

城市交通环境下 23GHz 信道仿真建模

张文茹¹, 汪莞乔^{2,3}, 官科³, 艾渤³, 曾毅^{1,4}, 赖峥嵘¹

(1. 广东省新一代通信与网络创新研究院, 广东广州 510670; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 3. 北京交通大学, 北京 100044; 4. 罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司, 北京 100012)

摘要: 随着车载网络的发展, 新的无线电技术已经成为人们关注的焦点. 车辆间通信既要求超可靠低时延, 同时又对通信数据速率有较高的要求. 本文针对韩国大田的城市环境进行仿真, 并表征 23GHz 车载移动通信信道的特性. 利用射线跟踪仿真萃取路径损耗、莱斯 K 因子、均方根时延扩展和角度扩展等典型信道参数, 定量地分析并总结其对车辆通信的影响, 为毫米波车载移动通信系统的部署提供参考和指导性建议.

关键词: 车载移动通信; 毫米波信道建模; 射线跟踪; 城市环境

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-2069-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200471

Channel Simulation Modeling at 23GHz in Urban Scenarios

ZHANG Wen-ru¹, WANG Wan-qiao^{2,3}, GUAN Ke³, AI Bo³, ZENG Yi^{1,4}, LAI Zheng-rong¹

(1. Guangdong Communications & Networks Institute, Guangzhou, Guangdong 510670, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;

3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

4. Rohde & Schwarz Technology Group (China), Beijing 100012, China)

Abstract: With the development of the vehicular network, new radio technologies have been in the spotlight. Communication between vehicles requires both ultra-reliability and low latency, and at the same time has high requirements for communication data rates. The urban scenario of Daejeon, South Korea, is simulated and the characteristics of the vehicular mobile communication channel at 23 GHz are characterized. Typical channel parameters such as path loss, Ricean K-factor, root mean square delay spread, and angle spread are extracted through ray tracing simulation. The influence of parameters on vehicle communication is quantitatively analyzed and summarized, providing reference and guidance suggestions for the design of millimeter wave vehicular mobile communication system.

Key words: vehicular mobile communication; millimeter wave channel modeling; ray tracing; urban scenario

1 引言

智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)是利用协同技术和系统工程概念来开发和改进的各种交通系统^[1]. 该领域涉及广泛的技术和应用^[2], 是当前解决交通拥堵、保障出行安全、提高运营效率等问题的最佳途径^[3].

移动通信在世界各国通过多种多样的形式已与人们的日常生活紧密结合^[4]. 国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)在“ITU-R M. 2083-0 建议书(09/2015)”中明确“IMT-2020 增强型移动宽带的峰值数据速率将达到 10 Gbit/s 至 20 Gbit/s”, “所需的带宽

至少在 1 GHz 以上”^[5]. “高移动性”也是车辆通信的核心要求^[6]. 由于频谱条件受限, 大带宽的毫米波通信成为学术界和工业界公认的关键技术, 韩国通信委员会(Korea Communications Commission, KCC)已采用了基于动态频谱接入技术的新频谱政策, 如灵活接入公共频谱(Flexible Access Common Spectrum, FACS). KCC 将 23GHz 频段分配给 FACS 频段, 韩国电子通信研究院(Electronics and Telecommunications Research Institute, ETRI)正针对该频段研究移动网络(Moving Network, MN)系统^[7], 旨在利用 FACS 非授权频段为公交车上的乘客提供免费(价格低廉)的移动宽带接入服务. 为

有效支持毫米波车载移动通信系统的设计、评估与开发,对无线信道的全面表征与分析至关重要^[8].

本文针对毫米波车载移动通信信道进行高性能射线跟踪(Ray Tracing, RT)仿真,研究成果将为车载移动通信系统的研究提供信道信息和理论依据. 本文主要贡献包括以下两点:①依据场景实际尺寸信息重构真实的目标场景模型,并考虑交通灯、树木等小型散射体模型的构建;②设置不同的仿真方案并萃取信道参数,总结影响车辆通信的因素,对城区下的毫米波车载移动网络的仿真、设计和测评提供指导性意见.

2 真实车载移动通信场景

为准确表征 MN 车载移动通信信道,须在传播模型中考虑车辆影响^[9,10]. 本文依据 3GPP TR 37.885 定义的 MN 体系结构重构综合车辆环境三维模型.

2.1 城区场景

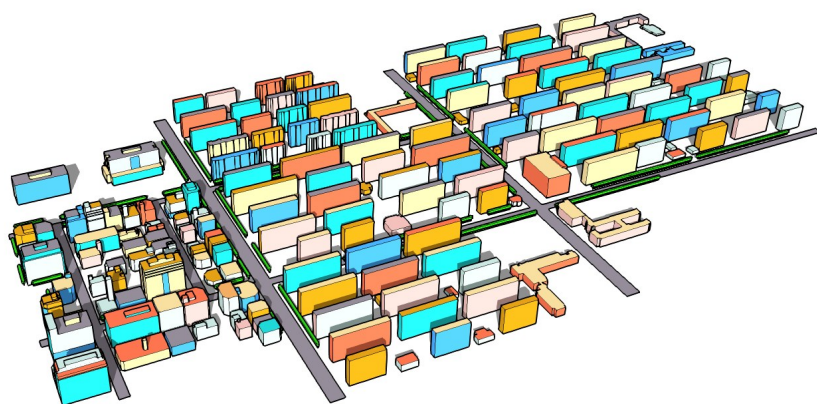
韩国大田为典型中型城市,建筑密度适中,高层与中、低层建筑分布合理,基础设施相对完善,将其作为

研究对象可获得更具代表性的城区车载移动信道特性.

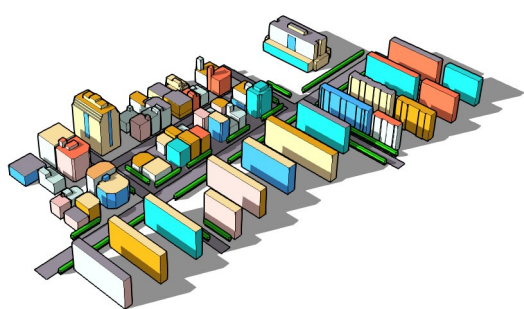
目标场景由 OpenStreetMap (OSM)、韩国地图软件 KakaoMap 构建. 如图 1 所示,利用开发的 OSM 插件获取 OSM 场景数据. 使用 SketchUp 软件重建大田的城市环境,如图 2 所示.



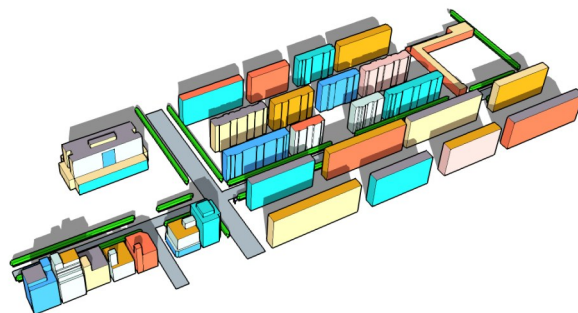
图1 OpenStreetMap中的大田市地图



(a) 大田市城区模型



(b) 大田城区区域1模型



(c) 大田城区区域2模型

图2 大田市目标场景三维模型

2.2 小型散射体

为还原真实城区场景,除大型建筑物外,在场景构建中还考虑常见的小型结构,如路旁树木、交通灯、交通标识牌和公交车站.

