



DTN 辅助的 低轨卫星网络路由技术

DTN-Assisted Low Orbit Satellite Network Routing Technology

张培颖 /ZHANG Peiyong¹, 王超 /WANG Chao², 吴胜 /WU Sheng¹

(1. 中国石油大学(华东), 中国 青岛 266580;

2. 北京邮电大学, 中国 北京 100876)

(1. China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

摘要: 对具有代表性的延迟/中断容忍网络(DTN)的路由算法以及低轨(LEO)卫星网络路由算法进行了全面的回顾,并总结现有算法主要的技术特点及局限性。为应对LEO卫星网络通信中的长时延、星地链路频繁中断和卫星存储能力受限等情况,提出一种基于DTN的LEO卫星网络路由技术。该技术能够充分利用LEO卫星的管理能力,在出现通信链路中断、链路时延过高等状况时,动态调整路由策略。这使LEO卫星网络一定的自主性、拥塞控制与抗毁能力,从而保证数据信息的正常通信。

关键词: 延迟/中断容忍网络;低轨卫星网络;自主路由技术;拥塞控制;抗毁能力

Abstract: The routing algorithms of Delay/Disruption Tolerant Network (DTN) and Low Earth Orbit (LEO) satellite network are reviewed, and the main technical characteristics and their limitations of existing algorithms are analyzed. To cope with the long latency of the LEO satellite network communication, frequent interruption of satellite ground link, and limited satellite storage capacity, a routing technology based on DTN for the LEO satellite network is proposed. This technology makes full use of the management ability of LEO satellite to dynamically adjust the routing strategy in case of communication link interruption and high link delay, which gives LEO satellite network certain autonomy, congestion control, and destruction resistance, so as to ensure the normal communication of data information.

Keywords: Delay/Disruption Tolerant Network; Low Earth Orbit satellite network; autonomous routing technology; congestion control; destruction resistance

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105006

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20211007.1807.002.html>

网络出版日期: 2021-10-09

收稿日期: 2021-08-21

卫星网络通信是地面通信的重要补充和延伸,它可以为地面用户提供更加广阔的信号覆盖范围,而且不易遭受自然灾害影响,具有较高的灵活性和可靠性。与中轨(MEO)/高轨(GEO)卫星网络相比,低轨(LEO)卫星网络还具有通信延迟低、路径损

耗小,以及真正意义上的全球覆盖等优势,因而,LEO卫星通信网络体系的建设具有重大价值。目前,世界各国越来越重视空间资源的开发与利用,LEO卫星通信系统有望成为新的竞争目标。

延迟/中断容忍网络(DTN)是一种面向消息的覆盖层网络体系结构。通过在传输层之上集成一个Bundle层,DTN协议实现了应用层和Bundle层单元的存储和运输。空间网络通信

缺少端到端连接,因此链路延迟大、链路频繁通断并且误码率高。DTN具有适应长延迟以及中断频繁的链路特性。DTN中输入流量与输出流量的速率往往存在巨大差异,双向速率比可达1000:1。另外,因为DTN经常部署在恶劣环境下,所以信息不能有效传达到目的地,这导致接收端的信噪比和误码率等性能均不理想。常见的光通信网络中误码率可达 10^{-15} ~ 10^{-12} ,深空通信系统中仅能达到 10^{-1} ,所以深空通信

基金项目: 中石油重大科技项目(ZD2019-183-006)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MF006)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(20CX05017A)

是 DTN 的一个主要应用场景。DTN 采用“存储-携带-转发”的通信方式，当源节点与目的节点之间没有直接相连的链路时，消息会被封装成束并暂存在源节点；当源节点与相邻节点之间建立链路时，消息会被传输给相邻节点，相邻节点又会择机将消息传输给下一跳节点，直至最终把消息传递给目的节点。由此可见，DTN 适用于难以形成稳定端到端链路以及高延迟的通信环境中，能够有效适应空间网络的特点。

