

卫星网络中的拓扑动态变化与路由协议优化策略

郭静静

(北京理工大学计算机学院, 北京 100081)

摘要: 随着空天地一体化信息网络建设不断推进, 卫星网络已经成为支撑全球全域通信、宽带互联网接入、深空通信、应急通信以及国防信息基础设施的关键组成部分。近年来, 以低轨卫星为主体的大规模星座快速部署, 使得卫星网络呈现出节点高速运动、链路频繁通断、拓扑持续时变、节点间歇性连通等典型特征, 传统地面网络路由协议以及早期卫星网络路由机制在高动态拓扑环境下普遍存在收敛速度慢、路由开销巨大、路径稳定性差、业务传输时延抖动明显、网络负载分布不均衡等一系列问题, 严重制约了卫星网络整体性能与服务质量。本文以卫星网络拓扑动态变化为核心研究对象, 系统分析拓扑动态变化的内在驱动因素、外在表现形式以及对网络传输性能的影响机理, 深入梳理现有典型路由协议在动态拓扑环境下面临的适应性缺陷与性能瓶颈, 从拓扑预测、动态自适应机制、多路径协同、负载均衡调度以及动态资源分配等多个层面提出一体化的路由协议优化策略, 并构建仿真环境对优化策略进行多维度验证。研究结果表明, 面向拓扑动态特性设计的优化路由机制能够有效降低路由收敛时延、减少业务丢包率、提升网络吞吐量、改善负载均衡效果, 可为大规模低轨卫星网络、多层混合卫星网络的路由协议设计与工程实现提供理论依据与技术参考。

关键词: 卫星网络; 拓扑动态变化; 星间链路; 路由协议; 拓扑预测; 负载均衡; 动态自适应

中图分类号: TN927.3

文献标识码: A

文章编号: 3106-2709 (2025) 05-0011-10

DOI: 10.62022/NCAR.issn3106-2709.2025.05.002

Topology Dynamic Change and Routing Protocol Optimization Strategies in Satellite Networks

Guo Jingjing

(School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: With the continuous development of space-air-ground integrated information networks, satellite networks have become a key infrastructure to support global seamless communication, broadband Internet access, deep-space communication, emergency communication and national defense information systems. In recent years, the rapid deployment of large-scale constellations dominated by low Earth orbit satellites has made satellite networks exhibit typical characteristics such as high-speed node movement, frequent link interruption and reestablishment, continuous time-varying topology, and intermittent node connectivity. Traditional routing protocols designed for terrestrial networks and early routing mechanisms of satellite networks generally suffer from a series of problems in highly dynamic topology environments, including slow convergence speed, excessive routing overhead, poor path stability, obvious delay jitter, and unbalanced network load distribution, which seriously restrict the overall performance and service quality of satellite networks. This paper focuses on the dynamic topology change of satellite networks, systematically analyzes the internal driving factors, external manifestations and the influence mechanism on network transmission performance, deeply sorts out the adaptive defects and performance bottlenecks of existing typical routing protocols in dynamic topology environments, and proposes an integrated routing protocol optimization strategy from multiple aspects such as topology prediction, dynamic adaptive mechanism, multi-path collaboration, load balancing scheduling and dynamic resource allocation. A simulation environment is constructed to verify the optimization strategies in multiple dimensions. The results show that the optimized routing mechanism designed for dynamic topology characteristics can effectively reduce routing convergence delay, decrease packet loss rate, improve network throughput and enhance load balancing performance. It can provide theoretical basis and technical reference for the routing protocol design and engineering implementation of large-scale LEO satellite networks and multi-layer hybrid satellite networks.

Keywords: satellite network; topology dynamic change; inter-satellite link; routing protocol; topology prediction; load balancing; dynamic adaptation

作者简介: 郭静静, 博士, 讲师, 研究方向为路由协议。

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 卫星网络在通信领域的重要性

进入21世纪以来,全球通信系统正从地面固定通信、地面移动通信向空天地一体化泛在通信方向快速演进。地面通信网络,包括光纤通信、5G移动通信以及各类局域网与广域网技术,在城市、人口密集区域已经具备极高的带宽与覆盖率,但在海洋、沙漠、森林、偏远山区、极地等地理环境复杂或人口稀疏区域,地面网络部署成本极高、建设周期长、维护难度大,难以实现全域覆盖^[1]。与此同时,航空、航海、灾害救援、野外勘探、军事行动等场景对移动中通信、广域覆盖通信、抗毁通信的需求持续提升,传统地面网络难以满足这类特殊场景下的通信服务要求。卫星网络以环绕地球运行的人造卫星作为网络节点,以星间链路、星地链路作为信息传输通道,能够实现全球无死角覆盖,不受地理条件限制,可在全天候、全时段条件下提供稳定通信服务,因此成为构建全域泛在连接的核心支撑手段。

从应用领域来看,卫星网络的重要性体现在民用、行业、国家安全等多个层面。在民用通信领域,卫星网络能够为偏远地区居民提供宽带互联网接入服务,推动数字普惠与信息公平,同时为航空乘客、航海人员、长途运输车辆提供连续不断的网络服务,提升移动场景下的用户体验。在行业应用领域,卫星网络广泛支撑气象监测、资源勘探、环境观测、灾害预警、远洋渔业、高精度定位导航等关键业务,成为现代社会基础设施不可缺少的一部分。在国家安全与国防建设领域,卫星网络承担远距离指挥控制、情报侦察信息回传、战场态势感知、联合作战协同通信等重要任务,具有抗毁性强、覆盖范围广、难以被地面手段完全压制等突出优势,是信息化、智能化作战体系的关键枢纽。

从技术发展趋势来看,卫星网络正经历从高轨小容量星座向低轨大规模星座、从透明转发模式向星上自主处理模式、从单一通信功能向通信导航遥感一体化融合、从独立天基网络向空天地一体化统一组网的重大转型。星间激光链路技术、星上交换与路由技术、软件定义卫星、网络虚拟化、智能星上处理等技术不断成熟,使得卫星节点从简单的信号转发器转变为具备计算、存储、交换、路由能力的空间智能节点^[2]。与此同时,全球范围内掀起低轨巨型星座建设浪潮,数百颗乃至上万颗卫星组成的大规模星座逐步投入使用,使得卫星网络容量、覆盖能力、传输速率得到数量级提升。卫星网络与地面5G/6G网络、地面互联网、车联网、无人机群

