

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.1207

高铁场景下 5G-R 大尺度衰落特性研究

宋宗莹¹, 袁张付², 苏璇², 王兴中¹, 王国英^{3*}, 王凯⁴, 苏昭阳⁴, 刘留⁴

(1.中国神华能源股份有限公司, 北京 100011; 2.国能数智科技开发(北京)有限公司, 北京 100011;
3.北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100073; 4.北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 当前我国铁路通信系统正在从传统 GSM-R 迈向 5G-R 网络制式, 高铁环境下的无线信道特性研究是高铁通信系统设计的基础, 尤其是大尺度衰落的预测对轨旁基站的部署起着至关重要的作用。首先分析了高铁环境下的通信特点, 总结了 3 种常见的高铁运行场景, 即高架桥、路堑、隧道。在此基础上, 进一步分析了目前已有的轨道交通制式及其相应的工作频段。随后分析了目前基于实测以及多种标准下的大尺度衰落模型, 并研究了典型高铁场景(高架桥以及路堑)下 GSM-R 与 5G-R 频段下的大尺度衰落特性。仿真结果表明, 5G-R 频段下路径损耗更高, 这对于优化 5G-R 基站部署有着重要意义。

关键词: 高速铁路; 无线信道; 信道建模; 大尺度衰落; 5G-R; 路径损耗

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132(2025)04-0040-09

近年来, 我国高速铁路发展迅速, 已经建成了设计时速在 $200\sim 350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的客运专线网络。截至 2023 年底, 全国铁路营业里程达到 15.9 万 km, 其中高铁 4.5 万 km, 我国成为世界上高速铁路里程最长的国家之一。2020 年 8 月出台的《新时代交通强国铁路先行规划纲要》中指出铁路是国家战略性、先导性、关键性重大基础设施, 在交通强国建设中应当好先行者。当前以“八纵八横”为主框架的高速铁路网正在不断完善, 展望到 2030 年基本实现内外互联互通、区际多路畅通、省会高铁连通、地市快速通达、县域基本覆盖^[1]。

随着经济迅猛发展和物流需求日益增长, 铁路运输量持续攀升, 对通信系统的要求也日益提高。鉴于高铁运行环境的独特性, 包括高速移动、复杂地形地貌以及多变的电磁环境等, 对高铁无线信道的精准认知成为了高铁车地通信系统研究的关键之一。因此, 深入研究高铁无线信道的特性, 不仅是提升铁路通信系统性能的关键, 也是推动高铁通信技术发展的必要条件, 对于保障高铁通信系统的

性能稳定性和可靠性具有重要意义^[2]。高铁运行的独特环境使其无线信道具有以下特点:

(1) 传播场景丰富。高铁在运行过程中会经过城市、郊区、高架桥、隧道、路堑等多种不同场景, 不同场景之间环境特点差异大, 因而其无线信道传播特性也有明显不同。

(2) 多普勒频偏大、多普勒变化快。高铁运行速度快, 导致多普勒频偏大, 信道呈现快速时变性。这种快速时变性使得沿线的基站信号接收不稳定, 并可能导致多普勒分集和多径效应引起的传输信号衰落。

(3) 穿透损耗严重。高铁车厢以全封闭构造、金属材质车体和厚重车窗玻璃为特点, 这些特性在保障乘客舒适与安全的同时, 也给无线信号的穿透带来了极大挑战, 车厢内无线信号覆盖难度大增。

近些年来, 针对高铁无线通信领域已经开展了大量无线信道测量与建模工作。一些关于高速铁路环境中特殊场景(如高架桥、路堑、隧道等)的问题已经被广泛讨论。其中, 最为普遍的是高架桥场

收稿日期: 2024-12-17

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 中国神华能源公司科研项目(GJNY-22-7/2300-K1220053)

第一作者: 宋宗莹, 正高级工程师, 主要研究方向为智慧铁路。E-mail: 10000322@ceic.com

*通信作者: 王国英, 高级工程师, 主要研究方向为铁路信号。E-mail: wangguoying@crscd.com.cn

景,例如,在我国青藏铁路的建设中大量采用了以桥代路的方式来解决冻土问题;在京沪高速铁路线路中,高架桥场景更是涵盖了高达70%的场景^[3]。文献[4]开展了2.35 GHz频段下高架桥场景基于位置的信道测量与建模工作,并建立了基于位置的统计信道模型来表征高铁信道;文献[5]开展了460 MHz频段下的铁路高架桥场景无线信道测试,并对无线信道的多普勒统计数据进行了表征;文献[6]在930 MHz频段下开展了广泛的高铁高架桥场景窄带信道测试,并对比分析了 K 因子模型。此外也对高铁隧道、路堑场景下的无线通信开展了广泛的研究:文献[7]建立一个基于几何结构的多输入多输出信道模型,以研究支持车载多阵列天线和隧道中部署多个RRU的大规模分布式MIMO系统;文献[8]研究了4 GHz频段下,3种常见高铁运行场景(路堑、高架桥、农村地区)下的无线信道统计特性;文献[9]提出通用的GBSM模型,研究了开放空间、高架桥和路堑场景中高铁无线信道的统计特性,并与实测数据进行了对比验证。上述测量工作大多基于已有的GSM-R系统。文献[10]开展了2.6 GHz频段下LTE-R系统在高架桥场景中的信道传播特性研究,构建了基于GBSM的信道模型。文献[11]开展了1.89 GHz与2.6 GHz频段下的北京至天津高铁LTE-R无线信道测量,测量结果涵盖了路径损耗、莱斯 K 因子、延迟扩展、单链路和多链路空间相关性。

