

## 面向多层多域巨型星座的卫星网络拓扑控制

徐晓帆<sup>1,2,3</sup>, 章跃跃<sup>1,2,3</sup>, 曹馨悦<sup>1,2,3</sup>, 缪馨<sup>1,2,3</sup>, 燕锋<sup>4</sup>, 杜平<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 200120; 2. 卫星互联网全国重点实验室, 上海 200120;  
3. 上海市卫星互联网重点实验室, 上海 200120; 4. 东南大学移动通信全国重点实验室, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 针对巨型星座单星任务的时变性以及由此产生的负载过重、单节点脆弱性以及网络控制平面的高可靠性需求, 研究面向多层多域巨型星座的卫星网络拓扑控制, 提出了一种基于北斗网格位置码的多层多域拓扑描述模型。首先给出了域、层、片、元相关概念及其定义, 以实现对卫星节点和星间链路的拓扑特征的统一表征, 刻画卫星节点的连通状态以及整个星座的网络拓扑结构; 然后设计了一套以在轨控制器为核心、以地面网络控制为辅助的拓扑控制架构, 用于提供常态化运行服务保障; 最后通过仿真平台对巨型星座子域划分和统一表征进行了验证分析。仿真结果表明, 所提拓扑描述模型能够提高巨型星座卫星网络拓扑控制过程的实时性与准确率。

**关键词:** 巨型星座; 多层多域; 北斗网格位置码; 网络拓扑控制

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024136

## Topology control of satellite networks for multi-layer and multi-domain mega-constellation

XU Xiaofan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yueyue<sup>1,2,3</sup>, CAO Xinyue<sup>1,2,3</sup>, MIAO Xin<sup>1,2,3</sup>, YAN Feng<sup>4</sup>, DU Ping<sup>1,2,3</sup>

1. Shanghai Satellite Network Research Institute Co.,Ltd., Shanghai 200120, China

2. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China

3. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 200120, China

4. National Key Laboratory of Mobile Communications, Southeast University, Nanjing 210018, China

**Abstract:** In view of the time-varying nature of the single-satellite mission in the mega constellation, the resulting overload, the vulnerability of a single node, and the high reliability requirements of the network control plane, the topology control of satellite networks for multi-layer and multi-domain mega-constellation was studied. A multi-layer and multi-domain topology description model based on Beidou grid position code was proposed. Firstly, the concepts and definitions of layer, domain, slice and element were given to realize the unified characterization of the topological characteristics of satellite nodes and inter-satellite links, and to describe the connectivity state of satellite nodes and the network topology of the entire constellation. Secondly, a topology control architecture with the on-orbit controller as the core and the ground network control as the auxiliary, was designed to provide normal operation service guarantee. Finally, the simulation platform was used to verify and analyze the subdomain division and unified characterization of the mega-constellation. The results show that the proposed topology description model can improve the real-time and accuracy of the topology control process for mega-constellation satellite networks.

**Keywords:** mega-constellation, multi-layer and multi-domain, Beidou grid position code, network topology control

收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-07-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No.62101317); 上海经信委基金资助项目(No.2022-2023-JCSS-01002)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China for Young Scientists (No.62101317), Shanghai Commission of Economy and Information Technology Fund (No.2022-2023-JCSS-01002)

## 0 引言

近年来,随着卫星制造和火箭发射技术的进步,以低地球轨道(LEO, low earth orbit)卫星星座为显著特征的卫星网络建设不断加快。卫星网络作为地面网络的补充,能够有效解决覆盖范围有限、容量不足、抗灾能力弱等问题,为全球用户提供无缝隙的互联网接入服务<sup>[1-2]</sup>。同时,由于距离地面更近、传播时延更低,LEO卫星网络能够提供更大的系统吞吐量和实时可靠的通信服务,满足未来移动通信、物联网等多种应用的数据传输需求<sup>[3-4]</sup>。从整体网络基础设施的角度,将卫星网络和地面网络有机融合,构建天地一体化通信系统,提供全域覆盖的立体空间网络、无处不在的用户连接和实时共享的异构网络资源,是未来通信网络发展的重要方向<sup>[5]</sup>。

节点密集、多层立体的LEO卫星网络在网络建设时会经历卫星数目和构型的不断变化,在运行服务时会经历卫星的频繁更换迭代,因此,区别于传统的高地球轨道卫星网络,不管是在系统建设阶段还是在常态运行阶段,卫星网络拓扑都将呈现极强的动态性,而有效的拓扑控制对于广泛的接入、稳定的路由和高效的管控都至关重要<sup>[6-10]</sup>。如何在巨型星座动态性下进行网络拓扑控制是卫星网络架构设计中需要解决的一个关键问题。

