

面向链路动态性的低轨卫星网络路由优化策略

程彦亭

北方工业大学人工智能与计算机学院, 北京

收稿日期: 2025年6月25日; 录用日期: 2025年7月28日; 发布日期: 2025年8月7日

摘要

低轨卫星网络因其高度动态的拓扑结构和链路状态的不确定性, 在提供广域覆盖能力的同时也面临路径中断频繁、服务质量难以保障等挑战。为此, 本文提出一种基于稳定性感知的自适应路由算法(Stability-Aware Adaptive Routing, SAAR), 该算法基于软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)实现链路状态的集中监控与路径策略的动态控制, 创新性地建立了链路稳定性评估模型, 用以量化链路在网络演化过程中的稳定性特征, 并据此筛选出具备长期可达性的候选路径。在此基础上, 进一步引入服务质量指标构建路径综合评价机制, 对候选路径进行多维度性能评估, 从而实现最优路径的动态选择与实时更新。实验结果表明, SAAR在端到端时延、吞吐率与丢包率等性能指标上均优于现有典型动态路由算法, 验证了其在高动态卫星网络环境中的有效性与鲁棒性。

关键词

卫星网络, 动态网络拓扑, QoS, 路由优化

Routing Optimization Strategy for Low-Orbit Satellite Networks with Dynamic Links

Yanting Cheng

School of Artificial Intelligence and Computer Science, North China University of Technology, Beijing

Received: Jun. 25th, 2025; accepted: Jul. 28th, 2025; published: Aug. 7th, 2025

Abstract

Due to its highly dynamic topological structure and uncertainty of link status, low-orbit satellite networks face challenges such as frequent path interruptions and difficult to ensure service quality while providing wide-area coverage. To this end, this paper proposes a stability-aware adaptive routing algorithm (SAAR) based on software defined networking (SDN). The algorithm realizes centralized monitoring of link status and dynamic control of path strategy based on software defined

networking (SDN). It innovatively establishes a link stability evaluation model to quantify the stability characteristics of links during network evolution and screen out candidate paths with long-term reachability. On this basis, service quality indicators are further introduced to construct a comprehensive path evaluation mechanism, and multi-dimensional performance evaluation of candidate paths is performed to achieve dynamic selection and real-time update of the optimal path. Experimental results show that SAAR outperforms existing typical dynamic routing algorithms in performance indicators such as end-to-end delay, throughput and packet loss rate, verifying its effectiveness and robustness in highly dynamic satellite network environments.

Keywords

Satellite Network, Dynamic Network Topology, QoS, Routing Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球数字化转型的深入推进和对泛在连接需求的日益增长，卫星网络作为空天地一体化通信系统的核心组成部分，正在重新定义全球通信基础设施的发展格局[1]。卫星网络由卫星节点通过星间链路构成[2]，在不依赖地面物理基础设施的前提下，实现了广域乃至全球范围的高效通信覆盖，成为构建无缝互联全球信息网络的关键技术支撑。其中，低轨卫星(Low Earth Orbit, LEO)网络凭借其低通信时延与广覆盖能力的双重优势[3]，已被视为下一代通信系统的核心基础之一。

然而，LEO 网络在提供广阔应用前景的同时，其固有的高度动态性也带来了复杂的技术挑战[4]。由于卫星节点在轨道上以高速运行，导致星间链路的建立与断开频繁发生，网络拓扑呈现出显著的时变性和不确定性。这种动态性削弱了链路的持续可用性，而且传统静态路由策略难以适应实际拓扑演化过程，极易影响端到端通信的连贯性与服务质量保障能力。尤其在面向时延敏感与可靠性要求较高的任务场景中，路径的频繁切换与重构所带来的开销将进一步削弱系统性能[5]。因此，在网络状态快速演化的环境中，如何选择一条同时具备高稳定性与服务性能保障能力的路径，成为低轨卫星网络路由设计中亟需突破的核心难题。

针对上述问题，现有的一些研究从动态性建模与快速感知的角度出发，探索具备时变适应能力的路由策略。文献[6]通过构建星间链路的效用函数模型，将链路关键动态属性进行量化表达，并结合最大偏差算法实现属性权重的动态调整，将路由问题转化为多属性决策过程，从而提升了路径选择对链路状态突变的响应效率。文献[7]设计了基于传播时延感知的动态多路径路由策略，结合网络拓扑预测机制，在链路变化发生前预配置转发规则，实现了路径切换过程的无缝衔接与稳定控制。文献[8]提出将卫星网络拓扑演化建模为时间图结构，并通过 Benders 分解与时间扩展贪婪算法协同求解，完成路径与虚拟网络功能的联合优化部署，在兼顾拓扑动态性的同时提升路径资源分配效率。文献[9]引入图神经网络框架，提出了 GNN-MPTE 算法以实现路径质量的动态估计，并结合不相交多路径结构完成流量拆分，增强了模型对拓扑变化的泛化能力与实时响应水平。

尽管上述方法在提高网络对链路动态变化的自适应能力方面取得了显著进展，但其核心目标主要集中于拓扑演化的感知，在多业务并发场景下对服务质量的同步保障仍存在一定欠缺。另一类研究则侧重于在多 QoS 约束条件下优化路由决策。文献[10]融合修改的 Bresenham 算法与 Dijkstra 算法，在限定的几