这些小型结构与波长数量级相同,在车辆环境中最重要的传播机制是散射^[11]. 图3为城市环境中小型建筑物的3D模型.

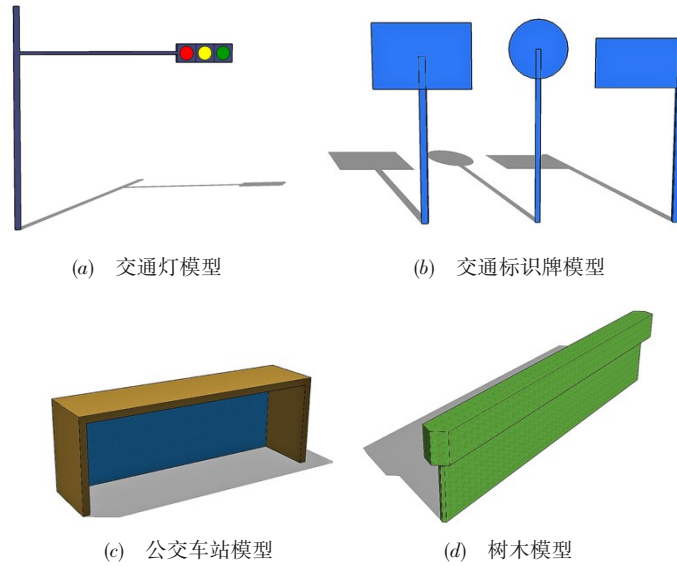


图3 小型散射体三维模型

2.3 移动车联建模及用户设备分布

本文依据 3GPP TR 37. 885 的建议,考虑 4 种车辆,分别定义如下.

- (1)类型 1(天线较低的乘用车):长 5.0m,宽 2.0m,高 1.6m,天线高度 0.75m.
- (2)类型 2(天线较高的乘用车):长 5.0m,宽 2.0m,高 1.6m,天线高度 1.6m.
- (3)类型 3(公交车、小型货车):长 13.0m,宽 2.6m,高 3.0m,天线高度 3.0m.
- (4)类型 4(厢式货车):长 13.5m,宽 2.6m,高 3.5m,天线高度 3.5m.

其中,类型 1 与类型 2 车辆模型相同,区别在于天线位置不同,可视为一种类型车辆进行三维建模. 利用 SketchUp 对乘用车(类型 1 和类型 2)、公交车(类型 3)和厢式货车(类型 4)建模,三种车辆模型如图 4~图 6 所示.

依据 3GPP TR 37. 885,车辆在城区中的分布服从以下几点要求.

- (1)在同一车道中,车辆后保险杠与相邻后续车辆

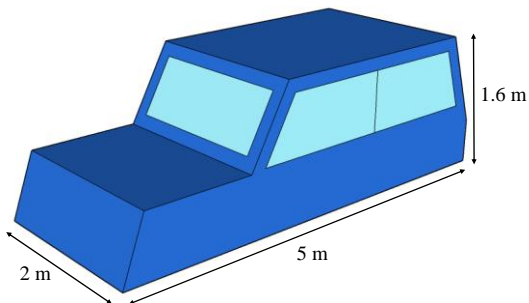


图4 乘用车模型

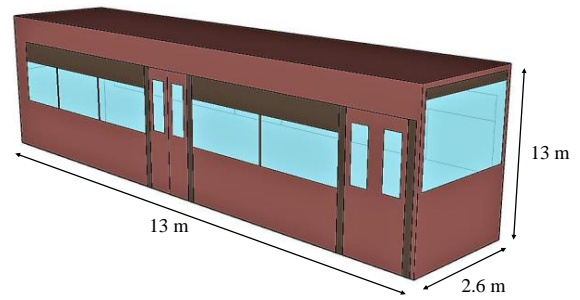


图5 公交车模型

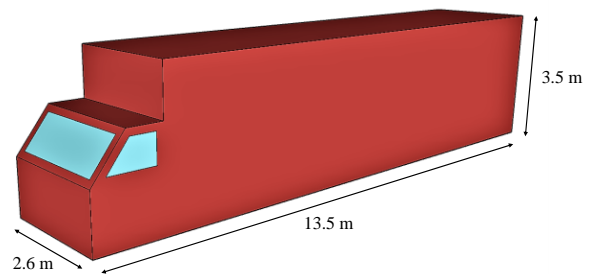


图6 厢式货车模型

前保险杠之间的最大距离取值满足

$$\max \{2, \text{expnd}(v) \cdot 2\}$$

其中, $\text{expnd}(v) \cdot 2$ 是均值为 v (车辆在道路上的平均速度)的指数随机分布.

- (2)同一车道上的车辆具有相同速度.
 - (3)不同类型的车辆分布与车道无关.
- 针对城区场景划分 2 种类型街道:
- (1)4 车道城区街道(3.5m/车道);
 - (2)6 车道城区街道(3.5m/车道).

考虑城区街道在早晚高峰时段出现交通拥堵,会降低车辆行驶速度.如图7和图8所示,本文设置不同的车道车速.

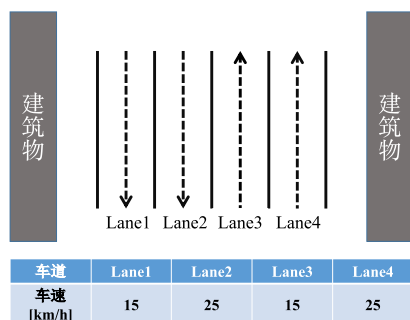


图7 城区4车道及车辆速度

城区场景的不同类型车辆分布如下:

- (1)60%类型1和类型2车辆(乘用车);
- (2)20%类型3车辆(公交车);
- (3)20%类型4车辆(厢式货车).

每个车道中的车辆根据车辆分布随机生成,且拟

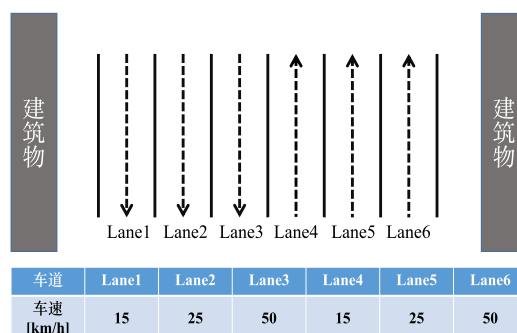


图8 城区6车道及车辆速度

定每辆车在交叉路口不会改变其行驶方向.

2.4 定向天线设置

城区场景发射机(Transmitter, Tx)天线和位于移动公交车顶部的接收机(Receiver, Rx)天线均采用相同的定向天线,天线方向图如图9所示.目标场景中的Tx位于建筑物或路边,相邻Tx间隔均为500m. Tx波束方向如图10所示, Rx波束方向指向公交车移动方向的反向.

