

超大规模低轨卫星网络的传输层协议性能评估与分析

李亦森¹, 张孟旻¹, 刘晓宇¹, 李 涛², 周海波¹

(1. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京交通职业技术学院, 江苏 南京 211188)

摘 要: 超大规模低轨通信卫星网络作为天空地一体化网络的核心组成部分, 凭借其高传输带宽、全球无缝覆盖和低传播时延等优势, 有望成为下一代无线通信系统架构的基石。然而, 尽管超大规模低轨卫星网络具有广泛应用前景, 但在实际部署中仍面临多种技术瓶颈, 网络服务性能面临严峻挑战。例如, 卫星的高速轨道运动导致网络拓扑持续动态变化; 复杂的空间环境效应造成节点可用性波动; 频繁的星地链路切换引发显著的传输性能劣化。这些特性使得传统地面网络传输层协议性能出现瓶颈, 难以满足超大规模低轨卫星网络的服务需求, 因此, 在超大规模低轨卫星网络场景下, 评估和分析各传输层协议的性能表现具有重要意义。面向超大规模低轨卫星网络并基于典型星座配置和不同流量负载情况, 采用自主研发的轻量化卫星互联网仿真平台 UltraStar 对 UDP、TCP、QUIC 及 SCPS-TP 等代表性传输层协议进行了多维度性能评估与对比分析。结果表明, SCPS-TP 在视频业务传输中表现出显著优势, 但其拥塞控制算法仍存在性能瓶颈; 相比之下, TCP 和 QUIC 协议在传输质量和用户体验方面表现相对不足; UDP 虽能够在该场景下实现高传输速率, 但丢帧率较高, 限制了其在业务可靠性传输中的适用性。

关键词: 超大规模低轨卫星网络; 传输层协议; 空间通信协议标准; 性能评估

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026006

Performance Evaluation and Analysis of Transport Layer Protocols in Ultra-Large-Scale Low Earth Orbit Satellite Networks

Li Yisen¹, Zhang Mengyang¹, Liu Xiaoyu¹, Li Tao², Zhou Haibo¹

1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China

Abstract: Ultra-large-scale low earth orbit satellite internet, as a core component of space-air-ground integrated networks, is poised to become the cornerstone of next-generation wireless communication system architectures, thanks to its advantages such as high transmission bandwidth, global seamless coverage, and low transmission latency. However, despite their wide application prospects, ultra-large-scale low earth orbit satellite internet still faces various technical bottlenecks in practical deployment, and its network service performance is severely challenged. For example, the high-speed orbital motion of satellites leads to continuously dynamic network topology; complex space environment effects cause fluctuations in node availability; and frequent satellite-to-ground link switches result in significant transmission performance degradation. These characteristics mean that traditional terrestrial network transport layer protocols may encounter performance bottlenecks and struggle to adapt to the service performance requirements of ultra-large-scale low earth orbit satellite Internet. Therefore, it is of great significance to evaluate and analyze the performance of various transport layer protocols in the context of ultra-large-scale low earth orbit satellite internet scenarios. This paper, focusing on ultra-large-scale low earth orbit satellite

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-09-23

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (No.62495021, No.62495020)

Foundation Items: The Major Program of the National Natural Science Foundation of China(No.62495021, No.62495020)

internet and based on typical constellation configurations and diverse service demands, utilizes the independently developed lightweight satellite internet simulation platform UltraStar to conduct a multi-dimensional performance evaluation and comparative analysis of mainstream transport layer protocols, including UDP, TCP, QUIC, and SCPS-TP. The results indicate that the SCPS-TP protocol demonstrates significant advantages in video service transmission; however, its delay-based congestion control algorithm still requires further refinement. In contrast, TCP and QUIC exhibit comparatively inferior performance in terms of transmission quality and user experience. Although UDP achieves high transmission rates and low latency in this scenario, its inherent lack of reliability results in elevated packet and frame loss rates, thereby constraining its applicability in service scenarios with stringent reliability requirements.

Keywords: ultra-large-scale LEO satellite networks, transport layer protocol, space communications protocol standard, performance evaluation

0 引言

随着 6G 的不断演进, 构建一个全域无缝覆盖、高速泛在互联、智能高效协同的新型信息基础设施已成为全球共识。在此背景下, 天空地一体化网络 (space-air-ground integrated network, SAGIN) 作为下一代无线通信网络架构的核心组成部分具有极其重要的战略价值。天空地一体化网络旨在通过深度融合空间、空中和地面异构网络, 实现全球范围内的无缝、高速、泛在连接, 并显著提高通信韧性, 同时有效解决传统地面通信的覆盖盲区和容量瓶颈, 为智慧城市、海洋通信、远程医疗、灾害应急等多样化应用场景提供强有力的支撑^[1]。在天空地一体化网络架构中, 空间段, 特别是超大规模低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星星座, 不仅承担通信中继的角色, 还具备边缘计算、内容缓存和网络切片等智能化服务能力, 具有重要战略意义和应用价值^[2]。与传统地球同步轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星相比, 低轨卫星的轨道高度大幅降低 (低于 2 000 km), 传播时延显著减小, 并能通过构建大规模低轨卫星星座网络, 实现全球范围的通信无缝覆盖, 展现出广阔的发展前景与战略价值。

近年来, 以超大规模低轨卫星星座为核心的太空基础设施建设正加速开展。截至 2025 年年底, SpaceX 公司旗下的 Starlink 星座已累计发射超 1 万颗卫星, 并规划最终部署卫星总数达 4.2 万颗^[3]。目前 OneWeb 公司运营的低轨卫星星座在轨卫星数量已超 600 颗, 具备对全球大部分区域的网络覆盖能力, 并计划通过追加卫星采购保障现有星座的持续运营与性能提升。亚马逊公司的 Kuiper 星座项目首批 27 颗生产型卫星于 2025 年 4 月 28 日搭载阿特拉斯五号火箭发射, 其总规划卫星数达 3 236 颗^[5]。在我国, 卫星互联网在 2020 年 4 月被首次纳入“新基建”范畴, 此后低轨卫星星座建设进入快速发展阶段。目前, 中国已向国际电信联盟 (International telecommunication

union, ITU) 提交了 5.13 万颗低轨卫星的频率使用申请。这些卫星规划涵盖了多个计划部署卫星数量超过万颗的大型星座项目, 包括由中国卫星网络集团有限公司主导的 GW 星座、上海垣信卫星科技有限公司主导的千帆星座, 以及北京蓝箭鸿擎科技有限公司主导的鸿鹄 - 3 星座^[6]。据英国卫星工业协会预测, 到 2030 年, 全球在轨卫星数量或将突破 10 万颗。庞大的低轨卫星群有望提供低时延、高带宽、全球覆盖的通信网络, 这将对全球通信产业格局和数字经济发展生态产生深远影响。

尽管超大规模低轨卫星网络凭借其覆盖范围广、高带宽、低传播时延等显著优势, 展现了极为广阔的应用前景, 然而在其实际部署进程中, 仍不可避免地受到多种技术瓶颈的制约。具体而言, 低轨卫星处于高速轨道运动状态, 这使得网络拓扑结构处于持续动态变化之中, 而超大规模低轨卫星网络因其卫星数量庞大, 拓扑变化更加频繁, 极大增加了网络管理与优化的难度; 此外, 复杂的空间环境效应 (如日凌效应、高能粒子辐射等) 会对卫星节点造成不同程度的损伤, 导致节点可用性出现波动, 影响网络的稳定运行; 同时, 卫星与地面站之间频繁的链路切换, 会引发信号中断、数据包丢失等问题, 造成显著的传输性能劣化。这些技术瓶颈严重影响了低轨卫星网络的服务性能, 制约了卫星星座的应用表现。作为支撑网络通信的重要组成部分, 传输层协议在数据通信过程中发挥了重要作用。然而, 由超大规模低轨卫星网络拓扑的高动态性等固有特征引发的传播时延波动、数据包丢失及连接中断等问题, 严重影响了为地面网络设计的传输层协议的服务性能, 导致协议在实际运行过程中出现了明显的性能劣化^[7]。例如, 广泛应用于地面网络的传输控制协议 (transmission control protocol, TCP) 在经历数据包丢失时, 拥塞机制会将丢包误判为网络拥塞, 导致吞吐量急剧下降, 链路资源利用率低下。因此, 在超大规模低轨卫星网络场景下评估现有传输层协议的性能表现, 分析各协议在网络环境适配过程

