

## 可见光定位系统中发光二极管的空间波束效应分析

丁举鹏<sup>1\*</sup>, 易芝玲<sup>2</sup>, 王劲涛<sup>3</sup>, 阳辉<sup>3</sup>, 陈习锋<sup>1</sup>, 刘雯雯<sup>1</sup><sup>1</sup>新疆大学信息科学与工程学院信号检测与处理新疆维吾尔自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;<sup>2</sup>中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;<sup>3</sup>清华大学电子工程系北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084

**摘要** 在可见光定位系统中,接收端需要捕获来自不同参考光源的可见光信号,进而根据参考光源的位置信息和预设的可见光定位算法估计接收端的位置坐标。上述定位过程中,通常假设光源为朗伯型光源,即光源的光波束符合朗伯规律。为了实现特定照明效果,固态光源厂商经常通过改进分装工艺、加装二次光学透镜等方式对光波束进行再次塑造,以获得多样化的空间光波束。为了量化评估实际非朗伯光波束对可见光定位系统的影响,将 3 种商用非朗伯光波束 EdiPower Emitter、LUXEON Rebel、Side Emitter 引入典型室内场景。量化结果表明,相比传统朗伯光波束配置,非朗伯光波束引入的最大定位误差和均值定位误差分别为 101.7 cm 和 48.8 cm。考虑到商用非朗伯光波束辐射功率未归一化的影响,上述定位误差会进一步增大。

**关键词** 光通信; 可见光定位; 发光二极管; 朗伯波束; 非朗伯波束

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0523001

## Analysis of Light-Emitting Diodes Spatial Beam Effect in Visible Light Positioning System

Ding Jupeng<sup>1\*</sup>, I Chih-Lin<sup>2</sup>, Wang Jintao<sup>3</sup>, Yang Hui<sup>3</sup>, Chen Xifeng<sup>1</sup>, Liu Wenwen<sup>1</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Signal Detection and Processing in Xinjiang Uygur Autonomous Region,

College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

<sup>2</sup>China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China;<sup>3</sup>Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** In visible light positioning system, the receiver needs to capture the visible light signals from different reference optical sources, and then the position coordinates of the receiver are estimated based on the position information of the reference light source and the preset visible light positioning algorithm. In the above positioning process, it is usually assumed that the light source is a Lambertian light source, that is, the light beam of the light source conforms to the Lambertian law. In order to achieve specific lighting effects, solid-state light source manufacturers often reshape the light beams by improving the subassembly process and adding secondary optical lenses to obtain diversified spatial light beams. In order to quantify the impact of actual non-Lambertian beams on the visible light positioning system, three commercial non-Lambertian beams, EdiPower Emitter, LUXEON Rebel, and Side Emitter are introduced into typical indoor scenes. The quantitative results show that, compared with the traditional Lambertian beam configuration, the maximum positioning error and the average positioning error

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-09-28; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(62061043)、新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01C020)、新疆维吾尔自治区全职引进高层次创新人才项目(042419004)、新疆维吾尔自治区天池博士计划(04231200728)、新疆大学自然科学基金(62031224624)、新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2020G063)

\* E-mail: jupeng7778@163.com

introduced by the non-Lambertian beam are 101.7 cm and 48.8 cm, respectively. Taking into account the influence of the non-normalized radiation power of commercial non-Lambertian beams, the above positioning error will be further increased.

**Key words** optical communications; visible light positioning; light-emitting diodes; Lambertian beam; non-Lambertian beam

**OCIS codes** 060.2605; 230.3670; 220.4830

## 1 引言

由于室内场景中的穿墙损耗、多径传播等因素,全球定位系统(GPS)等室外定位技术难以为用户提供高分辨率的定位<sup>[1-2]</sup>。因此,基于可见光通信(VLC)技术的可见光定位(VLP)得到了广泛的研究<sup>[3-5]</sup>。VLP系统可以充分利用固态照明基础设施为用户提供室内位置信息,大幅降低系统的改造与建造成本;同时使用可见光波进行信息传递,具有可用频谱资源丰富、无需频谱使用授权以及排除现有射频信号干扰的优点<sup>[6-9]</sup>。Gu等<sup>[10-11]</sup>提出了一种基于接收光信号强度的三边定位算法,首先在接收端测量参考光源发出的光信号强度;然后计算出光源与接收端之间距离,并以该距离为半径围绕参考光源绘制圆环;最后对3个参考光源绘制距离圆环,圆环间彼此重叠且存在唯一的交点即为接收端的位置。赵楚韩等<sup>[12]</sup>提出了一种结合三角定位算法和指纹算法的混合定位算法,先用三角定位算法粗略地确定位置范围,然后通过指纹定位算法提升位置坐标的精度。

