文章编号：2095-4980(2024)11-1181-12

面向5G-R高铁站场景的CDL建模与研究

李津汉[1]，王一冉[2a,2b]，官　科[*2a,2b]，姚欣楠[1]

(1.中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430063；
2.北京交通大学 a.先进轨道交通自主运行全国重点实验室；b.电子信息工程学院，北京 100044)

摘　要：为推动第五代移动通信技术(5G)在高铁专用网络建设中的应用，本文以2.1 GHz频段下厦门北高铁站为研究场景，研究场景中立柱、股道、站台等物体带来的显著多径的空间域特征。通过射线跟踪(RT)仿真，获取高铁站场景下由发射机到接收机的多维度多径数据；基于K均值(K-means)聚类算法对多径信号进行分簇，提取和分析相关簇参数，完成高铁站场景簇延迟线(CDL)模型构建。据此得到高铁站场景收发机不同极化组合下多径的空间域信息，对铁路5G系统(5G-R)高铁站场景信道模型进行补充，服务于铁路5G专用移动通信系统的建设。

关键词：射线跟踪；簇延迟线模型；铁路5G系统；高铁站

中图分类号：TN92　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2023400

CDL modeling and research for 5G-R high-speed railway station scenario

LI Jinhan[1]，WANG Yiran[2a,2b]，GUAN Ke[*2a,2b]，YAO Xinnan[1]

(1.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.，Ltd.，Wuhan Hubei 430063，China；
2a.State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation；2b.School of Electronic and Information Engineering，
Beijing Jiaotong University，Beijing 100044，China)

Abstract：To promote the application of fifth-generation mobile communication technology(5G) in the construction of high-speed rail dedicated networks, this paper takes the Xiamenbei Railway Station in the 2.1 GHz frequency band as the research scenario, studying the significant multipath spatial characteristics brought about by objects such as columns, tracks, and platforms in the scenario. Through Ray Tracing(RT) simulation, multidimensional multipath data from the transmitter to the receiver in the high-speed railway station scenario is obtained; based on the K-means clustering algorithm, the multipath signals are clustered, and relevant cluster parameters are extracted and analyzed to complete the construction of the Cluster Delay Line(CDL) model for the high-speed railway station scenario. This provides spatial domain information of multipath for different polarization combinations of transmitters and receivers in the high-speed railway station scenario, complementing the channel model of high-speed railway station scenario for 5G-Railway(5G-R), and serving the construction of dedicated mobile communication systems for railways using 5G.

Keywords：Ray-Tracing；Cluster Delay Line model；5G-Railway；high-speed railway station

随着高速铁路(High Speed Railway，HSR)的迅速发展[1]，与铁路运行及维护相关的智能业务和应用需求不断增加[2]，催生出铁路通信行业对更高可靠性、实时性和更高数据传输速率的铁路专用网络的需求。相较于传统的全球铁路移动通信系统(Global System for Mobile Communications for Railway，GSM-R)[3]，铁路5G(5G-R)系统在高性能的业务服务方面具有较大优势，因此5G-R专用移动通信系统成为未来铁路通信网络的发展方向[4]。

高铁站场景的5G网络建设是5G-R专用移动通信系统建设中的重要一环。面向结构复杂多样、人流量密集、网络接入密度大的高铁站场景，国内外已有许多不同频段下的信道测量、建模与信道特性研究工作。文献[5]在火车站场景，对工作在1 890 MHz和748 MHz的双频段无线通信系统进行了视距(Line Of Sight，LOS)和

收稿日期：2023-12-01；**修回日期：**2024-02-21

基金项目：中铁第四勘察设计院有限公司科技研究开发计划资助项目(2021K045)；教育部基金资助项目(8091B032123)

[*]**通信作者：**官　科　email:kguan@bjtu.edu.cn

非视距(Non-Line Of Sight，NLOS)传输情况下的多输入多输出测量，得到了该场景下无线传播的均方根时延扩展、路径损耗等参数。文献[6]通过测量和分析，对460 MHz频段铁路高架桥场景下不同区域的时变多普勒频移和多普勒功率谱进行了研究。文献[7]面向930 MHz高铁上盖建筑场景，研究了无线系统的信道特性。文献[8]对比了2.1 GHz频段下高铁站场景的智能反射面(Intelligent Reflecting Surface，IRS)辅助前后的路径损耗和阴影衰落等参数，研究了IRS部署的影响。文献[9]提出一种930 MHz下的高铁车站场景传输损耗经验模型，能够有效预测传输损耗，服务于通信系统的设计。文献[10]测量了2.6 GHz频段下高铁场景无线信道参数，并建立了抽头延迟线(Tapped-Delay Line，TDL)模型表征无线信道特性。文献[11]进行了Sub-6 GHz频段的信道测量，建立了基于多径簇的信道模型。文献[12]对高铁高架桥场景的复合信道特性进行了研究和分析，总结了高铁中高架桥无线信道的基本概率密度函数。

现有的信道特征研究工作包括TDL模型和簇延迟线(CDL)模型两种。TDL模型面向高铁站场景研究较多，主要根据多径的时延参数将信号划分为不同的抽头对信道进行建模，用来简化信道特性评估。与TDL模型相比，CDL模型具有空间特性，能够更好地表征信道模型的空间相关性，3 GPP TR38.901[13]提出CDL模型可以看作TDL模型的延伸。根据多径的角度参数将信号划分为不同的簇，其中主要的簇参数包括簇的时延、功率、水平到达角(Azimuth angle of Arrival，AoA)，水平离开角(Azimuth angle of Departure，AoD)，天顶到达角(Zenith angle of Arrival，ZoA)和天顶离开角(Zenith angle of Departure，ZoD)。

由于面向高铁站场景的CDL模型既有的研究目前较少，且由于高铁站场景中立柱、股道、站台等众多的反射体会带来显著的多径效应[14]，使用TDL模型无法考虑的空间域特征恰是在该场景下对信道建模影响非常大的因素。因此本文提出2.1 GHz频段下面向高铁站场景的CDL模型，旨在辅助评估高铁通信设备在该场景下的接入、切换、业务状况。具体而言，通过射线跟踪(RT)仿真，获取高铁站场景下线路各接收点的多维度(幅、相、时、空、频、极化)多径数据，之后基于K-means算法，对来自场景中轨道、立柱、雨棚等物体的多径信号进行分簇；随后，提取和分析相关簇参数，完成簇延迟线模型构建并研究去极化现象。

1 高性能射线跟踪仿真平台

自建的高性能射线跟踪仿真平台由高性能计算机、数据存储服务器和用户终端3部分构成[15]，见图1。高性能计算机与数据存储服务器通过交换机互连。用户通过因特网访问，可利用高性能计算机，基于数据处理、几何计算和电磁计算准确可靠地提取无线信道特征。

基于高性能射线跟踪仿真平台的射线跟踪仿真模块架构如图2所示。射线跟踪仿真架构中，输入参数包括三维场景模型、材料电磁参数、传播机理模型、仿真配置、收发天线信息。输出参数包括多径数量、射线类型、接收功率、信道冲激响应、传输路径损耗、各点场强、时延、角度等。因此，射线跟踪仿真能够根据环境的几何信息、材料的电磁参数、天线波束方向图等数据，在传播机理模型的输入下，确定性地刻画空间中的多径传播现象。

