

文章编号 1004-924X(2011)02-0493-07

# 强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布

孙 可, 江厚满, 程湘爱

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**在强光辐照情况下,主镜表面粗糙度产生的散射是引起反射系统视场内杂散光的主要因素之一。本文针对主镜的散射,提出了一种简单的处理方法。采用双向散射分布函数(BSDF)描述散射的角分布特性,推导了平行光平行于光轴入射时主镜焦平面上的散射光强分布表达式,并将其与衍射光强分布表达式联立,得到了焦平面上以几何像点为中心,散射与衍射强度相等时的特征半径。该特征半径将焦平面上的光强分布分为两个区域,在强光辐照下这两个区域的饱和效应机理不同:特征半径以内,衍射强度大于散射强度,饱和效应主要由衍射贡献;特征半径以外,散射强度大于衍射强度,散射是该区域饱和的主要因素。仿真实验表明,对于半径为 115 mm,焦距为 -757 mm,入射波长为 550 nm 时表面粗糙度为 10 nm 的主镜,其特征半径约为 0.843 mm,该结果与表达式计算结果相符,说明了计算表达式的正确性。

**关键词:**辐照效应;反射系统;表面散射;视场内杂散光;衍射;双向散射分布函数

**中图分类号:**TH703;O436.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111902.0493

## Distribution of in-field stray light due to surface scattering from primary mirror illuminated by intense light

SUN Ke, JIANG Hou-man, CHENG Xiang-ai

(College of Opto-electronics Science and Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Light scattered from the imperfect surface of a primary mirror in a reflective optical system will result in the in-field stray light and reduce the image contrast. This paper presents a simple method to process the scattering of the primary mirror. A Harvey Bidirectional Scatter Distribution Function(BSDF) model is used to characterize the angular distribution of scattered light from the mirror, and the scattering distribution at the focal plane of the primary mirror is derived. The characteristic radius centered by the image point can be achieved when the intensity of scattering equals that of diffraction. It is found that for the given optical system, the characteristic radius only depends on the scattering characteristic of the primary mirror. The intensity distribution at the focal plane is divided into two regions by the characteristic radius. The intensity of diffraction is larger than that of scattering intensity, which makes the dominant contribution to the saturation effect when the distance from the image point is less than the characteristic radius, conversely, the scattering is the main factor to the saturation effect when the distance from the image point is larger than the characteristic radius.

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 1030110)

For a primary mirror with a focal length of  $-757$  mm, an radius of  $115$  mm and the rms roughness of  $10$  nm at the wavelength of  $550$  nm, the characteristic radius is  $0.843$  mm approximately. These conclusions are conducive to the analyzing and explaining of the saturation effects in an optical system irradiated by a intense light.

**Key words:** irradiance effect; reflective optical system; surface scattering; in-field stray light; Bidirectional Scatter Distribution Function(BSDF)

## 1 引言

视场内杂散光是指光学系统视场角内的杂散光源产生的杂散光,经光学元件的散射、残余反射或衍射后被探测器接收<sup>[1]</sup>。杂散光会在被观测物的像的周围形成光晕,增大图像的背景噪声,降低图像的对比度,直接影响着高性能空间光学系统及地基观测系统的成像质量。自 20 世纪六七十年代以来,各国投入了大量的人力物力研究光学系统的杂散光问题<sup>[2]</sup>。中科院长春光学精密机械与物理研究所<sup>[3-7]</sup>、中科院西安光学精密机械研究所<sup>[8-10]</sup>等多家单位在系统杂光测试、光学系统杂散光抑制设计以及材料的散射特性测量等领域开展了卓有成效的工作。

然而,通常的杂光抑制措施对强光辐照时产生的杂光的抑制效果并不理想。因为在强光的辐照下,机械结构和光学器件表面的粗糙度、灰尘散射等因素会产生很强的散射光。由于这些散射光源位于视场内,无法通过遮挡或吸收等办法加以抑制,如果被探测器接收,将有可能使探测器饱和,干扰系统的正常工作。Ric Schleijsen 等人研究了不同的中红外激光与不同面阵探测器组合下的激光致眩效应(Laser Dazzling Effect)<sup>[11-13]</sup>。Anne Durecu 等人利用模式识别算法评估激光辐照电视摄像头的干扰效应<sup>[14]</sup>。国内中科院长春光学精密机械与物理研究所等多家单位针对激光对 CCD 相机系统的各种干扰效应进行了实验研究<sup>[15-19]</sup>。上述的工作多是从实验方面开展的,本文主要尝试建立一种可以像计算衍射场分布一样来计算或者估计视场内杂散光在探测器表面分布的方法。