1 路由算法简介

路由是空间网络与 DTN 必备的基础功能，高效的路由算法可以提升数据的交付效率，减少能量损耗与成本，并降低通信延迟。本节介绍了 DTN 与 LEO 卫星网络的代表性路由算法，并总结了它们主要的技术特点。

1.1 DTN 路由算法

依据算法特性，我们可以将 DTN 路由算法分为基于转发、复制、效用、编码和社会关系的路由算法五大类，表 1 概括了每一类算法的主要特征与优缺点。

下面我们举例说明不同特征 DTN 路由算法的典型代表。需要注意的是，一种 DTN 路由算法可能兼具多种特征。

(1) 基于转发的 DTN 路由算法

基于转发的 DTN 路由也称为单副本转发路由，即消息在传输过程中只复制产生一个副本。基于转发的 DTN 路由算法仅占用少量网络资源，网络拥塞风险低，但唯一副本一旦丢失，消息传输任务就会失败。

首次接触算法^[1]和直接交付算法^[2]是最基本的基于转发的 DTN 路由算法。前者是指携带消息的节点将消息转发给首次相遇的节点；后者是指不经过任何中转节点的转发，源节点直接将

消息发送给目的节点。两种算法不依赖于任何知识，逻辑过程简单，但是局限性很大。

接触图路由算法^[3]是由上述两种算法衍生的 DTN 路由算法。在空间 DTN，特别是 LEO 卫星网络中，卫星运动轨迹往往是可以预测的。根据这一特性，算法可以将卫星接触信息转化为路由图，之后依据性能需求选择转发路径。

(2) 基于复制的 DTN 路由算法

基于复制的 DTN 路由也称为多副本路由，即一条消息经过多次复制分别储存在多个节点中，通过增加节点接触次数的方式来提升成功投递概率。这样一来，即使某些副本丢失，也可以确保消息被传输到目的节点。但是复制过多的副本会消耗大量的网络资源，容易造成网络拥塞；少量副本的复制未给算法性能带来明显提升。

Epidemic 算法^[4]是典型的基于复制的 DTN 路由算法，它采用泛洪机制将消息发送到未持有该消息的每一个节点上。该算法本质上是一种以大量网络资源消耗为代价来换取更高投递率的路由算法。喷射与等待 (SaW) 算法^[5]是由 Epidemic 算法和直接交付算法结合而成的，有效解决了 Epidemic 算法副本数量不受限制的问题。该算法预先定义一个最大副本数 max_cop ，消息经过一次复制后 max_cop-1 ，直至 $max_cop=1$ 时停止复制。

(3) 基于效用的 DTN 路由算法

效用函数是实现基于效用的 DTN

路由算法的关键，它是指将用户关注的某些网络参数量化为效用函数，通过函数计算得到最优的中转节点。效用函数的参数权重在很大程度上影响着算法性能，常用参数包括节点历史相遇次数、节点运动轨迹以及网络资源等。

概率路由协议 (PRoPHET) 算法^[6]和基于能量感知的概率路由协议 (EA-PEoPHET) 算法^[7]是两种基础的基于效用的 DTN 路由算法：前者在 Epidemic 算法的基础上引入了预测投递概率，仅将消息发送给预测概率较高的下一跳节点；后者将节点剩余能量作为效用函数，仅选择能量充足的节点作为下一跳节点。

(4) 基于编码的 DTN 路由算法

基于编码的 DTN 路由算法可以降低信息传输的误码率以及链路中断概率。基于擦除编码的协作鲁棒转发 (CORE) 算法^[8]和 CCFM 算法^[9]都是根据节点历史相遇次数、平均相遇时间间隔和节点剩余资源量等参数计算消息发送的下一跳节点。区别在于前者将消息编码成了若干小码块，后者直接对节点进行编码。二者有效提高了消息的传输效率。

(5) 基于社会关系的 DTN 路由算法

基于社会关系的 DTN 路由算法可以看作基于效用的 DTN 路由算法的改进版本。我们将基于社会关系的 DTN 路由算法与人类社会网络进行类比：将节点看作人，节点之间的联系如同人与人之间的联系，并通过社会学知识进行

