

低轨卫星一体化路由交换技术

张世层, 张 冬, 安绍毅, 孙艳红, 王立民
(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘 要: 低轨卫星可提供更精准、更高效的多源数据融合信息服务。深入分析低轨卫星在轨特性对星座网络的影响, 设计融合了卫星的再生处理、透明转发、子带转发等多服务场景的载荷配置方案。针对星座网络拓扑变化对服务性能的影响, 以及多类用户不同应用模式需求, 从载荷配置、交换架构、控制机制、星间高速通信4个关键维度, 开展低轨星座载荷系统设计与星地一体化路由交换技术研究, 并进行路由交换典型性能测试验证。目前, 该技术已成功应用于某低轨卫星互联网试验星。

关键词: 低轨卫星; 网络拓扑; 再生处理; 路由交换

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025014

Integrated Routing and Switching Technology for LEO Satellites

ZHANG Shiceng, ZHANG Dong, AN Shaoyi, SUN Yanhong, WANG Limin
The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: Low Earth Orbit (LEO) satellites are capable of delivering more precise and efficient multi-source data fusion information services. This paper delves deep into the impact exerted by the on-orbit characteristics of low-orbit satellites on the constellation network. Based on this analysis, a payload configuration scheme is devised, which seamlessly integrates multiple service scenarios, including satellite regenerative processing, transparent forwarding, and sub-band forwarding. In view of the negative effects of constellation network topology changes on service performance and the diverse application mode demands of various user groups, this study conducts in-depth research on the design of the low-orbit constellation payload system and satellite-ground integrated routing and switching technology. The research is carried out from four crucial aspects: payload configuration, switching architecture, control mechanism, and inter-satellite high-speed communication. Moreover, the typical performance of routing and switching is validated through rigorous tests. Currently, this technology has been successfully implemented in a specific low-orbit satellite Internet experimental satellite.

Keywords: LEO satellites, network topology, regeneration processing, routing and switching

0 引言

在空天地一体化网络的宏大版图中, 低轨卫星扮演着举足轻重的角色。凭借基于星间链路构建的多星协同功能, 低轨卫星能够提供更为广泛的信号覆盖范围、更为高速的数据传输速率以及更为精准的信息交互服务^[1-2]。相较于中高轨卫星, 低轨卫星具备传输时延低、空间损耗小、建设成本低以及支持全球覆盖等显著优势,

这些优势使其成为进一步拓展和强化宽/窄带通信、导航增强、信息监测等应用的坚实基础, 已然成为空天地一体化网络建设的关键方向。目前, 美国的星链 (Starlink)、中国的卫星互联网以及“吉林一号”遥感卫星等低轨星座建设项目, 均已步入大规模部署阶段^[3-4]。然而, 基于低轨轨道构型的物理特性, 低轨星座在迎来高速建设的黄金时期的同时, 也不可避免地遭遇诸多技术难题。一是业务稳定性与网络高动态之间的矛盾。卫星

收稿日期: 2025-01-20; 修回日期: 2025-04-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2023YFB4302801)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB4302801)

节点与地面节点之间的相对位移极为迅速,致使单颗卫星的服务区域处于快速实时变化之中。为保障对地服务的连续性,需由成千上万颗卫星构建星座,且卫星之间必须协同作业。因此,在总体设计与实现过程中,必须妥善处理星间节点与星地节点的切换问题,克服星地链路快速移动、星间路由频繁切换等因素导致的网络拓升高动态实时变化的问题。二是性能与成本的矛盾。鉴于近地轨道空间辐照环境相对优良,为兼顾工程实现的性能适配与降本增效,在低轨星座的建设过程中,通常选用性能较高但等级较低的元器件,并通过减少载荷备份来优化项目成本。但这也带来了卫星失效的风险,诸如单星功能失效或某条功能链路失效,进而引发卫星网络拓扑的不确定变化。三是资源与平台的矛盾。由于受到平台在能源、散热、重量等方面对载荷的限制,低轨卫星需要进行合理设计,以确保相关载荷在平台限制条件下能够兼容并处理大量数据。为适配多种类型的平台,信息处理载荷必须具备一体化的路由交换技术。如何全面统筹低轨卫星网络的特点,兼容多种应用模式的需求,解决低轨卫星星间、星地之间的互联问题,以及在重量、体积、能源受限的情况下综合考虑载荷总体架构,成为设计星地一体路由交换技术时亟待攻克的关键难题。

