

基于分簇的甚低轨卫星通信系统馈电链路路由算法

李 鑫, 余龙丹, 张校宁, 常俊德
(长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130102)

摘 要: 随着航天技术的快速进步, 甚低轨卫星网络凭借覆盖广、传输时延低等优势得到了广泛应用。而甚低轨卫星计算能力有限, 且传统路由策略难以应对频繁的拓扑变化。针对以上问题, 提出一种基于分簇的卫星路由算法, 利用模糊逻辑系统完成分簇过程, 从网络稳定性和负载均衡能力方面对该算法进行深入分析与评估。仿真结果表明, 提出的算法能有效保证网络稳定性, 实现负载均衡。

关键词: 甚低轨卫星网络; 路由算法; 模糊逻辑系统; 负载均衡

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025024

Feed Link Routing Algorithm for Cluster-Based Very Low Orbit Satellite Communication Systems

LI Xin, YU Longdan, ZHANG Xiaoning, CHANG Junde
Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130102, China

Abstract: With the rapid advancement of aerospace technology, very low earth orbit (VLEO) satellite networks have been widely applied in various scenarios due to their extensive coverage and low transmission latency. However, VLEO satellites possess limited computational capabilities, and traditional routing strategies struggle to cope with the frequent topological changes in the network. To address this issue, a cluster-based satellite routing algorithm for VLEO networks has been proposed, which utilizes a fuzzy logic system to complete the clustering process. This routing algorithm has been thoroughly analyzed and evaluated in terms of network stability and load balancing capabilities. Simulation results demonstrated that the proposed method effectively ensures network stability and achieves load balancing.

Keywords: very low orbit satellite network, routing algorithm, fuzzy logic system, load balancing

0 引言

卫星通信目前已经加速走向消费市场, 成为拉动我国经济发展的重要动力。低轨卫星规模在近年来迅速扩大, 其业务场景覆盖也越来越广泛。近年来, 甚低轨 (very low earth orbit, VLEO) 卫星因其轨道高度较低、卫星更低, 在高分辨率成像、低时延通信、环境监测、科学研究等领域^[1]应用也较为广泛。尽管其面临空气阻力和寿命短等技术挑战, 但凭借高效和低成本等独特优势, VLEO 卫星在未来的卫星技术发展中将占据重要地位。

VLEO 卫星的星间链路和馈电链路的连接状态频繁变化, 使得网络拓扑高度动态化, 并且单颗卫星覆盖范围较小, 需要通过星座的协同工作实现大面积区域覆盖^[2]。网络几何构型的高度动态性、链路的不稳定性、资源受限性以及复杂的三维拓扑结构, 给网络路由技术带来了前所未有的挑战^[3]。如何在保证通信性能的同时降低路由策略的复杂度, 并实现网络的负载均衡, 成为甚低轨卫星网络研究的核心问题之一^[4-5]。

针对 VLEO 卫星的网络特性和业务需求, 需要设计具有高效数据交换、流量管理功能的路由策略。现有的静态路由和全局动态路由等传统算法, 依赖于相对固定

的拓扑结构,更关注数据传输效率、时延、拥塞等因素^[6-8],而星上所需的路由算法需要适应卫星的动态特性和链路的频繁变化,重点在于快速更新路由表、保证通信链路的稳定性、最小化路由开销,并在有限资源下优化数据传输^[9-10]。范永鹏^[11]提出了动态不可分割多商品流问题(dynamic uncapacitated multi-commodity flow problem, DUMCFP),通过考虑时间步长、流量变化和路径变化等因素,实现了卫星网络容量的优化,不仅解决了大规模数据传输的复杂性问题,还显著提升了网络性能。杨子健^[12]探讨了低轨卫星网络的安全路由算法,提出了一种基于区块链的路由策略,有效增强了网络对恶意攻击的防御能力,这一研究为低轨卫星网络的安全运行提供了有力保障。李锐^[13]提出了一种“激光-微波”混合式多层空间网络架构,通过分离控制层与传输层,实现了不同通信方式的优势互补,这种架构不仅提高了通信效率,还增强了网络的灵活性和可扩展性。此外,王芷晴^[14]研究了面向星地链路动态切换的控制路由机制,提出了星间与星地协同的控制路由架构,通过分开存储和独立更新星间拓扑与星地拓扑,实现了控制路由表的快速更新和路由的准确性。

传统的路由算法难以适应 VLEO 卫星网络中频繁的链路切换和大规模节点的管理需求^[15-19]。因此,本文提出了一种基于分簇的路由算法,在有限的能量和计算能力下,通过合理地划分星群(簇),实现网络分层结构,增强系统抗单点故障能力,同时延长卫星寿命、实现网络负载均衡。

1 基于模糊逻辑的分簇系统模型

针对 VLEO 卫星网络中频繁的链路切换和大规模节点的管理需求,使用分簇算法作为网络结构管理方式,通过将卫星划分为多个簇,每个簇由一个簇头卫星负责管理和协调,在减少全局信息交换的基础上实现更快速、鲁棒的路径选择,从而显著降低路由计算的复杂性,提高资源利用效率。除此之外,考虑将时间分片技术作为资源优化调度的手段,将通信资源划分为不同时段,有效减少链路冲突和资源竞争,还能对跨簇通信和时延敏感业务进行针对性优化,从而提升网络整体性能^[20]。

结合工程实践,可知能量消耗是通信卫星的重要性能指标,而使用基于分簇的路由算法,其目的是通过增加星间链路通信次数,将多颗卫星的数据传递给一颗簇首卫星,从而减少星地直连通信次数。星地直连馈电链

路具有带宽大、速率高的特点,足以支撑短时间内簇首汇聚的多颗星业务数据的星地馈电链路通信。而作为簇首的单颗卫星虽然承担了业务汇聚、更长时间星地建链等额外能源消耗,但对于整个卫星网络而言,将簇内业务汇聚到簇首卫星的能耗远远小于多星分别多次建链的功耗总和,其整体的能耗大幅降低。且本文分簇基于负载均衡,其簇首轮换机制定义了担任过簇首的卫星会在一定的时间阈值范围内不再担任簇首,确保了该卫星具有充足的充电时间以及降温时间。此外,使用分簇算法避免了全局拓扑维护的需求,通过分层结构和局部信息交换实现了高效的路由管理,预分簇策略基于轨道预测,需要实时处理的参数包括卫星-信关站距离、剩余能量、邻域连接度,其中,卫星-信关站距离可以预测,而邻域连接度也可以根据其定义预测,部分收敛过程可以前置至拓扑变化前完成。在分簇路由架构下,数据传输路径为“簇成员→簇首→基站(地面站)”,通过簇内和簇间的数据汇聚和转发,能够高效地将数据从卫星节点传输到地面站。同时,分簇机制减少了地面站直接通信的卫星数量,有助于降低网络负载^[21-22]、节约能量并提高传输效率。

