

引用格式: WEI Chen, WANG Hongjun, WANG Dasen, et al. Large Dynamic Range Scatter Signal Acquisition Based on Multi-exposure Image Fusion[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1112006

魏晨,王红军,王大森,等. 基于多曝光图像融合的大动态范围散射信号获取[J].光子学报,2021,50(11):1112006

基于多曝光图像融合的大动态范围散射信号 获取

魏晨¹,王红军¹,王大森²,田爱玲¹,刘丙才¹,朱学亮¹,刘卫国¹

(1 西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 西安 710021)

(2 中国兵器科学院宁波分院, 浙江 宁波 310022)

摘要:针对光散射法中散射信号的动态范围小影响光学元件表面粗糙度测量精度的问题,提出将图像融合技术应用到大动态范围散射信号的获取中。首先,采集光学元件同一位置处不同曝光时间的散射图像;然后,对其进行小波变换,分解后的低频分量采用散射信号最强原则、高频分量采用区域特性测量原则进行融合,经小波逆变换完成多曝光散射图像的融合;最后,将获取的大动态范围散射信号进行处理得到元件的表面粗糙度值。结果表明:融合后的散射信号与未经融合的散射信号相比,动态范围增加了3个数量级;融合后的散射信号计算得到的光学元件表面粗糙度值与白光干涉仪的测量结果一致,证明了该融合方法可用于大动态范围散射信号获取和光学元件的表面粗糙度测量。

关键词:光散射法;散射信号;多曝光散射图像融合;光学元件;表面粗糙度;小波变换;动态范围

中图分类号:O436.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215011.1112006

Large Dynamic Range Scatter Signal Acquisition Based on Multi-exposure Image Fusion

WEI Chen¹, WANG Hongjun¹, WANG Dasen², TIAN Ailing¹, LIU Bingcai¹, ZHU Xueliang¹,
LIU Weiguo¹

(1 Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, Xi'an Technological University,
Xi'an 710021, China)

(2 The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo, Zhejiang 310022, China)

Abstract: In the light scattering method, the small dynamic range of the scattering signal will directly affect the measurement accuracy of optical element surface roughness. To solve the problem, the image fusion is applied to acquire large dynamic range scattering signal. First, the scattering images of different exposure times at the same position are collected. Then, it is transformed with wavelet transform, the decomposed low-frequency components are fused using the principle of strongest scattering signal, meanwhile high-frequency components are fused using the principle of regional characteristic measurement. The multi-exposure scattering image fusion is completed by inverse wavelet transform. Finally, the large dynamic range scattering signal is processed to obtain the surface roughness value of the component. The results show that the dynamic range of the fused scattering signal is increased by 3 orders of magnitude compared with the unfused scattering signal. The surface roughness of optical elements calculated from the fused scattering signal is consistent with the measurement result of the white light interferometry, which proves

基金项目:基础科研项目(Nos.JCKY2018426C002,JSZL2018411C001)

第一作者:魏晨(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为光散射测量技术。Email:734011992@qq.com

导师(通讯作者):王红军(1974—),男,副教授,博士,主要研究方向为光学测量技术。Email:whj0253@sina.com

收稿日期:2021-05-06;录用日期:2021-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

the proposed fusion method can be used for large dynamic range scatter signal acquisition and surface roughness measurement of optical components.

Key words: Light scattering method; Scattering signal; Multi-exposure scattering image fusion; Optical element; Surface roughness; Wavelet transform; Dynamic range

OCIS Codes: 120.5820; 290.5880; 110.4155; 120.5820

0 引言

航空航天、军事以及天文学等领域^[1-3]对光学元件的表面粗糙度提出了很高的要求。光散射法作为一种非接触、快速、可靠的高分辨率检测方法,在元件粗糙度检测领域的应用越来越广泛^[4-6]。在利用光散射法检测光学元件表面粗糙度时,由于元件表面产生的散射信号非常弱,且反射方向附近的散射信号幅值变化很快,但受探测器探测范围的限制,采集到的散射信号动态范围小,严重影响了表面粗糙度的测量精度。因此,获取大动态范围的散射信号对光学元件表面粗糙度的检测具有重要意义。

目前,光学元件表面的大动态范围散射信号获取方法主要分为两类,利用大动态范围的探测器直接获取和获取低动态范围的散射图像经算法计算生成大动态范围散射信号。2014年,李俊麟等^[7]设计了积分球光源,使用单色仪与单片探测器实现了入射光和反射光的大动态范围辐亮度探测。2019年,黄聪等^[8]基于米氏散射,研究了光学元件的工作面放置位置对其表面产生的散射信号的影响,发现水平向上放置较垂直放置增大了数量级,较工作面向下放置增大了两个数量级。但此类方法的测量速度慢,且所需设备昂贵。现阶段,多曝光融合技术已广泛用于大动态范围的目标获取中。2015年,付争方等^[9]提出了基于Sigmoid函数拟合的多曝光图像融合算法,实现了高动态范围图像的获取。2019年,刘鑫龙等^[10]在金字塔融合算法中提出采用相位一致性滤波函数,实现了高动态范围图像的获取。