本文从载荷组成架构、组网交换架构、组网控制机制、路由交换等多个维度展开星地一体化路由交换技术的研究,旨在支持低轨卫星平台、兼容现有地面卫星通信设备的基础上,有效规避高动态网络拓扑变化对星座通信性能的不良影响。

1 架构设计与实现

结合低轨卫星网络的特点和对现有卫星应用服务模式的兼容,同时考虑到未来卫星资源高效灵活分配、快速路由交换、可管可控和抗毁顽存等方面的需求,本文从星地组网架构、多模式载荷两个维度展开架构一体化

设计。在星地组网架构一体化方面,借助星地协同控制机制,通过软件设计创新方式促使卫星与地面网络在路由计算、资源管理以及协议适配等层面实现深度融合;多模式载荷一体化运用可重构多版本加载的载荷架构,通过硬件设计创新方式支持在轨灵活切换、透明转发、子带转发、再生处理等模式。

通过借鉴地面网络先进性的软件定义网络的设计思想,本文将路由计算和数据转发相分离,设计了低轨卫星一体化路由交换技术。该技术通过将网络控制和转发功能分离,使得网络层次间解耦、平面间清晰,网络的逻辑控制功能更加聚合;同时,设计了一种载荷架构,可根据任务规划完成工作模式切换。通过结合软件设计和载荷配置,可根据不同的应用场景或者业务需求,灵活定制网络传输路径,增强网络弹性和自适应性,实现高效的数据传输和路由选择,如图1所示。

1.1 常用交换模式

低轨卫星的交换架构借鉴了地面网络控制与转发分离的设计思想,采用分布式与集中式相结合的思路,设计了星地一体化的路由交换架构,统筹了透明转发、子带转发、再生处理等多级混合交换模式^[5-8],如图2所示。

上述3种主要交换模式各有工程上的优势。

透明转发^[5]通过建立一条独占的通信路径,将通信双方的数据流直接连接起来,形成一个虚拟的电路。这种模式的优点是不涉及星上处理资源,工程实现上简单可靠,缺点是灵活性差。

子带转发^[6-9]需在数字域中实现信道分析、交换、综合等功能,将每个宽带信道划分为多个子信道(任意连续相邻子信道可合并使用),所有的子信道具有路由选择功能,该信道划分支持组播和广播业务,能够为网络控制提供极为有效的、灵活的上行链路频谱监控功能,从而完成任意子信道间的输入与输出,可实现跨频段路由,也可实现星上各个天线波束之间的灵活转接交换。

