

基于OMNeT++平台的V2X 无线通信场景库构建研究

Research on Construction of V2X Wireless Communication Scene
Library Based on OMNeT++ Platform

朱书勤¹, 苏向清¹, 高煜晴¹, 冯毅², 蔡超², 刘留¹ (1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 中国联通智网创新中心, 北京 100048)

Zhu Shuqin¹, Su Xiangqing¹, Gao Yuqing¹, Feng Yi², Cai Chao², Liu Liu¹ (1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Unicom Intelligent Network Innovation Center, Beijing 100048, China)

摘要:

在V2X车联网大规模推广应用前,C-V2X中的算法及应用需进行全面、深入的测试与评估。由于现实实验验证阶段成本高、耗时长、所需场地大且复杂,研究基于真实地图搭建的C-V2X无线通信场景库成为必要。相比现有V2X车联网仿真,优化了目前使用的理想化场景库,改善了其场景有限、难以与实用场景匹配的问题。介绍了蜂窝方式下的V2X通信,其中包含中继节点选择算法和最佳功率分配算法,建立了基于Veins OMNeT++的仿真模型,并通过Matlab仿真分析验证了论文方法的有效性及其模型的可用性。

Abstract:

Before the large-scale promotion and application of V2X Internet of vehicles, the algorithm and application of C-V2X need to be tested and evaluated comprehensively and deeply before large-scale promotion. Due to the high cost, time-consuming, large and complex site, it is necessary to study the C-V2X wireless communication scene Library Based on real map. Compared with the existing V2X vehicle network simulation, it optimizes the currently used idealized scene library and improves the problem that the scene is limited and difficult to match with the practical scene. It introduces V2X communication in cellular mode, including relay node selection algorithm and optimal power allocation algorithm. An simulation model based on veIns OMNeT++ is established, and the effectiveness of the proposed method and the availability of the model are verified by Matlab simulation analysis.

Keywords:

Internet of vehicles simulation; V2X communication; Algorithm verification; Veins; LTE

引用格式:朱书勤, 苏向清, 高煜晴, 等. 基于OMNeT++平台的V2X无线通信场景库构建研究[J]. 邮电设计技术, 2022(7): 31-37.

0 引言

近年来,我国汽车保有量不断增长,智能网联汽车的发展也推动了C-V2X相关研究的开展^[2-5],逐步实现车与人、车与车、车与路、车与服务平台的全方位网络连接,推动联网后车辆复杂环境感知、智能决策、

协同控制的快速发展。为了能够更客观地对车联网技术的各项性能进行评估与改进,网联车辆需在复杂的交通环境下进行广泛的测试。目前现实测试在持续推进中,但V2X车联网的性能评估与改进仍需要无线场景库模拟测试的补充。

近年来,国内外相关研究机构都在不断推动发展车联网无线通信仿真平台。德国柏林理工大学和克莱斯勒股份公司联合创建的VSimRTI可以对车辆运动和复杂的通信技术进行详细建模。MOVE(Mobility

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61931001)

收稿日期:2022-05-06

关键词:

车联网仿真; V2X通信; 算法验证; Veins; LTE
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2022.07.007
文章编号: 1007-3043(2022)07-0031-07
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):



model generator for Vehicular networks)是澳大利亚新南威尔士大学开发的仿真框架。它利用SUMO(Simulation of Urban Mobility)生成相应的trace文件,将轨迹文件导入网络仿真器中并进行网络仿真。江苏省智能网联汽车创新中心运用图像处理与深度学习等方法对图像中的车辆进行识别与跟踪,打造模拟真实交通路况的测试环境。上海威蓝公司提供车路协同网络与智慧城市交通流的整体方案,实现车路协同。

本文综合传统仿真环境的优缺点,提出了一种利用Veins(Vehicles in Network Simulation)和SUMO构建C-V2X无线通信场景库的方法,初步搭建贴近多变的道路实情的无线通信仿真平台。同时,由于应用中涉及多种场景,故使用Matlab搭建针对C-V2X的LTE通信分析模型,验证在几种场景下不同参数对仿真结果准确性的影响。本文主要针对以下问题展开:应用场建模、仿真环境配置、仿真方案可用性验证。

1 V2X仿真场景库概述

本文通过OMNeT++与SUMO的实时交互来运行交通仿真事件,使用Veins框架搭建V2X仿真场景库。同时使用Veins_INET模块集成SimuLTE,以完成LTE通信模拟。根据各部分关联及依赖情况,本文提出搭建上述V2X仿真场景库的总体流程,如图1所示。

