

可见光通信中的多维编码

亢 焱 柯熙政

西安理工大学自动化与信息工程学院电子工程系, 陕西 西安 710048

摘要 为了提高可见光通信(VLC)的频谱利用率,提出一种多维编码方法,从编码原理和性能上进行了理论分析,在此基础上构建了基于RGB发光二极管(LED)的可见光视音频传输系统,并对该编码方法进行了实验验证。实验对多基色LED采用16脉冲位置调制(16-PPM)作为基调制的多维编码方法,在3 m距离上实现了1.5 Mbit/s的视音频数据流传输。结果表明,多维编码方法可以有效利用可见光的宽频谱,提高信道容量,为进一步实现高速通信系统提供了可能。

关键词 光通信; 可见光通信; 多维编码; 多基色LED

中图分类号 TN929.12 文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0205001

Multi-Dimensions Encoding Scheme for Visible Light Communication System

Kang Ye Ke Xizheng

Department of Electronic Engineering, School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract In order to improve the spectrum utilization in visible light communications (VLC), a new multi-dimension encoding scheme is proposed and its encoding principle and performance are analysed. A VLC system to transmit high quality video and audio signal is demonstrated. The system uses RGB light emitting diode (LED) as source, which is encoded by the multi-dimension encoding scheme with 16 pulses position modulation (16-PPM) as a base modulation, and achieves the video stream communication in the distance of 3.0 m and at the rate of 1.5 Mbit/s. The results show that the method can take fully the advantage of the vast frequency resources provided by light, improve the channel capacity and provide the possibility of high-speed communication systems.

Key words optical communications; visible light communication; multi-dimension encoding; multi-primary colors LED

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4080; 200.4560

1 引言

发光二极管(LED)产业在近年来的迅速发展,不仅推动了人类照明方式的变革,也点燃了人们对可见光通信研究的热情。所谓可见光通信^[1],就是以可见光作为媒介,对LED发出的光信号进行编码调制,从而进行信息传递的一种通信方式。国内外的大学及科研机构在该领域也相继取得了阶段性成果,比如日本的可见光通信协会(VLCC)和美国的IEEE 15.7工作组都在对可见光通信进行着一系列的标准化工作^[2]。但目前的研究,大都主要集中在白光LED上^[3-7]。使用白光LED进行通信,虽然符合照明兼顾通信的可见光通信基

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(60977054)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2013JQ8011)、陕西省教育厅科研计划(2013JK1104)、陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17)、西安市科技成果转化基金(CX12165)

作者简介: 亢焱(1983—),男,博士研究生,主要从事可见光通信方面的研究。E-mail: kangye@stu.xaut.edu.cn

导师简介: 柯熙政(1962—),男,教授,博士生导师,现主要从事光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

本要求,但是由于其发光机制限制了调制带宽,使带宽只能达到几百兆赫兹,无法完全发挥出可见光谱400 THz 频谱提供的巨大带宽优势^[8],因此成为了可见光通信高速发展的一大瓶颈。

多基色 LED 技术的出现为解决这一矛盾、发挥可见光频谱优势提供了可能。本文在多基色 LED 技术的基础上,对多维编码的原理进行阐释,对该编码的性能进行分析,利用三基色 LED 构建的可见光通信视音频传输实验系统对多维编码的方法进行了实验验证。

2 多维编码原理

所谓多维编码,就是根据多种基色的光波长的区别,采用不同的功率、不同的码元宽度对光信号分别进行调制,使之构成一个唯一的空间图样,从而进行信息传递的一种编码。

给出一种采用传输信息位的三基色(红色、蓝色和绿色)的三条链路,并分别采用以 16 脉冲位置调制(16-PPM)作为基调制的调制方法^[9],红色链路(R)和绿色链路(G)的 16-PPM 可以在二维(2D)平面内构成 16×16 个唯一状态,然后 R/G 组合形成的 256 种状态中的任何一种状态再与蓝色链路(B)的 16-PPM 状态组合,可以在三维(3D)空间中构成 $16 \times 16 \times 16$ 个唯一状态,进而确定唯一的字节信息,原理如图 1 所示。

