

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.02.005

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:李征,许东升,梁静远,秦欢欢,柯熙政. 室外可见光通信路径损耗模型研究[J]. 西安理工大学学报,2023,39(2): 198-207.

LI Zheng, XU Dongsheng, LIANG Jingyuan, QIN Huanhuan, KE Xizheng. Research on path loss model for outdoor visible light communication[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(2): 198-207.

室外可见光通信路径损耗模型研究

李 征¹, 许东升¹, 梁静远¹, 秦欢欢¹, 柯熙政^{1,2}

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对室外可见光通信系统受到不同天气条件的影响,本文考虑了车辆到车辆的通信链路,提出了一种室外可见光通信路径损耗模型,并通过实验测量验证了模型的可靠性。仿真分析了可见光在雨天、雾天、雪天的衰减,实验分析了不同天气条件下接收光功率的概率密度函数,讨论了不同信噪比以及不同通信距离下的接收误码率。仿真结果表明,降雨对可见光的衰减从大到小依次是:暴雨、小雨、大雨、中雨;降雪对可见光的衰减随着降雪强度的增大而增大,降雪强度相同时,干雪的衰减比湿雪大;雾天对可见光的衰减随着能见度的减小而增大。实测结果表明,路径损耗模型符合高斯分布,路径损耗越大,接收信号概率密度函数的方差就越大。

关键词: 室外可见光通信; 智能交通系统; 路径损耗; 天气状况

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2023)02-0198-10

Research on path loss model for outdoor visible light communication

LI Zheng¹, XU Dongsheng¹, LIANG Jingyuan¹, QIN Huanhuan¹, KE Xizheng^{1,2}

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the influence of outdoor visible light communication system under different weather conditions, this paper considers the vehicle-to-vehicle communication link, proposes an outdoor visible light communication path loss model, and verifies the reliability of the model through experimental measurements. The attenuation of visible light in rainy, foggy, and snowy days was simulated and analyzed. The probability density function of received optical power under different weather conditions was analyzed experimentally. The received bit error rate at different signal-to-noise ratios and different communication distances was discussed. The simulation results show that the attenuation of visible light by rainfall from large to small is of torrential rain, light rain, heavy rain, and moderate rain; the attenuation of visible light by snowfall increases with the increase of snowfall intensity. When the snowfall intensity is the same, the attenuation of dry snow greater than wet snow; the attenuation of visible light in fog increases as visibility decreases. The measured results show that the path loss model conforms to the Gaussian distribution; the greater the path loss, the greater the variance of the probability density function of the received signal.

收稿日期: 2023-04-07; **网络首发日期:** 2023-05-11

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230511.1535.002.html>

基金项目: 陕西省科研计划项目(18JK0341);陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01);西安市科技计划项目(2020KJRC0083)

第一作者: 李征,女,硕士,讲师,研究方向为现代通信技术。E-mail: lixx-123@xaut.edu.cn

通信作者: 柯熙政,男,博士,教授,博导,研究方向为无线光通信。E-mail: xzke@263.net

Key words: outdoor visible light communication; intelligent transportation system; path loss; weather conditions

可见光通信(visible light communication, VLC)是指利用可见光为光源来实现照明、通信和定位^[1],可在室内^[2]、室外^[3]、水下^[4]、矿井和一些特殊场合提供无线光通信服务。VLC具有高安全性、大带宽、高数据速率和低延迟等优点^[5]。目前,室外可见光通信主要应用于智能交通系统(intelligent transport system, ITS),ITS将高速数据传输、实时监控和数据挖掘等技术相结合,可以为用户提供更好的移动和定位服务,保证车辆对车辆(vehicle to vehicle, V2V)之间、车辆对基础设施(vehicle to infrastructure, V2I)之间和基础设施对车辆(I2V)之间进行实时通信^[3]。

由于大气气溶胶粒子(如雪、雨、雾或沙尘等)引起的散射会对光学信号产生影响,甚至会导致系统通信中断^[6],因此天气条件的影响也成为室外VLC通信系统的难题之一^[7]。Zaki等^[8]提出了不同天气条件对室外VLC链路影响的分析模型,研究了Carbonneau-France、Marshall and Palmer和Japan三种模型在不同降雨强度下的衰减情况。Eldeeb等^[9]提出了一种基于车辆间VLC系统光线跟踪方法的路径损耗表达式,研究了晴天、雨天和雾天在不同传输距离下的误码率性能,分析了双光电探测器的优势。Alsalamy等^[10]通过计算得出了信道统计分布随交通车辆密度和车间距的变化而变化的结论。Kim等^[11]通过使用具有不同雾密度的实验装置,对车辆间VLC系统的性能进行了评估。柯熙政等^[12]对车联网可见光通信系统信道特性进行了分析,提出了一种采用双高斯函数叠加表示的夜间车联网可见光通信系统的背景光噪声模型,并采用该模型对不同地区和不同天气下的实测数据进行数值拟合,验证了模型的有效性。参考文献^{[5]~[9]}研究了室外可见光通信在不同天气条件下的衰减情况,分析了通信系统的性能,但大多是模拟分析,没有实际道路上的实验测量。本文在理论分析的基础上,结合实际的道路测量,建立了不同天气条件下的路径损耗模型。

