

渐晕对红外光学系统光谱透过率测量的影响

吴逸平 金尚忠 窦苒 李四维 王学新 胡铁力 何玉兰 俞兵 张云龙 尤越

Influence of vignetting on spectral transmittance measurement of infrared optical system

WU Yiping, JIN Shangzhong, DOU Yi, LI Siwei, WANG Xuexin, HU Tielu, HE Yulan, YU Bing, ZHANG Yunlong, YOU Yue

引用本文:

吴逸平, 金尚忠, 窦苒, 等. 渐晕对红外光学系统光谱透过率测量的影响[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1238–1244. DOI: 10.5768/JAO202445.0603004

WU Yiping, JIN Shangzhong, DOU Yi, et al. Influence of vignetting on spectral transmittance measurement of infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1238–1244. DOI: 10.5768/JAO202445.0603004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

红外光学系统光谱透射比校准技术

Spectral transmittance calibration technology of infrared optical system

应用光学. 2023, 44(4): 868–873 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403008>

基于硫系玻璃的紧凑型大相对孔径长波红外光学系统无热化设计

Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses

应用光学. 2021, 42(5): 790–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501005>

红外光谱辐射亮度测量中温度均匀性和源尺寸效应的研究

Research of temperature uniformity and size-of-source effect in infrared spectral radiance measurement

应用光学. 2020, 41(4): 737–742 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0406003>

大面阵连续变焦面阵扫描红外光学系统设计

Design of continuous zoom area array scanning infrared optical system with large area array

应用光学. 2024, 45(2): 292–299 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201003>

一种折反式红外/激光复合导引头光学系统设计

Design of catadioptric infrared/laser compound seeker optical system

应用光学. 2019, 40(6): 987–992 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601009>

紫外宽光谱大相对孔径光学系统设计

Design of UV optical system with wide ultraviolet spectrum and large relative aperture

应用光学. 2021, 42(5): 761–766 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1238-07

渐晕对红外光学系统光谱透过率测量的影响

吴逸平¹, 金尚忠¹, 窦 苒², 李四维², 王学新², 胡铁力²,
何玉兰², 俞 兵², 张云龙², 尤 越²

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018; 2. 西安应用光学研究所 国防科技工业
光学一级计量站, 陕西 西安 710065)

摘要: 在基于回返法的红外光学系统光谱透过率测试系统中, 光阑等元件的位置在测量时会对红外镜头测量光谱透过率造成影响。针对这一问题, 通过建立渐晕模型, 对测试系统的测量段光束的渐晕进行了分析, 推导出光阑等元件放置在不同位置处产生的渐晕公式。实验结果表明, 保持空测和实测的相对渐晕一致, 可以有效减小渐晕变化对红外镜头透过率测量的影响。

关键词: 红外镜头透过率; 回返法; 透过率测试系统; 光阑渐晕

中图分类号: TN216

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0603004

Influence of vignetting on spectral transmittance measurement of infrared optical system

WU Yiping¹, JIN Shangzhong¹, DOU Yi², LI Siwei², WANG Xuexin², HU Tieli²,
HE Yulan², YU Bing², ZHANG Yunlong², YOU Yue²

(1. College of Optical and Electronic Science Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. Primary Optical Metrology Station of National Defense Science and Technology Industry,
Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the infrared spectroscopic transmittance testing system based on the retro-reflective method, the position of the components such as aperture will affect the measurement of spectral transmittance of the infrared lens during measurement. To address this issue, a vignetting model was established to analyze the vignetting of the measurement beam in the testing system, and the vignetting formula generated by aperture and other components placing at different positions was derived. Experimental results show that maintaining the consistency in relative vignetting between the aerial and actual measurements can effectively reduce the effect of vignetting variations on the measurement of spectral transmittance of the infrared lens.