2020年初,工信部与中国国家铁路集团决定采用2.1 GHz频段进行5G-R(5G for Railway)建设,这标志着我国铁路通信系统将从GSM-R进入5G-R时代。文献[12]研究了典型高铁场景(包括城市、农村和隧道)中5G毫米波段的信道特性,在隧道场景中进行了25.25 GHz频段500 MHz宽带测量。文献[13]提出了一种在5G毫米波段实现现实高铁信道的可行范式,并在26.5和40 GHz之间测量和估计材料的电磁和散射参数。然而上述研究主要关注于5G毫米波频段的无线信道传播特性,缺少对5G-R的2.1 GHz频段的相关信道特性研究。

为充分了解5G-R系统在典型高铁列车运行场景中的无线信道传播特性,本文选取了高铁运行中的两个典型场景:高架桥与路堑,基于实际测量结果,结合3GPP标准信道模型,对GSM-R、5G-R

频段下常见的高铁运行场景进行了无线信道大尺度衰落特性仿真分析,将实测数据与标准信道模型进行了对比,分析了5G-R与GSM-R场景的信道特性差异,得到了各场景与频段下最准确的信道模型以及基站部署规则,以期5G-R系统部署提供可靠的参考。

1 高速铁路无线通信技术

1.1 常见高铁运行场景

典型高铁运行场景主要包括:高架桥、隧道、路堑、车站、城区以及郊区等,其中前3种场景在高铁运营场景中占比极高^[14]。

(1)高架桥。高架桥是高铁中最常见的场景之一,高架桥占我国京沪高铁的70%以上。高架桥是一种高度为10~30 m的长桥状结构,承载着穿过山谷或其他不平地面的铁路。通常,高架桥发射天线比轨道表面高20~30 m,接收天线安装在高速列车的顶部。在这种情况下,很少有散射体高于高架桥,并且直接射线在无线电波传播方面占主导地位,这使得高架桥成为典型的视距(Line of Sight, LoS)传播场景。

(2)路堑。路堑是高铁环境中常见的场景,其便于高铁经过不平地面以及通过山丘等大型障碍物。路堑侧边通常覆盖植被和钢筋混凝土,以防沉降。我国路堑的路拱宽度大多为48~63 m,底部宽度为14~19 m^[15],深度通常为3~10 m。最常见的路堑是规则的深路堑,铁轨两侧的陡峭墙壁具有几乎相同的深度和坡度。在此情况下,接收天线大多低于路堑顶部,使得路堑内具有丰富的反射和散射,导致接收信号出现更多的多径分量。

(3)隧道。隧道是一种特殊的地下通道,尤其是在高铁环境中穿过山脉建造的隧道。高铁隧道的断面通常为拱形或半圆,高5~10 m,宽10~20 m,其长度大多在几公里到几十公里之间。通常,在高铁隧道的起点和终点放置两个主基站。根据隧道的长度,在隧道内放置几个子基站,安装在墙上。由于隧道的光滑墙壁和紧密结构,隧道内有丰富的反射和散射成分,引入了主导隧道内无线电波传播的波导效应。这种现象使得对隧道中无线信号的预测与其他传播场景完全不同。

由于一般在高铁隧道内多采用漏泄波导、漏泄

电缆等覆盖方式,故本文主要针对高架桥以及路堑这两种常见开阔地带下由无线自由波覆盖的高铁运行场景大尺度衰落特性开展分析。

1.2 现有轨道交通无线网络制式

当前,轨道交通车地无线通信主要采用以下网络制式:TETRA(陆地集群无线电)、GSM(全球移动通信系统)、WLAN(无线局域网)、LTE(长期演进)、38 GHz 系统、EUHT(Enhanced Ultra High Throughput)以及正在研发的 5G-R 制式,表 1 对上述通信技术的传输速率和工作频段进行了对比。

表 1 轨道交通无线制式对比

通信技术	下行/上行传输速率	工作频段/MHz
TETRA	28.8 bps/28.8 kbps	806~821, 851~866
GSM-R	172 kbps/172 kbps	885~889, 930~934
LTE-R	50 Mbps/10 Mbps	450, 800, 1 400
WLAN(CBTC)	12 Mbps/12 Mbps	2 400, 5 000
LTE-M	50 Mbps/10 Mbps	1 785~1 805
38 GHz 毫米波	8 Mbps/4 Mbps	37 100~38 500
EUHT	3.48 Gbps(峰值)	U 波段, 3 400~3 600
5G-R	50 Mbps	2 100

(1) TETRA 技术。TETRA 系统主要服务于城市轨道交通,初期集中于列车运行语音通信、列车调度指挥以及有轨电车自动定位系统等方面。例如,重庆轨道交通系统采用了 Dimetra 数字集群通信系统,为轻轨提供语音通信和数据服务^[16]。但受限于带宽,TETRA 无法支持大带宽业务。

