



# 可见光通信中光学天线的研究

## 摘要

可见光通信作为一种结合了照明与通信的新型无线通信技术,近几年成为一个研究的热点.光学天线是可见光通信系统中的重要组成部分,在优化光能分布、提高接收功率、提升系统信噪比和通信质量方面起重要作用.目前国内外对于光学天线的研究可以分为发射天线和接收天线两个部分.发射天线一般与LED光学设计相结合,按照配光方式可以分为准直型、均匀照明型和聚焦型等类型.接收天线采用复合抛物面聚光器、菲涅尔透镜等光学元件作为光学接收前端,主要目的是提高接收信号的功率.本文介绍了近年来国内外光学天线的研究进展,评价并比较了各种类型光学天线的性能,并对光学天线的发展趋势做出了展望.

## 关键词

可见光通信;光学天线;发射天线;接收天线

中图分类号 TN929;TN821

文献标志码 A

收稿日期 2017-01-03

资助项目 国家自然科学基金(61475094,61675025)

## 作者简介

吴楠,男,硕士生,主要研究方向为可见光通信.sirius112358@163.com

杨爱英(通信作者),女,博士,教授,主要研究方向为光纤通信和可见光通信.yangaiying@bit.edu.cn

## 0 引言

近年来随着半导体照明的兴起,白光LED因其低功耗、使用寿命长、体积小、不产生电磁辐射等优点正逐渐取代传统的白炽灯和节能灯成为下一代照明的选择<sup>[1]</sup>.基于白光LED照明的可见光通信技术将经过调制的信号加载在LED上以可见光的形式发射出去,在接收端采用光电探测器对信号进行接收和解调,从而实现信息的传输.相比于传统的射频通信,可见光通信具有以下优点:1)可见光通信使用的是可见光波段(380~780 nm)进行信号的传输,可见光波段具有约450 THz的巨大带宽资源,并且不占用传统的无线通信波段;2)可见光通信使用LED作为系统的信号发射端,LED在实现照明的同时又实现了通信的功能,对于室内无线通信来说覆盖范围广,仅需对现有的设备进行简单改造即可实现大范围通信的覆盖;3)相比于传统的无线通信,可见光通信的通信速率更快,可见光通信最新的实验速率已经可以达到50 Gb/s<sup>[2]</sup>.

光学天线是可见光通信系统中的重要组成部分.光学天线指的是在可见光通信系统的发射端和接收端使用的透镜等光学元件.通过对光学天线的设计可以使光源覆盖面积增加、接收信号功率增强,从而提高整个光学系统的通信质量.因此,光学天线的研究对于可见光通信系统有着重要意义.光学天线可以分为发射天线和接收天线.发射天线用在LED发射端,一般采用非成像光学的方法对LED进行二次光学设计,从而改变LED的光能分布,实现提高光线覆盖面积或者增加传输距离等目的.按照配光方式光学发射天线可以分为准直型发射天线、均匀照明型发射天线和聚焦型发射天线等类型.接收天线是在光电探测器前端采用各种光学元件,一般目的是使更多的光线能被探测器接收,从而提高光电探测器接收到的光功率,提升通信质量.复合抛物面聚光器、菲涅尔透镜等光学元件常用来作为光学系统中的接收天线.本文接下来对光学天线的设计方法、典型实例进行介绍,并且就其对于可见光通信方面指标的提升做出评价.光学天线分类如图1所示.

## 1 基本原理

在对光学天线进行设计时主要遵循几何光学基本原理、光线追迹公式以及非成像光学理论,其中最重要的是非成像光学的基本理

1 北京理工大学 光电学院,北京,100081

2 北京邮电大学 电子工程学院,北京,100876

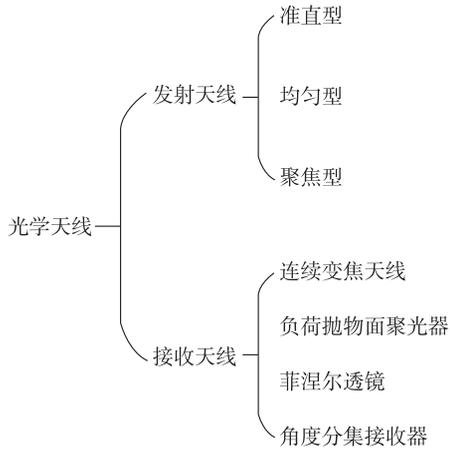


Fig. 1 Classification of optical antenna

论<sup>[3]</sup>.光学天线作为光通信系统中的重要组成部分,需要以光学增益、信噪比等参数为标准对光学天线的设计质量做出评价.