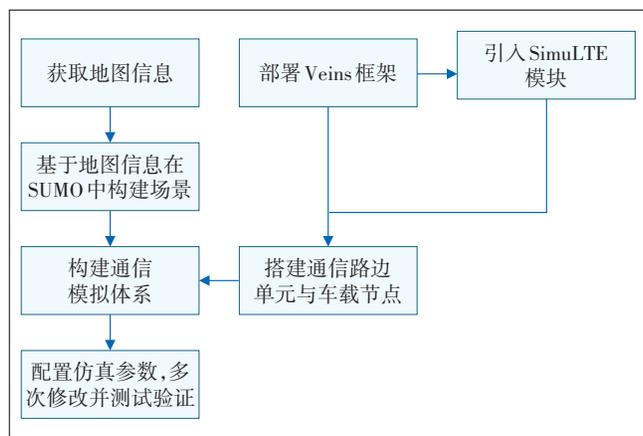


图1 V2X仿真场景库搭建流程

主要分为如下3步。

第1步,获取搭建仿真场景库所需的地图信息以及道路先验信息。基于所获地图信息在SUMO中构建与真实地图一致的场景。先对获取到的路网文件和车辆行驶文件等进行整理,再对地图中包含的建筑、河流等复杂元素进行添加和模拟,最终规划出车辆行驶路线。

第2步,搭建路边单元于车载节点,构建通信模拟体系。部署Veins框架,构建通信网络架构。同时设置使用LTE协议进行通信,引入SimuLTE,搭配Veins实现LTE网络模拟。将基站作为控制中心和数据信息调度中心,通过搭建通信路边单元与车载节点,配置基站的参数,控制拥塞,协调干扰,完成蜂窝车联网,即C-V2X的构建。

第3步,配置仿真参数,并多次验证。设置场景中车辆数量、基站输出功率、子信道数等参数,将运行结果与使用Matlab构建的模型对比,验证本文搭建场景库对于不同环境的适应性。

2 关键技术

本文建立了基于OMNeT++平台的V2X无线通信的场景库,通过对真实场景建模与LTE C-V2X通信网络的结合,为车联网仿真提供更理想的模拟仿真场景库。主要包括如下关键技术。

a) 使用SUMO进行交通仿真,将车辆移动情况在仿真中映射为节点实现对模拟车辆的控制与信息获取。

b) 实现基于Veins的车联网仿真,与SUMO连接,根据获取的车辆运行信息搭建通信网络,模拟V2X通信。

c) 进行LTE协议模拟,对无线接入网和EPC(Evolved Packet Core)进行数据层面的建模。

d) Matlab的C-V2X LTE通信分析模型,对不同应用场景下仿真结果的准确性进行验证,确保本文构建的仿真平台在多种场景下的准确性和实用性。

2.1 总体结构

本文建立的无线通信场景库构建于基于事件的网络模拟器OMNeT++和道路交通模拟器SUMO之上。OMNeT++提供了离散事件仿真环境,通过TraCI查询和调度SUMO场景中的车辆运动状态。Veins模块构建于OMNeT++之上,通过交通控制模块引入能够传递信息的路边节点以及车载节点,根据SUMO场景中各个车辆的信息,搭建通信网络,模拟V2X通信。各个节点间通信采用LTE协议。由于Veins框架中并没有集成LTE协议内容,故引入了LTE协议模拟模块SimuLTE,将其与Veins桥接,使得在基于Veins框架部署的节点中可以使用其所提供的LTE协议通信相关模拟。

2.2 基于Veins的车联网仿真

如图2所示,车载网络仿真框架 Veins 基于 OMNeT++ 与 SUMO 交互运行时的仿真事件,对仿真模拟中车载节点通信进行模拟,其核心是对车辆间通信的底层进行详细建模。Veins 中物理层和无线信道分组级模拟,能够实际地确定每个分组是否可以成功接收。

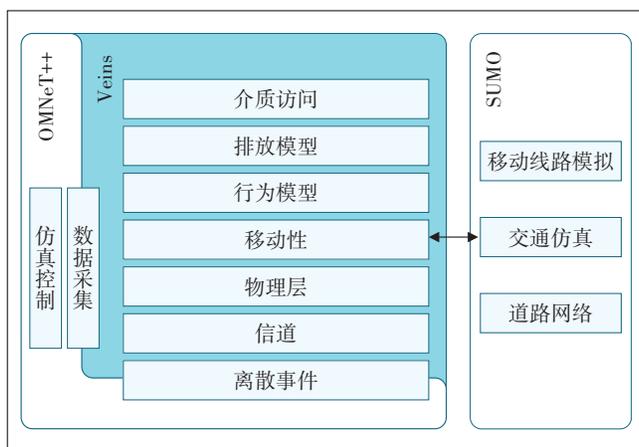


图2 Veins 框架结构示意图

本文在 OMNeT++ 生态中以 Veins 框架为基础进行车辆节点模拟开发,通过与 SUMO 连接,获取在道路场景中车辆运行的信息,放到通信网络上。使用模拟的路边单元与车辆通信,根据车辆与路边单元距离、建筑物遮挡情况等计算出通信丢包率等衡量通信可行性的参数。

