

引用格式: CAO Yang, XING Wenjun, PENG Xiaofeng, et al. Research on Routing Algorithms for Satellite Optical Networks under Space Debris Interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0206004

曹阳,邢雯珺,彭小峰,等. 空间碎片干扰下的卫星光网络路由算法研究[J]. 光子学报, 2024, 53(2):0206004

空间碎片干扰下的卫星光网络路由算法研究

曹阳,邢雯珺,彭小峰,包朝园

(重庆理工大学 电气与电子工程学院,重庆 400054)

摘要:针对低轨卫星激光通信中空间碎片可能造成的星间链路中断问题,提出一种方向增强的链路状态路由算法。首先搭建了卫星通信的网络拓扑结构,对空间碎片的运动模型和卫星的运动模型进行联合建模仿真,得到卫星与碎片的相对位置并进行星间可见性分析,提出了方向影响因子和方向增强指数,结合星间链路距离及传输时延综合考虑链路代价,从而选择合适的传输路径方向,依次在每个卫星节点对间进行最小路径选择,并以路由跳数为评价指标。仿真结果表明,在有空间碎片存在的环境中,所提算法能够在不牺牲通信质量的前提下,实现路由跳数相比 Dijkstra 算法降低 14%,传输时延相比 Dijkstra 算法减少 17%。

关键词:激光通信;卫星路由;链路状态路由算法;空间碎片

中图分类号: TN927+.2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245302.0206004

0 引言

空间碎片是指人类太空活动的产物,包括完成任务的火箭体和卫星体、火箭弹射等,是空间环境的主要污染源。近年,越来越多的太空活动导致在轨航天器的数量迅速增加,同时一系列太空试验也产生了大量的空间碎片,对太空环境造成了严重的污染^[1]。数据显示截至 2020 年初,直径超过 10 cm 的太空碎片有接近 3 万个,直径 1~10 cm 之间的危险空间碎片有超过 90 万个^[1]。这些碎片不仅对在轨运行的航天器造成损伤,同时也对卫星通信网络产生影响。激光通信因具有传输容量大、速度快、保密性好、终端设备功耗低等优点,将成为未来卫星网络的必然选择^[2]。同时为了覆盖全球,未来卫星光网络将由近地轨道上的数万颗卫星组成,卫星通过点对点或点对多点激光链路来实现视距通信。但大量的空间碎片将集中在近地轨道附近,碎片的运动会在两颗卫星之间形成三点共线现象,产生遮挡,这种情况将可能导致星间链路暂时中断,进而影响卫星通信服务质量。

针对卫星路由算法的研究, EKICI E 提出一种利用极轨卫星星座覆盖特点的虚拟节点的路由算法^[3],将移动卫星节点之间的路由问题转化为稳定虚拟节点之间的路由问题。文献[4]提出了一种离散时间动态虚拟拓扑路由(Discrete-time Dynamic Virtual Topology Routing, DT-DVTR)算法,将卫星的网络结构按照一定的规律在时间轴上将其划分成为若干个离散的时不变的拓扑,在这些不变的拓扑快照之间进行路由选择,但这两种路由计算方法无法适应卫星网络的实时动态性。文献[5]使用链路传播时延和链路排队时延作为链路代价度量,并提出了一种自适应路由方案,但该方案没有考虑网络拓扑变化的信息。

当网络中出现碎片遮挡引起故障时,数据包往往因为通信路径的断裂而无法继续前向传输,此时需要重路由或者采用一定的动态路由策略来解决。关于卫星网络的故障管理,传统的方法是故障信息收集和全局广播,为路由计算提供基础,然后采用最短路径的方式进行路由计算。此类方式造成的开销较大,同时

基金项目: 重庆市教委科学技术项目(No. KJQN201901125),重庆市科委社会事业与民生保障科技创新专项(No. cstc2017shmsA40019),重庆市基础与前沿研究计划项目(No. cstc2019jcy-msxm X0233),重庆市研究生科研创新项目(No. CYS23667)

第一作者: 曹阳, caoyang@cqut.edu.cn

通讯作者: 邢雯珺, 408723859@qq.com

收稿日期: 2023-08-14; **录用日期:** 2023-10-17

<http://www.photon.ac.cn>

效性较低,对于故障突发没有较好的恢复能力。基于此,LU Yong等提出基于有限状态自动机(Finite State Automata,FSA)的动态容错路由方法^[6]来处理二维网格中节点故障,利用边界扩散和转发协议使得极轨卫星星座的通信故障率降低,但其构建故障区域较复杂且种类繁多,边界需要泛洪扩散的信息也较多,计算复杂度较高。文献[7]提出一种卫星网络链路状态路由(Satellite Networks Link State Routing,SLSR)方案,通过实时采集节点和链路故障信息,应对节点和链路故障异常,但是信息泛洪的开销要远大于原始链路状态算法的开销。QI Xiaoxin等^[8]提出一种适用于倾斜轨道巨型星座的分布式生存路由算法,基于该星座网络拓扑的规律性,选取最小开销确定每对卫星节点对之间的主路径及多条备用路径。根据故障恢复机制,以降低链路故障时的端到端时延和信令开销,但其数据包容易因为拓扑早期的变化而被转发至非最优方案,从而产生更大的开销。赵扬提出了基于逻辑距离的概率分布式数据报路由算法^[9],通过分析某链路故障对网络最小跳数的影响从而衡量其重要程度,保证数据在最少跳数前提下尽可能沿受失效链路影响最小方向前进,考虑负载均衡并提高对链路失效的抵抗能力,但其无法应对网络中实时的链路故障。