针对光学元件表面大动态范围散射信号的获取,本文提出了基于多曝光散射图像融合的大动态范围散射信号获取方法。在光散射法理论及小波融合方法的基础上,通过分析散射信号的特征改进小波变换低频分量融合规则,完成大动态范围散射信号的获取。最后,通过实验验证多曝光散射图像融合在大动态范围散射信号获取以及提高表面粗糙度测量精度中的有效性。

1 散射图像的采集

光学元件表面的散射图像获取装置示意图如图1所示,激光器发出的光束通过光阑形成点光源,经会聚透镜后形成会聚光入射到光学元件表面,由CMOS接收被测元件表面产生的反射光以及散射光。在光学元件同一位置处采集不同曝光时间的散射图像,可同时获得反射光信息和靠近反射光束的散射信息。

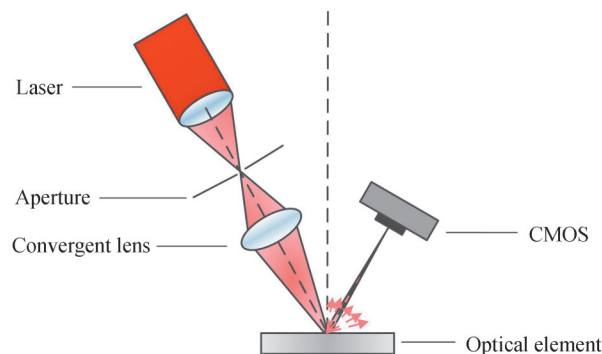


图1 光学元件表面散射图像获取装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical element surface scattering image acquisition device

根据图1所示的装置示意图,搭建实验装置,激光光源选用III-B类激光器(波长660 nm,光斑直径3 mm),探测器选用MV1-D2080-C040-160-G2-12(探测器尺寸:16.64 mm×16.64 mm,像元尺寸:16 μm×16 μm)。以光学元件标准件为例,在元件表面同一位置处采集曝光时间100 μs、800 μs、6 449 μs、51 980 μs、419 000 μs下的散射分布图,如图2所示。

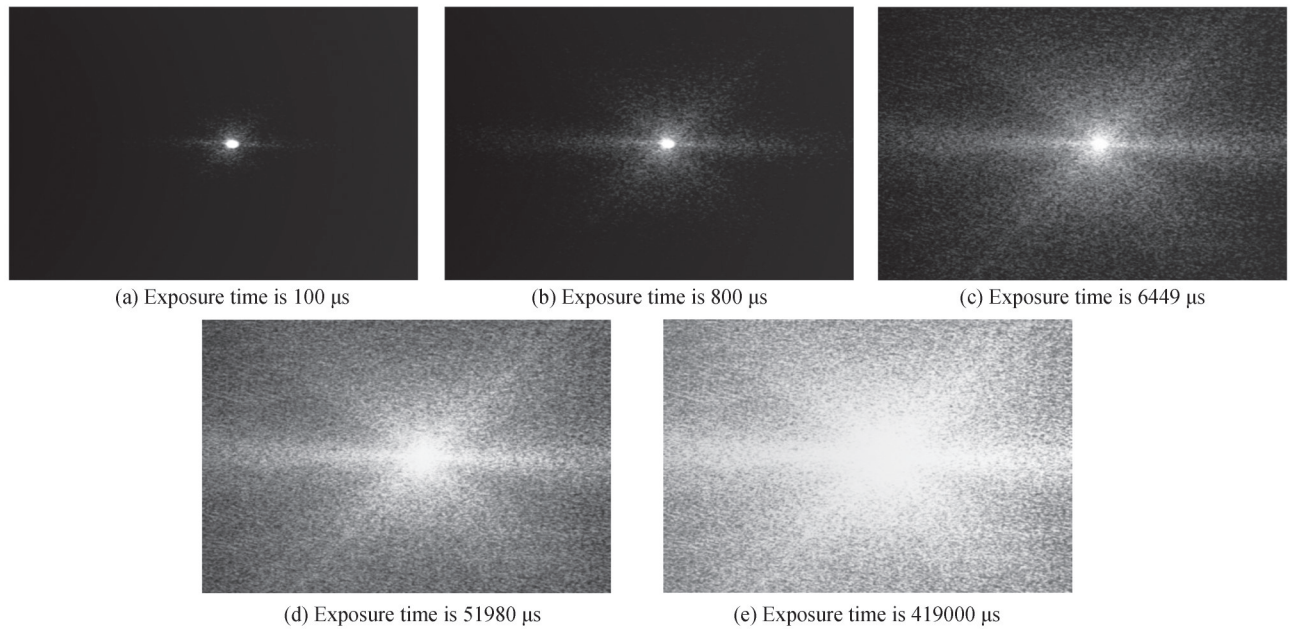


图2 光学元件同一位置不同曝光时间下的散射分布
Fig. 2 Scattering distribution diagram of the same position of the optical element under different exposure times

