

基于链路状态感知的卫星网络多路路由优化策略

张 乐, 李雨昂, 阔永红, 周雨晨, 杨 龙

(西安电子科技大学通信工程学院, 西安, 710071)

摘要 针对低轨卫星网络传输带宽不足以支撑大数据转发、链路需要周期性断开的问题, 设计了基于链路状态感知的卫星网络多路路由优化策略, 对低轨卫星的动态拓扑结构以及星间链路状态进行了建模, 构建了多路径选择的优化问题。为提高优化问题的求解效率, 设计了基于状态监控与路径预测的多路径选择算法, 算法使用时间片分割拓扑以规避拓扑的动态性, 通过监测状态对星间链路进行筛选来降低复杂度, 并根据星历信息对链路通断进行预测, 避免链路中断造成的大规模丢包, 在计算阶段综合考虑传输时延、传输带宽以及传输成功率等实时链路状态, 根据负载变化选出最优的多条路径, 增大卫星网络的吞吐量, 降低传输时延。仿真结果表明, 相较于传统的接触图路由算法(CGR)、基于最短路径优先算法(SPF)和等价多路径算法(ECMP), 当负载为8 Gbps时, 所提方案的传输时延比其他3种算法分别低16.9%、11.4%和7.1%, 网络吞吐量比其他3种算法分别高34.4%、26.9%和15.6%, 传输成功率分别比其他3种算法分别高15.3%、9.6%和5.6%。

关键词 卫星网络; 动态拓扑; 链路状态感知; 传输时延; 多路路由; 传输带宽

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.04.007

中图分类号 TN927⁺.2 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)04-0058-10

An Optimization Strategy for Multi-Path Routing in Satellite Network Based on Link State Awareness

ZHANG Le, LI Yuang, KUO Yonghong, ZHOU Yuchen, YANG Long

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Aimed at the problems that the transmission bandwidth in low earth orbit (LEO) satellite networks is difficult to support the forwarding of large data volumes and make the links periodically disconnecting and reconnecting according to the needs, a satellite network multi-path routing optimization strategy is designed based on link state awareness. The dynamic topology of LEO satellites and the state of inter-satellite links are modeled, and an optimization of multi-path selection is constructed. In order to enhance the efficiency of solving the optimization problem, a multi-path selection algorithm is devised based on state monitoring and path prediction. The algorithm is to utilize time slot partitioning of the topology for mitigating its dynamism and reducing complexity by screening inter-satellite links based on monitored states, and predicting link availability based on ephemeris data to avoid massive packet loss caused by link

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62371354); 陕西省青年科技新星项目(2024ZC-KJXX-080); 陕西省重点产业创新链(群)项目(2023-ZDLGY-50)

作者简介: 张 乐(2000—), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 研究方向为无线通信。E-mail: zhangle15075156069@163.com

引用格式: 张乐, 李雨昂, 阔永红, 等. 基于链路状态感知的卫星网络多路路由优化策略[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(4): 58-67. ZHANG Le, LI Yuang, KUO Yonghong, et al. An Optimization Strategy for Multi-Path Routing in Satellite Network Based on Link State Awareness[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(4): 58-67.

interruptions. On the computation phase, in comprehensive consideration of real-time link states such as transmission delay, transmission bandwidth, and transmission success rate, the optimal multiple paths are selected according to the load variations to increase the throughput of satellite networks and reduce transmission delay. The simulation results demonstrate that compared to the traditional routing algorithms such as contact graph routing (CGR), shortest path first (SPF), and equal-cost multi-path (ECMP), when the load is 8 Gbps, the proposed scheme in the aspects of transmission delays, is 16.9%, 11.4%, and 7.1% lower than the three algorithms respectively, and in terms of network throughput, is 34.4%, 26.9%, and 15.6% higher than the three algorithms respectively. The transmission success rate is 15.3%, 9.6%, and 5.6% higher than that of the three algorithms, respectively.

Key words satellite network; dynamic topology; link state awareness; transmission delay; multi-path routing; transmission bandwidth

随着 5G 技术的大规模部署和使用,对 6G 技术的相关研究成为热点。低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星网络因其部署灵活、覆盖范围广等特性被认为是未来 6G 时代很有应用前景的技术之一^[1-3],这同时为航空机载卫星通信带来了全新的发展机会^[4]。传统的机载卫星通信大多基于地球同步卫星(geosynchronous earth orbit, GEO)实现,然而其运行轨道过高,会导致传输时延过高、传输损耗过大且部署成本也较高。相较于传统的机载通信方案,LEO 卫星通信可以通过星座组网实现全球覆盖,同时,机载低轨卫星通信能够有效降低传输时延,提升信息传输性能,在发生战争和自然灾害时同样具有部署灵活、反应迅速的优点^[4-6],在军用和民用领域发展潜力巨大^[5-6]。

LEO 卫星网络同样存在诸多挑战^[7-9]:①卫星位置相对于地球高速运动导致其网络拓扑持续变化;②卫星之间相距较远导致星间链路丢包率过高;③LEO 卫星自身体积受限导致星上计算资源不足。上述挑战致使卫星网络的传输带宽不足且传输链路不够稳定可靠。地面网络广泛采用的是以 MPTCP (multipath TCP)^[10]为基础的多路路由策略,MPTCP 针对拓扑静态网络设计,无法解决高动态网络下机载平台频繁接入和切换的问题,不适用于 LEO 卫星网络。因此,研究适应动态变化的 LEO 卫星拓扑,根据星间链路状态自适应调控卫星网络路由,对保证 LEO 卫星网络稳定高速传输的性能至关重要。

现有的卫星网络路由算法已经在基于节点状态选择路径、基于多层架构缓解资源压力以及基于多路径增加传输带宽等方面取得诸多成果。

最初基于节点状态选择路径的研究大多基于拓扑预测策略开展^[11-12],即仅根据星历信息计算网络拓扑,通过 Dijkstra 算法计算传输路径。该方法在计算过程中未考虑卫星节点的可用带宽等状态,可

能会导致传输路径不可用。文献[13]研究了交通灯智能路由策略(traffic light based intelligent routing strategy, TLR),卫星节点通过使用一组指标红绿灯以及相邻节点的拥塞状态,根据红绿灯颜色适时调整路线。但 TLR 算法仅能根据相邻节点拥塞状态选择路径,无法考虑卫星网络的全局状态,导致局部最优解。文献[14]通过对卫星节点的状态进行广播来感知拓扑的连通性和星间链路的质量。然而该算法只有当路径中断时才会计算新路径,无法提前感知。同时,每一个卫星节点都需要接受其他所有节点的广播报文才能构建出整个网络的状态,这使得当节点状态变化导致传输路径中断时,新路径的收敛复杂度极高,进一步限制了 LEO 卫星节点的星上处理能力。

