

国家自然科学基金——铁道联合重点项目资助



铁路数字移动通信系统 (GSM-R) 应用基础理论

□ 钟章队 艾渤 刘秋妍 林思雨 编著



清华大学出版社



北京交通大学出版社

国家自然科学基金——铁道联合重点项目资助

铁路数字移动通信系统 (GSM-R) 应用基础理论

钟章队 艾 渤 编著
刘秋妍 林思雨

清华大学出版社
北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以 GSM-R 系统规范及标准为基础,系统深入地阐述了与 GSM-R 建设紧密相关的应用基础理论问题,主要包括:无线电波传播理论、干扰分析理论、频率规划理论、无线组网理论、GSM-R 系统服务质量理论;鉴于越区切换技术在 GSM-R 专用模式性能中的重要性,基于对越区切换阻塞率的分析,阐述了越区切换的可靠性问题。

本书是一本有关 GSM-R 系统的理论书籍,可作为高等院校相关专业本科生、研究生学习 GSM-R 技术和知识的教材和教学参考书,也可作为从事无线通信、铁路通信系统工程建设的科技工程人员的培训教材或自学参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

铁路数字移动通信系统(GSM-R)应用基础理论/钟章队等编著. — 北京:清华大学出版社;
北京交通大学出版社,2009.6

ISBN 978-7-81123-662-0

I. 铁… II. 钟… III. ① 铁路通信-时分多址-移动通信-通信系统 IV. U285.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 088373 号

责任编辑:韩 乐 特邀编辑:李晓敏

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969 <http://www.tup.com.cn>

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京交大印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:17 字数:424 千字

版 次:2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-662-0/U·33

印 数:1~4 000 册 定价:39.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

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

序

作为铁路信息化驱动力的 GSM-R (GSM for Railway) 系统最早起源于欧洲,当前已在铁路发展中扮演着越来越重要的角色,引导着全球铁路事业向着数字化、智能化、网络化和综合化的方向迈进。

我国铁路建设是国家中长期发展战略的需要。国家中长期综合交通发展规划纲要提出,到 2020 年全国铁路营业里程达到 12 万 km 以上,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平;国家中长期科技发展规划纲要已将“高速轨道交通系统”、“高效运输技术与装备”、“高速运输安全与应急保障”列为交通运输领域的优先发展主题;铁路科技发展“十一五”规划和国家中长期铁路网发展规划纲要已将高速列车、高速行车控制技术、高速铁路安全监控系统列为重点研发内容;2008 年科技部、铁道部启动《中国高速列车自动创新联合行动计划》研制时速 350 km 以上的高速动车组和基于 GSM-R 的列车运行控制系统 CTCS3 (Chinese Train Control System 3)。

铁路运营与国计民生息息相关,铁路通信系统的可靠性、有效性、可维护性、安全性 (Reliability, Availability, Maintenance, Safety) 一直是铁路信息化建设的重点和关键问题,直接关系到人民的生命财产安全;而 GSM-R 系统担负着传输列车控制数据的重要任务,其安全可靠的传输直接关系到列车行车安全。当前国内 GSM-R 系统建设中遇到的部分问题,如电波传播的模型选择、场强测试的统计区间及采样间隔的选取、干扰分析、指标建立与评估等都停留在工程应用或较浅的理论研究层面,缺乏系统、深入的理论支撑;而国外在 GSM-R 建设方面所依据的部分理论对外采取技术保密。正是基于这种背景,本书致力于 GSM-R 系统应用基础理论的阐述,力图从理论层面分析 GSM-R 系统建设中遇到的问题,希望能对我国铁路 GSM-R 系统工程建设有一定的理论指导意义。

本书重点阐述了与场强覆盖、无线链路预算及网络规划相关的无线电波传播理论及模型;与 GSM-R 通信网络的干扰评估及协调相关的干扰分析理论。鉴于我国复杂的铁路环境及频带使用情况,GSM-R 系统的干扰源远比公网复杂,对系统的干扰进行分析,建立了干扰分析模型并在此基础上确定干扰的分布,以便更好地保证 GSM-R 系统的服务质量。阐述了 GSM-R 系统特有环境下的单层网、同站址双层网及交织站址双层网下的频率规划理论问题和确保铁路高速环境下通信安全的越区切换技术,以及与 GSM-R 系统 QoS 指标相关的理论。作为无线电波传播理论、干扰分析理论、频率规划理论、无线组网理论、GSM-R 服务质量理论的数学基础,本书第 2 章阐述了与之相关的数学基础知识,以便使读者能更好地理解各章内容。

全书共分 7 章。第 1 章介绍了 GSM-R 系统的组成、功能及相关标准,阐述了 GSM-R 系统目前的国内外发展、建设情况。第 2 章对阐述 GSM-R 电波传播理论、无线组网理论、干扰分析理论、服务质量理论等需要用到的数学知识进行了简单介绍。第 3 章讨论了非铁路环境及铁路环境下的无线移动通信系统中的电波传播机制、场强覆盖的基本概念及常用的室内

