



# 计算机科学

COMPUTER SCIENCE

## 基于Wi-Fi 6的无线列车通信网络性能研究

杨少龙, 朱国胜, 庞兴龙, 李修远, 潘登

### 引用本文

杨少龙, 朱国胜, 庞兴龙, 李修远, 潘登. 基于Wi-Fi 6的无线列车通信网络性能研究[J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 220600179-5.

YANG Shaolong, ZHU Guosheng, PANG Xinglong, LI Xiuyuan, PAN Deng. [Study on Performance of Wireless Train Communication Network Based on Wi-Fi 6](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 220600179-5.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### [阵列光幕测试系统目标识别方法](#)

Testing System of Target Recognition Method of Array Screen

计算机科学, 2022, 49(11A): 211000109-4. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211000109>

#### [未知网络攻击识别关键技术研究](#)

Study on Key Technologies of Unknown Network Attack Identification

计算机科学, 2022, 49(6A): 581-587. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210400044>

#### [基于半监督学习的网络流量分析研究](#)

Survey of Network Traffic Analysis Based on Semi Supervised Learning

计算机科学, 2022, 49(6A): 544-554. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210600131>

#### [面向6G可信可靠智能的区块链分片与激励机制](#)

Blockchain Sharding and Incentive Mechanism for 6G Dependable Intelligence

计算机科学, 2022, 49(6): 32-38. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400004>

#### [基于吸收态马尔可夫链的智能无人车系统实时性能分析](#)

Real-time Performance Analysis of Intelligent Unmanned Vehicle System Based on Absorbing Markov Chain

计算机科学, 2021, 48(11A): 147-153. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210300050>

# 基于 Wi-Fi 6 的无线列车通信网络性能研究

杨少龙 朱国胜 庞兴龙 李修远 潘 登

湖北大学计算机与信息工程学院 武汉 430062

(1528945226@qq.com)

**摘要** 现代列车的正常运行离不开机械和电子系统的相互配合,特别是列车控制和管理系统(TCMS)在其中发挥着关键作用。与 TCMS 相关的应用程序和服务运行在列车通信网络(TCN)上,该网络是有线的且通常是冗余线路,这就会造成大量的有线链路互联,导致网络部署和维护困难且灵活性差。提出了基于 Wi-Fi 6 的列车无线通信组网方案,该方案将 Wi-Fi 6 技术应用于车辆级的 ECN 网络中,所做的工作包括对网络架构的设计、通信数据的选择和仿真环境下的实验验证。实验结果表明,所提出的基于 Wi-Fi 6 的列车通信服务质量中时延、抖动和丢包率满足 IEC 61375-3-4 标准,相对于长期演进技术(LTE)也占据了优势。

**关键词:** Wi-Fi 6; 列车通信网络; 无线通信; 实时性

**中图分类号** TP393

## Study on Performance of Wireless Train Communication Network Based on Wi-Fi 6

YANG Shaolong, ZHU Guosheng, PANG Xinglong, LI Xiuyuan and PAN Deng

School of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China

**Abstract** The normal operation of modern trains is inseparable from the cooperation of mechanical and electronic systems, especially the train control and management system(TCMS) plays a key role in it. TCMS-related applications and services run on the train communication network(TCN), which is wired and often redundant, resulting in a large number of wired links interconnection, making network deployment and maintenance difficulties, and poor flexibility. This paper proposes a Wi-Fi 6-based train wireless communication networking scheme, which applies Wi-Fi 6 technology to the vehicle-level ECN network. The work includes the design of network architecture, the selection of communication data and the experimental verification in simulation environment. Experimental results show that the proposed Wi-Fi 6-based train communication QoS in terms of delay, jitter and packet loss rate meets the IEC 61375-3-4 standard, and have advantages over long term evolution(LTE).

