

用于多光谱照明通信的大视场接收光学天线设计

郭蕾 张丽君 唐义 白廷柱 张学彬 黄河清

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 针对多光谱照明通信要求,提出了一种新型大视场高增益光学天线。天线采用前组三片式负组透镜、后组四片式正组透镜组合的反远距天线结构,通过理论计算、Zemax设计优化,设计出视场角(FOV)90°、增益115的大视场高增益前置接收光学天线,同时具有较小的体积。该光学天线与色散分光系统联合仿真表明,该天线可实现视场角90°×22°、增益20,适用于多光谱照明通信。同时设计出的前置光学接收天线也可独立作为大视场成像光学系统、成像光谱仪前置物镜系统等,具有广泛的适应性。

关键词 光通信;多光谱照明通信;接收光学天线;大视场;高增益

中图分类号 O435.1; TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.040603

Design on Receiving Optical Antenna with Wide Field of View for Multi-Spectral Light Communication

Guo Lei Zhang Lijun Tang Yi Bai Tingzhu Zhang Xuebin Huang Heqing

Key Laboratory of Photo-Electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract A new kind of optical antenna for multi-spectral light communication with large gain and wide field of view is proposed. The fore-receiving optical antenna is based on the reversed telephoto optical system and consists of three negative lenses in front and four positive lenses behind. By theoretical analysis and optimization with Zemax, the field of view (FOV) reaches 90° and the optical gain is up to 115, and the size is also compact. The antenna is appropriate for multi-spectral light communication. By cooperating with multi-spectral wavelength division multiplexing system, its FOV is up to 90°×22° and its optical gain is 20. Moreover, the antenna can be independently used as an optical system for wide FOV imaging systems and front-end system of imaging spectrometers.

Key words optical communications; multi-spectral light communication; receiving optical antenna; wide field of view; huge optical gain.

OCIS codes 060.4510; 080.3620; 300.6550

1 引言

照明通信是一种新兴的无线光通信,其载体光源发光二极管(LED)具有光效高、响应时间短、可高速调制等特性,在照明的同时,实现通信功能,相比传统的射频通信和其他无线光通信,照明通信技术具有发射功率高、无电磁辐射、不易受到干扰、节约能源等优点^[1]。目前国内外对于照明通信的研究大多集中于电学通信领域,针对照明通信接收光学天线进行的研究较少。2009年,Vucic J等^[2]利用滤镜和透镜实现光学接收;2013年,Wang Q等^[3]在光电探测器前采用半球透镜实现光学接收;2014年,Sung Jiunyu等^[4]采用DMT技术对RGB三色LED进行调制,并于接收端采用RGB三色滤光片实现接收;2014年,Green R J等^[5]利用棱镜将白光进行RGB分光,供光电探测器接收。上述光学天线实现了单通道或RGB三通道的照明通信接收光

收稿日期:2014-11-20;收到修改稿日期:2014-12-01;网络出版日期:2015-03-04

基金项目:国家973计划(2013CB329202)、工业技术基础项目(J312012B002)

作者简介:郭蕾(1989—),女,硕士研究生,主要从事光通信光学天线系统设计等方面的研究。

E-mail: gl274176341@163.com

导师简介:张丽君(1977—),女,博士,讲师,主要从事紫外通信、成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: zhanglj4510@bit.edu.cn

学天线信号传输,但天线结构较简单,视场角(FOV)和增益等光学指标考虑较少,同时对于三通道以上系统的接收光学天线,尚未进行相应研究。

多光谱白光通信将白光LED替换为多光谱的可见光LED,通过混光、合成白光照明发射,多光谱接收系统利用色散分光 and 阵列雪崩光电二极管(APD)探测,从而实现光学多通道高速率信号传输。多光谱接收系统以狭缝为划分点,分为前置接收光学系统和多光谱空间波分复用系统。前置接收系统由于需聚焦于多光谱分光系统的狭缝处,视场角受到一定限制,目前国内外研究仅达到 5° ^[6-9],均无法满足该照明系统大视场条件下的微小接收面聚焦。为此,本文提出一种新型光学天线设计,将成像设计引入非成像设计中,采用多片透射式结构,在满足微小接收面聚焦的条件下大幅提高天线的视场角和增益。

