

分集阵列式水下激光通信光学接收天线设计

贺锋涛¹, 石文娟^{*1}, 朱云周², 张建磊¹

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121;

2. 中国船舶重工集团第 705 研究所 水下信息与控制重点实验室, 陕西 西安 710121)

摘要: 针对水下无线激光通信系统中对准困难的问题, 提出了一种分集阵列式光学接收天线, 在光学设计软件 Zemax 中分别设计出了复合光学接收天线和分集阵列式光学接收天线的结构, 分析了复合光学接收天线和分集阵列式光学接收天线的视场角、聚光效率以及光源移动范围, 并且通过实验和 Matlab 仿真给出两种光学接收天线的聚光效率随光源径向移动范围和光源入射角的关系, 结果表明: 当光源尺寸 10 mm 时, 复合光学接收天线的聚光效率是 0.06%, 接收视场角是 $\pm 6^\circ$, 光源径向移动范围是 ± 6 mm; 分集阵列式光学接收天线的聚光效率是 0.06%, 接收视场角是 $\pm 16^\circ$, 光源径向移动范围是 ± 22 mm。因此分集阵列式光学接收天线更适用于水下激光通信系统。

关键词: 水下无线激光通信; 分集阵列式光学接收天线; 视场角; 聚光效率

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0903005

Design of optical receiving antenna for underwater laser communication based on diversity array

He Fengtao¹, Shi Wenjuan^{*1}, Zhu Yunzhou², Zhang Jianlei¹

(1. College of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. Underwater Information and Control Key Laboratory, China Shipbuilding Group 705 Institute, Xi'an 710121, China)

Abstract: A diversified array optical receiving antenna was designed for the problem of alignment difficulty in underwater wireless laser communication systems. The optical structures of the composite optical receiving antenna and diversity array optical receiving antenna were designed by the optical design software Zemax, and the field of view angle, the light gathering efficiency and the light source moving range of the two kinds of antenna were analyzed. Besides, the light gathering efficiency as a function of the light source moving range and the incident angle of the light source of the two kinds of optical receiving antennas was given by experiments and Matlab simulations. The results show that when the light source size is 10 mm, the light gathering efficiency of the composite optical receiving antenna is 0.06%, the receiving field angle is $\pm 6^\circ$, the moving range of the light source is ± 6 mm. And the light gathering efficiency of the diversity array optical receiving antenna is 0.06%, the receiving field angle is $\pm 16^\circ$, the moving range of the light source is ± 22 mm. Therefore, the diversity array optical receiving antenna was more suitable for underwater laser communication systems.

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-05-20

基金项目: 国防科技创新特区(17-H863-01-ZT-001-008-05); 水下信息与控制重点实验室(XK 国防-01-61-KS-0176)

作者简介: 贺锋涛(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要从事水下激光通信、光电检测、光电跟踪等方面的研究。Email: hefengtao@xupt.edu.cn

通讯作者: 石文娟(1993-), 女, 硕士生, 主要从事激光通信、光学天线设计等方面的研究。Email: 1143139693@qq.com

Key words: underwater wireless laser communication; diversity array optical receiving antenna; field of view angle; light gathering efficiency

0 引言

无线激光通信技术具有容量大、速率高、体积小、质量轻、功耗低、可靠性高、保密性和安全性好等优点^[1-3],在水下对潜通信、海洋环境监测、水下无人机等多方面发挥重要的作用。随着高速、大容量数据通信的需求,水下无线激光通信网络的高速处理和大量的数据传输引起了人们的研究兴趣。

