

## 基于关键节点分析的低轨卫星通信系统负载优化策略

糜雨廷, 赵柏, 刘笑宇, 欧阳键, 林敏

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 在低轨卫星网络中, 受卫星轨道参数和地面站位置分布的影响, 当遇到大规模交叉流量并行传输时, 许多流量会同时经过关键节点导致链路拥塞, 从而降低整个系统的性能甚至无法正常通信。针对这个问题, 首先利用虚拟拓扑法将卫星轨迹的动态变化转化成一系列时序静态拓扑图。其次, 结合节点的度属性与其邻边的边介数信息, 从信息传输角度对每个时隙的卫星节点重要度进行评估, 并进一步提出基于关键节点分析的低轨卫星通信系统负载优化策略, 依据每个节点的重要度评估值对路径进行规划, 缓解高负载下关键节点的传输压力, 为处理低轨卫星网络中的节点拥塞问题提出了一个新思路。最后, 在 Hypatia 平台的基础上对所提出的负载优化策略进行了仿真验证。结果表明, 与常用的最短路径路由方法相比, 所提出的负载优化策略能够在高负载情况下有效利用原本闲置的链路, 并合理规避易拥塞的卫星节点, 在提升系统吞吐量的同时降低信息传输的端到端时延。

**关键词:** 低轨卫星系统; 复杂网络; 负载优化; 关键节点

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.XXXX.

## Load optimization strategy for low earth orbit satellite communication systems based on critical node analysis

MI Yuting, ZHAO Bai, LIU Xiaoyu, OUYANG Jian, LIN Min

School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** In low Earth orbit (LEO) satellite networks, the influence of satellite orbital parameters and the distribution of ground stations can lead to link congestion during large-scale, parallel cross-traffic transmissions, as many data flows simultaneously pass through critical nodes. This congestion may degrade overall system performance or even disrupt normal communication. To address this issue, a virtual topology approach is employed to convert the dynamic trajectory changes of satellites into a series of sequential static topology graphs. Next, each satellite node's importance in each time slot is assessed from the perspective of information transmission, using the node degree and the betweenness centrality of its neighboring edges. A load optimization strategy for LEO satellite communication systems is then proposed, based on critical node analysis. This strategy plans routes according to each node's importance assessment value, alleviating transmission pressure on critical nodes under high load conditions and providing a new approach for addressing node congestion in LEO satellite networks. Finally, the proposed load optimization strategy is validated through simulations on the Hypatia platform. The results indicate that, compared to the conventional shortest path routing method, the proposed strategy effectively utilizes previously idle links and reasonably avoids congestion-prone satellite nodes, enhancing system throughput while reducing end-to-end transmission delay.

**Key words:** LEO, complex networks, load optimization, critical node

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 林敏, linmin@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (62471255)

**Foundation Items:** the National Natural Science Foundation of China under Grant (NO.62471255)

## 0 引言

近年来,天基信息网络成为了全球通信和互联网接入领域的热点研究发展方向<sup>[1-2]</sup>,其中低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星凭借着低时延高带宽等优势<sup>[3-5]</sup>,逐渐成为了卫星互联网中的关键一环<sup>[6-8]</sup>。但也正是受轨道高度的制约<sup>[9]</sup>,其需要大量卫星组成巨型星座才能实现网络的全球覆盖,这无疑使整个网络规模变得愈加复杂<sup>[10-11]</sup>,如何评价网络中不同节点发挥的具体作用,进而对重要节点进行重点保护或是加强其服务能力,对提升整个网络的运行效率和维护网络的鲁棒性具有重要意义。此外,由于全球的海陆分布与人口密度差异<sup>[12]</sup>,全球流量需求不平衡的现象愈发明显,在实际星座部署过程中经常会面临大量节点和链路闲置而局部地区网络负载过大而降低整体服务质量的情况<sup>[13]</sup>,此时如果能够在计算路由时提前预估网络中易出现的瓶颈节点并对路径进行合理的重新规划将有助于提高整个系统的性能,给用户带来更好的服务体验。

当前,卫星网络负载均衡研究的思路主要集中在卫星节点间的多路径规划以及拥塞节点的局部分流上。如文献[14]将多路径路由问题表述为带宽限制和流守恒约束下的随机优化问题,并进一步提出了一种用于中心路由计算的链路不相交多径路由(Link Disjoint Multipath Routing, LDMR)方案以最大化链路利用率,最后设计了一种基于图神经网络的多路径流量算法来平衡不同路径的负载情况。文献[15]提出了一种选择性迭代Dijkstra算法,通过降低节点的重用频率来优化寻路效率,并在此基础上提出了选择性分裂负载均衡策略,针对拥塞节点进行分流以缓解网络压力。文献[16]通过定量估算链路状态和动态调整排队延迟权重,对链路占用率进行划分,进而实现路径的合理规划,以达到负载均衡的目的。文献[17]则提出了一种全局与局部结合的混合负载均衡路由方案,通过分析地面流量分布完成全局流量的初步分配,并针对局部突发流量进行路径调整,以实现有效分流。此外,还有学者引入强化学习方法,提出了基于深度强化学习的节能路由(Deep Reinforcement Learning based Energy-efficient Routing, DRL-ER)算法,通过学习网络负载状态平衡卫星能量消耗<sup>[18]</sup>。然而,这类算法通常都需要主动检测链路拥塞状态来进行负载

优化,在提前预测拥塞方面存在一定局限性。随着LEO巨型星座的快速发展以及复杂网络理论的不完善,基于复杂网络拓扑的研究逐渐兴起。通过网络结构的角度预测潜在拥塞节点,这一方法能够在星座设计阶段提前识别并评估可能的拥塞问题,及时修正方案,并根据卫星节点的重要性合理分配功能<sup>[19]</sup>,有助于提升星座网络的整体效率和可靠性。

