计算机研究与发展
Journal of Computer Research and Development
DOI: 10.7544/issn1000-1239.202440314
61(11): 2693−2705, 2024

面向立体化异构网络的智融协同传输方法

季 翔[1] 许长桥[1] 张宏科[2]
[1](网络与交换技术全国重点实验室(北京邮电大学) 北京 100876)
[2](北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)
(jxiang_2019@bupt.edu.cn)

Smart Integrated Cooperative Transmission Method for Stereoscopic Heterogeneous Networks

Ji Xiang[1], Xu Changqiao[1], and Zhang Hongke[2]
[1](*State Key Laboratory of Networking and Switching Technology* (*Beijing University of Posts and Telecommunications*), *Beijing* 100876)
[2](*School of Electronic and Information Engineering*, *Beijing Jiaotong University*, *Beijing* 100044)

Abstract To address the complex challenges posed by node heterogeneity and connectivity changes in integrated stereoscopic heterogeneous networks, we propose a transmission control method with bounded, loop-free, and blocking-free policy update capabilities. This method incorporates network routing algorithms into the transmission control framework through cross-layer cooperative control. The selection of routing update nodes is modeled as a node search problem, ensuring that the resources involved in network transmission are bounded. On this basis, a breadth-first heuristic incremental search algorithm is designed to efficiently update both global and local routing configurations, ensuring that new paths are loop-free and devoid of network black holes. Additionally, to adapt to the volatility of integrated stereoscopic heterogeneous networks, a multi-mode hybrid congestion control mechanism is designed. This mechanism can switch to a more gradual window-increase mode when approaching the network bandwidth threshold, promptly adjusting policies to handle various potential network conditions. Simulation results demonstrate that HWCTC method provides high-quality data transmission services in dynamic and high packet loss rate integrated space-air-ground heterogeneous network environments. Compared with the classical Cubic and Reno algorithms, HWCTC achieves approximately 61.5% improvement in throughput, significantly enhancing data transmission stability and effectively reducing the impact of dynamic node routing changes on transmission performance.

Key words transmission control; integrated stereoscopic heterogeneous network; routing update; smart integration identifier networking; congestion control mechanism

摘 要 为应对空天地立体化异构网络中由于节点异构性及连通变化带来的复杂挑战,提出了具备有界无环无阻策略更新能力的传输控制方法HWCTC.该方法以跨层协同控制的方式将网络路由算法引入传输控制框架;在此基础上将路由更新节点的选择问题建模为节点搜索问题,使网络传输中需考虑被调用的资源限定在有界范围内.在此基础上,设计了一种基于广度优先的启发式递增搜索算法,该算法能够有效进行全局和局部的路由配置更新,同时确保新路径无环路且无网络黑洞.此外,为适应空天地立体化异

收稿日期: 2024-05-06; **修回日期**: 2024-07-13
基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(62225105); 国家自然科学基金重大项目 (62394323)
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (62225105) and the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (62394323).
通信作者: 许长桥(cqxu@bupt.edu.cn)

构网络环境的波动性,还设计了一种多模式混合的拥塞控制机制,该机制能在接近网络带宽阈值时切换到更平缓的增窗模式,及时调整策略以应对网络中可能出现的多种情况.仿真实验的结果表明,HWCTC方法在动态且高丢包率的空天地立体化异构网络环境下,不仅提供了高质量的数据传输服务,且相比于经典的 Cubic 和 Reno 方法,实现了约 61.5% 的吞吐量提升,显著增强了数据传输的稳定性,有效减少了节点路由动态变化对传输性能的影响.

关键词 传输控制;空天地立体化异构网络;路由更新;智融标识网络;拥塞控制机制

中图法分类号 TP391

随着智能物联网的快速发展,空天地立体化异构网络架构成为实现广泛设备互联和智能化服务的关键基础设施.国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的 2022 年白皮书《未来至 2030 年及以后的地面国际移动通信系统技术趋势》[1]指出,未来的 6G 无线通信网络将融合地面通信节点与空天通信节点,实现全域覆盖.尽管空天地网络的融合带来许多优势和潜力[2],但多种通信制式的异构性、网络拓扑的动态变化、链路性能的不稳定性以及路由的长跳数等因素,均影响了针对互联网设计的传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)的性能,使其在这种复杂环境下表现不佳.

现有互联网传输控制方法以“端到端”设计[3]为核心.发送端依赖一个往返时延之后从接收端获得的 ACK 反馈来调节发送速率,但这种交互方式在跨越广阔空间的空天立体化异构网络中显得迟钝且滞后,无法及时反应网络环境的快速变化.由于空天网络中的节点(如低轨卫星、无人机)高速移动,相对位置的快速变化会导致 TCP 连接在空天地立体化异构网络中频繁断开和重建,这可能会使 TCP 探针数据包[4]不能按时送达,从而导致会话异常中断.此外,当前传输控制方法中的拥塞检测机制通常将丢包造成的乱序视作网络拥塞,在空天链路高误码率环境,链路丢包易导致误判,频繁地降低拥塞控制窗口,阻碍了用户充分利用网络带宽资源.

为满足空天地立体化异构网络需求,现有的研究工作[5-6]引入了集中式资源管理技术,以应对异构网络融合带来的复杂挑战.智融标识网络[7](smart integration identifier networking, SINET-I)是一种新型网络体系架构,在此架构下,通过资源适配层的智慧控制服务器集群调度,可有效保障异构网络的传输性能,为实现高效可靠的立体化异构网络传输提供了研究基础.使得网络调度不仅能实时部署和执行节点行为规则,还能通过集中控制服务器高效管理资源.其他的网络优化工作包括卫星和无人机节点在内的核心网络功能,如网络路由[8]、地址转换[9]、性能增强代理[10]等.同时,一些在物理层和链路层的工作[11-12]中考虑多普勒偏移、传输时延抖动等卫星、无人机通信系统的特点,对路由选路、选址算法做出自适应的改进.然而,现有的研究往往忽视中间节点的特性,很少有研究将其考虑进空天地立体化异构网络传输控制方法的设计中,这导致大多数针对该场景的研究缺乏与传输层的协同合作.例如,文献 [13] 讨论了空天地立体化网络中未来可能出现的联邦学习应用,设计了新颖分层控制框架,但却忽略了传输控制方法的可靠性对这些应用的影响.类似地,一些在网络层或更底层的研究工作也仅仅关注局部算法改进对总体网络系统性能的影响,而很少关注分析不同层间算法的交互协作.总之,现有的研究大多未能从空天地立体化异构网络的整体视角出发,缺乏对不同层间算法交互协作的深入分析.

立体化异构网络的核心挑战是异构节点的组网协同,本文以图 1 中的空天地场景为例,其中数据流最初沿着由低轨卫星和高轨卫星等节点组成的路径(黑色箭头所示)传输到接收方;在传输过程中,低轨卫星由于高动态变化导致链路的一个环节中断,网络节点需要快速反应,通过其他节点尝试重新建立链路,如图 1 中红色箭头表示的新路径继续支持原数据流的传输.最新的研究进展[14-15],通过使用中心化的控制服务器,在控制侧调配节点资源,协同大空间尺度下的网络节点,实现流量重配置.然而,这些工作都只考虑了路由层面的可达性,而忽略了流重配置行为与传输控制算法之间的相互影响.综上所述,现有的空天地立体化异构网络的传输控制方法面临三大问题:1)无法在大空间尺度的网络中快速调节发送速率;2)需要中心控制服务器调度全局节点资源,却没有考虑随网络规模增大带来的调度开销增加和将全部节点纳入服务单个流的设备集合可能产生的资源浪费;3)不支持传输层与网络层协同合作,缺乏专门的跨层设计,可能导致如网络层的路

由重配置引发传输层会话中断等问题.

