

doi:10.3788/gzxb20174610.1023001

卡塞格伦光学天线收发隔离度分析与测试

夏方园^{1,2,3}, 杨建峰¹, 么周石³, 李帅³, 汪波³, 陈祥³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安空间无线电技术研究所, 西安 710100)

摘 要:根据激光通信系统中捕跟和通信探测器的实际应用情况, 分别使用消光比和单像元信噪比两种方案评价卡塞格伦光学天线的收发隔离能力, 提出了在卡塞格伦光学天线次镜打孔和增加光陷阱的方式抑制后向散射的方法, 推导得出当卡塞格伦光学天线次镜开孔的孔径比为 0.1~0.3 时不影响发射效率, 测试结果表明:改进后的卡塞格伦光学天线收发隔离度优于-40 dB, 并满足激光通信系统光学天线捕跟和通信的使用要求。

关键词:光通信; 杂散光; 隔离度; 消光比; 发射效率

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)10-1023001-6

Transmit-receive Isolation Analysis and Test of Cassegrain Optical Antenna

XIA Fang-yuan^{1,2,3}, YANG Jian-feng¹, YAO Zhou-shi³, LI Shuai³, WANG Bo³, CHEN Xiang³

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Xi'an Institute of SPACE Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Two schemes such as single pixel signal to noise ratio and extinction ratio are used to evaluate transmit-receive isolation ability based on the practical application of the tracking and communication detector in laser communication system. A method to inhibit the back scattering light was presented which boring a hole in the secondary mirror and increasing light trap. It is derived that when aperture ratio of secondary mirror K is 0.1~0.3, it dose not affect the emission efficiency, the measured results show that the improved Cassegrain optical antenna Transmit-Receive isolation is lower than -40 dB while not affecting the emission efficiency of system, and meet the requirements of laser communication system acquiring, tracking and communication.

Key words: Optical communication; stray light; Isolation ; Extinction ratio; Emission efficiency

OCIS Codes: 230.0250; 290.1350; 120.700; 120.5820; 120.6085

0 引言

卫星光通信系统需要满足几千公里至几十万公里的通信距离, 信标/信号激光经过远距离的空间传输, 能量损耗严重, 卫星激光通信设备是弱光探测系统, 同时激光发射功率较强, 因此高收发隔离度和高效率的光学天线是实现长距离、多波长、全双工激光通信的关键。卡塞格伦光学天线由于光学口径大, 工作波长范围宽, 消像差能力强, 结构简单, 像质优良等原因^[1-3]被美国、欧洲、日本以及中国广泛应用于卫星激光通信终端。如何抑制激光通信系统内部杂散光, 提高卡塞格伦光学天线收发隔离度乃至系统捕跟、通信灵敏度, 是激光通信系统需要重点解决的问题。早在 90 年代 SILEX 终端发射前期时, 欧空局就对激光终端光学天线次镜

基金项目:国家自然科学基金(No.61231012)资助

第一作者:夏方园(1987—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为激光通信系统设计及光机系统分析. Email: xfy8722@qq.com

导师:杨建峰(1968—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为空间光学, 成像光谱等. Email: yangjf@opt.ac.cn

收稿日期: 2017-04-20; **录用日期:** 2017-07-06

<http://www.photon.ac.cn>

遮挡造成的后向散射进行过测试,并开展了高稳定性镀膜的研究^[4];中航工业集团对卡塞格伦望远镜设计了蜂窝结构的超短遮光罩,同时达到传统结构杂散光抑制水平^[5];北京理工大学对卡塞格伦 R-C 形式的望远镜进行改进,设计了同轴三反光学系统的杂散光抑制结构,实现了大视场的轴外杂散光抑制^[6];长春理工大学通过设计光陷阱结构增加点源透射比的测试精度^[7].本文通过分析传统卡塞格伦光学天线后向杂散光传播路径,以次镜打孔和设置光陷阱的方式抑制杂散光,推导了次镜开孔的孔径比范围,最终将传统型卡塞格伦光学天线隔离度提高了将近 20 dB.最后,根据激光通信探测器的结构形式和作用,使用两种方式评价卡式天线收发隔离度,搭建了发射效率和收发隔离度的测试装置,验证了改进后的卡塞格伦光学天线收发隔离度满足指标要求并且不影响发射效率.

