

文章编号 1004-924X(2024)15-2363-11

太阳辐照度测量中孔径光阑衍射效应

余杰玲^{1,2}, 董航^{1,2}, 衣小龙¹, 林雨辰^{1,2}, 王思龙³, 苗庆祥⁴,
孙瑞⁵, 高展鹏⁶, 方伟¹, 叶新^{1*}

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 探月与航天工程中心, 北京 100048;

4. 长春理工大学 光电信息科学与工程(理), 吉林 长春 130013;

5. 吉林工程技术师范学院 电气与信息工程学院, 吉林 长春 130062;

6. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要:针对当前在辐照度测量中对孔径光阑衍射效应的评估仍停留在理论计算层面,无法评估衍射修正结果不确定度的现状,研究了光阑衍射效应实验检测方法,以校正孔径光阑的衍射效应并提升太阳总辐照度的测量精度。基于暗场成像技术和夫琅和费远场衍射理论,设计孔径光阑的衍射效应检测方法,开展检测实验,通过研究探测器线性度标定、背景信号校正、衍射图像数据分析等,建立数据修正处理流程,获取孔径光阑在前结构的太阳绝对辐射计衍射效应值,并对实验结果进行不确定度分析。测试结果显示:衍射效应测量值为 8.81×10^{-4} ,合成不确定度为6.49%。研究成果将为我国下一代风云气象卫星太阳辐射监测仪衍射效应的精确校正及实现高精度太阳总辐照度的测量奠定关键技术基础。

关键词:衍射效应;孔径光阑;衍射角;图像校正

中图分类号:O441.4 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243215.2363

Aperture stop diffraction effect of solar irradiance measurement

YU Jieling^{1,2}, DONG Hang^{1,2}, YI Xiaolong¹, LIN Yuchen^{1,2}, WANG Silong³, MIAO Qingxiang⁴,
SUN Rui⁵, GAO Zhanpeng⁶, FANG Wei¹, YE Xin^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100048, China;

4. Optoelectronic Information Science and Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130013, China;

5. School of Electrical and Information Engineering,
Jilin Engineering and Technology Normal University, Changchun 130062, China;

6. School of Materials Science and Chemical Engineering,

收稿日期:2024-03-26;修订日期:2024-04-13.

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(20220101165JC);国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFB3903200,
2022YFB3903203);国家自然科学基金资助项目(No. 42001316)

Harbin Engineering University, Harbin 150006, China)

* Corresponding author, E-mail: yexin@ciomp.ac.cn

Abstract: To address the current reliance on theoretical calculations for evaluating the diffraction effects of aperture stops in irradiance measurement, an experimental method to detect diaphragm diffraction effects was developed. This aims to correct aperture stop diffraction and enhance total solar irradiance measurement accuracy. Utilizing dark-field imaging and Fraunhofer far-field diffraction theory, a detection method was designed and tested. By calibrating detector linearity, correcting background signals, and analyzing diffraction image data, a data correction process was established. This process determined the solar absolute radiometer diffraction effect value at the aperture stop's front structure and assessed the experimental uncertainty. The experiment found a diffraction effect value of 8.81×10^{-4} with a total uncertainty of 6.49%. These findings provide a crucial technical foundation for accurately correcting diffraction effects in China's next-generation Fengyun meteorological satellites' solar radiation monitors, enabling precise total solar irradiance measurements.

Key words: diffraction effect; aperture stop; diffraction angle; image correction

1 引言

气候变化是当今世界面对的巨大挑战之一, 科学界正致力于研究气候变化机制^[1]。太阳总辐射照度(Total Solar Irradiance, TSI)是地球气候模型的关键参量之一。只有在适当不确定度尺度上建立长期观测数据链, 才能在气候变化研究中明确成因及结果, 提升未来气候发展趋势预测的准确性。受大气层影响, TSI只有在空间才能实现长期精准测量, 基于卫星平台的TSI测量被欧美和我国列为空间观测重大规划。长期精准监测空间TSI可为气候变化预测、环保政策制定提供科学依据^[2-3]。

最早的空间TSI监测实验始于1978年, 美国云雨卫星(Nimbus-7)上的地球辐射收支仪(ERB)测得TSI均值为 $1\,370.8\text{ W/m}^2$ 。在其后的三四十年里, 分别有SMM/ACRIM(太阳活动年任务卫星/有源腔型辐射计辐照度监测器)、SOHO/VIRGO(太阳日光层观测器/太阳辐照度变化和引力振动)、SORCE/TIM(太阳辐射和气候实验/太阳总辐照度监测仪), 以及我国风云卫星/SIARs(风云卫星/太阳辐照度绝对辐射计)等多颗卫星在轨对太阳总辐照度进行了长期、持续的监测。随着仪器自校准和辐射定标能力的提升, 测量结果均值逐步从 $1\,368\text{ W/m}^2$ 降低到

$1\,361\text{ W/m}^2$ ^[4-5], 不同空间任务下获得的TSI数据与国际同期卫星数据的相对偏差为 0.3% ^[6-9]。但要认知地球的长期变化, 就要同时具有高准确性和高稳定性的TSI观测, 这就需要 0.03% 不确定度的测量数据作为支撑^[10], 目前的空间TSI观测尚不能实现这一目标。因此, 国外开展了高精度空间TSI绝对辐射测量技术研究, 我国也开始研制新一代风云气象卫星SIAR型太阳绝对辐射计, 以满足气候变化、地球辐射收支平衡等应用领域的迫切需求。

