

# 软件定义卫星网络辅助的空基网络多域路由策略

沙沫, 孙凯旋, 何华森, 袁文科, 叶志成, 杨坚  
(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 卫星网络层与空基网络层作为下一代网络的重要组成部分将引领世界进入全球互联时代。然而, 飞机作为空基网络的主要节点具有的高机动性和稀疏分布等特点限制了原本为地面自组织网络设计的传统路由算法的应用。利用空基网络接入软件定义卫星网络, 通过卫星对飞机的连接实现航空网络中飞机的实时通信与状态同步。为了将航空组网和传输机制扩展到全球范围, 提出通过全球范围内划分为多域方法并设计提出一种域间路由算法。该算法通过类比光的反射原理, 限制路由学习包传播, 高效避免多节点大规模网络场景中状态同步与泛洪学习所带来的巨额通信开销。采用真实的飞机数据进行实验仿真, 验证了相较其余基准算法, 设计的低代价域间路由算法可以有效地降低通信成本和提高传输质量。

**关键词:** 软件定义卫星网络; Ad-Hoc网络; 路由算法

**中图分类号:** TN927.2

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.2022032

## Software Defined Satellite Network Assisted Multi-Domain Routing Strategy for Aeronautical Networks

SHA Mo, SUN Kaixuan, HE Huasen, YUAN Wenke, YE Zhicheng, YANG Jian  
University of Science and Technology of China, Hefei 23000, China

**Abstract:** Satellite network layer and aeronautical network layer are treated as important parts of the next generation network, which will lead the world into the era of global interconnection. However, the high mobility and sparse distribution of aircraft limit the application of traditional routing algorithms originally designed for ground-based ad-hoc networks. Therefore, this paper used the aeronautical network to access software defined satellite network (Sat-SDN) for realizing real-time communication and state synchronization between aircraft via the inter-satellite and satellite-to-aircraft links. In order to extend the aeronautical networking and transmission mechanism to the global scope, a multiple domain division method was proposed, and an inter domain routing algorithm was presented. By analogy the reflection principle of light, a routing learning method which limited the broadcasting of routing learning packets into a specific area was proposed, and effectively avoided severe communication overhead caused by state synchronization and flooding learning in large-scale networks. The real aircraft data was used for experimental simulation to compared the performance of proposed low-cost inter-domain routing algorithm (LIRA) with existing solutions. The simulation results showed that LIRA could effectively reduced the communication overhead and improved the transmission quality.

**Keywords:** software defined satellite network, Ad-Hoc networks, routing algorithm

## 0 引言

作为地面网络, 5G暴露出其固有的包括覆盖范围有限<sup>[1]</sup>、穿透能力弱<sup>[2]</sup>等的局限性。卫星互联网通信系

统具有覆盖范围大、灵活性高、部署成本低等优点, 在6G时代将成为发展方向<sup>[3]</sup>。在空天地一体化架构下, 以卫星网络、飞机网络、地面网络3层立体化网络为框

**收稿日期:** 2022-04-01; **修回日期:** 2022-08-01

**通信作者:** 何华森, hehuasen@ustc.edu.cn

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 62173315, No. 62101525); 合肥市留学回国人员创新创业扶持计划 (No. BJ2100007001)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundations of China (No. 62173315, No. 62101525), Hefei Innovation and Entrepreneurship Support Plan for Returned Overseas Chinese Scholars (No. BJ2100007001)

架,星一空、星一地、空一地互联网络连通为纽带,实现数据的全融合共享。可以真正做到无缝切换、全联通、全覆盖<sup>[3]</sup>组网。

飞机网络作为卫星互联网的中间部分与桥梁,上接卫星、下连地面,是全覆盖任务实现的重中之重,因此一直被视为卫星互联网的核心部分,并在6G网络架构中存在重大优势。

(1) 扩展覆盖范围:由于广泛分布的商业航空飞机<sup>[4]</sup>,飞机网络可以为地面网络无法覆盖的区域提供网络服务,例如:偏远山区、海域轮船等。

(2) 降低时延和通信成本<sup>[5]</sup>:飞机骨干网相对卫星部署离地更低,可以提供更低的时延、更低的成本和更高的服务质量,有利于时延敏感类的应用,例如:交互式语音和视频会议。

(3) 为飞机提供网络服务<sup>[6]</sup>:实现对飞机的无缝监控,飞机飞行阶段全感知、可沟通,尽可能避免事故发生,同时解决飞机乘客的上网需求。

目前飞机组网的实现还存在以下诸多困难:飞机通信链路的生存周期短,飞机节点间拓扑更新频繁<sup>[7]</sup>;基站部署成本高<sup>[8]</sup>、信号接收距离有限、覆盖范围小,不适合长距离广域的数据传输,因此要求飞机形成一个自组织网络;由于天气或其他原因,飞机的飞行规律和航线易变更<sup>[9]</sup>(如:延误、提前到达等),飞机的飞行轨迹难以被控制,无法提前预测。

目前针对动态网络路由的相关工作主要分为3类:主动路由算法、被动路由算法和基于地理位置的路由算法。主动路由算法如鱼眼状态路由(Fisher State Routing, FSR)<sup>[10]</sup>和优化链路状态路由(Optimized Link State Routing, OLSR)<sup>[11-12]</sup>,旨在为每一个源一目的地在动态场景下维护一条可达路径,当节点规模扩大时,为同步彼此状态达成一致,产生的周期泛洪通信代价无法接受;被动路由算法,例如无线自组网按需距离向量路由协议(Ad-Hoc On-demand Distance Vector, AODV)<sup>[13]</sup>和临时排序路由算法(Temporally Ordered Routing Algorithm, TORA)<sup>[14]</sup>则是在需要通信时,通过广播创建并维护一条源一目的地路径。在高速移动的网络中可能面临拓扑失效快,频繁的路径发现问题,因此往往会为数据传输带来较大的时延;如贪婪的周边无状态路由(Greedy Perimeter Stateless Routing, GPSR)<sup>[15]</sup>采用基于地理位置的贪婪转发策略,节点转发数据包只需要依据目的节点位置选择邻居中距其最近的节点贪婪转发。这种方法的转发失败率很大,转发失败后路径的重新恢复需要很长时间。

