

激光通信终端光学系统杂散光抑制技术研究

赵 迎, 接长伟

(长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130052)

摘 要:随着空间应用领域的扩展,卫星激光通信凭借其在速率、带宽、体积、重量和功耗等方面的优势而得到广泛应用。对于卫星光通信来说,终端光学系统的性能直接影响通信的可靠性和稳定性,本文根据激光通信中收发一体、双向双工工作模式对收发隔离度的要求,采用Code V软件完成了830 nm激光通信终端光学系统设计,实现物方全视场15 mrad,全视场MTF值 $>0.65@100$ 线对/mm,限制光线出射角不小于 8° ,设计结果满足系统使用要求。通过对光学系统杂散光分析与抑制技术研究,控制轴外杂散光在离轴角 $5^\circ \sim 20^\circ$ 时杂散光抑制能力大于45 dB且 20° 时大于60 dB。实验结果给出830 nm激光通信终端光学系统光路图并对系统轴外杂光范围及抑制能力进行了测试,测试结果与仿真的结果一致,满足卫星激光通信系统使用要求。

关键词:激光通信;光学天线;离轴三反;杂散光

中图分类号:O439 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.10.019

Research on stray light suppression technology of optical system of laser communication terminal

ZHAO Ying, JIE Chang-wei

(College of Optical and Electrical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130052, China)

Abstract: With the expansion of space applications, satellite laser communication has been widely used due to its advantages in speed, bandwidth, volume, weight, and power consumption. For satellite optical communications, the performance of the terminal optical system directly affects the reliability and stability of communications. According to the requirements of the transceiver integration and two-way duplex working mode in laser communication, the 830 nm laser communication terminal optical system design was completed with Code V software. The object field of view was 15 mrad, the full field of view MTF value was $>0.65@100$ lp/mm, and the light exit angle was limited to not less than 8° . The design results met the requirements of the system. Through the research on the stray light analysis and suppression technology of the optical system, the suppression ability of the off-axis stray light ($5^\circ \sim 20^\circ$) is controlled to be greater than 45 dB and be greater than 60 dB at the off-axis 20° . The optical path diagram of the 830 nm laser communication terminal optical system is given and the stray light range and suppression ability of the system are tested. The test results are consistent with the simulation results and meet the requirements of the satellite laser communication system.

Keywords: laser communication; optical antenna; off-axis three reflections; stray light

1 引言

反射光学系统具有易于轻量化、对温度变化不敏感、无色差等诸多优势,因此在激光通信终端光学系统中往往采用反射式结构。目前,国内外对两反系统的杂散光分析研究已经非常深入,长春光机所的史光辉对卡塞格林系统的遮光罩,挡光环等消杂散光措施的设置给出了详细的分析^[1];西安光机所的李婷等定量计算了同类系统的杂散光数值^[2];美国国家天文台的史蒂芬等人对地基天文望远系统的杂散光抑制方法进行了研究^[3]。这些工作使用的主要方法是建立实体模型,包括给定各个光学、机械结构表面的光学参数,通过改进的蒙特卡洛法进行光线追迹,确定各离轴角度的杂散光传输路径,得到最初的分析结果。然后,根据结果改进模型,修改遮光罩的设计,在散射路径上加入遮光叶片等,最终减小光学系统杂散光水平^[4]。常规的卡塞格林光学天线具有工作波长范围宽、消像差能力强、结构简单、像质优良等优点,被美国、欧洲、日本以及中国广泛应用于卫星激光通信终端,但由于卡-格光学天线是同轴光学结构形式,不可避免会出现次镜及次镜支撑筋遮挡引入的后向散射,虽然可以通过次镜打孔或设置光陷阱等措施抑制散射光,但不能从根本上降低卡-格光学天线的后

向散射^[5-9]。采取上述杂散光抑制措施的卡-格光学天线的隔离度仅能达到 55 dB,离轴三反光学天线可避免同轴光学天线中发射光路出现 180°的后向反射和散射,其收发隔离度达到 90 ~ 100 dB,而同轴光学天线的隔离度仅能达到 30 ~ 55 dB^[10-12]。因此,光学天线采用离轴三反光学结构形式,是激光通信终端具备高收发隔离度的基础。