中暴露出的关键问题，对研究适配低轨卫星网络的传输层技术，发挥卫星星座的服务潜力具有重要意义。

本文面向超大规模低轨卫星网络场景并基于典型的星座配置和不同流量负载情况，采用自主研发的轻量化卫星互联网仿真平台 UltraStar^[8]，对用户数据报协议（user datagram protocol, UDP）、TCP、快速 UDP 互联网连接（quick UDP Internet connections, QUIC）协议及空间通信协议规范传输层协议（space communications protocol specification - transport protocol, SCPS-TP）等主流传输层协议进行多维度性能评估与对比分析。首先阐明和分析现有传输层协议在超大规模低轨卫星网络中出现性能瓶颈的原因和技术挑战，然后基于 Starlink 和 Kuiper 两种典型的低轨卫星星座网络配置，结合视频传输业务对上述具有代表性的传输层协议进行仿真评估和性能分析。本文旨在为未来超大规模低轨卫星网络中传输层协议的设计和优化技术提供有价值的理论依据和实践指导，以期更好地发挥低轨卫星互联网的服务潜力，支撑未来全球通信业务的快速发展。

1 超大规模低轨卫星网络的特点

超大规模低轨卫星网络凭借其较低的轨道高度以及规模庞大的星座架构，具备为全球用户提供高容量、低时延且全覆盖通信服务的巨大潜力。然而，受空间环境固有特性与低轨卫星网络独特属性影响，传输层协议的性能遭遇了显著制约，主要体现在以下几个方面。

（1）高误码率

低轨卫星由于工作在不稳定的空间环境中，极易受到太阳活动、宇宙粒子辐射、噪声干扰等影响，复杂的空间环境效应易造成节点可用性波动，进而引发数据包丢失。此外，由于低轨卫星轨道高度低、移动速度快，其相对地面站的运动会产生显著的多普勒频移，导致更高的误码率。相对于传统地面网络，低轨卫星链路的误码率显著增加，严重影响了传输质量。

（2）链路切换频繁

低轨卫星通常运行于较低的轨道高度，相较于地球表面，其移动速度极高。此外，单颗低轨卫星的地面覆盖范围较为有限，一颗低轨卫星进入地面站的可视范围并成功建立通信链路后，会迅速飞离该地面站的覆盖区域。上述因素会致使星地链路的建立与断开频繁出现，链路切换的频次显著增加，从而极易造成数据包丢失和连接不稳定^[9]。而超大规模低轨卫星网络卫星数量庞大，这种高频次的星地链路切换在网络中同时大量发生，导

致拓扑变化更加频繁，极大地增加了网络管理与优化的难度。

（3）带宽资源受限

单颗低轨通信卫星受体积、重量和功耗的严格限制，直接影响其携带通信载荷的规模与能力，进而制约其可提供的总带宽容量。尽管超大规模低轨卫星网络中卫星数量庞大，但是由于全球流量分布均有不均匀性和突发性特征，局部热点地区流量密集，可能造成部分接入卫星容量受限；并且由于单颗卫星的对地高速移动，馈电链路带宽变化剧烈，可能难以满足所有用户的传输需求；同时，受限于实际业务需求和物理信道特性，空间通信信道呈现出明显的带宽不对称特性，其返回链路带宽容量通常远小于前向链路带宽容量。文献[10]测试了 TCP 在 Starlink 星座网络下的相关性能表现，结果表明：Starlink 网络下 TCP 的下载速度范围为 66 ~ 108 Mbit/s，低于地面网络的下载速度（238 ~ 799 Mbit/s）；而 Starlink 网络下 TCP 的上传速度范围为 6 ~ 7 Mbit/s，低于地面网络的上传速度（38 ~ 64 Mbit/s）。

（4）时延动态变化

低轨通信卫星利用自由空间的激光链路进行通信，光在真空中的传播速度高于在光纤中的传播速度，使得低轨卫星网络在超长距离通信时可以实现比地面光纤网络更低的端到端时延^[11]。然而，在短距离通信情况下，由于低轨卫星与地面站具有一定的物理距离，信号从地面站传输到卫星再回传到地面站具有固有的传播时延，可能导致低轨卫星网络时延仍高于地面光纤网络。此外，低轨卫星网络还存在更高的时延抖动，这来源于两个方面：一是低轨卫星与地面站之间的距离因卫星高速移动而持续变化，导致传播时延始终处于动态变化中；二是高移动速度导致低轨卫星网络拓扑频繁变动，进而引发路由的频繁切换，导致传播时延出现“尖峰”现象，进一步加剧时延抖动。超大规模低轨卫星网络庞大的规模使得网络拓扑变动更为频繁且复杂，从而显著加剧了时延抖动，对传输层协议的动态适应能力提出了更为严峻的挑战。

2 卫星网络现有传输层协议介绍

传输层协议是实现端到端低时延、高可靠通信的重要组成部分，对于保证应用业务的服务质量具有重要影响。本节概述当前广泛应用且具有代表性的几种主要传输层协议的功能特性，并讨论和分析 UDP、TCP、SCPS-TP、QUIC 以及时延容忍网络 Licklider 传输协议（delay/

disruption tolerant networking-Licklider transmission protocol, DTN-LTP) 等协议在超大规模低轨卫星网络中的性能和适应性。各协议的功能机制及其在低轨卫星网络中的性能分析总结见表1。

2.1 UDP

UDP是一种无连接, 尽力而为的传输层协议, 在数据传输前, 发送方和接收方不需要建立连接, 数据包直接发送到目标地址。UDP仅进行尽力而为的传输, 不提供数据的按序、完整交付保障。UDP协议简单, 头部开销小, 无须额外确认, 因此拥有传输速度快、时延低的优势, 适用于实时性较强且可容忍丢包的应用, 然而对于高可靠性的业务, 需要依赖上层协议进行弥补。

2.2 TCP

TCP是TCP/IP协议簇中的核心协议之一, 与IP协议共同构建了当今互联网通信的基础。TCP旨在为运行在不可靠的互联网络中的上层应用提供可靠的端到端数据传输服务, 其通过3次握手建立连接, 通过序列号、确认机制、重传机制等手段, 确保数据完整、按序且不重复地传递给接收方上层应用。此外, TCP还引入了拥塞控制机制, 通过滑动窗口机制限制网络中在途的数据量, 并结合多种拥塞控制算法动态调整发送速率, 在充分利用网络资源的同时, 有效避免网络拥塞和崩溃, 这些特

