



专题：6G 空间互联网

低轨卫星网络的航点分段路由及业务性能分析

赵鑫¹, 赵光¹, 陈睿¹, 王文鼎^{1,2}

(1.南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2.宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 提出一种基于卫星航点的分段路由 (waypoint-segment routing, WSR) 算法, WSR 算法以可预测的卫星网络拓扑运动周期为基础, 根据卫星节点链路状态确定卫星航点的位置; 利用分段路由灵活规划分组传输路径的机制, 提前响应网络拓扑变化, 计算得到一条不受网络拓扑快照切换影响的传输路径。基于 NS-3 仿真平台进行仿真实验, 设置源节点与目标节点在反向缝同侧与不同侧两种场景, 选取优化链路状态路由 (optimized link state routing, OLSR) 算法和最短路径算法与 WSR 进行时延抖动与分组丢失率的对比分析。实验证明 WSR 与 OLSR 相比, 两种场景下最大时延抖动分别降低 46 ms 与 126 ms, 分组丢失率分别降低 30% 和 21%, 并且能够解决拓扑快照切换导致分组传输路径中断的问题。

关键词: 低轨卫星网络; 虚拟拓扑; 极区星间链路; 卫星航点路由; 性能仿真

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023020

Analysis on waypoint-segment routing and performance evaluation for LEO satellite networks

ZHAO Xin¹, ZHAO Guang¹, CHEN Rui¹, WANG Wennai^{1,2}

1. College of Telecommunications & Information Engineering,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor
Network Technology, Ministry of Education, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: A waypoint-segment routing (WSR) algorithm was proposed. Based on the predictable periodicity of the topological changes of satellite network, the location of satellite waypoints based on the link state of satellite nodes at the current moment was determined by WSR algorithm. The mechanism of flexible planning of packet transmission paths was responded by segment routing to changes in satellite network topology in advance, and a packet transmission path that was not affected by network topology snapshot switch was calculated. Simulation experiment was based on the NS-3, and the optimized link state routing (OLSR) algorithm and the shortest path algorithm were se-

收稿日期: 2022-07-12; 修回日期: 2023-01-20

通信作者: 王文鼎, wangwn@njupt.edu.cn

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (No.KYCX21_0724, No.KYCX20_0718)

Foundation Items: The Postgraduate Research and Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX21_0724, No.KYCX20_0718)

lected to compare with WSR in order to analyze the delay jitter and packet loss rate. It was proved that compared with OLSR, the maximum delay jitter of WSR was reduced by 46 ms and 126 ms respectively in the two scenarios, the packet loss rate was reduced by 30% and 21% respectively, and the problem of packet transmission path interruption caused by topology snapshot switching can be solved.

Key words: low earth orbit satellite network, virtual topology, polar ISL, satellite waypoint routing, performance simulation

0 引言

卫星通信系统近年来得到广泛的关注与迅速的发展,其中低地球轨道(low earth orbit, LEO,以下简称低轨)卫星通信系统凭借信号发射功率小、发射成本低以及传输时延低等优点^[1-2],成为全球通信领域的研究热点之一。此外,一些业内专家认为,在6G通信系统中,为了提供全球覆盖应当引入卫星通信,以实现天地空一体化^[3-5]。

从Globalstar系统的48颗卫星,到如今Starlink系统计划的数万颗卫星,为全球用户提供网络接入服务,LEO卫星得到快速的发展^[6]。现代巨型星座卫星使用更先进的调制技术、多波束天线和复杂的频率复用技术,降低了制造与发射成本^[7]。同时,星座结构更加多样化^[8-9],星间拓扑的变动周期更短^[10]。

由于地面网络的路由协议无法直接应用到LEO卫星通信系统上,故为不断演变的动态卫星网络拓扑设计一种有效的路由方法成为当下的热点研究问题。传统的Dijkstra算法通过遍历拓扑中节点的权值来计算得到最短路径,即从源节点到目标节点的分组传输时延最小,但是LEO卫星网络是一种对称网络拓扑,这将导致来自同一节点的多条最短路径可能包含同一条链路^[11],这对动态变化LEO网络拓扑是不利的。然而应用于MANET的优化链路状态路由(optimized link state routing, OLSR)算法能够根据网络拓扑变化做出快速的应对,文献[12]的研究结果表明,OLSR协议应用于LEO卫星

网络中可以有效降低分组传输的总时延,且OLSR协议适用于极地卫星任务。文献[13]在OLSR协议的基础上,根据LEO卫星网络运动周期计算出的每条链路状态,得到更加稳定的传输路径,使得分组丢失率得到显著的改善。文献[14]提出应用于卫星与地面网络结合场景的OLSR优化算法,并做出性能评估。目前,虚拟拓扑(virtual topology, VT)技术成为处理动态网络拓扑的关键技术之一^[15],VT模型依据卫星运动的周期性,将一个时间连续的动态网络拓扑抽象划分成若干张静止的网络拓扑图,每一张静止的拓扑图被称为一张快照^[16],故可以离线计算卫星网络的路由,这降低了对卫星的存储空间与计算能力的要求^[17]。基于VT网络模型技术,文献[18]对分布式星间路由算法做出研究,未考虑拥塞避免的分布式路由算法造成网络拥塞,将导致分组丢失率上升,然而集中式路由算法相对于分布式路由算法收敛速度更快^[19],集中式的分段路由(segment routing, SR)允许源节点将一条或多条指令加在分组的头部,这些指令引导分组沿着一个特定的路径进行传输,即一条通向某个目的节点的路径通过在中间添加航点而被分割成若干段^[20],与传统的网络架构相比,SR更具有灵活性、可扩展性^[21],这更加有利于解决动态LEO网络的路由问题。

