

车载毫米波网络中 IRS 辅助的多跳 V2V 链路选择

杜旭阳, 张信明

(中国科学技术大学计算机科学与技术学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 多跳车辆与车辆(V2V)通信可以有效改善车载毫米波网络的连通性和覆盖范围,但是多跳转发会带来时延开销。智能反射面(IRS)可以提供反射增益以补偿远距离传输的高路径损耗,从而增加单跳传输距离,减少转发跳数。利用IRS辅助多跳V2V通信,能够减少转发跳数,降低时延开销。针对现有链路选择机制大多忽略转发车辆之间资源和信号冲突的问题,为车载毫米波网络中IRS辅助的多跳V2V通信提出一种基于向前转发效率和空间复用时分多址接入(FE-STDMA)的链路选择机制。综合转发距离、链路质量和传输时间评估候选链路的向前转发效率,将其作为链路选择的依据。在链路选择中利用空间复用实现并发传输,通过时分接入缓解转发资源冲突问题,从而最大化网络资源利用率。仿真结果表明,FE-STDMA机制的多跳时延相比于NFP机制平均降低49.88%,交付率远高于MFR和RFP机制,相比于NFP机制平均提高11.11%。与常用链路选择机制相比,FE-STDMA机制可在保证交付率的同时大幅改善多跳时延。

关键词: 车载网络;毫米波;多跳V2V通信;智能反射面;链路选择

源代码链接: <https://github.com/XuyangDu/myVeins.git>

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0067048

IRS-Assisted Multi-Hop V2V Link Selection in mmWave Vehicular Networks

DU Xuyang, ZHANG Xinming

(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

[Abstract] Multi-hop Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication can effectively improve connectivity and network coverage in mmWave vehicular networks, at the expense of delay overhead. An Intelligent Reflecting Surface (IRS) can provide reflection gain to compensate for the high path loss in long-distance transmission, thus increasing the single-hop transmission distance and reducing the number of hops. Utilizing IRS in multi-hop V2V communication, can reduce the number of forwarding hops and latency overhead. To address the problem of ignoring resource and signal conflicts among vehicles often manifested by existing link selection mechanisms, in this study, a link selection mechanism based on Forwarding Efficiency and Spatial reuse Time Division Multiple Access (FE-STDMA) is proposed for IRS-assisted multi-hop V2V in mmWave vehicular networks. This mechanism evaluates the forwarding efficiency of candidate links by integrating the forwarding distance, link quality, and transmission time. The candidate link selection adopts spatial reuse to enable concurrent transmissions. Time division multiple access is used to alleviate resource conflict problems and maximize the utilization of network resources. Simulation results show that the multi-hop delay of the FE-STDMA mechanism is reduced by an average of 49.88% compared to that of the Nearest with Forward Progress (NFP) mechanism, and the delivery ratio is increased by an average of 11.11% compared to that of the NFP mechanism, which is much higher than those of the Most Forward with Fixed Radius (MFR) and the Random Forward with Progress (RFP) mechanisms. Compared to these widely adopted link selection mechanisms, the FE-STDMA mechanism can significantly improve the multi-hop delay while ensuring the delivery ratio.

[Key words] vehicular networks; mmWave; multi-hop Vehicle-to-Vehicle (V2V) communication; Intelligent Reflecting Surface (IRS); link selection

0 引言

随着车载感知、通信和计算技术的发展,危险预警、自动驾驶等先进应用为出行提供了更多的安全保障和便利^[1],在环境复杂的城市道路上,这些应用需要车辆以低延迟交换大量传感器数据^[2]。毫米波

(mmWave)通信技术由于具有丰富的带宽资源,可以提供超可靠、低延迟的车辆与车辆(V2V)通信,被认为是能够实现车辆间大规模传感器数据传输的技术^[3]。然而,高频毫米波信号在大气中衰减严重,传输范围非常有限^[4-5]。中继转发是改善车辆连通性和网络覆盖率的有效方案,多跳转发可以在移动通

收稿日期:2023-02-27 修回日期:2023-04-08

基金项目:国家自然科学基金(62072425)。

通信作者 E-mail: duxuyang@mail.ustc.edu.cn

信基础设施匮乏的条件下拓展毫米波覆盖范围^[6],但是额外的转发跳数会增大时延开销。

多跳V2V通信的核心是链路选择,即为每一跳选择合适的链路从而实现实时可靠的V2V传输。链路选择需权衡链路质量和转发距离^[7-9],链路质量影响可靠性,而转发距离影响跳数,与时延密切相关。文献[10]分析了常用的3种链路选择方案,即随机向前转发(RFP)、固定半径最多转发(MFR)和最近向前转发(NFP)的时延与可靠性的关系。文献[11]研究了不同车辆密度下链路质量和转发距离的关系,得到了连通概率和多跳时延的解析表达式。文献[12]为毫米波和太赫兹相结合的超高速车载通信的链路选择设计了一种基于遗传算法的改进果蝇方案,其中的适应度函数基于链路稳定性和转发距离等指标。文献[13]提出了一种贪心路由策略,该策略设置若干距离阈值使信号覆盖区域分层,基于地理层次权衡信道质量和转发距离从而完成链路选择。上述转发方案中的链路选择基于链路质量与转发距离之间的权衡,但是相关研究结果表明^[7-10],链路质量与转发距离是相互对立的,高链路质量与远距离转发难以两全。

利用智能反射面(IRS)建立虚拟视距链路是增加毫米波传输距离的一种新技术^[14]。智能反射面是一种低成本、可配置的无源设备,由大规模反射元件组成,这些元件可以独立改变反射信号的振幅和相位。通过优化各个元件的反射系数,经由智能反射面反射的信号可以在特定位置相干或相消,实现对反射信号方向和强度的控制,达到被动波束成形的效果^[15-17]。通过优化智能反射面的配置,毫米波信号可以获得反射增益以补偿路径损耗,从而延长传播距离,扩大V2V单跳覆盖范围^[18-19]。文献[20]比较了单独使用智能反射面辅助和中继转发的性能。文献[21]和文献[22]分别提出将智能反射面辅助与半双工和全双工中继转发相结合,从而提高传输性能。文献[23]利用智能反射面辅助中继转发,通过集中式调度视距与非视距传输,解决了障碍物阻塞问题。文献[24]在十字路口场景结合智能反射面和中继转发辅助非视距通信,提高了通信范围。上述工作利用反射面与两跳中继解决了障碍物阻塞引起的非视距通信问题,但是没有解决多跳V2V通信高时延开销的问题,且大部分工作在链路选择中忽略了与其他传输资源和信号的冲突问题。受上述工作的启发,本文引入智能反射面辅助毫米波多跳V2V通信,利用反射增益在保障链路质量的同时改善多跳时延。