车辆间可见光通信信道是一种特殊的动态介质,由许多随时间快速连续变化的随机变量组成。这些随机变量包括相邻车辆的反射分量、不同路面的反射分量、前后车辆接收机和发射机之间的高度和角度差,而且这些随机变量之间的相互作用很难识别,增加了使用确定性方法描述信道特征的难度。

因此,本文的研究目标是建立车辆间VLC信道的分析模型,重点关注不同天气条件下的信道路径损耗,因为这是量化通信信道的一个重要指标。找到描述信道路径损耗的数学表达式对于建立链路预算和根据信噪比、误码率预测通信性能至关重要。

本文研究了雨、雾、雪衰减对室外VLC通信系统的影响,分析了不同天气条件下车辆间VLC的路径损耗。在实际道路上测量了不同天气条件下的接收光功率,并对其概率密度函数和均值进行分析。研究了不同信噪比和不同传输距离下的接收误码率。

1 系统建模

1.1 系统模型

系统整体模型如图1所示, V_b 车位于 V_a 车前方,两辆车位于同一车道内, V_a 车前照灯为信号发射端, V_b 车作为可见光信号的接收端, V_c 车为相邻车道车辆表面信号反射端。 V_c 车从 V_a 、 V_b 车相邻车道经过,汽车前照灯光束在 V_c 车表面以及路面发生反射,光束在车辆行驶经过所有位置点上的反射功率,可以通过空间矩形模型刻画。

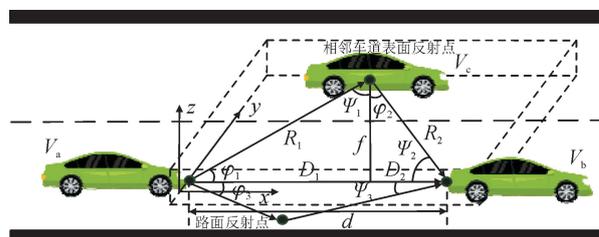


图1 双车道路灯系统模型

Fig. 1 Model of two-lane street lighting system

本文使用朗伯模型来描述LED光源辐射强度模式的角分布,探测器被建模为一个活动区域,收集小于探测器视场角(field of view, FOV)的入射角。式(1)给出了光功率计的有效接收面积^[13]:

$$A_{\text{effect}}(\psi) = \begin{cases} AT_s(\psi)g(\psi)\cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 表示接收孔径大小; ψ 表示探测器入射角,入射角接收的光线包含直射链路分量、相邻车辆反射分量、地面反射分量; $T_s(\psi)$ 表示滤光片增益损耗; $g(\psi)$ 表示集中器增益; Ψ_c 是接收器的视场角^[13]。

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

1.2 信道路径损耗模型

如图2所示,室外VLC信道受到近地面大气中水分子和气溶胶粒子的影响,这些粒子如雨、雾、雪和沙尘等会引起光散射,使传输的光信号衰减,从而影响到光功率计的接收光功率^[14]。本文采用OPHIR-PD300光功率计。

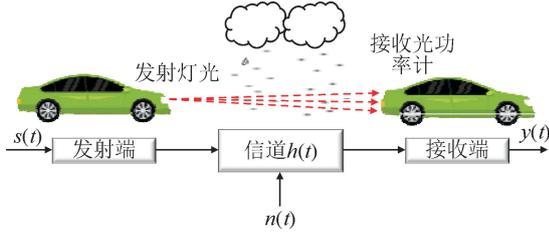


图2 简化的VLC系统模型
Fig.2 Simplified VLC system model

对于可见光通信系统,设 $s(t)$ 为发光二极管(light-emitting diode, LED)发出的光信号, $y(t)$ 为接收到的光信号,系统的数学模型如式(3)所示^[15]:

$$y(t) = [s(t) * h(t)] \cdot \eta + n(t) \quad (3)$$

式中: η 为探测器的响应度; $*$ 表示卷积; $n(t)$ 表示加性噪声,文献[12]提出了一种夜间背景光加性噪声模型(Ke's model); $h(t)$ 表示信道冲激响应(channel impulse response, CIR),主要包含了天气条件、几何传播路径损耗和对准误差几个方面的影响。数值分析参数见表1。

表1 数值分析参数

Tab.1 Numerical analysis parameters

参数	变量	取值
传输光功率/(mW)	P_t	314
探测器物理区域/(cm ²)	A	0.79
车道宽度/m	L	3.75
滤光器增益/dB	$T_s(\psi)$	1.0
集中器折射率	n	1.7
光电探测器响应度/(A·W ⁻¹)	η	0.35
开环电压增益/dB	G	10
场效应管噪声因子	Γ	1.5
LED波长/(nm)	λ	650
车辆速度/(km·h ⁻¹)	V_s	60
数据传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	R	20

入射光线与接收器表面的法线成角度 ψ ,则直视链路的信道冲激响应如式(4)所示^[15]:

$$h(t) = \frac{A(m+1)}{2\pi d^\gamma} \cos^m(\varphi) T_s(\psi) g(\psi) \cdot \cos(\psi) \delta(t - \frac{d}{c}) \quad (4)$$

式中: γ 是路径损耗指数; t 是传播时间; A 是光功率计的有效面积; d 是车间距; φ 是辐照度角; c 是光速; d/c 是信号的传播延迟; $m = -0.693 / \ln(\cos(\psi_{1/2}))$ 是朗伯阶, $\psi_{1/2}$ 是辐射的半角; δ 是狄拉克函数。