▼表 1 DTN 路由算法分类总结

算法	特征	优点	缺点
基于转发的 DTN 路由算法	消息只有一个副本	节约资源与能耗	消息丢失风险高
基于复制的 DTN 路由算法	消息有多个副本	可靠性、接收率高	耗费大量资源，信道易拥塞
基于效用的 DTN 路由算法	基于效用函数实现消息路由	路由效率高	计算复杂度大
基于编码的 DTN 路由算法	对消息进行编码	降低误码率与链路中断概率	冗余编码造成额外能耗
基于社会关系的 DTN 路由算法	用社会关系类比节点关系	目的性强、路由效率高	适用范围有限

DTN: 延迟 / 中断容忍网络

路由选择。Bubble 算法^[10]依据节点相遇次数划分社区，先将消息发送到社区，之后再由社区发送给具体节点。在 Bubble 算法基础上，文献[11]使用效用函数对副本数量进行控制，有效降低了网络能耗。其他具有代表性的算法还有目前最优(TBSF)算法^[12]和改进的目前最优(TBSFMDI)算法^[13]。

1.2 LEO 卫星网络路由算法

LEO 卫星通信系统可以实现真正意义上的全球无缝覆盖。现有 LEO 卫星网络路由算法的设计主要考虑用户业务类型、服务需求以及网络的负载均衡能力。依据算法实施场景与特点，可将它们分为基于 AI 的 LEO 路由算法、LEO 卫星多径路由算法和多层卫星路由算法。表 2 总结了具有代表性的 LEO 卫星网络路由算法。

1.3 局限性

DTN 赋予了空间网络更加灵活的组网方式，这使得卫星网络在恶劣环境下依旧能够拥有强大的通信能力。不可忽视的是，DTN 依旧面临逐跳传输、能量有限和场景复杂等挑战。上述 DTN 路由算法并没有真正应用到 LEO 卫星通信网络环境中。另外，现有的 LEO 卫星网络还面临星上资源受限、计算复杂度高和数据包失序等挑战。

2 基于 DTN 的 LEO 卫星网络路由技术

我们提出一种基于 DTN 的 LEO 卫星网络路由技术，该技术充分利用 LEO 卫星的管理能力，以应对空间通信中链路频繁中断、延迟高等问题，动态调整复杂断环境下的路由策略，确保消息在非正常情况下正常传输。

2.1 时间片划分

拓扑结构变化是卫星网络的常见

▼表 2 LEO 卫星网络路由算法

分类	算法	特征	评价
基于 AI 的 LEO 路由算法	模糊卫星路由策略 ^[14]	用模糊逻辑算法判断卫星拥塞程度，依据用户需求选择路由	计算复杂度随着网络规模扩大而提高
	多 QoS 约束蚁群优化路由算法 ^[15]	将链路 QoS 作为选择下一跳节点的依据，利用排序算法获取最优路径	算法收敛速度快，避免陷入局部最优解
	多目标约束遗传算法 ^[16]	依据 LEO 网络特性对初始种群生成算法进行改进，使初始路径满足约束条件	实现多路径优化，提高搜索效率
LEO 卫星多径路由算法	多径 LEO 卫星网络路由拥塞控制策略 ^[17]	基于费用函数计算链路费用值，以最小化传输带宽开销为目标实现流量均衡	降低 LEO 网络中超负荷链路数，提升网络吞吐量
	目的节点泛洪全局局部路由算法 ^[18]	在全局范围内采用多目标节点泛洪算法，对收敛节点进行多径路由优化	降低丢包率与平均时延
	基于源和目的的多径协作路由算法 ^[19]	沿多条不相交的路径动态、协同地传递数据流的不同部分	提升带宽利用率并降低端到端时延
多层卫星路由算法	基于优先级和失效概率的路由算法 ^[20]	利用虚拟节点拓扑策略消除卫星移动性，考虑服务分类和链路失效概率	路由计算复杂，集中式路由计算难以扩展
	双层网络路由算法 ^[21]	利用 LEO 卫星及星间链路的拓扑结构计算路由，利用拥塞避免和分组分类机制对算法进行优化	降低端到端时延和丢包率
	自适应路由算法 ^[22]	基于 SDN 3 层卫星通信网络模型实现最短卫星通信链路的自适应路由	减少通信链路距离并降低时延

