



基于二维函数PST的离轴四反系统杂散光分析

杨开宇 金宁 杨丹 普龙 徐曼 董树林 苏雷

Stray light analysis of off-axis four mirrors system based on two-dimensional function PST

Yang Kaiyu, Jin Ning, Yang Dan, Pu Long, Xu Man, Dong Shulin, Su Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220330>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学遥感卫星杂散光扫描测试系统

Scanning measuring system of stray light for optical remote sensing satellite

红外与激光工程. 2017, 46(9): 913001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0913001>

星敏感器光学系统设计及杂散光抑制技术研究

Optical system design of star sensor and stray light suppression technology

红外与激光工程. 2021, 50(9): 20210015 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210015>

激光引力波望远镜镜面杂散光测试方法

Test method of stray light on mirror surface of laser gravitational wave telescope

红外与激光工程. 2019, 48(9): 913001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0913001>

偏视场光学系统中心遮光罩设计

Centric baffle design of partial field optical system

红外与激光工程. 2017, 46(3): 318002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0318002>

离轴三反系统中视轴的偏转误差研究

Study on line-of-sight deflection error for off-axis three mirror system

红外与激光工程. 2018, 47(9): 918005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0918005>

大口径离轴反射镜四点热锁辅助支撑设计与验证

Design and verification of four auxiliary support points by heat lock for large aperture off-axis mirror

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20210007 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210007>

基于二维函数 PST 的离轴四反系统杂散光分析

杨开宇, 金 宁, 杨 丹, 普 龙, 徐 曼, 董树林, 苏 雷

(昆明物理研究所 第一研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 离轴四反系统是顺应多光合一机载观瞄系统未来发展的光机核心部件。该类型系统容易受到视场外部强杂散光的影响, 系统杂散光的点源透射率 (PST) 一般要求不大于 10^{-4} 量级, 因此, 对系统 PST 进行全方位扫描计算是分析和抑制其杂散光的关键。针对系统的非对称性, 将 PST 作为随杂散光入射空间水平角和垂直角变化的二维函数, 用以评价外部杂散光的影响, 同时建立了水平角、垂直角与光机建模所需绕坐标轴旋转的过程量的对应转换关系, 编制了仿真控制程序, 通过调用 LightTools 软件实现杂散光的自动追迹和 PST 的二维扫描计算。对多光合一离轴四反系统, 计算了整个入射半球空间内、所有方向的杂散光对应的 PST 分布情况, 从而筛选出对机载观瞄应用影响较大的三路杂散光, 寻找到其传输的路径和关键表面。基于此, 设计了内部遮光罩和挡光环, 优化系统内部的杂散光陷阱结构, 使得系统的 PST 峰值由原来 10^{-1} 量级降低至 10^{-4} 量级, 在规避角范围以外小于 10^{-7} , 可满足机载光电观瞄系统的使用要求。为离轴四反系统杂散光分析及抑制提供了依据。

关键词: 杂散光; 离轴四反系统; 扫描计算; 点源透射率 (PST); 机载观瞄

中图分类号: O435 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220330

Stray light analysis of off-axis four mirrors system based on two-dimensional function PST

Yang Kaiyu, Jin Ning, Yang Dan, Pu Long, Xu Man, Dong Shulin, Su Lei

(The First Institute, Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Off-axis four mirrors systems are opto-mechanical core components of multiband common aperture airborne observation and aiming systems to adapt to their future development. This type of systems is easily affected by strong stray light outside the field of view. The point source transmittance (PST) of stray light in those systems is generally required to be no more than 10^{-4} order of magnitude. Accordingly, omnidirectional scanning calculation of PST is the key to analyze and suppress stray light of them. For the asymmetry of the optical system, PST as a two-dimensional function varying with the horizontal and vertical angle of stray light was set up to evaluate the influence of external stray light. Besides, the conversion relationship between the horizontal and vertical angle and the process quantity of rotation about coordinate axis required for opto-mechanical modeling was established. The simulation control program was compiled, which realized the automatic tracking of stray light and the two-dimensional scanning calculation of PST by calling LightTools software. For a multiband common aperture off-axis four mirrors system, the PST distribution of stray light in all directions within the

收稿日期: 2022-05-16; 修订日期: 2022-06-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0701200)

作者简介: 杨开宇, 女, 高级工程师, 博士, 主要从事光学系统设计与仿真方面的研究。

whole incident hemispherical space was calculated, so as to screen out 3 series of stray light that had a great impact on the application of airborne observation and then find their transmission paths and key surfaces. Based on this, the inner baffles and vanes were designed to optimize the stray light trap structure in the system, so that the peak value of PST of the system was reduced from the original 10^{-1} level to 10^{-4} level, especially less than 10^{-7} outside the avoidance angle range, which could meet the application requirements of airborne photoelectric observation and aiming systems. It provides a basis for the analysis and suppression of stray light of off-axis four mirrors systems.