本文分析了卫星网络的特点,综合考虑卫星拓扑自身的变化及卫星与空间碎片的位置,星间链路的短暂失效性、链路传播时延等情况。根据相邻卫星的可见性和链路状态信息,利用方向判断,计算相邻卫星间的通信代价,动态地计算一条有效路径,提高通信成功率并减少链路故障导致的重路由。首先给出了卫星网络模型的星座拓扑模型和空间碎片的运动模型,然后提出了一种针对空间碎片干扰的方向增强的链路状态路由(Direction Enhanced-Link State,DE-LS)算法,最后对所提出算法进行了仿真验证及对比。

1 系统模型

1.1 LEO星座网络结构

本文采用如图1所示的极轨星座结构模型^[10]进行研究,极轨星座分为 P 个轨道面,每个轨道面有相同的倾角和相同数量 Q 的卫星,共计 $P \times Q$ 个卫星。所有卫星具有相同的轨道高度,不同轨道面的相同编号的卫星处于同一水平面,所有轨道平面在南北极形成两个交叉点。每个节点都可建立4条星间激光链路(Inter-Satellite Link,ISL),这些ISL在不受干扰的情况下能够获取和跟踪保持链路。

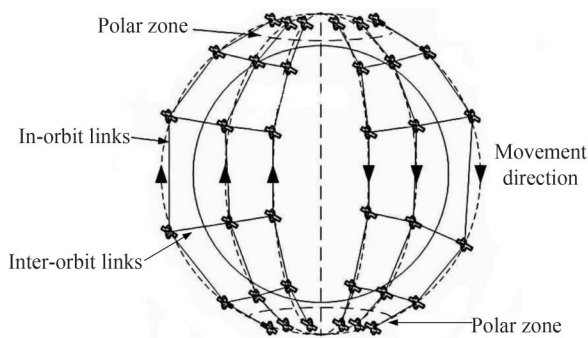


图1 极轨星座结构

Fig. 1 Structure of the polar orbit constellation

对于极轨道卫星网络拓扑结构,轨道内两颗卫星距离 L_v 始终等长,可表示为

$$L_v = \sqrt{2} R \sqrt{1 - \cos\left(\frac{360^\circ}{Q}\right)} \quad (1)$$

式中, R 为轨道半径, Q 为同一轨道面上的卫星数量。

轨道间两颗卫星距离 L_h 是随着节点运动而改变的,可得

$$L_h = b \times \cos l_{at} \quad (2)$$

式中, l_{at} 为轨道面所处的纬度, $b = \sqrt{2} R \sqrt{1 - \cos\left(\frac{360^\circ}{2P}\right)}$ 为轨道面间的距离, P 为轨道面的个数。

根据文献[11],可将极轨道星座结构抽象为如图2所示的二维网络模型结构。为了区别各个卫星节点,给其赋予唯一的地址。用 $\langle m, n \rangle$ 表示某卫星的逻辑地址,其中 m 为轨道面序号, n 为轨道面内卫星的序号,

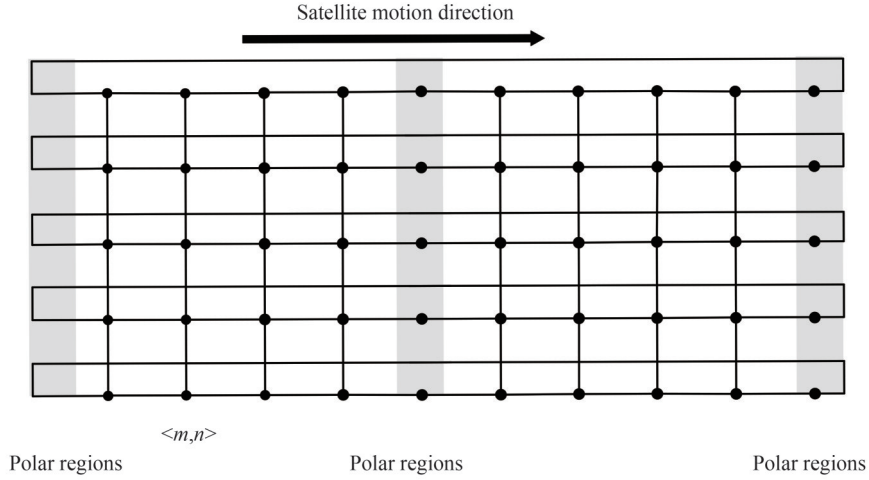


图2 极轨道卫星网络二维拓扑结构

Fig. 2 Two-dimensional topology of polar orbiting satellite networks

从源卫星A到目的卫星B的路径可定义为 $P(\langle m_0, n_0 \rangle, \langle m_l, n_l \rangle)$,由节点序列组成,表示为

$$P(\langle m_0, n_0 \rangle, \langle m_l, n_l \rangle) = \{\langle m_0, n_0 \rangle, \dots, \langle m_i, n_i \rangle, \dots, \langle m_l, n_l \rangle\} \quad (3)$$

式中, $\langle m_i, n_i \rangle$ 表示当前经过的节点的地址, i 表示当前卫星的编号,路径上每增加一跳,会使 m 或者 n 改变数值“1”。

二维网络中两点之间的一个路径集合包含了纵向连接集合和横向连接集合。映射到卫星场景,纵向连接即轨道面内纵向星间链路,横向连接即轨道面间的侧向星间链路。故可将源卫星与目的卫星间的路径跳数 $H(P(\langle m_0, n_0 \rangle, \langle m_l, n_l \rangle))$ 定义为

$$H(P(\langle m_0, n_0 \rangle, \langle m_l, n_l \rangle)) = \sum_{i=1}^{l-1} (|m_{i+1} - m_i| + |n_{i+1} - n_i|) \quad (4)$$

