

文章编号 1004-924X(2011)07-1456-08

空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除

杨 林^{1,2*}, 李 达^{1,2}, 崔天刚^{1,2}, 陈 波¹

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

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对 EUV 太阳望远镜在地面非工作波段预先检测时出现的杂散光问题, 考虑望远镜长焦距的特点, 建立了基于反射镜转动扫描原理的杂散光测量系统, 测量得到了望远镜的点源透射率(PST)曲线。通过对比 PST 曲线和分析望远镜结构, 得出杂散光的主要来源为小角度下的一级杂光, 由此设计了主次镜遮光罩, 并利用 Tracepro 软件建立望远镜的实体模型, 在不同散射表面的双向散射(BRDF)值条件下计算出遮光罩的消杂光效果。对 PST 实际测量结果表明, 在 0 ~ 4°, 使用遮光罩使杂散光减少 3 个数量级, 杂光系数不超过 3.65%。在分辨率成像测量中, 杂散光影响得到消除, 系统分辨率接近衍射极限, 满足地面上紫外光波段的测量要求。

关键词: 极紫外太阳望远镜; 杂散光; 点源透过率; 遮光罩

中图分类号: TH751; P111.41 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111907.1456

Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band

YANG Lin^{1,2*}, LI Da^{1,2}, CUI Tian-gang^{1,2}, CHEN Bo¹

(1. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: pieryang@163.com

Abstract: For the stray light from an Extreme Ultraviolet (EUV) solar telescope in the ground experiment, a measurement system for the Point Source Transmittance (PST) was established based on the parallel light introduced by the rotary scanning mirror at various angles and the PST curves were applied to assess the stray light level. By analyzing the structure of the telescope and the measured PST curves, the first order stray light under a small angle range was proved to be the main source of stray light. To eliminate the stray light, the principles of the baffles were presented in details and the simulation modeling of the telescope with baffles was created by Tracepro software. The eliminating ability of the baffle was calculated and tested at different Bidirectional Reflectance Distribution Function

收稿日期: 2010-08-26; 修订日期: 2010-11-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10878004; No. 40774098)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(BRDF) values. The test results show that the baffles can block most of the first order stray lights, the intensity of stray light has reduced 3 orders of magnitude, and the corresponding veiling glare index is less than 3.65%. With the help of baffles, the EUV telescope performs near the diffraction-limited condition at UV band, and all the requests for the imaging test can be met.

Key words: EUV solar telescope; stray light; Point Source Transmittance (PST); baffles

1 引言

杂散光是影响光学系统成像的主要因素之一,它使探测器面背景变亮,导致像面对比度和调制传递函数下降,系统信噪比降低,从而影响图像清晰度,严重时甚至会使系统失效。杂散光产生的原因主要有 3 个^[1]: 光学系统视场外部辐射、光学系统内部辐射以及成像光线的散射。传统光学系统杂光测量普遍使用的是整体包覆后用积分球测试的黑斑法。随着弱光强探测技术的发展,光学系统的杂散光特性一般使用点源透射率(Point Source Transmittance PST)来描述。获得 PST 有两种方法^[2-3]: 一个是通过实验直接测量,另一个是利用计算机软件仿真得到。在软件仿真计算中,需要对光学系统的几何模型、镜面的杂散光属性和非镜面元件的杂散光属性进行详尽的描述,以使计算机能够建立起包含足够信息量的计算模型。杂散光分析对于设计任何高性能光学系统都是必不可少的环节,如各类航空仪器、实验室的光谱仪、照明系统以及大尺寸的实验设备。一些地基望远镜也通过杂光分析来提高自己在可见光和红外波段的性能,例如 SIRTf, SDSST, APOTS, EQ-1 等^[4-5], 其中 EQ-1 利用了 Tracepro 软件建模分析, APOTS 使用的是 ASAP 软件建模分析和实验测量相结合的方法。