Key words: stray light; off-axis four mirrors system; scanning calculation; point source transmittance (PST); airborne observation and aiming

0 引言

近年来,机载光电观瞄系统朝着长焦大口径、轻小型化、多光合一的方向发展^[1-2]。离轴四反系统作为顺应多光合一机载观瞄系统发展趋势、满足发展需求的光机核心部件,已持续引起国内外研究人员的关注^[3]。离轴反射式成像系统容易实现大口径、长焦距,不受波段影响,可实现可见光、短波红外、中波红外或长波红外等宽光谱范围的共口径多光合一成像,也不存在中心遮挡问题^[4];此外,离轴四反光学系统与传统的离轴三反系统相比,具有更强的离轴像差校正能力,更利于共口径多光合一成像系统的像质优化。因此,离轴四反系统在机载多光合一观瞄应用背景下具有高像质、高分辨、高集成的优势。

对于离轴多反射系统,由于系统光路折叠紧密,光线可能会经过非正常反射顺序的路径、或经过反射镜安装结构件的散射进入像面^[5],因此离轴多反射系统容易受到视场外部杂散光光源(如太阳)的影响,严重干扰对目标的观察。就机载观瞄系统而言,当外部杂散光入射角小于规避角(一般为 30° 以上)时,其点源透射率(PST)一般要求控制在 10^{-4} 量级;入射角大于规避角时,要求控制在 10^{-5} 以下^[6]。对于非旋转对称的离轴四反系统,PST 是随外部杂散光入射的空间水平角和垂直角两个因素而变化的量。目前国内已有相关文章针对离轴反射式系统的 PST 开展了分析研究,但都将其作为以某个方向离轴角为变量的一维函数来进行扫描计算^[7-9],可能会将位于扫描方向之外、PST 值不满足指标的一些空间角度遗漏。

综合上述因素,文中将 PST 作为二维函数,针对离轴四反系统建立全方位扫描计算 PST 的程序,获得 PST 随杂散光入射水平角及垂直角分布的曲面,从

而能够在所有的空间角度中筛选出杂散光影响较大的情形,寻找其路径,进而提出优化抑制措施,降低其对机载观瞄应用的影响。

1 二维函数 PST 的扫描计算程序设计

1.1 评价离轴四反系统杂散光影响的参数

PST 是评价光学系统外部杂散光的重要参数,它的定义为:光学系统视场外离轴角为 θ (入射方向与光轴的夹角)的光源经光学系统后,在像面产生的辐照度 $E_i(\theta)$ 与其在光学系统入瞳处辐照度 $E_0(\theta)$ 的比值^[10],是随离轴角 θ 变化的函数,记为 $F_{\text{PST}}(\theta)$ 。PST 值越大,系统越容易受到杂散光的干扰。利用杂散光软件的仿真可以计算各离轴角度的 E_0 和 E_i 值,进而获得 PST 值,并绘制成 PST 随离轴角分布的曲线。

在传统的评价方法中,PST 是一维函数,通常只计算光学系统视场外子午或弧矢两条线上的离轴角 θ 对应的 PST 值。但对于非旋转对称的离轴四反系统,杂散光可能在整个入射半球空间内以任意角度入射,其方向应由水平角 θ_x 和垂直角 θ_y 两个量确定,如图 1 所示,其中, θ_x 为入射光线在 x - z 平面上的投影与 z 轴的夹角, θ_y 为入射光线在 y - z 平面上的投影与 z 轴的夹角。因此, PST 也随 θ_x 和 θ_y 两个量变化,是二维函数,记为 $F_{\text{PST}}(\theta_x, \theta_y)$,其数学表达式为:

$$F_{\text{PST}}(\theta_x, \theta_y) = \frac{E_i(\theta_x, \theta_y)}{E_0(\theta_x, \theta_y)} \quad (1)$$

对于离轴四反系统,需要通过对整个半球空间的所有 θ_x 和 θ_y 进行二维扫描,计算各个入射方向对应的 PST 值,获取 PST 随 θ_x 和 θ_y 分布的曲面,从而在所有可能的空间角度中无遗漏地筛选出杂散光影响较大的人射角度。

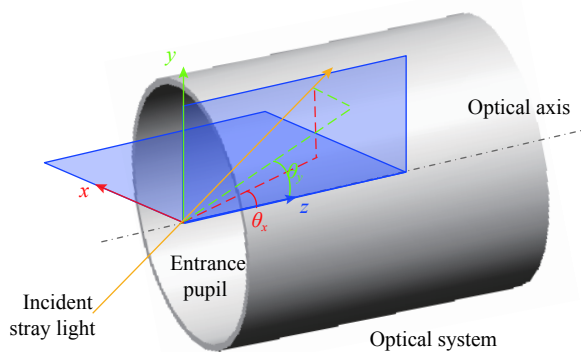


图 1 杂散光入射的水平角 θ_x 和垂直角 θ_y

Fig.1 Horizontal angle θ_x and vertical angle θ_y of stray light incidence

1.2 空间水平角和垂直角的建模转换

在通过杂散光仿真获取 E_i 和 E_0 之前,需要建立该空间方向入射的杂散光源模型。由于水平角 θ_x 和垂直角 θ_y 是描述杂散光入射方向空间姿态的状态量,在对杂散光源进行光机建模的过程中无法直接实现该状态,需要将初始入射方向(入瞳处光轴方向)向量多次绕自身局部坐标系的坐标轴旋转,以达到所需 θ_x 和 θ_y 对应的空间姿态。对于一维函数 PST 的计算,杂散光入射空间方向仅由 θ_x 和 θ_y 中的一个值确定,建模时光源绕坐标轴的旋转量直接等于 θ_x 或 θ_y 值。而对于二维函数 PST,入射空间方向由 θ_x 和 θ_y 两个值共同确定,光源绕坐标轴的旋转量需要计算获得。

