

# 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线

张学彬 唐 义 崔 璐 朱庆炜 白廷柱

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,北京 100081

**摘要** 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。相比同类多光谱通信光学系统,该光学天线具有信道数多、增益大、效率高等优点。经过理论分析,提出了采用双柱面镜结合反射式光栅的天线结构,在光谱维保持较高的光谱分辨率,增加信道数,提高系统的通信速率;同时缩小光斑空间维的大小,提高系统的增益。仿真分析表明,该光学天线可以同时高效地对8个不同的单光谱信号进行探测接收,视场角高达 $18^\circ \times 0.4^\circ$ ,增益为12.6,信噪比高达48.28 dB,天线尺寸为9 cm $\times$ 12 cm。最后,根据设计仿真制作了原理样机,实验结果显示该光学天线可以清晰地分开多光谱信号并实现探测接收,信号间没有产生串扰,信噪比较高,适用于多光谱波分复用通信系统。

**关键词** 光通信;光学天线;光栅;增益

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0206003

## Grating Optical Antenna for Spectral Wavelength Division Multiplex Visible Light Communication

Zhang Xuebin Tang Yi Cui Lu Zhu Qingwei Bai Tingzhu

*Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Photoelectricity,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

**Abstract** Based on the requirement of the wavelength division multiplex communication, an optical antenna is designed. Compared with the similar spectral communication system, the antenna has the advantages of large number of channels, large optical gain, high efficiency, etc. After theoretical analysis, the structure of double cylinder mirror with reflecting grating is proposed, which can not only maintain high spectral resolution at spectral dimension and improve the system's communication rate, but also decrease the spot size at spatial dimension and increase the optical gain of the system. The simulation results show that the antenna can receive eight kinds of different single spectrum signals efficiently. The field of view reaches  $18^\circ \times 0.4^\circ$ , the optical gain is 12.6, the optical signal-to-noise ratio achieves 48.28 dB and the size of the optical antenna is 9 cm $\times$ 12 cm. At last, a prototype based on the design is produced, and the experiments show that the antenna can receive the multi-spectrum signal efficiently and the signal noise rate(SNR) is high enough for wavelength division multiplexing (WDM) optical communication.

**Key words** optical communications; optical antenna; grating; gain

**OCIS codes** 060.4510; 220.2740; 080.4295; 050.2770

## 1 引 言

可见光通信相比无线通信具有更高的通信速率,且具有防窃听、抗干扰、可靠性高等优点<sup>[1-2]</sup>。另一方面,可见光通信可以在照明的同时实现高速的数据通信,以减小能耗<sup>[3]</sup>。因此,可见光通信与其他通信技术相结合,可以成为“最后一百米”的解决手段,具有极大的发展前景,引起了国内外通信界的广泛关注和研究。

收稿日期:2015-08-27;收到修改稿日期:2015-09-18

基金项目:国家973计划(2013CB329202)、国家自然科学基金(61571067)

作者简介:张学彬(1987—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: zhangxb9@163.com

导师简介:唐 义(1977—),男,博士,副教授,主要从事无线光通信、成像光谱仪方面的研究。

E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn(通信联系人)

国内外学者已经针对改进光通信的接收系统做了许多的研究。多个小光学天线拼接的方法是一种目前较为热门的光学结构,它可以提升系统的视场角并提高系统的增益<sup>[4-5]</sup>,但是其结构复杂且体积较大。自由曲面结构可以使系统体型微小的情况下获得较好的成像质量,但是设计复杂,且对于非成像探测接收的通信系统来说,像差校正并不是主要的指标<sup>[6]</sup>。为了得到更高的传输速率,研究者们采用预均衡、高效调制模型和光学多输入多输出技术(MIMO)等<sup>[7-8]</sup>方法,其中MIMO技术通过并行传输信号较大地提升了通信速率。波分复用技术是MIMO通信的一种常用手段,由于受到接收系统的限制,波分复用通信大多局限于三原色(RGB)三通道通信,且接收器件均采用成像物镜结合滤光片的结构<sup>[9]</sup>。根据滤光片的工作原理,每个波分复用器(WDM)通信接收机的分支接收器只接收相应特定光谱的信号能量,而其他光谱的信号能量将会被滤除,这将大大降低了通信效率,损失了能量。