网络控制通常可以分为集中式控制和分布式控制2种。集中式控制是传统卫星通信系统、导航系统和遥感系统中普遍采用的控制方式,在卫星数目较少的场景中,由地面运控中心集中接收通信、导航和遥感数据,发布控制信息和连接地面网络<sup>[11-13]</sup>。对于成千上万颗星座构成的巨型网络,沿用单一节点的集中式控制将使资源开销急剧增加和控制时延性能明显劣化。分布式控制是一个更合理的选择。基于软件定义网络(SDN, software defined networking)将控制与数据平面分离,采用星地协同或高低轨协同策略进行SDN控制器部署的分布式控制方式是当前卫星网络拓扑控制的主要研究方向<sup>[14-19]</sup>。文献[20]提出一种面向天地一体化网络的跨域SDN体系结构,将控制器分布在卫星域、空中域和地面域,放在地面域的主控制器作为中心控制器与其他域的控制进行通信,每个域的控制定期收集网络状态信息,并将信息在应用平面上分析以实现各域的最优操作。文献[21]提出一种基

于SDN的分层分域多控制器部署策略,将主控制器放置在地面上,将从控制器放置在中地球轨道与高地球轨道卫星上,通过k-means算法将卫星网络划分为多个子网络。文献[16]提出一种基于SDN的LEO卫星多控制器部署策略,考虑拓扑的动态性以及流量变化,通过制定混合整数规划模型,将控制器部署在多个固定的LEO卫星上,并动态地将卫星交换机分配给控制器。文献[22]提出一种面向LEO卫星的自适应控制器的部署和分配策略,将控制器部署在LEO卫星上;根据卫星移动性和网络负载情况,自适应地调整控制器数量和管理关系,从而降低LEO卫星的整体控制开销。文献[23]提出一种在卫星网络中基于多目标优化模型的SDN多控制器部署方案,以降低LEO卫星网络控制链路时延、提高星间链路鲁棒性、保持卫星网络的负载均衡,并为目标构建优化模型,通过对模型进行求解确定控制器与卫星交换机的控制关系。上述拓扑控制研究主要聚焦在SDN控制器的部署和分配策略算法的设计上,而对于巨型卫星网络分域表征及其影响域分析缺乏相关研究。

本文面向多层多域的巨型星座研究卫星网络的拓扑控制,从网络分域的表征入手研究大规模时变网络的拓扑控制理论与机制,主要贡献如下。

1) 在星座拓扑构建层面,提出一种基于北斗网格位置码的立体空间多维数组表征方法,给出域、层、片、元的概念,实现对卫星节点和星间链路的拓扑特征的统一表征,刻画卫星节点的连通状态和网络的拓扑结构。

2) 面向巨型卫星网络设计了以在轨控制器为核心,以地面网络控制中心及星座先验信息为辅助的拓扑控制架构。该架构从立体空间子域划分的角度出发,基于时间片的拓扑构建策略部署多组在轨控制器,进一步实现星上的分级分域控制并赋予一定的边缘计算能力。通过结合地面网络控制中心及其附属的服务器集群,可实现定时的天地信息交互,进一步优化集中控制器的性能。

3) 基于仿真平台对不同规模的星座网络端到端时延和抖动进行了分析,验证了网络分域拓扑控制的可行性和有效性。

## 1 巨型星座划分与表征需求分析

与地面网络类似,网络分域的基础是网络覆盖

范围的表征,地面网络基于物理位置划分蜂窝小区,卫星网络也需要对地表和卫星网络空间构成的立体区域进行划分和统一表征。卫星网络分域和表征的需求可总结为以下几点。

1) 子域尺度灵活可变。以接入域为例,卫星网络覆盖的区域由于人口密度、基础设施分布、城市化水平的不同,对通信流量的需求也存在较大的差异。在网络分域时,需要将吞吐量纳入考量,子域的划分尺度需要灵活可变,如在带宽需求较大的地区采用小尺度的子域划分,在带宽需求较小的地区采用大尺度的子域划分。

2) 支持分域方式自定义。对巨型星座进行子域划分可以有多种含义,例如,从网络功能角度划分为接入域、承载域、核心域等,从服务类型角度划分为大带宽域、低时延域、密集接入域,从立体空间角度分为低轨域、中轨域、高轨域等。