1 收发隔离度评价函数

在激光通信光学系统中,卡塞格伦光学天线一般是由抛物面的主镜、双曲面的次镜和目镜组成,实现发射扩束和接收缩束的作用^[8].发射时,大功率信标/信号光经中继光路的准直、分光后到达卡塞格伦光学天线,在传输过程中产生后向散射光,杂散光到达捕跟和通信探测器焦面处会影响光电探测器信噪比乃至激光通信系统的捕跟精度和通信误码率,中继光路及卡塞格伦光学天线光路如图 1 所示.

根据激光通信光学系统中捕跟和通信探测器的实际应用情况,常用的跟踪探测器为电荷耦合器件图像传感器 (Charge Coupled Device, CCD) 和互补性氧化金属半导体 (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS),通信探测器为雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode, APD),由于各个探测器的结构及作用不同,需要建立不同的评价函数研究杂散光的影响^[9-10].本文选用消光比 (Extinction Ratio, ER) 作为通信时系统杂散光抑制能力评价指标,其定义为

$$ER = 10 \log (P_0 / P_1) \quad (1)$$

式中, P_0 为到光学天线的后向散射功率, P_1 为发射的激光功率.

选用单像素信噪比 (Single Pixel Signal to Noise Ratio, SNR) 作为捕跟时光学系统杂散光抑制能力评价指标^[11],其中单像素信噪比定义为聚焦后的信标光在 CMOS/CCD 相机上成像最大光强接近饱和灰度值时对应的电子数与后向散射产生的杂散光在相机上成像的最亮像元灰度值对应的电子数的比值.

其表达式定义为

$$SNR = 20 \lg (13500 / N) \quad (2)$$

式中 N 是杂散光最大灰度值/0.019, 0.019 是相机 8 bit 输出下的转换因子, 13 500 是相机灰度 255 对应的电子数.

激光通信系统属于远距离弱信号探测系统,假设发射功率为 37 dBm,通信接收探测器 APD 灵敏度为 -48 dBm,捕跟相机 CMOS 接收灵敏度为 -65 dBm,此时整个光通信系统需满足捕跟支路隔离度大于 110 dB,通信支路隔离度大于 95 dB,考虑到中继光路通过波长分光片和光谱滤光能实现 70 dB 的隔离,因此光学天线的消光比要求为大于 40 dB.

2 后向散射抑制方案

针对某卡塞格伦光学天线的三维结构,使用 ASAP 杂光分析软件仿真其后向散射传输路径,由图 2 可知后向散射主要来自三个部分:一类是由 $\lambda/4$ 波片直接反射回光;第二类是目镜组靠近出瞳的透镜曲面反射回光;第三类就是卡塞格伦光学天线双曲面次镜光轴附近的后向散射,这部分也是最主要的杂散光源.

不同的杂散光来源有相应的抑制方法,对于第一类杂散光,通过偏转 $\lambda/4$ 波片安装角度,即相对于光轴

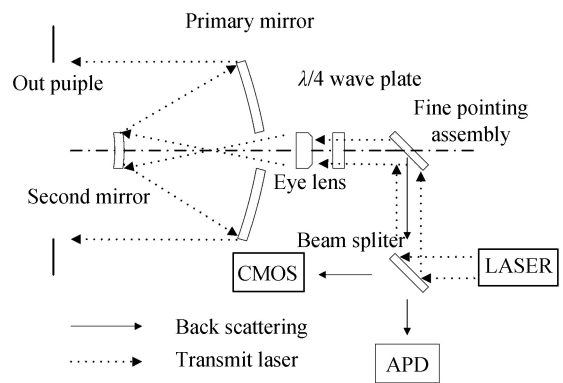


图 1 光学系统光路传输示意图
Fig.1 Schematic of laser propagation in a laser communication system

有一个小夹角,该夹角应略大于超前瞄及精指向机构反射镜的偏转角度;对于第二类杂散光需要在光学设计时优化目镜组结构,尽量使透镜曲率半径减小,降低回波区域;第三类杂散光对于传统卡塞格伦天线是无法避免的,也是这三类杂散光中后向散射最严重的部分。

