基于最短路径时延统计稳定性的低地球轨道网络服务功能链路由

Li Zeng*、Zixin Wang*、Yuanming Shi†、Khaled B. Letaief*

*电子与计算机工程系，香港科技大学，香港

†信息科学与技术学院，上海科技大学，中国上海 电子邮箱： {lzengan@connect.ust.hk; eewangzx@ust.hk; shiym@shanghaitech.edu.cn; eekhaled@ust.hk}

arXiv:2603.04361v1 [cs.NI] 4 Mar 2026

摘要—低地球轨道（LEO）卫星星座通过大量高速绕地球运行的卫星，已成为实现全球覆盖的关键支撑。网络功能虚拟化（NFV）将复杂的网络服务拆解为轻量级服务功能，从而把全球网络服务转化为多种服务功能链（SFC），并由资源受限的低地球轨道卫星协同提供。然而，卫星网络的动态拓扑以及星间链路时延的高度变化，给设计能够确保通信可靠且低时延的高效路由策略带来了重大挑战。许多现有路由方法可扩展性较差、性能下降，限制了其实用性。为应对这些挑战，本文提出一种新颖的SFC路由方法，利用网络链路状态的统计特性，缓解动态卫星网络中瞬时建模所造成的不稳定性。通过对低地球轨道网络中的端到端最短路径传播时延进行全面仿真，我们识别并验证了多跳路由的统计稳定性。基于这一发现，我们提出稳定性感知多阶段图路由（SA-MSGR）算法，将预计算平均时延纳入多阶段图优化框架。大量仿真结果表明，与具有代表性的基准策略相比，SA-MSGR性能更优，能够显著降低端到端服务功能链时延，并使其更具可预测性。

I. 引言

卫星星座的快速发展已成为实现泛在连接的关键推动因素，通过数千颗高速运行的低地球轨道（LEO）卫星提供无缝的全球覆盖 [1]。例如，星链拥有由7000多颗低地球轨道卫星组成的星座，可提供全球互联网服务，下载速度介于25至220 Mbps之间 [2]。然而，与具备强大计算能力的地面及近地网络不同，低地球轨道星座中的单颗卫星受限于有限的计算资源。这一限制给高级网络服务的实现带来了重大挑战，例如军事遥感和远距离海事视频通信。网络功能虚拟化（NFV）可通过将高级网络服务分解为一系列轻量级服务功能来应对这些挑战，这些服务功能随后可灵活映射到卫星网络中的分布式低地球轨道卫星上，并且因此，每项网络服务均可表示为一个服务功能链（SFC） [3]。然而，由低地球轨道卫星的高机动性所驱动的卫星星座动态拓扑会导致星间链路（ISL）状态频繁变化，成为提供可靠、低时延网络服务的性能瓶颈。因此，在低地球轨道卫星之间开发高效的功能路由算法变得势在必行。

许多现有研究提出使用时间扩展图（TEG）[4], [5]对动态低地球轨道网络进行建模。TEG 的核心概念是利用卫星网络拓扑中的时间相关性，将网络在指定时间窗口内的演变表示为静态图，其中节点和边在各个离散时隙中重复出现。例如，这种方法已用于在考虑服务约束的情况下寻找最大流路径以最小时延 [4] ，并通过量子辅助方法进一步加速 [5]。然而，TEG 的规模随网络规模与时间窗口长度的乘积增长，导致网络规模增大时可扩展性较差。此外，该方法依赖多个超参数，例如时间窗口长度，这些参数需要仔细调整 [6] ，从而降低了后续的可靠性。

为实现可扩展的路由决策，基于快照的方法应运而生，成为一种很有前景的方案。这类方法依据准静态网络拓扑生成路由决策，以调度SFC任务 [3], [7], 并优化对时延敏感的VNF部署 [8],；与时变方法相比，这类方法的复杂度更低。然而，在卫星拓扑快速演变的情况下，基于瞬时网络状态得出的路由决策可能会因拓扑变化而迅速变得次优或不可行，进而无法满足可靠性和时延要求。此外，在动态环境中确保路由有效性，需要根据更新后的网络状态频繁重新计算，这会带来显著的计算负担，对资源受限的低地球轨道卫星尤其如此。

本文提出了一种新颖的服务功能链路由方法，利用网络链路状态的统计特性，缓解动态卫星网络中瞬时建模所引发的不稳定性。具体而言，我们首先通过系统性仿真，证明了低地球轨道网络中端到端最短路径传输时延具有统计稳定性。研究结果表明，大多数卫星对表现出

Yuanming Shi 的工作部分得到了国家自然科学基金委员会项目（项目编号：62522117）的资助。本工作部分得到了香港研究资助局卓越领域计划（AoE）项目（项目编号：AoE/E-601/22-R）的资助。