**Keywords** Wi-Fi 6, Train communication network, Wireless communication, Real-time

### 1 引言

列车通信网络<sup>[1]</sup>是现代列车控制系统中的重要组成部分。为实现列车通信,绞线式列车总线/多功能车辆总线(Wire Train Bus/Multifunction Vehicle Bus, WTB/MVB)技术被广泛使用。随着列车信息化技术的高速发展以及 IEC 61375-1 标准中对列车中实时以太网的制定<sup>[2]</sup>,以太网列车骨干网/以太网列车编组网(Ethernet Train Backbone/Ethernet Consist Network, ETB/ECN)技术目前已逐步应用于列车通信网络。列车通信网络提供的功能可以分为 3 类:与安全相关的列车控制与监控系统(Train Control and Monitor System, TCMS),负责列车的安全运行;为操作员提供运营服务,如列车视频监控和语音服务;为乘客提供互联网接入服务。

目前 TCMS 系统的数据传输都是采用有线的通信,为了保证可靠性,设备之间的链路要满足冗余要求<sup>[3]</sup>,这些有线链路通常都是成倍出现,而冗余的有线链路会造成网络环境部署困难,同时带来不可忽视的安装和维护成本。与此同时,随着无线技术的快速发展,现行的无线通信标准已经支持设备之间以非常低的延迟进行通信,无线通信也已经被广泛应用于

各个领域。在列车上采用无线连接来替代 ECN 网络的部分有线链路,是日益成熟的技术方案。在列车编组内部或列车与列车之间采用无线连接的好处是显而易见的,可以增加车辆之间的兼容性,在部署上也会更加方便,网络的灵活性也大大提高。

TCMS 在列车中为两级网络架构,第一级是连接不同车组的列车骨干网,第二级是每个编组内的车辆编组网。骨干网和列车编组网两个层面都可以应用无线技术<sup>[4]</sup>,由此形成无线列车骨干(Wireless Train Backbone, WLTB)和无线编组网(Wireless Consist Network, WLCN)解决方案。本文主要针对 WLCN 方案进行研究。

目前无线技术的类型有多种,但是需要明确的一点是选择的无线技术必须满足列车原本对各项性能如丢包、时延和抖动的要求。本文采用电器电子工程师协会推出的无线局域网标准 IEEE802.11ax,即 Wi-Fi 6 技术<sup>[5]</sup>。Wi-Fi 6 使用 160MHz 的信道宽度,而且首次引入了目标时间唤醒(Target Wake Time, TWT)、正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDM)和上行 MU-MIMO 技术,将会给性能带来巨大的提升。从数据传输速率上来说,先前的

网络标准为 3.5Gbps, 而 Wi-Fi 6 理论上可以达到 9.6 Gbps, 更高的传输速率对于将 Wi-Fi 6 技术应用于列车环境无疑是一个巨大的优势; 同时, 使用 Wi-Fi 6 技术的路由器将能够连接更多的网络设备, 并且每台设备可以获得比以往更多的带宽, 这显然可以承载编组网列车环境中的各种终端设备; TWT 技术的引入也使得 Wi-Fi 6 使用寿命更长, 功耗也明显降低, 更加的节能环保; 在不可忽视的安全性上, Wi-Fi 6 引入了 WPA3(Wi-Fi Protected Access 3) 安全技术, 能够应对更加复杂的威胁, 可以极大程度地确保列车上数据的安全。如表 1<sup>[6-8]</sup> 可以看出, 从 1999 年提出的 802.11a 标准到现今的 802.11ax 标准, 通信速率提升了 1000 倍以上。

表 1 802.11 标准之间的对比

Table 1 Comparison of 802.11 networks

IEEE 802.11 Protocol	Frequency Bands/GHz	Max Throughput/Mbps	Bandwidth/MHz
802.11b	2.4	11	20
802.11a	5.0	54	20
802.11g	2.4	54	20
802.11n	2.4/5.0	450	20/40
802.11ac	5.0	3500	20/40/80/160
802.11ax	2.4/5.0	9600	20/40/80/160

