

doi: 10. 3788/gzxb20164504. 0406002

偏振分光光学天线前向散射杂光仿真测试与抑制

吕娟, 马小龙, 贺应红, 闫兴涛, 解培月, 于基睿, 赵意意

(中国科学院西安光学精密机械研究所 月球与深空探测室, 西安 710126)

摘 要:利用口径 150mm、视场 $\pm 0.17^\circ$ 、接收波长 974 nm 的光学天线望远系统原理样机, 搭建了试验装置并进行了实测, 测量结果显示光学天线在 0.35° 附近及 1° 附近出现了两个原路回波杂光峰值. 通过对两个杂光峰值的仿真分析, 提出了在主镜内部增加二次斜光阑及临时挡光环的措施, 消除望远系统前向散射杂光. 通过分析主次镜焦距分配对光学天线望远系统杂光的影响, 指出在设计中缩小主镜焦距可降低系统原路回波杂光, 这对光学天线消回波杂光设计具有指导意义.

关键词:相干光通信; 偏振分光; 前向散射; 杂散光; 试验测试; 仿真分析; 焦距分配

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0406002-6

Simulation Test and Inhibit Method of Forward Scattered Stray Light of Polarized Beam Split Optical Antenna

LÜ Juan, MA Xiao-long, HE Ying-hong, YAN Xing-tao, XIE Pei-yue, YU Ji-rui, ZHAO Yi-yi
(Chinese Academy of Science Xi'an Institute of Optics and Mechanics, Lunar and Deep Space Exploration Section, Xi'an 710126, China)

Abstract: An experimental installation using a proto of optical antenna telescope with diameter 150 mm, field of view $\pm 0.17^\circ$ and receive wavelength 974 nm has been built to measure the forward scattering, and the result shows that there are two energy peaks of original-road-returned stray light at 0.35° and 1° . By analysis of these two stray light peaks, a measure to eliminate forward scattered stray light of telescopic system is put forward. By analysis of the influence of primary and secondary lens focal power distribution on stray light of optical antenna, concluded that reduce the focal length of primary mirror can reduce the original-road-returned stray light.

Key words: Coherent optical communication; Polarized beam split; Forward scattering; Stray light; Testing; Simulation analysis; Focus distribution

OCIS Codes: 060.1660; 120.4570; 220.4840; 290.2558; 290.2648

0 引言

传统微波光通信具有波束发散角小、传输速率高、数据量大、重量轻、保密性强等优点^[1]. 20 世纪 90 年代起, 国内外投入大量的人力物力对深空光通信光学天线开展了研究. 欧空局于 2001 年和 2005 年分别发射了两颗名为 Artemis 及 Scroll 的光通信卫星, Artemis 的传输速率 50Mbps, 通信波长 800nm, 轨道为低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO)-地球同步轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO); Scroll 的传输速率

1200Mbps, 通信波长 1064nm, 轨道 LEO^[2]. 日本 2005 年发射的光通信卫星 Oicets 传输速率 50Mbps, 波长 800nm, 轨道 LEO^[3]. 德国 2008 年发射的 TerraSar-x 卫星, 传输速率达到 5625Mbps, 通信波长 1064nm, 轨道为 LEO-LEO^[4].

国内的光通信研究起步较晚, 还未有光通信卫星发射, 但许多高校及研究所都对该技术进行了深入研究, 包括北京大学、哈工大、上海光机所、光电所、504 所、西安光机所等. 哈工大于 2002 年成功研制了国内首套星间链路光通信试验系统, 可模拟卫星之间瞄准、

基金项目: 国家自然科学基金 (No. U1231204) 资助

第一作者: 吕娟 (1986-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为光学设计及杂散光抑制. Email: lvjuan_24_cathy@163.com

收稿日期: 2015-09-25; 录用日期: 2015-11-12

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

捕获、跟踪及信息传递^[5]. 西安光机所与 504 所在光学天线方面深入合作, 研制了多套用于 LEO 及 GEO 轨道的星间链路光学天线试验系统^[6].

