

R-C 系统中由表面散射引起的视场内杂散光分布*

孙可, 江厚满, 程湘爱

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 推导了 R-C 系统焦平面上由主镜和次镜表面散射引起的视场内杂散光分布的近似解析表达式。针对典型 R-C 系统的视场内杂散光分布, 由近似表达式得到的计算结果与利用商业光学仿真软件得到的模拟结果具有较好的一致性, 说明了近似表达式的正确性。与焦平面上无像差衍射光分布相比较, 可以方便地分析强光入射时 R-C 系统焦平面上不同区域的饱和机制。研究表明, 对于典型的 R-C 系统, 探测器表面上以几何像点为中心, 半径为 2.5mm 的范围内, 衍射光是引起探测器饱和的主要因素; 在此范围外, 表面散射造成探测器的饱和。该结果为进一步研究强光饱和实验, 解释有关现象提供理论分析基础。

关键词: R-C 反射系统; 表面散射; 视场内杂散光; 双向散射分布函数

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)01-0013-06

In-field stray light distribution caused by the surface scattering in ritchey-chretien systems

SUN Ke, JIANG Houman, CHENG Xiangai

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

Abstract: The analytic expressions for the scattered distributions at the focal plane of the Ritchey-Chretien reflective system (R-C system) from the primary mirror and the second mirror were derived. Aiming at the scattered distribution in a typical R-C system, the excellent agreement of the computing results according to the formula introduced in this study with the simulating results provided by the commercial optical analysis software shows that the formula derived is believable and reasonable. Compared with the diffracted distribution at the focal plane, it is more convenient to analyze the saturated effects at the focal plane of the system irradiated by intense light. The results indicate that in the typical R-C system, diffraction is the dominant factor of the saturating effect inside 2.5mm, while surface scattering saturates the detector outside this range. This result provides a theoretical basis for the further study of intense light induced saturating effects in optical system.

Key words: reflective optical system; surface scattering; in-field stray light; bidirectional scatter distribution function

Ritchey-Chretien 系统(以下简称 R-C 系统)是典型的双镜反射系统,具有大口径、结构紧凑等特点,被广泛应用于航天遥感和天文观测等领域,其中著名的哈勃空间望远镜就采用 R-C 结构^[1-2]。

然而,视场内杂散光对 R-C 系统影响较大。所谓视场内杂散光,是指光学系统视场角内的杂散光源,经光学元件散射、残余反射后被探测器接收的非成像光线。它会在目标像的周围形成光晕,增大图像的背景噪声,降低图像的对比如^[3-4]。R-C 系统中由光学元件的表面粗糙引起的散射是系统视场内杂散光的主要来源。自从 20 世纪 60 年代以来,各国相继投入了大量的人力物力研究光学系统的视场内杂散光问题^[5]。

中科院长春光学精密机械与物理研究所^[6-9]、西安光学精密机械研究所^[10-12]和国防科技大学^[13-15]等多家单位在系统杂光测试、光学系统杂散光抑制设计、材料的散射特性测量以及系统杂散光模拟等领域开展了卓有成效的工作。

目前,杂散光分析方法主要是通过光学分析软件对系统进行优化设计,并提出合理的杂散光抑制方案,以提高系统的性能。但是,目前的大多数软件在对光学系统进行杂散光分析时,都需要追迹至少数十万条以上的光线,耗时较长。对于大多数光学设计者以及不熟悉光学分析软件的人员,这无疑是很低效的。因此,如果能够找到一种方法从理论上描述探测器上接收到的杂散光的分布,并能够指出影响杂散光分布的主要因素,这样

* 收稿日期:2011-10-12

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:孙可(1982—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,E-mail:sunkenudt@gmail.com;

