

基于可见光系统的杂散光评价方法研究

孔祥悦¹, 贺融², 栗洋洋¹, 彭晴晴¹, 杨加强¹, 杜晓宇¹

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 重庆嘉陵华光光电科技有限公司, 重庆 400700)

摘要:随着光电成像技术日新月异的发展,杂散光干扰现象成为光电系统难以回避的问题。为了更好地表征可见光光学系统杂散光程度,解决现有评价方法——PST算法,无法表征杂散光入射在像面的总能量和能量分布的问题,本文提出一种优化后的等效 PST_{η} 计算方法。以一种可见光光学系统为例,通过杂散光仿真软件得到太阳光相对系统光轴各离轴角度的杂散光数据,分别使用原有PST算法和 PST_{η} 算法与杂散光辐照度分析图进行对比,结果表明 PST_{η} 算法在传统PST计算值一致时,能够更为准确表达杂散光变化趋势,由此可以更好的表征可见光光学系统杂散光分布情况。以 PST_{η} 作为评价指标设计了可见光光学系统杂散光抑制措施,验证了 PST_{η} 具备指导实际杂散光分析抑制工作的能力。该评价指标也可以推广到其他波段的成像系统中。

关键词:杂散光;点源透过率;可见光系统;辐照度分析图;评价方法

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.09.018

Research on stray light evaluation method based on visible light system

KONG Xiang-yue¹, HE Rong², LI Yang-yang¹, PENG Qing-qing¹, YANG Jia-Qiang¹, DU Xiao-yu¹

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. Chongqing Jialing Huaguang Photoelectric Technology Co., Ltd., Chongqing 400700, China)

Abstract: With the rapid development of optoelectronic imaging technology, stray light interference phenomenon has become a difficult problem for optoelectronic systems to avoid. In order to better characterize the stray light degree of visible optical system and to solve the problem that the existing evaluation method, PST algorithm, cannot characterize the total energy and energy distribution of stray light incident on the image plane, an optimized equivalent PST_{η} calculation method is proposed in this paper. Taking a visible optical system as an example, the stray light data of each off-axis angle of sunlight relative to the optical axis of the system are obtained by stray light simulation software, and the original PST algorithm and the PST_{η} algorithm are compared with the stray light irradiance analysis diagram, respectively. The results show that the PST_{η} algorithm can more accurately represent the stray light change trend when the traditional PST calculation values are consistent, and thus can better characterize the stray light distribution of visible light systems. The PST_{η} is used as an evaluation index to design stray light suppression measures for visible optical systems, and the ability of PST_{η} to guide the actual stray light analysis and suppression work is verified. The evaluation index can also be extended to other wavelength imaging systems.

Keywords: stray light; point source transmittance; visible light system; irradiance analysis diagram; evaluation method

1 引言

随着光电技术日新月异的发展,对各类光学系

统性能指标都有了更高的要求,其中,可见光光学系统在军民应用领域的地位举足轻重,然而可见光系

统极易受到杂散光的影响,一旦杂散光过于严重,轻则会导致信噪比、对比度降低,重则会导致目标完全淹没,致使光学系统完全失效^[1]。因此,可见光光学系统在设计阶段就必须考虑杂散光带来的影响,通过仿真软件来合理地评估、避免杂散光的负面影响是科研人员的常用设计手段,其中在评估过程中,评估函数是准确评估杂散光严重水平的关键因素^[2]。

为了更好地表征可见光光学系统杂散光严重程度,本文提出一种优化 PST 算法用以评价可见光光学系统杂散光水平,随后针对一种透射式可见光系统进行杂散光分析,完成了消光螺纹的结构设计,通过与杂散光辐照分析图对比,相较于原有 PST 算法,优化后的等效 PST_n 算法表征杂散光程度和趋势更准确。

