

兼顾照明的可见光 MIMO 通信系统模型

朱彤, 赵黎, 刘智港, 张峰

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 可见光通信要同时兼顾照明和通信的双重作用, 因此需要同时考虑光源布局及通信可靠性问题。为保证国际照明标准, 在总 LED 灯珠不变的情况下, 首先对光源布局进行了分析并数值计算了在同样功耗条件下 3 个及 4 个阵列布局方式的照度分布及均匀性。其次, 为了提高多阵列可见光通信系统有效性及可靠性, 将 MIMO 技术应用于 VLC 中, 采用 STBC 编码数值计算了多阵列布局方式下系统可靠性。结果表明, 在同样功耗条件下, 4 个阵列的 MIMO 系统照度均匀性较 3 个阵列提高了 20.9%, 当误码率为 10^{-4} 时, 4×1 系统较 3×1 系统的误码性能大约可提高 2 dB, 4×2 与 3×2 系统分别较 4×1 与 3×1 系统误码性能提高了 6 dB 与 5 dB。

关键词: 可见光通信; MIMO 技术; STBC 编码; LED 阵列; 误码率

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0822001

Visible light MIMO communication system model considering lighting

Zhu Tong, Zhao Li, Liu Zhigang, Zhang Feng

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Visible light communication has a double function of illumination and communication, so it is needed to consider the light source layout and communication reliability issues. In order to ensure the international lighting standard, in the constant of the total LED lamp beads, firstly, the layout of the light source was analyzed, the illumination distribution and uniformity of the three and four array layouts under the same power consumption were numerically calculated. Secondly, in order to improve the effectiveness and reliability of multi-array visible-light communication system, MIMO technology was applied to VLC, and STBC coding was used to calculate the reliability of multi-array layout. The results show that the uniformity of illumination of the four arrays is 20.9% higher than that of the three arrays under the same power consumption. When the bit error rate is 10^{-4} , the error performance of 4×1 system is improved by about 2 dB compared with the 3×1 system, the error performance of the 4×2 and 3×2 systems are increased by 6 dB and 5 dB compared with the 4×1 and 3×1 systems.

Key words: visible light communication; MIMO technology; STBC encoding; LED array; BER

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61271362); 陕西省科技厅一般项目-工业领域(2017GY-081); 陕西省自然科学基金(2017JM6041); 西安市科技计划(2017075CG/RC038(XAGY001)); 陕西省教育厅科技专项(2017JK0373)

作者简介: 朱彤(1995-), 男, 硕士生, 主要从事无线光通信关键技术方面的研究。Email: 653822977@qq.com

导师简介: 赵黎(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要从事无线光通信关键技术方面的研究。Email: pillily_lily@126.com

0 引言

可见光通信(Visible Light Communication, VLC)是利用波长为 380~780 nm 的可见光波段作为通信载体,将调制好的信息加载到白光 LED 光源上来控制 LED 灯高速闪烁传递信息的新型无线通信方式^[1-2]。因其与射频通信相比具有诸多优点被称为最具发展潜力的下一代移动通信。

目前我国的可见光通信技术发展大多是处于室内可见光通信研究阶段,对于室内可见光通信系统^[3]而言,其具有着照明与通信的双重功^[4]。为了保证国际照明标准及照度均匀性和避免通信盲区效应,需采用多个 LED 阵列的光源布局模式,在照明过程中多组阵列协同传输信息,以获取室内分集增益,从而提高通信系统的传输性能^[5],因此文中通过多阵列光源的合理布局,同时将多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术引入到 VLC 系统中,通过对数据进行 STBC 编码,实现兼顾照明的 VLC 系统的可靠传输。

1 可见光 MIMO 系统信道模型

1.1 非成像可见光 MIMO 系统原理

MIMO 技术的原理就是在发送端首先将原始的二进制比特流数据 $x(t)$ 进行调制映射^[6],然后将调制好的信号经过驱动电路控制发射端 TXn 个 LED 灯的闪烁以此来发送信号,在 RXn 个接收端上首先通过探测器 PD 把探测到的光功率信号转化成电信号,然后进行解调制映射,最后通过一系列的放大电路和判决电路恢复出原始的信号。图 1 为 MIMO 技术的原理图。