3) 数据空间充足。网络分域的统一表征需要提供充足的数据空间,支持星地覆盖的全域立体空间。

4) 具有可计算性。为了实现星地弹性组网和高效的业务传输,子域划分的表征需要具有计算性,能够支持域内和域间的路由计算和基于智能算法的资源调度。

## 2 基于北斗网格码的立体空间子域表征

### 2.1 北斗网格码

北斗网格码是在GeoSOT地球空间剖分理论的基础上发展出的一种离散化、多尺度区域位置标识体系,具有多尺度性、计算性、立体性等特点。多尺度性是指北斗网格码采用分级编码模式,支持从厘米级到千米级的多尺度应用,能够满足不同场景的精细化需求。计算性是指在时空大数据分析中,可以使用北斗网格码快速进行空间索引和查询。立体性则指的是北斗网格码覆盖范围不仅包括地面,还包括空中和地下,能够满足全域空间的信息编码需求。北斗网格码的基本特点能够满足巨型星座划分与表征的分析需求。

图1所示的空间剖分示意揭示了北斗网格码的剖分逻辑。该体系的核心是用一种全新的方法,将地心至地上60 000 km的地球空间剖分成大小不等、多尺度嵌套、最高精度达1.5 cm的立体空间网格群,同时为每一个网格赋予全球唯一的标识编码,

并可以非常方便地将其与客观实体对象和各种不同的数据之间建立起内在联系<sup>[24]</sup>。北斗网格码包含二维和三维位置码,二维位置码包含20个码元,将地球表面非两极区域,即南纬88°~北纬88°的二维网格划分为10级,最小网格大小为1.5 cm×1.5 cm;三维位置码包含32个码元,在二维位置码的基础上增加12个高度域编码。例如,三维位置码N050J014705149E3E710106243141477表示经度为116°19'14"E,纬度为39°59'56"N,地表以上高度为499.99 km。

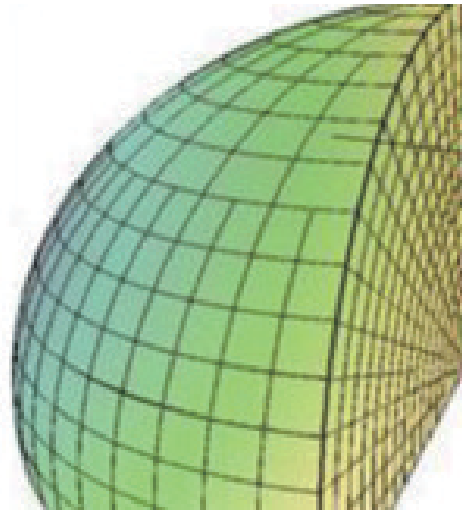


图1 空间剖分示意

### 2.2 基于北斗网格码的拓扑统一表征模型

#### 2.2.1 片、域、元的定义

将含有卫星轨道的同一高度所形成的地球外空间球面或椭球面定义为巨型星座网络空间的一个层,第*i*层表示为 $L_i$ 。高度域方向不等距离划分方法(赤道面)如图2所示,其中, $L_i$ 表示层次, $h_i$ 表示层间高度差, $H_i$ 表示与地表的距离, $r_i$ 表示与地心的距离。

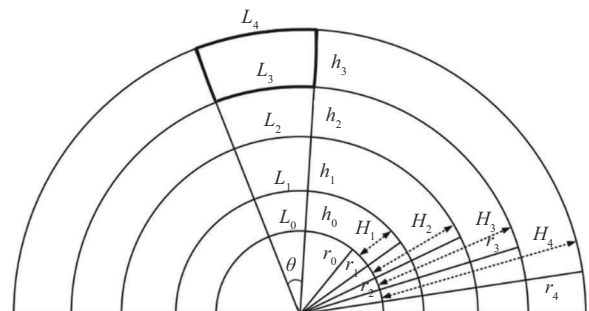


图2 高度域方向不等距离划分方法(赤道面)

**定义 1** 卫星网络空间中的层  $L_i$  的某一闭合曲面定义为卫星网络空间层  $L_i$  中的一个片, 对应于以地心为锥顶的一个锥体的某一截面,  $S_j$  表示片  $j$ 。

**定义 2** 卫星网络空间中的片  $S_j$  在层  $L_i$  的上、下多层投影所形成的闭合空间定义为卫星网络空间的一个域, 对应于以地心为锥顶的一个锥台,  $F_k$  表示域  $k$ 。

从上述定义可知, 片是层的一个子集, 域是地球外层空间某一厚度闭合壳层的一个子集, 即域是卫星网络的庞大空域的一个子集。根据定义 1 和定义 2 可以将卫星网络的庞大空域划分为多个相对较小的域, 这些域可以相连也可以不相连。域的本身具有多层性, 它的每一层是一个片。

