

# SDN 和 MEC 架构下高铁网络多维资源 适配架构研究

严晓云<sup>1</sup>, 李佳伟<sup>2</sup>, 刘智鑫<sup>3</sup>

(1. 中国电子科学研究院, 北京 100041; 2. 中国星网网络创新研究院有限公司, 北京 100029;  
3. 军事科学院 系统工程研究院, 北京 100141)

**摘要:** 为了满足高铁网络中不同业务对带宽、延迟、可靠性等多元化的要求, 采用集中式与分布式相结合的方法, 提出一种基于 SDN 和 MEC 的高铁网络多维资源适配架构, 采用了 SDN 逻辑集中控制和 MEC 的关键技术和方法, 并在 SDN 控制器、MEC 服务器和软件定义移动单元三个实体上设计了核心功能组件, 实现链路状态信息实时收集、多维网络资源动态适配、服务及时响应等能力, 通过一个实际的高铁网络应用案例测试验证了该架构在时延、丢包率等方面的性能提升, 最后讨论了该架构未来的一些问题和研究方向。

**关键词:** 高铁网络; 软件定义网络; 多址边缘计算; 资源适配; 网络延迟; 丢包率; 资源利用率

## Research on Multidimensional Resource Adaptation Architecture with MEC and SDN in High-speed Rail Networks

YAN Xiaoyun<sup>1</sup>, LI Jiawei<sup>2</sup>, LIU Zhixin<sup>3</sup>

(1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China;

2. China Satellite Network Innovation Co., Ltd., Beijing 100029, China;

3. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China)

**Abstract:** To meet the diversified requirements of different services in the high-speed rail networks, such as bandwidth, delay, and reliability, a multi-dimensional resource adaptation architecture of high-speed rail networks based on software-defined networking (SDN) and multi-access edge computing (MEC) is proposed. It adopts the key technologies and methods of SDN logic centralized control and MEC, and designs core functional components on three entities of the SDN controller, MEC server and software-defined mobile unit. It realizes the real-time collection of link state information, dynamic adaptation of multi-dimensional network resources, and timely response to services. Through a practical high-speed rail network application case test, it verifies the performance improvement of the architecture in terms of reliability, delay and resource utilization. Finally, some future problems and research directions of the architecture are discussed.

**Keywords:** high-speed rail network; SDN; MEC; resource adaptation; network latency; packet loss; resource utility

## 0 引言

随着我国铁路全面覆盖以及列车移动速度稳步提升, 高速铁路通信网络已然成为智能交通系统的重要组成部分。广义上, 高速铁路网络的车地通信模式类似一种特殊的车对网络 (V2N, vehicle-to-network) 车联网场景<sup>[1]</sup>, 通过汇聚铁路沿线的 GSM-R、LTE-R 以及未来的 5G-R 等专用网络资源<sup>[2-3]</sup>或是 3G、4G、5G 以及未来 6G 等公共蜂窝网络资源<sup>[4]</sup>, 为列车运行控制或乘客休闲娱乐提供网络服务。这种融合了铁路沿线多维异构网络资源的高铁网络系统丰富了铁路沿线的网络可用性, 为提升铁路服务质量带来了

潜在优势。

铁路信息技术的发展也促进了铁路服务向多样化、高需求化的方向演变。传统高速铁路通信系统是面向铁路控制专用的, 为列车安全调度控制提供通信传输通道。发展至今, 高速铁路通信网络不仅需要为铁路专用任务提供通信服务, 还需要为车上普通用户提供连通互联网的网络信息服务, 催生了对高铁网络的带宽、延迟、可靠性等性能要求有着较大差异的多样化业务<sup>[2]</sup>。近年来, 为了提供更加安全的列车服务以及实时的多媒体信息, 铁路通信网络从传统的仅面向语音传输、列车控制信令等服务演变为面

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-07-24。

基金项目: 国家自然科学基金(62101585, 62201534)。

作者简介: 严晓云(1991-), 女, 博士, 工程师。

通讯作者: 刘智鑫(1991-), 男, 博士, 工程师。

引用格式: 严晓云, 李佳伟, 刘智鑫. SDN 和 MEC 架构下高铁网络多维资源适配架构研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 303-309.

向高清视频、实时在线等高数据速率、时延敏感型服务<sup>[2]</sup>。与此同时,移动接入设备的数量呈现显著增长的趋势,将使得网络中移动流量猛然上升<sup>[5]</sup>,这些移动用户多样化、多元化的业务需求也将快速提升高速铁路网络的业务流量,一方面给高速铁路网络的传输容量带来了巨大的挑战,另一方面现有的高铁网络系统无法灵活协同多维异构网络资源,难以及时、可靠地响应差异化服务的需求,造成资源浪费、服务质量不佳。

