

平板型聚光器作为可见光通信中光学天线的设计与性能分析

尹鹏, 徐熙平, 姜肇国, 王加安, 张璐璐

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对室内可见光通信中光学天线存在的视场小、接收面光能分布不均匀,以及低功率光源条件下接收功率低的问题,设计了作为可见光通信系统光学天线的平板型聚光器,推导出适用于平板型聚光系统的光学增益理论公式。在一个(5×5×3) m 房间中对平板型聚光器作为光学天线的接收功率分布进行仿真,得到直射和非直射链路信道下视场角为 50°的平板型聚光器接收房间内各位置的光功率比直接探测时分别提升了 16.2411 dBm 和 16.4956 dBm。

关键词 光通信; 可见光通信; 平板型聚光器; 光学天线; 增益

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0406004

Design and Performance Analysis of Planar Concentrators as Optical Antennas in Visible Light Communication

Yin Peng, Xu Xiping, Jiang Zhaoguo, Wang Jiaan, Zhang Lulu

College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Optical antenna for indoor visible light communication has such problems as small field of view, non-uniformity of the irradiance distribution at the receiver, and low received power under the low power light source condition. We design a planar concentrator as an optical antenna and establish a gain theory. We establish a visible light communication system model based on planar concentrators in a 5 m×5 m×3 m room, which use a planar concentrator with a field of view of 50° as an optical antenna. The simulation results show that the received average powers after using the concentrator in the direct link channel and the non-direct link channel are increased by 16.2411 dBm and 16.4956 dBm compared with that under the direct detection.

Key words optical communications; visible light communications; planar concentrator; optical antenna; gain

OCIS codes 060.4510; 220.2740; 080.4295; 050.2770

1 引 言

无线光通信具有可靠性强、无电磁干扰、无需频谱认证、性价比高等优点^[1-2]。室内可见光通信以白光发光二极管(LED)作为室内照明光源的同时,以光信号为载体,构建无线光网络^[3-4]。1999年,Pang等^[5]将音频信号编码调制到LED光源上用于通信。自2000年起,Komine等^[6]以白光LED作为光源,

对室内条件下的通信信道进行研究,并通过数学分析与仿真,证明白光LED可同时作为照明和通信的光源。

室内可见光通信中的光学接收天线,也被称作光学聚光器或者光学前端,其作用是尽可能多地收集光能至探测器接收面,提高接收系统的光学增益。利用菲涅耳透镜可以满足聚光系统对光学天线尺寸及重量的要求。张逸伦等^[7]针对室内可见光通信系

收稿日期: 2017-08-22; 收到修改稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家重点研发计划(2013CB329204)、国家自然科学基金(61375083)、国家自然科学基金青年基金(61605016)

作者简介: 尹鹏(1988—),男,博士研究生,主要从事光通信、光伏发电等方面的研究。

E-mail: 2013100182@mails.cust.edu.cn

导师简介: 徐熙平(1969—),男,博士,教授,主要从事光电信号检测、图像处理方面的研究。

E-mail: xyp@cust.edu.cn(通信联系人)

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,提出一种二级级联式光学天线,光学仿真实验模拟计算的结果表明,该系统视场角为非涅耳透镜单独接收时的4倍,探测器接收到的信号功率平均值较直接探测时增大了7 dBm。赵太飞等^[8]在半球透镜前添加菲涅耳透镜,使接收系统的光学增益提高了近1倍。徐宁等^[9]设计了弯月形复合菲涅耳透镜,光能利用率达到90%。李湘等^[10]设计了一种等齿距平面菲涅耳透镜,光学效率达到了92.1%,提高了系统接收端的光学增益。此外,王龙辉等^[11]利用干涉和衍射原理在全息材料上制成具有聚集光束和滤除环境光双重功能的全息反射镜,提出了一种新型光学接收天线的设计和制作方法,所得到的系统比传统光学接收天线体积更小,重量更轻,成本更低。但是,菲涅耳透镜视场较小,只在平行光入射时聚光效果较好。对于光通信系统中存在的遮挡导致无法通信等问题,Burton等^[12]提出了采用角度分集思想的多面体式光学接收器,该接收器由多个子天线构成,每个子接收器负责一个视场角及方向,系统实现了较高的信噪比(SNR),误码率(BER)为 10^{-6} ,但是天线结构较为复杂。针对传统光学天线的局限性,Zhang等^[13]设计了一种能够连续变焦的光学天线,该系统由一个直角反射棱镜和一组球面透镜组成,有效提高了通信系统接收信号的增益和信噪比。此后,该课题组针对多光谱通信的需求,设计了一种光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线^[14],采用双柱面镜结合反射式光栅结构提高信噪比。呼树同等^[15]通过改变LED及光电探测器的空间分布,将天线布局分为圆形布局和格点布局两类,通过改变LED间距、发射端和接收端平面的高度差等条件,得到不同的信道传输矩阵。为了扩大接收端的视场角,王云等^[16]对作为可见光通信系统光学接收天线的复合抛物面聚光器(CPC)的性能做了研究与仿真,结果表明,60°视场角的CPC对于直射(LOS)和非直射(NLOS)链路的接收功率分别提高了4.39 dBm和4.77 dBm。Cooper等^[17]改变了传统CPC入射孔的形状,通过分析发现四边形的入射孔聚光性能最好。

平板型聚光器因其能够提供较高的设计自由度,以及在获得高聚光比的同时能够得到较高的聚光效率,近年来受到相关设计人员的广泛关注,现阶段主要应用于太阳能光伏领域^[18-19]。针对上述光学天线中存在的问题,尤其是菲涅耳聚光器的聚光视场小以及单个聚光器接收功率不能满足通信要求等

问题,本文提出将平板型聚光器作为可见光通信光学天线的设计方法。基于文献^[20]对平板型聚光器的几何结构与光学性能进行改进设计与分析,推导出基于平板型聚光器的增益理论公式,对平板型聚光器进行仿真设计与聚光性能分析,详细讨论视场角对平板型聚光器聚光性能的影响。为了验证平板型聚光器设计的合理性,采用平板型聚光器为光学前端对室内可见光通信系统进行信道仿真与分析。

