

文章编号: 2095-4980(2022)08-0781-09

基于 WiFi6 的城轨车地通信综合承载系统 —系统设计 with 现场测试

曹楠¹, 石雪涛², 焦凤仪²

(1.大连地铁十三号线建设管理有限公司, 辽宁 大连 100029; 2.北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘 要: 2018 年 10 月, IEEE 发布了最新的 WiFi 标准协议 802.11ax(WiFi6), 它同时支持 2.4 GHz 和 5 GHz 频段, 传输速率可达 9.6 Gbit/s^[1]。WiFi6 的横空出世引起大量技术人员的研究, 目前, WiFi6 已应用在智能家居、广电、矿井建设等领域, 但在轨道交通领域屈指可数。本文设计了基于 WiFi6 的城市轨道交通车地通信综合承载系统, 通过将 WiFi6 赋能轨道交通车地通信系统, 可以解决城市轨道交通的各项生产业务间严重的争抢频率资源问题, 并在大连地铁 13 号线进行全国第一个 WiFi6 系统的真实地铁线路测试。结果表明, 所设计的 WiFi6 系统具有网络吞吐能力大, 传输速率快, 覆盖范围广等特点, 能够满足轨道交通业务需求, 同时能够为 CCTV 和 PIS 等业务提供有效的传输通道。

关键词: WiFi6 协议; 车地通信; 基于通信的列车控制; 综合承载

中图分类号: TN915.06

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022045

An integrated WiFi6 based urban rail train-ground communication system —system design and field test

CAO Nan¹, SHI Xuetao², JIAO Fengyi²

(1.Dalian Metro Line 13 Construction Management Co., Ltd., Dalian Liaoning 100029, China;

2.School of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In October 2018, IEEE released the latest WiFi standard protocol 802.11ax(WiFi6). It can support both 2.4 GHz and 5 GHz frequency bands with the maximum transmission rate of 9.6 Gbit/s. At present, WiFi6 has been applied in smart home, radio, and mine construction. However, it is scarcely applied in the field of rail transit. An integrated urban train ground communication system based on WiFi6 is proposed. Aiming to the serious competition for frequency resources between production businesses, the first actual subway line test of the WiFi6 system in the country is conducted on the Dalian Metro Jinpu Line. The entire test process completely replicates the actual running scene of the train, including real vehicles, equipment, and actual communication scenarios such as elevated and tunnels. Extensive test results show that the designed WiFi6 system bears the characteristics of large network throughput, fast communication and transmission rate, long battery life, and strong AP signal coverage, satisfying the rail transit business. It can guarantee the reliable transmission of Communication-Based Train Control(CBTC) traffic and provide an efficient transmission path for Closed Circuit Television(CCTV) and Passenger Information System(PIS) traffic.

Keywords: WiFi6; train-ground communication; Communication-Based Train Control; integrated service

随着我国城市轨道交通技术的发展, 城市轨道交通运营面临着巨大的压力和挑战, 车地无线通信网络的需求也显得越来越迫切。WiFi6 技术的出现为加速城市轨道交通的发展实现科技助力, 其吞吐能力大、通信及传输速率快、续航能力长、覆盖范围广等特点能够保障基于通信的列车控制(CBTC)车厢视频监控系统 CCTV 和

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-03-21

乘客信息系统(PIS)业务的高可靠传输需求。

自 WiFi6 技术正式诞生以来,其应用价值被广泛认可。WiFi6 是在 WiFi5 的基础上发展而来,在此基础上,引入上行/下行链路:多用户-多输入多输出(Multi-User Multiple-Input Multiple-Output, MU-MIMO)、正交频分多址接入技术(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)、1024-正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)模式、基本服务集(Basic Service Set, BSS)着色识别,使 WiFi6 不仅具有较高的数据速率,且具有较低的网络延迟,设备容量也大大提高,高速设备不会被低速设备拖垮。

WiFi6 使用 OFDMA,而 WiFi5 使用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术。OFDMA 是 OFDM 的演进,是在利用 OFDM 对信道进行副载波化后,在部分子载波上加载传输数据的传输技术。OFDMA 是一种多址接入技术,可以容纳更多的用户,用户各自收到切分完的子信道后进行通信。这样可以大大降低数据连接的时间消耗,从而提高网络上每台设备的接入速率,提升无线 WiFi6 技术的通信效率。

WiFi6 相比 WiFi5 提供高达 15 dB 以上的链路附加余量。在功耗上, WiFi6 引入目标唤醒时间(Target Wake Time, TWT)技术,允许终端与无线路由器之间主动规划通信时间,并在传输距离不发生改变的情况下采用更低的功率进行传输,能够一定程度上减少电量消耗,延长设备续航时间。

WiFi5 支持 256-QAM 调制,而 WiFi6 采用 1024-QAM 调制,8 bit 的数据通过各个数据子载波进行携带。理论上,数据的传输速度大大提升,几乎提升了 25% 左右。

以往 WiFi 技术,采用的都是单一接入点(Access Point, AP)进行无线信号覆盖,而 WiFi6 技术可以采用多个 AP 进行整体组网,网络吞吐能力大大提升。WiFi6 可以采用两套不同的制式,这样可以提升 AP 信号覆盖能力,全面增加无线传输速率,进一步获得空间复用的增益。

WiFi6 同时支持上行与下行 MU-MIMO 技术,即设备可以同时包含多个天线的无线接入点做出响应,从而使 AP 可以与多个设备进行通信^[2]。而 WiFi5 标准仅支持下行 MU-MIMO 技术,即使 AP 可以与多个设备同时连接,但这些设备无法同时进行响应。

