

高速铁路无线传播信道测量与建模综述

刘留^{1,2}, 陶成^{1,2}, 陈后金¹, 周涛¹, 孙溶辰¹, 邱佳慧¹

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院 宽带无线移动通信研究所, 北京 100044;

2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 归纳了国内外已开展的高速铁路无线信道测量活动, 总结了国际标准化组织关于高速铁路无线信道的相关提案和标准化模型, 分类讨论了高速铁路在不同条件下无线信道大尺度、小尺度等方面的衰落特性, 得出高速铁路无线信道特征参数受传播环境、位置等因素影响较大; 根据高速铁路无线信道实际测量的问题, 详细分析了基于理论方法的高速铁路无线信道建模类型, 最后提出了未来的研究方向和重点。

关键词: 高速铁路; 无线信道; 信道测量; 信道建模

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)01-0115-13

Survey of wireless channel measurement and characterization for high-speed railway scenarios

LIU Liu^{1,2}, TAO Cheng^{1,2}, CHEN Hou-jin¹, ZHOU Tao¹, SUN Rong-chen¹, QIU Jia-hui¹

(1. Institute of Broadband Wireless Mobile Communications, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The conducted measurement campaigns, domestic and overseas, were presented. Meanwhile, proposals and standard channel models from the international standardization organization were reviewed. The large-scale and small-scale fading characteristics of High-Speed Railway wireless channels were adequately compared, and it is found that the channel parameters depend on the propagation environment and the distance between the transmitter and receiver. Moreover, due to difficulties encountered in realistic channel measurements, theoretical channel characterization methods were analyzed. Finally, open research issues were presented.

Key words: high-speed railway; wireless channel; channel measurement; channel characterization

1 引言

自 2002 年, 中国第一条真正意义上的高速铁路(以下简称“高铁”)“秦沈线”通车以来, 到现在为止, 铁路运营总里程已经超过 1×10^5 km, 位居世界第二, 其中高铁运营里程已经突破一万公里, 位居世界第一, 中国正式进入高铁时代^[1]。随着高铁技术的不断发展和列车速度的不断提高, 高铁车地宽带无线通信技术引起了人们的广泛关注。

以乘客为主体的宽带数据业务和面向运行安全的在途检测数据传输也逐渐成为高铁宽带无线接入的主要业务, 高铁宽带接入要求支持现有 2G、3G 移动通信系统, 并对未来通信体制能够平滑升级, 同时要求能够支持铁路运输的非安全数据业务。因此, 当前高铁宽带无线接入技术是高速铁路形成整套成熟技术的首要问题之一^[2,3]。

无线信道是通信系统设计的基础, 准确认知无线信道是设计通信系统的前提条件, 它为通信系统

收稿日期: 2013-06-18; 修回日期: 2013-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371070, 61102050); 国家重大专项基金资助项目(2011ZX03004-003); 北京交通大学人才基金资助项目(2013RC004); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(2012D07)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61371070, 61102050); National Science and Technology Major Project(2011ZX03004-003); Talent Foundation of Beijing Jiaotong University(2013RC004); Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory of Southeast University(2012D07)

原型机设计和系统、链路级仿真提供理论基础和技术支撑,因此准确的认知高铁无线信道是研究的首要问题^[4]。与陆地蜂窝通信系统的传播信道相比,高铁无线信道具有以下特点^[3,5]: 1) 高铁经历的丰富传播场景。高铁大多建设在城市郊区、农村空旷地带或高架桥之上,运行经过如山区、U型槽、隧道等特殊地貌,导致其无线信道呈多样化特征。2) 由于高铁大多修建于开阔空旷地域,铁路周围反射物较为稀疏,因此在无线通信链路存在较强的直射径(LOS, line of sight),信道时延散射分量较少。3) 大多普勒频偏与快速多普勒变化。构建可靠和可信的高铁信道模型是实现“双高”(高移动性、高信息速率)条件下无线数据有效、可靠和安全的传输的前提条件。

本文首先对国内外高铁信道测量活动进行了回顾,接着总结了通信产业界对于高铁无线信道模型的相关提案和标准化模型,然后分别介绍了基于实际测量和理论分析的2种高铁信道建模方法的研究成果,最后提出了今后的研究展望。

2 国内外已开展的高铁无线信道测量

现今国内外的相关研究团队,利用标准的信道测量设备,开展了高铁典型场景下的无线信道测量,统计获取了高铁真实场景下大尺度和小尺度衰落的特征。各次测量参数如表 1 所示。2006 年,德国 MEDAV 公司、德国卡尔斯鲁厄大学和伊尔梅瑙理工大学,首次利用标准信道测量设备 RUSK,在锡格堡和法兰克福的 ICE 高速铁路开展了高铁无线信道测量,经过测量,统计了路损模型, K 因子模型,多径延时等信道参数,这些参数部分写入 Winner II

的 D2a 场景信道模型^[6]; 2008 年,芬兰 Electrobit 公司和丹麦 Oulu 大学,联合台湾工业技术研究院(Industrial Technology Research Institute),使用 Electrobit 公司 Propsound 信道探测仪,在台湾 2 个高铁路段:新竹—台中(乡村模型),台中—嘉义(森林、山区模型)开展了高铁信道测量^[7]; 2010 年,北京交通大学宽带无线移动通信研究所和中国移动通信有限公司研究院(以下简称中国移动研究院)合作,在京津城际高铁线路(高架桥场景),使用 Electrobit 公司 Propsound 信道探测仪(同时利用车顶 HUBER+ SUHNE 颞颥天线^[8]),获得时速 240 km/h 的无线信道特征参数,测试场景示意如图 1 所示^[5,9]; 2012 年北京交通大学和中国移动研究院继续在郑西高铁上开展了遮挡高架桥和 U 型槽的信道测量,如图 2 和图 3 所示^[10,11],和京津城际高铁测量场景不同,本次测量中高架桥场景中无线链路中存在树木遮挡。2011 年底,清华大学在中国广深港高铁上,利用该实验室自行研制的信道测量设备,开展了山区场景的高铁无线信道测量,统计了大尺度等信道参数^[12]。

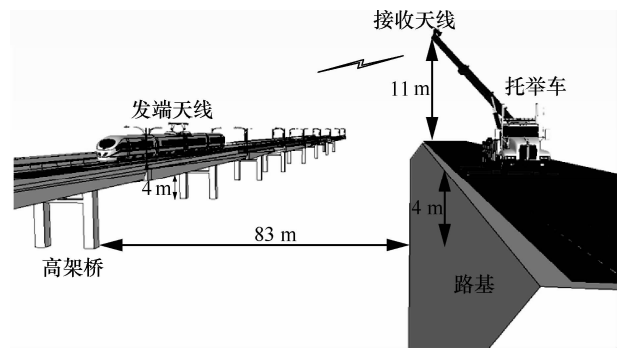


图 1 京津城际高铁信道测量位置示意

表 1 近几次国内外高铁车地间信道测量参数指标

RUSK Sounder 德国 ICE 测试指标 ^[6]		PropSound 台湾 测试参数 ^[7]		PropSound 京津城 际测试参数 ^[5,9]		PropSound 郑西线 测试参数 ^[10,11]		广深港高铁 测试参数 ^[12]	
参数	指标	参数	指标	参数	指标	参数	指标	参数	指标
频率	5.2 GHz	频率	5.2 GHz	频率	2.35 GHz	频率	2.35 GHz	频率	2.4 GHz
带宽	120 MHz	带宽	50 MHz	带宽	5 MHz	带宽	50 MHz	带宽	40 MHz
CIR 长度	1.6 μs	发射功率	31 dBm	发射功率	5 W(外接功放)	发射功率	30.8/32.7 dBm	发射功率	20 dBm
发射天线	车顶	CIR 速率	2 050.5 Hz	CIR 速率	984 Hz	CIR 速率	1 968.5 Hz	CIR 速率	1 968.5 Hz
接收天线	均匀圆天线阵 UCA, 地面	发射天线	Dipole, 2x8 全向天线阵地面	发射天线	Dipole 车内	发射天线	Dipole 车内	发射天线	定向天线地面
速度	20, 100, 240 km/h	接收天线	Dipole, 2x8 全向天线阵车内	接收天线	Dipole 地面	接收天线	Dipole 地面	接收天线	全向天线车内
		速度	260~290 km/h	速度	240 km/h	速度	198 km/h	速度	198 km/h
		激励方式	突发	激励方式	连续	激励方式	连续	车窗插损	12.4 dB

