

可见光通信非朗伯光波束发射分集技术

丁举鹏^{1,2},易芝玲³,赵楷^{1,2},张琳琳^{1,2},王丽丽⁴,郑灵^{1,2}(1. 新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 信号检测与处理新疆维吾尔自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830046;
3. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053; 4. 鲁东大学 信息与电气工程学院, 山东 烟台 264025)

摘要: 受限于传统朗伯光波束较强的空间指向性, 基于同构朗伯光波束的可见光通信发射器设计难以提供令人满意的空
间覆盖。综合考虑商用发光二极管(LED)光源多样的非朗伯光波束特性, 提出一种基于非朗伯光波束的发射分集技术方
案。该方案能够充分利用非朗伯光波束各自的空间辐射特性, 将更多发射光功率针对性地投射到远离光发射器的覆盖边
缘区域, 在保持整体发射光功率恒定且分集角为 60° 时, 所提出的非朗伯性分集方案能够引入 3.4 dB 的最小信噪比增
益, 同时将信噪比波动幅度从传统设计下的 19.4 dB 降低至非朗伯设计下的 13.5 dB。

关键词: 可见光通信; 非朗伯光波束; 发射分集

中图分类号: TN919 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)01-0044-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Non-Lambertian beam transmission diversity technology for visible light communication

DING Jupeng^{1,2}, I Chih-Lin³, ZHAO Kai^{1,2}, ZHANG Linlin^{1,2}, WANG Lili⁴, ZHENG Jiong^{1,2}(1. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Signal Detection and
Processing in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. China Mobile Research Institute, Beijing
100053, China; 4. School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China)

Abstract: Due to the strong spatial directivity of the traditional Lambertian beam, the design of visible light communication t
ransmitter based on isomorphic Lambertian beam is difficult to provide satisfactory spatial coverage. Considering the charac
teristics of various non-Lambertian light beams of commercial light-emitting diode (LED) light sources, a transmission diversity
technology scheme based on non-Lambertian light beams is proposed. This scheme can make full use of the respective spatial
radiation characteristics of the non-Lambertian optical beam to project more transmitted optical power to the coverage edge area
far away from the optical transmitter. When the overall transmitted optical power is kept constant and the diversity angle is 60° ,
the proposed non-Lambertian diversity scheme can introduce a minimum signal-to-noise ratio gain of 3.4 dB, at the same time,
the fluctuation amplitude of signal-to-noise ratio is reduced from 19.4 dB in traditional design to 13.5 dB in non-Lambert
design.

Key words: visible light communications, non-Lambertian optical beams, transmission diversity

收稿日期: 2021-05-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62061043)资助; 新疆维吾尔自治区
自然科学基金面上项目(2019D01C020)资助; 新疆维吾尔自治区全职引
进高层次创新人才项目(042419004)资助; 新疆维吾尔自治区天山雪松
计划项目(2020XS27)资助。

作者简介: 丁举鹏(1985—), 男, 博士, 新疆大学副教
授, 硕士生导师, 中国通信学会高级会员, 中国光学学
会高级会员, 中国电子学会高级会员。主要研究方向
为无线光通信及组网、可见光通信、光与无线的融合
和自由空间光通信等。



0 引言

时至今日, 随着传统射频资源危机问题日益凸
显, 产业界和学术界正积极探索新的频谱资源, 利用
可见光谱的可见光通信(VLC)技术作为一种新型无线
通信模式获得了广泛的关注和探索。此类技术依托商
用发光二极管(LED)照明基础设施, 可以同时为用户
提供通用照明及数据传输功能。VLC 具有免频谱管
制、不受电磁干扰、安全性高、保密性强和潜在容量大
等优势^[1-4]。截止目前, 研究人员已经成功地将 VLC 引
入到室内无线热点、车联网、物联网、保密通信、智慧