AI: 人工智能 LEO: 低轨 QoS: 服务质量 SDN: 软件定义网络

问题，通过划分时间片将 LEO 卫星网络划分为 n 个异构拓扑（默认在每一个时间片中卫星网络拓扑是相对固定的），依次计算不同时刻的路由路径，这样可以有效应对 LEO 卫星网络拓扑带来的变化。时间片划分方法有等长时间划分和非等长时间划分两种。等长时间划分是将时间划分为等长的多个时间片段，但在等长时间间隔内，卫星网络拓扑结构可能发生巨大变化，这会导致预设路由策略失效；因此，该方法缺乏灵活性。非等长时间划分虽能解决网络拓扑变化问题，但由于划分的时间片段过多又给路由制定带来了巨大计算量。因此，我们采取二者结合的方式对时间片进行划分。

假设 T_1 时刻 A 与 B 连通， T_2 时刻 A 与 B 断开。若在 $T_1 \sim T_2$ 时间段内，网络中只有此链路发生通断变化，那么依据非等长时间划分方式， $T_1 \sim T_2$ 就是一个时间片，由此可能形成如图 1 所示的时间片。

如图 1 所示，LEO 卫星链路通断可能会出现 $T_4 \sim T_5$ 较短的时间片段。在该时间片内，只有 1 条链路发生通断。虽然对网络拓扑影响不大，但带来的路由计算问题更让人担心。为此，将所划分的时间片长度与 T_d 比较，若时间片长度小于 T_d ，则将该时间片段与上一时间片段合并，并在上一时间片段内提前将此链路设置为断开，如图 2 所示。

2.2 路由过程

依据时间片划分原理，在不同时隙内，LEO 卫星网络的拓扑结构不同；而在同一时隙内，我们可认为 LEO 卫星网络的拓扑结构基本不变。因此，当 LEO 网络中各卫星轨道确定时，便可计算出一个周期内的时隙划分。时隙划分工作可由地面控制中心完成，划分后广播给各卫星进行存储。基于此方案，我们仅需在时隙更新时重新计算路由。基于 DTN 的 LEO 卫星网络路由过程如图 3 所示。

2.3 拥塞控制

由于分时隙计算网络路由，若在某时段内产生流量突发情况，则容易引起节点拥塞。为提高路由效率，我们有必要设计拥塞控制机制。

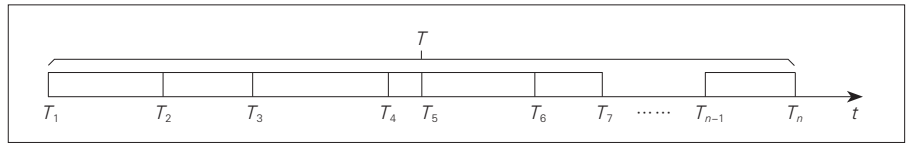
LEO 卫星主要负责地面网关接入以及大部分数据传输业务，因此当某一卫星节点拥塞，那么多因该地区业务量大或流量突发。不同轨道卫星的覆盖区域不同，人们可依据该特性来增加业务量大的区域的卫星数目，以共同完成路由任务，避免网络拥塞。对于流量突发情况，可利用卫星节点自身内存数与最大缓存数的比值实现监控，计算方式如公式（1）：

