



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

轨道交通电波传播 与无线信道建模

Radio Propagation and Wireless Channel Modeling
for Rail Traffic Scenarios

◎艾渤 熊磊 官科 何睿斯 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.cn>



“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

轨道交通电波传播 与无线信道建模

艾 渤 熊 磊 官 科 何睿斯 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是一本阐述轨道交通电波传播与无线信道建模理论及工程应用的书籍。内容涉及第一代至第五代无线信道模型的发展史;窄带、宽带、超宽带、短距离通信、广播、中继、车对车通信等无线信道特征及信道机理的分析。本书结合铁路、地铁等实际场景和现场测试数据,全面阐述了关于大尺度阴影衰落、多径快衰落的建模理论与方法;侧重针对高速铁路高架桥场景、路堑场景、隧道场景及地铁隧道场景展开电波传播预测模型及多径快衰落模型的建模研究。本书的特色在于:紧密结合轨道交通复杂特殊场景及现场实测数据,结合作者最新研究成果,对相关场景的电波传播特性进行了深入分析;追踪国际诸如欧洲 WINNER 工作组关于铁路场景无线信道模型建立的情况。本书兼有理论分析与工程实践研究,是一本关于轨道交通宽带移动通信电波传播与无线信道建模方法的专业书籍。本书可以在通信专业研究生及本科生中使用,也是从事电波传播与无线信道建模研究的科研人员的一部有价值的参考书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通电波传播与无线信道建模/艾渤等著. —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 978-7-5121-3177-4

I. ①轨… II. ①艾… III. ①轨道交通-电波传播-系统建模 ②轨道交通-无线电通信-通信信道-系统建模 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 049607 号

轨道交通电波传播与无线信道建模

GUIDAO JIAOTONG DIANBO CHUANBO YU WUXIAN XINDAO JIANMO

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.bjtu.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:29 字数:598千字

版 次:2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3177-4/TN·116

定 价:128.00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。

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

国际上已将发展高速铁路作为在交通运输领域贯彻可持续发展战略、调整交通运输结构的重要手段。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》“重点领域及其优先主题”中明确指出发展高速轨道交通系统，将在轨道交通基础理论、关键技术、装备研制等领域加大自主创新力度，引领世界轨道交通的发展。截至 2017 年年底，我国高速铁路运营里程已超过 2.5 万公里，居世界首位，高速铁路网络初具规模，是世界高速铁路发展最快的国家。根据国家《中长期铁路网规划》，今后几年，我国高速铁路仍将持续发展。我国城市轨道交通也发展迅猛，仅北京市目前已建成城市轨道交通线路 22 条、608 公里，快速成网，客流激增，日客运量达 1 200 万人次。

移动通信系统是高速铁路地面基础设施的重要组成部分和神经中枢，为列车调度指挥、列车运行控制、列车自动驾驶、列车安全视频监控、列车状态监测与远程故障诊断、基础设施无线监控、应急作业处理、信息发布与广告、旅客信息与娱乐服务等方面提供及时、准确的信息传递，是构建高速铁路运行安全保障系统的基础和前提条件。而无线信道建模是轨道交通专用移动通信网络质量的根本保证。

本书正是在此背景下撰写而成的，是一本阐述轨道交通电波传播与无线信道建模理论及工程应用的书籍。内容涉及第一代至第五代无线信道模型的发展史；窄带、宽带、超宽带、短距离通信、广播、中继、车对车通信等无线信道特征及信道机理的分析。本书结合铁路、地铁实际场景和现场测试数据，全面阐述了关于大尺度阴影衰落、多径快衰落的建模理论与方法；侧重针对高速铁路高架桥场景、路堑场景、隧道场景及地铁隧道场景展开电波传播预测模型及多径快衰落模型的建模研究。本书的特色在于：建模理论与方法具有普适性，但又紧密结合铁路的高架桥、路堑、隧道等复杂特殊场景以及现场实测数据，结合作者最新研究成果，对相关场景的电波传播特性进行了深入分析；追踪国际诸如欧洲 WINNER 工作组关于铁路场景无线信道模型建立的情况。本书兼有理论分析与工程实践研究，是一本关于电波传播与无线信道建模研究，同时具有铁路宽带移动通信系统特征的专业书籍。

本书共分 10 章，各个章节的写作都融入了在德国布伦瑞克工业大学及西



班牙马德里理工大学交流访问的官科博士、在美国南加州大学交流访问的何睿斯博士、在美国北卡罗莱纳大学访问的刘鹏宇博士、在英属哥伦比亚大学交流访问的陈炳昊博士以及李岩博士的学术成果及辛勤汗水。在这里向他们表示感谢!

