

镜面散射对离轴三反系统成像质量的影响

吕洋^{1,2**}, 曾雪峰^{1*}, 张峰^{1***}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对天文望远镜光学系统中镜面散射对成像质量的影响,提出了一种基于反射镜表面功率谱密度计算离轴三反成像系统像面环围能量比的方法。基于 Harvey-Shack 散射模型,提出了像面光强分布与反射镜表面功率谱密度的关系,描述了离轴三反系统中的散射在各个反射面的传播过程,并给出了像面光强分布与反射镜表面有效均方根相对于工作波长的比值的比值的关系。通过多手段测量获取 1.5 m 口径加工样件在不同空间频率频段内的表面功率谱密度,利用 k -相关模型拟合其全频段一维功率谱密度和二维功率谱密度,加工样件的面形精度有效均方根(在 $1/D$ 到 $1/\lambda$ 范围内)为 13.7 nm。对比了离轴三反系统在不同工作波长下像面环围能量比的分布,给出在我国某大型空间天文望远镜在考虑散射情况下的加工要求,镜面的有效均方根为 10.3 nm,其中低频误差均方根小于 8 nm。

关键词 表面光学; 表面散射; 离轴三反系统; 功率谱密度; 双向散射分布; 环围能量比

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092901

Effect of Surface Scattering on Imaging Performance for Off-Axis Three Mirror Optical System

Lü Yang^{1,2**}, Zeng Xuefeng^{1*}, Zhang Feng^{1***}

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences,

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aiming at the effect of surface scattering on the imaging performance for astronomical telescope optical system, we propose a method of calculating the encircled energy in image plane based on the power spectrum density (PSD) of the mirror surface. The relationship between the intensity distribution of the image surface and the power spectral density of the mirror surface is proposed based on Harvey-Shack scattering model. The propagation of the scattering in the off-axis three mirror optical system on each reflecting surface is described. The relationship between irradiance distribution and the ratio of the effective root-mean-square (RMS) to wavelength is discussed. The surface power spectral density in different spatial frequency bands of 1.5 m-diameter optical surface is obtained by different measurements, and the full-band one-dimensional and two-dimensional power spectral density are fitted by k -correlation model. It shows that the effective RMS of surface shape on the processed sample is 13.7 nm. Then the encircled energy distribution of the image plane at different wavelengths is compared. The processing requirements of a large space astronomical telescope in our country including scattering conditions are given: the effective RMS of mirror surface must be less than 10.3 nm, and the RMS of low frequency error needs to be less than 8 nm.

Key words optics at surfaces; surface scattering; off-axis three mirror optical system; power spectrum density; bidirectional scattering distribution function; encircled energy

OCIS codes 240.3695; 290.5835; 290.5838; 290.1483

收稿日期: 2018-02-11; 修回日期: 2018-03-22; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605202)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC038-02)

* E-mail: zengxf@ciomp.ac.cn; ** E-mail: lvyangoptics@foxmail.com; *** E-mail: zhangfjyz@sina.cn

1 引言

近年来,空间光学望远镜在分析太阳光谱、观测太阳系空间环境、探测星系演化以及寻找太阳系外行星等方面发挥着重要作用^[1-2]。随着对探测分辨率要求的不断提高,望远镜工作谱段不断拓宽,反射镜表面散射导致的入射能量损耗对像平面能量分布的影响更加凸显,所以研究光学表面散射现象对系统成像的影响具有重要意义。

许多研究人员对光学表面散射进行了理论研究;Stephen 于 1951 年首先提出了 Rayleigh-Rice 表面散射理论,但该理论只适用于光滑表面,并且要求光学表面粗糙度与入射光波长之比很小;1963 年,Beckmann 提出可以应用于“更为粗糙的表面”的 Beckman-Kirrhof 散射理论,但由于该理论的基础为近轴假设和小散射角度,其应用范围受到了一定限制^[3];1974 年,Harvey 基于线性系统理论提出了光滑表面散射理论;2011 年,Krywonos 等^[4]将其理论修正为更精确的 Generalized Harvey-Shack 散射理论,该理论不受散射角和表面粗糙度的限制,具有更广的应用范围。