反射系统中主镜表面因灰尘和表面粗糙度引起的散射是系统视场内杂散光的主要来源。本文

针对主镜的散射,提出了一种简单直观的处理方法,计算了平行光入射时,在给定表面双向散射分布函数(Bidirectional Scatter Distribution Function, BSDF)条件下,主镜的焦平面上的散射分布,与衍射分布相比较,给出了用于衡量焦平面上散射和衍射强度大小的特征半径。借助于特征半径,可以分析衍射和散射对系统饱和效应的贡献。

## 2 双向散射分布函数 BSDF

一般的,人们用双向散射分布函数 BSDF 来描述物体表面的散射,其定义为<sup>[20]</sup>

$$BSDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) \approx \frac{dP_s/d\Omega_s}{P_i \cos \theta_s} = \frac{L_s}{E_i}, \quad (1)$$

其中  $\theta, \varphi$  分别代表光线的天顶角和方向角;角标  $i, s$  分别表示入射物理量和散射物理量; $P$  为光功率; $\Omega_s$  表示探测系统对散射中心所张的立体角,  $L_s, E_i$  分别表示样品表面的散射光亮度 and 入射到样品表面的入射光强,如图 1 所示。

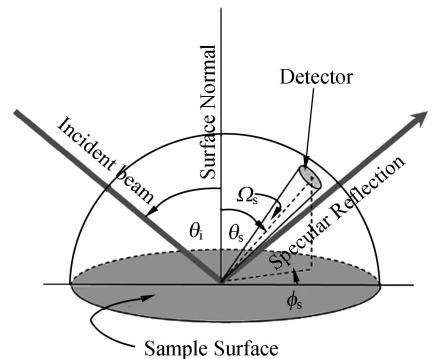


图 1 BSDF 定义的几何示意图

Fig. 1 Geometrical scheme of BSDF definition

式(1)是 BSDF 的微分定义式,描述的是平面的局部散射特性,是关于入射角和散射角的函数。而主镜的反射表面是曲面,不同位置的法线方向不同,相应的入射角也各不相同。因此,严格地说不能用统一的 BSDF 来描述整个主镜的散射特

性。如果要运用 BSDF 概念分析主镜的散射,需要建立简化的散射模型。

### 3 主镜的散射模型及其与衍射的比较

#### 3.1 主镜的散射模型

为了应用 BSDF 分析主镜的散射,需要建立主镜的散射模型。对于同轴的反射系统,主镜的中心通常有通光孔,并且主镜前有次镜及其支架,造成遮挡。为了便于分析,本文在假设主镜前没有遮挡,中心也没有通光孔的条件下,考察了平行光沿光轴入射时,因主镜表面粗糙度引起的散射在主镜焦平面上的分布。

如图 2 所示,散射模型需要将主镜分割成许多小面元,每个面元由散射微元和理想平面镜微元组成。平行于光轴的入射光入射到任意面元  $dA_i$  时,首先经过散射微元,一部分光未被散射,传播方向不变,这部分光称为镜向光。一部分光被散射而偏离传播方向,形成散射光,两者夹角为  $\theta_{si}$ ,如图 2 中虚直线所示。然后这两部分光再经过理想平面镜微元的镜面反射,镜向光入射到主镜的焦点  $F$ ,散射光线入射到与焦点  $F$  距离为  $r$  的  $P$  点。需要指出的是,理想平面镜微元不改变两者的夹角,只改变两部分光线的传播方向,使之入射到主镜焦平面上,以此近似主镜的聚焦作用。不难理解,经过上述假设,可以对每个面元定义 BSDF,计算每个面元在  $P$  点的散射,这样整个主镜在  $P$  点的散射就是主镜上每个面元在  $P$  点的散射贡献之和。