极紫外(EUV)太阳望远镜^[6-7]是用于太阳观测的空间仪器,几何像差、装调误差和工作波段的散射都会影响其实际分辨率。EUV 望远镜的设计达到了衍射极限,几何像差可以忽略,但装调误差却会降低成像质量。所以在完成望远镜装调后,需对其进行预先检测,以验证装调水平,保证装调误差不影响工作波段成像。望远镜结构初始设计中没有采取消杂光措施,缺少遮光罩的双反

结构,加之内部金属材质的桶壁、镜座、支撑架等都可能引起杂散光,因此有必要预先确定并消除这些影响。

传统的 PST 测量通过待测光学系统或者平行光管的转动来实现不同视场入射光的引入。为解决大型的平行光管和待测望远镜转动的不便,本文设计了一套新的杂散光测量装置。平行光管和待测望远镜呈垂直角度放置,利用反射镜转动扫描机构改变光路进行待测望远镜不同视场下的 PST 测量。根据望远镜的结构和 PST 测量曲线分析杂光的主要来源,利用 Tracepro 软件设计遮光罩,软件模拟和实测结果均表明分辨率检测中的杂光大大降低。根据实测望远镜在小视场范围下的 PST 响应,计算出了紫外光检测时加带遮光罩的望远镜的杂光系数结果,证明了本文的消杂光设计可以消除分辨率测试时杂光的影响。

2 杂散光定义

预先检测一般使用可见光或紫外光,要求成像结果能够达到或者接近检测光的衍射极限。本文检测光源选择的是 253.7 nm 的紫外光,要求得到 0.8 分辨率下的成像结果。端对端的分辨率测试中,均匀照明放置在平行光管焦点位置作为目标物的分辨率靶,参与成像的不是严格的点光源,而是一个面光源,它会在 CCD 像面上引入非成像光线。分辨率检测时光管和望远镜相连接,次镜附近光滑的不锈钢内壁与望远镜入瞳间的距离很近,未经煮黑的内壁对紫外光的反射也会引入非成像的杂光。上述两点即预先检测时产生杂光的原因。光学系统的杂光水平可以用杂光系数和点源透射率来评价,二者都可以通过测量得到。

2.1 点源透过率定义

光学系统对非轴上点源产生的杂光响应用归一化的点源透过率^[8]来描述,其定义为:视场外离轴角度为 θ 的点源经光学系统在像面产生的辐射照度 $P_d(\theta)$ 与该点源位于轴上时产生的辐射照度 $P_d(0)$ 的比值

$$PST(\theta) = \frac{P_d(\theta)}{P_d(0)}, \tag{1}$$

从式(1)可以看出光学系统的 PST 与测试用的点光源强度无关,只和系统本身对点光源的削减程度有关。显然,其数值越小表示光学系统抑制杂光的能力越强。在实际测量中要求点光源不可过强或过弱。测得的 PST 可以估算任意已知物的分布及其背景光在像面产生的总的杂光分布,从而预测待检系统对不同物体和背景成像时,杂光对像质的影响。

2.2 杂光系数 V 和 PST 关系

评价光学系统抑制杂光性能的黑斑法测量中,一个圆形小黑斑作为目标物被置于具有均匀辐亮度的扩展场上。均匀扩展亮场的实现,通常依靠积分球的方法。杂光系数 V 定义为像面上黑斑中心的辐照度与黑斑移去时同一点的辐照度之比。在李晖^[9]等的文献中,把黑斑法测量的杂光系数与 PST 联系起来,二者关系如下式

$$V = \frac{E_B}{E} = \frac{2 \int_0^{\theta} PST(\theta) \sin \theta d\theta}{\frac{B}{4F^2}} = \frac{8F^2 \int_0^{\theta} PST(\theta) \sin \theta d\theta}{B}, \tag{2}$$

其中 F 是光学系统的 F 数, θ 是视场角度,最大积分上限为 $\theta/2$,也可视具体情况取既定的杂光测量范围。式(2)中 PST 与 V 的关系表明通过对 PST 的积分,即扫描结果的累积,可以求出实际扩展光源在系统像面引起的杂散光辐照强度,得到系统杂光噪声的水平。

