

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2017.00018

基于新型光源的联合分步映射空间调制 可见光通信系统性能分析

宋健¹, 曹雅丽¹, 张文胜¹, 孙健¹, 王承祥^{1,2}

(1. 山东大学信息科学与工程学院山东省无线通信技术重点实验室, 山东 济南 250100;
2. 英国赫瑞瓦特大学工程与自然科学学院传感器、信号与系统研究所, 爱丁堡 EH14 4AS)

摘要: 在可见光通信 (VLC) 系统中采用一种新型光源来同时实现照明和数据传输功能, 并提出基于空间调制和红色、绿色及蓝色 (RGB) LED 联合分步映射空间调制方法。该新型光源由白光 LED 和一组或多组 RGB LED 组成, 其中, 白光 LED 仅提供照明功能, RGB LED 则被用来传输数据信息。在光源成色方面, 通过功率分配来控制 RGB LED 的成色, 并用颜色显色指数 (CRI) 来评价新光源的成色质量。在光源通信方面, 对联合分步映射空间调制与直流偏置光正交频分复用 (DCO-OFDM) 在接收端的误码率性能进行了研究与验证。仿真结果显示, RGB LED 的功率可根据不同的通信和照明要求做自适应调整以适应不同场景的需求, 同时在合适的灯组布局和直流偏置下, 该系统可取得较好的误码率性能。

关键词: 可见光通信; 新型光源; 联合分步映射空间调制; 功率比; DCO-OFDM

中图分类号: TN 918.1

文献标识码: A

Performance analysis of a VLC system with a new light source and joint step-by-step mapping spatial modulation

SONG Jian¹, CAO Ya-li¹, ZHANG Wen-sheng¹, SUN Jian¹, WANG Cheng-xiang^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Lab of Wireless Communication Technologies,
School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;
2. Institute of Sensors, Signals and Systems, School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK)

Abstract: A new type of light source in the visible light communication (VLC) system was adopted to realize the illumination and data transmission functions simultaneously. Also, a joint step-by-step mapping spatial modulation method based on spatial modulation and red, green, and blue (RGB) LED was proposed. The new light source consisted of white LED and one or more sets of RGB LED, where white LED provided only illumination and RGB LED was only used for communications. The color of RGB LED was controlled by power allocation and the color quality of the new light source was evaluated by color rendering index (CRI). Moreover, the bit error rate (BER) performance of the joint step-by-step mapping spatial modulation scheme with direct current optical orthogonal frequency division multiplexing (DCO-OFDM) at the receivers was also analysed. Simulation results show that the power of RGB LED can be adaptively adjusted according to different requirements of communication and illumination to meet the needs of different scenarios. The VLC system can achieve good BER performance with appropriate light group layout and direct current modulation.

Key words: VLC, new light source, joint step-by-step mapping spatial modulation, power ratio, DCO-OFDM

收稿日期: 2017-07-20; 修回日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61371110); 山东省自然科学基金资助项目 (No.ZR2017MF012); 山东省重点研发基金资助项目 (No.2016GGX101014)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61371110); The Natural Science Foundation of Shandong Province(No.ZR2017MF012); Shandong Key Research and Development Program (No.2016GGX101014)

1 引言

随着信息科技的高速发展,移动通信、物联网、移动互联网和人工智能等领域迎来了新的发展机遇。人类正进入万物互联的新时代,物联网飞速发展,智能设备数量呈现爆发式增长。物联网对通信服务质量的要求却越来越高,致使传统无线电频谱资源越来越短缺。有限的频谱资源严重制约了移动通信和物联网的发展与普及,频谱短缺问题亟需在下一代通信技术中解决。而可见光通信占据极其丰富的频谱资源,频谱范围从 400 THz 到 800 THz,是传统无线频谱的 1 000 倍^[1]。与传统无线通信相比,可见光通信在发射端控制白光 LED 或 RGB LED 的发光强度,光在自由空间中传播到达接收端,并在接收端通过光电检测器将光强信号转化为电信号的通信技术^[2]。整个通信过程具有高效性、无电磁干扰、高安全性、兼顾照明、免电磁许可和相对高带宽等优点^[3]。因此,可见光通信可提供低功耗、广覆盖面、高速率、高质量的通信服务,以满足物联网对通信技术的要求。而可见光通信将会成为下一代通信技术中极具吸引力和发展潜力的通信技术,尤其是作为室内高速无线通信接口^[4],这将推动万物互联时代的快速到来。

可见光通信需要同时满足照明和通信的需求,即不管可见光通信系统选用何种 LED 作为发射端,都要符合照明和通信的要求。而可见光通信系统一般采用 2 种常用的光源:一种是利用三原色 RGB LED 来合成白光和实现通信;另一种是利用蓝光激发荧光粉合成白光实现照明和通信^[5]。虽然白光 LED 可以提供稳定照明,但是荧光粉的低响应速率限制了通信系统带宽;RGB LED 在合成白光照明时需较高成本,但在通信时却能提供更高的系统带宽,并且能将波分复用和多输入多输出(MIMO)技术更好的应用到可见光通信系统中^[6,7]。