共用望远系统光通信光学天线内部的隔离度要求非常严格, 一般要求光学天线的发射或接收支路的隔离度大于 100dB, 即杂光抑制比小于十亿分之一^[7]. 光学天线设计中内部收发隔离度的控制主要采用减小望远镜系统对信号光的后向散射, 以及在分光组件中增加高截止窄带滤光片的方法^[8-10]. 笔者在项目研制中发现, 对于两组独立的共用望远系统单波长偏振分光光学天线, 在收发瞄准过程中, 鉴于偏振光散射或反射后振动方向偏转 90° 的特性, 一旦发射信号的前向散射回波杂光进入接收支路, 会严重影响光学天线的隔离度. 本文针对偏振分光光学天线的前向散射问题, 搭建了原理样机试验装置并进行了实测, 通过对 0.35° 及 1° 附近两个原路回波杂光峰值的仿真分析, 提出了消除前向散射杂光的措施并分析了主次镜焦距分配对望远系统原路回波杂光能量的影响.

1 光学天线前向散射问题

一套完整的光通信光学天线包括激光发射机、发射和接收支路、用于准直扩束的望远系统、用于瞄准、

捕获或跟踪的信标支路滤光片及分光镜等^[11]. 为了降低收发支路间的坐标转换误差, 缩小设备体积, 对于发射和接收信道, 通常采用共用望远系统的结构, 如图 1.

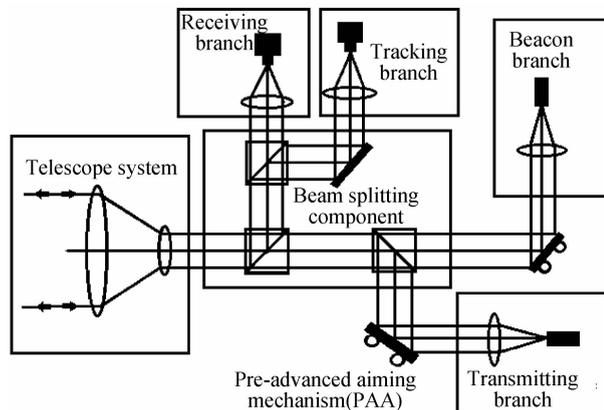


图 1 光学天线结构布局

Fig. 1 Primary Structure of optical antenna

对于单波长(收发同频率)相干激光通信光学天线, 通常利用激光的偏振特性, 采用偏振分光元件(Polarization Beam Splitter, PBS)进行分光. 光学天线的发射信道和接收信道, 分别采用 S 方向分量及 P 方向分量进行隔离, 避免相互干扰. 图 2 为相干光通信的偏振分光方案及收发信道瞄准示意图.

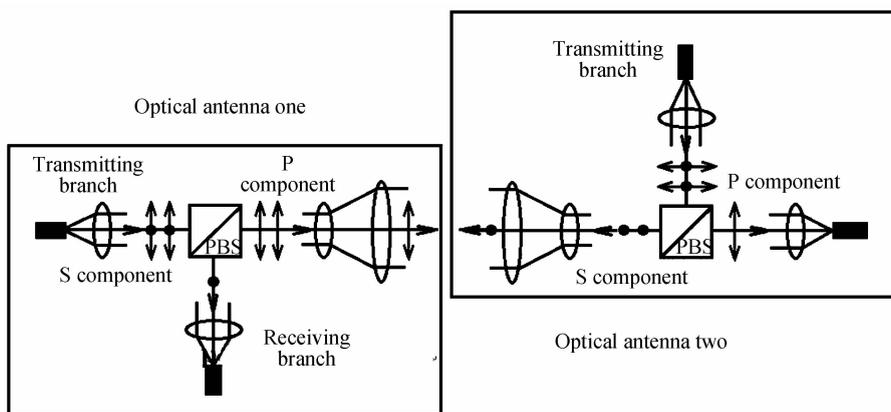


图 2 偏振分光方案及收发信道瞄准示意图

Fig. 2 The polarized beam split scheme and transmit-recv aiming diagram

利用单波长相干光进行通信(收发支路采用同波长, 不同偏振态的激光作为信号源), 具有降低接收终端功耗、提高信号接收灵敏度等优势. 但该方案有一个最大的难点: 在收发信道瞄准的过程中, 如果光学天线 1 的发射分量 P 经过光学天线 2 的奇数次反射或者奇数次散射, 会变成与自身分量相差 90° 的 S 分量回波杂光(与光学天线 2 的发射 S 分量同振动方向). 该回波杂光一旦原路返回, 前向散射进入光学天线 1 的接收支路, 会使其混淆光学天线 1 的接收信号(即光学天线 2 的发射信号)与光学天线 1 发射信号的回波杂光, 严重影响隔离度, 降低光学天线的信噪比.

