利用持续视场与多路径段路由，在低地球轨道卫星星座中实现流量工程

KaiWang 和 Chee Wei Tan

arXiv:2611.32852v1 [cs.NI] 24 Nov 2026

摘要—低地球轨道（LEO）卫星星座的兴起给传统路由范式带来了根本性挑战，原因在于节点移动性高、拓扑变化频繁且星载资源有限。本文提出一种段路由（SR）框架，将路由计算和控制信令从资源受限的低地球轨道交换机卸载到能力更强的中地球轨道（MEO）控制器。我们首先确定了用户到卫星以及LEO到MEO视场（FoV）连接在整个虚拟拓扑（VT）快照间隔内保持持续的充分条件，从而实现无切换运行。利用这种持续性，我们将MEO控制域划分问题表述为混合整数线性规划（MILP），以尽量减少控制开销，同时将互不相交的段路由域（SRD）分配给MEO控制器。在每个SRD内，我们构建一种多路径SR流量工程（SR-TE）模型，将流量分配到四种最小跳数路径类型，以尽量降低最大链路利用率。我们采用分布式原始-对偶混合梯度（PDHG）方法求解该线性规划（LP）；该方法既能保护SRD级隐私，又只需要AllReduce通信。在Starlink/GPS组合上的仿真表明，与传统的最小跳数路由（MHCR）和流量无关的负载均衡方法相比，我们的方法在Starlink、Kuiper和OneWeb场景下分别将最大链路利用率降低了13.09%、11.84%和12.50%以上。

索引词—段路由（SR）、段路由域（SRD）、多路径路由、视场（FoV）、低地球轨道卫星星座、原始-对偶混合梯度（PDHG）。

I. 引言

鉴于HE Starlink 等低地球轨道（LEO）星座的迅速扩张， [1], Kuiper [2], TeleSat [3], 和 OneWeb [4], 迎来了全球低时延宽带连接的新时代。然而，这些网络固有的特点——节点移动性高、拓扑变化频繁以及星载资源有限——给传统路由范式带来了根本性挑战。为缓解动态特性导致的路由振荡和收敛延迟，低地球轨道星座的维护需要频繁进行控制消息交换。然而，星间链路（ISL）不稳定迫使控制消息更加频繁地重传 [5], [6], ；由于不稳定链路数量众多且可能引发级联故障，规模较大的域效率低下，因此较小的、分布式域有助于将重传限制在局部范围内，并降低整体控制开销。除了控制开销增加、响应能力下降之外，集中式管理机构还会使网络容易受到中心软件故障的影响，臭名昭著的 2025年故障 [7] 就证明了这一点。

幸运的是，在高度为 8,000 至 20,000 km 的轨道上运行的中地球轨道（MEO）卫星，能够为管理具有更长轨道周期和更广地理覆盖范围的低地球轨道卫星网络提供广域且稳定的方案。通常，MEO星座（例如，最少 6—12 颗卫星）能够在保持较少卫星数量的同时实现全球覆盖。这一独特视角表明，可以构建一种受物理视距（LoS）和视场（FoV） [8] 约束的自然架构层级。在任意时刻，除满足视距可见性外，还必须遵守视场约束（例如，最低仰角为 25—40° [9]）。利用虚拟拓扑（VT）策略，我们将动态星座划分为一系列静态拓扑快照。对于每个快照，混合整数线性规划（MILP）将低地球轨道卫星星座划分为互不相交的控制区域，其中，给定快照的最优解可能取决于前一个快照的最优解。MEO控制器负责更新低地球轨道卫星星座的状态、运行分布式路径计算算法，并向下级低地球轨道卫星传输转发指令。重要的是，多个MEO卫星可能具有重叠的视场，从而提供冗余，并支持无缝切换，使低地球轨道卫星能够从一个MEO卫星的控制区域迁移到另一个。

MEO层和LEO层都会随时间确定性地演化，它们之间的视场也同样如此。由于MEO节点运行在显著更高的高度，其与LEO节点之间的视场在较长时间内能够保持足够的宽度和稳定性，因此MEO卫星适合在每个VT 快照期间充当区域控制器。同样，通过将地面用户谨慎地分配给满足视线和视场约束的LEO卫星，可以实现稳定的地面到卫星链路（GSL）可用性，从而建立固定的用户-LEO-MEO关联。基于这些关联，我们构建了一个线性规划，以优化LEO层中的流量工程。尽管采用二阶统计量的现有线性规划求解器能够快速收敛，但其通信开销很大，使其不适用于分布式求解器。在每个VT 快照开始时，我们可以使用集中式线性规划求解器获得一个解；然而，实时流量波动要求LEO卫星测量或预测 [10] 需求，并据此对解进行微调，

本研究部分得到了新加坡教育部学术研究基金第二层级 MOE-T2EP20224-0009 和南洋理工大学启动经费的支持（通信作者：*Chee Wei Tan*）。作者 Kai Wang 和 Chee Wei Tan 就职于新加坡南洋理工大学计算与数据科学学院（CCDS），邮编 639798（电子邮箱：wang1899@e.ntu.edu.sg；cheewei.tan@ntu.edu.sg）。

该解可以从当前解初始化，以避免冷启动。这促使我们采用分布式优化方法，通常需要在节点之间交换变量，并产生显著的通信开销。为应对这一挑战，我们采用D-PDLP [11]，一种面向大规模线性规划问题、通信高效的原始-对偶混合梯度（PDHG）算法分布式实现 [12] 该方法最近已应用于卫星通信领域 [13], [14]。具体而言，我们利用D-PDLP将路由计算分布到MEO卫星上，同时最大限度地减少交换的变量消息数量，通过一种利用多处理器并行的分布式一阶算法求解路由线性规划问题，并且相比ADMM等传统方法需要更低频率的通信 [15]。

SRv6（基于IPv6的段路由） [16]被广泛认为是低地球轨道星座网络的一种有前景的解决方案。在给定MEO控制器的域内，LEO卫星自然形成一个完全自包含的段路由域（SRD） [18]，其全部运行于数据平面。为实现负载均衡，我们求解基于段路由的流量工程（SR-TE）问题。随后，我们将所得路由方案转换为可行的段列表（SL），以满足三态内容寻址存储器（TCAM）硬件的约束。

总之，本文借鉴分层设计理念，提出了一种新颖且通信高效的负载均衡框架，通过清晰分离控制平面与数据平面功能，充分利用MEO-LEO层级结构。具体而言，资源受限的LEO卫星不执行任何路由计算、拓扑发现或控制信令；这些任务被卸载至功能更强大的MEO层。本文的主要贡献如下。

1) 我们提出了一种实用框架，用于在具有明确视场连接约束的分层 MEO-低地球轨道卫星网络中实现基于段路由的流量工程。

2) 我们提出了一种在 VT 快照中无需切换即可将 LEO 卫星交换机分配给 MEO 卫星控制器的方法，提出控制域划分问题，并将其建模为混合整数线性规划，以优化控制开销。

3) 我们提出了一种在 VT 快照中无需切换即可将用户关联到 LEO卫星的方法，将基于段路由的流量工程建模为线性规划以获得初始解，并采用通信高效的分布式线性规划求解器 D-PDLP，在流量需求波动时对解进行后续分布式调整。

4) 我们通过仿真评估 HR-SR。使用真实的Walker-Delta低轨星座（1,584 颗卫星，高度为 550 km）和一个 MEO星座（24 颗卫星，高度为 20,200 km），我们证明，与传统的最小跳数路由（MHCR）和不考虑流量的负载均衡方法相比，我们的方法可将最大链路利用率分别降低 13.09%、11.84% 和 12.50% 以上。

本文其余部分安排如下。第II节介绍卫星动力学和星座的基础知识。第III 节介绍段路由架构和SRD的预备知识。第IV 节自上而下介绍低地球轨道星座上的段路由框架的模块化组件。第VI-C节构建基于混合整数线性规划的SRD划分问题。第VI 节将负载均衡流量工程问题建模为线性规划，并提出使用D-PDLP求解。第VII 节介绍最先进的基准方法，并将其性能与所提方法进行比较。第VIII 节简要综述低地球轨道卫星网络中与段路由优化等相关的研究。最后，第IX 节总结理论和实验结果，并展望未来的研究方向。

II. 卫星动力学

为便于后续讨论，本节介绍卫星动力学的基础知识，其中大部分内容改编自文献 [19], [20]。本节使用的主要符号列于表I中。

表 I 卫星动力学中使用的符号

符号	描述
$a > 0$	轨道半长轴
$e > 0$	轨道偏心率
$\alpha \in [0, \pi]$	轨道倾角
$\Omega \in [-\pi, \pi)$	升交点赤经
$\omega \in [-\pi, \pi)$	轨道近拱点
$\nu \in [-\pi, \pi)$	卫星真近点角
r_e	地球半径
ϕ	球面纬度
λ	球面经度
h	球面上方高度
$\zeta(\nu)$	卫星真近点角 ν 处的经度差至其升交点
$\psi \in [0, \pi]$	球面两点间的中心角
$\theta \in [-\pi/2, \ \pi/2]$	从地面用户到卫星的仰角
s	地面用户与卫星之间的斜距
p, P	轨道索引、轨道数量
q, Q	卫星索引、每个轨道的卫星数量
F	相位因子
$\Delta\Omega$	相邻轨道之间的升交点赤经差
$\Delta\nu$	轨道内卫星之间的相位偏移
Δf	不同轨道卫星之间的真近点角差
ω_e, ω_s	卫星 地球和卫星的角速度
H_p, H_q, H	面间、面内和总跳数

A. 卫星开普勒轨道根数

升交点是卫星轨道向北运行时与赤道平面的交点。借助升交点，可以方便地用六个开普勒轨道根数描述卫星的当前位置。半长轴 a 和偏心率 e 描述椭圆轨道的大小和形状。轨道倾角 $\alpha \in [0, \pi]$定义为升交点处轨道平面与赤道平面之间的夹角，用于定量表示轨道相对于赤道的倾斜程度。升交点赤经（RAAN）$\Omega \in [-\pi, \pi)$ 是升交点与春分点之间的夹角；春分点是一个以太阳为中心的地心惯性（ECI）参考系。近心点 $\omega \in [-\pi, \pi)$ 是轨道平面内升交点与距地球最近点之间的夹角。真近点角 $\nu \in [-\pi, \pi)$

