

基于数字相位校正的双波长数字全息台阶高度测量

屈玲^{1,2,3},李常伟^{2,3,4*},吴婧¹,陆彦婷^{2,3}

(1.南京信息工程大学物理与光电工程学院,南京210044;2.中国科学院南京天文光学技术研究所,南京210042;
3.中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所),南京210042;4.中国科学院大学天文与空间科学学院,北京100049)

摘要:针对材料表面台阶高度测量中存在的 2π 相位模糊及离轴全息频谱移频引发的整体倾斜误差问题,提出一种基于数字相位校正的双波长数字全息台阶高度测量技术。该技术利用双波长激光照明获取全息图,采用数字滤波提取相位,并通过平面拟合法进行整体相位校正,有效剔除频谱非连续移频引起的倾斜误差。仿真与实验结果表明:经倾斜校正后, y 方向与 x 方向的相对误差分别降低至校正前的 $1/8.4$ 与 $1/12.2$ 。

关键词:台阶高度;双波长数字全息;平面拟合;整体倾斜

中图分类号:TN929.1;O436 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0054-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.009

Dual-wavelength digital holographic step height measurement based on digital phase correction

QU Ling^{1,2,3}, LI Changwei^{2,3,4*}, WU Jing¹, LU Yanting^{2,3}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;
3. CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology(Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology),
Nanjing 210042, China;4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve 2π phase ambiguity in measuring the step height on material surfaces and overall tilt errors caused by off-axis holographic spectrum frequency shift, a dual-wavelength digital holographic measurement technique based on digital phase correction is proposed. This technique uses dual-wavelength laser illumination to obtain holograms, employs digital filtering to extract the phase, and performs overall phase correction through plane fitting, effectively eliminating tilt errors caused by discontinuous spectrum frequency shifts. Simulation and experimental results show that after tilt correction, the relative errors in the y -direction and x -direction are reduced to $1/8.4$ and $1/12.2$ of their pre-correction values, respectively.

Key words: step height, dual-wavelength digital holographic, plane fitting, overall tilt

0 引言

随着超精密机械、微机电系统(MEMS)、微电子、微型光学及光伏电池等领域的飞速发展,对微纳结构

收稿日期:2025-01-06。

基金项目:国家自然科学基金项目(11873069)资助;中国科学院青年创新促进会项目(2019064)资助。

作者简介:屈玲(2000—),女,湖北武汉人,硕士研究生,现就读于南京信息工程大学物理与光电工程学院光学工程专业,主要从事双波长数字全息台阶高度测量方面的研究工作,针对离轴全息中因无法连续移频引入的整体倾斜问题,研究数字相位校正方法及其仿真验证。

***通信作者:**李常伟(1983—),男,博士,副研究员,主要从事自适应光学和相位恢复方面的研究工作。



构三维形貌的高精度测量需求日益迫切。台阶高度作为表征微纳结构的关键几何参数,其测量精度直接影响器件的性能与可靠性。目前,台阶高度测量方法主要分为接触式与非接触式2类。接触式方法(如原子力显微镜和台阶仪)虽具备高分辨率,但探针昂贵且易损伤样品表面;非接触式光学方法(如单波长激光干涉法、白光干涉法、数字全息术)则通过解算光场相位信息实现测量,其中单波长激光干涉法^[1]受限于相位模糊问题,白光干涉法^[2-3]虽提升了动态范围却易受表面粗糙度干扰。数字全息术凭借无损、非接触及高分辨率等优势,在微结构形貌表征中展现出巨大潜力^[4-10]。然而,传统数字全息术受限于光波波长,当台阶高度超过半波长时会出现相位包裹现象,需依赖复

杂的解包裹算法^[11-12]。相比之下,双波长数字全息术利用合成波长原理,有效避免了相位包裹问题,显著扩大了台阶高度的动态测量范围^[13-16],已成为当前微纳计量领域的重要研究方向。

针对双波长数字全息技术在台阶测量中的应用,国内外学者已开展了广泛研究。曾雅楠等人^[19]利用双波长数字显微像面全息系统实现了微米级台阶结构的测量;寇云莉等人^[20]采用透射式离轴系统结合角分复用技术进行三维检测,但对角度控制稳定性要求极高;陶思勤等人^[21]将该技术应用于微流控芯片通道结构的检测;Palacios-Ortega N等人^[22]及潘卫清等人^[23]分别在生物细胞形态测量和等效相位随机噪声抑制方面取得了进展。此外,葛磊等人^[24]、Shangguan H C等人^[25]、Wang Yue等人^[26]及 Yin Yongyao等人^[27]分别通过引入二向色镜分光、无透镜架构、快照技术和超表面元件等手段,进一步拓展了系统的测量深度、相位灵敏度及彩色三维测量能力。尽管现有研究极大地推动了双波长数字全息技术的发展,但在实际应用中仍面临关键瓶颈:在离轴数字全息图的傅里叶频域处理中,由于无法实现物光频谱的非整数像素连续移频,导致重建后的相位图存在整体倾斜^[28]。这一系统性误差显著降低了台阶高度的测量精度,限制了微纳结构的精确表征,而现有文献对此问题的针对性校正研究尚显不足。

