

doi: 10.3788/gzxb20154408.0806002

卡塞格伦光学天线杂散光分析与测试

李婷, 马小龙, 李福, 薛彬, 徐广州, 贺应红, 吕娟

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘要:从能量传递及光学天线出瞳允许的杂散光亮度出发, 推导得出了杂散光控制指标要求. 提出两种消除一次杂光方案. 方案一是在主、次镜上设置遮光罩, 方案二是设置主镜遮光罩并在出瞳附近设置利奥光阑. 理论分析表明方案一因设置次镜遮光罩而增加遮拦比, 方案二因在出瞳附近设置利奥光阑而产生渐晕, 由于光学天线对发射/接收效率指标要求很高, 因此在设计时需兼顾能量. 针对某卡塞格伦光学天线仿真分析了两种方案的接收/发射效率和杂散光抑制效果, 发现方案二的发射效率和杂散光抑制能力优于方案一, 只是边视场的接收效率略低. 最终选用方案二作为原理样机的杂散光抑制方案, 对其进行杂散光测试, 测试结果为: 视场外 $1^\circ \sim 20^\circ$ 系统实测消光比小于 -40 dB, 满足杂散光指标要求.

关键词:光通信; 杂散光; 消光比; Lyot 光阑

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)08-0806002-5

Stray Light Analysis and Test of Cassegrain Optical Antenna

LI Ting, MA Xiao-long, LI Fu, XUE Bin, Xu Guang-zhou, HE Ying-hong, LÜ Juan
(Xi'an Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

Abstract: The control target of stray light is deduced based on solar power transmission and the allowable stray light radiance at the exit pupil. Two schemes used to eliminate direct radiation were present, one way is setting primary baffle and secondary baffle, the other way is only setting primary baffle and Lyot stop near the exit pupil. Theoretical analysis indicates that by setting the secondary baffle the first scheme will increase the obscuration ratio, and by setting the Lyot stop near the exit pupil the second one will appear vignetting. Since the requirements of receiving /emission efficiency for optical antenna are very high, it's also needs to take into account the energy in the design process. The receiving /emission efficiency and stray light suppression level of the two scheme were analyzed to some cassegrain optical antenna. The emission efficiency and stray light suppression level of the second scheme is better than the first, but the receiving efficiency of edge field is slight lower. Finally the second way was used to control the stray light of the optical antenna prototype, and its stray light level was tested. The results show the extinction ratio are lower than -40 dB when the range of off-field angle is from 1° to 20° , it meets the requirement.

Key words: Optical communication; Stray light; Extinction ratio; Lyot stop

OCIS Codes: 060.4510; 290.2648; 290.2200

0 引言

随着空间探测领域的扩大和高准确度对地观测的发展, 目前的微波通信已无法满足对数据传输速率的需求^[1]. 卫星激光通信凭借传输速率高、容量大、体积

小、重量轻、无频率干扰、保密性和抗干扰能力强等优势成为现代大容量空间通信领域的重要研究方向^[2-4].

杂散光是光通信中的虚假信号, 会给激光通信终端带来严重的噪音问题. 当卫星收发器与地球通信时, 太阳是主要的杂散光源, 经常会遇到太阳-探测器-地球

基金项目: 国家自然科学基金(No. U1231204)资助

第一作者: 李婷(1980—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光学系统设计及杂散光分析与抑制. Email: azazb2@163.com

收稿日期: 2015-02-03; 录用日期: 2015-06-02

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

(Sun-Prober-Earth, SPE)角很小($<2^\circ$)的情况,此时航天器的跟踪与瞄准焦面的背景将增加,导致瞄准误差增加,提取信号困难.所以,要求激光通信光学系统能充分抑制杂散光,提高低太阳角时的跟踪性能^[5].

卡塞格伦望远镜由于其无色差、像质好、口径大小合适等特点是收发共光路光学天线的主要光学形式^[4],典型代表有美国宇航局的 OCD (Optical Communication Demonstrator)激光通信终端和欧空局的 SILEX (Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment)激光通信终端^[3].该系统常用的消杂光方法为设置主、次镜遮光罩^[6],有一次像面和实出瞳时增加视场光阑和利奥(Lyot)光阑.但若设置次镜遮光罩会增加遮拦比,若在出瞳附近设置 Lyot 光阑也可能产生渐晕(受精瞄镜转动空间限制 Lyot 光阑只能放在出瞳附近),而光学天线对发射/接收效率指标要求很高,因此在进行消杂散光设计时还需要兼顾能量.本文针对典型的卡塞格伦光学天线参量,分析了杂散光抑制指标,从接收/发射效率及消杂散光效果两方面对两种消杂散光方案进行分析对比,并提出杂散光测试方案,对原理样机进行杂散光测试.

