

面向大规模低地球轨道卫星网络的星间链路连接策略

燕锋, 聂浩俭, 夏玮玮, 沈连丰

(东南大学移动通信全国重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 针对大规模低地球轨道 (LEO) 卫星网络, 提出了2类新型星间链路 (ISL) 连接策略: Grid-V 和 Grid+, 并对传统的Grid连接策略进行改进。所提策略充分利用了次邻轨和跨邻轨星间链路, Grid-V连接策略舍弃了Grid连接策略的轨内链路, 利用次邻轨和跨邻轨的星间链路形成网络拓扑; Grid+连接策略在保留Grid连接策略中的星间链路基础上, 允许卫星与同轨道或者次邻轨道卫星建立跨星连接。针对 Walker-Delta 星座构型的大规模 LEO 卫星网络, 设计了基于所提星间链路连接策略的最短距离路由算法, 并分别从几何拓扑和数据包层面对路由进行了系统级仿真, 以评估各连接策略的性能。仿真结果表明, 在几何拓扑层面, 所提策略可以有效减少平均路由跳数与路径切换次数; 在数据包层面, 所提策略在往返时延及抖动、路径占用率、平均吞吐量等方面具有更好的性能。

关键词: 低地球轨道卫星网络; 星间链路; 连接策略; 路由

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024119

Inter-satellite link connection strategy for large-scale low earth orbit satellite networks

YAN Feng, NIE Haojian, XIA Weiwei, SHEN Lianfeng

National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: For large-scale low earth orbit (LEO) satellite networks, two new inter-satellite link (ISL) connection strategies named Grid-V and Grid+ were proposed, which improved the traditional Grid connection strategy. The proposed strategies made full use of the ISL connected to adjacent and cross-adjacent orbits. The Grid-V connection strategy abandoned the intra-orbit links of the Grid connection strategy and used ISL of the adjacent and cross-adjacent orbits to form the network topology. The Grid+ connection strategy, while retaining the Grid connection strategy, allowed satellites to establish cross-satellite connections with satellites in the same orbit or the cross-adjacent orbits. For the large-scale LEO satellite network with a Walker-Delta constellation configuration, a shortest distance inter-satellite routing algorithm was designed based on the proposed ISL connection strategies, and system-level simulations were conducted from the perspectives of geometric topology and packet respectively to evaluate the performance of each connection strategy. Simulation results show that, from the perspective of geometric topology, the proposed strategies can effectively reduce the average number of routing hops and path switches. At the packet level, the proposed strategies exhibit better performance in terms of round-trip time and jitter, path occupation ratio, average throughput and so on.

Keywords: LEO satellite network, inter-satellite link, connection strategy, routing

收稿日期: 2024-04-08; 修回日期: 2024-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62293492)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62293492)

0 引言

天地一体化网络 (SGIN, space-ground integrated network) 被认为是 6G 通信系统中不可或缺的组成部分^[1-2], 而低地球轨道 (LEO, low earth orbit) 卫星网络因具有低时延、广覆盖和连续不间断连接等特性成为 SGIN 的重要组成部分^[3-4]。随着星链 (Starlink)^[5]和柯伊伯 (Kuiper)^[6]等系统的发展, 大规模 LEO 卫星网络 (千颗星以上) 引起了全世界的广泛关注, 已在或将在测控遥感、全球探测、海运航运等领域发挥重要作用。在 LEO 卫星网络广阔的覆盖范围内, 持有卫星终端设备就可以直接接入卫星网络, 享受全球范围内的网络服务。在大规模 LEO 星座网络中, 由于卫星之间的距离缩小, 每颗卫星可以连接到更多的邻居, 这为星间链路 (ISL, inter-satellite link) 提供了更多选择, 也给大规模 LEO 星座网络的 ISL 连接策略设计带来了新的机遇和挑战^[7], 因此深入研究 ISL 连接策略具有重要意义。

目前提出的连接策略大致可以分为 2 种类型。第一种类型通常考虑基于网格 (Grid) 的 ISL 连接策略, 在一些较小规模的卫星网络中注重最短距离路由^[8]或最小跳数路由^[9]的研究。文献[10]通过拓扑分析, 给出了 LEO 巨型星座网络的最短距离路径与最小跳数路径之间的关系, 证明了当星座倾角小于 68° 时, 所有的最短距离路径都属于最小跳数路径集合。文献[11]给出了一个基于网格连接的 Walker-Delta 星座中的跳数模型, 以明确估计大规模 LEO 星座中任意地面用户之间的跳数, 并在此基础上推导了跳数的空间分布特性。文献[12]基于 Grid 连接策略, 从巨型星座结构设计的角度分析了 LEO 网络拓扑及其路由性能。文献[13]基于 Grid 连接策略的链路属性, 建立了星间链路的加权时空演化图, 精准表达了星间链路属性对网络拓扑及路由的影响。此外, 也有一些研究通过设计星地链路 (GSL, ground-station link) 连接策略来改变网络拓扑, 文献[14]改变了地面站与接入卫星的连接策略, 使地面站不仅与最近距离的卫星相关联, 还与其他非最近距离的卫星相关联, 所提出的关联策略可以提高路由性能。然而, 依赖传统的 Grid 星间链路连接策略会导致路由跳数较多以及路由路径频繁切换, 这将不利于路由性能的提升。