### 1.1 非成像光学

相比于成像光学,非成像光学更多关注的是能量的重新分配和光能利用率的提高.非成像光学研究的问题主要可以分为光线耦合和给定光分布两类<sup>[4]</sup>.光线耦合最早用于太阳能的收集,后来随着照明技术的发展,如何根据照明需求对光源的光能进行重新分配逐渐成为了研究的热点.在光学系统中,设计光学天线主要遵循非成像光学的基本原理,对发射端的光能重新分配,并且提高接收端的光能收集效率,从而提高通信质量.

非成像光学主要有三大基本原理:边缘光线理论、马吕斯定律和费马原理,其中最主要的是边缘光线理论<sup>[5-6]</sup>.边缘光线原理主要内容是在非成像光学系统中,光源发射出的边缘光线经过光学系统后会在接收端的边缘被接收<sup>[7]</sup>.根据边缘光线原理,在设计光学天线时只要考虑入射光线和接收光线的最大角度即可,不要求最大角度以内的光线精准成像.马吕斯定律和费马原理则对光线在传播过程中波面、光程的关系进行了补充说明.

### 1.2 光学天线基本参数

1) 光斑能量均匀性.光斑能量均匀性定义是照明范围内照度的最小值与平均值的比值.在可见光通信系统中,尤其是室内环境下,LED发射端既要发送信息又要承担照明的功能,所以光斑能量的均匀性是衡量发射端光学天线设计的重要指标.目前的研究主要利用自由曲面的方法设计均匀照明的透

镜,以提高光斑能量的均匀性.能量均匀的光斑不仅能满足照明标准的要求,还能使光信号均匀覆盖,提高整体的光能利用率.

2) 聚光比.在非成像光学中,聚光比可以分为几何聚光比和光学聚光比.几何聚光比定义是光学天线入射口径的面积与出射口径的面积比值.光学聚光比是几何聚光比与光效的乘积.由于光通信系统接收端尺寸一般较小,所以一般在设计光学天线的过程中追求大的几何聚光比,将更多的光线经过空间上的收束后传递到接收端.

3) 光学增益.光学增益定义为探测器加光学天线和未加光学天线时接收光功率的比值,也就是加光学天线之后的等效有效面积  $A_1$  与未加光学天线时有效面积  $A_0$  之比(光功率与有效面积成正比).光学增益是衡量一个光学天线的重要参数.在光通信系统中一般接收端需要大光学增益的光学天线,以提高探测器接收到的光功率.

4) 视场角.光学天线视场角指光线入射到接收端时与接收天线中心轴的最大夹角,超过这一夹角的光线则无法被接收端接收.视场角是衡量接收天线的重要指标,一般来说接收天线视场角越大,能接收到的光线就越多.以复合抛物面聚光器为例,接收端视场角的变化会引起整个系统光学增益、天线尺寸等方面的变化.一般在设计光学天线时要根据具体的需求选择合适的视场角.

5) 信噪比.信噪比(SNR)是衡量通信系统的重要指标,可见光通信系统作为通信系统的一种,所以必须通过分析光学天线对信噪比的影响来评价光学天线对可见光通信系统通信质量的影响.信噪比定义是光信号与噪声的比值:

$$R_{SN} = \max\left(\frac{R^2 P_r^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

其中  $R$  是探测器的响应率,  $P_r$  是探测器接收的光功率,  $\sigma_i$  是噪声.可见光通信系统中主要考虑背景噪声、电路噪声和散粒噪声.

## 2 发射天线

可见光通信采用LED作为信号的发送端.LED属于朗伯照明体,直接用LED芯片发送信号存在照度分布不理想、光能利用率低的问题.因此,一般在发射端对LED进行二次光学设计,对其光束进行收束、准直等处理.目前国内外对LED光学天线的设计主要采用自由曲面的方法,按照设计的功能大致可