(2) GSM-R/LTE-R。GSM-R 是专为铁路通信系统设计的无线标准,其主要目的是在铁路干线上传递列车调度指令和语音信息。GSM-R 带宽容量有限等缺点导致其无法承载大带宽的数据业务。朔黄重载铁路在 1.8 GHz 频段应用了全球首个 LTE-R 系统^[17]。

(3) WLAN。CBTC(基于通信的列车控制)系统采用了 WLAN 标准,然而 WLAN 并非为高移动场景专门设计的,其支持速度有限。相比之下,基于第 4 代移动通信系统的 LTE-M 系统则专为城市轨道交通环境打造^[18]。郑州和温州地铁正在构建 LTE-M 车地无线网络,以支持集群语音调度、乘客信息系统(PIS)及车载 CCTV 等业务^[19]。

(4) 38 GHz 毫米波技术。38 GHz 毫米波技术被应用于上海磁浮列车的车地通信,负责传输操作

控制、牵引磁轮角、诊断信息及旅客数据,同时为车辆与控制中心人员提供语音通信服务^[20]。

(5) EUHT。EUHT 技术已被认定为多个行业的国家标准,并已在轨道交通(广州地铁 6 号线)、高铁(京津城际 300 km/h 速度场景)开展测试验证和产业化应用^[21]。

(6) 5G-R。5G-R 系统上行速率理论上可以达到 50 Mbps,通过网络切片技术可实现铁路不同业务和部门共享 5G 网络资源,支持最高 500 km/h 的列车通信。5G-R 技术已在自动驾驶、远程医疗、智慧城市等多个领域得到应用。在铁路行业中,它主要承载列车控制、指挥调度通信等核心业务,是保障铁路行车安全、顺畅的关键性基础设施。

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中强调要加快我国 5G 网络规模化部署,并推广千兆光纤网络升级。根据规划,我国在 2024 年正式启动 5G-R 规模建设,标志着 5G-R 技术在中国铁路行业中得到了实质性的推进。目前,工信部已批准中国国家铁路集团使用 2.1 GHz 频段进行 5G-R 的外场技术试验。

2 无线信道大尺度衰落理论

2.1 路径损耗

当收发机之间无障碍物遮挡时,一般使用自由空间路径损耗预测信号衰减的强度。自由空间路径损耗的计算参考 Friis 公式:

$$P_{RX}(d) = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

式中: P_{RX} 为接收信号功率; P_{TX} 为发射信号功率; G_{TX} 与 G_{RX} 分别为发射天线与接收天线的增益; λ 为信号波长; d 为收发机间隔。当收发天线无增益,即 $G_{TX} = G_{RX} = 1$ 时,可将上式简化为

$$L_p(d) = 20 \lg(4\pi d / \lambda) \quad (2)$$

式中: L_p 为路径损耗, dB。需要注意的是, Friis 公式仅适用于天线远场场景,发送天线与接收天线之间间隔至少一个瑞利距离,瑞利距离 d_R 可以表示为

$$d_R = 2L_a^2 / \lambda \quad (3)$$

式中: L_a 为天线的最大尺寸,且要求传播距离 d 远大于 λ 与 L_a 。

然而,式(2)只适用于自由空间传播场景,实际传播环境无法达到真空条件,且存在各种障碍物的影响,因此需要使用一种扩展的路径损耗计算方法,即对数距离路径损耗模型,可以表示为

$$L_p(d) = L_p(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + \chi \quad (4)$$

式中: d_0 为参考距离; n 为路径损耗指数; χ 为阴影衰落。 d_0 随不同的传播环境而变化,一般而言,在半径大于 10 km 的小区中,将 d_0 设置为 1 km,在半径为 1 km 或更小的小区中,将 d_0 设置为 100 m 或 1 m。路径损耗指数 n 同样与传播环境相关,取值范围一般为 2~6,且传播环境越复杂, n 越大。一些典型场景下 n 的取值见表 2。

表 2 典型场景路径损耗指数

环境	n	环境	n
自由空间	2	室内视距	1.6~1.8
城市蜂窝	2.7~3.5	室内阴影	4~6
城市蜂窝阴影	3~5		

2.2 阴影衰落

阴影衰落由发射机与接收机之间的障碍物遮挡产生,反映为中等范围内数百波长量级接收功率的均值变化。由于不同障碍物的位置、大小、介电特性等均不同,且信号在传播过程中受到哪些障碍物影响是未知的,因此阴影衰落一般是一个随机变化的值,常使用统计模型来进行描述。最常用的描述阴影衰落的统计模型为对数正态阴影模型,可用于对室内与室外的阴影衰落进行建模。对数正态阴影模型可表示为

$$p(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi_{dB}}} \exp \left[-\frac{(\psi - \mu_{\psi_{dB}})^2}{2\sigma_{\psi_{dB}}^2} \right], \quad \psi > 0 \quad (5)$$