第二种类型是没有使用传统的 Grid 星间链路

连接策略。对于 Starlink 星座, Handley^[15]通过改变 ISL 的方向, 使其更加匹配于地面负载的流向, 从而获得了较低的网络时延。文献[16]考虑了网络中频繁出现的子图模式 motifs, 提出了一种基于 motifs 的 ISL 连接策略, 减少了路由跳数并降低了时延, 但侧重于拓扑层面的仿真, 并没有给出数据包层面的仿真结果。文献[17]考虑了一种跨网格星间链路连接策略, 提出了一种多约束条件下的网格间拓扑控制策略, 在可接受的系统开销下, 显著降低了端到端时延。文献[18]提出了一种用户驱动的 ISL 链路设计方案, 在各个时间片中, 统计最短路径集合中的高频 ISL, 并以“匹配度”来衡量所提出的连接图与最短路径网络图之间的差距, 但该方案网络实施部署的难度较大, 而且同样也没有给出数据包层面的仿真。文献[19]以最小化平均时延为目标, 将拓扑设计问题表述为一个整数线性规划问题, 提出了一种基于最大权重匹配的启发式算法来进行星间链路的分配。但其假设在给定时隙只能为一颗卫星建立一条星间链路或者星地链路, 这种匹配算法在未来的单星多链接模式中具有一定的局限性。

本文针对大规模 LEO 卫星网络, 基于卫星可见性等因素, 参考了 Kuiper 星座或其他现有星座的部署方案, 提出了一种新的星间链路连接策略及其星间路由算法, 从几何拓扑和数据包层面对所提策略的性能进行了仿真, 验证了其有效性, 为新的 LEO 卫星网络星座的实际部署提供了理论基础。

本文的主要贡献如下。

1) 基于卫星星间可见性及星间链路长度的约束, 提出了面向大规模 LEO 卫星网络的 2 类新型星间链路连接策略: Grid-V 与 Grid+, 其中, Grid-V 连接策略舍弃了 Grid 连接策略的轨内链路, 利用次邻轨和跨邻轨的星间链路形成网络拓扑; Grid+ 连接策略则保留了 Grid 连接策略的 4 条 ISL 链路, 并允许卫星在同轨道或次邻轨道建立跨星连接。

2) 为了评估所提出的星间链路连接策略的性能, 针对 Walker-Delta 星座构型的大规模 LEO 卫星网络, 设计了基于 Grid-V 与 Grid+ 型 ISL 连接策略的最短距离路由算法, 并在几何拓扑层面通过 Python 仿真分析了路由的性能。结果表明, 所提策略在大规模 LEO 卫星网络中可以有效减少路由的平均跳数和路径切换次数。

3) 针对大规模 LEO 卫星网络, 在 TCP New Reno 场景下, 通过 NS-3 (network simulator 3) 进行了数据包层面的仿真, 获得了所提策略在最短距离路由下的路由性能。仿真结果显示, 与传统的基于 Grid 的 ISL 连接策略相比, 所提 ISL 连接策略可以降低时延、改善丢包、降低链路占用率以及提高网络吞吐量。

1 系统模型

1.1 卫星网络模型

Walker-Delta 星座因具有运行稳定、覆盖分布均匀、调整纬度带覆盖性能比较灵活等优点, 常用于大规模 LEO 卫星网络系统。Walker-Delta 星座是指由多颗轨道高度和轨道倾角相同、以地球为球心均匀分布的圆形轨道卫星组成的星座。在 Walker-Delta 星座模型中, 大规模 LEO 星座的结构可以用卫星数量 N 、轨道平面数量 P 、相位因子 F 、轨道倾角 I 和轨道高度 h 这 5 个参数表示。注意到, 平面数量 P 必须是卫星数量 N 的因子, 每个轨道平面的卫星数量是 $\frac{N}{P}$; 相位因子 F 的值为 $0 \sim P-1$ 的整数, 用于确定 2 个相邻轨道平面内对应卫星之间的相位差 Δu , 可表示为

$$\Delta u = \frac{2\pi}{N} F \quad (1)$$

本文使用 Kuiper 星座的第一层卫星作为研究对象, 其卫星高度为 630 km, 轨道数为 34, 每条轨道卫星个数也为 34, 卫星轨道倾角为 51.9° , 星座构型 Kuiper 星座第一层示意如图 1 所示。

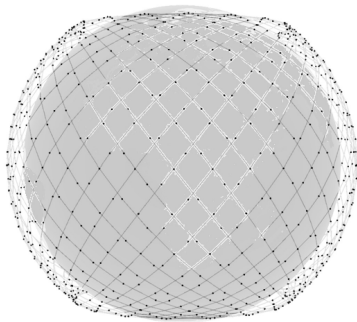


图 1 Kuiper 星座第一层示意

1.2 星间链路长度的限制

构建星间链路连接, 首先需要确定卫星之间的可见性。一些研究倾向于认为地球遮挡是影响卫星能见度的限制因素, 但由于星间链路经过大气层时

会造成信号衰减, 因此建议采用最小保护间隙 H 。最小的 H 对应最长星间链路。最长星间链路的计算如图 2 所示。

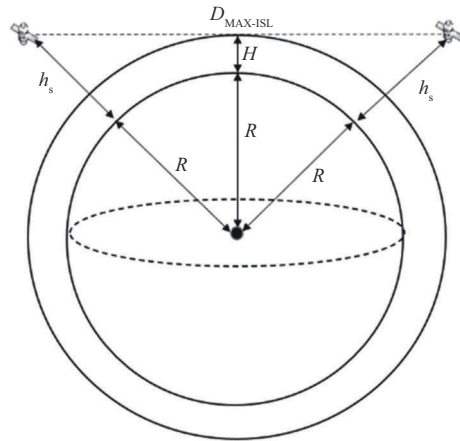


图 2 最长星间链路的计算

2 颗卫星之间的最长 ISL 距离 $D_{\text{MAX-ISL}}$ 可表示为

$$D_{\text{MAX-ISL}} = 2\sqrt{(R + h_s)^2 - (R + H)^2} \quad (2)$$

其中, H 设置为 130 km, 这是电离层 E 层的上限; Kuiper 星座第一层的卫星距地球表面的高度 $h_s=630$ km; 地球半径 $R=6\,371$ km。根据式 (2), 可以计算出最大 ISL 距离 $D_{\text{MAX-ISL}}=5\,196$ km。