对于短焦距的光学系统,利用积分球测量杂光系数较易实现。一旦待测系统焦距长达几米,按照模拟黑体应置于 10 倍焦距远的要求,需要直径巨大的积分球,但这很难实现。因此焦距 6917

mm 的 EUV 太阳望远镜不可能使用传统的黑斑法来测量。在公式(1)中, PST 与入射角度有关,只要通过视场扫描就能实现不同角度的光强测量,从而避免了使用大型积分球,也就是说可以选择通过 PST 的测量来求得杂光系数,从而得知预先检测中望远镜杂光的影响。

3 PST 测量实验

在实验室建立的一套紫外光学系统杂光指标 PST 测量装置如图 1 所示,其利用反射镜转动扫描光路的方式来避免极紫外望远镜(EUT)的转动。氙灯加 253.7nm 的窄带滤光片提供紫外波段入射光。为了确保光源的稳定性,氙灯需预热 10 min,使光源的稳定性高于 2%。通过聚光透镜将氙灯的光强聚焦在位于平行光管焦点位置的直径为 100 μ m 的针孔上,该针孔即是 PST 测量中的点源。平行光管出射的平行光经旋转平台上平面反射镜反射后进入望远镜,旋转台的转动分辨率 0.02 $^\circ$ 。由于反射镜的转动会导致入射光线偏离望远镜入瞳中心,整个旋转台需要沿平行光管光轴方向平移,使得不同视场的平行光均能从望远镜入瞳中心入射。通过反射镜转动扫描的方式,达到了不同视场入射角的要求,得到以角度为变量的 PST 曲线。图 1 中所示几何关系决定平移的距离 L 为

$$L = d \tan 2\alpha, \tag{3}$$

其中 d 是平行光管出射平行光中心到望远镜入瞳中心的垂直距离, α 是反射镜从初始位置起所转动的角度。初始位置上反射镜与平行光呈 45 $^\circ$,使经过反射的平行光从望远镜 0 视场入射。

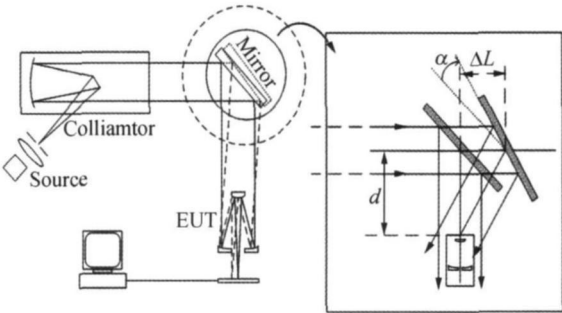


图 1 PST 测量示意图

Fig.1 Setup of PST measurement for EUT

PST 的测量要求探测器具有对微弱信号响应好、动态范围大和噪声低的特点, 所以选用光子计数探测器来接收光强。该探测器对微弱信号有很好的探测能力, 其计数率上限为 $3.5 \times 10^4 \text{ count/s}$ 。探测器上安装方形视场光阑, 只接收望远镜视场($13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$)范围内的光强能量。为了确保计数的准确性, 利用平行光管针孔位置上的标准衰减片调节入射光强度, 保证像面接收到的光子数不超过计数器的最大计数率。测试中用到的标准衰减片透过率为 10^{-3} , 加上探测器本身的计数范围, 整个系统能探测的动态范围可达 10^7 。光路中的平面反射镜使平行光经反射后光斑变成椭圆形, 在水平方向上光斑直径受到压缩, 改变量与转动角度有关, 经反射后的光强和光斑面积成正比。为了保证测量精度, 进入望远镜的光强必须恒定。因此, 被测望远镜入瞳直径 120 mm 时, 反射镜口径应大于 170 mm , 这样转动时进入望远镜的入射光强才能不受影响。本文选用口径为 200 mm 的反射镜, 使用其中心反射部分(180 mm), 该部分光强几乎恒定不变。