国内外的众多研究机构已对可见光通信系统进行了深入的研究。研究者多数采用的是白光 LED 或 RGB LED,未见有将白光 LED 和 RGB LED 结合应用到可见光通信系统中的研究^[8]。传统可见光调制方式如(ACO-OFDM, asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing)、(DCO-OFDM, direct current optical orthogonal frequency division multiplexing)等并未涉及空间映射、灯组映射思想;文献[9~12]对 non-direct current

(NDC)-OFDM、non-hermitian symmetry (NHS)-OFDM 和 generalized LED index modulation (GLIM)-OFDM 等空间映射调制技术进行了研究,并未涉及灯组映射;在已有文献中也未研究白光 LED 和 RGB LED 相结合应用到可见光通信系统中。

本文采用一种将白光 LED 和 RGB LED 相结合的新型光源应用到可见光通信系统,将白光 LED 和 RGB LED 结合在一起充分利用各自的优势为照明和通信服务,同时空间调制作为一种高效的 MIMO 技术被应用在可见光通信中^[13]。因此,本文提出了一种将空间调制和 RGB LED 灯相结合的新型联合分步映射空间调制方法和系统模型。在整个系统中,通过传输 DCO-OFDM 信号,对新型光源的功率的分配和成色现象进行了分析,同时也研究了新型联合分步映射空间调制与 DCO-OFDM 在通信系统中的性能表现与灯组布局之间的关系。

2 系统模型

2.1 新型光源模型

为了充分发挥白光 LED 和 RGB LED 各自在照明和通信时的独特优势,本文提出将白光 LED 和 RGB LED 相结合的新型光源应用到可见光通信系统。图 1 展示了一种新型光源模型。

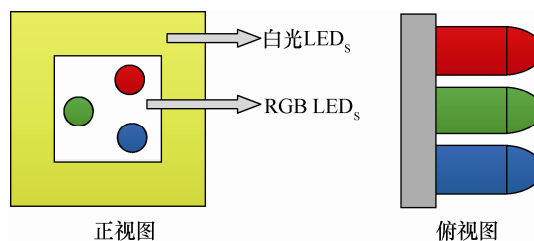


图 1 新型光源模型

新型光源由白光 LED 和 RGB LED 组合而成。外环为白光 LED 部分,负责新型光源照明功能,并且提供高质量稳定的照明,稳定光源可以避免人眼免受频率闪烁所带来的危害;内环由 RGB LED 组合而成,负责新型光源通信功能。在新型光源进行照明和通信时,需深入研究白光 LEDs 照明时对 RGB LED 通信的影响和 RGB LED 通信时对白光 LED 照明的影响。当分析通信对照明的影响时,需确定新型光源的光谱分布。在现有研究中,有许多数学 LED 光谱模型来描述 LED 的光谱功率分布。在本研究中,双高斯模型被用来描述实际 LED 的光谱^[14],即 LED 相对光谱分布模型可被表示为

$$D_{\text{led}}(\lambda) = f(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) + \frac{2}{3}f^5(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) \quad (1)$$

$$f(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_{0.5}}\right)^2\right] \quad (2)$$

其中, λ 、 λ_0 和 $\Delta\lambda_{0.5}$ 分别是光谱波长、LED 峰值波长和 LED 峰值波长半宽度 (光谱辐射带宽)。由式 (1) 可推导出新型光源在功率归一化条件下的相对光谱分布模型, 即新型光源光谱分布模型 $D_{\text{LS}}(\lambda)$ 可被表示为

$$D_{\text{LS}}(\lambda) = D_w(\lambda) + \alpha D_{\text{led}}(\lambda) \quad (3)$$

$$\alpha D_{\text{led}}(\lambda) = [\alpha_r \quad \alpha_g \quad \alpha_b] \mathbf{D}_{\text{led}}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{D}_{\text{led}} = \begin{cases} [D_{\text{led}}^r(\lambda) & 0 & 0], \text{R LED通信} \\ [0 & D_{\text{led}}^g(\lambda) & 0], \text{G LED通信} \\ [0 & 0 & D_{\text{led}}^b(\lambda)], \text{B LED通信} \\ [D_{\text{led}}^r(\lambda) & D_{\text{led}}^g(\lambda) & 0], \text{RG LED通信} \\ [D_{\text{led}}^r(\lambda) & 0 & D_{\text{led}}^b(\lambda)], \text{RB LED通信} \\ [0 & D_{\text{led}}^g(\lambda) & D_{\text{led}}^b(\lambda)], \text{GB LED通信} \end{cases} \quad (5)$$

在式(3)~式(5)中, α_r 、 α_g 和 α_b 分别是 RGB LED 中 R LED、G LED 和 B LED 与白光 LED 的功率比, 表示为 $\alpha_r = \frac{P_{\text{led}}^r}{P_w}$ 、 $\alpha_g = \frac{P_{\text{led}}^g}{P_w}$ 和 $\alpha_b = \frac{P_{\text{led}}^b}{P_w}$, P_{led}^r 、 P_{led}^g 和 P_{led}^b 分别是指 RGB LED 中 R LED、G LED 和 B LED 的功率, P_w 是白光 LED 的功率。在本文中研究中, \mathbf{D}_{led} 有 6 种取值情况, 分别是 R LED 通信、G LED 通信、B LED 通信、RG LED 通信、RB LED 通信和 GB LED 通信。