性使其成为地面网络中最常用的可靠传输层协议之一。

然而, 在低轨卫星网络中, TCP的传输性能面临诸多挑战。首先, 卫星链路普遍存在较高误码率。然而最初专为地面网络设计的TCP, 由于地面网络传输环境相对稳定、误码率较低, 在数据包丢失时, 该协议通常将丢包现象归结于网络拥塞这一因素。在基于丢包的拥塞控制算法中, 丢包被视为拥塞信号, 当检测到拥塞信号时, TCP会大幅降低拥塞窗口, 减小发送速率。在高误码率的低轨卫星网络中, TCP常常会误判拥塞信号, 触发不必要的窗口收缩, 致使TCP连接吞吐量非必要下降。在基于时延的拥塞控制算法中, 低轨卫星网络时延波动高, 会影响TCP对传播时延和可用带宽的估计, 导致吞吐量达不到理想水平^[12-13]。此外, 为实现可靠传输, TCP要求接收端严格按原始顺序交付数据。然而, 在实际传输过程中, 一旦出现数据包丢失情况, 便会导致后续其他数据包乱序抵达接收端。这种乱序现象会引发队首阻塞问题, 接收方无法按照既定顺序处理数据, 致使缓冲区中已到达的数据无法被及时处理, 进而产生额外的数据交付时延。同时, 接收方因队首阻塞问题导致窗口陷入停滞, 进而导致发送方的发送窗口也无法正常前进, 从而阻碍了新的数据的发送^[14]。更为严重的是, 高误码率会导致TCP进行频繁的丢包重传, 可能因超过重

表1 超大规模低轨卫星网络中传输层协议功能机制及其在低轨卫星网络中的性能分析总结

传输层协议	协议功能机制与特点	协议在低轨卫星互联网中的性能分析
UDP	无连接, 尽力而为传输	无可靠性保证, 但传输速率高、时延低, 适用于实时性强、容忍丢包的业务
TCP	(1) 3次握手建立连接, 面向字节流的可靠传输; (2) 拥塞控制和流量控制, 确认/重传机制; (3) 协议首部长度20~60 B	(1) 可提供可靠的端到端数据传输服务; (2) 拥塞控制可能会因低轨卫星网络高误码率导致的丢包或传播时延波动高等因素误判网络拥塞, 影响吞吐量 ^[12-13] , 高误码率和链路频繁切换会导致队首阻塞问题更加突出 ^[14] ; (3) 链路的有效载荷占比较低, 需要结合报文头部压缩进行改进 ^[15]
SCPS-TP	(1) 针对空间链路对TCP的优化措施包括区分丢包来源、头部压缩、SNACK机制高效重传和固定确认频率机制等; (2) 使用Vegas或Van Jacobson算法作为拥塞控制算法	(1) 针对空间信道高误码率、长时延、带宽不对称、带宽资源受限等特点进行的优化, 在低轨卫星网络中同样适用 ^[15, 20] ; (2) 默认使用Vegas拥塞控制算法, 其根据时延波动调整拥塞窗口, 可能将低轨卫星网络传播时延的动态性误判为拥塞, 导致不必要的窗口收缩, 影响吞吐量
QUIC协议	(1) 基于UDP, 集成TLS; (2) 支持多流传输; (3) 具备可靠传输能力, ACK帧, 支持携带多个不连续的已接收数据包范围快速进行错误恢复; (4) 支持可插拔的拥塞控制	(1) TLS与传输层集成简化握手流程, 实现1-RTT/0-RTT握手, 缩短连接建立时间, 同时保证了连接的安全性 ^[21] ; (2) 单个连接可以并行使用多个数据流进行传输, 即使某个流数据包丢失也不会阻塞其他传输, 降低了队首阻塞对传输效率的影响 ^[22] ; (3) ACK帧多范围确认功能有利于在高丢包率环境快速进行错误恢复; (4) 自由选择拥塞控制算法, 可以更好地适应低轨卫星网络, 从而提升传输性能
DTN-LTP	针对链路频繁中断、超高时延、高丢包率场景设计, 采用存储-转发机制, 可提供可靠或不可靠的传输	主要面向深空通信, 存储-转发机制牺牲了传播时延换取传输的可靠性, 不符合低轨卫星互联网的低时延业务需求; Bundle协议引入额外的协议开销, 不利于负载受限的低轨卫星网络环境 ^[23]

传次数阈值导致连接被迫终止,进一步限制了TCP在低轨卫星网络中的适用性。其次,低轨卫星网络中频繁的链路切换同样会对TCP性能造成严重影响。在链路切换过程中,可能会出现大量突发性数据包丢失,TCP协议会将这些丢包误判为网络拥塞,急剧减少发送端的拥塞窗口,吞吐量大幅下降。频繁的链路切换会导致TCP连接的断开和重新建立,从而引入了额外的连接建立时延。

同时,相较于地面有线网络,低轨卫星网络的可用带宽通常更为有限,这使得带宽利用率成为协议设计的重要考量。然而,TCP每个报文段均附带至少20 B的协议首部,当使用更小的IP分段策略来减少误码带来的丢包风险时,首部开销占报文的比例进一步上升,降低了链路的有效载荷占比。因此需要有效的协议首部压缩算法进行改进^[15]。

2.3 SCPS-TP

SCPS-TP是SCPS协议栈^[16]中的传输层协议,旨在为空间通信提供高效、可靠的协议支持。SCPS-TP是在保持与TCP向后兼容的前提下,针对空间链路带宽受限、信道非对称及高误码率等特点,扩展了多种TCP机制而形成的一种传输层协议。因此,SCPS-TP可以运行在SCPS协议栈中,也可作为TCP性能增强代理运行在IP之上,即使当前SCPS协议栈中除SCPS-TP外的协议都已停止维护,SCPS-TP仍具备研究价值^[17]。

SCPS-TP通过3种独立的算法分别应对太空网络中常见的3类数据丢失来源:网络拥塞、数据损坏和链路中断。当监测到数据损坏时,SCPS-TP不会触发拥塞控制或调整重传定时器,仅进行数据的重新传输,从而避免因误判网络拥塞导致传输速率下降;当监测到网络拥塞时,SCPS-TP基于拥塞控制算法对其进行响应,该协议默认使用Van Jacobson算法或者Vegas算法作为拥塞控制算法;当监测到链路中断时,发送方进入“持续模式”,停止数据传输并定期发送探测帧,直到连接恢复可用。SCPS-TP利用层间信令机制,显示拥塞通知(explicit congestion notification, ECN)和破损经历(corruption experienced, CE)等选项实现对丢包来源的精确感知。这种机制可有效避免将错误引发的丢包误判为拥塞,从而避免不必要的速率下降,保证了系统吞吐量和链路利用率。在链路中断时,该机制亦可显著降低系统资源消耗,并在链路恢复后快速恢复连接状态。

然而,尽管SCPS-TP在多个方面针对空间通信环境进行了优化,但默认使用的Vegas拥塞控制算法难以完全

适应低轨卫星网络的环境特性。为了测试SCPS-TP结合Vegas算法的性能表现,本文基于UltraStar仿真平台对其进行了性能评估与分析。仿真场景采取Starlink星座的配置,共包括72层低轨卫星,1584个卫星节点,星地带宽和星间带宽均设置为100 Mbit/s,SCPS-TP运行的流量速率为100 Mbit/s。图1展示了SCPS-TP在该场景下的吞吐量及往返时延表现。从图1可以看出,SCPS-TP的吞吐量持续保持在5 Mbit/s以下,远低于链路可用带宽。这种情况下,传输过程中的端到端时延主要由传播时延构成。此时,图1中往返时延(round trip time, RTT)的波动反映了传播时延的变化。然而,Vegas拥塞控制算法错误地将这种由传播时延变化引起的RTT增加误判为网络拥塞,进而错误地减小了拥塞窗口,导致系统实际吞吐量无法有效利用链路的可用带宽。

