

低轨星座网络多控制器动态部署研究

范泽基, 刘健培*, 邝 坚

北京邮电大学计算机学院, 北京

收稿日期: 2024年11月26日; 录用日期: 2024年12月24日; 发布日期: 2024年12月31日

摘 要

LEO (Low Earth Orbit)星座网络凭借其全球覆盖能力, 能够有效扩展和补充地面网络的不足, 但其高速运动和拓扑结构快速变化为控制器的部署带来了巨大挑战。为应对LEO星座网络中动态拓扑的挑战, 本文提出了一种基于区域划分的SDN多控制器选择与动态迁移方法, 采用Voronoi区域划分, 并引入动态评分机制, 综合考虑卫星与种子点的距离、资源使用情况和卫星在区域内停留时间等因素, 动态选拔最优控制器。此外, 本文提出的控制器迁移策略, 通过监测域内平均时延和控制器的资源消耗, 确保控制器及时迁移, 提升管理效率与稳定性。仿真实验表明, 本文提出的SDN多控制器部署方法在降低传输时延方面优于现有方法, 同时有效优化了控制器的资源使用率, 更加适应LEO星座网络的频繁拓扑变化。

关键词

低轨星座网络, Voronoi区域划分, SDN多控制器

Research on Dynamic Placement of Multiple-Controllers in LEO Constellation Networks

Zeji Fan, Jianpei Liu*, Jian Kuang

School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing

Received: Nov. 26th, 2024; accepted: Dec. 24th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

The LEO (Low Earth Orbit) constellation network, with its global coverage capability, can effectively expand and supplement the deficiencies of terrestrial networks. However, its high-speed movement and rapidly changing topology pose a huge challenge for the placement of controllers. To address

*通讯作者。

the challenge of dynamic topology in LEO constellation networks, this paper proposes an SDN multi-controller selection and dynamic migration method based on regional division. It adopts Voronoi regional division and introduces a dynamic scoring mechanism. By comprehensively considering factors such as the distance between satellites and seed points, resource usage, and the residence time of satellites in the region to dynamically select the optimal controller. In addition, the controller migration strategy proposed in this paper ensures timely migration of controllers by monitoring the average delay within the domain and the resource consumption of the controller. Simulation experiments show that the SDN multi-controller deployment method proposed in this paper is superior to existing methods in reducing transmission delay. At the same time, it effectively optimizes the resource utilization rate of the controller, making it more adaptable to the frequent topological changes of LEO constellation networks.

Keywords

LEO Constellation Network, Voronoi Regional Division, SDN Multi-Controller

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着 5G 技术的普及,人们对网络的需求增加,而地面网络在偏远环境中的覆盖仍存在不足。LEO (Low Earth Orbit)星座网络凭借全球覆盖能力[1],有效弥补地面网络空白。然而,LEO 星座网络因高速运动和拓扑变化,增加了管理复杂性。为了解决上述挑战,SDN (Software Defined Networking)通过将控制平面和数据平面分离,有效应对了 LEO 星座网络中的复杂拓扑变化。这种架构使得网络控制更具灵活性,能够实时调整和优化路由策略。然而,由于 LEO 星座卫星数量众多,单一控制器在性能和时延方面难以满足需求,因此多控制器的部署成为必然选择。

现有研究中,LEO 星座网络中 SDN 多控制器的部署策略主要可以分为静态部署(Static Controller Placement, SCP)和动态部署(Dynamic Controller Placement, DCP)。静态部署策略一般在星座初始部署阶段决定控制器的位置,如 Liu 等人[2]提出了一种联合 SDN 控制器与卫星网关的静态部署方案,采用模拟退火和聚类算法进行优化,以最小化延迟和提高网络可靠性。然而,静态部署无法适应网络拓扑的频繁变化,难以应对卫星失效或网络状态变化带来的需求。Guo 等人[3]则提出了 SPDA 方法,结合静态部署和动态映射,有效增强了控制器和低轨星座网络对于拓扑变化的适应能力。崔梦梦等人[4]同样采用静态部署与动态分配相结合的混合部署策略,通过构建多目标优化模型初步选择控制器静态位置,并使用动态算法调整交换机。动态部署方面,Papa 等人[5]通过整数线性规划(ILP)优化控制器的位置,以最小化流量设置时间。万颖等人[6]综合考虑控制链路时延、星间链路可靠性及负载均衡,提出了一种基于改进 NSGA-III 的控制器部署方法。Wei 等人[7]则通过动态调整控制器的位置和卫星之间的映射关系,利用多智能体深度 Q 学习(MADQN)优化多控制器部署。