由于海水介质的吸收、散射以及海水通信信道的随机多变,水下传输的光信号衰减严重,使发射端与接收端的对准特别困难,影响了光信号的传输,所以采用光学接收天线降低对准困难,增加传输距离、减小误码率。在水下激光通信中,性能优良的光学接收天线的基本要求是接收视场大、效率高、质量轻、体积小、结构稳定、可靠性高^[4]等。目前国内外学者对激光通信光学接收天线已有深入研究,Zhang^[5]等研究了曲面复眼成像系统,其视场角可达88°。Wu^[6]等提出一种新型可见光无线通信可调复眼光学接收天线,其视场角可达92°。Yu^[7]等设计了口径为100 mm、视场为2°的离轴三反卫星激光通信光学天线。Sun^[8]等提出了一种空间激光通信系统的离轴天线系统,克服传统卡塞格林两镜系统存在接收视场小、发射效率低等缺点,但视场角也仅有0.35°。Suryakant Gautam^[9]等设计了焦距为439 mm、视场角为2°的离轴两式系统,并采用XY多项式对系统次镜进行表征。Hu^[10]等提出空间激光通信中卡塞格伦天线的优化设计,但存在次镜遮挡和主镜中空,不但会造成收发光束能量的损失,而且被遮挡的部分发射激光束可能直接反射到终端内部成为杂光,影响接收光学系统的性能。Liu^[11]等提出一种增加轴锥镜对同轴反射式光学结构激光发射天线方案,通过对入射光束的光强重新排布,降低能量损失,提高光能利用率,但视场角小。Guan^[12]等提出采用离轴两反天线结构并引入自由曲面设计以提高通信系统的性能,但视场角只有2.4°。Tao^[13]等提出太空激光通信网络光学天线,视场角也很小。Chen^[14]等研究了基于OFDM调制的520 nm激光阵列的26 m/5.5 Gbps空气水下

无线光通信系统,接收天线采用凸透镜,但视场角很小,光源和接收机不可移动,仅实现静止状态下的短距离高速率传输。Li^[15]等研究了一种5 m/25 Gbps的水下无线光通信系统,接收天线也采用凸透镜,但视场角仅有0.34°。

以上研究大多在空间激光通信,对水下激光通信光学接收天线的研究很少,并且视场角都很小。由于海水对光强的衰减比较大,增加了水下激光通信的对准难度。文中提出一种用于水下激光通信的分集阵列式光学接收天线,分析了接收天线的光学聚光效率、视场角以及光源径向移动范围,通过仿真与实验,结果显示:光源尺寸10 mm时,聚光效率是0.06%,视场角是±16°,光源径向移动范围是±22 mm。

1 激光在水中的传输模型

激光在水下传输时会受到水的吸收、散射以及光束扩展对激光功率的影响,尤其是长距离水下无线激光通信,其光功率的损耗与通信距离、接收天线孔径以及发射光源发散角有关,光束的扩展随距离的增加而增大,其光束扩展后的光功率可表示为^[16]:

$$p_r = p_i \left[\frac{a_r^2}{(d \tan \theta + a_i)^2} \right] \cdot \exp(-c(\lambda)d) \quad (1)$$

式中: p_i 为入射功率; p_r 为接收功率; a_r 为接收天线的孔径半径; a_i 为发射天线的孔径半径; θ 为光源的发散半角; d 为水下传输距离; $c(\lambda)$ 为海水总衰减系数,文中采用532 nm的绿光,在近海中 $c(\lambda)=0.305 \text{ m}^{-1}$,港湾中 $c(\lambda)=2.170 \text{ m}^{-1}$ 。

激光光强是高斯分布,由公式(1)可知在水中长距离传输后,激光功率快速下降,光斑虽然扩展,但在接收机灵敏度范围内能被通信探测器接收到的光斑仅有几毫米大小,使得发射端和接收端在水中的对准特别困难。所以研究水下无线激光通信光学接收天线降低对准困难特别重要。

2 水下无线激光通信对光学接收天线的要求

2.1 聚光效率

光学接收天线是增大有效接收面积,汇聚足够

多的光信号到小探测器上,因此聚光效率是评价光学接收天线性能好坏的重要指标之一。

聚光效率(η)是输出面与输入面光能量之比。通常定义透镜前方平面为输入面,焦平面为输出面。

$$\eta = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Φ_{in} 为输入面光能量; Φ_{out} 为输出面光能量。

