

基于光纤阵列的卡塞格伦收发一体天线

柯熙政 雷思琛 王天瑜

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 卡塞格伦结构简单, 安装方便, 但次镜的盲区使天线的发射效率降低。基于此, 设计了一种基于卡塞格伦望远镜的收发一体光学天线, 充分利用卡塞格伦天线有效区域(盲区以外的部分)作为发射。通过4个自聚焦透镜胶合光纤结构的端面环形离轴发射代替激光器高斯沿轴发射, 可有效规避次镜盲区的影响; 用大芯径塑料光纤接收信号, 不但耦合效率高, 且便于发射-接收对准。实际测试结果表明: 该天线系统易于对准, 发射损耗低, 满足一般无线光通信系统的要求, 最终实现收发一体。

关键词 空间光通信; 收发一体; 卡塞格伦天线; 自聚焦透镜

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120602

Cassegrain Transceiver Antenna Based on Fiber Array

Ke Xizheng Lei Sichen Wang Tianyu

Faculty of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Cassegrain antenna can be easily installed and its structure is much simpler. However, the blind area caused by the secondary mirror costs the transmission lost. A novel transceiver antenna based on Cassegrain telescope, which makes full use of Cassegrain antenna effective area (area outside part) as transmitting, is proposed. To effectively avoid the influence of blind zone, the annular distribution and off-axis transmission of four GRIN-lens glued fiber structures transverses insteads Gaussian distribution and along-axis transmission of the lasers. The large aperture plastic fiber is used as the receiving method to improve the coupling efficiency and it makes transmitting align with receiving easily. The test results show that the transceiver antenna is easy to align at a low transmission loss costs. It satisfies the requirements of the general free space optical communication (FSO) system, and ultimately achieves transceiver integrated in one Cassegrain antenna.

Key words free space optical communication; transceiver; Cassegrain antenna; GRIN-lens

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 140.3325; 060.2310

1 引言

光学天线是无线激光通信(FSO)系统的重要组成部分^[1-5]。在FSO系统中高效率的收发一体天线是研究的热点问题。卡塞格伦天线以其结构简单、增益大、焦距长(容易满足空间到光纤耦合条件)获得了广泛应用,但其存在一定的遮光比,影响天线的发射效率。提高卡塞格伦天线发射效率的方法有附加器件法^[6]、衍射光学元器件法^[7-8]和离轴发射法^[9-11]等。Takahashi等^[12]利用“红透绿反”滤光片实现收发一体,但该方法不能规避卡塞格伦天线盲区;Shang等^[13]通过在圆筒上均匀间隔分布接收单元和发射单元,以恒定或者变速旋转圆筒实现收发一体,但该天线对准困难且加工难度大。王宏锋^[14]采用伽利略望远镜作为发射天线、格里高利望远镜作为接收天线,并将发射天线固定到接收天线次镜遮挡的地方实现收发一体,该结构虽然发射效率提高,但结构复杂;杨华军^[15]利用准直系统、光纤隔离器、分光棱镜等光学器件在卡塞格伦天线焦点后方实现收发一体,该结构安装精度要求高、对准困难,收发效率低;冯涛^[16]用偏振光分束器把光束分成2个正交的偏振态,然后输出到2个保偏光纤中,实现收发一体光学系统,但该结构分束/合束时能量损失比较大。

收稿日期: 2015-07-10; **收到修改稿日期:** 2015-07-18; **网络出版日期:** 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助(61377080)、国家科技创新计划(13C26213201867)、江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)项目资助(BE2013088)

作者简介: 雷思琛(1988—),女,博士研究生,主要从事空间光耦合方面的研究。E-mail: lsc429@163.com

导师简介: 柯熙政(1962—),男,教授,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

本文设计了一种基于卡塞格伦望远镜的收发一体天线,充分利用卡塞格伦天线有效区域(盲区以外的部分)作为发射,通过自聚焦透镜的端面环形分布、离轴发射代替激光器点沿轴发射。这种设计保证发射点与接收点位置分离使得发射光路和接收光路分离,最终发射效率达到了80%,实现收发一体。