1.2 空间碎片运动模型

低轨卫星周围聚集的空间碎片围绕地球旋转运动,假设地球是一个点的质量天体,围绕地球运行的物体的质量可以忽略不计。忽略地球引力场和环境扰动中的高阶效应,在地心地固坐标系(Earth-Centered, Earth-Fixed, ECEF)中,可以通过轨道六要素计算得到空间碎片的位置及速度。由天体运动规律^[12],在近焦点坐标系中,通过开普勒模型进行求解可得空间碎片的位置 r_p 和速度 v_p 分别为

$$r_p = \left[\frac{a(1-e^2)\cos\varphi}{1+e\cos\varphi}, \frac{a(1-e^2)\sin\varphi}{1+e\cos\varphi}, 0 \right] \quad (5)$$

$$v_p = \left[\sqrt{\frac{GM}{a(1-e^2)}}(-\sin\varphi), \sqrt{\frac{GM}{a(1-e^2)}}(e+\cos\varphi), 0 \right] \quad (6)$$

式中, a 为半长轴, e 为偏心率, φ 为真近地点角, GM 为地球引力常数,取值为 $398\,603 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 。将位置和速度换算至ECEF系中,任一点可用 (x, y, z) 表示,空间碎片换算之后的坐标为

$$x = (\cos l \cos \omega - \sin l \sin \omega \cos \theta_a, -\cos l \sin \omega - \sin l \cos \omega \cos \theta_a, \sin l \sin \theta_a) \quad (7)$$

$$y = (\sin l \cos \omega + \cos l \sin \omega \cos \theta_a, -\sin l \sin \omega + \cos l \cos \omega \cos \theta_a, -\cos l \sin \theta_a) \quad (8)$$

$$z = (\sin \omega \sin \theta_a, \cos \omega \sin \theta_a, \cos \theta_a) \quad (9)$$

式中, l 为升交点赤道经度, ω 为近地点辐角, θ_a 为轨道倾角。将式(7)、(8)、(9)带入 $R=(x, y, z)$,再将 R 带入式(10)和式(11)中,得到空间碎片在ECEF系中的位置 r_E 和速度 v_E 分别为

$$r_E = Rr_p \quad (10)$$

$$v_E = Rv_p \quad (11)$$

通过方程的四阶龙格-库塔数值积分迭代来得到位置和速度与时间的关系,表示为

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}h(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ K_1 = f(y_n, t_n) \\ K_2 = f\left(y_n + \frac{1}{2}hK_1, t_n + \frac{1}{2}h\right) \\ K_3 = f\left(y_n + \frac{1}{2}hK_2, t_n + \frac{1}{2}h\right) \\ K_4 = f(y_n + hK_3, t_n + h) \end{cases} \quad (12)$$

式中, t_n 表示时间, y_n 表示某个时刻的碎片的位置和速度。利用式(10)和式(11)中的数值表示得到 $y_n = (r_E(1), v_E(1), r_E(2), v_E(2), r_E(3), v_E(3))$, 随着时间的变化进行位置和速度矢量值的更新和迭代, 用于分析碎片与卫星之间的相对位置, 进行星间可见性分析。

2 路由算法原理

为了更好地适应星座拓扑及链路信息的动态变化, 采用动态路由算法。网络中出现的碎片遮挡只是暂时导致卫星之间处于不可见的状态, 基于此, 本文提出了方向增强的链路状态(DE-LS)算法, 通过实时收集的链路状态信息, 引入方向影响因子(Directional Impact Factor, DIF)和方向增强指数(Directionally Enhanced Index, DEI), 以DEI、DIF及卫星参数来计算链路代价, 从而影响数据包在每一跳的方向指向, 能够规避空间碎片对链路的暂时遮挡造成的通信中断情况, 进行更稳定地星间通信。

2.1 方向影响因子

根据源-目的卫星相对位置提出了方向影响因子, 在一次任务传输过程中方向影响因子只在开始时进行赋值, 用来在数据包的转发过程中辅以方向判断, 为了避免形成环路而使传输陷入死循环。传播方向可分为直线和斜线传播(如图3), 直线传播时地址中 $\langle m, n \rangle$ 只改变其中的一个值, 而斜线传播时 $\langle m, n \rangle$ 中两个值将都会发生改变。

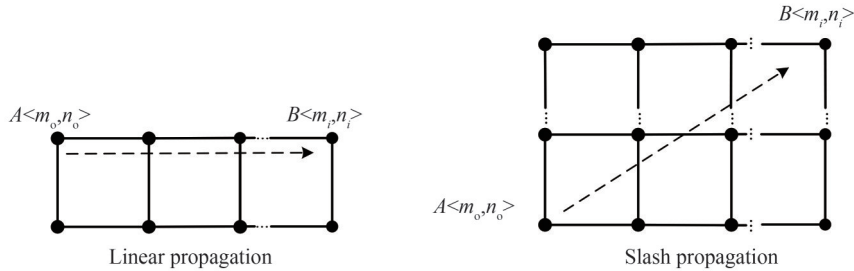


图3 源-目的节点数据传播方向图

Fig. 3 Source-destination node data propagation direction diagram

方向影响因子(DIF)由四个值构成, 用 $\{N, S, W, E\}$ 表示, 其初始值均为0, 可通过计算源卫星与目的卫星间地址的变化得到。表1和表2给出了两种传播方向下的源-目的卫星地址值的变化与方向影响因子中产生变化的值的关系, 没有变化的值为0。表中地址 $\langle m, n \rangle$ 的变化量由 n_i 和 m_i 表示, 记为 $n_i = n_i - n_o$, $m_i = m_i - m_o$, $\langle m_o, n_o \rangle$ 为源卫星节点的地址, $\langle m_i, n_i \rangle$ 为目的卫星节点的地址, Q 为每个轨道面上卫星的数量, P 为轨道面的数量。