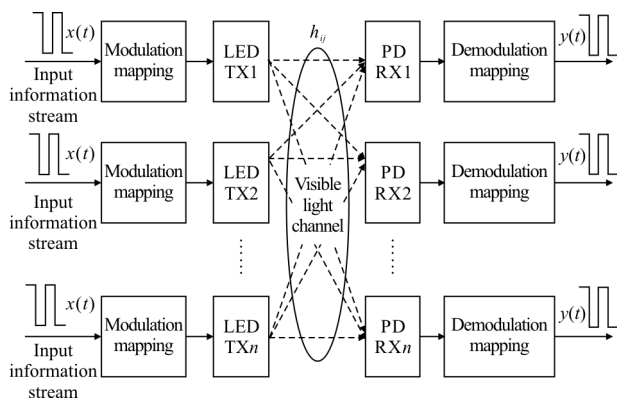


图 1 MIMO 技术原理图

Fig.1 Schematic diagram of MIMO technology

1.2 MIMO 可见光通信系统的信道矩阵

在非成像型室内 MIMO 系统中,发送端和接收端有一一对应的关系,由于 LED 光的传输相对于传输距离来说所需的时间是很小的,因此文中将其作为线性时不变系统处理,其信道矩阵 H 为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_r} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_t,1} & h_{N_t,2} & h_{N_t,3} & h_{N_t,N_r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: h_{ij} 表示每个信道的直流增益,该值与探测器的接收面积,视场接收角,探测器与光源的距离有关。发射端有 N_t 个 LED 阵列,每个 LED 阵列有 K 个 LED 灯珠,接收端有 N_r 个探测器,通过对发射端 i 上所有 LED 发出到达接收端 j 上的能量总和来估算,因此发射端 i 与接收端 j 之间的信道增益 h_{ij} 为:

$$h_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^K \frac{A_{rx}^j}{d_{ijk}^2} I(\phi_{ijk}) \cos(\varphi_{ijk}) & 0 \leq \varphi_{ijk} \leq \varphi_c \\ 0 & \varphi_{ijk} \geq \varphi_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_{rx}^j 表示第 j 个光电探测器上的接收面积; d_{ijk} 表示发射端 i 上的第 k 个 LED 到接收端 j 的距离; ϕ_{ijk} 为 LED 的辐射角; $I(\phi_{ijk})$ 是第 k 个 LED 沿 ϕ_{ijk} 方向的光强; φ_{ijk} 为接收端的光入射角; φ_c 为光电探测器的视场角。

2 可见光 MIMO 光照度分布模型

2.1 多阵列 LED 光照度及均匀性分析

图 2 为文中搭建的室内模型,大小为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,为了满足国际照度标准,需采用多个 LED 阵列作为光源,接收机放在距离地面 0.75 m 的办公桌上,以房间的一角作为坐标原点建立三维坐标系。根据国际照明标准规定^[7],室内照明的光照度需满足在 300~1500 lx 之间。为了在接收端获得更高的分集增益,如图 3 和图 4 所示,分别设计了由 324 颗灯珠构成的 3 阵列光源及 4 阵列光源布局方案^[8]。在 3 阵列布局中,以房间一角为坐标原点建立二维坐标系,则 3 个 LED 阵列的中心点坐标分别为 $A:(1,1)$, $B:(3,1)$, $C:(2,3)$;在 4 阵列布局中,当 LED 灯珠间隔选为 0.03 m,LED 阵列距离房顶边缘选为 0.4 m 时,其接收到的光照度既能满足国际标准,其标准差也最小。仿真参数如表 1 所示。

