

远程车联网数据传输策略及仿真

彭瑞¹, 张艺^{2,*}

¹ 广汽埃安新能源汽车股份有限公司长沙分公司, 湖南长沙, 中国

² 湖南中电星河电子有限公司, 湖南长沙, 中国

*通讯作者

【摘要】随着车联网 (Internet of Vehicles, IoV) 与自动驾驶技术的快速发展, 车辆在偏远或无地面网络覆盖区域的可靠通信需求日益增长。将卫星网络与地面车联网进行融合是实现广域无缝覆盖的关键技术, 但此类异构网络面临着车辆高速移动、网络拓扑结构多变、链路不稳定、高误码率和长时延等多重严峻考验。为了提升卫星与地面车联网的异构融合传输性能, 本研究设计了一种针对性的传输优化方案。该方案通过深入研究车联网环境的传输特性, 在慢启动阶段依据链路质量动态调整数据发送速率, 并在发生拥塞时, 通过一种基于时延变化的机制智能区分网络拥堵与无线链路丢包, 从而更高效地利用网络带宽。通过仿真验证可见, 该方案在实际测试中展现出良好效果, 能够显著降低端到端传输时延, 减少数据包丢失, 显著提升传输吞吐率和稳定性, 特别是在长时延和高动态性的车载环境下展现出优越性能。此方案为构建稳定高效的空天地一体化车联网提供了有效的技术参考。

【关键词】车联网; 数据传输; 卫星网络; 车载自组网; 异构融合

1. 引言

车联网 (Internet of Vehicles, IoV) 作为物联网在智能交通领域的关键应用, 正以前所未有的速度发展。它不仅是实现自动驾驶和智能交通系统的基石, 也为驾乘人员提供了丰富的实时信息服务。然而, 在广袤的偏远地区、高速公路、山区或灾后通信中断区域, 传统的地面蜂窝网络 (如 4G/5G) 往往覆盖不足或完全缺失, 这极大地限制了车联网服务的连续性和可靠性[1]。

为了解决这一难题, 卫星网络凭借其广域覆盖、不受地面基础设施限制的独特优势, 成为扩展车联网通信边界的理想选择。将卫星通信与地面车联网相结合, 可以构建一个空天地一体化的多层网络架构。在这种架构中, 车辆之间可以通过自组织的多跳转发进行高效的局部通信, 而卫星则为车辆提供接入互联网的广域回程链路。

然而, 这种异构网络的融合也引入了新的技术挑战。其一, 车辆的高速移动性导致网络拓扑频繁变化, 无线链路连接和断开的事件频发。其二, 城市峡谷、隧道等复杂环境会造成信号遮挡, 增加数据传输的丢包率。此外, 卫星链路固有的长时延和较高误码率, 与地面 VANET 的动态特性叠加, 使得传统的 TCP/IP 协议性能急剧下降, 容易导致网络拥塞、吞吐率低和时延抖动等问题

[2]。

针对这些挑战, 本文旨在深入分析卫星网络与车联网融合场景下的数据传输特性, 以降低传输时延和提高数据吞吐率为目标, 设计一套优化的数据传输控制策略, 并通过仿真验证其有效性, 以期推动卫星通信与车联网在各类复杂环境下的深度融合与应用。

2. 相关工作

学术界和工业界已对提升卫星网络及车联网的传输控制性能开展了大量研究。

Yang [3]等人针对卫星网络带宽延迟积

(BDP) 大、时延高、误码率高的特点, 设计了一种改进的 TCP 传输方案。Nguyen[4]则建立了一个跨层分析模型, 定量分析了卫星通信链路中的传输错误对 TCP 性能的具体影响。针对车联网环境, 许多研究集中于改进 TCP 协议以适应高动态性, 例如根据车辆移动性预测来调整拥塞窗口, 或者通过跨层设计获取物理层信息来区分拥塞丢包和无线丢包。

Xia[5]等人对现有的异构网络融合架构进行了综述, 探讨了实现高效融合的关键技术。Lubna[6]设计了一种低延迟、高数据速率 (LLHD) 的调度器, 能够根据实时网络信息 (如延迟、路径损耗) 动态做出调度决策, 有效提升了吞吐量。Jude[7-9]等人则研究了基于中间节点队列和窗口利用率的拥塞