1.1 模糊逻辑系统

模糊逻辑系统利用模糊概念和模糊逻辑处理不确定性和模糊性信息,是模糊集合和模糊比较思想的精确化,它通过相关规则的集成,为实现处理归类问题提供了良好的类比参考,可以为解决边界问题提供更好的解决方案^[23]。模糊逻辑已经广泛地运用在地面自组织网络中^[24-26],面向卫星网络通信,模糊逻辑允许使用多个模糊集合和隶属度函数来描述卫星间的各种属性,并通过模糊推理机制综合评估,有助于选择出更优的簇首卫星,从而实现更优的路径规划。将模糊逻辑系统用于路由选择,较单一指标路由策略而言更加全面和准确;较多指标路由策略而言减少了对实时信息的依赖,简化了决策过程,复杂度更低,更能适应动态变化的环境。

本文提出的不均匀分簇路由算法通过模糊逻辑处理卫星的状态消息,智能地将卫星划分为不均匀的簇,面向不确定的业务需求,实现资源的高效分配和动态负载均衡,延长卫星使用寿命。此外,该算法还通过信息中继介质保证了业务的连续传输,提高了卫星对地面业务的成功响应率,从而提高了系统吞吐量。

1.2 系统流程

根据卫星网络的特性,本文设计了一套包含多种模糊变量和相应模糊规则的库,支持灵活的路由决策过程。

工作流程大致分为 3 个阶段：分簇前准备阶段、分簇阶段、数据传输阶段。

在分簇之前，先按照地面站的覆盖范围进行区域划分，区域内是待分簇的所有卫星，地面站与星上建立馈电链路的模型如图 1 所示，将地面站覆盖区域近似为圆形，经过覆盖区域内的卫星均有概率与地面用户进行业务传输，需要和地面站进行建链。覆盖区域的平面模型如图 2 所示，将卫星抽象成区域内具有移动特性的点，将地面站的覆盖范围抽象成坐标系，默认地面站在区域内的投影为圆心。 k 颗 VLEO 卫星随机分布在轨道上，卫星的位置用范围内坐标表示，其中，坐标系模拟星座轨道，考虑到星座轨道的分布特性，卫星分布为符合轨道特征的网状分布。在实例中，卫星可采用相控阵天线系统，通过轨道参数预测实现邻居发现。在每个时间窗口初始阶段，卫星通过发射包括轨道倾角、升交点赤经等轨道参数的定向信标进行邻居识别，结合星历数据计算相对位置。同轨判定依据为：轨道倾角差值小于 0.1° 且升交点赤经差异在临界值范围内。

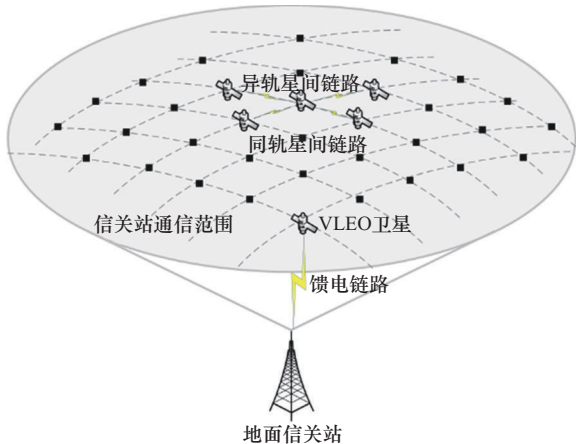


图 1 地面信关站馈电链路模型

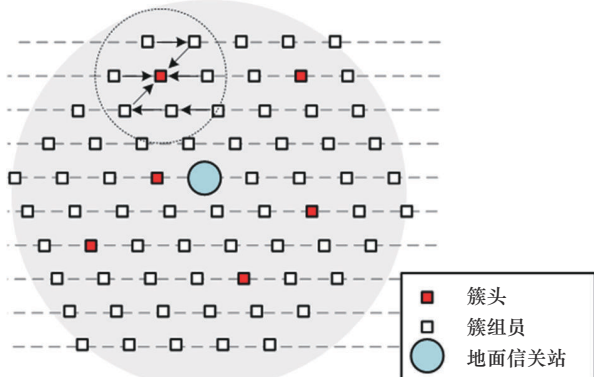


图 2 簇结构覆盖区域平面模型

考虑到 VLEO 卫星高速度、短周期的轨道特点，将时间按照时间分片划分，认为在一个时间分片内，卫星位置是固定的，一个时间分片长度设为 ΔT ，一个时间分片作为一轮，划定 S 个时间分片 $\{T_1, T_2, \dots, T_N, \dots, T_S\}$ 。规定 T_1 为初始状态，后续每个时间分片卫星的空间位置分布需结合上一个时间分片的卫星分布，以及不同卫星的运动轨道、运动速度计算得到。

地面站收集卫星的轨道、覆盖区域以及数据传输需求等信息，计算出卫星离地面站的距离 d 为：

$$d = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + d_0^2} \quad (1)$$

其中， x_i 、 y_i 分别为卫星的横坐标和纵坐标。单体卫星的能耗 E 主要关注传输、接收、数据聚合阶段的能耗，估算一个时间分片内已使用能耗 E ，表示为：

$$E_{\text{total}} = E_{\text{TX}} + E_{\text{RX}} + E_{\text{agg}} \quad (2)$$

$$E_{\text{TX}} = \frac{P_{\text{send}} \times G_t \times G_r}{L} \times \Delta T \quad (3)$$

其中， E_{TX} 表示数据传输能耗， P_{send} 为发射功率， G_t 为发射天线增益， G_r 为接收天线增益， ΔT 为时间分片长度， L 为自由空间路径损耗，具体表示为：

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f d_{\text{rt}}}{c} \right) = \quad (4)$$

$$20 \log_{10}(d_{\text{rt}}) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)$$

其中， d_{rt} 为收发双方的距离，可表示卫星到地面站的距离 d 或者星间链路距离， f 为信号频率， c 为光速。单位时间为 S 个时间分片的时间长度， S 的取值需要考虑卫星的最大连续工作时长。根据单体卫星在同轨和异轨的最大通信半径来判断卫星的邻近可通信卫星数量，即指低于卫星通信阈值范围内的所有邻居卫星数，将该数量记为邻域值 m 。