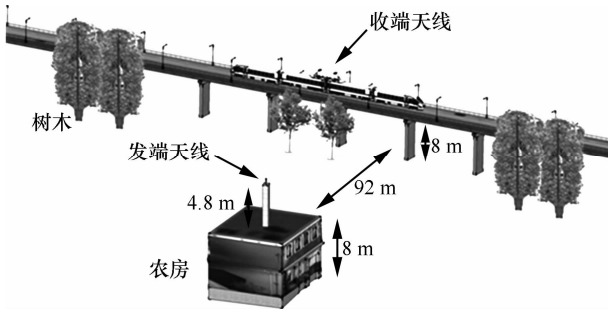


图 2 郑西高铁平原场景信道测量位置示意

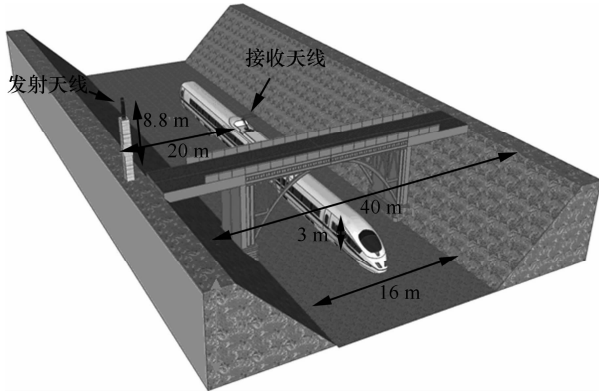


图 3 郑西高铁 U 型槽信道测量位置示意

此外，对于车厢内部无线传播环境，国内外一些研究机构也做了相应的测量，提取了相关信道参数，如表 1 和表 2 所示。中国移动研究院和北京邮电大学在中国唐山客车厂开展了车厢内接入系统的信道测量，并统计了高铁车厢在 2.35 GHz 和 2.15 GHz 的穿透损耗^[13]；2008 年，台湾工业研究院和日本 NTT 在台湾高铁开展了高速列车车厢内部通信和车厢之间通信的无线传播特性研究，测试包括运动场景和静止场景^[14-16]。

此外，国内学者王惠生等分析了 900 MHz 频段电波在山区长直隧道、隧道群和弯曲隧道中的场强测试数据，并参考经验公式，得出 900 MHz 频段电

波在不同类型隧道中传播特性参数^[17]；蔺伟等人从电波小尺度衰落形成和影响因素出发，根据列车无线通信系统参数确定小尺度衰落统计参数，并利用数理统计方法对测试数据进行分析，建立了电波小尺度衰落数学模型^[18]；李轶华结合传播模型校正的一般理论，通过实测取得铁路沿线不同地形特征条件（如平原、丘陵、市区、隧道）下电波传播的场强数据，通过实测数据获得在不同地形条件下场强预测的简易回归模型，并获得了铁路沿线场强预测模型的地形因子修正值^[19]；国立台湾大学研究团队利用矢量信号发生器和矢量信号分析仪，测量得到了台湾高铁的若干信道特征，如多径延时、Doppler 等^[20]；闻映红等基于频谱仪的测试方法，实现在较宽的频率范围内对 CTCS-3 级列控系统无线通信信道中等尺度衰落及小尺度衰落特性进行测量，通过对现场测试数据的分析，初步得到了高速列车无线信道电波传播中尺度及小尺度衰落特性的相关结论^[21]。

高铁无线信道测量耗时、耗物、耗力，组织安排一次高铁路信道测量工作包括：铁路相关管理部门备案、测试点勘察、测试方案低速场景验证、高速列车协调、铁路调度协调等工作，安排一次高铁信道测量至少需要 2 个月的准备时间；此外，若测试设备在测试中正常工作，由于信道测量设备覆盖范围有限，因此一次测量获得的测试数据有限，若要构建完整的高铁无线信道测试数据库，将会是一个漫长的过程^[22]。为此，研究人员尝试采用现有高铁沿线的无线蜂窝信号作为信道激励信号，完成对高铁无线信道测量。如利用 GSM-R 作为激励信号在郑西线开展的测量，由于 GSM-R 信号是窄带信号，研究主要限于 900 MHz 频段大尺度衰落特征^[23-27]；此外，文献[28-30]利用 WCDMA 和 LTE

表 2 车厢内部信道测量参数指标

唐山客车厂车厢内部信道测量参数 ^[13]		台湾高铁车厢内部测试参数 ^[14-16]			
参数	指标	车厢内部 (5.2 GHz)		车厢之间 (2.2 GHz)	
		参数	指标	参数	指标
频率	2.35/2.15 GHz	带宽	IEEE802.11a, 20 MHz (静止)	CW 信号(运动)	IEEE802.11b/g, 20 MHz
带宽	100 MHz	极化方式	垂直/水平	垂直/水平	垂直极化
发射天线	定向天线 (增益为 5 dBi), 双吸顶天线 (增益为 3 dBi)	—	—	—	—
接收天线	偶极子天线	—	—	—	—

作为激励信号对高铁无线信道进行测量，可以从测试数据中进一步提取信道小尺度衰落信息。将蜂窝信号作为激励信号获得的测量结果，和利用标准信道测量设备获得的结果相比，由于带宽有限导致时间分辨率较低，并且，统计结果中没有去除系统响应^[31]，会影响统计结果；另外，利用扫频仪作为接收信号采集器，并没有去除接收端的 AGC（自动增益控制）的补偿，从而造成测量误差。但这类方法能有效提高高铁无线信道测量效率，对于建立高铁典型场景初步模型，也是一种新的探索。

3 已有的高铁无线信道标准化提案和模型

迄今，虽然尚无确认的基于测量的高铁信道模型，但通信产业界、国际通信标准化组织和相关研究单位，利用已有的移动场景下的信道模型或理论方法，积极开展了高铁无线信道的探讨和研究。

1) 基于 ITU-VT 的高铁信道模型

2005 年 3GPP 国际标准会议上，西门子移动公司针对未来高铁的无线通信需求，提出了 350 km/h 的高铁多径信道模型。该提案以 M.1225 模型中 ITU-VA 信道模型为基础，给出了高铁场景下的修正模型，其中，减少了多径数量，且修改了每径的相对平均功率^[32]。

2) 2 倍多普勒频偏模型

2006 年，NTT DoCoMo 公司提出了两倍多普勒频偏模型^[33]。该提案针对 TDD 系统，提出了在高铁场景下上下行链路通信频率差问题。如图 4 所示，假设基站（BS）发端的中心频率为 f_0 ，由于 Doppler 频偏，此时列车上的终端收到 BS 信号的频率为 $f_0 + \Delta f$ ， Δf 是下行 Doppler 频偏；在切换至上行链路时，终端锁定在下行信号频率 $f_1 = f_0 + \Delta f$ ，当该信号到达 BS 时，同样 Doppler 频偏，BS 接收到信号的中心频率为 $f_1 + \Delta f'$ ， $\Delta f'$ 是上行 Doppler 频偏，这里假设上下行链路 Doppler 频偏相等，即 $\Delta f \approx \Delta f'$ ，因此，在上行链路 BS 端，信号经历了 2 倍的多普勒频偏 $2\Delta f$ 。