1.3 星地链路长度的限制

每颗卫星使用无线电上行/下行链路与地面站通信, 并与其距离最近的地面站建立星地链路。一颗卫星在天空中足够高, 才可以看到它所连接的地面站, 这与地面站天线的最小仰角有关。如果最小仰角为 θ , 那么只有仰角大于 θ 的卫星才可以与地面站通信。最长星地链路的计算如图 3 所示。

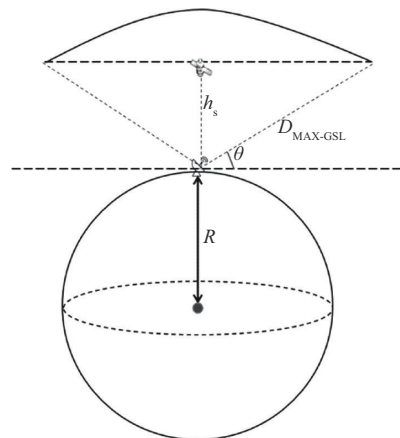


图 3 最长星地链路的计算

地面站与卫星连接的最大距离 $D_{\text{MAX-GSL}}$ 可表示为

$$D_{\text{MAX-GSL}} = \sqrt{\left(\frac{h_s}{\tan(\theta)}\right)^2 + (h_s)^2} \quad (3)$$

2 星间链路连接策略设计

2.1 传统 Grid 型星间链路连接策略

传统的 LEO 卫星星座（如铱星等）使用了网格格式的方法进行连接，在行业和相关学术文献中被认为是标准连接：每颗卫星有 4 条双向 ISL 与其附近的邻居进行连接，2 条与同一轨道上的邻居进行连接，另外 2 条与相邻 2 个轨道上的邻居进行连接。这种连接可以保持很长时间，因为连接的卫星相对速度较低，所以这种连接被称为 Grid 连接，以反映其形状。Grid 型星间连接策略如图 4 所示。

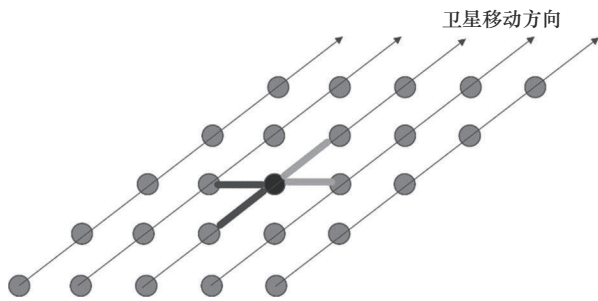


图 4 Grid 型星间连接策略

2.2 Grid-V 型星间链路连接策略

在密集卫星网络中，卫星在通信范围内可见的邻轨卫星数量较多。本文重点关注卫星与邻轨卫星及次邻轨卫星建立的 ISL，并提出一类新的 ISL 连接策略。对于某一颗卫星，将分别与可见邻轨卫星和可见次邻轨卫星建立 ISL，2 条 ISL 成 V 型，每颗卫星重复相同的连接模式，从而形成 Grid-V 型网络拓扑。

对于每颗卫星来说，仍然建立了 4 条双向 ISL。假设邻轨可见卫星有 m 颗、次邻轨可见卫星有 n 颗，理论上存在 $m \times n$ 种 ISL 组合，但是考虑到让 2 条 ISL 分别朝向轨道的北向和南向（这样能使消息更快传递，而不会产生额外的跳数）以及对称性，ISL 的组合将会减少。针对本文所讨论的 Kuiper 星座的第一层，根据式(2)得到最大的 ISL 距离，在最大 ISL 距离的限制下，可以得到 8 种 Grid-V 型拓扑。

具体来说，假设卫星的编号为 (a, b) ，轨道数为 N ，每颗轨道的卫星数量为 M ，则邻轨卫星的选择为

$$\begin{aligned} & ((a+1) \bmod N, (b+1) \bmod M) \\ & ((a+1) \bmod N, (b+2) \bmod M) \end{aligned} \quad (4)$$

次邻轨卫星的选择为

$$\begin{aligned} & ((a+2) \bmod N, (b-1) \bmod M) \\ & ((a+2) \bmod N, (b-2) \bmod M) \\ & ((a+2) \bmod N, (b-3) \bmod M) \\ & ((a+2) \bmod N, (b-4) \bmod M) \end{aligned} \quad (5)$$

一条邻轨 ISL 与一条次邻轨 ISL 形成 V 型拓扑，共有 8 种 ISL 连接策略。ISL 在邻轨的偏移为 1 或 2，在次邻轨的偏移为 1~4。图 5 显示了名为 Grid-V11 的星间连接策略，其邻轨 ISL 偏移量为 1，次邻轨偏移量也为 1。

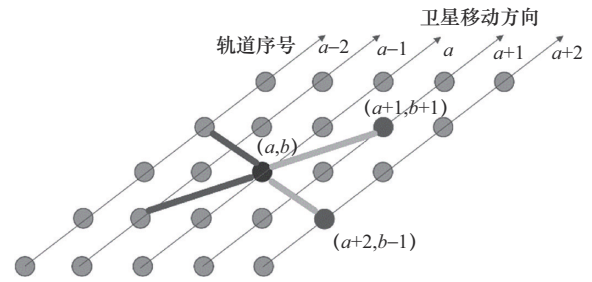


图 5 Grid-V11 星间连接策略

2.3 Grid+型星间链路连接策略

在 Grid+ 型星间链路连接策略中，每颗卫星配置了大于 4 条的双向星间链路。

Grid+ 轨内跨星连接策略保留了传统 Grid 连接策略的 4 条 ISL 连接，另外允许卫星在同轨道建立跨星连接，即同轨隔跳连接，每颗卫星重复相同的连接模式，每颗卫星共有 6 条 ISL。Grid+ 轨内跨星连接策略如图 6 所示。