部分研究人员通过使用多层架构对 LEO 卫星节点进行集中式管理,基于多层架构缓解压力可以使 LEO 卫星专注于数据的收发,而不用关注路由表的计算。文献[15]研究了一种适用于 MEO/LEO 双层卫星结构的路由协议(hierarchical QoS routing protocol, HQR),该协议中 MEO 卫星与 LEO 卫星分别负责不同任务,LEO 卫星将自身状态信息上传给 MEO 卫星,MEO 卫星根据所记录的状态信息计算并下发路由表给 LEO 卫星。然而由于 MEO 卫星与 LEO 卫星之间存在快速的相对运动,导致 MEO 卫星在计算路由表时复杂度较大。文献[16]研究了自适应路由算法(adaptive routing algorithm, ARA),该算法针对 GEO/MEO/LEO 3 层卫星架构设计,3 层卫星同样分别负责不同的任务。ARA 算法可以根据卫星的状态信息自适应的优化传输链路,提升卫星网络的传输质量,但 3 层卫星结构使得部署成本过高且整体的结构也比较复杂。上述路由算法均采用单路径传输数据,无法应对低轨卫星网络带宽不足的挑战。

多路路由技术是提升 LEO 卫星网络传输带宽

的关键技术。通过将计算出的多路径路由表下发给卫星节点,源卫星在与目的卫星进行通信时通过多条通路传输数据,大大提高传输带宽。文献[17]研究了紧凑显式多路径路由(compact explicit multi-path routing, CEMR)算法,该算法首次提出了同时通过 k 条最短时延路径进行数据传输的思想,传播时延与等待时延相加求得路径的总时延,然而该算法基于历史存储数据计算路径时延,且未能考虑带宽、丢包率等状态。文献[18]研究了混合流量绕行负载平衡路由(hybrid traffic detour load balancing routing, HLBR)算法,该算法通过长距离流量绕行与分布式流量绕行相协调来执行自适应数据传输,然而这种算法是基于负载均衡进行设计的,旨在解决卫星网络的拥塞问题,大大增加了端到端时延,同时由于每个卫星都要对整个卫星网络中的节点信息进行存储,进一步限制了卫星节点的星上处理能力。

综上所述,网络拓扑结构的动态变化与节点自身资源有限给 LEO 卫星网络实现稳定可靠的传输带来了极大的挑战,现有的研究无法根据网络拓扑的变化及时切换路径,无法综合节点可用带宽以及链路丢包率等状态信息选择最优多路传输数据,大大限制了 LEO 卫星网络的传输效率。因此,针对上述挑战,本文提出了基于链路状态感知的卫星网络多路路由策略,在时空尺度上考虑网络拓扑的变换,使得数据传输在链路中断时可以平滑地迁移,并根据实时链路状态计算多路路由,提升卫星网络的传输性能。

本文主要的研究工作如下:

1)对动态的 LEO 卫星网络进行拓扑建模,系统模型中计算链路状态时对历史状态数据和实时状态数据进行加权,使其更加贴合真实状态。在计算出备用星间链路状态后,以传输任务所需的传输带宽与传输成功率为约束,以最小化任务传输时延为目标,构建多路径选择的优化问题。

2)利用星历信息和最低传输成功率筛选出星间链路集合中的可用链路,降低计算传输路径的复杂度,通过迭代使用 Dijkstra 算法获得优化问题的最优解,并给出具体的算法步骤与计算复杂度分析。

3)针对在拓扑动态变化的场景下卫星之间传输链路不可靠问题,提出基于链路状态感知的卫星网络多路路由算法,并与现有的基于最短路径优先算法(shortest path first, SPF)^[19]、接触图路由算法(contact graph routing, CGR)^[20]和等价多路径算法(equal-cost multi-path, ECMP)^[21]进行对比,验证了本文所提方案可以更好地适应动态卫星拓扑,根据星间状态的变化自适应更新传输路径,在传

输时延、网络吞吐量以及传输成功率等方面的均有性能提升。

1 系统模型

如图 1 所示,考虑了一个基于 GEO/LEO 架构的卫星网络多路传输系统,该系统使用分层架构,包括高轨卫星、低轨卫星和用户。其中,高轨卫星可以实现全球覆盖,作为控制器部署在控制层负责计算路由策略并下发给低轨卫星,低轨卫星作为转发层节点负责执行路由策略对任务数据进行转发,机载平台则负责选择所在位置区域的过顶卫星并上传任务传输请求。系统依据时间片划分动态的网络拓扑,具体运行流程如下:

1)每个时间片内各低轨卫星会将自身状态信息上传给高轨卫星,高轨卫星接收状态信息并进行存储。

2)低轨卫星接收到用户发送的任务转发请求后,按照一定格式上传给高轨卫星。

3)高轨卫星将本时间片内的实时状态信息与之前存储的历史状态信息加权后得到节点真实状态信息。

4)高轨卫星计算出整条链路的性能并检验是否满足任务转发需求,不断迭代后求出最优的多路路由并下发给低轨卫星。

5)低轨卫星再执行高轨卫星下发的路由策略进行数据转发。

每经过一个时间片就重复上述步骤,最终完成整个任务的数据传输。

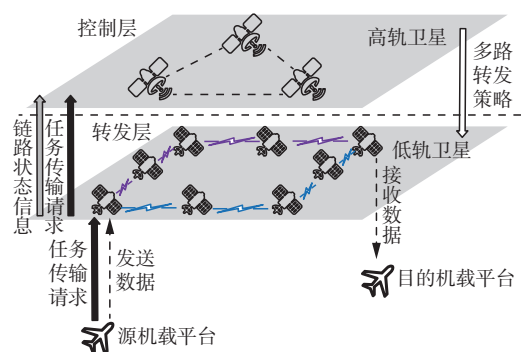


图 1 基于 GEO/LEO 架构的卫星网络多路传输系统模型
Fig. 1 Multi-path transmission system model of satellite network based on GEO/LEO architecture

由于每个时间片开始时,控制层需要对整个卫星网络的链路状态信息进行分析,为后续的多路径计算和选择提供依据。因此,控制层卫星需要包含以下 2 个模块:

1)监控存储模块(monitors storage module,

MSM)。该模块收集每个时间片内 LEO 卫星上传的空闲缓存区、可用带宽以及与相邻卫星的链路丢包率等状态信息,并对上述信息进行存储更新。

2) 路径预测模块(path prediction module, PPM)。该模块根据 LEO 卫星的星历信息可以预测各卫星在接下来一段时间可建立的星间链路(inter-satellite link, ISL)(当 2 颗卫星之间的距离小于一定阈值时,一般认为 2 颗卫星可以建立连接进行通信),并将所预测的 ISL 集合进行存储,以便后续计算链路状态时使用。

为了便于分析研究,本系统采用虚拟拓扑策略,将低轨卫星拓扑划分为时长为 T 的时间片,每个时间片内低轨卫星拓扑视为不变,同时各低轨卫星节点会将自身状态信息上传至高轨卫星,使用 $S = \{s_1^t, s_2^t, \dots, s_n^t\}$ 表示 t 时刻转发层的低轨卫星节点集合,则卫星节点 s_i^t 所上传信息包括 t 时刻处理数据的速度为 p_i^t (byte/s),可用于发送数据的带宽为 b_i^t (byte/s),在缓存区等待的数据队列为 q_i^t (byte),与下一跳节点之间链路的丢包率和距离分别为 $\delta_{i,j}^t$ 和 $d_{i,j}^t$ 。高轨卫星接收上述状态信息并进行存储,同时,在每个时间片内高轨卫星会依据此时的星历信息建立一个可进行通信的星间链路集合 $I_{\text{set}} = \{I_{i,j}^t = (s_i^t, s_j^t) \mid s_i^t \in S, s_j^t \in S, i \neq j\}$ 。用户向过顶低轨卫星发起任务传输请求,请求内容包含任务数据量、任务所需带宽、任务所需传输成功率以及任务传输目的地等信息,对于直播或者视频会议等持续性的传输任务,把它分为一系列连续的数据进行传输。过顶低轨卫星收到任务传输请求后上传给高轨卫星,高轨卫星会对请求内容进行分析并转化为以下形式:

$$Y = \{r_Y, B_Y^{\min}, J_Y^{\min}, s_Y^{\text{src}}, s_Y^{\text{dst}}\} \quad (1)$$

式中: r_Y 为此次任务要传输的数据量大小; B_Y^{\min} 为此次任务传输所需的最小带宽; J_Y^{\min} 为此次传输所要求的最小传输成功率; s_Y^{src} 和 s_Y^{dst} 分别为此次传输的源卫星节点和目的卫星节点。

1.1 路径传输时延建模

使用 p_k 表示源卫星到目的卫星的一条通路, p_k 为由转发层的部分卫星节点以及节点间的星间链路组成的有序集合,即 $p_k = \{I_{\text{src},i}, \dots, I_{j,\text{dst}}\}$ 。因此 p_k 的端到端时延可以由数据在每一跳 ISL 上的传输时延相加求得。单跳 ISL 的传输时延是卫星节点发送时延 d_{sen} 、处理时延 d_{pro} 、传播时延 d_{tra} 以及排队时延 d_{que} 的总和。因为卫星网络的负载动态变化,在求解时延所用到卫星节点的各项状态信息由本时间片内的实时状态与过去 m 个时间片的

历史状态加权得到,加权公式为:

$$c_i = c_i^t \chi_1 + ((\sum_{x \in [1, m]} c_i^{t-xT} \alpha^x) / m) \chi_2 \quad (2)$$

式中: c_i 为加权后得到的真实状态信息; c_i^t 为过去第 i 个时间片的历史状态信息; $\chi_1 + \chi_2 = 1$; α 为遗忘因子。设路径 p_k 上的节点 s_i^t 处理数据的速度 p_i 保持不变,可用于发送数据的真实带宽为 b_i ,在缓存区等待的真实数据队列为 q_i ,则由式(2)可得:

$$b_i = b_i^t \chi_1 + ((\sum_{x \in [1, m]} b_i^{t-xT} \alpha^x) / m) \chi_2 \quad (3)$$

$$q_i = q_i^t \chi_1 + ((\sum_{x \in [1, m]} q_i^{t-xT} \alpha^x) / m) \chi_2 \quad (4)$$

由此可以求得数据在 s_i^t 排队时延为:

$$d_{\text{que}} = q_i / b_i \quad (5)$$

设 p_k 上传输的数据大小为 ϑ_k ,则数据在 s_i^t 的处理时延为:

$$d_{\text{pro}} = \vartheta_k / p_i \quad (6)$$

发送时延为:

$$d_{\text{sen}} = \vartheta_k / b_i \quad (7)$$

设与节点 s_i^t 相连的节点为 s_j^t ,将二者之间的距离表示为 $d_{i,j}$,由于拓扑持续动态变化,因此 2 颗卫星节点之间的距离也需要使用式(2)作加权处理:

$$d_{i,j} = d_{i,j}^t \chi_1 + ((\sum_{x \in [1, m]} d_{i,j}^{t-xT} \alpha^x) / m) \chi_2 \quad (8)$$

节点 s_i^t 处的传播时延为:

$$d_{\text{tra}} = d_{i,j} / \varphi \quad (9)$$

式中: φ 为信号在真空中的传播速度。由此可得 s_i^t 与 s_j^t 之间的 $I_{i,j}^t$ 的传输时延为:

$$d_{p_k} = \sum_{I_{i,j}^t \in p_k} d_{I_{i,j}^t} = \sum_{I_{i,j}^t \in p_k} \left(\frac{q_i}{b_i} + \frac{\vartheta_k}{p_i} + \frac{\vartheta_k}{b_i} + \frac{d_{i,j}}{\varphi} \right) \quad (10)$$

1.2 路径传输成功概率建模

将 $I_{i,j}^t$ 的真实丢包率表示为 $\delta_{i,j}$,则由式(2)可得:

$$\delta_{i,j} = \delta_{i,j}^t \chi_1 + ((\sum_{x \in [1, m]} \delta_{i,j}^{t-xT} \alpha^x) / m) \chi_2 \quad (11)$$