3) 3GPP 高铁场景模型

2006 年 Motorola 公司在 3GPP 会议上，首先给出了高速铁路中存在 LOS 环境下的多普勒频移引起载波频率变化的情况，并最终写入标准。标准中提到的高速铁路的对应户外、隧道内泄露电缆和隧道内多天线场景的模型^[34]。

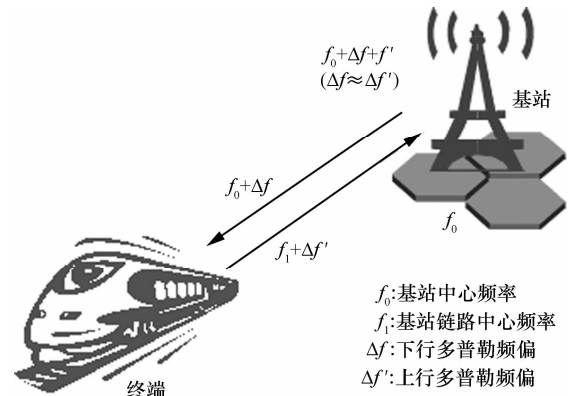


图 4 2 倍多普勒频偏示意

在列车从远处向基站驶近，经过基站，然后远离基站的过程中，其电波入射角的变化分别为

$$\cos \theta(t) = \frac{D_s / 2 - vt}{\sqrt{D_{\min}^2 + (D_s / 2 - vt)^2}}, 0 \leq t \leq D_s / v \quad (1)$$

$$\cos \theta(t) = \frac{-1.5D_s + vt}{\sqrt{D_{\min}^2 + (-1.5D_s + vt)^2}}, D_s / v \leq t \leq 2D_s / v \quad (2)$$

其中， $D_s/2$ 是高速列车距离基站的横向距离， D_{\min} 是铁轨到基站的距离。

户外场景和隧道场景高速列车穿越基站多普勒频偏如图 5 所示。从图中可以看出，当高速列车穿越基站时，出现多普勒快速变化轨迹，即从一个极端频偏向另一个极端频偏迅速变化。若在隧道场景下，轨道到基站的距离更近，其多普勒变化将更加剧烈。快变多普勒模型仅描述了单径（或者说是 LOS 径）在高速列车穿越基站过程中的时变特性，属于平坦衰落，对于多径的时变特征，该标准未做出相应建议。此外，需要指出的是，该模型在描述列车小区切换时，即 $-f_{\max}$ 向 f_{\max} 的变化进行了近似，因为在真实场景中，该位置对应小区切换，即 $-f_{\max}$

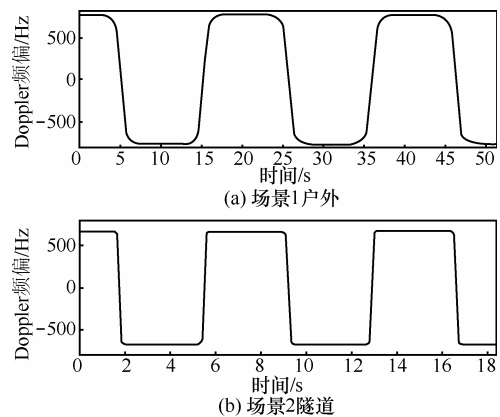


图 5 特殊场景多普勒变化曲线

向 f_{\max} 的跳变，而非模型中的平滑过渡，此处近似目的在于仿真方便。

4 基于测量的高铁信道建模

4.1 大尺度衰落特征

大尺度衰落模型主要用于对接收信号电平强度进行估计，预测移动通信系统中的信噪比。高铁大尺度信道模型可为高速铁路前期网络规划和后期网络优化提供参考，同时也可为高速铁路越区切换、频率规划和干扰等关键技术提供理论支撑。根据已有理论和测试的结果可知，平均接收信号功率随距离的变化呈对数衰减，阴影衰落服从对数正态分布，因此常用如下表达式对距离路径损耗关系进行建模

$$PL(d)=A+10n \lg (d)+X_s, d \geq d_0 \quad (3)$$

其中， A 是截断点， n 为路径损耗指数，它描述了路径损耗随距离变化的快慢趋势，依赖于特定的传播环境， X_s 表示阴影衰落。

在高铁场景中，很多因素影响了高铁大尺度衰落模型，例如电波传播环境、收发端天线高度、天线方向图、是否采用车顶天线（如接收天线在车厢内部，需考虑车窗的穿透损耗）等，表 3 是近年来几次高铁信道测量获得的大尺度传播模型，总结归纳了不同场景、不同带宽下的测量结果。由表 3 可以看出，不同的高铁场景下路损因子 n 不同，测量结果均大于自由空间场景下的 $n=2$ 。需要指出的是，未来高铁宽带无线接入，可能采用车载中继的方式，即 Mobile-Relay^[6,39]，即高速列车内部，

Mobile-Relay 提供类似微微蜂窝 Femtocell 的全方位无线接入业务，包括个人无线通信业务（2G、3G 和未来的 4G）和高速列车内部局域网业务 WLAN。列车车内数据通过 Mobile-Relay 汇聚，采用特定的宽带无线传输通道和地面连接。当 Mobile-Relay 采用车顶天线直接和地面基站无线连接，此时新型动车组的全金属合金车体，对车顶天线辐射方向图在某些方向上形成“零凹”区域^[8]，从而影响车顶天线的接收性能，导致测量得到的路损指数较大，这在多次测试中（德国 ICE 上测量的结果^[6]路损指数 $n=4.04$ ，京津高铁测试、郑西高铁测试）已经得到验证。

对于阴影衰落 X_s ，若采用对数正态阴影分布拟合建模，当传播场景较为开阔，阴影衰落标准差介于 2~3 dB 之间，若周围环境存在如植被等遮挡，标准差在 4 dB 附近。利用对数正态分布时，认为整个测量过程中，阴影衰落的样本是独立分布的，但实际传播过程中，由于来自于同一植被或建筑物的遮挡造成的阴影样本是相关的，因此，可以利用负指数函数描述样本之间的相关性^[40]。文献[12]中，在山区场景下测量得到的“去相关距离（decorrelation distance）” $d_{\text{cor}} \approx 10 \text{ m}$ ，该值小于 IEEE 802.16 标准中移动环境信道的 $d_{\text{cor}_M.2135} \approx 40 \text{ m}$ ，也小于 M. 2135 模型中的 $d_{\text{cor}} \approx 20 \text{ m}$ 。

4.2 K 因子特征

高铁场景下，由于周围缺乏丰富散射体，因此接收信号中视距直射径较强。 K 因子是描述直射径相对散射径强度的重要参数，其反映了接收信号中

表 3 高铁典型场景大尺度衰落参数^[35-38]

测量方法	场景	路损指数	阴影衰落标准差	适用范围	
窄带信道 (GSM-R) 930.2 MHz~932.8 MHz	高架桥	非开阔区域 ^[35,36]	2.2~3.28	2.21	250~3 200 m
		开阔区域 ^[35,36]	2.1~2.5	2.09	
		山区 ^[36]	3.5	2.14	
		城市 ^[36]	4.05	3.07	
	U 型槽 ^[25,37]	3.5~4.3	3~4	深浅适用	
宽带信道	WINNER II, 120 MHz, 5.3 GHz ^[6]	4.04	2.5	—	
	车厢内部, 100 MHz, 2.35 GHz ^[13]	1.8~2.1	2.3~2.8	1~15 m	
	高架桥, 10 MHz, 2.35 GHz ^[5]	3.03~3.56	2.0~4.8	400~2 500 m	
	山区, 50 M, 2.4 GHz ^[12]	2.4	3.3	$d < 788.6 \text{ m}$	
		3.88	4.2	$d > 788.6 \text{ m}$	
	遮挡高架桥, 50 MHz, 2.35 GHz	3.89	2.5	$d > 90 \text{ m}$	
U 型槽, 50 MHz, 2.35 GHz ^[38]	2.86	1.7	$d > 40 \text{ m}$		