当前复杂网络理论中关于节点重要性的评估方法已经较为完备,形成了以各类中心性为主的评价指标,最常见的就是以相邻节点个数为衡量标准的度中心性和表征节点全局概念的介数中心性<sup>[20]</sup>。但是这种单一的衡量指标只能反映节点的某一方面的重程度,较为片面,近年来许多学者将不同类型的指标进行综合,提出了更加完善的节点评价策略。文献[21]将度,介数和集聚系数等指标融合起来,提出了用于分析节点抗毁性的介数熵度量算法。另一种更加普遍和通用的思路是选取一些能够反映所需评估网络特点的单一指标,然后通过采用如熵权法,层次分析法和灰色关联度<sup>[22]</sup>等策略来对原来的单一指标进行加权融合,获得每个节点的评分组成向量,再计算出一个最理想的情况,通过逼近理想解排序法<sup>[23]</sup>和余弦相似度法<sup>[24]</sup>等与理想状况进行相似度比较来获得节点重要度排序。不过上述方法大部分考虑的对象都是静态复杂网络,而本文重点考虑的卫星网络属于时变网络,网络拓扑结构始终处于动态变化之中,使用传统网络节点评估策略的准确性可能会降低。对此有学者提出了基于时变拓扑图序列和节点贡献度的重要度评估方法<sup>[25]</sup>,并构造双层卫星网络进行仿真并给出了重要度排序,但作者并未对其最后卫星网络评估结果的有效性进行验证。

总的来说,上述文献对复杂网络的节点评估方法进行了深入的研究,但其实验和测试对象通常都只局限在传统的静态网络,例如社交网络,电子邮件网络等,对于时变卫星网络的节点评价策略相对较少且缺乏系统的有效性验证。而当前所提出的负载均衡路由算法更多的是依靠实时网络流量信息,在全局角度的预测方面效果不理想且会导致网络状态信息的大幅增长,从而加重网络负担<sup>[26]</sup>。针对该问题,本文提出了一种基于关键节点分析的负载优化策略。该策略首先利用节点自身的度属性以及其

邻边的边介数信息, 通过分析网络拓扑的整体结构来从全局角度对可能发生堵塞的节点进行相应的评估。接着将其评价结果作为参考依据, 在计算转发状态过程中加以考虑, 在最短路径的基础上对高评估节点采取合理的措施进行规避, 从而在不依赖每个节点实时流量反馈的情况下, 实现高负载情况下的负载优化。为了验证所提策略的有效性, 仿真首先采用 Telesat 星座 T1 层 351 颗卫星作为测试对象, 从拓扑结构角度分析了本文节点分析策略的效果, 并进一步利用 NS-3 在 T1 层轨道和 Kuiper 星座 K1、K2 双层轨道共计 2452 颗卫星上进行了数据包级的流量传输测试, 通过对往返时延, 吞吐量以及链路占用情况, 证明了所提策略的有效性。

## 1 复杂网络基本概念

从图论角度出发, 一个复杂网络可以由图  $G(A) = (V, E)$  来表示, 它由两个基本组成部分构成: 节点集和边集。其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为网络的节点集合,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  为网络的边集合。当前最传统和常用的评价方法是从网络拓扑结构出发的中心性度量方法, 从局部角度出发主要有度中心性, 而从全局角度出发主要有介数中心性, 接近度中心性等, 现对后续会采用的评估标准给出具体定义。

### (1) 度中心性

度中心性衡量了节点在网络中的连接程度, 即节点与其他节点相连接的边的数量。度数中心性高的节点通常被认为在网络中具有更多的影响力和控制力。度中心性定义为与其实际相连的节点数量与最大的邻居节点数量之比。设网络共有  $N$  个节点, 节点  $i$  的度为  $k_i$ , 则:

$$D(i) = \frac{k_i}{N-1} \quad (1)$$

### (2) 介数中心性

介数中心性定义为经过节点的最短路径数量与全部最短路径数量之比, 介数中心性高的节点通常在网络中有更多的控制权并具有重要的桥梁作用, 设  $g_{jk}$  表示节点  $j$  与  $k$  间的最短路径数,  $g_{jk}(i)$  表示节点  $j$  与  $k$  间经过点  $i$  的最短路径数,  $N$  为节点总个数, 则其公式为:

$$B(i) = \frac{2 \sum_{j \neq k} g_{jk}(i)}{N(N-1)} \quad (2)$$

### (3) 接近中心性

接近中心性基于节点到其他节点的平均最短路径长度来计算, 节点的接近度中心性值越高, 表示这个节点离其他节点更近, 与其他节点之间的联系更紧密。设  $d_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  间的最短距离, 则:

$$C(i) = \frac{N-1}{\sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}} \quad (3)$$

### (4) 边介数

边介数是指在网络中所有最短路径中, 经过某一边的比例。对于给定的一对节点, 如果存在多条最短路径, 那么这些路径上的每条边都会获得相同的贡献值。高边介数的边往往是信息流的关键通道, 删除这些边可能导致网络的连通性显著下降, 影响信息的高效传播。设  $e_{ij}$  表示节点  $i$  与节点  $j$  间的连边,  $g_{st}(e_{ij})$  表示节点  $s$  与  $t$  间经过边  $e_{ij}$  的最短路径数,  $g_{st}$  表示节点  $s$  与  $t$  之间的最短路径总数,  $N$  为节点总个数, 则边  $e_{ij}$  的边介数可以表示为:

$$B(e_{ij}) = \frac{2 \sum_{s \neq t} g_{st}(e_{ij})}{N(N-1)} \quad (4)$$

需要指出的是, 上述评价策略主要考虑的对象是静态网络, 对于诸如卫星网络之类的动态天基网络还需要针对其动态特性在传统的静态网络评价方法上进行一定的改进。对于拓扑随时间不断变化的网络, 一个通用的思路是将动态网络划分成时隙网络, 并进一步将其分解为一个静态网络, 然后采用静态网络的分析方法来评估这一时刻的节点重要程度, 最后再将所有结果按一定方法进行整合, 获得动态网络节点的最终重要性<sup>[27]</sup>。此外, 也有一部分研究人员进一步强化了时间片之间的联系, 提出了诸如时隙重叠拓扑系数和超邻接矩阵系统模型构建的方法, 为动态网络的表征提供了一种新的思路<sup>[28-29]</sup>。由于本文所考虑的对象为 LEO 卫星通信网络, 卫星链路通断较为频繁, 因此为了降低系统模型的复杂度, 在后续仿真中均采用虚拟拓扑法<sup>[30]</sup>来对网络的拓扑动态性进行管理, 即采用固定的时隙间隔来更新卫星的路由状态, 这也是当前最为常用的网络拓扑动态性仿真方法之一。

