

# 仿生复眼多级耦合光学天线优化设计及分析

陈考铭<sup>1</sup>, 杨春勇<sup>1</sup>, 吴庭明<sup>1</sup>, 倪文军<sup>2</sup>, 王润雨<sup>1</sup>, 侯金<sup>1</sup>, 陈少平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中南民族大学电子信息工程学院智能无线通信湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 在阴影遮挡等非视距应用场景中,可见光通信系统的性能受限于严重的光功率衰减影响。基于仿生复眼的工作原理,设计了一种球面仿生复眼微透镜组和复合抛物面聚光器耦合的光学接收天线。利用 TracePro 软件分析球面仿生复眼的非成像特性,发现当探测面面积一定时,随着邻子眼光轴夹角减小,能量收集比率逐步提高,当邻子眼光轴夹角小于局部最优值时,能量收集比率达 90% 以上,接近最优。光轴夹角的局部最优值与探测器面积呈正相关。复眼的大视场特性随邻子眼光轴夹角的增大而逐步丧失,最终趋近于单透镜特性。对于可见光通信非视距链路的应用,可获得天线增益达 56.45,视场角大于 90°。利用 MATLAB 对室内信道进行数值分析,证明了仿生复眼多级耦合光学天线在阴影遮挡严重的场景下依旧能保持较高的馈入光功率,与普通的单透镜天线相比,平均功率提高了 20 dBm,表明所设计的光学天线具有大视场和高增益的特性,可有效提高室内可见光通信系统的抗阴影遮挡性能。

**关键词** 探测器; 可见光通信; 光学天线; 耦合; 复眼透镜

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0704005

## Optimum Design and Analysis of Bionic Compound Eyes Multistage Coupling Optical Antenna

Chen Kaoming<sup>1</sup>, Yang Chunyong<sup>1</sup>, Wu Tingming<sup>1</sup>, Ni Wenjun<sup>2</sup>, Wang Runyu<sup>1</sup>,  
Hou Jin<sup>1</sup>, Chen Shaoping<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communications, College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup>School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** The performance of a visible optical communication system is limited by the effect of severe light power attenuation in application scenes of non-line-of-sight (NLOS) propagation such as shadow occlusion, etc. Thus, we propose a kind of optical receiving antenna coupled with spherical bionic compound eye micro-lens group and a compound parabolic concentrator. By using TracePro to analyze the non-imaging characteristics of bionic compound eye of spherical surface, we find that the ratio of energy collection increases with the decrease of angle of the neighbor's eye axis when the area of detection surface is certain. When the included angle between adjacent optical axes is less than local optimal value, the energy collection rate is more than 90%, which is close to the optimum. There is a positive correlation between the local optimal value of the angle of the optical axis and the area of the detector. With the increase of angle of the neighbor's eye axis, the character of large field of vision (FOV) of bionic compound eye is gone. For the application of NLOS link of indoor visible light communication, the antenna gain can

收稿日期: 2018-01-05; 收到修改稿日期: 2018-02-10

基金项目: 湖北省自然科学基金科技支撑计划(2015BCE048)、国家科技支撑计划(2015BAD29B01)、湖北省自然科学基金重点项目(2014CFA051)、中央高校基本科研业务费专项资金自科培育项目(CZP17026)

作者简介: 陈考铭(1996—),男,学士,主要从事非成像光学系统设计与光束整形方面的研究。

E-mail: 2357916005@qq.com

导师简介: 杨春勇(1975—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光通信与光传感方面的研究。

E-mail: cyyang@mail.scuec.edu.cn(通信联系人)

reach 56.45 and the angle of FOV is larger than  $90^\circ$ . Compared with the ordinary single-lens antenna, it is clear that the bionic compound eye multilevel coupling optical antenna can maintain a high light feeding power in the case of severe shading, and the average power is increased by 20 dBm. It also shows that the design of the optical antenna with large FOV and high gain characteristics can effectively improve the anti-shadowing performance of indoor visible light communication system.

