



DOI: 10.12086/oe.2020.190661

## 雾对基于可见光的车辆定位性能的研究

张颖<sup>1,2</sup>, 杨晶<sup>1\*</sup>, 杨玉峰<sup>1</sup><sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;<sup>2</sup>陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048

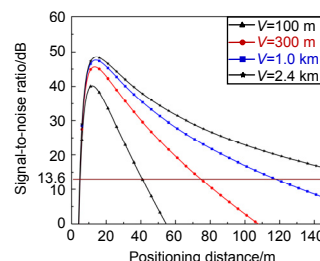
**摘要:** 分析雾环境下利用 LED 交通灯进行车辆定位的性能, 讨论了接收角度、道路宽度、雾环境下接收端信噪比等对车辆定位范围的影响。仿真结果表明: 信号最佳接收角度为  $25^\circ$ ; 车辆距离 LED 交通灯 20 m 之内时, 道路宽度对信号的接收功率影响较大; 在靠近交通灯处, 车辆位于第二车道上的定位距离比车辆位于第一车道的定位距离少 2.2 m; 晚间接收端的信噪比优于白天, 晚间的定位范围大于白天; 与晴朗天气相比, 雾天信噪比下降较大, 将极大影响车辆的定位范围, 因此为保证安全驾驶, 车辆在雾天行驶过程中需要更多的制动时间。

**关键词:** LED 交通灯; 能见度; 信噪比; 定位范围

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

引用格式: 张颖, 杨晶, 杨玉峰. 雾对基于可见光的车辆定位性能的研究[J]. 光电工程, 2020, 47(4): 190661



## The research on fog's positioning performance of vehicles based on visible light

Zhang Ying<sup>1,2</sup>, Yang Jing<sup>1\*</sup>, Yang Yufeng<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;<sup>2</sup>Shaanxi Civil-Military Collaboration Key Laboratory of Intelligence Coordination Networks, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract:** In order to analyze the performance of vehicle positioning using LED traffic lights in foggy environment, the influences of receiving angle, road width, and signal-to-noise ratio (SNR) at the receiver in foggy environment on vehicle positioning range are discussed. The simulation results show that the optimal signal reception angle is  $25^\circ$ ; when the vehicle is within 20 m of the LED traffic light, the road width has a greater impact on the received power of the signal; near the traffic light, the positioning distance of the vehicle on the second lane is 2.2 m shorter than that of the vehicle in the first lane; the SNR of the receiver at night is better than during the day, and the positioning range at night is greater than during the day; compared with sunny weather, the SNR in the fog days decrease significantly, which will greatly affect the positioning range of the vehicle, so to ensure safe driving, vehicles need more braking time when driving in foggy days.

**Keywords:** LED traffic light; visibility; signal to noise ratio; positioning range**Citation:** Zhang Y, Yang J, Yang Y F. The research on fog's positioning performance of vehicles based on visible light[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 190661

收稿日期: 2019-11-02; 收到修改稿日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(61405157); 陕西省教育厅自然科学基金资助项目(17JK0569); 陕西省重点计划产业创新链项目(2020ZDLGY05-02)

作者简介: 张颖(1982-), 女, 博士, 讲师, 主要从事可见光通信及 Ad Hoc 网络拓扑的研究。E-mail: zhangying@xaut.edu.cn

通信作者: 杨晶(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事典型天气下可见光通信与定位技术的研究。E-mail: 1285935272@qq.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

# 1 引言

构建安全、便利、环保的智能城市交通体系，是未来城市道路交通发展的首要目标。智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)集成了电子传感、数据传输、计算机等多种技术的交通管理系统，能够实时地、准确地为交通参与者提供可靠的信息平台<sup>[1-2]</sup>。借助交通灯和车载照明灯，基于可见光通信(visible light communication, VLC)的智能交通系统，不但可以实现交通基础设施与车辆之间、车辆与车辆之间的通信，还可以实时准确获取交通路况信息，准确定位车辆位置，对于开展智能公路建设、推动路网管理、车辆协同具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

