

LEO 星座中基于不完全信息的路由联盟博弈策略

魏松杰¹, 王佳贺¹, 刘沛龙², 程 浩¹

(1. 南京理工大学计算机科学与工程学院, 江苏南京 210094; 2. 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

摘 要: 针对 LEO 卫星网络在多跳转发数据包时流量分布不均问题, 提出了一种基于不完全信息的最优收益路由联盟博弈算法. 各节点协同联盟邻居节点, 共同确定数据报文当前最优转发路径, 从而分配和平衡节点间流量负载. 仿真结果表明, 与最短路径卫星路由 DSP 或智能路由 TLR 相比, 本文算法的平均数据传输延迟降低了 18.5%, 节点流量负载均衡度提高了 65.6%.

关键词: LEO 卫星网络; 联盟博弈; 最优收益; 路由算法

中图分类号: TN927+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)10-1923-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.10.007

Applying Collaborative Game Strategy for Incomplete-Information Based Routing in LEO Constellation

WEI Song-jie¹, WANG Jia-he¹, LIU Pei-long², CHENG Hao¹

(1. School of Computing Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

2. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To tackle the difficulty of imbalanced traffic load when forwarding data packets through multiple hops in LEO satellite network, we propose a collaborative game theory routing strategy with incomplete information. Each node determines the current optimal routing path of the data packets through cooperating with neighbors for locally optimized coalition gain. This strategy distributes and balances the traffic workload among neighbor nodes effectively. Simulations show that compared with satellite routing based on the DSP shortest path or the TLR intelligent routing, the proposed algorithm reduces the average transmission delay by 18.5%, and improves the load balancing of nodes by 65.6%.

Key words: LEO satellite network; coalition game theory; optimal revenue; routing algorithm

1 引言

LEO 卫星网络能够以多颗卫星构建低轨星座通信实现全球通信无缝覆盖, 兼具损耗小、时延短等特点, 受到广泛应用^[1]. LEO 卫星通过星间链路构成拓扑动态变化的多跳自组织网络, 具有明显可预测的周期性, 有助于设计路由算法提高网络效率和资源利用率.

Werner 等提出基于虚拟拓扑的路由算法^[2], 将卫星网络映射为多个时间片内静态拓扑. Karapantazis 等设计了一种动态路由 LAOR 算法^[3], 将地面 AODV 路由算法应用到 LEO 卫星网络中. Ekici 等人提出基于虚拟节点的路由算法^[4], 对地球表面进行区域划分并设定逻辑地址, 根据当前逻辑地址计算路由. 上述方法均属

于预先计算的路由策略, 无法动态适应网络负载和拥塞. Song 等人提出了一种基于红绿灯信号机制的智能多径路由策略 TLR^[5], 计算出节点间的多条路由路径, 根据邻居节点的信号灯消息局部调整, 尽量绕开拥塞节点和星间链路, 实现动静结合的多径路由和网络负载均衡. 但该策略仅适用于少数星间链路的有限拥塞场景, 无法适应卫星网络规模的增长.

经济学中的博弈理论可以应用到网络带宽、功率等资源分配上. Baig 等人用博弈论指导设计移动自组网的路由协议^[6], 实现自私节点的激励机制以获得更高收益; Jiang 等人将斯塔克尔伯格博弈引入到 GEO 和 LEO 卫星组成的混合多层卫星网络^[7], 实现数据分组中继转发和网络流量负载均衡.

收稿日期: 2019-07-17; 修回日期: 2020-05-10; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61802186, No. 61472189); 上海航天科技创新基金 (No. SAST2019-033); 中国航天科技创新基金 (No. F2016020013)

本文提出一种基于不完全信息的联盟博弈最优收益路由算法 CGR (Collaborative Gaming-strategy based Routing). 不完全信息是指单个卫星节点缺少全局网络状态信息, 仅依据局域信息决策路由转发. 这里将一条路由路径上的多个 LEO 节点看作一个博弈联盟, 根据节点实时状态信息和路径网络性能指标定义联盟收益. 单个节点倾向于有利联盟, 确保数据报文当前最佳路由路径. CGR 解决了 LEO 卫星网络中流量分布不均和网络拥塞等问题, 有效提高卫星资源利用率和网络整体性能.

