

陈成兵, 张琳琳, 江凌云, 等. 基于多专家学习的 MPTCP 调度优化算法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(5): 19-26. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240503

基于多专家学习的 MPTCP 调度优化算法

陈成兵¹, 张琳琳², 江凌云¹

(1 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003; 2 南京邮电大学 理学院, 南京 210023)

摘要: 在多径传输控制协议 (Multipath TCP, MPTCP) 的支持下, 多网络接入设备能够聚合网络带宽, 提高网络利用率。然而, 利用 MPTCP 协议在多接入异构网络环境中传输数据时, 网络环境的不对称以及网络性能 (延迟、抖动) 之间的差异, 必然会导致接收端缓冲区阻塞的问题, 这将会造成网络传输性能的下降。针对上述问题, 现有的解决方案大都利用前向延迟展开对 MPTCP 数据包的调度, 然而这些对于延迟的计算并不能准确地反映真实的情况。因此, 本文提出了一种基于多专家学习前向延迟预测的 MPTCP 调度优化算法, 该算法通过建立的多专家学习模型对前向延迟做出预测, 基于预测到的前向延迟, 将数据包通过延迟补偿的方式调度到各个路径。仿真结果表明, 基于该方法的 MPTCP 调度优化算法相比于其他方法, 有效地降低了接收端缓冲区无序数据包的数量, 提高了吞吐量。

关键词: 多专家学习; 多径传输控制协议; 路径管理; 数据包调度; 前向延迟

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2024)05-0019-08

Multi-expert learning-based MPTCP scheduling optimization algorithm

CHEN Chengbing¹, ZHANG Linlin², JIANG Lingyun¹

(1 School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2 College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the rapid development of modern network technology, multi-network access devices have gradually become the mainstream. With the support of Multipath TCP (MPTCP), these multi-access devices can aggregate network bandwidth and improve network utilization. However, when using MPTCP protocol to transmit data in a multi-access heterogeneous network environment, the asymmetry of the network environment and the differences in network performance (latency, jitter) will inevitably lead to the problem of receiver buffer blocking, which will result in the degradation of network transmission performance. For these problems, most of the existing solutions utilize forward delay to expand the scheduling of MPTCP packets, but these calculations for latency do not accurately reflect the real situation. Therefore, this paper presents an MPTCP scheduling optimization algorithm based on multi-expert learning forward delay prediction, which predicts forward delay by establishing a multi-expert learning model, and schedules packets to each path through delay compensation based on the predicted forward delay. The simulation results show that the MPTCP scheduling optimization algorithm based on this method can effectively reduce the number of unordered packets in the receiver buffer and improve the throughput compared with other methods.

Key words: multi-expert learning; MPTCP; path manager; packet scheduling; forward delay

0 引言

随着互联网技术的不断发展, 工业互联网已经成为工业化和信息化融合的重要标志之一。作为一种新兴的网络技术, 工业互联网结合了工业系统、大数据分析 and 智能传感等技术, 极大地提高了工业生

产的质量、效率以及智能化水平, 加快了数字化转型的进程。近年来, 随着我国网络技术的不断发展, 5G 作为新一代宽带移动通信技术, 在各个领域得到了广泛的普及与应用, 多接入异构网络技术的不断发展为工业互联网对于低延迟传输的需求提供了一种新的解决方案^[1]。随着 5G、4G 以及 WiFi 网

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (92067202)。

作者简介: 陈成兵 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 多流并发, 网络分流; 张琳琳 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器学习, 信息处理。

通讯作者: 江凌云 (1971-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 下一代网络。Email: jiangly@njupt.edu.cn

收稿日期: 2023-04-17

络的融合与发展,配备多种网络接口的工业设备正迅速在工业生产中普及。通过使用 MPTCP 协议,这些设备能够聚合多个网络链路的带宽以及并发多路径数据传输,增加应用吞吐量^[2]。MPTCP 是一种基于 TCP 协议的多路径传输协议。与传统 TCP 只能在单个网络路径上传输数据不同,MPTCP 可以同

时利用多条网络路径传输数据,提高网络传输的可靠性和效率,更好地适应异构网络环境中的数据传输需求。当负责传输数据的主要路径发生故障时,MPTCP 能够将传输的数据流平滑地转移到另一条传输路径,一定程度上减少切换带来的性能损失,降低时延对传输的影响。MPTCP 架构如图 1 所示。

