

鬼像影响下的调制传递函数计算模型

肖鹏益 刘铭鑫 闫磊 胡铭钰 张新

An MTF calculation model under the influence of ghost images

XIAO Peng-yi, LIU Ming-xin, YAN Lei, HU Ming-yu, ZHANG Xin

引用本文:

肖鹏益, 刘铭鑫, 闫磊, 胡铭钰, 张新. 鬼像影响下的调制传递函数计算模型[J]. *中国光学*, 2024, 17(5): 1183–1191. doi: 10.37188/CO.2023–0121

XIAO Peng-yi, LIU Ming-xin, YAN Lei, HU Ming-yu, ZHANG Xin. An MTF calculation model under the influence of ghost images[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1183-1191. doi: 10.37188/CO.2023-0121

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0121>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view
中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 678 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0678>

光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system
中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system
中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 638 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638>

激光合束光学系统气体热效应影响分析

Influence of gas thermal effect on beam combination system
中国光学 (中英文). 2018, 11(1): 108 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0108>

基于空间光调制器的层析成像技术

Tomography technology based on spatial light modulator
中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1338 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1338>

基于正解过程的Risley棱镜光束指向控制精度分析

Analysis of beam steering control precision for Risley prisms based on forward solution
中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 507 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0507>

文章编号 2097-1842(2024)05-1183-09

鬼像影响下的调制传递函数计算模型

肖鹏益^{1,2}, 刘铭鑫^{1*}, 闫磊¹, 胡铭钰¹, 张新¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了探究鬼像对成像系统性能的影响, 构建了二次反射产生的鬼像影响下的调制传递函数 (MTF) 的计算模型。本文首先介绍了在近轴近似下的鬼像分析与描述的方法。接着, 从调制传递函数的定义出发, 考虑鬼像在像面处的照度对像面调制的影响, 构建了鬼像影响下的 MTF 计算模型。通过对一系统进行实例计算, 并与仿真结果进行对比, 均方误差最大不超过 0.049373, 进而验证了该模型的准确性。同时针对误差较大的结果进行了详细分析, 明确了该计算方法的适用范围。研究表明, 利用近轴近似的方法计算鬼像影响下的 MTF 在大多数情况下是真实准确的, 该研究在光学系统的鬼像分析方面做出了有益探索。

关键词: 近轴近似; 杂散光分析; 鬼像; 调制传递函数

中图分类号: O439

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0121

An MTF calculation model under the influence of ghost images

XIAO Peng-yi^{1,2}, LIU Ming-xin^{1*}, YAN Lei¹, HU Ming-yu¹, ZHANG Xin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

* Corresponding author, E-mail: liumingxin2021@163.com

Abstract: To investigate the impact of ghost images on optical system performance, we develop a Modulation Transfer Function (MTF) calculation model under the influence of ghost images generated by secondary reflection. We first introduce the analyzing and describing method of ghost image using the paraxial approximation. Then, starting from the definition of the MTF, and considering the influence of ghost image irradiance on the modulation of the image plane, an MTF calculation model under the influence of ghost images is constructed. By conducting a case study calculation on a system and comparing it with the simulation results, it is found that the maximum mean square error is less than 0.049373, which verifies the accuracy of the model. Furthermore, a detailed analysis is conducted, examining cases that exhibited larger errors and clarifying the range in which this calculation method can be applied. The research results indicate that the paraxial approximation method is both accurate and reliable when calculating the MTF under the influence of ghost

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62005217)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62005217)

images is accurate, and is applicable in most cases. This study serves as a valuable exploration in the ghost image analysis of optical systems.

Key words: paraxial approximation; stray light analysis; ghost analysis; modulation transfer function

1 引言

近年来,随着光电探测器件灵敏度和探测阈值的不断提升,相应地对空间光学相机杂散光的抑制与评估提出了更高要求,因此对于杂散光的研究成为了国内外学者的关注重点^[1-3]。杂散光形成的原因较为复杂,例如:成像视场外的杂光源发出的光线照射光学系统结构内壁时会产生漫反射,这些光入射到光学元件表面时也会产生反射、散射等杂散光形式。此外,经过特定光学元件表面的偶次反射光还会在成像面形成鬼像^[4]。当光学系统存在杂散光时,会对系统的成像质量产生较大的影响,例如:对于多目标成像光谱仪等光学仪器来说,杂散光会对仪器的分辨率、信噪比等指标产生比较大的影响^[5];对于空间引力波探测器,来自空间的环境辐射也会对系统的产生较大的影响^[6]。