2 前置接收光学天线设计

多光谱照明通信光学系统如图1所示,包括照明发射端和用户接收端。在照明发射端,多光谱LED作为信号载体,信号通过调制、光谱合成、微小单元控制发送;在用户接收端,以狭缝为划分点,分为前置接收光学系统和多光谱分光色散系统,信号通过前置光学接收系统大视场聚焦、多光谱分光色散系统色散分离光谱,采用APD阵列进行多光谱信息提取,将光信号转换为电信号,传递给接收电路进行信号处理,其中大视场聚焦接收系统为研究重点。

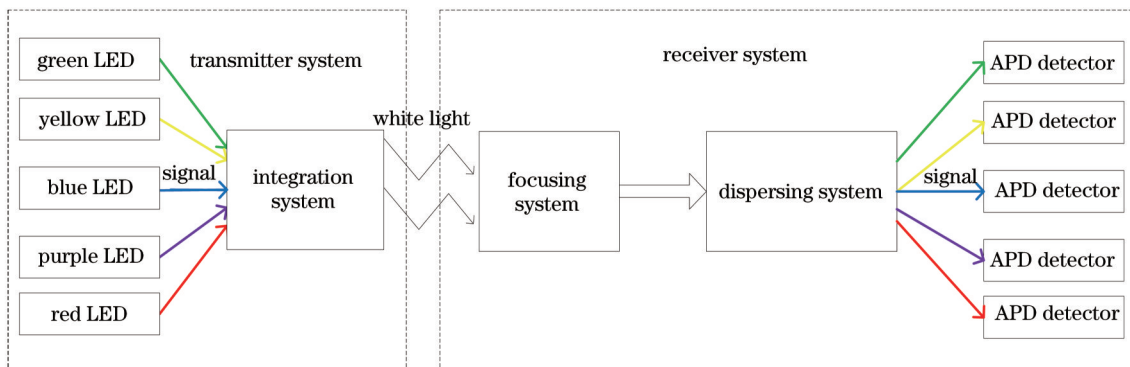


图1 多光谱照明通信光学系统

Fig.1 Optical system of multi-spectral light communication

由于分光色散系统的入射端为狭缝,前置接收光学系统的设计需兼顾大视场和后继的狭缝接收,将光线尽可能多地聚焦于狭缝处。狭缝既是系统的视场光阑,又是前置物镜接收光学天线的后聚焦位置。由于选用了狭缝大小为 $3\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ 的色散分光系统,为了满足设计要求,取视场和狭缝较大的一个方向数值为初始设计指标。设计指标如表1所示。

表1 前置接收光学天线设计指标

Table 1 Design indices of fore-receiving optical antenna

Parameter	Value
Wavelength	Visible light
Field of view	90°
Diameter of receiving plane	3 mm
Latter-working distance range	2~4 mm
Maximum diameter of first optical plane range	28~34 mm
Relative illumination	0.7

2.1 设计思想

多光谱照明通信系统前置接收光学天线设计结合视场角 90° 和接收面直径3 mm设计指标,采用单片透镜结构、抛物面反射镜、两片式卡塞格林系统、R-C结构、离轴三反结构等,视场角均只有 1° ,对其进行改进勉强可达到 5° ,均不适于大视场小接收面光学系统,即大视场短焦距光学系统。采用反远距光学系统,以构成正负镜组分离,负组在前的结构型式,使主面后移,负组可以减小轴外光线对正组的视场角,达到了大视场短焦距的目的^[10]。另外,发射端位于天花板,发射的光束近似于平行光束,被前置接收光学天线的负组镜组接收,所成的像为该天线正组镜组的物,正组镜组的任务就是对这一物成像于指定狭缝上,以便多

