



研究与开发

## 基于马尔可夫模型的卫星网络链路 通断分析与可靠路由算法研究

张硕<sup>1,2,3</sup>, 牛庆庆<sup>1,2,3</sup>, 缪馨<sup>1,2,3</sup>, 程袍<sup>1,2,3</sup>, 章跃跃<sup>1,2,3</sup>, 徐晓帆<sup>1,2,3</sup>, 杜平<sup>1,2,3</sup>

1. 上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 200120;
2. 卫星互联网全国重点实验室, 上海 200120;
3. 上海市卫星互联网重点实验室, 上海 200120)

**摘要:** 在大规模卫星通信网络中, 星间链路的动态性和不确定性严重影响网络性能。受卫星高速运动、轨道变化及空间环境干扰的影响, 传统静态路由算法难以适应链路通断引起的网络拓扑频繁变化。为此, 构建了基于马尔可夫模型的链路生存时间预测框架, 系统分析了链路可用性、恢复速率与失效速率的关系, 并探讨了日凌现象对链路稳定性的影响。在此基础上, 提出了两种优化策略: 基于链路生存时间预测的可靠稳定路由与传输算法, 通过引入链路通断概率动态调整路径选择, 提高路径生存时间; 基于链路生存时间的动态加权最短路径算法, 实现链路生存时间和时延因素的综合优化。仿真结果表明, 所提算法显著提升了卫星网络的路由可靠性和数据传输效率, 为大规模卫星星座网络的高效运行提供了理论和技术支撑。

**关键词:** 卫星通信网络; 链路生存时间; 可靠路由算法; 马尔可夫模型

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025189

## Research on link analysis and reliable routing algorithms for satellite communication networks based on Markov model

ZHANG Shuo<sup>1,2,3</sup>, NIU Qingqing<sup>1,2,3</sup>, MIAO Xin<sup>1,2,3</sup>, CHENG Pao<sup>1,2,3</sup>,  
ZHANG Yueyue<sup>1,2,3</sup>, XU Xiaofan<sup>1,2,3</sup>, DU Ping<sup>1,2,3</sup>

1. Shanghai Satellite Network Research Institute Co.,Ltd., Shanghai 200120, China
2. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China
3. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China

**Abstract:** In large-scale satellite communication networks, the dynamic and uncertain nature of inter-satellite links significantly impacts network performance. Due to the high-speed movement of satellites, orbital variations, and disturbances from the space environment, traditional static routing algorithms struggle to adapt to frequent network topology changes caused by link establishment and disconnection. To address this issue, a link survival time prediction framework based on a Markov model was constructed, systematically analyzing the relationship between link avail-

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-05-12

通信作者: 杜平, dup@chinasatnet.com.cn

ability, recovery rate, and failure rate, while also examining the impact of solar conjunction on link stability. Based on this framework, two optimization strategies were proposed: a reliable routing algorithm based on constrained shortest path first with link survival time (CSPF-LST), where link failure probability was introduced to dynamically adjust path selection, improving link survival time; a dynamic weighted shortest path algorithm based on link survival time, which integrated link survival time and latency factors for comprehensive optimization. Simulation results demonstrate that the proposed algorithms significantly improve routing reliability and data transmission efficiency in satellite networks, providing theoretical and technical support for the efficient operation of large-scale satellite constellation networks.

**Key words:** satellite communication network, link survival time, reliable routing algorithm, Markov model

## 0 引言

作为新一代信息基础设施的重要组成部分,卫星通信网络凭借其全域覆盖能力、低传输时延特性以及多元化的应用前景,正在重构全球通信体系架构<sup>[1]</sup>。特别是低轨卫星星座系统,通过构建多层次的空间网络拓扑,不仅能够弥补传统地面通信在偏远地区如极地、远洋等地的服务空白,还极大增强了数据传输的连续性与时效性<sup>[2]</sup>。然而,受星座拓扑的高动态特性、空间传播环境的复杂性以及星间链路频繁通断等因素影响,卫星网络在链路可靠性保障、最优路径决策和路由机制设计等方面正面临严峻挑战<sup>[3]</sup>。

### (1) 星间链路连通性建模

卫星网络连通性分析主要依赖于链路状态的可靠性建模。研究表明,链路连通性建模方法可分为3类:确定性建模、随机性建模和混合建模<sup>[4]</sup>。确定性建模方法利用卫星轨道参数、链路特性等信息构建数学模型,从而精确描述网络连通性。例如,韩松辉等<sup>[5]</sup>基于贝叶斯模型对GNSS星间链路可靠性进行了建模分析。随机性建模方法则侧重于空间环境优、设备失效等随机因素建模,通过概率统计模型刻画网络连通性的动态变化。例如,Rinaldi等<sup>[6]</sup>提出了一种适用于5G/6G非地面网络(NTN)的动态建模方法。混合建模方法通过融合物理约束与随机过程,形成更为完备的可靠性评估体系<sup>[7]</sup>。

### (2) 链路通断特性与路由优化

空间链路的时变特性对路由决策机制提出了特殊要求。LEO卫星间链路受轨道摄动、日凌效应等影响,呈现周期性中断与随机性衰减的复合特征<sup>[8]</sup>。学术界对此提出了多种优化策略:王蔚龙等<sup>[9]</sup>提出了一种基于负载均衡的卫星光网络路由与波长分配方法,利用蚁群算法优化路径选择,提高了网络的鲁棒性;Chen研究团队<sup>[10]</sup>则引入深度强化学习框架,构建了具有环境自适应能力的智能路由决策系统。

### (3) 本文研究内容

基于前述的研究成果,本文构建了一个基于马尔可夫模型的链路生存时间预测框架,并在此基础上提出了两种不同的路由优化策略,以提升卫星通信网络的路由稳定性和数据传输效率。本文核心贡献具体如下。

#### ① 基于马尔可夫模型的链路生存时间预测与可用性建模研究

本文首先建立了基于马尔可夫模型的链路生存时间预测模型,并对链路可用性、恢复速率和失效速率间的关系进行了系统的分析。同时,还探讨了日凌现象对链路稳定性和链路生存时间的影响。