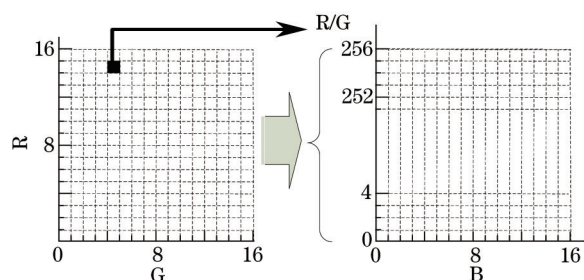


图 1 多维编码原理示意图

Fig.1 Principle of multi-dimension encoding

建立多维编码的码表,即特定信息分别与三条链路中 16-PPM 脉冲位置的空间建立唯一映射关系。在立体空间中,红色、绿色和蓝色的 16-PPM 组合可以形成 4096 种状态,红色(R)、绿色(G)和蓝色(B)的 16-PPM 调制中不同的高电平脉冲位置组合代表了空间中 4096 种状态中的唯一状态,那么三基色会在空间中形成多维编码的图样,进而构成完整的可见光通信的多维编码。接收终端通过分集接收技术分别提取三条链路的脉冲位置调制(PPM)脉冲信号的时隙位置,而后根据码表查找出对应的比特信息,完成完整的多维解码过程。

多维编码的超帧格式如图 2 所示,若干个数据子帧构成了一个超帧,每个超帧都包含一个同步帧头,用于保证通信系统的同步;每个数据子帧由通信时隙与保护时隙共同组成的。保护时隙的作用一方面是防止 LED 因发射功率太大而过载^[10],另一方面是给系统提供足够的时间用于数据处理。

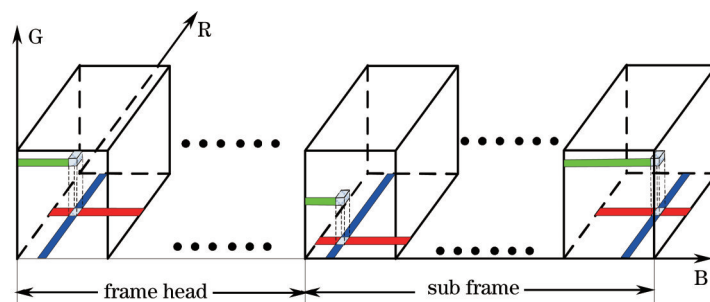


图 2 超帧组成示例

Fig.2 Super frame

3 编码性能分析

表 1 列出了不同维度时采用 16-PPM 作为基调制时的状态关系,从表中可以看出,当采用阶数相同的 PPM 调制^[11]时如果信道的维数越多,那么状态数目就会越多,且链路数目 N 之比等于系统信道容量 C 之比,

即 $N_n/N_i = C_n/C_i$ 。

对于一般的 Q 元信道,每信道(每符号)的信道容量定义为

$$C = I(X, Y) = H(Y) - H(Y|X), \quad (1)$$

式中 X 表示发送的符号集, Y 表示接收的符号集, $I(X, Y)$ 是互信息函数, $H(Y)$ 是接收符号集的熵, $H(Y|X)$ 是发送和接收符号间的条件熵函数。

表1 维数与状态数关系

Table 1 Relationship between dimensionality and state number

Dimension-PPM	State number	Symbol number
1D 16-PPM	24	4
2D 16-PPM	2^8	8
3D 16-PPM	2^{12}	12
n D 16-PPM	2^{4n}	$4n$

在 Q 个符号源是独立等概率的条件下,单脉冲位置调制(LPPM)调制中 Q 元擦除信道的容量^[6]可以表示为

$$C = (1 - q) \text{lb} Q = [1 - \exp(-S\tau)] \text{lb} Q = [1 - \exp(-ST_s/Q)] \text{lb} Q, \quad (2)$$

式中 τ 是时隙宽度, S 是光子计数速率, q 是接收端无光子的概率, T_s 为发送 Q 个符号元所占用的传信时隙。图3给出了当光子计数速率 S 改变时 PPM 的信道容量^[12] C 随 Q 的仿真图。

从图3中可以看出,当光发射功率变化时, C 随 Q 的增大先增大后减小,即存在一个最佳的时隙数使得信道容量最大,这是因为对于加性高斯白噪声(AWGN)信道,光信号能量 E 与单边噪声功率谱密度 N_0 受 $E/N_0 < 1$ 的限制,所以信道容量不会随时隙数的增大而无限增大。