鬼像是一种常见的杂散光。在光学系统中,光线经过某一折射面后一部分能量透射过去,而另一部分能量则被反射。被反射的光线在遇到该面前面的某一面时,又会发生折射和反射现象。被再次反射的光线经过光学系统后,在光学系统内部或像面上就有可能形成不希望存在的像,即鬼像^[7]。当鬼像距离像面较近时,则会在像面上形成一个明显的鬼像。当鬼像距离像面较远时,则会在像面上产生离焦的鬼像,这种鬼像会降低像面的对比度,犹如给像面蒙上了一层薄纱,进而降低系统成像的清晰度^[8]。由此可见,无论是哪种类型的鬼像都会对系统的成像质量造成明显的影响,严重时甚至会完全湮灭目标,使得光学系统完全失效,严重影响光学系统的性能^[9]。

1970年,Naylor最早采用光线追迹的方法来计算系统鬼像的大小与照度分布形式^[10]。1989年,陈志勇提出采用近轴近似法与有限光线追迹法的混合应用方法来计算鬼像^[11]。2003年,浙江大学的岑兆丰教授提出了一种基于光线追迹的有效光学系统杂光影响分析方法,建立了适合各类

光学系统杂散光及鬼像分析的数理模型^[12]。2007年,胡福生等人提出一种利用单向链表数据结构进行鬼像分析的方法,该方法能够全面描述鬼像在像面的位置和能量分布情况^[13]。2009年,亚利桑那大学的 Rania H 在近轴范围内对鬼像的产生进行了更为细致的分析,通过近轴光线追迹确定鬼像在像面的位置、范围以及鬼像系统的相关参数^[14]。2021年,李洋等人对透射式光学系统焦平面处的鬼像进行了细致研究,分析了透视式光学元件与探测器形成鬼像的原因^[15]。2022年,Clermont L 等人提出了杂散光入瞳的概念,在进行鬼像分析时,可以利用该入瞳对光线进行筛选,从而有效提高光线追迹的效率^[16]。

在对鬼像影响下的光学系统的研究中,对鬼像位置、鬼像能量及区域的研究已经较为充分,但鲜有关于鬼像对光学系统成像质量下降的影响的相关研究,使得鬼像对成像质量的影响表征不直观,而且没有对此类影响的量化处理方法。

本文基于近轴分析的方法,构建了由于二次反射产生的鬼像下的调制传递函数(MTF)的计算模型。以此来表征鬼像对光学系统性能的影响,在设计阶段就能够预估鬼像对光学系统的影响,从而避免了最终使用阶段由于鬼像的影响而造成的成像质量不满足实际需求所导致的严重后果。

2 鬼像分析与描述方法

2.1 近轴近似的鬼像分析方法

在对鬼像进行分析时,通常采用近轴近似法,即在光线追迹时采用近轴近似公式,将角度的正弦值与正切值均用其弧度值替代,并且该方法认为物面上一点的鬼像光束被真实像面所截,其光束界面上的照度是均匀的^[17-18]。此外,由于光学系统通常都会镀减反膜,设镀膜后光学表面的反射率为0.01,那么经过两次反射后,鬼像光束的能量为原光束能量的 10^{-4} ,经过四次反射后的鬼像光束能量为原光束的 10^{-8} 。相比于二次反射的鬼

像光束, 四次及更高阶次的鬼像光束的影响几乎可以忽略^[19], 因此本文着重于对由二次反射产生的鬼像进行讨论。

通常使用杂光率来评价系统的杂光程度。其定义为: 到达系统像面的杂光照度与理想像照度之比。通过近轴近似方法计算系统杂光率, 可以得到对于轴上点, 每一鬼像系统产生的杂光率为^[20]:

$$V_s = \frac{\tau_g B_Q u_{1g}^2 R^2}{\tau_0 B_O u^2 E_0^2} \cos^2(\phi) \quad (1)$$

其中, τ_g 为鬼像系统透过率, τ_0 为成像系统的透过率; B_Q 为杂光点源的亮度, B_O 为轴上点源的亮

度, u_{1g} 为成像点源相对于鬼入瞳的孔径角, u 为成像点源相对于成像入瞳的孔径角, R 为杂光点源在物面上的归化高度, ϕ 为杂光点源与鬼像系统入瞳中心的连线相对于光轴的夹角。 E_0 根据鬼像光束到达系统像面方式的不同, 计算表达式也不同, 如表 1(彩版见期刊电子版) 所示。

表 1 中, 表达式中的 h_k 为成像边缘光线在最后一面的高度, u_k 为成像边缘光线在最后一面的孔径角, h_{kg} 为鬼像边缘光线在最后一面的高度, u_{kg} 为鬼像边缘光线在最后一面的孔径角, H 为系统的拉式不变量, n_k 为像方折射率。

表 1 E_0 计算表达式 (其中鬼像光束示意图中的蓝色光线代表鬼像光线, 黑色代表成像光线)

Tab. 1 Calculation expressions for E_0 , where the blue lines in the schematic diagram of the ghost image beam represent the ghost image rays and black ones represent the imaging rays