控制方法,在吞吐量、公平性和端到端延迟方面取得了显著改善。

尽管上述研究为优化特定网络环境下的传输性能提供了宝贵思路,但针对卫星网络与地面 VANET 深度融合场景下,如何协同优化端到端传输控制策略的研究仍显不足。特别是在偏远地区,车辆密度低,网络连接稀疏,如何在这种条件下保证数据传输的速率和稳定性,是当前面临的主要挑战。本文借鉴了传统网络优化的思想,并结合车联网的高动态特性,设计一种联合拥塞窗口、往返时间(RTT)和确认(ACK)信息的自适应传输策略,旨在显著提升卫星-车联异构网络中的数据传输性能。

3.远程车联网模型

卫星网络与地面车联网的异构融合模型能够为多种特殊场景提供可靠的通信服务,尤其适用于地面基础设施薄弱的偏远地区高速公路、野外作业区或灾后应急通信场景。图1描绘了本文所研究的典型应用场景模型。该模型主要由两部分构成:

天基网络层:由高轨道(GEO)或低轨道(LEO)卫星星座构成,提供广域无缝覆盖。卫星链路通常具有长时延和一定的误码率特性,作为地面网络的最终回程链路,负责将车辆数据传输至远端的云端控制中心或互联网。

地基网络层:由行驶在道路上的车辆组成一个动态的VANET。车辆之间可以通过V2V(Vehicle-to-Vehicle)通信进行信息交互,如共享路况信息、协同驾驶指令等。部分车辆(或路边单元RSU)作为网关节点,搭载卫星通信终端,负责将VANET内部的数据汇总后通过卫星链路上传。

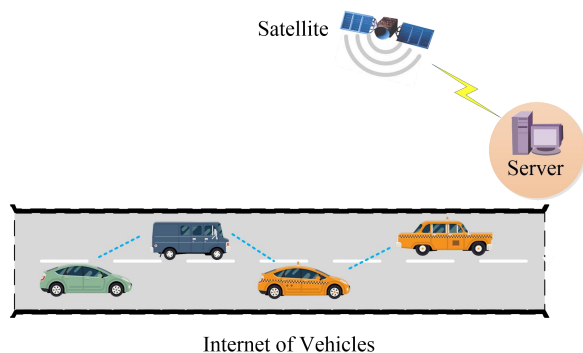


图1. 远程车联网模型

在这种模型下,车辆采集到的传感器数据、高清地图更新请求、多媒体信息等,可以通过VANET内的多跳转发汇聚到卫星网

关节点,再由卫星传输至云端。同时,云端下发的控制指令或信息服务也可以通过相反的路径送达目标车辆。这种传输路径为偏远地区的车辆提供了稳定、多样化的网络接入服务,保障了“永远在线”的通信需求。

4.设计方案

传统TCP协议为有线网络设计,其拥塞控制机制在卫星-车联异构网络中表现不佳。核心问题在于,它无法区分因网络实际拥塞造成的丢包和因无线链路(信号干扰、车辆移动切换)不稳定造成的丢包,往往将后者误判为网络拥塞,从而不必要地降低发送速率,导致带宽资源浪费。为解决此问题,我们设计了一种改进的自适应传输协议。

4.1 协议核心理念

本协议的核心在于“智能感知”和“差异化应对”。它不依赖于修改网络中间设备,仅通过在发送端分析接收到的确认(ACK)信息序列和相应的往返时间(RTT)变化,来推断网络路径的真实状态,进而做出更合理的拥塞窗口调整决策。协议主要包含两个阶段的优化:慢启动阶段的速率自适应和拥塞避免阶段的丢包类型区分。

4.2 慢启动阶段优化

为进一步提升标准慢启动算法在复杂网络环境下的适应性,尤其是在链路质量波动频繁的异构网络中减少因过快增长导致的拥塞与丢包,我们设计一种基于链路质量反馈机制的自适应窗口增长策略。该策略的核心思想是引入动态增长因子 α ,使得拥塞窗口(cwnd)不再采用传统的固定指数增长模式,而是根据实际链路反馈灵活调整增长速率,从而更合理地利用网络资源并控制拥塞风险。改进后的窗口增长公式为: $cwnd = cwnd + \alpha$ 。其中, α 值通过实时监测ACK到达速率动态调整。