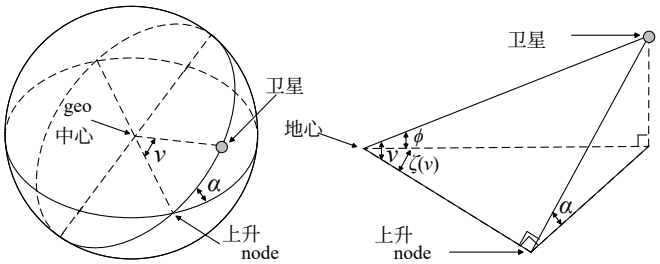


图1. 开普勒轨道要素到大地坐标的转换。右侧子图中，包含轨道倾角 α 的三角形位于升交点处的切平面内。

表示轨道平面内卫星与近心点之间的夹角。

对于满足 $e = 0$ 的理想圆轨道，半长轴等于地球半径 $r_e = 6378$。137 km 加上卫星高于地球表面的高度 h，即 $a = r_e + h$。然而，近心点 ω 并非唯一确定，因此我们假设其与升交点重合，即 $\omega = 0$。因此，真近点角 ν 是卫星与升交点之间的夹角，用于描述卫星在轨道中的角位置。根据当前真近点角 ν，卫星处于上升或下降状态。上升卫星沿东北方向旋转，其位置为 $\nu \in [-\pi/2, \pi/2)$，而下降卫星沿西南方向旋转，其位置为$\nu \in [-\pi, -\pi/2) \cup [\pi/2, \pi)$。简而言之，圆形地心轨道由半径 r_e、轨道倾角 α 和升交点赤经 Ω完全表征，而卫星的位置由真近点角 ν指定。

B. 卫星大地坐标

尽管开普勒轨道根数可以完整确定一条轨道以及单颗卫星的位置，但出于计算目的，转换为大地坐标更为有利。大地坐标具有固有的地固属性，并随地球旋转，由纬度 ϕ、经度λ和高度 h组成。在时刻 t，转换公式为

$$\phi_t = \arcsin(\sin\alpha \cdot \sin\nu_t),\ \phi \in [-\alpha, \alpha], \tag{1}$$

$$\lambda_t = \mathcal{N}(\Omega_t + \zeta(\nu_t)),\ \lambda \in [-\pi, \pi), \tag{2}$$

$$h_t = h, \tag{3}$$

其中，$\Omega_t = \Omega_0 - \omega_e \cdot t$ 是时刻 t的升交点经度，ω_e 是地球角速度，$\nu_t = \nu_0 + \omega_s \cdot t$ 是时刻 t的卫星真近点角，ω_s 是高度 h处的卫星角速度，$\zeta(\nu_t)$ 是卫星与其升交点之间的经度差：

$$\zeta(\nu_t) = \arctan(\cos\alpha \cdot \tan\nu_t) + \begin{cases} 0 & \text{asc. segment} \\ \pi & \text{desc. segment} \end{cases}. \tag{4}$$

我们使用取模函数 $\mathcal{N}(x) = ((x + \pi) \bmod 2\pi) - \pi$将角度限制在经度的定义域内。式（1）至（4）中的关系如图 1所示。

C. 通信视场条件

在任意时刻 t，假设用户的大地坐标为$(\phi_u, \lambda_u, 0)$，卫星的大地坐标为(ϕ_t, λ_t, h)，由式（1）-（4）给出。星下点（SSP），

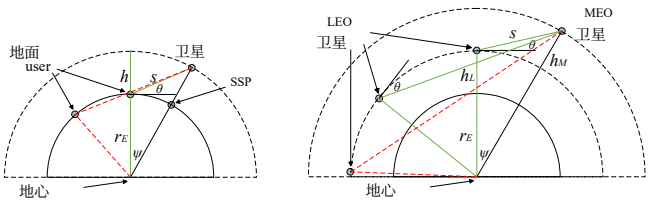


图 2. 仰角为 θ 时视线和视场条件的示意图。绿色实线满足视线约束（且当 $\theta \geq 25°$ 时也满足视场约束）；红色虚线违反视线约束。

又称天底点或星下点，是卫星在地球表面的垂直投影，其纬度和经度与卫星相同，高度为 0（即位于地球表面）。已知用户和星下点的经度和纬度，我们使用半正矢公式计算二者之间的中心角 $\psi \in [0, \pi]$：

$$\psi = 2\arcsin\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_u \cos\phi_t \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}, \tag{5}$$

其中 $\Delta\phi = \phi_u - \phi_t$, $\Delta\lambda = \lambda_u - \lambda_t$。视线条件，即连接用户与卫星的直线不与地球边缘相交，可由正弦定理表示：

$$\psi \leq \arccos\frac{r_e}{r_e + h}. \tag{6}$$

用户到卫星的仰角 $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\cos\psi - r_e/(r_e + h)}{\sin\psi}\right), \tag{7}$$

而仰角约束要求 [8], [9]

$$\theta \geq \theta_{us} = 25°. \tag{8}$$

通过地面站链路进行用户到卫星通信时，我们只要求式（8）成立（这意味着式（6））， 这等价于

$$\frac{\cos\psi - r_e/(r_e + h)}{\sin\psi} \geq \tan\theta_{us},\ \text{i.e.,}\ \psi \leq \psi_{us}. \tag{9}$$

对于通过星间链路进行低轨道到中轨道通信，我们仍然需要满足视距条件：

$$\psi \leq \arccos\frac{r_e}{r_e + h_l} + \arccos\frac{r_e}{r_e + h_m} = \psi_{lm}, \tag{10}$$

以及绝对仰角的条件：

$$|\theta| \geq \theta_{lm} = 25°, \tag{11}$$

其中

$$\theta = \arctan\left(\frac{\cos\psi - (r_e + h_l)/(r_e + h_m)}{\sin\psi}\right). \tag{12}$$

显然，式（12）等价于

$$\left|\frac{\cos\psi - (r_e + h_l)/(r_e + h_m)}{\sin\psi}\right| \geq \tan\theta_{lm}, \tag{13}$$

或者通过求解式（ ψ 13）得到的范围：

$$\psi \leq \psi_{lm}^{+} \text{ or } \psi \geq \psi_{lm}^{-}, \tag{14}$$

其中 ψ_{lm}^{+} 和 ψ_{lm}^{-} 分别是方程（13）左侧等于 $\pm\tan\theta_{lm}$ 时的解。与用户到卫星通信不同，低轨道到中轨道通信要求方程（10）-（12）均成立。图2展示了卫星几何关系中的相关概念。

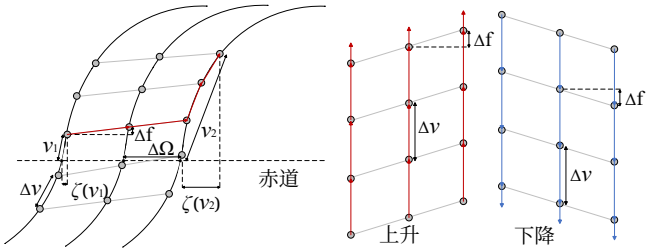


图 3。左：卫星星座及其路径，包含 $H_p = 2$、 $H_q = 2$。右：上升卫星和下降卫星的旋转方向。

D. Walker-Delta 星座

假设一个卫星星座由 P 个轨道平面组成，每个轨道平面包含 Q 颗卫星；所有轨道平面具有相同的轨道倾角 α，所有 P 个升交点沿赤道平面等间距分布，并且所有 Q 颗卫星沿轨道均匀分布，如图3所示。显然，相邻轨道平面之间的升交点赤经差为 $\Delta\Omega = 2\pi/P \in [0, 2\pi)$，同一轨道内相邻卫星之间的相位偏移为 $\Delta\nu = 2\pi/Q \in [0, 2\pi)$。相邻轨道平面之间的相位偏移 $\Delta f = 2\pi F/(PQ)$规定了两个水平邻居之间真近点角 ν 的差值，其中 $0 \le F < P$ 为相位因子。这样一来，$P{\cdot}\Delta\nu$ 始终是 $\Delta\nu$的整数倍，这是确保卫星间距规则性的关键要求；否则，相邻轨道平面中卫星之间的相对角偏移将不会在各轨道平面之间重复，从而形成非周期性编队模式。在相关文献中，这样的卫星星座正式表示为 α ： $PQ/P/F$。目前，大型卫星巨型星座可能由多个具有不同轨道倾角 α 和高度h的星座组成，其中每个星座称为一个轨道壳层。例如，截至 2025 [22]年，Starlink拥有6个轨道壳层。

目前，参数有两种商业选项，即 Walker-Star（中等 α）和 Walker-Delta（高 α）。本质上，这一选择体现了设计上的权衡：Walker-Delta 侧重覆盖中纬度地区（例如 OneWeb[4], Iridium [24]），而 Walker-Star 则侧重全球覆盖，包括极区（例如 GPS [25], Galileo [26],Starlink[1], Kuiper [2]）。本文分别为 MEO 控制器和低地球轨道交换机选用 Walker-Star 和 Walker-Delta。

E. 卫星网格（环面）、星间链路和跳数

在 Walker-Delta 星座中，我们用索引 (p, q) 表示第 p 个轨道面中的第 q 颗卫星。时间 t 的开普勒坐标为

$$\Omega_t(p, q) = \mathcal{N}(p \cdot \Delta\Omega - \omega_e \cdot t), \tag{15}$$

$$\nu_t(p, q) = \mathcal{N}(p \cdot \Delta f + q \cdot \Delta\nu + \omega_s \cdot t) \tag{16}$$

对于所有 $0 \le p < P$ 和 $0 \le q < Q$。

除极区外，每颗卫星都与其邻居建立四条稳定的星间链路，即与索引为（p、（$q-1$）模 Q）和（p、（$q+1$）模 Q）的两颗面内对等卫星，以及与索引为（（$p-1$）模 P、q）和（（$p+1$）模 P、q）的两颗面间对等卫星建立链路。在局部范围内，该星座呈现网格状拓扑，其中一颗卫星通过星间链路与四个相邻对等卫星 [22] 相连。在全局范围内，该星座形成一个环面，卫星会在边界 $p = P$ 和 $q = Q$ 处环绕连接。由此，任意一对卫星都可以通过一条或多条此类星间链路跳数实现连接。需要强调的是，相邻的上升卫星和下降卫星之间不会建立星间链路，因为它们之间的接近是暂时且偶然的，而非持续存在的。

