

引用格式: ZHAO Tai-fei, MA Zhuang, LI Xing-shan, *et al.* Research on Line-of-sight Channel Model of Short-range LED Optical Communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0106001

赵太飞, 马壮, 李星善, 等. 近距离 LED 光通信直视信道模型研究[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 0106001

## 近距离 LED 光通信直视信道模型研究

赵太飞<sup>1,2</sup>, 马壮<sup>1</sup>, 李星善<sup>3</sup>, 梁浩<sup>1</sup>

(1 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710072)

(2 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 西安 710000)

(3 湖北航天技术研究院总体设计所, 武汉 430040)

**摘要:** 利用高斯拟合函数确定了小发散角 LED 的类高斯发光模式, 并根据光辐射特性和发光模式建立了 LED 直视信道模型. 实际测量了服从朗伯、类高斯发光模式的多种多波段 LED 的接收光功率与信道参数的关系. 实验结果表明, 接收光功率的实测值与信道直流增益计算的理论值的平均相对误差小于  $\pm 6\%$ , 该结果验证了本文提出的直视信道模型的正确性.

**关键词:** 光通信; 信道模型; 发光模式; 小发散角; 直流增益

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204901.0106001

## Research on Line-of-sight Channel Model of Short-range LED Optical Communication

ZHAO Tai-fei<sup>1,2</sup>, MA Zhuang<sup>1</sup>, LI Xing-shan<sup>3</sup>, LIANG Hao<sup>1</sup>

(1 Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710072, China)

(2 Shaanxi Civil-military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710000, China)

(3 System Research Institute of Hubei's Space Technology Academe, Wuhan 430040, China)

**Abstract:** Gauss fitting function is used to determine the Gauss-like radiation pattern of LED with small divergence angle, and the line-of-sight channel model of LED is established according to the optical radiation characteristics and radiation pattern. The relationship between the received optical power and the channel parameters of various multi-band LEDs obeying the Lambertian and Gauss-like modes is actually measured. The experimental results show that the average relative error between the measured value of received optical power and the theoretical value of channel DC gain calculation is less than  $\pm 6\%$ , which verifies the versatility and correctness of the line-of-sight channel model proposed in this paper.

**Key words:** Optical communication; Channel model; Radiation pattern; Small divergence angle; DC gain

**OCIS Codes:** 060.4510; 060.2605; 230.3240

## 0 引言

LED 光通信是一种以光波作为载波的无线通信方式, 拥有带宽大、无需申请频段、安全保密性好、节能环保等诸多优势, 因而具有重要的研究价值和广阔的应用前景. LED 光源也具有众多优点, 包括: 尺寸小、功耗低、寿命长、响应灵敏度快等, 但其一般具有较大的光束发散角, 辐射光功率比较分散, 且光的传播损耗十分

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61971345), 国家自然科学基金-中国民航局民航联合研究基金(No. U1433110), 陕西省重点产业链创新计划项目(No. 2017ZDCXL-GY-06-01), 陕西省教育厅科研计划项目(No. 17-JF024), 西安市碑林区科技计划项目(No. GX1921), 西安市科学计划项目(No. CXY1835(4))

第一作者: 赵太飞(1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为紫外光通信技术、路由技术、网络抗毁性技术、物联网技术等. Email: zhaotaifei@163.com

收稿日期: 2019-08-18; 录用日期: 2019-11-06

<http://www.photon.ac.cn>

严重,因此,目前关于 LED 光通信的应用集中在近距离场景内,例如:室内定位、手机通信、家庭物联网、智能工厂<sup>[1-4]</sup>等。

信道模型是通信系统设计和性能评估的基础.对于 LED 光通信来说,信道模型是设计室内光通信光源最优化布局的必不可少的理论依据,且信道模型对于 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技术的应用、信道容量的分析、信道均衡算法的设计等都是非常重要的理论参考,因此众多学者都对 LED 信道特性进行了研究.文献[5-6]描述了室内红外 LED 通信系统,分析了室内直视和混合直视信道的特征,给出了朗伯辐射模式下红外 LED 路径损耗和多径响应的信道模型.TANAKA Y 等建立了室内白光 LED 直视信道模型,通过数值仿真分析了信道模型中各参数与接收光功率之间的关系<sup>[7]</sup>.文献[8]对室内紫外、可见、红外等 LED 光通信的路径损耗进行了仿真建模和实验测量.文献[9-10]设计了使用 LED 作为收发器的双向 LED 通信系统,对双向信道的通信性能进行了实验分析.文献[11]研究了直视 LED 信道模型,主要分析了发射器、接收器参数对信道特性的影响,并对信道特性进行了实验验证.文献[12]以近距离 LED 信道模型为基础,结合大气衰减和频率响应的影响,建立了远距离 LED 信道模型,并对 BER、通信距离等进行了仿真分析和实验验证.文献[13-14]研究基于红、绿、蓝等多种单色 LED 的波分复用技术,通过单色 LED 多通道复合传输,将 LED 通信的速率提升至 Gbps 级别.MEMEDI A 等提出了汽车 LED 通信光路损耗模型,重点研究了 LED 辐射模式对通信性能的影响<sup>[15]</sup>.WANG jia 等研究了地下矿井可见光 LED 信道的衰落和散射特性,提出了一种基于递归模型的路径损耗信道模型,并仿真分析了直视和非直视情况下的路径损耗指数<sup>[16]</sup>.

上述文献都对 LED 信道进行了相关介绍,但其信道模型大部分是基于大发散角朗伯发光模式建立的.然而在许多实际应用场景中,例如辐射光功率较小的深紫外波段 LED 通信、功率受限的精密仪器内部 LED 通信、短距离工业设备间的 LED 通信等,为了增加通信距离或者改变辐照度等其他光辐射参数,使用的是具有小发散角的 LED.这些小发散角 LED 的发光模式没有明确给定,所以也无法对其信道特性进行准确建模.本文的主要工作是确定了小发散角 LED 的类高斯发光模式,研究了适用于朗伯、类高斯两种发光模式的通用 LED 直视信道模型,并通过实验验证了信道模型的正确性.

## 1 LED 光子辐射机理和光辐射特性

### 1.1 光子辐射机理

LED 芯片向四周自发辐射出光子,光子经过不同介质和不同类型的封装后,投射出 LED.由于芯片和封装的影响,使得 LED 向不同方向辐射出的光子数不同,从而使得不同方向的光强也不同.发光模式即是用来描述光源不同方向的光强度分布.

