

超低照度下的可见光物联网终端设计

潘天豪^{1,3}, 陈雄斌^{2,3*}, 闵成或³, 孙启功^{1,3}, 毛旭瑞³

¹中国科学院大学微电子学院, 北京 101408;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083

摘要 针对物联网的广覆盖、多连接的应用需求,研究了超低照度下的可见光通信技术。采用LED照明灯发送红外协议格式的可见光信号时,调制深度小于0.625%时人眼觉察不到闪烁。参考朗伯光源辐射模型,模拟了一个30 m×2.1 m×2.6 m的室内可见光通信场景,仿真结果表明调制深度为0.46%时使用20×12阵列的9.7 W LED照明灯作为发射装置,其有效光信号覆盖范围可达616 m²。在实验室搭建了可见光智能家居系统,测试遥控机器人对该信号响应准确率为100%时的最远距离,实验测试结果为14.3 m,与仿真运算结果14 m间相对误差约为2%。

关键词 光通信; 智能家居系统; 双模光电接收器; 红外控制系统

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0706003

Design of Visible Light-Based Internet of Things Terminal Under Ultralow Illumination Conditions

Pan Tianhao^{1,3}, Chen Xiongbin^{2,3*}, Min Chengyu³, Sun Qigong^{1,3}, Mao Xurui³

¹ School of Micro-Electronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

² Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract In this study, we investigate the visible light communication technology under ultralow illumination to satisfy the wide coverage and multiconnection requirements associated with the internet of things. A light-emitting diode (LED) is used to transmit the visible light signals in the infrared protocol format. The calculations denote that the human eye can not notice flicker when its modulation depth is less than 0.625%. Further, an indoor visible light communication scene (30 m×2.1 m×2.6 m) is simulated by considering a Lambertian source radiation model; the signal coverage become 616 m² when a 9.7 W LED illumination lamp with a 20×12 array is used as the transmitting device and the modulation depth is 0.46%. Subsequently, a visible light-based intelligent home system is developed in the laboratory to estimate the farthest distance at which a remotely controlled robot can respond to the signal with 100% accuracy. The relative error between the experimental results obtained at 14.3 m and the simulation results obtained at 14 m is 2%.

Key words optical communications; smart home system; dual-mode photoelectric receiver; infrared control system

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4080

1 引 言

物联网(Internet of Things)通过组建“物-物”网络,实现万物高效、安全、便捷的连接,能达到实时监控、管理各种设备的目的。“物-物”网络的组建需

要借助有线或者无线通信技术。有线通信技术虽然安全可靠,但是布线成本很高且不利于移动,所以无线通信在物联网中逐步占据了主导地位。随着各种无线通信业务需求的增加,无线电频谱资源变得越来越拥挤,邻频干扰问题也越来越严重,因此必须拓

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-11-25; 录用日期: 2019-12-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403605)、国家自然科学基金(61875183)、中国科学院基金项目(GQRC-19-03)

* E-mail: chenxiongbin@semi.ac.cn

展新的无线频谱资源。太赫兹、可见光已经成为 6G 通信的备选频段。

可见光通信利用发光二极管发出明暗变化的信号来传输信息,它是一种新的无线光通信手段,具有速率高、安全性好、可以在电磁敏感区使用等优点。2000 年,日本 KEIO 大学的 Tanaka 等^[1]提出基于室内照明 LED 灯的可见光构建无线家庭链路的概念。2008 年,欧盟启动了包含可见光通信的 OMEGA 计划^[2],美国成立了从事可见光通信技术研究智能照明中心^[3]。同年,中国科学院半导体研究所基于可见光通信技术开展了半导体照明信息网的研发。2013 年,国家 863 计划和 973 计划资助国内的科研团队开始从事可见光通信技术研究,后来取得了一系列研究成果^[4-7]。2019 年,欧洲地平线计划 H2020 资助了可见光通信的物联网研究^[8]。预计,可见光通信技术的商用化将进一步加快。