大气信道对基于可见光的智能化城市交通系统影响较大。空气中含有大量小水滴或尘埃颗粒对 LED 光束发生散射或吸收效应，使光功率发生损耗<sup>[5]</sup>。刘景龙等<sup>[6]</sup>通过研究近地面室外信道对可见光功率的衰减的影响，得出了雾、雨、雪气象条件下可见光通信系统的误码率性能，给出了该系统的可靠工作区间。Elamassie 等<sup>[7]</sup>建立了雨、雾天车辆间可见光信号传输的路径损耗函数。秦岭等<sup>[8]</sup>研究了特殊天气下车路通信系统接收端信噪比性能，结果表明雾环境对光的传输影响最为严重。这些研究为利用 LED 交通灯进行车辆定位奠定了基础，特别是研究特殊天气条件下的可见光散射特性，分析由道路基础设施(如 LED 交通灯)所辐射的可见光进行车辆定位的性能至关重要。Kumar 等<sup>[9]</sup>分析了交通灯高度和灯发射角度对车辆定位的影响，给出了发射器距离接收器的最佳距离和最佳角度。曹岩等<sup>[10]</sup>提出了一种利用到达时间差确定车辆间位置的技术，并验证了该方法可以用于 LED 交通灯与车辆定位中。结合以上分析得出，在室外利用可见光定位时，选用到达时间差的方法，但典型天气下室外 LED 交通灯与车辆之间影响因素还有待于进一步研究。

本文研究雾对 LED 交通灯信号的衰减，分析雾天情况下接收机的接收角度、道路宽度、信噪比等对车辆定位时信号传输范围的影响，从而确定利用 LED 交通灯进行目标定位的有效范围。

## 2 系统模型

### 2.1 LED 交通灯定位系统模型

根据城市道路交通系统，建立如图 1 所示坐标系。A 车、B 车分别位于第一车道和第二车道，车道宽度

均为  $a$ 。以 A 车为例，搭载的光电探测器处于车辆引擎盖的中心且距离地面高度为  $h$ ，其系统坐标为  $(x, y, z)$ ，将光电探测器的位置视为该车辆所在位置，因此，车与 LED 交通灯之间的距离可表示为

$$d = \sqrt{x^2 + (3-y)^2 + (H-h)^2} \quad (1)$$

式中： $d$  表示 LED 交通灯和车辆间的距离。通常，LED 作为发射端，其发射高度为  $H$ ，发射角度为  $\varphi$ ，可表示为

$$\varphi = |\arccos(x/d)| \quad (2)$$

接收器的接收角度  $\psi$  表示为

$$\psi = \arccos\left(\frac{1}{d} \cdot \sin(\theta + \arctan(\frac{H-h}{x})) \sqrt{x^2 + (H-h)^2}\right) \quad (3)$$

根据朗伯模型，可见光在雾环境下传输时，该系统的信道增益为<sup>[11]</sup>

$$H(0)_{\text{Los}} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \tau(d), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\tau(d)$  是光的透射率。大气中雾滴引起的光信号衰减可以表示为

$$\tau(d) = \exp(-\mu d) \quad (5)$$

其中  $\mu$  是衰减系数。接收端的接收功率可表示为

$$p_r = p_t H(0)_{\text{Los}} = \begin{cases} p_t \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \tau(d), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (6)$$

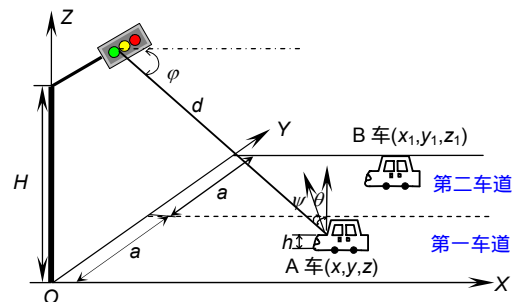


图 1 LED 交通灯定位系统模型  
Fig. 1 LED traffic light position system model

### 2.2 雾的衰减模型

雾是由空气中的小水滴凝结而成，这些小水滴通过吸收或者散射等造成可见光信号的衰减。根据这些小水滴造成的水平能见度的不同，可以把雾分为 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的关系

Table 1 Relationship between fog level and horizontal visibility

等级	水平能见度/m
0(浓雾)	<50
1(大雾)	50~200
2(中雾)	200~500
3(轻雾)	500~1000
4(薄雾)	1000~2000

可见光衰减可用 Kim 模型来表示,衰减系数为<sup>[12]</sup>

$$\mu_{\text{vis}} = \frac{3.192}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-\kappa}, \quad (7)$$

式中:  $V$  为能见度(km),  $\lambda$  为波长(nm),  $\kappa$  为雾天光信号的损耗对波长的依赖性,与能见度有关,其关系:

$$\kappa = \begin{cases} 0.16V + 0.34, & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5, & 0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0, & V < 0.5 \text{ km} \end{cases}. \quad (8)$$