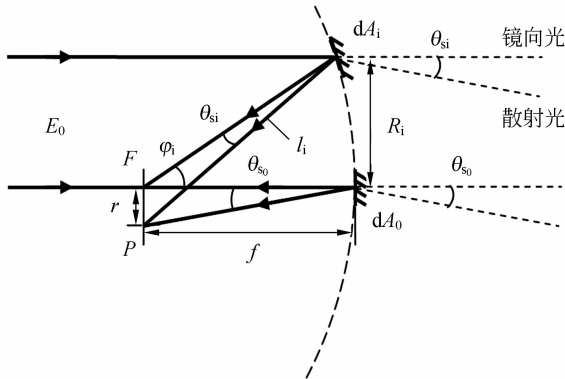


图 2 主镜散射模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of scattering model of primary mirror

BSDF 与面元的散射光和镜反射光之间的夹角  $\theta_{si}$  有关,定义这个角为面元的相对散射角,即散射光传播方向相对镜向光传播方向的夹角。在应用 BSDF 计算散射分布时,首先应该确定面元的相对散射角。

对于面元  $dA_i$ ,当  $r \ll f$  时,相对散射角近似为

$$\theta_{si} \approx \frac{r}{l_i}, \quad (2)$$

其中  $l_i \approx \sqrt{R_i^2 + f^2}$ ,是面元  $dA_i$  中心到  $P$  点的距离。当  $R_i = 0$  时, $l_i = f$ ,则中心面元  $dA_0$  的相对散射角为  $\theta_{s_0} \approx \frac{r}{f}$ 。

如果入射到面元  $dA_i$  的光强为  $E_i$ ,则根据 BSDF 的定义,被面元  $dA_i$  散射的光的亮度为

$$L_i = \text{BSDF}(\theta_{si}) \cdot E_i = \text{BSDF}\left(\frac{r}{l_i}\right) \cdot E_i, \quad (3)$$

故面元  $dA_i$  在  $P$  点的散射功率为

$$\begin{aligned} d\Phi_{si}(r) &= L_i dA_i \cos \varphi_i d\Omega_i = \\ &= E_i \cdot \text{BSDF}\left(\frac{r}{l_i}\right) \cdot dA_i \cdot \cos \varphi_i \cdot \frac{ds \cos \varphi_i}{l_i^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $ds$  为  $P$  点处的观察面元的面积,  $d\Omega_i$  为  $ds$  对  $dA_i$  中心所张的投影立体角。因此,整个主镜在  $P$  点的散射功率可写成

$$\begin{aligned} \Phi_s(r) &= \int_p d\Phi_{si}(r) = \\ &= \int_p E_i \cdot \text{BSDF}\left(\frac{r}{l_i}\right) \cdot dA_i \cdot \cos \varphi_i \cdot \frac{ds \cos \varphi_i}{l_i^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)是对整个主镜进行积分,因此观察面元  $ds$  与积分无关,可以移到积分号外。进一步假设入射光截面功率密度均匀分布,即每个面元的入射功率密度相等,  $E_i = E_0$ 。并将  $l_i \approx f/\cos \varphi_i$  也带入式(5),得到

$$\begin{aligned} E_s(r) &= \frac{\Phi_s(r)}{ds} = \\ &= E_0 \int_p \text{BSDF}\left(\frac{r}{f/\cos \varphi_i}\right) \cdot \cos^4 \varphi_i \cdot \frac{dA_i}{f^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

如果进一步计算,还需要知道主镜表面的 BSDF 函数的具体形式。Harvey 指出,对于粗糙度远小于波长的光滑且没有灰尘污染的干净的光学表面的 BSDF 具有线性位移不变的形式<sup>[21]</sup>

$$BSDF(\theta_0, \theta) = b[100|\sin \theta - \sin \theta_0|]^s, \quad (7)$$

其中,  $\theta_0, \theta$  分别为入射和散射天顶角。  $b$  是 BSDF 在镜方向上的值, 一般与表面粗糙度、入射波长等因素有关。  $s$  是 BSDF 在双对数坐标下的斜率,  $s$  的取值一般为  $-1 \sim -3$ 。

