

面向低轨巨型星座的多维属性特征联合表征方法

曹彩红, 禹明慧, 秦瑞艳, 宋雅琴, 王亚鹏, 程志密, 徐 晖

(大唐移动通信设备有限公司, 北京 100083)

摘要: 随着低轨星座向大规模、高动态化方向演进, 其时变拓扑与动态资源给网络管理带来严峻挑战。基于时变图模型, 融合算力和网络异构资源, 提出一种面向低轨巨型星座的多维属性特征联合表征方法, 实现网络状态的统一建模与精准表征。在具有 Starlink 特征的子星座路由决策场景下的仿真结果表明, 基于该表征的路由方案相比链路资源感知 Dijkstra 算法的端到端时延平均降低 14.23%, 显著提升了路由效率。

关键词: 低轨巨型星座; 多维属性; 特征表征; 星间路由

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2025069

Joint representation method of multi-dimensional attribute features for low earth orbit mega-constellations

Cao Caihong, Yu Minghui, Qin Ruiyan, Song Yaqin, Wang Yapeng, Cheng Zhimi, Xu Hui

Datang Mobile Communications Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China

Abstract: With the evolution of low earth orbit (LEO) constellations toward large-scale and highly dynamic systems, their time-varying topologies and dynamic resources pose significant challenges to network management. To address this, we propose a joint representation method of multi-dimensional attribute features for LEO mega-constellations, based on a time-varying graph model that integrates heterogeneous resources such as computing and networking capabilities, enabling unified modeling and precise characterization of network states. Simulation results in a Starlink-like sub-constellation routing scenario demonstrate that the routing scheme based on the proposed representation reduces end-to-end delay by an average of 14.23% compared with the link-resource-aware Dijkstra algorithm, significantly improving routing efficiency.

Key words: LEO mega-constellations, multi-dimensional attribute, feature representation, inter-satellite routing

0 引言

卫星接入在 5G 标准化和手机直连卫星的商用实践中取得了热烈反响, 面向 2030 年及以后无处不在的通信需求及愿景, 卫星通信将持续成为未来移动通信网络的关键支撑。卫星通信系统根据轨道高度, 可分为地球静止轨道 (geostationary orbit, GEO) 卫星、中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 卫星和低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星。第三代合作伙伴计划 (the 3rd generation partnership project, 3GPP) 标准组织定义的不考虑星

间链路场景下的 5G 卫星接入的时延关键绩效指标 (key performance indicators, KPI) 指出, 终端通过 LEO、MEO 和 GEO 卫星接入的最大往返时延分别是 30 ms、90 ms 及 280 ms^[1]。可以看出, 终端使用 GEO 卫星接入的通信时延是 LEO 卫星的 7 倍多, 因此针对时延敏感型业务, GEO 卫星并不能满足用户的服务质量 (quality of service, QoS) 需求。而 LEO 卫星由于具有通信时延小、信号衰减减少等优势, 已成为运营商和用户的首要选择。近年来, 随着“一箭多星”技术的高速发展, 低轨卫星的发射效率大幅提升, 发射成本显著降低^[2], 使得低轨卫星的商

收稿日期: 2025-12-29; 修回日期: 2026-04-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2024YFB2907303)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2024YFB2907303)

业价值愈发凸显,低轨巨型星座也因其广覆盖、低成本、低时延等优势成为研究热点。

低轨巨型星座通常是指由成千上万颗低轨卫星组成的系统性网络,具有卫星数目庞大、拓扑结构复杂等特点^[3]。典型的低轨巨型星座有 Starlink 和 OneWeb, Starlink 星座是 SpaceX 推出的全球互联网项目,截至 2025 年 6 月 20 日,Starlink 星座共发射低轨卫星 8 848 颗,在轨 6 554 颗,Starlink 还计划将星座总规模扩增至 4.2 万颗^[4]。OneWeb 的目标是通过发射数百颗中低轨卫星,构建一个低时延、高速率的全球通信网络,其已于 2024 年 10 月完成第一代卫星星座的发射,共发射卫星 654 颗。根据 OneWeb 公司的规划,其预计共发射 6 372 颗低轨卫星和 1 280 颗中轨卫星^[5]。

低轨巨型星座网络通过大规模部署卫星实现全球覆盖,其基础支撑体系由节点资源(如计算资源、存储资源)和链路资源(如带宽、时延)共同构成,为全球提供泛在连接服务。然而,低轨卫星运行周期较短,且不同卫星在轨道高度、轨道倾角等部署参数方面均存在差异,导致低轨巨型星座网络拓扑结构频繁发生变化、星间通信链路状态不稳定,进而引发卫星节点资源的动态波动^[6]。这一系列动态性和复杂性使得传统的单一维度建模方式难以全面、准确地反映低轨巨型星座网络的真实状态。

为精准表征低轨巨型星座网络的资源状况,本文结合低轨巨型星座的算力资源和网络资源展开研究,主要贡献如下:一是提出基于时变图的低轨巨型星座多维属性特征联合表征方法,对星座的异构资源进行统一建模;二是基于公开的 Starlink 部署参数,选取轨道高度 550 km、倾角 53°轨道层中的 800 颗卫星构建拓扑模型,并采用多维属性特征联合表征方法对星上资源进行模拟;三是通过多组实验对比多维资源感知路由算法与链路资源感知路由算法的端到端时延,验证多维资源联合表征方法对星间路由性能提升的有效性。

1 相关工作

为了屏蔽卫星星座网络的动态性,目前通常借鉴虚拟拓扑法思想。虚拟拓扑法利用星座拓扑可预测的特性将星座拓扑离散成若干时间片,每个时间片内的星座拓扑可被认为保持不变,拓扑的变化仅在时间片之间发生,每个时间片内的拓扑被称为虚拟拓扑^[7]。由于虚拟拓扑法并未明确每个时间片内静态拓扑的表征方式,而图模型被广泛用于表征各种网络,因此,业界众多学者