## 2 基于关键节点分析的负载优化策略

卫星通信网络不同于小世界网络和无标度网络等具有随机连边的传统复杂网络, 卫星网络的拓扑

结构相对固定，且具有周期性，因此在评估前对其进行分析将有助于提高关键节点评价策略的针对性和有效性。

### 2.1 LEO星座拓扑结构分析

在传统的卫星通信模式中，信号需要先从地面站发送至卫星，再由卫星转发至另一个地面站，如此循环往复，直到传递到目标地点。然而随着星间链路（Inter-Satellite Links, ISL）的引入，卫星实现了在整个星座内部的直接通信，不仅显著减少了路由跳数，还有效降低了传输时延，这对于提高低轨卫星星座的互联网接入性能至关重要。当前星间链路已被广泛应用于低轨卫星通信系统当中，Telesat与Starlink星座均在其卫星中引入了这一设计<sup>[31]</sup>。

当前星间链路通常被设计为“+Grid”形式<sup>[32-33]</sup>，即每颗卫星通常都拥有4个双向的星间链路，其中两个为其同一轨道上与之相邻的卫星，另外两颗为其相邻轨道上的卫星，由于相邻轨道上的卫星与其运动方向基本一致，因此两者的相对运动速度较低，可以维持很长一段时间。在此基础上，卫星之间是否能建立星间链路还受距离的限制。本文中星间链路的最长距离主要受地球半径 $R$ ，卫星轨道高度 $h$ 以及地球大气中电离层厚度 $h_s$ 的影响，为降低电离层对信号传输的损耗，星间链路应避免穿过该部分大气层。仿真中默认电离层厚度为80km，因此在满足+Grid型星间链路结构的基础上，两颗卫星间建链的最大距离为：

$$D_{max} = 2\sqrt{(R+h)^2 - (R+h_d)^2} \quad (5)$$

### 2.2 LEO卫星系统负载优化策略

考虑到低轨卫星的主要优势在于提供低延迟和低成本的全球网络覆盖，因此对LEO系统中的卫星节点进行信息传输能力的分析具有重要意义，这也有助于评估网络中可能出现的拥塞情况。设 $k_i$ 表示节点 $i$ 的度， $\Gamma(i)$ 为节点 $i$ 的邻居节点集合， $e_{ij}$ 表示节点 $i$ 与 $j$ 间的连边，则其节点的重要度可以表示为：

$$E(i) = \frac{\sum_{j \in \Gamma(i)} B(e_{ij})}{k_i} \quad (6)$$

$E(i)$ 反映了节点邻边在信息传递过程中可能产生的最大负载压力，其评估值越大，则表明经过该节点的信息量越大，在实际流量传输过程中发生拥塞的可能性越高，其故障可能会导致网络性能的显

著下降。在此基础上，进一步提出了基于关键节点分析的LEO卫星系统负载优化策略，算法流程图如图1所示：

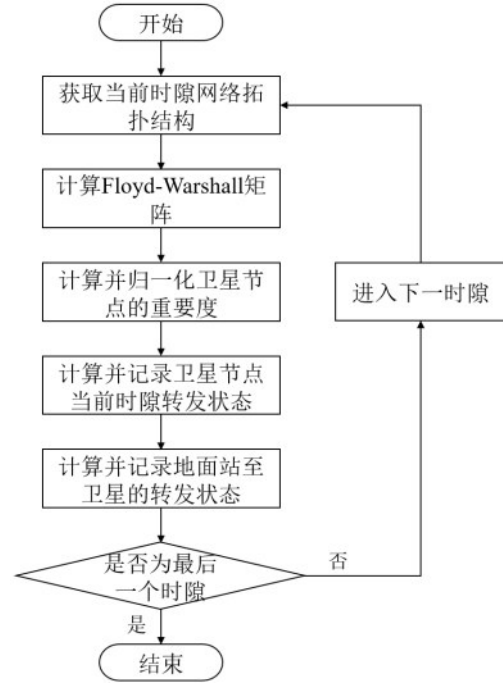


图1 算法整体流程图

步骤1根据卫星网络拓扑图（不含地面站）计算Floyd-Warshall矩阵。Floyd-Warshall算法是用来解决所有顶点之间的最短路径问题的一种算法，通过使用动态规划的思想，迭代更新一个二维矩阵来保存所有顶点之间的最短路径长度，能够高效地计算出所有顶点之间的最短路径，特别适合于稠密图和需要求解所有顶点间最短路径的问题。Floyd-Warshall矩阵计算过程如下：

算法1 Floyd-Warshall算法

输入 卫星个数 $N$ ，卫星拓扑图 $G$

输出 二维Floyd-Warshall矩阵

初始化 二维矩阵 $FW$

- 1) for  $i$  from 1 to  $N$  do
- 2) for  $j$  from 1 to  $N$  do
- 3) if  $(i,j)$  是直接相连的边 then
- 4)  $FW[i][j] = G[(i,j)]['weight']$
- 5) else if  $i = j$  then
- 6)  $FW[i][j] = 0$
- 7) else
- 8)  $FW[i][j] = \text{inf}$
- 9) end if

```

10) end for
11) end for
12) for  $k$  from 1 to  $N$  do
13) for  $i$  from 1 to  $N$  do
14) for  $j$  from 1 to  $N$  do
15) if  $FW[i][j] > FW[i][k] + FW[k][j]$  then
16)  $FW[i][j] = FW[i][k] + FW[k][j]$ 
17) end if
18) end for
19) end for
20) end for
21) return FW

