

## 可见光 MIMO 通信系统中级联编码的应用

赵黎, 朱彤, 霍杰, 张峰

(西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 可见光多输入多输出(MIMO)通信中空时分组编码能够获得较高的分集增益,但是其有效性较差,空间调制编码能够提高系统的频谱利用率但其可靠性较差。因此结合空时分组编码和空间调制编码的优势设计出空时分组-空间调制(STBC-SM)级联编码应用到可见光 MIMO 通信系统中,根据朗伯光源衰减特性建立了可见光室内传输信道模型,并对系统有效性及可靠性进行了仿真验证。结果表明在确保原有效性和相同误码率前提下,STBC-SM 级联编码的可靠性较 SM 提高了 5~8 dB,在确保原可靠性的前提下,STBC-SM 级联编码的有效性较 STBC 提高了。表明文中设计的级联编码可有效的解决通信系统中有效性与可靠性的矛盾问题,为研究室内可见光 MIMO 通信提供了很好的理论意义。

**关键词:** 可见光通信; 级联编码; 多输入多输出; 空时分组编码; 空间调制

**中图分类号:** TN929.1      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0322002

## Application of concatenated codes in visible MIMO communication system

Zhao Li, Zhu Tong, Huo Jie, Zhang Feng

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

**Abstract:** The space-time block coding (STBC) has the property of diversity gain in the visible light multiple-input multiple-output (MIMO) communications. However, its validity is low. And the spectrum efficiency is improved in the spatial modulation (SM) coding while the reliability was poor. Therefore, based on the advantages of STBC and SM coding, a STBC-SM concatenated coding was investigated in the visible light MIMO communications. A visible light indoor transmission channel model was established as Lambertian light attenuated. The validity and reliability of the system was verified. Simulation results indicate that the reliability of the STBC-SM concatenated coding is 5-8 dB more than SM under the precondition of ensuring the original validity and the same error rate, and on the premise of ensuring the original reliability, the efficiency of STBC-SM concatenated coding is higher than that of STBC. It shows that the concatenated codes designed in this paper can effectively settle the contradiction between validity and reliability in the communication system, and has a good theoretical significance for researching indoor visible MIMO communication.

**Key words:** visible light communication; concatenated codes; multiple-input multiple-output(MIMO); space-time block coding; spatial modulation

收稿日期:2018-10-10; 修订日期:2018-11-20

基金项目:国家自然科学基金(61671362);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))

作者简介: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: pilly\_lily@126.com

## 0 引言

随着人们对无线传输速率的需求越来越高,无线频谱资源日益紧张,因此,宽阔且无需授权的光波段具有极大的发展潜力,在这样的背景下,可见光通信(Visible light communications, VLC)技术应运而生<sup>[1-2]</sup>。近年来,绿色能源白光 LED 灯凭借其高能效和高普及率以及可见光通信充裕的带宽和较高的市场占有率使其拥有广阔的应用及发展前景<sup>[3-4]</sup>。

然而室内可见光通信相比于射频通信要同时兼顾照明的作用,单个 LED 的发光强度比较小,不能满足室内照明需求,因此在室内可见光通信系统中,光源应采用多个 LED 组成的阵列。为了获得室内国际照明标准的光照度和通信系统的分集增益,需要多组 LED 阵列进行协同传输信息,于是将多输入多输出 (Multiple input multiple output, MIMO) 技术引入到 VLC 系统中<sup>[5]</sup>,通过对数据进行合适的编码,实现兼顾照明的 VLC 系统的可靠传输。目前国内外研究工作者对可见光 MIMO 通信系统采用编码的研究较多, Mesleh 等人在可见光通信中使用空间调制编码进行研究,得出空间调制编码较 OOK 调制方式不仅可靠性提高且速率也成倍提高<sup>[6]</sup>; 郭树旭等在可见光通信中采用间隔多脉冲位置调制进行研究<sup>[7]</sup>。上述研究都没有很好地兼顾 VLC 的有效性和可靠性的联合增益,因此文中对可见光通信系统中采用级联编码进行研究,并仿真分析其性能,为提高系统频谱利用率和可靠性提供了一种解决方法。