Key words: spectral transmittance of infrared lens; retro-reflective method; transmittance testing system; vignetting of aperture

引言

随着红外光学系统越来越广泛地被应用于生物医药、军事国防等领域, 人们对于红外光学系统各项性能参数的测量^[1]提出了更高要求。红外光学系统的透过率是衡量红外光学系统透过的光辐射能量强度大小的重要指标, 也同时影响着像面照度和作用距离^[2]。目前对于可见光波段的光学系统光谱透过率测量, 国内外研究较多^[3-7]。但对

于红外波段, 由于其光学系统孔径相对较大, 因此无法像测量可见光波段一样采用积分球收集全孔径能量。国内主要通过测量其中心透过率从而实现光学系统透过率的测量^[8-10], 并非采用全口径光束测量。但是由于光学系统透过率受各个元件的折射、散射、自身吸收以及膜层不均匀等因素影响, 很有可能在不同位置处测得的透过率出现明显差异。采用中心小口径光束方式测量只能得到

收稿日期: 2023-10-23; 修回日期: 2024-04-30

基金项目: Y2352 红外光学系统光谱透过率校准技术项目

作者简介: 吴逸平 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学计量测试技术研究。E-mail: 951947625@qq.com

红外光学系统的中心透过率, 测得的透过率会具有较大误差, 因此对于大口径红外光学系统的光谱透过率测量精度提出了更高的要求。

本文采用基于回返法的红外光学系统光谱透过率测量系统^[11], 主要用于测量大口径红外光学系统的透过率, 其测量段光束为准直光束, 在理论上测量不同口径的红外镜头的透过率时, 对于理想的准直光, 光阑不会对透过率测量产生影响。但由于轴外点的光学渐晕存在, 一定条件下光阑大小和光阑所在的位置会对测试段轴外斜光束产生遮挡, 导致斜光束宽度小于轴上光束, 会使得最终在探测器像面边缘位置接收到的红外辐射能量减弱, 以致空测和实测时在不同位置接收到的红外辐射能量发生变化, 而这一变化会影响光谱透过率的精确测量。

本文首先通过建立渐晕分析模型, 推导了各个元件放置在不同位置处的线渐晕公式, 并通过开展不同类型的实验, 探究由光阑渐晕不一致导致的红外辐射能量沿测量段位置变化以致最终对透过率测量产生的影响, 为该系统测量红外光学镜头的光谱透过率提供了技术支撑。

1 测量原理

如图1所示, 黑体辐射源发出的红外辐射入射至红外分束镜上, 通过红外分束镜反射至离轴抛物面主镜上, 又经离轴抛物面主镜准直后入射至被测件上。光阑放置在镜头前方, 再调节平面反射镜, 使其位于被测件焦面上。根据光路可逆原理, 反射光原路反射回离轴抛物面主镜后, 经过离轴抛物面次镜准直后进入傅里叶变换红外光谱仪中, 傅里叶光谱仪具有高光通量^[12]等优势, 能够灵敏地检测到光路中微小的光通量变化。由于测量在短时间内完成, 环境辐射变化对测量的影响可以忽略, 通过采集加入被测件的光谱、不加入被测件的光谱以及背景光谱, 同时考虑测量渐晕对透过率测量的影响, 得到该被测件的光谱透过比 $\tau(\lambda)$ 为

$$\tau(\lambda) = \sqrt{\frac{V_1(\lambda, \psi(t_1)) - V_0(\lambda)}{V_2(\lambda, \psi(t_2)) - V_0(\lambda)}} \quad (1)$$

式中: $V_1(\lambda)$ 为放入被测件时特定波长下探测器的输出电压, 单位V; $V_2(\lambda)$ 为未放被测件空测时特定波长下探测器的输出电压, 单位V; $\psi(t_1)$ 为实测时与渐晕系数 t_1 有关的能量衰减, 无量纲; $\psi(t_2)$ 为空测时与渐晕系数 t_2 有关的能量衰减, 无量纲; $V_0(\lambda)$ 为