以分为准直型透镜、均匀照明型透镜和聚焦透镜等。下面将对这几种类型透镜的研究做详细说明。

## 2.1 准直型透镜

准直型透镜可以减小 LED 光线的出射角度,将绝大部分光线收束成一个较小的角度发射,这样可以提高光束的能量,提升光信号传输的距离。2010 年西班牙的 Molini 等<sup>[8]</sup>设计了一种抛物线椭圆形 LED 准直器并进行了仿真,结果表明该聚光器光线出射角为  $1^\circ$  左右,并且光能利用率达到了 98%。2012 年,Chen 等<sup>[9]</sup>采用了自由曲面和几何光学的方法设计并制造了一种 LED 准直透镜,该 LED 透镜高度为 28 mm,入射孔和出射孔直径分别为 18 和 30 mm。对该准直透镜原型的实验结果表明该透镜的光束角为  $4.75^\circ$ ,并且光能利用率高达 90.3%。2013 年 Shen 等<sup>[10]</sup>对设计的 LED 聚光透镜进行仿真,光源采用  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  的 LED 芯片,结果表明该聚光器光能利用率达到 95%,并且在传输距离达到 500 m 时绝大部分能量都集中在半径不超过 8 m 的光斑内。2016 年 Chen 等<sup>[11]</sup>设计了一种用于长距离可见光通信的 LED 聚光透镜,系统使用 1 W LED 作为发射端,采用 OOK 调制编码,使用该聚光透镜可以将光束角压缩至  $1.7^\circ$ ,并且在 90 m 的传输距离上达到 210 Mbit/s 的传输速率和  $10^{-3}$  的误码率。

上述文献中的准直透镜结构较为类似,以文献<sup>[9]</sup>为例,准直透镜的结构一般如图 2 所示。该透镜由 5 个曲面组成,其中②为球面,③为椭圆面,其他 3 个曲面为自由曲面。 $F$  为曲面①和③的焦点。整个透镜可以分为 A、B、C 3 个区域。光线以大角度入射到 A 区域时在曲面③发生全反射,在反射光光线到达焦点  $F$  之前在曲面⑤上发生折射后与光轴平行射出。入射到区域 B 的光线在曲面④上折射后平行于光轴射出。光线以小角度入射到 C 区域时在曲面①上发生折射,折射光线到达焦点  $F$  之前在曲面⑤上发生折射后与光轴平行射出。采用准直透镜后光源发出的任意角度光线都能经过反射和折射后平行射出,减少了光能损失,提高了传输能量的强度和传输距离。

## 2.2 均匀照明型透镜

在室内可见光通信系统中,LED 发射端同时承担照明和通信的功能。LED 属于朗伯照明体,LED 发出的光在照明平面上分布不均匀,中心照度高,随着水平距离的增加照度迅速衰减。LED 固有的光学特性不仅不适用于照明,并且光能利用率低,作为光通

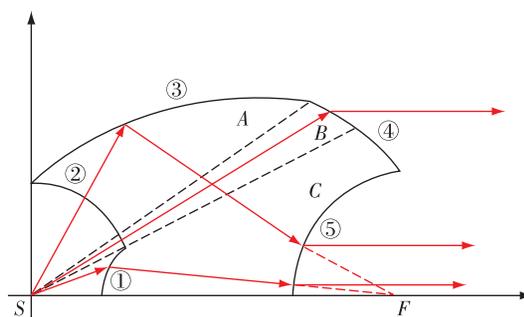


图 2 准直型透镜二维结构<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Two-dimensional structure of collimating lens<sup>[9]</sup>

信系统的发射端效率较低。针对这一问题,国内外主要采用自由曲面的方法设计透镜,改变 LED 的光能分布,获得均匀照明的效果,并且提升光能利用率。

2010 年美国的 Fournier 等<sup>[12]</sup>基于光源到目标平面的能量映射,采用划分网格的方法设计了一种均匀照明的 LED 反射杯,仿真结果表明该反射杯提高了光学系统照明的均匀性和光能利用率。

2008 年浙江大学的丁毅等<sup>[13]</sup>从折射定律和能量守恒出发,采用构建一阶微分方程组的方法求解透镜的形状,设计了一种均匀矩形光斑透镜。该透镜长 40 mm、宽 36 mm、高 10 mm,仿真结果表明使用该透镜后光能利用率达到了 95.56%,中心部分照明均匀度达到了 90%左右。

2015 年台湾的 Chen 等<sup>[14]</sup>采用光源-目标能量映射的方法求解自由曲面形状,设计了一种圆形光斑的均匀照明透镜,透镜形状如图 3 所示。该透镜底面直径为 10.8 mm、厚度为 10 mm。照明仿真结果表明使用该透镜后照明均匀度达到了 80%,光能利用率达到了 90%,并且出射光线半角有  $45^\circ$ 。