将图模型与动态拓扑的表征联系起来,提出基于时变图的动态网络拓扑表征方法。

目前,针对卫星星座动态拓扑的时变图模型已取得大量成果。文献[8]对 4 种常用的时变图方法(包括快照序列图、时间扩展图、存储时间聚合图和多功能时间扩展图)进行了对比,并分析了各自的优缺点。文献[9]将星间链路(inter-satellite link, ISL)的动态属性与时变图模型相结合,构建了一种基于 ISL 属性的时空演化加权图模型,以快速描述快照间连续变化的拓扑过程。文献[10]提出一种基于坐标图的时变图模型来描述 LEO 卫星网络的拓扑构型和资源分布,该方法利用二维笛卡尔坐标系建立时变模型图,以更好地反映 LEO 卫星网络的实时状态。文献[11]针对巨型星座网络,提出一组度量巨型星座网络拓扑动态性的指标,并提出一种等时快照拓扑方法,解决巨型星座的复杂动态导致的快照数量激增问题。文献[12]面向多层多域巨型星座的拓扑控制问题,通过将星座立体空间划分为不同的域、层、片等粒度,然后提出基于北斗网格位置码的立体空间多维数组表征方法,对拓扑进行统一表征。文献[13]通过使用事件驱动时间扩展图,将观察资源和传输资源联合考虑,并利用整数线性规划方法最大化任务成功调度的优先级之和,以解决当进行地球观测时多维异构网络资源的协调问题。文献[14]针对卫星互联网动态变化的特点,提出图划分和模拟退火策略结合的网络拓扑标识与优化算法,解决卫星互联网动态性特征表示过于依赖初始解而导致迭代次数较多的问题。

上述卫星网络拓扑表征方法中,采用时变图的卫星网络拓扑表征方法大多仅对星间链路是否存在或通信属性进行表征,较为先进的多功能时间扩展图^[15]对通信资源、存储资源和计算资源进行了联合表征,但其通过将一个功能节点划分为虚拟子节点和不同的虚拟功能节点以进行不同资源表示,这在低轨巨型星座中会导致求解优化问题的时间复杂度成倍增加。因此,针对上述挑战,本文提出一种面向低轨巨型星座的多维属性特征联合表征方法,在不增加复杂度的前提下,对低轨巨型星座网络拓扑的算力、网络等多维资源进行联合表征,实现对低轨巨型星座网络的全面精准感知,提升巨型星座网络的路由效率和灵活性。

2 低轨巨型星座网络模型

低轨巨型星座中卫星数目庞大,卫星之间通过星间链路进行通信,其网络拓扑随时间呈周期性规律变化。

由于巨型星座中的低轨卫星部署在不同的轨道面，不同卫星的运行周期和运行轨迹均存在较大差异，星间链路频繁断开或重建导致巨型星座的网络拓扑时刻发生变化。为了屏蔽低轨巨型星座拓扑的动态性，本文采用时变图的方法对低轨巨型星座网络拓扑进行建模，首先将卫星运行周期内的卫星动态拓扑离散成时间维度的图序列，每个时间片内的网络拓扑被认为是静止的；然后在基于时变图的低轨巨型星座网络拓扑中对卫星的算力、星间链路属性等内容进行表征，形成具有资源特征的低轨巨型星座网络。

2.1 低轨巨型星座网络拓扑构型

基于时变图的低轨巨型星座网络拓扑构型方法的核心思想是：在某一时间片内，低轨巨型星座的网络拓扑通常表征为一个无向加权图 $G = (V, E)$ ，其中， V 表示卫星节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ， E 表示边集合，即星间链路集合^[16]。在整个卫星运行周期内，低轨巨型星座网络拓扑可以表示为一个基于时间 t 变化的图 $G(t) = (V(t), E(t))$ ，其中， $V(t)$ 和 $E(t)$ 分别表示在时间 t 时的卫星节点集合和星间链路集合 $E(t) \subseteq V(t) \times V(t)$ 。基于时变图的低轨巨型星座网络拓扑构型如图1所示。

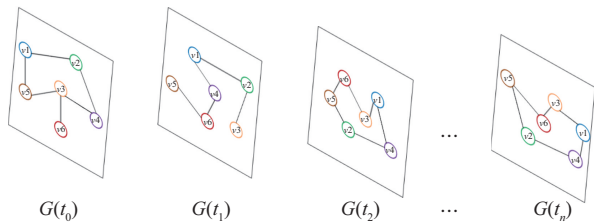


图1 基于时变图的低轨巨型星座网络拓扑构型

图1展示了低轨巨型星座网络中星间链路的网络特征属性，该属性分别由链路是否存在以及链路权重进行表征。然而实际上，卫星的算力情况也是影响卫星网络任务执行效率的关键因素之一，若卫星节点的算力不足，即使星间链路可达且路由路径最短，在卫星节点造成的处理时延也会影响整体的路由性能。且随着星上处理能力的不断提升，越来越多的任务（如边缘计算、数据压缩等）可以在卫星本地处理，计算资源和存储资源成为实现卫星节点任务高效处理和边缘计算能力的关键因素^[17]。因此，本文结合卫星节点的算力情况及星间链路的网络状况，对时刻 t 卫星的存储资源、计算资源等算力情况，以及链路的带宽、时延等特性进行联合表征，提出多维属性特征联合表征方法，如式(1)所示：

$$g(t) = (G(t), R(t)) \quad (1)$$

其中， $g(t)$ 是包含低轨巨型星座网络拓扑与资源双重信息的资源感知动态图，整个时间周期被划分为一系列离散图 $\langle g(t_0), g(t_1), \dots, g(t_n) \rangle$ ，每个 $g(t_m)$ 描述了时刻 t_m 的网络及资源状况。其中， $(t_0, t_1, \dots, t_n)$ 表示每个时间片开始的时间； $G(t) = (V(t), E(t))$ 表示低轨巨型星座在时刻 t 的网络拓扑图； $R(t)$ 表示时刻 t 时卫星节点粒度的计算能力、存储容量、星间链路粒度的带宽和通信时延这4种资源特征的集合， $R(t)$ 具体表达式如式(2)所示：

$$R(t) = \{C(i, t), S(i, t), B(i, j, t), D(i, j, t)\} \quad (2)$$

其中， $C(i, t)$ 和 $S(i, t)$ 为卫星节点资源属性， $B(i, j, t)$ 和 $D(i, j, t)$ 属于星间通信链路的关键属性，各分量含义如下。

