

非朗伯 MIMO 可见光通信误比特率表现研究

丁举鹏¹,易芝玲²,赵楷¹,王劲涛³,阳辉³,张慧^{4*},王丽丽⁵

(1.新疆大学 信息科学与工程学院,乌鲁木齐 830046;2.中国移动通信有限公司研究院,北京 100053;

3.清华大学 电子工程系,北京 100084;4.新疆交通职业技术学院,乌鲁木齐 831401;5.鲁东大学 信息与电气工程学院,山东 烟台 264025)

摘要:为了提升可见光通信(VLC)链路的可靠性,针对传统 VLC 研究范式的局限性,在典型室内应用场景将商用 LUXEON Rebel 非朗伯光波束引入到多输入多输出(MIMO)可见光发射器配置中,对比分析了非朗伯 MIMO VLC 与朗伯 MIMO VLC 的误比特率(BER)性能表现。仿真结果表明:较之于传统朗伯光波束的 MIMO 基准配置,当房间中心接收位置 $BER \leq 10^{-6}$ 时,所提出的非朗伯 MIMO 配置可以减少引入 13.1% 的发射功率。

关键词:可见光通信;多输入多输出;非朗伯光波束;误比特率

中图分类号:TN919.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)03-0076-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on bit error rate performance of non-Lambertian MIMO visible light communication

DING Jupeng¹, I Chih-Lin², ZHAO Kai¹, WANG Jintao³, YANG Hui³, ZHANG Hui^{4*}, WANG Lili⁵

(1. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China; 3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. XinJiang Vocational & Technical College of Communication, Urumqi 831401, China; 5. School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China)

Abstract: In order to improve the reliability of visible light communication (VLC) links and address the limitations of the traditional VLC research paradigm, commercial LUXEON Rebel non-Lambert light beams are introduced into multiple input multiple output (MIMO) visible light emitter configurations in typical indoor applications. The bit error rate (BER) performance of non-Lambert MIMO VLC and Lambert MIMO VLC is compared and analyzed. The simulation results show that the proposed non-Lambert MIMO configuration can reduce the introduced transmission power by 13.1% compared to the traditional Lambert beam MIMO reference configuration when the center of the room receiving position $BER \leq 10^{-6}$.

Key words: visible optical communications, multiple input multiple output, non-Lambertian light beams, bit error rate

0 引言

在大多数室内应用场景,照明工程师会在天花板

收稿日期:2021-11-05。

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,现任教于新疆大学。研究方向为无线光通信及组网、可见光通信及定位、光与无线的融合、物理层安全、空天地海无线光通信、5G 及 B5G 移动通信等,主持国家自然科学基金(地区基金、青年基金)、新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目、新疆维吾尔自治区全职引进高层次人才项目、自治区天池博士计划项目等多项科研项目。



*通信作者:张慧(1980—),女,硕士,副教授,主要研究方向为测绘技术。

上布放多个分布式光源来点亮整个房间。此类分布式光源空间配置便于开发多输入多输出(MIMO)可见光通信(VLC)系统^[1-8]。现有的众多 MIMO VLC 技术设计中,通常假设发射器发光二极管(LED)遵循简单且单一朗伯光波束的辐射模式^[9-20],但由于这种假设无法适用于所有 LED 照明场景,特别不适宜装配有光学配光 LED 的高能效照明场景。目前,面向单光源场景,非朗伯光波束已经初步在光信道增益、频率响应、均方根时延扩展和接收功率分布等指标上展现出独特甚至优越的表现^[16-20]。因此,本文探索基于非朗伯光波束的 MIMO VLC 链路配置,从接收端误码率(BER)、累积分布函数数值等方面展示非朗伯 MIMO 配置与朗伯 MIMO 配置的表现差异。