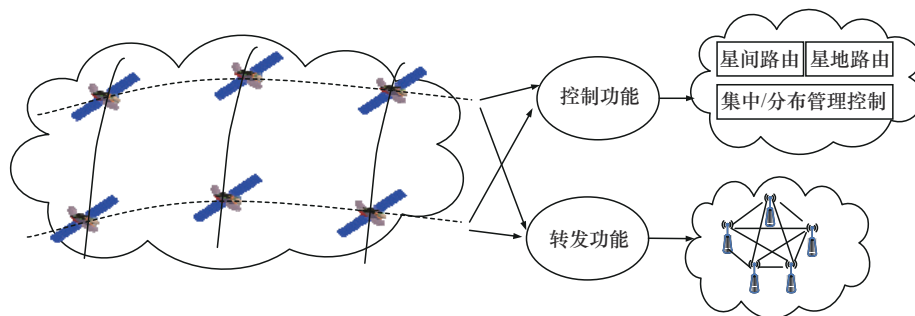


图1 低轨星座路由控制载荷架构

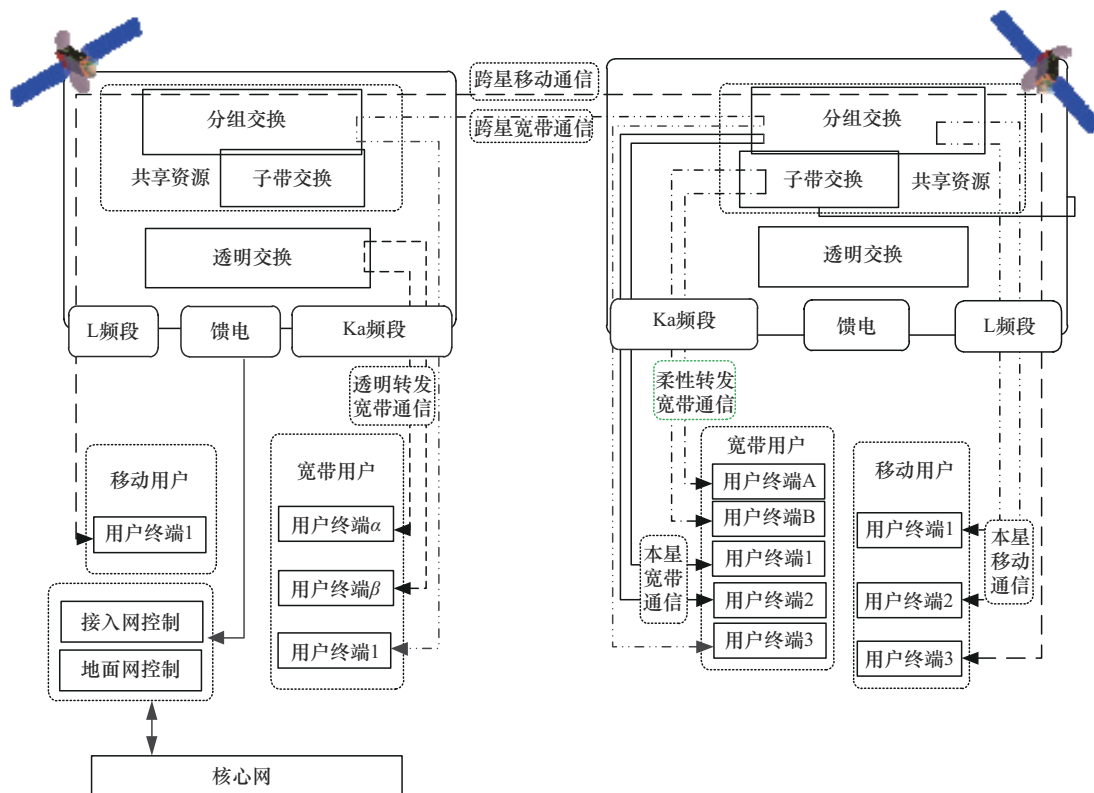


图2 星地一体化路由交换架构

再生处理^[8-10]是一种基于数据包交换的技术，它首先将数据分成若干个数据包，每个数据包都有自己的地址和源地址，数据包在网络节点间按照路由规则进行转发，直至到达目标节点。这种技术具备很高的灵活性和可扩展性。

上述3种交换模式的特点总结^[8-9]如下：透明转发模式数据处理量大，但是数据转发缺乏灵活性，需依靠地面节点保障扩展性和可靠性；子带转发模式使得系统信道的划分具有较大灵活性，载荷结构需求相对简单，具备一定的扩展性；再生处理模式能适应不同类型的数据传输需求，可扩展性更强，兼容大量用户，其通过数据包重传来保障可靠性，通过数据包压缩来保障传输效率。3种模式可以结合使用，比如：采用透明转发和子带转发承担简单而大量的通信数据，采用再生处理的关键数据包分发来增强传输的灵活性。

1.2 路由交换架构

低轨卫星一体化路由架构由星地相关控制和处理单元共同组成，分工如下：地面控制中心站的集中控制器可部署在核心网，负责学习卫星拓扑周期变化规律，集中计算路由转发表；计算后的转发表项通过馈电链路注入低轨星载交换载荷设备；星地数据在此阶段通过馈电

链路持续交互，待卫星、地面各相关设备确认转发表同步之后，各级数据面依照标签进行转发。

为应对卫星网络异常和确保链路传输的实时性，集中计算控制粒度不仅限于路由功能，还可在分布式获取网络全局拓扑变化、流量信息等关注项的基础上，完成转发表维护、网络资源的优化、控制和交换模式的最优选择，实现低轨卫星与卫星之间、卫星与地面节点之间互联。该技术基于星地/星间交换能力，通过智能路由选择，实现星座网络的高效数据转发和多数据融合，支持星座网络的高效组网和灵活扩容。

1.3 组网控制机制

低轨卫星运动轨道的物理特性带来了星间/星地节点切换频繁、路由控制及移动性管理复杂等技术难点^[11-12]。为保证低轨星座用户端到端数据传输的稳定性，在方案阶段组网协议根据低轨卫星星间/星地链路通断、节点动态变化等特点，设计低轨卫星之间的星间路由、低轨卫星到信关站之间的星地路由协议，以及地面各类用户的移动性管理机制，相关场景如图3所示。