LOS 分量和不可分辨多径的强度比,因此 K 因子直接体现了信道的性能质量,在链路预算、接收装置相关设计、测速、定位以及自适应调制等方面都是重要的信道统计参数。表 4 统计了已公布的高铁 K 因子统计模型。

从表 4 可以看出,高铁场景下 K 因子随传播环境而变化,需要重点指出的是,即使同一场景, K 因子也随收发端的距离的变化而变化。图 6 是京津高铁测量中的高铁列车在穿越整个无线区域的 K 因子变化曲线。从图中可以看出,当收发端较远时, K 因子在一个稳定的范围内波动;当列车靠近接收天线时,即收发端距离变近时, K 因子迅速增加;当收发端距离最小时, K 因子达到峰值;而后,随着列车离开的离开, K 因子随之下降,最终回归到原来区间波动变化。因此,传统的恒值 K 因子模型并不符合高铁场景,基于场景变化、位置变化的 K 因子模型,才更加符合高铁无线信道传播特性。

4.3 高铁时延多径衰落特征

时延扩展特征是描述无线信道传播特性的典型参数之一,包括平均时延、最大多径时延和 RMS (均方根) 时延。文献[5]利用局部最大值法进行多径搜索,搜索获得了每个信道快照 (snapshot) 的多径分量,图 8 给出高速列车穿越整个无线覆盖区的时变功率延迟分布图,图 9 给出了多径数目随距离的变化曲线。

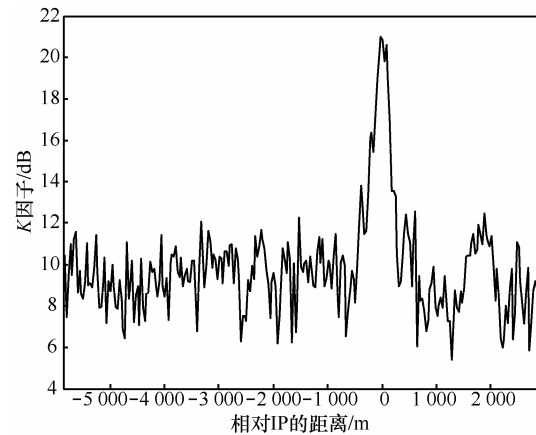


图 6 穿越基站 K 因子突变(注: IP 是铁路距离发射天线最近的点)

从图 8 和图 9 中可以看出,在列车的穿越过程中,多径的数目随收发端的距离的变化而变化,为此,根据不同位置的时间色散特征不同,可将整个无线覆盖范围划分为 5 个部分,分别是远端 RA (remote area)、接近 TA (toward area)、靠近 CA (close area)、甚靠近 (closer area) 和到达 AA (arrival area)^[5,9]。在测量结果中,不同的收发端距离呈现不同的时间色散特征,原因在于,在远端时,由于传播路损导致接收机接收信号功率较小,经过反射以后的多径功率更小,接收端难以识别,因此多径数目较少;随着列车逐步靠近,接收端接收功率到达逐步变大,多径的功率逐步增强,可识别的多径数目进一步增加;当收发端距离最近时,接收功率最强,但是此时周围反射造成的多径延时无法

表 4 高铁典型场景 K 因子衰落模型

场景	K 因子	适用范围	测量频率
高架桥 ^[23]	均值 6.16~7.93 均方差: 1.63~2.05	Mobile-Relay	(GSM-R) 930.2 MHz~932.8 MHz
U 型槽 ^[23]	均值-1.14~2.28 均方差: 4.08~4.23;	Mobile-Relay	(GSM-R) 930.2 MHz~932.8 MHz
U 型槽 ^[26]	$K = -0.0049d + 5.08$; $K = -0.0022d + 3.75$; $K = -0.0021d + 5.07$	Mobile-Relay	(GSM-R) 930.2 MHz~932.8 MHz
车厢内部 ^[13]	均值 10.41, 均方差: 4.9; 均值 4.09, 均方差: 4.46;	车内-车内	2.35 GHz, 100 MHz
平原 ^[30]	均值 4.6, 5.2	直接覆盖	2.1 GHz, 3.84 MHz
乡村 ^[30]	均值 2.5	直接覆盖	2.1 GHz, 3.84 MHz
高架桥 1 ^[4]	$K = -0.0337d + 23.05, d < 250$ $K \sim N(8.25, 1.05^2), d > 250$	Mobile-Relay 无树木遮挡	2.35 GHz, 10 MHz
高架桥 2 ^[38]	$K = -0.0019d + 9.49d, std = 6.1 \text{ dB}$	Mobile-Relay 有树木遮挡	2.35 GHz, 50 MHz
U 型槽 ^[41,42]	$K = -0.0117d + 10.12, d > 0, std = 3.35 \text{ dB}$ $K = 0.0176d + 11.56, d < 0, std = 3.15 \text{ dB}$ $K = 9.49d - 0.0019d, std = 6.1 \text{ dB}$	Mobile-Relay 深槽	2.35 GHz, 50 MHz

超过 1 个码片的时间，因此在 AA 端仅能分辨出 1 径。离开接收天线的特征是上述过程的逆过程。文献[5]建立基于位置的高铁高架桥场景的单天线抽头延迟线 (TDL, tapped delay line) 模型，其中包含了不同区域的多径数目、径功率、K 因子、多普勒特征等参数。

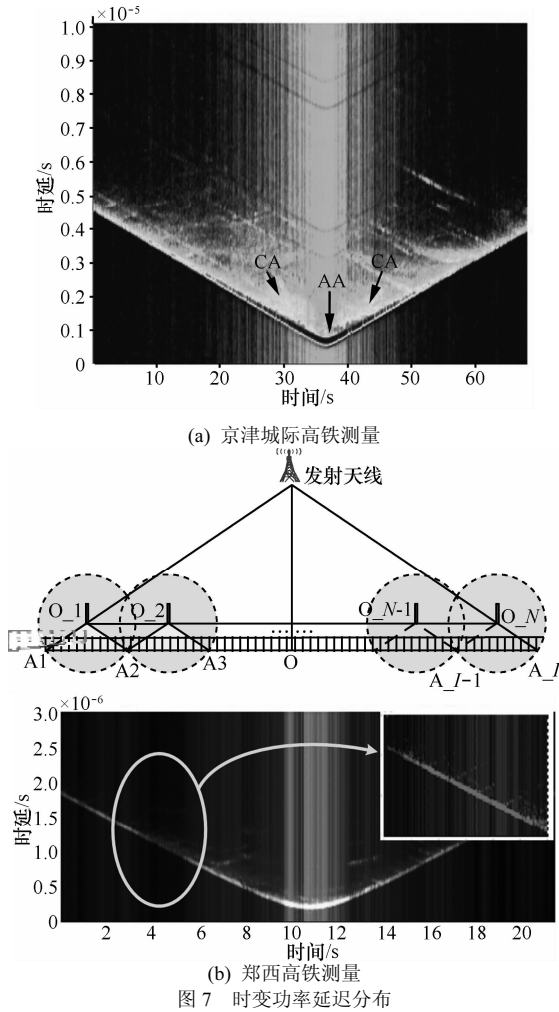


图 7 时变功率延迟分布

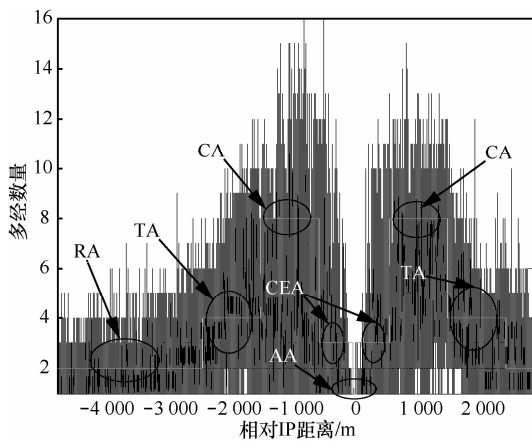


图 8 京津城际高铁测量多径数目随距离的变化曲线

此外，郑西高铁测试中，发现铁轨周围电杆对无线信号存在散射作用，从图 8(b)中可以看出，有一条较明显的次径周期性的靠近和远离主径，变化周期约为 0.89 m，对应距离为 50 m，经过理论位置分析结果和实际现场对照，该径是由高架桥两侧均匀分布的天线杆形成的漫反射区域造成的。在 WINNER II 模型中，同样提到在规律位置的规律建筑会对信号传播造成影响，但其传播特征未建模。根据测量数据和理论分析结果，将电杆反射电波分量建模为移动多径分量(moving propagation component)，用于准确描述列车在整个穿越过程中动态多径的确定性变化特征。