2 平板型聚光器的几何结构与光学性能

2.1 主聚光器的设计

根据室内LED光源的出光分布设计主聚光器的上表面面型。设主聚光器上表面的曲率半径为 ρ ,在此假设平行光线从主聚光器上方垂直入射,则此时 $\rho = \infty$,即主聚光器上表面为平面,如图1(a)所示。将主聚光器的侧面设计为抛物面,则该抛物面与 $y-z$ 平面的交线为抛物线,设该抛物线为^[20]

$$y = az^2, \quad (1)$$

式中: a 为抛物线系数。由抛物线性质可知,光线将会聚于空间坐标 $[0, 1/(4a), 0]$ 处,如图1(b)所示。

将主聚光器修剪为双抛物面结构,两个抛物面之间的距离设定为 $1/2a$,主聚光器的宽度修剪为 D ,从焦平面到主聚光器上表面的距离为主聚光器的高度 h ,为防止光线从焦平面漏出且进入波导板传播时满足全反射条件,通过计算得到主聚光器高度 h 的取值范围^[21]为

$$\frac{3}{4a} < h < \left(2 \sqrt{\frac{n_1 + \sqrt{n_1^2 - 1}}{n_1 - \sqrt{n_1^2 - 1}}} - 1 \right) / (4a), \quad (2)$$

式中: n_1 为波导板材料的折射率。最后将主聚光器的下表面修剪为球面(半径为 R),球心坐标位于空间坐标 $[0, 1/(4a), 0]$ 处,球面半径最大值为

$$R_{\max} = \sqrt{h^2 - \frac{h + \sqrt{\frac{4h}{a} + \frac{1}{a^2}}}{2a} + \frac{17}{16a^2}}. \quad (3)$$

所得主聚光器的结构如图1(c)所示。需要说明的是,为便于计算,采用的主聚光器上表面为平面面型,由于在室内可见光通信中,平行光垂直入射的情况并不符合实际场景,故在后期的仿真设计中需要调整主聚光器上表面的曲率半径 ρ 值以改变光学天线视场角。

2.2 波导板的设计

为了使光线无偏折地进入波导板中传播,需要

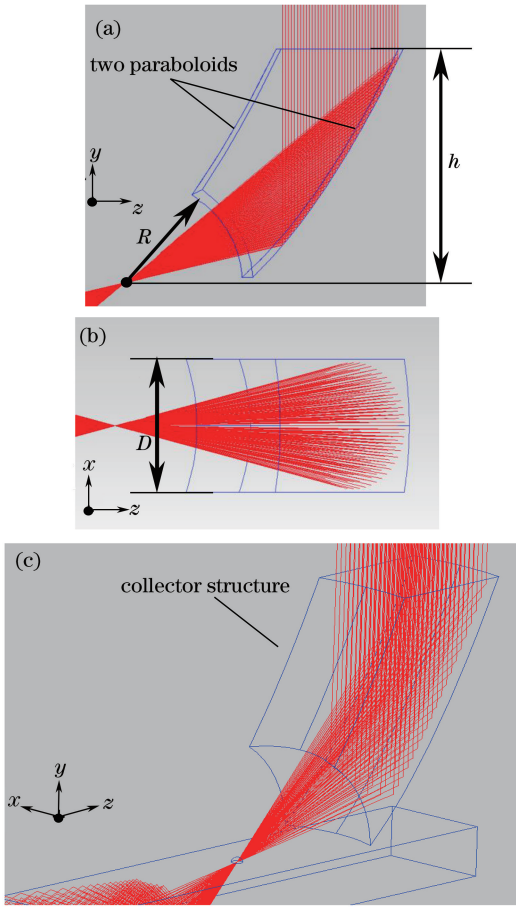


图 1 主聚光器结构。(a)侧视图；(b)俯视图；(c)三维图
Fig. 1 (a) Side view, (b) top view, and (c) three-dimensional view of the master collector structure

在波导板上表面设计光线耦合结构,如图 2 所示。该结构为半球型突起结构,球心位于空间坐标 $[0, 1/(4a), 0]$ 处,半径为 r 。由于该结构只起到耦合光线的作用,且光线理论上会聚于球心处,因此半径 r 的取值通常很小。

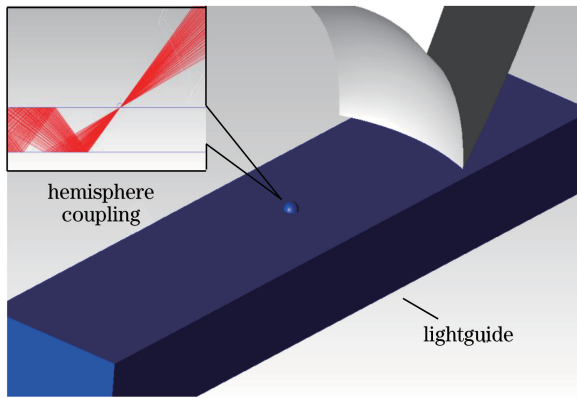


图 2 波导板结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the lightguide structure

2.3 光学增益

对于平板型聚光系统而言,接收天线的几何聚

光比为主聚光器阵列长度 l_c 与波导板厚度 w 的比值,即

$$C_{\text{geo}} = l_c / w. \quad (4)$$

当光源为朗伯分布时,设接收器的面积为 S_d ,在接收器表面所接收的光亮度为 L_o ,未加聚光系统时接收器所能接收到的光通量为

$$\Phi_d = \int L_o S_d \cos \theta_d d\Omega = 2\pi L_o S_d \int_0^{\pi/2} \cos \theta_d \sin \theta_d d\theta_d = \pi L_o S_d, \quad (5)$$

式中: Ω 为立体角; θ_d 为接收角。将接收器添加平板型聚光系统后,设主聚光器阵列上表面的面积为 S_i ,入射到主聚光器阵列上表面的光亮度为 L_i ,对于一个最大接收角(即视场角)为 θ_{max} 的平板型聚光器,此时入射到主聚光器阵列上表面的光通量为

$$\Phi_i = \int L_i S_i \cos \theta_d d\Omega = 2\pi L_i S_i \int_0^{\pi/2} \cos \theta_d \sin \theta_d d\theta_d = \pi L_i S_i, \quad (6)$$

经聚光器收集到达接收器表面的光通量为

$$\Phi_o = \eta_{\text{opt}} \Phi_i = \pi L_i S_i \eta_{\text{opt}}, \quad (7)$$

式中: η_{opt} 为平板型聚光系统的聚光效率。聚光效率定义为进入探测器的能量与接收全部可见光能量的比值。对于平板型聚光系统,光学增益定义为添加聚光器后接收器接收的光通量 Φ_o 与未添加聚光器时所接收的光通量 Φ_d 之比^[22],即

$$g(\theta_c) = \frac{\Phi_o}{\Phi_d} = \frac{\pi L_i S_i \eta_{\text{opt}}}{\pi L_o S_d} = \eta_{\text{opt}} \frac{L_i S_i}{L_o S_d} = \eta_{\text{opt}} C_{\text{geo}} \frac{L_i}{L_o}. \quad (8)$$

