

## 基于多路径传输的城市轨道交通带宽聚合

胡传搏<sup>1</sup> 刘小勇<sup>2</sup> 邹劲柏<sup>1</sup> 刘 虎<sup>1</sup> 王 森<sup>3</sup>

(1. 上海应用技术大学轨道交通学院, 201418, 上海;

2. 国家无线电监测中心检测中心(无线电频谱检测技术工业和信息化部重点实验室), 100041, 北京;

3. 上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海)

**摘 要** [目的]城市轨道交通广泛采用 LTE-M(地铁长期演进)系统,以支持多种业务。但随着视频业务数据量的快速增长,该系统面临带宽压力,需设计一种适应城市轨道交通网络环境的多路径传输系统,以达到聚合多网络带宽的目的。[方法]基于 MPQUIC(多路径快速用户数据报网络连接)协议设计了一种动态冗余的城市轨道交通多路径传输系统,该系统采用两种传输模式:在常规模式下,为缩短路径间完成传输的时间差异,使用基于预分配数据包的多路径调度算法,降低网络异构性对传输性能的影响,以适应异构网络环境;在越区切换发生时,为了克服移动场景下越区切换造成的网络波动对传输性能的影响,从信令层面进行并行调度与冗余调度切换的判决,并及时转换为冗余传输,以保证切换发生时传输性能的稳定。介绍了该系统的设计及其调度算法的设计,并通过仿真试验进行了验证。[结果及结论]在模拟的城市轨道交通网络场景中,基于冗余和预分配的多路径调度方法相比最低 RTT(往返时延)优先调度方法,在较好和较差的网络条件下,网络的平均吞吐量分别提升了 28.7% 和 33.9% 的,验证了所设计的动态冗余的城市轨道交通多路径传输系统的有效性和优越性。

**关键词** 地铁; 通信网络; 多路径传输; 带宽聚合

**中图分类号** U285.21

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.03.054

## Bandwidth Aggregation for Urban Rail Transit Based on Multi-path Transmission

HU Chuanbo<sup>1</sup>, LIU Xiaoyong<sup>2</sup>, ZOU Jinbai<sup>1</sup>, LIU Hu<sup>1</sup>, WANG Sen<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Technology School of Rail Transportation, 201418, Shanghai, China; 2. The National Radio Monitoring Center Testing Centre (Key Laboratory of Rad Radio Spectrum Monitoring Technology, Ministry of Industry and Information Technology), 100041, Beijing, China; 3. Technology Centre of Shanghai Shentong Metro Group Co. Ltd., 201103, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Urban rail transit widely adopts the LTE-M (long-term evolution for metro) system to support various services. However, with the rapid growth of video data

traffic, the system faces increasing bandwidth pressure. To address this challenge, a multi-path transmission system tailored to the urban rail transit network environment needs to be designed to aggregate multiple network bandwidths. [Method] Based on the MPQUIC (multipath quick UDP (user datagram protocol) internet connections) protocol, a dynamic redundancy-based multi-path transmission system for urban rail transit is designed. The system incorporates two transmission modes. Under regular conditions, to minimize time differences in data transmission across paths, a pre-allocated packet-based multi-path scheduling algorithm is used. This approach mitigates the impact of network heterogeneity on transmission performance, making it more adaptable to heterogeneous network environments. Under cross-section handover conditions, to address the challenge of network fluctuations in mobility scenario caused by cross-section handover degrading transmission performance, the system determines switching between parallel scheduling and redundant scheduling at the signaling level, transitioning to redundant transmission in time to ensure stable performance during handover. The system architecture and scheduling algorithm design are introduced, and simulation experiments are conducted for validation. [Result & Conclusion] In simulated urban rail transit network scenarios, the proposed multi-path scheduling methods—combining redundancy and pre-allocation—demonstrates superior performance compared to the lowest RTT (round trip time) priority scheduling method. Under both favorable and poor network conditions, the average network throughput increases by 28.7% and 33.9%, respectively, validating the effectiveness and superiority of the designed dynamic redundancy-based multi-path transmission system for urban rail transit.