```

步骤2根据式(6)计算每颗卫星的重要度并进行归一化。

步骤3进行转发状态的计算,算法流程如下:

算法2基于关键节点分析的负载优化策略

输入 当前时隙的拓扑图  $G$ , 卫星个数  $N_1$ , 地面站个数  $N_2$ , 当前时隙地面站可视卫星集合  $Vg$  (含对应距离), 距离限制因子  $\alpha > 0$ , 路径限制  $p$ , 卫星节点重要度评估值集合  $E$

输出 当前时隙的转发状态

```

1) for  $cs$  from 1 to  $N_1$  do
2) for  $gs$  from 1 to  $N_2$  do
3) for  $i$  in  $Vg[gs]$  do
4) if  $E[i] \leq 0.75$  then
5)  $length[i] = FW[cs,i] + Vg[gs][i]$ 
6) end if
7) 选择  $length$  中路径最短的作为最后一跳卫星  $dst$ , 并记录此时  $cs$  到  $gs$  的距离至  $D$ 
8) end for
9) if  $cs \neq dst$  then
10) 计算  $cs$  到  $dst$  的最短路径长度  $l_s$  及前  $p$  条最短路径集  $P$ 
11) for  $path$  in  $P$  do
12) if  $l_{path} \leq (1 + \alpha)l_s$  then
13) 计算每条路径节点重要度和
14) end if
15) end for
16) 选择重要度和最小的路径作为下一跳
17) end if
18) if  $cs = dst$  then
19) 更新转发状态

```

```

20) end if
21) end for
22) end for
23) for  $src_g$  from 1 to  $N_2$  do
24) for  $dst_g$  from 1 to  $N_2$  do
25) if  $src_g \neq dst_g$  then
26) for  $i$  in  $Vg[src_g]$  do
27) if  $E[i] \leq 0.75$  then
28)  $length[i] = Vg[src_g][i] + D(i, dst_g)$ 
29) end if
30) end for
31) 选择  $length$  中路径最短的作为第一跳, 更新转发状态
32) end if
33) end for
34) end for
35) return 当前时隙转发状态

```

改进后的算法主要依据 Floyd-Warshall 矩阵来确定最短路径, 并依据基于边介数的公式(6)来对网络中的信息传输关键节点进行分析评估, 并将此作为参考进行负载优化。

对于算法2, 主要分为两部分。第一部分计算确定卫星节点到地面站的下一跳信息, 对应1至22行, 其首先遍历卫星节点与地面站节点, 确定每颗卫星到每个地面站的最后一跳卫星, 通过对该卫星的评分值进行一定的限制以降低节点拥塞对整个链路的影响。在确定最后一跳卫星后, 依据距离限制因子  $\alpha$  和路径限制  $p$  来分析不同路径下的链路状况, 从而选出相对空闲的链路最为路径的下一跳。第二部分计算地面站到卫星的第一跳节点, 对应第23到34行, 该部分在考虑路径长度的同时, 结合节点的评估值来对其进行合理的规划。基于关键节点分析的负载优化策略为网络的路径规划提出了一个新的参考角度。

### 3 实验结果分析

本文采用的仿真平台为 Hypatia, 这是由苏黎世联邦理工学院的研究人员开发的基于 NS-3 的 LEO 星座模拟器<sup>[34]</sup>, 其首先使用 Python 相关模块计算出仿真全部时刻的转发状态, 再导入 NS-3 仿真环境进行实际数据包传输测试。但是 Hypatia 仅支持输入单一轨道高度的星座轨道参数, 因此本文在

此基础上对 Hypatia 程序进行了改进以支持完整的 LEO 星座。仿真采用 Telesat 和 Kuiper 星座作为测试对象并对其网络拓扑进行了相关的评估，具体轨道参数如表 1 所示。仿真主要分为三个部分，分别是节点评估策略效果分析、单层轨道高负载交叉流量测试以及多层轨道高负载交叉流量测试。第一部分首先选取了 Telesat 星座的 T1 层 351 颗卫星，采用节点删除法从前后路径改变次数和最小时延角度对比分析了本文节点评估的有效性。接着采用本文所提负载优化策略，在 T1 层轨道中进行了高负载下的流量传输测试，分析了算法的实际效果；最后，考虑到 LEO 星座的整体规模，在第二部分的基础上将单层轨道扩充至多层轨道，并选取卫星数量相对更多的 Kuiper 星座 K1 和 K2 层轨道共计 2452 颗卫星，进行了高负载交叉流量测试，验证了所提算法在现有星座中的有效性。

表 1 仿真涉及星座轨道参数

	层号	轨道高度/km	轨道个数	每个轨道的卫星数	倾角
Telesat	T1	1015	27	13	98.98°
	T2	1325	40	33	50.88°
Kuiper	K1	630	34	34	51.9°
	K2	610	36	36	42°
	K3	590	28	28	33°

### 3.1 节点评估策略效果分析

为了验证所提策略的有效性，在常规指标之外又选取文献[24]和文献[25]中的节点评估策略作为对比算法进行了实现。第一个算法是基于余弦相似度的评价方法，该算法将节点与理想化的特定指标进行比较，同样将多种属性融合对节点重要性进行评估；第二个算法是基于贡献度的卫星时变拓扑网络节点重要度评估方法，该方法充分考虑了节点的全局和局部重要性，是专门针对卫星网络提出的一种评价方法。

仿真中首先对上述节点评价方法分别进行了单独的测试，获取了每一时刻的节点评估值，并将其全部时刻结果进行累和排序选取出排名前 20% 的节点，然后删除这些节点，重新进行路由信息的计算并统计和对比前后路径变化情况，具体包含仿真期间的路径改变次数和最小时延情况，两者可以反映被删除节点的结构重要度以及数据转发和传输的能力，以此来评估其拥塞节点预测的准确性。

