

基于扇区化光波束切换的站址受限可见光通信覆盖方法

丁举鹏^{1,2}, 易芝玲², 米吉提·阿不里米提¹

(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)

摘要: 传统的静态朗伯和非朗伯光波束配置难以较好地解决发射器站址受限问题。针对单一发射器的应用场景, 提出了一种基于扇区化光波束切换的信道站址受限可见光通信覆盖方法。该方法采用商业可用的倾斜非朗伯光波束, 根据接收器在不同位置反馈的状态信息, 动态地确定能提供最佳覆盖信噪比的候选光波束, 构建定向传输链路。仿真结果表明: 在典型室内环境下, 与传统静态朗伯光波束配置相比, 该方法通过增加 2 个或 3 个候选扇区波束切换选项, 接收器可分别获得 4.48 dB、5.94 dB 的平均信噪比增益。

关键词: 扇区化光波束; 波束切换; 站址资源受限; 无线光通信

中图分类号: TN919 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)01-0063-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Site-restricted visible light communication coverage method based on sectorized beam switching

DING Jupeng^{1,2}, I Chih-Lin², MIJIT Ablimit¹

(1. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China;

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: The traditional static Lambert and non Lambert beam configuration is difficult to solve the problem of limited transmitter site. Aiming at the application scenario of a single transmitter, a coverage method of restricted visible light communication based on sectionalized optical beam switching is proposed. This method uses commercially available slanted non-Lambert optical beams to dynamically determine the candidate optical beams that can provide the best coverage signal-to-noise ratio according to the state information feedback from the receiver at different locations, and then builds a directional transmission link. Simulation results show that, compared with the traditional static Lambert beam configuration, the proposed method can achieve an average SNR gain of 4.48 dB and 5.94 dB respectively, by adding two or three candidate sector beam switching options in a typical indoor environment.

Key words: sectorized optical beams, beams switching, limited site resource, wireless optical communication

0 引言

可见光通信以其低成本、免于频谱注册和抗常规

收稿日期: 2022-02-28。

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, 现任职于新疆大学, 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和自治区天池博士计划项目等科研项目。



电磁干扰等优点, 被视为传统基于射频移动无线网络重要的补充技术之一^[1-4]。但是, 受限于全向朗伯光波束的可见光通信研究范式, 传统的朗伯光波束研究方案必须依赖多个可见光发射器来增强移动性。这些发射器布局在天花板上, 呈方形网格型、蜂窝型、泊松点型或硬核泊松点型, 数量充足。但是, 对于可用发射器数量受限甚至仅包含单个发射器的室内场景, 这种全向朗伯光波束的可见光通信范式则无法完成通信^[5-8]。文献[9-13]表明, 非朗伯光波束在信道增益、接收功率分布等方面表现出优越于朗伯光波束的特性。同时, 静态非朗伯光波束配置时系统的累积分布函数数值占比较高。因此, 本文以非朗伯光波束配置为基础, 提出一种

丁举鹏, 易芝玲, 米吉提·阿不里米提. 基于扇区化光波束切换的站址受限可见光通信覆盖方法

基于扇区化光波束切换的站址受限可见光通信覆盖方法。

1 非朗伯光波束三维空间辐射特性

本文借助多个倾斜的发光二极管(LED)平面型子阵列来构造发射器, 辐射出多束非朗伯倾斜候选光波束。但是, 由于每个LED子阵列有差异化的空间方位指向, 因而本文对发射器点亮的室内区域进行了区域化的划分: 以发射器所在的空间位置为中心, 当发射器由2个LED子阵列构成时, 可见光覆盖小区被等尺寸地划分为2个扇区区域(双扇区), 每个扇区区域由一个高度关联的LED子阵列和其非朗伯倾斜光波束来提供区域性覆盖; 当发射器由3个LED子阵列(假设三者的方位角朝向相差120°)构成时, 则可见光覆盖区域被近似划分为3个扇区(三扇区)。

为了便于研究, 本文将2个候选非朗伯光波束的动态配置中的对应初始方位偏置值分别设置为0°和180°, 其三维空间辐射特性如图1所示。其中, 红色实线箭头表示波束长轴的空间指向, 红色虚线箭头表示该空间指向在光源所在XY平面内的投影方向, 该投影方向与X轴正向的夹角即为初始方位偏置角度。将3个候选非朗伯光波束的扩展动态配置中的对应初始方位角偏置值分别设置为90°、210°和330°, 其三维空间辐射特性如图2所示。