SIAR是一种电替代绝对辐射计, 核心探测器是对入射光具有超高吸收比的黑体腔^[11]。利用电功率复现入射光功率造成的腔温变化, 通过精确测量等效电功率来标定未知的光功率, 测量结果直接溯源至国际基本单位制(SI)中的电流。入射光充满仪器孔径光阑, 通过预先精确标定的光阑面积将光功率转换为辐照度量值。作为自校准仪器, SIAR可实现测量数据的SI自溯源, 无需依赖其他辐射基准。因此, 为提高新一代星载SIAR的测量精度, 准确评估仪器的测量结果, 需要根据太阳总辐照度测量原理对TSI真实值进行参数分解, 并对每一个参数进行精确校正。其中, 衍射效应作为TSI测量系统误差的主要来源之一, 必须要进行修正。

衍射修正一直是辐射计量领域难以解决的

问题,所有限制光波传输的光学器件都会引起衍射效应,目前,国内外仅能依赖理论计算手段对辐射计的衍射效应进行评估。刘国栋等已对太阳辐射计的衍射效应理论修正开展了研究,基于基尔霍夫衍射理论建立衍射效应的计算模型。该模型指出,不同光阑结构的衍射效应对辐照度的测量误差通常为 $0.1\%\sim 0.3\%$,有些甚至达到 0.5% ^[12]。研究表明:孔径光阑在前结构的衍射效应对TSI测量的影响要低于孔径光阑在后结构。但由于缺乏实验测量手段,衍射修正系数的不确定度无法评估,从而限制了SIAR精度的提升。为此,针对我国下一代风云卫星SIAR型太阳绝对辐射计,长春光机所研制了孔径光阑前置的星载SIAR样机,并开展孔径光阑在前结构的衍射效应修正方法的研究。

本文对新一代星载SIAR样机的孔径光阑衍射效应实验检测方法进行研究。基于暗场成像技术和夫琅和费远场衍射理论,设计孔径光阑的衍射效应检测方法;建立衍射效应测量装置开展实验检测,并对测量结果的不确定度进行分析;最后,通过衍射效应与衍射角度的拟合曲线,得到SIAR在入射光波长为633 nm下的衍射效应值。该研究成果为我国太阳绝对辐射计衍射效应的精确校正奠定了关键技术基础。

2 衍射效应原理

2.1 夫琅和费圆孔衍射

太阳绝对辐射计光阑孔径形状为圆形且TSI测量过程中的衍射类型属于远场衍射问题,因此首先对夫琅和费圆孔衍射进行分析。图1为夫琅和费圆孔衍射光路。其中, x_1-y_1 面为孔径平面; L 为透镜,可以将无穷远处的衍射图样汇聚至透镜焦平面处; $x-y$ 面为透镜的焦平面, θ 为衍射角, a 为孔径半径, P_0, P 为观察平面上两点且 P_0 位于光轴上, r, φ 为极坐标系下某一点位置。根据夫琅和费衍射公式,透镜后焦面某一点的复振幅分布为:

$$\tilde{E}(x, y) = C' \int_0^a \int_0^{2\pi} \exp[-ikr_1\theta \cos(\phi_1 - \phi)] r_1 dr_1 d\phi_1, \quad (1)$$

式中: $C' = \frac{CA}{f} \exp(ikf)$;由于在圆形孔径对称的

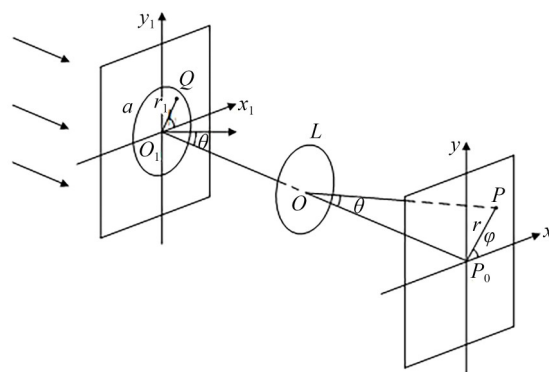


图1 夫琅和费圆孔衍射光路

Fig. 1 Fraunhofer circular aperture diffraction optical path diagram

情况下,积分结果与方位角无关,可令 $\phi=0$ 。根据贝塞尔函数性质,式(1)可表示为:

$$E(P) = 2\pi C' \int_0^a J_0(kr_1\theta) r_1 dr_1 = \frac{2\pi C'}{(k\theta)^2} kr_1 \theta J_1(kr_1\theta) \Big|_{r_1=0}^{r_1=a} = \pi a^2 C' \frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta}. \quad (2)$$

因此, P 点光强如下^[13]:

$$I = (\pi a^2)^2 |C'|^2 \left[\frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta} \right]^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2, \quad (3)$$

式中: I_0 为光轴上 P_0 点光强, $J_1(Z)$ 为一阶贝塞尔函数。根据夫琅和费圆孔衍射理论,当光源的波长和孔径固定时,衍射光强只与衍射角有关,且衍射光强曲线关于 $\theta=0^\circ$ 对称。

2.2 太阳绝对辐射计中的衍射效应

辐射计中的光阑结构通常包括孔径光阑(精密光阑)、视场光阑和若干个消杂光光阑。孔径光阑是经过精密加工并需要准确测量面积的器件,其面积即为计算辐射照度时的入射面积。孔径光阑和视场光阑共同决定了辐射计的视场,而消杂光光阑则主要用于消除系统内部的杂散光。入射光在通过光阑边缘时会发生衍射现象,导致辐射测量结果与几何预期值产生偏差,构成辐射计的部分系统误差。这几个光阑通过一定的组合,得到两种结构:第一种,视场光阑在前,孔径光阑靠近锥腔,中间依次放置消杂光光阑;第二种,孔径光阑与视场光阑位置调换。

