

基于射线追踪的

高速场景 V2I 链路的干扰研究

Research on Interference of V2I Link
in High-speed Scenario
Based on Ray-tracing

张晴雯¹, 郭洪辛¹, 谢荣浩¹, 宋玉巧² (1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

Zhang Qingwen¹, Guo Hongxin¹, Xie Ronghao¹, Song Yuqiao² (1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

摘要:

毫米波通信能够满足目前车辆与基础设施之间通信中低延迟、高可靠性和高数据传输速率的要求,是 V2I 中的关键技术和重要研究方向。为探究中继车及车流量的不同对 V2I 通信的干扰,对毫米波(22.1~23.1 GHz)波段的高速场景中 V2I 通信进行了射线追踪仿真。考虑到频率规划策略、中继车数量和车流量的不同,分析比较了不同部署方式下的信干噪比分布,为 V2I 通信系统的设计和部署提供支持。

关键词:

车联网;毫米波;射线追踪技术;V2I;SINR
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.02.008
文章编号:1007-3043(2023)02-0042-06
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Millimeter wave communication can meet the requirements of low delay, high reliability and high data transmission rate in Vehicle-to-Infrastructure communication. It is a key technology and important research direction in V2I. In order to explore the interference of relay vehicles and different traffic flows on V2I communication, ray tracing simulations are performed on V2I communication in high-speed scenario in the millimeter wave (22.1~23.1 GHz) band. Considering the different frequency planning strategies, the number of relay vehicles and traffic flows, it analyzes and compares the SINR distribution under different deployments, so as to provide support for the design and deployment of V2I communication system.

Keywords:

Internet of vehicles; mmWave; Ray-tracing; V2I; SINR

引用格式:张晴雯, 郭洪辛, 谢荣浩, 等. 基于射线追踪的高速场景 V2I 链路的干扰研究[J]. 邮电设计技术, 2023(2):42-47.

1 概述

随着无线通信技术的发展,汽车驾驶逐渐趋于智能化, V2X (Vehicle-to-Everything) 技术应运而生。V2X 技术即车与外界的信息交换,能够在车辆之间 (Vehicle-to-Vehicle, V2V)、车辆与基础设施之间 (Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、车辆与行人之间 (Vehicle-to-Pedestrian, V2P) 实现更精准的数据交换,

提高汽车对周围环境的感知能力,减少交通事故的发生。同时,该技术还可以为行人和驾驶员提供实时的路况信息,在一定程度上提高通行效率^[1-2]。

V2X 的应用起源于美国的 2 起特大交通事故,当时人们觉得如果有一种车辆之间可以互相通信的系统,就可以避免一些事故^[3]。随后美国的一些相关国际标准机构制定了一系列 V2X 车联网通信标准。日本的车辆信息与通信系统 (Vehicle Information and Communication System, VICS) 中心也较早展开了对车联网技术研究并取得了一定成果^[4-5]。相比欧美、日本,我国 V2X 技术起步较晚,但由于我国在 5G 方面具有引领地位,且在基于蜂窝网络的车用无线通信技术

基金项目:北京交通大学大学生创新创业训练计划资助项目 (210105031)

收稿日期:2022-12-16

(Cellular Vehicle-to-Everything, C-V2X) 方面具有创新优势, 我国 V2X 技术有望实现更进一步的发展。

V2X 技术要求车辆在高速变化的环境中能以较高的速度实现安全驾驶, 这就要求超可靠、低延时、高数据速率的通信^[6]。低频波段的频谱效率有限, 而大带宽的毫米波通信可以实现以上需求。毫米波技术正在成为支持高数据速率 V2I 通信的关键技术^[7]。为了进一步优化技术性能, 需要探究中继车及不同车流量对 V2I 通信的干扰。对于毫米波通信, 本文采用射线追踪(Ray-Tracing, RT)仿真, 建立准确的信道模型。

射线追踪是一种被广泛应用到移动通信环境中的电磁仿真技术, 最早于 20 世纪 90 年代开始应用于无线通信领域^[8]。该方法根据电磁波传播理论和几何光学理论, 考虑电磁波的直射、散射、反射及绕射等多种传播机制, 计算出所追踪射线的准确的功率、时延、角度、极化等信息。与随机统计模型相比, 射线追踪可以在不同的场景模型以及不同的电磁传播环境中, 准确地预测和分析电磁波的传播状态^[9]。然而, 射线追踪技术的计算具有一定的复杂度且效率较低, 为了保证效率和精准性, 采用北京交通大学研发的高性能平台 CloudRT 进行射线追踪的仿真与计算^[10]。