网络深度融合,共同构成下一代全球统一连接的信息基础设施。在这样的时代背景下,如何保证卫星网络在高动态、强时变、大规模节点条件下高效稳定运行,解决拓扑动态变化带来的一系列核心技术问题,具有重要的理论价值与工程应用价值。

1.1.2 拓扑动态变化对卫星网络性能的影响

卫星网络与地面网络最本质的区别,在于其网络拓扑具有强动态、高时变、周期性重构、间歇性连通的特点^[3]。地面网络的节点通常固定部署,链路状态相对稳定,拓扑结构在较长时间内保持不变,即使出现少量链路或节点故障,也不会造成全网范围内的频繁重构。而卫星网络,特别是以低轨卫星为主体的星座网络,卫星围绕地球高速运动,轨道高度通常在500km至1500km之间,绕地周期仅为90分钟到120分钟,卫星相对地面站以及卫星与卫星之间的相对位置时刻发生改变,导致星地链路与星间链路持续处于通断交替状态。

拓扑动态变化对卫星网络性能的影响是全方位、深层次的。首先,链路频繁切换会直接造成数据传输中断。在低轨卫星网络中,一颗卫星对某一地面终端的可见时间通常只有数分钟,地面终端必须在短时间内完成星地链路切换;而星间链路,尤其是不同轨道面之间的星间链路,会因为卫星相对运动快速接近或远离,导致链路建立、维持与断开的过程频繁发生^[4]。链路的频繁通断会引发数据包丢失、业务重传、传输时延增大、时延抖动加剧等问题,对于语音、视频、实时控制等对时延和抖动敏感的业务影响尤为严重。

其次,拓扑快速重构会导致路由信息快速失效。路由协议的基本工作机制是基于当前网络拓扑状态计算路径,当拓扑变化速度超过路由协议收敛速度时,路由表项尚未更新完成就已经过时,路由计算结果与实际拓扑不匹配,进而出现路由环路、路径不可用、转发错误等问题。在大规模卫星星座中,拓扑变化具有全域性,局部链路变化会引发区域甚至全网路由信息更新,传统路由协议在这种环境下会出现收敛滞后、路由震荡、决策混乱等现象,严重降低网络传输可靠性。

再次,卫星节点的间歇性连通使得网络在很多时刻表现出容延迟/中断容忍网络的特性。传统地面网络默认端到端路径始终存在,而卫星网络中,由于卫星运动、链路遮挡、链路切换等原因,端到端路径可能在某一时间段内并不存在,数据包需要依靠星上存储转发能力进行传输。传统路由协议无法有效支持这种间歇性连通场景,会出现传输成功率低、时延不可控、资源浪费严重等问题。

最后,在大规模星座条件下,拓扑动态变化还会带来路

由开销爆炸式增长。为了保证路由决策准确,节点需要不断广播或交互链路状态信息,拓扑变化越频繁,状态更新消息数量越多,占用的星上带宽与处理资源越大,大量控制开销会挤压业务数据传输空间,导致网络有效吞吐量下降、星上设备能耗增加、系统整体效率降低^[5]。

综上所述,拓扑动态变化是制约卫星网络性能提升的核心因素之一,准确理解拓扑动态变化的内在规律、表现形式与影响机理,是设计高效路由协议、提升卫星网络服务能力的前提与基础。

1.1.3 路由协议优化的必要性

路由协议是网络控制平面的核心功能,负责在源节点与目的节点之间选择合适路径、维护路径状态、完成数据包转发决策,其性能直接决定网络的吞吐量、时延、丢包率、可靠性与资源利用率。在地面网络中,路由协议经过长期发展已经形成成熟体系,例如适用于局域网内部的链路状态协议、距离矢量协议,适用于大规模网络的边界网关协议等。然而,这些协议均是基于拓扑相对稳定、节点固定、链路持续连通的假设设计的,直接应用于卫星网络会出现严重的不适应性。

早期卫星网络以高轨卫星为主,高轨卫星与地面相对静止,拓扑变化缓慢,可以采用静态路由或简单的动态路由完成数据转发。但随着低轨大规模星座成为主流,拓扑高动态成为常态,传统路由协议的缺陷被无限放大。静态路由无法应对链路与节点状态变化,一旦路径中断,业务将完全中断^[6];基于洪泛或全网广播的路由协议会产生巨大控制开销,在大规模网络中难以实用;传统按需路由协议在路径断裂后才开始重新寻找路径,重路由时延过长,无法满足实时业务需求;传统最短路径路由只关注跳数或距离,不考虑链路剩余时间、负载状态、节点剩余能量等因素,容易造成负载集中、资源利用率低、网络拥塞等问题。

随着卫星网络业务不断丰富,高清视频传输、物联网海量终端接入、工业互联网低时延控制、深空探测高可靠传输等新型业务不断涌现,对路由机制提出了更低时延、更高可靠性、更好服务质量保障、更强抗毁性、更高安全性的要求。同时,卫星网络正在向多层混合架构发展,高轨、中轨、低轨卫星协同组网,卫星与地面站、关口站、无人机、舰船、车辆等多种节点互联互通,网络结构更加复杂,对路由的协同调度能力、跨层适配能力、动态扩展能力提出更高要求。

因此,面向卫星网络拓扑动态变化特性,开展路由协议优化研究,突破高动态环境下路由快速收敛、低开销维护、多路径协同、负载均衡、资源智能分配等关键技术,构建能

够自适应拓扑变化、感知业务需求、合理分配资源、提升传输效率的新一代路由机制,对提升卫星网络整体性能、推动空地一体化网络实用化部署与规模化应用具有十分重要的理论意义与现实必要性。

2 卫星网络拓扑动态变化特性分析

2.1 卫星网络拓扑动态变化的驱动因素

卫星网络拓扑动态变化并非随机无序,而是由确定性因素、随机不确定性因素、可控管理因素共同驱动。这些因素从不同维度影响卫星节点位置、链路状态、连通关系与网络结构,共同决定了拓扑变化的规律、频率、幅度与可预测性。