直流(direct current, DC)增益 $H(0)$ 由式(5)给出^[15]:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (5)$$

设式(4)中的滤光片增益 $T_s(\psi)$ 、集中器增益 $g(\psi)$ 具有单一增益,则直流信道增益 $H(0)$ 由式(6)给出^[15]:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^\gamma} \cos^m(\varphi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases} \quad (6)$$

由于通信链路 d 、 φ 和 ψ 的几何尺寸是随机的,因此任何时刻的信道冲激响应和直流增益都是随机的。

由此,接收功率可由式(7)计算得到:

$$P_r = P_t H(0) \quad (7)$$

我们提出了车辆链路的闭合形式路径损耗表达式,并通过实验测量对其进行了验证。距离 d 处的接收光功率可以表示为:

$$P_r = P_t \tau(d) S(d) \quad (8)$$

式中: $\tau(d)$ 表示大气衰减,根据天气条件而变化; $S(d)$ 表示传播距离引起的几何损耗。

光在大气中的吸收和散射由比尔-朗伯定律计算^[8]:

$$\tau(d) = I_t / I_0 = \exp(-\gamma(\lambda)d) \quad (9)$$

式中: $\tau(d)$ 是距离发射器 d 处的透射率; I_0 为发射光强; I_t 为接收光强; d 为传播距离; $\gamma(\lambda)$ 是单位长度的消光系数。

$S(d)$ 是发射器和接收器之间的传播距离引起的几何损耗。本文使用高斯模型:

$$S(d) = \frac{1}{d \sqrt{2\pi\sigma_s}} \exp\left(-\frac{(d-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (10)$$

其中 σ_s 为标准差, μ_s 为平均值。

代入不同天气条件下的 $\tau(d)$ 和 $S(d)$,即可确定室外可见光信道路径损耗。

四相移相键控(QPSK)系统信噪比与误码率的关系为^[16]:

$$B_{\text{ER}} = \frac{P_e}{\log_2 4} = \frac{4(\sqrt{4}-1)}{\log_2 4 \times \sqrt{4}} Q\left(\sqrt{\frac{3E_b(\log_2 4)}{(4-1)N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (11)$$

其中 P_e 表示系统误码率, E_b 为信号的功率谱密度, N_0 为噪声的功率谱密度, Q 为 Q 函数。

$$B_{\text{ER}} = \frac{3}{2 \log_2 4} Q\left(\frac{1}{3} \sqrt{\frac{(\eta P_t)^2 \log_2 4}{N_0 R}}\right) \quad (12)$$

2 不同天气条件下的衰减

2.1 雨天的衰减

雨天条件下光强的散射衰减系数由式(13)表示^[17]:

$$\gamma_{\text{rain}} = \frac{I_i}{I_0} = \exp(-\rho \sigma_a d) - \exp(-\rho \sigma_t d) \quad (13)$$

式中: I_0 为发射光强; I_i 为散射光强; d 为信号传播距离; ρ 为雨粒子数密度; σ_a 为吸收截面; σ_t 为总截面。

波长为 650 nm 的可见光在降雨天气条件下, 降雨强度与散射衰减系数的关系, 如图 3 所示^[18]。

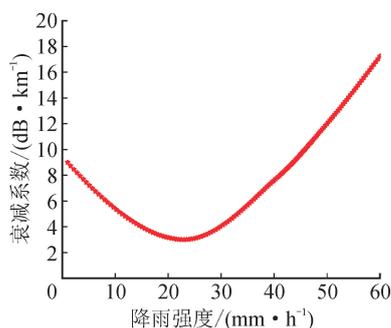


图 3 降雨强度与散射衰减系数的关系

Fig. 3 Relationship between precipitation intensity and scattering attenuation coefficient

由图 3 可知, 散射衰减系数在降雨强度 0.1 mm/h~45 mm/h 范围内存在一个极值, 在极值点时降雨对接收信号的影响最小。究其原因, 是因为在小雨时, 雨粒子的后向散射较大, 此时衰减较大; 随着雨势的增大, 雨粒子的半径增大而数量几乎保持不变, 前向散射会随着雨粒子的增大而增大, 此时的衰减较小; 当雨势持续增大, 雨粒子的半径就会保持在一定大小, 此时雨粒子总的光学厚度增大, 衰减较大。因此, 可见光在小雨天比在中雨和大雨天衰减大, 当降雨强度超过 45 mm/h 时, 此时的散射衰减比小雨时要大, 并且随着降雨强度增大, 衰减会持续增大。

2.2 雾天的衰减

雾天条件下 LED 的衰减系数可由式(14)

表示^[11]:

$$\gamma_{\text{fog}}(\lambda) = \frac{17.35}{V} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-\zeta} \quad (14)$$

式中: $\gamma_{\text{fog}}(\lambda)$ 为衰减系数, dB/km; V 为能见度范围; λ 为 LED 光的波长; 参数 ζ 取决于能见度的距离范围, 可由式(15)表示^[19]。

$$\zeta = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34, & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5, & 0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0, & V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (15)$$