低轨星座路由协议包括路由计算、路由注入和时间片切换3部分，如图4所示。

① 路由计算。根据卫星轨道参数，计算卫星在任意

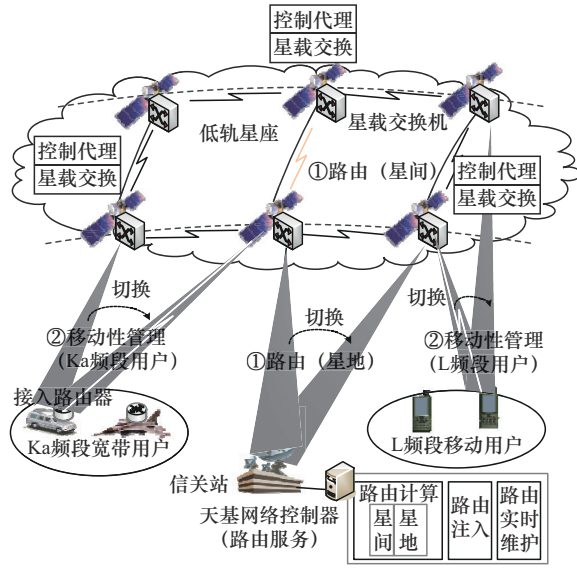


图3 低轨星座组网机制

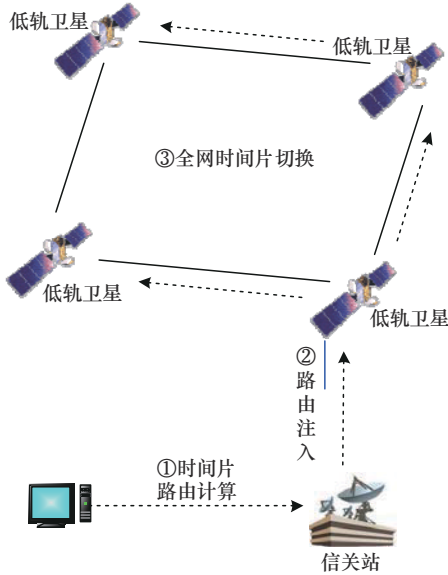


图4 低轨星座路由协议

时刻的位置。根据卫星的波束构型、频率复用情况可以规划出完整的星座构型，根据星座构型以及卫星的运行位置，可以进一步规划出整个星座中卫星打开和关闭的时刻，然后计算得到一个周期内星座的路由拓扑结构随时间变化的关系。

② 路由注入。路由注入包括星间路由注入和星地路由注入两部分。对于星间路由注入，路由控制器完成路由计算后，首先将路由表传送给部署在信关站的地面网关，然后由地面网关将更新的路由表注入低轨卫星上。地面网关与星载路由交换设备之间以及星载路由交换设

备之间通过链路检测机制进行路由表的传送，每个卫星节点的路由表更新将触发星间链路检测，通过链路检测获得临星路由表的更新情况，若临星路由表未更新，则进一步触发路由表传送。以此类推，直到新的路由表完成在低轨星座所有卫星节点的扩散。在解决了星间路由问题的前提下，星地路由主要解决反向的业务或信令数据需要落地到核心网时确定馈电链路接入节点卫星的问题。当信关站发生馈电链路切换时，通过信关站的地面网关将该信息注入与该信关站关联的低轨卫星节点上。星地之间的前向传输，主要由信关站根据多条馈电链路的负载均衡状态进行路由传输来完成。

③ 时间片切换。天基网络控制器根据星历图将星座运动周期（即每个重复周期）分成若干个静态拓扑快照，并预先计算周期性变化的拓扑快照序列，计算各个拓扑快照下的静态拓扑数据库、静态邻居表和路由转发表。将路由计算结果注入各个卫星的星载交换机，星座系统运行中每颗卫星按一定时间间隔完成时间片切换。另外，当星上分布式路由检测到链路变化时，将触发路由有效性维护功能，生成并发送路由维护信息到全网。