测量背景辐射时探测器对特定波长的输出电压。

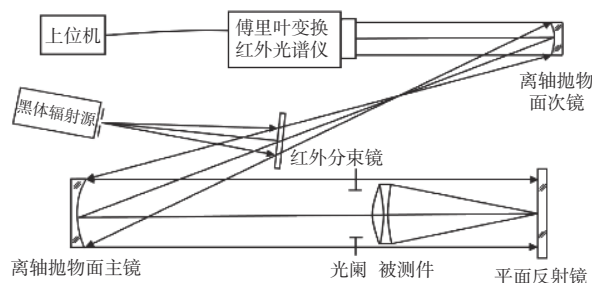


图1 红外光学系统光谱透过率测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of spectral transmittance testing apparatus of infrared optical system

2 光阑渐晕对红外光学系统光谱透过率测量影响的理论分析

从图1可以看出, 在理想状态下, 黑体辐射源经离轴抛物面主镜扩束的平行光束, 加入被测件和不加入被测件时, 不同的光阑位置和平面反射镜位置对于最终探测器接收的红外辐射能量大小, 在光阑沿光轴方向的移动是基本不变的, 只与加入光阑的大小和被测件本身的透过率有关, 而与光阑位置无关。

实际上, 由于沿光轴方向的光阑及平面反射镜位置的影响, 造成进入光学元件的轴外的斜光束被部分遮挡, 使得这部分光束不能通过光学系统进入探测器, 从而产生轴外点的渐晕, 最终进入探测器的像面边缘辐照度随偏轴距离增加而下降^[13-15]。

离轴光学系统在离轴角较小的情况下, 可以等效成同轴光学系统进行分析^[16-17]。因此建立同轴等效模型进行分析, 如图2所示, 这是实测时系统在子午面内的等效几何模型。

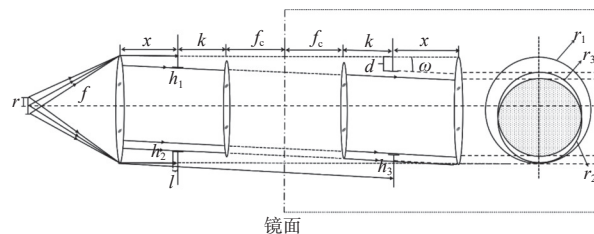


图2 轴外视场充满光阑产生渐晕等效模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of off-axis field producing vignetting equivalent model when filled with aperture

设黑体辐射源半径大小为 r , 离轴抛物面主镜(以下简称主镜)等效的理想透镜口径为 D_1 , 焦距为 f , 光阑口径为 D_2 , D_1 与 D_2 之差的一半为 d , 光阑

中心到离轴抛物面镜中心的距离为 x , 光阑厚度的一半为 l , 平面反射镜中心到光阑中心的距离为 k , 待测件焦距为 f_c 。因此, 最大视场角的大小为

$$\omega = \frac{r}{f} \quad (2)$$

由图1可知, 定义从黑体辐射源经主镜准直至平面反射镜的这段光路为入射段, 从平面反射镜反射回主镜的为接收段。由图2可知, 把主镜等效成理想凸透镜, 以平面反射镜为中心进行展开, 虚线框内部的为等效的接收段光路, 其光阑和主镜分别为各自的等效对称结构。因此, 主镜在入射段既充当孔径光阑和出射光瞳, 同时又充当接收段的视场光阑和入射光瞳。当加入限制成像范围作用的光阑时, 光阑代替主镜成为视场光阑, 它对其前面光学系统在物空间所成的像为入射窗。

光路中没有加入光阑时, 轴上光束经主镜后, 在入瞳面上形成的投影是半径为 r_1 的圆。加入光阑后, 在经过平面镜反射之前, 斜光束经过光阑(入射窗)在入瞳平面上的投影是半径为 r_2 的圆。经过平面镜反射之后, 在入瞳平面上的投影是半径为 r_3 的圆。因此, 轴外斜光束经过入射窗最终在入瞳平面上的投影面积为 r_1 、 r_2 、 r_3 与3个圆重合部分的交集。

如图2和图3所示, 在加入光阑的情况下, 经过主镜准直的轴上平行光束和轴外斜光束均被光阑拦截, 平行光束被光阑拦截的宽度为 d 。图3为光阑上边缘对光束拦截的情况, 其中轴上光束 AB 以及轴外光束 AC 被光阑 GF 拦截。