**Key words** detectors; visible light communication; optical antenna; coupling; compound eye lens

**OCIS codes** 040.1880; 080.2175; 080.4295; 230.4000

## 1 引 言

可见光通信(VLC)技术是LED照明与无线通信技术的结合,具有保密性强、无电磁干扰、无需频谱认证等优势。近年来,一些研究小组不断刷新该技术的视距传输记录<sup>[1-3]</sup>,该技术取得了较快进展。然而,可见光通信系统的应用仍面临不少挑战。其中,阴影遮挡是VLC技术拓展应用必须克服的重要挑战之一。围绕抗阴影遮挡技术的研究一直备受关注<sup>[4-6]</sup>。有学者提出利用漫射链路和宽视场角光学接收器来解决阴影遮挡的问题,其中的光学接收器是关键<sup>[7-8]</sup>。目前,光学接收器的讨论主要分为成像接收和非成像接收两个方向。对于传统的光学成像接收器,如成像凸透镜光学天线<sup>[9-10]</sup>,受制于视场角及成像质量,只能以小于 $10^\circ$ 的入射角度发挥作用。薄透镜成像接收器<sup>[9]</sup>虽然可以提供良好的信道矩阵,但同样面临视场角受限的问题。Chen等<sup>[8]</sup>提出了一种鱼眼透镜成像接收器,该接收器具有 $180^\circ$ 的较大视场角,然而其结构设计较为复杂。与成像接收器相比,非成像接收器因结构设计相对简单,也是发展方向之一。Wei等<sup>[11]</sup>提出了一种方形非成像光学接收器,虽然它具有较高的数据速率,但光功率馈入能力有限。Burton等<sup>[12]</sup>提出一种由7个子接收器组成的非成像光学接收器,改善了光馈入能力,但其最高增益仅为2.25。可见,无论是成像接收技术还是非成像接收技术,都在抗阴影遮挡方面具有一定的效果,但都远未达到应用的要求。

受仿生复眼技术在成像光学方面应用的启发,本课题组从可见光通信系统的接收机设计入手,提出了一种融合仿生复眼大视场特点和复合抛物面聚光器高增益特性的仿生复眼多级耦合非成像光学天线模型和方案。首先,利用TracePro验证分析球面复眼的非成像特性,仿生复眼在保证大视场优势的同时具有较高能量收集比率的科学数据;然后通过对比分析复合抛物面聚光器和复眼透镜的增益,证明在大视场角情况下,复眼多级耦合天线依旧能保持较高的增益;最后对室内可见光通信的链路进行

仿真,验证所提天线模型和方案的抗遮挡性。

## 2 模型与结构设计

设计的天线结构模型如图1所示。该结构由物空间、球面复眼透镜、复合抛物面聚光器(CPC)及探测面构成,模型如图1所示。

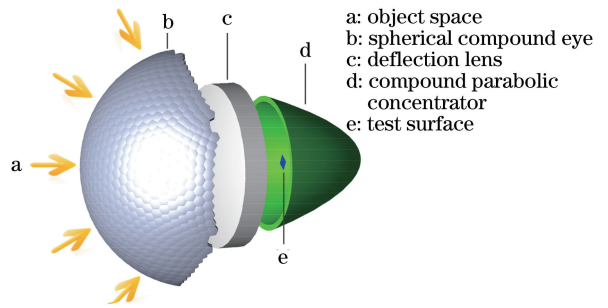


图1 多级耦合光学天线原理图

Fig. 1 Schematic of multistage coupling optical antenna

物空间的信息光被球面复眼透镜分为多个通道会聚,由于复眼是多点聚焦,实际形成的光斑较大,CPC可以将光线近乎理想地会聚到探测面上,形成一个较小的光斑。转折透镜的功能是对复眼大角度入射光线进行压缩,在复眼与CPC之间起耦合过渡的作用。光路如图2所示, $L_1$ 、 $L_2$ 分别为复眼与转折透镜、转折透镜与CPC之间的相对距离, $f$ 为CPC的焦距。

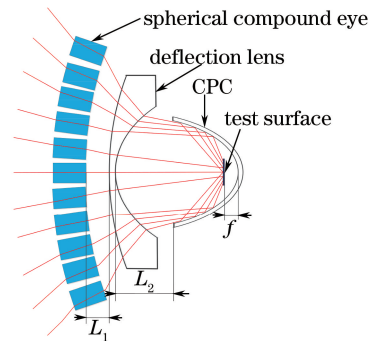


图2 多级耦合光学天线光路示意图

Fig. 2 Optical scheme of multistage coupling optical antenna

### 2.1 球面复眼透镜模型

图1中多级耦合天线光学天线中的重要组

件——球面复眼透镜的几何模型如图 3 所示。球面复眼由多个呈环形排列在球面上的子眼构成,图中的子眼透镜按照“层数.排序”的方式,即用 $(M,N)$ 组合的形式对应进行命名标注。假设空间中任意一点 $O$ 为原点,以中心子眼 $(0,0)$ 与原点 $O$ 的连线为 $Z$ 轴,建立空间三维球面坐标系 $(R, \theta_{MN}, \phi_{MN})$ ,其中: $R$ 为原点与子眼的距离, $\theta_{MN}$ 为第 $M$ 层第 $N$ 个子眼的光轴与 $Z$ 轴正向的夹角; $\phi_{MN}$ 为子眼的光轴在 $XY$ 平面的投影线与正 $X$ 轴之间的方位角。相邻两个子眼的光轴夹角为 $\Delta\theta$ 。