外无线电波传播模型；详细阐述了大、小尺度衰落特性及测量方法。第4章从确定全网载干比 C/I 分布的角度，探讨了网内、网外干扰问题，深入分析了各种干扰产生的原因；分别针对单干扰源和多干扰源情况，论述了链状及面状干扰的分布情况。第5章主要阐述了 GSM-R 系统中无线频率资源规划的基本概念和基本原理，依据覆盖方式的不同，引入了粗糙集和灰色聚类理论，综合多种电波传播模型，分别介绍了线状频率规划和面状频率规划。第6章介绍了覆盖概率、重叠区等无线组网中涉及的基本概念，基于概率论和随机过程，对单层网、同站址双层网、交织站址双层网方式下的频率分配情况、电平覆盖分布、C/I 分布及覆盖半径和重叠区的计算进行了理论分析；并引入排队论对越区切换阻塞率进行了分析。第7章介绍了服务质量 QoS 中的 KPI、KQI、QoE 等基本概念；分析了 GSM-R 系统 QoS 指标的建立依据与原理；引入粗糙集和灰色聚类理论，对 GSM-R 系统中的 QoS 评估、指标权重及 QoS 关键性能参数的确定进行了深入分析。

笔者在编著本书的过程中，借鉴了国内外关于 GSM-R 的规范、标准及技术资料，并结合在工程实践中积累的经验，撰写了这本专门阐述 GSM-R 应用基础理论的书籍。本书的最大特点在于所阐述的应用基础理论都是以 GSM-R 系统规范、标准为基础的，突出了 GSM-R 系统与公众数字移动通信网络在场强覆盖、干扰、频率规划及 QoS 方面存在的差异，它是一本具有 GSM-R 系统专有特色的书籍。

本书共7章。序言部分及第1章由艾渤、钟章队撰写；第2章由林思雨、钟章队撰写；第3章由艾渤撰写；第4章、第5章由刘秋妍、钟章队撰写；第6章由艾渤、刘秋妍、钟章队撰写；第7章由艾渤、林思雨、钟章队撰写。在本书的撰写过程中，得到了轨道交通控制与安全国家重点实验室（北京交通大学）和铁道部 GSM-R 实验室的老师、博士生、硕士生的大力支持和帮助，特别是硕士生陈欣、庞萌萌同学的帮助，在此谨向她们表示衷心的感谢。同时，向北京交通大学出版社的责任编辑韩乐表示衷心的感谢，感谢她为此书提出的许多中肯的建议和意见。本书研究内容受国家自然科学基金——铁道联合重点项目“满足高速列车控制安全数据传输的无线通信理论与关键技术”（编号：60830001），以及国家重点实验室重点项目“高速铁路电波传播的理论，建模与仿真”（编号：RCS2008ZZ006）和“高速铁路无线通信系统干扰分析与抗干扰技术的研究”（编号：RCS2008ZZ007）的资助，借此机会也向国家自然科学基金委员会、铁道部科技司和国家重点实验室对我国 GSM-R 系统建设的基础研究工作所给予的大力资助和支持表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误在所难免，敬请同仁与读者批评指正。

作 者

2009年6月

于轨道交通控制与安全国家重点实验室（北京交通大学）

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 GSM-R 系统	1
1.1.1 GSM-R 系统简介	1
1.1.2 GSM-R 系统相关标准及规范	2
1.1.3 国内外 GSM-R 发展状况	3
1.2 GSM-R 系统中的理论问题	5
1.2.1 应用基础理论及关键技术	5
1.2.2 相关研究的国内外现状	6
1.2.3 GSM-R 基础研究受国家资助状况	8
1.3 GSM-R 系统未来发展	8
1.3.1 GSM-R 系统发展展望	8
1.3.2 高可信无线通信网络 GSMR-C	9
1.3.3 GSMR-C 理论研究发展方向	10
第 2 章 GSM-R 应用基础理论相关数学基础	11
2.1 概率论	11
2.1.1 概率分布和概率密度	11
2.1.2 期望、矩和方差	13
2.1.3 不相关性和独立性	14
2.2 随机过程	16
2.2.1 随机过程基本概念	16
2.2.2 平稳性、均值和自相关函数	17
2.2.3 宽平稳过程、时间平均和遍历性	18
2.2.4 功率谱	19
2.2.5 概率论与随机过程在 GSM-R 应用基础理论研究中的应用	19
2.3 排队论	20
2.3.1 排队论基本概念及模型	20
2.3.2 排队模型的 Markov 过程分析方法	23
2.3.3 排队论在 GSM-R 应用基础理论研究中的应用	25
2.4 粗糙集理论	25
2.4.1 知识与知识表达系统	26
2.4.2 不精确范畴, 近似与粗糙集	26
2.4.3 知识约简及依赖性	27
2.4.4 粗糙集理论在 GSM-R 应用基础理论研究中的应用	28