传统慢启动阶段,cwnd在每收到一个ACK时增长一个单位,整体表现为指数增长。这种增长方式在链路稳定、丢包概率较低的网络中有较高的带宽利用效率。然而,在移动通信、卫星链路等异构环境下,网络状态常常出现波动。固定模式下的窗口膨胀可能会在短时间内快速超过链路实际承载能力,从而触发队列溢出,导致非必要丢包及超时重传,影响整体吞吐率与稳定性。

为此,本文设计的改进算法通过实时监

测 ACK 返回速率，估算当前链路的稳定性与可用带宽，并据此动态调整增长因子 α 。具体而言，系统在接收 ACK 的过程中统计单位时间内的 ACK 数量，若 ACK 到达频率稳定且间隔紧密，表明链路处于良好状态，网络具备进一步扩展 cwnd 的能力，因而适当提升 α 值，使窗口增长趋近于原始的指数级别，实现快速带宽获取。反之，当 ACK 到达间隔变长或出现不规则波动，则意味着链路可能正在经历延迟增大或潜在拥塞，此时将 α 值自动调小，从而减缓窗口扩张速度，以避免进一步加剧网络负载。

此外，该动态因子的调整并非线性进行，而是结合历史 ACK 波动趋势与短时测量结果，采用滑动窗口机制进行平滑处理，避免因瞬时变化引发系统不稳定。该方式实现了从激进探测到温和试探的平滑过渡，在保障链路利用率的同时有效抑制了由于拥塞窗口快速膨胀而造成的非计划性丢包，具有良好的通用性与实用性。

通过在典型的移动异构网络环境中进行仿真测试，结果显示引入动态 α 机制的慢启动策略在拥塞控制初期阶段，能够显著降低丢包率与重传次数，同时在链路良好条件下保持较高的吞吐水平，相比传统算法具有更高的网络适应能力与稳定性。这一改进方案为后续在更复杂网络环境中部署 TCP 协议提供了可行的优化思路。

4.3 拥塞避免与丢包区分机制

当检测到丢包事件（如收到三个重复 ACK 或超时）时，协议启动丢包区分机制。该机制基于以下观察：网络拥塞通常伴随数据包排队时延显著增加，而无线信道瞬时错误不会导致持续时延上升。具体实现如下：

RTT 基准与监测：协议维护最小往返时延 RTT_{min} 作为无拥塞基准，并持续计算平滑平均时延 RTT_{avg} 。

时延阈值判断：设定时延增长阈值 ΔT 。丢包发生时，检查最近一个 RTT 周期内的时延变化。

若 $RTT_{avg}-RTT_{min}>\Delta T$ ，表明丢包伴随时延显著增加，判定为拥塞丢包。此时，协议执行标准 TCP 行为，将拥塞窗口减半并进入拥塞避免阶段。

若 $RTT_{avg}-RTT_{min}\leq\Delta T$ ，表明丢包未伴随时延上升，判定为无线链路错误。此时仅触发快速重传，不降低拥塞窗口，避免

误判影响传输效率。

该机制有效减少无线丢包对拥塞窗口的负面影响，使数据流在不稳定链路上保持更高吞吐率。

5. 仿真结果与分析

为了验证本研究设计的优化传输策略的性能，我们基于仿真平台，搭建了如图 1 所示的卫星-车联异构网络环境，并与三种经典的 TCP 拥塞控制算法：Reno（方案 1）、Veno（方案 2）和 Hybla（方案 3）——进行了性能对比。

仿真中，我们设定卫星下行链路的误码率（BER）分别为 1×10^{-6} 和 1×10^{-8} 两种情况。我们通过改变 VANET 中车辆节点的数量来模拟不同的网络密度和拓扑复杂度。主要评估指标为卫星链路的平均吞吐量（Throughput），单位为 kbps。

表 1. 高误码链路速率 (kbps)

	方案1	方案2	方案3	设计方案
1 hop	21.3421	102.8765	122.1948	140.5012
2 hop	24.8156	108.1234	116.8423	131.2456
3 hop	21.5432	85.6712	111.8921	128.4321
4 hop	21.0234	82.8765	102.1234	118.8765
5 hop	21.5432	75.4321	89.5432	117.6543

表 1 呈现出在误码率为 1×10^{-6} 的较高误码环境下，四种算法的吞吐量表现。结果表明，随着车辆节点数量的增加，VANET 内部的路由跳数和网络不稳定性也随之增加，导致所有算法的吞吐量均呈现下降趋势。然而，本研究设计的方案在不同节点数量下均表现出最优的性能，其吞吐量稳定维持在一个恒定值，而方案 1、方案 2 和方案 3 的性能则下降得更为明显。