江厚满(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:jhm3395@sina.com

就可以初步地分析和预估散射对系统的成像质量的影响,既简化了光学系统杂散光分析的过程,又无需经过复杂而耗时的光线追迹计算,缩短了光学设计周期,提高了效率。

本文针对 R-C 系统的主镜和次镜的表面散射,提出了一种简单直观的处理方法。在给定表面双向散射分布函数 BSDF (Bidirectional Scatter Distribution Function) 和系统的主要参数条件下,推导了平行光入射时,主镜和次镜在系统焦平面上的散射分布的近似解析表达式,从理论上分析 R-C 系统的各主要参数对焦平面上视场内杂散光分布的影响。针对典型的 R-C 系统,将利用本文方法得到的计算结果与由当前流行的商业光学分析软件得到的模拟结果对比,以验证本文方法是否正确。

1 R-C 系统散射分布

图 1 给出了典型的 R-C 双镜反射系统结构示意图。一束平行光经主镜和次镜两次反射汇聚于系统焦平面 F' 。其中主镜的半口径为 R ,像方焦点位于 F'_1 ,次镜的半口径为 εR ,两镜间距为 d ,系统后截距为 b ,系统遮挡比为 ε 。

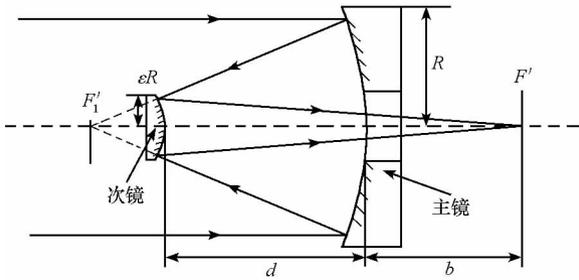


图 1 R-C 系统结构示意图

Fig. 1 Nomenclature for the Ritchey-Chretien two-mirror system

Peterson 指出,系统焦平面上视场内杂散光的光强是系统中各光学元件散射光强的线性叠加。因此,本文分别考虑主镜和次镜散射引起的视场内杂散光在焦平面上的光强分布,最后将两者线性叠加,得到系统焦平面上总的视场内杂散光光强分布。

1.1 主镜的散射

首先考虑主镜散射,此时不考虑次镜对主镜散射光的二次散射作用。平行光入射到主镜上,一部分光经主镜镜面反射汇聚到主镜的焦点 F' ,一部分光线由于主镜的散射偏离镜反射方向,入射到主镜焦平面某点 P' 。镜面反射光和散射光再经过次镜的镜面反射入射到系统焦平面上。由于主镜焦平面与系统焦平面共轭,因此只要得到

主镜焦平面上散射光分布,再通过几何光学变换关系就可以得到系统焦平面上的散射分布。

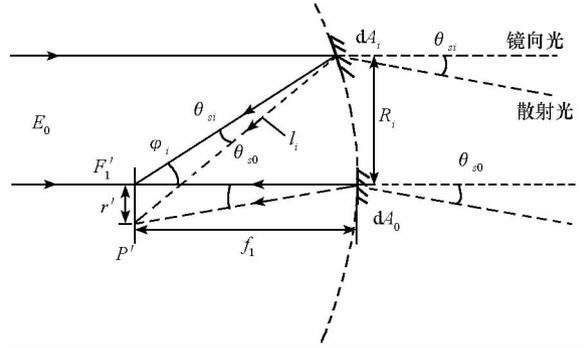


图 2 主镜散射模型示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the scattering model of primary mirror

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,其中一部分光未被散射,传播方向不变,这部分光被称为镜向光;一部分光被散射而偏离传播方向,形成散射光,两者夹角为 θ_{si} ,被称为相对散射角,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' ,散射光线入射到焦平面上 P 点,取该点与焦点 F'_1 距离为 r' 。对于面元 dA_i ,当 $r' \ll f_1$ 时,相对散射角近似为

$$\theta_{si} \approx \frac{r'}{l_i} \quad (1)$$

其中 $l_i \approx \sqrt{R_i^2 + f_1^2}$,是面元 dA_i 中心到 P 点的距离。如果入射到面元 dA_i 的光强为 E_i ,则根据 BSDF 的定义,面元 dA_i 在 P 点产生的散射亮度为

$$L_i = \text{BSDF}_1(\theta_{si}) \cdot E_i = \text{BSDF}_1\left(\frac{r'}{l_i}\right) \cdot E_i \quad (2)$$