4.4 高铁多普勒衰落模型

多普勒特征是高铁无线信道最重要的特征，它能够准确描述高铁信道中多径的时变特征，对通信接收机同步、信道估计等算法设计有重要指导意义。文献[34]中，在理论上建立了单径的非衰落快变多普勒特性曲线模型，文献[5]利用测量数据验证了这个模型；此外，对于其他多径的多普勒特征，文献[5]的测量场景是开阔的高架桥场景，经过参数统计，最终给出了散多径的多普勒特征服从离散随机分布， $f_v \in \{0.5f_{\max}, 0.7f_{\max}, 0.9f_{\max}\}$ ，对应的分布概率为：9%，43%和 48%，其中， f_{\max} 是最大多普勒频偏。

此外，在高铁 U 型槽场景下，由于直射径较强，表现的多普勒功率谱也比较单一，如图 9 所示，均为“纯频偏”的多普勒功率谱，并无类似 Jakes 的 U 型谱扩展^[11]。

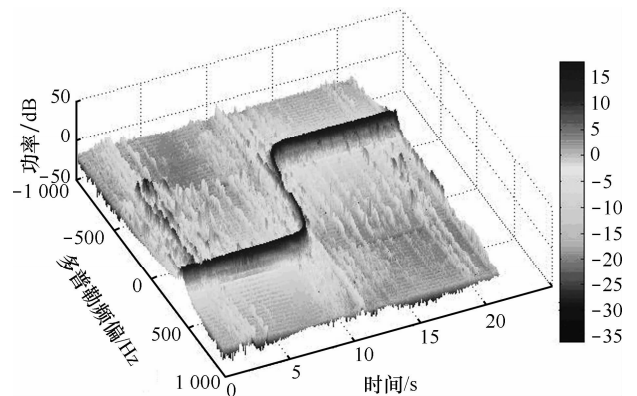


图 9 U 型槽场景快变多普勒曲线

4.5 角度域衰落特征

经典的 Jakes 信道模型中，一般认为在二维平面上传播的电磁波到达接收天线的角度均匀分布

在 $[-\pi, \pi)$ 之间, 最终能够形成 U 型多普勒功率谱。然而, 在实际高铁信道中, 由于高铁无线电波传播环境属于“欠散射”环境, 电磁波仅能以 non-isotropic (非同向各性) 散射方式到达接收端。为此, 文献[42]中利用包含有 Von Mises 和具有直射径分量角度特征的 2 类分布来拟合到达角 (AoA, angle of arrival) 的角度分布, 其分布为

$$p(\theta) = \frac{1}{K+1} p_{\text{scat}}(\theta) + \frac{K}{K+1} p_{\text{LOS}}(\theta) \quad (4)$$

其中, K 是赖斯因子, $p_{\text{LOS}}(\theta)$ 是直射分量的角度分布函数; $p_{\text{scat}}(\theta)$ 是散射分量的角度分布, 上式展开可以写为

$$p(\theta) = \frac{1}{K+1} \left(\underbrace{n \frac{1}{2\pi I_0(\kappa_{\text{scat}})} e^{\kappa_{\text{scat}} \cos(\theta - \theta_{\text{scat}})} + (1-\eta) \frac{1}{2\pi}}_{p_{\text{scat}}(\theta)} \right) + \frac{K}{K+1} \underbrace{\frac{1}{2\pi I_0(\kappa_{\text{LOS}})} e^{\kappa_{\text{LOS}} \cos(\theta - \theta_{\text{LOS}})}}_{p_{\text{LOS}}(\theta)} \quad (5)$$

其中, θ_{scat} 是散射物到达角, θ_{LOS} 是 LOS 分量到达角度, κ_{scat} 和 κ_{LOS} 分别是可以表示散射分量和直射分量的角度扩展, 例如, 若 $\kappa = 0$, 即满足 $p_{\text{von}}(\theta) = 1/2\pi$, 即入射波满足 U 型多普勒功率谱的形成条件; 若 $\kappa = \infty$, 可以得到 $p_{\text{von}}(\theta) = \delta(\theta - \alpha)$, 即入射波为理想射线, 在高铁信道测量数据分析中发现, $\kappa \geq 50$ 。系数 $\eta \in [0, 1]$, 它控制着散射分量和 LOS 分量的权重比例。 $I_0(\cdot)$ 是零阶修正贝塞尔函数。

角度服从上述分布的接收信号相关函数为

$$\phi(\tau) = \frac{1}{K+1} (\eta \phi^{\text{scat}}(\tau) + (1-\eta) I_0(2\pi f_{\text{max}} \tau)) + \frac{K}{K+1} \phi^{\text{LOS}} \quad (6)$$

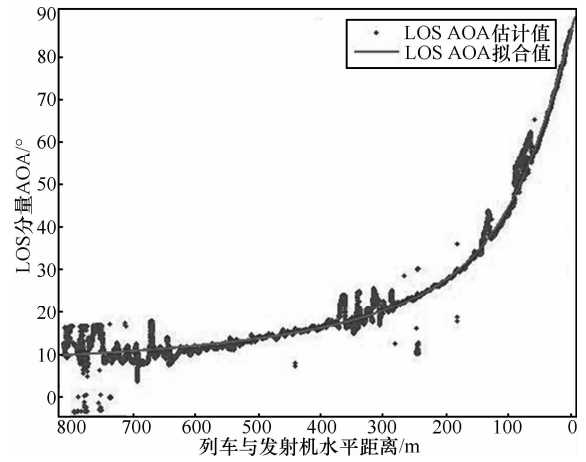
根据文献[44]可得

$$\phi^{\text{scat/LOS}}(\tau) = \frac{I_0 \left(\sqrt{\kappa_{\text{scat/LOS}}^2 - 4\pi^2 f_{\text{max}}^2 \tau^2} + j4\pi \kappa_{\text{scat/LOS}} \cos(\theta_{\text{scat/LOS}}) f_{\text{max}} \tau \right)}{I_0(\kappa_{\text{scat/LOS}})} \quad (7)$$

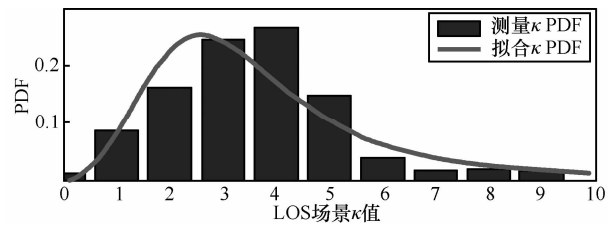
根据郑西线实测数据, 采用相关函数 $\phi(\tau)$ 为目标函数, 经过非线性最小二乘法的联合估计, 可以得到 $(\hat{K}, \hat{\kappa}_{\text{LOS}}, \hat{\theta}_{\text{LOS}}, \hat{\kappa}_{\text{scat}}, \hat{\theta}_{\text{scat}}, \hat{\eta})$ 。