另外,星载硬件设备小型化和计算能力的增强,推动了LEO卫星的发展。Starlink、OneWeb和Telesat等已在卫星中部署小型硬件设备,其端到端传输时延及可靠性的需求,成



为现代巨型星座技术的核心问题之一^[22]。分组在传输过程中发生网络拓扑快照切换导致分组传输路径断开，会造成路由重计算，即分组在该中间节点将会有短暂的等待时间，继而总时延增加，这对通信质量造成了严重的影响，而拓扑快照切换后，同时路由收敛完成，传输时延会恢复正常。因此，网络拓扑快照切换前后时间段内会出现严重的抖动现象，而先验式路由协议 OLSR 与目的节点序列距离矢量协议都具有较好的鲁棒性，因此能够适应具有抖动特性的 LEO 卫星网络^[23]，但不能完全解决该问题，且目前 LEO 卫星数量急剧增加使得拓扑快照数量急剧增加^[24]，故高频率的拓扑快照切换导致时延抖动更加频繁。

本文提出一种基于卫星航点的分段路由 (waypoint-segment routing, WSR) 算法用于解决卫星网络拓扑快照切换前后路由中断问题，并进一步改善时延抖动问题。仿真实验选择 OLSR 算法、Dijkstra 算法与 WSR 进行性能对比，选取分组丢失率来分析拓扑快照切换前后是否出现传输路径中断的问题，并且为了进一步观察时延抖动改善程度，选择分组端到端时延作为性能评价指标。

1 低轨卫星网络路由中断问题

1.1 星间链路特征

LEO 卫星网络拓扑如图 1 所示，空心圆点代表卫星，卫星在轨道上向极区方向运动。每颗卫星与前后左右的 4 颗卫星通过星间链路 (inter satellite link, ISL)^[25] 连接，同一轨道内的链路称为轨内星间链路，相邻轨道间的链路称为轨间星间链路。

LEO 卫星运动过程中，轨内 ISL 始终保持连接状态，轨间 ISL 却会出现断开与恢复的现象。相邻轨道的两颗运动方向相同的卫星在向极区方向运动时，两颗卫星之间的距离不断缩

小^[26]，因为 ISL 通过卫星天线的不断转动调整来保持连接状态，故为了适应两颗卫星之间不断缩小的距离，卫星天线的旋转角速度将会随之增大。但因为天线无法承受过大的角速度，因此卫星天线旋转角速度达到某一阈值，即卫星进入极圈时会关闭轨间 ISL，与相邻轨道卫星断开连接，在出极区时恢复连接。图 1 中卫星 S_1 与 S_2 、 S_2 与 S_3 之间的虚线代表卫星即将通过极圈而将要关闭的轨间 ISL，称为极区 ISL。LEO 卫星网络拓扑中相邻轨道上卫星反向运动时，两轨道间的区域称为反向缝，图 1 中反向缝两侧上的卫星高速相对运动，故反向缝两侧上的卫星之间无法建立 ISL^[27]。

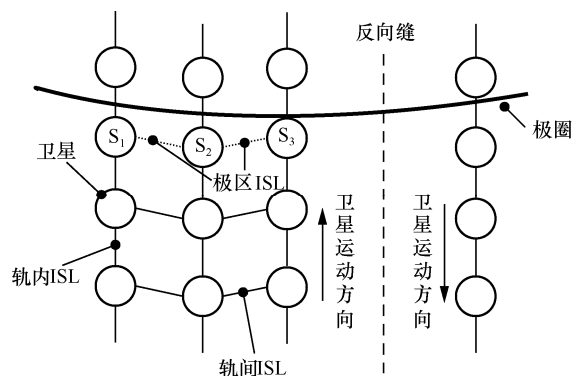


图 1 LEO 卫星网络拓扑

1.2 星间路由中断问题分析

分组在 ISL 上传输过程中发生网络拓扑快照切换，会导致路由中断。 t_0 时刻与 t_0+T 时刻的网络拓扑快照对比如图 2 所示，源节点 S 向目标节点 D 沿着箭头线所指的两条传输路径传输分组。其中，下一个为 next，继续为 continue，压入为 push。源节点 S 到目标节点 D 的传输路径见表 1，路径 1 因为存在 2-3 与 3-D 极区 ISL，在发生拓扑快照切换后，该路径发生中断。即图 2 中， t_0+T 时刻网络拓扑快照中的两条链路 e_1 与 e_2 断开，而路径 2 则在拓扑快照切换后未受影响。故可以认为一次通信过程中某个时间点发生网络拓扑快照切换，若此次通信的分组