2 理论分析

2.1 天线设计

卡塞格伦天线^[7]为双反射设计,如图1所示,光线通过弯月校正镜后入射到主反射镜上,经过反射镜反射到次反射镜上,将光束进一步压缩在焦平面位置会聚,此处为整个卡式系统的焦点。由几何光学知识可知,将满足一定发散角的光源放置在系统的焦点位置,经过该卡塞格伦系统后,理想状态下将会得到一束平行光。但不难发现作为信号光发射天线,卡塞格伦天线存在盲区,如图1中阴影区所示,发散角较小的区域被第2遮拦遮挡,光线不能入射到主反射镜面上。从图2可以看出阴影部分的光束返回到第2遮拦内不能出射,对于基横模输出的激光光源来说,该部分光造成的发射能量损失至少在50%以上。

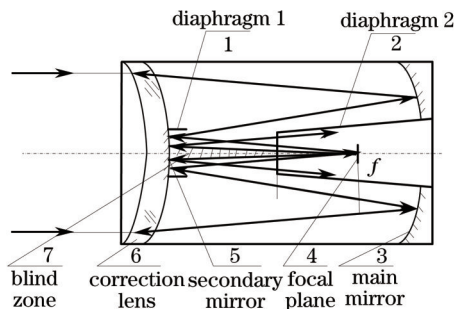


图1 卡塞格伦天线结构图

Fig.1 Cassegrain antenna structure diagram

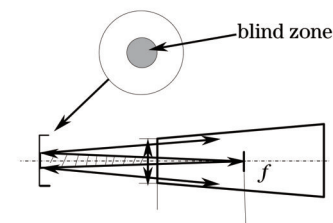


图2 卡塞格伦天线发射盲区

Fig.2 Blind zone of Cassegrain antenna

由图1可以看出从天线焦点 f 发出的光经过卡塞格伦天线后平行出射;由于光路可逆,所以天线接收到平行光后必定会聚到 f 点。如果来实现收发一体,则 f 点既要充当发射点也要充当接收点,发射和接收不能同时满足,因为两者存在遮挡。因此,要实现收发一体,必须确保发射与接收是不同光路并且发射点和接收点分离^[8]。

如图3所示,如果只考虑光路分离,发射点和接收点都在 f 点,不能解决遮挡问题。将激光耦合进光纤通过自聚焦透镜发射,用自聚焦透镜端面发射来代替激光器点发射,本质就是将光源前移并离轴(如图4所示),这样就可以满足发射与接收点分离,并且理论上可以实现光功率100%发射。从图4可看出,发射和接收光路分离,而且发射点和接收点也分离。

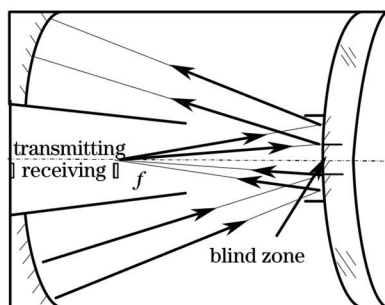


图3 发射与接收光路分离

Fig.3 Transmitting and receiving optical demultiplexing

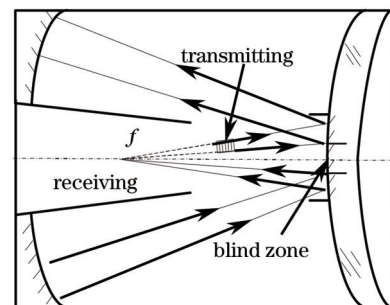


图4 光路分离-发射点/接收点分离

Fig.4 Launch point/receiver separation

2.2 Zemax 仿真

用Zemax对望远镜(SICONG)105 mm口径卡塞格伦天线进行单光源前移离轴发射仿真,利用1束带有发散角的高斯光束,避开盲区进行离轴发射。表1仿真所对应器件类型以及相应的参数,图中序号3-6为卡塞格伦天线整体系统,序号7为带发散角的光源,序号8为探测器。表中Detector表示探测器,Z-position表示探测器与卡塞格伦天线的距离,Source diode代表光源,X-divergence表示X方向发散角;Y-

divergence 表示 Y 方向发散角; Tilt about X 表示 X 方向的倾斜角, Z -positon 表示光源与次反射镜的位置。从表 1 可以看出, 如果要求出射光束为平行光, 则光源必须在距离次反射镜 90 mm 的位置以 1° 的发散角倾斜 5° 旋转进行发射。

表 1 卡塞格伦发射仿真参数

Table 1 Cassegrain antenna emission simulation parameters

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X
1 Source Po...		0	0	0.000	4.000	120.000	3.000
2 Source Po...		0	0	0.000	4.000	120.000	2.000
3 Standard ...	surfaces 2-3	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
4 Standard ...	mirror 4	3	0	0.000	0.000	16.000	0.000
5 Cylinder ...		4	0	0.000	0.000	100.000	0.000
6 Standard ...	mirror 4	5	0	0.000	0.000	113.000	0.000
7 Source Di...		0	0	0.000	3.000	90.000	5.000
8 Detector		0	0	0.000	0.000	-1.000E+007	0.000