综上所述,传统动态路由算法往往只适合小规模

或者是低移动性的动态系统,不能适应飞机组网的大规模、高移动性场景,这需要提出并研究新的路由算法以解决。飞机组网的难点之一是如何使飞机间状态同步。一种具有前景的有效解决方案是引入卫星网络层,利用卫星网络的广泛覆盖特性实现飞机间状态同步。由于卫星网络具有覆盖范围广、鲁棒性强等优势,可以利用这些优势来解决飞机网络目前存在的有关动态性与范围大的问题。常见的方法是将空基网络、卫星网络与地面网络连接起来构成空天地一体化网络架构。但是传统卫星网络存在复杂异构的特点,难以对大规模场景进行管理及资源分配。为了应对卫星网络的星间链路的频繁变化,卫星网络控制需要根据网络状态即时实现拓扑重构。为实现这一目标,卫星网络必须进行对应的调整和改进,把软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的思想引入卫星网络中<sup>[16]</sup>,将卫星网络中的同步地球轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星、低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星进行重组,将卫星网络数据平面和控制平面分离,控制平面进行路由计算、资源管理等操作,剩下卫星节点只需进行简单的硬件配置和数据转发。软件定义卫星网络(Software Defined Satellite Network, Sat-SDN)降低了卫星建设成本和对星上计算处理能力的要求,并且因为控制平面的集中管理,其可以实时更新网络状态,灵活地分配网络资源。

利用Sat-SDN是一种有效的能降低星间通信代价的手段,以此可为飞机网络提供稳定服务的卫星通信网络。参考文献[17]提出基于SDN架构的模型,通过覆盖域的划分设计网络移动管理策略,将网络地址与地理位置信息绑定来解决由于卫星的高拓扑动态性而面临的路由困难问题。其尽管提出了网络架构,却没有进行具体的路由算法与路由协议的设计以及对网络性能情况的详细分析。参考文献[18]借助SDN架构带来的更强的网络控制和感知能力,采用了基于分段路由的区分服务路由算法,做到区分业务类型的QoS保障,并将用户的接入切换和卫星网络路由统一起来。但是提出的基于分段路由的区分服务路由算法中,没有考虑拓扑的高动态性导致的拓扑变换后路由情况,且随着时间推移,没有考虑链路长度变化引起业务QoS要求不满足时的优化。参考文献[19]基于SDN的LEO卫星网络路由算法,设计出一种基于虚拟拓扑的静态路由优化算法。但是其所设计的路由方案每次路由优化时都会涉及大量的流表删除和添加,在实际部署中对卫星计算和存储提出了比较高的要求。参考文献[20]通过设计一种卫星网络控制架构以降低卫星节点复杂度,提高网络资源利用率,并在网络架构基础

上提出卫星路由算法以优化网络带宽、丢包率、传输时延。SDN基站被设置在地面会导致控制器与转发节点的传输时延增加,通过将控制节点放在卫星可以降低传输时延。综上所述,Sat-SDN可以降低星间通信代价,提高空基通信效率,现有工作对广域的数据传输和通信策略提出了相关的优化方案,使全球飞机组网成为可能。

与现有工作相比,本文的主要贡献可以总结如下:设计基于Sat-SDN辅助的天地一体化架构,结合多层卫星网络覆盖能力与飞机网络高质量、低时延服务能力,为全球设备互联通信提供新思路;创新引入光传播定理,为域间学习包传播设计灵活自主传播方案,避免多节点大规模网络场景中状态同步与泛洪学习所带来的巨额通信开销;基于合理域划分机制,结合为域间传输所提出的动态域间望远镜节点概念,设计高效灵活的域间路由算法;采用真实飞机数据进行实验仿真,验证了相较于其余基准算法,本文所设计路由算法在多种性能上的优越表现。

## 1 系统模型

本节介绍Sat-SDN辅助的空基网络多域路由策略的系统模型,包含基于Sat-SDN的空天地一体化系统架构、飞机运动模型、域划分及望远镜节点设置和通信设置。

### 1.1 系统架构

利用Sat-SDN连接到飞机网络可以有效提高飞机

间的通信效率。基于Sat-SDN的卫星互联网架构如图1所示。该构架分为卫星网络层、飞机网络层、地面网络层3层。这3层既能独立工作,也能互相通信。其中卫星网络层为Sat-SDN,卫星网络主要设有两层,上层为GEO卫星,设有SDN控制器,控制器上运行各种管理配置应用程序,通过OpenFlow协议对卫星网络状态维护等进行统一管理。同时GEO卫星内存储所有飞机的相关状态信息以协助飞机找到目的飞机位置。本文架构选用北斗导航卫星中的3颗地球静止轨道卫星作为架构中的GEO。下层为LEO卫星,负责与其所覆盖下的飞机间的通信。在本文架构中的LEO卫星需要覆盖全球,因此可以采用铱星系统。每个低轨卫星分别下辖一个域的飞机,而所有低轨卫星的信息又交给上层卫星同步。飞机网络为众多飞机节点自组织的移动通信网络,设定飞机与在固定距离阈值内的其他飞机可以直接通信。可以直接通信的飞机称为该飞机的邻居,符合条件的不同飞机可以形成Ad-Hoc飞机组网。地面网络主要包括基站、用户设备等,可以与飞机网络层、卫星网络层通信,可以内部互相通信,也可以借助飞机网络进行通信。