目前，大多数研究工作（例如， [19], [20]）采用跳数而非视距距离之和作为选择最短路径的标准。对于激光链路，每跳的处理时间通常超过传播时延，因此，仅凭较短的链路总长度不足以抵消额外跳数带来的开销。在时刻 t，对于索引为（p_1， q_1）和（p_2， q_2）的一对卫星，我们可以推导出最小跳数的一般公式

$$H = H_p + H_q. \tag{17}$$

在式（17）中， H_p 表示面间跳数， H_q表示面内跳数：

$$H_p = \min\{|p_1 - p_2|, P - |p_1 - p_2|\}, \tag{18}$$

$$H_q = \min\{|q_1 - q_2|, Q - |q_1 - q_2|\}, \tag{19}$$

这是根据环面结构的性质得出的，其中路径可以沿正向或反向行进。此外，我们可以假设每个地面用户始终至少能连接到一颗上升卫星和一颗下降卫星[19]。这样，两个地面用户之间的通信可以通过四种链路类型实现：上升–上升（A2A）、上升–下降（A2D）、下降–下降（D2A）和下降–上升（D2D）。

III. 段路由背景

段路由 [16] 是一种源路由范式，在入口节点的 IPv6 段路由头（SRH）中，将路径编码为有序的段标识符（SID）列表。这样，只有入口节点需要维护段路由策略，从而简化流量工程，提高可扩展性和鲁棒性，并减轻控制平面的负担。

A. 段路由控制平面与数据平面

SR架构专门设计为能够灵活适应硬件基础设施：既可以借助 IGP 扩展，利用现有的多协议标签交换（MPLS）网络（SR-MPLS），并提供向后兼容性以实现更平滑的迁移；也可以原生构建于普及的 IPv6 网络（SRv6）之上，从而释放高级网络编程能力 [54]。SR-MPLS 与 SRv6 在数据平面上存在根本差异：SR-MPLS 使用 MPLS 标签作为段标识符（SID），并将路由编码为标签栈；而 SRv6 使用 128 位 IPv6 地址作为 SID，并通过段路由头（SRH）携带 SL。控制平面也存在类似区别：SR-MPLS 仍需协调全局一致的段路由全局块（SRGB）来分配 SID，而 SRv6 使用 IPv6 地址前缀作为 SID，完全免除了标签协调，并可像汇总常规 IPv6 路由一样汇总 SID。

B. 段路由域

随着互联网不断扩展，段路由域（SRD） [18] 的引入主要是为了提升可扩展性、实现管理控制和安全隔离。一般而言，一个 SRD 由若干支持段路由的节点组成，其内部路由细节可以对外隐藏。为此，例如，SRD 使用绑定 SID（BSID），使边界节点能够处理域内路由，并将 BSID 扩展为完整路径，以适应内部变化。混合 SR/IP网络存在于硬件逐步迁移的过程中，在此过程中，支持段路由的节点与传统 IP 节点互通，但这对 SRD 拓扑有重要影响：SR-MPLS 要求每个 SRD 构成一个连通子网，因为 IP 节点会丢弃数据包；而 SRv6 则取消了这一限制，允许 IP 节点忽略 SRH，并按照传统 IGP 规则转发数据包 [29]。因此，支持段路由的节点可以分散部署，SRv6 [29],尽管碎片化段路由域在管理上仍不受欢迎 [16]。在完全采用段路由或支持多个互不相交 SRD 的混合网络中，每个 SRv6 节点都会将其 SID 编入转发信息库（FIB）。此外，SRD 边界节点（即入口和出口节点）承担的职责比内部节点更多。例如，入口节点通过 SR策略将进入的流量流映射到 SL，而出口节点则负责移除 SRH 并解封装数据包 [31]。图4 展示了混合 IPv6 网络中的一条典型路径，其中 SRD 2001 内的支持段路由节点为 2001:1–2001:3。

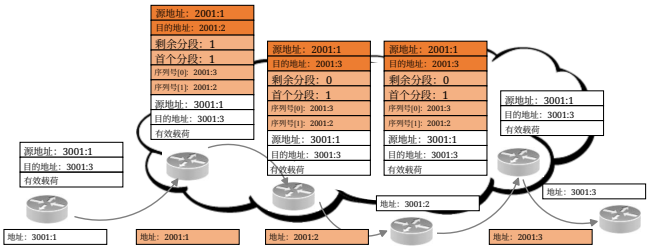


图4. SRD 2001由支持段路由的节点2001:1–2001:3组成，而IP域由不支持段路由的节点3001:1–3001:3组成。每个数据包示意图表示数据包经由出口边发送时的数据包头部。字段分别包括外部/封装头部（深橙色）、SRH（橙色）和有效载荷（包括内部头部等），其中活动段始终显示在外部头部中。

SR允许通过利用外部路径多次经过同一SRD，从而提升流量工程性能 [18]。然而，出于时延、安全性和服务质量方面的考虑，不建议段路由域内流量采用外部路径。尽管允许多次经过，但为避免路由环路和段列表深度（SLD）违规，禁止策略嵌套 [30]。因此，我们禁止嵌套IPv6头部和嵌套段列表，并要求数据包在离开当前SRD时进行解封装。在第II节中，我们建立了四种路径模式，它们均具有最小跳数，因此不存在环路。

IV. 系统概述

为应对上述挑战，我们提出了一个统一处理域划分、SR-TE 和 BSID 翻译的框架。具体而言，工作流程分为三个阶段：

1) 域划分模块。该模块收集 MEO/LEO 卫星和 ISL 状态的信息，并将其封装为标准化消息格式。在 VT 快照 τ 期间（Starlink 约为 15 秒），网络拓扑被视为静态。该模块旨在将星座划分为互不相交的SRD，以尽可能减少控制开销，具体衡量标准为流表更新和域状态同步所需的总时间。

2）SR-TE 模块。该模块基于引力模型，针对流量矩阵解决最小化网络拥塞的问题。具体而言，它利用最新提出的 D-PDLP 库，在不降低性能的情况下实现高通信效率和多处理器并行化。分布式解决方案的一个优势是，路由变量被限定在其对应的SRD内，从而保护了SRD级隐私。另一个优势是，只需以 AllReduce（求和）格式传递变量，因而显著降低了通信开销。

3) SL 翻译模块。该模块将得到的路由变量转换为可执行的 SL。

V. MEO 卫星控制域划分

本节介绍分层 MEO/LEO 卫星星座模型，并概述控制域划分的优化目标。在一个 VT 快照间隔τ内，该层级结构由作为上层控制节点的 MEO卫星和作为下层交换节点的 LEO卫星组成。MEO卫星具备计算能力，可在控制平面执行路由计算和网络管理；而 LEO卫星则作为数据平面中的分组转发交换机，在专用 TCAM 硬件中维护和更新流表条目。我们对相关工作 [27]提出的控制开销模型进行了修改。

A. 用户到卫星及 *LEO* 到 *MEO* 视场的持续性

为减少不必要的频繁切换，我们倾向于采用能够长期保持的用户到卫星及 LEO到MEO连通性。由于 LEO卫星的位置随时间变化具有可预测性，MEO卫星可以利用两行轨道根数（TLE）或存储的星历，预测其视场内 LEO卫星未来的位置。然而，要验证视场条件在连续时间内是否成立，通常需要密集采样或数值求根器，两者的计算开销都很大。在温和且实际的条件下，我们提出一种算法，只需检查起始时刻 t_1 和结束时刻 t_2的视场条件，即可确保整个 VT 快照间隔 τ 内连通性持续有效。该算法通过引理1和引理2进行了形式化表述，证明见附录A。

引理 *1*（用户到卫星视场持续性）。定义 $n=\sqrt{\mu_E/r_a^3}$ 为卫星的平均运动，μ_E 为地球引力场强度。假设当前的 VT 快照从 t_1 开始，到 t_2 结束，持续时间为 $\tau = t_2 - t_1$，且地心角分别为 ψ_1 和 ψ_2。如果 $\psi_1 \le \psi_{us}$、$\psi_2 \le \psi_{us}$、ψ_1 和 ψ_2 均有足够的裕量：

$$|f(\psi_1) - f(\psi_{us})| + |f(\psi_2) - f(\psi_{us})| \ge \tau, \qquad (20)$$

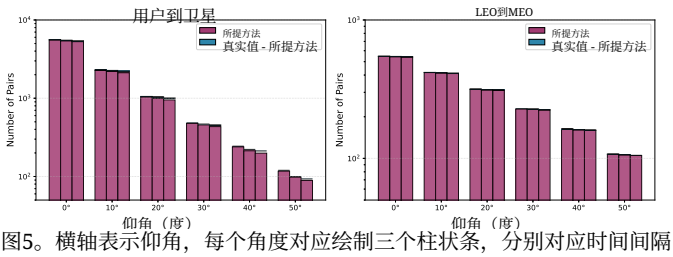


图5。横轴表示仰角，每个角度对应绘制三个柱状条，分别对应时间间隔 $\tau = 10$ 、 20 和 30 秒。纵轴采用对数刻度，表示匹配对的数量。

那么，对于所有 $t \in [t_1, t_2]$，我们都可以确保 $\psi_t \le \psi_{us}$ 。定积分 f 定义如下：

$$f(\psi) = \int_c^{\psi} \frac{\sqrt{D - 2k\cos u \sin u\sqrt{D} + k^2 \sin^2 u}}{n \sin^2 u} du$$

对于任意常数 c，当 $k = r_e/r_a$ 时， D 定义为：

$$D = 1 - 2k\cos u + k^2.$$

式(20)中的条件是充分但非必要的，我们可以使用 SciPy [28] 等数值积分 Python 库高效地验证这一点。

引理*2*（*LEO*到*MEO*视场持续性）。设 n_l 和 n_m 分别为低地球轨道和MEO卫星的平均运动。若 $\psi_1 \le \psi_{lm}$、 $\psi_2 \le \psi_{lm}$、 $\psi_1 \le \psi_{lm}^+$、 $\psi_2 \le \psi_{lm}^+$以及 ψ_1 和 ψ_2 对于视距条件具有足够的裕量：

$$|g(\psi_1) - g(\psi_{lm})| + |g(\psi_2) - g(\psi_{lm})| \ge \tau, \tag{21}$$

并且对于仰角条件具有足够的裕量：

$$|g(\psi_1) - g(\psi_{lm}^+)| + |g(\psi_2) - g(\psi_{lm}^+)| \ge \tau, \tag{22}$$

其中，定积分 g 定义为：

$$g(\psi) = \int_c^{\psi} \frac{\sqrt{D - 2k\cos u \sin u\sqrt{D} + k^2 \sin^2 u}\sqrt{D} r_m}{(n_l r_l + n_m r_m)\sin^2 u} du$$

