

外界干扰下车对车2×2 MIMO-VLC系统研究

尹荣荣^{1,2}, 沈兴悦^{1,2}, 桑 军^{1,2}, 秦 豪^{1,2}, 翟萌发^{1,2}, 贾宽宽^{1,2}

(1. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北秦皇岛 066004; 2. 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 为了研究干扰车辆和穿越道路行人对车对车可见光通信系统的影响, 本文提出了带有外界干扰的车对车2×2 MIMO可见光通信模型. 该模型以基于市场加权灯束模型的汽车前照灯作为2个发射器, 以光电探测器作为2个接收器, 考虑了间隔车道车辆和过道行人对系统性能的影响. 研究结果表明: 当误码率小于 10^{-4} 时, 同道、邻道和间隔车道车辆的纵向通信距离分别为: 28 m、5~18 m、0 m; 间隔车道的两车不能直接通信, 但其前照灯发射光线会进入信号接收车辆从而对正常通信两车产生影响; 行人穿越道路会使正常通信两车的误码率产生较大波动且存在积极影响, 正常通信两车横向距离越大积极影响占比越高; 本文提出的模型考虑了行人和车辆的干扰, 为改善可见光通信在复杂交通网的应用效果提供了理论依据.

关键词: 外界干扰; 车对车; 可见光通信; 误码率

基金项目: 国家留学基金(No.201808130258)

中图分类号: TN911.74; TN929.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)04-1269-13

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

DOI: 10.12263/DZXB.20231145

Research of Vehicle-to-Vehicle 2×2 MIMO-VLC System Based on External Interference

YIN Rong-rong^{1,2}, SHEN Xing-yue^{1,2}, SANG Jun^{1,2}, QIN Hao^{1,2}, ZHAI Meng-fa^{1,2}, JIA Kuan-kuan^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: In order to study the effects of interfering vehicles and crossing pedestrians on vehicle-to-vehicle visible light communication system, a vehicle-to-vehicle 2×2 MIMO visible light communication model with external interference is proposed in the paper. In this model, the automotive headlights based on the market-weighted model are considered as two transmitters and the photodetectors as two receivers. The effects of vehicles in the spaced lanes and pedestrians are considered. The results show that when the bit error rate is less than 10^{-4} , the longitudinal communication distances of vehicles in the same lane, adjacent lane and spacing lane are 28 m, 5~18 m and 0 m, respectively. The two vehicles in the separate lane cannot communicate directly, but the light emitted by the headlights will enter the signal receiving vehicle and affect the normal communication between the two vehicles. Pedestrian crossing the road will make the bit error rate of normal communication vehicles fluctuate greatly and have a positive effect. The larger the lateral distance between normal communication vehicles, the higher the positive effect proportion. The model proposed in this paper takes into account the interference of pedestrians and vehicles, and provides theoretical basis for the application of visible light communication in complex traffic networks.

Key words: external interference; vehicle to vehicle; visible light communication; bit error rate

Foundation Item(s): China Scholarship Council (No.201808130258)

1 引言

可见光通信(Visible Light Communication, VLC)系统应用在车对车(Vehicle to Vehicle, V2V)通信时存在众多挑战, 诸如:(1)不同天气条件对传输信道的影响;

(2)系统模型与实际交通环境的差异^[1]. 研究者针对V2V-VLC系统存在的问题开展了一系列的工作. 在文献[2,3]中, 研究者在V2V-VLC系统中引入了多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统以达

到降低 V2V-VLC 系统误码率(Bit Error Rate, BER)的目的. 文献[4~6]中,研究者通过在路灯杆的合适位置安装反射装置,解决了相邻车道两车因纵向距离过小引发通信中断的问题. 在文献[7,8]中,研究者基于转弯道路建立了 V2V-VLC 模型,并使用路边基础设施以及安装在基础设施上的中继装置实现了处于弯道路两车之间的通信,文献[9~11]在不同天气条件下对 V2V-VLC 系统的性能指标进行了分析. 在文献[12]中,研究者打破常规乘用车的限制,基于重型卡车提出了一个考虑了横向距离和车身振荡影响的路径损耗模型,分析了不同信道参数对 V2V-VLC 性能的影响. 以上的文献中,研究者基于真实交通环境对 V2V-VLC 系统进行了分析,提高了通信系统的质量并解决了部分交通环境中使用 VLC 潜在的问题. 文献[13~15]通过改进路由协议提高 V2V 长距离 VLC 的质量,但是在研究过程中允许两车直接跨越多个车道进行通信,且没有考虑两车通信时其他车道经过车辆对系统性能的影响. 文献[16]研究了车辆密度对 VLC 系统性能的影响,研究结果表明:当相邻车道和间隔车道有车辆经过时由车辆表面引入的反射光线会改善正常通信两车的 BER 性能. 在建模的过程中研究者认为干扰车辆表面绝对光滑且平整,然而车辆表面是有弧度的且不绝对光滑,且没有考虑正常通信两车旁边经过车辆前照灯发出光线对系统性能的影响. 文献[17]指出车辆前照灯所发出的光线会到达光线发射车辆所在车道相邻的车道以及间隔车道,并对到达每个车道的光线覆盖范围进行了分析,但是没有对前照灯光线对其他通信车辆的影响进行量化分析. 以上研究均没有考虑行人穿越道路的交通场景对 V2V-VLC 系统的影响以及间隔车道干扰车辆发出光线对正常通信两车通信质量的影响. 然而在城市交通环境中行人和车辆同时处于道路上的交通场景以及两车正常通信时有干扰车辆经过的交通场景是十分常见的.

为了弥补行人穿越道路的交通环境和干扰车辆经过的交通环境对正常通信两车通信质量影响的研究缺陷,从而降低系统模型与实际交通环境的差距. 本研究首先对外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 系统进行了建模,然后分别对存在行人干扰和间隔车道干扰的交通环境 V2V-VLC 的 BER 性能进行了分析,这些研究结果对于改善 V2V-VLC 系统在复杂交通网中的通信性能提供了理论依据.

2 外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 系统模型

本节首先对外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 系统的干扰来源(行人和干扰车辆)以及信号传递流程进行了分析,然后基于行人和间隔车道车辆建立了外界干扰模

型和系统 BER 波动程度的评价指标,最后对系统的 LOS 链路、NLOS 链路以及噪声部分进行了分析.

在多车道的城市交通环境中,正常通信的两车会受到非通信车辆发出光线的干扰. 如图 1 所示,潜在的干扰情况包括:同车道两车进行通信时受间隔车道经过车辆的干扰(车道 3 的两车进行通信,车道 1 和车道 5 有车辆经过),相邻车道的两车进行通信时受间隔车道经过车辆的影响(车道 2 和车道 3 的两车进行通信,车道 1 和车道 5 有车辆经过). 为了方便推导,两车进行正常通信时隔车道经过的车辆被定义为干扰车辆.

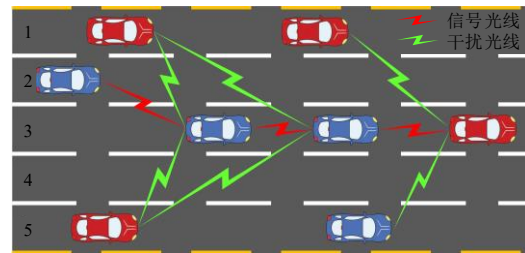


图1 城市交通路况图

在城市交通路口和直线道路上的人行横道,会出现行人和车辆同时处于道路上的交通场景,由于城市交通路口的通信环境完全包括具有人行横道直线道路交通环境,所以本研究只对路口的交通场景进行了分析. 图 2 展示了双向四车道城市路口的交通场景,当前时刻交通信号灯左右方向为红灯,上下方向为绿灯. 根据交通规则,当前时刻左侧和右侧的人行横道允许行人经过,上侧和下侧的人行横道禁止行人通过;左侧车道和右侧车道允许车辆右转,但是不允许车辆直行;上方车道和下方车道允许车辆直行、右转以及左转. 因此,在城市交通路口是车辆和行人同时处于道路上的交通情形是十分常见的.