1 非朗伯光波束辐射特性

一般地, 为了分析方便, 通常均假设 LED 光源呈现朗伯型光波束特性, 但受配光及封装等工艺流程的影响, 众多实际商用光源会呈现出非朗伯的空间辐射特性^[17-19]。例如, Lumileds Philips 的 LUXEON Rebel LED 系列光源产品会呈现非朗伯光波束特性, 其光波束辐射强度^[17]表示为

$$I_{\text{Rebel}}(\varphi) = \alpha_{\text{Rebel}} \sum_{i=1}^{N_i} g_{i1}^{\text{Rebel}} \exp \left[-\ln 2 \left(\frac{|\varphi - g_{2i}^{\text{Rebel}}|}{g_{3i}^{\text{Rebel}}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中, φ 为光源光线的出射方向相对于光源法向的偏移角 (简称出射角), $N_i=2$, $g_{11}^{\text{Rebel}} = 0.76$, $g_{21}^{\text{Rebel}} = 0$, $g_{31}^{\text{Rebel}} = 29^\circ$, $g_{12}^{\text{Rebel}} = 1.10$, $g_{22}^{\text{Rebel}} = 45^\circ$, $g_{32}^{\text{Rebel}} = 21^\circ$, α_{Rebel} 为 LUXEON Rebel 光波束的功率归一化系数。非朗伯光波束的空间辐射特性示意图如图 1 所示, 其辐射强度仅依赖出射角 φ , 因而呈现出旋转对称的空间辐射特点。

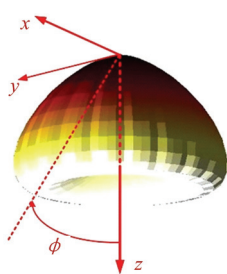


图 1 非朗伯光波束的空间辐射特性

2 MIMO VLC 链路

2.1 传统朗伯 MIMO VLC 链路

在传统朗伯 MIMO VLC 链路中, N_t 个朗伯型 LED 光源发射器通常被等间隔地分布于房间的天花板上, 并将光源法向朝下指向 VLC 接收器所在的工作平面。同时, 发射器和接收器采用强度调制 (IM) 和直接检测 (DD) 来完成信号的电光调制和光电检测。在接收器中, N_r 个等间隔光电探测器被用于捕获 VLC 的光信号, 接收到的信号矢量^[6-7]可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_{\text{Lam}} \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为 $N_t \times 1$ 个发射器所发送的信号矢量, $\mathbf{H}_{\text{Lam}}$ 为 $N_r \times N_t$ 个朗伯型 MIMO VLC 信道的矩阵; $\mathbf{v}$ 为 $N_r \times 1$ 个接收器所接收到的噪声矢量。

在上述朗伯型 MIMO 配置下, 信道矩阵 $\mathbf{H}_{\text{Lam}}$ ^[6-7]可以表示为

$$\mathbf{H}_{\text{Lam}} = \begin{bmatrix} H_{\text{Lam}}(T_1, R_1) & \cdots & H_{\text{Lam}}(T_{N_t}, R_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{\text{Lam}}(T_1, R_{N_r}) & \cdots & H_{\text{Lam}}(T_{N_t}, R_{N_r}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $H_{\text{Lam}}(T_n, R_{n_r})$ 为第 n_t 个朗伯型光发射器与接收器中第 n_r 个光电探测器之间的无线链路增益^[5-8], 可以表示为

$$H_{\text{Lam}}(T_{n_t}, R_{n_r}) = \begin{cases} \frac{A_R}{d^2} I_{\text{Lam}}(\varphi) G_{\text{of}} G_{\text{oc}}(\alpha) \cos(\alpha), & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{FOV}} \\ 0, & \alpha \geq \alpha_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $I_{\text{Lam}}(\varphi)$ 为朗伯辐射强度, $I_{\text{Lam}}(\varphi) = \frac{m_{\text{Lam}} + 1}{2\pi} \cos^{m_{\text{Lam}}} \varphi$, m_{Lam} 为朗伯指数。此外, A_R 为第 n_r 个光电探测器的物理面积, d 为第 n_t 个光发射器与第 n_r 个光电探测器之间的视线 (LOS) 距离, G_{of} 为接收器中滤光片增益, $G_{\text{oc}}(\alpha)$ 为聚光器增益, α 为光信号的入射角, α_{FOV} 为接收器的视场角 (FOV)^[17]。此外, 聚光器增益 $G_{\text{oc}}(\alpha)$ ^[5-8]可以具体表示为

$$G_{\text{oc}}(\alpha) = \begin{cases} \frac{u}{\sin^2(\alpha)}, & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{FOV}} \\ 0, & \alpha \geq \alpha_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, u 为聚光器折射率。