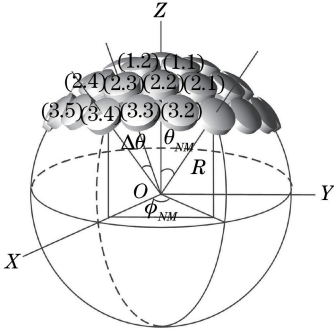


图 3 复眼结构模型

Fig. 3 Model of compound eyes

复眼透镜在可见光通信中的应用为非成像特性应用。对非成像光学而言,过长的焦距会导致光能损耗过大,但过短的焦距又会限制后级转折透镜和复合抛物面聚光器的设计空间。参考文献[13]的相关内容,本研究设计 $R$ 值为 $40\text{ mm}$ ,复眼子眼焦距与子眼下表面曲率半径在数值上等于球半径 $R$ ,由此可确定上表面曲率半径 $r$ 。选择BK7作为透镜材料,其折射率 $n$ 约为 $1.517$ 。单个子眼的厚度 $d$ 为 $2\text{ mm}$ ,球面复眼最外层子眼 $(15,1)$ 的坐标为 $(40, 90, 0)$ ,即复眼最大光轴夹角 $\theta_{\max}$ 为 $90^\circ$ 。

### 2.2 转折透镜模型

图 1 中多级耦合光学天线中的转折透镜实际上是负弯月型透镜,其作用是对前级光线进行压缩,以便实现复眼与CPC的高效耦合。值得注意的是,过大的压缩比会导致转折透镜后表面曲率半径过小,无法与CPC实现有效耦合。转折透镜的原理如图 4 所示。 $r_1, r_2$ 分别为透镜前后光学面曲率半径, $h$ 为入射光线与前光学面交点到光轴的距离, $\alpha_i, U_i$ 分别为光线在第 $i$ 个光学面的入射角和折射角, $\mu_0$ 为入射光线初始视场角, $\mu_i$ 为第 $i$ 个光学面的像方视场角。光线在透镜中传输满足如下关系<sup>[14]</sup>:

$$h = r_1 \sin(\mu_0 - \alpha_1), \quad (1)$$

$$U_i = \arcsin\left(\frac{n_{i-1}}{n_i} \sin \alpha_i\right), \quad (2)$$

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\sin \mu_1 - \sin U_1}{\sin \alpha_2 + \sin \mu_1}, \quad (3)$$

式中: $n_i, n_{i-1}$ 分别为第 $i$ 个光学面的像方和物方的空间折射率。

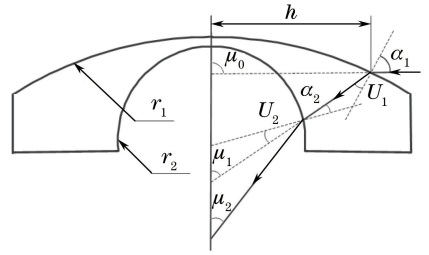


图 4 转折透镜光路示意图

Fig. 4 Optical path of turning lens

用压缩比 $\mu_0/\mu_2$ 衡量转折透镜视场角压缩效果,实际设计中可通过调节焦距来控制压缩比。转折透镜前光学面曲率半径 $r_1$ 在数值上等于 $R$ 。设定焦距 $f'$ 后,根据表达式 $f' = \frac{n' r_1 r_2}{(n' - 1)[n'(r_2 - r_1) + (n' - 1)d]}$ 可反推后光学面曲率半径 $r_2$ 。参照文献[14]提出的负弯月型透镜设计原则,设计转折透镜焦距为 $-20\text{ mm}$ ,转折透镜材料折射率 $n'$ 取 $1.713$ ,薄转折透镜厚度 $d$ 可忽略。计算得到后表面曲率半径为 $8.22\text{ mm}$ ,根据(1)~(3)式可知边缘光线对应的压缩比为 $2.49$ 。