在此系统架构中,由于卫星网络具有覆盖范围广的特点,飞机节点可以连接到上空的LEO卫星,飞机状态信息通过LEO卫星储存到卫星网络的控制器中,飞机节点可以通过卫星网络获取到目的飞机节点的位置。

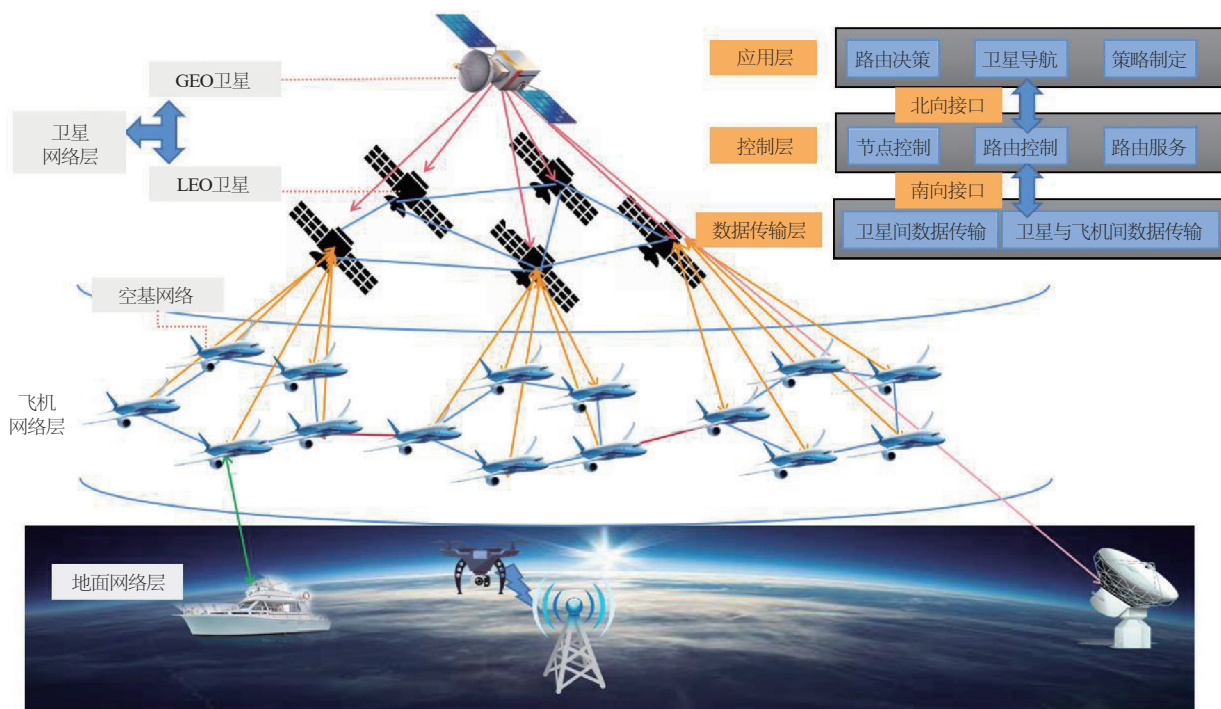


图1 基于Sat-SDN的卫星互联网架构

## 1.2 飞机运动模型

由于飞机的高移动性,路由时应考虑根据时间调整其位置信息。飞行轨迹常常因为恶劣的天气、空中交通管制等原因而发生变化,与管理预计的固定航线产生偏差。飞机的运动模型被描述为一个由多个分段函数组成的飞行计划(Flight Plan, FP)。每个函数描述了两个节点之间的飞行信息,包括开始时间、开始位置、飞行方向、飞行速度和预计结束时间。每当FP发生变化时,飞机会将新的FP发送给卫星网络并储存在Sat-SDN系统的控制节点即GEO卫星中。Sat-SDN中部署飞机飞行控制系统(Flight Control System, FCS),存储所有飞机起飞时设定的FP。飞机定期向FCS获取所有FP并进行定期更新,飞机在建立域间通信需求时从FCS获取的FP表中查询目的节点的FP,来得到目的节点当前所属域信息,然后即可发出路由学习包,依靠诸多节点组建并维护一条域间数据传输链路。将飞机骨干网连接到基于SDN的卫星网络架构中,Sat-SDN的控制层存储所有飞机设定的FP,飞机可以通过卫星与SDN控制层通信。

## 1.3 域划分及望远镜节点设置

考虑到飞机在全球飞行,同时在飞的民航航班最多可达1万架,飞机网络会涉及全球范围的广域传输,故难以在某一个域内同时管理所有飞机,对飞机网络分而治之进行域划分管理必不可少。因此提出了如图2所示的域划分机制作为多域解决方案。域划分模型<sup>[21]</sup>将地球表面平均划分为406个域。每个域的面积约为125.6万平方千米,每个域有20~50架飞机在上空航行。域之间通过域间路由算法连接其他的域。