极小的相对波动，并且随着多跳服务功能链路径的增加，稳定性进一步增强。这一改进归因于链长度增加后变异系数的降低。基于这一观察，我们提出了稳定性感知多阶段图路由（SA-MSGR）算法。该方法将预先计算的平均最短路径传输时延作为静态权重，应用于为服务功能链请求设计的多阶段图框架中。通过将动态优化的复杂性与在线路径计算解耦，SA-MSGR算法能够实现高效且可扩展的路由决策。主要贡献总结如下：

1）对代表性低地球轨道星座中成对及多跳最短路径传输时延的统计稳定性进行系统的实验验证。2）开发 SA-MSGR 算法，该算法利用多阶段图框架中的时延稳定性，实现在线复杂度较低的高效服务功能链路由。3）通过全面的性能评估证明，与现有基线启发式算法相比，SA-MSGR 能够降低端到端SFC时延。

本文其余部分安排如下。第二节介绍系统模型，包括低地球轨道网络架构和服务功能链请求定义。第三节对最短路径时延的统计稳定性进行实验研究。第四节构建时延最小化问题，并介绍所提出的 SA-MSGR 算法。第五节通过仿真评估 SA-MSGR 的性能。最后，第六节总结全文。

II. 系统模型

我们采用应用最广泛的沃克 Delta 构型[9] 作为底层低地球轨道网络架构。该构型通常表示为 $T/P/F$，其中 T 表示星座中的卫星总数， P 表示等间距轨道面的数量，$N = T/P$ 表示每个轨道面上的卫星数量， F 表示相邻轨道面间卫星的相对相位参数。将所有卫星的集合记为

$$\mathcal{S} = \{s_{i,j} \mid i = 1, 2, \ldots, P;\ j = 1, 2, \ldots, N\}, \qquad (1)$$

其中 $s_{i,\ j}$ 表示第 i个轨道面上的第 j颗卫星。卫星总数为 $|\mathcal{S}| = T = P \times N$。

我们假设所有 P 轨道平面具有相同的高度和倾角，其升交点赤经均匀分布，相邻轨道平面之间的角间隔为 $2\pi/P$ 。在每个轨道面 i中， N颗卫星沿轨道均匀分布，这意味着相邻卫星$s_{i,\ j}$ 和$s_{i,\ j+1}$之间的平近点角差（表示沿轨道位置的角度）为 $2\pi/N$[1]。沃克 Delta 相位参数 F 会在相邻轨道面（i 和 $i+1$）中对应的卫星之间引入特定的平近点角偏移量 $2\pi F/T$ ，从而确保不同轨道面之间具有规律的相对位置。连接

[1]轨道面和卫星的索引运算（例如 $i \pm 1, j \pm 1$）在适用时分别按 P和 N取模。

通过双向激光星间链路建立卫星之间的连接。我们用 $\mathcal{E}(t)$表示时刻 t所有星间链路的集合。连接模式通常遵循以下规则：

- **轨道面内连接：**同一轨道面内的卫星与其紧邻卫星保持稳定连接，即$s_{i,\ j}$ 通常与 $s_{i,\ j\pm1}$相连。
- **轨道面间连接：**相邻轨道面（例如轨道面 i 和轨道面 $i\pm1$）上的卫星在距离足够近且满足运行约束时建立连接。具体而言，每颗卫星 $s_{i,\ j}$ 通常会尝试与前一轨道面和后一轨道面 $i\pm1$中几何距离最近的邻居建立连接。此外，只有满足以下要求时，才会启用此类潜在的轨道面间星间链路：1）两颗卫星之间的视线不得被地球遮挡；2）两颗卫星之间的相对速度不得超过阈值 V_{th}，因为过高的相对速度可能损害链路稳定性和跟踪精度。这些条件确保启用的轨道面间链路在物理上可行且能够维持。

通常，对大多数卫星而言，存在四条稳定的星间链路：两条轨道面内链路连接相邻卫星，另外两条轨道面间链路连接相邻轨道面。

A. 激光星间链路模型

如 [10],中所述，我们用传播时延来表征每条处于活动状态的激光星间链路 $e = (u,\ v) \in \mathcal{E}(t)$ 在时刻 t 的特性，该时延在传输时延中占主导地位。令 $L_e(t)$ 表示时刻 t相连卫星 u与 v之间的欧几里得距离。时刻 t 链路 e 上的传播时延为： $d_e(t) = \frac{L_e(t)}{c}$ ，其中 c 为真空中的光速。由于卫星不断移动， $L_e(t)$ 以及相应的$d_e(t)$ 会随时间变化，尤其是轨道面间链路。请注意，激光星间链路通常采用全双工，并具有很高的信道容量 C_e，可达 100 Gbps 甚至更高[11]。因此，对于服务功能链场景中设想的典型数据包大小 S ，与传播时延 $d_e(t)$ [12]相比，传输时延部分 $t_e = S/C_e$可以忽略不计。

