

基于室内可见光通信技术的新型两级光学接收天线设计与分析

彭星 孔令豹

Design and analysis of novel two-stage optical receiving antenna for indoor visible light communication technology

Peng Xing Kong Ling-Bao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 094201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172341

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172341>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Nd:YAG 单晶的光谱和激光性能](#)

Spectral and laser properties of Nd:YAG single crystal

物理学报.2017, 66(15): 154204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154204>

[885nm 双端泵浦连续微秒脉冲 1319nm 三镜环形腔激光](#)

A quasi-continuous dual-end 885 nm diode-pumped three-mirror ring-cavity laser operating at 1319 nm

物理学报.2016, 65(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154205>

[掺镱硼酸钙氧钪飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光](#)

Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb:YCOB laser

物理学报.2015, 64(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054206>

[角抽运 Nd:YAG 复合板条 946 nm 连续运转激光器](#)

Corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab continuous-wave 946 nm laser

物理学报.2013, 62(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144205>

[用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究](#)

Thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave

物理学报.2013, 62(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204205>

基于室内可见光通信技术的新型两级光学接收天线设计与分析*

彭星 孔令豹†

(复旦大学信息科学与工程学院, 上海超精密光学制造工程技术研究中心, 上海 200433)

(2017年10月30日收到; 2017年12月4日收到修改稿)

针对室内可见光通信系统的应用需求, 设计了一种新型两级光学接收天线. 根据复合抛物面聚光器光学增益随视场增大而减小的聚光特性, 将复合抛物面聚光器截面基准曲线旋转设计得到具有一定旋转角与厚度的透镜壁复合抛物面聚光器. 进一步结合透镜壁复合抛物面聚光器和半球透镜的优势设计了一种新型两级光学接收天线, 在增益保持的情况下视场角增大了近 20° . 在一个 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的空旷房间, 通过TracePro建立光学天线的分析模型, Matlab软件对室内可见光通信系统进行信道建模. 计算结果表明, 采用这种新型两级光学接收天线, 与直接接收的情况相比, 平均接收功率增幅为757.2%, 是复合抛物面聚光器的5.62倍; 信噪比平均值增幅为28.07%, 是复合抛物面聚光器的1.67倍; 光学增益为11.49, 是复合抛物面聚光器的2.81倍. 且光斑半径仅为2.5 mm, 较复合抛物面聚光器减小了近37.5%, 使得能量集中均匀分布, 进一步证实该新型两级光学接收天线适用于室内可见光通信系统.

关键词: 可见光通信, 新型两级光学接收天线, 增益, 视场

PACS: 42.15.-i, 42.60.Lh, 42.15.Eq, 42.79.Bh

DOI: 10.7498/aps.67.20172341

1 引言

发光二极管(light emitting diode, LED)凭借其亮度高、寿命长、功耗低等优势在视觉传输、信息显示和照明等领域得到了广泛应用^[1]. 与此同时, LED能被高速调制, 将照明和高速数据通信传输有机地结合起来^[2,3]. 这种新型无线光通信方式被称为可见光通信(visible light communication, VLC)^[4]. 与传统射频通信方式相比, VLC无需申请频谱资源, 不受电子设备的电磁干扰, 安全保密性高, 且LED设备易于安装, 具有极大的发展潜力^[5-7]. 2000年, 随着白光LED技术的快速发展, 日本KEIO大学的Tanaka等^[4]利用白光LED搭建室内VLC模型, 并仿真和分析了直射链路下光电探测器的接收功率、信噪比和误码率, 验证了白光LED照明与通信结合的可能性. 利用白光

LED的发光特性, 将高速调制信号加载到白光上, 可以基于LED搭建VLC通信系统^[8].

目前, 室内VLC技术的主要研究范畴包括通信信道模型^[9]、调制解调技术^[10,11]以及光源的布局优化^[12]等, 但与可见光接收技术相关的研究甚少. 在很多室内VLC系统中, 接收端设计简单, 仅由汇聚透镜和滤光片组成, 难以满足系统对光学接收端性能的要求^[13]. VLC系统的研究中, LED光源通常被认为是朗伯型的, 其发射范围广. 因此, 光学接收端需要宽视角和高增益特性以保证足够的光能量^[14]. 传统的光学天线如高斯天线具有非常小的接收视场角, 仅 1° ; 菲涅耳透镜只能在入射光束为平行光时才实用, 局限性大^[13]. 半球形透镜的光学增益随光束入射角度增大而减小, 当入射角为 $0-30^\circ$, 光学增益仅保持在1.25—2.25^[15]. 北京理工大学王云等^[16]提出利用复合抛物面聚光

* 上海科委“创新行动计划”基础研究项目(批准号: 17JC1400601)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lkong@fudan.edu.cn

器 (compound parabolic concentrator, CPC) 作为 VLC 的光学接收天线, 分析得出 CPC 聚集的光斑尺寸大、均匀性差, 光能量难以得到有效利用, 且光学增益随视场的增大而减小, CPC 的体积随视场的增大而增加。

综合以上传统光学天线的优势和局限性, 本文设计了一种基于室内 VLC 技术的新型两级光学接收天线。相比于传统 CPC, 新型两级光学接收天线具有更大的光学增益和接收视场角, 能够有效地提高接收功率和信噪比, 减小了光斑尺寸, 提高了能量分布的均匀性。根据 CPC 的结构特性和光学特性, 采用三维结构设计软件 Pro/E, 将 CPC 截面基准曲线通过旋转设计得到具有一定旋转角与厚度的透镜壁 CPC, 并将该透镜壁 CPC 和半球透镜结合成新型两级光学接收天线。针对该新型两级光学接收天线进行仿真和性能研究, 采用光学仿真软件 TracePro, 研究光学增益、光斑尺寸和光斑能量分布的均匀性。通过 Matlab 仿真 5 m × 5 m × 3 m 的房间, 对比分析了采用 CPC 和新型两级光学接收天线时作为接收端的光学接收功率与信噪比分布。分析结果表明, 本文设计的新型两级光学接收天线, 在保证较高增益的同时能够提供更大的视场, 得到尺寸更小且能量分布均匀的光斑。相比于直接接收的情况, 新型两级光学接收天线的平均接收功率增幅为 757.2%, 是 CPC 平均接收功率的 5.62 倍; 信噪比平均值增幅为 28.07%, 是 CPC 信噪比平均值增幅的 1.67 倍; 光学增益为 11.49, 是 CPC 光学