2 试验装置搭建及测试

为了复现光学天线产生前向散射, 形成原路回波干扰现象, 利用光学天线原理样机搭建了试验装置, 见图 3. 图中分光镜的分光能量比为 1 : 1, 光学天线望远系统采用 R-C 结构^[12], 口径 150 mm, 视场 ±0.17°, 接收波长 974 nm. 望远系统主、次镜材料采用镀多层介质膜的微晶玻璃, 主、次镜座及支撑杆材料采用染黑处理的钛合金及殷钢. 搭建过程为: 将扩束后的 974 nm 激光调平行, 并调整激光器、扩束镜及平面反射镜 2 三者自准; 调整转台方位、俯仰及功率计位置, 通过功率计接收能量最大值确定零位; 调整平面反射镜 1 使另

一回波也被功率计接收.图4为光学天线望远系统的
光学设计图.

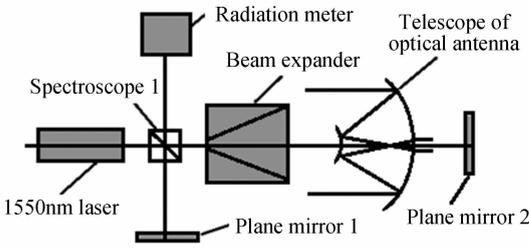


图3 试验装置示意图
Fig.3 Test device sketch

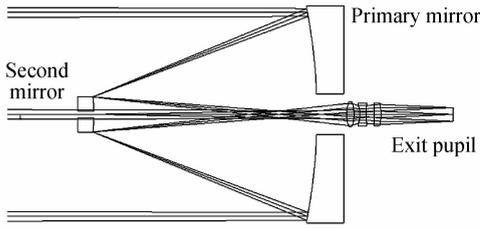


图4 光学天线望远系统光学设计图
Fig.4 Telescope design map of optical antenna

试验过程为:1)遮挡平面反射镜2,测得974 nm
入射光能量为3.725 mW;2)遮挡平面反射镜1,测得
经由扩束镜、望远系统后被功率计接收的能量为
395 μW ;3)将平面反射镜1挡住,以0.05°的准确度
转动转台(-2°~2°),测量各视场前向散射功率值并
绘制前向散射测试曲线.图5为实验过程的实物照片.
图6为前向散射测试曲线.



图5 试验过程实物照片
Fig.5 Picture of test process

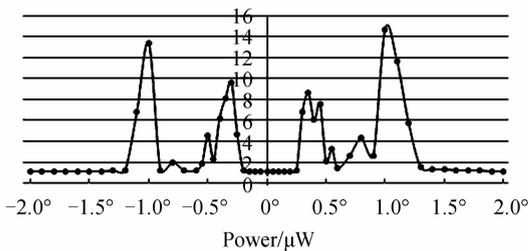


图6 各视场前向散射测试曲线
Fig.6 Forward scattering test curve of each field

分析可知:1)在视场内-0.2°~0.2°,前向散射值
极低,约为1.2 μW ;2)前向散射能量最大值出现在
 $\pm 0.35^\circ$ 左右,最大值约8.6 μW ,最大前向散射杂光比
在2.3%~2.2%之间(入射能量按3.725 mW和

395 μW 计算).用黑色圆环挡住主镜内遮光筒内孔后,
发现 $\pm 1^\circ$ 以内视场的前向散射值,均减小至1.2 μW .
初步判断该角度杂光来源为主镜内遮光筒一次光阑散
射;3)随着视场增大,前向散射功率逐渐减小,当转台
转动至 $+1^\circ$ 及 -1° 时,功率增大至13.4 μW .根据反射
光路判断,此视场的平行光经过主-次镜的二次反射
后,光线少部分进入扩束镜后被功率计接收.