由图2可知,实验过程中的相机曝光时间短会丢失弱散射光信息,相机曝光时间长会丢失强散射光信息,使得采用单幅散射图像表征光学元件表面粗糙度时精度不高。为提高表面粗糙度的测量精度,就需要获取更大动态范围的散射信号。

2 大动态范围散射信号的获取及处理

2.1 大动态范围散射信号的获取

通过多曝光散射图像融合方法可获取大动态范围的散射信号。如图3所示,将图2采集的散射图像分别进行小波分解,得到多个高频分量及1个低频分量,低频分量采用散射信号最强原则,高频分量采用区域特性测量原则,再经小波逆变换得到融合后的散射图像。

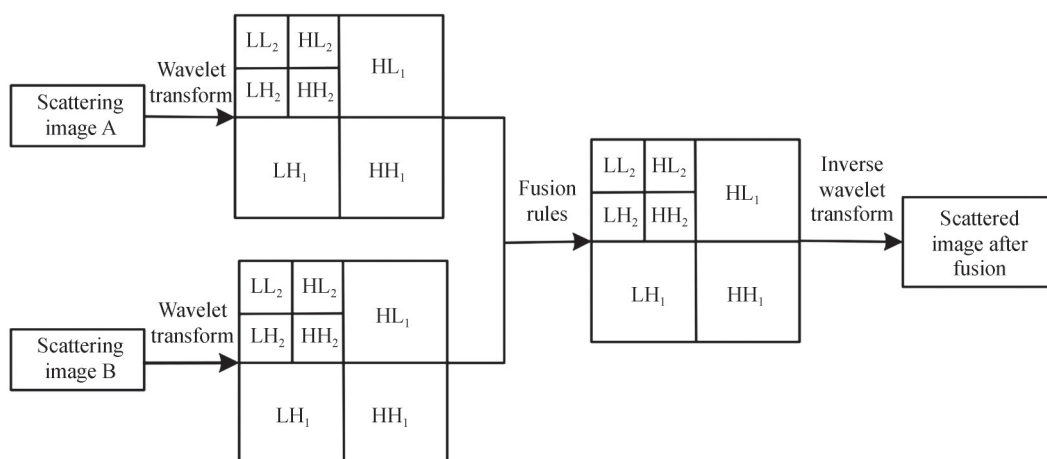


图3 多曝光散射图像融合流程
Fig. 3 Multi-exposure scattering image fusion flowchart

低频分量表示各散射图像的整体散射信号,在短曝光时间下,散射图像的边缘散射光信息缺失,长曝光时间下,散射图像的中间散射光信息饱和。针对低频分量的融合,采用散射信号最强原则,将采集的多曝光散射图像从曝光不足到曝光过度依次排列,记为低曝光时间散射图像、中曝光时间散射图像、高曝光时间散

射图像,散射信号最强原则融合的低频分量流程如图4所示。

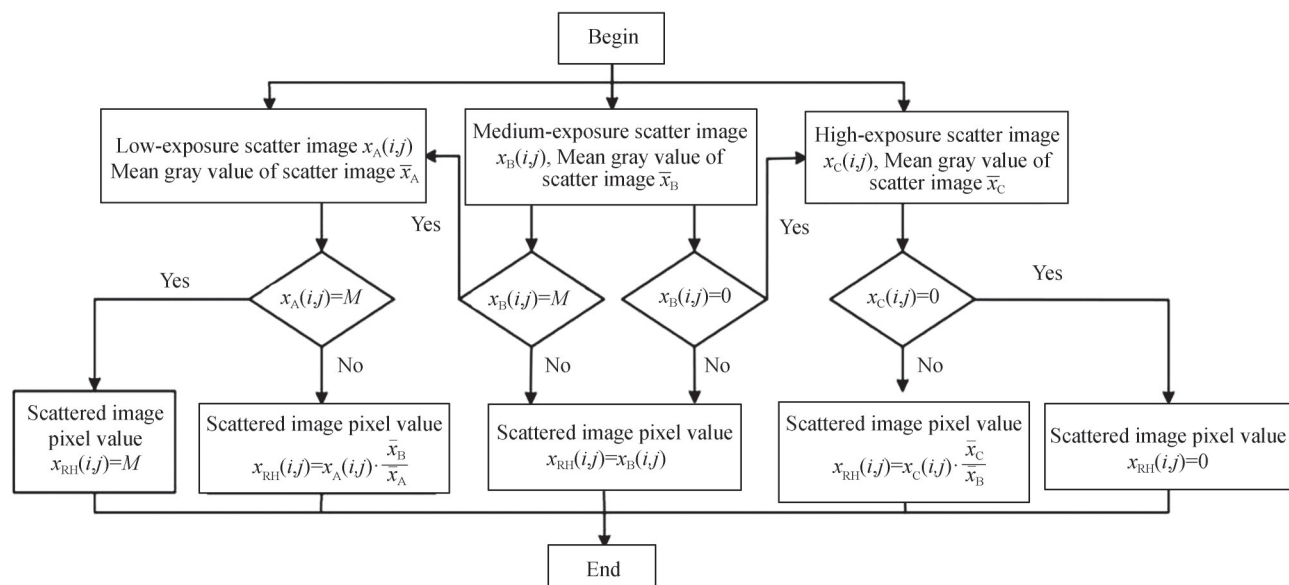


图4 散射信号最强原则融合低频分量流程

Fig. 4 Flow chart of fusion of low-frequency components with the strongest principle of scattered signal