### 2.3 系统的噪声

利用交通灯进行车辆定位时,会受到背景光影响。如太阳辐射的环境光和街灯、车辆、静态霓虹灯标志牌和广告屏幕等带来的人造光。其中,太阳辐射诱发的散粒噪声是系统在白天时噪声的主要来源,表示为

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2qR_p B + 2qI_{\text{bg}} I_2 B, \quad (9)$$

式中:  $q$  为电子电荷常量,  $B$  为系统带宽,  $I_{\text{bg}}$  为背景光电流,  $I_2$  为背景噪声带宽系数,  $R$  为光电转换效率。人造光诱发的热噪声是夜间的主要噪声来源,表示为

$$\sigma_{\text{th}}^2 = \frac{8\pi kT}{G} c A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 kTG}{G_m} c^2 A^2 I_3 B^3, \quad (10)$$

式中:  $G$  是系统电压增益,  $c$  是单位面积电容,  $T$  是绝对温度,  $K$  是波尔兹曼常数,  $G_m$  场效应管的跨导。

表 2 系统参数

Table 2 System parameters

参数	数值
LED 波长/nm	525
LED 功率半角/(°)	15
接收机最大视角/(°)	25
透镜折射率	1.7
光电感应面积/cm <sup>2</sup>	1
光电转换速率	0.35
平均发射功率/W	0.314
LED 灯高度/m	5.5
发射角度/(°)	30
道路宽度/m	7
光电探测器高度/m	1
绿灯坐标	(0, 3, 5.5)

因此,系统总噪声为

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2. \quad (11)$$

该系统选用 OOK 调制,信噪比可表示为<sup>[13]</sup>

$$R_{\text{SNR}} = (Rp_r)^2 / \sigma^2. \quad (12)$$

## 3 仿真分析

实际应用中,LED 交通灯高度、信号发射角度、道路宽度、接收机高度和角度等都将影响交通灯和车辆之间信息的传输。为研究车辆利用交通灯进行定位的性能,讨论雾环境对交通灯信号的衰减,以及接收角度、道路宽度对车辆定位的影响,分析接收端信噪比,确定车辆可定位范围,具体的仿真参数如下。

### 3.1 衰减系数和能见度的关系

雾环境下,LED 交通灯信号的传输衰减和能见度的关系如图 2 所示。从图中可以看出,当能见度小于 0.5 km 时,衰减随能见度的增加迅速下降;当能见度大于 0.5 km 时,衰减变得平缓。相同条件下,绿色信号灯的衰减最大。因此,选择波长为 525 nm 的绿光作为研究对象为宜。

### 3.2 接收角度和光信号水平传输距离的关系

图 3 为车辆分别在第一车道( $y=3$  m)和第二车道( $y=7$  m)时,接收角度和可定位范围的关系。为确定合适的接收角度,比较了垂直角度( $\theta$ )为 45°、55°、65° 时接收角度的变化情况。可以看出,传输信号在 150 m 以内,接收角度随垂直角度的增加而减小。虽然接收角度越小,越有利于信号的接收,但接收角度过小将导致光电探测器无法有效探测微弱信号。一般情况下,选取接收角度应大于 20°。已知接收角度和垂直角度之和不大于 90°,因此,25°的接收角度较为合适。

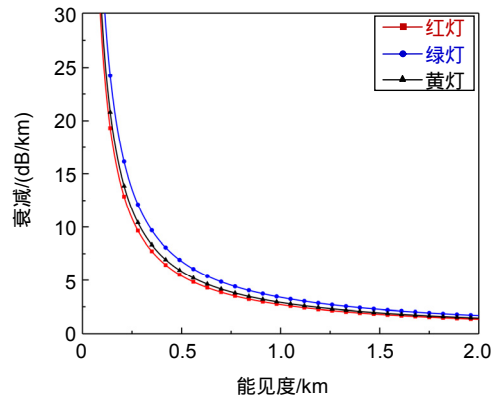


图 2 传输衰减与能见度的关系

Fig. 2 Relationship between transmission attenuation and visibility

### 3.3 接收端接收功率和光信号水平传输距离的关系

当 LED 交通灯的高度为 5.5 m，光电探测器的高度为 1 m，LED 交通灯发射角度为 30°，车辆接收端接收角度为 25°时，车辆分别在第一车道和第二车道时接收端接收功率的变化情况如图 4 所示。从图中可以看出，接收端接收功率随着光信号传输距离的增大而减小，在水平传输距离超过 20 m 之后，道路宽度对信号水平传输距离的影响不大。但是第一和第二车道上的车辆在距离交通灯 20 m 之内时，接收端接收功率相差较大，因此，在确定可定位范围时，应分析车辆位于第一车道和第二车道时的情况。