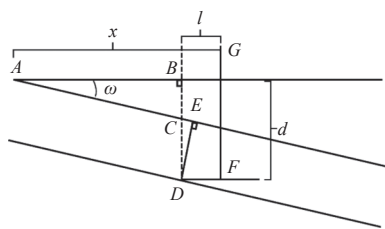


图3 轴外视场被光阑前表面上边缘拦截示意图

Fig. 3 Schematic diagram of off-axis field intercepted by upper edge of front surface of aperture

在 $\triangle ABC$ 中, $BC = AB \tan \omega = (x-l) \tan \omega$, 在这种情况下, 若有:

$$(x-l) < \frac{d}{\tan \omega} \quad (3)$$

则此时轴外视场角为 ω 的倾斜光束始终充满光阑。如图3所示, 在 $\triangle CED$ 中, $DC = BD - BC = d - (x-l) \tan \omega$, 所以视场角为 ω 的轴外斜光束被光阑拦截的上边缘宽度 $DE = [d - (x-l) \tan \omega] \cos \omega$, 记为 h_1 。

图4为光阑下边缘对光束拦截的情况, 其中边缘光束 A_2D_2 被光阑 G_2M 拦截, 因此 $G_2F_2 = G_2E_2 + E_2F_2$ 。又因 E_2F_2 在 $\triangle A_2E_2F_2$ 中, 所以 $E_2F_2 = (x+l) \tan \omega$, 故 $G_2M = [(x+l) \tan \omega + d] \cos \omega$, 记为 h_2 。

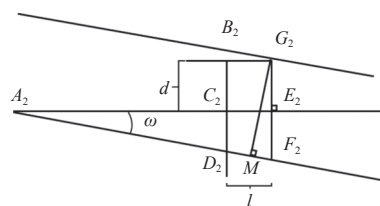


图4 轴外视场被光阑前表面下边缘拦截示意图

Fig. 4 Schematic diagram of off-axis field intercepted by lower edge of front surface of aperture

此时, 由于反射镜和光阑之间的距离导致的轴外倾斜视场 ω 的光束被第二次拦截, 这之间产生了两种情况: $k=0, f_c=0$ 意味着光阑紧贴平面反射镜或者待测件, 且不加入待测件; $k \neq 0, f_c \neq 0$ 则意味着光阑距离反射镜有一定的距离, 此时反射的光线被光阑下边缘继续拦截, 如图5所示, $G_3E_3 = (2k+2f_c+l) \tan \omega$, $G_3F_3 = (2k+2f_c+l) \sin \omega$, 记为 h_3 。

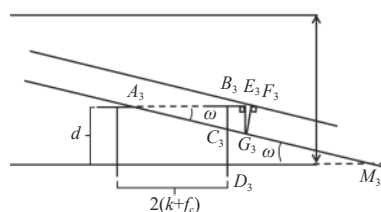


图5 轴外视场被光阑后表面下边缘拦截示意图

Fig. 5 Schematic diagram of off-axis field intercepted by lower edge of rear surface of aperture

由图5可知, 轴外倾斜视场 ω 与光束上的交点 M_3 与光阑的距离大于光阑到主镜的距离, 反射的光线始终能反射回到主镜中去, 故此时代的光束宽度为

$$D_1 - 2d \cos \omega - \sin \omega (2k + 2f_c + l) \quad (4)$$

对于轴外倾斜视场 ω 没有充满光阑时, 则满足:

$$(x-l) > \frac{d}{\tan \omega} \quad (5)$$

此时如图6所示, 轴外倾斜视场 ω 没有充满整个光阑, 光阑的下边缘对经过平面反射镜反射的光线拦截, 同理上述 h_2 、 h_3 分析过程不变, 如图6和图7所示。

$$B_4M_4 = \frac{d}{\tan \omega} \quad (6)$$

$$M_4E_4 = \left[(x-l) - \frac{d}{\tan \omega} \right] \sin \omega \quad (7)$$

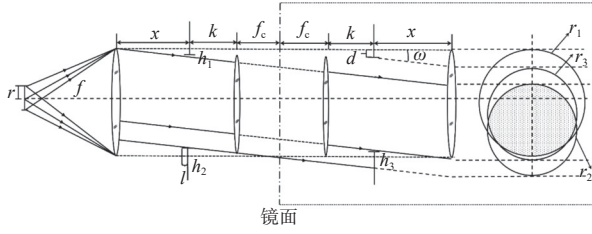


图6 轴外视场未充满光阑产生渐晕等效模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of off-axis field producing halo equivalent model without filling with aperture