双频技术也是 WiFi6 技术的很大亮点。一个 5 GHz 频段只能由一个 WiFi5 支撑,而 WiFi6 所运用到的 802.11ax 协议,对 2.4 GHz 和 5 GHz 两个频段可通过其进行支持,因此 WiFi6 同 WiFi1~WiFi5 进行兼容作用,不仅兼具了 2.4 GHz 传输距离较远、穿透能力强的特点,同时具备了 5 GHz 频段相对宽松、信号稳定的优势,双频道切换,扬长避短,二者结合可以完整涵盖低速与高速设备。且 WiFi6 必须使用 WiFi 保护接入 WPA3(WiFi Protect Access 3),使其更具安全性。

WiFi6 应用了一种新的同频传输识别机制,即着色机制(BSS Coloring),可以解决同频干扰问题,提升密集部署环境中系统的整体性能,并实现空间复用能力。接收端可根据报文头的 BSS Coloring 字段及早识别同频干扰信号并停止接受,避免浪费收发时间。

新一代的 WiFi6 无疑是应用场景的通信必争之地,各大通信产商相继崭露头角, WiFi6 技术也应用在教育、医疗、企业、工业等行业。2019 年, WiFi6 技术首次应用在深圳地铁福田枢纽的地铁站,该车站采用 WiFi6+5G 技术融合方案,将车站的应用依托 WiFi6 网络进行了立体呈现^[2]。在教育场景中, WiFi6 带来的极致体验使网络教学、云课堂成为趋势,颠覆了传统教学模式,提升了教学质量^[3]; WiFi6 与物联网融合的方式可有效分析学生行为习惯,为学情管理提供辅助决策; WiFi6 超低延时保障视频会议,提升了企业办公效率;基于 LoRa/Zigbee 物联协议的智慧楼宇使得能源管控精细化,降低了企业能源开销^[3]。在医疗场景中, WiFi6 速率满足医学影像存档与通信系统(Picture Archiving&Communication System, PACS)等医疗对高带宽的传输需求,为高效分析病理提供必要保障^[4]; WiFi6 漫游满足移动医护业务对漫游的诉求,为精细化、数字化医疗提供基础;智慧输液、智能体温采集助力医护人员生产力^[5]。

但 WiFi6 在轨道交通领域的应用还处于起步阶段。通过将轨道交通通信领域与 WiFi6 融合和推广,首次将 WiFi6 技术应用在城市轨道交通车地通信领域——大连地铁 13 号线,这是国内第一条采用 WiFi6 技术承载 CCTV/PIS 业务的轨道交通线路。本次测试用的 WiFi6 车地无线通信系统设备由新华三技术有限公司提供,主要试验城市轨道交通线路中 WiFi6 的传输性能,以及承载 CCTV/PIS 业务的能力。

1 城市轨道交通车地无线通信的承载业务

城市轨道交通车地无线通信承载了 CBTC 系统、PIS、CCTV 等基本业务。其中, CBTC 是用通信网络来实现列车和地面设备的双向通信,用实时汇报的列车位置和计算移动授权的移动闭塞来代替固定的轨道区段闭塞实现列车运行控制。为了保证无线网络的安全性,车载无线单元与基站需要进行认证授权,通过后才能进行关联,

并且对传输的数据进行加密，加密密钥不少于 128 位；车头、车尾配合实现与 A/B 网双网通信，信号系统无线网络部分与其他部分应隔离；整条线路每列车单网传输速率不低于 200 kbps，上下行各 100 kbps；车地通信单网络信息的丢包率应小于 1%；车地通信单网信息的误码率小于或等于 10^{-6} ；车地通信单网的越区切换时间应在 150 ms 以内；车地通信信息经有线和无线网络传输延迟时间应小于 150 ms；应实现不高于 200 km/h 运行速度下车地实时双向通信的要求。

PIS 系统是依托多媒体网络技术，以车站和车载显示终端为媒介向乘客提供信息服务的系统。正常情况下提供乘车须知、服务时间、列车到/发时间、列车时刻表、管理者公告、出行参考、媒体新闻、广告等实时动态多媒体信息；在火灾、阻塞及恐怖袭击等非正常情况下，提供动态紧急疏散提示。PIS 系统所需带宽一般为 4~8 Mbps。

CCTV 系统是城市轨道交通运营、管理现代化的配套设备，是供运营、管理人员实时监视车站客流、列车出入站、乘客上下车情况和变电所设备运行情况等，以加强运行组织管理，提高效率，确保安全正点地运送乘客的重要手段。一般由前端设备、视频信号传输系统、图像显示设备、控制设备和存储设备等组成。在正常情况下，一旦中心下指令需要查看车厢视频信息，列车需向中心上传至少 2 路客室监控图像信息，每路上行车载 CCTV 业务带宽需求为 1~2 Mbps。

WiFi6 大带宽的特性，能够同时传输 7 个及以下的通路，这是不同于传统 LTE-M(Long Term Evolution-Machine to Machine)最大的优点。城市轨道交通车地生产业务的 QoS 需求如表 1 所示。

表 1 城市轨道交通车地生产业务的 QoS 需求
Table1 QoS requirements of urban rail transit business

business	data rate	transmission delay/ms	switch delay/ms	reliability needs
CBTC	200 kbps	150	150	high
PIS	4~8 Mbps	300	300	low
CCTV	1~2 Mbps/per channel	300	300	middle

