

文章编号 1004-924X(2009)09-2091-07

# 卫星光通信光学天线轴间距的精确调试

俞建杰, 谭立英, 刘剑峰, 韩琦琦, 杨玉强

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 卫星光通信系统的光学天线由物镜和目镜构成, 两者在光轴方向的间距对系统的发射和接收性能有重要影响。轴间距通常由干涉仪确定, 但干涉仪与光学天线的工作波长不同时会引起镜头组焦距变化, 导致物镜和目镜的轴间距存在偏差。为了能利用单波长干涉仪精确调试物镜和目镜的轴间距, 本文根据光学天线在干涉测量装置中的程函方程, 研究了因波长差异引起的物镜和目镜的轴间距变化量与干涉条纹变化量的相应关系, 并据此提出一种能精确调试光学天线物镜轴间距的方法。提出了几种检验该方法有效性的验证方案, 包括实验验证和计算机仿真验证两大类。基于计算机仿真的验证结果表明, 卡塞格伦反射式光学天线和透射式光学天线轴间距模拟调试误差分别 $<15\%$ 和 $<3\%$ , 仿真误差满足使用要求。

**关键词:** 卫星光通信; 光学天线; 天线装配; 轴间距

**中图分类号:** TN929.13 **文献标识码:** A

## Alignment for center distance of optical telescope in satellite optical communication terminal

YU Jian-jie, TAN Li-ying, LIU Jian-feng, HAN Qi-qi, YANG Yu-qiang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The optical telescope of satellite optical communication terminal is composed of an objective and an eyepiece, and the axial center distance of the two lenses has an important influence on emitting and receiving performance of the system. The digital single-wavelength interferometer is an effective device to measure and adjust the axial center distance, however, it is usually difficult to be determined precisely when there is a wavelength difference between the interferometer and the optical telescope, because the focal length difference of the objective and the eyepiece varies with the wavelength. In this paper, the relation between the variations of center distance and the corresponding interference fringe counts was deduced on the basis of eikonal equation, then an efficient alignment method was given according to the relation. Several proof schemes including experiments and numerical simulation were suggested, and the second scheme was chosen to verify the alignment method presented in this paper. Numerical results show that the alignment error of center distance in a Cassegrain reflective optical telescope is less than 15%, and that in a refractive optical telescope is only about 3%. These results

收稿日期: 2008-08-21; 修订日期: 2008-10-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10904026)



和光学天线的波长以及透镜的折射率都确定以后,该值固定。显然,物镜和目镜在轴向位置的移动对应于干涉条纹数量的变化,当目镜位于 A 时,干涉仪采集到的条纹数量最少,理想情况应没有条纹;而当目镜位于 B 时,干涉条纹变化量应为  $\Delta n$ ,且  $\Delta n$  与  $\Delta d$  之间必然存在一定的对应关系。因此如果能给定由波长不同引起的轴间距偏差  $\Delta d$  与干涉条纹变化量  $\Delta n$  之间的关系表达式,就能利用干涉条纹的变化,确定物镜和目镜在  $\lambda_2$  时的相对位置。

如图 1 所示,当目镜位于 A 时,从干涉仪出射的平行参考光束经物镜折射后形成光束  $Oa$ ,该折射光束在目镜的入射点为  $a$ ,它与光轴的夹角为  $\alpha$ ,折射光束  $Oa$  经目镜后平行出射,它在标准平面反射镜上的入射点为  $e$ 。当目镜位于 B 时,折射光束  $Oa$  在目镜的入射点为  $b$ ,经目镜再次折射后光线到达标准平面反射镜,其入射点为  $c$ ,折射光束  $bc$  与光轴的夹角为  $\beta$ 。目镜在位置 A 和位置 B 之间的距离即为需要调整的轴间距偏差  $\Delta d$ :

$$\Delta d = (f_{1\lambda_1} + f_{2\lambda_1}) - (f_{1\lambda_2} + f_{2\lambda_2}) \quad (1)$$

当目镜分别位于 A 和 B 时,系统中的单程光程变化可近似为:

$$\begin{aligned} OPD &= (ab + bc) - (ad + de) = \\ &= (ab - \Delta d) + (bc - L) = \\ &= \Delta d \times (\cos \alpha^{-1} - 1) + L(\cos \beta^{-1} - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