离轴三反系统具有视场角大、对各种像差都有很好的矫正效果等特点,并且具有很大的相对孔径,同时能够有效地节省空间,是空间望远镜发展的一个新方向^[5-7]。我国正在研制的某大型天文观测系统为离轴三反系统,口径为 2 m,工作波段为 255~1700 nm,其设计指标要求两倍艾里斑范围内包围能量比大于 80%,散射对望远镜的影响不可忽略。2014 年,付怀洋等^[8]利用余弦相位调制光栅分析方法定性说明了镜面粗糙度均方根(RMS)对能量集中度的影响,给出了分辨率误差与主镜表面粗糙度之间的关系。光学元件的低频误差主要产生低阶像差,这会对像面上艾里斑的弥散产生贡献;中频段误差产生小角度散射,影响艾里斑的对比度;高频误差产生大角度散射,影响艾里斑亮度。在反射系统中,低阶像差主要为光学设计残差,其均方根小于 $\lambda/50$ (λ 为波长),此时低阶误差对艾里斑弥散的影响远小于散射部分^[8],所以本文主要考虑散射对艾里斑分布的影响。通过推导适用于离轴三反系统的散射理论公式获得高斯像面上的光强分布,进而获得像面上包围能量比等影响光学成像质量的参数,研究了反射镜表面功率谱密度(PSD)对成像质量的影响。通过计算不同波长的入射光在高斯像面上的光强分布,研究了离轴三反系统在不同工作波长下高

斯像面上的包围能量比等参数,给出了本研究的天文望远镜系统的光学表面功率谱密度对成像质量影响的仿真结果,为研究离轴三反系统的散射问题提供了一种新方法。

2 反射镜散射模型

对于空间天文高分辨率光学系统来说,镜面上的散射使像面产生的弥散斑加大,系统的光通量降低,造成系统的包围能量比降低,对比度降低,这是影响成像质量的重要因素。从单个反射镜上的散射现象出发,将散射传递函数应用到多个反射镜系统中。对于单个粗糙光学表面,其散射传递函数为^[9]

$$H(\hat{x}, \hat{y}) = \exp \left\{ - (4\pi\sigma_{\text{eff}}/\lambda)^2 \left[1 - \frac{f_{\text{ACV}}(\hat{x}, \hat{y})}{\sigma_{\text{eff}}^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: λ 为入射到系统的光波长; $\hat{x} = x/\lambda$; $\hat{y} = y/\lambda$; $f_{\text{ACV}}(\hat{x}, \hat{y})$ 为光学表面自相关函数,表面自相关函数可以由表面功率谱密度的傅里叶变换获得,即

$$f_{\text{ACV}}(\hat{x}, \hat{y}) = \iint f_{\text{PSD}}(f_x, f_y) \exp \cdot [i(f_x \hat{x} + f_y \hat{y})] df_x df_y, \quad (2)$$

其中, f_x 和 f_y 分别为 x 方向和 y 方向的空间频率; σ_{eff} 为光学表面有效均方根,是描述反射镜表面粗糙程度的重要参数,其表达式为^[10]

$$\sigma_{\text{eff}} = \left[2\pi \int_{1/D}^{1/\lambda} f_{\text{PSD}}(f) df \right]^{1/2}, \quad (3)$$

其中, D 为反射镜口径, $f_{\text{PSD}}(f)$ 为光学表面功率谱密度。积分下限为反射镜口径的倒数 $1/D$,积分上限为工作波长的倒数 $1/\lambda$ 。理论研究表明,空间频率大于 $1/\lambda$ 的部分将会产生倏逝波,它对散射光辐射功率没有贡献^[11]。(3)式表明,获得反射镜表面全频段功率谱密度后,通过积分就可以得到光学表面有效均方根,从而可以获得描述工作波段内对光学表面散射产生影响的参数。

若要描述光学表面散射的空间分布,就需要建立具体的模型来反映反射镜表面在空间各个方向上的光强分布,Nicodemus^[12]提出了双向反射分布函数(BRDF),即反射(散射)的光辐射率与入射方向上的辐射照度的比值。Harvey 等^[9]提出的光学表面双向散射分布函数(BSDF)可以同时描述透镜散射与反射镜散射的空间分布,BSDF 可以表示为^[13]:

$$f_{\text{BSDF}} = Q\mathcal{F}[H(\hat{x}, \hat{y})], \quad (4)$$

式中: \mathcal{F} 为傅里叶变换的符号; Q 为偏振反射因子;

$H(\hat{x}, \hat{y})$ 为表面传递函数, 由于表面传递函数满足平移不变性^[14], 即对于不同的入射角, 其散射光相对于反射角的分布只和散射角与入射角的夹角有关, 与入射角的大小无关, 并且对于大 F 数系统, 入射角相对于镜面的变化很小, 对表面散射传递函数的影响可以忽略不计。将(1)式和(2)式代入(4)式得到 BSDF 与表面全频段功率谱密度的关系为

$$f_{\text{BSDF}} = Q \exp[-(4\pi\sigma_{\text{eff}}/\lambda)^2] \cdot \mathcal{F}\{\exp\{(4\pi/\lambda)^2 \mathcal{F}[f_{\text{PSD}}(f_x, f_y)]\}\} \quad (5)$$