3 仿真分析及解决方案

3.1 表面散射 ABg 参量的确定

杂光的传输特性和光学系统的内表面散射特性有
关,一般采用双向散射分布函数(Bidirectional
Scattering Distribution Function, BSDF)定义^[13-14].
BSDF定义为单位散射辐亮度和单位入射辐照度的比
值,用来衡量一个表面在不同方向上散射光的空间分
布.当用 θ_i, φ_i 表示入射光的入射角和方位角, θ_s, φ_s
散射光的散射角和方位角时,有

$$\text{BSDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_s(\theta_s, \varphi_s)}{dE(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

对于光学表面,BSDF的大小和光线的入射方向无
关^[15],如图7.假设 r_i 为某方向入射光线单位矢量, r_o
为 r_i 镜面反射方向单位矢量, r 为任意方向矢量, β_o, β
为 r_o, r 在散射面上的投影,那么表面的BSDF对数值就和
 $|\beta - \beta_o|$ 成线性对应关系,即

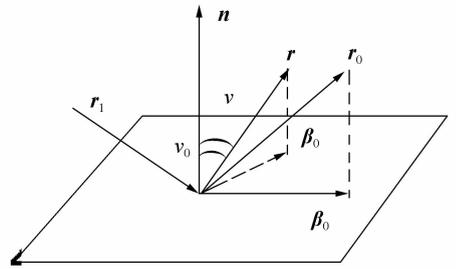


图7 BSDF 位移不变性示意图
Fig.7 The displacement invariance of BSDF

$$\text{BSDF} = \frac{A}{B + |\beta - \beta_o|^g} \quad (2)$$

式(2)可模拟整个半球空间的散射分布,式中A、B、g
参量可通过对测量某些散射方向的BSDF值后,用待
定系数法求解.A、B、g参量取不同值时,可模拟不
同的表面粗糙度、微粒特性、反射镀膜材料特性和工
艺等.例如,当参量 $g=0$ 时,材料表面特性为朗伯体,
参量 $B=1$ 时,材料表面特性为黑体.本文根据式(2)对
不同的表面类型,在光学天线望远系统仿真分析模型
中,设置了各表面A、B、g参量.

3.2 仿真分析模型的建立

前项散射仿真分析模型如图8,仿真计算入射光
线数约为50万根,入射光波长为974 nm,每根能量为
1 W,光线阈值为 $1e-8$.设光源直径为90 mm,扩束镜口