### 2.3 复合抛物面聚光器模型

依据文献[15]可知,球面复眼透镜具有大视场的特性,但其实际聚光效果欠佳。根据文献[16]可知,CPC具有高增益的特性,可实现对入射光的再次会聚,考虑将其作为复眼透镜的后级融合组件。CPC的结构参照图 5,设计原则是不限制复眼大视场的特性。根据非成像光学边缘光线理论,经由复眼的入射光线被转折透镜按比例压缩。在理论上,到达CPC的最大入射角度为球面复眼透镜半视场角和转折透镜压缩比的比值,即 $36.14^\circ$ ,所以CPC的半视场角 $\omega$ 应大于或等于 $36.14^\circ$ ,几何聚光比 $C_g$ 为CPC入射口半径 $a$ 与出射口半径 $b$ 的比值,即

$$C_g = \frac{a}{b} = \frac{1}{\sin \omega}. \quad (4)$$

抛物线的焦距 $f$ 和高度 $l$ 分别为

$$f = b(1 + \sin \omega), \quad (5)$$

$$l = \frac{b(1 + \sin \omega) \cos \omega}{\sin^2 \omega} = \frac{f \cos \omega}{\sin^2 \omega}. \quad (6)$$

为匹配前级的光线,设计一个 $\omega$ 为 $40^\circ$ 的CPC,入射口半径 $a$ 与出射口半径 $b$ 分别为 $13.79\text{ mm}$ 和 $3\text{ mm}$ , $f = 4.93\text{ mm}$ , $l = 9.14\text{ mm}$ ,将数值导入

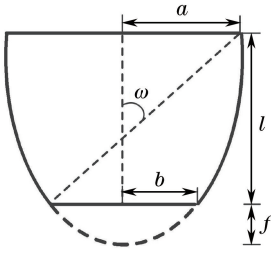


图 5 复合抛物面聚光器的结构图  
Fig. 5 Geometry of CPC

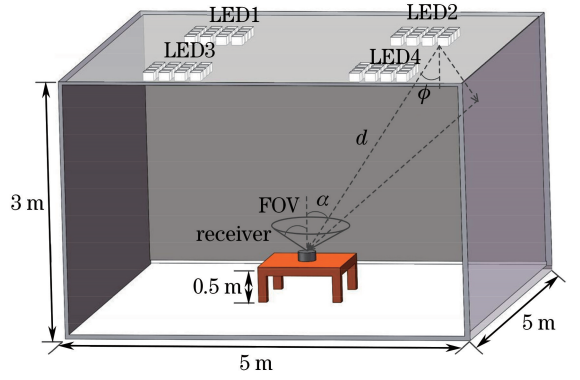


图 6 室内可见光通信漫射模型  
Fig. 6 Diffusing model of indoor VLC

TracePro 中构建 CPC 模型。

### 2.4 室内漫射模型

为验证基于所设计光学天线的 VLC 系统的抗遮挡性能,构建一个大小为 5 m×5 m×3 m 的室内漫射模型,如图 6 所示。采用 4 组 LED 阵列均匀对称地分布在房间天花板顶部,每组阵列包含 4×4 个 LED,每个 LED 的发射功率为 20 mW,发射半功率角为 60°,墙面反射率为 0.7,接收机置于桌面,离地 0.5 m。

针对 VLC 中的阴影遮挡问题,文献[17]认为非视距链路与视距链路组成的可见光漫射链路对提高抗遮挡性有一定作用。这里定义以发射端 LED 阵列与接收端之间无任何遮挡物时确定为无遮挡,发射端 LED 阵列仅能通过反射链路与探测器建立链接时确定为全遮挡。在不考虑墙面反射的情况下,视距链路信道直流增益  $H_{LOS}$  可写为

$$H_{LOS} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{det}T_s}{2\pi d^2} G_{opt} \cos^m \phi \cos \alpha, & 0 \leq \alpha \leq V_{FOV} \\ 0, & \alpha > V_{FOV} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $m$  为朗伯辐射系数; $\phi$  为光源的发射角; $d$  为 LED 灯与探测器间的视距距离; $A_{det}$  为探测器的有效面积; $T_s$  为光滤波器增益; $\alpha$  为可见光入射角; $V_{FOV}$  为接收视场角; $G_{opt} = \eta_{opt} C_w$  为接收机聚光器增益<sup>[18]</sup>,其中  $\eta_{opt}$  为接收机聚光器的光学效率, $C_w$  为接收机聚光器的几何聚光比。当考虑墙面一次反射时,到达接收机的非视距直流增益  $H_{NLOS}$  可表示为