2.2 非朗伯 MIMO VLC 链路

参照上文朗伯 MIMO VLC 链路配置, 如果将传统朗伯光源替换为 LUXEON Rebel LED 系列光源, 就可以构造出的 Rebel 非朗伯 MIMO (下文简称为非朗伯 MIMO) VLC 链路配置。接收器接收到的信号矢量为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_{\text{Rebel}} \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{H}_{\text{Rebel}}$ 为 $N_r \times N_t$ 个非朗伯型 MIMO VLC 信道的矩阵, 可以表示为

$$\mathbf{H}_{\text{Rebel}} = \begin{bmatrix} H_{\text{Rebel}}(T_1, R_1) & \cdots & H_{\text{Rebel}}(T_{N_t}, R_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{\text{Rebel}}(T_1, R_{N_r}) & \cdots & H_{\text{Rebel}}(T_{N_t}, R_{N_r}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $H_{\text{Rebel}}(T_n, R_{n_r})$ 为第 n_t 个非朗伯型光发射器与第 n_r 个光电探测器之间的无线链路增益, 可以表示为

$$H_{\text{Rebel}}(T_{n_t}, R_{n_r}) = \begin{cases} \frac{A_R}{d^2} I_{\text{Rebel}}(\varphi) G_{\text{of}} G_{\text{oc}}(\alpha) \cos(\alpha), & 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{FOV}} \\ 0, & \alpha \geq \alpha_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $I_{\text{Rebel}}(\varphi)$ 为朗伯辐射强度。

3 MIMO VLC 链路 BER 特性

3.1 朗伯 MIMO VLC 链路特性

为便于讨论, 本文采用重复编码 (RC) MIMO 传输技术。在该传输技术中, 各个 LED 光源发射器同时发射相同的光信号。发射器在数字域采用 M 进制脉冲幅度调制 (M -PAM)。在发送端, 全部发射功率在发射器之间均匀分配; 在接收端, 采用最大比合并 (MRC) 方案对 N_r 个光电探测器所接收的信号进行合并。相应地, 在朗伯光波束配置下, RC MIMO 的接收 BER^[6-7]可以表示为

$$BER_{RC}^{Lam} = \frac{2(M-1)}{M \log_2 M} \times Q \left(\frac{1}{M-1} \sqrt{\frac{SNR_t}{N_t^2} \sum_{n=1}^{N_t} \left(\sum_{n=1}^{N_t} H_{Lam}(T_{n_i}, R_{n_i}) \right)^2} \right) \quad (9)$$

其中, SNR_t 为 MIMO 发送端的信噪比, 可以表示为

$$SNR_t = \frac{(rP_t)^2}{\delta^2} \quad (10)$$

其中, r 为接收器的响应度, P_t 为全部发射器的整体发射功率, δ^2 为接收器的噪声方差。

$$\delta^2 = 2qI_{bg}B + \frac{4K_bTB}{R_t} \quad (11)$$

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。此外, K_b 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, R_t 为跨阻放大器(TIA)的反馈阻抗。

3.2 非朗伯 MIMO VLC 链路特性

在 Rebel 非朗伯光波束配置下, 参照等式(9), RC MIMO 的接收 BER 可以相应表示为

$$BER_{RC}^{Rebel} = \frac{2(M-1)}{M \log_2 M} \times Q \left(\frac{1}{M-1} \sqrt{\frac{SNR_t}{N_t^2} \sum_{n=1}^{N_t} \left(\sum_{n=1}^{N_t} H_{Rebel}(T_{n_i}, R_{n_i}) \right)^2} \right) \quad (12)$$

4 仿真结果与性能分析

在应用场景、仿真参数(如表 1 所示)相同的情况下, 本文将量化比较传统朗伯、非朗伯配置对 MIMO VLC BER 特性的影响。

当接收器被置放于工作平面的中心接收位置, 本文分 2 种接收器配置(无收发端对准、收发端对准)进行讨论。在无收发端对准配置下, 接收器中各个光电探测器垂直朝向天花板; 在收发端对准配置下, 通过手动调整将各个光电探测器分别朝向一个不同的光源发射器(信号从所朝向发射器到所关联接收器的入射角为 0°)。同时, 为了简化分析, 假设对准配置下探测器的视场角足够小, 每个探测器仅会接收到来自所朝向的发射器的光信号, 并完全屏蔽来自其它光源发射器的光信号。由于本文讨论的是各个发射器同时发送相同数据流的 RC MIMO 传输模式, 因此采用对准配置时会增强光电探测来自关联探测器的光信号水平, 同时也会完全排除其余发射器对该光电探测器的潜在影响。2 种接收器配置中心接收位置处 BER 的比较如图 2 所示。