在引入智能反射面后,车辆之间可以构建直接链路进行传输,也可以在智能反射面的辅助下通过反射链路传输。智能反射面辅助的多跳V2V链路选

择主要有2个问题需要解决:一是需要权衡直接链路和反射链路的链路质量与转发距离等因素,得到直接链路和反射链路的统一评价标准;二是进行链路选择时需考虑与其他发射车辆的资源和信号冲突,使链路选择机制适用于更加真实的场景。

本文提出一种基于向前转发效率和空间复用时分接入(FE-STDMA)的链路选择机制。该机制结合转发距离、链路质量和传输所需时间来评价候选链路。毫米波一般采用波束赋形提高传输距离^[25],窄波束定向传输为基于空间复用实现无冲突并发传输提供了条件。时分接入可以缓解接收车辆和智能反射面等转发资源的冲突问题。本文主要工作如下:

- 1)将智能反射面辅助的多跳V2V链路选择问题形式化为一个优化问题,目标是 minimized 整体时延。
- 2)结合转发距离、链路质量和传输所需时间提出一种基于向前转发效率的候选链路评价函数。
- 3)考虑与其他发射车辆的资源和信号冲突问题,提出一种基于FE-STDMA的链路选择算法。
- 4)使用OMNET++、VEINS和SUMO进行模拟,将所提链路选择机制与RFP、MFR、NFP机制进行比较,以验证所提机制的有效性。

1 系统模型与问题形式化

1.1 系统模型

1.1.1 网络模型与假设

考虑一个城市场景中智能反射面辅助的毫米波多跳V2V网络模型,如图1所示。城市中的街道具有典型的网格状拓扑,网络中的车辆之间存在大量V2V传输需求,这些V2V传输需求因为源车辆和目标车辆距离过远或视距链路被障碍物阻挡而无法进行视距传输,需要通过多跳中继转发完成。智能反射面在街道两侧均匀部署,每一跳转发可以通过直接链路或反射链路传输,如图2所示,其中发射车辆有6条可选的转发链路,链路2和链路5是直接链路,其他链路是反射链路。

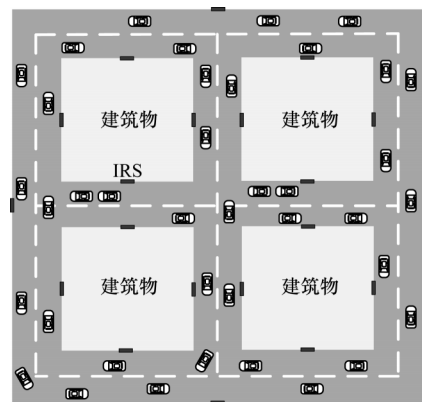


图1 智能反射面辅助的多跳V2V网络模型

Fig.1 IRS-assisted multi-hop V2V network model

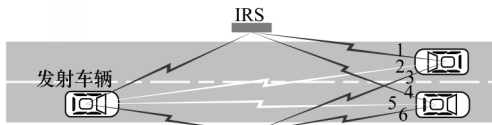


图 2 直接链路与反射链路

Fig.2 Direct links and reflected links

假设网络中的车辆集成了感知、计算、存储和通信设备,每个车辆都配备有用于 sub-6 GHz 和毫米波的 2 套通信设备^[26]。车辆之间可以通过 sub-6 GHz 广播周期性地交换移动信息,需要进行链路选择的发射车辆也可以交换候选链路信息,避免在决策时发生冲突。毫米波接口用于大数据量的 V2V 传输。智能反射面的配置需要信道状态信息(CSI)支持,但是车辆的高移动性给瞬时 CSI 的获取带来了困难。本文参考文献[27],提出一种基于信道状态统计信息(而不是瞬时信道状态信息)的方法来完成智能反射面的配置优化。

1.1.2 时隙结构

网络中所有车辆被同步到同一个时钟。为实现时分多址接入,时间轴被划分为相等长度的时隙。车辆间的传输在时间轴上表现为一个传输周期,每个传输周期由一个控制时隙和若干个传输时隙构成,如图 3 所示。

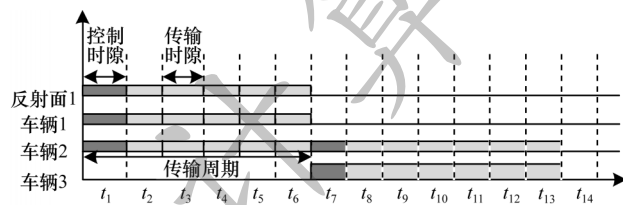


图 3 时隙结构

Fig.3 The structure of time slot

车辆在控制时隙中完成链路选择、波束对准和智能反射面配置,做好传输准备。在紧随控制时隙的若干个传输时隙内,车辆完成 V2V 数据传输。每个传输周期所需的传输时隙数量取决于完成传输所需的时隙数。对于每个车辆和智能反射面,当处于传输周期中时,其状态为“忙碌”,在其他时间则状态为“空闲”。

1.1.3 信道模型

假设网络中的每个车辆都配备了毫米波天线阵列,通过波束赋形获得的增益计算如下^[28]:

$$g(\theta, \phi) = g_0 10^{-1.2 \left[\left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2 + \left(\frac{\phi}{\phi_{3dB}} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

其中: g_0 是在波束对准方向上的最大天线增益; θ 和 ϕ 分别表示用户与波束对准方向在水平平面和垂直平面上偏移的角度; θ_{3dB} 和 ϕ_{3dB} 分别表示在水平平面和垂直平面上的 3 dB 波束宽度。