2 联盟博弈基础知识

联盟博弈又称合作博弈^[8], 是参与者通过合作来最大化收益的博弈类型, 强调理性、效率和公平. 联盟一旦达成, 参与者会作为整体争取最大收益.

定义 1 n 人博弈中, 参与者集合表示为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, N 任意子集 M 称为一个联盟.

定义 2 给定 n 人博弈, M 是一个联盟, $v(M)$ 指 M 和 $N - M = \{i | i \in N, i \notin M\}$ 的两人博弈中 M 的最大收益, 称为联盟 M 的特征函数. $v(i)$ 表示参与者 i 与他人博弈时的最大收益值.

用 (N, v) 表示参与者集合为 N , 特征函数为 v 的联盟博弈, v 是定义在 2^N 上的实值映射函数.

定理 1 设 v 是参与者集合 N 上的特征函数, 则有超可加性: 对于联盟 M_1 和 M_2 , 如果 $M_1 \cap M_2$ 为空, 则 $v(M_1 \cup M_2) \geq v(M_1) + v(M_2)$. 因此特征函数只有满足超可加性, 才有必要形成新联盟.

分配策略是一个 n 维向量集合, 即博弈的解.

定义 3 对于联盟博弈 (N, v) , 对每个参与者 $i \in N$, 给予实值参数 x_i , 形成 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 且满足式 (1) 和 (2), 则称 \mathbf{x} 为博弈的一个分配方案.

$$x_i \geq v(\{i\}), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = v(N) \quad (2)$$

式 (1) 是基于个体条件, 如果联盟收益小于独立收益, 那参与者 i 不可能加入联盟. 式 (2) 是基于集体条件, 参与人分配之和不能超过 $v(N)$, 也不可有余, 满足上述两式的联盟博弈具有稳定性.

对于实质博弈 (N, v) , 定义

$$\Delta \mathbf{u} = v(N) - \sum_{i=1}^n v(\{i\}) > 0 \quad (3)$$

存在无限个正向量 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, 满足 $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 + \dots + \mathbf{u}_n, x_i = v(\{i\}) + u_i, 1 \leq i \leq n$. 因此让每个参与者都能按照分配得到各自收益, 且均无异议, 即得到该联盟博弈的解.

3 LEO 卫星网络路由联盟博弈

合作博弈过程中, 参与者关注如何结成联盟来最大化收益也关注如何分配收益保证联盟稳定. 本节针对卫星网络星间路由构造了联盟博弈模型.

3.1 路由联盟博弈模型

LEO 卫星网络运行的规律性提供了天然的多径路由属性, 但又会导致路由选择问题. 本文在 LEO 卫星节点路由决策过程中引入联盟博弈, 如图 1 所示, 将一条从源卫星节点 s 到目的卫星节点 d 路由路径 $Path$ 上的多个 LEO 卫星中继节点作为一个联盟. 卫星轨道位置变化的可预测性提供了充分的多径路由. 同时, 随着卫星网络中报文业务的随机性增强, 网络状态分布趋于均匀, 路由信息扩散愈加充分, 都有利于路由联盟博弈判断最优路径.

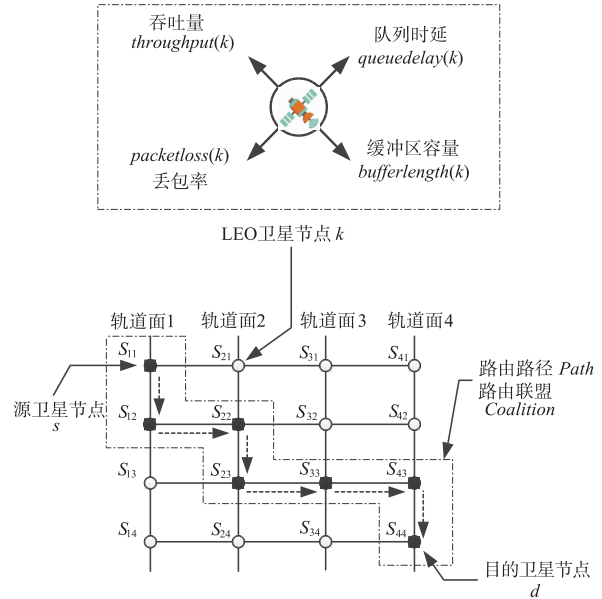


图1 LEO卫星网络路由联盟博弈模型

3.2 路由联盟收益函数和分配机制

在上述定义模型中, 联盟收益就是一条路由路径上的基于不完全信息的所有节点组成联盟后能获得的收益, 根据数据分组的路由性能以及网络整体性能参数来衡量, 系统追求联盟收益最大化从而达到提高数据分组的转发效率和质量的的目的^[9].