由于平板型聚光系统的尺寸相对于室内的高度很小,因此 $L_o \approx L_i$,将(4)式代入(8)式并整理得

$$g(\theta_c) = \eta_{\text{opt}} l_c / w. \quad (9)$$

3 平板型聚光器的仿真设计与聚光性能分析

3.1 平板型聚光器在 40° 视场角时的仿真分析

将室内可见光通信场景设定为 $(5 \times 5 \times 3)$ m,其中高度为 3 m。依据白光照明标准,普通办公照明要求照度范围为 200~1000 lx,采用 4 组白光 LED 阵列均匀对称分布在房间中,如图 3 所示。每组阵列有 60×60 个 LED 单元,单个 LED 发光功率为 20 mW,发射半功率角为 60° ,中心发光强度为 0.73 cd。设 LED 阵列与房顶边缘的最短距离为 l_m ,LED 阵列中各 LED 灯珠之间的距离为 i ,在这

种布局模式下,光照度分布如图 4 所示,接收平面照度分布的均匀度为(照度均值与照度最大值的比值) 89.6%。光学天线法线与所能接收光线夹角最大值为半视场角,在实际应用中,扩大视场可使光学接收天线接收更多入射光从而增加聚光效率,但是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重要的意义。之前的研究表明,室内可见光通信光学接收天线的视场角需要设计在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间^[15],为了适应室内可见光通信中 LED 的光强分布,需要调整主聚光器上表面的二次曲面系数以及曲率半径数值。为了将光线导入主聚光器后折射为平行光,本文将主聚光器上表面二次曲面系数设置为 -1,即抛物透射面。调整后的具体参数如表 1 所示,对主聚光器的光线追迹如图 5 所示,LED 光源的相关参数如表 2 所示。为了使仿真实验更具一般性,调整平板型聚光器的位置空间坐标为(1500 mm, 1500 mm, 850 mm)。图 5(c) 和图 5(d)分别为有无平板型聚光器作为光学前端时接收面的光能分布情况,在有聚光器时接收端接收到的光线数量为 1457 条,接收端接收面的光斑呈均匀分布;没有聚光器时接收端接收到的光线数量为 396 条,但是由于光源出光分布以及位置的变化,接收面的光斑分布均匀性较差;根据两种情况下接收光线的数量,计算出平板型聚光器的实际增益为 3.68。通过比较发现,在调整主聚光器上表面曲率

半径后,平板型聚光器在光源为朗伯分布模式时聚光性能有所提高,这说明上表面为曲面面型的平板型聚光器适合作为室内可见光通信的光学天线。

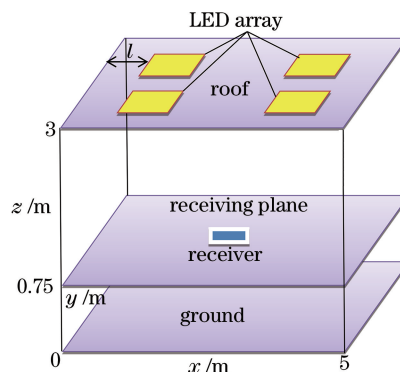


图 3 室内光源布局模型

Fig. 3 Layout model of indoor light source

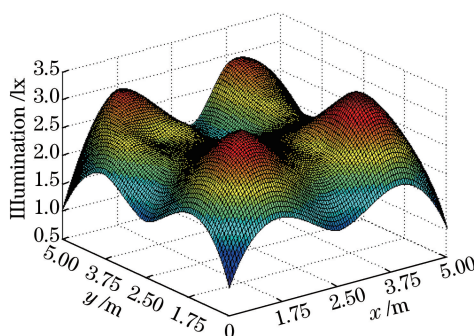


图 4 接收平面光照度分布

Fig. 4 Illumination distribution on receiving plane

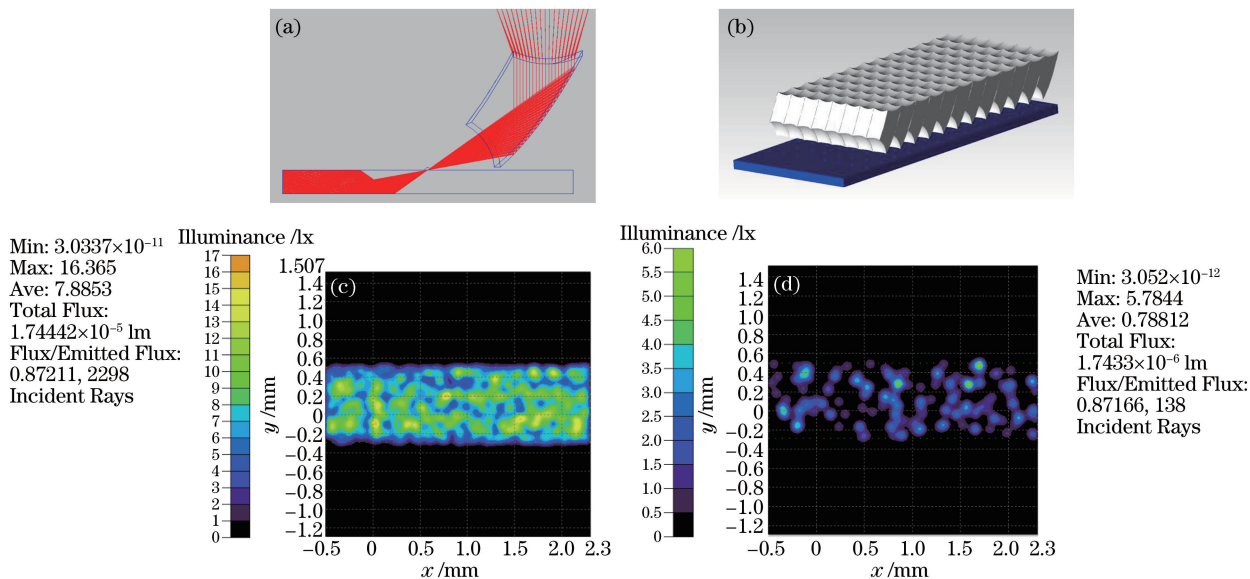


图 5 平板型聚光器在 40° 视场角时仿真示意图。(a) 主聚光器光线追迹示意图;

(b) 平板型聚光器结构图; (c) 采用聚光器时接收端的光斑分布; (d) 未采用聚光器时接收端的光斑分布

Fig. 5 Simulation diagrams of the planar concentrator with a field of view of 40° . Schematic diagrams of (a) ray-tracing of the collector and (b) the planar concentrator structure; irradiance distributions of the receiver (c) with and (d) without the planar concentrator

