

文章编号: 1001-3806(2014)06-0807-06

LED 室内可见光语音通信系统设计及实现

江晓明, 朱孝勇, 刘 涛, 朱 娜, 刘嘉蓓
(江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 镇江 212013)

摘要: LED 灯作为主要的新型照明工具, 因其较高的灵敏度, 可用于光通信系统中。为了研究与验证 LED 室内可见光语音通信系统的接收性能与传输距离, 参照红外通信的信道模型, 融入反射光的影响因素, 在使用室内标准照明的光发射功率下, 采用多径叠加网格算法, 计算桌面各接收点接收信号功率等参量的分布, 并设计与实现了 LED 可见光语音单向通信系统的收发电路。结果表明, 当 LED 灯的发射功率大于 2W、信号物理层通信速率不高于 1Mbit/s 的情况下, 系统能够满足信号接收功率与接收信噪比的实际通信要求, 并能够实现 10m 距离内的信号无失真解码与清晰收听。这一结果对 LED 可见光通信系统进一步的研究与应用有一定的价值。

关键词: 光通信; 照明; 信道模型; 接收功率; 解码

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.018

Design and implementation of LED indoor visible light voice communication system

JIANG Xiaoming, ZHU Xiaoyong, LIU Tao, ZHU Na, LIU Jiabei

(School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: As a main illumination tool, light emitting diode (LED) light can be utilized in optical communication system because of the high sensitivity. In order to study and verify the receiving performance and the transmission distance of a LED indoor visible light voice communication system, referring to the channel model of an infrared communication and the effect of the reflected lights, the signal power of the receiving point on the desktop was calculated according to indoor illumination standard by multipath overlay grid algorithm and the sending and receiving circuits of LED visible light voice single-direction communication system was designed and realized. The results show that when the emissive power of LED light is above 2W and the communication rate in the signal physical layer is less than 1Mbit/s, the system is suitable for the actual requirements of the received power and the received signal-noise-rate and can achieve the no-distortion decoding and clear listening in 10m limit. This result is helpful for the research and application of LED visible-light communication systems.

Key words: optical communication; illumination; channel model; received power; decoding

引 言

随着高亮度发光二极管 (light emitting diode, LED) 光效的不断提高, 其应用已从显示领域扩展到照明与灯光美化领域。与传统照明器件相比, LED 具有电压低、功耗小、寿命长与小型化等优点。该照

明光源, 特别是白光 LED 灯, 已被视作当代节能环保型照明产品^[1-2]。LED 的另一个突出优点是响应灵敏度高、调制性能好、发射功率大, 目前已逐步替代传统光源, 作为高速率数据光纤通信系统的光源得到了普遍的应用。所以, 利用 LED 的发光特性, 可以将数据调制到自由空间的可见光上进行传输, 形成 LED 可见光无线通信 (visible light communication, VLC) 系统^[3]。与传统红外通信相比, 室内 VLC 通信系统具有对人眼无伤害、无电磁干扰、无需申请频谱、不会出现数据泄漏等优点。因此, 使用 LED 的 VLC 通信系统技术有着广阔的应用前景, 近年来得到了国内外广泛的关注与研究。

日本 KEIO 大学的 NAKAGAWA 等学者提出了

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2011475); 江苏省科技技术创新基金资助项目 (BC2012208)

作者简介: 江晓明 (1977-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为智能光网络与电子线路设计。

E-mail: jxm772400@163.com

收稿日期: 2013-12-11; 收到修改稿日期: 2014-02-25

利用 LED 灯进行信息传输的室内 VLC 通信系统,并在信道设计和调制方式等方面做了大量工作^[4]。国内暨南大学 CHEN 教授等人对 LED 发光特性和室内通信链路进行了仿真^[5],西安理工大学 KE 教授等人对不同无线光信号的调制方法与接收性能进行了分析^[6]。作者参考上述文献中的研究方法和结论,借助 BARRY 等人的室内红外通信信道模型^[7],采用可见光发射常用的强度调制/直接检测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)信号调制方法,在典型 LED 灯室内布局与常用 LED 光发射功率的情况下,采用多径叠加网格算法,建立仿真模型与计算程序,计算桌面上各点的水平照明度与接收信号功率等参量指标的分布。为了通过实验来验证计算结果的可靠性与该通信系统的可行性,采用 ADUC7020 型数模转换的 ARM 可编程芯片及配套的外围印制电路板(printed circuit board, PCB),设计及实现了包含收发两端器件的 VLC 语音单向通信系统。该系统能实现在一定功率要求和较短传输距离的情况下,语音数字信号的无中继接收、放大滤波及清晰收听。