基于光学表面散射理论,本文提出在光学设计中控制光线出射角不小于 8°,20°离轴角轴外杂散光抑制能力大于 60 dB,测量结果与仿真分析一致。满足卫星激光通信系统捕跟和通信对光线天线杂散光抑制的要求。

2 表面散射理论

对于一个表面通常用双向散射分布函数(bidirectional scattering distribution function)评价其表面散射特性,BSDF 的定义如下所示:

$$\text{BSDF} = \frac{L(\alpha_s, \beta_s)}{E(\alpha_i, \beta_i)} \quad (1)$$

其中, α 是高低角; β 是方位角; 下标 i 表示入射; s 表示散射; $L(\alpha_s, \beta_s)$ 是光学面的辐亮度; $E(\alpha_i, \beta_i)$ 是入射光的辐照度。对于光学镜面(哈维模型)其表面散射能量分布与出射角的关系如图 1 所示。

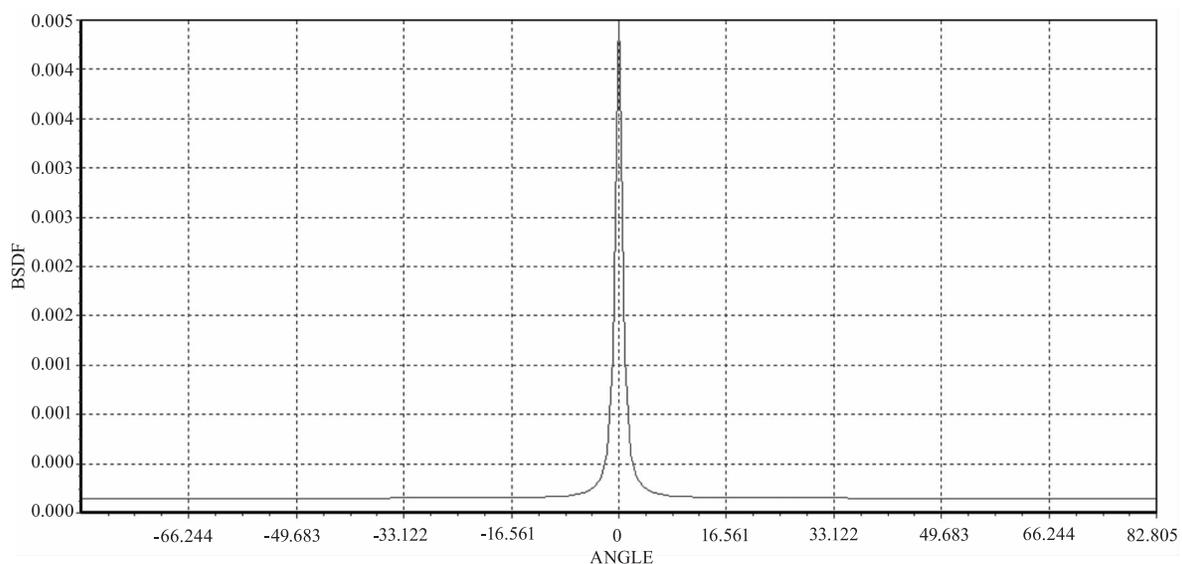


图 1 光学镜面散射能量分布与方位角

Fig. 1 Optical mirror scattering energy distribution and azimuth angle

对于光滑的光学表面,98 % 散射能量分布在出射角附近 $\pm 7^\circ$ 以内,结合工程实现性,所以在光学设

计中,对光线出射角限制在不小于 8° ,可避免大部分后向散射直接进入视场。

3 光学设计参数

激光通信终端光学系统的工作波长为 830 nm, 入瞳直径 125 mm, 物方视场 15 mrad, 全视场 MTF 值 $> 0.65@100$ 线对/mm。根据指标要求选取激光通信终端光学系统的初始结构进行优化, 主、次镜成一次中间像, 目镜将一次像转成平行光, 限制光线出射角不小于 8° , 用 Code V 软件完成了如图 2 所示的光学设计, 从调制传递函数曲线图 3 可以看出, 设计结果满足使用要求。

