

激光与光电子学进展

车载可见光通信系统工作区间的研究

张颖^{1*}, 雷亚茹¹, 黄朝军²

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

²陕西理工大学物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001

摘要 针对雾环境造成光功率衰减影响车辆间有效工作区间的问题, 考虑了汽车尺寸、白光汽车前照灯的两辐射模式, 建立了空间车载可见光通信矩形信道模型, 采用微元法求得漫反射链路传输功率, 利用积分思想推导出雾环境下白光的衰减系数并求得系统的有效工作区间。仿真结果表明: 车辆间相对速度、运动方向和车灯功率半角, 路面及相邻车道车辆位置和其表面反射材料等都会带来不同程度的信道衰减, 影响着车辆间信息的可靠传递。

关键词 光通信; 可见光通信; 矩形模型; 接收功率; 工作区间

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1706002

Working Range of Vehicle-Mounted Visible Light Communication System

Zhang Ying^{1*}, Lei Yaru¹, Huang Chaojun²

¹*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;*

²*School of Physics and Telecommunications Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China*

Abstract Aiming at the problem that the attenuation of optical power caused by the foggy environment affects the effective communication area between vehicles, considering the size of the car and the two radiation modes of the white light car headlamps, a rectangular channel model of the space vehicle-mounted visible light communication is established. The differential element method is used to obtain the transmission power of the diffuse reflection link, and the integral idea is used to derive the attenuation coefficient of white light in the fog environment and obtain the effective working range of the system. The simulation results show that the power half-angle of the lamp, relative speed, direction of motion, road surface, surface reflective material and position of adjacent lane vehicles vary with degrees of channel attenuation, which affects the reliable transmission of information between vehicles.

Key words optical communications; visible light communication; rectangular model; received power; operating range

OCIS codes 060.4510; 120.5700; 120.4820

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2020-12-19; 录用日期: 2021-01-06

基金项目: 陕西省重点产业创新链工程(2017ZDCXL-GY-06-01)

通信作者: *zhangying@xaut.edu.cn

1 引言

随着社会对交通运输需求的日益增加,如何提高道路利用率、道路交通安全度及舒适度成为交通运输管理领域的研究热点。智能交通是在现有的基础设施上,融入先进的数据通信技术、传感技术、控制技术及计算机处理技术等,形成便捷、安全、高效、环保、舒适的交通运输和管理系统。

基于可见光通信(VLC)的智能交通系统能够利用道路交通系统中广泛存在的各类交通信号灯、汽车照明灯及信号灯等,实现车车、车路信息的交互和共享,并结合动态交通信息的采集与融合开展车辆的主动控制和道路的协同管理等^[1-2]。大气中的气溶胶粒子、背景光噪声,以及真实可靠的信道模型都会对室外车载可见光通信的可靠工作区间产生影响。大气中含有的大量小水滴和尘埃颗粒会使LED光束发生散射或吸收效应,造成光功率损耗^[3-5]。秦岭等^[6]研究了典型天气下LED交通灯与车辆间可见光通信系统接收端的信噪比(SNR, R_{SN})性能,发现在同一调制方式下,与晴天相比,系统在雾天时信噪比最低,在干雪天、雨天和湿雪天时信噪比下降得最少。Kim等^[7]采用汽车尾灯作为发射端,发现利用菲涅耳透镜和多个光电二极管可有效地降低雾造成的光功率衰减。背景光是信息传输过程中主要的干扰源,可以利用硬件滤波^[8]、隐形结构光三维成像^[9]、遮光罩等方法,减小背景光对系统性能的影响。李鑫等^[10]建立了室外可见光信道模型,采用微元法计算了反射面的接收功率,分析了传输距离、发射机发射角和反射面位置对系统传输性能的影响。Luo等^[11]采用卤化钨前照灯光束模型,研究了车灯表面污垢沉积对光分布的影响。

Kinani等^[12]结合双环和共焦椭圆的组合模式模型,研究了漫反射链路接收功率,发现二次漫反射链路传输功率对总接收功率的影响可以忽略。Alsalam等^[13]采用椭圆模型研究了车辆运动性对信道脉冲响应的影响。结合以上研究发现,前人对于车载可见光通信的研究取得了一定成果,但是在研究车载可见光通信时,没有准确说明利用的是近光灯还是远光灯发射信号,在建立模型研究光信号在相邻车道车辆表面的反射时,没有考虑汽车尺寸。此外,在大气环境下利用多波长白光通信时的光功率损耗问题还需进一步研究。