2.1.1 卫星轨道运动特性

卫星轨道运动是造成拓扑动态变化最根本、最主要、最具规律性的驱动因素。所有卫星按照天体力学规律在预定轨道上运行,其位置、速度、姿态随时间严格变化,直接导致星间相对位置与星地相对位置持续改变,进而引发链路通断与拓扑重构。

按照轨道高度划分,卫星网络通常包含高轨卫星、中轨卫星与低轨卫星三类。高轨卫星运行在地球静止轨道,轨道高度约35786km,运行周期与地球自转周期相同,相对地面保持静止,因此拓扑结构高度稳定,几乎不会因为轨道运动产生明显变化^[7]。但高轨卫星距离地面过远,信号传播时延大,带宽有限,难以满足低时延、大容量通信需求。中轨卫星轨道高度介于高轨与低轨之间,运行速度较慢,拓扑变化相对平缓,常作为多层星座中的骨干转接节点。低轨卫星轨道高度低、传播时延小、路径损耗小,能够提供接近地面通信的体验,是当前大规模星座的主流选择,但低轨卫星绕地速度快,星间与星地相对位置变化剧烈,是拓扑高动态特性的主要来源。

在星座构型中,同一轨道面内的卫星通常以相近速度同向运行,卫星之间相对速度较小,同轨星间链路相对稳定;而相邻轨道面的卫星,在极区附近会出现高速相对运动,在赤道区域则相对平缓,轨间链路因此呈现周期性通断。此外,由于地球并非理想球体,存在非球形引力场,同时受到日月引力、太阳光压、高层大气阻力等摄动力影响,卫星实际运行轨道会缓慢偏离理论开普勒轨道,这种轨道摄动会使拓扑变化在周期性基础上叠加缓慢的非理想漂移,长期累积会改变星座构型,进一步增加拓扑变化的复杂性。

轨道运动带来的拓扑变化具有强周期性、高可预测性,可以通过轨道模型精确计算卫星在未来任意时刻的位置与姿态,这为基于拓扑预测的路由优化策略提供了重要基础。

2.1.2 空间环境干扰

空间环境是造成拓扑动态变化的随机、突发、不可完全预测的驱动因素。卫星运行在外层空间,面临复杂恶劣的环境条件,这些环境因素会直接影响卫星节点状态与链路可用性,引发非计划、非周期性的拓扑变化^[9]。

空间辐射与高能粒子是最常见的环境干扰因素。空间中存在大量带电粒子,会对星载电子设备产生单粒子效应,可能导致处理器、存储器、收发机等设备出现瞬时错误、数据翻转甚至永久性损伤,使卫星节点工作异常、通信中断,表现为节点短暂失效或长期离线。太阳风暴、地磁暴等空间天气事件会剧烈影响电离层与磁层状态,改变电磁波传播条件,导致星地链路信噪比下降、误码率上升,严重时会造成链路暂时中断。

空间碎片与微流星体撞击是威胁卫星安全的重要因素。随着人类空间活动增多,空间碎片数量持续增加,高速运动的碎片与卫星碰撞可能造成卫星结构损坏、设备失效、链路中断,甚至导致卫星完全报废,引发网络拓扑突变。极端温度变化也会影响卫星天线指向精度与机械结构稳定性,对于指向要求极高的星间激光链路,微小的指向偏差就可能导致链路失锁、通信中断。

空间环境干扰具有随机性、突发性、短时性或永久性等特点,无法像轨道运动一样精确预测,只能通过概率模型进行评估。这类因素会使基于理想轨道预测的路由策略在某些时刻失效,对路由协议的鲁棒性、容错能力与快速恢复能力提出极高要求。

2.1.3 任务需求变化

任务需求变化是驱动拓扑动态变化的可控、主动、人为管理因素。卫星网络并非单纯被动运行,而是根据用户需求、业务流量、系统管理策略、安全抗毁需求主动调整拓扑结构,实现资源优化配置与服务能力提升。

任务需求驱动拓扑变化的形式多种多样。第一,卫星载荷任务调整会改变链路配置。卫星通常同时搭载通信、导航、遥感等多种载荷,不同任务阶段需要调整波束指向、链路优先级、工作频段与带宽分配,链路状态与连通关系随之改变。第二,流量分布变化会触发网络主动重构。当某一区域出现业务流量激增,形成网络热点时,系统可以主动调整链路带宽、切换服务卫星、开启或关闭部分链路,实现流量均衡分担,避免局部拥塞^[9]。第三,卫星在轨管理操作会直接改变网络组成。新卫星发射入轨、故障卫星离轨维修、星座构型优化调整、轨道维持机动等操作,都会增加或减少网络节点,改变拓扑结构。第四,为提升网络抗毁性与安全性,系统会

在检测到干扰、攻击或故障隐患时,主动切断脆弱链路,启用备用链路与冗余节点,实现拓扑弹性重构。

这类拓扑变化由地面管控系统或星上自主管理系统触发,具有计划性、阶段性、可控性,要求路由协议具备平滑切换、无中断服务、动态适配拓扑调整的能力,在拓扑主动变化过程中保证业务连续性与服务稳定性。

2.2 拓扑动态变化的典型表现形式

在轨道运动、空间环境、任务需求三类因素共同作用下,卫星网络拓扑变化呈现出多种典型表现形式,这些表现形式直接影响路由协议设计与网络性能。

2.2.1 链路频繁切换

链路频繁切换是卫星网络拓扑动态变化最直观、最频繁的表现形式。链路切换主要分为星地链路切换与星间链路切换两大类。

星地链路切换是指地面终端与卫星之间的通信链路随卫星运动而发生的切换。低轨卫星快速飞过地面终端上空,可见时间极短,当下一颗卫星进入有效覆盖范围时,地面终端必须断开与当前卫星的连接,建立与新卫星的连接。在大规模星座中,地面终端可能每秒都处于链路切换准备或执行过程中,切换频率极高,对切换时延、丢包率、业务连续性要求极为严格^[10]。