基于模糊逻辑进行分簇过程，使用的模糊逻辑系统如图 3 所示，将卫星离地面站的距离 d 、能耗 E 以及卫星的邻域值 m 作为模糊逻辑系统的输入。输出有两个，分别为该卫星成为其邻域卫星簇首节点的概率 p ，以及该卫星作为簇首节点的通信竞争半径 r 。

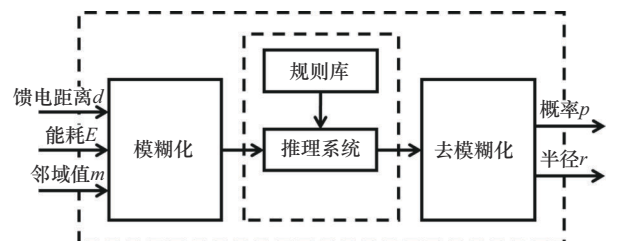


图 3 模糊逻辑系统

输入输出的逻辑关系满足：邻域值越高，该卫星被选为簇首的概率越大，而通信竞争半径与邻域值呈负相关。确定作为簇首的卫星后，剩余卫星分别依据簇首卫星的能耗、到不同簇首的距离、簇首到地面站的距离等因素确定范围内最优的簇加入，将簇首卫星作为其与地面站通信的中继。若簇首与自己不在同一个轨道平面上，考虑到处于不同轨道的卫星星间链路不稳定，选择最近的相邻簇成员卫星作为下一跳路由，二者通过星间链路直接通信。本文提出的不均匀分簇算法中，地面站负责初始分簇计算，卫星节点执行分布式路由维护，流程如算法1所示，地面站角色执行步骤1~7的全局拓扑计算，簇首角色执行步骤8~17的竞争决策，簇成员节点执行步骤18~27的接入决策。

算法1 基于模糊逻辑的不均匀分簇算法

输入：其中 $area$ 为信关站覆盖区域， $Satellite$ 为每颗卫星信息

输出：完成预路由的卫星网络

```

1: /*对于每一个时间分片*/
2: 初始状态卫星离散， $Satellite_i$  下标  $i$  为  $id$ 
3: 信关站收集、计算每颗卫星的状态
4: 使用模糊逻辑系统，将  $Satellite$  初始状态输入系统
5: 经过 if - then 规则库，得到概率  $p_i$  和半径  $r_i$ 
6: 根据  $p$  计算候选簇首  $Satellite$  集合  $CH_{candidate}$ 
7: 候选簇首  $Satellite_j$  竞争半径  $r_j$  内存在其他候选簇首  $Satellite_k$ 
8: /*簇首选择阶段*/
9: 候选簇首  $Satellite_j$  与候选簇首  $Satellite_k$  竞争
10: if  $r_j > r_k$  then
11:    $CH_{candidate}$  中去除  $Satellite_k$ 
12:   EXIT
13: end if
14: if  $Satellite_i$  在  $CH_{candidate}$  中 then
15:    $Satellite_i$  加入簇首集合  $CH$ 
16:   EXIT
17: end if
18: /*入簇阶段*/
19: 接收通信半径内簇首卫星的入簇消息
20: 分别计算到簇首的跳数，优先选择最开销最小的簇首
21:  $Satellite_{CM}$  根据路由发送数据至簇首  $Satellite_{CH}$ 
22: if  $Satellite_i$  下一跳的距离  $> r_i$  then

```

23: $Satellite_i$ 的下一跳修改为地面信关站

24: EXIT

25: else

26: $Satellite_{CH}$ 聚合簇内业务数据，发送至地面信关站

27: EXIT

1.3 对比算法

基于分簇的路由算法设计难点首先在于如何在动态条件下平衡单颗卫星的额外能耗与整体动态网络的能耗，然后需要考虑星间链路状态进行路径规划，最后还需要考虑星上计算能力有限，不能支持全局类的高复杂度路由算法。对离散卫星进行分簇时，需要考虑多种关键参数，以确保网络的稳定性、高效性和可扩展性。

簇首选举是分簇过程中的核心步骤，需要考虑多个参数来决定适合担任簇首的节点：距离直接影响簇的形成，能耗水平影响网络寿命，邻居节点数影响簇内通信效率及网络的通信开销，跨轨道星间通信影响拓扑稳定性。簇首选择策略按依据的参数数量可以分为单一策略和混合策略，二者各有优势：单一策略复杂度较低，计算开销低，算法运行更快，但容易忽略数据中的重要信息，分簇结果的区分度不高，导致簇首选择不平衡或网络寿命缩短；混合策略可以通过更多特征提高簇的准确性，但复杂度较高，计算量和内存需求增加。本文设定两种对比算法：距离优先分簇以及基于负载均衡的均匀分簇。

1.3.1 距离优先分簇

距离优先分簇算法在分簇机制中将节点与下一跳节点间的物理距离作为核心决策参数，其优先级权重设置为系统最高等级。在具体实例中，该算法的距离计算一般采用基于接收信号强度指示（received signal strength indication, RSSI）的测距模型，通过 Friis 自由空间传播方程与对数路径损耗模型构建节点间距映射关系。仿真实验中，在距离优先算法的拓扑初始化阶段，采用离散化独立簇结构，将星间网络中的每个卫星节点定义为独立簇头候选节点，通过空间坐标系转换建立三维欧氏距离计算模型，同步生成包含卫星间链路距离及卫星与地面站间直连距离 $d_{ij}(i, j \in N)$ 的全局距离矩阵 D ，其中矩阵维度由卫星节点数量 n 确定，距离矩阵 D 表示为：

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, d_{ij} 为编号为 i 和编号为 j 的卫星间距离, 该距离参数通过星载导航系统实时获取。在簇首选举阶段, 建立基于地理位置的动态选举机制, 具体实施策略为: 通过预设的距离阈值筛选准则, 将满足 $\|s_i - G\| \leq d_{th}$ 条件的卫星节点纳入备选簇首集合 C (其中, G 表示地面站坐标, d_{th} 为预设阈值参数), 该机制可有效确保簇首节点具备与地面站的高效通信能力。在节点归属分配阶段, 采用最小距离优先的贪婪算法进行簇结构优化。对于非备选簇首节点 $s_k \in S/C$ (其中 S 为簇成员集合), 计算其与各备选簇首节点的距离矩阵 $D_k = \{d(s_k, c_i) | c_i \in C\}$, 依据距离最优准则确定归属簇。若经过全局分配后存在孤立簇首节点 $c_j \in C$, 即 $|c_j.members| = 0$, 则启动冗余簇首消除机制: 首先解除 c_j 的备选资格, 随后将其作为普通节点重新执行归属分配, 通过该动态调整策略可显著提升网络拓扑的稳定性。最终形成的簇结构需满足完备性条件: $\bigcup_{c_i \in C} c_i.members = S$ 且 $\forall c_i, c_j \in C, c_i.members \cap c_j.members = \emptyset$ 。当所有节点完成归属分配后, 系统生成最终簇首列表, 标志着本轮分簇周期结束。