图2 行人过道路场景

车对车 2×2 MIMO-VLC 系统模型中的汽车前照灯采用了市场加权灯束模型,市场加权灯束模型是通过测量市场上主流型号汽车前照灯的光照强度分布特性,然后根据不同型号车辆在市场中的份额占比对其进行加权,从而获得最符合市场上主流车型光照强度

分布特性的前照灯模型^[2]. 本研究将车辆干扰和行人干扰统称为外界干扰. 存在外界干扰的车对车 2x2 MIMO-VLC 系统模型的系统框图如图 3 所示. 信号发射车辆的两个前照灯(LED1 和 LED2)与安装在信号接收车辆尾部的两个光电探测器(PD1 和 PD2)进行通信. 所需发送的数据经过开关键控的方法同时调制 LED1 和 LED2 上,两个前照灯同时发出带有调制信息的光线. 光线经过传输信道到达光电探测器(PhotoDetector, PD)后,对 PD 接收的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)进行最大比合并,再使用计算标准高斯分布的尾部概率函数对 SNR 进行处理,最终完成数据的接收以及分析.

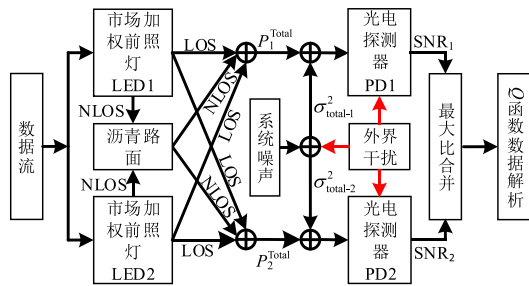


图3 外界干扰下2x2 MIMO的V2V-VLC系统框图

通过图3可以得到外界干扰下2x2 MIMO的V2V-VLC系统模型的信道传输矩阵为

$$\mathbf{H}_{(h_{ij}^{\text{LOS}} + h_{ij}^{\text{NLOS}})} = \begin{bmatrix} h_{11}^{\text{LOS}} + h_{11}^{\text{NLOS}}, h_{21}^{\text{LOS}} + h_{21}^{\text{NLOS}} \\ h_{12}^{\text{LOS}} + h_{12}^{\text{NLOS}}, h_{22}^{\text{LOS}} + h_{22}^{\text{NLOS}} \end{bmatrix}, i = \{1, 2\} \quad (1)$$

其中, h_{ij}^{LOS} 为信号发射车辆和干扰车辆第 i 个前照灯到信号接收车辆第 j 个 PD 的 LOS 链路信道增益, 其表达式为: $h_{ij(1)}^{\text{LOS}} + \dots + h_{ij(n)}^{\text{LOS}}$, 式中 n 为信号发射车辆和干扰车辆之和; h_{ij}^{NLOS} 为信号发射车辆和干扰车辆第 i 个前照灯到信号接收车辆第 j 个 PD 的 NLOS 链路增益之和, 其表达式为: $h_{ij(1)}^{\text{NLOS}} + \dots + h_{ij(n)}^{\text{NLOS}}$, $h_{ij(n)}^{\text{NLOS}}$ 为第 n 辆车的第 i 个前照灯到信号接收车辆的第 j 个 PD 的信道增益, 其表达式为: $h_{iA(n)} \cdot h_{iAj(n)} + \dots + h_{iA'(n)} \cdot h_{iAj'(n)}$, 式中: $h_{iA(n)}$ 为第 n 辆车的第 i 个前照灯到反射点 A 的信道增益; $h_{iAj(n)}$ 为由第 n 辆车的第 i 个前照灯引起的在反射点 A 到第 j 个 PD 的信道增益. A 为第 n 辆车的第 i 个前照灯引起的信道内可以发生反射的任意点. 所以, 外界干扰下 2x2 MIMO 系统 PD 接收的来自 n 辆车前照灯的总功率为

$$\begin{bmatrix} P_1^{\text{Total}} \\ P_2^{\text{Total}} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{(h_{ij}^{\text{LOS}} + h_{ij}^{\text{NLOS}})} \cdot \begin{bmatrix} I_T(\zeta_{1j}, \zeta_{1j}) / \text{LER} \\ I_T(\zeta_{2j}, \zeta_{2j}) / \text{LER} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, P_j^{Total} 为第 j 个 PD 从 n 辆车前照灯接收的总功率($j = \{1, 2\}$); $I_T(\zeta_{ij}, \zeta_{ij})$ 为市场加权灯束模型的发光强度(cd), ζ_{ij} 和 ζ_{ij} 为第 i 个前照灯和第 j 个 PD 组成的 LOS 链路或第 i 个前照灯出射光线经过反射面反射进入第 j 个 PD 光线组成 NLOS 链路的前照灯出射部分与前照灯灯

轴方向的水平夹角和垂直夹角; LER 为前照灯的发光效能. 所以, 外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统信号接收车辆第 j 个 PD 的 SNR 可以表示为

$$\text{SNR}_j = \frac{(R \cdot P_j^{\text{Signal}})^2}{\sigma_{\text{Total-}j}^2} \quad (3)$$

其中, SNR_j 为信号接收车辆第 j 个 PD 接收信号的信噪比; R 为 PD 的响应度; P_j^{Signal} 为第 j 个 PD 从信号发射车辆接收的总功率; $\sigma_{\text{Total-}j}^2$ 为第 j 个 PD 噪声方差的总和. 所以, 使用最大比合并的方法合并后外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统的 BER 为

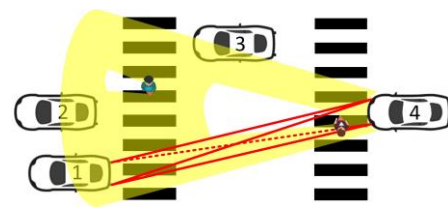
$$\text{BER} = Q(\sqrt{\text{SNR}^{\text{Total}}}) = Q\left(\sqrt{\frac{\text{SNR}_1^2 + \text{SNR}_2^2}{\text{SNR}_1 + \text{SNR}_2}}\right) \quad (4)$$

其中, BER 为外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统的误码率; $Q(x)$ 为用于计算标准高斯分布的尾部概率的函数. 在本节的其余部分将对系统的主要部分进行详细说明.

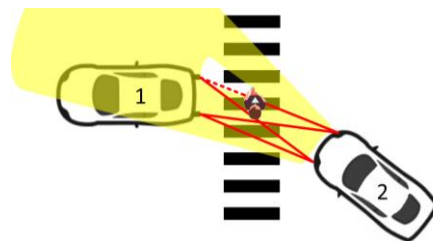
2.1 外界干扰模型

本节首先基于城市交通环境对行人穿越道路的交通场景进行了分类以及数学表示, 进而推导了行人穿越道路的过程中 PD 有效感光面积和 NLOS 链路反射面积的变化情况; 然后对干扰车辆对正常通信两车的影响进行了表述, 最后使用类方差的方法 (Similarity Variance, SV) 对系统 BER 性能的波动程度进行了定义.