2 杂散光仿真原理分析

2.1 杂散光来源及辐射量计算

杂散光来源主要有三类:(1)外部杂散光,例如阳光、月光、地气光等;(2)内部杂散光,主要由内部热辐射引起,例如系统中控制电机、控制电源、控制电路板等;(3)成像杂散光,此类杂散光一般由于光学透镜或结构表面的剩余反射、散射或衍射导致成像光线的非正常路径传播,其中经过偶数次反射后在探测器形成的非正常成像光斑,俗称为“鬼像”^[3]。在这三类杂散光中,内部杂散光只会发生在红外系统中,成像杂散光只会发生在特定光学系统。成像杂散光需要在设计阶段考虑抑制措施,或通过提高透镜膜层透过率,降低剩余反射率实现抑制“鬼像”,但这并不在本文所涉及的范围之内。因此在本文中,可见光系统只需重点考虑外部杂散光作为杂散光来源,相比之下,在各类杂散光光源中,日光强度最高,所带来的影响远远大于其他杂散光光源,因此本文只考虑日光作为主要杂散光光源。

为了能够模拟更接近在现实情况下,杂散光对系统性能的影响,需要计算日光在相机可见光工作波段 400 ~ 700 nm 下的辐射度。根据普朗克黑体公式,便可以得到在每个特定波长下的辐射度。由此可计算出太阳在波段 400 ~ 700 nm 的辐射出射度:

$$M_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (1)$$

其中, λ_1 为 400 nm; λ_2 为 700 nm; T 为辐射体温度,取太阳平均温度 $T = 5900$ K, 第一黑体辐射

常数 $c_1 = 3.741844 \times 10^8$ W · m⁻² · μm⁴, 第二黑体辐射常数 $c_2 = 14388$ μm · K。

太阳的辐射通量为:

$$\Phi_s = A_s M_s = 4\pi R_s^2 M_s \quad (2)$$

其中, A_s 为太阳表面积; R_s 为太阳半径。

太阳辐射强度为:

$$I_s = \frac{A_s M_s}{4\pi} = R_s^2 M_s \quad (3)$$

系统入瞳面对太阳所呈立体角为:

$$\Omega = \frac{A_o \cos\alpha}{l^2} \quad (4)$$

式中, A_o 为光学系统入瞳面积; l 为光学系统入瞳处与太阳之间的距离; α 为光太阳与光学系统的离轴角大小。

太阳在相对光学系统的立体角 Ω 内光通量为:

$$\Phi_o = I_s \cdot \Omega = R_s^2 M_s \frac{A_o \cos\alpha}{l^2} \quad (5)$$

可得太阳在光学系统入瞳处的等效辐照度为:

$$E_o = \tau \frac{\Phi_o}{A_o} = \tau \frac{R_s^2 M_s}{l^2} \cos\alpha \quad (6)$$

式中, τ 为大气对所计算波长的透过率,此处取可见光平均透过率 0.598。

经由上式可计算太阳在可见光光学系统入瞳处的等效辐照度。

2.2 杂散光程度评价标准

2.2.1 辐照度分析图法

判断杂散光情况最准确的是通过杂散光分析软件得到的杂散光辐照度图,直接分析判断杂散光抑制情况,判断主要根据两点:1) 辐照度分析图的能量分布是否均匀;2) 观察辐照度分析图中的最大能量值^[4]。这种方法可以准确判断出目标系统在各个离轴分析角度 θ 的杂散光情况,当辐照度分析图显示的能量分布均匀或能量最大值低于探测器相应能量阈值时,即可判断光学系统对当前离轴角度下的杂散光抑制情况良好。但是通过此方法难以整体直观把控目标光学系统在各个离轴角度杂散光情况变化趋势。

2.2.2 点源透过率

当系统杂散光来自外部杂散光辐射时,目前进行杂散光仿真分析常用点源透过率(point transmittance function, PST)作为评价标准^[5]。PST 的定义如公式(7)所示, $E_d(\theta)$ 为离轴角为 θ 的外部点光源经过目标光学系统后在探测器上图像显示的辐照

度, $E_i(\theta)$ 为外部点光源在目标光学系统入瞳处的等效辐照度。

$$PST(\theta) = E_d(\theta)/E_i(\theta) \quad (7)$$

点源透过率可以表征目标光学系统的杂散光抑制能力,其数值越小说明光学系统的杂散光抑制能力越强,杂散光对成像的负面影响越小。通过 Lighttools 等杂散光分析软件经过光线追迹计算可得到光学系统入瞳处的等效辐照度和探测器上的辐照度。