图4中表现了保护时隙对信道容量的影响,可以看出:信道容量 C 随保护时隙时间长度的增大而减小,其中 T_b 是保护时隙。

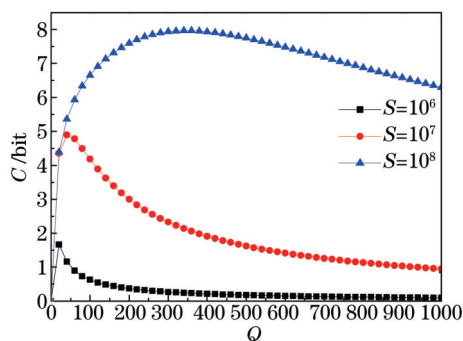


图3 光功率改变时 C 随 Q 的变化图

Fig.3 Diagram of C varies with Q when optical power changes

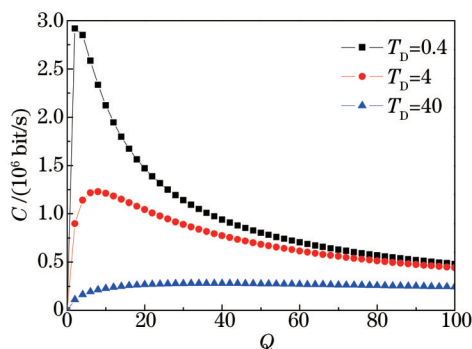


图4 保护时隙改变时 C 随 Q 的关系

Fig.4 Diagram of C varies with Q when protection time slot changes

设在传信时段有 Q 个信息时段,并且有 p 个脉冲,把它记为 (Q, p) 多脉冲位置调制(MPPM),这样 MPPM 中存在 $M = \binom{Q}{p}$ 种脉冲组合形式, (Q, p) MPPM 的信道容量表达式为

$$C_{(Q,p)} = [1 - \exp(-S\tau)]^p \times \text{lb} \binom{Q}{p}. \quad (3)$$

设其中的 $p=3$,比较 RGB-LED 系统与 $(Q, 3)$ MPPM 的信道容量关系,对比 RGB-LED 系统中的 LPPM 调制与 $(Q, 3)$ MPPM 调制的信道容量^[13],如图5所示。

图5中给出了不同光功率时 RGB-LED 与 $(Q, 3)$ MPPM 的信道容量关系的仿真。该结果表明:当 $S < 10^8$ 时,RGB-LED 的信道容量始终优于 $(Q, 3)$ MPPM 的信道容量,当 $S \geq 10^8$ 时两种系统的信道容量基本相同。该仿真结果也说明,在 AWGN 信道中,信道容量并不能随发射功率的增大而无限制地提升。

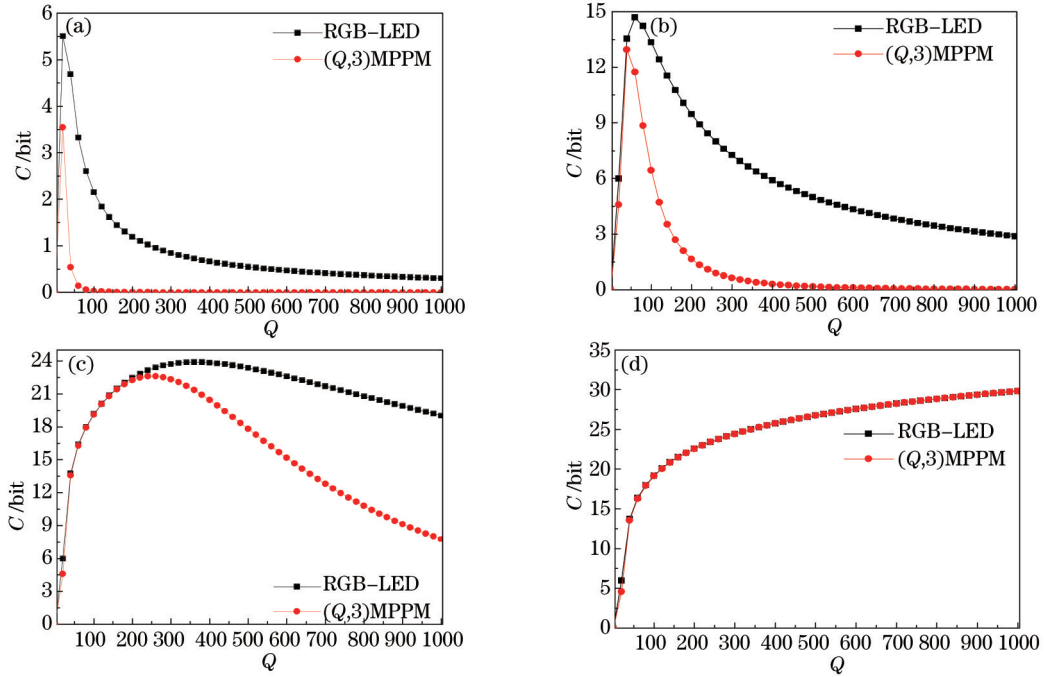


图5 不同S时RGB-LED与(Q,3)MPPM的信道容量关系。(a) $S=10^5$; (b) $S=10^6$; (c) $S=10^7$; (d) $S=10^8$