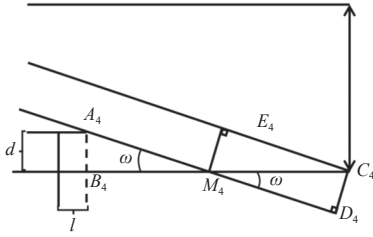


图7 反射光线被主镜自身孔径拦截示意图

Fig. 7 Schematic diagram of reflected light being intercepted by aperture of main mirror itself

临界状况为 $M_4E_4 = 0$, 经过平面反射镜反射的光线正好与离轴抛物面主镜孔径边缘相交, 反映在出瞳面上的投影情况是 r_1 与 r_3 圆相切, 那么上述经过平面镜反射的部分光束将被主镜的自身孔径边缘拦截, 不能进入主镜中, 此时渐晕情况则是由主镜镜框、光阑前表面和光阑后表面共同决定, 那么此时轴外的光束宽度为

$$D_1 - 2\sin\omega(x + k + f_c + l) \quad (8)$$

综上, 该系统在实测时的线渐晕系数为

$$t_1 = \begin{cases} \frac{D_1 - 2d\cos\omega - \sin\omega(2k + 2f_c + l)}{D_1 - 2d}, & (x - l) \leq \frac{d}{\tan\omega} \\ \frac{D_1 - 2\sin\omega(x + k + f_c + l)}{D_1 - 2d}, & (x - l) > \frac{d}{\tan\omega} \end{cases} \quad (9)$$

光阑厚度 l 可忽略, 当视场角 ω 很小时, $\tan\omega \approx \omega$, 可化简为

$$t_1 = \begin{cases} \frac{D_2 - 2\omega(k + f_c)}{D_2}, & x \leq \frac{d}{\omega} \\ \frac{D_1 - 2\omega(x + k + f_c)}{D_2}, & x > \frac{d}{\omega} \end{cases} \quad (10)$$

同理, 当系统在空测时, 线渐晕系数 t_2 为

$$t_2 = \begin{cases} \frac{D_2 - 2\omega l_e}{D_2}, & x \leq \frac{d}{\omega} \\ \frac{D_1 - 2\omega(x + l_e)}{D_2}, & x > \frac{d}{\omega} \end{cases} \quad (11)$$

式中 l_e 为空测时反射镜距光阑的距离。

为了方便衡量空测与实测时由渐晕导致的能

量变化大小对透过率测量的影响, 定义相对渐晕比为

$$S = \frac{t_1}{t_2} - 1 \quad (12)$$

结合式(1)和式(12), 若实测线渐晕系数 t_1 小于空测线渐晕系数 t_2 , 那么相对渐晕比 $S < 0$, 代表实测时渐晕导致的能量衰减比空测时的大, 并且 S 的绝对值越大说明两者差距越大, 测得的透过率则会偏小; 反之 $S > 0$, 则说明实测时的渐晕能量衰减比空测时小, 测得的透过率则会偏大; 若 $S = 0$, 两者线渐晕系数一致, 则此时两者的渐晕能量衰减对测得的透过率影响降到最小。因此, 两者相对渐晕比不一致, 最终会引起测量的透过率产生变化。