值得指出的是, 对于离轴光学系统, 离轴量会改变入射光相对于镜面的入射角, 使得光线不能正入射到反射镜表面。根据 Harvey-Shack 散射理论, 不同的离轴量带来的差异体现在散射强度的绝对大小不

同, 而归一化散射强度分布曲线不受离轴量的影响。

3 镜面散射对离轴三反系统的影响

基于反射镜散射模型, 首先从理论上分析了镜面散射对离轴三反系统的影响, 然后基于实际工程样件的表面实测参数对离轴三反系统散射的影响进行了计算, 最后通过仿真分析本研究光学系统的围能量比设计指标对光学元件制造质量的要求。

3.1 散射对离轴三反系统影响的理论分析

离轴三反系统的光路结构如图 1 所示, 图中的 M_P 、 M_S 、 M_T 分别表示主镜、次镜、三镜, 主要研究散射对光学系统的影响, 仅考虑理想的光学系统, 暂不考虑系统设计残差对像面光强分布的影响。

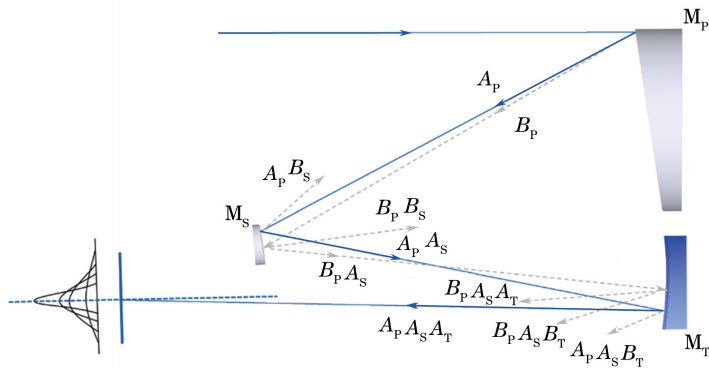


图 1 离轴三反系统示意图

Fig. 1 Illustration of off-axis three-mirror system

光学散射传递函数可以改写成

$$H(\hat{x}, \hat{y}) = A + BG(\hat{x}, \hat{y}), \quad (6)$$

式中:

$$A = \exp[-(4\pi\sigma_{\text{eff}}/\lambda)^2], \quad (7)$$

$$B = 1 - \exp[-(4\pi\sigma_{\text{eff}}/\lambda)^2], \quad (8)$$

$$G(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{\exp[(4\pi)^2 f_{\text{ACV}}(\hat{x}, \hat{y})/\sigma_{\text{eff}}^2] - 1}{\exp(4\pi\sigma_{\text{eff}}/\lambda)^2 - 1}, \quad (9)$$

式中: A 为镜面反射系数; B 为镜面散射系数, 是描述光学表面散射的一个重要参数。单个反射镜面对入射光的反射可以划分为镜向反射和散射两部分, 如图 1 所示。而镜向反射光强和散射光光强比例分别满足(7)式和(8)式, 像面上的光强分布可以由单个镜面上的镜向反射或散射光强逐次叠加而成。对于图 1 中的主镜, 入射光经过主镜变为镜向反射光以及散射光, 其中镜向反射部分定义为 A_P , 散射部分定义为 B_P ; 对于次镜, 主镜反射的光 A_P 再经过次镜反射后定义为 $A_P A_S$, 而经过次镜散射后定义为 $A_P B_S$, 由主镜散射的光 B_P 经次镜镜向反射后定义为 $B_P A_S$, 而经次镜散射后定义为 $B_P B_S$;

对于第三镜, 由主镜的反射光和次镜的反射光经过第三镜镜向反射的部分定义为 $A_P A_S A_T$, 其对像面光强分布的贡献记为 P_{ddd} , 经过第三镜散射的部分定义为 $A_P A_S B_T$, 其对像面光强分布的贡献记为 P_{dds} , 角标 d 代表镜向反射, s 代表散射。同理, 入射光在各个镜面上的镜像反射和散射成分见表 1。

对于离轴三反系统, 像面上的总光强分布可以表 1 各个镜面上反射和散射以及像面光强分布的符号表示

Table 1 Expression for reflection and scattering on each mirror and power spectral density of the mirror surface