本文对高速场景下毫米波频段(22.1~23.1 GHz) V2V 和 V2I 进行干扰研究, 在不同的频率规划策略、中继车数量和车流量场景下, 对接收功率、信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)等进行了分析和比较。本文提供的分析和数据有助于研究人员了解毫米波频段的 V2V 和 V2I 的干扰情况, 并有助于未来毫米波车地通信系统的研究。

本文将首先对高速场景仿真模型和仿真配置进行简单介绍, 随后在第 3 章对仿真所得数据进行分析, 研究 3 种频率规划策略以及中继车的存在对 SINR 的影响, 并对比不同车流量情况下通信质量的变化, 最后进一步分析并得出结论。

2 建模及仿真配置介绍

2.1 仿真模型与参数设置

本文选择典型高速公路作为仿真场景。高速公路模型由 SketchUp 软件绘制, 其 3D 模型如图 1 所示。该模型为一个长 1 500 m 的双向 8 车道公路模型, 道路中央分隔带宽 0.5 m、高 1.1 m, 由混凝土材料填充而成, 道路两侧设有宽 0.5 m、高 2 m 的金属隔音板, 每个车道宽 3.6 m, 道路总宽度为 29.5 m。

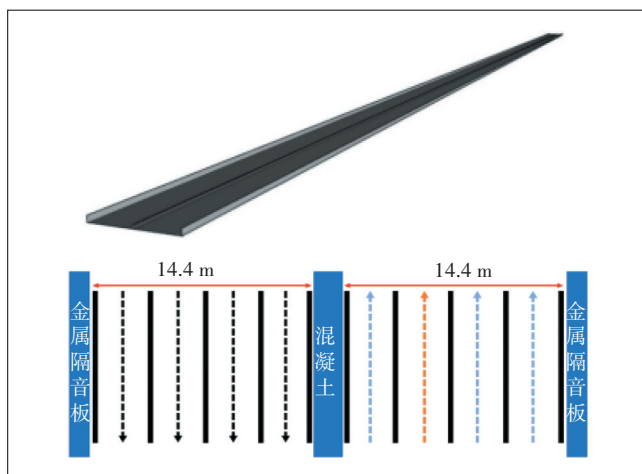


图 1 高速公路 3D 模型及俯视图

高速公路主要的车辆类型为公共汽车、小汽车以及卡车, 其 3D 模型如图 2 所示。小汽车与卡车作为干扰车辆随机行驶于双向八车道, 公共汽车作为接收天线的载体以及中继车行驶。

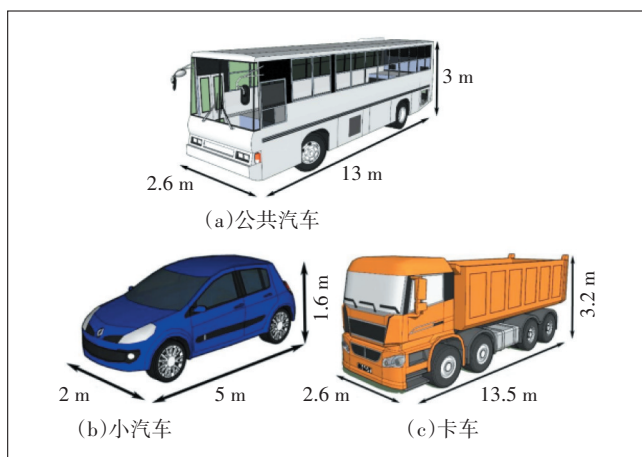


图 2 车辆模型

2.2 仿真配置

高速场景中, 公共汽车沿第 3 车道直线行驶 1 500 m, 接收天线 Rx 放置于移动的公共汽车前端距顶部 0.15 m 处, 于第 3 车道中央处与车保持相对静止向前移动 1 500 m, 主瓣指向汽车前进方向。