图 5 是 2 维(2D)和 3 维(3D)卡塞格伦天线发射仿真图, 从图中可以看出发射没有受到卡塞格伦天线盲区的影响, 光能量几乎全部发射。

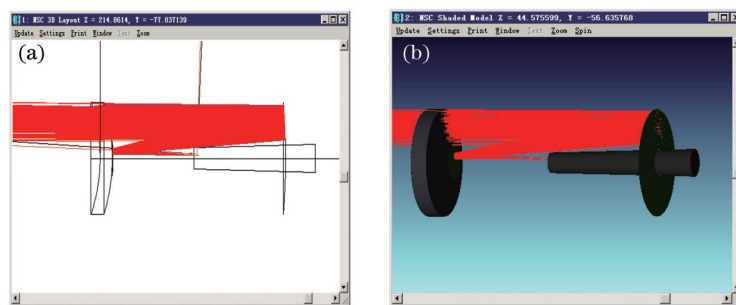


图 5 卡塞格伦发射仿真效果图。(a) 2D 仿真图;(b) 3D 仿真图

Fig.5 Cassegrain antenna emission simulation diagram. (a) 2D simulation charts; (b) 3D simulation charts

通过理论计算和仿真分析, 为满足收发一体设计要求, 最终选取端面大小为 2.8 mm、发散角为 1° 的自聚焦透镜准直器作为发射, 并在距离次镜 88 mm 处倾斜 5° 放置。

2.3 收发过程

图 6 为卡塞格伦天线收发一体示意图, f 为卡塞格伦天线系统焦点, 通过自聚焦透镜离轴发射代替激光器点沿轴发射, 同时在焦点 f 处通过塑料光纤接收。可以看出, 自聚焦透镜反向延长线正好会聚到接收点(焦点), 说明发射和接收焦点都在 f 处。同时发射光斑规避了卡塞格伦天线盲区, 利用盲区以外的有效区域发射。可以明显看出: 发射和接收的光路不同、位置分离, 发射光斑等效从焦点 f 发射, 接收光斑会聚到焦点 f , 实现了卡塞格伦收发一体天线。图 7 为实现收发一体的实际机械结构图, 只需对卡塞格伦第 2 遮拦进行简单改造, 利用自聚焦透镜准直器、光纤和机械结构即可实现收发一体。

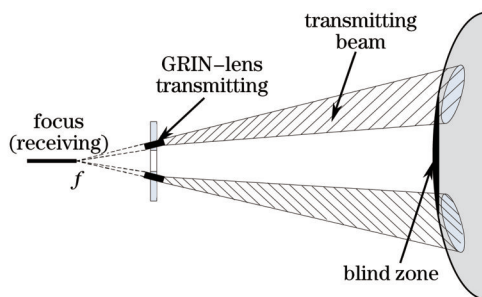


图 6 收发一体过程

Fig.6 Transceiver process

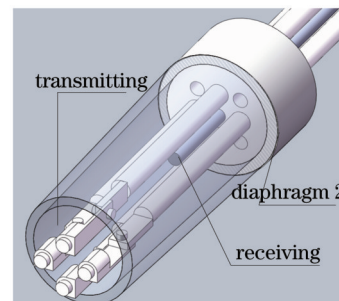


图 7 收发一体的机械结构图

Fig.7 Mechanism diagram of transceiver

3 实验研究

实验设备如表 2 所示, 2 个卡塞格伦天线(以下称望远镜 A 和望远镜 B) 分别作为上下行天线, 每个天线安装 4 个自聚焦透镜准直器(如图 7 所示), 其中每个安装自聚焦透镜准直器的光纤都通过光纤(FC 接口)连

接1个带尾纤输出的激光器作为发射进行收发一体实验。实验地点为西安理工大学教学6楼8层,实验最远距离可达120 m。

表2 实验设备

Table 2 Experimental equipment

Name	Parameter
Cassegrain antenna	Aperture: $D=105$ mm, Focal length: $f=1365$ mm
Fiber laser source	Wavelength: 650 nm, Power: 5 mW, Power distribution: Gaussian distribution
GRIN collimator	Divergence angle: 1°
Power supply	Direct current 12 V
Optical power meter	Range: 2~50 mW

