

引用本文:丁举鹏,易芝玲,赵楷,等.异构可见光及 RF 混合链路软切换表现分析[J].光通信技术,2022,46(5):94-98.

异构可见光及 RF 混合链路软切换表现分析

丁举鹏¹,易芝玲²,赵楷¹,王劲涛³,阳辉³,王丽丽⁴

(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. 鲁东大学 信息与电气工程学院,山东 烟台 264025)

摘要:现有的可见光及射频(RF)混合链路仍然局限于空间辐射特性单一的朗伯光波束配置,面向商用发光二极管的非朗伯空间辐射特性,提出一种基于典型 LUXEON Rebel 非朗伯光波束的可见光及 RF 混合链路软切换方案,并进行了仿真分析。仿真结果表明:设定 RF 接入点在近端($d=10$ m)和远端($d=60$ m)时,所提出的异构非朗伯光波束配置混合链路吞吐量的最大值分别为 370.72 Mb/s、275.68 Mb/s;发射功率为 2~15 W 时,比传统朗伯光波束配置混合链路可引入高达约 14 Mb/s 的吞吐量增益。

关键词:可见光通信;混合链路;光波束特性;软切换

中图分类号:TN919.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)05-0094-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soft switching performance analysis for heterogeneous visible light & RF hybrid link

DING Jupeng¹, I Chih-Lin², ZHAO Kai¹, WANG Jintao³, YANG Hui³, WANG Lili⁴

(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. School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China)

Abstract: The current visible light and radio frequency (RF) hybrid links are still obviously limited to the Lambertian beam configuration with simple spatial radiation characteristics. For addressing this issue, based on the non-Lambertian space radiation characteristics of commercial LED, a soft switching scheme of hybrid link between visible light and RF based on typical LUXEON Rebel non-Lambertian beam is proposed, and simulation analysis is carried out. The simulation results show that when the RF access point is set at the proximal end ($d=10$ m) and the distal end ($d=60$ m), the maximum throughput of the hybrid link of the proposed heterogeneous non-Lambertian beam configuration is 370.72 Mb/s and 275.68 Mb/s, respectively. When the transmission power is from 2~15 W, the hybrid link can introduce a throughput gain of up to about 14 Mb/s compared with the traditional Lambertian beam configuration.

Key words: visible light communications, hybrid link, optical beam characteristic, soft switching

收稿日期:2021-11-06。

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。



0 引言

可见光通信(VLC)使用波长仅为几百纳米级别的可见光波作为无线信号载波,通信链路易受到遮挡、阴影效应等不利因素的影响,导致 VLC 的可达吞吐量波动较大,甚至链路中断^[1-9]。此外,多项研究工作已初步证实发光二极管(LED)光波束的空间辐射特性可以显著地影响 VLC 的信道特性和覆盖表现^[10-12]。因此,有必要在可见光及射频(RF)混合通信这一分支领域开展针对性研究。考虑到已有 RF 无线技术在链路强壮性上的出色表现,研究人员相继构想并提出可见光及 RF 混合通信链路,以求实现 2 类技术的优势互补。在所设想的应用场景中,VLC 被用于为具体区域提供高

数据速率, 而 RF 链路则被用于确保中等速率的泛在无线覆盖。

LED 是 VLC 系统中的重要器件, 为了提升照明性能并满足具体定制需求, LED 厂商通常需要对原始 LED 进行二次封装^[13-15], 使得诸多 LED 产品呈现出多样化的非朗伯光波束特性^[15-16]。然而, 现有的可见光及 RF 混合链路方案设计中, 通常仅讨论 LED 光源的光波束遵循简单的朗伯辐射特性, 对实际商用的非朗伯光波束缺少必要讨论和比较。