第一种孔径光阑在后的情况如图2所示,孔径光阑位于黑体腔开口前端,因此通过孔径光阑的光会全部进入黑体腔。但对于视场光阑及消杂光光阑,由于光阑尺寸依次减小,入射光会直

接照射到全部的光阑上,通过这些光阑的光由于衍射效应还会有一部分光进入黑体腔,最终使测量结果偏大。此时,每片光阑均会产生衍射效应,总的衍射效应为视场光阑及 4 片消杂光光阑衍射效应的总和。

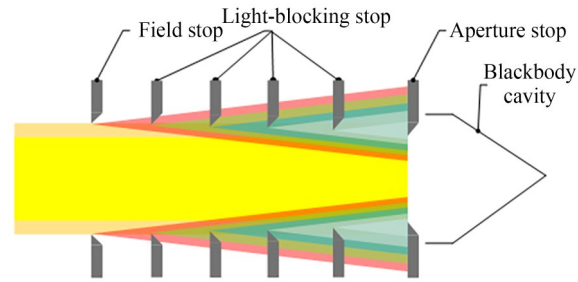


图 2 孔径光阑在后衍射效应示意图
Fig. 2 Diffraction effect with main aperture at rear

孔径光阑在前的情况如图 3 所示,孔径光阑位于光阑系统的最前端,通过孔径光阑的光由于衍射会有部分光被后续光学系统遮挡,无法全部进入黑体腔中,这导致最终的测量结果偏小。此时,由于消杂光光阑及视场光阑不能被太阳光照射,高阶次的衍射光可忽略不计,总的衍射效应主要取决于孔径光阑的衍射。

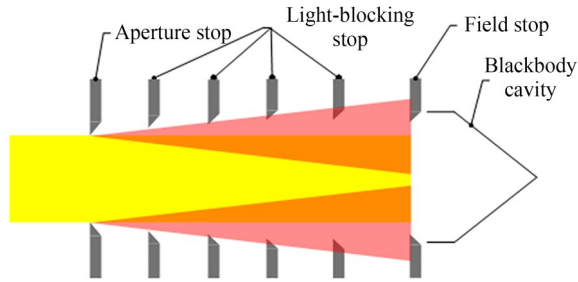


图 3 孔径光阑在前衍射效应示意图
Fig. 3 Diffraction effect with main aperture in front

将衍射光与总光的比值定义为衍射效应值,对比辐射计中两种光阑的结构可知,孔径光阑在前的结构,总的衍射效应仅由一片光阑产生,这会大大简化衍射效应的分析。表 1 列出了不同 TSI 监测设备由于衍射效应引入的 TSI 测量误差,可以看出,ACRIM III,ERBE 没有计算衍射效应。而从 PMO6V,TIM,SIAR 等的估计值可以看出,衍射效应对总辐照度的影响在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间。受衍射效应的制约,目前,太阳绝对辐射计的测量精度难以突破 0.03% 的需求。

表 1 不同 TSI 监测设备衍射效应

Tab. 1 Diffraction effect of different TSI monitoring devices

TSI 设备	衍射效应引入误差/ 10^{-6}	评估方法
ACRIM III	未评估	无
ERBE	未评估	无
DIARAD	776	理论计算
PMO6V	1 000	理论计算
TIM	452	理论计算
SIAR	2 724	理论计算

目前,美国 TIM 采用孔径光阑与视场光阑调换的结构,减少了产生衍射光的关键表面,从而降低了衍射效应。而我国在轨测量的 SIAR 型太阳绝对辐射计仍为孔径光阑在后的结构,随着光阑个数的增加,衍射效应逐次累加,从而导致总不确定度的增加。长春光机所研制的新一代 SIAR 型太阳绝对辐射计原理样机,采用孔径光阑在前的结构,如图 4 所示。本文对这种光阑结构的 SIAR 衍射效应进行了实验测量。

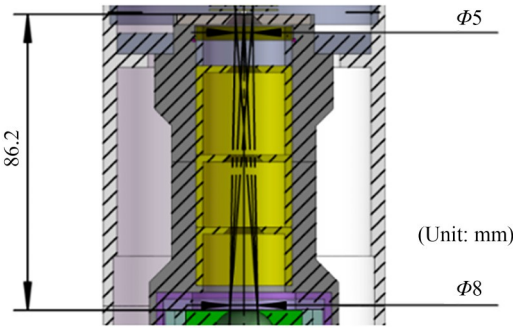


图 4 光阑系统结构
Fig. 4 Structure of stop system

2.3 衍射效应实验检测

图 5 为光阑衍射效应测量原理(彩图见期刊电子版)。图中,入射光通过孔径光阑后将会发生衍射,以主光(蓝色)为分界线,主光外侧的衍射光定义为外衍射光(绿色),主光内侧的衍射光定义为内衍射光(红色)。孔径光阑位于成像透镜物方 $2f$ 处,因此,会在像方 $2f$ 处产生一个与孔径光阑等大的实像,即图 5(b)中的像面处。若在透镜像方焦距处放置挡光圆盘,将主光和部分衍射光反射到中心光路外,则在小于成像透镜 $2f$ 处的位置 1 时,由于存在离焦,内外衍射光并未成像