则 p_k 的传输成功率为:

$$j_{p_k} = \prod_{I_{i,j}^t \in p_k} (1 - \delta_{i,j}) \quad (12)$$

1.3 路径传输带宽建模

p_k 是由转发层的部分卫星节点以及节点间的星间链路组成的有序集合,因此 p_k 的带宽由其所包含的所有卫星节点的带宽最小值决定,即:

$$b_{p_k} = \min_{I_{i,j}^t \in p_k} b_i \quad (13)$$

1.4 基于链路状态感知的多路路由优化问题建模

任务请求的总处理时延可以分成 LEO 卫星到 GEO 卫星的传播时延和任务在 GEO 卫星上的处

理时延,具体如下:

$$d_{Y_{\text{pro}}} = 2 \times \frac{d_{L,G}^t}{\varphi} + (q_G^t + 1)d_{G_{\text{pro}}} \quad (14)$$

式中: $d_{L,G}^t$ 为 LEO 卫星与 GEO 卫星之间的距离; φ 为信号的传播速度; q_G^t 为 GEO 卫星的请求队列; $d_{G_{\text{pro}}}$ 为 GEO 卫星的处理速度。

GEO 卫星在当前时间片内最终下发的多路径集合为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_\mu\}$, 则任务 Y 的数据需要分为 μ 份同时通过 P 进行传输, 因此数据通过 P 的传输时延是由传输时延最大的一条路径决定的, 即:

$$d_P = \max_{p_k \in P} \{d_{p_k}\} \quad (15)$$

由式(14)可得 P 的可用带宽为:

$$b_P = \sum_{p_k \in P} b_{p_k} \quad (16)$$

因此任务 Y 的所有数据通过 P 传输完成的总时延为:

$$d_Y = d_{Y_{\text{pro}}} + d_P + \frac{r_Y}{b_P} \quad (17)$$

设 B 为源卫星节点在满足其他传输任务需求的条件下的最大可用带宽, D_{\max} 为卫星之间的最大可见距离, 则根据式(1)以及对于源卫星和目的卫星之间路径状态的分析, 以最小化任务 Y 的总传输时延为目标, 以传输带宽、传输成功率以及各卫星节点间的距离为约束, 建立以下优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & d_Y \\ \text{vars} \quad & P \\ \text{s. t.} \quad & \text{C1: } B \geq \sum_{p_k \in \{p_1, p_2, \dots, p_\mu\}} b_{p_k} \geq B_Y^{\min} \\ & \text{C2: } j_{p_k} \geq J_Y^{\min}, \forall p_k \in P \\ & \text{C3: } 1 - \delta_{i,j} \geq J_Y^{\min}, \forall I_{i,j} \in p_k, \forall p_k \in P \\ & \text{C4: } d_{i,j} \leq D_{\max}, \forall I_{i,j} \in p_k, \forall p_k \in P \\ & \text{C5: } \vartheta_1 + \vartheta_2 + \dots + \vartheta_\mu = r_Y \end{aligned} \quad (18)$$

式中:

$$\begin{aligned} d_Y = 2 \times \frac{d_{L,G}^t}{\varphi} + (q_G^t + 1)d_{G_{\text{pro}}} + \\ \max_{p_k \in \{p_1, p_2, \dots, p_\mu\}} \left\{ \sum_{I_{i,j} \in p_k} \left(\frac{q_i}{b_i} + \frac{\vartheta_k}{p_i} + \frac{\vartheta_k}{b_i} + \frac{d_{i,j}}{\varphi} \right) \right\} + \\ \frac{r_Y}{\sum_{p_k \in \{p_1, p_2, \dots, p_\mu\}} b_{p_k}} \end{aligned} \quad (19)$$

2 算法设计

式(18)是一个离散的 NP-hard 优化问题, 需要解决最优多路径集合的问题, 问题中涉及缓存队列

q_i 、可用带宽 b_i 、丢包率 $\delta_{i,j}$ 以及处理速度 p_i 等多个变量, 所涉及到的卫星节点规模较大, 使用传统算法难以求解。为了提高问题的求解效率, 缩小问题的搜索空间, 先依据约束 C4 对转发层 LEO 卫星节点之间的星间链路进行筛选, 得到理论上可以建立通信的星间链路集合 E , 再依据约束 C3 对得到的星间链路集合 E 进行筛选, 剔除其中丢包率不满足约束的链路得到 E_{avi} , 最终基于 E_{avi} 使用多路径选择算法, 对简化后的优化问题进行求解, 得到最优多路径集合 P 。

2.1 获取理论可通信链路集合

由约束 C4 获取的理论可通信链路集合的过程可以表示为:

$$\begin{aligned} \text{find } E \\ \text{s. t. } d_{i,j} \leq D_{\max}, \forall I_{i,j} \in p_k, \forall p_k \in P \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)的求解可以由系统模型中的 PPM 模块来完成, 控制层 GEO 卫星的 PPM 可以根据已知的星历信息对转发层的 LEO 卫星的运行轨迹进行预测, 并将满足式(20)中约束的理论星间链路进行存储, 存储结果表示为 $T_{\text{Topo}} = \{S, E\}$, T_{Topo} 在存储时被划分为长度为 T 的一组连续的时间片, 任务 Y 传输完成需要 L 个时间片。因此在任务 Y 的传输过程中, 由 PPM 所输出的 T_{Topo} 如图 2 所示, 详细描述了 L 个时间片内的转发层 LEO 卫星的网络拓扑。

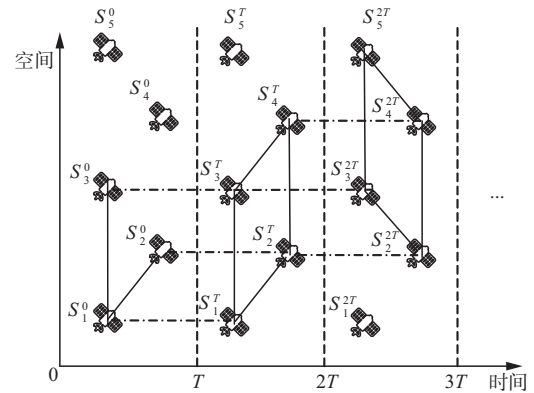


图 2 L 个时间片的 Topo 示意图

Fig. 2 Topo schematic diagram of L time slices

如图 2 所示, 将每个时间片内的转发层 LEO 卫星拓扑视为静止不变, 当 2 颗卫星节点之间的距离小于 D_{\max} 时, 用实线将二者连接, 代表这 2 颗卫星节点之间存在理论的可通信路径。相邻 2 个时间片之间, 如果同一颗卫星节点的物理缓存没有被消耗殆尽, 则将 2 个时间片内的同一颗卫星使用虚线连接。其中, $S = \{s_1^t, s_2^t, \dots, s_n^t\}$ 表示在时间片 t 内的转发层的 LEO 卫星节点集合, $E = E_{\text{ISL}} \cup E_{\text{STO}}$ 表示 T_{Topo} 中的链路集合, $E_{\text{ISL}} = \{I_{i,j} = (s_i^t, s_j^t) \mid s_i^t \in S, s_j^t \in S, i \neq j\}$ 表示潜在的可通信链路集合, $E_{\text{STO}} =$