$$H_{NLOS} = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{det}T_s}{2(\pi d_1 d_2)^2} \rho G_{opt} A_w \cos^m \phi \cos \alpha \cos \beta \cos \psi, & 0 \leq \alpha \leq V_{FOV} \\ 0, & \alpha > V_{FOV} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $d_1$  为 LED 灯与墙面反射点之间的距离; $d_2$  为墙面反射点与接收机之间的距离; $\rho$  为墙面反射系数; $A_w$  为反射面元的面积; $\beta$  为发送端 LED 的辐射角度; $\psi$  为墙面反射点的辐射角度。若  $P_t$  为发射机总功率,则系统接收总功率  $P_r$  可写为

$$P_r = \sum_{LEDs} \left( P_t H_{LOS} + \int_{walls} P_t dH_{NLOS} \right). \quad (9)$$

## 3 模型验证

### 3.1 球面复眼透镜非成像特性

球面复眼透镜作为天线的第一级聚光结构,其作用在于赋予光学天线大视场优势的同时,保证会聚尽量多的光能量进入下一级结构。以相邻子眼光轴夹角  $\Delta\theta$  为变量,分析复眼非成像特性,以提高复眼能量收集比率(复眼能量收集比率定义为经过复

眼后的光通量和光源发射总光通量的比值)。参考文献[19],采用六边形子眼组合以消除相邻子眼间死角对复眼非成像特性的影响。设定所有复眼的  $\theta_{max}$  为 72°,焦距为 40 mm,使  $\Delta\theta$  分别为 3°,6°,9°,12°,18°。在此基础上,设计不同光轴夹角的复眼透镜阵列,从而获得 5 组子眼排布密度不同的复眼透镜。作为对照组,具有相同焦距的单透镜也一并设计。各透镜模型如图 7 所示。

采用 TracePro 软件对同光源条件下不同光轴夹角的复眼及单透镜进行能量收集比率对比分析。考虑到探测面尺寸会对能量收集比率产生较大影响,对探测面  $S$  分别为 9,25,49 mm<sup>2</sup> 时的能量收集进行仿真,结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,当探测面面积一定时,随着视场角 (FOV) 增大,各光轴夹角  $\Delta\theta$  对应的复眼透镜



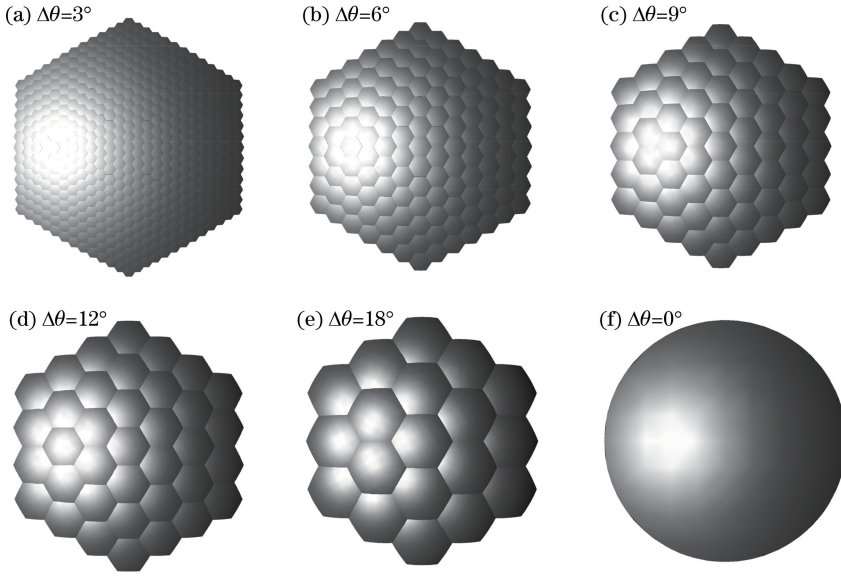


图 7 (a)~(e)不同光轴夹角的复眼透镜模型与(f)单透镜模型

Fig. 7 (a)-(e) Compound eye lens model with different angles of optical axis and (f) single len model