式中: ψ 为发射功率与接收功率的比值; $\mu_{\psi_{dB}}$ 与 $\sigma_{\psi_{dB}}^2$ 分别为 ψ 在对数形式表示下的均值与方差。一般为了简单起见,常将阴影衰落的均值与路径损耗合并考虑,由此将 $\mu_{\psi_{dB}}$ 设为 0,即阴影衰落服从 0 均值的对数正态分布。 $\sigma_{\psi_{dB}}$ 则与传播环境和频率相关,一般在障碍物较多的场景中, $\sigma_{\psi_{dB}}$ 可达 4~10 dB,而在障碍物较少的场景中, $\sigma_{\psi_{dB}}$ 为 2~4 dB。

2.3 常见标准大尺度衰落模型

常见的标准大尺度衰落模型包括 Okumura-Hata 模型、COST 231 Walfisch Ikegami 模型、

WINNER II模型以及 3GPP TR 38.901 模型。

2.3.1 Okumura-Hata 模型

Okumura-Hata 模型可以应用于城区、开阔地带、郊区等多种环境,是应用最为广泛的大尺度衰落模型之一^[22],其预测表达式为

$$L_p = 69.55 + 26.16 \lg f_c - 13.82 \lg h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg d \quad (6)$$

式中: f_c 为载波频率, MHz; h_b 与 h_m 分别为基站与移动台的高度, m; a 为修正因子; d 为基站与移动台之间的距离, km。各参数取值范围见表 3。

表 3 Okumura-Hata 模型各参数取值范围

参数	取值范围	参数	取值范围
f_c /MHz	150~1 500	h_m /m	1~10
h_b /m	30~200	d /km	1~35

为了扩展模型应用场景, Okumura-Hata 模型引入了接收端天线高度修正因子 $a(h_m)$, 对于不同场景,修正因子及模型的修正方法如下:

(1) 中小城市

$$a(h_m) = (1.1 \lg f_c - 0.7) h_m - (1.56 \lg f_c - 0.8) \quad (7)$$

(2) 大型城市

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29 \lg^2(1.54 h_m) - 1.1, & f_c \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2 \lg^2(11.75 h_m) - 4.97, & f_c \geq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (8)$$

(3) 郊区地带

$$L_p = L_{p,urban} - 2 \lg^2(f_c / 28) - 5.4 \quad (9)$$

(4) 开阔地带

$$L_p = L_{p,urban} - 4.78 \lg^2 f_c + 18.33 \lg f_c - 40.94 \quad (10)$$

由以上分析可知, Okumura-Hata 模型具有广泛的应用场景,在铁路通信中,可以依据场景使用修正后的模型估计大尺度衰落。

2.3.2 COST 231 Walfisch Ikegami 模型

COST 231 Walfisch Ikegami 模型主要用于城区宏小区与微小区环境的大尺度衰落。该模型考虑了自由空间路径损耗、沿传播路径的多屏损耗以及从最后一个屋顶边沿到移动台的衰减^[23]。

当只存在 LoS 路径时,基于该模型的大尺度衰落可表示为

$$L_p = 42.6 + 26 \lg d + 20 \lg f_c \quad (11)$$

当收发端传输路径为 NLoS 路径时,大尺度衰落可表示为

$$L_p = L_{p0} + L_{p1} + L_{p2} \quad (12)$$

式中: L_{p0} 为自由空间路径损耗; L_{p1} 为多屏损耗; L_{p2} 为屋顶到移动台的绕射和散射损耗。

L_{p1} 的计算方法为

$$L_{p1} = \begin{cases} -18\lg(1+h_t-h_b)+k_a+k_d\lg d+ \\ k_f\lg f_c-9\lg b, h_t \geq h_b \\ k_a+k_d\lg d+k_f\lg f_c-9\lg b, h_t < h_b \end{cases} \quad (13)$$

式中: h_t 为发射端天线高度; h_b 为建筑物平均高度; d 为收发端水平距离; b 为相邻建筑物距离; k_a 为基站天线低于附近建筑物高度时的修正因子,

$$k_a = \begin{cases} 54, h_t \geq h_b \\ 54-0.8(h_t-h_b), h_t < h_b, d \geq 0.5 \text{ km} \\ 54-1.6d(h_t-h_b), h_t < h_b, d < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (14)$$

k_d 为与距离相关的多屏损耗,

$$k_d = \begin{cases} 18, h_t \geq h_b \\ 18-15(h_t-h_b)/h_b, h_t < h_b \end{cases} \quad (15)$$

k_f 为与频率相关的多屏损耗,

$$k_f = \begin{cases} -4+0.7\left(\frac{f_c}{925}-1\right), \text{中等城市、郊区} \\ -4+1.5\left(\frac{f_c}{925}-1\right), \text{大型城市} \end{cases} \quad (16)$$

L_{p2} 的计算方法为

$$L_{p2} = \begin{cases} -26.9-10\lg \omega+10\lg f_c+20\lg(h_b-h_t)+ \\ 0.354\phi, 0 < \phi < 35^\circ \\ -14.4-10\lg \omega+10\lg f_c+20\lg(h_b-h_t)+ \\ 0.075(\phi-35^\circ), 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ -12.9-10\lg \omega+10\lg f_c+20\lg(h_b-h_t)- \\ 0.114(\phi-55^\circ), 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (17)$$