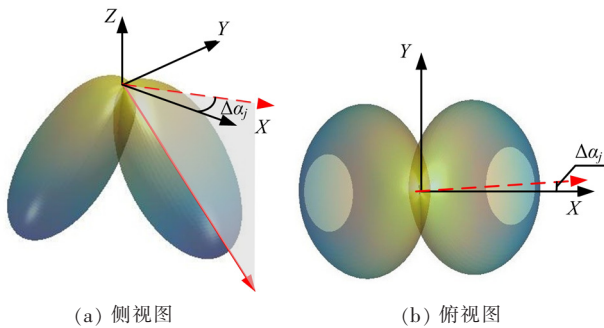


图1 双扇区动态配置的三维空间辐射特性

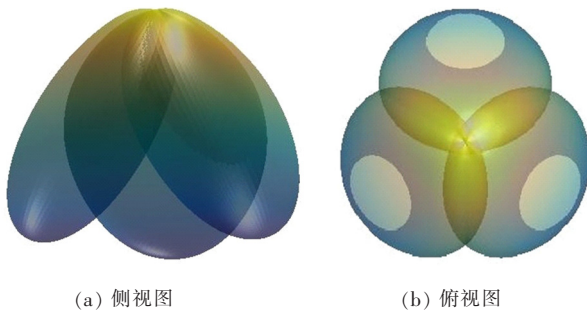


图2 三扇区动态配置的三维空间辐射特性

对于第 j 束倾斜候选光波束, 相应的辐射强度表达式为

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

其中, $\Delta\alpha_j$ 是第 j 束倾斜候选光波束的初始方位角偏置值, φ 为出射角, $\Delta\varphi$ 为出射角变化量, α 为光线投影在光源所在平面内的方位角, 高斯系数为 $g_{11}=0.13$ 、 $g_{21}=45^\circ$ 、 $g_{31}=g_{41}=18^\circ$ 、 $g_{12}=1$ 、 $g_{22}=0$ 、 $g_{32}=38^\circ$ 、 $g_{42}=22^\circ$ ^[10,13]。

所选的第 j 束工作光波束和接收器之间的信道增益表达式为

$$H(S_{Beam}^{NSPW}, R, \Delta\alpha_j) = \begin{cases} \frac{A_R I_{NSPW}(\varphi + \Delta\varphi, \alpha + \Delta\alpha_j)}{d_0^2} \times \cos\theta G_d G_{oc}, & 0 \leq \theta \leq \theta_{FOV} \\ 0, & \theta > \theta_{FOV} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $I_{NSPW}(\varphi_0, \alpha_0)$ ^[14]为NSPW345CS系列光源产品的光波束辐射强度, A_R 为接收器光电二极管(PD)探测面积, d_0 为光源与接收器之间视距(LOS), G_d 和 G_{oc} 分别为接收器滤光片增益和聚光器增益, θ_{FOV} 为接收器的视场角(FOV)。 S_{Beam}^{NSPW} 代表NSPW型LED光源, 该光源发出典型的非朗伯光波束, R 代表接收器。

2 基于扇区化光波束切换方法

假设在单个发射器场景中接收器的信道状态信息(CSI)对发射器而言是完全已知的, 则可以根据接收器在不同接收位置反馈的CSI, 动态地确定能提供最佳覆盖信噪比的候选光波束, 进而将全部数据流加载到选定的扇区光波束来构建定向传输链路。

对于可见光通信发射器, 被选定的最优候选扇区光波束的标识号可根据CSI来确定, 其表达式为

$$\hat{j} \arg \max_{j \in J} = \left\{ \frac{[P_T H(S_{Beam}^{NSPW}, R, \Delta\alpha_j)]^r}{\delta^2} F_{OE} \right\} \quad (3)$$

其中, J 是候选光波束的数量, r 为PD的响应度, F_{OE} 是光/电转换因子, δ^2 是接收器处的加性噪声方差, P_T 为发射光功率。

基于扇区化光波束切换方法中接收器的信噪比表达式为

$$SNR_{dyna} = \frac{[P_T H(S_{Beam}^{NSPW}, R, \Delta\alpha_j)]^r F_{OE}}{\delta^2} \quad (4)$$