尽管建立 ISL 需要精确的捕获、跟踪与指向（ATP）[13]，但极区以外的轨道面内链路和轨道面间链路通常足够稳定，能够长期保持连接 [10]。不过，需要注意的是，链路存在的稳定性并不意味着链路时延恒定。距离 $L_e(t)$ 仍会变化。虽然单条链路的时延 $d_e(t)$会波动，但我们将在后文研究由多条此类链路组成的端到端最短路径时延的统计稳定性。

B. 服务功能链任务请求

在低地球轨道网络中，我们假设每颗卫星 $s \in \mathcal{S}$都可以预先部署一组 VNF模块。令 $\mathcal{V}(s) \subseteq \mathcal{V}$ 表示卫星 s上可用的虚拟网络功能集合，其中 $\mathcal{V}$是所有可能虚拟网络功能的全集。一个服务功能链请求指定了必须按顺序执行的虚拟网络功能序列，用于处理源自源卫星的数据，并将最终结果传送至目的卫星。形式化地，

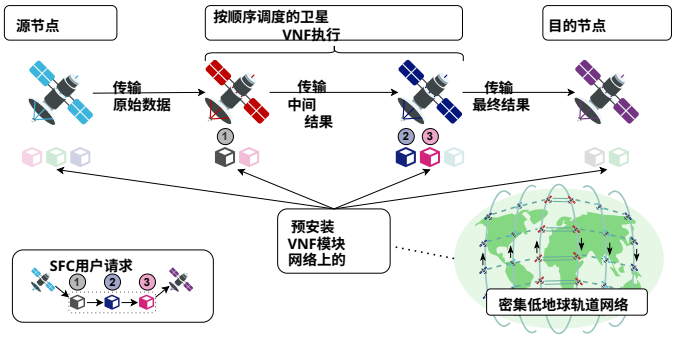


图1. 系统模型示意图。SFC用户请求指定了源节点与目的节点之间按顺序排列的虚拟网络功能序列（例如，1、2、3）。该逻辑链映射到物理低地球轨道网络，其中卫星承载相应的预装虚拟网络功能模块。

一个服务功能链请求 r 定义为一个元组：$r = \left(s_{\text{src}}, s_{\text{dst}}, \mathbf{f}\right)$，其中 $s_{\text{src}} \in \mathcal{S}$ 是持有初始输入数据的源卫星，$s_{\text{dst}} \in \mathcal{S}$ 是接收最终结果的目的卫星，$\mathbf{f} = [f_1, f_2, \ldots, f_M]$ 是要依次执行的M 虚拟网络功能有序列表（$f_k \in \mathcal{V}$）。序列中的每个虚拟网络功能 f_k 都有特定属性：$D_{\text{in},\, f_k}$ 表示虚拟网络功能 f_k 所需的输入数据大小，$D_{\text{out},\, f_k}$ 表示虚拟网络功能 f_k生成的输出数据大小，C_{f_k} 表示虚拟网络功能 f_k的计算复杂度，以浮点运算（FLOPs）计量。每颗卫星 $s \in \mathcal{S}$ 都配有一个处理单元，其计算能力为 F_s （每秒浮点运算次数）。在卫星 s 上执行虚拟网络功能 f_k 所产生的处理时延（假设 $f_k \in \mathcal{V}(s)$）为：

$$D^{\text{cp}}_{s,f_k} = \frac{C_{f_k}}{F_s}. \tag{2}$$

需要注意的是，只有当所选卫星上提供 VNF f_k 时，才能对其进行处理，即 $f_k \in \mathcal{V}(s_k)$。系统模型如图1所示。

C. 服务功能链路由路径与端到端时延 y

为满足 SFC请求 $r = (s_{\text{src}}, s_{\text{dst}}, \mathbf{f})$，必须选择一系列卫星，按照指定顺序执行虚拟网络功能。请求 r 的可行执行路径表示为：$\pi(r) = \{s_0, s_1, \ldots, s_{M+1}\}$，其中 $s_0 = s_{\text{src}}$ 是源卫星，$s_{M+1} = s_{\text{dst}}$ 是目的卫星。此外，对于每个 $k = 1, \ldots\ldots, M$，选择卫星 $s_k \in \mathcal{S}$ 执行虚拟网络功能 f_k，并且必须满足部署约束$f_k \in \mathcal{V}(s_k)$。沿路径 $\pi(r)$ 执行服务功能链的总端到端时延，取决于所选卫星上的计算时延以及路径中相邻卫星之间的传输时延。由于网络拓扑$\mathcal{G}(t) = (\mathcal{S}, \mathcal{E}(t))$和链路传播时延 $d_e(t)$ 会随时间变化，因此任意两颗卫星$u, v \in \mathcal{S}$ 之间的传输时延也会随时间变化。