根据三维空间向量绕坐标轴旋转变换的原理,假设向量 n_1 自身局部坐标系与全局坐标系方向一致,如果按照光机建模仿真软件的旋转规则^[11],向量先以左旋绕自身局部 x 轴转角度为 α ,再以左旋绕新生成的自身局部 y 轴旋转角度为 β (如图 2 所示),在全局坐标系中,旋转以后新生成的向量 n_2 可以通过旋转矩阵的乘法计算得到^[12-13]:

$$n_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}^{-1} n_1 \quad (2)$$

在离轴四反系统的光机建模时,按照图 1 所示的位置和方向设定全局坐标系,为了提高计算效率,将

杂散光的初始入射方向向量 n_1 与全局坐标 z 轴重合,经过对公式 (2) 的化简和推导,可以获得对不同入射方向杂散光源建模所需要的过程量 α 、 β 与描述空间姿态的状态量 θ_x 、 θ_y 的对应关系:

$$\begin{cases} \alpha = \theta_x \\ \beta = -\arctan\left(\frac{\tan\theta_x}{\cos\theta_y}\right) \end{cases} \quad (3)$$

计算 $F_{PST}(\theta_x, \theta_y)$ 时,可根据公式 (3) 将 θ_x 、 θ_y 值转换为相应的 α 、 β 值,即可在杂散光仿真分析软件中,针对不同入射方向的空间姿态建立光源模型,经仿真得到 $E_i(\theta_x, \theta_y)$ 和 $E_0(\theta_x, \theta_y)$,从而求得 $F_{PST}(\theta_x, \theta_y)$ 。

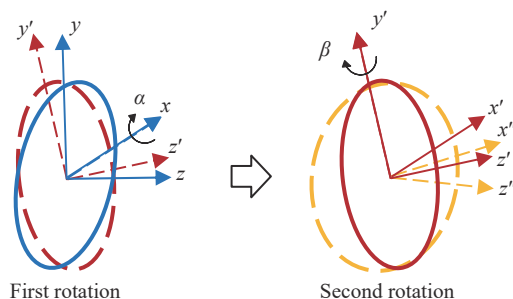


图 2 杂散光源建模的旋转规则

Fig.2 Rotation rules for modeling stray light source

1.3 PST 的二维扫描计算流程

计算二维函数 PST 的空间分布情况,本质是扫描所有可能的空间角度进行杂散光仿真。具体实现过程如下:针对系统的光机模型,在杂散光入射空间内对 θ_x 、 θ_y 值进行二维采样,每一个采样点可确定一个杂散光的入射空间角度;对于每个采样点,通过公式 (3) 将 θ_x 、 θ_y 值转换为相应的 α 、 β 值,以建立杂散光源模型;在上述模型基础上进行杂散光仿真,得到 E_i 和 E_0 ,并由公式 (1) 计算出 PST 值。将所有 θ_x 和 θ_y 采样完成,即能够获得二维函数 PST 随 θ_x 和 θ_y 的分布曲面。其流程如图 3 所示。

由于需要在整个入射半球空间内进行 PST 的二维扫描,搜索计算量非常庞大,因此必须通过程序控制完成^[14]。根据以上流程编制了二维函数 PST 的扫描计算程序,利用 Matlab 完成了空间水平角和垂直角的扫描和建模过程量的转换,然后基于杂散光仿真软件 LightTools 的扩展宏语言调用该软件,完成杂散光源建模、杂散光模拟和 PST 值计算。

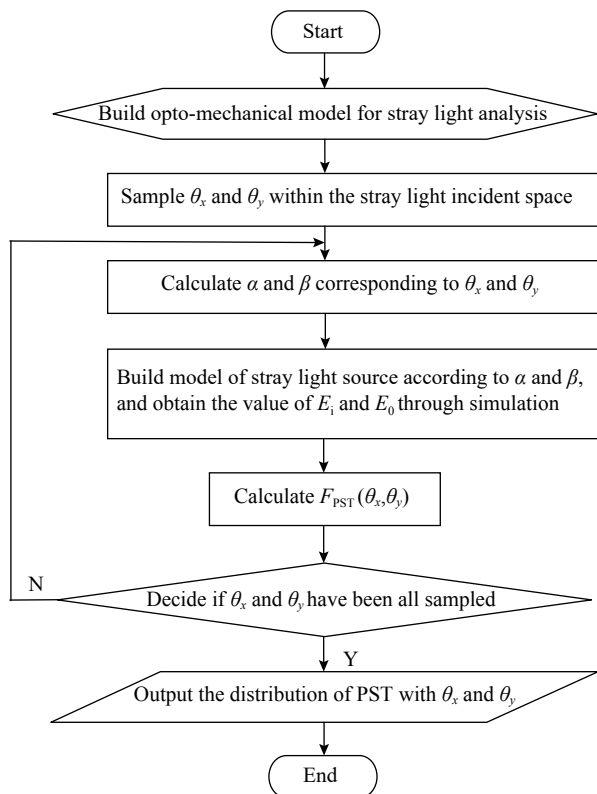


图 3 二维函数 PST 随 θ_x 和 θ_y 分布的扫描计算流程图

Fig.3 Scanning calculating flow diagram of the distribution of bivariate function PST with θ_x and θ_y .