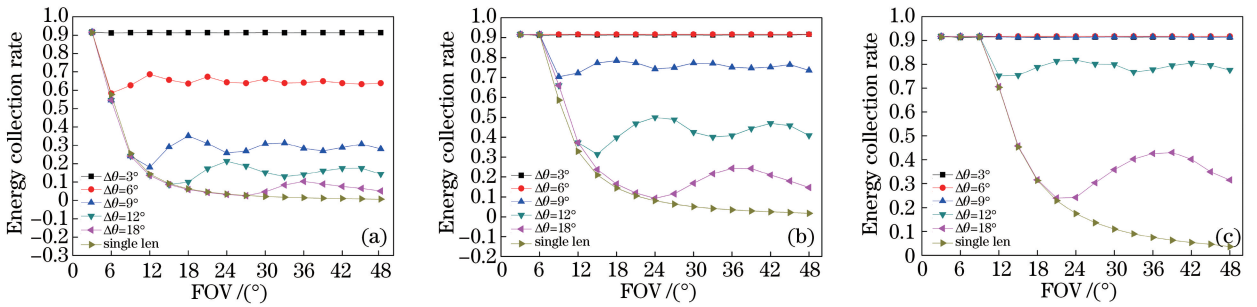


图 8 不同探测面面积时的能量收集比率。(a)  $S=9 \text{ mm}^2$ ; (b)  $S=25 \text{ mm}^2$ ; (c)  $S=49 \text{ mm}^2$

Fig. 8 Energy collection rates at different detector areas. (a)  $S=9 \text{ mm}^2$ ; (b)  $S=25 \text{ mm}^2$ ; (c)  $S=9 \text{ mm}^2$

能量收集比率总体上趋于衰减,其中单透镜的能量收集比率衰减最快。随  $\Delta\theta$  增大,能量收集比率曲线逐渐逼近于单透镜,即在  $\theta_{\max}$  一致的情况下,复眼透镜子眼光轴夹角越小,大视场优势越明显。当  $S=49 \text{ mm}^2$ ,  $\Delta\theta$  为  $9^\circ, 6^\circ, 3^\circ$  时,复眼能量收集比率曲线基本重合,即使继续减小光轴夹角,系统视场的提升并不明显,  $\Delta\theta$  存在局部最优值  $9^\circ$ 。同理可知,当  $S=25 \text{ mm}^2, S=9 \text{ mm}^2$  时,  $\Delta\theta$  存在局部最优值  $6^\circ$  和  $3^\circ$ 。这一现象表明,复眼能量收集比率的光轴夹角局部最优和探测器面积呈正相关。从图 8 还可以看出,当探测器面积一定时,随着光轴夹角减小,能量收集比率曲线出现起伏波动现象,这主要是由仿真光源在复眼光轴和轴外物点间随视场角变化而移动所致。当入射光沿光轴入射时,通过复眼的光通量高于光源在轴外物点时经过复眼的光通量。随光轴夹角  $\Delta\theta$  减小,单位角度上光轴分布密集度增加,曲线波动频率增大且幅度减小,当  $\Delta\theta$  小于对应

的局部最优值时,曲线逐渐趋于平稳。

为进一步研究能量收集比率与探测面尺寸的关系,以  $\Delta\theta=9^\circ$  的复眼透镜为例,分析 FOV 为  $30^\circ$  时,复眼透镜能量收集比率随探测面面积的变化规律,结果如图 9 所示。随探测器面积增大,能量收集比率逐渐变大。在探测器面积  $S=35 \text{ mm}^2$  时,能量收集比率

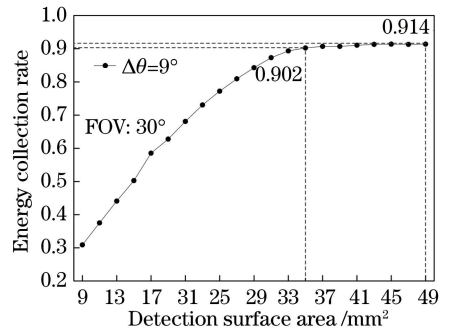


图 9 能量收集比率与探测面面积的关系

Fig. 9 Relationship between energy collection rate and detection surface area

达到 0.902;在探测面面积  $S = 49 \text{ mm}^2$  时,能量收集比率为 0.914。以上结果表明,在一定视场角情况下,虽然扩大探测面可有效提升复眼的能量收集比率,但对固定光轴夹角的复眼最大能量收集能力的影响较小。