为了满足高铁通信行业和列车乘客对高铁网络带宽、延迟、可靠性等越来越高的服务需求,解决多维异构网络资源协同问题,国内外众多研究学者就软件定义网络(SDN, software-defined network)、5G 等新兴技术对高铁网络的演进展开分析讨论。5G 蜂窝网络的目标是实现峰值超高速带宽、毫秒级时延、超高密度链接,是增强高速铁路网络系统全面感知和“泛在”连接能力的重要手段<sup>[6-7]</sup>。然而,5G 网络采用毫米波技术,虽然可以提高容量、带宽,但是使用更高频段也将使得 5G 蜂窝网覆盖域降低,在高速移动环境中将面临更频繁的切换,造成业务传输不连续,降低传输可靠性<sup>[8]</sup>。软件定义网络被引入无线网络和车联网场景中,通过将数据平面与控制平面解耦,实现网络控制的直接可编程性和无线应用底层基础设施的抽象,以满足其性能和管理需求<sup>[9-10]</sup>。但是,文献[10]仅仅讨论了高速移动对软件定义车联网(SDVN, software-defined vehicle network)的移动管理和网络信息实时感知等方面带来的挑战,却没有提出一种具体的解决方法。综上所述,这些架构和机制的提出并不能解决所有的高铁网络的信息服务需求。因此,急需一种能高效协同利用高铁沿线异构网络资源的架构和适配技术,以提升高可靠、低延迟等差异化服务需求的服务质量。

考虑到时变网络中网络状态信息感知更新的实时性、时间敏感服务对网络延迟的紧迫性等因素,多接入边缘计算(MEC, multi-access edge computing)技术是一个很好的解决方法。MEC 技术以更靠近移动终端的边缘位置,可以为移动用户提供云计算功能和信息计算(IT information technology)服务,有利于减少网络时延、加快服务响应、缓解核心网络的负荷<sup>[11-12]</sup>。一方面,MEC 与移动终端的近距离连接也有利于网络状态信息的实时感知、收集、共享,为资源适配管理提供更加实时的状态信息,提高适配的准确性。另一方面,基于 MEC 的边缘云平台也可以开放给第三方内容提供商,实现第三方应用的部分服务功能部署,在边缘位置即可实现部分服务的快速响应,提高用户对时间敏感服务的体验<sup>[13-14]</sup>。

综合考虑现有高速铁路多维资源协同适配问题和服务差异化与多元化需求,以及 SDN 与 MEC 技术优势,本文采用集中式与分布式相结合的方法,提出了一种基于 SDN 和 MEC 的高铁网络多维资源适配架构。为适应高速移动环境,本文首先基于该架构,布设了 SDN 控制器、MEC 服务器和软件定义移动单元 3 个主要功能实体,在这 3 个功能实

体上分别设计了核心功能组件,并详细介绍了多个组件间的协作流程,以实现多维资源协同管理、高效响应多元化服务;然后,从理论分析层面和真实的高铁数据试验层面,分别评估了该架构的对高速铁路网络资源协同带来的优势。最后,讨论了该架构未来的一些问题和研究方向。

## 1 现有 SDN 与 MEC 的车联网架构研究工作

### 1.1 软件定义铁路通信网络

众多学者将 SDN 的控制与转发分离设计思路应用于铁路无线通信网络<sup>[15-16]</sup>中,实现移动环境中用户需求与网络资源的动态适配。

文献[15]针对铁路通信网络特点和业务需求,提出了一种基于 SDN 的铁路无线通信网络,控制面通过 Markov 模型实现动态调度决策,转发面综合接入多种异构无线通信网络,根据控制面的决策按需协同传输。但是,该文献主要针对架构的可用性和调度功能进行了测试验证,未对网络传输的性能指标进行分析评估。

文献[16]面向铁路运行控制业务,设计了基于软件定义网络和网络功能虚拟化的铁路系统空地融合网络体系架构,并从带宽、时延、覆盖能力、数据传输速率与移动性支持、安全性、可靠性等多个角度分析了该架构的优势。该文献虽然提出了 MEC 就近部署于接入网边缘,但是仅试验评估了架构的可靠性,未验证 MEC 对架构带来的优势,试验评估相对单薄。

### 1.2 MEC 增强的软件定义车联网

鉴于 MEC 对异构网络和移动场景的优势,众多学者对 MEC 应用于软件定义车联网展开相关的研究<sup>[17-19]</sup>。

文献[17]基于 MEC 特点设计了一种可扩展、快速响应的 SDVN 架构,提高通信可靠性,降低端到端传输延迟。该 SDVN 架构与 SDN 类似,包括数据平面、控制平面和应用平面。其中,SDN 控制器部署于 MEC 云平台中,协调管控车联网中 V2V、V2I、V2N 等网络接入方式。但是,这种分布式控制架构在车辆移动到另一个 SDN 控制域时,相邻控制器需要及时交换相关信息、更新流表。而且控制域的范围与基站覆盖域相关,很有可能存在失去 SDN 控制的区域。

不同于文献[17]中的 3 层结构,文献[18]将 SDVN-MEC 的数据平面分离为传输、缓存、计算平面和道路车辆平面,并基于这个四层架构针对时延容忍服务在 SDVN-MEC 架构中设计了一种资源管理机制,以最小化系统开销。该机制联合边缘缓存计算资源和远端云缓存计算资源,考虑网络拥塞开销和执行时间的代价,对服务在本地、边缘或远端执行任务进行决策。