本文借助 Veins 与其他仿真框架连接的接口,在其基础上构建了本文场景库的 LTE 仿真模块,完成对 LTE 协议的模拟。在配置上述结构后,即可在 Veins 实现路边单元与车辆通信时使用 LTE 协议,并模拟通信相关数据和衰减情况等。

此外,每个车辆在接收到来自另一个车辆的消息时,都可以计算其交叉口碰撞概率。如果碰撞概率超过一定阈值,则车辆将相应地暂时降低其消息传播间隔。这对于仿真场景下车辆自动调整其消息间隔、保持信道负载平衡有着重要意义。

2.3 SUMO 交通仿真

本文使用交通仿真框架 SUMO 为 Veins 提供车辆轨迹信息以及道路和建筑信息,集成了车辆行驶规律、车辆驾驶行为、驾驶习惯、路径选择等内容,允许包括行人在内的多式联运仿真,旨在处理大型通信网络仿真。在 SUMO 中构建的场景如图3所示。

现有仿真框架 MOVE 中地图模块可由用户自行定义道路参数(如车道数、道路长度、车速),也可以引



图3 SUMO 中构建的道路和建筑场景

用真实地图库;与之相比,本文基于真实高精度地图进行建模,其优势在于能够借助 SUMO 对地图进行局部调整,延展性更好,能够测试现实场景中通信设备位置、节点设置的合理性与可行性,对其位置选择起指导作用,同时,可以通过对道路以及路旁基础设施的修改,计算不同情况下道路车流量的变化情况,得到交通配置最优方案。

此外,在 MOVE、CORSIM 等仿真框架中交通模拟器和网络模拟器为单向链接,缺乏交互性且节点的移动轨迹灵活性较差。本文能够对车辆进行实时通信仿真,通过调配 SUMO 服务器与作为客户端的基于 Veins 的仿真进行通信,完成与网络通信模块的交互,将车辆轨迹输入到仿真中,对道路交通和网络通信进行双向耦合模拟,将车辆移动情况在仿真中映射为节点的移动,从而使节点可以与正在运行的道路交通模拟进行交互,将交通模拟器和网络模拟器实时连接,实现对每个模拟车辆的移动属性的获取和控制。

2.4 LTE 协议模拟

其他 V2X 仿真平台,如 VSimRTI,采用 IEEE 标准,本文采用 LTE-V2X 标准作为通信协议。作为车联网 V2X 无线通信技术,LTE-V2X 拥有更好的远距离数据传输可达性、更高的非视距(NLOS)传输可靠性以及网络建设和维护等方面的优势。相比包含 DSRC 在内的其他技术,LTE-V2X 适应于更复杂的安全应用场景,满足现阶段对车联网设备低延迟、高可靠性的要求,解决了在其他部分 V2X 仿真平台中出现的成本较高,延展性不足的问题。在移动通信技术方面,LTE 已经成为当前无线移动领域的热点技术。

本文用于进行 LTE 协议模拟的 SimuLTE 模拟框架由多个模块共同实现,与 INET 框架中的模块集成。

PHY 模块位于 LTE 协议栈的底部, 承担与物理层相关的功能, 如信道反馈报告和计算、空气信道仿真自用空间以及数据传输和接收。MAC 模块主要负责 LTE 节点的大部分智能实现, 主要任务包括缓冲来自较低层 (PHY) 的数据包和请求来自较高层 (RLC) 的传输数据, 处理和存储信道反馈, 执行调度, 以及自适应调制和编码 (AMC)。RLC 模块执行 MAC 业务数据单元到 MAC 层的复用和解复用, 将数据包在 PDCP 无线电资源控制与适当的 RLC (Radio Link Control) 模式实体间转发。图 4 给出了本文搭建的 SimuLTE 数据流仿真模块中 IP 包的传输具体过程。