由图 1 的三角关系可知,  $\alpha = \arctan \{ D_1 / (2f_{1\lambda_1}) \}$ ,其中,  $D_1$  为物镜的有效口径。由几何光学物像公式和图 1 的三角关系,得  $\beta = \arctan \{ D_1 \cdot \Delta d / (2f_{1\lambda_1} \cdot f_{2\lambda_1}) \}$ 。将  $\alpha$  和  $\beta$  代入方程(2),即可得到光程差表达式:

$$\begin{aligned} OPD &= \left( \frac{1}{\cos(\arctan(D_1 / (2f_{1\lambda_1})))} - 1 \right) \Delta d + \\ &= \left( \frac{1}{\cos(\arctan(D_1 \Delta d / (2f_{1\lambda_1} f_{2\lambda_1})))} - 1 \right) L \end{aligned} \quad (3)$$

考虑到  $D_1 \cdot \Delta d / (2f_{1\lambda_1} f_{2\lambda_1})$  一般在  $10^{-3}$  量级,此时,由三角近似关系  $\arctan \theta \approx \theta$ ,可知  $\arctan \{ D_1 \Delta d / (2f_{1\lambda_1} f_{2\lambda_1}) \} \approx D_1 \Delta d / (2f_{1\lambda_1} f_{2\lambda_1})$ 。再考虑到  $\theta \approx 0$  时,  $\cos \theta \approx 1$ ,因此,可以将式(3)简化为:

$$OPD = \left( \frac{1}{\cos(\arctan(D_1 / (2f_{1\lambda_1})))} - 1 \right) \Delta d \quad (4)$$

由  $\Delta n = OPD / \lambda_1$ ,有:

$$\Delta d = \left\{ \frac{1}{\cos(\arctan(D_1 / (2f_{1\lambda_1})))} - 1 \right\}^{-1} \cdot \lambda_1 \cdot \Delta n \quad (5)$$

上式即为物镜和目镜轴间距偏差  $\Delta d$  与干涉条纹变化数  $\Delta n$  的对应关系式,由该式可知,当满足简化条件时,轴间距偏差  $\Delta d$  只与干涉测量仪器的工作波长  $\lambda_1$  及物镜(或目镜)的相对孔径有关。

根据式(5),便可通过干涉条纹数量的控制,精确测量和调整望远物镜与目镜的轴间距,从而完成卫星光通信终端光学天线的高精度调试。

### 3 验证方法研究

为验证式(5)的有效性,采取了如下两类验证方式。

#### 3.1 实验验证

(1)单干涉仪验证法。该方法利用干涉仪和超精密位移台来实现光学天线轴间距的调试和验证,其实验装置如图 2 所示。将工作波长为  $\lambda_2$  的光学天线置于工作波长为  $\lambda_1$  的干涉测量光路中,调整各部件同轴。保持天线物镜位置固定不变,并将目镜放置在可沿光轴方向移动的精密位移台上。调整目镜,使条纹最少,此时,目镜的位置与图 1 中的位置 A 重合。操纵位移台使目镜仅沿轴向移动  $\Delta d$ 。记录干涉条纹变化量  $\Delta n$ ,并按式(5)计算物镜和目镜间隔的变化量  $\Delta d'$ ,比较  $\Delta d$  和  $\Delta d'$ ,理想情况下两者应相等。

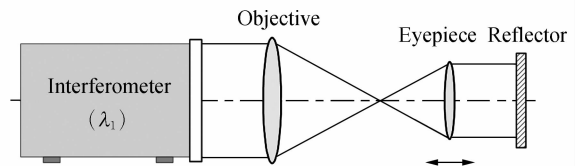


图 2 使用单干涉仪的光学天线轴间距偏差验证装置  
Fig. 2 Proof of center distance deviation in optical telescope with one interferometer

(2)双干涉仪验证法。该方法利用两台干涉仪实现光学天线轴间距的调试和验证,其中一台干涉仪的工作波长与光学天线的设计波长  $\lambda_2$  相等。如图 3 所示,将光学天线置于工作波长为  $\lambda_1$  的干涉测量光路中,调整各部件同轴并保持物镜位置不变。移动目镜,使干涉条纹最少。然后根