被测 EUV 太阳望远镜是卡塞格林式的两反系统, 其工作视场为 $0.16^\circ \sim 0.16^\circ$ 。大视场下进入的光线不能直接或者经二次反射到达像面, 必须经过多次反射才有可能到达像面。这些光线的衰减程度远远大于在一级杂光范围内的杂光, 其对成像的影响几乎可以忽略。测量时, 从 0° 视场开始, 每隔 0.04° 测量一次, 并在探测器前加入衰减片以保证探测器接收光强不溢出。 0° 视场时探测器面光强最强, 随着反射镜的转动, 入射光视场增大, 到达探测器面光强逐渐减小, 当读数显示为 30 以下, 即实际计数低于 3 W 时, 可去掉衰减片继续测量, 以得到不同角度下的像面光强值。根据归一化 PST 的定义, 计算得到 PST 值如图 2 所示(纵轴 PST 值取对数)

测量结果表明, 入射光在偏离视场以后强度剧烈下降, 直至 0.8° 出现明显上升, 其值大于周边视场两个量级, 最大值是 0° 视场时的 $1/10$, 说明有很强的光到达探测器面, 因此可以预见 EUV 望远镜在紫外光的检测中整体杂光水平较高。对于存在杂散光的光学系统, 其传递函数的变化由下式表示^[10]:

$$MTF_{\text{practice}} = (1 - V) MTF_{\text{no stray}}, \quad (3)$$

式中 V 是黑斑法测量得到的杂光系数。显然, 在

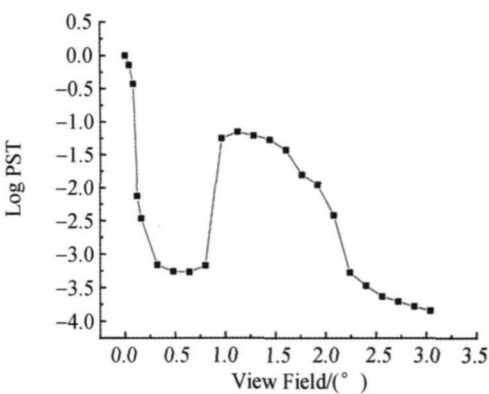


图 2 不同离轴角下 PST 测量结果

Fig. 2 Point source normalized transmittances of EUT at various off-axis angles

整个空间频率范围内, 光学系统的传递函数将随着杂光系数的增大而下降。图 2 中的 PST 曲线由式 2 积分得出紫外光下望远镜的杂光系数为 0.4 , 实际测量的 MTF 是无杂光时 MTF 的 0.6 倍, 严重影响分辨率测试的判别, 检测中必须采取措施降低其影响。

4 实验分析

4.1 望远镜的杂散光来源

两反结构的望远镜最大杂散光来源是一级杂散光^[11], 即视场外部的辐射源从物空间直接到达像面的辐射。这类光线没有经过衰减, 强度远远大于经过多次反射的杂光, 是两反结构中最严重的杂光。根据光线可逆原则由像面逆向看, 如果光线从像面中心出发能够到达次镜边缘并出射, 如图 3 中光线 1, 该光线和光轴形成的角度为一级杂光的最小入射角度 $\theta_{\min}$ 。入瞳边缘与主镜内边缘的连线之延长线如果能够到达像面, 这个角度即是最大入射角 $\theta_{\max}$; 如不能到达, 则最大入射角由像面中心和主镜内边缘或者入瞳外边缘确定, 而在 $\theta_{\max}$ 的范围之外没有光线直接到达像面。图 3 中, 光线 2 与光轴的夹角即为一级杂光的最大入射角。根据主次镜几何尺寸和间距, 可计算出 EUT 的一级杂散光最小角 $\theta_{\min} = 0.92^\circ$ 和最大角 $\theta_{\max} = 1.51^\circ$ 。对比图 2 测量结果发现, 在 $0.8^\circ \sim 2.1^\circ$ 的突起峰正好覆盖了由几何尺寸计算出的 $0.92^\circ \sim 1.51^\circ$ 的一级杂散光, 说明在小角度的测量范围中, 一级杂散光是最主要的杂光来源, 其次还