$$\beta_{men} = m_n / m_{max}, \quad (1)$$

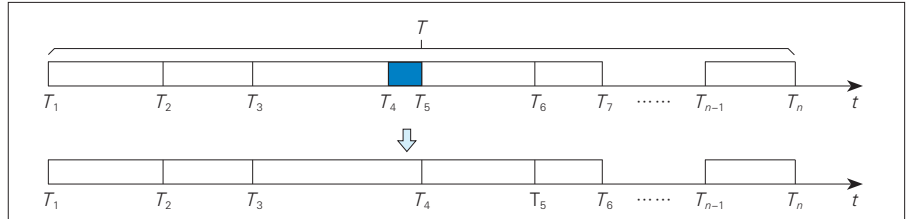
其中， m_n 代表节点当前可用内存资源， m_{max} 代表节点最大内存容量。假设节点拥塞判定的阈值为 85%，当 β_{men} 大于 0.85 时，就认为当前节点出现拥塞。本节点发送拥塞报告至分组内管理者，管理者在自身存储网络拓扑中将该拥塞卫星设为不可达，重新计算路由并下发至组内其他 LEO 卫星，直至节点发送拥塞解除报告，再置其为可到达，并更新组内路由。

2.4 性能评估

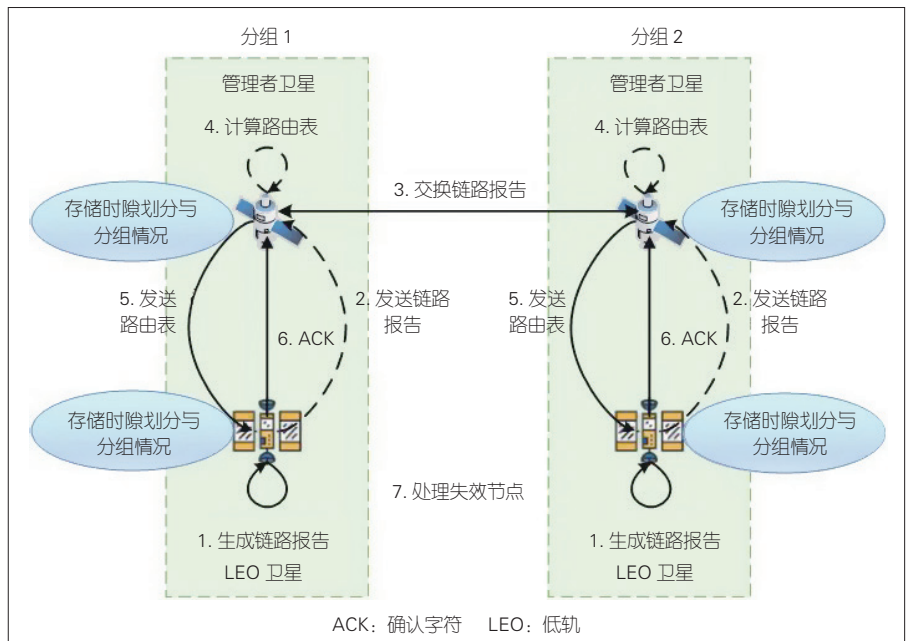
为验证所提方案性能，我们将其与一种多层卫星路由（MLSR）算法^[23]在时延方面进行对比。MLSR 算法是基于互联网协议（IP）设计的，可以为每个卫星分配独特的逻辑地址。不同于本文所提方案，MLSR 算法适用于由 GEO、MEO、LEO 组成的 3 层卫星网络。该算法将高层卫星作为管理者，将底层卫星进行分组，实现分层的网络拓扑信息收集。当组内卫星发生变化时，该算法可以动态更新路由表。由于该算法采用了集中式路由策略，当有新的卫星加入网络或者有卫