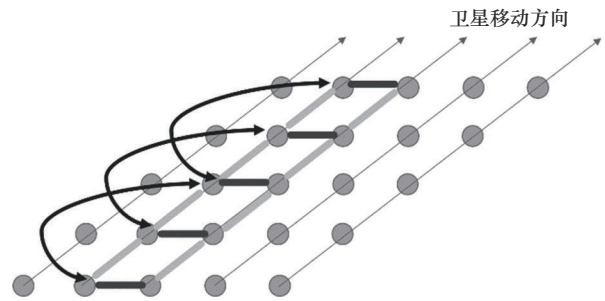


图 6 Grid+ 轨内跨星连接策略

Grid+ 邻轨跨星连接策略保留了传统 Grid 连接策略的 4 条 ISL 连接，另外允许卫星跳过相邻轨道建立跨星连接，即与次邻轨卫星连接，每颗卫星重

复相同的连接模式，共有 6 条 ISL。Grid+邻轨跨星连接策略如图 7 所示。

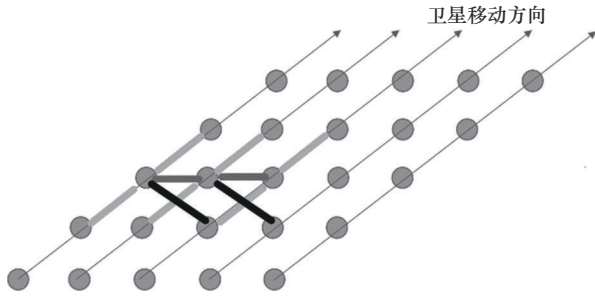


图 7 Grid+邻轨跨星连接策略

本节所提出的星间链路连接策略不代表 Kuiper 星座或其他现有星座的实际部署策略。实际的星间链路可能采用激光、太赫兹、毫米波等通信方式，本文基于卫星可见性等因素，主要考虑星间链路采用激光通信的方式，并通过路由算法分析所提连接策略的性能，重点从理论层面探讨星间链路连接策略的性能。

3 基于各星间链路连接策略的路由方案

3.1 基于最短距离算法的路由方案

为了充分利用卫星运行规律性和周期性的特点，首先将卫星的运行周期划分为多个等长时间片，在时间层面上将卫星网络拓扑虚拟化，每个时间片上的拓扑可以看成是静态的。然后针对每个时间片，计算源节点与目的节点的路由。这样就将时变的大规模 LEO 卫星网络路由问题，转化为一系列离散时间片上的静态路由表计算问题。

对于所提的各种星间链路连接策略，使用 Floyd-Warshall 最短距离算法确定路由。Floyd-Warshall 算法是一种多源最短路径算法，一次计算就能得到图中每一对节点之间（多对多）的最短路径，对稠密图效率较高。它采用了动态规划的思想，从子图逐渐扩大到全图，在扩大图的过程中计算和更新最短路径。

首先定义某一时隙 t 内，LEO 网络的状态图为 $G_t=(E_t, V_t)$ ，其中， V_t 为卫星节点集合， E_t 为 LEO 网络的 ISL 连接边集合，边权重为 ISL 链路的长度，然后定义状态 $f[k][i][j]$ ，其中， i, j, k 为点的编号，范围为 $1 \sim N$ ， N 为卫星节点数量， $f[k][i][j]$ 表示在包含 $1 \sim k$ 个点 G_t 的子状态图中，节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度。当子状态图大小由 $1 \sim k-1$ 个点扩展

到 $1 \sim k$ 个点时，定义状态转移方程为

$$f[k][i][j] = \min(f[k-1][i][j], f[k-1][i][k] + f[k-1][k][j]) \quad (6)$$

其中， $f[k-1][i][j]$ 表示在包含 $1 \sim k-1$ 个点 G_t 的子状态图中，节点 i 与节点 j 之间的最短路径长度； $f[k-1][i][k] + f[k-1][k][j]$ 表示在包含 $1 \sim k-1$ 个点 G_t 的子状态图中，经过点 k 的新路径的长度，即这条路径从 i 出发，先到 k ，再从 k 到终点 j 。比较不经过 k 的最短路径 $f[k-1][i][j]$ 和经过 k 的新路径，较小者就是新的 $f[k][i][j]$ 。该算法在每次扩展新的节点 k 的过程中，都用到了 $1 \sim k-1$ 的结果，从而提升了效率，这是一种动态规划的策略。算法 1 为基于各星间链路连接策略的最短路由算法。

算法 1 基于各星间链路连接策略的最短路由算法

根据 Walker-Delta 星座参数，通过式(2)和式(3)计算 $D_{\text{MAX-ISL}}$ 和 $D_{\text{MAX-GSL}}$ ，选择某种 ISL 连接策略 P 。

输入 $D_{\text{MAX-ISL}}$ ， $D_{\text{MAX-GSL}}$ ，卫星数量 N ，地面站数量 K ，时隙数量 T

输出 各个时隙任意节点对的转发状态表

初始化 开始时隙的转发状态表

根据 $D_{\text{MAX-ISL}}$ 找到每颗卫星的可视卫星集合 S_1

根据 $D_{\text{MAX-GSL}}$ 建立地面站接入卫星的集合 S_2

根据集合 S_1 、 S_2 和策略 P 建立每一时隙的 LEO 网络（包含 ISL、GSL）的状态图为 $G_t=(V_t, E_t)$

1) for (int $t=1$; $t \leq T$; $t++$)