传输路径包含极区 ISL, 则必将发生路由中断, 导致路由重计算, 增加某一分组的总时延, 造成抖动问题。

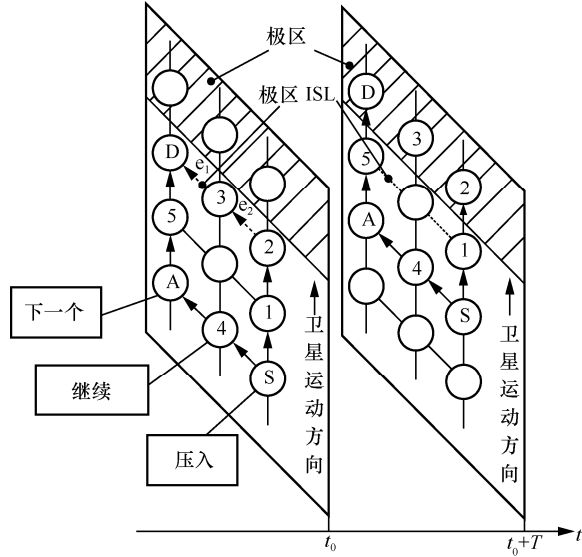


图2 t_0 时刻与 t_0+T 时刻的网络拓扑快照对比

表1 源节点 S 到目标节点 D 的传输路径

路径	传输路径	t_0 时刻路径状态	t_0+T 时刻链路状态
路径1	S-1-2-3-D	未中断	中断
路径2	S-4-A-5-D	未中断	未中断

2 WSR 算法描述

文献[20]指出 SR 算法是基于松散源路由的概念, 分组头部加入的单条指令被称为段指令 (segment), 多条有序的指令序列称为 segment 列表, 每个 segment 可以执行一个拓扑需求, 例如命令分组传输路径必须包含某一个具体的节点。现行的多协议标签交换 (MPLS) 技术, 通过标签分配协议 (LDP) 在所有中间节点完成分组标记和转发控制, 并结合流量工程扩展的资源预留 (RSVP-TE) 协议实现网络资源分配和业务质量保障。相比而言, SR 仅需在 SR 域中的入口节点保持逐流 (per-flow) 状态并对传输路径上的节点编号 Node-SID 与链路编号 Adj-SID 操作即可, 而其他 SR 路由器根据 SID 转发分组, 无

须了解数据包的其他信息^[28]。SR 操作功能描述见表2。

表2 SR 操作功能描述

操作	功能描述
压入	插入 segment, 并将指针指向它
继续	当前 segment 保活, 节点不处理 segment 列表
下一个	segment 指针指向下一条 segment, 当前 segment 完成

文献[26]指出, 现代 LEO 卫星通信的星座规模变大, 卫星不仅需要完成中继转发, 还需要具有路由计算能力。除此之外, LEO 卫星网络拓扑变化具有固定的周期, 因此可以计算出所有 LEO 卫星在任何时刻的具体位置, 即可以计算出任意一条 ISL 变成极区 ISL 的时刻。WSR 算法在 LEO 卫星网络路由计算中使用 SR 算法机制, 分组传输过程中, 传输路径中的某条或某几条 ISL 变成极区 ISL, 为了避免在拓扑快照切换后出现路由中断, 可在节点中 push 相应的 segment, 从而规避极区 ISL, 以维持正常业务流传输。图2中, 源节点 S 根据 t_0 时刻网络拓扑信息, 判定路径1包含 e_1 、 e_2 两条极区 ISL, 便执行 push 操作, 即将节点 A 与目标节点 D 的 Node-SID 插入分组头部。分组到达节点4被执行 continue, 即节点4不处理当前 segment 列表。到达节点 A 后, 执行 next 操作, 即指针指向下一条 segment, 代表当前 segment 完成并向目标节点 D 传输分组。由此分组可沿路径2传输, 绕开极区 ISL, 即当前分组的传输路径不会受到网络拓扑快照切换的影响。

2.1 LEO 卫星航点的确定

通过上述可知 WSR 算法的关键在于确定卫星航点, 由卫星网络拓扑运动的周期性, 可计算出任意时刻的卫星节点及 ISL 的位置。因此, 可以根据源节点 S 或目标节点 D 在当前时刻的位置, 寻找航点以确定新的分组传输路径, 有效避开极区 ISL, 以保证在快照切换时刻正在传输分组的路径不受影响。



2.1.1 源节点与目标节点在反向缝同侧情况

源节点 S 与目标节点 D 在反向缝同侧的情况下，在 S 或 D 所在的轨道上沿着卫星运动的反方向，在极区外找一个不与极区 ISL 相连的节点作为航点，为保证传输路径最小，通常选择距离 S 或 D 最小的节点。 S 与 D 确定航点的方法相同，用 S 进行说明。源节点 S 确定航点示意图如图 3 所示，表示源节点 S 所在位置的 3 种情况，虚线代表极区 ISL，卫星向极区方向运动。

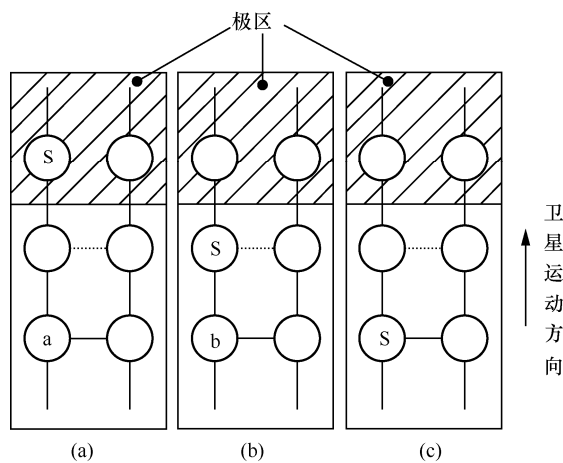


图 3 源节点 S 确定航点示意图

图 3 (a) 中 S 位于极区内且未到达极点，为保证传输路径不受快照切换影响，从 S 发出的分组前两跳必须是轨内 ISL，即选择 a 作为 S 的航点；同理，图 3 (b) 中 S 与极区 ISL 相连，从 S 发出的分组第一跳必须是轨内 ISL，即选择 b 作为 S 的航点；而图 3 (c) 中， S 的轨间 ISL 不会受下次拓扑快照切换的影响，故不需要为其寻找航点确定新路径。