据式(1)和(5)计算  $\Delta n$ , 并移动目镜使条纹数量往相应方向变化  $\Delta n$ , 至此光学天线调试完毕。保持物镜和目镜相对位置不变, 将其整体放置在另一个工作波长为  $\lambda_2$  的干涉验证光路中(如图 2), 此时干涉条纹数量应为 0。

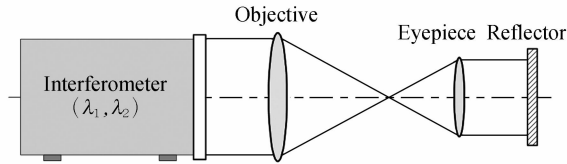


图 3 使用双干涉仪的光学天线轴间距偏差验证装置  
Fig. 3 Proof of center distance deviation in optical telescope with double interferometers

(3)波前分析仪验证法。该方法利用波前分析仪和平行光管检验已经调试完毕的光学天线。首先参考双干涉仪验证法, 将光学天线放置在工作波长为  $\lambda_1$  的干涉测量装置中, 执行调试程序, 使干涉条纹数量变化  $\Delta n$ 。保持物镜和目镜相对位置不变, 将已调试完毕的光学天线整体放置在图 4 所示的光路中, 调整光路同轴, 此时在工作波长为  $\lambda_2$  的波前分析仪中, 光束波前的 PV 值应近似为 0。

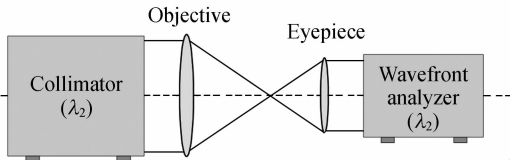


图 4 使用波前分析仪的光学天线轴间距偏差验证装置  
Fig. 4 Proof of center distance deviation in optical telescope with wavefront analysis meter

### 3.2 计算机仿真验证

计算机仿真是利用光学计算机软件模拟和验证整个实验过程, 常用的光学仿真软件包括 Zemax, Code V, 以及 OSLO 等。由于光学天线的设计通常就是由这些软件完成的, 因此只需正确导入设计文件, 便可得到设计波长为  $\lambda_2$  的光学天线系统。将系统波长更改为  $\lambda_1$ , 并将物镜和目镜的间隔设置为优化变量后进行优化, 使两者在波长为  $\lambda_1$  时组成理想望远系统。优化后目镜将处于 A 位置, 系统出瞳波前接近平面波。保持望远物镜位置不变, 将目镜沿轴向移动  $\Delta d$  (移动方向与  $\lambda_1$  有关), 由于光学系统的出瞳波前像差与干涉

测量装置得到的干涉图之间呈正比关系, 因此可以考察出瞳波前像差以研究干涉条纹数量的变化量  $\Delta n$  与移动距离  $\Delta d$  的关系。

在以上两类验证方法中, 第一类验证方法比第二类方法更直观更准确, 但其困难在于试验设备昂贵, 尤其是双干涉仪和波前分析仪验证方法。鉴于实验条件所限, 本文选择光学软件仿真的方式验证了式(5)的准确性。

## 4 计算机仿真

以卫星光通信通常采用的卡塞格伦式光学天线系统为例, 用光学软件仿真模拟单干涉仪实验验证式(5)的过程。

设置仿真参数如下:  $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$ ;  $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$ ;  $D_1 = 310 \text{ mm}$ 。如图 5 所示, 光学天线的物镜由两个反射面组成, 目镜组则全部为透射镜片。由光学天线在波长  $\lambda_2$  下的优化设计结果