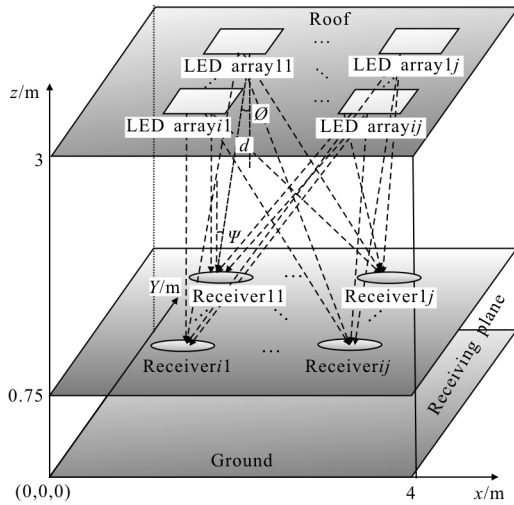


图 2 室内布局模型
Fig.2 Indoor layout model

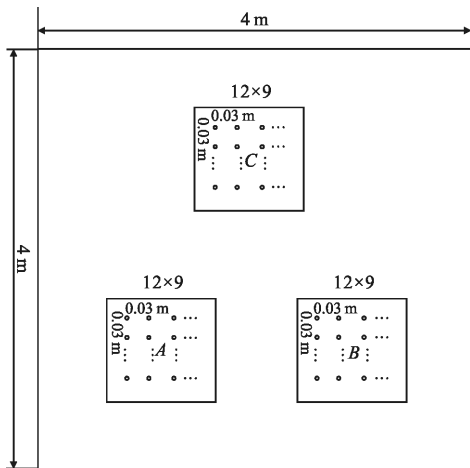


图 3 3 个 LED 阵列在天花板上的分布示意图
Fig.3 Distribution diagram of three LED arrays on the ceiling

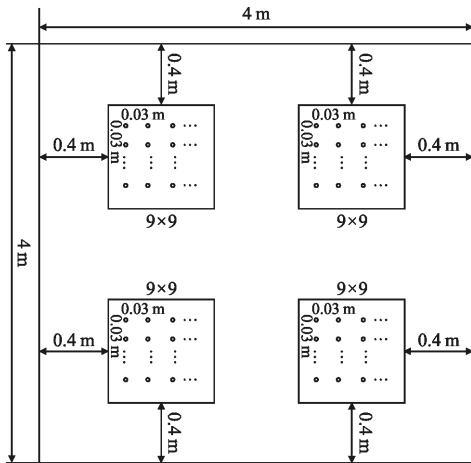


图 4 4 个 LED 阵列在天花板上的分布示意图
Fig.4 Distribution diagram of four LED arrays on the ceiling

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Room model (length×width×height)	4 m×4 m×3 m
Single LED power/W	0.5
Semi-angle at half power/(°)	60
LED center luminous intensity(I ₀)/cd	21.5
Lamp beads interval/m	0.03
3 array with 4 array layout	12×9, 9×9

当光源发射角为 φ,接收角为 ψ 时,某一点的水平照度可表示为^[9]:

$$E_n = I_0 \cos^m(\phi) \cos(\psi) / d^2 \quad (3)$$

式中: I₀ 为 LED 的中心发光强度; m = -ln2/ln cos φ_{1/2}, φ_{1/2} 为 LED 半功率角。d 为:

$$d = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (3 - 0.75)^2} \quad (4)$$

式中: (x_n, y_n, 3) 为点光源坐标; (x, y, 0.75) 为接收平面上某点坐标。由于 LED 灯发出的光为非相干光,所以在接收平面上的每一点的光照度等于各个 LED 灯珠到这一点的总光照度的总和,所以在接收平面上的某一点 (x, y, 0.75) 接收到的光照度为:

$$E(x, y) = \sum_{n=1}^M E_n \quad (5)$$

式中: M 为总的光源个数。照度均值 \bar{E} 为:

$$\bar{E} = \frac{1}{S} \iint_{(x,y)} E(x, y) dx dy \quad (6)$$

式中: S 为接收平面的面积。照度均匀性为^[10]:

