

MPTCP 多路径传输技术在网络性能优化中的应用研究

孙乐康

(中移在线服务有限公司 郑州 450001)

摘要 文中研究了基于自适应拥塞控制的 MPTCP 多路径传输技术,以提高网络性能。首先,介绍了 MPTCP 的基本原理及其在多路径数据传输中的优势。其次,提出了一种创新的自适应拥塞控制方法,通过动态调整路径权重和基于反馈的流量控制策略来优化 MPTCP 的性能。为验证该方法的有效性,使用 NS-3 构建了多路径传输的仿真环境并进行了实验。实验结果表明,自适应 MPTCP 在吞吐量、延迟和丢包率等关键指标上均优于传统 TCP 方法,为网络传输技术的优化提供了有效的参考。

关键词: 多路径传输;网络性能;拥塞控制;自适应

中图分类号 TN929.5

Research on the Application of MPTCP Multipath Transmission Technology in Network Performance Optimization

SUN Lekang

(China Mobile Online Service Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract In this paper, MPTCP multi-path transmission technology based on adaptive congestion control is studied to improve network performance. Firstly, the basic principle of MPTCP and its advantages in multi-path data transmission are introduced. Secondly, an innovative adaptive congestion control method is proposed to optimize the performance of MPTCP by dynamically adjusting path weights and feedback-based flow control strategy. To verify the effectiveness of this method, a simulation environment for multi-path transmission is constructed using NS-3 and experiments are carried out. The experimental results show that adaptive MPTCP outperforms traditional TCP methods in key indicators such as throughput, delay and packet loss rate, providing an effective reference for the optimization of network transmission technology.

Key word Multi-path transmission, Network performance, Congestion control, Self-adaption

0 引言

随着互联网应用的多样化和数据传输需求的不断增加,传统的单路径传输方式逐渐暴露出带宽利用率低、处理能力有限等问题^[1]。MPTCP(Multipath TCP)是一种可以在多个路径上同时传输数据的协议,为提高网络资源利用率和传输效率提供了一种新的思路^[2-3]。因此,深入研究 MPTCP 多路径传输的原理及其优化方法,对于推动网络技术的发展具有重要意义。

目前,MPTCP 多路径传输技术已成为学术界和工业界关注的重要课题。研究者围绕着多路径传输的性能提升^[4-5]、路径选择算法^[6]、拥塞控制机制^[7-8]等开展了大量研究。然而,现有方法在实际应用中仍存在一些挑战,拥塞控制方法在动态网络环境中的适应性较差,难以充分发挥 MPTCP 的多路径传输优势。

针对上述问题,本文分析了 MPTCP 多路径传输的基本原理,在此基础上提出了一种自适应拥塞控制方法。该方法通过动态调整传输路径上的流量分配策略来优化 MPTCP 的传输效率。最后,本文利用 NS-3(Network Simulator 3)网络仿真工具^[9-10]构建了模拟环境,对所提方法进行了测试与验证。

1 MPTCP 多路径传输的基本原理

与传统的单路径 TCP 协议相比, MPTCP 允许在同一 TCP 连接中并行使用多条路径。MPTCP 通过在传输层对多条路径进行协调与管理,以动态选择最佳路径并优化数据流量分配,达到增强传输性能、降低延迟、提升数据传输稳定性的目标。这种方法特别适用于复杂和动态变化的网络环境,其原理如图 1 所示。

MPTCP 可以在多个网络路径上建立子连接。完成初始的 TCP 3 次握手后, MPTCP 会通过协商来确认可用的多

作者简介: 孙乐康(1992—),本科,研发工程师,研究方向为软件开发。

个路径。在路径管理中,该方法会监控每条路径的质量,包括带宽、延迟、丢包率等,且可以动态添加或移除路径,以提高数据传输效果。数据在传输时会被分割成多个数据块,分别通过不同的路径传输。然后,MPTCP会在接收端重新组合这些数据块并确保数据的完整性。在该过程中,可采用特定的拥塞控制算法来调节通过不同路径的数据流量,以避免过度拥塞和数据丢失,并实时选择最佳路径进行数据传输,提高传输效率。