1 室内 VLC 通信系统的照明与功率要求

1.1 典型房间模型和 LED 照明度分布

照明度表示物体表面的亮度,水平照明度可表示为^[8]:

$$E_{\text{hor}} = I(0) \cos^m \Phi / (L_d^2 \cos \Psi) \quad (1)$$

式中, $I(0)$ 为 LED 中心光照强度, Φ 为光发光角度, Ψ 为光入射角度, D_d 为 LED 与光接收机(photo detector, PD)表面的距离。假设 LED 符合朗伯辐射规则, m 为朗伯辐射系数,它与 LED 的半功率半角 $\Phi_{1/2}$ 的关系可表示为 $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$ 。根据 ISO 定义的照明度要求,办公室房间的光照强度适合在 300lx ~ 1500lx 之间。

在空间尺寸为 5.0m × 5.0m × 3.0m 的典型室内房间模型中,LED 灯安装在离地面 2.5m 处,桌面高度为 0.85m,房间顶部装有 4 个 LED 灯,每个灯有 100(10 × 10) 个 LED 灯珠芯片。灯珠芯片之间的距离为 5cm,发光半角为 60°,中心发光强度为 0.73cd,单个灯珠光发射功率为 20mW,每个 LED 灯的总发光功率共计 2W。通过 MATLAB 仿真工具进行 3 维建模仿真,可以获得桌面的水平照明度分布图,如图 1 所示。可以看出,灯垂直位置下的照明度

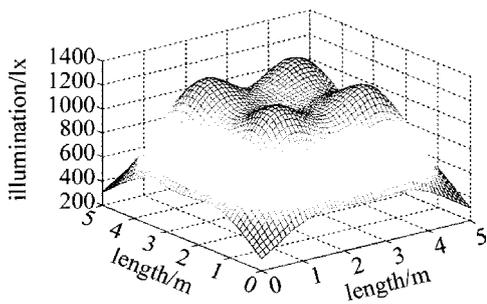


Fig. 1 Illumination distribution

最高,房间桌面各点照明度在 307lx ~ 1286lx 之间,符合 ISO 规定的照明标准。

1.2 直射光与一次反射光的接收功率

参考文献[7]中的光直射信道数学模型,在朗伯照射标准下,信道的增益为:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m \Phi T_s(\Psi) g(\Psi) \cos \Psi, & (0 \leq \Psi \leq \Psi_c) \\ 0, & (\Psi > \Psi_c) \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 为光 PD 接收器的收光面积, $T_s(\Psi)$ 为光滤波器增益, $g(\Psi)$ 为 PD 接收机增益, Ψ_c 为 PD 最大可接收视角。接收的直射光功率 P_r 与 LED 灯发射功率 P_l 的关系为:

$$P_r = P_l \cdot H(0) \quad (3)$$

在上述典型房间中,设接收机视角为最大视角 60°,PD 的收光面积为 1.0cm²,光滤波器增益为 1.0,PD 的光电转换率增益为 1.5A/W,并利用 PD 接收效率最灵敏的白光波长进行传输,可仿真计算

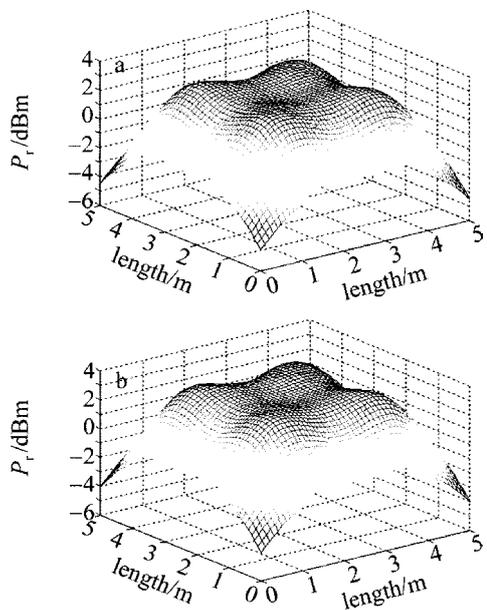


Fig. 2 a—receiving power distribution of the direct light b—receiving power distribution with the reflected light