$$\Delta = \bar{E} / \max[E(x, y)] \quad (7)$$

根据图 3 和图 4 的光源布局方式,仿真出室内接收平面上的光照度分布如图 5 和图 6 所示,仿真结果如表 2 所示。

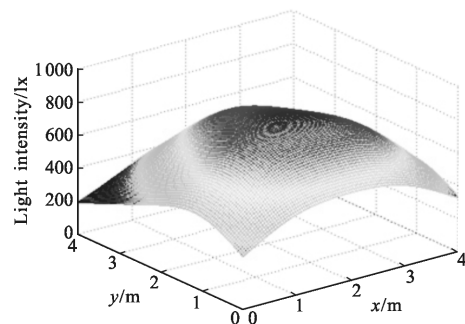


图 5 3 个 LED 阵列的光照度仿真图
Fig.5 Simulation of the illumination of three LED arrays

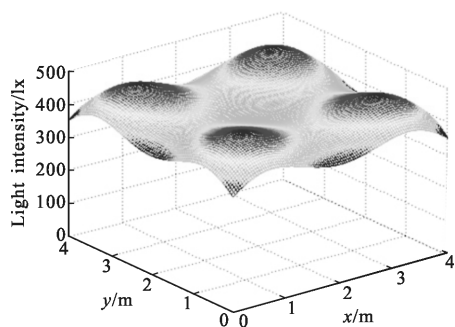


图 6 4 个 LED 阵列光照度的仿真图

Fig.6 Simulation of the illumination of four LED arrays

表 2 仿真结果

Tab.2 Simulation results

Array form	3 LED arrays	4 LED arrays
Power consumption/W	324×0.5=162	324×0.5=162
Max illumination/lx	808.41	462.51
Min illumination/lx	190.31	348.28
Ave illumination/lx	561.71	418.09
Uniformity Δ	69.5%	90.4%

由仿真结果分析可得在同样的功耗条件下 4 阵列接收平面所有点的光照度均符合国际照明标准,并且照度均匀性较 3 阵列提高了 20.9%,所以多阵列的光源布局能够兼顾照明与通信的双重作用。

3 基于 STBC 编码的 MIMO 系统

为了提高通信系统的可靠性,更好地抵抗外部环境的干扰,文中在 MIMO 通信系统中引入 STBC 编码从而实现不增加带宽的情况下提高系统的可靠性。

3.1 Alamouti 空-时码

Alamouti 码是人们最早熟知的 STBC 编码,它是专门用在两根发射天线的复正交空-时码,并且以满足速率进行传输,编码矩阵如公式(8)所示。

$$X_2 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

图 7 为 Alamouti 空时编码方案。Alamouti 编码后的信号经过两个符号周期从两根发射天线发射,在可见光通信系统中两根发射天线也就是两个 LED 阵列。在第一个符号周期内,两个符号 x_1 和 x_2 分别

从两个 LED 阵列中传输。在第二个符号周期内,第一个 LED 阵列传输 $-x_2^*$,第二个 LED 阵列传输 x_1^* 。

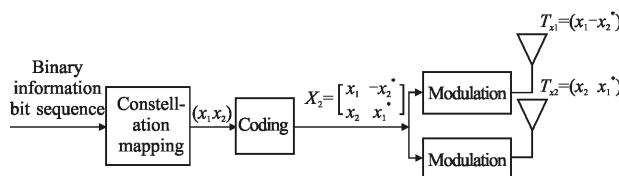


图 7 Alamouti 空时编码方案

Fig.7 Alamouti space-time coding scheme

3.2 MIMO 系统的 STBC 编解码

根据光源布局结构,发射端由 3 个 LED 阵列或 4 个 LED 阵列组成,因此需采用不同的编码矩阵,根据 STBC 编码原理对公式(8)进行推广^[11],当发射端为 3 个 LED 阵列时,码率为 3/4,采用的 STBC 编码的矩阵为:

$$X_3 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} \\ x_2 & x_1^* & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-x_3^*}{\sqrt{2}} \\ \frac{x_3}{\sqrt{2}} & \frac{x_3}{\sqrt{2}} & \frac{-x_1 - x_1^* + x_2 - x_2^*}{2} & \frac{x_2 + x_2^* + x_1 - x_1^*}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