认为  $\sin \theta - \sin \theta_0 \approx \theta_{si}$ , 将式(7)代入式(6),

并有  $\cos(\varphi_0) \approx f/\sqrt{R_i^2 + f^2}$ , 在主镜表面取极坐标,  $dA_i = R_i dR_i d\theta_i$ 。因此, 式(6)还可写成

$$E_s(r) = E_0 b 100^s r^s f^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \frac{R_i dR_i d\theta_i}{(R_i^2 + f^2)^{(s+4)/2}}, \quad (8)$$

积分上限  $R_0$  是主镜的半径。当  $s = -2$  时, 积分后式(8)可写成

$$E_s(r) = \pi E_0 b 100^s r^s f^2 \ln\left(1 + \frac{R_0^2}{f^2}\right) \approx \pi R_0^2 E_0 b \frac{1}{(100r)^2}, \quad (9)$$

(9)式近似认为当  $-1 < x \leq 1$  时,  $\ln(1+x) \approx x$ 。若  $s \neq -2$ , 则积分后式(8)可写成

$$E_s(r) = E_0 b 100^s \frac{2\pi}{s+2} \left(\frac{r}{f}\right)^s \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{R_0^2}{f^2}\right)^{\frac{s+2}{2}}}\right], \quad (10)$$

利用关系式  $(1+x)^{-m} \approx 1 - mx$ ,  $|x| < 1$ , 对式(10)最后括号项进行简化, 则式(10)可以近似成

$$E_s(r) \approx E_0 b 100^s \frac{\pi R_0^2}{f^2} \left(\frac{r}{f}\right)^s = E_0 \frac{\pi R_0^2}{f^2} BSDF\left(\frac{r}{f}\right), \quad (11)$$

式(11)就是主镜焦平面上由表面粗糙度引起的散射强度分布。不难看出, 整个主镜在  $P$  点的散射分布  $E_s(r)$  与观察到点几何像点的距离  $r$  的  $s$  次方成正比, 同时与主镜的口径和焦距有关。

根据镜面加工工艺, 假定镜面粗糙度为 10 nm, 则当  $s = -1.5$  时,  $b = 4.154$ 。利用式(11)分别对不同的  $R_0, f, s$  组合进行计算, 同时利用光线追迹法对其进行仿真模拟, 将计算结果与模拟结果进行对比, 以验证式(11)的正确性。

表 1 给出了固定  $s = -1.5$  时, 不同的  $R_0, f$  的不同组合, 图 3 给出了相应的计算结果与模拟结果的对比。表 2 给出了固定  $R_0 = 115$  mm,  $f = -757$  mm 与不同  $s$  的组合, 相应的计算结果与模拟结果如图 4 所示。图 3 和图 4 中的横坐标为观察点与几何像点的距离, 纵坐标为散射光强的自然对数。从两图可以看出, 在不同的  $R_0, f, s$  组合下, 仿真模拟结果与基于式(11)的计算结果符合得很好, 说明了式(11)的正确性。

表 1  $s = -1.5$  时, 不同的  $f$  和  $R_0$  的组合

Tab. 1 Different values of  $f$  and  $R_0$  with  $s$  in  $-1.5$

组合序号	$f/\text{mm}$	$R_0/\text{mm}$	$s$	$b$
1	-757	141	-1.5	4.154
2	-757	115	-1.5	4.154
3	-535	141	-1.5	4.154

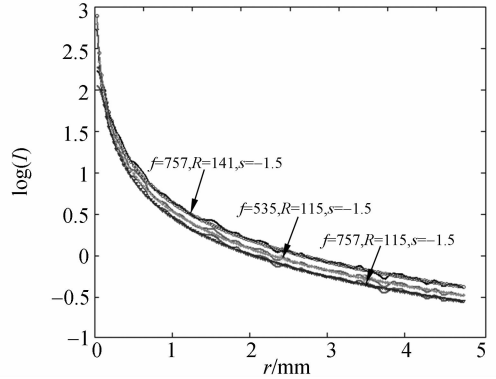


图 3  $s = -1.5$  时, 不同的  $f$  和  $R_0$  组合时计算结果与模拟结果的对比

Fig. 3 Comparison of calculation and simulation with different values of  $f$  and  $R_0$ , and  $s$  in  $-1.5$