#### ② 基于链路生存时间预测的可靠稳定路由与传输算法(CSPF-LST)

本文在约束最短路径优先(constrained shortest path first, CSPF)算法的基础上,提出了一种



基于链路生存时间的路径优化算法。在路径计算过程中,动态调整权重参数,实时更新链路状态信息,从而有效规避高故障风险链路,提高路径的可靠性和稳定性。

### ③ 基于链路生存时间的动态加权最短路径算法(DWSP-LST)

为了实现链路生存时间与时延的决策平衡,本文在CSPF优化算法的基础上,进一步提出了一种基于链路生存时间的动态加权最短路径算法。通过综合考虑路径选择中的可靠性与传输时延因素,实现链路权重的动态调整,在保障路径稳定性的同时,优化端到端传输效率。

## 1 大规模星座节点通断影响特征分析与模型构建

本文首先聚焦卫星通信网络中激光链路的稳定性问题,重点分析由卫星运动规律和空间环境引发的两类链路状态变化:卫星运动导致的周期性通断和空间环境引发的随机性通断。其中,周期性通断主要源于卫星在轨运行过程中与太阳形成的特定几何关系(即日凌现象),表现为具有确定时间特征的链路通断交替;随机性通断则由卫星所处空间环境中的辐射波动、粒子干扰等不确定因素引发,呈现非平稳随机过程特性。本文建立星间链路通断模型,通过模拟链路状态的动态转换,推导并分析链路维持时间,旨在为后续的可靠稳定路由与传输算法的设计和 optimization 奠定坚实的理论基础。

### 1.1 周期性通断

随着卫星通信技术的快速发展,激光链路因其高带宽、低时延和高保密性等优势,逐渐成为星间通信的主流方式。然而,激光链路的稳定性易受太阳背景辐射的干扰,尤其是在日凌现象发生时,太阳辐射会直接进入通信接收端,导致信号被淹没,通信链路中断。日凌现象的发生与太阳、卫星及对端卫星(或地面站)之间的空间几

何关系密切相关,其影响在1550 nm波段尤为显著<sup>[11]</sup>。

设 $S$ 为太阳位置矢量, $T_1$ 为本星(卫星1)指向对端卫星(卫星2)的矢量; $\theta$ 为 $S$ 和 $T_1$ 之间的夹角,即太阳-本星-对端卫星夹角,日凌示意图如图1所示。

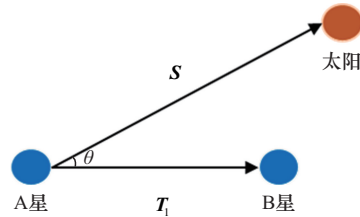


图1 日凌示意图

当日凌发生时,太阳辐射直接进入激光通信接收端,临界条件可表示为:

$$\theta \leq \theta_{th} = \arcsin\left(\frac{R_{sun}}{D_{st}}\right) \quad (1)$$

其中, $R_{sun}$ 为太阳的视半径, $D_{st}$ 为卫星与太阳之间的距离。

当夹角 $\theta$ 小于或等于临界角 $\theta_{th}$ 时,太阳辐射强度在1550 nm波段可达:

$$I_{sun}(\lambda = 1550 \text{ nm}) \approx 1.5 \times 10^3 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{nm}^{-1}) \quad (2)$$

该强度的太阳辐射会显著降低通信信号的信噪比(SNR),使其低于检测阈值:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}} + I_{\text{sun}}} < \text{SNR}_{th} \quad (3)$$

因此,临界角 $\theta_{th}$ 是激光通信链路需要保持的最小安全角度,可视为日凌规避角。

为了进一步量化日凌对链路通信质量的影响,本文假设太阳背景噪声功率随夹角 $\theta$ 衰减满足高斯分布,建立规避角与链路信噪比之间的关系表达式。设定激光终端的接收功率为-40 dBm,背景辐射峰值为-45 dBm,接收热噪声为-60 dBm,系统最低可接受SNR为8 dB。结果表明,当规避角 $\theta_{th} \geq 1.31^\circ$ 时,信噪比不低于8 dB,满足链路稳定通信的基本要求。为了保证工程安全裕度,

本文仿真中选取  $2^\circ \sim 5^\circ$  的规避角作为典型设置区间，合理覆盖理论阈值范围。

### 1.2 随机故障建模：马尔可夫过程

除周期性日凌干扰外，卫星网络的连通性易受空间环境和网络故障的双重影响，导致网络连通度下降。其中，空间环境因素（如太阳活动、宇宙射线等）以及卫星硬件老化、软件故障等引发的网络故障，是常见的随机破坏类型。针对单粒子翻转、激光捕获不稳定等随机故障，本文基于随机过程理论构建概率模型，计算链路维持时间，为路由算法提供预测性决策支持。

#### (1) 马尔可夫过程建立

本文采用马尔可夫过程对星间链路的状态进行建模。假设每条链路的状态为二元随机过程，包括连通状态（状态 A: up）和中断状态（状态 B: down），且状态转移满足马尔可夫性（无后效性）。链路在连通和中断状态之间的转移过程可通过状态转移概率矩阵描述，链路连通和中断状态的马尔可夫概率模型如图 2 所示。

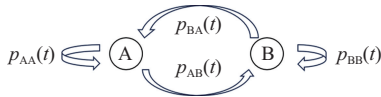


图2 链路连通和中断状态的马尔可夫概率模型

令  $t$  时刻，某一条星间链路的状态转移概率矩阵为  $\mathbf{P}(t)$ ，具体表示如下：

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} p_{AA}(t) & p_{AB}(t) \\ p_{BA}(t) & p_{BB}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $p_{AA}(t)$  是在  $t$  时刻链路仍然处于状态 A 的概率； $p_{AB}(t)$  是在  $t$  时刻链路从状态 A 转移到状态 B 的概率； $p_{BA}(t)$  是在  $t$  时刻链路从状态 B 转移到状态 A 的概率； $p_{BB}(t)$  是在  $t$  时刻链路仍然处于状态 B 的概率。由于链路在任何时间点只能处于状态 A 或状态 B，即得：

$$p_{AA}(t) + p_{AB}(t) = 1 \quad (5)$$

$$p_{BA}(t) + p_{BB}(t) = 1 \quad (6)$$

#### (2) 状态转移速率与概率分布

星间链路在实际运行中易受如单粒子翻转、电源扰动、姿态偏差等突发事件影响，导致状态在连通与中断之间频繁切换。这类状态转换通常具有突发性和独立性，事件间隔无法预测，历史状态无影响。因此，本文假设链路通断时间服从负指数分布，该分布具备无记忆性，广泛用于描述独立随机事件间隔，在通信系统中常用于建模链路失效与恢复行为，具有明确的物理意义和工程合理性。