图 2 和图 3 分别显示了删除节点后所有路径的变更次数与最小时延的经验累积分布 (Empirical Cumulative Distribution Function, ECDF) 情况，其中基于边介数的策略即为本文中公式 (6) 的评估结果。从中可以看出基于边介数的评估策略效果显著，删除相应节点后会导致更频繁的路由切换并显著增加物理时延，其效果甚至远远优于根据实际链路利用率得出的结果，说明其预测结果具有全局性，考虑到了部分节点故障失效后的替代路径情况。为了确认其对潜在拥塞节点的评估效率，将基于边介数评估的前 20% 节点与实际仿真得出的原始数据中链路占用率最高的前 20% 节点进行了对比，数据显示两者的重合度为 62%，优于其他方法，因此基于复杂网络的节点评估方法在依靠网络拓扑结构信息来预测拥塞节点方面具有良好的效果。

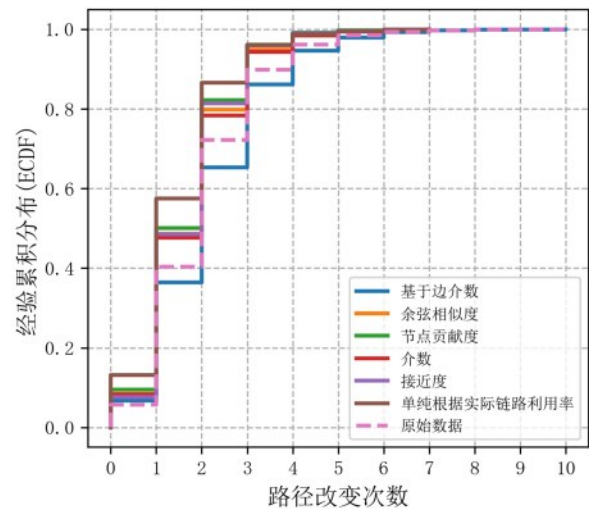


图 2 删除排名前 20% 节点后路径变化情况

### 3.2 单层轨道高负载交叉流量测试

通过上一小节的仿真分析，已经验证基于边介数的节点评估方法在潜在拥塞节点预测方面具有良好的效果。在此基础上，对本文所提出的负载优化策略进行单层轨道交叉流量测试，其中  $\alpha = 0.3$ ,  $p = 5$ , 详细参数设置如表 2 所示，仿真选取了全球人口排名前 100 个城市作为地面信关站，随机两两配对构成了 100 个城市对，对每一对城市设置了  $8 \times 10^6$  Mbit 的流量发送计划，考虑到链路最大传输速率为 10 Mb/s，每个节点对均不可能在 200 秒的仿真中完成相应的流量传递，以此来模拟 LEO 星座高负载情况。

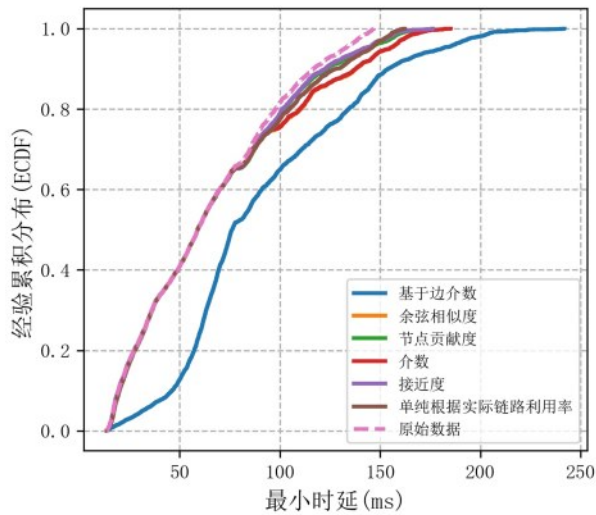


图3 删除排名前20%节点后最小时延分布情况

表2 单层轨道高负载交叉流量测试仿真参数设定

参数	数值
仿真时间	200秒
转发状态更新间隔	100毫秒
星间链路传输速率上限	10Mb/s
地面站与卫星链路传输速率上限	10Mb/s
星间链路缓冲队列长度	100个数据包
地面站与卫星链路缓冲队列长度	100个数据包
拥塞控制协议	TcpNewReno

图4记录了这100个城市对在200秒仿真中的最大最小与平均时延情况。结果显示所提策略的最小时延与原来相比基本无明显变化，但是可以有效降低时延的峰值，减小高负载情况下的时延波动。出现这种现象的原因在于，最低时延主要由物理距离决定，而本文策略对可能发生拥塞的节点选取了

非最短路径来进行规避，因此其路径长度大于原始数据；而仿真结果显示两者最低时延相差极小，表明改进策略所选取的路径长度相比最短路径并没有发生明显的增加。最大时延反映了整个链路的拥塞程度，改进后最大时延的降低表明该方法所得的路由结果相比于最短路径可以有效降低整条链路的拥塞程度。从平均时延来看，100个城市对的平均时延整体呈现下降趋势，且整体平均时延低于原始数据。这也表明高负载下的链路时延状况主要由节点拥塞情况决定，此时应该优先考虑下一跳节点的流量负载对链路的影响。

仿真同时还抽取一定时刻记录了星间链路占用率和整体吞吐量，如表3所示，其中链路平均占用率计算排除了无负载的链路。仿真结果表明，本文所提负载优化策略可以有效提升高负载下整个系统的吞吐量，同时在一定程度上分散和降低平均链路占用率，缓解部分链路因少数节点满载而导致的性能降低。

表3 Telesat星座T1层链路占用率与吞吐量情况

性能指标	最短路径算法	本文算法
总计吞吐量	76135Mb	76293Mb
50秒时链路平均占用率	73.7%	68.9%
100秒时链路平均占用率	79.6%	70.3%
150秒时链路平均占用率	74.7%	62%
200秒时链路平均占用率	79.3%	77.4%

