

文章编号: 2095-4980(2023)06-0801-08

面向高速铁路车站场景的多频段信道特性

陈四清¹, 李 凯²

(1.东南沿海铁路福建有限公司, 福建 福州 350013; 2.中国铁建电气化局集团有限公司, 北京 100043)

摘 要: 为助力我国铁路数字化转型升级, 需加快推进智能铁路的总体建设。以厦门北高铁车站为目标场景, 结合我国铁路实际, 采用射线跟踪(RT)技术对 932 MHz、2.1 GHz、41 GHz 和 93.2 GHz 4 个频段的铁路综合数字移动通信系统(GSM-R)、铁路 5G(5G-R)、毫米波通信系统 3 种制式的信道特性展开研究。依托高性能射线跟踪仿真, 精准刻画了不同频段下高铁车站场景的电波传播特性, 对多频段、多制式下的多维度信道特性进行比较和研究。结果表明, 电波频率越高, 无线信号覆盖范围越小; 且经由散射体产生的多径越少, 多径信号在时间域和空间域的色散程度越弱。本文研究基于高铁车站的应用场景, 为铁路专用移动通信系统的设计与改善提供了相应的理论依据、数据支持。

关键词: 铁路专用移动通信; 高铁车站; 射线跟踪; 多频段; 信道特性

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022212

Multi-band channel characterization for high-speed train station scenario

CHEN Siqing¹, LI Kai²

(1.Dongnan Coastal Railway Fujian Co., Ltd., Fuzhou Fujian 350013, China;

2.China Railway Construction Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: The overall construction of the intelligent railways should be promoted in order to facilitate the digital transformation of railways. Taking the Xiamen North Station as the scenario and combining with the actual situation of China's railways, the channel characteristics of Global System for Mobile Communications-Railway(GSM-R), 5G-Railway(5G-R) and millimeter wave communication systems based on high-performance ray tracing at the four frequency bands of 932 MHz, 2.1 GHz, 41 GHz and 84.25 GHz are studied. Relying on high-performance Ray Tracing(RT) simulation, the radio propagation characteristics of high-speed rail station scenarios under different frequency bands are accurately modeled, and then the multi-dimensional channel characteristics under multi-band multi-standard are compared and studied. The outcomes indicate that as the radio frequency increases, the wireless signal coverage becomes smaller. And the less the multipaths generated by scatterers, the weaker the dispersion of multipath signal will be in the time and space domains. The research can provide theoretical basis and data support for the design and optimization of the railway dedicated mobile communication system for the high-speed railway station scenario.

Keywords: railway dedicated mobile communication; high-speed railway station; ray tracing; multi-band; channel characteristics

2022 年, 我国铁路集团从铁路技术创新等方面竞相出台了多项“十四五”规划文件, 要求快速促进铁路的发展, 提升其智能化水平。文件中还指出: 应依托先进的技术设施、新基建, 为铁路的应用赋能, 实现铁路的智能化发展, 建立系统化网络、高度可靠、稳定运行的铁路系统等核心目标。在不久的将来, 智能化将成为各国铁路发展的必然趋势。

列车的安全运行离不开铁路专用移动通信系统的有力支持。铁路专用移动通信系统是决定铁路智能化发展

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-11-24

基金项目: 铁路 5G 专网标准体系架构与关键应用技术研究资助项目(P2021G012); 东郊环行铁道 5G 专用移动通信系统技术试验资助项目(SY2021G001)

的核心技术装备，作为一个中枢神经系统，不仅为乘客提供良好的信息服务，而且能提供保障列车稳定运行的运营维护服务^[1]。当前的铁路综合数字移动通信系统(GSM-R)可以承担应急通信等基本业务^[2]，正在研发的铁路5G-R专用移动通信系统有望满足视频和宽带业务需求。但智能铁路所要求的是带宽密集型应用，即高清视频的实时传输，空中接口的频谱带宽在数GHz到数十GHz之间，频谱需求与现有无线资源之间存在差距。拥有大带宽的毫米波通信系统成为解决上述问题的重要途径。

通信系统的设计与改善首要步骤是避免在信道特性参数上出现任何差错。近期，各国专家针对高铁的不同场景、频段，通过测量信道参数，分析建立模型。针对GSM-R，文献[3]在910 MHz频段下研究了高铁列车内部到达方位角(Angular of Arrival, AoA)与路径损耗(Path Loss, PL)的关系。针对5G-R，文献[4]在2.1 GHz频段下对高铁室内机房开展了信道测量工作，利用所采集数据对射线跟踪平台校准后，获取了路径损耗等多项信道参数；文献[5]基于2.6 GHz频段，对京津城际高铁无线环境中2个不同场景(平原、郊区)的信道小尺度衰落特点进行了研究。文献[6-7]基于高架桥、高铁车厢2种场景测量了毫米波通信系统，获得了角度域和能量域等多维度信道特性参数，并分析了参数之间的互相关特性。