尽管 PST 常用于表征光学系统的杂散光抑制能力,但随着光学系统设计水平发展,对杂散光抑制程度要求日趋严格,在传统 PST 只以图像照度最大值作为计算依据,但是 PST 无法准确表述如图 1 所示的杂散光程度,即在探测器显示的杂散光图像辐照度一致但杂散光光点数量不同的情况。

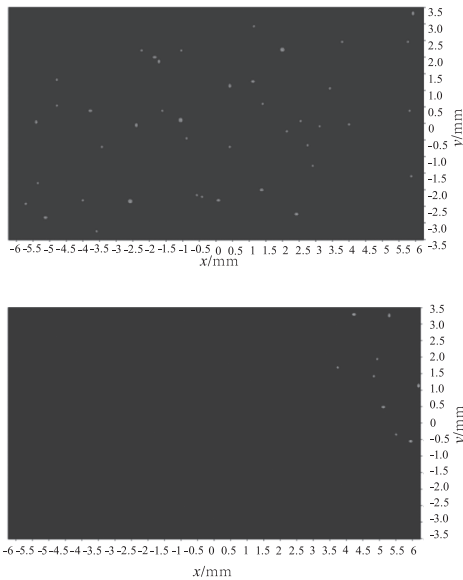


图 1 杂散光辐照图

Fig. 1 Stray light irradiation diagram

2.2.3 PST_η 算法

为了解决当前问题,本文引入能量传递效率用以优化 PST 计算公式,在光学系统各表面之间传播的杂散光都满足辐射能量传递公式^[6]:

$$d\phi_c = BRDF(\theta_i, \psi_i, \theta_o, \psi_o) \cdot d\phi_s \cdot GCF \quad (8)$$

式中, $BRDF(\theta_i, \psi_i, \theta_o, \psi_o)$ 为双向散射分布函数; θ_i, θ_o 分别表示表面入射及出射的方位角; ψ_i, ψ_o 分别表示表面入射和出射的俯仰角。 $d\phi_s$ 为表面出射辐射通量; GCF 为几何构成因子,其由系统结构参数决定,只与各元件表面有关。

能量传递效率定义如式(9)所示, Q_B 为接收器上接收到的辐射总能量, Q 为光学系统入瞳处接收到的辐射总能量。

$$\eta(\theta) = \frac{Q_B(\theta)}{Q(\theta)} \times 100 \% \quad (9)$$

优化后的公式为:

$$PST_\eta(\theta) = PST(\theta) \cdot \eta(\theta) \quad (10)$$

与传统 PST 算法相比, PST_η 引入了整体能量传递效率,在 PST 值一致时,能够更好地反映光学系统像面处杂散光总能量水平。 PST_η 值越小,则说明杂散光对系统的影响越小。

3 杂散光分析模型

3.1 光学系统参数

本文研究的透射式可见光光学系统的系统参数如表 1 所示,光学原理图如图 2 所示,为一种无中间像面的透射式光学系统。此类光学系统因为没有中间像面,所以无法通过设置光阑抑制杂散光,本文将通过所提 PST_η 作为杂散光评价标准,分析光学系统外部杂散光程度并提出相应的杂散光抑制措施。

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Optical system parameters

| 参数 | 值 |
|---------------------|-----------------|
| 工作波段/nm | 400 ~ 700 |
| 焦距/mm | 100 |
| 视场角/(°) | $2\omega = 1.7$ |
| F 数 | 5 |
| 探测器分辨率 | 1024 × 1024 |
| 像元尺寸/ μm | 6 |

3.2 杂散光仿真模型

首先通过三维建模软件建立目标透射式光学系统模型,模型如图 3 所示,之后将模型导入非序列杂散光仿真软件 Lighttools 中,并简化模型以排除一些影响较小的零件,以此提升杂散光分析工作效率。