根据何丽^[12]等人的研究,卡塞格伦光学天线主次镜遮拦比为 0.2 时增益最大.以某卡塞格伦光学天线为例,有效通光口径为 150 mm,发射高斯光束束腰为 9.5 mm,经 FPA 以 0~20 mrad 到达卡塞格伦天线,在距离目镜组 100 mm 的位置设置后向散射探测像面,使用 ASAP 仿真软件计算^[7-8]光学天线收发隔离度及发射效率,在建模时已通过沿光轴旋转 $\lambda/4$ 波片 3° 减少第一类杂散光,光学设计避免了第二类杂散光,仿真结果如图 3、图 4,其中图 3 为出瞳光强分布图,图 4 为后向散射光强分布及点列图.假设发射光功率为 1 W 时,计算得到发射激光以 0~20 mrad 角度发射,对发射效率及后向散射光功率影响不大,800 nm 波长激光发射效率 $\eta=78.7\%$,其中第一和第二类杂散光功率为 4.8448×10^{-4} W,第三类后向散射杂散光功率为 2.2799×10^{-3} W,探测器接收到的后向散射光功率为 $P=2.8499 \times 10^{-3}$ W,即光学天线的隔离度为 -21.73 dB,距离系统指标要求的 -40 dB 隔离度还有较大差距。

由仿真分析结果可知,第一类和第二类杂散光占到了整个后向散射能量 17%,后向散射 80% 以上的能量都集中在次镜光轴附近区域,要想解决第三类后向杂散光,必须在次镜中心打孔,并在次镜座设置光陷阱吸收透过的光,同时又要考虑系统发射效率,因此需要推导次镜开孔的孔径比、收发隔离度及发射效率之间的数学关系。

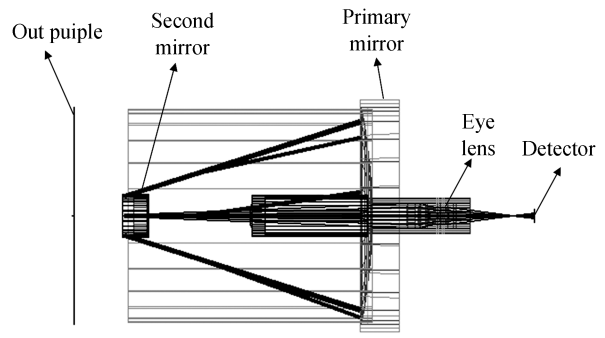


图 2 卡塞格伦光学天线后向反射路径仿真
Fig.2 Simulation of backward reflection path of Cassegrain optical antenna

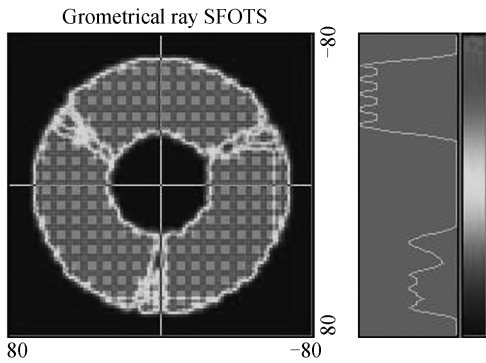


图 3 出瞳光强分布

Fig.3 Intensity distribution diagram of outpupile

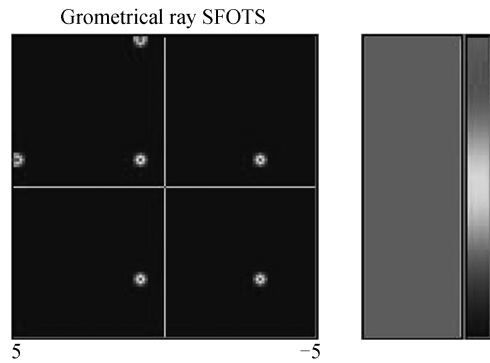


图 4 后向散射光强分布

Fig.4 Intensity distribution diagram Back scattering

对于卡塞格伦光学天线,根据上述的仿真分析,发射的大功率激光由于后向散射产生的杂散光可表征为次镜光轴附近产生的后向反射 P'_s 以及目镜处的光学镜组表面产生后向散射 P_e 之和,其数学表达式为

$$P = P'_s \cdot T + P_e \quad (3)$$

式中 T 是目镜组的光学透射率, P_e 可以根据辐射传递方程可表达为

$$P_e = P_{source} \cdot \text{BSDF}(\theta, \varphi)_e \cdot \Omega_{detector} \quad (4)$$