2 离轴四反系统杂散光分析

2.1 杂散光分析模型建立

基于上述建立的程序,对某型多光合一离轴四反望远系统开展杂散光分析。利用 LightTools 对光机系统进行建模,其模型如图 4 所示。光学系统为四片离轴自由曲面反射镜构成的开普勒式无焦望远系统,其指标如表 1 所示;机械结构主要为安装和支撑四片反射镜的镜座。在系统出瞳后端加入分光镜及可见光、短波红外、中波红外等不同波段的成像分系统,即可实现紧凑的共口径多光合一成像。在系统中以中波红外波段为分析对象进行杂散光仿真分析。由于该光学系统为无焦望远系统,需要在其出瞳后端建立虚拟的理想透镜和像面接收器,以统计进入望远系统后端观察视场的光线辐射能量及其分布情况。

系统的机械支撑结构件为金属件,其表面由具有一定随机分布规律的细微结构组成,表面散射模型不能由理想的镜面反射或漫反射描述,而是介于二者之

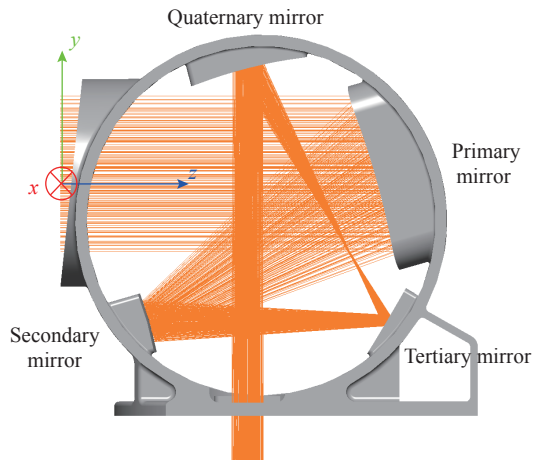


图 4 离轴四反望远系统光机模型

Fig.4 Opto-mechanical model of the off-axis four mirrors telescope

表 1 离轴四反望远系统指标

Tab.1 Index of the off-axis four mirrors telescope system

Parameter	Value
Wavelength/ μm	VIS: 0.65-0.9
	SWIR: 0.9-1.7
	MWIR: 3.7-4.8 (analyzed)
Entrance pupil diameter/mm	170
Field of view/ $^\circ$	3 \times 3
Magnification	5 \times

间。当一束光照射到金属零件表面,在一定的角度方向会产生较强的波瓣形散射,波瓣的宽度取决于金属表面的纹理和粗糙程度^[15]。对用于工程计算的简化建模,金属表面的散射一般采用高斯散射模型,如图 5 所示,其散射能量随不同方向的角度而变化,变化规律服从高斯分布,由以下公式确定:

$$I(\varphi) = I_0 \exp\left[\left(-\frac{1}{2}\right)\left(\frac{\varphi}{\sigma}\right)^2\right] \quad (4)$$

式中: φ 为光线的散射方向与镜面反射方向的夹角; $I(\varphi)$ 为散射光线在 φ 方向的辐射强度; I_0 为散射光线在镜面反射方向的辐射强度; σ 为高斯分布的标准差,以角度为单位,它与表面的粗糙度有关:粗糙度越大, σ 越大,散射模型越接近朗伯散射;反之越接近镜面反射。

系统的机械结构件为铝合金零件,根据上述分析,采用高斯散射模型;其表面进行了消光处理,与吸

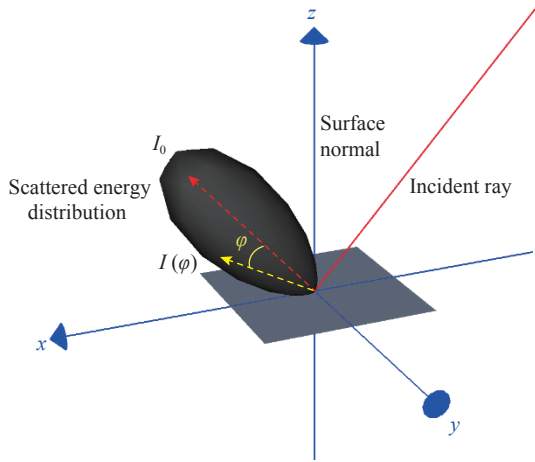


图 5 金属结构件表面高斯散射模型

Fig.5 Gaussian scattering model of metal structure surface

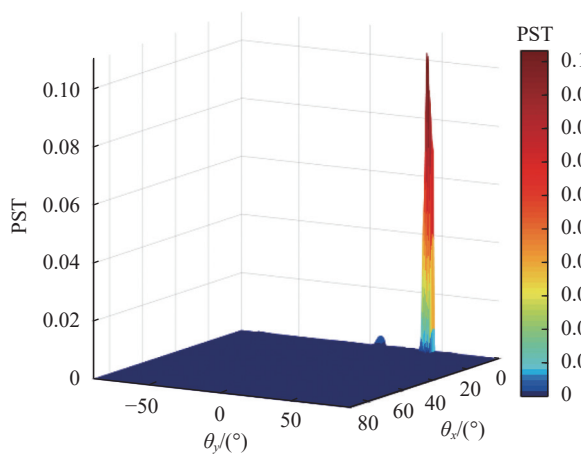
收率 90% 朗伯散射面较为接近^[10], 因此, 将该高斯散射面的 σ 设置为最大角度 30° ^[11], 吸收率 90%, 反射率 10%。

系统的反射镜表面为镀有宽波段高反膜层的金属抛光面, 反射率可达 93% 以上^[16-17], 且表面散射非常弱。如引言中所述, 机载观瞄系统 PST 要求不高于 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级, 对于该量级的仿真精度要求, 反射镜表面的散射可以忽略不计, 按理想镜面反射设置其属性; 为提高光线追迹效率, 反射率设为 100%。