图3为基于扇区化波束切换的站址受限无线光通

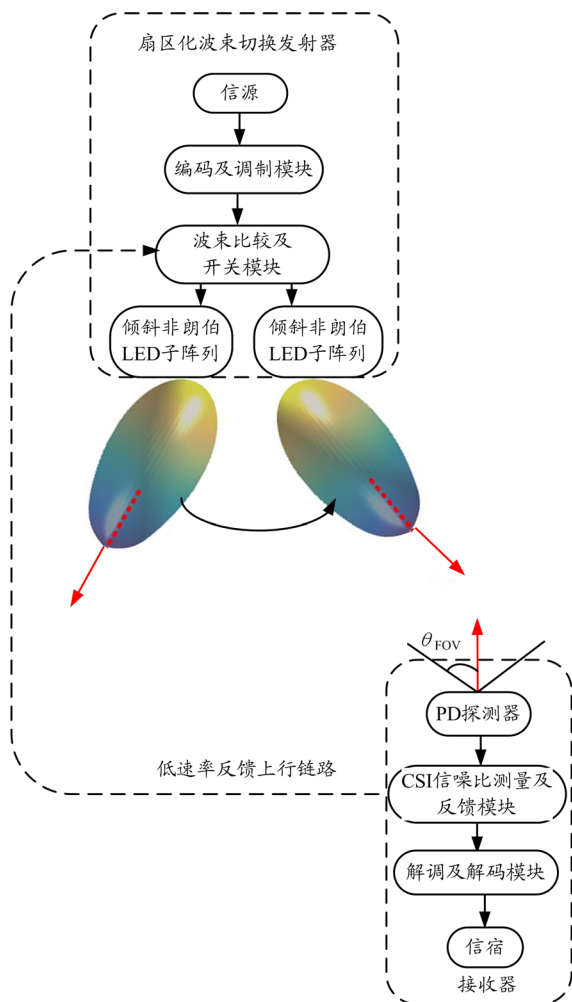


图3 基于扇区化波束切换的站址受限无线光通信系统框图

信系统框图。基于扇区化光波束切换方法的具体流程如下:①在波束测量阶段的第一个测量时隙内,发射器首先将 CSI 测量信号仅加载到第一个倾斜非朗伯 LED 子阵列,进而接收器对检测到的 CSI 测量信号的信噪比进行检测并在缓存中暂时保存上述记录;在第二个测量时隙内,发射器将 CSI 测量信号仅加载到第二个倾斜非朗伯 LED 子阵列,进而接收器第二次检测 CSI 测量信号信噪比,并缓存记录。重复上述过程,直至每个非朗伯 LED 子阵列及其空间波束的测量信号信噪比被接收器所测量并记录。②在判定反馈阶段,通过强壮的低速率射频链路或者红外上行链路,接收器将各条测量信噪比记录反馈至发射器。③在波束判定阶段,将得到的各项测量信噪比记录进行比较,并将其中更高一项的关联波束选定为用于加载数据信息的工作波束。④在选择执行阶段,依据所选定的工作波束标识信息,通过波束选择开关,发射器将数据流切换到选定的 LED 子阵列。

由于上述扇区化光波束切换方法仅改变数据信号(交流信号)在不同 LED 子阵列之间的加载与否,并不改变直流偏置电源对各个 LED 子阵列的偏置点亮,因而不会影响其稳定点亮状态。

3 数值仿真及分析

本文将量化评估静态非朗伯光波束配置和动态扇区化非朗伯光波束配置下可见光通信的覆盖特性。为了便于比较,仿真仅包含单一发射器的资源受限场景,涉及的主要参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

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
发射器的平均光发射功率/W	40.83
接收器视场角/(°)	70
接收平面高度/m	0.85
PD 探测器面积/cm ²	1.5
PD 探测器响应度/(A·W ⁻¹)	0.28
聚光器折射指数	1.54
滤光片增益	1
调制带宽/MHz	20
背景光电流/μA	5100
绝对温度/K	298
跨阻放大器的反馈阻抗/kΩ	6

3.1 静态非朗伯光波束配置

传统的静态朗伯和非朗伯光波束配置中,发射器位于天花板的中心,可见光覆盖范围主要集中在发射器空间位置下方的有限圆形区域。同时,峰值信噪比出现在接收机工作平面的中心,该工作平面被朗伯光波束直接照亮。