为使总时延最小，我们假设卫星对之间的传输遵循最短路径，这也是现代数据路由协议采用的基本策略。令 $D^{\text{tx}}(u, v, t)$ 表示在时间 t 从卫星 u 到卫星 v 的路径上的最小总传播时延。这是通过对该路径上的瞬时链路时延 $d_e(t)$ 求和得到的最短路径传输时延，其中 $e \in \mathcal{E}(t)$ 是在 $\mathcal{G}(t)$ 中总和最小的路径（例如，在权重为 $d_e(t)$ 的 $\mathcal{G}(t)$ 上使用 Dijkstra 算法）。

$$D^{\text{tx}}(u, v, t) = \min_{p \in \mathcal{P}_{u,v}(t)} \sum_{e \in p} d_e(t), \tag{3}$$

其中$\mathcal{P}_{u,\, v}(t$ 是 $\mathcal{G}(t)$中从 u到 v 的所有路径集合。

因此，所有需要求和的链路时延均根据时间 t的网络状态计算，记为 $d_e(t)$。在时间 t ，沿路径 $\pi(r)$执行SFC请求r 所产生的总瞬时端到端时延，等于所有虚拟网络功能的计算时延与执行序列中相邻卫星之间的最短路径传输时延之和：

$$D(\pi(r), t) = \sum_{k=1}^{M} D^{\text{cp}}_{s_k, f_k} + \sum_{k=0}^{M} D^{\text{tx}}(s_k, s_{k+1}, t_k), \tag{4}$$

其中，t_k 是从 s_k 到s_{k+1}的传输开始时间，具体取决于前序传输和计算过程。由于 $D^{\text{tx}}(s_k,\ s_{k+1},\ t_k)$项会随动态网络状态 $\mathcal{G}(t)$变化，因此该瞬时时延 $D(\pi(r)\ t)$也会随时间波动。

要制定稳健的路由策略，必须了解波动部分的统计特性。具体而言，我们提出以下假设：1）相当一部分卫星对可能具有统计稳定的最短路径时延（即相对于均值而言方差较低）。2）沿SFC路径的总传输时延稳定性可能随着跳数（$M+1$）增加而提高，这可能是平均效应所致。这些假设将在第三节中通过详细的实验研究进行检验，研究结果将作为第四节所提出路由算法的经验依据。

III. 最短路径时延稳定性特性

本节通过仿真展示 $D^{\text{tx}}(u, v, t)$ 和 $\sum_{k=0}^{M} D^{\text{tx}}(s_k, s_{k+1}, t_k)$ 的统计稳定性，这是解决该路由挑战所利用的一项关键特性。仿真中，我们采用包含 12 个轨道面、每个轨道面 30 颗卫星、高度为 550 km、倾角为 53 度的 Walker Delta 星座配置。在一个轨道周期内，网络拓扑每隔$\Delta t = 1$ 秒更新一次。

A. 成对最短路径时延稳定性

我们首先分析各卫星对的最短路径传播时延 $D^{\text{tx}}(u, v, t)$ 随时间的稳定性。对于网络中的每一对 (u, v)，我们采用变异系数（CV）作为度量指标，其定义为

$$CV_{uv} = \sigma_{uv} / \mu_{uv}, \tag{5}$$

其中，σ_{uv} 为标准差，μ_{uv} 为时间序列 $\{D^{\text{tx}}(u, v, t) \mid t = 0, \Delta t, \ldots, T_{\text{orbit}}\}$ 的均值。CV 提供了时延变化的归一化度量，CV 越低表示稳定性越高。

稳定性分布结果汇总于表 I。我们观察到，很大比例的卫星对具有较低的变异系数。具体而言，70% 的卫星对的变异系数小于 0.2，90% 小于 0.3，这表明尽管底层网络动态变化，最短路径时延仍具有显著的稳定性。这证实了我们的第一个假设。

表 I 成对最短路径时延的稳定性：变异系数阈值

变异系数低于阈值的路径对（%）	50	70	90
变异系数 阈值	0.125	0.198	0.295

表 II
路径传输时延的平均变异系数与 SFC 长度（M）的关系

SFC 长度（M）	1	2	5	10	20
平均变异系数	0.099	0.079	0.053	0.041	0.028

*B. SFC*路径总传播时延稳定性

接下来，我们研究多跳服务功能链路径上的总 传输时延稳定性。我们关注的是，沿路径累积时延是否会比单个成对时延更加稳定。我们针对不同的 SFC 长度 N_{paths} =生成 500 条随机路径 $\pi = \{s_0, s_1, \ldots, s_{M+1}\}$ M（例如 $M = 1$，2、5、10、20）。对于每条生成的路径π 以及每个时间步 t，我们计算瞬时传输时延总和：$D^{\text{tx}}_{\text{path}}(\pi,\ t) = \sum_{k=0}^{M} D^{\text{tx}}(s_k,\ s_{k+1},\ t_k)$。对于每条路径 π，我们计算其传输时延总和时间序列的变异系数 $CV_\pi = \sigma_\pi/\mu_\pi$。结果如下：