2.2 接收器模型

本文中, 对接收器进行了全新的设计, 在光电检测器的外部设计了半球面的接收器。图 2 展示了接收器结构模型。

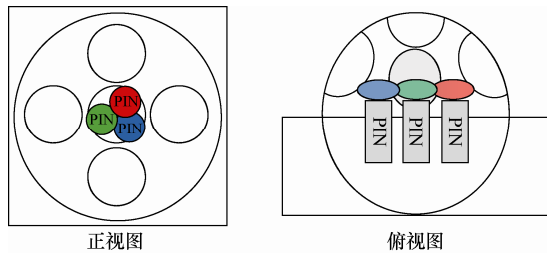


图 2 接收器结构模型

接收器外部为半球状, 并镶嵌 5 个聚光器对接收光进行增强。内部放置 3 个 PIN 光电检测器, 3

个检测器前分别放置 RGB 物理滤光片, 用来滤出红绿蓝三色光。聚光器增益^[15]为

$$G(\varphi_r) = \begin{cases} \frac{A^2}{\sin^2(\Phi_c)}, 0 \leq \varphi_r \leq \Phi_c \\ 0, \varphi_r > \Phi_c \end{cases} \quad (6)$$

其中, A 为折射率, Φ_c 为光电检测器的视场角, φ_r 为入射角。

2.3 信道模型

在众多研究中, 朗伯模型被用来描述光信号在自由空间中传输, 直射路径占据光信号传播的主要能量^[16]。对于 $N \times M$ MIMO 系统, 其信道传播矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,M-1} & h_{1,M} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,M-1} & h_{2,M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N,1} & h_{N,2} & \dots & h_{N,M-1} & h_{N,M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在式(7)中, $h_{r,t}$ 为灯组 t 到接收器 r 之间的光信道增益, $r=1, \dots, N$, $t=1, \dots, M$ 。信道传播矩阵中每个元素的光信道增益^[13]可表示为

$$h_{r,t} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_r \cos^m(\varphi_r) G(\varphi_r) T(\varphi_r) \cos(\varphi_r)}{2\pi d_{r,t}^2}, 0 \leq \varphi_r \leq \Phi_c \\ 0, \varphi_r > \Phi_c \end{cases} \quad (8)$$

在式(8)中, $G(\varphi_r)$ 和 $T(\varphi_r)$ 分别为聚光器增益和滤光片增益, m 称为朗伯辐射系数, 具体为 $m = \frac{\ln 2}{\ln(\cos \Phi_1) \frac{1}{2}}$, Φ_1 为半功率角, $d_{r,t}$ 为发射端与接收端之间的距离, A_r 为光电检测器的面积, φ_r 和 φ_t 分别为发射角和入射角。

2.4 可见光传输系统模型

图 3 展示了可见光传输系统模型。系统采用联合分步映射空间调制来传输 DCO-OFDM 信号。本文首次提出将该调制方式应用在可见光通信系统中, 并充分利用 RGB LED 通信的特殊优势。输入比特信息由 OFDM 调制所需比特信息和映射比特信息组成。

OFDM 调制比特信息直接经过 OFDM 调制模块调制, 再经过功率分配器并结合 LED 映射比特信息选择灯组和灯组中 RGB LED 组合, 再经过信

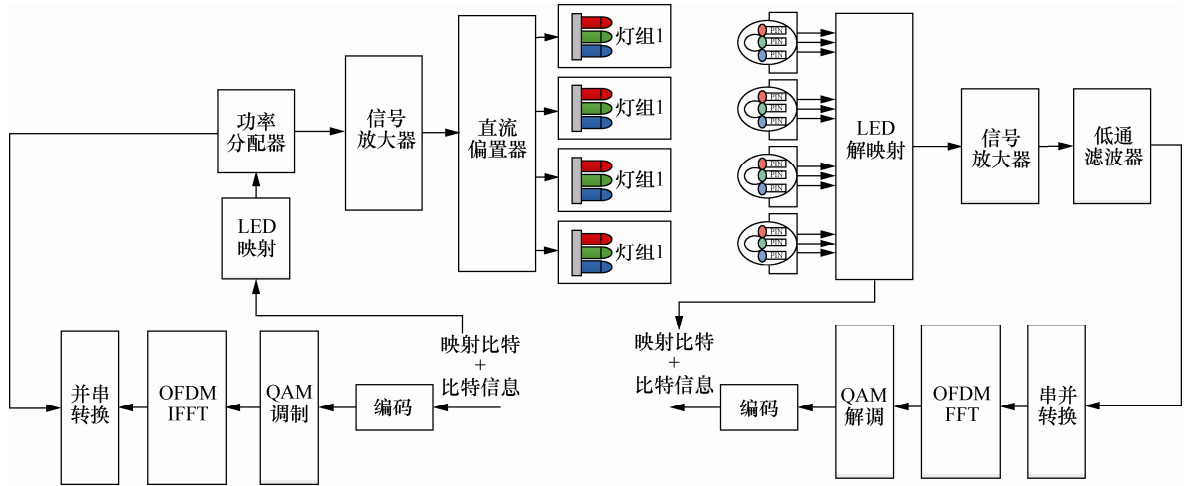


图 3 可见光传输系统模型

号放大器和直流偏置器加载到灯组上被转化为光信号发射出去。映射比特信息直接被输入 LED 映射模块，LED 映射模块根据映射关系表将 OFDM 调制信息加载到一个灯组之上，并且在所选择的灯组中选择特定的 RGB LED 组合发射 OFDM 调制信息，具体映射关系将在 3.1 节中阐述。功率分配器控制着 OFDM 调制信号的功率分配和 RGB LED 通信时光功率与白光 LED 的功率比，使 RGB LED 通信时不影响白光 LED 照明功能。