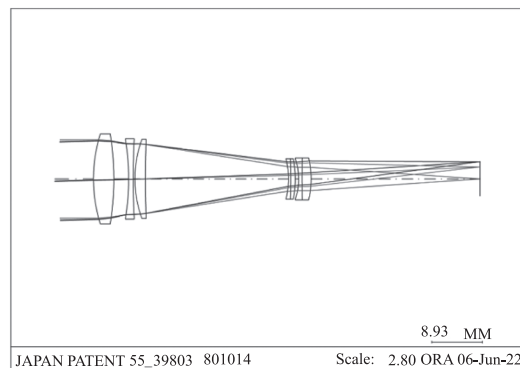


图 2 光学原理图

Fig. 2 Optical schematic

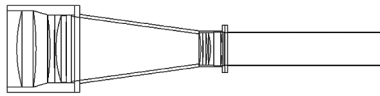


图3 杂散光分析模型

Fig. 3 Stray light analysis model

在杂散光软件中进行杂散光追迹前,需要设置各个部件表面的光学属性,其中包括各个光学元件和机械部件表面对分析光线的透过率、反射率、吸收率、散射情况等参数。

对于散射情况的设置,一些文献中常使用 ABg 模型仿真表面光线散射情况,ABg 是基于双向散射分布函数(bidirectional scattering distribution function, BSDF)的一个经验公式,BSDF 是用于描述物体表面在不同入射条件散射特性,其是入射角、散射角、波长和位置的函数^[7]。对于已经镀膜后的光学表面来说,增透涂层、厌水涂层、保护涂层、带通涂层等会严重影响表面 BSDF,且镀膜层数越多,相较于为镀膜表面之间的 BSDF 参数差异就越大。对于机械表面来说,不同的加工厂商、不同工艺的加工处理方法也会造成很大的 BSDF 参数差异。因此 BSDF 参数难以仿真建模,如果要准确模拟各表面散射特性,需要进行实际表面的 BSDF 测量。本文仿真光机情况为光学透镜前后表面镀增透膜层,透镜侧表面毛面处理,机械表面发黑喷砂处理。综合仿真精度和仿真效率,对光机模型各个表面的散射率参数进行了简化,如表 2 所示,为光机各表面光学属性设置情况。

表 2 光机各表面仿真属性设置

Tab. 2 Simulation property settings of optical and mechanical surfaces

| 表面名称 | 透过率 | 吸收率 | 反射率 | 散射率 |
|----------|------|-------|-------|-----------|
| 光学透镜前后表面 | 0.99 | 0.005 | 0.005 | 0 |
| 光学透镜侧表面 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 发黑喷砂机械表面 | 0 | 0.95 | 0 | 朗伯散射 0.05 |

为了使光机系统的使用环境更贴近实际情况,还需要设置相应的杂散光辐射源和系统仿真精度等参数,通过式(1)~(6)得太阳正入射光机系统入瞳处的辐照度为:186.88 W/m²。

4 杂散光仿真分析及抑制

本文所设太阳光光源相较于于系统光轴离轴角为 1.8°~90°,分析角度间隔为 1.96°共 46 个分析角度,仿真模型中接收器光线追迹阈值为 1×10^{-10} ,每个分析角度分析 1000 万根追迹光线。