- **稳定性分布与路径长度：**图2给出了按SFC长度 M分组的路径变异系数（CV_π）的累积分布函数。随着 M 增大，曲线明显向左上方偏移。这表明，对于更长的SFC路径，有显著更大的比例呈现出极低的变异系数值（高稳定性）。
- **平均稳定性趋势：**表 II 列出了平均变异系数（对给定 M的所有 $N_{\text{路径}}$路径取平均）随SFC长度 M的变化。平均变异系数随 M 增大呈现明显下降趋势，从 $M = 1$ 时的0.099降至 $M = 20$时的0.028，证实更长的路径在总传输时延方面往往相对更为稳定。

这些结果有力地支持了我们的第二个假设。沿多跳路径对最短路径时延进行聚合，往往会平滑各个体波动，从而增强服务功能链时延中总传输分量的稳定性。这种稳定效应对更长的链路愈发显著，尤其是在涉及大规模网络以及服务链长度相当可观的高度复杂服务流程的场景中。

这些发现对服务功能链路由具有重要意义。它们为使用预先计算的平均值 $D^{\text{tx}}(u,\ v)$ 近似复杂且随时间变化的最短路径传输时延 $D^{\text{tx}}(u,\ v,\ t)$ 提供了有力的实证依据。在下一节中，我们将介绍所构建的服务功能链时延最小化问题，并提出我们的方法。

IV. 问题建模与 所提出的SA-MSGR算法

首先，我们建立时延最小化问题的数学表述，然后详细说明所提出的 SA-MSGR 方法。具体而言，给定时刻 t 的服务功能链请求 $r = (s_{\text{src}}, s_{\text{dst}}, \mathbf{f} = [f_1, \ldots, f_M])$，主要目标是确定卫星序列 $\pi(r) =$

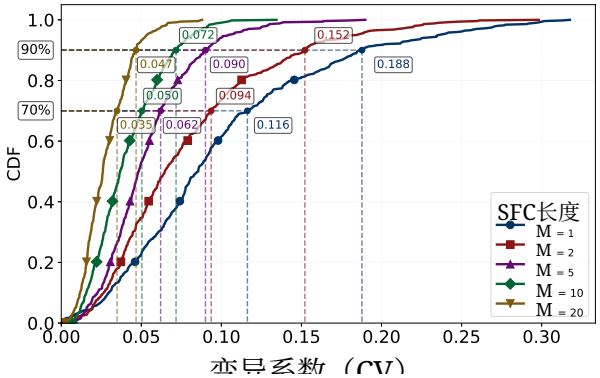


图2. 不同le下路径传输时延变异系数的累积分布函数 ngths（M）。

$\{s_0, s_1, \ldots, s_M, s_{M+1}\}$（其中 $s_0 = s_{\text{src}}$, $s_{M+1} = s_{\text{dst}}$）将承载虚拟网络功能 $f_1, \ldots, f_M$，使端到端总时延最小。如前所述，瞬时端到端时延 $D(\pi(r)\ t)$，即式（4），会随时间波动，这是因为最短路径传输时延 $D^{\text{tx}}(s_k, s_{k+1}, t)$ 具有动态性。优化问题可表述为：

$$\begin{aligned} \underset{\pi(r)}{\text{minimize}} \quad & D(\pi(r), t) \\ \text{subject to} \quad & s_0 = s_{\text{src}}, \quad s_{M+1} = s_{\text{dst}}, \\ & f_k \in \mathcal{V}(s_k), \quad \forall\, k = 1, \ldots, M. \end{aligned} \tag{6}$$

该问题的关键挑战在于卫星大幅移动所带来的变化的传输时延，即基于网络拓扑某一快照计算出的路由可能很快过时；在某一准静态假设下的最优路径，随着网络演进可能变为次优，甚至不可行。

然而，基于第三节中已验证的时延稳定性特性，我们可以提出一种面向动态低轨网络的高效服务功能链路由算法。核心挑战在于优化式（6），其中涉及时变的传输时延。我们的方法利用所观察到的稳定性（低变异系数），从而有理由用¯其通过离线仿真预先计算得到的时间平均 D^{tx}（u，v）来近似期望时延。这种稳定性感知多阶段图路由（SA-MSGR）方法将动态问题转化为在所构建的多阶段图上的静态最短路径问题，从而避开时间扩展图的复杂性以及快照方法的局限性。

A. 多阶段图构建

我们采用针对特定SFC请求 r =($s_{\text{src}}, s_{\text{dst}}, \mathbf{f} = [f_1, \ldots, f_M]$) 定制的多阶段图（消息图） $\mathcal{G}_{\text{MSG}}$ =($\mathcal{V}_{\text{MSG}}, \mathcal{E}_{\text{MSG}}$)，如图3所示。