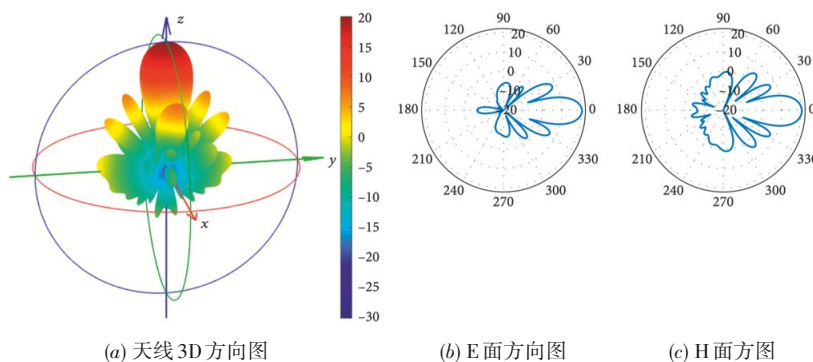


图9 Tx和Rx的天线方向图

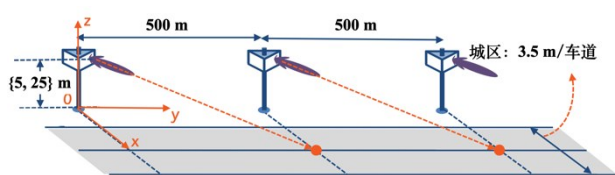


图10 Tx波束方向示意图

3 真实场景的RT仿真

3.1 RT仿真平台及仿真验证

本文采用的RT仿真器是北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室开发的高性能射线跟踪仿真平台—CloudRT. CloudRT包含几何场景库、材料库和天线库三大输入模块,利用高性能计算平台的硬件加速能力,依托散射中心稀疏化、面元划分灵活化等加速算法,大幅提升大型真实场景无线信道的仿真效率^[12].

可登录<http://www.raytracer.cloud/>免费获得.

仿真前需通过传播测量校准RT,再使用标准定义的配置开展密集且接近实际的信道仿真.在各种传播环境和不同频带中,已针对各种测量对RT仿真器进行验证,例如,在25GHz隧道环境^[13]、28GHz城市环境^[14]、26GHz室内环境^[15]和93GHz高架桥环境^[16]中分别对RT进行校准和验证,获得相应的材料参数.通常,材料参数取决于频率,根据Rec. ITU-R P. 1238-7^[17]和Rec. ITU-R P. 2040^[18]:在1~100GHz下获得用于城市和室内环境的材料参数差异很小,且几乎与20~30GHz范围内的频率无关.经校准的材料基本涵盖本文传播环境中的所有材料,例如混凝土、砖块、花岗岩、大理石、玻璃和金属,以保证在RT仿真中使用适当的材料参数获得真实的信道结果.

3.2 仿真配置

本文设计针对移动场景的 RT 仿真流程. 如图 11 所示, 定义移动物体和收发信机的动态移动模式, 并将所有模型和配置上传 RT 仿真器, 对每个 snapshot 更新几何和可视化关系. 仿真分 2 个步骤.

(1) 低精度粗仿真: 采样间隔为 1.38~1.67m, 分析仿真结果特征, 划分传播区域.

(2) 高精度细仿真: 针对每种仿真方案, 以 80λ 的距离和 $8.92\mu\text{s}$ 的时间采样间隔对各传播区域进行 RT 仿真并萃取路径损耗、均方根时延扩展、莱斯 K 因子等信道参数.

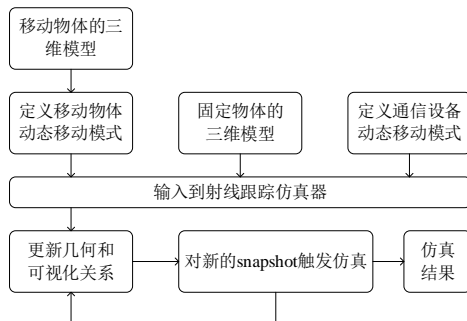


图 11 毫米波移动场景的射线跟踪仿真系统

传播机制考虑直射、反射、散射、绕射和透射, 表 1 详细列出了仿真配置. 依据 3GPP TR 37.885, 城区道路车辆行驶速度为 15~60km/h, 本文道路模型为 4、6 车道, 因此设置车速为 25km/h、50km/h. 路边发射单元只在车辆起始处路旁设置, 500m 仿真路段中只设置一部发射机.

表 2 总结了场景材料的电磁参数, 其中 ϵ' 为相对介

表 1 城区场景仿真设置

| | | |
|----------|--|------------------|
| 频率 | 22.1~23.1GHz | |
| 天线 | 定向天线 | |
| Tx | 功率 | 0dBm |
| | 高度 | 5m, 25m |
| Rx | 高度 | 3.2m |
| | 车辆行驶距离 | 500m |
| 车辆行驶道路设置 | D1: Rx 位于 Lane 2 (4 车道, 图 7), $v=25\text{ km/h}$ | |
| | D2: Rx 位于 Lane 3 (6 车道, 图 8), $v=50\text{ km/h}$ | |
| 车辆类型 | 乘用车 | 占道路总车辆的 60%, 图 4 |
| | 公交车 | 占道路总车辆的 20%, 图 5 |
| | 厢式货车 | 占道路总车辆的 20%, 图 6 |
| 传播机制 | 直射、透射 | 开启 |
| | 反射 | 最高为二阶反射 |
| | 绕射 | 一致性绕射理论 |
| | 散射 | 方向性散射模型 |
| 材料 | 建筑物 | 砖、大理石、玻璃 |
| | 小型散射体、车辆 | 金属 |
| | 树木 | 木头 |
| | 地面 | 混凝土 |

电常数实部, $\tan\delta$ 为损耗角正切, S 和 α 为定向散射模型的散射系数和散射指数^[19]. 木头参数在文献[20, 21]中校准, 混凝土参数在文献[22]中校准. 仿真场景中针对不同物体开启不同传播机制, 如表 3 所示, “√”表示传播机制开启, “×”表示传播机制关闭.

表 2 不同材料的电磁参数

| 材料 | ϵ' | $\tan\delta$ | S | α |
|-----|-------------|--------------|--------|----------|
| 砖 | 1.9155 | 0.0568 | 0.0019 | 49.5724 |
| 大理石 | 3.0045 | 0.2828 | 0.0022 | 15.3747 |
| 玻璃 | 1.0538 | 23.9211 | 0.0025 | 5.5106 |
| 金属 | 1 | 10^7 | 0.0026 | 17.7691 |
| 混凝土 | 5.4745 | 0.0021 | 0.0011 | 109 |
| 木头 | 6.6 | 0.9394 | 0.0086 | 13.1404 |

表 3 仿真中的传播机制

| 物体 | LOS | 反射(最高二阶) | 散射 | 透射 | 绕射 |
|-------|-----|----------|----|----|----|
| 树木 | √ | × | √ | √ | × |
| 建筑物 | √ | √ | × | × | √ |
| 交通标识牌 | √ | √ | × | × | √ |
| 交通灯 | √ | √ | × | × | √ |
| 公交车站 | √ | √ | × | × | √ |
| 地面 | √ | √ | √ | × | × |
| 车辆 | √ | √ | √ | × | √ |

3.3 仿真方案

考虑实际道路的早晚高峰时段、凌晨时段和普通时段, 本文设置 3 种交通流量.