表1 直线方向传播
Table 1 Linear propagation

Address status	$m_i = 0 \ \& \ n_i > 0$		$m_i = 0 \ \& \ n_i < 0$		$m_i > 0 \ \& \ n_i = 0$		$m_i < 0 \ \& \ n_i = 0$	
	$n_i \geq 0.5Q$	$n_i < 0.5Q$	$-n_i \geq 0.5Q$	$-n_i < 0.5Q$	$m_i > 0.5P$	$m_i \leq 0.5P$	$-m_i > 0.5P$	$-m_i \leq 0.5P$
DIF	$N=1$	$S=1$	$S=1$	$N=1$	$W=1$	$E=1$	$E=1$	$W=1$

表2 斜线方向传播
Table 2 Slash propagation

Address status	$m_i > 0 \& n_i > 0$				$m_i > 0 \& n_i < 0$			
	$n_i \geq 0.5Q$		$n_i < 0.5Q$		$-n_i \geq 0.5Q$		$-n_i < 0.5Q$	
	$m_i > 0.5P$	$m_i \leq 0.5P$	$m_i > 0.5P$	$m_i \leq 0.5P$	$m_i > 0.5P$	$m_i \leq 0.5P$	$m_i > 0.5P$	$m_i \leq 0.5P$
DIF	$N=1, W=1$	$N=1, E=1$	$S=1, W=1$	$S=1, E=1$	$N=1, W=1$	$N=1, E=1$	$S=1, W=1$	$S=1, E=1$

Address status	$m_i < 0 \& n_i > 0$				$m_i < 0 \& n_i < 0$			
	$n_i \geq 0.5Q$		$n_i < 0.5Q$		$-n_i \geq 0.5Q$		$-n_i < 0.5Q$	
	$-m_i > 0.5P$	$-m_i \leq 0.5P$	$-m_i > 0.5P$	$-m_i \leq 0.5P$	$-m_i > 0.5P$	$-m_i \leq 0.5P$	$-m_i > 0.5P$	$-m_i \leq 0.5P$
DIF	$N=1, E=1$	$N=1, W=1$	$S=1, E=1$	$S=1, W=1$	$N=1, E=1$	$N=1, W=1$	$S=1, E=1$	$S=1, W=1$

2.2 方向增强指数

根据网络特性结构,将整个系统网络拆解成单个的“十字路口”形状的单节点元,如图4。用 A 表示方向增强指数, A 是由四个方向的卫星可见性数值组成的数组,可见时取值为1,不可见时取值为0,用 $\{A_N, A_S, A_W, A_E\}$ 表示,其中下标表示方向。每个节点的 A 值都在时间 t 内进行刷新,用于辅助核算链路代价,来判定数据包下一跳的转发方向。

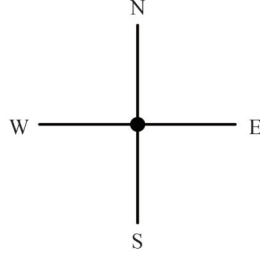


图4 单节点元
Fig. 4 Single-node element

由式(12)得到碎片的位置坐标以及卫星的当前位置坐标,记两个卫星坐标和碎片坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$,带入式(13)中进行三点共线判断。当 $d=0$ 时,三点共线,星间不可见,对应的 A 取值为0;反之,对应的 A 取值为1,从而得到卫星之间的可见性数据。

$$d^2 = (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2 - \frac{[(x_2 - x_1)(x_3 - x_1) + (y_2 - y_1)(y_3 - y_1) + (z_2 - z_1)(z_3 - z_1)]^2}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (13)$$

2.3 链路代价

根据网络最优化理论,考虑到拓扑本身的持续变化和碎片的暂时遮挡,需要选择能反映网络的动态性的链路代价度量及时反映激光链路状态。故选取DEI、DIF和链路距离来设定链路代价,单条链路的链路代价 L 可表示为

$$L = \begin{cases} \theta \times S + \partial \times T, A_i = 1 \\ \partial \times S + T, A_i = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\theta = (A_i \oplus i) + \Delta\epsilon$, $i \in \{N, W, S, E\}$, $\partial + \theta = 2$, A_i 为当前时刻的该方向链路的DEI值, \oplus 为异或运算, $\Delta\epsilon$ 取 10^{-15} , S 为端到端距离, T 为端到端传输时延, $T = \frac{S}{c}$, c 为光速。

对于任意节点,在某个方向的DEI和DIF相同的情况下,链路代价会比较小,则会优先选择方向影响因子所指示的方向;当某方向的影响因子和增强指数不同的情况下,此时将要进行数据包的绕路,此时将以传输时延更低的方向作为数据的转发方向。

对于整个传输过程而言,传输的总代价记为 $L_s = \sum_{j=1}^{j=n} L_j$,其中 j 为走过的每条路径的序号。

2.4 路由决策算法实现

极轨道星座的每个轨道面上卫星均匀分布,因此轨道面内的纵向星间距离是一致的。文献[13]中经过推导及仿真验证,在极轨星座中,最短传播时延路径属于最小跳数路径。因此本研究的目的是在空间碎片干扰造成链路短暂不可用的情况下,利用方向判断,选择链路距离及传输时延作为指标影响链路代价,选择传输性能更优的路径,以跳数作为评价通信性能的优劣。算法主要分为以下步骤:

1)初始化。根据极轨卫星网络的拓扑,得到初始时刻对应的卫星网络拓扑的邻接矩阵,包括卫星之间可见性、卫星经纬度及相关的坐标参数。

2)卫星编址及确定DIF。按照轨道面和卫星个数,为每个卫星分配唯一的不变的逻辑地址 $\langle m, n \rangle$,计算源卫星和目的卫星之间的地址变化得到DIF值,且在一次传输过程中不进行改变。