节点 k 的性能指标包括吞吐量 $tput(k)$ 、排队时延 $delay(k)$ 、网络丢包率 $ploss(k)$ 、缓冲区容量 $buflen(k)$. $P = \{s, k_1, k_2, \dots, d\}$ 表示从节点 s 到 d 的路由路径并称之为联盟, 相应定义了该路由联盟节点决定的路径路由性能参数为:

$$tput(P) = \min_{k \in P} \{tput(k)\} \quad (4)$$

$$delay(P) = \sum_{k \in P} delay(k) \quad (5)$$

$$ploss(P) = 1 - \prod_{k \in P} (1 - ploss(k)) \quad (6)$$

$$buflen(P) = \min_{k \in P} \{ buflen(k) \} \quad (7)$$

根据节点和路由路径性能,定义路由联盟收益函数 $f(P)$. 其中 T_{\min} 、 D_{\max} 、 B_{\min} 表示数据转发要求最小吞吐量、最大延时、最小缓冲区容量空间.

$$f(P) = \sum \mu_a \cdot \{ tput(P) - T_{\min}, D_{\max} - delay(P), 1 - ploss(P), buflen(P) - B_{\min} \} \quad (8)$$

其中, μ_a 是指标 a 的归一化权重因子, $a \in \{ tput, delay, ploss, buflen \}$, 可定制路由 QoS, 针对性满足数据流对网络性能的期望.

此外,联盟收益的分配关系到联盟的稳定. 本文采用夏普里公式作为 LEO 卫星网络路由联盟收益的分配方案,节点 k 加入联盟所获收益如下:

$$\eta_k(f) = \sum_{M \subseteq N \setminus \{k\}} \frac{|M|! (n-1-|M|)!}{n!} (f(M \cup \{k\}) - f(M)) \quad (9)$$

其中, $|M|$ 表示参与者个数, $\frac{|M|! (n-1-|M|)!}{n!}$ 表示

k 加入联盟 M 的概率. 在上述公式中,存在 k 加入前和后的两个联盟,显然,由 k 决定数据分组的下一跳转发节点,所有没有节点 k 参与的联盟 M 收益为 0,因此 k 在路由联盟 $M \cup \{k\}$ 的收益可简化为

$$\eta_k(f) = \sum_{M \subseteq N \setminus \{k\}} \frac{|M|! (n-1-|M|)!}{n!} (f(M \cup \{k\})) \quad (10)$$

随着参与者总数 n 的增加,联盟收益下降,节点 k 获得的收益也在减少. 理性节点为了最大化收益,会倾向参与者较少的联盟.

为了实现上述过程,本文提出的 CGR 算法包含两部分子算法,如图 2 所示,A、B、C 和 D 分别代表 LEO 卫星节点传输单元.

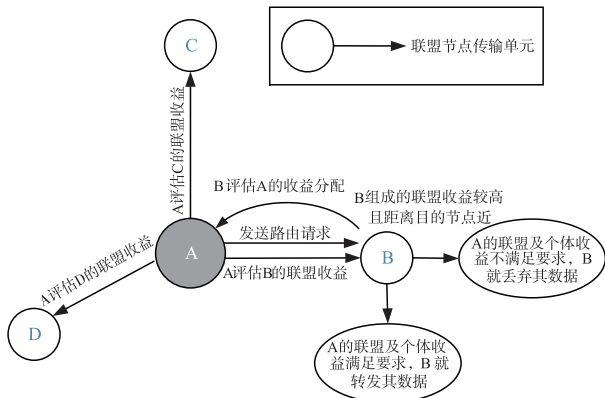


图2 联盟博弈最优收益算法示意图

其中,第一部分是 LEO 节点发送单元根据收益函数,评估与邻居卫星节点传输单元组成联盟收益值,并

结合其位置信息,确定最适合的下一跳合作单元转发数据包. 第二部分是接收单元根据收益分配机制来确定是否为上一跳转发数据包,从而保证稳定性. 整个过程良性激励,同时 LEO 节点预先感知网络状态及评估与邻居节点的联盟收益.