2.2 视场角

在水下激光通信中,为了降低发射系统与探测器的对准困难,需要大的接收视场,以免激光在水中传输时由于环境影响导致通信性能下降。从几何光学考虑,接收光学天线要将光线耦合到探测器,将探测器放在接收天线的焦面上探测,透镜的汇聚角必须和探测器的接收角相匹配。

如图 1 所示, β 为探测器的最大接收角,为了使透镜接收到的光线尽量进入到探测器,透镜将平行

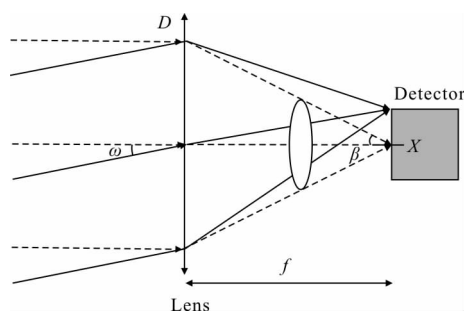


图 1 接收天线视场角的几何关系示意图

Fig.1 Geometric diagram of receiving antenna field of view

光汇聚时的角度应该小于探测器的最大孔径角,即:

$$\arctan \frac{D}{2f} < \beta \quad (3)$$

式中: D 为天线口径; f 为天线焦距。

在不考虑衍射受限的因素,透镜将光束汇聚后,聚焦光斑应落在探测器的有效区域内。当光束入射角度发生变化时,光斑就会在探测器上移动,当光斑移到有效区域的边界处,此时对应的入射角即为接收天线的视场角。所以接收天线的线视场半角可近似由探测器的半径和透镜焦距的比值决定^[18]。

$$\omega = \arctan \frac{x}{f} \quad (4)$$

式中: x 为探测器半径; f 为接收天线焦距。

3 分集阵列式光学接收天线的设计与特性分析

3.1 分集阵列式光学接收天线的设计

分集阵列式光学接收天线是由多个复合光学接收天线拼接组成,复合光学接收天线由菲涅耳透镜,复眼透镜和半球透镜组成,其中复眼透镜是由小六边形的平凸透镜组成。菲涅耳透镜在点对点通信中具有很高的聚光比,但光斑均匀性差、接收视场角小;相反复眼可以提高光斑均匀性,扩展光斑,半球透镜可以提高接收视场角,有效提高信噪比和接收动态范围。

文中设计的复合光学接收天线的参数如表 1 所示,输入光源直径是 10 mm,输入光功率是 1 W,光线追迹数是 1 000 000 条。其光路图如图 2 所示。

表 1 复合光学接收天线中各器件参数

Tab.1 Parameters of each device in the composite optical receiving antenna

Parameter	Light source	Fresnel lens	Compound eye lens	Hemispherical lens	Detector
Diameter/mm	10	17.41	17.41	3	0.2
Position/mm	-5	-2	0	100	102
Thickness/mm	-	2	2	1.5	-
Material	-	PMMA	PMMA	K9	Absorb

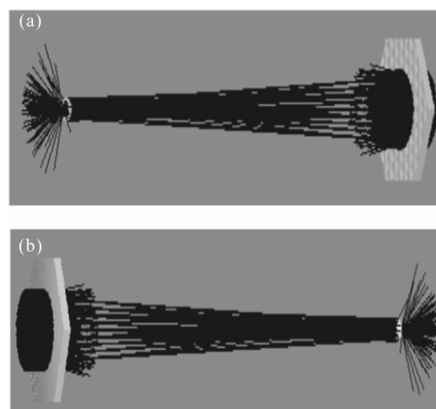


图 2 复合光学接收天线

Fig.2 Composite optical receiving antenna

复合光学接收天线的视场角小,为了再次增大探测器接收视场角和接收范围,使整个光学接收天线调整简单容易,降低对准困难,在复合光学接收天线

设计的基础上,设计出了分集阵列式光学接收天线,其平面布局图如图 3 所示。分集阵列式光学接收天线由中心六边形的主菲涅耳透镜、复眼透镜和周围六个子菲涅耳透镜、复眼透镜以及半球透镜组成,中心主镜和周围子镜的直径相等为 17.41 mm。相邻子镜之间有一定的夹角,周围子镜光轴与中心主镜光轴之间的夹角为 5°。图 4 是分集阵列式光学接收天线的光路图。