综上, 对系统进行杂散光仿真建模时, 针对中波红外的分析波段, 根据实际加工情况及应用需求, 按表 2 所示的数据来设置表面属性。

2.2 PST 扫描计算

基于前面建立的光机模型、表面属性模型和 θ_x 、



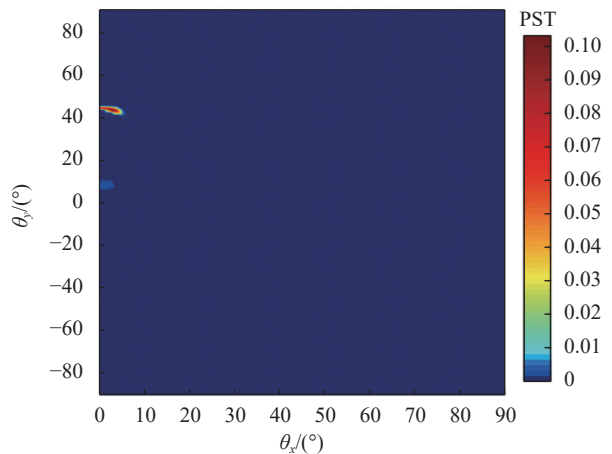
(a) 三维视图
(a) 3D view

表 2 杂散光仿真的表面属性设置
Tab.2 Setting of surface property for stray light simulation

Components & parameters		Properties
Wavelength/ μm		3.7-4.8
Mirrors	Surface type	Specular reflecting
	Reflectivity	100%
Structures	Surface type	Gaussian scattering
	Reflectivity	10%
	Absorptivity	90%
$\sigma/(\text{°})$		30

θ_y 转换方法, 利用编制计算程序对多光合一离轴四反系统在整个半球空间内的入射杂散光 PST 值进行二维扫描计算。由于系统关于 x 轴对称、关于 y 轴非对称, 水平角 θ_x 取值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 、垂直角 θ_y 取值为 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 扫描采样间隔为 1° ; 通过 LightTools 完成杂散光线的蒙特卡洛采样追迹^[18], 每次追迹 10^7 条光线。扫描计算所得的 PST 分布曲面如图 6 所示。

通过图 6 可以看出, 在整个半球空间内有三个区域的 PST 值较大, 表明离轴四反系统主要受三路杂散光影响: 杂散光 1 分布在 θ_x 为 $0^\circ \sim 6^\circ$ 、 θ_y 为 $41^\circ \sim 44^\circ$ 区域内, PST 峰值大于 10^{-1} ; 杂散光 2 分布在 θ_x 为 $0^\circ \sim 3^\circ$ 、 θ_y 为 $6^\circ \sim 10^\circ$ 区域内, PST 峰值大于 3×10^{-3} ; 杂散光 3 分布在 θ_x 为 $12^\circ \sim 18^\circ$ 、 θ_y 为 $12^\circ \sim 16^\circ$ 区域内, PST 峰值大于 8×10^{-4} 。这三路杂散光的 PST 值不满足机载观瞄系统的使用要求, 需要找到其传输路径, 提出相应的抑制措施。



(b) θ_x - θ_y 平面视图
(b) θ_x - θ_y plane view

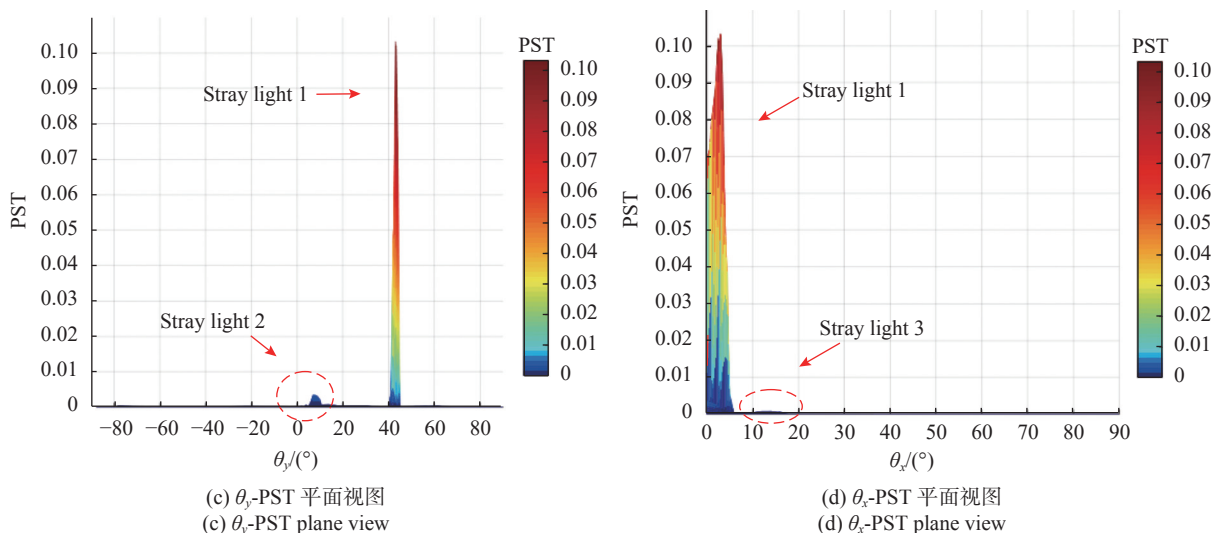


图 6 二维 PST 随 θ_x 、 θ_y 的分布曲面

Fig.6 Distribution surface of two-dimensional PST with θ_x and θ_y

同时,采用一维 PST 函数的分析方法,分别计算了离轴四反系统子午和弧矢两条线上的 PST 值,其分布情况分别如图 7(a)和图 7(b)所示。根据两条线上的 PST 分布信息能够筛查出对机载观瞄影响较