图4中, $x_A(i, j)$, $x_B(i, j)$, $x_C(i, j)$ 分别表示低曝光、中曝光以及高曝光时间散射图像在 (i, j) 处的像素灰度值; $x_{RH}(i, j)$ 表示融合图像在 (i, j) 处的像素灰度值; M 为曝光过度的像素值; \bar{x}_A , \bar{x}_B , \bar{x}_C 分别表示低曝光、中曝光以及高曝光时间散射图像内除曝光不足及曝光过度的像素灰度值的平均值。

高频分量反映了散射信号的变化信息。针对高频分量, 采用区域特性测量的融合规则, 即分别计算低曝光、中曝光、高曝光的散射图像两两之间的匹配度, 并将其与设定阈值进行比较, 若匹配度大于阈值, 则采用加权平均的融合方法, 若匹配度小于阈值, 则将局部区域散射分布较大的小波系数作为融合图像的小波系数。该规则既考虑了不同曝光时间散射图像的散射分布, 也考虑了局部邻域的散射分布。

任意两幅散射图像的匹配度的计算公式为

$$M(i, j) = \frac{2 \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 \omega(2+n, 2+m) * \{ [x_A(i+n, j+m)] \cdot [x_B(i+n, j+m)] \}}{I_A(i, j) + I_B(i, j)} \quad (1)$$

式中, $*$ 表示卷积, $I_{A/B}(i, j)$ 为光学元件表面的散射光在探测器处 (i, j) 的局部区域散射分布; $x_{A/B}(i, j)$ 为光学元件表面的散射光在探测器 (i, j) 处的散射分布; 局部区域散射分布是指该像素及其邻域像素的整体分布信息, 采用 3×3 大小的卷积核, 各像素权重设置为

$$\omega = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

局部区域散射分布的计算公式为

$$I(i, j) = \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 \omega(2+n, 2+m) * [x(i+n, j+m)]^2 \quad (3)$$

若两图像之间的匹配度小于设定阈值(阈值范围 $T = 0.5 \sim 1$), 则将局部区域散射分布进行比较, 取较大的小波系数作为融合图像的小波系数, 即

$$x(i, j) = \begin{cases} x_A(i, j) & I_A(i, j) \geq I_B(i, j) \\ x_B(i, j) & I_A(i, j) < I_B(i, j) \end{cases} \quad (4)$$

若两图像之间的匹配度大于设定阈值, 则采用加权平均的融合方法, 即

$$x(i, j) = \begin{cases} T \cdot x_A(i, j) + (1 - T) \cdot x_B(i, j) & I_A(i, j) \geq I_B(i, j) \\ T \cdot x_B(i, j) + (1 - T) \cdot x_A(i, j) & I_A(i, j) < I_B(i, j) \end{cases} \quad (5)$$

将图2所示的不同曝光时间的散射图像采用上述融合方法进行处理,得到的大动态范围散射分布如图5所示。

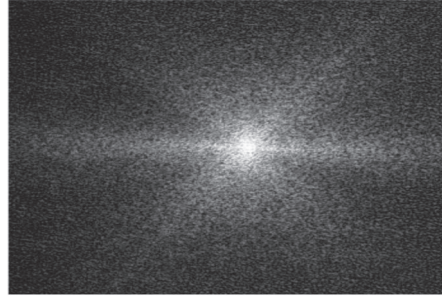


图5 大动态范围的散射分布
Fig. 5 Scattering distribution map with large dynamic range

2.2 大动态范围散射信号的处理

激光照射到光学元件表面某位置处,其表面的微观不平度会产生散射光,此时可用双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)表示该位置处的散射分布。BRDF定义为经过目标表面散射沿着出射光方向出射的辐亮度 $dL(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s)$ 与沿着入射光方向入射到光学元件表面的辐照度 $dE(\theta_i, \phi_i)$ 的比值^[11],可根据融合后的大动态范围散射信号计算得到该位置处的散射光功率值,即

$$\text{BRDF} = f(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s) = \frac{dL(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \approx \frac{\Delta P_s}{\Delta \Omega_s P_i \cos \theta_s} \quad (6)$$

式中, θ_i 为入射角; θ_s 为散射角; ϕ_s 为散射方位角; P_i 为入射光功率; ΔP_s 为散射立体角 $\Delta \Omega_s$ 内的散射光功率,其位置关系如图6所示。