增益的 2.81 倍。且光斑半径仅为 2.5 mm, 较 CPC 光斑半径减小了近 37.5%, 使得能量集中且均匀分布, 保证了 VLC 系统高增益、大视场以及高稳定性的通信质量。

2 光学接收天线设计

2.1 透镜壁 CPC 建模与分析

CPC 是一种根据边缘光线原理设计的非成像聚光器, 其结构是由两条对称抛物线绕对称轴旋转而成^[17]。相关学者对 CPC 的研究结果表明, 其接收功率和增益之间存在着反比关系, 即通过增大视场角等手段增大接收功率的同时, 系统增益会减小。如图 1 所示, 根据结构中的几何关系构建如方程 (1):

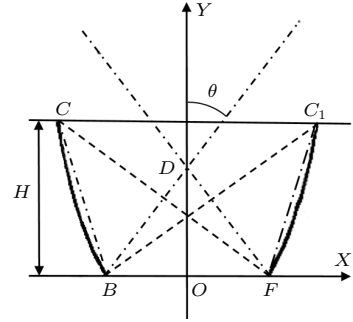


图1 CPC 截面示意图

Fig. 1. Sectional view of CPC.

$$\begin{cases} 16(\sin^2 \theta + \sin \theta)t_C^4 + 8(3\sin^2 \theta + \sin \theta - 1)t_C^2 + (-16\sin \theta \cos \theta)t_C + (-3\sin^2 \theta + \sin \theta + 2) = 0, \\ 4\overline{BF}(\sin \theta \cos \theta + \cos \theta)t_C^2 + 4\overline{BF}(\sin^2 \theta + \sin \theta)t_C - (\overline{BF} \sin \theta \cos \theta + \overline{BF} \cos \theta + 2H) = 0, \\ 4(\sin^2 \theta + \sin \theta)t_C^2 - 4(\sin \theta \cos \theta + \cos \theta)t_C - (\sin^2 \theta + \sin \theta - C - 1) = 0, \\ \overline{BF}(\sin \theta + 1) - 2f = 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $C = \frac{\overline{CC_1}}{\overline{BF}}$, θ 是 CPC 的半视场角, \overline{BF} 为 CPC 出射口的直径宽度, $\overline{CC_1}$ 是入射口的直径大小, f 为抛物线的焦距, t_C 是 C 点的参数, H 为 CPC 的高度。

然后, 给定 $\overline{CC_1}$ 和 \overline{BF} 的数值并代入 (1) 式得到对应 H , θ 和 f 的值。构建出关于抛物线 CB 和 C_1F 的方程如 (2) 和 (3) 式所示^[18]:

$$\begin{cases} x = (4f\sin\theta)t_C^2 - (4f\cos\theta)t_C + \left(\frac{f}{1+\sin\theta} - f\sin\theta\right), \\ y = (4f\cos\theta)t_C^2 + (4f\sin\theta)t_C - f\cos\theta, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = -(4f\sin\theta)t_C^2 + (4f\cos\theta)t_C - \left(\frac{f}{1+\sin\theta} - f\sin\theta\right), \\ y = (4f\cos\theta)t_C^2 + (4f\sin\theta)t_C - f\cos\theta, \end{cases} \quad (3)$$

式中, t_C 是参数, 其取值范围可以通过 (4) 式来描述:

$$\begin{cases} 0 < \frac{\cot \theta - \sqrt{\cot^2 \theta - \left(\frac{2}{\sin^2 \theta + \sin \theta} - 1\right)}}{2} \leq t_C \leq \frac{\cot \theta - \sqrt{\cot^2 \theta - \frac{1+C}{\sin^2 \theta + \sin \theta} - 1}}{2}, \\ 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

CPC的内壁实质上起到镜面反射的作用, 视场角内入射的光线能够在出射口处被有效接收, 但是视场角以外的光线却无法收集. 根据边缘光线原理, 我们设想通过折射的方式接收更多视场角外的光线, 在不削弱光学增益的基础上增大光学天线的视场角. 设计得到的透镜壁CPC结构如图2所示, 其设计参数包括剖面曲线旋转角度 δ 与底部壁厚 BH . 透镜壁CPC外壁曲线是以内壁曲线为基准, 以顶点为旋转中心进行旋转得到的. 当光线以 40° 角入射的情况下, 30° 视场角的CPC难以收集视场角外的光线, 而透镜壁CPC中光线经透镜壁折射和外壁反射之后能够在出射口处被有效地接收和利用.

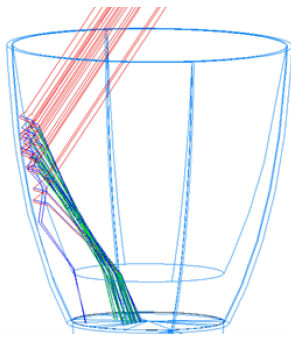


图2 透镜壁CPC接收光线示意图

Fig. 2. Light collection diagram of lens-wall CPC.

选取光学接收端的光学接收效率和视场角为目标参数对透镜壁CPC的结构进行优化, 分析不同 δ 和 BH 对透镜壁CPC性能的影响, 得到最优化结构参数. 通过对比透镜壁CPC取不同 δ 和 BH 时光学效率随入射角度的变化, 得到 $\delta = 5^\circ$ 且 $BH = 5$ 的透镜壁CPC在 $0-55^\circ$ 光线入射角范围内, 光学接收效率能够始终保持在较高水平且明显优于其他参数组合. 如图3所示, 透镜壁CPC在接收 $35^\circ, 40^\circ$ 以及 45° 的入射光线时, 光学效率分别是87.91%, 80.28%和45.17%, 而传统CPC对于 30° 视场角以外的光线, 接收功率基本为0. 这种透镜壁结构的设计使得CPC的视场角从 30° 提升到

50° , 且大角度光线入射的情况下, 光学效率也能维持在较高水平. 在一定范围内, 大角度光线入射时的光学接收效率随着 BH 的增大而增大, 这是因为透镜壁CPC的底部透镜结构减少了镜面反射带来的光线损失, 使得光线能够通过折射在出射口处被有效接收. 分析结果表明透镜壁CPC能够有效地将光学天线视场角增大近 20° , 保证了室内通信性能的稳定性的.