κ_{scat} 值的统计结果表明, 在散射分量不占主要部分的 LOS 条件下, 散射分量的角度扩展比较大, 这表明除了直射分量外, 其他所有散射物对接收信

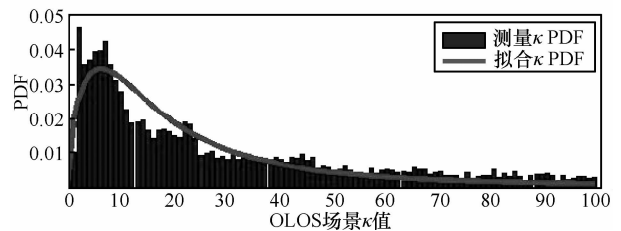
号的贡献都很微弱。在受阻碍的视距(OLOS)条件下, 直射信号受阻, 散射分量比重变大, 并且接收机附近的散射物较远处散射物对接收信号贡献较多, 平均入射角接近 90° , κ 值大, 角度扩展小。在 LOS 环境中, 直射分量占主要成分, 来自不同方向的散射分量趋于平均, κ 值小, 角度扩展大, 同时发射机附近的散射物对信号影响趋于明显, 因此平均入射角围绕主径变化。



(a) AOA 估计



(b) LOS 场景 κ 估计值



(c) OLOS 场景 κ 估计值

图 10 信道参数估计

5 基于时频散射理论的信道模型

基于实际测量的信道建模存在诸多客观困难, 如测试点选取较难、协调测试线路及测试车困难、测量效率低等, 因此基于实际测量的信道建模方式往往不能满足未来特殊场景宽带信道建模需求, 无法对特殊场景下无线电波传播机理

提供有效支撑^[22,29]。为此,国内外的一些研究团队,也积极开展了基于理论方法的高铁无线信道建模研究。

5.1 基于射线跟踪法的高铁无线信道模型构建

德国卡尔斯鲁厄大学的研究团队一直致力于利用 Ray-tracing 的方法构建高铁无线信道模型。上个世纪 90 年代中期,该团队利用 Ray-tracing 方法,研究了椭圆型截面高铁隧道的传播模型^[45-47];2008 年,该团队利用 3D 的 Ray-tracing 方法,构建了高铁平原场景的移动传播信道^[47]。该高铁场景中,同样考虑了铁轨两边周围均匀分布离散电杆和铁道两旁的音障。在模型构建时,发端基站安置在铁轨旁,收端采用车顶天线,收发端均是垂直极化天线。根据 3D Ray-tracing 信道建模方法,文献[48]比较了接收端分别使用全向天线和定向天线时的 DoA(离开角)扩展和多普勒功率谱扩展特征,从仿真结果看出,采用定向天线能较大地约束到达波的角度扩展,从而进一步压缩接收端的多普勒扩展,以达到提高系统性能的目的。

5.2 基于时域随机散射理论的高铁无线信道模型构建

为了解决射线跟踪法仿真数据量大、仿真速度慢、普适性较差的问题,研究人员提出了随机半确定性模型(semi-stochastic model)^[49]。半确定性模型的典型代表分为 2 类:基于时域冲击响应的几何随机分布信道模型(GSCM, geometry-based stochastic channel model)^[49]和基于频域传递函数的传播图理论(propagation graph)的信道模型^[50]。GSCM 模型和射线跟踪法模型非常接近,它们都是基于收发端传播射线来获取信道衰落特征的。

英国赫瑞瓦特大学王承祥教授团队利用时域随机散射理论,研究了非平稳高铁无线信道,其宽带信道模型采用共焦椭圆模型。该模型应用于 Mobile Relay 的高铁覆盖场景,其中考虑了 LOS 和一次反射波分量,经过相关数学推导和近似,获得了 LOS 和一次散射波分量的本地散射函数(local scatter function),在该模型中,非 LOS 径的多普勒功率谱服从 Jakes 多普勒功率谱^[51,52]。

北京交通大学国家重点实验室团队利用随机集合模型,研究了 U 型槽、郊区和城区的高铁信道模型。对于 U 型槽场景,考虑 LOS 和单次反射波分量,其中单次反射波分量来自于 U 型槽两侧的斜

坡上离散的分布着点状散射物;对于郊区和城区场景,采用了规则球形几何分布特征来分布散射物,推导了 LOS 和散射物的相关函数^[53]。

5.3 基于传播图理论的高铁无线信道模型构建

基于频域传递函数的传播图理论的信道建模方法理论,通过将传播环境中的反射物和传播射线抽象为图论中的顶点和边,这样就可研究多个反射体散射体反射或散射群带来的多次反射特性,通常,这种传播特征也可称为“递归反射”。通过传播图的理论,可以将“递归反射”传播机理在理论上演化,最终获得整个传播信道的传递函数。

同济大学研究团队利用传播图理论,模拟构建了高铁乡村 MIMO 无线信道模型,其中散射物包括铁路周围建筑物、树木、电杆和通信铁塔等,并用 SAGE 估计算法获得了延时、多普勒、角度域的信道信息^[54];北京交通大学宽带无线研究团队利用传播图论的建模方法,结合 Von Mises 分布对高铁平原场景无线信道模型进行建模,并通过真实测量数据进行验证^[55]。

6 将来的工作

1) 高铁多天线信道空间域衰落特性

高铁无线信道的空间衰落特性直接影响了 MIMO 系统分集增益的获得。在理论研究方面,文献[56]采用理论分析和蒙特卡罗仿真方法,分别研究了宽带和窄带信道的遍历容量和截止容量;文献[57]在三维模型基础上,利用线性多天线阵列分析了车载 N 组阵列合并接收的信道容量,并给出了相应的信道容量提升方案;文献[58]基于 winner II 的信道模型,研究和比较了高铁环境下极化分集与空间分集的性能。

基于测量方法的 MIMO 信道建模主要有 2 种建模思路——基于几何簇结构的建模方法和基于相关矩阵的建模方法。经典信道探测设备构建 MIMO 信道模型大多利用几何簇结构的建模方法,然而,在高速移动条件下较难获取精确信道角度域特征。标准的信道探测仪 Propsound 和 RUSK,均采用多天线阵列获取信道空间域冲击响应,同时,为保证激励信号在不同子信道测量时的正交性,该类设备均采用时分复用(TDM, time division multiplexing)的信号收发机制^[28,31],其前提条件是系统循扫一周内,信道须保持静止。

高速移动条件下, 由于信道处于快衰落状态, 因此这个条件很难满足。所以, 采用传统测量手段获取移动条件下的角度信息, 其精度是无法保证的。有效获取高铁信道空间域衰落特征, 有 2 种可行的方法: a) 基于相关矩阵的建模方法, 发射端发射正交序列 (如文献[22]中采用多天线 LTE 系统作为激励信号源), 接收端同时接收获取激励信号, 避免 TDM 轮循时延导致信道的变化, 利用 Kronecker 积方式构建时变 MIMO 信道衰落特征; b) 采用 SISO 配置条件下测量得到的信道参数信息, 经过相关变换 (如利用压缩感知技术处理单天线的测量结果, 试图恢复出一定条件下多天线的信道参数), 或约束条件 (如单天线高速移动测量, 可在特定场景恢复出线性天线阵列条件下的空间多天线衰落特征) 等, 获取一定条件下多天线的空间衰落特征。

2) 小区重叠区域无线信道特征

为了降低高铁频繁的小区切换次数, 一般采用基带处理单元 (BBU, base band unit) + 远端射频单元 (RRU, remote radio unit) 的配置来覆盖带状的高铁小区, 但是这种无线覆盖方式会引入新的问题: 在隶属于同一个 BBU 的 2 个 RRU 覆盖小区的重叠部分, 接收端将会同时收到来自于 2 个 RRU 发来的同源信号, 这 2 个信号多普勒频偏相反, 信号功率大小近似相等。因此, 小区重叠区信道的时间色散和时变特征值得深入研究^[59]。