至一处,而是会聚为两个圆环。其中,内环为外衍射光会聚得到,内环为外衍射光会聚得到。同理在位置 2 时,外衍射光成像在外环处,内衍射光成像在内环处。

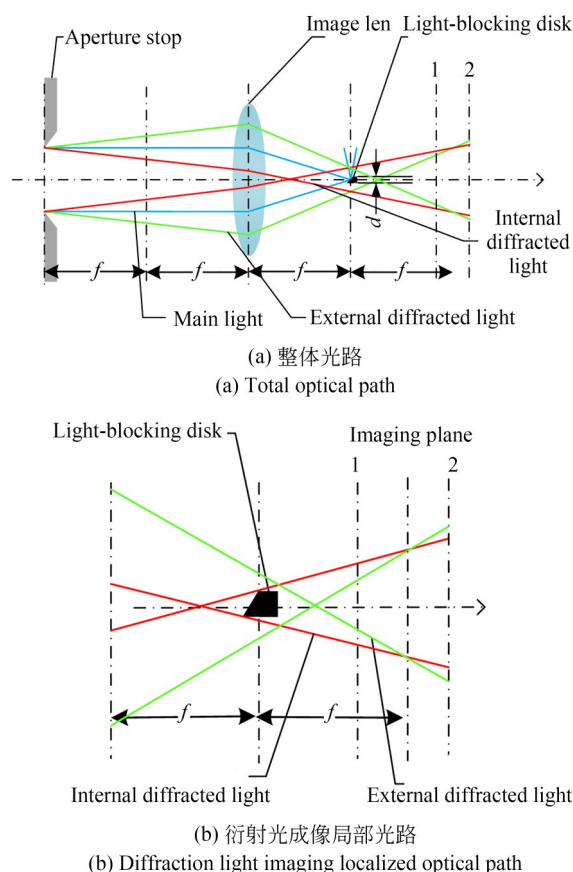


图 5 衍射光成像原理

Fig. 5 Schematic diagram of diffraction light imaging

为了测量被视场光阑所遮挡的衍射光,需要去掉消杂光光阑及视场光阑,仅保留一片孔径光阑进行实验。因此,实验过程中无需考虑光阑系统内部的杂散光。挡光圆盘采用铝制圆盘,表面涂有吸收率为 0.97 的黑漆,同时挡光圆盘存在 45° 倾角,使反射光垂直反出光路而不会产生额外的杂散光。

由于孔径光阑位于透镜物方 $2f$ 处,则在透镜的像方焦面上,以不同角度入射到透镜上的光会聚焦到不同的空间位置。利用近轴近似,在焦平面上的径向位置 d 与入射到透镜上的光的的角度 θ 有关,公式如下^[14]:

$$d = \tan(\theta) f \approx \theta f. \quad (4)$$

孔径光阑与视场光阑定义了系统的衍射光通过范围。根据图 4 可知,最大可进入黑体腔的外衍射光的衍射角为 0.997° ,最大可进入黑体腔的内衍射光的衍射角为 4.312° ,即大于这两个角度的衍射光将被视场光阑遮挡,造成能量损失,致使进入黑体腔的能量偏小。因此对于这种光阑结构,衍射角大于 0.997° 的外衍射光及衍射角大于 4.312° 的内衍射光是产生衍射效应的主要因素。总的衍射效应为:

$$D_T = D_O + D_I, \quad (5)$$

其中: D_O 为外衍射光的衍射效应, D_I 为内衍射光的衍射效应。

衍射效应检测实验的基本原理为:首先,通过 CCD 相机测量几何光和衍射光的总光强 (I_T),根据上述可知,在像方 f 处,衍射光会聚成直径 θf 的圆形光斑。由于几何光会聚的圆形光斑直径很小,无法恰好遮挡几何光并让衍射光全部通过,在透镜像方 f 位置分别放置直径为 $\theta_1 f, \theta_2 f, \theta_3 f, \theta_4 f$ 的圆形遮光块,分别将衍射角小于 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 的衍射光和几何光反射出主光路,用 CCD 相机测量衍射光强 ($I_{\theta_1}, I_{\theta_2}, I_{\theta_3}, I_{\theta_4}$),分别得到衍射角度大于 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 的衍射光信号的叠加。衍射光信号与总光信号之比即为大于衍射角度下衍射光强能量占比。对这几个值进行曲线拟合,建立衍射光及衍射角的关系函数,即可得到固定衍射角下的衍射能量,进而计算该光阑结构下的衍射效应。

3 实验

3.1 实验测试

实验装置由光源、功率稳定器、空间滤波器、准直透镜、光阑系统、成像透镜(焦距 $f = 60 \text{ mm}$)、一系列不同直径的挡光圆盘和 CCD 相机组成。照明光源是由恒流电源供电的 633 nm 氦氖激光器,在激光器后放置功率稳定器,以保证入射光的稳定性。空间滤波器可滤除高斯光束的边缘噪声,并在针孔位置形成点光源出射,再经准直透镜后得到平行光源。

平行光源经过光阑系统后,几何光继续沿平行光轴的方向传播,而衍射光则沿衍射角 θ 传播。成像透镜是一个 $f = 60 \text{ mm}$ 的平凸透镜,位于孔径光阑后 $2f$ 的距离。实验装置的下一部分是

挡光圆盘,它位于透镜像方焦面处。大部分的入射光被挡光圆盘遮挡,改变挡光圆盘的尺寸,实现不同衍射角的衍射光通过,最终被 CCD 相机接收。综合考虑 CCD 相机的靶面尺寸,本文将相机固定在像方小于 $2f$ 的位置,以保证成像圆环在相机视场范围内,实验装置如图 6 所示。

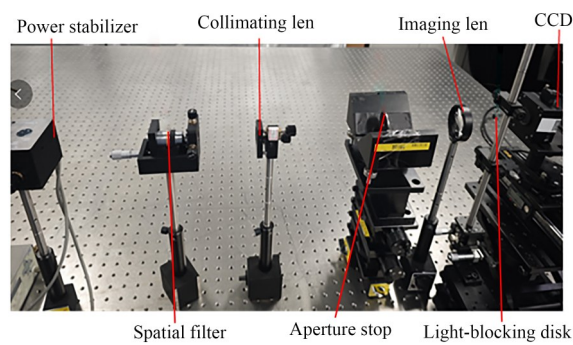


图 6 衍射效应测量实验装置
Fig. 6 Experimental setup for diffraction effect measurement

确定 CCD 相机位置后,首先关闭激光光源,CCD 获取暗场图像,用于修正测量数据的背景噪声及 CCD 底噪。随后打开激光光源,不加挡光圆盘,CCD 相机拍摄总光图像,如图 7 所示。拍摄总光时,为防止 CCD 相机饱和,曝光时间设为 1 ms。