文献[19]在控制平面和数据平面之间新增了一个社会平面,为临近车辆中具有相似的兴趣、目标建立互联团队。互联团队作为一个整体由路边基础设施和基站提供服务,这增强系统容量。该架构的控制平面中除了部署 SDN 全局控制器外,还辅助了 MEC 服务器作为本地控制器,用于加强对互联团队(VNG)的建立、维护等管理工作,强化网络状态监测、指令下发以及本地决策处理的实时性。

### 1.3 现状小结

文献 [15-16] 中, 虽然针对铁路环境提出了软件定义的铁路无线通信网络架构, 但是针对该网络架构的网络传输性能分析评估不足, MEC 部署于铁路沿线接入网侧的能力增强效果也未开展相关的分析验证。尤其是在高速移动的铁路环境中。

文献 [17-19] 主要是针对中低速的车联网环境构建, 虽然高速铁路通信网络是一种依赖于铁轨沿线多个蜂窝网络建立的 V2N 通信模式的特殊车联网场景, 但是, 适用于中低速车联网架构中的集中控制器、MEC 平台等功能实体以及其中的功能组件部署, 极可能不适用于高速移动环境。

综上所述, 考虑到高铁通信网络的高速移动、信道环境恶劣、网络资源异构等特点, 以及铁路运行控制通信保障与乘客互联网服务的差异化需求, 架构设计仍面临如下挑战:

1) 列车行驶车速将使得车地连接产生时变的无线信道, 需要建立合理的信道模型;

2) 过期、不准确的无线链路状态信息 (如连接状态、丢包率、带宽、时延等) 将影响传输可靠性、服务质量, 需要对无线链路质量状态进行实时、可靠的感知预测;

3) 同时使用多个异构网络资源为高效协同使用带来了困难, 需要建立多个基站资源、MEC 服务器资源之间的协作机制;

4) 高速列车通信服务行业对可靠性、时效性有非常严格的要求, 乘客信息娱乐服务的需求也是复杂多元的, 拟建立的新型架构满足特定的服务需求, 尤其是时间需求。

## 2 多维适配架构设计

本文结合 SDVN 相关文章论述的特性<sup>[10]</sup>, 以及集中式与分布式相结合方式的优势<sup>[20]</sup>, 将车对车 (V2V, vehicle-to-vehicle)、车对基础设施 (V2I, vehicle-to-infrastructure)、车对网络 (V2N, vehicle-to-network)、车对行人 (V2P, vehicle-to-pedestrian)、车对路边 (V2R, vehicle-to-road) 等车对任何事物 (V2X, vehicle-to-everything) 的车联网通信模式都包含在内, 覆盖中低移动速度的城市智能交通应用和高速移动场景的铁路通信应用, 设计了如图 1 所示的基于 SDN 和 MEC 的车联网通用框架 (SDVN-MEC), 并进一步针对高速列车无线通信场景设计了多维资源适配相关的功能组件。

该架构由应用平面 (application plane)、控制平面 (control plane) 和数据平面 (data plane) 3 个平面组成。各平面的功能具体如下。

1) 应用平面: 应用平面主要负责提供多样化的网络服务, 满足列车运控人员和乘客的业务需求。主要部署的功能实体由运控服务平台、云平台服务器以及语音、视频、图像等多媒体服务器组成。一方面, 该平面为服务提供商提供开放接口, 便于开发部署列车运行控制服务、实时视频、数据中心、云计算等服务程序; 另一方面, 该平面汇聚不同用户的通信业务需求, 为控制平面的适配策略提供

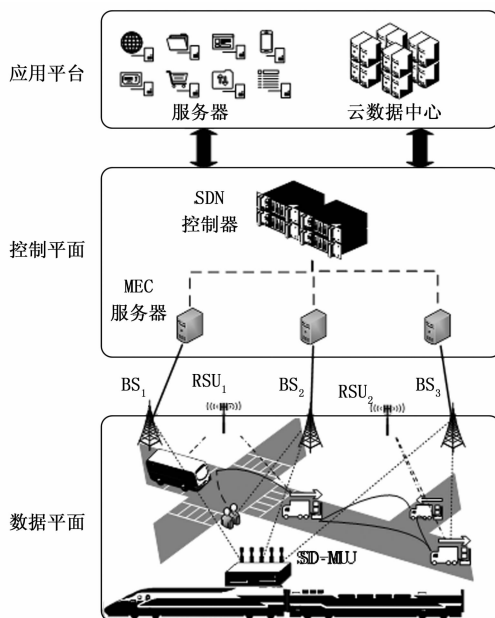


图 1 基于 SDN 和 MEC 的车联网多维资源适配架构

输入, 更好地支持不同地高速铁路通信网络的业务。

2) 控制平面: 控制平面主要负责实现全局网络拓扑管理和资源调度等功能。根据高速移动和恶劣的信道环境等特点, 主要部署的功能实体由一个远程 SDN 控制器和若干个边缘 MEC 服务器组成。其中, SDN 控制器来实现对整个车联网通信系统的管理和控制, 包括感知应用平面的服务详尽需求、监测数据平面状态、列车轨迹追踪预测, 通过适配策略调整转发规则, 并向底层下发数据转发规则。MEC 云服务器按需部署在铁路沿线的无线通信网络接入网边缘 (比如蜂窝网络的基站中), 将部分管控功能和服务功能组件与内容数据下沉至边缘控制器中, 一方面在其控制范围内, 加强与高速列车建立的无线链路状态感知、提升车地多维资源适配的时效性与准确性, 另一方面在边缘侧立即响应部分低时延要求的业务场景, 降低时间敏感服务的响应时间。