$C(i, t)$ 表示卫星节点 v_i 在时刻 t 可用的计算资源总量，以反映卫星节点的硬件配置水平及当前负载状态。维度可通过中央处理器（central processing unit, CPU）核数、CPU 利用率、可用图形处理器（graphics processing unit, GPU）资源等指标体现，通常以每秒十亿次浮点运算（Giga floating-point operations per second, GFLOPS）或每秒百万条指令（million instructions per second, MIPS）为单位进行度量。具体表达式如式(3)所示：

$$C(i, t) = C_{\text{total}} \times (1 - \rho_{c_usage}(i, t)) \quad (3)$$

其中， C_{total} 为卫星节点 v_i 的总计算资源， $\rho_{c_usage}(i, t)$ 为卫星节点 v_i 在时刻 t 的计算资源使用率， $C(i, t)$ 随卫星的计算资源使用率 ρ_{c_usage} 动态调整。

$S(i, t)$ 表示卫星节点 v_i 在时刻 t 的可用存储空间，其对于保障任务执行的完整性、高效的数据转发以及缓存管理具有重要意义。具体包括剩余内存、固态存储等，单位通常为千兆字节（Gigabyte, GB）或兆字节（Megabyte, MB）。具体表达式如式(4)所示：

$$S(i, t) = S_{\text{total}} \times (1 - \rho_{s_usage}(i, t)) \quad (4)$$

其中，卫星的可用存储资源 $S(i, t)$ 由总存储空间 S_{total} 和存储资源使用率 $\rho_{s_usage}(i, t)$ 决定。

链路带宽 $B(i, j, t)$ 是描述连接卫星节点 v_i 与 v_j 的通信链路 e_{ij} 在时刻 t 所能支持的最大或实际可用数据吞吐速率，是衡量节点间数据传输能力的核心指标之一，其度量参数包括最大可用带宽、当前剩余带宽等，通常以兆比特每秒（Megabits per second, Mbit/s）或千兆比特每秒（Gigabits per second, Gbit/s）为单位。星间链路带宽需要考虑传输距离对链路可用带宽的影响，传输距离越远信

号衰减越大,接收端信噪比越低,整体符合平方反比定律^[18],基于此,建立传输距离与链路带宽 $B(i,j,t)$ 的映射关系,如式(5)所示:

$$B(i,j,t) = B_0 \times \left(\frac{d_0}{d_{ij}(t)} \right)^2 \quad (5)$$

其中, d_0 为邻近卫星之间的参考距离, B_0 为星间链路的最大可用带宽, $d_{ij}(t)$ 为两颗卫星在时刻 t 的实际距离。

链路时延 $D(i,j,t)$ 表示在时刻 t 通信链路 e_{ij} 从源卫星节点 v_i 传输至目标卫星节点 v_j 的时延,其直接决定了数据在卫星节点之间传输所需的时间,是衡量通信链路性能和服务质量的重要指标之一,包括传播时延和传输时延,通常以毫秒(ms)为单位。链路时延建模如式(6)所示:

$$D(i,j,t) = D_{\text{prop}} + D_{\text{trans}} = \frac{d_{ij}(t)}{c} + \frac{m_{\text{task_data}}}{B(i,j,t)} \quad (6)$$

其中,传播时延 D_{prop} 是指信号在卫星之间传播以及接收或发射所需的时间,其只和卫星之间的直线距离有关,可基于卫星间直线距离和激光在太空的传播速度(即光速 c) 计算得出;传输时延 D_{trans} 由任务数据量 $m_{\text{task_data}}$ 和链路可用带宽共同决定^[19]。

在进行多维属性特征联合表征时,原始属性数据存在量纲差异和数值尺度不一致的问题。为消除不同物理量纲对联合表征的影响,本文对4类属性均采用 Min-Max 归一化方法^[20]进行预处理,将每维属性线性映射至 $[0, 1]$ 区间,然后采用加权线性融合方法构建最终的节点与特征向量。考虑到不同属性对网络任务的重要性可能存在差异,引入可配置的权重系数 w 以增强表征的灵活性,如式(7)所示:

$$w = \alpha \times \hat{C} + \beta \times \hat{S} + \gamma \times \hat{B} + \delta \times \hat{D} \quad (7)$$

其中, $\hat{C}$ 、 $\hat{S}$ 、 $\hat{B}$ 和 $\hat{D}$ 分别为归一化后的计算资源、存储资源、链路带宽及时延, α 、 β 、 γ 、 δ 分别为向量权重,满足 $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ 。采用线性加权方法对多维属性进行融合,不仅运算简单,计算开销极低,适合星上处理能力受限的场景,还可根据任务类型设置不同的权重,增强了多维属性特征联合表征的可解释性,便于在动态变化的星座网络中快速应用,如可作为边权重直接用于路径代价计算。

2.2 多维属性特征联合表征

为了实现低轨卫星网络中卫星节点的计算资源、存储资源以及星间链路的带宽和时延等多维异构资源的统一建模,实现对整个卫星网络资源分布的精准表征,本节对基

于时变图模型的低轨巨型星座多维属性特征进行统一描述,将 $R(t)$ 定义为一个三维邻接张量 $A(t)$, 如式(8)所示:

$$A(t) \in R^{n \times n \times d}, \text{ 其中 } A_{ij}^k(t) = r_k(i,j,t) \quad (8)$$