星间链路切换包括同轨道面链路、跨轨道面链路与跨层链路切换。同轨道面内卫星相对运动较小,链路维持时间较长,切换频率较低;跨轨道面卫星相对速度大,链路维持时间短,切换频繁;中轨与低轨之间、高轨与低轨之间的跨层链路,会因为卫星可见性周期性变化而呈现规律性切换。星间激光链路对指向、捕获、跟踪要求极高,更容易因为姿态偏差、运动速度过快而发生切换。

链路频繁切换会直接导致传输路径中断、路由重计算、数据包缓存与重传,是造成网络时延增加、丢包率上升、时延抖动加剧的最主要原因,也是路由协议必须重点解决的问题。

2.2.2 网络拓扑结构重构

拓扑重构是指网络中大量节点连通关系发生整体性改变,形成全新的拓扑结构。拓扑重构可以分为周期性重构与非周期突发重构两类。

周期性重构由卫星轨道运动驱动。由于卫星运行具有严格周期,星座在不同时刻呈现出不同的连通模式,整个网络拓扑按照固定时间窗口依次变化,形成一系列准静态拓扑片段。在大规模星座中,拓扑重构可能每秒甚至更短时间就发生一次,全网路由表需要批量更新。

非周期突发重构由节点故障、链路干扰、任务调整、攻击规避等不确定因素触发,不具备明显周期规律,发生时间与变化幅度难以提前预测^[11]。局部少量链路变化可能引发区域级重构,而大规模节点失效则可能导致全网级重构。

拓扑重构频率越高、范围越大,路由协议维护成本越高,收敛难度越大。如果路由收敛速度慢于拓扑重构速度,网络将长期处于路由不一致状态,严重影响传输性能。

2.2.3 节点失效与恢复

节点失效与恢复是拓扑变化中影响范围较大、后果较为严重的表现形式。节点失效指卫星节点暂时或永久无法提供正常通信与转发服务,失效原因包括设备故障、能源耗尽、辐射损伤、空间碎片撞击、温度异常、管控指令关停等。失效可能是瞬时的,也可能是永久的;可能是单个节点,也可能是批量节点。

节点失效会导致与之相连的所有星间链路与星地链路同时断开,改变网络连通性,可能造成网络分割、关键路径中断、流量被迫绕行、局部负载急剧升高等问题。节点恢复是指失效节点经过故障排除、系统重启、轨道修正或重新入网后,恢复正常通信能力,重新加入网络。节点恢复会重新增加网络连通路数,提升网络容量与抗毁性,缓解拥塞压力。

节点失效与恢复具有离散性、突发性、不可预见性,要求路由协议能够快速感知节点状态变化,及时更新路由信息,自动绕开失效节点,并在节点恢复后快速利用新增资源,提升网络整体容错能力与抗毁能力。

3 现有卫星网络路由协议的局限性

3.1 传统路由协议的适应性不足

3.1.1 静态路由协议的僵化性

静态路由协议是最早应用于卫星网络的路由方式,其核心思想是由地面管控系统预先计算所有可能的路径,并将路由表固化配置到卫星节点中,节点运行过程中不进行路由计算与表项更新。静态路由实现简单、控制开销为零、对星上处理能力要求低,在早期高轨小星座中得到一定应用。

但在动态拓扑卫星网络中,静态路由的僵化性问题极为突出。静态路由无法感知链路切换、节点失效、流量变化等动态信息,一旦预设路径发生中断,业务将直接中断,无法自动切换到备用路径^[12]。同时,静态路由不支持负载均衡,流量只能按照固定路径传输,容易造成部分链路与节点长期高负载,而其他资源长期闲置。在大规模星座中,静态路由表配置工作量巨大,难以适应星座扩展、卫星更新、业务调整等变化,维护成本极高。因此,静态路由只能适用于拓扑

高度稳定、网络规模极小、业务模式固定的场景,无法满足现代低轨大规模动态卫星网络的需求。

3.1.2 基于洪泛的协议开销过大

为了适应拓扑变化,研究人员将地面网络中的动态路由协议引入卫星网络,其中一类典型协议基于洪泛机制实现路由信息同步。这类协议通过节点周期性广播链路状态信息,使全网节点维护一致的网络视图,再基于全网拓扑计算路径。

在卫星高动态环境下,基于洪泛的路由协议暴露出严重缺陷。由于拓扑频繁变化,链路状态消息需要极高频率发送,才能保证路由信息的实时性。在大规模星座中,节点数量巨大,广播消息数量呈指数级增长,形成严重的广播风暴,占用大量星上带宽与处理资源,大量控制开销挤压业务数据传输空间,导致网络有效吞吐量大幅下降。同时,频繁洪泛会加剧信道竞争与冲突,进一步增加传输时延与丢包率。在极端情况下,路由控制开销甚至会超过业务数据流量,使网络陷入瘫痪。因此,传统基于洪泛的路由协议难以在大规模高动态卫星网络中实用。

3.2 动态拓扑下的路由性能瓶颈

3.2.1 路径断裂与重路由延迟

大多数传统动态路由协议(如Ad Hoc网络中的AODV、DSR协议)在设计时未充分考虑低轨卫星网络的高动态特性,普遍采用事后响应模式,即只有在路径已经发生物理断裂、数据包无法正常转发并出现丢包或超时现象时,才会触发重路由过程。这一被动响应机制本身就存在先天性的时延缺陷,而重路由的完整过程包含多个依次执行的关键步骤,每一步都需要消耗一定的时间成本:故障感知阶段需要节点持续监测链路状态,通过数据包反馈、链路信号强度检测等方式确认路径断裂,这一过程通常需要数十至数百毫秒;路由请求广播阶段,故障节点需向周边节点广播路由请求报文,报文在星间传播过程中会受到空间信道干扰、节点转发延迟等影响;路径应答收集阶段需要等待候选节点返回可用路径信息,若多个节点同时应答,还需额外时间进行信息筛选;新路径选择阶段需基于预设准则(如最短路径、最小跳数)完成路径计算,而星上计算资源有限,复杂的路径计算会进一步增加时延;最后,路由表更新阶段需要将新路径信息同步至全网相关节点,确保数据包能够按照新路径转发,这一同步过程同样会产生不可忽视的时延。