### 3.4 系统的信噪比分析

根据气象等级与能见度关系，能见度  $V$  取 100 m、300 m、1 km、2.4 km 时，分别对应于大雾、中雾、轻雾、晴天。在 OOK 调制中，为保证正常通信，信噪比应不低于 13.6 dB。即在确定可定位范围时，系统的信噪比不低于 13.6 dB。图 5 和图 6 分析了多种天气条件下，白天 12 点和晚间 22 点两个时段的接收端信噪

比性能。从图 5 可以看出，由于能见度的减小，车辆的定位距离随接收端信噪比的变小而减小。大雾时接收端信噪比最小，晴天则最大。

图 5(a)是白天车辆位于第一车道时的情况，大雾天气下车辆的可定位范围为 4.8 m 到 41 m，晴朗时的定位范围为 4.8 m 到 150 m。

图 5(b)是车辆位于第二车道时的情况，大雾天气下的定位范围为 7 m 到 40 m，晴朗时为 7 m 到 150 m。图 5(a)和图 5(b)表明，在同一天气条件下，第一车道的信噪比优于第二车道，靠近交通灯处，第二车道上的定位距离比第一车道的定位距离少 2.2 m。

图 6(a)是夜晚车辆位于第一车道时情况，大雾天气下的定位范围为 4.8 m 到 51 m，夜间晴朗时为 4.8 m 到 180 m。图 6(b)是车辆位于第二车道下的情况，大雾天气下的定位范围为 7 m 到 50 m，夜间晴朗时为 7 m 到 180 m。对比图 5 和图 6 可以看出，同一能见度下，夜晚的信噪比优于白天，因此，夜间车辆可定位范围大于白天。

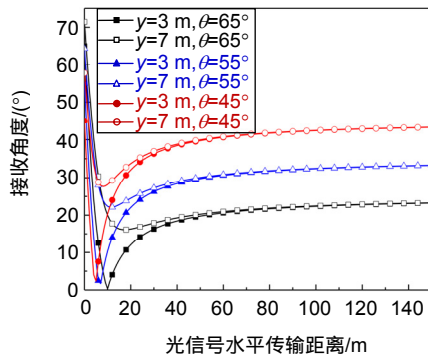


图 3 接收角度与光信号水平传输距离的关系  
Fig. 3 Relationship between receiving angle and horizontal transmission distance of optical signal

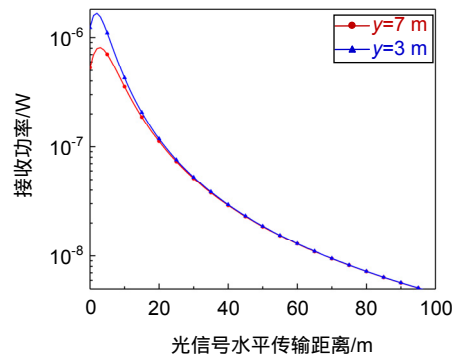


图 4 接收功率与光信号水平传输距离的关系  
Fig. 4 Relationship between received power and horizontal transmission distance of optical signal

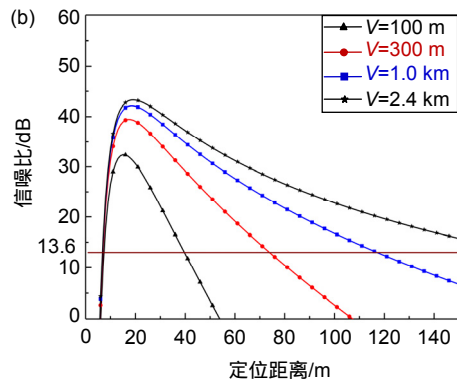
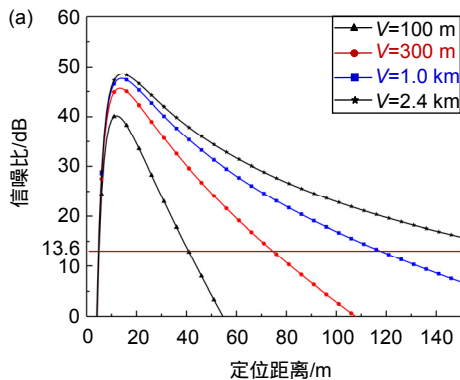


图 5 白天不同能见度情况下信噪比和定位距离之间的关系。

(a) 第一车道时信噪比与定位距离的关系；(b) 第二车道时信噪比与定位距离的关系

Fig. 5 Show the relationship between signal-to-noise ratio and positioning distance for different visibility during the day.