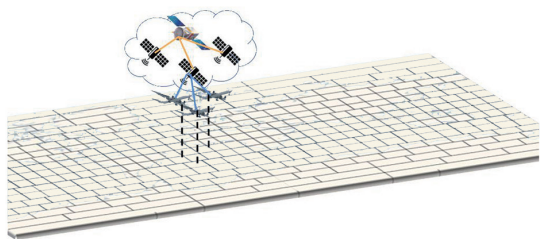


图2 域划分

在每个域内,不同飞机可以形成飞机自组织网络,但是在不同域飞机需要通信时,就需要域中的某些飞机充当跨域的“桥梁”,望远镜节点就是这个“桥梁”。在每个域中,将能够和其他域通信的飞机节点定义为望远镜节点(Telescope Node, TN),如图3所示。如果飞机在飞行过程中,能够直接与其余域飞机通信,则自动成为望远镜节点,并把自己所连接的域的信息对域内其余飞机进行广播,其中包含自身的全局唯一标识符

(Globally Unique Identifier, GUID)、连接的域以及持续时间,为将来可能的域间飞机组网提供必要信息。没有成为望远镜节点的普通节点可以通过望远镜节点连接到其他域。当一个普通节点需要与其他域的飞机进行通信时,望远镜节点负责将其寻找路径的学习包转发至对应域的相关望远镜节点。同时望远镜节点还负责在路径建立完成后维护使用期间的可达性。一个望远镜节点在其生命周期内维护两个表,分别为本地转发记录表(Local Forward Record Table, LFRT)和新路由表(New Routing Table, NRT)。LFRT用于存储望远镜节点已转发的所有项目。LFRT中记录的项目包含目标GUID、广播ID、持续时间和数据包通过的前一个望远镜节点。NRT由目的地、下一跳、前一个望远镜节点的信息组成。下一跳用于转发数据包,前一个望远镜节点用于通信维护。

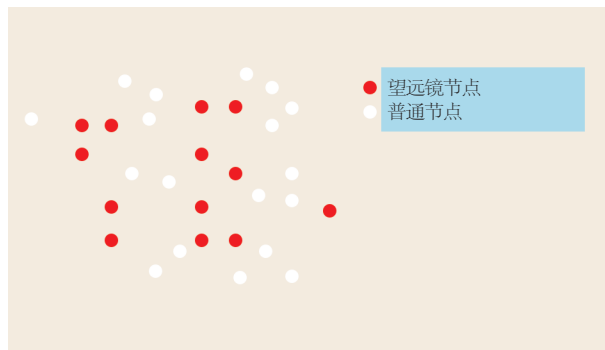


图3 望远镜节点分配

## 1.4 通信设置

想要保证飞机之间的可靠通信,需要正确获取或计算飞机的实时状态信息。自身状态表包括5个不同的字段,分别为GUID、位置、高度、速度、域ID。具体来说,作为唯一标识符的GUID,其在飞行过程中不会改变。为了应对飞机组网的动态拓扑,运用GUID代替IP地址进行路由。飞机通信的前提是彼此获取相关信息,因此飞机会一直维护自身状态表以用于互相通信。自身状态表中既包括飞机自身位置、高度、速度(矢量)、所属域的位置信息,还包括节点进行域间路由时所需的域间身份的信息。

望远镜节点负责在域内飞机发出域间路由请求时,将其寻找路径的学习包转发至对应域的相关望远镜节点。同时望远镜节点还负责在路径建立完成后维护使用期间的可达性。表1为域间路由时,为寻找到达目的地路径的学习包格式。其中广播ID用于区别同一个源和同一个目的地时数据包的不同请求,它是一个与时间相关的变量,每次源在发出新的通信请求时都会加1。兴趣表持续时间用于为减少寻路而产生的通信代价,保证获取到

的路径的低时延。经转域数和途径望远镜节点表用于目的地在收到请求时寻找返回路径。

表1 学习包格式

| 序号 | 参数        |
|----|-----------|
| 1  | 通信源节点     |
| 2  | 通信目的节点    |
| 3  | 广播ID      |
| 4  | 经转域数(有限位) |
| 5  | 途径望远镜节点表  |
| 6  | 兴趣表持续时间   |

## 2 域间路由策略

由于现有工作提出了很多解决小范围通信的路由算法,在域内不同飞机节点通信时采用已有的OLSR<sup>[11]</sup>作为域内路由算法。本文主要聚焦大范围空基网络域间组网路由策略研究。

### 2.1 学习包转发规则

为了限制大量广播学习包带来的开销,本文定义了两个节点之间传输学习包的转发策略。

策略1:一个学习包最多可以转发到离目的节点的域最近的3个域。由于每个域周围有很多邻居域,限定在最近的3个域可以减少很多学习包转发开销。

策略2:基于光线反射原理类比的路由学习包传播机制<sup>[22]</sup>。策略2是在策略1的基础上继续加以限制。由于每次转发的目的节点有最近的3个域,最近的3个域又各自有最近的3个域,这样学习包的途径可能会有很多种并且会带来大量重复。因此策略2在策略1的基础上,定义了学习包转发途径的域的限制。策略2原理是根据光的反射原理,假想以源节点和目的节点为顶点,构建夹角为某给定度数的菱形,并可以由此得出菱形区域的坐标。将菱形的棱边假设为一个虚拟的“镜面”,用于改变学习包的传播方向。望远镜节点发出的学习包在发送给另一个望远镜节点时会判断该节点是否位于菱形区域内,若该节点不在菱形区域内会重新发送给下一个位于菱形区域内的望远镜节点。这样就形成了类似物理学上的“光的反射”的学习包传播机制,如图4所示。