表 1 视场角为 40°时平板型聚光器的关键设计参数

Table 1 Key design parameters of planar concentrator with a field of view of 40°

Radius curvature of the collector	Parabolic coefficient	Collector width	Collector height	Lightguide length	Lightguide thickness	Field of view	Collector material
ρ / mm	a	D / mm	h / mm	l_m / mm	w / mm	$\theta_{\max} / (^{\circ})$	
-34	0.021	5	42	600	2	40	PMMA

表 2 LED 光源相关设计参数

Table 2 Design parameters of the LED light source

Ray distribution	LED size	LED power	Color temperature	Simulation rays amount
	S_s / mm^2	P_s / W	T / K	
Lambertian	1	1	4500	100000

3.2 通信可靠性研究

在 3.1 节中,讨论了室内 LED 照明分布的均匀性,还需对通信的可靠性进行研究。本文采用接收平面上 BER 均值评价通信系统可靠性,当第 n 个点光源作用时接收平面的接收功率 P_n 为^[23]

$$P_n = g_{\text{LOS}}(0)P_s, \quad (10)$$

式中: $g_{\text{LOS}}(0)$ 为信道的直流增益; P_s 为光源功率。单个 LED 光源出光分布服从朗伯辐射模型,则 $g_{\text{LOS}}(0)$ 为^[26]

$$g_{\text{LOS}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)S_d}{2\pi d_n^2} \cos^m \theta_s g_s(\theta_c) g(\theta_c) \cos \theta_c, & 0 \leq \theta_c \leq \theta_{\max} \\ 0, & \theta > \theta_{\max} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: d_n 为光源与探测器之间的直线距离; θ_s 为光源发射角度; θ_c 为光线入射角度; m 为模式阶数; $g_s(\theta_c)$ 为光滤波器的增益; $g(\theta_c)$ 为聚光器的增益。则 m 和 $g(\theta_c)$ 可分别表示为

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}, \quad (12)$$

$$g(\theta_c) = \begin{cases} n_1^2 / (\sin^2 \theta_{\max}), & 0 \leq \theta_c \leq \theta_{\max} \\ 0, & \theta_c > \theta_{\max} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $\theta_{1/2}$ 为发射功率的半角。则接收端探测器收到 LED 阵列传输的总光源功率为

$$P_d = \sum_{n=1}^N P_s g_{\text{LOS}}(0), \quad (14)$$

式中: N 为 LED 数量。系统信噪比为^[24-25]

$$R_{\text{SN}} = (\gamma P_d)^2 / \sigma^2, \quad (15)$$

式中: γ 为 PD 转换效率; σ^2 为接收端接收到的总系统噪声, $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$, σ_1^2 为系统散粒噪声, σ_2^2 为放大器噪声。 σ_1^2 可表示为

$$\sigma_1^2 = 2q\gamma(P_d + P_b)B_b, \quad (16)$$

式中: q 为电子电量; P_b 为周围环境背景光产生的噪声功率; B_b 为噪声带宽。 B_b 可表示为

$$B_b = I_1 R_b, \quad (17)$$

式中: R_b 为系统的数据传输速率^[24]; I_1 为光电二级管的噪声带宽因子。 σ_2^2 可表示为

$$\sigma_2^2 = I_a^2 B_a, \quad (18)$$

式中: I_a 为放大器的噪声密度; B_a 为放大器带宽。系统 BER 为

$$R_{\text{BE}} = Q(x) \sqrt{R_{\text{SN}}}, \quad (19)$$

式中: $Q(x)$ 可表示为

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{\exp(-y^2/2)}{\sqrt{2\pi}} dy, \quad (20)$$

则接收平面的 BER 均值 $\bar{R}_{\text{BE}}(l_m, i)$ 为

$$\bar{R}_{\text{BE}}(l_m, i) = S_d \iint_{(x,y)} R_{\text{BE}}(x, y) dx dy. \quad (21)$$

图 6 为不同 (l_m, i) 取值时接收平面 BER 均值的分布情况。由图 6 可知,在满足照度的前提下,当 $(l_m, i) = (0.35, 0.025)$ 时,接收平面的 BER 均值最

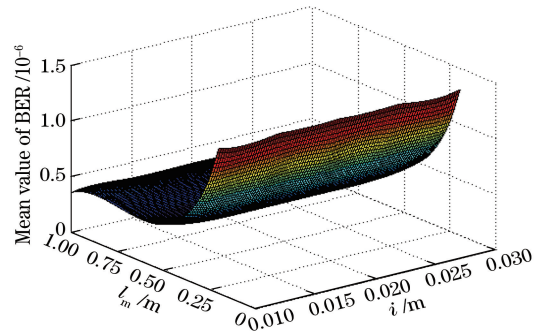


图 6 接收平面 BER 均值分布

Fig. 6 Distribution of BER average value on receiving plane

低,此时系统最可靠。

3.3 聚光器结构对聚光性能的影响

通过上述对实际通信条件的研究,得到的接收天线的体积、质量、接收聚光面积分别为 126000 mm^3 , 140.2 g , 3000 mm^2 。该接收天线的体积较小,结构较为简单,能够满足实际应用需要。聚焦光斑辐照度分布随着接收天线位置坐标的变化如图 7 所示。为了使仿真数据更具一般性,选取接收天线位置空间坐标 (x, y, z) 分别为 $(1.60 \text{ mm}, 0,$

$0.85 \text{ mm})$ $(1.60 \text{ mm}, 0.80 \text{ mm}, 0.85 \text{ mm})$ $(1.60 \text{ mm}, 1.60 \text{ mm}, 0.85 \text{ mm})$ $(1.60 \text{ mm}, 2.50 \text{ mm}, 0.85 \text{ mm})$ 进行仿真实验。由于 LED 阵列分布的对称性,这 4 个位置坐标的数据能够较客观地反映实验结果的正确性。由图 7 可见,不同位置坐标下聚焦光斑的分布都较均匀,几乎不受位置坐标的影响,即随着入射光照方向的变化聚焦光斑的位置几乎没有漂移。