- **节点 $\mathcal{V}_{\text{消息图}}$:** 该消息图包含 $M + 2$ 个阶段。
  – 阶段0：源节点 N_{src}（表示 s_{src}）。– 阶段 $k \in [1, M]$：对应于VNF f_k。若 $f_k \in \mathcal{V}(s)$，则为每颗卫星 s包含节点（$N_{\text{属于}s,k}, N^{\text{out}}_{s\,k,}$）。– 阶段 $M + 1$：目的节点 N_{dst}（表示 s_{dst}）。
- **边 $\mathcal{E}_{\text{消息图}}$ 与权重：**有向边仅连接相邻阶段。

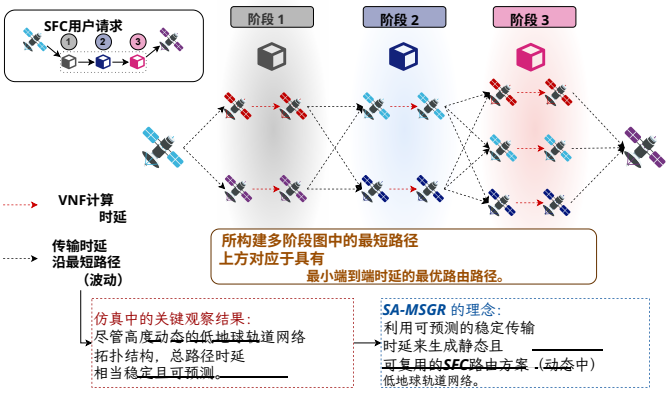


图3. 所提出的SA-MSGR方法。

–计算边：按照公式 (2)，将 $N_{\text{输入}s,\,k}$ 连接到 $N_{\text{输出}s,\,k}$，权重为 $D_s^{\text{cp}}{}_{,\,f_k}$。–传输边：将阶段 k 的输出节点连接到阶段 $(k+1)$ 的输入节点。从卫星 u（阶段 k）到卫星 v（阶段 $k+1$）的权重为预先计算的平均时延 $D^{\text{tx}}(u,\,v)$。边还将 N_{src} 连接到阶段 1，并以类似方式将阶段 M 连接到 N_{dst}。

B. 最优路径计算

在原问题中寻找最小估计平均时延路径，等价于在 $\mathcal{G}_{\text{MSG}}$中计算从 N_{src} 到 N_{dst} 的最短路径。由于消息图是具有非负权重的有向无环图（有向无环图），可使用基于拓扑排序的有向无环图最短路径算法高效求得该最短路径，其时间复杂度与消息图的规模呈线性关系，即 $O(|\mathcal{V}_{\text{MSG}}|+|\mathcal{E}_{\text{MSG}}|)$。SA-MSGR算法的步骤如下：

1) **离线阶段：** 预先计算并存储所有卫星对 $(u,\,v)$ 之间的平均最短路径传输时延 $\bar{D}^{\text{tx}}(u,\,v)$。这些数值基于第二节中详述的动态网络仿真和稳定性分析得出。这项计算可能十分耗时，通常利用地面资源执行一次。

2) **在线阶段（在收到请求 r 时执行）：**

a) 构建消息图：构建针对特定请求定制的图 $\mathcal{G}_{\text{MSG}}$（包含其 VNF序列**f** 以及源节点/目的节点），使用预先计算的 $\bar{D}^{\text{tx}}$ 作为传输边权重，并使用已知的计算时延 D^{cp} 作为计算边权重。 b) 寻找最短路径：利用动态规划，在 $\mathcal{G}_{\text{MSG}}$的静态有向无环图结构中，高效地寻找从源节点 N_{src} 到目的节点 N_{dst} 的最短路径。 c) 输出路径：提取与计算所得最短路径对应的卫星序列$\pi^*(r)$，即最终的 SFC 路由。

SA-MSGR针对每个SFC请求的在线复杂度主要由MSG上的最短路径计算决定，约为 $O(M\cdot S_{\max}^2)$，其中 $S_{\max}$ 为每个VNF阶段的卫星选项数量上限。它避免了TEG方法中与时间窗口维度相关的复杂度乘积，因此具有显著更好的可扩展性。与基于快照的方法相比，它将完整LEO网络图上的高开销最短路径计算转移到离线阶段，同时还避免了在不同时隙频繁进行路由重新计算。