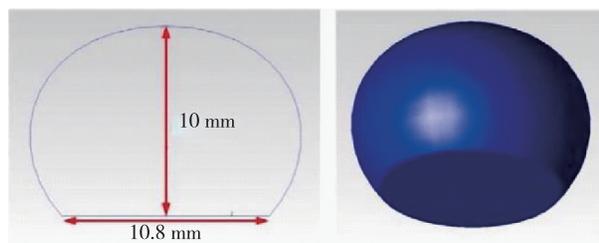


图 3 台湾 Chen 等<sup>[14]</sup>设计的均匀透镜尺寸及形状

Fig. 3 Uniform illumination lens designed by Chen<sup>[14]</sup> of China's Taiwan

从上述文献的研究中可以看出,均匀照明型光学天线用作光学系统的发射端可以获得均匀分布的照度,并且可以提高光能利用率。这不仅能够提高

LED 的照明效果,还能提高光通信系统发射端发射的能量.由于照明需求,这种光学天线发射角一般较大,比较适合用作短距离室内光通信系统的发射端.

### 2.3 聚焦型透镜

在可见光通信系统中,由于 LED 调制带宽的影响,系统的通信速率会受到限制.此外,由于光线在信道中传播时存在衰减,系统的通信距离也会受到限制.

为了解决通信速率和传输距离的限制,2013 年韩国的 Kim<sup>[15]</sup> 提出一种聚焦型的发射天线,系统结构如图 4 所示.该系统采用光束自动聚焦技术将光线聚焦在目标位置,以提高整个通信系统的信噪比.系统的发射端采用空间光调制的方法,并且配合菲涅尔透镜使空间光调制系统起到类似于动态衍射透镜的作用,实验结果表明该方法聚焦光线可以使系统的信噪比提高 13.4 dB,通信距离提高了两倍<sup>[15-17]</sup>.

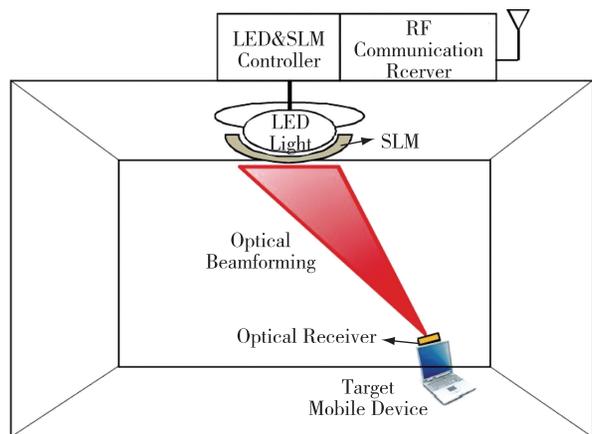


图 4 Kim<sup>[15-17]</sup>设计的自聚焦光学系统结构  
Fig. 4 Self-focusing optical system designed by Sung-Man Kim<sup>[15-17]</sup> of South Korea

由于光束自聚焦技术不依赖电信号调制,因此可以提升接收信噪比,从而提升系统的数据传输速率.此外,通过聚焦光线到焦点上,可以提升接收光功率,从而提升了系统的传输距离.

### 2.4 发射天线总结

从以上关于各种光学天线的研究进展中可以看出,目前对于光学天线的设计主要基于几何光学的基本原理和非成像光学的相关理论.对于发射天线的设计更多的是与 LED 的照明设计相结合,各种类型的发射光线共同特点是尽量使更多的光线照射到目标平面上,以提高光能利用率.对于准直型光学天

线,各文献中的结构较为类似,都是对于大角度和小角度发射光线分别采用全反射和折射的方法,使 LED 发出的光线经过透镜后以较小的角度平行射出.准直型天线一般光能利用率高、出射角小,适用于长距离光通信传输,缺点是不适用于照明.均匀照明的光学天线主要采用自由曲面的方法设计透镜曲面,由于在自由曲面设计方法中存在网格划分法、裁剪法、数值优化法、偏微分方程法等多种方法,因此透镜的形状一般各不相同,并且可以通过控制自由曲面的形状来灵活控制照明区域光斑的形状和能量分布.均匀照明型光学天线与 LED 照明结合最为紧密,优点是光能分布均匀,光束角一般较大,能量利用率高,适用于室内光通信环境.聚焦型光学天线可以将光束聚焦在一个点上,提高接收端的信噪比,缺点是光能利用率较低.各种类型的光学发射天线的性能对比如表 1 所示.