出室内桌面直射光接收功率的分布情况,见图2a。

再考虑典型室内墙面引起的反射,光接收功率由直射 $H(0)$ 与反射 $H_{ref}(0)$ 的增益决定^[9]。

$$P_r = \sum \{P_t H(0) + \int P_t dH_{ref}(0)\} \quad (4)$$

反射一次的增益表达式为:

$$H_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho dA_{walls} \cos^m \Phi \cos \alpha \cos \beta \times \\ T_s(\Psi) g(\Psi) \cos \Psi, (0 \leq \Psi \leq \Psi_c) \\ 0, (\Psi > \Psi_c) \end{cases} \quad (5)$$

式中, D_1 为 LED 与反射点距离, D_2 为反射点与 PD 接收机距离, ρ 为反射系数, dA_{walls} 为反射区域面积, α 为光源和反射点夹角, β 为光源与 PD 接收机夹角, Ψ 为反射光入射角, 其它参量与直射相同。同样可以计算出包含一次反射光信号的接收功率分布, 如图2b所示。

通过图2a的计算结果可以得到, 在典型室内环境中, 桌面各点接收到的直射光功率范围为 $-4.3\text{dBm} \sim 2.5\text{dBm}$, 并且直射单一路径接收信号不存在码间干扰(inter symbol interference, ISI) 的影响, 可由 PD 接收机作为确认信号来接收。由图2b的结果可知, 包含一次反射的光接收总功率比直射信号的接收功率高 0.5dBm 左右, 并且, 虽然接收总功率有所增加, 但是由于数字无线通信中反射的多径效应, 会导致真实信号接收的码间干扰 ISI^[10], 并且在同一物理信道和系统相同调制方式下, 光发送端信号传输速率越高, 多径效应引起的 ISI 对实际信号接收的影响就越大。

1.3 不同信号传输速率的光信号接收质量

基于第1.2节中的功率分布计算与反射引起的 ISI 影响, 设发送的数字信号使用常见的非归零开关键控(on-off keying, OOK) 信号, 调制方式为白光载波 IM/DD 的波长调制法, 可以采用多径叠加的网格算法, 仿真计算出数字信号在不同传输速率下包含一次反射的接收信号信噪比(signal-to-noise ratio, SNR) 值。

接收信号的表达式为:

$$Y(t) = \gamma X(t) \otimes h(t) + P_n(t) \quad (6)$$

式中, γ 为 PD 接收器的功率增益, $X(t)$ 为非归零 OOK 光脉冲发送信号, $h(t)$ 为信道冲击响应, $P_n(t)$ 为包含了与信号发送周期 T 相关的 ISI、散弹噪声及热噪声等多种噪声功率之和^[11]。接收信号 SNR

中, 信号功率表示为:

$$P_{SNR} = \gamma^2 P_{r,s} = \gamma^2 \left\{ \int_0^T [h(t) \otimes X(t)] dt \right\}^2 \quad (7)$$

式中, T 为码元周期。ISI 的噪声功率 $P_{n,ISI}$ 表达式为:

$$P_{n,ISI} = \gamma^2 P_{r,ISI} = \gamma^2 \left\{ \int_T^\infty [h(t) \otimes X(t)] dt \right\}^2 \quad (8)$$

接收信号 SNR 中噪声功率之和 $P_n(t)$ 可表示为:

$$P_n(t) = \sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 + P_{n,ISI} \quad (9)$$

参考文献[5]和参考文献[11]中的典型室内模型系统散弹噪声 σ_{shot} 与热噪声 $\sigma_{thermal}$ 公式、参量与仿真结果, 可以得到 PD 接收机的平均散弹噪声与平均热噪声之和为较小信 $3.82 \times 10^{-5} \text{dBm}$; 设 PD 接收器的功率增益 $\gamma = 1$, 可在信号物理层速率为 1Mbit/s 与 10Mbit/s , 即单信号码元周期为 10^{-6}s 与 10^{-7}s 时, 分别仿真计算出 PD 接收机带 ISI 干扰的光接收 SNR 值桌面分布, 如图3a与图3b所示。并且, 同样可以计算出在信号速率不断增加的情况下, 灯正下方、房间四角及房间中心 SNR 值的变化曲线, 如图4所示。