在控制器迁移方面,现有文献也提出了优化方案来应对 LEO 网络的动态特性。Liuwei 等人[8]提出了一种针对 LEO 星座网络中控制器迁移的动态迁移策略,通过分析控制器的负载组成,设置触发因素以确定负载失衡,再选择迁移目标,并通过建立迁移效率模型来提高控制器的迁移效率。

在低轨星座网络中,所有卫星都具有交换机功能且所有卫星节点也都具有被选为控制器的可能性。尽管上文所述的研究方法在一定程度上解决了 LEO 星座网络中控制器的部署和迁移问题,但这些方法仍

未考虑卫星在执行交换机功能时所占用的资源，难以适应卫星个体在运行过程中的状态变化。

因此，本文提出了一种基于 Voronoi 区域划分的 SDN 控制器选择方法。Voronoi 区域划分法是一种基于几何划分的区域分配策略，其特点是在空间中通过多个种子点进行划分[9]，使得每个区域中的任意点与其所属的种子点之间的距离比其他种子点更近。具体来说，本文基于 Voronoi 区域划分，综合考虑卫星与种子点的距离、资源使用情况、停留时间等因素，提出动态评分机制。在评分机制的基础上提出了选拔迁移机制，以确保在控制器失效或资源紧缺时，能够根据卫星的当前状态动态地选拔或迁移新的控制器。

2. 相关工作

2.1. 网络拓扑模型

LEO 星座网络由大量低轨卫星组成，卫星处于近地轨道，轨道高度一般在 300 公里到 1200 公里之间[10]。由于距离地球表面较近，低轨卫星可以提供低延迟的通信服务。每颗卫星会与邻近的多颗卫星建立通信链路，如图 1，卫星会与同轨道前后邻近的卫星，以及相邻轨道上距离接近的卫星建立直接链路，这些直接连接的卫星被称为邻接卫星。通过这种方式，低轨星座网络形成了一个网格状的拓扑结构，该结构随卫星运行而不断变化，且链路的建立依赖于卫星间的距离和可视性。

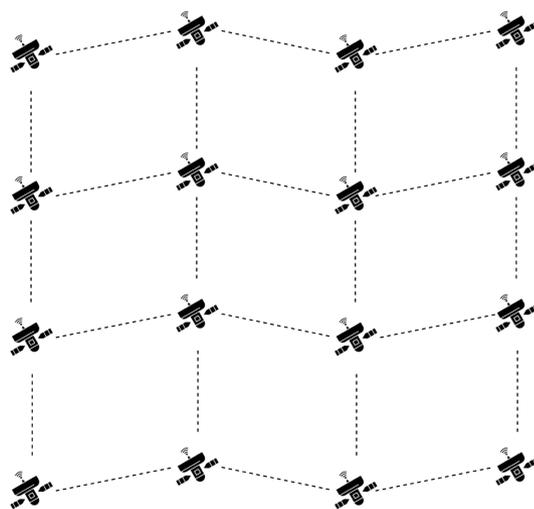


Figure 1. Diagram of the inter-satellite link system

图 1. 卫星间链路示意图

可将低轨星座网络模型抽象为无向图 $G = (V, C, E)$ ，其中， V 表示卫星节点集合，即 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，其中 v_i 代表第 i 颗卫星，即第 i 个 SDN 交换机。 C 表示控制器节点集合，控制器集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 中的每个控制器 c_i 负责管理一定范围内的卫星节点， E 表示卫星间的通信链路集合，包含卫星之间的直接通信链路。

2.2. 动态评分机制

在选择控制器时，优先考虑控制器与交换机之间的传输时延，传输时延可以通过两者之间的距离来衡量。由于 Voronoi 图的几何特性恰好契合了我们对控制器部署的需求(例如图 2 采用均匀划分之后的 Voronoi 区域)：通过合理划分区域，让控制器处于种子点附近，可以确保每个区域内的交换机与其对应的控制器之间的平均传输时延最小化，同时也使得控制器之间的通信时延得到优化。

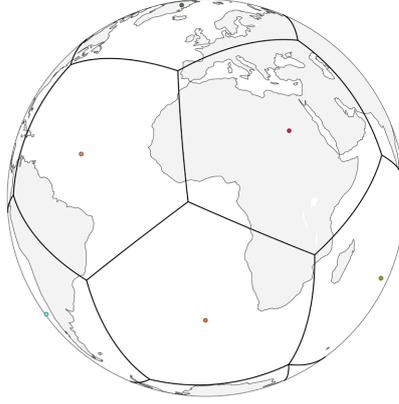


Figure 2. Diagram of the Voronoi regional division
图 2. Voronoi 区域划分图

首先, 我们需要根据低轨星座的部署特征以及控制器数量, 选择合适位置的点, 这些点被称为源点或种子点, 集合为 $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。基于这组种子点, 通过距离将每颗卫星划分至不同的区域:

$$v_i \in Z(s_j) \text{ 当且仅当 } d(v_i, s_j) < d(v_i, s_k) \quad \forall s_k \neq s_j \quad (1)$$