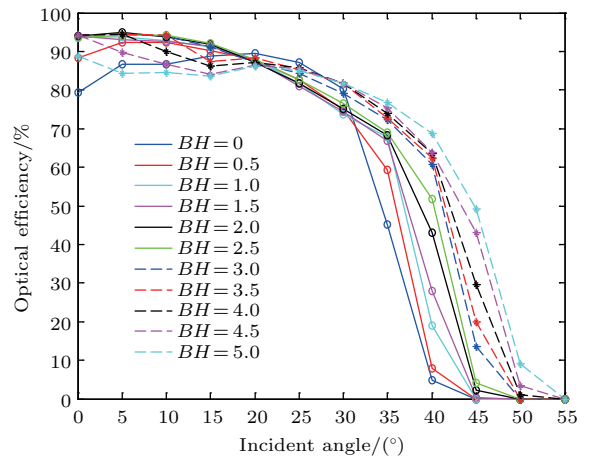


图3 $\delta = 5^\circ$ 时光学天线的效率与入射角度的关系

Fig. 3. Relationship between the optical efficiency of the optical antenna and the incident angle for $\delta = 5^\circ$.

2.2 新型两级光学接收天线的建模与分析

通过前面的建模与分析发现, 透镜壁CPC能有效提高接收端的视场角和接收功率, 且光斑均匀性远大于传统CPC. 但是透镜壁CPC得到的光斑相对分散, 光能量分布不够集中. 在VLC系统中光电探测器的尺寸很小, 为了提高光能的利用率并保证通信的稳定性, 需要减小光斑面积以提高聚光度. 我们结合透镜壁CPC和半球形透镜的优势特征, 设计得到了一种新型两级光学接收天线.

半球形透镜结构如图4所示, 其具有广视角、低增益的特性, 光线入射后发生一定角度的偏转. 根据光线传播的几何关系可以得到:

$$\overline{BC} = \overline{OC} -$$

$$n_2 \left[\theta_1 - \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{R \sin \theta_1}{\overline{OC}} \right) \right]. \quad (5)$$

式中, R 表示半球形透镜的半径, n_1 是空气的折射率, n_2 是半球形透镜的折射率. 可知当 n_1 惟一确定, R 和 n_2 越大, 则 \overline{BC} 越小, 得到的光斑尺寸越小.

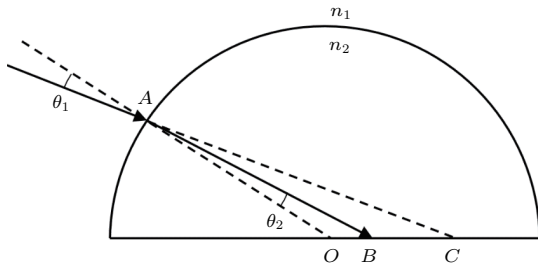


图4 半球形透镜结构示意图

Fig. 4. Schematic diagram of hemispherical lens structure.

半球形透镜和透镜壁CPC之间用圆柱形镜面反射壁连接, 以防止光线遗失, 保证光学接收效率, 得到新型两级光学接收天线结构如图5所示. 为了进一步优化天线结构, 下面探究半球形透镜的半径 R 及半球形透镜顶点到透镜壁CPC底部的距离 h 对光学天线性能的影响.

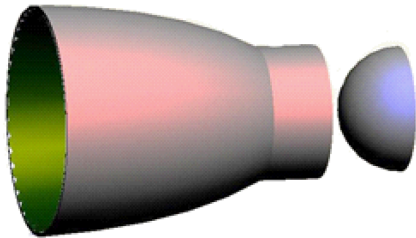


图5 两级光学接收天线结构示意图

Fig. 5. Structure diagram of two-stage optical receiving antenna.

在TracePro中设置四个 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 规格的LED阵列光源, 每盏功率均为 1 W , 半球形透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 得到测试结果如图6和图7所示. 对比分析结果显示: 随着半球形透镜半径 R 的增加, 接收光线数目明显上升, 光学天线的增益呈直线上升, 但是光斑尺寸也在不断增大, 而VLC系统中光学接收端的光电探测器尺寸非常小; 在一定范围内, 随着距离 h 的增大, 光学增益呈明显上升的趋势, 但是光斑的均匀性却逐渐变差. 为了保证两级光学天线结构连接和安装的方便, 得到尺寸小、能量分布均匀性好的光斑, 以满足VLC系统稳定、高速的通信需求, 优化后得到天线

结构参数组合为: $R = 7.5 \text{ mm}$, $h = 0$. 图8所示为半球形透镜半径取 7.5 mm 时光学接收天线的光斑分布; 图9是距离 $h = 0$ 时光学接收天线的坎德拉分布示意图.

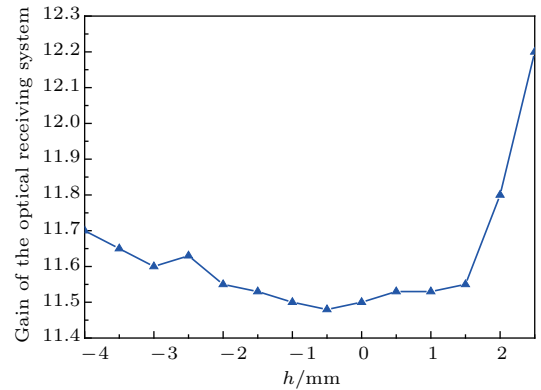


图6 距离 h 与光学增益之间的关系

Fig. 6. Relationship between the distance h and the optical gain.

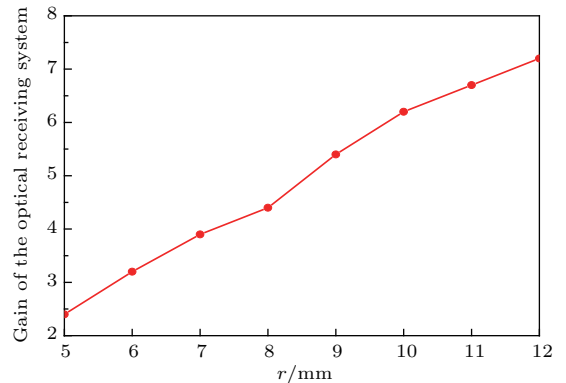


图7 半径 R 与光学增益之间的关系

Fig. 7. Relationship between the radius R and the optical gain.