M_P - M_S - M_T	Component	Radiant power distribution
Direct-direct-direct	$A_P A_S A_T$	P_{ddd}
Direct-direct-scattered	$A_P A_S B_T$	P_{dds}
Direct-scattered-direct	$A_P B_S A_T$	P_{dsd}
Direct-scattered-scattered	$A_P B_S B_T$	P_{dss}
Scattered-direct-direct	$B_P A_S A_T$	P_{sdd}
Scattered-direct-scattered	$B_P A_S B_T$	P_{sds}
Scattered-scattered-direct	$B_P B_S A_T$	P_{ssd}
Scattered-scattered-scattered	$B_P B_S B_T$	P_{sss}

表示为

$$P_t = P_{\text{ddd}} + P_{\text{dds}} + P_{\text{dsd}} + P_{\text{dss}} + P_{\text{sdd}} + P_{\text{sds}} + P_{\text{ssd}} + P_{\text{sss}} \quad (10)$$

由(10)式可知,通过(7)式和(8)式计算出表1中8个点扩展函数的系数就可以求得各个部分的光强在像面上的比例,并且离轴三反系统的总散射光强为 $V_{\text{TIS}} = 1 - A_p A_s A_T$,由(8)式可以发现,系统中的散射强度和有效均方根与工作波长的比值有直接关系。离轴三反系统像面光强关于反射镜表面的有效均方根和入射波长比值的曲线如图2所示,它描述了光学表面散射各个成分对像面光强分布的贡献。假设主镜、次镜、三镜的均方根相同,可以看到,随着 $\sigma_{\text{eff}}/\lambda$ 增大,镜向反射光所占比例逐渐减小,散射光所占比例不断增大,能量逐渐由镜向反射光转移到散射光。可以看出:当 $\sigma_{\text{eff}}/\lambda < 0.02$ 时,散射成分的影响较小;当 $\sigma_{\text{eff}}/\lambda = 0.038$ 时,镜向反射光强占总光强的一半;当 $\sigma_{\text{eff}}/\lambda > 0.18$ 时,像面上的光斑几乎全由散射光线组成,没有镜向反射,此时望远镜像面上几乎都是散射光强,无法成像。所以,光学系统的波长越短,其反射镜需要加工的精度就越高,尤其是在紫外波段,散射对于像面光强分布的影响不可忽略。

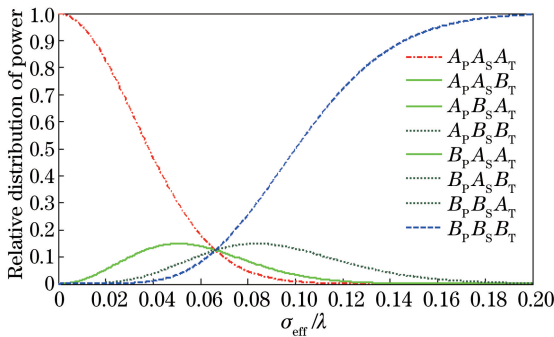


图2 光学表面散射各个成分对像面光强分布的贡献

Fig. 2 Contribution of each component of optical surface scattering on intensity of image plane

反射镜有效均方根以及总积分散射参数可以评价光学系统镜面散射的影响,但是无法表征散射光强的空间分布。为了描述反射镜粗糙度对成像质量的影响,对于由多个反射镜组成的光学系统来说,各个反射镜表面都会对入射光产生散射效应,每个表面上的散射光对像面上的贡献可由 Peterson 方程表示^[15]:

$$E_{\text{Sj}}(r) = \pi (NA)^2 T \frac{a_{\text{ent}}^2}{a_j^2} f_{\text{BPDF}} \left(NA \frac{r}{a_j} \right) E_{\text{ent}}, \quad (11)$$

式中: f_{BPDF} 为双向散射分布函数,可以由(5)式给出; NA 为整个光学系统的数值孔径, $NA = 1/(2F^{\#})$, $F^{\#}$ 为光学系统的 F 数; E_{ent} 为入射光强度; r 为像面上到点扩展函数中心的距离; T 为镜面反射率; a_{ent} 为入瞳半径; a_j 为第 j 个镜面的有效口径。对于整个光学系统来说,每个反射镜上的散射在像面上的光强贡献可以分别由上式获得。