1.3.2 基于负载均衡的均匀分簇

基于负载均衡的均匀分簇算法将卫星节点的能耗优化作为网络分簇过程的核心决策准则。理论与工程实证研究表明, 在轨卫星能源系统存在显著的双重约束特征: 其一源于周期性充放电机制, 受限于卫星平台的能源供给特性, 蓄电池系统仅能在日照区完成充电循环, 且必须满足平均充电功率持续高于放电功率的条件; 其二源自通信载荷的热-功耦合效应, 卫星内外部均使用保温包覆等工艺, 当卫星执行星地业务传输时, 馈电链路工作模式功耗水平较休眠模式显著提升, 且内部载荷温度随工作时长呈现累积性增长趋势。结合以上两点, 卫星整体的工作能耗与任务持续时间存在强正相关关系, 长期高负荷运行将引发节点性能劣化。为此, 基于负载均衡的算法设定了单星持续运行的时间阈值, 构建了网络负载均衡的均匀分簇决策机制。该算法创新性地构建了动态能量消耗模型, 通过量化单位时间窗内的能源损耗率来表征卫星负载状态。在初始化阶段, 对卫星节点的历史工作负载进行回溯分析, 具体通过计算最近时段内的能量消耗轨迹函数 $E(t) = \int P(t)dt$, 其中 $P(t)$ 为瞬时功耗函数, 从而建立节点能耗特征图谱。作为均匀分簇机制, 该算法将网络区域划分成均匀的多级网格单元, 其分簇的具体实施过程如下。

首先, 构建极坐标系下的动态网格划分模型: 以地

面站覆盖区域中心为极点, 采用等距同心圆环进行径向切割, 继而对各圆环实施等角度扇形分割, 形成多级网格单元。

然后进行簇域内簇首选举: 将存在两颗及以上卫星的网格单元定义为候选簇域, 通过分布式协商完成簇域组建。完成簇域组建后, 在簇内进行簇首选举, 采用多属性决策模型, 每个卫星节点维护一个实时更新的负载评价矩阵, 矩阵表达式为:

$$L = [E_{avg}, \Delta E, E_{remain}] \quad (6)$$

其中, E_{avg} 为平均能耗率, ΔE 为能耗波动方差, 表征卫星能耗变化程度, E_{remain} 为剩余能源储备, 表征卫星在超负荷门限之外的剩余可使用能量。基于此负载评价矩阵 L , 赋予各指标信息不同权重, 结合能量消耗轨迹预测选择最优候选节点。

2 问题建模

2.1 基于模糊逻辑的不均匀分簇

使用模糊工具对图 3 所示模糊逻辑系统内部进行建模, 具体细节如下。

(1) 模糊过程: 对输入变量集依次进行模糊化, 分别获得关于距离 d 、能耗 E 、邻域值 m 的远中近、低中高、多中少等级的隶属度函数, 将清晰的输入值模糊化为适当的语言变量。

(2) 模糊输出: 给输入的 3 个要素设定不同的权重, 建立输入对输出的对应规则库, 最终输出 p 和 r 两个要素的隶属度函数, 规则库表示输入输出的逻辑映射关系如图 4~图 5 所示。图 4 给出了单颗卫星成为簇首的概率随距离和能耗的变化关系, 距地面站距离越近, 卫星的能耗越低, 则该卫星成为簇首的概率就越大。图 5 给出了单颗卫星成为备选簇首后的竞争半径随距离和节点度的变化关系, 距地面站距离越远, 邻居卫星越多, 卫星的竞争半径越大。

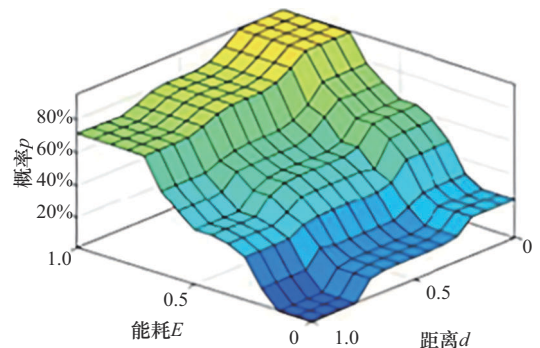
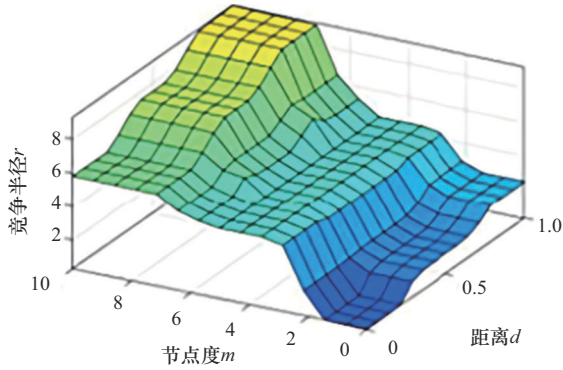


图 4 模糊逻辑输入 d 、 E 与输出 p 的规则对应关系

图5 模糊逻辑输入 d 、 m 与输出 r 的规则对应关系

(3) 清晰化：给输出两要素的隶属度函数去模糊，去模糊后每颗卫星获得具体的成为簇首的概率值 p 和通信竞争半径 r 。本文采用面积中心法去模糊，表达式为：

$$z = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (7)$$

其中， $\mu(x)$ 是隶属函数，积分在整个值域上进行。

每颗卫星获得成为簇首的概率值后进行备选簇首选举，按概率生成备选簇首，若某颗成为备选簇首卫星的通信竞争半径内存在其他概率值及竞争半径均优于自身的备选簇首，则取消该卫星的备选身份，作为离散卫星等待选择簇首入簇。选举完成后，所有备选簇首成为正式簇首。然后，根据簇首分布，进行路由分配和任务规划。整个网络内确定作为簇首的卫星后，剩余离散卫星在其通信半径 r 内可选簇首卫星可能会多于一个。对于范围内的多个簇首，编号为 i 的离散卫星 Satellite_i 根据邻近簇首卫星的不同参数确定范围内最优的簇加入，参数考虑单位 T 时间内簇首的能耗 E 、离散卫星到簇首的距离 d 、簇首到地面站的距离 d_0 等，能耗 E 的优先级 priority_1 、卫星距离 d 的优先级 priority_2 、簇首到地面站的距离 d_0 的优先级 priority_3 满足 $\text{priority}_1 > \text{priority}_2 > \text{priority}_3$ ，优先选择竞争半径内单位时间能耗最低的卫星作为簇首，并考虑该卫星到所属簇首的距离。