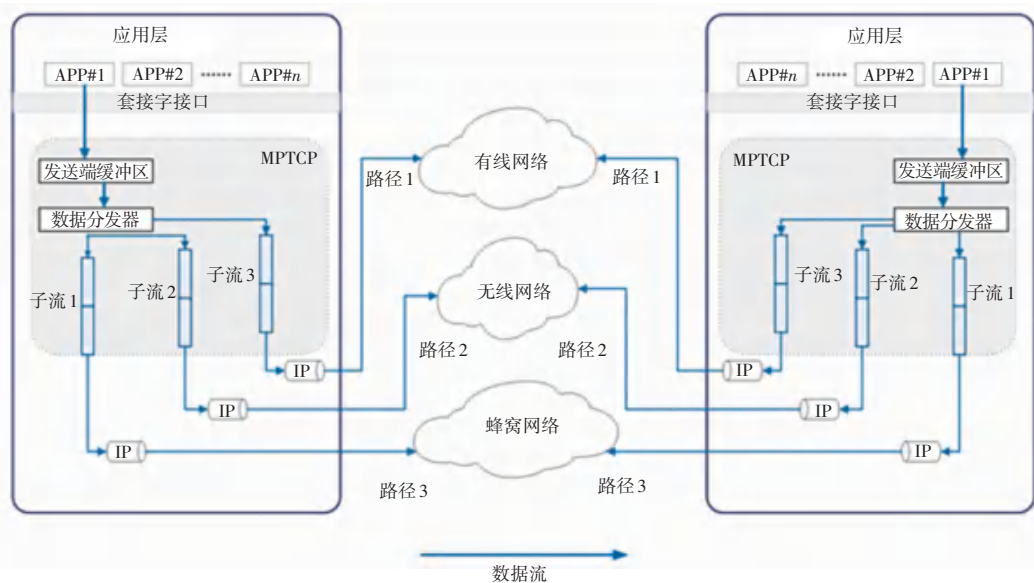


图 1 MPTCP 结构

Fig. 1 MPTCP structure

然而,由于异构网络中各接入网之间性能存在差异,同时考虑到不同路径在路径延迟、带宽和丢包率等方面的不同特性,使用 MPTCP 协议在不同路径上传输的数据分组会经历不相同的端到端的延迟,从而导致接收端缓冲区数据包序列号发生排序错误的问题,即乱序(Out of Order, OFO)^[3]问题。无线网络中的高传输错误率是 OFO 的另一个原因,如果具有较低序列的分组丢失、且不能及时到达接收器,则接收器可能不得不在等待丢失的分组时存储大量无序的分组。在受约束的接收端缓冲区中,将 OFO 的数据包重新排序可能会导致更严重的缓冲区阻塞。基于分组的调度可以快速地将所需负载分配到每个路径,但是当路径延迟不同时,同样会导致大量的数据包乱序。TCP 将这种重排序视为阻塞的标志,这将导致应用程序性能的下降。即使对于一些对延迟不敏感的、基于 UDP 的实时应用来说,数据包的重排序也可能导致明显的丢失,并加重接收端的缓冲区需求。当接收端缓冲区空间有限时,OFO 的数据包最终可能会占据整个缓冲区,造成 MPTCP 传输的中断,从而导致队首阻塞问题。在多接入异构网络环境中,由于 MPTCP 对 OFO 数据包的高敏感性,路径的不对称和分组丢失很大程

度上影响着 MPTCP 的性能,这些问题也将进一步影响工业互联网的服务质量(Quality of Service, QoS)指标,对工业生产和服务产生负面作用。

因此,针对上述问题,如何有效缓解因网络不对称产生的接收端缓冲区阻塞的问题,从而降低延迟以及提高吞吐量,是目前研究的重点和难点之一。

1 相关工作

近年来,MPTCP 技术得到各领域研究学者的广泛关注,针对 MPTCP 接收端缓冲区阻塞问题目前有多种优化方法。

为了解决重排序带来的重传和超时问题,提出了一种基于无序调度的有序到达调度(OSIA)。该调度利用发送时间差异来保持有序数据包到达,将最优流量调度公式化为一个约束优化问题,并通过本文提出的渐进充水解导出其闭合形式解^[4]。该方法降低了时间复杂度,减轻了重排序,提高了传输性能。然而,该方法并没有针对路径管理的问题做出相应的说明。Dong 等学者^[5]提出了一种新的基于管网编码的 MPTCP,通过使用创新的经济编码系数规则减少编解码延迟,解决无序数据包抵达问题。但该方法只考虑了编解码延迟带来的影响,缺乏对

整体传输延迟的考虑。针对大多数减轻OFO的方法都专注于补偿路径延迟差异,而没有考虑分组丢失影响的问题,提出了损失感知吞吐量估计调度器LATE^[3]。LATE综合考虑每个子流的路径特性和协议参数,包括往返时间(RTT)、拥塞窗口(cwnd)和丢失率,以预测在给定时间可以通过每个子流发送的数据量,并清晰地确定出哪些数据段应该分配给哪些子流。针对恒定比特率(CBR)和大容量流量,提出了一种MPTCP的新型调度器LAMPS,在选择子流同时考虑损耗和延迟,又根据子流的状态选择分段,为不同的业务实现稳定的性能,并显著减少不必要的带宽消耗,尤其是在突发性损失的情况下^[6]。然而,对于延迟敏感业务,该方法对性能的提升效果并不明显。