如图 4 所示, 行人对 V2V-VLC 系统的影响是通过遮挡 LOS 链路和改变 NLOS 链路的反射面积实现的. 对于十字路口交通场景和直线道路上存在人行横道的交通场景, 行人对 V2V-VLC 的干扰可以归纳为两类: (1) 正常通信的两车车身平行 (即: 直行状态), 处于相同车道



(a) 车身平行交通场景



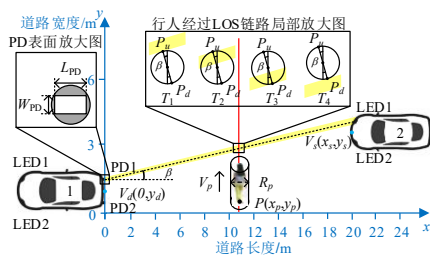
(b) 转弯交通场景

图4 不同交通环境行人干扰示意图

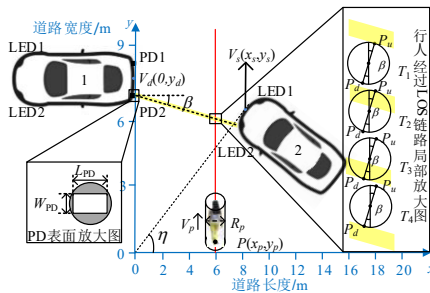
或不同车道,信道中有一条或两条人行横道.如图4(a)所示,车1、2和3为处于不同车道的信号接收车辆,车4为信号发射车.其中车1和车4、车3和车4为邻道通信,车2和车4为同道通信;(2)正常通信的两车车身具有一定角度(即转弯状态),信道中有一条人行横道.如图4(b)所示,车1为信号接收车辆,车2信号发射车辆.

为了量化行人对V2V-VLC系统LOS链路的影响,在图5中对城市交通场景的两种情况进行了数学具体化.具体操作如下:(1)以信号接收车辆尾部的PD为纵轴,路边为横轴建立适用于动态交通环境的直角坐标系;(2)在车上相对位置标示出了车辆前照灯、PD以及其他计算所需的位置;(3)由于车灯发出的光线具有较强的方向性,当两个行人左右并行穿越道路时,对通信系统的影响近似与一个人穿越道路时相同.所以,研究中假设行人前后依次顺序穿越道路,并将行人经过人行横道时的运动轨迹描述为从 x 轴出发沿 y 轴正方向的直线(图中红色线);(4)由于人体形态的描述较为复杂所以使用了圆柱体进行简化,并在圆柱体底部中心位置定义了行人的中心位置坐标^[18];(5)对PD表面进行了放大并表示出了其无遮挡时有效感光面积的计算方法,即 $L_{PD} \times W_{PD}$;(6)在图5(a)中,以LED1入射到PD1的LOS光线为例,在图5(b)中,以LED2入射到PD2的LOS光线为例,将行人影响PD有效感光面积的4个特殊时刻点进行了放大(T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4).由于车辆和行人处于运动状态,因此不同时刻车辆和行人相对位置不同.

如图5所示,设信号发射车辆车头中心位置坐标为



(a) 车身平行交通场景



(b) 转弯交通场景

图5 行人干扰LOS链路的示意图

$V_s(x_s, y_s)$,接收车辆车尾中心位置坐标为 $V_d(0, y_d)$,则车身平行时信号发射车辆LED1和LED2的位置可以表示为

$$\begin{cases} x_{LEDi} = x_s \\ y_{LEDi} = y_s \pm \frac{1}{2} d_{TX} \end{cases} \quad (5)$$

其中, d_{TX} 为两个前照灯的间距;当 i 为1时式中的符号取正,反之取负($i=\{1,2\}$).当两车处于转弯交通情形时,信号发射车辆的前照灯的位置可以表示为

$$\begin{cases} x_{LEDi} = x_s \pm \frac{1}{2} d_{TX} \cdot \cos \eta \\ y_{LEDi} = y_s \pm \frac{1}{2} d_{TX} \cdot \sin \eta \end{cases} \quad (6)$$

其中, i 为1时式中的符号取正,反之取负($i=\{1,2\}$); η 为信号发射车辆车身法线方向与 x 轴正方向的夹角.两种交通场景接收车辆PD位置表示为

$$\begin{cases} x_{PDi} = 0 \\ y_{PDi} = y_d \pm \frac{1}{2} d_{PD} \end{cases} \quad (7)$$

其中, d_{PD} 为两个PD的间距,当 i 为1时式中的符号取正,反之取负($i=\{1,2\}$).行人在信道中运动时会对PD接收的LOS链路产生遮挡,被遮挡的LOS链路光线将不会被PD接收.由于行人穿越道路的轨迹和PD感光面是平行的,所以行人对LOS链路光线的遮挡程度可以等比例转化为PD有效感光面积的变化.图5中行人遮挡LOS链路放大图展示了行人经过LOS链路的过程与LOS链路相切的4个特殊时刻(PD有效感光面积表达式转变的时刻).行人运动过程中与LOS链路的切点坐标 P_u 和 P_d 可以表示为

$$\begin{aligned} P_u(x_{P_u}, y_{P_u}) &= (x_p \pm R_p \cdot \sin \beta, y_p + R_p \cdot \cos \beta) \\ P_d(x_{P_d}, y_{P_d}) &= (x_p \pm R_p \cdot \sin \beta, y_p - R_p \cdot \cos \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, R_p 为圆柱体的半径; β 为信号发射车辆前照灯LOS链路光线和PD法线方向的夹角.若前照灯和PD之间的LOS链路斜率为正,则 P_u 和 P_d 分别位于行人运动方向(y 轴方向)逆时针旋转 β 的圆柱体表面的上方和下方,反之 P_u 和 P_d 位于行人运动方向顺时针旋转 β 的圆柱体表面的上方和下方.因此,当信号发射车辆前照灯LOS光线斜率为正时,式中 x_{P_u} 表达式中符号取负, x_{P_d} 表达式中符号取正;当信号发射车辆前照灯LOS光线斜率为负时, x_{P_u} 表达式中符号取正, x_{P_d} 表达式中符号取负.由于 y 轴方向LOS链路光柱的横截面和PD感光面相同,所以LED x 到PD x 的LOS链路光束的边界函数可以表示为($x=\{1,2\}$)

$$y_i^{los}(x) = \frac{y_{LEDx} - y_{PDx}}{x_{LEDx}} x + y_{PDx} \pm \frac{1}{2} L_{PD} \quad (9)$$

其中, i 为1时式中的符号取负,此函数为LOS链路光柱

$$E = \frac{d\phi}{dS} = \frac{d\phi}{d\omega} \cdot \frac{d\omega}{dS} = \frac{I_T(\zeta, \xi) \cdot \cos \theta}{r^2} \quad (17)$$

其中, ϕ 为光通量(lm); S 为被光线照射的面积(m^2); ω 为光线立体角(sr); r 为光线出射点与被照射点的直线距离(m); θ 为汽车前照灯出射光线与光线照射面法线方向的夹角.

外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 系统 PD 接收的 LOS 链路光线由信号发射车辆 LOS 链路光线和干扰车辆 LOS 链路光线共同组成. 根据式(17)可知, 信号接收车辆的第 j 个 PD 从任意单一前照灯接收的 LOS 功率可以表示为

$$P_j^{\text{LOS}} = \begin{cases} \frac{E \cdot \text{Ar}_{ij}}{\text{LER}} = \frac{I_T(\zeta_{ij}, \xi_{ij}) \cdot \cos \theta_{ij} \cdot \text{Ar}_{ij}}{d^2 \cdot \text{LER}}, & 0 \leq \theta \leq \psi \\ 0, & \theta > \psi \end{cases} \quad (18)$$