一种发射天线 Tx 部署在与接收机同侧的路边基站上, 基站的位置分别为 $x=250\text{ m}$ 、 750 m 、 $1\ 250\text{ m}$, 发射天线设置如表 1 所示, 一个基站上架设 2 个发射天线, 如图 3 中 Tx1~Tx6 所示。另一种发射天线位于中继车尾部高 0.15 m 处, 主瓣指向与接收天线相反, 分别行驶于第 2、3 车道。接收天线 Rx 和中继车尾部的发射天线 Tx7 如图 3 所示。

表1 发射天线设置

发射天线	位置(x, y, z)	主瓣指向(x, y, z)
Tx1	(250 m, 0 m, 15 m)	(0 m, 9.1 m, 3.15 m)
Tx2	(250 m, 0 m, 15 m)	(500 m, 9.1 m, 3.15 m)
Tx3	(750 m, 0 m, 15 m)	(500 m, 9.1 m, 3.15 m)
Tx4	(750 m, 0 m, 15 m)	(1 000 m, 9.1 m, 3.15 m)
Tx5	(1 250 m, 0 m, 15 m)	(1 000 m, 9.1 m, 3.15 m)
Tx6	(1 250 m, 0 m, 15 m)	(1 500 m, 9.1 m, 3.15 m)

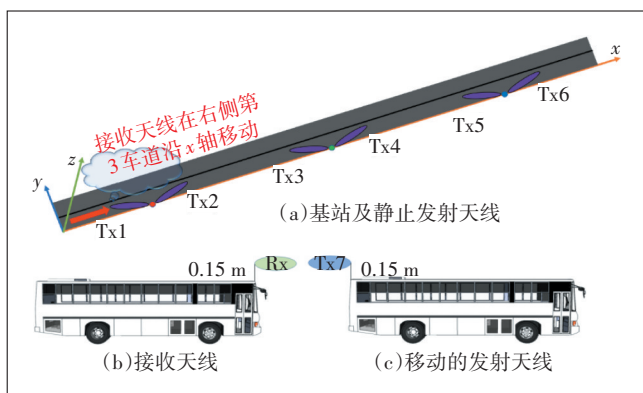


图3 基站及静止发射天线位置

仿真频率涉及到3种频率规划策略:频率不复用、频率复用、频率反向复用。其频率配置如图4所示。仿真模型中使用到的材料的电磁参数如表2所示,其中 ϵ'_r 为材料相对介电常数的实部, $\tan \delta$ 为损耗因子, S 和 α 为散射系数与散射指数。

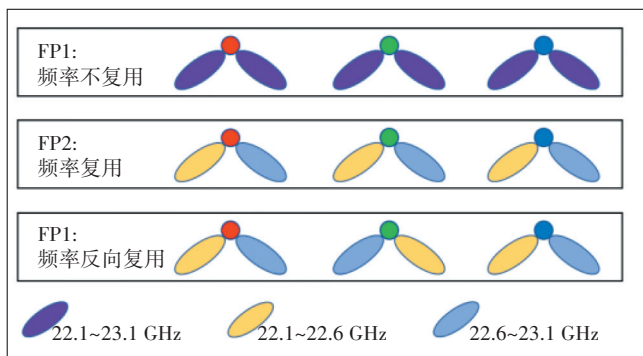


图4 3种频率规划策略^[11]

3 结果及分析

3.1 中继车对通信质量的影响

在高速场景下,本文首先研究不同频率规划策略和中继车的存在所产生的干扰,在无中继车、1辆中继车轨迹顺序生成、1辆中继车轨迹随机生成、2辆中继车轨迹顺序生成和2辆中继车轨迹随机生成情况下,

表2 仿真参数配置

参数		取值			
Tx	高度	15 m; 3.15 m			
	位置	$y=250\text{ m}, 750\text{ m}, 1\ 250\text{ m}$; 随机			
Rx	高度	3.15 m			
	样本间隔	1 m			
	样本点数	1 500			
传播机制设置	直射	√			
	反射	阶数为2			
	散射	方向性散射模型			
	透射	√			
仿真频率范围	FP1	22.1~23.1 GHz			
	FP2	22.1~22.6 GHz, 22.6~23.1 GHz			
	FP3	22.1~22.6 GHz, 22.6~23.1 GHz			
材料电磁参数	参数	ϵ'_r	$\tan \delta$	S	α
	金属	1	10^7	0.26	17.761
	混凝土	5.474 5	0.002 1	0.11	109