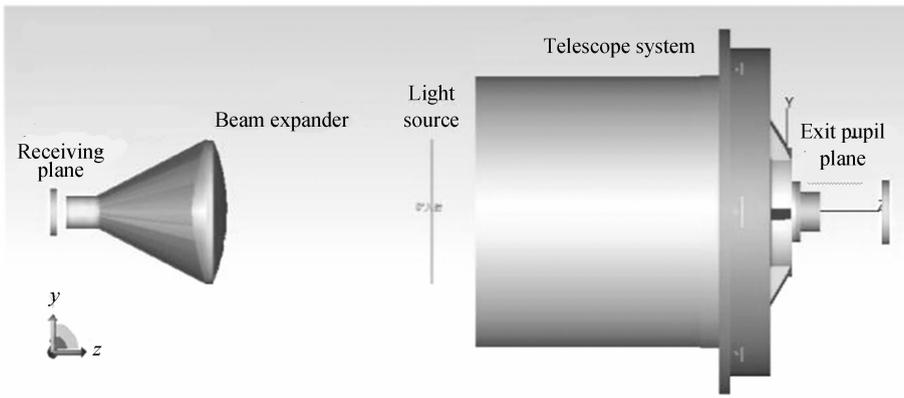


图 8 974 nm 光学天线前向散射仿真分析模型

Fig. 8 Forward scattered simulation model of 974 nm optical antenna

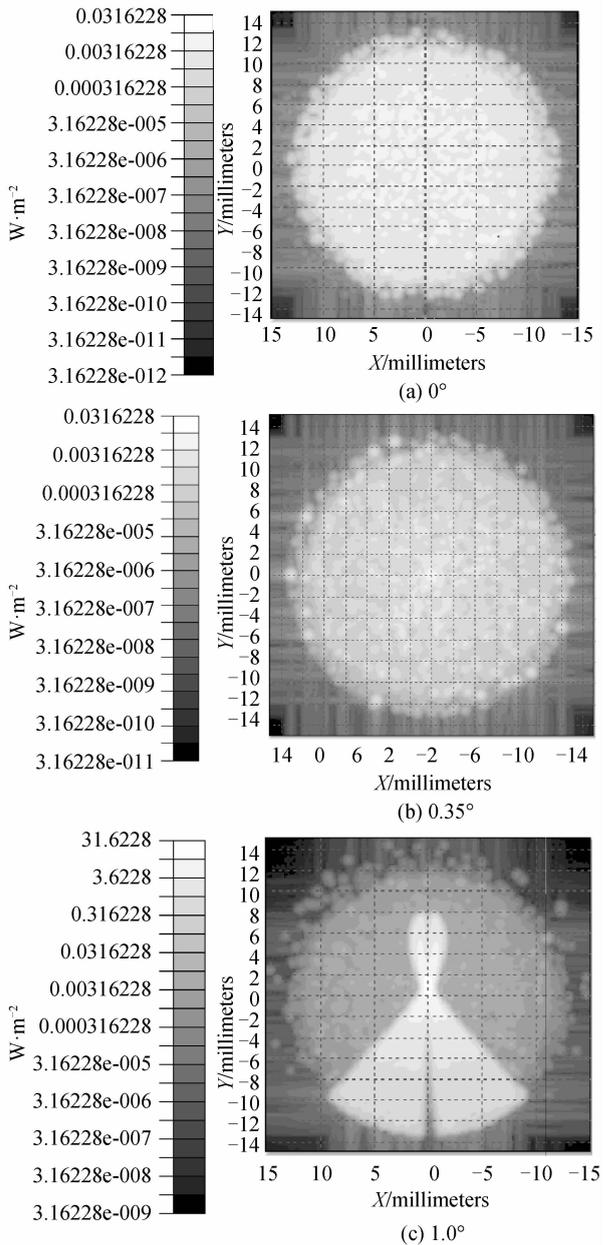


图 9 不同视场前向散射杂光仿真分析结果

Fig. 9 Forward scattered light analysis of different field

径为 90 mm,接收面直径为 30 mm.通过同一模型,分别设定 0° 、 0.1° 、 0.2° 、 0.35° 、 0.4° 、 0.6° 、 0.8° 、 1.0° 几种视场角的光源,分析接收面对接收望远镜系统前项散射杂光的影响.图 9 为轴上 0° 、轴外 0.35° 、 1.0° 前向散射仿真分析结果.分析表明,接收面接收杂光和实际测量结果趋势吻合,在 0.35° 时杂光能量出现小峰值,在 1.0° 时出现大峰值.仿真分析也确认了 0.35° 及 1.0° 附近的杂光来源.

3.3 杂光路径分析及解决措施

0.35° 附近杂光路径见图 10,包括主镜反射、次镜反射、主镜内遮光筒、次光阑散射、次镜反射和主镜反射.

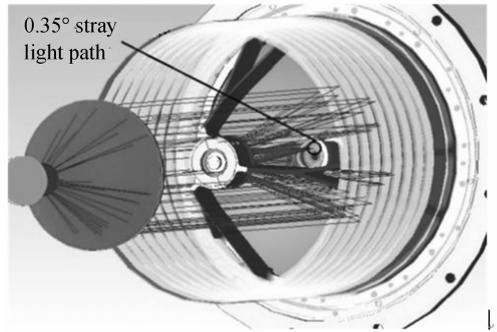


图 10 0.35° 杂光路径

Fig. 10 0.35° stray light path diagram

在主镜内遮光罩中增加二次斜光阑,重新进行前向散射杂光分析.表 1 为增加二次斜光阑前后,不同视

表 1 各视场前向散射仿真分析结果

Table 1 Analysis results of forward scattered stray light energies in each field

Field of view	0°	0.1°	0.2°	0.35°	0.4°	0.6°	0.8°	1.0°
Received power/W	79.6	80.4	135.1	145.9	137.4	96.4	98.8	14280
No tilt stop ratio/ $(\times 10^{-3})$	0.16	0.16	0.18	0.30	0.29	0.20	0.18	29
Add tilt stop ratio/ $(\times 10^{-3})$	0.16	0.16	0.18	0.23	0.24	0.20	0.18	/

场时接收杂光能量与入射光能量的比值。

由仿真分析可知,在主镜内遮光罩内部加入二次斜光阑,对 0.35° 附近的前向散射杂光有所减弱,二次斜光阑示意图见图 11。为了完全消除 0.35° 附近前向散射杂光,除了在望远系统内增加二次斜光阑,还采用 3M 消杂光贴纸(或喷砂染黑处理)对一次光阑面及斜光阑面进行粘贴遮挡,最终完全消除了 0.35° 附近前向散射杂光。