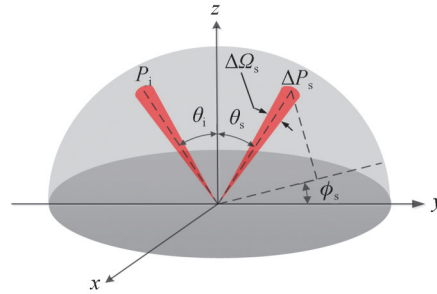


图6 双向散射分布函数坐标关系
Fig. 6 Coordinate relation diagram of bidirectional scattering distribution function

角分布散射(Angle Resolved Scattering, ARS)定义为空间立体角 $\Delta \Omega_s$ 内的能量 ΔP_s 与入射光能量的比值^[12],亦可表示为BRDF与散射角余弦值的乘积,即

$$\text{ARS}(\theta_s) = \frac{\Delta P_s}{\Delta \Omega_s P_i} = \text{BRDF} \cos \theta_s \quad (7)$$

功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)即功率随频率变化的函数。根据光散射原理,PSD可由ARS推导出,即

$$\text{PSD}(f) = \frac{\lambda^4}{16\pi^2 \cos \theta_i \cos^2 \theta_s Q} \text{ARS}(\theta_s) \quad (8)$$

式中, Q 为光学因子(包括表面折射率、偏振、方位角、散射角等信息。)

光学元件的表面粗糙度可根据PSD计算得到^[13]

$$\sigma = \sqrt{2\pi \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \text{PSD}(f) f df} \quad (9)$$

3 实验与分析

3.1 散射信号的动态范围增强分析

为验证本文基于多曝光散射图像融合的大动态范围散射信号获取的有效性,从图2所示的不同曝光时间的原始散射图像中取中间一行的像素灰度值,将其转换为相对散射光功率值。绘制曝光时间 100 μs 、800 μs 、6 449 μs 、51 980 μs 、419 000 μs 时的相对散射光功率分布,如图7所示。