$\{I_{i,i}^t = (s_i^t, s_i^{t+T}) | s_i^t \in S, s_i^{t+T} \in S\}$ 表示相邻时间片内的可用卫星节点集合。 $I_{i,j}^t = (s_i^t, s_j^t)$ 表示在时间片 t 内, 卫星节点 s_i 可以与卫星节点 s_j 建立理论可通信链路。 $I_{i,i}^t = (s_i^t, s_i^{t+T})$ 则表示在时间片 t 与其相邻的下一个时间片 $t+T$ 内, 卫星节点 s_i 的物理资源可以继续保证任务 Y 的正常传输。

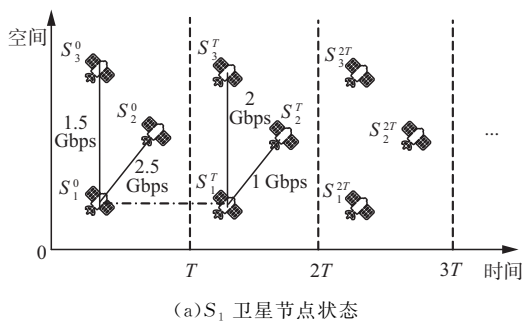
2.2 筛选可通信链路集合

由约束 C3 对式(20)所得理论可通信链路集合进行筛选的过程可以表示为:

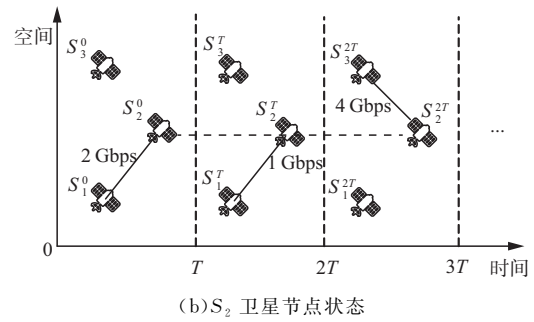
$$\begin{aligned} & \text{find } E_{\text{avi}} \\ & \text{s. t. } 1 - \delta_{i,j} \geq J_Y^{\min}, \forall I_{i,j} \in E \end{aligned} \quad (21)$$

上一节中使用 GEO 卫星的 PPM 根据卫星节点之间的距离求得了理论可通信链路集合 E , 但卫星拓扑的动态变化不仅包括卫星节点相对位置的不断变化, 还包括卫星节点自身状态的不断变化, 因此求解式(21)可以使用系统模型中的 MSM 来完成。该模块可不断收集卫星节点的状态信息并进行存储, 由于节点自身的可用带宽等资源不断变化, 就意味着 E 的卫星节点之间的理论链路并不都能够满足通信需求, 因此在每个时间片内 GEO 卫星通过 MSM 来收集卫星节点的可用带宽、数据缓存队列以及与相邻卫星节点所建立星间链路的丢包率等信息, 并根据式(18)中的约束对 PPM 所输出 E 中包含的理论链路集合进行筛选, 剔除不满足通信需求的链路得到 E_{avi} , 以降低路径计算的复杂度。

如图3所示, 与 PPM 相同, MSM 同样包含连续的 L 个时间片, 并在每个时间片内记录各卫星节点所上传的自身状态信息, 包括可用带宽、数据缓存队列以及与相邻卫星节点所建立星间链路的丢包率等信息。由于 LEO 卫星节点需要同时进行多个任务的数据传输, 为了避免发生冲突, MSM 会将该任务所占用的带宽等资源进行扣除, 防止卫星节点由于资源不足发生拥塞。同时, 当 LEO 卫星节点在收到 GEO 卫星节点下发的转发策略后, 也会在下一个时间片上传自身状态时为该传输任务预留所需带宽等资源。



(a) S_1 卫星节点状态



(b) S_2 卫星节点状态

图3 L 个时间片的卫星节点状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of satellite node status over L time slices

2.3 基于 PPM 和 MSM 的多路径选择算法设计

求解式(20)和式(21)得到筛选后的可通链路集合 E_{avi} , 由于本文所研究算法旨在获得传输任务 Y 的最优多条路径, 因此可以在进行流量分配的约束 C5 上进行适当简化, 即在计算路径状态时每条路径所需传输的流量默认为 ϑ 。则原优化问题可以简化为:

$$\begin{aligned} & \min d_Y \\ & \text{vars } P \\ & \text{s. t. C1: } B \geq \sum_{p_k \in \{p_1, p_2, \dots, p_\mu\}} b_{p_k} \geq B_Y^{\min} \quad (22) \\ & \quad \text{C2: } j_{p_k} \geq J_Y^{\min}, \forall p_k \in P \end{aligned}$$

针对上述优化问题的求解, 本节提出算法1。算法1中, D_{th} 和 J_{th} 为任务所要求的传输时延和传输成功率, 可以根据不同任务进行更改。最后所提到的路径质量指数的计算式为:

$$Q_p = \beta_1 \sigma_D + \beta_2 \sigma_J \quad (23)$$

式中: $\sigma_D = \frac{D_{\text{th}} - d_{p_k}}{D_{\text{th}}}$; $\sigma_J = \frac{j_{p_k} - J_Y^{\min}}{J_Y^{\min}}$; $\beta_1, \beta_2 \in [0, 1]$; $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。

算法1中使用的 Dijkstra 算法是一种解决有向图或无向图上的单源最短路径问题的经典算法, 其核心思想是贪心, 从起始顶点开始, 逐步扩展到达最短路径的顶点集合, 直到包含目标顶点为止。具体算法步骤如下:

步骤1 将所有卫星节点的最短路径估计值设为无穷大, 除了起始卫星 s_{src} 设为0(因为 s_{src} 到自身的最短路径为0), 所有卫星节点都标记为未访问。