节点间采用数据捎带机制来收集动态的流量变化信息及星间链路的状态信息,这些信息封装到数据分组流量中转发扩散到网络中,不完全信息的卫星节点利用收集的节点、链路状态计算各个路由联盟的收益信息,根据最佳收益的路由联盟路径进行数据分组的协作转发^[10].

4 实验与评估

为了验证本文提出的 CGR 算法的有效性和可靠性,采用卫星星座设计软件 STK 构建模型仿真. STK 计算输出各个卫星节点的轨道参数、连接状态和持续时间后,导入 NS2 网络仿真实验中,通过添加和改写部分卫星节点路由、链路检测和切换的仿真代码,从而建立 LEO 卫星网络仿真实验^[11].

4.1 实验星座设置

实验构建的类铱星共有 6 个轨道面各 11 颗 LEO 卫星. 轨道倾角 86.4° , 高度为 780km. 单卫星节点有 4 条星间链路,两条同轨星间链路,在网络运行期间稳定建立并长久保持;另外两条是相邻轨道上节点的跨轨星间链路. 每次实验仿真时间为 7200s,约为一个卫星网络运行周期,结果重复 100 次并取平均值. 在网络应用层建立 200 个数据流连接,发送符合 Pareto 分布特性. 具体参数如表 1.

表 1 LEO 卫星网络路由联盟博弈策略仿真参数设置

仿真参数	设置值
数据流数量	200
数据流类型	CBR (Constant Bit Rate) 数据流
单个数据流持续时间	15 ~ 25s 内的随机值
单个数据报大小	512 Bytes
源节点流量速率	1000, 2000, 3000, ..., 10000
星间链路带宽	25M
节点队列长度	50
收益函数因子	0.4, 0.3, 0.2, 0.1

4.2 实验结果分析

实验分别测试了 DSP、TLR 及本文 CGR 算法在不同网络负载情况下的分组投递率、平均端到端时延等典型网络性能指标,对比分析了实时节点负载差异度. 网络负载按数据分组发送速率分三种,轻度 ($< 4000/s$),重度

(>7000/s),二者之间为中度。

三种算法的分组投递率如图3。负载较轻时性能相当,CGR算法的最优收益联盟路由、TLR的第一路由路径均为DSP确定的路由路径。当负载加重时,数据分组投递率均开始下降,这时卫星节点的输入、输出缓冲区逐渐填满,多余的数据分组因无处容纳或等待时间过长而被丢弃。DSP单纯把跳数作为路由依据,而忽略星间链路实时状态信息;TLR仅考虑邻居节点状态,动态调整局部路由来避开某些拥塞节点,分组投递率稍好;而CGR实时维护多个路由联盟,计算联盟博弈收益综合评价路由路径质量,分组转发率和分组投递率相对最佳。

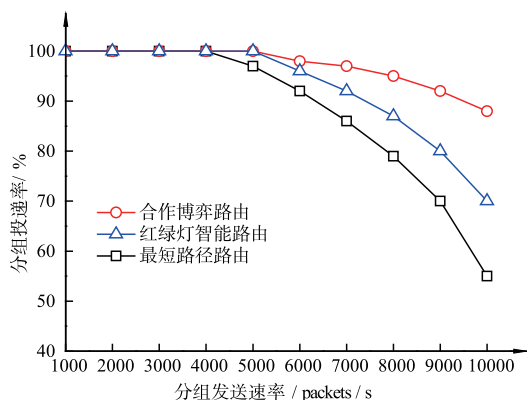


图3 不同网络负载下的分组投递率

图4为三种路由算法的平均端到端时延,即数据在星间链路上的传输时延和途经各节点队列时延的总和。DSP只考虑数据分组的传播延时而不考虑其队列处理延时;TLR算法辅以邻居节点的实时队列占用率动态选择,能够通过降低某些数据流的队列处理时延达到有限降低整体端到端时延的目标;而CGR综合考虑了路由联盟中各LEO卫星节点和星间链路的实时状态信息,同时考虑节点自身实时的吞吐量、队列延时等指标及星间链路生存时间。在重度网络负载下,