**Key words** metro; communication network; multi-path transmission; band-width aggregation

## 0 引言

目前我国大部分城市轨道交通通过 LTE-M(地铁长期演进)采用综合承载方式在一个网络系统中

承载多种业务。随着视频业务进行数据传输的数据量越来越多, LTE-M 系统所面临的带宽压力也越来越大。与此同时,城市轨道交通环境中还存在 WLAN(无线局域网)、TETRA(数字陆地无线电系统)、运营商 LTE(长期演进)、5G 公网等网络,形成了异构无线网络环境,这些网络资源未得到充分利用,造成了资源浪费。

以多路径传输控制协议(Multipath TCP, MPTCP)<sup>[1-2]</sup>、MPQUIC(多路径快速用户数据报网络连接)<sup>[3-4]</sup>协议为代表的多路径传输协议的快速发展为轨道交通周边异构无线资源的网络融合和协同利用提供了新的方向。由于城市轨道交通网络的异构性和动态性相当显著,容易导致多路径传输时的快速路径等待和缓冲区膨胀,需要一种能够有效处理路径异构性和周期性网络波动的路径调度方法,以确保数据传输的稳定性和效率。因此,本文基于 MPQUIC 协议设计了一种动态冗余的轨道交通多路径传输系统,并提出一种 PAS(基于预分配的路径调度)方法。当列车发生越区切换时,通过将有损路径上的数据包复制到其他路径上进行发送的方法实现暂时的冗余调度,以保证高速移动场景下的传输性能;常规情况下,通过预分配数据包能够缩短路径间完成传输的时间差异,从而缩短整体的传输时间。

## 1 研究背景

多路径调度算法评估的一个常用基线是 RR(轮询)调度算法,只要在 CWND(拥塞窗口)中存在空间,该算法就会在每条路径上循环传输数据包。然而,由于 RR 在调度决策中没有使用路径的任何特征,导致其在底层网络路径异构时性能较差。

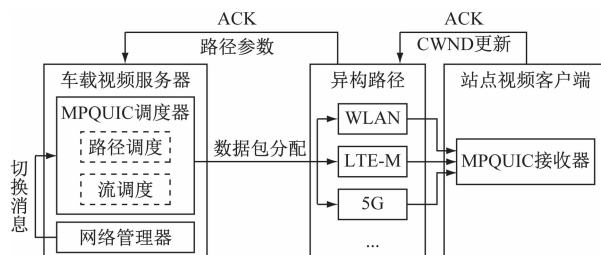
为了改进异构路径的传输性能,文献[5]提出了基于阻塞估计的 BLEST(MPTCP 调度算法),BLEST 算法引入了等待机制:如果预测在最高 RTT(往返时延)路径上发送可能会阻塞接收方,而且此时具有最高 RTT 的网络路径是唯一可用的路径,BLEST 算法可以决定等待,直至最低 RTT 路径再次可用。最早完成优先算法也引入了相似的等待机制,但其估计是基于减少最低 RTT 路径的空闲时间<sup>[6]</sup>。

为了克服移动场景下越区切换造成的网络波动对传输性能的影响,文献[7]在车载多路径传输中基于车辆和接入点的位置预测通信路径丢失的

时间提前进行路径调度,以减少 ACK(确认字符)数据包丢失;另一种常用的方法是在有损网络状态下动态地将并行模式切换为冗余模式来保证有损模式下的性能,文献[8]和文献[9]分别通过设置丢包阈值和带宽损失预测作为两种模式之间的切换判决依据。然而基于位置或网络特征的冗余模式判决容易受到短暂的小区拥堵或同频干扰等因素的影响,对越区切换的判决不够准确,无法完全保证地铁场景下越区切换时的多路径传输性能。

## 2 多路径传输系统设计

本文设计的城市轨道交通多路径传输系统如图1所示,由车载视频服务器、异构网络路径和站点视频客户端三个部分组成。



注:CWND—拥塞窗口。

图1 多路径传输系统架构图

Fig. 1 Diagram of multi-path transmission system architecture

车载视频服务器包括网络管理器和 MPQUIC 调度器。网络管理器功能为对网络无线接入进行管理,并在切换发生时向 MPQUIC 调度器发送切换消息。MPQUIC 调度器根据网络状态进行路径选择、优先级管理、流量控制。以常见的 LTE 网络基站间小区切换为例,当网络管理器检测到切换源基站通过 RCC Connection Reconfiguration 消息发送的切换命令时,立即向 MPQUIC 调度器发送切换消息,此时 MPQUIC 调度器由并行传输模式转为冗余传输模式,当网络管理器在目标基站的非竞争性的随机接入过程完成后,向目标基站发送 RCC Connection Reconfiguration Complete 消息,并向 MPQUIC 调度器传达切换完成消息,此时 MPQUIC 转回常规并行调度模式。