其中, $Z(s_j)$ 表示与种子点 s_j 关联的 Voronoi 区域。 $d(v_i, s_j)$ 表示卫星节点 v_i 与种子点 s_j 之间的距离。该距离可以表示为三维欧几里得距离, 具体公式为:

$$d(v_i, s_j) = \sqrt{(x_{v_i} - x_j)^2 + (y_{v_i} - y_j)^2 + (z_{v_i} - z_j)^2} \quad (2)$$

其中, $(x_{v_i}, y_{v_i}, z_{v_i})$ 是卫星节点 v_i 的三维坐标。 (x_j, y_j, z_j) 是种子点 s_j 的三维坐标, 这些空间坐标可由卫星实际经纬度换算而来。

$$x_{v_i} = (R + h_i) \cdot \cos(lat_i) \cdot \cos(lon_i) \quad (3)$$

$$y_{v_i} = (R + h_i) \cdot \cos(lat_i) \cdot \sin(lon_i) \quad (4)$$

$$z_{v_i} = (R + h_i) \cdot \sin(lat_i) \quad (5)$$

$$x_j = R \cdot \cos(lat_j) \cdot \cos(lon_j) \quad (6)$$

$$y_j = R \cdot \cos(lat_j) \cdot \sin(lon_j) \quad (7)$$

$$z_j = R \cdot \sin(lat_j) \quad (8)$$

其中, R 为地球的平均半径, 所有种子点的半径均设为地球半径 R , h_i 为卫星节点 v_i 的轨道高度, lon_i 和 lat_i 是卫星节点 v_i 的经纬度, lon_j 和 lat_j 是种子点 s_j 的经纬度。

控制器在网络中扮演了一个管理和协调的角色, 需要处理大量数据包、管理路由和调度资源。因此, 在选择控制器时, 应该综合考虑各卫星节点的资源使用情况, 可以避免某些卫星在负载过重时还被选为控制器, 从而提升网络性能、减少潜在故障。资源使用率 L_i 可以定义为卫星资源使用的比例:

$$L_i = w_B \cdot B_i + w_C \cdot C_i + w_M \cdot M_i \quad (9)$$

其中, B_i 表示卫星实际使用的带宽占其最大带宽的比例, C_i 代表卫星处理器的使用率, M_i 是卫星存储资源的占用情况。 w_B 、 w_C 、 w_M 分别是带宽、CPU 和存储使用率的权重系数, 用于根据具体需求对不同资源使用率的重要性进行调整。

低轨卫星由于处于快速运动中，会频繁跨越不同的 Voronoi 区域。因此将卫星在区域内停留时间纳入考虑，有利于保持网络的长时间稳定运行。定义卫星在当前 Voronoi 区域内的剩余停留时间 T_i 。

$$T_i = \min(T_\lambda, T_\phi) = \min\left(\frac{\Delta\lambda}{|v_\lambda|}, \frac{\Delta\phi}{|v_\phi|}\right) \quad (10)$$

为了计算卫星在当前 Voronoi 区域内的总剩余停留时间 T_i ，我们取经度和纬度方向上最短的离开时间。其中 v_λ 和 v_ϕ 为卫星在经度和纬度方向的速度， $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\phi$ 为卫星到 Voronoi 区域边界在经度和纬度方向上的距离。

最终选择控制器需要综合考虑卫星的三方面评分：与种子点的距离、资源使用率和当前区域的停留时间。通过这三个方面的评分加权计算综合评分 P_i 。

$$P_i = \alpha \cdot \frac{1}{d(v_i, z)} + \beta \cdot \frac{1}{L_i} + \gamma \cdot T_i \quad (11)$$

权重 α 、 β 、 γ 用于平衡不同因素对评分的影响。通过这些权重，可以根据具体的需求调整每个因素在综合评分中的影响程度。

2.3. 控制器选拔策略

依据上文所述，每个卫星会按照一定时间间隔评分，但这一评分机制是由卫星独立完成的，单个卫星无法快速掌握区域内所有卫星的评分情况。因此，本文提出一种控制器选拔机制，该机制的核心在于通过低轨卫星直接连接的拓扑结构，在每颗卫星直接连接范围内选拔局部高分的卫星，进一步在这些局部高分者中确定最终的控制器。选拔的整个流程如下：