LED 发出的光通常可分为三部分:由封装透镜直接折射的光,在透镜内部反射的光,以及由反射杯反射的光.因此,发光模式很大程度上取决于反射杯、封装透镜的几何形状和材料.反射杯的漫反射光和封装透镜的漫折射光的相对强度通常可用高斯和余弦幂函数的线性叠加来描述.另一方面,芯片本身的辐射模式也是影响发光模式的主要因素,而 LED 芯片大都是朗伯型光源.综合考虑上述光子辐射机理,可以合理地认为 LED 的发光模式是余弦函数或者高斯函数的叠加<sup>[17-18]</sup>.

### 1.2 光学辐射特性

光学辐射特性主要包含辐射通量  $\Phi_e$ 、辐射强度  $I_e$ 、辐照度  $E_e$  等.辐射通量  $\Phi_e$  即为辐射光功率,辐射强度  $I_e$  表示光源在单位立体角  $d\Omega$  内发出的辐射通量,其表达式为

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1)$$

辐射强度的单位为  $W/sr$ (瓦/球面度).辐照度  $E_e$  表示单位面积内接收到的辐射通量

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (2)$$

辐照度的单位为  $W/m^2$  或者  $mW/cm^2$ .

当 LED 光束传输距离远大于 LED 本身尺寸时,LED 辐射模拟图如图 1 所示.

图 1 中, $L$  为 LED 光源到接收器中心的距离,当  $L^2$  远大于  $dS$  时, $dS$  可表示为  $dS = d\Omega \times L^2$ ,因此,辐照度  $E_e$  可通过辐照强度  $I_e$  求出

$$E_e = d\Phi_e / dS = \frac{d\Phi_e}{d\Omega \times L^2} = \frac{I_e}{L^2} \quad (3)$$

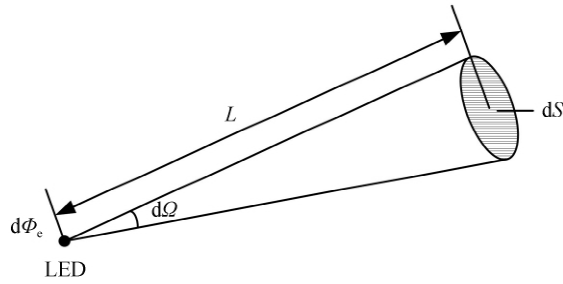


图 1 LED 光源辐射模拟图

Fig.1 Radiation simulation of LED source

## 2 直视信道模型

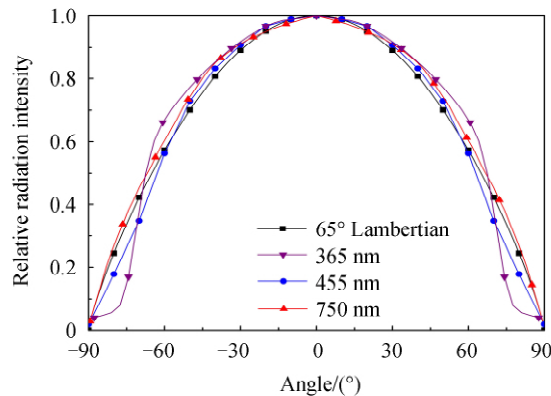
### 2.1 LED 发光模式分析

当前关于 LED 光通信的研究大部分集中在大发散角朗伯型 LED,当 LED 符合朗伯辐射定律时,其辐射强度可表示为

$$I_e(\varphi) = I_0 \cos^m \varphi \quad (4)$$

式中,  $I_0$  为 LED 中心法线辐射强度,  $\varphi$  表示光束辐射角即光束辐射方向与中心法线的夹角,  $m$  为朗伯辐射的阶数,与半功率角  $\Phi_{1/2}$  有关,可表示为  $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$ 。

LED 的发光模式可以用相对辐射强度分布图表示。相对辐射强度分布图中横坐标表示光束辐射角,即光束辐射方向与 LED 中心法线的夹角;纵坐标表示相对辐射强度,即辐射强度与 LED 中心辐射强度的相对比值。相对辐射强度分布图表示了 LED 辐射角度与辐射强度之间的关系。LG-XP3535 型 365 nm 紫外、Cree-XPE 型 455 nm 蓝色、光宏-XP3535 型 750 nm 红外三种 LED 的发光模式都标注为朗伯,视角为  $130^\circ$ (即半功率角为  $65^\circ$ )。图 2 显示了它们的实际相对辐射强度分布图与  $\Phi_{1/2}$  为  $65^\circ$  标准朗伯分布图之间的比较,图中曲线显示了良好的一致性,这说明朗伯发光模式与实际辐射模式的拟合程度非常高。

图 2 三种朗伯型 LED 实际辐射分布与  $65^\circ$  标准朗伯分布对比Fig.2 Comparison of real radiation distribution and  $65^\circ$  standard Lambertian distribution of three Lambertian LEDs

除了朗伯型 LED 外,还有很大一部分不符合朗伯发光模式的小发散角 LED,这些 LED 几乎没有受到研究人员的关注,而随着 LED 通信技术的发展,小发散角 LED 的应用范围会愈加广泛,使用频率也会愈加频繁,所以为了更加准确的理解 LED 通信的相关特性,需要对小发散角 LED 的发光模式进行研究。

以两种型号的小发散角 LED 为例,通过分析它们的相对辐射强度分布,确定小发散角 LED 的发光模式。LED 型号为 SETI-UVTOP255 型 255 nm 紫外 LED 和 Bioraytron-3535 型 280 nm 紫外 LED,其视角分别为  $7^\circ$  和  $30^\circ$ ,如果将它们默认为朗伯发光模式,则实际相对辐射分布与朗伯辐射分布的对比如图 3 所示。

