

文章编号: 1002-1582(2025)06-0704-06

白光干涉信号的分段拟合优化方法研究

张昊, 韦晓孝*, 范淼, 陈锦涛

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要: 白光扫描干涉技术是一种高精度、非接触式的三维测量方法,但在大行程扫描和复杂测量环境下易受到振动和非线性扫描误差影响,导致采样信号呈现非均匀分布,从而降低传统拟合算法的稳定性与计算效率。文章针对非均匀采样带来的信号畸变问题,提出了一种基于感兴趣区域(ROI)分段的傅里叶级数拟合优化方法。方法首先通过粗略峰值定位快速确定干涉信号的有效区域,剔除无效背景区段,并结合多线程并行计算策略对信号进行分段拟合与重构,有效降低了拟合阶数与计算开销。仿真结果表明,该方法在保证重构精度的同时,计算效率显著提升。在实际大高差台阶量块测量中,重构高度与参考值误差小于0.5%,总耗时仅为传统方法的约1/44。实验验证了方法在大数据量和低占空比条件下具备优越的稳定性与可扩展性,具有良好的工程应用前景。

关 键 词: 白光干涉; 非均匀采样; 感兴趣区域分段; 傅里叶级数拟合; 三维重构

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Research on segmented fitting optimization method for white light interference signals

ZHANG Hao, WEI Xiaoxiao*, FAN Miao, CHEN Jintao

(College of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: White light scanning interferometry is a high-precision, non-contact 3D measurement technique. However, in scenarios involving large-range scanning and complex measurement environments, it is susceptible to vibrations and nonlinear scanning errors, which lead to non-uniformly distributed sampling signals. This in turn degrades the stability and computational efficiency of traditional fitting algorithms. To address the signal distortion caused by non-uniform sampling, an optimized Fourier series fitting method based on region of interest segmentation is proposed. The method first performs coarse peak localization to quickly identify the effective region of the interference signal, eliminating invalid background segments. It then applies a multithreaded parallel computing strategy to perform segmented fitting and reconstruction, effectively reducing the fitting order and computational cost. Simulation results demonstrate that the proposed method significantly improves computational efficiency while maintaining reconstruction accuracy. In practical measurements of large-step height gauge blocks, the reconstruction error is less than 0.5% compared to reference values, and the total computation time is approximately 1/44 of that required by traditional methods. Experimental results validate the method's superior stability and scalability under conditions of large data volumes and low duty cycles, indicating strong potential for engineering applications.

Keywords: white light interferometry; non-uniform sampling; fourier series fitting; region of Interest segmentation; 3D reconstruction

收稿日期: 2025-05-28; 收到修改稿日期: 2025-09-15

基金项目: 国家重点研发计划“基础科研条件与重大科学仪器设备研发”重点专项(2021YFF0700400)

作者简介: 张昊(1999—),男,硕士研究生,从事光学设计等方面研究。zh1220_edu@163.com

韦晓孝(1983—),女,副教授,博士,从事光学仪器研发及光学设计等方面的研究。

* 通讯作者: weixx@usst.edu.cn

0 引言

白光扫描干涉测量技术是一种重要的三维表面测量方法,具有精度高、无需接触、无损测量等特点,目前广泛用于精密制造^[1]、半导体工业^[2]、生物医学^[3]和光学元件检测^[4]等领域。

该技术的基本原理是通过镜头或样品台的垂直运动,逐点记录样品表面的干涉光强信号,并获得一系列离散的数据。通过特定的算法分析这些数据,就能重建出样品表面的三维形貌。然而,实际测量过程中,由于设备运动控制精度有限以及环境中的振动等因素影响,常导致扫描过程中采样间隔不均匀^[5]。常用的白光干涉解算算法如重心法^[6]、傅里叶包络法^[7]等通常只能处理均匀采样的数据,因此这种不均匀现象会明显降低测量的精度。针对信号的非均匀采样造成的畸变现象,一种方式是直接改进解算算法,例如将非均匀傅里叶变换^[8](NUFFT)或改进重心法^[9]运用于解算流程,以在原时间域信号上补偿采样不均匀性。然而,NUFFT方法依赖于权重函数的选择,若权重函数不当,可能导致信号高频成分丢失,尤其在白光干涉的低相干、低占空比条件下,易出现精度下降的问题。此外,NUFFT算法的计算复杂度较高,在白光干涉的大规模数据处理中对内存与GPU性能提出了更高要求,目前主要应用在数据量较小的二维成像重建中。另一种方式是可以使用拟合的方式对信号进行重构,使其变换为等间隔序列,再调用成熟的均匀采样解算算法^[10]。在后一思路中,傅里叶级数拟合法在处理周期性带限信号方面效果较好^[11]。但由于白光光源相干长度低的特性^[12],导致使用白光干涉系统进行大行程扫描时,信号有效占空比较低,绝大部分采样点处于无干涉或低对比度区域。使用傅里叶级数对该类非周期信号进行拟合需要显著增加拟合阶数以捕捉局域特征,增加了矩阵病态度,从而显著恶化拟合精度并提高计算复杂度^[13]。因此,探索更高效的拟合优化方法对提高白光干涉测量的应用前景具有重要意义。