2.1.2 源节点与目标节点在反向缝两侧情况

源节点 S 与目标节点 D 分别在反向缝两侧的情况下，需分别对 S 与 D 进行航点确定。在 S 所在轨道上沿着卫星运动方向和卫星运动的反方向，分别在反向缝的另一侧找到第一个不与极区 ISL 连接的两个卫星节点作为节点 S 的备选航点，

并选择距离节点 S 跳数较小的备选航点作为其最终的航点。源节点 S 与目标节点 D 确定航点示意图如图 4 所示，在节点 S 所在轨道上，从节点 S 开始沿着箭头方向找到备选航点 f 与 b 。从节点 S 到节点 f 为 5 跳，到节点 b 为 4 跳，故最终选择节点 b 为节点 S 的航点。

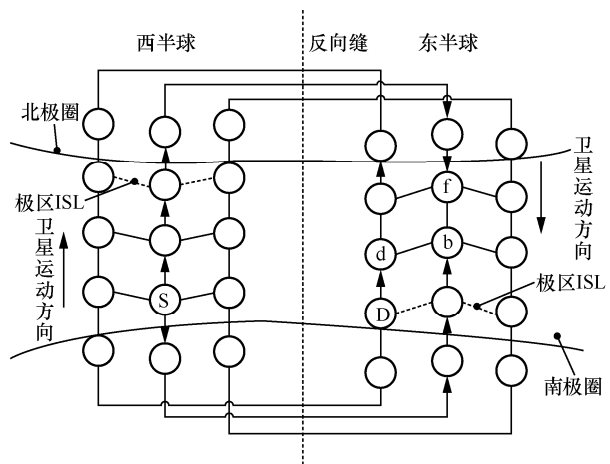


图 4 源节点 S 与目标节点 D 确定航点示意图

在反向缝的另一侧确定了源节点 S 的航点后，根据目标节点 D 当前的位置确定是否需要为其确定航点。图 4 中节点 D 与极区 ISL 相连，这与图 3 (b) 相符，故将节点 d 作为节点 D 的航点。

2.2 算法流程

WSR 算法用于解决网络拓扑快照切换而导致传输路径中断的问题。在发送每个分组前，根据 LEO 卫星网络拓扑的周期，计算出各个卫星节点的位置，判断当前时刻 Dijkstra 算法计算出的分组传输路径是否包含极区 ISL，若包含则通过 WSR 算法找到航点，确定新的传输路径发送分组。WSR 算法流程如图 5 所示，其函数功能解释见表 3。

算法执行步骤如下。

步骤 1: 首先输入源节点 S 、目标节点 D 与一个用于存储航点的集合 W (初始为空)，并判断 S 与 D 的运动方向是否一致，运动方向一致可说

表3 函数功能解释

函数名称	功能描述	返回结果与含义
Dir(K)	获取卫星 K 运动方向	0: 由北向南 1: 由南向北
POS(K)	(1) 获取卫星 K 纬度 (2) 判断卫星是否在极区	0: 纬度大于 66° 1: 纬度小于 66°
BACKW(K)	在卫星 K 的轨道上沿运动反方向寻找航点	w: 航点编号
OVERF(K)	在卫星 K 的轨道反向缝另一侧确定寻找航点	w: 航点编号

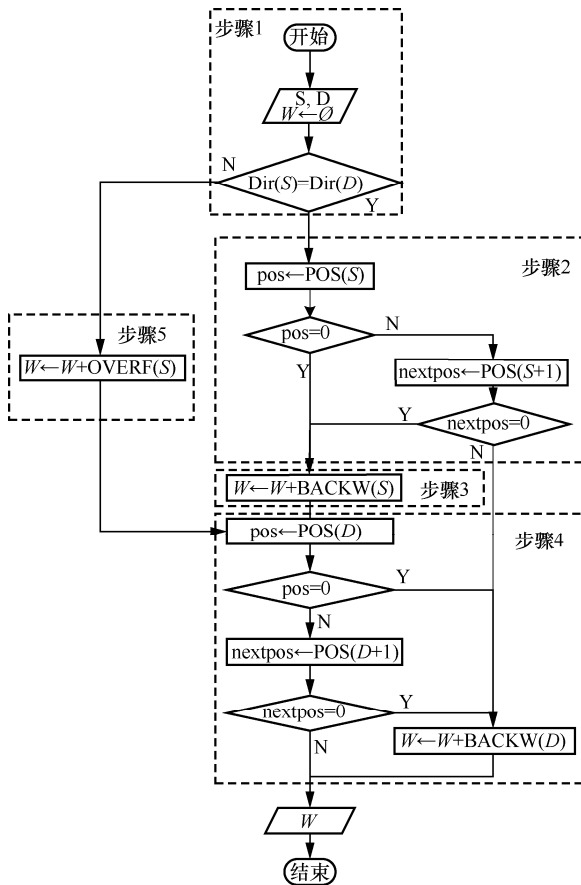


图5 WSR 算法流程

明 S 与 D 在反向缝同侧，反之则在不同侧。Dir(S) 与 Dir(D) 返回结果代表 S 与 D 的运动方向，运动方向一致执行步骤 2，不一致则执行步骤 5。