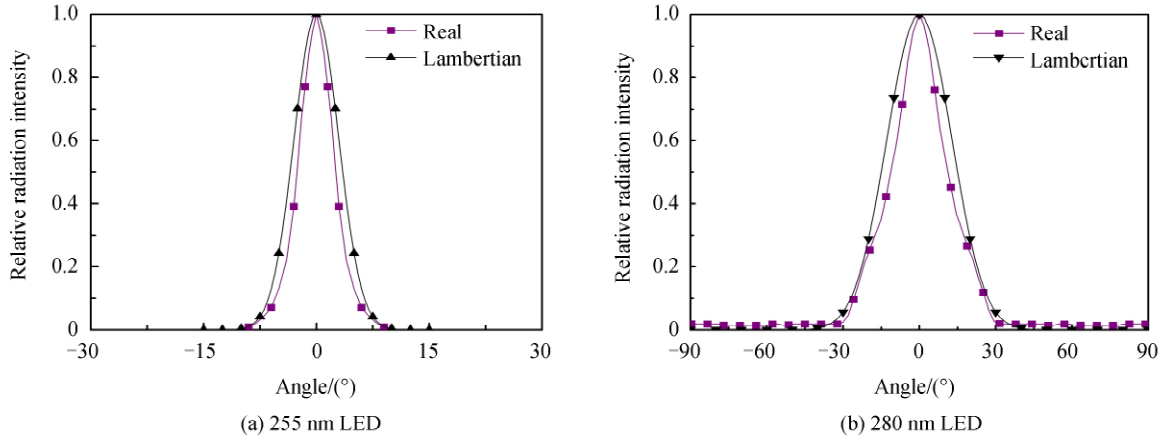


图3 255 nm、280 nm LED 实际相对辐射强度分布与朗伯辐射分布对比  
Fig.3 Comparison of real relative radiation intensity distribution and Lambertian radiation distribution of 255 nm, 280 nm LEDs

由图3可以看出,255 nm LED 和 280 nm LED 的实际相对辐射强度分布与朗伯辐射分布有很大差异,所以不能用朗伯定律描述它们的发光模式。

根据第二节 LED 光子辐射机理,本文使用高斯函数拟合上述两种 LED 的相对辐射强度分布函数  $R_i(\varphi)$ , 结果为

$$R_{I,255}(\varphi) = \sum_{i=1}^2 a_{i,255} \times \exp \left[ - \left( \frac{\varphi - b_{i,255}}{c_{i,255}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$R_{I,280}(\varphi) = \sum_{i=1}^6 a_{i,280} \times \exp \left[ - \left( \frac{\varphi - b_{i,280}}{c_{i,280}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中,

$$\begin{aligned} a_{i,255} &= [0.7769; 0.2053] \\ b_{i,255} &= [8.384 \times 10^{-10}; 1.257 \times 10^{-8}] \\ c_{i,255} &= [0.04912; 0.09551] \\ a_{i,280} &= [0.01794; 0.994; 0; -0.1204; 0.1596; 0.1161] \\ b_{i,280} &= [-0.04349; -0.01732; 0.1333; -0.1243; 0.3254; -0.3637] \\ c_{i,280} &= [2.605; 0.2264; 0.0003184; 0.08461; 0.1303; 0.09486] \end{aligned}$$

则实际相对辐射强度分布与高斯拟合分布对比如图4所示.由图4可以看出,使用高斯函数拟合的曲线与实际分布曲线几乎重合,说明两条曲线的相似度很高.函数拟合程度可用拟合优度表示,度量拟合优度的

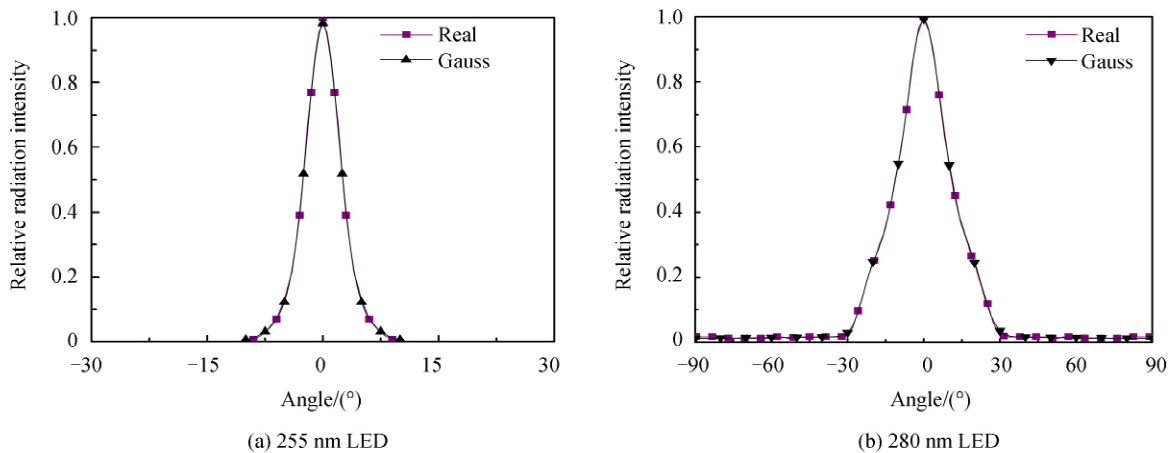


图4 255 nm、280 nm LED 实际相对辐射强度分布与高斯拟合分布对比

Fig.4 Comparison of real relative radiation intensity distribution and Gauss fitting distribution of 255 nm, 280 nm LEDs

统计量是可决系数(亦称确定系数) $R^2$ ,  $R^2$ 的取值范围为0~1,越接近1,拟合程度越好,上述高斯拟合函数的 $R^2$ 分别为0.9993和0.9997,均大于0.999,说明高斯函数对相对辐射强度分布的拟合效果非常好.

## 2.2 直视信道模型

LED光通信中通常使用强度调制/直接检测调制方式,该调制方式下的直视信道模型如图5所示.图中, $X(t)$ 表示LED的辐射光功率, $Y(t)$ 为光电二极管(Photo Diode, PD)输出的光电流,其中包含了传输过程中的各种加性高斯噪声 $N(t)$ ,则直视信道模型表示为

$$Y(t) = \eta X(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (7)$$

式中, $\eta$ 表示接收器的光电转换效率, $\otimes$ 表示卷积, $h(t)$ 表示信道的脉冲响应.

LED发射光功率为 $P_t$ ,则PD的接收光功率 $P_r$ 可通过式(8)求得.

$$P_r = P_t H(0) \quad (8)$$

式中, $H(0)$ 为信道直流增益,是直视信道一个非常重要的特征参数,表征了信道路径损耗,也表征了信道脉冲响应,因为直流增益 $H(0)$ 与脉冲响应 $h(t)$ 有关系<sup>[6]</sup>

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (9)$$

为了评估直流增益 $H(0)$ ,建立了如图5所示的信道模型.图5中, $\varphi$ 为LED光束辐射角, $\psi$ 为PD光束入射角, $D_d$ 为光束传输距离.PD的感光面积为 $A_R$ ,其有效感光面积 $A$ 可表示为 $A = A_R \cos \psi$ .