异构网络路径包括城市轨道交通 LTE-M 专网及其他可用网络,通常包括 WLAN、运营商 LTE、5G 网络。

站点视频客户端的 MPQUIC 接收器将接收到的数据按序重组并递交上层应用,同时,作为数据

传输的关键组成部分,接收端还负责流量控制和错误处理,以确保数据的完整性和正确性。

### 3 调度算法设计

为解决常规并行传输状态下 minRTT 算法无法充分利用网络资源,导致传输效率较低的问题,本文设计了 PAS 算法以优化传输过程中的路径调度。PAS 算法旨在根据每条路径的带宽、延迟、可靠性等特性,将待传输的数据包预分配到不同的传输路径上,并根据网络状态的变化动态调整数据包的分配。这种预分配机制确保了数据包在多路径上传输时的均衡分布,避免了单一路径的拥塞或闲置。PAS 算法的主要思想是通过缩短路径间传输时间差异,进而缩短整体传输时间,其调度过程如下:建立连接后,服务器的路径管理器获取每条路径的属性及待传输数据流的信息,如带宽、CWND、RTT、流大小等;当接收到路径管理器的越区切换指令时,PAS 算法将复制切换路径上的待发送数据包并通过其他可用路径进行冗余传输,否则,PAS 算法根据路径参数估计每条路径的传输完成时间,然后通过线性规划算法在路径上预先分配数据传输量;随后,服务器利用 MPQUIC 协议将数据包发送给客户端;最后,客户端完成接收后向服务器发送 ACK 消息,并重置 CWND。

对路径调度进行建模,假设存在  $n$  条可用路径和  $m$  个流。令  $R_i$  表示可用路径  $i$  的 RTT,  $B_i$  表示可用路径  $i$  的带宽,其中  $i \in [1, n]$ 。当流  $j(j \in [1, m])$  通过路径  $i$  传输了大小为  $N_{ij}$  的数据时,路径  $i$  完成数据传输所需的时间  $T_i$  为:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^m N_{ij}}{B_i} + R_i \quad (1)$$

整体传输耗时  $T$ :

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (2)$$

流  $j$  调度在可用路径  $i$  上的数据比例为  $P_{ij}$ ,其计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{S_j} \quad (3)$$

式中:

$S_j$ ——流  $j$  的大小。

为了尽可能充分利用所有路径的带宽资源,减少最快路径上的闲置等待时间,需要使各路径最长空闲时间小于限定值  $T_l$ ,因此给出约束条件:

$$\max(T_1, T_2, \dots, T_n) - \min(T_1, T_2, \dots, T_n) \leq T_l \quad (4)$$

其中,  $T_l$  取固定值和整体传输耗时的比例的更大值,以适应待传输数据不同的规模,固定值  $t$  和比例系数  $\delta$  初始值分别为 25 ms 和 0.15,若不存在可行域则递增。

另外,为了使多路径传输能够达到聚合可用带宽的目的,需要使整体传输耗时  $T$  小于仅使用任何一条单一链路进行传输的耗时,因此给出约束条件:

$$T \leq \min\left(\frac{\sum_{j=1}^m S_j}{B_1} + R_1, \dots, \frac{\sum_{j=1}^m S_j}{B_n} + R_n\right) \quad (5)$$

目标函数  $Z$  表示为:

$$Z = \min\left(\sum_{i=1}^n T_i\right) \quad (6)$$

基于上述约束条件和目标函数求解出路径调度比例  $P_{ij}$ ,对待传输的流进行优先级排序,根据调度比例将数据包分配到各路径上进行传输。

### 4 仿真评估

首先,本文基于 quic-go 项目实现了 PAS 算法,并在 Ubuntu 14.04 LTS 系统上基于 Mininet 网络仿真工具设置了仿真网络环境,网络拓扑设计参考 MPQUIC 试验装置由两条独立的传输路径与基于这两条路径进行 Web 对象传输的客户端和服务端组成。

为了验证 PAS 算法在通用异构网络场景下的性能,本文首先将两条路径的带宽固定为 1 Mibit/s,将路径 1 的 RTT 设置为 5 ms,并将路径 2 的 RTT 设置为从 1 ms 不断增加到 320 ms,以增加两条路径之间的 RTT 异构性。为了模拟带宽异构,本文将两条路径的 RTT 固定为 5 ms,将路径 1 的带宽设置为 1 Mibit/s,将路径 2 的带宽从 1 Mibit/s 不断增加到 100 Mibit/s。使用不同的路径调度算法分别对大小为 256 kB 和 64 MB 的文件进行数据传输,并记录客户端从启动到完成所有数据传输所消耗的时间。每次试验重复 10 次,记录每种调度器的平均下载时间。以默认的 minRTT 算法为基准,计算各调度器的平均下载时间比率,结果分别如图 2 和图 3 所示。