其中, P_j^{LOS} 为第 j 个 PD 接收的来自信号发射车辆或干扰车辆前照灯的 LOS 功率(W); d 为前照灯到 PD 的直线距离; ψ 为 PD 接收光线的视场半角. 当仅存在干扰车辆时 Ar_{ij} 为常数, 其数值为 PD 感光部分的总面积, 在外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 模型中, 若干扰车辆数量为 1 时, 每个 PD 最多可以接收到来自信号发射车辆和干扰车辆各 2 条 LOS 链路光线, 当干扰车辆数量增加 1 辆, 则每个 PD 接收的 LOS 光线最多增加 2 条. 信号接收车辆任意 PD 接收来自信号发射车辆的 LOS 链路功率为^[19]

$$P_j^{\text{LOSC}} = \begin{cases} \frac{\text{Ar}_{1j} \cdot I_T(\zeta_{1j}, \xi_{1j}) \cdot \cos \theta_{1j}}{\text{LER} \cdot d_{1j}^2}, & 0 \leq \theta_{1j} \leq \psi \cap \theta_{2j} > \psi \\ \frac{\text{Ar}_{2j} \cdot I_T(\zeta_{2j}, \xi_{2j}) \cdot \cos \theta_{2j}}{\text{LER} \cdot d_{2j}^2}, & \theta_{1j} > \psi \cap 0 \leq \theta_{2j} \leq \psi \\ \sum_{i=1}^2 \frac{\text{Ar}_{ij} \cdot I_T(\zeta_{ij}, \xi_{ij}) \cdot \cos \theta_{ij}}{\text{LER} \cdot d_{ij}^2}, & 0 \leq \theta_{ij} \leq \psi \\ 0, & \theta_{ij} > \psi \end{cases} \quad (19)$$

其中, P_j^{LOSC} 为第 j 个 PD 从信号发射车辆 LOS 链路接收的总功率($j = \{1, 2\}$), θ_{ij} 为第 i 个前照灯和第 j 个 PD 组成的 LOS 链路 PD 表面法线的夹角; d_{ij} 为第 i 个前照灯到第 j 个 PD 之间的直线距离. 信号接收车辆任意 PD 接收来自单一干扰车辆的 LOS 链路功率为

$$P_j^{\text{LOSD}} = P_j^{\text{LOSC}} \quad (20)$$

其中, P_j^{LOSD} 为第 j 个 PD 从一个干扰车辆 LOS 链路接收的总功率(与 PD 接收来自信号发出车辆 LOS 链路功率相比, 改变的是 Ar_{ij}); 当干扰车辆增加时, 信号接收车辆任意 PD 接收的来自干扰车辆的 LOS 链路总功率为 P_j^{LOSD} 的叠加. 所以信号接收车辆第 j 个 PD 接收的总 LOS 链路功率为

$$P_j^{\text{LOSS}} = P_j^{\text{LOSC}} + (n-1)P_j^{\text{LOSD}} \quad (21)$$

其中, P_j^{LOSS} 为信号接收车辆接收 LOS 链路的总和.

2.3 外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 系统 NLOS 链路

通过镜面反射和漫反射可以产生 V2V-VLC 系统的 NLOS 链路. 在 V2V-VLC 系统性能进行研究时, NLOS 链路光线对系统性能的影响是不可忽略的^[2]. 实际交通环境中, 潜在发生镜面反射的反射面包括: 车辆表面的喷漆、车窗玻璃以及道路附近建筑表面等; 潜在发生漫反射的反射面为: 道路表面. 相比于漫反射光线的光照强度, 镜面反射光线的光照强度更高, 但是镜面反射光线的方向较为单一(符合镜面反射定律), 且与反射面相对于入射光线的角度高度相关. 车辆或路边设施存在反射面且反射面的角度合适时, 反射光线才能够入射到 PD 感光面. 因为 PD 的感光面积相对较小, 所以由镜面反射引入的反射光线进入 PD 感光面的概率较小. 因此, 外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 系统 NLOS 链路光线主要由信号发射车辆照射在路面区域反射光线、干扰车辆照射在路面区域反射光线、行人表面反射光线以及经过路面和人体表面的二次反射光线组成. 单一前照灯在路面或人体表面的反射点 A 处的发光强度为^[2]

$$dI_A^{\text{NLOS}} = \frac{r(\beta_A, \tan \gamma_A) \cdot dI_T(\zeta_A, \xi_A) \cdot dS_A}{h_{\text{Tx}}^2} \quad (22)$$

其中, I_A^{NLOS} 为反射点 A 处的发光强度; S_A 为反射点 A 对应面积; $r(\beta_A, \tan \gamma_A)$ 为计算反射特性的 r 表^[20]. 将路面反射点 A 作为发光强度为 I_A^{NLOS} 的二次点光源, 再根据公式(17)从而推导出第 j 个 PD 从反射点 A 点获得的来自单一前照灯的照度为

$$dE_{A-RX-j}^{\text{NLOS}} = \frac{dI_A^{\text{NLOS}} \cdot \cos \theta_{A-j}}{d_{A-RX-j}^2} \quad (23)$$

其中, d_{A-RX-j} 为反射点 A 到第 j 个 PD 的直线距离; θ_{A-j} 为反射点 A 和第 j 个 PD 组成的 NLOS 链路 PD 表面法线方向的夹角. 因此, 第 j 个 PD 从路面反射点 A 接收到的由单一前照灯引入的 NLOS 链路功率表示为

$$dP_{A-RX-j}^{\text{NLOS}} = \begin{cases} \frac{dI_A^{\text{NLOS}} \cdot \cos \theta_{A-j} \cdot \text{Ar}}{d_{A-RX-j}^2 \cdot \text{LER}}, & 0 \leq \theta_{A-j} \leq \psi \\ 0, & \theta_{A-j} > \psi \end{cases} \quad (24)$$

其中, Ar 为第 j 个 PD 接收来自路面反射点 A 光线时的有效感光面积. 由文献[20]可知, 与一次反射引入的 NLOS 链路功率相比, 二次反射引入的 NLOS 链路功率很小, 可以忽略不计. 因此本文不对前照灯经过路面和行人表面两次反射的光线功率进行推导. 将信号发射车辆两个前照灯在路面发生反射的区域分别记为 $S_{\text{road}}^{(1)}$ 和 $S_{\text{road}}^{(2)}$, A, A' 分别为 $S_{\text{road}}^{(1)}, S_{\text{road}}^{(2)}$ 内的反射点. 外界干扰下 2×2 MIMO-VLC 系统信号接收车辆的第 j 个 PD 从信号发射车辆两个前照灯在路面的反射范围内接收的

NLOS 链路功率计算式如下:

$$P_j^{\text{NLOS}} = \begin{cases} P_{S_{\text{road}}^{(1)}}^{\text{NLOS}}, & 0 \leq \theta_{A-j} \leq \psi \cap \theta_{A'-j} > \psi \\ P_{S_{\text{road}}^{(2)}}^{\text{NLOS}}, & \theta_{A-j} > \psi \cap 0 \leq \theta_{A'-j} \leq \psi \\ P_{S_{\text{road}}^{(1)}}^{\text{NLOS}} + P_{S_{\text{road}}^{(2)}}^{\text{NLOS}}, & 0 \leq \theta_{A-j} \leq \psi \cap 0 \leq \theta_{A'-j} \leq \psi \\ 0, & \theta_{A-j} > \psi \cap \theta_{A'-j} > \psi \end{cases} \quad (25)$$

其中, P_j^{NLOS} 为第 j 个 PD 接收的由信号发射车辆发出的经路面反射进入 PD 的总 NLOS 功率; $P_{S_{\text{road}}^{(1)}}^{\text{NLOS}}$ 为 PD 通过反射区域 $S_{\text{road}}^{(1)}$ 接收到的 NLOS 链路总功率, 其计算式为: $\iint_{S_{\text{road}}^{(1)}} dP_{A-RX-j}^{\text{NLOS}} dS$; $P_{S_{\text{road}}^{(2)}}^{\text{NLOS}}$ 为 PD 通过反射区域 $S_{\text{road}}^{(2)}$ 接收到的 NLOS 链路总功率, 其计算式为: $\iint_{S_{\text{road}}^{(2)}} dP_{A'-RX-j}^{\text{NLOS}} dS$. 由于 PD 接收的来自干扰车辆前照灯在路面的反射范围和行人表面反射范围功率的计算方式与正常两车的路面反射 NLOS 链路功率的计算方式相同, 区别在于发生反射的区域, 所以使用式 (25) 更换反射区域即可获得干扰车辆和行人表面引入的 NLOS 链路功率. 记第 j 个 PD 接收的由单一干扰车辆反射引入的 NLOS 链路功率为: P_j^{NLOSC} , 记第 j 个 PD 接收的由单一车辆在行人表面反射引入的 NLOS 链路功率为: P_j^{NLOSP} . 所以外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统第 j 个 PD 接收的 NLOS 链路总功率可以表示为

$$P_j^{\text{NLOSS}} = P_j^{\text{NLOS}} + n \cdot P_j^{\text{NLOSP}} + (n-1) P_j^{\text{NLOSC}} \quad (26)$$