表 2  $f = -757$  mm,  $R_0 = 115$  mm 与不同的  $s$  组合

Tab. 2 Different values of  $s$  with the same  $f$  in  $-757$  mm and  $R_0$  in  $115$  mm

组合序号	$f/\text{mm}$	$R_0/\text{mm}$	$s$	$b$
1	-757	115	-1	4.154
2	-757	115	-1.5	4.154
3	-757	115	-1.8	4.154
4	-757	115	-2.5	4.154

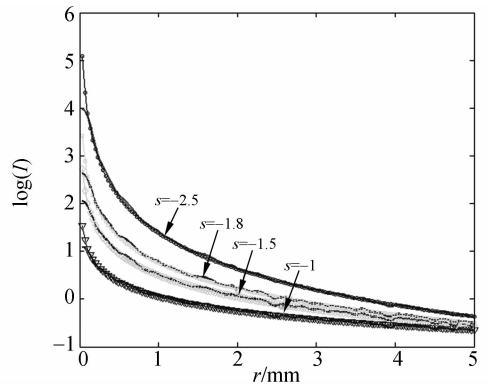


图 4  $f = -757$  mm,  $R_0 = 115$  mm 与不同的  $s$  组合时计算结果与模拟结果的对比

Fig. 4 Comparison of calculation and simulation with different values of  $s$ , and  $f$  in  $-757$  mm and  $R_0$  in  $115$  mm

### 3.2 散射光强与衍射光强的比较

当强光从视场内入射时,散射和衍射同时存在。观察点  $P$  处的光强是衍射和散射光强的叠加。那么,两者哪个更大?换句话说,在什么范围衍射起主要作用,在什么范围散射起主要作用?这里对衍射和散射在探测器表面任意点处的光强大小进行了比较。

在入射条件不变的情况下,主镜焦平面上光强的衍射分布是

$$E_d(r) = \frac{(1-TIS)E_0(\pi R_0^2)^2}{\lambda^2 f^2} \left[ \frac{2J_1\left(\frac{kR_0 r}{f}\right)}{\frac{kR_0 r}{f}} \right]^2, \quad (12)$$

其中  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , TIS 是系统的全散射积分,表示散射光能量占总反射光能量的份额,  $TIS \approx (4\pi\sigma_{\text{rms}}/\lambda)^2$ 。对于  $x \gg 1$  的情况,贝塞尔函数有如下渐进式

$$J_1(x) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{3\pi}{4}\right), \quad (13)$$

把式(13)带入式(12),得到了在距离中心像点较远处的衍射光强的近似表达式

$$E_d(r) = \frac{(1-TIS)E_0 R_0 f \lambda}{\pi^2 r^3} \cos^2\left(\frac{2\pi R_0 r}{\lambda f} - \frac{3\pi}{4}\right), \quad (14)$$

式(14)是一个光强的包络乘以振荡项。在典型的相机系统中,由于两个暗环的间距与探测器的像元大小相当,因此相机不能分辨出两个暗环,故式(14)中振荡项的贡献应该是其平均值  $1/2$ <sup>[11]</sup>,此时式(14)应该写成

$$E_d^{\text{env}}(r) = \frac{(1-TIS)E_0 R_0 f \lambda}{2\pi^2 r^3}. \quad (15)$$

式(15)说明,在距离中心像点较远处的衍射光强是以到几何像点距离的3次方衰减的。

利用式(11)和式(15)比较散射和衍射在同一位置的强度大小,用式(11)除以式(15),并令其等于1得到

$$r_s = \left( \frac{(1-TIS)\lambda f^{3+s}}{2\pi^3 R_0 b 100^s} \right)^{\frac{1}{3+s}}. \quad (16)$$

称这个半径为特征半径,表示焦平面上散射和衍射相等的点与几何像点之间的距离。以几何像点为中心,半径小于  $r_s$  的区域,衍射光强大于散射光强;半径大于  $r_s$  的区域,散射光强大于衍射光强。