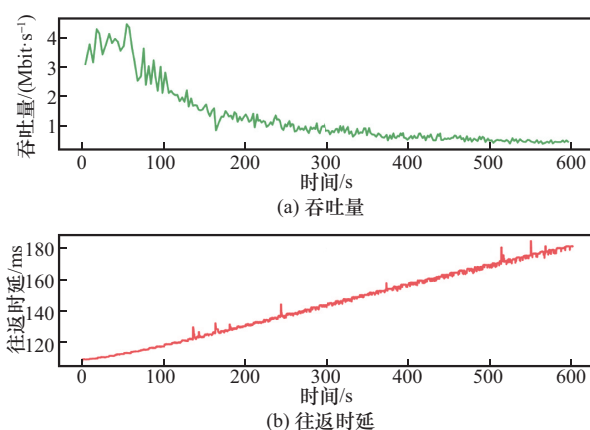


图1 SCPS-TP结合Vegas算法的吞吐量与往返时延随时间变化曲线

为进一步提升带宽利用率,SCPS-TP采用了报头压缩和选择性负确认(selective negative acknowledgement, SNACK)两种机制。其中报头压缩机制借鉴Van Jacobson压缩算法减小报头长度,提高有效载荷占比,它通过最小化报头信息(仅连接ID、位索引、校验和等)和容忍丢包设计,即使在丢包情况下也能正确解压,显著提高带宽效率,降低处理开销^[15]。SNACK机制是融合选择性确认(selective acknowledgement, SACK)^[18]与负确认(negative acknowledgement, NAK)^[19]的混合方案,该机制允许接收方精确报告缓冲区中的丢失数据块(“空洞”),同时促使发送方在收到SNACK后立即重传这些数据,避免了代价昂贵的重传超时,从而减少了不必要的带宽浪费^[20]。此外,针对信道非对称性问题,SCPS-TP引入了固定确认频率机制以减轻反向链路负担,该机制基于预估RTT,使接收端不再对每个接收数据段

发送确认字符 (acknowledgement, ACK), 而是将ACK统一延迟至不超过一个RTT的固定时间后批量发送, 即使接收到乱序数据段也不改变该策略, 这能够显著缓解太空中反向链路带宽瓶颈造成的传输效率下降的问题。

2.4 QUIC 协议

QUIC 协议是 Google 于 2013 年提出的一种基于 UDP 的新型协议, 旨在提高其承载的 Web 应用程序的性能, 提供更快、更安全、更稳定的连接^[21]。QUIC 协议使用了多流复用技术, 支持在单个连接内进行多流传输, 即使其中的某个流出现丢包, 也不会阻塞其他流的正常传输, 从而提高在高丢包率网络中的吞吐量^[22]。此外, QUIC 协议集成了传输层安全性 (transport layer security, TLS) 协议, 从而有效减少了建立连接的往返时延。对于首次连接, QUIC 协议仅需一个往返时延 (1-round trip time, 1-RTT) 即可完成连接建立和加密参数的协商; 对于后续连接, 如果客户端有之前的会话票据等缓存信息, 则允许实现零往返时延 (0-RTT) 握手。此外, QUIC 协议的一个 ACK 帧支持携带多个 ACK 块 (即连续确认范围)。这一特性允许接收方通过单个 ACK 帧反馈多个非连续接收的数据包范围, 发送端可以一次性识别多个丢失的数据包, 无须等待多次重复 ACK, 有助于 QUIC 协议在高丢包率的网络中快速进行错误恢复。

2.5 DTN-LTP

DTN 最初是由美国国家航空航天局 (national aeronautics and space administration, NASA) 研究的一种专门应对深空通信等链路频繁中断、超高时延、高丢包率场景的网络架构, 其核心是存储-转发机制, 当数据包无法立

即转发给下一跳时, 节点会持续存储数据包, 直到能转发到下一节点, 从而打破了数据传输对端到端路径连续性的依赖。其中, Licklider 传输协议 (Licklider transmission protocol, LTP) 是 DTN 架构中会聚层的首选协议, 与捆绑协议 (bundle protocol, BP) 协同工作, 可以提供可靠传输和不可靠传输两种传输方式。

目前, LTP 已在空间数据系统协商委员会 (CCSDS) 中完成标准化, 并积极推动在互联网工程任务组 (Internet engineering task force, IETF) 中的标准化工作。然而, DTN 协议主要面向深空通信领域, 其采用的存储转发机制以牺牲传播时延为代价保障通信可靠性, 不适合低轨卫星互联网广泛业务的需求。同时, 束协议的引入额外增加了协议开销, 不利于负载受限的低轨卫星^[23]。

3 仿真评估方案与结果分析

为了更详细地探讨各传输层协议在大规模低轨卫星网络场景中的性能表现, 本文基于 UltraStar 仿真平台并结合多维度指标对 SCPS-TP、TCP、UDP 和 QUIC 协议 4 种代表性的传输层协议进行仿真评估与性能分析。

3.1 评估方案

为了全面评估各传输层协议在超大规模低轨卫星网络中的性能表现, 基于 UltraStar 卫星互联网仿真平台进行低轨卫星网络场景搭建和协议性能仿真。UltraStar 仿真平台是由南京大学团队开发的面向超大规模、超稠密低轨星座网络而设计的轻量级离散事件网络仿真器, 其架构如图 2 所示。它在保证仿真高保真度的同时, 通过对物理实体和协议栈的简化抽象、大规模动态拓扑的高效维

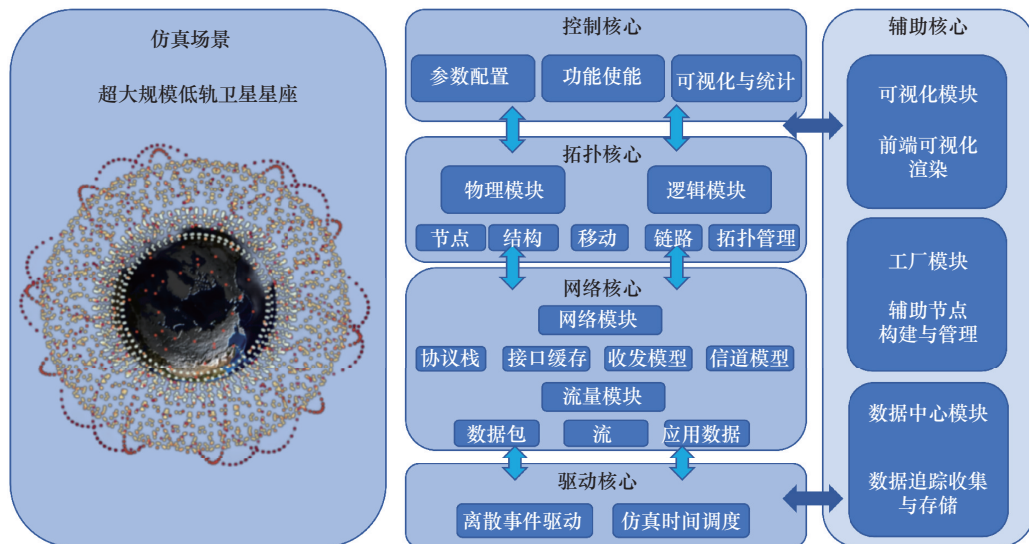


图 2 UltraStar 网络仿真器架构

护以及内置的数据统计可视化功能，实现了在普通计算资源上对复杂场景的高效仿真。

考虑到基于时延的拥塞控制算法在传播时延频繁变化的低轨卫星网络中表现不佳，因此仿真中 SCPS-TP、TCP 与 QUIC 协议均统一采用 Linux 内核中默认 CUBIC 拥塞控制算法，各协议套接字发送和接收缓冲区大小设置为 32 MB，TCP、SCPS-TP 最大报文段长度 1 380 B，QUIC 协议最大报文段长度 1 460 B，TCP 启用了 SACK 功能，SCPS-TP 启用了 SNACK 功能。