3)计算链路代价的 $L(t)$ 。考虑碎片对卫星的遮挡计算得到当前时刻卫星之间的可见性、DIF和DEI及链路距离,得到在数据包到达某点时的四条链路代价。

4)路由选择。利用步骤3)中计算得到的代价选取在当前时间两卫星之间的最小代价的转发路径及方向,并进行数据转发。

5)循环执行。在数据到达下一颗卫星时重复执行步骤3)和4),直至到达目的节点,结束本次传输,输出路径、传输总时延及总跳数。

上述动态路由实现流程如图5。

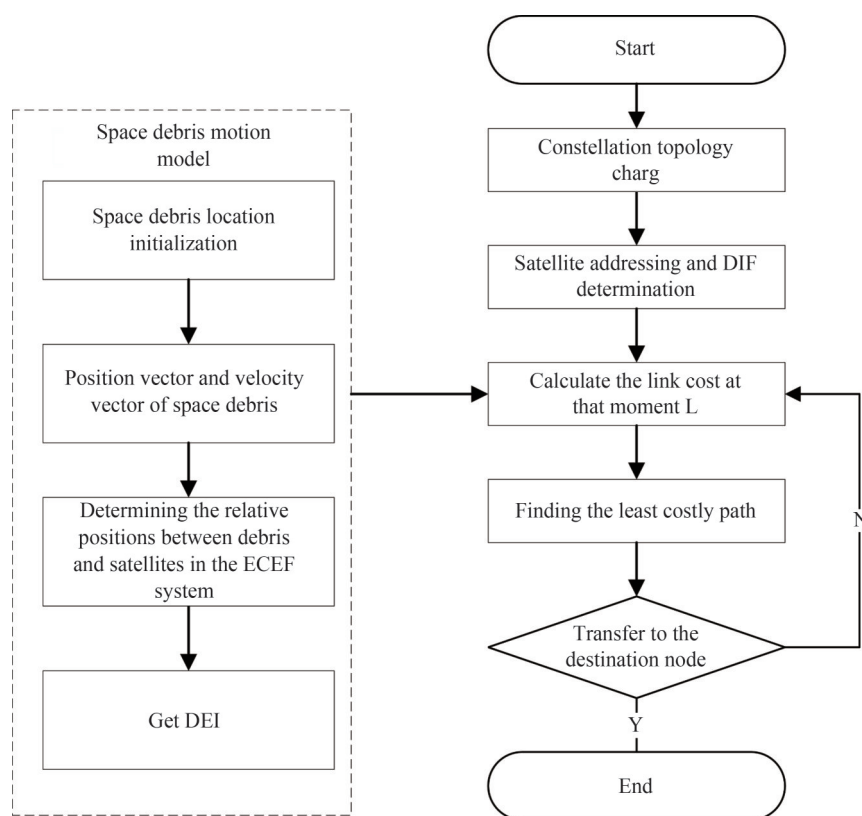


图5 DE-LS算法流程

Fig. 5 Flowchart of the DE-LS algorithm

3 仿真验证

3.1 仿真环境设定

在卫星仿真软件STK上建立Walker48星座通信(星座参数48/6/30:1 400 km)的网络模型,环境参数如表3。通信系统网络拓扑如图6,各个卫星的运动轨迹如图7,极区边界为 70° 。

表3 仿真环境参数设置
Table 3 Simulation environment parameter setting

Parameters	Numerical value
Satellite orbit altitude	1 400 km
Number of orbits/ M	6
Number of satellites per orbit/ N	8

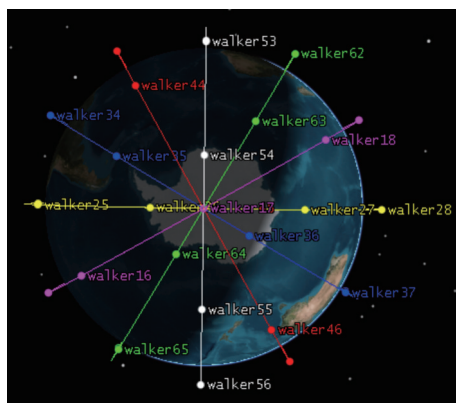


图6 48/6/30星座模型结构
Fig. 6 48/6/30 Constellation model structure

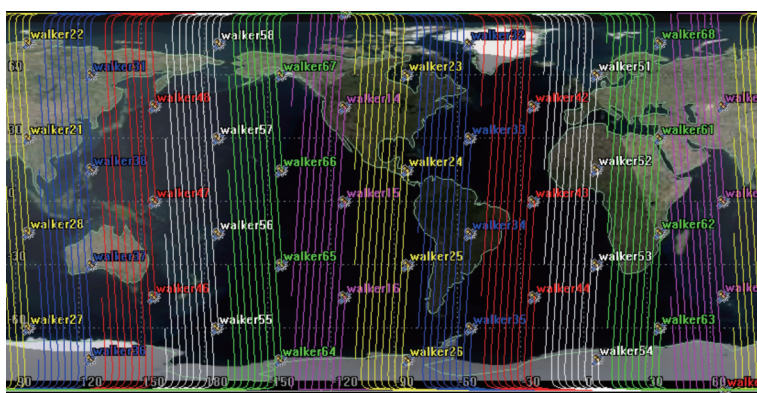


图7 极轨道卫星网络各卫星运动轨迹
Fig. 7 Trajectories of the satellites of the polar orbiting satellite network

3.2 仿真结果分析

根据文献[14],将碎片对链路的影响分为三种风险,通过机器学习分类得到3%左右的碎片会使链路处于高风险状态。基于现有3万个碎片(尺寸超过10 cm)的数量,为了简化计算,设定仿真环境中为1 000个空间碎片,对他们进行跟踪,若与两颗卫星出现共线,则认为对通信系统带来高风险,本文不再做过多的区分。图8为仿真得到的1 000个碎片的某时刻的位置。

碎片的轨迹是不规律的,有可能会存在多个碎片对同一链路产生干扰,从碎片角度进行跟踪,由得到的坐标判断星间可见性。图9为某一时刻网络中95条链路的可用情况,在该时刻整个网络中因为碎片遮挡导致失效的链路占到10%左右。