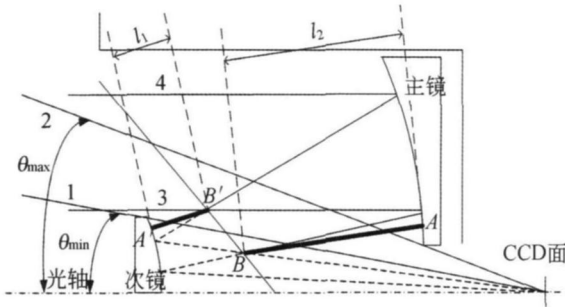


图 3 遮光罩和杂光示意图

Fig. 3 Diagram of baffles and stray light of EUT

存在一些经过多次反射到达像面的杂光。

4.2 遮光罩设计

对于光学系统,消杂散光的措施^[12]主要有内外遮光罩、消光环、视场光阑和里奥光阑。外遮光罩用于避免来自大入射角度杂散辐射源的光线直射进入光学系统视场,其几何尺寸由大入射角度杂散辐射源的临界入射角决定,同时还受到光学系统结构的制约。在 EUV 太阳望远镜的分辨率测量实验中,因平行光管几何尺寸的局限,没有大范围杂散光,需要关心的是略大于视场的杂光带来的响应,而不需要针对大角度入射的外遮光罩。根据上节对一级杂光的分析,内遮光罩应该直接阻挡最大角 θ_{max} 之外的光线,其位置由图 3 中粗黑线所示。主镜遮光罩 AB 的 B 点是由 0 视场入射内边缘光线 3 经主镜反射,再与外边缘光线 4 经主、次镜依次反射后相遇形成的相交点,次镜罩 AB 的外延 B 由光线 4 经主镜反射后与光线 3 形成交点,这两个点确定了遮光罩的极限长度,结合已知系统遮拦比,主、次镜参数和主、次镜间距离,可计算出遮光罩的几何尺寸。同时为了保证视场内没有直接射入的杂光, BB 的连线不能直接达到像面,即两个罩的外延连线不能进入视场,具体的计算如下式所示

$$l_1 = \frac{(f_p - x)(d_2/2 + f_p \tan \theta)}{(f_p - l_5) \tan \theta + d/2} - f_p + l_3, \quad (3)$$

$$l_2 = \frac{(l_3 - l_1) \tan \theta + (d_3 - d_2)/2}{(l_3 - l_1 - f_p) \tan \theta - d_2/2} f_p, \quad (4)$$

式中 l_2 和 l_1 分别为主、次镜遮光罩长度, f_p 是望远镜主镜焦距, d_2 为次镜内罩直径, d_3 为主镜内罩直径, d 为主镜直径, θ 为视场角, l_3 为主次镜间距, l_5 为入瞳到主镜的距离, x 为主镜边缘矢高。合理选择内遮光罩的长度能够减小中心不通光面积^[13]。该面积在小视场时几乎恒定不变。对于视

场角非常小的 EUV 望远镜,改变遮光罩长度对减小轴外渐晕没有显著效果。由已知几何尺寸关系计算取 $l_1 = 150 \text{ mm}$, $l_2 = 680 \text{ mm}$ 。遮光罩直径次镜取 40 mm,主镜取 20 mm。

