

二级级联式室内可见光通信光学接收天线设计

张逸伦 蓝天 高明光 赵涛 沈振民

Design of two-cascade optical antenna for indoor visible light communication

Zhang Yi-Lun Lan Tian Gao Ming-Guang Zhao Tao Shen Zhen-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 164201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超高分辨光学相干层析成像技术与材料检测应用

Ultrahigh-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials

物理学报.2015, 64(17): 174201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174201>

隔行分层填充的太赫兹超高双折射多孔光纤

Ultrahigh birefringence terahertz porous fibers based on interlacing layered infiltration method

物理学报.2015, 64(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154201>

基于 $y_{bar}y$ 图的光学结构计算方法研究

An approach for calculating the optical structure based on $y_{bar}y$ diagram

物理学报.2015, 64(11): 114201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114201>

双小凹光学成像系统设计

Design of dually foveated imaging optical system

物理学报.2015, 64(3): 034201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034201>

室内可见光通信系统中菲涅尔透镜接收天线的设计研究

Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system

物理学报.2015, 64(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024201>

二级级联式室内可见光通信光学接收天线设计*

张逸伦 蓝天[†] 高明光 赵涛 沈振民

(北京理工大学光电学院, 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 精密光电测试仪器及技术北京重点实验室, 北京 100081)

(2015年2月10日收到; 2015年3月9日收到修改稿)

针对室内可见光通信系统的传统光学接收天线无法同时满足高增益和大视场的问题, 设计了一种二级级联式光学天线. 通过分析信噪比、通信速率与接收天线视场角的关系, 发现视场角为 40° — 60° 的光学天线最适用于室内可见光通信系统. 通过光学仿真软件 TracePro 的模拟及计算, 给出了所设计的二级级联式光学天线的增益随信号光入射角的变化关系. 结果表明, 相较于传统接收天线, 二级级联式光学天线具有更好的光学性能, 视场角为菲涅耳透镜单独接收时的4倍. 利用 Matlab 对二级级联式光学天线竖直向上时的接收功率分布进行仿真, 结果显示探测器接收到的信号功率提升效果明显, 平均值较直接探测时增大了7 dBm, 进一步证实该二级级联式光学天线适用于室内可见光通信系统.

关键词: 室内可见光通信, 二级级联式光学接收天线, 视场, 增益

PACS: 42.15.Eq, 42.60.Lh, 42.79.Bh, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.64.164201

1 引言

由于人们对网络通信的要求日益提高, 无线通信技术先后出现了蓝牙、无线保真、红外通信等多种通信方式. 随着白光发光二极管 (lighting emitting diode, LED) 照明技术的不断发展和完善, 白光LED被认为是下一代照明光源, 预计2021年LED照明将占据52%以上的全球商用照明光源的市场份额^[1-3]. 考虑到白光LED的未来发展, 日本KEIO大学的Komine和Nakagawa^[4]提出了利用白光LED光源作为基站的可见光通信技术, 该技术利用具有高速调制特性的白光LED发出高速信号来传输信息^[5], 其所处波段对人体无害, 还可以进行高速通信, 因而广受关注. 由于白光LED不仅作为照明装置, 还可作为通信装置, 因此诞生了诸如智能超市、智能化交通系统、博物馆展品应景讲解系统等, 应用前景广阔^[6].

目前, 室内可见光通信技术的研究主要集中在

光源的调制与布局、信号的编码及解调技术等, 对光学接收天线尚缺乏系统深入的研究. KEIO大学Matsumoto和Nakada^[7]设计了一种双透镜室内可见光通信接收系统, 此系统可大幅降低背景噪声. 南京邮电大学徐宁等^[8]提出利用菲涅耳透镜作为可见光通信的光学天线, 并利用Zemax软件对其进行了优化分析. 诺桑比亚大学Burton等^[9]设计了一种采用分集角度接收的室内可见光通信接收系统.