其中, $n = |V(t)|$ 表示时刻 t 低轨巨型星座网络的卫星节点总数,即 $G(t) = (V(t), E(t))$ 中的顶点数量。 d 表示资源维度数量,本文中 $d=4$, 分别对应4类关键资源属性:卫星节点的计算资源、存储资源、星间链路的带宽和通信时延; $A_{ij}^k(t) = r_k(i,j,t)$ 表示第 k 维资源在时刻 t 从卫星节点 v_i 到 v_j 的资源量化值, $k \in \{0, 1, 2, 3\}$ 。各通道的具体物理含义如下。

$$k=0 \text{ 时, } A_{ij}^0(t) = \begin{cases} A_{ij}^0(t) = r_0(i,i,t) = C(i,t), i=j \\ 0, i \neq j \end{cases}, \text{ 表}$$

示每个卫星节点的计算资源。由于计算资源是节点属性而非边属性,因此其值主要映射于张量 $A(t)$ 的对角线位置,对于非对角元素 $A_{ij}^0(t) (i \neq j)$ 可设为0,以表明该资源不作用于卫星节点间的连接关系。

$$k=1 \text{ 时, } A_{ij}^1(t) = \begin{cases} A_{ij}^1(t) = r_1(i,i,t) = S(i,t), i=j \\ 0, i \neq j \end{cases}, \text{ 表}$$

示各卫星节点在时刻 t 的可用存储资源。存储资源同样属于节点属性,故也体现在对角线位置。

$k=2$ 时, $A_{ij}^2(t) = r_2(i,j,t) = B(i,j,t)$, 表示卫星节点之间星间链路 e_{ij} 的链路可用带宽,是典型的边属性。若卫星节点 v_i 与 v_j 之间存在有效星间链路,则使用 $B(i,j,t)$ 填充矩阵;若无直接连接或有效星间链路,则将 $A_{ij}^2(t)$ 置为0或设为极小值,表示链路不可达。

$k=3$ 时, $A_{ij}^3(t) = r_3(i,j,t) = D(i,j,t)$, 表示源卫星节点 v_i 经过星间链路 e_{ij} 传输至目标卫星节点 v_j 的时延。在低轨卫星星座中,单跳时延通常为1~10 ms,但多跳累加时延可能显著增加。

通过上述构造方式,三维邻接张量 $A(t)$ 实现了卫星节点属性与星间链路属性的统一编码,不仅保留了低轨巨型星座的原始网络拓扑结构,还将多维属性特征以结构化形式集成于同一数学框架之下,在路由算法中可通过统一输入接口 $A(t)$ 获取目标节点和星间链路的资源信息,以克服传统图模型难以同时表达多种资源类型的局限。同时还可结合时间序列方法,如长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络^[21]、图神经网络^[22]等方法,为低轨巨型星座网络中资源状态演化的动态预测以及任务的智能调度奠定基础。

3 仿真实验

低轨巨型星座作为空天地一体化网络的关键组成部分，正逐步发展为下一代通信系统的重要基础设施。在当前已部署的 LEO 星座中，Starlink 星座凭借其庞大的星座规模、多层次的轨道构型以及持续演进的组网能力，已成为最具代表性的大规模 LEO 通信星座之一，为巨型星座网络拓扑结构与路由机制的研究提供了可靠的现实参照。因此，本文基于 Starlink 星座公开部署参数，首先构建包含轨道高度 550 km、倾角 53° 轨道层的 800 颗卫星的网络拓扑模型，并进行可视化；然后基于第 2 节所述的多维属性特征联合表征方法，将星座拓扑和多维属性进行统一建模，形成具有资源特征的网络拓扑结构；最后在该拓扑结构中分别使用多维资源感知 Dijkstra 算法和链路资源感知 Dijkstra 算法，并以端到端时延为评价标准对两种算法的结果进行对比分析，以证明本文所提出的低轨巨型星座多维属性特征联合表征方法的可行性和优越性。

3.1 子星座拓扑构建及仿真

Starlink 星座轨道数据由北美防空司令部 (north American aerospace defense command, NORAD) 等机构通过 Space-Track^[23] 等公开数据平台定期发布和更新^[24]。CelesTrak^[25] 网站作为权威的第三方数据平台，定期从 Space-Track 同步并整理数据，为研究地球轨道环境和卫星运行状态提供了重要支持。本文通过访问 CelesTrak 网站获得 Starlink 星座的两行轨道根数 (two-line element set, TLE) 数据^[26]，TLE 数据是一种用于描述在轨航天器 (如卫星、火箭残骸等) 特定时刻轨道状态的标准数据格式，由 3 行文本组成：第一行为卫星名称，第二行和第三行为轨道元素数据，包含轨道倾角、偏心率、升交点赤经 (right ascension of the ascending node, RAAN) 等核心轨道参数。结合第 4 代简化通用摄动模型 (simplified general perturbations model 4, SGP4) 可精确计算低轨卫星在任意时刻的位置^[27]。该数据源具有良好的时效性、准确性和学术认可度，已被广泛应用于卫星轨道预测与网络拓扑建模研究。

本文采用 Python 平台对由 800 颗卫星构成的子星座的拓扑进行建模及仿真分析，通过解析 Starlink 公开的 TLE 数据，构建基于指定时刻 t_0 (本文中 t_0 取值为 2025-08-07 12:00:00) 的模拟实际运行状态的卫星网络拓扑模型。为减小计算负载并提高仿真效率，本文从 TLE 数据的 7 996 颗卫星中筛选出轨道高度 550 km、倾角 53° 轨道层的 800 颗卫星作为样本构建拓扑。在进行样本选择时，首先根据轨道高度和倾角筛选出属于目标轨道层的卫星，再从该