3 联合分步映射空间调制、功率控制及信号解调

3.1 联合分步映射空间调制

为降低解映射的复杂度，本文提出联合分步映射空间调制，即将灯组和色彩组合分开进行映射。具体映射分 2 步。第一步，对于 4 个灯组共有 16 种组合，分别为选择 0 个灯组有 1 种、选择 1 个灯组有 4 种、选择 2 个灯组有 6 种、选择 3 个灯组有 4 种和选择 4 个灯组有 1 种。对于 16 种组合，当 4 个灯组全灭时，接收端无法判别。对于剩下 15 种组合，为了降低接收端的检测复杂度和通信消耗的能量，本文仅使用一个灯组被激活的 4 种组合，即激活一组新型光源中的 RGB LED 组合进行通信，其他 3 组新型光源只提供白光 LED 的照明功能，即使用 2 bit 进行灯组映射。第二步，在被选择激活的灯组中的 RGB LED 有 8 中组合方式，分别是选择 0 个 LED 发射信息，选择 R LED 发射信息，选择 G LED 发射信息、选择 B LED 发射信息、选择 RG LED 发射信息、选择 RB LED 发射信息、选择 GB LED

发射信息和选择 RGB LED 发射信息。对于 RGB LED 的 8 种组合，无法实现选择 0 个 LED 发射信息，而对于剩余 7 种组合最多可传输 2 bit 信息，即选择其中 4 种组合来传输信息。表 1 展示了第一步具体映射关系。

表 1 二进制序列与 LED 灯组映射

映射序列	灯组 1	灯组 2	灯组 3	灯组 4
00	√	×	×	×
01	×	√	×	×
10	×	×	√	×
11	×	×	×	√

表 1 中，当映射序列为“00”时，4 组新光源只激活灯组 1 中的 RGB LED 进行信号传输；当映射序列为“01”时，4 组新光源只激活灯组 2 中的 RGB LED 进行信号传输；当映射序列为“10”时，4 组新光源只激活灯组 3 中的 RGB LED 进行信号传输；当映射序列为“11”时，4 组新光源只激活灯组 4 中的 RGB LED 进行信号传输。

第二步对于 RGB LED 映射关系，共有 8 种组合方式，本文仅使用其中 4 种，即使用 2 bit 进行色彩组合映射，具体映射表如表 2 所示。

表 2 二进制序列与 RGB LED 选择映射

映射序列	R	G	RG	RB
00	√	×	×	×
01	×	√	×	×
10	×	×	√	×
11	×	×	×	√

表 2 中, 当映射序列为“00”时, RGB LED 3 种颜色灯只激活 R LED 进行信号传输; 当映射序列为“01”时, RGB LED 3 种颜色只激活 G LED 进行信号传输; 当映射序列为“10”时, RGB LED 3 种颜色只激活 RG LED 进行信号传输; 当映射序列为“11”时, RGB 3 种颜色只激活 RB LED 进行信号传输。选择此 4 种组合依据将在下文给出理论依据。

综上所述, 联合分步映射空间调制通过 4 bit 即实现了 $4 \times 4 = 16$ 种映射方案。同时在解映射时需分 2 步进行, 首先通过空间解调可确定信号来自哪一个灯组, 此后再通过光电检测器可判断信号来自哪一种 RGB LED 组合, 即可解调出联合分步映射空间调制信息, 最后再对接收信号进行 DCO-OFDM 解调。

3.2 新光源功率控制

在色度学中, 当三原色确定时, 一种颜色的三刺激值唯一的, 即可用三刺激值来确定一种颜色。在 1931 年, 国际照明委员会(CIE)制定了一种颜色系统为 CIE 1931 XYZ 系统^[17]。光源颜色可以用坐标 (x, y) 来表示。首先, 需要计算出新型光源的三刺激值, 其计算过程如下^[18]。

$$X_{LS} = k \int_{380}^{780} D_{LS}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

$$Y_{LS} = k \int_{380}^{780} D_{LS}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

$$Z_{LS} = k \int_{380}^{780} D_{LS}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

在式(9)~式(11)中, $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 分别是来自 CIE 1931 标准色度观察者的三刺激值。标准化常数为 k , 当在绝对单位下, $k=683 \text{ lm/W}$ 。根据式(14)~式(16), 可计算出新光源在 CIE 1931 XYZ 系统中的坐标值 (x_{ls}, y_{ls}) , $z_{ls} = 1 - x_{ls} - y_{ls}$, 但是在 CIE 1931 XYZ 系统中颜色分布不均匀。为了使颜色能较均匀地分布在坐标系中, 1960 年, CIE 提出了 CIE 1960 (u, v) 系统, 新型光源在 (u, v) 系统中的 (u_{ls}, v_{ls}) 可被表示为