大的杂散光 1 和杂散光 2,但不能筛查出杂散光 3。由此看来,采用二维函数 PST 的全方位扫描分析更有助于筛查出杂散光风险,不会遗漏每一个空间角度。

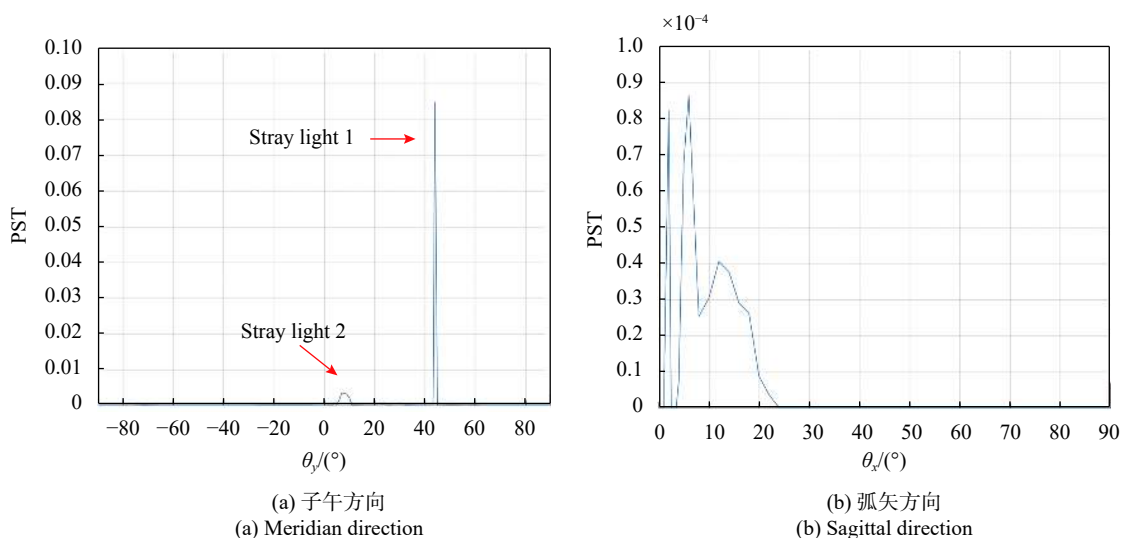


图 7 一维 PST 的分布曲线

Fig.7 Distribution curve of one-dimensional PST

2.3 杂散光路径分析

根据 PST 计算结果,结合逆向光线追迹,寻找前面计算的 PST 值较大的三路杂散光传输的路径和关键表面。图 7 显示了三路杂散光路径及其在像面上的照度分布。杂散光 1 经四片反射镜的非顺序反射形成,其路径为四镜-主镜-次镜-三镜-四镜,如图 8(a)所示,关键表面为四镜的镜面。杂散光 2 和

杂散光 3 由镜座内框表面的一次散射和反射镜的反射形成,其中杂散光 2 的路径为主镜-镜座-三镜-四镜,如图 8(b)所示,杂散光 3 的路径为主镜-镜座-主镜-次镜-三镜-四镜,如图 8(c)所示,两路杂散光的关键表面均为镜座的内框表面。以上杂散光路径和关键表面分析可为杂散光抑制优化设计提供指导依据。

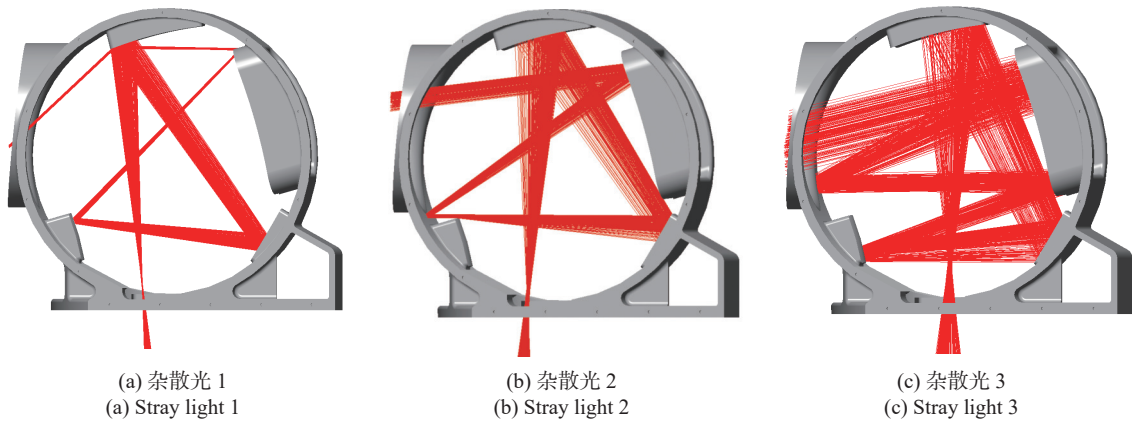


图 8 杂散光路径

Fig.8 Ray path of stray light

2.4 遮光罩设计

对于多反射式系统的外部杂散光抑制,最常见的方法是添加较长的外部遮光罩^[19-21],它可以使外部杂散光在规避角以外,PST降低到 10^{-10} 以下。但该方法主要用于对PST值要求很严、对布局体积要求相对较宽的空间光电系统。而对于高度集成的机载观瞄系统,这不仅会增加的体积,而且会破坏整个吊舱的球形布局;另外,此类系统相较于空间光电系统,在应用中受强光影响的概率较低,系统杂散光PST值在规避角之外降至 10^{-5} 量级以下即可满足应用需求。因此,基于前面对离轴四反系统分析的三路杂散光传输路径及关