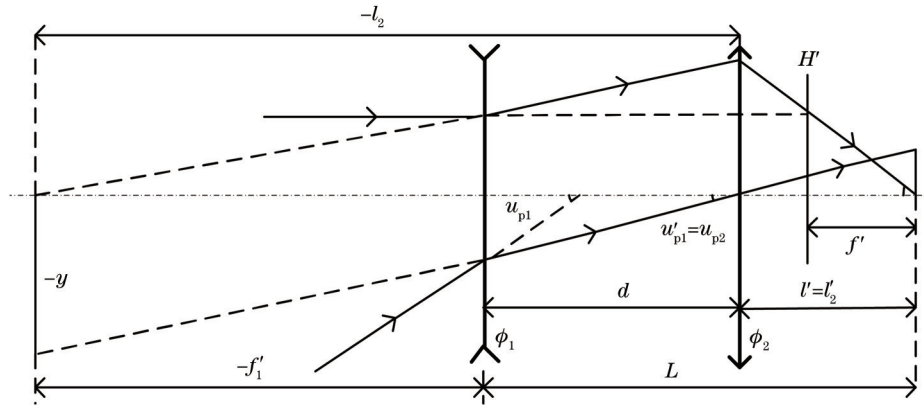


图2 反远距结构原理图

Fig.2 Schematic of reversed telephoto structure

光谱空间波分复用系统分光接收信号。

图2为反远距结构原理图。设 f' 、 f'_1 、 f'_2 为系统、前组镜组和后组镜组的焦距， φ 、 φ_1 、 φ_2 为系统、前后组镜组的光焦度， d 为前组与后组的间隔，当给定设计指标的条件下（如视场角、像高、后工作距离 l' ），根据高斯光学求解推导其结构参数，有：

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2, \quad (1)$$

$$l' = \frac{f'(f'_1 - d)}{f_1}, \quad (2)$$

$$l = f'_1 = \frac{f'(f'_2 - d)}{f_2}. \quad (3)$$

由(1)~(3)式可得到 f'_1 、 f'_2 、 d 的初始解^[11]。

根据反远距光路原理图，结合高斯光学，推导出公式：

$$\beta_2 = \frac{y'}{-y} = \frac{l'_2}{-l_2}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{l'_2}{f'} = \frac{u_{p1}}{u'_{p1}}, \quad (5)$$

$$\omega = \frac{w_2}{\gamma_1}. \quad (6)$$

其中， $-l_2 = d - f'_1$ 。由(4)~(6)式可以得到后组镜组的放大倍率 β_2 、前组主光线的角放大率的倒数 $1/\gamma_1$ 、后组半视场角 w_2 。当 $1/\gamma_1 > 1$ 时，可以看出 $1/\gamma_1$ 表示视场角经前后物镜的降低比率，而前组的光焦度直接关系着其相对口径的大小，也就是说 φ_1 决定前组物镜的复杂程度。

运用(1)~(6)式推算，得到系统参数如表2所示。

表2 前置接收光学天线系统参数

Table 2 Parameters of fore-receiving optical antenna system

Parameter	Value
f'	1.5 mm
F	1.8
f'_1	-9.7 mm
f'_2	4 mm
d	30 mm
l'	6.14 mm
β_2	0.15
$1/\gamma_1$	4.1
$2w_2$	22°
2ω	90°
y'	3 mm

2.2 设计仿真结果

对于反远距结构,无论前组采用哪种形式,都需要后组对残存的像差进行补偿,缩小像面,故后组一般采用非对称结构形式,如双高斯、三片、匹兹万型或者它们的精细化。由于系统的特殊需求,为满足前置接收光学天线尽可能多的使信号聚焦于3 mm接收面、与多光谱波分复用系统联立可在空间光谱维上色散分光分集被APD阵列接收的要求,不同于以往非成像光学系统只需要对能量进行接收探测,此系统还需要对系统的像差,尤其是轴外像差进行校正。为此,通过构建轴外像差计算公式,建立多种评价函数,设置边界条件,对轴上像差、轴外像差、传递函数和相对照度进行不同权重的控制,设计优化出照明通信系统前置接收光学天线如图3所示。该系统为一精细化的反远距结构,前三片透镜组合为负组镜组,后四片透镜组合正组镜组,均采用标准球面,便于加工制作,视场角为 90° ,焦距为0.96 mm,总长为89 mm,后工作距离为3.75 mm,最大口径大小为38.8 mm, F 数为1.8,像面高度为2.5 mm(小于狭缝高度)。