从试验结果可以看出,在异构网络环境下,BLEST 和 PAS 算法能够获得优于默认调度器的传输性能,并且 PAS 算法的表现在大部分时候都优于 BLEST 算法的表现。另外,PAS 算法的优越性随着路径异构性和传输文件规模的增大而更加显著,这



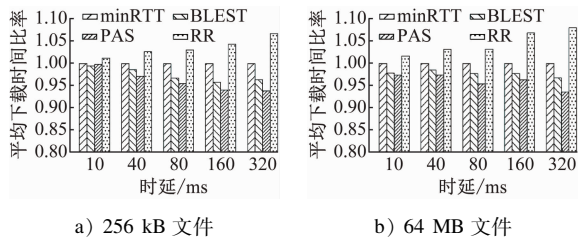


图 2 时延异构下文件下载时间比率  
Fig. 2 File download time ratio under delay heterogeneity

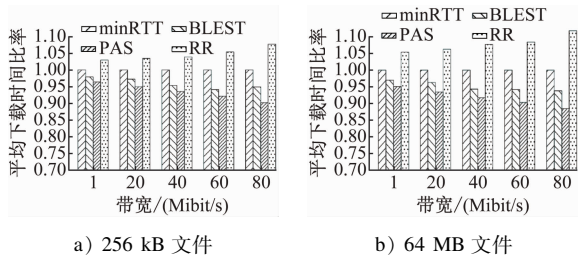


图 3 带宽异构下文件下载时间比率  
Fig. 3 File download time ratio under band-width heterogeneity

说明了 PAS 算法在异构网络中的适应性。

为了进一步验证城市轨道交通动态异构网络场景下多链路传输方法对带宽的聚合效应,本文设计了相互独立的一条 WLAN 路径、两条 LTE 路径(分别模拟 LTE-M 专网和运营商 LTE 网络),路径参数设置如表 1 所示。城市轨道交通场景中列车经历大量越区切换事件,此过程通常会造较大的网络性能波动。为了模仿不同网络条件下的越区切换事件,在上面的试验设置上对每条无线链路分别加入了两组周期性的网络参数波动。根据文献[10-11]中的研究,切换的频率被设置在 100 s 内 8~11 次。每次切换的持续时间、RTT 波动倍率和丢包率在如表 2 所示的范围内随机选取。

表 1 网络参数设置  
Tab. 1 Network parameter configuration

网络	带宽/(Mibit/s)	时延/ms	丢包率
LTE-M	10	30	0.001
WLAN	10	60	0.002
LTE	5	20	0.001

表 2 仿真切换事件网络参数

网络	持续时间/s	RTT	丢包率
较好网络	[1.5, 2.5]	[140%, 200%]	[0.05, 0.15]
较差网络	[1.5, 3.5]	[140%, 300%]	[0.1, 0.25]

使用提出的基于预分配算法的 MPQUIC(PAS-MPQUIC)分别与常规 MPQUIC(minRTT-MPQUIC)和 LTE-M 单网进行传输性能对比,PAS-MPQUIC 和 minRTT-MPQUIC 均同时使用设计的三条路径进行多路径传输,LTE-M 仅通过 LTE 路径使用 UDP(用户数据报)协议进行传输。在此设置下评估 100 s 内客户端的平均吞吐量,结果如图 4 所示。

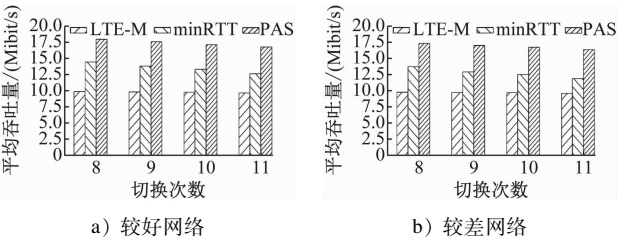


图 4 不同性能网络的 100 s 内平均吞吐量  
Fig. 4 Average throughput within one hundred seconds under different network performance conditions

从图 4 可以看出,基于 minRTT 算法的默认 MPQUIC 协议传输受到越区切换影响较大,这是由于在受影响路径上的延迟和丢包堵塞了接收缓冲区,而基于冗余和 PAS 算法的 MPQUIC 协议,由于在越区切换发生时及时转向了冗余调度,对越区切换事件不敏感,避免了因为一条路径上的网络波动造成整体传输效率的恶化。在 100 s 内经历 10 次越区切换的情况下,使用基于冗余和 PAS 算法相较于 minRTT 算法,在较好和较差的网络条件下分别提升了 28.7% 和 33.9% 的平均吞吐量,实现了有效聚合带宽的目标。