Fig.5 Relationship of channel capacity between RGB-LED (Q,3) MPPM when S varies. (a) $S=10^5$; (b) $S=10^6$; (c) $S=10^7$; (d) $S=10^8$

假定信道只存在 AWGN,且噪声 $n(t)$ 均值为零,方差为 σ_n^2 。如果当发送的脉冲为 1 时,那么判决器的输入端采样得到的 $x(t)$ 为 $\sqrt{S_t} + n(t)$;假如不发送脉冲信号时,那么判决器输入端采样得到的 $x(t)$ 应为 $n(t)$,其中 S_t 为判决器输入端的信号峰值功率。所以开关键控(OOK)与 PPM 调制的误时隙^[14]可以表示为

$$\eta_{OOK} = \frac{1}{2}(P_{0/1} + P_{1/0}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{S_t}/(2\sigma_n)}{2} \right], \quad (4)$$

$$\eta_{PPM} = \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln l}{2\sqrt{R_{SN}}} + \frac{\sqrt{R_{SN}}}{2} - \sqrt{R_{SN}} \right) + l \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln l}{2\sqrt{R_{SN}}} + \frac{\sqrt{R_{SN}}}{2} \right) \right] \right\} / 2^{M+1}, \quad (5)$$

式中 $\operatorname{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \times \int_0^x \exp(-u^2) du = 1 - \operatorname{erfc}(x)$, $P_{0/1}$ 是将 1 错误判为 0 的概率, $P_{1/0}$ 是将 0 错误判为 1 的概率, PPM 调制中 $l = 2^M - 1$,定义信噪比(SNR)的表达式为 $R_{SN} = S_t/(2\sigma_n^2)$ 。

图 6 给出了采用 OOK 和 LPPM 调制的情况下,信号的误时隙率与信噪比的关系。从图中可以看出,采用相同调制时,信号的误时隙率随信噪比的增大而减小^[15];采用不同阶的 PPM 调制时,信号的误时隙率随 PPM 调制阶数的增大而减小,且采用 OOK 调制时,信号的误时隙率始终高于采用 PPM 调制的情况。该仿真说明,在一定信噪比条件下,采用高阶 PPM 调制可以在一定程度上降低信号误时隙率,提高信号接收质量。