策略2源节点S与目的节点D设为菱形顶点,设定菱形夹角为60°,则可以绘制如图4所示的菱形区域。

### 2.2 望远镜节点辅助的域间路由算法

基于上述策略1、2及上述基本设置设计了如下的域

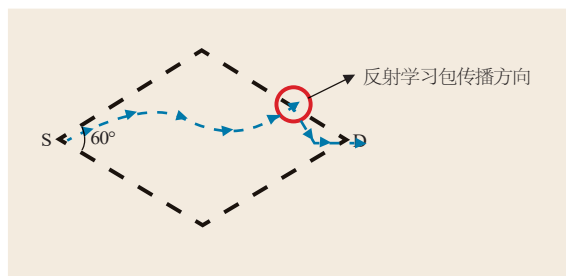


图4 基于反射原理的路由学习包传播机制示意

间飞机的路由算法:飞机数据传输链路通过飞机网络通信链路(Aircraft to Aircraft, A2)类似反应式路由建立,每个飞机节点会定期从所连接到的FCS下载全部飞机的FP,在需要进行域间通信时会在之前下载的FP查询目的节点的当前所属域信息,然后即可发出学习包,依靠诸多望远镜节点组建并维护一条域间数据传输链路。域间路由学习的步骤如下。

在域间通信策略基础上即可设计基于望远镜节点的域间路由算法,本文设计了一种基于反应式路由的域间路由传输策略。建立域间传输路径的飞机节点需要首先依据所连接的LEO卫星节点查询对应的目的节点的域信息,并在此基础上发出路由学习包。路由学习包的转发过程为:学习包依据域间通信策略,经由多个域间望远镜节点最终到达目的节点之后,即可组建域间传输路径。具体低代价域间路由算法(Low-cost Inter-domain Routing Algorithm, LIRA)如下。

(1)需要通信飞机首先获取目的飞机位置信息,若为域内则使用OLSR<sup>[11]</sup>路由算法通信,若为域外则向Sat-SDN的FCS获取目的节点所在域信息。

(2)判断离目的域最近的3个邻居域,向需要通信飞机的域内连通此3个域的望远镜节点发送学习包到与这些域相连的需要通信飞机的域内的望远镜节点。在学习包中添加传递的望远镜节点信息后,学习包将被发送到最近邻域中的望远镜节点。此外新的转发项目将记录在LFRT中。

(3)学习包到达新的域的望远镜节点后,如果目的节点存储在望远镜节点的路由表中,则说明当前望远镜节点有一条到达目的节点的有效路径,望远镜节点将根据学习包中的路径信息向源节点发送回复。

(4)学习包到达新的域的望远镜节点后,目的节点如果路由信息还没有被存储,且新的域的望远镜节点满足以下条件之一,望远镜节点将丢弃学习包:收到过同一源和同一ID的数据包;由于时长和广播ID,学习包超时;目的相同的学习包已经被广播了相同或更大的广播

IID, 且可以在LFRT中找到。

(5) 如果以上条件均不满足, 望远镜节点会更新学习包内所经望远镜节点和所经域的数据表, 然后将学习包转发给自己邻居域中距目标节点最近的3个域。则该望远镜节点将选择新的望远镜节点并向其广播学习包, 直到该包到达目的地或已存储目的节点路由信息的一个望远镜节点。

(6) 到达目的地, 目的地节点会根据路径信息返回数据包至源节点。

此外, 路由方案还拥有中间恢复的能力, 位于数据传输路径的望远镜节点始终维护下一域的可达状态, 根据望远镜节点的最短持续时间信息, 在路径失效前主动寻找备选方案。

### 3 性能分析

为了测试本文所提的域间路由算法LIRA在实际场景中的性能表现, 持续采集位于美国中部地区408架飞机为期5 h的实时轨迹, 数据来源见参考文献[23]。同时选定北斗导航卫星的3颗地球静止轨道卫星作为GEO卫星, LEO为铱星卫星系统, 星一星带宽为1 Mbit/s, 星一机带宽为1 Mbit/s。为验证路由算法相较于现有路由算法的对比效果, 本文选取了两种基准路由算法, 分别为GPSR<sup>[15]</sup>与OLSR<sup>[11]</sup>。GPSR为地理由算法的代表, 其核心思想为基于目的地位置信息进行贪婪转发, 直至路由陷入死路节点时采用基于无交叉图论的方式

进行路由恢复。OLSR则是传统的主动式路由算法的代表, 其所有节点在每个时隙开始时积极将自身状态信息广播出去, 并依据自身获得的信息组建路由表。模拟性能实验结果展现了本文所提出的LIRA在大规模飞机路由中的性能优势。

图5比较了GPSR、OLSR、LIRA算法在408架飞机网络通信时的转发失败次数。由图6可知, 与GPSR相比, LIRA在复杂环境下具有更小的转发失败率。这是由于GPSR使用贪婪转发, 节点已知信息很少, 导致错误率会很高。由于OLSR算法可以获得全局的路由信息, 因此不存在转发失败的情况。本文所提算法旨在限制广播包的大规模传播对资源的浪费, 因此存在一定的转发失败风险, 但是相较于传统基于位置的路由算法仍取得了较好的表现。

图6比较了LIRA、OLSR在408架飞机网络中通信时的路由学习广播包数, 由于计算数据包时忽略了邻居发现的广播包, 而GPSR只在邻居中进行路由, 因此在图6中没有GPSR的广播包数。由图6可知, 与OLSR相比, 在复杂环境下LIRA具有更少的广播包数, 这是因为与OLSR不同, LIRA域间传输时只有两个域的望远镜节点之间传输, 减少了很多广播包。

图7比较了LIRA、GPSR、OLSR在408架飞机网络中通信时的路由平均跳数。由图7可知, 与GPSR相比, 在复杂环境下LIRA具有更少的平均跳数。因为GPSR只根据位置信息进行贪婪转发, 在转发失败时往往会付出较