矿井和智慧城市等前沿热点领域^[5-8]。

然而,现有的 VLC 技术方案通常假设 LED 光源的光波束遵循传统朗伯空间辐射模式。此类朗伯光波束具有相对较高的空间指向性,最大辐射方向出现在光源表面的法向方向,因而难以提供一致性强的 VLC 信号覆盖。有一类直观的解决方案是引入多个分布式 LED 光源来改善 VLC 的覆盖情况。但是,对于中小尺寸房间和光源布放位置受限的场景,这种方案并不适用。于是,研究人员^[9]提出了基于同构朗伯光波束的发射分集技术。一般地,未经二次配光的原始 LED 光波束能够遵循朗伯光波束模型^[10-12],并且,国际厂商的诸多 LED 光源已呈现出与传统朗伯光波束有明显区别的空间波束特性^[13-17]。但是,商用光源的非朗伯光波束尚未在 VLC 发射分集设计讨论中获得应有的关注和探索。因此,本文尝试将非朗伯光波束引入到 VLC 发射分集设计中,提出一种基于非朗伯光波束的 VLC 发射分集技术。

1 传统朗伯及非朗伯光波束

1.1 传统朗伯光波束

辐射强度是指在某一光出射方向单位立体角内光源所发射的光功率,是度量光波束空间辐射特性的关键指标。为便于分析,研究人员通常假设 LED 光源遵从朗伯光波束,其响应辐射强度数学表达式为^[17]:

$$I_{\text{Lam}}(\theta) = \frac{m_{\text{Lam}} + 1}{2\pi} \cos^{m_{\text{Lam}}}(\theta) \quad (1)$$

其中, θ 为光源所发出光线的出射方向与光源法向之间的夹角, m_{Lam} 为光波束的朗伯指数,该指数用来指示光源的方向性。

1.2 非朗伯光波束

如前文所述,实际商用光源的辐射特性并不总是遵循朗伯模式。已有研究工作显示:作为非朗伯模式的典型代表 NSPW345 系列光源产品,其光波束的辐射模式需要通过多个高斯函数来累计表征^[14]。

$$I_{\text{NSPW}}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^2 g_i \exp \left\{ -(\ln 2) \left(|\theta - g_{2i}|^2 \left[\frac{\cos^2 \varphi}{(g_{3i})^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{(g_{4i})^2} \right] \right) \right\} \quad (2)$$

其中, φ 为光源光线的出射方向相对于光源所在平面的方位角, i 为模型中包含的第 i 个高斯函数的编号。由于非朗伯光波束模型通常由实测数据拟合得到,无法确保满足天然的功率归一化。为不失比较的公平性,应该引入非朗伯光波束功率归一化系数以消除由于模型本身引入的功率偏差。式(2)中 2 组高斯函数系数分别为

$g_{11}=0.13$ 、 $g_{21}=45^\circ$ 、 $g_{31}=g_{41}=18^\circ$ 、 $g_{12}=1$ 、 $g_{22}=0$ 、 $g_{32}=38^\circ$ 、 $g_{42}=22^\circ$ 。由于上述非朗伯光波束都是依赖出射角和方位角,因而客观上呈现出非旋转对称的空间辐射特性。

2 光波束发射分集

2.1 传统朗伯光波束发射分集

在传统朗伯光波束发射分集方案中,各个光波束不再同时垂直指向下方的接收平面,而是按照特定的分集角度指向接收平面的不同方位。不失一般性,本文考虑由 4 个独立光波束构成的发射分集方案。在典型 VLC 室内场景中,当独立波束的数量为 4 时,各个波束的方位分别为 45° 、 135° 、 225° 和 315° 。传统同构光波束发射分集的空间辐射特性的 3D 斜视图和 3D 俯视图如图 1 所示。在上述发射分集配置下,分集发射器的整体空间辐射强度可以表示为:

$$I_{\text{Lam.Div}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{beam}}} P_j \frac{m_{\text{Lam}} + 1}{2\pi} \cos^{m_{\text{Lam}}}(\theta_j) \quad (3)$$

其中, P_j 代表第 j 个光波束的发射光功率, N_{beam} 代表独立光波束的数量, θ_j 为光源光线的出射方向与第 j 个光波束法向之间的夹角。在典型的中小尺寸室内场景中,如果综合造价、维护和可用站址数量等工程因素,使用集中式单光源发射器是复杂度更低的候选方案。在此类方案中,为了最大限度且均匀点亮整个覆盖区域,通常将发射器布设于天花板的中心位置处,如图 2 所示。