式中: ω 为接收机所在街道的宽度, m; h_t 为接收机天线高度; ϕ 为收发机连线与街道方向的夹角。

COST 231 Walfisch Ikegami 模型各参数的取值范围见表 4。

表 4 COST 231 Walfisch Ikegami 模型各参数取值范围

参数	取值范围	参数	取值范围
f_c/MHz	800~2 000	h_t/m	1~3
h_t/m	4~50	d/km	0.02~5

2.3.3 WINNER II模型

WINNER II模型^[24]的频率适用范围为 2~6 GHz, 可用于郊区宏小区、城市宏小区、乡村宏小区等 17 种场景, 且支持高速移动场景。适用于铁路通信场景的为 WINNER II D2a 模型, 该模型特点如下:

- (1) 传播路径为 LoS 路径;
- (2) 支持列车移动速度为 0~350 km·h⁻¹;
- (3) 基站距离轨道 50 m, 天线高度为 30 m, 或距离轨道 2 m, 天线高度为 5 m;
- (4) 列车天线高度为 2.5 m;
- (5) 基站间隔为 1~2 km。

WINNER II模型的通用大尺度衰落表达式为

$$L_p = A\lg d + B + C\lg(f_c/5) + X \quad (18)$$

式中: A 为路径损耗指数; B 为截距; C 为频率相关因子; X 为服从均值 0、标准差 σ 的对数正态分布的阴影衰落; d 为传播距离, m; f_c 为载波频率, GHz。根据 d 是否大于参考距离 d_0 , WINNER II D2a 模型的表达式为

- (1) 10 m < d < d_0 时,

$$L_p = 21.5\lg d + 44.2 + 20\lg(f_c/5) + N(0,4) \quad (19)$$

- (2) $d_0 \leq d < 10 \text{ km}$ 时,

$$L_p = 40\lg d + 10.5 + 1.5\lg(f_c/5) - 18.5\lg h_t h_r + N(0,6) \quad (20)$$

2.3.4 3GPP TR 38.901 模型

3GPP TR 38.901 模型为基于几何的随机信道模型, 适用频率范围为 0.5~100 GHz, 具有室内、城市宏蜂窝、城市微蜂窝、农村宏蜂窝(RMa) 4 类典型场景^[25]。铁路通信可以使用 RMa 场景的信道模型, 该场景参数见表 5。

表 5 3GPP TR 38.901 RMa 场景参数取值范围

参数	取值范围
f_c/GHz	0.5~100
h_t/m	10~150
h_r/m	1~10
h/m	5~50
$v_r/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	最高 500

与 WINNER II模型类似, RMa 场景的大尺度衰落估计同样需要根据收发端水平距离是否大于

参考点而采取不同的方法。但不同于 WINNER II 模型只考虑 2D 距离, 3GPP TR 38.901 模型还考虑了基站顶端到接收天线顶端的 3D 距离。大尺度衰落的计算方法为

$$(1) 10 \text{ m} \leq d_{2D} < d_0 \text{ 时},$$

$$L_{P1} = 20 \lg(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \times$$

$$\lg d_{3D} - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) +$$

$$0.002 \lg(h) d_{3D} + N(0, 4) \quad (21)$$

$$(2) d_0 \leq d_{2D} < 10 \text{ km 时},$$

$$L_{P2} = L_{P1}(d_0) + 40 \lg(d_{3D} / d_0) + N(0, 6) \quad (22)$$

式中: h 为传播路径上建筑物平均高度; d_0 为参考距离, 具体表达式为

$$d_0 = 2\pi h_t h_r f_c / c \quad (23)$$

d_{3D} 计算方法为

$$d_{3D} = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d_{2D}^2} \quad (24)$$

3 信道模型及仿真

本文选取了 GSM-R 与 5G-R 两种载波频段, 在高架桥与路堑两种铁路典型场景下对大尺度衰落进行了仿真。仿真选择了基于实测的经验模型、Okumura-Hata 模型、COST 231 模型以及 WINNER II 模型进行对比, 仿真参数见表 6。

表 6 仿真参数及取值

参数	取值
f_c / GHz	0.9 (GSM-R)、2.1 (5G-R)
h_t / m	12.8 (高架桥)、13.8 (路堑)
h_r / m	10 (高架桥)、3 (路堑)
d / m	10~2 000

对于基于实测的经验模型, 不同场景与频段的路径损耗指数和阴影衰落标准差的取值见表 7。

表 7 经验模型参数取值

场景	通信频段	n	σ
高架桥	GSM-R	$2.10^{[26-27]}$	$2.09^{[26-27]}$
	5G-R	$3.03^{[27]}$	$4.00^{[27]}$
路堑	GSM-R	$3.50^{[28]}$	$3.50^{[28]}$
	5G-R	$2.86^{[29]}$	$1.70^{[29]}$

图 1 对 GSM-R 通信频段下高架桥场景的路径损耗进行了仿真与对比, 从图中可以看出, 随着收发端距离的增加, 路径损耗也随之增加, 且在收发端距离为 1 000 m 之后基本在 100 dB 上下波动。由