针对以上问题,提出了一种光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线。该光学天线不需要光学滤光片即可以实现8个不同的光谱信号探测接收,信道数多且光学信噪比较高。仿真结果显示,该光学天线可以较好地8个单光谱信号进行探测接收,光学天线的视场角高达 $18^\circ \times 0.4^\circ$ ,天线效率为81.6%,尺寸为9 cm $\times$ 12 cm,增益为12.6,信噪比达到48.28 dB,系统的通信性能得到了较大的提升。最后,为了验证该设计的可行性,根据设计仿真制作了实验样机。实验结果显示该光学天线可以清晰地区分多光谱信号并且各信号间没有产生串扰,信噪比较高,表明该光学天线结合雪崩光电二极管(APD)探测阵列可以较好地实现多光谱信号探测接收,适用于多光谱波分复用通信。

## 2 理论分析

### 2.1 结构选型

多光谱波分复用通信系统的工作原理如图1所示,发射端将信号进行调制,加载进不同光谱的发光二极管(LED)中,然后通过调整各LED灯的直流量控制不同光谱的光强,使输出光融合成白光进行空间照明传输;接收端将复合的白光信号细分成不同波长的单光谱信号,然后再用APD阵列对各路信号进行独立探测接收,实现可见光照明通信的目的。该系统的一个难点是如何将复合的白光信号细分成多个单光谱信号,增加系统信道数量的同时保证系统具有较高的增益。

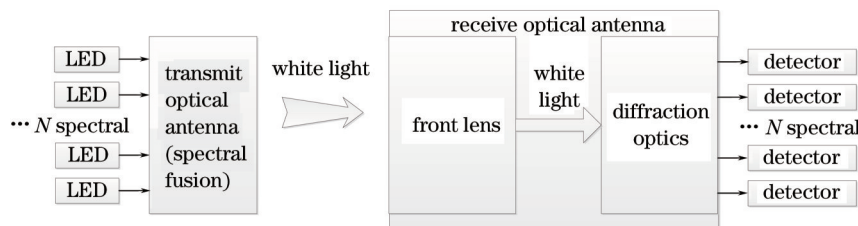


图1 多光谱波分复用通信系统工作原理

Fig.1 Multi-spectral WDM communication system working principle

基于多光谱波分复用通信的需求,多光谱波分复用通信天线的指标如表1所示。由于该系统应用于室内可见光照明通信环境,所以通信距离设定为2 m;探测器阵列采用APD阵列,由8个独立的APD组成,可以同时探测8个不同的单光谱信号,如图2所示。

表1 多光谱波分复用通信天线设计指标

Table 1 Index of the multi-spectral WDM optical antenna

Parameter	Value
Wavelength range /nm	380 to 700
Communication distance /m	2
System size /cm	$\leq 18 \times 18$
Single image size /mm	$1 \times 0.4$
Detector array size /mm	$1 \times 4$
Optical gain	$\geq 10$
Geometric encircled energy	$\geq 0.7$
Channel number	$\geq 8$

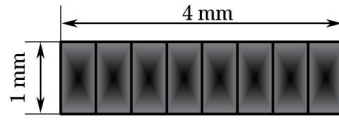


图2 APD阵列示意图

Fig.2 Schematic diagram of APD array

针对以上需求,采用平面反射光栅将复合的白光信号分成多个单光谱信号。平面反射光栅是刻有一系列等距平行刻线的平面反射镜,其通过每个刻槽的衍射实现分光的目的。由于光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线是用于非成像探测通信中,所以对光斑长度方向(空间维方向)的像差校正要求不高,只需要保证光斑宽度方向(光谱维方向)具有较高的光谱分辨率即可。针对以上特点,在平面反射光栅的基础上,提出了采用双柱面镜结合反射光栅的方法,对多光谱信号进行分光探测接收。为了使系统更加完整,扩大天线视场角,在天线前端加入前置物镜收集信号,如图3所示。其中M1为子午方向的柱面镜,使子午面的光焦度发生变化,缩小信号光斑的长度;M2为弧矢方向的柱面镜,使弧矢面的光焦度发生变化,与聚焦镜M3一起校正弧矢方向的像差,提高系统的光谱分辨率,增加通信系统的信道数。M4是前置物镜,可以扩大天线的接收视场角,增强天线的集光能力。