本文针对编组网级别的运行 TCMS 系统的列车无线通信方案进行讨论, 提出了基于 Wi-Fi 6 的列车通信方案。针对列车编组网内部的部分有线连接, 将其替换成由 Wi-Fi 6 无线通信, 并基于此方案搭建了列车编组网通信仿真环境; 同时, 为了验证所提的组网方案的通信性能, 开发了专用的通信测试系统进行测试。在 Wi-Fi 6 环境下对列车通信数据中 TCMS 系统的过程数据和面向操作员的视频流数据进行模拟和采集, 对无线通信中数据帧的丢包率、时延和抖动进行计算, 同时设置了对比实验, 使用长期演进(Long Term Evolution, LTE)无线通信技术来进行对比验证。结果表明在不同协议类型、数据发送周期和长度的测试用例下, 文中方案的丢包率为 0%, 而时延和抖动均满足 IEC 61375-3-4 中的对应标准, 且相比 LTE 技术在列车无线通信上的使用, Wi-Fi 6 技术也占据了明显优势。

## 2 相关工作

近年来, 无线通信技术在列车中 TCMS 系统上的应用引起了人们极大的关注。欧洲的 CONNECTA-2 和 Shift2Rail 项目正在研究将无线通信用于下一代 TCMS 系统<sup>[9]</sup>, 目的便是将当前的 TCMS 系统迁移到无线架构, 实现可靠的信息传输, 提高列车通信方案的灵活性并降低成本。Ai 等<sup>[10]</sup> 描述了未来铁路服务的通信网络, 提出了基于海量多输入输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)的列车车厢内的无线覆盖方案, 在精心的设计下, 可以实现可靠的无线传输。García-Loygorri 等<sup>[11]</sup> 的目的是拆除列车通信网络中 TCMS 的部分有线电缆, 将其从有线模式转变为无线模式, 简化列车耦合程序, 为此预先选择了 5 项无线通信技术, 即超宽带、IEEE 802.11a/b/g/n/ac 系列标准、5.9GHz 智能交通系统、长期演进(Long-Term Evolution, LTE)和毫米波, 通过评估它们的吞吐量、延迟和技术成熟度, 最终选择 LTE 技术, 并在实验室得到了验证。Aljama 等<sup>[12]</sup> 则研究了 5G 技术对 WLTB 的适用性, 给出了理论分析和实验模拟, 以验证 5G 技术在

高负载场景中的性能, 最终的结果表明 5G 技术适用于列车骨干网。

## 3 基于 Wi-Fi 6 的 TCN 无线通信组网方案

本节对文中提出的应用在 TCMS 系统上的基于 Wi-Fi 6 的无线组网方案进行讨论, 阐述了是如何将 Wi-Fi 6 技术引入到列车的 TCMS 系统中。如图 1 所示为 IEC 61375-1 标准中基于 ETB/ECN 网络的架构。本文在此基础上, 对 ECN 级别的列车通信网络进行重构, 选择通信数据并开发了测试系统, 来对本文提出的基于 Wi-Fi 6 无线组网方案作出具有说服力的验证。

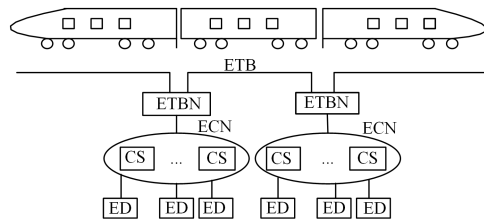


图 1 列车通信网络架构

Fig. 1 Train communication network architecture

### 3.1 网络架构设计

TCMS 是铁路车辆的一个子系统<sup>[13]</sup>, 主要负责提供基本的列车控制和监控功能, 如管理车辆信息, 确定列车拓扑及配置, 管理列车网络接入和实现数据传输等。TCMS 是集中管理车载设备所必需的, 它的数据实时通信由列车实时数据协议(Train Real-Time Data Protocol, TRDP)提供<sup>[9]</sup>。目前的 TCMS 在物理层由冗余电缆构成, 如图 1 所示为 IEC 61375-1 标准中基于 ETB/ECN 网络的 TCMS 通信架构。ECN 的功能是实现列车编组组内的终端设备(End Device, ED)进行互联和控制组网<sup>[14]</sup>, 需要通过 ETBN 节点来连接到 ETB 上, 实现多个编组网之间的数据传输。一个完整的列车编组网网络是基于交换式以太网产生的, 包括交换机、通信电缆、中继器和需要传输的数据帧, 并在列车的骨干网节点和终端设备之间进行数据帧的传输。