## 1 非成像可见光 MIMO 信道

非成像可见光 MIMO 通信就是在发射端将待传输的信息进行调制映射,然后将调制好的信号经过驱动电路控制发射端  $N_t$  个 LED 阵列的高速闪烁以此来发送信号。在接收端通过  $N_r$  个光电检测器将接收到的光功率转化为电信号,然后经过信号的放大和判决解调恢复出待传输信号。

文中研究的非成像室内可见光 MIMO 通信系统,其室内 LED 阵列和光电检测器布局是在本课题组研究成果基础上,如图 1 所示,以  $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$  的室内空间为模型,以房间一角为中心原点建立坐

标系,选取 4 个 LED 阵列及 4 个光电检测器布局,LED 阵列距离边缘的距离为  $0.4\text{ m}$ ,每个 LED 阵列都采用  $9 \times 9$  的 LED 灯珠布局,灯珠之间距离  $0.03\text{ m}$ ,其距离地面  $0.75\text{ m}$  的接收平面照度均匀性可以达到  $90.4\%$ <sup>[8]</sup>。

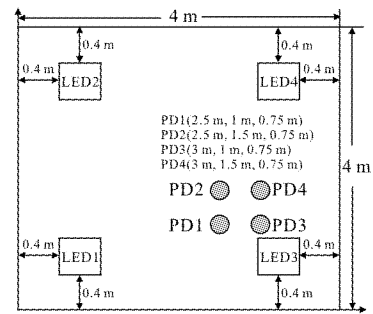


图 1 LED 阵列和光电检测器的平面图

Fig.1 Plan of LED arrays and photodetectors

该系统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,因此可近似作为线性时不变系统处理<sup>[9]</sup>。正是由于一一对应的关系,因此在可见光信道中会形成一个  $N_r \times N_t$  维的可见光信道矩阵  $H$ , 信道矩阵中的元素  $h_{ij}$  表示每个信道的直流增益,其值可通过发射端  $i$  上所有 LED 的辐射能量到达接收端  $j$  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:

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

式中:  $A_{rx}^j$  为第  $j$  个光电检测器上的接收面积;  $d_{ijk}$  为发射机  $i$  上的第  $k$  个 LED 到接收机  $j$  的距离;  $\phi_{ijk}$  为 LED 的辐射角;  $\varphi_{ijk}$  为光电检测器 PD 的光入射角;  $\varphi_c$  为 PD 的视角;  $I(\phi_{ijk})$  为第  $k$  个 LED 沿  $\varphi_{ijk}$  方向的光强,其表达式为:

$$I(\phi_{ijk}) = I_0 \cos(\phi_{ijk}) \quad (2)$$

式中:  $I_0$  为光源 LED 的中心发光强度。

文中根据公式(1)~(2)中设置参数  $A_{rx}^j$  为  $1\text{ cm}^2$ ;  $\varphi_c$  设为  $60^\circ$ ;  $I_0$  为  $21.5\text{ cd}$ ; 采用图 1 的布局方式,数值计算出可见光 MIMO 通信系统的室内直射链路信道矩阵  $H$ :

$$H = \begin{bmatrix} 0.010 & 4 & 0.003 & 9 & 0.002 & 5 & 0.006 & 0 \\ 0.008 & 9 & 0.005 & 3 & 0.018 & 1 & 0.008 & 9 \\ 0.006 & 7 & 0.002 & 9 & 0.028 & 8 & 0.006 & 7 \\ 0.006 & 0 & 0.003 & 9 & 0.022 & 5 & 0.010 & 4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2 空时分组编码与空间调制级联编码 (STBC-SM)

### 2.1 空间调制编码

空间调制<sup>[10]</sup>(Spatial Modulation, SM)编码是一种将部分信号扩展到空间维的编码方式。在可见光 MIMO 通信系统中,其原理如图 2 所示,首先根据