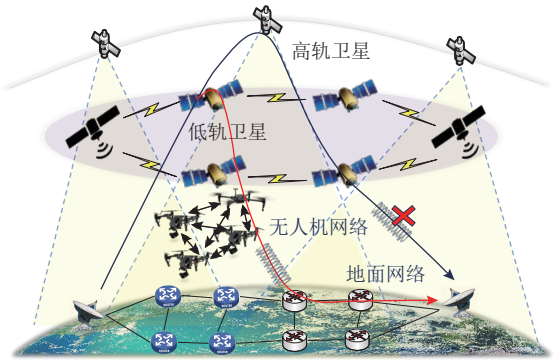


Fig. 1 Schematic diagram of traffic reconfiguration in integrated space-air-ground heterogeneous network

图 1 空天地立体化异构网络传输流重配置示意图

为了应对上述问题带来的挑战，本文提出了一种空天地立体化异构网络中基于有界无环无阻更新机制的传输控制方法. 通过智融标识网络中的智慧控制服务器提供更高效、鲁棒的传输服务，为物联网环境下的数据交互提供了技术支持. 本文的主要贡献包含 4 个方面：

1）提出了一种面向空天地立体化异构网络的传输控制方法 HWCTC（hopwise consistent transmission control），以更细粒度的“跳到跳”设计模式替代传统 TCP 的“端到端”方案，使用线性增、对数增和乘性减混合的方式调整拥塞控制窗口，显著提升了对网络环境变化的适应能力.

2）设计了一种数据流重配置算法，此算法基于李雅普诺夫漂移加惩罚方法衡量网络节点可提供的服务性能和稳定性，从而确保仅选取满足特定条件的网络设备子集进行更新，这解决了传统算法依赖全局节点遍历进行节点资源调度的冗余性问题.

3）HWCTC 有效地实现了网络层和传输层的高效协同，通过在 SINET-I 框架内部集成智能的启发式广度优先路由搜索算法，将传输层信息考虑进路由更新过程，并进而定义了新的传输性能标准——“网络无环无阻”，即确保空天地一立体化异构网络中无路由循环、无网络黑洞，同时避免局部链路拥塞.

4）我们在 ns-3 仿真平台上实现并部署了 HWCTC，实验测试结果表明 HWCTC 与 Cubic, Reno 相比，吞吐量提升了约 61.5%，同时取得了更好的数据传输稳定性，显著减少了因节点路由动态变化对传输性能造成的影响.

综上所述，HWCTC 能够有效应对空天地立体化异构网络传输过程中面临的挑战，为下一代智能物联网生态发展提供了传输方案.

1 相关工作

近年来，随着网络技术的迅速发展，多种多样的网络设备被纳入其中，如卫星和无人机. 这些新型异构设备的加入对传输控制算法提出了更高的要求.

1.1 空天地立体化异构网络的特点

与地面系统不同，空天地立体化异构网络面临着动态拓扑、长时延和高误码率挑战[14]. 特别是需要 ACK 数据包确认的传输层，这些因素使传统的数据传输技术变得不可靠. 现有研究在传输层角度深入分析空天地立体化异构网络的特点较为有限. 例如，文献 [16] 将变化的丢包率作为参数引入模型，将移动性带来的误差叠加进行动态分析. 尽管证明了所提出算法在高丢包环境下的稳定性，但是忽略了动态拓扑带来网络中路径不可达，导致中间节点缓存突发堆积的问题. 此外，现有的“端到端”设计的传输控制方法难以捕捉到网络层面的重要影响因素. 例如文献 [17] 指出，每增加 1 000 km 的星间距离将使得单跳延迟大约增加 20 ms；另外，额外的卫星跳数也会明显增加延迟. 这表明，空天地立体化异构网络的传输性能实际依赖于网络层面的动态演化，难以通过上层预测或依靠接收端的反馈准确感知. 因此，对于立体化的空天地网络来说存在明显的发展需求，以提升传输过程的效率和可靠性.

空天地立体化异构网络的另一个显著特点是其高度异构性，组成它的不同子网络由各种通信协议支持[2]. 因此，解决如路由管理和协同传输控制等复杂问题需要新的技术方法. 目前广泛使用的一种模型是移动自组织网络（mobile ad hoc network, MANETs）中的随机航点（random waypoint, RWP）模型[18]. 它是一个简单的随机模型，用于描述异构节点在空间系统中的移动行为. 然而，如果要将其用于指导传输控制算法，需要在每条流的发送节点实时收集、处理网络中上一时刻所有节点的位置，带来了不可预测的计算开销和信息同步成本.

1.2 传输控制方法发展趋势

尽管 TCP/IP 协议已经在地面固定和移动网络中被广泛使用，但一些经典的传输控制方法，如 Cubic[19] 和 BBR[20]，在地面互联网中表现出色，但在空地协同的网络环境下表现不佳[10]. 随着低轨卫星、无人机等基础设施的发展，一些专门为其设计的传输控制方法开始涌现. 文献 [21] 提出了 CTCP 方法，将中间代理节点引入传输控制，以快速应对空中节点移动性带

来的网络环境变化. 文献 [22] 在文献 [21] 所提方法的基础上进一步增加了基于发送速率改变的传输模式规则，以提升方法的鲁棒性. 尽管这些新方法额外考虑了无线环境带来的影响，却往往依赖于理论上预设的随机变量，而未深入到网络路由层面分析造成这些影响的具体原因. 因此，这些方法难以在实际网络环境中得到其理论预期中的效果.

随着技术的发展，标识化网络的概念被广泛应用于异构网络管理中，提供了多种创新解决方案以优化流量管理和网络传输控制. 文献 [23] 利用智融标识网络架构中的“资源动态适配”机制，动态感知网络状态并完成定制化的网络编解功能的构建. 这种基于智融标识网络的逻辑隔离的设计，有助于高效地整合、管理网络资源. 文献 [24] 研究的 CT-RMU 方法展示了如何将标识控制器有效应用于这些领域. 此方法与文献 [25] 中 H-STN 的设计思想类似，强调了通过搜集网络设备的实时链路信息来使发送端的决策更具适应性. 然而，这些研究通常假设一个相对稳定的网络拓扑，这种假设与空天地立体化异构网络的高度动态特性并不完全匹配. 文献 [26] 提出了一种动态的 DHSTC 方法尝试解决这一差异，它创新地将空天地立体化异构网络中的节点转发信息纳入决策框架. 尽管这种方法在理论上是先进的，但它要求控制器搜集广泛的网络全局信息，从而带来的高控制开销和同步成本限制了其在实际环境中的应用价值.

表 1 列举了经典的传输控制方法，并比较了它们的响应条件和预期性能提升，有助于比较各种方法在不同场景下的效果和适用性.

表 1 指出，最近的研究已经开始探讨跨层设计，以提高空天地立体化异构网络的性能. 这些工作尝试在 TCP/IP 模型的不同层之间建立更紧密的协作关系，以实现更高效的数据传输和管理. 尽管在跨层设计方面取得了一定的进展，但在传输控制层面，特别是在同时解决网络层与传输层问题的自下而上研究方面仍然存在较大的空白. 本文提出的 HWCTC 方法是一种新的传输控制方法，它与网络层进行跨层协作. 该方法引入了“网络无环无阻”的设计思想，通过控制理论筛选有界的资源集合，实现了平衡全局和局部影响的高效点到点协作，最终显著提升了网络整体的传输性能.

2 空天地立体化异构网络模型和问题描述

在本节中，我们首先提出了空天地立体化异构网络中存在的传输控制问题建立数学模型，然后对网络无环无阻进行了严谨的定义.