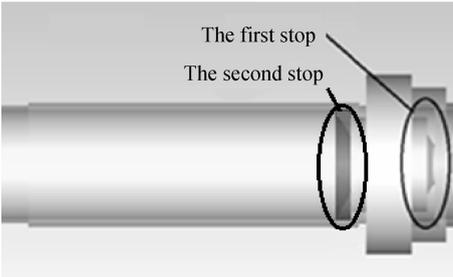


图 11 次镜内遮光罩一次光阑、二次斜光阑

Fig. 11 Once and secondary inclined aperture diaphragm of second mirror

1.0° 附近的杂光路径见图 12,包括主镜反射、次镜反射、主镜内边缘反射、次镜反射和主镜反射。仿真可知,在主镜内部加入临时挡光环后,原路回波杂光比由原来的 0.029 下降到 0.000 2。待 2 组光学天线的收发支路瞄准摆正后,该临时挡光环可将其去除。

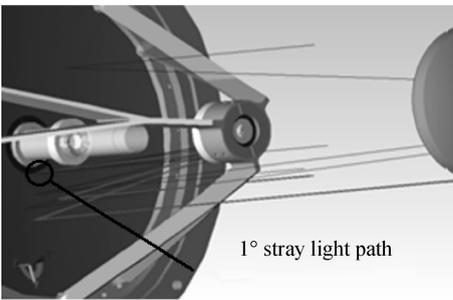


图 12 1.0° 杂光路径

Fig. 12 1.0° stray light path diagram

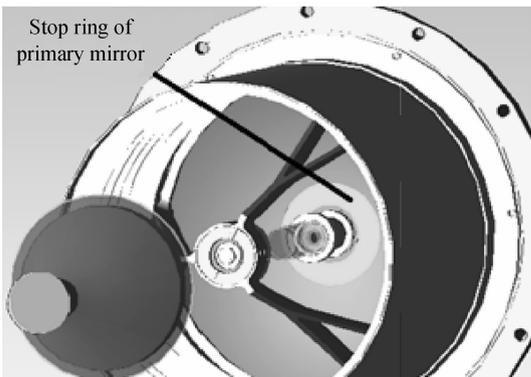


图 13 主镜挡光环示意图

Fig. 13 The sketch of primary mirror block rings

3.4 主次镜焦距分配对杂光能量的影响

为了优化光学天线的系统设计,减小原路回波杂

光,对主次镜焦距分配对杂光能量的影响进行了分析。光学望远镜系统设计焦距为 807 mm,主镜焦距为 200 mm。分析可知,当改变主镜曲率半径,次镜焦距保持不变,系统焦距产生变化时,原来 1° 附近杂光的角也发生变化。表 2 为不同系统焦距对应的不同杂光出现角度,以及系统焦距变化时,杂光与入射光能量比的变化情况。

表 2 主镜焦距变化,次镜焦距不变对杂光的影响

Table 2 Stray light changes effected by focus changes of primary mirror (second focus fixed)

System focus/mm	Primary len focus/mm	Stray light angle	Stray light energy ratio
-3480	214	0.4°	0.15
43819	211	0.5°	0.075
2924	208	0.7°	0.07
1491	205	0.8°	0.058
991	202	0.9°	0.05
807	200	1.0°	0.047
678	198	1.1°	0.041
583	196	1.2°	0.036
479	193	1.2°	0.019
405	190	1.3°	0.0073

由表 2 可知,系统焦距减小,杂光出现角度增大;系统焦距增大,杂光角度减小。随着主镜焦距的减小,原路回波杂光的能量也有所下降。这是因为原有设计中 R-C 系统的一次焦面恰与主镜镜面接近,减小主镜焦距使得一次焦面距离缩短,远离主镜,减小经由主镜多次反射形成的原路回波杂光。而增大主镜焦距会使得入射到主镜内边缘的光线角度减小甚至接近 0° ,导致原路返回的光线增多。

当主镜、次镜曲率半径同时增大或者减小,但系统焦距不变时,对杂光出现角度及杂光能量比的影响见表 3。仿真分析可知,对于主次镜曲率同时改变而系统焦距不变,杂光出现的角度一直维持在原来的 1° 附近,但当主次镜焦距同时减小时,接收到的原路回波杂光能量比下降。