2.2 路由选择策略

簇形成过程完成后，进行路由分配，路由选择策略流程如图6所示。若卫星 Satellite_i 非簇首卫星，则将 Satellite_i 的簇首卫星 Satellite_j 作为 Satellite_i 与地面站通信的中继，距离阈值 d_{th} 设置为异轨最大通信半径；若 Satellite_j 与 Satellite_i 不在同一个轨道平面上且二者之间的距离大于距离阈值 d_{th} ，则选择最近的相邻簇成员卫星作为下一跳路由，二者通过星间链路直接通信。若卫星 Satellite_i 为簇首卫星，其下一跳为地面站。路由分配完成

后，进行任务规划，卫星 Satellite_i 作为簇首时，等待簇成员的业务数据，在此阶段还需考虑卫星的缓存空间有限，需要提高空间利用率， Satellite_i 在接收来自簇成员的业务数据时，比较现有缓存，进行重复数据聚合后再进行保存。

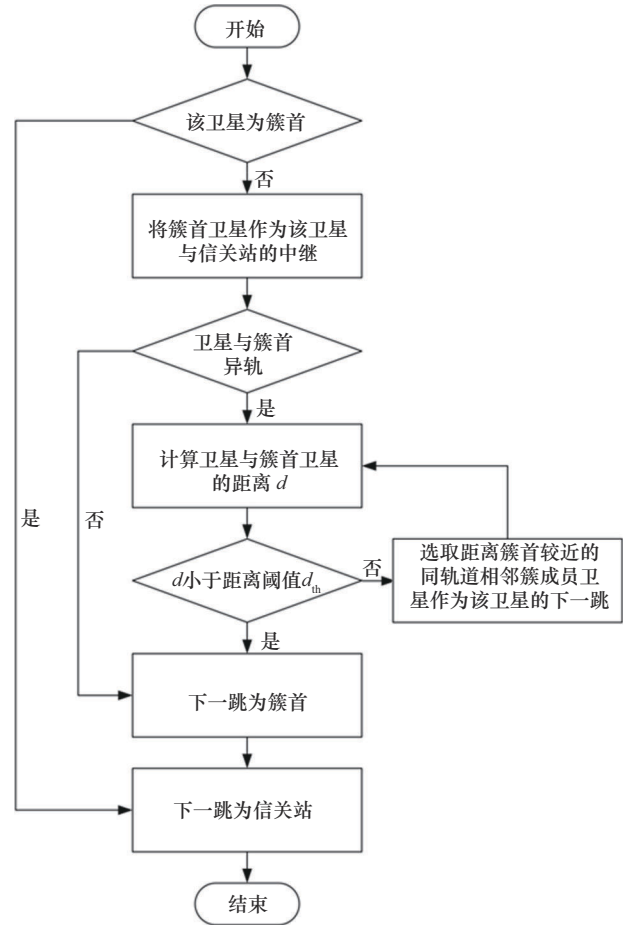


图6 路由选择策略流程

2.3 网络模型

整个卫星网络在每一轮次都会进行分簇和数据传输，根据每颗卫星的概率值 p 和通信竞争半径 r 分簇完成后，就进入数据传输阶段。数据传输阶段考虑同构单位时间 T 内卫星的能耗阈值 E_{max} ，认为当单位时间内卫星能耗大于 E_{max} 时，卫星处于超负载状态，在该单位时间 T 内不再对后续的业务需求做出响应，其中业务需求包括地面终端上行业务需求以及星间业务数据交换；还考虑卫星的最大缓存量 M_{max} ，若认为某卫星的预业务量超过最大缓存量，则需要等清空现有缓存后，再与数据发送端建立连接以接收多余数据。当某一颗卫星作为簇首时，为提高缓存空间利用率并减少数据转发量，在接收来自簇成员

的业务数据时, 比较现有缓存, 进行重复数据聚合后再进行保存。此外, 在数据传输阶段, 应注意以下几点。

(1) 不考虑地面站的能耗限制。

(2) 卫星网络分布在 ΔT 时间分片内视为静止, 其中 $\Delta T \ll T$ 。

(3) 在进行仿真场景设计时, 卫星初始位置随机生成, 后续运动按轨道特征模拟。

(4) 卫星在单位时间 T 内通过太阳翼等方式补充的能量不影响能耗阈值。

单颗卫星的轨道是周期性且可预测的, 但是对于大规模组网而言, 多颗卫星可能因为轨道高度不一致、变轨等行为导致网络拓扑不能和运行轨道一样周期性变化。本文在仿真时, 基于全局网络区域划分后的场景, 且使用的时间阈值与时间分片长度有关, 在所讨论的时间范围阈值内, 卫星的全局轨道运行特征对于区域划分后的仿真场景而言意义不大, 更关注卫星短期内的邻居拓扑变化。此外, 在实际通信过程中, 卫星的功耗不仅包括发射功率, 还包括卫星内部电子设备、姿态控制、电源系统等功耗。但本文主要关注的是与星间链路通信直接相关的功耗。在上述前提下, 可以得出卫星总能耗包含传输能耗、接收能耗及数据聚合能耗, 一个时间分片内能耗具体计算见式 (2)。

传输和接收的能量与链路损耗和业务量有关, 可以得出在卫星接收功率、天线增益相同的前提下, 不同卫星的能耗差异主要与业务量和链路损耗有关。电波的自由空间衰减表达式为:

$$L_d = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (8)$$

其中, λ 为工作波长, d 为发送方到接收方的距离, 可以为卫星间距离或者卫星与地面站的距离。

接收功率的表达式为:

$$P_r = P_t \times G_t \times \frac{G_r}{L_d} \quad (9)$$

其中, P_t 为发射功率, G_t 为发射天线增益, G_r 为接收天线增益。

鉴于业务流量具有显著地域不均衡性以及随时间波动的特性, 本文规划并部署了多个面积各异、地理位置灵活调整的高业务密度区域, 设计这些区域旨在精准匹配并响应不同地理区域内业务需求的动态变化。负责覆盖高业务区域的卫星处于高业务负载的运作状态, 模拟了分布不均匀的业务需求, 对路由算法的灵活性和可靠性有较高的要求, 有利于辅助评估整个卫星网络系统在