(1) 交通流量拥堵 (Full Traffic Flow, TFFull): 道路上有 100% 随机生成车辆.

(2) 交通流量中等 (Half Traffic Flow, TFHalf): 道路上有 50% 随机生成车辆.

(3) 交通流量稀疏 (Low Traffic Flow, TFLow): 道路上有 10% 随机生成车辆.

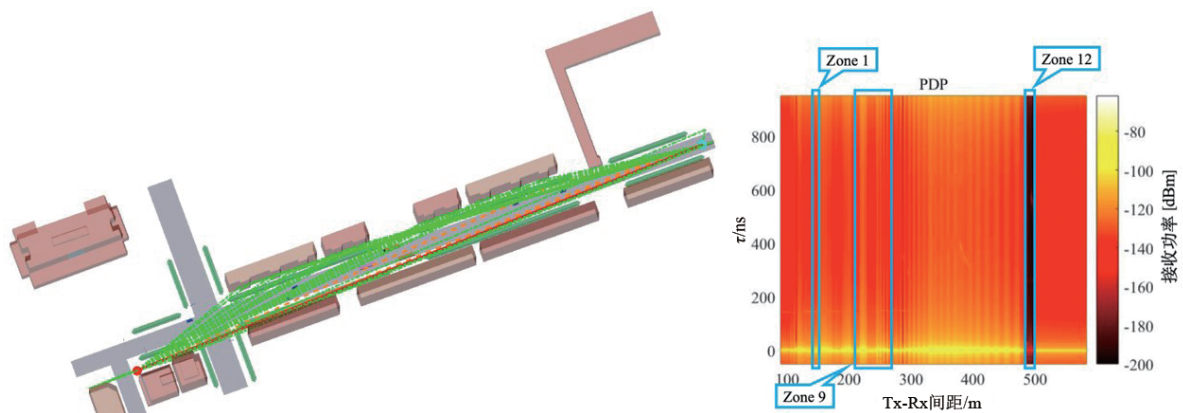
针对不同场景、车道数量、Tx 高度和交通流量, 表 4

表 4 仿真方案

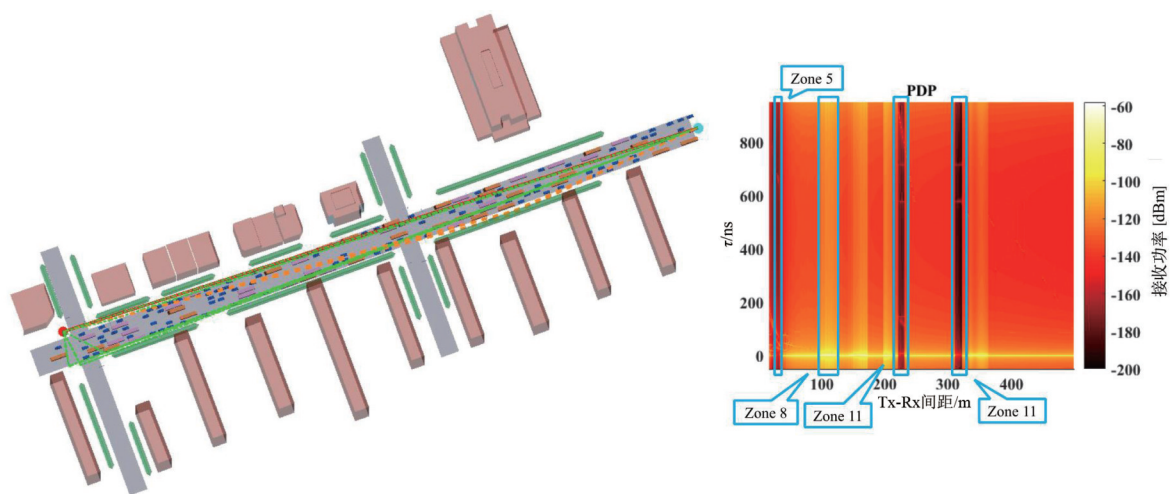
| 索引 | 场景 | 车道数 | Tx 高度 | 交通流量 | 术语 |
|----|----|--------|-------|------|----------------------|
| 1 | 大田 | 4-lane | 25 m | Full | D-4Lanes-Tx25-TFFull |
| 2 | 大田 | 4-lane | 25 m | Half | D-4Lanes-Tx25-TFHalf |
| 3 | 大田 | 4-lane | 25 m | Low | D-4Lanes-Tx25-TFLow |
| 4 | 大田 | 4-lane | 5 m | Full | D-4Lanes-Tx5-TFFull |
| 5 | 大田 | 4-lane | 5 m | Half | D-4Lanes-Tx5-TFHalf |
| 6 | 大田 | 4-lane | 5 m | Low | D-4Lanes-Tx5-TFLow |
| 7 | 大田 | 6-lane | 25 m | Full | D-6Lanes-Tx25-TFFull |
| 8 | 大田 | 6-lane | 25 m | Half | D-6Lanes-Tx25-TFHalf |
| 9 | 大田 | 6-lane | 25 m | Low | D-6Lanes-Tx25-TFLow |
| 10 | 大田 | 6-lane | 5 m | Full | D-6Lanes-Tx5-TFFull |
| 11 | 大田 | 6-lane | 5 m | Half | D-6Lanes-Tx5-TFHalf |
| 12 | 大田 | 6-lane | 5 m | Low | D-6Lanes-Tx5-TFLow |

汇总了12种仿真方案,按照仿真步骤1进行RT粗仿真,仿真结果如图12所示.图12(a)和图12(b)分别为方案9、方案10的典型多径分布和功率时延谱(Power Delay Profile, PDP),以直观区分延迟域中的多径分布.根据不同的多径分布和传播机制划分“区域(Zone)”,表5展示12个典型的划分区域.对方案9标记2个区

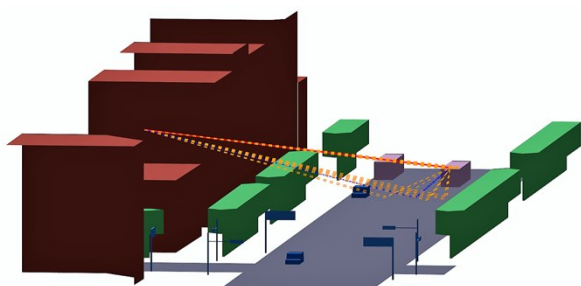
域,对方案10标记3个区域,如图12(c)所示,在区域9中,Rx在Tx主瓣内,LOS信道,存在地面反射,且没有小型散射体或其他车辆的反/散射;如图12(d)所示,在区域11中,Rx在Tx主瓣内,LOS径被车辆遮挡.需要注意的是,功率低于最强径80dB以上的射线均会被天线过滤.