从图 2 可以看出: ①在无收发端对准配置下, 由

表 1 主要仿真参数设定

参数	取值
场景房间长/m、宽/m、高/m	5.0、5.0、3.0
LED 光源朗伯指数	1
LED 光源间距/m	2.5
LED 分布式光源数量/个	4
接收器高度/m	0.85
接收器视场角/(°)	45
接收器俯仰角/(°)	0
接收器方位角/(°)	180
PD 探测器面积/cm ²	1.0
聚光器折射指数	1.54
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	298
TIA 反馈阻抗/kΩ	6
系统调制带宽/MHz	20
背景光电流/μA	5100
频谱效率/(b/s)·Hz ⁻¹	4

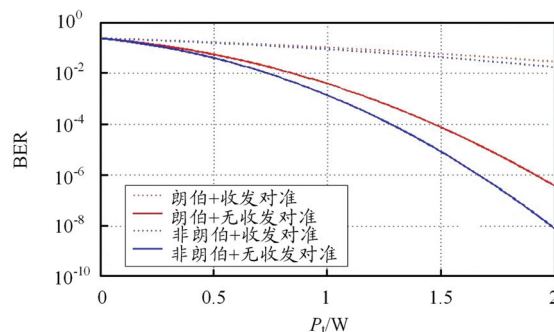


图 2 中心接收位置处 BER 比较

于每个光电探测器会同时捕获来自 4 个光源发射器的光信号, 接收端 BER 取值会随着 4 个发射器整体功率的增加而快速降低。在该中心接收位置, 为实现 $BER \leq 10^{-6}$ 目标, 朗伯 MIMO 配置所需的整体发射功率为 1.91 W, 非朗伯 MIMO 配置所需的发射功率为 1.66 W, 与前者相比, 非朗伯 MIMO 配置可减少引入 13.1% 的发送功率。②在收发端对准配置下, 非朗伯 MIMO 配置的 BER 表现仍然优于朗伯 MIMO 配置, 但是两者之间的表现差异明显减小。

由于本文仿真采用分布式光源构造 RC MIMO 可见光传输配置, 所有发射器发送相同的数据流, 因而其最大的优势在于通过引入冗余链路来增强传输的

可靠性,进而改善 BER 表现。一方面,在无收发端对准配置下,每个光电探测器能够同时捕获来自每个发射器的光信号,因而 MIMO 引入链路的冗余度得到了很好的保持。尽管在该配置下,通常不存在某一对发射器与探测器之间的理想对准,但是整体冗余链路仍然可以改善整体接收功率。另一方面,在收发端对准配置下,由于认为探测器的视场角足够小,每个探测器仅会与所朝向的发射器构建主要链路,并完全消除来自其它光源发射器的冗余链路。因此,尽管通过对准操作使得主要链路获得了最佳传输增益,但是由于余下的冗余链路贡献被完全消除,最终导致光信号增益的损失。最终,在 RC MIMO 配置下,非对准配置通过保留冗余链路获得了优于对准配置(对应冗余链路被消除)的 BER 表现。

类似地,将接收器从中心接收位置移到房间的临边接收位置、角落接收位置,由于收发端视距(LOS)路径长度的增加,光信号被接收器所捕获时会经历更多的路径损耗。因此,接收器 BER 下降的速度会明显地变缓慢。与此同时,无论在收发端非对准和对准配置下,非朗伯 MIMO 配置仍然可以提供优于朗伯 MIMO 配置的 BER 表现,具体对比情况如图 3、图 4 所示。