2.5	着色 Petri 网基本理论	28
2.5.1	着色 Petri 网基本概念	28
2.5.2	着色 Petri 网的基本特性和分析方法	30
2.5.3	着色 Petri 网理论在 GSM-R 应用基础理论研究中的应用	30
2.6	灰色聚类理论	31
2.6.1	灰数、灰数白化与灰度	31
2.6.2	灰色序列生成	33
2.6.3	灰色关联、变权与定权聚类	34
2.6.4	灰色聚类理论在 GSM-R 理论研究中的应用	37
2.7	本章小结	38
第3章	无线电波传播理论	39
3.1	引言	39
3.2	无线电波传播机制	39
3.2.1	直射	39
3.2.2	反射	40
3.2.3	绕射	41
3.2.4	散射	42
3.3	无线电波衰落特性	42
3.3.1	平均路径损耗	43
3.3.2	阴影衰落	44
3.3.3	小尺度衰落	47
3.4	电波传播模型	53
3.4.1	电波传播模型的建立	53
3.4.2	宏小区模型	54
3.4.3	微小区传播模型	56
3.4.4	微微小区传播模型	58
3.4.5	室内传播模型	58
3.5	传播模型环境参数及模型校正	59
3.5.1	传播模型环境参数	59
3.5.2	铁路环境下传播模型的校正	61
3.5.3	无线链路预算	63
3.6	阴影衰落的测量	66
3.6.1	场强与电平的关系	66
3.6.2	Lee 氏定律	67
3.6.3	统计区间的确立依据	68
3.6.4	采样数目的确立依据	73
3.6.5	置信度的确立依据	75
3.6.6	测量次数的确立依据	76
3.6.7	统计处理方法	76

3.7 小尺度衰落特性的测量	79
3.7.1 影响小尺度衰落因素	79
3.7.2 多径随时间变化规律	80
3.7.3 多径径数的变化规律	82
3.7.4 多径径数的时间间隔变化规律	85
3.7.5 小尺度衰落测量方法	86
3.8 电波传播理论在高速铁路中的应用	90
3.8.1 高速铁路电波传播特点	90
3.8.2 与电波传播相关的高速铁路工程设计	91
3.8.3 与电波传播相关的高速铁路工程验收	92
3.9 本章小结	92
第4章 GSM-R 系统中的干扰分析理论	93
4.1 基本概念	93
4.1.1 干扰的分类	93
4.1.2 载干比与信噪比	95
4.1.3 同频、邻频及交调/互调干扰	95
4.1.4 频率复用距离及复用模式	97
4.1.5 通信质量	99
4.1.6 接收灵敏度与接收系统灵敏度	100
4.2 噪声干扰	101
4.2.1 自然噪声	101
4.2.2 人为噪声	102
4.2.3 内部噪声	102
4.2.4 噪声干扰分析	103
4.3 同频干扰	105
4.3.1 同频干扰的生成机理及计算	105
4.3.2 大尺度路径损耗同频载干比	109
4.3.3 阴影衰落下的同频载干比	110
4.3.4 小尺度衰落下的载干比	115
4.4 邻频干扰	121
4.4.1 邻频干扰的生成机理	121
4.4.2 邻频干扰载干比计算	124
4.5 同邻频干扰综合模型	127
4.5.1 单干扰源情况	127
4.5.2 多干扰源情况	128
4.6 交调/互调干扰机理及计算	129
4.6.1 互调干扰机理	129
4.6.2 互调干扰载干比的计算与三阶无互调信道组	131
4.7 大信号阻塞干扰	133

4.8 系统间干扰问题分析	133
4.8.1 CDMA 系统对 GSM-R 系统的干扰途径	134
4.8.2 CDMA 系统对 GSM-R 系统的杂散干扰分析	134
4.8.3 CDMA 系统对 GSM-R 系统的阻塞干扰分析	135
4.9 本章小结	136
第5章 频率规划理论	137
5.1 基本概念	137
5.1.1 频率复用距离	137
5.1.2 链状网	137
5.1.3 面状网	139
5.2 GSM-R 系统中的频率规划概述	139
5.2.1 基站站型的确定	140
5.2.2 频率规划方法的确定	140
5.2.3 GSM-R 频率规划目标	141
5.3 线状铁路频率规划分析	141
5.3.1 粗糙集灰色聚类理论基本概念	142
5.3.2 基于粗糙集灰色聚类理论的频率规划理论	143
5.3.3 举例分析	146
5.4 面状频率规划算法	149
5.4.1 禁忌搜索法	149
5.4.2 遗传算法	153
5.4.3 爬山算法	155
5.4.4 穷举搜索法	156
5.4.5 顺序分配法	157
5.5 面状铁路频率规划分析	158
5.5.1 采用 3×3 频率复用的频率规划方案	159
5.5.2 采用 2×3 频率复用的频率规划方案	160
5.5.3 采用 3×2 频率复用的频率规划方案	160
5.5.4 采用 4×3 频率复用的频率规划方案	161
5.5.5 不规则频率复用的频率规划方案	162
5.5.6 几种频率规划方案的比较	162
5.6 本章小结	163
第6章 GSM-R 无线组网理论	164
6.1 组网基本概念	164
6.1.1 通信/覆盖概率	164
6.1.2 覆盖半径	166
6.1.3 重叠区	166
6.1.4 双层网网络覆盖	167
6.2 越区切换	170