2) for (int $k=1$; $k \leq N+K$; $k++$)

3) for (int $i=1$; $i \leq N+K$; $i++$)

4) for (int $j=1$; $j \leq N+K$; $j++$)

5) $f[i][j] = \min(f[i][j], f[i][k] + f[k][j]);$

6) end for

7) end for

8) end for

9) 根据 f 得到转发状态

10) if 转发状态改变 then

11) 相应地重写新的转发状态表

12) else 保持原转发状态表

13) end if

14) end for

3.2 路由方案复杂度分析

根据 $D_{\text{MAX-ISL}}$ 和 $D_{\text{MAX-GSL}}$ 获得可视卫星集合 S_1 和地面站的接入卫星集合 S_2 为常数操作，复杂度为 $O(1)$ 。

由于 Floyd-Warshall 算法与节点数相关, 记总节点数为 $X=N+K$, N 为卫星节点数量, K 为地面站数量, 则 Floyd-Warshall 循环的复杂度为 $O(X^3)$, 其中, Grid 与 Grid-V 连接策略每个节点与邻居节点需要对星间链路的长度进行 4 次比较, 以确定距离最近的邻居, Grid+ 连接策略需要比较 6 次, 根据划分的时隙数量 T , 可以得到总的路由计算复杂度: Grid 与 Grid-V 连接策略为 $O(4TX^3)$, Grid+ 连接策略为 $O(6TX^3)$ 。

3.3 各连接策略抗毁性分析

自然连通度^[20]这一概念来源于对节点间可代替路径冗余性的考虑。而度量这一冗余性, 则考虑计算网络中闭路径的数目, 用闭路径的数目来量化网络路径的冗余性, 冗余性越强则抗毁性越强。利用网络图邻接矩阵的特征值来表示网络的自然连通度, 即

$$\bar{\lambda} = \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^N e^{\lambda_i}}{N} \right) \quad (7)$$

其中, λ_i 为 LEO 网络图邻接矩阵的特征根, N 为 LEO 卫星节点数量。从式(7)可以看出, 该抗毁性指标是由特征值的自然指数值求对数平均得到的。下面计算 Kuiper 星座的第一层卫星各连接策略基于自然连通度的抗毁性度量指标, 结果如表 1 所示。

表 1 Kuiper 星座的第一层卫星各连接策略的自然连通度

连接策略	自然连通度
Grid	1.648 0
Grid+轨内跨星	2.833 4
Grid+邻轨跨星	2.733 1
Grid-V	1.648 0

从表 1 可以看到, 从自然连通度角度分析连接策略的抗毁性, Grid+ 连接策略的抗毁性要强于 Grid 连接策略。

4 仿真结果与分析

4.1 仿真环境与参数

本文仿真部分参考由 ETH Zurich 开发的 LEO 卫星仿真架构 Hypatia^[21], 该架构采用 Python、NS-3 联合作为开发环境。首先在 Python 中根据 Kuiper 轨道参数设计卫星星座模型, 生成 TLE (two line element) 轨道数据包文件, 由此得出仿真时间内各个时隙卫星的位置; 然后利用 Python 中的 Net-

workx 工具包进行网络图的构建、分析, 实现基于最短路径算法的路由转发表的计算, 并利用 Python 实现几何拓扑层面的仿真, 根据在 Python 中计算得到的路由转发表, 在 NS-3 仿真软件中进行数据包层面的仿真; 最后将仿真得到的数据结果导入 MATLAB 中进行分析处理。

本节仿真实验中采用的 Walker-Delta 星座参数为 1156/34/17/51.9/630, 即星座包含 1 156 颗卫星, 卫星平均分布于 34 条轨道, 轨道的相位因子为 17, 轨道平面的倾角为 51.9°, 卫星轨道的高度为 630 km。地面站选取全球人口排名前 100 的城市, 地面站天线最小仰角为 30°。设定 Hypatia 仿真的时间为 200 s, 对于数据包层面的仿真实验, ISL 和 GSL 的链路容量均设定为 10 Mbit/s。

4.2 几何拓扑层面的仿真结果

首先对每颗卫星配备 4 条 ISL 的 Grid-V 连接策略进行几何拓扑层面的仿真, 并与 Grid 连接策略进行对比。选取全球人口排名前 100 的城市, 作为候选地面站集合。任选 2 个地面站进行配对, 共有 4 950 个组合, 统计每对地面站在仿真时间内的平均路由跳数 v 与平均路径切换次数 u , 如表 2 所示。Grid+ 轨内跨星和 Grid+ 邻轨跨星的平均路由跳数为 9.07 和 6.31, Grid+ 轨内跨星和 Grid+ 邻轨跨星的平均路径切换次数为 4.51 和 3.52。

表 2 Grid 与 Grid-V 连接策略的平均路由跳数与平均路径切换次数

邻轨偏移	次邻轨偏移	平均路由跳数	平均路径切换次数
0	0	9.02	4.38
1	1	7.57	4.54
1	2	6.43	3.58
1	3	6.03	3.42
1	4	5.65	3.31
2	1	6.75	4.24
2	2	5.42	3.35
2	3	5.20	3.33
2	4	5.05	3.25

从表 2 可以看出, 对于相同的邻轨偏移, 随着次邻轨偏移的增加, 平均路由跳数与平均路径切换次数下降; 对于相同的次邻轨偏移, 随着邻轨偏移的增加, 平均路由跳数与平均路径切换次数也下降。更大的偏移意味着更长的 ISL 连接, 这表明在连接拓扑中, 试图引入更长的 ISL 能带来更好的物