设相对辐射强度分布函数 $R_I(\varphi)$ ,则LED的辐射强度 $I_e(\varphi)$ 可表示为

$$I_e(\varphi) = I_0 R_I(\varphi) \quad (10)$$

由式(1)、(10),LED辐射光功率 $P_t$ 可表示为

$$P_t = \int_{\Omega} I_e(\varphi) d\Omega = I_0 \int_{\Omega} R_I(\varphi) d\Omega \quad (11)$$

式中, $\Omega$ 为发光立体角,与最大光束半角 $\theta_{1/2}$ 有关, $d\Omega$ 可表示为 $d\Omega = \sin \varphi d\varphi d\theta$ ,式(11)变成

$$P_t = I_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{1/2}} R_I(\varphi) \sin \varphi d\varphi d\theta = 2\pi I_0 \int_0^{\theta_{1/2}} R_I(\varphi) \sin \varphi d\varphi \quad (12)$$

通过式(12),求得LED中心辐射强度 $I_0$

$$I_0 = \frac{P_t}{2\pi \int_0^{\theta_{1/2}} R_I(\varphi) \sin \varphi d\varphi} \quad (13)$$

则辐射强度 $I_e(\varphi)$ 表示为

$$I_e(\varphi) = \frac{P_t}{2\pi \int_0^{\theta_{1/2}} R_I(\varphi) \sin \varphi d\varphi} R_I(\varphi) \quad (14)$$

当PD的有效感光面积 $A$ 满足 $D_d^2 \gg A$ 时<sup>[5]</sup>,PD处的辐照度 $E_e(\varphi)$ 可由辐射强度求出 $E_e(\varphi) = I_e(\varphi) / D_d^2$ ,则PD的接收光功率 $P_r$ 为

$$P_r = E_e(\varphi) A = \frac{I_e(\varphi) A}{D_d^2} = \frac{P_t A_R \cos \psi}{2\pi D_d^2 \int_0^{\theta_{1/2}} R_I(\varphi) \sin \varphi d\varphi} R_I(\varphi) \quad (15)$$

由式(15),求得直视信道直流增益 $H(0)$

$$H(0) = \frac{P_r}{P_t} = \frac{A_R \cos \psi}{2\pi D_d^2 \int_0^{\theta_{1/2}} R_I(\varphi) \sin \varphi d\varphi} R_I(\varphi) \quad (16)$$

当LED为朗伯发光模式时,因其通常具有大发散角,所以将最大光束半角 $\theta_{1/2}$ 设置为 $\pi/2$ .由式(4),得

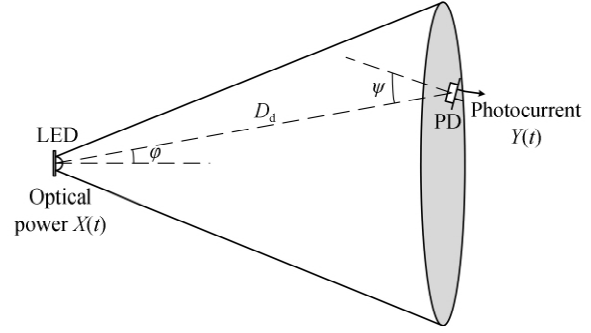


图5 LED光通信直视信道模型  
Fig.5 LED optical communication line-of-sight channel model

到 365 nm、455 nm、750 nm 三种朗伯型 LED 的相对辐射强度分布函数  $R_l(\varphi)$ ,  $R_l(\varphi) = \cos^{0.8048}(\varphi)$ , 将其代入式(16), 则朗伯型 LED 的直流增益  $H_L(0)$  为

$$H_L(0) = \frac{0.9024A_R \cos \psi}{\pi D_d^2} \cos^{0.8048}(\varphi) \quad (17)$$

当 LED 为类高斯发光模式时, 如 2.1 节介绍的 255 nm LED 和 280 nm LED, 根据实际相对辐射强度分布, 将它们的最大光束半角设置为  $\pi/18$  和  $\pi/4$ . 由式(5)、(6)得到  $R_{I,255}(\varphi)$  和  $R_{I,280}(\varphi)$  并代入式(16), 则类高斯型 255 nm LED 和 280 nm LED 的直流增益  $H_{G,255}(0)$ 、 $H_{G,280}(0)$  为

$$H_{G,255}(0) = \frac{267.118A_R \cos \psi}{\pi D_d^2} R_{I,255}(\varphi) \quad (18)$$

$$H_{G,280}(0) = \frac{10.251A_R \cos \psi}{\pi D_d^2} R_{I,280}(\varphi) \quad (19)$$

### 3 信道模型验证实验及结果分析

为了证明本文提出的信道模型的正确性, 对直视信道直流增益  $H(0)$  与各信道参数的关系进行实验验证. 利用  $H(0)$  可计算出 PD 接收光功率的理论值, 通过实验可得到接收光功率的实际测量值, 分析理论值和测量值的误差, 验证直视信道直流增益与距离、角度等各信道参数的关系, 继而证明信道模型的正确性.

#### 3.1 实验平台

构建了 LED 直视链路实验测量平台, 实验平台如图 6 所示, 实验平台采用激光实验中使用的专业光学导轨, LED 和光电二极管固定在光学支架上, 光学支架卡在光学导轨上, 通过滑动光学支架, 改变距离、角度等参数.



图 6 实验平台

Fig.6 Experiment platform

准备了包含紫外至红外的多波段的多 LED. LED 型号分别为: 255 nm 紫外 LED、280 nm 紫外 LED、365 nm 紫外 LED、455 nm 蓝色 LED、750 nm 红外 LED. 各 LED 参数如表 1 所示.

表 1 LED 主要参数

Table 1 Main parameters of LED

	Viewing angle/(°)	Radiation pattern	DC forward current/mA	Typical optical power/mW	Minimum optical power/mW
255 nm	7	Gauss-like	30	0.3	0.15
280 nm	30	Gauss-like	150	10	8
365 nm	65	Lambertian	700	700	600
455 nm	65	Lambertian	350	485	425
750 nm	65	Lambertian	700	700	600

因为采用了多波段 LED, 且发射光功率差异巨大, 所以为了方便准确的测量接收光功率, 准备了一款具有宽光谱、大感光面积的光电二极管, 型号为滨松 S1336-8BQ, 其参数如表 2 所示.