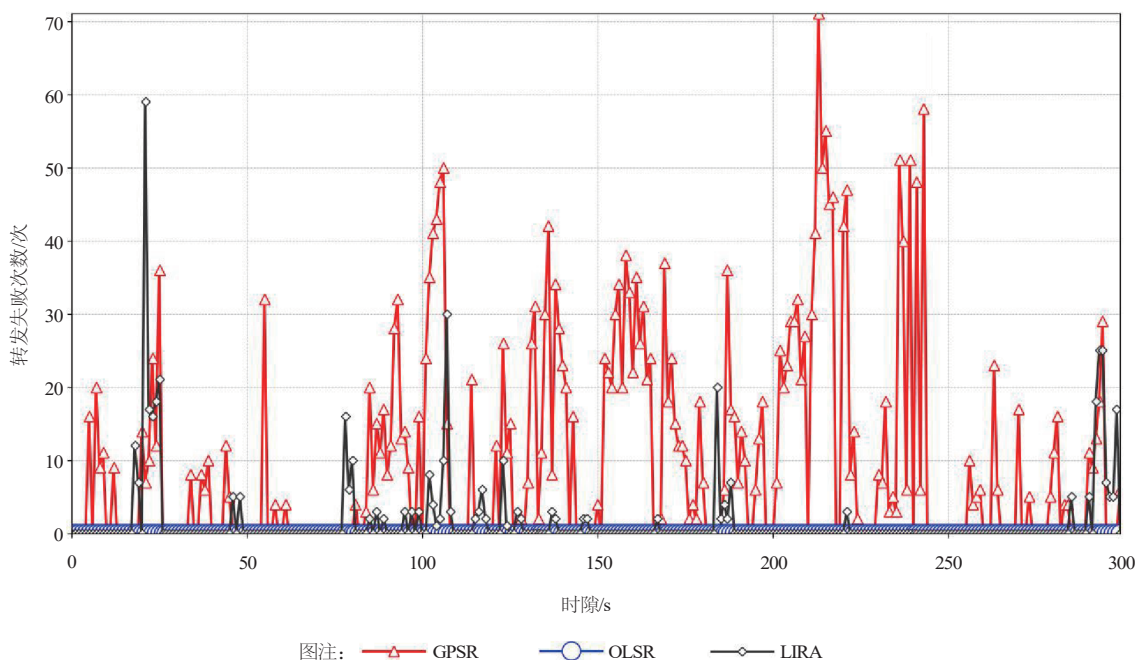


图5 GPSR、OLSR、LIRA在408架飞机网络通信时的转发失败个数

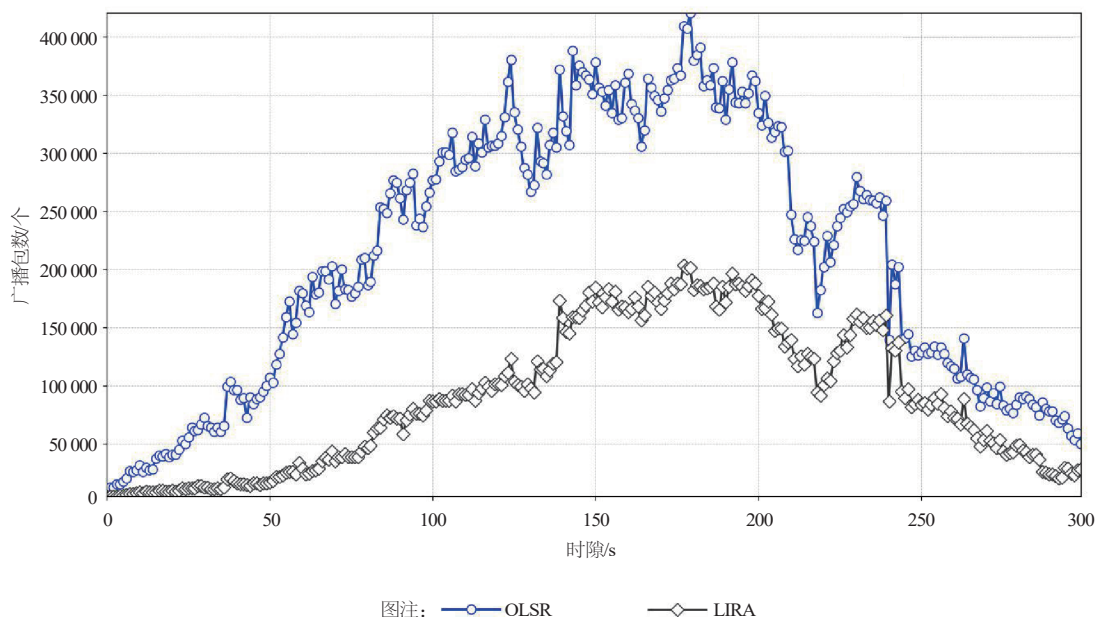


图6 OLSR、LIRA在408架飞机网络中通信时的路由学习广播包数

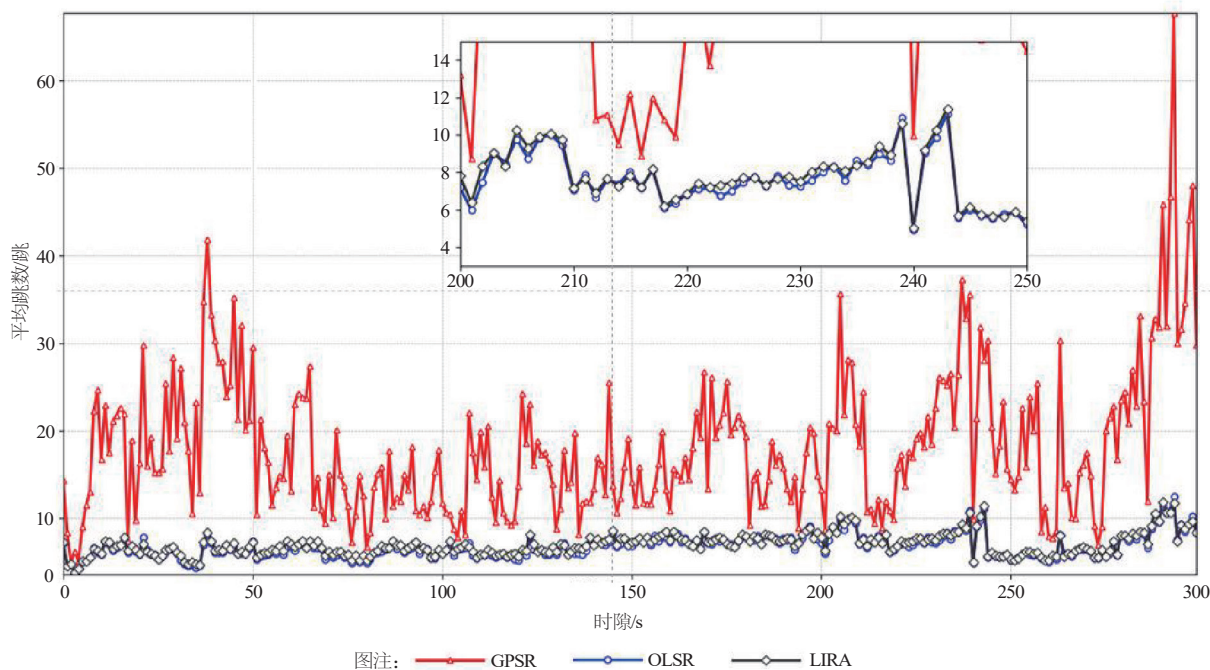


图7 GPSR、OLSR、LIRA在408架飞机网络中通信时的路由平均跳数

多的时间和跳数进行路由恢复。本文所提算法虽然限制了广播包的传播但是仍取得了和基于全局信息进行决策的OLSR算法相近的性能。

图8比较了GPSR、OLSR、LIRA在408架飞机网络中通信时的时延。由图8可知,与GPSR和OLSR相比,LIRA在复杂环境下具有更低的时延,这是因为GPSR有

着较高的平均跳数,不可避免地会影响转发效率。由之前的结论可知,本文所提的路由算法相较OLSR有着极低的通信开销,因此在大规模场景下不会因为广播包占用较多的带宽资源,影响排队时延和增加传输的总时间。