对于任意常数 c，在 $k = r_l/r_m$的情况下， D 定义为：

$$D = 1 - 2k\cos u + k^2.$$

则可以确保 $\psi_t \le \psi_{lm}$， $\psi_t \le \psi_{lm}^+$ 对于所有 $t \in [t_1, t_2]$均成立。对于负仰角，同样适用类似的视场条件，即 $\psi_1 \le \psi_{lm}$， $\psi_2 \le \psi_{lm}$， $\psi_1 \ge \psi_{lm}^-$以及 $\psi_2 \ge \psi_{lm}^-$。然而，对于Starlink和GPS星座的组合，这些条件无法同时满足。与用户到卫星视场的情况类似，式（21）-（22）中的条件是充分条件，但不是必要条件。

虽然这些引理给出的充分条件往往会低估结果，但实验表明，所得结果与真实值相当接近。对于 Starlink 星座 53。0°: 1584/72/3/550 km 和 GPS 星座 55。0° : 24/6/4/20，200 km，设置 15° 的实际裕量后， ψ 通过简单计算可得 $\tau \sim 123$ 秒（引理 1）和 $\tau \sim 69$ 秒（引理 2）。图 5对地面到 Starlink 以及 Starlink 到 GPS 的匹配对数量估算方法进行了比较分析。引理 1 和引理 2 中提出的数值方法在所有最低要求仰角范围内均表现良好，仰角范围从 0° 到 50°，其中用户到卫星的场景结果最接近，尤其是在实际应用中常见的中等最低仰角下。尽管存在差异，与真实值相比，该估算方法对匹配对数量的低估幅度很小。

B. 控制开销模型

在 VT 快照 N期间，所有 MEO控制器的总控制开销 T^{ctrl} 取决于域划分，并由三个主要部分组成。也就是说，

$$\max_i T_i^{\text{sync}} + \max_i T_i^{\text{migr}} + \sum_i T_i^{\text{pdhg}} + \max_i T_i^{\text{flow}},$$

它们分别表示全局状态同步、部分变量迁移、聚合变量通信和流表更新的开销。在可能的情况下，省略对当前 VT 快照的显式依赖。本节使用的关键符号列于表II。

表 II 控制开销模型中常用的符号

符号	描述
τ	VT快照时长
N， $N-1$	当前 VT 快照和先前 VT 快照的索引
SRD_i	第i个 SRD
FoV_i	第 i个 MEO控制器的视场
M_{sync}	LEO 到 MEO 同步消息大小
M_{comm}	MEO 到 MEO 通信消息大小
M_{flow}	MEO 到 LEO 流表更新消息大小
S_j	用于发送第 j-第 th 个 LEO 交换机
G_j	用于迁移 PDGH 求解器的同步消息数第 j 个 LEO 交换机的状态变量
N_j	# 第 j个LEO交换机的流量更新消息
V	# 用于传输聚合（即AllReduce）变量的通信消息
B_{ji}	从第 j个LEO交换机到第 i个MEO控制器的带宽
$B_{ii'}$	从第 i个MEO控制器到第 i'个中地球轨道交换机的带宽
B_{ij}	从第 i个MEO控制器到第 j个LEO交换机的带宽
d_{ji}^{prop}	从第 j 个低地球轨道交换机到第 i 个低地球轨道的传播时延控制器
$d_{ii'}^{\text{prop}}$	从第 i 个 MEO 控制器到第 i' 个 MEO 控制器的传播时延
d_{ij}^{prop}	从第 i 个 MEO 控制器到第 j 个低地球轨道的传播时延交换机
N^{pdhg}	τ 期间的原始-对偶混合梯度更新次数

1）*LEO*间全局状态同步开销：由于控制域划分 $\text{SRD}_i \subset$ 视场$_i$ 尚未确定，视场$_i$ 内的所有低地球轨道交换机都必须依次向 MEO控制器发送状态变量（例如 B_{ij} 和 d_{ij}^{prop} ）。第 i 个 MEO 控制器的同步开销为：

$$T_i^{\text{sync}} = \sum_{j \in \text{FoV}_i} \left(\frac{S_j \cdot M_{\text{sync}}}{B_{ji}} + d_{ji}^{\text{prop}} \right).$$

注意， T_i^{sync} 不会影响划分 SRD_i 的优化，因为求和必须遍历所有 $j \in$视场$_i$，而这取决于对每一对（i， j）验证引理2中的视场条件。

2）*MEO*间部分变量迁移开销：由于卫星移动性， i号MEO控制器必须迁移

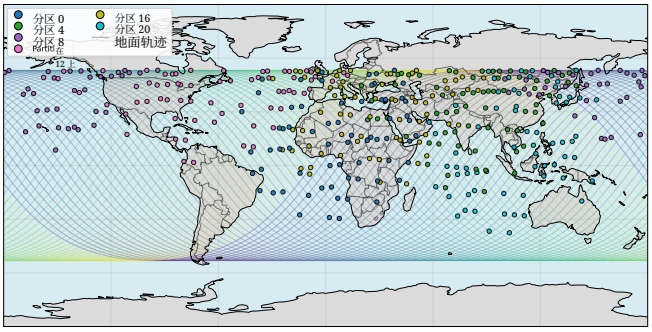


图6. 全球地图上显示的 Starlink 域分区（0、4、8、12、16、20）。每个分区使用不同颜色；卫星以彩色圆圈表示，地面轨迹以浅色线条表示。陆地：浅灰色；海洋：浅蓝色。各分区在地理上分散于所有经度范围内。

与 SRD_i 对应的 PDHG 求解器变量至相邻 MEO。 i号MEO控制器的迁移开销为：

$$T_i^{\mathrm{migr}} = \sum_{j\in \mathrm{SRD}_i^{N-1}} \sum_{i'\neq i} b_j^{i'} \left(\frac{G_j \cdot M_{\mathrm{sync}}}{B_{ii'}} + d_{ii'}^{\mathrm{prop}} \right).$$

在迁移过程中，第 i个 MEO控制器将与 SRD_i^{N-1}对应的求解器变量移交，这些变量属于此前的 VT 快照中由其控制的低地球轨道交换机，但在当前 VT 快照中被重新分配给另一个 $\mathrm{SRD}_{i'}$ ，其中包含 $i' \neq i$。

3) MEO 到 *MEO* 的聚合变量通信开销：对于每次 PDHG 更新迭代，AllReduce 格式的聚合变量预计将遍历所有 MEO控制器。总通信开销为：

$$T_i^{\mathrm{pdhg}} = N^{\mathrm{pdhg}} \cdot \sum_i \left(\frac{V \cdot M_{\mathrm{comm}}}{B_{ii'}} + d_{ii'}^{\mathrm{prop}} \right).$$

第 VI-C 节中的 PDHG 方案要求聚合变量按照任意顺序恰好遍历所有 MEO 控制器一次。由于聚合变量 V 从i号控制器传输到 i'号控制器的大小是固定的，因此与域划分 SRD_i无关，将 T_i^{pdhg} 中的加数视为从 i号控制器到 i'号控制器的行程成本后，我们可以将其精确转化为 NP 难旅行商问题（TSP）。该问题的优化仅取决于 MEO 拓扑，与域划分SRD_i无关。

4）*MEO* 到 *LEO* 的流表更新开销：求解混合整数线性规划后， i号 MEO 控制器将流量分割比的解发送回所有 LEO 交换机 $j \in \mathrm{SRD}_i$，LEO 交换机则在本地 TCAM 中更新相应的流表条目。 i号 MEO 控制器的流表更新开销为：

$$T_i^{\mathrm{flow}} = \sum_{j\in \mathrm{SRD}_i} \left(\frac{N_j \cdot M_{\mathrm{flow}}}{B_{ij}} + d_{ij}^{\mathrm{prop}} \right).$$

5）其他开销：相关工作 [27] 还引入了路径计算开销，该开销已计入 PDHG 求解器的运行时间，因此不属于本文的研究范围。

C. 基于混合整数线性规划的问题建模

我们假设 $M_{\mathrm{sync}} = 24$ 字节 [27]、 $M_{\mathrm{flow}} = 36$ 字节 [27]，$B_{ij} = 20\,\mathrm{Gbps}$，以及 G_j和 N_j取决于 VT 快照 $N-1$的流量工程问题的解。对于任意 VT 快照 N，我们可以求解一个等价的混合整数线性规划，以最小化总控制与通信开销：

$$\min_{b_j^i} \left(\max_i T_i^{\mathrm{migr}} + \max_i T_i^{\mathrm{flow}} \right) \tag{23}$$

$$\text{s.t.: } b_j^i \le \mathbb{I}[j \in \mathrm{FoV}(i)],\ \forall j,\ \forall i \tag{24}$$

$$\textstyle\sum_i b_j^i = 1,\ \forall j, \tag{25}$$

$$b_j^i \in \{0,1\},\ \forall j,\ \forall i. \tag{26}$$

二元指示变量定义为 $b_j^i = \mathbb{I}[j \in \mathrm{SRD}_i]$。式（24）-（26）中的约束要求每个 LEO 交换机恰好属于一个 MEO控制器，且必须位于该控制器的视场内。图 6 展示了一个示例划分，该划分是通过使用 gurobipy [32]求解 Starlink 和 GPS 的混合整数线性规划得到的。

VI. 分段路由流量工程子问题

与域划分问题中的持久 LEO 到 MEO 匹配类似，我们在 SR-TE 问题中寻求持久的用户到卫星匹配。给定 VT 快照内的稳定匹配，该问题可建模为线性规划。

A. 地面用户分配

利用引理 1 中视场条件的持久性，我们可以将地面用户与其附近的一颗卫星关联起来。在用户于整个 VT快照间隔 τ 内均处于卫星视场范围内的约束下，我们优先选择仰角较高的卫星 θ。出于多种提升物理效率的考虑，优先选择仰角较高的卫星是合理的，例如降低自由空间路径损耗和大气衰减、减少多径干扰、提升相控阵天线增益，以及延长驻留时间从而减少切换。为此，我们需要求解两个如下形式的独立问题

$$\max_{p,q}\ \theta\Big((\phi_u, \lambda_u, 0), (\phi_t(p,q), \lambda_t(p,q), h) \Big), \tag{27}$$

即：用户 u在 p， q 的卫星的视场内持续存在于 τ，一个用于 $\nu_t \in [-\pi/2,\ \pi/2)$，另一个用于 $\nu_t \in [-\pi, -\pi/2) \cup [\pi/2,\ \pi)$，分别。对于位于 $(\phi_u,\ \lambda_u,\ 0)$ 的每个地面用户，我们求解这两个问题，并找到与之关联的两颗卫星，其索引为 $(p,\ q)$，一颗处于上升阶段，另一颗处于下降阶段。