此次仿真构建了两类典型的卫星星座场景：Starlink 壳层 1 和 Kuiper 壳层 K2，其具体参数配置见表 2。在每个星座场景下均选取了 4 个地面站节点，构建了两条端到端连接。其中，中国山东烟台（37.465087°N, 121.437152°E）至广东深圳（22.541487°N, 114.063427°E）的连接具有较短的物理距离（路径 1），而日本东京（35.6895°N, 139.69171°E）至美国纽约（40.717042°N, -74.003663°E）的连接具有较长的物理距离（路径 2），网络拓扑示意图如图 3 所示。

表 2 星座参数配置

星座	海拔高度/km	轨道数/个	轨道内卫星数/颗	轨道倾角
Starlink 壳层 1	550	72	22	53°
Kuiper 壳层 K2	600	40	50	50°

每个星座中的链路层参数设置如下：星地链路带宽设置为 100 Mbit/s，星间链路带宽设置为 1 Gbit/s；为模拟现实中的误码特性，星间链路配置了 0.001 的包错误

率。另外，仿真平台 UltraStar 针对星地链路采用了具体的物理层建模，该模型已内置了星地链路的误码特性和相关物理层损耗机制，因此，不再单独设置星地链路的包破损率或误码特性。其余链路配置见表 3-4。

表 3 星地链路配置

配置项	参数
星地链路带宽	100 Mbit/s
星地链路最大队列容量(数据包数)	500 个
频分多址技术	启用
最大馈线链路数量	5 条
最近距离优先策略	启用

表 4 星间链路配置

配置项	参数
星间链路带宽	1 000 Mbit/s
星间链路最大队列容量(数据包数)	500 个
星间链路包错误率	0.1%

仿真中使用的流量基于真实的数据追踪文件生成，这些文件通过 FFmpeg 和 FFprobe 工具对真实视频文件进行编码并追踪帧数据而得到，编码后每条业务流量的码率约为 4.7 Mbit/s。

为了测试各协议在不同业务流量负载条件下的性能表现，在每个星座场景中的每组地面站之间依次运行上述 4 种传输层协议，并通过改变流量运行条数实现不同的网络负载。测试负载分为 4 类：基线（约 10 Mbit/s，对应

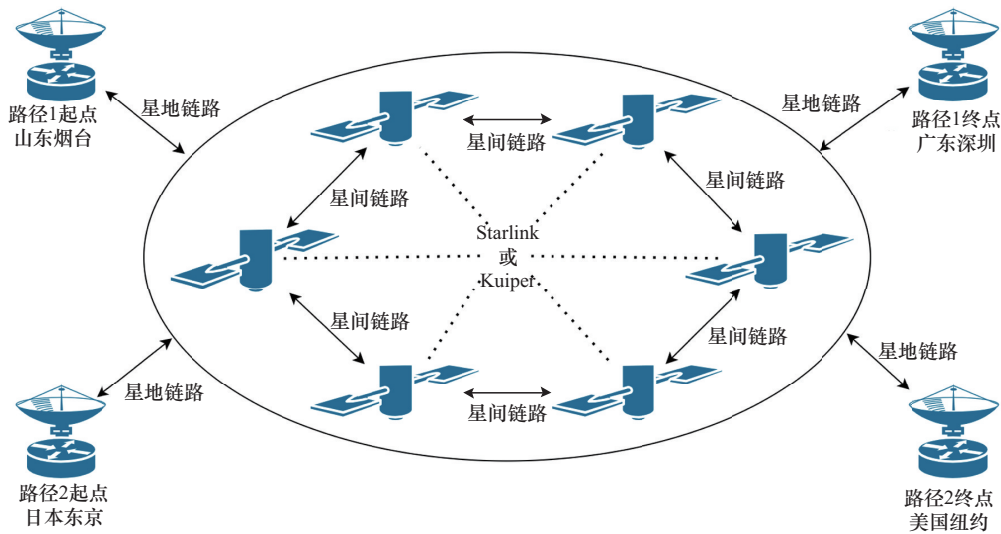


图 3 网络拓扑

瓶颈链路带宽的10%)、轻载(约30 Mbit/s, 对应瓶颈链路带宽的30%)、满载(约100 Mbit/s, 对应瓶颈链路带宽的100%)和重载(约150 Mbit/s, 对应瓶颈链路带宽的150%)。此外, 选取平均传输速率、公平性、帧卡顿率和丢帧率作为评估指标, 以全面比较各协议在超大规模低轨卫星网络环境下的适应能力与性能表现。

3.2 仿真结果分析

图4展示了不同星座路径各协议在不同网络负载情况下的平均传输速率仿真对比结果, 其中图4(a)~(d)分别展示了路径1和路径2在Starlink和Kuiper星座下的测试表现。从图4可以看出, UDP与SCPS-TP在平均传输速率方面表现最佳, 在基线和轻载情况下, 其平均传输速率均接近应用层数据产生速率4.7 Mbit/s。其中, UDP因尽力而为的传输特性, 不会因丢包而降低发送速率, 具有更高的传输速率。然而, 在卫星网络中存在较高的误码率导致丢包, UDP对于这些丢失的数据不进行重传, 接收方无法

接收到完整的数据流; SCPS-TP是基于TCP的可靠传输层协议, 并且具有丢包识别机制, 能够将非拥塞丢包进行重传的同时保持拥塞窗口的稳定, 从而保证数据传输的可靠性和较高的吞吐量, 但等待数据包重传阻塞滑动窗口的移动, 对传输速率表现有一定影响。在路径2的满载和重载情况下, UDP的传输速率相较于SCPS-TP呈现出更大优势, 这主要是因为路径2更长, 卫星跳数更多, 导致由误码引发的丢包更为严重。QUIC协议和TCP的性能表现较为接近, 两者都因链路错误导致的丢包而引发了错误的拥塞控制响应, 使传输速率有所降低。在路径1场景中, QUIC协议和TCP的传输速率约为SCPS-TP的50%; 在路径2场景中, QUIC协议和TCP的传输速率约为SCPS-TP的25%。此外, 在轻载和基线条件下, QUIC协议的表现略优于TCP, 这归因于QUIC协议的ACK帧比TCP的SACK机制能够承载更多的ACK块信息, 从而在发生丢包后能更快地进行恢复。