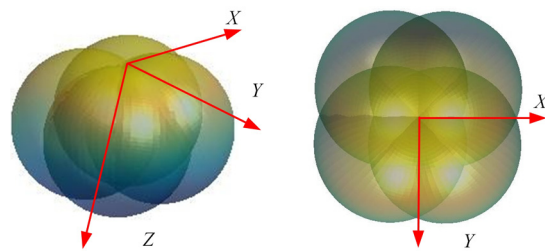


图 1 传统同构光波束发射分集的空间辐射特性

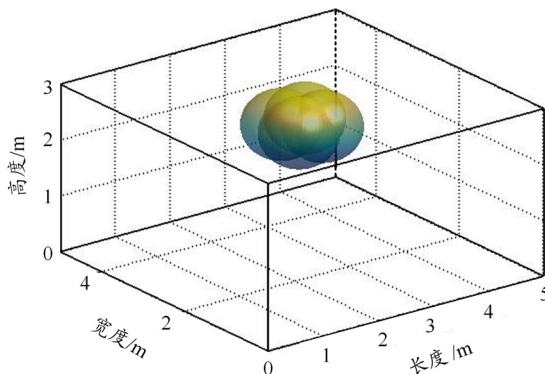


图 2 应用朗伯光波束发射分集的典型 3D 室内场景

2.2 非朗伯光波束发射分集

本文提出的非朗伯光波束发射分集技术需要将传统朗伯光波束发射分集方案中的各个独立光波束替换为前文所述的更为复杂的非朗伯光波束。以 NSPW345 非朗伯光波束为例,由于其非旋转对称的独特辐射特性,因而在分集方案中能够呈现出空间分离程度更高的空间辐射特点。相对应地,每个独立非朗伯波束能够将光信号更聚焦地投射到所朝向的目标方位。

非朗伯光波束发射分集空间辐射特性如图 3 所示。类似地,在上述发射分集配置下,分集发射器的整体空间辐射强度则表示为:

$$I_{\text{NonLam_Div}} = \alpha_{\text{NonLam}} \sum_{j=1}^{N_{\text{beam}}} P_j \sum_{i=1}^2 g_i \exp \left\{ -(\ln 2) (|\theta_j| - g_i)^2 \left[\frac{\cos^2 \varphi_i}{(g_3)^2} + \frac{\sin^2 \varphi_i}{(g_4)^2} \right] \right\} \quad (4)$$

其中, φ_i 为光源光线的出射方向相对于第 j 个非朗伯光波束所在平面的方位角。非朗伯光波束由实测数据拟合得到,通常无法确保满足天然的功率归一化。不失公平性,在式(4)中引入非朗伯功率归一化系数 α_{NonLam} 以消除由于模型本身引入的功率偏差。图 4 为应用 NSPW345 非朗伯光波束发射分集的典型室内场景图。

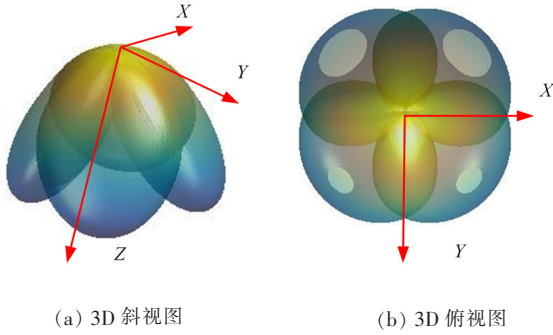


图 3 非朗伯光波束发射分集的空间辐射特性

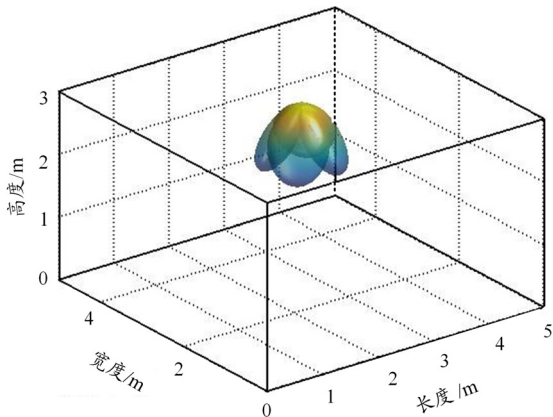


图 4 应用非朗伯光波束发射分集的典型 3D 室内场景

3 VLC 覆盖特性

3.1 同构发射分集下的覆盖特性

如果朗伯分集发射器所发出的光信号在接收器的视场角 (FOV) 以内,则该信号能通过视线链路 (LOS) 被接收端所捕获。相应地,朗伯光源 T 在接收器 R 处所产生的信道增益为^[9,17]:

$$H_{\text{LOS}}^{\text{Lam}} = \begin{cases} \frac{A_R}{d^2} I_{\text{Lam_Div}} G_{\text{af}} G_{\text{oc}} \cos(\alpha), & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{FOV}} \\ 0, & \alpha > \alpha_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, A_R 为接收器的光电二极管 (PD) 探测器面积, d 为光源与接收器之间的 LOS 距离。此外, G_{af} 为接收器滤光片增益, G_{oc} 为聚光器增益, α 为 LOS 光信号的入射角, α_{FOV} 为接收器的 FOV 角度^[9,17]。相应地,接收器处的信噪比可以表示为:

$$\text{SNR}_{\text{Lam}} = \frac{(H_{\text{LOS}}^{\text{Lam}} r)^2 F_{\text{OE}}}{\delta^2} \quad (6)$$

其中, r 为接收器的响应度, F_{OE} 为接收器的光/电转换因子, δ^2 为接收器的噪声功率。

$$\delta^2 = 2qI_{\text{bg}}B + \frac{4K_{\text{b}}tB}{R_{\text{f}}} \quad (7)$$

其中, q 为电子电荷, I_{bg} 为背景噪声电流, B 为等效噪声带宽, K_{b} 为玻尔兹曼常数, t 为绝对温度, R_{f} 为跨阻放大器 (TIA) 的反馈阻抗。

3.2 非朗伯发射分集下覆盖特性

若发射器采用前文所述的非朗伯光波束,参照朗伯配置信道增益,可以相应给出非朗伯发射分集下不同接收位置处所产生的信道增益为:

$$H_{\text{LOS}}^{\text{NonLam}} = \begin{cases} \frac{A_R}{d^2} I_{\text{NonLam_Div}} G_{\text{af}} G_{\text{oc}} \cos(\alpha), & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{FOV}} \\ 0, & \alpha > \alpha_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (8)$$

此时,接收器的信噪比为:

$$\text{SNR}_{\text{NonLam}} = \frac{(H_{\text{LOS}}^{\text{NonLam}} r)^2 F_{\text{OE}}}{\delta^2} \quad (9)$$

4 仿真结果与性能分析

为了量化分析非朗伯光波束发射分集对 VLC 的影响,本文将在典型室内场景,对传统朗伯发射分集及非朗伯发射分集下的仿真实验结果进行比较。

4.1 接收端信噪比对比分析

参照已有可见光系统配置方案,表 1 为本文涉及的仿真参数。

传统朗伯光波束发射分集的信噪比空间分布如图 5 所示。可以看出,指向房间 45° 方位区域的单波束

表 1 主要仿真参数设定

参数	取值
场景房间长、宽和高/m	5.0、5.0 和 3.0
LED 光源朗伯指数	1
LED 光源空间坐标	(2.5 m, 2.5 m, 3.0 m)
LED 全部光波束分集角	30°、45°和 60°
LED 分集光波束数量	4
LED 分集光波束各方位角	45°、135°、225°和 315°
接收器俯仰角	0°
接收器方位角	180°
探测器面积/cm ²	1.5
光滤波片增益	1
玻尔兹曼常数	1.38×10^{-23}
电子电荷	1.6022×10^{-19}
响应度/(A·W ⁻¹)	0.28
绝对温度/K	295
TIA 反馈阻抗/k Ω	6
系统调制带宽/MHz	20
背景光电流/ μ A	5100

在接收平面的覆盖光斑仍然呈现圆形的弥散特征,这是由于传统朗伯光波束固有的旋转对称覆盖特性所决定的;而朝向 4 个方位的分集光波束在接收平面的覆盖光斑却呈现出以发射器位置为中心的圆环形覆盖特性。