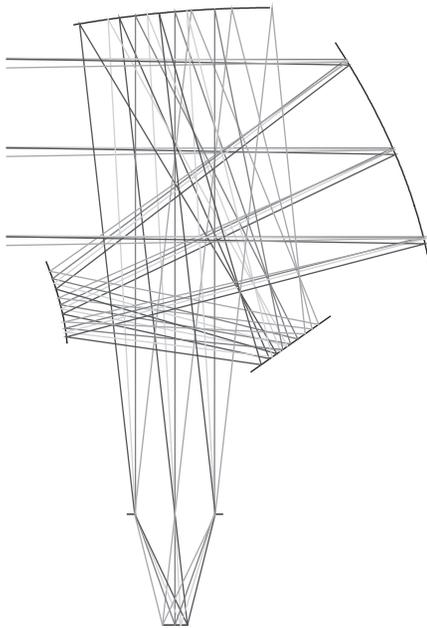


图 2 离轴光学天线结构形式

Fig. 2 Off-axis optical antenna structure

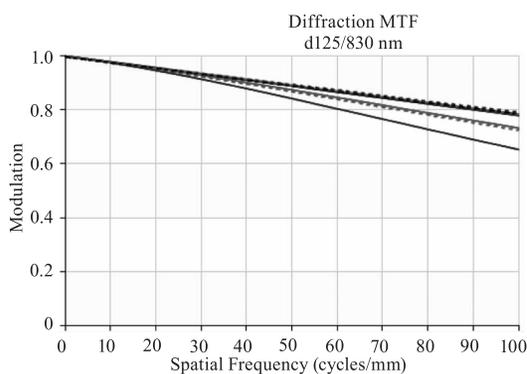


图 3 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curve

4 杂散光仿真分析

杂散光仿真分析中所有光学件均采用哈维模型 (RMS 粗糙度 0.5 ~ 3 nm), 所有机械件均采用多项式散射模型。杂散光仿真模型中机械件表面朗伯散射率 0.15; 光学件镜面反射率大于 99.8%。根据

光学设计和结构设计结果建立杂散光仿真分析模型。

杂散光抑制能力分析模型如图 4 所示。仿真模型的表面特性 (反射率、散射模型等) 以及内部物理性质, 按照光学件、结构件的实际情况赋值。通过对系统进行非顺序光线追迹, 分析到达系统像面的杂散光能量大小。