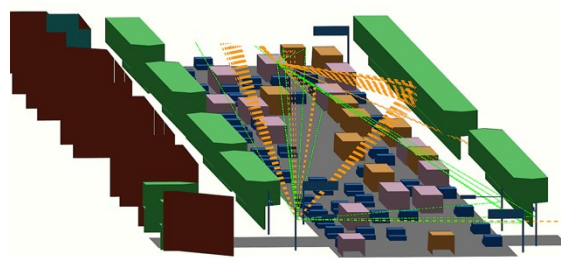
(a) 方案3:D-4Lanes-Tx25-TFLow



(b) 方案10:D-6Lanes-Tx5-TFFull



(c) 区域9:Tx主瓣内,LOS,有地面反射,没有小型散射体或其他车辆的反/散射



(d) 区域11:Tx主瓣内,NLOS,直射径被车辆遮挡

图12 不同方案和分区下的RT仿真结果

表 5 传播区域划分

| 分区 (Zone) | 天线 主瓣 | LOS | NLOS 被车辆 遮挡 | NLOS 被小型散 射体遮挡 | 地面 反射 | 小型散射体 和其他车辆 的反/散射 |
|--------------|----------|-----|-------------------|----------------------|----------|-------------------------|
| 1 | × | √ | × | × | × | × |
| 2 | × | √ | × | × | × | √ |
| 3 | × | √ | × | × | √ | × |
| 4 | × | √ | × | × | √ | √ |
| 5 | × | × | √ | × | — | — |
| 6 | × | × | × | √ | — | — |
| 7 | √ | √ | × | × | × | × |
| 8 | √ | √ | × | × | × | √ |
| 9 | √ | √ | × | × | √ | × |
| 10 | √ | √ | × | × | √ | √ |
| 11 | √ | × | √ | × | — | — |
| 12 | √ | × | × | √ | — | — |

对于每个传播区域,按照仿真步骤 2 仿真. RT 仿真带宽为 1GHz(1000 个频点,每频点为 1MHz).

4 关键信道参数分析

本章基于大量 RT 仿真结果,对大田市的城区场景 12 种仿真方案进行综合信道表征. 信道特征包括路径损耗(Path Loss, PL)、均方根(Root-mean-square, RMS)时延扩展(Delay Spread, DS)、莱斯 K 因子(Rician K-factor, KF)、方位到达角扩展(Azimuth Angular Spread of Arrival, ASA)、方位离开角扩展(Azimuth Angular Spread of Departure, ASD)、垂直到达角扩展(Elevation Angular Spread of Arrival, ESA)、垂直离开角扩展(Elevation Angular Spread of Departure, ESD)和障碍物遮挡损耗(Blockage Loss, BL).

所有信道参数均由正态分布拟合,萃取参数如表 6~表 8 所示. 其中, μ_{DS} 、 μ_{KF} 、 μ_{ASA} 、 μ_{ASD} 、 μ_{ESA} 、 μ_{ESD} 分别是 DS、KF、ASA、ASD、ESA、ESD 的均值; σ_{DS} 、 σ_{KF} 、 σ_{ASA} 、 σ_{ASD} 、 σ_{ESA} 、 σ_{ESD} 分别是 DS、KF、ASA、ASD、ESA、ESD 的标准差.

4.1 路径损耗

使用“A-B”模型拟合以 dB 为单位的的路径损耗^[23],如式(1)所示:

$$PL(\text{dB}) = A \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + B + X_{\sigma} \quad (1)$$

其中, d 为 Tx 和 Rx 之间的距离(单位:m); d_0 为参考距离,即 1m; A 为路径损耗系数; B 为浮动截距; X_{σ} 为阴影衰落,可表示为具有零均值和标准差为 σ_{SF} 的高斯变量,描述与距离相关的平均路径损耗的大尺度信号波动.

如表 6 所示,对比各传播分区的 PL 拟合结果. Zone

1 至 Zone 4(Tx 主瓣外, LOS)以及 Zone 11、Zone 12(Tx 主瓣内, NLOS)的 $|A|$ 大于 Zone 7 至 Zone 10(Tx 主瓣内, LOS). 这表明 Tx 主瓣内和障碍物(其他车辆和交通标识牌)遮挡对 PL 有显著影响. 随着交通流量的增加, Zone 5 和 Zone 11(NLOS, 直射径被其他车辆遮挡)出现的可能性增加.

4.2 均方根时延扩展和莱斯 K 因子

莱斯 K 因子为接收信号中最强分量的功率与其余分量和功率的比值^[24]. KF 传统上是通过基于矩量的方法从窄带信道探测的结果中计算得出的^[20],但本文的超宽带信道在时域中具有高分辨率. 因此可以根据其定义计算 KF,如式(2)所示:

$$KF = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_{\text{strongest}}}{\sum P_{\text{remaining}}}\right) \quad (2)$$

其中, $P_{\text{strongest}}$ 、 $P_{\text{remaining}}$ 分别表示最强多径分量的功率和其余各多径分量功率.

表 6 萃取的 PL 参数

| 场景 | 分区 | PL / dB | | |
|----------------------|----|---------|---------|---------------|
| | | A | B | σ_{SF} |
| D-4Lanes-Tx25-TFFull | 2 | -70.26 | 204.75 | 4.16 |
| | 8 | -3.62 | 79.74 | 2.71 |
| D-4Lanes-Tx25-TFHalf | 8 | 16.95 | 24.76 | 2.50 |
| | 10 | 10.13 | 43.02 | 3.58 |
| D-4Lanes-Tx25-TFLow | 2 | -68.95 | 202.26 | 3.96 |
| | 10 | 6.60 | 51.12 | 3.90 |
| D-4Lanes-Tx5-TFFull | 8 | 20.53 | 15.17 | 2.43 |
| D-4Lanes-Tx5-TFHalf | 2 | -76.02 | 170.44 | 4.97 |
| | 8 | 19.85 | 16.57 | 0.14 |
| D-4Lanes-Tx5-TFLow | 4 | -42.18 | 124.74 | 2.49 |
| | 9 | 10.00 | 40.23 | 5.71 |
| D-6Lanes-Tx25-TFFull | 2 | -10.55 | 110.09 | 3.19 |
| | 8 | 16.55 | 25.49 | 0.06 |
| D-6Lanes-Tx25-TFHalf | 8 | 15.73 | 27.51 | 0.05 |
| | 10 | 10.49 | 41.08 | 4.40 |
| D-6Lanes-Tx25-TFLow | 4 | -21.13 | 125.78 | 2.12 |
| | 9 | 12.59 | 35.17 | 3.27 |
| D-6Lanes-Tx5-TFFull | 5 | -24.10 | 134.65 | 16.12 |
| | 8 | -16.42 | 93.07 | 5.76 |
| | 11 | 163.87 | -272.66 | 0.88 |
| D-6Lanes-Tx5-TFHalf | 4 | -26.86 | 114.01 | 2.29 |
| | 8 | 18.66 | 19.67 | 0.06 |
| D-6Lanes-Tx5-TFLow | 12 | 99.19 | -86.21 | 5.82 |
| | 1 | 277.23 | -253.11 | 5.98 |
| | 9 | 22.40 | 10.88 | 5.77 |
| D-6Lanes-Tx5-TFLow | 10 | -51.38 | 155.12 | 5.40 |
| | 12 | -16.34 | 175.27 | 2.69 |

均方根时延扩展用于量化多径信道的色散效应, 定义为PDP二阶矩的平方根^[24], 如式(3)所示:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \tau_n^2 \cdot P_n}{\sum_{n=1}^N P_n} - \left(\frac{\sum_{n=1}^N \tau_n \cdot P_n}{\sum_{n=1}^N P_n} \right)^2} \quad (3)$$