轨道层中，根据 RAAN 筛选出处于同一轨道平面的卫星，从中选取卫星数量最多的轨道面并向两侧扩展选择邻近轨道面，直至达到数量上限。这样，所选的卫星既能够代表整个星座的分布特性，又保证了拓扑的连通性。

在建立星间链路时，采用“一星四链”原则。首先在每个轨道面内，按照平近点角 (mean anomaly, MA) 排序并首尾相连，每颗卫星与前后相邻卫星各建立一条同轨链路，形成闭环结构；同时每颗卫星向相邻左右轨道面中平近点角最接近的卫星各建立一条异轨链路。链路建立过程中引入最大距离约束 2 500 km 以限制无效链路，最终构建的网络图模型中每颗卫星理论上可维持 4 条稳定星间链路 (两同轨、两异轨)^[28-29]。

基于 800 颗卫星的子星座在时刻 t_0 的基础拓扑仿真如图 2 所示，该图展示了卫星在三维空间中的分布位置及其星间链路连接情况，每个点代表一颗卫星，节点之间的连线表示卫星之间的通信链路；卫星节点颜色表示卫星节点的升交点赤经，颜色由深至浅表示卫星轨道的升交点赤经逐渐变大。

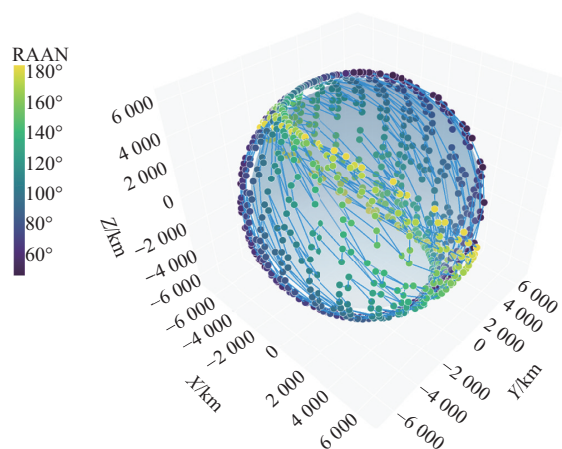


图2 基于800颗卫星的子星座在时刻 t_0 的基础拓扑仿真

3.2 基于多维属性特征联合表征方法的子星座拓扑建模

本文采用第 2 节描述的多维属性特征联合表征方法对卫星的计算资源、存储资源以及星间链路的时延和带宽等属性在图 2 所示的网络拓扑上进行表征，对 800 颗卫星随机配置差异化计算资源和存储资源^[30]，其中，卫星的计算资源以浮点运算能力 (单位为 GFLOPS) 表示，卫星节点的存储资源以可用存储容量 (单位为 GB) 表示。

在资源配置仿真模型中，每颗卫星的计算资源按如下方式生成：首先，随机为卫星配置 12~18 核 CPU 及 1~2 个 GPU^[31]，假设每核 CPU 贡献 8 GFLOPS 算力、每

GPU 贡献 1 500 GFLOPS 算力；然后，随机生成 1%~100% 的数值作为计算资源使用率 ρ_{c_usage} ，并代入式(3)中计算得出每颗卫星的可用计算资源。

在存储资源配置方面，每颗卫星的总存储容量随机设定为 2 400~4 800 GB，并同样在 1%~100% 范围内随机生成卫星存储资源使用率 ρ_{s_usage} ，进而基于式(4)确定卫星的可用存储资源。

对星间链路带宽建模时，参考 Starlink 星座的公开资料，将邻近卫星之间的参考距离 d_0 取值为 500 km^[32]，并利用式(5)计算链路的可用带宽资源。

在链路时延计算中（见式(6)），光速取值为 $c = 299\,792.458\text{ km/s}$ ，任务数据量 $m_{\text{task_data}}$ 统一取值为 100 MB。

通过上述资源配置原则，对所构建的 800 颗卫星模型中的计算资源和存储资源进行随机分配，同时计算星间链路的可用带宽和时延，生成包含卫星节点资源属性和链路状态的可视化结果，如图3所示。图3(a)展示了卫星节点的资源属性，图3(b)体现了星间链路的资源属性。其中，节点颜色映射可用存储资源，颜色越浅表示可用存储资源越大；链路颜色映射可用带宽，颜色越浅表示可用带宽越大。