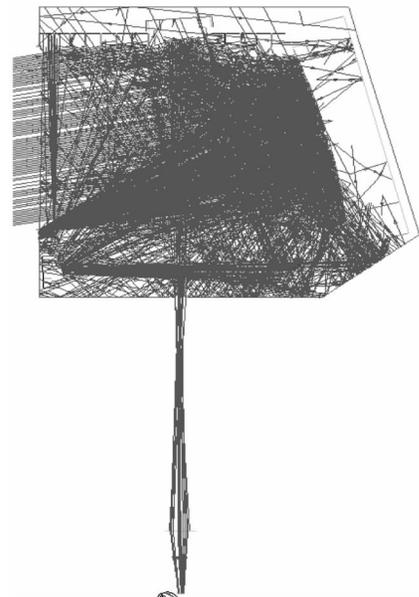


图 4 轴外杂散光抑制能力分析模型

Fig. 4 Analytical model of off-axis stray light suppression capability

光学系统的杂光由散射杂光与边缘衍射杂光共同构成, 图 5 为该光学系统衍射杂光 $PST_d(\theta)$ 的计算值 (一级衍射杂光)。

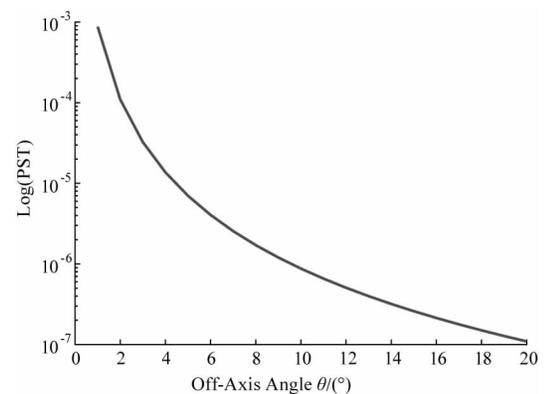


图 5 光学系统衍射杂光 PST

Fig. 5 Optical system diffracted stray light PST

系统总 PST (散射和衍射) 如图 6 和表 1 所示, 光学系统轴外杂光抑制能力大于 45 dB。

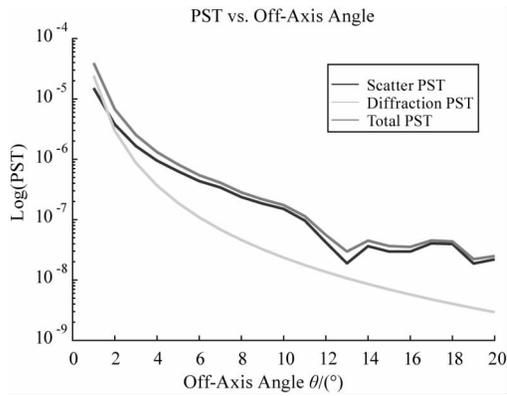


图6 光学系统杂散光抑制能力 PST 曲线图

Fig.6 PST curve of stray light suppression capability of optical system

表1 光学系统轴外杂散光抑制能力表

Tab.1 Suppression ability of off-axis stray lit of optical system

离轴角(°)	PST	dB 值
5	5.21×10^{-6}	47.8
6	2.60×10^{-6}	58.9
7	1.40×10^{-6}	52.6
8	1.04×10^{-6}	54.8
9	9.14×10^{-7}	55.4
15	6.70×10^{-7}	61.2
20	8.88×10^{-7}	63.5

5 实验结果

系统加工装调集成后,波像差测量结果如表2所示,测试结果表明:0 视场 RMS 值为 15.92 nm;0 视场 PV 值为 120.1 nm;FOV1 RMS 值为 40.55 nm(+ X: 5.25 mrad),41.42 nm(- X: - 5.25 mrad),39.14 nm(+ Y: 5.25 mrad),38.54 nm(- Y: - 5.25 mrad);FOV1 PV 值为 173.4 nm(+ X: 5.25 mrad),169.3 nm(- X: - 5.25 mrad)166.4 nm(+ Y: 5.25 mrad),167.5 nm(- Y: - 5.25 mrad);FOV2 RMS 值为 55.84 nm(+ X: 7.5 mrad),57.66 nm(- X: - 7.5 mrad)55.15 nm(+ Y: 7.5 mrad),55.67 nm(- Y: - 7.5 mrad);FOV2 PV 值为 350.6 nm(+ X: 7.5 mrad),360.3 nm(- X: - 7.5 mrad)362.4 nm(+ Y: 7.5 mrad),356.6 nm(- Y: - 7.5 mrad)。轴外杂光范围及抑制能力(5° ~ 20°) ≥ 45 dB,与实测结果相符,验证了杂散光分析模型,分析方法的正确性。