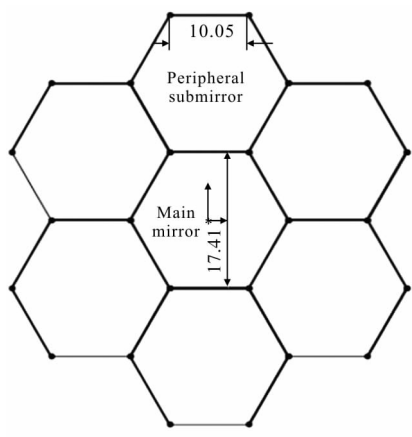


图 3 分集阵列式光学接收天线平面布局图

Fig.3 Diversity layout of the array optical receiving antenna

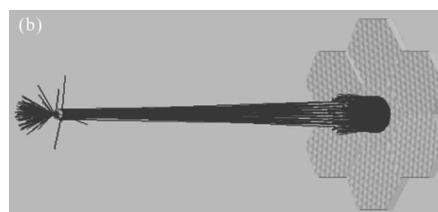
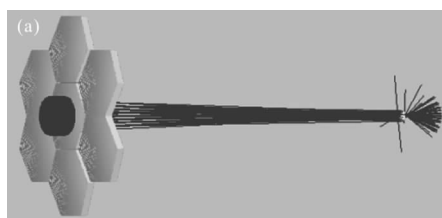


图 4 分集阵列式光学接收天线光路图

Fig.4 Diversity array optical receiving antenna optical path diagram

3.2 分集阵列式光学接收天线仿真与分析

通过由多个菲涅耳复眼透镜组成的分集阵列式光学接收天线,分析其在探测器上的光斑分布。由于分集阵列式光学接收天线结构的对称性,只分析光源入射主镜和周围一个子镜时的光斑分布,选用两个直径均为 10 mm 的光源 A、B,固定其中光源 A 在主镜中心位置且垂直入射,光源 B 入射光束与主镜光轴夹角变化且光源与主镜中心径向距离变化时,观察其光斑分布。为了清楚的看到光线经过分级阵列式光学接收天线后的光斑分布,选用半径为 30 mm 的探测器。图 5(a)、(b)分别是光源 B 在主镜中心位置且与主镜光轴夹角为 0°、5°入射主镜时,探测器上的光斑分布。图 5(c)~(f)分别是光源 B 入射光束与主镜中心径向距离 12 mm 且与主镜光轴夹角为 0°、5°、10°、15°同时入射主镜和周围一个子镜时,探测器上的光斑分布,由于光源 B 同时入射主镜和周围一个子镜,在 30 mm 探测器上可观察两