式中 $\text{BSDF}(\theta, \varphi)_e$ 为目镜组光学表面的双向散射分布函数, $\Omega_{detector}$ 为探测器的立体接收视场,一般的光学表面 BSDF 采用哈维模型的修正形式,该函数取值可以通过表面粗糙度有关函数进行换算,也可以通过杂散光测量仪测量各个角度因子下的散射功率拟合得到。

假设发射激光场强服从类高斯分布,则发射激光束沿 z 向传输的光强分布为^[13]

$$I(z) = \frac{A^2}{w^2(z)} \cdot e^{-\frac{2\rho^2}{w^2(z)}} \quad (5)$$

式中, A 为光束截面中心的振幅, ρ 是光束截面半径, w 为光束截面半径有关的参数,对式(5)积分可得发射

的激光到达次镜时光功率 P_s 为

$$P_s = \iint I(z) d\sigma = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\rho} I(z) \rho d\rho \quad (6)$$

假设次镜尺寸半径为 R , 需要开孔半径为 r , 则卡塞格伦光学天线次镜后向散射光功率由式(6)可得

$$P'_s = \frac{\pi A^2}{2} \cdot [1 - e^{-2r^2/\omega^2(z)}] \quad (7)$$

此时卡塞格伦光学天线的发射效率为

$$\eta_t = (1 - P'_s/P_s) \times 100\% \quad (8)$$

由式(4)、(5)、(6)得到发射效率为

$$\eta_t = \frac{e^{-2r^2/\omega^2(z)} - e^{-2R^2/\omega^2(z)}}{1 - e^{-2R^2/\omega^2(z)}} \quad (9)$$

设次镜开孔孔径比为 K , 即有

$$K = r/R \quad (10)$$

为了方便计算, 取 $\omega(z) = R$, 即发射光束到达次镜时光斑半径近似等于次镜尺寸半径, 将式(10)代入式(9)得到次镜孔径比和发射效率的关系式为

$$\eta_t = (e^{-2K^2} - e^{-2}) / (1 - e^{-2}) \quad (11)$$

由式(11)可知, 当卡塞格伦光学天线的各项光学、机械结构参数确定后, 发射效率只与次镜傍轴附近区域后向反射导致的能量损失有关, 计算出 K 值, 同时得到次镜开孔尺寸, 即可在不影响卡塞格伦光学天线发射效率的情况下, 后向散射能量最小. 根据本文中卡塞格伦的例子, 仿真计算出 1 550 nm 波长激光发射效率为 78.7%, 代入式(11)计算得 $K = 0.3$, 次镜半径为 $R = 15$ mm 时, 次镜开孔半径 r 不大于 4.5 mm 即可不影响发射效率, 并在次镜座设置光陷阱, 光陷阱为圆锥形状结构, 内表面加工消光螺纹增加杂散光的多次散射, 然后喷上消光黑漆, 黑漆牌号为上海有机所的 SB-3, 对于 800 nm 和 1 550 nm 波段的吸收率约为 98%, 逐次计算卡塞格伦光学天线不同次镜开孔孔径比对应的发射效率和隔离度, 得到改进后光学天线的发射效率 η 、隔离度 ER 与次镜开孔的孔径比 K 关系曲线, 如图 5.

由图 5 分析可知, 当卡塞格伦光学天线次镜孔径比 K 为大于 0.1 时, 光学天线收发隔离度基本保持不变, 孔径比小于 0.3, 发射效率也基本保持不变, 这个结果也与理论分析结果吻合, 结合式(3)可知, 次镜打孔只能消除次镜光轴附近后向散射光, 一旦光学系统探测器位置确定, 目镜组的后向散射是一固定值, 因此提高目镜组透射效率, 减小表面粗糙度也是抑制后向散射的手段. 在实际工程应用中, 考虑次镜散热及光学加工的方便性, 取 $K = 0.2$, 此时卡塞格伦光学天线在 1 550 nm 处的发射效率为 78.75%, 隔离度为 -41.4 dB, 满足系统指标要求.