Peterson 方程给出了光学系统视场角内任意镜面单独散射对像面光强分布的影响,但视场外散射光对像面的影响没有考虑。通过 3.3 节的计算结果可知,视场外散射光对像面光强分布的影响很小,几乎不影响像面光强分布。给出光学系统参数并获得反射镜表面的全频段功率谱密度后,结合(5)式和(11)式就可以给出光学系统中单个反射镜散射在像面的空间分布。(10)式中的 P_{ddd} 项可以认为是入射光在像面上的理想的点扩展函数分布,可以由光瞳函数的傅里叶变换获得,只有一次散射的 P_{dds} 、 P_{dsd} 、 P_{sdd} 项可由(11)式计算得到,其他项在像面的光强分布可以由中间项之间通过卷积计算获得,最终可获得像面总的光强分布。

3.2 实际表面功率谱密度对离轴三反系统散射的影响

光学表面功率谱密度表征了一定空间频率尺度范围内的光学表面质量,Church 等^[14]提出了光学表面功率谱密度的计算方法,表达式为

$$P_{1D} = \frac{1}{2l} \left| \int_{-l}^l h(x) \exp(-i2\pi fx) dx \right|^2, \quad (12)$$

式中: l 为采样长度; $h(x)$ 为光学表面轮廓矢高; f 为二维功率谱密度。

在研究表面散射问题时,一般使用 k -相关模型来表征实际的一维功率谱密度,获得其 ABC 方程的参数后,就可以外推至全频段范围的二维功率谱密度^[16],从而计算有效均方根。拟合方程为

$$P(f_x)_{1-D} = \frac{A'}{[1 + (B'f_x)^2]^{C'/2}}, \quad (13)$$

$$P(f)_{2-D} = K \frac{A'B'}{[1 + (Bf)^2]^{(C+1)/2}}, \quad (14)$$

$$K = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma[(C'+1)/2]}{\Gamma(C'/2)}, \quad (15)$$

式中: A' 、 B' 、 C' 是拟合得到的系数,参数 A' 影响功率谱密度曲线最大值的大小,参数 B' 影响曲线拐点的位置,参数 C' 影响曲线下降段的斜率;通过(14)式可以获得其二维功率谱密度 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ 。

由于不同测量方法的频段覆盖宽度有限,不能

通过一种仪器获得全频段的功率谱密度,杨相会等^[17]利用不同干涉仪检测光学表面功率谱密度,研究表明不同干涉仪测得的功率谱密度曲线随空间频率增加的变化相差较大,所以需要采用组合检测方法获取光学元件全频段功率谱密度。通过干涉检测获得了 1.5 m 口径实际加工样件(如图 3 所示)的表面低频误差,通过 Wyko 轮廓仪、原子力显微镜仪获得工艺实验片的中、高频误差,计算获取的一维功率谱密度如图 4 所示。Zygo 干涉仪获得了光学表面的全口径面形分布,其空间频率范围为 $0.66 \times 10^{-3} \sim 0.683 \text{ mm}^{-1}$; Wyko 轮廓仪测量面积为 $603 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$,其空间频率范围为 $1.65 \sim 304.8 \text{ mm}^{-1}$; 原子力显微镜能够测量的面积为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,其空间频率范围为 $50 \sim 1.28 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}$ 。利用 k -相关模型(ABC 方程)拟合得到工艺实验片的功率谱密度曲线如图 4 所示,其中 $A' = 7.01 \times 10^8$, $B' = 74.51$, $C' = 1.713$ 。值得注意的是,采用 Wyko 轮廓仪和原子力显微镜采样区域的大小有限,测得的是特定区域镜面的中、高频误差。对于高精度抛光反射镜来说,目前的加工工艺十分稳定,整个面形的中、高频误差分布均匀,且满足高斯分布,选取合适区域的镜面进行测量即可。其中,高频误差的结果可以代表整个反射镜,即局部采样数据与镜面中、高频误差具有一致性,局部采样数据可以表示整个反射镜中、高频误差的特征。

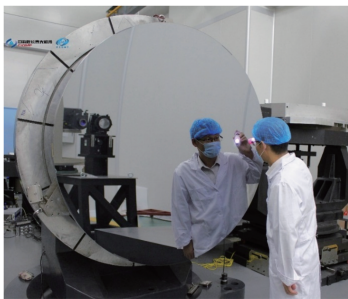


图 3 1.5 m 口径 SiC 反射镜

Fig. 3 SiC mirror with 1.5 m diameter

利用(14)式可以获得工艺实验片的二维功率谱密度,如图 5 所示。

对 $1/D$ 到 $1/\lambda$ 范围内的二维功率谱密度进行积分便可得到有效均方根 $\sigma_{\text{eff}} = 13.7 \text{ nm}$, σ_{eff} 是全频段误差的综合指标,表征了全空间频率范围内反射镜的面形误差,也是计算表面 BSDF 的重要参数。