表 2 S1336-8BQ 型 PD 主要参数

Table 2 Main parameters of S1336-8BQ

Parameters	Value
Spectral response range/nm	190~1100
Photosensitive area size/mm <sup>2</sup>	33.64
Peak sensitivity wavelength/nm	950
Peak sensitivity/(A · W <sup>-1</sup> )	0.5
Dark current/pA	100

#### 3.2 实验结果及分析

由信道直流增益的表达式  $H(0)$  可知, 当 LED 和 PD 型号确定时, 距离  $D_d$ 、光束辐射角  $\varphi$  和光束入射角

$\psi$  对接收光功率有较大的影响,所以实验中主要测量了这三种信道参数与接收光功率的关系。

距离实验中,LED、PD 固定在同一光学导轨上,调节 LED 和 PD 角度,使  $\varphi=0^\circ$ 、 $\psi=0^\circ$ ,在这种情况下,移动 PD 并测量其接收光功率。

角度实验中,LED、PD 分别固定在相互垂直的两条光学导轨上,LED 平面与 PD 平面平行,即辐射角  $\varphi$  与入射角  $\psi$  相等,沿导轨平行移动 PD,改变  $\varphi$  和  $\psi$ ,继而测量角度与接收光功率的关系。

### 3.2.1 三种朗伯型 LED 的接收光功率与信道参数的关系

首先测量了 365 nm、455 nm 和 750 nm 三种 LED 接收光功率与距离的关系,结果如图 7 所示。

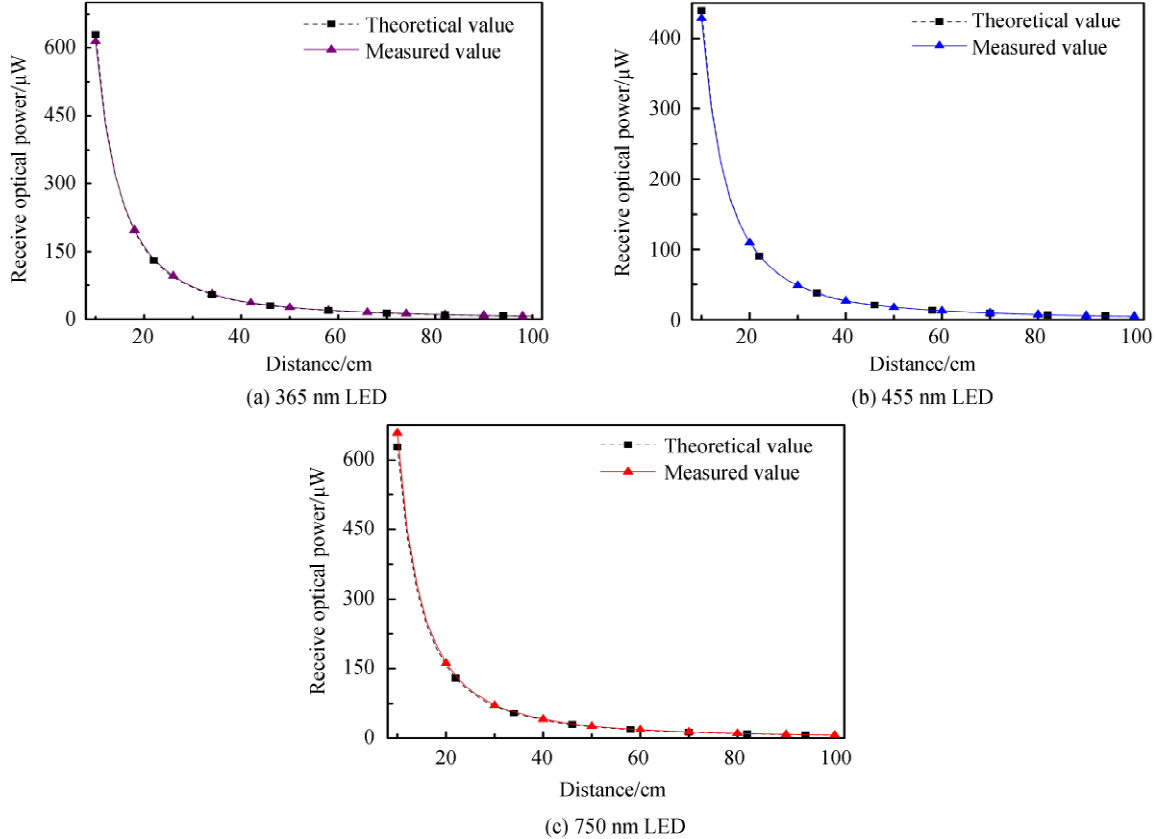


图 7 三种朗伯型 LED 接收光功率与距离的关系

Fig.7 The relationship between receive optical power and distance of three Lambertian-type LEDs

由图 7 可以看出,理论值曲线与测量值曲线几乎重合,说明误差非常小.为了对实验结果进行更加准确的分析,定义一个相对误差  $\delta_{op}$ ,其表达式为

$$\delta_{op} = \frac{V_T - V_M}{V_T} \times 100\% \quad (20)$$

式中,  $V_T$  表示利用信道直流增益计算出的接收光功率理论值,  $V_M$  表示实际测量值.相对误差与距离的关系如图 8 所示。

由图 8 可以看出,三种 LED 的相对误差均在  $\pm 10\%$  以内.分析图 8,得到 365 nm 的平均相对误差为  $-2.53\%$ ,455 nm 为  $0.63\%$ ,750 nm 为  $-4.68\%$ ,750 nm 的平均相对误差相比于前两种 LED 有所增大,原因可能为室内地面、墙面等对近紫外和可见光波段有强烈的吸收作用,对红外波段却有很好的漫反射作用<sup>[9]</sup>,红外波段的接收光功率不仅有 LED 直射光,还有来自其它反射面的漫反射光,这将导致测量值比理论值大,即相对误差为负值,这一点在图 8 中也有所体现。