4) 数据平面: 数据平面主要负责各类业务流量按照控制平面下发的相应转发规则执行路由转发。主要的功能实体包括无线通信网络中数据转发相关的基础设施、移动通信车辆以及相关的无线设备。城市交通路边或铁路沿线的基础设施包括多个无线接入网、路边单元 (RSU, roadside unit) 和 3G/4G/5G 基站 (BS, base station) 等基础设施, 移动通信车辆包括车载本身具备通信功能 (比如, 智能通信车辆、通信列车) 和新布设车载软件定义移动单元 (SD-MU, software-defined mobile unit)。具体的, 路边单元主要是城市道路和铁轨沿线的信号灯、智能调度设施等智能交通相关基础设施。路边基站设施通常由移动运营商建设, 可以是 3G、4G、5G 以及未来 6G 等专用与公共蜂窝网络或是 Wi-Fi 的接入点, 为通信车辆提供互联网接入。车载 SD-MU 通过集成多个无线通信网络接入手段, 为车上用户和地面网络之间建立多连接通道, 并且接受控制平面管控,

实现车地多维网络资源状态的实时上报、转发规则接受与业务按需转发等功能。

### 3 功能组件设计

为了实现高速铁路场景中多链路状态实时感知、按需响应服务需求，本章针对 SDVN-MEC 架构中 SDN 控制器、MEC 服务器和 SD-MU 三个主要实体，开展功能组件设计和各功能实体间的协作流程设计，如图 2 所示。值得注意的是，控制器因软件定义网络的可编程功能可以部署一系列功能组件。例如，实时感知收集的信息可以通告列车信息管理组件，便于管理和更新列车的到达时间、铁路路况等信息。论文主要针对多维异构网络资源的协同适配机制开展相关的功能组件设计开发，其他功能软件可根据研究进展按需增设。

#### 3.1 SDN 控制器功能组件

SDN 控制器内嵌的功能组件主要包括以下 6 种：

- 1) 拓扑管理组件，负责管理、维护全局的网络拓扑；
- 2) 无线资源管理组件，负责管理和更新所有与通信车辆连接的接入网边缘侧基站信息（如 RSU/BS 身份 ID、位置和传输范围）和无线连接时延、吞吐量、丢包率、信噪比等状态信息；
- 3) 列车位置管理组件，负责管理和更新通信车辆状态信息（如身份 ID、位置和移动速度），勾勒并预测列车行驶轨迹；
- 4) 流表管理组件，负责维护、更新全局的流表信息；
- 5) 服务 QoS 管理组件，负责感知应用平面各类服务对网络功能和性能方面的需求；
- 6) 转发适配策略组件，负责根据全局拓扑、无线链路状态和服务需求选择合适的数据转发链路，并向转发平面下发流表决策。

#### 3.2 MEC 服务器功能组件

MEC 服务器内嵌的功能组件主要包括以下 4 种：

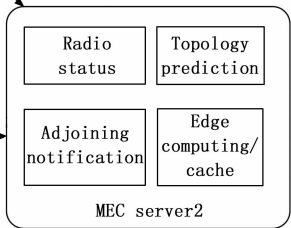
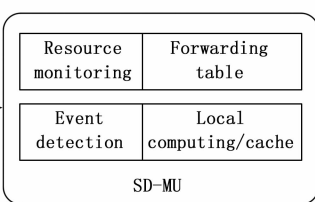
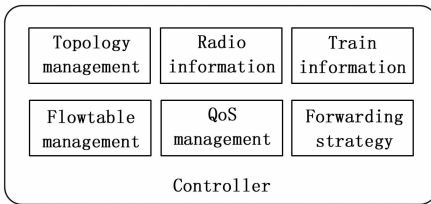
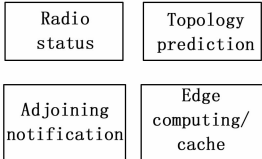


图 2 功能实体间的协作流程

1) 无线状态感知组件，负责管理和更新本地接入网边缘侧 BS 与通信车辆连接的无线链路的时延、吞吐量、丢包率、信噪比等状态；

2) 拓扑预测组件，负责更新本地 BS 覆盖范围内通信车辆进入、离开变化情况，维持实时的本域网络拓扑；

3) 毗邻信息通告组件，负责发送、接收相邻 MEC 服务器（如 MEC server1 与 MEC server2）之间信息更新消息，当移动到相邻的下一个 BS 覆盖域时，当前覆盖域的 MEC 服务器提前将通信车辆相关信息通告给下一个 MEC 服务器，以实现用户无缝切换和业务不中断；