### 3.3 多层轨道高负载交叉流量测试

为了继续分析本文所提算法在多层轨道系统中的性能，在上一节的基础上，将仿真场景由Telesat

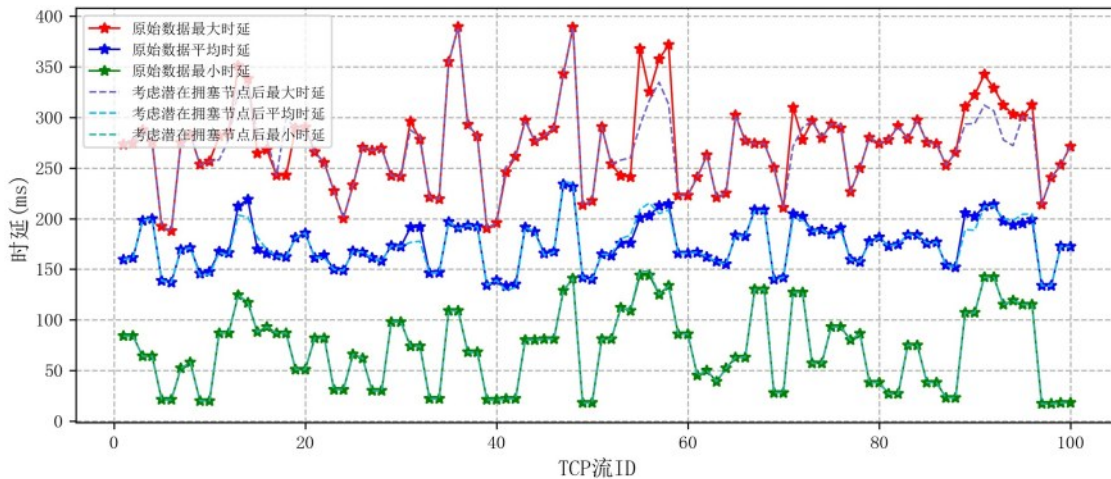


图4 单层轨道高负载交叉流量测试下100个城市对时延对比

星座T1层变为Kuiper星座的K1与K2层，卫星数量则由351颗扩充至2452颗。由于本部分拓扑规模急剧扩大，因此仿真时间缩短为100秒，转发状态的更新间隔为扩大为1000毫秒，即每隔1秒更新一次路由状态，其余参数均维持不变。其仿真结果如表4所示。

表4 Kuiper星座K1与K2层轨道不同算法的性能对比

采用策略	平均时延	总计吞吐量	平均链路占用率
最短路径	175.49ms	46119.25Mb	54.45%
本文算法	171.35ms	47337.63Mb	54.22%

仿真数据显示本文所提负载优化策略可以有效改善整个系统在高负载下的平均时延情况，其效果比单层轨道要更为明显。为了全面评估该策略的适用性，本文接下来将进一步分析其在低负载场景下的表现。

在低负载场景中，网络中的数据流量相对较少，节点之间的流量负载通常不会达到饱和状态，资源较为充裕。此时，节点间的传输时延主要受实际距离影响，最短路径路由算法在理论上可以最小化数据包的传输时延，因此本文将这一策略选作对比基准。在该场景下，两点间的理论往返时延(Round Trip Time, RTT)如公式(7)所示：

$$RTT = \frac{2 \times L_{path}}{c} \quad (7)$$

其中 $L_{path}$ 表示两个地面站间链路的路径长度，光速 $c = 299792458\text{m/s}$ 。

在此基础上，图5以经验累积分布函数(ECDF)的形式对两种算法下的理论最小时延和理论平均时延进行比较。

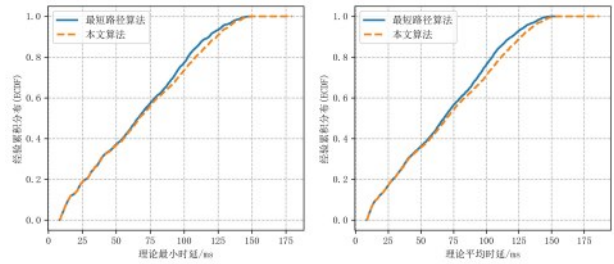


图5 低负载场景下不同策略理论时延对比

结果显示，当网络负载较低时，最短路径路由算法与所提负载优化策略之间的时延差距较小，只产生约4.4%的平均物理时延增长。这表明即使在低负载场景下，所提出的优化策略也不会带来明显的性能损失。

此外，图6和图7分别展示了仿真期间100个地面站对之间的时延情况和其中两个城市对之间的全程时延变化情况，数据表明除极少数城市对外，其余链路的平均时延与最大时延均发生了明显的降低。

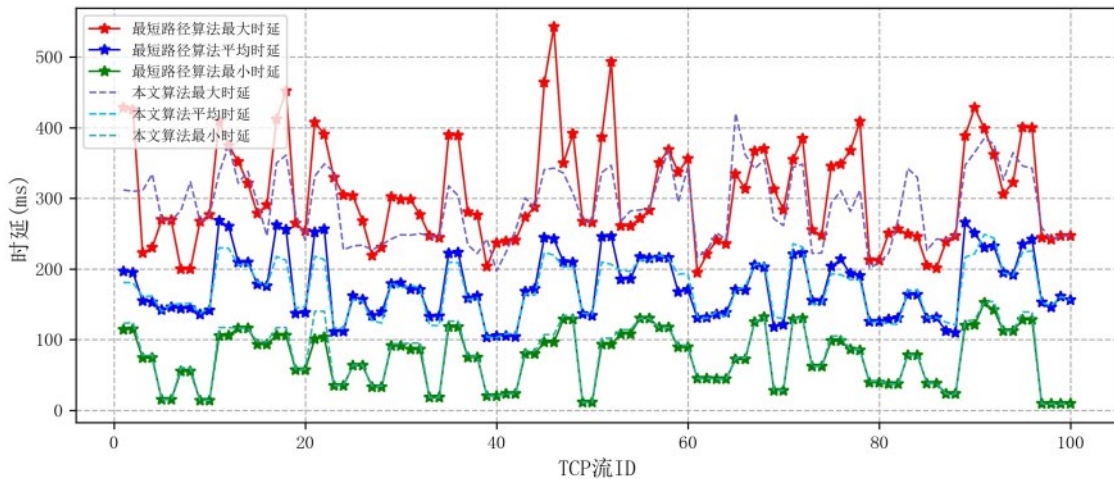


图6 Kuiper星座K1和K2层高负载下不同算法时延对比

图8和图9展示了t=29秒时最短路径算法与本文算法的星间链路占用率对比，其中红色表示链路占用率大于等于90%，橙色表示占用率在70%到90%之间，蓝色表示占用率在40%到70%，绿色表