在低轨卫星网络中,由于卫星围绕地球高速运动(轨道高度通常在500–2000km,运动速度可达7–8km/s),星间链路、星地链路的连接关系具有极强的动态性,链路剩余稳定时间通常很短,短则几秒,长则数十秒,这就导致路径断裂

现象频繁发生,重路由操作被反复、密集触发。重路由过程中产生的感知延迟、信令交互延迟、计算延迟与路由表更新延迟相互叠加、累积,其总时延往往会超过当前链路的剩余稳定时间,形成“重路由未完成、新路径已失效”的恶性循环——即当系统耗时完成重路由的全流程并启用新路径时,该新路径对应的链路已因卫星运动而断裂,不得不再次启动重路由,进而导致连续重路由、连续丢包的问题。

这种重路由延迟带来的负面影响在时延敏感业务中表现得尤为突出。对于语音通信、高清视频会议、卫星遥感实时回传、工业实时控制等业务,其对传输时延的要求通常在毫秒级,一旦重路由时延超过业务容忍阈值,就会直接导致业务卡顿、画面模糊、语音中断,甚至引发实时控制指令传输延迟,造成设备误操作等严重后果,服务质量急剧下降,无法满足用户的核心使用需求。综上,路径断裂的高频性与重路由延迟的累积性,已成为制约动态卫星网络性能提升、限制其支撑时延敏感业务能力的关键瓶颈之一。

3.2.2 负载均衡问题

传统路由协议(如OSPF、RIP等)在路径选择时,大多以最短路径、最小跳数作为核心判断标准,这一机制在静态或低动态网络环境中能够有效降低传输时延、减少信令开销,但在低轨卫星网络这种高动态拓扑环境下,极易引发严重的负载均衡问题。由于卫星轨道运动的规律性,最短路径的分布相对固定,大量不同类型的业务流量(包括实时业务、非实时业务)会持续集中在少数处于核心位置、链路质量较好的卫星节点与星间链路上,导致这些核心节点与链路长期处于高负载运行状态。

高负载状态会引发一系列连锁反应:节点缓存队列因数据包大量堆积而溢出,导致数据包丢失率大幅上升;链路带宽被充分占用,传输时延显著增加,甚至出现链路拥塞,进一步加剧丢包问题;同时,高负载运行还会加速星上设备的损耗,降低节点与链路的可靠性和使用寿命。与之形成鲜明对比的是,网络中存在大量备用路径、边缘卫星节点以及空闲链路资源,这些资源由于未被纳入最短路径选择范围,长期处于低负载或空闲状态,无法得到充分利用,造成网络资源的严重浪费,大幅降低了整个卫星网络的资源利用率。

更为严重的是,负载均衡不仅会造成资源浪费,还会放大局部故障的影响范围和破坏程度。长期处于高负载状态的节点或链路,其故障概率本身就高于正常负载的节点和链路,一旦这些核心节点发生故障或链路出现切换,原本集中在该节点或链路上的大量流量会突然向周边节点和链路迁移,导致周边节点和链路瞬间过载,引发大范围的网络拥塞

和性能波动,甚至可能导致局部区域网络瘫痪。在大规模低轨卫星星座(如Starlink、OneWeb等)中,卫星节点数量众多、链路关系复杂,负载不均衡问题会更加突出,局部热点区域的形成会快速扩散,进而导致全网吞吐量下降、业务传输稳定性降低、用户体验恶化。

深入分析其根源,传统路由协议缺乏对全网节点负载、链路利用率、流量分布的全局感知能力,无法实时掌握各节点和链路的运行状态,同时也不具备全局协同调度能力,只能基于局部信息进行路径选择,无法实现全网流量的合理分配,难以适应大容量、多业务、高动态卫星网络的发展需求,也无法满足各类业务差异化的服务质量要求。

4 卫星网络路由协议优化策略

为有效克服传统路由协议在低轨卫星网络高动态拓扑环境下存在的路径断裂频繁、重路由延迟过大、负载不均衡、资源利用率低等缺陷,本文结合低轨卫星网络的拓扑特性、业务需求以及星上资源约束,从拓扑预测、动态自适应、多路径协同、负载均衡、动态资源分配等多个维度,提出一套一体化路由优化策略,通过主动感知网络状态、提前预判拓扑变化、快速适配动态场景、智能调度网络资源,全面提升卫星网络在高动态环境下的综合性能,满足不同类型业务的服务质量要求。

4.1 基于拓扑预测的路由优化

低轨卫星网络的拓扑变化虽然频繁,但并非毫无规律可循——卫星的轨道运动遵循严格的天体力学规律,其位置、速度、姿态等参数均可通过轨道模型进行计算和预测。基于这一特性,拓扑预测成为解决卫星网络高动态问题最有效的思路之一,其核心思想是利用拓扑变化的规律性,通过多种预测方法结合,提前计算未来一段时间内的网络拓扑状态,将持续变化的动态拓扑转化为一系列连续的、可预测的准静态拓扑片段,使路由决策从传统的“被动响应故障”转变为“主动预判变化”,从根源上解决路径断裂与重路由延迟问题。

4.1.1 拓扑预测方法

为实现高精度、高可靠性的拓扑预测,本文采用多层次、多方法融合的拓扑预测方案,主要包括轨道确定性预测、环境偏差补偿预测与分布式协同预测三种核心方法,三者相互补充、协同工作,确保预测结果的准确性、实时性和适应性。

轨道确定性预测是拓扑预测的基础,其核心是基于卫星的轨道参数(如轨道半长轴、偏心率、倾角、升交点赤经等)与轨道动力学模型,结合天体力学原理,精确计算卫星在未

来任意时刻的位置、速度与姿态信息,进而确定星间链路、星地链路的通断时间、维持时长、指向关系以及链路带宽、时延等关键参数,最终生成确定性的拓扑时序表。这种预测方法的优势在于精度高、可靠性强,不受外部环境干扰,能够为路由优化提供基础的拓扑数据支撑,适用于中长期拓扑预测场景。