本文基于异构朗伯光波束可见光及 RF 混合链路软切换方案, 提出一种基于异构非朗伯光波束的可见光及 RF 混合链路软切换方案。

1 可见光及 RF 软切换混合链路

本文根据朗伯及非朗伯可见光链路特性^[17-18], 从吞吐量方面对比分析传统朗伯可见光、非朗伯可见光分别与 RF 软切换混合链路的性能。

1.1 异构朗伯可见光及 RF 软切换混合链路

在已有基于朗伯光波束可见光及 RF 软切换混合链路方案中, 可见光链路和 RF 链路共同为移动终端提供数据传输服务, 应用示意图如图 1 所示。

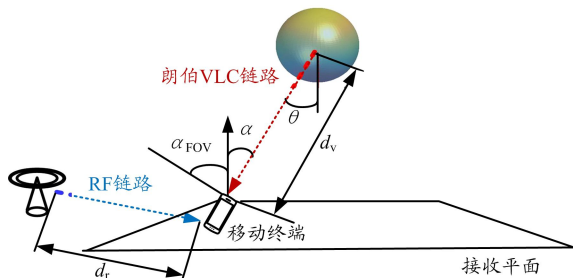


图 1 传统可见光及 RF 软切换混合链路应用示意图

图 1 中, θ 为光源所发出光出射方向与光源法向之间的夹角, α 为光信号的入射角, α_{FOV} 为接收器的视场角, d_v 为朗伯 VLC 链路长度, d_r 为 RF 链路长度。在 RF 链路部分, RF 接入点 (RF 发射器) 在房间之外区域, 移动终端通过 RF 链路所接收到的信号^[9]可以表示为

$$y_r(t) = x_r(t)h_r + n_r(t) \quad (1)$$

其中, t 为光信号传输时间, $x_r(t)$ 、 $y_r(t)$ 分别为所发射、接收的 RF 信号, $n_r(t)$ 为所接收的 RF 高斯噪声。 h_r 为 RF 信道增益^[9], 可以表示为

$$h_r = 10^{L(d_r)/10} \quad (2)$$

其中, $L(d_r)$ 为收发端 d_r 间隔距离下 RF 信道路径损耗, 该损耗应以 dB 为单位且其具体表达式应为^[9]

$$L(d_r) = A \lg(d_r) + B + C \lg(f_c/5) + X \quad (3)$$

其中, f_c 为 RF 载波频率, A 、 B 、 C 为 RF 链路损耗模型常数, X 为环境条件变量。对于本文所考虑的 RF 非视距应用场景 (假设室外 RF 接入点与室内移动终端之间存在房间的薄壁, 即厚度较薄的墙体), 对应 RF 链路损耗模型常数及 X 的取值分别为: $A=36.8$, $B=43.8$, $C=20$, $X=5$ 。

在本文所讨论的混合链路中, 可见光链路 (下文简称 VLC 链路) 与 RF 链路之间采用软切换的协作机制。该机制的基本原理是同时让 2 种异构链路保持激活状态, 并且在 2 种链路之间共享恒定的整体电域发射功率。分析和评估可见光和 RF 混合链路时, 必须兼顾这 2 种链路的各自特点。为便于联合分析, 研究人员通常在发射器光源的电域讨论其发射功率, 本文沿用此种常规做法来讨论混合链路软切换表现。在该链路协作机制下, 收发端之间的整体吞吐量 $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 应为 VLC 链路和 RF 链路各自吞吐量之和^[9], 即

$$C_{\text{total}}^{\text{SS}} = C_{\text{Lam}}^{\text{SS}} + C_{\text{RF}}^{\text{SS}} \quad (4)$$