其中 BSDF_1 代表主镜的散射分布函数。故面元 dA_i 在 P 点的散射功率为

$$\begin{aligned} d\Phi_{s1}(r) &= L_i dA_i \cos\varphi_i d\Omega_i \\ &= E_i \cdot \text{BSDF}_1\left(\frac{r'}{l_i}\right) \cdot dA_i \cdot \cos\varphi_i \cdot \frac{ds \cos\varphi_i}{l_i^2} \end{aligned} \quad (3)$$

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。整个主镜在 P 点的散射功率为式(3)的对主镜区域的积分,即

$$\begin{aligned} \Phi_{s1}(r') &= \int_P d\Phi_{s1}(r') \\ &= \int_P E_i \cdot \text{BSDF}_1\left(\frac{r'}{l_i}\right) \cdot dA_i \cdot \cos\varphi_i \cdot \frac{ds \cos\varphi_i}{l_i^2} \end{aligned} \quad (4)$$

上式是对整个主镜进行积分,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 $l_i \approx f_1 / \cos\varphi_i$ 也带入式(4),得到

$$\Phi_{s1}(r') = E_0 ds \int_p \text{BSDF}_1\left(\frac{r'}{f_1/\cos\varphi_i}\right) \cdot \cos^4\varphi_i \frac{dA_i}{f_1^2} \quad (5)$$

为了进一步计算,我们还需要知道主镜表面的 BSDF_1 函数的具体形式。Harvey 指出,光滑、干净的光学表面的 BSDF 具有线性位移不变的形式^[15]

$$\text{BSDF}(\theta_0, \theta) = b [100 |\sin\theta - \sin\theta_0|]^s \quad (6)$$

其中, θ_0, θ 分别为入射和散射的天顶角。 b 是 BSDF 在镜方向(specular direction)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 $-3 \sim -1$ 。

认为 $\sin\theta - \sin\theta_0 \approx \theta_{si}$, 将式(6)代入式(5), 并有 $\cos\varphi_i \approx f_1 / \sqrt{R_i^2 + f_1^2}$, 在主镜表面取极坐标, $dA_i = R_i dR_i d\theta_i$ 。因此,式(5)还可写成

$$\Phi_{s1}(r') = E_0 ds b 100^s (r')^s f_1^{2s} \int_0^{2\pi R_0} \int_{\varepsilon R_0} \frac{R_i dR_i d\theta_i}{(R_i^2 + f_1^2)^{(s+4)/2}} \quad (7)$$

积分上限 R_0 是主镜的半径。当 $s = -2$ 时,积分后式(7)可写成

$$\begin{aligned} \Phi_{s1}(r') &= E_0 ds \pi b 100^{-2} r^{-2} f_1^2 \ln\left(1 + \frac{R_0^2(1 - \varepsilon^2)}{\varepsilon^2 R_0^2 + f_1^2}\right) \\ &= E_0 ds b 100^{-2} \frac{\pi R_0^2(1 - \varepsilon^2)}{f_1^2} \left(\frac{r}{f_1}\right)^{-2} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)近似认为当 $-1 < x \leq 1$ 时, $\ln(1+x) \approx x$, 即有 $\varepsilon^2 R_0^2 + f_1^2 \approx f_1^2$ 。

若 $s \neq -2$, 则积分后(8)式可写成

$$\begin{aligned} \Phi_{s1}(r') &= E_0 ds b 100^s \frac{2\pi}{s+2} \\ &\left(\frac{r'}{f_1}\right)^s \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{\varepsilon^2 R_0^2}{f_1^2}\right)^{\frac{s+2}{2}}} - \frac{1}{\left(1 + \frac{R_0^2}{f_1^2}\right)^{\frac{s+2}{2}}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

利用关系式 $(1+x)^{-m} \approx 1 - mx$, $|x| < 1$, 对式(9)最后括号项进行简化后可近似成

$$\begin{aligned} \Phi_{s1}(r') &= E_0 ds b 100^s \left(\frac{r'}{f_1}\right)^s \frac{\pi R_0^2(1 - \varepsilon^2)}{f_1^2} \\ &= E_0 ds \text{BSDF}_1\left(\frac{r'}{f_1}\right) \frac{\pi R_0^2(1 - \varepsilon^2)}{f_1^2} \end{aligned} \quad (10)$$

当 $s = -2$ 时,式(10)就变成了式(8),因此,无论 s 是否等于 -2 ,式(10)都表示主镜焦平面上由表面粗糙度引起的散射功率分布。

设系统焦平面上 P 点与主镜焦平面上 P' 点共轭,根据几何光学共轭关系,则两点坐标关系为

$$r = \beta_2 \cdot r', ds = \beta_2^2 \cdot ds' \quad (11)$$

其中 $\beta_2 = \frac{f}{f_1}$ 为次镜的横向放大率, f 和 f_1 分别为系统和主镜的像方焦距。将式(11)代入式(10),则得到系统焦平面上 P 点处由主镜贡献的散射光功率密度为

$$\begin{aligned} E_{s1} &= \frac{\Phi_{s1}}{ds} = E_0 \cdot \text{BSDF}_1\left(\frac{r}{\beta_2 f_1}\right) \cdot \frac{1}{\beta_2^2} \cdot \frac{\pi R^2(1 - \varepsilon^2)}{f_1^2} \\ &= E_0 \cdot \text{BSDF}_1\left(\frac{r}{f}\right) \cdot \frac{\pi R^2(1 - \varepsilon^2)}{f^2} \end{aligned} \quad (12)$$

由上式可以看出,主镜散射光在系统焦平面上的分布与三部分相关:入射光在主镜表面处的功率密度 E_0 、主镜的 BSDF_1 以及考虑遮挡效应时主镜被照面积对系统焦点所张的等效立体角。

1.2 次镜的散射

考虑次镜的散射贡献时,不考虑主镜的二次散射,分析方法与主镜分析方法相同,只需给出式(12)中与次镜对应的每一项即可。

入射到次镜上的光强为

$$E_2 = \frac{E_0 \cdot S_1}{S_2} = E_0 \frac{\pi R_0^2(1 - \varepsilon^2)}{\pi R_0^2(1 - \varepsilon^2) \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)^2} = \frac{E_0}{\left(1 - \frac{d}{f_1}\right)^2} \quad (13)$$

其中, $S_1 = \pi R_0^2(1 - \varepsilon^2)$, $S_2 = \pi R_0^2(1 - \varepsilon^2) \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)^2$ 分别为主镜和次镜被照亮的面积。

由图3可知,次镜上被主镜照亮的面积对 P 点所张的立体角为

$$\Omega_2 = \frac{S_2}{(d+b)^2} = \frac{\pi R_0^2(1 - \varepsilon^2) \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)^2}{(d+b)^2} \quad (14)$$

另外,次镜的相对散射角为

$$\theta_2 = \frac{r}{d+b} \approx \frac{r}{\varepsilon f} \quad (15)$$

与式(12)类似,系统焦平面上 P 点处由次镜贡献

的散射光功率密度为

$$E_{s2} = E_2 \cdot \text{BSDF}_2\left(\frac{r}{\varepsilon f}\right) \cdot \Omega_2$$

$$= E_0 \cdot \text{BSDF}_2\left(\frac{r}{\varepsilon f}\right) \cdot \frac{\pi R_0^2 (1 - \varepsilon^2)}{(\varepsilon f)^2} \quad (16)$$

其中 BSDF_2 为次镜的散射分布函数。将式(16)和式(12)相加,得到系统焦平面上 P 点的总的散射光功率密度

$$E_s = E_{s1} + E_{s2}$$

$$= E_0 \cdot \pi R_0^2 (1 - \varepsilon^2) \cdot \left[\frac{\text{BSDF}_1\left(\frac{r}{f}\right)}{f^2} + \frac{\text{BSDF}_2\left(\frac{r}{\varepsilon f}\right)}{\varepsilon^2 f^2} \right] \quad (17)$$

利用式(12)、(16)和(17),可以从理论上分析 R-C 系统各参数对视场内杂散光分布的影响。不难看出,系统的焦距 f 和遮挡比 ε 影响视场内杂散光的角分布,而它们的平方则影响视场内杂散光的功率的大小。

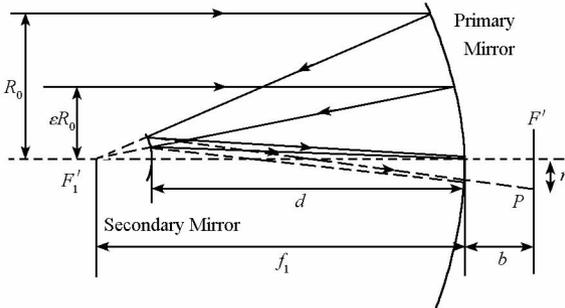


图 3 次镜被照亮面积对 P 点所张的立体角
Fig. 3 The solid angle subtended by the irradiated area on the secondary mirror to point P

2 与软件仿真结果对比

利用式(12)、(16)分别计算系统焦平面上主镜和次镜的散射分布,同时利用光线追迹软件对其进行仿真模拟,将计算结果与模拟结果进行对比,以验证两式的正确性。图 4 给出了在商业光学分析软件中建立的典型的 R-C 系统的仿真模型,表 1 给出了该系统的主要参数。根据镜面加工工艺,假定镜面粗糙度 10nm,则当 $s = -1.5$ 且入射波长为 550nm 时, $b = 4.154$ 。在实际计算和模拟时,假设主镜和次镜具有相同的 BSDF 函数。图 5 给出了相应的计算结果和模拟结果的对比。图中横坐标是观察点与几何像点的距离,纵坐标是焦平面上散射光功率密度的对数。图中实线为软件得到的模拟结果,虚线为由本文方法得到的计算结果,很明显两者具有较好的一致性,说明了

本文方法是合理的,可以用于分析 R-C 系统焦平面上的视场内杂散光的分布,不需要建立复杂的仿真模型,省去了大量的计算时间。

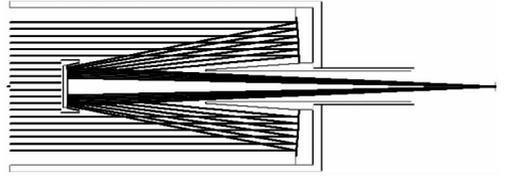


图 4 典型的 R-C 系统仿真模型
Fig. 4 The simulating model of a typical R-C system

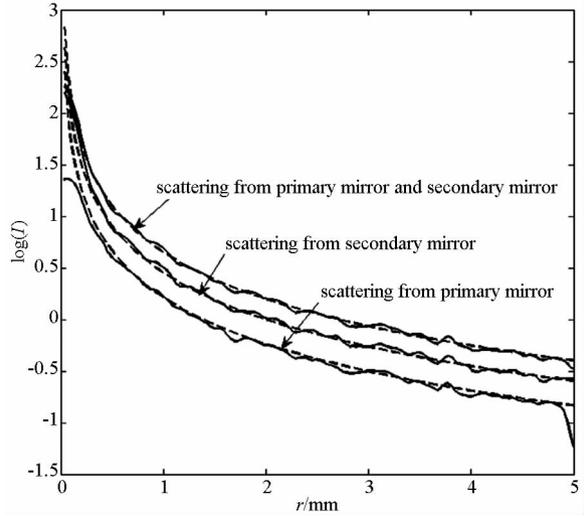


图 5 计算结果(虚线)和模拟结果(实线)的对比:主镜和次镜散射(上),
仅次镜散射(中),仅主镜散射(下)

Fig. 5 Computing results(dash line)and simulating results (solid line)for primary and secondary (upper), secondary mirror alone (middle) and primary mirror alone (lower)

3 散射光强分布与衍射光强的比较

当强光从视场内入射时,散射和衍射将同时使探测器响应。探测器上某点 P 处的光强是衍射和散射光强的叠加。那么,两者哪个更大?即,在什么范围衍射起主要作用,在什么范围散射起主要作用?下面我们将比较衍射和散射在探测器表面任意点处的光强大小。

在入射条件不变且无像差的条件下,系统焦平面上光强的衍射分布是^[16]

$$E_d(r) = \frac{TE_0(\pi R_0^2)^2}{\lambda^2 f^2} \left(\frac{2J_1\left(\frac{kR_0 r}{f}\right)}{\frac{kR_0 r}{f}} - \varepsilon^2 \frac{2J_1\left(\frac{\varepsilon kR_0 r}{f}\right)}{\frac{\varepsilon kR_0 r}{f}} \right)^2 \quad (18)$$

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, T 是系统透过率。

表 1 光学系统主要参数

Tab. 1 The main parameter of the system

系统参数	数值	系统参数	数值	系统参数	数值
系统焦距 f	1600 mm	主镜焦距 f'	-371.4285 mm	次镜焦距	-145.116 mm
系统半口径 R	75 mm	主镜半口径	78 mm	次镜半口径 ϵR	23.5 mm
遮挡比 ϵ	0.387	主镜顶点曲率半径	-742.857 mm	次镜顶点曲率半径	-290.232796 mm
主次镜间距 d	260 mm	主镜非球面系数	-1.0462	次镜非球面系数	-2.915

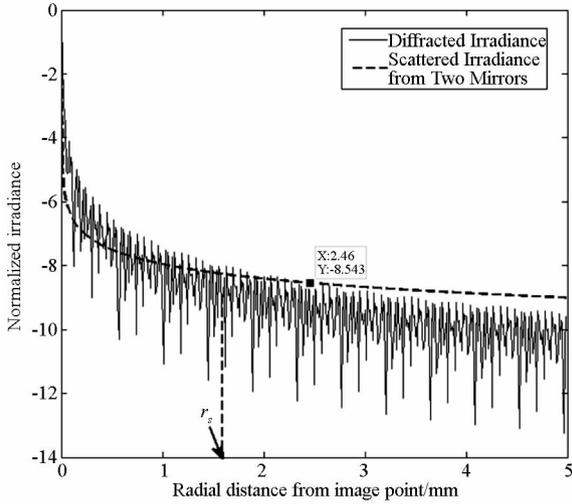


图 6 焦平面上衍射光强和散射光强分布比较
Fig. 6 The distribution of diffraction and scattering on the focal plane

图 6 给出了焦平面上由式 (18) 确定的衍射光强分布和由式 (17) 确定的散射光强分布的比较,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。实线是衍射的光强分布,虚线是散射光强分布。从图中可以看出,两者分别以不同的速度衰减,并在 r_s 处相等。我们称 r_s 为特征半径 (characteristic radius),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强,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两个反射镜表面粗糙度引起的散射效应导致的。对于本文的情况, $r_s \approx 2.5\text{mm}$,而双镜反射系统的爱理斑的第一暗环直径为 $6.4\mu\text{m}$,若取爱理斑的第一暗环直径为系统探测器的一个像元大小,则特征半径 r_s 约为 390 个像元。即在强光辐照下,探测器表面的饱和范围随着入射强光功率密度提高,光斑半径在 390 个像元以内,衍射光使探测器饱和;光斑半径在 390 个像元以外,散射效应起主要作用。