3) 高铁信道非平稳特征

经典的无线信道模型构建, 前提条件是假设信道是广义平稳非相关散射 (WSSUS), 即满足: a) 时变信道系数的一阶和二阶统计量是常数, 自相关函数仅和样本间隔有关; b) 时变信道不同径的强度和时变特征不相关。然而对于实际高铁信道环境, 特别是高速移动条件下的无线信道并不满足 WSSUS 的条件, 主要原因在于: a) 时间传递函数 (time transform function) 并不是平稳随机过程: 路损, 阴影衰落, 移动场景的变化导致信道的非平稳特性; b) 在实际场景中, 一方面, 不同多径可能来自于同一反射体, 另一方面收发端频域或时频域的泄露, 造成多径功率和多普勒特征存在相关性, 导致扩展函数 (spread function) 是“非白”过程。此外, 高速移动带来周围反射物散射物的急剧变化, 在空间距离较大时, 会导致传播信道中多径的数目发生变化; 空间范围较

小时, 会导致信道中某些多径分量“时有时无”, 因此, 可以根据高铁信道时变特征, 基于实测数据分析其平稳区间^[60], 确定平稳界; 然后, 可以基于随机马尔科夫过程研究多径数目的变化和确定多径的生灭变化^[61]。

7 结束语

综上所述, 高铁无线信道特征的研究, 是具有明确应用背景和相当研究难度的问题。一方面, 已开展的测量活动和基于理论的分析研究方法, 目前尚不能完全满足实际通信系统链路级仿真和样机优化的需求。另一方面, 在高铁 SISO 场景已取得相应进展的情况下, 高铁 MIMO 信道衰落特性、高铁 3D MIMO 的可行性研究、小区重叠区域无线信道特征和高铁信道非平稳特征, 将是高铁无线信道研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 维基百科. 中国高速铁路 [EB/OL]. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E9%AB%98%E9%80%9F%E9%93%81%E8%B7%AF>, 2013. WIKIPEDIA. High-speed rail in China [EB/OL]. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E9%AB%98%E9%80%9F%E9%93%81%E8%B7%AF>, 2013.
- [2] ZHOU Y Q, PAN Z G, HU J L, *et al.* Broadband wireless communications on high speed trains [A]. Proc of 20th Annual Wireless and Optical Communications Conf (WOCC) [C]. Newark, US, 2011. 1-6.
- [3] 刘留. 高速移动条件下宽带无线接入关键技术的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010. LIU L. Research on the Key Technologies of Broadband Wireless Access in High Speed Scenario [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [4] ROCHE G D L, GLAZUNOV A A, ALLEN B. LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks Channel Modelling and Propagation [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2013.
- [5] LIU L, TAO C, QIU J, *et al.* Position-based modeling for wireless channel on high-speed railway under a viaduct at 2.35 GHz [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 834-845.
- [6] PEKKA K. WINNER II Channel Models part II Radio Channel Measurement and Analysis Results [S]. 2007.
- [7] ROOPE P, PEKKA K. Results of high speed train channel measurements [A]. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research [C]. Lille, 2008.

- [8] Sencity Rail Antenna: 1399.17.0039 HUBER+SUHNER Data Sheet[S]. 2010.
- [9] 刘留, 陶成, 邱佳慧等. 高速铁路平原场景无线信道小尺度衰落特征的研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(5):11-17.
LIU L, TAO C, QIU J H, *et al.* Research on small-scale fading characteristics of wireless channels in rural area of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(5):11-17.
- [10] ZHOU T, TAO C, LIU L, *et al.* High-speed railway channel measurements and characterizations: a review[J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(4): 199-205.
- [11] SUN R, TAO C, LIU L, *et al.* Channel measurement and characterization for HSR U-shape groove scenarios at 2.35 GHz[A]. IEEE 78th Vehicular Technology Conference[C]. Las Vegas, USA, 2013. 1-5.
- [12] LUAN F Y, ZHANG Y, XIAO L M, *et al.* Fading characteristics of wireless channel on high-speed railway in hilly terrain scenario[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 2013: 1-9.
- [13] DONG W H, LIU G Y, YU L, *et al.* Channel properties of indoor part for high-speed train based on wideband channel measurement[A]. Proc 5th International Communications and Networking in China (CHINACOM)[C]. Beijing, China, 2010. 1-4.
- [14] KITA N, ITO T, YIMADA W, *et al.* Experimental study of path loss characteristics in high-speed train cars[A]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Charleston, SC, 2009. 1-4.
- [15] ITO T, KITA N, YIMADA W, *et al.* Study of propagation model and fading characteristics for wireless relay system between long-haul train cars[A]. Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)[C]. ROME, 2011. 2047-2051.
- [16] KITA N, ITO T, YIMADA W, *et al.* Experimental study of propagation characteristics for wireless communications in high-speed train cars[A]. Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation[C]. Berlin, 2009. 897-901.
- [17] 王惠生. 900 MHz 频段电波在山区隧道的覆盖特性和应用设计[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 94-98.
WANG H S. Coverage characteristics and application design of 900 MHz frequency band in mountain tunnels[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 94-98.
- [18] 蔺伟, 沈京川, 李辉等. 高速铁路电波小尺度衰落特性分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(3): 97-102.
LIN W, SHEN J C, LI H, *et al.* Radio small-scale fading around high-speed railway[J]. China Railway Science, 2004, 25(3): 97-102.
- [19] 李轶华. GSM-R 无线信道模型分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
LI Y H. Wireless Channel Model Analysis for GSM-R System[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2007.
- [20] CHUNG Y Y, CHIEN P L, TSENG M C, *et al.* An OFDM-based channel sounder system[A]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI'09)[C]. Charleston, SC, 2009. 1-4
- [21] 闻映红, 崔勇, 张晓燕. 高速铁路 CTCS-3 级列控系统无线信道电波传播特性研究[J]. 铁道通信信号, 2010, 46(9): 1-4.
WEN Y H, CUI Y, ZHANG X Y. The propagation characteristics of wireless radio for CTCS-3 system in high-speed railway scenarios[J]. Railway Signaling and Communication, 2010, 46(9): 1-4.
- [22] LIU L, TAO C, ZHOU T, *et al.* A highly efficient channel sounding method based on cellular communications for high-speed railway scenarios[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012:1-16.
- [23] GAO L Y, ZHONG Z D, AI B, *et al.* Estimation of the Ricean K factor in the high speed railway scenarios[A]. Proc 5th International Communications and Networking in China(CHINACOM)[C]. Beijing, China, 2010. 1-5.
- [24] HONG E, ZHONG Z D, GUAN K, *et al.* Path loss models in viaduct and plain scenarios of the High-speed Railway[A]. Proc 5th International Communications and Networking in China(CHINACOM)[C]. Beijing, China, 2010. 1-5.
- [25] HE R S, ZHONG Z D, AI B, *et al.* An empirical path loss model and fading analysis for high-speed railway viaduct scenarios[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 808-812.
- [26] HE R S, ZHONG Z D, AI B, *et al.* Propagation measurements and analysis for high-speed railway cutting scenario[J]. Electronics Letters, 2011, 47(21): 1167-1168.
- [27] HE R S, ZHONG Z D, AI B, *et al.* Measurements and analysis of propagation channels in high-speed railway viaducts[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 794-805.
- [28] 刘留, 陶成, 邱佳慧等. 高速铁路宽带无线信道测量方法研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(5): 48-53.
LIU L, TAO C, QIU J H, *et al.* Research on broadband wireless channel sounding methods for high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(5): 48-53.
- [29] 周涛, 刘留, 陶成等. 基于WCDMA的高铁宽带无线信道测量方法研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(10): 55-60.
ZHOU T, LIU L, TAO C, *et al.* Research on broadband wireless channel sounding methods for high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 55-60.
- [30] QIU J H, TAO C, LIU L, *et al.* Broadband channel measurement for the high-speed railway based on WCDMA[A]. 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)[C]. Yokohama, 2012.