何区域内综合考虑路径长度、带宽与延迟等 QoS 因子，以几何约束降低计算开销并提升路径判别能力。文献[11]基于区间二型模糊集理论构建多 QoS 优化模型，通过模糊决策机制对多种典型业务队列进行分类与调度，实现在服务需求不确定性下的性能协同优化。文献[12]结合业务识别机制，分别对时延敏感型与带宽密集型业务采用差异化优化策略，前者使用低复杂度时延压缩路径算法，后者则结合链路状态进行动态带宽调节，从而提升 QoS 指标的综合保障能力。文献[13]则引入能量感知机制，通过将任务按业务类型进行分类，实现对路径跳数、排队策略与链路结构的联合优化，从而在资源受限环境下有效提升 QoS 满足率。

当前已有方法在路由策略设计中分别从网络动态性与服务性能保障两个维度进行研究。一类策略强调链路状态建模与拓扑变化适应，增强了对动态环境的弹性处理能力，但在 QoS 约束满足方面相对不足；另一类策略则聚焦于 QoS 约束下的路径优化与业务调度，却普遍未能兼顾拓扑结构在时间维度上的不稳定性。因此，本文提出一种基于稳定性感知的自适应路由算法(Stability-Aware Adaptive Routing, SAAR)，该算法将链路稳定性建模与动态路由算法融合。通过对链路状态进行建模，生成稳定性评分并替代传统路径权重生成候选路径集合，并与时延、带宽、丢包率等 QoS 约束指标联合构建路径选择准则来选择最优路径，在高动态环境下实现链路可靠性与服务性能的统一优化，有效提升低轨卫星网络中路由策略的自适应性与鲁棒性。SAAR 相较于现有代表性动态路由方法 IADR [14]与 SDRA [15]，在关键性能指标方面分别实现了显著优化，端到端时延降低约 20.55%、吞吐量提升约 13.99%、丢包率下降约 36.21%，验证了其在高动态卫星网络环境中的有效性与鲁棒性。

2. 系统模型

为实现对低轨卫星网络中全局拓扑状态的动态感知与集中式路径控制，同时保持对高频拓扑变动的适应能力，本文引入 SDN 架构。如图 1 所示，该架构通过控制平面与数据平面的分离[16]，将路径计算、网络配置与策略控制集中于地面控制中心部署的全局控制器中，而数据的具体转发操作则由在轨卫星节点独立执行，增强了控制的灵活性与策略的一致性。

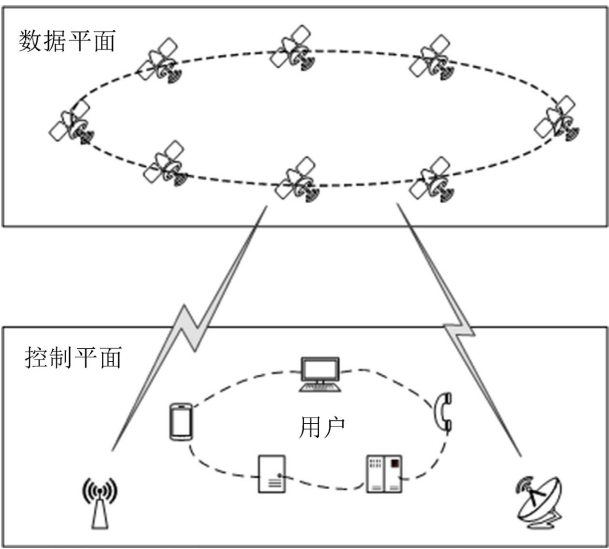


Figure 1. System architecture
图 1. 系统架构图

在该架构中，全局控制器与各卫星节点进行周期通信，来收集全网的链路质量参数与节点状态信息。

由于低轨卫星星座在轨道运行过程中不断变化, 直接在连续时间上进行路径计算与策略部署不仅将面临极高的计算开销和实时性压力, 还容易因为拓扑快速变化而导致策略失效。因此, 本文采用快照划分方法[17]将网络划分为一系列离散的静态周期, 来降低建模复杂度。

然而, 传统以固定时间间隔划分快照的方式在动态网络中存在不足, 一条链路即使在某一时段中仅短暂存在, 也可能在整个快照内被误判为始终可用, 无法准确捕捉链路的真实可用状态。因此, 本文引入链路可见性作为划分依据, 使每一快照不仅保证在时间上相对稳定的网络状态, 也在物理层面确保其中的链路具备可通信性, 使得建模结果更贴近真实网络, 为路径规划提供更可靠的基础。

将每一快照周期记作 (t_i, t_{i+1}) , 并在每个离散时刻 t_i 构建静态拓扑图 $G(t_i)(V, E(t_i))$, 其中 V 为星座中所有节点的集合, $E(t_i)$ 表示在当前快照内满足基础物理连接条件的链路集合。链路集合 $E(t_i)$ 的判定基于任意两颗卫星之间在该时刻是否具备建立通信链路的条件。而链路是否存在取决于两颗卫星之间的视线是否被地球遮挡[18]。由于地球可近似为一个理想球体, 可从几何视角分析, 其本质在于判断连接两颗卫星的空间直线是否与地球球体发生交叉。若该直线与地球球体存在交点, 则表明传播路径被地球遮挡, 链路不可用; 反之, 若该直线未与球体交叉, 则视线无遮挡, 可建立通信链路。为此, 可依据中心角与视锥半角的关系进行判定, 如图 2 所示。

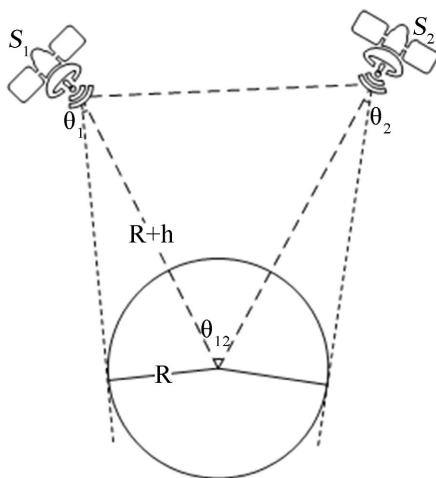


Figure 2. Diagram of central angle and cone half angle

图 2. 中心角与视锥半角示意图

将从地心出发, 分别指向两颗卫星位置的向量之间所形成的夹角定义为中心角。设两颗卫星分别为 S_1 、 S_2 , 其在地心坐标系下的位置向量分别为 $\vec{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $\vec{r}_2 = (x_2, y_2, z_2)$, 根据向量点积定理可得:

$$\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = |\vec{r}_1| |\vec{r}_2| \cos \theta \quad (1)$$

$$\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2 \quad (2)$$

其中 $|\vec{r}_i|$ 表示向量 $\vec{r}_i$ 的模, 计算方式为:

$$|\vec{r}_i| = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad (3)$$

由此可得中心角:

$$\theta_{12} = \arccos \left(\frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2}{|\vec{r}_1| |\vec{r}_2|} \right) \quad (4)$$

其中 $\theta_{12} \in [0, \Pi]$ 。

用视锥角来判定该中心角是否位于两颗卫星可视区域的联合覆盖范围内。从卫星出发，将其到地球表面所能构成切线的方向，与卫星地心矢径之间形成的夹角。称为视锥半角。对于卫星 S_i ，设 h 为轨道高度，其视锥半角可表示为：

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right) \quad (5)$$

其中 R 表示地球半径， $R+h$ 为卫星到地心的距离。视锥半角限定了卫星沿其最远无遮挡视线方向所能覆盖的角度范围。

在上述基础上，若两颗卫星之间的中心角小于或等于其各自视锥半角之和，即满足不等式：

$$\theta_{12} \leq \theta_1 + \theta_2 \quad (6)$$

则可以判定图 2 中 S_1 到 S_2 的连线完全处于两颗卫星各自可视区域所覆盖的联合范围内，且在空间中不会穿过地球球体。可判定该链路在物理上可建立，从而纳入边集合 $E(t_i)$ 中。

基于每个快照周期内的可见性判定与状态信息采集，控制器构建当前时刻完整的网络拓扑视图，在此基础上，通过集中式路径计算算法生成最优路由策略。计算得到的路由规则通过 OpenFlow 协议或其扩展协议下发至各卫星节点的转发表中。

数据平面则由分布在各卫星节点的转发设备构成，这些设备按照控制器下发的流表规则执行数据包的转发操作。每个卫星节点维护多个流表，用于存储不同优先级和不同类型业务的转发规则。当接收到数据包时，节点根据包头信息匹配相应的流表项，执行转发、丢弃或上报控制器等操作。通过该机制，系统能够在动态拓扑结构下持续维持高效的数据转发能力，同时为后续服务质量保障与路径优化策略的实施提供必要的协议支撑

3. 链路评估模型

考虑到卫星网络的空间动态性和通信环境的多变性，本文综合考虑信噪比(SNR)、链路可用性以及链路持续性三项关键因素，建立链路评估模型，以提升评估结果对实际链路状态的刻画精度。其中，SNR 反映了链路的物理层质量；链路可用性衡量其在快照序列中的平均可达能力；链路持续性则进一步刻画链路状态的时间相关性，为后续稳定路径选择提供依据。

3.1. 链路质量

链路质量在卫星通信系统中是影响信号传输可靠性与整体服务性能的核心因素，而信噪比作为衡量链路质量的基础性物理量，是评估通信链路性能的重要依据。SNR 定义为接收端接收到的有效信号功率与噪声功率之比。本文以链路预算为基础[19]，对链路 (i, j) 在 t 时刻的 SNR 进行计算

设发射功率为 P_t ，则接收功率 P_r (单位 dBm)可表示为：

$$P_r(t) = P_t + G_t + G_r - L_p(t) - L_o \quad (7)$$

其中， P_t ：发射功率(dBm)； G_t 、 G_r 发射与接收天线增益(dBi)； L_p ：自由空间路径损耗； L_o ：系统杂散损耗(dB)，包括电缆损耗、大气损耗、雨衰等杂项损耗，通常在 1~3 dB 之间

自由空间路径损耗是电磁波在真空或大气中传播时的基本损耗，路径损耗自由空间模型：

$$L_p = 20\log_{10}(d_{ij}(t)) + 20\log_{10}(f) + 32.44 \quad (8)$$

其中， $d_{ij}(t)$ ： t 时刻卫星 i 与 j 的距离(km)； f ：信号频率(MHz)；32.44 为常数用于平衡单位转换噪声

功率的计算基于热噪声理论。根据 Nyquist 定理, 热噪声功率谱密度由玻尔兹曼常数、温度和带宽决定。噪声功率基本计算公式为

$$P_n = 10 \log_{10}(kTB) + F + 30 \quad (9)$$

其中: k (玻尔兹曼常数) $= 1.38 \times 10^{-23}$ (W/K/Hz), 其中 $10 \log_{10} k = -228.6$ (dBW/K/Hz)

T : 系统等效噪声温度(K); B : 带宽(Hz); F : 接收机噪声因子(dB); 30: 用于单位转换, 将 dBW 转换为 dBm, 在这里假设信号带宽以外频段的噪声都已提前滤波消除。

将上述表达式展开, 可简化为:

$$P_n = -228.6 + 10 \log_{10} T + 10 \log_{10} B + F + 30 \quad (10)$$

SNR 计算公式为:

$$\text{SNR}_{ij}(t) = P_r(t) - P_n \quad (11)$$

当 $\text{SNR}_{ij}(t) > \text{门限}(\text{SNR}_{\min})$ 时, 认为在 t 时刻链路 (i, j) 具有通信能力。

归一化后为:

$$Q_{ij} = \frac{\text{SNR}_{ij}(t) - \text{SNR}_{\min}}{\text{SNR}_{\max} - \text{SNR}_{\min}} \quad (12)$$

3.2. 链路可用性

在动态卫星网络中, 链路状态随时间演化而频繁变化, 受轨道几何关系与通信物理条件的共同影响, 链路可能在不同时间帧之间不断切换于连接(Up)与断开(Down)状态。为了在时间尺度上刻画链路的平均连通能力, 本文引入链路可用性作为核心指标, 用以衡量在一个完整拓扑周期内链路处于可用状态的时间比例。

设整个拓扑周期被均匀划分为 T 个快照帧, 每帧对应网络在某一离散时间点的静态状态。在此基础上, 对任意一条链路 (i, j) , 定义其在第 t 帧的状态为二值变量 $S_{ij}(t)$, 用于描述该链路是否处于连接状态:

$$S_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{链路}(i, j) \text{ 在第 } t \text{ 帧可用(Up)} \\ 0, & \text{链路}(i, j) \text{ 在第 } t \text{ 帧不可用(Down)} \end{cases} \quad (13)$$

其中 $S_{ij}(t) \in \{0, 1\}$, 用于指示链路在当前帧是否处于可用状态。该状态变量在整个拓扑周期内构成一个长度为 T 的时间序列, 用以记录链路在各个时刻的可用状态。基于该序列, 链路 (i, j) 的平均可用性可定义为:

$$A_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T S_{ij}(t) \quad (14)$$

$A_{ij} \in \{0, 1\}$, 其值越接近 1, 表示链路在周期内处于连接状态的时间越长, 整体连通性越强; 反之, 若趋近于 0, 则说明链路频繁断连, 可用程度较低

3.3. 链路持续性

在评估链路性能时, 仅考察其整体可用程度往往不足以全面反映链路的实际质量。即使某条链路在统计意义上具有较高的可用率, 但若其状态频繁切换, 每次可用持续时间过短, 则难以满足实时通信的连续性需求。因此本节使用链路持续概率作为衡量指标, 用以表示链路在当前帧已处于可用状态(Up)的条件下, 在下一帧中仍保持该状态的概率。

设链路 (i, j) 在 t 帧的状态为 $S_{ij}(t) \in \{0, 1\}$ ，为刻画其状态转移过程，引入一阶马尔可夫模型。该模型假设链路的状态转移满足马尔可夫性，即链路在任意时刻 $t+1$ 的状态仅依赖于其在时刻 t 的状态而与此前历史状态无关。具体而言，设随机过程 $\{X_t\}_{t=1}^T$ ，令 $X_t = S_{ij}(t)$ ， $X_t = 1$ 表示链路可用， $X_t = 0$ 表示链路不可用。整体观测序列长度为 T ，其转移概率定义为：

$$P_{mn} = P(X_{t+1} = n | X_t = m), m, n \in \{0, 1\} \quad (15)$$

可定义状态转移概率矩阵为：

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix} \quad (16)$$

p_{mn} 表示在当前可用性状态为 m 的条件下，下一时刻跃迁至状态 n 的概率，其中链路 (i, j) 的持续概率即为

$$P_{stay}^{ij} = P_{11} = P(X_{t+1} = 1 | X_t = 1) \quad (17)$$

由于概率通常不可直接观测，因此通过链路状态序列进行估计。则链路持续概率的极大似然估计量可表示为：

$$\widehat{P_{stay}^{ij}} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} 1_{\{X_t=1, X_{t+1}=1\}}}{\sum_{t=1}^{T-1} 1_{\{X_t=1\}}} \quad (18)$$

其中 $1_{\{A\}}$ 为指示函数，当事件 A 成立时取值为 1，否则为 0。该式的分子表示链路在连续两个快照中均为 Up 的次数，分母表示链路在当前帧为 Up 的总次数。比值反映在链路处于 Up 状态时，其状态在下一帧保持不变的频率，能够反应链路在短时尺度下的状态保持能力。

为进一步用于路径优化与候选路径筛选，将各项影响链路稳定性的因素综合为统一的评分指标。

$$R_{ij} = Q_{ij}^\alpha \times A_{ij}^\beta \times (P_{stay}^{ij})^\gamma \quad (19)$$

其中 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，当 $\text{SNR}_{ij}(t) < \text{SNR}_{\min}$ 时，链路将不满足最基本的信道可用性条件，无论其他指标如何，结果依然为 0。

4. 基于稳定性感知的自适应路由算法

动态卫星网络环境下，链路状态的持续变化使得路径质量具有高度不确定性。传统路由算法通常仅选取单一路径作为通信方案，这种方式极易因某一链路短时失效而导致整条路径不可用，从而触发频繁的路径切换。为解决链路不稳定这一问题，SAAR 算法采用两阶段决策机制。在第一阶段，算法基于链路稳定性模型评估网络中的可用路径，生成一组满足稳定性要求的候选路径集合。在第二阶段，算法综合考虑时延、带宽等服务质量指标，从候选集中选择最优路径。这种分层决策机制既保证了路径的可靠性，又实现了网络资源的高效利用。具体算法流程如下：

其中输入卫星网络拓扑 $G(V, E)$ 和稳定性阈值 $C_{\min}$ ，输出最优路径 P_{optimal} 和候选路径集合 R 。

为提升路径选择的稳健性并降低后续切换概率，算法需在初始阶段构建具有结构合法性和稳定性的候选路径集合。后续最优路径的选取也不再基于全网重新搜索，而是限定在已构建的候选路径集合中进行，显著降低了计算复杂度。

本文选择 Yen 算法作为候选路径生成的基础框架。Yen 算法能够高效生成前 K 条无环最短路径[20]，保证路径之间在结构上的差异性，并支持基于边权的排序。然而，传统 Yen 算法在路径搜索过程中采用静态边权，并依赖最短路径作为最优判据，无法反映链路在时间演化下的可持续性与实际可用性。

算法 1: SAAR 算法主要流程

输入: $G(V, E)$, C_{min}

输出: $P_{optimal}$, R

```

1) 初始化候选路径集合  $R = \{\}$ , 链路状态
2) for each 时间片  $t$  do
3)   更新拓扑  $G$ 
4)   {
5)     使用公式(19)评估链路稳定性  $R_{ij}$ 
6)     if  $SNR_{ij}(t) < SNR_{min}$  then  $R_{ij} = 0$ 
7)   end for
8)   while Ture do
9)     使用公式(20)改进边的权重
10)     $K = 1$ 
11)    搜寻  $K$  条最短路径  $P_k$ 
12)    if  $C_k < C_{min}$  then break
13)    else  $P_k \rightarrow R$ ,  $K++$ 
14)  end while
15)  for each  $P_k$  in  $R$  do
16)    使用公式(22)进行评分  $S(P_k)$ 
17)  end for
18)   $P_{optimal} = \max\_S(P_k)$ 
19)  }
20) end for
21) return  $P_{optimal}$ ,  $R$ 

```

为弥补传统 Yen 算法在动态环境中的建模缺陷, 本文将链路稳定性评估模型嵌入 Yen 算法框架。具体来说, 对于网络拓扑 $G = (V, E)$, 其中每条边 $(i, j) \in E$ 对应一条可用链路, 其稳定性评分 $R_{ij} \in (0, 1)$ 。在不可见或信噪比低于门限的情形下, $R_{ij} = 0$, 视为链路不可用。基于此, 构建适用于路径代价的权重函数:

$$W_{ij} = \begin{cases} \infty, & R_{ij} = 0 \\ -\ln R_{ij}, & 0 < R_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

这使得稳定性越高的链路赋予越小的代价, 稳定性为零的链路不会被路径搜索过程选中。

在路径生成时, 先使用 Dijkstra 算法计算从源节点 S 至目标节点 T 的初始最小代价路径 P_1 , 其对应于一条综合稳定性最强的路径。随后, 在 Yen 算法的扰动机制下, 针对 P_1 中每个中间节点 v_i , 构造以该节点为扰动点的路径变体。具体地, 如图 3 所示, 保留从源节点至 v_i 的路径前缀, 并在删除与前缀重复的子路径后, 利用边权 $W_{ij} = -\ln R_{ij}$ 重新执行 Dijkstra 算法计算从 v_i 到终点 t 的后缀路径, 从而构造新的完

整路径。最终可得到一组候选路径集合 $R = \{P_1, P_2, P_3 \dots P_k\}$ 。

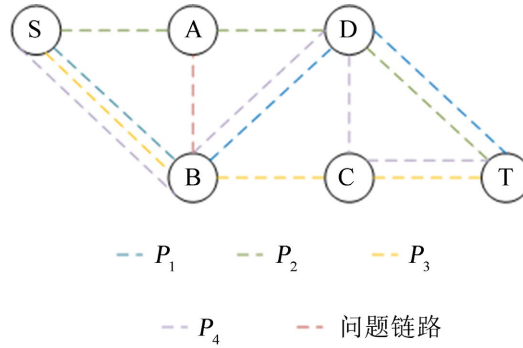


Figure 3. Path search based on Yen algorithm
图 3. 基于 Yen 算法的路径搜索

此外，传统 Yen 算法通常预设固定的候选路径数量 K ，这种方式可能导致生成大量稳定性不足的无效路径，浪费计算开销。为解决这一问题，本文引入基于路径稳定性的动态终止机制。定义路径 P_k 的综合稳定性代价为：

$$C_k = - \sum_{(i,j) \in P_k} \ln R_{ij} \quad (21)$$

当某条路径的综合稳定性代价低于稳定性阈值时，即 $C_k < C_{\min}$ ，认为当前路径已不具备可用性，立即终止候选路径扩展。

然而，候选路径的结构优势并不等同于通信性能的全局最优。为进一步从中选出最终路径，还需在服务质量层面进行综合评估，以确保所选路径在满足服务质量的同时具备稳定可用性。因此，算法针对候选路径集上引入一组多维指标，包括时延、带宽、丢包率以及链路评估模型的综合评分，建立了一种统一的路径性能评价函数。从而在多路径中选择在传输性能与结构稳定性上均表现最优的路径。

$$\text{Score}(P_k) = w_1 \tilde{L}(P_k) + w_2 \tilde{B}(P_k) + w_3 \tilde{D}(P_k) + w_4 \tilde{R}(P_k) \quad (22)$$

其中， $L(P_k)$ 表示路径的端到端时延归一化指标，数值越小代表路径传输性能越优； $B(P_k)$ 为路径带宽的归一化指标，体现路径可用传输容量的水平； $D(P_k)$ 则为路径端到端丢包率归一化指标，刻画路径传输可靠性的程度；而 $R(P_k)$ 则是路径中所有链路基于稳定性评估模型所得评分的综合指标，以此体现路径在动态拓扑条件下的稳健性与连通持续能力。

在函数中，各指标间的权重系数 w_1, w_2, w_3, w_4 满足 $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$ ，用于表达不同评估维度在路径选择中的相对重要性。各权重系数可根据实际业务需求或通信场景灵活配置，例如在实时业务中可提高对时延指标的权重，而在大数据传输或敏感任务中则可强调带宽或稳定性维度。

对所有候选路径计算统一的综合评分 $\text{Score}(P_k)$ ，最终选取评分值最高的路径作为当前的最优路径，用于承载数据转发任务。

$$P_{\text{optimal}} = \max \{ \text{Score}(P_k) \} \quad (23)$$

相比传统路径选择方法，所选路径在保持高性能传输的同时具备良好的抗扰性与连接稳定性。

此外，为增强系统的容错性与运行鲁棒性，算法还具有完善的故障保护机制。在实际运行过程中，一旦当前最优路径发生链路断裂、节点失联或信道质量劣化等突发异常，系统将自动转移至评分次高的候选路径以进行应急接续，确保通信链路在动态环境中的持续可用与服务不中断，从而进一步提升路由

系统在动态网络环境下的服务可靠性与恢复效率。

5. 实验结果与分析

为了验证本文所提出的 SAAR 算法的有效性, 本研究基于 STK 与 Mininet [21]平台构建了卫星网络联合仿真环境, 具体参数[22]如表 1 所示。STK 用于精确模拟卫星轨道参数、节点运动轨迹与链路几何关系, 以获取实时卫星节点位置、星间链路(ISL)距离矩阵等。然后将些参数序列导入 Mininet 平台, 以动态构建网络拓扑并实时更新链路状态。Mininet 承担了卫星节点、地面节点与 SDN 控制器的网络通信仿真功能, 并依据 STK 输出的距离矩阵序列实时调整链路延迟、带宽和状态, 从而真实反映网络拓扑的变化特性。

Table 1. Experimental parameters
表 1. 实验具体参数

仿真参数	参数值
卫星星座构型	Iridium
轨道高度	780 km
轨道倾角	86°
极区范围	70°~90°
发射功率	20 dBm
噪声标准差	10^{-7} A/Hz
ISL 带宽	20 Mbps

在实验中,除了评估本文提出的算法 SAAR 外,我们还评估了另外两种动态路由方案:IADR 和 SDRA。通过对比 SAAR、IADR 和 SDRA 在卫星通信下的端到端时延、吞吐量和丢包率表现, 分析不同算法的性能, 以验证 SAAR 的优势。

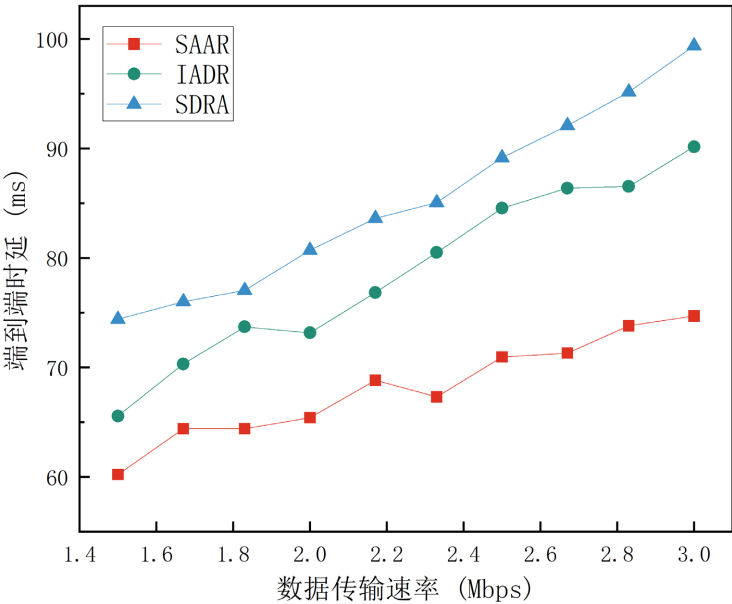


Figure 4. Changes in end-to-end delay of each algorithm at different data transmission rates
图 4. 不同数据传输速率下各算法端到端时延变化

在时延方面,如图4所示,SAAR通过建立链路评估模型结合Qos进行路径选择,有效规避高时延与易中断链路,使其在中高流量场景下依然维持相对稳定的路径结构,整体时延最低且随流量增长上升趋势最为平缓。相较之下,IADR虽能根据当前链路状态进行路径选择,但缺乏链路演化连续性的约束机制,高负载条件下更易发生路径重计算与链路重建,致使端到端时延迅速上升。SDRA因采用静态策略,不具备链路质量判断与动态适应机制,导致路径跳数冗长、链路重路由频繁,在负载增加时系统易陷入拥塞状态,整体时延最高且波动剧烈。