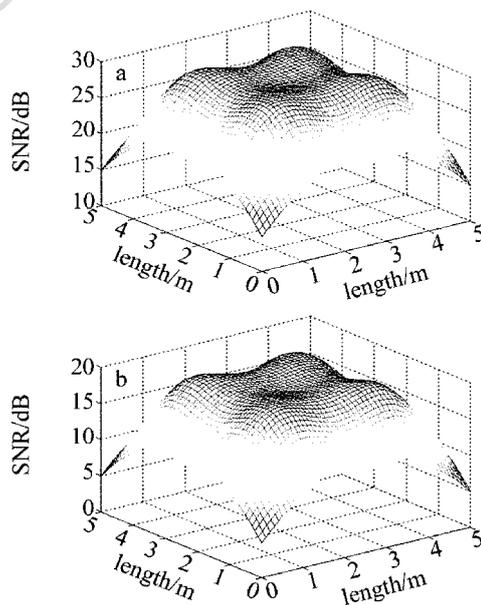


Fig. 3 a—SNR distribution of the received signal in 1Mbit/s b—SNR distribution of the received signal in 10Mbit/s

分析接收信号功率与各类干扰噪声功率, 对常规语音数字解码器中信号接收质量的影响。在接收信号 SNR 值大于 13dB 时, 系统能够获得误码值小于 10^{-4} 的数字解码效果与清晰音质试听^[12]。由图3a与图3b可见, 当信号发送速率小于 1Mbit/s , 即单个码元周期大于 10^{-6}s 时, 系统桌面接收点的 SNR 值均可达到 14.9dB 以上; 而在 10Mbit/s 信号

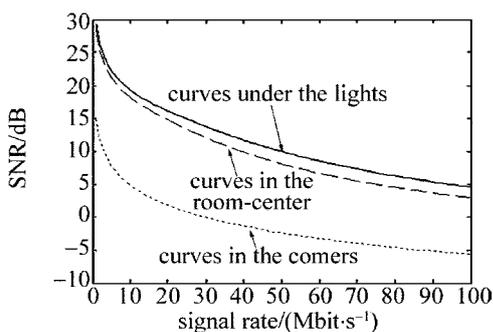
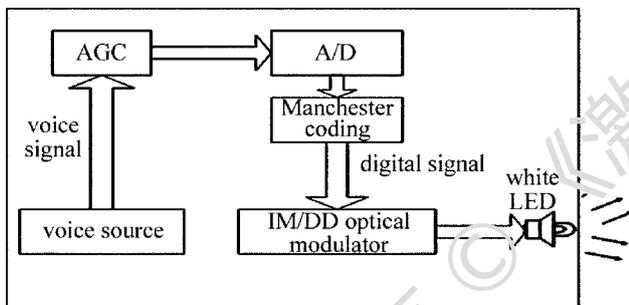


Fig. 4 SNR points curves under the lights in the room-center and in the corners

发送速率下,由于码间干扰 ISI 值的影响加剧,SNR 值介于 4.8dB 到 19.3dB 之间,大部分接收点不满足语音信号接收的 SNR 质量要求。同样,由图 4 中的 3 种室内接收点连续变化曲线亦可发现,在 LED 室内可见光短距离通信系统中,使用同样的信道模型与光信号发送功率,虽然接收信号的通信质量随着信号发送速率增加呈现不断下降的趋势,但是通过接收信号的 SNR 值可以看出,系统能够支持短距



离中低速(信号发送小于 1Mbit/s)语音信号的传输与接收。

2 语音通信收发机电路的设计与测试

2.1 LED 与 PD 光收发器件电路设计思路

发送端首先对语音源通过自动增益控制(automatic gain control, AGC)电路放大与整流,通过核心处理芯片进行曼彻斯特编码,并且满足语音信号编码速率小于或远小于 1Mbit/s,使得模拟语音信号转变成数字基带信号^[13];然后使用 NPN 三极管控制电路,利用 LED 发光器的调制灵敏度直接进行光波强度调制,达到既能够发光又能够实现数字信号发射的目的。