本文首先要把当前的有线列车控制和监控系统(TCMS)迁移到无线架构, 即将图 1 所示架构的部分有线电缆通过应用无线通信 Wi-Fi 6 来进行替换, 达到重新设计网络架构的目的。为此, 提出了如图 2 所示的 WLCN 的体系结构。

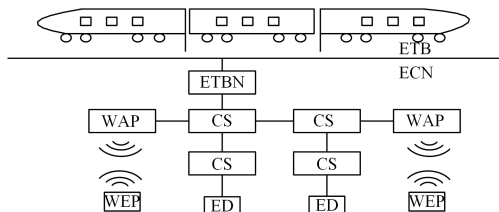


图 2 WLCN 网络通信结构

Fig. 2 Network architecture of WLCN

该架构无线网络部分引入了 Wi-Fi 6 组网技术<sup>[15]</sup>, 每个编组列车内都配置有无线接入点(Wireless Access Point, WAP), 无线终端点(Wireless End Point, WEP)连接到 WAP 上进行通信, 同时所有的 WAP 都连接到交换机, 此时连接到交换机上的终端设备就可以通过有线以太网和其它设备进行通信, 实现 ECN 级别的网络间互联。

### 3.2 通信数据选择

列车通信网络数据是指列车上各设备之间发送和接收的数据。根据列车通信网络标准 IEC-61375-1 定义<sup>[2]</sup>,列车通信网络有 5 种数据类型:监视数据、过程数据、消息数据、流数据以及尽力而为数据。这 5 类数据的数据帧长度和对实时性的要求都不尽相同,列车通信网络标准 IEC-61375-3-4 对这 5 类数据的典型服务参数值作出了规定<sup>[16]</sup>。其中,过程数据和部分监视数据对实时性要求最高,属于周期性的实时数据;消息数据、流数据和部分监视数据实时性相对较高,属于非周期性的实时数据。尽力而为数据没有周期性和实时性的限制,属于非实时的数据。

通常来说,列车中网络传输的数据主要用于实现 TCMS 控制、面向操作员的信息服务以及面向旅客的视频流业务<sup>[17]</sup>,传输 TCMS 的数据对时延、抖动和丢包率的要求较高,而传输多媒体业务的视频流数据一般来说属于尽力而为的数据,称之为流数据,对实时性的要求相对较低<sup>[18]</sup>。IEC 61375-3-4 中给出了对列车上数据类型的服务参数典型值,表 2 列出了过程数据和流数据的参数典型值。

表 2 数据类型服务参数典型值

Table 2 Typical values of data class service parameters

(单位:ms)

Data type	Min cycle time	Max delay	Max jitter
Process Data	20	10	10
Stream Data	Not applicable	125	25

本文在对列车通信网络无线接入方案的验证中关注实时性较高的过程数据以及视频流数据。数据模拟中,过程数据基于列车实时数据协议,视频流数据则基于实时传输协议(Real-time Transport Protocol, RTP)。

### 3.3 通信测试系统

由于实验环境中并没有列车上的真实数据,因此需要开发列车通信测试系统来模拟生成列车运行时车辆上的数据信息,并且对数据进行分析,验证在 Wi-Fi 6 环境下的性能参数是否满足需要。测试系统是端对端的传输,一方作为数据的发送端,负责数据生成和数据发送;另一方为数据接收端,负责数据采集和数据分析。

数据生成和发送部分要实现以下功能:生成 TRDP 和 RTP 协议数据,设置数据帧的长度,发送周期,发送次数,向指定的 IP 地址即接收端地址发送数据帧。对此,系统中采用 TCNopen 组织公开的 TRDP 协议开源库和 JRTPLIB 库。TCNopen 是和铁路行业相关的旨在合作构建铁路标准一些关键部分的开源项目,目前关于 TRDP 协议栈的代码也已开源。JRTPLIB 是用 C++ 编写的面向对象的开源库,该库提供了对 RFC 3500 中定义的实时传输协议的支持,使得接受和发送 RTP 协议数据非常容易。