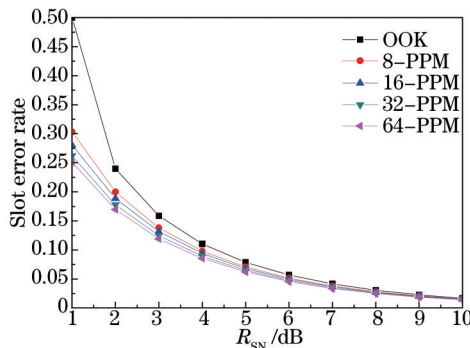


图6 信噪比不同时OOK与LPPM的误时隙比较

Fig.6 Slot error rate between OOK and LPPM when SNR varies

4 实验及结果分析

构建如图7所示的可见光视音频传输系统,对多维编码进行实验验证。实验系统的参数如表2所示。

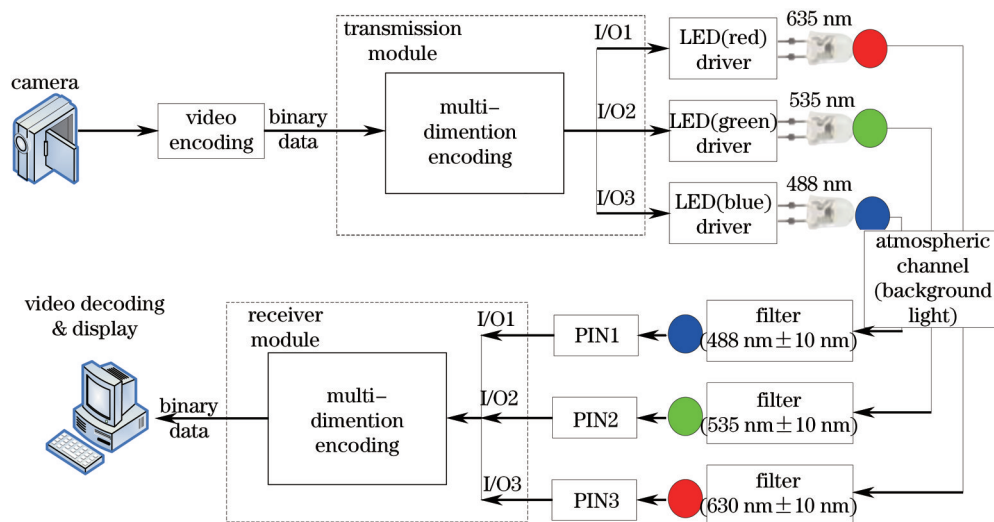


图7 可见光通信视频传输系统框图

Fig. 7 Block diagram of video transmission system based on VLC

表2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

Power / mW	Directivity $\theta_{1/2} / (^{\circ})$	Luminance Red-Green-Blue /cd	λ /nm	Optical window area /mm ²	Sensitivity / (μ A/lm)	Distance /m	Transmission speed /(Mbit/s)
10	30	4.5 37 6.3	185~900	192	250	2.0	1.5

在系统发射端,摄像头采集视频流信号,并通过视频编码器的网络接口以用户数据报协议(UDP)形式传输至发射终端,在发射终端中经过必要的端口号、数据形式判别后,采用以16-PPM为基调制的多维编码,并通过脉冲宽度调制(PWM)波产生相应的PPM脉冲信号分别发送至三基色的LED矩阵驱动中,并以光散射的形式将信号发送至室内信道中。因为LED光源发出的是可见光并且半发散角较大,对人眼无伤害,所以系统具有较大的功率利用率并且使得系统的可靠性大大提高。

在系统接收端,经过滤光片的分光作用,采用分集接收使得接收终端可以分别接收三基色的光信号,并通过信号倒向、滤波、阈值判决等工作后,将信号送至信号接收板中,经过与多维码表的对比还原出原始的二进制流信息,经过IP地址、MAC地址等信息的重新修改后以UDP数据包的形式将其组包发送至计算机,使用视频流解码软件进行解码并显示视频画面。该系统采用分集接收技术可以成倍地提高系统的信道容量,拓展调制带宽。

图8(a)中显示了利用RGB-LED室内可见光通信系统传输视频流的截图,图8(b)中显示了当视频传输一段时间后解码软件的相关的媒体统计信息,从媒体信息中可以看出,解码软件实时解码183497包UDP数据

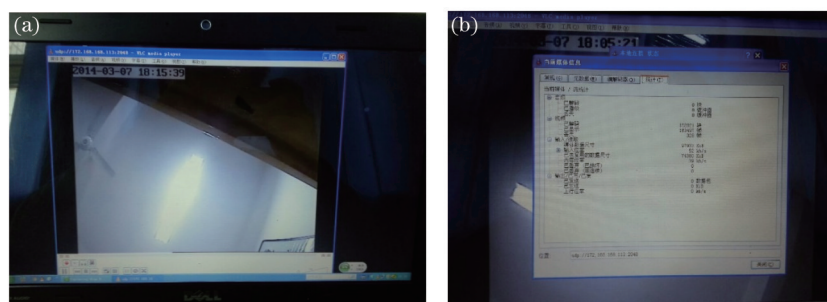


图8 多维编码视频流传输实验。(a) 视频画面; (b) 信息统计

Fig.8 Video stream transferring experiment using multi-dimension encoding. (a) Video screen; (b) information statistics

包,丢失328包UDP数据包,丢包率为 10^{-3} 。该室内可见光通信系统的误码率可以低于 10^{-3} 原因有二方面:1)虽然受验证系统设计的限制,无法提供单独的信道误码分析,仅能采用UDP数据包来评估该可见光通信系统的误码率,但是因为UDP的校验和与所有的UDP数据有关,当其中一个比特数据接收错误后就会导致UDP校验和的计算错误从而导致整包UDP数据被丢弃;2)虽然视频流的解码是在系统有一定接收数据量积累之后才开始工作的,这期间之前收到的数据包也会随之丢弃,但是软件是在打开的同时对接收到的数据包开始统计。