表2 系统测试结果

Tab.2 System test results

参数	要求	检测结果	
视场角 FOV1	全视场 15 mrad	15 mrad	
入瞳直径	≥ 125 mm	125 mm	
波像差	0 视场 RMS 值	≤ 30 nm	
	0 视场 PV 值	≤ 150 nm	
	FOV1 RMS 值	≤ 60 nm	40.55 nm(+ X: 5.25 mrad), 41.42 nm(- X: - 5.25 mrad), 39.14 nm(+ Y: 5.25 mrad), 38.54 nm(- Y: - 5.25 mrad)
	FOV1 PV 值	≤ 350 nm	173.4 nm(+ X: 5.25 mrad), 169.3 nm(- X: - 5.25 mrad) 166.4 nm(+ Y: 5.25 mrad), 167.5 nm(- Y: - 5.25 mrad)
	FOV2 RMS 值	≤ 83 nm	55.84 nm(+ X: 7.5 mrad), 57.66 nm(- X: - 7.5 mrad) 55.15 nm(+ Y: 7.5 mrad), 55.67 nm(- Y: - 7.5 mrad)
	FOV2 PV 值	≤ 500 nm	350.6 nm(+ X: 7.5 mrad), 360.3 nm(- X: - 7.5 mrad) 362.4 nm(+ Y: 7.5 mrad), 356.6 nm(- Y: - 7.5 mrad)
轴外杂光范围及抑制能力			
(5° ~ 20°)	≥ 45 dB	≥ 47 dB	
20°	≥ 60 dB	63.5	

6 结论

收发一体双向通信的离轴三反光学天线的杂散光与光学设计方案有关,采用 Code V 软件设计完成了全视场 MTF 值 > 0.65@ 100 线对/mm 且光线出射角不小于 8° 的激光通信终端光学系统设计,设计结果满足系统使用要求。通过杂散光仿真分析条件给出杂散光抑制能力分析模型,进而对光学系统衍射杂光点源透过率和光学系统杂散光抑制能力点源透过率进行了分析。测试结果与仿真的结果一致,满足卫星激光通信系统使用要求。

参考文献:

[1] Shi Guanghui. Methods preventing stray light emergenced in cassegrain systems [J]. Opt. Precision Eng., 1997, 5 (5): 10 - 16. (in Chinese)
史光辉. 消除卡塞格林系统杂光的措施 [J]. 光学精密工程, 1997, 5 (5): 10 - 16.

[2] St Eph En M P. A st ray light analysis of the apache point observatory 3.5-meter telescope system [J]. SPIE, 2003,

- 4842:128 - 138.
- [3] Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping, et al. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36:137 - 142. (in Chinese)
李婷, 杨剑锋, 阮萍, 等. 月基光学天文望远镜 (LOT) 的杂散光分析[J]. *光子学报*, 2007, 36:137 - 142.
- [4] Gary L P. Stray light calculation methods with optical ray trace software[J]. *SPIE*, 1997, 3780:132 - 137.
- [5] Hou Jia, He Zhiping, Shu Rong. Emitting system of fiber-array 3D laser imaging using off-axis three-mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4):124 - 128. (in Chinese)
侯佳, 何志平, 舒嵘. 离轴三反光纤阵列激光三维成像发射系统 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4):124 - 128.
- [6] McCarthy D J. Operating characteristics of the stratoscope II balloon-borne telescope[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 5(2):323 - 329.
- [7] Ge Jingjing, Lin Zhaorong, Zhu Dakai. Design of mid-wave infrared continuous zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5):728 - 732. (in Chinese)
葛婧菁, 林招荣, 朱大凯. 机载轻小型中波红外连续变焦系统设计[J]. *应用光学*, 2013, 34(5):728 - 732.
- [8] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14):2960 - 2971.
- [9] Mercado R I, Ryzhikov L. Designs of apochromats and superachromatic objectives[J]. *SPIE*, 1998, 3482:321 - 331.
- [10] A Biswas, K E Wilson, N A Page. Lasercom test and evaluation station (LTES) development: an update[J]. *Proc. of SPIE*, 1998, 3266:22 - 32.
- [11] Zhang Wenying, Zhang Guoyu, Zhang Lei. Optical system design of large-diameter off-axis reflection-type star simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(6):949 - 954. (in Chinese)
张文颖, 张国玉, 张雷. 大口径离轴反射式星模拟器光学系统设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(6):949 - 954.
- [12] Liu Yuan, Ye Demao, Wang Jianying, et al. Design of 50 mm ~ 1 000 mm zoom optical system with high zoom ratio[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6):1147 - 1152. (in Chinese)
刘圆, 叶德茂, 王建楹, 等. 50 mm ~ 1000 mm 大变倍比变焦光学系统设计 [J]. *应用光学*, 2020, 41(6):1147 - 1152.