

调车机车自动驾驶技术研究——无线通信技术应用研究

王辉 刘晶 刘文才 王彬鉴 刘斌

北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 北京 100070

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17676

[摘要] 本文对铁路调车机车自动驾驶的无线通信制式进行了研究，并根据现场特点和需求，制定了一套适用于调车机车自动驾驶的无线通信方案，旨在为铁路调车机车自动驾驶的应用和推广提供参考。

[关键词] 调车机车；自动驾驶；无线通信

Abstract: This article conducts research on the wireless communication system for automatic driving of railway shunting locomotives, and based on the characteristics and requirements of the site, formulates a wireless communication scheme suitable for automatic driving of shunting locomotives, aiming to provide a reference for the application and promotion of automatic driving of railway shunting locomotives.

Keywords: shunting train; automation driving; wireless communication

1. 引言

1.1 研究背景

1.1.1 铁路车站与调车

车站作为铁路运输的基层生产单位，汇集了与运输相关的各类技术设备。统计显示，我国现有内燃机车约 1.2 万台，货车约 57 万辆。货车在一次全周转时间中，车辆在站作业时间占比约为 60%~70%。由此可见，科学布置并高效运用车站与枢纽的各项设备，确保运输安全，提升运转效率，增强自动化水平，是降低运输成本的重要环节之一。

目前，国内调车机车在自动化与信息化建设方面差异显著。一些较为先进的车站，如广州局集团的江村站、怀化西站，以及成都局集团的成都北站等，已基本实现调机作业信息化，并在此基础上完成了行车安全防护，有效防止了行车安全事故的发生。同时，在保障行车安全的前提下，部分作业已实现了自动驾驶。

随着基础技术和通用技术的迅速发展，5G 无线通信、北斗卫星定位、环境感知识别、数字孪生、人工智能 AI 训练等新技术逐步投入使用，推动调车机车自动控制领域朝着更安全、更高效、更节约的方向快速迈进。

1.1.2 无线通信在铁路系统中的应用

无线通信在铁路作业中有着广泛的应用，起到至关重要的作用。比较典型的应用有采用 GSM-R 的列车自动防护系统 (ATP)、采用 450MHz 的铁路列车无线调度通信系统、采用 400MHz 的铁路无线调车灯显系统和无线调车机车信号和监控系统，以及车务、电务、工务等部门的通信、维修、对讲等系统应用。

同时，还有一些应用 WiFi、LTE、LoRa、Tetra、zigbee、Bluetooth 解决局部通信问题的无线通信技术，运用较为复杂，没有形成大规模应用效应。

随着 5G 技术的发展，5G 技术越来越多的应用于铁路无线通信领域，并且随着 5G-R 的相关政策、标准、规范的出炉，5G 技术将逐渐成为铁路通信的主要技术手段。

1.3 无线通信在铁路调车机车自动驾驶中的作用

铁路调车机车自动驾驶，根本原理是依据铁路调车作业的计划，结合机车行驶的路径（进路），实现有目标点的、有轨道约束的、有行驶要求的机车自动控制过程。调车作业计划、进路等关键作业条件均由设置在地面的调度信息管控系统、信号控制系统等相关系统办理生成，必须将这些关键条件发送到机车上，再由机车设备进行执行，同时，机车运行状态、位置、工况等重要信息也必须发送给地面的管控系统。因此，车地间的数据通信在整个系统中起到关键作用，是调车机车自动驾驶的关键技术之一。

传统的车地通信，有采用轨道电路载频信号承载行车相关信息的方式，有采用无线电台传递行车信息的方式，也有采用无线局域网、GSM-R 等方式传递行车信息的。随着 4G/5G 无线通信技术的发展与日臻成熟应用，采用 4G/5G 方式实现车地通信，是未来该领域发展的重要方向。特别是 5G 技术，5G 技术凭借其低时延、高可靠、大带宽的特性，能够满足调车机车与地面系统间实时、双向、海量数据交互的需求，有效支撑自动驾驶指令的精准下发与运行状态的实时回传。同时，5G 网络切片技术可为调车业务提供独立、隔离的专属通道，保障通信安全性与服务等级，进一步提升系统整体可靠性与运行效率。

2. 文献综述

2.1 国际方面

目前，国外自动驾驶系统主要针对长大线路货运或者多级重联同步控制方向。美国 GE 公司的重联机车无线遥控系统 (LOCOTROL) 在世界范围内得到广泛应用，中国大秦运煤专线引进的正是 GE 公司的 LOCOTROL 技术，解决了多机车同步控制重载列车运行的操控难题，并于 2006 年开始运行两万吨列车。美国 GE 公司研发的 TripOptimizer (TO) 系统在美国实现批量应用，累计装车超过 7000 套，但该系统仅在机车速度高于 15km/h 时才被允许启用，且 TO 系统获取控制权后，只负责机车的牵引和电制动（不涉及空气制动系统）。

庞巴迪公司开发的 InterFL0 系统,在智利艾尔特尼恩特铜矿、瑞典基律纳铁矿等地已开展了列车自动控制的研究与试验。澳大利亚力拓公司的机车自动驾驶系统 AutoHaul 在澳大利亚西部皮尔巴拉 (Pilbara) 地区的重载铁路网上实现了自动化运营。

2.2 国内方面

近几年,国内铁路机车自动驾驶技术取得了一定进步。因城轨系统运营环境较为简单,列车操控难度相对较低,所以目前国内外轨道交通行业的自动驾驶技术主要应用于城市轨道交通领域。在城际(市域)铁路中,已推广采用 CTCS2+ATO 的驾驶模式。在货运机车领域,受货运机车控制复杂性与工况复杂等因素限制,实现完全自动驾驶的应用暂时不多,研究重点主要放在优化操纵与辅助驾驶等方面。2020 年,北京全路通信信号研究设计院集团有限公司研发的货运站场自动驾驶系统,在鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司范屯站 75km 线路上得到应用,实现了站场大部分调车作业的自动驾驶以及部分特定作业的遥控驾驶。中国铁道科学研究院集团有限公司开发的调机自动驾驶系统,在朔黄铁路黄骅港站实现了站场调车作业自动驾驶。中冶赛迪集团有限公司在湛江钢铁实现了铁水运输的自动驾驶。

II. 引言二

1. 目前存在的问题

近年来,铁路机车自动驾驶技术发展迅速,尤其在机车定位、无线通信以及感知识别等技术领域,进步尤为显著。然而,铁路调车作业自身具备较强的特殊性与复杂性,与客运列车、地铁、轻轨等存在明显区别。调车作业以单节车辆为基本单位,进行统筹管理与调配。在不同作业场景下,车辆会以不同的编组形式存在于车列中。根据铁路调车作业特

点,对于无线通信的需求主要集中在以下几个方面:

1) 实时性要求。作为实时在线的控制系统,对控制数据的传输实时性要求较高,一般要求不高于 20ms;对于视频流、语音流等数据,传输时延一般要求不高于 500ms。

2) 可靠性要求。对于控制数据的传输,可靠性要求不低于 99.999% (双向传输);对于感知类数据的传输,可靠性要求不低于 99.9% (单向传输)。

3) 传输速率要求。单台机车的控制数据,速率一般不大于 2kbit/s (双向传输),在同一站场作业的调车机车数量一般不大于 20 台。视频数据流,一般按照 4 路高清视频传输计算,应能保证双向各 16Mbit/s 的传输速率。

2. 研究目的

本文通过对调车机车自动驾驶无线通信的需求整理,总结出几种无线通信方案,为调车机车自动驾驶项目建设实施提供参考,为该领域技术发展、产品应用与推广起到推动作用。

3. 本文后续章节及概要

本文后续章节概括如下: 第 III 部分介绍自动驾驶无线通信技术研究, 第 IV 部分介绍研究成果应用案例, 第 V 部分为结论。

III. 自动驾驶无线通信技术研究

1. 5G 方案

根据国家发展规划和相关政策,在调车机车自动驾驶项目建设时,优先选用 5G 作为主要通信手段。5G 的建设可分为建立在电信运营商建设的公网 5G 通信基础上建设调车机车自动驾驶无线通信网络、工程建设方自主建设 5G 专网等方案,根据建设方式的不同,可以总结为以下几个建设方案。

1) 方案一: 企业用户自建 5G 专网方案

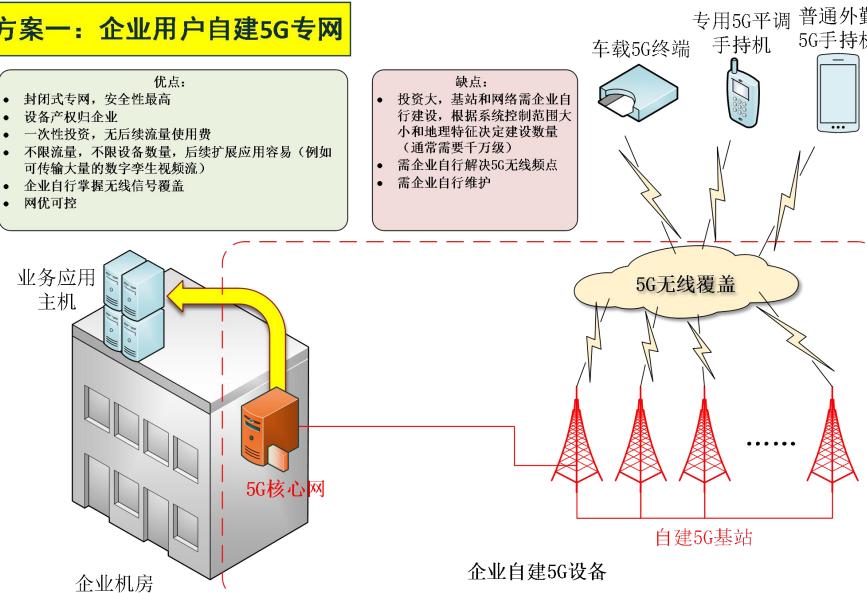


图 1 企业用户自建 5G 专网方案

企业用户自主建设 5G 专网平台,构建一个专用于本企业自动驾驶系统的专用局域网。局域网内车、地、手持端等各种通信终端设定静态 IP,通过授权接入的方式,允许连接入

该局域网,实现局域网内宽带通信。

自建 5G 专网不与任何外部网络连接,属于封闭的局域网。所有接入设备均需由私有专网管理端予以授权,非法设

备一律拒绝接入,保障内网安全性。

自动驾驶系统地面设备通过专线与5G网络连接,车载设备通过5G专用CPE连入本专网。移动端采用专用便携设备,

通过本专网的管理平台予以授权后可连入本局域网。

2) 方案二: 5G专网方案

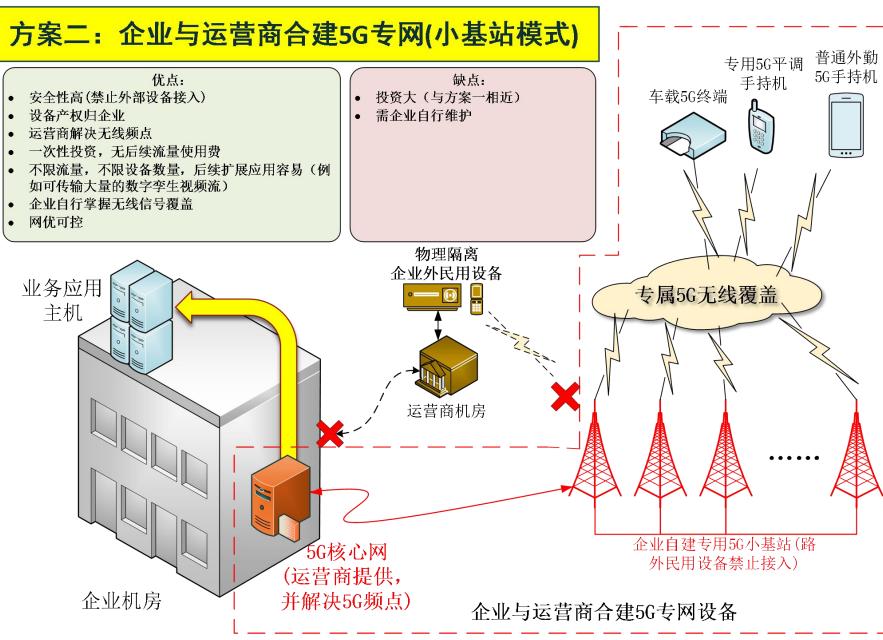


图2 企业与运营商合建5G专网方案

企业与电信运营商合建5G专网平台,专用于本企业自动驾驶系统的专用局域网。

该方案与方案一类似,区别在于5G的核心网由电信运营

商提供并管理,由运营商解决频点、牌照等问题。

3) 方案三: 公网专用通道方案

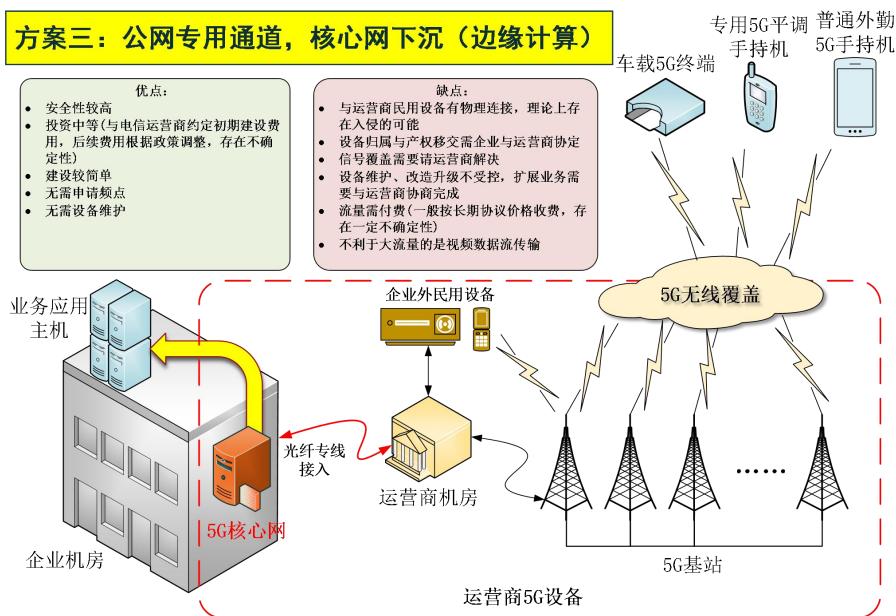


图3 核心网下沉的公网专用通道方案

自动驾驶系统通过运营商提供的公专网平台,实时传输车地数据。公专网平台由运营商建设,企业用户的自动驾驶系统主要通过三部分设备接入。

(1) 地面端

地面端接入指自动驾驶系统地面主机等设备,通过VPN路由器服务、公网接入防火墙等设备和服务,接入运营商公网

平台。地面端需要运营商向机房引入专用光纤通道,并提供公网静态IP地址。

(2) 车载端

车载端接入指车载主机应用层设备,通过5G专用移动端CPE,连接到运营商提供的公专网平台,并通过平台与地面设备、手持设备建立连接通道,传送控制命令。车载端需要运

营商提供接入 SIM 卡。

(3) 手持端

手持端接入系统专用的便携手持终端设备, 通过接入运营商网络, 与地面端、车载端应用建立通信连接, 用于接收报警命令等信息, 发送现场图片等。手持端需要运营商提供

方案四: 普通公网虚拟专用通道

优点:

- 投资最小(一般<10万/年)
- 建设最简单
- 无需申请频点
- 无需设备维护

缺点:

- 安全性低
- 设备完全归运营商
- 信号覆盖需要请运营商解决
- 设备维护、改造升级不受控, 扩展业务需要与运营商协商完成
- 流量需付费(一般按长期协议价格收费, 存在一定不确定性)
- 不利于大流量的是视频数据流传输

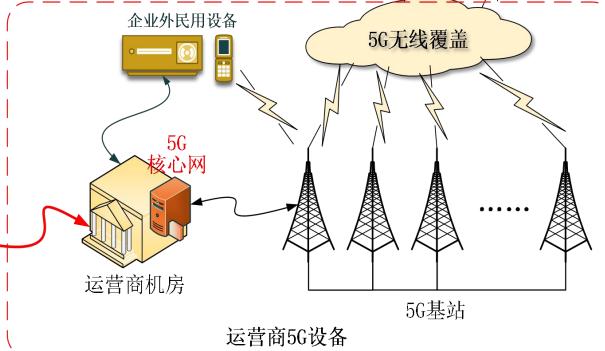
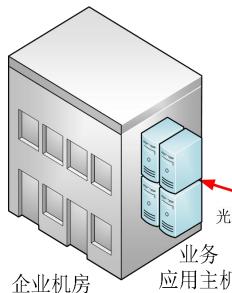


图 4 普通公网虚拟专用通道方案

该方案类似于普通民用 5G 网, 采用现有公网虚拟通道的方案, 所有设备建设、联网服务、后期维护均由运营商提供。相较于方案三, 由于方案四的企业 5G 网络与运营商的普通民用网络服务连接在一起, 完全依靠运营商设置的虚拟网络切片进行隔离, 存在入侵风险, 安全性最低。

2. 其他方案

自动驾驶的运用, 也可采用数字电台、WiFi、LTE、LoRa、Tetra、zigbee 等无线通信方式实现, 但这些无线通信制式, 各有优缺点, 均不能完美解决自动驾驶应用需求。如果用户投资允许, 可采用这些无线通信技术作为 5G 通信方案的补充或备用, 解决局部通信问题或故障异常下的应急。

IV. 研究成果应用案例

上述无线建设方案已在国内铁路建设中有过成熟的应用案例。在中国铁路广州局集团公司江村站、怀化西站, 运用方案三构建的自动驾驶系统已进入长期运用状态; 在鞍钢集团鲅鱼圈钢铁分公司、朔黄铁路黄骅港站, 运用方案四组建的无线通信系统也长期运用于自动驾驶系统; 在中国铁路成都局集团公司成都北站, 运用方案二构建的无线通信网络, 也已投入运用。

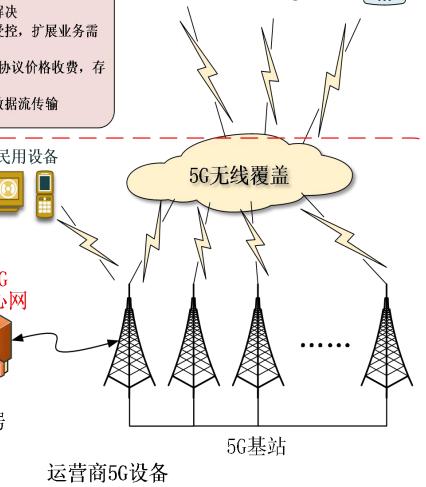
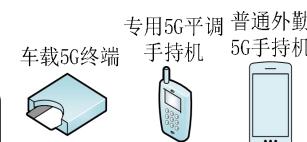
V. 结论

本文对铁路调车机车自动驾驶系统的无线通信方式进行了探讨, 根据无线通信基本构成、现场应用经验与成效、5G 无线通信建设方案的优缺点分析, 推荐了几种基于 5G 的自动驾驶无线通信构建方案, 为该领域的系统建设实施、长期维

接 SIM 卡。

【网络安全】地面端组网后, 可通过接入企业网络安全监控平台后接入运营商公网, 保证网络安全性。

1) 方案四: 普通公网虚拟专用通道方案



护使用提供了思路和经验。

[参考文献]

- [1] 强常军. 新建西安至安康高速铁路 5G 公网布设方案简析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21 (7) : 49-54.
- [2] 孙晓明. 铁路 5G 公专网联合无线覆盖系统技术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2025, 22 (2) : 58-64.
- [3] 韩利祥. 铁路 5G 专用移动通信网络安全探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2025, 22 (4) : 51-57.
- [4] 栾德杰, 杨华昌, 冯军. 基于 5G 技术的调车机车远程驾驶控制系统 [J]. 中国铁路, 2022 (9) : 105-111.
- [5] 许展瑛, 刘青, 冯军, 等. 基于 5G 的重载车站智能调车系统总体方案研究 [J]. 中国铁路, 2024 (8) : 114-121.
- [6] 张永, 孙宇, 杨振全. CHA3A1 型调车机车无人驾驶系统 [J]. 铁道机车与动车, 2021 (12) : 10-12, 16.
- [7] 闫石, 栾德杰, 唐江东, 等. 无线调车机车信号和监控系统宽带移动通信方案研究 [J]. 中国铁路, 2021 (5) : 93-97.
- [8] 铁道部统计中心. 铁路简明统计资料 [M]. 北京, 中国铁道出版社, 2009: 25.
- [9] 李海鹰, 张超. 铁路站场及枢纽 [M]. 北京, 中国铁道出版社有限公司, 2020: 1.
- [10] 尚敬, 刘勇, 江帆. 机车自动驾驶技术研究与应用 [J], 机车电传动, 2023 (1) : 1-12.