本书是“十二五”国家重点图书出版规划项目,并受到国家出版基金、北京交通大学优秀著作出版基金资助。本书的研究内容依托于轨道交通控制与安全国家重点实验室,以及北京市高速铁路宽带移动通信工程技术研究中心的平台,受国家重大研发计划子课题(编号:2016YFB1200102-04),国家杰出青年科学基金(编号:61725101),国家优秀青年科学基金(编号:61222105),国家重大专项子课题(编号:2016ZX03001021-003),国家重点研发计划项目(编号:2016YFE0200900),北京市自然科学基金重点专项(编号:L172020)的资助,以最新研究成果为主要阐述内容,以实际现场测试数据为验证基础,先进性强,对通信与信息系统学科发展、对电波传播与无线信道建模领域内容的充实都具有很强的理论指导意义和实践意义。

作 者

2016年12月于

北京交通大学,轨道交通控制与安全国家重点实验室

目 录

第 1 章 电波传播与无线信道	1
1.1 电波传播	1
1.1.1 水下电波传播	4
1.1.2 空中机载电波传播	5
1.1.3 铁路场景电波传播	6
1.2 无线信道	6
1.2.1 无线信道概述	6
1.2.2 无线信道模型	7
1.2.3 常用的信道建模方法	9
1.3 电波传播与无线信道建模研究现状	10
1.3.1 新一代移动通信系统给电波传播与无线信道建模带来的挑战	10
1.3.2 电波传播与无线信道建模的研究热点	11
1.3.3 多天线信道特性及建模研究	13
1.3.4 MIMO 系统无线信道历代标准模型	18
本章参考文献	20
第 2 章 相关数学知识	29
2.1 随机过程	29
2.1.1 随机过程定义	29
2.1.2 随机过程的数字特征	30
2.1.3 平稳随机过程	30
2.1.4 常用的随机过程	32
2.2 矩阵论	34
2.2.1 矩阵基本定义	34
2.2.2 矩阵乘积	36
2.3 数学物理方程	40
2.3.1 数学物理方程的导出	41
2.3.2 定解条件	43
2.3.3 分离变数法	44



本章小结	48
本章参考文献	48
第3章 电波传播机制与无线信道衰落机理	50
3.1 电波传播机制	50
3.1.1 自由空间传播	50
3.1.2 反射	51
3.1.3 绕射	51
3.1.4 散射	53
3.1.5 其他传播机制	54
3.2 阴影衰落	54
3.3 多径快衰落	57
3.3.1 幅度衰落统计分布	57
3.3.2 多径快衰落特性参数	60
3.4 多普勒扩展	62
3.4.1 多普勒扩展	62
3.4.2 相干时间	63
3.5 快速时变非平稳信道	64
3.5.1 线性时变信道 (LTV)	64
3.5.2 广义平稳非相关散射信道	65
3.5.3 非广义平稳非相关散射信道	66
3.5.4 快速时变非平稳信道	68
3.6 簇与子簇	68
3.7 零时延子簇与中径	74
3.7.1 零时延子簇	74
3.7.2 中径	77
本章小结	78
本章参考文献	78
第4章 无线信道类型	88
4.1 窄带信道	88
4.2 宽带信道	89
4.3 超宽带信道	91
4.3.1 基本概念	91
4.3.2 UWB 模型	92
4.4 中继信道	95
4.5 广播信道	99