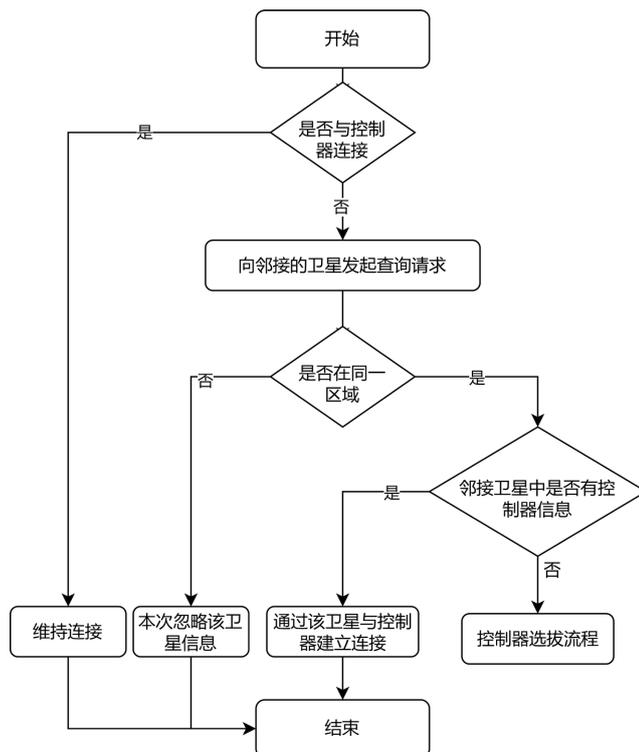


Figure 3. Flow chart of initial inspection
图 3. 初始检查流程图

如图 3 所示，当卫星检测到与控制器的连接断开时，会向邻接卫星发送查询请求，以获取它们的区域、评分和控制器等相关信息。收到响应后，卫星会进行一系列判断。首先，会判断这些邻接卫星是否位于同一区域，如果不在同一区域，该邻接卫星的信息将被忽略。对于同一区域内的邻接卫星，检查它们是否拥有控制器信息，如果存在这样的邻接卫星，则会通过该邻接卫星与控制器建立连接。如果没有，就会进入控制器选拔过程。