为了分析源-目的卫星的相对位置关系对路由性能的影响,选取同轨道理论最小跳数为4跳及异轨道理论最小跳数为7跳的卫星节点进行通信。以同轨道21号卫星与25号卫星、异轨道21号卫星与55号卫星为例,进行两次星间通信,仿真时间为15 min,每隔1 min任务传输一次。为了体现方向增强算法能够减轻链路故障带来的影响,选取同样是求解最短路径的Dijkstra与DE-LS算法进行跳数和时延的对比,用来评估通信质量。

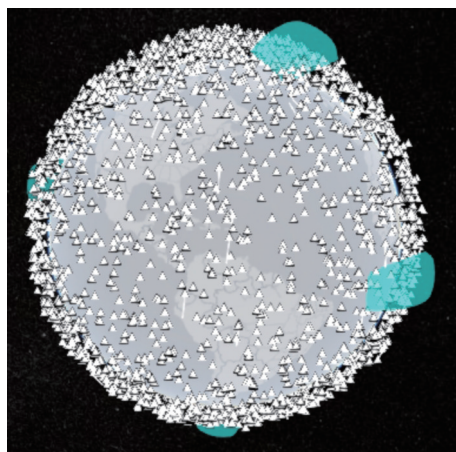


图8 某时刻碎片的运动状态

Fig. 8 The state of motion of a fragment at a moment

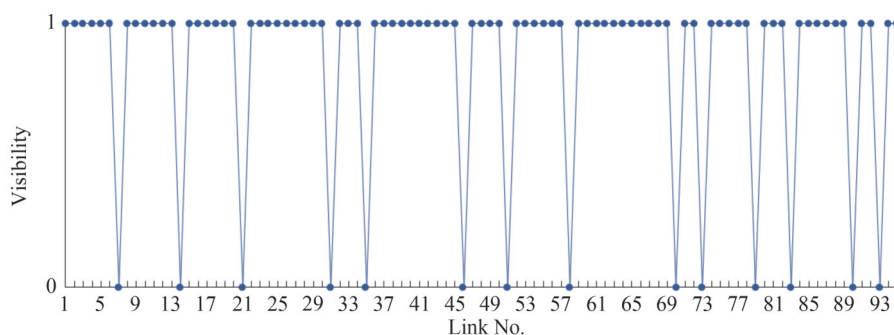


图9 某时刻网络中95条链路的可用情况(卫星之间可见性)

Fig. 9 Visibility of 95 links in the network at a given moment (inter-satellite visibility)

图10给出了采用Dijkstra算法情况下,21号卫星在执行同轨道传输和异轨道传输的起始时刻与相邻四个卫星通信的链路代价情况,对于Dijkstra算法而言,只认定链路距离为指标。其代价的取值不会随着传输任务的不同而改变。

图11给出了采用DE-LS算法时,21号卫星在执行同轨道传输和异轨道传输的起始时刻与相邻四个卫星通信的链路代价情况。对比图10可以看出,即使是同个卫星节点在同一时刻完成不同任务传输时,由于引入了方向影响因子和方向增强指数,得到的链路代价是不一样的。同轨道面的卫星进行直线传播(21号与25号卫星通信)时,与31号和11号卫星的数据转发方向不是理论最短路径的传输方向,因此链路代价较高;而28号和22号卫星的数据转发方向均是理论最短路径的传输方向,且与28号卫星通信的链路代价比与22号卫星通信的链路代价小很多,可以看出是方向选择的结果,与22号卫星的传输方向的链路可能出现了空间碎片遮挡的情况。异轨道面的卫星进行斜线传播(21号与55号卫星通信)时,其方向影响因子 E 和 S 均为1,与28号和11号卫星的数据转发方向不是理论最短路径的传输方向,链路代价较大;而31号和22号卫星均是理论最短路径的传输方向,两条链路代价都很小,表示可能没有出现遮挡,故优先选择时延更低、代价更小的传输方向。

图12和图13分别给出了DE-LS算法和传统Dijkstra算法情况下,两次传输的路由跳数的变化对比。仿真结果显示无论源卫星和目的卫星是否处于同一轨道,DE-LS算法比Dijkstra算法的跳数更少,在Dijkstra算法路由跳数增大的情况下,DE-LS算法也能较好地维持至理论最小跳数,平均比Dijkstra算法的跳数低20%。

同轨及异轨两次任务的传输时延如图14和15。在同轨道面传输中,DE-LS算法的平均传输时延比传统Dijkstra算法低20%;在异轨道面传输中,DE-LS算法的平均传输时延比传统Dijkstra算法低13%。

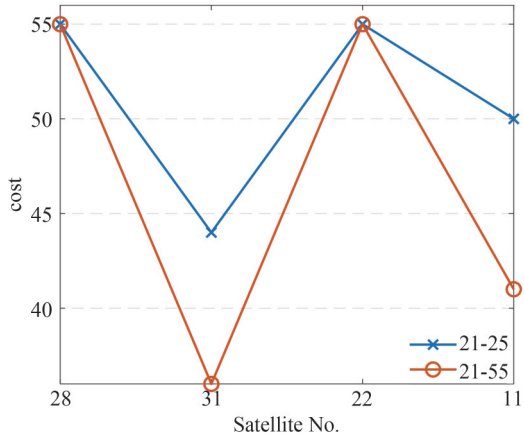


图10 Dijkstra算法下21号卫星与相邻四颗卫星的链路代价
Fig. 10 Cost of satellite 21 with four neighbouring satellites under Dijkstra's algorithm