应对复杂业务场景时, 采用不同路由算法实现负载均衡的不同效果。

3 仿真及分析

本文通过仿真对提出的路由算法进行验证, 还将提出的负载均衡不均匀分簇算法与常见的两种卫星分簇路由算法进行对比, 并将不使用分簇策略的传统路由方式作为对照组, 从多个角度评估了本文提出的卫星路由算法的性能。

3.1 仿真参数设定

为了更好地评估算法性能, 为不同业务场景设定不同时间参数。在有高业务密度区域的场景下, $S=1\ 500$, 即实验进行 1 500 轮; 业务分布平均的场景下, $S=3\ 000$ 。 S 值较大可确保单位时间 T 内大部分卫星的负载状态因为工作情况改变, 有利于评估不同算法的负载均衡能力以及鲁棒性。在不同场景下基于以下几个方面进行算法对比。

(1) 系统出现超负荷卫星的时间节点

卫星处在超负荷工作状态不仅会对卫星本身寿命产生影响, 也不能保证自身的工作效率和稳定性, 甚至可能对整个网络拓扑产生影响。第一个超负荷卫星的出现意味着系统内出现了首个因负载增大而必须停止工作进行休整的卫星, 卫星停止工作的阈值用单位时间内持续运作的最大时间表示, 超过该阈值则表示在该时间分片内该卫星负载过大, 不能再正常工作。该参数也意味着在该时间点卫星网络拓扑发生了变化, 对整个系统的负载均衡能力评估具有较大意义。

(2) 面对不同业务流量时算法的鲁棒性

由于用户分布不均, 地面业务的某些卫星区域可能会承载更多流量, 而其他区域则流量较少。路由选择不当可能进一步加剧热点区域的拥堵, 导致带宽与资源分配失衡, 链路的负载不均衡性加剧。通过仿真模拟真实的流量分布情况, 依据不同前提下卫星的平均最大工作时长和吞吐量分析出不同路由算法的鲁棒性。

(3) 卫星网络业务响应率

业务响应率 η 定义为: $\eta = (\text{成功传输业务量}) / (\text{地面业务总量}) \times 100\%$, 成功响应的数据量占该时间内区域所有吞吐量的比值即网络业务响应率, 影响因素包括链路中断概率、队列溢出概率、卫星负载状态等。当卫星剩余能量低于安全阈值或者缓存溢出时, 判定卫星暂停业务响应。在仿真中的设置如下: 在过去单位时间内, 若某颗卫星的业务工作时长超出阈值, 从能源的角度来看认

为该卫星会进入强制休眠状态。此外，若某簇首卫星需要处理的业务总量大于其设定的处理缓存，则可能忽略后续汇聚来的业务，从而影响业务响应率。该参数反映了在该时间段内网络的通信性能，可以评估路由策略传输路径、平衡负载的能力。

(4) 簇首数变化

簇首数代表着网络内星群的数量，簇首数的变化能表示在单位时间内路由对网络拓扑自适应的程度。

仿真剩余参数设置为：卫星数量 $K=100$ 颗，单颗卫星上行业务需求总量 $D=4$ Gbit/s，同轨最大通信半径 $R_{\text{MAXeq}}=50$ km，异轨最大通信半径 $R_{\text{MAXdiff}}=25$ km。

3.2 仿真结果及分析

系统内处于正常工作状态的卫星数量如图7所示，其中横坐标为轮数，即时间分片数。对照组中无分簇的路由策略存在分段时间骤降的情况，这是因为随着实验运行轮数的增加，网络中单颗卫星的能耗会在某个时间节点附近陆续达到临界值，使得这些卫星的工作状态在该时间轮数附近统一发生改变。而剩下3种使用分簇的路由策略能使得能耗较多的卫星减少工作频率，改善分时段骤降的现象。从图7可以看出，在同一时间，采用本文提出的负载均衡不均匀算法的卫星超负荷量远远低于其他两种算法，3种分簇策略均优于对照组。

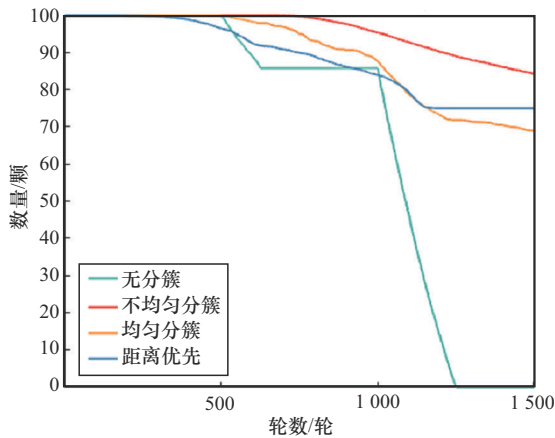


图7 处于正常工作状态的卫星数量

在业务流量平均的情况下，系统出现第一个超负荷卫星时间节点的情况如图8所示，其中纵坐标为轮数。在部分高业务流量的情况下，系统出现第一个超负荷卫星时间节点的情况如图9所示。从图8可以看出，在业务流量分布均匀的前提下，采用模糊逻辑的不均匀分簇策略时，首颗超负荷卫星出现的时间平均在2100轮，采用

均匀分簇算法时，出现首颗超负荷卫星的轮数平均为990轮，采用距离优先分簇算法时，出现首颗超负荷卫星的轮数平均为750轮，可以得出距离优先分簇算法在卫星网络中不适用。从图9可以看出，在存在高业务流量区域的前提下，采用模糊逻辑的不均匀分簇策略时，首颗超负荷卫星出现的时间最晚，平均在830轮，在高业务流量区域存在的前提下依旧能实现网络的负载均衡，具有良好的鲁棒性。均匀分簇算法在业务均匀分布时表现良好，但在存在高业务流量区域的情况下，出现首颗超负荷卫星的轮数平均为540轮，就这一指标而言，其优势不大，不适用于实际情况。而采用距离优先分簇算法时，在高业务流量情况下出现首颗超负荷卫星的轮数平均为480轮，这是因为该算法对业务流量比较敏感，随着流量面积及区域变化容易出现极端情况，算法鲁棒性较差。