序号	鬼像光束示意图	E_0 表达式
1		$E_0 = \frac{n_k [h_k u_{kg} - h_{kg} u_k]}{H}$
2		$E_0 = \frac{n_k [h_k u_{kg} + h_{kg} u_k]}{H}$
3		$E_0 = \frac{n_k [h_{kg} u_k - h_k u_{kg}]}{H}$

2.2 鬼像的矩阵描述方法

矩阵光学是描述光线传输的重要理论, 可将光线折射、传输、反射等过程利用矩阵直观清晰地表示出来^[21]。利用光学传输矩阵, 可以将整个系统的传输过程表示为几个矩阵乘积的形式, 从而快速计算出系统的光学性质。

由于通常是在近轴区对鬼像进行分析, 因此可以利用光学传输矩阵来更加便捷地描述和分析系统中的鬼像。以一单透镜的鬼像路径说明鬼像传输矩阵的构建方法, 其鬼像路径示意图如图 1 所示。

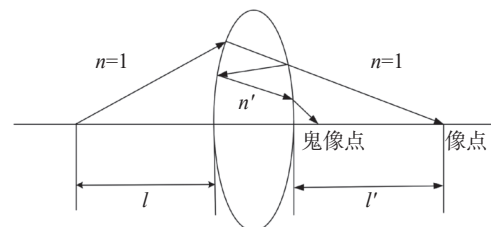


图 1 单透镜鬼像路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ghost image path of a single lens

根据系统参数构建所有表面的传输矩阵如表 2 所示。

透镜中的过渡矩阵为:

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} .$$

鬼像形成路径为:物面-前表面透射-后表面反射-前表面反射-后表面透射-像面,在该鬼像路径下的传输矩阵为:

$$M_{\text{ghost}} = M_2 \cdot M_3 \cdot M_{11} \cdot M_3^{-1} \cdot M_{22} \cdot M_3 \cdot M_1 = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} .$$

若构建入射光线矩阵为:

$$\text{Ray}_{\text{inc}} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_n \\ u_1 & u_2 & u_3 & \cdots & u_n \end{bmatrix} ,$$

则在该鬼像路径下的鬼像光束矩阵为:

$$\text{Ray}_{\text{ghost}} = M_{\text{ghost}} \cdot \text{Ray}_{\text{inc}} = \begin{bmatrix} h_{1g} & h_{2g} & h_{3g} & \cdots & h_{ng} \\ u_{1g} & u_{2g} & u_{3g} & \cdots & u_{ng} \end{bmatrix} .$$

在近轴范围内对鬼像进行分析,可以根据不同的鬼像路径,结合系统的相关参数来构建不同鬼像系统的传输矩阵,并利用鬼像传输矩阵追迹鬼像光束,以此来获取鬼像光束的相关信息。

表 2 所有表面的传输矩阵

Tab. 2 Transmission matrices for all surfaces

	透射矩阵	反射矩阵
前表面	$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n'-1}{n'r_1} & \frac{1}{n'} \end{bmatrix}$	$M_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_1} & -1 \end{bmatrix}$
后表面	$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1-n'}{r_2} & n' \end{bmatrix}$	$M_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_2} & -1 \end{bmatrix}$

3 鬼像影响下的 MTF 计算模型

调制传递函数(MTF)的定义为物、像调制度之比:

$$MTF = \frac{M_{\text{image}}}{M_{\text{object}}} , \quad (2)$$

其中, $M_{\text{image}} = \frac{E'_{\text{max}} - E'_{\text{min}}}{E'_{\text{max}} + E'_{\text{min}}}$, $M_{\text{object}} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}$, E_{max} 和 E_{min} 分别表示物面的最大与最小照度; E'_{max} 和 E'_{min} 分别表示像面的最大与最小照度。

设鬼像在像面的附加照度为 E_g , 那么在鬼像的影响下,像面的调制度变为:

$$M'_{\text{image}} = \frac{E'_{\text{max}} + E_g - (E'_{\text{min}} + E_g)}{E'_{\text{max}} + E_g + E'_{\text{min}} + E_g} = \frac{E'_{\text{max}} - E'_{\text{min}}}{E'_{\text{max}} + E'_{\text{min}} + 2E_g} . \quad (3)$$

故考虑鬼像影响后,系统的 MTF 变为:

$$MTF' = \frac{M'_{\text{image}}}{M_{\text{object}}} = \frac{E'_{\text{max}} - E'_{\text{min}}}{M_{\text{object}}(E'_{\text{max}} + E'_{\text{min}} + 2E_g)} . \quad (4)$$

对式(4)取倒数,得到:

$$\frac{1}{MTF'} = \frac{M_{\text{object}}(E'_{\text{max}} + E'_{\text{min}} + 2E_g)}{E'_{\text{max}} - E'_{\text{min}}} . \quad (5)$$

