



国家出版基金项目 “十二五” 国家重点图书出版规划项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



轨道交通宽带移动通信系统理论与关键技术

Fundamental Theories and Key Technologies of Rail Traffic Broadband  
Mobile Communication Systems

◎钟章队 主编

# 轨道交通宽带移动通信系统 无线资源管理

Radio Resource Management of Rail Traffic Broadband Mobile  
Communication Systems

◎朱刚 陈霞 沈超 林思雨 著

北京交通大学出版社  
<http://www.bjtup.com.cn>



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

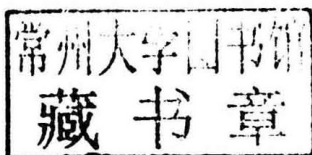
“十二五”国家重点图书出版规划项目

轨道交通宽带移动通信系统理论与关键技术

钟章队 主编

# 轨道交通宽带移动通信系统 无线资源管理

朱刚 陈霞 沈超 林思雨 著



北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

轨道交通以其高效、绿色、安全的特性已经并将继续成为未来公共交通的重要方式。面向轨道交通的无线通信系统是其安全、高效运行的基础,针对轨道交通环境的信道特性和业务需求进行无线资源配置和调度的优化设计则是轨道交通无线通信系统的核心技术之一。本书特点是不仅介绍了轨道交通无线通信应用和信道特点及无线通信系统资源管理的基本概念,还介绍了目前轨道交通无线通信领域中较成熟的无线资源管理理论和技术,从在线式实时资源管理、跨层优化设计等角度进行了深入探讨。本书可作为通信工程技术人员和相关通信专业研究生的参考书。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

轨道交通宽带移动通信系统无线资源管理/朱刚等著. —北京:北京交通大学出版社,2018.4

(轨道交通宽带移动通信系统理论与关键技术/钟章队主编)

ISBN 978-7-5121-3453-9

I. ①轨… II. ①朱… III. ①轨道交通-移动通信-宽带通信系统-研究  
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第331267号

### 轨道交通宽带移动通信系统无线资源管理

GUIDAO JIAOTONG KUANDAI YIDONG TONGXIN XITONG WUXIAN ZIYUAN GUANLI

责任编辑:解 坤

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

<http://www.bjtup.com.cn>

地 址:北京市海淀区高粱桥斜街44号

邮编:100044

印 刷 者:艺堂印刷(天津)有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印张:13.25 字数:252千字

版 次:2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3453-9/TN·114

定 价:78.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: [press@bjtu.edu.cn](mailto:press@bjtu.edu.cn)。

# 前 言

自 1807 年英国威尔士出现第一辆铁路列车以来，轨道交通经历了巨大的变化。高速铁路、城市轨道交通已经成为目前城市间和城市内重要的公共交通工具，重载铁路也成为城市间大宗货物的高效运输方式。列车动力从蒸汽机车、柴油机车、电力机车牵引，到目前广泛采用的动车组牵引，使得轨道交通成为一种高效、绿色的运输方式。面向轨道交通的无线通信系统成为轨道交通的重要组成部分，其作用不仅在于提高运输的效率，更是保障轨道交通运输有效性、可靠性和高效性的核心。

基于第二代数字蜂窝移动通信 GSM 系统发展而来的 GSM-R 是专门为铁路通信设计的综合专用数字移动通信系统，已广泛应用于铁路运输的无线列调、编组、自动控制与检测等业务；IEEE 802.11 广泛应用于城市轨道交通的列车控制系统和宽带无线接入；其他，如 WiMAX 系统在高速铁路等轨道交通系统中也得到了应用。基于 LTE 的下一代高速铁路无线通信系统 LTE-R 已经处于研究、测试、规范之中。此外，面向高速移动的无线通信也是未来 5G 系统必须考虑的业务场景。这些系统一方面需要适应轨道交通的典型场景，特别是高架桥、隧道、路堑等，另一方面也需要利用这些场景的特殊性进行系统的优化设计，同时轨道交通无线通信业务有其特殊性，也需要进行专门的传输机制设计。因此移动通信系统无线资源管理对轨道交通的运行具有非常重要的作用。

面向轨道交通的无线通信系统资源管理形式多样、机制复杂、牵涉面广泛。本书首次尝试针对这一领域的现状和研究给出较全面的综述与分析。过去几年，无线通信领域取得了突飞猛进的发展，在轨道交通移动通信领域涌现出许多具有专用通信特色的新的无线资源管理理论与方法。本书的目标是提供本研究领域较全面的基础理论和最新研究进展，包括北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室轨道交通专用移动通信方向所取得的相关研究成果，为高等院校学生、相关领域研究人员和业界工程师提供参考与帮助。本书内容包

# 轨道交通宽带移动通信系 理论与关键技术

◎钟章队 主编

- ◎ 轨道交通电波传播与无线信道建模
- ◎ 轨道交通宽带移动通信网络
- ◎ 轨道交通宽带移动通信系统物理层关键
- ◎ 轨道交通宽带移动通信系统无线资源管

责任编辑：解 坤  
封面设计：乔 楚

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 概述            | 1  |
| 1.1 铁路移动通信          | 1  |
| 1.1.1 铁路数字移动通信系统    | 2  |
| 1.1.2 铁路下一代移动通信系统   | 4  |
| 1.2 城市轨道交通无线通信      | 7  |
| 1.2.1 基于通信的列车控制系统   | 8  |
| 1.2.2 地铁移动通信系统      | 9  |
| 1.2.3 地铁下一代无线通信系统   | 13 |
| 1.3 本书内容安排          | 15 |
| 本章参考文献              | 16 |
| 第 2 章 移动通信系统无线资源管理  | 18 |
| 2.1 无线资源管理概述        | 18 |
| 2.2 第二代移动通信系统无线资源管理 | 20 |
| 2.2.1 GSM 系统简介      | 21 |
| 2.2.2 GSM 切换控制      | 22 |
| 2.2.3 GSM 功率控制      | 24 |
| 2.2.4 GSM 信道分配      | 27 |
| 2.3 第三代移动通信系统无线资源管理 | 29 |
| 2.3.1 3G 系统简介       | 29 |
| 2.3.2 3G 负载控制       | 30 |
| 2.3.3 3G 接入控制       | 31 |
| 2.3.4 3G 功率控制       | 31 |
| 2.3.5 3G 软切换        | 33 |



|              |                       |            |
|--------------|-----------------------|------------|
| 2.3.6        | 3G 信道分配               | 33         |
| 2.3.7        | 3G 分组调度               | 34         |
| 2.4          | LTE 系统无线资源管理          | 35         |
| 2.4.1        | LTE 系统简介              | 36         |
| 2.4.2        | OFDM 系统资源分配           | 39         |
| 2.4.3        | LTE 分组调度              | 45         |
| 2.4.4        | LTE 功率控制              | 49         |
| 2.4.5        | LTE 小区间干扰管理           | 51         |
| 2.4.6        | LTE 接入控制              | 57         |
| 2.4.7        | LTE 移动性管理             | 61         |
|              | 本章参考文献                | 67         |
| <b>第 3 章</b> | <b>铁路无线移动通信应用</b>     | <b>73</b>  |
| 3.1          | 铁路专用通信业务              | 73         |
| 3.2          | 无线列车调度                | 75         |
| 3.2.1        | 无线列调系统组成              | 75         |
| 3.2.2        | 无线列调系统制式              | 76         |
| 3.3          | 铁路列车控制                | 77         |
| 3.3.1        | 欧洲铁路列车控制系统            | 78         |
| 3.3.2        | 中国铁路列车控制系统            | 84         |
| 3.4          | 铁路应急通信                | 89         |
| 3.4.1        | 我国应急通信的现状             | 89         |
| 3.4.2        | 铁路应急通信系统的基本组成部分       | 90         |
| 3.4.3        | 铁路应急通信系统的总体结构         | 90         |
| 3.4.4        | 铁路应急通信系统的接入技术         | 93         |
| 3.5          | 铁路旅客通信                | 95         |
| 3.5.1        | 铁路旅客通信需求              | 95         |
| 3.5.2        | 实现旅客列车移动通信的几种方案       | 96         |
|              | 本章参考文献                | 99         |
| <b>第 4 章</b> | <b>铁路移动通信系统无线资源管理</b> | <b>102</b> |
| 4.1          | 概述                    | 102        |



|              |                             |            |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 4.2          | 铁路移动通信系统概述 .....            | 103        |
| 4.2.1        | 铁路移动通信系统基本特征 .....          | 103        |
| 4.2.2        | 铁路移动通信系统网络架构 .....          | 105        |
| 4.2.3        | 铁路移动通信系统传输技术 .....          | 107        |
| 4.2.4        | 铁路移动通信系统承载业务 .....          | 110        |
| 4.2.5        | 铁路场景电波传播机制和信道模型 .....       | 113        |
| 4.3          | 铁路移动通信无线资源管理 .....          | 136        |
| 4.3.1        | 铁路移动通信资源分配 .....            | 137        |
| 4.3.2        | 铁路移动通信接入控制 .....            | 140        |
| 4.3.3        | 铁路移动通信功率控制 .....            | 143        |
| 4.3.4        | 铁路移动通信移动性管理 .....           | 144        |
| 4.4          | 铁路移动通信无线资源管理发展前景 .....      | 148        |
| 4.4.1        | 具有位置感知的无线资源管理 .....         | 148        |
| 4.4.2        | 基于跨层设计的联合资源管理 .....         | 149        |
| 4.4.3        | 面向多媒体传输的能效资源管理 .....        | 149        |
| 4.4.4        | 具有可靠性保障的鲁棒性资源管理 .....       | 150        |
| 4.4.5        | 面向 5G 移动通信的增强型资源管理 .....    | 150        |
|              | 本章参考文献 .....                | 151        |
| <b>第 5 章</b> | <b>铁路移动通信在线无线资源分配 .....</b> | <b>160</b> |
| 5.1          | 离线调度和在线调度 .....             | 160        |
| 5.2          | 在线算法设计 .....                | 162        |
| 5.3          | 在线无线资源分配 .....              | 163        |
| 5.3.1        | 基于窗口的在线无线资源分配算法 .....       | 164        |
| 5.3.2        | 基于预测的在线调度算法 .....           | 166        |
| 5.3.3        | 启发式在线算法 .....               | 168        |
| 5.4          | 高速铁路无线资源调度的在线算法 .....       | 168        |
| 5.4.1        | 问题建模与算法建立 .....             | 168        |
| 5.4.2        | 仿真结果与性能分析 .....             | 175        |
|              | 本章参考文献 .....                | 178        |





|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第 6 章 铁路移动通信的跨层资源分配         | 179 |
| 6.1 概述                      | 179 |
| 6.1.1 跨层优化的概念               | 179 |
| 6.1.2 高速铁路移动通信系统中的跨层优化      | 182 |
| 6.2 具有时延敏感要求的跨层资源管理         | 183 |
| 6.2.1 等价速率约束                | 187 |
| 6.2.2 李雅普诺夫 (Lyapunov) 漂移理论 | 188 |
| 6.2.3 基于效用函数的数据调度方法         | 189 |
| 6.3 高速铁路移动通信系统时延性能研究思路      | 191 |
| 6.3.1 非严格时延约束跨层资源优化         | 192 |
| 6.3.2 严格时延约束跨层资源优化          | 194 |
| 6.3.3 两跳队列时延模型              | 196 |
| 6.4 总结                      | 197 |
| 本章参考文献                      | 198 |

# 第 1 章 概 述

轨道交通 (rail transport) 是以机车牵引列车在轨道上行走的陆上运输方式, 包括铁路和城市轨道交通。铁路根据运行速度可分为普通铁路与高速铁路 (high-speed railway, HSR), 根据国际铁路联盟 (International Union of Railways, UIC) 的定义, 高速铁路是允许速度至少达到 250 km/h 的专线或允许速度达到 200 km/h 的铁路线路。高速铁路与其他运输方式相比有明显的优越性, 包括: 运送速度快; 能源消耗低; 占地少, 只有高速公路的 1/3; 环境污染轻, 电气化高速铁路基本消除了燃料燃烧所造成的污染。由于运力、成本等方面的优势, 在经济全球化和低碳化的时代背景下, 铁路尤其是高速铁路迅速发展, 快速、便捷、准时且舒适的高速铁路旅行越来越受欢迎。而近年来城市道路拥堵、流动性差、能耗高等问题持续恶化, 城市轨道交通因具有运量大、速度快、安全准点、节约能源和土地、建设周期短等特点, 成为解决城市交通问题的优选方案。

在轨道交通中, 无线通信特别是移动通信基础设施扮演着神经中枢系统的角色, 承载着工作人员之间、设备之间通信信息数据的传递, 特别是高速行驶的车辆与地面间高实时性、高可靠性的控制信息的传递, 为保障轨道交通运输系统的安全、高效和舒适发挥着重要作用。

## 1.1 铁路移动通信

我国除工业和信息化部管理的运营商公用通信系统之外, 铁路、军队、石油、电力等系统都有各自的专用通信系统, 铁路专用通信系统是为解决铁路运



输、调度而建设的通信网络，是全国最大的专用通信系统。铁路信号及通信系统如同铁路运输的耳目，是保证列车运行安全和提高运输效率的重要手段。铁路通信按传输方式可分为有线通信和无线通信两大类，按服务区域可分为长途通信、地区通信、区段通信和站内通信等。

作为铁路基础设施，我国的铁路通信网经过多年建设已形成包括基础网、业务网、移动通信网的网络架构。其中，基础网包括通信线路（光缆、电缆）、传输网、数据通信网，是各类信息的载体。业务网包括电话交换网、调度通信网、电报网、会议电视网、应急通信网和视频监控系统，提供和承载的业务主要是面对铁路行业的应用。调度通信网采用电路交换的调度交换机组网，实现中国铁路总公司、铁路局（集团公司）、站段的调度通信和站场专用通信。电报网使用传统电报交换机，完成各单位和车站的电报业务。早期铁路移动通信以模拟无线列车调度系统为主，提供调度员、司机及车站间的三方通信。目前的铁路移动通信网主要包括铁路数字移动通信系统（global system for mobile communication-railway, GSM-R）和 450 MHz 无线列车调度系统，既提供无线传输数据的承载，又提供语音、数据业务、呼叫相关业务和铁路特定业务，基本满足铁路运输生产和经营管理的通信需求。面向未来数字化、智能化、网络化发展的铁路新一代移动通信系统正在研究、开发和标准化进程中。

### 1.1.1 铁路数字移动通信系统

作为铁路信息化驱动力的铁路数字移动通信系统 GSM-R 技术，最早是 UIC 为满足欧洲 21 世纪铁路一体化进程而推荐的欧洲铁路专用移动通信系统。1995 年，为了满足未来欧洲铁路系统互操作性的需求，经世界铁路最大的国际性标准化机构 UIC 与欧洲电信标准组织（European Telecommunication Standards Institute, ETSI）协商确认，提出了欧洲各国铁路下一代无线通信以全球移动通信系统（global system for mobile communication, GSM）phase2+ 为基础的铁路数字移动通信系统 GSM-R，这标志着高速铁路通信系统从模拟时代走向了数字化时代。在 GSM-R 标准确立并广泛应用的同期，日本新干线将原有的模拟多信道通信方式升级到了数字多信道通信方式。在地铁系统中广为



使用的数字集群系统 (terrestrial trunked radio, TETRA) 也在我国台湾高速铁路系统中应用, 为列车控制提供车-地无线传输链路。

GSM-R 系统是在 GSM 系统基础上发展创新而来, 采用与 GSM 系统相同的 900 MHz 频段, 能够满足 UIC 提出的铁路专业调度通信的要求, 具有功能完善、传输可靠、交换灵活、容量大等特点, 继承了原有系统的优势, 又增加了适合铁路应用的特点, 主要体现在其综合性、经济性好, 容量大, 可靠性高和安全性好等方面<sup>[1]</sup>。GSM-R 网络可以使铁路现有的各类通信系统综合到统一的网络平台上, 还可以使电力、车务、工务施工等不同系统互相通信、互相协调; GSM-R 网络是无线列调的更新换代产品, 能够满足铁路区间服务需求; GSM-R 网络可以将大多数通信业务统一到特定系统中来减少建设成本, 并且由于 GSM-R 是由 GSM 发展而来, 大大降低了技术引入成本, 是一种经济高效的数字综合无线通信系统; 由于 GSM 网络技术成熟可靠, GSM-R 能满足高速铁路通信需求, 因此可以为高速列车提供优质的通信服务。此外, GSM-R 改进创新了很多算法, 如越区切换算法、信道分配算法、高速抗失真算法等, 大大提高了 GSM-R 网络的性能。

GSM-R 系统的主要功能包括: ①列车调度功能——列车调度是 GSM-R 系统的基本功能之一, 其业务主要包括列车调度、货车运输调度、电源调度、专用调度、车站调度、应急调度等; ②信息传送功能——列车信息必须及时、准确地传输到目的地, GSM-R 系统有多种渠道可以传输列车信息, 也可以采用 GPRS 方式来实现, 对列车安全具有重要意义; ③调令传送功能——调度员向列车司机下达的铁路调度命令 (调令) 是列车运行安全的重要前提, GSM-R 系统可以将调令快速准确地传输出去, 从而提高工作效率; ④装置数据传送功能——将列车各个位置的装置数据传输到 GSM-R 通信系统, 可以方便地解决列车数据传输问题; ⑤监控信息传输功能——提供列车监控信息传输通道, 实现地面设备和多台车载设备间的监控数据传输, 并能够存储有关信息; ⑥列控信息传输功能——GSM-R 通信系统可以实现车与地之间安全的双向数据传输; ⑦区域协调功能——某一区域中各个部门内部的通信都可以使用 GSM-R 系统进行互相联络。

GSM-R 通过将成熟且已标准化的 GSM 通信体制引入铁路运输行业, 大大节省了研发生产成本, 使铁路系统使用统一的语音、数据传输平台成为可能,



对漫游的支持可以对列车在整个运行过程中进行自动控制，提高了铁路运营管理效率和安全性。GSM-R 系统已在许多国家取得了良好的发展，引导着全球铁路通信事业向着数字化、智能化、网络化和综合化的方向迈进。在我国，GSM-R 初期应用于青藏线（高原铁路）、大秦线（重载铁路）、胶济线，之后扩展到武广、郑西、京沪、沪宁、沪杭、哈大等客运专线，以及北同蒲线、云岗支线、迁曹线等重载线路，已全面建设和应用的 GSM-R 系统不断增强铁路信息化程度，提高铁路运输指挥效率，使中国铁路行业整体服务水平大大提升。

### 1.1.2 铁路下一代移动通信系统

随着铁路运输的现代化，对通信信息技术的需求在量和质上都日益提升。GSM-R 基于 20 世纪八九十年代的技术，其缺点及瓶颈不可避免地暴露出来：其窄带特性只能满足低速率的列车控制调度业务需求，所分配的 4 MHz 带宽更使这一情况恶化，所面临的来自运营商公网干扰等问题也影响其性能。可以预期的是，GSM-R 无法承载高速铁路未来智能化调度、视频监控和运营管理等高数据速率业务的需求。根据 GSM-R 发展的生命周期，下一代铁路移动通信系统的研发已是当前工作日程上紧迫的任务，国际铁路联盟（UIC）及各国家、地区的铁路运输管理部门都开始考虑和部署 GSM-R 未来的演进战略。

另外，近二十年来，移动通信领域理论、技术快速发展，尤其是公网移动通信系统的各种标准、产品、应用都在 21 世纪有了长足的进步。随着高速发展的移动通信广泛深入地渗透到人们工作、生活的各个方面，随时随地的通信信息应用已经成为人们日常活动不可缺少的部分，特别是在选择高速铁路这种便捷出行方式的同时也希望在路途中享受到便捷的移动多媒体服务，因此需要移动通信系统可以为高速移动用户提供满意的无线多媒体业务。GSM-R 技术是为了满足列车控制系统的车-地通信需求而设计的，从资源和技术上并不能满足高速铁路旅客的移动信息服务需求。世界各国研究者、工业界提出了不同的方案解决高速铁路旅客信息服务的问题。接入网络一般为铁路沿线架设基站的方式，接入技术可以采用通用分组无线业务（general packet radio service, GPRS）、高速下行分组接入（high speed downlink packet access, HSDPA）、全球微波接入互操作性系统（worldwide interoperability for microwave access,



WiMAX)、Wi-Fi、光无线通信、漏泄电缆、卫星通信及高海拔通信平台方式等。这些接入方案或多或少都存在一些问题,如 GPRS 技术受到带宽及技术本身的限制,无法保障大容量多媒体业务传输的服务质量;光无线通信及漏泄电缆接入方案由于造价较高而无法大范围铺设;卫星通信及高海拔通信平台方式都受到视距通信要求的限制,无法推广到所有高速铁路系统上;Wi-Fi 技术提供给高速移动旅客的服务质量不佳。

GSM-R 的提出、发展和广泛应用的成功经验表明,在已成熟的通用技术和系统标准基础上进行增强和改进以满足铁路运输等对可靠性要求较高的特殊行业要求的技术路线完全可行。但铁路移动通信从基于第二代数字移动通信的 GSM-R 出发,如多数国家的公用移动通信网那样,通过“演进”到第三代移动通信系统(3G)实现进步的路线已经从技术和经济的角度被明确否定。基于扩频码分多址技术的 3G 系统不但使用频点高,不满足铁路部门希望经济、实惠地实现网络在广泛地域内的覆盖目标,而且在语音业务上 3G 技术与 2G 技术并没有本质区别。目前,业界对铁路移动通信发展路线所达成的共识是直接过渡到基于第三代合作伙伴计划(the 3rd generation partnership project, 3GPP)长期演进(LTE)的 LTE-R 技术。

国际铁路联盟(UIC)于 2009 年 9 月 14 日颁布技术研究报告<sup>[2]</sup>,明确了铁路未来移动通信系统的演进需求、远景、目标、演进计划等,认为向 LTE-R 演进是 GSM-R 发展的必然趋势,已安装的 GSM-R 系统可以增强其应用,同时铁路部门也应大胆创新。此外,目前铁路环境中由于在服务类型和质量上有差异化需求,铁路专用通信用户和铁路旅客用户所使用的移动通信系统,继续各自发展,使得通信系统建设成本倍增,造成了经济上和资源上的双重浪费,因此 UIC 希望能够与各国铁路管理运营部门和国际电信组织继续开展合作,发展满足列车控制系统以及旅客信息业务需求的新一代高速铁路移动通信系统。随着 LTE 在公众运营网的普及发展,加速采纳这一标准作为铁路通信演进方向的特殊需求也被提上日程。越早地适应新技术,铁路部门就可以更灵活地应对内部及外部的通信需求,为未来的运营发展做好准备。

国际铁路与通信信息界已取得共识,认为铁路下一代无线通信的演进将选择 LTE。UIC 正在积极研究 GSM-R 向 LTE-R 的演进标准,确保 GSM-R 的生命周期随电信技术的不断发展而获得延长,在 GSM-R 向 LTE-R 平滑迁移时,



能尽可能保护 GSM-R 的投资、业务质量的一致性、提高服务质量 (quality of service, QoS) 等。UIC 提出的 GSM-R 向 LTE-R 演进将分两步实现。第一步, 需 5~10 年, 建设并存的 GSM-R/LTE 系统, 将由 GPRS 来承载的小容量非安全数据业务从 GSM-R 网络迁移至 LTE 网络, 实现非安全数据业务在容量和功能上的升级, 但与铁路生产安全性密切相关的话音组呼业务 (VGCS) 和话音广播业务 (VBS) 及用于列车控制数据传输的电路交换数据 (CSD) 功能依然由 GSM-R 网络承载。第二步, 约需 10 年, 在解决提升语音质量和快速呼叫建立问题后用 POC (push to talk over celler, 无线一键通) 代替 VGCS/VBS, 在解决分组业务交换、切换和 IP 传输时延问题后用分组数据代替 CSD, 即完全攻克技术问题之后再安全数据业务迁移到增强的 LTE 系统上去, 完全实现符合铁路运输容量和质量需求的 LTE-R 系统。

UIC 制定的演进计划 (LTE-R) 包括以下内容:

- 分析预期未来铁路的应用, 特别是 (宽带) 多媒体的相关应用;
- 验证移动通信新技术, 如 LTE/SAE, 是否支持所有既有和预期未来铁路需求 (包括点对点语音呼叫、点对多点语音呼叫等);
- 验证 4 MHz 或 7 MHz LTE 频带带宽是否满足预期未来移动需求;
- 定义/讨论需提交给 3GPP 的既有及/或新的铁路应用, 并建立共识, 尽快成立包括所有相关角色的工作组;
- 开始 3GPP 工作, 以将所有既有及/或新的铁路需求 (包括点对点语音呼叫、点对多点语音呼叫) 考虑进入移动通信新技术 (如 LTE/SAE);
- 为将来全 IP 移动通信系统建立概念;
- 定义长期的铁路移动通信系统, 包括运营方面和工作模型的考虑;
- 同供应商讨论既有 GSM-R 设备的支持及维护; 对于未来铁路移动通信系统, 同供应商讨论移动通信新技术 (如 LTE/SAE) 的功能和 QoS, 如有可能, 包括测试;
- 对于未来铁路移动通信系统, 同供应商讨论移动通信新技术 (如 LTE/SAE) 的功能商业实用性;
- 同供应商讨论 LTE/SAE 的“语音和短信问题”, 如有可能, 包括测试;
- 同供应商讨论移动台的 SDR/多模及无线接入系统的可行性及商业实用性;



- 计划从制定当时到 2020 年的演进之路；
- 制定从 GSM-R 过渡到未来铁路移动通信系统的策略；
- 针对未来铁路移动通信系统展开可行性研究。

国内方面,2011 年国家重大专项设立了“基于 TD-LTE 的高速铁路宽带通信的关键技术研究与应用验证”的研究课题;对于满足列车安全监控系统实时数据传输要求的高速铁路宽带移动通信系统,UIC 正在进行需求征集和技术讨论,并提出 LTE-R 作为铁路宽带移动通信系统的技术标准<sup>[2]</sup>;国家工业和信息化部批准中国铁路通信信号股份有限公司承担“基于 TD-LTE 的高速铁路宽带通信的关键技术研究与应用验证”国家重大专项课题,开展面向高速铁路应用的宽带通信系统的关键技术研发、可行性方案设计、样机系统研发;华为技术有限公司提出高速铁路移动通信系统向 LTE-R 演进的必要性、挑战、系统架构及设计目标<sup>[3]</sup>。目前,我国正在开展 LTE-R 标准制定和 LTE-R 试验设备研制推进工作。这些都标志我国已成为下一代高速铁路宽带移动通信系统 LTE-R 通信系统研制和标准制定的主要推动和参与者。

## 1.2 城市轨道交通无线通信

随着我国城市化的进程大大加快,城市人口急剧增加,大量流动人口涌进城市,人员出行和物资交流频繁,汽车保有量持续攀高,使城市交通面临着严峻的局势,交通拥堵、空气污染日益严重,影响了城市经济和社会活动的正常秩序。发展大容量、快捷、准点、安全的城市轨道交通已成为我国大中城市的首选,这是对国家战略需求与老百姓出行质量改善要求的积极响应。截至 2017 年上半年,全国 31 个城市共开通运营城市轨道交通 3965 公里<sup>[11]</sup>。城市轨道交通网络发展已初具规模,进入网络化阶段,已成为城市公共交通的命脉,在城市运行中发挥着越来越重要的作用。在当前形势下,城市轨道交通运营安全也成为中央到地方各级政府关注的重点。

城市轨道交通 (urban rail transit) 是采用专用轨道导向运行的城市公共客运交通系统,包括地下铁道、轻轨、有轨电车等,具有快速、便捷、安全、运量大和运输效率高等特性,是城市公共交通的重要组成部分。地下铁





道简称地铁 (metro、underground railway、subway 或 tube)，是由电力牵引、轮轨导向、轴重相对较重、具有一定规模运量、按运行图行车、车辆编组运行在地下隧道内的城市轨道交通的先驱。轻轨原指采用轻型轨道的城市交通系统，因为当初是在有轨电车基础上改造发展而来，使用的是轻型钢轨。目前国内外地铁和轻轨都已采用相同质量钢轨，而以客运量或车辆轴重的大小来区分两者。运量或车辆轴重较大的城市快速轨道交通称为地铁，而运量或车辆轴重稍小者称为轻轨。此外，早期地铁线路基本都设在地下，而轻轨一般采用地面和高架桥相结合的方法建设。自 20 世纪 70 年代以来，地铁吸收了轻轨的一些技术优点，并且为了减少造价，只在市区建筑物密集的地段建在地下，在市郊结合部和郊区，在建筑场地和环境允许的情况下，线路和车站建造在地面和高架桥上。

地铁系统与国家干线铁路一样，主要由线网、轨道、车站、车辆、通信信号等部分构成，各部分能够有机结合，协同动作。地铁必须设置独立的内部通信网，由以下子系统组成：综合有线传输系统、专用通信系统、公务通信系统、无线通信系统、广播系统、时钟系统、闭路电视监视系统和电源及接地系统。地铁的信号系统应由行车指挥和列车运行控制设备组成，并应设必要的故障监测及报警设备。信号系统应满足地铁行车组织和运营管理的需要，保证列车运行安全，提高行车效率。同时地铁信号工程设计应满足大运量、高密度行车和不同列车编组的运营要求。

下面介绍几种轨道交通无线通信及其应用系统。

### 1.2.1 基于通信的列车控制系统

随着地铁列车行驶速度不断提升，如何在高速环境下确保运营安全，缩短行车间隔，提高运营效率，这对地铁车辆、信号系统、通信系统等都提出了较高要求。信号系统的持续改进是推动列车提速、保障行驶安全的关键。目前较先进的是利用基于通信的列车控制 (communication based train control, CBTC) 系统对列车进行定位进而实现的移动闭塞控制系统。

根据 IEEE 的定义，CBTC 是利用高精度的列车定位 (不依赖于轨道电路)、双向连续大容量的车-地数据通信、车载与地面的安全功能处理器实现