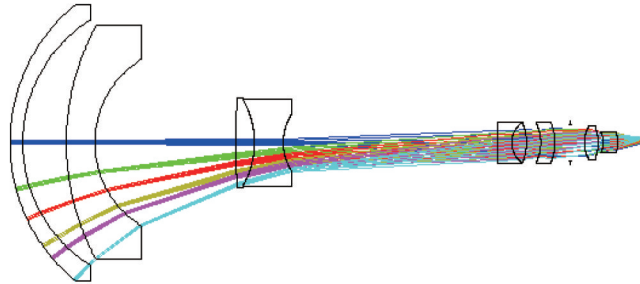


图3 前置接收光学天线外形图

Fig.3 Layout of fore-receiving optical antenna

2.3 设计仿真分析

照明通信光学系统属于非成像光学范畴,与成像系统有一定差异,关注的主要目标有:

- 1) 探测面的集光能量;
- 2) 视场角;
- 3) 探测面能量均匀性。

成像光学的一些评价指标对非成像系统仍有指导,采用调制传递函数(MTF)、增益、照度2D维面、几何圈入能量和相对照度对系统进行评价分析。

图4为本光学系统在全视场下的光学MTF曲线,频率40 lp/mm,全视 90° 视场下均达到0.6以上,轴外像差校正得较好。

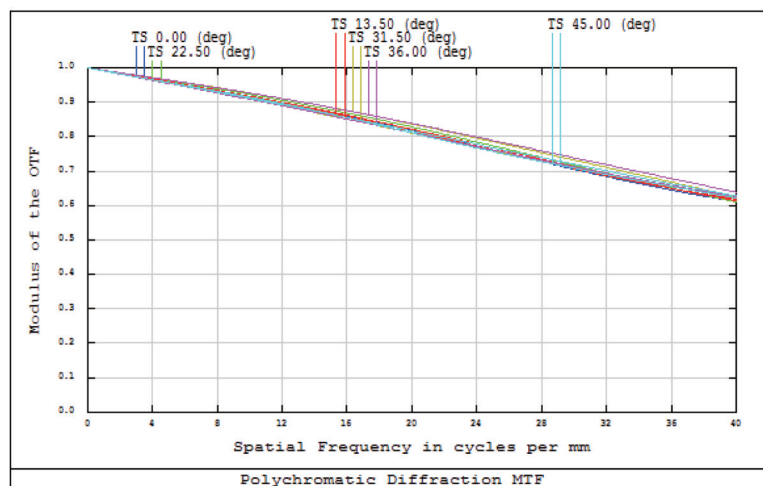


图4 前置接收光学天线 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves of fore-receiving optical antenna

光学增益 G 指同一接收面在加和未加光学系统时光敏面接收到的光功率的比值,即有效面积之比^[12]。则有:

$$G = \frac{A}{A_0} \cdot \eta, \quad (7)$$

其中 A 为光学天线口面面积, A_0 为直径 3 mm 接收面面积, η 为光学天线效率。考虑到系统因透射率引入的效率为 69%, 此时直径 3 mm 接收面处增益为 115。

照度 2D 维面可以直观的观测到接收面的照度分布, 一定程度上可代表光学系统能量效率。实际光学系统的像面照度计算一般在光学设计软件中用光线追迹方法由计算机软件自动计算而得。其效率定义为

$$E = \frac{\sum W_i}{\sum W_j}, \quad (8)$$

其中, W 为光线的波长加权因子, i 的求和是对所有未产生渐晕的光线进行的, j 的求和是对所有已发射的光线进行的。假设光源为朗伯光源, 图 5 为各视场下像面照度 2D 维面, 在不考虑折反射面损失的情况下, 像面照度效率经光学设计软件 Zemax 自动计算得出, 其效率均高于 99%。

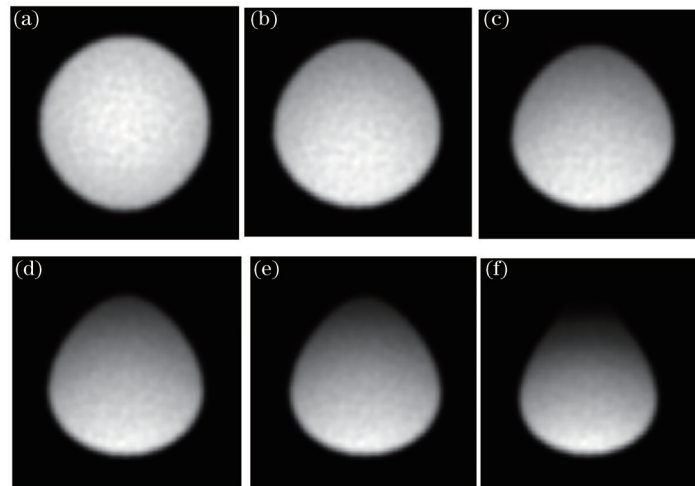


图 5 前置接收光学天线像面照度 2D 图。(a) 0°视场;(b) 13.5°视场;(c) 22.5°视场;(d) 31.5°视场;(e) 36.5°视场;(f) 45°视场
Fig.5 Illumination 2D surface of imaging plane of fore-receiving optical antenna. (a) 0° FOV; (b) 13.5°FOV; (c) 22.5°FOV; (d) 31.5°FOV; (e) 36.5°FOV; (f) 45°FOV

相对照度表征像面均匀性, 即指接收面上不同点的照度与中心点照度之比。在计算时, 假定光源是一个均匀照明的朗伯体, 以视场坐标为函数, 通过出瞳有效面积的数值积分求得。按照几何光学推导, 可得到轴外视场角 θ 对应的像面照度 E' 与轴上像点照度 E_0' 关系为

$$E' = E_0' \cos^4 \theta. \quad (9)$$

由上式可知, 像方视场角 θ 的减小有利于提高接收面照度均匀性, 轴外视场经过前三片透镜(负组)发散后光轴夹角显著减小, 对后四片透镜进行一定的光焦度分配, 可以进一步缩小像方视场角。图 6 为前置接收光学天线系统相对照度图。由图可知, 系统视场角由 0°变化到 90°, 相对照度仅由 1 降低到 0.77 左右。