其中, $C_{\text{Lam}}^{\text{SS}}$ 为朗伯光波束配置下 VLC 链路自身的吞吐量, $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 为 RF 链路自身的吞吐量。由于混合链路受到最大可用发射功率 P_t 的约束, 软切换机制下实现整体吞吐量 $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 最大化的过程 U_1 ^[9]可以表示为

$$U_1 = \max_{P_r, P_v} C_{\text{total}}^{\text{SS}} \quad (5)$$

其中, P_v 为朗伯 VLC 链路的发射功率, $P_r = (K_E/100)P_t$, K_E 为功率划分因子; P_r 为朗伯 RF 链路的发射功率, $P_r = (1 - K_E/100)P_t$ 。对应地, 朗伯 VLC 链路的吞吐量^[9]为

$$C_{\text{Lam}}^{\text{SS}} = B_v \log_2 \left(1 + \frac{R^2 P_{\text{Lam}} (h_v^{\text{Lam}})^2}{\delta_n^2} \right) \quad (6)$$

其中, P_{Lam} 为朗伯 VLC 链路的发射功率 ($P_r + P_{\text{Lam}} \leq P_t$), B_v 为 LED 调制带宽, δ_n^2 为 VLC 链路噪声方差, R 为接收器中光电探测器 (PD) 的响应度, h_v^{Lam} 为朗伯光源在接收器处的信道增益^[18]。与此同时, RF 链路的吞吐量^[9]为

$$C_{\text{RF}}^{\text{SS}} = B_r \log_2 \left(1 + \frac{P_r (h_r)^2}{\delta_n^2} \right) \quad (7)$$

其中, B_r 为 RF 调制带宽, δ_n^2 为 RF 链路噪声方差。

1.2 异构非朗伯可见光及 RF 软切换混合链路

上述可见光及 RF 混合链路框架仍局限于朗伯光波束的研究范式, 难以涵盖广泛商用的非朗伯光波束

丁举鹏,易芝玲,赵楷,等:异构可见光及 RF 混合链路软切换表现分析

配置。为不失一般性,基于 LUXEON Rebel LED 光源空间辐射特性^[18],本节讨论并参照给出典型 LUXEON Rebel 非朗伯可见光及 RF 软切换混合链路的数学框架。非朗伯波束配置下可见光及 RF 混合链路应用示意图如图 2 所示。

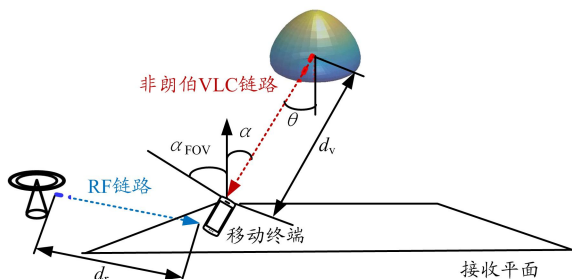


图 2 非朗伯可见光及 RF 混合链路应用示意图

在非朗伯配置下,此时软切换机制实现的整体吞

吐量 $C_{total}^{ss'}$ 表示为

$$C_{total}^{ss'} = C_{NonLam}^{ss} + C_{RF}^{ss} \quad (8)$$

其中, C_{NonLam}^{ss} 为非朗伯光波束配置下 VLC 链路自身的吞吐量。相应地,受到最大可用发射功率约束,软切换机制下寻求实现整体吞吐量 $C_{total}^{ss'}$ 最大化过程 U_2 如式(9)所示。

$$U_2 = \max_{P_r, P_v'} C_{total}^{ss'} \quad (9)$$

其中, P_v' 为非朗伯 VLC 链路的发射功率。与此同时,非朗伯 VLC 链路的吞吐量为

$$C_{NonLam}^{ss} = B_v \log_2 \left(1 + \frac{R^2 P_v' (h_v^{NonLam})^2}{\delta_{n_v}^2} \right) \quad (10)$$