上述可见光定位研究工作中,通常假设光源为朗伯型光源,即光源的光波束符合朗伯规律<sup>[1-5]</sup>,原因是发光表面相对粗糙,原始发光二极管(LED)发出的光信号遵从朗伯辐射模式<sup>[13]</sup>。实际中在楼道、会场、办公室、展厅等室内场景中,为获得特定照明效果,国内外光源厂商会对LED进行封装、加装反射杯或定制光学透镜,以实现光波束的再次塑造,获得所需的波束特性,这类光波束并不遵从朗伯规律<sup>[14]</sup>。目前,非朗伯光波束对VLC系统的影响得到了广泛的关注与讨论<sup>[15-18]</sup>。人们尝试借助特定非朗伯光波束配置改善VLC系统的信干噪比(SINR)空间分布,Ding等<sup>[18]</sup>展示了均值约为12 dB的SINR增益。但关于非朗伯光波束对VLP系统影响的研究较少,因此,无法确定现有主流VLP系统对多光波束配置的适用程度。

针对上述问题,本文将3种典型非朗伯光波束引入VLP系统并进行量化分析。首先,给出典型朗伯及非朗伯空间波束的解析表达式;然后,根据接收

信号强度(RSS)VLP算法给出非朗伯波束配置下的定位误差;最后,通过数值仿真,量化给出了2种典型非朗伯光波束对VLP系统的影响。

## 2 基于LED光源的可见光定位系统

### 2.1 典型朗伯及非朗伯空间波束

辐射强度指在某一光出射方向单位立体角内光源发射的光功率,为了便于分析,在VLP系统的理论分析过程中,通常采用传统红外无线技术的处理方式,即将LED光源假设为朗伯型光源,其辐射强度可表示为<sup>[10,13,18-21]</sup>

$$I_L(\phi) = \frac{m_L + 1}{2\pi} \cos^{m_L}(\phi), \quad (1)$$

式中, $\phi$ 为光源发出光线的出射方向与光源法向的夹角,归一化系数 $(m_L + 1)/2\pi$ 可确保朗伯波束向空间各方向辐射的总功率为1 W, $m_L$ 为光波束的朗伯指数,可指示光源的方向性,与光源的半功率角 $\phi_{1/2}$ 有关,可表示为

$$m_L = -\frac{\ln 2}{\ln[\cos(\phi_{1/2})]}。 \quad (2)$$

图1为朗伯型LED的三维空间光波束及其应用的典型室内场景,图1(b)中的箭头指向光源发光表面的法向方向。

实际中为实现特定照明效果,固态光源厂商经常通过改进分装工艺、加装二次光学透镜等方式对光波束进行再次塑造,从而获得多样化空间光波束,这类光波束并不遵从朗伯规律。为了便于分析对比,将3种典型商用非朗伯光波束分别引入室内VLP场景中,包括Edison生产的EdiPower Emitter 3-RD-01-H0001(EdiPower Emitter),Lumileds Philips生产的LUXEON Rebel(LUXEON Rebel)以及Seoul Semiconductor生产的Z-Power Side Emitter(Side Emitter)。

部分商用光源的辐射特性虽然与传统朗伯模式有所差异,但仍然保留了类似的辐射特点。EdiPower Emitter LED光源便是其中的典型代表,其三维空间光波束如图2(a)所示,图2(b)为其典型的室内应用场景。EdiPower Emitter LED光源的

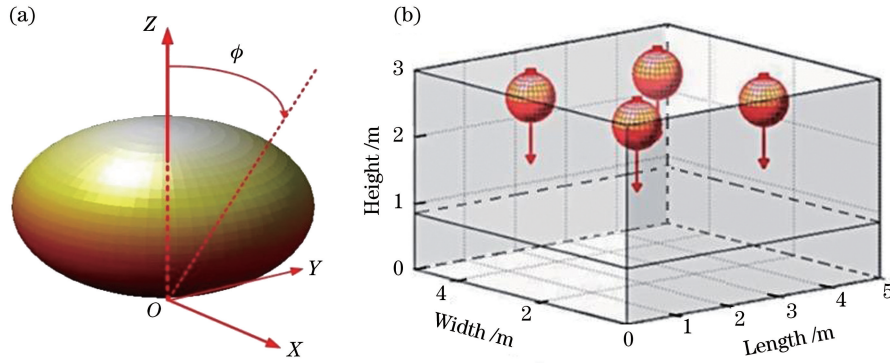


图 1 朗伯型 LED。(a) 三维空间光波束；(b) 应用的室内场景

Fig. 1 Lambertian LED. (a) Three-dimensional spatial light beam; (b) application indoor scene

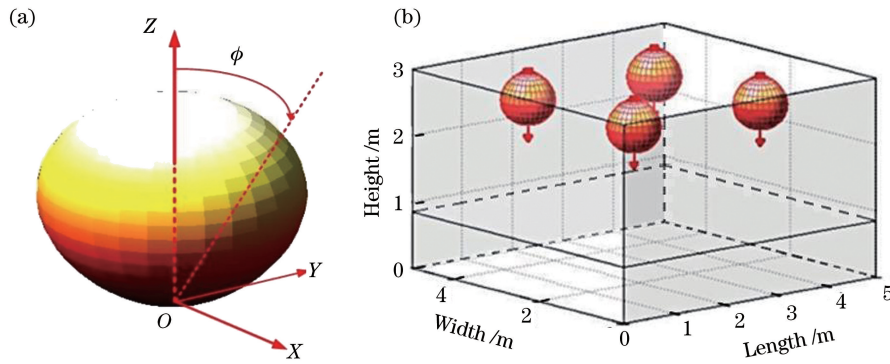


图 2 EdiPower Emitter 非朗伯型 LED。(a) 三维空间光波束；(b) 应用的室内场景

Fig. 2 EdiPower Emitter non-Lambertian LED. (a) Three-dimensional spatial light beam; (b) application indoor scene