$$u_{ls} = \frac{4x_{ls}}{-2x_{ls} + 12y_{ls} + 3} \quad (12)$$

$$v_{ls} = \frac{6y_{ls}}{-2x_{ls} + 12y_{ls} + 3} \quad (13)$$

$$x_{ls} = \frac{X_{LS}}{X_{LS} + Y_{LS} + Z_{LS}} \quad (14)$$

$$y_{ls} = \frac{Y_{LS}}{X_{LS} + Y_{LS} + Z_{LS}} \quad (15)$$

$$z_{ls} = 1 - x_{ls} - y_{ls} \quad (16)$$

1~14 号 14 种孟塞尔样品试验色被用来评价颜色的质量, 其中, 前 8 种试验色被用来评价光源成色的质量, 即计算标准光源照射在该 8 种试验色上所呈现的颜色在 CIE 1960 (u, v) 系统中的坐标, 再计算出新型光源照射在该 8 种试验色上所呈现的颜色在 CIE 1960 (u, v) 系统中的坐标。根据 2 组坐标值, 利用沃尔特方法计算出新型光源与标准光源在 CIE 1960 (u, v) 系统中的色差 ΔE_j 。最后再由色差计算出新型光源的 CRI。CRI 是国际唯一公认的评价颜色指标, 在相近色温下, CRI 可被表示为

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 R_j \quad (17)$$

$$R_j = 100 - 4.6 \Delta E_j \quad (18)$$

R_a 反映了新型光源成色与标准光源成色之间的相似度, 当 $R_a=100$ 时, 新型光源即为标准光源。在室内照明标准中, 要求 R_a 不能小于 80, 即 $R_a \geq 80$ 被用来约束 RGB LED 与白光 LED 的功率比 α_r 、 α_g 和 α_b 。

3.3 信噪比和噪声分析

当新型光源进行通信时, 白光 LED 中的 RGB 分量将会对 RGB LED 的通信信号产生干扰。白光 LED 在照明时提供稳定的照明, 在接收端所接到的来自白光 LED 中的 RGB 光分量为直流分量, 并且只对散粒噪声产生影响。RGB LED 发射信号时, 光强经过自由空间和物理滤光片到达接收端时的平均光信号功率为

$$\bar{P}_{re}^* = \frac{1}{B} \int_0^B G_T(f) P_{tr}^* H_{LOS}^{LED} d(f) \quad (19)$$

$$P_{tr}^* = \alpha P_w \quad (20)$$

在式(19)和式(20)中, P_{tr}^* 是 R LED、G LED 或 B LED 的发射光功率, \bar{P}_{re}^* 是接收端所接收到的红色光功率、绿色光功率或者蓝色光功率, 系统带宽为 B 。本研究中主要考虑直射光信道, 其增益为 H_{LOS}^{LED} 。LED 频率响应的相对功率分布函数为 $G_T(f)$ 。系统信噪比被定义为

$$SNR^* = \frac{(R\bar{P}_{re}^*)^2}{N_{noise}^2} \quad (21)$$

$$N_{noise}^2 = n_{shot}^2 + n_{thermal}^2 \quad (22)$$

在式(21)和式(22)中, R 为光电检测器的光电转换效率。 N_{noise} 噪声主要由散粒噪声 n_{shot} 和热噪声 n_{thermal} 组成^[19,20]。其中接收到的总光功率决定散粒噪声的大小, 接收到的总光功率包括 RGB LED 通信时的光信号功率和白光 LED 中 RGB 光功率分量, 其中, 散粒噪声可被表示为

$$n_{\text{Rshot}}^2 = 2qR\bar{P}_{\text{total}}^*B + 2qI_{\text{BC}}I_2B \quad (23)$$

$$\bar{P}_{\text{total}}^* = \bar{P}_{\text{re}}^* + 4 \frac{\int_{380}^{780} D_{\text{W}}^*(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} D_{\text{W}}(\lambda) d\lambda} P_{\text{W}} H_{\text{LOS}}^{\text{LED}} \quad (24)$$

在式(23)中, I_{BC} 为背景电流, I_2 为噪声带宽因数, q 为电荷量。

3.4 信号解调

在发射端的映射比特流按映射规则选择那一个灯组和灯组中 RGB LED 组合情况进行传输 DCO-OFDM 调制的 N 路信号 $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]$ 。其中, 将每路信号根据联合分步映射空间调制映射到 RGB LED 上, 经过 $N \times M$ MIMO 光自由空间信道传播到达接收端, 本文设置 4×4 MIMO 信道的接收信号为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{N}_{\text{noise}}^r \quad (25)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{\text{ZF}} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{11}, \hat{x}_{12}, \hat{x}_{13}, \dots, \hat{x}_{1N} \\ \hat{x}_{21}, \hat{x}_{22}, \hat{x}_{23}, \dots, \hat{x}_{2N} \\ \hat{x}_{31}, \hat{x}_{32}, \hat{x}_{33}, \dots, \hat{x}_{3N} \\ \hat{x}_{41}, \hat{x}_{42}, \hat{x}_{43}, \dots, \hat{x}_{4N} \end{bmatrix} \quad (26)$$

在式(25)和式(26)中, \mathbf{X} 为 $4 \times N$ 的信号矩阵, $\mathbf{N}_{\text{noise}}^r$ 为 $4 \times N$ 的高斯白噪声矩阵。 $\hat{\mathbf{x}}^{\text{ZF}}$ 是采用 zero-forcing 检测方法所解调出的信号^[11], 再对 $\hat{\mathbf{x}}^{\text{ZF}}$ 中