3 隔离度及发射效率测试

3.1 隔离度测试

光学天线消光比测试方案如图 6, 在光学天线入口处加入反射镜 1, 调整分光镜、光学天线的相对位置, 使激光器发出的光能够自准直到其出光口, 将反射镜 1 遮挡; 加入反射镜 2, 调整位置使激光器发出的光自准直到其出光口处, 取消反射镜 1 的遮挡, 调整激光器位置对准光轴, 记录此时功率计读数为 P_0 , 撤掉反射镜 2, 记录此时功率计读数 P_1 .

按照式(12)计算光学天线隔离度

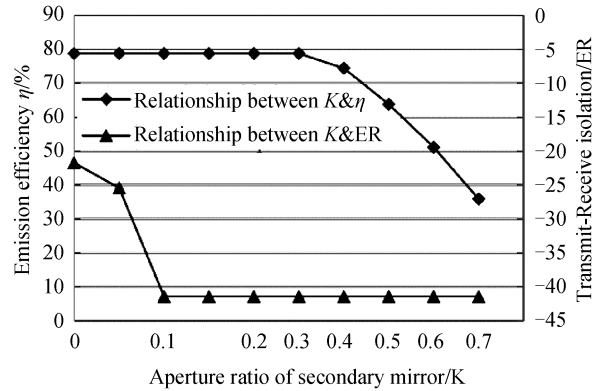


图 5 次镜孔径比与发射效率、隔离度的关系

Fig.5 Relationship of aperture ratio of secondary mirror, emission efficiency and Transmit-Receive isolation

$$ER=10\lg[(P_0-P_1)/P_1 \cdot R_2] \quad (12)$$

式中 R_2 为反射镜 2 在 1 550 nm 和 800 nm 波长处的反射率,经测试计算得到卡塞格伦光学天线在 1 550 nm 波段处收发隔离度为 40.76 dB.再将光功率计换成 CMOS 相机,更换 800 nm 波段光源,通过 CMOS 相机采集图片,用式(2)计算在 800 nm 波段处,光学天线的收发隔离度为 41.56 dB,这与本文第二部分的仿真分析结果一致.

3.2 发射效率测试

发射效率的测试原理如图 7 所示,光纤激光器连接准直器发射至大口径离轴平行光管,调整光学天线位置,使其光轴与平行光管的光轴平行,在光学天线目镜后放置激光功率计,测量光束经过光学天线后的功率 P_1 ,取出光纤头,使用功率计测试输出光束的功率 P_2 ,使用式(13)计算光学天线发射效率.

$$T=P_1/P_2 \cdot 100\% \quad (13)$$

测试计算得到卡塞格伦光学天线在 800 nm 波段发射效率为 86.13%,在 1 550 nm 处发射效率为 76.9%,由式(9)可知,发射效率与激光光源发射的束腰半径有关,光学天线在 1 550 nm 处的发射效率 76.9% 与仿真结果 78.75% 相差不大.

4 结论

本文通过在卡塞格伦望远镜的次镜打孔和设置光陷阱的方式,仿真计算得到卡塞格伦光学天线的收发隔离度由 21.73 dB 提高到 41.4 dB,通过搭建测试装置测得改进后的卡塞格林光学天线收发隔离度为 41.56 dB,实测与仿真结果相吻合,发射效率没有影响,仍为 76.9%.实验结果验证了仿真计算结果的准确性,即卡塞格伦光学天线后向散射主要来自于次镜光轴附近区域,当次镜开孔的孔径比 K 为 0.1~0.3 时,光学天线收发隔离度满足激光通信系统使用要求,这对于光学天线的结构设计有重要指导意义,提高了卫星激光通信系统的灵敏度.目前,对于卡塞格伦光学天线的研究主要集中在发射效率的提高和视场外杂散光抑制的研究上,对于光学天线内部的收发隔离度抑制没有系统的研究,并且卡塞格伦光学天线由于其同轴的结构形式,目镜处的后向散射仍无法完全解决,随着光通信探测器件灵敏度的进一步提升,对于光学天线的收发隔离度有更高的要求,因此,需要进一步研究抑制光学天线后向散射的方法,提高激光通信系统隔离度.