波长为 650 nm 的可见光在薄雾和浓雾两种天气条件下, 能见度与衰减系数的关系, 如图 4 所示。

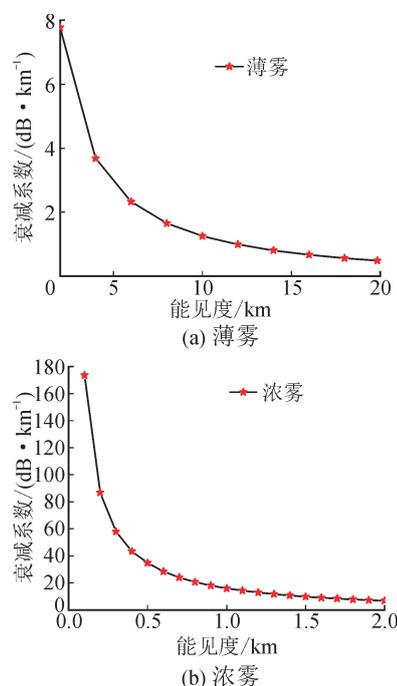


图 4 衰减系数与雾天能见度的关系

Fig. 4 Relationship between attenuation coefficient and visibility in foggy weather

从图 4 中可以看出, 浓雾和薄雾的衰减系数曲线是相似的, 但是浓雾天的雾粒子浓度高且能见度低, 雾粒子对光的散射严重, 所以浓雾和薄雾的衰减趋势虽然是相似的, 但浓雾的衰减更严重。

2.3 雪天的衰减

雪天的衰减系数 γ_{snow} 是降雪强度 S (mm/h) 的函数, 可由式(16)表示^[8]:

$$\gamma_{\text{snow}}(\lambda) = a \cdot S^b \quad (16)$$

式中: γ_{snow} 为衰减系数; 参数 a 、 b 是关于波长 λ 的函数, 湿雪和干雪条件下的参数取值如表 2 所示。

表 2 降雪引起的衰减参数

Tab. 2 Attenuation parameters caused by snow

雪的类型	a	b
湿雪	$0.000102 \times \lambda + 3.79$	0.72
干雪	$0.0000542 \times \lambda + 5.50$	1.38

波长为 650 nm 的可见光在干雪和湿雪两种天气条件下,降雪强度与衰减系数的关系,如图 5 所示。

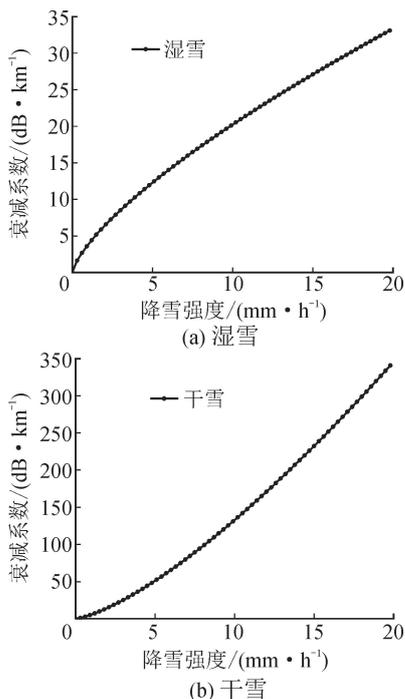


图 5 衰减系数与降雪强度的关系
Fig. 5 Relationship between attenuation coefficient and snowfall intensity

从图 5 中可以看出,湿雪和干雪的衰减系数虽然都是随着降雪强度的增大而增大,但是两条曲线的衰减趋势是不同的,降雪强度增幅相同时,干雪的衰减幅度更大,在相同降雪强度下,干雪比湿雪的衰减更为严重。

3 实验测量

3.1 实测数据分析

基于真实的道路实验测量,将探测器型号为 OPHIR-PD300-UV 的光功率计放置在前车的车尾,采样频率为 25Hz,在西安市进行测量,不同天气条件下各测量 40~60 组数据,每组测量时间为 30~60 min,每组测量的数据量在 20~30 万个,并对实时测量接收到的光功率值进行分析。

图 6 是在西安市金花路和咸宁路不同时间段测量到的光功率概率密度函数(probability density

function, PDF)分布曲线。

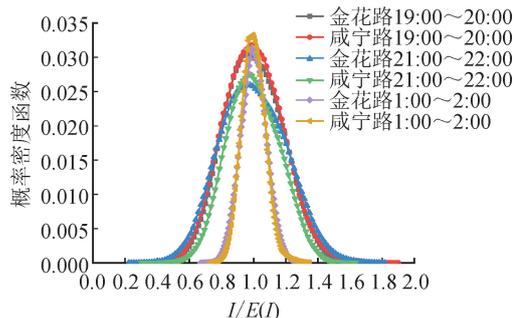


图 6 不同时间段接收光功率的 PDF
Fig. 6 PDF of received optical power at different time periods

由图 6 可知,接收到的光功率概率密度函数符合高斯模型。对接收光功率值进行归一化后,可以看出不同时间段接收光功率概率密度函数的方差有所不同,但相同时间段、不同道路的路径损耗相同。晚上 19:00~20:00 车流量较大^[20],接收到的光功率概率密度函数的方差较大,在凌晨 1:00~2:00 车辆较少^[20],接收到的光功率概率密度函数的方差较小,其主要原因是车流量较大时,接收信号受到的影响更大,如旁边车道车辆的反射光,这将造成信道路径损耗增大。