表 3 主镜焦距变化,系统焦距不变对杂光的影响

Table 3 Stray light changes effected by focus changes of primary mirror (system focus fixed)

System focus/mm	Primary len focus/mm	Second len focus/mm	Stray light angle	Stray light energy ratio
807	205	27.9	1.0°	0.059
808	200	24.14	1.0°	0.047
808	196	21.15	1.0°	0.028
808	193	18.94	1.0°	0.009

根据上述分析,无论系统焦距变化与否,只要主镜焦距减小,望远镜系统在 1° 附近产生的原路回波杂光能量比均有所下降。设计中,在系统焦距一定并保证像质的情况下,应尽量压缩主镜焦距,减小大角度的原路回

波杂光,针对本文所述望远系统,采取在主镜内部添加临时挡光环的措施,可有效消除由于光路搭建及调试过程中,大角度偏视场导致的原路回波杂光。

4 结论

本文针对单波长偏振分光光学天线在收发瞄准过程中,产生前向散射的问题,利用光学天线原理样机,搭建了试验装置并进行了实测,通过对 0.35° 附近及 1° 附近出现的两个原路回波杂光峰值进行仿真分析,提出了在望远系统中设置二次斜光阑及临时挡光环等措施,用来消除光学天线的原路回波杂光。通过主次镜焦距分配对杂光影响的分析可知,在今后光学天线设计中,在系统焦距一定并保证像质的情况下,应尽量压缩主镜焦距,减小大角度的原路回波杂光。

参考文献

- [1] ZHANG Tao, WANG Bo, JIANG Hui-lin. Development level of space optical transceiver and the design of network communication on optical transceiver[C]. SPIE, 2015, **9619**: 9619P0-9619P9.
- [2] CHENG Hong-wei, CHEN Er-hu. Development and enlightenment of data-relay satellite systems using laser links abroad[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(6): 198-205.
程洪玮, 陈二虎. 国外激光链路中继卫星系统的发展与启示[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(6): 198-205.
- [3] CHEN C, ALEXANDER J W, HEMMATI H, *et al.* System requirements for a deep space optical transceiver[C]. SPIE, 1999, **3615**: 142-152.
- [4] LIU Hong-zhan, SUN Jian-feng, LIU Li-ren. Analyzing the trends of space laser communication[J]. *Wireless Optical Communication*, 2010, (8): 39-44.
刘宏展, 孙建峰, 刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析[J]. *无线光通信*, 2010, (8): 39-44.
- [5] YU Jian-jie. Research on the optimal design and performance evaluation methods of the optical system in intersatellite optical communications[D]. Harbin Institute of Technology, 2009.
- 俞建杰. 卫星光通信光学系统优化设计及性能评测方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 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.
- [7] GENG Wen-feng. The Influence Factors and performance analysis of wireless optical communication systems[D]. Xi'an Electronics and Technology University, 2010.
耿文凤. 无线光通信系统的影响因素和性能分析[D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [8] THOMAS W R. Stray light modeling and performance of the 15cm deep space optical communications transceiver (DSOCT) [C]. SPIE, 2010, **7587**: 75870V-1-75870V-10.
- [9] CANUEL B, GENIN E, VAJENTE G, *et al.* Displacement noise from back scattering and specular reflection of input optics in advanced gravitational wave detectors[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(9): 10546-10562.
- [10] MEI Zhi-yu. Analysis of stray light of coherent laser radar optical system [D]. Changchun university of Science and Technology, 2012.
梅志宇. 相干激光雷达光学系统杂散光分析[D]. 长春理工大学, 2012.
- [11] 赫马提, 王平, 孙威. 深空光通信[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [12] LI Ting, YANG Jian-feng, RUAN Ping, *et al.* Baffle design and simulation of R-C system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 332-336.
李婷, 杨建峰, 阮萍, 等. R-C系统的遮光罩设计与仿真[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 332-336.
- [13] TracePro users. Manual 3.0. Lambda Research Corporation, 2002, version3.0
- [14] DITTMAN M G. Contamination scatter functions for stray-light analysis[C]. SPIE, 2002, **4774**: 99-110
- [15] LI Ting. Research on optical system of the lunar-based optical telescope (LOT) [D]. Chinese Academy of Science, 2007.
李婷. 月基光学天文望远镜 (LOT) 的光学系统研究[D]. 中国科学院研究生院, 2007.