其中, h_v^{NonLam} 为非朗伯光源在接收器处的信道增益^[18]。

2 仿真结果与性能分析

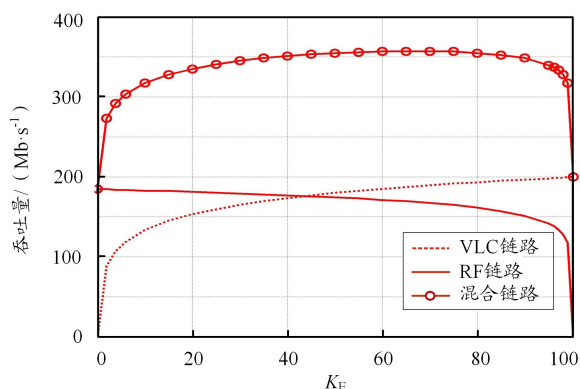
为了量化分析非朗伯光波束对混合链路软切换表现的影响,本节将在典型室内场景按照表 1 仿真参数对传统朗伯及非朗伯波束进行仿真比较,重点比较 VLC 链路吞吐量、RF 链路吞吐量和混合链路整体吞吐量在 2 种异构方案中光波束配置的依赖关系。

2.1 传统朗伯光波束配置仿真

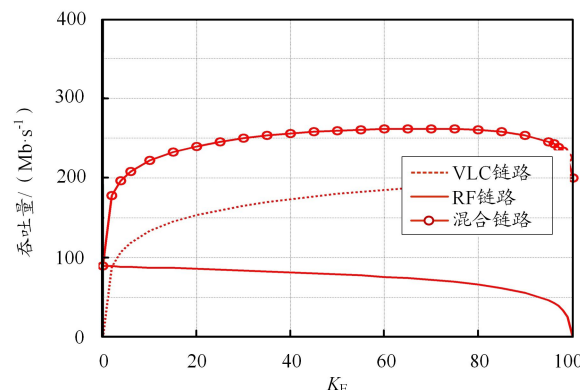
当 $d_r=10$ m 时,传统朗伯可见光、RF 及对应混合链路吞吐量情况如图 3(a)所示。可以看出,随着 K_E 从 0 逐渐增加到 100, C_{Lam}^{ss} 从 0 Mb/s 逐渐增加到 199.72 Mb/s, C_{RF}^{ss} 从 184.67 Mb/s 逐渐降低到 0 Mb/s; 当 K_E 取值 65

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 光源空间坐标	(2.5 m, 2.5 m, 3.0 m)
接收器空间坐标	(4.3 m, 4.3 m, 0.85 m)
接收器视场角/(°)	90
PD 探测器面积/cm ²	1.0
PD 探测器响应度/(A·W ⁻¹)	0.53
光滤波片增益	1
光折射指数	1.5
LED 调制带宽/MHz	20
RF 调制带宽/MHz	10
RF 载频/GHz	5
最大等效电域发射功率/W	10
RF 噪声功率密度/(W·Hz ⁻¹)	7.6×10^{-21}
可见光通信噪声功率密度/(W·Hz ⁻¹)	1.0×10^{-21}



(a) $d_r=10$ m



(b) $d_r=60$ m

图 3 传统朗伯可见光、RF 及对应混合链路吞吐量比较

时, C_{total}^{ss} 取得最大吞吐量为 356.83 Mb/s。当 $d_r=60$ m 时, 传统朗伯可见光、RF 及对应混合链路吞吐情况如

图 3(b)所示。可以看出,随着 K_E 从 0 逐渐增加到 100, $C_{\text{Lam}}^{\text{SS}}$ 从 0 Mb/s 逐渐增加到 199.72 Mb/s, $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 从 89.58 Mb/s 逐渐降低到 0 Mb/s; 当 K_E 取值 65 时, $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 取得最大吞吐量为 261.79 Mb/s。