接收端采用增益系数较高的 PD 光电二极管接收光波信号,并在接收系统电路的控制和解码作用下,进行与发送端相反的信号处理。设计的系统电路原理图,如图 5 所示。

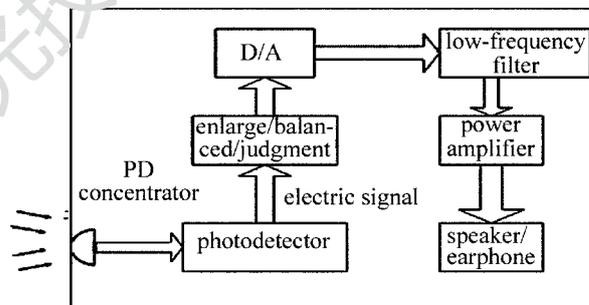


Fig. 5 Theoretical diagram of voice transceiver device circuits

2.2 电路设计的重点

收发器件电路中的核心芯片均采用 ADI 公司的 ARM 芯片 ADUC7020, 配以外围工作电路与供电模块,电路均采用 3.3V 供电^[14]。其中,发送端由语音终端设备的耳孔发出音频信号,经过外围电路整流放大,输出至 ADUC7020 芯片的模拟信号输入引脚,经过模数转换与曼彻斯特数字编码等信号处理后,输出数字基带信号;接着连接到 NPN 型三极管电路 B 极上,用以控制 LED 光信号发射器的信号发射。接收端的光信号接收与检测由光接收器与光敏三极管构成,将光电转换后的电信号发送到放大均衡芯片中,并将放大整流后的数字信号连接到 ADUC7020 芯片的数字信号引脚,通过解码与译码,输出相应的模拟语音信号;该信号再经过外围电路的滤波放大,实现模拟音频的播放。

2.3 发送与检测的软件程序流程

基于核心芯片的良好的程序开发与编译功能,该 LED 语音可见光收发系统的嵌入式软件程序,都能在该芯片中设计编译完成。在发送端,主要完成的是语音信号输入的检测判别、基于曼彻斯特的模数转换、以及驱动 LED 灯发射信号等工作。在接收端,主要完成的是判别光电转换后的电流中是否有数字信号、进行单向通信的建立与释放、以及对数字信号进行解码译码等工作。发送与接收两端的嵌入式软件程序流程图,分别如图 6a 与图 6b 所示。

2.4 电路中信号接收的效果

通过对上述 LED 与 PD 收发器件的多次实验检测,在无遮挡的典型室内环境下(见第 1.1 节),LED 的信号发射功率为 2W,并且满足 PD 接收机的接收

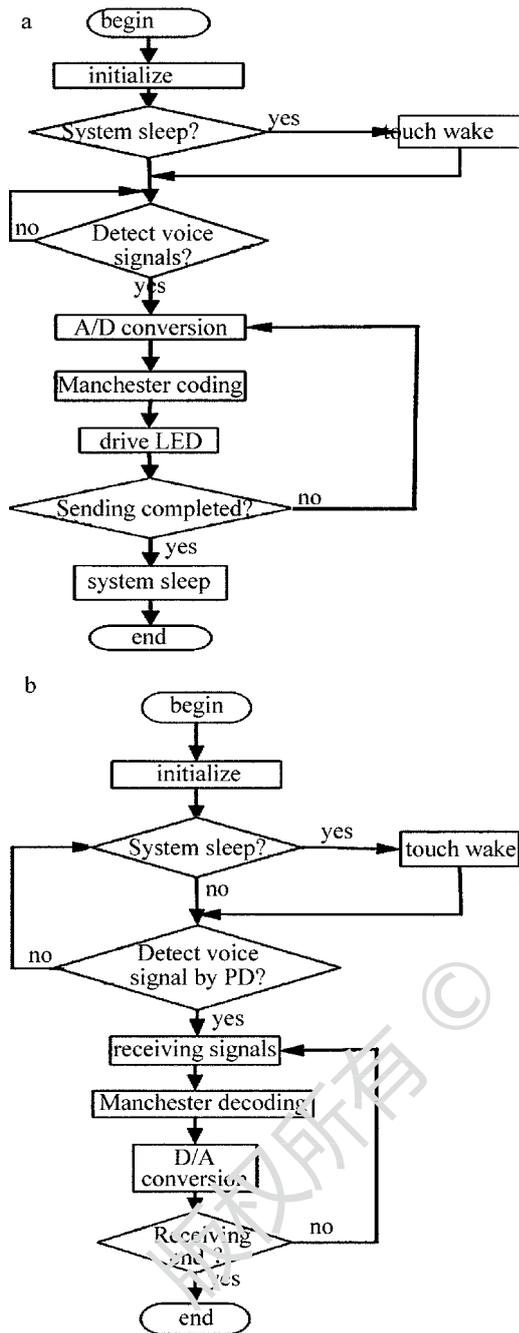


Fig. 6 a—program chart of modulation and transmission b—program chart of receiver and demodulation