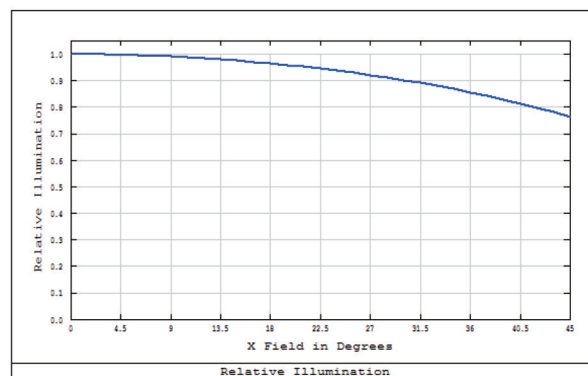


图 6 前置物镜接收光学天线相对照度图

Fig.6 Relative illumination of fore-receiving optical antenna

几何圈入能量反映了光学系统能量接收集中范围,图7为前置物镜接收光学天线系统几何圈入能量图,其80%的能量集中在质心10 μm内。

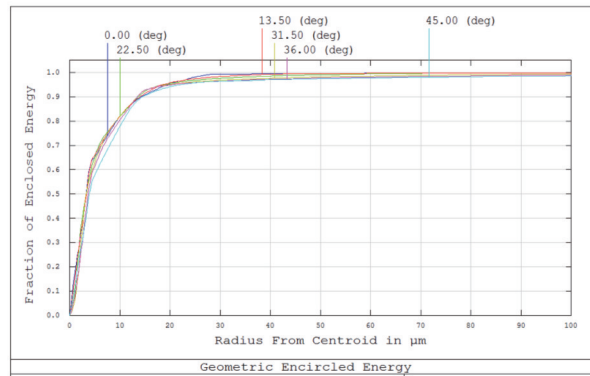


图7 前置物镜接收光学天线几何圈入能量图

Fig.7 Geometric image analysis of fore-receiving optical antenna

3 多光谱照明通信系统联合仿真分析

3.1 多光谱照明通信接收光学天线结构

将设计的前置接收光学天线系统与色散分光系统(Czerny-Turner结构色散光路)联合仿真,该色散分光系统是在 Czerny-Turner 结构基础上改进的,通过消除轴外像差提高了系统的光谱分辨率和空间分辨率^[13],满足多光谱照明通信分光色散分集接收的要求。采用光敏面面积为4 mm×1 mm的阵列APD探测接收多光谱信号。为使系统像面控制在分光色散系统的狭缝宽度之内(弧矢方向实现视场角22°对应狭缝宽度0.4 mm,子午方向视场角90°对应狭缝高度3 mm),针对采用的5个可见光波段(407 nm、454 nm、0.516 nm、597 nm、638 nm)优化后,系统总长度不到200 mm,多光谱信号接收面大小为3.94 mm×0.92 mm。图8为多光谱照明通信接收光学天线系统仿真图,(a)、(b)分别为弧矢方向和子午方向系统仿真图。

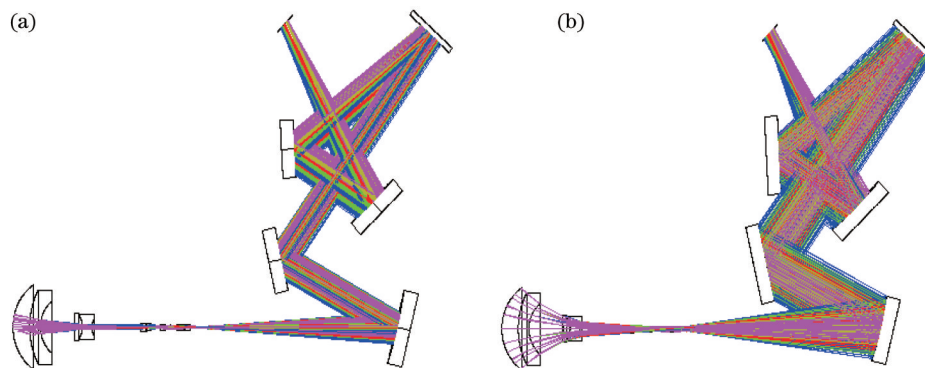


图8 多光谱照明通信接收光学天线系统仿真图。(a)弧矢面;(b)子午面

Fig.8 Layout of receiving optical antenna of multi-spectral light communication. (a) Sagittal plane; (b) tangential plane

3.2 联合仿真分析

多光谱照明通信接收光学天线系统为实现空间多通道分集接收,故采用到达阵列APD探测面的能量和色散分光结果作为评价标准。图9(a)为一个视场下接收面的像面照度图,由该图可知,信号光源发射的光线被接收光学天线系统很好地色散为5个通道波段,5个光斑有效面积为3.94 mm×0.92 mm,与阵列APD大小4 mm×1 mm基本匹配。假设光源为朗伯光源时,效率为95.43%;图9(b)为中心波长下,系统接收面的80%集中在5 μm质心内,其余波段几何圈入能量80%均集中在5~7 μm质心内。

通过上述结构与分析,实现了视场角90°×22°的用于多光谱照明通信的前置接收光学天线。在狭缝(3 mm×0.4 mm)接收范围内,则有:

$$G_s = G \cdot \tau, \quad (10)$$

其中, G_s 为狭缝接收面增益, G 为前置接收光学天线增益, τ 为狭缝有效接收率,得到光学增益 G_s 为20。

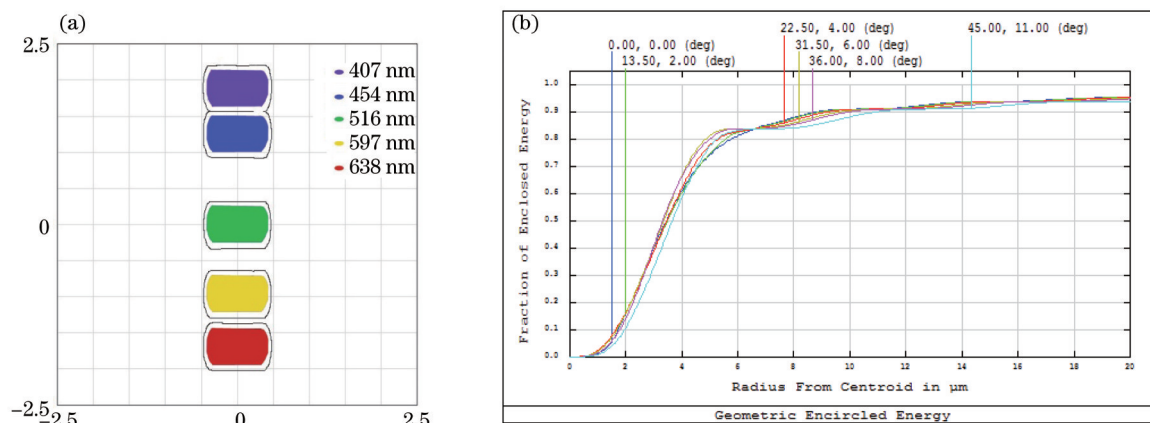


图9 多光谱照明通信接收光学天线系统分析。(a) 接收面照度2D图;(b) 接收面几何圈入能量图

Fig.9 Analysis of receiving optical antenna of multi-spectral light communication. (a) Illumination 2D surface; (b) geometrical image

4 结 论

本文结合多光谱照明通信的应用背景,提出一种新型光学天线设计,将用于成像的反远距结构引入非成像照明通信领域,通过优化该结构,设计出基于多光谱照明通信的视场 90° 的前置光学接收天线,增益高达115。该系统与多光谱波分复用系统结合,视场角为 $90^\circ \times 22^\circ$,增益为20,适用于多光谱照明通信。此外,设计出的前置接收天线也可独立作为大视场接收光学系统、成像光谱仪前置系统,具有广泛的适用性。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Vucic J, Kottke C, Nerretter S, *et al.*. White light wireless transmission at 200+ Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(20): 1511-1513.
- 3 Wang T Q, Sekercioglu Y A, Armstrong J. Analysis of an optical wireless receiver using a hemispherical lens with application in MIMO visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11): 1744-1754.
- 4 Sung Jiunyu, Chow Chiwai, Yeh Chienhung. Dimming-discrete-multi-tone (DMT) for simultaneous color control and high speed visible light communication [J]. Opt Express, 2014, 22(7): 7538-7543.
- 5 Wang T Q, Green R J, Armstrong J. Prism array-based receiver with application in MIMO indoor optical wireless communications [C]. IEEE Transparent Optical Networks (ICTON), 2014. 1-4.
- 6 Fan Xuewu, Chen Rongli, Liu Bo, *et al.*. Optical design of prefixing objective of imaging spectrometer [J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 498-503.
樊学武, 陈荣利, 刘卜, 等. 一种成像光谱仪前置物镜的设计[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 498-503.
- 7 Chen Tingai. Research on the Optical System of Plane-Grating Imaging Spectrometer[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. 51-54.
陈廷爱. 平面光栅型成像光谱仪光学系统研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014. 51-54.
- 8 Tawfik T M. Efficient approach to designing a Schmidt-Cassegrain objective for a remote sensing satellite [J]. Appl Opt, 2009, 48(35): 6832-6840.
- 9 Yu Lei, Wang Shurong, Qu Yi, *et al.*. Broadband FUV imaging spectrometer: advanced design with a single toroidal uniform-line-space grating [J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4468-4477.
- 10 Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 274-275.
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 274-275.
- 11 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1990. 51-55.
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 51-55.
- 12 Winston R, Min-ano J C, Benitez P. Nonimaging Optics [M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. 21-46.
- 13 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang, *et al.*. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322007.
刘建鹏, 唐义, 黄刚, 等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322007.

栏目编辑: 韩峰