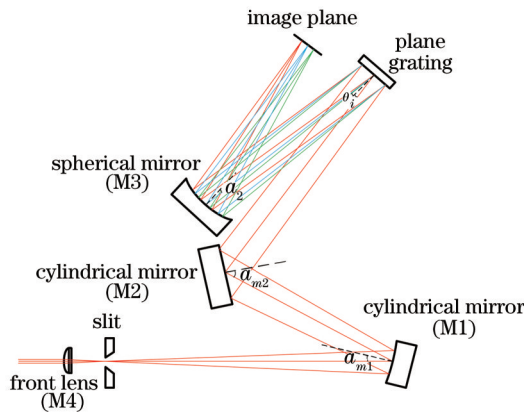


图3 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线结构图

Fig.3 Grating spectral WDM visible light communication optical antenna structure

## 2.2 结构设计

光栅公式可表示为

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中  $d$  是光栅常数;  $i$  是入射角, 根据需求决定;  $\theta$  是衍射角;  $m$  是光栅级次, 本系统采用一级光谱 ( $m=1$ ),  $\lambda$  是衍射波长。根据 2.1 节指标要求, 光栅的衍射角可由(1)式确定。

光学天线的波长范围是 380~700 nm, 探测面(APD 阵列探测面)的面积是 4 mm×1 mm。聚焦镜的焦距可表示为

$$\frac{f_2' m}{d \cos \theta} = \frac{D}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (2)$$

(2)式也是光栅线色散公式,  $f_2'$  是聚焦镜的焦距,  $m$  是光栅的衍射级次,  $d$  是光栅常数,  $\theta$  是光栅的衍射角,  $D$  是光谱分光方向的宽度,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是天线的边缘波长,  $\frac{D}{\lambda_2 - \lambda_1}$  为天线的光谱分辨率。

如果确认了天线的放大倍数  $\beta$ , 可以得到柱面镜 M1 的焦距  $f_{m1}'$ :

$$\beta = -\frac{f_{m1}'}{f_2'} \quad (3)$$

离轴聚焦镜和柱面镜 M2 之间的关系满足

$$\frac{\sin(\alpha_2)}{\sin(\alpha_{m2})} = \frac{r_2^2 (\cos i)^3}{r_{m2}^2 (\cos \theta)} \quad (4)$$

时,可以提高天线的光谱分辨率和消除假谱线<sup>[10]</sup>。式中  $\alpha_{m2}$  和  $\alpha_2$  是柱面镜 M2 和聚焦镜的离轴角,  $r_{m2}$  和  $r_2$  是柱面镜 M2 和聚焦镜的曲率,  $i$  是光栅平面的光线入射角,  $\theta$  是衍射角。

通过(4)式可计算出后继分光系统的初始结构参数。当确定天线的通信距离和信号光源尺寸后,前置物镜的焦距  $f'$  可表示为

$$\frac{a}{f'} = \frac{b}{H}, \quad (5)$$

式中  $a$  是探测器单元的尺寸,  $b$  是信号光源尺寸,  $H$  是通信距离。确定了前置物镜的焦距  $f'$  后,光学天线的接收视场角可表示为

$$w = 2 \arctan\left(\frac{l/2}{f'}\right), \quad (6)$$

式中  $l$  为狭缝长度。

另一方面,前置物镜的数值孔径必须与后继系统匹配,即前置物镜的数值孔径须不小于后继系统的数值孔径,保证有足够的光通量进入到光学天线中。前置物镜的数值孔径  $NA$  可表示为

$$NA = n \sin \frac{w}{2} = n \sin \arctan \frac{D'}{2f'} \approx n \frac{D'}{2f'}. \quad (7)$$