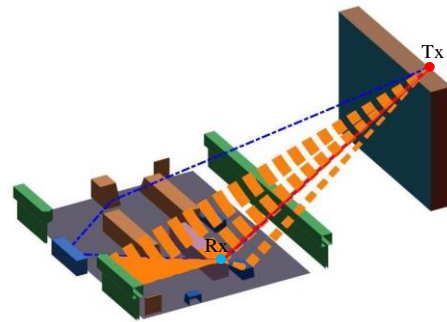
其中, σ_{τ} 表示均方根时延扩展; P_n 、 τ_n 分别表示第 n 条多径的功率和时延。

拟合的KF与DS参数如表7所示. 经对比发现, 当Rx在Tx主瓣外且LOS或在Tx主瓣内且NLOS时, KF均值小于Rx在Tx主瓣内且LOS的情况. 相应地, DS均值较大. 如图13所示, 这是因为直射径没有对准Tx主瓣, 功率较低, 但从远处经由建筑物、地面或其他移动车辆散射或反射的射线是位于Tx主瓣内的, 功率相对较高.

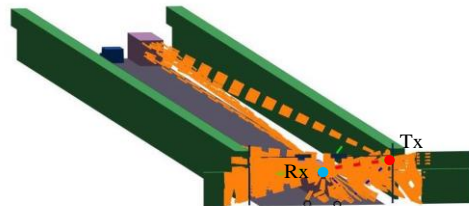
相同场景、Tx高度和相同传播区域的情况下, 交通流量拥堵时的KF均值小于交通流量稀疏时, 而DS均

表7 萃取的DS与KF参数

| 场景 | 分区 | DS/ns | | KF/dB | |
|----------------------|----|------------|---------------|------------|---------------|
| | | μ_{DS} | σ_{DS} | μ_{KF} | σ_{KF} |
| D-4Lanes-Tx25-TFFull | 2 | 9.53 | 6.77 | 14.41 | 6.39 |
| | 8 | 9.15 | 2.63 | 13.75 | 14.46 |
| D-4Lanes-Tx25-TFHalf | 8 | 4.96 | 2.11 | 19.15 | 18.27 |
| | 10 | 3.48 | 1.08 | 9.41 | 11.48 |
| D-4Lanes-Tx25-TFLow | 2 | 9.01 | 7.13 | 14.61 | 7.14 |
| | 10 | 3.80 | 1.26 | 23.53 | 23.40 |
| D-4Lanes-Tx5-TFFull | 8 | 2.97 | 1.83 | 51.88 | 18.84 |
| D-4Lanes-Tx5-TFHalf | 2 | 23.71 | 25.18 | 13.83 | 13.06 |
| | 8 | 1.76 | 0.57 | 65.19 | 7.78 |
| D-4Lanes-Tx5-TFLow | 4 | 4.81 | 2.77 | 22.31 | 2.73 |
| | 9 | 5.56 | 1.26 | 1.66 | 6.28 |
| D-6Lanes-Tx25-TFFull | 2 | 9.70 | 5.34 | 15.09 | 5.09 |
| | 8 | 1.76 | 0.54 | 55.49 | 3.40 |
| D-6Lanes-Tx25-TFHalf | 8 | 1.27 | 0.01 | 45.69 | 17.05 |
| | 10 | 4.26 | 0.50 | 52.77 | 3.82 |
| D-6Lanes-Tx25-TFLow | 4 | 9.40 | 4.46 | 14.61 | 7.46 |
| | 9 | 2.46 | 0.95 | 6.93 | 1.92 |
| D-6Lanes-Tx5-TFFull | 5 | 18.12 | 11.11 | -2.23 | 18.52 |
| | 8 | 7.15 | 1.36 | 3.80 | 1.01 |
| | 11 | 178.41 | 46.24 | 13.57 | 4.43 |
| D-6Lanes-Tx5-TFHalf | 4 | 3.30 | 1.15 | 19.36 | 5.89 |
| | 8 | 2.11 | 0.73 | 59.79 | 10.55 |
| D-6Lanes-Tx5-TFLow | 1 | 36.76 | 5.94 | 0.61 | 3.91 |
| | 9 | 5.49 | 1.02 | 13.69 | 23.61 |
| | 10 | 4.29 | 1.55 | 7.39 | 6.90 |
| | 12 | 6.91 | 0.90 | -2.58 | 6.54 |



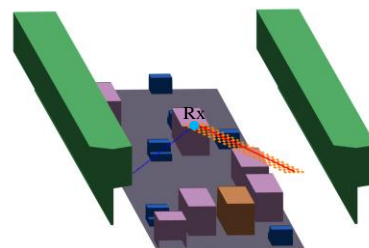
(a) 对准天线主瓣的反射径



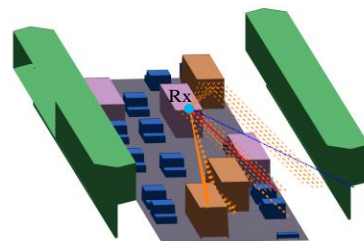
(b) 对准天线主瓣的散射径

图13 对准天线主瓣的非直射径

值大于交通流量稀疏时. 如图14所示, 在交通拥堵的情况下, 会有更多移动车辆和多径分量, 导致最强径以外的多径功率和时延分量增加.



(a) 城区-Tx25m-交通流量中等-Zone8



(b) 城区-Tx25m-交通流量拥堵-Zone8

图14 不同的交通流量对KF和DS的影响

此外, 如图15所示, 存在反射径且NLOS下的KF均值大于其他无反射径且NLOS的情况, 且与LOS情况相近. 通过分析发现, 该情况下发生反射的表面均为金属的移动车辆或地面, 并且反射的射线(一阶和二阶反射)几乎与直射径一样强.

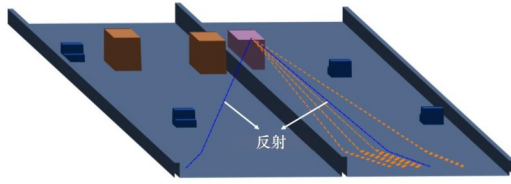


图 15 NLOS 情况下反射对 KF 的影响

4.3 角度扩展

根据 3GPP 定义,复合信号的常规角度扩展(Angular Spread, AS)计算如式(4)所示:

$$\sigma_{AS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\theta_{n,\mu})^2 \cdot P_n}{\sum_{n=1}^N P_n}} \quad (4)$$

其中, σ_{AS} 表示角度扩展; P_n 表示第 n 条多径的功率; $\theta_{n,\mu}$

由式(5)定义:

$$\theta_{n,\mu} = \text{mod}(\theta_n - \mu_\theta + \pi, 2\pi) - \pi \quad (5)$$

其中, θ_n 是第 n 条射线的到达角 (Angle of Arrival, AOA) 或离开角 (Angle of Departure, AOD) 或垂直到达角 (Elevation Angular of Arrival, EOA) 或垂直离开角 (Elevation Angular of Departure, EOD). μ_θ 可由式(6)计算:

$$\mu_\theta = \frac{\sum_{n=1}^N \theta_n \cdot P_n}{\sum_{n=1}^N P_n} \quad (6)$$

表 8 为拟合的 AS 参数,总体来看, ASD 和 AS 大于 ESD 和 ESA,说明大多数多径来自水平方向. 该数据也反映了一个事实:如图 16 所示,城区场景中,位于 Rx 车辆两侧的物体多于位于 Rx 车辆上、下方的物体.