获取背景信号与总光信号后,将挡光圆盘放置于像方焦距处获取衍射光图像。根据几何结

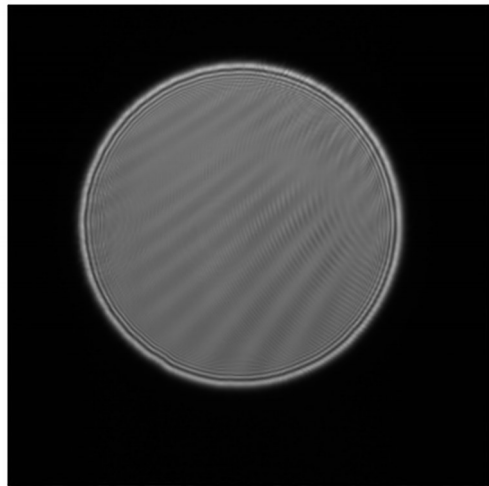


图 7 总光图像
Fig. 7 Total light image

构计算出此时衍射光的最大内衍射角为 13.09° ,最大外衍射角为 10.8° 。

根据式(1)可知,内衍射光在焦面处的最大半径为 13.95 mm,而外衍射光在焦面处的最大半径为 11.45 mm。因此,随着挡光圆盘直径的逐渐增加,衍射光能量会逐渐降低且外环能量高于内环能量。选用直径分别为 2,4,6,8 mm 的挡光圆盘,依次测量不同衍射角的衍射光信号,利用长曝光时间获得图像。实验结果如图 8 所示,随着挡光圆盘直径的逐渐增大,内环率先消失,外环不断变窄,即被遮挡住的衍射角度逐渐增大。为提高衍射光信号的信噪比,这里将 CCD 曝光时间延长至 300 ms,因此,用 CCD 相机在不同曝光时间下拍摄同一目标,建立长曝光时间与短曝光时间测量信号的比例关系,使总光信号与衍射光信号归一化到同一曝光时间水平,以修正 CCD 的响应非线性。

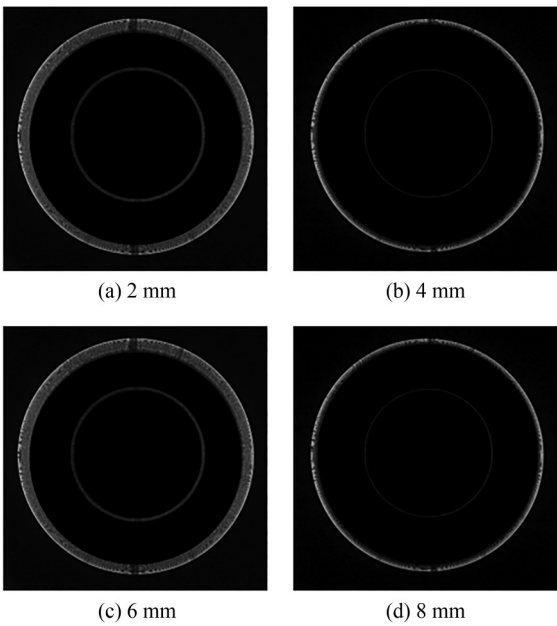


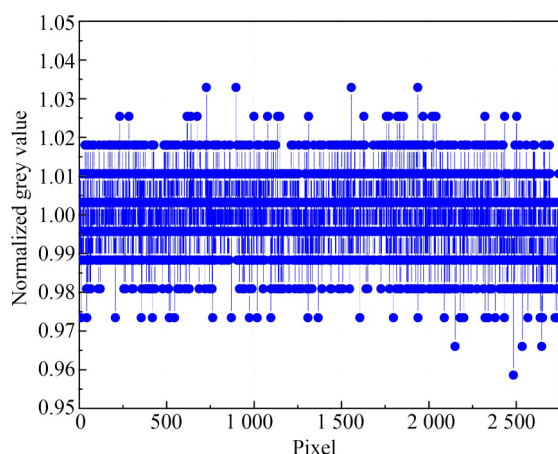
图 8 不同尺寸挡光圆盘下的衍射光图像
Fig. 8 Diffractive light image with light blocking disc in different diameters

3.2 数据处理

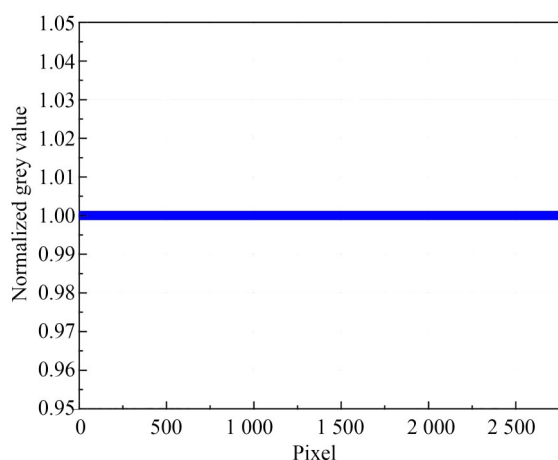
理想情况下,当 CCD 相机各像元接收到的辐照度相等即探测器整个靶面辐照均匀时,图像中所有像素点的灰度值应该是相等的。而实际上,CCD 相机各像素对相同的辐照度产生的灰度