参考文献

- [1] YANG Hua-jun, YU Hu. Optimum design for optical antenna of space laser communication system [C]. 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems(ICCCA'06), 2006, **3**: 2016-2019.
- [2] SUN J, YUN M, WAN L. Study of the transmitter antenna gain for intersatellite laser communications [J]. *Optical Engineering*, 2006, **77**(6): 058001.
- [3] HE Wen-sen, YANG Hua-jun, JIANG Ping. Research on laser beam propagation characteristic of Cassegrain optical antenna [J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(3): 280-284.
何文森,杨华军,江萍.卡塞格伦光学天线光传输特性研究[J].*激光与红外*, 2014, **44**(3): 280-284.
- [4] BIRKL P, MANHART S. Backreflection Measurement on the SILEX Telescope [C]. SPIE, 1991, **1522**: 252-258.
- [5] HU Xiao-dong, WANG Wei-ke, HU Qiang, et al. Design of CASSEGRAIN telescope baffles with honeycomb entrance [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(7): 75-78.
- [6] DU Bao-lin, LI Lin, HUANG Yi-fan. Stray light analysis of an on-axis three-reflection spaceoptical system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(6): 569-572.
- [7] CAO Zhi-rui, FU Yue-gang. Research on high performance light trap technology for PST test [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(1): 183-189.
曹智睿,付跃刚.点源透射比测试的高性能光陷阱技术研究[J].*红外与激光工程*, 2017, **46**(1): 183-189.

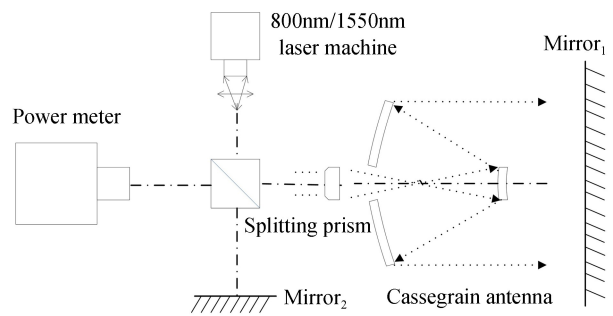


图 6 光学天线隔离度测量系统

Fig.6 The measurement which uses optical antenna isolation

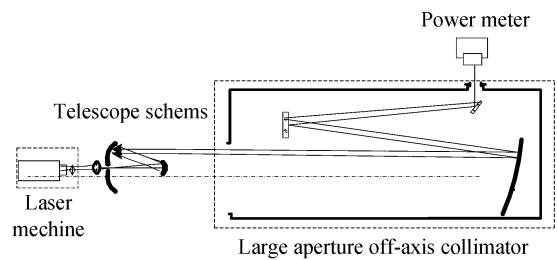


图 7 光学天线发射效率测试示意图

Fig.7 The measurement which uses optical antenna emission efficiency

-
- [8] MA Xiao-jun, WANG Bing, YANG Hua-jun, *et al.* Optimum design for Cassegrain optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2014, **44**(4):410-413.
马晓军,王冰,杨华军,等. Cassegrain 光学天线系统的优化设计[J].激光与红外,2014,**44**(4):410-413.
- [9] LI Ting, MA Xiao-long, LI Fu, *et al.* Stray light analysis and test of Cassegrain optical antenna[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8): 0806002.
李婷,马小龙,李福,等.卡塞格伦光学天线杂散光分析与测试[J].光子学报,2015,**44**(8):0806002.
- [10] LIAO Zhi-bo, JIAO Wen-chun, FU Rui-min. Veiling glare index caculation for refract optical system [J]. *ActaPhotonica Sinica*, 2011, **40**(3): 424-427.
廖志波,焦文春,伏瑞敏.透射式光学系统杂光系数计算方法[J].光子学报,2011,**40**(3):424-427.
- [11] 胥全春. 星地激光通信星上终端杂散光分析及抑制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014:20.
- [12] HE Li, FAN Guo-bing, YE Yi-dong. Parameters matching between Cassegrain telescope system and lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 49-52.
何丽,范国滨,叶一东.卡塞格林望远系统与激光束参数匹配[J].强激光与粒子束,2008,**20**(1):49-52.
- [13] LUCIMARA C, JOSE S. Two mirror telescope design with third-order coma insecsitive to decenter misalignment[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6): 6851-6865.
- [14] SHAN Ze-biao, SHI Yao-wu, SHAN Ze-tao, *et al.* Joint estimation of DOA and Doppler frequency by SQP[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 2079-2085.
单泽彪,石要武,单泽涛,等.应用序列二次规划的波达方向与多普勒频率联合估计[J].光学精密工程,2015,**23**(7): 2079-2085.