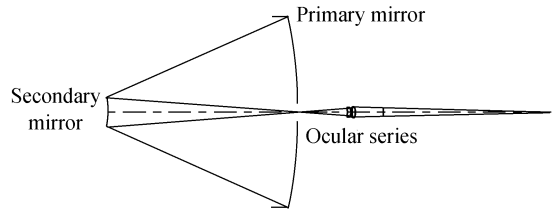


图 5 卡塞格伦式光学天线  
Fig. 5 Cassegrain optical telescope

可得  $f_{1\lambda_1} = f_{1\lambda_2} = 2300.00 \text{ mm}$ ,  $f_{2\lambda_1} = 114.5982 \text{ mm}$ ,  $f_{2\lambda_2} = 115.1111 \text{ mm}$ , 根据式(1)可得  $\Delta d = 0.5129 \text{ mm}$ 。将天线波长更改为  $\lambda_1$ , 然后设置物镜和目镜的轴间距为优化变量进行优化。此时, 目镜将在 A 位置处(参考图 1)与物镜组成波长为  $\lambda_1$  时对应的理想望远系统, 该处系统的出瞳见图 6, 对应的条纹数量为 0.255。将物镜和目镜的距离增加  $\Delta d$ , 则系统出瞳如图 7 所示, 对应的条纹数量为 1.826。因此干涉条纹变化量  $\Delta n = 1.571$ , 由此按式(5)计算可得  $\Delta d' = 0.4383 \text{ mm}$ 。根据以上结果可知, 仿真结果  $\Delta d'$  与理论值  $\Delta d$  之间的误差为 14.5%, 基本满足卫星光通信系统对光学天线的调试要求。

下面以透射式光学天线为例, 检验式(5)的有效性。设置仿真参数如下:  $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$ ;  $\lambda_2 =$