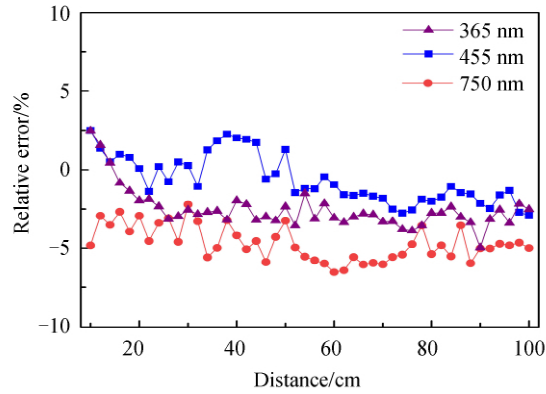
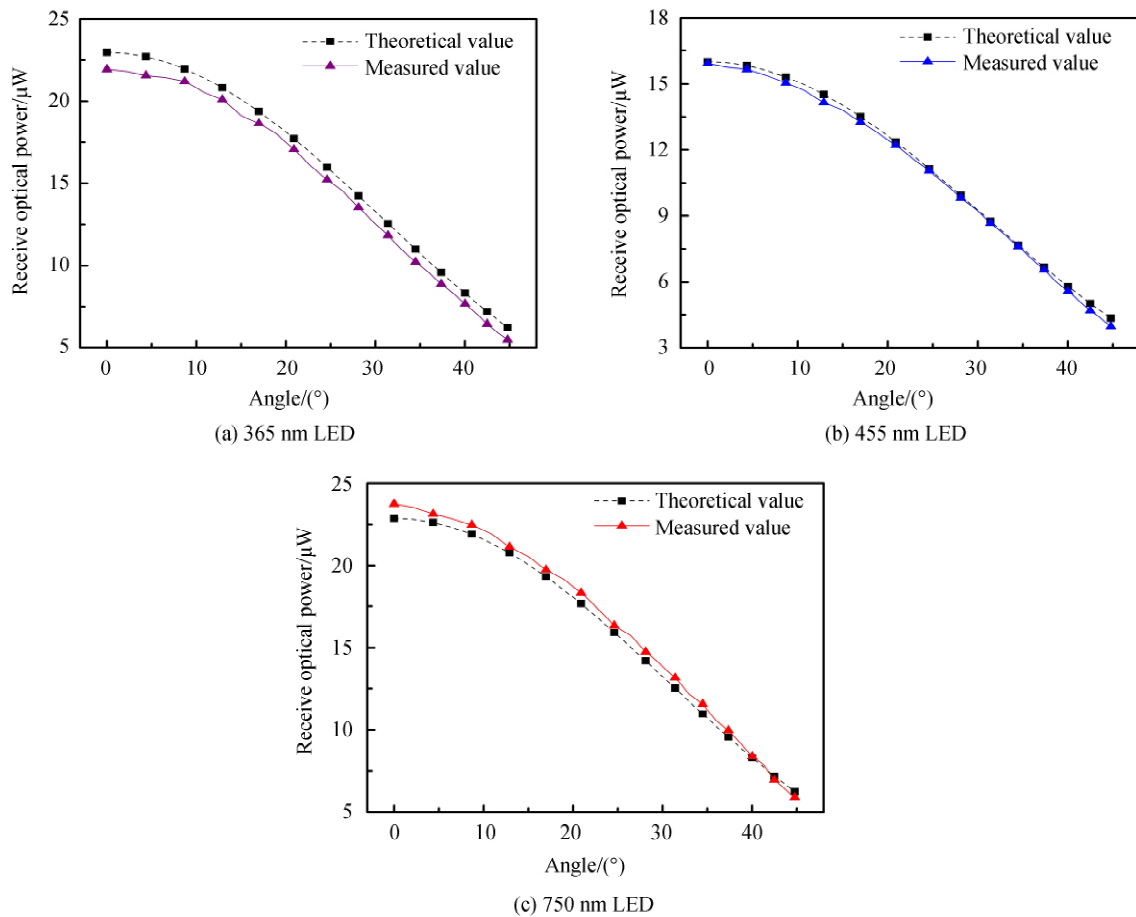


图 8 不同距离对应的相对误差

Fig.8 Relative error corresponding to different distances

接下来测量了辐射角  $\varphi$ 、入射角  $\psi$  与接收光功率的关系.实验结果如图 9 所示.

图 9 三种朗伯型 LED 接收光功率与  $\varphi, \psi$  的关系Fig.9 The relationship between receive optical power and  $\varphi, \psi$  of three Lambertian-type LEDs

相对误差与  $\varphi, \psi$  的关系如图 10 所示.

由图 9、10 可以看出,改变角度时,接收光功率的理论值与测量值之间的误差也非常小,这说明了直流增益  $H(0)$  与  $\varphi, \psi$  的关系的准确性.图 10 中 365 nm、455 nm、750 nm 的平均相对误差分别为 5.93%、2.28%、-2.39%,365 nm 的平均相对误差明显大于其它两种 LED,分析原因可能为实际辐射模式的影响.由 2.1 小节图 2 可以看出,相比于 455 nm 和 750 nm,365 nm LED 的实际辐射模式与标准朗伯辐射之间的差异最大,正是这一点,造成了角度实验中 365 nm 的平均相对误差最大.



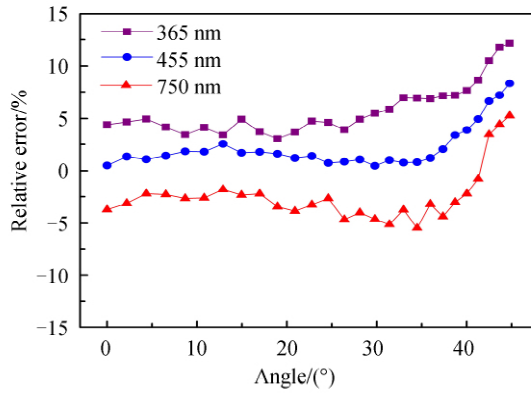


图 10 不同角度对应的相对误差  
Fig.10 Relative error corresponding to different angles

### 3.2.2 两种类高斯型 LED 的接收光功率与信道参数的关系

为了说明本文研究的信道模型对于类高斯型 LED 的准确性,对利用本文计算出的接收光功率和利用文献[19]中信道直流增益计算出的接收光功率进行对比分析.文献[19]模型是基于朗伯发光模式建立的,所以假设 255 nm、280 nm LED 服从朗伯发光模式,由式(5)、(6)计算出半功率角分别为  $2.6^\circ$  和  $11^\circ$ ,将利用文献[19]求出的理论值称为朗伯值,利用式(18)、(19)计算的理论值称为高斯值,则测量值、高斯值、朗伯值三者与距离的关系如图 11 所示.

