时延比较小,说明此时以表驱动路由方式为主。

图 4 给出了 ZRP 协议和 HSRP 协议归一化路由开销的比对。由于 ZRP 协议中节点区域重叠概率较高,并且此概率会随着区域半径值的增大而提高,此时会使节点同时属于多个区域的情形增多,从而使网络中冗余路由控制分组的数量增多,以致路由的控制开销提高;而 HSRP 协议使用了基于最大

空间半径分区的算法,降低了空间的重叠性,减少了路由控制分组的转发数量和频度,所以相对 ZRP 协议具有较低的归一化路由开销。而当飞行器总数超过 50 以后,ZRP 协议中路由开销的增长速度要明显高于 HSRP 协议,大量的路由控制分组会致使网络的拥塞,这也是图 2 中 ZRP 协议分组投递率明显下降的一个原因。

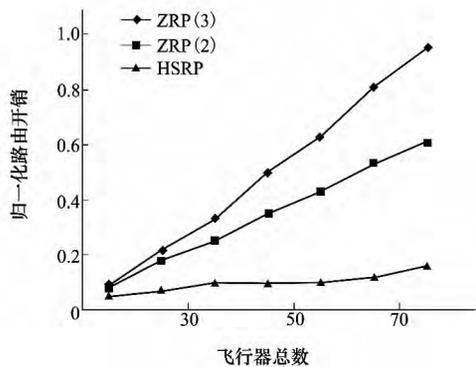


图 4 归一化路由开销对比

4 结 论

本文给出了空中交通流的相关描述参数,提出了一种基于空中交通流量动态修正节点空间半径的路由协议,该协议改进了 ZRP 协议体系中的 NDM 协议和 IARP 协议,采用基于最大空间半径的空间分区算法,建立了适用于航空自组织网络的分层结构。并在集成了飞行流量仿真工具 AVMSim 的 NS2 网络仿真平台上,对 ZRP 协议和 HSRP 协议进行了性能仿真,同时对仿真结果进行了对比分析。结果表明,HSRP 协议的分组投递率、平均端到端时延和路由开销都比 ZRP 协议性能更优,可有效满足航空自组织网络的应用需求。不足之处在于 HSRP 协议的运算量要高于 ZRP 协议。未来可进一步研究 HSRP 协议的优化方法。

参考文献:

- [1] Ehssan S, Abbas J. The Global In-Flight Internet [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(9): 1748-1757
- [2] Wang S G, Fan C Q, Deng C, et al. A-GR: A Novel Geographical Routing Protocol for AANETs [J]. Journal of Systems Architecture, 2013, 59(10): 931-937
- [3] 郑博,张衡阳,黄国策,等. 三维平滑移动模型的设计与实现 [J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(6): 179-184
Zheng Bo, Zhang Hengyang, Huang Guoche, et al. Design and Implementation of a 3-D Smooth Mobility Model [J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(6): 179-184 (in Chinese)
- [4] Hoffmann F, Medina D, Wolisz A. Joint Routing and Scheduling in Mobile Aeronautical Ad Hoc Networks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2013, 62(6): 2700-2712
- [5] Li Y, Shirani R, Stilaire M, et al. Improving Routing in Networks of Unmanned Aerial Vehicles: Reactive-Greedy-Reactive [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2012, 12(18): 1608-1619
- [6] Sakhaee E, Jamalipour A. Stable Clustering and Communications in Pseudolinear Highly Mobile Ad Hoc Networks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3769-3777
- [7] Rohrer J P, Jabbar A, Cetinkaya E K, et al. Highly-Dynamic Cross-Layered Aeronautical Network Architecture [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2742-2756
- [8] Thi X M N, Miyanaga Y, Saivichit C. Connectivity Modeling Analysis in Flight-Path Based Aviation Ad Hoc Networks [J]. IEEE Trans on Communications, 2011, 59(6): 1606-1616

A Hierarchical Space Routing Protocol in Aeronautical Ad Hoc Networks (AANET)

Zhong Dong , Zhu Yian , You Tao

(Department of Computer Science and Engineering , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China)

Abstract: To solve the problem that routing protocols in MANET can not be used in AANET , we propose the Hierarchical Space Routing Protocol (HSRP) . Section 1 of the full paper gives five definitions that we have come to find useful in describing HSRP protocol. Section 2 uses the above-mentioned five definitions to design the HSRP protocol; the HSRP protocol has the ability to dynamically change the update frequency of HELLO beacon and adjust the radius of routing space in accordance with air traffic; section 2 also gives the architecture of HSRP protocol and the procedure for implementing the HSRP algorithm. Section 3 do three experiments to test the HSRP protocol. The experimental results , shown in Fig.2 through 4 of section 3 , and their analysis , indicate preliminarily that the HSRP protocol , compared with ZRP protocol , can adapt to the impact of air vehicle density change on routing protocol and has high delivery ratio , low routing control overhead and low average end-to-end delay. And the HSRP is practical and effective in AANET.

Key words: ad hoc networks , algorithms , computer simulation , computer software , design , efficiency , experiments , mobile computing , reliability , routing protocols , time delay