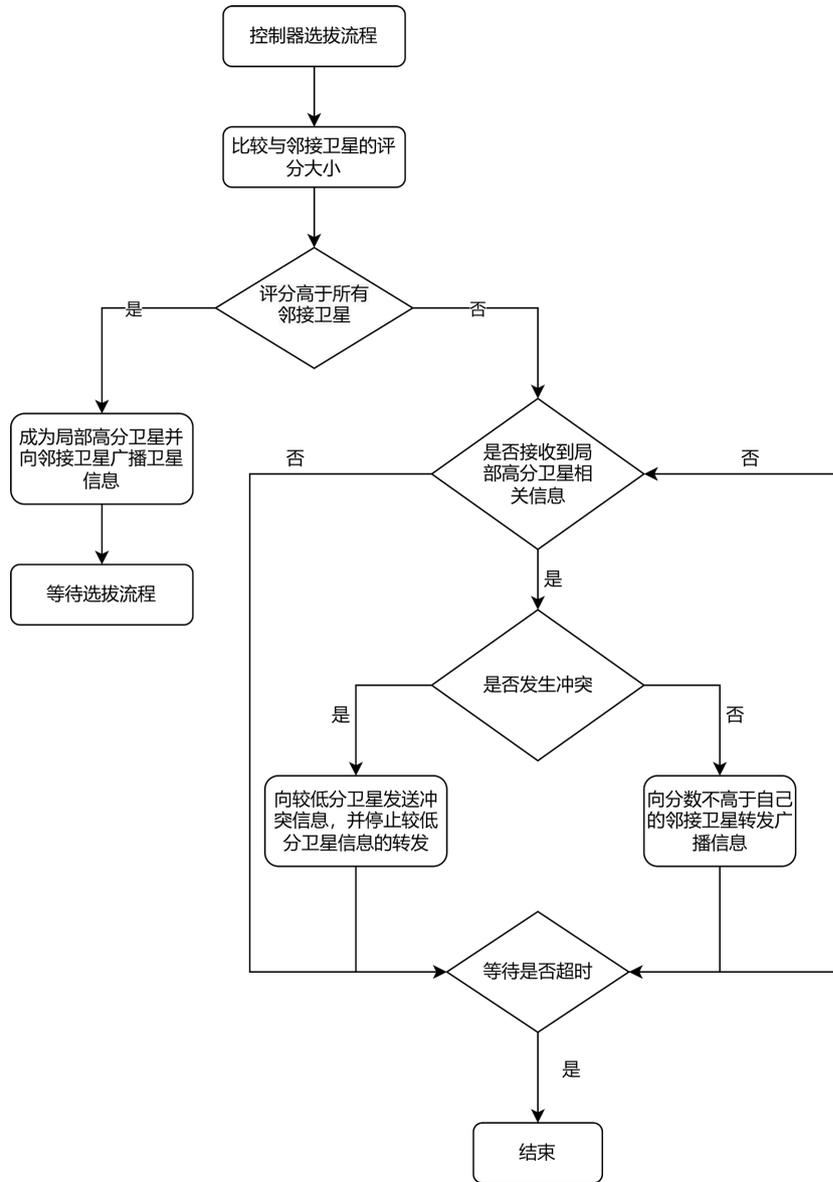


Figure4. Flow chart of score comparison
图 4. 评分比较流程图

如图 4 所示，当卫星进入控制器选拔流程时，首先判断自身评分是否高于所有邻接卫星。如果自身评分最高，则该卫星被认定为局部高分卫星，并将这一信息广播给所有邻接卫星，随后进入等待选拔结果的流程。由于评分标准包含了多种因素，这可能导致同一区域内出现多个局部最高分卫星。因此，当其他卫星收到这些高分卫星的信息时，可能会发生评分冲突。若发生冲突，较低分的卫星会收到冲突信

息，并放弃竞争控制器。同时，较高分的卫星信息会继续被转发。其中，每颗卫星仅向评分不高于自己的邻接卫星转发局部高分卫星信息。

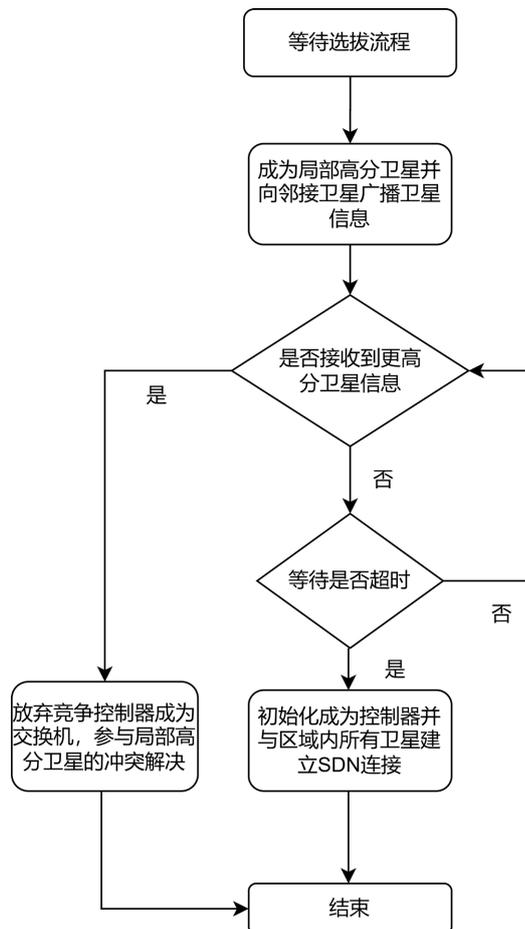


Figure 5. Flow chart of the final selection
图 5. 最终选拔流程图

如图 5 所示，局部高分卫星在向邻接卫星发送信息后，会等待其他卫星的冲突反馈，以判断自身是否为区域内的最高分卫星。如果在等待一段时间后未收到更高分卫星的信息，则该卫星会被初始化为控制器，并与区域内的所有卫星建立 SDN 连接。

2.4. 控制器动态迁移策略

为了确保控制器能够在网络动态变化的同时，持续提供高效的管理和服务，本文提出了动态迁移策略并定义了两个控制器迁移触发条件：域内平均时延超限和控制器节点资源消耗超限。这两类触发条件分别从网络时延和控制器资源使用率的角度出发，确保控制器在面临网络拓扑变化或资源压力时能够及时迁移，避免性能瓶颈的产生。

控制器在与域内的交换机建立连接后，会通过心跳机制掌握每个交换机的评分信息。当控制器满足上述迁移触发条件之一时，就会选择评分最高的候选卫星作为新的控制器。评分机制已经综合了时延、资源使用率等多种因素，能够确保新控制器具备足够的计算资源和通信能力来管理整个区域的网络。并且通过直接使用已有的评分信息，控制器能够迅速做出迁移决策，减少不必要的计算和通信开销。