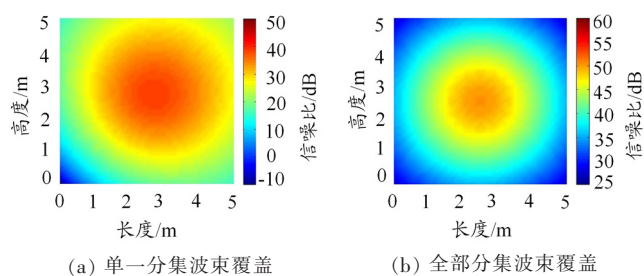


图 5 传统朗伯光波束发射分集的信噪比空间分布

对于非朗伯光波束发射分集覆盖,由于所引入非朗伯光波束独特的非旋转对称辐射特性,接收平面上的信噪比空间分布发生了显著的改变,如图 6 所示。可以看出,单一非朗伯分集波束覆盖光斑不再遵循圆形,而是明显呈现出朝向目标空间方位的特点,使得该方位对应房间角落的覆盖效果得到增强;与此同时,全部分集波束覆盖不再严格遵循圆环形覆盖特性,而是更趋向于与房间结构匹配的方形覆盖特点,房间中心位置的峰值区域信噪比轻微增大,房间的四周边缘区域信噪比在矩形覆盖下相对增强。

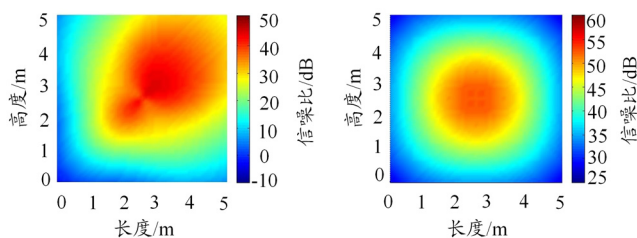


图 6 非朗伯光波束发射分集的信噪比空间分布

4.2 信噪比累积分布函数对分集方案配置的依赖关系

为了确定分集角度对覆盖特性的影响,本文给出了 30°、45°和 60°这 3 种分集角度下信噪比累积分布函数值如图 7 所示。可以看出,在不同分集角度设定下,与传统朗伯分集发射配置相比,本文所提出的非朗伯分集发射配置可提供一致性更高的信噪比覆盖,但对最小信噪比影响有所不同。具体地,在 30°分集角度下,最小信噪比从初始的约 27.5 dB 增加至约 28.3 dB,仅引入 0.8 dB 的信噪比增益;在 45°分集角度下,最小信噪比从初始的约 27.1 dB 增加至约 29.3 dB,可以引入增益 2.2 dB;在 60°分集角度下,最小信噪比从初始的约 26.1 dB 增加至约 29.5 dB,引入增益高达 3.4 dB。

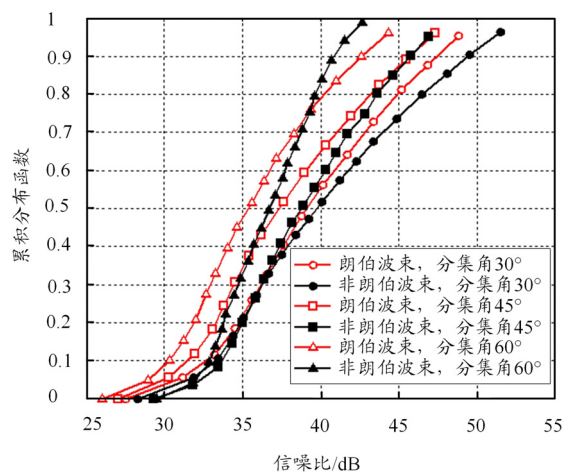


图 7 不同分集角度下信噪比累积分布函数表现比较

本文针对 60°分集角度配置给出了不同波束配置下信噪比累积分布函数值如图 8 所示。可以看出,当只考虑单一波束贡献,非朗伯配置呈现更为剧烈的信噪比波动,这是由于其固有的波束特性所决定的。但是,对于最终的分集多波束覆盖性,非朗伯光波束则将初始的信噪比范围从 26.1~45.5 dB 改善至 29.5~43.0 dB;波动幅度从传统朗伯设计下的 19.4 dB 降低至非朗伯设计下的 13.5 dB,改善幅度高达 6.0 dB。此外,信噪比低于 32 dB 弱覆盖位置占比从初始配置时