6.2.1	越区切换相关的基本概念	170
6.2.2	越区切换中的参数	172
6.2.3	越区切换可靠性理论	176
6.3	无线组网理论	176
6.3.1	无线网络的组网概念	176
6.3.2	无线网络组网方式	178
6.3.3	GSM-R 网络结构	182
6.4	单层网组网	188
6.4.1	电平覆盖分布计算	189
6.4.2	覆盖半径和重叠区的计算	190
6.4.3	频率规划	198
6.4.4	C/I 分布计算	198
6.4.5	越区切换可靠性分析	199
6.5	同站址双层网组网	204
6.5.1	电平覆盖分布计算	204
6.5.2	覆盖半径和重叠区的计算	204
6.5.3	频率规划	204
6.5.4	载干比 C/I 分布计算	205
6.5.5	越区切换可靠性分析	205
6.6	交织站址双层网组网	210
6.6.1	电平覆盖分布计算	210
6.6.2	覆盖半径和重叠区的计算	211
6.6.3	频率规划	211
6.6.4	载干比 C/I 分布计算	211
6.6.5	越区切换可靠性分析	211
6.7	本章小结	213
第7章	GSM-R 系统 QoS 理论	214
7.1	网络服务质量	214
7.1.1	基本概念	214
7.1.2	QoS 的关键性能指标 KPI/KQI	215
7.1.3	QoE、QoS、GoS、CEM、KPI/KQI 间的关系	216
7.2	与网络 QoS 相关的技术	217
7.2.1	服务模型及其实现	217
7.2.2	QoS 控制理论	220
7.2.3	基于 QoS 的路由技术	221
7.3	QoS 体系建立	224
7.3.1	QoS 体系框架及建立原则	224
7.3.2	QoS 模型建立	227
7.3.3	QoS 参数分解	229

7.3.4 QoS 验证	230
7.4 GSM-R 系统 QoS 指标的建立	230
7.4.1 GSM-R 网络服务质量指标	230
7.4.2 GSM-R 网络 QoS 与公网 QoS	234
7.4.3 GSM-R 网络分组域与电路域 QoS	235
7.4.4 GSM-R 网络 QoS 与列车控制 QoS 的关系	235
7.4.5 GSM-R 网络 QoS 确立依据及原理	237
7.5 灰色聚类理论和粗糙集理论与 GSM-R 网络 QoS 分析	241
7.5.1 粗糙集模型对 GSM-R 网络 QoS 分析的适应性	242
7.5.2 灰色聚类理论与 GSM-R 网络 QoS 评估	242
7.5.3 粗糙集理论与 GSM-R 网络 QoS KPI 及指标权重的确定	246
7.6 本章小结	248
附录 A Lee 氏定律推导	249
附录 B 符号表	250
附录 C 缩略语	252
参考文献	256

第 1 章 概 述

1.1 GSM-R 系统

作为铁路信息化驱动力的铁路综合数字移动通信系统(Global System for Mobile Communication Railway, GSM-R)技术,是国际铁路联盟(Union International des Chemins de fer, 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,最早在欧洲发展起来。该系统能满足国际铁路联盟提出的铁路专用调度通信的要求,具有功能完善、传输可靠、交换灵活、容量大等特点,已在许多国家取得了良好的发展,并在铁路发展中扮演着越来越重要的角色,引导着全球铁路事业向着数字化、智能化、网络化和综合化的方向迈进。它与全球移动通信系统(Global System for Mobile Communication, GSM)既有相通之处,但也存在诸多不同。

1.1.1 GSM-R 系统简介

GSM-R 是铁路数字移动通信系统的简称,是在 GSM 系统基础上增加了调度通信功能(语音组呼、语音广播、增强多优先级与强拆等)、铁路特有的调度业务(功能寻址、接入矩阵、基于位置的寻址等)来满足铁路专用调度通信的要求,并以此作为信息化平台,使用户可以在此平台上开发各种铁路应用。GSM-R 的业务模型可以概括为:GSM-R 业务 = GSM 业务 + 语音调度业务 + 铁路基本业务 + 铁路应用。未来的 GSM-R 还将引入更多新的特性和服务,如货物跟踪、旅客信息服务等,这些都将确保铁路运营方能够尽可能以低廉的价格为铁路乘客提供持续的高水平服务。

GSM-R 系统的优势主要体现在以下几方面。

(1) GSM-R 的综合性。GSM-R 能将铁路现有的各类通信融合到统一的网络平台上来,并且使各类通信系统(电务、工务、车务、电力、施工等)之间可以相互通信、相互协调;它是无线列调的更新换代产品,能够满足区间公务移动、紧急救援、调车编组作业、站场无线等移动语音通信的需求;GSM-R 将通信和信号有机地融合为一体,实现移动闭塞,提高了线路的利用率;除了满足铁路运输主业和路内各种语音、数据、多媒体图像通信的需求外,同时也可为旅客和铁路职工提供丰富的新业务,如移动办公、文件传输、收发 E-mail 等。