V. 性能评估

本节通过仿真评估所提出的 SA-MSGR算法的性能，重点考察其在最小化端到端SFC时延方面的有效性。我们将 SA-MSGR 与若干基准路由策略进行比较。

A. 仿真设置

我们对 Walker Delta低地球轨道星座进行仿真，其中包含 $P=12$ 个轨道面，每个轨道面有 $N=30$ 颗卫星，高度为 550 km，倾角为 53°。利用轨道可预测性，我们预先计算一个轨道周期内的动态拓扑 $\mathcal{G}(t)$ 和瞬时星间链路时延 $d_e(t)$，周期为（≈ 90 min，$\Delta t = 1$ s），从而离线计算 SA-MSGR 使用的平均最短路径时延 $D^{\text{tx}}(u,\,v)$。随机 SFC请求 $r=(s_{\text{src}},\,s_{\text{dst}},\,\mathbf{f})$ 的源节点和目的节点均随机生成。SFC长度 M 可变，例如 $M\in\{5,10,15,20,25\}$；VNF序列 **f** 由从 $|\mathcal{V}|=60$ 种类型中随机选择的 M 种不同类型组成。VNF复杂度 C_{f_k} 在 $[1,5]$ GFLOPs 范围内均匀分布，星载处理器频率 F_s 在每秒 $[1,2]$ GFLOPs 范围内均匀分布，由此得到计算时延 $D_s^{\text{cp}}{}_{,\,f_k}$。每颗卫星上的 VNF 部署均采用随机方式：托管的VNF数量 N_s 服从 $\mathcal{N}(3,\,0.752)$ 分布，并四舍五入为最接近的非负整数 N_s'。随后，从 $\mathcal{V}$ 中随机选取 N_s' 个不同的 VNF，构成可用集合 $\mathcal{V}(s)$。主要性能指标是根据式（4）计算的计算与通信联合端到端 SFC时延的平均值。对于每种参数设置，结果均取 300 个不同SFC请求的平均值。我们将所提出的 SA-MSGR算法与以下基准策略进行比较。

- **贪心传输（Greedy-Tx）**选择承载 f_{k+1} 的下一跳卫星 s_{k+1}，使从当前节点 s_k出发的瞬时最短路径传输时延 $D_{\text{tx}}(s_k,\,s_{k+1},\,t_0)$最小。
- **贪心计算（Greedy-Cp）**则选择承载 f_{k+1} 且计算时延 $D_{\text{cp}}{}_{s_{k+1},\,f_{k+1}}$最低的卫星 s_{k+1}，而不考虑传输代价。
- **随机（Rand）**作为基本参照，从所有承载 f_{k+1}的可行卫星中均匀随机选择s_{k+1}。
- **基于快照**方法使用MSG框架，基于瞬时传输时延$D_{\text{tx}}(u,\,v,\,t_0)$优化路径。
- **基于 TEG**方法从理论上利用时间扩展图，在一个时间窗口（10 秒）内优化路由，但其计算开销被认为难以承受。

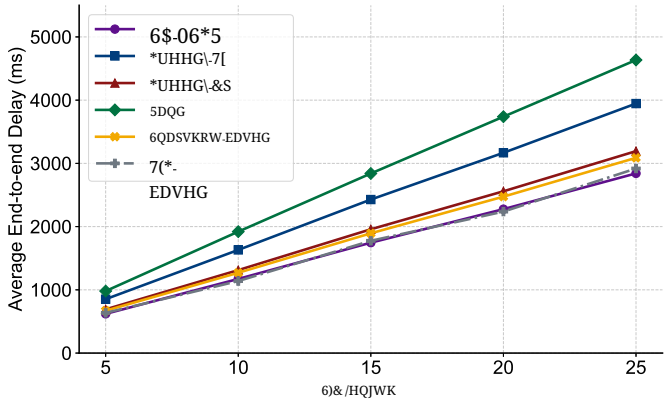


图4. 端到端服务功能链时延的平均值对比

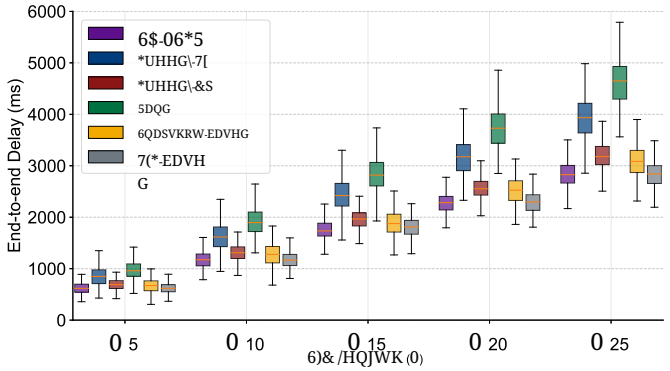


图5. 不同算法的端到端服务功能链时延分布。箱体表示四分位距（IQR，即第25至第75百分位数）。箱体内的线表示中位数。须线从箱体边缘延伸至1.5 × IQR处。

B. 结果与分析

如图 4 所示，在所有测试的 SFC长度（M）下，SA-MSGR 始终实现最低的平均端到端时延。值得注意的是，其性能与基于 TEG 的理论方法非常接近；该方法虽然能在时间窗口内进行优化，但由于计算开销过大，难以实际部署。这表明，SA-MSGR 利用路径时延的统计稳定性，有效捕捉了实现近乎最优平均性能所需的长期特征，同时避免了 TEG 的复杂性。此外，SA-MSGR 始终优于实际可用的基于快照的方法。基于快照的方法根据瞬时网络状态进行优化，而依赖可能缺乏代表性的暂态条件，会使其平均时延略高于 SA-MSGR 基于稳定平均值的优化结果。SA-MSGR 和基于快照的方法都利用了全局 MSG 框架，显著优于较简单的启发式算法。与先前的观察一致，在我们的设置中，贪心-Cp 的平均时延优于贪心-Tx（这可能是因为计算时延占主导地位），而随机算法的表现最差。不过，贪心-Cp 可能存在的负载均衡问题仍是一个实际隐患，单凭平均时延无法体现这一点。