目前采用的各自独立的车地通信系统，存在以下几个问题：a) 设备数量大，故障隐患多；b) 频谱利用率低；c) 投资建设时间长；d) 维护难度大，成本高；e) 系统缺乏可扩展能力。城市轨道交通车地生产业务不仅要满足轨道交通安全稳定运行需求，同时还需满足乘客对通信的多样化需求，因此城市轨道交通通信系统必须要达到相应的要求，如无线网络系统的覆盖面要更广，实现全覆盖；车载通信系统单元要与控制基站相联系并授权，以确保系统信息的交流稳定性；基本的通信要保障信息的及时性和双向信息通信的稳定性等。

建立城市轨道交通车地无线通信综合承载系统需要根据城市轨道交通的特点和需求，加强对通信系统建设方面的研究。WiFi6 技术是利用电磁波信号进行信息传播、交换的一种通信方式，其传播不受通信电缆敷设的限制，可以解决城市轨道交通通信系统建设的问题。

2 基于 WiFi6 的城市轨道交通车地通信综合承载系统

2.1 系统结构设计

城市轨道交通车地无线通信网络的性能要求有：线路全程可靠稳定无线信号覆盖；高带宽的车地无线通信传输；无线网络的无缝切换，车地无线链路漫游时间短；较低的车地无线通信丢包率和传输时延。利用最新的 WiFi6 技术，提出了基于 WiFi6 的城市轨道交通车地通信综合承载系统。大连地铁 13 号线 120 km/h 高速 WiFi6 车地通信系统测试组网图如图 1 所示。

2.2 工作频段选择

5.8 GHz 无线频段可显著提升 WiFi 网络容量，使数据收发路径的数量在当前基础上实现双倍以上增加。除支持 5 GHz 频段 160 MHz 信道外，双频 160 MHz 特性还可在 6 GHz 频段支持高达 7 个非重叠信道，覆盖全部频段，支持高性能的上行/下行 MU-MIMO 和 OFDMA 移动技术。全新 WiFi6 上行 MU-MIMO 特性，使得网络容量提升 2.5 倍以上。

大连轨道交通的车地无线通信系统组网采用 5.8 GHz 无线频段，使用 WiFi6 协议，4×4 MIMO 80 MHz 频宽组

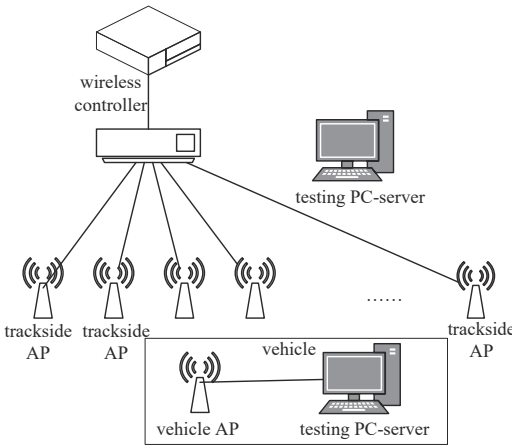


Fig.1 Dalian metro WiFi6 vehicle-ground communication system test

图 1 大连地铁高速 WiFi6 车地通信系统测试组网图

网模式，主信道为 153 信道。

3 轨旁 AP 部署设计方案

以往的 WiFi 技术，采用单一 AP 进行无线信号覆盖。地铁列车在高速移动状态下，要提供高速率业务，同时有视频监控等对时延和丢包比较敏感的业务。随着 WiFi6 技术的快速发展，可以采用多个 AP 进行整体组网，网络吞吐能力大大提升。WiFi6 技术的引入，在地铁内部署 AP 似乎不再困难。

车地 AP 安装限制多。车载：车内空间紧凑，线路部署要求高；高架：接触网支柱较多，离 AP 太近会影响通信链路质量；隧道：天线和设备装在弱电侧的墙上，另外可能会有人防门、广告牌、凹墙等各种影响回传质量的情况；车辆段/停车场：安装位置有限，另外列车进库后都是同频，信道利用率会提高。以大连地铁 13 号线给定的周边线路环境数据为输入，根据无线信道传播损耗模型进行无线信号覆盖质量仿真运算，输出全线 AP 的初步布置方案，数据输入包括数据通信系统的电磁环境工作参数、物理环境数据、无线收发器技术参数。根据线路图的各个点对无线覆盖的性能进行分析，并为网络优化提供分析数据。在此基础上，对大连地铁 13 号线的线路场地进行系统的实地调查，利用调查数据对无线覆盖的仿真结果进行标定，并输出最终的工程布置图，进而减少 AP 设备的安装和测试工作量。AP 布置如图 2 所示。

3.1 AP 布放方案

AP 布放方案需要根据实际的物理环境和系统设计需求进行无线覆盖设计和网络容量设计，这个过程中

需考虑如下原则：a) 减少无线信号穿越的障碍物的数目，如不能避免穿越，则尽量垂直穿越墙壁、天花板等障碍物，尤其是避免金属障碍物遮挡；b) AP 的正面正对网络覆盖区域；c) AP 远离干扰源；d) 安装美观。