图 17 展示了 AS 随 Tx-Rx 距离的变化. 可看出, LOS 信道下, Tx 主瓣内的 AS 均值通常小于 Tx 主瓣外. 这表示随着 Tx-Rx 间距增大, Rx 逐渐对准 Tx 主瓣,且发生反

表 8 萃取的 AS 参数

| 场景 | 分区 | ASA/(°) | | ESA/(°) | | ASD/(°) | | ESD/(°) | |
|----------------------|----|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| | | μ_{ASA} | σ_{ASA} | μ_{ESA} | σ_{ESA} | μ_{ASD} | σ_{ASD} | μ_{ESD} | σ_{ESD} |
| D-4Lanes-Tx25-TFFull | 2 | 29.29 | 30.79 | 9.75 | 10.49 | 13.19 | 12.22 | 1.32 | 1.23 |
| | 8 | 2.63 | 0.85 | 0.01 | 0.00 | 2.72 | 0.90 | 0.01 | 0.00 |
| D-4Lanes-Tx25-TFHalf | 8 | 36.11 | 48.07 | 0.02 | 0.01 | 1.64 | 1.02 | 0.02 | 0.01 |
| | 10 | 1.55 | 0.53 | 2.68 | 1.71 | 9.54 | 2.71 | 0.35 | 0.20 |
| D-4Lanes-Tx25-TFLow | 2 | 27.93 | 30.88 | 9.41 | 10.46 | 12.98 | 12.14 | 1.23 | 1.18 |
| | 10 | 4.79 | 20.68 | 3.08 | 1.36 | 0.04 | 0.17 | 0.39 | 0.17 |
| D-4Lanes-Tx5-TFFull | 8 | 21.30 | 54.92 | 0.07 | 0.14 | 0.11 | 0.28 | 0.01 | 0.05 |
| D-4Lanes-Tx5-TFHalf | 2 | 27.78 | 33.58 | 8.13 | 7.07 | 18.92 | 20.02 | 5.14 | 4.89 |
| | 8 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| D-4Lanes-Tx5-TFLow | 4 | 6.36 | 4.34 | 1.48 | 0.33 | 2.69 | 1.92 | 0.93 | 0.24 |
| | 9 | 0.01 | 0.01 | 1.02 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | 0.09 |
| D-6Lanes-Tx25-TFFull | 2 | 20.04 | 7.42 | 21.09 | 8.71 | 0.72 | 0.49 | 1.83 | 0.74 |
| | 8 | 0.05 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.05 | 0.01 |
| D-6Lanes-Tx25-TFHalf | 8 | 0.05 | 0.05 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| | 10 | 0.03 | 0.02 | 3.27 | 0.14 | 0.02 | 0.02 | 0.42 | 0.02 |
| D-6Lanes-Tx25-TFLow | 4 | 18.52 | 6.82 | 23.38 | 9.98 | 0.57 | 0.45 | 1.85 | 0.79 |
| | 9 | 0.02 | 0.03 | 4.71 | 0.35 | 0.01 | 0.01 | 0.60 | 0.04 |
| D-6Lanes-Tx5-TFFull | 5 | 52.72 | 35.28 | 5.75 | 3.73 | 14.08 | 8.38 | 2.44 | 1.52 |
| | 8 | 40.88 | 8.95 | 0.01 | 0.00 | 1.09 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| | 11 | 17.84 | 0.65 | 0.43 | 0.06 | 4.07 | 0.13 | 0.14 | 0.02 |
| D-6Lanes-Tx5-TFHalf | 4 | 2.09 | 1.93 | 2.14 | 1.26 | 3.16 | 1.04 | 1.52 | 0.76 |
| | 8 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| | 12 | 24.69 | 6.11 | 3.41 | 0.09 | 0.36 | 0.11 | 0.50 | 0.05 |
| D-6Lanes-Tx5-TFLow | 1 | 61.38 | 6.31 | 9.68 | 0.56 | 30.04 | 4.66 | 7.69 | 0.93 |
| | 9 | 0.01 | 0.00 | 1.21 | 0.17 | 0.01 | 0.00 | 0.78 | 0.11 |
| | 10 | 72.23 | 44.20 | 2.69 | 0.28 | 0.99 | 0.56 | 1.72 | 0.18 |
| | 12 | 0.08 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 0.15 | 0.02 | 0.06 | 0.01 |

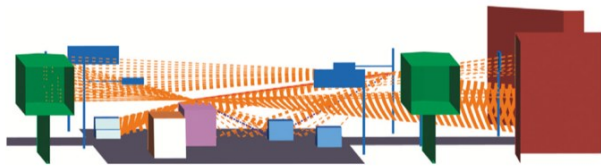


图 16 在城区场景下的多径

射、散射的物体相比于 Rx 更靠近 Tx. 此外,主瓣过滤低能量射线,导致 AS 降低. 另外,值得注意的是,当 Rx 车辆位于天线主瓣内时,NLOS 下的 AS 远大于 LOS 下的 AS.

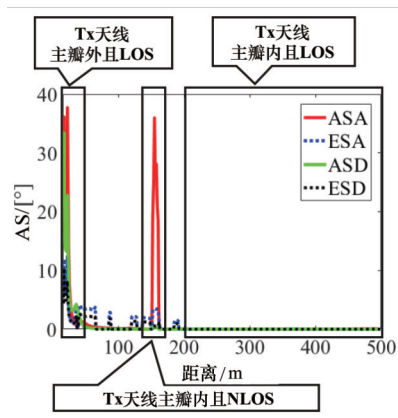


图 17 城区场景的水平和垂直轴 AS

4.4 遮挡损耗

Rx 所在公交车在行驶中,直射径可能会被城区数量众多的建筑物、交通标识牌等小型散射体和移动车辆遮挡. 如图 18 所示,利用均值为 μ_{BL} 、 μ_{BL_i} 且标准差为 σ_{BL} 、 σ_{BL_i} 的正态分布来计算和拟合每个分段的最大遮挡损耗和相应的遮挡时间,参数总结在表 9 中.

表 9 萃取的 BL 参数

| μ_{BL} /dB | σ_{BL} /dB | μ_{BL_i} /s | σ_{BL_i} /s |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| 59.75 | 35.94 | 2.76 | 5.67 |

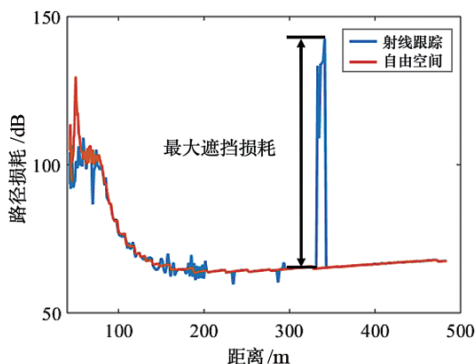


图 18 遮挡损耗示例

4.5 仿真与标准信道模型参数对比

依据针对 0.5~100GHz 信道标准 3GPP TR 38.901, 将 23GHz 仿真信道模型与 24GHz 标准信道模型进行参数对比,如表 10 所示. 可以发现,二者在 PL、DS、KF、AS 信道参数的数值量级相同,从侧面证明了本文仿真结果的准确性.