当采用 4 个 LED 阵列做发射天线时,码率为 3/4,采用的编码矩阵为:

$$X_4 = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2 & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} \\ x_2 & x_1 & \frac{x_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-x_3^*}{\sqrt{2}} \\ \frac{x_3}{\sqrt{2}} & \frac{x_3}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_1 - x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} & \frac{(x_2 + x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} \\ \frac{x_3}{\sqrt{2}} & \frac{-x_3}{\sqrt{2}} & \frac{(-x_2 - x_2^* + x_1 - x_1^*)}{2} & \frac{-(x_1 + x_1^* + x_2 - x_2^*)}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

无论是 3 个 LED 阵列还是 4 个 LED 阵列作为发射端,采用的编码矩阵都是正交的,正是由于编码矩阵行之间的正交性,也就人为造成了天线发送信号的正交,这样不仅可以提高系统的可靠性也降低了译码的复杂度,并且仍能达到最大的发送分集增益。对于 STBC 编码的译码^[11],当发射端为 3 个 LED 阵列时在译码过程中接收机需要构造公式(11)的判决统计:

$$x_1 = \sum_{j=1}^{n_r} \left(r_1^j h_{j,1}^* + (r_2^j)^* h_{j,2} + \frac{(r_4^j - r_3^j) h_{j,3}^*}{2} - \frac{(r_4^j - r_3^j) h_{j,3}}{2} \right)$$

$$x_2 = \sum_{j=1}^{n_r} \left(r_1^j h_{j,2}^* - (r_2^j)^* h_{j,1} + \frac{(r_4^j + r_3^j) h_{j,3}^*}{2} + \frac{(r_4^j - r_3^j) h_{j,3}}{2} \right)$$

$$x_3 = \sum_{j=1}^{n_e} \left(\frac{(r_1^j + r_2^j) h_{j,3}^*}{\sqrt{2}} + \frac{(r_3^j)^* (h_{j,1} + h_{j,2})}{\sqrt{2}} + \frac{(r_4^j)^* (h_{j,1} - h_{j,2})}{\sqrt{2}} \right) \quad (11)$$

当发射端为 4 个 LED 阵列时在译码过程中接收机需要构造公式(12)的判决统计:

$$\begin{aligned} x_1 &= \sum_{j=1}^{n_e} \left(r_1^j h_{j,1}^* + (r_2^j)^* h_{j,2} + \frac{(r_4^j - r_3^j)(h_{j,3}^* - h_{j,4}^*)}{2} - \frac{(r_4^j + r_3^j)(h_{j,3}^* + h_{j,4}^*)}{2} \right) \\ x_2 &= \sum_{j=1}^{n_e} \left(r_1^j h_{j,2}^* - (r_2^j)^* h_{j,1} + \frac{(r_4^j + r_3^j)(h_{j,3}^* - h_{j,4}^*)}{2} + \frac{(r_4^j - r_3^j)(h_{j,3}^* + h_{j,4}^*)}{2} \right) \\ x_3 &= \sum_{j=1}^{n_e} \left(\frac{(r_1^j + r_2^j) h_{j,3}^*}{\sqrt{2}} - \frac{(r_1^j - r_2^j) h_{j,4}^*}{\sqrt{2}} + \frac{(r_3^j)^* (h_{j,1} + h_{j,2})}{\sqrt{2}} + \frac{(r_4^j)^* (h_{j,1} - h_{j,2})}{\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $r_t^j, t=1, 2, 3, 4$ 表示第 j 根接收天线上 t 个时隙内的接收信号; h_{ij} 为信道矩阵 H 中元素。