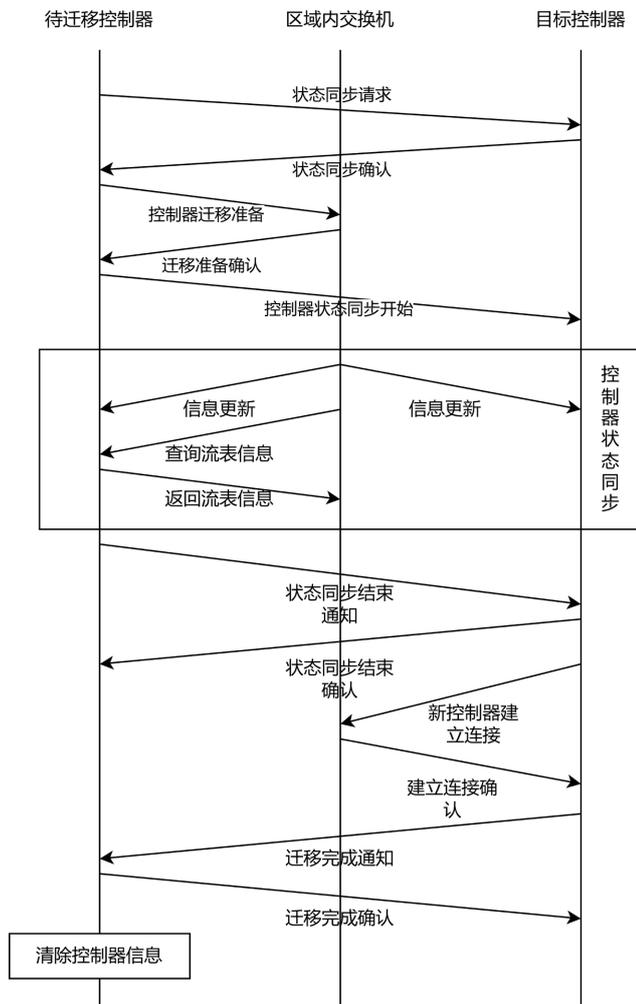


Figure 6. Process diagram of the multi-stage migration of the controller
图 6. 控制器多阶段迁移过程图

在确定新的控制器后，当前控制器会将其管理的网络状态(如拓扑信息、流表、策略等)同步至新的控制器。为了确保迁移过程中管理任务的正常进行，本文采用了一种多阶段迁移方法。如图 6 所示，待迁移的控制器首先与目标控制器确认状态同步，同时通知区域内的交换机进行控制器迁移。在控制器状态同步过程中，如果发生交换机信息更新，需要同时向原控制器和目标控制器同时同步相关信息，保证迁移前后控制器数据的一致性。在控制器状态同步完成后，目标控制器会与区域内所有交换机建立连接，只有连接全部成功建立后，才会通知原控制器清除其控制器信息。该流程确保了控制器切换过程的平滑进行，最大程度地减少了网络服务中断的可能性，维护了整个低轨星座网络的稳定性和可靠性。

3. 测试与验证

本文基于 Iridium 星座[11]的数据构建了低轨星座网络模型，并通过 STK (Systems Tool Kit)软件对卫星的运动轨迹进行了仿真。仿真过程中，每隔固定时间采集各个卫星的经纬度、速度等动态参数，从而精确描述卫星在轨道上的运行状态和位置变化。鉴于 Iridium 星座的卫星呈均匀分布，本文在划分 Voronoi 区域时，选取的种子点同样采用了均匀分布的方式，以确保区域划分的合理性和覆盖的均匀性。

基于上述数据，本文进行了多项实验，涵盖了不同控制器数目下的域内和域间传输时延，并将这些

时延数据与现有其他方法的结果进行对比。此外, 本文还针对动态迁移策略进行了相关实验对比, 在固定控制器数目的情况下, 比较了动态迁移与卫星离开区域前被动迁移的时延和资源使用情况。

3.1. 实验一

不同控制器数目下的域内域间控制时延。由图 7 可知。在本文所提动态评分机制下, 随着控制器数量增多, 域内平均时延、域内最大时延和域间控制器时延总体都在逐步减少。主要在于随着控制器数量的增多, 每个 Voronoi 区域的范围减小, 控制器的管理范围减小, 进而降低了传输时延。