光波束空间辐射强度可通过 2 个累加的高斯函数表示为<sup>[14]</sup>

$$I_{\text{EDI}}(\phi) = \sum_{j=1}^2 g_{1j}^{\text{EDI}} \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{|\phi| - g_{2j}^{\text{EDI}}}{g_{3j}^{\text{EDI}}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中, 高斯函数系数  $g_{11}^{\text{EDI}} = 0.381$ ,  $g_{21}^{\text{EDI}} = 47.1^\circ$ ,  $g_{31}^{\text{EDI}} = 26.2^\circ$ ;  $g_{12}^{\text{EDI}} = 0.944$ ,  $g_{22}^{\text{EDI}} = 0^\circ$ ,  $g_{32}^{\text{EDI}} = 38.5^\circ$ 。

与传统朗伯光波束及 EdiPower Emitter 非朗伯光波束不同, LUXEON Rebel LED 光源的最大

发光强度没有出现在光源的法线方向, 而是出现在与法线方向有一固定夹角的所有方向, 如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为其典型的室内应用场景。LUXEON Rebel LED 光波束的空间辐射强度也可以通过 2 个累加的高斯函数表示为<sup>[14]</sup>

$$I_{\text{LUX}}(\phi) = \sum_{j=1}^2 g_{1j}^{\text{LUX}} \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{|\phi| - g_{2j}^{\text{LUX}}}{g_{3j}^{\text{LUX}}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中, 高斯函数系数  $g_{11}^{\text{LUX}} = 0.76^\circ$ ,  $g_{21}^{\text{LUX}} = 0^\circ$ ,  $g_{31}^{\text{LUX}} =$

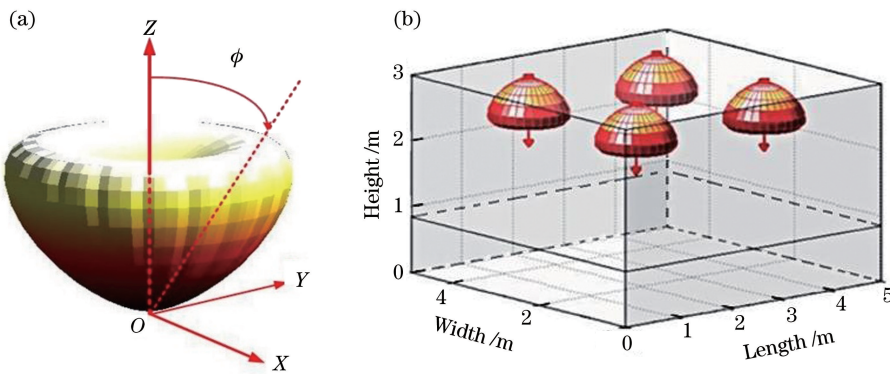


图 3 LUXEON Rebel 非朗伯型 LED。(a) 三维空间光波束；(b) 应用的室内场景

Fig. 3 LUXEON Rebel non-Lambertian LED. (a) Three-dimensional spatial light beam; (b) application indoor scene

$29^\circ, g_{12}^{LUX} = 1.10, g_{22}^{LUX} = 45^\circ, g_{32}^{LUX} = 21^\circ$ 。

为体现非朗伯光波束的多样性,将 Side Emitter LED 的光波束作为第 3 种典型非朗伯型光波束。该波束的辐射强度可根据 Z-Power Side Emitter 产品的实测数据拟合得到,可表示为<sup>[14]</sup>

$$I_{\text{Sid}}(\phi) = \sum_{j=1}^3 g_{1j}^{\text{Sid}} \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{|\phi| - g_{2j}^{\text{Sid}}}{g_{3j}^{\text{Sid}}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

式中,高斯函数系数  $g_{11}^{\text{Sid}} = 0.542, g_{21}^{\text{Sid}} = 22.75^\circ$ ,

$g_{31}^{\text{Sid}} = 49.96^\circ; g_{12}^{\text{Sid}} = 0.573, g_{22}^{\text{Sid}} = 77.84^\circ, g_{32}^{\text{Sid}} = 23.7^\circ; g_{13}^{\text{Sid}} = 0.279, g_{23}^{\text{Sid}} = 86.67^\circ, g_{33}^{\text{Sid}} = 8.43^\circ$ 。与传统朗伯光波束以及前 2 种非朗伯光波束不同,Side Emitter LED 光波束具备向周边方向发射光强度的特点,其最大的光发射方向与光源法线方向的夹角约为  $80^\circ$ ,该角度远大于前 3 种光波束对应的夹角。图 4 为 Side Emitter 非朗伯型 LED 的三维空间光波束及其典型的室内应用场景。