数据采集和分析是接收端需要完成的部分,发送端的数据成功传送到接收端后,接收端在采集数据的基础行对数据进行分析,计算数据帧的时延、抖动、丢包率和带宽等参数,以此测试验证通信链路的服务质量。时延是指数据从发送端节点经过网络链路到达接收端节点时所需的时间,是计算机网络的重要性能指标之一。抖动描述了传输的数据时延之间的差值。计算丢包率需要统计规定时间内,从发送端节点发出的数据帧成功到达接收端节点的数据,之后与理论上应该

达到的数据帧数量进行运算,从而得出。通信测试系统结构如图 3 所示。

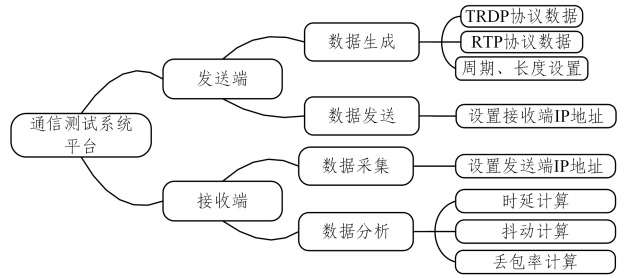


图 3 通信测试系统结构

Fig. 3 Communication test system architecture

## 4 实验验证

### 4.1 测试环境

本文的通信测试系统是在 ARM 架构的 Ubuntu 18.0.4 平台下使用 C++ 语言开发的,搭建列车通信环境仿真平台时,使用的设备有:配备了包含 2.4GHz 频段和 5GHz 频段并且支持 Wi-Fi 6 通信协议的路由器、千兆以太网交换机、支持 PTP 时钟同步协议并且基于 NXP i.MX6ULL 控制器的搭载有 Ubuntu 操作系统的开发板以及 Windows 平台下的笔记本电脑。平台架构如图 4 所示。

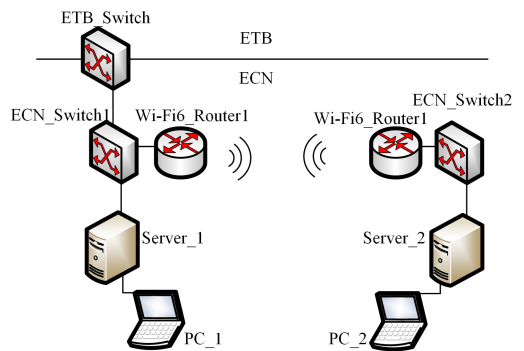


图 4 基于 Wi-Fi 6 的 ECN 列车通信平台

Fig. 4 ECN train communication platform based on Wi-Fi 6

列车平台上包含一个车辆级网络 ECN,交换机 ETB\_Switch 实现 ETB 和 ECN 之间的数据交换。ECN 内部由两台交换机 ECN\_Switch1 和 ECN\_Switch2,以及分别通过有线链路连接的设备组成。服务器 Server\_1 和 Server\_2 上可以看作是列车上中央控制单元和制动控制单元,在服务器上部署自行开发的列车网络通信服务质量测试和分析系统软件,用来模拟生成 TRDP 过程数据和用于传输视频流的 RTP 协议数据。系统运行时,发送端根据配置好的 IP 地址、数据帧周期、数据帧大小等参数,实时向接收端发送数据,接收端接收并分析来自发送端的数据,在 PTP 高精度授时协议的支持下,对其进行性能参数的计算。PC 机用来实现对服务器的操作,控制服务器上测试软件的运行以及维护。Wi-Fi 6\_Router1 和 Wi-Fi 6\_Router2 是平台的核心部分,应用 Wi-Fi Mesh 组网技术可以实现两台 Wi-Fi 6 路由器的无线组网,使其配置在同一个网段上,两台路由器会给服务器分配地址,在 IEEE802.11ax 协议的支持下,实现高速无线通信。

在搭建好测试环境后,接下来需要开展实时的实验,此时

Server\_1 和 Server\_2 的 IP 地址由在同一个网段上的 Wi-Fi 6 路由器分配,在各自连接的 PC 端查看地址可知,通过 ping 命令可以测试两台服务器之间的网络连通性。测试网络成功通信后,启动通信测试系统,在发送端依次选择相应的测试参数,接收端在测试系统的支持下实时对性能测试指标进行计算,得出结果。实验中选择测试的协议类型,将不同数据帧长度和周期进行组合得出了多种测试用例,具体如表 3 所列。