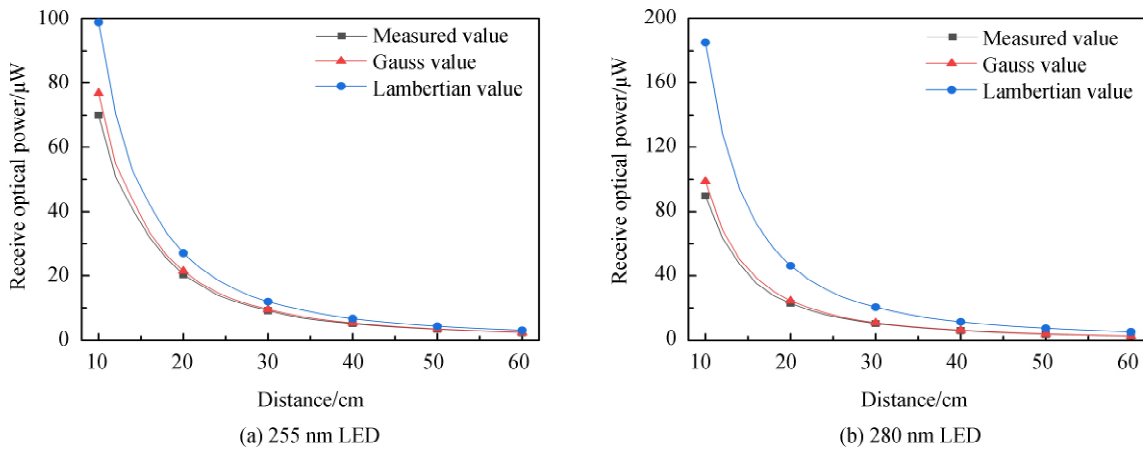


图 11 两种类高斯型 LED 接收光功率与距离的关系

Fig.11 The relationship between receive optical power and distance of two Gauss-like-type LEDs

距离实验中高斯值、朗伯值与测量值的相对误差对比如图 12 所示.

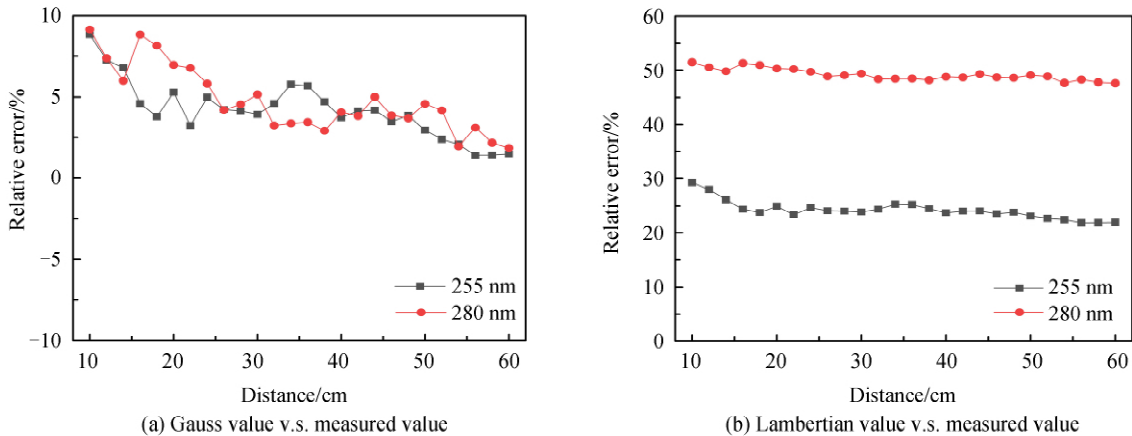


图 12 距离实验中高斯值、朗伯值与测量值的相对误差对比

Fig.12 Comparison of relative errors between Gauss value, Lambertian value and measured value in distance experiment

由图 11 可以看出,相比于文献[19],利用本文信道模型计算出的高斯值更接近实际测量值.图 12(a)中,255 nm、280 nm 的平均相对误差分别为 4.17%、4.78%;图 12(b)中,平均相对误差分别为 24.17%、49.13%.朗伯值与测量值的相对误差较大,说明文献[19]中的信道模型对于小发散角 LED 并不适用,而高斯值与测量值的相对误差小于 5%,说明本文所研究的直视信道模型非常符合实际信道情况.

两种类高斯型 LED 接收光功率与  $\varphi$ 、 $\psi$  的关系如图 13 所示.

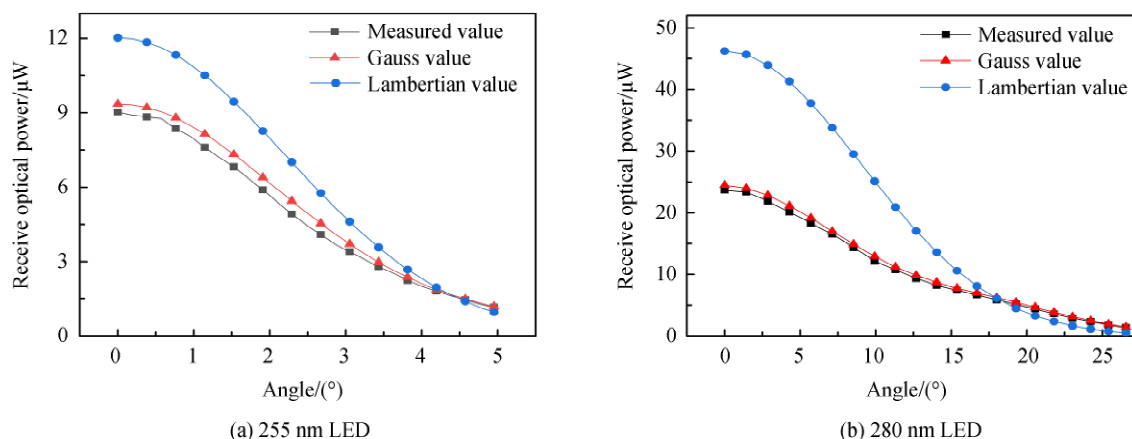


图 13 两种类高斯型 LED 接收光功率与  $\varphi$ 、 $\psi$  的关系

Fig.13 The relationship between receive optical power and  $\varphi$ 、 $\psi$  of two Gauss-like-type LEDs

两种类高斯型 LED 高斯相对误差、朗伯相对误差与角度  $\varphi$ 、 $\psi$  的关系如图 14 所示.