步骤 2: 通过 POS(S) 获取 S 的纬度位置信息，判断是否大于极圈纬度 66° ，用 bool 型变量 pos 存储判断结果。pos 为 0，即 S 位于极区内需为其寻找航点；pos 非 0，即 S 处于极区外，但仍需要确定 S 运动方向的前一个卫星节点 S+1 的纬度位

置，判断 S 在下一张拓扑快照中是否在极区内。POS(S+1) 执行判断结果存储于 nextpos 中，若 nextpos 为 0，即 S+1 在极区内，说明 S 在下一张拓扑快照中在极区内，即当前时刻 S 的轨间 ISL 为极区 ISL，需要为其寻找航点，执行步骤 3，为 S 寻找航点；若 nextpos 非 0，即 S+1 不在极区内，说明 S 在下一张拓扑快照中不在极区内，则执行步骤 4 直接为 D 寻找航点。

步骤 3: 通过 BACKW(S) 在 S 所在轨道上沿着卫星运动反方向寻找航点，并存储于集合 W 中，BACKW(S) 算法伪代码如算法 1 所示，其中 tempS 为存储卫星节点编号的临时变量， N_{sat} 为一个轨道上的卫星数量。

算法 1 BACKW(S) 算法

输入：节点编号 S

输出：航点编号 w

- (1) while POS(S) == 0 do
- (2) tempS ← S mod N_{sat}
- (3) if tempS == 0 then
- (4) S ← S + $N_{\text{sat}} - 1$
- (5) else S ← S - 1
- (6) end if
- (7) end while
- (8) w ← S - 1
- (9) return w

步骤 4: 通过 POS(D) 与 POS(D+1)，判断是否需要为 D 寻找航点，判断逻辑与步骤 2 中是否需要为 S 寻找航点的判断逻辑相同。若需要，则



通过 BACKW(D) 在 D 所在轨道上沿着卫星运动反方向寻找航点, 存储于集合 W 中, 并结束流程。

步骤 5: S 与 D 运动方向不一致的情况下, 即 S 与 D 在反向缝两侧时, 需通过 OVERF(S) 在 S 所在轨道上, 沿着 S 运动反方向在反向缝的另一侧确定两个不在极区的备选航点 f 与 b , 并比较 S 到 f 的跳数 $\text{Pa}(S, f)$ 与到 b 的跳数 $\text{Pa}(S, b)$, 选取距离 S 较短的备选航点作为其最终的航点并存储于 W 中, 再执行步骤 4。函数 OVERF(S) 的算法伪代码如算法 2 所示, 其中 S^* 用于沿卫星运动方向执行遍历使用, j 与 i 分别用于记录正向遍历与反向遍历执行次数。

算法 2 OVERF(S) 算法

输入: 节点编号 S

输出: 航点编号 w

```

(1)   $S^* \leftarrow S, i \leftarrow 0, j \leftarrow 0$ 
(2)  while  $\text{POS}(S) \geq \text{POS}(S - 1)$  do
(3)      temp  $S \leftarrow S \bmod N_{\text{sat}}$ 
(4)      if temp  $S == 0$  then
(5)           $S \leftarrow S + N_{\text{sat}} - 1$ 
(6)      else  $S \leftarrow S - 1$ 
(7)      end if
(8)       $i \leftarrow i + 1$ 
(9)  end while
(10)  $f \leftarrow S - 2$ 
(11)  $\text{Pa}(S, f) \leftarrow i + 2$ 
(12) while  $\text{POS}(S^*) \geq \text{POS}(S^* + 1)$  do
(13)     temp  $S \leftarrow (S^* + 1) \bmod N_{\text{sat}}$ 
(14)     if temp  $S == 0$  then
(15)          $S^* \leftarrow S^* - N_{\text{sat}} + 1$ 
(16)     else  $S^* \leftarrow S^* + 1$ 
(17)     end if
(18)      $j \leftarrow j + 1$ 
(19) end while
(20)  $b \leftarrow S^* + 1$ 
(21)  $\text{Pa}(S, b) \leftarrow j + 1$ 
(22) if  $\text{Pa}(S, f) \geq \text{Pa}(S, b)$ 

```

(23) $w \leftarrow b$

(24) else $w \leftarrow f$

(25) end if

(26) return w

因此, 最后输出的航点集合 W 一定非空, 源节点 S 根据 W 利用 SR 规划新的分组传输路径, 从而导致频繁的拓扑快照切换不会对分组传输造成影响。

3 仿真模型描述与场景设置

为了在 NS-3 仿真平台中实现对 WSR 算法的性能仿真, 在仿真中根据铱星系统设计出以一种简化的 LEO 卫星移动模型。对于大规模星座, 其拓扑变动具有与中小规模星座相同的周期性, 其可预测的极区 ISL 中断, 同样可以采用 WSR 算法。

模型设计 6 个圆形轨道面等夹角间隔, 即相邻轨道面夹角为 30° ; 设计每个轨道面上的 11 颗卫星等距离间隔, 即两颗相邻卫星之间夹角约为 32.72° , 卫星轨道高度设置为 780 km。模型中卫星节点的位置可由真近点角 $V(t, n)$ 与升交点赤经 $\Omega(n)$ 确定, 计算式为:

$$V(t, n) = \frac{360^\circ}{N_{\text{Sat}}} \times (n \bmod N_{\text{Sat}}) + \frac{360^\circ}{T_{\text{Sat}}} \times t \quad (1)$$

$$\Omega(n) = \left(\left\lfloor \frac{n}{N_{\text{Sat}}} \right\rfloor + 1 \right) \times \frac{360^\circ}{N_{\text{Orb}}} \quad (2)$$