4.1 杂散光评价标准验证

为了更好地验证上文所提优化后杂散光评价标准,通过对目标光学系统外部杂散光仿真追迹,研究发现如图 4 所示。

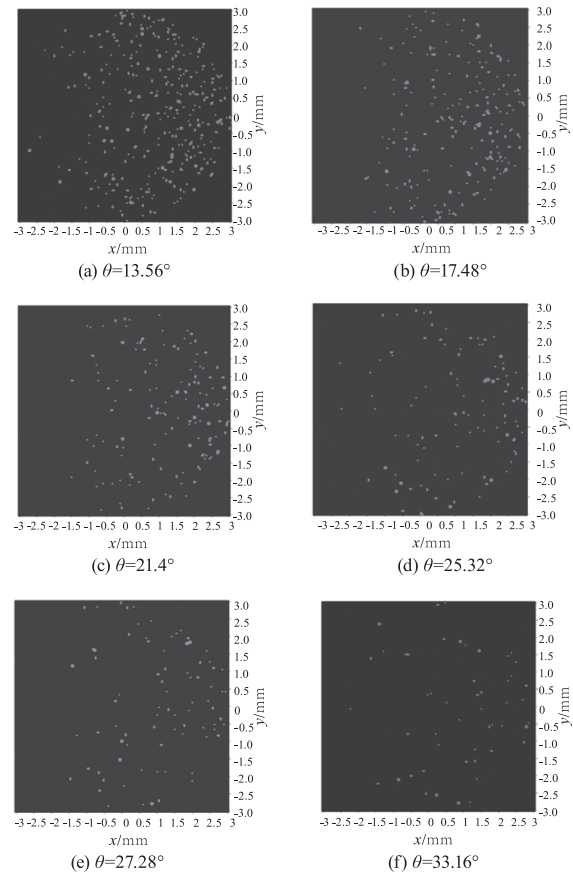


图4 杂散光辐照度图

Fig. 4 Stray light irradiance diagram

图 4 为太阳辐射离轴角 θ 为 13.56°、17.48°、21.4°、25.32°、27.28°、33.16° 时模拟接收器显示的杂散光辐照度图,通过辐照图分析法可知这 6 张杂散光图像所表征的杂散光干扰程度呈逐图下降趋势,如表 3 所示,为经公式(7)、(10)分别计算 PST 和 PST_{η} 的对数值,其趋势如图 5 所示,可知经 PST 公式判定这 6 张成像图的杂散光程度接近一致,显然这并不符合对辐照度图分析所得杂散光严重程度逐渐降低的结论,而经 PST_{η} 公式所得结果更符合辐照图分析法判定杂散光变化趋势,证明在 PST 值一致时, PST_{η} 计算方法相较于传统 PST 计算方法能够表达杂散光变化趋势更细致,从而表征光学系统杂散光严重程度更准确。准确表征光学系统杂散光程度不仅有助于科研人员了解光学系统性能,也能更有针对性提出相应的杂散光抑制措施,对杂散光抑制分析起到指导性作用。

表3 PST 和 PST_{η} 对数值
Tab.3 Logarithm values of PST and PST_{η}

| 离轴角度/(°) | lg(PST) | lg(PST_{η}) |
|----------|---------|--------------------|
| 13.56 | -2.217 | -7.600 |
| 17.48 | -2.222 | -7.795 |
| 21.4 | -2.217 | -7.950 |
| 25.32 | -2.224 | -8.075 |
| 27.28 | -2.228 | -8.158 |
| 33.16 | -2.218 | -8.311 |

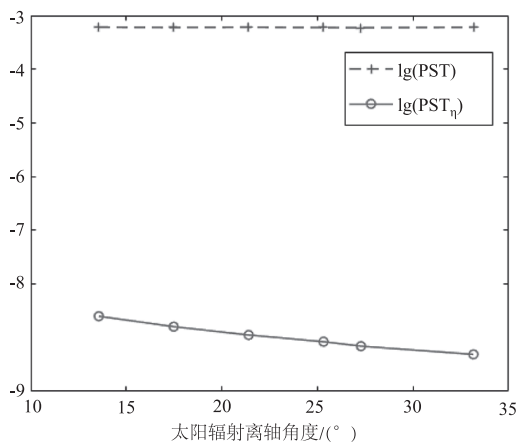


图5 PST 和 PST_{η} 对数值变化趋势图

Fig.5. Change trend of logarithmic values of PST and PST_{η}

4.2 杂散光分析及抑制

由式(8)可知,可以从以下几个方面来减小杂散光:

- ①减小杂散光入射到表面的能量;
- ②减小上一级表面杂散光出射光通量 $d\phi_s$;
- ③减小机械表面的 BRDF 值,例如使用消光漆等;
- ④减小几何构成因子 GCF,例如增加遮光罩等;

通过 Lighttools 软件分析杂散光光线路径,如图6所示,可知除镜片剩余反射引起的“鬼像”外,外部杂散光入射至第二段镜筒内壁上产生的散射光为系统杂散光的重要来源,因此在以上四种方法中,本文选择通过设计消光螺纹来减小几何构成因子,进而减小系统杂散光。设计消光螺纹的主要目的是让杂散光入射到消光螺纹表面时,可以增加多次的反射或散射以减少入射至探测器像面中的能量。本文设计的消光螺纹如图7所示,螺纹为直角三角形,牙尖为 60° 朝向光线入射方向,并对消光螺纹进行氧化发黑及喷砂处理。