受瓶颈带宽和往返传播时间(BBR)的启发,Han等学者^[7]首先提出了耦合BBR,利用检测到的带宽来调整MPTCP连接中的发送速率。为了进一步提高性能,提出了一种自适应冗余和预测数据包(AR&P)调度器,以提高自适应性,并在高度动态的网络场景中保持数据包交付的有序性。该方法提高了吞吐量,在一些恶劣的环境下提高了鲁棒性并减少了无序数据包。针对车载异构网络,Luo等学者^[8]提出了一种可持续的基于前向延迟的多径传输路径调度方法,以解决多径传输问题。该方法的主要思想是根据发送方估计的前向延迟和吞吐量差异,通过并发路径调度数据包,但对于前向延迟的表达不能够反映真实的情况。Xue等学者^[9]提出了一种基于预测的MPTCP动态分组调度算法,利用TCP建模中的最大似然估计,来估计同时在其他路径上发送的数据量。Le等学者^[10]提出了一种基于前向延迟的MPTCP数据包调度算法,其中发送方

根据估计的前向延迟和吞吐量差异通过并发路径分配数据包,以解决数据包到达无序的问题。

Kim等学者^[11]使用MPTCP路径管理的方法缓解缓冲区阻塞的问题,提出基于接收缓冲区的路径管理(RBPM),来管理MPTCP的多条路径,该方法基于可用的接收缓冲区大小和多条路径的不同特性进行操作。RBPM方案估计无序数据包,提前预测缓冲区阻塞问题,并停止在性能较差的路径上传输。Chen等学者提出一种基于机器学习的路径管理方法,通过机器学习模型计算的决策来管理多个连接之间的路径使用。结果表明,该方法有效地降低了时延。但机器学习的方法只针对路径进行管理,缺乏对数据包调度的研究。现有的MPTCP解决方法通常使用静态数学模型来评估路径质量,并禁止在质量较差的路径上传输,然而这些方法在高度复杂动态的网络环境中效果较差^[12]。Cao等学者提出了一种学习驱动的延迟感知MPTCP变体(I2-MPTCP),该方法利用强化学习的方法管理MPTCP路径,但并没有对数据包如何调度做出具体说明^[13]。

本文针对上述方法中存在的问题,通过多专家学习的方法对前向延迟做出预测,优化了路径管理和调度方法,降低了网络性能不对称对整体传输性能带来的影响。

2 基于多专家学习的调度算法

本文算法的基本结构如图2所示,该算法对前向延迟的计算方式以及路径管理的机制进行了改进,给出了前向延迟的预测模块,以及基于多专家学习的路径管理和调度算法。本文的调度算法包括基于多专家学习的前向延迟预测模块、基于前向延迟的数据包调度器、以及针对动态时变网络的路径管理器。

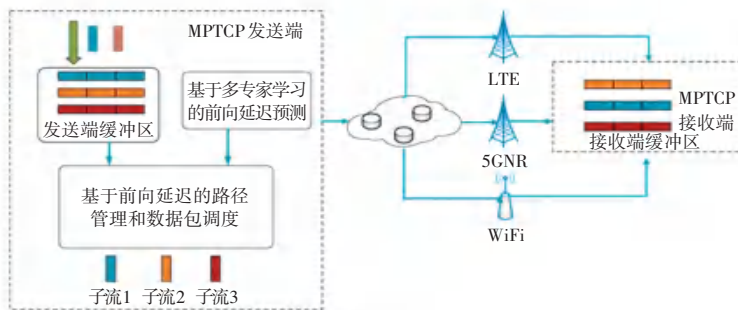


图2 系统架构

Fig. 2 System architecture

2.1 前向延迟

在多接入异构网络环境中,网络之间往往具有较大的不对称性,这种不对称表现在具体的网络性能指

标上(如:带宽和时延)。相比于单路径的TCP网络,多路径MPTCP网络因为发送端到接收端数据包的分流和聚合,需要更大的接收端缓冲区,以此为到来的

数据包重新排序。前向延迟如图3所示,当网络性能差异较大,尤其多个网络之间的延迟相差较多时,不同路径数据包到达的时间相隔更长,到达接收端缓冲区的大量无序数据包短时间内无法处理,这将会造成缓冲区阻塞的问题,从而影响传输的性能。为了提高MPTCP的性能,首要考虑的问题就是网络的延迟。