本文通过考虑汽车尺寸建立了空间车载可见光通信矩形信道模型,研究了直射链路和漫反射链路接收光功率随收、发端相对速度的变化情况。考虑雾对光功率的衰减最大,推导了白光在雾环境下的衰减系数公式,计算了接收端接收的总功率,最后确定了近光灯和远光灯在雾天环境下的有效工作区间。

2 系统模型

2.1 车载可见光通信系统信道模型

假设行驶的车辆上都配备有可见光信息收、发设备,即汽车前照灯作为发射机,车尾安装光电二极管作为接收端,由此构成车载可见光通信系统。若机动车的长宽高分别为5 m、1.7 m和1.6 m,同向双车道路宽为7 m,A车、B车、C车分别位于A、B、C点处,如图1所示:B车位于A车前方同一车道内,A车前照灯为信号发射端,B车作为可见光信号的接收端;假设相邻车道的P车为朗伯反射体,P车从A、B车相邻车道经过,A车的汽车前照灯光束在P车表面和路面发生反射,光束在P车行驶路径上的反射功率,可以通过空间矩形模型计算。

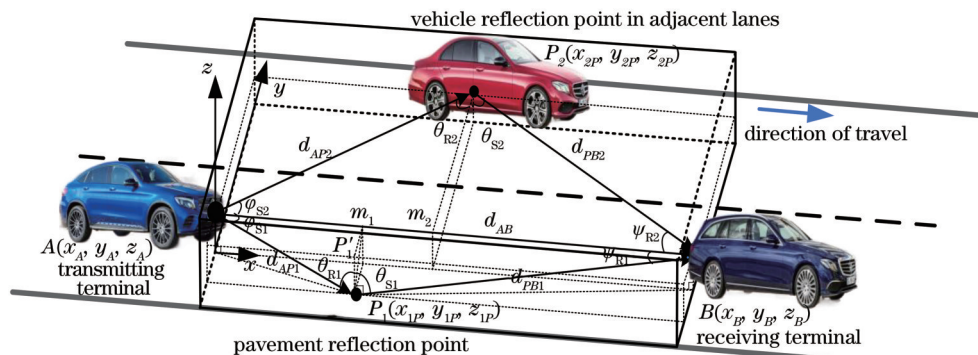


图1 车载可见光通信系统空间矩形信道模型

Fig. 1 Spatial rectangular channel model of vehicle-mounted visible light communication system

以 A 车前照灯在地面的投影位置为系统坐标原点, 车辆行驶方向为 x 轴, 与地面水平但与车辆行驶方向垂直的方向为 y 轴, 与地面垂直方向为 z 轴。A、B 和 P 三辆车在该坐标系的相对位置关系为

$$d_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}, \quad (1)$$

$$d_{AP} = \sqrt{x_P^2 + (y_P - y_A)^2 + (z_P - z_A)^2}, \quad (2)$$

$$d_{PB} = \sqrt{(x_B - x_P)^2 + (y_B - y_P)^2 + (z_B - z_P)^2}, \quad (3)$$

式中, d_{AB} 为发射端到接收端的距离, d_{AP} 为发射端到一次反射端的距离, d_{PB} 为一次反射端到接收端的距离。

根据朗伯模型, 可见光直射链路信道增益^[14]可表示为

$$H_{\text{los}}(0) = \begin{cases} \frac{A_r(m+1)}{2\pi d_{AB}^2} \cos^m \varphi T_s(\psi_c) g(\psi_c) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (4)$$

式中, A_r 表示光电探测器有效面积, φ 表示车载发射机发射角, ψ 表示车载接收机接收角, ψ_c 表示接收机视场角, $T_s(\psi_c)$ 表示光滤波器增益, $g(\psi_c)$ 表示光聚能增益, m 表示光源辐射模式的指向性指数, 与功率半角 $\Phi_{1/2}$ 有关。其中 $g(\psi_c)$ 和 m 的表达式分别为

$$g(\psi_c) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}. \quad (5)$$

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \Phi_{1/2})}, \quad (6)$$

针对漫反射路径的接收功率, 本研究采用微元法的思想, 将反射面分解为 N 个较小的微元, 光信号在反射面上产生反射后, 每个微元都可看作为一个独立的小光源^[15]。计算过程是先对单个微元反射面的反射功率进行计算, 然后对各个微元的计算结果求和, 故可见光漫反射链路总信道增益^[16]可表示为

$$H_{\text{ref}}(0) = \begin{cases} \sum_{j=1}^N \frac{A_r \rho (m+1)}{(2\pi)^2 (d_{AP}^{(j)})^2 (d_{PB}^{(j)})^2} A^{(j)} \cos^m \varphi_s^{(j)} \cos \theta_R^{(j)} \cos \theta_S^{(j)} \cos \psi_R^{(j)} T_s(\psi_c) g(\psi_c), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (7)$$