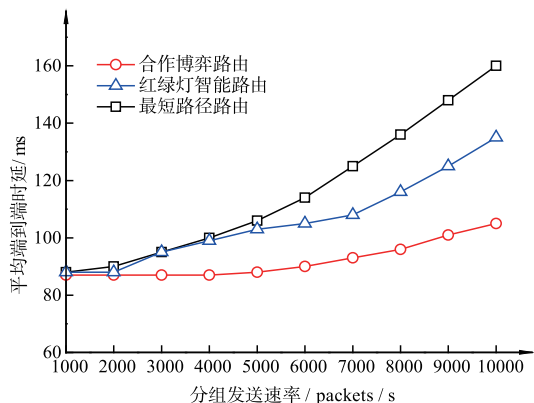


图4 不同网络负载下的端到端时延

CGR节点通过对比联盟博弈收益选择最佳路径进行数据分组流量的负载均衡,降低了因节点队列阻塞造成的时延增加。

图5所示为三种路由算法的平均路由跳数。由于全网由6个轨道面各11颗卫星构成,理论上最短路径最多经3次跨轨转发和6次轨内星间转发就可以从源节点到达目的节点,平均7跳。但由于仿真生成的数据流符合Pareto分布,影响跳数波动随机性。图5中的最短路径路由DSP的平均跳数在7~10之间。无拥塞时,随着负载增加,最短路径的利用率也相应提高,全网平均路径长度更加接近并基本处于最优情况(速率在3000附近时)。当负载持续加重时,DSP路由路径不再性能最优。各路由路径性能均显著降低,TLR算法需要在大部分中继节点甚至是逐跳动态调整局部路由路径;CGR算法能在多个路由联盟中选择当前最佳路由路径,尽可能绕过可能的热门节点和拥塞链路。实验显示,网络处中度负载时,CGR算法与DSP相比,以平均增加3跳将网络的平均分组投递率提高了6.7%,分组传输延迟降低了21.2%;在重度网络负载情况下,通过平均增加5跳,但将平均分组投递率提高23.7%,分组传输延迟降低31.8%,效果显著。

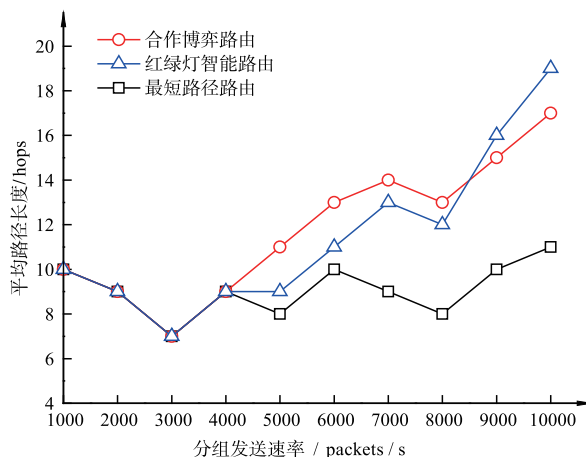


图5 不同网络负载下的路由跳数

图6为三种算法中卫星节点随仿真时间变化的负载标准差值。其计算方式为:首先统计在该时间点每颗卫星所承载的网络流量,然后对网络中所有卫星的流量负载情况计算标准差,度量负载的星间差异和波动性。DSP算法极易造成热门节点和链路拥塞,其负载差异偏大且变化剧烈。TLR算法通过中继节点动态调整局部路由路径,在局部对网络流量进行了一定程度的负载均衡。而本文的CGR算法从全局的角度对整网流量进行了负载均衡,其流量负载分布更加均衡于整个卫星网络,节点负载差异最小且变化最平缓,极少剧烈波动。