(2) GSM-R 的经济性。GSM-R 能将现有的铁路通信应用融合到单一网络平台中,可以减少集成和运行费用;且由于 GSM-R 是由已标准化的 GSM 设备改进和再创新而成,从而保证了技术引入成本低、性能易实现、运行可靠性高,是一种经济高效的综合无线通信系统。

(3) 适合高速铁路。GSM-R 开发了用于优化呼叫建立时间的业务信道分配算法、越区算法,用于增强高速移动体通信服务质量的高速抗失真算法等。目前世界上只开展了 GSM-R 系统经过列车运行时速为 573.4 km 的通信模拟试验;在法国的现场测试中,当列车时速为 350 km 时, GSM-R 的各项指标都得到了验证,满足欧洲铁路无线通信增强集成网(European

Integrated Railway Radio Enhanced Network, EIRENE)制定的标准。

GSM-R 系统主要由移动台(Mobile Station, MS)、基站子系统(Base Station System, BSS)、网络交换子系统(Network Switching Subsystem, NSS)、运行与维护子系统(Operation and Maintenance System, OMS)四大部分构成;更广义的 GSM-R 系统还包括智能网(Intelligent Network, IN)、固定接入系统(Fixed Access Switch, FAS)等组成部分。

1.1.2 GSM-R 系统相关标准及规范

1993 年国际铁路联盟 UIC 成立了 ERIENE 工作组,开始了新一代铁路综合无线通信系统 GSM-R 标准及规范的制定工作。1997 年,欧洲 24 个国家的 32 个铁路组织签署协议,承诺共同为 GSM-R 作为新一代的铁路无线通信系统标准而努力;1997 年以后,生产厂商加大了投资力度,UIC 成立了专门负责试验开发的 MORANE 项目组,分别在德国、法国及意大利进行现场试验,并配合 ERIENE 工作组完善了 GSM-R 系统的标准。

GSM-R 系统标准总体来讲包括以 GSM phase-2+ 为基础的骨干标准和针对铁路特殊应用的欧洲铁路综合无线增强网络 EIRENE 标准。前者包括商用 GSM 标准部分(包括电信业务和补充业务)、通用集群功能(包括组呼、广播呼叫、优先级、强插强拆等);后者包括功能寻址(车次、机车、客车、调度作业、铁路维护等功能呼叫)、与位置有关的寻址、Follow Me 功能、直接模式、调车编组作业通信、列车自动控制数据传输业务等。截至目前,已颁布了很多的相关标准及规范。例如,描述各种需求的规范:增强型位置寻址的功能需求规范 eLDA_FRS_v4.0 及接口需求规范 eLDA_IRS_v5.0, EIRENE 的功能需求规范 EIRENE_FRS_v7 及系统需求规范 EIRENE_SRS_v15;描述铁路信号安全性的标准和规范:EN50129, EN50159-1 及 EN50159-2-2001;关于铁路运营、铁路业务服务质量的相应标准和规范:ERTMS/GSM-R 的 QoS 测试规范 GSM-R QoS_Test_Specification_0-2475 等;GSM-R 顶层指标的 RAMS 相关描述和规范:ERTMS/ETCS RAMS Requirements Specification Chapter 0/1/2/3。此外,还有关于 FIS、FFFIS 等其他系统的标准和规范。

为了促进我国 GSM-R 系统的发展和建设,铁道部科技司、运输局、建设司和鉴定中心联合北京交通大学,中国铁道科学研究院,北京全路通信信号研究设计院,铁道第一、二、三、四勘察设计集团有限公司,北京电铁通信信号勘测设计院有限公司,中国铁通集团有限公司,诺基亚-西门子公司,北电网络(中国)公司,华为技术有限公司,中铁电气化局集团有限公司电测中心,天津七一二通信广播有限公司,深圳长龙铁路电子有限公司,北京中瑞特电子有限公司,北京世纪东方国铁科技股份有限公司,北京首科中系希信息技术有限公司等科研院所和设备厂商推进了我国各种规范和行业标准的制订。例如,中华人民共和国行业标准:铁路 GSM-R 数字移动通信系统工程设计暂行规定,铁路 GSM-R 数字移动通信工程施工质量验收暂行标准等;通过分类建立起的一系列相应技术规范。例如,系统类中的 GSM-R 数字移动通信网总体技术规范、GSM-R 数字移动通信网编号计划;工程类中的 GSM-R 数字移动通信系统工程设计规范、GSM-R 数字移动通信系统工程施工规范;设备类中的 GSM-R 数字移动通信网设备技术规范;接口技术要求及测试类中的 GSM-R 数字移动通信网接口技术要求及测试规范等。

这一系列标准及规范的建立为我国 GSM-R 系统试验和工程实施奠定了坚实的基础。

1.1.3 国内外 GSM-R 发展状况

1. 国外发展状况

1993 年国际铁路联盟 UIC 与欧洲电信标准组织 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 协商, 提出了欧洲各国铁路下一代无线通信以 GSM Phase 2 + 为标准的 GSM-R 技术, 这一提议在 1995 年经 UIC 评估并最终确认。之后, UIC 开展了一系列的标准制定和测试工作。1997 年, 24 个国家的 32 个铁路组织签署了 GSM-R 谅解备忘录; 同年, 为了验证 GSM-R 系统的可靠性、兼容性等指标, UIC 还成立了另一个专门组织——欧洲铁路移动无线系统 MORANE (Mobile Radio for Railway Networks in Europe), 其重点放在测量高速环境的 GSM-R 特性上。