环境偏差补偿预测主要用于处理轨道摄动、空间环境干扰等非理想因素带来的预测误差。在实际空间环境中,卫星会受到地球引力场不均匀、太阳辐射压、大气阻力等多种因素的影响,导致其实际轨道与理论轨道存在一定偏差,进而影响拓扑预测的精度。为解决这一问题,系统通过星上传感器和地面监测设备,持续收集历史拓扑偏差数据,利用机器学习方法(如LSTM、BP神经网络等)学习拓扑偏差的变化规律,建立偏差预测模型,对纯轨道模型的预测结果进行实时修正,有效提高短期拓扑预测的精度,确保预测结果与实际拓扑状态高度匹配。

分布式协同预测则主要用于提升预测的实时性和适应性,降低对地面管控系统的依赖。在大规模卫星星座中,若仅依靠地面管控系统进行集中式拓扑预测,会存在数据传输延迟大、地面系统压力大、单点故障风险高等问题。分布式协同预测由卫星节点之间相互交互局部拓扑状态信息、预测结果和偏差数据,通过节点间的协同计算,联合预测局部区域的拓扑变化情况,每个卫星节点既可以作为预测节点,也可以作为数据提供节点,实现预测任务的分布式分担。这种方式不仅能够大幅降低地面管控系统的压力,还能提升预测的实时性,同时在部分卫星节点故障时,其他节点仍能正常完成预测任务,提升了预测系统的可靠性和适应性。

通过上述三种方法的融合应用,系统可以获得未来多个时间片内的精确拓扑结构,清晰掌握每条链路的有效时间、稳定性、带宽等关键信息,为后续的路由预计算、路径预分配、资源预预留提供可靠的数据依据,为路由协议的主动优化奠定基础。

4.1.2 预计算路由表设计

基于拓扑预测得到的精准拓扑时序表,本文设计了一套高效的预计算路由机制,核心目标是在拓扑切换发生之前,提前完成路径计算与路由表更新,实现拓扑切换时的无感知、零延迟路由更新,彻底解决传统重路由延迟过大的问题。

预计算路由表采用时间片划分与滑动窗口机制,兼顾预测精度与计算开销。系统根据拓扑预测的精度和链路稳定时间,将未来一段时间划分为若干个连续的时间片,每个时间片对应一段准静态拓扑,在每个时间片内,拓扑状态相对稳

定。滑动窗口机制则用于动态调整时间片的划分范围,根据预测精度的变化和网络状态的波动,实时调整窗口大小,在保证预测精度的同时,有效控制星上节点的计算量,避免因计算过载影响节点正常运行。

在路由表的内容设计上,系统为每条业务流预先计算三条核心路径:主路径、备用路径与迂回路径。主路径优先选择链路剩余时间长、稳定性高、时延低、负载轻的路径,用于日常业务传输;备用路径与主路径实现物理隔离,避免因主路径所在链路故障而导致备用路径同时失效,用于主路径发生故障时的快速切换;迂回路径则作为补充,用于主路径和备用路径均失效时的应急传输,进一步提升业务传输的可靠性。同时,路由表中还标注了每条路径的有效时间、链路剩余寿命、可靠性等级、时延、带宽等关键参数,为路径选择提供全面的参考依据。

为减少信令开销与星上存储压力,路由表采用增量更新方式。当拓扑发生变化时,系统仅更新路由表中发生变化的部分(如失效路径的删除、新路径的添加、路径参数的调整),无需对整个路由表进行重新计算和更新,大幅降低了星间信令交互的频率和数据量,同时减少了星上节点的存储负担。在路径选择过程中,路由协议会根据当前时间片的拓扑状态,优先选择链路剩余时间长、稳定性高、故障概率低的路径,从源头上降低路径中断的概率,减少重路由操作的触发次数。

通过预计算路由机制的应用,路由协议彻底从传统的“断裂后重路由”转变为“切换前预部署”,提前完成路径计算和路由表更新,当拓扑发生切换时,能够直接启用预先计算好的路径,实现零延迟路由切换,从根本上解决了重路由延迟过大、路由收敛滞后等问题,显著降低了业务丢包率与时延抖动,有效提升了实时业务的传输质量。

4.2 动态自适应路由机制

低轨卫星网络的拓扑状态具有显著的动态波动性,不同时间段的拓扑变化频率、链路质量、业务流量均存在较大差异,单一的路由模式难以适应这种复杂多变的场景。为此,本文设计了动态自适应路由机制,通过融合按需路由与主动路由的优势、引入多路径协同策略,实现路由协议对网络状态的动态适配,提升路由协议的灵活性、可靠性和适应性。

4.2.1 按需路由与主动路由的混合模式

传统的纯主动路由模式需要节点周期性地广播路由信息,维护全网路由表,能够快速响应用户的业务请求,但在拓扑变化频繁的场景下,会产生大量的信令开销,浪费宝贵的星上资源和链路带宽;而纯按需路由模式仅在用户发起业

务请求或路径断裂时才触发路由计算,信令开销低,但路由计算时延高,无法满足实时业务的传输需求。针对这一问题,本文提出按需路由与主动路由的混合模式,结合两者的优势,根据网络状态动态调整路由工作方式,实现信令开销与路由时延的平衡。

混合模式引入了状态感知触发机制,系统实时监测全网的拓扑变化频率、节点负载水平、业务重要性、链路质量等关键参数,根据这些参数动态调整路由策略:在网络拓扑相对稳定、链路变化缓慢、业务流量较大的阶段,采用主动路由模式,节点周期性地广播路由信息,持续维护全网路由表,确保路径的可用性和实时性,快速响应用户的业务请求;在拓扑变化剧烈、链路频繁切换、业务流量较小的阶段,适当降低主动广播的频率,减少无效的信令开销,避免资源浪费,同时在路径发生断裂时,快速启用按需路由机制,通过局部路由请求与应答,快速重建可用路径,缩短路由恢复时延。

为进一步提升路由协议的自适应能力和扩展能力,混合模式结合软件定义网络(SDN)架构,构建“集中计算+分布式执行”的路由框架。由高层卫星节点或地面控制器作为控制层,负责全局拓扑感知、业务流量分析、路径全局优化计算等核心任务,具备全局视野,能够实现全网资源的协同调度;低层卫星节点作为数据转发层,负责快速执行控制层下发的转发指令,完成数据包包的转发任务,无需进行复杂的路径计算,降低了低层卫星节点的计算压力。这种架构不仅提升了路由协议的自适应能力,还增强了网络的可扩展性,便于后续接入更多的卫星节点和业务类型。