设入射波长  $\lambda = 550 \text{ nm}$ , 主镜半径  $R_0 = 115 \text{ mm}$ , 焦距  $f = -757 \text{ mm}$ 。同样取  $s = -1.5$ ,  $b = 4.154$ 。以上数值带入式(16)计算得到  $r_s = 0.842 \text{ mm}$ 。而主镜对应的爱里斑直径  $r_d$  为  $4.4 \mu\text{m}$ , 如果认为焦平面探测器的像元大小等于一个爱里斑直径,那么特征半径  $r_s$  对应的像元数约为190个。这就是说,在190个像元内,衍射强度大于散射强度;在190个像元外,散射强度大于衍射强度,具体的计算结果如图5所示。图5中纵坐标表示的是对衍射中心强度归一化的光强的对数,横坐标表示的是观察点到几何中心像点的距离。实线是根据式(11)得到的散射的光强分布,虚线是根据式(15)得到的衍射光强近似表达式,两者对  $r$  以不同的速度衰减。两者在特征半径  $r_s$  处相等。该特征半径将焦平面上的光强分布分为两个区域,在强光辐照下焦平面上这两个区域的饱和效应机理不同:当  $r < r_s$  时,衍射光强大于散射光,探测器的饱和效应主要是系统的衍射效应引起的;当  $r > r_s$  时,衍射光强小于散射光,探测器的饱和效应主要是主镜表面粗糙度引起的散射效应导致的。

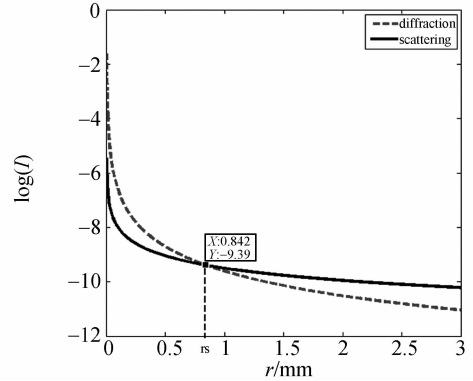


图5 焦平面上衍射光强和散射光强分布比较

Fig. 5 Distribution of diffraction and scattering on focal plane

## 4 结论

本文针对某系统中的主镜,采用双向散射分布函数(BSDF)描述散射的角分布特性,推导了平行与光轴的平行光入射时主镜焦平面上的散射光强分布函数的解析表达式,并将其与衍射光强分布函数联立,得到了焦平面上以几何像点为中心,散射与衍射强度相等时的特征半径  $r_s$ 。对于半径

$R_0 = 115 \text{ mm}$ , 焦距  $f = -757 \text{ mm}$ , 且在入射波长  $\lambda = 550 \text{ nm}$  时的表面粗糙度为  $10 \text{ nm}$  的主镜, 其