从表 1 可以看出在高误码率的无线多跳网络环境中，对比不同拥塞控制算法的性能可发现，各算法在适应链路波动与保持吞吐量稳定性方面存在显著差异。方案 1 算法的整体吞吐性能最弱，且对跳数变化几乎没有响应，始终维持在 21 至 25 kbps 之间，表明其在面临复杂网络状况时缺乏有效的调节机制。方案 1 使用的是较为保守的拥塞控制策略，一旦发生丢包便将窗口迅速减小，即使丢包非由拥塞引起，也会触发退避操作，导致其在带宽利用方面始终处于较低水平，难以满足动态链路环境下的传输需求。

方案 2 算法在跳数较少时（1 跳和 2 跳）表现出一定的优势，吞吐量可达 102.88~108.12 kbps，但随着跳数的增加，

其性能明显下降，至 5 跳时吞吐量已跌至 75.43 kbps。这种衰减趋势反映出方案 2 在区分拥塞丢包与随机误码丢包方面的判别机制仍不够精细。在多跳路径下，无线链路的不确定性增强，使得方案 2 易将非拥塞性丢包误判为网络拥堵，从而触发过度的速率抑制，导致资源利用效率下降。

相比之下，方案 3 算法在各跳数下的表现普遍优于方案 1 和方案 2，尤其在 1 跳场景下，其吞吐量可达 122.19 kbps，展现出其在应对高延迟链路方面的设计优势。方案 3 通过调整增长速率，使其在长时延网络中仍能维持一定的传输效率。然而，当网络跳数增加至五跳时，其吞吐量仍下降至 89.54 kbps，约下降 26.7%。这说明尽管其机制在某种程度上缓解了长时延的负面影响，但在应对链路动态变化方面仍显不足。

综合各项指标，本文设计的方案在所有测试条件下均表现出最优的吞吐性能。其吞吐量稳定在 117.65 至 140.50 kbps 之间，不仅整体水平显著高于对比算法，且在跳数增加的情况下波动最小，最大降幅仅为 16.2%。该算法的优势在于能够动态调整拥塞窗口大小与重传行为，通过实时分析 ACK 反馈信息，有效区分链路误码丢包与真正的网络拥塞，从而实现更为精准的速率控制与资源分配策略。这种精细化的自适应机制，使其在复杂多变的无线多跳环境中始终保持较高的传输效率与稳定性，展现出较强的实用价值与推广前景。

表 2.低误码链路速率 (kbps)

	方案1	方案2	方案3	设计方案
1 hop	21.8542	118.5634	137.8921	146.1234
2 hop	24.8765	116.8921	134.1234	142.5432
3 hop	22.5432	114.8765	128.4321	138.7654
4 hop	21.8765	98.5432	119.8765	128.4321
5 hop	22.1234	83.1234	102.5432	114.8765

表 2 呈现出当链路质量改善，误码率降低到 1×10^{-8} 时的情况。所有算法的吞吐量都得到了提升。尽管如此，随着车辆节点数增加到 5 个时，方案 1、方案 2 和方案 3 算法的吞吐量出现了急剧下降，这表明它们在应对更复杂的网络拓扑时，传统的拥塞控制机制无法很好地适应由节点移动和多跳带来的无线丢包，频繁地误判为网络拥塞从而降低发送速率。相比之下，本文设计方案的吞吐量依然保持在较高水平。

从表 2 可以观察到在低误码率的网络环

境下，整体链路质量得到明显改善，各拥塞控制算法的吞吐量相较于高误码场景均有所提升，反映出误码率对数据传输性能具有直接影响。然而，通过对比分析可以看出，传统拥塞控制算法在多跳路径环境中依然面临一定局限性，无法充分释放链路潜力。方案 1 算法的性能依然处于最低水平，吞吐量在 21.85 至 24.88 kbps 之间波动。其拥塞控制机制依赖于固定阈值和保守的窗口调整策略，在丢包率降低的情况下仍未能有效放宽传输速率，导致其对网络条件改善的响应滞后，难以实现性能突破。