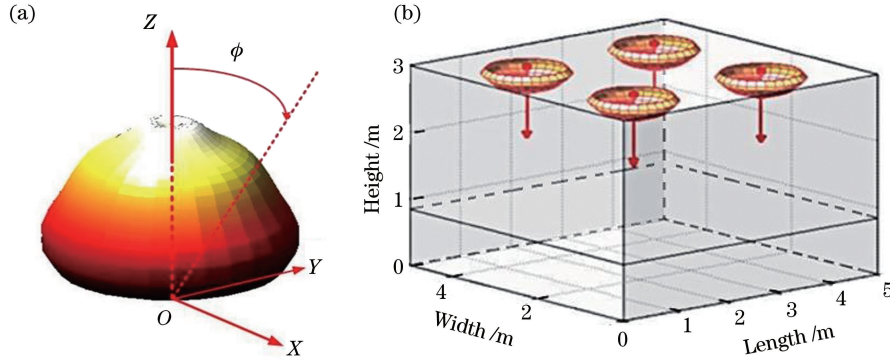


图 4 Side Emitter 非朗伯型 LED。(a)三维空间光波束;(b)应用的室内场景

Fig. 4 Side Emitter non-Lambertian LED. (a) Three-dimensional spatial light beam; (b) application indoor scene

## 2.2 可见光定位算法

为不失一般性,选用复杂度低、适用范围广的 RSS 算法作为 VLP 的基础算法,以评估典型非朗伯

空间光波束特性对 VLP 实际表现的影响。传统 RSS 算法中假设光源为传统朗伯光源,因此,接收端检测到来自第  $i$  个光源的平均光信号功率可表示为<sup>[13]</sup>

$$P_r^i = \begin{cases} \frac{A_R}{d_i^2} I_L(\phi) T_s(\theta) g(\theta) \cos(\theta) P_t, & 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{FOV}} \\ 0, & \theta \geq \theta_{\text{FOV}} \end{cases} = \begin{cases} \frac{m_L + 1}{2\pi d_i^2} A_R \cos^{m_L}(\phi) T_s(\theta) g(\theta) \cos(\theta) P_t, & 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{FOV}} \\ 0, & \theta \geq \theta_{\text{FOV}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中,  $A_R$  为接收器的光电二极管(PD)探测器面积,  $d_i$  为第  $i$  个光源与接收器之间的视距(LOS),  $\phi$  和  $\theta$  分别为 LOS 光信号的出射角及入射角,  $T_s(\theta)$  为光滤波片增益,  $g(\theta)$  为聚光器增益,  $P_t$  为平均光发射功率,  $\theta_{\text{FOV}}$  为接收器的视场角(FOV)。为便于分析,假设接收器保持水平,且空间指向竖直向上,根据空间几何关系可知,光信号的出射角与入射角相等,即  $\phi = \theta$ 。同时,在接收器与光源各自距离地面高度保持不变且已知的条件下,如果接收器第  $i$  个光源的平均光信号功率不为 0,则接收器与光源的间距可表示为<sup>[10,13]</sup>

$$d_i = \sqrt{\frac{(m_L + 3)}{2\pi P_r^i} (m_L + 1) A_R T_s(\theta) g(\theta) P_t h^{(m_L + 1)}}, \quad (7)$$

式中,  $h$  为光源与接收器之间的垂直距离。接收器

与第  $i$  个光源的水平间距可表示为

$$r_i = \sqrt{d_i^2 - h^2} = \left[ \frac{(m_L + 3)}{2\pi P_r^i} \sqrt{(m_L + 1) A_R T_s(\theta) g(\theta) P_t h^{(m_L + 1)}} - h^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

根据接收器坐标  $(x, y)$  与各个光源的水平几何间距,可构造方程组

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ \vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = r_n^2 \end{cases}, \quad (9)$$

式中,  $n$  为 RSS 算法定位涉及的参考光源数量,  $x_n$  与  $y_n$  为第  $n$  个光源的二维坐标。为便于求解,将(8)式中首个方程与其他方程的等式两边对应相减,

得到

$$\begin{cases} (x_1 - x_2)x + (y_1 - y_2)y = \\ (r_2^2 - r_1^2 - x_2^2 + x_1^2 - y_2^2 + y_1^2)/2 \\ \vdots \\ (x_1 - x_n)x + (y_1 - y_n)y = \\ (r_n^2 - r_1^2 - x_n^2 + x_1^2 - y_n^2 + y_1^2)/2 \end{cases}, \quad (10)$$

将(10)式表示为矩阵的形式<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}, \quad (11)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_2^2) + (x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2) \\ \vdots \\ (r_1^2 - r_n^2) + (x_n^2 + y_n^2) - (x_1^2 + y_1^2) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{X} = [x \quad y]^T. \quad (14)$$

通过求解伪逆矩阵,获得  $\mathbf{X}$  的线性估计  $\hat{\mathbf{X}}$  为

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}, \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{A}^T$  为  $\mathbf{A}$  的转置矩阵,  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  为  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  的逆矩阵。

### 2.3 可见光定位算法

传统基于朗伯光源的 VLP 系统中,接收端检测到来自第  $i$  个朗伯光源平均光信号功率的同时,也会捕获到对应的光噪声信号,从而影响最终 VLP 系统的定位精度。实际接收端检测的光信号可表示为

$$P_r^i = P_L^i + n_r^i, \quad (16)$$

式中,  $P_L^i$  为第  $i$  个光源的平均光定位信号功率,  $n_r^i$  为伴随  $P_L^i$  接收到的光噪声功率。VLP 系统中的噪声分量主要包括散粒噪声和热噪声两部分,整体噪声的方差可表示为<sup>[13]</sup>

$$N = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2, \quad (17)$$

式中,  $\sigma_{\text{thermal}}^2$  为接收器热噪声的方差,  $\sigma_{\text{shot}}^2$  为散粒噪声的方差,可表示为<sup>[13]</sup>