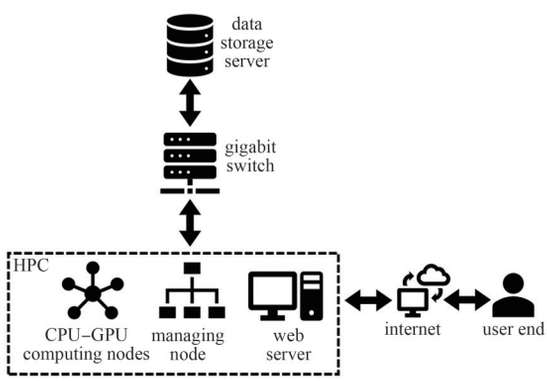


Fig.1 Architecture schematic of high-performance cloud-based RT simulation platform

图1 高性能射线跟踪仿真平台架构示意图

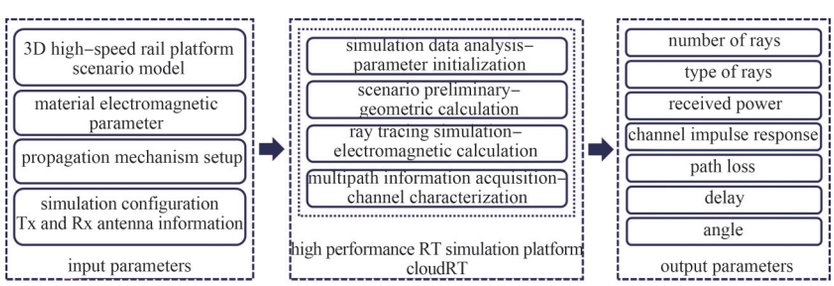


Fig.2 Module architecture based on high-performance cloud-based RT simulation platform

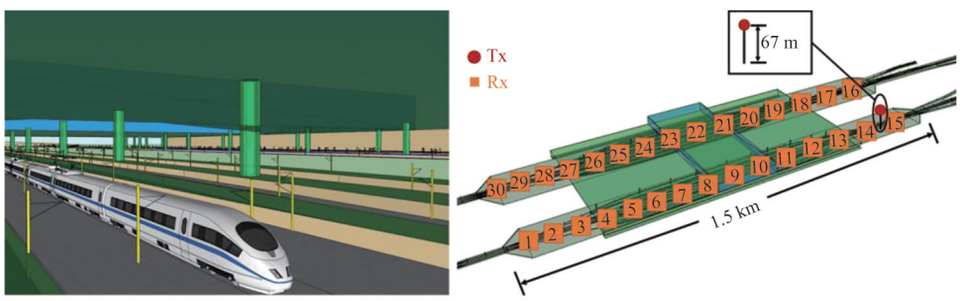
图2 基于高性能射线跟踪仿真平台的模块架构

由3GPP TR 38.901[13]可知，CDL模型中主要的参数包括簇的时延、功率、角度信息和簇内的角度扩展、交叉极化率参数信息。因此，可对车站场景进行不同收发天线极化组合下的高性能射线跟踪仿真，利用大批量仿真

得到的数据，通过获取、分析和处理射线跟踪仿真得到的幅、相、时、空、频、极化等多维度多径信息，提取相关簇参数、簇内参数，从而建立2.1 GHz频段下面向5G-R高铁站场景的CDL模型。

2　面向5G-R高铁站场景的射线跟踪仿真

针对高铁站场景，选取了2条线路共30个点位开展射线跟踪仿真(见图3)。为支撑射线跟踪仿真，输入仿真物料信息包括三维高铁车站场景模型、材料电磁参数、传播模型设置、仿真配置及收发天线信息等(图2)。



(a) high-speed railway station scenario model　　(b) deployment position of transmitter and receiver

Fig.3 Model of high-speed railway station scenario and the location of transmitter and receiver
图3 高铁车站场景模型和收发天线位置

2.1 高铁站场景模型和配置信息

高铁站场景仿真结构模型和发射天线、接收天线部署位置分别如图3(a)和图3(b)所示。图中高铁站场景中包含高铁列车、立柱、轨道、电力牵引架、雨棚、站台等。发射机高度为67 m，接收机高度约为高铁车体高度，即4.69 m，接收机1#~30#以约90 m的间隔分布在2条高铁线路上，2条线路分别穿过长度约为1.5 km的车站。

2.2 收发端参数配置

表1为收发端具体的参数配置。射线跟踪仿真的频率范围为2.155~2.165 GHz，带宽为10 MHz，子载波间隔为15 kHz，传播机理设置为直射、一阶反射、一阶散射与透射，在第2.3节中进行确定。

天线类型及其极化方式在CDL模型的构建中也极为重要，本文中发射机天线与接收机天线为全向天线，仿真中所涉及的4种天线极化组合如表2中所示，发射天线、接收天线三维天线方向图如图4所示。

表1 收发端参数配置表

Table1 Parameter configuration of transmitter and receiver

parameter	value
frequency band/GHz	2.155~2.165
bandwidth/MHz	10
subcarrier spacing/kHz	15
number of resource blocks	52
propagation mechanism	LOS, 1st order reflection, 1st order scattering, transmission
Tx antenna	omnidirectional antenna with vertical and horizontal polarization
Rx antenna	omnidirectional antenna with vertical and horizontal polarization
Tx antenna gain/dBi	5.5
Rx antenna gain/dBi	5.5
RE transmitting power/dBm	41
cable loss/dB	3
Tx, Rx height/m	67, 4.69

表2 4种天线极化组合列表

Table2 Four antenna polarization cases

polarization case	Tx antenna	Rx antenna
HH	horizontal polarization	horizontal polarization
HV	horizontal polarization	vertical polarization
VH	vertical polarization	horizontal polarization
VV	vertical polarization	vertical polarization

2.3 材料电磁参数与传播机理模型

在场景建模后，模型中所涉及物体的材料电磁参数在很大程度上能够影响射线跟踪计算的准确性[16]。图3所示的高铁站场景模型中，涉及到的主要包括砖石、有机玻璃、瓷砖、金属、混凝土5种材料。基于已有的相关研究成果[17]，表3中罗列了上述5种材料的电磁参数，包括：相对介电常数实部、损耗角正切、方向性散射系数、表面等效粗糙度、散射系数等。

镜像法和发射射线法是高性能射线跟踪仿真平台支持的两种电磁传播几何计算方式。镜像法根据几何与光学基本理论，通过发射机和接收机位置确定射线路径，完成射线跟踪仿真。传播机理模型[18]的确定对于射线跟踪仿真的精确度和仿真结果的准确性具有重要意义，考虑到CDL模型的构建需要相对确定的一种方式，因此本文的射线跟踪仿真中使用了镜像法[19]而非发射射线法[15]。由于高铁站场景中包含的立柱、轨道、雨棚、站台等物体能够带来丰富的多径，为确保在复杂传播机制下能得到准确的射线跟踪仿真结果，不仅需要考虑到直射、