图 7 是在相同时间段、不同降雨强度下,测量到的光功率概率密度函数分布曲线。

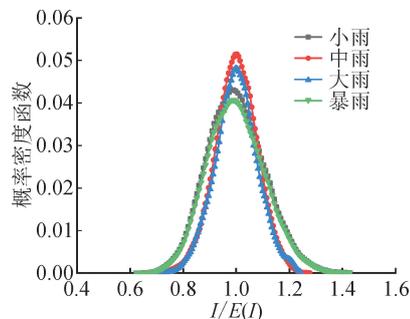


图 7 不同降雨强度下接收光功率的 PDF
Fig. 7 PDF of received optical power at different precipitation intensities

由图 7 可知,接收到的光功率概率密度函数符合高斯模型。对接收功率值进行归一化后,可以看出不同降雨强度下接收光功率概率密度函数的方差不同。发射端的发射光强经过雨天信道后,不同的降雨强度对其衰减影响不同,路径损耗的大小也就不同。小雨和暴雨接收光功率的概率密度函数的方差比中雨和大雨更大,说明在小雨和暴雨天接收的光功率比中雨和大雨天更不稳定。图 8 是不同降雨强度下接收到的光功率均值,可以看出小雨和暴雨天接收到的光功率均值比中雨和大雨天的均值小,

也就是在雨衰减较大时,接收到的光功率均值较小,这也印证了图 3 的降雨强度与散射衰减系数之间的关系。

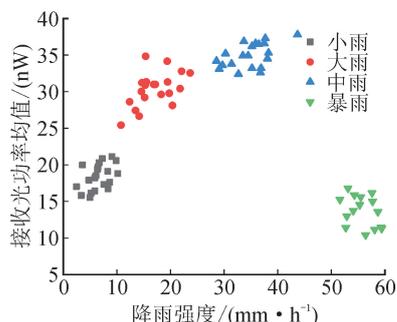


图 8 不同降雨强度下的接收光功率均值
Fig. 8 Average received optical power at different precipitation intensities

表 3 列出了部分不同降雨天气条件下的采样数据,降雨强度是根据当天气象站的天气预报进行记录^[21]。

表 3 不同降雨天气条件下的测量情况

Tab. 3 Measurement under different rainfall weather conditions

时间	天气条件	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	测量组数/ (组)
2021-08-31	暴雨	66	10
2021-09-27	小雨	5	12
2021-10-19	中雨	18	10
2021-11-29	小雨	3	13
2022-04-21	大雨	38	13
2022-04-27	大雨	33	13
2022-07-18	暴雨	56	9
2022-11-11	中雨	16	10

图 9 是在相同时间段、不同雾浓度条件下,测量到的光功率概率密度函数分布曲线。

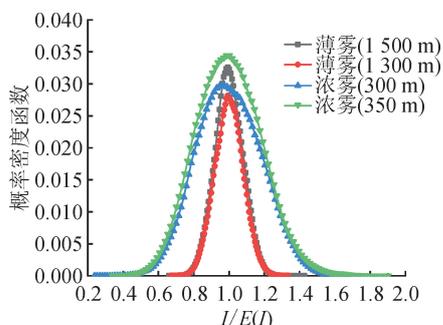


图 9 薄雾和浓雾天气条件下接收光功率的 PDF
Fig. 9 PDF of received optical power under misty and dense weather conditions

由图 9 可知,接收到的光功率概率密度函数符合高斯模型。对接收功率值进行归一化后,可以看出不同雾浓度下的接收光功率概率密度函数的方差不同。发射端的发射光强经过雾天信道后,不同的雾浓度对其衰减影响不同,浓雾天接收光功率的概率密度函数的方差更大,说明在浓雾天接收的光功率更不稳定,即浓雾天的衰减更严重。图 10 是不同雾浓度下接收到的光功率均值,可以看出,浓雾天接收到的光功率均值比薄雾天接收到的均值小,也就是在雾衰减较大时,接收到的光功率均值较小,这也印证了图 4 的雾天能见度与衰减系数之间的关系。

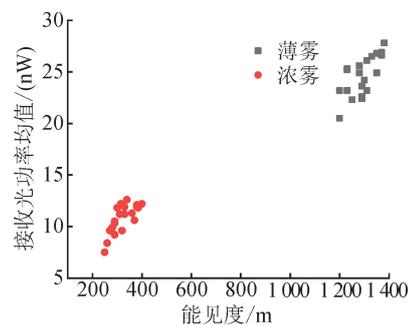


图 10 不同雾浓度下的接收光功率均值
Fig. 10 Average received light power at different fog concentrations

表 4 列出了部分不同雾浓度天气条件下的采样数据,能见度是根据当天气象站的天气预报进行记录^[22]。

表 4 不同雾浓度天气条件下的测量情况

Tab. 4 Measurement under different fog concentration weather conditions

时间	天气条件	能见度/ m	测量组数/(组)
2021-09-25	浓雾	400	11
2021-10-27	浓雾	300	12
2021-11-27	薄雾	1 200	12
2022-11-10	浓雾	350	13
2022-12-26	薄雾	1 500	13
2023-03-16	薄雾	1 800	11