当前针对高铁车站场景5G-R的信道特性研究较少，文献[8-9]仅研究了2.1 GHz频段下5G-R系统的信道特性。但利用2.1 GHz频率资源风险较大，且高频段基站间距小，需投入大量资金进行工程建设。欧洲铁路提出采用既有900 MHz重耕5G-R。但5G-R无法完全与“智慧铁路”愿景所提出的高速率、大带宽的要求保持同步，需利用毫米波通信系统摆脱现有桎梏。我国已规划37~42.5 GHz频段用于5G网络，工信部指出将在92~95 GHz等频段的使用计划中，对铁路运用需求进行全面考虑。目前，利用毫米波通信满足铁路场景需求研究主要集中在T2I信道^[10]，其相关数据研究无法沿用至半封闭式的信道上。

针对上述问题，本文对站台、立柱、雨篷、电力牵引架等高铁车站场景下常见的物理结构进行三维建模，并在4种频段下利用RT技术对高铁车站场景进行动态仿真，获得射线信息；之后，通过射线，对均方根时延(Root-Mean-Square Delay Spread, RMSDS)、角度扩展(Angular Spread, AS)等参数进行萃取分析。研究发现，利用RT技术可以对复杂的实际高铁车站中的电波传播特性进行多维度表征。电波频率越高，信号功率衰减越严重，覆盖范围越小，电波传播环境中的多径效应越弱。因此，在高频通信条件下，视距的重要性变得尤为突出。本文对多维度信道参数的萃取与分析，对于高铁车站场景无线覆盖和网络规划起到了较好的参考作用。

1 场景建模与仿真配置

通过建立三维模型，对高速铁路车站内的部分设施进行高度还原。为基于高铁的应用场景、不同材料赋予电磁参数^[6]，通过专项技术的使用，从不同的维度表征电波传播特点。

1.1 射线跟踪仿真平台

使用性能可靠的CloudRT^[11]，能够追踪计算多径信道下多种电磁波传播机理类型(直射、反射、散射、绕射、透射等)的射线信息，输出每条射线的幅、频、时、空、相和极化仿真数据。利用上述本征参数，可以进一步计算路径损耗等信道特点，也能对RMSDS、AS等不同维度的信道传播特点进行萃取分析^[12]。

1.2 三维场景建模

对高铁车站场景中常见的物体，如站台、电力牵引架、列车和柱子等，保留其重要细节进行三维建模。

图1为高精度的高铁车站场景模型及相关参数示意图， L_{st} 、 W_{st} 、 H_p 、 H_c 、 H_u 和 W_o 分别表示车站的长度、车站的宽度、站台的高度、电力牵引架的高度、立柱的高度和轨面的宽度，为场景本身的参数； H_T 、 L_{to} 、 H_R 、 L_n 和 L_f 分别为发射机(Transmitter, Tx)距地面高度、Tx距轨面距离、接收机(Receiver, Rx)距车头顶高度、Tx到Rx的最近距离和最远距离； H_l 和 W_l 分别表示列车的高度和宽度。各参数具体取值见表1。

表1 三维数字模型相关参数(单位:米)

Table1 3D digital model parameters values(unit:m)

L_{st}	W_{st}	H_p	H_c	H_u	W_o	H_T	L_{to}	H_R	L_n	L_f	H_l/W_l
870.55	441.74	1.00	5.00	19.00	30.75	0.15	51.58	24.26	225.92	1 188.74	4.49/3.55

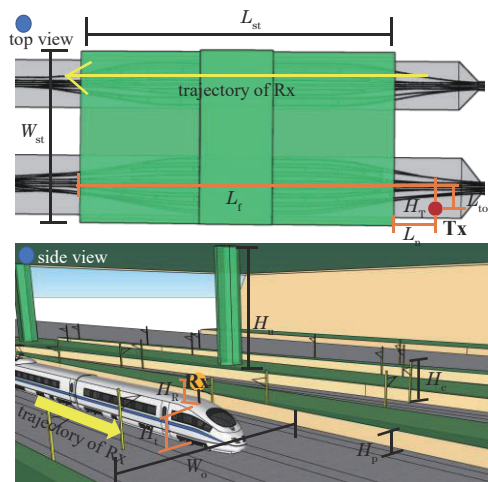


Fig.1 3D digital of the scenario and parameters
图1 三维场景及相关参数示意图

1.3 仿真链路配置

按照不同的频段制式，将仿真分为4种情况：Case 1的中心频率和带宽分别为932 MHz、4 MHz；Case 2的中心频率和带宽分别为2.1 GHz、4 MHz；Case 3的中心频率和带宽分别为41 GHz、20 MHz；Case 4的中心频率和带宽分别为93.2 GHz、500 MHz和2 GHz。本次仿真将垂直极化定向天线作为发射设备，垂直极化全向天线作为接收设备，二者的增益均为14.5 dBi。以实际高铁车站和高铁列车数据为参考，发射机位于车站外部高于地面45 m处，接收机位于列车车头，高于车辆顶部0.15 m处，高于地面4.64 m。本文研究直射、一阶反射、散射(散射模型采用方向性散射模型)和透射等传播机制下的信道特性。根据实际车站及列车设施赋值相应的电磁材料，与射线跟踪仿真平台材料参数库相匹配。图2为RT仿真中接收机位于车站内的一快照。为获得更好的视觉效果，参照3GPP38.901，信道结果筛选了比最强接收径功率小25 dB的多径信息。

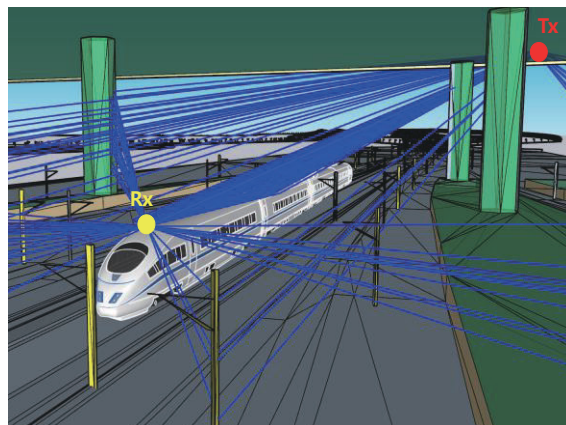


Fig.2 One snapshot of RT simulation
图2 RT仿真快照

由图2可以看出，高铁车站场景中的雨篷、立柱和电力牵引架等物体会阻挡视距传播，并带来大量的反射、反射多径，对信道的能量、时间、空间等多维度特性产生影响。

2 高铁车站场景信道特性研究

对高铁车站场景不同频段制式下的无线信道大尺度传播特性和时域、空域小尺度传播特点进行对比分析。

2.1 大尺度传播特性

为清晰地观察不同频段制式与传播特点的关系，在43 dBm的发射功率下，4种情况下高铁车站内的无线信号覆盖效果如图3所示。式(1)为RT中接收功率计算方法：

$$\begin{cases} P_R = 20 \times \lg \left| \sum_{j=1}^{N_f} h(\tau_j) \right| \\ h(\tau) = \text{IFFT}(H(f)) \end{cases} \quad (1)$$

式中： P_R 为Rx的接收功率； $h(\tau)$ 为由信道传递函数 $H(f)$ 经过傅里叶逆变换得到的信道冲激响应； N_f 为频点总数。

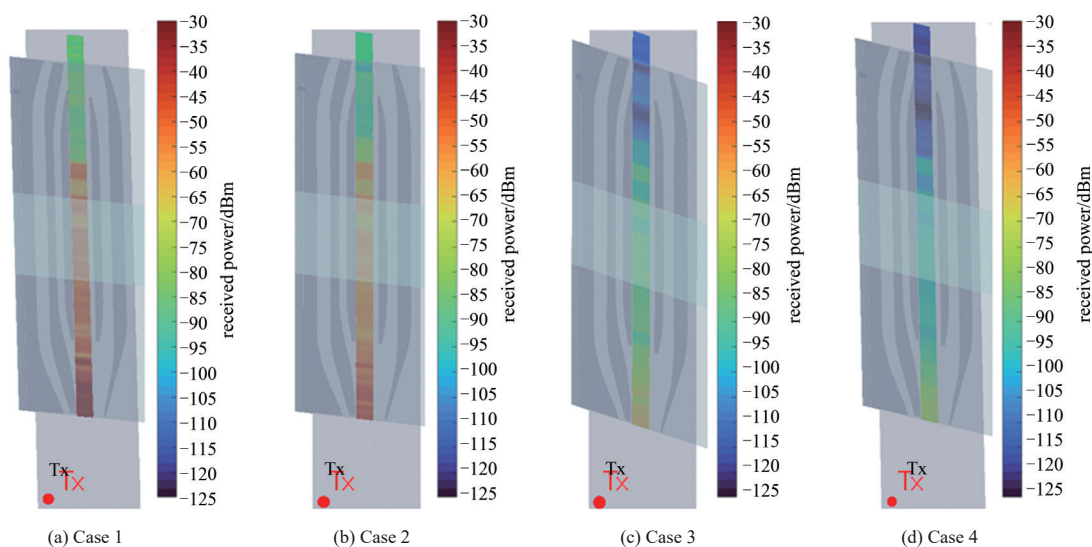


Fig.3 Effect of wireless signal coverage
图3 无线信号覆盖效果

由图 3 可以看出, 信号频率越高, 功率衰减越严重, 覆盖范围越小。当信号频率上升至毫米波频段时, 超过 5% 的区域其接收功率处于 -105 dBm 以下。单一的发射机部署无法满足中国移动 5G 覆盖率达 95% 的指标。

为进一步比较不同频段制式下的无线信道大尺度传播特性, 可在上述接收功率基础上, 计算相应的路径损耗。在一定空间内, 随着电磁波的不断传播, 因信道的传播特点、辐射扩散导致的损耗即为路径损耗。在特定范围内, 随着电磁波信号的不断传播, 其平均功率会发生相应变化, 这种变化情况可通过路径损耗来反映。路径损耗计算公式为:

$$P_L = P_T - P_R \quad (2)$$

自由空间路径损耗(Free Space Path Loss, FSPL)计算公式为:

$$FSPL(f_0, d_0) = 20 \lg \left(\frac{4\pi d_0 f_0}{c} \right) \quad (3)$$

式中: d_0 为相对参考距离; c 为光速, $c=3 \times 10^8$ m/s; f_0 为载波频率(Hz)。

将 2 个修正变量加入到 FSPL 中, 可获取自由空间参考距离(Close-In, CI)路径损耗模型。该模型可在高速铁路车站场景下反映无线电传输路径损耗随距离变化而发生变化的情况^[13]:

$$P_L'(f_c, d) = FSPL(f_c, d_0) + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + \chi_{CI}^\sigma \quad (4)$$

式中: n 为路径损耗指数; d 为发射机与接收机之间的距离; χ_{CI}^σ 为标准差为 σ 的零均值高斯随机变量。

将电波传播区域划分为 2 种类型: 视距传播(Line-Of-Sight propagation, LOS)区、非视距传播(Non-Line-of-Sight propagation, NLOS)区。使用最小二乘法(Generalized Least Squares, GLS)拟合 CI 模型参数, 2 个区域的路径损耗模型结果分别如图 4、图 5 所示。

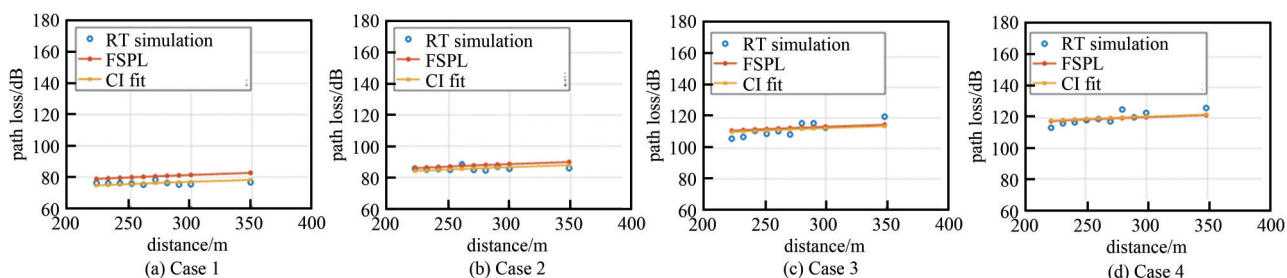


Fig.4 Path Loss of LOS
图 4 视距传播下的路径损耗

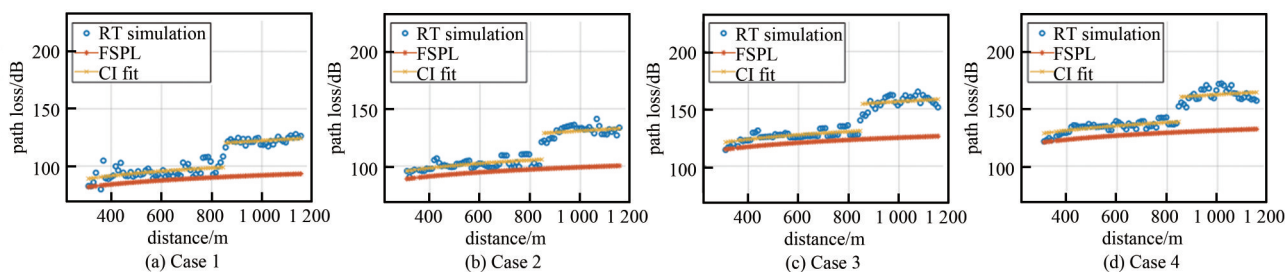


Fig.5 Path Loss of NLOS
图 5 非视距传播下的路径损耗

由图 4 可看出, 4 种情况下, 相较于 FSPL, LOS 区整体路径损耗更小, 原因是因为车站中存在立柱等多样化的散射体, 产生了叠加效应。由图 5 可以看出, 在 NLOS 传播区域, 反射径同样也会随着距离的增加消失。因此, 本文基于反射径是否存在进行了分段数据分析, 经过仿真分析, 其临界距离为 845 m。

对路径损耗拟合的参数结果见表 2, 由表中结果可知, 频率越高, 路径损耗随距离增加的速度越快。对应表 2 中的路径损耗指数 n 在 LOS 区域由 Case 1 时的 1.82 增加到 Case 4 时的 2.26; 在 NLOS 传播区域, 也由 Case 1 的 2.18(存在反射)和 2.82(反射消失)分别增加到 Case 4 的 2.54(存在反射)和 3.36(反射消失)。该结果表明, 频率越高, 电波传播过程中信号功率衰减的速度越快。同时, 阴影衰落标准差 σ 随频率升高, 表明频率越高, 阴影衰落

波动幅度越剧烈。此外，4 种频段制式下，相较于 LOS 区，NLOS 区有着更大的路径损耗指数，这意味着若没有 LOS 径，链路长度将大大缩短。

表2 路径损耗参数
Table2 Path loss parameters

	LOS				NLOS(distance<845 m)				NLOS(distance>845 m)			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Max/dB	78.25	88.24	120.85	126.54	118.26	120.87	139.83	152.02	127.16	141.05	161.80	173.49
Min/dB	75.10	84.37	106.38	113.53	79.59	90.43	113.96	121.45	117.1	120.15	143.84	151.22
mean/dB	76.09	85.57	112.27	119.85	94.62	101.49	126.47	134.32	122.43	130.68	156.28	162.42
median/dB	76.01	85.34	111.37	118.21	93.82	100.2	126.31	134.64	122.22	131.93	156.64	160.88
<i>n</i>	1.82	1.94	2.01	2.26	2.18	2.22	2.29	2.54	2.82	2.95	3.05	3.36
<i>σ</i> /dB	2.35	3.17	3.92	4.11	3.80	4.18	3.47	3.55	2.53	4.29	4.68	5.43

2.2 小尺度传播特性

本文在仿真研究的基础上对 932 MHz(Case 1)、2.1 GHz(Case 2)、41 GHz(Case 3)和 93.2 GHz(Case 4) 4 个频段下高铁车站场景的小尺度信道参数进行萃取，进而从能量域、时间域和角度域对不同频段制式的信道进行多维度表征。对所有信道参数进行拟合分析，结果如表 3 所示。

表3 小尺度信道特性参数
Table3 Parameters of small-scale channel characteristics

			Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Ricean K factor/dB		Max	13.50	12.95	13.88	18.51
		Min	-5.9	-2.98	-1.43	-0.84
		Mean	3.71	4.90	6.64	8.07
		Median	1.62	4.93	6.49	7.66
		Std	4.55	3.02	3.92	5.02
RMS delay spread/ns		Max	471.12	217.08	46.02	10.56
		Min	36.74	28.34	3.98	0.95
		Mean	199.53	110.08	16.53	4.98
		Median	196.23	105.69	13.37	4.87
		Std	94.56	46.36	10.21	2.14
angle spread/(°)	Azimuth angular Spread of Arrival (ASA)	Max	72.73	73.12	63.63	62.95
		Min	0	0	0	0
		Mean	12.83	11.35	10.02	8.74
		Median	6.79	6.50	4.47	4.08
		Std	13.81	13.56	12.60	11.19
	Azimuth angular Spread of Departure (ASD)	Max	19.82	19.82	18.52	18.86
		Min	0	0	0	0
		Mean	8.79	8.85	7.90	7.06
		Median	5.14	5.15	5.24	4.36
		Std	5.41	5.36	4.57	4.70
	Zenith angular Spread of Arrival (ZSA)	Max	8.88	8.93	7.94	6.94
		Min	0.02	0	0	0
		mean	1.56	1.52	1.31	1.06
		Median	1.03	1.02	0.80	0.72
		Std	1.77	1.79	1.67	1.52
	Zenith angular Spread of Departure (ZSD)	Max	2.96	2.96	2.54	2.53
		Min	0	0	0	0
		Mean	1.33	1.31	1.15	1.06
		Median	1.31	1.31	1.26	1.24
		Std	0.72	0.73	0.73	0.77

2.2.1 莱斯 K 因子

接收功率最强的多径功率与其他多径功率之和的比值为莱斯 K 因子，该参数可用于反映信道的衰落水平，其具体算法^[8]如式(5)所示，参数的数值越小，表明信道的衰落水平越高。

$$K(i) = \frac{P_d(i)}{\sum_{n=1}^N P(i,n) - P_d(i)}$$

(5)

式中： $K(i)$ 为第 i 个 snapshot 的莱斯 K 因子； $P_d(i)$ 为信号接收功率最强的多径功率； N 为一个 snapshot 下的多径总数； $P(i,n)$ 为第 n 条多径的接收功率。

4 个频段下的莱斯 K 因子累积分布 (Cumulative Distribution Function, CDF) 图如图 6 所示。对图 6 和表 3 进行分析, 不难发现, 该指标的平均数值会随着频率的提升而发生同步变化, 由最初的 3.71 dB 增长为 8.07 dB。这是因为高铁车站中存在电力牵引架等较多的散射体, 频率越高, 电波绕射能力越差, 经由散射体产生的多径越少, 且多径功率占比越小。因此, 在高频通信条件下, LOS 径变得尤为重要。

对莱斯 K 因子的平均数值进行分析, Case 1 条件下为 3.71 dB, 略大于文献[14]中提到的 930 MHz 频段下半封闭式高铁车站场景的 2.84 dB。这是由于文献[14]中结合其他列车对电波传播的干扰因素进行了研究, 而本文并未考虑这种干扰因素, 仅对单一列车进行研究。因此, 在传播环境方面, 本研究具有更加简单的特点, 该参数的数值会随之提升。Case 2 中该参数的平均数值 (4.90 dB) 与文献[5]中提及的在 1.89 GHz 频段下该参数的平均数值 (4.98 dB) 并不存在明显出入。Case 3 中该参数的平均数值 (6.64 dB) 比文献[9]中相同频率下室内走廊的莱斯 K 因子均值 (10.39 dB) 更小, 这是因为较之完全封闭且形态狭长的室内走廊, 高铁车站场景更为开阔。文献[7]中提到, 93.2 GHz 频段下高架桥场景中 90% 的莱斯 K 因子均小于零, 而 case 4 条件下 99% 的莱斯 K 因子均大于零。这是因为在高架桥狭长的结构特征下, 产生的多条反射径在大多数位置下贡献了主要能量成分, 而车站中反射、散射径的来源较为分散, LOS 径占据主要能量成分。

2.2.2 均方根时延扩展

电波通过不同路径的距离存在一定差异, 因此在多径传播中, 不同路径抵达发射端的时间存在一定差异, 进而出现多径时延扩展的情况。RMSDS 被界定为功率延迟曲线的二阶中心矩的平方根, 能够从时间域的角度描述无线信道的多径衰落, 对无线信道的时间扩展效果进行量化分析。可按照式(6)进行计算^[8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N P(\tau_n) \tau_n^2}{\sum_{n=1}^N P(\tau_n)} - \bar{\tau}^2} \\ \bar{\tau} = \frac{\sum_{n=1}^N P(\tau_n) \tau_n}{\sum_{n=1}^N P(\tau_n)} \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: $P(\tau_n)$ 为第 n 条多径的功率; τ_n 为相对时延; $\bar{\tau}$ 为均附加时延。

RMSDS 的累积分布图如图 7 所示, 从图中不难发现, 在频率逐步提升的情况下, 均方根时延扩展呈下降趋势, 这意味着高频下的多径传播比低频下的要稀疏得多, 与上述对莱斯 K 因子进行分析后所得的结果相对应。

2.2.3 角度扩展

角度扩展(AS)从空间维度描述了移动无线信道的多径衰落, 其由 3GPP 定义为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{AS} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (\theta_{m,\mu})^2 P_m}{\sum_{m=1}^M P_m}} \\ \theta_{m,\mu} = \text{mod}(\theta_m - \mu_{\theta} + \pi, 2\pi) - \pi \\ \mu_{\theta} = \frac{\sum_{m=1}^M \theta_m P_m}{\sum_{m=1}^M P_m} \end{array} \right. \quad (7)$$

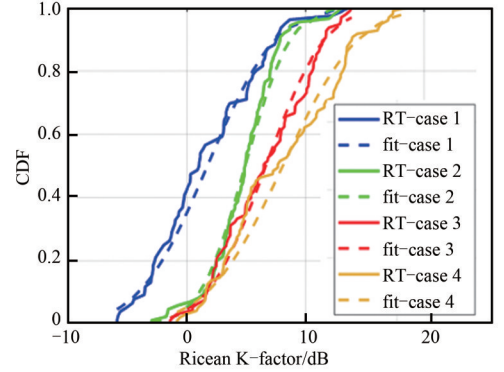


Fig.6 CDF of Ricean K-factor
图6 莱斯K因子累积分布

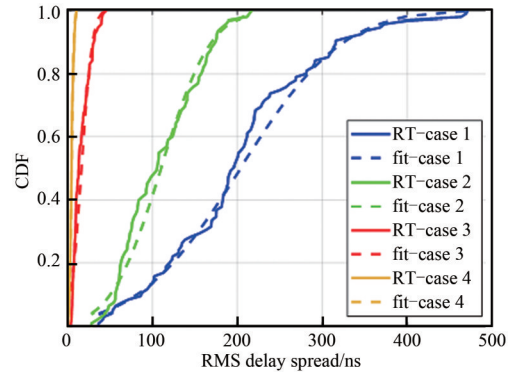


Fig.7 CDF of RMS delay spread
图7 均方根时延扩展累积分布

式中： σ_{AS} 为角度扩展； P_m 为第 m 条径的接收功率； $\theta_{m,\mu}$ 表示第 m 条路径的方位到达角(AoA)/方位出发角(AoD)/天顶到达角(ZoA)/天顶出发角(ZoD)。

图8为部署4种频段制式下的角度扩展累积分布，AoA的角度扩展为ASA，AoD的角度扩展为ZSA，ZoA的角度扩展为ASD、ZoD的角度扩展为ZSD。由图中可看出，频率越低，无线信道的角度色散程度越大。这是因为低频时多径更丰富，信号在入射和出射的位置发生畸变，导致角度扩展的统计特性发生了变化。在动态仿真条件下，列车移动到不同位置，场景中环境的变化会产生不同的反射、散射情况，使方位出发/到达角角度扩展呈阶梯状变化。且Tx和Rx都使用了垂直极化天线，导致方位面上出现大量多径，因此相较于ZSA和ZSD，ASA和ASD明显更大。

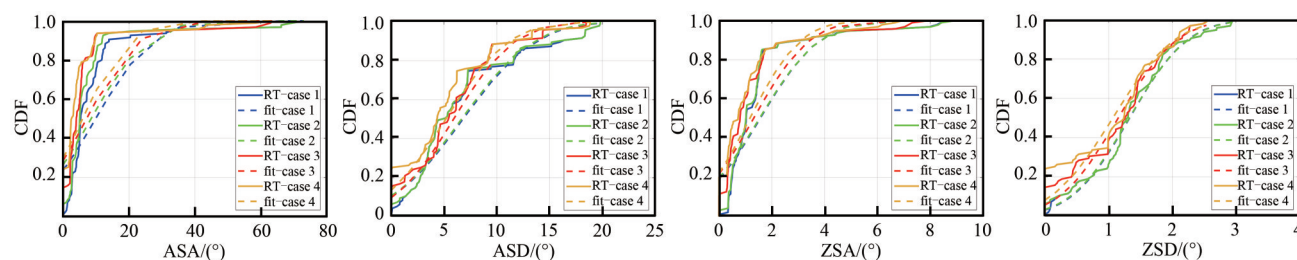


Fig.8 CDF of angle spread

图8 角度扩展累积分布

由图8和表3可知，4种情况下ASA(12.83°、11.35°、10.02°、8.74°)均大于ASD均值(8.79°、8.85°、7.90°、7.06)，这是由于相较于Rx，Tx的架高更高(Tx与地面相距45 m，Rx与地面相距4.64 m)并且二者的距离较大。另外，多径的功率与最强功率接收径的差值在-25 dB以内时，均应认定为有效多径，小Tx所处平面可以生成众多有效多径，其中鲜有出现立柱等散射体，在Rx周边区域出现了大量散射体。因此，Tx周边区域只会在较为局促的范围内出现稀疏的多径，而Rx周边区域能在较大的范围内出现大量的多径，相较于ASD而言，ASA更大。

3 结论

本文针对932 MHz、2.1 GHz、41 GHz和93.2 GHz 4个频段下的高铁车站场景，采用射线跟踪仿真技术，对不同频段制式的无线信道大、小尺度信道参数进行了比较和研究。结果表明，随着电波频率的升高，2个区域路径损耗指数由932 MHz的1.82和2.49上升至93.2 GHz的2.26和3.24，表明信号功率衰减速度加快，覆盖范围变小。莱斯K因子均值由932 MHz的3.71变为93.2 GHz的8.07，表明这种多径效应会随着频率的提升而衰减，信号的衰落水平随之下降。相较于932 MHz，93.2 GHz在RMSDS和AS 2个维度的信道参数上出现了下降变化，表明高频率会减弱多径信号在时间域和空间域的色散程度。本文的相关工作填补了高铁车站场景下GSM-R、5G-R、毫米波通信系统三者联合比较研究的空缺，为铁路专用移动通信系统的革新设计提供了思路。

参考文献：

- [1] 钟章队,官科,陈为,等. 铁路新一代移动通信的挑战与思考[J]. 中兴通讯技术, 2021,27(4):44-50. (ZHONG Zhangdui, GUAN Ke, CHEN Wei, et al. Challenges and perspective of new generation of railway mobile communication[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(4):44-50.)
- [2] 李翠然,谢健骊,高文娟. 基于5G-R业务的高速铁路异构网络接入技术[J]. 中兴通讯技术, 2021,27(4):18-23. (LI Cuiran, XIE Jianli, GAO Wenjuan. Heterogeneous network access technologies based on 5G-R services for high-speed railway[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(4):18-23.)
- [3] ZHANG L, GONZALEA-PLAZA A, FERNANDEZ J R, et al. Propagation measurements and modelling inside trains at 900 MHz, 2.4 and 5.8 GHz[C]// 2017 the 11th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Paris, France: IEEE, 2022: 2895-2898.
- [4] LIU Ting, HE Danping, GUAN Ke, et al. Channel characterization for 5G-R Indoor Communication at 2.1 GHz[C]// 2022 the 16th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Madrid, Spain: IEEE, 2021: 1-5.
- [5] 周涛,李华玉,秦鑫彤,等. 高速铁路信道小尺度衰落与非平稳特性研究[J]. 铁道学报, 2019,41(4):88-95. (ZHOU Tao, LI Huayu, QIN Xintong, et al. Research on small-scale fading and non-stationary properties for high-speed railway channels[J]. Journal of the China Railway Society, 2019,41(4):88-95.)
- [6] GUAN Ke, PENG Bile, HE Danping, et al. Channel sounding and ray tracing for intrawagon scenario at mmWave and sub-

- mmWave bands[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021,69(2):1007–1018.
- [7] 林雪,艾渤,何丹萍,等. 高架桥场景下的射线跟踪仿真器校正及信道特性分析[J]. 电波科学学报, 2018,33(1):41–47. (LIN Xue,AI Bo,HE Danping,et al. Calibration of ray tracer and channel analysis for high-speed railway viaduct scenario[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2018,33(1):41–47.)
- [8] 杜晓. 高铁站场景 2 100 MHz 信道仿真与传播特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(5):449–457. (DU Xiao. Channel simulation and propagation characteristics analysis at 2 100 MHz in high-speed railway station scenario[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(5):449–457.)
- [9] 曾成胜,单馨漪,何丹萍,等. 基于 5G-R 系统的高铁站台场景信道特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(8):769–774. (ZENG Chengsheng,SHAN Xinyi,HE Danping,et al. Channel characteristics of high-speed rail platform scenario based on 5G for railway system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(8):769–774.)
- [10] GUAN Ke,LI Guangkai,KURNER Thomas,et al. On millimeter wave and THz mobile radio channel for smart rail mobility[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017,66(7):5658–5674.
- [11] 唐庆涛,马子昂,官科,等. 基于高性能射线跟踪技术的城市隧道无线信号覆盖研究[J]. 北京交通大学学报, 2021,45(5):16–21. (TANG Qingtao,MA Ziang,GUAN Ke,et al. Research on wireless signal coverage in urban tunnels based on high-performance ray tracing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021,45(5):16–21.)
- [12] 赵友平,郭嘉琦. 一种改进的 SBR 射线跟踪信道仿真方法[J]. 北京交通大学学报, 2021,45(5):1–7. (ZHAO Youping,GUO Jiaqi. An improved SBR ray-tracing channel simulation method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021,45(5):1–7.)
- [13] 吴丽娜,何丹萍,艾渤,等. 基于多层感知器神经网络的路径损耗预测研究[J]. 电波科学学报, 2021,36(3):396–404. (WU Lina,HE Danping,AI Bo,et al. Path loss prediction based on multi-layer perceptron artificial neural network[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021,36(3):396–404.)
- [14] GUAN Ke,ZHONG Zhangdui,AI Bo,et al. Propagation measurements and analysis for train stations of high-speed railway at 930 MHz[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014,63(8):3499–3516.

作者简介:

陈四清(1965–), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为高速铁路四电工程建设管理和技术管理.email: tw308@126.com.

李 凯(1983–), 男, 学士, 正高级工程师, 主要研究方向为高速铁路四电工程建设管理和技术管理.