理拓扑层面的表现。针对本文讨论的星座模型，对比 Grid 连接策略，在最好的 Grid-V 连接策略（Grid-V24，即邻轨偏移为 2、次邻轨偏移为 4）情况下，平均路由跳数降低了 44%，平均路径切换次数降低了 25.8%；在最差的 Grid-V 连接策略（Grid-V11）情况下，也能降低 16% 的平均路由跳数，但却以 3.7% 的平均路径切换次数的提升作为代价。

定义加权度量指数 Q 为

$$Q = w_1 u + w_2 v \tag{8}$$

其中， w_1 为平均路径切换次数的权重， w_2 为平均路由跳数的权重， $w_1 + w_2 = 1$ 。指数 Q 综合了平均路径切换次数和平均路由跳数 2 种指标，本文将指数 Q 作为几何拓扑层面的衡量标准，各连接策略加权度量指数 Q ($w_1 = w_2 = 0.5$) 如图 8 所示。

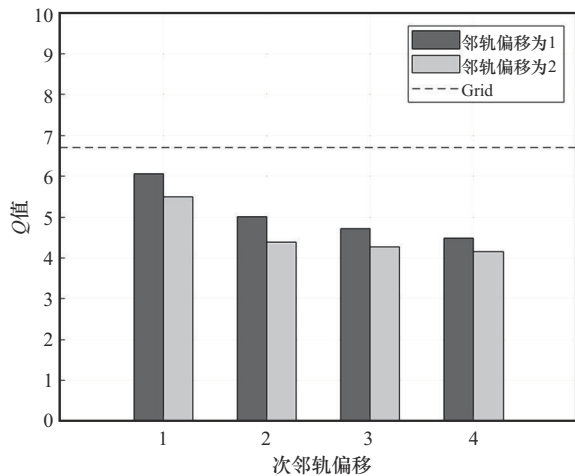


图 8 各连接策略加权度量指数 Q ($w_1 = w_2 = 0.5$)

从综合平均路径切换次数和平均路由跳数 2 个因素的加权度量指数 Q 可以看出，各 Grid-V 连接策略均获得了比 Grid 连接策略更好的性能，在最好的 Grid-V 情况下， Q 值降低了 38%。Grid+ 轨内跨星和 Grid+ 邻轨跨星的 Q 值分别为 6.79 和 4.92，接近 Grid 和 Grid-V12 连接策略。

路径切换次数少，意味着更稳定的平均往返时延 (RTT, round trip time) 及其抖动，也能减少因切换带来的丢包。路由跳数能直观地度量网络容量，平均路由跳数越少，意味着每个端到端连接的网络占用率越低，因此较低的平均路由跳数能缓解拥塞，这一点在文献[12, 16]中已被证明。而较好的丢包性能和较低的拥塞能带来吞吐量性能的提升，这一点将在 4.3 节的仿真中详细讨论。

4.3 数据包层面的仿真结果

根据拓扑级别的仿真情况，本文选择了 Grid-V24 连接策略 2 种 Grid+ 连接策略与传统的 Grid 连接策略进行数据包层面的仿真。选择 Grid-V24 连接策略的原因是 Grid-V24 连接策略具有最小的 Q 值，而且在几何上该策略的 2 条 ISL 形成最大的 V 型拓扑。本节在 TCP New Reno 场景下选取了 45 组不同的城市对进行了 TCP 流的测试。

4.3.1 平均往返时间及其抖动

网络的平均 RTT 定义为每个地面站对 TCP 流平均 RTT 的均值，网络的平均 RTT 抖动定义为每个地面站对 TCP 流平均 RTT 抖动的均值，单个 TCP 流的平均 RTT 抖动定义为该流各时刻的 RTT 与平均 RTT 之差的均值。

图 9 显示了不同连接策略下平均 RTT 的经验累积分布函数 (ECDF, empirical cumulative distribution function)。从图 9 中可以看到，对于平均 RTT 较高的比例，Grid-V24 连接策略小于 Grid 连接策略，表明 Grid-V 连接策略对降低距离较远的城市对的 RTT 更有效。这是因为 Grid-V 连接策略的 ISL 路径长度更长，路由跳数更少，这带来了更短的传播距离，因此降低了往返时延。从图 9 还可以看出，虽然 Grid+ 轨内跨星和 Grid+ 邻轨跨星连接策略也降低了 RTT，但是效果没有 Grid-V24 连接策略好，这是因为 Grid+ 连接策略没有完全舍弃 Grid 连接策略的连接，导致网络平均传播距离小于 Grid 连接策略，但大于 Grid-V 连接策略。这更加印证了 ISL 的平均长度越长，越能降低 RTT 的结论。

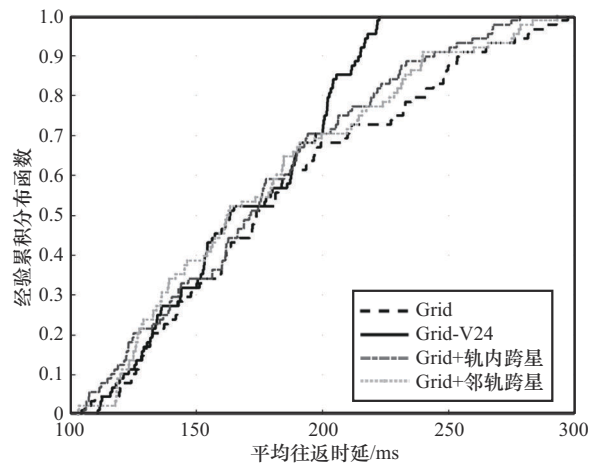


图 9 不同连接策略下平均 RTT 的 ECDF

表 3 显示了不同连接策略下平均 RTT 及其抖动。从表 3 可知, 在平均 RTT 性能方面, 相比于 Grid 连接策略, 各连接策略的平均 RTT 均降低了, Grid-V24 相比 Grid 降低了 10.64%, 降幅较大, 因为 Grid-V 连接策略采用了更长的星间链路; 在平均 RTT 抖动性能的表现上, Grid-V24 连接策略具有较低的抖动, 原因在于 Grid-V24 连接策略具有较少的路径切换次数。