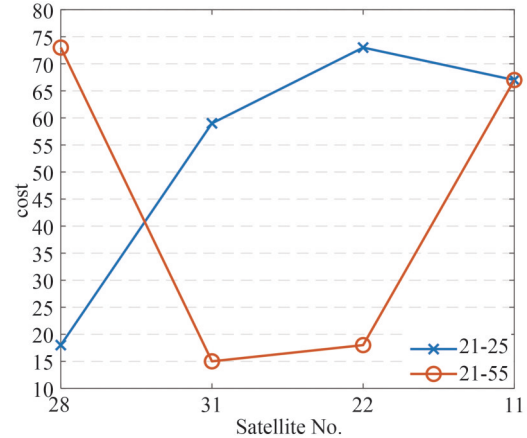


图11 DE-LS算法下21号卫星与相邻四颗卫星的链路代价
Fig.11 Cost of satellite 21 to four adjacent satellites under DE-LS algorithm

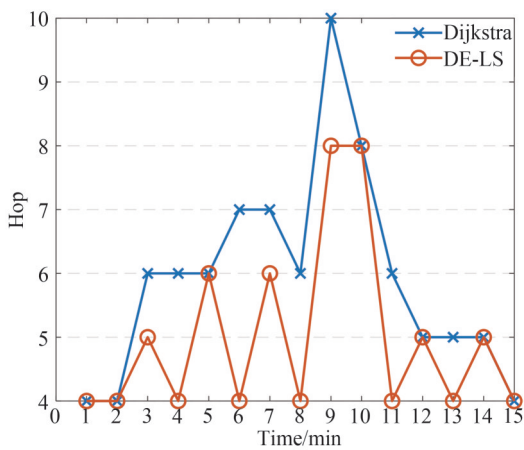


图12 21号卫星与25号卫星路由跳数
Fig. 12 Satellite 21 and Satellite 25 routing hops

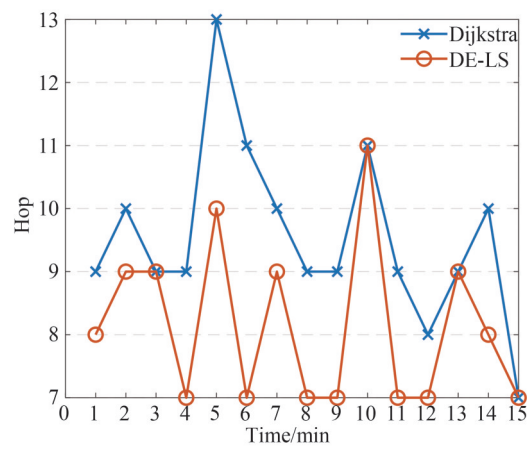


图13 21号卫星与55号卫星路由跳数
Fig. 13 Satellite 21 and Satellite 55 routing hops

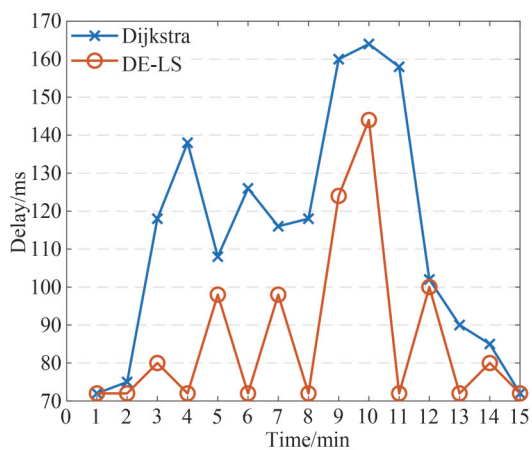


图14 21号卫星与25号卫星传输时延
Fig. 14 Satellite 21 and Satellite 25 transmission time delay

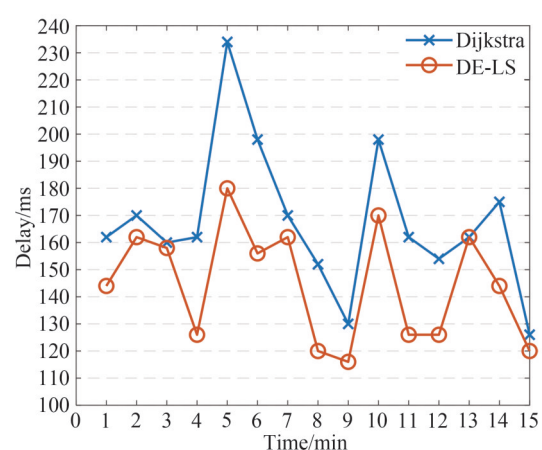


图15 21号卫星与55号卫星传输时延
Fig. 15 Satellite 21 and Satellite 55 transmission time delay

4 结论

考虑到空间碎片及LEO星座的拓扑时变性,在卫星激光通信系统中建立了空间碎片导致星间激光链路中断的环境模型,并提出了一种带有方向增强的链路状态(DE-LS)路由算法。该算法通过碎片的实时位置

来分析星间可见性,在碎片出现遮挡时进行方向增强的数据转发,绕开故障链路。仿真结果表明,该算法的路由跳数能与理论最小跳数基本保持一致,与Dijkstra算法相比跳数降低了14%,传输时延减少了17%。该算法能够在链路中断带来的网络不稳定情况下,不因躲避故障链路而增加路由跳数牺牲通信质量,从而能够增强网络的稳定性。