示占用率在40%以下。数据显示相比最短路径路由算法，本文所提负载优化策略可以有效利用许多原本闲置的无负载链路，以图9为例，其中跨大西洋与太平洋的有效链路显著增加，且亚欧大陆上空的

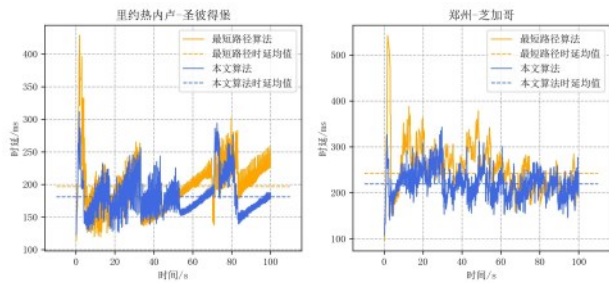


图7 Kuiper星座K1和K2层高负载下里约热内卢-圣彼得堡链路及郑州-芝加哥链路时延情况

链路也变得更加错综复杂，从链路占用率角度来看，橙色和蓝色的中高负载链路数量与原先相比明显增多，说明所提出的算法可以更为有效地利用原本的中低负载链路同时避开易拥塞节点来提高整体的吞吐量水平。

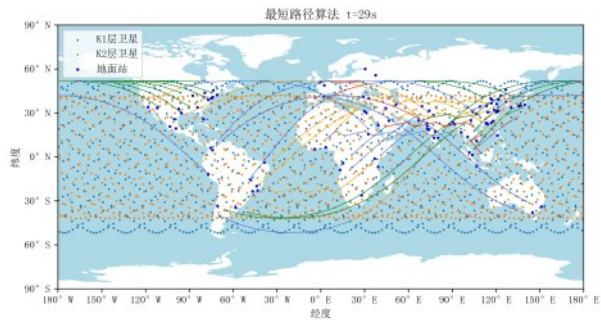


图8 K1和K2层高负载下最短路径算法星间链路使用情况(t=29s)

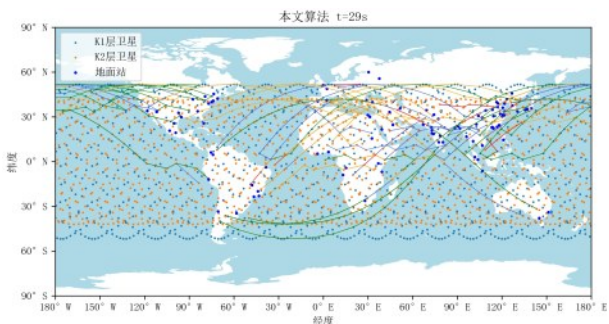


图9 K1和K2层高负载下本文算法星间链路使用情况对比(t=29s)

#### 4 结束语

本文依据复杂网络理论，提出了一种基于关键节点分析的低轨卫星通信系统负载优化策略。该策略首先利用虚拟拓扑法，将时变卫星网络转化为时序静态拓扑图，接着对每一时隙的网络图进行研究，通过分析节点自身的度属性以及其邻边的边介数信息，从全局角度对可能发生拥塞的节点进行评估，将其评价结果作为参考，在最短路径的基础上

对高分值节点采取合理的措施进行规避，从而在不完全依赖每个节点实时流量反馈的情况下，实现传输链路的负载优化，为网络的路径规划问题提供了一个新的参考角度。仿真结果显示本文提出的负载优化策略可以在不显著增加链路长度的情况下利用更多原本闲置的中低负载链路来提高卫星网络在高负载情况下的吞吐量并降低端到端时延，提升了网络的整体性能，弥补了当前负载均衡算法在全局拥塞节点预测方面的不足。

#### 参考文献：

- [1] JI S J, D. ZHOU D, SHENG M, et al, Mega Satellite Constellation System Optimization: From a Network Control Structure Perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(2): 913-927.
- [2] 张更新, 王运峰, 丁晓进, 等. 卫星互联网若干关键技术研究[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 1-14.  
ZHANG G X, WANG Y F, DING X J, et al. Research on Some Key Technologies of Satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 1-14.
- [3] 白卫岗, 盛敏, 杜盼盼. 6G卫星物联网移动性管理: 挑战与关键技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 104-110.  
BAI W G, SHENG M, DU P P. Mobility management of the 6G satellite IoT: challenges and key techniques[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 104-110.
- [4] 林敏, 李菲, 王子宁, 等. 智能反射面辅助的太赫兹卫星通信鲁棒安全波束成形算法[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2715-2723.  
LIN M, LI F, WANG Z N, et al. Robust Secure Beamforming Algorithm for IRS-Aided Terahertz Satellite Communication Systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(10), 2715-2723.
- [5] HAN C, LIU A J, HUO Y L, et al. A prediction-based resource matching scheme for rentable LEO satellite communication network[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(2): 414-417.
- [6] XU J J, KISHK M A and ALOUINI M S, Space-Air-Ground-Sea Integrated Networks: Modeling and Coverage Analysis[J], IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(9): 6298-6313.
- [7] AL-HRAISHAWI H, CHOUGRANI H, KISSELEFF S, et al. A survey on nongeostationary satellite systems: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 101-132.
- [8] HANDLEY M. Using ground relays for low-latency wide-area routing in megaconstellations[C]//Proceedings of the 18th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2019: 125-132.
- [9] 田露, 马冬青, 孙剑伟等. 高中低轨道导航星座混合体制星间链路规划[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(04): 19-26.  
TIAN L, MA D Q, SUN J W, et al. Inter-satellite link planning of