除了平均值之外，图 5 还揭示了时延变化方面的显著差异。SA-MSGR 的分布非常集中四分位距较窄、须线较短，表明其性能稳定且可预测，这对服务保证十分重要。相比之下，基于快照的方法的时延方差明显大于 SA-MSGR 和 TEG。这凸显了快照方法的一个关键局限：根据不断波动的瞬时状态进行优化，会导致路径多样性增加，端到端时延也更难预测。SA-MSGR 使用稳定的平均值来减轻这种波动。在启发式算法中，贪心-Cp 的方差相对较低（可能是因为它始终选择特定的高功率卫星及其稳定链路），而贪心-Tx 和随机算法的波动最大，反映出其路由决策不断变化且较难预测。

VI. 结论

本文证明了低地球轨道网络最短路径时延的统计稳定性，并提出了SA-MSGR算法，该算法利用MSG框架中的预计算平均时延。仿真结果验证了，与基线方法相比，SA-MSGR能够实现显著更低且更加稳定的时延。未来的工作可以将该方法扩展至拥塞控制和动态VNF部署策略。

参考文献

[1] Y. Shi、L. Zeng、J. Zhu、Y. Zhou、C. Jiang 和 K. B. Letaief，“卫星联邦边缘学习：架构设计与收敛分析”，*IEEE Trans. Wireless Commun.*，第23卷第10期，第15 212–15 229页，2024年10月。[2] SpaceX，“星链”，[在线]。可访问：https://www.starlink.com，访问日期：2025年4月23日。[3] G. Wang、S. Zhou、S. Zhang、Z. Niu 和 X. Shen，“面向可重构空天地一体化网络的基于SFC的服务供应”，*IEEE J. Sel. Areas Commun.*，第38卷第7期，第1478–1489页，2020年7月。[4] H. Yang、W. Liu、H. Li 和 J. Li，“具有服务功能约束的空间信息网络最大流路由策略”，*IEEE Trans. Wireless Commun.*，第21卷第5期，第2909–2923页，2022年5月。[5] Y. Zhang、Y. Gong、L. Fan、Y. Wang、Z. Han 和 Y. Guo，“空间信息网络中量子辅助的联合虚拟网络功能部署与最大流路由”，*IEEE Trans. Mobile Comput.*，第24卷第2期，第830–844页，2025年2月。[6] B. Guo、Z. Chang、Z. Han 和 Z. Xiong，“面向大规模卫星网络中基于时序图的连续服务供应的增强型时间离散化”，*IEEE Wireless Commun. Lett.*，第13卷第9期，第2625–2629页，2024年9月。[7] P. Zhang、P. Yang、N. Kumar 和 M. Guizani，“基于服务功能链的空天地一体化网络资源分配”，*IEEE Trans. Veh. Technol.*，第71卷第7期，第7730–7738页，2022年7月。[8] M. Xu、M. Jia、Q. Guo 和 T. de Cola，“卫星地面网络中时延敏感且资源高效的VNF部署”，*IEEE Trans. Veh. Technol.*，第73卷第10期，第15 467–15 482页，2024年10月。[9] N. Wang、L. Liu、Z. Qin、B. Liang 和 D. Chen，“低地球轨道巨型星座网络的容量分析”，*IEEE Access*，第10卷，第18 420–18 433页，2022年。[10] B. Shang、S. Zhang 和 Z. J. Wong，“星间光链路（OISL）的信道建模与速率分析”，*arXiv preprint arXiv:2501.02756*，2025年，可访问：https://arxiv.org/pdf/2501.02756。[11] T. R. Brashears，“在低地球轨道中由100G空间激光星间链路组成的舰队上实现99%的链路正常运行时间”，载于*Proc. SPIE Free-Space Laser Commun. XXXVI.*，第12877卷，2024年，第1287702页。[12] E. Ekici、I. F. Akyildiz 和 M. D. Bender，“低地球轨道卫星网络中数据报流量的分布式路由算法”，*IEEE/ACM Trans.Netw.*，第9卷第2期，第137–147页，2001年4月。[13] D. Bhattacharjee、A. U. Chaudhry、H. Yanikomeroglu、P. Hu 和 G. Lamontagne，“激光星间链路建立时延：量化、影响及可容忍值”，载于*Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.(WCNC)*，格拉斯哥，苏格兰，英国，2023年3月，第1–6页。