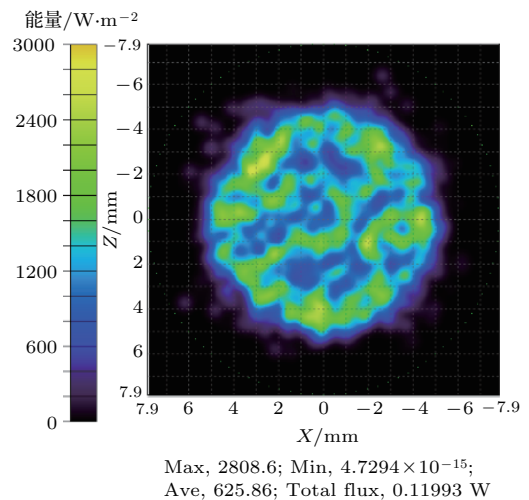


图8 $R = 7.5 \text{ mm}$ 时光学接收天线的光斑分布

Fig. 8. Spot distribution of hemispherical lens for $R = 7.5 \text{ mm}$.

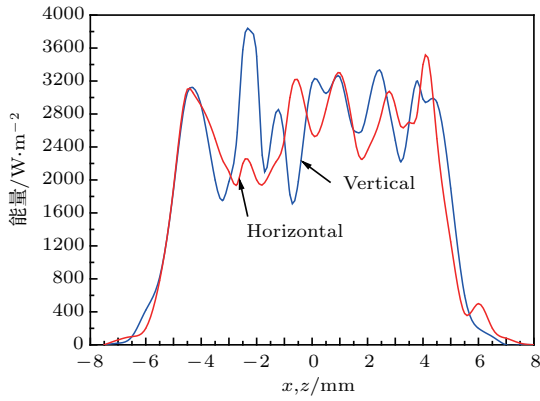


图9 $h = 0$ 时光学接收天线的光斑分布

Fig. 9. Spot distribution of two-stage optical receiving antenna for $h = 0$.

2.3 光学性能对比分析

为了进一步评估天线的光学性能, 将新型两级光学接收天线和CPC、透镜壁CPC的光学增益及光斑质量进行对比分析. 仿真结果如图10所示. 图10(a)未加任何光学天线, 探测器直接接收光线, 共接收光线809条, 且光斑分布散乱, 无法

满足VLC系统高速、稳定通信的需求. 图10(b)中CPC作为光学前端, 起到聚光的作用, 接收入射光线为3310条, 光学增益约为4.09. 通过图10(b)可以看出CPC聚集光能量主要分布在光斑外围, 且光斑的均匀性差, 显然难以满足系统对通信质量的要求. 图10(c)选用透镜壁CPC作为光学天线, 接收端共接收光线5852条, 光学增益是7.23. 通过观察可以发现, 透镜壁CPC收集光斑的均匀性明显优于CPC, 但是其光斑尺寸较大, 而VLC系统中光电探测器的尺寸很小, 光能量难以得到充分利用. 图10(d)采用新型两级光学接收天线, 接收光线数目9298条, 光学增益为11.49. 与前三种光学天线接收的光斑进行对比和分析发现, 新型两级光学接收天线的光学增益是CPC光学增益的2.81倍, 是透镜壁CPC光学增益的1.59倍. 且新型两级光学接收天线接收到的光斑能量分布均匀性好, 光斑半径仅2.5 mm, 光斑尺寸较CPC和透镜壁CPC减小了近37.5%, 保证了光信息被光电探测器有效接收和利用, 能够满足VLC系统高速、稳定的通信需求.

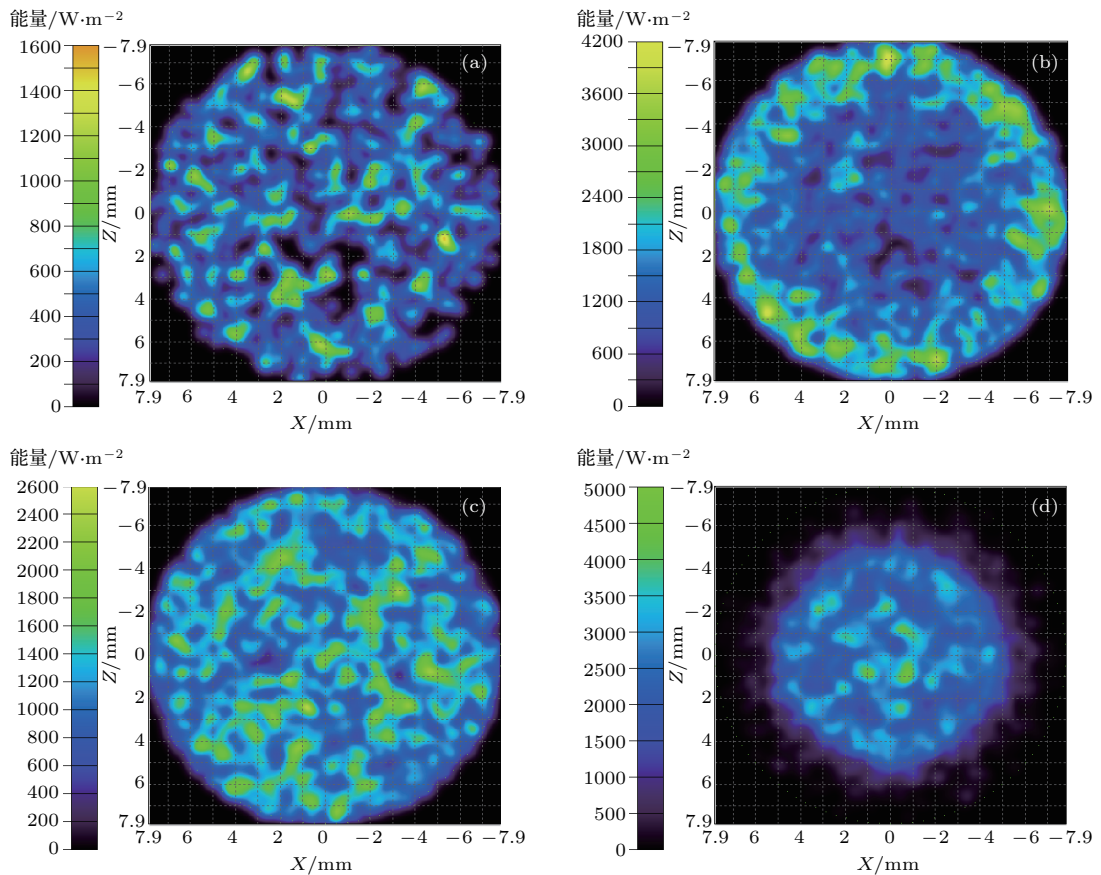


图10 光学天线增益对比分析示意图 (a) 无光学天线; (b) CPC; (c) 透镜壁CPC; (d) 新型两级光学接收天线

Fig. 10. Comparison and analysis diagram of optical gain for different optical antenna: (a) No antenna; (b) CPC; (c) lens-wall CPC; (d) new two-stage optical receiving antenna.