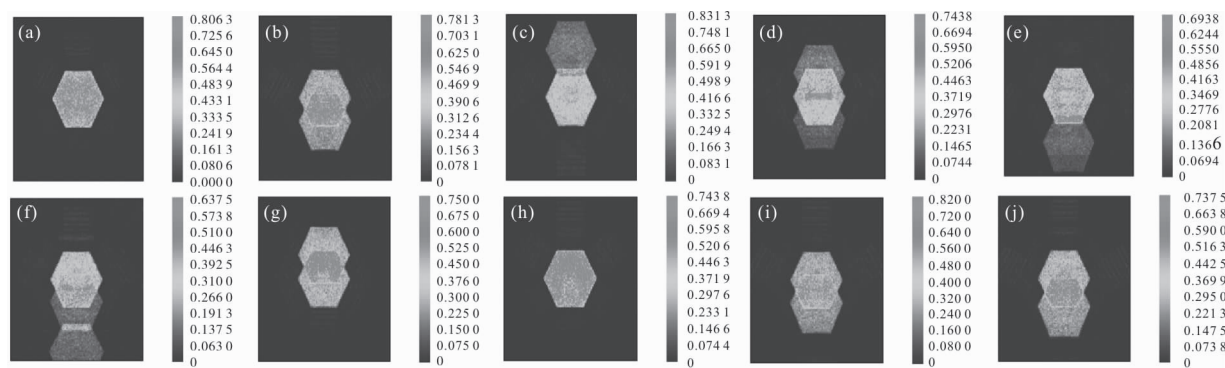


图 5 半径 30 mm 探测器接收到的光斑分布图

Fig.5 Spot distribution pattern received by the 30 mm detector

个光斑,其中图 5(c)、(e)中的一个光斑是光源 A、B 光斑的完全重合,所以图 5(c)、(e)在探测器上可见两个光斑;图 5(d)、(f)中光源 B 在探测器上的两个光斑与光源 A 在探测器上的光斑是部分重合,所以图 5(d)、(f)在探测器上可见三个光斑。图 5(g)~(j)分

别是光源 B 入射光束与主镜中心径向距离 22 mm、入射光束与主镜光轴夹角为 5°、10°、15°、16°入射周围一个子镜时,探测器上的光斑分布,由于光源 B 入射周围一个子镜,在 30 mm 探测器上可观察一个光斑,其中图 5(g)~(j)中光源 A、光源 B 的光斑部分

重合,所以图 5(g)~(j)在探测器上可见两个光斑;图 5(h)中光源 A、光源 B 的光斑完全重合,所以图 5(h)在探测器上可见一个光斑。从图 5 可以看出,入射光束与主镜中心径向距离不同且入射光束与主镜光轴夹角发生变化时,探测器上接收到的光斑都有重叠,所以分集阵列式光学接收天线之间没有盲区。

分集阵列式光学接收天线的接收口径是 26 mm,光源直径是 10 mm,光源距离菲涅耳复眼透镜的距离是 5 mm。图 6 是光束垂直入射且与主镜中心径向距离不同时,聚光效率的变化曲线。当光束垂直入射,随着光束与主镜中心径向距离增加,探测器接收到的光功率减小,光束与主镜中心径向距离在 0~17 mm

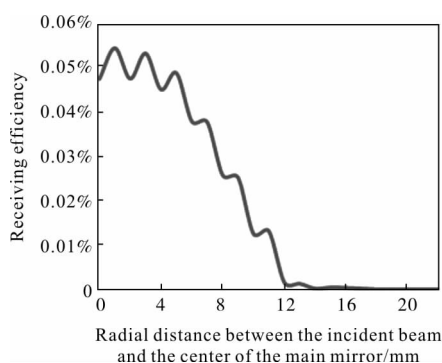


图 6 光束垂直入射时聚光效率

Fig.6 Concentration efficiency of normal incidence of light beam

范围内移动时,探测器接收到的光功率均在灵敏度范围内,即分集阵列式接收天线可接收到的范围是±17 mm。图 7 是光束与主镜光轴夹角不同且与

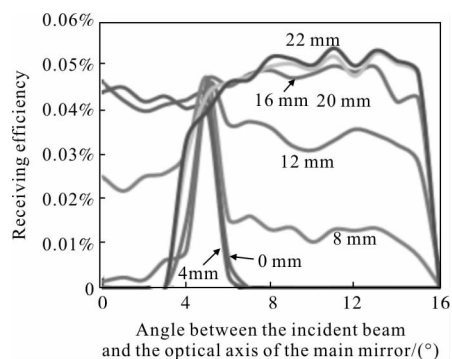


图 7 光束与主镜光轴夹角不同且与主镜中心径向距离不同的聚光效率

Fig.7 Concentration efficiency of the beam at different angles from the optical axis of the main mirror and concentration efficiency of the beam at a different radial distance from the center of the main mirror

主镜中心径向距离不同时,聚光效率的变化曲线。光束与主镜中心径向距离在 0~22 mm 范围内移动时,探测器在 0°~16°都可以接收到光功率,最大聚光效率是 0.06%。故分集阵列式光学接收天线通过在周围子镜与中心主镜之间设置夹角使系统接收视场角达到±16°,接收范围是±22 mm,并且接收视场连续没有盲区。