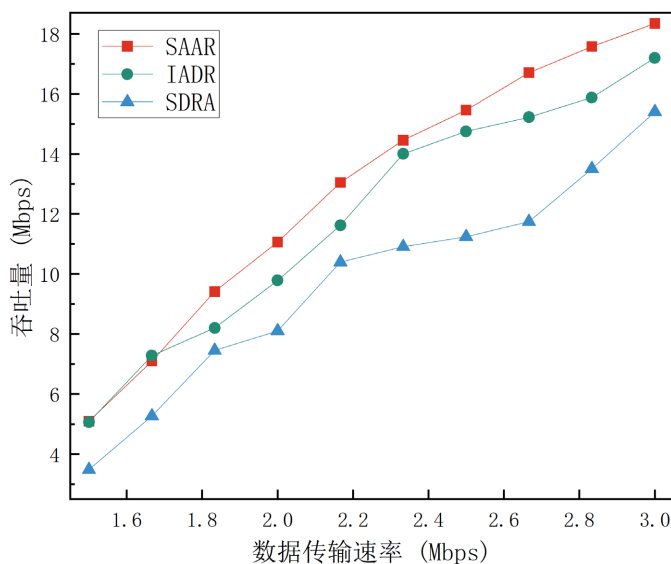


Figure 5. Changes in throughput of each algorithm at different data transmission rates

图 5. 不同数据传输速率下各算法吞吐量变化

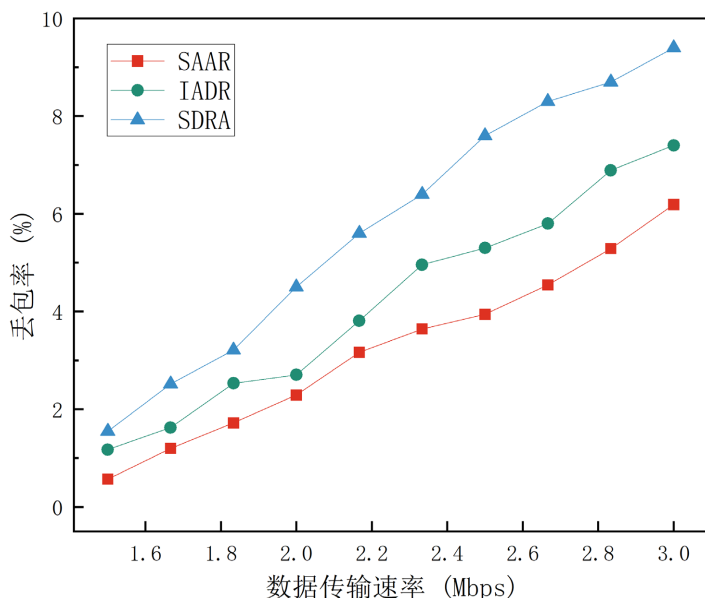


Figure 6. Changes in packet loss rate of each algorithm at different data transmission rates

图 6. 不同数据传输速率下各算法丢包率变化

在吞吐量方面,如图5所示,SAAR借助链路状态感知与路径稳定性控制,在路由过程中显式规避

负载集中节点与质量退化链路,使其在全流量区间均能维持较高的数据转发效率,尤其在临近网络容量上限前,吞吐量增长依然显著且趋于平台期前持续保持最优水平。IADR 由于路由选择依赖当前快照中的局部链路属性,在链路状态变化或节点负载突增时易发生路由震荡,缓冲机制负载加剧,传输效率下降,表现为吞吐量中段上升后趋于饱和。SDRA 路径构建不考虑实时链路可用性与带宽变化,缺乏链路分担机制,易出现瓶颈阻塞与低效转发,使整体吞吐量始终处于最低水平,且高负载区间增长受限明显。

在丢包率表现上,如图 6 所示,SAAR 在路径构建中能有效识别并规避不稳定链路与潜在高拥塞路径,显著降低链路切换与缓冲溢出所致的丢包事件,整体丢包率最低且在高流量区间上升趋势最缓。IADR 虽具备链路属性驱动的动态路径能力,但由于缺乏对路径连贯性的建模,面对链路状态突变与负载快速增长时更易导致路径不稳定与拥塞累积,丢包率随流量升高而显著上升。SDRA 在路径选择中未考虑链路状态的实时反馈,结构僵化且跳数过多,难以及时响应链路异常与负载波动,在高频拓扑变化与拥塞情形下,重传与失效传播频繁发生,造成丢包率在各负载区间始终维持最高水平。

6. 结论

本文针对低轨卫星网络中路径不连续与服务质量保障困难等问题,提出了一种基于稳定性感知的自适应路由算法(SAAR)。该方法创新性地构建链路稳定性评估模型,刻画链路在网络拓扑演化过程中的动态特征,并将该模型引入路径决策过程,与服务质量指标协同构建路径综合评价机制。算法主要通过快照划分实现对动态拓扑的静态近似建模,并基于 SDN 实现链路状态的集中感知与策略动态控制。在此基础上,本文设计了一套面向链路状态演化的候选路径筛选与最优路径选择机制,实现了在高动态环境下的稳健路由。仿真结果表明,所提算法在平均时延、吞吐率与丢包率等关键性能指标上均显著优于现有典型动态路由算法,展现出较强的服务保障能力与系统鲁棒性。

但本研究仍存在一些尚未解决的问题,比如在建模过程中仍存在一定理想化假设,例如链路状态信息的获取被视为完备且准确,未充分考虑环境扰动、干扰因素及链路调度冲突等复杂情形;此外,在大规模网络环境下路径计算过程可能带来一定的计算开销。未来将进一步引入链路状态预测机制与复杂系统建模方法,以提升算法在多场景、多约束条件下的适应能力与工程可用性。