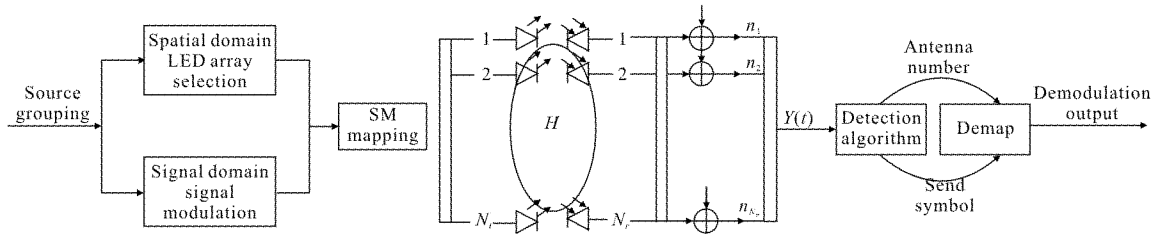


图 2 可见光 MIMO 通信中 SM 原理图

Fig.2 Schematic of SM in visible MIMO communication

得到有效的保障。

### 2.2 空时分组编码

空时分组编码 (Space-time block coding, STBC)是利用空间域上的发射分集和时间域上的信道编码相结合的编码技术,且能够在不增加带宽的情况下提高系统的可靠性。Alamouti 码是最早提出应用到两发射天线的空时分组码,能够提供满速率传输的分集增益,并且由于其编码矩阵采用了正交的设计原理,因此能够较好地抵抗信号间的干扰并且降低系统的译码复杂度。Alamouti 码的编码矩阵为:

$$X = (x_1 \ x_2) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ * & * \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

在可见光 MIMO 通信系统中,空时分组编码的 Alamouti 码应用到两个 LED 阵列的可见光通信系统中,Alamouti 编码后的信号经过两个符号周期从两个 LED 阵列中进行信号传输。在第一个符号周期内,两个符号  $x_1$  和  $x_2$  分别在阵列 LED1 和阵列 LED2 的高速闪烁中传输信息。在第二个符号周期

发送端 LED 阵列个数  $N$  和所采取的信号调制阶数  $M$  确定每组信源的比特数,为  $\log_2 N + \log_2 M$  (bit),前部分  $\log_2 N$  (bit)即发送端的空间位置所携带的信息,用于空间域 LED 阵列的选取,且该信息不需要在信道中传输,后部分  $\log_2 M$  (bit)为调制的信号,然后调制信号通过 SM 映射在选中的 LED 阵列中传输,最后接收端接收到的信号通过检测发射的序列号和调制信号来恢复出待传输信息。由于空间调制中空间维度可以携带  $\log_2 N$  (bit)信息,因此系统有效性可提高  $(\log_2 N / \log_2 M) \times 100\%$ ,然而系统的可靠性并没有

内,第一个 LED 阵列传输  $-x_2^*$ ,第二个 LED 阵列传输  $x_1^*$ 。因此 STBC 编码的频谱利用率为<sup>[11]</sup>:

$$\eta = \log_2 M \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad (5)$$

式中: $M$  为信号的调制阶数。

### 2.3 STBC-SM 级联编码原理

在可见光 MIMO 通信系统中,SM 通过空间维位置信息可以提高有效性,即系统较高的信息传输速率是以牺牲整个系统的性能为代价换来的。STBC 通过空间分集可以提高可靠性,即高可靠性是以牺牲系统的有效性而得到的。因此为了协调系统的有效性和可靠性之间的矛盾,引入了空时分组编码辅助的空间调制编码,称之为 STBC-SM 级联编码<sup>[11-13]</sup>。为了使 STBC-SM 级联编码能够获得 MIMO 系统所具有的空分复用和分集增益的优势,在级联时选择满速率且分集度为 1 的 Alamouti 码作为空时分组码与空间调制编码级联,因此在级联时空调制编码每次选两个 LED 阵列进行信号的传输,此种级联方法能够在不失空时分组码所具有的可靠性前提下提高系统的频谱利用率。

如图 3 所示为文中 STBC-SM 级联编码的系统

模型图,信源分组根据所需传输 LED 阵列个数和信号调制阶数共同决定,文中采取图 1 所示的 4 个 LED 阵列和光电检测器的布局方式,信源的前两比特用于选择传输信息的 LED 阵列组,表 1 为文中提

出的 STBC-SM 级联编码的 LED 阵列组的映射表,信源的后部分比特信息进行 Alamouti 码变换后在所选取的 LED 阵列组中通过室内可见光信道进行传输。

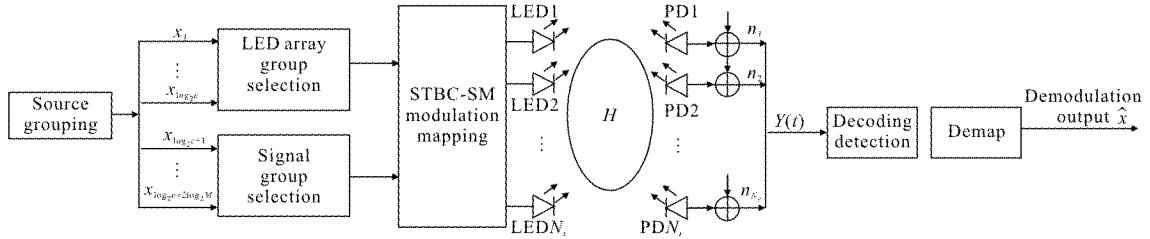


图 3 STBC-SM 级联编码系统模型

Fig.3 STBC-SM cascade coded system model

表 1 STBC-SM 中 LED 阵列号映射表  
Tab.1 LED array number mapping table in STBC-SM

Input bit	LED array number
00	LED1&LED2
01	LED3&LED4
10	LED1&LED3
11	LED2&LED4

信源信息通过表 1 设定的空间维 LED 阵列号的选取后经过 STBC-SM 级联编码可得到如下两个码本:

$$X_1 = \{X_{11}, X_{12}\} = \left\{ \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & * \\ -x_2 & x_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 & x_2 \\ * & * & * & * \\ 0 & 0 & -x_2 & x_1 \end{pmatrix} \right\}$$

$$X_2 = \{X_{21}, X_{22}\} = \left\{ \begin{pmatrix} x_1 & 0 & x_2 & 0 \\ * & * & * & * \\ -x_2 & 0 & x_1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & x_1 & 0 & x_2 \\ * & * & * & * \\ 0 & -x_2 & 0 & x_1 \end{pmatrix} \right\} e^{j\theta} \quad (6)$$

$X_1, X_2$  是 STBC-SM 系统的两个码本,每个码本包含两个码字,在第二个码本中引入了旋转角  $\theta$ ,这是由于在不同的码字中会存在相同的两列信号,为了保证不失 Alamouti 码的分集增益。在可见光通信中,光电检测器接收到的信号通过对 LED 序列号和信号的译码检测解调出原信息比特。因此 STBC-SM 级联编码系统的频谱利用率为:

$$\eta = \frac{1}{2} \log_2 c + \log_2 M \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad (7)$$

$c$  为系统的码字个数即文中的 LED 阵列组合数,1/2 是因为同时使用了两个 LED 阵列进行传输,

$M$  为信号的调制阶数。STBC-SM 级联编码系统相较于 STBC 编码在不失其可靠性前提下频谱利用率提高了,这源于对选取的两个 LED 阵列进行信息传输的优势。

### 2.4 STBC-SM 级联编码的译码原理

STBC-SM 级联编码系统的译码采用经典的最大似然译码准则,从文中叙述的 4 个 LED 阵列中选取两个 LED 阵列进行 Alamouti 码的信息传输,接收信号可表示为:

$$y = \sqrt{\rho} X_i H + n \quad (8)$$

式中: $\rho$  为接收天线的平均信噪比; $H$  为信道矩阵; $X_i \in \{X_1, X_2\}$  是系统的两个码本; $n$  为系统受到的噪声。在最大似然译码准则中要对所有的可能进行遍历,因此为了简化检测的复杂度,由 Alamouti 码的正交性可得到等价的接收信号为:

$$y = \sqrt{\rho} H_x \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + n \quad (9)$$

式中: $H_x$  为系统的等价信道矩阵,其是利用已知的信道参数对应公式(6)的传输关系构造出  $2N \times 2$  维的等价信道。文中采用 4 个码字的传输矩阵,因此在信道矩阵的构造中也有 4 个对应的传输信道矩阵,以第一个码字为代表选择 LED1 和 LED2 阵列进行传输,那么其等价信道矩阵可表示为:

$$H_1 = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2}^* & h_{2,1} & h_{2,2}^* & \cdots & h_{N,1} & h_{N,2}^* \\ h_{1,2} & -h_{1,1}^* & h_{2,2} & -h_{2,1}^* & \cdots & h_{N,2} & -h_{N,1}^* \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

对于第  $f$  个等价信道中,信号的检测算法为:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{1,f} &= \underset{x_1 \in \mathcal{X}}{\operatorname{argmin}} \left\| y - \sqrt{\rho} h_{f,1} x_1 \right\|_F^2 \\ \hat{x}_{2,f} &= \underset{x_2 \in \mathcal{X}}{\operatorname{argmin}} \left\| y - \sqrt{\rho} h_{f,2} x_2 \right\|_F^2\end{aligned}\quad (11)$$

式中:  $H_f = [h_{f,1} \ h_{f,2}]$  为  $2N_r \times 2$  维向量;  $\|A\|_F$  为矩阵  $A$  的 Frobenius 范数,符号  $x_1, x_2$  的 ML 检测误差为:

$$\begin{aligned}m_{1,f} &= \min_{x_1 \in \mathcal{X}} \left\| y - \sqrt{\rho} h_{f,1} x_1 \right\|_F^2 \\ m_{2,f} &= \min_{x_2 \in \mathcal{X}} \left\| y - \sqrt{\rho} h_{f,2} x_2 \right\|_F^2\end{aligned}\quad (12)$$

在此信道中可得到对应的检测总误差为  $mf = m_{1,f} + m_{2,f}$ 。在接收端译码就通过寻找最小的  $m$  值得出  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = (\hat{x}_{1,f}, \hat{x}_{2,f})$  解调出原信息比特。

### 3 性能分析

为了验证文中设计的级联编码性能,采用蒙特卡洛方法对空间调制编码及级联编码的性能进行仿真。仿真参数为:发送端固定为4个LED阵列,接收端光电检测器的个数分别为1、2、3、4个,LED阵列和检测器的布局平面图如图1所示。采用公式(3)的信道矩阵  $H$  作为室内可见光信道环境,接收端受到高斯噪声影响,数据长度取  $10^6$ ,信号调制选择 QPSK。

以此仿真条件,系统有效性方面,根据公式(5)、(7)理论分析,得出 STBC 的有效性为  $2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ , STBC-SM 的有效性为  $3 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。级联编码的有效性较空时分组编码相比提高了  $1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

系统的可靠性方面,图4和图5为空间调制和级联编码的性能仿真图。由图4可以分析出空间调制编码在可见光 MIMO 通信系统的可靠性随着接收端光电检测器数量的增加,系统的性能逐渐变好,然而在性能最优的  $4 \times 4$  MIMO 系统中信噪比为 16 dB 时误码率仅能达到  $10^{-5}$  量级,为了获得更好的系统性能,采用文中级联方式进行数据传输,由图5可分析出 STBC-SM 级联编码随接收端光电检测器数量的增加误码性能提高明显,与图4相比,  $4 \times 1$ 、 $4 \times 2$ 、 $4 \times 3$  和  $4 \times 4$  MIMO 系统,采用 STBC-SM 级联编码比 SM 稳定性分别提高 8、6、6、5 dB 的增益,STBC-SM 级联编码系统比 STBC 的有效性提高  $1 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。因此级联编码能够利用

空时分组编码和空间调制编码二者的联合优势,在提高系统可靠性的同时提高系统的有效性。

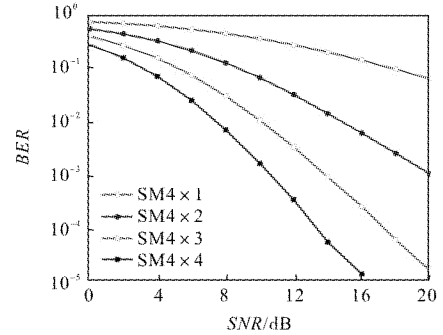


图4 SM性能仿真图

Fig.4 Performance simulation of SM

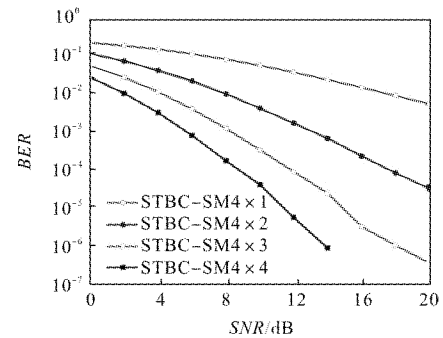


图5 STBC-SM级联编码性能仿真图

Fig.5 Performance simulation of STBC-SM concatenated codes

### 4 结论

文中在可见光 MIMO 通信系统中对采用空间调制编码及 STBC-SM 级联编码在室内可见光信道中传输进行了研究。以文中所设计的  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  室内空间为仿真模型,采用图1所示的 LED 阵列和光电检测器的布局方式,以及文中提出的可见光室内传输信道模型为仿真环境。分别对空间调制编码和 STBC-SM 级联编码在可见光室内信道中发射端固定为4个LED阵列、接收端光电检测器个数变化时进行性能仿真。由仿真结果分析得出级联编码能较好地应用于可见光 MIMO 通信系统中。在误码率相同情况下,级联编码的可靠性比空间调制编码提高 5~8 dB 的增益,且级联编码的频谱利用率比空时分组编码提高了。因此在可见光 MIMO 通信系统中应用级联编码不仅能提高其信息传输速率,而且能够为其稳定传输提供保障,为解决可见光 MIMO 通信系统中高速率和稳定性二者之间的矛盾问题提供了理论依据。

参考文献：

- [1] Wang Junbo, Xie Xiuxiu. Fractionally space equalizer for indoor visible light communication system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 24–30. (in Chinese)
- [2] Zhao Li, Zhu Tong, Liu Zhigang, et al. An annular light source layout model for both lighting and communication reliability [J]. *Opto –Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 170503. (in Chinese)
- [3] Song Xiaoqing, Wei Youcai, Zhao Zixu, et al. Research progress on hardware pre-equalization technology for high-speed visible light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080003. (in Chinese)
- [4] Wu S, Wang H, Youn C H. Visible light communication for 5G wireless networking system: from fixed to mobile communications [J]. *IEEE Network*, 2014, 28(6): 41–45.
- [5] Guo Xinyue, Li Xin, Huang Ruyi. Adaptive multiple-input multiple-output mode switching for indoor visible light communication system with orthogonal frequency division multiplexing modulation [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(11): 110604.
- [6] Mesleh R, Elgala H, Haas H. Optical spatial modulation [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(3): 234–244.
- [7] Guo Shuxu, Zhang Lingling, Han Mingzhu, et al. Interval pulse position modulation in visible light communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1760–1765. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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): 0122001. (in Chinese)
- [10] Renzo M D, Haas H, Uraycb A, et al. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities and implementation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(1): 56–103.
- [11] Basar E, Aygolu U, Panayirci E, et al. Space-time block coded spatial modulation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(3): 823–832.
- [12] Vo B T, Nguyen H H, Quoc-Tuan N. High-rate space-time block coded spatial modulation [C]//International Conference on Advanced Technologies for Communications. IEEE, 2016: 1–5.
- [13] Fath T, Klaue J, Haas H. Coded spatial modulation applied to optical wireless communications in indoor environments [C]//Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2012: 1000–1004.