**定义 3** 卫星网络空间片  $S_j$  中可用北斗三维位置码标识的一个点及其邻域空间, 定义为卫星网络空间的层中的一个元,  $U_m$  表示元  $m$ 。特别地,  $U_k$  可基于北斗网格位置码标识, 是分析卫星网络空间拓扑结构时的最小空间单元。

片、域、元示意如图 3 所示。卫星网络中运行的每一颗卫星在某一瞬时的空间位置, 可以用其所属的域、层、片、元集合  $\{F_k, L_i, S_j, U_m\}$  来标识。将每一区位赋予编码, 其集合为卫星网络系统中的区位码, 区位码与北斗网格位置码有明确的对应关系。

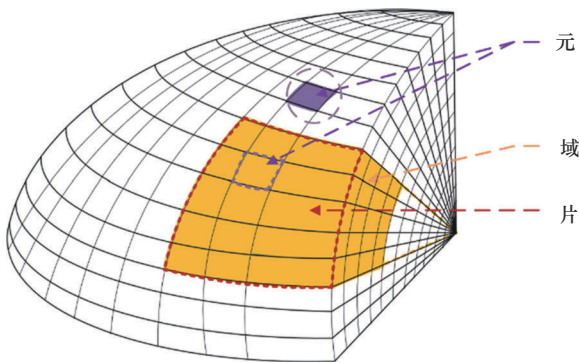


图 3 片、域、元示意

### 2.2.2 网络分域模型

基于以上域、层、片、元集合  $\{F_k, L_i, S_j, U_m\}$  对卫星网络进行分域设计。首先, 域间控制节点发起各域中心节点选取过程, 发送建立相邻中心节点的通知消息, 在确定相邻中心节点后, 控制节点依据一定的原则从中心节点的集合中选取一组节点作为源节点; 然后, 向这些源节点推送连接关系, 这些

源节点同时发送相邻节点建立的消息, 从而确定各自的相邻节点集合。

按照与源节点相同的选择原则得到新的中心节点, 新的中心节点重复上述过程, 直到网络分域完成, 由此确保网络的全面覆盖和连通。其中, 相邻中心节点间连接关系的权重表示为

$$w_{ij} = \frac{d(i,j)^a}{\left(\frac{e_i e_j}{\sqrt{e_i + e_j}}\right)^b}$$

其中,  $i$  和  $j$  表示 2 个域内卫星中心节点,  $d(i,j)$  表示  $i$ 、 $j$  间的距离,  $e_i$  和  $e_j$  分别表示 2 个节点的路由时延,  $a$  和  $b$  表示预先设定的参数。权重的分子和分母分别反映了相邻两节点的路由时延和相互连接的鲁棒性。

## 3 基于立体空间子域表征的拓扑控制

### 3.1 立体空间子域划分提升网络拓扑控制性能

通过对立体空间进行基于北斗网格码统一表征方式下的子域划分, 整个网络被划分为若干个相对独立且相互关联的子网络, 有助于简化网络管理的复杂性, 提高网络的可扩展性和灵活性。同时, 划分子域后还可以根据卫星的运动轨迹、覆盖区域以及业务需求进行动态调整, 实现对网络资源的精细化管理和高效利用。立体空间子域表征对卫星网络拓扑控制的有益效果主要体现在时间片降维、路由时延抖动降低和资源利用率提升 3 个方面。

#### 3.1.1 时间片降维

在卫星网络结构存在动态性的情况下, 传统的拓扑控制方法通常无法适用, 现有卫星系统将连续变化的网络拓扑结构离散化为一系列时间片, 在每个时间片内认为网络拓扑结构相对稳定, 从而简化拓扑控制问题的复杂度, 降低计算开销, 同时提高拓扑控制的实时性和准确性。

具体地, 时间片的定义如下。对于一个卫星网络中全部卫星构成的物理链路或逻辑链路, 当前时刻  $t_i$  发生任一链路状态变化, 下一时刻  $t_{i+1}$  发生任一新的链路状态变化, 时间差  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$  被称为一个时间片。这里的物理链路是指卫星间的直接通信连接构成的链路, 无论是否已经建立连接, 物理链路都存在; 逻辑链路是指卫星间已经建立的通信连接构成的链路。将物理链路视为卫星之间的一种外在链

路,链路间可随时建立和断开通信,具有“看得见”的拓扑结构;将逻辑链路视为卫星之间的一种内在链路,具有“看不见”的拓扑结构。

在网络中,任一卫星进入或者离开都有可能导导致网络的物理链路产生变化,任一卫星的通信连接状态发生改变都有可能导导致网络的逻辑链路产生变化。只要物理链路或逻辑链路发生改变,其拓扑结构都将发生改变。因此,对于巨型星座而言,这种基于时间片的拓扑控制将会由于极速变化的拓扑结构和随之而来的极其短暂的时间片变得难以实现。而本文所提出的基于立体空间子域划分与表征的方法则能够对全域时间片进行降维,在域间以各子域中心节点构成的稀疏网络为对象定义域间时间片,获得相对稳定的网络结构,在域内则能够根据子域规模选择时间片方式或其他传统拓扑控制方法。