其中, n 代表卫星节点编号, 即 $n=0, 1, 2, \dots, 65$; t 为当前仿真时间, N_{Sat} 代表一个轨道内的卫星数量, N_{Orb} 代表模型中的轨道数, T_{Sat} 代表卫星运动周期。如该模型在运动 190 s 后, 24 号卫星节点的真近点角 $V(190, 24)$ 约为 76.8° , 升交点赤经 $\Omega(24)$ 为 180° 。

模型中卫星经过极圈时网络拓扑发生变化, 该时间点即拓扑快照切换的时间点, 从小到大排序为: 87.68 s、186.22 s、361.74 s、460.11 s、635.64 s、727.17 s、909.69 s 等。

选取 OLSR 与 Dijkstra 算法与 WSR 算法进行时延与分组丢失率的比较, 以分析拓扑快照切换导

致的传输路径中断问题与时延抖动问题。NS-3 平台中, Dijkstra 算法被称为全局路由算法, 全局路由的路由表更新函数没有考虑计算路由的时间成本, 即不会出现分组丢失, 而且分组传输时延最优, 故在实际场景中无法实现, 因此可认为此路由算法是理想最佳路由。仿真中所用参数见表 4。

表 4 仿真参数设置

仿真参数	场景 1	场景 2
LEO 模型运动周期/s	6 026	
ISL 带宽/(Mbit·s ⁻¹)	5	
分组大小/byte	1 024	
分组发送时间间隔/s	0.1	
仿真时间/s	180~200	720~740
源节点编号	24	7
目的节点编号	1	33
快照切换发生时间/s	186.22	727.17

场景 1 为源节点与目标节点在反向缝同侧, 目标节点在 186.22 s 进入极区; 场景 2 则为源节点与目标节点在反向缝两侧, 源节点在 727.17 s 进入极区。场景 1、场景 2 中, 源节点与目标节点之间由 Dijkstra 算法计算出的最短路径存在极区 ISL, 故可以证明 WSR 算法是否能解决拓扑快照切换造成的路径中断问题。

4 算法性能对比

4.1 算法性能评价指标

仿真实验中选取分组端到端的传输时延 d_k 作为算法性能的评价指标之一, 通过观察前后传输分组的时延变化分析是否产生传输路径中断或时延抖动问题, 计算式如下:

$$d_k = t_{rk} - t_{sk} \quad (3)$$

其中, t_{rk} 代表目标节点接收第 k 个分组的时间点, t_{sk} 代表源节点发送第 k 个分组的时间点。若拓扑快照切换造成传输路径中断, 则会使得分组丢失率 PLR 上升, 其计算式如下:

$$PLR = 1 - \frac{N_s}{N_r} \quad (4)$$

其中, N_s 与 N_r 分别代表源节点发送分组的个数与目标节点接收分组的个数。另外, 定义前后分组传输的时延抖动 $J(k)$ 为:

$$J(k) = d_{k+1} - d_k \quad (5)$$

式(5)体现了前后分组传输时延的变化程度, 通过观察时延抖动的大小与个数能够更好地分析出算法对抖动问题的影响。

4.2 仿真结果与分析

将 WSR 算法在两种场景下与 OLSR 算法、Dijkstra 算法进行仿真对比分析, 分组传输时延比较如图 6 所示, OLSR 与 WSR 的目标节点接收分组个数比较如图 7 所示, OLSR 与 WSR 的时延抖动比较如图 8 所示。

图 6 中, 两种场景下, 不考虑路由重计算时间的 Dijkstra 算法计算出的最短路径作为最理想的传输路径用于比较。OLSR 分别在 186.22 s 与 727.17 s 发生分组传输中断, 即 OLSR 两种场景下的传输路径包含极区 ISL, 在网络拓扑快照切换时造成分组传输路径中断, 如图 6 中所示的两个中断区间。因为中间节点的重路由造成中间节点上正在传输的分组丢失, 如图 7 所示, OLSR 分别在 186.22 s 与 727.17 s 目标节点接收分组个数开始不变, 即发生分组丢失; 最终目标节点接收的分组个数分别为 140 与 158, 即分组丢失率分别为 30%和 21%。而 WSR 算法在拓扑快照切换前, 分别约在 183 s 与 725 s 计算出不包含极区 ISL 的传输路径, 从而避免了 OLSR 中出现的问题, 并且如图 7 所示, 目标节点接收了源节点所发的全部分组。因此由图 6 与图 7 的分析证明 WSR 算法可以计算出一条新的传输路径, 从而避免拓扑快照切换造成的路由中断问题。

图 8 反映了 OLSR 与 WSR 在两种场景下的时延抖动的情况, 两种场景下 OLSR 出现两次相对剧烈的抖动现象, 而 WSR 的时延抖动相对较小, 且出现抖动的次数少, 故 WSR 算法能够较好地改善时延抖动问题。

