

文章编号: 1000-7032(2009)06-0877-05

基于白光 LED 照明光源的室内 VLC 系统

臧景峰^{1,2}, 朴 燕¹, 宋正勋^{1,2}, 尹福昌², 康 桀¹

(1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: LED 照明与可见光通信技术相结合, 构建出基于 LED 可见光无线通信系统。对室内 VLC (Visible Light Communication) 系统的白光 LED 光源特性和系统信道模型分析, 提出照明光源布局设计与接收光功率分布的关系; 对强度调制直接检测方式的室内 VLC 系统中信噪比和多径效应引起的码间串扰分析, 提出采用光分集接收技术克服码间串扰和提高信噪比, 并给出光检测器阵列布局的模型。建立 VLC 系统仿真模型, 给出 OOK-NRZ (On-Off Keying & Non-Return Zero) 和 OOK-RZ (On-Off Keying & Return Zero) 调制方式的误码率和均方根时延扩展之间的关系曲线。仿真结果表明, 接收光功率相同时, 均方根时延扩展时间大于 1.0 ns 时, OOK-RZ 特性优于 OOK-NRZ。

关键词: 白光 LED; 室内可见光通信系统; 码间串扰; 均方根时延扩展; 分集接收技术

中图分类号: TN929.12; TN911.6

PACS: 42.79.Sz

PACC: 4280S

文献标识码: A

1 引 言

室内 VLC 系统中, 由于照明和增大发射功率、增强接收功率、防止阴影效应影响等原因需要安装多个 LED 灯或 LED 阵列, 因而光源的合理布局是影响照明和系统性能的关键因素。不同的光信号到达接收机会产生码间串扰 (ISI), 极大地降低了系统的性能, 可采用光分集接收技术提高 VLC 系统的信噪比, 克服不同路径引起的 ISI、接收机位置改变、室内人员走动和物体阴影效应对通信系统的影响。进行光信号检测时, 白光 LED 信号受到背景光的干扰, 后续的检测电路设计要考虑自身的电路噪声和前端的背景光噪声的影响。

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

$$dH_{\text{ref}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2} \rho dA_{\text{wall}} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\varphi) g(\varphi) \cos(\varphi), & 0 \leq \varphi \leq \Psi_c \\ 0, & \varphi > \Psi_c \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, m 为光源的辐射模式, A 为光电探测器接收面积, d 是发射端与接收端之间的距离, φ 是入射角, ϕ 为发射角, $T_s(\varphi)$ 是光滤波器增益, $g(\varphi)$ 是光聚能器增益, Ψ_c 是接收机视角。

2 室内 VLC 系统分析

2.1 室内通信信道分析

假定白光 LED 满足朗伯辐射模型, 直射视距光信道如图 1(a), 漫射光信道模型如图 1(b)。直射视距链路中, 接收机直接指向白光 LED 光源, 信号光源功率利用率高, 易于实现高速数据链接, 但会因链路上存在的障碍物而阻断。漫射链路设计中接收机视角一般较大, 降低了对指向的要求, 系统不易受阴影效应影响, 但链路中存在多径效应会引起 ISI, 限制信号传输速率。直射视距光信道直流增益表示为 $H(0)$, 漫射光信道(第一反射光)直流增益表示为 $dH_{\text{ref}}(0)$ ^[1]。