3.1 4个自聚焦透镜发射

图8~10为4个自聚焦透镜在不同距离时光斑发射图。图8为望远镜A和望远镜B在10 m处的光斑图;图9为望远镜A和B在50 m处的光斑;图10为望远镜A和B在100 m处的光斑图。理论情况下出射光为4束平行光,即它们的光轴是平行的。但是通过对比明显看出100 m处的光斑比50 m处的光斑大,说明出射光束还存在发散角,但是4束光的光轴依然平行,100 m处光斑大小仍然满足望远镜接收要求。

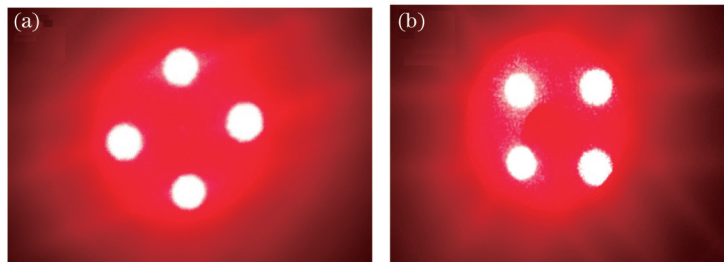


图8 10 m望远镜发射光斑图。(a) 望远镜A;(b)望远镜B

Fig.8 10 m distance telescope launch spots. (a) Telescope A; (b) telescope B

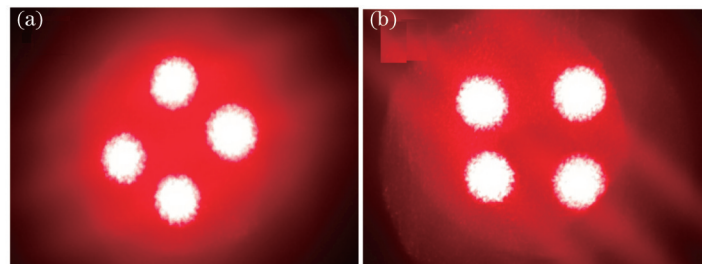


图9 50 m望远镜光斑图。(a) 望远镜A;(b)望远镜B

Fig.9 50 m distance telescope launch spots. (a) Telescope A; (b) telescope B

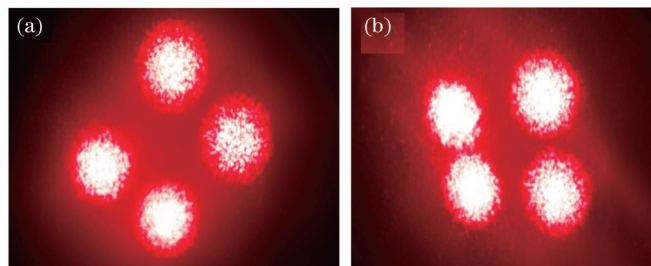


图10 100 m望远镜光斑图。(a) 望远镜A;(b)望远镜B

Fig.10 100 m distance telescope launch spots. (a) Telescope A; (b) telescope B

在卡塞格伦天线焦点处,通过塑料光纤接收发射光斑。表3和表4分别记录了不同距离时2个望远镜的发射和接收功率。可以看出随着距离的增大,接收功率变小。通过实验可以看出:卡塞格伦天线可以成功发射出规则且满足要求的光斑;同时通过塑料光纤在卡塞格伦焦点处成功接收光斑。虽然耦合接收效率较低,但是光纤阵列的卡塞格伦系统可使发射与接收相互独立并且同时进行,最终实现基于光纤阵列的卡塞格伦收发一体天线。

表3 收发一体天线发射和接收功率

Table 3 Transceiver antenna transmitting and receiving power

Distance /m	Transmit power from telescope A /mW	Receiving power in telescope B /mW
10	16.8	3.3
50	16.8	2.76
100	16.8	2.5

表4 收发一体天线发射和接收功率

Table 4 Transceiver antenna transmitting and receiving power

Distance /m	Transmit power from telescope B /mW	Receiving power in telescope A /mW
10	16.3	3.2
50	16.3	2.6
100	16.3	2.49