1 杂散光指标要求

在光通信系统中,卡塞格伦光学天线是发射/接收信号共用部分,实现对接收信号的缩束及对发射信号的扩束.光学天线由抛物面主镜和双曲面次镜组成物镜,形成一次像面,再经过目镜缩束准直.一般入瞳放在主镜上,出瞳位于目镜组后一定距离,为消除精瞄镜扫描时光束在主镜上的移动,精瞄镜设在出瞳处.系统光路如图 1.

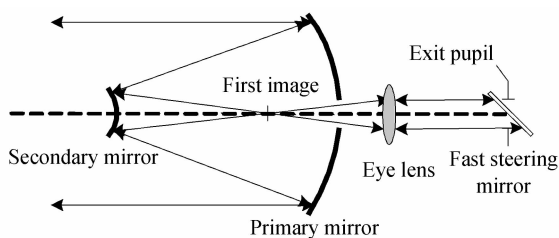


图 1 卡塞格伦光学天线光路

Fig. 1 The optical path of cassegrain optical antenna

通常评价光学系统杂散光抑制能力的指标有点源透射比(Point Source Transmittance, PST)、杂光系数(Veiling Glare Index, VGI)和消光比(Extinction Ratio, ER)^[7-9],这里选用消光比的分贝形式作为评价指标,其定义为

$$ER = 10 \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \quad (1)$$

式中, P_o 是光学天线出瞳处的杂散光功率, P_i 是光学天线入瞳处的杂散光功率.

只考虑太阳为杂散光源,根据能量传递和出瞳处

允许的最大的杂散光亮度阈值可估算对杂散光的指标要求.首先,根据黑体辐射普朗克算出工作波段在 λ_1 至 λ_2 间的太阳光谱辐射出射度 $M(\lambda, T)$ 为

$$M(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp \left(\frac{c_2}{\lambda T} \right) - 1 \right]} d\lambda \quad (2)$$

式中, c_1 是第一辐射常量, c_2 是第二辐射常量, $c_1 = 3.7415 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$, $c_2 = 1.4388 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$, T 是太阳的绝对温度(K).

再依据工作波段内太阳光的辐射出射度占全辐射出射度的比例关系和太阳常量,等比例计算出在光学天线入瞳处的照度 E_i 为

$$E_i = \frac{M(\lambda, T)}{\sigma T^4} E_{\text{sun}} \quad (3)$$

式中, σT^4 是全辐射出射度, $\sigma = \frac{c_1 \pi^4}{15 c_2^4} = 5.6697 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, E_{sun} 是太阳常量, $E_{\text{sun}} = 1353 \text{W}/\text{m}^2$.

根据功率定义,进入入瞳直径为 D 的光学天线的功率 P_i 为

$$P_i = \frac{\pi}{4} D^2 E_i \quad (4)$$

根据文献^[5],允许光学天线出瞳处的最大太阳杂散光亮度 $L_{\text{stray light}} < 1 \mu\text{W}/(\text{nm} \cdot \text{sr})$.假设杂散光亮度与方向无关,则在光学天线杂散光出射角 ω 所对应的立体角范围内,允许出瞳的最大功率 P_o 为

$$P_o = L_{\text{stray light}} (\lambda_2 - \lambda_1) \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\omega} \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (5)$$

最后,将 P_i 和 P_o 代入式(1)可计算出系统的消光比要求 ER. 举例说明,设光学天线入瞳直径 $D = 155 \text{mm}$,工作波段为 $1500 \pm 2 \text{nm}$ (通过在接收光路中设置窄带滤光片实现),太阳的绝对温度 $T = 5900 \text{K}$,取光学天线杂散光出射角 $\omega = \pi/8$ (假设出瞳直径为 16mm ,出瞳距为 20mm),根据式(1)~(5)可算出 $P_i = 0.016 \text{W}$, $P_o = 1.84 \times 10^{-6} \text{W}$, $ER = -40 \text{dB}$.因此,要求在环境背景光轴外抑制角范围内,消光比 $ER < -40 \text{dB}$.

2 杂散光抑制方案

按卡塞格伦光学天线出瞳处的杂光传播路径可大致将杂散光分为三类.第一类是视场边缘小角度入射的杂光经过主镜、次镜的反射到达一次像面附近,再经过目镜镜筒内壁的反射到达出瞳;第二类是最严重的一次杂光,即不经过主镜、次镜直接到达一次像面并穿过目镜到达出瞳的杂光;第三类是大入射角度的杂光经过主镜筒内壁的散射到主镜、次镜经过目镜到达出瞳.