透射的存在，还需进行反射、散射阶数的确定。

表3 材料电磁参数列表

Table3 Electromagnetic parameters of materials

objects	material	real part of relative permittivity	loss tangent	directive scattering coefficient	surface equivalent roughness	transmission loss/dB
subgrade	brick	1.915	0.029	0.165	5	18.56
station	organic glass	1.002	0.217	0.349	3	18.56
platform	tiles	6.275	0.004	0.105	5	7.79
high speed train	metal	1.000	107.000	0.230	2	53.81

采用文献[17]中所提方法确定车站场景5G-R频段下的反、散射阶数。该方法根据不同反射、散射阶数下平均接收功率的变化，确定射线跟踪仿真中合适的反射、散射阶数。射线跟踪仿真中从仅有直射、透射到考虑直射、一阶反散、散射和透射，接收功率显著提升。当反射、散射阶数由一阶提升至二阶时，接收功率无明显增长。因此，将针对5G-R高铁站场景的射线跟踪仿真反射阶数、散射阶数确定为一阶。综上，本文的传播机理模型选择了直射、反射、散射和透射[20]。

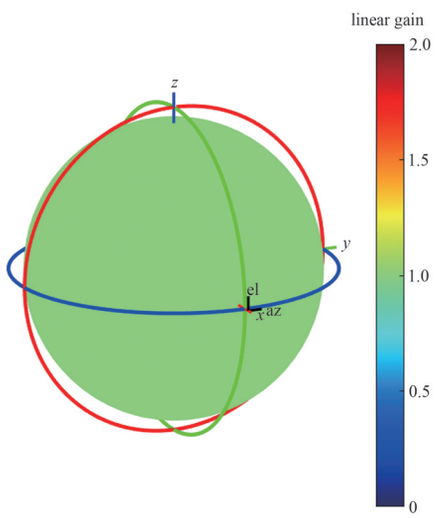


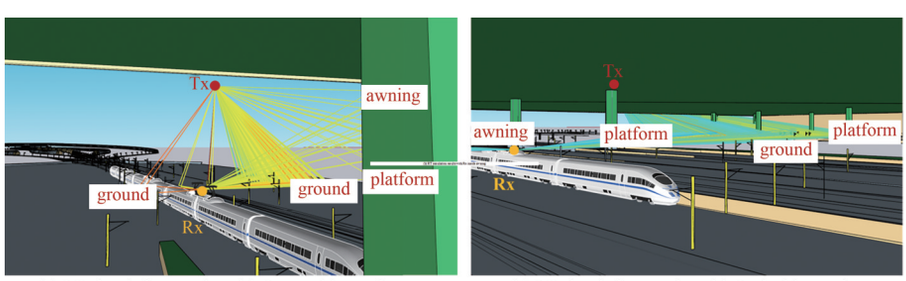
Fig.4 3D radiation pattern of transmitter and receiver

图4 发射、接收天线三维辐射方向图

2.4 仿真结果分析

面向5G-R高铁站场景的射线跟踪仿真结果包括了功率、时延、角度等多维度信道信息。这些信息将作为后续进行数据处理和分簇的数据输入。

图5以多径射线的方式展示了无线信号在高铁车站场景的传播过程。从图5(a)中可以看到，接收机设置于车站雨棚外时，来自地面和站台等比较明显的多径。从图5(b)中可以看到，接收机设置于车站雨棚内时，来自立柱和站台等比较明显的多径。根据3GPP TR38.901[13]，LOS和NLOS情况下对应的CDL模型有所不同。因此需判断场景中的LOS和NLOS情况，确定CDL模型构建的通信环境。



(a) RT simulation results with Rx outside awning (b) RT simulation results with Rx inside awning

Fig.5 RT simulation results in high-speed railway station scenario

图5 高铁车站场景RT仿真效果

基于射线跟踪结果有无透射径的存在，给出了高铁站场景的LOS和NLOS的判定结果，见图6。根据图6中所示场景LOS和NLOS情况，统计LOS和NLOS情况占比为9:21。因此，可得出本研究场景70%为NLOS情况，在后续进行CDL模型构建参数设置时，考虑通信环境为NLOS时的相关参数。

3 CDL模型构建

根据3GPP TR38.901[13]，CDL模型中的参数包括了簇参数和簇内参数两个主要组成部分。其中，簇参数包括簇数量、簇时延、簇功率、AoA、AoD、ZoA、ZoD。簇内参数包括簇内射线数量、时延扩展(Delay Spread，DS)、到达水平角度扩展(Azimuth Angular Spread of Arrival，ASA)、离开水平角度扩展(Azimuth Angular Spread of Departure，ASD)、到达天顶角度扩展(Zenith Angular Spread of Arrival，ZSA)、离开天顶角度扩展(Zenith Angular Spread of Departure，ZSD)和交叉极化率(Cross-Polarization Ratio，XPR)。通过对来自场景中各物体的多径进行分

簇，提取和分析相关簇参数，萃取簇内多径特性。

3.1 多径分簇

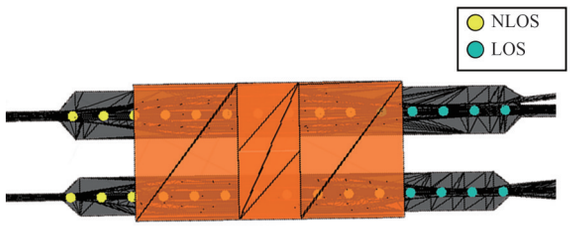


Fig.6 LOS and NLOS cases of high-speed railway station scenario
图6 高铁站场景的视距和非视距情况

多径分簇是构建CDL模型的基础。分簇算法通过考虑能量、时延、角度域等多维信道特性，以聚类的方式将每个接收点位置处的众多多径分量进行归类，并获取其簇心特性数据；之后，在分簇结果的基础上，簇内多径特性被依次从所有分簇结果中萃取并统计。K-means算法为常见的聚类算法，是多种聚类算法中较为简洁和高效的算法。K-means算法采用平方欧氏距离作为聚类指标，在同时考虑多维度特性的情况下对射线进行聚类，实现分簇。K-power means算法在K-means算法的基础上在分簇时添加了多径功率的影响[21]，但在进行XPR提取时，K-power means算法会导致簇心偏移。因此，本文选择K-means算法作为分簇算法。图7为K-means算法的主要迭代过程。

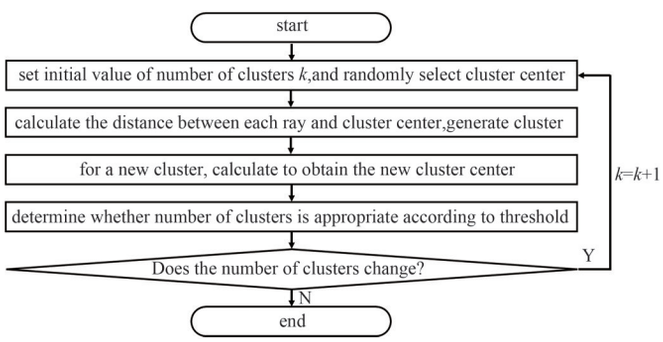


Fig.7 The iteration process of K-means algorithm
图7 K-means算法迭代过程

如图7所示，首先，设置分簇数量初值，并随机生成簇心位置；随后，根据平方欧式距离确定空间中射线距离每个簇心的远近程度，将场景中的射线划分进入每个簇中；之后，对于每个确定的簇，选择簇中功率最大的多径作为簇心，进行新的簇心的确定；确定簇心后，根据多维度的条件(时延阈值、偏移角度阈值)判断分簇数量初值是否需要改变：若目标簇的数量不变，则完成分簇；若目标簇的数量仍需再增加，则进行新一轮迭代计算，直至符合阈值条件，则停止分簇，得到分簇结果。