在无线网络中，使用 AP 设备和天线实现有线和无线信号互相转换，可能会干扰 AP 布站的无线设备，主要包含轨旁 AP、轨旁天线、车载无线电台 (Special Temporary Authority, STA) 和车载天线，其中的工作参数主要包括发射功率、工作频率、接收灵敏度等。障碍物是无线网络环境中最常见、对信号衰减影响非常显著的一个重要因素。日常环境中的各种墙壁、玻璃、门对信号都有不同程度的衰减，尤其是金属障碍物，很有可能完全阻隔、反射掉无线信号的传播。因此在 AP 布放的过程中，尽量避免各类障碍物遮挡 AP。

无线网络覆盖设计涉及到规划网络覆盖范围和范围内信号强度。AP 通过天线发射无线信号，在天线周围产生无线网络覆盖，信号传得越远，信号强度就变得越弱。

3.2 方案的方法及原理

射线跟踪方法是一种广泛用于移动通信环境中的预测无线电波传播特性的技术，可以辨别出多径信道中收发之间所有可能的射线路径。根据电波传播理论，每条射线的幅度、相位、延迟和极化都可以计算出来，再结合天线方向图和系统带宽，就可以得到接收点所有射线的相干合成结果。

轨旁 AP 的辐射区域是以轨道为中心呈带状分布在轨道周围沿线，而隧道壁是平滑的，隧道的直径为数米，因此直射和反射是在隧道中传播的主要方式，WiFi6 的 OFDMA 技术由于频谱利用率高，抗多径干扰和频率选择性衰落能力强，因此可以运用射线跟踪法对隧道内的无线信道进行建模^[6]。

如果 AP 和车载天线间存在直射路径，则该路径对 (θ, ϕ) 方位处接收点的场强贡献为：

$$E(r, \theta, \phi) = \left(A_{\theta}(\theta, \phi) \mathbf{e}_{\theta} + A_{\phi}(\theta, \phi) \mathbf{e}_{\phi} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (1)$$

则源点到场点处的路径损耗 L 为：

$$L = 10 \lg(P_R/P_T) \quad (2)$$

式中： $A_{\theta, \phi}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{P_T \eta_0}{2\pi}} g_{\theta, \phi}(\theta, \phi)$ ， P_T 为发射设备功率的平均值， $g_{\theta, \phi}(\theta, \phi) = \sqrt{|G_{\theta, \phi}(\theta, \phi)|} e^{j\psi_{\theta, \phi}}$ ， $\eta_0 = 377 \Omega$ 为自由空间阻抗； G_{θ}, G_{ϕ} 分别表示无线天线发射增益的 θ 和 ϕ 。电磁波在空气中传播时，随传输距离的增加，信号强度会逐步衰减，直至消失。在传输路径上的衰减即为路径损耗。人们无法更改空气的衰减值，也无法避开空气传播无线信

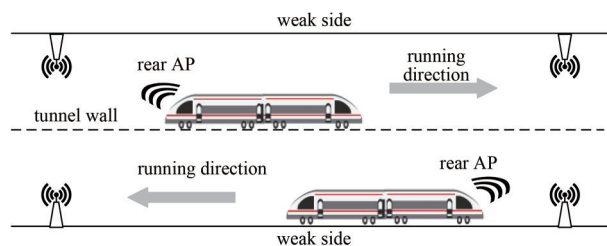


Fig.2 AP deployment
图 2 AP 部署方式

号,但可以通过诸如合理增强天线端的发射功率、减少障碍物遮挡等方式来延长电磁波的传输距离。电磁波传输得越远,无线信号能覆盖的空间范围越大。

$$L = 10 \lg \frac{P_R}{P_T} = 32.44 + 20 \lg d + 20 \lg f - 10 \lg (g_t g_r) + 20 \lg \left| 1 + \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^{N_l} \prod_{k=1}^i \Gamma_{ilk} \exp(j\Delta\varphi_{il}) \right| \quad (3)$$

式中: d 表示传输距离; f 表示实际的工作频率; g_t, g_r 代表 AP 和车载天线增益; $i(i=1,2,\dots,M)$ 为反射次数; l 代表路径的反射; N_l 为每次反射的路径数量; k 表示每条路径的反射次数; Γ_{ilk} 为每次反射的系数; $\Delta\varphi_{il}$ 表示 AP 直射路径与第 l 条路径第 i 次反射的相位差^[7]。

3.3 隧道内场景下信号传播衰减损耗

准确的隧道内电波的传播模型和信道特性是无线网络规划和优化的基础。通常隧道内的传播空间可分为 3 个区域:一是自由空间区域,它最靠近 AP 的位置;二是近场区域,自由空间的附近区域;三是远场区域,场强分布在这个区域下降很快。

自由空间区域传播损耗为:

$$L = 10 \lg \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \times \frac{1}{d^2} \right] \quad (4)$$

经大量测试后,得出结论:当车载 AP 位于车头时,轨旁 AP 无线信号覆盖信号强度最小为 -76 dBm,最大为 -23 dBm;当车载 AP 位于车尾时,轨旁 AP 无线信号覆盖信号强度最小为 -74 dBm,最大为 -22 dBm。

4 WiFi6 性能测试场景设计

4.1 测试场地

列车在高速移动状态下要保证高速率、低丢包、低时延。为了验证在真实的轨道交通线路和电磁环境中, WiFi6 无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)车地无线通信系统的可用性、传输性能和业务承载能力,在大连地铁 13 号线进行实际测试,测试侧重于 WiFi6 WLAN 车地无线通信网络的性能。有线传输组网主要是在车站通过部署接入交换机,连接轨旁 AP,再通过有线方式与控制中心相连。大连地铁高速 WiFi6 车地通信系统测试组网如图 3 所示。