### 3.1.2 路由时延抖动降低

路由时延抖动是卫星网络面临的一个重要问题。由于卫星运动的不确定性和网络拓扑结构的变化,数据包在传输过程中可能会经历不同的路径和时延。这种时延抖动不仅影响了网络的服务质量,还可能导致数据传输的失败。通过立体空间的子域划分,可以优化网络拓扑结构,减少卫星之间的通信跳数,从而降低路由时延抖动。同时,结合先进的路由算法和协议,可以进一步减少数据包在网络中的传输时延,提高网络的稳定性和可靠性。

### 3.1.3 资源利用率提升

在卫星网络中,卫星资源是有限的,如何合理利用这些资源,提高网络的通信能力和覆盖范围,是拓扑控制需要解决的关键问题。通过立体空间的子域划分,可以实现对卫星资源的精细化管理和高效利用。一方面,可以根据子域内的业务需求和网络状况,动态调整卫星的轨道和位置,以优化网络覆盖和通信性能。另一方面,可以利用子域之间的协作和交互,实现网络资源的共享和互补,进一步提高网络的整体性能。

## 3.2 拓扑控制机制

基于北斗网格码的统一表征体系对多层多域的巨型星座进行子域划分,并提出巨型星座的网络拓扑控制模型。本文考虑巨型星座的运行管控场景,相应地将拓扑控制分为常态拓扑控制和异

常拓扑恢复2种情况,分别设计具体的拓扑控制机制。

### 3.2.1 拓扑控制模型

根据前文所定义的域、层、片、元、物理链路、逻辑链路、时间片,对于卫星网络进行分域、分层,基于时间片进行拓扑控制,对每一颗卫星提供星间链路的前、后、左、右、上、下跳的网络连接和逻辑连接。

基于时间片的网络拓扑结构如图4所示。利用卫星星座运转的周期性以及可预测性,将卫星网络的动态拓扑进行了离散化处理,将一个系统周期划分为不同尺度的时间片,每个时间片内的拓扑均可视为静态的,星间链路变化发生在时间片的分割点。

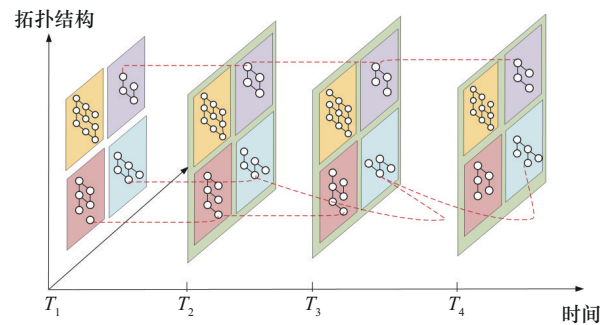


图4 基于时间片的网络拓扑结构

### 3.2.2 常态拓扑控制

在常态拓扑控制中,基于星座先验信息和服务器集群,在星上结合分级分域的策略以多组集中控制器的形式,实现拓扑的实时探测与更新。

常态拓扑控制系统如图5所示,整个拓扑控制框架的实现媒介基于集中控制器。考虑到拓扑控制算法的复杂度及高计算量,拓扑图的更新需要了解卫星在轨道上的结构和配置,以及它们之间的连接和通信路径。拓扑图更新主要包含以下3个方面的信息。

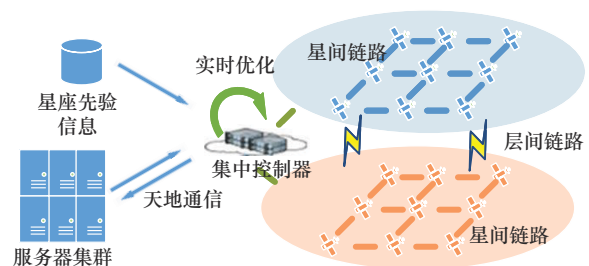


图5 常态拓扑控制系统

1) 区域信息。对于卫星网络中卫星的位置，域标识了当前卫星所在的区域，层、片、元标识了卫星所在的位置，它们共同描述卫星所在的区域信息；同时将每一区位赋予编码，其集合则为卫星网络系统的区位码。