K-means算法的核心计算公式[22]为：

$$J(z,A)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{c}z_{ik}\|x_i-a_k\|^2 \tag{1}$$

式中：z为n行c列的布尔矩阵；A为所有簇心的集合；x_i为欧几里得空间数据集中的数据点，范围为x_1至x_n；a_k为迭代选取的第k个簇心，范围为a_1至a_c；z_{ik}表示某多径是否属于某簇内，取值为0或1；$\|x_i-a_k\|$为数据点x_i与簇心a_k之间的欧氏距离。

此算法通过不断更新簇心和簇中多径，最小化目标函数得到分簇结果。簇心更新公式和簇中多径更新公式为：

$$a_k=\frac{\sum_{i=1}^{n}z_{ik}x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}z_{ik}} \tag{2}$$

$$z_{ik}=\begin{cases}1, \text{if}\|x_i-a_k\|^2=\min\limits_{1\leqslant c}\|x_i-a_k\|^2\\ 0, \text{otherwise}\end{cases} \tag{3}$$

式中x_{ij}为多径数据。

特别地，在使用K-means算法进行多径的聚类时，需要分别对于AoA、AoD、ZoA、ZoD的阈值进行计算。根据计算结果设置簇内多径分量的角度阈值，排除不满足条件的多径，从而判断当前簇数量是否合适，是否需

要更新簇数量。以 AoA 的阈值计算为例：

$$\phi_{n,m,\mathrm{AOA}}=\phi_{n,\mathrm{AOA}}+c_{\mathrm{ASA}}\alpha_m \tag{4}$$

式中：ϕ_n 为簇的角度；c 为簇的到达角扩展；α_m 为簇内射线的偏移角度；$\phi_{n,m}$ 为簇内射线的对应角度。

根据 3GPP TR38.901[13]中室内场景 LOS 和 NLOS 情况下的角度扩展和簇内最大射线偏移角，由式(4)计算出室内场景和室外场景角度阈值如表 4 所示。

表4 簇内射线偏移角阈值

Table4 Threshold of in-cluster ray offset angle

angle of ray	AoA	ZoA	AoD	ZoD
indoor scenario threshold/(°)	23.71	19.40	10.76	9.72
outdoor scenario threshold/(°)	32.33	15.09	4.31	6.42

表 4 中给出了室内和室外场景下的角度阈值计算结果。考虑到整个场景中大部分接收机点位在高铁站内(见图 6)，因此，本文使用室内场景的簇内射线偏移角阈值。基于上述 K-means 聚类算法及各个角度阈值的设置，图 8 给出了本文的簇参数提取流程。

如图 8 所示，进行射线跟踪仿真后，根据仿真结果中信号接收功率、时延、角度等多维(幅、相、时、空、频、极化)信息，利用 K-means 算法，将簇内射线偏移角度阈值的设置作为是否进行重新分簇的条件对多径进行分簇。若分簇后，簇内多径角度超过阈值，则增大簇数量初值重新分簇，直至其符合阈值范围，则停止迭代。

此外，通过射线跟踪仿真获取到的多径的时延分辨力为无穷大，因此在分簇后，按照 2 GHz 的最大带宽[13]合并簇内射线。取簇内功率最大的多径作为簇心，对簇参数和簇内参数进行萃取。

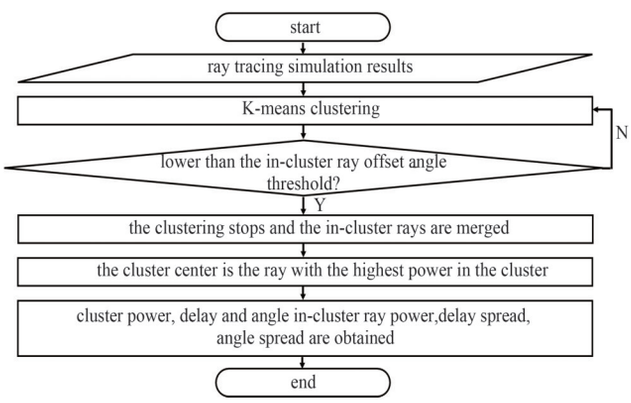


Fig.8 Flow chart of cluster parameter extraction

图8 簇参数提取流程图

3.2 簇参数萃取

根据 3GPP TR38.901[13]，完成分簇后，簇内功率最大的径为簇心，簇心多径的功率为簇功率。由于整个场景中的多径分布复杂，形成的簇数量较多，而部分杂散簇功率较弱。因此，根据射线跟踪仿真结果聚类得到的所有簇中，滤除功率相较于最大簇功率偏差大于 25 dB 的杂散簇，滤除后得到的簇为高铁站场景下的有效簇。筛选公式为：

$$P=\{P_{\mathrm{cluster}}|P_{\mathrm{cluster}}\geqslant P_{\max}-25\} \tag{5}$$

式中：P_{cluster} 为有效簇功率；$P_{\max}$ 为聚类后的最大的簇功率；P 为筛选后的簇功率。

考虑到环境中热噪声的存在，接收天线接收到信号的功率需大于热噪声。热噪声功率的计算公式为：

$$P_{\mathrm{N}}=10\lg(1\,000kT)+10\lg W \tag{6}$$

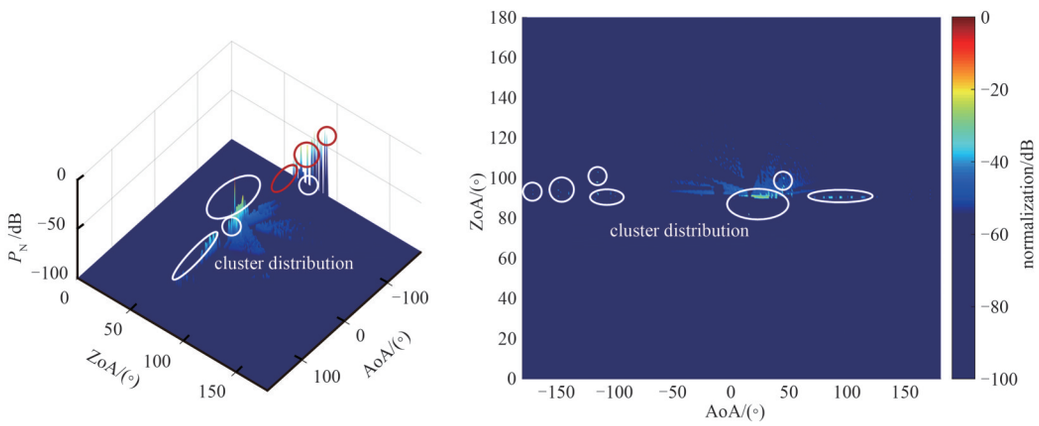
式中：k 为玻尔兹曼常数，k=1.381×10^{-23} J/K；T 为开氏温度，常温下为 290 K；W 为带宽。