2.2 室内白光 LED 光源布局分析

室内 VLC 系统中, 由于各个房间的大小以及室内设施不尽相同, 因而要使通信效果达到最优, 须使房间内同一水平面上分布的光功率变化最小。

收稿日期: 2009-06-17; 修订日期: 2009-07-03

基金项目: 总装备部十五项目(40405060301); 吉林省科技发展计划项目(20080525)资助

作者简介: 臧景峰(1976-), 男, 吉林长春人, 在读博士, 主要从事光通信、通信信号处理、信息安全的研究。

E-mail: zjf0319830@yahoo.com.cn

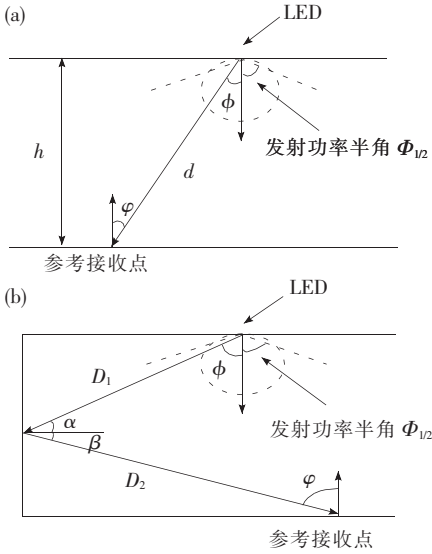


图 1 室内某点接收功率图, (a) 直射视距信道; (b) 漫射信道

Fig. 1 Received power of one indoor point

以一房间为例, 该房间尺寸为 $L \times W \times Z_H$, 设终端设备均放置在高度为 h 的平面, 平面 $z = h$ 上任意一点 (x, y, h) 的接收功率为:

$$P_r(x, y) = \sum_{i=1}^N P_{i1} [H_i(0) + dH_{i,ref}^m(0)] \quad (3)$$

式(3)中, N 为 LED 灯的个数, $dH_{i,ref}^m$ 为第 i 个 LED 灯 m 次一次反射的直流增量和。文献[2,3]表明: 室内可见光通信系统中, 直射光、第一反射光、第二次发射光与总接收光的比率分别为 95.16%, 3.57%, 1.27%, 检测器接收到的直射光和全部漫射光的增益总和比直射光的增益平均仅增加 0.5 dB, 表明 VLC 系统性能主要受直射光的影响, $dH_{i,ref}^m(0)$ 可忽略。室内平面 $z = h$ 上每点的平均功率为:

$$\bar{P}_r = \frac{1}{S} \iint_L P_r(x, y) dx dy = \frac{1}{S} \iint_L \sum_{i=1}^N P_{i1} [H_i(0)] dx dy \quad (4)$$

式(4)中, S 为房间内平面 $z = h$ 的面积, L 代表该区域。用接收功率的方差 D 表示平面 $z = h$ 上各点功率的“平均偏离”程度, 则

$$D = \frac{1}{S} \iint_L [P_r(x, y) - \bar{P}_r]^2 dx dy \quad (5)$$

对式(5)分别求 x_1 和 y_1 的偏导数, 仅当 $\frac{\partial D}{\partial x_1} =$

$\frac{\partial D}{\partial y_1} = 0$ 时, 可取到最优的 x_1^* 和 y_1^* , 即可确定最

佳的 LED 灯布局。

2.3 室内接收机噪声分析

2.3.1 PIN 检测阵列接收电路设计

光接收部分的核心是光电检测器和后续电信号放大电路^[4]。由于 PIN 光电二极管的光电转换线性度好, 无需高工作电压, 响应速度快, 价格较低, 但接收灵敏度较低, 通常可通过增加白光 LED 的发射功率解决, 常应用于室内光通信。对于室内环境的杂散光, 可以在光电检测器前面安装可见光滤波器, 可以减少收到的杂散光强度。如图 2 所示, PIN 检测阵列将接收光转化成微弱光电流, 经由多级放大器放大。多级放大结构中, 前级噪声会随着有用信号被后级放大, 要求设计低噪声, 宽频带的前置放大器。限幅放大器则要求增益高, 同时要有均衡电路以减小 ISI。

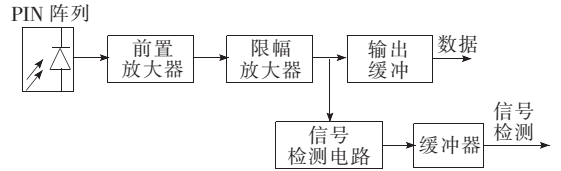


图 2 接收终端电路框图

Fig. 2 Receiver terminal circuit block

2.3.2 噪声分析

VLC 系统多采用强度调制 (IM: Intensity modulation) 和直接检测 (DD: Direct detection) 技术。图 3 是室内 VLC 系统的简易模型。图 3(a) 为采用 IM-DD 技术的室内 VLC 系统简易模型; 图 3(b)