对于室内可见光通信系统, 光学天线要简便灵活, 因此在保证通信质量的前提下要尽可能减小体积与重量. 菲涅耳透镜在点对点通信中具有很高的增益, 但是其视场很小. 与之相反, 复合抛物面聚光器 (compound parabolic concentrator, CPC) 视场虽然可以设计得很大, 但是增益随视场增加而下降, 且体积随之增大^[10]. 结合两种光学天线的优势, 本文设计了一种用于室内可见光通信系统的二级级联式光学接收天线, 在保证接收天线有足够增益的同时, 扩大了接收视场.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB329202) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lantian@bit.edu.cn

2 室内可见光通信系统对光学接收天线的要求

2.1 增益

光学天线最主要的功能是增大有效接收面积, 汇聚足够多的光信号到探测器上, 因此光学增益是评价光学天线聚光能力的最重要的参数之一^[11]. 本文采用文献^[4]对室内可见光通信技术进行基础研究时提出的房间模型, 设房间大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$, 接收系统所放置的桌面距离地面 0.85 m , LED光源距离地面 2.5 m . 室内共有4组光源, 每组光源由3600 (60×60)个LED组成, LED间距为 1 cm . 每个LED光功率为 20 mW , LED中心的发光强度为 0.73 cd . 在直视 (line-of-sight, LOS) 信道下, 信道直流增益可表示如下^[12]:

$$H_{\text{LOS}}(0) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)A}{2\pi D_i^2} \cos^m(\phi_i) g(\psi_i) \cos(\psi_i) & (0 < \psi_i < \Psi), \\ 0 & (\psi_i > \Psi), \end{cases} \quad (1)$$

其中, i 为第 i 个LED, m 为辐射模式数, D_i 为探测器距光源的距离, ϕ 为光源辐射角, ψ 为入射角, A 为探测器有效接收面积, Ψ 为探测器的半视场角, g 为光学天线增益.

2.2 视场角

在实际应用中, 扩大视场可以让光学接收天线接收更多入射光以增加其聚光效率, 但视场角过大又会增加噪声, 因此确定合适的视场角对于设计光学接收天线具有非常重要的实际意义.

假设采用正交频分复用调制方式, 室内可见光通信系统的功率信噪比为^[13]

$$\text{SNR} = \gamma^2 P_R^2 \left[2q\gamma P_R B + 2qI_{\text{bg}} I_2 B + \frac{8\pi k T_K}{G} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k T_K \Gamma}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^3 \right]^{-1}, \quad (2)$$

其中, γ 为探测器响应度, q 是电子电荷, P_R 是信号功率, B 是等效噪声带宽, I_{bg} 是暗电流, I_2 是噪声带宽因子, k 是玻尔兹曼常数, T_K 是绝对温度, η 是

光电探测器单位面积的固定电容, G 是开环电压增益, Γ 是噪声因子, g_m 是跨导.

图1显示了接收系统在一些视场角下的信噪比与信号速率间的关系. 随着视场角变大, 信噪比随之下降; 随着传输速率的增加, 信噪比下降. 如果想获得 200 Mb/s 传播速率且信噪比大于 10 dB , 视场角不能大于 60° , 但视场角过小又会造成探测器接收到的信号很弱. 因此, 在国际标准化组织的书写照度标准下, 室内可见光通信光学接收天线的视场角需要设计在 $40^\circ - 60^\circ$ 之间.

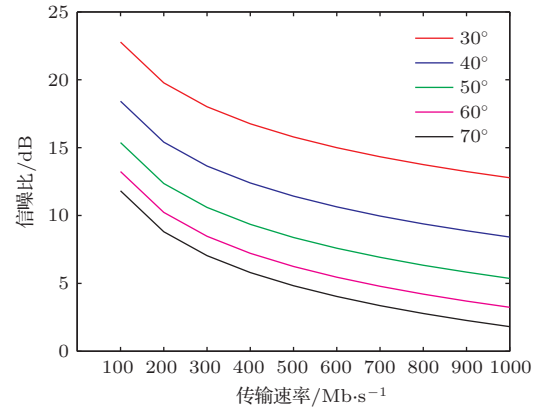


图1 (网刊彩色) 不同视场角下室内可见光通信信噪比随速率的变化

Fig. 1. (color online) SNR versus data rate with different fields of view.

3 菲涅耳光学天线特性分析

如图2所示, 菲涅耳透镜是在平凸透镜的基础上发展而来的, 由于在均匀介质中光线不发生偏转^[14], 去除平凸透镜中对光线无影响的部分, 可以在保存会聚功能的同时减小平凸透镜的体积和重量, 降低成本与价格.

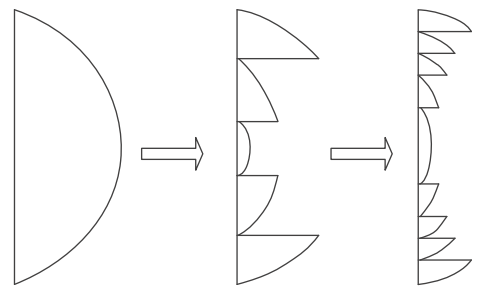


图2 菲涅耳透镜形成原理

Fig. 2. Conceptual illustration of Fresnel lens.

随着入射角度的增大, 光线经过菲涅耳透镜聚焦后的光斑半径与偏移量都随之增加. 如果具体分析倾斜入射光通过菲涅耳透镜后的光斑半径, 需要

考虑斜入射光线通过菲涅耳透镜最外齿与最内齿的偏移情况.

如图 3 所示, 以入射角 α 斜入射的光线经过菲涅耳透镜发生一次折射后的出射角 α' 如下式所示:

$$\alpha' = \arcsin(\sin \alpha/n), \quad (3)$$

其中, n 为菲涅耳透镜材料的折射率.

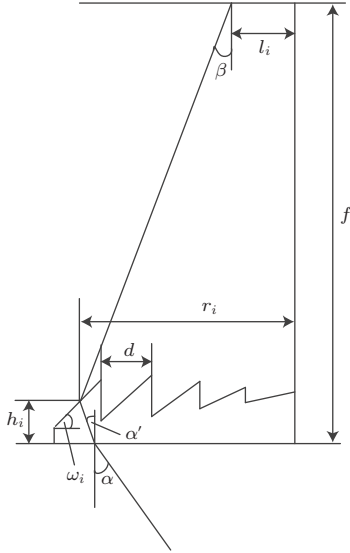


图 3 斜入射时菲涅耳透镜会聚后会聚点的偏移
Fig. 3. Fresnel lens' deviation of convergence point at inclined incidence angle α .

光线经过出射面时再次折射, 光线会聚向焦平面的入射角为

$$\beta = \arcsin[n \sin(\omega_i + \alpha')] - \omega_i, \quad (4)$$

其中, ω_i 为菲涅耳第 i 齿的斜边与入射面的倾角.

$$\tan \beta = \frac{r_i - l_i}{f - (d/2) \tan \omega_i}. \quad (5)$$

将 (3) 和 (4) 式代入 (5) 式中, 得入射角为 α 时会聚点偏离中心的长度:

$$l_i = r_i - f \tan \left\{ \arcsin \left[n \sin \left(\omega_i + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right) \right] - \omega_i \right\} + \frac{d}{2} \tan \omega_i \tan \left\{ \arcsin \left[n \sin \left(\omega_i + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha_1}{n} \right) \right) \right] - \omega_i \right\}. \quad (6)$$

利用 MATLAB 计算不同入射角时的会聚点相对于焦点的偏移量, 如图 4 所示.

由图 4 可知, 会聚点相对于焦点的偏移量随着入射角的增大而增加. 此外, 由图 4 可知, 最外齿与最内齿的偏移量之差也随入射角的增大而增大, 这

说明光线经过菲涅耳透镜聚焦后的光斑也随入射角的增大而增大. 以上结果表明, 菲涅耳透镜的视场十分有限, 基本局限在近轴范围, 更适用于点对点的通信系统.

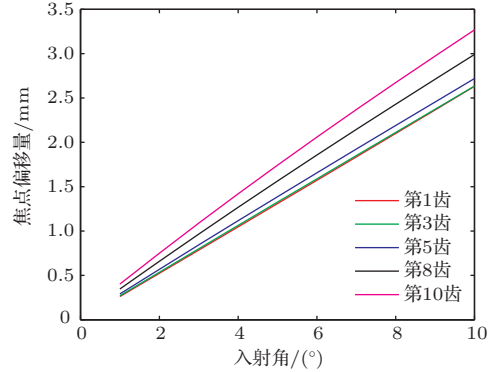


图 4 (网刊彩色) 各齿会聚点偏移量随入射角的变化
Fig. 4. (color online) Deviation of convergence point versus the angle of incidence for different pitches.

4 二级级联式光学天线的设计与特性分析

4.1 二级级联式光学天线的设计

菲涅耳透镜在点对点通信系统中可以大幅度提升接收系统的性能, 但对于大角度入射光的聚光性能却不尽如人意. 对比了多种聚光器的特性后, 本文选择使用 CPC 作为二次聚光器. CPC 虽然增益不高, 但其视场角可设计得很大.

本文设计的二级级联式光学天线结构参数如下: 由于光学接收天线的结构必须紧凑, 且接收面光照度在无遮挡情形下至少为 300 lx, 因此设计菲涅耳透镜的通光孔径 D 为 10 mm; 此外, 菲涅耳透镜的光学效率随 F 数的增大而增大, 当 F 数超过 1.5 后, 增长趋势趋于平缓^[15], 所以透镜焦距 f 为 15 mm, 既可以保证光学效率高, 还可以尽量减小体积; 透镜材料使用最为常用的聚甲基丙烯酸甲酯, 其折射率 n 为 1.4935; CPC 的结构参数为最大接收角 $\theta_{\max} = 40^\circ$, 出口半径 a_2 为 2.5 mm, CPC 焦距 f_{CPC} 为 4.1 mm, CPC 长度 l 为 7.6 mm. 将 CPC 的出射面放置于菲涅耳透镜的焦平面上, 既可以保证小角度入射时菲涅耳透镜的高增益, 也能接收大角度入射光线. 将上述参数输入到光学设计软件 TrcaePro 可获得二级级联式光学天线的三维模型, 如图 5 所示. 在 CPC 出射面位置添加半径为 2.5 mm 的圆形板作为探测器, 并设圆形板表面对白光的吸收系数为 1.

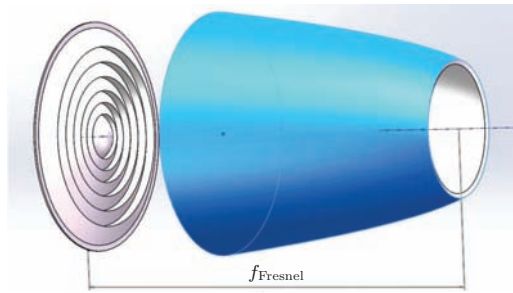


图5 (网刊彩色) 二级级联式光学天线

Fig. 5. (color online) Two-cascade optical antenna.

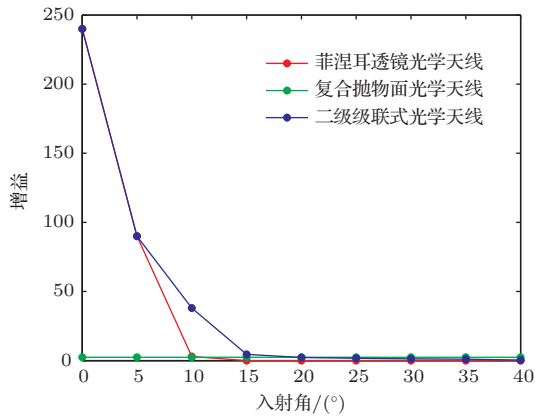


图6 (网刊彩色) 三种光学天线增益随入射角的变化

Fig. 6. (color online) Gain versus the angle of incidence of three kinds of optical antennas.

图6为本文设计的二级级联式光学天线、同尺寸菲涅耳透镜和CPC这三种光学天线的增益随光

线入射角的变化关系曲线. 由图6可知, 40° CPC的增益不随入射角变化但只有2.42; 菲涅耳透镜的增益在10°以后趋近于0; 而二级级联式光学天线的增益优于上述两种光学天线.

4.2 室内可见光通信系统信道仿真与分析

将(1)式代入(7)式可得室内可见光通信系统LOS信道下的接收信号功率 P_{LOS} , 其中 p 为LED发光功率. 根据(8)式计算使用不同光学天线的接收功率分布, 如图7所示.

$$P_{LOS} = p H_{LOS}(0), \quad (7)$$

$$P_{LOS} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N p \frac{(m+1)A}{2\pi D_i^2} \cos^m(\phi_i) g(\psi_i) \cos(\psi_i) & (0 \leq \psi_i < \Psi), \\ 0 & (\psi_i > \Psi). \end{cases} \quad (8)$$

由图7可见, 单独使用菲涅耳透镜竖直向上作为光学接收天线时, 只有4组LED光源正下方的探测器接收功率分布有所增加, 其他区域接收功率不仅没有增加, 反而因为视场的限制形成了盲区, 因此不适用于室内宽视场接收的可见光通信系统. 单独使用40°的CPC作为光学天线时, 整体性能优于

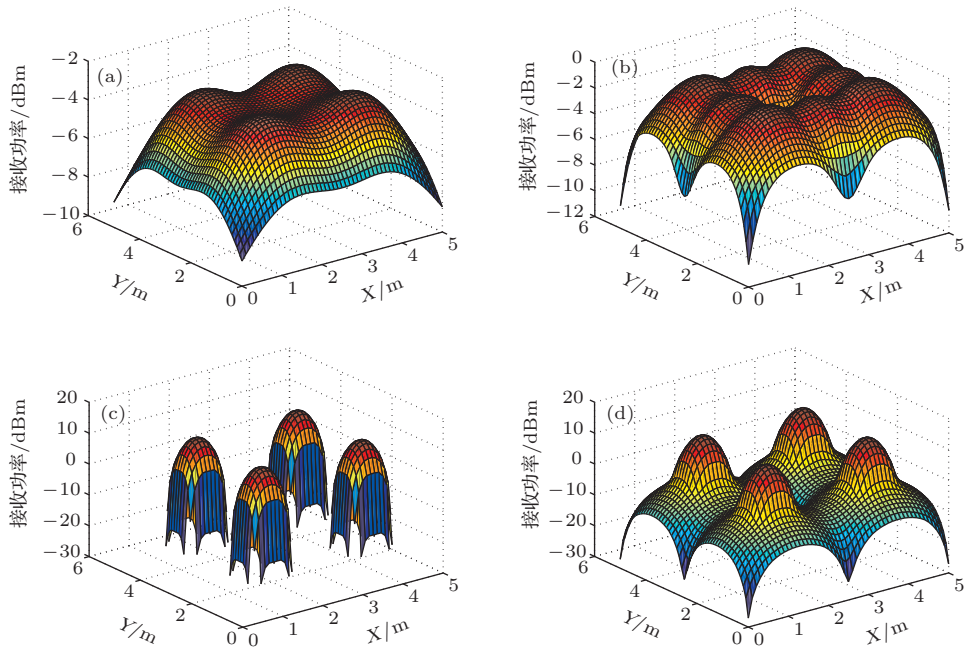


图7 (网刊彩色) 接收功率分布 (a) 不使用光学天线; (b) CPC; (c) 菲涅耳透镜; (d) 二级级联式光学天线

Fig. 7. (color online) Distribution of received power: (a) without optical antennas; (b) CPC; (c) Fresnel lens; (d) two-cascade optical antenna.

直接使用探测器, 平均功率有所提升, 但提升效果不明显. 二级级联式光学天线性能明显优于单级光学天线, 平均接收功率提升了 7 dBm (如表 1 所列). 二级级联式光学天线的接收功率最小值出现在房间四个边角区域, 考虑到非视距的贡献, 这个数

值会有所增加. 因为遮挡的原因, 实际应用中接收器一般不会放置在房间角落. 此外还可以安装机械转轴增加二级级联式光学天线的覆盖范围, 因此二级级联式光学天线的整体性能更适用于室内可见光通信系统.

表 1 各种光学天线接收功率分布

Table 1. Distribution of received power for different kinds of optical antennas.

光学天线类型	接收功率		
	最大值/dBm	最小值/dBm	平均值/dBm
无	-3.0115	-9.8237	-4.5750
CPC 光学天线	-0.1578	-10.2453	-1.7756
菲涅耳光学天线	12.5706	$-\infty$	0.1875
二级级联式光学天线	13.3189	-27.0817	2.2313

5 结 论

菲涅耳透镜因为加工方便、体积小、成本低而经常用于光通信接收系统. 本文利用光学仿真软件 TracePro 分析了菲涅耳透镜各齿会聚点随光线入射角度的变化关系. 仿真结果与理论分析均表明, 菲涅耳透镜的视场非常小, 不适于作为大视场光学通信系统的光学接收天线. 为了解决菲涅耳透镜视场小的问题, 本文将 CPC 作为二级聚光器, 设计了一种视场角为 40° 的二级级联式光学天线. 所设计的二级级联式光学天线结合了两种单级光学天线的优点, 相比于单级光学天线, 接收功率得到很大改善.

参考文献

- [1] Wang Z J, Li P L, Yang Z P, Guo Q L, Li X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 017801
- [2] Xie Z L, Zhang R, Fu D Y, Liu B, Xiu X Q, Hua X M, Zhao H, Chen P, Han P, Shi Y, Zheng Y D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 116801
- [3] Hu J, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L, Zhou J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1384 (in Chinese) [胡瑾, 杜磊, 庄奕琪, 包军林, 周江 2006 物理学报 **55** 1384]
- [4] Komine T, Nakagawa M 2004 *IEEE Trans. Consum. Electron* **50** 100
- [5] Ab-Rahman M S, Shuhaimi N I, Aziz L A, Hassan R 2012 *J. Comput. Sci.* **8** 141
- [6] Wang K, Nirmalathas A, Lim C, Skafidas E 2011 *IEEE Photon. Tech. L* **23** 519
- [7] Matsumoto Y, Nakada H 2012 *Electron. Commun. Jpn.* **95** 9
- [8] Xu N, Xu D T, Yang G, Sun X Y 2012 *Chin. J. Quantum Electron.* **29** 629 (in Chinese) [徐宁, 徐丹彤, 杨庚, 孙晓芸 2012 量子电子学报 **29** 629]
- [9] Burton A, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, Liaw S K 2014 *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.* **25** 591
- [10] Wang F, Sui C H, Ye B Q 2010 *Opt. Instrum.* **32** 68 (in Chinese) [汪飞, 隋成华, 叶必卿 2010 光学仪器 **32** 68]
- [11] Kong M M, Liang Z C, Zhang G H 2012 *Infrared and Laser Engineer* **41** 750 (in Chinese) [孔梅梅, 梁忠诚, 张国虎 2012 红外与激光工程 **41** 750]
- [12] Kahn J M, Barry J R 1997 *Proc. IEEE* **85** 265
- [13] Shen Z M 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Institute of Technology) (in Chinese) [沈振民 2014 博士学位论文 (北京: 北京理工大学)]
- [14] Davis A, Kühnlenz F 2007 *Opt. Photon.* **2** 52
- [15] Li X, Lan T, Wang Y, Wang L H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024201 (in Chinese) [李湘, 蓝天, 王云, 王龙辉 2015 物理学报 **64** 024201]

Design of two-cascade optical antenna for indoor visible light communication*

Zhang Yi-Lun Lan Tian[†] Gao Ming-Guang Zhao Tao Shen Zhen-Min

(Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 10 February 2015; revised manuscript received 9 March 2015)

Abstract

White light emitting diode (LED) is expected to replace the incandescent lamp and becomes the next generation of lighting source because of its long life expectancy, high tolerance to humidity, and low power consumption. It is proposed that for the indoor visible light communication system white LED should be used as both lighting source and base station for its properties of high brightness and high speed modulation. Indoor visible light communication has a very wide area of applications, but there is a lack of research on receiver optical antenna that functions as an energy concentrator so as to increase received power. In order to meet the needs of high gain and meanwhile large field of view of receiver optical antenna for indoor visible light communication, two-cascade optical antenna is designed. It is shown that the field of view from 40 to 60 degrees can meet the requirements for high speed communication by analyzing the relationship between signal-to-noise ratio and data rate of different fields of view. The performances of the traditional optical antenna of Fresnel lens and the compound parabolic concentrator are simulated and analyzed by TacrePro. The gains of the designed two-cascade optical antenna are discussed at different incident angles. The results show that two-cascade optical antenna has better performance than traditional receiver optical antenna. The distribution of received power of two-cascade optical antenna is analyzed by using Matlab. The received average power by using two-cascade optical antenna is about 7 dBm larger than that without any optical antenna. The designed optical antenna provides a field of view of 40 degrees and enough gain for indoor visible light communication system.

Keywords: indoor visible light communication, two-cascade optical receiver antenna, field of view, gain

PACS: 42.15.Eq, 42.60.Lh, 42.79.Bh, 42.79.Sz

DOI: [10.7498/aps.64.164201](https://doi.org/10.7498/aps.64.164201)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB329202).

[†] Corresponding author. E-mail: lantian@bit.edu.cn