通过式(6)可得到热噪声功率为−104 dBm。基于有效功率阈值和噪声功率阈值，去除杂散簇和淹没在噪声中的簇。以车站场景下的第 11 个快照为例(发射天线、接收天线均为垂直极化)，绘制到达角度能量谱如图 9 所示。

图 9 所示角度谱中，分别定义了发射部分的球坐标系和接收部分的球坐标系。在发射部分，以发射机所在位置为原点，过发射机和接收机的直连线做垂面，垂面向上的方向 ZoD 为 0°；发射机与接收机的连线(发射机到接收机方向为正方向)在谱中所对应的角度 AoD=0°、ZoD=90°。在接收部分，以接收机所在位置为原点，过接收机和发射机的直连线做垂面，垂面向上的方向 ZoA 为 0°；接收机与发射机的连线(接收机到发射机方向为正方向)在谱中所对应的角度 AoA=0°、ZoA=90°。基于上述角度谱定义，图 9 所示到达角度谱显示，在水平方向，簇的角度相对分散，AoA 的最大值为 124°，最小值为−172°。在垂直方向，簇的角度分布相对集中，ZoA 的主要角度范围分布在 80°~110°。由于射线跟踪可以获取反、散射点的空间位置，因此能够统计和追溯多径来源。

图 10 以 VV 极化情况第 11 个快照为例，给出了高铁车站场景下反、散射点的空间分布状况。由图 10 可知，高铁车站场景下，簇的来源包括地面、站台、股道等位置。由于该点位 Rx 与 Tx 距离较近，散射点在水平方向上

的分布范围将较大，该情况与图 9 中所示情况相呼应。



(a) 3D view　　(b) top view

Fig.9 Angle of arrival energy spectrum for the 11th snapshot in the scenario(Tx, Rx, VV polarization)

图 9　车站场景中第 11 个快照的到达角度能量谱(Tx，Rx，VV 极化)

将上述每个快拍的分簇结果进行汇总，图 11 为 VV 极化情况下，不同发射机与接收机组合对应的簇数量，图中紫色为 LOS 条件点位，蓝色为 NLOS 条件点位。如图 11 所示，当接收机点位(点位 10、11)距离发射机极近时，簇的数量较多。这是由于接收机距离发射机较近时，由列车、雨棚、周围站台地面产生的多径在水平范围角度域上的分布范围大，又由于时延阈值和 4 个角度阈值的共同限制，导致接收机距离发射机极近时，分簇数量较多。而后，随着接收机逐渐远离发射机，簇的数目显著减少。一方面，是由于接收机点位与发射机点位的空间位置逐渐变远，角度域范围收缩所致；另一方面，是由于在这些点位中存在能量较强的簇，使其他簇被视为杂散簇所致。最终，当接收机位于 1~3，以及 27~30 这些点位时，簇的数目逐渐上升。这个上升趋势是由于信道中最强簇的减弱，使一些信号相对较弱的簇变强(超过了 25 dB 门限阈值)。

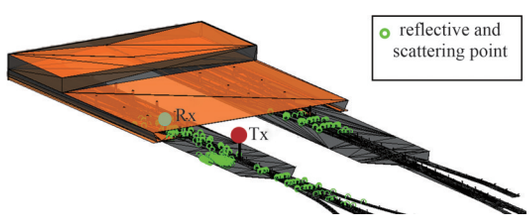


Fig.10 Distribution of reflective and scattering points in the 11th snapshot of VV case

图 10　VV 极化情况第 11 个快照下反、散射点分布

将图 11 中所有 NLOS 点位在不同极化方式下的簇数量结果进行统计，图 12 给出了整个车站中的簇数量的累积分布函数(Cumulative Distribution Function，CDF)。由图 12 可知，场景中簇数量跨度较大。由于铁路上大量的天线使用垂直极化方式，因此以 VV 极化情况为例，50% 区域的簇数量为 1，75% 区域的簇数量为 6，90% 区域的簇数量在 8 以下。发、收天线不同极化情况下的簇数量比相同极化情况下的簇数量更大。表 5 列出了不同极化组合方式下簇数量的统计结果。在相同的极化方式下，VV 和 HH 的簇数量结果相近(范围在 3~5 之间)；不同极化方式下，HV 和 VH 的簇数目相近，均值在 10 附近。以 snapshot 为单位，对各簇功率在能量域上进行归一化。

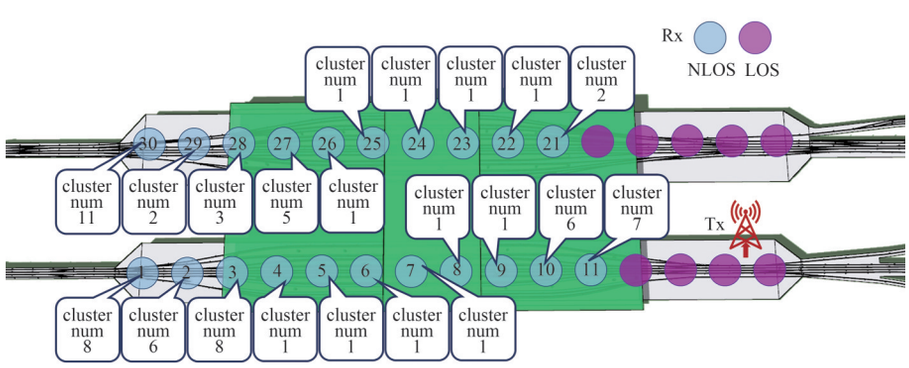


Fig.11 Diagram of the number of clusters at different receiver positions under VV polarization case

图 11　VV 极化情况下不同接收机位置的簇数量示意图

除簇数量和簇功率外，CDL 模型还包括簇的时延、角度参数。簇心对应的时延值为簇时延，在 CDL 建模过程中，簇时延的归一化过程是以时延最小的簇为 0 进行归一化过程。另外，簇心对应的 AoA、AoD、ZoA、ZoD 作为簇角度。

表 5 HH、HV、VH、VV 极化组合簇参数—簇数量、功率

Table5 HH, HV, VH, VV cluster parameters—number of clusters, cluster power

case	cluster number		normalized cluster power/dB	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation
HH	4.76	6.02	−12.52	9.89
HV	10.10	30.74	−9.27	4.58
VH	9.90	29.64	−9.68	4.51
VV	3.29	3.13	−10.99	10.54

需要说明的是，上述方式主要用于单接收机点位(snapshot)进行簇参数萃取。对于整体场景情况下的建模，由于空间一致性被打破，给出另外的建模方式。

3.3 簇内参数萃取

在 CDL 模型中，簇内多径参数包括多径数量、时延扩展、角度扩展、簇内交叉极化率，这些参数将用于进一步研究和表征簇的相关特性。

对于簇内相关参数，文献[23]~[24]中分别使用对数正态分布、指数分布建模簇内参数，因此，本文分别利用正态分布、对数正态分布、指数分布对簇内多径数量进行拟合。图 13 为不同极化组合下簇内多径数量 CDF 及拟合结果。