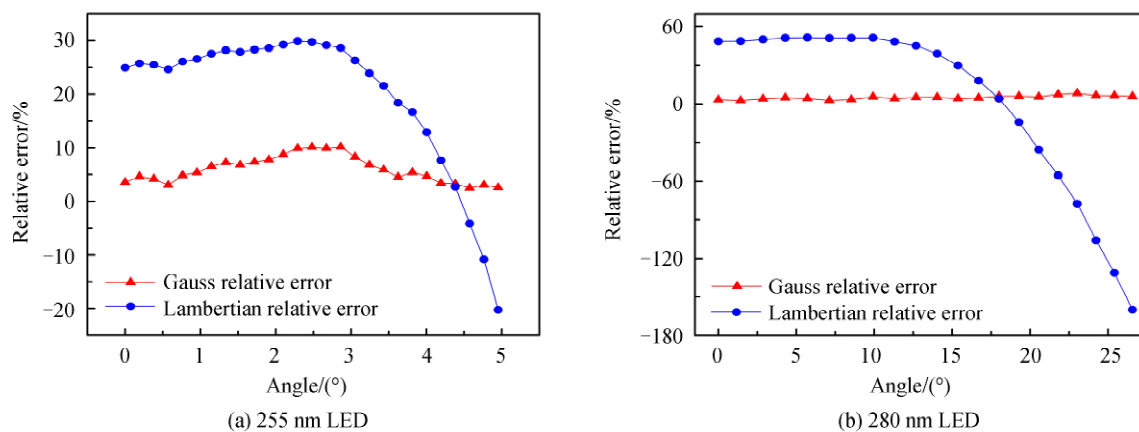


图 14 两种类高斯型 LED 高斯相对误差、朗伯相对误差与  $\varphi$ 、 $\psi$  的关系

Fig.14 The relationship between Gauss relative error, Lambertian relative error and  $\varphi$ 、 $\psi$  of two Gauss-like-type LEDs

由图 13、14 可以看出,255 nm、280 nm LED 接收光功率的测量值与利用文献[19]计算的朗伯值相差较大,其相对误差范围分别为  $-20.27\% \sim 29.93\%$ 、 $-160\% \sim 51.46\%$ ;而高斯值与测量值非常接近,其相对误差范围分别为  $2.49\% \sim 10.12\%$ 、 $2.82\% \sim 8.33\%$ ,且平均相对误差均小于 6%.角度实验结果表明,对于小发散角 LED 来说,本文的信道直流增益与辐射角、入射角的关系相比于文献[19]更为准确.

## 4 结论

本文研究了小发散角 LED 的发光模式和近距离 LED 直视信道模型.根据 LED 光子辐射机理,推导出小发散角 LED 的类高斯发光模式.拟合仿真结果表明,类高斯发光模式对于不同的小发散角 LED,其拟合确定系数均大于 0.999,具有较高的准确性.通过对 LED 光辐射特性和发光模式的分析,建立了近距离 LED 直视信道模型,并对多种 LED 的信道直流增益进行了实验验证.对于三种朗伯型 LED,距离和角度实验中接收光功率理论值与测量值的平均相对误差均小于  $\pm 6\%$ ;对于 255 nm、280 nm 两种类高斯型 LED,比较了本文与文献[19]信道模型的准确性.距离实验中,本文接收光功率的平均相对误差分别为 4.17%、4.78%,而利用

文献[19]中信道模型计算出的平均相对误差为 24.17%和 49.13%。角度实验中,本文的平均相对误差小于 6%,而利用文献[19]计算的理论与实际测量值差异较大,最大相对误差分别为 29.93%和 -160%。实验结果验证了本文所研究的信道模型的正确性。

#### 参考文献

- [1] WU N, FENG L H, YANG A Y. Localization accuracy improvement of a visible light positioning system based on the linear illumination of LED sources[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(5): 7905611.
- [2] CHEN S H, CHOW C W. Color-shift keying and code-division multiple-access transmission for RGB-LED visible light communications using mobile phone camera[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **6**(6): 7904106.
- [3] CHEN C W, WANG W C, WU J T, *et al.* Visible light communications for the implementation of internet-of-things[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(6): 060501.
- [4] CHANG S H. A visible light communication link protection mechanism for smart factory [C]. IEEE International Conference on Advanced Information Networking & Applications Workshops, IEEE, 2015: 15107148.
- [5] GFELLER F R, BAPST U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation[J]. *Proceeding of the IEEE*, 1979, **67**(11): 1474-1486.
- [6] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, **85**(2): 265-298.
- [7] TANAKA Y, HARUYAMA S, NAKAGAWA M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links[C]. 11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE, 2000: 6866645.
- [8] CUI K Y, CHEN G, HE Q F, *et al.* Indoor optical wireless communication by ultraviolet and visible light [C]. Proceedings of SPIE, 2009, **7464**: 74640D1.
- [9] LIS, PANDHARIPANDE A, WILLEMS F M J. Two-way visible light communication and illumination with LEDs[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, **65**(2): 740-750.
- [10] WU Meng-long, GUO Jia, LIU Wen-kai, *et al.* Scheme and implementation of bi-directional visible light communication system with LED as both optical transmitter and receiver elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(4): 0406003.  
武梦龙, 郭佳, 刘文楷, 等. LED 作为收发元件的双向可见光通信系统方案及实现[J]. *光学学报*, 2018, **38**(4): 0406003.
- [11] CUI K Y, CHEN G, XU Z Y, *et al.* Line-of-sight visible light communication system design and demonstration[C]. 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010), IEEE, 2010: 11535439.
- [12] CHEN Y C, WEN S S, WU Y X, *et al.* Long-range visible light communication system based on LED collimating lens [J]. *Optics Communications*, 2016, **377**: 83-88..
- [13] WANG Y G, TAO L, HUANG X X, *et al.* 8-Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(6): 7904507.
- [14] CHI N, ZHANG M J, ZHOU Y J, *et al.* 3.375-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing PAM-8 modulation with phase shifted Manchester coding[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(19): 21663-21673.
- [15] MEMEDI A, TSAI H M, DRESSLER F. Impact of realistic light radiation pattern on vehicular visible light communication[C]. GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference, IEEE, 2017: 17505871.
- [16] WANG J, AHMED A K, ZHANG W S, *et al.* A general channel model for visible light communications in underground mines[J]. *China Communications*, 2018, **15**(09): 95-105.
- [17] SCHUBERT E F, KIM J K, LUO H, *et al.* Solid-state lighting-a benevolent technology[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, **69**(12): 3069-3099.
- [18] MORENO I, SUN C C. Modeling the radiation pattern of LEDs[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(3): 1808-1819.
- [19] ZHAO Li, PENG Kai. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(7): 0706001.  
赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化[J]. *光学学报*, 2017, **37**(7): 0706001.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61971345), Natural Science Foundation of China-Civil Aviation Administration of China Joint Research Fund (No. U1433110), Shaanxi Key Industry Chain Innovation Project (No.2017ZDCXL-GY-06-01), Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (No.17-JF024), Xi'an Beilin Science and Technology Plan Projects (No. GX1921), Xi'an Science and Technology Plan Projects (No.CXY1835(4))