大连市金州新区至普湾新区城际铁路工程(大连地铁 13 号线)一期工程正线全长 43.152 km,其中高架线长度 23.598 km,地下线和山岭隧道长度 1.229 km,地面线长度 18.325 km,出入段线长度 2.295 km。本工程初期设车站 11 座:十三里站、二十里堡站、三十里堡站、石河高铁站、普湾体育站、石河北海站、长店堡站、大医三院站、海湾高中站、普兰店开发区站、普兰店振兴街站。最大站间距 8.263 km(二十里堡-三十里堡(不含预留站)),最小站间距 1.537 km(海湾高中站-普兰店开发区站),平均站间距 2.697 km。车辆段 1 处,控制中心 1 座。初期为 2 动 2 拖 4 辆编组,最高运行速度为 120 km/h,配属车辆 20 列 80 辆。

轨道交通场景是一种高速移动状态下的车地传输场景,对速率、时延和丢包率要求比较高,该场景实施难度大,交付周期长,应做好各个阶段工作。经过多次的现场踏勘,包括线路的周边环境、线路的运行速度等,本次选取在普湾体育场和石河黄旗两个车站之间作为本次高速 120 km/h 的场景测试区段。

4.2 测试网络实施方案

4.2.1 列车调头方式

车载 AP 信道是固定不变的,不同的掉头方式, WiFi6 方案的轨旁 AP 射频信道配置不一样。岔道掉头:到站后折返,车头变车尾,车尾变车头,通过岔道并轨到对面方向的轨道上,岔道掉头方式如图 4 所示。弯道掉头:运行方向上,车头车尾不变,通过弯道变换到对面方向的轨道上。弯道掉头方式如图 5 所示。

4.2.2 AP 使用方式

车地无线通信子系统是 WLAN 在轨道交通方案中的核心部分,车地无线通信网由轨旁 FITAP 车头/车尾 AP 组成,无线 Mesh 方式对接,实现车地网络间的快速漫游切换,提供车地之间双向、可靠、安全的数据交换。头尾

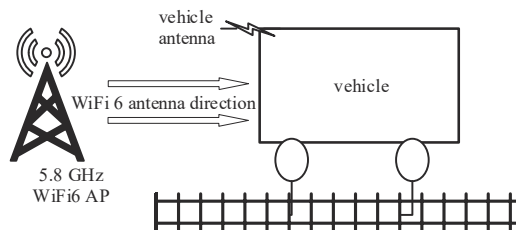


Fig.3 Networking of Dalian metro high-speed WiFi6 vehicle-ground communication system test

图3 大连地铁高速 WiFi6 车地通信系统测试组网图

备份，运行方向上，车尾 AP 与轨旁 AP 通信；车尾 AP 故障时，切换到车头 AP 与轨旁 AP 通信，侧重稳定性。车头 AP 与轨旁 AP 逐渐接近，在车头跨过当前 AP 时，信号会突然恶化，影响吞吐率，而远离切换就不存在该问题。接触网支柱：列车通过车顶受电弓与接触网接触取电驱动运行，接触网由接触网支柱搭建，支柱间距通常 40 m 左右，轨旁天线要避免被接触网支柱遮挡，单 AP 双天线部署在轨旁。

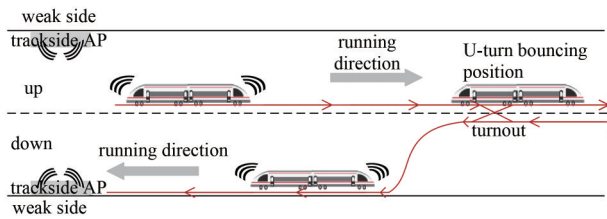


Fig.4 The way of the train turning around
图4 列车岔道掉头方式

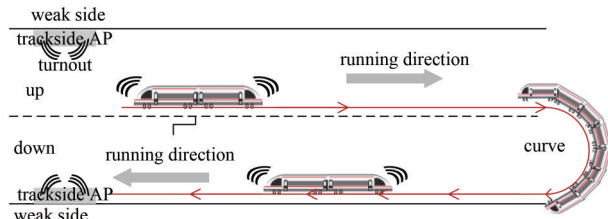


Fig.5 The way of the train making a U-turn
图5 列车弯道掉头方式

4.2.3 测试网络工具

进行试验的测试网络工具如表 2~3 所示：

表 2 辅助测试设备和软件及说明

Table2 Test equipment, software and instructions

test equipment and software	synopsis	amount
laptop	to generate traffic at both ends of the network, one of which sends the data stream and the other receives the data stream	2
flow generator	to generate background traffic at both ends of the network, using IxChariot data flow test software	2
FastPing	to test network latency, packet loss, etc.	1
IxChariot	at the application layer, the network comprehensively evaluates the throughput, delay, jitter, packet loss, and packet error, and conducts simple and reasonable analysis of quantitative data with detailed test reports	2

表 3 测试网络设备及说明

Table3 Test network equipment and instructions

network equipment	synopsis	amount
wireless controller	to manage trackage AP	1
trackage AP	trackage wireless equipment, capable of carrying high-reliability, high-bandwidth wireless networks	20
antenna system	panel antennas, power dividers and RF cables, etc.	20
onboard AP	in-vehicle wireless equipment can carry wireless APs with high reliability and high bandwidth wireless network	2
vehicle antenna	panel antennas and RF cables, etc.	2