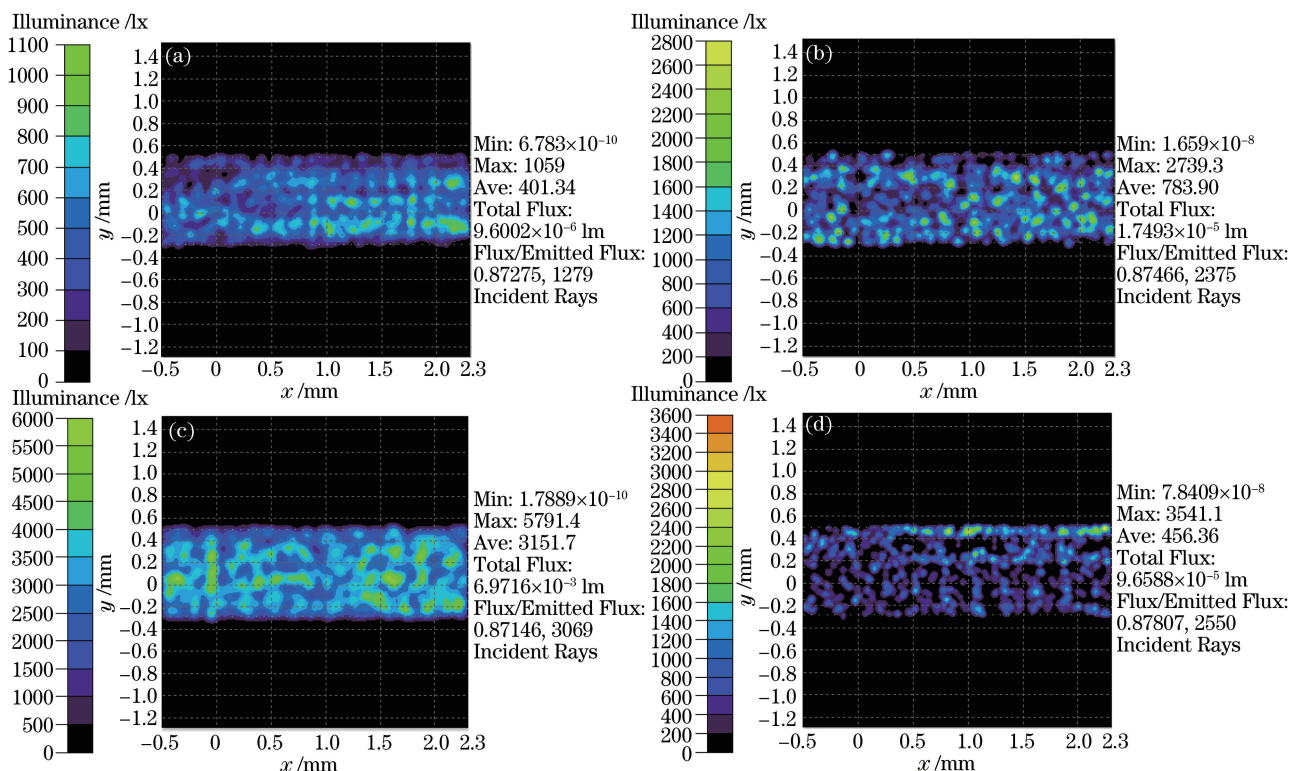


图 7 聚焦光斑辐照度分布。图(a)、(b)、(c)、(d)接收天线位置空间坐标分别为 $(1.60 \text{ mm}, 0, 0.85 \text{ mm})$ $(1.60 \text{ mm}, 0.80 \text{ mm}, 0.85 \text{ mm})$ $(1.60 \text{ mm}, 1.60 \text{ mm}, 0.85 \text{ mm})$ $(1.60 \text{ mm}, 2.50 \text{ mm}, 0.85 \text{ mm})$

Fig. 7 Irradiance distributions of concentrated spot with $x = 1.60 \text{ mm}$, $z = 0.85 \text{ mm}$, and
(a) $y = 0$, (b) $y = 0.80 \text{ mm}$, (c) $y =$

随着平板型聚光器长度的增加,主聚光器和半球耦合结构阵列数量也增多,部分波导板中的光线传播至波导板上表面半球耦合结构处,由于这部分表面型为球面,光线在此处不再发生全反射,部分光线透射出波导板,发生漏光现象。由于接收到光线总量不变,但漏光后到达探测器的光线变少,因此聚光效率下降。光线耦合结构的尺寸直接影响波导板的漏光程度,利用光线追迹软件对 3 种聚光器进行仿真,并考虑菲涅耳损失和光学材料的吸收损失。3 种聚光器的长度分别为 400, 500, 600 mm, 宽度和高度均为 50, 42 mm。图 8 为聚光效率随光线耦合结构尺寸变化曲线。可见,随着光线耦合结构尺寸

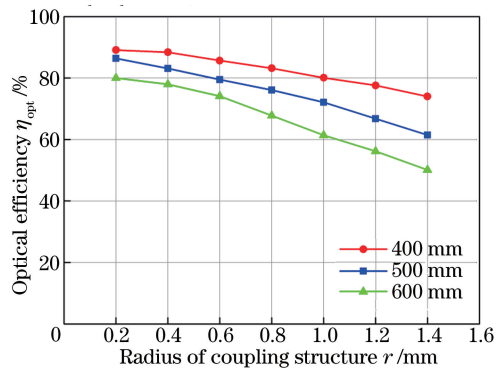


图 8 3 种聚光器长度下聚光效率随光线耦合结构半径的变化曲线

Fig. 8 Optical efficiencies vary with the coupling structure radii with three concentrator lengths

光线耦合结构尺寸下,聚光器长度越长,漏光现象越严重,聚光效率越低。需要注意的是,当光线耦合结构半径为零时,即波导板上表面为平面,从主聚光器出射的光线与波导板上下表面发生折射后从波导板下表面漏出,没有任何光线被导入波导板中。因此,在实际设计聚光器时,光线耦合结构的半径不能为零。

3.4 视场角对平板型聚光器聚光性能的影响

视场角 θ_{\max} 是评价光学天线性能优劣的重要指标。在实际应用中,扩大视场角能够使光学天线接收更多的入射光,从而增加聚光系统的聚光效率。但是,根据以上分析可知,视场角对于平板型聚光器聚光性能影响较大。在不改变光源条件的基础上,将平板型聚光器的位置空间坐标设置为(1500 mm,

1500 mm,850 mm),通过改变主聚光器上表面曲率半径的设计参数,分别模拟视场角为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 时接收端所能够接收到的能量。具体的设计参数以及各视场角下的增益情况分别列于表 3。根据表 3 绘制的实际增益随视场角的变化如图 9 所示。由图 9 可见,当视场角较小时,平板型聚光器的聚光效果较好,实际增益较大;随着视场角的增大,实际增益迅速下降,这是由于聚光器的位置、LED 光源的布局,以及 LED 出光分布等因素导致一部分光线未能被主聚光器接收所致,而另一部分被主聚光器接收的光线由于入射角度的变化未能导入至波导板,则使聚光器的聚光效率大幅下降;当视场角较大时,实际增益下降幅度较平缓。