基于上述计算,假设此离轴三反系统中次镜、三镜的有效均方根与实际加工样件及工艺实验片相同,根据(8)式就可以获得主镜、次镜、三镜的反射系

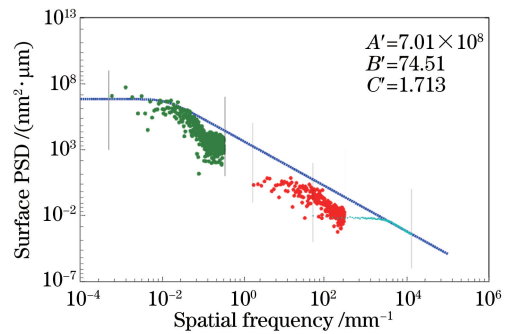


图 4 工艺实验片功率谱密度及其 k -相关模型拟合结果

Fig. 4 Measured PSDs at different frequency ranges and fitted PSD curves by k -correlation mode

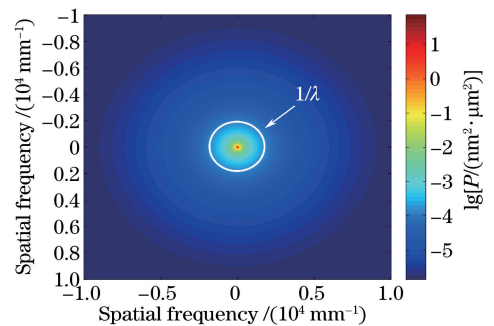


图 5 工艺实验片的二维功率谱密度

Fig. 5 Two-dimensional PSD of the processed sample

数 A_P 、 A_S 、 A_T , 于是通过公式 $V_{\text{TIS}} = 1 - A_P A_S A_T$ 就可以计算出由反射镜表面全频段误差引起的像面总散射光强。

在 255 nm 波长下工作时,总积分散射 $V_{\text{TIS}_{255}} = 0.745$; 在 632.8 nm 波长下工作时, $V_{\text{TIS}_{632.8}} = 0.199$; 在 1500 nm 波长下工作时, $V_{\text{TIS}_{1500}} = 0.039$ 。可见: 在观测紫外目标时,望远镜入射光强的总损失量为 74.5%; 在观测红外目标时,望远镜入射光强的总损失量仅为 3.9%。光强损失仅表征了像面总光通量的减少,要描述反射镜散射对成像质量的影响,还要计算像面归一化光强分布、环围能量比等参数。

针对给出的光学系统,像面上的光强分布是由各个分立的光强成分在像面上叠加而成的,系统焦距为 28 m,通光口径为 2 m,取工作波长为 632.8 nm,首先基于(5)式计算 f_{BSDF} ,然后将 f_{BSDF} 代入(11)式可以获得工艺实验片表面散射在像面上的光强分布,然后分别计算各个反射、散射成分在像面上的光强分布,最终获得像面上的总光强分布,如图 6 所示。像面上的大部分能量集中在焦点附近,散射光相当于将理想的点扩展函数进行平滑,将光强分散在艾里斑周围和背景中,降低了成像对比度和分辨率。

在 632.8 nm 波长工作的离轴三反系统像面上

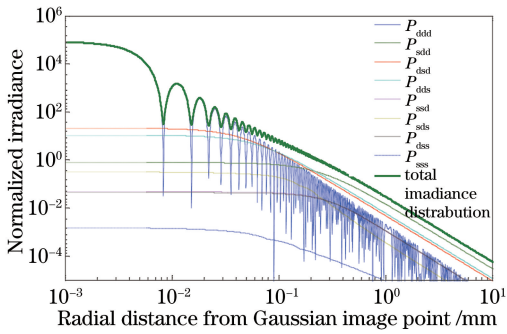


图6 光学表面散射各个成分对像面光强分布的贡献

Fig. 6 Contribution of each component of optical surface scattering to intensity distribution of image plane