GSM-R 是面向未来的技术, 具有巨大的发展空间。在欧洲的高速铁路和一般铁路中都已进行了大量的试验和验证。以 GSM-R 为平台, 欧洲列车控制系统 ETCS 在许多线路上已经进行了 ETCS-2 级测试, 并在意大利、瑞士、荷兰、德国等国家的部分铁路商业化应用取得了成功。

瑞士: 瑞士国家铁路局 (SBB) ETCS 试验线设在洛桑至乌尔特之间的 35 km 区段上, 主要完成二级 ETCS 对覆盖和服务质量的测试。它是基于 GSM-R 传输平台的无线列车控制系统试验段, 为双线客货混用, 最高时速达 160 km。瑞士国家铁路线路总长 3 200 km, 主要应用了列车无线通信和 ETCS。

德国: 全国 GSM-R 第一阶段商用网线路全长 27 000 km, 计划采用 7 个 MSC、60 个 BSC、2 700 个 BTS、1 个 IN, 已配备了 1600 个 BTS。德国铁路部门在 2000 年试运行了这条线路, 已于 2001 年正式投入商用。德国的科隆至法兰克福间的高速铁路线是 1 条城市间特快线, 于 2002 年 8 月 1 日开始运行, 总长 180 km, 其间穿越 30 条隧道。这条线上共有 56 列高速列车, 都配备了标准时速超过 300 km 的 GSM-R 无线电机车。德国铁路的模拟无线通信系统将于 2004 年全部关闭。

西班牙: 2000 年 10 月西班牙国家铁路 (GIF) 开始实施 Madrid-Lleida 高速铁路新线项目, 它属于欧盟的泛欧高速铁路计划的一部分, 全长 486 km, 主要应用了列车无线通信、ETCS, 是高可靠性网络双层网覆盖。此项目将为 GSM-R 扩展至全国高速铁路线路奠定基础, 目前已经完成线路的 QoS 测试。

荷兰: 荷兰铁路权威部门——荷兰铁路网络运营公司 (NSRIB) 于 2000 年 9 月开始建设荷兰铁路 NS-RIB 线路, 2002 年部分投入运营。线路全长 3 000 km, 其中包括 ETCS 试验线 93 km。主要应用列车无线通信、ETCS 及采用准确位置数据库 (TPALIS) 和基于位置的寻址, 并采用 GPRS 和 NSRIB 的企业内部网相连提供数据业务。目前已经开始进行 ETCS 测试, 并开始全国网络的铺设。

目前已有 26 个国家广泛实施 GSM-R, 11 个国家开通商用网络, 超过 30 个铁路公司已承诺在其国际路网中使用该技术, 累计里程 48 633 km。2008 年 3 月 4 日, 保加利亚铁路基础设施公司邀请 UIC 的代表团在索非亚讨论 GSM-R 的战略和技术问题。会上, 保加利亚相关部门的负责人介绍了谅解备忘录的执行情况、首次成功实施商业 ETCS 项目情况及正在建设的首条 GSM-R 线路的情况。该线路从普洛夫迪夫至斯维林格勒, 全线 200 km。

2008 年 6 月, 阿根廷政府与法国阿尔斯通公司签署了南美首条高速铁路建设项目。该线

路从布宜诺斯艾利斯至罗萨里奥和科尔瓦多,全长 710 km,计划分别于 2012 年和 2016 年开通不同区段。法国阿尔斯通公司负责整个项目管理与实施,车辆和列车维护、安装和 ERTMS 2 级通信系统、电气化及基础设施的安装和调试。

2008 年 7 月,法国拟建 4 500 km 高速铁路新线,计划实施的高速铁路项目包括 12 条线路。其中,截至 2020 年计划新建 2 000 km 高速铁路线路,目的是通过在主要城市之间开通公共运输,鼓励人们乘火车出行,其他 2 500 km 线路将在 2020 年后实施。

2008 年 7 月,印度“北部铁路”公司建设第 1 条基于 GSM-R 的信号系统线路。线路从马图拉到占西共 270 km,采用 GSM-R 承载司机和调度员、列车防护装置之间的信息传输。

2008 年 7 月,挪威国家铁路机构完成 38 000 km 的 GSM-R 项目,共有 650 座隧道。希腊铁路新建 700 km 的 GSM-R 项目。

2008 年 10 月 1 日,意大利铁路运营商 RFI 启动从米兰到博洛尼亚 ERTMS/ETCS-2 高速铁路试运营。该线路装备欧洲 ERTMS/ETCS-2 系统,完全配置诊断系统的 ERT500 列车开始在新线路上行驶,并预计在 12 月中旬投入正式的商业运营。截至 12 月 12 日,每天进行 20 次测试来检查基础设施和列车设备参数,包括 ERTMS/ETCS-2 与 GSM-R 设备。