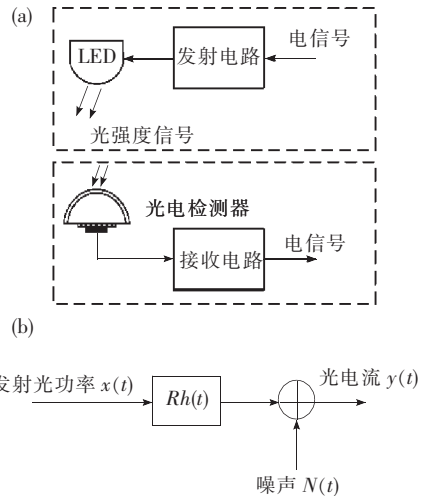


图 3 室内 VLC 系统简易模型, (a) IM-DD 系统简易模型; (b) 线性基带传输模型

Fig. 3 Simple model of indoor VLC system

为脉冲响应为 $h(t)$ 的线性基带传输模型。

室内 VLC 系统中,发射机光源为白光 LED,发出经过强度调制的光功率信号 $x(t)$,接收机用光电检测器直接检测,背景噪声和接收机前置放大器噪声可看作高斯白噪声 $N(t)$ 。接收到的光电流信号 $y(t)$ 表示为:

$$\begin{cases} x(t) = P_1(1 + A_m \cos \omega t) \\ y(t) = Rx(t) \cdot h(t) + N(t) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 P_1 为发射光平均功率, A_m 为正弦幅度。 R 为光电检测器的响应度。

VLC 系统接收机前端的主要噪声是前置放大电路等引入的电路噪声 i_{circ} 。VLC 系统在传输速率 R_b 时的 PIN 接收端信噪比可由式(7)计算^[5]:

$$\text{SNR} = \frac{1}{2} \frac{A_m^2 R^2 P_m^2}{i_{\text{circ}}^2 + 2qR(P_{\text{in}} + P_{\text{amb}})R_b} \quad (7)$$

式(7)中 q 为电子电荷, i_{circ}^2 为电路噪声平均功率值, P_{amb} 为入射到检测器的背景光功率(包括自然光和室内其它光源等功率), P_{in} 为检测器平均输入光功率。

2.3.3 ISI 分析

研究表明^[6-8]:VLC 系统中,传输速率越高,ISI 对信噪比的影响也越大。室内 VLC 系统中由于光检测器尺寸远远大于光波长,同时考虑非相干光源白光 LED 的布局,为了克服高速通信中 ISI 的影响,提出光分集接收技术方案。在接收机的不同方向上安装多个光电检测器或检测器阵列,同时将多个检测器均匀分布在同一个半球面上。选取第一个 PIN 接收到的光功率下降到垂直入射接收到的光功率的一半时,放置第二个 PIN。经过计算,当通信传输距离远远大于检测器所在半球面的球半径时,两个 PIN 表面的夹角应为 60° 。在与水平面成 60° 方向放置第三个 PIN, PIN 的表面垂直球面半径。为了提高接收效果,半球面顶部水平再放置一个 PIN,因此至少需要四个 PIN 构成 PIN 阵列,其布局如图 4 所示。该布局既可以提高接收效果,减少 PIN 的个数,又可以克服高速通信中 ISI,可以保证接收机位置移动或是室内有人员走动和有其他物体产生阴影时也能可靠通信。光分集接收中,低速率传输系统中可以简单地将多个信号直接求和,总体上提高接收信号的功率;传输速率高于 100 Mbps 时,由于 ISI 的影响,不能将信号直接相加。信噪比最大的方