表 2 分别是复合和分集阵列式光学接收天线的接收范围和接收视场角,从表 2 可以看出,在 0.2 mm 尺寸的探测器上复合接收天线的接收视场角是±6°,接收范围是±6 mm;分集阵列式接收天线的接收视场角是±16°,接收范围是±22 mm。

表 2 接收范围和接收视场角

Tab.2 Receiving range and receiving field angle

Receiving parameter	Receiving field angle/(°)	Receiving range/mm
Composite receiving antenna	-6-6	-6-6
Diversity array receiving antenna	-16-16	-22-22

4 实验室水下激光传输实验

采用室内长 8 m 的水池进行实验。水下激光传输实验验证分集阵列式光学接收天线对经过水池中的水衰减后散射光的聚焦能力。信号接收端是封装好的分集阵列式光学接收天线,在其菲涅耳复眼透镜后方光轴方向 100 mm 处固定 3 mm 聚光半球透镜,在半球透镜后方 0.5 mm 处固定 0.2 mm 探测器,将其封装好后进行水下实验,图 8(a)、(b)分别是封装好的发射系统和接收系统,水池中将发射端固定在光学云台上,改变光源入射角和移动范围,在水池的另一侧放置接收端接收光能量,通过此方法测量接收天线的移动范围和接收视场角。

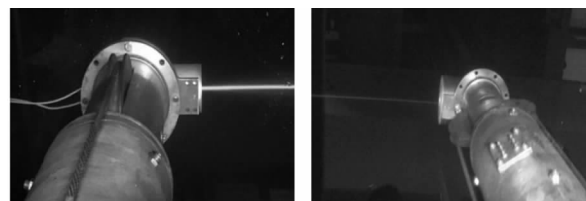


图 8 封装系统

Fig.8 Packaging system

图 9 是实验测得的光斑分布图,表 3 是实验测

得的分集阵列式接收天线的接收范围和接收视场角。

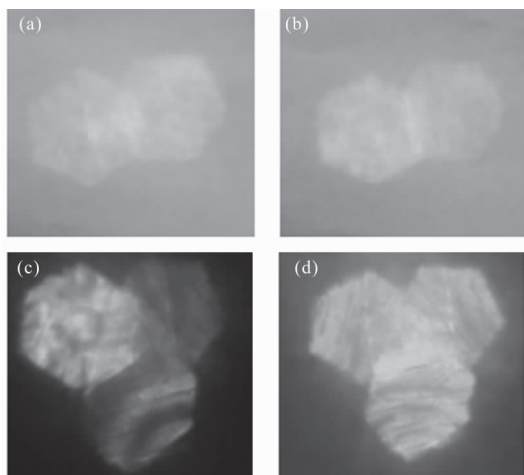


图 9 实验测得光斑分布图

Fig.9 Spot distribution by experiment

表 3 接收范围和视场角

Tab.3 Receiving range and field angle

Receiving parameter	Receiving field angle/(°)	Receiving range/mm
Simulation data	-16~16	-22~22
Experimental data	-15~15	-20~20

从图 9 可以看出，实验测得光斑和仿真光斑基本相同，光斑之间都有重叠，没有盲区。从表 3 可以看出，实验数据和仿真数据基本相同，证明了该设计的适用水下激光通信接收系统的可行性。

5 结 论

文中设计了一种应用于水下无线激光通信系统的光学接收天线，相比广角透射式接收天线，克服了水下激光通信中的对准困难问题，实现了聚光效率高的同时接收视场角和接收范围大的性能，降低了对外界环境的要求。通过仿真和实验验证，该分集阵列式光学接收天线之间没有盲区，接收视场角是，接收范围是。实现了大角度、宽范围的水下无线激光通信接收天线，为实现超高速、长距离的水下无线光通信提供了技术支持。

参考文献：

[1] Chan V W S. Optical satellite networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(11): 2811-2827.