实验中分析了不同距离下2个望远镜的发射光斑和接收到对方望远镜并耦合进光纤的光功率。测得望远镜出射光斑是圆形光斑,表明自聚焦透镜发射光束成功规避了盲区全部出射;在天线出射光束的同时,接收到对方天线出射光斑,用光功率计测得耦合进光纤的功率,发现随着距离的增加,接收功率逐渐减小,光斑变大,接收效率大约在20%,发射效率高达80%。一方面,光纤阵列收发天线对安装精度要求很高,相比于理想状态而言,存在更多干扰因素,导致接收到的4个光斑在焦点处很难严格地会聚成一点,所以导致接收效率下降;另一方面,由于理论和实际存在误差,达不到将发散角控制在微弧度的要求,所以存在一定发散角,光斑变大。

3.2 光斑模式分析

利用 OPHIR-SP620U 光束分析仪对2组望远镜发射光斑进行了分析。光束分析仪中光束强度等级从高到低依次用红、橙、黄、绿、青、蓝、紫代表。图11为一束高斯光束,从中间向四周按从强到弱等级划分。

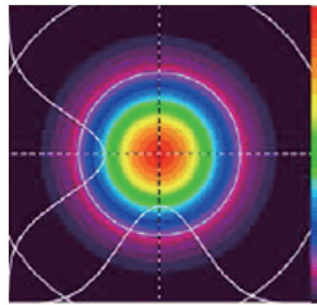


图11 高斯光束强度分布

Fig.11 Intensity distribution of Gaussian beam

在望远镜出射口对4束光斑进行分析,望远镜A的光斑强度分布如图12所示。图12(a)为强度分布的2D图形,可以看出光斑从中间到四周强度变弱;图12(b)为强度分布的3D图形,可以看出4束光都类似高斯分布,中间最高为红色,然后向四周扩展的同时强度降低,扩展到最边缘时变为紫色。虽然光束不是连续而且光滑地向四周扩展,但是整体上仍为高斯光束,并且单个光斑模式为 TEM_{00} 模式,4个光斑整体为 TEM_{11} 模式。

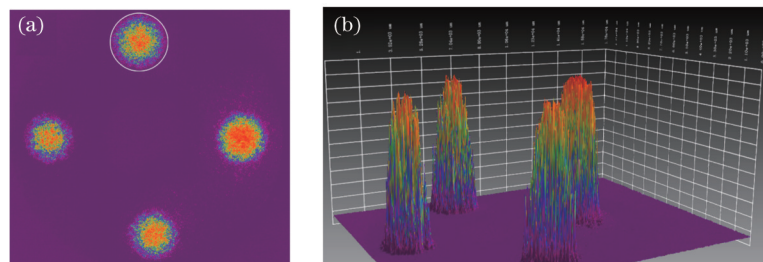


图12 望远镜A端口出射光斑光强分布。(a) 强度2D分布;(b) 强度3D分布

Fig.12 Distributions of telescope A light spots intensity. (a) 2D distribution of intensity; (b) 3D distribution of intensity

望远镜B的光斑强度分布如图13所示。图13(a)为强度分布的2D图形,图13(b)为强度分布的3D图

形,整体上为高斯光束,且单个光斑模式为 TEM_{00} 模式,整体光斑为 TEM_{11} 模式,与望远镜 A 类似。

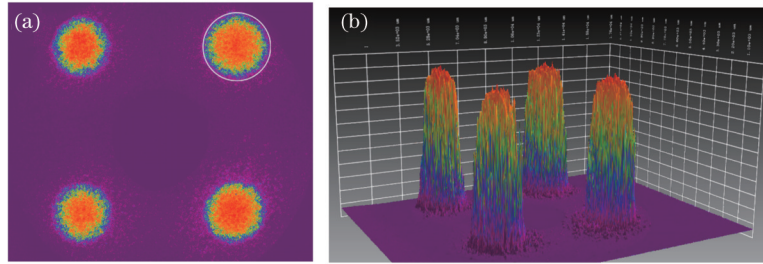


图 13 望远镜 B 端口出射光斑光强分布。(a) 强度 2D 分布; (b) 强度 3D 分布

Fig.13 Distributions of telescope B light spots intensity. (a) 2D distribution of intensity; (b) 3D distribution of intensity

4 结 论

研制了一种基于卡塞格伦的收发一体天线,利用有效区域作为发射和接收,使发射和接收光路分离,同时提高了发射效率;将激光耦合进光纤连接到自聚焦透镜,使用自聚焦透镜端面发射代替激光器点发射,从而使发射点和接收点分离。分析了 10、50、100 m 距离下 2 个望远镜的发射光斑和接收到对方望远镜并耦合进光纤的光功率。并且通过光束分析仪分别对望远镜端口和 50 m 处光强分布进行了分析,通过光强分布图可以看出,出射光斑依然是高斯光束。最终完成 2 个望远镜天线同时发射且同时接收的效果,实现了接收效率大约在 20%,发射效率高达 80% 的基于卡塞格伦的收发一体天线。