其中, P_j^{NLOSS} 为第 j 个 PD 接收的 NLOS 链路总功率. 信号接收车辆第 j 个 PD 接收的由信号发射车辆引入的功率为

$$P_j^{\text{Signal}} = P_j^{\text{LOSC}} + P_j^{\text{NLOS}} + P_j^{\text{NLOSP}} \quad (27)$$

信号接收车辆第 j 个 PD 接收的总功率为

$$P_j^{\text{Total}} = P_j^{\text{LOSC}} + P_j^{\text{NLOSS}} \quad (28)$$

2.4 外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 总噪声分析

根据文献 [22, 23] 可知, 外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统的散粒噪声、码间干扰噪声方差和热噪声方差的计算式分别如下:

$$\sigma_{\text{shot-}j}^2 = 2qRP_j^{\text{Total}}B + 2qI_{\text{bg}}I_2B \quad (29)$$

其中, $\sigma_{\text{shot-}j}^2$ 为第 j 个 PD 散粒噪声的方差; q 为电子电荷量; B 为系统带宽; I_{bg} 为接收到的背景噪声电流; I_2 为背景噪声的噪声带宽因子.

$$\sigma_{\text{ISI-}j}^2 = (RP_j^{\text{DSUM}})^2 \quad (30)$$

其中, $\sigma_{\text{ISI-}j}^2$ 为第 j 个 PD 码间干扰噪声的方差; P_j^{DSUM} 为第 j 个 PD 接收的干扰功率之和, 其表达式为 $(n-1)P_j^{\text{LOSD}} + P_j^{\text{NLOSS}}$.

$$\sigma_{\text{thermal}}^2 = \frac{8\pi kT_k}{G} \eta \text{Ar} I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 kT_k \Gamma}{g_m} \eta^2 \text{Ar}^2 I_3 B^3 \quad (31)$$

其中, $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 为热噪声的方差; k 为玻尔兹曼常数; T_k 为

绝对温度; G 为开环电压增益; η 为单位面积 PD 的固定电容; Γ 为晶体管信道噪声因子; g_m 为晶体管反电导率; I_3 为热噪声的晶体管信道噪声电流.

根据式 (29)~(31) 可以得出信号接收车辆第 j 个 PD 的总噪声方差表示为

$$\sigma_{\text{total-}j}^2 = \sigma_{\text{shot-}j}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 + \sigma_{\text{SIS-}j}^2 \quad (32)$$

其中, $\sigma_{\text{total-}j}^2$ 为信号接收车辆第 j 个 PD 噪声方差的总和.

3 外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统性能分析

本节基于提出的外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统模型, 首先讨论了相同车道、相邻车道以及间隔车道两车系统 BER 性能和车间纵向距离之间的关系, 证明了间隔车道两车直接使用 VLC 是不现实的; 然后分析了干扰车辆对正常通信两车 BER 性能的影响; 最后分析了行人干扰对正常通信两车 BER 性能的影响.

由于存在不同车道两车通信的交通场景, 为了在不同交通场景下对系统的性能进行分析, 模型将两车相对位置表示方法进行了如图 7 所示的定义, 其中 d_v 为两车中心线之间的距离, 即横向距离; d_h 为两车在车道长度方向的距离, 即纵向距离.

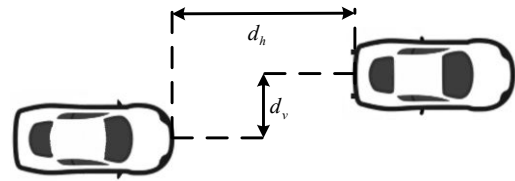


图 7 车辆相对位置表示图

外界干扰下 2x2 MIMO-VLC 系统模型的数据调制方式为开关键控, 系统带宽为 5 MHz. 其他关键建模参数配置如表 1 所示.

3.1 不同车道 VLC 纵向距离和 BER 性能的关系

基于 2x2 MIMO-VLC 系统的两车处于相同车道、相邻车道以及间隔车道时 (即两车间的纵向距离分别为 $0, W_{\text{road}}$ 和 $2W_{\text{road}}$), 两车间纵向距离和 BER 之间的关系如图 8 所示.

当 2x2 MIMO-VLC 系统的 BER 小于 10^{-4} 时, 两车间的纵向通信距离由远到近依次是: 相同车道车辆、相邻车道车辆、间隔车道车辆. 相同车道车辆纵向通信距离约为 28 m, 相邻车道车辆纵向通信距离约为 5~18 m, 间隔车道车辆的通信质量始终没有达到正常通信所需满足的最低要求. 相邻车道车辆纵向距离过近时不能满足正常通信的最低 BER 的要求, 这是因为纵向距离过近时仅有较少部分光线可以入射到信号接收车辆 PD 感光面, 且 LOS 链路的入射角过大, 从而导致 PD 接收来自信号发射车辆功率过低; 间隔车道车辆始终不能满足正常通信的最低 BER 的要求, 这是因为间隔车道

表1 外界干扰下2×2 MIMO-VLC建模参数

变量名称	符号	数值	文献来源
前照灯高度/m	h_{TX}	0.66	文献[21]
前照灯间距/m	d_{TX}	1.2	文献[21]
模拟行人圆柱体的半径/m	R_p	0.3	文献[18]
模拟行人圆柱体的高度/m	H_p	1.8	文献[18]
行人过路速度/(m/s)	V_p	1.2	文献[20]
PD感光片长度/m	L_{PD}	0.015	文献[2]
PD感光片宽度/m	W_{PD}	0.01	文献[2]
车道宽度/m	W_{road}	3.5	文献[24]
电子电荷/C	q	1.602×10^{-19}	文献[25]
开环电压增益/dB	G	10	文献[25]
散粒噪声的背景电流/A	I_{bg}	0.0051	文献[25]
PD视场半角/(°)	ψ	30	文献[25]
热噪声的FET信道噪声电流/A	I_3	0.0868	文献[26]
PD响应度/(A/W)	R	0.45	文献[19]
玻尔兹曼常数/(J/K)	k	1.381×10^{-23}	文献[25]
信道噪声因子	Γ	1.5	文献[25]
跨导/(mS)	g_m	30	文献[25]
单位面积PD的固定电容/(pF/cm ²)	η	112	文献[25]
发光效能/(lm/W)	LER	250.3	文献[25]
热噪声反馈电阻噪声电流/A	I_2	0.562	文献[25]
绝对温度/K	T_k	298	文献[25]
系统带宽/Hz	B	5M	文献[3]

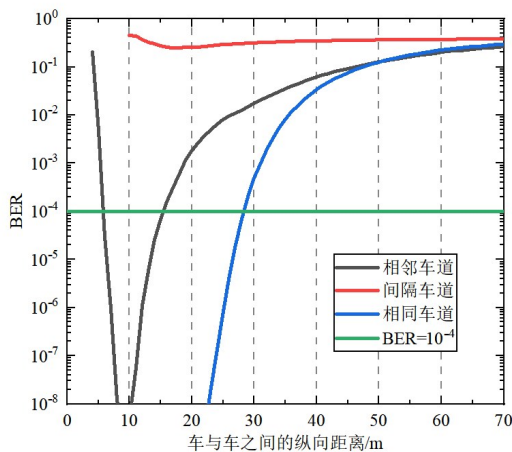


图8 不同车道车辆通信质量和车车间纵向距离之间的关系

的两辆车的横向距离过大,信号发射车辆发出的光线到达接收车辆PD的光照强度很小,且LOS链路的入射角度一直很大,PD接收来自信号发射车辆光线的功率一直很低.由于处于间隔车道的两车始终不能满足正常通信的最低BER的要求,所以采用市场加权灯束模型的2×2 MIMO-VLC系统在间隔车道的两车使用VLC是不符合实际的.由文献[27~29]可知,间隔车道车辆可以通过中继车辆、路旁的基础设施(如:路灯)、小型

无人机以及射频进行通信,因此间隔车道车辆直接使用VLC是不必要的.