假设每条星间链路的通断都符合负指数分布，令  $\lambda_A$  表示从状态 A（up）转移到状态 B（down）的速率；令  $\lambda_B$  表示从状态 B（down）转移到状态 A（up）的速率。在实际应用中， $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  可以基于系统的特定特性或历史数据来估计。基于指数分布的特性，状态转移概率矩阵可进一步表示为：

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} e^{-\lambda_A t} & 1 - e^{-\lambda_A t} \\ 1 - e^{-\lambda_B t} & e^{-\lambda_B t} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中， $\lambda_A$  表示链路的失效速率，其倒数表示链路在正常状态下的平均持续时间；同理， $\lambda_B$  表示恢复速率，其倒数表示平均恢复时间。

#### (3) 链路维持时间与故障间隔时间

根据上述建模，链路维持时间（time to failure, TTF），即链路从连通状态转移到中断状态的时间服从负指数分布，具体为：

$$f_{\text{TTF}}(t) = \lambda_A e^{-\lambda_A t} \quad (8)$$

其期望值为：

$$E[\text{TTF}] = \frac{1}{\lambda_A} \quad (9)$$

故障间隔时间（time to repair, TTR），即链路从中断状态恢复到连通状态的时间服从负指数分布，具体为：

$$f_{\text{TTR}}(t) = \lambda_B e^{-\lambda_B t} \quad (10)$$

其期望值为：



$$E[\text{TTR}] = \frac{1}{\lambda_B} \quad (11)$$

### 1.3 并发性故障建模

当周期性故障（如日凌）与随机性故障（如单粒子翻转）同时发生时，会引发并发性故障。本文通过结合周期性故障模型和随机性故障模型，实现对多类型故障的精确模拟，通过矩阵乘法结合周期性故障和随机性故障模型，能够更准确地模拟卫星通信网络中链路的故障行为。本文使用一个逻辑链路状态矩阵  $\mathbf{M}_n(t)$ ，表征某一时刻某条链路的可用性，其中包含周期性通断判据与马尔可夫链模拟的随机可用性状态的叠加。 $\mathbf{M}_{n,ij}(t)=1$  表示链路  $i \rightarrow j$  可用， $\mathbf{M}_{n,ij}(t)=0$  表示链路  $i \rightarrow j$  因发生日凌或随机性故障而不可用。

为了将该状态引入路由决策算法中，需结合链路可用概率模型构造链路状态矩阵  $\mathbf{S}(t)$ ，具体地，本文定义：

$$\mathbf{S}_{ij}(t) = \mathbf{M}_{n,ij}(t) \cdot I[\mathbf{P}_{\text{up},ij}(t)] \geq \epsilon \quad (12)$$

其中， $I[\cdot]$  为指示函数，条件成立时取 1，否则取 0； $\epsilon$  是链路可用性的置信判据阈值，通常取值为 0.5。即，只有在链路不受日凌影响，且链路的瞬时可用概率超过阈值时，该链路才被视为当前可用。

## 2 基于链路生存时间预测的可靠稳定路由与传输算法

随着卫星通信网络规模的扩大和网络复杂度的增加，如何在动态变化的网络环境中找到可靠的端到端路径，成为路由协议设计中的核心问题。传统的最短路径优先（shortest path first, SPF）算法通常仅以路径跳数或静态性能参数（如时延、带宽）作为权重，忽略了链路的动态特性和可靠性。本文基于约束最短路径优先（constrained shortest path first, CSPF）的思想，提出基于链路生存时间预测的可靠稳定路由与传输算法（CSPF with link survival time, CSPF-

LST），综合考虑链路的故障概率和修复时间，旨在提升端到端数据传输的可靠性。

### 2.1 算法设计

传统 SPF 算法在卫星网络等高动态环境中存在局限性，无法适应链路频繁通断的特性。本文提出的 CSPF-LST 算法将链路中断概率引入为路径计算的动态权重，从理论上优化了路径选择过程。基于前文建立的链路马尔可夫状态模型，假设每条链路的通断时间服从负指数分布，链路的状态转移满足无后效性的马尔可夫过程。对于任一处于连通状态的链路  $m$ ，其在  $t$  时刻内发生中断的概率可表示为  $p_m = 1 - e^{-\lambda_m t}$ ，链路在  $t$  时刻内保持正常工作的概率为  $e^{-\lambda_m t}$ 。当  $t$  为特定的路由重计算周期或数据传输时长时， $p_m$  可视为该链路在该时间窗口内的中断概率。显然， $p_m$  值越小表示链路越可靠、预计生存时间越长。

假设某端到端路由由  $M$  条星间链路组成，若各链路中断事件相互独立，则该路径在该时间内出现中断（即至少一条链路发生故障）的累计概率如下：

$$P_n = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - p_m) \quad (13)$$

显然，路径所含链路越多或每条链路的不可靠性越大，都会导致整个路径失效概率升高、可靠性降低。在链路失效服从指数分布的特例下，

路径在  $t$  时刻内的生存概率为  $\exp\left(-\sum_{m=1}^M \lambda_m t\right)$ ，可

见各链路失效率之和决定了路径可靠性的下界。据此，选择累计中断概率最小的路径将最大限度提高端到端连接的生存时间。CSPF-LST 算法利用该原理，将每条链路的中断概率作为权重参与路径度量，从而偏好于选择预期生存时间最长、累计故障风险最低的路径。