- 1-5.
- [31] 胡诗维. 基于测量的宽带 MIMO 信道建模研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- HU S W. Broadband MIMO Channel Modeling Research Based on Radio Channel Measurement[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [32] SIMENS. High Speed Environment Channel Models[S]. 2005.
- [33] NTT DOCOMO. Discussion on AFC Problem Under High Speed Train Environment[S]. 2006.
- [34] 3GPP Technical Report 25.104, V8.9.0 Release 8. 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (FDD)[R]. 2009.
- [35] LU J H, ZHU G, AI B. Radio propagation measurements and modeling in railway viaduct area[A]. Proc 6th International Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM) Conference[C]. Chengdu, China, 2010. 1-5.
- [36] HE R S, ZHONG Z D, AI B. Path loss measurements and analysis for high-speed railway viaduct scene[A]. Proc the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC) Conference[C]. New York, USA, 2010, 266-270.
- [37] LU J H, ZHU G, BRISO-BODRIGUEZ G. Fading characteristics in the railway terrain cuttings[A]. Proc IEEE 73rd Vehicular Technology Conf. (VTC Spring)[C]. Yokohama, 2011. 1-5.
- [38] GUO Y L, ZHANG J H, TAO C, *et al.* Propagation characteristics of wideband high-speed railway channel in viaduct scenario at 2.35 GHz[J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(4): 206-212.
- [39] 陶成, 刘留, 邱佳慧等. 高速铁路宽带无线接入系统架构与关键技术[J]. 电信科学, 2010, 6: 95-101.
- TAO C, LIU L, QIU J H, *et al.* Architecture and key techniques of broadband wireless access system for high speed railway[J]. Telecommunications Science, 2010, 6: 95-101.
- [40] GUDMUNDSON M. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems[J]. Electronics Letters, 1999, 27(23): 2145-2146.
- [41] GUO Y, ZHANG J, TAO C, *et al.* Propagation characteristics of wideband high-speed railway channel in viaduct scenario at 2.35 GHz[J]. Journal of Modern Transportation. 2012, 20(4): 206-212.
- [42] 董伟辉, 张建华, 刘留. 高铁信道测量和建模—高架桥和 U 形槽场景[R]. 2012.
- DONG W H, ZHANG J H, LIU L. Chanel Measurement and Characterization-Viaduct and U- Shape Cutting[R]. 2012.
- [43] PÄTZOLD M. Mobile Radio Channel (Second Edition)[M]. England: John Wiley, 2011.
- [44] BARGER J A, KAVEH M. A parametric model for the distribution of the angle of arrival and the associated correlation function and power spectrum at the mobile station[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(3): 425-434.
- [45] CICHON D J, ZWICK T, WIESBECK W. Radio link simulations in highspeed railway tunnels[A]. Proc Ninth International Antennas and Propagation Conference[C]. Eindhoven, 1995. 216-219.
- [46] CICHON D J, ZWICK T, WIESBECK W. Ray optical modeling of wireless communications in highspeed railway tunnels[A]. IEEE 46th Vehicular Technology Conference[C]. Atlanta, 1996. 546-550.
- [47] SANDRA K, THOMAS F, WERNER W. Ray-tracing for mobile communications[A]. Proceeding of WFMN 2007[C]. Chemnitz, 2007. 10-15.
- [48] KNORZER S, BALDAUF M A, FUGEN T, *et al.* Channel modelling for an OFDM train communications system including different antenna types[A]. 2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference (VTC-2006 Fall)[C]. Montreal, Que, 2006. 1-5.
- [49] MOLISH F, KUCHAR A, LAURILA J, *et al.* Geometry-based directional model for mobile radio channels-principles and implementation[J]. European Transactions on Telecommunications, 2003, 14(4): 351-359.
- [50] PEDERSRN T, FLEURY B. Radio channel modelling using stochastic propagation graphs[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC '07)[C]. Glasgow, 2007. 2733-2738.
- [51] GHAZAL A, WANG C X, HAAS H, *et al.* A non-stationary MIMO channel model for high speed train communication systems[A]. 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)[C]. Yokohama, 2012. 1-5.
- [52] GHAZAL A, WANG C X, HAAS H, *et al.* A non-stationary geometry-based stochastic model for MIMO high-speed train channels[A]. 2012 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)[C]. 2012. 7-11.
- [53] CHEN B H, ZHONG Z D. Geometry-based stochastic modeling for MIMO channel in high-speed mobile scenario[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012, 2012: 1-6.
- [54] TIAN L, YIN X F, ZUO Q, *et al.* Channel simulation and modeling based on the propagation-graph theory for high-speed railway scenarios[A]. IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC 2012)[C]. Sydney, 2012. 1746-1750.
- [55] CHENG W P, TAO C, LIU L, *et al.* Geometrical channel characterization for high speed railway environments using propagation graphs methods[A]. The 16th International Conference on Advanced Com-

munication Technology (ICACT2014)[C]. KOKEA, 2014. 1-5.

- [56] 熊磊, 钟章队, 钱金龙. 高速铁路环境下多输入多输出信道容量分析[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(1): 108-113.
XIONG L, ZHONG Z D, QIAN J L. The capacity analysis of MIMO channel in high-speed railway environment[J]. China Railway Science, 2013, 34(1): 108-113.
- [57] 罗万团, 方旭明, 程梦等. 高速列车车载多天线系统传输方案及容量分析[J]. 通信学报, 2013, 34(3): 90-98.
LUO W T, FANG X M, CHENG M, *et al.* Transmission scheme and capacity analysis of onboard multi-antenna system in high-speed train[J]. Journal on Communications, 2013, 34(3): 90-98.
- [58] 孙溶辰, 陶成, 刘留等. 基于 WINNER II 模型的高铁环境下极化分集与空间分集性能研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(2): 1-6.
SUN R C, TAO C, LIU L, *et al.* Performance research on spatial and polarization diversity in high-speed rail scenarios based on WINNER II channel model[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(2): 1-6.
- [59] 刘留, 陶成, 余立等. 高速铁路无线信道测量与信道模型探讨[J]. 电信科学, 2011, 27(5): 54-60.
LIU L, TAO C, YU L, *et al.* Discussion on the channel measurement and channel model under high speed railway environment[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(5): 54-60.
- [60] CHEN B H, ZHONG Z D, AI B. Stationarity intervals of time-variant channel in high speed railway scenario[J]. China Communications, 2012, 9(8): 64-70.
- [61] LIU L, TAO C, QIU J, *et al.* The dynamic evolution of multipath components in high-speed railway in viaduct scenarios: from the birth-death process point of view[A]. IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2012)[C]. Sydney, 2012. 1-5.

作者简介:



刘留 (1981-), 男, 云南昆明人, 博士, 北京交通大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为高铁无线信道测量与建模、高铁宽带接入物理层关键技术。



陶成 (1963-), 男, 山西侯马人, 博士, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为时变信道物理层信号处理、高铁无线通信系统关键技术、多用户检测技术。



陈后金 (1965-), 男, 安徽当涂人, 博士, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数字信号处理、数字图像处理、生物医学信号与图像处理、复杂系统建模与仿真。

周涛 (1988-), 男, 江西南昌人, 北京交通大学博士生, 主要研究方向为高铁无线信道测量方法学研究、高铁信道测量建模技术。

孙溶辰 (1988-), 男, 黑龙江鸡西人, 北京交通大学博士生, 主要研究方向为隧道空间信道建模技术。

邱佳慧 (1985-), 女, 山东高密人, 北京交通大学博士生, 主要研究方向为高铁信道测量与建模、时变信道物理层信号处理技术。