4.3 测试内容

本次实地测试是在真实的轨道交通线路和电磁环境下，轨交场景线路比较长，接触网支柱多且图纸上通常不会标记，首先按照规划原则做初步规划，然后沿着线路依次工勘确认规划点位是否合理，有问题确认解决方案后在设计中刷新。测试 WiFi6 系统的覆盖能力以及 WiFi6 系统的车地通信传输性能。在测试区段内，分别对车头、车尾进行石河黄旗-普湾体育场方向、普湾体育场-石河黄旗两个运行方向的测试。测试要求单向传输时延不大于 150 ms，丢包率不超过 0.5%。

5 WiFi6 性能测试结果与分析

5.1 WiFi6 无线信号场强测试

车头、车尾在两个运行方向上的接收信号场强指示(Received Signal Strength Indicator，RSSI)测试结果分别如图 6~8 所示。测试中 RSSI 的变化范围分别为 -68~-22 dBm,-76~-22 dBm,-22~-68 dBm,-74~-34 dBm，均满足要求。

5.2 WiFi6 传输性能测试

车地通信传输性能测试内容包括切换时延、传输时延、丢包率和吞吐量测试。

5.2.1 切换时延测试

随着列车在轨道上的运行，车载 AP 会与不同的轨旁 AP 进行通信并传输数据，车地无线链路的漫游切换质量会直接影响到吞吐量、丢包率等测试的效果，切换时延的测试结果如表 4 所示，满足链路漫游切换时间控制在 10 ms 以内的测试要求。

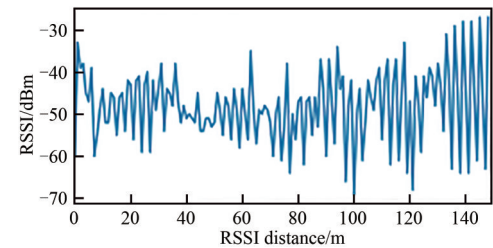


Fig.6 RSSI distribution of Dalian Line 13–Puwan stadium
图6 大连13号线车头—普湾体育场方向RSSI分布

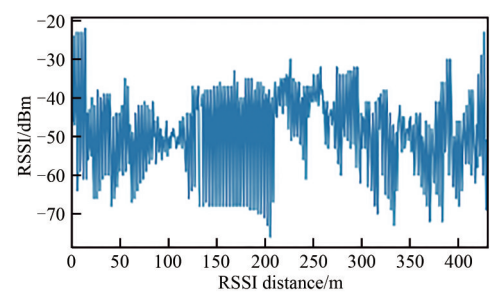


Fig.7 RSSI distribution of Dalian Line 13–Shihe Huangqi
图7 大连13号线车头—石河黄旗方向RSSI分布

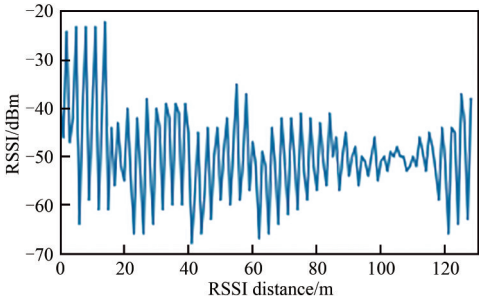


Fig.8 RSSI distribution of Dalian Line 13–Puwan stadium
图8 大连13号线车尾—普湾体育场方向RSSI分布

表4 切换时延测试结果统计

Table4 Statistics of handover delay test results

direction	maximum switching delay/ms	minimum switching delay/ms	average value/ms
Puwan stadium direction	7.0	5.0	5.3
Shihe Huangqi direction	5.0	5.0	5.0

5.2.2 丢包时延测试

丢包和时延测试可以直观反映出当前车地无线链路传输数据的质量。丢包率：一个或多个数据包(packet)的数据无法通过网上到达目的地。由于网络拥塞、传输错误等造成的数据包丢失概率，无拥塞时为0%，轻度拥塞为1%~4%，严重拥塞为5%~15%。一些网络传输协议如TCP可提供可靠的数据包交付。在丢包发生时，接收器可以要求发送方重传或自动重新发送。TCP可以撤消丢包，但经常发生的重传已丢失数据包可能导致网络吞吐量下降^[8]。延时：数据包发送到对端再返回到发送端的时长在传输介质中传输所用的时间，即从报文开始进入网络到离开网络的时间。一般网络延迟Ping值越低，速度越快，但速度与延迟没有必然联系。网络延迟包括传输延迟、传播延迟、节点处理延迟和排队延迟，其中排队延迟和网络的拥塞有关。延时抖动：衡量延时变化的程度^[9]。

本测试采用辅助测试工具软件Fping测试时延与丢包，测试结果如表5所示，在4个测试用例中，丢包率均满足小于0.5%的规范要求；车头、车尾在两个运行方向上的平均传输时延分别为6.9 ms,7.0 ms,8.4 ms,7.4 ms，由此可知传输时延大部分集中在10 ms以内，测试中出现的最大传输时延为68.35 ms。WiFi6的传输时延概率密度分布如图9所示，WiFi6传输时延累计分布如图10所示。

表5 丢包测试结果统计

Table5 Statistics of packet loss test results

cases	number of sent packets	number of received packets	number of loss packets	packet loss rate/%
front(Puwan stadium)	206	206	0	0
front(Shihe Huangqi)	257	256	1	0.39
rear(Puwan stadium)	181	181	0	0
rear(Shihe Huangqi)	252	252	0	0