### 2.2 算法流程

CSPF-LST 算法通过考虑端到端路径中每条

链路的中断概率，避免了传统 SPF 算法仅依赖局部信息的缺陷，显著提升了路径选择的可靠性。在路径构建过程中，CSPF-LST 算法动态更新链路中断概率，能够适应网络环境的变化，确保始终选择最优路径，路径选择如图 3 所示，算法流程如图 4 所示。

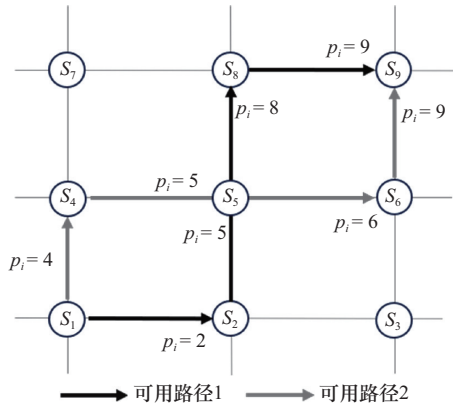


图3 路径选择

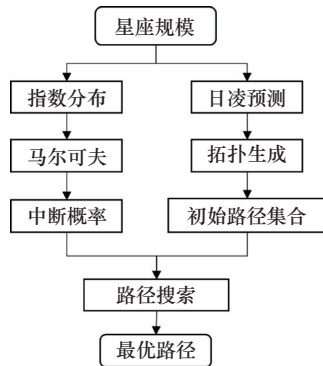


图4 算法流程

(1) 网络初始化

① 设置网络拓扑参数：首先，需要确定卫星网络的基本拓扑参数，包括节点数  $V$  和边数  $E$ 。

② 初始化链路状态：对于每条链路，令其初始化状态为连通。

(2) 状态更新及权重计算

① 根据网络拓扑和链路状态，预测日凌现象的发生时刻和持续时间，并对链路状态进行更新。

② 利用前述随机性故障模型和周期性故障模

型，构建链路状态矩阵  $S(t)$ ，记录每条链路在当前时刻下的可用性（1表示正常，0表示因故障或日凌不可用）以及预测的中断概率。

(3) 路径搜索及优化

① 根据链路状态矩阵剔除当前不可用的链路，获取当前时刻的有效拓扑，从而确定端到端可用路径的集合。

② 在有效拓扑上运行最短路径算法（如 Dijkstra 算法或 A\* 算法），以链路中断概率为路径开销对候选路径进行度量和比较。

③ 比较计算得到的各条候选路径的累计中断概率  $P_n$ ，选择其中值最小的路径作为最优路由方案。

④ 在网络持续运行过程中，若链路状态发生变化（如出现新的故障或恢复），算法可重复执行上述状态更新、权重计算和路径搜索步骤，实时调整路径以适应拓扑变化，确保始终使用最优路径完成数据传输。

2.3 复杂度分析

CSPF-LST 算法的时间复杂度主要由图的构建与初始化、路径搜索、权重更新与动态计算 3 个部分组成。

(1) 图的构建与初始化：该部分主要包括读取或生成网络拓扑和初始化链路状态矩阵。采用适当的数据结构存储  $V$  个节点和  $E$  条边，其时间复杂度为  $O(V+E)$ （假设链路初始化遍历每条边一次）。在卫星网络的应用中， $V$  和  $E$  由星座规模和链路密度决定。

(2) 路径搜索：在赋予链路动态权重后，需要进行最短路径计算以找到最优路径。使用 Dijkstra 算法或 A\* 算法进行全网范围的路径搜索，当采用邻接表存储图并使用堆实现时，其时间复杂度可达到  $O((V+E) \cdot \log V)$ 。

(3) 权重更新与动态计算：链路权重的更新涉及根据最新链路状态重新计算每条边的中断概率。假设每次更新需要遍历所有  $E$  条链路并执行



表1 两种算法特性对比

特性	SPF算法	CSPF-LST算法
路径选择依据	路径长度或静态性能参数	链路中概率与路径长度综合优化
动态适应性	无法适应链路状态动态变化	动态更新链路权重, 适应网络环境变化
时间复杂度	$O(V^2)$	$O((V+E)\log V)$
适用场景	链路状态稳定的网络环境	高动态网络环境 (如卫星通信网络)
可靠性	较低	较高

常数时间的概率计算, 则每次更新的时间复杂度约为  $O(E)$ 。如果路由计算周期较短或事件触发频繁, 此部分可能反复执行, 但单次计算成本随网络规模线性增长。

综上, CSPF-LST 算法的总时间复杂度为  $O((V+E)\log V)$ 。

## 2.4 与传统 SPF 算法的对比

CSPF-LST 算法通过在传统的 SPF 算法中引入链路中断概率的动态计算, 能够有效地解决高动态网络环境中的不确定性问题, 从而显著提高网络的路由可靠性和数据传输效率。尽管 CSPF-LST 算法的复杂度略高于 SPF 算法, 但其在卫星通信网络等高动态网络环境中的性能优势显著, 具有广泛的应用前景。两种算法特性对比见表 1。

## 3 基于链路生存时间的动态加权最短路径算法

### 3.1 算法设计

为了平衡链路生存时间与时延等网络参数的关系, 本文进一步提出基于链路生存时间的动态加权最短路径算法 (dynamic weighted shortest path algorithm based on link survival time, DWSP-LST), 旨在通过动态融合链路生存时间与时延等多维度指标, 优化端到端路径选择。该算法基于马尔可夫模型预测链路状态演化, 结合动态权重机制, 进一步引入链路失效风险与时延风险进行加权综合评估, 显著提升网络传输可靠性。