分别以频率不复用(FP1)、频率复用(FP2)、频率反向复用(FP3)这3种频率规划策略进行射线追踪仿真,具体仿真情况如表3所示。

表3 仿真案例

车流量	中继车数量	中继车生成轨迹	频率规划策略
无	0	无	FP1-3
	1(第2车道)	顺序生成	FP1-3
		随机生成	FP1-3
	2(第2,3车道)	顺序生成	FP1-3
随机生成		FP1-3	
有	0	无	FP1-3
	1(第2车道)	随机生成	FP1-3

为了有效且快速完成仿真,仅设置了3个距离相等的基站,道路长度为1 500 m,但在现实中道路很长,必然不只存在这3个基站,在这段道路以外的基站对Rx的影响是无法计算得到的。以FP1的情况为例,接收天线Rx在0~250 m范围内移动时收到的信号主要来自于发射天线Tx1, Tx2~Tx6此时都作为干扰源,因Tx3的主瓣指向Rx一方且距离Rx最近,所以Tx3为主干扰源,但在实际情况中基站很多,Rx前后应都存在干扰,不符合实际,无法用来进行分析。同样地,250~500 m、1 000~1 500 m区域也无法用来进行分析。在500~1 000 m中,Rx在500~750 m内移动时Tx3主瓣指向Rx一方,在750~1 000 m移动时则背着发射天线Tx4,所以500~750 m范围内的数据更具有代表性,选择500~750 m范围进行分析(见图5)。

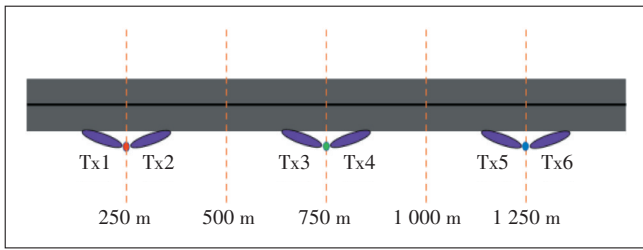


图5 基站位置

本文计算了500~750 m范围内每种部署下的接收功率与SINR,并根据计算得到的SINR画出其累计概率分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)图,如图6所示。并定量观测有无车流量的SINR的分布情况,在每种情况下分别取分布函数 $F(x)=0.1$ 、 $F(x)=0.5$ 、 $F(x)=0.9$ 时SINR的取值,具体情况如表4所示。

3.1.1 无中继车时SINR数据分析

根据表4中数据,分析SINR值的分布可知,当无

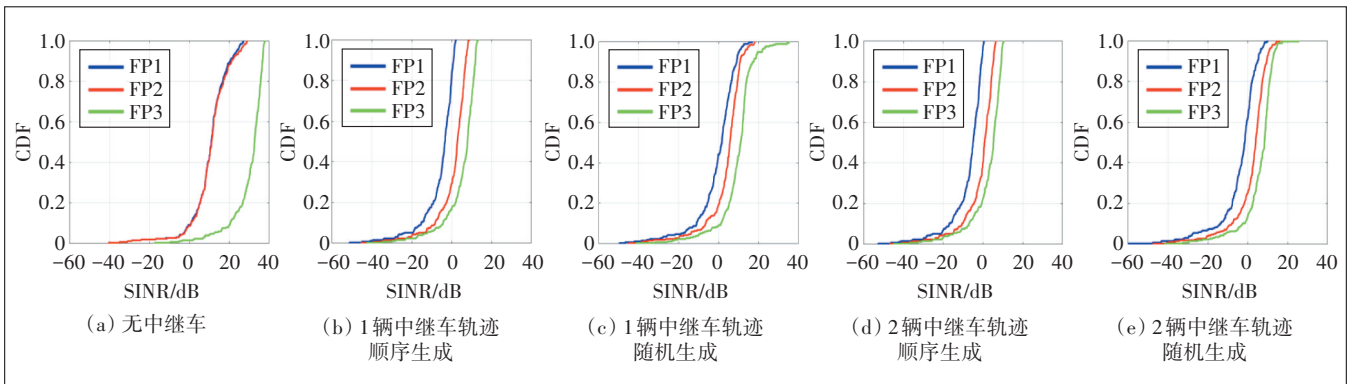


图6 Rx在500~750 m范围内SINR的CDF图

表4 SINR分布

中继车情况	$F(x)=0.1$			$F(x)=0.5$			$F(x)=0.9$		
	FP1	FP2	FP3	FP1	FP2	FP3	FP1	FP2	FP3
无中继车/dB	1.0	1.0	20.5	11.0	11.0	33.0	20.5	21.0	36.5
1辆中继车轨迹顺序生成/dB	-15.5	-8.0	-4.5	-3.5	3.0	8.0	1.0	7.0	12.0
2辆中继车轨迹随机生成/dB	-11.0	-7.0	1.0	1.5	5.5	11.0	9.0	10.5	17.0
2辆中继车轨迹顺序生成/dB	-17.0	-10.5	-7.0	-5.0	0.5	5.5	-1.0	5.0	9.0
2辆中继车轨迹随机生成/dB	-14.0	-9.0	-3.0	-1.5	4.0	8.5	5.0	9.5	12.5

中继车干扰时,对于FP1、FP2和FP3,接收机的SINR值均处于较高状态,通过将同种情况下FP1、FP2和FP3的SINR值相对比可知,FP1与FP2的SINR值分布大致相同,而FP3的SINR值具有明显上升,可见在无中继车条件下,FP1与FP2的通信质量大致相同,信号质量均较好,而FP3的通信质量相较于前两者更有明显优势。

3.1.1.2 1辆中继车轨迹顺序生成时SINR数据分析

根据表4中数据,分析SINR值的分布可知,存在1辆中继车干扰时,与无中继车存在相比,对于FP1、FP2和FP3,接收机的SINR值均大幅度减小,通信质量大大降低。同时,通过同种情况下FP1、FP2和FP3的SINR值分布对比可知,在3种频率规划策略当中,FP1的通信质量最低,FP2的通信质量居中,FP3的通信质

量最好,但三者均处于较低状态,说明存在1辆中继车时对接收机造成了很大干扰,在通信系统设计过程当中,要重点考虑中继车对通信系统所造成的干扰,提高系统的SINR值,从而提高通信质量。

3.1.1.3 1辆中继车轨迹随机生成时SINR数据分析

在进行1辆中继车轨迹顺序生成案例仿真的同时,本文还增加了中继车轨迹随机生成的案例,因为中继车轨迹随机生成更符合现实生活中的实际路况,同时与轨迹顺序生成对比,使仿真结果更加精确。因此,在中继车轨迹顺序生成外加设轨迹随机生成的案例。根据表4中数据,分析SINR值的分布可知,存在1辆中继车轨迹在对应区域随机生成时,对于FP1、FP2和FP3,与无中继车存在相比,接收机的SINR值均大幅度减小,通信质量大大降低;与1辆中继车轨迹在对

应区域顺序生成时相比,接收机的SINR值略有提高。同时,通过同种情况下FP1、FP2和FP3的SINR值分布对比可知,在3种频率规划策略当中,FP1的通信质量最低,FP2的通信质量居中,FP3的通信质量最好,但三者均处于较低状态。中继车轨迹随机生成相较于等距顺序直线运动而言,位置的随机分布中更多的随机点位于距离接收机500 m外,导致此时中继车对接收机的干扰小于等距顺序直线运动,因此,此时的SINR值略大于等距顺序直线运动时的SINR值。

3.1.4 2辆中继车轨迹顺序生成时SINR数据分析

根据表4中数据,分析SINR值的分布可知,2辆中继车轨迹在对应区域顺序生成时,对于FP1、FP2和FP3,其SINR值均为各情况中最低,通信质量最差,且严重不符合正常通信指标,说明2辆中继车对接收机造成了严重干扰,使接收机的通信质量大幅度下降。同时,通过同种情况下FP1、FP2和FP3的SINR值分布对比可知,在3种频率规划策略当中,FP1的通信质量最低,FP2的通信质量居中,FP3的通信质量最好,但三者均处于极低状态。在通信系统设计过程中,如遇到类似2辆中继车所造成的严重干扰,导致通信质量远低于指标时,应设法降低中继车所造成的干扰,或减小接收机所受到的影响。