▲ 图1 低轨卫星链路通断时间片划分



▲ 图2 短时间片的合并

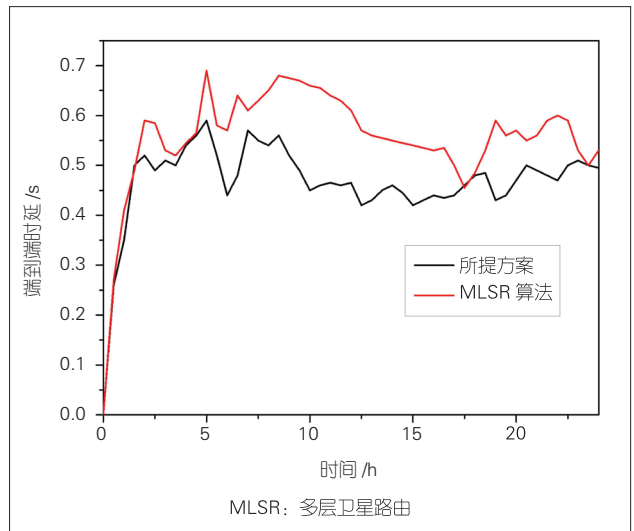


▲ 图3 LEO 卫星网络路由过程

星离开网络时，路由表无法及时更新，因此缺乏自治能力。当卫星网络中有流量突发情况发生时，算法性能急剧下降。

利用 STK 组建卫星网络模型，在 OPNET 中进行仿真实验，我们得到了所提方案与 MLSR 算法在时延性能方面的比较结果，如图 4 所示。

由于数据包发送



▲ 图4 平均时延对比

时间间隔较短, MLSR 算法在组内卫星发生变化时需要重新更新路由, 而且当其他组内的消息在经过本组卫星节点时, 由于更新后的路由还未在整个卫星网络更新, 所以消息在发送到该组内时会导致跳数增加。因此, MLSR 算法的平均时延较高而且抖动较大。相反, 由于本文所提方案重点考虑了 LEO 分组变化时隙, 且分组信息发生变化时可以及时在整个卫星网络更新, 所以获得了相对较低的时延。

3 结束语

本文首先介绍 LEO 卫星网络与 DTN 的基本概念与特征, 之后系统总结了 LEO 卫星网络与 DTN 代表性的路由算法, 并指出它们的典型特征, 最后提出一种 DTN 辅助的 LEO 卫星网络自主路由技术, 并描述了该技术的路由策略与拥塞控制过程。

随着天地一体化网络建设与 5G 甚至是 6G 通信服务的部署, LEO 卫星网络路由技术必将拥有广阔的应用空间与发展前景。人们需要根据差异化场景与用户差异化服务质量 (QoS) 需求设计来实现不同的 LEO 卫星网络路由算法。另外, 人们需要拓展卫星网络路由技术的应用范围与环境, 包括在 LEO、MEO 和 GEO 网络中的应用, 研究多层卫星结合的路由技术, 同时采用多个指标来测评路由技术效果。

参考文献

- [1] FALL K, HONG W. Custody transfer for reliable delivery in delay [J]. IRB, 2003, 26(1): 87-92
- [2] SHAH R C, ROY S, JAIN S, et al. Data MULEs: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks [J]. Ad hoc networks, 2003, 1(2/3): 215-233. DOI: 10.1016/S1570-8705(03)00003-9
- [3] ARANITI G, BEZIRGIANNIDIS N, BIRrane E, et al. Contact graph routing in DTN space networks: overview, enhancements and performance [J]. IEEE communications magazine, 2015, 53(3): 38-46. DOI:10.1109/MCOM.2015.7060480
- [4] JAIN S, FALL K, PATRA R. Routing in a delay