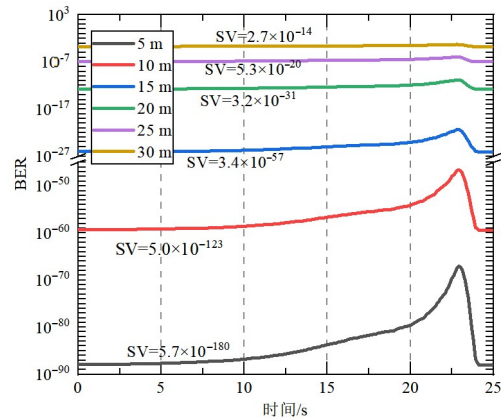
3.2 干扰车辆经过对两车间通信BER的影响

当相同车道的两车使用VLC时,如果不使用车以外的中继(路旁基础设施、无人机、射频技术等)则被传输的信息将只能在此车道的上传递.此时通信范围是一条线(一个车道),而不是一张网(多个车道),信息只在一个车道上进行传输是不符合智能交通网的最低要求的.为了扩大信息的传输范围,邻道车辆进行通信十分必要,且相邻车道车辆纵向距离过近时可以使用安装在路灯杆上的反射装置进行通信,从而解决纵向距离为0~5 m系统BER高的问题^[6].在外界干扰下2×2 MIMO-VLC系统中,汽车前照灯发出的光线可以被其所在车道、相邻车道以及间隔车道合适位置的车辆接收.因此不同车道合适位置的车辆会出现相互干扰的现象.本节研究了干扰车辆对正常通信两车BER的影响.在实验中,干扰车辆速度被设置为10 m/s,在其位置处于信号接收车辆后方纵向距离250 m处开始计时,SV的采样频率为10 Hz.

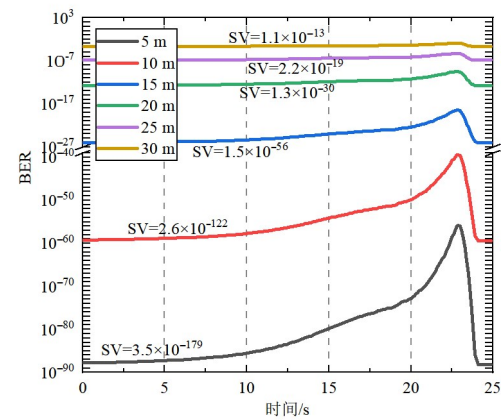
相同车道两车进行通信单一干扰车辆从间隔车道经过时,正常通信两车的BER性能和干扰车辆运行时间的关系如图9(a)所示.干扰车辆对同道两车的干扰程度随其运行时间呈现出先增加后减小至恢复正常的

趋势. 当干扰车辆运行到第 23 s 时对信号接收车辆的干扰程度最大(干扰车辆和信号接收车辆的纵向距离约为 20 m), 然后开始下降, 第 24 s 干扰降至 0(车间纵向距离 10 m), 此时 BER 恢复到没有干扰车辆的水平; 单一干扰车辆对系统 BER 的影响随正常通信两车之间纵向距离的增大而减小. 当正常通信的两车纵向距离为 5 m 时, 单一干扰车辆经过时 BER 最大提高约 21 个数量级, 当正常通信的两车纵向距离为 30 m 时, 单一干扰车辆经过时 BER 提高约 0.5 个数量级; 干扰车辆存在时正常通信两车的波动程度随两车纵向距离的增大呈现出上升的趋势, 最大波动程度和最小波动程度相差约 166 个数量级. 相同车道两车进行通信双干扰车辆在双侧间隔车道同时经过时, 正常通信两车的 BER 性能和干扰车辆运行时间的关系如图 9(b) 所示. 相比于单一干扰车辆经过, 双侧间隔车道同时经过干扰车辆对同道正常通信的两车的 BER 性能影响更大. 当正常通信的两车纵向距离为 5 m 时, 双干扰车辆经过时 BER 最大提高约 33 个数量级, 当正常通信的两车纵向距离为 30 m 时, 双干扰车辆经过时 BER 提高约 1 个数量级; 相比于单一干扰车辆在间隔车道经过的交通场景, 双干扰车辆同时经过时相同交通环境两车系统波动程度提高约 1 个数量级. 因此, 干扰车辆对同道进行正常通信两车的通信性能影响极大, 当同时有多个干扰车辆经过时, 对同道进行正常通信两车的通信性能影响更大.

相邻车道两车进行通信单一干扰车辆从间隔车道经过时, 正常通信两车的 BER 性能和干扰车辆运行时间的关系如图 10(a) 所示. 干扰车辆对邻道两车的干扰程度随其运行时间呈现出先增加后减小至恢复正常的趋势. 当干扰车辆运行到第 23 s 时对信号接收车辆的干扰程度最大(干扰车辆和信号接收车辆的纵向距离约为 20 m), 然后开始下降, 第 24 s 干扰降至 0(车间纵向距离 10 m), 此时 BER 恢复到没有干扰车辆的水平; 单一干扰车辆对系统 BER 的影响随正常通信两车之间纵向距离的增大呈现出先增大后减小的趋势. 在邻道正常通信两车的纵向距离约为 10 m 时对系统 BER 的干扰最大, 最大可使系统 BER 提高约 3 个数量级, 当正常通信的两车纵向距离为 18 m 时对系统 BER 的干扰最小, 最小使系统 BER 提高约 1 个数量级. 这是因为当两车处于相邻车道时, 系统 BER 性能随车间纵向通信距离的增大先提高后下降, 在车间纵向距离约为 8 m 时系统 BER 最低; 干扰车辆存在时正常通信两车的波动程度随两车纵向距离的增大呈现出先下降后上升的趋势, 最大波动程度和最小波动程度相差约 9 个数量级. 相邻车道两车进行通信双干扰车辆在双侧间隔车道同时经过时, 正常通信两车的 BER 性能和干扰车辆运行