表 3 不同视场角下的平板型聚光器参数与增益值

Table 3 Parameters and gain values of planar concentrator in different fields of view

Field of view $\theta_{\max}/(^{\circ})$	Parabolic coefficient ρ / mm	Collector height h / mm	Lightguide length l_c / mm	Rays amount (with collector)	Rays amount (without collector)	Gain $g(\theta_c)$
0	∞	42	600	39900	144	277
10	-52	42	600	2562	61	42
20	-46	42	600	3762	209	18
30	-39	42	600	2540	324	7.84
40	-34	42	600	1457	396	3.68
50	-30	42	600	761	435	1.75

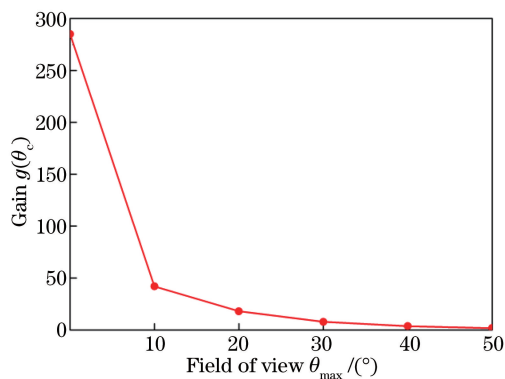


图 9 平板型聚光器作为光学天线在不同视场角下的增益
Fig. 9 Gain of the planar concentrators as optical antenna in different fields of view

4 采用平板型聚光系统为光学前端的室内可见光通信系统信道仿真与分析

为了验证平板型聚光器设计的合理性,在一个 $(5 \times 5 \times 3) \text{ m}$ 的空旷房间中,利用 Matlab 软件分别对采用视场角为 $10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ 的平板型聚光器为光学天线的室内可见光通信系统进行建模与仿

真。4 组白光 LED 阵列均匀对称地分布在距离天花板 0.5 m 的位置,每组 LED 光源由 60×60 个 LED 组成,每个 LED 光功率为 20 mW,每两个 LED 之间的距离为 1 cm,LED 中心的发光强度为 0.73 cd,接收系统所放置的桌面距离地面 0.85 m,墙壁反射率为 0.7,聚光器光学材料折射率 $n_1 = 1.5$ 。

在不考虑墙壁反射的情况下,设光学滤波器增益为 1,探测器有效面积为 1 cm^2 ,响应度为 0.53 A/W,接收器视场角为 90° 。分别模拟仿真不采用平板型聚光器、采用视场角为 $10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ 的平板型聚光器作为光学天线的 4 种情况,得到的 0.85 m 水平任意位置的接收功率分布如图 10 及表 4 所示。需要说明的是,文中探测器有效面积 1 cm^2 只作计算数值。

由图 10 和表 4 可见,使用视场角为 10° 的平板型聚光器作为光学天线时,4 组 LED 下方的探测器接收功率增加,但是其他区域有较大的盲区存在;使用视场角为 30° 的平板型聚光器作为光学天线时,接收功率增加的区域面积变大,但仍然存在部分盲区;使用视场角为 50° 的平板型聚光器作为光学天线时,接收功率平均值为 11.7274 dBm,

较无聚光器时提升 16.2411 dBm,且之前出现的盲区被覆盖,接收功率最小值出现在房间的边缘及角落。使用视场角为 70°的平板型聚光器作为光

学天线时,接收功率平均值为 18.1684 dBm,较无聚光器时提升22.6821 dBm,但是接收功率最大值有所下降。

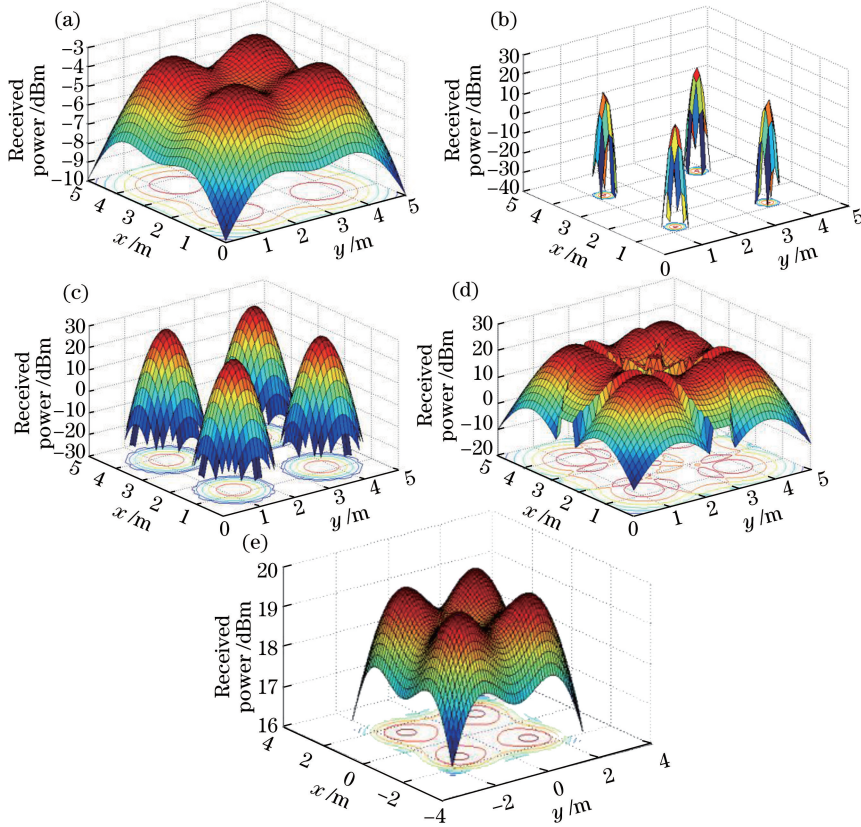


图 10 LOS 信道下接收功率分布。(a) 不使用聚光器；
(b)、(c)、(d)、(e)使用视场角分别为 10°、30°、50°、70°的平板型聚光器
Fig. 10 Distributions of received power in LOS (a) without concentrator and using a planar concentrator with the fields of view of (b) 10°, (c) 30°, (d) 50°, and (e) 70°

表 4 LOS 信道下不同视场角平板型聚光器的接收功率分布

Table 4 Distribution of received power in LOS using the planar concentrators with different fields of view

Type of optical antenna	Field of view $\theta_{\max} / (^{\circ})$	Minimal received power P_{\min} / W	Maximal received power P_{\max} / W	Average received power $P_{\text{ave}} / \text{W}$
Without collector		-9.9431	-3.1408	-4.5137
Planar concentrator	10	$-\infty$	21.4318	0.3796
	30	$-\infty$	23.1988	3.8864
	50	-10.0432	23.1956	11.7274
	70	16.0327	20.0046	18.1684