卫星路由交换体系架构历经星载透明转发、IPv4 协议路由、标签交换等发展阶段。为突破星载处理资源瓶颈，本文提出基于新型二层路由协议的解决方案，该方案采用轻量级路由控制机制，通过在节点间交互不含 IP 信息的路由帧，实现链路层路由状态同步与路径计算，显著降低控制平面复杂度。卫星路由交换模块通过链路状态通告（Link-State Advertisement, LSA）实时感知星间链路连通状态及星地馈电链路可用性，基于动态自主选择最优通信路径，构建承载网资源自管理体系。该模块融合持续自主学习算法与实时网络状态感知能力，可智能判别并优先选择存续周期长、可靠性高的传输路径，显著提升数据传输效率与实时性，并保障网络韧性。路径策略如下。

在低轨卫星网络完成拓扑 G 更新，等待下一次更新前，假设 $P = \{V_s, V_i, V_j, \dots, V_e\}$ 表示卫星网络中从节点 V_s 至节点 V_e 的一条传输通路。

$$w(v_i, v_j) = \begin{cases} \frac{2\sin\left(\frac{180 - \theta_i - \theta_j}{2}\right) \times (h + R)}{S(v_i, v_j)}, & v_i, v_j \text{ 链路有效} \\ +\infty, & v_i, v_j \text{ 链路无效} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， h 为卫星高度， R 为地球半径， θ_i 为卫星节点 V_i

的轨道倾角, θ_j 为卫星节点 V_j 的轨道倾角, $S(v_i, v_j)$ 为链路传播速率。则路径 P 的路径权值 $W(P)$ 计算方式为

$$W(P) = \sum_{i=s}^e w(v_i, v_{i+1}) \quad (2)$$

当值 $W(P)$ 为最小值时, 路径 P 为此时间段内 V_s 至 V_e 的最短传输路径。

2 载荷配置架构

目前, 低轨卫星常用的3种交换模式的载荷分别为透明转发器、子带转发器、再生处理器。其中, 透明转发器将信号进行放大、变频等, 上述工作通过微波交换矩阵载荷即可实现, 信息在传输过程中不会被修改或处理。再生处理器需配置高算力FPGA、CPU等处理芯片, 将信号进行模数转换、调制解调、编译码、加解密等数据解析工作, 提取解析信息中的关键信息并进行分组完成交换, 在信号解析过程中避免了噪声累加, 可适用于高安全和长距离通信场景。子带转发器统筹了再生处理和透明转发的特点, 其利用少量FPGA芯片处理资源实现数字信道化, 通过多相滤波器和调制滤波器组等实现波束内带宽信号分路与合路, 通过电路交换支持跨频段和跨波束交换, 实现频带资源的灵活调配和管理。

本文设计了一种多模式交换架构, 配置了各类处理器载荷、微波交换矩阵载荷、多波束链路载荷等设备。通过处理器内部载荷控制单元加载不同程序版本, 结合多波束链路载荷, 可独立配置波束工作在子带转发模式或者再生处理模式, 实现再生处理或子带转发, 各个波束工作模式零耦合; 通过微波交换矩阵和多波束链路载荷, 可实现透明模式的波束铰链。以星地4通道波束载荷为例, 通过多波束链路载荷分路单元和开关单元实现波束模式选择, 通过加载不同软件版本实现子带模式和透明模式, 4个波束可独立工作在透明转发模式、子带转发模式、再生处理模式。处理器配置了不易失存储区, 存储多个版本程序, 方便通过简单指令加载不同的工作模式, 如图5所示。

该载荷配置可支持移动、宽带、物联网数据采集、测控等服务业务。其中, 移动业务可通过单星分组交换到地面关口站核心网或直接到本星下移动终端, 也可跨星分组交换转发到地面关口站核心网或跨星转发到移动终端; 宽带业务可通过单星或多星分组交换的方式转发, 也可通过子带转发为单星下用户直接提供互联通道, 还可通过透明转发到地面关口站实现与地面用户互联; 物