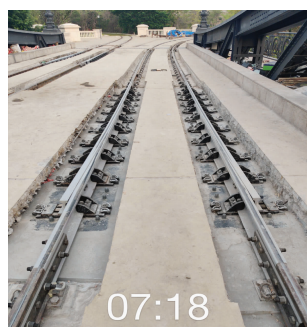
5 结语

基于 MPQUIC 协议的多路径传输作为一种很有前景的传输机制可用来聚合地铁网络环境资源,以缓解视频等大带宽业务对 LTE-M 系统造成的巨大压力。然而,地铁网络环境的异构性和高速移动频繁经历的越区切换事件会对多路径传输性能造成很大的影响。因此,本文提出了地铁环境多路径传输系统,在常规模式下使用基于预分配数据包的调度算法进行多路径传输,以减轻网络异构性对传输性能的影响;在切换发生时,从信令层面进行切换判决,及时转换为冗余传输,以保证切换发生时的传输性能。试验结果验证了本文所提出的地铁环境多路径传输系统的有效性和优越性。

## 参考文献

- [1] BARRÉ S, PAASCH C, BONAVENTURE O. MultiPath TCP: from theory to practice [C] // NETWORKING 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 444.
- [2] COSTIN R, CHRISTOPH P, Sebastien B, et al. How hard can it be? designing and implementing a deployable multipath {TCP} [C] // The 9 th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 12). San Jose: USENIX, 2012: 399.
- [3] DE CONINCK Q, BONAVENTURE O, DE CONINCK Q, et al. Multipath QUIC [C] // Proceedings of the 13 th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies. Incheon: ACM, 2017: 160.
- [4] VIERNICKEL T, FROEMMGEN A, RIZK A, et al. Multipath QUIC: a deployable multipath transport protocol [C] // 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kansas City: IEEE, 2018: 1.
- [5] FERLIN S, ALAY Ö, MEHANI O, et al. BLEST: Blocking estimation-based MPTCP scheduler for heterogeneous networks [C] // 2016 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops. Vienna: IEEE, 2016: 431.
- [6] LIM Y S, NAHUM E M, TOWSLEY D, et al. ECF: an MPTCP path scheduler to manage heterogeneous paths [C] // Proceedings of the 13 th International Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies. Incheon: ACM, 2017: 147.
- [7] OKUNISHI R, TENG R, SATO K. Reachability-based packet scheduler of multipath QUIC for heterogeneous mobile networks [J]. Communications and Network, 2022, 14(4): 200.
- [8] NGUYEN K, VILLARDI G P, KIBRIA M G, et al. An enhancement of multipath TCP performance in lossy wireless networks [C] // 2016 IEEE 41 st Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops). Dubai: IEEE, 2016: 187.
- [9] KHAN I, CHEN K. EBA: efficient bandwidth aggregation for connected vehicles with MPTCP [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5812.
- [10] XIAO Q, XU K, WANG D, et al. TCP performance over mobile networks in high-speed mobility scenarios [C] // 2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols. Raleigh: IEEE, 2014: 281.
- [11] LI L, XU K, LI T, et al. A measurement study on multi-path TCP with multiple cellular carriers on high-speed rails [C] // Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM, 2018: 161.
- 收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2024-06-25 出版日期: 2025-03-10  
Received: 2024-05-16 Revised: 2024-06-25 Published: 2025-03-10  
• 第一作者: 胡传搏, 硕士研究生, huchuanbo27@163.com  
通信作者: 邹劲柏, 教授, zoujb@sit.edu.cn  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 289 页)



a) 钢盖板铺面前



b) 钢盖板铺面后

图 15 现场改造实景图

Fig. 15 Photo of site reconstruction

3) 通过局部道床凿除、道床钻孔及在大铁板下浇筑快凝高强砂浆, 可实现现场的快速施工。道床局部凿除和钻孔占据了改造天窗时间的近一半, 1 个天窗期内即可完成主体单侧钢轨伸缩调节器的改造。

## 参考文献

- [1] 崔逸鹏. 有轨电车小半径曲线连续钢梁桥上无缝线路布置及其伸缩工况 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 267.
- CUI Yipeng. Layout of continuous welded rail on tram small radius curve continuous steel beam bridge and the expansion condition [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 267.

• 收稿日期: 2022-12-09 修回日期: 2023-01-28 出版日期: 2025-03-10  
Received: 2022-12-09 Revised: 2023-01-28 Published: 2025-03-10  
• 通信作者: 崔逸鹏, 高级工程师, 1027539592@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license