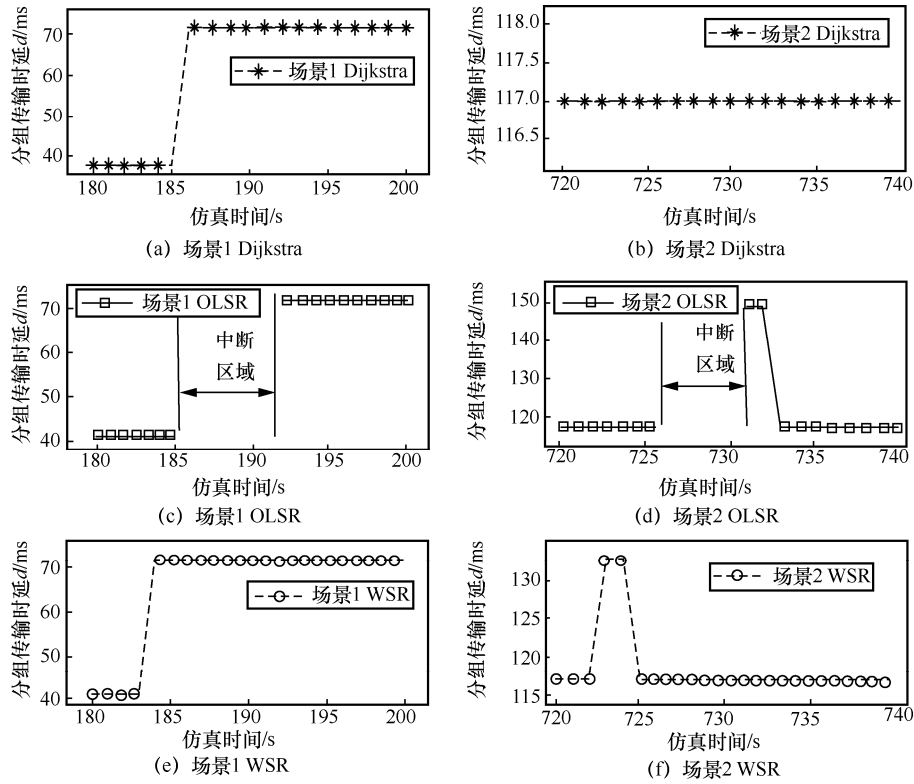


图6 分组传输时延比较

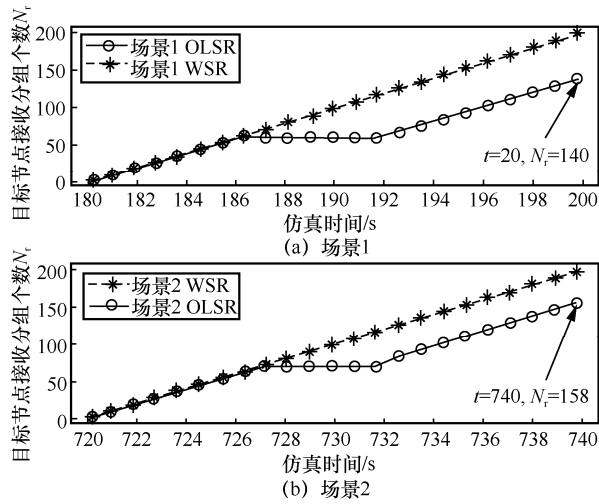


图7 OLSR 与 WSR 的目标节点接收分组个数比较

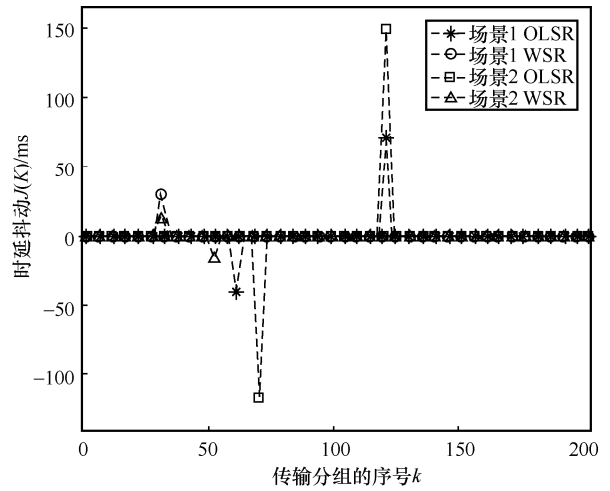


图8 OLSR 与 WSR 的时延抖动比较

性能比较见表5, 进一步定量分析了算法性能的对比如。WSR 与 OLSR 相比, 两种场景下, 分组丢失率降低分别为 0.3 和 0.21, 最大时延抖动分别降低 46 ms 与 126 ms。因此 WSR 计算出的传输路径是不受拓扑快照切换影响的稳定的分组传输路径。

通过上述对仿真结果的分析, 可以得到结论, 在分组传输期间, 因拓扑快照切换造成 OLSR 计算出的传输路径中断, 故发生严重的抖动现象, 而 WSR 算法通过计算出航点位置, 重新为分组找到一条不受拓扑快照切换影响的传输路径, 从而解决了路由中断问题, 并改善了时延抖动与分组丢失现象。

表5 性能比较

性能指标	场景	OLSR	WSR
分组丢失率	场景 1	0.3	0
	场景 2	0.21	0
最大时延抖动/ms	场景 1	74	28
	场景 2	149	23

5 结束语

本文通过虚拟拓扑技术对 LEO 卫星拓扑的动态问题进行分析解决,重点针对因拓扑快照切换导致极区 ISL 断开、造成路由中断乃至整个业务流崩溃的问题做出阐述分析,并提出一种基于卫星航点的分段路由算法,通过仿真实现了对算法性能的研究。

仿真实验中,WSR 算法分组丢失率低,时延抖动小,并且通过设定航点计算出的新的分组传输路径能够避开极区 ISL,从而解决了网络拓扑变化导致的路由中断问题。如今 LEO 卫星数量的不断增加使得拓扑快照切换频率提高,导致抖动现象频繁,WSR 算法可有效地解决该问题。实际情况下,若某颗卫星节点发生故障,恢复故障卫星及路由需要较长时间,可利用 WSR 算法绕过发生故障的卫星,以保证业务流的持续性。