B. 随机化最短路径构造

因此，两个地面用户之间的跳数取决于四种路径模式 X2X，其跳数为 H^{X2X}，其中 X $\in$ {A，D}。不同于大多数仅考虑四种路径模式中的最小跳数的研究，我们保留所有模式，以便实现负载均衡并增强故障安全鲁棒性。对于任意源-目的地用户对，我们可以分别将源和目的地与一颗上升卫星和一颗下降卫星关联起来，从而建立四条不同的路径。每条路径均采用式（18）-（19）中的最小水平跳数和垂直跳数，将路径限制在球面矩形内。我们采用概率方法 [20]，，其中每颗源卫星通过随机抛硬币决定是否改变方向

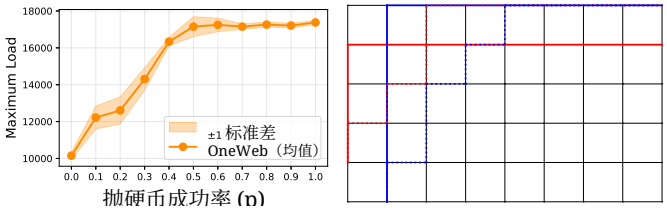


图7. 成功率 p 对最大负载的影响。左：最大负载随 p 变化的情况；随着 $p \geq 0.5$，最大负载单调增加并趋于饱和。右：对其根本原因的示意：具有 $p = 0$（实线箭头）的路径彼此边不相交，而具有 $p > 0$（虚线）的路径可能存在边重叠，从而导致竞争加剧并使最大负载升高。

每一步都通过成功率为 p的随机抛硬币来决定。一旦路径完成了所有必需的水平跳数，例如，就会强制其完成剩余的所有垂直跳数，反之亦然。无线网络中已采用类似的方法——单转向直线型路由 [17], ；通过恰当设计转向规则，该方法确实能够降低整个网络的最大链路利用率。

对于给定的源-目的节点对，尽管存在许多最小跳数路径，但我们发现，当成功率为 $p = 0$时对应的路径（优先经过所有水平跳数，再经过垂直跳数）对于稀疏节点对始终能产生最低的最大负载。图 7展示了这一趋势，说明成功率 p 对最大负载的影响。左侧子图显示，最大负载随 p 增加，并在 $p \geq 0.5$时趋于平稳。右侧子图揭示了这一现象的原因：具有 $p = 0$ 的路径（实线箭头）不存在重叠边，而具有 $p > 0$ 的路径（虚线）可能共享多条边，导致竞争加剧，进而使最大负载升高。在本文中，我们始终要求 $p = 0$。

表III SR-TE 中常用的符号

符号	描述
$G(V, E)$	网络 G，包含节点 V 和有向边 E
$i \in V$	低地球轨道卫星 i
$e \in E$	有向星间链路 e
s, d	地面源/目的用户
U	网络拥塞（即最大链路利用率）
$C(e) \geq 0$	链路容量 e
$t^{sd} \geq 0$	从 s 到 d 的流量需求
T	流量矩阵，其中第 (s, d) 个元素为 t^{sd}
路径$^{sd}_{XX}$	从 s_X 到 d_X的路径，其中 X $\in$ {A,D}
$f^{sd}_{XX} \in [0, 1]$	t^{sd} 通过路径$^{sd}_{XX}$传输的比例，其中 X $\in$ {A,D}
$t^{sd}_{XX} \geq 0$	t^{sd} 通过路径$^{sd}_{XX}$传输的流量，其中 X $\in$ {A,D}
$t^{sd}_{XX}(e) \geq 0$	t^{sd}_{XX} 经过链路 e的流量，其中 X $\in$ {A、D}
SRD_k	第k个 SRD，$\forall k \in K$

C. 采用线性规划进行问题建模

SR-TE 问题的线性规划表述十分直接，旨在最小化低地球轨道卫星星座上的最大星间链路利用率，使用分流比例 [21]:

$$\text{最小化 } U \tag{28}$$

$$\text{s.t.: } f^{sd}_{\mathrm{AA}} + f^{sd}_{\mathrm{AD}} + f^{sd}_{\mathrm{DA}} + f^{sd}_{\mathrm{DD}} = 1, \ \forall s, d \in V \tag{29}$$

$$\sum_{s,d} t^{sd}_{\mathrm{AA}}(e) + t^{sd}_{\mathrm{AD}}(e) + t^{sd}_{\mathrm{DA}}(e) + t^{sd}_{\mathrm{DD}}(e) \leq U \cdot C(e), \quad \forall e \in E \tag{30}$$

$$t^{sd}_{\mathrm{AA}}(e) = \mathbb{I}[e \in \mathrm{path}^{sd}_{\mathrm{AA}}] \cdot f^{sd}_{\mathrm{AA}} \cdot t^{sd}, \ \forall s, d \in V \tag{31}$$

$$t^{sd}_{\mathrm{AD}}(e) = \mathbb{I}[e \in \mathrm{path}^{sd}_{\mathrm{AD}}] \cdot f^{sd}_{\mathrm{AD}} \cdot t^{sd}, \ \forall s, d \in V \tag{32}$$

$$t^{sd}_{\mathrm{DA}}(e) = \mathbb{I}[e \in \mathrm{path}^{sd}_{\mathrm{DA}}] \cdot f^{sd}_{\mathrm{DA}} \cdot t^{sd}, \ \forall s, d \in V \tag{33}$$

$$t^{sd}_{\mathrm{DD}}(e) = \mathbb{I}[e \in \mathrm{path}^{sd}_{\mathrm{DD}}] \cdot f^{sd}_{\mathrm{DD}} \cdot t^{sd}, \ \forall s, d \in V \tag{34}$$

$$U, \ f^{sd}_{\mathrm{AA}}, \ f^{sd}_{\mathrm{AD}}, \ f^{sd}_{\mathrm{DA}}, \ f^{sd}_{\mathrm{DD}} \geq 0, \ \forall s, d \in V. \tag{35}$$

符号 $f^{sd}{}_{\mathrm{AA}}$ 表示与之间 A到A路径的流量分配比例 s、 d; 符号 $f^{sd}{}_{\mathrm{AD}}$、 f^{sd}_{DA}和 $f^{sd}{}_{\mathrm{DD}}$ 的定义类似。表III列出了 SR-TE 中常用的全部符号。

在任意时刻，给定流量需求 t^{sd} 已知且地面用户的位置 s 和 d已知后，与其关联的卫星s_{A}、 s_{D}、 d_{A} 和 d_{D} 即可确定。源—目的卫星对之间的每条路径均在执行前随机构造一次，并为所有流量需求重复使用。指示变量的含义显而易见；例如， $\mathbb{I}[e \in$ 路径$^{sd}_{\mathrm{AA}}]$若从 s_{A} 到 d_{A} 的路径经过链路 e，则等于 1，否则为 0。该问题具有线性目标函数和线性约束，其变量由公式（35）给出。

尽管可以使用高效的现成线性规划求解器（如Gurobi）[32], 获得最优解，但我们转而提出一种分布式线性规划求解方案。采用该方法时，低地球轨道交换机被划分为互不相交的SRD，每个SRD的MEO控制器在内部为低地球轨道交换机规划路由。这种分布式设计的一个显著优势在于，一个SRD内的路由决策（即随机选择的路径和分流比例）不会向其他SRD披露，仅共享聚合后的AllReduce变量。

D. 基于D-PDLP的分布式求解方案

原始—对偶混合梯度（PDHG）框架在求解大规模线性规划方面已展现出巨大潜力。在此框架下，基于PDHG的线性规划方法（PDLP）[12] 已确立求解超大规模线性规划的先进水平。迄今为止，已提出可在多个图形处理器上扩展的分布式PDLP（D-PDLP） [11] 。

1）PDLP：基于 PDLP 的方法考虑一般的线性规划

$$\min_{x \in \mathcal{X}} c^T x \text{ subject to } Ax \in \mathcal{S} \tag{36}$$

其中 $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$， $c \in \mathbb{R}^n$， 可行集 X $= \{x \in \mathbb{R}^m : \ l_v \leq x \leq u_v\}$, 约束范围 S $= \{s \in \mathbb{R}^n : \ l_c \leq s \leq u_c\}$, 所有上界和下界均可扩展至无穷大。相应的拉格朗日函数导出等价的鞍点形式:

$$\min_{x \in \mathcal{X}} \max_{y \in \mathcal{Y}} c^T x + y^T Ax - p(-y; l_c, u_c), \tag{37}$$

其中，分段线性函数 $p(y; \ l, \ u) = u^T y^+ - l^T y^-$为 $y^+ = \max\{y, \ 0\}$ 和 $y^- = \max\{-y, \ 0\}$，以及对偶问题

可行集 $\mathrm{Y} \subset \mathbb{R}^m$ 是按分量定义的笛卡尔积，其取决于原始约束 X 的有界性：

$$\mathcal{Y}_i = \begin{cases} \{0\}, & \text{if } (l_c)_i = -\infty,\ (u_c)_i = \infty, \\ \mathbb{R}^-, & \text{if } (l_c)_i = -\infty,\ (u_c)_i < \infty, \\ \mathbb{R}^+, & \text{if } (l_c)_i > -\infty,\ (u_c)_i = \infty, \\ \mathbb{R}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

PDHG方法可应用于式（37）中的鞍点问题，从而得到以下更新规则 [12]:

$$\begin{aligned} x^{t+1} &= \mathrm{Proj}_{\mathcal{X}}\left(x^t - \lambda_1(c - A^T y^t)\right), \\ z^{t+1} &= A(2x^{t+1} - x^t), \\ y^{t+1} &= y^t - \lambda_2 z^{t+1} - \lambda_2 \mathrm{Proj}_{-\mathcal{S}}\left(\lambda_2^{-1} y^t - z^{t+1}\right) \end{aligned}$$

其中，λ_1 和 λ_2 分别表示原始步长和对偶步长，Proj–$\mathcal{S}$ 表示到集合 –S的投影。

2）D-PDLP：为了扩展到多个分布式计算资源，D-PDLP采用灵活的二维分区策略来分配向量 c、矩阵 A和变量 x，y，z，使求解器能够有效利用数据并行。我们将式（28）-（35）中的线性规划重写为式（36）的形式，并按列划分相应的矩阵 A，这构成了一般二维分区策略的一个特殊情况，

$$\min_{x \in \mathcal{X}} \sum_{k \in K} c_k^T x_k \ \text{subject to} \ \sum_{k \in K} A_k x_k \in \mathcal{S}, \qquad (38)$$