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2q\gamma P_{\text{rec}} B + 2qI_{\text{bg}} I_2 B, \quad (18)$$

式中,  $q$  为电子电荷,  $\gamma$  为接收器的响应度,  $P_{\text{rec}}$  为接收到的 LED 光源的光功率,  $B$  为等效噪声带宽,  $I_{\text{bg}}$  为背景噪声电流,  $I_2$  为噪声带宽因子。接收器热噪声的方差可表示为<sup>[13]</sup>

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

式中,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T_k$  为绝对温度,  $G$  为开环

电压增益,  $\eta$  为 PD 单位面积的固定电容,  $A$  为接收器的 PD 探测器面积,  $I_3$  为热噪声因子,  $\Gamma$  为场效应管(FET)信道噪声因子,  $g_m$  为 FET 跨导。实验涉及的主要噪声参数如表 1 所示<sup>[10,13,15]</sup>。

表 1 主要噪声参数

Table 1 Main noise parameters

Parameter	Value
Boltzmanns constant $k$	$1.38 \times 10^{-23}$
Electric charge $q$	$1.6022 \times 10^{-19}$
Fixed capacitance of photo detector per unit area $\eta$ / (pF · cm <sup>-2</sup> )	112
Photo detector responsivity $\gamma$ / (A · W <sup>-1</sup> )	0.54
Noise bandwidth factor $I_2$	0.562
Absolute temperature $T_k$ /K	295
Open loop voltage gain $G$	10
FET channel noise factor $\Gamma$	1.5
FET trans-conductance $g_m$ /ms	30
Background noise current $I_{\text{bg}}$ /μA	5100
Thermal noise factor $I_3$	0.0868

在 VLP 系统中,最终定位的准确性不仅会受到噪声的影响,也会受到实际光源空间波束特性的影响。当光源为非朗伯光波束配置时,接收端检测到包含噪声的第  $i$  个参考光源定位光信号功率为

$$P_r^i = P_{\text{non-L}}^i + n_r^i, \quad (20)$$

式中,  $P_{\text{non-L}}^i$  为接收的第  $i$  个非朗伯型参考光源的光信号功率,可表示为<sup>[15]</sup>

$$P_{\text{non-L}}^i = \begin{cases} \frac{A_R}{d_i^2} I_{\text{non-L}}(\phi) T_s(\theta) g(\theta) \cos(\theta) P_L, & 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{FOV}} \\ 0, & \theta \geq \theta_{\text{FOV}} \end{cases}. \quad (21)$$

从(21)式可以发现,相比传统朗伯波束,在不同非朗伯光波束下,同一接收位置接收到的光信号功率很可能有明显差异。但接收端依然遵循 RSS 算法设定的朗伯规律,即依据(7)式估计收发端的位置会出现距离估计偏差并影响最终定位的准确性。

### 3 数值仿真与结果分析

为了量化对比不同非朗伯光波束对 VLP 系统的影响,在同一典型室内场下,对 4 种光源波束配置下 VLP 系统的仿真结果进行对比。VLP 系统量化分析涉及的主要参数如表 2 所示<sup>[10,13,15]</sup>。

与文献[13]中典型场景一致,实验使用的室内 VLP 场景为中等尺寸,长、宽、高分别为 5 m、5 m、3 m,接收位置全部被设定在距离地面为 0.85 m 的

表 2 VLP 系统的主要参数

Table 2 Main parameters of the VLP system

Parameter	Value
Scenario room length, with, height /m	5,5,3
LED source arrays Lambertian index $m_L$	1
1st LED source arrays spatial coordinate	(1.25,3.75,3)
2nd LED source arrays spatial coordinate	(3.75,3.75,3)
3rd LED source arrays spatial coordinate	(1.25,1.25,3)
4th LED source array spatial coordinate	(3.75,1.25,3)
LED source arrays elevation angle /( $^\circ$ )	-180
LED source arrays azimuth angle /( $^\circ$ )	180
Receiver elevation angle /( $^\circ$ )	0
Receiver height /m	0.85
Receiver azimuth angle /( $^\circ$ )	180
Receiver field of view $\theta_{FOV}$ /( $^\circ$ )	70
PD detector area $A_R$ / $\text{cm}^2$	1
Optical filter gain $T_s$	1
Optical concentrator gain $g$	2.5481
Transmitted optical power $P_t$ /W	4