用 P_0 表示发射功率,接收车辆 v_j 通过直接链路接收到的来自发射车辆 v_i 的功率计算如下:

$$P_{ij} = P_0 g_{i,j,t} g_{i,j,r} L_{Loss,i,j} \quad (2)$$

其中: i 和 j 分别表示发射车辆和接收车辆的序号; $g_{i,j,t}$ 和 $g_{i,j,r}$ 分别表示发射天线增益和接收天线增益; $L_{Loss,i,j}$ 表示毫米波信号在 60 GHz 下的路径损耗。 $L_{Loss,i,j}$ 计算如下^[29]:

$$L_{Loss,i,j} = 10^{\frac{10\gamma_{i,j} \lg(d_{ij}) + \eta_{i,j} + 15d_{ij}/1000}{10}} \quad (3)$$

其中: d_{ij} 是发射机与接收机之间的距离; $\gamma_{i,j}$ 是路径损耗指数; $\eta_{i,j}$ 是反映障碍物阻塞效应的参数。 $\gamma_{i,j}$ 和 $\eta_{i,j}$ 的值都是由 v_i 和 v_j 之间的障碍物数量所决定。

接收车辆 v_j 通过智能反射面 s 构建的反射链路接收到的来自发射车辆 v_i 的功率计算如下:

$$P_{i,j,s} = P_0 g_{i,s,t} g_{s,j,r} L_{Loss,i,j,s} |G_{i,j,s}|^2 \quad (4)$$

其中: s 是智能反射面的序号; $g_{i,s,t}$ 和 $g_{s,j,r}$ 分别是发射天线增益和接收天线增益; $L_{Loss,i,j,s} = L_{Loss,i,s} L_{Loss,s,j}$ 是总路径损耗,由入射阶段和反射阶段的路径损耗组成; $|G_{i,j,s}|^2$ 表示反射增益。

智能反射面辅助的信道模型研究已经相对成熟,本文采用文献[30]中基于响应函数表征反射增益的信道模型,其中智能反射面被划分为若干个块来配置。响应函数的值对应反射增益,由入射、出射角度和反射元件的配置决定。当以反射面配置对应的最优角度入射和反射时,响应函数可以取得最大值, $|G_{i,j,s}| = \frac{4\pi L^2}{\lambda^2}$,其中, L 是智能反射面边长, λ 是信号波长。响应函数的定义可以参考文献[30],本文受限于篇幅,此处不再赘述。

为统一表示,用 $l_{i,j,s}$ 表示发射车辆为 v_i 、接收车辆为 v_j 的链路,其中, $s=0$ 表示直接链路, $s \neq 0$ 表示智能反射面 s 辅助的反射链路。在这种情况下,直接链路的接收功率 $P_{i,j}$ 重新表示为 $P_{i,j,0}$ 。直接链路($s=0$)和反射链路($s \neq 0$)的数据速率可以统一表示如下:

$$R_{i,j,s} = B \log \left(1 + \frac{P_{i,j,s}}{N_0 B} \right) \quad (5)$$

其中: $R_{i,j,s}$ 是链路 $l_{i,j,s}$ 的数据速率; N_0 是噪声的功率谱密度; B 是带宽。

1.2 问题描述与形式化

四元组 $\langle s_{src,q}, d_{des,q}, T_{beg,q}, L_{len,q} \rangle$ 表示序号为 q 的传输任务在时隙 $T_{beg,q}$ 出现,需将长度为 $L_{len,q}$ 的数据包 q 从车辆 $v_{src,q}$ 传输到车辆 $v_{des,q}$ 。需要为传输任务选择每次转发所用链路,直到将数据包转发到目标节点。用 $T_{end,q}$ 表示车辆 $v_{des,q}$ 收到数据包 q 后的时隙,时隙长度为 t_0 ,则所有传输任务的总时延为 $\sum_q (T_{end,q} - T_{beg,q}) t_0$,链路选择的目标是最小化这个总时延。用 α 表示链路选择,其中, $\alpha_{i,j,s,q,\tau}$ 表示链路 $l_{i,j,s}$ 在时隙 τ 被选择传输数据包 q 。 N 表示车辆数量, S 表示智能反射面数量。链路选择可形式化为如下的数学问题:

$$\min_{\alpha} \sum_q (T_{\text{cnd},q} - T_{\text{beg},q}) t_0 \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \alpha_{i,j,s,q,\tau} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in [1, N], \forall s \in [0, S] \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s=0}^S \sum_q \alpha_{i,k,s,q,\tau} + \sum_{j=1}^N \sum_{s=0}^S \sum_q \alpha_{k,j,s,q,\tau} \leq 1$$

$$\forall k \in [1, N] \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{s=0}^S \sum_q \alpha_{i,j,s,q,\tau} \leq 1, \forall s \in [1, S] \quad (9)$$

$$\sum_{\tau} \alpha_{i,j,s,q,\tau} \geq \left\lceil L_{\text{Len},q} / (R_{i,j,s} t_0) \right\rceil + 1, \forall \alpha_{i,j,s,q,\tau} = 1 \quad (10)$$

其中:式(7)是对链路选择 α 的约束;式(8)是对车辆的半双工约束,前半部分是 v_k 在时隙 τ 作为接收车辆参与的传输数量,后半部分是 v_k 在时隙 τ 作为发射车辆参与的传输数量,该约束表示车辆在一个时隙只能作为发射或接收车辆最多参与一个传输;式(9)是对反射面的约束,限制了反射面只能同时辅助最多一条链路;式(10)是对分配的时隙数量的约束, $\sum_{\tau} \alpha_{i,j,s,q,\tau}$ 表示分配给链路 $l_{i,j,s}$ 传输数据包 q 的时隙数,在分配的时隙内必须完成传输,其中多出的一个时隙是控制时隙。

2 多跳 V2V 链路选择机制

本节分2个部分介绍链路选择机制 FE-STDMA,分别是基于向前转发效率的链路评价函数和基于空分复用时分接入的链路选择算法。最后总结并展示链路选择机制的总体流程。

2.1 基于向前转发效率的链路评价函数

在车辆 v_i 成为传输任务 q 的源车辆或转发车辆将数据包 q 发送给车辆 v_j ,这2种情况下,车辆 v_i 会从未持有数据包 q 的状态转变为持有数据包 q 的状态。在这2种情况下,如果 v_i 不是传输任务 q 的目标车辆,它将作为新的发射车辆继续转发数据包。需要评估发射车辆的候选链路优先级,为链路选择提供依据。候选链路的优先级评估需要满足如下要求:

1) 优先级评估函数需要能反映链路转发数据包的有效性。链路的接收车辆距离发射车辆越远、距离目标车辆越近,则使用该链路转发越有效。因为单跳转发距离越远,数据包到达目标节点所需跳数越少,多跳时延也越低。为了在网格状的城市街道中更准确地反映转发进度,使用曼哈顿距离而不是欧几里得距离来计算车辆的转发距离。用 $D_{\text{Dis},i}$ 和 $D_{\text{Dis},j}$ 分别表示链路 $l_{i,j,s}$ 的发射车辆和接收车辆与目标车辆的曼哈顿距离,则链路 $l_{i,j,s}$ 的转发距离 $D_{\text{Dis},i,j} = D_{\text{Dis},i} - D_{\text{Dis},j}$ 。如果 $D_{\text{Dis},i,j} < 0$,链路 $l_{i,j,s}$ 会将数据包向远离目标车辆的方向转发,这样的链路不需要作为候选链路, $D_{\text{Dis},i,j} > 0$ 的链路构成了发射车辆 v_i 的候选链路集合,用 L_i 表示。

2) 链路质量也是影响候选链路选择的重要因素,选择转发距离较远的链路虽然能加快转发进度,

但是毫米波信号衰减严重,传播距离越远的链路质量越差。选择链路质量低下的链路转发,需要承担传输失败的风险。本文用成功传输的概率衡量链路质量,假设信号传播服从 Nakagami- m 分布,链路 $l_{i,j,s}$ 成功传输的概率如下^[31]:

$$P_{\text{Pb},i,j,s}(P_r, m, P_{i,j,s}) = 1 - \frac{m^m}{\Gamma(m) P_{i,j,s}^m} \int_0^{P_r} x^{m-1} e^{-(m/P_{i,j,s})x} dx \quad (11)$$

其中: P_r 是接收功率阈值; m 是由传播距离决定的衰落因子; $P_{i,j,s}$ 是链路 $l_{i,j,s}$ 的接收功率。

3) 发射车辆的候选链路可能因资源或信号冲突不可用,例如,候选链路的接收车辆或智能反射面正在传输数据,或候选链路正在传输的链路存在信号冲突。如果最优候选链路因冲突而不可用,但是冲突因素将在短时间内消失,则等待一段时间后选择最优链路可能比选择次优链路获得更好的转发效果。为充分利用网络资源,避免资源或信号冲突影响链路选择,本文采取时分接入机制,允许与正在传输的链路存在冲突的候选链路等待一段时间再转发。考虑到等待时间将带来时延代价,因此,链路完成数据包 q 的传输所需的时隙数量 $T_{i,j,s,q}$ 也将影响候选链路选择。链路完成传输所需的时隙数量由链路变为可用需等待的时隙数量 $T_{\text{wait},i,j,s}$ 和传输时隙数量 $T_{\text{trans},i,j,s,q}$ 组成,即 $T_{i,j,s,q} = T_{\text{wait},i,j,s} + T_{\text{trans},i,j,s,q}$,其中, $T_{\text{wait},i,j,s}$ 的计算将在后文介绍, $T_{\text{trans},i,j,s,q} = 1 + \left\lceil L_{\text{Len},q} / (R_{i,j,s} t_0) \right\rceil$ 。

综合转发距离、链路质量和完成传输所需时间,本文候选链路评价函数计算如下:

$$f(i, j, s) = \frac{D_{\text{Dis},i,j}}{T_{i,j,s,q}} P_{\text{Pb},i,j,s} \quad (12)$$

可以看出,该链路评价函数反映了选择链路 $l_{i,j,s}$ 的向前转发效率。

2.2 链路选择算法

采用时分多址接入机制,允许不可用的候选链路变为可用后再传输。用 T_{now} 表示当前时隙序号,三维数组 Trans 表示正在传输的链路的传输结束信息。 $\text{Trans}[i, j, s] > 0$,则链路 $l_{i,j,s}$ 正在传输,用 $\text{Trans}[i, j, s]$ 表示 $l_{i,j,s}$ 传输结束后的时隙序号;反之, $\text{Trans}[i, j, s] = 0$,则链路 $l_{i,j,s}$ 空闲。接下来给出链路变为可用需等待的时隙数量 $T_{\text{wait},i,j,s}$ 的计算方法。如果链路 $l_{i,j,s}$ 与正在传输的链路不存在资源或信号冲突,则链路 $l_{i,j,s}$ 可用, $T_{\text{wait},i,j,s} = 0$ 。如果链路 $l_{i,j,s}$ 与正在传输的链路存在资源或信号冲突,则等待时间需要分情况讨论。链路 $l_{i,j,s}$ 可能因以下3种因素不可用:

1) 接收车辆忙碌。如果 $l_{i,j,s}$ 的接收车辆 v_j 正在作为其他链路的发射车辆传输数据,即存在 $l_{j,y,z}$, $\text{Trans}[j, y, z] > 0$, $l_{i,j,s}$ 至少要等待 $\text{Trans}[j, y, z] - T_{\text{now}}$ 个时隙才可用。如果 $l_{i,j,s}$ 的接收车辆 v_j 正在作为其他链路的接收车辆传输数据,即存在 $l_{x,j,z}$, $\text{Trans}[x, j, z] > 0$,则

$l_{i,j,s}$ 的等待时间 $T_{\text{wait},i,j,s}$ 被设置为一个大正数。

2) 智能反射面忙碌。如果 $l_{i,j,s}$ 的智能反射面正在辅助其他链路传输,即存在 $l_{x,y,s}, \text{Trans}[x,y,s] > 0$, 则 $l_{i,j,s}$ 至少要等待 $\text{Trans}[x,y,s] - T_{\text{now}}$ 个时隙才可用。

3) 信号冲突。如果 $l_{i,j,s}$ 与正在传输的 $l_{x,y,z}$ 信号冲突,则 $l_{i,j,s}$ 至少要等待 $\text{Trans}[x,y,z] - T_{\text{now}}$ 个时隙才可用。

当接收车辆忙碌时,如果链路 $l_{i,j,s}$ 的接收车辆是其他链路的发射车辆,则只需等待传输完成即可。但是,如果 $l_{i,j,s}$ 的接收车辆是其他链路的接收车辆,则等待时间被设置为一个大正数。这是因为车辆 v_j 在成功接收数据包后将作为新的发射车辆转发数据包, v_j 变为空闲所需时间长且难以预估,因此将 $l_{i,j,s}$ 的等待时间设置为一个大正数,表示放弃等待这种链路。当 $l_{i,j,s}$ 的智能反射面忙碌,需等待其空闲 $l_{i,j,s}$ 才可用。信号冲突是指来自其他发射车辆的信号功率过高,影响接收机的正常接收。毫米波信号采用定向传输,主瓣方向的功率远高于旁瓣方向,如果出现主瓣方向的信号冲突,将严重影响链路传输。但是从另一方面分析,由于主瓣和旁瓣方向上功率存在巨大差距,定向传输中的最大干扰信号对信干噪比 (SINR) 起着决定性作用。可以假设只要最大干扰信号不超过阈值,链路就不会受到信号干扰影响^[32]。根据该假设,提出智能反射面辅助的毫米波信号冲突判定规则,如定义 1 所示:

定义 1 对于链路 $l_{i,j,s}$ 和 $l_{x,y,z}$, 如果 $\frac{P_{i,j,s}}{\sum_w P_{x,j,w} + N_0 B} < S_{\text{SINR},0}$ 或 $\frac{P_{x,y,z}}{\sum_w P_{i,y,w} + N_0 B} < S_{\text{SINR},0}$, 且 $i \neq x$, 则 $l_{i,j,s}$ 和 $l_{x,y,z}$ 存在信号冲突,其中, $S_{\text{SINR},0}$ 是信干噪比的最小阈值。

链路 $l_{i,j,s}$ 可能因单个因素不可用,也可能同时因多个因素不可用。如果同时有多个因素使 $l_{i,j,s}$ 不可用,则 $l_{i,j,s}$ 需要等待这些因素都消失后才可用,即 $T_{\text{wait},i,j,s}$ 应从多个因素的等待时间中取最大值。本文链路选择算法描述如下:

算法 1 链路选择算法

输入 $\Psi_L, \text{Trans}, T_{\text{now}}$

输出 α, Trans

1. While Ψ_L 非空:
2. For $l_{i,j,s}$ in L_i, L_i in Ψ_L :
3. $T_{\text{wait},i,j,s} = 0$;
4. For $\text{Trans}[x,y,z] > 0$ in Trans :
5. If $j = x$ or $s = z$ or $l_{i,j,s}$ 与 $l_{x,y,z}$ 冲突:
6. $T_{\text{wait},i,j,s} = \max\{T_{\text{wait},i,j,s}, \text{Trans}[x,y,z] - T_{\text{now}}\}$;
7. End If
8. If $j = y$:
9. $T_{\text{wait},i,j,s} = \text{INT_MAX}$;
10. End If
11. End For

12. 根据式(8)计算 $l_{i,j,s}$ 的优先级;

13. End For

14. 找到优先级最高的链路 $l_{i,j,s}$;

15. For τ in $[T_{\text{now}} + T_{\text{wait},i,j,s}, T_{\text{now}} + T_{\text{wait},i,j,s} + T_{\text{wait},i,j,s,q})$:

16. $\alpha_{i,j,s,q,\tau} = 1$;

17. End For

18. 从 Ψ_L 中删除 L_i ;

19. $\text{Trans}[i,j,s] = T_{\text{now}} + T_{\text{wait},i,j,s} + T_{\text{wait},i,j,s,q}$;

20. End While

为了在考虑其他转发影响的情况下完成分布式决策,所有发射车辆需通过 sub-6 GHz 广播其候选链路集合和需传输的数据包信息,车辆收集到的所有候选链路集合构成的集合表示为 Ψ_L 。需要为每个发射车辆选择一条链路转发数据包,即需要从 Ψ_L 中的每个候选链路集合中各选择一条链路,该过程如算法 1 所示。首先,完成所有候选链路集合中的所有候选链路的等待时间和优先级计算;然后,从所有候选链路中找到优先级最高的链路,假设其为 $l_{i,j,s}$,转发的数据包序号为 q ,则发射车辆 v_i 选择的转发链路是 $l_{i,j,s}$,接下来需要配置 $\alpha_{i,j,s,q,\tau}$,从 Ψ_L 中删除候选链路集合 L_i ,并将 $l_{i,j,s}$ 的传输结束信息加入 Trans 中;最后,需要重复链路选择过程,直到为所有发射车辆各选择一条转发链路,集合 Ψ_L 为空。由于每次选择后 Trans 中加入了 $l_{i,j,s}$ 的新信息,待选择的候选链路等待时间可能改变,因此每次循环需要重新计算所有候选链路的等待时间和优先级。

2.3 复杂度分析

● 本节对链路选择算法的复杂度进行分析。令 M 表示正在传输的多跳传输任务的数量,在链路优先级计算中,需要判断链路是否与所有正在传输的链路是否冲突,而正在传输的链路数量上限是 M ,因此单个链路优先级的计算复杂度是 $O(M)$ 。在每次进行链路选择时,需要为所有候选链路计算优先级。发射车辆的数量是 $|\Psi_L|$,每个发射车辆的候选链路数量是 $O(N(S+1))$,其中, N 和 S 分别是车辆和智能反射面的数量,因此候选链路的总数量是 $|\Psi_L|N(S+1)$,每次进行链路选择的复杂度是 $O(|\Psi_L|N(S+1)M)$ 。链路选择算法需要为 $|\Psi_L|$ 个发射车辆全部完成链路选择,因此链路选择算法的复杂度为 $O(|\Psi_L|^2 N(S+1)M)$,因为 $|\Psi_L| \leq M$,所以链路选择算法的复杂度最终可表示为 $O(M^3 N(S+1))$ 。

在常用的链路选择机制中, MFR 和 NFP 机制分别选择最远和最近的链路,复杂度为 $O(N(S+1))$, RFP 机制随机选择链路,但是需要先找到所有候选链路,因此复杂度也为 $O(N(S+1))$ 。相比于简单通用的 MFR、NFP 和 RFP 机制, FE-STDMA 机制的复杂度较高,其以计算开销为代价优化了链路选择。

后文将在仿真部分评估 FE-STDMA 机制的链路选择耗时,证明其可在单个控制时隙内完成链路选择。

2.4 链路选择机制总体流程

链路选择通过分布式决策实现,网络中的所有车辆都是平等的,同一区域内的车辆收到的 Ψ_L 是相同的,做出的决策也一致。以车辆 v_i 为例,图4给出了链路选择机制的总体流程。在每个时隙,需要选择转发链路的发射车辆会通过 sub-6 GHz 广播其候选链路集合,只要收到其他车辆的 sub-6 GHz 广播后 Ψ_L 不为空,所有都会执行链路选择算法。执行链路选择算法后,发射车辆可以确定转发链路,且所有车辆都可以获知区域内即将传输的链路信息以更新 Trans,为未来的链路选择提供信息。

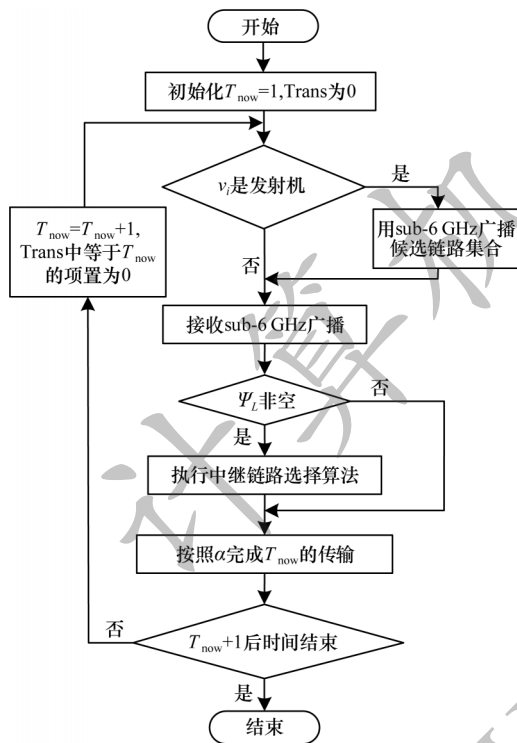


图4 链路选择机制流程

Fig.4 Procedure of the link selection mechanism

3 仿真评估

3.1 仿真场景与参数设置

使用 OMNET++(5.1)+VEINS+SUMO 框架^[33]对所提链路选择机制进行模拟实验,并和3种常用的链路选择机制进行对比。OMNET++是一个基于事件的网络模拟器,VEINS是为车载移动通信场景而设计的一个开源仿真框架。值得注意的是,VEINS中车辆节点的物理层和MAC层基于802.11p实现,为了实现智能反射面辅助的毫米波V2V通信,本文扩展了VEINS的底层模型,添加了波束对准机制使其支持毫米波定向传输,并实现了智能反射面模块。SUMO用于生成网络和车辆,本文使用SUMO建立

类似图1的2×2街道网格,其中3条经向街道和3条纬向街道相交于9个路口,相邻路口间的街道段长度为300 m,智能反射面部署间隔为100 m。每条街道有4条4 m宽的车道,每个方向各2条。考虑到城市场景中人行道的存在,设置街道总宽度(即两侧建筑物的间距)为30 m。其他参数配置如表1所示。

表1 仿真参数配置

Table 1 Simulation parameters configuration

参数名	参数配置
交通信号灯周期/s	$(t_R, t_Y, t_G)=(20, 3, 20)$
默认平均车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	50
跟车模型	Krauss model
变道模型	LC2013
载波频段/GHz	60
信道带宽/GHz	1.08
发射功率/mW	30
噪声功率谱密度/($\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1}$)	-174
SINR 阈值/dBm	5
3 dB 波束宽度	10°
数据包长度/Mb	2.56
时隙持续时间/ms	2
移动性信息交换周期/s	0.1
仿真时间/s	200
仿真次数/次	100

3.2 仿真结果分析

为了验证所提链路选择机制 FE-STDMA 的有效性,在部署智能反射面的场景中模拟 FE-STDMA,并将其与常用的 MFR、NFP 和 RFP 这3种链路选择机制进行比较,其中, MFR 和 RFP 的固定半径设置为100 m。为了验证智能反射面提高毫米波多跳 V2V 性能的效果,比较几种机制在不同反射面大小(包括不部署智能反射面)下的表现。链路选择的目标是在保障多跳 V2V 通信可靠性的同时最小化时延,因此,选择交付率和多跳平均时延2个指标来评估链路选择机制的性能。

为验证 FE-STDMA 机制的实用性,统计各机制在不同车辆密度下完成链路选择的耗时,结果如表2所示,其中,车辆密度由跟车距离衡量。从表2可以看出,车辆密度越高,链路选择耗时越久。相比于计算简单、通用性强的 MFR、NFP 和 RFP 机制,FE-STDMA 机制完成链路选择的耗时更久,这是因为 FE-STDMA 机制在链路选择时基于向前转发效率和空间复用时分接入,选择了更优的链路并避免了冲突,但是 FE-STDMA 机制的链路选择耗时仍然远小于时隙持续时间,可在单个控制时隙内完成链路选择。

表2 不同车辆密度下的链路选择耗时

Table 2 Time consumed by link selection under different vehicle densities 单位:ms

链路选择机制	跟车距离为 30 m	跟车距离为 50 m	跟车距离为 70 m	跟车距离为 90 m
FE-STDMA	2.22×10^{-1}	1.31×10^{-1}	1.06×10^{-1}	8.34×10^{-2}
MFR	3.53×10^{-3}	1.89×10^{-3}	1.44×10^{-3}	1.13×10^{-3}
NFP	3.46×10^{-3}	1.92×10^{-3}	1.42×10^{-3}	1.18×10^{-3}
RFP	1.53×10^{-3}	8.79×10^{-4}	6.14×10^{-4}	4.45×10^{-4}

图5给出了4种链路选择机制的多跳V2V交付率与车辆密度的关系,其中,车辆密度由跟车距离衡量,智能反射面边长设置为0.6 m。从图5可以看出:MFR和RFP机制的交付率很低,这主要是因为MFR选择固定半径内转发距离最远的链路,而RFP机制随机选择链路,都无法保证链路的可靠性;NFP和FE-STDMA机制在高车辆密度下有很高的交付率,随着车辆密度的降低,交付率降低。NFP机制选择转发距离最近的链路,因此车辆密度越高,链路质量越高,可靠性越强。FE-STDMA机制在进行链路选择时虽然权衡了转发距离,但是由于考虑了其他的转发影响因素,避免了因信号冲突造成的传输失败问题,因此交付率相比于NFP平均提高了11.11%。

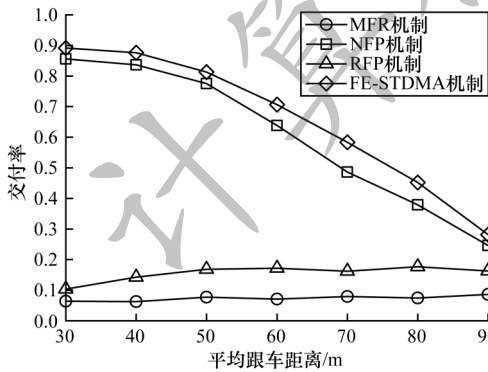


图5 交付率随车辆密度的变化情况

Fig.5 The variation of delivery rate with vehicle density

图6给出了不同车辆密度下4种链路选择机制成功交付传输任务的平均多跳时延,其中部署的智能反射面边长为0.6 m。从图6可以看出:MFR和RFP机制的时延随车辆密度变化不大,这是因为时延主要受单跳转发距离影响,而这2种机制的单跳转发距离不依赖于车辆密度;随着车辆密度的降低,NFP和FE-STDMA机制的时延逐渐降低,且FE-STDMA的时延相比于NFP平均降低了49.88%。NFP时延降低是由于与最近车辆的距离随着密度降低而增加。FE-STDMA机制的转发距离在高车辆密度下受车辆障碍物限制,随着车辆密度的降低,FE-STDMA机制的转发距离得到改善。总体上MFR和RFP机制的时延很低,但这2种机制的可靠性存在很大缺陷,而FE-STDMA机制可以在保证高可靠性的同时显著改善时延。

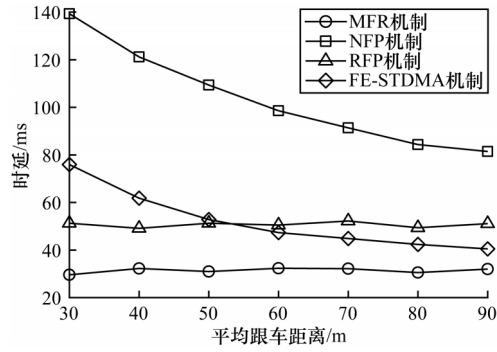


图6 时延随车辆密度的变化情况

Fig.6 The variation of time delay with vehicle density

车载网络中车辆的高移动性会减少波束对准时间,降低无线链路的稳定性。图7给出了在不同车辆速度下4种链路选择机制的多跳交付率,其中,平均跟车距离为60 m,智能反射面边长设置为0.6 m。从图7可以看出,NFP和FE-STDMA机制在较低车速下的交付率较高。在高车速下,波束对准时间降低,毫米波链路稳定性受到影响,NFP和FE-STDMA机制的交付率都有明显降低,其中,FE-STDMA机制交付率的降低相比于NFP机制更为明显,可见需要进行配置优化的智能反射面辅助通信不能很好地适用于高车速场景。

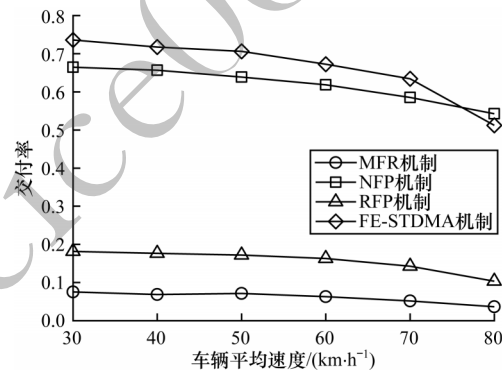


图7 交付率随车辆速度的变化情况

Fig.7 The variation of delivery rate with vehicle speed

图8给出了4种链路选择机制成功交付传输任务的平均多跳时延与部署的智能反射面边长的关系,其中,平均跟车距离为60 m。随着智能反射面面积的增大,可以提供的反射增益增强。从图8可以看出,随着智能反射面面积的增加,MFR、NFP和RFP这3种机制的时延没有明显变化,因为这3种机制的转发距离受反射增益影响较小。而随着智能反射面面积的增加,反射增益增强,FE-STDMA机制的时延明显降低,这是因为反射增益可以改善链路质量,使FE-STDMA在不影响链路可靠性的情况下选择更远的车辆,从而提高转发距离,该结果证明了部署智能反射面可以有效改善多跳V2V性能。

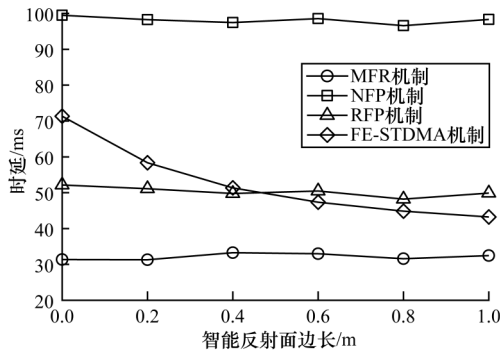


图8 时延随智能反射面边长的变化情况

Fig.8 The variation of time delay with the side length of IRS

4 结束语

针对毫米波多跳V2V通信中时延与可靠性难以平衡的问题,本文将智能反射面辅助与多跳转发相结合,以改善多跳V2V性能。提出一种链路选择机制FE-STDMA,综合转发距离、链路质量和传输所需时间,通过空间复用避免信号冲突,从而实现并发传输,同时利用时分接入缓解转发资源冲突问题。仿真结果表明,与MFR、NFP、RFP机制相比,FE-STDMA链路选择机制可以在保证高可靠性的同时显著改善多跳V2V时延。为了实现分布式链路选择、波束对准和智能反射面控制,所提机制需要车辆通过sub-6 GHz接口交换大量控制信息,控制开销较大。下一步将对使用智能反射面辅助通信所带来的控制开销问题进行分析,探索一种车载网中低控制开销的智能反射面辅助传输机制。

参考文献

- [1] GHAFOR K Z, KONG L, ZEDADALLY S, et al. Millimeter-wave communication for Internet of vehicles: status, challenges, and perspectives[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 8525-8546.
- [2] VA V, SHIMIZU T, BANSAL G, et al. Millimeter wave vehicular communications: a survey[J]. Foundations and Trends in Networking, 2016, 10(1): 1-113.
- [3] CHOI J, VA V, GONZALEZ-PRELCIC N, et al. Millimeter-wave vehicular communication to support massive automotive sensing[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12): 160-167.
- [4] GIORDANI M, ZANELLA A, ZORZI M. Millimeter wave communication in vehicular networks: challenges and opportunities [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [5] 何尔利, 纪澎善, 贾向东, 等. 位置协助的无人机毫米波通信网络自适应信道估计[J]. 计算机工程, 2020, 46(6): 196-201.
HE E L, JI P S, JIA X D, et al. Position-aided adaptive channel estimation for mmWave communication network of UAV[J]. Computer Engineering, 2020, 46(6): 196-201. (in Chinese)
- [6] DENG J, TIRKKONEN O, FREIJ-HOLLANTI R, et al. Resource allocation and interference management for opportunistic relaying in integrated mmWave/sub-6 GHz 5G networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(6): 94-101.
- [7] FAROOQ M J, ELSAWY H, ALOUINI M S. A stochastic geometry model for multi-hop highway vehicular communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3): 2276-2291.
- [8] LIN X, ANDREWS J G. Connectivity of millimeter wave networks with multi-hop relaying [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(2): 209-212.
- [9] 王桐, 王鹏, 柳冰忆. 城市环境下跨层VANET路由由协议研究[J]. 计算机工程, 2017, 43(11): 55-65.
WANG T, WANG P, LIU B Y. Research on cross-layer routing protocol in VANET under urban environment[J]. Computer Engineering, 2017, 43(11): 55-65. (in Chinese)
- [10] LI Z, XIANG L, GE X, et al. Latency and reliability of mmWave multi-hop V2V communications under relay selections[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 9807-9821.
- [11] LI S, LI Z, GE X, et al. Multi-hop links quality analysis of 5G enabled vehicular networks [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [12] RASHEED I, HU F. Intelligent super-fast vehicle-to-everything 5G communications with predictive switching between mmWave and THz links [J]. Vehicular Communications, 2021, 27: 100303.
- [13] DU S, HOU J, SONG S, et al. A geographical hierarchy greedy routing strategy for vehicular big data communications over millimeter wave[J]. Physical Communication, 2020, 40: 101065.
- [14] WANG P, FANG J, YUAN X, et al. Intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave communications: joint active and passive precoding design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14960-14973.
- [15] GONG S, LU X, HOANG D T, et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2020, 22(4): 2283-2314.
- [16] WU Q, ZHANG S, ZHENG B, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [17] 王丹, 梁家敏, 刘金枝, 等. 6G可重构智能表面的相移模型设计[J]. 计算机应用, 2021, 41(9): 2694-2698.
WANG D, LIANG J M, LIU J Z, et al. Phase shift model design for 6G reconfigurable intelligent surface[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(9): 2694-2698. (in Chinese)
- [18] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [19] 曾嵘, 杭潇. 车联网环境下可重构智能反射面辅助无线信道估计算法[J]. 通信学报, 2022, 43(8): 142-150.
ZENG R, HANG X. Reconfigurable intelligent surface assist wireless channel estimation algorithm in Internet of vehicles environment[J]. Journal on Communications, 2022, 43(8): 142-150. (in Chinese)

- [20] BJÖRNSSON E, ÖZDOĞAN Ö, LARSSON E G. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward: how large surfaces are needed to beat relaying? [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(2): 244-248.
- [21] ABDULLAH Z, CHEN G, LAMBOTHARAN S, et al. A hybrid relay and intelligent reflecting surface network and its ergodic performance analysis [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(10): 1653-1657.
- [22] ABDULLAH Z, CHEN G, LAMBOTHARAN S, et al. Optimization of intelligent reflecting surface assisted full-duplex relay networks [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(2): 363-367.
- [23] PAN S, ZHANG X, SUNG D K. Intelligent reflecting surface-aided centralized scheduling for mmWave V2V networks [C]//*Proceedings of 2022 International Conference on Computer Communications and Networks*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2022: 1-10.
- [24] SINGH G, SRIVASTAVA A, BOHARA V A. Visible light and reconfigurable intelligent surfaces for beyond 5G V2X communication networks at road intersections [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(8): 8137-8151.
- [25] RASHEED I, HU F, HONG Y K, et al. Intelligent vehicle network routing with adaptive 3D beam alignment for mmWave 5G-based V2X communications [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 22(5): 2706-2718.
- [26] COLL-PERALES B, GOZALVEZ J, GRUTESER M. Sub-6 GHz assisted MAC for millimeter wave vehicular communications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(3): 125-131.
- [27] CHEN Y, WANG Y, ZHANG J, et al. Resource allocation for intelligent reflecting surface aided vehicular communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 12321-12326.
- [28] SERIES M. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced [J]. Report ITU, 2009, 638: 1-72.
- [29] YAMAMOTO A, OGAWA K, HORIMATSU T, et al. Path-loss prediction models for intervehicle communication at 60 GHz [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 65-78.
- [30] NAJAFI M, JAMALI V, SCHÖBER R, et al. Physics-based modeling and scalable optimization of large intelligent reflecting surfaces [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(4): 2673-2691.
- [31] MA X, YIN X, WILSON M, et al. MAC and application-level broadcast reliability in VANETs with channel fading [C]//*Proceedings of 2013 International Conference on Computing, Networking and Communications*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2013: 756-761.
- [32] TAYA A, NISHIO T, MORIKURA M, et al. Concurrent transmission scheduling for perceptual data sharing in mmWave vehicular networks [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2019, 102(5): 952-962.
- [33] RELANO W, MAHGOUB I. TrafficModeler extensions: a case for rapid VANET simulation using, OMNET++, SUMO, and VEINS [C]//*Proceedings of 2013 Conference on High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*. Washington D. C. , USA: IEEE Press, 2013: 109-115.

编辑 吴云芳