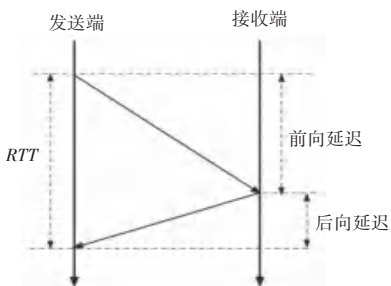


图3 前向延迟

Fig. 3 Forward delay

研究表明,在不对称的多路径冗余网络中,前向延迟相比RTT更能识别和体现网络的QoS特性,这是由于转发路由之间的不对称性造成的,数据流发送方向的延迟与返回确认方向的延迟不相同,因此RTT指标无法体现网络的QoS特性。如何精确地得到网络的前向延迟成为了缓解缓冲区阻塞的一个重要议题,Xue等学者^[9]根据发送端和接收端时钟的差异,给出了一种前向延迟的计算方法。本文在此基础上提出了改进的前向延迟计算方法,对前向延迟做出更加高精度的预测。

2.2 基于多专家学习的前向延迟预测模型

多专家学习(Multi-expert learning)是一种特殊形式的集成学习,通过使用多个独立训练的专家来产生不同的预测结果,然后将这些结果组合成一个最终的预测结果,从而提高预测的准确性。多专家学习通常使用不同的训练数据集和不同的特征集来单独地训练每位专家,以确保每位专家都能够捕捉到不同的特征和关系,多专家学习还可以通过不同的组合方法来获得最终的预测结果(如:加权平均、投票、堆叠、混合等)。

本文提出了一种基于公式的多专家学习机制,利用多级分层学习的框架来提高前向延迟预测的精度。基于多专家的前向延迟预测模型如图4所示,该框架包括输入层、多专家学习层、平滑层以及输出层。输入层输入网络的相关参数(如:RTT、抖动、时间戳等信息);多专家学习层由3个基于公式的前向延迟预测器组成,每一个预测器都代表着一个基于公式的前向延迟预测模型;平滑层对每个专家输出的结果做进一步的平滑处理;最后在输出层通

过加权平均的方式,输出预测的前向延迟。

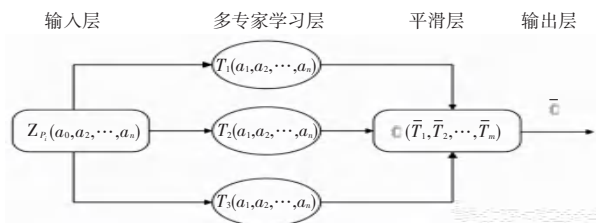


图4 基于多专家的前向延迟预测模型

Fig. 4 Forward delay prediction model based on multi-expert learning

假设,网络中有*i*个传输路径为MPTCP提供链接,每个传输路径*P_i*都有*n*个网络参数、称为 (a_1, a_2, \dots, a_n) ,这些网络参数可以是RTT、丢包率、抖动等与QoS相关的指标。本文以这些网络参数 (a_1, a_2, \dots, a_n) 作为输入,将这些参数传递到多专家学习层做下一步的计算处理。多专家学习层采用基于公式的前向延迟预测模型*T_i*,通过*P_i*的*n*个网络参数可以将*T_i*表示为:

$$T_i(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad 1 \leq i \leq m \quad (1)$$

多专家学习层中的延迟预测器基于大量具有代表性的延迟计算公式,得到前向延迟的预测结果。每个预测器都分别独立地进行前向延迟的估计,最后的预测结果可以表示为:

$$\bar{T}_i(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad \text{s. t.} \quad 1 \leq i \leq m \quad (2)$$

其中, \bar{T}_i 表示多专家学习层第*i*个预测器的输出结果。

本文基于具有代表性的前向延迟计算公式,得到了多专家学习层中的3种单向延迟预测模型,各自独立地为MPTCP各路径提供前向延迟的估计结果。3种预测模型表示如下:

$$T_1 = \frac{1}{2} \times RTT \quad (3)$$

$$\bar{T}_2 = \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^M t_i \quad (4)$$

$$T_3 = t_{\text{rec}} - t_{\text{send}} + \Delta t \quad (5)$$

其中,RTT表示往返时间; t_{send} 表示MPTCP发送端发送数据的时间戳; t_{rec} 表示MPTCP接收端接收数据的时间戳; Δt 为数据处理的时间;*M*表示前向延迟样本的总数; clk_S 和 clk_T 分别表示了发送端和接收端的时钟时间。

前向延迟预测模型计算出的结果将会进一步地传入平滑层做数据平滑处理,用于平滑延迟抖动以及降低不确定性。平滑层平滑处理过程可由式(6)

来描述:

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \frac{1}{m} \times \sum_{i=1}^m b_i \bar{T}_i \\ \bar{C} &= C(\bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_m) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, m 表示预测模型的数量, $b_i \in [0, 1]$ 表示 3 种模型之间的权重。为了公平起见, 本文将 b_i 取值为 $1/3$, $C(\bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_m)$ 是一个加权和函数, \bar{C} 则是最终预测到的路径 P_i 的前向延迟, 最后该数值将传递给输出层。研究可知, 平滑处理后的结果即为预测出的前向延迟。