Table 1 Comparison of Transmission Control Approaches in Integrated Space-Air-Ground Heterogeneous Networks

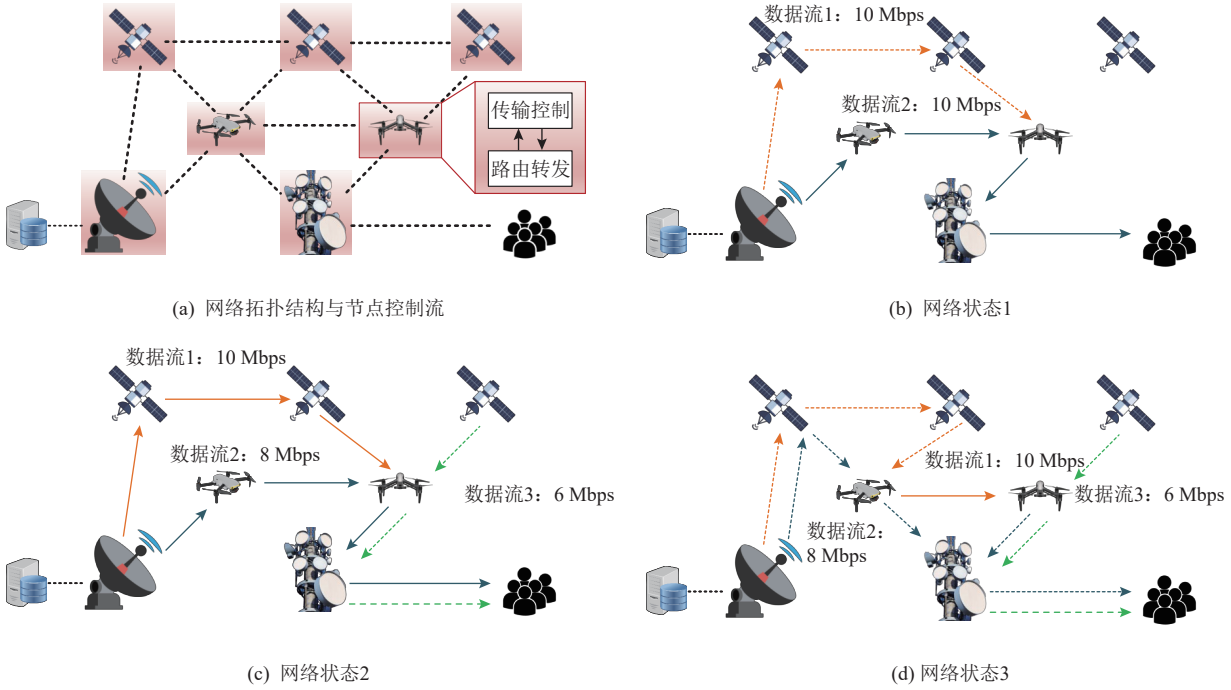
表 1 空天地立体化异构网络中不同传输控制方法的比较

方法	是否跨层	响应条件	预期性能提升
Cubic[19]	×	乱序、丢包	吞吐量
Reno[27]	×	重复 ACK、超时	稳定性、公平性
BBR[21]	×	带宽、往返时延	吞吐量、时延
CTCP[22]	×	中间代理 token	吞吐量、公平性
A-PEP[23]	×	发送速率	资源效率
CT-RMU[24]	×	网络资源信息	任务完成率
H-STN[25]	√	传输速率、需求信息、服务阈值	链路利用率
DHSTC[26]	√	网络节点服务到达率和资源上限	缓存队列长度
HWCTC（本文）	√	吞吐量期望、阈值触发	吞吐量、无环无阻、时延、重传占比

2.1 网络模型

空天地立体化异构网络在本文中被定义为无向图$G=(V, E)$，其中V是网络节点集合，$E \subseteq V \times V$是可用的双向链路的集合，每条链路的容量大小由通信双方节点的最小网口速率C_v决定，其中$v \in V$，在介绍传输控制问题之前，我们将以 SINET-I 网络中资源适配层的视角提供一个在空天地网络中常见的网络状态变化示例.

图 2(a) 展示了一个简单的网络拓扑，网络由地面、无人机和卫星节点组成，假设所有节点的网卡支持的吞吐量上限为 20 Mbps，黑色虚线代表可用的双向链接. 在网络抽象出的“资源动态适配层”视角，连续的更新事件随机到来，每个更新事件由数据发送端或者网络节点本身触发，包含一个或一组流路由的更新操作. 具体来说，这些更新操作作用于网络中的异构节点大体分为三类，分别为添加、修改或删除网络规则. 这些更新操作的执行，会实时对网络中的数据流进行重配置，目的是优化网络的负载均衡和平均传输性能. 图 2(b) 描述了一个初始的网络状态，蓝色实线箭头代表数据流 2 在空天地立体化异构网络中传输，它的实时吞吐量大小为 10 Mbps，接收端为地面用户；与此同时，橙色虚线箭头代表的数据流 1 出现，虚线代表这是一组尚未部署的网络更新配置，在确切执行前需要判断它与网络中现有的流之间是否存在冲突，例如在多流共存节点是否存在吞吐量超过网卡吞吐量上限的情况. 在图 2(c) 展示的网络状态 2 中，数据流 1、2 已经处于正在传输的状态；此时



(a) 网络拓扑结构与节点控制流　(b) 网络状态1

(c) 网络状态2　(d) 网络状态3

Fig. 2　Example of coordinated nodes in integrated space-air-ground heterogeneous networks

图 2　空天地立体化异构网络节点协同示例

从卫星节点到地面用户的传输请求(数据流 3)出现，我们用绿色虚线箭头表示这一尚未执行的网络更新事件. 然而，如果该更新事件被执行，3 条数据流将会同时经过一个无人机节点，而它们的吞吐量需求总和超过了单一节点的网卡处理能力上限. 因此，在图 2(d) 所示的网络状态 3 的 3 条数据流进行了协同的更新，通过改变对有限资源的利用方式，新的网络更新方案通过对数据流进行重配置避免了流量竞争可能带来的传输性能下降. 在这个网络状态变化的例子中，我们设想了一个特殊场景，描述在空天地立体化异构网络实际使用中会频繁遇到的问题，并在图 2(d) 展示了一种巧妙的解决方式. 现有的一些研究工作尝试用集中控制服务器解决数据流重配置的工作，并以更短的路径跳数和无路由循环的方案设计作为目标. 在本文中，我们创新性地提出将传输层的拥塞窗口信息与网络层的更新操作相结合，如图 2(a) 中红色框中展示的，我们在每个网络节点上实现跳到跳的拥塞控制，并维护一个能与集中控制服务器交互的接口. 本文提出的 HWCTC 的目标是实现空天地立体化异构网络的“网络无环无阻”. 下面给出本文中一些技术概念的明确定义.

定义 1. 网络状态与更新事件. 我们用一个由更新事件组成的集合描述网络状态 $N_{\text{state}}=\{O_{\text{e}},O_{\text{ne}}\}$，其中 O_{e} 表示已执行的更新事件集合，O_{ne} 表示尚未执行的更新事件集合，假设网络中有 n 个更新事件，每一个更新事件都包含若干更新操作，可以将 2 个更新事件集合表示为：

$$O_{\text{e}}=\left\{\left(O_{event_1}-\tilde{O}_{event_1}\right)\cup\left(O_{event_2}-\tilde{O}_{event_2}\right)\cup\cdots\cup\left(O_{event_n}-\tilde{O}_{event_n}\right)\right\},\tag{1}$$

$$O_{\text{ne}}=\left\{\tilde{O}_{event_1}\cup\tilde{O}_{event_2}\cup\cdots\cup\tilde{O}_{event_n}\right\},\tag{2}$$

其中 O_{event_n} 表示第 n 个更新事件的更新操作集合，$\tilde{O}_{event_n}$ 表示第 n 个更新事件中未被执行的更新操作集合. 在更新事件到达集中控制服务器且尚未执行时，存在 $O_{event}=\tilde{O}_{event}$. 随着时间经过，更新操作被依次执行，直到 $\tilde{O}_{event}=\varnothing$. 如果某一时刻当前网络状态中未执行更新事件集合为空集，我们将其定义为网络初始状态.

定义 2. 无环无阻的传输控制. 联合传输层与网络层信息进行协同决策，实现无环无阻的空天地立体化异构网络传输控制. “无环无阻”指一类调度决策方案，在执行的过程中能做到网络无环路、无黑洞和避免拥塞发生.

定义 3. 有界更新. 指空天地立体化异构网络中的传输策略的更新范围和使用资源有界，在使用有限制资源的前提下制定策略，而并非从全局的角度出发搜索、调度节点资源.

以上定义为本文后续提出的传输控制方法奠定基础. 值得注意的是，HWCTC 是一种跨层协同的传输控制方法，其性能指标不完全定义在传输层层面.