值并不相同,称为探测器的响应非均匀性。平场校正的目的就是修正响应非均匀性,在衍射效应检测实验中,由于 CCD 相机像元响应非均匀性引入的误差不可忽略,因此必须对相机进行平场校正^[15]。

平场校正的方法是使用标准光源照明 CCD 相机,由于各像元间存在响应不均匀性,各像元输出的灰度值不同,因此,需要建立平场系数矩阵,将各像元的输出结果归一到同一灰度值上,以达到平场校正的目的。图 9 给出了 CCD 相机拍摄的原始图像与平场校正后图像水平方向上像元的亮度曲线,CCD 获取的每张图像都需要乘以平场系数矩阵,以修正 CCD 的响应不均匀性。



(a) 原始图像亮度曲线
(a) Brightness curve of the original image



(b) 平场图像的亮度曲线
(b) Brightness curve of flat field images

图 9 CCD 平场校正

Fig. 9 Flat field correction of CCD

对于总光图像,直接计算图像中所有像元灰度值之和,剔除背景噪声后即为总光信号。由于衍射由孔径光阑边缘导致,因此需要截取总光边缘环带区域,以评估入射光以及光阑刃口加工精度的均匀性。以圆心为原点,将总光图像按 360° 的方位角进行展开,以 5° 为间隔计算截取环带各个区域内像元的灰度总值,代表该角度范围内的空间亮度。总光边缘区域的信号值如图 10 所示,以图中各点数据的标准偏差进行表征,得到均匀性为 3.45%,用于后续测量结果的不确定度分析。

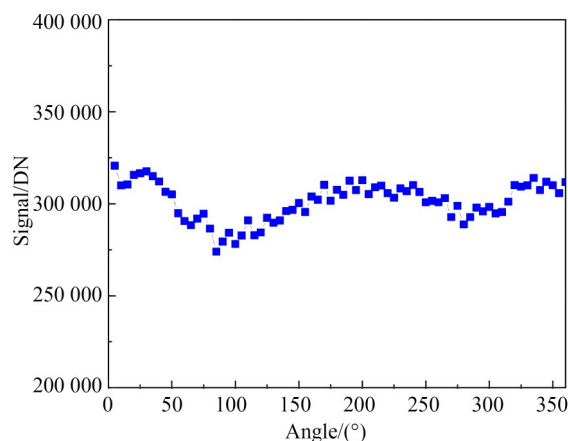


图 10 总光边缘环带处亮度曲线

Fig. 10 Luminance curve at edge band of total light

由基尔霍夫衍射原理可知,衍射能量曲线关于衍射角 $\theta=0^\circ$ 对称,即相同角度的内外衍射光能量相同。此外,可测量的内衍射光的衍射角度大于外衍射光的衍射角度,因此本文选择对内衍射光(外环)进行分析。首先,根据内外衍射环的半径将二者进行分离,分离后的衍射图像如图 11 所示。可以看出,衍射环在竖直方向上存在两处明显的信号缺失,这是悬挂挡光圆盘的细线在竖直方向上会遮挡衍射光,CCD 相机无法获取这一部分的衍射光信号,因此在计算衍射光信号的过程中,需要对这一部分信号进行修正。

以圆心为原点,将衍射环按 360° 的方位角展开,每间隔 5° 计算衍射环区域内像元的灰度总值,代表该角度范围内的空间亮度。由图 12 可

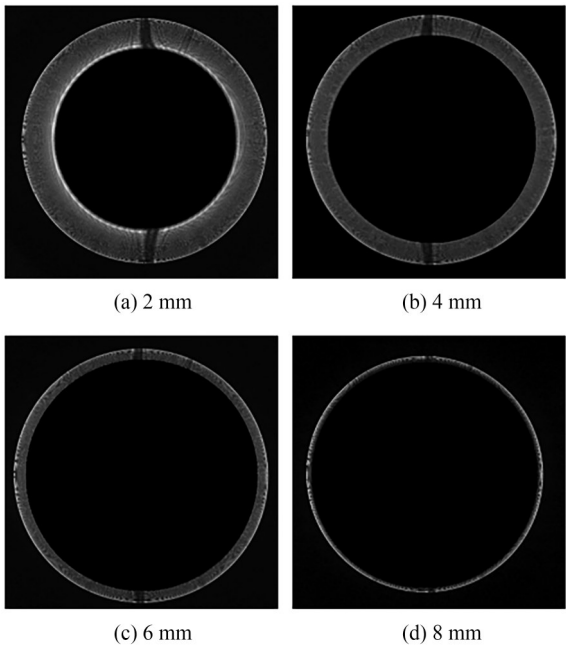


图 11 不同尺寸挡光圆盘下分离外环后的衍射光图像
Fig. 11 Diffracted light image after separation of outer ring with light block disk in different diameters

见, 90° 与 270° 位置两处空间亮度明显的下降是由细线的遮挡导致的。

对图 12 中信号缺失部分进行填充, 通过对缺失部位两端的信号取均值的方式作为该位置的信号值, 修补后的亮度曲线如图 13 所示。将各区域信号相加, 得到内环或外环的衍射光信号。再将衍射光信号和总光信号进行背景噪声与 CCD 响应非线性修正后, 二者之比即为该衍射角度下的衍射效应值。