式中, ρ 表示反射系数, $A^{(j)}$ 为第 j 个微元的面积, φ_s 为发射端发射角, θ_R 为一次反射端接收角, θ_S 为一次反射端发射角, ψ_R 为接收端接收角。其中 φ_s 、 θ_R 、 θ_S 、 ψ_R 的表达式为

$$\varphi_s = \arccos \frac{x_P^2 + z_A^2 - z_A \min(|z_A|, |z_B|)}{x_P \sqrt{x_P^2 + y_P^2 + z_A^2} [z_A - \min(|z_A|, |z_B|)]^2}, \quad (8)$$

$$\theta_R = \arccos \frac{z_A \min(|z_A|, |z_B|)}{\min(|z_A|, |z_B|) \sqrt{(x_P^2 + y_P^2 + z_A^2)}}, \quad (9)$$

$$\theta_S = \arccos \frac{z_B \min(|z_A|, |z_B|)}{\min(|z_A|, |z_B|) \sqrt{(d_{AB} - x_P)^2 + y_P^2 + z_B^2}}, \quad (10)$$

$$\psi_R = \arccos \frac{(d_{AB} - x_P)^2 + z_B^2 - z_B \min(|z_A|, |z_B|)}{\sqrt{(d_{AB} - x_P)^2 + y_P^2 + z_B^2} \sqrt{(d_{AB} - x_P)^2 + [z_B - \min(|z_A|, |z_B|)]^2}}. \quad (11)$$

在现实情况下, 收发端可能会不在一条直线上, 如图 2 所示, 接收机在相对时变速度中运动时, 收发端不在一条直线上的运动角度 φ 可表示为

$$\varphi = \arctan \frac{d_y}{d_x}, \quad (12)$$

式中, d_y 是发射机与接收机之间的横向距离, d_x 为

发射机与接收机之间的纵向距离, d 与以下速度直接相关, 即

$$d = tv_x(t)(2 \cos \varphi)^{-1}, \quad (13)$$

式中: t 为时间, v_x 为沿 x 方向的速度。

2.2 雾天光功率的衰减模型

雾是由空气中的小水滴凝结而成。小水滴会

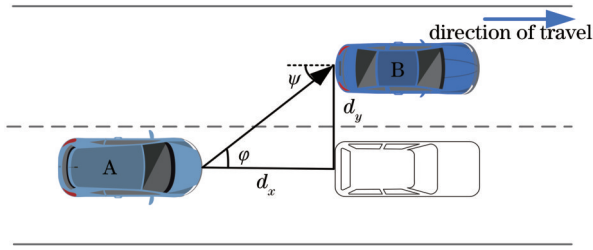


图 2 收发端相对运动的状态

Fig. 2 State of relative movement of the transceiver

使可见光光束产生吸收与散射效应,造成可见光接收功率衰减。根据水平能见度的不同,把雾分为 5 个等级,对应关系如表 1 所示。

表 1 雾的等级与水平能见度之间的关系

Table 1 Relationship between fog level and horizontal visibility

Grade	Horizontal visibility / m
0(Dense fog)	[0,50)
1(Fog)	[50,200)
2(Medium fog)	[200,500)
3(Light fog)	[500,1000)
4(Mist)	[1000,2000)

在 Kim 模型中,雾天大气衰减系数可表示为^[6]

$$\alpha(\lambda)_{\text{fog}} = \frac{17.35}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q'} \quad (14)$$

式中: V 为雾天气下的能见度(km); λ 为波长(μm); q' 为雾天光信号损耗对波长的依赖性,与能见度有关,其关系式为

$$q' = \begin{cases} 0, & V < 0.5 \text{ km} \\ V - 0.5, & 0.5 \text{ km} \leq V < 1 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34, & 1 \text{ km} \leq V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (15)$$

(14)式适合用于计算单波长的可见光通信系统的雾天大气衰减系数,但不适用于由多波长组成的白光。根据(14)式,通过积分运算可得 380~780 nm 可见光波段的大气衰减系数为

$$\beta_{\text{fog}} = \frac{17.35}{V} \left(\frac{1}{0.55} \right)^{-q'} \left(\frac{0.78^{1-q'} - 0.38^{1-q'}}{1 - q'} \right) \quad (16)$$

由朗伯-比尔定律可知,光通过均匀介质前后的光功率关系为^[17]

$$T = \frac{P_T}{P_R} = \exp(-\beta L), \quad (17)$$

式中: T 为透过率,可以用来描述光透过性; P_T 为探测器接收功率; P_R 为发射端发射功率; β 为衰减系数; L 为传输距离。

2.3 系统噪声

噪声是室外可见光通信中的主要干扰因素,包含散粒噪声和热噪声。散粒噪声主要是由探测器接收背景光(太阳光中的可见光和街灯、静态霓虹灯、广告屏幕等人造光源)引起的,热噪声是由接收机内部自由电子布朗运动引起的,两者的表达式为^[18]

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2qR\rho_r B' + 2qI_{\text{bg}} I_2 B', \quad (18)$$

$$\sigma_{\text{thermal}}^2 = \frac{8\pi k T_K}{G} \eta A_r I_2 B'^2 + \frac{16\pi^2 k T_K \Gamma}{g_m} \eta^2 A_r^2 I_3 B'^3, \quad (19)$$

式中: q 、 B' 、 I_{bg} 、 I_2 、 R 、 ρ_r 分别表示电子电荷常量、系统带宽、背景光电流、背景噪声的带宽系数、光电转换效率、接收端接收的有用功率; G 、 η 、 T_K 、 k 、 g_m 、 I_3 、 Γ 分别表示系统电压增益、单位面积电容、热力学温度、玻尔兹曼常数、场效应管的跨导、暗电流、场效应管噪声因子。

因此,系统总噪声可表示为

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 \quad (20)$$

系统选用开关键控(OOK)调制,信噪比的表达式为^[19]

$$R_{\text{SN}} = \frac{(RP_1 H_0)^2}{\sigma_{\text{total}}^2}, \quad (21)$$

式中: H_0 为表示系统直射路径和漫反射路径信道增益值和; P_1 为发射端发射功率。

3 仿真分析

汽车前照灯分为近光灯和远光灯。其中,近光灯主要用于近距离路面和路两侧的照明,远光灯主要用于远距离前方道路照明,以扩大驾驶人员的观察视野。汽车前照灯能够在不同的交通场景中切换,实现汽车前方道路照明。本节使用数值仿真的方法,研究和分析雾天车载可见光通信系统不同前照灯对系统有效通信距离的影响。主要方法包括: 1) 通过建立 A、B、P 三车之间的矩形信道模型,研究收发端相对运动方向和相对速度对直射链路接收功率的影响; 2) 采用微元法计算道路表面和相邻车道车辆表面漫反射链路的接收功率; 3) 分析汽车前照灯在不同浓度等级雾环境中的有效通信距离。系统参数如表 2 所示。

3.1 直射链路的接收功率

图 3 展示了近光灯和远光灯直射链路的接收功率随收发端相对速度和运动方向的变化情况。从图中可以看出: 当不考虑运动方向时,汽车前照

表 2 系统参数
Table 2 System parameters

Parameter	Value
Half power angle of high beam $\Phi_{1/2, \text{high}} / (^{\circ})$	15
Half power angle of low beam $\Phi_{1/2, \text{low}} / (^{\circ})$	80
Receiver viewing angle $\psi_c / (^{\circ})$	45
Optical filter gain $T_s(\psi_c)$	1.7
Effective area of photodetector A_r / cm^2	1
Transmitting power P_t / W	1
Light gathering gain $g(\psi_c)$	0.8
Road width y / m	7
Height of lamp from ground h / m	0.9

灯直射链路的接收功率随收发端相对距离的增加呈递减趋势,近光灯直射路径接收功率的衰减程度

大于远光灯;由图 3(a)可知,系统采用近光灯发送信号,收发端相对距离为 0~30 m 时,运动方向对直射路径的接收功率影响较大;由图 3(b)可知,系统采用远光灯发送信号,收发端相对距离为 0~60 m 时,运动方向对直射路径的接收功率影响较大。

3.2 漫反射链路接收功率

3.2.1 路面漫反射链路接收功率

当 A、B 两车沿右侧行道线行驶时,汽车近光灯和远光灯照射路面的光功率分布分别如图 4 所示,可以看出,接收功率从光源位置沿道路宽度方向和水平传输方向均呈现递减趋势。在相同发射功率和传输链路条件下,功率半角越小,接收功率越大。因此,远光灯光束照射到路面各点的接收功率大于近光灯光束照射到路面各点的接收功率。

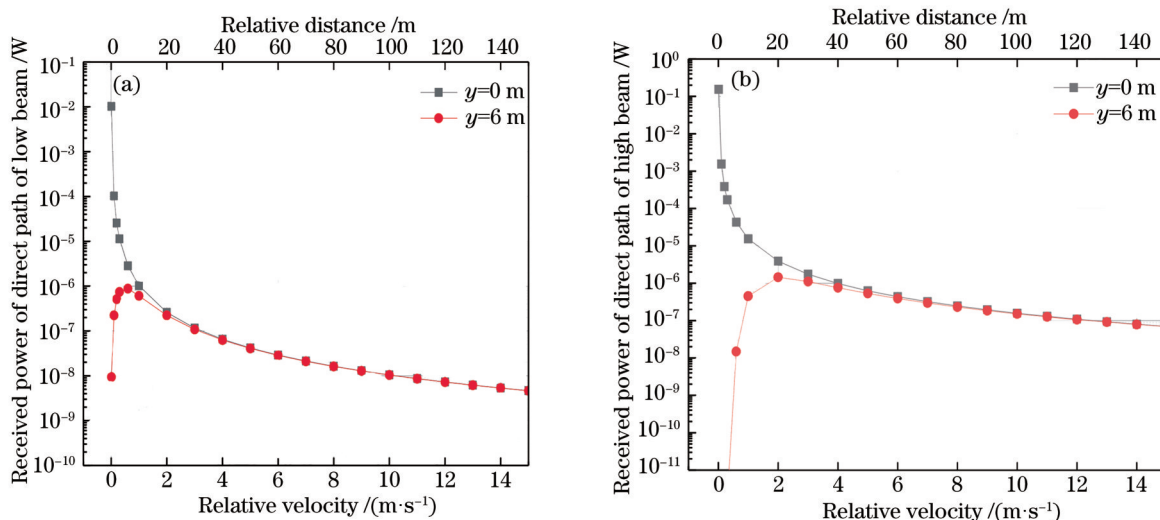


图 3 运动方向对前照灯直射路径接收功率的影响。(a)近光灯直射路径接收功率;(b)远光灯直射路径接收功率

Fig. 3 Influence of movement direction on received power of direct path of headlamp. (a) Received power of direct path of low beam; (b) received power of direct path of high beam

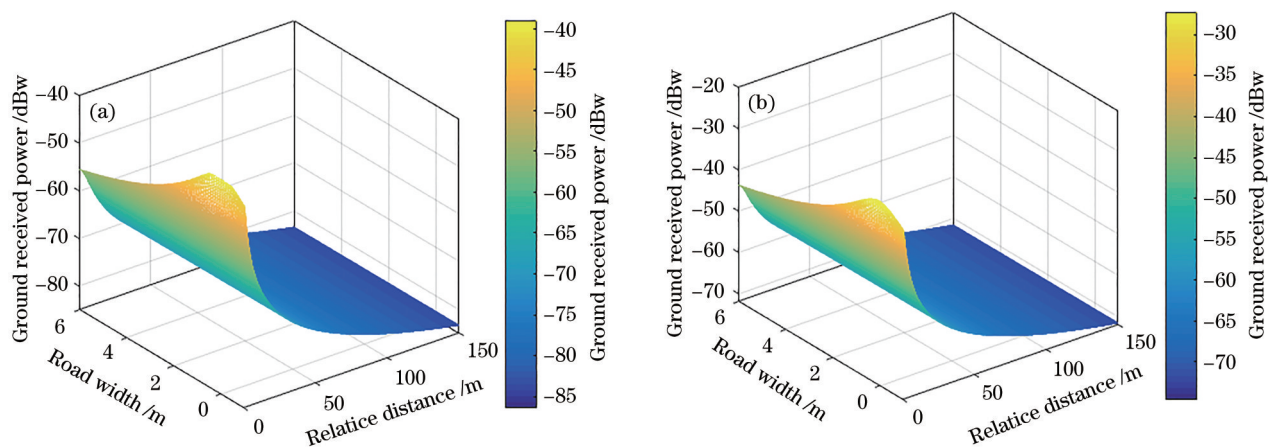


图 4 汽车前照灯在路面的功率分布。(a)近光灯;(b)远光灯

Fig. 4 Power distribution of automobile headlamp on road surface. (a) Low beam; (b) high beam

汽车前照灯用于照明汽车前方和两侧路面,便于驾驶者及时发现障碍,以避免车祸发生。图 5 表示了不同汽车前照灯在路面发生漫反射时接收功率的衰减情况,雨雪天的道路表面通常存在积水和积雪现象,不同路面对车载可见光通信系统路面漫反射链路接收功率的影响不同。从图 5 中可以看出,路面的漫反射链路接收功率呈先增加后减小的趋势,受发射端最大发射角影响,当收发端相对距离小于 3.5 m 时,近光灯的地面漫反射链路接收功率大于远光灯。还可以看出,与干燥沥青路面(取反射系数 $\rho=0.14^{[20]}$)相比,积水路面(取反射系数 $\rho=0.25^{[20]}$)接收功率增加了 2 dB,积雪路面(取反射系数 $\rho=0.90^{[20]}$)则相比增加了 8 dB,这说明积水路面和积雪路面都可以增加漫反射链路的接收功率。

3.2.2 路侧车辆漫反射链路接收功率

汽车表面材料通常具有较高的反射率,可达 85%~90%^[21]。因此,相邻车道的车辆表面也将影响可见光漫反射链路的传输功率。图 6 给出相邻车道车辆位置(相邻车道 P 车与 A、B 车链路的垂直距离分别为 1.5, 2.5, 3.5 m)对漫反射链路接收功率的影响。由图 6(a)可知, A、B 车使用近光灯通信

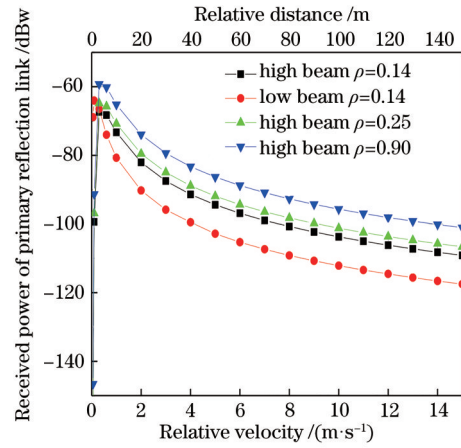


图 5 不同路面反射链路接收功率

Fig. 5 Received power of primary reflection link on different road surfaces

时,相邻车道车辆表面漫反射链路接收功率随收发端相对距离呈先增加后减小的趋势;当收发端相对距离不超过 60 m 时,相邻车道车辆位置对漫反射链路接收功率的影响较大;与此同时,由图 6(b)可知, A、B 车使用远光灯通信时,在收发端相对距离为 90 m 的范围内相邻车道车辆位置对接收功率的影响较大。

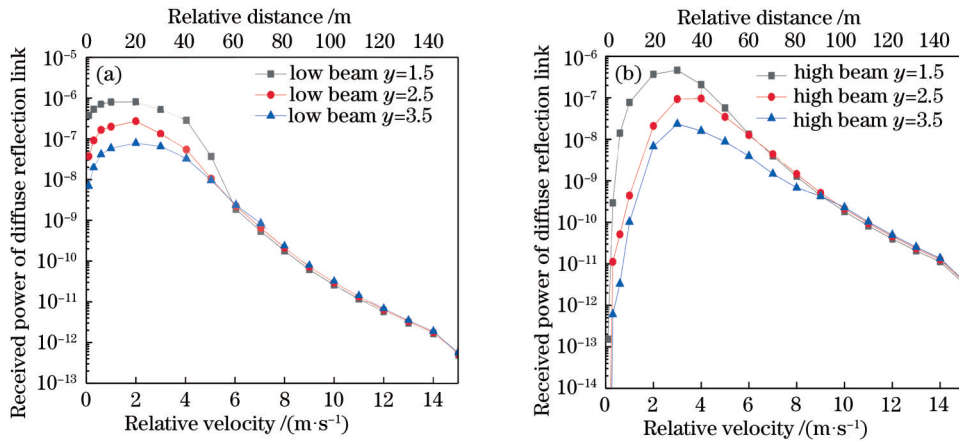


图 6 路侧车辆位置对漫反射链路接收功率的影响。(a)近光灯;(b)远光灯

Fig. 6 Influence of roadside vehicle position on received power of diffuse reflection link. (a) Low beam; (b) high beam

3.3 系统的工作区

工作区又称服务区,是无线光通信系统能够正常工作情况下的最大通信范围。本节针对室外汽车前照灯发射信号透过近地面大气信道被车载接收机可靠接收的相对距离进行研究。本系统采用 OOK 调制方式对可见光通信系统中的光载波进行调制,工作区定义为接收端信噪比指标不低于 13.6 dB^[22]的范围。

假设 A 车与 B 车收发端在同一条直线上, P 车位于相邻车道且垂直 A、B 车链路 $y=2.5$ m 位置处,仿真了无雾和不同等级雾环境下系统的信噪比,得出不同环境下系统的工作区间,如图 7 所示。图 7(a)表示车载可见光通信系统使用近光灯为发射机时,系统在雾天的有效通信距离,可以看出在浓雾、大雾、中雾、轻雾、薄雾大气环境中,近光前照灯车载可见光通信系统的有效通信距离分别为 18,

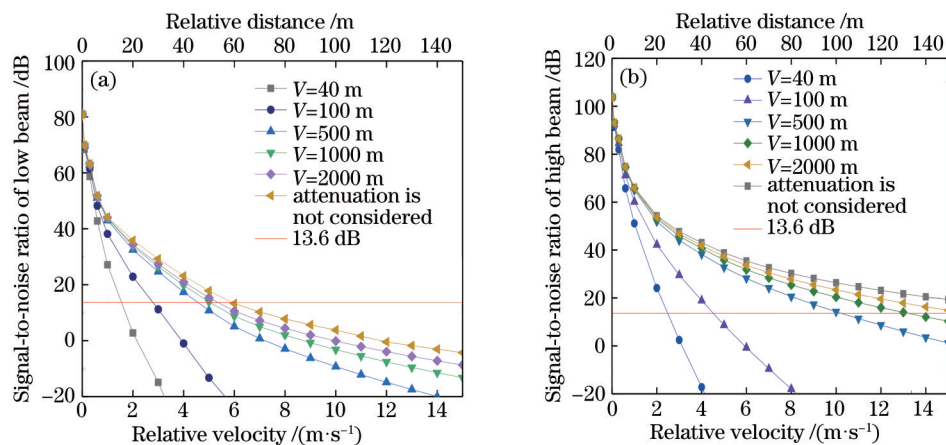


图7 雾天车载可见光通信系统信噪比与收发端之间相对速度的关系。(a)雾天近光灯信噪比;(b)雾天远光灯信噪比

Fig. 7 Relationship between signal-to-noise ratio of vehicle-mounted visible light communication system and relative speed between signal transmitter and signal receiver in foggy weather. (a) Signal-to-noise ratio of low beam in foggy days; (b) signal-to-noise ratio of high beam in foggy days

29, 45, 50, 55 m。图7(b)表示车载可见光通信系统使用远光灯为发射机时系统在雾天的有效通信距离,可以看出在浓雾、大雾、中雾、轻雾、薄雾大气环境中,远光前照灯车载可见光通信系统的有效通信距离分别为25, 45, 100, 130, 150 m。

4 结 论

建立了车载可见光通信链路的空间矩形模型,研究了两种汽车前照灯光束在雾环境下的传输损耗及有效工作区间。研究发现,近光灯系统直射路径传输功率损耗大于远光灯系统,运动方向对收发端相对距离为30 m范围内的近光灯系统影响大,对60 m范围内的远光灯系统影响大;在对漫反射链路接收功率研究发现,积水、积雪路面漫反射链路的接收功率较干燥路面分别增加了2 dB和8 dB,提高了漫反射链路接收功率;相邻车道车辆的位置在收发端距离小于60 m时,对近光灯系统影响大,在收发端距离小于100 m时,对远光灯系统影响大。通过对比雾环境下近光灯系统和远光灯系统的信噪比发现,在水平能见度为500 m时,远光灯系统的有效工作区间为100 m,近光灯系统的有效工作区间为45 m,在浓雾天气下,通信距离有限。因此为保证安全驾驶,应注意车辆在雾天行驶的有效通信距离。