对(5)式进行化简,最终得到鬼像影响下的 MTF 与理想情况下的 MTF 之间的关系式:

$$\frac{1}{MTF'} = \frac{1}{MTF} + \frac{2M_{\text{object}}E_g}{E'_{\text{max}} - E'_{\text{min}}} . \quad (6)$$

在实际的 MTF 测量中,一般可以采用固有频率目标法来测量系统的 MTF。固有频率目标主要是指正弦条纹或栅条类目标。这类目标物一般由多个固有频率的条纹板组成,或者是将多个空间频率的条纹制作在同一个板上。通过对比物和像的对比度,从而获得固定空间频率的 MTF,然后根据空间频率和该频率下对应的 MTF 值绘制 MTF 曲线^[22]。

基于 MTF 的实测方法,我们设一正弦光栅的透过光强分布为^[23]:

$$O(u) = I_0 + I_a \cos(2\pi ur) , \quad (7)$$

其中 r 表示空间频率, I_0 表示平均光强, I_a 表示光强按正弦变化的幅值, u 为物面坐标点,则根据式(7),物方调制度可以写为:

$$M_{\text{object}} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} = \frac{I_0 + I_a - I_0 + I_a}{I_0 + I_a + I_0 - I_a} = \frac{I_a}{I_0} . \quad (8)$$

则 $O(u)$ 经过光学系统后,像面处的辐照度分布为:

$$g(u') = \int_{-\infty}^{\infty} [I_0 + I_a \cos(2\pi u' r - 2\pi ur)] LSF(u) du . \quad (9)$$

式中, u' 为像面坐标点。

将 $\cos(2\pi u'r - 2\pi ur)$ 展开, 并逐项积分得到:

$$g(u') = I_0 + I_a \left[\int_{-\infty}^{\infty} LSF(u) \cos(2\pi ru) du \right] \cos(2\pi ru') + I_a \left[\int_{-\infty}^{\infty} LSF(u) \sin(2\pi ru) du \right] \sin(2\pi ru'). \quad (10)$$

若令式 (10) 中:

$$\begin{cases} H_c(r) = \int_{-\infty}^{\infty} LSF(u) \cos(2\pi ru) du \\ H_s(r) = \int_{-\infty}^{\infty} LSF(u) \sin(2\pi ru) du \end{cases} .$$

进一步化简可以得到:

$$g(u') = I_0 + I_a H_c(r) \cos(2\pi ru') + I_a H_s(r) \sin(2\pi ru') \quad (11)$$

根据三角函数的结合定律, 化简式 (11) 可以得到:

$$g(u') = I_0 + I_a MTF(r) \cos[2\pi ru' - PTF(r)]. \quad (12)$$

式 (12) 中:

$$\begin{cases} MTF(r) = \sqrt{H_c^2(r) + H_s^2(r)} \\ PTF(r) = \arctan \frac{H_s(r)}{H_c(r)} \end{cases} .$$

根据式 (12), 考虑鬼像影响下的像面辐照度分布为:

$$g'(u') = I_0 + I_a MTF(r) \cdot \cos[2\pi ru' - PTF(r)] + E_g \quad (13)$$

由式 (13) 可得:

$$\begin{cases} E'_{\max} = I_0 + I_a MTF(r) + E_g \\ E'_{\min} = I_0 - I_a MTF(r) + E_g \end{cases} \quad (14)$$

将式 (8) 与 (14) 带入式 (6) 并化简, 可得:

$$\frac{1}{MTF'} = \frac{I_0 + E_g}{I_0 MTF} \quad (15)$$

根据杂光率的定义, 式 (15) 可化简为:

$$MTF' = \frac{1}{1 + V_s} MTF \quad (16)$$

至此, 就建立了鬼像影响下的成像系统 MTF 与理想情况下成像系统 MTF 之间的联系。

4 实例计算与验证

选取了一个三片式镜头进行实例计算, 其相关参数如表 3 所示。其中: 系统 F 数为 4; 第一个面为孔径光阑, 物面位于第一个面左侧 10 mm 处; 在物面上的杂光源距离光轴的高度为 0.2 mm, 亮度为成像光源亮度的 100 倍, 系统波长为 0.587561 mm。

表 3 三片式镜头参数数据

Tab. 3 Triplet lens parameter data (Unit: mm)			
表面	曲率半径	厚度	材料
1	3.285	1	N-LASF31A
2	-30.01	0.142	
3	-6.769	0.9	SF15
4	2.489	0.673	
5	6.31	1	N-LAK21
6	-4.889	10.6713	