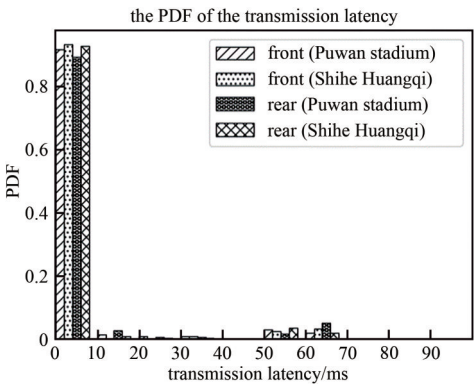


Fig.9 Probability density distribution of transmission latency
图9 WiFi6传输时延概率密度分布图

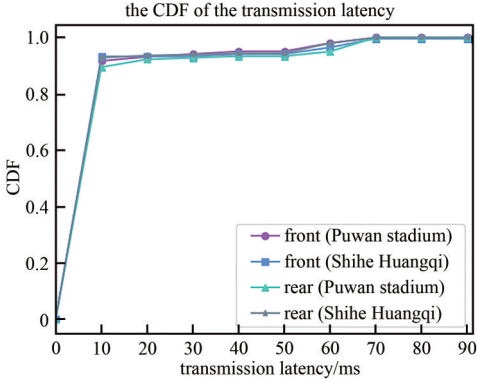


Fig.10 Cumulative distribution of transmission latency
图10 WiFi6传输时延累计分布图

5.2.3 背景流量下丢包时延测试

用 Ixchariot 软件发送 8 Mbps 数据流作为背景流量, 采用辅助测试工具软件 Fping 测试时延与丢包情况, 测试结果如下所示: 在 4 个测试用例中, 车头丢包率未达到小于 0.5% 的规范要求; 车头、车尾在两个运行方向上的平均传输时延分别为 3.6 ms, 5.0 ms, 3.6 ms, 4.1 ms, 由此可知传输时延大部分集中在 10 ms 以内, 测试中出现的最大传输时延为 258.5 ms (车头-石河黄旗方向)。背景流量下丢包时延测试结果如表 6 所示。8 Mbps 背景流量下传输时延概率密度分布以及累积分布如图 11~12 所示。

表 6 丢包测试结果统计
Table 6 Statistics of packet loss test results

cases	number of sent packets	number of received packets	number of loss packets	packet loss rate/%
front (Puwan stadium)	207	205	2	0.96
front (Shihe Huangqi)	282	280	2	0.71
rear (Puwan stadium)	175	175	0	0
rear (Shihe Huangqi)	255	255	0	0

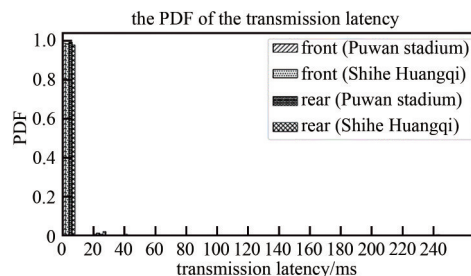


Fig. 11 Probability density distribution of transmission latency under background traffic

图 11 8 Mbps 背景流量下传输时延概率密度分布图

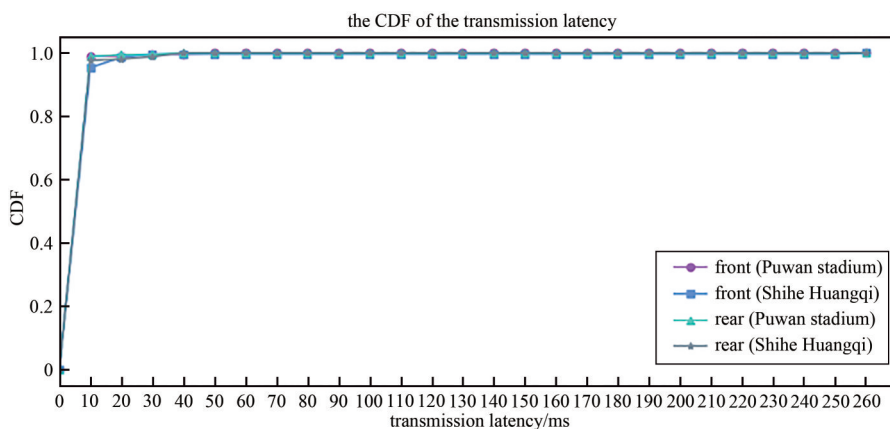


Fig. 12 Cumulative distribution of transmission latency under background traffic

图 12 8 Mbps 背景流量下传输时延累积分布图

5.2.4 有效传输带宽测试

车地无线通信网络的有效传输带宽是列车 WiFi 热点业务相关的最重要指标, 采用 Ixchariot 软件测试列车在时速 120 km 下的车地无线传输带宽, 测试结果如表 7 所示。吞吐量概率分布如图 13 所示。

表 7 有效传输带宽测试结果统计
Table 7 Test results of effective transmission bandwidth

cases	minimum throughput/Mbps	maximum throughput/Mbps	average throughput/Mbps
front(Puwan stadium)	225.234	831.159	569.429
front(Shihe Huangqi)	281.734	1 033.761	597.692
rear(Puwan stadium)	476.986	913.539	656.461
rear(Shihe Huangqi)	548.086	1 027.829	659.306