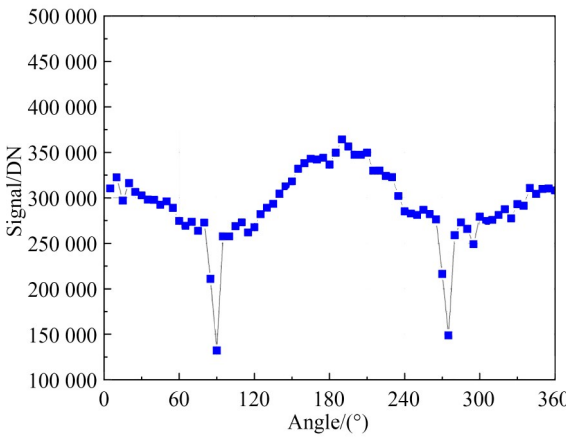


图 12 衍射环亮度曲线
Fig. 12 Diffraction ring brightness curve

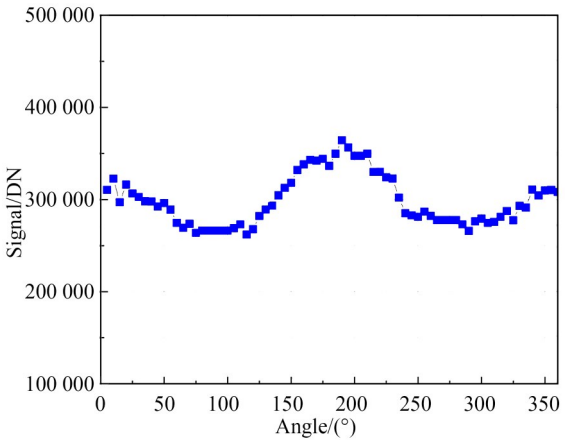


图 13 修补后衍射环亮度曲线
Fig. 13 Diffraction ring brightness curve after repair

3.3 实验结果

将 4, 6, 8 mm 的挡光圆盘遮挡下的衍射光图像按 3.2 节所述的方式进行数据处理。不同尺寸的挡光圆盘代表不同衍射角下的衍射效应值, 衍射角度可由式 (2) 计算得到。测量结果如表 2 所示。

表 2 不同挡光圆盘下测量的衍射效应值
Tab. 2 Diffraction effect values measured with different light-blocking discs

挡光圆盘尺寸/mm	衍射角/(°)	衍射效应值/(10^{-4})
1.94	0.926	7.410
4.02	1.919	4.042
5.96	2.843	2.703
7.98	3.805	1.893

表 3 总结了测量结果的误差来源并合成得到衍射效应测量结果的不确定度^[16-17]。其中, 测量重复性是指衍射光在一定时间尺度上的稳定性, 以衍射光测量的标准偏差为特征。均匀性包括光源自身的均匀性和孔径光阑刃口的均匀性, 已在第 3.2 节中进行了表述。几何不确定度包括圆盘位置的不确定度和尺寸的不确定度, 二者的误差会传播到衍射角, 进而影响衍射光信号。背景噪声的不确定度以测量背景噪声的标准偏差来表征。CCD 响应非线性由 CCD 相机在不同曝光时间对同一目标测量的信号之比得出, 以实现 CCD 在同一曝光水平下对总光和衍射光的测量。

表 3 不确定度分量

Tab. 3 Components of measurement uncertainty (%)

挡光圆盘尺寸/mm	测量重复性	均匀性	几何	背景噪声	CCD 响应非线性	角度	合成不确定度
1.94	0.52	3.45	2.52	0.1	0.4	2.10	4.81
4.02	0.66	3.45	1.80	0.1	0.4	0.54	4.01
5.96	0.79	3.45	1.56	0.1	0.4	0.27	3.90
7.98	0.95	3.45	1.38	0.1	0.4	0.16	3.86

入射角度的不确定度是指实验光源与太阳光源之间的差异,根据基尔霍夫衍射公式与傍轴近似计算得到。每个挡光圆盘下测量的衍射效应值不同,得到的合成不确定度在 3%~5% 内。

3.4 SIAR 衍射效应计算

根据夫琅和费圆孔衍射的光强分布公式可知,衍射光强与衍射角度近似呈指数分布,因此对实验测量结果进行指数拟合,建立衍射效应值与衍射角之间的函数关系,拟合函数曲线如图 14 所示。

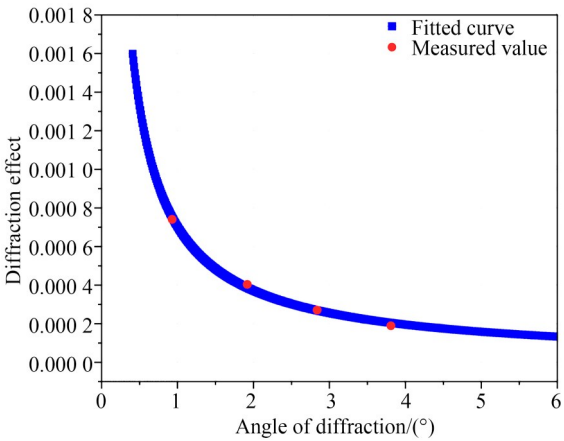


图 14 衍射效应曲线

Fig. 14 Diffraction effect curve

绘制出拟合曲线后,得到衍射角大于 0.997° 的外衍射光衍射效应值及衍射角大于 4.312° 的内衍射光衍射效应值;根据式(5)得到,孔径光阑在前结构 SIAR 的衍射效应值为 8.81×10^{-4} 。此时,由于衍射光的最大角度只能测到 13.09°,仍需评估 13.09° 之外的衍射光占比,以进行误差分析。根据上一节得到的合成不确定度可知,单次测量的平均不确定度为 4.15%,结合拟合曲线的

不确定度及衍射角度引入的不确定度,SIAR 的衍射效应值在 633 nm 处测量的合成不确定度为 6.49%。结合衍射效应测量值与测量不确定度可得到,将测量结果用于衍射效应的修正,修正后的衍射效应由原来的 8.81×10^{-4} 降至 5.72×10^{-5} ,这将衍射效应对于辐照度测量的影响降低了一个数量级。