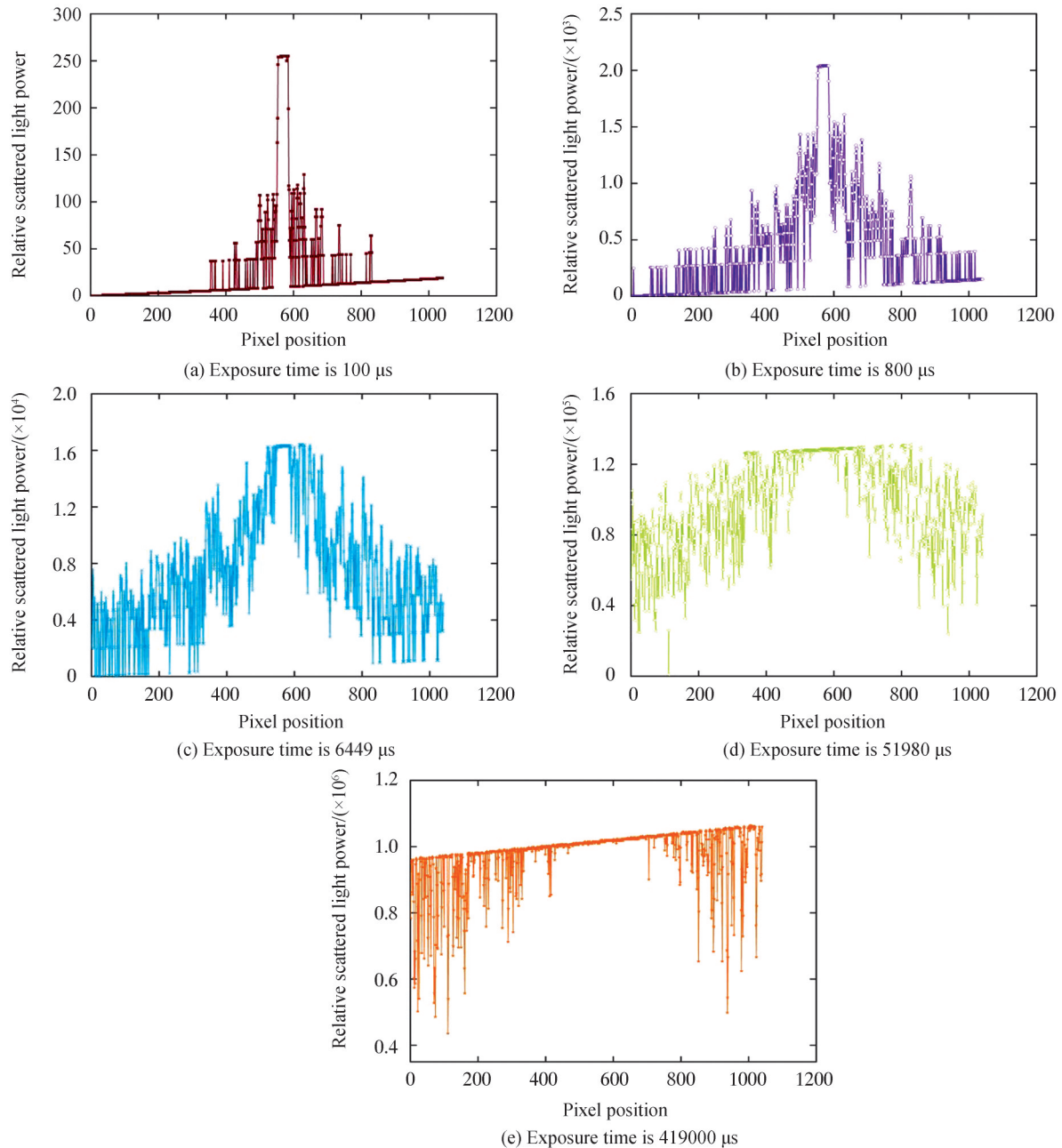


图7 不同曝光时间的相对散射光功率分布

Fig. 7 Distribution of relative scattered light power at different exposure times

由图7可知,原曝光时间为 100 μs 的散射图像,相对散射光功率值主要集中在 0~250 之间;原曝光时间为 800 μs 的散射图像,相对散射光功率值主要集中在 0~ 2×10^3 之间;原曝光时间为 6 449 μs 的散射图像,相

对散射光功率值主要集中在 $0\sim 1.6\times 10^4$ 之间;原曝光时间为 $51\ 980\ \mu\text{s}$ 的散射图像,相对散射光功率值主要集中在 $2\times 10^4\sim 1.4\times 10^5$ 之间;原曝光时间为 $419\ 000\ \mu\text{s}$ 的散射图像,相对散射光功率值主要集中在 $4\times 10^5\sim 1.1\times 10^6$ 之间。结果表明:受曝光时间的影响,不同曝光时间散射图像的相对散射光功率集中在某一段,导致散射图像采集过程中会丢失部分散射信号,进一步导致散射信号的动态范围变小。为获得更大动态范围的散射信号以满足光学元件表面粗糙度测量精度的要求,通过2.1节对多曝光散射图像进行融合,同时选取加权平均融合^[9,14]、拉普拉斯变换融合与本文方法进行比较。得到的融合散射图像如图8所示。

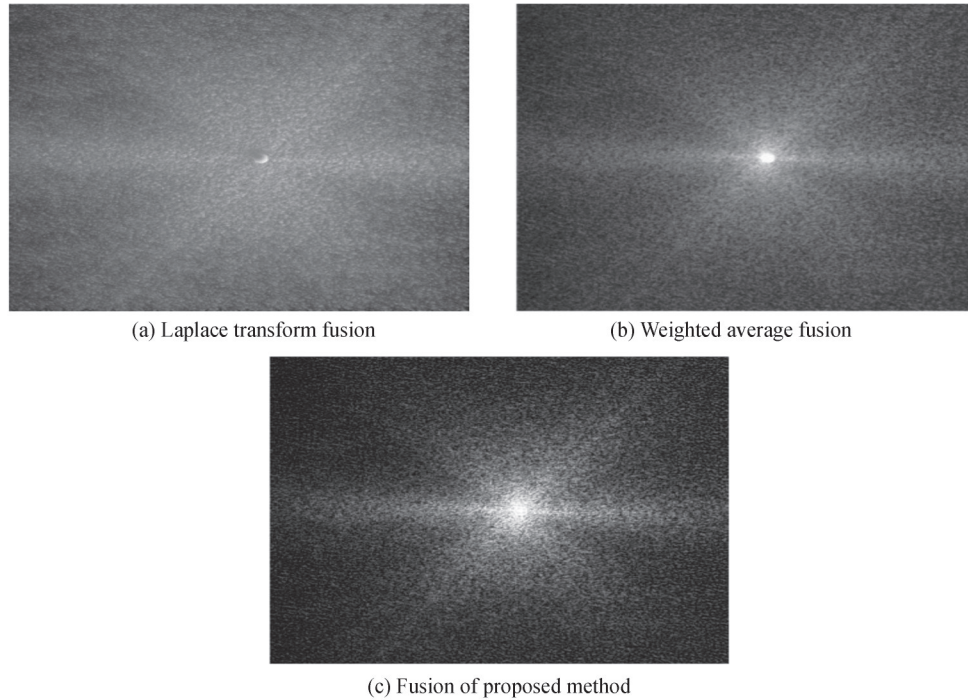


图8 不同融合方法的融合结果
Fig. 8 Fusion results of different fusion methods

由图8可知,与未经融合的散射图像对比,融合后的散射图像能更好地呈现不同层次的亮度细节。为有效验证本文方法的有效性,从图8所示的不同融合方法融合得到的散射图像中取相同行的相对光功率值进行分析,如图9所示。