4.1 三片式镜头杂光率的计算

对于有 K 个面的光学系统, 任意两个表面都可能会产生鬼像, 这样就会有 $C_K^2 = \frac{K(K-1)}{2}$ 个鬼像系统。该三片式镜头共有 6 个表面, 所以其可能的鬼像路径共有 15 个。同时, 在计算系统的 MTF 时, 为了使空间频率完全抽样直至达到系统的截止频率, 像面的最小半宽 W_{\min} 至少为^[24]:

$$W_{\min} = \frac{N_x^2}{4N_f} \lambda f^\# \quad (17)$$

其中, N_x 为分析面上的像素个数, N_f 为网格内的像素个数, λ 为系统的工作波长, $f^\#$ 为系统的 f 数。计算得到系统的像面半宽为 0.75 mm。需要注意的是, 并不是所有鬼像光束都会到达像面从而对系统的调制传递函数产生影响, 故需要根据近轴的光线追迹结果, 并采用线性插值的方法计算出能够刚好到达像面边缘的鬼像光束的光线信息, 并对该光线进行倒追, 获取该光线在系统每一面的数据, 从而计算杂光率 V_s , 进而计算在鬼像影响下的 MTF。其中线性插值的计算方法为: 若已知 $f(x_1) = y_1, f(x_2) = y_2$, 且 $x_1 < x_3 < x_2$, 则:

$$f(x_3) = y_1 + \frac{(x_3 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (18)$$

按照图 2 所示的流程图, 计算该系统所有鬼像路径下的系统杂光率与鬼像影响下的 MTF 值, 如表 4 所示。

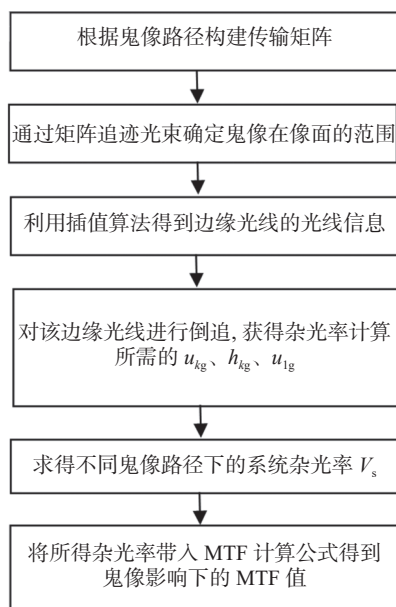


图 2 MTF 计算流程图

Fig. 2 MTF calculation flowchart

表 4 所有路径下的杂光率与鬼像影响下的 MTF 值

Tab. 4 The stray light rates and MTF values under the influence of ghost image in all paths

路径	杂光率	MTF' 与 MTF 之间的关系
2_1	0.058 858	$MTF' = 0.944\ 413MTF$
3_2	0.877 073	$MTF' = 0.532\ 744MTF$
3_1	0.029 316	$MTF' = 0.971\ 518MTF$
4_3	0.008 263	$MTF' = 0.991\ 804MTF$
4_2	0.005 352	$MTF' = 0.994\ 676MTF$
4_1	0.061 024	$MTF' = 0.942\ 485MTF$
5_4	0.119 049	$MTF' = 0.893\ 615MTF$
5_3	0.006 792	$MTF' = 0.993\ 252MTF$
5_2	0.004 984	$MTF' = 0.995\ 040MTF$
5_1	0.019 154	$MTF' = 0.981\ 20MTF$
6_5	0.067 233	$MTF' = 0.937\ 001MTF$
6_4	0.064 353	$MTF' = 0.939\ 534MTF$
6_3	0.037 417	$MTF' = 0.963\ 936MTF$
6_2	0.018 945	$MTF' = 0.981\ 406MTF$
6_1	0.044 890	$MTF' = 0.957\ 038MTF$

按照计算流程, 以 2-1 路径为例, 给出具体的计算过程。首先构建杂光源光束矩阵为:

$$M_{\text{Ray}} = \begin{bmatrix} 0.2 & \cdots & 0.2 \\ 0.054\ 556 & \cdots & -0.094\ 329 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

根据系统参数构建所有表面的传输矩阵, 在该路径下的传输矩阵为:

$$M_{2_1} = \begin{bmatrix} -3.743\ 148\ 50 & -0.486\ 991\ 62 \\ -0.132\ 492\ 89 & -0.116\ 507\ 09 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

将光束矩阵与传输矩阵相乘可计算出到达像面的光束矩阵, 并通过插值算法计算出的边缘光线信息矩阵为:

$$M'_{\text{ray}} = \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.019\ 779 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

对该边缘光线进行倒追, 得到边缘光线在每一面上的信息, 计算该路径下的杂光率为 0.058 858 12, 则在该鬼像路径影响下的 MTF' 与理想 MTF 之间的关系为: $MTF' = 0.944\ 413\ 59MTF$ 。