3.1.5 2辆中继车轨迹随机生成时SINR数据分析

根据表4中数据,分析SINR值的分布可知,2辆中继车轨迹在对应区域随机生成时,对于FP1、FP2和FP3,SINR值略高于2辆中继车轨迹顺序生成与1辆中继车轨迹顺序生成时的SINR值,但仍处于较低水平,通信质量低,说明2辆中继车对接收机造成较大干扰。同时,通过同种情况下FP1、FP2和FP3的SINR值分布对比可知,在3种频率规划策略当中,FP1的通信质量最低,FP2的通信质量居中,FP3的通信质量最好,但三者均处于极低状态。2辆中继车轨迹随机生成相较于等距顺序直线运动而言,位置的随机分布中更多的随机点位于距离接收机500 m外,导致此时2辆中继车对接收机的干扰小于等距直线运动,因此,此时的SINR值略大于2辆中继车等距顺序直线运动时的SINR值。

3.1.6 总结不同频率规划策略和中继车产生的干扰

分析5种情况的SINR值分布可知,在2种情况下,均为FP3的SINR值最高,FP2的SINR值居中,FP1的SINR值最低。因此,在同等条件下,处在频率规划策略FP3时,SINR值最高,通信质量最佳。

当无中继车存在时,由于没有中继车所造成的干

扰,此时,SINR值远高于其余4种情况,通信质量极优。其余4种情况中,轨迹随机生成更符合实际情况,选择中继车轨迹随机生成作为前提条件,2辆中继车的存在对接收机接收信号造成极大干扰,通信质量差;而1辆中继车的存在对接收机接收信号造成的干扰适中。因此,得出结论:中继车数量越多,通信质量越差,小区间干扰越明显。

3.2 车流量对通信质量的影响

在此高速场景中,在每个车道生成10辆小汽车和5辆货车(8个车道共80辆小汽车和40辆货车),使这些除Rx车和中继车外的其他车辆轨迹在1500 m的道路上随机生成,仿真高速公路上实际的路况,仿真动画如图7所示。

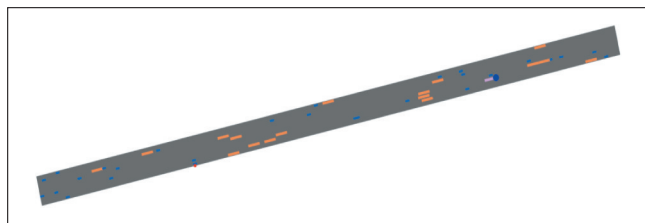


图7 带有车流量的高速公路

在无中继车和有1辆中继车轨迹随机生成2种情况下,加车流量后结果(SINR)的累积分布函数如图8所示。

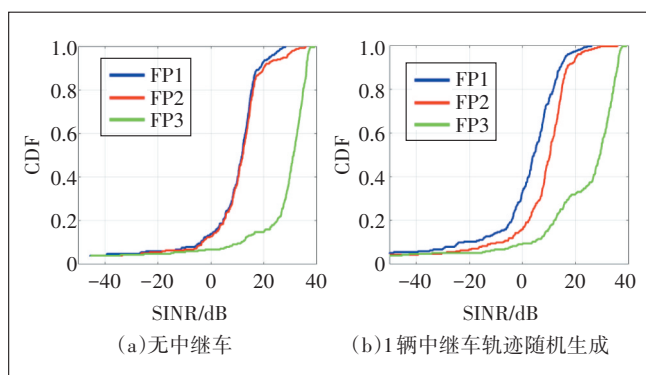


图8 加车流量后Rx在500~750 m范围内SINR的CDF图

定量观测有无车流量的SINR分布情况,在每种情况下分别取分布函数 $F(x)=0.1$ 、 $F(x)=0.5$ 、 $F(x)=0.9$ 时SINR的取值,取值情况如表5所示。对比加车流量和不加车流量的结果,发现在无中继车时,加车流量的SINR明显比不加车流量的SINR低,这是因为,部署在道路边的天线Tx3在向500~750 m范围内发射电磁波时,若不加车流量,电磁波的直射传播能使接收机接收到较大的功率;若加车流量,干扰车辆使电磁波直

表5 SINR分布

中继车情况	$F(x)=0.1$			$F(x)=0.5$			$F(x)=0.9$		
	FP1	FP2	FP3	FP1	FP2	FP3	FP1	FP2	FP3
无中继车,不加车流量/dB	1	1.0	20.5	11	11.0	33	20.5	21.0	36.5
无中继车,加车流量/dB	-4	-3.5	11.0	11	11.5	31	18.5	20.0	36.0
1辆中继车轨迹随机生成,不加车流量/dB	-11	-7.0	1.0	1.5	5.5	11	9.0	10.5	17.0
1辆中继车轨迹随机生成,加车流量/dB	-24	-12.0	3.0	4.0	10.0	29	14.0	17.0	36.0