基于马尔可夫链建立链路状态转移模型, 定义链路生存时间为链路从“正常”(up) 状态首

次转移到“故障”(down) 状态的持续时间, 服从指数分布:

$$P(T_{\text{survival}} > t) = e^{-\lambda A t} \quad (14)$$

当链路状态为“故障”时,  $T_{\text{survival}} = 0$ 。

对于每条处于“连通”状态的链路, 计算其失效风险  $R_{\text{failure}}$ :

$$R_{\text{failure}} = \frac{1}{T_{\text{survival}} + \epsilon} \quad (15)$$

其中,  $T_{\text{survival}}$  为链路的预测生存时间,  $\epsilon$  为防止除零的极小值。

为了兼顾路由算法对网络性能与链路可靠性的双重要求, 可以通过加权求和的方式实现对路径的综合决策, DWSP-LST 算法设计思路如图 5 所示。

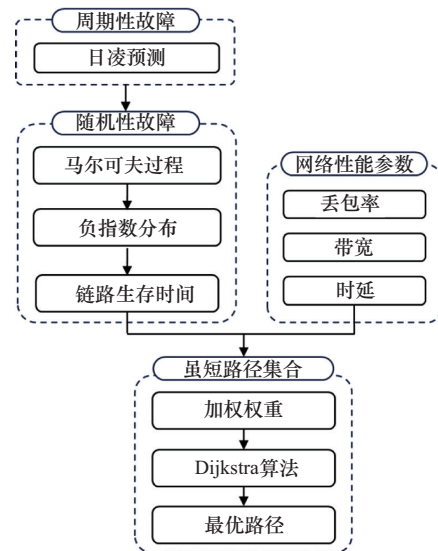


图5 DWSP-LST 算法设计思路

以时延为例, DWSP-LST 算法综合每条链路的时延与生存时间进行归一化加权处理, 分别定义时延风险  $D_{\text{norm}}$  和失效风险  $R_{\text{norm}}$ , 具体如下:

$$D_{\text{norm}} = \frac{D - D_{\text{min}}}{D_{\text{max}} - D_{\text{min}}} \quad (16)$$

$$R_{\text{norm}} = \frac{R_{\text{failure}} - R_{\text{min}}}{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}} \quad (17)$$

综合考虑时延与失效风险，第  $i$  条链路权重可表示为：

$$E_i = \alpha \cdot D_{\text{norm}} + \beta \cdot R_{\text{norm}} \quad (18)$$

其中， $\alpha$  和  $\beta$  分别为权重系数， $\alpha + \beta = 1$ 。

### 3.2 复杂度分析

DWSP-LST 算法是在 CSPF-LST 算法的基础上，进一步考虑了链路时延和生存时间的加权因素来进行路径选择，其复杂度主要由图的构建与初始化、链路权重的更新、路径搜索、路径选择与优化 4 个部分组成。

(1) 图的构建和初始化：主要是与节点数  $V$  和链路数  $E$  成线性关系，时间复杂度为  $O(V+E)$ 。

(2) 链路权重的更新：DWSP-LST 算法动态地根据链路时延和生存时间来调整链路权重，通常这些计算是常数时间操作。因此，更新每条链路的时间复杂度为  $O(1)$ 。由于有  $E$  条链路，链路权重更新的时间复杂度为  $O(E)$ 。

(3) 路径搜索：类似于 CSPF-LST 算法，路径搜索使用 Dijkstra 算法或 A\* 算法来寻找最短路径，时间复杂度为  $O((V+E) \cdot \log V)$ 。

(4) 路径选择与优化：在计算出所有候选路径后，DWSP-LST 算法会根据路径时延和生存时间的加权总和来选择最优路径。路径选择的优化过程通常是对已计算路径的遍历，计算每条路径的总权重，然后选择权重最小的路径。假设存在  $P$  条候选路径，路径选择的复杂度是  $O(P)$ 。在最坏情况下，需要遍历所有路径，则  $P$  可能等于网络中的所有路径数。通常情况下，路径数远小于  $V \times E$ ，因此可以近似认为该步骤的复杂度是常数时间  $O(1)$ 。

综上，DWSP-LST 算法的总时间复杂度为  $O((V+E) \cdot \log V)$ 。

## 4 仿真结果

### 4.1 通断模型仿真结果

#### (1) 周期性通断模拟

本文首先开展了在不同规避角条件下的星座网络日凌影响分析。针对 1 800 颗卫星组成的星座系统，模拟了 24 h 内不同规避角的日凌发生情况，不同规避角下的日凌发生总次数对比如图 6 所示。

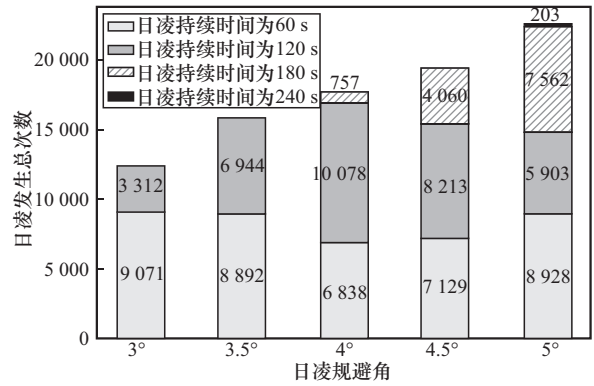


图6 不同规避角下的日凌发生总次数对比

图6给出了日凌规避角与日凌发生总次数之间的关系趋势，日凌发生次数随着日凌规避角的增大显著增多。当规避角增加至  $3^\circ$  和  $3.5^\circ$  时，日凌事件发生次数的增幅均超过 20%，其中最大增幅为 27.8%。此外，日凌规避角的增大还导致日凌持续时间变长，短时日凌事件的比例减少，长时间事件的发生率显著增加，其增长幅度通常超过 50%。

#### (2) 随机性通断模拟

为了分析不同通断频率条件下网络链路的可用性，本文定义链路可用性为处于“up”状态的链路数量占比，并采用稳态概率模型描述其变化趋势。

不同通断参数组合下的平均链路可用性如图 7 所示，浅色代表高可用性，深色代表低可用性。结果表明，随着  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$  的增大，平均链路可用性呈现逐渐下降趋势。这表明较高的失效率和较



低的恢复速率会导致链路长期处于不可用状态，从而影响网络的整体稳定性。因此，为了提升链路可用性，降低 $\lambda_A$ 并增加 $\lambda_B$ 是有效的应对措施。