针对每类杂散光都有其对应的抑制措施.为了消除视场外小角度入射的杂散光必须在一次像面处设置视场光阑组.为了消除大入射角度的杂光,系统需要合

理设计外部遮光罩.为了消除不经过主次镜直接到达望远镜出瞳的一次杂光可采用两种不同的方案,但各有利弊.方案一是在主、次镜上分别设置遮光罩,优点是全视场内无渐晕,缺点是增加中心遮拦比,接收/发射效率降低,从而降低光学天线增益;方案二是只设置主镜遮光罩并在出瞳附近设置 Lyot 光阑,优点是主视场内接收/发射效率高,杂散光抑制效果好,缺点是边视场有渐晕.图 2 是两种一次杂光抑制方案的示意图.

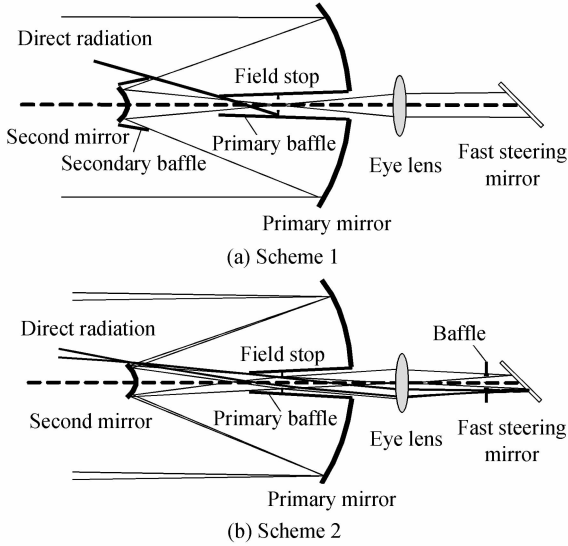
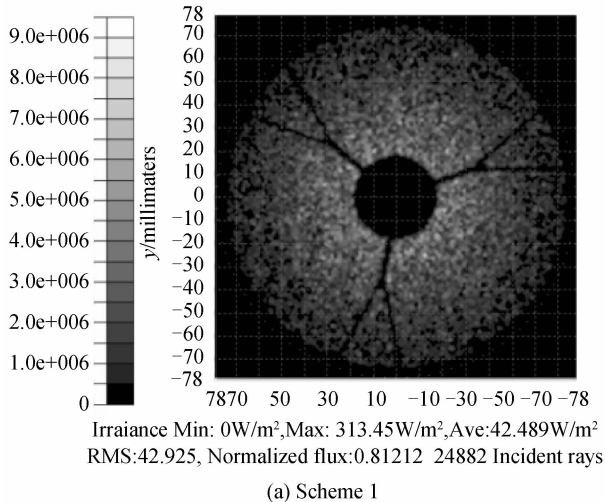


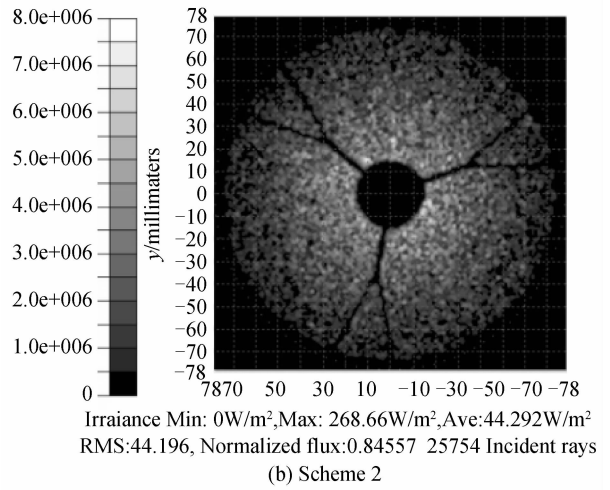
图 2 两种一次杂光抑制方案

Fig. 2 Two schemes of eliminating direct radiation

针对某卡塞格伦光学天线,进行了两种方案的杂散光设计和分析.该光学天线的主要指标为:入瞳直径为 155 mm, 缩束比为 15.5 倍;发射束腰直径为 9.5 mm 的高斯光,接收均匀光;全视场为 600 mrad,要求全视场内接收效率优于 0.86,发射效率优于 0.7;在轴外 $1^\circ \sim 20^\circ$ 时杂散光消光比 $ER < -40$ dB.通过 Tracepro 软件仿真出方案一和方案二的轴上发射效率分别为 0.812 和 0.846,仿真结果如图 3,但仿真软件