由图9可知,经加权平均方法融合得到的散射图像,其相对散射光功率主要集中在 $2\times 10^5\sim 1\times 10^6$ 之间,

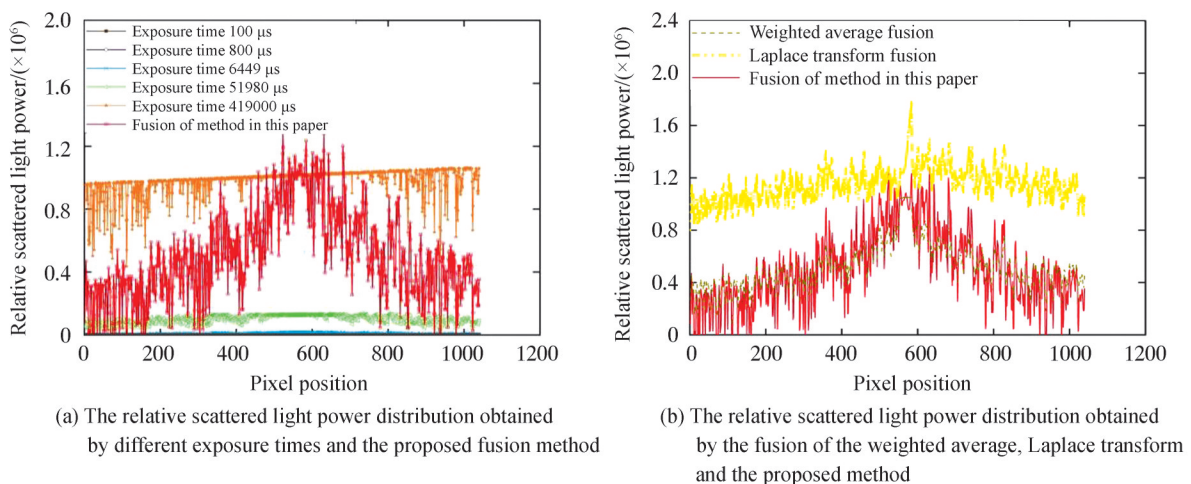


图9 不同融合方法得到的相对散射光功率分布
Fig. 9 Relative scattered light power distribution map obtained by different fusion methods

经拉普拉斯金字塔变换方法融合得到的散射图像,其相对散射光功率主要集中在 $8 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^6$ 之间,而本文融合方法融合得到的散射图像,相对散射光功率主要集中在 $0 \sim 1.2 \times 10^6$ 之间。结果表明:经本文融合方法得到的散射信号的动态范围更大,较未经融合的散射信号动态范围增大了3个数量级。

此外,采用信息熵(Entropy, EN)、平均梯度(Average Gradient, AG)、像素方差(Pixel Variance, VAR)等评价指标^[15],以某种特定算法从融合散射图像中计算出一个具体的数值指标来对融合散射图像质量进行量化评价。

由表1~2可知,原不同曝光时间的散射图像信息熵小、像素方差小、动态范围窄、图像视感不强。经本文方法融合之后的散射图像信息熵增大,表明得到的散射信号更加完善;散射图像的清晰度越大,表明图像的可视程度越好;散射图像之间的像素方差增大,表明图像动态范围更大。

表1 不同曝光时间的原散射图像评价结果
Table 1 Evaluation results of original scattering images with different exposure time

Evaluation index	Different exposure time				
	100 μ s	800 μ s	6 449 μ s	51 980 μ s	419 000 μ s
EN	0.083 5	0.082 2	0.040 1	0.001 9	0.000 1
AG	0.847 9	4.842 5	18.904 6	22.018 5	19.918 9
VAR	142.073 8	540.330 4	2 181.358 1	2 743.789 4	1 935.880 1

表2 不同方法融合后的散射图像评价结果
Table 2 Evaluation results of scattering images fused by different methods

Evaluation index	Different fusion methods		
	Weighted average	Laplace transform	Proposed method
EN	0.692 4	0.572 2	0.698 1
AG	11.775 4	12.5131	25.504 1
VAR	948.042 0	1 393.028 6	2 639.147 4

3.2 光学元件表面粗糙度的测量精度验证

以光学元件标准件为例,利用白光干涉仪测量光学元件某一位置处的粗糙度,并采用图1所示的方法获取该元件同一位置处不同曝光时间的散射图像,利用2.1节所示的融合方法进行融合,融合得到的散射图像采用2.2节所示的光学元件表面散射分布与其表面粗糙度之间的关系模型进行计算,可得到元件该位置处的表面粗糙度值。采用单幅不同曝光时间的散射图像计算得到的表面粗糙度值如表3所示,不同融合算法融合的散射图像计算得到的表面粗糙度值如表4所示。

表3 各曝光散射图像下的表面粗糙度计算结果
Table 3 The surface roughness calculation results of each exposure scattering image