参考文献

- [1] LEI Yunfan, WANG Long, ZHONG Hongjun, et al. A space-based identification method for space debris based on trajectory consistency detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(11): 271-280.
雷轲璠,王龙,钟红军,等.基于轨迹一致性检测的空间碎片天基识别方法[J].*红外与激光工程*, 2022, 51(11): 271-280.
- [2] REN Weijie, SUN Jianfeng, ZHOU Yu, et al. Multi-system compatible coherent detection technology of satellite laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(12): 1206002.
任伟杰,孙建锋,周煜,等.多体制兼容相干探测卫星激光通信技术[J].*光学学报*, 2023, 43(12): 1206002.
- [3] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2001, 9(2): 137-147.
- [4] WERNER M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(8): 1636-1648.
- [5] MOHORCIC M, WERNER M, SVIGELJ A. Adaptive routing for packet-oriented intersatellite link networks: performance in various traffic scenarios[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 808-818.
- [6] LU Yong, ZHAO Youjian, SUN Fuchun, et al. Dynamic fault-tolerant routing based on FSA for LEO satellite networks [J]. *In IEEE Transactions on Computers*, 2013, 62(10): 1945-1958.
- [7] YAN Hongcheng, ZHANG Qingjun, SUN Yong. A novel routing scheme for LEO satellite networks based on link state routing[C]. *IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering*, 2014: 76-880.
- [8] QI Xiaoxin, ZHANG Bing, QIU Zhiliang. A distributed survivable routing algorithm for mega-constellations with inclined orbits[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 219199-219213.
- [9] ZHAO Yang, FANG Hai, SUN Zhao, et al. Study on the impact of distributed datagram routing link failure in polar orbiting constellations[J]. *Space Electronics Technology*, 2021, 18(3): 36-42.
赵扬,方海,孙召,等.极轨星座分布式数据报路由链路失效影响研究[J].*空间电子技术*, 2021, 18(3): 36-42.
- [10] LIU Yuting. Research on efficient link switching strategies in low-orbit broadband satellite networks [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Microsatellite Innovation, Chinese Academy of Sciences), 2021: 13-21.
刘宇婷.低轨宽带卫星网络中高效链路切换策略研究[D].上海:中国科学院大学(中国科学院微小卫星创新研究院), 2021: 13-21.
- [11] ZHANG Chen. Methodology and performance evaluation of large-scale low-orbit satellite networking [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021: 21-23.
仇陈.大规模低轨卫星组网方法与性能评估[D].南京:南京大学, 2021: 21-23.
- [12] WANG Hongyuan, CHEN Yun. Modeling and simulation of dynamic infrared radiation characteristics of space-based space targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 19-25.
汪洪源,陈贇.天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真[J].*红外与激光工程*, 2016, 45(5): 19-25.
- [13] DUAN Sirui. Research on satellite network routing algorithm based on LEO polar orbit constellation [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
段思睿.基于LEO极轨星座的卫星网络路由算法研究[D].北京:北京邮电大学, 2014.
- [14] MA Zhuangzhuang, ZHAO Yongli, WANG Wei, et al. Adaptive snapshot routing based on space debris risk perception in satellite optical networks[C]. *International Conference on Optical Network Design and Modeling*, 2021: 9492513.

Research on Routing Algorithms for Satellite Optical Networks under Space Debris Interference

CAO Yang, XING Wenjun, PENG Xiaofeng, BAO Chaoyuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: With the advancement of the construction of space, space and ground integrated information networks, satellite communication systems now have a higher requirements for information transmission

rate, satellite node storage capacity, satellite coverage and security. Traditional microwave communication methods are limited by bandwidth, speed, geographical location, spectrum, etc., and will be difficult to meet the ultra-high speed and ultra-large capacity communication requirements of multimedia broadband services for satellite networks. At the same time, laser communications are gradually becoming an important technical means for satellite communications due to its advantages of high transmission rate, high security and reliability, strong confidentiality, small terminal equipment, light weight and low power consumption. To achieve all-round coverage of communication signals, laser networking based on dynamic satellites and the establishment of high-speed, low-latency, high-reliability and large-capacity satellite communication systems will become the future development trend of satellite communication. In the future, space will inevitably gather a large number of products of human space activities, including rockets, satellites, and rocket ejections. As humans develop space, the increase in these space debris will also bring a series of hazards. Existing space debris research mainly focuses on how to avoid collisions with satellites and spacecraft in orbit. In addition, these space debris move randomly in space, which will block point-to-point laser communications. Therefore, more effective research on the reliability of satellite laser communication systems is needed.

In order to solve the problem of inter-satellite link interruption that may be caused by space debris in low-orbit satellite laser communications, this paper proposes a Direction-enhanced Link State (DE-LS) routing algorithm. Firstly, the network topology of satellite communication is built. The polar orbit constellation model is selected. According to the orbital plane and the number of satellites, an initial and constant address is set for each satellite in the polar orbit constellation. Based on the changes in the satellite node addresses of the starting and ending points in different transmission tasks, the Direction Influencing Factor (DIF) is introduced. Then, based on the celestial motion patterns of satellites and space debris in polar orbit constellations. A joint simulation model of space debris and satellites is constructed to obtain the relative positions of satellites and debris at a given moment and to perform inter-satellite visibility analysis.. Based on the inter-satellite visibility data, a Direction Enhancement Index (DEI) is proposed corresponding to the four directions of each node. The direction impact factor and direction enhancement index are combined with the inter-satellite link distance and transmission delay to comprehensively represent the link cost. The cost is used as a measure to select the shortest path, and the shortest path is selected between each pair of satellite nodes in turn, and the number of routing hops is used as the evaluation index. The simulation experiment is carried out in the Walker constellation. Space debris and satellites are jointly modeled and simulated first. Then, in this environment, two situations are selected: the theoretical minimum number of hops in the same orbit is 4 hops and the theoretical minimum number in different orbits is 7 hops. Taking satellite communications No. 21 and No. 25 and satellite No. 21 and No. 55 as examples for routing selection, routing hop count and transmission delay are used as evaluation indicators, and compared with the Dijkstra routing algorithm, which also solves the shortest path. The simulation results show that the DE-LS algorithm can maintain the theoretical minimum number of hops when the link is interrupted. At the same time, it saves 14% of the hops and reduces the transmission delay by 17% compared with the Dijkstra algorithm, which reflects the effectiveness of DE-LS algorithm in avoiding faulty links.

Key words: Laser communications; Satellite routing; Link-state routing algorithms; Space debris

OCIS Codes: 060.0060; 060.4251; 060.2605