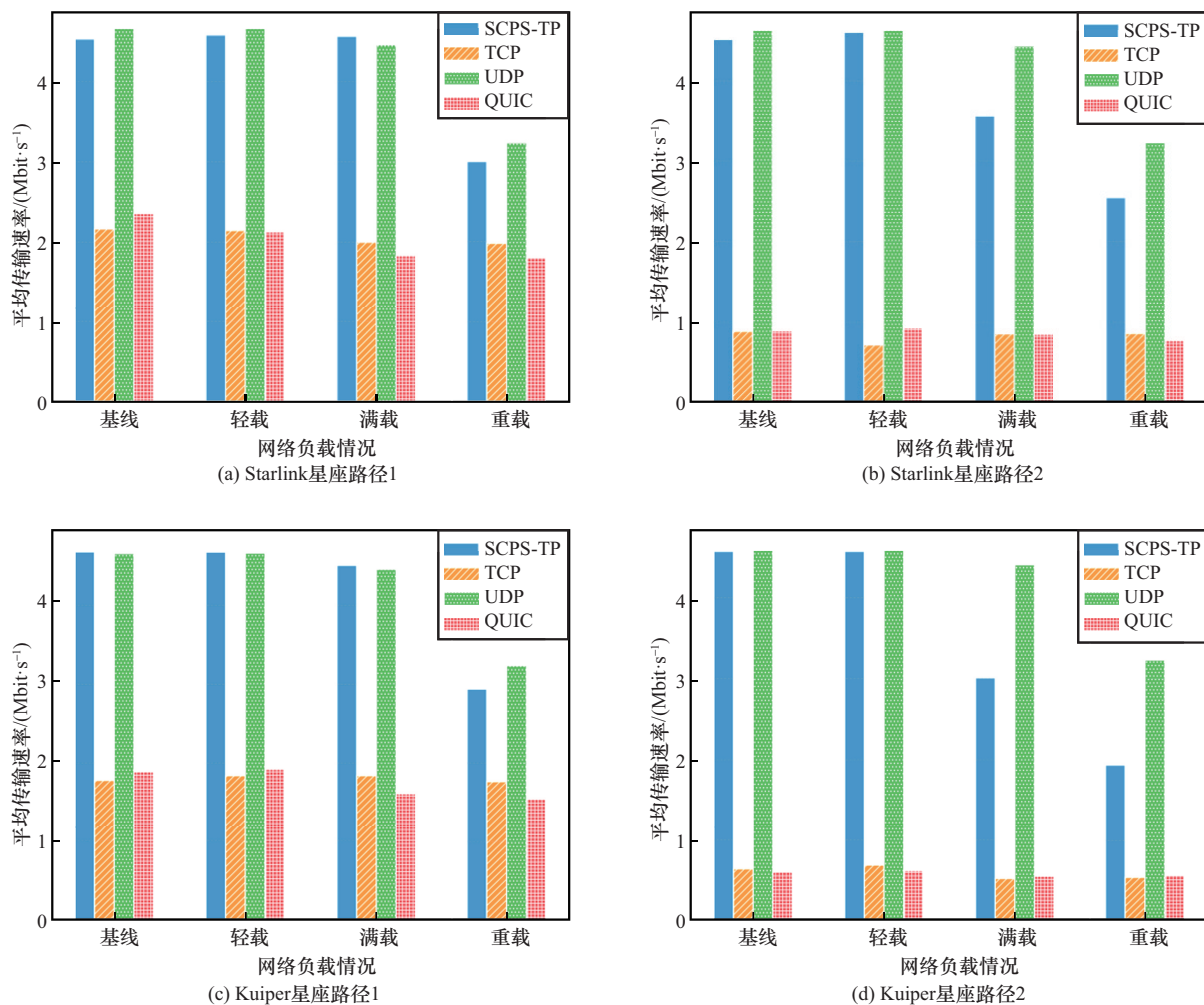


图4 不同星座路径各协议在不同网络负载情况下的平均传输速率仿真对比

图 5 展示了不同网络负载情况下各协议在两种星座配置下的公平性仿真对比, 本文采用 Jain 公平性指数^[24]作为多流公平性的测试指标。Jain 公平性指数是一个介于 0 和 1 之间的指标, 可用于量化多流分配资源的公平程度, 其值越接近 1 表示分配越公平, Jain 公平性指数的计算式为:

$$J = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

其中, n 表示参与资源竞争的数据流总数, x_i 表示第 i 条数据流获得的平均传输速率, J 代表 Jain 公平性指数。

仿真结果显示, SCPS-TP 和 UDP 相对于其他协议表现出更好的公平性, 其 Jain 公平性指数接近 1。对于 UDP 来说, 由于其不具备拥塞控制机制, 不会因丢包而降速, 接收速率的差异只取决于丢包, 因此具有较高的公平性。SCPS-TP 也具有较好的公平性表现, 这得益于 SCPS-TP 能区分丢包类型的错误恢复机制, 使其受链路损伤影响较小, 从而在不同路径上的传输速率更为接近。同时, SCPS-TP 通过 ECN 能够准确地感知拥塞, 并在拥塞发生时主动降低传输速率, 从而维护了整个网络的稳定性和公平性。QUIC 协议和 TCP 在两个卫星星座中的表现接近, 总体表现低于 SCPS-TP 和 UDP, 其中 QUIC 协议略优于 TCP。这同样得益于 QUIC 协议受误码率导致的非必要降速影响较小。

为了评估用户体验 (quality of experience, QoE), 本文模拟了视频应用的传输, 并通过帧卡顿率这一指标来反映用户体验。在视频应用传输过程中, 接收方会使用接收方接收每一帧的时间, 维护一个播放器缓冲区, 然

后按目标帧率 (本仿真测试中为 25 帧) 定时从缓冲区取帧播放。当播放器需要渲染帧但缓冲区为空时, 就会产生卡顿, 帧卡顿率为总卡顿时长除以总播放时长。此外, 由于 UDP 是不可靠传输, 因此使用丢帧率来描述其承载业务的用户体验。

图 6 展示了不同星座路径 SCPS-TP、TCP 和 QUIC 协议在不同网络负载情况下的帧卡顿率仿真对比, 图 7 则展示了不同星座路径各协议在不同网络负载情况下的平均丢帧率对比。其中, SCPS-TP 在基线和轻载条件下, 在 Starlink 星座中的路径 1 和路径 2 以及 Kuiper 星座中的路径 1 场景中, 其帧卡顿率接近 0, 在连接跳数最高的 Kuiper 星座路径 2 中也能将帧卡顿率控制在 10% 以下。即使在短连接的满载情况下, SCPS-TP 也能将卡顿率保持在 15% 以下, 这是因为 SCPS-TP 在这些场景中能保持较稳定的高传输速率, 能够高效地将应用层数据及时传输至接收端。QUIC 协议和 TCP 由于低轨卫星网络中的较高误码率造成了非必要的吞吐量下降, 端到端传输速率低, 无法及时传输应用层产生的帧数据, 帧卡顿率在所有场景中均高于 50%, 在 Kuiper 星座路径 2 场景中帧卡顿率超过 90%, 严重影响用户体验。对于 UDP, 在基线和轻载网络负载情况下, 丢帧主要由误码导致, 丢帧率保持在较低水平, 其中路径 2 丢帧率略高于路径 1。当网络负载达到满载时, 各场景丢帧率均上升至约 5%, 当负载达到重载时, 丢帧率甚至提升到 30%。在过载情况下, 由于 UDP 不具备拥塞控制机制, 网络拥塞会导致大量丢包, 这对视频业务的传输质量产生了严重影响。相较之下, SCPS-TP、TCP 和 QUIC 协议具有可靠传输的特性, 对丢失的报文及时进行重传, 使其丢帧率保持为 0。