4) 边缘计算/缓存组件，负责根据通信车上业务流量的卸载迁移需求为列车提供接入网边缘侧的计算/缓存服务。

#### 3.3 SD-MU 功能组件

车载 SD-MU 内嵌的功能组件主要包括以下 4 种：

- 1) 资源监测组件，负责实时感知无线链路的连接状态以及列车行驶相关的状态信息。具体的，该组件感知收集的数据集包括网络相关参数（如带宽、时延、分组丢包率）、信道相关参数（如 SNR、RSSI）和车辆信息（如位置、速度）；
- 2) 流表管理组件，根据控制平面下发的流表信息，负责转发策略更新、维护流表；
- 3) 事件探测组件，负责探测列车安全调控方面的紧急事件，调整本地业务流量的转发优先级，并且可以通过将紧急事件上传至 MEC 服务器来及时进行处理；
- 4) 本地计算/缓存组件，负责根据列车本地业务流量的计算/缓存服务。

#### 3.4 功能实体协作流程

三类功能实体间的协作流程如图 2 所示，涉及的实时状态感知、移动切换的主要功能流程如下：

1) 初始时，SDN 集中控制器、多个 MEC 服务器和车载 SD-MU，可通过多个无线通信网建立连接；

2) 车载 SD-MU 与多个 MEC 服务器之间根据无线状态

感知组件, 周期性或触发式监测多维网络无线接入侧的链路状态与网络带宽资源, 并通过 MEC 服务器实时向 SDN 控制器和临近 MEC 服务器上报状态信息;

3) SDN 控制器根据上报的状态信息, 建立全局拓扑状态, 并根据业务需求构建不同的转发策略, 并将转发策略下发至车载 SD-MU;

4) 当列车即将行驶到某个 MEC 管控范围外时, 当前 MEC 服务器可根据拓扑预测将于 SD-MU 的连接信息及时迁移至临近 MEC 服务器中, 在车载 SD-MU 与临近基站建立连接时, 可通过临近 MEC 服务器接受控制器管控, 进行数据传输、计算、缓存。

#### 4 潜在优势

本文提出的网络架构综合了 SDN 和 MEC 的技术优势, 以及车联网场景中多维异构网络资源的优势, 可以为移动用户提供更高带宽的通信服务的同时, 也可以提升服务质量。具体带来的潜在优势包括以下方面:

1) 传输带宽提高。与单通道传输方式相比, 该架构集成了铁路沿线多维资源, 提升了网络可用性和传输容量, 可以为更多用户或更高带宽需求的业务提供服务。

2) 实时无线状态感知。基于更靠近移动终端的 MEC 服务器感知采集的无线链路状态实时性更高, 可为适配策略提供包括网络时延、丢包率、吞吐量、信号强度、蜂窝基站信息、列车位置等更为精准可靠的状态信息。

3) 移动性支持。通过 MEC 服务器和全局控制器可以实现列车移动轨迹追踪、预测网络拓扑的动态变化趋势, 提前在相邻 MEC 服务器之间建立联系, 以旧 MEC 服务器作为移动代理, 直到全局通告新建立的链路或者超过固定时限, 用以提高移动性支持。

4) 可靠性提高。通过 MEC 服务器和全局控制器实现列车信息、无线状态信息的实时感知、预测, 及时修改、调整转发规则, 利用冗余传输、备份缓存等机制避免数据包丢失, 提高传输可靠性。

5) 资源高效协同。基于网络架构中的 3 个功能实体, 对下实现网络状态实时感知、预测, 对上感知服务需求, 通过控制器和 MEC 服务器实现灵活高效的适配机制, 提高多维网络资源协同效率, 按需实现业务流量转发。

6) 服务灵活部署。通过 MEC 云平台的开放式功能以及网络功能虚拟化, MEC 服务器上可以灵活部署第三方应用。并且, MEC 服务器感知的网络状态信息可以开放共享给第三方内容提供商, 提高第三方服务的响应效率。

7) 低延迟。针对时间敏感的服务可以在 MEC 服务器部署第三方服务程序, 加快响应流程, 降低网络延迟。针对高计算资源需求的服务, 如增强现实/虚拟现实 (AR/VR, augmented reality/virtual reality) 应用, 可以执行 MEC 边缘计算、缓存迁移, 降低服务执行延迟, 提高服务体验。