为了比较接收平面上 BER 的空间分布情况,假设全部发射器的整体发射功率 P_t 为 2 W,在朗伯光波束且收发对准配置下,BER 分布呈现良好的均匀性,4 个最小 BER 区域出现在 4 个朗伯发射器的下方区域,如图 5(a)所示;在朗伯光波束且无收发对准配置下,BER 分布的差异性有所增强,最小 BER 处于房间的中心区域,出现这种现象的原因在于中心接收位置能够同时接收到来自全部光源发射器的发射光功率,如图 5(b)所示。在非朗伯配置下,若收发端进行手动对准,则 BER 空间分布呈现良好均匀性,但是最低 BER 表现出现在房间的中心区域,如图 5(c)所示;若收发端未进行一对一对准,不同接收位置能够捕获更多的发射功率,因而不同接收位置的 BER 差异程度显著增加,中心区域相对于 4 个角落区域的 BER 有明显的降低,如图 5(d)所示。

朗伯及非朗伯配置下 BER 空间分布的累积分布函数值情况比较情况如图 6 所示。可以看出,在朗伯+无收发对准配置下,BER 区间为 $3.75 \times 10^{-3} \sim 1.16 \times 10^{-1}$;对应地,非朗伯+无收发对准配置将 BER 区间降至 $1.35 \times 10^{-3} \sim$

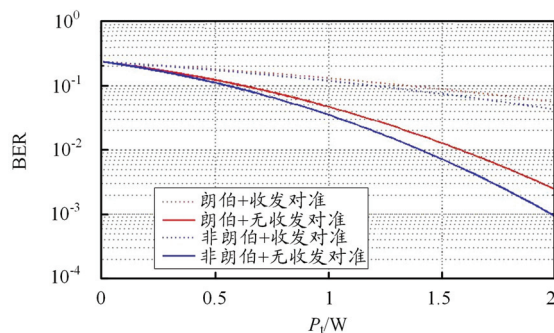


图 3 临边接收位置处 BER 表现比较

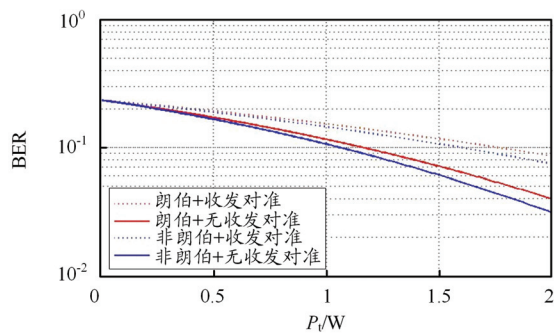
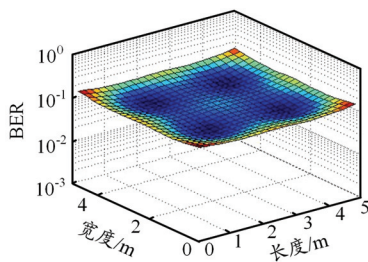
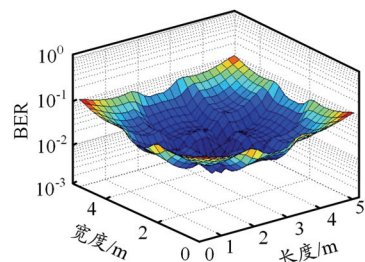


图 4 角落接收位置处 BER 表现比较

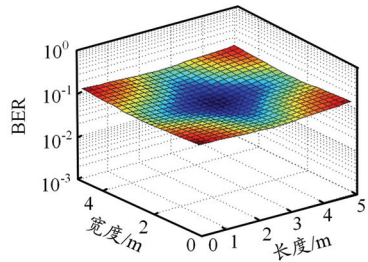
1.06×10^{-1} 。但是,在朗伯+收发对准配置下,由于每个光电探测器仅能捕获各自对准的光源发射功率,因而 BER 区间被劣化至 $8.43 \times 10^{-2} \sim 1.53 \times 10^{-1}$;类似地,在非朗伯+收发对准配置下,BER 区间被劣化至 $8.67 \times 10^{-2} \sim 1.45 \times 10^{-1}$ 。