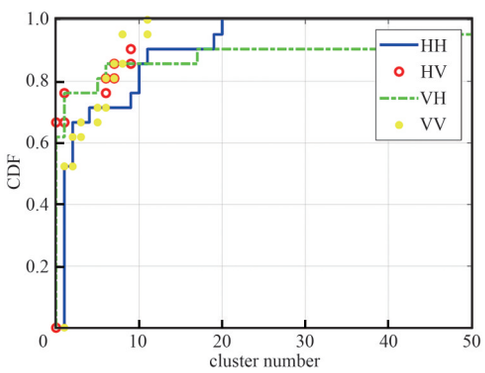
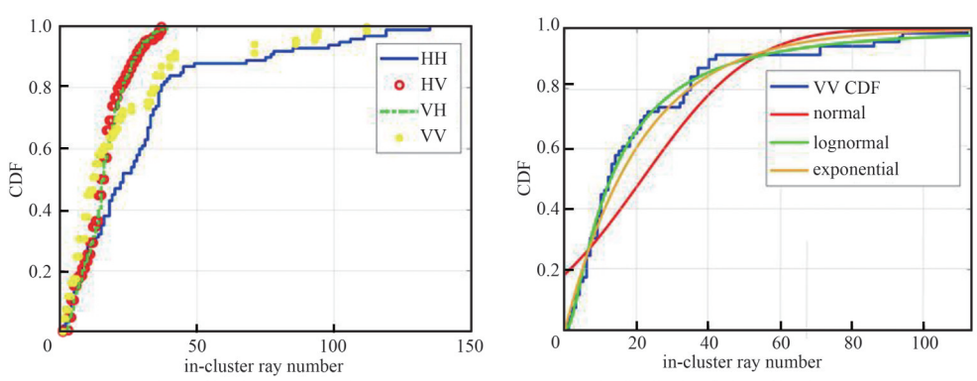


Fig.12 CDF of number of clusters under different polarization cases of Tx and Rx

图 12 发射、接收天线不同极化组合下簇数量 CDF

图 13(a)为高铁站场景下，发、收天线极化方式相同和不同时，簇内多径数量 CDF 分布情况。由于铁路上大量的天线使用垂直极化方式，因此以 VV 极化情况为例：CDF 为 5% 的簇内多径数量为 2，50% 处为 13，75% 处为 32，90% 处为 41。表 6 中详细列出 4 种极化组合下簇内多径数量的统计结果均值和标准差。



(a) CDF of in-cluster ray number

(b) distribution fitting of in-cluster ray number

Fig.13 CDF and distribution fitting of in−cluster ray number

图 13 簇内多径数量统计结果及分布拟合

表 6 HH、HV、VH、VV 极化组合簇内参数—簇内多径数量、DS

Table6 HH, HV, VH, VV in−cluster parameters—in−cluster ray number, DS

case	in−cluster ray number		in−cluster DS/ns	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation
HH	29.91	28.81	34.71	90.88
HV	15.76	8.29	2.30	1.44
VH	16.24	8.18	2.36	1.50
VV	21.43	23.90	52.14	104.89

图13(b)中给出正态分布、对数正态分布、指数分布拟合结果。利用Matlab对3种分布拟合结果进行评估，引入参数估计误差和对数似然评估拟合度[25]。其中，参数估计误差越小越好，对数似然绝对值越小越好。

表7为簇内多径数量分布的拟合结果误差。表7结果所示，对数正态分布的参数估计误差和对数似然数值最小，指数分布次之，正态分布参数估计误差和对数似然数值最大。因此，在此场景下，用对数正态分布拟合簇内多径数量CDF是较为合适的。

表7 簇内多径分布拟合评估

Table7 Fitting evaluation of in-cluster ray number distribution

function	parameter estimation	parameter estimation error	logarithmic likelihood
normal	μ=21.43, σ=23.90	2.88,2.06	−316.41
lognornal	μ=2.54, σ=1.09	0.13,0.09	−278.17
exponential	μ=21.43	2.58	−280.49

除簇内多径数量外，簇内时延扩展、角度扩展都是重要的簇内参数。均方根时延扩展为时延功率谱的第二个中心距的平方根：

$$\sigma_\tau=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K}P(\tau_k)\tau_k^{\,2}}{\sum_{k=1}^{K}P(\tau_k)}-\left(\frac{\sum_{k=1}^{K}P(\tau_k)\tau_k}{\sum_{k=1}^{K}P(\tau_k)}\right)^2} \tag{7}$$

式中：τ为时延；τ_k和$P(\tau_k)$为第k条射线的相对时延和功率，k条射线的相对时延和功率可由射线跟踪的仿真结果直接获取；K为多径数量。

基于射线跟踪仿真获取多径结果的角度域信息，如：AoA、AoD、ZoA和ZoD，结合多径功率，可给出了角度扩展的计算方法：

$$\sigma_{\mathrm{AS}}=\sqrt{\frac{\sum_{m-1}^{M}(\theta_{m,\mu})^2P_m}{\sum_{m-1}^{M}P_m}} \tag{8}$$

式中：P_m为第m条多径的功率；θ为角度。

在不同极化条件下，获取车站中每个接收机点位每个簇的簇内时延扩展和角度扩展后，在表6和表8中列出4种极化组合下的时延扩展、角度扩展的统计结果。由表6和表8中VV极化情况可知，簇内多径数量约为21，簇内时延扩展约为52 ns，ASA、ASD、ZSA、ZSD均值分别为0.25°、0.63°、0.19°、0.68°。

表8 HH、HV、VH、VV极化组合簇内参数—簇内角度扩展

Table8 HH, HV, VH, VV in-cluster parameters—in-cluster angular spread

case	in-cluster AS/(°)							
	ASA		ASD		ZSA		ZSD	
	mean	standard deviation	mean	standard deviation	mean	standard deviation	mean	standard deviation
HH	0.33	0.42	1.22	5.60	0.23	0.37	0.59	0.60
HV	0.62	0.47	8.82	30.72	0.35	0.46	0.59	0.48
VH	0.65	0.53	6.91	25.81	0.36	0.48	0.61	0.49
VV	0.25	0.35	0.63	0.82	0.19	0.43	0.68	0.84

除簇内多径数量、时延扩展、角度扩展外，XPR也是重要簇内参数。XPR定义为接收到的垂直(水平)共极化的功率相对于发射垂直(水平)极化、接收水平(垂直)极化的功率之比：

$$R_{\mathrm{XP}}=10\lg\left(\frac{P_{\mathrm{co}}}{P_{\mathrm{cross}}}\right) \tag{9}$$