虚设接收平面上,与图 1(b)中的场景一致。假设所有发射器的法向方向都垂直指向地面;接收平面上,接收器法向方向均垂直向上。当光源为传统朗伯光波束时,VLP 系统的定位结果仅受接收端检测的光噪声影响。图 5 为传统朗伯光波束配置下的定位误差空间分布,可以看出,此时定位误差由随机噪声主导,呈现出随机波动的特点;同时,最大定位误差出现在房间的角落区域,原因是房间角落距离定位参考光源较远,接收到的光信号相对较少。由于光源波束配置与 VLP 定位算法中假设的光源波束相匹配,此时,VLP 系统能获得令人满意的定位表现。接收平面上,定位误差的最大值、平均值分别为 1.50 cm、0.24 cm。图 6 为传统朗伯光波束配置下定位误差的累积分布函数(CDF),可以发现,超过 80%的接收位置定位误差小于 0.5 cm。

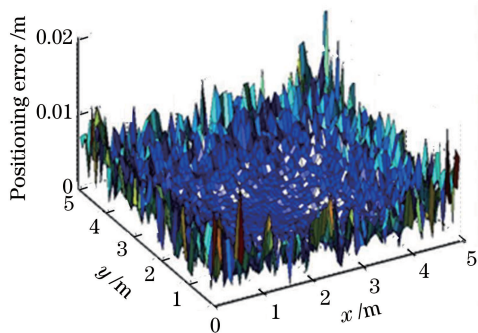


图 5 传统朗伯光波束的定位误差空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the positioning error of the traditional Lambertian beam

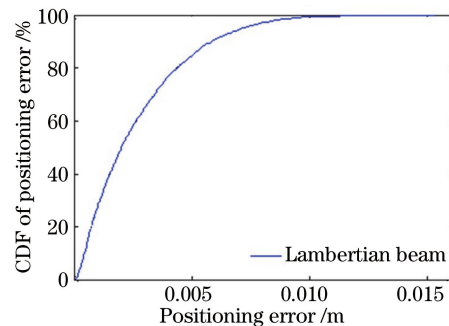


图 6 传统朗伯光波束的定位误差 CDF

Fig. 6 Positioning error CDF of the traditional Lambertian beam

使用 EdiPower Emitter 非朗伯光波束时,光源波束配置与 VLP 定位算法中假设的光源波束不匹配,此时,VLP 系统的定位精度有明显下降。图 7 为 EdiPower Emitter 非朗伯光波束下的定位误差空间分布,可以发现,图 7、图 5 中的定位误差空间分布有一定的相似性,最大定位误差同样出现在房间的角落区域。原因是 EdiPower Emitter 非朗伯光波束与传统朗伯光波束有较高的相似度。但此时的定位误差不再由接收信号的噪声主导,而是由 EdiPower Emitter 非朗伯光波束不匹配主导,因此呈现出比较连续的空间分布。此时定位误差的最大值、平均值、最小值分别为 14.37 cm、3.62 cm 和 0.14 cm。实际上,基于商用光源的 EdiPower Emitter 非朗伯光波束在空间中辐射的全部光功率并没有天然归一化,因此会引入平均发射功率偏差。为了在相同发射功率下进行对比,图 7 中的结果已经进行了归一化操作,消除了由非朗伯波束引入的发射功率偏差。图 8 为定位误差的 CDF,可以看出,归一化操作对于提升定位误差分析的准确性有显著影响,带来的平均定位误差修正幅度约为 80.69 cm。

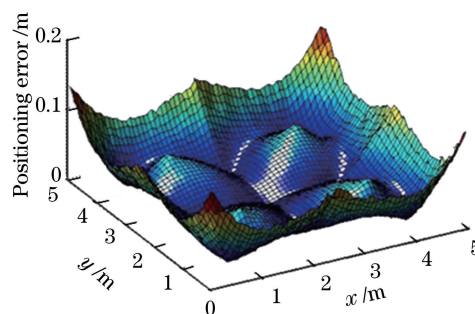


图 7 EdiPower Emitter 非朗伯光波束的定位误差空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the positioning error of the EdiPower Emitter non-Lambertian beam

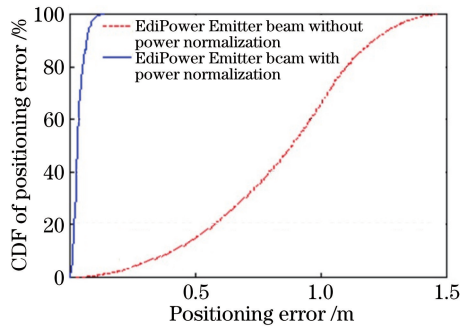


图 8 EdiPower Emitter 非朗伯光波束的定位误差 CDF  
Fig. 8 Positioning error CDF of the EdiPower Emitter non-Lambertian beam

在 LUXEON Rebel 非朗伯光波束配置下定位精度同样由实际光源波束特性主导,不同的是最大定位误差出现在光源的正下方区域,如图 9 所示(已进行归一化处理)。原因是 LUXEON Rebel 的最大光强度方向明显偏离光源的法向方向;当接收端在光源正下方即光源法向指向的区域时,能接收到的光功率远低于传统朗伯配置下接收到的光功率。此时,接收平面上定位误差的最大值、平均值、最小值分别为 77.00 cm、49.00 cm 和 2.20 cm。相比朗伯光波束,LUXEON Rebel 非朗伯光波束配置引入的最大定位误差及均值定位误差分别为 75.50 cm 和 48.80 cm。图 10 为定位误差的 CDF,可以看出,归一化操作带来的平均定位误差修正幅度约为 74.29 cm。