4.2 数据验证与分析

利用光学仿真软件 FRED®(22.40 Photon Engineering) 对该系统进行鬼像分析。通过非序列光线追迹获得在不同鬼像路径下的系统点扩散函数 (PSF)。对获得的 PSF 进行傅立叶变换, 获得不同鬼像路径影响下的 MTF。利用均方误差 (MSE) 来衡量近轴近似法和 PSF 方法得到的 MTF 曲线的相似度。MSE 值越小说明两种方法得到的 MTF 曲线越相似。不同鬼像路径下的 MSE 值如表 5 所示。

表 5 所有鬼像路径下 MSE 的值

Tab. 5 MSE values under all ghost image paths

路径	MSE 值
2_1	$1.253\ 505 \times 10^{-4}$
3_2	$1.826\ 590 \times 10^{-2}$
3_1	$3.627\ 304 \times 10^{-5}$
4_3	$2.866\ 007 \times 10^{-6}$
4_2	$2.798\ 693 \times 10^{-5}$
4_1	$7.217\ 275 \times 10^{-4}$
5_4	$1.933\ 488 \times 10^{-4}$
5_3	$1.222\ 153 \times 10^{-5}$
5_2	$9.061\ 267 \times 10^{-6}$
5_1	$5.363\ 379 \times 10^{-5}$
6_5	$4.459\ 207 \times 10^{-4}$
6_4	$1.627\ 363 \times 10^{-4}$
6_3	$4.774\ 974 \times 10^{-5}$
6_2	$1.692\ 015 \times 10^{-5}$
6_1	$4.937\ 398 \times 10^{-2}$

由表 5 的结果可以看出, 在大多数鬼像路径下, 近轴近似计算的结果与利用 PSF 计算的结果相近。部分结果的 MTF 曲线示意图如图 3(彩图见期刊电子版) 所示。

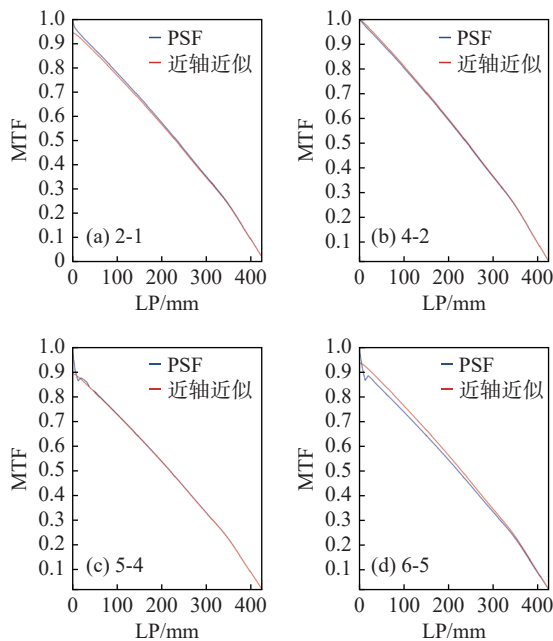


图 3 4 种鬼像路径下两种计算方法的 MTF

Fig. 3 MTF curves calculated by two methods under four types of ghost image paths

图 3 中蓝色曲线为 PSF 的计算结果, 红色曲线为近轴近似的计算结果, 可以看到两者具有较好的一致性。

同时根据表 5 的 MSE 结果, 发现最大误差出现在 3_2 与 6_1 两条路径上, 接下来对这两条路径进行单独分析。

3_2 鬼像路径下的 MTF 曲线如图 4(彩图见期刊电子版) 所示。

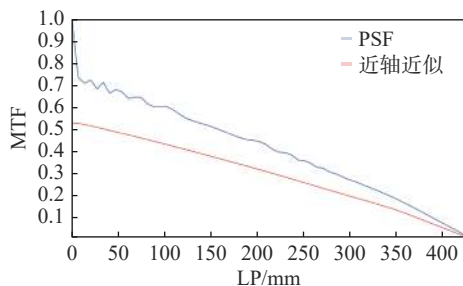


图 4 3_2 鬼像路径下的两种计算方法的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves calculated by two methods under ghost image path 3_2

通过非序列光线追迹得到实际鬼像光束在像面上的照度分布, 如图 5(彩图见期刊电子版) 所示。

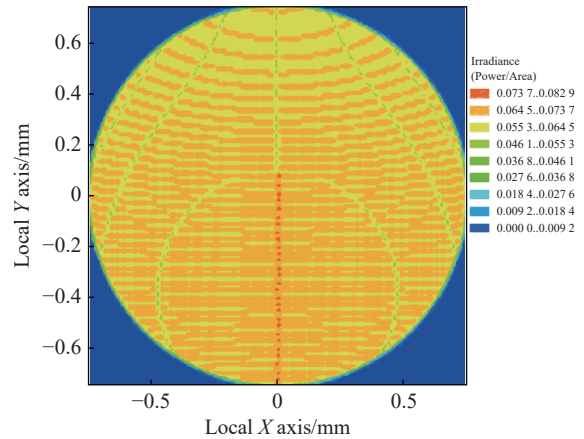


图 5 非序列光线追迹得到的 3_2 路径下鬼像光束在像面上的照度分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of illuminance distribution of ghost image beams on image plane under 3_2 path calculated by non-sequential ray tracing