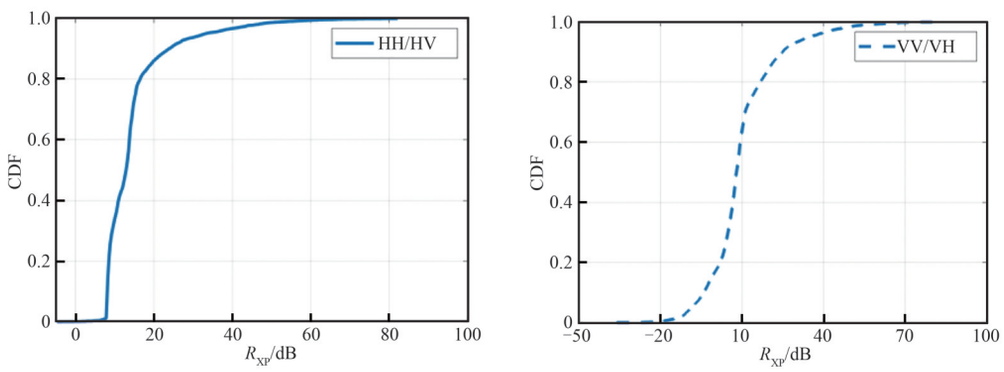
式中：P_{co}为接收到的垂直(水平)共极化的功率；P_{cross}为发射垂直(水平)极化、接收水平(垂直)极化的功率。

在进行XPR提取时，K-power means算法会导致簇心的偏移，因此本文采用K-means算法。进行交叉极化率的计算时，考虑HH、HV和VV、VH两种情况。由于天线同极化与不同极化情况下射线跟踪仿真结果不同，因此提取两种情况仿真结果中来自相同位置的多径参数，并在计算交叉极化率时，进行计算所使用的参数来源于射线跟踪仿真得到的全部多径。对于双极化天线，有两种方式计算XPR，如式(10)和(11)所示：

$$R_{\mathrm{XP,VV-VH}}=10\lg\left(\frac{P_{\mathrm{VV}}}{P_{\mathrm{VH}}}\right) \tag{10}$$

$$R_{\mathrm{XP,HH-HV}}=10\lg\left(\frac{P_{\mathrm{HH}}}{P_{\mathrm{HV}}}\right) \tag{11}$$

不同极化组合 XPR 的累积分布函数如图 14 所示。由图 14 可知，HH/HV 组合中，CDF 5% 处簇内多径 XPR 为 8，50% 处为 13，75% 处为 15，90% 处为 24。VV/VH 组合中，CDF 50% 处簇内多径 XPR 为 8，75% 处为 13，90% 处为 25。这说明高铁站场景下 XPR 较大，去极化现象不明显。



(a) HH/HV (b) VV/VH

Fig.14 CDF of XPR of Tx and Rx in different polarization cases

图 14 发射、接收天线不同极化组合 XPR 的 CDF

表 9 统计了交叉极化率的均值和标准差，统计结果表明，$R_{\mathrm{XP,VV-VH}}$ 与 $R_{\mathrm{XP,HH-HV}}$ 均值分别为 11.68 dB 和 15.39 dB。相较于 3GPP TR38.901[13] 的 CDL-A、B、C 模型中的 10 dB、8 dB、7 dB，数值更大，说明高铁站场景相较于 3GPP 给出的标准模型去极化现象更弱。

表 9 不同极化组合下的 XPR

Table9 XPR of different cases

(VV/VH)/dB		(HH/HV)/dB	
mean	standard deviation	mean	standard deviation
11.68	13.81	15.39	10.16

3.4 CDL 模型构建

根据上述方法和结果，给出高铁站场景的统一的 CDL 模型。由于铁路场景下大量的天线使用垂直极化方式，因此以发射天线、接收天线均为垂直极化(VV)的情况为代表进行 CDL 模型构建，并与 3GPP TR38.901[13] 的标准模型进行比较。具体建模过程如下：

首先，基于射线跟踪获取 VV 极化条件下各接收点(snapshot)位置处多径的幅-相-时-空-频多维度信息。以 snapshot 为单位，将车站 NLOS 条件下获取的多径信息进行时延、功率的归一化操作，以及角度域的坐标系变换。其中，在时延方面，以第一条径时延为 0 进行归一化；在功率方面，以功率最大径为 0 进行归一化；在角度方面，以 3.2 节给出的空间坐标系为准，进行坐标变换。

其次，考虑到要对整个车站场景给出 CDL 模型，因此，整合以 snapshot 为单位获取的归一化后的多径数据；针对整合后的数据，基于 K-means 的分簇算法完成对数据的分簇工作。

最后，由于整个场景的空间一致性被打破，在簇参数的萃取过程中，仅从信号多径能量的显著性角度进行簇功率、簇角度和簇时延的萃取(该方式不同于 3.2 节中逐接收点的簇参数萃取方式)。具体方式为：把簇内所有多径功率转换为线性值，求均值后代表簇功率；簇时延和簇角度按照簇功率在总功率中的占比，在簇所包含的所有多径内进行加权计算。

表 10~11 中列出 2.1 GHz 高铁站场景下的簇延迟线模型相关参数(表中簇参数以功率大小进行排序)。由表 10 可知，VV 极化条件下，高铁站场景的簇数量为 4，归一化簇时延最大值、归一化簇功率最小值分别为 16.95 ns 和 −23.56 dB。根据 3GPP TR 38.901[13]，NLOS 情况下，簇数量、归一化簇时延最大值、归一化簇功率最小值在 CDL-A 模型中分别为 23 ns、9.66 ns 和 −29.7 dB，在 CDL-B 模型中分别为 23 ns、4.78 ns 和 −14.9 dB，在 CDL-C

模型中分别为24 ns、8.65 ns和−22.8 dB。在簇内参数方面，根据3GPP TR 38.901[13]，NLOS情况下，簇内ASA、ASD、ZSA、ZSD和XPR在CDL-A模型中分别为11°、5°、3°、3°、10，在CDL-B模型中分别为22°、10°、7°、3°、8，在CDL-C模型中分别为15°、2°、7°、3°、7。本文簇内多径的角度扩展均值相较于3GPP TR 38.901[13]较小，如表11中所示。并且，本文高铁站场景XPR相较于3GPP TR 38.901[13]中CDL-A、B、C模型(NLOS情况)更大，表明高铁站场景去极化现象不明显。

表10 面向5G-R高铁站场景的CDL模型

Table10 CDL model for 5G-R high-speed railway station scenario

cluster#	normalized cluster parameters					
	delay /ns	power /dB	AoD /(°)	AoA /(°)	ZoD /(°)	ZoA/(°)
1	0	0	0	0	90.00	90.00
2	3.34	−23.40	−0.55	10.16	90.35	99.41
3	14.38	−22.52	−2.62	29.55	90.96	98.69
4	16.95	−23.56	−2.85	29.59	91.43	102.47

表11 簇内参数

Table11 In-cluster parameter

parameter	value
c_{ASD}/(°)	0.63
c_{ASA}/(°)	0.25
c_{ZSD}/(°)	0.68
c_{ZSA}/(°)	0.19
XPR/dB	11.68

4　结论

本研究基于射线跟踪仿真结果，利用多径空间角度作为分簇的依据，根据K-means算法提取并分析相关簇参数和簇内多径参数，形成2.1 GHz频段下面向高铁站场景的CDL模型，得到高铁站场景中收发机不同极化组合下多径的空间域信息。通过分析发现，VV极化情况下，簇内多径大多集中在10条及以下，簇内多径时延均值较大，$R_{XP,VV-VH}$与$R_{XP,HH-HV}$较大，表明高铁站去极化现象不明显。

本文通过对簇参数以及簇内参数的计算与分析，建立CDL模型获取高铁站场景中信道信息，后期辅助空口测量，能有效用于模拟车站场景的无线信道，评估高铁通信设备在该场景下的接入、切换、业务状况。本研究对高铁站场景CDL模型的构建以及对于相关参数的分析，对现有的5G-R高铁站场景信道模型进行了有效补充，对未来高铁5G-R网络建设具有一定的指导意义。

参考文献：

[1] HOFER M,LÖSCHENBRAND D,ZELENBABA S,et al. Massive MIMO channel measurements for a railway station scenario[C]// 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Glasgow, United Kingdom: IEEE, 2023: 1-6. doi: 10.1109/WCNC55385.2023.10118778.