- tolerant network [C]//Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications - SIGCOMM, 04. New York, USA: ACM Press, 2004: 145-157. DOI:10.1145/1015467.1015484
- [5] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case [J]. IEEE/ACM transactions on networking, 2008, 16(1): 63-76. DOI:10.1109/TNET.2007.897962
- [6] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review, 2003, 7(3): 19-20. DOI:10.1145/961268.961272
- [7] BISTA B B, RAWAT D B. EA-PRoPHET: An energy aware PRoPHET-based routing protocol for delay tolerant networks [C]//2017 IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Taipei, China: IEEE, 2017: 670-677. DOI:10.1109/AINA.2017.75
- [8] LIAO Y, ZHANG Z S, RYU B, et al. Cooperative robust forwarding scheme in DTNs using erasure coding [C]//MILCOM 2007-IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1-7. DOI:10.1109/MILCOM.2007.4454738
- [9] 王汝言, 王燕燕, 刘乔寿, 等. 带有节点编码能力感知的 DTN 数据转发机制 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2295-2302. DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2014.11.29
- [10] HUI P, CROWCROFT J, YONEKI E. BUBBLE rap: social-based forwarding in delay-tolerant networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2011, 10(11): 1576-1589. DOI:10.1109/TMC.2010.246
- [11] 刘玉梅, 任清源. 社会机会网络中基于节点相遇历史信息的路由算法 [J]. 应用科技, 2016, 43:70-74
- [12] WEI K M, ZENG D Z, GUO S, et al. Social-aware relay node selection in delay tolerant networks [C]//2013 22nd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). Nassau, Bahamas: IEEE, 2013: 1-7. DOI:10.1109/ICCCN.2013.6614195
- [13] 周朝荣, 徐小琼, 杨柳, 等. 基于小世界与能效的容迟网络路由算法 [J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(1): 129-134. DOI:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.01.022
- [14] JIANG Z Q, LIU C H, HE S B, et al. A QoS routing strategy using fuzzy logic for N GEO satellite IP networks [J]. Wireless networks, 2018, 24(1): 295-307. DOI:10.1007/s11276-016-1326-8
- [15] 魏德宾, 刘健, 潘成胜, 等. 卫星网络中基于多 QoS 约束的蚁群优化路由算法 [J]. 计算机工程, 2019, 45(7): 114-120. DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0051284
- [16] 周睿, 何利文, 唐澄澄, 等. 基于多目标约束遗传算法的 SDN 路径增强算法 [J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(7): 17-22. DOI:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.07.004
- [17] 焦媛媛, 田丰, 石神, 等. 基于多径的低轨卫星网络路由拥塞控制策略 [J]. 电子设计工程, 2018, 26(18): 113-117, 122. DOI:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2018.18.024
- [18] WANG Y, ZHANG X, ZHANG T. A flooding-based routing algorithm for ads-b packets transmission in LEO satellite n D, QI S. An adaptive routing algorithm for integrated information networks [J]. China communications, 2019, 16(7): 195-206. DOI:10.23919/JCC.2019.07.015
- [19] TANG F L, ZHANG H T, YANG L T. Multipath cooperative routing with efficient acknowledgement for LEO satellite networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2019, 18(1): 179-192. DOI:10.1109/TMC.2018.2831679
- [20] ZHU Y, RUI L L, QIU X S, et al. Double-layer satellite communication network routing algorithm based on priority and failure probability [C]//2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier, Morocco: IEEE, 2019: 1518-1523. DOI:10.1109/IWCMC.2019.8766688
- [21] 马久龙, 齐小刚, 陈春绮. 基于拥塞避免的卫星网络路由算法 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2019, 57(2): 357-362. DOI:10.13413/j.cnki.jdxblxb.2018002
- [22] WANG F, JIANG D, QI S. An adaptive routing algorithm for integrated information networks [J]. China communications, 2019, 16(7): 195-206
- [23] 余哲斌, 朱晓薇, 吴兆峰, 等. 多层卫星网络路由协议研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2011(12): 37-40

作者简介



张培颖, 中国石油大学 (华东) 副教授; 主要研究领域为虚拟网络映射、网络人工智能及空地一体化网络; 先后主持或参加 10 余项科研项目, 获得 3 项科研奖励; 已发表论文 50 余篇。



王超, 中国石油大学 (华东) 在读硕士研究生; 主要研究领域为虚拟网络映射、深度强化学习及网络人工智能; 先后参加多项科研项目; 已发表论文 10 篇。



吴胜, 北京邮电大学副教授; 主要研究领域为卫星通信、航天侦察和阵列信号处理; 主持/参与国家高技术研究发展计划 ("863" 计划) 项目、国家重点基础研究发展计划 ("973" 计划) 项目、国家自然科学基金项目、国防预研项目和国防横向项目等项目 20 余项; 发表论文 60 余篇, 获授权国家/国防专利 30 余项。