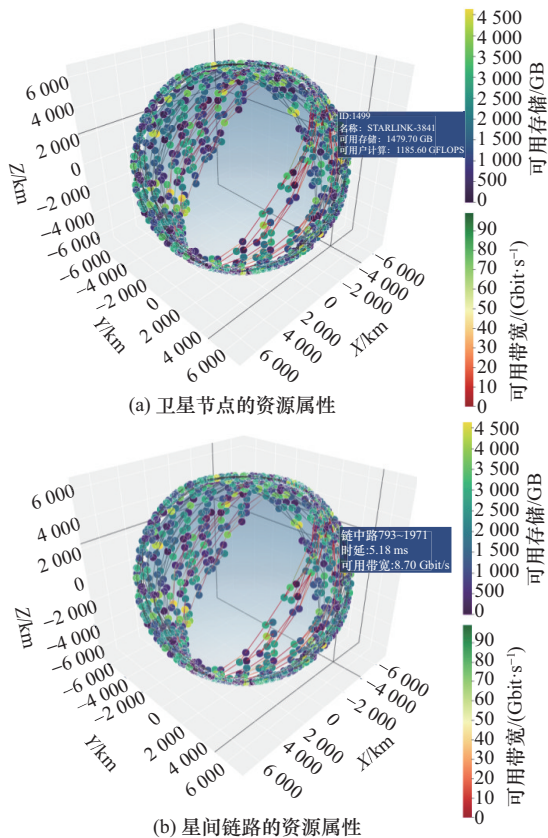


图3 包含卫星节点资源属性和链路状态的可视化结果

3.3 实验验证

基于第3.2节融合多维属性的子星座网络拓扑模型，本文采用 Dijkstra 算法在网络拓扑上进行路由计算，算法的权重取 w ，计算方法见式(7)。链路资源感知 Dijkstra 算法针对单一链路资源维度（如带宽）计算最优路径，这种方法易导致所选路径在某一维度最优，但其他维度可能存在严重不足，导致整体性能下降，若首次选择的路径不满足约束则还需要重新计算，效率低下。基于第2.2节定义的三维邻接张量表征的路由方案，将多维异构资源统一映射到同一度量空间，使得算法能够在计算过程中同时权衡所有资源维度，实现资源均衡和全局最优。以下实验中，对比方案选择链路资源感知路由算法^[33-34]，式(7)中带宽和时延权重分别设为 0.5，即 α 、 β 、 γ 、 δ 的值分别为 0、0、0.5、0.5；基于本文表征的路由方案多维资源感知路由算法将式(7)中的 α 、 β 、 γ 、 δ 均设置为 0.25，作为通用场景下的基准权重配置，从而实现对机制的联合优化。

通过对比链路资源感知路由算法与多维资源感知路由算法的端到端时延，以验证多维资源感知对路径规划的优越性。在实验中，首先确定路由的源节点 source_1 和目标节点 target_1 ；然后基于链路资源感知路由算法在网络拓扑中计算出 source_1 到 target_1 的最短路径 Path_1 ，并结合路径上卫星节点的资源属性按照式(9)计算 Path_1 路径的端到端时延 t_1 ；最后在考虑卫星节点和星间链路资源状态的情况下，基于式(9)计算从 source_1 到 target_1 的最短路径 Path_2 和端到端时延 t_2 。

$$t = t_{\text{link}} + t_{\text{process}},$$

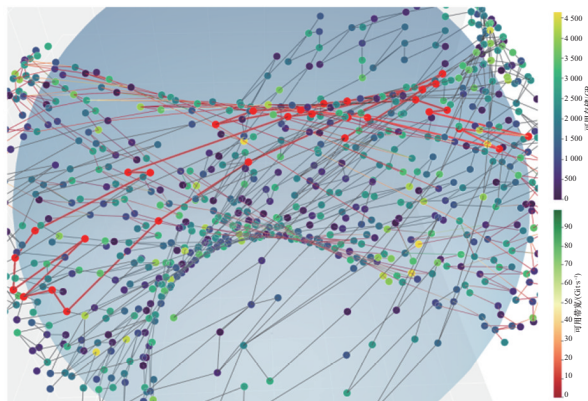
$$t_{\text{process}} = t_{\text{compute}} + t_{\text{read}} = \frac{C}{C(i,t)} + t \frac{m_{\text{task_data}}}{b_{\text{sto}} \times (1 - \rho_{s_usage})} \quad (9)$$

其中， t_{link} 为链路时延，计算方式见式(6)。 t_{process} 为卫星节点的处理时延，包括计算处理时延 t_{compute} 和数据读取时延 t_{read} 两部分，计算处理时延 t_{compute} 对应任务的逻辑处理，指卫星在接收到任务数据后处理器执行相关计算操作（如协议解析、数据包加解密、路由表查询等^[35]）所需的时间，其中 C 表示任务所需计算量，为方便计算，统一假定 $C = 100\text{ GFLOPS}$ ^[36]；数据读取时延 t_{read} 对应存储读写开销，指数据读取星载存储器或缓存加载在内存时因访问时延和带宽限制产生的耗时^[37]，其中 b_{sto} 为卫星节点的存储系统峰值带宽，参考现代嵌入式计算平台（如 NVIDIA Jetson Orin），将 b_{sto} 设为 13 Gbit/s。

以ID为534和1019的卫星作为源节点和目标节点,按照上述仿真思路进行测试,链路资源感知与多维资源感知路径规划结果对比如图4所示。其中,根据链路资源感知路由算法计算的路径 $Path_1$ 为[534, 1946, 1955, 821, 1957, 1480, 1952, 789, 1496, 1499, 1971, 794, 795, 1124, 1865, 1991, 657, 1111, 1884, 1881, 350, 1010, 355, 1677, 785, 1019],共26跳卫星节点;采用多维资源感知路由算法计算后的路径 $Path_2$ 为[534, 1948, 1479, 1954, 821, 1957, 1480, 1952, 789, 1496, 1499, 1971, 794, 795, 1124, 1123, 796, 1132, 341, 1867, 665, 127, 119, 362, 1009, 1011, 1662, 648, 640, 1019],共30跳卫星节点。对 $Path_1$ 和 $Path_2$ 的端到端时延进行详细计算, $Path_1$ 和 $Path_2$ 时延对比见表1。



(a) 链路资源感知路由算法 $Path_1$



(b) 多维资源感知路由算法 $Path_2$

图4 链路资源感知与多维资源感知路径规划结果对比

表1 $Path_1$ 和 $Path_2$ 时延对比

路径	计算处理 时延 $t_{compute}/s$	数据读取 时延 t_{read}/s	传播 时延 D_{prop}/s	传输时延 D_{trans}/s	端到端 时延 t/s
$Path_1$	7.762 131	0.854 560	0.113 887	3.096 547	11.827 125
$Path_2$	3.454 873	1.340 812	0.134 168	4.564 271	9.494 123

由表1可以看出, $Path_1$ 的端到端时延 t_1 为11.827 125 s, $Path_2$ 的端到端时延 t_2 为9.494 123 s。相较于 t_1 , t_2 减少了2.333 002 s,整体路由效率提升19.73%。虽然 $Path_2$ 明显增加了传输距离,但其路径上卫星节点的存储和计算资源更充足,链路带宽也更大,整体路由时延反而比 $Path_1$ 大幅减少。