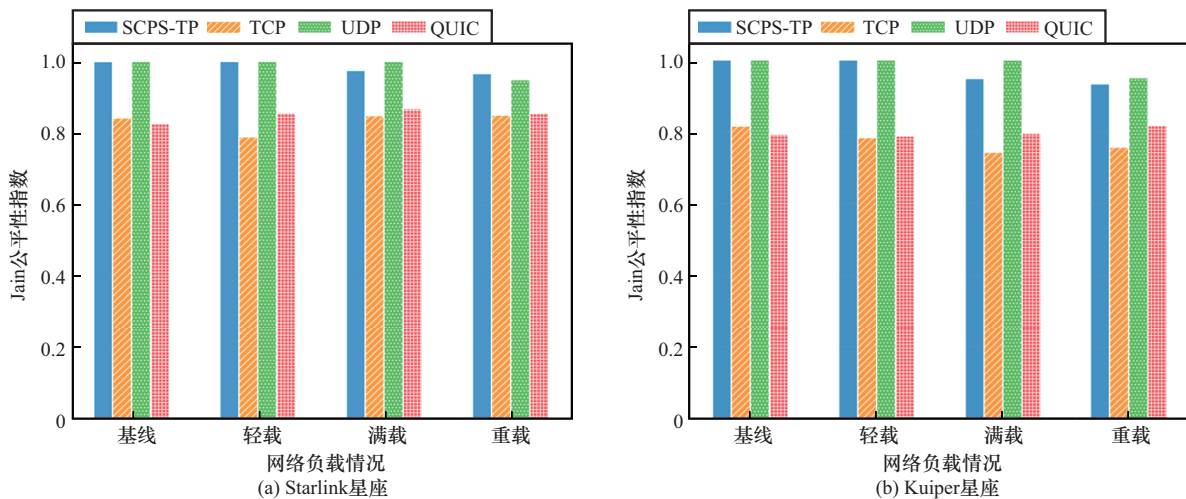


图 5 不同网络负载情况下各协议在两种星座配置下的公平性仿真对比

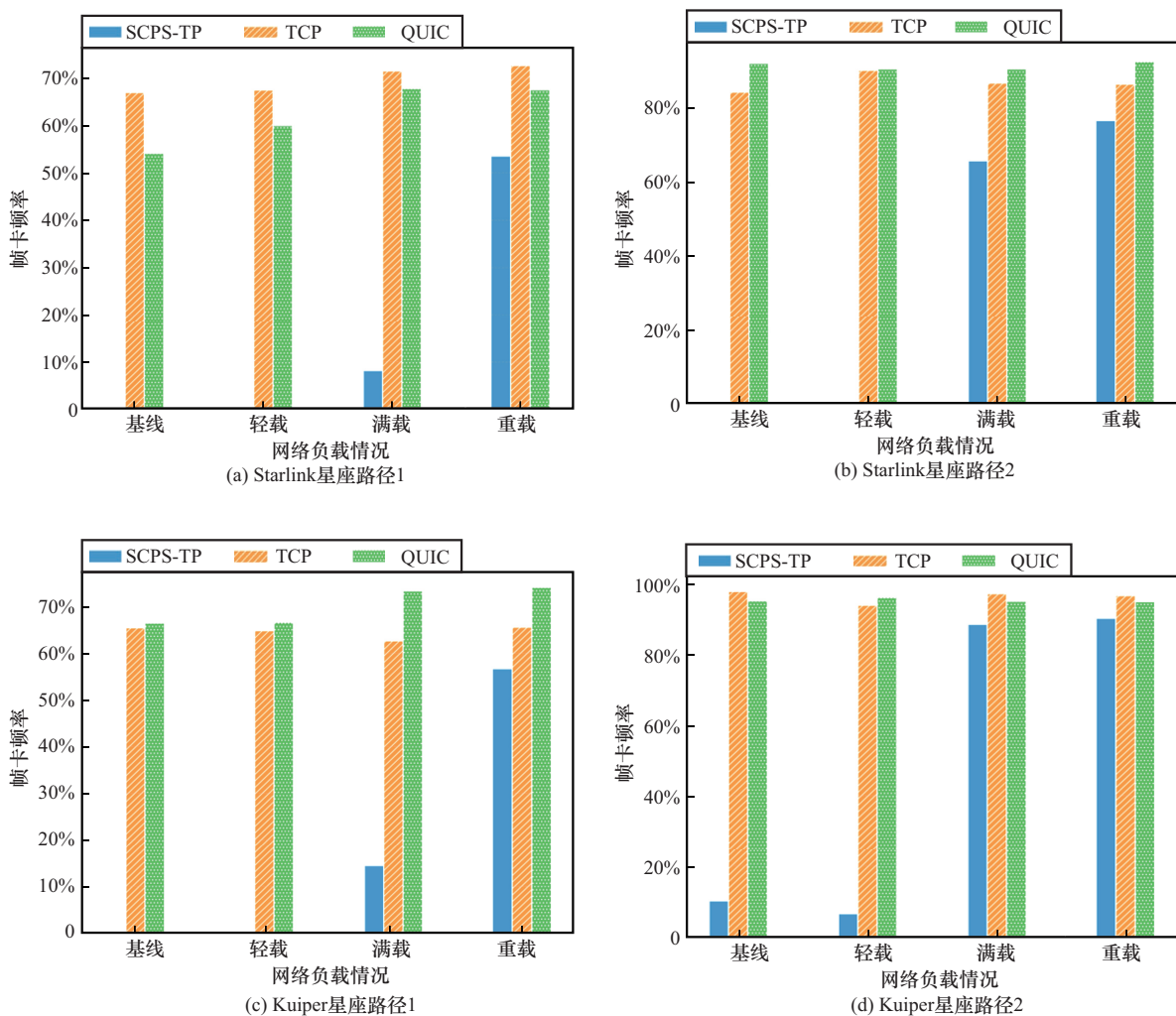


图6 不同星座路径各协议在不同网络负载情况下的帧卡顿率仿真对比

总体而言,在均采用CUBIC作为拥塞控制算法的条件下,SCPS-TP在低轨卫星网络环境下的视频业务传输中展现出最为全面的优势,其不仅能够实现较高的传输速率,并保持良好的多流公平性,还凭借其可靠性保障与错误恢复机制,在低轨卫星网络场景中保持较低的帧卡顿率,从而提供最佳的用户体验。相比之下,UDP虽然在部分场景中能够实现较高吞吐量,但在高误码率和高网络负载条件下丢帧率较高;而TCP与QUIC协议作为针对地面网络特性设计的协议,在低轨卫星网络这一复杂环境中的传输速率和用户体验表现均不及SCPS-TP协议。

4 结束语

本文面向超大规模低轨卫星网络场景,对具有代表性的传输层协议开展了仿真评估。基于UltraStar仿真平

台,构建了Starlink和Kuiper两种典型星座构型,并在此环境下围绕视频业务传输,对SCPS-TP、TCP、UDP和QUIC这4种协议在平均传输速率、公平性、帧卡顿率和丢帧率等关键指标上的表现进行了系统分析。结果显示,SCPS-TP凭借其为空间通信环境设计的优化机制,在超大规模低轨卫星网络中的视频业务传输方面展现出显著优势。然而,其推荐采用的基于时延的Vegas拥塞控制算法并不适应低轨卫星网络时延动态波动的特性,仍存在进一步优化空间。相比之下,TCP和QUIC协议作为针对地面网络特性设计的传输层协议,在传输性能和用户体验上的表现逊色于SCPS-TP。UDP虽能够实现高传输速率,但其在高误码率和高网络负载场景中具有较高丢帧率,限制了其在业务可靠性传输中的适用性,仅适合时延敏感且具备一定丢包容忍度的业务。