4.2.2 多路径路由策略

单路径路由在高动态卫星网络中存在明显的局限性:一旦路径发生断裂,必须重新计算路径,路由恢复时延高,抗毁性差、可靠性低,无法满足高可靠业务的传输需求。为此,本文优化了多路径路由策略,通过为业务流同时维护多条路径,实现流量并行传输、故障快速切换、负载分担传输,大幅提升网络的鲁棒性、吞吐量和业务传输可靠性。

优化后的多路径路由策略为每个业务流建立三条相互独立的路径:主路径、备用路径与迂回路径,三条路径之间尽可能保证物理隔离——即三条路径不共用任何卫星节点和星间链路,这样可以有效避免因单个节点或链路故障导致多条路径同时失效,显著提高路径的抗毁能力。在路径选择过程中,系统会根据链路稳定性、剩余时间、负载情况、时延水平等多维参数,为每条路径分配合理的流量比例,避免单条链路过载,实现流量的负载分担,提升链路利用率和网络吞吐量。

在路径发生中断时,多路径路由策略能够实现毫秒级快速恢复:当主路径因拓扑切换或故障而断裂时,系统无需重新计算路径,直接将原本在主路径上传输的流量切换到备用路径,确保业务传输不中断;若备用路径也发生失效,则启用迂回路径,进一步保障业务的连续性。同时,为解决多路径传输过程中数据包乱序到达的问题,系统采用有序传输与乱序重排机制:在发送端,对数据包进行编号,按照编号顺序在不同路径上传输;在接收端,根据数据包编号对乱序到达的数据包进行重排,确保数据包按原始顺序交付给用户,有效提升业务传输体验,尤其适用于语音、视频等对数据包顺序要求较高的实时业务。

4.3 负载均衡与资源分配优化

负载不均衡是制约卫星网络资源利用率和性能提升的重要因素,而星上资源(带宽、缓存、计算能力)的有限性,进一步要求路由协议必须实现负载均衡与资源的高效分配。为此,本文从流量调度和带宽分配两个维度,提出负载均衡与资源分配优化策略,实现全网资源的合理利用,提升网络的承载能力和服务质量。

4.3.1 基于流量感知的路由选择

负载均衡优化的核心是实现全局流量感知与智能调度,打破传统路由协议“最短路径优先”的单一选择标准,构建多维度路径选择准则,实现流量的均衡分布。路由协议不再仅仅以路径长度、跳数作为判断依据,而是综合考虑节点缓存占用率、链路利用率、队列长度、时延、丢包率等多维网络状态信息,选择“最稳定、最空闲、最合适”的路径,确保每条路径的负载处于合理范围。

系统通过星上节点与地面控制器的协同工作,实时监测全网流量分布情况:星上节点实时采集自身的负载状态、链路利用率、队列长度等数据,通过星间链路传输至地面控制器;地面控制器对全网数据进行汇总、分析,识别出网络中的热点区域(高负载节点和链路)与轻载区域(空闲节点和链路),生成全网流量分布热力图。根据流量分布情况,系统自动将热点区域的流量逐步迁移到轻载区域,实现流量的均衡分布,避免局部节点和链路过载,同时充分利用空闲资源,提升全网资源利用率。

为进一步提升负载均衡的效果,系统引入流量预测机制,通过分析历史流量数据,学习不同时间段、不同区域的流量变化规律,预测未来一段时间内的流量高峰,提前调整路由策略,将流量提前疏导至轻载区域,预防拥塞的发生。基于流量感知的路由选择能够有效避免局部热点的形成,缓解网络拥塞,提升全网在高负载条件下的吞吐量和稳定性,

同时降低数据包丢包率和传输时延,满足不同业务的服务质量要求。

4.3.2 动态带宽分配算法

带宽是卫星网络中最宝贵的资源之一,由于星上功率和链路容量有限,固定带宽分配方式无法适应业务流量的动态变化和业务类型的差异化需求,容易导致带宽资源浪费或关键业务带宽不足。为此,本文设计了动态带宽分配算法,根据业务类型、优先级、时延要求、流量大小等参数,为不同业务动态分配带宽资源,实现带宽资源的全局优化,在有限资源条件下最大化网络承载能力。

动态带宽分配算法采用优先级分级机制,将业务分为高优先级业务和普通业务:高优先级业务主要包括语音、实时控制、应急通信等时延敏感、可靠性要求高的业务,算法优先保障这类业务的最小带宽需求和最大时延约束,确保其传输质量不受影响;普通业务主要包括文件传输、网页浏览、视频点播等非实时业务,对时延要求较低,算法在不影响高优先级业务的前提下,充分利用剩余带宽资源,提升普通业务的传输速率,实现带宽资源的高效利用。

结合前文提到的拓扑预测结果,动态带宽分配算法能够实现带宽的提前预留:在拓扑切换发生之前,系统根据预测得到的链路变化信息,提前为正在传输的业务预留切换后路径的带宽资源,避免切换后因带宽不足导致的拥塞和丢包问题,确保业务传输的连续性。同时,星上节点之间通过协同调度机制,相互交互带宽使用情况,避免多条业务流同时抢占同一段链路的带宽资源,实现带宽资源的全局协同优化。

动态带宽分配算法能够根据网络状态和业务需求的变化,实时调整带宽分配方案,在有限的星上资源条件下,最大化网络的承载能力,提升多业务并发传输条件下的服务质量,同时减少带宽资源的浪费,实现资源利用效率与业务体验的双重提升。

5 优化策略的仿真验证与效果评估

5.1 仿真环境搭建

为验证本文提出的路由优化策略有效性,搭建贴近实际卫星网络的仿真环境。采用卫星工具软件生成低轨卫星星座轨道数据,获得卫星位置、姿态、链路通断等拓扑时序信息;在此基础上,使用网络仿真器构建卫星网络节点模型、链路模型、业务流量模型与路由协议模块。