角度,接收机能够确保在 10m 范围内的正常信号接收与耳机清晰收听。图 7 为在收发两端相隔 10m 距离时,用数字示波器检测并截留产生的收发两端语音数字信号波形。

在实验检测中,还通过数字误码仪测量了收发两端的数字误比特率(bit error rate, BER)值,获得了 10m 范围内满足误比特率小于 10^{-4} 的测量结果。但是,在光发送功率和 PD 接收面积不变的情况下,随着收发两端距离的不断增加,信号接收效果将不

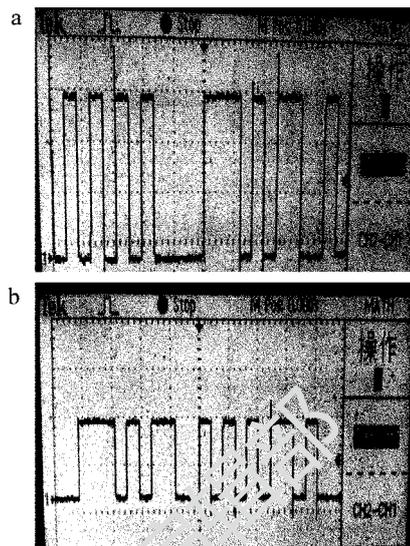


Fig. 7 a—voice digital signal waveform of transmission b—voice digital signal waveform of receiver

断下降,当收发两端传输距离从 10m 逐渐增加到 20m 时,实测误比特率急剧恶化,信号逐渐无法正常接收与恢复。

3 结论

系统采用可见光发射常用的 IM/DD 信号调制方法,在典型 LED 灯布局和 LED 光发射功率恒定的情况下,采用多径叠加网格算法,建立仿真模型与计算程序,获得桌面上各点的水平照明度、接收信号功率及信号 SNR 等参量指标的分布。计算结果表明,当信号发送速率小于 1Mbit/s,系统桌面接收点的 SNR 值均可达到 14.9dB 以上,所以系统能够支持短距离中低速语音信号的传输与接收。并且,使用 ADUC7020 型可核心编程芯片及配套的外围 PCB 电路,设计及实现了室内 VLC 语音单向通信的收发系统,实验测量可得到,在 LED 发射功率为 2W,并且收发传输距离小于 10m 范围的情况下,该 LED 可见光收发器件能够实现中低速率语音数字信号的无中继接收与清晰收听。

参 考 文 献

- [1] TAGUCHI T. Technological innovation of high-brightness light emitting diodes (LEDs) and a view of white LED lighting system [J]. *Optronics*, 2000, 19 (228): 113-119.
- [2] ISHIDA M. InGaN based LEDs and their application [J]. *Optronics*, 2000, 19 (228): 120-125.
- [3] XU G L, ZHANG X P. Free-space optical communication [J]. *Photonics Technology*, 2002, 22(4): 198-205 (in Chinese).
- [4] KOMINE T, NAKAGAWA M. Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lightings [C] // Ninth International Symposium on Computers and Commu-

- nications. Alexandria, Egypt; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004; 258-263.
- [5] HU G Y, CHEN Ch Y. Study on white LED light source for wireless indoor communications[J]. Optical Communication Technology, 2006, 30(7): 46-48 (in Chinese).
- [6] KE X Zh, CHEN J N. Performance comparison of various pulse position modulation in wireless laser communication [J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 67-76 (in Chinese).
- [7] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communication [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [8] YU L H. Electrical lighting [M]. Shanghai: Shanghai Tongji University Press, 2001; 112-123 (in Chinese).
- [9] TANAKA Y, KOMINE T, NAKAGAWA M. Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights [J]. IEEE Transactions Communication, 2003, 86(8): 2440-2454.
- [10] PROAKIS J G. Digital communication [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006; 273-279 (in Chinese).
- [11] PANG G. Information technology based on LEDs optical wireless communications [C] // IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings. New York, USA: IEEE, 2004; 395-398.
- [12] LIU B H, YAN Y, YANG L Y. Influence of noise signal on ARM speech encoder [J]. Communication Technology, 2008, 41(1): 143-145 (in Chinese).
- [13] YUAN D F, ZHANG H X. Code modulation principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006; 76-82 (in Chinese).
- [14] YANG H. LED lighting driver circuit design and examples [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008; 135-149 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©