基于多专家学习的前向延迟预测模型为每一条路径预测出前向延迟的数值, 这对下一步 MPTCP 调度器对各路径的调度管理有着至关重要的作用。当网络路径之间的性能差异过大, 尤其存在延迟差异时, 基于该模型预测得到的前向延迟将传输的 MPTCP 报文调度到前向延迟较小的路径, 以此来尽可能地缓解因网络不对称产生的缓冲区数据包顺序混乱问题, 降低缓冲区阻塞产生的概率。

2.3 基于前向延迟的路径管理和数据包调度

传统的 MPTCP 路径管理器受限于其本身的管理机制, 只能被动地创建新的子流, 或者选择所有的子流共同参与传输。在不同路径网络延迟较大时, 这无疑会造成缓冲区阻塞的问题。本文基于多专家学习的前向延迟预测模型, 通过预测出的前向延迟的数值管理 MPTCP 的传输路径。算法描述如下。

算法 1 基于前向延迟的路径管理和调度算法

输入 $RTT, t_{\text{send}}, t_{\text{rec}}, \Delta t, M, clk_s, clk_r$, 路径集

P , 带宽 $B_i, i \in p$

输出 P^+

1. 初始化: $P^+ = P; P^- = \emptyset$;
2. while true do
3. 基于 P^+ 中的路径调度 MPTCP 数据包
4. for(path i in P)
5. $\bar{C}_i = C_i(\bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_m)$, 多专家学习模型预测路径 i 的前向延迟 \bar{C}_i , 根据前向延迟的数值从小到大对路径排序
6. end
7. if path j 的前向延迟 \bar{C}_j 在所有路径中数值最大
8. then
9. 将路径 j 从 P^+ 移入到 P^-
10. return P^+

由算法 1 可知, 设网络中的路径集为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 本文提出的 MPTCP 路径管理算法

根据预测模型得到的结果, 对路径进行动态管理, 根据预测模型的结果得到新的前向延迟的数值。据此结果, 路径管理器更新参与传输的路径集, 删除路径集中前向延迟最大的路径。延迟差异较大的路径并不会对数据的传输产生正面的影响, 在对延迟比较敏感的场景下反而会降低传输的性能, 产生一系列的缓冲区阻塞问题, 因此对于延迟与其他相差较大的路径, 路径管理器会在数据到来前暂停该路径数据流的传输。数据包调度算法示意如图 5 所示。

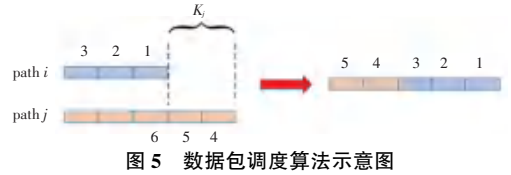


图 5 数据包调度算法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of packet scheduling algorithm

在得到各路径的前向延迟以及更新的路径集之后, 通过改进的 MPTCP 调度器对数据进行分组调度。假设发送端发送的数据足够大, 能够完全填满接收端缓冲区。调度器将发送端缓冲区拟要发送的数据分割成 TCP 消息段 K_j 大小的数据包, 通过延迟补偿的方式在各路径中分别发送相应的数据包。调度器选择在最小前向延迟路径上传输小序号的数据包, 并根据式(7)计算出其他路径与最小前向延迟路径之间相应延迟差时间内所能传输的数据包。延迟差数据包的数量定义为:

$$K_j = \Delta \bar{C}_i \bar{C}_j \times \frac{B_j}{MSS} \quad (7)$$

其中, \bar{C}_i 表示最小延迟路径的前向延迟; \bar{C}_j 表示其他第 j 条路径的前向延迟; $\Delta \bar{C}_i \bar{C}_j$ 表示路径 i 与路径 j 之间的延迟差; B_j 表示路径 j 的带宽; MSS 表示被分割成数据包大小。

由图 5 可知, K_j 可解释为当路径 i 与路径 j 之间存在延迟差异时, 在 $\Delta \bar{C}_i \bar{C}_j$ 时间内路径 j 比路径 i 晚一步到达接收端缓冲区数据包的数量。算法流程如图 6 所示。由图 6 可知, 在路径 j 传输了 K_j 个大序号数据包后, 路径 i 再传输相应小序号的数据包。总的来说, 相对最小延迟路径要在 K_j 个数据包被延迟较大路径发送后再开始传输。以此类推, 路径之间通过延迟补偿的方式使得数据包能够以尽可能正确的顺序发送至接收端缓冲区。

由图 6 可知, 该调度算法根据不同路径之间前向延迟的差异, 对大延迟路径上发送的数据包进行延迟补偿, 合理地调度各路径中所要发送的数据包,

降低接收端缓冲区数据包序号混乱的程度,最大限度地弥补因延迟差异带来的数据包排序混乱问题,并且缓冲区得以快速地对数据包进行排序,从而有效地避免缓冲区阻塞问题的产生。