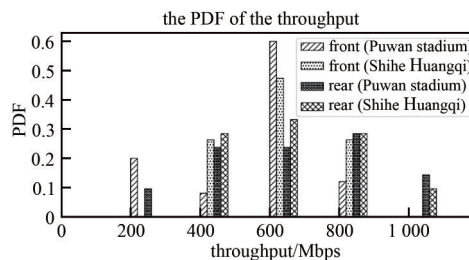


Fig. 13 Throughput probability distribution

图 13 吞吐量概率分布图

5.3 测试结果分析

从以上测试结果可以看出, 车尾的性能总体要优于车头, 这是由于在列车运行过程中车头 AP 与轨旁 AP 逐渐接近^[10], 当车头跨过当前 AP 时, 信号会突然恶化, 从而造成丢包的增加以及吞吐量的下降, 而车尾 AP 在运行过程中进行远离切换, 因此不存在该问题。车头车尾的信号强度及性能如图 14~15 所示。

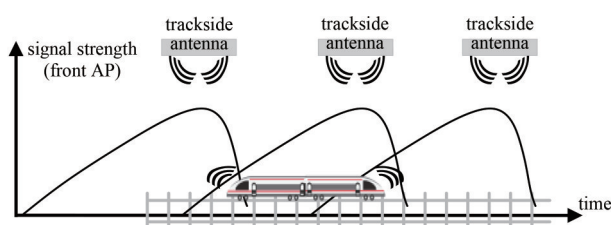


Fig.14 Signal strength at the front of train
图 14 车头 AP 的信号强度

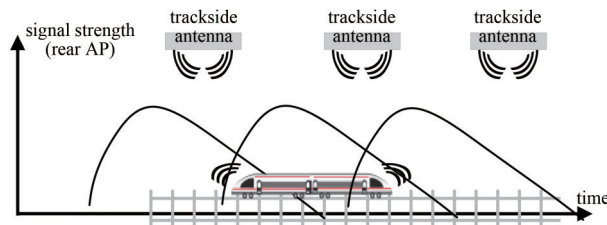


Fig.15 Signal strength at the rear of train
图 15 车尾 AP 的信号强度

6 结论与展望

本文设计了基于 WiFi6 的城市轨道交通车地通信综合承载系统。在大连地铁 13 号线进行了全国第一个 WiFi6 系统的实际地铁线路测试。试验结果满足预期效果，验证了 WiFi6 系统网络吞吐能力大，通信及传输速率快，续航能力长，覆盖范围广的特点，能够满足轨道交通业务需求。

WiFi6 系统用于承载轨道交通综合业务，在保障 CBTC 业务高可靠传输的同时，能够为 CCTV 和 PIS 等业务提供有效的传输通道。在高速移动状态下能够保证高速率、低丢包、低时延。

下一步将推广 WiFi6 系统在城市轨道交通中的应用，并同步推进 WiFi6 系统的技术规范工作，以规范和指导 WiFi6 系统的设计和研究工作。

参考文献：

- [1] KHOROV E, KIRYANOV A, LYAKHOV A, et al. A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 21(1): 197–216.
- [2] 毛磊, 翟浩杰, 尹尚国. 5G 在轨道交通行业的应用探讨[J]. 移动通信, 2020, 44(1): 63–70. (MAO Lei, ZHAI Haojie, YIN Shangguo. Discussion on the application of 5G in the rail transportation industry[J]. Mobile Communications, 2020, 44(1): 63–70.)
- [3] New WiFi6(11ax) Access Points deliver connections in educational environs[J]. Telecomworldwire, 2019(5): 90–91.
- [4] 万菁晶, 陆怡琪, 田梦倩, 等. 面向 5G 无线通信系统中若干物理层技术探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6): 962–969. (WAN Jingjing, LU Yiqi, TIAN Mengqian, et al. On some physical layer technology in 5G wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6): 962–969.) doi:10.11805/TKYDA201806.0962.
- [5] COONEY M. Juniper's Mist adds WiFi6, AI-based cloud services to enterprise edge[J/OL]. Network World(Online), <https://www.networkworld.com/article/3405123/juniper-s-mist-adds-wifi-6-ai-based-cloud-services-to-enterprise-edge.html>, 2019.
- [6] NETGEAR expands business essentials line with powerful and affordable new WiFi6 Access Point for small business[DB/OL]. (2020-11-24). <https://www.businesswire.com/news/home/20201124005625/en/>, 2021.
- [7] KATO H, TAKEDA R, IDENO Y, et al. Physicians' compliance for hand hygiene in medical outpatient clinics: automated hand-hygiene monitoring with touch sensor and wireless internet[J]. American Journal of Infection Control, 2021, 49(1): 50–54.
- [8] 黄克勇, 王惟一, 宓燕. 城轨信号系统中 AP 布站设计方案[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3): 40–45. (HUANG Keyong, WANG Weiyi, MI Yan. Design scheme of AP station layout in an urban rail signal system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(3): 40–45.)
- [9] 唐亚平. 无线电波传播损耗预测方法与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014. (TANG Yaping. Research on prediction method and application of radio wave propagation loss[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)
- [10] 卞雨谦. 复杂隧道内电波传播的抛物线方程方法分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2020. (BIAN Yuqian. Analysis of parabolic equation method for radio wave propagation in complex tunnels[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2020.)

作者简介：

曹楠(1983–)，男，工程师，主要从事地铁通信系统建设工作.email:220202@163.com.

焦凤仪(2000–)，女，本科，主要研究方向为轨道交通的智能调度。

石雪涛(2000–)，女，本科，主要研究方向为云计算在轨道交通的应用。