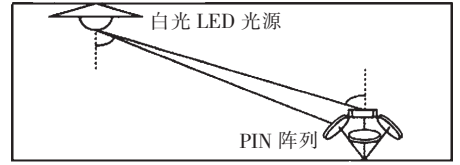


图4 VLC系统光分集接收原理图

Fig.4 Optical diversity reception block of VLC system

向就是直射信道链接的方向,应选取最接近直射信道链接的方向作为最佳接收方向。

3 结果与讨论

3.1 仿真模型

VLC 系统中,多个 LED 光源的光信号叠加会引起多径效应,导致 ISI 并降低通信性能,均方根时延扩展(RMS delay spread)是反映 ISI 性能的重要指标^[9,10]。仿真中,光调制解调方式为光强度调制-直接探测(IM-DD)。电信号调制方式为 OOK-NRZ 和 OOK-RZ。假定光传输为直视信道,噪声为加性高斯白噪声,并且它的光功率为 0.0 dBm,一个 PIN 的响应度 R 为 0.53 A/W。根据指数式衰减模型建立多径信道模型^[2,3]。

$$h_e(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \exp(t/\tau) u(t) \quad (8)$$

式(8)中 τ 为描述多路信道特性的时延参数,通过参数 τ 计算 τ_{RMS}

$$\tau_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^{N_{\text{LED}}} P_i \tau_i^2 - \tau_0^2} \quad (9)$$

式(9)中 P_i 表示接收光功率, τ_i 表示任意光束相对于第一个到达终端的光束时延。 τ_0 为平均时延, P_T 为总接收功率,由式(10)给出。

$$\begin{cases} \tau_0 = \frac{1}{P_T} \sum_{i=1}^{N_{\text{LED}}} P_i \tau_i \\ P_T = \sum_{i=1}^{N_{\text{LED}}} P_i \end{cases} \quad (10)$$

3.2 仿真结果

OOK-NRZ 调制方式的 BER(Bit error rate)和 τ_{RMS} 之间的关系如图 5 所示。当接收光功率 $p_{\text{rev}} < -30$ dBm 时,即使数据传输速率是 100 Mbit/s 时, $\tau_{\text{RMS}} < 1.0$ ns 的情况也不具有讨论意义。当 $\tau_{\text{RMS}} = 1.0$ ns 时,此时的误码率大约是 3×10^{-4} 。当 $\tau_{\text{RMS}} > 1.0$ ns 时,误码率开始增加。数据传输速率达到 400 Mbit/s 时,延时影响更严重。

OOK-NRZ(占空比 $r = 100\%$) 和 OOK-RZ 调

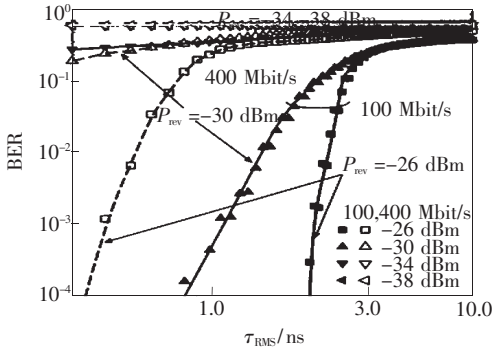


图 5 OOK-NRZ 调制方式的 τ_{RMS} 和 BER 的关系曲线

Fig. 5 The relation curve of τ_{RMS} and BER for OOK-NRZ modulation

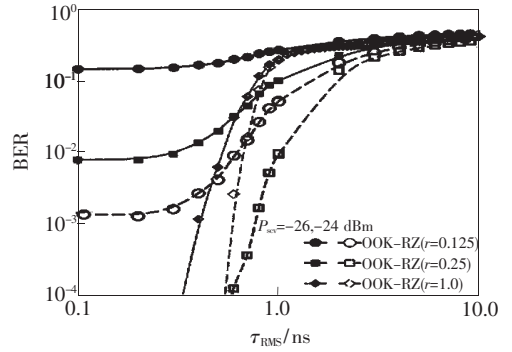


图 6 OOK-NRZ, OOK-RZ 调制下 τ_{RMS} 和 BER 的关系曲线

Fig. 6 The relation curve of τ_{RMS} and BER for OOK-NRZ and OOK-RZ modulations

制方式的 BER 和 τ_{RMS} 之间的关系比较曲线如图 6 所示。由于 OOK-RZ 噪声等效带宽比 OOK-NRZ 大, 当接收光功率相同时, OOK-RZ 的 SNR 比 OOK-NRZ 的 SNR 小。 $\tau_{\text{RMS}} < 1.0$ ns 时 (即 ISI 的影响小), OOK-NRZ 特性比 OOK-RZ 好。当 $\tau_{\text{RMS}} > 1.0$ ns, 由于 OOK-RZ 的信号保护间隔可以减弱 ISI 的影响, OOK-RZ 特性优于 OOK-NRZ。