(a) 单干扰车辆



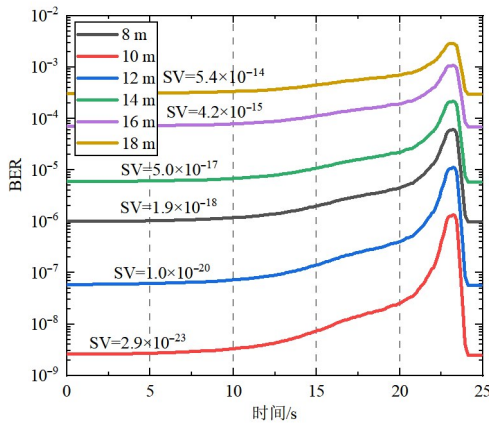
(b) 双干扰车辆

图 9 干扰车辆对同道不同车间纵向距离两车 BER 性能的影响

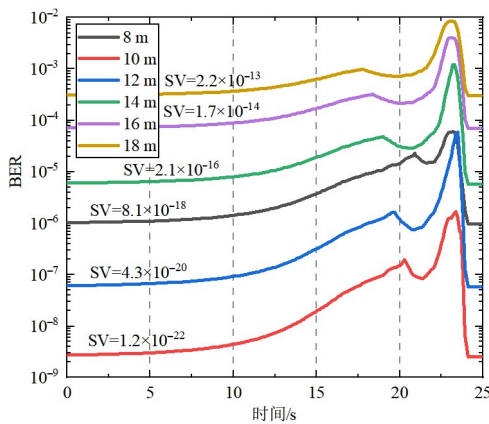
时间的关系如图 10(b) 所示. 干扰车辆对邻道两车的干扰程度随其运行时间呈现出先增加后回落再上升至顶峰最终恢复正常的趋势. 出现回落的原因是在合适道路距离干扰车辆发出的干扰光线会被信号发射车辆遮挡, 所以对信号接收车辆 BER 性能的影响有所下降; 双干扰车辆经过时系统 BER 回落出现的时刻随正常通信两车的纵向距离的增大而提前. 这是因为在干扰车辆出发位置不变的条件下, 相邻车道正常通信两车的纵向距离越大其遮挡干扰车辆发出光线的时刻越早; 相比于同道单干扰和双干扰的系统波动程度差异, 邻道单干扰和双干扰的系统波动程度差异较低. 这是因为邻道正常通信两车存在双干扰车辆时, 部分时刻信号发射车辆会遮挡干扰车辆光线从而降低了系统的波动程度.

3.3 行人穿越道路对两车间通信 BER 的影响

在实验中, 行人的速度被设置为 1.2 m/s, 在路边处开始计时, SV 的采样频率为 1 kHz. 车身处于平行交



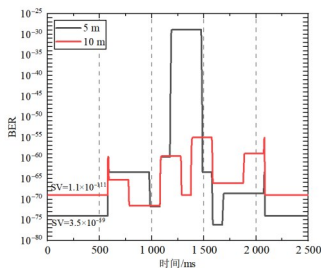
(a) 单干扰车辆



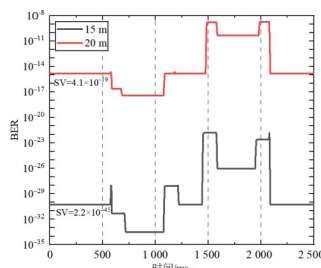
(b) 双干扰车辆

图 10 干扰车辆对邻道不同车间纵向距离两车 BER 性能的影响

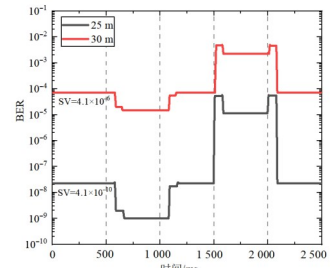
通场景同道通信两车行人在距离信号接收车辆 PD 端 2 m 处经过时,不同车间纵向距离系统 BER 随时间的变化趋势如图 11 所示. 车间不同纵向距离时行人穿越道路会使系统 BER 性能出现大范围跳动,最大可使系统 BER 提高 46 个数量级或降低 2 个数量级. 这是因为行人穿越道路的过程中会对 LOS 链路光线对应 PD 有效感光面积和 NLOS 链路反射面积产生较大影响;



(a) 同道 $d_h=5$ m 和同道 $d_h=10$ m



(b) 同道 $d_h=15$ m 和同道 $d_h=20$ m



(c) 同道 $d_h=25$ m 和同道 $d_h=30$ m

图 11 行人经过时同道两车系统 BER 与车间纵向距离之间的关系

行人穿越道路对正常通信两车 BER 存在积极影响,这是因为系统 SNR 是通过最大比合并的方法获得的,最大比合并方法具有动态特性. 由式 (4) 可知系统 SNR^{Total} 不仅取决于 SNR_j 还与 SNR_j 在 SNR_1+SNR_2 的占比有关. 因此没有行人经过时系统的 SNR^{Total} 不一定是最好的. 这是因为当行人遮挡链路的 SNR 较差时,行人经过道路在降低链路 SNR 的同时也会降低其在 SNR^{Total} 中所占的比例. 因此行人穿越道路过程中对系统的贡献存在积极影响,所以存在行人穿越道路时存在改善系统 BER 的情况;系统的波动程度随车间纵向距离的增大先减小后增大,在车间纵向距离为 10 m 时出现最小值,此时行人穿越道路的过成引起系统 BER 性能的波动最小.

车身处于平行交通场景邻道通信两车行人在距离信号接收车辆 PD 端 2 m 处经过时,不同车间纵向距离系统 BER 随时间的变化趋势如图 12 所示. 相比于行人对同道通信两车 BER 影响开始出现的时刻,行人对邻道通信两车影响开始出现时刻更靠后,两车处于同道时约第 600 ms 开始出现干扰,两车处于邻道时约 2 500 ms 后出现干扰,且两车处于邻道时行人干扰出现的时刻随两车纵向距离的增大而后延. 这是因为两车纵向通信距离越大,LOS 链路光线纵向位置沿横向距离的变化率越小,相同过道路径行人遮挡 LOS 光线出现的时刻越晚;与行人对同道两车 BER 性能产生有利影响的比例相比,行人对邻道通信两车 BER 性能产生有利影响的比例有所提高. 这是因为邻道两车由于相对位置的变化,不同 LOS 链路的 SNR 差异大于同道两车 LOS 链路的差异,因此行人穿越道路时遮挡较低通信质量的 LOS 链路比例有所提高;随邻道两车纵向距离的增加,系统 BER 的波动程度变化相对平稳.

转弯半径为 10 m 行人在距离信号接收车辆 PD 端 2 m 处穿越道路时,不同转弯角度系统 BER 随时间的变化趋势如图 13 所示. 行人对处于转弯状态两车系统 BER 的影响随转弯角度的增大而增大. 当转弯角度为 60° 时行人最大可使处于转弯状态的两车系统 BER 升