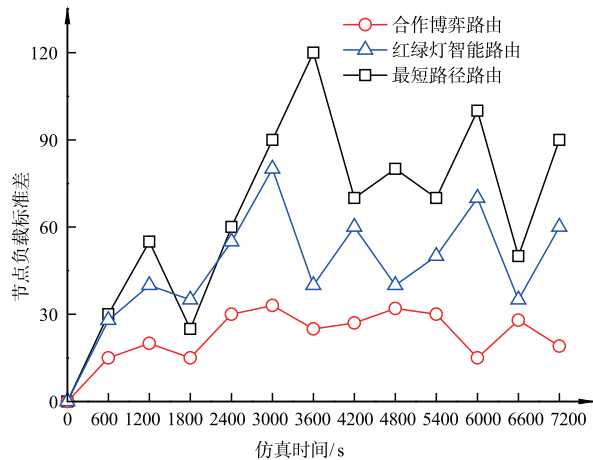


图6 重度网络负载下的流量分布情况

5 结束语

本文提出的 CGR 算法以联盟博弈收益理论为依据,对星间路由过程进行建模分析,从全局的角度优化解决了 LEO 卫星网络流量负载不均衡问题.路由联盟策略优势表现在:(1)方案性能指标完全基于 LEO 网络星间链路的服务质量;(2)路由算法是自适应性和启发式的,能够有效应对流量分布的不确定性;(3)采用数据捎带机制收集动态网络信息,开销不大;(4)每个 LEO 卫星节点在数据报中添加辅助信息预先感知网络状态,计算及时准确.

参考文献

- [1] Sheng M, Wang Y, Li J, et al. Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network; resource management architecture and strategies [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 127 - 133.
- [2] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8): 1636 - 1648.

作者简介



魏松杰 男,1977 年 12 月生,天津人.现为南京理工大学计算机科学与工程学院副教授,研究方向为网络协议、网络安全、区块链技术.
E-mail: swei@njust.edu.cn

刘沛龙 男,1989 年 7 月生,天津人.现为北京信息科学与技术国家研究中心博士后,主要研究方向为卫星星座组网、星间路由协议.

- [3] Karapantazis S, Papapetrou E, Pavlidou F. On-demand routing in LEO satellite systems [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications [C]. Glasgow, UK: IEEE, 2007. 26 - 31.
- [4] Ekici E, Akyildiz I, Bender M. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137 - 147.
- [5] Song G, Chao M, Yang B, et al. TLR: a traffic-light-based intelligent routing strategy for N GEO satellite IP networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3380 - 3393.
- [6] Baig O, Ai-Harathi Y, Al-Tubaishi E. Game-theoretic algorithm stimulating cooperation in multi-hop wireless networks [A]. Proceedings of International Conference on Game Theory for Networks [C]. Beijing, China: IEEE, 2014. 1 - 5.
- [7] Jiang L, Cui G, Liu S, et al. Cooperative relay assisted load balancing scheme based on stackelberg game for hybrid GEO-LEO satellite network [A]. Proceedings of International Conference on Wireless Communications & Signal Processing [C]. Nanjing, China: IEEE, 2015. 1 - 5.
- [8] Fele F, Maestre J, Camacho E. Coalitional control; cooperative game theory and control [J]. IEEE Control Systems, 2017, 37(1): 53 - 69.
- [9] Qu Z, Zhang G, Cao H, et al. LEO satellite constellation for Internet of things [J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 18391 - 18401.
- [10] Cheng H, Liu M, Wei S, et al. A distributed algorithm for self-adaptive routing in LEO satellite network [A]. Proceedings of International Conference on Space Information Network [C]. Kunming, China: Springer, 2016. 274 - 286.
- [11] Fan J, Hu X, Ding D, et al. A generic satellite simulation framework design and implementation [A]. Proceedings of Industrial Electronics and Applications [C]. Hefei, China: IEEE, 2016. 2571 - 2574.



王佳贺 男,1994 年 12 月生,黑龙江五常人.现为南京理工大学计算机科学与工程学院硕士研究生,研究方向为分布式系统、网络安全. E-mail: jhwang@njust.edu.cn

程浩 男,1993 年 11 月生,江西于都人.现为南京理工大学计算机科学与工程学院硕士研究生,主要研究方向为 LEO 卫星网络、路由协议.