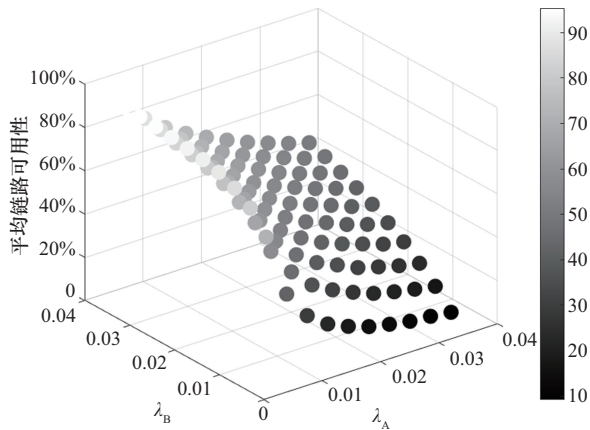


图7 平均链路可用性

链路平均最长生存时间如图8所示。仿真数据显示，在链路故障率相对较低且恢复速度相对较快的情况下，链路平均最长生存时间会显著增加（表现为图8中的浅色区域）。随着 $\lambda_A$ 和 $\lambda_B$ 的增加，链路均最长生存时间逐渐降低，颜色向深色过渡。在等高线分布较为密集的区域，生存时间对通断参数的变动表现出较高的敏感性，而在稀疏区域，生存时间的变化则相对较为稳定。这进一步印证了链路的生存能力在低故障率和高恢复率方面的关键作用。

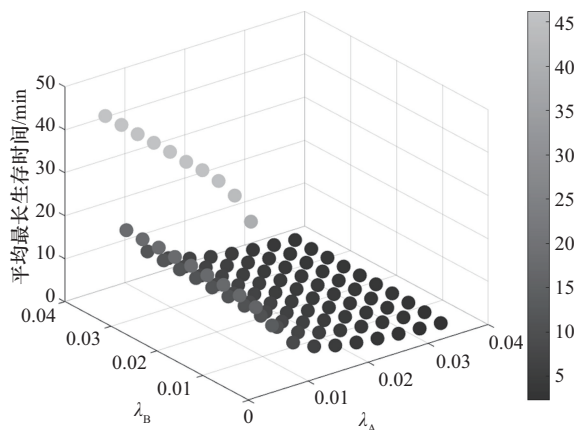


图8 链路平均最长生存时间

### (3) 并发性通断模拟

并发性通断对链路生存时间的联合影响如图9所示。结果显示，日凌现象会显著降低链路生存时间，总体减少3~5 min。特别是在较高失效率和较低修复率情况下，日凌现象对链路生存时间的负面影响尤为显著，这表明在不稳定的网络环境中，外部干扰因素的影响被进一步放大。因此，在实际工程应用中，对链路选择策略进行优化并充分考虑周期性外部因素的作用，对于增强网络的稳定性显得尤为关键。

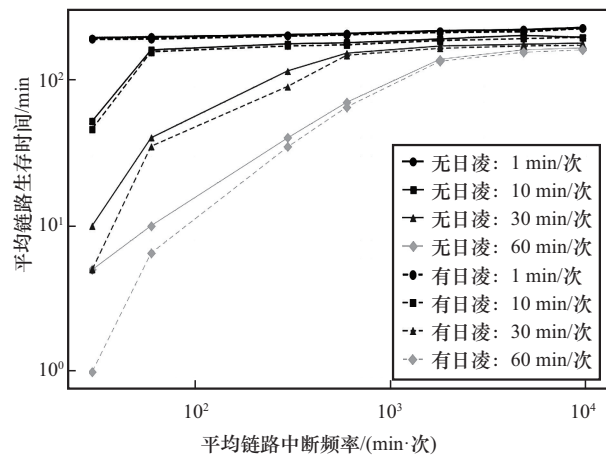


图9 并发性通断对链路生存时间的联合影响

## 4.2 基于链路生存时间预测的可靠稳定路由与传输算法仿真结果分析

基于不同链路通断特性，本文进一步研究了SPF算法与CSPF-LST算法在动态通断场景下的端到端路径生存时间表现，CSPF-LST算法端到端生存时间如图10所示。结果表明，CSPF-LST算法在所有实验条件下均优于SPF算法，特别是在短恢复时间和高故障率环境下，提升幅度最高达900%。CSPF-LST算法适用于高动态网络环境，能够有效规避高故障链路，提高路径生存能力。在链路较稳定（失效时间>300 s）时，CSPF-LST算法仍维持至少45%的生存时间优势，表明其在多种网络环境下均具备较高的适应性。

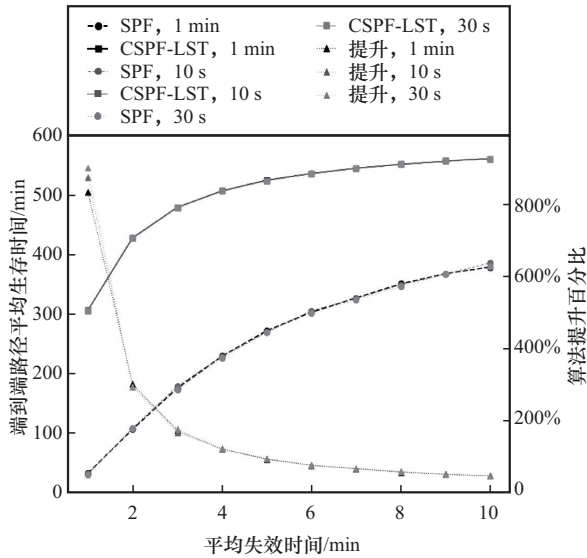


图 10 CSPF-LST 算法端到端路径生存时间

本文进一步基于 Hypatia 仿真平台构建 1 800 (30×60) 的星座网络, 星座轨道面高度为 630 km, 运行周期为 14.8 圈/天, 倾斜角为 51.9°, 轨道近似于圆形。每颗卫星的连接方式为与同轨道面的前后两颗卫星建链, 与相邻轨道的同位置卫星建链。