4.3 软件模拟计算

为了验证上文计算得到的遮光罩几何尺寸,使用 Tracepro 软件进行了光通量的模拟计算。Tracepro 是一款 Lambda Research 公司推出的实体模型光学分析软件,可以将光线引入到模型,在光线和模型表面交汇处以个体光线遵从吸收、反射、折射、衍射和散射定律^[14]来进行光线传播的精确计算。通过计算光线在实体中沿不同路径传播的光通量变化,最终得出到达像面时的光强值。需要模拟计算的光学系统可以通过三维建模精确地在 Tracepro 中表现。图 4 是通过 AutoCAD 建立加上主、次镜遮光罩的望远镜的 3D 模型导入得到的实体图。软件材料库里面有上百种表面材料属性可选,同时支持多种自定义材料表面属性。因为没有反射镜和外壳的 BRDF 测量数据,模拟计算结果只能作为遮光罩对光强改变趋势的参考。本文选取了材料库里面 3 种材料 SACALL 106、ANOFOL 510.35 和 SACALL 130 为外壳材料,其 BRDF 值分别为 0.07、0.55 和 0.85。取主镜、次镜和主镜遮光罩内壁为关键面作为计算时的重点采样面。在设定相同计算光线数的条件下,由不同表面材料得到像面光强值,通过 PST 定义绘出如下的 PST 曲线(图 5)。