本文通过对白光干涉信号的特性及傅里叶级数拟合原理进行深入分析,提出了一种基于区域分段的高效拟合优化方法:首先,利用快速的峰值粗定位算法,对各像素的干涉信号极值位置进行初步估计,以高效确定有效的信号相干区域;随后,对信号进行ROI(Region of Interest)分段,并结合并行计算原理,实现面向多线程的信号块分配。这种区域分段方法有效剔除了信号中的无

干涉区域和背景噪声,显著压缩了后续参与拟合运算的数据量,有效降低了傅里叶级数拟合过程中所需的拟合阶数,从而缓解了拟合矩阵的病态性问题,进一步增强了算法在实际测量环境下的适应性与鲁棒性。实验验证表明,这种区域分段的拟合优化策略在大高差、高数据量的测量场景中表现出明显优势,能够广泛适用于高精度、高效率的工业检测和科研应用领域。

1 拟合原理

白光干涉信号由多组单色光相干叠加而成,其具有相干长度短的特性。基于双光束干涉测量原理,只需沿显微物镜的光轴方向进行微量垂直位移改变程差,即可获得样品不同位置的光强变化量

$$I(z) = A \left\{ 1 + B(z - h_0) \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda_0} (z - h_0) \right] \right\} \quad (1)$$

式中, $A = I_1 + I_2$ 为背景光强; $B(z - h_0)$ 为干涉条纹对比度函数; z 为干涉仪扫描时引起的光程差变化即扫描位置; h_0 为扫描样品表面与等光程点的距离; λ_0 为光源的中心波长。由式(1)及白光干涉测量原理可知,扫描位置 z 的采样密度取决于位移部件每次移动的步进距离,因此实际测量中所获取的光强信号必然表现为离散数据。此外,环境振动的干扰使得实际扫描过程中相邻采样点的位移间隔随机波动,表现出非均匀分布的特征,引发信号畸变并影响后续的精确定解算,具体表现如图1所示,可见在对采样间隔添加随机的采样误差后,干涉信号的波形逐渐偏离理想形态。

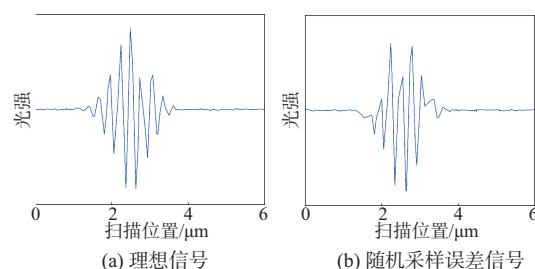


图1 采样误差对干涉信号的影响

同时由式(1)可知,白光干涉信号可认为是具有包络调制特征的三角函数曲线,适宜采用傅里叶级数拟合的方式对该类离散信号进行重构,从而恢复为连续的光强曲线,傅里叶级数拟合函数表示为

$$f(z) = a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\omega z) + b_n \sin(n\omega z)] \quad (2)$$

式中, $f(z)$ 为拟合信号, a_0, a_n, b_n 为傅里叶系数, ω 为信号的角频率, N 为谐波分量即拟合阶数。其

中, ω 为非线性参数, 该参数与扫描间隔、有效信号占空比以及光源的光谱波长相关。在单次完整扫描过程中, 所有像素点的干涉信号均受统一的光源及扫描控制参数约束, 故各信号的拟合最优参数 ω 表现出明显的一致性。因此, 可预先估计最优全局参数 ω , 再通过最小二乘法对全部像素信号统一进行矩阵求解, 以高效实现各像素点干涉信号的快速重构。

2 分段优化

由于白光干涉信号的低相干特性, 干涉现象仅限于特定光程差范围。随着扫描范围的增大, 有效信号占空比降低, 无信号区域占比升高。若采用全局傅里叶级数拟合, 将采样信号视为闭合周期函数, 则需要引入更高阶次谐波以保证重构精度。如图 2 所示, 图 2 (a) 所示为 120 个采样点的干涉信号, 使用 $N=20$ 阶即可良好拟合。当扫描范围扩展至 360 个采样点时, 由图 2 (b) 可见使用同阶拟合 (红色线) 无法准确还原特征, 所需阶数增至 $N=75$, 导致计算量显著增加、效率降低。