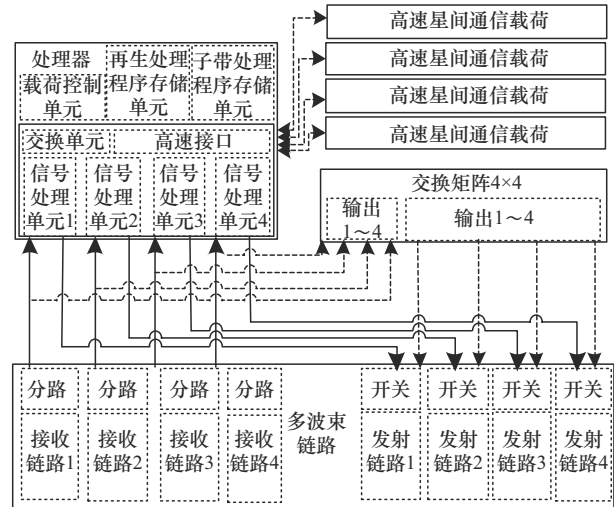


图5 多模式载荷配置

联业务可通过单星或跨星转发到地面关口站核心网物联网业务管理中心。

低轨卫星在完善星地链路通信功能的同时, 也需要星间链路的稳定和高速率通信, 以满足多样化应用场景, 并提升整体系统性能。高速率通信是海量数据传输的关键, 可避免数据积压。高速星间通信是实现低时延、高带宽连接的核心技术, 通过星间链路在轨直接交换数据, 可减少对地面站的依赖, 缩短传输路径, 从而降低时延并提升服务质量。此外, 军事通信、灾害监测和应急响应等对实时性要求极高的应用场景也依赖高速率通信以确保数据的即时传输和处理。由于激光通信具有安全性高、通信容量大、无须频率使用许可等优势, 星间通信载荷通常采用激光通信技术路线。因此, 低轨卫星设计并配置了4套高速星间通信载荷, 支持前后左右共4个方向的通信, 能够实现不同轨道面相邻卫星之间的直接连接, 增强网络的灵活性和覆盖范围。

3 性能测试

通过标准的数据流测试仪表, 进行了星间/星地路由交换性能确认。首先使用网络测试仪配置两条星地链路, 其中, 这两条星地链路分属于两颗卫星; 然后搭建高速星间激光链路, 连接两颗卫星的通信处理载荷; 最后设置随机长度的测试数据包, 开展测试验证, 并记录传输时延、时延抖动、丢包率等性能测试结果。网络测试仪的参数配置为: 设置2条信息流, 每条星地链路速率为2.5 Gbit/s, 数据包随机长度为64~1 600 B, 持续时间为1 min; 承载类型均为“面向连接承载”; 设置每条数据流

的源 IP 地址和目的 IP 地址，分别为本星地面节点和目的卫星地面节点，保证数据通过星地/星间进行传输。路由交换性能测试结果如图 6 所示。

由图 6 可知，双星在星地/星间通信速率 5 Gbit/s 下的系统最大传输时延为 746.79 μ s、时延抖动为 36.68 μ s，丢包率为 0。

同时，该算法基于天基承载网半实物仿真验证环境，对卫星拓扑动态变化进行高真实度仿真，对自主路由进行功能和性能验证分析。半实物仿真验证环境如图 7 所示，在该系统中，对由部署在轨道高度 880 km、倾角为 50° 的 108 颗互联卫星组成的星座进行验证，通过云平台

主控服务器运行脚本程序模拟卫星节点某条链路失效。测试方法如下。

- ① 将宽带卫星终端 107 和宽带卫星终端 607 分别接入编号为 L107 和 L706 的卫星并配置映射。
- ② 宽带卫星终端 107、607 分别连接网络测试仪；测试仪分别配置默认网关，指向各自连接的宽带卫星终端。
- ③ 通过网络测试仪向网络中注入特定流量，云仿真界面呈现数据流路径渲染效果；测试仪信息流参数设置速率 R_b 为 11 760 kbit/s、数据包长 L 设置为 1 470 B，即测试仪打流每秒 1 000 包。
- ④ 在数据流路径上选取一条链路断开，待自主路由