表 3 实验选择的测试用例

Protocol	Data Length/Byte	Cycle time/ms
TRDP	64	50/200/500
TRDP	128	50/200/500
TRDP	256	50/200/500
RTP	64	20/50/100
RTP	512	20/50/100
RTP	1024	20/50/100

## 4.2 结果分析

为了验证 Wi-Fi 6 环境下列车通信网络方案的可行性,在基于搭建好的硬件和软件环境下,采用表 3 所列的测试用例,数据包发送次数统一设置为 1000,分别对 TRDP 协议下的过程数据和 RTP 协议下的流数据进行仿真实验。基于不同的数据帧发送周期和长度,测试不同情况下的时延、抖动和丢包率,并与 IEC 61375-3-4 中对过程数据和流数据的典型值进行对比。

表 4 传输协议为 TRDP 协议时,不同周期和数据长度下的抖动和延迟

Table 4 Jitter and delay with different data lengths and cycles when the transmission protocol is TRDP protocol

Cycle time/ms	Data length/Byte	Min delay/ms	Max delay/ms	Max jitter/ms	Loss rate/%
50	64	1.032	8.213	0.296	0
50	128	1.468	8.264	0.213	0
50	256	1.521	7.865	0.314	0
200	64	1.115	9.167	0.342	0
200	128	1.951	8.263	0.406	0
200	256	1.714	8.576	0.486	0
500	64	1.064	9.021	0.564	0
500	128	1.853	8.136	0.375	0
500	256	1.975	7.968	0.352	0

### 4.2.1 TRDP 协议下网络性能分析

如表 4 所列,设置协议类型为 TRDP 时,选择周期分别为 50 ms, 200 ms 和 500 ms,再组合不同的数据长度分别为 64 Byte, 128 Byte 和 256 Byte,测试出了最小时延、最大时延和最大抖动。观察表 4 可得出, Wi-Fi 6 网络下的时延最小值在 2 ms 以下,时延最大值不超过 10 ms,最大抖动值的范围为 0.213~0.564 ms,未发生数据包丢失的情况,丢包率一直保持为 0%。

### 4.2.2 RTP 协议下网络性能分析

RTP 协议类型数据帧的测试用例与 TRDP 协议的数据帧稍有不同。从表 5 可以看出,在发送周期设置为 20 ms, 50 ms 和 100 ms,数据帧长度设置为 64 Byte, 512 Byte 和 1024 Byte 的情况下,相对于 TRDP 协议数据传输的最大时延, RTP 协议数据在时延和抖动值上明显增加,数据传输过程中的最小时延在 2.346~5.237 ms 之间,最大时延达到了 35.623 ms,对应的最大抖动在 2.268~4.518 ms 之间波动,不同情况下的丢包率的值同样为 0%。

表 5 传输协议为 RTP 时,不同周期和数据长度下的抖动和延迟  
Table 5 Jitter and delay with different data lengths and cycles when the transmission protocol is RTP

Cycle time/ms	Data length/Byte	Min delay/ms	Max delay/ms	Max jitter/ms	Loss rate/%
20	64	2.564	23.941	3.297	0
20	512	3.265	32.635	2.268	0
20	1024	3.162	34.624	3.394	0
50	64	3.264	34.254	4.518	0
50	512	5.237	35.623	3.376	0
50	1024	4.265	33.352	3.397	0
100	64	2.346	29.197	2.271	0
100	512	3.012	20.265	2.382	0
100	1024	2.569	21.263	3.210	0

### 4.2.3 性能参数对比

为了更好地展现 Wi-Fi 6 应用于列车通信的优越性,本文从两个方面进行对比分析。首先是将 Wi-Fi 6 下的实际测试的性能参数结果和 IEC 61375-3-4 标准中的对应参数典型值进行比较;另一方面,使用无线通信技术中的 LTE 技术<sup>[19]</sup>开展实验,进行对比分析。

3.2 节中的表 2 给出了 IEC 61375-3-4 中过程数据和流数据的典型值,其中过程数据的最大时延和抖动均为 10 ms,流数据的最大时延为 125 ms,最大抖动值为 25 ms。