3 光学接收端信道性能分析

3.1 光学接收功率分析

VLC系统中, 信道的增益和脉冲响应直接相关联, 如下式所示^[19]:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt. \quad (6)$$

因此, 在直射视距链路中, 信道的增益可以表示为^[20]

$$H_{\text{LOS}}(0) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)A_R}{2\pi L_i^2} \cos^m(\phi_i) T_s(\theta_i) g(\theta_i) \cos(\theta_i) & (0 \leq \theta_i \leq \theta_c), \\ 0 & (\theta_i > \theta_c), \end{cases} \quad (7)$$

式中, i 指代第 i 个 LED, θ_c 为光学接收端的半视场角, $g(\theta_i)$ 为聚光器的直流增益, $T_s(\theta_i)$ 为滤波器的

增益, A_R 为探测器有效接收面积, ϕ_i 为光源辐射角. 光学聚光器的增益可以用下式表示^[20]:

$$g(\theta_i) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\theta_c)} & (0 \leq \theta_i \leq \theta_c), \\ 0 & (\theta_i > \theta_c), \end{cases} \quad (8)$$

式中, n 是光学接收端的折射率.

因此, 直射视距中系统的光学接收功率为

$$P_{\text{R(LOS)}} = P_S H_{\text{LOS}}(0), \quad (9)$$

式中, P_S 是单个 LED 灯珠的电功率.

通过 Toshihiko 和 Masao^[21] 的研究可知, 对于非直射视距链路而言, 直射视距链路传播占据的光功率高于 95%, 一次墙壁反射大概占总体的 3.37%, 二次墙壁反射光功率仅占 1.27%. 因此, 在这里, 两次及两次以上墙壁反射的情况可以忽略不计, 得到信道的增益为

$$dH_{\text{NLOS}}(0) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \frac{(m+1)A_R}{2\pi D_{1,i}^2 D_2^2} \rho \cos^m(\phi_i) \cos(\gamma_{1,i}) \cos(\gamma_2) T_s(\theta) g(\theta) \cos(\theta) dA_{\text{wall}} & (0 \leq \theta \leq \theta_i), \\ 0 & (\theta > \theta_i), \end{cases} \quad (10)$$

式中, dA_{wall} 是墙壁微小面元面积, $D_{1,i}$ 是第 i 个 LED 发射单元到墙壁某一点的距离, $\gamma_{1,i}$ 是第 i 个 LED 发射单元入射到墙壁的光线与墙壁法线的夹角, ρ 是墙壁反射率.

系统的接收功率为

$$P_{\text{R(NLOS)}} = \int P_S dH_{\text{NLOS}}(0). \quad (11)$$

综上所述, 室内 VLC 系统中光学接收端的总光学接收功率为

$$P = P_S H_{\text{LOS}}(0) + \int P_S dH_{\text{NLOS}}(0). \quad (12)$$

根据 (12) 式, 采用本文设计的新型两级光学接收天线作为光学接收前端, 建立室内 VLC 系统模型. 利用 Matlab 仿真软件, 对 VLC 系统进行信道建模和仿真分析. 在一个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的空旷房间, 采用 60×60 的 LED 阵列单元, LED 阵列尺寸是 59×59 , 单颗 LED 光功率为 20 mW , LED 的中心光强为 0.73 cd , LED 单元间距 10 mm . LED 阵列光源根据照度最小均方差的原则进行放置^[22], 四组 LED 阵列放置的中心坐标分别为 $A(0.815, 0.815)$, $B(4.185, 0.815)$,

$C(4.185, 4.185)$ 与 $D(0.815, 4.185)$. 通过计算得到未安装光学天线、安装 CPC, 安装透镜壁 CPC 和安装新型两级光学接收天线四种情况下的光学接收功率. 图 11 是未安装光学天线时房间内的功率分布. 光电探测器的具体参数列于表 1.

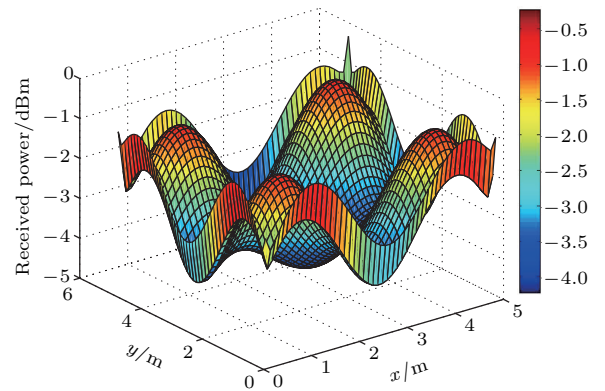


图 11 未安装光学天线时房间中的功率分布

Fig. 11. Power distribution in the room when the optical antenna is not installed.

从图 11 可以看出, 在没有安装光学天线的情况下, 接收端接收功率的最大值为 -0.2428 dBm , 最小值为 -4.2258 dBm , 平均值为 -2.505 dBm . 接

收功率整体呈现距离灯光较近位置的功率高, 边缘位置功率低的分布. 这是因为光学接收端的接收功率受视场角限制, 在距离光源近的位置, 光线入射角度小, 因此会有更多的光线被光学接收端接收.

表1 光电探测器参数 [23–25]

Table 1. Parameters of the photo detector [23–25].

探测器响应率 /A·W ⁻¹	探测器物理 接收面积/cm ²	探测器 半视场角	光学滤波 器增益
0.53	1.00	60°	1

采用设计得到的新型两级光学接收天线时, 房间内的接收功率分布如图 12 所示. 其中, 接收功率的最大值为 9.3524 dBm, 最小值为 -45.6190 dBm, 平均值为 6.8259 dBm. 相对于直接接收的情况, 最大接收功率增幅为 811.03%, 平均接收功率增幅为 757.2%. 由于新型两级光学接收天线设计的视场角大, 光斑能量分布均匀, 因此房间内功率分布均

匀性好, 大大减小了通信盲区. 表 2 列出了不同接收条件下房间内接收功率分布的最大值、最小值和平均值, 以及此时接收功率相对于直接接收情况下的增幅.