可靠性满足通信要求, 随着 LED 阵列和探测器的增加, 系统的性能是逐渐变好的, 这也就说明文中提出的 MIMO 通信系统模型是可行的。

4 性能分析

基于综合上的 LED 阵列布局 and STBC 编码的 MIMO 技术, 文中在室内兼顾照明的同时进行可见光通信系统的性能仿真, 采用图 2 的房间模型, 探测器放在距离地面 0.75m 的平面上, 光源布局采用图 3 和图 4 的布局模式, LED 灯采用表 1 的性能参数, 并且采用第 3 节中的 STBC 编码方式, 此时在接收平面分别放置 1 个和 2 个探测器, 调制方式采用 QPSK 方式。码率都为 3/4, 仿真结果如图 8 所示。

5 结论

文中讨论了兼顾照明的可见光 MIMO 通信系统模型, 从照明方面进行研究, 研究了不同的光源布局方式对照度均匀性的影响, 为了能够满足国际标准的照度要求, 在总 LED 灯珠不变情况下, 4 个 LED 阵列的布局可以达到 90.4% 的均匀度, 照度也符合国际标准。然后从通信方面来研究, 将 MIMO 技术引入到 VLC 中, 并且理论推导信道矩阵 H , 采用 STBC 编码并进行了仿真研究, 分别对 3 个和 4 个 LED 阵列作为发射天线, 1 个和 2 个探测器作为接收天线, 仿真其误码性能, 通过仿真分析随着 LED 阵列和探测器的增加, 系统的可靠性提高了 2 dB 以上。文中通过对在可见光通信中加入 MIMO 系统模型, 仿真分析了其兼顾照明和通信的可行性, 为可见光通信系统提高传输性能提供了一种可行的解决方法。

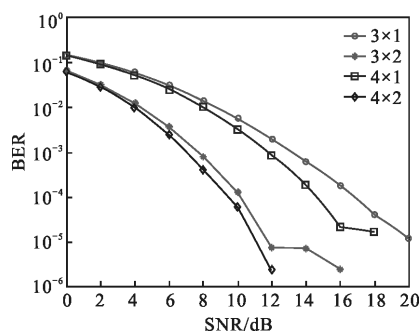


图 8 MIMO 系统的传输性能
Fig.8 MIMO system transmission performance

由仿真结果可以分析得出, 在 SNR 大于 12 dB 时, 当采用一个探测器作为接收天线时, 4 个 LED 阵列的可靠性比 3 个 LED 的可靠性提高了大约 2 dB, 当采用 2 个探测器作为接收天线时, 4 个 LED 阵列的可靠性比 3 个 LED 的可靠性提高了大约 4 dB。在 SNR 大于 10 dB 时, 当发射天线相同时, 接收天线为两个探测器比一个探测器的可靠性提高大约 5 dB。并且在信噪比达到一定的阈值时, MIMO 系统的可

参考文献:

- [1] Wu Congjun, Yan Changxiang, Gao Zhiliang. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 672-680. (in Chinese)
- [2] Chi N, Wang Y Q, Wang Y G, et al. Ultrahigh-speed single red-green-blue lightemitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 010605.
- [3] Shen Zhenmin, Lan Tian, Wang Yun, et al. Simulation and analysis for indoor visible-light communication based on LED [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (8): 2496-2500. (in Chinese)

- [4] Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Design and performance analysis of multi-LEDs UV communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1544-1549. (in Chinese)
- [5] Wang Junbo, Xie Xiuxiu. Fractionally space equalizer for indoor visible light communication system [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(1): 24-30. (in Chinese)
- [6] Zhao Zixu, Song Xiaoqing, Jia Shengjie, et al. Research on optical channel of multiple LEDs lighting arrays distribution communication system in vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0922006. (in Chinese)
- [7] Yuan Wei. CIE standard lighting-lighting indoor workplace[J]. *China Illuminating Engineering*, 2002, 4: 55-60. (in Chinese)
- [8] Dong Yuting. Research on layout schemes of lighting for indoor visible light communication system [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [9] Komine T, Nakagava M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [10] Zhao Li, Peng Kai. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0706001. (in Chinese)
- [11] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 45(5): 1456-1467.