确定  $NA$  后,可以由(7)式确定前置物镜的入瞳直径  $D'$ ,其中透镜在空气中  $n=1$ 。

### 3 设计与仿真分析

将上述公式代入 MATLAB 进行计算,得到一组合理的初始数值,再将其代入光学设计软件 ZEMAX 中进行仿真设计,得到一种适用于多光谱波分复用通信的光学天线初始结构。通过加入双柱面反射镜,提高了光学天线的光谱分辨率,增加了通信系统的信道数,并提高了系统的增益。像面采用 APD 阵列进行探测,像面尺寸为  $4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,柱面镜 M1 的曲率半径为  $113.6 \text{ mm}$ ,柱面镜 M2 的曲率半径为  $228.6 \text{ mm}$ ,聚焦反射镜的曲率半径为  $112.8 \text{ mm}$ 。根据需求,光栅选用  $200 \text{ lp/mm}$  的平面闪耀光栅,衍射效率为  $89\%$ 。在光学系统前端加入前置物镜,焦距为  $25.26 \text{ mm}$ ,入瞳直径为  $8 \text{ mm}$ 。根据 2.2 节提到的设计指标,利用光学设计软件 ZEMAX 对天线进行优化,最终得到天线参数如表 2 所示,光路结构如图 4 所示。其中 M1 是子午方向的柱面镜, M2 是弧矢方向的柱面镜, M3 是聚焦反射镜, M4 是前置物镜。天线视场角为  $18^\circ \times 0.4^\circ$ ,其中  $18^\circ$  为天线狭缝长度方向的视场角,  $0.4^\circ$  为狭缝宽度方向的视场角。仿真过程中设置 8 个信号光谱,分别为:  $380, 420, 460, 500, 540, 580, 620, 660 \text{ nm}$ 。实际使用过程中,可以通过调整电流的方法控制各光谱的光强,使其混合成白光达到白光照通信的标准<sup>[11]</sup>。另外,目前 LED 生产厂商可以制造可见光波段内任一光谱 LED,所以该仿真条件具有可行性。

表 2 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线参数

Table 2 Parameters of the grating spectral WDM visible light communication optical antenna

Parameter	Value
Wavelength range /nm	380 to 700
Communication distance /m	2
Source size /cm	$\leq 7$
Focal length /mm	58
$F$ number	8.2
Grating line number /(lp/mm)	300
Slit size /mm <sup>2</sup>	$8 \times 0.4$
Single image size /mm <sup>2</sup>	$1 \times 0.4$
Focal length of front lens /mm	25.26
Diameter of front lens/mm	8
System size /cm <sup>2</sup>	$9 \times 12$
Field of view	$18^\circ \times 0.4^\circ$
Detector array size /mm <sup>2</sup>	$4 \times 1$

光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线探测面处的光谱信号分布如图5所示,光学天线可以清晰地分辨出8个波段的单光谱信号,光斑长度为0.8 mm,天线接收效率达到了81.6%。该仿真结果证明了光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线在达到多信道数的同时,缩小了信号光斑的长度,提高了系统的增益,可以结合APD阵列对多光谱信号实现高效的探测接收,达到设计要求。由于各信道信号是独立传输的,相互间没有影响,所以该光栅型多光谱通信系统相比普通的单通道传输系统通信速率提高了8倍。

对于非成像接收天线的评价,应该更注重探测面能量的集中程度和探测效率,光学天线的几何圈入能量如图6所示,在半径为12  $\mu\text{m}$ 的范围内,集中了80%的能量,光斑聚集效果较好,证明该光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线具有较高的探测效率。

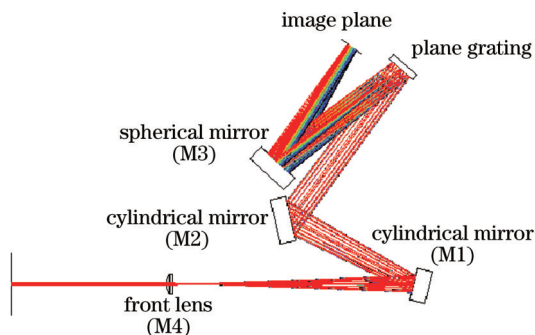


图4 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线光路图  
Fig.4 Grating spectral WDM visible light communication optical antenna optical path

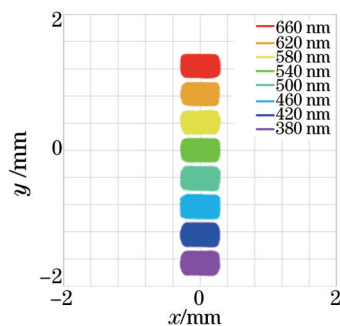


图5 探测面光谱信号分布图  
Fig.5 Spectral signal distribution on detection surface

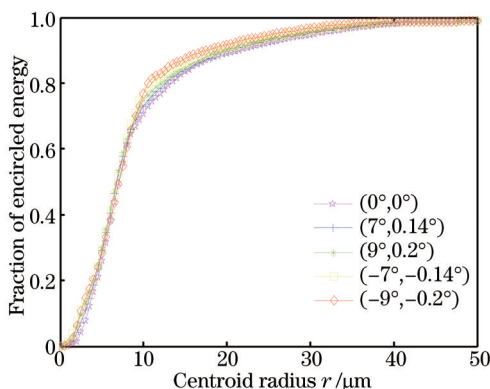


图6 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线的几何圈入能量

Fig.6 Geometric encircled energy of the grating spectral WDM visible light communication optical antenna

光学增益的定义是:相同探测器的情况下,在有光学天线和没有光学天线时,系统接收到的光功率之比。对于非成像光学天线,增益是评判其是否适合用于光通信系统的一个重要标准。非成像光学天线的增益可表示为<sup>[12]</sup>

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

式中  $g(\psi)$  为增益,  $\psi$  为光线入射角,  $n$  是天线的折射率,  $\psi_c \leq \pi/2$  是视场角。根据(8)式计算,该光学天线的增益为12.6。

传统方案的滤光片分光系统,前置物镜将信号光进行会聚,信号光经过滤光片过滤后由APD阵列接收。滤光片的透射率为76%,系统的接收效率约为64%。另一方面,滤光片系统的增益主要是前置物镜的增益,增益为2.8。相比传统方案的滤光片分光系统,提出的光栅型多光谱波分复用通信天线具有更高的接收效率和增益。

由于该光学天线是服务于光通信领域,所以必须考虑其实际通信性能,从而确保其可行性。在光学天



线中,主要考虑杂散光对光学信噪比的影响,其杂散光可以分为两类:来自反射镜、光栅等的随机散射;反射、二次进入信号、光栅鬼线和光栅生成的聚焦杂散光等这些现象造成的直接杂散光。光学天线的光学信噪比可表示为<sup>[13]</sup>

$$\frac{\phi_s}{\phi_n} = \frac{EB_s L_A T_g}{CB_T S \cos \alpha} \quad (9)$$

式中  $\phi_s$  是信号光通量,  $\phi_n$  是噪声光通量,  $E$  是光栅的衍射效率,  $B_s$  是探测面上信号的光强,  $L_A$  是入射天线的焦距,  $T_g$  是天线的几何传输系数 ( $T_g=1$  时代表理想天线),  $C$  是光栅的质量因子,  $B_T$  是进入光学天线的总光强,  $S$  是探测器面积,  $\cos \alpha$  是光栅平面光线入射角度的余弦。

利用 ZEMAX 软件对通信场景进行仿真,通信距离设定为 2 m,将随机散射噪声加入系统中,并且将系统的背景光噪声典型值<sup>[14]</sup> [ $5.8 \mu\text{W}/(\text{nm} \times \text{cm}^2)$ ] 和探测器噪声代入仿真系统中,同时利用光阑滤除随机散射等噪声,最后利用探测器探测带有噪声的信号功率。利用光阑滤除杂散光示意图,如图 7 所示。由图 7(a)可以看出若不添加光阑,系统将会有产生大量的杂散光,降低系统的信噪比(SNR);若添加光阑如图 7(b)所示,添加了光阑 D1、D2 和 D3 后,系统内部的杂散光基本被滤除,此时系统的噪声主要源于背景光噪声和探测器噪声等。将仿真中得到的参数代入(9)式,并转化为信噪比,得到该系统的信噪比为 48.28 dB。

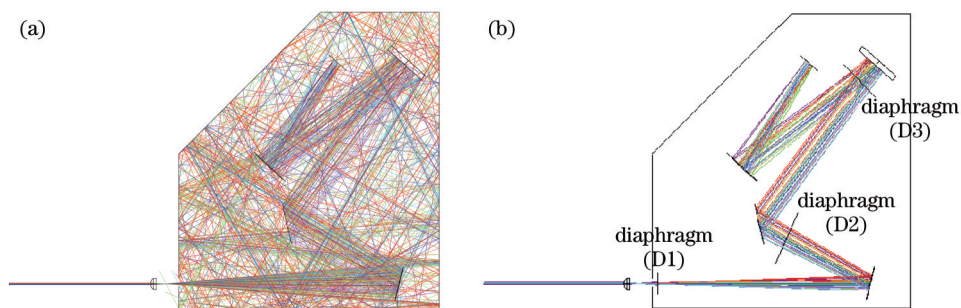


图 7 杂散光滤除示意图。(a) 无光阑光学系统; (b) 带光阑光学系统

Fig.7 Schematic diagrams of stray light filtered. (a) Optical system without diaphragm; (b) optical system with diaphragm

## 4 实验分析

根据上述设计仿真,通过设计相应的机械结构对光学器件进行夹持,制作出了一台光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线样机,如图 8 所示。该光学天线尺寸为  $13 \text{ cm} \times 16 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ ,结构紧凑,天线前端通过前置物镜扩大了天线的视场角,并通过分光系统对光谱信号进行分光,最后用 APD 阵列对信号进行探测接收。

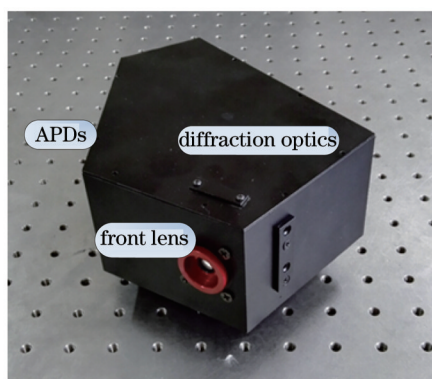


图 8 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线样机

Fig.8 Prototype of the grating spectral WDM visible light communication optical antenna

在实验过程中,由于市面上的 LED 光谱宽度较宽,为了得到较好的通信效果,并验证该天线具有多信道通信的优势,选择其中 5 种光谱不重叠的单体 LED,颜色分别为:紫色(402~412 nm)、蓝色(447~460 nm)、绿色(504~527 nm)、橘红色(592~602 nm)、红色(631~643 nm)。用单色仪 DK240 测量这 5 种 LED 的光谱数据(测试时每个 LED 的直流量相同),并将这 5 种 LED 的光谱数据结果输入到仿真软件中,用光栅型光谱波分复用可

见光通信光学天线对光谱信号进行探测,如图9所示。

如图9所示,该光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线可以很好地同时探测到5种LED光谱信号,且信号强度和位置与LED光谱原始数据对应。仿真结果证明该光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线具有较强的多光谱信号探测能力,可以实现多光谱探测通信的目的。通过理论分析,得到该5种光谱混合成白光所需要的光强比例,调整各LED灯的直流量控制相应的发光强度,然后用积分球将搭载着不同信号的LED光混合成白光,并用光栅型光谱波分复用通信实验样机对混合的白光信号进行探测接收。在探测面处采用CCD观察光学天线的探测情况,实验场景如图10所示,实验中采用积分球作为LED的混光装置。

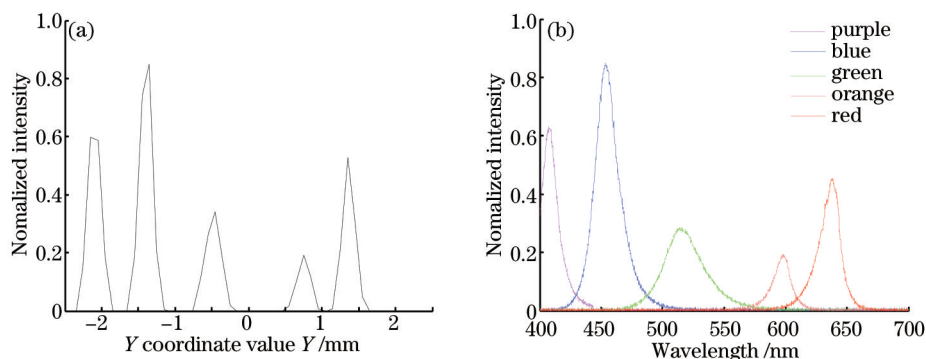


图9 (a) 探测器Y方向扫描图; (b) 5种颜色的LED光谱数据波形图

Fig.9 (a) Scanning of the detector Y direction; (b) five kinds of color LED spectral data waveform

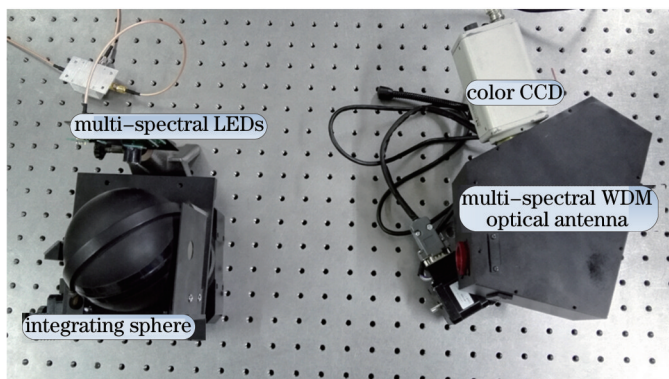


图10 实验场景图

Fig.10 Experiment scene

光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线探测面上得到的多光谱信号分布与仿真结果的对比,如图11所示。当光学天线接收混合白光信号后,其可以较好地同时探测多个单光谱信号,实验得到的各光谱信号分布

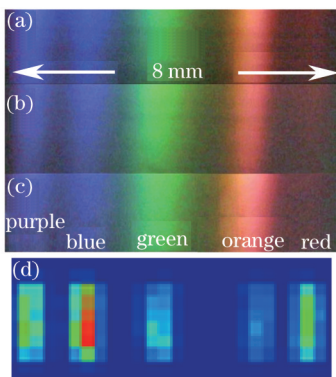


图11 光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线探测面信号分布与仿真结果对比。

光源入射角为(a)+9°, (b) 0°, (c) -9°; (d) 探测器像面仿真结果

Fig.11 Signals distributions of the grating spectral WDM visible light communication optical antenna detection surface.

Incident angles are (a) +9°, (b) 0°, (c) -9; (d) simulation results of the detector image plane

结果和仿真结果相同。当光源入射角改变时,各光谱的光斑位置保持不变,可以较好地被 APD 阵列接收,证明了该光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线的视场角达到了  $18^\circ$  且具有较好的稳定性。由于实验中需要将各 LED 光谱按照一定比例融合成白光,所以实验得到的各光谱光强与仿真结果有一定的差异。

最后,利用光学天线进行通信实验,验证通信性能。实验包含 4 组对比实验,每组选择两个相邻信道以便测试探测到的各相邻光谱信号之间是否会产生串扰。发射端采用阻容电路(R-C)后均衡技术,使每组中两信道信号频率分别达到 100 MHz 和 110 MHz,通信距离为 2.12 m。探测器采用 First Sensor 生产的 APD 阵列,型号为 8AA0.4-9 SMD,灵敏度为 60A/W。实验结果如图 12 所示。各组中两信道信号相互间没有产生干扰,且信噪比较高,误码率为  $10^{-15}$ ,证明了该系统可以实现多光谱波分复用通信的目的。

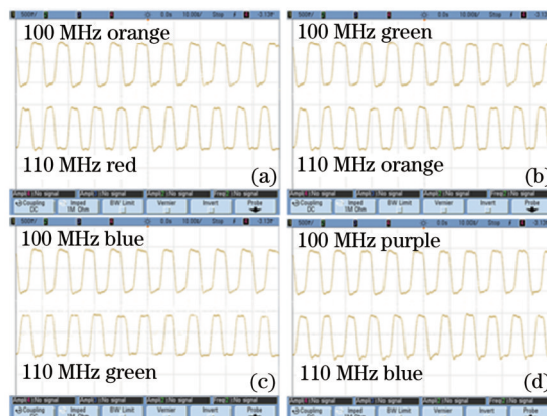


图 12 APD 阵列探测波形图。(a) 红色光谱和橙色光谱;(b) 橙色光谱和绿色光谱;(c) 绿色光谱和蓝色光谱;(d) 蓝色光谱和紫色光谱

Fig.12 Detected waveforms of APD arrays. Spectra of (a) red and orange, (b) orange and green, (c) green and blue, (d) blue and purple