的环围能量比如图7所示,其中 $\lambda/60$ (10.5 nm)代表工艺实验片使用 Zygo 干涉仪获得的均方根值,其一倍艾里斑半径内环围能量比为 67.19%,与衍射极限环围能量比 83.77%相比下降了 16.58%,其两倍艾里斑半径内环围能量比为 73.46%,与衍射极限环围能量比 91.21%相比下降了 17.55%。根据 k -相关模型(ABC 方程)各个参数的意义可知,对于一定的加工工艺,可以假设在参数 B' 和 C' 基本不变的情况下缩放 A' ,从而使得表面功率谱密度等比例下降,即面形均方根按照一定的比例减小,以模拟光学元件加工质量的提升。分别计算低频段面形均方根在 $\lambda/80$ (7.9 nm) 和 $\lambda/100$ (6.3 nm) 时的环围能量比,其中 $\lambda/80$ (7.9 nm) 下两倍艾里斑半径内的环围能量比为 80.7%, $\lambda/100$ (6.3 nm) 下两倍艾里斑半径内的环围能量比为 84.4%,所以低频误差均方根加工到 $\lambda/80$ (7.9 nm) 即可满足两倍艾里斑半径内环围能量比大于 80% 的系统设计要求。

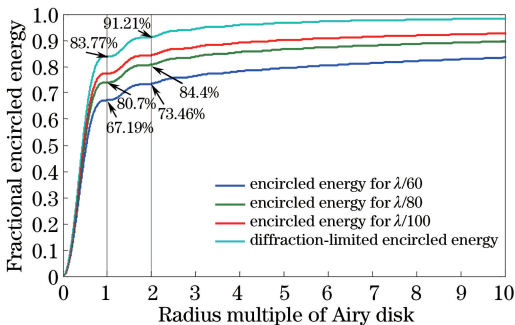


图7 不同加工精度下环围能量比与艾里斑半径倍数的关系曲线

Fig. 7 Relation curves of encircled energy and radius multiple of Airy disk at different processing precisions

3.3 工作波长对离轴三反系统中散射的影响

由第 3.1 节分析可知,对于不同的入射波长,其总积分散射强度不同,有效均方根与工作波长之比

越大,散射对成像质量的影响越强烈。将表面自相关分布函数代入(5)式并取工作波段内的特定波长可以得到加工样件的 BSDF,如图 8 所示。BSDF 表征反射表面对于入射到表面的光强的散射,对于散射传递函数来说,散射强度随指数下降,在所研究的望远镜的视场角内,对散射传递函数积分可知散射强度占比为 99.99%,即散射到望远镜镜面之外的光强小于 0.01%。由此可见,散射到望远镜外的光强对计算结果的影响可以忽略。根据 Harvey-Shack 散射理论,由于 BSDF 满足平移不变性,即对于不同的入射角,归一化散射光强相对于反射角的分布只与其与反射角的夹角有关,与入射角无关,即入射角变化时,对反射光强分布来说相当于平移,其中心仍然为反射角方向。根据实验片的均方根误差(有效误差均方根误差)绘制工作波长下像面光强的环围能量比与距像面中心之间的关系,如图 9 所示。不同波长像面中心亮斑的弥散程度不同,两倍艾里斑半径(632.8 nm 工作波长)位置如图中虚线所示,由于天文观测望远镜对系统成像质量的要求(两倍艾里斑半径位置的环围能量比要大于 80%)是由 632.8 nm 的工作波长确定的,所以越靠近紫外波段,被散射到背景中的光强就越大,从而造成环围能量比下降,成像质量相对变差。

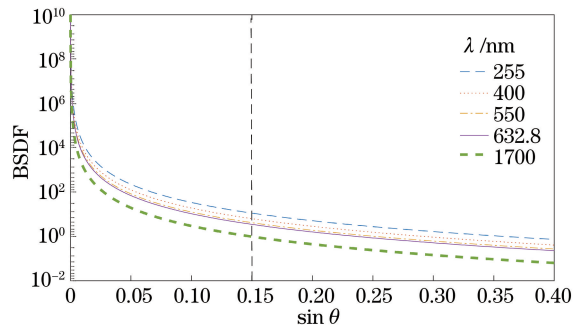


图8 实验片双向散射分布函数

Fig. 8 BSDF of processed sample

给出的散射系数相对于实际系统要更加严格,即散射系数相对要大一些,因为在实际的系统中,一些散射光不能满足(6)式,散射到反射镜以外的位置,无法到达像面。对于所用离轴三反系统,镜面上的散射光能够进入像面的最大散射角约为 0.15° ,即 BSDF 中大于 0.15° 的部分不会进入最终的像平面,通过对 BSDF(632.8 nm) 积分可以获得最终落到像平面外面的散射光强约为 0.01%,所以计算出的散射光强分布比实际散射光强大 0.01%,从而使得两倍艾里斑直径内的环围能量比比实际值小一些。实