#### 5 实验结果与分析

为了验证 SDVN-MEC 架构的多维资源协同效果, 本文

采用如图 3 所示的一个网络场景作为实验案例进行仿真分析。其中,  $BS_1 \{1, 2\}$ 、 $BS_2 \{1, 2\}$  和  $BS_3 \{1, 2\}$  分别属于 3 个不同的电信运营商提供的无线接入网 (RAN)。那么, 车载 SD-MU 可以同时接入这 3 个网络, 并且通过 MEC 服务器和控制器实现资源协同。高速列车以车速  $v = 300 \text{ km/h}$  自右向左行驶, 依次途径基站覆盖域  $BSC1 = \{BS_{11}, BS_{21}, BS_{31}\}$ 、 $BSC2 = \{BS_{32}, BS_{11}, BS_{21}\}$ 、 $BSC3 = \{BS_{22}, BS_{32}, BS_{11}\}$  和  $BSC4 = \{BS_{12}, BS_{22}, BS_{32}\}$ 。本文基于在京昌高铁沿线感知采集的中国移动、中国电信、中国联通三大运营商的大量真实的 LTE 网络的无线链路状态数据, 对提出的 SDVN-MEC 架构针对延迟、可靠性和资源利用率展开了仿真实验, 并且就网络延迟、丢包率两类性能指标, 对比分析了采用单一 LTE 网络 (图中  $RAN_2$ )、基于 SDVN-MEC 架构的单一 LTE 网络 (图中 SDVN-MEC  $RAN_2$ ) 和基于 SDVN-MEC 架构的 3 个 LTE 网络 (图中 SDVN-MEC  $RAN_{1,2,3}$ ) 3 种传输机制的仿真结果。

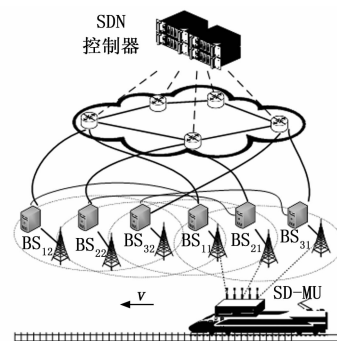


图 3 SDVN-MEC 架构中多 MEC 服务器的协同示意

实验结果如图 4 所示, 单  $RAN_2$ 、SDVN-MEC 单  $RAN_2$  传输机制设计只能使用  $RAN_2$ , 本文提出的 SDVN-MEC 机制可以同时使用  $RAN_{\{1, 2, 3\}}$  多维网络资源。在这种情况下, 基于本文提出的新型架构设计的多维资源协同

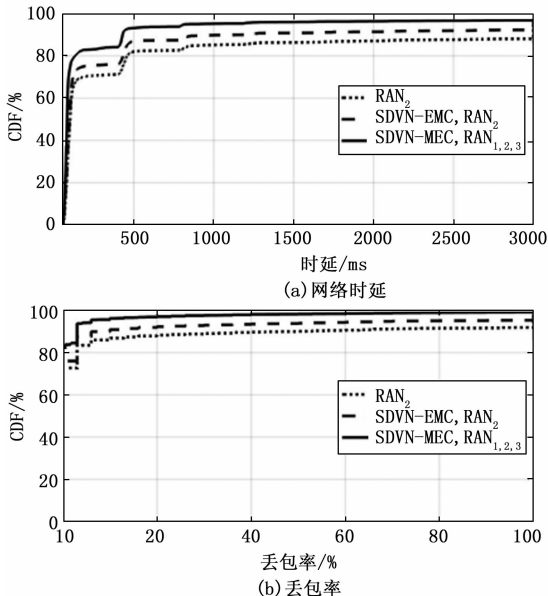


图 4 使用不同适配策略的仿真结果

机制,即 SDVN-MEC 多 RAN 机制,网络延迟和可靠性都优于其他两种架构的机制。RAN<sub>2</sub> 的 LTE 时延、丢包率最差,SDVN-MEC 的 RAN<sub>2</sub> 次之。这是因为,在高速移动环境中,单链路 LTE 的信道是时变的且遭遇频繁切换,虽然 SDVN-MEC 单链路机制中控制器和 MEC 服务器可以根据实时感知及时切换转发链路,稍微提高延迟和丢包性能。但是,在相邻基站水平切换时,新的无线链路质量并不一定比旧链路质量高出很多。与之对比的,SDVN-MEC 多 RAN<sub>{1,2,3}</sub> 机制在多维资源情况下,往往采取垂直切换,即在不同 RAN 之前切换。这种切换的结果,往往新的无线链路质量比旧链路质量高出很多,也就获得了更佳的网络延迟和丢包率性能。

## 6 挑战

面向未来高速铁路网络的应用,由于列车处于高速移动状态,而且无线信道环境恶劣、业务需求多样化发展,本文提出的 SDVN-MEC 架构还面临着如下问题和挑战。

1) 安全隐私问题。对于通信车辆尤其是列车,其安全、隐私方面的敏感信息泄露将严重影响车辆安全运行、威胁乘客人身安全。比如,攻击者可以通过获取的敏感信息对车辆实现远程控制,甚至是挟持车辆以及车上的乘客,实行绑架勒索等犯罪行为。为了解决用户、车辆安全隐私问题,针对不同的攻击类型已经设计了多种加密、追踪等策略<sup>[21]</sup>。在这里,考虑到新型高速列车架构面向乘客开放,这个问题不仅需要来自地面的攻击者,也要加强车上是否有恶意攻击者。对此,可以加强对网络接入用户的身份标识认证,进行列车通信与乘客通信的网络安全隔离。