步骤2 将起始卫星 s_{src} 添加到优先队列中。

步骤3 判断优先队列是否为空, 若是则跳转到步骤6, 若不是则跳转到步骤4。

步骤4 从优先队列中移除具有最小估计距离的顶卫星节点 u 。

步骤5 对于 u 的每一个相邻卫星节点 v , 更新

v 的最短路径估计, 如果通过 u 到 v 的路径比当前已知路径更短, 就更新 v 的最短路径估计值并更新其在优先队列中的位置。

步骤 6 当优先队列为空时, 算法结束。此时, 从起始卫星节点到所有其他卫星节点的最短路径估计值已确定。

算法 1 基于 PPM 和 MSM 的多路径选择算法

输入: 转发层各 LEO 卫星节点的状态信息

输出: 最优的多条传输路径集合 P

1. PPM 模块根据卫星节点间的距离输出理论可通信链路集合 E
2. MSM 模块根据丢包率对 E 进行筛选得到 E_{avi}
3. 使用 Dijkstra 算法计算 E_{avi} 中可连接 s_{src} 与 s_{dst} 的一条通路 p_k
4. **if** p_k 不存在 **do**
5. go to step 22
6. **else**
7. 通过式(3)~式(10)计算出路径 p_k 的传输时延 d_{p_k}
8. **if** $d_{p_k} > D_{\text{th}}$ **do**
9. 从构成 p_k 的所有 I_{set} 中筛选出时延最大的一条并将其从 E_{avi} 中删除
10. go to step 3
11. **else**
12. 通过式(3)~式(12)计算出路径 p_k 的传输成功率 j_{p_k}
13. **if** $j_{p_k} < J_{\text{th}}$ **do**
14. 从构成 p_k 的所有 I_{set} 中筛选出丢包率最大的一条并将其从 E_{avi} 中删除
15. go to step 3
16. **else**
17. 将路径 p_k 添加到可用路径集合 P' 中, 并从 E_{avi} 中删除构成 p_k 的所有 I_{set}
18. return to step 3
19. **end if**
20. **end if**
21. **end if**
22. 计算 P' 中所有路径的质量指数 Q_p
23. 将所有链路按 Q_p 从小到大排序
24. 从排序好的 P' 中挑选 Q_p 较大的路径添加至最优路径集 P 中, 直带宽上限
25. 输出最优路径集 P

2.4 计算复杂度分析

算法 1 首先计算出源卫星与目的卫星的一条通路, 再根据路径的传输时延和传输成功概率对路径进行筛选, 最终依据式(22)挑选出路径质量指数最高的多条路径。在计算通路的过程中会使用到 Di-

jkstra 算法, 整个迭代过程的计算复杂度主要由该算法产生, 设每个卫星节点最多与相邻卫星建立 4 条星间链路, 则任务 Y 的传输过程中由 PPM 所记录的 T_{Topo} 共包含 nL 个卫星节点和最多 $(4n-1)L$ 条链路, 因此计算一条由源卫星至目的卫星的路径复杂度为 $O((4n-1)L + nL \log(nL)) = O(nL \log(nL))$ 。由于最终需要输出 μ 条路径, 则整个迭代过程的复杂度为 $O(\mu nL \log(nL))$ 。

3 仿真分析

3.1 仿真参数设置

为了验证本方案进行真实数据传输时的性能, 使用基于真实卫星星座参数的拓扑结构进行仿真。本文模拟的卫星星座基于 GEO/LEO 双层卫星星座结构, 其中 3 颗 GEO 卫星作为控制层部署在地球同步轨道, 以保证可以覆盖全部的转发层 LEO 卫星以便下发路由策略。转发层的 LEO 卫星基于铱星星座进行仿真, 整个仿真星座包括 6 个轨道平面, 每个轨道平面上有 11 颗 LEO 卫星在运行, 共包含 66 颗 LEO 卫星, 轨道倾角为 86.4° , 轨道高度为 780 km, 每颗卫星配置 4 个可以用于建立星间链路的收发信机, 最多可与相邻卫星维持 4 条星间链路。同时, 转发层 LEO 卫星在处理数据时默认处理速度上限 p_{max} 为 80 Mbps/s, 在发送数据给相邻卫星节点时默认可用带宽上限 b_{max} 为 50 Mbps/s。

3.2 对比方案介绍

本文的对比方案包括 CGR 算法^[19]、SPF 算法^[20]、ECMP 算法^[21]。

CGR 是一种专为太空通信设计的路由算法, 利用星历信息预测卫星节点之间的可用连接以及连接的持续时间来计算最优的转发路径。其核心思想是“接触图”, 用来预测卫星节点间星间链路持续时间的, 根据这个图计算出数据包的转发路径, 以实现尽可能早地将数据传输至目的地。CGR 算法的复杂度为 $O(\mu(5n-1)L \log(nL))$ 。

SPF 算法基于由卫星节点所构成的最短路径树结构来实现, 该结构为给定的源卫星节点到卫星网络中的所有可达节点的最短路径集合, 由此确保数据包在卫星网络中可以通过最少跳数或最低时延从源卫星到达目的卫星, 从而优化网络效率和性能。SPF 算法的复杂度为 $O(\mu(nL \log(nL)) + (4n-1)L)$ 。

ECMP 算法核心思想是寻找源卫星与目的卫星之间多条链路成本相等的路径, 并在这些路径上平均的分配流量, 以提高整个网络的带宽利用率, 减少拥塞, 实现负载均衡。ECMP 算法在计算路径时