键表面,在不增加系统体积、不遮挡成像光线的前提下,进行内部遮光罩的设计,以阻断外部杂散光传输。

杂散光1由大角度入射的外部光线被四镜反射而形成,可在相应位置增设四镜遮光罩,如图9(a)、(c)所示,隔离未经吸收衰减的强光入射。杂散光2和杂散光3均经由系统入口处的镜座内壁散射形成,所以需要在该位置设计添加一个入口遮光罩,如图9(b)、(c)所示。同时,依据光线入射角度在遮光罩内壁设计具有一定锥角的挡光环,并对挡光环微元的半径、厚度、间隔、倾斜角进行优化,以限制遮光罩内壁新引入的散射。

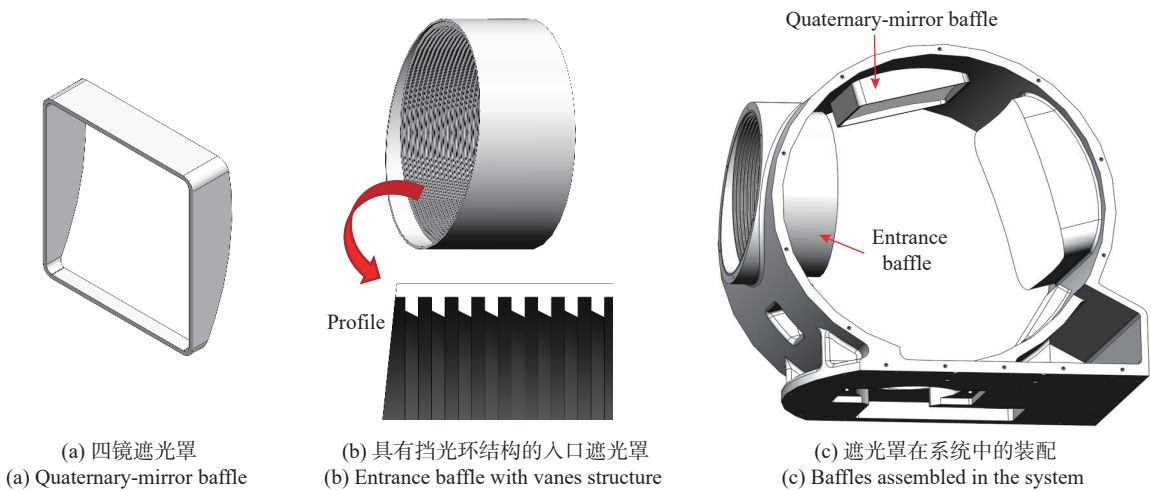


图 9 离轴四反系统的杂散光抑制结构

Fig.9 Structures to suppress stray light for the off-axis four mirrors system

2.5 杂散光抑制效果评价

在添加设计遮光罩后,通过再次二维扫描计算系

统的PST值,对离轴四反系统的杂散光影响大小进行评价,验证杂散光抑制措施的有效性。计算结果如

图 10 所示, 整个半球空间内入射杂散光的光学串扰 (PST) 峰值小于 3×10^{-4} , 远远低于添加遮光罩前的 10^{-1} 量级; 在水平角 θ_x 超过 40° 、垂直角 θ_y 超过 30° 的大角度入射