[2] Borah D K, Boucouvalas A C, Davis C C, et al. A review of communication-oriented optical wireless systems [J]. *EURASIP J Wireless Commun. Networking*, 2012, 91: 1-28.

[3] Shen T C, Drost R J, Davis C C, et al. Design of duallink (wide-and narrow-beam) LED communication systems [J]. *Optical Express*, 2014, 22: 11107-11118.

[4] Li Shaohui, Chen Xiaomei, Ni Guoqiang. Highly precise ground certification system of satellite laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1149-1158. (in Chinese)
李少辉, 陈小梅, 倪国强. 高精度卫星激光通信地面验证系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1149-1158.

[5] Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Wang Ruiting, et al. Study on curved compound eye imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 346-350. (in Chinese)
张红鑫, 卢振武, 王瑞庭, 等. 曲面复眼成像系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 346-350.

[6] Wu Junfeng, Zhu Na, Jiang Xiaoming. A new type of adjustable compound eye optical array antenna for visible light communication [J]. *Wireless Communication Technology*, 2012, 21(4): 48-51, 54. (in Chinese)
吴俊峰, 朱娜, 江晓明. 一种新型可见光无线通信可调复眼光学接收系统[J]. *无线通信技术*, 2012, 21(4): 48-51, 54.

[7] Yu Jianjie, Li Xuanjiao, Tan Liying, et al. Off-axis optical telescope for satellite laser communication terminal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1890-1895. (in Chinese)
俞建杰, 李宣娇, 谭立英, 等. 离轴天线在卫星激光通信系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1890-1895.

[8] Sun Quanshe, Zhao Facai, Chen Kunfeng, et al. Design of off-axis optical antenna for space optical communications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2501-2505. (in Chinese)
孙权社, 赵发财, 陈坤峰, 等. 空间激光通信系统离轴天线设计研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2501-2505.

[9] Suryakant Gautam, Amit Gupta, Ganga Sharan Singh. Optical design of off-axis cassegrain telescope using freeform surface at the secondary mirror [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(2): 1-2.

[10] Yuan Hu, Lun Jiang, Chao Wang, et al. Optimum

- design of cassegrain antenna for space laser Communication[C]//SPIE, 2016,(10158): 10158-1-6.
- [11] Liu Xianzhu, Wang Chao, Li Yingchao, et al. Analysis of performance of high light-energy-utilization-ration laser communication antenna based on axicon pair [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 54-60. (in Chinese)
刘显著, 王超, 李英超, 等. 基于轴锥镜对的高光能利用率激光通信天线性能分析[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 54-60.
- [12] Guan Shu, Wang Chao, Tong Shoufeng, et al. Optical antenna design of off-axis two-mirror reflective telescope with freeform surface for space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017,46(12): 1222003. (in Chinese)
关姝, 王超, 佟首峰, 等. 空间激光通信离轴两镜反射望远镜自由曲面光学天线设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1222003.
- [13] Tao Zhang, Shan Mao, Qiang Fu, et al. Networking optical antenna of space laser communication [J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29 (1): 0120121-0120129.
- [14] Cheng Yifei, Kong Weimei, Ali Tariq, et al. 26 m/5.5 Gbps air-water optical wireless communication based on an OFDM-modulated 520-nm laser diode [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14760-14765.
- [15] Li C Y. A 5 m/25 Gbps underwater wireless optical communication system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 1-9.
- [16] Wang Fei, Yin Yafang, Yang Yi. Analysis of the influence of seawater channel laser transmission distance on the receiver sensitivity [J]. *Study on Optical Communications*, 2017(2): 23-26. (in Chinese)
王菲, 阴亚芳, 杨祎. 海水信道激光传输距离对接收功率的影响分析[J]. 光通信研究, 2017(2): 23-26.
- [17] Tang Shijian, Zhang Xuedan, Dong Yuhua. On impulse response for underwater wireless optical links [C]//2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen, 2013: 1-4.
- [18] Zhang Yixin. Transmission and Imaging of Light Waves in the Atmosphere [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 114-128. (in Chinese)
张逸新. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 114-128.