现在商用的智能家居系统源于 WHL(Wireless Home Link)的概念^[9],多使用红外(IR)或射频(RF)通信技术^[10]。随着半导体照明技术的发展,被誉为“绿色照明”的白光 LED 已经占据了主要市场,由于灯光信号具备室内全覆盖的特点,其控制范围远大于手持红外遥控器。本课题组从 2008 年开始从事可见光智能家居系统的研究,希望将 LED 照明灯具的价值最大化。现有可见光智能家居系统的研究多使用强度调制和直接检测技术,接收终端抗低频噪声干扰能力差,本文将红外协议应用于可见光智能家居领域,带有红外遥控接收功能的家用电器和物联网执行终端在保留原有红外遥控功能的基础上,可实现红外和可见光的双模控制。根据国家照明标准^[11],对建筑物内照度要求最低的环境是车库,为 30 lx,加上灯光闪烁条件的限制,LED 灯具发送低频信号时的照度变化将极小。可见光智能家居系统能够检测微弱光信号的变化,这意味着它支持受控终端大范围的移动,能真正实现安全、经济、环保、高效的万物光互连,有望解决工业电磁环境下工业机器人无线操控的技术难题。

本文针对物联网的应用需求,建立可见光智能家居系统的信道模型,并进行理论分析及数据仿真,得到了该可见光智能家居系统在防闪烁前提下被正确操控时的最大通信范围;使用研制的可见光、红外双模光接收器(PD)搭建了兼容红外、可见光的智能家居控制系统;测试了家用 LED 灯具对可见光智能家居系统控制的范围与正确率,验证了新技术方案

的可行性和理论计算的准确性。

2 理论推导

红外通信和可见光通信系统都包括光的调制、光电的转换和电信号的解调这三个主要部分。常用红外遥控器采用“亮-灭”调制,虽然常用载波频率是 38 kHz,但红外协议中信号频率最低为 25 Hz 左右,为了不影响可见光 LED 的照明效果,在 LED 发送红外协议格式的信号时,需要使用“明-暗”的调制方式,即限制其调制深度。调制深度的定义为:光信号最大值与最小值的差除以光信号最大值与最小值的和。因此调制深度越小,LED 灯发送信号时造成的“闪烁”现象就越不明显^[12],但是其通信范围也越小。因此本文将通过公式推导和软件仿真去计算调制深度为闪烁临界值时可见光智能家居系统传输信号的有效覆盖范围。

2.1 光功率模型

图 1 是朗伯光源的信道模型示意图,其中 d 为光源与接收器的直线距离, θ 为 LED 和接收器连线与 LED 光轴的夹角, $\theta_{1/2}$ 为 LED 辐射强度半角, φ 为接收器表面法线与入射光线的夹角, φ_{FOV} 为接收器视场角。可见光智能家居系统传输的是低速信号(载波频率为 38 kHz),因此可见光多径效应引起的码间干扰可以忽略。参考文献^[13]可知,假设墙壁反射系数为 0.81,则平均接收光功率中四侧墙反射光贡献率为 27.58%。因为反射光功率与墙壁的反射系数成正比,本文实验环境为长过道,只需考虑两侧墙壁的发射,该墙壁反射系数为 0.5,所以反射光功率的贡献远小于 27.58%。为了充分证明可见光智能家居系统传输的信号具有大范围覆盖的能力,本研究将在不考虑反射光对光信号增益的前提下计算信号的有效覆盖范围。

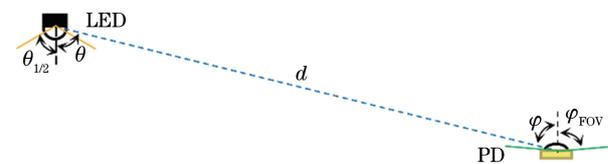


图 1 朗伯光源的信道模型示意图

Fig. 1 Schematic of Lambert source channel model

已知朗伯光源模型的辐射公式为

$$R(\theta) = \frac{m+1}{2\pi} P_s \cos^m \theta, \theta \in [-\pi/2, \pi/2], \quad (1)$$

式中: $R(\theta)$ 为辐射强度; P_s 为发射光功率; m 为 LED 的辐射方向性指数,表达式为

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln \cos \theta_{1/2}} \quad (2)$$

由表 1 可知 LED 的半功率角为 60° , 因此 $m=1$ 。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Operating current I_F/mA	13
Central luminous intensity I_0/cd	1.36
Luminous half angle $\theta_{1/2}/(^{\circ})$	60
Field of view $\varphi_{\text{FOV}}/(^{\circ})$	90
Detector effective area S/mm^2	20
Filter gain G_f	1
Optical lens gain G_0	4
Minimum irradiance at 940 nm $E_{\text{emin}}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	0.4
Photosensitivity $R/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.7