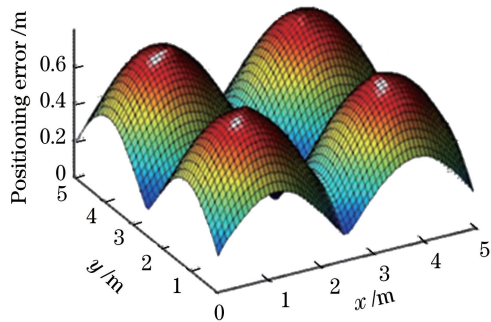


图 9 LUXEON Rebel 非朗伯光波束的定位误差空间分布  
Fig. 9 Spatial distribution of the positioning error of the LUXEON Rebel non-Lambertian beam

Side Emitter 非朗伯光波束对 VLP 系统定位误差的影响大于前 2 种非朗伯光波束,其定位误差的空间分布如图 11 所示(已进行归一化处理)。此时,接收平面上定位误差的最大值、平均值、最小值分别为 103.20 cm、38.60 cm 和 0.66 cm。相比朗伯光波束配置,Side Emitter 非朗伯光波束配置引入的最大定位误差及均值定位误差分别为

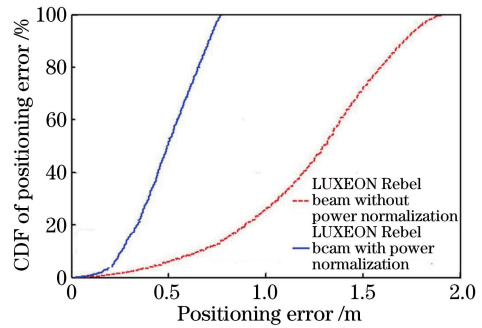


图 10 LUXEON Rebel 非朗伯光波束的定位误差 CDF  
Fig. 10 Positioning error CDF of the LUXEON Rebel non-Lambertian beam

101.70 cm 和 38.36 cm,原因依旧是 Side Emitter 非朗伯光波束与传统朗伯光波束空间辐射特性的差异。图 12 为定位误差的 CDF,可以看出,归一化操作带来的平均定位误差修正幅度约为 82.00 cm。

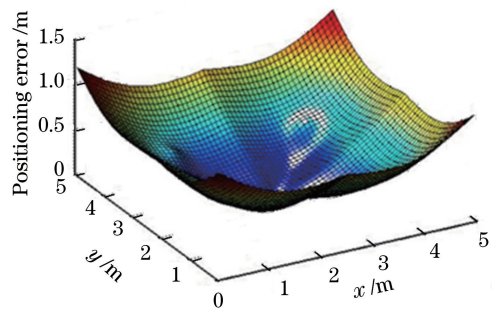


图 11 Side Emitter 非朗伯光波束的定位误差空间分布  
Fig. 11 Spatial distribution of the positioning error of the Side Emitter non-Lambertian beam

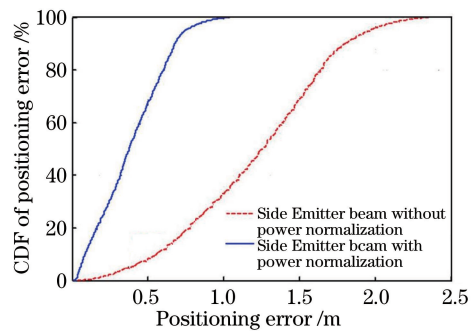


图 12 Side Emitter 非朗伯光波束的定位误差 CDF  
Fig. 12 Positioning error CDF of the Side Emitter non-Lambertian beam

上述定位误差均是基于线性定位方案,为初步提升可见光定位对不同空间光波束的适用性,进一步将非线性位置估计引入可见光定位方案。非线性估计的基本思想是通过寻找非线性估计定位坐标  $\tilde{\mathbf{X}} = [\tilde{x}, \tilde{y}]$ ,该坐标可实现定位误差平方和  $\tilde{S}$  的最小化,可表示为<sup>[10,19]</sup>

$$\bar{S} = \sum_i [F(x, y; x_i, y_i) - r_i]^2, \quad (22)$$

式中,  $F(x, y; x_i, y_i) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$  为候选定位坐标与第  $i$  个参考光源在水平面上的投影距离。通过迭代过程估计  $\bar{\mathbf{X}} = [\bar{x}, \bar{y}]$ , 首先, 通过线性估计方案将位置估计初始化为  $\bar{\mathbf{X}}_0 = [\bar{x}_0, \bar{y}_0]$ , 并计算其对应的  $\bar{S}_0$ 。然后, 在  $\bar{\mathbf{X}}_0$  周围随机选择几个邻近位置, 并将其中能够实现  $\bar{S}_1$  最小化的位置选定为一次迭代后的更新位置  $\bar{\mathbf{X}}_1$  [10, 22]。多次迭代  $\bar{S}$  完成收敛, 接收器位置的非线性估计最终更新为  $\bar{\mathbf{X}}$ 。将上述非线性位置估计方案引入 3 种非朗伯空间光波束场景, 可以不同程度地减小定位误差, 如图 13 所示, 插图为线性及非线性定位方案定位误差的局部放大图。可以发现, 相比线性估计方案, 对于 EdiPower Emitter 非朗伯光波束, 非线性估计方案引入的绝对定位误差增益相对有限, 定位误差减小了 0.94 cm (25.4%)。LUXEON Rebel 与 Side Emitter 非朗伯光波束对应的定位误差分别减小了 15.35 cm (31.0%) 和 10.90 cm (39.4%)。