- high-middle-low orbit hybrid constellation[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(4):19-26.
- [10] 陈全,杨磊,郭剑鸣等. 低轨巨型星座网络:组网技术与研究现状[J]. 通信学报, 2022, 43(05): 177-189.  
CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art [J]. Journal of Communications,2022,43(05):177-189.
- [11] Wang N, Liu L, Qin Z, et al. Capacity analysis of LEO mega-constellation networks[J]. IEEE Access, 2022, 10: 18420-18433.
- [12] 王子宁,林敏,李菲等. 卫星网络和高空平台网络频谱共存下的分布式鲁棒波束成形算法[J]. 通信学报,2023,44(12):39-49.  
WANG Z N, LIN M, LI F, et al. Distributed robust beamforming algorithm for spectral co-existence of satellite networks and high-altitude platform networks [J]. Journal of Communications, 2023, 44 (12) : 39-49.
- [13] 贾庆民,丁瑞,刘辉,等. 算力网络研究进展综述[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(5): 1-12.  
JIA Q M, DING R, LIU H, et al. A Review of the Research Progress of Computing Network[J]. Journal of Network and Information Security, 2021, 7(5): 1-12.
- [14] Huang Y, Yang D, Feng B, et al. A GNN-enabled multipath routing algorithm for spatial-temporal varying LEO satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 73(4): 5454-5468
- [15] Liu J , Luo R , Huang T , et al. A load balancing routing strategy for LEO satellite network[J]. IEEE Access, 2020, PP(99):1-1.
- [16] Xu L , Tang F , Long C , et al. A state-aware and load-balanced routing model for LEO satellite networks[C]. IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2017.
- [17] Liu Z , Li J , Wang Y , et al. HGL: A hybrid global-local load balancing routing scheme for the Internet of Things through satellite networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(3):155014771769258.
- [18] LIU J H, ZHAO B K, XIN Q, et al. DRL-ER: An intelligent energy-aware routing protocol with guaranteed delay bounds in satellite mega-constellations[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(4): 2872-2884.
- [19] 戴翠琴,秦杰鹏,许涛等. 基于QoS保障的低轨卫星星座设计[J]. 中国空间科学技术, 2023,43(03):105-115.  
DAI C Q, QIN J P, XU T, et al. LEO satellite constellation design based on QoS [J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43 (3): 105-115.
- [20] GHANEM M, MAGNIEN C, TARISSAN F. Centrality metrics in dynamic networks: A comparison study[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2019, 6(4): 940-951.
- [21] 张昕,郭阳. 复杂网络中的一种介度熵抗毁性度量方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(12): 105-111.  
ZHANG X, GUO Y. A method for measuring mesoscopic entropy resilience in complex networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 56(12):105-111.
- [22] 蒋成洋,张瀚阅,孔槐聪,等. 融合功能特征和拓扑结构的卫星物联网关键节点分析[J/OL]. 物联网学报, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1491.tp.20240925.1751.002.html>.  
JIANG C Y,ZHANG H Y,KONG H C, et al. Analysis of key nodes fusing functional characteristics and topology in satellite internet of things networks[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 1-12.
- [23] 蒋世洪. 城市公共交通网络关键节点识别研究[D]. 西南大学, 2022.  
JIANG S H. Research on identification of key nodes of urban public transport network[D]. Southwest University,2022.
- [24] 郭晓成,马润年,王刚. 复杂网络中节点重要性综合评价方法研究. 计算机仿真[J], 2017, 34(07): 264-268.  
GUO X C, MA R N, WANG G. Research on comprehensive evaluation method of node importance in complex network[J]. Computer Simulation,2017,34(07):264-268.
- [25] 朱林,方胜良,胡卿等. 卫星时变拓扑网络节点重要度评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(06):1274-1279.  
ZHU L, FANG S L, HU Q, et al. Evaluation method of node importance in satellite time-varying topological networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(06):1274-1279.
- [26] 倪少杰,岳洋,左勇等. 卫星网络路由技术现状及展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(02): 383-395.  
NI S J, YUE Y, ZUO Y, et al. Current situation and prospect of satellite network routing technology [J]. Journal of Electronics and Information Technology,2023,45(02):383-395.
- [27] 李国栋,赵忠文,石成豪. 基于复杂网络的天基信息网节点重要性评价综述[J]. 兵工自动化, 2023,42(02):70-74+82.  
LI G D, ZHAO Z W, SHI C H. A review of node importance evaluation of space-based information networks based on complex networks[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 42(02): 70-74+82.
- [28] 杨剑楠,刘建国,郭强. 基于层间相似性的时序网络节点重要性研究[J]. 物理学报, 2018, 67(04):279-286.  
YANG J N, LIU J G, GUO Q. Research on node importance of temporal network based on interlayer similarity[J]. Acta Physica Sinica,2018,67(04):279-286.
- [29] 胡钢,许丽鹏,徐翔. 基于时序网络层间同构率动态演化的重要节点辨识[J]. 物理学报, 2021, 70(10):355-366.  
HU G, XU L P, XU X. Identification of important nodes based on dynamic evolution of isomorphism rate between layers in temporal networks[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 70(10):355-366.
- [30] JIA M, ZHU S Y, WANG L F, et al. Routing algorithm with virtual topology toward to huge numbers of LEO mobile satellite network based on SDN[J]. Mobile Networks and Applications, 2018, 23 (2): 285-300.
- [31] Osoro O B, Oughton E J. A techno-economic framework for satellite networks applied to low earth orbit constellations: Assessing Starlink, OneWeb and Kuiper[J]. IEEE Access, 2021, 9: 141611-141625.
- [32] Bhattacharjee D, Singla A. Network topology design at 27,000 km/

- hour[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments And Technologies. 2019: 341-354.
- [33] McLaughlin J, Choi J, Durairajan R. × Grid: A Location-oriented Topology Design for LEO Satellites[C]//Proceedings of the 1st ACM Workshop on LEO Networking and Communication. 2023: 37-42.
- [34] KASSING S, BHATTACHERJEE D, ÁGUAS A B, et al. Exploring the "Internet from space" with Hypatia[C]. //Proceedings of the ACM Internet Measurement conference. 2020: 214-229.