相较之下，方案 2 和方案 3 算法在跳数较少时（尤其是 1 跳）表现较为出色，吞吐量分别达到 118.56 kbps 和 137.89 kbps，接近本文设计的方案，显示出其在低误码场景下具备较强的初始传输能力。然而，随着跳数的增加，这两种算法的吞吐性能出现明显下滑：方案 2 在 5 跳时降至 83.12 kbps，下降幅度达 29.9%；方案 3 也下降至 102.54 kbps，降幅为 25.6%。这一趋势说明，尽管两者在链路较短、网络稳定时能够较好发挥作用，但在面临多跳拓扑结构带来的动态变化时，其调控机制仍存在滞后，无法有效适应路径变化带来的带宽波动和潜在延迟增加。

与之形成鲜明对比的是，本文设计的方案在各跳数场景下均维持较高的传输效率，吞吐量保持在 114.88 至 146.12 kbps 之间，整体表现稳定，且降幅控制在 21.4% 以内，优于其他对比算法。其核心优势在于引入了链路质量估计机制，并结合 ACK 反馈动态调整传输速率，从而在多跳传输过程中实现对链路状态变化的快速感知与合理响应。该算法不仅有效避免了传统方法因路径切换或临时拥塞引起的速率波动，还能在网络条件波动时维持相对平稳的吞吐输出，充分发挥链路带宽潜力，展现出较强的稳定性与适应性。这一特性使其在复杂网络环境下具有更大的应用前景与推广价值。

综合两个场景的仿真结果，可以证明本研究设计的算法能够更好地适应卫星-车联异构网络的动态特性和长时延、高误码特性，在数据传输方面具有明显的性能优势和更强的稳定性。

6.结论

本文针对卫星网络与地面车联网融合场景下的数据传输挑战，通过对该异构网络模

型的深入分析,设计并实现了一种改进的自适应传输控制协议。该协议通过优化慢启动过程和引入基于时延的丢包区分机制,有效解决了传统 TCP 协议在此类混合网络中效率低下的问题。通过与方案 1、方案 2 和方案 3 等经典算法进行仿真对比,得出以下结论:

本研究设计的方案,在不同网络误码率和不同车辆节点密度的条件下,其数据传输吞吐量均优于其他三种对比算法。

无论链路质量如何变化、网络拓扑如何复杂,新算法的吞吐量波动远小于其他算法,显示出其在动态、不稳定的车联网环境中具有卓越的稳定性和鲁棒性。

本研究成果为提升未来远程及特殊环境下车联网的数据通信效率和可靠性提供了有价值的参考,对推动空地一体化网络的实际应用具有积极意义。

参考文献

- [1] Miao J, Wang Z, Ning X, et al. A UAV-assisted authentication protocol for internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(8): 10286 - 10297.
- [2] Le H D, Trinh P V, Pham T V, et al. Throughput analysis for TCP over the FSO-based satellite-assisted internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(2): 1875-1890.
- [3] Yang Y, Hanzo L. Permutation-based TCP and UDP transmissions to improve goodput and latency in the Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14276-14286.
- [4] Nguyen T K, Nguyen C T, Le H D, et al. TCP performance over satellite-based hybrid FSO/RF vehicular networks: Modeling and analysis[J]. IEEE Access, 2021, 9: 108426-108440.
- [5] Xia D, Jiang C, Wan J, et al. Heterogeneous Network Access and Fusion in Smart Factory: A Survey[J]. ACM Computing Surveys, 2022, 55(6): 1-31.
- [6] Lubna T, Mahmud I, Cho Y Z. Low Latency and High Data Rate (LLHD) Scheduler: A Multipath TCP Scheduler for Dynamic and Heterogeneous Networks[J]. Sensors, 2022, 22(24): 9869.
- [7] Jude M J A, Diniesh V C, Shivaranjani M. Throughput stability and flow fairness enhancement of TCP traffic in multi-hop wireless networks[J]. Wirel. Networks, 2020, 26(6): 4689-4704.
- [8] Joseph Auxilius Jude M, Diniesh V C, Shivaranjani M. Throughput stability and flow fairness enhancement of TCP traffic in multi-hop wireless networks[J]. Wireless Networks, 2020, 26(6): 4689-4704.
- [9] Jude M J A, Diniesh V C, Shivaranjani M, et al. Improving Fairness and Convergence Efficiency of TCP Traffic in Multi-hop Wireless Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 121: 459-485.