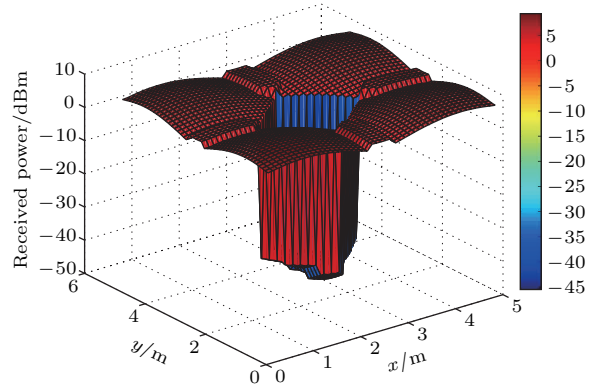


图 12 安装新型两级光学接收天线时房间中的功率分布
Fig. 12. Power distribution in the room when a new two-stage optical receiving antenna is installed.

表 2 安装不同光学天线时接收功率对比

Table 2. Receiving power comparison for different optical antennas.

系统	P_{Rmax}	P_{Rmin}	P_{Rmean}	Growth rate		
				P_{Rmax}	P_{Rmin}	P_{Rmin}
No-antenna	-0.2428	-4.2258	-2.505	—	—	—
CPC	4.8688	-45.6190	1.1994	224.47	-100	134.66
透镜壁 CPC	7.3413	-45.6190	4.8141	473.36	-100	439.40
两级天线	9.3524	-45.6190	6.8259	811.03	-100	757.20

从表 2 可以看出, 安装传统 CPC 的情况下房间内的最大接收功率 P_{Rmax} 为 4.8688 dBm, 最小接收功率 P_{Rmin} 为 -45.6190 dBm, 平均接收功率 P_{Rmean} 为 1.1994 dBm; 与直接接收的情况相比, 最大接收功率增幅为 224.47%, 平均接收功率增幅为 134.66%. CPC 作为光学前端起到会聚光线的作用, 因此相比于直接接收的情况, 最大接收功率和平均接收功率均有明显增加, 但是受 CPC 视场角的限制, 最小接收功率大幅降低. 采用本文设计的透镜壁 CPC, 其信道性能明显优于传统 CPC, 与直接接收的情况相比, 最大接收功率增幅为 473.36%, 是 CPC 最大接收功率增幅的 2.11 倍; 平均接收功率增幅为 439.40%, 是 CPC 平均接收功率增幅的 3.26 倍. 通过透镜壁结构的设计增大了天线的视场角, 在房间内能够接收更多的光线. 综上数据分析

可知, 新型两级光学接收天线的光学性能远远优于传统的 CPC 结构, 能够有效会聚光线, 满足了 VLC 系统的需求.

3.2 信噪比分析

室内 VLC 系统的噪声主要是加性高斯白噪声, 包括前置放大器噪声和散粒噪声, 系统的通信质量主要受到散粒噪声的影响, 且背景光产生的光子散粒噪声远大于信号本身产生的散粒噪声. 因此, 当背景光较强时, 忽略信号本身产生的噪声 [26]; 当背景光较弱时, 主要考虑前置放大器噪声. 散粒噪声可以通过下式表示 [21]:

$$\delta_{shot}^2 = 2q\gamma(P_{R(signal)} + P_{R(ISI)})B + 2qI_{bg}I_2B, \quad (13)$$

式中, $P_{R(\text{signal})}$ 是接收到的信号光功率, B 是等效噪声带宽, $P_{R(\text{ISI})}$ 为码间干扰的功率, I_2 是噪声带宽因子, I_{bg} 是暗电流, γ 是光电探测器的响应度.

热噪声由下式表示:

$$\delta_{\text{thermal}}^2 = 8\pi k T_k \eta A_R I_2 B^2 / G + 16\pi^2 k T_k \Gamma \eta^2 A_R^2 I_3 B^3 / g_m, \quad (14)$$

式中, G 是开环电压增益, Γ 是场效应晶体管 (FET) 的沟道噪声因子, η 是光电探测器的单位面积电容, k 是玻尔兹曼常数, g_m 是 FET 的跨导, T_k 是绝对温度.

综上可知, 系统的噪声总和为

$$N_{\text{total}} = \delta_{\text{shot}}^2 + \delta_{\text{thermal}}^2 + \gamma^2 P_{R(\text{ISI})}. \quad (15)$$

因此室内 VLC 系统的信噪比表达式是为

$$\text{SNR} = \frac{\gamma^2 P_{R(\text{signal})}^2}{\delta_{\text{shot}}^2 + \delta_{\text{thermal}}^2 + \gamma^2 P_{R(\text{ISI})}}. \quad (16)$$

根据 (16) 式, 利用 Matlab 进行仿真, 计算房间内的信噪比分布. 其中, 探测器的响应率是 0.53 A/W 各参数的具体数值分别列于表 3 中.

表 3 室内 VLC 系统仿真设计参数

Table 3. The simulation and design parameters of indoor visible light communication system.

参数类型	参数大小
室内绝对温度 T_k	298 K
背景光电流 I_{bg}	5.1 mA
接收器单位面积固定电容 η	112 pF/cm ²
噪声带宽因子 I_2	0.562
等效噪声带宽 B	100 Mbit/s
噪声带宽因子 I_3 [20]	0.0868
开环电压增益 G	10.0
FET 跨导 g_m	30 mS
FET 沟道噪声因子 Γ	1.5

通过计算分别得到未安装光学天线、安装 CPC、安装透镜壁 CPC 和安装新型两级光学接收天线四种情况下的信噪比. 图 13 是安装新型两级光学接收天线的情况下房间内的信噪比分布.