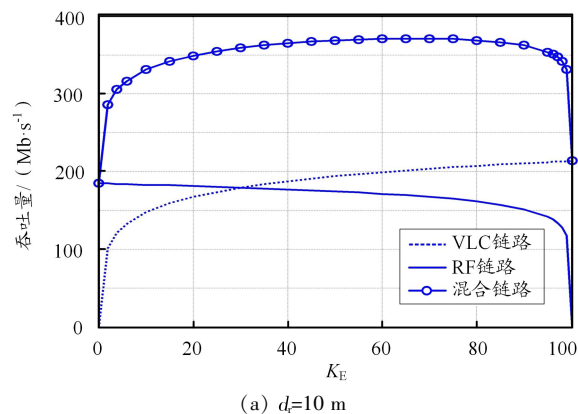
2.2 非朗伯光波束配置仿真

当 $d=10$ m 时, 非朗伯可见光、RF 及对应混合链路吞吐情况如图 4(a)所示。可以看出,随着 K_E 从 0 逐渐增加到 100, $C_{\text{NonLam}}^{\text{SS}}$ 从 0 Mb/s 逐渐增加到 213.61 Mb/s, $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 从 184.67 Mb/s 逐渐降低到 0 Mb/s; 当 K_E 取值 65 时, $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 取得最大吞吐量为 370.72 Mb/s。当 $d=60$ m 时, 非朗伯可见光、RF 及对应混合链路吞吐情况如图 4(b)所示。可以看出,随着 K_E 从 0 逐渐增加到 100, $C_{\text{NonLam}}^{\text{SS}}$ 从 0 Mb/s 逐渐增加到 213.61 Mb/s, $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 从 89.58 Mb/s 逐渐降低到 0 Mb/s; 当 K_E 取值 65 时, $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 取得最大吞吐量为 275.68 Mb/s。在 K_E 取值从 20 增加至 65 时, $C_{\text{NonLam}}^{\text{SS}}$ 随着发射功率的增加而稳定增加, $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 随着发射功率的降低而呈现缓慢下降的趋势。由于 $C_{\text{NonLam}}^{\text{SS}}$

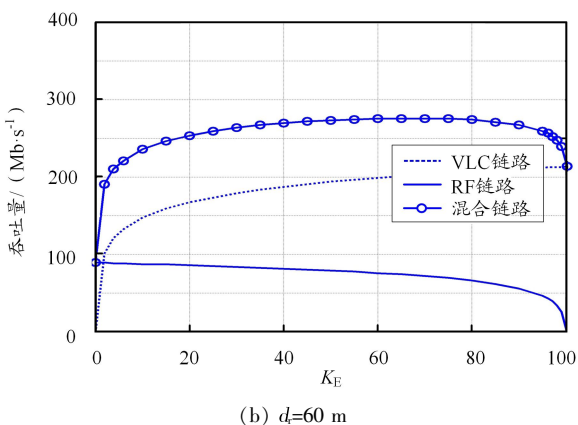
提升的速度略高于 $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 下降的速度, 因而混合链路整体上呈现稳步提升的趋势。在 K_E 取值大于 65 以后, $C_{\text{NonLam}}^{\text{SS}}$ 稳定增加的趋势得到了延续, $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 下降的速度却急剧增加, $C_{\text{NonLam}}^{\text{SS}}$ 提升的速度已无法抵消 $C_{\text{RF}}^{\text{SS}}$ 下降的速度, 混合链路整体上呈现加速下降的趋势。

不同于传统朗伯光源, 非朗伯光源的最大出射方向不再出现于光源的法向方向, 而是出现于偏离法向方向约 30° 的所有空间方向。因此, 非朗伯光源不再将光功率集中于光源的正下方, 而是将更多的光功率投射于覆盖的非中心区域, 可以显著提升覆盖的均匀性。为不失一般性, 本文所讨论接收位置处于典型非中心区域, 可以在非朗伯光源配置下接收更多的光功率, 因此系统的吞吐量可得到相应提高。