表 10 23GHz 仿真信道与 24GHz 标准信道模型参数对比

| 参数 | 24GHz 街道峡谷 | 23GHz 城区车载移动通信 |
|-----------|-------------------|---------------------------|
| PL / dB | A: 21 | A: 6.60-22.40 |
| | B: 32.4 | B: 10.88-79.74 |
| | σ_{SF} : 4 | σ_{SF} : 0.06-5.77 |
| DS / ns | 33.88 | 1.76~7.15 |
| KF / dB | 9 | 3.8~51.88 |
| ASD / (°) | 13.80 | 0.00~9.54 |
| ASA / (°) | 41.69 | 0.01~73.23 |
| ESA / (°) | 3.89 | 3.80~51.88 |

23GHz 车载移动通信场景的路径损耗系数 A 在部分传播区域中的数值远小于 20(自由空间传播),说明这些区域中有较强的多径分量有效增强接收信号功率. 此外,由于本次研究的 23GHz 车载移动信道采用定向天线,因此在部分传播区域中 KF 会远大于 24GHz 标准信道,相应地,这些区域中的 DS 会远小于标准信道. 这都反映出发射机和接收机都采用定向天线的情况下,在部分区域(比如收发信机定向天线主瓣对齐时)的无线信道存在较强的“空间滤波”效应,定向天线的主瓣有效滤除了其他方向的多径影响,使信道特性得以改善.

5 结论

本文研究 23GHz 车载移动通信信道,在不同传播环境中针对不同天线高度进行了 RT 仿真,对每个区域的 PL、KF、DS、AS 和 BL 进行表征. 在重构的大田三维城市环境中,考虑所有主要建筑物和小型散射体(例如交通灯、交通标志、公交车站和树木)的实际几何形状和材料,汇总分析了基本信道参数,可以将这些参数导入标准信道模型中,为类似环境生成实际信道. 本文的研究和提供的建议将对指导车辆通信系统的设计和部署有一定帮助.

参考文献

[1] 张德干,崔玉亚,陈晨,等. 一种面向高速路车联网场景的自适应路由方法[J]. 电子学报, 2020, 48(1): 172 - 179.
Zhang D G, Cui Y Y, Chen C, et al. An adaptive routing method for high-speed-road scenario of the Internet of vehicle[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(1): 172 - 179. (in Chinese)

- [2] Wang C X, Bian J, Sun J, et al. A survey of 5G channel measurements and models[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 3142 – 3168.
- [3] Han C, Jornet J M, Akyildiz I. Ultra-massive MIMO channel modeling for graphene-enabled terahertz-band communications[A]. 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring) [C]. Porto, Portugal: IEEE, 2018. 1 – 5.
- [4] 谭晓衡, 谢朝臣, 郭坦. 基于区域感知贝叶斯决策的 5G 超密集异构网络联合垂直切换技术研究[J]. *电子学报*, 2018, 46(3): 582 – 588.
Tan X H, Xie C C, Guo T. Research of joint vertical hand-off technology based on area sensing Bayesian decision in ultra-dense het net for 5G[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(3): 582 – 588. (in Chinese)
- [5] ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[EB/OL]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf, 2015/2020.
- [6] Salous S, Degli Esposti V, Fuschini F, et al. Millimeter-Wave Propagation: Characterization and modeling toward fifth-generation systems. [Wireless Corner] [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, 58(6): 115 – 127.
- [7] 胡林林, 曾造金, 陈洪斌, 等. 毫米波/太赫兹扩展相互作用速调管放大器的应用及研究进展[J]. *电子学报*, 2019, 47(1): 211 – 219.
Hu L L, Zeng Z J, Chen H B, et al. Application and development of extended interaction klystrons in millimeter-wave and terahertz band[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(1): 211 – 219. (in Chinese)
- [8] Antonescu B, Moayyed M T, Basagni S. mmWave channel propagation modeling for V2X communication systems[A]. 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) [C]. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2017. 1 – 6.
- [9] Kim J, Chung H, Noh G, et al. Overview of moving network system for 5G vehicular communications[A]. Proceedings of 2019 13th European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP) [C]. Krakow, Poland: EurAAP, 2019. 1 – 5.
- [10] 陈兵兵, 曹欣远, 陈明生, 等. 基于欠定方程的频谱峰值搜索算法及其在连续毫米波雷达系统中的应用[J]. *电子学报*, 2020, 48(2): 369 – 374.
Chen B B, Cao X Y, Chen M S, et al. A spectral peak search algorithm based on underdetermined equation and its application in continuous millimeter wave radar system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(2): 369 – 374. (in Chinese)
- [11] He D P, Ai B, Guan K, 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] He D P, Ai B, Guan K, 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.
- [15] Ai B, Guan K, He R S, et al. On indoor millimeter wave massive MIMO channels: Measurement and simulation [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(7): 1678 – 1690.
- [16] Yang J Y, Ai B, Guan K, et al. A geometry-based stochastic channel model for the millimeter-wave band in a 3GPP high-speed train scenario[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(5): 3853 – 3865.
- [17] ITU-R P.1238-7. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz[EB/OL]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-9-201706-1!!PDF-E.pdf, 2012/2020.
- [18] ITU-R P.2040. Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz [EB/OL]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-1!!PDF-E.pdf, 2013/2020.
- [19] Ko J, Noh Y S, Kim Y C, et al. 28 GHz millimeter-wave measurements and models for signal attenuation in vegetated areas[A]. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) [C]. Paris, France: IEEE, 2017. 1808 – 1812.
- [20] Rahim H M, Leow C Y, Rahman T A. Millimeter wave

propagation through foliage: Comparison of models[A]. 2015 IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC)[C]. Kuching, Malaysia: IEEE, 2015. 236 – 240.

- [21] 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.
- [22] Pathak P, Burnside W, Marhefka R. A uniform GTD analysis of the diffraction of electromagnetic waves by a smooth convex surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1980, 28(5): 631 – 642.
- [23] Zhou T, Tao C, Salous S, et al. Channel characterization in high-speed railway station environments at 1.89GHz [J]. Radio Science, 2015, 50(11): 1176 – 1186.
- [24] Rappaport T S. Wireless communications: Principles and practice[EB/OL]. <https://www.semanticscholar.org/paper/>

Wireless-communications-principles-and-practice-Rappa - port/c2fe958ccd2d5b087aedecf42615736d3ebcee7, 1996/2020.

作者简介



张文茹 女, 1975年1月生, 河北唐山人. 2001年毕业于厦门大学物理系, 硕士, 主要从事无线通信、网络技术等方面的研究工作.
E-mail: zhangwenru@gdeni.cn



汪莞乔 女, 1995年9月生, 辽宁丹东人. 2020年毕业于北京交通大学电子信息工程学院, 硕士, 主要从事射线跟踪无线信道仿真技术方面的研究工作.
E-mail: wangwanqiao@bjtu.edu.cn