综上所述,与基准路由算法相比,本文所提的路由算法LIRA可以有效降低通信成本并提高传输质量。

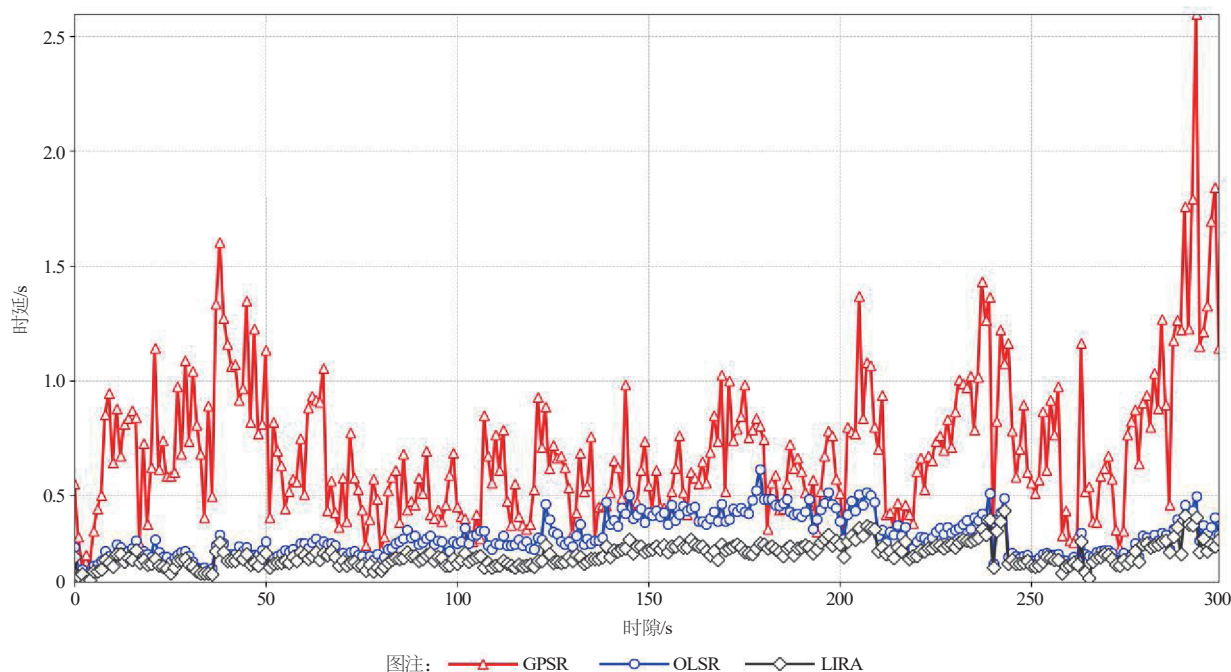


图8 GPSR、OLSR、LIRA在408架飞机网络中通信时的时延

## 参考文献：

- [1] 杨智杰, 韩永. 邹贺铨:5G要达到4G的覆盖范围,还要相当长的时间[J]. 中国新闻周刊, 2019.  
YANG Z J, H Y, Wu Hequan: It will take a long time for 5G to reach 4G coverage[J]. China News Weekly, 2019.
- [2] 杨洁. 5G通信技术的优缺点及应用前景[J]. 中国新通信, 2019, 21(20): 117.  
YANG J. Advantages, disadvantages and application prospects of 5G communication technology[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(20): 117.
- [3] 赵雄文, 张钰, 秦鹏, 等. 空天地一体化无线光通信网络关键技术及其发展趋势[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 1-17.  
ZHAO X W, ZHANG Y, QIN P, et al. Key technologies and development trends for a space-air-ground integrated wireless optical communication network[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(1): 1-17.
- [4] 空中客车中国公司企业资讯部. 空中客车公司发布2012—2031全球民用航空市场预测[J]. 空运商务, 2012(18): 44.  
Airbus China Corporate Information Department. Airbus releases 2012-2031 global civil aviation market forecast[J]. Air Transport & Business, 2012(18): 44.
- [5] 任宝平, 李创. 无线网络技术在飞机系统中的应用与趋势分析[J]. 电光与控制, 2022, 29(3): 59-64.
- [6] 牛志强, 甄小琼, 杨玲. 跨洋环境下民航飞机网络通信路由算法研究[J]. 数字技术与应用, 2017(8): 117-119.  
NIU Z Q, ZHEN X Q, YANG L. Civil aircraft network communication routing algorithm research under transoceanic environment[J]. Digital Technology and Application, 2017(8): 117-119.
- [7] 吴德伟, 高晓光, 王永胜. 无人作战飞机通信延时仿真[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(4): 14-16.  
WU D W, GAO X G, WANG Y S. Research on the simulation of communication time delay for uninhabited combat aerial vehicles[J]. Fire Control & Command Control, 2005, 30(4): 14-16.
- [8] 丁然, 梁俊, 肖楠, 等. 软件定义空基骨干网中的编码感知机会路由方案[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(10): 3085-3088.  
DING R, LIANG J, XIAO N, et al. Coding aware opportunistic routing scheme for software-defined airborne backbone networks[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(10): 3085-3088.
- [9] 李奔驰. 使用多计算机分布式整数规划求解飞机运行计划修复问题[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.  
LI B C. Solving aircraft schedule recovery problems using a distributed computation approach to integer programming[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [10] REN B P, LI C. Application of wireless network technology in aircraft system and its trend analysis[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(3): 59-64.

- [10] PEI G Y, GERLA M, CHEN T W. Fisheye state routing: a routing scheme for ad hoc wireless networks[C]//Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2000: 70-74.
- [11] JACQUET P, MUHLETHALER P, CLAUSEN T, et al. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks[C]// Proceedings of IEEE International Multi Topic Conference. Piscataway: IEEE Press, 2001.