静态朗伯和非朗伯光波束配置的信噪比空间分布如图 4 所示。一旦朗伯光波束被非朗伯光波束取代,系统平均信噪比将从 39.22 dB 增加到 42.99 dB,信噪比波动范围则从 24.01~46.85 dB 调整到 18.32~53.52 dB 之间,对应的信噪比波动幅度从 22.74 dB 提升至 35.20 dB。因此,与静态朗伯光波束配置相比,静态非朗伯光波束配置的平均信噪比增益高达 3.77 dB。然而,这种简单的波束替换会使系统信噪比波动幅度增强 12.46 dB,从而导致可见光的覆盖均匀性恶化。从图 4(b)可以看出,由于所引入的非朗伯光波束空间的不对称性,虽然峰值信噪比仍然出现在接收器工作平

丁举鹏, 易芝玲, 米吉提·阿不里米提. 基于扇区化光波束切换的站址受限可见光通信覆盖方法

面的中心, 但是相应的覆盖分布从原有的圆形变为椭圆形。

3.2 扇区动态化非朗伯光波束配置

双扇区动态非朗伯光波束配置 (包含带有 2 束候选的倾斜非朗伯光波束, 下文简称双扇区动态配置) 和三扇区动态非朗伯光波束配置 (包含带有 3 束候选的倾斜非朗伯光波束, 下文简称三扇区动态配置) 的室内

场景如图 5 所示。

当采用双扇区动态配置时, 信噪比空间分布如图 6(a) 所示。接收平面上系统的平均信噪比为 43.70 dB, 信噪比波动范围和幅度分别为 23.50~51.86 dB、28.36 dB。可以看出, 覆盖热点由 2 个扇区区域组成, 每个扇区区域由 1 个候选倾斜非朗伯波束提供来定向服务。与静态非朗伯光波束配置相比, 双扇区动态配置

可以获得的平均信噪比增益高达 4.48 dB, 波动幅度相近, 这表明系统覆盖均匀性损失微小且可以接受。本文选择性地将信号加载到接收机所在的扇区光波束, 提高可见光通信的覆盖强度, 从而改善室内场景中通信设备的移动范围。

当采用三扇区动态配置时, 可用的空间自由度将进一步增强, 信噪比空间分布如图 6(b) 所示。接收平面上系统的平均信噪比高达 45.16 dB, 与静态非朗伯光波束配置相比, 信噪比增益高达 5.94 dB; 各自的信噪比波动范围为 26.63~51.86 dB, 信噪比波动幅度仅为 25.23 dB, 覆盖均匀性与静态朗伯光波束配置相当。可以看出, 最终覆盖热点由 3 个扇区区域组成, 每个扇区区域由 1 束候选倾斜非朗伯波束提供定向服务。在不增加发射功率消耗的情况下, 热点区域获得了极大的扩展; 与静态朗伯光波束配置不同, 三扇区动态配置包括 3 个单独的峰值信噪比位置, 且房间至少 2 个角落位置与所在扇区的非朗伯波束对齐, 在很大程度上缓解了局部可见光信号覆盖弱的问题。