3 实验开展与结果分析

本文搭建了红外光学系统光谱透过率测试系统, 其主要参数为: 主镜大小 $D_1 = 165$ mm, 光阑 D_2 分别为 115 mm、145 mm 和 155 mm, 黑体辐射源半径 $r = 6.5$ mm, 主镜焦距 $f = 2000$ mm, 待测件焦距 $f_c = 200$ mm。在黑体辐射源温度为 900 °C 并保持稳定时进行测试, 使用傅里叶红外光谱仪获得测量光谱, 测试完成后通过软件得到待测件在 $3\text{ }\mu\text{m} \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 范围的平均积分透过率。

3.1 实测时光阑位置造成的渐晕对测量的影响

首先在距离主镜 1300 mm 处放置 115 mm 口径的光阑, 使得待测件紧贴光阑以及调节平面反射镜, 并通过傅里叶光谱仪采集实测光谱, 光阑沿测量段每隔 100 mm 作为实际测量位置, 直至距离主镜 2000 mm 处。空测时, 光阑位置保持不变, 仍保持在距主镜 1300 mm 处, 平面反射镜保持距离光阑 200 mm (即 $l_e = f_c$)。采集实测光谱, 每个位置采集 10 次, 得出待测件在 $3\text{ }\mu\text{m} \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 范围的平均积分透过率。最后改用直径 145 mm 和 155 mm 的光阑重复上述实验过程, 结果如图8所示。

由式(1)和式(12)可知, 当光阑口径为 155 mm 且处于距离主镜 1540 mm 位置时, 视场未充满整个光阑, 此时渐晕大小与实测和空测时光阑位置有关, 具体表现为随着实测位置光阑越远离主镜, 实测时渐晕能量衰减比空测时能量衰减更大。从图8中可以看出, 155 mm 光阑在距离主镜 1700 mm ~ 2000 mm 范围内, 相对渐晕比从 0 变化至 1.6%, 透过率明显呈下降趋势且透过率最大相差超过 2%, 此时由相对渐晕导致对透过率测量的影响逐渐增大。

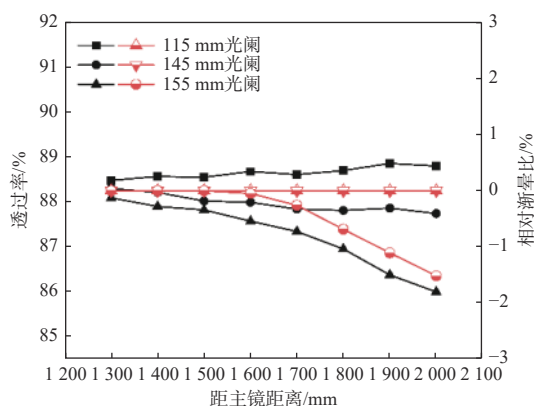


图8 光阑位置造成的渐晕对测量的影响

Fig. 8 Effect of vignetting caused by aperture position on measurement

由式(1)和式(12)可知,当光阑口径为115 mm和145 mm时,视场充满光阑平面内,空测和实测光阑不在同一位置,但是保持了在空测和实测时反射镜与光阑距离的一致,实测时渐晕能量衰减与空测时能量衰减一致。从图8中可以看出,115 mm和145 mm光阑在距离主镜1700 mm~2000 mm范围内,相对渐晕比为0,两者渐晕能量衰减保持一致,透过率变化较为平坦,不呈现明显上升或下降趋势,且透过率最大相差在0.5%以内,此时由相对渐晕导致对透过率测量的影响最小。

3.2 空测时光阑与平面回返反射镜距离造成的渐晕对测量的影响

实测位置的光阑在距离主镜1300 mm处保持不变,待测件紧贴光阑,通过傅里叶光谱仪采集实测光谱。空测位置的光阑也仍然保持距离主镜1300 mm处不变,但在空测时移动反射镜位置,依次在距离主镜1300 mm(距光阑0 mm)~2000 mm(距光阑700 mm)范围内分别采集每次的空测光谱数据,同样每个位置采集10次,得出待测件在3 μm~5 μm范围内的平均积分透过率。