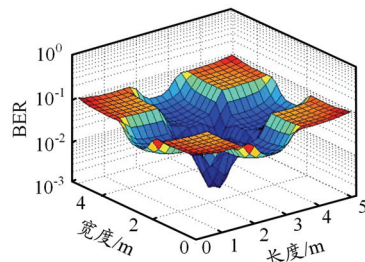
(a) 朗伯光波束+收发对准



(b) 朗伯光波束+无收发对准



(c) 非朗伯光波束+收发对准



(d) 非朗伯光波束+无收发对准

图 5 不同光波束配置下 BER 空间分布表现比较

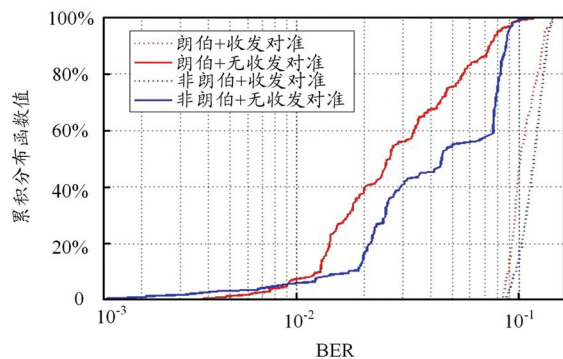


图6 BER 空间分布累积分布函数值比较

5 结束语

不同于现有基于朗伯光波束的研究范式, 本文所分析的基于非朗伯光波束的 MIMO VLC 设计可以引入高达 13.1% 的发射功率改善; 此外, 在无收发对准配置下, 接收平面上的 BER 的波动范围从 $3.75 \times 10^{-3} \sim 1.16 \times 10^{-1}$ (朗伯 MIMO 配置下) 被改善至 $1.35 \times 10^{-3} \sim 1.06 \times 10^{-1}$ (非朗伯 MIMO 配置下)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] KOUHINI S M, MANA S M, FREUND R, et al. Distributed MIMO experiment using LiFi over plastic optical fiber [C]// IEEE. Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Hawaii: IEEE, 2020: 1–6.
- [4] MANA S M, KOUHINI S M, HELLWIG P, et al. Distributed MIMO experiments for LiFi in a conference room [C]// IEEE. Proceedings of 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). Bali: IEEE, 2020: 1–5.
- [5] 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.
- [6] FATH T, HAAS H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 61(2): 733–742.
- [7] TRAN N A, LUONG D A, THANG T C, et al. Performance analysis of

indoor MIMO visible light communication systems [C]// IEEE. Proceedings of 2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE). Danang: IEEE, 2014: 60–64.

[8] DING J P, I Chih-Lin, XU Z Y. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–15.

[9] VOLKER J, PABLO W B, ZSREELAL M, et al. LiFi for industrial wireless applications[C]// OSA. Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego: OSA, 2020: 1–3.

[10] TELI S R, ZVANOVEC S, GHASSEMLOOY Z. Optical internet of things within 5G: applications and challenges [C]// IEEE. Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS). Bali: IEEE, 2018: 40–45.

[11] BERENGUER P W, SCHULZ D, HILT J, et al. Optical wireless MIMO experiments in an industrial environment [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(1): 185–193.

[12] MAJEED K, HRANILOVIC S. Performance bounds on passive indoor positioning using visible light [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2190–2200.

[13] DING J P, I Chih-Lin, ZHANG H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam [C]// IEEE. Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai: IEEE, 2019: 1–6.

[14] DING J P, I Chih-Lin, XIE R Y, et al. Actual radiation patterns-oriented non-deterministic optical wireless channel characterization [C]// Springer. Proceedings of 13th Chinese Conference on Biometric Recognition (CCBR 2018). Urumqi: Springer, 2018: 517–527.

[15] 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.

[16] DING J P, I Chih-Lin, ZHANG C, et al. Evaluation of outdoor visible light communications links using actual LED street luminaries [C]// Springer. Proceedings of 13th Chinese Conference on Biometric Recognition (CCBR 2018). Urumqi: Springer, 2018: 572–579.

[17] MORENO I, SUN C. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1808–1819.

[18] 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.

[19] LEE X H, MORENO I, SUN C C. High-performance LED street lighting using microlens arrays[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10612–10621.

[20] 丁举鹏, 易芝玲, 赵楷, 等. 可见光通信非朗伯光波束发射分集技术[J]. 光通信技术, 2022, 46(1): 44–48.