鉴于此,本文旨在解决离轴双波长数字全息术中因频谱移频不匹配导致的相位倾斜问题,提出一种基于数字相位校正的双波长数字全息台阶高度测量技术。

1 基本原理

为简化全息再现过程中参考光的模拟和复杂的衍射计算,本文采用离轴像面全息的方法记录全息图。该方法在确保记录平面与待测物体所在平面满足光学共轭的情况下,利用电荷耦合器件(CCD)直接记录物体像面光场与参考光的干涉全息图,最后可以直接提取出待测物体的相位信息。测量样品台阶高度的流程图如图1所示。其中,平面拟合选取的拟合区域为表面平坦、无边界和不连续的部分。

在全息图记录过程中,假设2束不同波长的照明激光,其波长分别为 λ_1 和 λ_2 ,不同激光照明下的物光光场分别为 O_1 和 O_2 ,对应的参考光光场分别为 R_1 和 R_2 。经过实验光路系统后,对应波长的物光和参考光

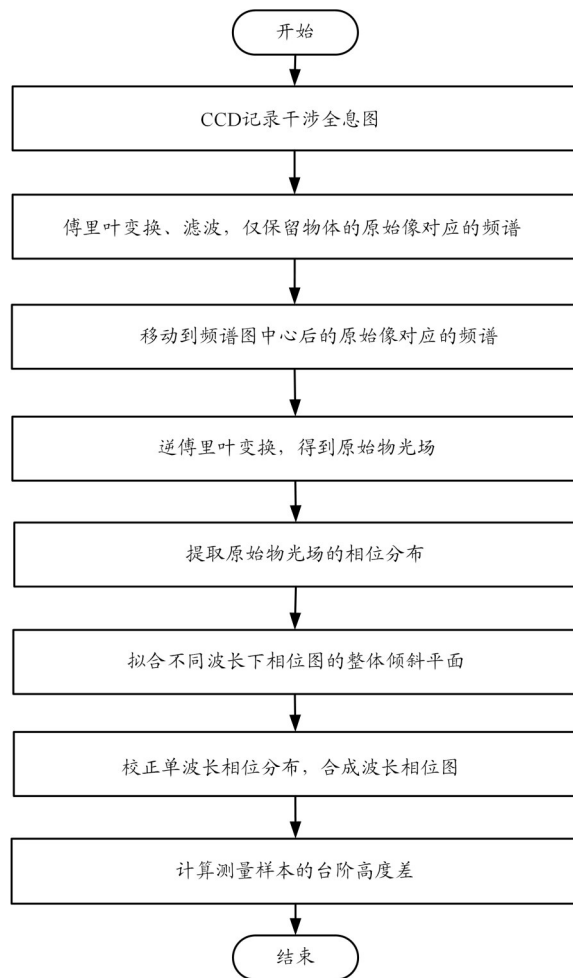


图1 测量样品台阶高度的流程图

发生干涉,CCD记录的不同照明波长下的2幅干涉全息图可以表示为

$$\begin{cases} I_{\lambda_1} = |O_1|^2 + |R_1|^2 + O_1 R_1^* + O_1^* R_1 \\ I_{\lambda_2} = |O_2|^2 + |R_2|^2 + O_2 R_2^* + O_2^* R_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{λ_1} 和 I_{λ_2} 分别表示波长为 λ_1 和 λ_2 的激光照明下记录的全息图;符号*表示复共轭。等号右侧前2项为0级衍射项,第三项为+1级虚像(物体原始像),第四项为-1级实像(物体共轭像)。

假设记录过程中物体像面光场与2束参考光的夹角保持一致,在离轴配置下,尽管2束参考光波长不同,经傅里叶变换后的频谱图中,式(1)右侧的0级衍射项、+1级虚像和-1级实像对应的频谱分量相互分离。因此,可通过频域滤波有效提取包含物体相位信息的原始像。

在离轴像面全息记录中,可直接从全息图中提取复振幅信息,无需额外进行衍射传播计算即可获取像面信息。获得相互分离的全息图频谱后,采用数字滤

屈玲,李常伟,吴婧,等:基于数字相位校正的双波长数字全息台阶高度测量

波技术,将0级衍射项和共轭像对应频域的频谱值置零,仅保留式(1)中物体原始像对应的频谱。数字滤波器的边界设定在0级衍射项与原始像之间的强度最小点处。之后,将物体原始像对应频谱的幅值最大点移动至频谱图中心^[29],以消除相位偏移和图像失真,确保重建质量。移动后的物体原始像对应的频谱 $H_i(u, v)$ 可以表示为

$$H_i(u, v) = H_{i0}(u - u_i, v - v_i) \quad (2)$$

式中: u, v 是频域中的空间频率坐标变量, (u_i, v_i) 表示物体原始像对应频谱的幅值最大点移动到频谱中心的位移距离, $i = 1, 2$ 。

频域滤波后提取的被测样品在对应波长下的原始物光场可以表示为

$$O_i = F^{-1}\{H_i(u, v)\} \quad (3)$$

式中: F^{-1} 表示傅里叶逆变换。

由式(3)可以提取出原始物光场的相位分布。

$$\varphi_i = \arg(O_i) \quad (4)$$

式中: $\arg(\cdot)$ 表示提取复振幅的相位部分。

在频谱移频过程中,由于无法实现物光频谱的非整数像素级连续平移,导致重建相位图引入了整体倾斜误差。该倾斜不仅阻碍了相位的精确恢复,更严重干扰了台阶高度的测量精度。因此,消除整体倾斜是确保台阶结构相对相位差准确测量的关键。针对此问题,本文提出一种数字相位校正方法:在单波长相位图中选取若干无突变边界的平坦区域,计算各区域的倾斜斜率并取其均值,从而重构出表征整体倾斜的参考平面,进而完成相位校正。不同波长下相位图的整体倾斜平面可以表示为

$$T_i = A_i x + B_i y + C_i \quad (5)$$

式中: A_i 和 B_i 分别表示在不同波长时的相位图沿 x 方向和 y 方向的斜率, C_i 表示相位图在不同波长时的整体平移。

将单波长相位图减去对应的倾斜面后,可以得到校正后的单波长相位分布如式(6)所示。

$$\bar{\varphi}_i = \varphi_i - T_i \quad (6)$$

此时,合成波长时的相位图可以表示为

$$\varphi_s(x, y) = \bar{\varphi}_1 - \bar{\varphi}_2 \quad (7)$$

最后,利用合成波长时的相位信息,计算出被测样品的台阶高度差,其表达式为

$$H(x, y) = \frac{1}{2} \frac{\varphi_s(x, y) \lambda_s}{2\pi} \quad (8)$$

式中: λ_s 为合成波长, $\lambda_s = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ 。

由于光线在入射和反射过程中会2次通过台阶,合成波长时台阶状物体的光程差是实际台阶高度差的2倍。

2 仿真实验与分析

2.1 实验装置

本文搭建了一套迈克尔逊型反射式离轴双波长数字全息系统,其实验系统装置图如图2所示,主要包含双波长激光光源、4倍焦距(4f)成像系统及CCD探测器。光源选用Coherent公司生产的OBIS系列半导体二极管激光器,工作波长分别为 $\lambda_1 = 640 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 685 \text{ nm}$,通过光纤耦合器实现波长的快速切换,计算可得合成波长为 $9.74 \mu\text{m}$ 。探测器采用Edmund Optics公司的EO-0312M型CCD相机,有效分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $9.9 \mu\text{m}$ 。成像光路由焦距分别为 $f_1 = 150 \text{ mm}$ 和 $f_2 = 50 \text{ mm}$ 的2枚透镜组成4f成像系统。

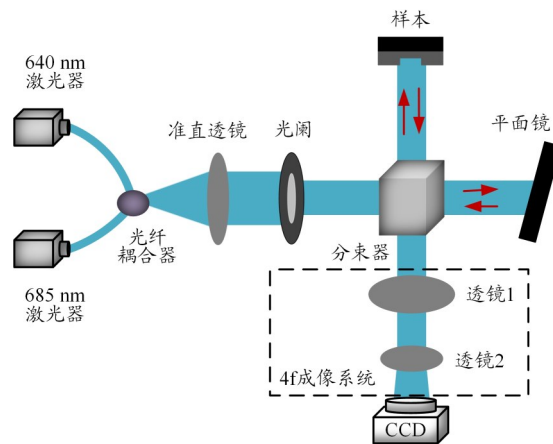


图2 实验装置示意图

实验时,首先将激光器调谐至工作波长。出射激光经准直透镜变为平行光,通过光阑滤波后入射至分束器。光束被分为2路:参考光经平面镜反射后进入4f成像系统;物光照射至台阶标准件表面,携带样品振幅与相位信息的反射光同样经过4f成像系统。由于4f成像系统的缩束作用,物光光束尺寸缩小为原来的 $1/3$,随后与参考光在CCD靶面发生干涉,记录波长 λ_1 时的离轴全息图。随后,将激光器切换至波长 λ_2 ,重复上述步骤记录第二幅全息图。数据采集完成后,由计算机进行离线重建处理。实验中需微调参考光路平面镜的倾角,以确保频谱面上+1级、-1级和0级衍射项完全分离,从而满足后续频域滤波及频谱移频的处理要求。

2.2 仿真分析

为验证相位图中整体倾斜对台阶高度测量的影响,本文对图2中的光路进行数值仿真。仿真实验参数设置如下:光源采用波长 $\lambda_1 = 640 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 685 \text{ nm}$ 的激光;被测样品的台阶高度差为 $2 \text{ }\mu\text{m}$;物体与参考光在 x 方向的夹角为 1.3° , y 方向的夹角为 0.02° ;CCD采样数为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $10 \text{ }\mu\text{m}$;瞳面通光孔径半径对应256像素;干涉图信噪比设为30 dB。图3为阶梯状的矩形被测样品相位图,在波长为 λ_1 和 λ_2 的照明条件下获取的干涉全息图与相位图分别如图4、图5所示。其中,图4(b)与图5(b)中实线矩形框标示了用于倾斜拟合的选取区域。该区域避开相位突变边界,具有较好的表面均匀性与平坦度。通过计算各子区域斜率的均值,可确定表征整体倾斜的参考平面;从原始相位图中减去该平面,即得到校正后的单波长相位图。

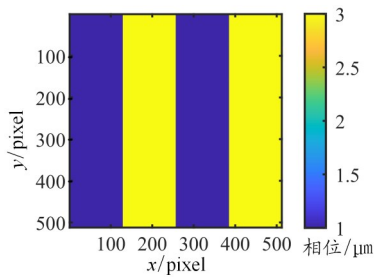


图3 阶梯状的矩形被测样品相位图

图6(a)为由图4(b)和图5(b)直接合成的未校正等效波长相位图。为定量分析倾斜误差,沿 x 方向对

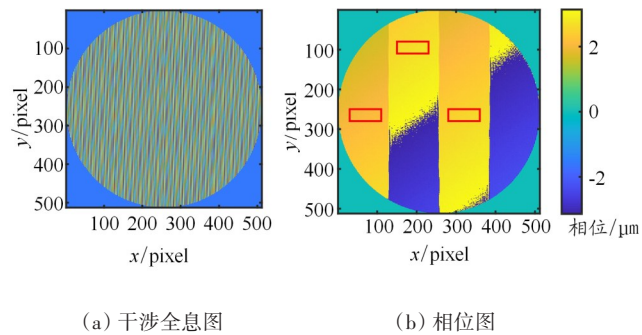


图4 波长为640 nm时的干涉全息图和相位图

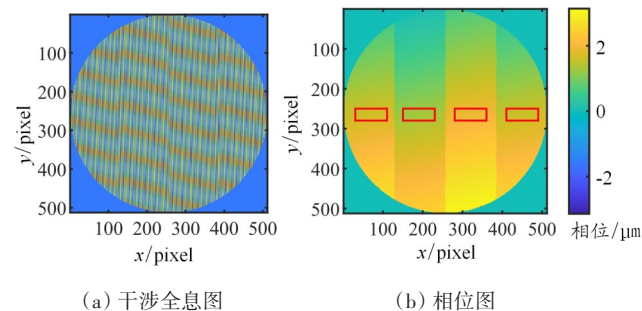


图5 波长为685 nm时的干涉全息图和相位图

图6(a)中红色矩形区域取均值,绘制得到台阶高度截面轮廓,如图6(b)所示。可以看出,合成波长相位图在 x 方向存在显著的整体倾斜。该倾斜源于频谱移频过程中无法实现物光频谱的非整数像素级连续平移,致使单波长重建相位图引入微小倾斜分量;在双波长合成过程中,该微小误差被等效波长放大,进而显著降低台阶高度的最终测量精度。

图6(c)为基于图4(b)和图5(b)数据生成的、经倾斜校正后的合成波长相位图。沿 x 方向对图6(c)中红色矩形区域取均值,绘制台阶高度截面轮廓如图6(d)所示。与图6(b)对比可见,校正后 x 方向的整体倾斜已被有效抑制,验证了本文所提数字相位校正方法的可行性。

表1汇总了校正前后台阶高度测量的定量结果。校正前,合成波长相位图被测样品的台阶平均高度差为 $2.120 \text{ }\mu\text{m}$,相对误差为6.00%;校正后,平均高度差为 $2.001 \text{ }\mu\text{m}$,相对误差降至0.05%。相对误差降低了

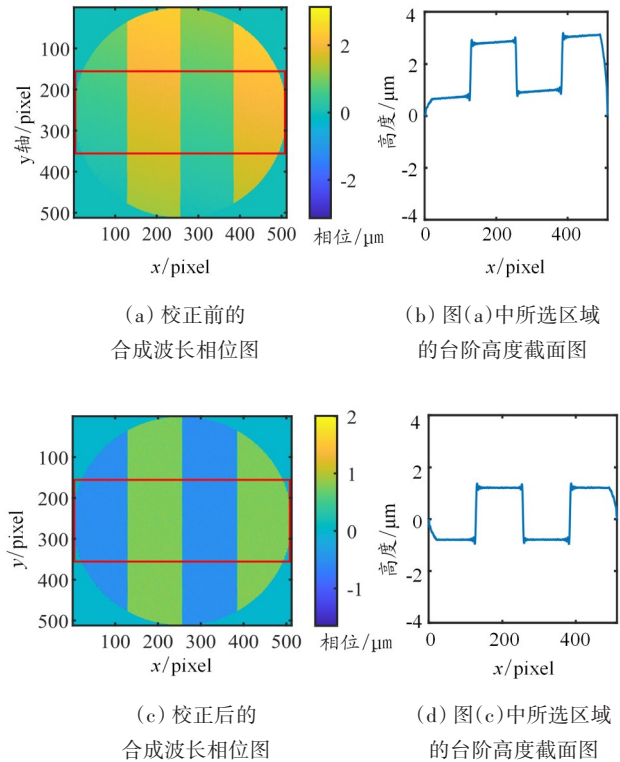


图6 仿真验证实验测量的台阶高度结果图

表1 校正前和校正后被测样品的高度差结果对比

操作	平均高度差/ μm	相对误差/%
校正前	2.120	6.00
校正后	2.001	0.05

屈玲,李常伟,吴婧,等:基于数字相位校正的双波长数字全息台阶高度测量

2个数量级,表明消除非整数像素移频引入的整体倾斜误差后,台阶高度的测量精度得到显著提升。

3 样品台阶实测结果

3.1 样品台阶高度的测量

实验样品选用美国 VLSI Standards 公司生产的厚台阶高度标准件,该标准件基底为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的石英块,中心加工有矩形凹槽,且仅凹槽区域经认证,标称台阶高度差为 $1.78\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$,适用于高度测量的量值溯源与系统定标。

图 7(a)、图 7(b)为实验采集的不同照明波长下的离轴全息图;图 7(c)、图 7(d)为经频域最大滤波器滤波、频谱中心化及逆傅里叶变换后重建的单波长相位图及其局部放大图。放大图中红色实线框为倾斜拟合的选取区域,该区域位于凹槽四周的平坦基底表面,

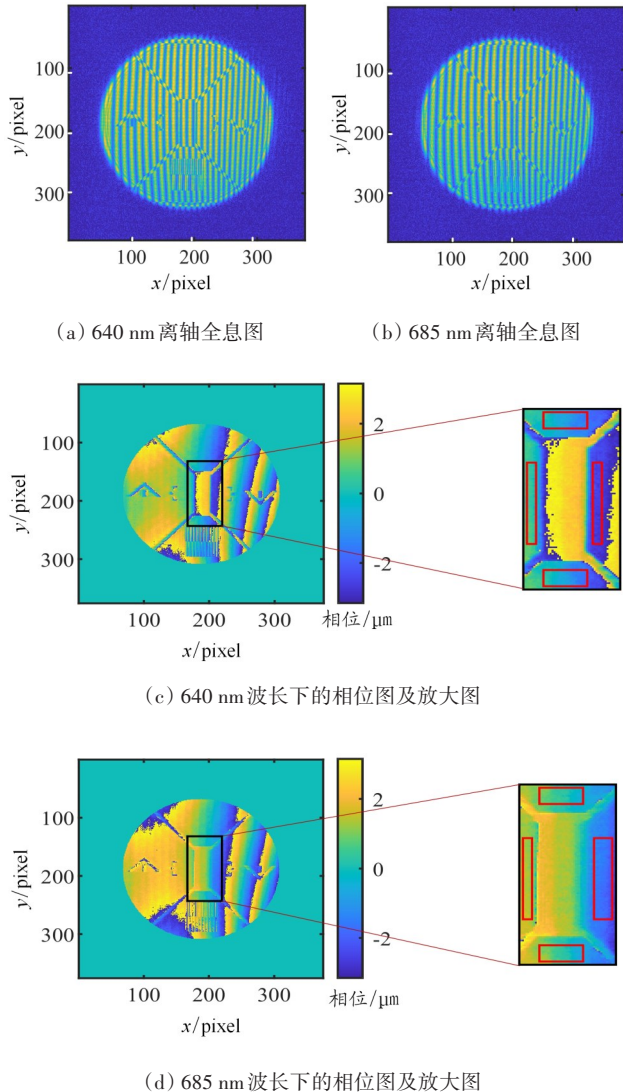


图 7 不同照明波长下的离轴全息图和重建的相位图

具有较好的均匀性且无相位突变边界。通过计算各子区域斜率的均值,可确定表征整体倾斜的参考平面。

将图 7 中不同波长下的相位图合成后,所得校正前后的合成波长相位图及放大图如图 8(a)、图 8(c)所示。图 8(b)、图 8(d)分别为图 8(a)、图 8(c)中凹槽区域沿 y 轴与 x 轴方向的高度截面轮廓。对比图 8(b)、图 8(d)可见,校正前,倾斜明显;而校正后,倾斜分量基本消除,台阶轮廓恢复平整。

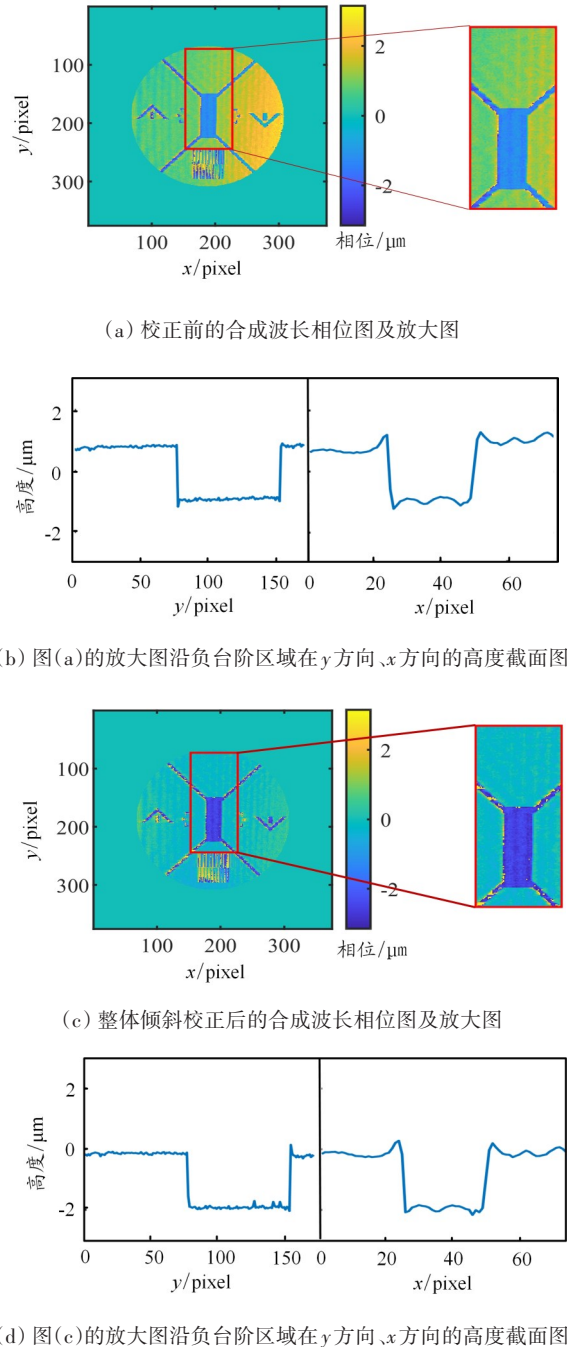


图 8 整体倾斜校正前后的台阶高度测量实验结果

表2对比了校正前后台阶高度标准件沿凹槽中心区域 x 方向与 y 方向的测量结果。为规避台阶边缘相位突变及衍射效应引入的测量误差,数据处理时避开了阶跃边界,仅选取凹槽两侧平坦基底与底部区域进行统计。从表2可以看出,校正后, y 方向与 x 方向的相对误差分别降低至校正前的1/8.4与1/12.2,表明消除非整数像素移频引入的整体倾斜误差后,台阶高度的测量精度与方向一致性均得到显著提升。