当考虑墙壁光线一次反射时,即 NLOS 信道下,反射光的直流增益为

$$g_{\text{NLOS}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)S_d}{2\pi d_1^2 d_2^2} \rho dS_{\text{wall}} \cos^m \theta_s \cos \theta_{\text{wall1}} \cos \theta_{\text{wall2}} g_s(\theta_c) g(\theta_c) \cos \theta_c, & 0 \leq \theta_c \leq \theta_{\max} \\ 0, & \theta_c > \theta_{\max} \end{cases}, \quad (22)$$

式中: d_1 为光线到墙壁任意点的距离; d_2 为该点到接收端的距离; dS_{wall} 为墙面的微元面积; θ_{wall1} 为光线相对于墙壁的入射角度; θ_{wall2} 为光线经过墙壁反

射后的出射角度。则考虑一次反射时的接收功率为

$$P_r = \int_{S_{\text{wall}}} P_s dg_{\text{NLOS}}(0), \quad (23)$$

系统总接收功率为

$$P_R = \sum_{n=1}^N [P_{sg_{LOS}}(0) + \int_{S_{wall}} P_{sg_{NLOS}}(0)]. \quad (24)$$

根据 (11)式、(13)式、(24)式, 仿真得到 NLOS 下 0.85 m 水平任意位置的接收功率分布, 如图 11 及表 5 所示。

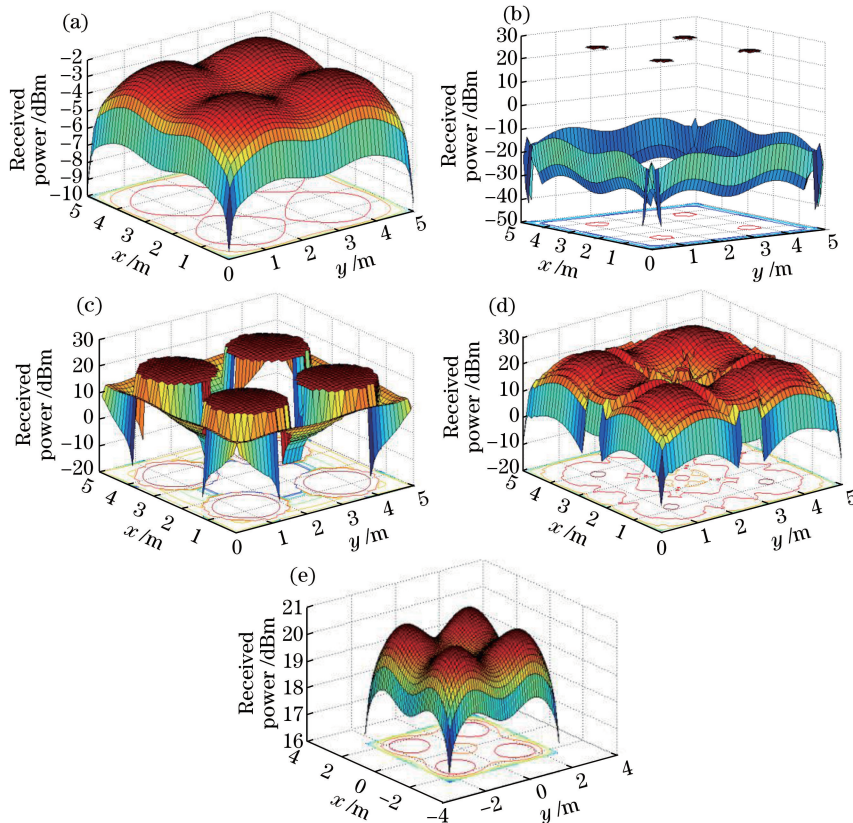


图 11 NLOS 信道下接收功率分布。(a) 不使用聚光器; (b)、(c)、(d)、(e)使用视角分别为 10°, 30°, 50°, 70°的平板型聚光器

Fig. 11 Distribution of received power in NLOS. (a) Without concentrator; (b) using a planar concentrator of the field of 10° view; (c) using a planar concentrator of the field of 30° view; (d) using a planar concentrator of the field of 50° view; (e) using a planar concentrator of the field of 70° view

表 5 NLOS 信道下不同视角下平板型聚光器的接收功率分布

Table 5 Distribution of received power of the planar concentrators in different fields of view in NLOS

Type of optical antenna	Field of view	Minimal received power	Maximal received power	Average received power
	$\theta_{max} / (^\circ)$	P_{min} / W	P_{max} / W	P_{ave} / W
Without collector		-9.7876	-3.2394	-4.1547
	10	$-\infty$	21.9105	0.8863
Planar concentrator	30	$-\infty$	23.9054	4.3167
	50	-9.9481	24.0064	12.3409
	70	16.0547	20.1794	18.9534

由图 11 和表 5 可见, 采用平板型聚光器作为光学天线后, NLOS 信道下系统的接收功率普遍比 LOS 信道下有所提升。对于视角角为 50°的平板型聚光器, 接收功率的平均值较无聚光器时提升 16.4956 dBm, 较 LOS 信道下提高 0.6135 dBm。对于视角角为 70°的平板型聚光器, 接收功率的平均值较无聚光器时提升 23.1081 dBm, 较 LOS 信道下提高 0.785 dBm。可见, 墙壁的反射光线对于接收

功率的分布有较大影响。因此, 平板型聚光器作为可见光通信中的光学天线的整体性能适用于室内可见光通信。

5 结 论

平板型聚光器常用于太阳光接收系统, 本文通过调整主聚光器上表面型面参数设计出可作为室内可见光通信光学天线的平板型聚光器, 利用光线追

迹软件 TracePro 模拟了主聚光器上表面不同曲率半径下的平板型聚光器在不同视场角下的聚光性能,分析了视场角对平板型聚光器聚光性能的影响,并推导出适用于平板型聚光系统的光学增益理论公式。为了验证平板型聚光器设计的合理性,在一个(5×5×3) m 的空旷房间中,利用 Matlab 软件分别对视场角为 10°,30°,50°,70°的平板型聚光器作为光学天线的室内可见光通信系统进行了建模与仿真,分别得到了 LOS 和 NLOS 信道下视场角为 50°的平板型聚光器接收房间内各位置的光功率较直接探测时分别提升了 16.2411 dBm 和 16.4956 dBm。仿真结果表明:视场角为 50°时的平板型聚光器作为可见光通信中的光学天线的整体性能适用于室内可见光通信;视场角较小的平板型聚光器更适用于点对点的环境。