仿真场景覆盖不同规模星座、不同流量负载、不同拓扑变化频率条件,对比静态路由、传统链路状态路由、按需路由与本文优化路由的性能差异。仿真参数设置符合实际工程

系统,包括卫星轨道高度、星座规模、链路带宽、链路维持时间、业务到达率、数据包大小等关键参数,保证仿真结果具有说服力与参考价值。

5.2 评估指标设计

从多个维度设计评估指标,全面衡量路由协议性能。主要包括端到端平均时延,反映数据传输效率;端到端时延抖动,反映传输稳定性;数据包丢包率,反映路径可靠性与重路由能力;路由收敛时间,反映拓扑变化后路由恢复速度;网络吞吐量,反映系统承载能力;负载均衡度,反映资源利用公平性;路由控制开销率,反映协议效率。通过多指标综合对比,客观评价优化策略的提升效果。

5.3 对比实验结果分析

在不同仿真场景下开展对比实验,结果表明,本文提出的基于拓扑预测、动态自适应、多路径与负载均衡的一体化路由优化策略,在各项指标上均显著优于传统路由协议。在时延方面,优化路由平均时延明显降低,时延抖动大幅减小,更适合实时业务传输;在丢包率方面,由于采用预计算路由与多路径快速切换,丢包率显著下降,传输可靠性大幅提升;在收敛时间方面,基于预测的主动路由机制使收敛时间远低于传统协议,能够快速跟上拓扑变化速度;在吞吐量方面,负载均衡与动态资源分配有效避免拥塞,高负载条件下吞吐量提升明显;在负载均衡度方面,节点与链路负载分布更加均匀,资源利用率显著提高;在控制开销方面,混合路由机制与增量更新策略有效降低路由开销,提高带宽利用效率。

实验结果充分证明,面向拓扑动态变化的路由优化策略能够有效解决传统协议适应性差、收敛慢、开销大、负载不均等问题,适用于大规模高动态卫星网络环境。

6 结论与展望

6.1 研究成果总结

本文围绕卫星网络拓扑动态变化与路由协议优化问题开展系统性研究。首先阐述卫星网络在空天地一体化信息网络中的重要地位,分析拓扑高动态特性对网络性能的深刻影响,指出路由协议优化的必要性与紧迫性。其次,从轨道运动、空间环境、任务需求三个层面深入分析拓扑动态变化的驱动因素,总结链路频繁切换、拓扑重构、节点失效与恢复三大典型表现形式,揭示动态拓扑的内在规律。再次,剖析传统静态路由、洪泛式路由、按需路由等现有协议在动态环境下的僵化性、高开销、重路由延迟、负载不均衡等局限性。在此基础上,提出以拓扑预测为基础、动态自适应为核心、多路径为支撑、负载均衡与动态资源分配为保障的一体化路

由优化策略。最后,通过仿真实验从多维度验证优化策略的有效性。

研究表明,通过主动预测拓扑变化、提前计算路径、动态适配网络状态、协同调度多路径、全局均衡负载,可以显著提升卫星网络在高动态条件下的时延、丢包、吞吐量、可靠性与资源利用率,为大规模低轨卫星网络与多层混合卫星网络路由设计提供可行技术方案。

6.2 未来研究方向

尽管本文对卫星网络拓扑动态变化与路由优化进行了较为系统的研究,但随着卫星网络向巨型化、智能化、一体化、安全化方向发展,未来仍存在大量值得深入探索的问题。

第一,基于星上人工智能的智能路由研究。利用强化学习、深度学习等技术,使星上节点具备自主感知、自主决策、自主学习能力,在复杂扰动条件下实时优化路由决策,进一步提升路由自适应能力与鲁棒性。

第二,通导遥一体化融合路由研究。面向通信、导航、遥感业务融合承载需求,设计能够统一调度通信资源、导航资源、遥感资源的多维协同路由机制,实现业务高效承载与资源全局优化。

第三,空天地深度协同路由研究。突破卫星网络与地面6G网络、车载网络、无人机网络的路由协同关键技术,实现跨域、跨层、跨系统统一路由,构建全球无缝覆盖一体化网络。

第四,高安全可信路由研究。针对空间网络易被干扰、易被攻击、信道开放等特点,研究具有抗干扰、抗欺骗、抗劫持能力的安全路由机制,保证路由信息真实性与传输安全性。

第五,面向巨型星座的轻量化可扩展路由研究。针对上

万颗卫星组成的超大规模星座,设计低开销、分布式、弱同步、高扩展路由协议,解决规模扩展带来的开销爆炸、同步困难、复杂度激增等问题。

参考文献:

- [1]张军,王兆曾.卫星通信网络[M].北京:电子工业出版社,2018.
- [2]吴诗其,冯钢.低轨卫星通信系统关键技术[M].北京:科学出版社,2020.
- [3]李斌,刘绍汉.天地一体化信息网络路由技术研究综述[J].软件学报,2023,34(2):689-720.
- [4]吴伟仁,王海涛,于龙江.卫星互联网体系架构与核心技术[J].中国工程科学,2022,24(1):45-54.
- [5]吴娜,陈山枝.低轨卫星网络动态拓扑感知路由算法[J].通信学报,2021,42(8):1-12.
- [6]吴静,吴伟.基于轨道预测的LEO卫星网络预计算路由[J].计算机工程,2022,48(5):156-163.
- [7]吴昊,周笛.大规模LEO星座负载均衡路由策略[J].光学学报,2023,43(7):112-121.
- [8]吴迪.基于SDN的多层卫星网络动态路由机制[D].北京:北京邮电大学,2021.
- [9]刘畅.高动态卫星网络多路径QoS路由研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [10]Long T, Zhang X. Dynamic Routing Based on Topology Prediction for LEO Satellite Networks[J]. IEEE Access, 2022, 10: 45892-45903.
- [11]Chen L, Liu Y. Load Balanced Routing with Adaptive Path Switching for Mega-Constellations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(4):2678-2691.
- [12]Wang H, Wu W. Distributed Hybrid Routing Protocol for GEO/LEO Hybrid Satellite Networks[J]. Acta Astronautica, 2021, 185: 456-468.