(a) The relationship between the signal-to-noise ratio and the positioning distance in the first lane;  
(b) The relationship between the signal-to-noise ratio and the positioning distance in the second lane

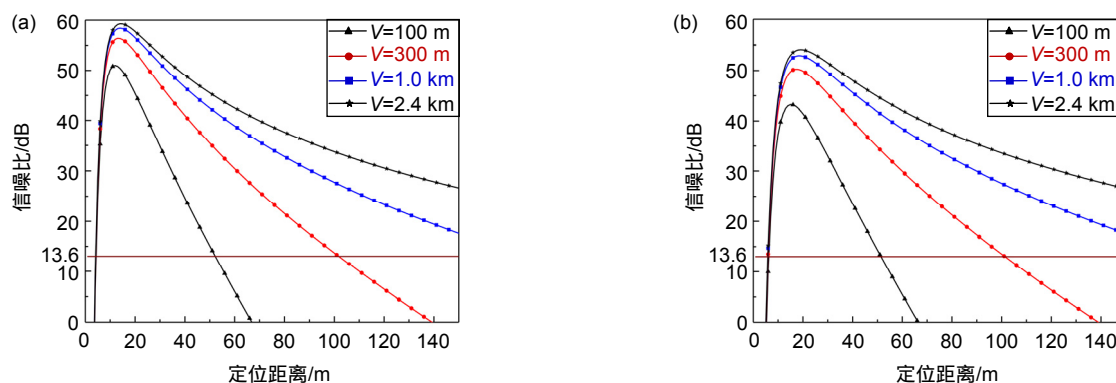


图6 夜晚不同能见度情况下信噪比和定位距离之间的关系。

(a) 第一车道时信噪比与定位距离的关系; (b) 第二车道时信噪比与定位距离的关系

Fig. 6 Show the relationship between signal-to-noise ratio and positioning distance for different visibility at night.

(a) The relationship between the signal-to-noise ratio and the positioning distance in the first lane;

(b) The relationship between the signal-to-noise ratio and the positioning distance in the second lane

## 4 结论

本文研究了智能交通中雾对利用可见光进行车辆定位性能的影响。分析了接收角度对定位范围的影响,比较垂直角度为 $45^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $65^\circ$ 时接收机接收角度的变化情况,确定了可见光定位时的最佳接收角度;通过比较不同车道上车辆接收功率可知,道路宽度在距离交通灯20 m的范围内对定位性能的影响较大。通过比较白天和夜晚时的接收端信噪比可知,靠近交通灯方向上,第一车道的信噪比优于第二车道,第二车道上的定位距离比车辆位于第一车道的定位距离少2.2 m;同一能见度下夜晚的信噪比优于白天,在夜晚对车辆进行定位时,可定位范围大于白天;通过比较不同浓度的雾与晴朗天气可知,雾对基于可见光的车辆定位影响较大。综合以上分析得出,在雾天利用可见光进行定位时,为保证定位精度更加准确,应确保接收端可以有效接收光信号,在定位时要考虑道路宽度及白天、夜晚不同能见度条件下对定位范围的影响。

## 参考文献

[1] Dang Q H, Yoo M. Handover procedure and algorithm in vehicle to infrastructure visible light communication[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 26466–26475.

[2] 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.

[3] Ding D Q, Ke X Z, Li J X. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(1): 131–134.  
丁德强, 柯熙政, 李建勋. VLC系统的光源布局设计与仿真研究[J]. *光电工程*, 2007, 34(1): 131–134.

[4] Zhuang Y, Hua L C, Qi L N, et al. A survey of positioning systems using visible LED lights[J]. *IEEE Communications Surveys*

& Tutorials, 2018, 20(3): 1963–1988.

[5] Long K J, Li F, Gao Z B. Study of foggy highway traffic monitoring and warning system[J]. *Transportation Science & Technology*, 2016(3): 183–186.  
龙科军, 李峰, 高志波. 雾天高速公路路况监测预警系统研究[J]. *交通科技*, 2016(3): 183–186.