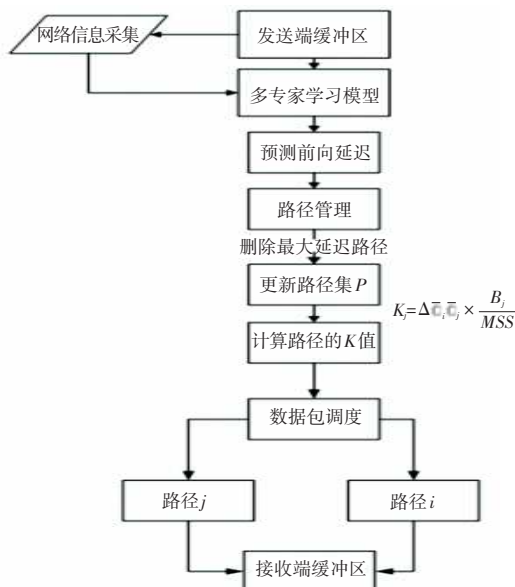


图6 基于多专家学习的调度优化算法流程图

Fig. 6 Flow chart of scheduling optimization algorithm based on multi-expert learning

3 仿真实验分析

3.1 实验环境以及网络仿真拓扑图

本文基于 NS-3 仿真实验平台对提出的方法进行

行了仿真实验及结果评估,在 NS-3 上部署了 MPTCP 协议,用于对本文算法的实现。针对接收端缓冲区出现的大量无序数据包的问题,在图 7 给出的网络拓扑环境下从各个角度对比了 FDPS 算法以及原生 MPTCP 对于接收端缓冲区阻塞问题缓解程度,从多个维度论证了本文所提出 ML-FD 算法的优势。本文设计了 3 条从 MPTCP 发送端到接收端的路径,到来的数据流分别通过 5 GNR、LTE 以及 WiFi 传输到设备的接收端。为了对比不同时延对接收端缓冲区的影响,本实验将各路径的带宽设置为统一的 10 Mbps。为体现实际传输情况,本仿真实验加入统一损耗模型以及马尔可夫损耗模型,来模拟数据传输过程中所遭遇的噪声干扰以及信号衰落;为体现 ML-FD 算法对接收端缓冲区无序数据包的减少程度,实验假设接收端缓冲区无限大。具体实验参数见表 1,仿真过程持续 100 s 的时间。



图7 网络仿真拓扑

Fig. 7 Network simulation topology

表1 路径网络参数

Table 1 Path network parameters

网络参数	链路带宽/Mbps	链路延迟/ms	核心网延迟/ms	统一损失率/%	马尔可夫损失率/%	链路队列限制
5GNR	10	5~15	10	1	1	500
LTE	10	80~120	10	1	1	500
WiFi	10	10~25	10	1	1	500

3.2 仿真结果分析

3.2.1 发送和接收端数据包数量结果分析

图 8 和图 9 分别展示了在 100 s 仿真时间内,3 种方法发送和接收数据包数量之间的对比结果。

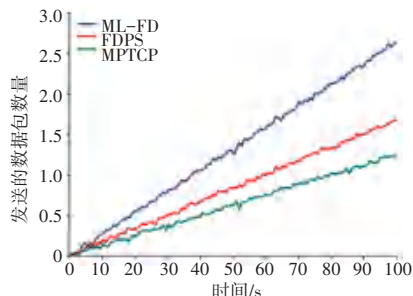


图8 发送数据包数量

Fig. 8 Number of sent packets

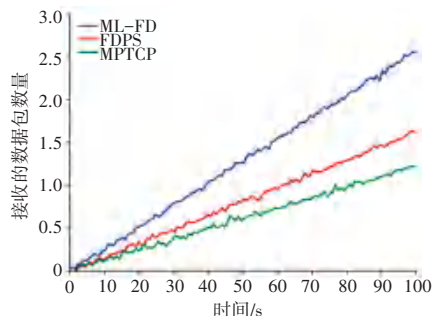


图9 接收数据包数量

Fig. 9 Number of received packets

由图 8 和图 9 可以看出,ML-FD 的数据传输和接收性能明显优于 FDPS 和 MPTCP。在仿真进行的前 3~4 s 时间内,3 种方法的传输和接收能力基本相同,随着时间的延长以及发送和接收的数据包

持续增加,ML-FD与其他2种方法相比,性能更加优秀。这是因为FDPS和MPTCP无法实现灵活的路径管理,延迟较大的LTE路径参与了数据流的传输,与其他传输链路相比,LTE的延迟表现较差,这样的性能差异势必会影响到数据包到达的顺序,从而导致缓冲区大量无序数据包的出现,影响整体的传输性能。并且ML-FD对于前向延迟的估计要比FDPS更加接近真实值,对比数据包的调度也更合理、更精确。ML-FD在发送和接收能力的良好表现得益于基于多专家学习的调度算法,在预测到LTE延迟过大之后,ML-FD对于该路径做出了删除的操作,规避了不良子流对传输性能的影响;接收端缓冲区阻塞程度越小,接收到的有效数据就越多,从而间接提高了发送端发送数据包的数量。