4 结 论

白光 LED 具有高输出功率, 寿命长和效率

高, 高调制速率等特点, 白光 LED 即可用作照明光源又可作为通信光源。提出 VLC 系统中 LED 灯的布局对接收功率的影响, 给出最优 LED 灯布局设计方法。理论分析了 IM-DD 方式下室内通信链路和信道模型, 指出光链路中系统参数对通信性能的影响和设计光收发机端时应考虑的因素。将分集接收技术应用于 VLC 通信系统, 给出检测器 PIN 阵列布局模型, 仿真结果表明能很好地克服多径效应引起的 ISI 的影响。

参 考 文 献:

- [1] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Trans. on Consumer Electron.*, 2004, **50**(1):100-107.
- [2] Komine T, Haruyama S, Nakagawa M. A study of shadowing on indoor visible-light wireless communication utilizing plural white LED lightings [J]. *Wireless Personal Communications*, 2005, **34**(1-2):211-225.
- [3] Fang Fubo, Wang Yaohao, Song Daihu, et al. Spectroscopic analysis of white LED attenuation [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(2):353-357 (in Chinese).
- [4] Guo Weiqiang, Wan Zhi, Chang Lei, et al. Noise suppression of area array CCD signal acquisition [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(1):204-208 (in Chinese).
- [5] Ding Deqiang, Ke Xizheng, Li Jianxun. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system [J]. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 2007, **34**(1):131-134 (in Chinese).
- [6] Hu Guoyong, Chen Changying, Chen Zhenqiang. Study on white LED light source for wireless indoor communications [J]. *Optical Communication Technology* (光通信技术), 2006, **30**(7):46-48 (in Chinese).
- [7] Yu Zhigang, Chen Changying, Zhao Jun. The diversity reception technology in visible-light LED illumination and communication system [J]. *Optical Communication Technology* (光通信技术), 2008, **25**(9):2-54 (in Chinese).
- [8] Xu Guofang, Rao Haibo, Yu Xinmei, et al. Improvement of optical uniformity of white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(4):707-712 (in Chinese).
- [9] Lu Hui. Study and design on indoor wireless infrared communication [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006 (in Chinese).
- [10] Yun Wenyue. Study on modulation and demodulation method for visible-light communication system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008 (in Chinese).

Indoor Visible-light Communication System Based on White LED

ZANG Jing-feng^{1,2}, PIAO Yan¹, SONG Zheng-xun^{1,2}, YIN Fu-chang², KANG Jie¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Optics and Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: White LEDs have high power output, high efficiency and long lifetime, and are expected to serve as lighting of the next generation. Visible light LEDs are being used for indoor optical wireless communication system as well as the illumination of rooms. The visible light communication (VLC) system based on LEDs can attain high luminosity as a lighting source, and thus high quality transmission for an optical wireless system. In indoor diffuse optical wireless links multi-path dispersion limits the maximum transmission data rates. White LED light source, SNR, system channel model and RMS delay spread have been analyzed for indoor VLC system. The relation between optimal strategies of light source and received optical power was discussed. SNR of indoor VLC system based IM-DD and ISI produced by multi-path impulse response was investigated. The optical diversity reception technology was given to get rid of ISI and increase the SNR. And the model of the optical detector's layout was given. The system simulation model was built, and the relation curves between BER and RMS delay spread of OOK-NRZ modulation and OOK-RZ modulation were given. Based on the experimental results and under the same received optical power and RMS delay spread time of greater than 1.0 ns, OOK-RZ requires a wider band-width than OOK-NRZ's, since it shows a better performance than OOK-NRZ.

Key words: white LED; indoor VLC system; ISI; RMS delay spread; diversity reception technology

CLC number: TN929.12; TN911.6

PACS: 42.79.Sz

PACC: 4280S

Document code: A