的每列元素进行如下判决

$$(\bar{x}_{mi}, m) = \arg \max_{\hat{x}_{mi}} (\hat{x}_{1i}, \hat{x}_{2i}, \hat{x}_{3i}, \hat{x}_{4i}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (27)$$

在式(27)中, 通过比较 $\hat{\mathbf{x}}^{\text{ZF}}$ 每列元素的大小, 分别得到每列最大元素 \bar{x}_{mi} 以及其所在位置 m , 根据 m 取值即可确定此信号来自哪一个灯组, 然后通过映射表解调出空间映射比特信息并且重建解调数据 $[\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \dots, \hat{x}_N]$, 同时在接收端根据 RGB 滤光片下的光电检测器可确定该灯组采用何种 RGB 组合, 即可解调出联合分步映射空间调制比特信息, 分步解调降低了系统复杂度。

4 数值与仿真结果

4.1 仿真设置

可见光传输系统设在一间普通的 $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ 房间中, 在天花板下方 0.5 m 处放置 4 个灯组作为发射端, 每个灯组都由白光 LED 和 RGB LED 组合而成; 在地面上方 1 m 处放置 4 个接收器作为接收端。场景模型如图 4 所示, 灯组与接收器均垂直于地面, d_{Tx} 和 d_{Rx} 分别为灯组之间的距离和接收器之间的距离。在实际仿真中仿真参数设置如下: OFDM 载波数设置为 1 024, R LED 波长为 325 nm, G LED 波长为 530 nm, B LED 波长为 455 nm, $T(\varphi_r) = 1$, $\Phi_{\frac{1}{2}} = \Phi_c = 15^\circ$, $A_r = 1 \text{ cm}^2$, $G(\varphi_r) = 1$, $d_{\text{Tx}} = 0.5 \text{ m}$ 或 0.6 m , $d_{\text{Rx}} = 0.1 \text{ m}$ 。

4.2 结果分析

当 RGB LED 中 GR LED 用于通信时对光源颜色的影响如图 5 (a)所示, GB LED 用于通信时对光

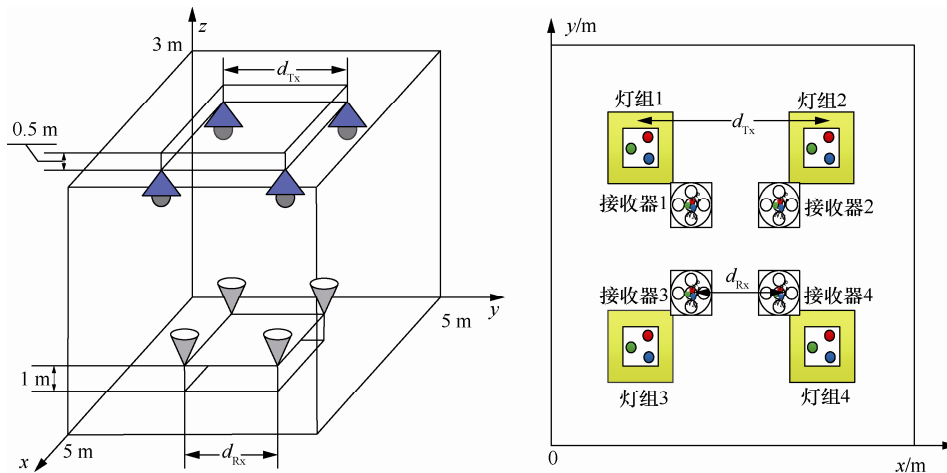


图4 场景模型

源成色的影响如图 5 (b)所示, BR LED 用于通信时对光源成色的影响如图 5 (c)所示。在国际照明中, 要求室内光源的 R_a 要满足照明, 即 $R_a \geq 80$ 。图 5 (a) 显示, 当 $\alpha_r=0$ 时, G LED 的功率比可以控制在 $\alpha_g \leq 1.4$ 范围内, 仍然可以满足 $R_a \geq 80$, 同时当 RG LED 同时被用来通信时, α_r 和 α_g 都具有较大的可调功率比范围, 可以满足多种功率的配比。