其中 $x = [U;\ x_1^T;\ \ldots\ldots;\ x_K^T]^T$、$c = [1;\ 0_1^T;\ \ldots\ldots;\ 0_K^T]^T$、$l_v = 0$、$u_v = \infty$。对于所有 $k \in K$，

$$x_k = \Big[\{f_{\mathrm{AA}}^{sd}\}_{s,d \in V, s_{\mathrm{A}} \in \mathrm{SRD}_k}^T; \{f_{\mathrm{AD}}^{sd}\}_{s,d \in V, s_{\mathrm{A}} \in \mathrm{SRD}_k}^T; \{f_{\mathrm{DA}}^{sd}\}_{s,d \in V, s_{\mathrm{D}} \in \mathrm{SRD}_k}^T; \{f_{\mathrm{DD}}^{sd}\}_{s,d \in V, s_{\mathrm{D}} \in \mathrm{SRD}_k}^T\Big]^T.$$

全零向量 0_k 在 c 中的维度等于其对应部分的维度 x_k。矩阵 A 和约束范围$\mathcal{S}$由公式（29）-（30确定，具体表达式在此省略。

为了在多个MEO控制器之间使用D-PDLP框架，我们将 x_k、c_k、A_k以及相应的 y_k、z_k分配给第 k个MEO控制器，并将 U 分配给其中任意一个控制器。完整的分布式过程如算法1所示，其中AllReduce算子旨在聚合所有设备上的向量，并将总和广播回去。请注意，x_k^t 中的流量分配比例不会在SRD之间共享；只有聚合变量 z^t 会被共享。这对于维护每个SRD中管理信息的机密性至关重要。

主要计算开销来自第5行和第7行中的矩阵与向量相乘，该计算由MEO控制器分布式并行执行。主要通信开销来自第8行的AllReduce操作，即对向量 v_k求和。使用AllReduce对分布式 v_k 进行求和，需要在所有 K 个MEO控制器之间进行通信。幸运的是，这可以通过分布式方式，利用双向Ring-AllReduce过程进行两次并行遍历来实现。第9行的计算在每台设备上以相同方式执行，以节省通信开销。

一个值得注意的问题是，基于 PDHG 的方法由于其一阶特性，通常收敛较慢。为缓解这一问题，我们提出了一种混合策略，采用一种

算法1D-PDLP

输入： 问题实例 $(A, c, \mathrm{X}, \mathrm{S})$，定义域 SRD_k，初始值 (x^0, y^0)，步长 λ_1 和 λ_2，以及精度 ϵ。

1：根据 SRD_k, $\forall k \in K$ 确定 (A_k, c_k, X_k)。
2：**对于** $t = 1$ 到 $t_{\max}$ **执行**
3：　▷ 原始更新
4：　计算部分梯度 $g_k = A_k^T y^t$。
5：　更新原始变量 $x_k^{t+1} = \mathrm{Proj}_{\mathcal{X}_k}(x_k^t - \lambda_1(c_k - g_k))$。
6：　▷ 分布式对偶更新
7：　计算局部部分约束 $v_k = A_k(2x_k^{t+1} - x_k^t)$。
8：　跨列聚合 v_k AllReduce(v_k) $z^{t+1} =$。
9：　接收 z^{t+1} 并行更新本地对偶变量 $y^{t+1} = y^t - \lambda_2 z^{t+1} - \lambda_2$投影$_{-\mathcal{S}}(\lambda_2^{-1} y^t - z^{t+1})$。
10：　当 KKT误差小于 ϵ [11]， [12]时停止。
11：**结束循环**
12：**返回** $x^t = \{x_k^t\}_{k \in K}$。

更快的商业求解器（如 Gurobi） [32],生成初始解，随后根据 VT快照间隔内观察到的波动，适时调用 D-PDLP 动态优化该解。

VII. 性能评估

在评估中，我们通过导入已知规格（例如，拓扑、ISL容量以及LEO卫星天底点之间的测地距离）并结合合成和采样技术生成流量矩阵 T，构建MEO-LEO卫星网络。

A. 硬件和软件配置

所有实验均在一台专用工作站上进行，该工作站配备英特尔 i9-14900KF/RTX 4090 GPU 和 32 GB 内存，运行 Ubuntu 20.04-LTS 和 Python 3.11.14。我们使用 gurobipy [32], 获取线性规划的初始解，并在必要时使用 D-PDLP [11]对初始解进行分布式调整，以应对流量需求波动。

B. 仿真设置

我们使用 Python 实现第II 节中的天体动力学模型，并使用 gurobipy 对第V-B 节中的混合整数线性规划 [32]和第 VI-C 节中的线性规划进行建模和求解。

*1）*低地球轨道星座：我们针对以下商用低地球轨道星座开展了大量实验，并将其作为低地球轨道交换机：

- Starlink S1：53.0°：1584/72/3/550 km，
- Kuiper K1：51.9°：1156/34/3/630 km，以及
- OneWeb Phase 1：87.9°：588/12/3/1,200 km。

*2) MEO*星座： 我们采用基准 GPS 星座 55.0°：24/6/4/20,200 km 作为 MEO控制器。卫星分布在六个轨道平面上，每个轨道平面包含四颗主卫星，以实现全球覆盖。

*3）*地理数据集与流量矩阵：我们从 GeoNames 获取城市级地理信息系统（GIS）地理数据集。GeoNames [33], 是一个免费且可靠的数据来源，可用于收集全球各城市的人口统计数据（如人口）和地理数据（如纬度、经度）。我们采用引力模型 [34]， 该模型假设流量需求

t^{sd} 节点 s 与 d 之间的流量 C^s，C^d 与它们各自的容量乘积成正比，且与它们之间距离 dist$(s,\ d)^\kappa$ 的某个函数成反比，即：

$$\bar{t}^{sd} = \frac{C^s \cdot C^d}{\text{dist}(s,d)^\kappa}. \tag{39}$$

我们定义 C^s 为城市 s的总人口，并将dist(s,d) 表示该城市对之间的最小跳数(s,d)。由于所有城市对的最大跳数都很小且为常数，因此我们可以忽略城市对之间距离的影响，即 $\kappa = 0$。为考虑时间变化，我们可以将流量需求视为泊松随机过程，其均值由式 $\bar{t}^{sd}$ （39）给出。我们从泊松分布 t^{sd} ~泊松$(\bar{t}^{sd})$ 中独立采样每个流量需求，并重复此过程。

C. 基线方法与共享超参数

尽管当前大量研究聚焦于低地球轨道星座中的路由，但关于降低链路拥塞的研究仍相对有限。为确保比较公平，我们选择了若干基线方法，它们采用相同的粒度级别——即流级——因为分组级信息规模过大，难以收集、更新和传播。具体而言，我们将本方法与这些基线方法进行比较，考察主要目标（即链路利用率）以及衍生指标，包括端到端时延和分组丢弃率。所选基线方法包括适用于卫星网络的经典基于MHCR的算法：

- DisCoRoute [20], 通过在极区附近布置星间链路来尽可能缩短总链路长度，
- FROG [39],地面用户同时考虑可见的上升和下降卫星，以获得最小跳数，

以及负载均衡算法：

- VLB，一种经典的流量无关随机路由方法。

我们筛选出人口不少于 400 万的城市，并根据公式（39）计算流量需求，其中人口变量以百万为单位表示，结果以 Mbps 为单位。假设 Starlink、Kuiper 和 OneWeb 的低地球轨道交换机处理速率分别为 20、40 和 60 Gbps，输入缓冲区容量为 10 个数据包。这些处理速率低于星间链路比特率，确保链路不会成为系统瓶颈。

D. 性能分析

图 8 比较了所提算法与 DisCoRoute、VLB 和 FROG 在 Starlink、Kuiper 和 OneWeb 星座中的四项指标表现。从各子图中可以看出，所提算法在最大负载、平均逗留时间和分组丢弃率方面表现出色，在跳数方面则排名第二。不过，所提算法在跳数方面并非最优，这是为了实现更优负载均衡而有意作出的权衡。仿真时间仅表示低地球轨道星座的时间，并不存在有逻辑顺序的时间排列。

1）最大负载：如第一列所示，所提算法在所有评估方法中实现了最低的最大负载。相比之下，FROG 在较晚的时间步表现出更高的负载，说明在相同流量条件下发生了严重拥塞。DisCoRoute 和 VLB 的最大负载则介于两者之间。值得注意的是，这些结果验证了，与最小化跳数相比，最小化最大负载能更有效地防止形成瓶颈链路。

2）平均逗留时间：第二列展示了各算法的平均逗留时间，即数据包在 LEO 交换机中停留的总时间，包括排队时延和处理时延。所提方法始终实现最低的逗留时间；DisCoRoute 和 VLB 的逗留时间适中，而 FROG 的时延最高，尤其是在较后的时间步。这一结果尤其值得注意：尽管没有明确地最小化跳数，所提算法仍通过避开拥塞链路，取得了更优的时延表现。相反，FROG 采用最小化跳数的策略，导致特定链路过度利用，进而造成队列积压并增加逐包等待时间。因此，即使路径长度不是主要优化目标，负载均衡也能间接改善时延表现。

3）丢包率：第三列以对数刻度展示了丢包率，进一步凸显了负载均衡的优势。所提算法的丢包率始终最低；DisCoRoute 和 VLB 的丢包率适中，而 FROG 的丢包率则显著更高，最高达到 10^{-2} 量级。这种差异源于最小化跳数的路由会将流量集中到部分链路上，导致缓冲区溢出并进而丢包。所提算法采用负载感知路由，在整个网络中更均匀地分配流量，从而降低任一链路达到容量上限的概率。这些结果表明，丢包率的降低是有效负载均衡的自然结果。

4）平均跳数：第四列报告了各算法的平均跳数。FROG 的跳数最低，这证实了其通过缩短路径长度来实现主要设计目标。DisCoRoute 和所提方法的跳数适中，而 VLB 的跳数最高。值得注意的是，所提方法并未实现最小跳数；它牺牲了路径长度最优性，以获得更好的负载分布。这种权衡是经过刻意设计的，也是我们设计理念的核心：在拥塞网络中，与较短但拥塞的路径相比，较长但负载较低的路径往往能带来更低的时延、更少的丢包和更高的整体吞吐量。所提方法在三项主要指标（最大负载、逗留时间和丢包率）上表现更优，证明了这一设计选择是合理的。因此，不应将跳数非最优视为局限，而应将其理解为在密集低地球轨道星座中实现有效负载均衡所必须付出的代价。