为避免数据的偶然性,提高数据的说服力,随机选取50组卫星进行测试,两种策略时延减少情况对比测试结果如图5所示。实验结果显示,在40组实验中 $Path_2$ 的端到端时延 t_2 (图5橙色线)均小于 $Path_1$ 的端到端时延 t_1 (图5蓝色线),10组实验中 t_1 与 t_2 相同, t_2 相较于 t_1 平均减少了14.23%,最多减少43.97%,明显提升了路由效率。

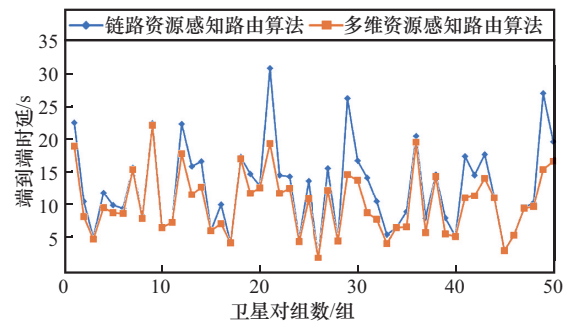


图5 两种策略时延减少情况对比测试结果

综上所述,在考虑多维属性特征时,基于多维资源感知路由算法的路由方案更倾向于选择算力更优的卫星节点和星间链路,确保路径上的卫星具备足够的任务处理能力。这一性能提升源于多维属性联合表征方法对资源的均衡考虑,以及综合权重设置对负载流量的分散效应,减少了热点拥塞。相比于链路资源感知路由算法,多维资源感知路由算法在很大程度上避免了卫星资源不足导致的额外时延,保证了链路的通信质量和卫星节点的计算能力,从而实现节点资源与传输性能的联合优化。同时,多维资源感知路由算法和链路资源感知路由算法均基于Dijkstra最短路径算法实现,二者的时间复杂度均为 $O((|V| + |E|) \log |V|)$ 。

4 结束语

针对低轨巨型星座网络拓扑动态性强、通信链路不稳定的问题,本文基于时变图模型,综合卫星节点的计算资源、存储资源以及星间链路的可用带宽和时延,提出了面向低轨巨型星座的多维属性特征联合表征方法,

实现了卫星网络算力资源和网络资源的统一建模。基于该方法,以Starlink星座公开部署参数中轨道高度550 km、倾角53°轨道层的800颗卫星为研究对象,对其网络拓扑和资源属性进行动态模拟,形成了具有多维属性的网络拓扑模型。此外,还分别对采用多维资源感知路由算法和链路资源感知路由算法的端到端时延进行多次实验。实验结果表明,相较于链路资源感知路由算法,多维资源感知路由算法的端到端时延平均降低14.23%,最多减少43.97%,极大地提升了路由效率。但本文所述的方法仅对多维资源进行了统一表征,在后续的研究工作中,可引入权重系数对不同资源维度的重要性进行加权融合,以满足多样化的应用场景或任务的个性化需求。同时,结合神经网络、LSTM等人工智能算法,还可实现资源状态的动态预测、最优路径智能规划等,从而进一步提升低轨巨型星座网络的自适应能力和自主化能力。

参考文献

- [1] 3GPP. Service requirements for the 5G system; Stage 1(Release 20): TS 22.261[S]. 2024.
- [2] 金栋平,丁鼎峰,伍霖,等.堆叠式卫星系统分离动力学关键技术与展望[J].航空学报,2025,46(5):316-341.
Jin D P, Ding D F, Wu L, et al. Key technologies and prospects for separation dynamics of stacked satellite systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(5): 316-341.
- [3] Zhang J R, Cai Y F, Xue C B, et al. LEO mega constellations: review of development, impact, surveillance, and governance[J]. Space: Science & Technology, 2022: 9865174.
- [4] 郝子慧,刘敏,齐戔,等.Starlink卫星星座项目进展与未来前景分析[J].国际太空,2025(4):60-66.
Hao Z H, Liu M, Qi Y, et al. Analysis of Starlink satellite constellation project progress and future prospects[J]. Space International, 2025(4): 60-66.
- [5] 张静,张珣.对OneWeb卫星星座系统发展的思考[J].中国无线电,2025(3):40-43.
Zhang J, Zhang X. Reflections on the development of the OneWeb satellite constellation system[J]. China Radio, 2025(3): 40-43.
- [6] 孙耀华,冯昕澳,彭木根.低轨巨型星座组网:挑战与关键技术[J].天地一体化信息网络,2024,5(4):57-74.
Sun Y H, Feng X A, Peng M G. Mega LEO satellite constellations networking: challenges and key technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024,5(4): 57-74.
- [7] Qi X G, Ma J L, Wu D, et al. A survey of routing techniques for satellite networks[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2016, 1(4): 66-85.
- [8] 杨惠婷,刘伟.空间信息网络时变图建模方法[J].移动通信,2024,48(1):13-18.
Yang H T, Liu W. Time-varying graph modeling method for space information networks[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 13-18.
- [9] Han Z Z, Xu C, Zhao G F, et al. Time-varying topology model for dynamic routing in LEO satellite constellation networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(3): 3440-3454.
- [10] Tao J H, Na Z Y, Zhang N T. Time-varying graph model for LEO satellite network routing[C]//Proceedings of the 2022 9th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA). Piscataway: IEEE Press, 2022.
- [11] Xu X, Zhang S B, Liu A J. Topology dynamic of mega-constellation networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(13): 22975-22988.
- [12] 徐晓帆,章跃跃,曹馨悦,等.面向多层多域巨型星座的卫星网络拓扑控制[J].通信学报,2024,45(7):1-9.
Xu X F, Zhang Y Y, Cao X Y, et al. Topology control of satellite networks for multi-layer and multi-domain mega-constellation[J]. Journal on Communications, 2024, 45(7): 1-9.
- [13] Wang Y, Sheng M, Zhuang W H, et al. Multi-resource coordinate scheduling for earth observation in space information networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 268-279.
- [14] 嵇明.卫星互联网结构模型特征表示方法及其应用研究[D].成都:电子科技大学,2024.
Zhuo M. Research on feature representation methods and applications for satellite internet structural models[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [15] Liu W, Yang H T, Li J D. Multi-functional time expanded graph: a unified graph model for communication, storage, and computation for dynamic networks over time[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(2): 418-431.
- [16] Casteigts A, Flocchini P, Quattrociocchi W, et al. Time-varying graphs and dynamic networks[C]//Proceedings of the Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 346-359.
- [17] Xie H R, Zhan Y F, Zeng G M, et al. LEO mega-constellations for 6G global coverage: challenges and opportunities[J]. IEEE Access, 2021, 9: 164223-164244.
- [18] Feeney S M. Wide-band channel sounding in the bands above 2GHz[J]. Durham University, 2007.
- [19] Zeng G M, Zhan Y F, Pan X H. Failure-tolerant and low-latency telecommand in mega-constellations: the redundant multi-path