[2] CHEN Rui,LONG Wenxuan,MAO Guoqiang,et al. Development trends of mobile communication systems for railways[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018,20(4):3131-3141. doi:10.1109/COMST.2018.2859347.

[3] HEDHLY W,AMIN O,SHIHADA B. Hyperloop communications: challenges, advances, and approaches[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021(2):2413-2435. doi:10.1109/OJCOMS.2021.3121313.

[4] 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 communications[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(4):44-50.) doi:10.12142/ZTETJ.202104009.

[5] SONG Zongying,DING Jianwen,WANG Yabo,et al. Measurement-based Doppler analysis in viaduct scenarios for railway[C]// 2021 the 13th International Symposium on Antennas,Propagation and EM Theory(ISAPE). Zhuhai,China:IEEE, 2021:1-3. doi: 10.1109/ISAPE54070.2021.9753140.

[6] AI B,CHENG X,KÜRNER T,et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014,15(5):2143-2158. doi:10.1109/TITS.2014.2310771.

[7] 李津汉. 基于射线跟踪技术的上盖物业动车所无线覆盖预测研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022,19(9):33-40. (LI Jinhan. Wireless coverage prediction for EMU depot with superstructures based on ray tracing technology[J]. Railway Signaling & Communication Engineering, 2022,19(9):33-40.) doi:10.3969/j.issn.1673-4440.2022.09.007.

[8] 单馨漪,何丹萍,费丹,等. 智能反射面辅助的5G高铁车站覆盖增强技术研究[J]. 电波科学学报, 2023,38(1):63-70. (SHAN Xinyi,HE Danping,FEI Dan,et al. Intelligent reflecting surface-assisted 5G high-speed railway station coverage enhancement technology[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023,38(1):63-70.) doi:10.12265/j.cjors.2022153.

[9] GUAN Ke,ZHONG Zhangdui,AI Bo,et al. Empirical models for extra propagation loss of train stations on high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(3):1395-1408. doi:10.1109/TAP.2013.2294468.

[10] WANG Qing,XU Chunxiu,ZHAO Min,et al. Measurement-based Tapped Delay Line(TDL) models for wireless channels under high speed railway scenarios at 2.6 GHz[C]// 2014 the 21st International Conference on Telecommunications(ICT). Lisbon,

Portugal:IEEE, 2014:353-357. doi:10.1109/ICT.2014.6845138.

[11] 侯绪艳,尹学锋,张琳坚. 基于被动测量的5G宽带高铁信道分簇模型[J]. 电波科学学报, 2021,36(3):460-466. (HOU Xuyan, YIN Xuefeng,ZHANG Linjian. Stochastic cluster models of wideband high-speed-train channel based on passive measurement in in-service 5G-NR networks[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021,36(3):460-466.) doi:10.12265/j.cjors.2020221.

[12] 张逸康,王公仆,叶如意. 高速铁路高架桥场景中的复合无线信道特性[J]. 中兴通讯技术, 2021,27(4):30-35. (ZHANG Yikang,WANG Gongpu,YE Ruyi. Composite wireless channel characteristics for communication systems on viaducts of high-speed railway[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(4):30-35.) doi:10.12142/ZTETJ.202104007.

[13] 3GPP. TR 138 901-2018 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[S]. 2018.

[14] 申瑜,欧盼,陈付坤,等. 智能超表面辅助的5G高铁场景信道特性[J]. 北京交通大学学报, 2023,47(2):23-35. (SHEN Yu,OU Pan,CHEN Fukun,et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted channel characteristics in 5G high-speed railway scenario[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023,47(2):23-35.) doi:10.11860/j.issn.1673-0291.20220098.

[15] HE Danping,AI Bo,GUAN Ke,et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications:a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019,21(1):10-27. doi:10.1109/COMST.2018.2865724.

[16] HE Danping,GUAN Ke,YAN Dong,et al. Physics and AI-based digital twin of multi-spectrum propagation characteristics for communication and sensing in 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023,41(11):3461-3473. doi:10.1109/JSAC.2023.3310108.

[17] 曾成胜. 基于高性能射线跟踪的高铁车站场景5G-R网络优化技术[J]. 北京交通大学学报, 2023,47(2):13-22. (ZENG Chengsheng. 5G-R network optimization technology for high-speed railway station scenes based on high-performance ray tracing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023,47(2):13-22.) doi:10.11860/j.issn.1673-0291.20220110.

[18] YUN Z Q,ISKANDER M F. Ray tracing for radio propagation modeling:principles and applications[J]. IEEE Access, 2015(3):1089-1100. doi:10.1109/ACCESS.2015.2453991.

[19] SON H W, MYUNG N H. A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999,47(8):1344-1350. doi:10.1109/8.791954.

[20] 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.) doi:10.11805/TKYDA2022015.

[21] CZINK N,CERA P,SALO J,et al. A framework for automatic clustering of parametric MIMO channel data including path powers[C]// IEEE Vehicular Technology Conference. Montreal,QC,Canada:IEEE, 2006:1-5. doi:10.1109/VTCF.2006.35.

[22] SINAGA K P,YANG M S. Unsupervised K-means clustering algorithm[J]. IEEE Access, 2020(8):80716-80727. doi:10.1109/ACCESS.2020.2988796.

[23] HUANG Chen,ZHANG Jianhua,NIE Xin,et al. Cluster characteristics of wideband MIMO channel in indoor hotspot scenario at 2.35 GHz[C]// 2009 IEEE the 70th Vehicular Technology Conference Fall. Anchorage,AK,USA:IEEE, 2009:1-5. doi:10.1109/VETECF.2009.5379070.

[24] RAPPAPORT T S,MACCARTNEY G R,SAMIMI M K,et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015,63(9):3029-3056. doi:10.1109/TCOMM.2015.2434384.

[25] WASSERMAN L. All of statistics: a concise course in statistical inference[M]. New York:Springer, 2004.

作者简介:

李津汉(1992-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为铁路无线通信.email:007350@crfsdi.com.

王一冉(2000-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

官 科(1983-),男,博士,教授,主要研究方向为电波传播与无线信道测量、仿真与建模,毫米波与太赫兹通信技术、智慧轨道交通移动通信系统等.

姚欣楠(1989-),男,硕士,工程师,主要研究方向为无线通信.