射功率减小,尽管增大了反射、散射,却也远不如直射功率大,有用信号的强度降低,SINR减小。在有1辆中继车轨迹随机生成时,加车流量的SINR整体比不加车流量的SINR高,这是因为存在中继车时,干扰主要来自于中继车,若不加车流量,中继车向后发出的电磁波会对Rx有较大干扰;若加车流量,车流量会阻挡一部分中继车向Rx发出的电磁波,中继车的干扰减弱,SINR增高。

4 结论

5G时代的来临,车联网技术的发展得到了前所未有的技术支持^[12],在现有城市规划的基础上提高城市交通的运行效率,是城市交通向智能化演进的解决方案^[13],然而,由于车辆的快速移动,V2I通信受到挑战^[14]。

本文针对典型的高速场景,通过射线追踪仿真,研究了毫米波段下频率规划策略、中继车数量和车流量对V2I通信的影响,根据仿真结果计算出接收功率及SINR并进行分析比较。

根据仿真结果和对信道参数的分析,可以得出以下结论。

首先,在相同条件下,在频率不复用、频率复用、频率反向复用3种频率规划策略中,处于频率反向复用时,接收功率最高,SINR值最佳,通信质量最好。在相同频率规划策略下,中继车数量越多,SINR值越低,通信质量越差,小区间干扰越明显。

在简单的高速场景下,交通流量对V2I通信有很大的影响^[6]。在无中继车时,车流量越大,SINR值越低,通信质量越差;存在中继车时,车流量越大SINR值越高,通信质量越好。本文的工作为V2I通信系统的设计和部署提供依据。

参考文献:

[1] 李凤,房家奕,赵丽. 3GPP LTE-V2X标准进展及技术介绍[J]. 电网技术,2016(6):40-45.

[2] 陈山枝,胡金玲,时岩,等. LTE-V2X车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学,2018,34(4):1-11.

[3] 百度百科. V2X[EB/OL]. [2022-03-25]. <https://baike.baidu.com/item/V2X/8734150?fr=aladdin>.

[4] 卓义斌,缪照滨,高月红,等. V2X技术发展历程及应用研究[J]. 电信工程技术与标准化,2016,29(2):20-24.

[5] KABASHKIN I. Reliable v2x communications for safety-critical intelligent transport systems[C]//2017 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). Riga, Latvia: IEEE, 2017: 251-255.

[6] WU L N, HE D P, GUAN K, et al. Millimeter-wave channel characterization for vehicle-to-infrastructure communication [C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark: IEEE, 2020: 1-5.

[7] HE D P, WANG L H, GUAN K, et al. Channel characterization for mmWave Vehicle-to-Infrastructure communications in urban street environment [C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Krakow, Poland: IEEE, 2019: 1-5.

[8] 何继勇,富子豪,赵雄文,等. 室外微蜂窝毫米波信道测试与射线追踪建模技术[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(8):38-46.

[9] 广东省新一代通信与网络创新研究院,清华大学,北京邮电大学,等. 6G无线热点技术研究白皮书(2020年)[EB/OL]. [2022-03-25]. <https://www.vzkoo.com/document/fbfff8e25bfff7a9caa46d186d86515.html>.

[10] 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.

[11] KIM J, CHOI S W, NOH G, et al. A study on frequency planning of MN system for 5G vehicular communications [C]//2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju, Korea(South): IEEE, 2019: 1442-1445.

[12] 赵思成. 车联网场景下V2V/V2I混合传输方式的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.

[13] 李利民. 车联网V2I通信媒体接入控制技术[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[14] 徐会彬,焦克莹. 车联网中V2I通信路由的研究[J]. 传感技术学报,2018,31(9):1430-1435.

作者简介:

张晴雯,北京交通大学本科在读,研究方向为通信工程;郭洪辛,北京交通大学本科在读,研究方向为通信工程;谢荣浩,北京交通大学本科在读,研究方向为通信工程;宋玉巧,北京交通大学硕士研究生在读,研究方向为信息与通信工程。