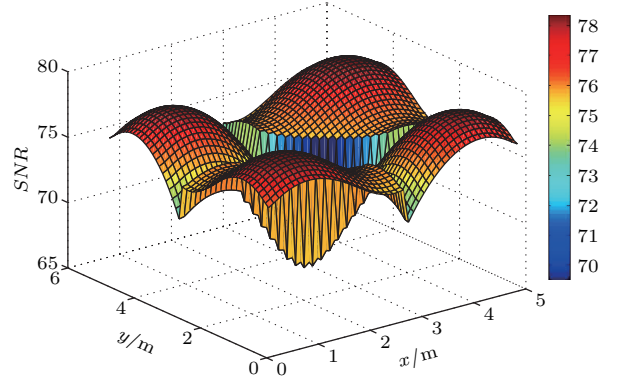


图 13 安装新型两级光学接收天线时房间中的信噪比分布
Fig. 13. Signal-to-noise ratio distribution in a room when a new two-stage optical receiving antenna is installed.

根据 (16) 式计算得到安装新型两级光学接收天线的情况下, 系统信噪比最大值为 78.3381 dB, 最小值为 69.4945 dB, 平均值为 76.0632 dB. 相比于直接接收的情况, 最大值增幅为 18.17%, 平均值增幅为 28.07%, 最小值的增幅为 550.72%. 在 OOK 调制的 VLC 系统中, 13.6 dB 是系统信噪比需满足的最小值 [27-29]. 从图 13 可以看出, 房间内的信噪比分布显然能够满足通信的需求. 且距离光源越近的位置信噪比越大, 通信的稳定性越强. 表 4 列出了不同接收条件下房间内信噪比分布的最大值、最小值和平均值, 以及此时信噪比相对于直接接收情况下的增幅.

从表 4 的数据可以看出: 安装 CPC 作为光学前端与直接接收的情况相比, 最大值增幅 9.61%, 最小值增幅 373.01%, 平均值增幅 16.76%; 透镜壁 CPC 接收的信噪比最大值 SNR_{max} 为 76.2349 dB,

表 4 安装不同光学天线时信噪比对比

Table 4. Comparison of signal-to-noise ratio when different optical antennas are installed.

系统	$\text{SNR}_{\text{max}}/\text{dB}$	$\text{SNR}_{\text{min}}/\text{dB}$	SNR_{mean}	Growth rate		
				SNR_{max}	SNR_{min}	SNR_{mean}
No-antenna	66.2939	10.6796	59.3896	—	—	—
CPC	72.6638	50.5153	69.3431	9.61	373.01	16.76
透镜壁 CPC	76.2349	62.8584	73.1634	15.00	488.58	23.19
两级天线	78.3381	69.4945	76.0632	18.17	550.72	28.07

最小值 SNR_{\min} 为 62.8584 dB, 平均值 SNR_{mean} 为 73.1634 dB, 与直接接收的情况相比, 最大值增幅为 15.00%, 最小值增幅为 488.58%, 平均值增幅为 23.19%. 通过透镜壁接收结构的设计, 增大了接收器的视场角, 光学接收端能够接收到更多的光线, 信噪比明显增加. 采用新型两级光学接收天线接收的信噪比平均值增幅是 CPC 信噪比平均值增幅的 1.67 倍, 是透镜壁 CPC 信噪比平均值增幅的 1.21 倍.

综合以上数据结果和分析可知, 我们设计的新颖两级光学接收天线不仅光学增益大, 且光斑均匀性好、尺寸小, 天线信道性明显优于一些传统光学天线, 能够满足 VLC 系统高速、高稳定性通信的需求.

4 光学天线试验验证方案

本文利用室内 LED 灯作为光源仿真了新型两级光学接收天线的性能, 在此基础上提出光学天线系统的试验验证方案, 评估新型两级光学接收天线的性能并验证设计的合理性. 图 14 所示为光学接收天线试验验证系统的示意图, 根据软件模拟的情况设置室内 VLC 系统模型.

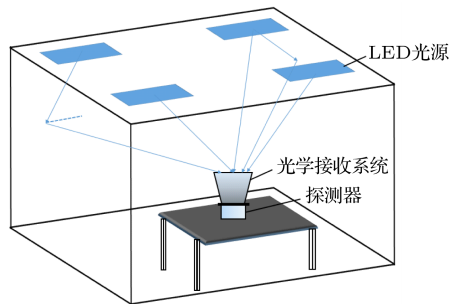


图 14 光学天线试验验证系统示意图

Fig. 14. Test verification of the optical antenna system.

试验验证方案中, 试验测试数据包括信噪比、光学增益、光学接收功率和光斑分布. 测试仪器包括光功率计、电荷耦合器 (CCD) 工业相机和垂直辐射计. 在新型两级光学接收天线焦面位置放置 CCD 工业相机, 根据会聚光斑的实际大小微调 CCD 相机的位置, 尽量确保全部会聚光线被 CCD 探测器接收. 利用 CCD 相机采集聚光光斑的图像信息, 并通过软件进行图像处理, 收集光斑能量分布状况. 利用光功率计测量聚光光斑的光功率, 接收天线的入射功率通过垂直辐射计进行测量.

5 结 论

本文设计了一种用于室内 VLC 系统的新型两级光学接收天线. 对于单个 CPC 光学接收天线来说, 光学增益随视场的增大而减小, 且体积随视场的增大而逐渐增加. 通过 CPC 截面基准曲线旋转设计得到具有一定旋转角与厚度的透镜壁 CPC. 进一步结合透镜壁 CPC 和半球透镜的优势设计了一种新型两级光学接收天线, 增益保持的情况下视场角增大了近 20° . 采用 TracePro 建立光学天线分析模型, 对比不同光学天线系统的光学增益、光斑尺寸及均匀性. 通过 Matlab 软件对室内 VLC 系统进行信道建模, 得到不同光学天线系统的接收功率分布与信噪比分布. 仿真结果表明: 与直接接收的情况相比, 新型两级光学接收天线的平均接收功率增幅为 757.2%, 是 CPC 平均接收功率增幅的 5.62 倍; 信噪比平均值增幅为 28.07%, 是 CPC 信噪比平均值增幅的 1.67 倍; 光学增益为 11.49, 是 CPC 光学增益的 2.81 倍. 且光斑半径仅为 2.5 mm, 较 CPC 光斑半径减小了近 37.5%, 使得能量会聚并均匀分布. 因此, 采用这种设计的新颖两级光学接收天线, 能够满足室内 VLC 系统高速、稳定的通信需求. 最后, 给出了该新型两级光学接收天线性能分析和试验验证的方案.