由于 LED 是非相干光源, 因此 LED 阵列光源可以采用朗伯模型。建立一个长、宽、高为 $30 \text{ m} \times 2.1 \text{ m} \times 2.6 \text{ m}$ 的室内走廊空间模型(因为普通房间无法进行远距离测试, 所以选用走廊进行实验), 将 LED 灯板的位置设为 $(5 \text{ m}, 1.05 \text{ m}, 2.5 \text{ m})$, 接收器水平放置在距离地面 0.25 m 的高度。光源如图 2 所示, 为一个 20×12 阵列的 LED 灯板, LED 的间距为 20 mm , 灯具的工作电流为 260 mA , 工作电压

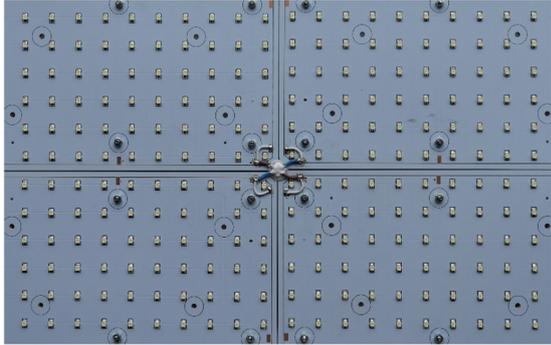


图 2 LED 灯板
Fig. 2 LED Arrays

为 37.2 V , 故 LED 灯的电功率约为 9.7 W 。每颗 LED 的位置为 $(x_n, y_n, 2.5 \text{ m})$, 接收器的中心位置为 (x, y, z_h) , z_h 表示接收器到地面的距离, 则 LED 到接收器中心的距离可表示为

$$d_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (2.5 - z_h)^2} \quad (3)$$

接收器接收到单颗 LED 发射的光功率可表示为^[14]

$$P_n = \begin{cases} \frac{P_T(m+1) \cos^m \theta G_f(\varphi) G(\varphi) S \cos \varphi}{2\pi d_n^2}, & \varphi < \varphi_{\text{FOV}} \\ 0, & \varphi \geq \varphi_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_T 为发射光功率; S 为接收器的面积; $G_f(\varphi)$ 为光学滤波器的增益; $G(\varphi)$ 为光学集中器的增益。图 3 为接收器的相对辐射特性曲线, 可以看出其接近于余弦的二分之三次方, 因此光学集中器的增益 $G(\varphi)$ 可以表示为

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_0 \cos^{3/2} \varphi, & \varphi < \varphi_{\text{FOV}} \\ 0, & \varphi \geq \varphi_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: G_0 为光学集中器 0° 所对应的增益。

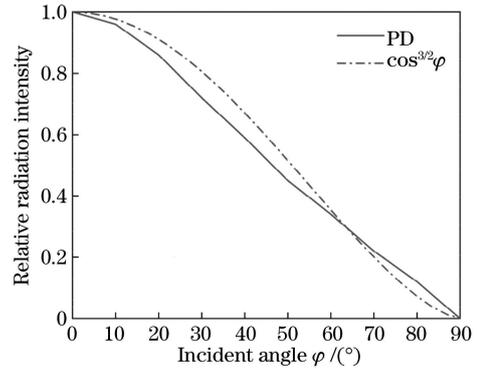


图 3 接收器相对辐射特性曲线

Fig. 3 Relative radiation intensity of PD

由于 LED 光源为非相干光源, 且 $\cos \theta = \cos \varphi = (2.5 - z_h)/d_n$, 因此接收器接收 LED 灯具发射的光功率可以表示为

$$P = \sum_{n=1}^{240} P_n = \begin{cases} \sum_{n=1}^{240} \frac{P_T(m+1) S G_f(\varphi) G(\varphi) (2.5 - z_h)^{m+1}}{2\pi [(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (2.5 - z_h)^2]^{(m+3)/2}}, & \varphi < \varphi_{\text{FOV}} \\ 0, & \varphi \geq \varphi_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 最小接收光功率

照明最常用的荧光型 LED 的光谱主要覆盖蓝光和黄光两个波段。图 2 中使用的 LED 是

GT3528, 图 4(a) 是其光谱分布曲线, 其光谱分布覆盖 $380 \sim 780 \text{ nm}$ 。本文设计的一体化光接收器 GT59438R 光谱响应特性曲线如图 4(b) 所示, 其光

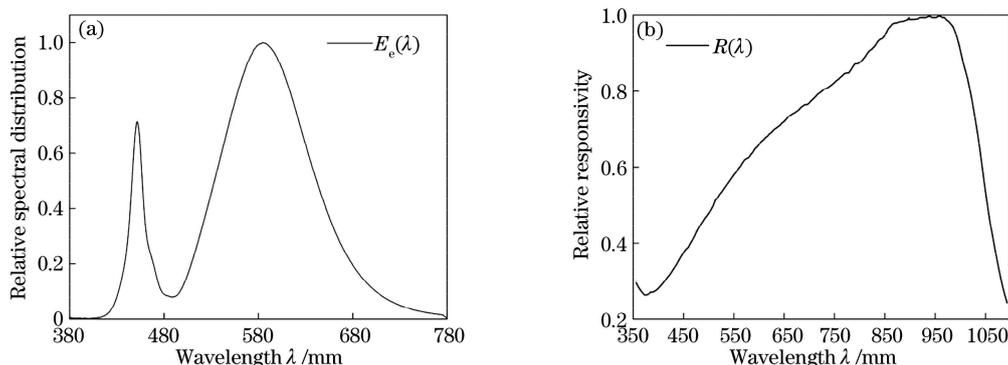


图 4 LED 光谱分布曲线与接收器光谱响应曲线。(a) LED; (b) 光接收器

Fig. 4 LED spectral distribution curve and receiver spectral response curve. (a) LED; (b) PD

谱响应范围在 350~1100 nm,不仅可以响应可见光波段的光信号,还可以响应红外波段的光信号。

根据文献[15],可得

$$E_{\text{emin}}(\lambda) = \frac{P_{\text{th}}(\lambda)}{S} = \frac{i_{\text{min}}}{SR(\lambda)}, \quad (7)$$

式中: $E_{\text{emin}}(\lambda)$ 为使接收器正常工作的最小辐射照度; $P_{\text{th}}(\lambda)$ 为通量阈; i_{min} 为使接收器正常工作的最小光生电流; $R(\lambda)$ 为接收器的光谱响应曲线。设

$\int_{380}^{780} P_0 E_e(\lambda) R(\lambda) d\lambda = i_{\text{min}}$,其中 P_0 为接收器接收到的 LED 光束峰值波长对应的光功率,对于 LED-GT3528 光源,该接收器至少需要接收到的光功率为 $P_{\text{min}} = \int_{380}^{780} P_0 E_e(\lambda) d\lambda = 13 \text{ nW}$ 。

2.3 闪烁融合条件

参考文献[16]设计闪烁感知实验:邀请 10 位被试人员(5 男 5 女),在不同环境亮度条件下分别测试被试人员非直视和直视时对闪烁的感知情况,每种条件下发送 10 次遥控信号。环境亮度条件 1:晴天开灯,室内测试灯具下 1 m 处的照度为 300~400 lx;环境亮度条件 2:晴朗白天,室内测试灯具下 1 m 处的照度为 160~200 lx;环境亮度条件 3:白天拉上窗帘,室内测试灯具下 1 m 处的照度为 0~1 lx。被试人员认为感觉不到闪烁的统计结果如表 2 和表 3 所示,其中调制深度的计算取 LED 灯具不发送信号时的照度作为光信号最大值,取发送 38 kHz 方波时的照度作为光信号最小值。测量位置位于 LED 灯具下 1 m,不发送信号时照度固定为 364.3 lx。

根据 IEEE 2015 年发布的 LED 调制相关标准[17],当 LED 的闪烁频率 $f < 90 \text{ Hz}$ 时,调制深度应小于 $f \times 0.025\%$ 。已知日本 NEC 公司的 uPD6121G 红外协议编码的最低频率为 25 Hz[18],则调制深度应小于 $25 \text{ Hz} \times 0.025 = 0.625\%$,符合闪烁感知实验的结果,因此可将 LED 灯具的调制深度

设为 0.46%。

表 2 非直视条件下不同环境亮度条件下被试人员对闪烁的感知度

Table 2 User perception of flicker in indirect viewing under different ambient light levels %

Modulation depth	Level 1	Level 2	Level 3
1.14	90	80	0
0.46	100	100	100
0.18	100	100	100

Notes: 100% represents that none of the subjects can feel flicker; 0% represents that all subckects can feel flicker.

表 3 直视条件下不同环境亮度条件下被试人员对闪烁的感知

Table 3 User perception of flicker in direct viewing under different ambient light levels %

Modulation depth	Level 1	Level 2	Level 3
1.14	20	0	0
0.46	100	100	90
0.18	100	100	100

Notes: the same as in Table 2.

2.4 控制范围分析

经测试计算,实验用 LED 灯具调制深度为 0.46%时,单颗 LED 光功率变化约为 9 mW。图 5 是发射光功率为 9 mW、 z_h 为 0.25 m 条件下室内模型的光功率分布图,可以看出光功率等于 13 nW 的点与灯具的水平距离为 14 m,即该套可见光智能家居系统的有效控制范围是一个半径为 14 m 的圆,面积约为 616 m²。

3 系统设计

3.1 调制电路与接收器设计

调制模块的原理框图如图 6(a)所示,联网的手

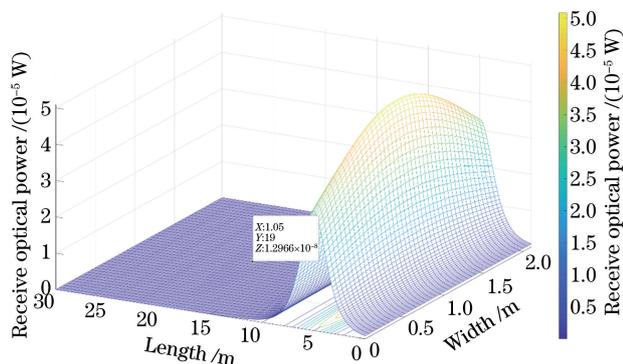


图 5 $z_h = 0.25$ m 时接收功率分布图

Fig. 5 Received power distribution when z_h is 0.25 m

机将控制指令发送给 Wi-Fi 模块, 然后传递给 STM32 单片机, STM32 单片机将接收到的控制指令进行编码, 最后经过调制电路加载到 LED 灯具上转换为可见光信号。

一体化光接收器 GT59438R 原理框图如图 7(a) 所示, 电路芯片中的放大电路将电流信号转换为较大的电压信号, 经过带通滤波器滤除噪声后传给解调电路恢复出控制指令。实物图见图 7(b), 主要使用金丝球焊技术将光电探测器和电路芯片连接在一起, 然后采用双酚 A 型透明环氧树脂材料进行封装。

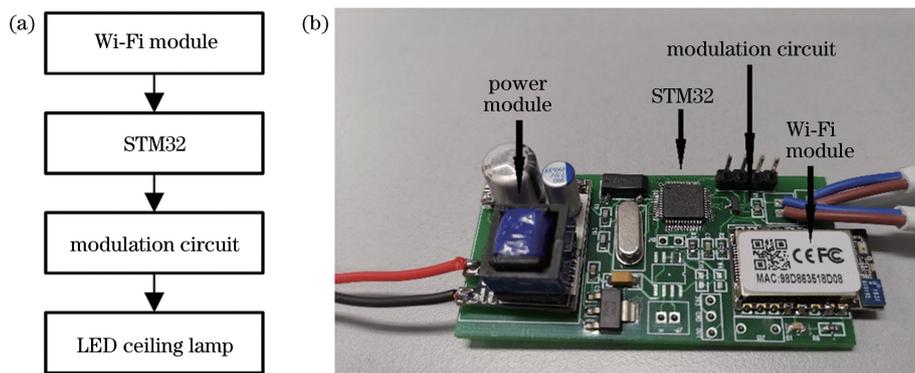


图 6 调制模块。(a)原理框图;(b)实物图

Fig. 6 Modulation module. (a) Block diagram; (b) physical picture

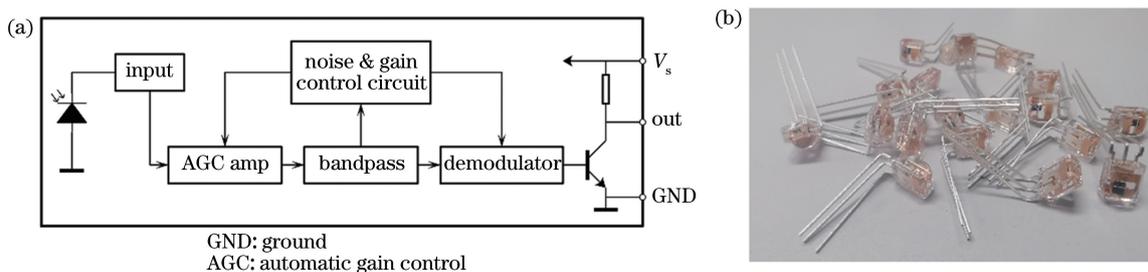


图 7 一体化光接收器。(a)原理框图;(b)实物图

Fig. 7 Miniaturized optical receiver. (a) Block diagram; (b) physical picture

3.2 系统搭建

为了测试该智能家居系统对可见光及红外控制指令的响应情况, 验证上述计算仿真的准确性, 在实验室搭建了如图 8 所示的实验验证系统, 其中实验选用的遥控机器人型号为雄胜星宝战士 3。

4 系统测试与分析

利用上述实验系统, 令 LED 灯具发送红外协议格式的遥控指令, 通过测试接收终端对控制指令的正确响应率, 表征基于可见光通信的物联网系统的误码率。

对于如图 8 所示基于 LED 灯具的智能家居系

统, 点击手机遥控器面板——机器人的“前进”和“后退”按钮各 10 次, 重复 10 次并记录测试结果。然后, 使用机器人原装的红外遥控器进行相同的测试, 并记录测试结果。如表 4 所示, 两个机器人均能响应 LED 照明灯的遥控信号, 正确率为 100%; 同时, 对红外遥控器的响应正确率也为 100%。

测试中, 可见光控制系统的直线控制距离比红外遥控器的略大, 并且由于红外遥控器的控制角度比较小, 因此可见光智能家居系统的控制范围比红外遥控器大很多。该可见光智能家居系统 9.7 W 灯具的最大有效控制距离的测试结果是 14.3 m (对应圆形有效控制范围 642 m^2), 与仿真结果 14 m 间的

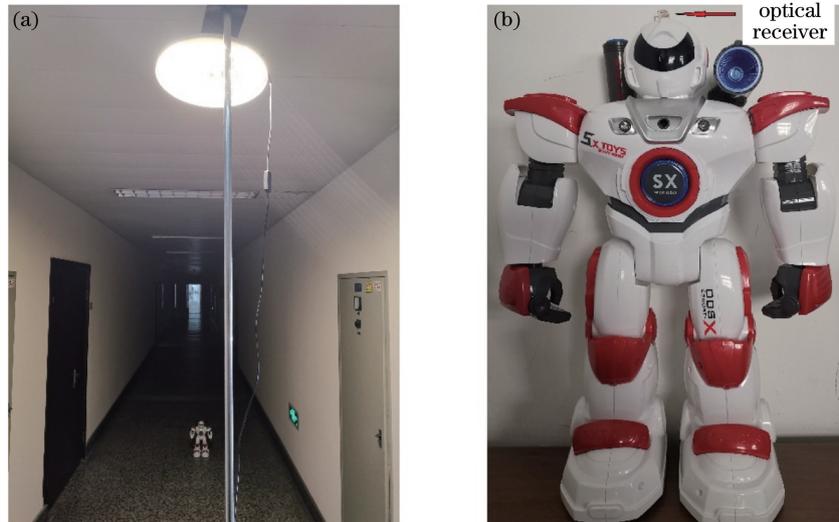


图 8 系统测试图。(a)基于大功率 LED 照明灯的可见光智能家居系统;(b)遥控机器人
Fig. 8 System test diagram. (a) Visible light smart home system based on high-power LED lamp;
(b) visible light control robot

表 4 系统测试结果
Table 4 Test results of system

Test Condition		Advance (R/W)	Retreat (R/W)	Total (R/W)	Accuracy / %
Visible light test	Robot 1	100/0	100/0	200/0	100
	Robot 2	100/0	100/0	200/0	100
IR test	Robot 1	100/0	100/0	200/0	100
	Robot 2	100/0	100/0	200/0	100

Note: The distance of horizontal visible light test with 100% accuracy is 0 m to 14.3 m; the distance of horizontal IR test with 100% accuracy is 0 m to 13.7 m; R/W represents right or wrong.

相对误差为 2%。分析原因:2%的相对误差是因忽略反射光的信号增益等因素造成的。

由于实际生活中电器一般放置于房间的边角处,此时墙壁的反射光会使实际控制距离比仿真结果更大,因此实际使用时该可见光智能家居系统 9.7 W 灯具的控制范围会大于 616 m²。

5 结 论

通过计算与仿真,获得了 20×12 阵列、功率为 9.7 W 的 LED 灯具发送低速红外协议格式信号时,物联网控制终端的最大控制距离和范围分别为 14 m 和 616 m²。在实验室搭建了可见光智能家居系统的实物平台,测试结果表明系统实际最大控制距离为 14.3 m,与理论计算的结果 14 m 间相对误差约为 2%,验证了模型的准确性。该系统的调制深度限制在 0.46%,满足 IEEE 的相关标准,证明了在不影响照明功能的前提下,用功率为 9.7 W 的 LED 灯具搭建物联网通信网络,在 642 m² 范围内可

以实现兼容红外、可见光的有效控制。

参 考 文 献

- [1] Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links[C]//11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. PIMRC 2000, London, UK. New York: IEEE, 2000(2): 1325-1329.
- [2] OMEGA research project uses light to help achieve higher broadband speeds [EB/OL]. (2013-02-06) [2019-01-17]. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-66_en.htm.
- [3] Wang C. US LED lighting is moving toward “wireless” and “intelligent direction” [J]. Urban lighting, 2009(1): 61.
王川. 美国 LED 照明向“无线”与“智能方向迈进” [J]. 城市亮化, 2009(1): 61.
- [4] 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): 011001.
- [5] Yang Y, Chen X B, Zhu L, et al. Design of indoor wireless communication system using LEDs[C]//2009 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 2-6, 2009, Shanghai, China. New York: IEEE, 2010: FF5.
- [6] Li H Y, Chen X B, Li H L, et al. A one-to-many video broadcast system based on visible light communication [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2016, 27(9): 923-929.
李慧宇, 陈雄斌, 李洪磊, 等. 基于可见光通信的一对多视频广播系统[J]. 光电子·激光, 2016, 27(9): 923-929.
- [7] Chi N, Lu X Y, Wang C, et al. High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [8] European commission: enhance lighting for the Internet of Things[EB/OL]. (2019-06-03) [2019-09-26]. https://cordis.europa.eu/project/rcn/220023_en.html.
- [9] Nakagawa M. Microwave and millimeter-wave wireless home link system in Japan[C]//30th European Microwave Conference, 2000, October 4-6, 2000. Paris, France. New York: IEEE, 2000: 1-5.
- [10] Manikandan J. Design and evaluation of wireless home automation systems[C]//2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), July 4-6, 2016. Delhi, India. New York: IEEE, 2016: 1-5.
- [11] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Chinese standard book number: GB 50034—2013[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.
中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国标准书号: GB 50034—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [12] Jin Y C, Chen X B, Mao X R, et al. Influence of modulation degree on performances of visible light communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0506001.
靳永超, 陈雄斌, 毛旭瑞, 等. 调制度对可见光通信系统性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0506001.
- [13] Al-Kinani A, Wang C X, Haas H, et al. A geometry-based multiple bounce model for visible light communication channels[C]//2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), September 5-9, 2016. Paphos, Cyprus. New York: IEEE, 2016: 31-37.
- [14] Wang J A, Che Y, Guo L Y, et al. LED layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506002.
王加安, 车英, 郭林扬, 等. 室内可见光通信系统光源LED布局优化与性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506002.
- [15] An Y Y, Lui J F, Li Q H, et al. Optoelectronic technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 120-123.
安毓英, 刘继芳, 李庆辉, 等. 光电子技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 120-123.
- [16] Tian Z, Wright K, Zhou X. The darklight rises: visible light communication in the dark[C]//Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking-MobiCom'16, October 3-7, 2016. New York, USA. New York: ACM Press, 2016: 495-496.
- [17] IEEE Power Electronics Society. IEEE Recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers: 1789-2015[S]. New York: IEEE, 2015-06-05.
- [18] Zhong W N, Wu Y P, Su W D, et al. Application of infrared communication decoding based on embedded system [J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(8): 246-250.
钟炜楠, 吴允平, 苏伟达, 等. 基于嵌入式系统的红外通讯解码应用[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(8): 246-250.