参考文献

- [1] 郑爽, 张兴, 王文博. 低轨卫星通信网络路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 97-105.
- [2] Al Homssi, B., Al-Hourani, A., Wang, K., Conder, P., Kandeepan, S., Choi, J., *et al.* (2022) Next Generation Mega Satellite Networks for Access Equality: Opportunities, Challenges, and Performance. *IEEE Communications Magazine*, **60**, 18-24. <https://doi.org/10.1109/mcom.001.2100802>
- [3] 刘翔宇, 李东博, 刘劼. 低轨卫星定位: 探索与展望[J/OL]. 物联网学报, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1491.TP.20241104.1611.014.html>, 2025-06-05.
- [4] Cao, X., Li, Y., Xiong, X. and Wang, J. (2022) Dynamic Routings in Satellite Networks: An Overview. *Sensors*, **22**, Article No. 4552. <https://doi.org/10.3390/s22124552>
- [5] Zhu, X. and Jiang, C. (2022) Integrated Satellite-Terrestrial Networks toward 6G: Architectures, Applications, and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, **9**, 437-461. <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3126825>
- [6] Han, Z., Xu, C., Zhao, G., Wang, S., Cheng, K. and Yu, S. (2023) Time-Varying Topology Model for Dynamic Routing in LEO Satellite Constellation Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **72**, 3440-3454. <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3217952>
- [7] Qi, H., Guo, Y., Hou, D., Xing, Z., Ren, W., Cong, L., *et al.* (2022) SDN-Based Dynamic Multi-Path Routing Strategy for Satellite Networks. *Future Generation Computer Systems*, **133**, 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.03.012>
- [8] Yuan, S., Sun, Y. and Peng, M. (2024) Joint Network Function Placement and Routing Optimization in Dynamic Software-Defined Satellite-Terrestrial Integrated Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **23**, 5172-5186.

- <https://doi.org/10.1109/twc.2023.3324729>
- [9] Huang, Y., Yang, D., Feng, B., Tian, A., Dong, P., Yu, S., *et al.* (2024) A GNN-Enabled Multipath Routing Algorithm for Spatial-Temporal Varying LEO Satellite Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **73**, 5454-5468. <https://doi.org/10.1109/tvt.2023.3333848>
 - [10] Kumar, P., Bhushan, S., Halder, D. and Baswade, A.M. (2022) fybrLink: Efficient QoS-Aware Routing in SDN Enabled Future Satellite Networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, **19**, 2107-2118. <https://doi.org/10.1109/tnsm.2021.3129876>
 - [11] Wu, Y., Hu, G., Jin, F. and Tang, S. (2021) Multi-Objective Optimisation in Multi-Qos Routing Strategy for Software-Defined Satellite Network. *Sensors*, **21**, Article No. 6356. <https://doi.org/10.3390/s21196356>
 - [12] Zhang, J., Ding, R., Liu, J., Zhang, R. and Lu, H. (2021) QoSRA: A QoS-Aware Routing Algorithm for Software Defined Satellite Networks. 2021 *2nd Information Communication Technologies Conference (ICTC)*, Nanjing, 7-9 May 2021, 165-171. <https://doi.org/10.1109/ictc51749.2021.9441632>
 - [13] Hao, L., Ren, P. and Du, Q. (2020) Satellite QoS Routing Algorithm Based on Energy Aware and Load Balancing. 2020 *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 21-23 October 2020, 685-690. <https://doi.org/10.1109/wcsp49889.2020.9299827>
 - [14] Han, Z., Zhao, G., Xing, Y., Sun, N., Xu, C. and Yu, S. (2021) Dynamic Routing for Software-Defined LEO Satellite Networks Based on ISL Attributes. 2021 *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Madrid, 7-11 December 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1109/globecom46510.2021.9685868>
 - [15] Xie, T. (2019) SDSN: Software-Defined Space Networking—Architecture and Routing Algorithm. *Mobile Networks and Applications*, **24**, 1542-1554. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01275-x>
 - [16] Shi, X., Li, Y., Zhao, S. and Wang, W. (2020) Multi-Qos Adaptive Routing Algorithm Based on SDN for Satellite Network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **768**, Article ID: 052035. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/768/5/052035>
 - [17] Zhang, P., Xian, Z., Liao, M., Huang, H. and Yang, J. (2025) Adaptive Routing Mechanism for LEO Satellite Network Based on Control Domain Partition. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, **9**, 70-82. <https://doi.org/10.1109/tgcn.2024.3425458>
 - [18] Cinelli, M., Ortore, E., Laneve, G. and Circi, C. (2021) Geometrical Approach for an Optimal Inter-Satellite Visibility. *Astrodynamics*, **5**, 237-248. <https://doi.org/10.1007/s42064-020-0099-0>
 - [19] Guidotti, A., Vanelli-Coralli, A., Mengali, A. and Cioni, S. (2020) Non-Terrestrial Networks: Link Budget Analysis. 2020 *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, 7-11 June 2020, 1-7. <https://doi.org/10.1109/icc40277.2020.9149179>
 - [20] Yen, J.Y. (1970) An Algorithm for Finding Shortest Routes from All Source Nodes to a Given Destination in General Networks. *Quarterly of Applied Mathematics*, **27**, 526-530. <https://doi.org/10.1090/qam/253822>
 - [21] Zhang, Y., Wang, B., Guo, B., Yuan, Y., Dong, T., Yin, J., *et al.* (2021) A Research on Integrated Space-Ground Information Network Simulation Platform Based on SDN. *Computer Networks*, **188**, Article ID: 107821. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107821>
 - [22] Chen, K., Ran, Y., Xia, S., Luo, J. and Chen, S. (2024) Inter-Satellite Link Re-Planning Algorithm under Link Failures of LEO Satellite Constellations. 2024 *IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall)*, Washington DC, 7-10 October 2024, 1-6. <https://doi.org/10.1109/vtc2024-fall63153.2024.10757838>