参 考 文 献

- 1 Ke Xizheng, Xi Xiaoli. Introduction to Wireless Laser Communication[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004: 25-27.
柯熙政, 席晓莉. 无线激光通信概论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 25-27.
- 2 Fang Jingyue, Chang Shengli, Qin Shiqiao, *et al.*. Optical communication antenna based on Fresnel zone plate[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 36-42.
方靖岳, 常胜利, 秦石乔, 等. 基于菲涅耳波带片的光通信天线[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 36-42.
- 3 Zheng Yang, Fu Yuegang, Hu Yuan, *et al.*. Research on four-mirror dynamic alignment based on space laser communication link networks[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105001.
郑 阳, 付跃刚, 胡 源, 等. 基于空间激光通信组网四反射镜动态对准研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105001.
- 4 Jia Xiaodong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, *et al.*. Optimal design of the telescope in coherent lidar and detection performance analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0301001.
贾晓东, 孙东松, 舒志峰, 等. 相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0301001.
- 5 Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei. Analysis of optical aberration impact on acquisition performance[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1005004.
吴从均, 颜昌翔, 刘 伟. 像差对通信捕获光斑质心的影响分析[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005004.
- 6 Zhang Yuxia, Ai Yong. Drawback of Cassegrain antenna system based on space optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 560-564.
张玉侠, 艾 勇. 基于空间光通信卡塞格伦天线弊端的探讨[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 560-564.
- 7 Yu Jianjie, Tan Liying, Ma Jing, *et al.*. A novel method to improve the emission efficiency of satellite optical communication terminal[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(3): 581-586.
俞建杰, 谭立英, 马 晶, 等. 一种提高卫星光通信终端发射效率的新方法[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 581-586.
- 8 Lin Yong. Design of Diffractive Optical Elements for Laser Beam Shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
林 勇. 用于激光光束整形的衍射光学元件设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- 9 Mao Hongmin, Xu Jing, Zhen Shenglai, *et al.*. Off-axis use of Cassegrain telescope in heterodyne detection system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 508-511.
毛红敏, 徐 静, 甄胜来, 等. 外差探测系统中马卡望远镜离轴使用的研究[J]. 应用光学, 2008, 29(4): 508-511.
- 10 Ran Yinghua, Yang Huajun, Xu Quan, *et al.*. Properties of Cassegrain optical antenna with inclined optical axis[J]. Acta

- Physica Sinica, 2009, 58(2): 946-951.
冉英华, 杨华军, 徐 权, 等. 卡塞格伦光学天线偏轴及性能分析[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 946-951.
- 11 Lei Sichen, Ke Xizheng. Laser emitted through the off-axis Cassegrain antenna[C]. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Communication Technologies and Systems, 2013.
- 12 Koichi Takahashi, Nobuo Nakajima. Design and evaluation of fiber direct coupling optical antennas for next generation optical wireless communication systems[C]. Tokyo: 2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, 2010: 129-136.
- 13 Tao Shang, Jijun Jia, Xin Wang. Analysis and design of a multi-transceiver optical cylinder antenna for mobile free space optical communication[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(8): 2384-2392.
- 14 Wang Hongfeng. The Design of Free Space Optical Communication System and the Reaserch of Optical Antenna[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004.
王宏锋. 自由空间光通信系统设计与光学天线部分的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2004.
- 15 Yang Huajun. Design and Implementation of High Precision Laser Alignment and Optical Antenna in Space Optical Communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2007.
杨华军. 空间光通信中高精度激光束准直和光学天线设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- 16 Feng Tao. Study of Coupling System of a Novel Optical Antenna[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
冯 涛. 新型光学天线耦合系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- 17 Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan, *et al.*. Laser reflection characteristics of cat eye effect of Cassegrain lens [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1149-1155.
赵延仲, 宋丰华, 孙华燕, 等. 卡塞格伦镜头的猫眼效应激光反射特性[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1149-1155.
- 18 Ke Xizheng, Lei Sichen. The Cassegrain Transceiver Antenna Based on Optical Fiber Array: China, 201410174446. 6[P]. 2014-04-28.
柯熙政, 雷思琛. 基于光纤阵列的卡塞格伦收发一体天线及收发一体方法: 中国, 201410174446. 6[P]. 2014-04-28.

栏目编辑: 王晓球