表 1 各类光学发射天线性能对比

发射天线	光束角	光能利用率	通信距离	照明均匀性
准直型	小,一般在 5° 以内	高	长	低
均匀型	较大	高	短	高
聚焦型	较大	低	中等	中等

## 3 接收天线

### 3.1 连续变焦光学天线

针对聚焦天线在接收端距离和位置变化时接收信号功率变化的问题,北京理工大学的张学彬等<sup>[18]</sup>设计了一种连续变焦的光学天线,如图 5 所示.整个接收天线由一个直角反射棱镜和一组球面透镜组成.棱镜起到折叠光路、减小整个光学系统尺寸的作用,透镜 1—3 是固定组,扩大了视场角.4 和 5 组成变焦透镜,通过移动 4 和 5 的位置改变系统的焦距.6 为补偿透镜,通过移动 6 的位置来补偿像面的位移.7 为探测器.系统尺寸为 18 mm×6 mm,变焦倍率为 2.44,视场角范围 18°~48°,系统的光学增益为 16.8.仿真结果表明采用变焦天线可以有效提高通信系统接收信号的增益和信噪比,对通信质量有较大提升.

### 3.2 复合抛物面聚光器

复合抛物面聚光器 (Compound Parabolic Concentrator, CPC) 是一种常见的光学接收器,其基本结构如图 6 所示.

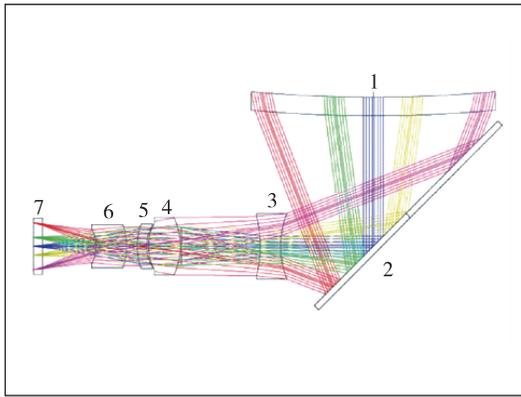


图5 张学彬等<sup>[18]</sup>设计的变焦光学接收系统

Fig. 5 Continuous zoom antenna designed by ZHANG Xuebin<sup>[18]</sup>

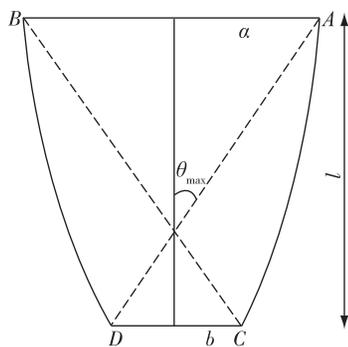


图6 复合抛物面聚光器二维结构

Fig. 6 Two-dimensional structure of composite parabolic concentrator

CPC 的侧面为两个对称的抛物面,CPC 入射孔径和出射孔的直径比值决定了视场角  $\theta$ ,小于视场角入射的光线会经过侧壁多次反射之后被底部的接收器接收.

国内外对于 CPC 的研究较多,王云等<sup>[19]</sup>对 CPC 作为可见光通信系统光学接收天线的性能做了研究和仿真,分别分析了不同光源和不同视场角的 CPC 对于接收增益的影响,结果表明  $60^\circ$  视场角的 CPC 对于 LOS 和 NLOS 信道的接收功率分别提高了 4.39 和 4.77 dBm.瑞士的 Cooper 等<sup>[20]</sup>对传统的 CPC 进行了改进,改变了入射孔的形状,分析了不同多边形的入射孔对于聚光效率的影响,结果表明在各种形状中四边形的聚光性能最好,如图 7 所示.四边形无缝拼接的特点可以大幅提高多个 CPC 阵列整体的光能利用率<sup>[20]</sup>.