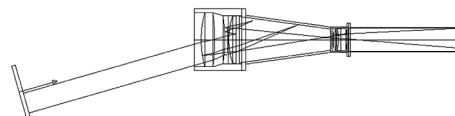


图6 太阳杂散光路径示意图

Fig.6 Path diagram of solar stray light

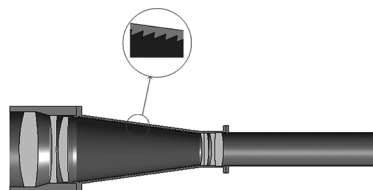
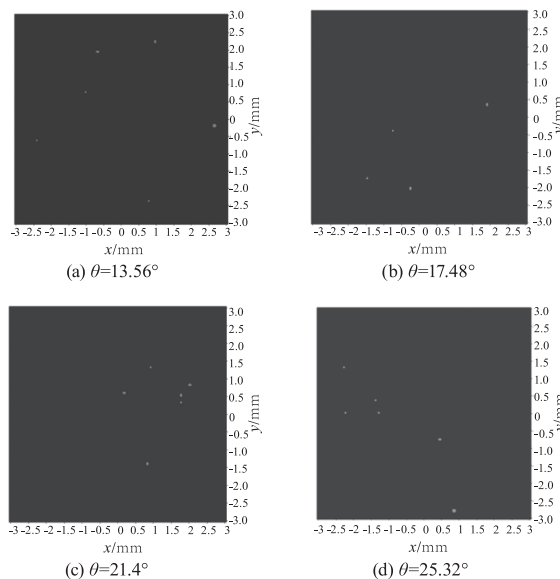


图7 镜筒添加消光螺纹模型

Fig.7 Model of adding extinction thread to mirror barrel

通过仿真对比无消光螺纹和有消光螺纹镜筒的仿真结果,如图8所示,为有消光螺纹后太阳辐射离轴角 θ 为 13.56° 、 17.48° 、 21.4° 、 25.32° 、 27.28° 、 33.16° 时模拟接收器显示的杂散光辐照度图,通过辐照图分析法可知这6张杂散光图像所表征的杂散光干扰程度呈近似一致,公式(10)计算 PST_{η} 值依次为: 5.114×10^{-9} 、 2.976×10^{-9} 、 2.006×10^{-9} 、 8.407×10^{-9} 、 1.803×10^{-9} 、 1.629×10^{-9} ,与辐照图分析法结果吻合,说明本文所提出的 PST_{η} 计算方法适用于各类可见光系统杂散光分析中。如图9所示可以分别得到在太阳光离轴角 $\theta = 1.8^\circ \sim 90^\circ$ 时,不同离轴角下的改进后 PST_{η} 对数值。根据 PST_{η} 对数曲线,可以看出在对第二段镜筒增加了消光螺纹后,目标光学系统对视野外太阳杂散光辐射有明显的抑制作用,证明了抑制杂散光措施的有效性,同时也进一步验证了 PST_{η} 在杂散光分析中作为指导标准的可行性。



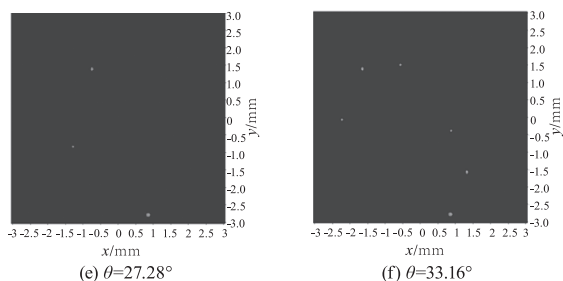
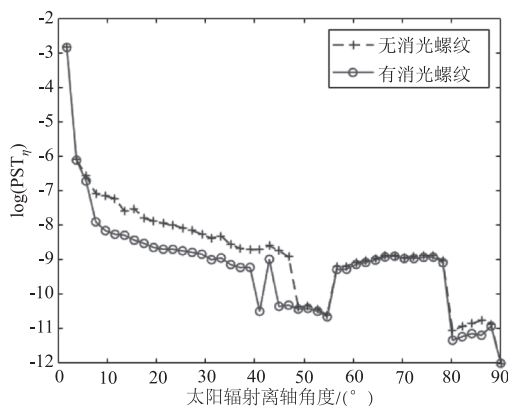