### 3.2 复眼耦合天线增益特性

为验证复眼耦合光学天线在大视场角下的整体聚光性能,在同等条件下进一步对 CPC、球面复眼透镜和多级耦合光学天线(MCOA)的聚光性能进行对比分析。仿真中对复眼采用六边形密铺结构,其子眼焦距  $R = 40 \text{ mm}$ ,光轴夹角  $\Delta\theta = 3^\circ$ ;对 LED 选择朗伯光源模拟。光学增益的仿真结果如图 10 所示。由仿真结果可知,CPC 在小视场角情况下表现出较高增益,但随着 FOV 增大,其增益下降明显,在 FOV 为  $40^\circ$  时,增益已减小至 3.04。球面复眼透镜增益曲线总体较平稳,但由于聚焦效果有限,平均增益仅有 2.99。在小视场情况下,MCOA 的最高增益可达 56.45,略低于 CPC。当 FOV 大于  $20^\circ$  后,其增益高于 CPC 与复眼阵列。在 FOV 为  $40^\circ$  时,MCOA 比 CPC 增益高 19,这一结果证明 MCOA 较好地利用了复眼大视场与 CPC 高增益的特性,可兼具大视场与高增益的优势。

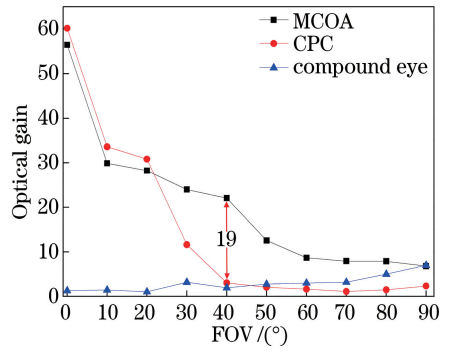


图 10 光学增益的仿真结果

Fig. 10 Simulated optical gains

### 3.3 室内可见光通信系统光功率分布特性

根据文献[20]可知,室内二次及二次以上反射信号功率对接收总功率的占比仅为 1.5%。为简化分析,仿真计算时仅考虑直射信号及一次反射信号功率对系统性能的影响。以图 4 室内漫射模型为基础,通过对 MCOA 是否应用在无遮挡和全遮挡两种信道场景中,得到无光学天线无遮挡模型、MCOA 无遮挡模型、无光学天线全遮挡模型、MCOA 全遮挡模型 4 种情况下,光学天线所在平面的接收功率分布,结果如图 11 所示。

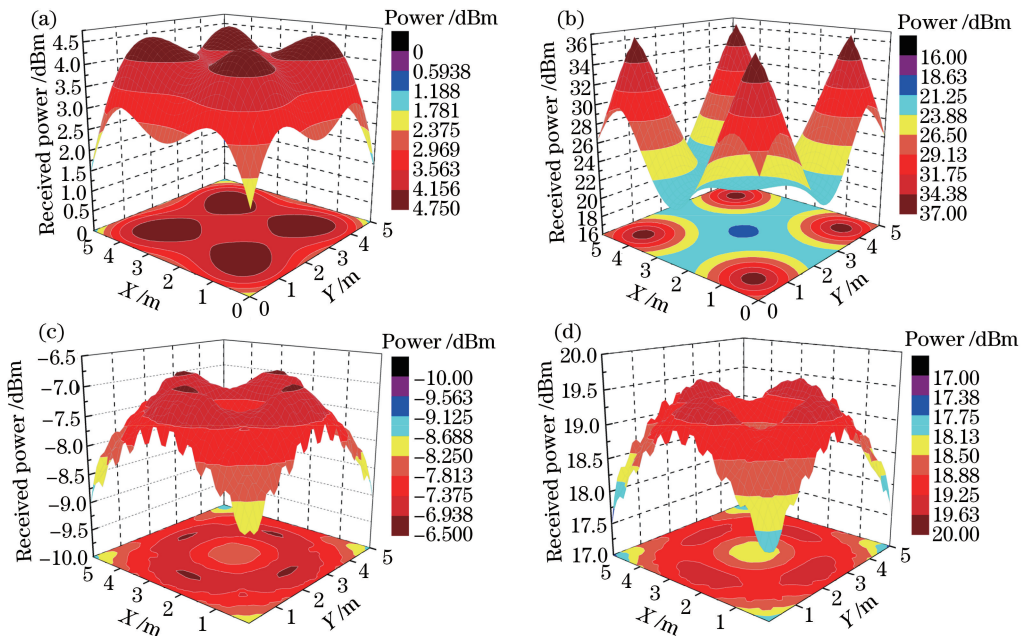


图 11 不同模型下的接收功率分布。(a) 无光学天线无遮挡模型;(b) MCOA 无遮挡模型;