2) 多径并行传输。它是一种特殊的资源协同传输机制。由于架构存在多维异构网络资源,可以利用多径并行传输机制诸如 SCTP、MPTCP 等增大资源利用率、提高冗余。对于高可靠需求的服务来说,在开销允许范围内,对数据进行冗余传输也是一种保证可靠传输的手段。然而,在高速移动环境中多径传输将带来数据包乱序问题,降低传输性能。而且,频繁的链路切换也增加了多径传输机制的路径管理工作,也使得拥塞控制、调度无法及时适应<sup>[22]</sup>。为了缓解多径传输机制在高速移动环境中的这些问题,一方面需要提高对多条无线链路状态感知、预测的准确度,另一方面需要设计应变能力更优的拥塞控制和调度机制。

## 7 结束语

本文提出了一种基于 SDN 和 MEC 的高铁网络多维资源适配架构,基于集中式与分布式相结合的网络架构,满足不同服务对带宽、延迟、可靠性等多元化的要求。首先该架构中以 SDN 逻辑集中控制和 MEC 分布式控制实现实时感知并动态调整通信列车的多维资源适配策略。依赖于 MEC 以更靠近移动终端的特点,该架构可以实时收集链路连接状态、列车移动轨迹等信息;同时可以在 MEC 云平台嵌入第三方应用,提供边缘计算、缓存、信息服务等,及时响应服务,满足低延迟需求。为了高效协同多维网络资源,在三大功能

实体中设计相应的组件功能和协作流程。随后,分析了该架构的潜在优势,并通过真实的高铁数据进行性能评估实验,验证该架构在可靠性、延迟方面的优势。

## 参考文献:

- [1] 刘 轶. 高速公路 V2V 通信中 C-V2X 和 IEEE802.11p 通信协议的比较 [J]. 交通世界, 2023 (12): 1-3, 10.
- [2] AI B, GUAN K, RUPP M, et al. Future railway services-oriented mobile communications network [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53 (10): 78-85.
- [3] 曾成胜. 基于高性能射线跟踪的高铁车站场景 5G-R 网络优化技术 [J]. 北京交通大学学报, 2023, 47 (2): 13-22.
- [4] FOKUM D T, FROST V S. A survey on methods for broadband internet access on trains [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12 (2): 171-185.
- [5] AI-TURIMAN F, EVER E, ZAHMATKESH H. Green Femtocells in the IoT Era: traffic modeling and challenges-an Overview [J]. IEEE Network, 2017, 31 (6): 48-55.
- [6] WANG C X, HAIDER F, GAO X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52 (2): 122-130.
- [7] 李 平, 栾 中, 刘子源, 等. 面向智能高铁的 5G 技术示范应用场景研究 [J]. 中国铁路, 2022, 723 (9): 62-68.
- [8] SONG H, FANG X, YAN L. Handover scheme for 5G C/U plane split heterogeneous network in high-speed railway [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63 (9): 4633-4646.
- [9] LI F X, XU X B, HAN X, et al. Adaptive controller placement in software defined wireless networks [J]. 中国通信: 英文版, 2019, 16 (11): 12.
- [10] YAQOOB I, AHMAD I, AHMED E, et al. Overcoming the key challenges to establishing vehicular communication: is SDN the answer? [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55 (7): 128-134.
- [11] 杜建华, 王立俊, 谢寒生, 等. 基于移动边缘计算环境下的服务缓存和任务调度联合优化算法 [J]. 计算机测量与控制, 2022 (5): 30.
- [12] NDIKUMANA A, TRAN N H, Ho T M, et al. Joint communication, computation, caching, and control in big data multi-access edge computing [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19 (6): 1359-1374.
- [13] YANG S, TSENG Y, HUANG C, et al. Multi-access edge computing-enhanced video streaming: proof-of-concept implementation and prediction/QoE models [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 68 (2): 1888-1902.
- [14] 王万齐, 沈海燕, 程清波, 等. 高铁数据传输中融合 MEC 理论的核心技术 [J]. 电子技术与软件工程, 2020, 177 (7): 16-18.
- [15] 王开锋, 张 琦, 刘 畅, 等. 面向软件定义的铁路无线通信网络 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2019, 59 (2):

142 - 147.

[16] 滕颖蕾, 李鑫, 王剑, 等. 基于 SDN 的铁路系统空地融合网络架构 [J]. 物联网学报, 2020, 4 (3): 30 - 41.

[17] LIU J, WAN J, ZENG B, et al. A scalable and quick-response software defined vehicular network assisted by mobile edge computing [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55 (7): 94 - 100.

[18] LI M, SI P, ZHANG Y. Delay-tolerant data traffic to software-defined vehicular networks with mobile edge computing in smart city [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 (10): 9073 - 9086.

[19] HUANG X, YU R, KANG J, et al. Exploring mobile edge

computing for 5G-enabled software defined vehicular networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24 (6): 55 - 63.

[20] 高先明, 王宝生, 邓文平. SDRS: 集中与分布控制相结合的弹性多路径路由机制 [J]. 计算机学报, 2018, 41 (9): 1976 - 1989.

[21] LU Z, QU G, LIU Z. A survey on recent advances in vehicular network security, trust, and privacy [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018 (99): 1 - 17.

[22] 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. ACM, 2018: 161 - 175.