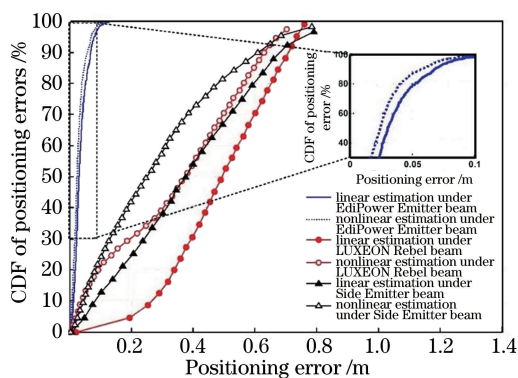


图 13 线性及非线性位置估计下定位误差 CDF  
Fig. 13 Positioning error CDF under linear and nonlinear position estimation

## 4 结 论

为评估 LED 空间波束效应对 VLP 系统定位精度的影响, 将 3 种典型的商用非朗伯光源光波束引入 VLP 系统模型。量化结果表明, 在典型中等尺寸室内场景中, LUXEON Rebel 光波束引入的定位误差为 2.20~77.00 cm, Side Emitter 光波束的定位误差为 0.66~103.20 cm。相比传统朗伯光波束, LUXEON Rebel 光波束引入的平均定位误差为 48.8 cm, Side Emitter 光波束引入的平均定位误差为 38.4 cm。为提升 VLP 系统对实际各类 LED 光源配置的实用性, 必须综合考虑光源波束的多样性,

借助非线性位置估计, 可以缓解非朗伯光波束对定位精度的负面效应, 对于 EdiPower Emitter 光波束、LUXEON Rebel 光波束与 Side Emitter 光波束, 非线性位置可以分别引入 25.4%、31.0% 及 39.4% 的定位误差增益幅度。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X F, Wang M, Wang J. Research status and development of indoor positioning based on visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100001.  
张晓锋, 王敏, 王瑾. 基于可见光通信室内定位的研究现状与发展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100001.
- [2] 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.
- [3] Luo J H, Fan L Y, Li H S. Indoor positioning systems based on visible light communication: state of the art [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2871-2893.
- [4] Lam E W, Little T D C. Visible light positioning: moving from 2D planes to 3D spaces [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(3): 030604.
- [5] 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.
- [6] Song J, Ding W B, Yang F, et al. An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2015, 61(2): 299-308.
- [7] Song J, Liu S C, Zhou G X, et al. A cost-effective approach for ubiquitous broadband access based on hybrid PLC-VLC system [C] // 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 22-25, 2016, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2016: 2815-2818.
- [8] Ding W B, Yang F, Yang H, et al. A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications [J]. *Computers in Industry*, 2015, 68: 170-178.
- [9] Ma X, Gao J N, Yang F, et al. Integrated power line and visible light communication system compatible with multi-service transmission [J]. *IET Communications*, 2017, 11(1): 104-111.
- [10] Gu W J, Aminikashani M, Deng P, et al. Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems [J]. *Journal of*



- Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2578-2587.
- [11] Zhou Z, Kavehrad M, Deng P. Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications[J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 085009.
- [12] Zhao C H, Zhang H M, Song J. Fingerprint based visible light indoor localization method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0806002.  
赵楚韩, 张洪明, 宋健. 基于指纹的室内可见光定位方法[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0806002.
- [13] 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.
- [14] Moreno I, Sun C C. Modeling the radiation pattern of LEDs[J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1808-1819.
- [15] Ding J P, I C L, Xu Z Y. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-15.
- [16] Ding J P, I Chih-Lin, Chen X F, et al. Asymmetrical emission beams based visible light communication access points design [C] // 2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), May 9-10, 2019, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [17] Ding J P, I Chih-Lin, Xie R Y, et al. Actual radiation patterns-oriented non-deterministic optical wireless channel characterization[M]//Zhou J. et al. Biometric Recognition. CCBR 2018. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2018, 10996: 517-527.
- [18] Ding J P, I Chih-Lin, Zhang H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20-24, 2019, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [19] Chen Q R, Yu X, Cui W N, et al. Visible-light communication and performance analysis based on medium- and short-distance inter-satellite links [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006003.  
陈泉润, 虞翔, 崔文楠, 等. 基于中短距离星间链路的可见光通信及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006003.
- [20] Chen Q R, Zhang T. Light source layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0406003.  
陈泉润, 张涛. 室内可见光通信系统的光源布局优化及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0406003.
- [21] Bai X W, Li Q, Tang Y Q. Low-complexity spectrum resource allocation algorithm for indoor ultra-dense visible light communication networks[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0906007.  
白向伟, 李青, 唐燕群. 低复杂度室内超密集可见光通信网络频谱资源分配算法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0906007.
- [22] Moré J J, Sorensen D C. Computing a trust region step[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1983, 4(3): 553-572.