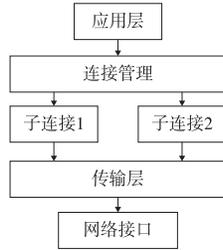


图1 MPTCP的基本原理

2 基于自适应堵塞控制的优化方法

为优化MPTCP的性能,本文提出了一种自适应拥塞控制方法。该方法通过引入动态权重调整机制来优化多路径数据传输中的拥塞控制策略,以实现更高效的网络资源利用和更稳定的传输性能。设网络中有 N 条路径,每条路径的传输速率为 $r_i(i=1, 2, \dots, N)$,路径的拥塞程度可以通过拥塞窗口 W_i 表示。为简化分析,需要定义每条路径的拥塞度 C_i ,如式(1)所示:

$$C_i = \frac{1}{W_i} \quad (1)$$

为优化数据分配,需定义路径 i 的权重 w_i ,如式(2)所示:

$$w_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^N C_j} \quad (2)$$

路径权重 w_i 表示在总传输流量中,路径 i 所占的比例。根据权重调整机制,数据流量 F_i 在路径 i 上的分配比例如式(3)所示:

$$F_i = w_i \cdot F_{\text{total}} \quad (3)$$

其中, F_{total} 是总数据流量。

该方法可以利用网络状态反馈信息,定义路径 i 的反馈信号 Δ_i 如式(4)所示:

$$\Delta_i = \alpha \cdot \frac{\partial C_i}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial r_i}{\partial t} \quad (4)$$

其中, α 和 β 是权重系数,反映对拥塞度和传输速率变化的敏感程度。

根据反馈信号,更新路径的流量控制参数 λ_i 如式(5)所示:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i(t-1) + \gamma \cdot \Delta_i \quad (5)$$

其中, γ 是调整步长。

为验证该方法的有效性,可以在拥塞程度不断变化的情况下明确系统的稳定性和传输效率。设 $W_i(t)$ 为 t 时刻路径 i 的拥塞窗口,基于上述权重调整机制和反馈算法,路径 i 的拥塞度变化速率如式(6)所示:

$$\frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = -\frac{1}{W_i^2} \cdot \frac{\partial W_i(t)}{\partial t} \quad (6)$$

引入动态权重调整机制,路径的实际传输速率 $r_i(t)$ 如式(7)所示:

$$r_i(t) = \frac{F_i(t)}{w_i(t)} = \frac{F_{\text{total}}}{w_i(t)} \quad (7)$$

根据反馈调整算法,路径的流量控制参数调整如式(8)所示:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i(t-1) + \gamma \cdot \left(\alpha \cdot \frac{\partial C_i(t)}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial r_i(t)}{\partial t} \right) \quad (8)$$

由于 $\frac{\partial C_i(t)}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial r_i(t)}{\partial t}$ 会被动态调整,因此能有效地平衡不同路径的传输流量,以减少网络拥塞,提升网络的整体性能。

3 实验与分析

NS-3是一种开源的网络仿真工具,可以提供一个灵活而高效的仿真环境,用于模拟各种网络协议和网络系统的行为。其采用模块化设计,能提供丰富的网络协议模型,包括TCP、UDP、IP、无线网络协议等,也能支持多种网络场景的仿真。另外,该工具能模拟真实世界中的网络环境,包括网络拓扑、流量模式和拥塞控制机制。为测试基于自适应拥塞控制方法的MPTCP在多路径传输中的性能,本实验使用NS-3构建了仿真环境进行实验。(1)定义网络拓扑。网络拓扑包括源节点(S)、目标节点(D)和中间路由节点(R1、R2),链路参数如表1所列。(2)配置MPTCP参数。在NS-3中配置MPTCP协议,设置多路径传输的相关参数。本文应用的自适应拥塞控制算法的拥塞度计算系数 α 为0.5,传输速率反馈系数 β 为0.5,调整步长 γ 为0.1。(3)创建流量生成器。使用UDP流量模型,流量生成速率为2 Mbps,数据包大小为512 Bytes。

表1 链路参数设置

	路径	带宽/Mbps	延迟/ms
链路1	S到R1	10	10
链路2	S到R2	05	20
链路3	R1到D	15	5

在仿真过程时,设置仿真总时长为300 s,并基于链路1和链路2对比了传统TCP和本文方法的有效性。实验结果如表2所列。

可以看出,相较于传统的TCP,本文方法在网络性能上具有显著优势。具体而言,在吞吐量方面,自适应MPTCP的平均吞吐量达到了8.6 Mbps,而传统TCP的平均吞吐量仅为5.0 Mbps。这表明自适应MPTCP在多路径数

据传输任务中能更有效地利用网络带宽,提高传输效率。从吞吐量来看,自适应 MPTCP 的表现也优于传统 TCP。自适应 MPTCP 的最大吞吐量为 10.2 Mbps,而传统 TCP 仅为 7.1 Mbps。自适应 MPTCP 的最小吞吐量为 6.1 Mbps,传统 TCP 则仅为 3.5 Mbps。在延迟方面,自适应 MPTCP 的平均延迟为 18.6 ms,显著低于传统 TCP 的 26.3 ms。这表明自适应 MPTCP 在多路径选择和数据分流的过程中能有效降低数据传输延迟,提升用户体验。在丢包率方面,自适应 MPTCP 的丢包率显著低于传统 TCP。自适应 MPTCP 的丢包率为 1.2%,而传统 TCP 为 2.4%。这表明自适应拥塞控制方法能更有效地处理网络拥塞,避免数据丢失,保证数据的可靠传输。