5) 星座间比较：比较不同星座时，我们发现，稀疏连接拓扑中的链路状态变化更为显著。此类配置需要更高容量的星间链路，才能达到与连接更密集的拓扑相当的性能指标。这表明，星座拓扑在决定链路状态的变化程度以及维持网络性能稳定所需的容量需求方面发挥着

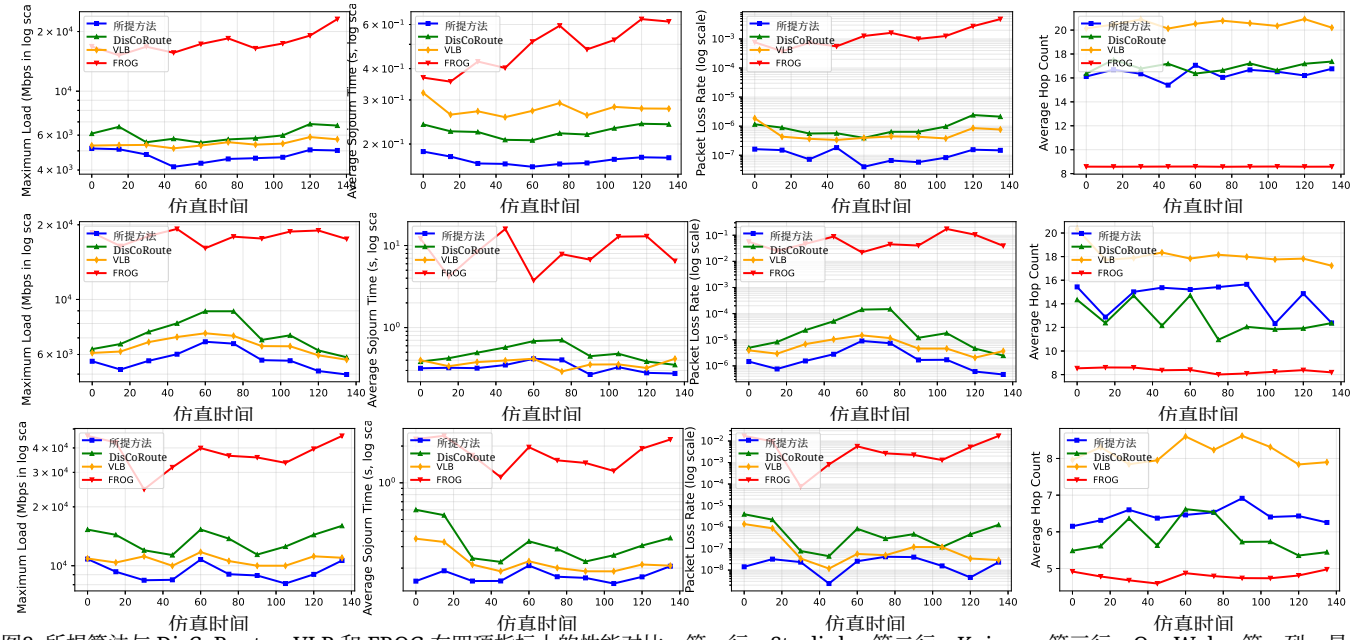


图8. 所提算法与 DisCoRoute、VLB 和 FROG 在四项指标上的性能对比。第一行：Starlink；第二行：Kuiper；第三行：OneWeb。第一列：最大负载（Mbps，采用对数刻度）；第二列：平均逗留时间（秒，采用对数刻度）；第三列：丢包率（采用对数刻度）；第四列：平均跳数。

在确定链路状态变化以及维持网络性能稳定所需的容量需求方面发挥着关键作用。

VIII. 相关工作

随着卫星网络的重要性日益凸显，已有多种方法被提出，以提高路由的效率和可扩展性。本节简要回顾利用球面环面拓扑的卫星路由方法。

A. 最小跳数路由（*MHCR*）方法

传统的基于最短路径的路由协议，例如开放最短路径优先（OSPF），难以应对低地球轨道卫星星座固有的频繁拓扑变化。为解决这一局限，已有研究提出了基于 OLSR 协议的主动路由算法 [36]，这类算法会周期性地交换控制消息，并根据网络状况动态调整消息大小。其他研究则利用低地球轨道卫星星座动态变化的规律性和可预测性，实现低复杂度路由，代表性方法包括 OPSPF[37]，、ASER [40], 和 RFC 9717 [35]。尤其是在卫星路由领域，越来越多的当前研究倾向于采用 MHCR，因为在卫星网络中，跳数而非物理链路长度应作为首要路由指标 [20], [38]。在最小跳数路由范式下，研究者提出了若干简单而颇具启发性的算法。例如，DisCoRoute[20] 通过将轨道面间星间链路布设在极区附近来缩短其长度。FROG算法 [39]，则不会总是选择最近的卫星，而是从候选子集中选择首尾卫星；当上升卫星和下降卫星均可用时，这种方法可以大幅减少跳数。此外，近期研究还探索了在密集星座中突破传统四邻接假设、利用更多链路机会的方法 [41]–[44]。

B. 降低时延的分组级方法

与主要致力于降低利用率的流级模型不同，分组级方法采用排队论工具，根据服务器的实时队列状态作出路由决策。例如，LSP策略 [45]考虑当前卫星的负载，ELB [46] 考虑下一跳卫星的负载，而 TLR [47] 则兼顾两者并支持多路径路由。然而，这些方法的一个共同局限是，频繁的状态更新可能引发大规模全网泛洪。近期一种方法[52] 通过采用地理启发式方法，经由地面中继在集群间转发分组，从而减少对全网泛洪的依赖。总之，现有方法要么需要在网络中传播更新信息，要么因依赖严格的局部信息而缺乏对网络状态的全局视图。

C. 基于区域的卫星路由

随着现代低地球轨道卫星星座不断扩展，基于区域的分层路由已成为实现高效且可扩展流量工程的一种颇具前景的方法，并日益受到研究关注。现有研究已探索基于多种标准的动态分区机制，包括地理位置和连通性 [48],流量强度和链路质量 [49],以及期望的路由性能 [50]。采用段路由时，这一范式的一个关键优势在于其与SRD的天然契合。在此框架下，低地球轨道卫星星座被划分为互不相交的 SRD，卫星利用域内和域间段路由实现多路径转发 [51]–[53]。然而，当前的域间路由方法主要依赖局部拓扑邻近性，导致性能欠佳。尽管近期进展已开始引入负载均衡机制，但许多现有方法仍未

考虑可用域间路径上的全局负载分配。

IX. 结论与未来工作

本文提出了一种面向低地球轨道卫星星座的段路由框架，解决了可扩展性、控制开销和负载均衡等关键挑战。通过将所有路由计算、拓扑发现和控制信令卸载至更高高度的 MEO 层，我们证明了资源受限的 LEO 交换机能够作为纯数据平面转发单元高效运行。

我们做出了四项主要贡献。首先，我们建立了在 VT快照时间间隔内用户到卫星和低地球轨道到中地球轨道连接的视场条件充分持续性（引理 1 和引理2），从而实现无切换运行和稳定的 SRD分配。其次，我们将中地球轨道控制域划分问题建模为一个混合整数线性规划，在满足视场约束的同时最小化控制开销，并生成在每个 VT 快照期间持续存在的互不相交的SRD。第三，我们提出了一种多路径段路由流量工程建模方法，利用四种最小跳数路径类型（A2A、A2D、D2A、D2D）来平衡流量并最小化最大链路利用率。该线性规划采用 PDHG框架以分布式方式求解，在保留 SRD 级隐私的同时，仅需 AllReduce通信。第四，我们将最优分流比例转换为硬件可实现的SL。

在配备 GPS 中地球轨道控制层的实际低地球轨道星座（Starlink、Kuiper、OneWeb）上进行的仿真结果验证了我们的方法。与基于经典 MHCR 的基线方法（DisCoRoute、FROG）以及不考虑流量的基线方法（VLB）相比，我们提出的方法始终实现了最低的最大链路利用率、最低的平均驻留时间和最低的丢包率，虽然跳数适中，但这是有意以路径长度最优性换取负载均衡。

未来仍有若干研究方向。首先，将分布式 PDHG 框架扩展到能够处理 VT 快照内的动态拓扑变化，有助于提升对实时流量波动的响应能力；然而，由于 PDHG 仅利用一阶信息，其收敛通常较慢。其次，纳入能源效率、时延公平性或拥塞感知重路由等额外优化目标，能够进一步提升网络性能。第三，在硬件测试平台或轨道演示任务中进行实验验证，将有助于深入了解我们的方法在真实条件下的可行性。

参考文献

[1] Starlink，“Starlink规格说明”，2026年。 [在线]。网址：https://www.starlink.com/specifications [2] Amazon Leo，“Project Kuiper”，2026年。 [在线]。网址：https://www. amazon.com/projectkuiper [3] TeleSat，“Telesat Lightspeed低地球轨道卫星星座”，2025年。 [在线]。网址：https://www.telesat.com/ [4] Eutelsat Group，“OneWeb低地球轨道卫星星座”，2025年。 [在线]。网址：https://www.eutelsat.com/en/satellite-fleet/oneweb.html [5] H. Yang、B. Guo、X. Xue、X. Deng、Y. Zhao、X. Cui、C. Pang、H. Ren 和 S. Huang，《采用光学星间链路的低地球轨道卫星星座中断容忍策略》，*IEEE*《网络与服务管理汇刊》，第20卷，第4期，第4815–4830页，2023年12月。