进一步说，通过在集中控制服务器影响的路由算法中引入传输层的流量信息，同时在传输层拥塞控制中考虑网络节点的路由信息是 HWCTC 区别于其他传输控制方法的设计思想.

2.2 问题描述

本文的研究目标是最大化空天地立体化异构网络的服务效率. 我们将数据率在中间节点排队等待的延迟作为传输控制成本，网络服务数据流的方式被建模为一个 M/M/1 的需求不饱和排队模型. 数据流经过网络中任意节点v的传输控制成本S_v与该节点的剩余带宽正相关：

$$S_v \propto \frac{D}{C_v - x_v}, \tag{3}$$

其中D代表平均数据包大小，C_v代表节点v的吞吐量上限，x_v代表节点v的吞吐量大小. 在这个模型中，随着流量负载接近节点能处理的吞吐量上限时，传输成本会急剧提升. 在我们定义的网络模型中，集中控制服务器会对进入空天地立体化异构网络的传输需求进行响应，寻找一个可行的路径分配方案，目前的配置方法往往采用基于路由表寻找最短路径的算法，例如最小生成树算法. 为了评估不同方案的性能，我们结合式(3)中关于传输成本的定义，对空天地立体化异构网络的传输控制问题建立如下模型：

$$\min \sum_{v\in V} \frac{D\cdot x_v}{\gamma(C_v - x_v)}, \tag{4}$$

$$\text{s.t. } \gamma = \sum_{f\in F_v} cwnd_f,\ x_v = \sum_{f\in F_v} x_f,\ \forall v \in V,$$

$$x_v \leqslant C_v,\ \forall v \in V,$$

$$\sum_{f\in F_v} x_f = 1,\ \forall f \in F_v,$$

其中γ由经过节点v的所有数据流的拥塞控制窗口大小之和决定，它旨在最小化传输成本的同时，尽可能增大用户传输层算法的发送潜力. 请注意，本文在问题模型中将经过节点的流按来源区分成f个子流，并以下标的形式标注具体变量. 这是一种在智能网络场景下的常见设计，针对数据流的细粒度算法被广泛应用于企业级的智能网络场景.

在 2.1 节，我们提到了一个多流共存的例子，以说明吞吐量信息对节点协同的重要性. 然而，想要在空天地立体化传输控制中实际应用还存在 2 个问题：1)这种新的流配置过程可能更新网络系统中的所有流，虽然我们在图 2 中只提及了 3 条数据流，但是在真实场景中数据流的数量取决于那一时刻需求的数量. 如果不限制更新策略的资源边界，那么任意时刻新的数据流加入都可能会影响网络中已有的所有数据流，这种需要全局信息的更新策略不实际. 2)空天地立体化异构网络中的用户需求是庞大且动态的. 一般情况下，在求解下一个网络状态流配置的最优解之前，新的数据流需求就会到达. 因此，本文尝试提出一种基于数据流相互影响的流量管理方法.

3 跨层协作的传输控制框架

当前，空天地立体化异构网络作为新一代网络架构，因其广泛的覆盖范围和多样的网络类型而备受关注. 然而，传统的传输控制方法主要集中在单一层面的算法改进，缺乏有效的整体解决方案.

针对这一点，本文提出了一种新的传输控制框架，设计网络层和传输层协同的关键算法. 具体执行的过程中，需要解决 2 个关键问题：1)如何设计数据流重配置算法，在有界的资源范围内确定哪些流需要重配置，并确保新路径是无环路的；2)如何设计跳到跳的拥塞控制算法，以快速响应网络环境，从而避免传输阻塞.

3.1 数据流重配置算法

为了提高网络性能并维持高效的全局流配置. 空天地立体化异构网络中的控制器需要在严格的时间限制下解决流量分配问题. 在本节中，我们研究了第 1 个关键问题，并提出了 HWCTC 框架下的数据流重配置算法. 与现有的依赖全局信息的工作不同，HWCTC 平衡了网络全局和局部信息对决策的影响. 我们将传输层研究共享链路瓶颈的思路引入网络层的数据流重配置中. 在流重配置进行之前，数据流在网络中沿初始路径p传输. 首先，本文建立了一个数学模型度量路径p的瓶颈拥塞程度：

$$B(p) = \max_{v\in p}\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\frac{D\cdot x}{\gamma(C_v - x)}\right)\bigg|_{x=x_v}\right). \tag{5}$$

数据流所处路径的瓶颈拥塞程度取决于其存在路径上最拥塞的节点. 集中控制服务器为每一条数据流维护其瓶颈拥塞程度信息；除此之外，当网络中数据流变化且存在 2 条或以上数据流的路径部分重合时，本文定义了一个计算它们相互影响的方法，我们将这些数据流看作若干个节点，并以如下方式计算数据流f_a变化对f_b带来的影响：

$$R(f_a, f_b) = \frac{\Delta f_a}{r_a - \Delta f_a}\cdot\frac{B(p_a)}{B(p_b)}\cdot\frac{f_a}{f_b}, \tag{6}$$

其中，Δf_a表示数据流f_a的变化量，r_a表示 2 条流路径重合部分除去数据流f_a吞吐量之后的剩余传输潜力.

$R(f_a, f_b)$定义了流f_a的变化对流f_b的影响力，这种计算方式不仅考虑了数据流的吞吐量的变化，也考虑了流在特定瓶颈传输环境下的负载基线与网络节点的承载能力. 此外，我们引入了一个参数$R_{\min}$作为影响力阈值，用于决定是否需要针对特定流进行配置更新. 若计算出的影响力值超过此阈值，我们将在下一次网络重配置中更新该数据流的配置，否则保持现状. 这使得 HWCTC 能够根据网络的实时需求动态调整，并且在性能和成本之间取得平衡.

在控制器明确需要配置更新的数据流之后，下一步需要判断这些数据流的更新方式. 更新方式分为全局节点更新和局部节点更新. 尽管全局节点更新能够带来相对更优的性能结果，但其也伴随着较高的控制成本. 相比之下，局部节点的流配置更新虽然只能获得折中的性能，但其成本较低. 在本文中，我们引入了李雅普诺夫控制理论的思想，还引入了 2 个变量：$\varphi^*(t)$和$\varphi(t)$分别表示在时隙t空天地立体化异构网络的全局与局部的最优性差距，定义为

$$\varphi^*(t) = J \cdot a(t) + (1-\delta^*) \cdot \varphi^*(t-1), \tag{7}$$

$$\varphi(t) - k \cdot d = J \cdot a(t) + (1-\delta)(\varphi(t-1) - k \cdot d), \tag{8}$$

其中$a(t)$为描述更新事件是否到达的随机变量，J是一个跳变常数用于量化对网络的影响，δ^*和δ都是在$(0,1)$范围的变量，分别与全局和局部更新事件的发生有关；k和d分别代表从上一次全局更新开始，局部流配置更新的次数和影响权重. 需要强调的是，最佳的数据流重配置是面向全局节点的. 本文定义全局最优与局部的最优差距是为了在更新策略以合理的次数进行局部更新之后，算法能自适应地进行一次面向数据流全局节点的重配置. 根据定义 1，本文以更新事件集合的变化来表示网络状态的演变. 因此，我们将时隙 t 对数据流的更新操作设定为 2 个二元变量$\tilde{O}_d^*(t)$和$\tilde{O}_d(t)$，当$(\tilde{O}_d^*(t), \tilde{O}_d(t)) = (1,0)$时，表示网络在时隙$t$以全局的方式处理更新事件；当$(\tilde{O}_d^*(t), \tilde{O}_d(t)) = (0,1)$时，表示在时隙$t$以局部的方式处理更新事件；当$(\tilde{Q}_d^*(t), \tilde{Q}_d(t)) = (0,0)$时，表示系统在该时隙无配置更新. 此处更换了未完成更新事件的变量下标，以将更新操作与更新事件区分. 更新事件包含若干个更新操作，更新事件由具体的数据流需求产生. 因此，HWCTC 对数据流所经过的网络节点定义了 2 个虚拟队列：