实测数据模型与标准模型的对比可以看出, 在收发端距离大于 100 m 的范围内, COST 231 模型与实测数据较为吻合, 因此 COST 231 模型较适合描述 900 MHz 频段高架桥场景的路径损耗变化情况。

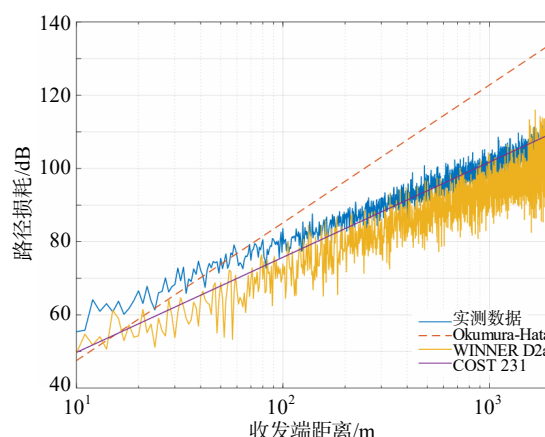


图 1 GSM-R 频段下高架桥场景路径损耗

图 2 描绘了 GSM-R 通信频段下路堑场景的路径损耗。从图中可以看出, 路径损耗随着收发端距离的增大而增大。当收发端距离大于 100 m 时, WINNER D2a 模型与实测数据拟合较好。当收发端距离大于 1 000 m 时, 路径损耗在 110 dB 上下波动, 大于高架桥场景。这是因为高架桥场景收发天线高度均高于路堑场景, 信号传播路径上几乎没有障碍物遮挡, 而路堑场景中接收端处于 U 型槽中, 地势较低, 信号较容易被遮挡, 且多径分量丰富, 因此路径损耗更高。

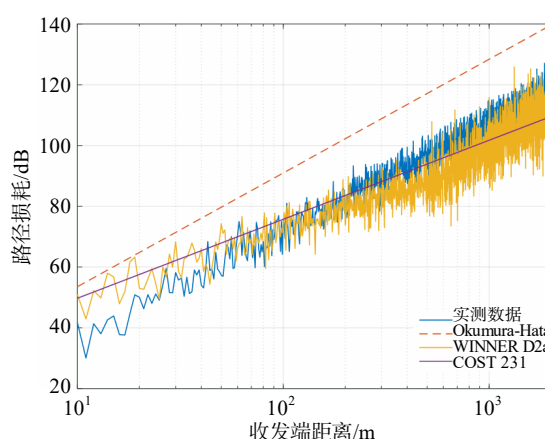


图 2 GSM-R 频段下路堑场景路径损耗

图 3 为 5G-R 通信频段下高架桥场景的路径损耗及各模型对比。可以看出在收发端距离大于 100 m 时, WINNER D2a 模型与实测数据较为接近, 可用于描述该场景的路径损耗变化情况, 且路径损

耗依然随着收发端距离增大而增大。此外,当收发端距离较大时,路径损耗相比图 1 中的数值更大,在 110 dB 上下波动。这是因为 5G-R 通信频段相比 GSM-R 更高,信号更容易受到传播过程中反散射的影响,其辐射导致的能量损失也更大,从而路径损耗也更大。

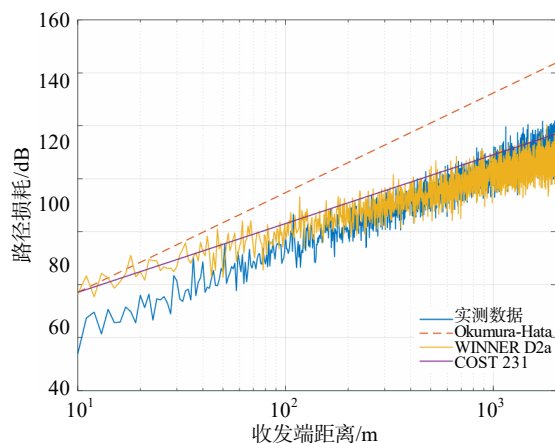


图 3 5G-R 频段下高架桥场景路径损耗

图 4 为 5G-R 通信频段下路堑场景的路径损耗及各模型对比。可以看出该场景下 COST 231 模型与实测数据拟合度更好,且路径损耗大于高架桥场景以及 GSM-R 通信频段下的路堑场景,这是因为该场景不仅频段更高,接收端还处于地势较低的 U 型槽中,导致更高频率的信号在更容易发生遮挡与反散射的环境内传播,产生了更大的路径损耗。

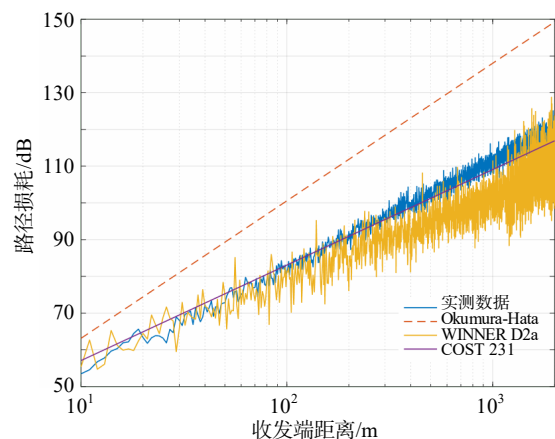


图 4 5G-R 频段下路堑场景路径损耗

图 5 对 2 种通信频段、2 种列车运行环境组成的 4 种场景路径损耗变化情况进行了对比,可以看出,随着收发端距离的增加,在 200 m 之内路径损耗快速增大,200 m 之后增加速度逐渐变缓,且在 1 600 m 之后基本保持稳定,仅有少量增加。此外,