将表 4 和表 5 的实验结果与表 2 中过程数据和流数据的典型值进行对比可以分析得出,对于在 Wi-Fi 6 环境下模拟的过程数据和流数据的网络性能参数测试结果,其最大时延和抖动都不超过 IEC 61375-3-4 中的对应标准,说明在列车编组网内用 Wi-Fi 6 无线技术替代原有的部分有线,在抖动、时延及丢包率这些实时性参数已达到了有线环境的要求,验证了 Wi-Fi 6 通信方案的可行性。

LTE 作为一种 3G 和 4G 技术中的过渡技术,在一些常见的场景中都有所应用,具有低延时和高速率的特点。在如图 4 基于 Wi-Fi 6 的环境搭建基础上,将 Wi-Fi 6\_Router 替换成客户前置设备(Customer Premise Equipment, CPE),用来将 4G 信号转换成 Wi-Fi 信号,同时部署 LTE 的核心网和基站,用来实现两端 CPE 的通信,完成基于 LTE 的环境部署。数据包发送次数统一设置为 1000,对不同协议类型、不同周期、不同数据长度进行测试,结果如表 6 所列。

表 6 LTE 无线环境下,不同协议类型下的性能测试数据

Table 6 performance test data under different protocol types in LTE wireless environment

Data type	Cycle time/ms	Data length/Byte	Min delay/ms	Max delay/ms	Max jitter/ms	Loss rate/%
TRDP	50	64	2.576	20.732	1.083	0
TRDP	50	128	3.206	36.529	1.365	0
TRDP	200	64	2.915	30.354	1.275	0
TRDP	200	128	2.537	30.165	1.234	0
RTP	20	64	5.134	46.235	7.683	0
RTP	20	512	5.942	40.367	7.429	0
RTP	50	64	6.327	52.164	7.132	0
RTP	50	512	7.391	51.241	8.021	0

对比 Wi-Fi 6 环境和 LTE 环境下的各项性能参数测试结果可以看出,在 LTE 无线环境中,在相同的协议类型、数据发送周期和数据长度下,无论是延迟还是抖动,数据表现都弱于 Wi-Fi 6 无线环境,并且 LTE 环境的部署相对于 Wi-Fi 6 环境更为繁琐,核心网和基站的使用也带了一定的成本代价。这再次验证了 Wi-Fi 6 通信方案的优越性。

4.2.4 应用场景分析

在实际使用方面,Wi-Fi 6 技术的高带宽和高传输的特点满足列车 TCMS 通信的实时传输要求,同时也符合国际认可的 61375-3-4 标准中规定的参数典型值,并且相对于 LTE 技术来说,建设成本和实施难度都占据了明显优势。但目前该技术的使用仍有一定的代价,比如在信号干扰方面,如何保持无线通信状态的稳定性及使其故障率满足使用标准,仍需要进一步研究,同时 Wi-Fi 6 的部署和维修也要考虑成本代价。

**结束语** 本文提出了一种基于 Wi-Fi 6 的无线列车通信网络方案,应用 Wi-Fi 6 技术,用无线替代部分有线,验证在列车编组内开展无线通信的可行性。搭建列车仿真平台,应用 Mesh 组网技术将 Wi-Fi 6 环境引入到列车通信平台中,实现编组交换机之间的无线通信传输。为了实际验证 Wi-Fi 6 无线组网方案的可行性,本文还开发了通信测试系统,针对列车上的过程数据和流数据展开研究,模拟 TRDP 协议和 RTP 协议数据发送,实现采集和分析功能,对 Wi-Fi 6 环境下的数据进行丢包率、时延和抖动的实时性分析。

将测试的实验数据与 IEC 61375-3-4 标准中给出的列车数据参考值进行对比,实验结果满足标准中对数据实时性的要求;采用 LTE 技术作为实验对比,结果表明 Wi-Fi 6 技术的使用优于 LTE 无线技术,进一步验证了基于 Wi-Fi 6 列车通信方案的可行性。

目前本文仅对方案中过程数据和流数据的实时性传输进行了测试和验证,虽然测试结果满足了国际标准对数据实时性的要求,但研究仍有需要继续进行的地方。比如对于消息数据和监视数据的测试需要进一步的研究,列车通信中数据的安全性及抗干扰能力也是需要进一步考虑的重点,未来将对更全面的数据类型和通信中的安全性以及抗干扰能力作进一步的研究。

参 考 文 献

[1] MA L C,ZHONG C C,CAO Y,et al. Research on train communication network based on switched Ethernet[J]. Computers in Railways XIV: Railway Engineering Design and Optimization, 2014,135(109).