丁举鹏,易芝玲,赵楷,等:VLC 非朗伯光波束发射分集技术

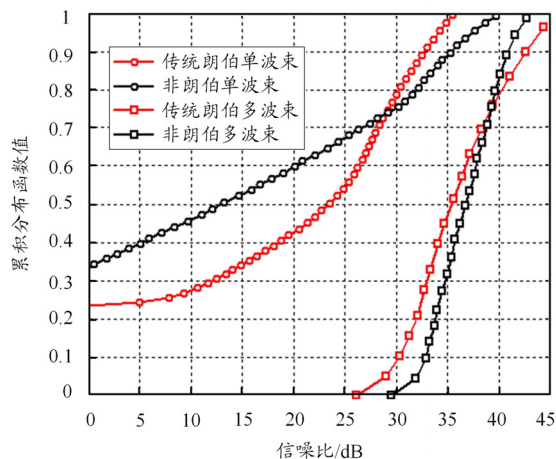


图8 不同波束配置下信噪比累积分布函数表现比较

的 21%降低至非朗伯设计时的 4.6%，降幅高达 16.4%。上述结果表明：在整体覆盖上，朝向不同方位的非朗伯光波束形成了独特的覆盖互补，最终实现对弱覆盖的空间信噪比的改善。

客观上，本文所采用的 NSPW345 型非朗伯光波束是旋转非对称非朗伯光波束的典型代表，具备此类转非对称辐射特性的光源可以被用来构造发射分集，形成相对互补的空间覆盖特性，最终获得潜在的接收增益。但是，由于许多非朗伯光波束并不具备旋转非对称辐射特性，甚至呈现出与传统朗伯光波束相近的辐射规律，因而难以被用于构造所预期的发射分集配置，也难以提供所需的接收增益。

5 结束语

与已有的基于同构朗伯光波束的发射分集设计相比，本文提出的基于非朗伯光波束的分集设计方案可以引入高达 3.4 dB 的最小信噪比增益；在房间边缘位置可改善 6.0 dB 的信噪比波动。此外，该方案还可缓解房间边缘位置附近的弱覆盖，信噪比低于 32 dB 弱覆盖位置占比从初始配置时的 21%降低至非朗伯设计时的 4.6%。

参考文献：

[1] WU S, WANG H, YOUN C. Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications [J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 41–45.

- [2] 丁举鹏,易芝玲,王劲涛,等. 面向智能电力的无线光技术研究与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 1–12.
- [3] 丁举鹏,易芝玲,王劲涛,等. 可见光通信物理链路的基准保密容量比较研究[J]. 信息安全, 2020, 20(5): 65–71.
- [4] AN J, CHUNG W Y. Single-LED multichannel optical transmission with SCMA for long range health information monitoring [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5470–5480.
- [5] DING W, 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(1): 170–178.
- [6] 陈习锋,丁举鹏,梅弘业,等. 高铁无线光通信技术研究现状[J]. 光通信技术, 2021, 45(1): 5–9.
- [7] 陈习锋,丁举鹏,张心云,等. 基于无线光通信智慧矿井研究现状[J]. 光通信研究, 2020(6): 70–76.
- [8] DING J P, I CHIH-L, XU Z Y. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–15.
- [9] CHENG C, TSONEV D, HAAS H. Joint transmission in indoor visible light communication downlink cellular networks[C]// 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 9–13, 2013, Atlanta, GA. New York: IEEE, 2013: 1127–1132.
- [10] DING J P, I C L, ZHANG H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam [C]//2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20–24, 2013, Shanghai, China. New York: IEEE, 2019: 1–6.
- [11] DING J P, CHIH-LIN I, XIE R Y, et al. Actual radiation patterns-oriented non-deterministic optical wireless channel characterization [C]//13th Chinese Conference on Biometric Recognition (CCBR 2018), August 11–12, 2018, Urumqi, China. Berlin: Springer, 2018: 517–527.
- [12] 丁举鹏,易芝玲,王劲涛,等. 可见光定位系统中发光二极管空间波束效应分析[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 174–182.
- [13] DING J P, I C L, ZHANG C, et al. Evaluation of outdoor visible light communications links using actual LED street luminaries[C]// 13th Chinese Conference on Biometric Recognition (CCBR 2018), August 11–12, 2018, Urumqi, China. Berlin: Springer, 2018: 572–579.
- [14] MORENO I, SUN C. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1808–1819.
- [15] SHANG W, KAI W, FEI C, et al. Design of primary optics for LED chip array in road lighting application[J]. Optics Express, 2011, 19(14): A716–A724.
- [16] LEE X H, MORENO I, SUN C C. High-performance LED street lighting using microlens arrays[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10612–10621.
- [17] 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.