4.6 汽车对汽车通信信道	101
4.6.1 概况	101
4.6.2 车对车通信协议	102
4.6.3 V2V 中的传播信道	106
4.7 列车对列车通信信道	108
本章小结	112
本章参考文献	112
第5章 无线信道模型	118
5.1 1G、2G 信道模型	118
5.1.1 大尺度传播模型	119
5.1.2 小尺度快衰落信道模型	133
5.2 3G 信道模型	140
5.2.1 信道模型概述	141
5.2.2 大尺度路径损耗模型	141
5.2.3 信道冲激响应模型	144
5.3 3.9G 信道模型	147
5.3.1 测试场景类型	147
5.3.2 信道模型	149
5.3.3 SCME 信道模型	153
5.4 4G 信道模型	156
5.4.1 4G 信道模型发展历程	156
5.4.2 4G 信道模型适用场景	157
5.4.3 4G 信道模型建模方法	158
5.4.4 4G 信道模型比较及结论	161
5.5 5G 信道模型	162
本章小结	165
本章参考文献	165
第6章 WINNER 模型	168
6.1 WINNER 工作组	168
6.1.1 WINNER 概述	168
6.1.2 WINNER 的目标与合作	169
6.1.3 WINNER 工作组大事记	169
6.2 WINNER 场景划分	171
6.3 WINNER 信道模型	173
6.3.1 3GPP 空间信道模型 SCM	173



6.3.2	WINNER I SCM 扩展模型 (SCME)	174
6.3.3	WINNER 信道模型	175
6.4	WINNER 高速铁路信道模型	176
6.5	WINNER II 信道模型的实现	189
6.5.1	WINNER II 信道模型仿真流程	189
6.5.2	WINNER II 信道模型仿真实现及仿真结果	193
	本章小结	198
	本章参考文献	199
第7章	无线信道建模方法	201
7.1	电波传播预测建模	201
7.1.1	统计性建模	201
7.1.2	确定性建模	206
7.1.3	半确定性建模	213
7.1.4	其他确定性建模	214
7.1.5	路径损耗建模性能比较	215
7.2	信道参数萃取方法	216
7.2.1	基于物理信道的双定向信道参数估计	216
7.2.2	基于虚拟阵列的双定向信道参数估计	218
7.3	基于 GIS 的建模	227
7.3.1	GIS 概述	227
7.3.2	基于 DEM 的地形分析	228
7.3.3	空间数据可视化	229
7.3.4	基于地理信息系统的建模方法	230
7.4	基于射线跟踪法的建模	237
7.4.1	射线跟踪方法的理论依据	237
7.4.2	射线跟踪方法的建模方法	239
7.4.3	基于射线跟踪法的信道模型	242
7.4.4	真实高速铁路场景中基于射线跟踪法的确定性信道建模	243
	本章小结	251
	本章参考文献	251
第8章	轨道交通复杂环境下的无线信道建模	265
8.1	高速铁路复杂场景划分	266
8.2	天线建模	271
8.3	高架桥场景建模	274
8.3.1	无线传播信道建模方法	274



8.3.2 高架桥传播信道建模	276
8.4 路堑场景建模	290
8.5 隧道场景建模	295
8.5.1 隧道内常用建模方法及电波传播特征	298
8.5.2 不同类型隧道中的电波传播特性	303
8.6 多输入多输出系统建模	315
8.6.1 MIMO 信道建模的国内外研究进展	316
8.6.2 MIMO 系统的时变性及相关性	325
8.7 车对车 (V2V) 信道建模	333
8.7.1 非几何的随机性建模	335
8.7.2 基于几何的确定性建模	340
8.7.3 基于几何的随机性建模	344
8.8 列车对列车通信信道建模	375
8.8.1 车辆通信中的传播信道	375
8.8.2 列车对列车通信中的信道	379
本章小结	385
本章参考文献	387
第9章 基于电磁转换技术的无线场强覆盖	407
9.1 电磁转换技术	407
9.2 电磁转换设计方法	408
9.3 电磁转换技术应用实例	410
本章小结	421
本章参考文献	421
第10章 无线信道仿真	423
10.1 概述	423
10.2 噪声信道仿真	424
10.2.1 热噪声	424
10.2.2 人为噪声	425
10.2.3 接收机噪声	425
10.2.4 白噪声的仿真	425
10.3 多径信道仿真	427
10.3.1 广义平稳非相关散射 (WSSUS)	429
10.3.2 多径信道等效低通表示	430
10.3.3 窄带多径信道仿真	431
10.4 多普勒频移与扩展	434



10.5 时变信道仿真	440
10.5.1 成形滤波法	440
10.5.2 正弦波叠加法	441
10.5.3 Jakes 仿真法	442
10.6 宽带时变多径信道仿真	443
10.7 MIMO 信道仿真	444
10.8 半实物仿真	448
本章小结	451
本章参考文献	451

第 1 章 电波传播与无线信道

电波传播是一门理论性很强的学科，经过了一百多年，电波传播研究获得了巨大的发展，然而客观世界是无穷的，电波传播的一些基本规律虽然已被掌握，但结合具体应用、具体环境有待研究的问题还很多；同时，电波传播又是一门实用性极强的技术，它的研究一直围绕应用需求而展开，发展到了今天，其发展动力更多地是来自应用的需求。也就是说，电波传播发展的总趋势是应用牵引、交叉渗透。无线信道是无线通信系统设计和优化的基础，只有在充分研究和了解所设计的无线通信系统的信道特性以后，才能采取与之相适应的各种物理层及上层技术；而无线信道特性研究的基础则是电波传播中的直射、反射、绕射、散射、透射等机制。关于电波传播与无线信道的研究，两者相辅相成、密不可分。

1.1 电波传播

人们对无线电波传播的最初了解要追溯到 James Clerk Maxwell 的开创性研究。他于 1864 年建立的电波传播理论预言了无线电波的存在。1887 年，Heinrich Hertz 证实了电磁波的物理存在，然而 Hertz 没有看到电磁波的实用特性，他认为由于声波的频率非常低并且电磁波传播特性很差，因此无线电波不能用来携带语音。Maxwell 和 Hertz 的研究开创了无线通信领域。1892 年，英国科学家 Sir William Crookes 预言了使用调制的发送接收设备实现长距离电报通信的可能^[1]。1894 年，Oliver Lodge 运用这些理论建造了第一个无线通信系统^[2]，尽管其传输距离只有 150 m。1897 年，Guglielmo Marconi 成功地把无线信号从英国的怀特岛发送到 18 英里（29 km）之外的一艘拖船上。1901 年，Marconi 的通信系统已经能够横跨大西洋。1906 年，Reginald Fessenden 使用幅度调制第一次进行了语音和音乐的传送。他把低频信号调制到高频电磁波上进行传输，从而突破了 Hertz 所说的低频传播限制，这也是今天在各种无线通信系统中普遍使用的方法。如今，“移动电波传播”这个词语已经囊括了无线通信实际运用中的所有情况，无论发射端和接收端能否移动或正在移动；它也涵



盖了卫星移动通信、航海移动通信,以及无绳电话、传统的私人移动通信系统和蜂窝通信系统。其中,“陆地移动电波传播”的发展尤为引人关注,因为它直接服务于现实社会的大众群体。

电波传播的基础理论大多奠定于 20 世纪,这也是无线信道研究大发展的年代。1923 年, R. Bown 等人对电波传播开展了测量与研究^[3],他们在论文中提出了电场强度及噪声的测量方法,并开展了实验。1946 年, Friis 在论文中首次推导出自由空间损耗公式^[4],即:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1-1)$$

其中, P_r 和 P_t 分别表示接收和发射功率; G_r 和 G_t 分别表示接收和发射天线增益, λ 为电磁波波长, d 为发射和接收天线间距, L 表示与传播无关的系统损耗因子。该结果成为很长一段时间内电波传播测量与研究的参考。1946 年, J. S. McPetrie 等人在陆地上采用 9.2 cm 波长的电磁波,对不同障碍物(如树林、墙壁、窗户)下的传播情况进行了研究^[5]。1947 年, K. Bullington 系统地分析了 30 MHz 频段以上电波传播受频率、距离、天线高度、地表起伏和大气的影 响^[6]。这个时期关于电波传播的研究处于探索阶段,受限于理论认知及实验条件,研究成果的准确性和实用性大打折扣,但许多工作具有开创性意义,特别是影响电波传播的三种机制——反射、绕射、散射,以及菲涅耳区(Fresnel region)理论在无线通信中的应用,都为后续电波传播理论的进一步发展奠定了基础。

无线信道大、小尺度范畴的划分是对电波传播特性进行认知的巨大进步,划分的依据是人们观测的无线电波窗口的大小。信道的大尺度特性反映了接收机和发射机之间长距离(一般几百米到几千米)范围的信号场强变化。对于大尺度特性的研究侧重于路径损耗的预测和阴影衰落的估计。路径损耗是由发射功率的辐射扩散以及信道的传播特性造成的;阴影衰落则是由随机存在于发射机与接收机间的障碍物通过吸收、反射、绕射和散射等方式造成的。小尺度特性描述短距离(几个波长)或短时间(秒级)内接收场强快速波动的特性,其主要是由多径效应引起。自 20 世纪 50 年代起,大量学者在各类场景下针对信道的大、小尺度特性开展了研究,建立了一系列经典的信道模型,为今天蓬勃的通信行业做出了巨大贡献。表 1-1 列出了为电波传播与无线信道建模领域做出突出贡献的部分里程碑式人物。

表 1-1 为电波传播与无线信道建模领域做出突出贡献的部分里程碑式人物

代表人物	年	研究领域	国 籍	开创性贡献
Willebrord Snellius	1621	天文学	荷 兰	反射



续表

代表人物	年	研究领域	国籍	开创性贡献
Christiaan Huygens	1678	天文学	荷兰	衍射
Augustin Fresnel	1818	物理学	法国	
James Clerk Maxwell	1864	物理学	英国	电磁学
Lord Rayleigh	1871	物理学	英国	散射
Joseph Bishop Keller	1962	应用数学	美国	GTD
G. H. Spencer	1962	光学	美国	Ray-tracing
Kane Yee	1966	电磁计算	美国	FDTD
Robert G. Kouyoumjian	1974	电磁计算	美国	UTD
Masaharu Hata	1980	无线传播	日本	Hata 模型
William C. Y. Lee	1985	天线传播	中国	李氏定理
Theodore S. Rappaport	1988	无线通信	美国	对数正态模型
Robert A. Scholtz	1993	无线通信	美国	UWB
Gerard. J. Foschini	1998	无线通信	美国	MIMO
Andreas F. Molisch	2003	无线通信	奥地利	GSCM

表 1-1 中的 GTD (geometry theory of diffraction) 表示几何绕射理论; FDTD (finite difference time domain) 表示时域有限差法; UTD (uniform geometrical theory of diffraction) 表示一致性几何绕射理论; UWB (ultra wideband) 表示超宽带; MIMO (multiple-input, multiple-output) 表示多进多出; GSCM (geometry-based stochastic channel models) 表示基于几何的随机信道模型。

无线电波传播的研究在 20 世纪 70 至 90 年代达到顶峰,大量基础理论以及传播模型得以建立。近些年,无线电波传播的研究处于平稳发展阶段,关于电波传播的研究呈现出三种趋势:新的电波传播预测方法、更高的传输频段和带宽、新的无线通信应用场景。

美国麻省理工学院 (MIT) 的 R. Janaswamy 教授提出了较多新颖的无线电波传播的预测方法。例如,提出了一种使用四阶 random walk (FRW) 的方法抛物线等式进行求解,进而解决电波传播的预测问题^[7-9]。同时,他还提出一种 non-exact 的方法来处理复杂散射环境中路径损耗的建模问题^[10-11]。土耳其 Istanbul Technical 大学的 L. Sevgi 教授利用解析/数值计算的方法解决了很多复杂环境下电波传播的预测问题,比如,基于抛物线方程的无线电波预测工具^[12-13],基于数值计算的表面波预测方法^[14-15]。尽管这些方法都能从确定性的角度解决电波传播的预测问题,但仍然无法突破计算过于复杂的障碍,使得模型实用性不强。



美国 Texas at Austin 大学的 T. S. Rappaport 教授着眼于 60 GHz 通信频段的研究^[16-17]，并有针对性地对室内外 60 GHz 频段的无线信道进行了研究^[18-19]，同时也对 1 920 MHz 频段 Peer to Peer 通信的角度弥散和时延弥散现象进行了研究^[20]。美国 Southern California 大学的 A. F. Molisch 教授对 UWB 信道尤为关注，对室外超宽带信道进行了深入的研究^[21-24]。目前对于这些更高频段和更宽带宽通信信道问题的研究仍在继续，还缺乏不同应用领域、不同场景下的可用无线信道模型。

随着无线通信的发展和用户需求的不断增加，越来越多新的无线应用不断涌现，也对新的应用场景下电波传播和无线信道建模的研究提出了新的挑战。例如，A. F. Molisch 教授对车对车（vehicle to vehicle, V2V）场景下电波传播的基本问题开展了广泛研究^[25-27]，同时也关注了短距离传感器网络的信道问题^[28]。加拿大 UBC 大学的 D. G. Michelson 教授对郊区场景固定无线信道的衰落特性开展了大量研究^[29-33]，这些信道特性的研究成果成为 WiMax 标准制定的基础。特殊场景下的电波传播机理也一直是学者们关注和研究的重点。

1.1.1 水下电波传播

水下无线信道的电波传播问题近年来得到了广泛关注，尤其在军事领域具有广阔的应用前景。在设计水下通信的收发系统时，所涉及的因素与传统陆地无线通信系统不同。假设入射信号伴随着来自大气噪声源的噪声场，在甚低频波段，噪声场对应的噪声温度约为 10^{14} K。如果信号与噪声之比为 20 dB，那么当噪声场和信号场都传入海水时，它们的衰减速率是相同的，信噪比仍为 20 dB。如果假设接收机的等效噪声温度为 1 000 K，总的衰减为 10^{-11} 。由于附加了接收机本身的噪声，使得接收机输入端的等效温度变为 2 000 K，因此，信噪比将下降 3 dB。实际应用所希望的特性是，100 dB 或更大的衰减是可以允许的，但是接收机的信噪比不要有明显的下降。海水的衰减特性使信号强度减弱，但同时将接收机与海面上的高环境温度噪声隔离开来。另外，位于海水中的天线，当它的发射信号传播到空气与海水的交界面时，将遭受严重衰减。100 dB 的衰减将耗尽发射机的功率。因此，如何提升传输效率也成为水下通信的难点。此外，天线在无损耗媒介中辐射时的许多概念不能应用于它在有损媒介中的辐射。第一个影响是，玻印亭矢量在围绕天线半径为 r 的球面上的积分不等于天线的总辐射功率。这是由于在有损耗媒介中，天线的部分辐射功率将损耗在该球体内。第二个影响是辐射图依赖于包围天线的球面原点的选取。这是因为在有损耗媒介中，场强随距离的增大而迅速衰减^[34]。

水下无线通信主要用于海域，由于海水的电导率高、衰减大^[35]。声音在水下的传播速度仅为 1 500 m/s，远远低于光的传播速度，这会导致巨大的传



输时延和多普勒效应。此外,水下信道的衰减随频率增长加快,这也限制了系统所能有效支持的带宽。所以海域内的无线通信只能使用甚低频(VLF)频段或者更低的频段^[34]。在此低频段,海水可以表示为有损电解质。对于短距离通信,F. Schill教授在2004年指出122 kHz的长波通信可以在水下取得较好的通信效果^[36]。2005年,N. Farr教授指出,在非常清澈的水中,光通信可以很好地覆盖100 m的通信半径^[37]。对于长距离通信,现阶段依然只能采用声学通信,其可达传输速率约为40 kbps^[38]。水下通信的多径干扰也非常严重,信道多为频率选择性信道^[39]。2004年,L. Freitag教授提出在水下采用多天线阵列的方式来克服多径以提高系统吞吐量^[40]。2001年,D. M. Farmer教授通过实验发现,在水中远距离处(接近水面)会出现至少20 dB/m的巨大衰减^[41],这些效应通常会导致网络连通性的降低。

由于电磁波在水体中传输的损耗很大,在水下通常采用声波的水声信道进行传输。不同密度和盐度的水层形成了反射、折射和水下物体的散射,使得水声信道也是多径衰落信道。2000年,美国实现了从水下400英尺的潜艇发送E-mail至陆上,其间通过中等距离的水声无线数据传输后,由其他的通信链路予以中转接入互联网。这一结果标志着水声通信技术达到了有实用意义的程度。它也预示着国际上出于海洋资源开发、科学研究或军事活动等目的,将竞相研究与组建陆海空三维的移动通信网,研究重点放在水下无线移动通信的中继与组网的方法及技术^[42]方面。

1.1.2 空中机载电波传播

空中无线电波传播主要面向机载通信。1997年,B. Roturier教授的团队利用测试深入研究了机载无线信道的大尺度传播特性^[43],并讨论了地面建筑对机载无线通信带来的多径效应。早在20世纪70年代,部分卫星通信信道的模型也常常被用作机载环境下无线通信系统的仿真^[44-46]。1992年,S. M. Elnoubi教授首次提出了甚高频(VHF)频段下机-地无线链路下的随机信道模型^[47],但此模型仅仅考虑了多普勒功率谱。1997年,B. Chateau教授在118~137 MHz的频率范围内讨论了对流层传播对机载无线信道的影响^[48]。文献[49]和文献[50]分别利用信道探测技术对不同场景下的机载无线信道传播模型进行了研究。P. A. Bello教授在文献[44]中重点考虑了机载通信中直射径和地面反射径的影响,并给出了简化的信道模型。2002年,Erik. Haas教授在基于大量实际测试的基础上,给出了标准化信道模型参数的设置方法^[51],将其分为典型环境和恶劣环境。2010年,文献[52]在基于实际测试的基础上,研究了不同天线俯仰角对无线传播特性的影响。考虑到机载通信的广阔运用前景,



在基于大量前期工作的基础上, COST 207 工作组最终将机载无线传播信道列为标准信道模型之一^[53]。

1.1.3 铁路场景电波传播

当前, 国际高速铁路建设正处于高速蓬勃发展时期。铁路运营与国计民生息息相关, 高速铁路的应用需求将会推动电波传播研究继续充实和发展。铁路通信系统的可靠性、有效性、可维护性、安全性 (reliability, availability, maintenance, safety, RAMS) 一直是铁路信息化建设的重点和关键问题。高速铁路环境中的电波传播、无线组网、干扰等问题, 是影响高速铁路运输安全和效率的重要因素之一。而这些重要因素当中, 电波传播的特性是进行高速铁路专用移动通信系统设计首先要遇到的问题, 是进行高速铁路系统干扰、无线链路层关键技术和指标评估研究的重要基础。关于铁路场景电波传播以及无线信道建模的发展将在后面章节详述。

1.2 无线信道

1.2.1 无线信道概述

无线电信号由无线通信发射机的天线辐射到整个自由空间进行传播, 不同频段的无线电波有不同的传播方式。

1. 天波传播

短波、超短波可以分别通过电离层形成的反射信道和对流层形成的散射信道进行传播。短波电台就利用了天波传播的方式。天波传播距离最大可以达到 10 000 km 左右。电离层和对流层的反射与散射, 形成了从发射机到接收机的多条随时间变化的传播路径, 电波信号经过这些路径在接收端形成相长或相消的叠加, 使得接收信号的幅度和相位呈随机变化, 这就是多径信道的衰落, 这种信道被称作衰落信道。

短波通过电离层传播的链路存在一个最高可用频率, 最高可用频率受多种因素的影响而变化, 因为电离层的高度和电子密度是随时间、季节、年份、地理位置而变化的。太阳的周期活动性强弱也直接影响到太阳黑子数, 而太阳黑子数对短波传播的影响很大。文献 [54] 给出了最高可用频率等值线世界图; 文献 [55] 给出了太阳黑子数为 10、110 和 160 的最高可用频率等值线世界图, 其他太阳黑子数的最高可用频率情况可以采用内插或外插法^[56]实现; 国际电信联盟的建议书^[57]给出了天波传播信道的参考模型。