需要说明的是,仿真过程中为了突出表现不同参数下光学天线整体性能间的差异,选用的平板型聚光器尺寸较大,在实际应用中,可根据光通信应用的场景,减少主聚光器的数量,调整聚光系统的高度,得到切合实际条件的设计尺寸。此外,光线在平板型聚光器的接收面上均匀分布,均匀的能量不但不会影响探测器的性能,反而可以提高探测效率;对于高通信速率中光源功率较低时,可以通过增加聚光器的长度或宽度增大系统的接收面积,从而满足低功率光源下的通信需求。

参 考 文 献

- [1] Liu Y, Zhang G A. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090601.
刘洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090601.
- [2] Lu Q F, Ji X S, Huang K Z, *et al.* Power allocation method for reducing nonlinearity clipping distortion in asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing based visible light communication [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0706004.
陆庆峰, 季新生, 黄开枝, 等. 降低可见光通信不均匀限幅失真的功率分配方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0706004.
- [3] Zhao L, Peng K. Optimization of layout of lighting for indoor VLC based on white-LED[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706001.
赵黎, 彭恺. 基于白光 LED 的室内 VLC 光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0706001.
- [4] Li Y X, Liang W Y, Ye H G, *et al.* COB LED based optical design of transmitting end with uniform luminous intensity distribution for visible light communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1022002.
李远兴, 梁文跃, 叶湖贵, 等. 基于 COB LED 的均匀光强分布可见光通信系统发射端的光学设计[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1022002.
- [5] Pang G, Ho K L, Kwan T, *et al.* Visible light communication for audio systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(4): 1112-1118.
- [6] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [7] Zhang Y L, Lan T, Gao M G, *et al.* Design of two-cascade optical antenna for indoor visible light communication [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16): 164201.
张逸伦, 蓝天, 高明光, 等. 二级级联式室内可见光通信光学接收天线设计[J]. 物理学报, 2015, 64(16): 164201.
- [8] Zhao T F, Ke X Z, Liang W, *et al.* Design of two levels optical receiver system for UV scattering communication [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2011, 33(2): 310-314.
赵太飞, 柯熙政, 梁薇, 等. 紫外光散射通信中一种二级光学接收系统设计[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 310-314.
- [9] Xu N, Xu D T, Yang G, *et al.* Simulating and optimizing of Fresnel lens in visible light communications [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2012, 29(5): 629-636.
徐宁, 徐丹彤, 杨庚, 等. 可见光通信中菲涅耳透镜仿真设计与优化[J]. 量子电子学报, 2012, 29(5): 629-636.
- [10] Li X, Lan T, Wang Y, *et al.* Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 024201.
李湘, 蓝天, 王云, 等. 室内可见光通信系统中菲涅耳透镜接收天线的设计研究[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024201.
- [11] Wang L H, Lan T, Shen Z M, *et al.* Optical receiving antenna for indoor visible light communication based on holographic mirror [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0306004.
王龙辉, 蓝天, 沈振民, 等. 基于全息反射镜的室内可见光通信光学接收天线[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0306004.

- [12] Burton A, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, *et al.* Design and analysis of an angular-segmented full-mobility visible light communications receiver [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014, 25: 591-599.
- [13] Zhang X B, Tang Y, Cui L, *et al.* Continuous zoom antenna for mobile visible light communication [J]. Applied Optics, 2015, 54(32): 9606-9612.
张学彬, 唐义, 崔璐, 等. 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0206003.
- [14] Zhang X B, Tang Y, Cui L, *et al.* Grating optical antenna for spectral wavelength division multiplex visible light communication [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0206003.
张学彬, 唐义, 崔璐, 等. 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0206003.
- [15] Hu S T, Zhang J Y. Research of antenna layouts in multiple-input multiple-output visible light communication [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, 26(10): 1908-1914.
呼树同, 张建勇. 多输入多输出可见光通信的天线布局研究 [J]. 光电子·激光, 2015, 26(10): 1908-1914.
- [16] Wang Y, Lan T, Li X, *et al.* Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 124212.
王云, 蓝天, 李湘, 等. 复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的设计研究与性能分析 [J]. 物理学报, 2015, 64(12): 124212.
- [17] Cooper T, Dähler F, Ambrosetti G, *et al.* Performance of compound parabolic concentrators with polygonal apertures [J]. Solar Energy, 2013, 95(5): 308-318.
- [18] Xie P, Lin H C, Liu Y, *et al.* Total internal reflection-based planar waveguide solar concentrator with symmetric air prisms as couplers [J]. Optics Express, 2014, 22(s6): A1389-A1398.
- [19] de Jong T M, de Boer D K G, Bastiaansen G W M. Diffractive flat panel solar concentrators of a novel design [J]. Optics Express, 2016, 24(14): A1138-A1147.
- [20] Wang X, Cao M, An Z Y, *et al.* Design and research of total-internal-reflection solar energy concentrating module [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1020001.
王骁, 曹秒, 安志勇, 等. 全内反射型太阳能聚光模块设计与研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1020001.
- [21] Bouchard S, Thibault S. GRIN planar waveguide concentrator used with a single axis tracker [J]. Optics Express, 2014, 22(s2): A248-A258.
- [22] Liu Y X, Huang R, Madsen C K, *et al.* Two-axis tracking using translation stages for a lens-to-channel waveguide solar concentrator [J]. Optics Express, 2014, 22(s6): A1567-A1575.
- [23] Teng T C, Lai W C. Planar solar concentrator featuring alignment-free total-internal-reflection collectors and an innovative compound tracker [J]. Optics Express, 2014, 22(s7): A1818-A1834.
- [24] Languy F, Fleury K, Lenaerts C, *et al.* Flat Fresnel doublets made of PMMA and PC: combining low cost production and very high concentration ratio for CPV [J]. Optics Express, 2011, 19(s3): A280-A294.
- [25] Ding D Q, Ke X Z, Li J X. Design and simulation on the layout of lighting for VLC system [J]. Optoelectronic Engineering, 2007, 34(1): 131-134.
丁德强, 柯熙政, 李建勋. VLC 系统的光源布局设计与仿真研究 [J]. 光电工程, 2007, 34(1): 131-134.
- [26] Zeng L B, O'Brien D, Le-Minh H, *et al.* Improvement of data rate by using equalization in an indoor visible light communication system [C]. 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, 2008: 10052223.
- [27] Wang Z, Yu C, Zhong W D, *et al.* Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4564-4573.
- [28] Kahn J M, Barry J R. Wireless Infrared Communications [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.