根据刘国栋对衍射效应计算的理论模型研究,得到相同结构的 SIAR 在 633 nm 处的衍射效应为 9.22×10^{-4} ,与本文的结果相差 4.65%。两种方法得到的衍射校正因子的偏差均在实验测量的不确定度范围内,相互对比验证了理论模型的正确性和实验方案的可行性。相较于衍射效应的理论模型,本文通过实验对衍射效应进行测量,给出测量结果的不确定度,并对衍射效应修正结果进行定量评估。

4 结 论

本文基于暗场成像技术和夫琅和费远场衍射理论,设计孔径光阑的衍射效应检测方法。研制衍射效应检测装置,建立了包含探测器线性度标定、背景信号校正、衍射图像数据分析等数据处理流程,在单波长下对孔径光阑在前结构的 SIAR 衍射效应进行测量。实验结果表明:SIAR 衍射效应值为 8.81×10^{-4} ,测量结果的合成不确定度为 6.49%。将测量结果用于衍射效应的修正,这将使辐照度测量中由衍射效应引起的误差减小至 5.72×10^{-5} 。测量结果将为我国新一代 SIAR 衍射效应的精确修正及未来高精度 TSI 测量及提供关键的技术支持。为实现 SIAR 衍射效应的在轨修正,下一步需开展太阳模拟光源与太阳光谱全谱段拟合方法的研究。

参考文献:

- [1] SOLANKI S K, KRIVOVA N A, HAIGH J D. Solar irradiance variability and climate[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2013, 51: 311-351.
- [2] THUILLIER G, ZHU P, SNOW M, *et al.* Characteristics of solar-irradiance spectra from measurements, modeling, and theoretical approach [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 79.
- [3] STEPHENS G L, LI J, WILD M, *et al.* An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 691-696.
- [4] FRÖHLICH C. Total solar irradiance observations [J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(3): 453-473.
- [5] SONG B Q, YE X, FINSTERLE W, *et al.* The Fengyun-3E/joint total solar irradiance absolute radiometer: instrument design, characterization, and calibration[J]. *Solar Physics*, 2021, 296(3): 52.
- [6] 郭旭, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 基于蒙特卡罗法的星载太阳辐照度光谱仪对日指向误差分析[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(3): 474-483.
GUO X, HU CH H, YAN CH X, *et al.* Analysis of Sun pointing error of spaceborne solar spectroradiometer based on Monte Carlo method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(3): 474-483. (in Chinese)
- [7] WANG H R, WANG Y P, YE X, *et al.* Instrument description: the total solar irradiance monitor on the FY-3C satellite, an instrument with a pointing system[J]. *Solar Physics*, 2016, 292(1): 8.
- [8] 高鑫, 王凯, 方伟. 太阳辐照度绝对辐射计吸收腔结构优化[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(3): 624-631.
GAO X, WANG K, FANG W. Optimization on the structure of the absorption cavity of solar irradiance absolute radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(3): 624-631. (in Chinese)
- [9] YE X, YI X L, LIN C, *et al.* Instrument development: Chinese radiometric benchmark of reflected solar band based on space cryogenic absolute radiometer[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2856.
- [10] TANG X, XIA Y Z, FANG W, *et al.* International comparison of the SIAR measurement and the WRR standard [J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 15(2): 147-150.
- [11] 衣小龙, 杨振岭, 叶新, 等. 低温辐射计斜底腔吸收比测量[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2733-2739.
YI X L, YANG ZH L, YE X, *et al.* Absorptance measurement for sloping bottom cavity of cryogenic radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2733-2739. (in Chinese)
- [12] 刘国栋. 太阳辐照绝对辐射计衍射效应分析与修正[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
LIU G D. *Analysis and Correction of Diffraction Effect of Solar Irradiation Absolute Radiometer* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [13] CHANG W S C. *Principles of Optics for Engineers: Diffraction and Modal Analysis*[M]. .
- [14] HARBER D M, HEUERMAN K F, KOPP G A, *et al.* Aperture edge scatter calibration of the cavity radiometers for the spaceflight Total Irradiance Monitor[C]. *SPIE Proceedings, Earth Observing Systems XI. San Diego, California, USA*. SPIE, 2006: 6296.
- [15] 常松涛, 夏豪杰. 时间延迟积分荧光显微成像平场校正技术[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(5): 527-535.
CHANG S T, XIA H J. Flat field correction technique for time delay integration fluorescence microscopy imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(5): 527-535. (in Chinese)
- [16] 郑翔远, 叶新, 罗志涛, 等. 高精度辐射热流计的不确定度分析与评价[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 780-788.
ZHENG X Y, YE X, LUO ZH T, *et al.* Uncertainty analysis and evaluation of a high-precision radiative heat-flux meter[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 780-788. (in Chinese)
- [17] 夏桂锁, 廖城, 伏燕军. 平行双关节坐标测量机

的标定及不确定度评价[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1227-1234.

XIA G S, LIAO CH, FU Y J. Calibration and un-

certainty evaluation of double parallel-joint coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1227-1234. (in Chinese)

作者简介:



余杰玲(1998—),女,浙江衢州人,硕士研究生,2017年于中国计量大学获得学士学位,主要从事辐射计量等方面的研究。E-mail: yujieling21@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



叶新(1979—),男,吉林省吉林市人,研究员,博士,2005年于中国科学技术大学获得硕士学位,2019年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学研究一部主任,主要从事星上辐射定标、太阳总辐照度测量方面的研究。E-mail: yexin@ciomp.ac.cn