- routing[J]. IEEE Access, 2021, 9: 34975-34985.
- [20] Yu L, Sun L L, Du B W, et al. Heterogeneous graph representation learning with relation awareness[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2022.
- [21] Elsworth S, Güttel S. Time series forecasting using LSTM networks: a symbolic approach[PP]. arXiv preprint, 2020. arXiv:2003.05672.
- [22] Zhang S B, Liu A J, Han C, et al. Graph neural network and reinforcement learning based routing for mega LEO satellite constellations[C]//Proceedings of the 2023 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2023.
- [23] Guo Z, Shi Q, Xu X, et al. SpaceTrack-TimeSeries: time series dataset towards satellite orbit analysis[PP]. arXiv preprint, 2025, arXiv:2506.13034.
- [24] 刘媛荣, 熊永清, 惠建江, 等. SpaceX 星链卫星发布星历的研究[J]. 天文学报, 2024, 65(6): 40-59.
- Liu Y R, Xiong Y Q, Hui J J, et al. Research on Starlink ephemeris published by SpaceX[J]. Acta Astronomica Sinica, 2024, 65(6): 40-59.
- [25] CELESTRAK. CelesTrak[EB]. 2025.
- [26] Xu P Y. Development of a program for the prediction of placement of spacecraft based on TLE data[J]. International Journal of Mathematics and Physics, 2023, 14(1).
- [27] Wrona A, Tantucci A. Artificial intelligence-based data path control in low Earth orbit satellites-driven optical communications[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2024, 42(6): 425-443.
- [28] 李元龙, 李志强. Starlink 星座通信建模仿真分析[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(4): 118-126.
- Li Y L, Li Z Q. Modeling and simulation analysis of Starlink constellation communication[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(4): 118-126.
- [29] Saunders A, Swinerd G G, Lewis H G. Preliminary results to support evidence of thermospheric contraction[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009.
- [30] 舒晴, 张校宁, 费泽松. 基于系统容量最大化的多星跳波束资源分配[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(4):10.
- Shu Q, Zhang X N, Fei Z S. Resource allocation of multi-satellite beam hopping technology based on system capacity maximization[J]. Space-integrated-ground information networks, 2022, 3(4): 10.
- [31] Shen J, Varbanescu A L, Lu Y T, et al. Workload partitioning for accelerating applications on heterogeneous platforms[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016.
- [32] Xu P, Feng M J, Zhou J X, et al. Inter-satellite routing for LEO satellite networks: a GNN and DRL integrated approach[C]//Proceedings of the 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2024.
- [33] Qi Y W, Yang L, Chen S J. A DTN routing scheme for LEO satellites topology[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 569(3): 032011.
- [34] Liang J, Madoery P G, Lung C H, et al. Green traffic engineering for satellite networks using segment routing flexible algorithm[PP]. arXiv preprint, 2025, arXiv:2509.02149.
- [35] Liu J, Pacitti E, Valduriez P, et al. Scientific workflow scheduling with provenance data in a multisite cloud[C]//Transactions on Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems XXXIII. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017: 80-112.
- [36] Cao J Q, Zhang S L, Chen Q X, et al. Computing-aware routing for LEO satellite networks: a transmission and computation integration approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(12): 16607-16623.
- [37] 沈佳杰, 朱良杰, 向望, 等. 大规模高校纠删码键值存储读写负载均衡研究[J]. 深圳大学学报:理工版, 2020, 37(S01): 9.
- Shen J J, Zhu L J, Xiang W, et al. Efficient load balance of the I/O operations for large-scale erasure-coded key-value storage systems in higher education[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(S01): 9.

[作者简介]



曹彩红 (1994-), 女, 大唐移动通信设备有限公司中级工程师, 主要研究方向为星地融合网络、可编程网络、无线接入网服务化等。



禹明慧 (2001-), 女, 电信科学技术研究院硕士生、大唐移动通信设备有限公司研究工程师, 主要研究方向为低轨巨型星座态势感知。



秦瑞艳 (1997-), 女, 硕士, 大唐移动通信设备有限公司中级工程师, 主要研究方向为移动算力网络技术、移动通信核心网技术、6G 网络架构、云原生技术等。



宋雅琴（1993-），女，大唐移动通信设备有限公司高级工程师，主要研究方向为6G网络架构、星地融合、数据服务。



程志密（1980-），女，大唐移动通信设备有限公司高级工程师，主要研究方向为移动通信核心网、星地融合网络技术、确定性网络技术。



王亚鹏（1985-），女，硕士，大唐移动通信设备有限公司中级工程师，主要研究方向为移动算力网络、移动通信核心网、6G网络架构、宽带集群通信等。



徐晖（1969-），女，大唐移动通信设备有限公司教授级高级工程师，主要研究方向为移动通信核心网、星地融合网络技术、移动通信安全等。