为了确定发射功率对混合链路吞吐量的影响, 本文分别对 2 W、5 W、10 W 和 15 W 共 4 种发射功率配置进行链路吞吐量对比, 对比情况如图 5 所示。可以看出, 在相同光波束配置情况下, 随着发射功率从 2 W 逐渐增加至 15 W, 混合链路吞吐量会逐步增加; 当光波束配置从传统朗伯光波束替换为非朗伯光波束时, 4 种发射功率下的混合链路吞吐量都有不同程度的提高。在 4 种发射功率下, 朗伯 $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 的最大值分别为 287.35 Mb/s、326.88 Mb/s、356.83 Mb/s 和 374.37 Mb/s。相应地, 非朗伯 $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 的最大值分别为 301.17 Mb/s、340.75 Mb/s、370.72 Mb/s 和 388.26 Mb/s。因此, 与朗伯光波束相比, 非朗伯光波束配置时对应的 $C_{\text{total}}^{\text{SS}}$ 最大值的增益分别为 13.82 Mb/s、13.87 Mb/s、13.89 Mb/s 和 13.89 Mb/s, 对比情况如图 6 所示。可以看出, 在不同整体发射功率配置下, 当 $K_E > 10$ 时, 吞吐量增益都能保持在 14 Mb/s 左右。



(a) $d=10$ m



(b) $d=60$ m

图 4 非朗伯可见光、RF 及对应混合链路吞吐量比较

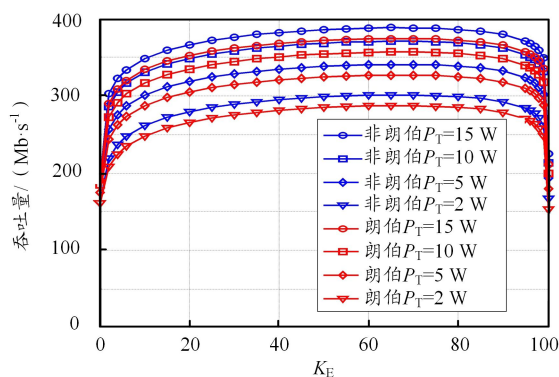


图 5 $d=10$ m 时不同光波束配置下混合链路吞吐量比较

丁举鹏,易芝玲,赵楷,等:异构可见光及 RF 混合链路软切换表现分析

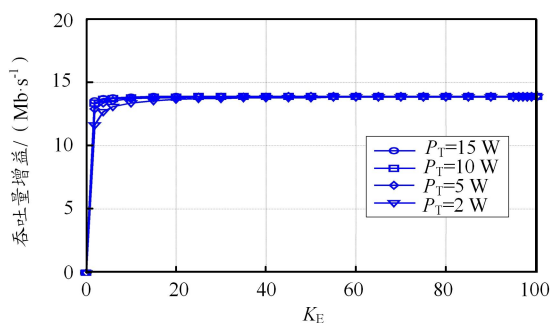


图6 $d=10$ m 时非朗伯光波束相对朗伯光波束引入的吞吐量增益

3 结束语

在近端、远端 RF 接入点配置下,本文所提出的基于非朗伯混合链路设计方案的整体吞吐量的最大值分别为 370.72 Mb/s、275.68 Mb/s。与已有的基于传统朗伯光波束的可见光及 RF 混合链路设计相比,本文所提方案可以引入高达约 14 Mb/s 的吞吐量增益。因此,本文初步证实了异构非朗伯可见光及 RF 混合链路配置可提供吞吐增益,为深入研究可见光通信技术提供了一种新思路。

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进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 40–51.
- [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: 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 C L, Xu Z Y. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–15.
- [9] ASHIMBAYEVA A, KALIKULOV N, KIZILIRMAK R C. Hard and soft switching for indoor hybrid VLC/RF systems [C]// IEEE. Proceedings of 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). Moscow: IEEE, 2017: 1–5.
- [10] DING J P, I C L, 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.
- [11] DING J P, I C L, 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.
- [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]// Springer. Proceedings of 13th Chinese Conference on Biometric Recognition (CCBR 2018). Urumqi: 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] 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]. 2022, 46(1): 44–48.
- [18] 丁举鹏,易芝玲,赵楷,等. 非朗伯 MIMO 可见光通信误比特率表现研究[J]. 光通信技术, 2022, 46(3): 76–80.