图 8 有消光螺纹杂散光辐照度图

Fig. 8 Stray light irradiance diagram of extinction thread

图 9 不同处理方式下系统 PST_n 对数曲线Fig. 9 Log curves of PST_n of the system under different treatment methods

5 结论

本文说明了现有 PST 值计算方法的不确定因素,提出了一种改进后的 PST_n 计算方法。通过 Lighttools 软件分析了一种透射式可见光光学系统,得到了太阳外部杂散光对光学系统的影响数据,分别计算传统 PST 和改进后 PST_n 与得到的杂散光图像的判断差异,验证了在 PST 值相同时,改进后 PST_n 更能够表征系统杂散光严重程度的准确性。为了进一步验证 PST_n 在实际应用中的可行性,以 PST_n 作为评价方法设计可见光光学系统杂散光抑制措施,通过分析了目标光学系统的杂散光路径,在镜筒内壁设计了相应的消光螺纹,并使用优化后的 PST_n 对无杂散光措施与有杂散光措施的杂散光程度进行评价。结果表明:本文提出的杂散光评价方法 PST_n 能够更准确地反映光学系统的杂散光水平,具备在实际杂散光分析抑制工作中准确评估杂散光程度的指导性作用。同时,本文所提评价方法适用于其他波段系统外部杂散光分析,具有较强的实际应用价值。

参考文献:

- [1] Xiang Jiangua, Liu Chanlao. Simulation of scattering characteristics of optical surface defects based on BRDF [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20 (2): 54 - 60. (in Chinese)
向江华,刘缠牢.基于 BRDF 的光学表面疵病散射特性的仿真研究 [J]. 光学与光电技术, 2022, 20 (2): 54 - 60.
- [2] Wu Liquan. Research on optical design with large field of view based on free-form surface and stray light suppression [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
吴俐权.大视场自由曲面光学系统设计及杂散光抑制技术研究 [D]. 西安:中国科学院大学,中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020.
- [3] Li Yangyang, Liu Lin, Peng Qingqing, et al. Stray radiation analysis of cassegrain system [J]. Laser & Infrared, 2019, 49 (8): 987 - 991. (in Chinese)
栗洋洋,刘琳,彭晴晴,等.卡塞格林系统的杂散辐射分析 [J]. 激光与红外, 2019, 49 (8): 987 - 991.
- [4] Song Xincheng, Zhang Yu, Jia Yuchao, et al. Stray light analysis and suppression structure design of transmissive infrared lens [J]. Infrared Technology, 2018, 40 (11): 1065 - 1070. (in Chinese)
宋新成,张宇,贾钰超,等.透射式红外镜头杂散光分析与抑制结构设计 [J]. 红外技术, 2018, 40 (11): 1065 - 1070.
- [5] Chen Xing, Hu Chunhui, Yan Changxiang, et al. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view [J]. Chinese Optics, 2019, 12 (3): 678 - 685. (in Chinese)
陈醒,胡春晖,颜昌翔,等.大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制 [J]. 中国光学, 2019, 12 (3): 678 - 685.
- [6] Pei Linlin, Xiang Libin, Lü Qunbo, et al. Research on the stray light suppression for super-resolution optical system [J]. Acat Photonica Sinica, 2017, 46 (11): 182 - 187. (in Chinese)
裴琳琳,相里斌,吕群波,等.超分辨卫星载荷光学系统杂散光抑制 [J]. 光子学报, 2017, 46 (11): 182 - 187.
- [7] Xu Liang, Gao Limin, Zhao Jianke, et al. Calibration of stray light based on point source transmittance measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24 (7): 1607 - 1614. (in Chinese)
徐亮,高立民,赵建科,等.基于点源透过率测试系统的杂散光标定 [J]. 光学精密工程, 2016, 24 (7): 1607 - 1614.