需要指出的是,特征半径的大小与光学系统的入瞳直径、系统有效焦距、遮挡比、入射波长以

及散射参数等因素有关。它反映的是系统焦平面上不同区域内衍射和散射的强弱对比。通常情况不同系统因参数不同,得到的特征半径大小也不同。对于同一系统,在保持衍射特征不变的情况下,散射越强,则特征半径越小;若保持散射属性不变,而改变系统的衍射强度分布,例如改变次镜支架的遮挡方式,可以改变衍射光强的分布,若改变后衍射增强,则特征半径变大。

4 结 论

本文针对 R-C 双镜反射系统中主镜和次镜,提出了一种简便的分析方法,得到了平行于光轴的平行光入射时主镜和次镜在焦平面上的散射光强分布函数的解析表达式,给出了分析光学系统的各个参数对视场内杂散光分布的影响的理论依据。利用本文的方法可以方便地分析 R-C 系统的视场内杂散光,若与衍射光强分布表达式相比较,则可以从理论上分析探测器表面不同区域上的饱和机制,不需要建立复杂的仿真模型,也省去了大量的软件计算时间,大大地提高了效率。下一步工作将该方法应用到透射式光学系统中,进而得到能够分析一般光学系统焦平面上散射光分布的理论模型。

参考文献 (References)

[1] 李婷,杨建峰,阮萍,等. RC 系统的遮光罩设计与仿真 [J]. 光子学报, 2008, 37(2):332-336.
LI Ting, YANG Jianfeng, RUAN Ping, et al. Baffle design and simulation of R-C system [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(2):332-336. (in Chinese)

[2] Bely P Y. The design and construction of large optical telescopes [M]. Springer, 2003.

[3] Peterson G L. Analytic expression for in-field scatter light distributions [J]. Proc. SPIE, 2004, 5178:184-193.

[4] 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 Yuncai, XIAO Shuqin, WANG Lixia. Status and development of stray light elimination technology for spaceborne optical sensors [J]. Chinese Space Science and Technology, 1995(3): 40-50. (in Chinese)

- [5] 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 Hongxin, LU Zhenwu, XIA Lidong, et al. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2371 - 2376. (in Chinese)
- [6] 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 Xing, ZHANG Lei, JIN Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316 - 318. (in Chinese)
- [7] 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 Xing, JIA Jiqiang. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 621 - 625. (in Chinese)
- [8] 贾辉, 李福田. 铝漫反射板 200 ~ 300nm 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 Hui, LI Futian. Bidirectional reflectance distribution function of Aluminium diffuser at UV spectral band [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 24(2): 230 - 234. (in Chinese)
- [9] 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 Guanghui. Methods preventing stray light emerged in Cassergrain systems [J]. Optics and Precision Engineering, 1997, 5(5): 10 - 16. (in Chinese)
- [10] 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 Xuewu, MA Weihong, CHEN Rongli, et al. Study on three mirror reflective optic system having one image surface [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(8): 1001 - 1003. (in Chinese)
- [11] 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 Xuewu, MA Zhen, CHEN Rongli, 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)
- [12] 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(增刊): 136 - 141.
LI Ting, YANG Jianfeng, RUAN Ping, et al. Stray light analysis of the Lunar-based optical telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(Supplied): 136 - 141. (in Chinese)
- [13] 孙可, 江厚满, 程湘爱. 强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 493 - 499.
SUN Ke, JIANG Houman, CHENG Xiangai. Distribution of in-field stray light due to surface scattering from primary mirror illuminated by intense light [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 493 - 499. (in Chinese)
- [14] Sun K, Jiang H M, Cheng X A. In-field stray light due to surface scattering effects in infrared imaging systems [J]. Proc. SPIE, 2011, 8193: 81933F-1 - 81933F-10.
- [15] Sun K, Huang L J, Cheng X A, Jiang H M. Analysis and simulation of the phenomenon of secondary spots of the TDI CCD camera irradiated by CW laser [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 23901 - 23907.
- [16] Scattering in ASAP. ASAP Technique Guide [R]. BRO, Inc, 2006
- [17] Born M, Wolf E. Principle of Optics [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.