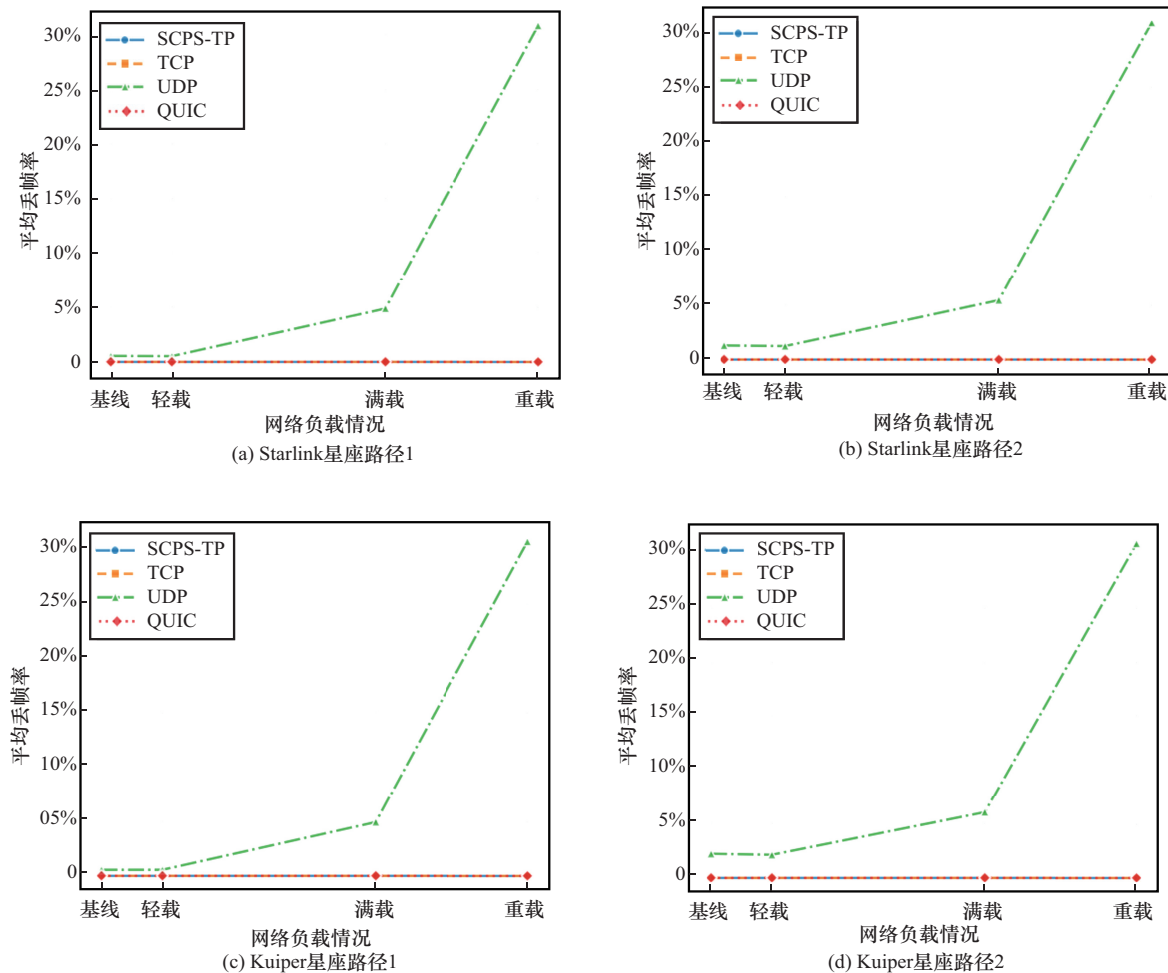


图7 不同星座路径各协议在不同网络负载情况下的平均丢帧率对比

参考文献

- [1] Jin L, Wang L, Jin X, et al. Research on the application of LEO satellite in IoT[C]//2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI). IEEE, 2022: 739-741.
- [2] Jia Z, Sheng M, Li J, et al. Toward data collection and transmission in 6G space-air-ground integrated networks: cooperative HAP and LEO satellite schemes[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(13): 10516-10528.
- [3] Jonathan McDowell. Starlink statistics[EB]. 2025.
- [4] NewSpace Index. OneWeb - Satellite constellation[EB]. 2025.
- [5] Amazon. Project Kuiper[EB]. 2025.
- [6] 新华社. 千帆星座:中国卫星互联网未来通信的星辰大海[EB]. 2025.
Xinhua News Agency. Qianfan constellation: the star sea of future communication of China's satellite Internet[EB]. 2025.
- [7] 王宁远, 陈东, 刘亮, 等. 未来低轨信息网络发展与架构展望[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 396-406.
- [8] Liu X, Ma T, Tang Z, et al. UltraStar: a lightweight simulator of ultra-dense LEO satellite constellation networking for 6G[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 632-645.
- [9] 王子涵, 张娇, 张远, 等. 基于链路信息估计的低轨卫星网络传输控制协议[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(8): 1846-1857.
Wang Z H, Zhang J, Zhang Y, et al. Transmission control protocol for LEO satellite networks based on link information estimation [J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60(8): 1846-1857.
- [10] Ma S, Chou Y C, Zhao H, et al. Network characteristics of LEO satellite constellations: a starlink-based measurement from end users[C]//IEEE INFOCOM 2023-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2023: 1-10.
- [11] Handley M. Delay is not an option: low latency routing in space[C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Net-

works, Redmond WA USA. ACM, 2018: 85-91.

- [12] Barbosa G C G, Theeranantachai S, Zhang B, et al. A comparative evaluation of TCP congestion control schemes over low-earth-orbit (LEO) satellite networks[C]//Asian Internet Engineering Conference, AINTEC 2023, Dec 12-14, 2023, Hanoi, Vietnam. New York: Association for Computing Machinery, 2023: 105-112.
- [13] IETF. Analysis for the adverse effects of LEO mobility on Internet congestion control: draft-lai-ccwg-lsncc-00[S]. 2024.
- [14] Yang S, Li H, Wu Q, et al. Performance analysis of QUIC protocol in integrated satellites and terrestrial networks[C]//2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), Limassol, Cyprus. IEEE, 2018: 1425-1430.
- [15] 陈彬. SCPS-TP 协议头压缩算法的研究[J]. 数字技术与应用, 2016.
Chen B. Research on SCPS-TP protocol header compression algorithm[J]. Digital Technology & Application, 2016.
- [16] Consultative Committee for Space Data Systems. Space communications protocols specification (SCPS)-transport protocol (SCPS-TP): CCSDS714.0-B-2[S]. 2006.
- [17] Consultative Committee for Space Data Systems. Overview of space communications protocols: CCSDS 130.0-G-4[S]. 2023.
- [18] Mathis M, Mahdavi J, Floyd S, et al. TCP selective acknowledgment options: RFC 2018[S]. RFC Editor, 1996.
- [19] Fox R. TCP big window and NAK options: RFC 1106[S]. RFC Editor, 1989.
- [20] Li Z L, Meng X, Zhang S L, et al. Performance analysis of SCPS-TP SNACK in space communication[C]//IET 2nd International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ICWMMN 2008). IET, 2008: 1-4.
- [21] Langley A, Riddoch A, Wilk A, et al. The QUIC transport protocol: design and internet-scale deployment[C]//Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. ACM, 2017: 183-196.
- [22] Alshagri A, Mutairi A. Evaluation of modern internet transport protocols over GEO satellite links[J]. Network, 2023, 3: 451-468.
- [23] 孙耀华, 冯昕澳, 彭木根. 低轨巨型星座组网: 挑战与关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 05(4): 57-74.
Sun Y H, Feng X A, Peng M G. Mega LEO satellite constellations networking: challenges and key technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(4): 57-74.
- [24] Jain R, Chiu D M W, Hawe W R. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer

systems (TR-301)[R]. Maynard, MA: Digital Equipment Corporation, 1984. .

[作者简介]



李亦森 (2003-), 男, 南京大学电子科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为低轨卫星网络传输层协议、空间通信协议标准。



张孟阳 (2000-), 男, 南京大学电子科学与工程学院博士生, 主要研究方向为空天地一体化网络、低轨卫星互联网传输层协议。



刘晓宇 (1999-), 男, 南京大学电子科学与工程学院博士生, 主要研究方向为空天地一体化网络、低轨卫星互联网路由和传输机制、卫星网络仿真。



李涛 (1978-), 男, 南京交通职业技术学院教授级高级工程师、东南大学兼职硕士生导师, 主要研究方向为人工智能、控制理论、智能交通和传感器网络。



周海波 (1985-), 男, 南京大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为车载自组织网络、B5G/6G 网络的资源管理与协议设计、空天地一体化网络。