以系统信噪比小于 35 dB

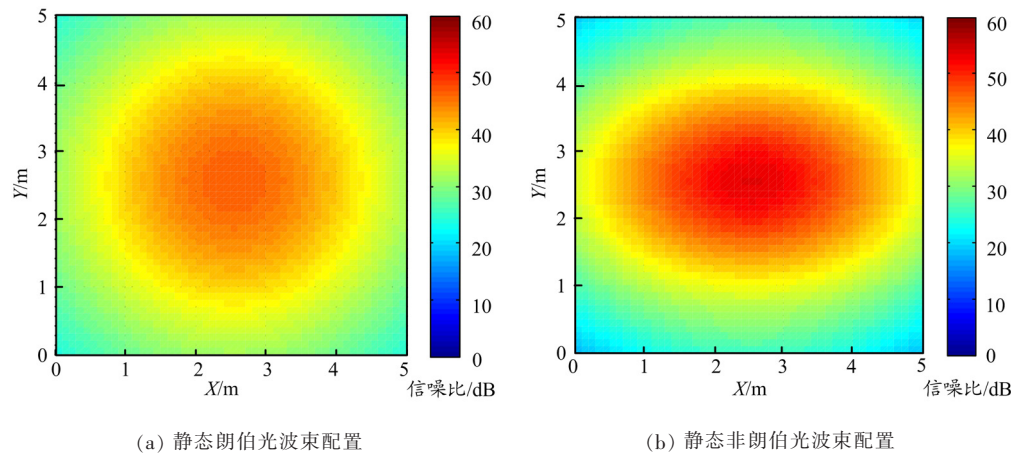


图 4 朗伯和非朗伯光波束配置

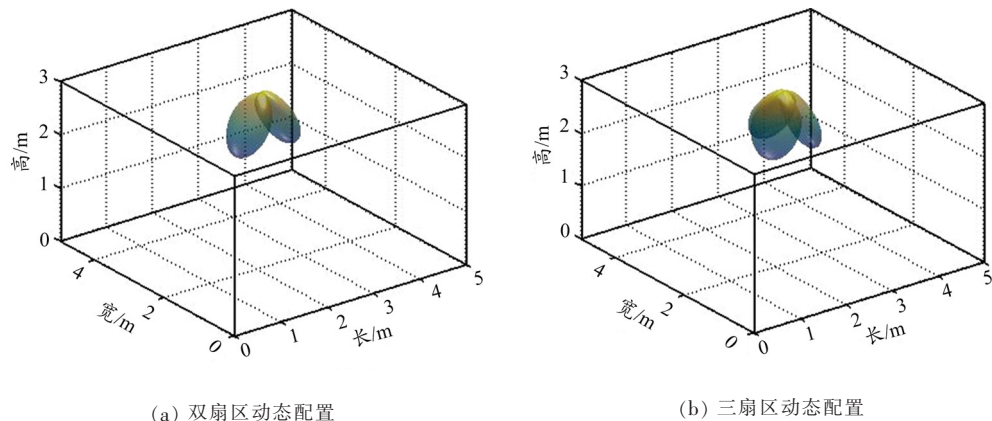


图 5 典型室内应用场景比较

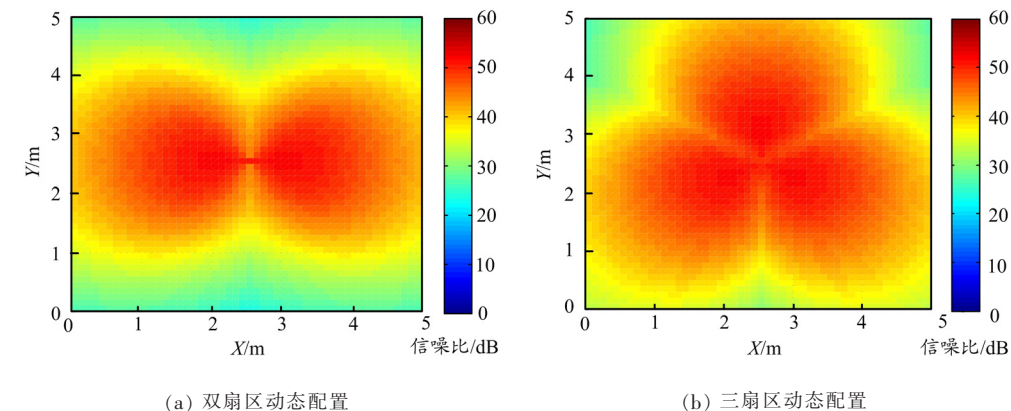


图 6 信噪比空间分布特性比较

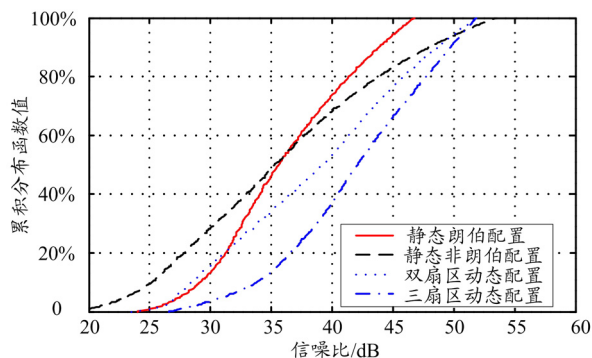


图7 信噪比空间分布的累积分布函数特性比较

为界,综合并数字化图4、图6,得到4种光波束配置信噪比空间分布的累积分布函数值如图7所示。可以看出,静态朗伯和非朗伯链路配置对应的系统累积分布函数值占比分别高达46.6%和48.7%,而双扇区动态配置、三扇区动态配置的占比分别降低到约34.1%、13.5%。