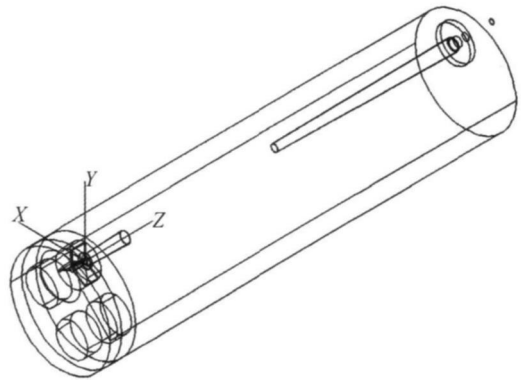


图 4 带主次镜遮光罩的望远镜 3D 模型

Fig. 4 3D model of EUV telescope with baffles

从模拟结果可以看出,主次镜遮光罩有效地降低了在 0.1 视场以外的光通量,并使原先 1 视

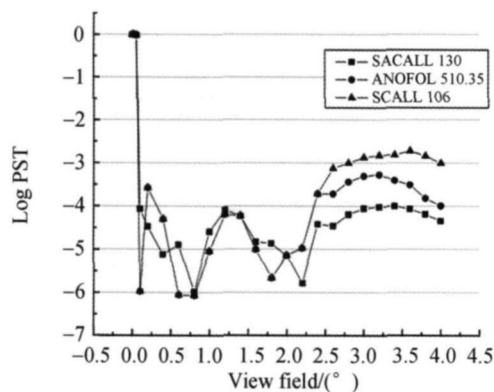


图 5 不同 BRDF 值材料下模拟的 PST 响应曲线
Fig.5 Simulated PST curves for various materials

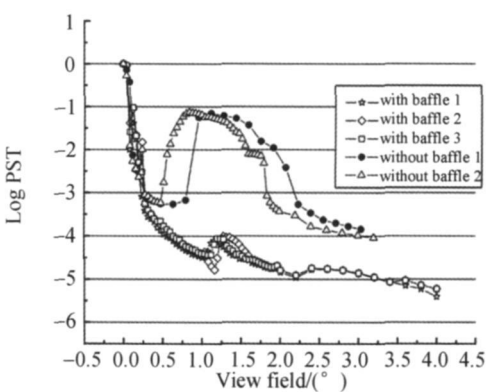


图 6 有无遮光罩时 PST 的测量结果对比
Fig.6 PST test results of EUT with and without baffles

场以后出现的杂光能量下降, 一级杂光得到了有效控制, 说明遮光罩的使用对一级杂光的抑制十分有效。

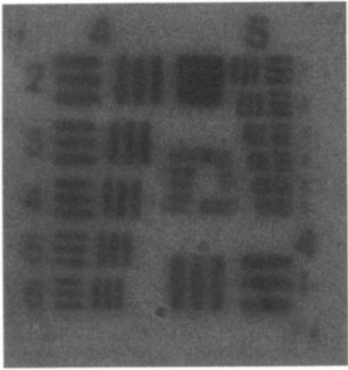
4.4 实测杂散光系数计算

本文加工了铝质材料的主、次镜遮光罩桶, 考虑到金属对光能的反射, 将罩桶外部打磨成磨砂面, 使一级杂光在罩桶外部不发生镜向反射, 避免了两次或多次反射到达像面的情况发生。将遮光罩安装在主次镜上后, 由子午方向间隔 0.04 采集一次光强, 重新绘制了其 PST 响应曲线(见图 6)。多次测量结果显示, 原先一级杂光处的光强减少了 3 个数量级, 没有视场外的光线直接到达像面。从图 6 中加有遮光罩的 PST 测量曲线看出, 其值随着视场的增大而减小。实际测量角度到 4 时, PST 已经进入到了 10^{-6} 区间。此时进入像面的光强大部分是因为经过筒壁和遮光罩壁多次反射衰减残留下来的, 消除这类杂光需考虑使用消光环和低反射率涂层。在测量过程中选取扫描角度 10, 30, 50 和 70 四个点, 探测器只有暗噪声输出, 说明这四个视场的 PST 已经等于或小于测量范围的极限 10^{-7} , 这个结果是因光源强度不够大造成的。通过数值计算可以证明这个量级的 PST 对杂光系数 V 的积分贡献几乎可以忽略, 所以, 扫描角度到 4 的测量结果已足以说明遮光罩的消光能力, 不必再考虑消光环的使用。最终测量结果表明, PST 曲线在 1 左右离轴角的突增现象得到了消除, 曲线平滑下降, 和最初结果相比较, 所有非视场离轴角度的 PST 都有所下降, 杂光得到了很好抑制。

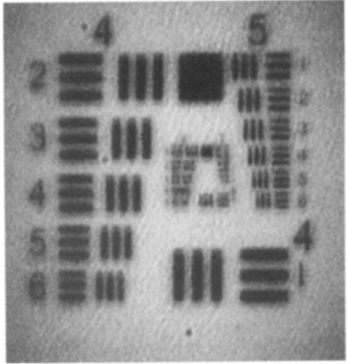
由杂光系数定义式(2), 其中积分下限 θ_0 为最大视场 0.08, 上限取实际测量值 4 和最大值 90 两种情况。鉴于实测 PST 曲线的下降趋势和 10 以上四个视场下实测 PST 等于或小于 10^{-7} 的情况, 4 以后的未知 PST 值用 10^{-6} 或 10^{-7} 来代替, 其中选取 10^{-6} 是出于对实测 4 和 10 两点表现出来的光强下降趋势应有过渡阶段的考虑。具体计算结果见表格 1, 同一行的 3 种计算结果差别不大, 所以实际 4 范围的测量能够表明遮光罩对一级杂光消除能力。

表 1 杂光系数计算			
Tab. 1 Veiling glare indexes derived from PST			
杂光系数	积分角度		
	0~ 4	4 以后 10^{-6} 代替	4 以后 10^{-7} 代替
V (无遮光罩)	0.413	0.446	0.423
V (有遮光罩)	0.013 1	0.036 5	0.013 2

没有遮光罩的望远镜杂光系数高达 0.4 以上, 说明紫外光检测时系统的传递函数受到杂光的严重影响, 会导致中高频区间分辨率严重下降, 检测时加上主、次镜遮光罩是有效的改善措施。图 7 为紫外光条件下, 存在杂光和消杂光后分别拍摄的望远镜分辨率板像。左图中杂光在像面上形成灰色的背景, 影响到分辨像的对比度。右图是加上遮光罩以后拍摄的分辨率像, 可分辨的目标从原先的 5 组 3 号靶提高到 5 组 6 号靶, 十分接近望远镜在紫外光的衍射极限(6 组 1 号靶), 且分辨率靶图像的对比度得到很大改善。接近衍射极限的紫外光成像检测结果表明望远镜的装调是满足要求的, 可以进行工作波段的成像检测。



(a)无遮光罩
(a) Without baffles



(b)有遮光罩
(b) With two baffles

图 7 紫外波段望远镜对分辨率板的成像

Fig. 7 Resolution target images of EUT received by an UV CCD

5 结 论

本文针对 EUV 太阳望远镜在地面非工作波段预先检测中出现的杂散光问题,提出了利用平面镜转动扫描的方法来实现对长焦距望远镜杂散光的测量。根据得到的 PST 曲线分析了杂散光的来源,并利用 Tracepro 设计了消一级杂散光的