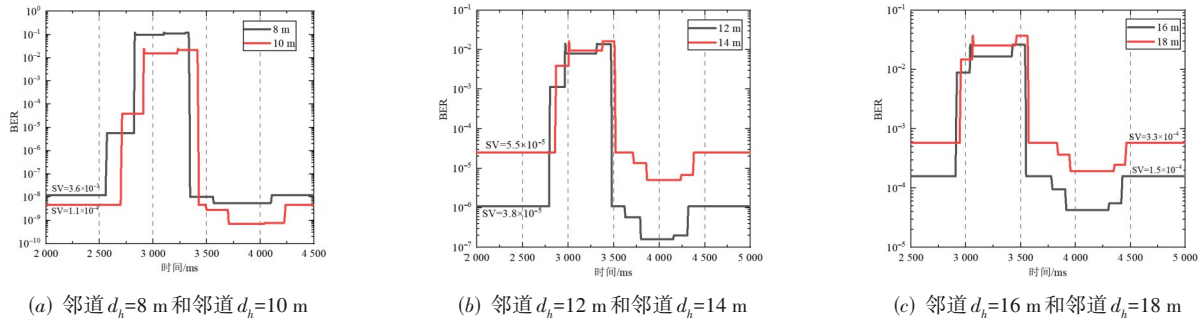


图12 行人经过时邻道两车系统BER与车间纵向距离之间的关系

高约41个数量级或降低约10个数量级;处于转弯交通场景的两车系统BER的波动程度随转弯角度的增大而减小。

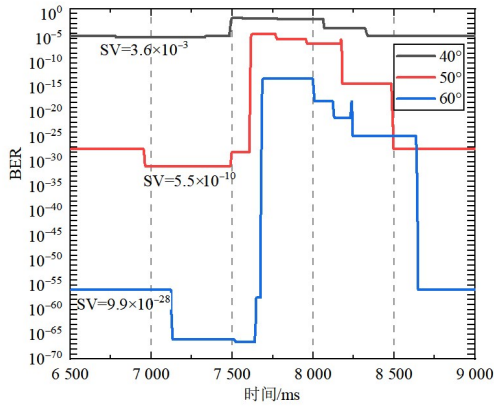


图13 行人经过时转弯两车系统BER与转弯角度之间的关系

4 结论

本研究从实际交通中存在的问题出发,基于车辆干扰和行人干扰提出了带有外界干扰的2×2 MIMO-VLC系统模型,降低了系统模型与实际交通环境的差异.通过研究不同相对位置车辆的BER性能,发现处于间隔车道的两车不能直接通信.将间隔车道经过的车辆作为干扰车辆,发现干扰车辆对正常通信两车的影响极大.最后分析了行人在正常通信的两车之间经过时系统BER性能的变化情况,发现行人会使系统BER产生较大波动,且存在正面影响.在未来的工作中,我们将建立综合考虑反射面干净程度、不同行驶方向车辆表面反射以及路边建筑反射等因素的2×2 MIMO-VLC系统模型,并研究提高V2V-VLC系统的抗干扰能力的方法。

参考文献

[1] TURAN, COLERI S. Machine learning based channel modeling for vehicular visible light communication[J].

IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7): 9659-9672.

- [2] 尹荣荣, 沈兴悦, 赵朋程, 等. 车间2×2 MIMO可见光通信模型优化研究[J]. 电子学报, 2023, 51(4): 933-943.
YIN R R, SHEN X Y, ZHAO P C, et al. Optimization of 2×2 MIMO vehicular visible light communications model [J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(4): 933-943. (in Chinese)
- [3] YAHIA S, MERAIHI Y, REFAS S, et al. Performance study and analysis of MIMO visible light communication-based V2V systems[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 575: 1-22.
- [4] ZHANG L, ZHAO H, ZHANG W, et al. Performance analysis and node selection of intelligent reflecting surface-aided visible light communication for parallel vehicles[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 1-11.
- [5] ZHAN L, ZHAO H, ZHANG W, et al. An optimal scheme for the number of mirrors in vehicular visible light communication via mirror array-based intelligent reflecting surfaces[J]. Photonics, 2022, 9(3): 129.
- [6] ELDEEB H B, NASER S, BARIAH L, et al. Energy and spectral efficiency analysis for RIS-aided V2V-visible light communication[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(9): 2376-2377.
- [7] CHEN Q, WANG C X, SUN J, et al. A non-stationary VV-LC MIMO channel model for street corner scenarios[C]// 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2020: 15-19.
- [8] SINGH G, SRIVASTAVA A, BOHARA V A, et al. 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.
- [9] ESO E, BURTON A, HASSAN N B, et al. Experimental

- investigation of the effects of fog on optical camera-based VLC for a vehicular environment[C]//2019 15th International Conference on Telecommunications. Piscataway: IEEE, 2019: 19013743.
- [10] CERVINKA D, AHMAD Z, SALIH O, et al. A study of yearly sunlight variance effect on vehicular visible light communication for emergency service vehicles[C]//2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.
- [11] ELDEEB H B, UYSAL M. Visible light communication-based outdoor broadcasting[C]//2021 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [12] ALY B, ELAMASSIE M, UYSAL M, et al. Vehicular visible light communication with low beam transmitters in the presence of vertical oscillation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(8): 9692-9703.
- [13] ZUNIGA D C, MAFRA A B, SALAZAR R M. Cooperative full-duplex V2V-VLC in rectilinear and curved roadway scenarios[J]. Sensors, 2020, 20(13): 1-13.
- [14] CARAI M, SLITI M, BOUDRIGA N. Access and resource reservation in vehicular visible light communication networks[C]//2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Piscataway: IEEE, 2016: 2161-2064.
- [15] MATHEUS L M, VIEIRA A B, VIEIRA M A M, et al. DYRP-VLC: A dynamic routing protocol for wireless ad-hoc visible light communication networks[J]. Ad Hoc Networks, 2019, 94(C): 101941.
- [16] ALSALAMI F M, HAAS O C L, AI-KINANI A, et al. Impact of dynamic traffic on vehicle-to-vehicle visible light communication systems[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(3): 3512-3521.
- [17] PLASCENCIA E, GUAN H, CHASSAGNE L, et al. A comprehensive investigation on multi-user interference effects in vehicular visible light communications[J]. Sensors, 2023, 23(5): 2553.
- [18] 蔡欧洋. 室内存在阴影遮挡的可见光通信系统性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
CAI O Y. Study on Performance of Visible Light Communication System with Indoor Shadow Occlusion[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [19] LUO P F, GHASSEMLOOY Z, LEMINH H, et al. Fundamental analysis of a car to car visible light communication system[C]//2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP). Piscataway: IEEE, 2014: 1011-1016.
- [20] AL-KINANI A, SUN J, WANG C H, et al. A 2-D non-Stationary GBSM for vehicular visible light communication channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(12): 7981-7992.
- [21] LIU W, HE X X. Performance analysis of MIMO visible light based V2V communications[C]//2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [22] VIRIYASITAVAT W, YU S H, TSAI H M. Short paper: Channel model for visible light communications using off-the-shelf scooter taillight[C]//2013 IEEE Vehicular Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2013: 170-173.
- [23] KOMINE T, NAKAGAWA M. Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lightings[C]//Proceedings of ISCC 2004: Ninth International Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE, 2004: 258-263.
- [24] 杨睿. 基于信号交叉口行人二次过街设置方法的行人延误研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
YANG R. The Study of Pedestrian Delay Based on Setting Method of Pedestrian Twice Crossing at Signalized Intersection[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [25] ELDEEB H B, MIRAMIRKHANI F, UYSAL M. A path loss model for vehicle-to-vehicle visible light communications[C]//2019 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL). Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [26] LEE I E, SIM M L, KUNG F W L. Performance enhancement of outdoor visible-light communication system using selective combining receiver[J]. IET Optoelectronics, 2009, 3(1): 30-39.
- [27] WANG L, ZHAUNG F, CUI Y, et al. Stochastic velocity prediction for connected vehicles considering V2V communication interruption[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(11): 11654-11667.
- [28] CESPEDES M M, GUZMAN B G, GIL JIMENEZ V P, et al. Aligning the light for vehicular visible light communications: High data rate and low-latency vehicular visible light communications implementing blind interference alignment[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine

zine, 2023, 18(1): 59-69.

- [29] BAZZI A, MASINI B M, ZANELLA A, et al. Visible light communications as a complementary technology for the internet of vehicles[J]. Computer Communications, 2016, 93(1): 39-51 .

作者简介



尹荣荣 女, 1985年4月出生于甘肃省白银市. 现为燕山大学信息科学与工程学院副教授, 博士生导师. 主要研究方向为可见光通信技术、物联网等.

E-mail: yrr@ysu.edu.cn



沈兴悦 男, 1998年10月出生于河北省沧州市. 现为燕山大学信息科学与工程学院硕士研究生. 研究方向为车对车可见光通信技术.

E-mail: shenxingyue1021@163.com



桑 军 男, 1999年2月出生于甘肃省张掖市. 现为燕山大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为车对车可见光通信技术.

E-mail: 466042723@qq.com



秦 豪 男, 1997年8月出生于河北省邯郸市. 现为燕山大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为车对车可见光通信技术.

E-mail: 823379674@qq.com



翟萌发 男, 2001年4月出生于河北省邢台市. 现为燕山大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为车对车可见光通信技术.

E-mail: 791349609@qq.com



贾宽宽 男, 1997年2月出生于河北省石家庄市. 现为燕山大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为车对车可见光通信技术.

E-mail: 1262844163@qq.com