参 考 文 献

- [1] Chen S Y, Wang Z X, Xiao J N, et al. Research on the road-to-vehicle system utilizing LED-based visible light communication[J]. China Light & Lighting, 2015
- [2] Peng X, Deng Q Y, Tian S J, et al. Data dissemination scheduling algorithm for V2R/V2V in multi-channel VANET[J]. Journal on Communications, 2019, 40(3): 92-101.
- [3] Long K J, Li F, Gao Z B, et al. Study of foggy highway traffic monitoring and warning system[J]. Transportation Science & Technology, 2016(3): 183-186.
- [4] Sun Q Y, Xu J, Gao Y, et al. Transmission characteristics of visible light in different types of aerosols[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110103.
- [5] Chen P, Zhao J G, Song Y S, et al. Influence of microscopic characteristics of aerosol particles on backscattering echo[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0405001.
- [6] Qin L, Ju Y F, Du Y X, et al. Study on performance

- of new visible light communication system in intelligent transport[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(7): 114-118.
- 秦岭, 巨永锋, 杜永兴, 等. 智能交通中新型可见光通信系统性能研究[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(7): 114-118.
- [7] Kim Y H, Cahyadi W A, Chung Y H, et al. Experimental demonstration of VLC-based vehicle-to-vehicle communications under fog conditions[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1-9.
- [8] Wu M L, Ma F K, Liu W K, et al. Noise suppression method in medium and long distance outdoor visible light communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130601.
- 武梦龙, 马富康, 刘文楷, 等. 中远距离室外可见光通信中噪声抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130601.
- [9] Mao A, Sun J F, Lu Z Y, et al. Dynamic background light interference suppression technology based on invisible structured light three-dimensional imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0711004.
- 毛奥, 孙建锋, 卢智勇, 等. 隐形结构光三维成像动态背景光干扰抑制技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0711004.
- [10] Li X, Guo X Y, Xu B Q, et al. Channel modeling for outdoor visible light communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(4): 41-43.
- 李鑫, 郭心悦, 徐伯庆, 等. 室外可见光通信信道建模[J]. *光通信技术*, 2016, 40(4): 41-43.
- [11] Luo P F, Ghassemlooy Z, le Minh H, et al. Performance analysis of a car-to-car visible light communication system[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(7): 1696-1706.
- [12] Kinani A A, Sun J, Wang C X, 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.
- [13] Alsalami F M, Ahmad Z, Haas O, et al. Regular-shaped geometry-based stochastic model for vehicle-to-vehicle visible light communication channel[C]//2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT), April 9-11, 2019, Amman, Jordan. New York: IEEE Press, 2019: 297-301.
- [14] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [15] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S, et al. *Optical wireless communications*[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019.
- [16] Hong Y, Chen J, Wang Z X, et al. Multi-user MIMO indoor visible light communication system based on BD precoding algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(11): 1277-1282.
- 洪阳, 陈健, 王子雄, 等. 基于BD预编码的多用户MIMO室内可见光通信系统[J]. *光子学报*, 2013, 42(11): 1277-1282.
- [17] Wang L L, Duan J, Fu J, et al. Analysis on the impact of rainfall on laser transmission distance[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(1): 99-103.
- 王林林, 段锦, 付军, 等. 降雨量对激光传输距离的影响分析[J]. *应用激光*, 2015, 35(1): 99-103.
- [18] Mesleh R, Elgala H, Haas H, et al. Optical spatial modulation[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(3): 234-244.
- [19] Akanegawa M, Tanaka Y, Nakagawa M, et al. Basic study on traffic information system using LED traffic lights[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2001, 2(4): 197-203.
- [20] Qin L, Hao Y N, Du Y X, et al. Channel modeling and analysis for optical communication system of LED traffic lights[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2017, 12(3): 221-229.
- 秦岭, 郝雅楠, 杜永兴, 等. LED交通灯的光通信系统信道建模与分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2017, 12(3): 221-229.
- [21] Mu Y, Qu H D, Yuan X, et al. Present status of automobile finish coating materials and problems existed[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2010, 40(10): 73-75.
- 穆颖, 曲辉德, 袁兴, 等. 汽车面漆涂层材料的研究现状与存在问题[J]. *涂料工业*, 2010, 40(10): 73-75.
- [22] Vučić J, Fernández L, Kottke C, et al. Implementation of a real-time DMT-based 100 Mbit/s visible-light link[C]//36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 19-23, 2010, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2010: 19-23.