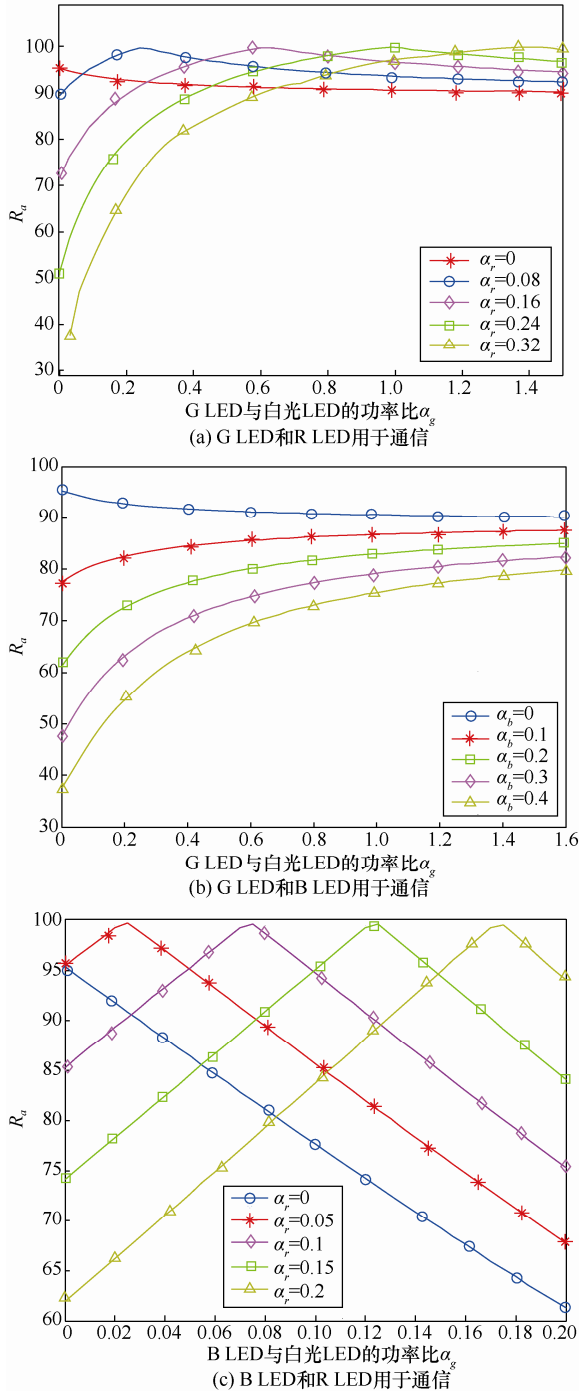


图 5 不同 RGB LED 通信时光源的显色指数

图 5 (b)显示, 当 GB LED 被用来通信时, 由于 B LED 对光源成色的影响波动较大, 并且颜色显色指数没有 RG LED 和 RB LED 通信时稳定, 所以在映射关系中未选择 GB LED 组合。图 5 (c)显示, 当 $\alpha_r=0$ 和 $R_a \geq 80$ 时, B LED 用于通信功率比范围仅为 $\alpha_b \leq 0.08$, 相比于 R LED, G LED 通信时, 功率比可控范围较小。当 $\alpha_g=0$ 时, R LED 可取功率比范围为 $\alpha_r \leq 0.12$, 功率比可控范围比 B LED 功率比可控范围大 0.04。

综上所述, 选择其中 4 种可控功率比范围大的情况, 分别为 R LED 通信、G LED 通信、RG LED 通信和 RB LED 通信。

在实际仿真中直流偏置 *Bias* 的设置与 OFDM 信号 $x(n)$ 的功率有关, 表示为: $Bias=k_{DC}\sqrt{E\{x(n)^2\}}$, 其中, k_{DC} 为直流偏置系数, 本文研究了采用 4QAM、16QAM 星座调制下 k_{DC} 的设置对误码率的影响。

图 6 给出了采用 4QAM 星座调制时系统的误码率仿真曲线。可以看到随着 d_{Tx} 数值增加, 系统误码率趋于更优。这是因为在 d_{Rx} 数值不变的情况下, d_{Tx} 增大即代表 4 个灯组之间的距离增大, 干扰就会减小, 因而误码率性能更优。还可以看到误码率曲线出现不同的误差底板, 随着 k_{DC} 的取值增大, 误差底板逐渐消失。这是因为 $x(n)$ 信号存在较大的负峰值, 当 k_{DC} 较小时, 直流偏置 *Bias* 的取值不足以使负峰值转化为正值使部分负值信号被削去而使信号质量下降。随着直流偏置 *Bias* 的增加, 信号质量提升, 误差底板逐渐消失, 但是这也是以增加系统平均光功率为代价的。

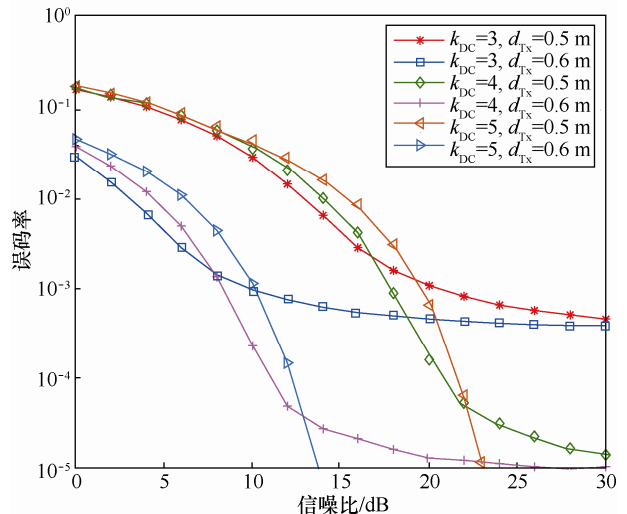


图 6 4QAM 系统误码率

图7给出了采用16QAM星座调制时系统的误码率仿真曲线。与图6类似，可以看到随着 d_{Tx} 数值增加，系统误码率趋于更优；随着 k_{DC} 的取值增大，误差底板逐渐消失，同时对比图6和图7也可以观察到，采用4QAM时，系统误码率性能优于16QAM。