[6] W. Cho 和 J. P. Choi，“软件定义低地球轨道卫星网络中无线控制链路的跨层优化”，IEEE Access，第 7 卷，第 113534–113547 页，2019 年 8 月。[7] “Starlink 中断分析：2023 年 7 月”，ThousandEyes 博客，2023 年 7 月。 24, 2025, 25, 在线。可访问 2025 [ ] 问：https://www.thousandeyes.com/blog/ starlink- outage-analysis-july- 24 2025 - S. Xu、H. Wang、Y. Fang、Z. Zhao、X. [8] Wang 和 M. Huang，“软件定义星地网络中的分布式多层分层控制器部署”，Transactions on Emerging Telecommunications Technologies，第 35 卷，第 1 期，第 e4890 页，2024 年。[9] A. N. Plastikov，“用于卫星地面站应用的具有 40°视场的高增益多波束双焦反射器天线”，IEEE Transactions on Antennas and Propagation，第 64 卷，第 7 期，第 3251–3254 页，2016 年 7 月。[10] Q. Chen、L. Gong、L. Yang、Y. Wang、K. Zhao 和 W. Yao，“通过邻近卫星协作实现低地球轨道接入网络的实时弹性流量预测”，IEEE Communications Magazine，第 64 卷，第 3 期，第 84–91 页，2026 年 3 月。[11] H. Li、Y. Huang、H. Liu、D. Ge 和 Y. Ye，“D-PDLP：将 PDLP 扩展至分布式多 GPU 系统”，arXiv 预印本 arXiv: 2601 07628 。D. [12] Applegate、M. Dıaz、O. Hinder、H. Lu、M. Lubin、B. O’Donoghue 和 W. Schudy，“使用原始-对偶混合梯度进行实用的大规模线性规划”，载于 Advances in Neural Information Processing Systems，第 34 卷，2021 年 12 月，第 20243–20257 页。[13] X. Tong、C. W. Tan 和 H. V. Poor，“对抗性注水：开放式无线接入网中的极小极大资源分配优化与近端分解”，载于 IEEE GLOBECOM，2025 年 12 月，第 3933–3938 页。[14] X. Tong、C. W. Tan、H. V. Poor，“对抗性注水：理论、算法与基础模型”，arXiv 预印本 arXiv:2605.26163。[15] S. Boyd、N. Parikh、E. Chu、B. Peleato 和 J. Eckstein，“通过交替方向乘子法实现分布式优化与统计学习”，Found. Trends Mach. Learn.，第 3 卷，第 122 页，2010 年，第 1 期，第 1 页–。[16] C. Filsfils、N. K. Nainar、C. Pignataro、J. C. Cardona、P. Francois，“段路由架构”，载于 GLOBECOM，2015 年 12 月，第 1–6 页。[17] S. Durocher、E. Kranakis、D. Krizanc 和 L. Narayanan，“使用单转向直线型路由平衡流量负载”，载于第 5 届计算模型理论与应用国际会议（TAMC’08），2008 年 4 月，第 467–478 页。[18] A. Cianfrani、M. Listanti 和 M. Polverini，“将段路由增量部署到 ISP 网络：流量工程视角”，IEEE/ACM Trans. Netw.，第 25 卷，第 5 期，第 3146–3160 页，2017 年 10 月。[19] Q. Chen、G. Giambene、L. Yang、C. Fan 和 X. Chen，“低地球轨道巨型星座网络中的星间链路路径分析”，IEEE Trans. Veh. Tech.，第 70 卷，第 3 期，第 2743–2755 页，2021 年 3 月。[20] G. Stock、J. A. Fraire 和 H. Hermanns，“低地球轨道巨型星座的分布式按需路由：Starlink案例研究”，载于第 11 届高级卫星多媒体系统会议和第 17 届空间通信信号处理研讨会（ASMS/SPSC），2022 年 9 月，第 1–8 页。[21] M. Wang、C. W Tan、W. Xu 和 A. Tang，“路由中不进行分流的代价：特征描述与估计”，IEEE/ACM Transactions on Networking，第 19 卷，第 6 期，第 1849–1859 页，2011 年 12 月。[22] SpaceX Starlink，“Starlink任务”，2025 年。 [在线]。可访问：https://www.spacex.com/webcast [23] S. Li、Q. Wu 和 R. Wang，“星地融合网络的动态离散拓扑设计与路由”，IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)，第 32 卷，第 5 期，第 3840–3853 页，2024 年 10 月。[24] IEEE Communications Society，“低地球轨道卫星网络 - Iridium”， 2026 [ ] 19806 。在线。可访问：https://www.comsoc.org/node/ [25] GPS，“Navstar GPS 空间段/导航用户接口（IS-GPS-200）”，2022 年。 [在线]。可访问：https://www.gps.gov/technical/icwg[26] 欧洲联盟空间计划局，“欧洲全球导航卫星系统（Galileo）开放服务空间信号接口控制文件（OS SIS ICD）”，2025 年。 [在线]。可访问：https://www.gsc-europa.eu [27] Q. Zhang、K. Qiu、Z. Chen、W. Zhu、X. Xu、P. Du 和 Y. Gao，“Eunomia：分层卫星网络中的多控制器域划分框架”，IEEE Journal on Selected Areas in Communications，第 44 卷，第 2807–2820 页，2025 年 12 月。[28] P. Virtanen、R. Gommers、T. E. Oliphant、M. Haberland、T. Reddy、D. Cournapeau 等，“SciPy 1.0：用于 Python 科学计算的基础算法”，Nature Methods，第 17 卷，第 272 页，2020 年，第 3 期，第 261 页–。[29] Y. Tian、Z. Wang、X. Yin、X. Shi、Y. Guo、H. Geng 和 J. Yang，“基于深度强化学习的 IPv6 网络中部分部署段路由的流量工程”，IEEE/ACM Trans. Netw.，第 28 卷，第 4 期，第 1573–1586 页，2020 年 8 月。

[30] A. Brundiers、T. Sch¨uller 和 N. Aschenbruck，“段路由的中点优化扩展研究”，IEEE《通信学会开放期刊》，第 5 卷，第 1447–1468 页，2024 年 2 月。[31] A. Brundiers、T. Sch¨uller 和 N. Aschenbruck，“段路由的中点优化”，载于 IEEE 计算机通信会议，2022 年 5 月，第 1579–1588 页。[32] Gurobi Optimization。访问日期：2025 年 3 月 5 日。 [在线]。可访问：http://www.gurobi.com [33] GeoNames，“GeoNames地名数据库”，2026 年。 [在线]。可访问：https://download.geonames.org/export/ [34] M. M. Rahman、S. Saha、U. Chengan 和 A. S. Alfa，“IP流量矩阵估计方法：比较与改进”，载于 IEEE 国际通信会议，第 1 卷，2006 年 4 月，第 90–96 页。[35] T. Li。《卫星网络的路由架构》。 [在线]。可访问：https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc[36]

H. Li、Z. Li、H. Wang、K. Zhao、W. Li 和 Y. Fang，“基于 OLSR 的低地球轨道卫星网络多路径路由算法”，载于第 7 届算法、计算与系统国际会议（ICACS），2023 年 10 月，第 171–177 页。[37] T. Pan、T. Huang、X. Li、Y. Chen、W. Xue 和 Y. Liu，“OPSPF：面向弹性低地球轨道卫星网络的轨道预测最短路径优先路由”，载于 IEEE 国际通信会议（ICC），2019 年 5 月，第 1–6 页。[38] Q. Chen 、 G. Giambene 、 L. Yang 、 C. Fan 和 X. Chen，“低地球轨道巨型星座网络中的星间链路路径分析”，IEEE Transactions on Vehicular Technology，第 70 卷，第 3 期，第 2743–2755 页，2021 年 3 月。[39] A. Auddino、A. Barraqu´e、O. Hotescu、J. Lacan、J. Radzik 和 E. Lochin，“最近的不一定最快：在低地球轨道卫星星座中选择进/出路由跳的必要性”，载于 IEEE 第 96 届车辆技术会议（VTC2022-Fall），2022 年 9 月，第 1–5 页。[40] X. Zhang、Y. Yang、M. Xu 和 J. Luo，“ASER：可扩展的低地球轨道卫星网络分布式路由协议”，载于 IEEE 第 46 届局域计算机网络会议（LCN），2021 年 10 月，第 65–72 页。[41] D. Bhattacherjee 和 A. Singla，“时速 27,000 千米下的网络拓扑设计”，载于 CoNEXT ’19，2019 年 12 月，第 341–354 页。[42] G. Tian、Y. Jia、S. Cao、X. Wang 和 H. Zhong，“低地球轨道巨型星座的改进最小跳数路由”，载于第 12 届网络、通信与计算国际会议（ICNCC 2023），2023 年 12 月，第 22–31 页。[43] T. Klenze、G. Giuliari、C. Pappas、A. Perrig、D. Basin，“如在地上，如在天上网络”，载于第 17 届 ACM网络热点主题研讨会，2018 年 11 月，第 22–28 页。[44] B. Soret 和 D. Smith，“最少使用面间链路的低地球轨道卫星星座自主路由”，载于 IEEE 国际通信会议（ICC），2019 年 5 月，第 1–6 页。[45] Q. Chen、X. Chen、L. Yang、S. Wu 和 X. Tao，“具有多网关的巨型星座网络分布式拥塞避免路由算法”，Acta Astronautica，第 162 卷，第 376–387 页，2019 年 5 月。[46] T. Taleb、D. Mashimo、A. Jamalipour、N. Kato 和 Y. Nemoto，“具有星载处理能力的非地球同步轨道卫星IP网络显式负载均衡技术”，IEEE ACM Trans. Netw.，第 17 卷，第 1 期，第 281–293 页，2009 年 2 月。[47] G. Song、M. Chao、B. Yang 和 Y. Zheng，“TLR：面向非地球同步轨道卫星IP网络的基于交通信号灯的智能路由策略”，IEEE Trans. Wirel. Commun.，第 13 卷，第 6 期，第 3380–3393 页，2014 年 6 月。[48] J. Jiao、P. Yang、Z. Du、Y. Wang 和 Q. Zhang，“巨型低地球轨道卫星星座的聚类多准则路由算法”，IEEE Trans. Veh. Technol.，第 73 卷，第 9 期，第 13790–13803 页，2024 年 9 月。[49] L. Wang、Z. Xu、R. Zhi 和 J. Wang，“低地球轨道卫星集群网络的自适应负载均衡路由算法”，载于计算与通信系统国际会议（ICCCS），2024 年 4 月，第 666–671 页。[50] H. Yang、W. Bai、Y. Shi、D. Zhou、M. Sheng 和 J. Li，“低地球轨道巨型星座网络的最优区域路由方案”，IEEE移动计算汇刊，doi：10 1109 2026 3674959 。/ [51] TMC。R. Li、J. Zhang、S. Zheng、K. Wang、P. Wang 和 X. Zhang，“基于区域分割的低地球轨道巨型星座路由算法”，载于 IEEE无线通信与网络会议（WCNC），2023 年 3 月，第 1–6 页。[52] X. Feng、Y. Sun 和 M. Peng，“巨型低地球轨道卫星星座中基于最小跳数分析的分布式星地协作路由策略”，IEEE移动计算汇刊，第 23 卷，第 11 期，第 10678–10693 页，2024 年 11 月。

[53] Z. Du、J. Jiao、H. Liu、Y. Wang 和 Q. Zhang，“面向低地球轨道卫星巨型星座的多属性一致性段弹性路由”，*IEEE*移动计算汇刊，第24卷，第10期，第10823–10839页，2025年10月。[54] Z. N. Abdullah、I. Ahmad 和 I. Hussain，“软件定义网络中的段路由：综述”，*IEEE Commun. Surv. Tut.*，第21卷，第1期，第464–486页，2019年。

9717