参考文献

- [1] Dupuis R D, Krames M R 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 1154
- [2] Kwonhyung L, Hyuncheol P, Barry J R 2011 *IEEE Commun. Lett.* **15** 217
- [3] Hoa Le M, Dominic O, Grahame F, Lubin Z, Kyungwoo L, Daekwang J, YunJe O 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1243
- [4] Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M 2000 *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on PIMRC London, England, September 18–21, 2000* p1325
- [5] Kahn J M, Barry J R 1997 *Proc. IEEE* **85** 265
- [6] Vucic J, Kottke C, Nerreter S, Langer K D, Walewski J W 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 3512
- [7] Jae H C, Sung W K, Jin Y K 2009 *The 9th International Symposium Communications and Information Technology London, England, September 28–30, 2009* p1247
- [8] Wang Y, Lan T, Ni G Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 084207 (in Chinese) [王云, 蓝天, 倪国强 2017 物理学报 **66** 084207]

- [9] Afgani M Z, Haas H, Elgala H, Knipp D 2006 *IEEE 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities Barcelona Spain, March 1–3, 2006* p134
- [10] Cui L, Tang Y, Zhu Q W, Luo J B, Hu S S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 094208 (in Chinese) [崔璐, 唐义, 朱庆炜, 骆加彬, 胡珊珊 2016 物理学报 **65** 094208]
- [11] Hashemi S, Ghassemlooy Z, Chao L, Benhaddou D 2008 *IEEE 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CNS-DSP) Graz, July 25, 2008* p174
- [12] Liu H J, Lan T, Ni G Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 238503 (in Chinese) [刘浩杰, 蓝天, 倪国强 2014 物理学报 **63** 238503]
- [13] 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]
- [14] Yun W, Tian L, Ni G Q 2016 *Appl. Opt.* **55** 10229
- [15] Fang J Y, Zhang H L, Jia H H, Shao Z Z, Chang S L, Yang J C 2008 *Appl. Opt.* **29** 98 (in Chinese) [方靖岳, 张海良, 贾红辉, 邵铮铮, 常胜利, 杨俊才 2008 应用光学 **29** 98]
- [16] Wang Y, Lan T, Li X, Shen Z M, Ni G Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124212 (in Chinese) [王云, 蓝天, 李湘, 沈振民, 倪国强 2015 物理学报 **64** 124212]
- [17] Liu L Z, Li J H 2006 *Power Energy* **27** 52 (in Chinese) [刘灵芝, 李戡洪 2006 能源技术 **27** 52]
- [18] Cao J 2012 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [曹捷 2012 硕士学位论文 (南京: 南京邮电大学)]
- [19] Komine T, Nakagawa M 2004 *IEEE Trans. Consum. Electron.* **50** 100
- [20] Shen Z M 2014 *M. S. Dissertation* (Beijing: Beijing Institute of Technology) (in Chinese) [沈振民 2014 硕士学位论文 (北京: 北京理工大学)]
- [21] Toshihiko K, Masao N 2004 *IEEE Trans. Consum. Electron.* **50** 100
- [22] Shen Z M, Lan T, Wang Y, Wang L H, Ni G Q 2015 *Infrared Laser Eng.* **44** 2496 (in Chinese) [沈振民, 蓝天, 王云, 王龙辉, 倪国强 2015 红外与激光工程 **44** 2496]
- [23] Liang W, Li X B, Chong W C, Liu Z J, Che F Y, Husain B, La K M 2015 *2015 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers* Kyoto, Japan, June 17–19, 2015 C328
- [24] Ding J P 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [丁举鹏 2013 博士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [25] Yu B Y 2015 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [余冰雁 2015 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [26] Gao M G, Lan T, Zhao T, Zhang Y L, Cui Z H, Ni G Q 2015 *2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing* Beijing, China, May 17–19, 2015 p961901
- [27] Zhang T 2016 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [张天 2016 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [28] Yang C Y, Yang J, Yang Z W, Hou J, Chen S P 2016 *J. Optoelectron. Lasers* **27** 491 (in Chinese) [杨春勇, 杨杰, 杨振威, 候金, 陈少平 2016 光电子·激光 **27** 491]
- [29] Chen Q F 2014 *M. S. Dissertation* (Zhengzhou: Information Engineering University) (in Chinese) [陈庆峰 2014 硕士学位论文 (郑州: 解放军信息工程大学)]

Design and analysis of novel two-stage optical receiving antenna for indoor visible light communication technology*

Peng Xing Kong Ling-Bao[†]

(Shanghai Engineering Research Center of Ultra-Precision Optical Manufacturing, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(Received 30 October 2017; revised manuscript received 4 December 2017)

Abstract

White light emitting diode has become the next generation of light source because of its high illuminance efficiency, low power consumption, and long life, and it has also been adopted in the application of indoor visible light communication (VLC) system. The VLC has great development potentials, however, there is a lack of research on optical receiving antenna which is a key component of VLC. Therefore, in this paper we design a novel two-stage optical receiving antenna for indoor VLC system. In the designed antenna, the lens wall of a compound parabolic concentrator with a certain rotation angle and thickness is obtained through rotating the parabolic reflector cross-section reference curve. Furthermore, a novel two-stage optical receiving antenna is designed by taking advantage of lens-wall compound parabolic concentrators and hemispherical lenses. This significantly increases the view angle by nearly 20° in the case of gain retention. The analytical model of the optical antenna in a $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ open room is established by using a software of TraceProTM. The indoor VLC system is also modelled and implemented by using a software of MatlabTM. The results show that the growth rate of average received power is 757.2%, which is 5.62 times that of the compound parabolic concentrator, and the signal-noise-ratio is increased by 28.07%, on average, which is 1.67 times that of the compound parabolic concentrator. The optical gain of the two-stage optical receiving antenna is 11.49, which is 2.81 times that of the compound parabolic concentrator. The spot radius is only 2.5 mm, which is reduced by nearly 37.5% compared with the spot radius of the compound parabolic concentrator, and the energy concentration is evenly distributed at the same time. This further confirms that the designed two-stage optical receiving antenna is suitable for indoor VLC system. Finally, the performance analysis and experimental verification of the new two-stage optical receiver antenna are also given.

Keywords: visible light communication, two-stage optical receiving antenna, gain, field of view

PACS: 42.15.-i, 42.60.Lh, 42.15.Eq, 42.79.Bh

DOI: 10.7498/aps.67.20172341

* Project supported by the Shanghai Science and Technology Committee Innovation Grand, China (Grant No. 17JC1400601).

[†] Corresponding author. E-mail: lkong@fudan.edu.cn