本文对三扇区动态配置时不同光波束俯仰角(光波束法线方向与其在水平面上的投影方向之间的角度)的信噪比空间分布的累积分布函数值进行了比较,如图8所示。可以看出,俯仰角被设置为60°时增益性能最佳(信噪比小于35 dB时的占比最低),但剩余4种的俯仰角(30°、45°、75°和90°)配置下的接收平面也可以获得类似的累积分布函数值曲线和增益趋势。综上所述,本文所提出的扇区化光波束切换配置方法鲁棒性较好。

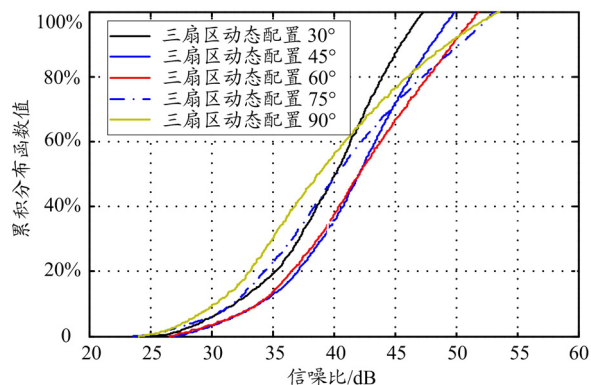


图8 不同俯仰角设定下信噪比累积分布函数特性比较

4 结束语

本文提出了基于扇区化波束切换的站址受限可见光通信覆盖方法,利用独特辐射特性的商业可用非朗伯光波束来配置可见光通信链路。与静态朗伯和非朗伯链路配置相比,当系统信噪比小于35 dB时,双扇区动态配置、三扇区动态配置时系统的累积分布函数值

占比分别降低到约34.1%、13.5%。因此,即使在站址受限场景,本文所提出的基于扇区化波束切换方案仍然可以显著改善可见光弱覆盖的问题。

参考文献:

- [1] HARALD H, LIANG Y, YUNLU W, et al. What is LiFi [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 34(6): 1533–1544.
- [2] YESILKAYA, PURWITA A, PANAYIRCI E, et al. Flexible LED index modulation for MIMO optical wireless communications [C]// GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference, December 7–11, 2020, Taipei, China. New York: IEEE, 2020: 1–7.
- [3] TOSHIHIKO K, MASAO N. Fundamental analysis for visible light communication system using LED light [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100–107.
- [4] DING J, XU Z, HANZO L. Accuracy of the point-source model of a multi-LED array in high-speed visible light communication channel characterization [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 1–14.
- [5] CHEN C, TSONEV D, HAAS H. Joint transmission in indoor visible light communication downlink cellular networks [C]// 2013 IEEE Globecom Workshops, December 9–13, 2013, Atlanta, USA. New York: IEEE, 2013: 1127–1132.
- [6] CHEN X, DING J, YU B, et al. A survey on wireless optical ITS for smart city [C]// 2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 24–27, 2020, Beijing, China. New York: IEEE, 2020: 1–3.
- [7] LIU W, DING J, ZHENG J, et al. Relay-assisted technology in optical wireless communications: a survey [J]. IEEE Access, 2020(8): 194384–194409.
- [8] MEI H, DING J, ZHENG J, et al. Overview of vehicle optical wireless communications [J]. IEEE Access, 2020, 8: 173461–173480.
- [9] DING J, I C L, CHEN X, 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, 2019: 1–5.
- [10] DING J, I C L, XU Z. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–15.
- [11] DING J, I C, ZHANG H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam [C]// IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20–24, 2019, Shanghai, China. New York: IEEE, 2019: 1–6.
- [12] DING J, I C L, XIE R, et al. Actual radiation patterns-oriented non-deterministic optical wireless channel characterization [C]// Springer Chinese Conference on Biometric Recognition, August 11–12, 2018, Urumchi, China. Berlin: Springer, 2018: 517–527.
- [13] MORENO I, SUN H. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1808–1819.
- [14] 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.