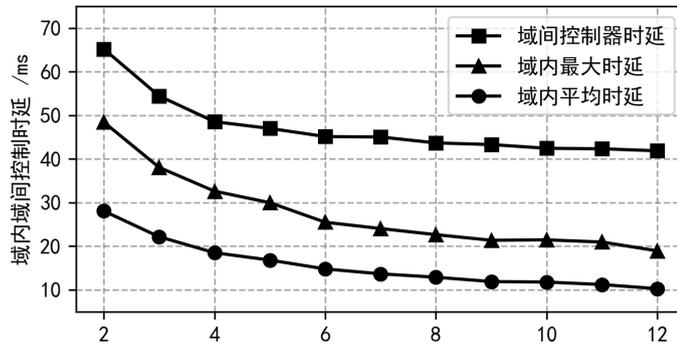


Figure 7. Control delay diagram within and between domains

图 7. 域内域间控制时延图

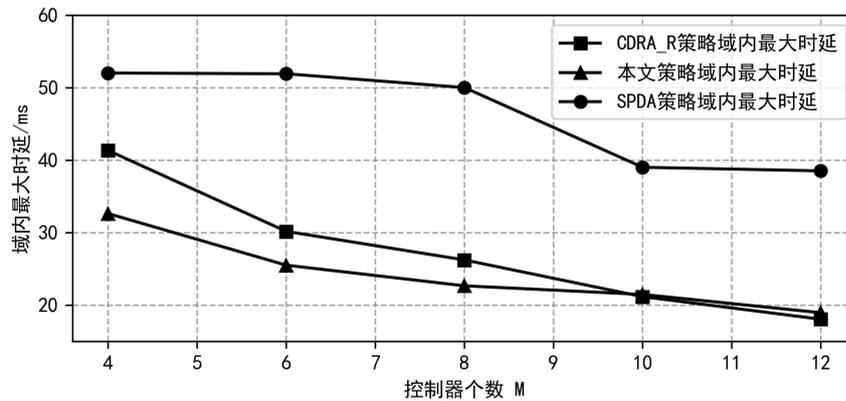


Figure 8. Diagram of the maximum delay within the domain

图 8. 域内最大时延图

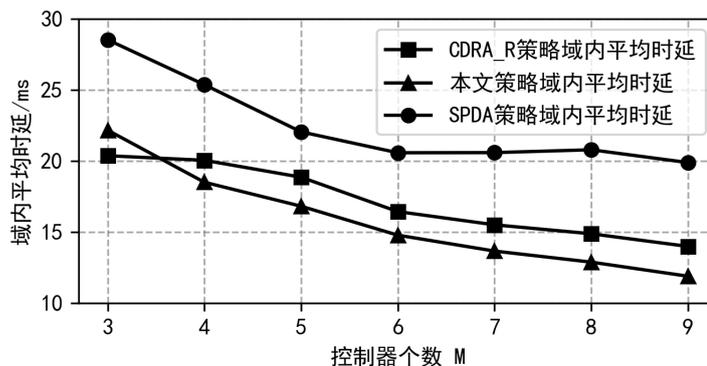


Figure 9. Diagram of the average delay within the domain

图 9. 域内平均时延图

本文选取了近期提出的 SPDA 策略和 CDRA-R 策略进行对比实验，实验结果如图 8 和图 9 所示，在域内平均时延和域内最大时延方面，本文所提的策略都取得了更优的数据效果。在域内最大时延方面，随着控制器个数的增多，本文所提的策略较 CDRA-R 策略的优势逐渐减少。在域内平均时延方面，控制器数量较低时，本文策略略差于 CDRA-R 策略，但随着控制器个数的增加，本文策略的表现更优。

3.2. 实验二

本文对比了在控制器数量为 6 的情况下，动态迁移策略与被动迁移策略在时延方面的表现。如图 10 所示，随着时间的推移，被动迁移策略下的控制器域内平均时延始终保持在较高水平，而本文提出的动态迁移策略则能够有效将域内平均时延控制在较低水平，展现出更优的时延优化效果。

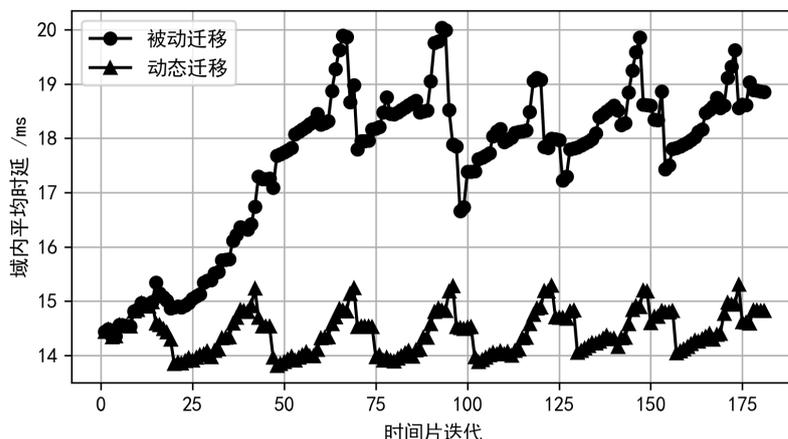


Figure 10. Delay comparison diagram between dynamic migration and passive migration
图 10. 动态迁移与被动迁移时延对比图

3.3. 实验三

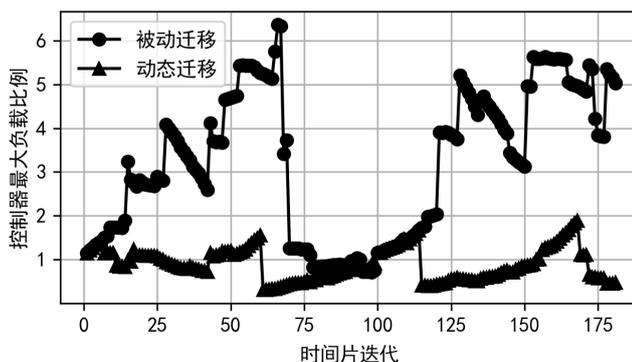


Figure 11. Load comparison diagram between dynamic migration and passive migration
图 11. 动态迁移与被动迁移负载对比图