(a) Scheme 1



(b) Scheme 2

图 3 两种方案的高斯光发射效率仿真

Fig. 3 Emission efficiency simulation with gauss beam of the two schemes

未考虑孔径的衍射损耗.而根据衍射损耗计算公式 $D = \exp\left(-2 \frac{r^2}{\omega^2}\right) = \exp\left(-2 \frac{155^2}{(9.5 \times 15.5)^2}\right) = 0.109^{[10]}$,考虑衍射损耗后,两种方案的发射效率分别为 0.72 和 0.76.图 4 是对两种方案各视场角下的接收和发射效率的仿真结果.图 5 是对两种方案的视场外

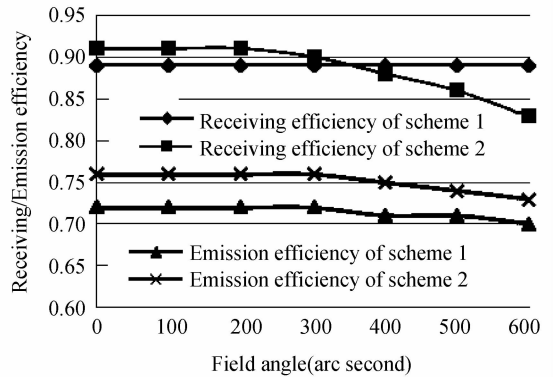


图 4 两种方案视场内接收/发射效率仿真曲线

Fig. 4 Receiving/emission efficiency in field angle simulation curves of the two schemes

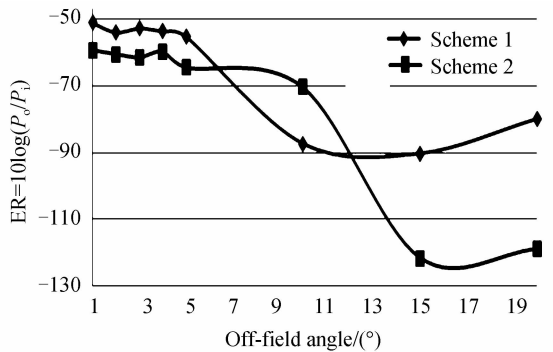


图 5 两种方案视场外消光比仿真曲线

Fig. 5 Extinction ratio at off-field angle simulation curves of the two schemes

$1^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的杂散光消光比仿真结果. 仿真结果显示: 方案一的接收/发射效率全视场内一致, 分别为0.89和0.7; 方案二在视场角300角秒内接收效率大于0.9, 500角秒内接收效率大于0.86, 边视场稍有渐晕, 全视场内发射效率比方案一稍高大于0.73; 两种方案在大于视场外 1° 时消光比ER都小于 -40 dB, 方案二的视场外杂散光抑制能力比方案一约高10 dB. 综合比较, 方案二虽然牺牲一些边视场的接收效率, 但发射效率及杂散光抑制能力都优于方案一.

3 杂散光测试

在实验室通过图6中的方案进行视场外杂散光消光比的测试. 用激光器经过大口径平行光管扩束准直模拟杂散光, 在被测卡塞格伦光学天线的出瞳处放置高灵敏度功率探测器, 光学天线和功率探测器共同放置在电控转台上, 转台转动时光学天线和探测器保持相对位置不变, 在探测器上可获得不同离轴角度下杂散光功率. 测试过程分两个步骤: 将光学天线对准平行光管使出瞳处探测器上的功率值最大记为 P_{axis} , 通过公式 $P_i = \frac{P_{axis}}{\tau}$ 计算出入射进入系统的光功率 P_i , 式中 τ 系统透过率; 旋转转台测试各轴外角度下探测器上的功率记为 P_o , 再根据式(1)计算出消光比ER.