图 11 是在相同时间段、湿雪和干雪两种天气条件下,测量到的光功率概率密度函数分布曲线。

由图 11 可知,接收到的光功率概率密度函数符合高斯模型。对接收功率值进行归一化后,可以看出不同降雪情况下接收光功率概率密度函数的方差不同。发射端的发射光强经过雪天信道后,湿雪和干雪对其衰减影响不同,干雪天光功率概率密度函数的方差更大,说明在干雪天接收的光功率更不稳定。

定,即干雪天的衰减更加严重。图 12 是不同降雪天气条件下接收到的光功率均值,可以看出,湿雪天接收到的光功率均值比干雪天接收到的均值小,也就是在雪衰减较大时,接收到的光功率均值较小,这也印证了图 5 的降雪强度与衰减系数之间的关系。

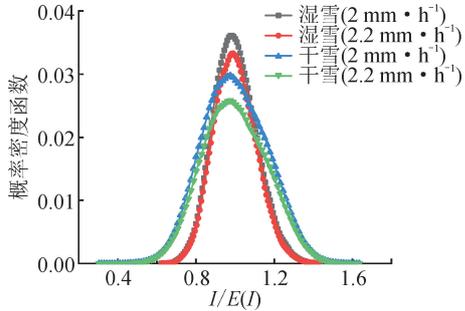


图 11 湿雪和干雪天气条件下接收光功率的 PDF
Fig. 11 PDF of received optical power under wet and dry snow weather conditions

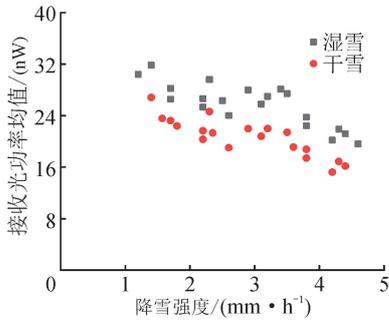


图 12 不同降雪强度下的接收光功率均值
Fig. 12 Average received optical power at different snowfall intensities

表 5 列出了部分不同降雪天气条件下的采样数据,降雪强度是根据当天气象站的天气预报进行记录^[23]。

表 5 不同降雪天气条件下的测量情况
Tab. 5 Measurement under different snowfall weather conditions

时间	天气条件	降雪强度/ (mm · h ⁻¹)	测量组 数/(组)
2021-11-07	干雪	1.5	12
2021-12-25	干雪	2.2	13
2022-01-27	湿雪	2.0	13
2022-01-28	湿雪	2.3	12
2022-11-24	湿雪	2.5	10
2022-11-30	干雪	2.0	11

对不同天气条件下测得的光功率概率密度函数进行高斯拟合,拟合后的高斯函数参数如表 6 所示。在均值归一化后,不同天气下的均值相同,方差随着

路径损耗增大而增大。

表 6 不同天气条件下高斯模型拟合参数
Tab. 6 Gaussian model fitting parameters under different weather conditions

天气条件	μ_s	σ_s
小雨	0.99	0.092
中雨	0.99	0.053
大雨	0.99	0.055
暴雨	0.99	0.098
湿雪	0.99	0.114
干雪	0.99	0.156
薄雾	0.99	0.133
浓雾	0.99	0.191

3.2 数据统计特性分析

分析表 3~5 中的样本实测数据,以方差为横坐标,不同天气条件下光强信号样本的偏度和峰度如图 13、图 14 所示^[23]。

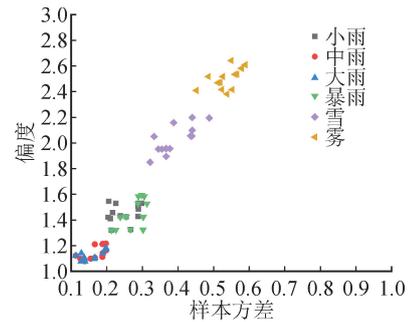


图 13 样本偏度
Fig. 13 Sample skewness

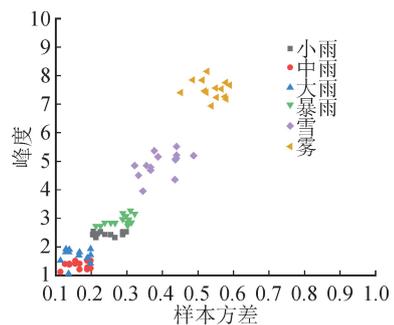


图 14 样本峰度
Fig. 14 Sample kurtosis

从图 13、14 中可以看出,随着数据样本方差的增加,偏度和峰度的绝对值均增大。偏度是指接收信号概率密度分布函数关于中线对称的程度,峰度是指接收信号在其数学期望附近的集中程度。其中雾天的偏度和峰度明显高于其他天气,雪天的偏度和峰度高于雨天,小雨和暴雨的偏度和峰度高于大