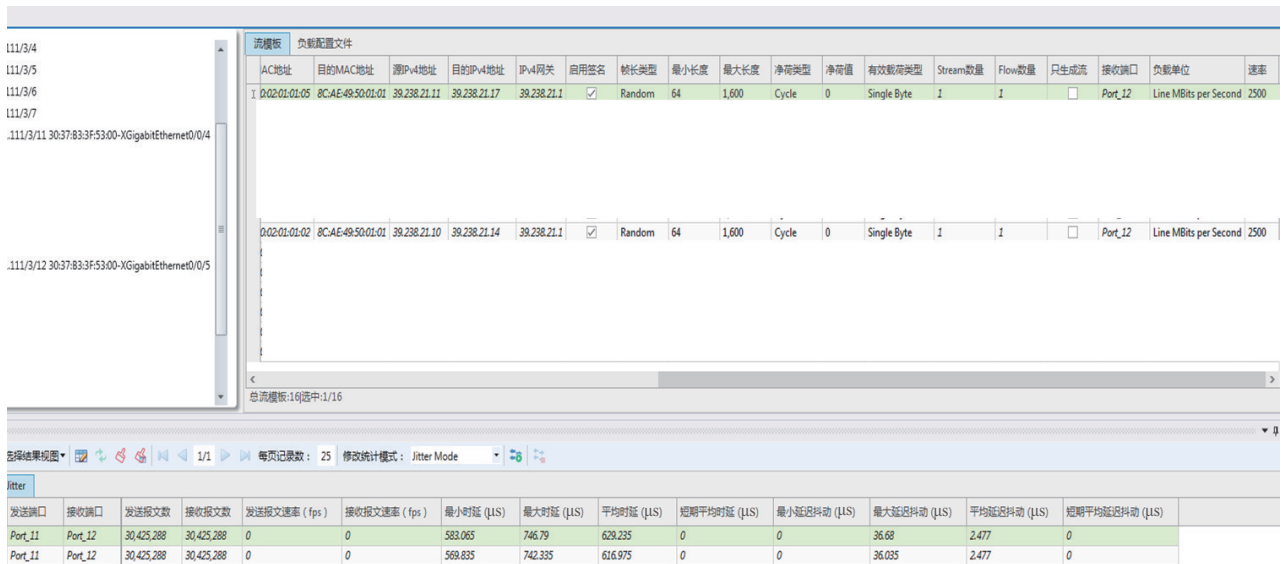


图 6 路由交换性能测试结果

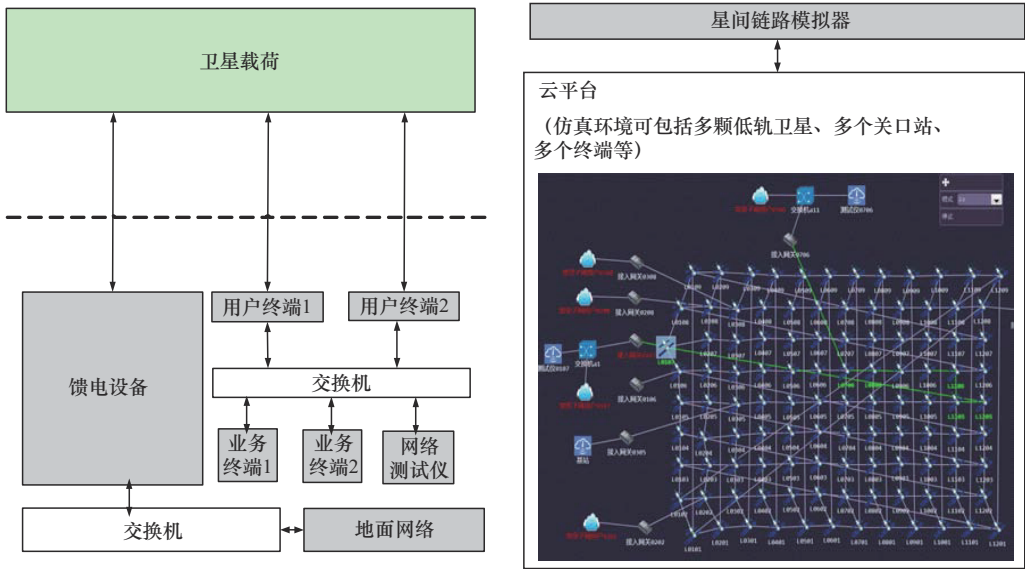


图 7 半实物仿真验证环境

重收敛后，界面呈现新的数据流路径。

⑤ 查看测试仪数据丢包状态，记录路由重收敛时间。在单条链路失效的情况下，路由重新收敛过程中丢失数据为4 342包，即路由重新收敛时间为4.34 s。

4 结束语

本文首先介绍了低轨卫星对地快速移动、卫星整体失效或卫星单条链路失效、卫星协同等原因造成卫星网络拓扑变化的情况，然后介绍了卫星透明转发、子带转发、再生处理等模式的资源需求和工作特点。本文所提方案借鉴了地面网络控制与转发分离的设计思想，采用分布式与集中式相结合的设计思路，结合载荷配置方式，统筹3种转发模式，既可有效避免卫星网络拓扑变化对星座服务性能带来的影响，又可兼容现有地面终端应用模式。该技术部署在低轨卫星互联网试验卫星中，在卫星资源有限的情况下，实现了多波束并发，通过任务规划可独立配置各个波束的服务模式，该卫星已在轨完成试验验证和典型示范应用，为后续低轨卫星互联网工程建设提供了技术支持。