[2] IEC/TC9. IEC 61375-1:2012 Electronic railway equipment-Train communication network(TCN)-Part 1:General architecture[S]. Geneva:International Electrotechnical Commission(IEC),2012.

[3] FENG J,LU X,YANGW,et al. Survey of development and application of train communication network[C]// Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation. Springer, Berlin, Heidelberg,2016:843-854.

[4] HÄRRI J,ARRIOLA A,ALJAMA P,et al. Wireless Technologies for the Next-Generation Train Control and Monitoring System[C]// 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). IEEE, 2019:179-184.

[5] MIN C,JINHAO Z. The Application of Wi-Fi 6 Technology in Underground Mine[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing,012153.

[6] SERRANO P,SALVADOR P,MANCUSO V,et al. Experimenting with commodity 802.11 hardware:Overview and future directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2015, 17(2):671-699.

[7] KHOROV E,KIRYANOV A,LYAKHOVA,et al. A tutorial

on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2018,21(1):197-216.

[8] BANERJI S,CHOWDHURY R S. On IEEE 802.11 wireless LAN technology[J]. arXiv:1307.2661,2013.

[9] LUDICKE D,LEHNER A. Train communication networks and prospects[J]. IEEE Communications Magazine, 2019,57(9): 39-43.

[10] AI B,GUAN K,RUPPM,et al. Future railway services-oriented mobile communications network [J]. IEEE Communications Magazine,2015,53(10):78-85.

[11] GARCÍA-LOYGORRI J M,GOIKOETXEA J,ECHEVE-RRÍA E,et al. The wireless train communication network:Roll2Rail vision[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine,2018,13(3): 135-143.

[12] ALJAMA P,ARRIOLA A,MARTÍNEZ I,et al. Applicability of 5G Technology for a Wireless Train Backbone[C]// 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE,2021:1-5.

[13] REKIK M,GRANSART C,BERBINEAU M. Cyber-physical security risk assessment for train control and monitoring systems[C]// 2018 IEEE Conference on Communications and Network Security(CNS). IEEE,2018:1-9.

[14] IEC/TC9. IEC 61375-2-5:2014 Electronic railway equipment-Train communication network(TCN)-Part 2-5:Ethernet train backbone[S]. Geneva:International Electrotechnical Commission(IEC),2014.

[15] LIU Y,TONG K F,QIUX,et al. Wireless mesh networks in IoT networks[C]// 2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition. IEEE, 2017:183-185.

[16] IEC/TC9. IEC 61375-3-4:2014 Electronic railway equipment - Train communication network(TCN)-Part 3-4:Ethernet Consist Network (ECN) [S]. Geneva:International Electrotechnical Commission(IEC),2014.

[17] WANG T,WANG L D,ZHOU J Q,et al. Research on Real-time Performance of Train Communication Network Based on the Switched Ethernet Technology[J]. Journal of the China Railway Society,2015,37(4):39-45.

[18] GARCÍA-LOYGORRI J M,VAL I,ARRIOLA A,et al. Channel model and interference evaluation for a wireless train backbone [J]. IEEE Access,2019,7:115518-115527.

[19] MURUGANATHAN S D,LIN X,MÄÄTTÄNEN H L,et al. An overview of 3GPP release-15 study on enhanced LTE support for connected drones[J]. IEEE Communications Standards Magazine,2021,5(4):140-146.



**YANG Shaolong**, born in 1998, post-graduate. His main research interests include network traffic analysis and communication network.

**ZHU Guosheng**, born in 1972, Ph.D, professor. His main research interests include next-generation Internet and software-defined network.