为 2.1%，完全满足卫星光通信系统对光学天线的调试要求。

由卡塞格伦式和透射式光学天线的仿真结

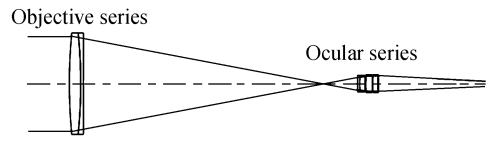


图 8 透射式光学天线

Fig. 8 Transmission optical telescope

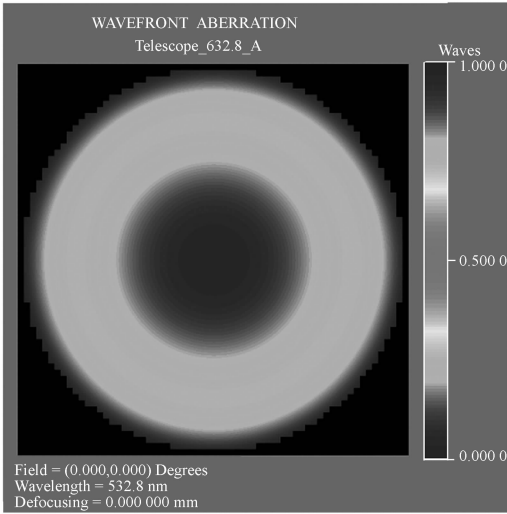


图 6 波长为  $\lambda_1$  时 A 位置处的系统出瞳

Fig. 6 Pupil map of telescope located at A

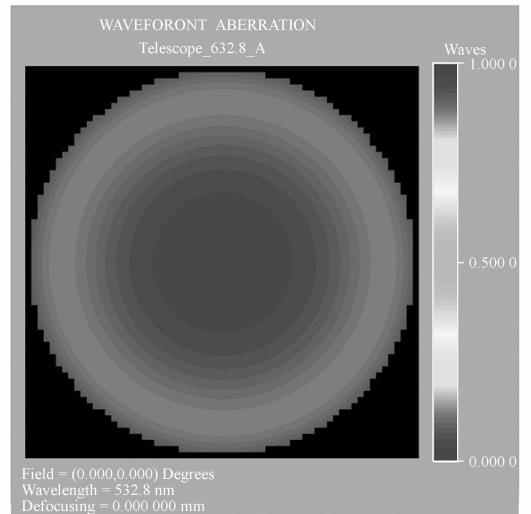


图 9 波长为  $\lambda_1$  时 A 位置处的系统出瞳

Fig. 9 Pupil map of telescope located at A

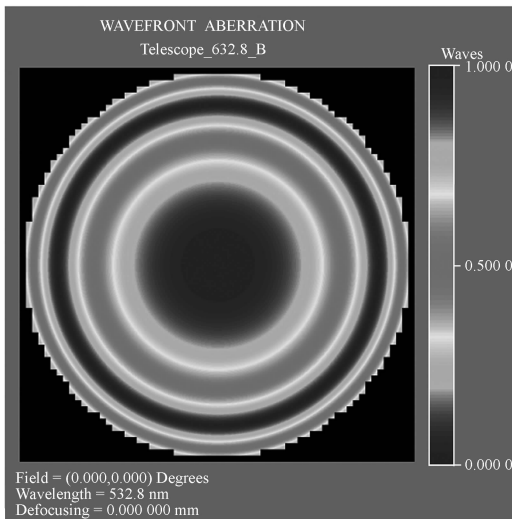


图 7 波长为  $\lambda_1$  时 B 位置处的系统出瞳

Fig. 7 Pupil map of telescope located at B

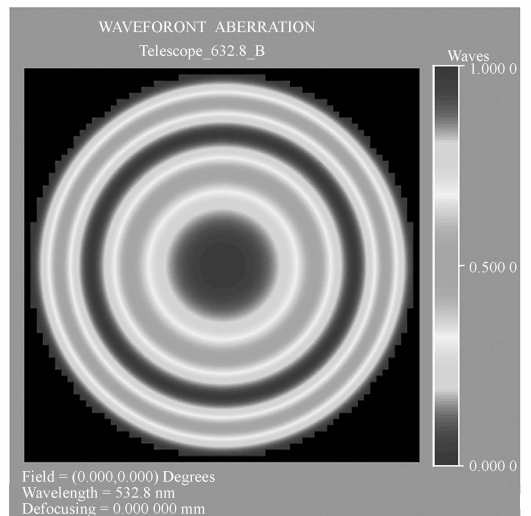


图 10 波长为  $\lambda_1$  时 B 位置处的系统出瞳

Fig. 10 Pupil map of telescope located at B

800 nm;  $D_1 = 40$  mm。如图 8 所示,光学天线的物镜和目镜均为透射镜片。由光学天线在波长  $\lambda_2$  下的优化设计结果可得  $f_{1\lambda_1} = 233.956 1$  mm,  $f_{1\lambda_2} = 234.141 2$  mm,  $f_{2\lambda_1} = 41.996 5$  mm,  $f_{2\lambda_2} = 42.156 9$  mm,根据式(1)可得  $\Delta d = 0.345 5$  mm。参考反射式光学天线的仿真验证过程,可得目镜组分别位于 A 和 B 位置时,系统出瞳分别如图 9 和 10 所示。按照反射式光学天线的仿真验证过程,最终可得干涉条纹变化量  $\Delta n = 2.074 - 0.125 = 1.949$ ,对应的  $\Delta d' = 0.338 2$  mm。根据以上结果可知,仿真结果  $\Delta d'$  与理论值  $\Delta d$  之间的误差

果可知,系统的模拟调试误差均 $<15\%$ 。虽然公式推导过程中的近似处理,系统复杂度提升所产生的模型偏差,以及干涉条纹细分精度等均会导致仿真误差的产生,但式(5)所描述的关系式仍开辟了卫星光通信光学天线系统高精度调试的新途径。

## 5 结 论

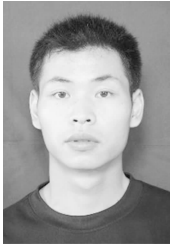
本文探讨了干涉仪和光学天线工作波长不相等时,利用单波长干涉仪调试不同工作波长的光学天线物目镜轴间距的方法。根据光程差公式和几何物象关系,推导了光学天线物目镜轴间距

偏差与干涉条纹变化量之间的关系表达式,据此提出了卫星光通信系统光学天线物目镜轴间距的精确调试方法。分析和讨论了检验该方法有效性的几种方式,并以卡塞格伦式和透射式光学天线为例,进行了数值仿真试验。仿真结果表明,利用本文提出的关系表达式,卡塞格伦式光学天线的轴间距的模拟调试误差约为 $15\%$ ,而透射式光学天线的轴间距的模拟调试误差不到 $3\%$ ,两者均能满足卫星光通信系统对光学天线的调试要求。文中所提的方法不要求干涉仪的工作波长与光学天线的工作波长相等,极大地提高了干涉仪的适用范围,具有较重要的普适意义和经济意义,可推广至类似光学系统的装配和调整。