表 3 不同连接策略下平均 RTT 及其抖动

连接策略	平均 RTT/ms	平均 RTT 抖动/ms
Grid	184.14	26.39
Grid+轨内跨星	175.44	25.75
Grid+邻轨跨星	176.01	26.84
Grid-V24	164.55	24.96

4.3.2 丢包性能

本节仿真是在 TCP New Reno 场景下进行的, 记录了拥塞窗口 (CWND, congestion window) 的变化情况, 其中丢包会产生重复的 ACK (acknowledgment) 包, 导致 CWND 突然下降, 所以统计 CWND 平均下降的次数可以从侧面反映丢包性能。

图 10 显示了不同连接策略 CWND 平均下降次数的 ECDF。从图 10 中可以看出, Grid-V24 连接策略的 ECDF 曲线整体靠左, 表明其在减少 CWND 下降次数方面效果最好, 原因是 Grid-V24 连接策略的路径切换次数最少, 可以减少数据包乱序而导致的丢包。从图 10 还可以看出, Grid+轨内跨星、Grid+邻轨跨星与 Grid 连接策略的 CWND 平均下降次数几乎一样, 这是因为 Grid+ 连接策略并没有显著降低路径切换次数, 甚至还增加了路径切换次数, 从而很难改善丢包性能。通过仿真计算可以得到, Grid-V24 连接策略的 CWND 平均下降次数为 16.34, 与 Grid 连接策略的 CWND 平均下降次数 18.82 相比, 降低了 13.2%, 效果明显。

4.3.3 星间链路占用率

将单条星间链路占用率定义为该星间链路在一个时隙中工作的时间与该时隙长度的比。每个时隙的单个 ISL 占用率的平均值被用作整个网络 ISL 占用率的衡量标准。不同连接策略下网络 ISL 占用率如表 4 所示。相比 Grid 连接策略, 其他连接策略的网络 ISL 占用率都减少了, 其中 Grid-V24 连接策略降低了 46.13% 的网络 ISL 占用率, 效果最为显著。

原因是 Grid-V24 连接策略显著减少了跳数, 从而减少了一些不必要的 ISL 的使用, 这将缓解 LEO 网络的拥塞情况。跳数可以直观地衡量网络容量, 因此跳数越少意味着拥塞越少。

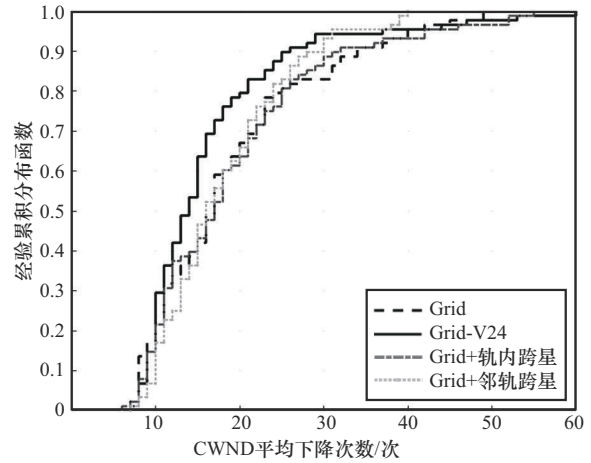


图 10 不同连接策略 CWND 平均下降次数的 ECDF

表 4 不同连接策略下网络 ISL 占用率

连接策略	网络 ISL 占用率
Grid	6.07%
Grid+轨内跨星	4.46%
Grid+邻轨跨星	5.92%
Grid-V24	3.27%

4.3.4 平均吞吐量

图 11 显示了不同连接策略下平均吞吐量的 ECDF。从图 11 中可以看出, Grid-V24 连接策略的 ECDF 曲线整体靠右, 表明其提高网络平均吞吐量的效果最好。Grid+ 连接策略对平均吞吐量的提高有一定效果, 但提升效果不够明显。

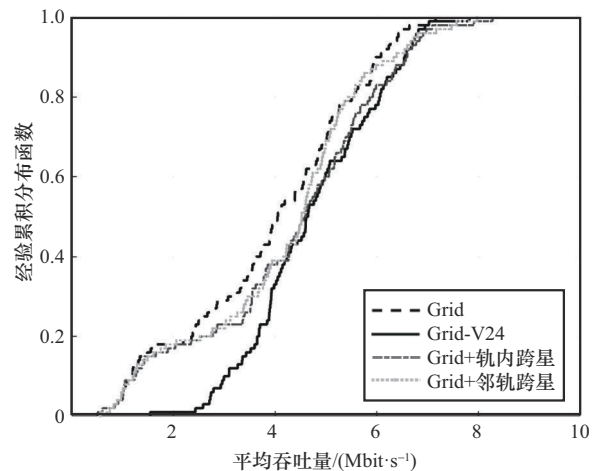


图 11 不同连接策略下平均吞吐量的 ECDF

吞吐量的提升与丢包性能的改善和 ISL 占用率的降低密不可分。Grid-V24 连接策略的丢包性能最好且 ISL 占用率最低, 丢包的缓解使得 CWND 下降的频率降低, 在 TCP New Reno 场景下, CWND 越大, 发送速率越快, CWND 下降的频率降低使得 CWND 维持在较高水平的时间延长, 并且 ISL 占用率的降低缓解了拥塞, 这 2 个方面的因素带来了吞吐量提升的可能性。