区域, PST 值小于 10^{-7} 。该指标能够满足机载观瞄系统的应用需求。

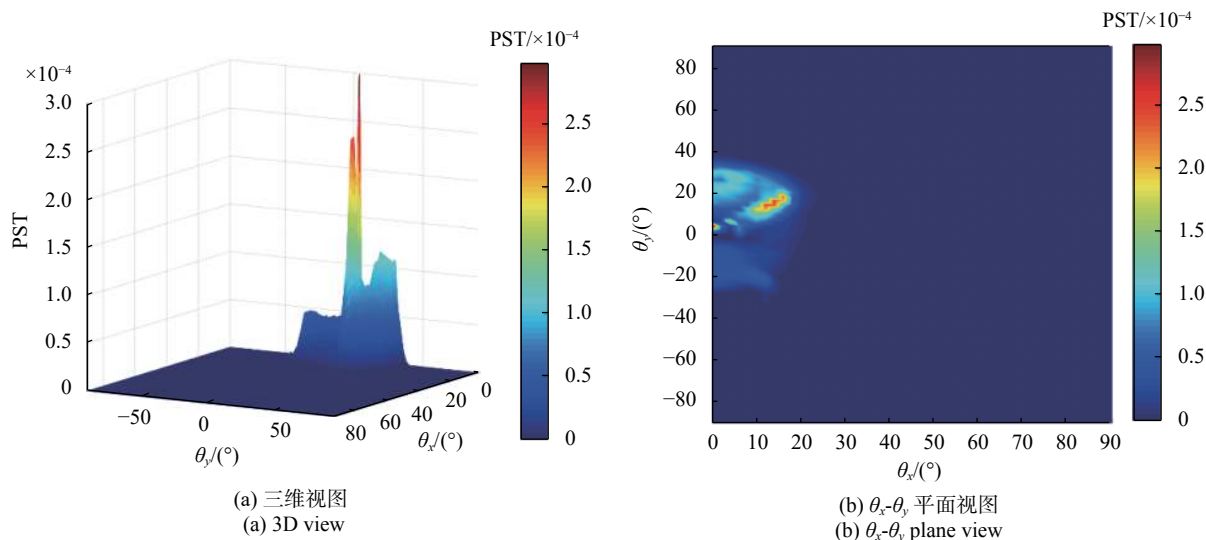


图 10 系统添加遮光罩后的 PST 分布图

Fig.10 Distribution diagram of PST of the system with baffles

3 结论

针对离轴四反系统的非对称性, 采用二维函数 PST 评价系统外部杂散光的影响, 并确立了描述杂散光入射方向的水平角 θ_x 、垂直角 θ_y 与光机建模过程量 α 、 β 的对应转换关系, 以计算 PST 随 θ_x 和 θ_y 的分布曲面, 并结合 Matlab 和 LightTools 的扩展宏语言编制了二维函数 PST 的扫描计算程序。在此基础上, 对机载观瞄应用的多光合一离轴四反光机系统进行了杂散光分析, 在整个半球空间内, 扫描计算了不同入射方向的杂散光对应的 PST 分布情况, 筛选出了影响较大的三路杂散光。同时寻找到其传输的路径和关键表面, 通过添加内部遮光罩对其进行杂散光抑制设计, 显著降低了系统 PST 在整个空间分布的量级, 可满足机载光电观瞄系统的使用要求。所建立的分析方法相较于过去采用一维函数 PST 的传统评价方法, 弥补了其可能遗漏空间角度的缺陷, 更全面地衡量非对称系统的杂散光影响情况, 为离轴反射式系统杂散光仿真分析及抑制优化设计提供了依据。

对某型多光合一离轴四反望远系统的杂散光仿真模型做了一定程度的简化, 例如, 将反射镜设置为纯理想的反射模型。该仿真属于杂散光趋势仿真, 虽

然计算的 PST 值不够精确, 但从工程应用来说, 能够准确反映趋势, 高效指导杂散光抑制设计。未来将进一步开展细化模型研究, 实现精度仿真。

参考文献:

- [1] Chen Xiaoyang, Gao Ming. Design of airborne dual-band common aperture photoelectric aiming optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200322. (in Chinese)
- [2] Deng Jian, Qu Rui, Huang Jianbing. Several ways to realize multi-band common aperture optical imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201017. (in Chinese)
- [3] Xia Chunqiu, Zhong Xing, Jin Guang. Design of the off-axis four mirrors system by differential equations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0922002. (in Chinese)
- [4] Yang Tong, Duan Yingzhe, Cheng Dewen, et al. Freeform imaging optical system design: Theories development, and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0108001. (in Chinese)
- [5] Zhang T C, Wang Z, Tang T J. The design of 3-mirror off-axis optical system with stray light analysis based on vector aberration theory [C]//Proceedings of SPIE, 2020, 11525:

- 115251B.
- [6] Fu Qiang. Research on airborne mid-wave/long-wave dual color infrared optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [7] Zhao Y C, Xu Y J, Chen C Z, et al. Optical design and stray light analysis of the space infrared optical system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 24(1): 32-36.
- [8] Wang C C, Wei L M, Tian X, et al. New baffle design and analysis of long-wave infrared camera [J]. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 242: 166820.
- [9] Li T R, Wang J F, Zhang X M, et al. Stray light analysis of the Xinglong 2.16-m telescope [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(3): 30.
- [10] Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, et al. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822002. (in Chinese)
- [11] Synopsys, Inc. Core module user's guide, version 9.1 [Z]. Synopsys, 2020.
- [12] Geng Lei, Lao Dabao, Yang Xueyou, et al. Key techniques on rotating laser plane coordinate measuring system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2274-2280. (in Chinese)
- [13] Zhang Shun, Huang Yuchun, Zhang Wenjun. Relative position calibration of multibeam LiDAR based on coplanar constraints [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0330003. (in Chinese)
- [14] Lv Yinhuan. Simulation analysis of influence of aerodynamic heating effect of dome window on rosette scan system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190520. (in Chinese)
- [15] Wang Fangbin, Yi Long, Wang Feng, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surfaces based on diffuse reflection optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 1129002. (in Chinese)
- [16] Mao L Y, Geng Y Q, Cao Y Z, et al. Uniform high-reflectivity silver film deposited by planar magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2021, 185: 109999.
- [17] Mao Liyang. Research on deposition of high-reflective film on optical element integrated with free-form surfaces by magnetron sputtering [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] Lu Qiang. Thermal radiation stray light integration method of infrared camera in geostationary orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190457. (in Chinese)
- [19] Clermont L, Aballea L. Stray light control and analysis for an off-axis three-mirror anastigmat telescope [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(5): 055106.
- [20] Hammar A, Christensen O M, Park W, et al. Stray light suppression of a compact off-axis telescope for a satellite-borne instrument for atmospheric research [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10815: 108150F.
- [21] Shi Yijun, Xu Ziqi. Optical system design of star sensor and stray light suppression technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210015. (in Chinese)