CSPF-LST 算法传输成功率如图 11 所示, CSPF-LST 算法平均时延如图 12 所示。仿真结果表明, CSPF-LST 算法在保障高可靠性方面具有明显优势, 尤其在长距离传输场景中表现突出。在长距离 (≥8 000 km) 场景中, CSPF-LST 算法的传输成功率 (54.5%~81.0%) 显著高于 SPF 算法 (14.5%~52.0%)。时延方面, SPF 算法的时延虽整体低于 CSPF-LST 算法, 但两者时延差距随着距离增加而逐渐缩小 (12 000 km 时差值: 22.5 ms), 同时 SPF 算法的长距离时延优势伴随成功率的大幅下降 (如 12 000 km 时成功率仅 14.5%~18.0%)。综上, 在短距离 (<5 000 km) 场景下, SPF 算法凭借更低的时延更适用于时延敏感型任务; 在长距离 (≥5 000 km) 场景下, CSPF-LST 算法的综合性能更优, 适用于高可靠性需求场景。

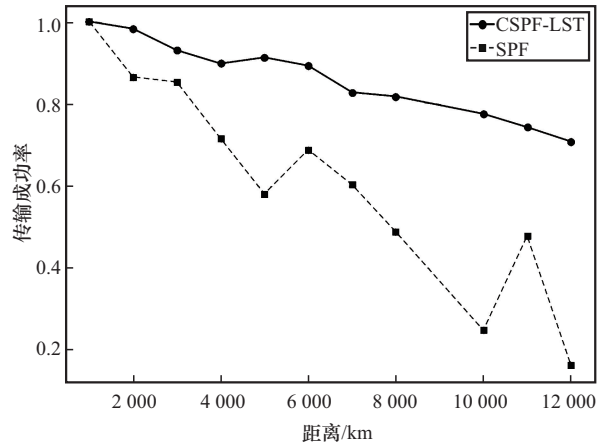


图 11 CSPF-LST 算法传输成功率

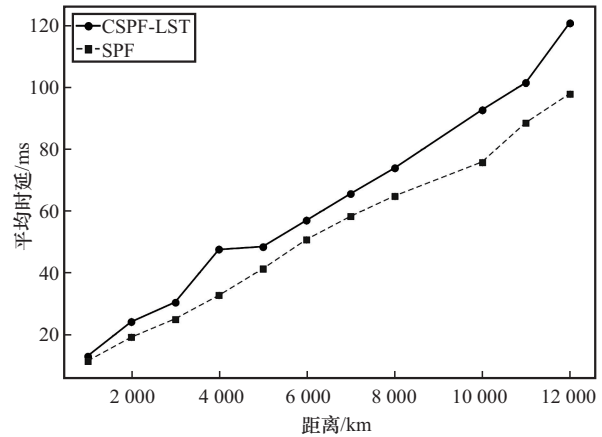


图 12 CSPF-LST 算法平均时延

### 4.3 基于链路生存时间的最短路径路由算法 (DWSP-LST)

DWSP-LST 算法端到端路径生存时间趋势如图 13 所示, DWSP-LST 算法在路径连续生存时间方面优于传统的 SPF 算法。随着故障发生频率的增加 (平均故障间隔时间减小), 两种算法的平均路径生存时间均下降。在所有故障发生频率下, DWSP-LST 算法的平均路径生存时间均高于 SPF 算法, 表明 DWSP-LST 算法能够选择更可靠的路径。

针对基于两种不同的平均恢复时间 (1 min 和 5 min), 本文进一步分析了无日凌和有日凌条件下 SPF 算法和 DWSP-LST 算法的端到端路径平均生存时间表现。DWSP-LST 算法端到端



路径平均生存时间受日凌影响趋势对比如图 14 所示, 当平均恢复时间为 1 min 时, 两种算法受日凌影响端到端路径平均生存时间均有所下降, SPF 算法得到的链路生存时间平均下降约 5.74%, DWSP-LST 算法得到的链路生存时间平均下降约 3.51%。可以观察到, 当平均恢复时间为 5 min 时 SPF 算法得到的链路生存时间平均下降约 2.32%, DWSP-LST 算法得到的链路生存时间平均下降约 1.67%。与平均恢复时间为 1 min 的条件相比, 链路生存时间平均的变化幅度均有减小, DWSP-LST 算法相对 SPF 算法仍比较稳定。

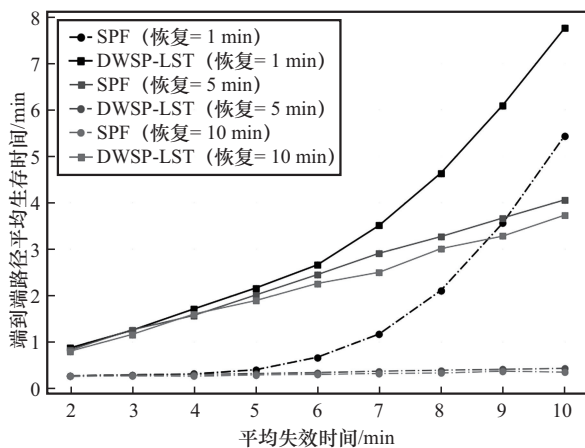


图 13 DWSP-LST 算法端到端路径生存时间趋势

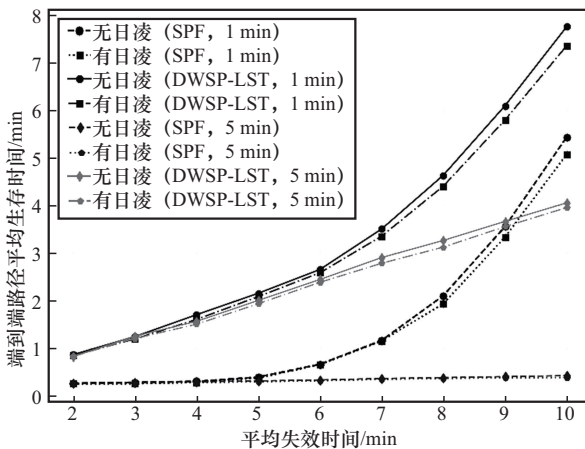


图 14 DWSP-LST 算法端到端路径平均生存时间受日凌影响趋势对比

DWSP-LST 算法在不同权重组合下的端到端路径平均生存时间表现如图 15 所示。随着平均失效时间增加, DWSP-LST 算法的端到端路径生存时间显著延长。当  $\alpha=0$ 、 $\beta=1$  时, 随着平均失效时间从 2 min 减至 1 min, 无日凌条件下生存时间由 0.86 min 增至 7.75 min; 当  $\alpha=0.2$ 、 $\beta=0.8$  时, 生存时间分别提升约 5.8% 和 10.5%; 当  $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.5$  时, 生存时分别提升约 14.5% 和 11.2%。在各参数组合下, 有日凌条件均较无日凌条件下降约 5%, 表明日凌对链路稳定性存在约 5% 的负面影响。总体而言, 适当增加时延风险的权重可在一定程度上提高预测生存时间, 但过高可能削弱对链路实际状态的反映。因此, 在实际应用中需在链路失效间隔与实际状态之间实现合理平衡, 以优化路由性能。