随着频段的增加,相同运行环境的路径损耗也增加,而同频段下具有更丰富多径分量的路堑的路径损耗大于高架桥环境,导致了 5G-R 通信频段下路堑场景具有最大的路径损耗, GSM-R 通信频段下高架桥场景具有最小的路径损耗。

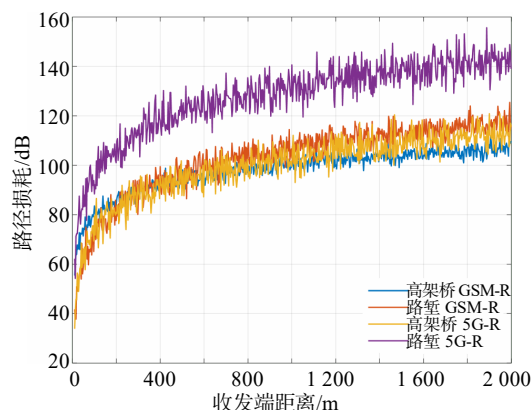


图 5 不同场景下路径损耗对比

综上所述,无论列车运行环境如何,5G-R 通信频段的路径损耗均大于 GSM-R 通信频段,因此在部署 5G-R 路侧基站时,应当比 GSM-R 基站更加密集,避免单一基站覆盖范围较大导致过大的路径损耗。此外还可以发现,除了路径损耗的频率相关性,路堑场景的路径损耗也大于高架桥场景,因此应当在关注频段对路径损耗的影响之外,针对不同列车运行环境做出优化,对路堑场景进一步减小 5G-R 路侧基站的部署间隔,保障通信信号的准确传输与列车的安全运行。在本文所设置的场景下,为了保障信号的覆盖,以信号衰减 90 dB 作为布设基站的标准,则对于衰减最严重的 5G-R 路堑场景,应当每隔 70 m 左右布设一个基站,而对于其余场景,可以选择每隔 400 m 左右布设一个基站。对于部分难以密集部署基站的路堑场景,也应当尽可能以不超过 200 m 的间隔部署基站,以对抗信号的快速衰减。

4 总结

随着 5G-R 频段的批复,我国高铁无线通信专网正在从传统 GSM-R 网络向 5G-R 转变。鉴于无线信道为影响无线通信系统最重要的因素之一,对不同载波频段与不同列车运行环境的信道特性进行研究具有重要意义。其中,大尺度衰落的预测对进行准确的链路预算发挥着重要作用。本文着眼于

现有各轨道交通无线网络制式的差异以及高铁列车典型运行场景,对 GSM-R 与 5G-R 通信频段下高架桥以及路堑场景的大尺度衰落进行了仿真,并将基于实测的经验性模型与多种标准大尺度模型进行对比。仿真结果表明,在任意一种列车运行场景下,具有更高频段的 5G-R 均具有更高的路径损耗,且路堑场景的路径损耗均大于高架桥场景。因此,在部署 5G-R 路侧基站时,基站间应当具有相比 GSM-R 基站更小的间距,并且需要针对路堑等富散射场景进一步优化基站部署间隔。

参考文献:

- [1] 国家铁路局. 中长期铁路网规划[EB/OL]. [2024-06-10]. https://www.nra.gov.cn/jglz/fgzd/gfwj/201607/t20160721_336768.shtml.
- [2] DE LA ROCHE G, GLAZUNOV A A, ALLEN B. LTE-advanced and next generation wireless networks: channel modelling and propagation[M]. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2013:4.
- [3] WEI H, ZHONG Z D, XIONG L, et al. Study on the shadow fading characteristic in viaduct scenario of the high-speed railway[C]//2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Harbin, 2011:1216-1220.
- [4] LIU L, TAO C, QIU J H, 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.
- [5] SONG Z Y, DING J W, WANG Y B, et al. Measurement-based Doppler analysis in viaduct scenarios for railway [C]//2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Zhuhai, 2021:1-3.
- [6] HE R S, ZHONG Z D, AI B, et al. Distance-dependent model of ricean K -factors in high-speed rail viaduct channel[C]//2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Quebec City, QC, Canada, 2012:1-5.
- [7] LU H P, LIU Y, WANG D M, et al. Channel modeling and performance analysis of massively distributed MIMO in high-speed rail tunnels[C]//2021 IEEE 21st International Conference on Communication Technology (ICCT). Tianjin, 2021:263-267.
- [8] LIU Y, ZHANG Y P, GHAZAL A, et al. Statistical properties of high-speed train wireless channels in different scenarios[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Nanjing, 2016:1-5.
- [9] GHAZAL A, WANG C X, LIU Y, et al. A generic non-stationary MIMO channel model for different high-speed train scenarios[C]//2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Shenzhen, 2015:1-6.
- [10] ZHAO R J, WU M Q, XIANG X, et al. Measurement and modeling of the LTE train-ground channel for high-speed railway in viaduct scenario[C]//2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Vancouver, BC, Canada, 2014:1-5.
- [11] ZHOU T, TAO C, SALOUS S, et al. LTE-based channel measurements for high-speed railway scenarios[C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, CA, USA, 2015:1-6.
- [12] HE D P, AI B, GUAN K, et al. Channel measurement, simulation, and analysis for high-speed railway communications in 5G millimeter-wave band[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2018, 19(10):3144-3158.
- [13] GUAN K, AI B, PENG B L, et al. Towards realistic high-speed train channels at 5G millimeter-wave band: Part I: paradigm, significance analysis, and scenario reconstruction[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 67(10):9112-9128.
- [14] AI B, HE R S, ZHONG Z D, et al. Radio wave propagation scene partitioning for high-speed rails[J]. International journal of antennas and propagation, 2012, 2012:815232.
- [15] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Propagation measurements and analysis for high-speed railway cutting scenario[J]. Electronics Letters, 2011, 47(21):1167-1168.
- [16] 陈皓, 王军, 陈瀚. TETRA 无线网络在地铁应用方面的规划方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2011(2):33-35.
- [17] 熊洁, 虞凯. TD-LTE 技术在朔黄重载铁路中的应用[J]. 铁路通信信号工程技术, 2015, 12(1):20-24.
- [18] TAO T, DAI K P, ZHANG Y B, et al. Field test results analysis in urban rail transit train ground communication systems of integrated service using LTE-M[C]//2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rio de Janeiro, Brazil, 2016:2017-2021.
- [19] 佚名. 中兴通讯与温州铁投集团联合举办 LTE 集群及智慧轨道发布会[J]. 电信网技术, 2016(9):77.
- [20] 汤丹. 浅析 38G 无线电系统在上海磁浮示范运营线中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(10):69-72.
- [21] WANG X X, JIANG H L, TANG T, et al. The QoS indicators analysis of integrated EUHT wireless communication system based on urban rail transit in

- high-speed scenario[J]. *Wireless communications and mobile computing*, 2018, 2018:1-9.
- [22] ARTHUR J K, AMARTEY A T, BROWN-ACQUAYE W. Adaptation of the Okumura-Hata model to the environment of Accra[C]//2019 International Conference on Communications, Signal Processing and Networks (ICCSPN). Accra, Ghana, 2019:1-6.
- [23] NIMAVAT V D, KULKARNI G R. Simulation and performance evaluation of GSM propagation channel under the urban, suburban and rural environments[C]//2012 International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT). Mumbai, India, 2012:1-5.
- [24] 王营. 3D MIMO 信道建模研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [25] RAPPAPORT T S, SUN S, SHAFI M. Investigation and comparison of 3GPP and NYUSIM channel models for 5G wireless communications[C]//2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Toronto, ON, Canada, 2017:1-5.
- [26] LU J H, ZHU G, AI B. Radio propagation measurements and modeling in railway viaduct area[C]//2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). Chengdu, China, IEEE, 2010:1-5.
- [27] HE R S, ZHONG Z D, AI B. Path loss measurements and analysis for high-speed railway viaduct scene[C]//Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Caen, France, 2010:266-270.
- [28] LU J H, ZHU G, BRISO-RODRIGUEZ C. Fading characteristics in the railway terrain cuttings[C]//2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Budapest, Hungary, 2011:1-5.
- [29] 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.

Research on large scale fading characteristics of 5G-R in high-speed rail scenarios

SONG Zongying¹, YUAN Zhangfu², SU Xuan², WANG Xingzhong¹, WANG Guoying³,
WANG Kai⁴, SU Zhaoyang⁴, LIU Liu⁴

(1.China Shenhua Energy Company Limited, Beijing 100011, China;

2.CHN Energy Digital Intelligence Technology Development (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100011, China;

3.Beijing National Railway Research & Design Institute of Signal & Communication Group Co., Ltd., Beijing 100073, China;

4.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Currently, the railway communication system in China is transitioning from traditional GSM-R to 5G-R network standards. The study of wireless channel characteristics in high-speed rail environments lays the foundation for high-speed rail communication system design, especially for the prediction of large-scale fading, which plays a crucial role in the deployment of trackside base stations. This paper first analyzes the characteristics of communication in high-speed rail environments and summarizes three common high-speed rail operation scenarios, namely viaduct, cutting, and tunnel. On this basis, further analysis is conducted on the existing railway communication systems and their corresponding operating frequency bands. Subsequently, the current large-scale fading models are analyzed, including those based on actual measurements and those with various standards. Based on these, the research on large-scale fading characteristics of GSM-R and 5G-R frequency bands in typical high-speed rail scenarios (viaduct and cutting) are eventually conducted. The simulation results show that there exists higher path loss in the 5G-R frequency band, which is of great significance for optimizing the deployment of 5G-R base stations.

Keywords: high-speed rail; wireless channel; channel modeling; large scale fading; 5G-R; path loss

(责任编辑 韩 超)