5 结 论

提出了一种应用于多基色LED可见光通信系统的多维编码方法,并从信道容量、误时隙率以及光功率对信道容量的影响等方面对其进行了分析与仿真。结果表明:采用PPM调制的多维编码,具有较高的功率利用率、较小的误时隙率,并且随着符号长度的增加该优势更加明显;在信噪比相同的情况下,采用PPM调制的多维编码,其调制阶数越高,误时隙率越小;当光入射功率小于 10^8 时,采用多维编码的RGB-LED系统的信道容量始终优于 $(Q,3)$ MPPM。最后,搭建了基于RGB-LED的室内可见光通信系统的硬件平台,利用多基色LED进行多维编码,实现了传输距离为3 m、速率为1.5 Mbit/s的点对点视频通信。

参 考 文 献

- 1 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Visible light communication and research on its key techniques[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(2): 114-117.
丁德强,柯熙政.可见光通信及其关键技术研究[J].半导体光电,2006,27(2):114-117.
- 2 S Rajagopal, R D Roberts, L Sang-Kyu. IEEE 802.15.7 visible light communication: Modulation schemes and dimming support[J]. IEEE Commun Mag, 2012, 50(3): 72-82.
- 3 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2536-2540.
丁德强,柯熙政.一种通用白光LED数学发光模型研究[J].光学学报,2010,30(9):2536-2540.
- 4 Li Rongling, Wang Yuanquan, Tang Chanjuan, *et al.*. Improving performance of 750-Mb/s visible light communication system using adaptive Nyquist windowing[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 080605.
- 5 Wang Chao, Zhu Yijun, Yang Yuhong. Interleave-division multiple-access for high-speed visible light communication in parallel [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0406003.
王超,朱义君,杨育红.可见光并行高速通信交织分多址技术研究[J].光学学报,2014,34(4):0406003.
- 6 Tang Danying, Li Honglei, Chen Xiongbin, *et al.*. Effects of detector's nonlinearity on frequency response of visible light communication system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405002.
唐丹颖,李洪磊,陈雄斌,等.探测器非线性对可见光通信系统幅频响应的影响[J].中国激光,2014,41(4):0405002.
- 7 Chi Nan, Wang Yuanquan, Wang Yiguang, *et al.*. Ultra-high-speed single red-green-blue light-emitting diode-based visible light communication system utilizing advanced modulation formats[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 010605.
- 8 Hong Wenxin, Yu Zhong, Wei Wei, *et al.*. Evolution of the short-range visible light communications & IEEE802.15.7[J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(7): 4-7.
洪文昕,禹忠,韦玮,等.短距离可见光通信技术进展与IEEE802.15.7[J].光通信技术,2013,37(7):4-7.
- 9 Ke Xizheng, Yin Zhiyun. Coding Theory in Wireless Laser Communication System[M]. Beijing: Science Press, 2009. 12-18.
柯熙政,殷致云.无线激光通信系统中的编码理论[M].北京:科学出版社,2009.12-18.
- 10 M Noshad, M Brandt-Pearce. Application of expurgated PPM to indoor visible light communications part I: Single-user systems[J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(5): 875-882.
- 11 Fu Hongshuang, Zhu Yijun. Analysis of the correlation of optical multiple-input multiple-output channel using white LED lighting in indoor line of sight environments[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906002.
付红双,朱义君.室内直射环境下白光LED的多输入多输出信道相关性分析[J].光学学报,2013,33(9):0906002.
- 12 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Design of PPM for laser communication in atmosphere[J]. Optical Communication Technology, 2005, 29(1): 50-52.

- 丁德强, 柯熙政. 大气激光通信 PPM 调制解调系统设计与仿真研究[J]. 光通信技术, 2005, 29(1): 50-52.
- 13 Wasiu O.Popooal, Enrique Poves, Harald Hass. Spatial pulse position modulation for optical communications[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(18): 2948-2954.
- 14 Qin Ling, Ke Xizheng. Analysis of optical MPPM channel capacity without background noise[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(7): 107-110.
- 秦 岭, 柯熙政. 无背景噪声下的光 MPPM 信道容量分析[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 107-110.
- 15 Zhang Jiankun, Yang Yu, Chen Hongda. Modulation scheme analysis of indoor visible light communications[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405003.
- 张建昆, 杨 宇, 陈弘达. 室内可见光通信调制方法分析[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405003.

栏目编辑: 王晓琰