## 参考文献:

- [1] 马晶,高宽,谭立英,等.星地光通信中 PAT 链路的衰落冗余[J].光学精密工程,2007,15(3):308-314. MA J, G CH, TAN L Y, *et al.*. Fade budgets of PAT link in satellite-to-ground optical communications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):308-314. (in Chinese)
- [2] LANGE R, SMUTNY B. Homodyne BPSK-based optical inter-satellite communication links [J]. *SPIE*, 2007,6457:645703-1-9.
- [3] SCHAADT P. The german earth observation programme: building on the success of terraSAR-X and RapidEye [J]. *SPIE*, 2007,6744:674407-1-11.
- [4] FUJIWARA Y, MOKUNO M, JONO T, *et al.*. Optical inter-orbit communication engineering test satellite (OICETS) [J]. *Acta Astronautica*, 2007,61(6):163-175.
- [5] PERLOT N, KNAPEK M, GIGGENBACH D, *et al.*. Results of the optical downlink experiment KIODO from OICETS satellite to optical ground station oberpfaffenhofen (OGS-OP) [J]. *SPIE*, 2007, 6457: 645704-1-8.
- [6] 赵馨,王世峰,佟首峰,等.飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J].光学精密工程,2008,16(7):1190-1195. ZHAO X, WANG SH F, TONG SH F, *et al.*. Initial alignment of antenna for laser communication system between aircraft and ground station [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(7):1190-1195. (in Chinese)
- [7] 王绍举,金光,徐升.高精度激光通信小卫星星座仿真平台设计[J].光学精密工程,2008,16(8):1554-1559. WANG SH J, JIN G, XU K. Design of simulation platform for high precision laser communication small satellite constellation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(8):1554-1559. (in Chinese)
- [8] OPPENHAUSER G, WITTING M, POPESCE A. The European SILEX project and other advanced concepts for optical space communications [J]. *SPIE*, 1991,1522:2-13.
- [9] YAMAMOTO A, HORI T, SHIMIZU T, *et al.*. Japanese first optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) [J]. *SPIE*, 1994,2210:30-38.
- [10] HEMMATI H, PAGE N A. Preliminary opto-mechanical design for the X2000 transceiver [J]. *SPIE*, 1999,3615:206-211.
- [11] PRESBY H M, TYSON J A. Telescope for a free-space wireless optical communication system: European, EP1199822[P]. 2002-04-24.
- [12] DANDIEL MALACARA. *Optical Shop Testing* [M]. Second Edition. U. S. A.: John Wiley & Sons, Inc, 1992.

## 作者简介:



俞建杰(1980—),男,浙江绍兴人,工学博士,分别于2002年、2004年、2009年在哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为卫星光通信、衍射光学元件设计、光学设计及测量等。E-mail: yjjhit@163.com



韩琦琦(1976—),男,北京人,工学博士,副教授,主要从事卫星光通信系统的设计和研究。E-mail: han.qiqi@163.com

## 导师简介:



谭立英(1957—),女,山东掖县人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信、小波光学等方面的研究。E-mail: tanliying@hit.edu.cn



杨玉强(1977—),男,山东德州人,博士研究生,主要从事卫星光通信技术的仿真研究。E-mail: yqyang0@gmail.com



刘剑峰(1975—),男,辽宁沈阳人,工学博士,副教授,主要从事光学系统设计和光学检测方面的研究。E-mail: jfliu1@163.com

## ● 下期预告

## 白光日冕仪光学系统杂散光抑制结构

张红鑫<sup>1</sup>,卢振武<sup>1</sup>,夏利东<sup>2</sup>,刘 华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研发中心,吉林 长春 130033;

2. 山东大学威海分校 空间科学与物理学院,山东 威海 264209)

“夸父计划”是由“L1+极轨”的三颗卫星组成的一个空间观测系统,夸父 A 星中一个重要的仪器是白光日冕仪( $2.5 R_{\odot} \sim 15 R_{\odot}$ ),并且在我国是首次研制。日冕仪的工作特点决定了其对杂散光抑制要求极其严格,需要对系统进行杂散光抑制的研究。本文通过分析系统工作特点,设计了白光日冕仪,系统视场  $4^{\circ}$ 、角分辨率  $14''$ 、口径 30 mm、焦距 200 mm、系统总长 1 080 mm、其中光学系统 370 mm,  $37 \text{ pl/mm}$  的 MTF 值大于 0.5;根据其杂散光抑制的结构特点,利用多个光阑互相共轭的空间位置关系进行杂散光的抑制。系统的四个主要杂散光光源从结构上被全部抑制,系统的整体杂散光抑制水平可达  $10^{-8} \sim 10^{-10} B_{\odot}$ 。满足系统对杂散光抑制的要求。