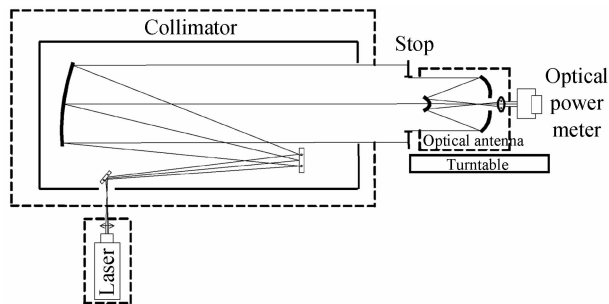


图6 杂散光测试光路

Fig. 6 Test optical path of stray light

根据第2节的分析结果, 对某卡塞格伦光学天线原理样机选择杂散光方案二进行设计实施, 并在试验室对原理样机进行杂散光测试. 测试设备为: 口径500 mm焦距5 m的平行光管、光功率为100 mW的1500 nm激光器、灵敏度为 $0.1 \mu\text{W}$ 的功率探测器及转动准确度为8 s的转台. 视场外 $1^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 杂散光测试结果如图7, 曲线表明: 视场外 $1^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 系统消光比实测值 $ER < -40$ dB满足指标要求, 其中 $1^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 时消光比 $-54 \text{ dB} < ER < -40 \text{ dB}$, $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时消光比不变是因为杂散光已经淹没在环境背景中, 超出测试功率计的灵敏度范围无法识别. 对比图5中的曲线二, $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 实测值比仿真值高约20 dB, $4^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 仿真值比实测值高约10 dB, 这是由于仿真模型中结构件发黑表面参量设定和实际值存在偏差造成的仿真误差.

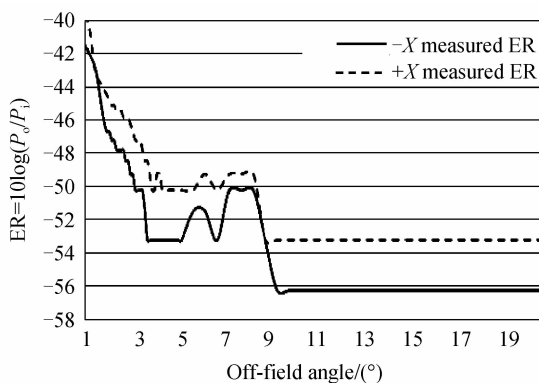


图7 视场外消光比实测曲线

Fig. 7 Extinction ratio test curves at off-field angle

4 结论

本文从杂散光能量传递的角度出发, 分析了卡塞格伦光学天线望远系统的杂散光指标要求, 提出两种杂散光抑制方案, 从接收/发射效率和杂散光抑制效果两方面对比分析了其优缺点, 最终选择设置视场光阑、主镜遮光罩及出瞳附近设置Lyot光阑的杂散光抑制方案作为某典型卡塞格伦光学天线原理样机的消杂光方案, 并对其进行了杂散光测试, 测试结果表明: 视场外 $1^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 系统实测消光比小于 -40 dB, 满足分析的杂散光指标要求. 本文对分析和控制卡塞格伦光学天线的杂散光, 具有一定的实用价值.

参考文献

- [1] ZHAO Shang-hong, WU Ji-li, LI Yong-jun, et al. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 092801. 赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 092801.
- [2] HE Wen-sen, YANG Hua-jun, JIANG Ping, et al. The characteristics analysis of beam transmitting cassegrain optical antenna system [J]. *Laser Journal*, 2013, **34**(5): 40-41. 何文森, 杨华军, 江萍, 等. 卡塞格伦光学天线系统的光传输特性分析 [J]. *激光杂志*, 2013, **34**(5): 40-41.
- [3] YU Jian-jie. Research on the optimal design and performance evaluation methods of the optical system in intersatellite optical communications [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 1-25. 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: 哈尔滨工业大学, 2009: 1-25.
- [4] RAN Ying-hua. Design and characteristics analysis of optical antenna in space optical communication [D]. Cheng Du: University of Electronic Science and Technology of China, 2009: 2-18. 冉英华. 空间光通信中光学天线系统的设计及性能分析 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 2-18.
- [5] HEMMATRI H. 深空光通信 [M]. 王平, 孙威, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [6] PAGE N A. Design of the optical communication demonstrator Instrument optical system [C]. SPIE, 1994, 2123: 498-504.
- [7] ZHU Yang, ZHANG Xin, WU Yan-xiong, et al. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope [J]. *Acta Optica*

Sinica, 2014, **34**(8):0822002.

朱杨,张新,伍雁熊,等.离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J].*光学学报*,2014,**34**(8):0822002.

- [8] LIAO Zhi-bo, JIAO Wen-chun, FU Rui-min. Veiling glare index calculation for refract optical system[J]. *Acta Photonica 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.

- [9] LU Wei, LI Zhan. Optimum designing of baffle of CCD-star

sensor[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2002, **257**(3):47-50.

卢卫,李展.星敏传感器遮光罩的优化设计[J].*导弹与航天运载技术*,2002,**257**(3):47-50.

- [10] ZHANG Xian-liang. Measuring the far-field small divergence angle of laser beams by CCD[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005:7-8.

张宪亮.利用 CCD 测量微小角度的激光远场发散角[D].成都:电子科技大学,2005:7-8.