雨和中雨。信号链路受到天气条件影响越大,信号的方差也就越大,同时信号数据样本的倾斜度和陡峭度越大。

3.3 通信性能分析

对接收到的数据进行误码率(BER)与信噪比(SNR)和通信距离之间的关系分析,如图 15、16 所示。

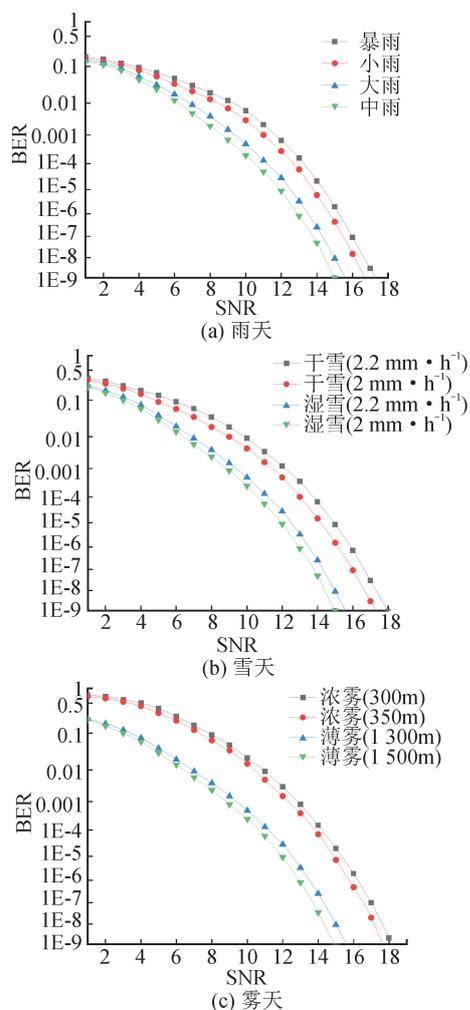


图 15 信噪比与误码率的关系

Fig. 15 Relationship between signal-to-noise ratio and bit error rate

图 15(a)、(b)、(c)分别表示在雨天、雪天、雾天这三种天气条件下进行的信噪比与误码率的分析。可以看出在不同降雨条件下信噪比相同时,中雨和大雨的误码率接近,并且暴雨和小雨的误码率比中雨和大雨大。由图 3 可知,在降雨衰减极值点的两端,虽然不同降雨强度下的衰减是大致相同的,但是在相同信噪比下暴雨的误码率比小雨大,暴雨天气条件下雨滴的前向散射最为严重,因此在相同信噪比下暴雨的误码率更大。同样,在相同信噪比下干雪的误码率比湿雪大,浓雾的误码率比薄雾大。在

相同信噪比下,信道的路径损耗越严重,接收到的信号误码率就越大。

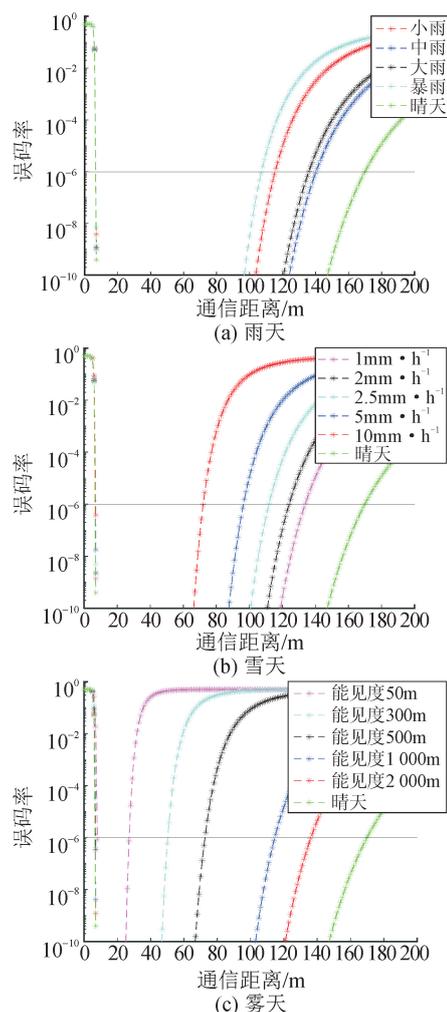


图 16 误码率与通信距离的关系

Fig. 16 Relationship between bit error rate and communication distance

图 16(a)、(b)、(c)分别表示在雨天、雪天、雾天这三种天气条件下进行的通信距离与误码率的分析。可以看出在不同天气条件下系统误码率都随通信距离的增加而增加。雨天条件下在系统误码率为 10^{-6} 时,室外可见光通信系统有效通信距离从小到大依次为:暴雨、小雨、大雨、中雨;雪天条件下在系统误码率为 10^{-6} 时,室外可见光通信系统有效通信距离随着降雪强度的增大逐渐减小;雾天条件下在系统误码率为 10^{-6} 时,室外可见光通信系统有效通信距离随着能见度的增大逐渐增大。

4 结论

本文建立了一个描述室外可见光通信信道路径损耗的统计模型。通过模拟与实验分析,得到以下结论。

1) 理论和实验分析发现,室外可见光路径损耗模型符合高斯模型,并研究了不同天气条件对模型的影响。

2) 从可见光在雨天、雾天、雪天的衰减情况可以看出,雨天对可见光的衰减从大到小依次为暴雨、小雨、大雨、中雨;雪天对可见光的衰减则是随着降雪强度的增大而增大的,降雪强度相同时,干雪比湿雪的衰减大;雾天对可见光的衰减是随着能见度的减小而增大的,浓雾比薄雾的衰减大。

3) 道路实验测量结果表明,发射端的发射光强经过雨天信道后,不同的降雨强度对其衰减影响不同,小雨和暴雨天接收的光功率概率密度函数的方差更大,也就是接收的光功率值更不稳定。不同的雾浓度对其衰减影响不同,浓雾天接收的光功率值更不稳定。干雪和湿雪对其衰减影响不同,干雪天接收的光功率值更不稳定。信道路径损耗越严重,接收到的光功率概率密度函数的方差越大,噪声数据样本的偏度和峰度也就越大,衰减小时,每组数据接收光功率均值大,衰减大时,每组数据接收光功率均值小。