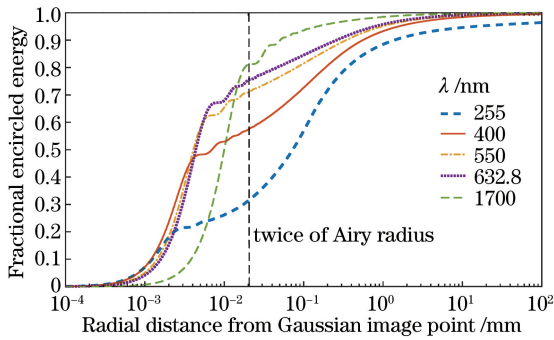


图9 离轴三反系统工作波段内的环围能量比

Fig. 9 Encircled energy of off-axis three-mirror system at working wavelengths

实际上,散射光的传递过程十分复杂,具体的数值无法通过该方法准确计算获得。尽管如此,所提出的计算方法仍然可以作为严格要求光学加工参数的一种手段。

4 结 论

针对光学反射镜表面散射对离轴三反系统的影响,提出了一种基于反射镜表面功率谱密度快速计算离轴三反望远镜在其工作波段内环围能量比的方法。主要分析了离轴三反系统的光强在3个反射镜之间的传播方式,推导出了望远镜的总体散射系数。根据实际测量的镜面全频段误差计算了其二维功率谱密度,结合 k -相关模型拟合出光学表面二维功率谱密度,并以此为基础建立了适合离轴三反望远镜系统的散射计算模型。该模型为计算散射对离轴三反望远镜的影响提供了一种简单有效的计算方法,可以定量描述散射对该望远镜的影响。通过模型计算了离轴三反空间望远镜像面的环围能量比,结果表明:反射镜表面均方根误差越小,其两倍艾里斑半径内的环围能量比就越高;当反射镜工艺样件表面在低频段的加工精度面形均方根达到8 nm水平时,有效均方根为10.3 nm,像面环围能量比在两倍艾里斑半径内才能达到80.7%,即可以满足某大型空间天文望远镜系统的设计要求。

参 考 文 献

[1] Zhang X J, Fan Y C, Bao H, *et al.* Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (11): 2613-2626.
张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2613-2626.

[2] Li X P, Shi J F, Wang W, *et al.* Review on the splicing, structure technology of large space primary mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030002.
李旭鹏, 石进峰, 王伟, 等. 空间大口径主反射镜拼接化结构技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030002.

[3] Stover J C. *Optical scattering: measurement and analysis* [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

[4] Krywonos A, Harvey J E, Choi N. Linear systems formulation of scattering theory for rough surfaces with arbitrary incident and scattering angles [J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2011, 28(6): 1121-1138.

[5] Zeng X F, Yan F, Zhang X J. Effects of structured surface errors on MTF of off-axis TMA system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8416: 84161B.

[6] Wang X K. Optical design of a high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (1): 0122001.
王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0122001.

[7] Wang Y Q, Liu W Q, Fu H Y, *et al.* Optical design of space detailed survey camera in the middle or high orbit [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0116001.
王蕴琦, 刘伟奇, 付瀚毅, 等. 中高轨道空间详查相机光学设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0116001.

[8] Fu H Y, Zhou S Z, Jiang K, *et al.* Effects of mirror surface roughness on encircled energy for far ultraviolet telescopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2562-2567.
付怀洋, 周泗忠, 姜凯, 等. 镜面粗糙度对远紫外望远镜能量集中度的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2562-2567.

[9] Harvey J E, Krywonos A. Systems engineering analysis of image quality [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4093: 379-389.

[10] Church E L. Fractal surface finish [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(8): 1518-26.

[11] Harvey J E. Integrating optical fabrication and metrology into the optical design process [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2224-2233.

[12] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474-1475.

[13] Harvey J E, Choi N, Krywonos A, *et al.*

- Calculating BRDFs from surface PSDs for moderately rough optical surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7426: 74260I.
- [14] Church E L, Takacs P Z. Light scattering from non-Gaussian surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2541: 91-108.
- [15] Peterson G L. Analytic expression for in-field scattered light distribution [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5178: 184-194.
- [16] Harvey J E, Pfisterer R N. Evolution of the transfer function characterization of surface scatter phenomena [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9961: 99610E.
- [17] Yang X H, Shen W X, Zhang X J, *et al.* Comparison among different interferometers for measuring power spectral density of optical elements [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (9): 0904002.
- 杨相会, 沈卫星, 张雪洁, 等. 不同干涉仪检测光学元件功率谱密度的比较 [J]. 中国激光, 2016, 43 (9): 0904002.