根据非序列光线追迹结果可以看出, 在此路径下, 鬼像光束的照度分布并不均匀, 从而导致与近轴近似条件下的计算结果出现了较大的差异。

6_1 鬼像路径下的 MTF 曲线如图 6(彩图见期刊电子版) 所示。

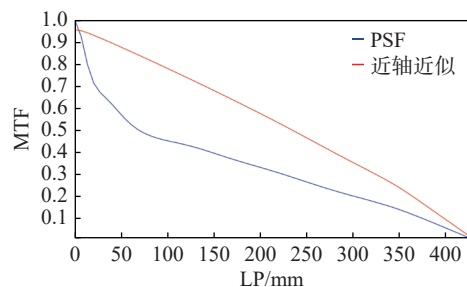


图 6 6_1 鬼像路径下的 MTF 曲线示意图

Fig. 6 MTF curves calculated by two methods under 6_1 ghost image path

在 6_1 路径下, 鬼像光束在像面上的照度分布如图 7(彩图见期刊电子版) 所示。可见, 在该路径下, 鬼像光束聚焦在像面的局部区域内, 即鬼像光束并未铺满整个像面, 从而导致在利用近轴近似计算时鬼像的照度偏小, 进而使得该路径下的杂光率偏小, 从而使计算出的 MTF 值偏大。

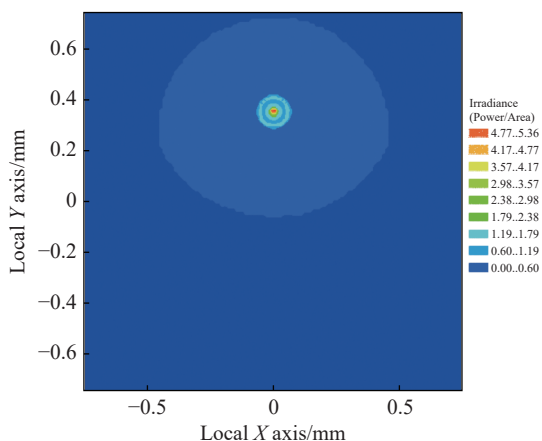


图 7 非序列光线追迹得到的 6_1 路径下鬼像光束在像面上的照度分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of illumination distribution of ghost image on image plane under 6_1 path calculated by non-sequential ray tracing

通过分析上述结果,可以发现:对于在像面上分布较为均匀的鬼像光束,利用近轴近似的方法计算鬼像影响下的 MTF 的结果是较为准确的,而对于非均匀分布的鬼像光束,利用该模型进行计算时会出现一定的偏差。利用本研究构建的鬼像影响下的 MTF 计算模型,可以在无需复杂的仿真建模的前提下,快速预估不同路径下鬼像对成像质量的影响,从而提高分析效率和准确性。在实际应用中,该模型可以帮助研究人员筛选出最有

可能对光学系统成像质量产生显著影响的几种表面组合,从而为后续的优化工作提供便利。同时,也需要注意到该模型的局限性,即在处理非均匀分布的鬼像影响时会存在一定误差,未来尝试利用更为准确的鬼像描述模型来改善性能。

5 结 论

本文利用近轴近似方法构建了在鬼像影响下的调制传递函数计算模型,其目的在于分析与预测鬼像对成像质量造成的影响。首先,介绍了利用矩阵光学对鬼像进行描述与分析的方法。然后,从 MTF 的定义出发,考虑鬼像对像面照度的影响,进而构建出鬼像影响下的 MTF 计算模型。最后,对一个三片式镜头进行实例计算,并与仿真结果进行对比。结果显示,其均方误差最大不超过 4.937397×10^{-2} 。结果表明:当鬼像光束近似均匀地到达系统像面时,利用近轴近似的计算结果与真实光线追迹所得结果较为相近,表明了该计算模型的正确性。利用该计算模型能够对鬼像造成的成像质量下降进行快速预估,且无需建立复杂的仿真模型,从而有效提高了工作效率。综上所述,本研究为光学系统的鬼像分析提供了新的思路,使得鬼像对成像质量的影响更为直观。

参考文献:

- [1] 王虎,陈钦芳,马占鹏,等. 杂散光抑制与评估技术发展及展望(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(7): 0751406. WANG H, CHEN Q F, MA ZH P, *et al.*. Development and prospect of stray light suppression and evaluation technology (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751406. (in Chinese).
- [2] 陆强. 地球同步轨道空间相机杂散光分析与应用技术的研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016. LU Q. *Study on stray light analysis and application technology of the earth synchronous orbit space camera*[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese).
- [3] 梁斌,朱海龙,张涛,等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 16-29. LIANG B, ZHU H L, ZHANG T, *et al.*. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 16-29.
- [4] 吕博,冯睿,寇伟,等. 折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 822-831. LÜ B, FENG R, KOU W, *et al.*. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 822-831.
- [5] 姚雪峰,高毅,龙兵,等. 数字微镜器件(DMD)杂散光特性测试方法及装置[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 339-347. YAO X F, GAO Y, LONG B, *et al.*. Method and device for testing stray light characteristics of Digital Micro-mirror Device (DMD)[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 339-347.
- [6] 冷荣宽,王上,王智,等. 空间引力波探测前向杂散光测量和抑制[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(5): 1081-1088. LENG R K, WANG SH, WANG ZH, *et al.*. Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1081-1088.
- [7] 耿安兵. 光学系统的鬼像分析及快速计算方法[J]. *舰船光学*, 2004, 40(4): 34-36. GENG A B. Ghost image anlysis and rapid calculation for optical system[J]. *Ship Optical*, 2004, 40(4): 34-36. (in

- Chinese).
- [8] ABD EL-MAKSOU D R H, SASIAN J. Modeling and analyzing ghost images for incoherent optical systems[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(15): 2305-2315.
- [9] 颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统杂散光分析[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 289-293.
YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 289-293. (in Chinese).
- [10] NAYLOR A G. Veiling glare due to multiple reflections between surfaces[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1970, 48(22): 2720-2724.
- [11] 陈志勇. 透镜系统的镜面反射杂光的计算——鬼像的模拟与分析[J]. 光学机械, 1989(2): 23-27.
CHEN ZH Y. Calculation of veiling glare due to reflections between surfaces-ghost image simulation and analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1989(2): 23-27. (in Chinese).
- [12] 岑兆丰,何志平,李晓彤,等. 一种基于光线光学的杂光分析模型[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(23): 188-190.
CEN ZH F, HE ZH P, LI X T, et al.. A computer modeling for stray light analysis based on geometrical optics[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(23): 188-190. (in Chinese).
- [13] 胡福生,金光,张楠. 复杂光学系统鬼像分析的单向链表实现算法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 322-325.
HU F SH, JIN G, ZHANG N. Algorithm of list structure of ghost images analyzing in complicated optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 322-325. (in Chinese).
- [14] ABD EL-MAKSOU D R H, SASIAN J M. Paraxial ghost image analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7428: 742807.
- [15] 李洋,鲍书龙,穆生博,等. 透射式光学系统焦平面鬼像特性及验证[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2567-2573.
LI Y, BAO SH L, MU SH B, et al.. Ghost image characteristic and experimental verification of focal plane in refractive optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(11): 2567-2573.
- [16] CLERMONT L, MICHEL C, STOCKMAN Y. Stray light correction algorithm for high performance optical instruments: the case of metop-3MI[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1354.
- [17] GREIVENKAMP J E. *Field Guide to Geometrical Optics*[M]. Bellingham: SPIE, 2004.
- [18] 张国玉,曹维国,高玉军,等. 光学系统杂散光的计算与分析方法[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1995, 18(4): 21-24.
ZHANG G Y, CAO W G, GAO Y J, et al.. The methods of analyses and calculation for stray light in optical system[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1995, 18(4): 21-24. (in Chinese).
- [19] 卜和阳,卢振武,张红鑫,等. 内掩式透射地基日冕仪中杂光鬼像的消除[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 231-236.
BU H Y, LU ZH W, ZHANG H X, et al.. Suppression of stray light ghost image in internally occulting refractive ground-based coronagraph[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 231-236. (in Chinese).
- [20] 王子余,钟伯亮,史云飞. 用近轴近似方法计算二次反射杂散光[J]. 光学仪器, 1982, 4(2): 6-15.
WANG Z Y, ZHONG B L, SHI Y F. Calculation of secondary reflection stray light by Paraxial approximation[J]. *Optical Instruments*, 1982, 4(2): 6-15. (in Chinese).
- [21] 石荣宝,季轶群,赵知诚,等. 适于逆光条件的消鬼像镜头光学设计与实验验证[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922002.
SHI R B, JI Y Q, ZHAO ZH CH, et al.. Optical design and experimental verification of a reduced ghost image lens for backlight condition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0922002. (in Chinese).
- [22] 马卫红. 基于图像分析的光学传递函数测试技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005.
MA W H. *Study of MTF measurement technique based on image analysis*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese).
- [23] 郑克哲. 光学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
ZHENG K ZH. *Optical Metrology*[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2002. (in Chinese).
- [24] Photon Engineering. FRED Reference Manual[J/OL]. 2012.

作者简介:



刘铭鑫(1991—),男,吉林辽源人,博士,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,主要从事光学设计分析软件研发、杂散辐射分析方面的研究工作。E-mail: liumingxin2021@163.com