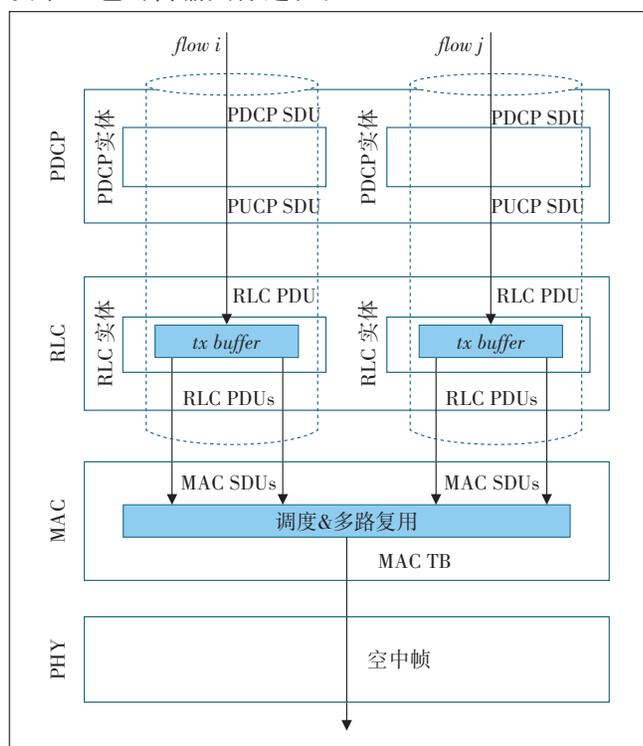


图 4 SimuLTE 流仿真模块网络接口控制器内部结构

2.5 路径损耗模型

实际场景路面较为复杂, 影响无线链路质量的因素众多 (如发送和接收节点的相对运动, 周围节点的运动, 周围环境如建筑物、桥梁、路障等), 都能阻断无线信号的传播或降低无线信号的功率, 影响数据传输的稳定性。因此, 仿真框架是否能够支持障碍物仿真也十分重要, 但包括 MOVE、TraNs 在内的多种仿真框架都不具备这一能力。

本文利用路径损耗模型分析障碍物对通信效果的影响。通过计算帧的实际接收功率, 判断信道变忙还是保持空闲, 对于驾驶中的干扰因素进行分析, 实现障碍物仿真功能。

帧的实际接收功率可通过式 (1) 进行计算:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - \sum L \quad (1)$$

式中:

P_t ——天线发射功率

P_r ——天线接收功率

G_t, G_r ——发送与接收天线的增益

本文使用了自由空间路径损耗模型和双射线干扰路径损耗模型。同时, 考虑到信号快速衰落的影响, 采取了一种反映城市环境中多径传播的概率方法进行分析, 使用损失模型来解释障碍物的影响。假设每个障碍物是一个多边形, 则接收功率随其与信号相交的边数 n 和多边形内部覆盖的距离 m 的增大而减小。为得到符合实际的接收功率, 使用常数参数 β 和 γ 对这些值进行加权, β 和 γ 使用实际测量值进行校准, 并随障碍物的材料而改变。受障碍物影响的损耗模型 L_{build} 的计算如式 (2) 所示:

$$L_{\text{build}} = \beta \times n + \gamma \times m \quad (2)$$

3 Matlab 验证模型方法

为对各通信技术点在仿真场景库中的适用情况进行验证, 确保仿真方法的正确性和可用性, 本文借助 Matlab 构建 C-V2X LTE 通信数学模型, 对本文搭建的场景库进行验证与分析。相较于实际验证, Matlab 验证开销更小, 且便于参数的调整和多场景的多次验证。模型综合考虑 LTE 传输的底层逻辑和在传播时信道及周围环境对传播过程的影响, 通过输入车辆密度、数据传送频率、传送功率、子信道数以及数据包大小, 计算正确接收概率、传播距离函数、数据传输错误率以及信道忙的概率, 与仿真结果进行比较来判断仿真方法的正确性与可用性。

3.1 数学模型输入的参数

在数学模型中, 本文将对在实际场景中对通信效果产生影响的 4 个主要参数进行分析, 它们分别为车辆密度 β (辆/m)、数据传送频率 λ (Hz)、发送功率 P (dBm) 及子信道数 S 。仿真实验与数学模型中上述参数保持一致, 以达到对比效果。

3.2 计算过程

在场景库中应根据实际来模拟数据的传输, 而在实际场景中, 数据的传输会由于种种因素而产生传输的错误。因此传输错误率是重要的需验数据, 也是验证模拟正确性的关键数据。

传输错误共有 4 种, 分别为:

a) 由于半双工传输导致的错误 δ_{HD} 。C-V2X使用的是半双工通信, 当车辆或路边节点在一个子帧中发送数据包时, 其无法同时进行数据的接收。考虑到模拟中使用1 ms子帧, 由于半双工效应而不接收分组的概率可以用式(3)来近似:

$$\delta_{HD} = \frac{\lambda}{1000} \quad (3)$$

b) 由于接收信号功率小于感测阈值产生的错误 $\delta_{SEN}(d_{i,r})$ 。当接收到的数据包的信号功率低于传感功率阈值 P_{SEN} 时, 就会产生此错误, 这个错误的概率主要取决于发送功率 P_t 、传感功率阈值 P_{SEN} 、传输过程以及发射机与接收机之间的距离 $d_{i,r}$, 可由式(4)来计算:

$$\delta_{SEN}(d_{i,r}) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{P_t - PL(d_{i,r}) - P_{SEN}}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right\} \quad (4)$$

c) 传播效应产生的错误 $\delta_{PRO}(d_{i,r})$ 。在实际场景中当接收端接收到信号时, 该信号已经在信道中受到了噪声的污染, 此时为保证信号没有产生失真, 应判断信号的信噪比(SNR), 当信噪比过小, 以至于不能保证信号不失真时, 本文就认定发生了传播效应产生的错误。将由于传播效应产生的错误 $\delta_{PRO}(d_{i,r})$ 表示为:

$$\delta_{PRO}(d_{i,r}) = \sum_{s=-\infty}^{+\infty} \text{BL}(s) \times f_{\text{SNRIP}, > P_{\text{SEN}}, d_{i,r}}(s) \quad (5)$$

式中:

$\text{BL}(s)$ ——信噪比等于 s 时的误块率, 每个 s 对应的误块率可参见文献[6]

$$f_{\text{SNRIP}, > P_{\text{SEN}}, d_{i,r}}(s) = \begin{cases} \frac{f_{\text{SNR}, d_{i,r}}(s)}{1 - \delta_{\text{SEN}}} & P_r > P_{\text{SEN}} \\ 0 & P_r \leq P_{\text{SEN}} \end{cases} \quad (6)$$

d) 由于数据包冲突而导致的错误 $\delta_{COL}(d_{i,r})$ 。车辆与其他车辆使用相同的资源(即相同的子信道与子帧)传输数据包时就会出现此类错误。令车 v_i 由于数据包冲突而产生错误的概率为 $\delta_{COL}^i(d_{i,r}, d_{i,i}, d_{i,r})$, 则:

$$\delta_{COL}(d_{i,r}) = 1 - \prod_i (1 - \delta_{COL}^i(d_{i,r}, d_{i,i}, d_{i,r})) \quad (7)$$

最终, 由于以上各种错误是互相独立的, 可推知数据正确传输的概率PDR(Packet Delivery Ratio)为:

$$\text{PDR} = (1 - \delta_{HD}) \times [1 - \delta_{SEN}(d_{i,r})] \times [1 - \delta_{PRO}(d_{i,r})] \times [1 - \delta_{COL}(d_{i,r})] \quad (8)$$

若对各种错误可能出现的概率进行归一化处理, 则式(8)可化为:

$$\text{PDR} = 1 - \widehat{\delta}_{HD} - \widehat{\delta}_{SEN} - \widehat{\delta}_{PRO} - \widehat{\delta}_{COL} \quad (9)$$

4 仿真验证

本文选取影响通信情况的4个主要参数, 分析它们对场景库仿真结果拟合度的影响, 使用Matlab建立数学模型, 并对所选参数进行调整。在该过程中, 将仿真得到的PDR以及其他数据输入Matlab中, 拟合出仿真曲线, 与先前的数学模型产生的数据放在同一图像中进行对比。如在误差允许范围内得到一致结果即证明仿真符合要求。

在使用Matlab的数学模型验证中, 进行多次基于实际情况的模拟实验, 并最终得到验证结果与仿真结果的对比图像, 产生直观的验证结论。

4.1 不同拥挤程度场景下的仿真分析

在真实道路场景中, 由于建筑与道路相对固定, 对通信产生较大影响的因素主要是道路拥堵程度, 其数值体现在车辆密度上。通过SimuLTE的PHY模块设置物理层, 第一次仿真在数据传送频率 $\lambda=10$ Hz、发送功率 $P=20$ dBm、子信道数 $S=4$ 、数据包大小 $B=190$ B的条件下进行, 图5给出了车辆密度 β 为0.1、0.2、0.3(辆/米)时的仿真结果与数学模型结果的对比。

输出 β 取不同值时理论模型的传输错误概率, 并与模拟结果进行对比, 如图6所示。

从图5和图6可以看出, 当车辆密度变化时, 代表模拟数据的实线依然能与代表验证模型的虚线较好拟合, 说明车辆密度改变对模拟准确性无明显影响。

4.2 不同基站配置下的仿真分析

调整物理层数据, 对与数学模型对应的其他数据也进一步进行验证: 分别调整 $P=23$ dBm; 子信道数 $S=2$; 数据传送频率 $\lambda=20$ Hz进行多组多次实验, 并将得到的模拟数据与理论数据进行对比。

图7给出了 $\beta=0.2$ 、 $\lambda=10$ Hz、 $P=23$ dBm、 $S=4$ 时, 仿真结果与理论数据PDR的对比(左)和模拟结果与理论数据传输错误概率的对比(右)。

调整数据传输频率 λ 进行仿真, 结果如图8所示。图8给出了 $\beta=0.2$ 、 $\lambda=20$ Hz、 $P=23$ dBm、 $S=4$ 时, 模拟结果与理论数据PDR的对比(左)和模拟结果与理论数据传输错误概率的对比(右)。

调整子信道数 S 进行仿真, 结果如图9所示。图9为 $\beta=0.2$ 、 $\lambda=10$ Hz、 $P=20$ dBm、 $S=2$ 时, 模拟结果与理论数据PDR的对比(左), 和模拟结果与理论数据传输错误概率的对比(右)。

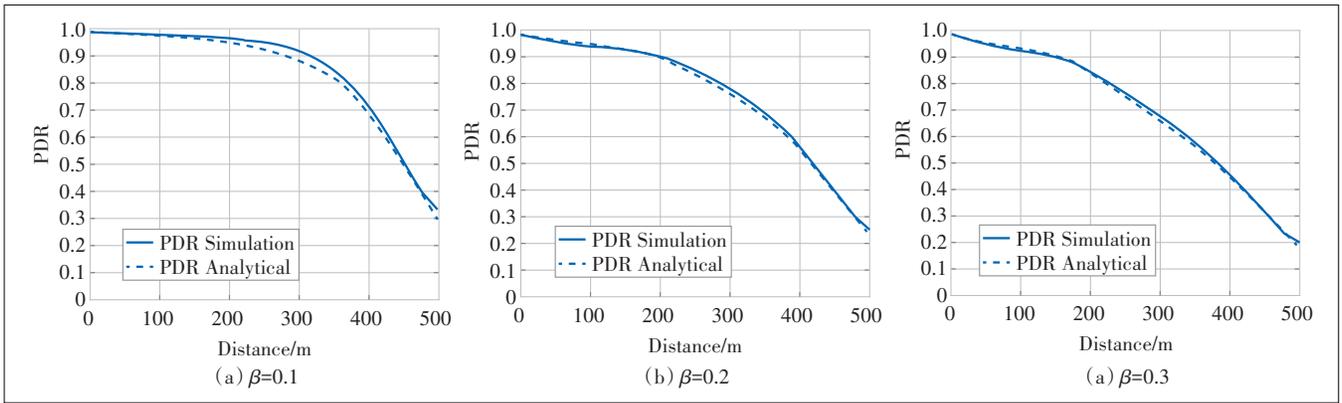


图5 不同车辆密度仿真得到PDR结果与数学模型计算结果对比

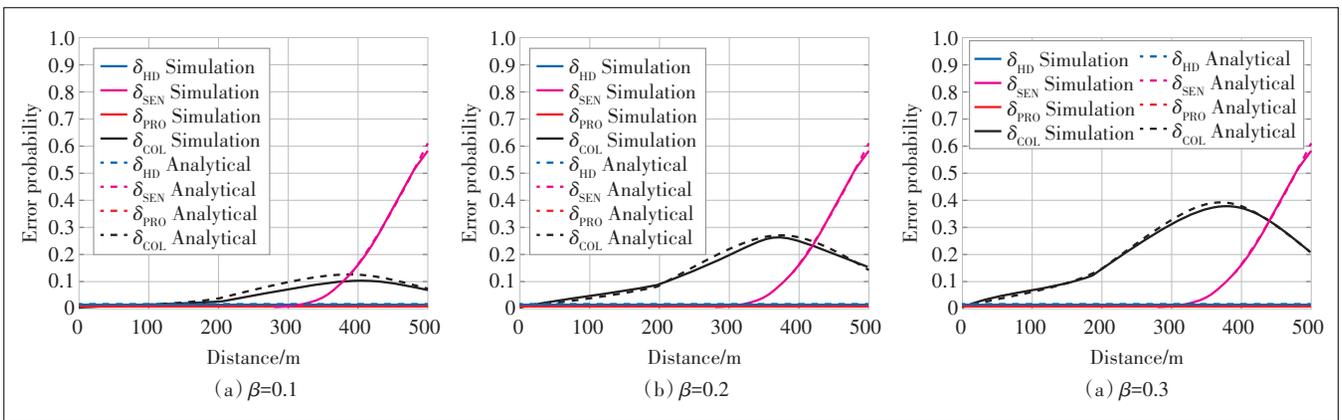


图6 不同 β 时仿真得到传输错误概率与理论模型传输错误概率对比