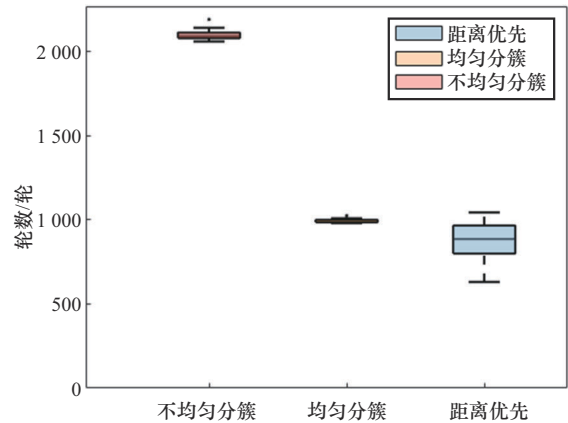


图8 均匀流量模型下不同策略的超负荷卫星情况

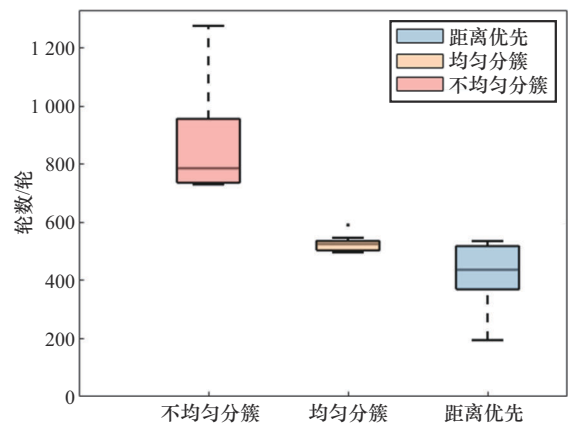


图9 不均匀流量模型下不同策略的超负荷卫星情况

由此可见，分簇对负载均衡起到了积极的作用，且就负载均衡效果和鲁棒性而言，本文所提出的不均匀分

簇算法在分簇算法中具有一定的优势。

因每一轮业务流量的分布情况存在随机性,所以不进行业务总吞吐量的比较,而是对整个网络对地面业务的响应比例进行比较,这样亦不丧失通用性。图10是在存在高业务流量区域场景下4种策略响应比例的仿真结果,可以看出,图10中距离优先算法在此仿真前提下表现最差,这是因为距离优先算法并未考虑整个网络的负载均衡,距离地面站越近的卫星越容易成为中继,也越早达到超负荷状态。由此可以得出结论:只将距离作为路径规划参数的算法,会由路由规划不合理导致热点问题以及网络工作负载不均,从而对整个卫星网络的业务流量产生消极影响,在极端情况下这种分簇甚至会加剧能量的浪费;而对照组的响应曲线同图7的超负荷曲线趋势相似,都存在分时段骤降的情况,但其骤降比例远远大于其超负荷比例,这是因为最先超负荷的都是分布在高业务流量区域内的卫星。均匀分簇策略和本文提出的基于模糊逻辑的不均匀分簇策略的表现均优于以上两种策略,且采用不均匀分簇策略时的业务响应比例最高。

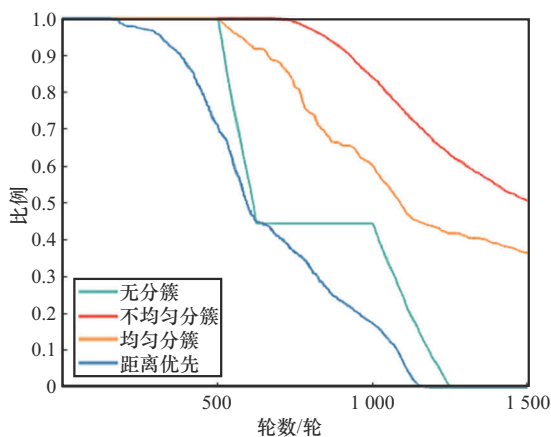


图10 不同路由策略下业务的响应比例

图11给出了不同路由策略下系统的能耗,可以发现无分簇的能耗随时间变化上升最快,而采用本文提出的不均匀分簇策略时的能耗次之,略高于均匀分簇,上升最慢的是距离优先分簇策略。系统能耗与业务响应量相关,结合图10可以看出采用不均匀分簇策略时系统的吞吐量最高,但相较其他两种算法,不均匀分簇策略的能耗只是略微升高。因此可以得出结论:本文提出的基于模糊逻辑的不均匀分簇路由算法具有较高的能量利用率,相同的能耗前提下能传输更多的业务数据。

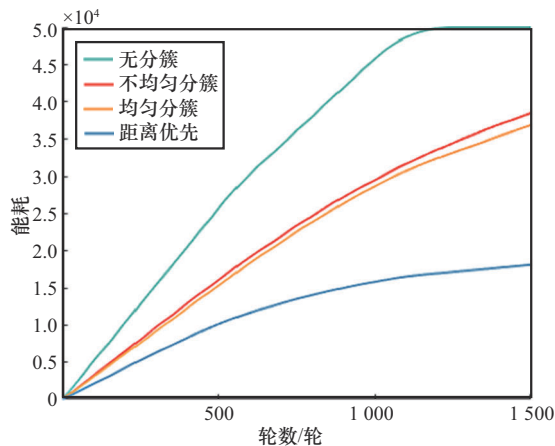


图11 不同路由策略下系统的能耗

图12给出了不同策略下选举出的簇首数量随时间的变化情况,可以看出本文提出的不均匀分簇算法以及均匀分簇的簇首数量均随时间增长逐渐减少,且不均匀分簇算法在前期选举出的簇首数较多,后期簇首数较少,这是因为各颗卫星的平均工作时间出现一定差距后,临近超载的卫星成为簇首的概率下降,并且此时簇首的分布区域相对均匀。采用均匀分簇策略时,簇首数量随时间增长逐渐减少,均匀分簇是基于区域位置分簇的算法,高业务流量区域的存在使得某些簇内卫星平均负载相对较多,经过一段时间后容易出现集体超载的情况,后续这一区域不会产生新的簇首。采用距离优先策略时,簇首数量比较稳定,这是因为该策略簇首的选择只与位置分布有关。