表 2 实验结果

方案	路径	平均 吞吐量/ Mbps	最大 吞吐量/ Mbps	最小 吞吐量/ Mbps	平均 延迟/ms	丢包 率/%
传统	1	5.2	7.1	3.8	25.4	2.3
TCP	2	4.8	6.9	3.5	27.1	2.6
本文	1	8.7	10.2	6.3	18.3	1.1
方法	2	8.5	10.0	6.1	18.8	1.2

自适应 MPTCP 在吞吐量、延迟、丢包率等关键指标上的表现均优于传统 TCP。数据表明,基于自适应拥塞控制方法的 MPTCP 能提升多路径传输任务的性能,具有较强的实用价值,值得推广应用。

4 结语

本文探讨了基于自适应拥塞控制的 MPTCP 技术,并通过 NS-3 仿真验证了其在实际应用中的性能表现。研究表明,自适应拥塞控制方法能显著提升 MPTCP 的多路径传输

效率,在吞吐量、延迟、丢包率方面优于传统 TCP。通过动态权重调整和反馈调节策略,该方法能更有效地应对网络条件的变化,以调整数据流量的分配,减少网络拥塞。此外,实验结果也突出了 MPTCP 在高带宽和低延迟环境中的优势,验证了该方法的应用潜力。未来,可以进一步探讨该方法在更复杂网络环境中的表现,并探索其他潜在的优化方向。总体而言,该方法不仅为多路径传输技术的优化提供了新的思路,也为网络协议的改进提供了支撑。

参考文献

[1] 董绘,王晓喃.单路径与多路径路由协议性能分析[J].常熟理工学院学报,2013,27(2):122-124.

[2] 薛开平,陈珂,倪丹,等.基于 MPTCP 的多路径传输优化技术综述[J].计算机研究与发展,2016,53(11):2512-2529.

[3] 符发,周星,谭毓银,等.多场景的 MPTCP 协议性能分析研究[J].计算机工程与应用,2016,52(5):89-93,98.

[4] 黄辉.基于权重的 MPTCP 数据调度算法设计[J].软件,2016,37(2):77-80.

[5] 叶宁,董芊芊,段桂华,等.基于数据流特性的 MPTCP 数据流调度算法研究[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(7):1691-1699.

[6] 王琨,周星,周峰,等.基于 MPTCP 路径管理算法性能分析[J].海南大学学报(自然科学版),2017,35(3):211-218.

[7] 刘骥,谭毓银,符发,等.MPTCP 与 CMT-SCTP 拥塞控制机制研究[J].计算机工程,2015,41(4):117-124.

[8] 王竹,袁青云,郝凡凡,等.基于链路容量的多路径拥塞控制算法[J].通信学报,2020,41(5):59-71.

[9] 张登银,张保峰.新型网络模拟器 NS-3 研究[J].计算机技术与发展,2009,19(11):80-84.

[10] 茹新宇,刘渊.网络仿真器 NS3 的剖析与探究[J].计算机技术与发展,2018,28(3):72-77,82.

(上接第 69 页)

4 结语

将智能优化算法应用于解决复杂的室内信号部署问题,可以显著提高用户体验。通过优化信号覆盖与用户体验,能为现代通信技术的进一步发展和应用提供宝贵的经验。未来,这类优化方法将在更广泛的场景中发挥作用,进一步提高通信网络质量与用户体验。

参考文献

[1] 梁国寿,湛亮书,刘宓,等.基于共建共享模式的 5G 室内分布系统组网技术[J].信息技术与信息化,2024(9):144-147.

[2] 张婧,杨占春,唐俊,等.融合大数据技术的 4G/5G MRO 数据挖掘与应用研究[J].信息通信技术,2024,18(4):78-84.

[3] 湛晓明.通过 700 MHz 天线调整提升室内 5G 覆盖的研究及应用[J].电信工程技术与标准化,2024,37(8):60-66.

[4] 聂磊,朱立标,罗慧颖,等.基于 5G 室内定位的数字商贸应用研究[J].长江信息通信,2024,37(7):234-237.

[5] 肖潇,王强.针对低小场景的 5G 网络微分布覆盖解决方案[J].数字通信世界,2024(2):75-77.

[6] 乔楠婷,陶昕,李益锋,等.5G 信号在室内的传播模型分析与校正[J].信息通信技术,2024,18(1):79-84.

[7] 陈永霖.基于 5G 的室内分布系统规划与设计[J].无线互联科技,2023,20(3):81-83.

[8] 马颖.700 MHz 频段对于 5G 网络室内覆盖建设影响的分析[J].电信工程技术与标准化,2022,35(10):69-72.