- [12] CHEN C, LIU L, QIU T, et al. ASGR: an artificial spider-web-based geographic routing in heterogeneous vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(5): 1604-1620.
- [13] PERKINS C E, ROYER E M. Ad-Hoc on-demand distance vector routing[C]//Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. Piscataway: IEEE Press, 1999: 90-100.
- [14] PARK V D, CORSON M S. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks[J]. Proceedings of INFOCOM '97, 1997, 3: 1405-1413.
- [15] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]//MobiCom '00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. [S.l.:s.n.], 2000: 243-254.
- [16] 杨丹, 刘江, 张然, 等. 基于SDN的卫星通信网络: 现状、机遇与挑战[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 34-41.
- YANG D, LIU J, ZHANG R, et al. SDN-based satellite networks: progress, opportunities and challenges[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 34-41.
- [17] 郭剑鸣. 面向多层卫星星座的空间信息网络架构设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- GUO J M. Design of space information network architecture for multi-layer satellite constellation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [18] 袁梦珠. 基于SDN的卫星网络关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- YUAN M Z. Research on key technologies of SDN based satellite network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [19] 吴环宇. 低轨卫星SDN-WAN路由方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- WU H Y. A research on SDN-WAN-based routing method for LEO satellite network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [20] 赵杰. 基于SDN的VDES卫星网络路由关键技术研究[D]. 成都:

电子科技大学, 2017.

ZHAO J. Research on key technologies of VDES satellite network routing based on SDN[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

- [21] MALKIN Z. A new method to subdivide a spherical surface into equal-area cells[EB]. 2016: arXiv: 1612.03467.

- [22] KAZI A K, KHAN S M. DyTE: an effective routing protocol for VANET in urban scenarios[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2021, 11(2): 6979-6985.

- [23] 飞友科技. 飞常准VariFlight全球航班实时跟踪雷达[EB]. 2022. Feiyou Technology. Feichangzhun VariFlight global flight real-time tracking radar[EB]. 2022.

### [作者简介]



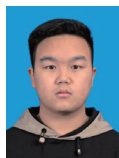
**沙沫** (1999-), 男, 中国科学技术大学先进技术研究院硕士生, 主要研究方向为未来网络、机器学习。



**孙凯旋** (1996-), 男, 中国科学技术大学信息科学技术学院博士生, 主要研究方向为未来网络、无线通信和机器学习。



**何华森** (1990-), 男, 博士, 中国科技大学信息科学技术学院副研究员, 主要研究方向为未来网络、网络建模与优化。



**袁文科** (2001-), 男, 中国科学技术大学信息科学技术学院硕士生, 主要研究方向为未来网络、无人机组网和强化学习。



**叶志成** (1998-), 男, 中国科学技术大学信息科学技术学院硕士生, 主要研究方向为无线通信和卫星网络。



**杨坚** (1977-), 男, 博士, 中国科学技术大学信息科学技术学院教授, 主要研究方向为未来网络、分布式系统建模与优化、随机优化。