3.2.2 无序数据包数量结果分析

作为直接导致缓冲区阻塞问题出现的因素,无序数据包的数量最能直接反映出缓冲区阻塞的程度以及整体传输的性能表现。无序数据包可以根据2个连续的MPTCP数据序号的偏移来获得。图10展示了3种方法在100s时间内产生无序数据的数量对比情况。

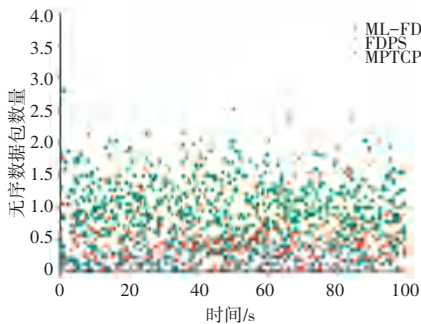


图10 无序数据包数量

Fig. 10 Number of OFO packets

由图10可以看出,ML-FD方法产生的无序数据包数量总体上比FDPS以及MPTCP少很多。无序数据包产生的原因是网络传输性能的不对称,尤其延迟的差异会导致延迟较高路径传输的数据包到达缓冲区时间的滞后,造成缓冲区数据包顺序的混乱。ML-FD在无序数据包数量上的良好表现在于该算法可以准确地预测各个路径的前向延迟,通过改进的路径管理机制选择延迟较低的路径传输数据,最小化传输的延迟。基于前向延迟的数据包调度算法通过在较大延迟路径进行数据包延迟补偿的方式,能够最大程度地弥补因延迟所带来的缓冲区数据包顺序混乱的问题,减少无序数据包的到达。相比于FDPS和MPTCP,ML-FD对于无序数据包的

数量分别降低了30%和60%。

3.2.3 吞吐量结果分析

3种方法在100s仿真时间内吞吐量变化情况的对比结果如图11所示。结果表明,MPTCP在数据传输过程中的表现最差,这是因为LTE路径延迟过大导致了大量无序数据包的到达,加重了缓冲区阻塞的程度,数据的传输很容易被迫中断,影响到整体的吞吐量性能。可以看出,FDPS通过其提出的数据包调度方法,一定程度上能够缓解缓冲区阻塞的程度,相比于MPTCP提高了部分吞吐量的性能表现,然而这种方法仍旧无法规避不良子流对于整体传输性能的影响。ML-FD精确地预测出路径的前向延迟,避免了不良子流的使用,减轻了缓冲区阻塞的程度。通过路径管理和数据包调度,ML-FD选择了性能较好的路径进行数据的传输,能够将数据分布在稳定的路径上传输,最终获得了较高的吞吐量。平均吞吐量结果如图12所示。由图12可知,使用ML-FD方法得到的平均吞吐量相比MPTCP提高了42.3%,比FDPS提高了33%。ML-FD平均吞吐量约为12.1Mbps,就与理论的20Mbps聚合带宽相差较多,这与本文在仿真实验中设置了2种损耗模型有关,因而无疑会损失掉一部分传输性能,造成吞吐量的下降。

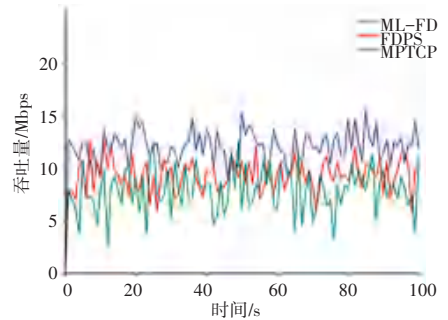


图11 吞吐量

Fig. 11 Throughput

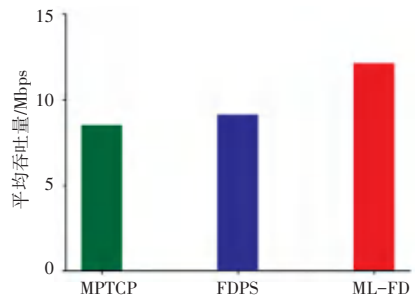


图12 平均吞吐量

Fig. 12 Average throughput

总体而言,本文提出ML-FD方法在吞吐量的表现上优于FDPS及MPTCP,这说明ML-FD能够

有效地提高传输的性能,提高整体的吞吐量表现。

4 结束语

MPTCP 被认为是多接入异构网络中用于带宽聚合最适配的协议,然而面对网络不对称的情境时 MPTCP 会导致接收端缓冲区大量数据包的无序到达。本文针对该问题提出了基于多专家学习的 MPTCP 调度优化算法,利用分层的多专家学习模型更合理预测了各路径的前向延迟,相较于其他方法中固定的前向延迟计算方式,本文提出的预测机制能够更精确地计算出前向延迟的数值,更好地反映实际的延迟情况。结果表明,基于该预测机制的调度算法以及路径管理机制的改进有效地提高了 MPTCP 的性能表现,提高了传输效率。具体实验数据来看,本文提出的算法相比于其他方法,降低了不良子流对于传输性能的影响,对于数据包更合理的调度方法使得改进的 MPTCP 具有更好的发送和接收性能,减少了缓冲区无序数据包的产生,有效地提高了平均吞吐量,增强了整体传输的性能。