遮光罩,实际测量了安装遮光罩后的消杂光效果。实验结果表明,在紫外波段分辨率成像检测时杂散光有着不可忽略的影响,遮光罩的使用可以使杂散光在 0~ 4 减小 3 个数量级,杂光系数从 41.3% 下降到 3.65%,基本不影响成像检测,可以完成紫外光下的分辨率测试,为望远镜的工作波段检测奠定了基础。

参考文献:

[1] 史光辉. 消除卡塞格林系统杂散光的措施[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(5): 10-16.
SHI G H. Methods preventing stray light emerged in cassegrain systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(5): 10-16.
[2] BERGENER DW, POMPEA S M, SHEPARD D F, *et al.*. Stray light rejection performance of SIRT F: a Comparison [J]. *SPIE*, 1984: 65-72.
[3] ROBERT P B. Current technology of stray light [C]. *SPIE*, 1986, 675: 2-12.
[4] STEPHEN M P, RICHARD N P, JEFFREY S M, *et al.*. A Stray light analysis of the apache point observatory 3. 5-Meter telescope system [J]. *SPIE*, 2003, 4842: 128-138.
[5] POMPEA M, MENTZELL J E, SIGEMEND W E. A stray light analysis of the sloan digital sky survey telescope [J]. *SPIE* 1753: 172-182.

[6] 陈波, 尼启良, 曹建林, 等. 空间软 X 射线/ 极紫外波段正入射望远镜研究[J]. 光学 精密工程, 1997, 7(5): 89-94.
CHEN B, NI Q L, CAO J H, *et al.*. Development of a space soft x-ray and EUV normal incidence telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 89-94. (in Chinese)
[7] 陈波, 尼启良, 王建林. 长春光机所软 X 射线-极紫外波段光学研究[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(12): 1862-1868.
CHEN B, NI Q L, WANG J L. Soft x-ray and extreme ultraviolet optics in CIOMP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1862-1868.
[8] STAUDER J, ZOLLINGER R. Stray light analysis of the SABER telescope [J]. *SPIE*, 1995, 2553: 264-270.
[9] 李辉, 李英才, 薛鸣球. 光学系统黑斑法杂光系数和 PST 间的联系[J]. 光子学报. 1996, 25(10): 920-923.

- LI H, LI Y C, XUE M Q. Relations between PST and Veiling Glare index of optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25(10): 920-923. (in Chinese)
- [10] 杨文志,等. 光学测量[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995:248-251.
YANG W Z. *Optical measurement* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995: 248-251.
- [11] 钟兴,贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程,2009,17(3):621-625.
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 621-625. (in Chinese)
- [12] 宋宁,韩心志,李润顺,等. 航天遥感里奇-克雷蒂安系统遮光罩的设计和分析[J]. 光学学报,2000,20(6):821-826.
SONG N, HAN X Z, LI R S, *et al.*. Design and analysis of the baffle of the Ritchey-Chretien(R-C) system used in space remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 821-826. (in Chinese)
- [13] 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.
LI T, YANG J F, RUAN P, *et al.*. Baffle design and simulation of R-C system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 332-336. (in Chinese)
- [14] Lambda Research Corporation. EQ-1 Stray Light Analysis Report[R]. No. 3: 1-16.

作者简介:



杨 林(1983-),男,重庆人,博士研究生,主要从事光学设计及系统检测的研究。E-mail: pieroyang@163.com



李 达(1985-),男,山东人,博士研究生,主要从事太阳日冕仪设计的研究。E-mail: adily1985@163.com



崔天刚(1983-),男,山东济南人,博士研究生,主要从事光学设计及非球面表面检测的研究。E-mail: foreverctg@163.com

导师简介:



陈 波(1961-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于吉林大学获得学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软X射线极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn