

阶梯光栅拼接中的纵向位移误差精确调整技术

王瑞^{1,2,3}, 韩建^{1,2*}, 肖东^{1,2}, 叶慧琪^{1,2}, 唐靓^{1,2}, 郝俊^{1,2,3}, 翟洋^{1,2}, 郝志博^{1,2}¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 共相光栅拼接技术是目前研制米级大尺寸阶梯光栅的重要手段, 位移误差调整精度对光栅的拼接精度有决定性影响。为消除拼接光栅中的周期性位移误差, 实现大尺寸阶梯光栅的共相拼接, 从理论出发分析了位移误差对拼接光栅点扩散函数的具体影响, 并基于干涉测量原理, 提出了一种基于迈克耳孙干涉系统, 利用白光和双波长测量技术相结合的光栅拼接位移误差检测调整方法。通过对比不同调整量下干涉条纹位移变化的模拟计算结果与纳米位移平台实验结果, 分析了傅里叶分析算法的计算精度, 进而实现了位移误差的精确调整。实验计算结果表明, 白光双波长测量技术实现的拼接光栅位移误差 Δz 小于 6 nm, 可满足大尺寸拼接光栅的共相检测要求。

关键词 测量; 拼接光栅; 共相调整; 纵向位移误差; 调整精度

中图分类号 P111.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1812006

Accurate Adjustment Technology for Longitudinal Piston Error in Echelle Grating Tiling

Wang Rui^{1,2,3}, Han Jian^{1,2*}, Xiao Dong^{1,2}, Ye Huiqi^{1,2}, Tang Liang^{1,2}, Hao Jun^{1,2,3}, Zhai Yang^{1,2}, Hao Zhibo^{1,2}¹National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;²CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Co-phasing mosaic grating technology is an important method of manufacturing meter-sized echelle gratings, and the precision of piston error adjustment has a decisive influence on the mosaicking precision. To eliminate the periodic piston error in mosaic gratings and achieve the co-phasing mosaicking of large-size echelle gratings, the specific influence of the piston error on the point spread function of the mosaic gratings is analyzed theoretically. A piston error detection and adjustment method for grating mosaicking is proposed in light of the principle of interferometry. For this purpose, the Michelson interferometry system is utilized, and white light and two-wavelength measurement technologies are combined. Simulation calculation results of the piston change of interference fringes under different adjustment amounts are compared with the results of tests on the nano-translation stage. The calculation precision of the Fourier analysis algorithm is analyzed, and the precise piston error adjustment is achieved. The experimental results show that the piston error Δz of mosaic gratings achieved by the white light and two-wavelength measurement technologies is smaller than 6 nm, which means the proposed technology can meet the requirements of co-phasing detection of large-size mosaic gratings.

Key words measurement; mosaic grating; co-phasing adjustment; longitudinal piston error; adjustment precision

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-03-31; 录用日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(11873071, 11903060, 11973066)、国家自然科学基金联合基金重点项目(U2031211)

通信作者: *jhan@niaot.ac.cn

1 引言

大尺寸衍射光栅是天文光谱分析^[1-3]、激光核聚变等领域^[4-6]中重要的光学元件。在天文领域中,随着天文学的快速发展和人们对浩瀚宇宙的进一步探索,更大的望远镜口径($D > 4$ m)和更高的光谱分辨率($R > 100000$)成为人们实现宇宙探索的重要技术手段^[7]。目前望远镜的口径可增加到 10 m 甚至更大尺寸^[8],望远镜口径越大,高分辨率光谱仪所要求的阶梯光栅尺寸越大,进而人们对米级尺寸阶梯光栅的需求更加迫切。

由于国际上可购买到的阶梯光栅的单个尺寸为 $200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,单块的优良光栅尺寸很难达到 1 m 以上量级^[9],故为了获得阶梯光栅面积的大尺寸和衍射波前的高精度,在 3~4 m 口径望远镜高分辨率光谱仪的设计中采用了机械拼接结构^[10]。20 世纪 80 年代,美国理查森实验室完成了两块尺寸为 $214 \text{ mm} \times 415 \text{ mm}$ 的中阶梯光栅拼接^[11],主要针对分辨率要求,实现拼接误差的合理分配。在拼接光栅光路中由于拼接误差对 $[(\Delta\theta_x, \Delta\theta_z)$ 和 $(\Delta x, \Delta z)]$ 存在着误差补偿效应,并且在位移调整中位移误差存在周期性,故难以通过干涉仪来精准地确定位移误差。目前光栅拼接技术手段主要包括干涉条纹法和衍射光斑法。对于国际上光栅拼接技术的发展:Harimoto 等^[12-13]利用夫琅禾费积分方法建立了拼接光栅误差与远场光斑能量的数学模型,该模型计算得到的两拼接光栅的位移误差容限为 $\lambda/13$ 。仿真结果表明,位移误差 Δx 和 Δz 会影响拼接光栅的远场光斑,进而产生纵向缝隙,但并未对两个位移误差分离进行研究;Kessler 等^[14-15]基于 OMEGA EP 系统中由三块光栅拼接而成的 $1410 \text{ mm} \times 430 \text{ mm}$ 口径的光栅,明确提出了根据拼接光栅配对误差补偿的原则,只需要调节三维空间自由度即可完成对光栅的拼接,并指出干涉法检测不仅可避免远场光斑成像系统中的像差问题,还可避免环境因素对检测系统的影响,但这种误差补偿的调整方法并不适用于天文中应用的阶梯光栅的拼接调整;Hornung 等^[16]在基于

Polaris 系统中利用远场光斑法对两块尺寸为 $350 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ 的光栅进行拼接研究,分析位移误差 Δz 的函数关系,通过优化 Δz 在 z 轴零级处的焦点,实现了位移精度为 41 nm 的光栅拼接。对于国内关于消除拼接光栅的周期性位移误差,增大光路的调节范围的研究:Hu 等^[17-18]提出了一种基于对双波长下三种远场衍射强度图的定量图像处理方法,并将其用于光栅拼接和位移误差精确定位,利用双波长的一阶远场图像来分离横向和纵向的相位误差,最后实验分析得到位移检测精度小于 14 nm,双波长技术有效地提高了位移的检测范围;Lu 等^[19-20]基于光干涉的原理设计了拼接光栅误差检测消除系统,通过加入楔形棱镜,改变了部分检测光的入射角度,增大了位移误差的调整范围,从而消除了位移纵向拼接误差的不确定性。楔形棱镜的加入增加了系统的复杂性,同时减小了检测光斑的可测检测区域,缩小了该技术的应用范围。

为了增大拼接光栅光路中位移误差的检测范围,在采用双级次同步检测实现光栅拼接过程中误差相互干扰分离,并在精确调整拼接角度误差的基础上,本文针对纵向位移误差 Δz 的检测消除,在零级检测光路中提出了一种基于迈克耳孙干涉的测量系统。基于白光与双波长相结合的位移测量原理,建立了光栅拼接五维误差分析模型,分析了位移误差对拼接光栅干涉图像的影响。搭建了精密的检测实验系统,采用白光粗调与双波长干涉精调相结合的方式,准确有效地检测和消除了不同范围的位移误差,在原理上解决了位移误差的周期性变化。该方式在应用中与干涉仪的条纹测量技术相结合,实现了拼接光栅的高精度共相拼接,为拼接光栅在天文光谱仪中的工程应用提供了必要的技术手段。

2 实验原理

2.1 阶梯光栅拼接误差理论模型

如图 1 所示,对于拼接光栅,以两块子光栅为例, G1 为基准光栅, G2 为调整光栅,将 G1 稳定在固定支架上,保持姿态不变,通过精确调整 G2 的姿态来实现子光栅 G2 与 G1 的严格共相拼接。

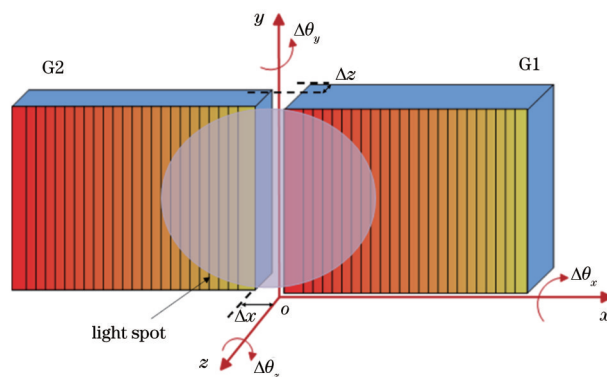


图 1 光栅拼接误差坐标定义

Fig. 1 Coordinate definition of grating mosaic error

在光栅拼接的过程中,在不考虑光栅刻线(周期)误差的条件下,共有五维拼接误差影响拼接精度。以基准光栅 G1 所在的平面建立笛卡儿空间直角坐标系,设 G1 光栅的矢量方向为 x 轴,光栅的栅线方向为 y 轴, z 轴垂直于 G1 光栅表面。影响拼接精度的五维误差分别是绕光栅矢量旋转的角度偏差 $\Delta\theta_x$ 、绕光栅栅线方向旋转的角度偏差 $\Delta\theta_y$ 、绕光栅法线方向旋转的角度偏差 $\Delta\theta_z$ 、沿光栅矢量方向的横向位移误差 Δx 和沿光栅法线方向的纵向位移误差 Δz 。各拼接误差引起的相位变化可表示为

$$E = \frac{2\pi}{\lambda} [(\sin \alpha + \sin \beta) \Delta x - (\cos \alpha + \cos \beta) \Delta z], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{2\pi}{\lambda} [(\cos \alpha + \cos \beta) \Delta\theta_x + (\sin \alpha + \sin \beta) \Delta\theta_z], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(\cos \alpha + \cos \beta) \Delta\theta_y - (\sin \alpha + \sin \beta) \frac{\Delta d}{d} \right] \sec \beta, \quad (3)$$

式中: λ 为入射波长; α 为光栅入射角; β 为光栅衍射角; Φ 和 E 分别是角度误差引起的角度误差相位和位移误差相位; d 是光栅周期; Δd 是两块需要拼接的光栅间的周期误差,由于在实际的光栅拼接中采用完全相同的光栅,因此可忽略光栅周期误差 Δd 。

根据式(1)~(3),相位误差 Φ 可以表示为线性关系,即

$$\begin{cases} \Phi = ax + by + c \\ a_0 = \frac{k(\cos \alpha + \cos \beta)}{\cos \beta} \Delta\theta_y \\ b_0 = -k \left[(\cos \alpha + \cos \beta) \Delta\theta_x + \frac{m\lambda}{d} \Delta\theta_z \right] \\ c_0 = E \end{cases}, \quad (4)$$

式中: m 为光栅衍射级次。由式(4)可知,拼接光栅后光栅的相位由 x 、 y 方向的倾斜和位移误差组成。干涉条纹拼接技术的基本原理:在条纹的姿态方面,使得基准光栅和调整光栅的条纹完全一致;在条纹的计算处理方面,使得基准光栅和调整光栅相位分布在 x 、 y 方向的拟合系数相同,位移系数 c_0 相同。如果存在误差,在光谱仪系统中,根据光学系统的远场理论,光栅拼接误差引起的点扩散函数(PSF)将会随误差的变化而发生变化,点扩散函数 I_{PSF} 可表示为

$$I_{\text{PSF}}(x, y) = \frac{I_0^2}{(\lambda f)^2} \left| \mathcal{F} \left[A e^{i\Phi(x, y)} \right] \right|^2, \quad (5)$$

式中: $\mathcal{F}(\cdot)$ 为傅里叶变换算法; f 为需要计算的条纹中像素点的空间频率。角度调整误差的大小在理论上由相位中 x 方向和 y 方向的系数决定,在干涉图上表现为条纹的倾斜和条纹密度的变化。为了实现光栅共相拼接,需要对拼接光栅位移误差进行精密调整。由式(1)可知,位移误差 Δx 和 Δz 都能引起波前相位变化,并且两个位移误差相互耦合,都存在着周期性的变化,结合

光栅衍射公式 $d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda$, 两个位移误差的周期可分别表示为

$$\begin{cases} \Delta z_0 = \frac{\lambda}{\cos \alpha + \cos \beta} \\ \Delta x_0 = \frac{d}{m} \end{cases}. \quad (6)$$

在实际的光栅调整中,可采用 0 级和 m 级分级次同步调整将相互耦合的位移误差解耦,具体为:在光栅衍射 0 级检测时, Δx 变化对条纹无影响,条纹变化只与 Δz 的变化有关,在 Δz 精确调整的基础上,光栅衍射 m 级次的条纹变化只与 Δx 有关,因此在光栅 0 级检测中就可以实现位移误差 Δz 的精确调整;在 Δz 调整后,采用相同的方法利用光栅衍射 m 级次实现对 Δx 的调整,从而实现对拼接光栅整体位移的检测。本文聚焦于光路的 0 级检测,在拼接角度误差精确检测的前提下,针对纵向位移误差 Δz 的精确检测进行实验研究。当采用垂直入射方式时, $\alpha = \beta = 0$, 此时 Δx 位移误差对条纹不产生影响。 Δz 周期性误差为 $\lambda/2$, 当使用单波长进行调整时,以 632.8 nm 波长计算,即 Δz 每移动 316.4 nm 的距离,干涉条纹就会呈现一次周期性变化。因此,当调整光栅相对于基准光栅距离较大时,由于位移存在周期性的变化,故难以采用单波长技术对光栅位移 Δz 进行精确定位。

2.2 拼接光栅位移精确调整原理

为精确调整拼接光栅的位移误差,需要增大光栅的可测位移量程,在实验中可采用粗调和细调相结合的方案对平移误差进行精密调节。粗调技术主要是将调整光栅位移误差调整到细调技术的位移可测周期范围内,细调技术主要是对调整光栅的位移进行精确的调整,将两个方案相结合可实现拼接光栅位移误差的精确调整。粗调技术采用白光光源进行干涉调节,由干涉理论可知,白光光源的相干长度可表示为

$$\Delta_{\text{max}} = \lambda^2 / \Delta\lambda, \quad (7)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为光谱宽度。

由于白光光源的相干长度非常短,一般情况下只有几微米,因此当使用单一的白光干涉对光栅进行精确调整时,位移误差 Δz 可被标定在微米量级,如 1~2 μm 范围内。

在细调技术中,可采用双波长和单波长技术进行调节。与单波长测量技术相比,双波长测量技术有效提高了干涉测量的有效距离,其双波长(λ_1 和 λ_2)的合成波长可表示为

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}. \quad (8)$$

双波长技术的位移周期误差在 $\Lambda/2$ 以内,以波长为 532 nm 和 632.8 nm 的双波长为例,根据式(8)可以计算出有效测量范围为 1.67 μm , 因此双波长干涉技术使得位移误差精确调整,进而实现了白光干涉与单波长干涉之间的过渡,可将位移误差标定在百纳米量级。双波长检测可使测量范围增大,但测量的灵敏度

或测量精度会减小,故后续使用单波长进行精确的调整,从而实现纳米量级位移的精确检测。

2.3 拼接光栅位移精确计算原理

精确计算平移误差不仅在调整的过程中可实时获得调整幅度与光栅姿态之间的变化关系,还是在光栅拼接完成后的光栅稳定性实验中获得精确的位移误差信息的重要途径。采用干涉条纹傅里叶分析算法对条纹进行角度和位移调整实现精确计算,其中相位恢复算法的计算精度决定了位移误差的计算精度,实验中采用光强度传输方程(TIE)相位恢复算法对条纹的位移误差进行计算,相位恢复算法计算公式^[21]可表示为

$$\varphi = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{1}{|f|^2} \mathcal{F} \left\{ \text{Im} \left\{ e^{-i\Phi'} \mathcal{F}^{-1} [|f|^2 \mathcal{F} (e^{i\Phi'})] \right\} \right\} \right\}, \quad (9)$$

式中: φ 为相位恢复算法计算得到的波前相位,也是拼接光栅的相位; Φ' 为傅里叶算法中的卷积相位; $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 为傅里叶逆变换算法; $\text{Im}(\cdot)$ 为取虚部函数。根据最小二乘法基本原理,结合式(4),拟合出相应系数(a, b, c)的数值,相应的数学形式为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n x_i x_i & \sum_{i=0}^n x_i y_i & \sum_{i=0}^n x_i \\ \sum_{i=0}^n x_i y_i & \sum_{i=0}^n y_i y_i & \sum_{i=0}^n y_i \\ \sum_{i=0}^n x_i & \sum_{i=0}^n y_i & \sum_{i=0}^n 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n x_i \varphi_i \\ \sum_{i=0}^n y_i \varphi_i \\ \sum_{i=0}^n \varphi_i \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: a 和 b 分别为在 x 方向和 y 方向上的偏移系数; c 为平移偏差。在双拼接光栅实验中,将通过相位恢复算法和数据拟合后分别获得的基准光栅和调整光栅的位移参数记为 c_1 和 c_2 :在不存在位移误差的条件下, $c_1=c_2$;在存在位移误差的条件下,位移误差大小可表示为 $\Delta c=|c_1-c_2|$ 。

3 拼接光栅误差的模拟计算

3.1 周期性位移误差对拼接光栅点扩散函数的影响

根据式(1),由于位移误差具有周期性,因此在光谱仪系统中,光栅拼接误差引起的PSF的光斑变化也存在周期性。根据式(5),以波长632.8 nm为例,当光束垂直入射时, $\alpha=\beta=0$,不同位移误差 Δz 引起的PSF变化如图2所示。