参考文献：

- [1] 张更新, 廖磊瑶, 何元智. 面向空天地海一体化的卫星通信关键技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 11-24.
ZHANG G X, LIAO L Y, HE Y Z. Study on the key technologies of satellite communication for space-air-ground-sea integration[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 11-24.
- [2] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 161-176.
YI K C, LI Y, SUN C H, et al. Recent development and its prospect of satellite communications[J]. Journal on Communications, 2015, 36(6): 161-176.
- [3] 禹华钢, 方子希. 低轨卫星互联网: 发展、应用及新技术展望[J]. 无线电工程, 2023, 53(11): 2 699-2 707.
YU H G, FANG Z X. LEO satellite Internet: development, application and new technology prospects[J]. Radio Engineering, 2023, 53(11): 2699-2707.
- [4] 张世层, 张冬, 王平, 等. 低轨卫星激光载荷配置及快速建链方法的研究[J]. 激光技术, 2024, 48(2): 249-254.
ZHANG S C, ZHANG D, WANG P, et al. Research on configuration of laser payload for LEO satellites and rapid link establishment method[J]. Laser Technology, 2024, 48(2): 249-254.
- [5] 王则予, 张梦菲, 孙耀华, 等. 星上透明转发非地面网络中的切换机制[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 101-108.
WANG Z Y, ZHANG M F, SUN Y H, et al. Handover mechanism design in non-terrestrial networks with transparent satellites[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 101-108.
- [6] 张世层. 星载柔性转发器的数字信道化器设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
ZHANG S C. Design and implementation of digital channelizer for spaceborne flexible repeater[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- [7] 田斌, 李晨曦. 近似精确重构的低复杂度星载信道化器[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(6): 1395-1401.
TIAN B, LI C X. Nearly perfect reconstruction onboard channelizer of low complexity[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(6): 1395-1401.
- [8] 张世层, 张冬, 王立民, 等. 新型低轨通信卫星载荷设计及在轨应用[J]. 电讯技术, 2024, 64(8): 1243-1248.
ZHANG S C, ZHANG D, WANG L M, et al. New satellite payloads configuration and in-orbit application of LEO communication satellite[J]. Telecommunication Engineering, 2024, 64(8): 1243-1248.
- [9] 田斌, 李晨曦. 近似精确重构的低复杂度星载信道化器[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(6): 1395-1401.
TIAN B, LI C X. Nearly perfect reconstruction onboard channelizer of low complexity[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(6): 1395-1401.
- [10] 朱子行, 赵尚弘, 李勇军, 等. 再生式通信卫星转发器的研究进展[J]. 电讯技术, 2011, 51(8): 147-153.
ZHU Z H, ZHAO S H, LI Y J, et al. Research progress of regenerative communication satellite repeaters[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(8): 147-153.
- [11] 魏雯婷, 伏丽莹, 王琨, 等. 卫星互联网路由技术综述[J]. 西安电子科技大学学报, 2024, 51(5): 9-23.
WEI W T, FU L Y, WANG K, et al. Survey of routing technologies for the satellite Internet[J]. Journal of Xidian University, 2024, 51(5): 9-23.
- [12] 王晓锋, 张怡, 张国秀. 面向低轨卫星互联网的效能评估技术[J]. 系统仿真学报, 2015, 31(1): 119-133.
WANG X F, ZHANG Y, ZHANG G X. Performance evaluation technology for Low Earth Orbit satellite Internet[J]. Journal of System Simulation, 2015, 31(1): 119-133.

[作者简介]



张世层 (1991—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为载荷总体设计。

张冬 (1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星网络总体设计。

孙艳红 (1986-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为卫星网络总体设计。

安绍毅 (1993-), 男, 工程师, 主要研究方向为卫星轨道仿真设计。

王立民 (1976-), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为载荷总体设计。