的步骤与 SPF 算法类似,所不同的是选择路径时的依据,因此其算法复杂度为 $O(\mu(nL \log(nL) + (4n-1)L))$ 。

3.3 动态拓扑下的自适应性能分析

如图4~图6所示,在100个时间片的拓扑变化过程中,本文所提算法在传输时延、吞吐量和传输成功率3项指标的表现均优于其他3种对比方案。

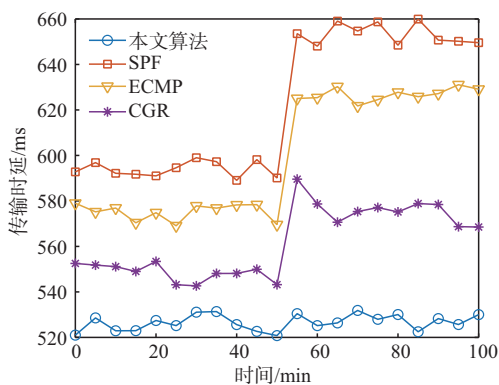


图4 动态拓扑下传输时延

Fig. 4 Transmission delay curve diagram under dynamic topology

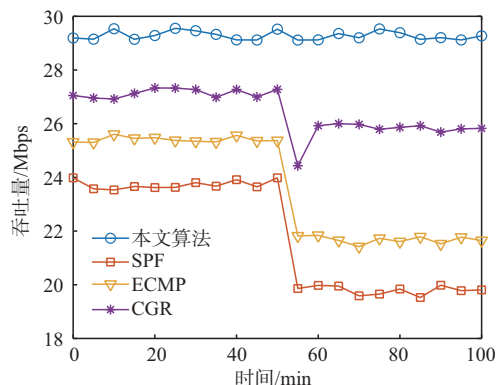


图5 动态拓扑下吞吐量

Fig. 5 Throughput curve diagram under dynamic topology

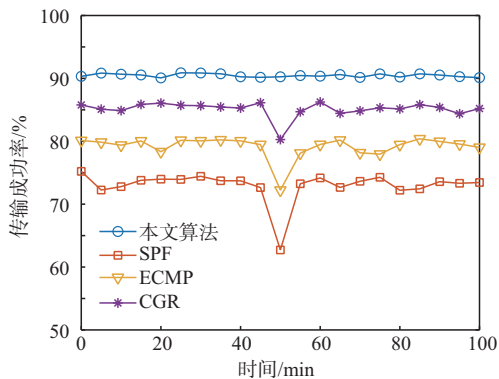


图6 动态拓扑下传输成功率

Fig. 6 Transmission success rate curve diagram under dynamic topology

仿真假设在第50个时间片出现了较大规模的

拓扑变化,部分原有星间链路断开。在此情形下,所提方案依旧可以保证稳定可靠的数据传输。然而,其他3种方案均受到链路断开所导致的不同程度的影响。其中,SPF算法受影响最大,拓扑变化前后传输时延增加了约10.0%,吞吐量下降了约16.7%,传输成功率下降了约9.8%。CGR算法受影响最小,且在拓扑变化后的下一个时间片传输时延与吞吐量均有所恢复,这是由于CGR算法中使用了针对卫星拓扑动态变化的“接触图”,因此对链路的变化具有一定的适应性。

分析上述结果可知,本文所提算法相较于其他3种对比方案,在动态变化的低轨卫星拓扑下,可以提供更加稳定可靠且性能更优的传输,对于拓扑变化的适应性也更好。这是由于本算法在路由计算过程中不仅考虑当前时间片内可用的星间链路,还会基于星历信息预先考虑未来时间片内可用的星间链路,以此可以显著提高带宽利用率。同时,本文方案具备可以基于星历信息预测星间链路的连接情况,在星间链路断开前将流量分发到即将建立的新链路上,以此避免链路断开所造成的传输成功率下降问题。

3.4 不同负载下的自适应性能分析

如图7所示,随着网络负载增加,各算法的传输时延都在显著增加。

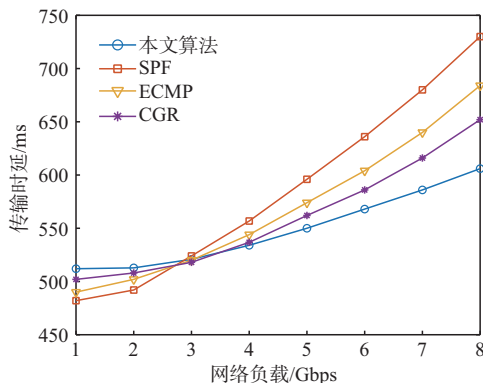


图7 不同网络负载下的传输时延变化

Fig. 7 Transmission delay variation curve under different network loads

在1 Gbps和2 Gbps的低负载情况下本文方案的传输时延会高于3种对比方案,但是当负载超过3 Gbps后,所提方案的传输时延一直低于对比方案,在满负载8 Gbps的情况下,传输时延比SPF算法、ECMP算法和CGR算法分别低16.9%、11.4%和7.1%。这是因为在低负载情况下,本文方案不仅会考虑传输时延,还会综合考虑传输带宽和传输成功率等因素,导致低负载情况下时延会高于对比

方案。但是当负载超过 3 Gbps,本文方案通过对历史信息与实时信息进行加权,基于真实状态选择更优的链路进行数据传输,不会选择带宽过低或者丢包率过高的链路,这就大大降低了链路故障以及数据重传的风险。对比在选择链路时基于历史状态信息,具有一定的滞后性,不能实现根据链路实时状态选择出最优链路。

如图 8 所示,4 种方案的吞吐量随着卫星网络负载不断增加而逐渐增大,这是因为随着负载的增加,每一个卫星节点需要转发的流量也逐步增加。在从低到高的负载情况下,本文方案的吞吐量一直高于其他 3 种。当负载为 8 Gbps 时,本文方案吞吐量比 SPF 算法、ECMP 算法和 CGR 算法分别高了 34.4%、26.9%和 15.6%。这是由于本文算法在选择路径时,会考虑路径的传输带宽,偏向于选择带宽较大的路径,从而降低了网络拥塞的风险,同时在负载发生变化时,本文方案会及时根据链路的真实状态对所选路径进行更新,以此提高网络带宽利用率,吞吐量也随之提升。

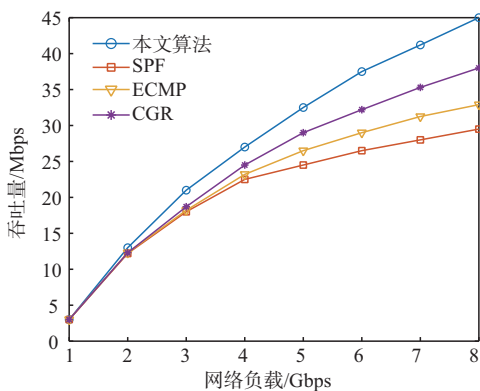


图 8 不同网络负载下的吞吐量变化

Fig. 8 Throughput variation curve under different network loads

如图 9 所示,4 种算法的传输成功率随着卫星网络负载的不断增加呈下降趋势,但在整个负载增加过程中,本文方案的传输成功率均显著高于其他对比方案,且在卫星网络负载达到 8 Gbps 时,传输成功率比 SPF 算法、ECMP 算法和 CGR 算法分别高 15.3%、9.6%和 5.6%。这是由于本文方案在选择传输路径时,会根据所组成路径的星间链路的丢包率来计算路径质量指数,避免了选择丢包率过高的链路,同时还会根据星历信息预测星间链路的通断状况,及时将流量分发至新建立的链路,避免了原有链路断开所带来的丢包,从而大大提升了传输成功率。