$$Q_v^*(t+1) = \left[Q_v^*(t) - \lambda_v\right]^+ + \tilde{O}_d^*(t), \tag{9}$$

$$Q_v(t+1) = [Q_v(t) - \lambda_v]^+ + \tilde{O}_d(t). \tag{10}$$

在集中控制服务器进行全局和包含节点 v 的数据流更新时，式(9)和式(10)定义的虚拟队列会分别增加. 其中$\lambda_v = f_v / C_v$代表节点的服务能力，$\lambda_v \in (0,1)$. 受到最新研究定义局部李雅普诺夫函数[28]的启发，本文基于虚拟队列的平方形式定义节点的李雅普诺夫函数：

$$L_v(t) = \frac{1}{2}\left(Q_v^{*2}(t) + Q_v^2(t)\right). \tag{11}$$

为确保局部节点的更新策略稳定性并优化长期的传输性能，本文采用最小化系统漂移的方式，即最小化李雅普诺夫函数随时间的期望变化量，以推动系统向着稳定的状态演化. 李雅普诺夫漂移可以定义为：

$$\Delta L_v(t) = \mathbb{E}\{L_v(t+1) - L_v(t)\}, \tag{12}$$

其中$\mathbb{E}$代表统计期望值的运算符，定义节点系统的李雅普诺夫漂移可以量化系统状态随时间变化的稳定性. 在此基础上，我们引入一个惩罚项，惩罚项旨在表明系统对最优数据流配置的演进偏移，其定义为：

$$\begin{aligned} Evo(t) = &\left(1 - \tilde{O}_d^*(t)\right)\left[(\varphi(t) - \varphi^*(t)) \cdot \tilde{O}_d(t) + \right. \\ &\left. (Evo(t-1) + \delta^* \varphi^*(t-1))\left(1 - \tilde{O}_d(t)\right)\right]. \end{aligned} \tag{13}$$

惩罚项的设计遵循平衡全局和局部更新策略的思想. 在此基础上，进一步定义漂移加惩罚函数：

$$P(t) = \Delta L(t) + w \cdot \mathbb{E}\{Evo(t)\}. \tag{14}$$

式(14)综合考虑了系统即时稳定性变化与长期性能期望. 其中，w是一个重要性权重，权衡系统的稳定性和性能要求. 观察式(12)(13)(14)，可推理出漂移加惩罚函数的上界：

$$\begin{aligned} P(t) \leqslant &\frac{1}{2}\left(f^2 + f^{*2}\right) + Q_v^*(y)\left(\mathbb{E}\left\{\tilde{O}_d^*(t)\right\} - f^*\right) + \\ &Q_v(t)\left(\mathbb{E}\left\{\tilde{O}_d(t)\right\} - f\right) + w \cdot \mathbb{E}\left\{Evo(t)\right\}, \end{aligned} \tag{15}$$

其中f和f^*分别表示进行局部和全局更新的频率. 由于空天地立体化异构网络中的更新事件发生具有随机性，难以预测漂移加惩罚函数的确切值. 因此，本文使用一种阈值策略来最小化漂移加惩罚函数的上界，该策略的选择是由于能够在较低计算复杂度下有效平衡系统性能与资源消耗. 如果满足条件：

$$w(Evo(t-1) + \delta^* \cdot \varphi^*(t-1)) \geqslant (1-\lambda_v) Q_v(t), \tag{16}$$

则在此次数据流更新中将该节点排除在可选节点集合之外，即该节点需要被重新配置，不作为保留路径中的节点；如果这条路径上所有节点都需要被重新配置，则$(\tilde{O}_d^*(t), \tilde{O}_d(t)) = (1,0)$，反之则$(\tilde{O}_d^*(t), \tilde{O}_d(t)) = (0,1)$，如果没有节点满足条件则将旧流的瓶颈节点排除. 到目前为止，我们已经详细描述了 HWCTC 框架中的控制器如何判断哪些数据流需要被更新，以及

在这些被更新的数据流中,哪些节点需重新考虑或保持不变.本文提出的方法能够实现空天地立体化异构网络的有界更新.在重新配置路径之前引入李雅普诺夫控制理论中的平衡思想,通过2个阶段的筛选,HWCTC有效地将更新过程中需要考虑的资源范围限制在一个合理的范围内.

3.2 广度优先路由搜索算法

确定好网络节点的更新范围后,集中控制服务器的下一个任务是重新构建或者修补网络路由,实现数据流的路径更新.在本节,我们将提出一种广度优先的路由搜索算法,该算法通过评估网络节点的演进状态进行启发式的路由节点搜索,从而解决传统静态路由算法在应对无人机、卫星等移动节点时的局限性,同时考虑了实际数据流的复杂性和节点负载的动态变化.

空天地立体化异构网络在该环节面临的关键挑战是如何在高度动态的网络环境中搜索一系列中间节点.由于无人机、卫星等节点移动性强,传统的静态路由算法无法适应节点位置和网络拓扑的频繁变化.此外,实际数据流来源的复杂性,也可能导致节点因为多条流负载而变得拥堵.本节延续3.1节的算法流程,在筛选完需更新的数据流和其路径上需要更新的节点之后,从源节点或者与源节点或者与源节点相通的最后一个中间节点开始,向外逐层展开搜索,直至找到目标节点或覆盖所有可达节点.该启发式算法遵循如下数学表述:

$$\min_{u\in N(v)}\{\alpha_1(x_v-C_v)+\beta_1\cdot Evo(t)\},\tag{17}$$

其中,v是当前节点,$N(v)$是v的邻接节点集合,α_1和β_1是平衡可达节点剩余容量与演进便宜的重要性权重.演进偏移函数$Evo(t)$代表节点在时隙t的负载情况.值得注意的是,由于该路由搜索算法采用了递增构建的设计理念,可以避免在任何情况出现路由环路.这种逐层展开的特性,还使得算法在减少路由跳数方面具有天然优势.我们的路由搜索算法在广度优先搜索的框架下,引入了启发式评估函数,分别衡量了网络中各节点的剩余传输容量和节点的实时工作负载,使得算法能够在搜索过程中智能地优先选择那些传输能力较强且当前负载较轻的节点.

算法1描述了利用广度优先搜索技术寻找空天地网络新的路由路径的过程.算法的输入是网络拓扑结构$G=(V,E)$,输出为从源节点s到目标节点o的路由路径p.算法首先初始化一个队列并将起始节点标记为已访问,然后根据网络的联通结构,逐层在3.1节筛选的可选网络节点集合内搜索,直到找到目标节点或遍历完所有可达节点.算法1大体分为3个步骤实现:首先将起始节点s加入队列,作为搜索的起点;随后算法不断从队列中取出节点,检查其所有未访问的邻居节点,并根据一个启发式函数评估其优先级,优先级最高的节点被加入队列继续进行搜索;一旦遇到目标节点o,即通过回溯路径的方式重构从s到o的路由路径,并返回该路径作为算法的输出.算法1适用于动态变化的空天地立体化异构网络,确保路由的实时性和准确性.

算法1. 广度优先路由搜索算法.

输入:网络图G,起始节点s,目标节点o;

输出:从节点s到节点t的路由路径p.