2) 节点信息。集中控制器收集有关卫星和网络状态的关键信息，包括卫星的位置码、轨道参数、通信频率等。

3) 链路信息。通过网络测量工具监测卫星通信链路，分析与卫星通信相关的频段和信号特征，以及卫星之间的连接关系。

基于上述决定性条件，本文给出了常态拓扑控制的更新策略。首先，集中控制器发送多维度的数据包给卫星，收集卫星基础数据、相应的卫星节点探测数据以及路径探测数据。对于收集的信息，以分析频率、信号以及节点、路径探测数据的形式生成多条局部拓扑链路进行第一轮异常检测。在此基础上，基于局部拓扑链路生成完整拓扑图，并执行第二轮异常检测，检测拓扑图的完备性。

### 3.2.3 异常拓扑恢复

若出现非常规因素所造成的影响，如日凌、雨衰、单粒子翻转等，卫星拓扑结构将出现异常，需要进行异常检测及拓扑恢复。异常检测与拓扑恢复系统如图6所示。在非常态拓扑管理场景中，异常检测器对卫星之间的链路异常进行监测，主要包含以下几部分。

1) 信号强度监测。监测卫星之间的信号强度可以帮助检测链路异常，如果信号强度突然下降或波动超出正常范围，则表明链路出现问题。

2) 时延监测。监测卫星通信链路的时延，异常的时延表明链路拥塞或其他问题。

3) 丢包率监测。监测数据包的丢失率，高丢包率表示链路不稳定或拥塞，这里可以使用 ping 命令或专业的网络监控工具来执行此操作。

4) 带宽利用率监测。监测链路上的带宽利用率，过度利用链路会导致数据包丢失和时延增加。

在卫星网络遇到异常情况时，实现拓扑结构的优化是为了最大限度地维持网络的性能和可用性。在收到各卫星节点的反馈信息之后，集中控制器会基于异常检测进行链路诊断，分别涉及节点间的异常检测以及局部拓扑链路的异常检测。一方面，集中控制器会针对星座内的高相关性节点执行信号强度监测、时延监测、丢包率监测和带宽利用率监测；另一方面，在确定没有问题之后，进行拓扑链路完备性检测。

## 4 大规模卫星网络拓扑控制仿真

本节基于 Hypatia 平台对不同规模的巨型星座端到端路由时延与抖动进行了仿真分析，验证本文提出的立体空间子域划分和统一表征的可行性和有效性。Hypatia 是一个卫星网络 Python 分析框架，能够展示网络中端到端的连接、时延和路由的变化，其可视化功能体现了卫星运动轨迹和星座构型，以及网络中的流量热点及其随时间的变化情况。考虑到硬件平台资源的约束，本文设计了面向工程应用的典型场景，通过将网络纵向降维来验证模型能力。基于 Hypatia 仿真系统对不同规模的卫星星座网络进行分析，考察端到端时延抖动情况。

随着卫星数目的增加，卫星间链路的平均端到端时延绝对值呈现减小趋势。仿真结果显示，400 颗星座系统的端到端时延约为 130 ms，当卫星数目增加到 1 000 颗时，端到端时延则减小为 100 ms。随

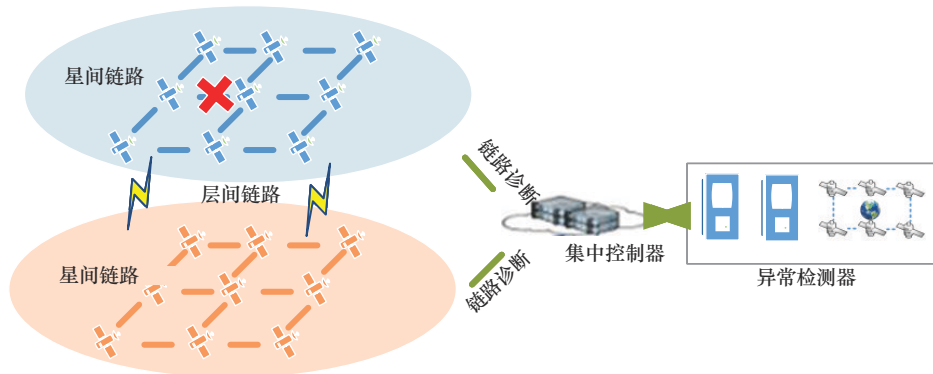


图6 异常检测与拓扑恢复系统

随着星座规模的扩大,星间建链的选择增加,建链速度提升,单跳路由对网络整体时延的影响也变小,使时延曲线变平滑。这体现了巨型卫星网络的稳定性优势。

进一步地,本文比较分析了1 000颗卫星和4 000颗卫星2种星座规模的端到端时延抖动。2种规模的星座构型如图7所示,1 000颗卫星由20个轨道面构成,每个轨道面50颗卫星;4 000颗卫星由50个轨道面构成,每个轨道面80颗卫星。