[6] Liu J L. The analysis of outdoor wireless communication system based on the LED visible light[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013: 1–65.  
刘景龙. 基于室外可见光LED交通灯的无线通信系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 1–65.

[7] Elamassie M, Karbalayghareh M, Miramirkhani F, et al. Effect of fog and rain on the performance of vehicular visible light communications[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2018: 1–6.

[8] 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.

[9] Kumar N, Alves L N, Aguiar R L. Design and analysis of the basic parameters for traffic information transmission using VLC[C]//*Proceedings of the 2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, 2009: 798–802.

[10] Cao Y, Lei T. High precision vehicle positioning method based on traffic light[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(3): 212–215, 264.  
曹岩, 雷涛. 基于交通灯的高精度车辆定位技术[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(3): 212–215, 264.

[11] Chen Q R, Zheng W B, Zhang T, et al. A power analysis model for outdoor long-distance visible light communication[C]//*Proceedings of the 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, 2017: 131–136.

[12] Kim Y H, Cahyadi W A, Chung Y H. Experimental demonstration of VLC-based vehicle-to-vehicle communications under fog conditions[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 7905309.

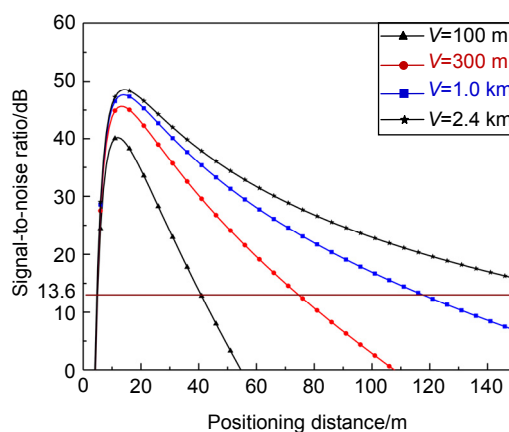
[13] Akanegawa M, Tanaka Y, Nakagawa M. Basic study on traffic information system using LED traffic lights[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2001, 2(4): 197–203.

# The research on fog's positioning performance of vehicles based on visible light

Zhang Ying<sup>1,2</sup>, Yang Jing<sup>1\*</sup>, Yang Yufeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Civil-Military Collaboration Key Laboratory of Intelligence Coordination Networks, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China



Relationship between signal-to-noise ratio and positioning distance under different visibility in the first lane

**Overview:** The intelligent urban transportation system is an important direction for the development of urban road traffic in the future. It mainly uses the communication between transportation infrastructure and vehicles to build a safe, convenient and green intelligent information platform. Intelligent urban transportation system based on visible light communication has LED traffic lights and vehicle lighting. It can not only realize communication between infrastructure and vehicles, and between vehicles, but also obtain traffic road condition information in real time and accurately obtain vehicle position information. It is of great significance to carry out intelligent highway construction, promoting road network management and vehicle coordination. However, the outdoor atmospheric channel has a great influence on the intelligent urban transportation system based on visible light communication. A large amount of small water droplets or dust particles contained in the air will scatter or absorb the LED beam, causing loss of optical power. Many scholars at home and abroad are studying the communication performance of visible light in atmospheric channels, which lays a foundation for vehicle positioning using LED traffic lights. However, the positioning performance between outdoor LED traffic lights and vehicles in typical weather still needs further study. In this paper, the influence of fog on the vehicle positioning performance using visible light is studied. The influence of the receiving angle on the positioning range is analyzed, and the vertical angle is  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $65^\circ$ . When the receiver receives a change in angle, the optimal receiving angle for the visible light is determined. By comparing the receiving power of the vehicle in different lanes, it can be seen that the road width has a great influence on the positioning performance within 20 m of traffic lights. The signal-to-noise ratio of the receiver at night is better than during the day under the same visibility. The positioning range of the vehicle at night can be greater than during the daytime. By comparing different concentrations of fog and sunny weather, it can be seen that fog has a greater influence on vehicle positioning based on visible light. Therefore, in order to ensure safe driving in the intelligent urban transportation system, the influence of the weather environment on the positioning distance should be considered when performing visible light vehicle positioning.

**Citation:** Zhang Y, Yang J, Yang Y F. The research on fog's positioning performance of vehicles based on visible light[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 190661

Supported by National Natural Science Foundation of China (61405157), Natural Science Foundation of Shaanxi Provincial Department of Education (17JK0569), and Key Industry Innovation Chain Project of Shaanxi Province(2020ZDLGY05-02)

\* E-mail: 1285935272@qq.com