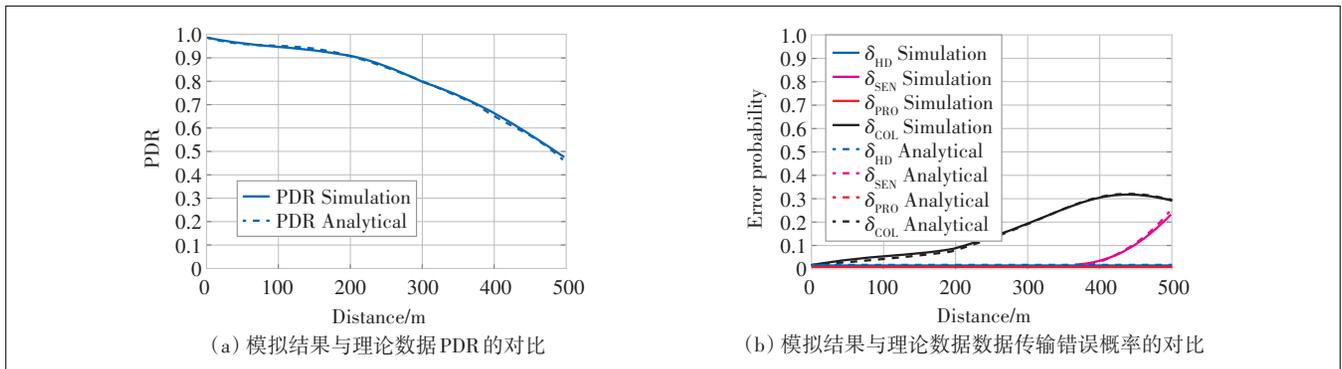


图7 $\beta=0.2, \lambda=10 \text{ Hz}, P=23 \text{ dBm}, S=4$ 时模拟结果与理论数据的对比

从图7、图8和图9可知,当数据传输频率、发送功率与子信道数发生变化时,模拟得到的数值与期望数值在误差可接受的范围内,各条曲线拟合度较高。可得出结论,在不同场景下,本文搭建的场景库都可以达到较好的仿真效果,具有实用价值。

此外,仿真软件在自动驾驶等领域的主要应用就是复现路测效果。然而目前大部分的V2X无线通信仿真都存在在不同场景中正确性无法保证,可复用性差的问题;本文的多次仿真结果皆与用以验证的数学

模型吻合,说明了本文搭建的场景库在多场景中都具有良好的表现,稳定性强,有较高的使用价值。

5 结论

本文提出了一种基于V2X无线通信的场景库搭建方法。与其他搭建方法不同的是,本文采用真实地图在交通模拟框架SUMO中构建场景,并使用车载网络仿真框架Veins搭建车辆间通信模拟提高了场景的真实性与仿真的可靠性。此外,本文引入LTE通信协