表2 被测样品沿中心负台阶 x 方向和 y 方向测量的高度差结果对比

操作	方向	平均高度差/ μm	相对误差/%
校正前	y 方向	1.729	2.87
	x 方向	1.793	0.73
校正后	y 方向	1.774	0.34
	x 方向	1.781	0.06

3.2 数字滤波器对测量精度的影响

为分析数字滤波器对测量精度的影响,本文以6种不同的数字滤波器为例,分别按照图1流程图测量台阶高度并比较其精度。

所有数字滤波器的起始点均设置在频谱图中0级衍射项与原始像之间最小强度点处,并计算出不同波长频谱图中最大强度点(频谱中心)的坐标 (x_0, y_0) 。频谱图以 y_0 行作为分界线划分为上下2个区域。考虑到不同波长时物体傅里叶频谱的差异,每种滤波器的频谱高度范围均以傅里叶频谱上振幅最小值来确定。滤波器1~6的高度范围分别为: y_1 行到 $\text{end} - y_1$ 行、 $\text{end} - y_2$ 行到 y_2 行、 y_3 行到 $\text{end} - y_3$ 行、 $\text{end} - y_4$ 行到 y_4 行、 y_1 行到 y_2 行、 y_3 行到 y_4 行。在波长为 λ_1 的频谱图中,分别确定 x_0 列中的上下区域中2个强度最小点的坐标 (x_0, y_1) 和 (x_0, y_2) 。波长为 λ_2 的频谱图,同样确定 x_0 列中的上下区域中2个强度最小点的坐标 (x_0, y_3) 和 (x_0, y_4) 。本文测得不同滤波器的台阶高度结果如表3所示。可以看出,采用这6种典型数字滤波器生成的校正合成波长相位图的高度差值,其在 y 方向和 x 方向的测量精度(相对误差)分别降低至校正前的1/2与1/3,但整体效果远不如表2所示结果。这是因为表2采用的是最大滤波器,该滤波器保留了更丰富的频率成分,从而最大限度地降低了由截频引起的吉布斯现象对测量结果的影响。这表明,在提取台阶高度时,最大滤波器具有最高的精度。

表3 不同滤波器实测的高度差结果对比

滤波器序号	操作	方向	平均高度差/ μm	相对误差/%
1	校正前	y 方向	1.729	2.87
		x 方向	1.789	0.51
	校正后	y 方向	1.814	1.91
		x 方向	1.785	0.28
2	校正前	y 方向	1.729	2.87
		x 方向	1.789	0.51
	校正后	y 方向	1.813	1.85
		x 方向	1.785	0.28
3	校正前	y 方向	1.729	2.87
		x 方向	1.788	0.45
	校正后	y 方向	1.809	1.63
		x 方向	1.783	0.17
4	校正前	y 方向	1.729	2.87
		x 方向	1.788	0.45
	校正后	y 方向	1.810	1.69
		x 方向	1.784	0.22
5	校正前	y 方向	1.729	2.87
		x 方向	1.789	0.51
	校正后	y 方向	1.813	1.85
		x 方向	1.785	0.28
6	校正前	y 方向	1.729	2.87
		x 方向	1.788	0.45
	校正后	y 方向	1.810	1.69
		x 方向	1.783	0.17

4 结束语

本文提出了一种基于数字相位校正的双波长数字全息台阶高度测量技术,有效消除了台阶高度测量中整体倾斜对测量精度的影响。仿真与实验结果表明:经倾斜校正后, y 方向与 x 方向的相对误差分别降低至校正前的1/8.4与1/12.2。此外,本文系统探讨了不同数字滤波器对测量精度的影响,研究发现最大滤波器有助于抑制吉布斯现象,可最大程度提升台阶高度的测量精度。该技术能够稳定、精确地测量微米级台阶结构,有效克服了整体倾斜引入的测量误差,在光栅尺、微光学元件、微流控芯片等领域具有广阔的应用前景。

屈玲,李常伟,吴婧,等:基于数字相位校正的双波长数字全息台阶高度测量

参考文献:

- [1] Hand D P, Carolan T A, Barton J S, et al. Profile measurement of optically rough surfaces by fiber-optic interferometry[J]. *Optical Letter*, 1993, 18(16): 1361.
- [2] 刘盛刚,陶天炯,马鹤立,等.基于白光频域干涉的大台阶高度测量方法[J].*强激光与粒子束*,2015,27(9):50-54.
- [3] 郭鑫,施玉书,皮磊,等. Mirau干涉型微纳台阶高度测量系统的研究[J].*计量学报*,2017,38(2):141-144.
- [4] 王云新,王大勇,赵洁,等.基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J].*光学学报*,2011,31(4):117-122.
- [5] 赵洁,王大勇,李艳,等.数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J].*中国激光*,2010,37(11):2906-2911.
- [6] 张娅雅,段俊萍,张斌珍.基于无透镜傅里叶变换数字全息的结构形貌测量[J].*光通信技术*,2024,48(5):91-96.
- [7] 刘雅坤,肖文,车蕾平,等.基于数字全息显微层析的癌细胞空泡化成像研究[J].*中国激光*,2022,49(20):152-162.
- [8] Kumar M, Pensia L, Kumar R. Highly stable vibration measurements by common-path off-axis digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 163: 107452.
- [9] Mach M, Psota P, Zidek K, et al. On-chip digital holographic interferometry for measuring wavefront deformation in transparent samples[J]. *Optics Express*, 2023, 31(11): 17185-17200.
- [10] Falk E, Stefano M, Dimitris P, et al. Digital holography from shadow-graphic phase estimates[J]. *Optical Letter*, 2012, 37(4): 509-511.
- [11] 张亦卓,王大勇,赵洁,等.数字全息中实用相位解包裹算法研究[J].*光学学报*,2009,29(12):3323-3327.
- [12] 徐佳男,孔明,刘维,等.微流控芯片通道的全息显微检测方法[J].*红外与激光工程*,2022,51(9):351-358.
- [13] 王羽佳,江竹青,高志瑞,等.双波长数字全息相位解包裹方法研究[J].*光学学报*,2012,32(10):86-91.
- [14] 闵俊伟,郜鹏,但旦,等.高精度定量相位显微成像方法研究[J].*光学学报*,2024,44(2):32-43.
- [15] Yan Yizhang, Veetil S P, Zhu Pengfei, et al. Compact single-shot dual-wavelength interferometry for large object measurement with rough surfaces[J]. *Photonics*, 2024, 11(6): 518.
- [16] Khoo T C, Sharikova A, Khmaladze A. Dual wavelength digital holographic imaging of layered structures[J]. *Optics Communications*, 2020, 458(1): 124793.
- [17] 张悦萌,蔡萍,隆军,等.多波长数字全息计量技术综述[J].*激光与光电子学进展*,2020,57(10):24-35.
- [18] 陈波,白倬宁,赵亚迪,等.双波长数字全息法测量物体三维形貌[J].*华北理工大学学报(自然科学版)*,2018,40(4):120-124.
- [19] 曾雅楠,汪飞,雷海,等.双波长数字显微像面全息术测量微结构表面形貌[J].*光学学报*,2013,33(10):82-86.
- [20] 寇云莉,李恩普,邸江磊,等.利用双波长数字全息术测量微小物体表面形貌[J].*中国激光*,2014,41(2):94-99.
- [21] 陶思勤,孔明,刘维,等.基于双波长像面数字全息显微的微通道检测[J].*光学学报*,2023,43(5):88-95.
- [22] Palacios-Ortega N, HernáNdez-Montes M D, Santoyo F M, et al. Simultaneous dual-wavelength digital holographic microscopy as a tool for the analysis of keratoacanthoma skin samples[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2024, 57(2): 25401.
- [23] 潘卫清,龚国芳,范玉峰.低噪声双波长数字全息及在超精密加工表面检测中的应用[J].*光电工程*,2015,42(1):25-31.
- [24] 葛磊,文永富,程灏波.双波长离轴数字全息成像技术研究[J].*影像科学与光化学*,2021,39(6):790-797.
- [25] Shangguan H C, Urbach H P, Kalkman J. Lensless single-shot dual-wavelength digital holography for industrial metrology[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(16): 4427-4434.
- [26] Wang Yue, Xi Teli, Zhang Xinyu, et al. Snapshot dual-wavelength digital holography with LED and laser hybrid illumination[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 14154-14168.
- [27] Yin Yongyao, Jiang Qiang, Wang Hongbo, et al. Color holographic display based on complex-amplitude metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(1): 2400884.
- [28] 栗银,范琦,王云飞,等.干涉条纹的高准确度傅里叶变换分析[J].*光子学报*,2015,44(11):100-105.
- [29] Li Changwei, Zhang Sijiong. A digital holographic approach for co-phasing of segmented telescopes: proof of concept using numerical simulations[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2014, 126(937): 280-286.