① 初始化:创建队列S_q,标记所有节点为未访问,起始节点s标记为已访问;
② *Enqueue*(S_q, s); /*将起始节点s入队*/
③ while $S_q \neq \varnothing$
④ *currentNode* = *Dequeue*(S_q); /*从队列中取出一个节点*/
⑤ if *currentNode* == o
⑥ return *ReconstructPath*(s, o);
⑦ end if
⑧ for *currentNode* 在G的每个邻居v
⑨ if v未被访问且 *heuristic(v)* 最小 /*检查邻居节点是否未访问且启发式项(式(17))最小*/
⑩ 标记v被访问;
⑪ *Enqueue*(S_q, v); /*将节点v入队*/
⑫ *SetParent(v, currentNode)*; /*设置当前节标记点为v的父节点,用于路径重构*/
⑬ end if
⑭ end for
⑮ end while
⑯ return 未找到路径. /*如果队列为空,返回未找到路径*/

3.3 跳到跳异步确认与混合拥塞控制机制

在空天地立体化异构网络中,由于复杂的网络拓扑结构和多样化的通信环境,中间节点间的数据传输丢包率较高.传统的端到端确认机制在处理多跳传输时,往往依赖于接收端的不及时反馈,难以应对随着跳数增加而指数级累积的丢包概率.现有的研究大多集中于提高单一类型网络的传输性能,但缺乏在异构网络环境下的有效解决方案.为了应对

这一挑战，HWCTC 的跳到跳的异步确认机制提供了一个独特的解决方案. 与传统的端到端确认机制不同，跳到跳的确认机制允许每个中间节点独立确认数据包的接收状态. 这意味着，如果传输过程出现错误，只需从上一跳节点敏捷重传，而不需要等待携带错误信息 SACK(selective ACK) 或 RTO(retransmission timeout) 超时的事件，大幅度减少了因多跳传输错误累积导致的重传开销.

图 3 展示了跳到跳异步确认机制的一个实例. 本文以泳道图形式描述了数据包在多个节点之间传输的过程. 其中数据传输和单跳确认发生在发送节点和其下一条节点之间，随着传输距离的增大，单跳的往返时延RTT_{hop}占传输全流程的往返时延RTT的比例会更小. 图 3 中红色箭头展示了当数据在某个节点丢失时，如果发送节点仍能收到同一数据流的 ACK（代表节点仍连通），则在收到 2 个重复 ACK 后进行跳到跳重传；如果出现无人机节点不可达的情况，重传流量会开始在发送端堆积，直到触发 3.1 节介绍的流重配置阈值. 图 3 中的 2 条蓝色虚线代表新加入的 2 个中间节点，新加入的节点会填补之前的路由空缺，而无需像传统 TCP 协议将网络错误回溯至发送端重新建立会话. 图 3 中的黑色箭头表示如果没有发生流重配置的传输行为，可以直观地观察到在跳到跳异步确认机制下，网络的恢复流程被缩短到一个较小的范围内. 绿色箭头代表 ACK 反馈流，值得一提的是，在确认信息通过 ACK 数据包返回给上一跳节点之后，会继续向数据流的发送端反馈；其携带了中间节点的拥塞程度信息，其计算方法在式(5)已经讨论，这样做可以帮助发送端获得链路的瓶颈负载信息，有助于帮助其自适应地调整拥塞控制窗口.

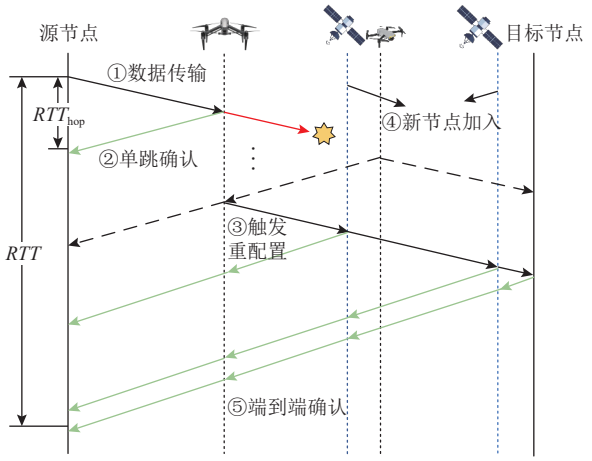


Fig. 3 Hop-by-hop asynchronous acknowledgment data transmission workflow

图 3 跳到跳异步确认数据传输工作流程

$$\begin{cases} cwnd(t+RTT)=cwnd(t)+\alpha, \\ cwnd(t+RTT)=cwnd(t)+\dfrac{\alpha}{\log(\varepsilon+cwnd(t))}, \\ cwnd(t+RTT)=\beta\cdot cwnd(t). \end{cases} \tag{18}$$

在 HWCTC 框架中，拥塞窗口调整策略融合了线性增长、对数增长与乘性减少 3 种方式. 如式(18)给出的更新方法，当在观测路径p上有节点的拥塞程度超过预设阈值时，为了维持网络稳定性，拥塞窗口$cwnd$将通过对数增长方式调整，对数增长有相对缓和的窗口增长速率. 相反，如果节点拥塞程度低于阈值，HWCTC 则鼓励占用更多的网络资源，因此采用更为激进的线性增长策略，其中增长系数α= 2，这一数值相较于传统 TCP(AIMD 算法)的默认值更大，保护因子ε=1. 这样的设计是为了在低拥塞状态下提供更快速的带宽利用率提升，与传统 TCP 的方案相比，能更有效地利用空闲带宽. 我们观察到在不同的网络条件下，如低延迟高带宽和高延迟低带宽，将α设置为 2 能显著提高网络吞吐量，同时不显著增加拥塞风险. 此外，考虑到对网络状态反馈的灵敏性，我们在乘性减少阶段参考了成熟的 Cubic 方法，将乘性减少系数β设为 0.7. 通过对比实验，我们发现 β=0.7 在减少网络拥塞恢复时间和提高整体传输效率之间达到了较好的平衡. 我们认识到由于实际网络环境的多样性和不可预测性，难以确立一组普适的最优参数配置. 因此，尽管我们在仿真环境中验证了上述的参数选择能够取得良好的性能，但这并不意味着它对于所有应用场景均为最佳选择. 我们希望读者理解，本文的核心贡献并不在于细致的参数调优，而是展示 HWCTC 的设计思路和证明其有效性.

4 实验及结果分析

在本节我们首先介绍 HWCTC 部署和仿真测试的环境. 仿真环境使用 Linux 操作系统，具体使用的发行版本为 Ubuntu 18. 04. 我们基于 ns-3.29 框架搭建仿真平台，为了模拟空天地网络中存在的卫星、无人机节点，我们在 ns-3 基础模块上扩展了 sns3 插件[29]，作为欧洲空间局委托开发的 ns-3 的扩展模块，具备配置卫星通信节点的能力. 此外，借助 ns-3 自带的 TapBridge 接口，我们将通过 ns 脚本设定的虚拟网络环境与虚拟机容器相连接，形成一个包含发送端容器实例和中间虚拟节点的混合网络系统. 具体来说，我们在 ns-3 仿真环境外部通过 Python 脚本实现 HWCTC

的控制逻辑，并基于 DCE(direct code execution)模块让传输/网络层协议栈能够获得算法的实时决策信息. 我们对仿真框架内的基本的协议栈代码进行了修改，添加了新的分支逻辑以实现本文所述功能. 表 2 给出了在仿真环境下空天地立体化异构网络的参数设置.

表 2 描述的空天地立体化异构网络由 5 个地面节点、36 个无人机节点和 12 个卫星节点组成. 卫星轨道高度参数设置为 1 460 km，与当前低轨通信卫星的实际情况相匹配，其他参数的设置都源于对现实情况的观察和合理估计.

Table 2 Detailed Parameters of Integrated Air-Space-Ground Heterogeneous Network in Simulation Environment

表 2 仿真环境下的空天地立体化异构网络详细参数

实验参数	取值
地面节点数	5
无人机节点数	36
卫星节点数	12
卫星轨道高度/km	1 460
单跳链路时延/ms	5~30
节点吞吐量/Mbps	20
数据包长度/B	512~1 500
地面通信链路误码率	10^{-6}~10^{-9}
空中通信链路误码率	10^{-5}~10^{-8}
单次仿真时长/s	300

4.1 吞吐量性能测试

在本节中，我们对传统的 Reno 方法 、Cubic 方法以及本文提出的 HWCTC 方法在空天地立体化异构网络仿真环境下进了吞吐量性能测试. 空天地立体化异构网络由于其路径的动态性和较高的累计丢包率，对传输控制方法提出了更高的挑战. 实验结果如图 4 所示，相较于经典的 Reno 方法，Cubic 方法由于其相对激进的窗口调整策略，能够利用更多网络带宽资源，展示出更高的吞吐量. 然而，Cubic 方法的激进性也可能导致网络稳定性问题，在接近网络性能边界时继续采取激进的策略会触发网络节点丢包，进而负反馈抑制吞吐量的增长.