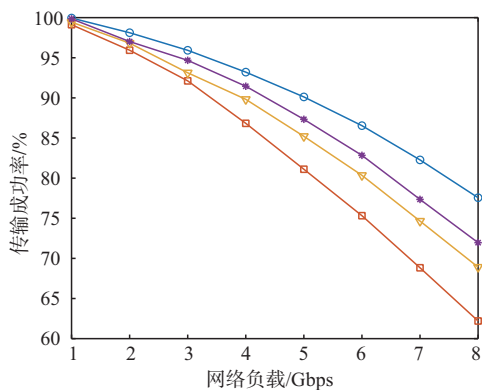


图 9 不同网络负载下路径传输成功率

Fig. 9 Path transmission success rate curve under varying network loads

4 结语

本文面向通过低轨卫星网络实现通信的场景,对低轨卫星的动态拓扑结构以及低轨卫星网络中动态变化的星间链路状态进行了建模。针对在拓扑动态变化的场景下卫星之间传输链路不可靠问题,提出基于链路状态感知的卫星网络多路路由优化策略,该算法通过使用卫星网络分层架构,解决了低轨卫星节点星上计算资源不足的问题,同时采用虚拟拓扑策略规避拓扑的动态性,并综合考虑传输时延、传输带宽等实时链路状态,根据星历信息预测链路的通断情况,使得生成的多路路由策略可以更好地适应动态变化的拓扑,并根据负载变化选出最优的多条路径,增大了卫星网络的吞吐量与传输成功率,降低了传输时延。仿真结果表明,与 CGR 算法、SPF 算法和 ECMP 算法对比,本文方案可以更好地适应动态卫星拓扑网络环境,并根据实时的链路状态自适应更新传输路径,提升传输性能,保证数据稳定可靠传输。

参考文献

- [1] ZHU X M, JIANG C X. Creating Efficient Integrated Satellite-Terrestrial Networks in The 6G Era [J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29 (4): 154-160.
- [2] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018, 186(9): 16-23.
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. Preliminary Exploration of the Integration of Satellite Communication and Terrestrial 5G (Part I)[J]. Satellite and Network, 2018, 186(9): 16-23. (in Chinese)
- [3] KUMAR P, BHUSHAN S, HALDER D, et al. FybrLink: Efficient QoS-Aware Routing in SDN Enabled Future Satellite Networks[J]. IEEE Transactions

- on Network and Service Management, 2021, 19(3): 2107-2118.
- [4] 陈书恒,莫嘉倩,莫小欣. 机载低轨卫星通信发展及关键技术综述[J]. 电讯技术, 2024, 64(1): 149-157.
- CHEN S H, MO J Q, MO X X. A Survey of the Development and Key Technologies of Airborne Low Earth Orbit Satellite Communication[J]. Telecommunications Technology, 2024, 64(1): 149-157. (in Chinese)
- [5] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
- CHEN S Z. Analysis of Low Earth Orbit Satellite Communication and Development Suggestions for China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13. (in Chinese)
- [6] 刘秀,彭振忠,刘达. 商业低轨通信卫星星座的发展态势及军事应用分析[J]. 军事文摘, 2020(15): 29-33.
- LIU X, PENG Z Z, LIU D. Development Trends and Military Application Analysis of Commercial Low Earth Orbit Communication Satellite Constellations[J]. Military Digest, 2020(15): 29-33. (in Chinese)
- [7] DU P, NAZARI S, MENA J, et al. Multipath TCP in SDN-Enabled LEO Satellite Networks [C]// 2016 IEEE Military Communications Conference. Baltimore, MD: IEEE, 2016: 354-359.
- [8] KATSOULIS G. Satellite Telecommunications in the Military: Advantages, Limitations and the Networking Challenge[M]// Applications of Mathematics and Informatics in Science and Engineering. Cham: Springer, 2014: 243-263.
- [9] 张晓娜,张亚生,何辞. 基于低轨星座的星地路由技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 264-267, 272.
- ZHANG X N, ZHANG Y S, HE C. Research on Star-Ground Routing Technology Based on Low Earth Orbit Constellation[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(10): 264-267, 272. (in Chinese)
- [10] FORD A, RAICIU C, HANDLEY M, et al. TCP Extensions for Multipath Operation with Multipath Addresses: RFC 6824[R]. 2013.
- [11] LU Y, SUN F, ZHAO Y. Virtual Topology for LEO Satellite Networks Based on Earth-Fixed Footprint Mode[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(2): 357-360.
- [12] RUIZ-DE-AZUA J A, RAMÍREZ V, PARK H, et al. Assessment of Satellite Contacts Using Predictive Algorithms for Autonomous Satellite Networks [J]. IEEE Access, 2020(8): 100732-100748.
- [13] 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.
- [14] YANG J, LI D, JIANG X, et al. Enhancing the Resilience of Low Earth Orbit Remote Sensing Satellite Networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(4): 304-311.
- [15] LEE J, KANG S. Satellite over Satellite (SOS) Network: A Novel Architecture for Satellite Network [C]// Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Tel Aviv: IEEE, 2000.
- [16] WANG F, JIANG D, QI S. An Adaptive Routing Algorithm for Integrated Information Networks[J]. China Communications, 2019, 12(2): 108-132.
- [17] BAI J J, LU X C, LU Z X, et al. Compact Explicit Multi-Path Routing for LEO Satellite Networks [C]// 2005 Workshop on High Performance Switching and Routing. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 386-390.
- [18] LIU P, CHEN H, WEI S, et al. Hybrid-Traffic-Detour Based Load Balancing for Onboard Routing in LEO Satellite Networks[J]. China Communications, 2018, 15(6): 28-41.
- [19] FRAIRE J A, DE J O, BURLEIGH S C. Routing in the Space Internet: A Contact Graph Routing Tutorial [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 174: 102884.
- [20] NIRANJANE P B, AMDANI S Y. Comparison of Variants of Yen's Algorithm for Finding K-Simple Shortest Paths [C]// 2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT). Hubli: IEEE, 2022: 1-5.
- [21] RHAMDANI F, SUWASTIKA N A, NUGROHO M A. Equal-Cost Multipath Routing in Data Center Network Based on Software Defined Network [C]// 2018 6th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT). Bandung: IEEE, 2018: 222-226.

(编辑:徐楠楠)