本文对比了在控制器数量为 6 时，动态迁移策略和被动迁移策略在控制器资源使用方面的情况。通过利用人口密度分布，模拟卫星覆盖区域范围内交换机功能所承担的流量负载，从而评估卫星资源的消耗程度。本文使用控制器负载比例 L 来衡量控制器的资源使用率：

$$L = \frac{N_c}{N_{avg}} \tag{12}$$

其中 N_c 表示某控制器覆盖的人口数, N_{avg} 表示控制域内所有卫星的平均覆盖人口数, 即:

$$N_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (13)$$

从图 11 可以看出, 随着时间的推移, 被动迁移策略下的控制器最大负载比例呈现显著的波动和上升趋势。这种现象主要源于控制器覆盖区域内人口分布的动态变化, 导致某些控制器面临过高的负载压力。具体而言, 承担控制器功能的卫星所处理的交换机流量远超区域平均水平, 其资源消耗率也明显高于区域内其他卫星的平均消耗水平。相比之下, 动态迁移能够将最大负载比例维持在一个较低的水平, 有效避免因控制器资源不足而引发的网络问题。

4. 结束语

本文提出了一种基于 Voronoi 区域划分的低轨星座网络 SDN 多控制器选择与动态迁移方法。通过引入动态评分机制, 综合考虑卫星与种子点的距离、资源使用情况及停留时间等因素, 实现了控制器的高效选择。基于该评分机制, 本文设计的控制器选拔与动态迁移策略能够更好地适应卫星运行过程中的状态变化, 快速应对网络拓扑的动态特性与波动变化。实验结果表明, 本文提出的方法在降低网络时延和平衡资源负载方面具有显著优势。与现有其他方法相比, 本文所提策略在不同控制器数量下表现出更优的时延性能, 并能有效避免资源过载问题。未来的研究将进一步优化区域划分、动态评分机制及迁移策略, 以应对更复杂的网络环境和业务需求, 为低轨星座网络的高效管理提供新的解决思路。

基金项目

本文由国防科工局“十四五”民用航天技术预先研究项目(D040304)资助。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Liu, J., Shi, Y., Zhao, L., et al. (2018) Joint Placement of Controllers and Gateways in SDN-Enabled 5G-Satellite Integrated Network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **36**, 221-232.
- [3] Guo, J., Yang, L., Rincon, D., Sallent, S., Chen, Q. and Liu, X. (2022) Static Placement and Dynamic Assignment of SDN Controllers in LEO Satellite Networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, **19**, 4975-4988. <https://doi.org/10.1109/tnsm.2022.3184989>
- [4] 崔梦梦, 张新有, 冯力, 等. 基于 SDN 的卫星互联网多控制器动态部署研究[C]//中国指挥与控制学会. 第十二届中国指挥控制大会论文集(下册). 成都: 西南交通大学, 2024: 333-340.
- [5] Papa, A., De Cola, T., Vizarreta, P., He, M., Mas Machuca, C. and Kellerer, W. (2018) Dynamic SDN Controller Placement in a LEO Constellation Satellite Network. 2018 *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, 9-13 December 2018, 206-212. <https://doi.org/10.1109/glocom.2018.8647843>
- [6] 万颖, 钱克昌, 邢鹏, 等. 改进 NSGA-III 的卫星网络多控制器部署方法[J]. 电子设计工程, 2023, 31(12): 16-22, 27.
- [7] Wei, A., Yu, H., Lang, X. and Yang, B. (2021) Dynamic Controller Placement for Software-Defined LEO Network Using Deep Reinforcement Learning. 2021 *7th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, 10-13 December 2021, 1314-1320. <https://doi.org/10.1109/iccc54389.2021.9674245>
- [8] Huo, L., Jiang, D., Yang, W., et al. (2022) A Dynamic Migration Strategy of SDN Controllers in LEO Networks. In: Jiang, D. and Song, H., Eds., *Simulation Tools and Techniques*, Springer, 19-28.
- [9] Guo, J., Rincon, D., Sallent, S., et al. (2021) Gateway Placement Optimization in LEO Satellite Networks Based on Traffic Estimation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **70**, 3860-3876.
- [10] 龚宇鹏. 低轨巨型星座构型设计及覆盖分析方法研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [11] Wei, D., Wei, N., Yang, L. and Kong, Z. (2020) SDN-Based Multi-Controller Optimization Deployment Strategy for Satellite Network. 2020 *IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*, Shenyang, 28-30 July 2020, 467-473. <https://doi.org/10.1109/icpics50287.2020.9202260>