(上接第 289 页)

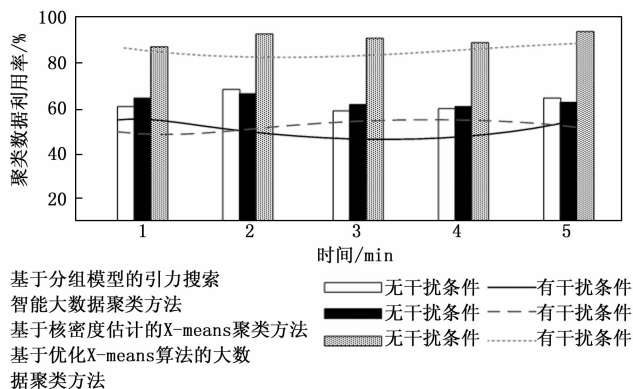


图 6 大数据聚类方法应用效果测试结果

从图 6 中可以看出, 与无干扰条件相比, 在有干扰条件下, 聚类大数据的利用率均会得到不同程度的下降。通过纵向对比, 发现在有、无干扰环境下, 优化设计聚类方法的数据利用率始终高于 80%, 且高于两种传统方法, 由此证明优化设计方法的应用效果更优。

### 3 结束语

目前 Hadoop 平台已从最初的单一开放源码框架, 发展成一个系统、分布式计算框架, 并可为流态化大数据聚类分析提供基本平台, Hadoop 平台从架构组成到包含的技术类别都具有一定优势。在 Hadoop 平台的支持下, 利用 X-means 算法实现对大数据聚类方法的优化设计, 解决了传统 K-means 算法在聚类过程中存在的问题。从实验结果中可以看出, 优化设计方法具有良好的聚类效果和应用效果, 对于大数据的管理与处理工作具有重要意义。

#### 参考文献:

[1] 胡晓东, 高嘉伟. 基于分组模型的引力搜索智能大数据聚类方法 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (6): 1660 - 1667.

[2] 熊开玲, 彭俊杰, 杨晓飞, 等. 基于核密度估计的 K-means 聚类优化 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (2): 1 - 5.

[3] 王雪蓉, 万年红. 云模式事件混沌关联特征提取的物联网大数据聚类算法 [J]. 计算机应用研究, 2021, 38 (2): 391 - 397.

[4] 谢挺, 刘瑞华, 魏正元. 一类连续的 K-means 等价聚类模型

[5] 贺建风, 李宏煜. 大数据背景下基于社交网络的聚类随机游走抽样算法研究 [J]. 统计研究, 2021, 38 (4): 131 - 144.

[6] 郑冬花, 叶丽珠, 隋栋, 等. 云计算环境中面向大数据的改进密度峰值聚类算法 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2022, 36 (5): 592 - 596, 602.

[7] 申锐, 吴睿. 抽样改进加权核大数据谱聚类算法 [J]. 机械设计与制造, 2021 (1): 171 - 174.

[8] 刘解放, 张志辉. 面向大数据的并行聚类算法 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (8): 2265 - 2270.

[9] 边鹏, 赵妍, 苏玉召. 一种改进的 K-means 算法最佳聚类数确定方法 [J]. 现代图书情报技术, 2011 (9): 34 - 40.

[10] 葛青青, 高建瓴. 粒子群算法改进的 K-Means 聚类算法 [J]. 微型电脑应用, 2015, 31 (10): 45 - 46 + 5.

[11] 张晓, 王红. 一种改进的基于大数据集的混合聚类算法 [J]. 计算机工程与科学, 2015, 37 (9): 1621 - 1626.

[12] 李旻, 何婷婷. 基于随机数三角阵映射的高维大数据二分聚类初始中心高效鲁棒生成算法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (4): 948 - 955.

[13] 全海金, 何映思. 基于大数据的改进模糊 K-means 算法 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2018, 32 (12): 145 - 148.

[14] 宋旭东, 朱文辉, 邱占芝. 大数据 K-means 聚类挖掘优化算法 [J]. 大连交通大学学报, 2015, 36 (3): 91 - 94.

[15] 周文娟, 赵礼峰. 基于 ACO-PSO 自适应的划分聚类算法 [J]. 计算机技术与发展, 2019, 29 (2): 90 - 95.

[16] 姚奥, 张宇. 一种优化的 K-Means 聚类算法 [J]. 工业控制计算机, 2016, 29 (11): 120 - 121, 124.

[17] 刘寒梅, 张鹏. 基于模拟退火算法对 K-means 聚类算法的优化 [J]. 中国西部科技, 2013, 12 (6): 23 - 24, 71.

[18] 陈兴蜀, 吴小松, 王文贤, 等. 基于特征关联度的 K-means 初始聚类中心优化算法 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2015, 47 (1): 13 - 19.

[19] 戴月明, 王明慧, 张明, 等. SVD 优化初始簇中心的 K-means 中文文本聚类算法 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30 (10): 3835 - 3842.

[20] 林丹楠, 黄锐. 大数据挖掘中的 MapReduce 并行聚类优化算法研究 [J]. 太原师范学院学报 (自然科学版), 2019, 18 (4): 49 - 53.