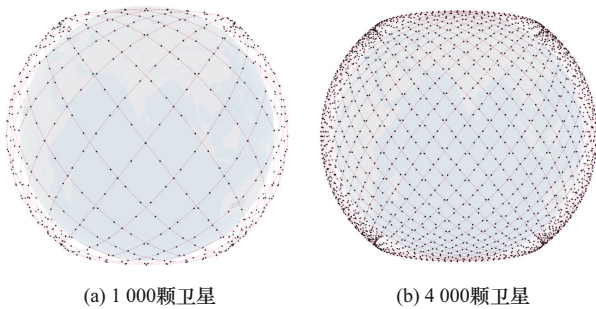


图7 2种规模的星座构型

不同星座规模下不同地面节点的端到端时延分别如图8和图9所示。当星座规模分别为1 000颗和4 000颗时,地面17号节点到29号节点的端到端时延均约为142 ms,地面79号节点到93号节点的端

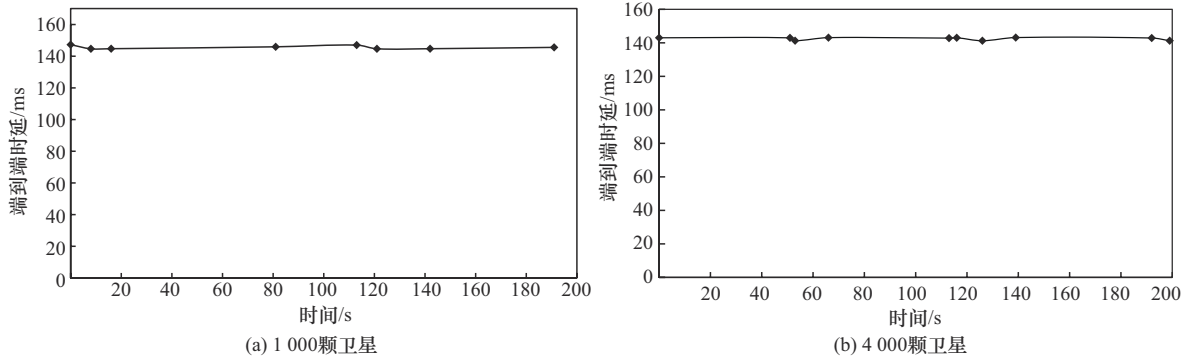


图8 不同星座规模下地面17号节点到29号节点的端到端时延

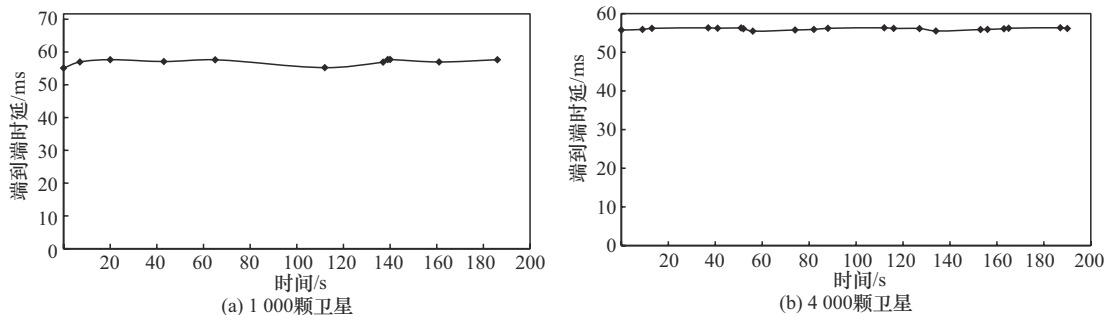


图9 不同星座规模下地面79号节点到93号节点的端到端时延

到端时延均约为56 ms。从图8和图9可以看出,星座规模增大对时延抖动的有益效果会趋于平缓。

从网络运维管控角度出发,更大规模的星座消耗更多的网络管控资源,采用分域管控机制,可以在获得相同量级时延抖动性能的同时,大大降低控制的复杂度,从而提升资源利用率。

### 5 结束语

本文面向多层多域巨型星座的卫星网络拓扑控制机制,提出了一种基于北斗网格位置码的多层多域星座拓扑描述模型。首先给出了域、层、片、元的概念,实现了对卫星节点和星间链路的拓扑特征的统一表征,刻画了卫星节点的连通状态以及整个星座的网络拓扑结构;然后设计了以在轨控制器为核心,以地面网络控制中心及星座先验信息为辅助的拓扑控制架构,提高了星座卫星网络拓扑控制过程的实时性与准确率;最后基于仿真平台对巨型星座子域划分和统一表征的可行性和有效性进行了验证分析。随着星座规模的扩大,卫星网络将表现出更加显著的时间变化性和复杂性。未来的研究将进一步针对多层多域巨型星座中节点的动态变化场景,基于对拓扑特性的统一表征,研究低复杂度的优化控制算法和机制。

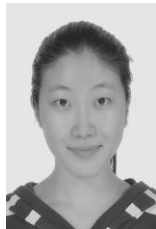
## 参考文献:

- [1] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(1): 70-109.
- [2] CUI H X, ZHANG J, GENG Y H, et al. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: requirements, architecture and challenges[J]. *China Communications*, 2022, 19(2): 90-108.
- [3] 陈全. 面向低轨巨型星座的星地一体化网络关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- CHEN Q. Towards LEO mega-constellation: study on integrated satellite-terrestrial networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [4] LIN X Q, CIONI S, CHARBIT G, et al. On the path to 6G: embracing the next wave of low earth orbit satellite access[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(12): 36-42.
- [5] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2020, 1(1): 1-16.
- WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(1): 1-16.
- [6] ZHANG Y Y, WU Q, LAI Z Q, et al. Enabling low-latency-capable satellite-ground topology for emerging LEO satellite networks[C]//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1329-1338.
- [7] 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.
- [8] LI C X, HE W J, YAO H P, et al. Knowledge graph aided network representation and routing algorithm for LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(4): 5195-5207.
- [9] 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.
- [10] KASSING S, BHATTACHERJEE D, ÁGUAS A B, et al. Exploring the "Internet from space" with hypatia[C]//*Proceedings of the Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference*. New York: ACM Press, 2020: 214-229.
- [11] WANG W, ZHAO Y L, ZHANG Y J, et al. Intersatellite laser link planning for reliable topology design in optical satellite networks: a networking perspective[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(3): 2612-2624.
- [12] 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.
- [13] LI R, ZHANG J X, ZHENG S, et al. LEO mega-constellations routing algorithm based on area segmentation[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [14] QIAO L, YAN H C, ZHOU X Y, et al. Onboard centralized ISL-building planning for LEO satellite constellation networks[J]. *Electronics*, 2023, 12(3): 635.
- [15] SONI G, SHARMA M. Performance evaluation of a free space optical link-based inter satellite link (ISL) across low earth orbit (LEO)[C]//*Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [16] GUO J M, YANG L, RINCÓN D, et al. Static placement and dynamic assignment of SDN controllers in LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(4): 4975-4988.
- [17] HU M L, LI J, CAI C, et al. Software defined multicast for large-scale multi-layer LEO satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(3): 2119-2130.
- [18] CHEN Q, GUO J M, YANG L, et al. Topology virtualization and dynamics shielding method for LEO satellite networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(2): 433-437.
- [19] ZHANG Z K, GU S S, LI S M, et al. Multi-hop coflow routing for LEO distributed computation satellite networks[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [20] SHI Y P, CAO Y R, LIU J J, et al. A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 29-35.
- [21] CHEN C, LIAO Z, JU Y, et al. Hierarchical domain-based multicontroller deployment strategy in SDN-enabled space-air-ground integrated network[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(6): 4864-4879.
- [22] CHEN L, TANG F L, LI X. Mobility and load-adaptive controller placement and assignment in LEO satellite networks[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-10.
- [23] 钱克昌, 万颖, 熊达鹏, 等. 一种卫星网络 SDN 多控制器部署方法及系统: CN115242295A[P]. 2022-10-25.
- QIAN K C, WAN Y, XIONG D P, et al. A method and system for deploying multiple controllers in satellite network SDN: CN115242295A[P]. 2022-10-25.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 北斗网格位置码: GB/T 39409—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. BeiDou grid location code: GB/T 39409—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

## [作者简介]



徐晓帆 (1986-), 男, 北京人, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司研究员, 主要研究方向为卫星网络架构、空间激光通信和 5G/6G。



缪馨 (1993-), 女, 江苏盐城人, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为卫星网络架构、短距离光通信和 5G/6G。



章跃跃 (1988-), 男, 江苏南通人, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网网络架构及体制协议等。



燕锋 (1983-), 男, 湖北天门人, 博士, 东南大学副教授, 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。



曹馨悦 (1998-), 女, 河北邢台人, 上海卫星互联网研究院有限公司助理工程师, 主要研究方向为卫星互联网网络架构和 5G/6G 等。



杜平 (1978-), 男, 江苏泰州人, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司研究员, 主要研究方向为卫星互联网网络架构、承载网和核心网技术体制标准。