可以观察到，HWCTC 取得了显著更优的性能，在多次实验下，其平均吞吐量性能超越了 Cubic 方法 61.5%. 这是由于我们采用了更细粒度的“跳到跳”设计模式，并使用线性增、对数增和乘性减混合的方式调整拥塞控制窗口，使其能够根据网络状态进行快速调整. 当网络条件适合发送更多数据时，HWCTC 通过增加其传输窗口来快速提升吞吐量；达到阈值后，它会转入对数增模式，放缓窗口的增长速率以避免过度激进的上探行为，从而保护数据流的稳定性. 同时，HWCTC 在路径拥挤时还会触发网络路由重配置，使传输路径向性能更优的方向更新. 这些特性使得 HWCTC 在增强性能的同时也兼顾了在空天地立体化异构网络环境下的传输可靠性，因此在吞吐量方面取得了比经典的 Reno 方法和 Cubic 方法更好的性能表现.

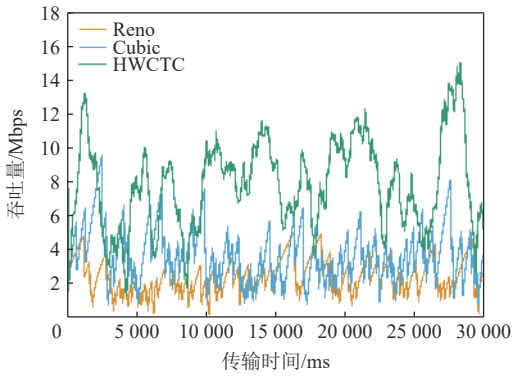


Fig. 4 Throughput performance comparison of transmission control methods

图 4 各传输控制方法吞吐量性能比较

4.2 实用性分析

为了评估所提出传输方法的实用性，我们设计了一系列实验，比较了 Reno、Cubic 和 HWCTC 三种传输控制方法在不同实际场景中可能出现的网络环境下的时延性能. 具体来说，我们在传输路径跳数固定的情况下改变了其中高移动性空中节点，即无人机节点和卫星节点的比例. 图 5 展示了在 20%、40%、60%、80% 和 100% 高移动性空中节点比例下，不同传输方法的传输时延分布情况. 相较而言，Reno 和

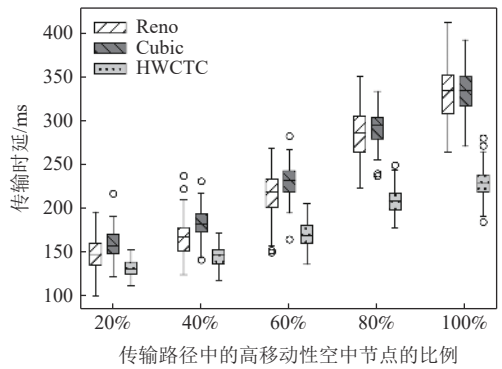


Fig. 5 Delay comparison of different transmission control methods at different air node ratios

图 5 各传输控制方法在不同空中节点比例下的时延对比

Cubic 方法在高移动性空中节点比例增加时，其传输时延均显著增加. Reno 方法的时延表现略优于 Cubic 方法，但其时延的方差也相对较大. 这表明传统方法虽然在某些情况下能够提供可接受的传输时延，但其稳定性较差. 随着高移动性空中节点比例的增加，HWCTC 相较于传统方法的优势增大，证明了其在不同网络环境下，特别是高移动性的空中节点占比更高时表现更佳. HWCTC 通过网络层和传输层方法的协同设计，提升了在立体化异构网络中传输的鲁棒性，使得其在不同网络环境下仍能保证数据传输时延的稳定.

4.3 不同方法在不同路径长度下的时延分析

在本节，我们探讨了不同路径长度对传输时延性能的影响，对比了 Reno、Cubic 和 HWCTC 三种传输控制方法在路径长度分别为 5、6、7、8 跳时的平均端到端时延. 为了排除干扰因素，我们固定了每次实验的路由路径，这意味着通信过程产生的时延大体相同，在同一环境下不同方法的时延性能差距主要由数据重传行为决定. 实验结果如图 6 所示，HWCTC 方法在所有实验组中均表现出最低的平均端到端时延. 值得注意的是，随着路径长度的增加，HWCTC 的优势相对更加明显. 这一现象的主要原因是 HWCTC 基于李雅普诺夫漂移加惩罚方法，确保仅选取满足特定调节的网络设备子集进行更新，从而避免了传统方法依赖全局节点遍历带来的资源浪费和调度开销问题；同时 HWCTC 采用的跳到跳的异步确认机制，只需在出错的那一跳进行数据重传，相较于传统的端到端重传机制，显著减少了总体的重传时延.

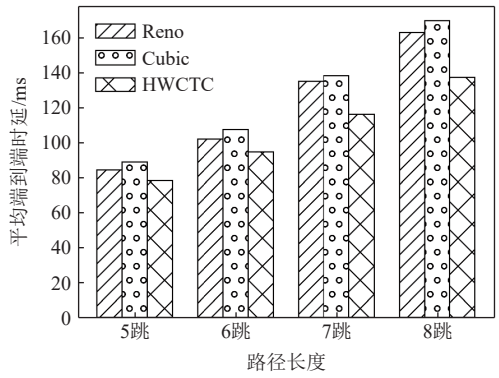


Fig. 6 Analysis of the impact of path length on average end-to-end delay

图 6 平均端到端时延受路径长度影响分析

随着总跳数的增加，每一跳占总跳数的比例逐渐降低，会使得 HWCTC 的时延优势愈加明显. 相比方之下，虽然 Cubic 方法在吞吐量测试中取得了相较于 Reno 方法更优的性能，但其激进的窗口增长策略同时也会导致更多的丢包和重传，从而使其在平均端到端时延上表现最差. 这一结果也揭示了在设计传输控制算法时，存在不同性能之间的权衡. 而 HWCTC 由于从网络层获得了额外的信息，因此在吞吐量和时延方面均有最佳表现，显示了跨层的传输控制方法在空天地立体化异构网络中的应用潜力.

4.4 跳到跳异步确认机制的开销与收益分析

在空天地立体化异构网络中，随着路径长度的增加，由于错误率的层层嵌套累积，端到端的单次传输成功率显著下降. 在此背景下，跳到跳的异步确认机制能够有效地最小化因重传带来的开销，这是因为它允许在发现错误时立即在局部节点间进行数据重传，而无需等待端到端长距离的反馈. 尽管跳到跳确认机制确实带来了性能方面的优势，但它并非在所有方面都优于端到端确认机制. 表 3 中的 p_{hop} 表示单跳重传概率，p_{total} 表示单条传输成功的概率，由于 ACK 包头较短且不携带或只携带少量数据，因此端到端确认机制下 ACK 流量只占总吞吐量的约 1.6%. 相较之下，跳到跳异步确认机制带来了额外的确认开销. 在数据包向目标传输的过程中，它要求每一跳的节点都向发送端回传 ACK 包. 这意味着跳到跳确认机制的 ACK 流量将会增加到端到端机制的 $(n+1)/2$ 倍（n 指跳数），额外的确认开销将会随着跳数的增加而线性增长. 我们在表 3 中总结了确认机制开销的变化规律.