不同连接策略下网络平均吞吐量如表 5 所示。各连接策略相比 Grid 连接策略的平均吞吐量都提高了, 其中, Grid-V24 连接策略的平均吞吐量提高了 21.23%, 而且 Grid-V24 配置的 ISL 更少, 这使得卫星 ISL 对准控制、网络拓扑控制等复杂度大大降低, 同样情况下, Grid-V24 应当是更优的策略。

表 5 不同连接策略下网络平均吞吐量

连接策略	平均吞吐量/(Mbit·s ⁻¹)
Grid	3.91
Grid+轨内跨星	4.30
Grid+邻轨跨星	4.16
Grid-V24	4.74

5 结束语

本文面向大规模 LEO 卫星网络提出了 Grid-V 和 Grid+ 连接策略, 并基于各连接策略提出了最短距离路由方案。对于 Kuiper 星座的第一层, 通过几何拓补层面仿真和 NS-3 数据包层面仿真, 分析了所提策略在最短距离路由方案下的性能, 并与传统 Grid 连接策略进行了比较。仿真结果表明, 所提出的 Grid-V 连接策略能够有效减少路由的路径切换次数和路由跳数。Grid-V 与 Grid+ 连接策略在往返时延、丢包、吞吐量等方面具有更好的性能, 其中 Grid-V24 连接策略的性能最好。

本文对大规模 LEO 卫星网络星间链路连接策略的研究为后续路由算法的研究奠定了基础。在后续针对 LEO 卫星网络路由算法的研究中, 将进一步考虑不同于最短距离路由算法的其他算法。本文的研究虽然针对 Kuiper 星座, 但其结果对基于卫星可见性的其他星座具有普适性, 为大规模 LEO 卫星网络星间链路连接提供了理论基础。实际部署策略可能因技术、经济和政策等多种因素而有所不同。笔者建议未来的研究应考虑这些实际因素, 以推动理论模型向实际应用的转化。对于具体的卫星

网络还会因通信方式(如光通信、太赫兹频段和毫米波频段)等技术体制以及性价比等要求而进行必要的修正, 相应的工作正在进一步的深入研究中。

参考文献:

- [1] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 905-974.
- [2] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Cooperative transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(3): 204-210.
- [3] AL-HRAISHAWI H, CHOUGRANI H, KISSELEFF S, et al. A survey on nongeostationary satellite systems: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 101-132.
- [4] HANDLEY M. Using ground relays for low-latency wide-area routing in megaconstellations[C]//Proceedings of the 18th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2019: 125-132.
- [5] 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.
- [6] 杨力, 潘成胜, 孔相广, 等. 5G 融合卫星网络研究综述[J]. 通信学报, 2022, 43(4): 202-215.
YANG L, PAN C S, KONG X G, et al. Review on 5G-satellite integrated network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 202-215.
- [7] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 177-189.
CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 177-189.
- [8] MOHORCIC M, SVIGELJ A, KANDUS G. Traffic class dependent routing in ISL networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1160-1172.
- [9] 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.
- [10] CHEN Q, YANG L, GUO D K, et al. LEO satellite networks: when do all shortest distance paths belong to minimum hop path set?[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(4): 3730-3734.
- [11] CHEN Q, GIAMBENE G, YANG L, et al. Analysis of inter-satellite link paths for LEO mega-constellation networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(3): 2743-2755.
- [12] YANG H, GUO B L, YAN K, et al. Constellation structure design for LEO mega-constellation with optical intersatellite link[C]//Proceedings of the 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1258-1261.
- [13] HAN Z Z, XU C, ZHAO G F, et al. Time-varying topology model for dynamic routing in LEO satellite constellation networks[J]. IEEE

Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(3): 3440-3454.

- [14] AUDDINO A, BARRAQUÉ A, HOTESCU O, et al. The nearest is not the fastest: on the importance of selecting in/out routing hops over a satellite LEO constellation[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [15] HANDLEY M. Delay is not an option: low latency routing in space[C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2018: 85-91.
- [16] BHATTACHERJEE D, SINGLA A. Network topology design at 27, 000 km/hour[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM Press, 2019: 341-354.
- [17] QI X X, ZHANG B, QIU Z L, et al. Using inter-mesh links to reduce end-to-end delay in walker delta constellations[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(9): 3070-3074.
- [18] FAN G J, LI H W, LIU J, et al. User-driven flexible and effective link connection design for mega-constellation satellite networks[C]//Proceedings of the 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 793-799.
- [19] YAN Z B, ZHAO K L, LI W F, et al. Topology design for GNSSs under polling mechanism considering both inter-satellite links and ground-satellite links[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(2): 2084-2097.
- [20] 吴俊, 谭索怡, 谭跃进, 等. 基于自然连通度的复杂网络抗毁性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2014, 11(1): 77-86.
WU J, TAN S Y, TAN Y J, et al. Analysis of invulnerability in complex networks based on natural connectivity[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2014, 11(1): 77-86.
- [21] KASSING S, BHATTACHERJEE D, ÁGUAS A B, et al. Exploring the “Internet from space” with hypatia[C]//Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference. New York: ACM Press, 2020: 214-229.

[作者简介]



燕锋 (1983-), 男, 湖北天门人, 博士, 东南大学移动通信全国重点实验室副教授, 主要研究方向为无人机自组网、卫星互联网、无线传感器网络等。



聂浩俭 (2000-), 男, 河南焦作人, 东南大学移动通信全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为卫星网络拓扑控制、卫星路由等。



夏玮玮 (1975-), 女, 江苏句容人, 博士, 东南大学移动通信全国重点实验室副研究员, 主要研究方向为无线网络资源管理、边缘计算、泛在网络与短距离无线通信等。



沈连丰 (1952-), 男, 江苏邳州人, 博士, 东南大学移动通信全国重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信、短距离无线通信和泛在网络等。