参考文献

- [1] WANG Jingyu, LIAO Jianxin, LI Tonghong. OSIA: Out-of-order scheduling for in-order arriving in concurrent multi-path transfer [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(2):633-643.
- [2] CHEN C, JIANG L, JUN S, et al. A machine learning based MPTCP subflow control algorithm for multi-access heterogeneous networks [C]//2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT). Nanjing, China: IEEE, 2022:1817-1822.
- [3] HAN Jiangping, XUE Kaiping, XING Yitao, et al. Leveraging coupled BBR and adaptive packet scheduling to boost MPTCP[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7555-7567.
- [4] CAO Yuanlong, JI Ruiwen, JI Lejun, et al. MPTCP: A learning-driven latency-aware multipath transport scheme for industrial Internet applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(12):8456-8466.
- [5] DONG Enhuan, XU Mingwei, FU Xiaoming, et al. LAMPS: A loss aware scheduler for multipath TCP over highly lossy networks [C]//2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks (LCN). Singapore: IEEE, 2017:1-9.
- [6] WU Hongjia, FERLIN S, CASO G, et al. A survey on multipath transport protocols towards 5G access traffic steering, switching and splitting[J]. IEEE Access, 2021, 9: 164417-164439.
- [7] HAN Zhe, WANG Bin, ZHAO Haitao, et al. Optimization of multipath transmission path scheduling based on forward delay in vehicle heterogeneous networks[C]//2021 IEEE 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft). Tokyo, Japan: IEEE, 2021: 381-387.
- [8] LUO Jiacheng, SU Xin, LIU Bei. A reinforcement learning approach for multipath TCP data scheduling [C]//2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). Las Vegas, USA: IEEE, 2019:276-280.
- [9] XUE Kaiping, HAN Jiangping, NI Dan, et al. DPSAF: Forward prediction based dynamic packet scheduling and adjusting with feedback for multipath TCP in lossy heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2):1521-1534.
- [10] LE T A, BUI L X. Forward delay-based packet scheduling algorithm for multipath TCP[J]. Mobile Networks & Applications, 2018, 23(1):4-12.
- [11] KIM J, OH B H, LEE J. Receive buffer based path management for MPTCP in heterogeneous networks [C]//2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM). Lisbon, Portugal: IEEE, 2017: 648-651.
- [12] ALHEID A, DOUFEXI A, KALESHI D. Packet reordering response for MPTCP under wireless heterogeneous environment [C]// 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT). Thessaloniki, Greece: IEEE, 2016: 1-6.
- [13] YANG Fan, WANG Qi, AMER P D. Out-of-order transmission for in-order arrival scheduling for multipath TCP [C]//2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Victoria, Canada: IEEE, 2014:749-752.
- [14] CHUNG J, HAN D, KIM J, et al. Machine learning based path management for mobile devices over MPTCP [C]//2017 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp). Jeju, Republic of Korea: IEEE, 2017: 206-209.
- [15] YANG Wenjun, DONG Pingping, CAI Lin, et al. Loss-aware throughput estimation scheduler for multi-path TCP in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(5):3336-3349.
- [16] ALHEID A, DOUFEXI A, KALESHI D. Packet reordering response for MPTCP under wireless heterogeneous environment [C]// 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT). Thessaloniki, Greece: IEEE, 2016:1-6.
- [17] PANG Shanchen, YAO Jiamin, WANG Xun, et al. Transmission control of MPTCP incast based on buffer balance factor allocation in data center networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 183428-183434.
- [18] XU Changqiao, WANG Peng, XIONG Chunshan, et al. Pipeline network coding-based multipath data transfer in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2017, 63(2): 376-390.
- [19] FERLIN S, KUCERA S, CLAUSSEN H, et al. MPTCP meets FEC: Supporting latency-sensitive applications over heterogeneous networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(5): 2005-2018.
- [20] CHOI K W, CHO Y, LEE J, et al. Optimal load balancing scheduler for MPTCP-based bandwidth aggregation in heterogeneous wireless environments [J]. Computer Communications, 2017, 112: 116-130.
- [21] HURTIG P, GRINNEMO K J, BRUNSTORM A, et al. Low-latency scheduling in MPTCP [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2019, 27(1): 302-315.