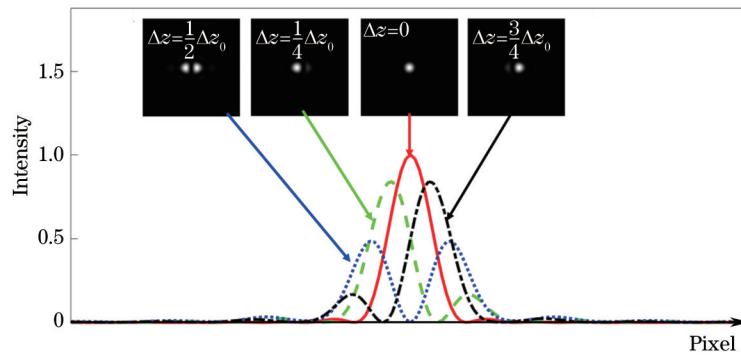


图2 不同位移误差下的PSF变化

Fig. 2 PSF variation under different piston errors

从图2中可知:在不存在位移误差的条件下,拼接光栅的PSF表现为理想的艾里斑;随着位移误差 Δz 的增大,PSF呈现周期性的变化,位移误差使得光斑的中心光强减弱,同时光斑能量向周围扩散,光斑尺寸变大;当位移误差为位移误差周期的一半时,光斑尺寸最大,艾里斑分裂为两个波峰斑,整个波峰能量最小。在实际的拼接光栅光谱仪的应用中,艾里斑波峰光强的减弱会使得探测的星光信号的信噪比降低,艾里斑尺寸的增大会使得光谱仪的分辨率下降,具体的信噪比和光谱仪分辨率随位移误差的变化情况需要根据特定的光谱仪的设计参数来进行计算。为了实现光谱仪的最佳性能,光栅拼接采用近似于接近光栅衍射极限的调整精度,即实现拼接光栅角度误差和位移误差的精确调整,从而实现光栅的共相拼接。

3.2 单色光和白光光源对条纹变化模拟

实验中采用干涉条纹技术进行调整,根据式(1)仿真出单色光 and 不同带宽下的白光在不同拼接误差下的

干涉条纹情况,干涉图分为三部分:右半部分为基准光栅G1的干涉条纹;中间空白处为两个光栅之间的空隙,不存在干涉;左半部分为调整光栅G2的干涉条纹。不同拼接误差和不同光源下干涉图如图3所示。

图3(a)、(d),图3(b)、(e)和图3(c)、(f)分别为在相同的误差条件下单色光和白光的干涉条纹。可以看出,在光栅拼接过程中, x 轴倾斜误差、 y 轴倾斜误差和位移误差对干涉条纹的影响是相互独立的,拼接光栅间存在的角度误差 $\Delta\theta_x$ 会使条纹周期(或粗细)变化、 $\Delta\theta_y$ 误差会使干涉条纹倾斜,而位移误差 Δz 的存在会使干涉条纹产生错位。在使用单色光源进行调整的情况下,当存在位移误差 Δz 时,会产生条纹的错位,并且条纹具有周期性变化,即使调整调整光栅G2也无法完全消除 Δz 的周期性误差。为了验证实验方案的可行性,对位移误差的检测消除过程进行仿真,如图4所示。

人为假设 Δz 为某一数值,由于白光干涉测量范围

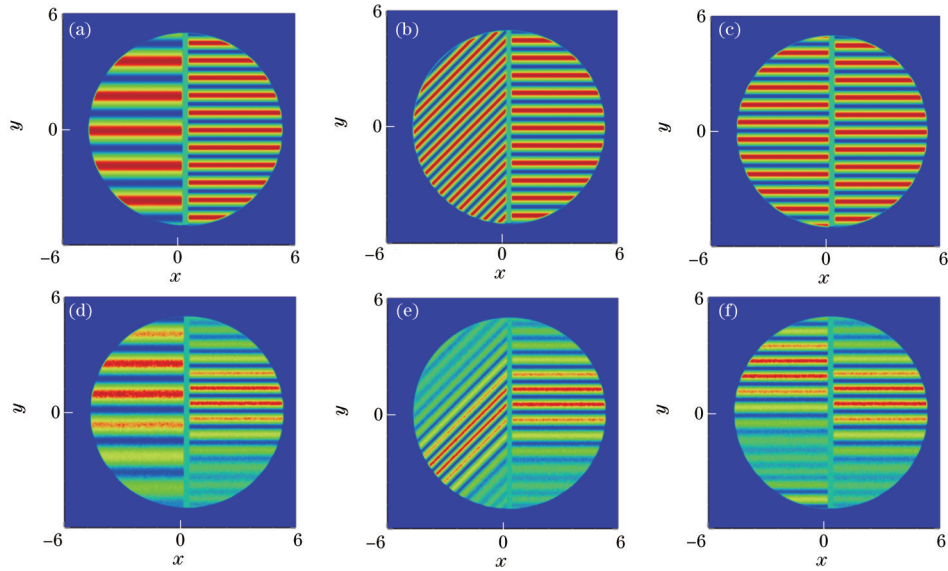


图 3 单色光和白光在不同拼接误差下的干涉情况。(a)单色光 x 轴倾斜误差;(b)单色光 y 轴倾斜误差;(c)单色光位移误差;(d)白光 x 轴倾斜误差;(e)白光 y 轴倾斜误差;(f)白光位移误差

Fig. 3 Interference of monochromatic light and white light under different mosaic errors. (a) x -axis tilt error of monochromatic light; (b) y -axis tilt error of monochromatic light; (c) piston error of monochromatic light; (d) x -axis tilt error of white light; (e) y -axis tilt error of white light; (f) piston error of white light

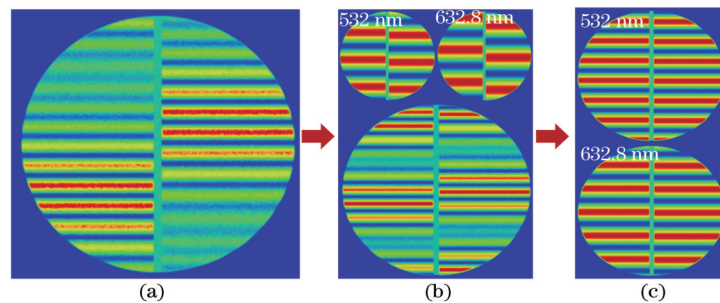


图 4 两步法调整拼接光栅位移误差。(a) $\Delta z=1 \mu\text{m}$ 时的白光干涉图;(b) $\Delta z=240 \text{ nm}$ 时的双波长干涉图;(c) $\Delta z=10 \text{ nm}$ 时的单波长干涉图

Fig. 4 Adjustment of piston error of mosaic grating by two-step method. (a) White light interferogram when $\Delta z=1 \mu\text{m}$; (b) two-wavelength interferogram when $\Delta z=240 \text{ nm}$; (c) single-wavelength interferogram when $\Delta z=10 \text{ nm}$

较大,故先使用白光干涉技术进行粗调整。图 4(a)为白光干涉图,此时 $\Delta z=1 \mu\text{m}$,由于白光测量精度有限,故无法进一步提高拼接精度。继续通过调整精密位移台缩小位移误差值,此时若直接采用单波长光源进行实验,可得到图 4(b)中上半部分所示的两幅干涉条纹图,采用的光源波长分别为 532 nm 和 632.8 nm 。由于单色光干涉条纹具有周期性变化,故无法完全消除 Δz 的周期性误差。将单波长光源切换成双波长光源继续进行调整,得到图 4(b)中下半部分所示的干涉图像,位移误差 Δz 为 240 nm 。最后,为进一步精确消除位移误差,让位移误差 Δz 处于半波长之内,利用单波长进行精密检测调整,调整后的两单波长干涉图像如图 4(c)所示,此时两种波长下的干涉条纹基本都处于对齐状态,位移误差为 $\Delta z=10 \text{ nm}$,实现了两块光栅的完美拼接。

4 实验结果及分析

实验采用迈克耳孙干涉系统实验装置,如图 5 所示,包括白光光源(卤钨灯)、单色光源 1(波长为 632.8 nm)、单色光源 2(波长为 532 nm)、准直透镜、滤光片、分光比为 50:50 的分光棱镜、六维高精度调整台和两块大小为 $50 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的待拼接阶梯光栅(光栅常数为 31.6 mm^{-1})。

光源通过光纤耦合器出射平行光,光线经过分光棱镜被分成强度相等且相互垂直的两束平行光:一束为参考光束,该光束被反射镜原路反射;一束为测量光束,通过显微物镜(F4 镜头)将光束变为发散光,再被抛物面反射镜反射后垂直入射到光栅表面,最后光束由双胶合消色差透镜会聚到探测器上。由于两块光栅存在位移误差 Δz ,因此在探测器上可以分别得到条纹

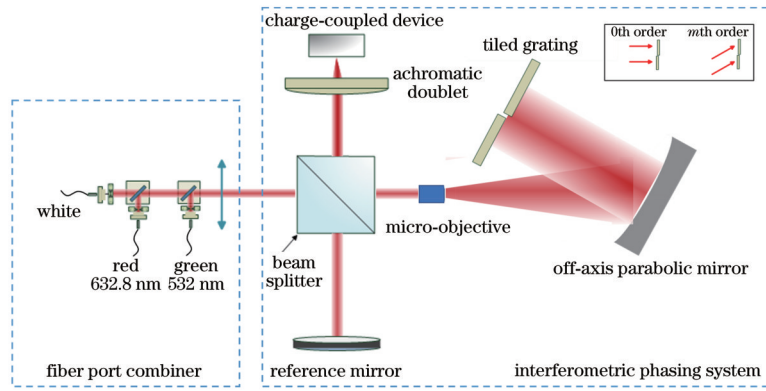


图 5 实验装置设计

Fig. 5 Design of experiment setup

错位的基准光栅和调整光栅的干涉条纹。

4.1 基于傅里叶算法的位移计算的精度分析

在实验中对位移的计算精度进行分析,首先对调整光栅的角度误差进行精细调整,在干涉条纹上表现为基准光栅和调整光栅产生的条纹完全水平,条纹周

期完全相同,此时在光束垂直入射条件下,实现了对调整光栅角度误差的精密调整。当存在位移误差 Δz 时,调整光栅和基准光栅产生的条纹出现错位。通过傅里叶算法可获得位移误差大小,其计算过程如图 6 所示。

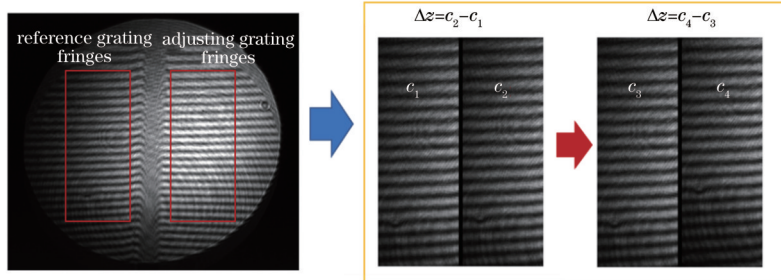


图 6 通过干涉条纹进行傅里叶分析位移计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Fourier analysis piston calculation by interference fringes

电荷耦合器件(CCD)采集的图像中包括基准光栅条纹和调整光栅条纹,在不存在角度误差条件下,两个光栅产生的条纹完全平行。在数据处理前选择需要进行分析的条纹数据及其像素位置区域,在基准光栅条纹和调整光栅条纹中选择相同大小的区域后,分别利用傅里叶算法分析相应区域条纹的位移 c_1 和 c_2 。在基准光栅位移不变的条件下,调整光栅位移的变化表现为调整光栅条纹的移动,调整光栅相对基准光栅的位移大小为两个区域的条纹位置之差,即 $\Delta z=c_2-c_1$,当调整光栅移动时, Δz 也随之移动。通过傅里叶分析技术进行位移分析计算的本质是计算调整光栅与基准光栅的相对位置,其优点在于条纹振动对位移计算的精度影响较小。当以基准光栅位移为 0 计算调整光栅位移时,外界环境引起的条纹变化通常使基准光栅条纹和调整光栅条纹同步变化,在计算相对位移时,各自条纹位移相减就可使得环境变化引起的条纹变化相互抵消,进而实现位移计算精度的提高。同时,计算过程中数据处理区域可方便调节,通常以基准光栅条纹处理后位移接近为 0 时的区域位置为初始位置。实验中将调整光栅安装到纳米位移平台(德国,PI,Q-545.140)上,单向重复精度为 15 nm,控制位移平台使

得 CCD 在光程每隔 90 nm 处采集一幅图像,实验中共采集 4 次。然后,将通过图形处理获得的位移大小与实际纳米位移平台行走的位移大小进行比较。控制 PI 纳米平移台上调整光栅的移动间隔为 45 nm,则在干涉图上相应的光程变化为 90 nm,表 1 详细记录了 4 次测量过程中基准光栅位移和调整光栅位移的大小。图 7 为根据表 1 数据分析的 PI 纳米位移平台控制位移与位移计算值之间的关系。

图 7(a) 上半部分中散点表示通过傅里叶条纹分析算法获得的位置大小,PI 纳米位移平台产生的数据在图中用实线表示。可以发现,通过傅里叶条纹分析计算获得的位移数据基本上与纳米位移平台控制的精确数据吻合,从而验证了傅里叶条纹分析算法在位移计算中的有效性和高精度。在不同位移位置上的计算偏差如图 7(a) 中下半部分图所示,图中最初位移计算获得的位移点严格地与精确数据吻合,而随着位移的增大,位移计算的数据相对基准数据的偏差在增大,其主要原因有:1)PI 位移控制台的重复精度为 15 nm,随着移动步数的增加,误差逐渐累积,逐渐偏离设置的位移值;2)相对于初始位置时条纹变化得越多,条纹移动越多,计算的累积误差也越多。图 7(b) 为通过傅里叶

表 1 4 次重复位移测试和傅里叶计算数据分析
Table 1 Four repeated piston tests and Fourier calculation data analysis

unit: nm

Measuring time	Type	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7	Step 8
1st	Reference grating piston c_1	-0.04	11.15	30.67	30.09	15.86	18.24	21.14	24.30
	Adjusting grating piston c_2	3.64	51.40	109.16	150.36	190.85	236.15	282.29	334.82
	Piston Δz	3.68	40.25	78.49	120.27	175.00	217.91	261.16	310.52
2nd	Reference grating piston c_1	0.01	12.34	14.01	8.62	4.24	7.03	4.45	9.65
	Adjusting grating piston c_2	1.68	46.36	94.24	127.26	184.19	221.15	248.50	297.97
	Piston Δz	1.67	34.01	80.23	118.63	179.95	214.12	244.06	288.32
3rd	Reference grating piston c_1	14.00	24.14	21.44	26.11	15.29	6.49	18.45	-8.72
	Adjusting grating piston c_2	18.44	70.96	113.17	170.84	197.57	235.40	294.11	301.69
	Piston Δz	4.44	46.82	91.73	144.73	182.28	228.91	275.66	310.69
4th	Reference grating piston c_1	4.14	5.51	9.99	8.60	13.23	15.57	11.98	15.75
	Adjusting grating piston c_2	9.84	54.23	94.08	142.92	179.97	233.58	268.57	296.60
	Piston Δz	5.70	48.72	84.09	134.32	166.72	218.01	256.59	280.86

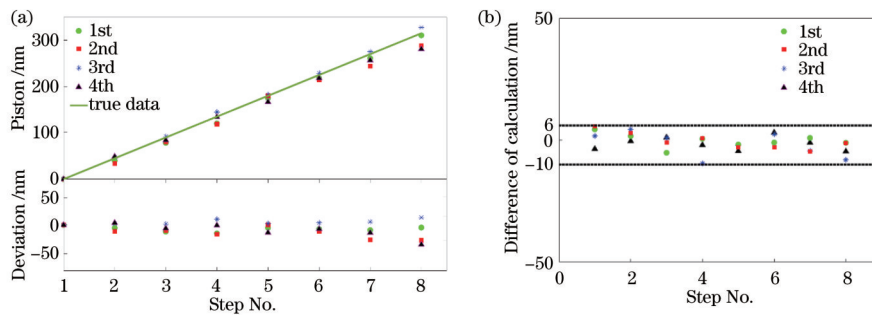


图 7 PI 纳米位移平台控制位移与位移计算值之间的关系。(a) 位移计算精度分析; (b) 环境引起的位移变化分析

Fig. 7 Relationship between control piston of PI nano-translation stage and calculated piston value. (a) Piston calculation accuracy analysis; (b) analysis of piston change caused by environment

条纹分析计算的环境变化引起的位移图, 环境变化主要包括震动、气流扰动等引起的条纹微小移动。对同一组位移处的干涉条纹在不同时间进行了两次采样, 再通过计算比较不同时间下同一组干涉条纹下的位移可以发现, 环境变化引起的两幅图的偏差在 $-10 \sim 10$ nm 范围内, 相对于 PI 位移和计算累积误差, 该数值可忽略不计。

4.2 位移误差的精确调整结果

位移误差的精确调整主要包括粗调和精调。首先, 使用白光光源进行粗调。调节白光干涉仪的位置, 获得基准光栅的干涉条纹。固定干涉仪的位置, 精确地调整调整光栅的前后位置。在 CCD 上获得干涉条纹后, 进行精确调整, 使得左右干涉条纹的干涉峰值相互对齐, 此时位移的控制误差在微米量级。然后, 使用两个单色光进行细调, 使得波长为 632.8 nm 的光源产生的干涉条纹和 532 nm 光源产生的干涉条纹与相应的基准光栅条纹近似对齐。最后, 使用波长为 632.8 nm 的光源进行细调, 使得左右两个干涉条纹的峰值严格对齐, 从而实现位移误差的精确调整。在利用白光光源进行调整的过程中, 通过加入不同的滤波片分析白光带宽范围对测量精度的影响, 得到的干涉

图像如图 8 所示。

从图 8 中白光干涉条件下的条纹对准示意图可以看出: 当没有滤波片, 全波段波长范围为 360~2600 nm 时, 探测器上只出现有限的干涉条纹; 在使用滤光片后, 对光源的带宽逐渐降低, 条纹的对比度逐渐增大, 条纹越来越明显, 同一个干涉图中条纹的峰值强度越来越接近, 无法获得精确的干涉峰值的位置, 不利于位移的精确调整。因此, 在使用白光粗调过程中, 优先使用宽波段的白光光源, 以减小条纹周期性误差, 在获得左右两个干涉条纹近似对齐的条件下, 位移的控制精度在微米量级。

在精调过程中, 使用双波长和单波长相结合的方式对拼接光栅的位移进行精细调节, 使得在两个波长测量下获得的参考光栅的干涉条纹同时与基准光栅产生的干涉条纹吻合, 在不存在条纹错位的条件下, 获得了位移的精确调整。图 9 为最后的位移调整状态, 通过图像处理得到干涉图的强度和波前拟合平面, 经过傅里叶条纹分析算法计算得到, 采用 532 nm 时条纹的位移误差为 6 nm, 采用 632.8 nm 时条纹的位移误差为 1 nm, 该误差完全在环境变化引起的位移误差范围内。

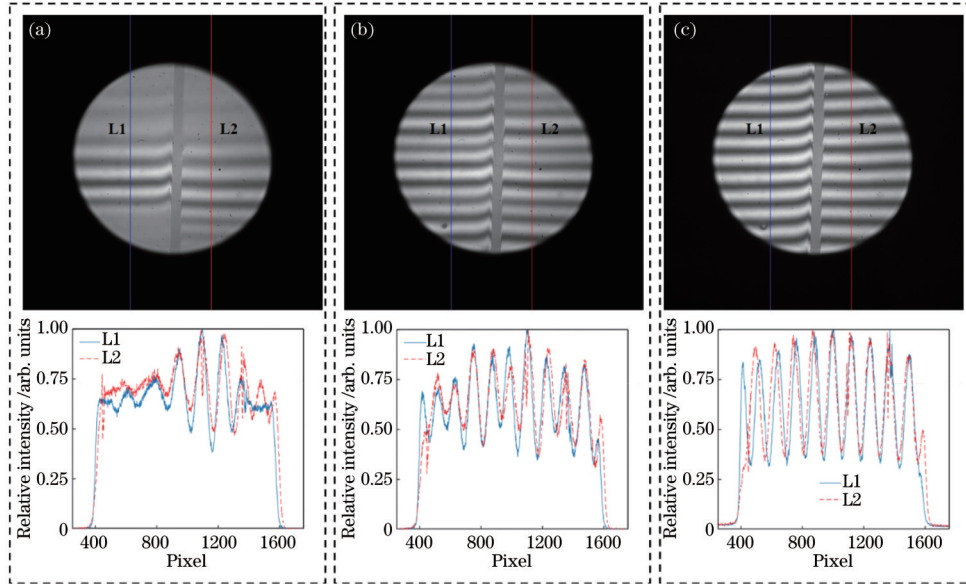


图 8 白光干涉条件下的条纹对准示意图。(a)波长为 360~2600 nm 的卤钨光源的干涉条纹和强度对比图;(b)带宽为 50 nm、波长为 607~657 nm 时的干涉条纹和强度对比图

Fig. 8 Schematic diagram of fringe alignment under white light interference. (a) Interference fringes and intensity comparison diagram of tungsten-halogen light source with wavelength of 360-2600 nm; (b) interference fringes and intensity comparison diagram at bandwidth of 50 nm and wavelength of 607-657 nm; (c) interference fringes and intensity comparison diagram at bandwidth of 10 nm and wavelength of 627-637 nm

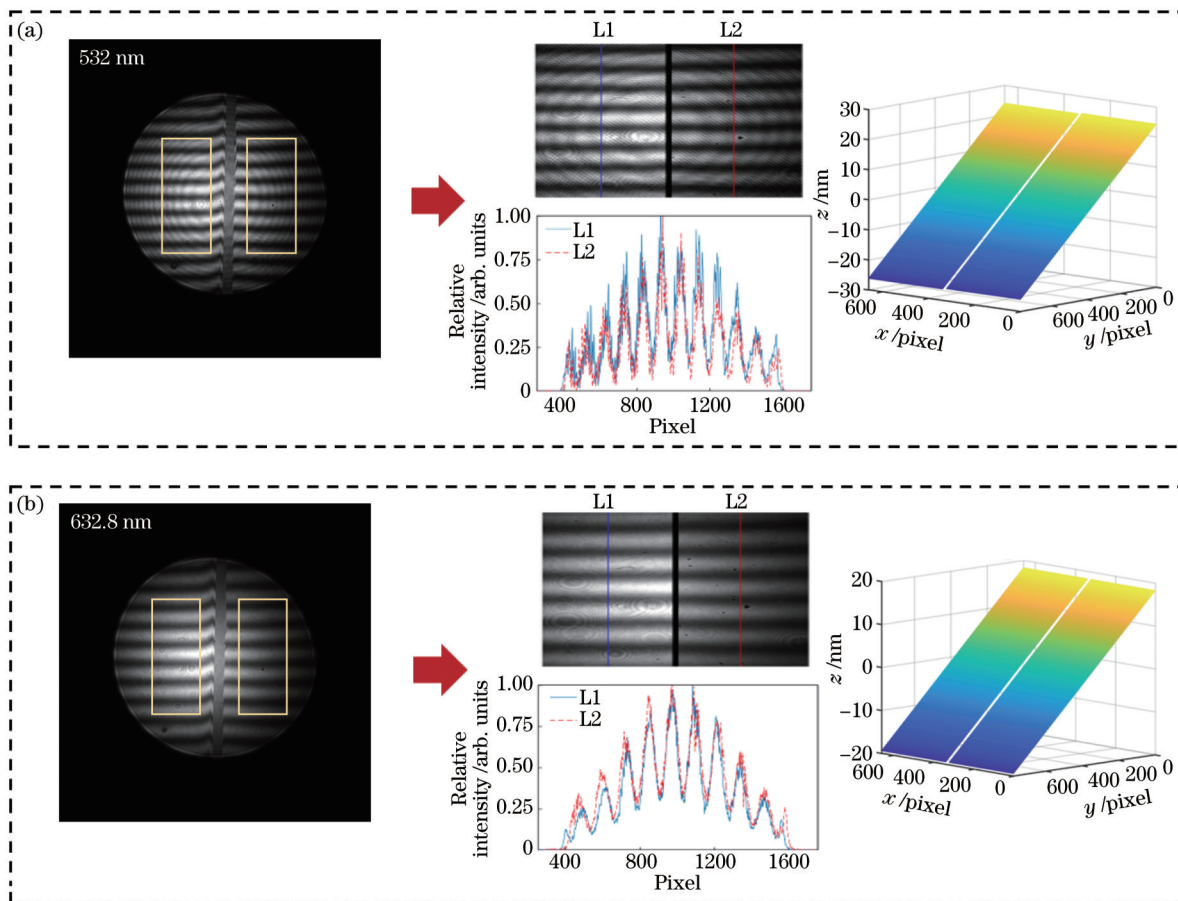


图 9 位移精调检测结果。(a) 532 nm 波长时的干涉条纹图及波前拟合;(b) 632.8 nm 波长时的干涉条纹图及波前拟合

Fig. 9 Piston precision adjustment detection results. (a) Interference fringe and wavefront fitting at wavelength of 532 nm; (b) interference fringe and wavefront fitting at wavelength of 632.8 nm

5 结 论

建立了拼接光栅误差理论模型,通过理论分析和仿真计算,明确了五维拼接误差给拼接结果带来的影响。针对大尺寸中阶梯拼接光栅的高精度位移误差检测消除,提出一种利用白光和双波长测量技术相结合的方法。基于迈克耳孙干涉,搭建误差检测消除系统,精确控制调整光栅的姿态,通过傅里叶算法对拼接光栅波前进行计算分析,结果表明,两块待拼接的光栅间位移误差小于 6 nm(在 532 nm 波长条件下计算),满足光栅拼接的技术要求。所提实验系统有效地解决了位移误差的周期性问题,实验系统简单,易于进行装调检测,为未来更大尺寸光栅拼接研制提供了有效的技术手段。

参 考 文 献

- [1] Sakanoi T, Kasaba Y, Kagitani M, et al. Development of infrared Echelle spectrograph and mid-infrared heterodyne spectrometer on a small telescope at Haleakala, Hawaii for planetary observation[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9147: 91478D.
- [2] Dekker H, D'Odorico S. UVES, the UV-visual echelle spectrograph for the VLT[J]. The Messenger, 1992, 70: 13-17.
- [3] Vogt S S, Allen S L, Bigelow B C, et al. HIRES: the high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-m Telescope[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2198: 362-375.
- [4] Hornung M, Bödefeld R, Kessler A, et al. Spectrally resolved and phase-sensitive far-field measurement for the coherent addition of laser pulses in a tiled grating compressor[J]. Optics Letters, 2010, 35(12): 2073-2075.
- [5] Habara H, Xu G, Jitsuno T, et al. Pulse compression and beam focusing with segmented diffraction gratings in a high-power chirped-pulse amplification glass laser system[J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1783-1785.
- [6] Cotel A, Castaing M, Pichon P, et al. Phased-array grating compression for high-energy chirped pulse amplification lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2742-2752.
- [7] 朱永田. 8~10 m 级光学/红外望远镜的高分辨率光谱仪[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 295.
Zhu Y T. High resolution spectrographs for 8-10 m class optical/IR telescopes[J]. Progress in Astronomy, 2001, 19(2): 295.
- [8] 季杭馨, 朱永田, 胡中文. 极大望远镜高效率多通道光谱仪的光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0330003.
Ji H X, Zhu Y T, Hu Z W. Optical system design of high throughput multi-channel spectrograph for very large telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0330003.
- [9] 韩建, 姜明达, 张凯, 等. 基于干涉条纹傅里叶分析技术对拼接光栅调整偏角的计算分析[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0311001.
- [10] Han J, Jiang M D, Zhang K, et al. Fourier-transform method for analyzing angular errors from interferograms for mosaic grating alignment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0311001.
- [10] Dekker H, Hoose J. Very high blaze angle R4 echelle mosaic[C]//ESO Workshop on High Resolution Spectroscopy with the VLT, February 11-13, 1992, Garching bei München, Germany. Garching bei München: European Southern Observatory, 1992, 40: 261.
- [11] Blasiak T, Zheleznyak S. History and construction of large mosaic diffraction gratings[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4485: 370-377.
- [12] Harimoto T. Far-field pattern analysis for an array grating compressor[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(4A): 1362-1365.
- [13] Harimoto T, Yamakawa K. Analytical expressions for small-signal and saturation processes of optical parametric chirped-pulse amplification[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(9): 098005.
- [14] Qiao J, Kalb A, Nguyen T, et al. Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems[J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1684-1686.
- [15] Qiao J, Kalb A, Guardalben M J, et al. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9562-9574.
- [16] Hornung M, Bödefeld R, Siebold M, et al. Alignment of a tiled-grating compressor in a high-power chirped-pulse amplification laser system[J]. Applied Optics, 2007, 46(30): 7432-7435.
- [17] Hu Y, Zeng L J. Grating mosaic based on image processing of far-field diffraction intensity patterns in two wavelengths[J]. Applied Optics, 2007, 46(28): 7018-7025.
- [18] Hu Y, Zeng L J, Li L F. Method to mosaic gratings that relies on analysis of far-field intensity patterns in two wavelengths[J]. Optics Communications, 2007, 269(2): 285-290.
- [19] Lu Y X, Qi X D, Li X T, et al. Removal of all mosaic grating errors in a single-interferometer system by a phase-difference reference window[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7997-8002.
- [20] 卢禹先, 齐向东, 糜小涛, 等. 基于波前法的光栅拼接误差检测及计算方法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505001.
Lu Y X, Qi X D, Mi X T, et al. Detection and calculation of mosaic grating error based on wavefront method[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0505001.
- [21] Martinez-Carranza J, Falaggis K, Kozacki T. Fast and accurate phase-unwrapping algorithm based on the transport of intensity equation[J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7079-7088.