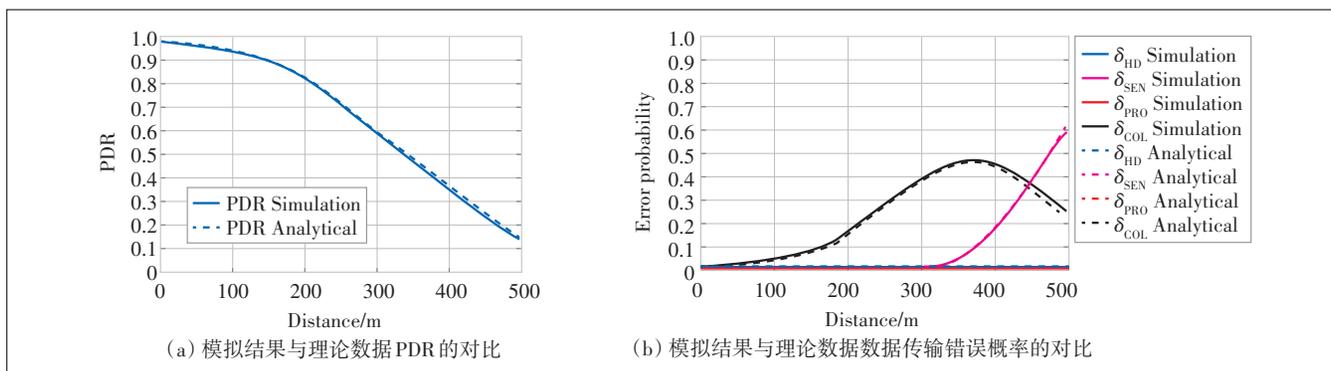


图8 $\beta=0.2, \lambda=20 \text{ Hz}, P=23 \text{ dBm}, S=4$ 模拟结果与理论数据的对比

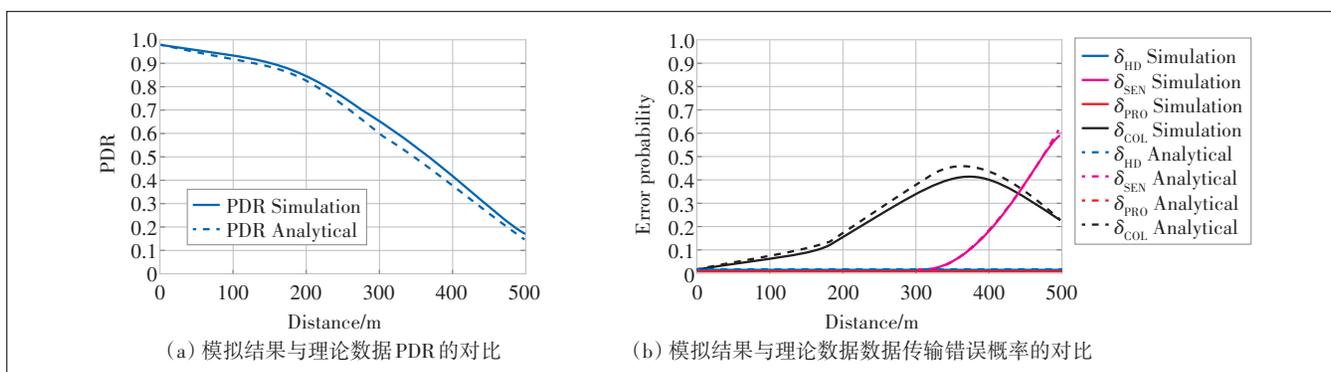


图9 $\beta=0.2, \lambda=10 \text{ Hz}, P=20 \text{ dBm}, S=2$ 模拟结果与理论数据的对比

议模块,降低了车联网设备之间通信的延迟并提高了传输的可靠性,相较于其他国家开发的无线通信场景库,更贴合我国的通信发展前景。将上述几个部分在OMNeT++平台中相结合,根据SUMO中的交通事件信息和车辆移动信息,完成蜂窝方式下的V2X通信模拟。同时,本文以现实可能出现的情况为依据,使用Matlab搭建数学模型,对影响通信效果的因素进行分析,对搭建的场景库从PDR和传输错误率2个方面进行验算,将Matlab模型仿真结果与之对比,验证了本文搭建的场景库的正确性以及可行性。使用Matlab的验证相较于实际验证等其他方法,灵活性高,能方便地调整参数并进行反复多次的验证,其复现场景的能力也较实际验证强。但由于当前本组使用的基站参数有限,数据可靠性还无法达到完全符合实际场景的程度,验证数据的内容还可以进一步优化。

本文提出的方法不仅支持对LTE V2X无线通信场景进行仿真分析,而且未来还可扩展车辆通信方式,扩大地图场景,具有一定的应用价值与前景。

参考文献:

[1] 冯春林. 我国智能网联汽车产业的发展困境与应对策略[J]. 当代

经济管理, 2018, 40(5): 64-70.
 [2] 南洋, 董馨, 陈博, 等. C-V2X技术在智能网联汽车上的应用场景研究[J]. 汽车文摘, 2019(9): 8-12.
 [3] 林琳, 李璐, 葛雨明. 车联网通信标准化与产业发展分析[J]. 电信科学, 2020, 36(4): 15-26.
 [4] 金博, 胡廷明. C-V2X车联网产业发展综述与展望[J]. 电信科学, 2020, 36(3): 93-99.
 [5] 缪立新, 王发平. V2X车联网关键技术研究及应用综述[J]. 汽车工程学报, 2020, 10(1): 1-12.
 [6] GONZALEZ-MARTÍN M, SEPULCRE M, MOLINA-MASEGOSA R, et al. Analytical models of the performance of C-V2X mode 4 vehicular communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1155-1166.
 [7] 林琳, 李璐, 葛雨明. 车联网通信标准化与产业发展分析[J]. 电信科学, 2020, 36(4): 15-26.

作者简介:

朱书勤, 北京交通大学本科在读, 主要研究方向为软件工程; 苏向清, 北京交通大学本科在读, 主要研究方向为信息与通信工程; 高煜晴, 北京交通大学本科在读, 主要研究方向为轨道交通与信号控制; 冯毅, 毕业于南京邮电大学, 教授级高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电子与通信工程; 蔡超, 毕业于西安电子科技大学, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为信息与通信工程; 刘留, 毕业于北京交通大学, 教授, 博士, 主要研究方向为电波传播与无线信道建模、时变信道信号处理、5G关键技术、高铁宽带接入物理层关键技术等。