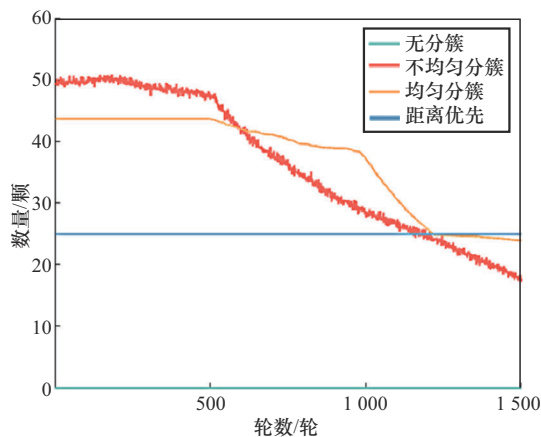


图12 不同策略下选举出的簇首数量随时间的变化情况

4 结束语

本文研究了基于簇的甚低轨卫星通信系统馈电链路

路由算法,提出了一种面向卫星网络的不均匀分簇路由算法,同时对比了两种地面经典路由算法,分析了影响网络性能的因素,并对使用不同路由策略的网络进行了性能的仿真评估。仿真结果表明,本文提出的不均匀分簇策略算法复杂度低,相对于地面经典路由算法具有更高的鲁棒性,在网络负载均衡能力上表现也更好。该基于簇的路由策略能够延长甚低轨卫星通信系统的平均网络寿命,随着甚低轨卫星系统的发展和卫星数量的增加,基于簇的馈电链路路由算法将会发挥其技术优势,降低通信成本,促进星地通信的发展。

参考文献

- [1] GARCÍA BESCÓS A. Study of the benefits and applications of VLEO (Very Low Earth Orbit) for communications and definition of space new business models: Starlink case[D]. Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [2] CHEN G Q, WU S H, DENG Y J, et al. VLEO satellite constellation design for regional aviation and marine coverage[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2023, 11(1): 1188-1201.
- [3] LUO X W, CHEN H H, GUO Q. LEO/VLEO satellite communications in 6G and beyond networks-technologies, applications, and challenges[J]. IEEE Network, 2024, 38(5): 273-285.
- [4] NIU Z, YANG H, YAO Q Y, et al. Reliable low-latency routing for VLEO satellite optical network: a multiagent reinforcement learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(3): 2309-2321.
- [5] DONG C Y, XU X, LIU A J, et al. Load balancing routing algorithm based on extended link states in LEO constellation network[J]. China Communications, 2022, 19(2): 247-260.
- [6] 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.
- [7] LUO Z J, PAN T, SONG E G, et al. A refined Dijkstra's algorithm with stable route generation for topology-varying satellite networks [C]//Proceedings of the 2021 IEEE 41st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1146-1147.
- [8] 李喆, 李冬妮, 王光兴. LEO/MEO 卫星网络中运用自组网思想的动态路由算法[J]. 通信学报, 2005, 26(5): 50-56.
LI Z, LI D N, WANG G X. New dynamic routing algorithm based on MANET technology in the LEO/MEO satellite network[J]. Journal of China Institute of Communications, 2005, 26(5): 50-56.
- [9] BASIT Z, TABASSUM M, SHARMA T, et al. Performance analysis of OSPF and EIGRP convergence through IPsec tunnel using multi-homing BGP connection[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 4853-4861.
- [10] SUN Y H, FANG M, SU Y X. AGV path planning based on improved Dijkstra algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1746(1): 012052.
- [11] 范永鹏. 基于大型低轨卫星星座的网络容量分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
FAN Y P. Network capacity analysis based on large LEO satellite constellation[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [12] 杨子健. 大规模低轨卫星网络动态路由算法及其安全技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院微小卫星创新研究院), 2023.
YANG Z J. Research on dynamic routing algorithm and security technology of large-scale low earth orbit constellation[D]. Shanghai: Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [13] 李锐. 多层空间混合网络架构与路由设计[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院微小卫星创新研究院), 2023.
LI R. Multi-layer hybrid space network architecture and routing designs[D]. Shanghai: Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [14] 王芷晴. 面向星地链路动态切换的卫星光网络控制路由机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
WANG Z Q. Routing mechanism oriented dynamic handover of ground-satellite link for optical satellite networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [15] 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.
ZHENG S, ZHANG X, WANG W B. Survey of low earth orbit satellite communication network routing technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 97-105.
- [16] 朱立东, 张勇, 贾高一. 卫星互联网路由技术现状及展望[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 33-42.
ZHU L D, ZHANG Y, JIA G Y. Current status and future prospects of routing technologies for satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 33-42.
- [17] WANG B, LIU L X, LIU S J, et al. Performance analysis of OSPF in integrated satellite and terrestrial network[C]//Proceedings of the 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-4.
- [18] YAN Z K, ZHAI S H, WANG W. Performance analysis and im-

- proved of using OLSR in low-orbit satellite communication system [C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1423-1426.
- [19] ZHU H W, JIN Z H. Routing algorithm for Ad-Hoc networks of LEO satellites based on OSPF[C]//Proceedings of the 2023 3rd International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 404-408.
- [20] 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, 2022, 72(3): 3440-3454.
- [21] DENG X, ZENG S Y, CHANG L, et al. An ant colony optimization-based routing algorithm for load balancing in LEO satellite networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022: 3032997.
- [22] WANG L M, XU Z, ZHI R X, et al. Adaptive load balancing routing algorithm for low earth orbit satellite cluster networks[C]//Proceedings of the 2024 9th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 666-671.
- [23] HÁJEK P. Metamathematics of fuzzy logic[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] SHERIBA S T, RAJESH D H. Energy-efficient clustering protocol for WSN based on improved black widow optimization and fuzzy logic[J]. Telecommunication Systems, 2021, 77(1): 213-230.
- [25] 孙爱晶, 李世昌, 张艺才. 基于 PSO 优化模糊 C 均值的 WSN 分簇路由算法[J]. 通信学报, 2021, 42(3): 91-99.
- SUN A J, LI S C, ZHANG Y C. WSN clustering routing algorithm based on PSO optimized fuzzy C-means[J]. Journal on Communications, 2021, 42(3): 91-99.
- [26] ZHAO L, YIN Z H, YU K P, et al. A fuzzy logic-based intelligent multiattribute routing scheme for two-layered SDVNs[J]. IEEE

Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(4): 4189-4200.

[作者简介]



李鑫 (1991-), 男, 博士, 长光卫星技术股份有限公司副研究员, 主要研究方向为低轨卫星通信。



余龙丹 (2000-), 女, 现就职于长光卫星技术股份有限公司, 主要研究方向为低轨卫星通信。



张校宁 (1997-), 男, 现就职于长光卫星技术股份有限公司, 主要研究方向为低轨卫星通信。



常俊德 (1990-), 男, 长光卫星技术股份有限公司助理研究员, 主要研究方向为低轨卫星通信。