最后改用直径145 mm和155 mm的光阑重复上述实验过程,结果如图9所示。由式(1)和式(12)可知,当采用115 mm、145 mm和155 mm的光阑时,空测与实测时光阑的位置并没有移动,但反射镜距光阑的间距从0增大至700 mm,反射镜距光阑的间距从小于待测件的焦距到逐渐大于待测件的焦距,即从空测时的渐晕能量衰减小于实测时的能量衰减到空测时的渐晕能量衰减大于实测时的能量衰减这一过程。从图9中可以看出,采用115 mm、145 mm和155 mm这3个不同大小的光阑测量的透过率,呈现出先下降后上升的趋势,

其中115 mm光阑的相对渐晕比变化范围为-1.1%~2.9%,透过率最大相差超过2.7%,此时由相对渐晕导致对透过率测量的影响先减小后逐渐增大。

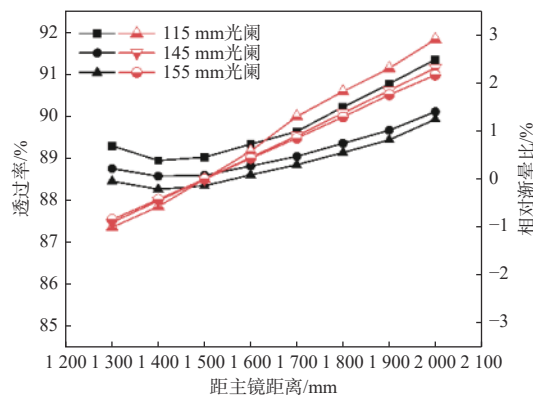


图9 光阑与平面回返反射镜的距离造成的渐晕对测量的影响

Fig. 9 Effect of vignetting caused by distance between aperture and plane return mirror on measurement

3.3 空测和实测相对渐晕一致的测量结果

由上述实验和式(1)、式(12)可知,当视场充满整个光阑时,待测件紧贴光阑($k=0$)。由于在两次测量时,反射镜与光阑的距离相等($l_e=f_e$)。在视场未充满所用光阑时,两次测量位置同时远离主镜,那么空测时的线渐晕系数 t_1 与实测时的线渐晕系数 t_2 相同,两者能量衰减一致,相对渐晕比 S 始终为0,此时透过率将保持稳定,结果如图10所示。

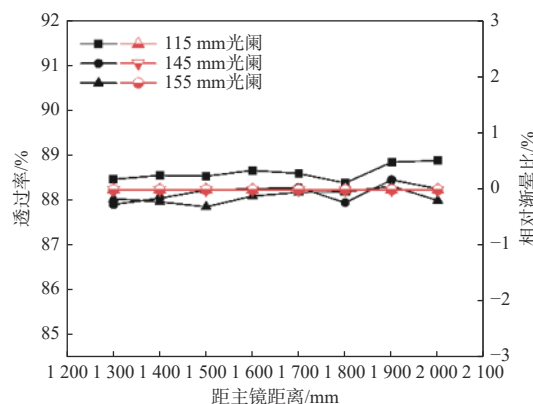


图10 实测与空测相对渐晕一致时的测量结果

Fig. 10 Measurement results when consistency in relative vignetting between actual and aerial measurements

从图10中可以看出,采用115 mm、145 mm和155 mm的光阑在改变测量位置时,由于相对渐晕比 S 始终为0,并且实验结果显示透过率没有明显的上升或下降的变化趋势,透过率基本保持稳定,三者各自透过率最大相差均在0.5%以内,此时由

相对渐晕导致对透过率测量的影响降至最小。

4 结论

本文对基于回返法的红外光谱透过率测试系统测量段光束的渐晕产生原理进行了研究, 通过建立渐晕模型, 推导出各个元件在不同位置下的渐晕公式。实验表明, 光阑处于不同相对位置会产生不同渐晕, 从而影响光学系统透过率测量结果。通过控制光阑和回返射镜的距离, 使得空测和实测的相对渐晕一致, 可以降低渐晕变化对红外镜头透过率测量的影响。

参考文献:

- [1] 周建, 周易, 倪歆玥, 等. 偏振集成红外光电探测器研究进展与应用[J]. 光电工程, 2023, 50(5): 60-77.
ZHOU Jian, ZHOU Yi, NI Xinyue, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(5): 60-77.
- [2] 王学新, 杨鸿儒, 吴李鹏, 等. MRTD 高精度测试和校准技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 1026-1031.
WANG Xuexin, YANG Hongru, WU Lipeng, et al. Research on high precision MRTD testing and calibration technology[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(5): 1026-1031.
- [3] 周磊, 郑小兵. 高精度分光光度计测量光谱透过率[J]. 光电工程, 2006, 33(12): 32-38.
ZHOU Lei, ZHENG Xiaobing. High-accuracy spectrometer for measurement of spectral transmissivity[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(12): 32-38.
- [4] 林志聪. 光学系统透过率测试[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
LIN Zhicong. Optical system transmittance test[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [5] 王立秋. 光谱透过率测试系统设计及优化[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
WANG Liqui. Design and optimization of spectral transmittance testing system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [6] HANSSEN L. Integrating-sphere system and method for absolute measurement of transmittance, reflectance, and absorptance of specular samples[J]. Applied Optics, 2001, 40(19): 3196-3204.
- [7] 杨威. 望远系统透过率测试系统[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
YANG Wei. Transmission test system of telescopic system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [8] 李洪雨, 郭汉洲, 李俊霖, 等. 大口径红外光学系统透过率测量装置[J]. 光学精密工程, 2023, 31(12): 1752-1760.
LI Hongyu, GUO Hanzhou, LI Junlin, et al. Transmittance measurement device of large-aperture infrared optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(12): 1752-1760.
- [9] 田留德, 王涛, 赵怀学, 等. 红外光学系统光谱透过率测试装置及方法: CN201810663934.1[P]. 2020-04-03.
TIAN Liude, WANG Tao, ZHAO Huaxue, et al. Spectral transmittance test device and method of infrared optical system: CN201810663934.1[P]. 2020-04-03.
- [10] 李晓平, 杨文佳, 石春雷, 等. 一种红外镜头光谱平均透过率测量系统及方法: CN202210757158.8[P]. 2022-09-02.
LI Xiaoping, YANG Wenjia, SHI Chunlei, et al. System and method for measuring average spectral transmittance of infrared lens: CN202210757158.8[P]. 2022-09-02.
- [11] 李四维, 王学新, 谢毅, 等. 红外光学系统光谱透射比较准技术[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 868-873.
LI Siwei, WANG Xuexin, XIE Yi, et al. Spectral transmittance calibration technology of infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 868-873.
- [12] 杨琨. 傅里叶变换红外光谱仪若干核心技术研究及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
YANG Kun. Research and application of some core technologies of Fourier transform infrared spectrometer[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [13] 李召龙, 沈同圣, 史浩然, 等. 基于场景的红外光学系统渐晕效应校正方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(增刊1): 8-12.
LI Zhaolong, SHEN Tongsheng, SHI Haoran, et al. Scene-based method to correct vignetting effect of IR optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(S1): 8-12.
- [14] 史浩然, 沈同圣, 李召龙, 等. 红外系统中渐晕效应的模拟方法研究[J]. 红外技术, 2015, 37(4): 296-299.
SHI Haoran, SHEN Tongsheng, LI Zhaolong, et al. Simulation of the vignetting effect in infrared imaging system[J]. Infrared Technology, 2015, 37(4): 296-299.

- [15] 李召龙, 沈同圣, 娄树理. 基于多项式逼近的红外系统渐晕效应校正方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(增刊 1): 6-10.
- LI Zhaolong, SHEN Tongsheng, LOU Shuli. Vignetting correction method for the infrared system based on polynomial approximation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S1): 6-10.
- [16] 邹百英, 赵慧洁, 张颖, 等. 离轴抛物面镜准直输出辐照度特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 688-692.
- ZOU Baiying, ZHAO Huijie, ZHANG Ying, et al. Irradiance characteristics for the off-axis parabolic collimating mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 688-692.
- [17] 梁培. 离轴抛物镜准直特性的研究[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 909-913.
- LIANG Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 909-913.