该光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线样机结合 APD 阵列可以较好地实现通信距离为 2.12 m,信道数可达 8 个的多光谱通信,适用于室内可见光照明高速通信场合。在未来的优化设计中,将进一步扩大天线的视场角并缩小天线的尺寸,使其满足实际的可见光照明通信使用需求。

## 5 结 论

在多光谱波分复用通信中,光学天线的使用有利于增加信道数,提高系统的通信速率和信噪比,对其开展研究具有重要的应用价值。提出一种基于双柱面反射镜的光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线,并对其进行了理论设计和仿真分析。结果表明,该光学天线可以较好地同时探测到 8 个不同的单光谱信号,视场角达到了  $18^\circ \times 0.4^\circ$ ,天线接收效率为 81.6%,尺寸为  $9 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ ,探测面能量较为集中,增益为 12.6,信噪比达到 48.28 dB。最后,通过实验验证了光栅型光谱波分复用可见光通信光学天线的可行性,实验结果表明该光学天线可以在通信距离为 2.12m 的情况下较好地实现多光谱信号探测接收,各光谱信号间串扰较少,信噪比较高,适用于多光谱波分复用通信系统。因此,该光学天线可以在无需滤光片的情况下,实现多光谱信号的高效接收,具有较高的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Gao Junying, Wang Dechang, Yao Jianguo. MIMO visible light wireless communication system employed camera-based receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106004.  
高俊英,王德昌,姚建国.基于摄像头的 MIMO 可见光无线通信系统[J].光学学报,2015,35(1): 0106004.
- 2 Lu Qingfeng, Ji Xinsheng, Huang Kaizhi, *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正交频分复用系统非线性限幅失真的功率分配方法[J].光学学报,2014,34(7): 0706004.
- 3 Kang Ye, Ke Xizheng. Multi-dimensions encoding scheme for visible light communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0205001.



- 亢 焯, 柯熙政. 可见光通信中的多维编码[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0205001.
- 4 Yuanquan Wang, Jianyang Shi, Chao Yang, *et al.*. Integrated 10 Gb/s multilevel multiband passive optical network and 500 Mb/s indoor visible light communication system based on Nyquist single carrier frequency domain equalization modulation[J]. Opt Lett, 2014, 39(9): 2576–2579.
- 5 Andrew Burton, Zabih Ghassemlooy, Sujan Rajbhandari, *et al.*. Design and analysis of an angular-segmented full-mobility visible light communications receiver[J]. T Emerg Telecommun T, 2014, 25(6): 591–599.
- 6 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722001.  
巩 盾, 王 红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- 7 Honglei Li, Xiongben Chen, Beiju Huang, *et al.*. High bandwidth visible light communication based on a post-equalization circuit[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(2): 119–122.
- 8 A Burton, L M Hoa, Z Ghassemlooy, *et al.*. Experimental demonstration of 50 Mb/s visible light communications using 4×4 MIMO[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(9): 945–948.
- 9 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu, *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112011.  
于 磊, 曲 艺, 林冠宇, 等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112011.
- 10 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1516–1521.  
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1516–1521.
- 11 Heqing Huang, Yi Tang, Lu Cui, *et al.*. Capacity analyze of WDM indoor visible light communication based on LED for standard illumination [J]. SPIE, 2015, 9619: 96190U.
- 12 Z Ghassemlooy, W Popoola, S Rajbhandari. Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB[M]. USA: CRC Press, 2012: 81.
- 13 J M Lerner, A Thevenon. The Optics of Spectroscopy[M]. France: HORIBA Jobin Yvon Press, 1988: 38–41.
- 14 Jelena Grubor, Sebastian Randel, Klaus-Dieter Langer, *et al.*. Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting [J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(24): 3883–3892.

栏目编辑: 王晓琰