特征半径约为  $0.843 \text{ mm}$ , 仿真模拟结果与表达式计算结果相符, 说明了计算表达式的正确性。

### 参考文献:

- [1] PETERSON G L. Analytic expression for in-field scatter light distributions[J]. *SPIE*, 2004, 5178: 184-193.
- [2] 郝云彩, 肖淑琴, 王丽霞. 星载光学传感器消杂光技术现状与发展[J]. *中国空间科学技术*, 1995(3): 40-50.  
HAO Y C, XIAO SH Q, WANG L X. Status and development of stray light elimination technology for space-borne optical sensors[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1995(3): 40-50. (in Chinese)
- [3] 张红鑫, 卢振武, 夏利东, 等. 白光日冕仪光学系统的杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2371-2376.  
ZHANG H X, LU ZH W, XIA L D, *et al.*. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2371-2376. (in Chinese)
- [4] 钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 316-318.  
ZHONG X, ZHANG L, JIN G. Stray light removing of reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 贾辉, 李福田. 铝漫反射板  $200 \sim 300 \text{ nm}$  相对双向反射分布函数的实验研究[J]. *光学技术*, 2004, 24(2): 230-234.  
JIA H, LI F T. Bidirectional reflectance distribution function of aluminium diffuser at UV spectral band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 24(2): 230-234. (in Chinese)
- [7] 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.  
SHI G H. Methods preventing stray light emerged in Cassergrain systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(5): 10-16. (in Chinese)
- [8] 樊学武, 马卫红, 陈荣利, 等. 具有二次像面的三反射光学系统的研究[J]. *光子学报*, 2003, 32(8): 1001-1003.  
FAN X W, MA W H, CHEN L R, *et al.*. Study on three mirror reflective optic system having one image surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 1001-1003. (in Chinese)
- [9] 樊学武, 马臻, 陈荣利, 等. 偏视场用三反射系统的一次杂光问题研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(8): 960-963.  
FAN X W, MA ZH, CHEN L R, *et al.*. Study on stray light of the three mirror optical system used in field bias[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 960-963. (in Chinese)
- [10] 李婷, 杨建峰, 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(增): 136-141.  
LI T, YANG J F, RUAN P, *et al.*. Stray light analysis of the Lunar-based optical telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(supp.): 136-141. (in Chinese)
- [11] SCHLEIJPEN R, van den HEUVEL J C, MIEREMET A L, *et al.*. Laser dazzling of focal plane array cameras [J]. *SPIE*, 2007, 6543: 65431B1-65431B10.
- [12] SCHLEIJPEN R A, DIMMELER A, EBERLE B, *et al.*. Laser dazzling of focal plane array cameras [J]. *SPIE*, 2007, 6738: 6380O1-6380O10.
- [13] SCHLEIJPEN R. Laser dazzling of infrared focal plane array cameras[J]. *SPIE*, 2008: 1-2.
- [14] DURÉCU A, VASSEUR O, BOURDON P. Assessment of laser-dazzling effects on TV-cameras by means of pattern recognition algorithms [J]. *SPIE*, 2007, 6738: 1-9.
- [15] 王世勇, 付有余, 郭劲. 激光辐照面阵 CCD 探测器系统局部的干扰效应[J]. *半导体光电子*, 2002, 23(2): 106-109.  
WANG S Y, FU Y Y, GUO J. Study of disturbing effect on array CCD detectors irradiated locally by laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, 23(2): 106-109. (in Chinese)
- [16] 张震. 可见光 CCD 的激光辐照效应实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.  
ZHANG Z. *Experimental study of laser induced effect on visible light CCD* [D]. Changsha: Na-

tional University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)

- [17] 江天. 激光辐照 3CCD 相机的饱和和干扰效应及效果评估研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.

JIANG T. *Study of saturation interference effect and interference assessment methods of 3CCD irradiated by laser*[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)

- [18] 郭少锋,程湘爱,傅喜泉,等. 高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏[J]. 强激光与粒子束, 2007,19(11):1783-1786.

GUO SH F, CHENG X A, FU Q X, *et al.*. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser[J]. *High Power Laser and Parti-*

*cle Beams*, 2007,19(11):1783-1786. (in Chinese)

- [19] 张大勇,赵剑衡,王伟平,等. 1.319  $\mu\text{m}$  连续 YAG 激光束对可见光面阵 CCD 系统的干扰研究[J]. 强激光与粒子束,2003,15(11):1050-1052.

ZHANG D Y, ZHAO J H, WANG W P, *et al.*. Study of disturbance to visible-light array CCD detectors irradiated by 1.319  $\mu\text{m}$  CW YAG laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003,15(11):1050-1052. (in Chinese)

- [20] STOVER J C. Optical scatter: an overview[J]. *SPIE*, 1991,1530:2-6.

- [21] HARVEY J E, SHACK R V. Light-Scattering Characteristics of Optical Surfaces[R]. *California;Space and Missile System Organization, Air Force System Command Los Angeles*,1975.

#### 作者简介:

孙可(1982—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2005年于大连理工大学获得学士学位,2008年于国防科学技术大学获得硕士学位,现为国防科技大学光电科学与工程学院博士研究生,主要从事激光对光学系统的辐照效应和光学系统的杂散光分析的研究。E-mail: sunkenudt@gmail.com



程湘爱(1966—),女,安徽桐城人,教授,博士生导师,主要研究方向为激光与物质相互作用。E-mail: xiang\_ai\_cheng@126.com

江厚满(1970—),男,安徽怀宁人,博士后,副教授。主要激光与物质相互作用和光学系统杂散光方面的研究。E-mail: jhm3395@sina.com