截至 2008 年 10 月,GSM-R 网络已经在 26 个国家广泛实施,11 个国家开通商用网络,累计里程 48 633 km。GSM-R 网络覆盖已达 60 000 km,有 9 个网络投入运营,其中德国、意大利、荷兰、挪威、瑞典 5 国的第一阶段网络建设已完成。

在实施 GSM-R 时,各国铁路部门考虑的侧重点不同,有些国家铁路部门首先考虑的是语音通信,取代目前互不兼容的模拟设备;有些国家则是为了实现高速铁路双线客货混用;有些则是为全国高速铁路作前期准备。

2. 国内发展状况

GSM-R 进入中国已有十余年的历程,其间经过了理论研究、技术决策、工程试验等阶段,目前已步入网络运营阶段。

1994 年国家京沪高速铁路的可行性研究启动了新一代铁路数字移动通信的研究;1996~1997 年,铁道部提出了《高速铁路无线列车控制技术探索的研究(96x07)》、《基于无线传输的安全信息通道技术研究(96x07-B)》;1997~2000 年,诺基亚-西门子公司、北电网络公司、国际铁路联盟 UIC 多次来中国就 GSM-R 技术及发展进行交流,中国铁路多次组团考察欧洲 GSM-R 的进展;2001~2002 年,铁道部针对铁路数字移动通信技术体制展开了广泛论证,最终确定采用欧洲的 GSM-R 作为中国新一代铁路无线移动通信基本制式,并写入铁路技术装备政策;2003 年 2 月,铁道部建立了 GSM-R 应用与模拟系统实验室;2003 年 9 月 22 日,信息产业部无线电管理局批准 GSM-R 使用频段;2003 年 6 月至今,青藏、大秦、胶济 3 条线的建设,技术规范和标准的制订,工程建设可行性论证、建设规划等,标志着 GSM-R 工作全面启动。2004 年,铁道部在消化吸收欧洲铁路标准的基础上,组织编制了 GSM-R 系统网络规划,制定了 GSM-R 各项技术标准,并组织有关单位完成了 GSM-R 机车综合无线通信设备的研制和功能测试工作。在设备功能、接口条件、物理结构、人机界面上实现了“四统一”的技术要求,完成了青藏线格尔木至不冻泉的 GSM-R 试验段工程,大秦、胶济线 GSM-R 工程也进入建设试运营阶段。

国家中长期科技发展规划纲要已将“高速轨道交通系统”,“高效运输技术与装备”,“高速运输安全与应急保障”列为交通运输领域的优先发展主题;铁路科技发展“十一五”规划和

国家中长期铁路网发展规划纲要已将高速列车、高速行车控制技术、高速铁路安全监控系统列为重点研发内容;2008 年国家科技部、铁道部启动《中国高速列车自动创新联合行动计划》研制时速 350 km 以上的高速列车、基于 GSM-R 的列车运行控制系统。

国家《中长期铁路网规划》于 2004 年经国务院审议通过,其发展目标为:截至 2020 年,全国铁路营业里程达到 12 万 km。其中,客运专线 1.2 万 km,复线铁路 5 万 km,电气化铁路 5 万公里,主要繁忙干线实现客货分线,复线率和电化率均达到 50%,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。要建立四横四纵的高速铁路网,完成 9800 km 客运专线(高速铁路)建设任务,其中时速在 300 km 以上的铁路线路将达 5 457 km,到 2020 年将达 1.4 万 km;在 1.3 万 km 提速干线上实现客车时速 200 km 以上;四横:徐州至兰州、杭州至长沙、青岛至太原、南京至重庆(成都);四纵:京沪、京广、京哈(大)、杭州—宁波—福州—深圳;计划建立的城际客运系统:环渤海地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区。

2008~2012 年,我国将相继开通北京至上海高速铁路、北京至广州客运专线、哈尔滨至大连客运专线、北京至天津城际铁路、广州至深圳(香港)客运专线、郑州至西安客运专线等,这些线路的最高时速将达到 350 km,并将建设基于 GSM-R 数字移动通信系统的列车运行控制系统。同时,我国还将相继开通沿海通道铁路(深圳、厦门、福州、温州、上海、青岛、大连、丹东)、沿长江通道铁路(上海、南京、合肥、武汉、宜昌、重庆)、天津至秦皇岛客运专线、石家庄至太原客运专线、兰州至重庆铁路等,建设 GSM-R 数字移动通信系统,为铁路信息化提供可靠的综合移动信息传输通道。

1.2 GSM-R 系统中的理论问题

我国的高速铁路建设涉及多方面的理论、技术及工程问题,如铁路路轨铺设的地况问题、轨道交通运输组织理论、列车运行控制理论、安全保障体系与预警技术问题、列车信息融合及集成、专用数字移动通信理论与关键技术等;而作为我国高速铁路数字移动通信依托平台的 GSM-R 系统在飞速发展的同时,也面临着许多基础理论、应用基础理论问题和技术挑战。