Exposure time	100 μ s	800 μ s	6 449 μ s	51 980 μ s	419 000 μ s	White light interferometry
Surface roughness/nm	6.41	4.18	3.87	2.11	1.73	2.85

表4 不同融合方法的表面粗糙度计算结果
Table 4 Surface roughness calculation results of different fusion algorithms

Fusion methods	Weighted average	Laplace transform	Proposed method of this paper	White light interferometry
Surface roughness/nm	6.39	7.79	3.15	2.85

由表3可知,实验过程中的曝光不足以及曝光过度都会造成散射信号的缺失,严重影响了光学元件表面粗糙度的测量结果。由表4可知,采用本文方法得到的高动态范围散射图像计算得到的表面粗糙度值与白光干涉仪测得该位置处的表面粗糙度值一致,进而验证了本文方法得到的高动态范围散射图像可提高光散射法测量光学元件表面粗糙度的测量精度。

4 结论

为降低散射信号动态范围小对表面粗糙度测量精度的影响,本文提出了一种大动态范围散射信号获取方法。该方法将光散射理论与小波变换理论结合起来,提出了基于多曝光融合的大动态范围散射信号获取方法,并且在多曝光散射图像的融合过程中,改变小波变换的低频分量,即低频分量采用散射信号最强原则,以表征散射信号的特征。从实验结果看,本文方法相对未经融合的散射图像,动态范围可增大3个数量级,同时能提高光散射法测量光学元件表面粗糙度的测量精度。该方法可广泛应用于光学元件表面粗糙度检测中。

参考文献

- [1] GUO Yinbiao, YANG Wei, WANG Zhenzhong, et al. Technology and application of ultra-precision machining for large size optic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 171-178.
郭隐彪, 杨炜, 王振忠, 等. 大口径光学元件超精密加工技术与应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 171-178.
- [2] XU Sihua, YU Xinchun. Design and manufacture of micro-nano satellite optical payload for aerospace rapid launch[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(3): 513-523.
徐思华, 于新辰. 面向航天快速发射的光学载荷设计与制造[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 513-523.
- [3] LI Lin, YUAN Li, WANG Li, et al. Influence of micro vibration on measurement and pointing control system of high-performance spacecraft from hubble space telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(11): 2478-2487.
李林, 袁利, 王立, 等. 从哈勃太空望远镜剖析微振动对高性能航天器指向测量与控制系统的影响[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2478-2487.
- [4] HUANG Cong, ZHANG Kepeng, WANG Xiang, et al. Method for surface quality inspection based on total scattering measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712005.
黄聪, 张科鹏, 王翔, 等. 基于总散射测量的表面质量检测新方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712005.
- [5] LV Dongmei. Research on surface roughness detection of optical elements based on light scattering [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
吕东梅. 基于光散射的光学元件表面粗糙度检测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- [6] ZHANG Kepeng. Assessing surface quality for optical components by light scattering measurement [D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
张科鹏. 基于散射测量的光学元件表面质量评估方法研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019.
- [7] LI Junlin, ZHANG Liming, CHEN Hongyao, et al. Development of BRDF absolute measuring device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
- [8] HUANG Cong, YOU Xinghai, ZHANG Bin. Influence of surface cleanliness of optical element on its surface scattering characteristics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 243-249.
黄聪, 游兴海, 张彬. 光学元件表面洁净度对其表面散射特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 243-249.
- [9] FU Zhengfang, ZHU Hong, XUE Shan, et al. Direct fusion algorithm for multi-exposed images based on sigmoid function fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2321-2329.
付争方, 朱虹, 薛杉, 等. 基于Sigmoid函数拟合的多曝光图像直接融合算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2321-2329.
- [10] LIU Xinlong, YI Hongwei. Improved multi-expose image pyramid fusion method[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 106-116.
刘鑫龙, 易红伟. 改进的多曝光图像金字塔融合方法[J]. 光子学报, 2019, 48(8): 106-116.
- [11] ZHANG Yingge. Study on optical scattering characteristics of surface microstructure for optical elements[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017.
张英鸽. 光学元件表面微观形貌的光学散射特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
- [12] STAVENGA D G, LEERTOUWER H L, PIRIH P, et al. Imaging scatterometry of butterfly wing scales[J]. Optics Express, 2009, 17(1): 193-202.
- [13] SCHRODER S, DUPARRE A, CORIAND L, et al. Modeling of light scattering in different regimes of surface roughness [J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9820-9835.
- [14] ZHOU Shan, SHEN Yi, HAO Jiasheng. Adaptive pixel-weighted CT/MRI fusion based on local priority[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1314-1317+1339.
周杉, 沈毅, 郝家胜. 基于局部占优的自适应像素加权CT/MRI图像融合算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1314-1317+1339.
- [15] YANG Yanchun, LI Jiao, WANG Yangping. Review of image fusion quality evaluation methods[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2018, 12(7): 1021-1035.
杨艳春, 李娇, 王阳萍. 图像融合质量评价方法研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2018, 12(7): 1021-1035.