### 3.3 菲涅尔透镜

菲涅尔透镜与传统透镜相比,具有会聚能力强、

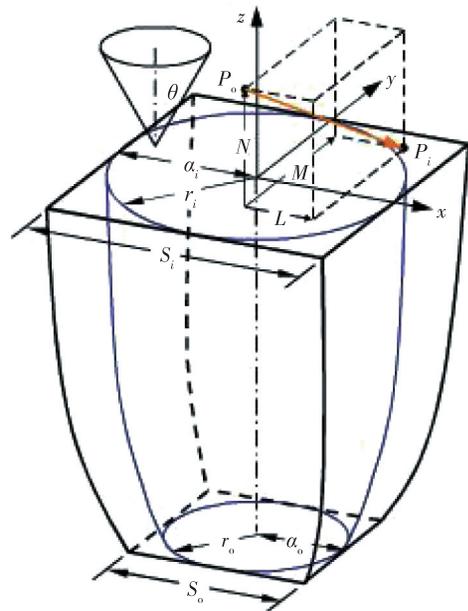


图7 Cooper 等<sup>[20]</sup>设计的四边形孔径 CPC

Fig. 7 Polygonal aperture CPC designed by Cooper<sup>[20]</sup>

体积小、质量轻、量化生产成本低等优势,现阶段主要应用于包括投影及太阳能光伏领域<sup>[21-23]</sup>.菲涅尔透镜的一般结构如图 8 所示.

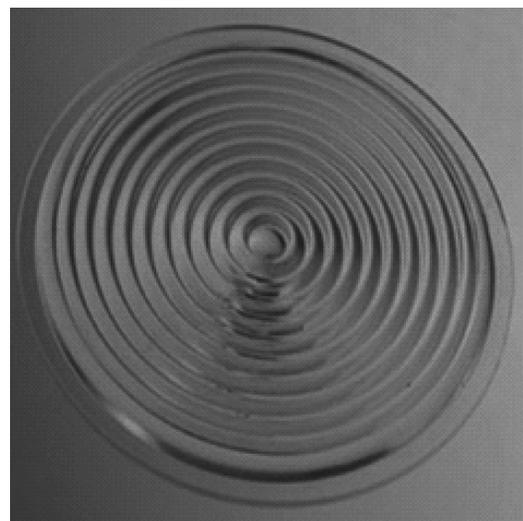


图8 菲涅尔透镜

Fig. 8 Fresnel lens

菲涅尔透镜的一面一般为平面(平面菲涅尔透镜)或者曲面(曲面菲涅尔透镜),另一面为一组同心的棱形槽,每个棱形槽都可以对入射光线起到折射的作用.菲涅尔透镜可以将平行入射的光线聚焦在一个焦点(点聚焦)或一条线上(线聚焦).

2011 年西安理工大学的赵太飞等<sup>[24]</sup>在普通的

半球透镜前面添加了菲涅尔透镜组成了一个二级光学系统,入射光线先由菲涅尔透镜进行初步聚光,再由半球透镜将光线聚焦在接收器处.仿真结果表明使用菲涅尔透镜可以将接收系统的光学增益提高近一倍<sup>[24]</sup>.2012年南京邮电大学的徐宁等<sup>[25]</sup>设计了一种弯月形复合菲涅尔透镜,在光源光功率为20 mW的情况下探测器可以接收到18 mW的光能量,利用率达到了90%.2015年李湘等<sup>[26]</sup>对菲涅尔透镜作为光学接收天线的相关问题进行了研究,设计了一种等齿距平面菲涅尔透镜,仿真结果表明平面点聚焦菲涅尔透镜的光学效率可以达到92.1%,可以有效提高光通信系统接收端的光学增益.

### 3.4 角度分集接收器

针对光通信系统中存在遮挡导致无法通信以及码间串扰等问题,诺森比亚大学的Burton等<sup>[27]</sup>和南京邮电大学的孔梅梅等<sup>[28]</sup>都提出了一种采用角度分集思想的多面体式光学接收器.该类多面光学接收器结构如图9所示.每个探测器的视场角为 $60^\circ$ ,多个探测器可以保证水平视场 $360^\circ$ 、垂直市场 $180^\circ$ 的全覆盖接收.Burton等<sup>[27]</sup>的研究表明由于多个探测器的存在,该接收天线能实现全向的光信号接收,并且系统能实现较高的信噪比,误码率仅为 $10^{-6}$ .孔梅梅等<sup>[28]</sup>研究了单个光锥接收到的光强随入射角的变化关系,在此基础上确定了光锥两两之间的夹角,给出了具体的布局设计方案,并根据接收光强的情况研究了角度分集接收技术对于系统码间干扰的影响.

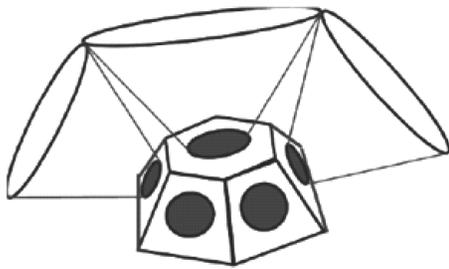


图9 角度分集接收器<sup>[27]</sup>

Fig. 9 Angle diversity receiving antenna<sup>[27]</sup>

### 3.5 接收天线总结

光学接收天线作为光学系统的接收前端,其主要目的是使探测器接收到更多的能量,提升系统的信噪比.本文讨论的各接收天线中,连续变焦天线采用的透镜均为普通球面镜,成本低,并且有变焦接收

的功能.复合抛物面聚光器的视场角和增益都与其上下孔的尺寸有关,优点是可以通过截断来控制视场角,比较适合用作可见光通信系统的接收天线.菲涅尔透镜尺寸较小,便于灵活应用在各种光学系统中,缺点是只对平行光有较好的聚焦效果.角度分集接收器优点是视场角很大,能够实现全角度覆盖接收,一定程度上能克服遮挡带来的信道损失.但角度分集接收器由多个光锥组成,增加了系统的复杂度.各种类型的光学接收天线的性能比较如表2所示.

表2 各类光学接收天线性能对比

Table 2 Performance comparison of receiving antennas

接收天线	视场角	尺寸	增益
连续变焦	中等	较小	中等
复合抛物面聚光器	与截取比有关	可变	与视场角有关
菲涅尔透镜	较小	小	高
角度分集接收器	全向	中等	较高

## 4 光学天线展望

光学天线作为光通信系统的重要组成部分,对于系统通信质量的提升有着重大意义.然而,现阶段光学天线研究方面还存在一些问题与挑战.首先是天线设计的优化方面,由于光学天线尤其是自由曲面透镜的形状一般较为复杂,因此其设计的流程步骤较为繁琐,如何优化算法实现快速准确的光学天线设计是今后研究的重点;其次,光学天线一般加工复杂、成本较高,如何降低生产成本是光学天线能否得到应用的关键所在;最后,随着光通信系统的发展,发射机和接收机向小型化、便携化方向发展,光学天线的尺寸会影响其在光通信系统中应用的前景.光学收发天线小尺寸、轻型化会是今后设计的发展趋势,光学天线也会在可见光通信系统中发挥更加重要的作用.

## 5 结语

可见光通信在国内外已经有了10多年的研究历史,目前研究的焦点主要集中在提升通信速率和系统的稳定性等方面.光学天线的研究对于可见光通信具有重要意义,通过光学天线的设计可以同时优化可见光通信系统在通信和照明两个方面的性能.此外,光学天线还可以在在一定程度上克服光通信系统信道遮挡和码间串扰等问题.随着光学设计研究的发展,光学天线会在可见光通信系统中发挥更

加重要的作用。

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Schubert E F, Kim J K. Solid-state light sources getting smart[J]. *Science*, 2005, 308(5726): 1274-1278
- [ 2 ] 迟楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013  
CHI Nan. LED visible light communication technologies [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013
- [ 3 ] 张学彬. 可见光无线通信光学接收天线设计[D]. 北京: 北京理工大学光电学院, 2015  
ZHANG Xuebin. Optical receiving antenna design for visible light communication[D]. Beijing: School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, 2015
- [ 4 ] 罗毅, 张贤鹏, 王霖, 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 963-971  
LUO Yi, ZHANG Xianpeng, WANG Lin, et al. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 963-971
- [ 5 ] 梁雪. LED(准直)光源的 SMS 非成像光学设计方法[D]. 浙江: 浙江工业大学理学院, 2013  
LIANG Xue. Simultaneously multiple surface design method for LED collimator based on nonimaging optics [D]. Zhejiang: College of Science, Zhejiang University of Technology, 2013
- [ 6 ] 张丽. 高匀光性菲涅尔聚光光学系统的设计[D]. 北京: 中国计量学院光学与电子科技学院, 2013  
ZHANG Li. Design of Fresnel concentrating optical system with high homogeneity of energy distribution[D]. Beijing: College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, 2013
- [ 7 ] Chaves J. Introduction to nonimaging optics[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2015
- [ 8 ] Vázquez-Moliní D, Montés M G, Fernández-Balbuena A A, et al. High-efficiency light-emitting diode collimator [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(12): 123001-123001-8
- [ 9 ] Chen J J, Wang T Y, Huang K L, et al. Freeform lens design for LED collimating illumination [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10984-10995
- [ 10 ] Shen Y, Huang Y, Xing H. Design of collimating system for LED source[C]//International Conference on Optical Instruments and Technology (OIT2013), 2013: 90420V-7
- [ 11 ] Chen Y, Wen S, Wu Y, et al. Long-range visible light communication system based on LED collimating lens [J]. *Optics Communications*, 2016, 377: 83-88
- [ 12 ] Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5295-5304
- [ 13 ] Ding Y, Liu X, Zheng Z R, et al. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12958-12966
- [ 14 ] Chen J J, Huang Z Y, Liu T S, et al. Freeform lens design for light-emitting diode uniform illumination by using a method of source-target luminous intensity mapping [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 146-152
- [ 15 ] Kim S M. Performance improvement of visible light communications using optical beamforming [C]//2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2013: 362-365
- [ 16 ] Kim S M. Wireless optical energy transmission using optical beamforming [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(4): 3205
- [ 17 ] Kim S M. Wireless visible light communication technology using optical beamforming [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 106101
- [ 18 ] 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
- [ 19 ] 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): 249-256  
WANG Yun, LAN Tian, LI Xiang, 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): 249-256
- [ 20 ] Cooper T, Dähler F, Ambrosetti G, et al. Performance of compound parabolic concentrators with polygonal apertures [J]. *Solar Energy*, 2013, 95(5): 308-318
- [ 21 ] 王刚, 胡芑, 陈则韶, 等. 两级透射-反射聚光变频电热联产系统设计和分析 [J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 239-243  
WANG Gang, HU Peng, CHEN Zeshao, et al. Design and analysis of two-stage transmitted-reflected concentration PV/thermal system with spectral beam splitter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 239-243
- [ 22 ] 程颖. 聚光光伏系统聚光器的初步研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器及光电子工程学院, 2009  
CHENG Ying. Preliminary study of the solar concentrators of concentrator photovoltaic System [D]. Tianjin: School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, 2009
- [ 23 ] 刘永强. 均匀聚光菲涅尔透镜设计及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 2012  
LIU Yongqiang. Design and performance research of the uniform concentrating Fresnel lens [D]. Harbin: School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, 2012
- [ 24 ] 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  
ZHAO Taifei, KE Xizheng, LIANG Wei, et al. Design of two levels optical receiver system for UV scattering communication [J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2011, 33(2): 310-314
- [ 25 ] 徐宁, 徐丹彤, 杨庚, 等. 可见光通信中菲涅尔透镜仿真设计与优化 [J]. *量子电子学报*, 2012, 29(5): 629-636  
XU Ning, XU Dantong, YANG Geng, et al. Simulating and optimizing of Fresnel lens in visible light communications [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(5): 629-636
- [ 26 ] 李湘, 蓝天, 王云, 等. 室内可见光通信系统中菲涅尔

- 透镜接收天线的设计研究[J].物理学报,2015,64(2):112-118  
 LI Xiang, LAN Tian, WANG Yun, et al. Design and study of Fresnel lens for an antenna in indoor visible light communication system [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2):112-118
- [27] Burton A, Le Minh H, Ghassemlooy Z, et al. Performance analysis for 180° receiver in visible light communications [C]//IEEE Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), 2012:48-53
- [28] 孔梅梅,梁忠诚,张国虎.采用角度分集接收技术的光学天线设计[J].红外与激光工程,2012,41(3):750-754  
 KONG Meimei, LIANG Zhongcheng, ZHANG Guohu. Optical receiving antenna design based on angle diversity technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3):750-754

## Research of optical antenna technology in visible light communication

WU Nan<sup>1</sup> YANG Aiyong<sup>1</sup> FENG Lihui<sup>1</sup> XIN Xiangjun<sup>2</sup>

1 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

2 School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

**Abstract** As a new wireless communication technology combined illumination with communication, visible light communication has become attractive recently. Optical antenna plays a significant role in visible light communication system for it can optimize the light intensity distribution, enhance the received optical power, and improve the signal to noise ratio of the system. Research on optical antenna is mainly focused on the transmitting antenna or the receiving antenna. Transmitting antenna is usually combined with LED optical design, which can be divided into collimation type, uniform illumination type, and focus type according to the light intensity distribution. Receiving antenna uses composite parabolic concentrator (CPC), Fresnel lens or other optical components as the optical receiving front end to enhance the received optical power. In this paper, the research of optical antenna at home and abroad is introduced. The optical performance of the optical antenna is evaluated and compared, and finally the development trend of the optical antenna is forecasted.

**Key words** visible light communication; optical antenna; transmitting antenna; receiving antenna