Table 3 Comparison of Performance between Hop-by-Hop and End-to-End Acknowledgment Mechanisms

表 3 跳到跳与端到端确认机制的性能比较

跳数	确认机制	成功率	确认开销	重传数据占比
5	跳到跳	$(1-p_{\text{hop}})^5$	≈4.8%	$(1-p_{\text{total}})/5$
5	端到端	$(1-p_{\text{hop}})^5$	≈1.6%	$1-p_{\text{total}}$
6	跳到跳	$(1-p_{\text{hop}})^6$	≈5.6%	$(1-p_{\text{total}})/6$
6	端到端	$(1-p_{\text{hop}})^6$	≈1.6%	$1-p_{\text{total}}$
7	跳到跳	$(1-p_{\text{hop}})^7$	≈6.4%	$(1-p_{\text{total}})/7$
7	端到端	$(1-p_{\text{hop}})^7$	≈1.6%	$1-p_{\text{total}}$

根据表 3 的数据，我们还可以探讨不同确认机制下重传数据占总数据比例的变化. 跳到跳的确认机制在减少重传所需的数据量方面展现出了优势，并且该优势随着跳数的增加而成比例增加. 虽然我们通过实验多方面证明了跳到跳异步确认机制的潜力. 然而，我们也必须接受这种机制存在一些不足之处. 其额外的开销在网络规模较小时尚可接受，但在未来可能出现的具有更多路由跳数的超大规模空天地

立体化异构网络环境中,这一点则必须被认真考虑.

综上所述,为应对未来的空天地立体化异构网络带来的复杂挑战,我们认为减少跳到跳确认机制中ACK包的频率和大小将是一个有价值的研究方向.同时,作为算法演进过程中的折中方案,端到端和跳到跳的机制相结合并自适应切换的方案也展现出了良好的前景.在未来的研究中,我们计划继续深入研究这些问题,以期找到更加高效且稳定的传输控制方法.

5 结 论

在本文中,我们针对空天地立体化异构网络高动态性带来的传输控制挑战,提出了一种新型的传输控制方法——HWCTC.该方法的特点是以跨层协作的视角看待经典的传输控制问题,并且创新地将网络层的路由重配置过程与传输层的确认、拥塞控制机制相结合,通过自适应的策略来应对复杂网络环境带来的不确定挑战.与现有的方法不同,我们将数据流的传输层信息跨层引入网络层的路由节点递增构建中,同时在传输层设计与网络层相关的跳到跳确认机制,因此HWCTC能够确保发送的数据流在网络中"无环无阻".在实验部分我们介绍了一系列仿真实验,结果表明,与经典的Reno和Cubic方法相比,HWCTC在各种网络条件下都表现出了显著的性能提示,展现出了动态环境下的传输潜力,实验结果证明其能够应对空天地立体化异构网络带来的高丢包和网络跳数增加带来的挑战.在未来的工作中将研究如何减少跳到跳确认机制带来的开销,从而进一步提高传输控制方法的实用性.

作者贡献声明: 季翔负责文献调研、撰写论文并完成相关实验;许长桥负责确定论文思路和具体方案,并修改论文;张宏科负责对论文学术性和技术性内容进行审阅和关键性修订.

参 考 文 献

[1] ITU-Radio communications sector. Future technology trends of terrestrial international mobile telecommunications systems towards 2030 and beyond, Report M. 2516-0 [R]. Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, 2022

[2] Liu Jiajia, Shi Yongpeng, Fadlullah Z M, et al. Space-air-ground integrated network: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2714−2741

[3] Floyd S, Fall K. Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(4): 458−472

[4] Li Ye, Chen Liang, Su Li, et al. Pepesc: A TCP performance enhancing proxy for non-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 23(4): 3060−3076

[5] Zhang Peiying, Chen Ning, Shen Shigen, et al. AI-enabled space-air-ground integrated networks: Management and optimization[J]. IEEE Network, 2023, 1(4): 1−7

[6] He Jingchao, Cheng Nan, Yin Zhisheng, et al. Service-oriented network resource orchestration in space-air-ground integrated network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1): 1162−1174

[7] Zhang Hongke, Feng Bohao, Quan Wei. Fundamental research on smart integrated network[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(5): 977−982 (in Chinese)
(张宏科,冯博昊,权伟. 智融标识网络基础研究[J]. 电子学报, 2019, 47(5): 977−982)

[8] Deng Xia, Chang Le, Zeng Shouyuan, et al. Distance-based back-pressure routing for load-balancing LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1): 1240−1253

[9] Cao Xuelin, Yang Bo, Yuen Chau, et al. HAP-reserved communications in space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8): 8286−8291

[10] Huang Chong, Chen Gaojie, Xiao Pei, et al. Joint offloading and resource allocation for hybrid cloud and edge computing in SAGINs: A decision assisted hybrid action space deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(5): 1029−1043

[11] Bankey V, Sharma S, Ramabadran S, et al. Physical layer security of HAPS-based space–air–ground-integrated network with hybrid FSO/RF communication[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(4): 4680−4688

[12] Cheng Nan, Quan Wei, Shi Weisen, et al. A comprehensive simulation platform for space-air-ground integrated network[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 178−185

[13] Tang Fengxiao, Wen Cong, Chen Xuehan, et al. Federated learning for intelligent transmission with space-air-ground integrated network toward 6G[J]. IEEE Network, 2023, 37(2): 198−204

[14] Liu Dong, Zhang Jiankang, Cui Jingjing, et al. Deep learning aided routing for space-air-ground integrated networks relying on real satellite, flight, and shipping data[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 29(2): 177−184

[15] Eiza M H, Raschellà A. A hybrid SDN-based architecture for secure and QoS aware routing in space-air-ground integrated networks (SAGINs)[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2023: 1−6

[16] Yang Yunshan, Dai Lin. Stability region and transmission control of multi-cell Aloha networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(9): 5348−5364

[17] Henderson T R, Katz R H. Transport protocols for Internet-compatible satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(2): 326−344

[18] Irio L, Oliveira R, Bernardo L. Aggregate interference in random waypoint mobile networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(6): 1021−1024

[19] Abbasloo S, Yen Chen-Yu, Chao H J. Classic meets modern: A pragmatic learning-based congestion control for the Internet[C]//Proc of the Annual Conf of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (SIGCOMM'20). New York: Association for Computing Machinery, 2020: 632–647

[20] Cardwell N, Cheng Yuchung, Gunn C S, et al. BBR: Congestion-based congestion control[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(2): 58−66

[21] Kim Y, Park H, Kim J H, et al. Fairness PEP solution for satellite TCP[C]//Proc of Int Conf on Ubiquitous and Future Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 83−85

[22] Lee K H, Jang D H, Kim Y S, et al. Adaptive PEP based on location information for SOTM networks[C]//Proc of Int Conf on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 211−213

[23] Yu Chengxiao. Research on heterogeneous multi-path cooperative transmission mechanism under smart integrated network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023 (in Chinese).
(于成晓. 智融标识网络下异构多路协同传输机制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023)

[24] Sheng Min, Zhou Di, Liu Runzi, et al. Resource mobility in space information networks: Opportunities, challenges, and approaches[J]. IEEE Network, 2018, 33(1): 128−135

[25] Du Jun, Jiang Chunxiao, Zhang Haijun, et al. Auction design and analysis for SDN-based traffic offloading in hybrid satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(10): 2202−2217

[26] Guo Chao, Gong Cheng, Xu Haitao, et al. A dynamic handover software-defined transmission control scheme in space-air-ground integrated networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6110−6124

[27] Peng Yang, Juan Shao, Wen Luo, et al. TCP congestion avoidance algorithm identification[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(4): 1311−1324

[28] Cui Yukang, Chen Yaoqi, Yang Dong, et al. Resilient formation tracking of spacecraft swarm against actuation attacks: A distributed lyapunov-based model predictive approach[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(11): 7053−7065

[29] Li Ye, Feng Ru, Gao Ruifeng, et al. Fountain coded streaming for SAGIN with learning-based pause-and-listen[J]. IEEE Networking Letters, 2023, 5(1): 36−40



Ji Xiang, born in 1997. PhD candidate. His main research interests include network transmission control and network intelligence.

季　翔, 1997 年生. 博士研究生. 主要研究方向为网络传输控制、网络智能.



Xu Changqiao, born in 1977. PhD, professor, PhD supervisor. His main research interest includes innovative networking technologies.

许长桥, 1977 年生. 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为新型网络技术.



Zhang Hongke, born in 1957. PhD, professor, Academician of the Chinese Academy of Engineering. His main research interests include next-generation information network theory and key technologies.

张宏科, 1957 年生. 博士, 教授, 中国工程院院士. 主要研究方向为新一代信息网络理论与关键技术.