1.2.1 应用基础理论及关键技术

铁路运营与国计民生息息相关,铁路通信系统的可靠性、有效性、可维护性、安全性,即 RAMS 指标(Reliability Availability Maintenance Safety, RAMS)一直是铁路信息化建设的重点和关键问题,直接关系到人民的生命财产安全,GSM-R 无线通信网络担负着传输列车控制数据信号的任务,其安全可靠的传输直接关系到列车行车安全,因此,深入研究 GSM-R 系统应用基础理论对指导 GSM-R 平台建设意义重大,是关乎高速铁路运输安全和效率的重要因素。

与 GSM-R 无线通信安全性、可靠性紧密相关的理论与技术问题主要包括以下几个方面。

(1) 无线电波传播理论。通过电波传播理论得到路径损耗模型,由此经过无线链路预算进一步确定小区覆盖半径、重叠区及覆盖概率,得出全网的载波功率 C ,这也是 GSM-R 无线组网的基础。

(2) 干扰分析理论。移动通信系统的干扰是影响无线网络质量和传输可靠性的重要因素之一,为了保证移动通信网能够有效运转,使所有用户的通信互不干扰,必须进行干扰的评估与协调,这是无线通信组网设计中重要的任务之一,也是网络初建、改建、扩容、优化各个阶段

需要关注的关键问题之一。鉴于我国复杂的铁路环境及频带使用情况,GSM-R 系统的干扰源远比公网复杂,对系统中的干扰进行分析时,需要建立干扰分析模型并在此基础上确定干扰的分布,得出全网的干扰功率 I ,结合电波传播理论得到全网的载干比 C/I 分布,以便更好地保证 GSM-R 组网的质量。

(3) 频率规划理论。GSM-R 系统是频率资源严重受限的系统,同时,GSM-R 系统干扰的复杂性及双层网的组网方式使得 GSM-R 系统的频率规划十分复杂,如何在这种情况下进行合理、高效的频率规划也成为 GSM-R 系统组网的关键,本书将对频率规划的理论、方法进行深入探讨。

(4) 冗余覆盖理论。为了确保 GSM-R 网络高的可靠性和安全性,GSM-R 采用了双层网覆盖方式,这种组网方式下 GSM-R 的可靠性、干扰情况、覆盖情况等问题都值得深入研究。

(5) 越区切换可靠性理论。越区切换技术是 GSM-R 无线资源管理中的关键技术,铁路高速环境下越区切换的可靠性和有效性是体现 GSM-R 专用模式性能的重要方面,它对保障铁路移动通信的高可靠性和有效性起着举足轻重的作用。本书以越区切换阻塞率作为重点指标,对越区切换可靠性的相关理论问题进行了分析。

(6) QoS 指标建立与评估理论。网络服务质量是 GSM-R 全网建设的检验标准之一。网络建成后,找出 GSM-R 系统中各项指标的建立依据,以及如何对各项指标进行评估,这对于进一步提高网络服务质量意义重大。

上述与 GSM-R 系统组网相关的研究方面是以无线电波传播理论、数理统计、随机过程、灰色聚类理论、排队论、马尔可夫过程、Petri 网理论、模糊数学、粗糙集理论为基本理论支撑的,关于这些理论及相关概念的阐述将在本书第 2 章中给出。

1.2.2 相关研究的国内外现状

电波传播理论是指导铁路无线通信系统工程建设的理论基础,国内外一些科研院所对此已开展了很多研究。例如,德国卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)大学的 Cichon D J 等研究了利用射线跟踪技术对高速铁路隧道中的电波传播特性进行建模的方法^[1];法国里尔(Lille)大学的 Lienard M 等给出了一种铁路隧道中电波传播的理论方法,并用于测距系统^[2];西班牙马德里科技大学的 Briso C 等提出了铁路隧道中分布式天线系统解决方案^[3];芬兰赫尔辛基科技大学的 Aikio P 等讨论了隧道中无线信道测量方法^[4];Hattori T 等则研究了高速铁路 25 GHz 频段电波传播特性^[5];国内学者闻映红等研究了高速铁路电波传播快衰落与慢衰落特性^[6],但缺乏对高速铁路环境大、小尺度衰落建模进行系统深入的研究。尽管已有相当多的国内外研究,但仍存在很多有待解决的理论及技术问题。例如,目前工程设计使用的电波传播模型——Hata 模型存在较大偏差,对于确定覆盖电平、小区覆盖半径、相邻基站重叠区等参数产生较大影响,容易产生覆盖盲区,导致数据传输发生误码及通信失败,直接影响列车运行控制系统的通信超时。因此,高速铁路工程建设亟待建立较为准确的、满足高速铁路典型环境的无线电波传播模型及高效的模型校正方法,以指导工程设计。

干扰是产生数据传输误码、导致通信失败的又一个关键因素,GSM-R 系统的干扰源非常复杂,并且可能存在各种恶意干扰。Kocaturk M 等人对 TDMA 系统重叠覆盖区同频干扰环境下的误比特率(Bit Error Rate, BER)进行了推导,为同频干扰问题的分析作出了基础性的工作^[7];美国阿灵顿大学的 Li J 等人利用 LVQ 均衡器消除 TDMA 系统的同频干扰,得到比传统