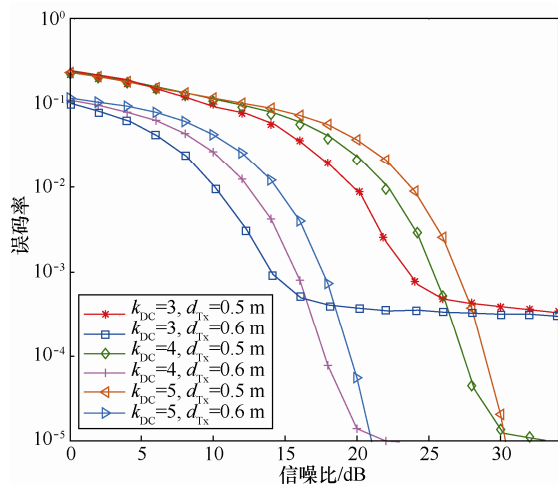


图7 16QAM系统误码率

5 结束语

通过数值与仿真结果分析新型光源的颜色显色指数，证实了本文中选用的R LED、G LED、RG LED和RB LED的优越性和合理性。对于这4种组合，新型光源都有较大的可控功率比范围，可以让通信系统适应不同场景的通信需求，并且能保证光源成色的高质量性。本文提出的联合分步映射空间调制方法在传输4QAM和16QAM的DCO-OFDM信号时，验证了灯组之间不同布局距离和直流偏置对系统性能的影响，在合适的布局下系统取得优异的误码率性能表现。综上所述，本文所提出的联合分步映射空间调制方式不仅适用于多场景的应用，也可扩展应用到ACO-OFDM、Unipolar-OFDM等其他可见光调制方式中。

参考文献:

- [1] PATHAK P, FENG X, HU P, et al. Visible light communication, networking and sensing: a survey, potential and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2047-2077.
- [2] KARUNATILAKA D, ZAFAR F, KALAVALLY V, et al. LED based indoor visible light communications: State of the art[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1649-1678.
- [3] CHEN H D, WU C H, LI H L, et al. Advances and prospects in visible light communications[J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(1): 1-10.

- [4] WANG C X, HAIDER F, GAO X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [5] COSSU G, KHALID A M, CHOUDHURY P, et al. Long distance indoor high speed visible light communication system based on RGB LEDs[C]//ACP'12. Guangzhou, China, 2012: 1-3.
- [6] HE S, REN G, ZHONG Z, et al. M -ary variable period modulation for indoor visible light communication system[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(7): 1325-1328.
- [7] CHEN S H, CHOW C W. Color-filter-free WDM MIMO RGBLED visible light communication system using mobile-phone camera[C]//ICOCN'14. Suzhou, China, 2014: 1-4.
- [8] LUNA-RIVERA J M, PEREZ-JIMENEZ R, RABADAN-BORJES J A, et al. Multiuser scheme for indoor visible light communications using RGB LEDs[C]//IWOB'14. 2014: 119-123.
- [9] LI Y, TSONEV D, HAAS H. Non-DC-biased OFDM with optical spatial modulation[C]//PIMRC'13. London, UK, 2013: 486-490.
- [10] ZHONG W D, CHEN C, WU D. Non-hermitian symmetry OFDM for indoor space division multiplexing visible light communications[C]//ICTON'16. Trento, Italy, 2016: 1-4.
- [11] BAS E, PANAYIRCI E, UYSALY M. et al. Generalized LED index modulation optical OFDM for MIMO visible light communications systems[C]//ICC'16. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1-5.
- [12] DISSANAYAKE S D, ARMSTRONG J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD systems[J]. Journal of Light wave Technology, 2013, 31(7): 1063-1072.
- [13] FATH T, KLAUE J, HAAS H. Coded spatial modulation applied to optical wireless communications in indoor environments[C]//IEEE WCNC'12. Paris, France, 2012: 1000-1004.
- [14] OHNO Y. Spectral design considerations for white LED color rendering[J]. Optical Engineering, 2013, 44(11): 1-9.
- [15] LI E, ZHANG W, SUN J, et al. Energy-spectral efficiency tradeoff of visible light communication systems[C]//ICCC'16. Chengdu, China, 2016: 1-5.
- [16] MESLEH R, ELGALA H. Optical spatial modulation[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networks, 2011, 3(3): 234-244.
- [17] SRIVIDYA R, KURIAN C P. White light source towards spectrum tunable lighting - a review[C]//ICAECT'14. Manipal, India, 2014: 203-208.
- [18] OHNO Y. CIE fundamentals for color measurements[C]//IS & TNIP. Vancouver, Canada, 2000: 16-20.
- [19] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visiblelight communication system using LED lights[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [20] LEE J H, JUNG S Y. SNR analyses of the multi-spectral light channels for optical wireless LED communications in intelligent transportation system[C]//VTC-Spring'14. Seoul, South Korea, 2014: 1-5.

作者简介:



宋健(1991-),男,山东大学硕士生,主要研究方向为可见光通信。



曹雅丽 (1992-), 女, 山东大学硕士生, 主要研究方向为可见光通信。



孙健 (1975-), 男, 山东大学讲师, 主要研究方向为信道测量与建模、多载波 (OFDM/FBMC)、多天线 (MIMO)、软件无线电、无线通信系统实现 (FPGA、USRP)、通信网络仿真等。



张文胜 (1975-), 男, 山东大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为随机矩阵理论、5G 关键技术、可见光通信等。



王承祥 (1975-), 男, 英国赫瑞瓦特大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线信道测量与建模、5G 关键技术、可见光通信等。