参考文献:

- [1] 李征, 王沸钢, 梁静远, 等. LED可见光通信的研究进展[J]. 照明工程学报, 2023, 34(1): 29-40,44.
LI Zheng, WANG Feigang, LIANG Jingyuan, et al. The principle and research progress of LED visible light communication [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2023, 34(1): 29-40,44.
- [2] KARUNATILAKA D, ZAFAR F, KALAVALLY V, et al. LED based indoor visible light communications: state of the art[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [3] CĂILEANA M, DIMIAN M. Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2681-2703.
- [4] JAMALI M V, NABAHI P, SALEHI J A. MIMO underwater visible light communications: comprehensive channel study, performance analysis, and multiple-symbol detection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8223-8237.
- [5] COSSU G, KHALID A M, CHOUDHURY P, et al. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED [J]. Optics Express, 2012, 20(26): 501-506.
- [6] RAMIREZ-AGUILERA A M, LUNA-RIVERA J M, GUERRA V, et al. A review of indoor channel modeling techniques for visible light communications [C]. IEEE 10th Latin-American Conference on Communications, 2018, 5: 1-6.
- [7] MOHAMMED E, MEHDI K, FARSHAD M, et al. Effect of fog and rain on the performance of vehicular visible light communications[C]. Vehicular Technology Conference, Porto, Portugal, 2018, 7: 1-6.
- [8] ZAKI R W, FAYED H A, ABDEL A A, et al. Outdoor visible light communication in intelligent transportation systems: impact of snow and rain[J]. Applied Sciences. 2019, 9(24): 1-20.
- [9] ELDEEB H B, MIRAMIRKHANI F, UYSAL M. A path loss model for vehicle-to-vehicle visible light communications[C]. International Conference on Telecommunications, 2019, 10: 1-5.
- [10] ALSALAMI F M, AHMAD Z, ZVANOVEC S, et al. Statistical channel modelling of dynamic vehicular visible light communication system [J]. Vehicular Communications, 2021, 12(2): 100339.
- [11] 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): 1-9.
- [12] 柯熙政, 秦欢欢, 杨尚君, 等. 车联网可见光通信系统夜间背景光噪声模型[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 986-990.
KE Xizheng, QIN Huanhuan, YANG Shangjun, et al. Night background light noise model of visible light communication system in vehicle networking environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(6): 986-990.
- [13] LIU Jiang, PETER W C C, DERRICK W K, et al. Hybrid visible light communications in intelligent transportation systems with position based services [J]. IEEE Globecom Workshops, 2012, 12(5): 1254-1259.
- [14] 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/OL]. 电子学报:1-12 [2023-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2087.TN.20230303.0930.004.html>.
YIN Rongrong, SHEN Xingyue, ZHAO Pengcheng, et al. Optimization of 2×2 MIMO vehicular visible light communications model[J/OL]. Acta Electronica Sinica: 1-12 [2023-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2087.TN.20230303.0930.004.html>.
- [15] BÉCHADERGUE B, CHASSAGNE L, GUAN H. Simultaneous visible light communication and distance measurement based on the automotive lighting [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2019, 4

- (4): 532-547.
- [16] 陈牧, 柯熙政. QPSK 调制光通信中混合噪声的功率谱性能与误码率[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 313-318.
CHEN Mu, KE Xizheng. Power spectrum performance and bit error rate of mixed noise in QPSK modulated optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 313-318.
- [17] ISHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media[M]. New York: IEEE Press, 1978.
- [18] 柯熙政, 杨利红, 马冬冬. 激光信号在雨中的传输衰减[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1021-1024.
KE Xizheng, YANG Lihong, MA Dongdong. Transmitted attenuation of laser signal in rain[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 1021-1024.
- [19] KIM I I, MCARTHUR B, KOREVAAR E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001, 14(2): 26-37.
- [20] 张玲, 叶海炳, 何伟. 一种基于边缘信息的改进车辆检测方法[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(11): 56-58.
ZHANG Ling, YE Haibing, HE Wei. Improved vehicle detection algorithm based on edge information[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(11): 56-58.
- [21] 尹丽云, 李辰, 李红梅, 等. 滇中一次强降雨雪过程粒子谱特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 598-608.
YIN Liyun, LI Chen, LI Hongmei, et al. Analysis of characteristics of particle spectrum during the heavy rain-snow process in center of Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2017, 39(4): 589-608.
- [22] 张浩, 石春娥, 杨军, 等. 寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1217-1231.
ZHANG Hao, SHI Chun'e, YANG Jun, et al. Microphysical characteristics of fog with different intensities and their relationship with visibility in Shouxian County[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(6): 1217-1231.
- [23] 蒋瑜, 陈循, 陶俊勇, 等. 指定功率谱密度、偏斜度和峭度值下的非高斯随机过程数字模拟[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1127-1130.
JIANG Yu, CHEN Xun, TAO Junyong, et al. Numerically simulating non-gaussian random processes with specified PSD, skewness and kurtosis[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1127-1130.

(责任编辑 周 蓓)