参考文献:

- [1] ZHANG J R, ZHU S B, BAI H F, et al. Optimization strategy to solve transmission interruption caused by satellite-ground link switching[J]. IEEE Access, 2020(8): 32975-32988.
- [2] LI C C, ZHANG Y S, XIE R C, et al. Integrating edge computing into low earth orbit satellite networks: architecture and prototype[J]. IEEE Access, 2021(9): 39126-39137.
- [3] MARCO G, MICHELE Z. Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2021, 35(2): 244-251.
- [4] GUO H Z, LI J Y, LIU J J, et al. A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 53-87.
- [5] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. VNF-based service provision in software defined LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 6139-6153.
- [6] KHALIFE J, NEINAVAI E M, KASSAS Z M. The first carrier phase tracking and positioning results with Starlink LEO satellite signals[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(2): 1487-1491.
- [7] PORTILLO I D, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019(159): 123-135.
- [8] XIE H R, ZHAN Y F, ZENG G M, et al. LEO Mega-constellations for 6G global coverage: challenges and opportunities[J]. IEEE Access, 2021(9): 164223-164244.
- [9] OSORO O B, OUGHTON E J. A techno-economic framework for satellite networks applied to low earth orbit constellations: assessing Starlink, OneWeb and Kuiper[J]. IEEE Access, 2021(9): 141611-141625.
- [10] RABJERG J W, LEYVA-MAYORGA I, SORET B, et al. Exploiting topology awareness for routing in LEO satellite constellations[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [11] LIU J, LUO R Z, HUANG T, et al. A load balancing routing strategy for LEO satellite network[J]. IEEE Access, 2020(8): 155136-155144.
- [12] RUIZ-DE-AZÚA J A, CAMPS A, CALVERAS AUGÉ A. Benefits of using mobile Ad-Hoc network protocols in federated satellite systems for polar satellite missions[J]. IEEE Access, 2018(6): 56356-56367.
- [13] YUE P C, QU H, ZHAO J H, et al. An inter satellite link handover management scheme based on link remaining time[C]//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1799-1803.
- [14] RODRIGUEZ C G, FRANCK L, BAUDOIN C, et al. OLSR-H: a satellite-terrestrial hybrid broadcasting for OLSR signaling[C]//Proceedings of International Conference on Personal Satellite Services. Heidelberg: Springer, 2011: 143-150.
- [15] WERNER M, DELUCCHI C, VOGEL H, et al. ATM-based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(1): 69-82.
- [16] 齐星, 柳震, 梁家辉, 等. 一种面向低轨遥感星座的路由任务规划算法研究[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 30-38.
QI X, LIU Z, LIANG J H, et al. Research on a routing task planning algorithm for LEO remote sensing constellation[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 30-38.
- [17] ZHU Y, RUI L L, QIU X S, et al. Double-layer satellite communication network routing algorithm based on priority and failure probability[C]//Proceedings of the 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1518-1523.
- [18] LIU H Y, SUN F C, YANG Z, et al. A novel distributed routing algorithm for LEO satellite network[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2012: 37-40.
- [19] LIU F, QIAN G. Simulation analysis of network capacity for LEO satellite[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Computer Science and Management Technology. Piscataway:



- IEEE Press, 2020: 100-104.
- [20] VENTRE P L, SALSANO S, CIANFRANI A, et al. Segment routing: a comprehensive survey of research activities, standardization efforts, and implementation results[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2021, 23(1): 182-221.
- [21] ABDULLAH Z N, AHMAD I, HUSSAIN I. Segment routing in software defined networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 464-486.
- [22] PAN G F, YE J, AN J P, et al. Latency versus reliability in LEO mega-constellations: terrestrial, aerial, or space relay[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, Early Access.
- [23] XIE X Y, WANG J, GUO X B, et al. Performance evaluation of Ad-Hoc routing protocols in hybrid MANET-Satellite network[C]// Proceedings of International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications. Heidelberg: Springer, 2018: 500-509.
- [24] PAN T, HUANG T, LI X C, et al. OPSPF: orbit prediction shortest path first routing for resilient LEO satellite networks[C]// Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [25] LU N N, ZHANG H P, MA J. A novel inter-satellite routing protocol based on link recognizing[C]// Proceedings of International Conference on Cyberspace Technology (CCT 2014). Bangalore, KA: IET, 2014: 1-4.
- [26] RUIZ J A, CALVERAS A, CAMPS A. Internet of satellites (IoSat): analysis of network models and routing protocol requirements[J]. IEEE Access, 2018(6): 20390-20411.
- [27] LIU W, TAO Y, LIU L. Load-balancing routing algorithm

based on segment routing for traffic return in LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019(7): 112044-112053.

- [28] ZHOU J X, ZHANG Z P, ZHOU N. A segment list management algorithm based on segment routing[C]// Proceeding of IEEE the 11th International Conference on Communication Software and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2019: 297-302.

[作者简介]



赵鑫（1995—），男，南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为低轨卫星通信与网络规划。

赵光（1995—），男，南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生，主要研究方向为低轨卫星通信与网络规划。

陈睿（1991—），女，南京邮电大学通信与信息工程学院博士生，主要研究方向为低轨卫星通信与网络规划。

王文鼎（1966—），男，南京邮电大学教授，主要研究方向为通信网技术理论、通信网仿真与网络规划。