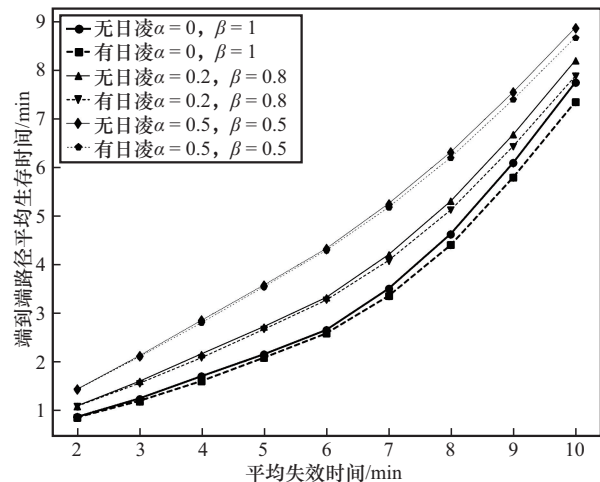


图 15 DWSP-LST 算法在不同权重组合下的端到端路径平均生存时间表现

## 5 结束语

本文针对大规模卫星通信网络中星间链路的动态性和不确定性问题, 提出了一个基于马尔可夫模型的链路生存时间预测框架。在此基础上, 分别提出了基于链路生存时间预测的可靠稳定路由与传输算法和基于链路生存时间的动态加权最短路径算法。仿真结果表明, 所提

算法能够显著提升卫星通信网络的路由可靠性和数据传输效率，为大规模卫星星座网络的高效运行提供了有力的理论和技术支持。未来研究将进一步探索更复杂的空间环境因素对链路稳定性的影响，并优化算法以适应更广泛的卫星网络应用场景。

### 参考文献:

- [1] 倪少杰, 岳洋, 左勇, 等. 卫星网络路由技术现状及展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 383-395.  
NI S J, YUE Y, ZUO Y, et al. The current situation and prospects of satellite network routing technology[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 383-395.
- [2] 陈山枝, 范志文, 金家德, 等. 卫星互联网星间激光通信的分析及建议[J]. 电信科学, 2024, 40(2):1-10.  
CHEN S Z, FAN Z W, JIN J D, et al. Analysis and suggestions on inter-satellite laser communication of satellite internet[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(2):1-10.
- [3] LIU J, SHI Y, FADLULLAH Z M, et al. Space-time network calculus: a novel theory for space information networks[C]// Proceedings of the 2018 IEEE/ACM Transactions on Networking. Piscataway: IEEE Press, 2018, 26(2): 743-756.
- [4] 蔡睿妍, 潘芸, 魏德宾, 等. 基于QoS的卫星网络端-端通信可靠性分析[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 323510.  
CAI R Y, PAN Y, WEI D B, et al. End-to-end communication reliability analysis based on QoS in satellite network[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 323510.
- [5] 韩松辉, 归庆明, 李建文, 等. 混合星座星间链路的建立以及连通性和稳健性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(9): 1014-1019.  
HAN S H, GUI Q M, LI J W, et al. Establishment of inter-satellite links of hybrid constellations and analysis of connectivity and robustness[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(9): 1014-1019.
- [6] RINALDI F, MAATTANEN H L, TORSNER J, et al. Non-terrestrial networks in 5G & beyond: a survey[J]. IEEE Access, 2020, 8: 165178-165200.
- [7] ZHOU H, FENG B, LI G, et al. An efficient routing protocol for LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(11): 6241-6251.
- [8] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[C]// Proceedings of the 2001 IEEE/ACM Transactions on Networking. Piscataway: IEEE Press, 2001, 9(2): 137-147.
- [9] 王蔚龙, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于负载均衡的卫星光网络路由与波长分配方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 706004.  
WANG W L, LI Y J, ZHAO S H, et al. Research on routing and wavelength allocation method of satellite optical network based on load balancing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 706004.
- [10] CHEN J, WANG L, ZHANG J, et al. A dynamic routing algorithm for LEO satellite networks based on software-defined networking[J]. IEEE Access, 2019, 7: 43773-43785.
- [11] 李峰, 李兵, 陆纪杰. 卫星通信日凌干扰分析及预报研究[J]. 中国新通信, 2018, 20(17):1.  
LI F, LI B, LU J J. Satellite communication sun outage interference analysis and prediction research[J]. China New Telecommunications, 2018, 20(17):1.

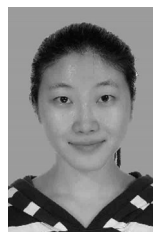
### [作者简介]



张硕 (1996-), 女, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星互联网网络架构、空间承载网体制标准及路由协议。



牛庆庆 (1982-), 女, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星互联网网络架构、空间承载网体制标准及关键技术。



缪馨 (1993-), 女, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星网络架构、短距离光通信和5G/6G移动通信。



程袍（1993-），男，上海卫星互联网研究院有限公司工程师，主要研究方向为卫星互联网通信网络仿真与卫星互联网通信前沿技术。



徐晓帆（1986-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司研究员，主要研究方向为卫星网络架构、空间激光通信和5G/6G移动通信。



章跃跃（1988-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师，主要研究方向为卫星互联网网络架构及体制协议等。



杜平（1978-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司研究员，主要研究方向为卫星互联网网络架构、承载网和核心网技术体制标准。