(c) 无光学天线全遮挡模型;(d) MCOA 全遮挡模型

Fig. 11 Received power distributions at different models. (a) Unsheltered model without optical antenna; (b) unsheltered model with multilevel coupling optical antenna; (c) full occlusion model without optical antenna; (d) full occlusion model with multilevel coupling optical antenna

从图 11 可看出:采用 MCOA 为聚光器后,两种信道模型下室内 VLC 系统的接收功率都有较大提

升,平均接收功率提升了 25 dBm;在全遮挡模型下,MCOA 仍有较高增益,平均功率提高了 20 dBm。

这说明复眼多级耦合光学天线在无遮挡时能提供较高的增益,同时对提高抗遮挡性能也有比较积极的作用。

## 4 结 论

针对可见光通信系统的抗阴影遮挡问题,根据复眼的大视场和复合抛物面聚光器高增益的特点,设计了兼具大视场和高增益优势的仿生复眼多级耦合光学天线。通过数值仿真发现,当探测器面积一定时,随光轴夹角增大,复眼具有视场角逐步丧失的非成像特性,并在特定光轴夹角下出现能量收集比率的局部最优,该光轴夹角值随探测器面积的增大而增大。通过对不同的光学天线进行比较分析,验证了复眼多级耦合光学天线兼具大视场和高增益的特性,视场角可达  $90^\circ$  以上,最高增益可达 56.45。进一步通过对室内信道建模仿真分析可知,本研究设计的仿生复眼多级耦合光学天线在全遮挡情况下的平均接收功率相较于普通光学天线提高了 20 dBm,能有效解决阴影遮挡效应带来的光功率衰减问题。

## 参 考 文 献

- [1] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, *et al.* A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride  $\mu$ LED [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 637-640.
- [2] Huang X, Shi J, Li J, *et al.* A Gb/s VLC transmission using hardware preequalization circuit [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(18): 1915-1918.
- [3] Lu I C, Lai C H, Yeh C H, *et al.* 6.36 Gbit/s RGB LED-based WDM MIMO visible light communication system employing OFDM modulation [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2017: 16929996.
- [4] Wang Y, Wu X, Haas H. Load balancing game with shadowing effect for indoor hybrid LiFi/RF networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4): 2366-2378.
- [5] Li L, Tian H, Fan B. A joint resources allocation approach for hybrid visible light communication and LTE system [C]. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, IET, 2016: 15662822.
- [6] Hussein A T, Alresheedi M T, Elmirghani J M H. Fast and efficient adaptation techniques for visible light communication systems[J]. IEEE/OSA Journal

- of Optical Communications & Networking, 2016, 8(6): 382-397.
- [7] Liu X, Liang Z, Wang X, *et al.* Wide FOV receiving device for indoor visible light communication systems based on the MIMO principle [C]. Proceedings of SPIE, 2012, 8555(3): 85551S.
- [8] Chen T, Liu L, Tu B, *et al.* High-spatial-diversity imaging receiver using fisheye lens for indoor MIMO VLCs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(22): 2260-2263.
- [9] Dambul K D, O'Brien D C, Faulkner G. Indoor optical wireless MIMO system with an imaging receiver [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(2): 97-99.
- [10] Azhar A H, Tran T, O'Brien D. A Gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 171-174.
- [11] Wei L, Zhang H, Song J. Experimental demonstration of a cubic receiver based MIMO visible light communication system [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 7900107.
- [12] Burton A, Minh H L, Ghassemlooy Z, *et al.* Performance analysis for  $180^\circ$  receiver in visible light communications [C]. IEEE Fourth International Conference on Communications and Electronics, 2012: 13037209.
- [13] Tang X, Pan D, Zhang X, *et al.* A novel receiver employing a compound-eye lens and a frequency domain synchronization algorithm for multiple-input single-output visible light communication system [C]. IEEE International Conference on Optical Communications and Networks, 2015: 15382325.
- [14] Lü L J, Wu X W. Design of initial structure of fisheye lens [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0208001.  
吕丽军, 吴学伟. 鱼镜头初始结构的设计 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0208001.
- [15] Cheng Y, Cao J, Hao Q, *et al.* Compound eye and retina-like combination sensor with a large field of view based on a space-variant curved micro lens array [J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3502-3509.
- [16] Yun W, Tian L, Xiang L, *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.
- [17] Miramirkhani F, Uysal M. Channel modeling and characterization for visible light communications [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 7905616
- [18] 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.
- [19] Liu Y S. The model design of artificial optical compound eye and its path planning [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- 刘业胜. 曲面仿生光学复眼建模设计及其加工路径规划研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [20] Kominé T. Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.