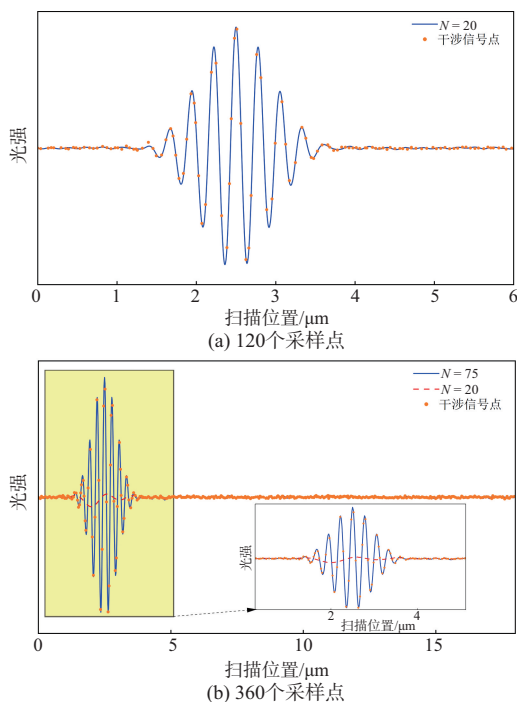


图 2 傅里叶级数拟合对不同长度信号的拟合性能

针对以上问题, 本文提出基于 ROI 的分段拟合方法, 通过定位有效干涉区域并剔除无信号区, 减少无效数据干扰, 同时使分割信号适配多线程并行运算, 从而降低拟合阶数和开销。具体步骤如下:

第一步, 为适配多线程计算, 根据预设坐标长度将原始信号划分为独立子片段, 相邻片段间设重叠区域以确保交界连续性。重叠宽度最小

值 o 可依据下式估算

$$o \geq \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda \cdot \Delta z} \quad (3)$$

式中, 重叠宽度 o 对应于光源相干长度覆盖的采样点数量, $\Delta\lambda$ 表示光源的光谱宽度, Δz 为扫描采样步长。分段从信号起始推进, 直至覆盖全长; 每个片段计算中心坐标标记位置。分段数量和坐标表示为

$$K = \left\lceil \frac{M - o}{l - o} \right\rceil \quad (4)$$

$$z_k = (k - 1)(l - o) \quad (5)$$

$$z'_k = z_k + l \quad (6)$$

$$c_k = z_k + \frac{z'_k - z_k}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

式中, K 为所得的总分段数; M 为采样点总数; l 是预先定义的单个片段长度; k 为分段索引值; z_k 和 z'_k 分别对应第 k 个分段的起始与结束位置。若 K 非整数, 向下取整, 并调整末片段结束位置至信号终点, 避免遗漏。

第二步, 为实现 ROI 划分, 首先通过峰值检测初步定位各像素有效区间, 然后将数据分配至第一步子片段, 剔除无效点。以峰值为基准, 计算数据点至各分段中心距离, 将点归入距离最近的片段 (索引 k), 生成标签矩阵记录所属索引

$$\text{Label}(x, y) = \arg \min_k |Z_c(x, y) - c_k| \quad (8)$$

式中, $\arg \min_k$ 表示使得目标函数取最小值时的索引 k 。对于白光干涉信号, ROI 分段结果如图 3 所示, 每条信号根据索引划分至特定的 ROI 分段中

$$I'_k = \begin{cases} I(z), & z \in [z_k, z'_k] \\ \phi, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中, I'_k 表示属于索引 k 的某个数据点所属的分段信号, 其中坐标 (x, y) 被省略。所有 Label 相同的数据点构成同一 ROI 分段集合, 即一个自定义矩阵块 (block), 数据间独立且坐标明确, 便于多核并行拟合与峰值解算; 标签矩阵用于后续结果合并。通过上述分段及标签处理, 参与计算数据量减少至原始信号的 l/M 倍, 显著提升效率。完整流程如图 4 所示。

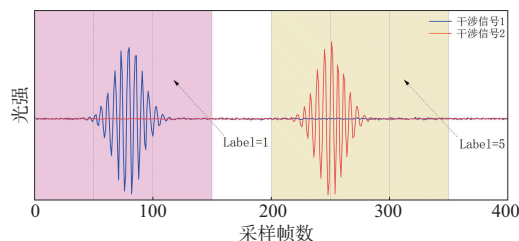


图 3 信号 ROI 分段示例

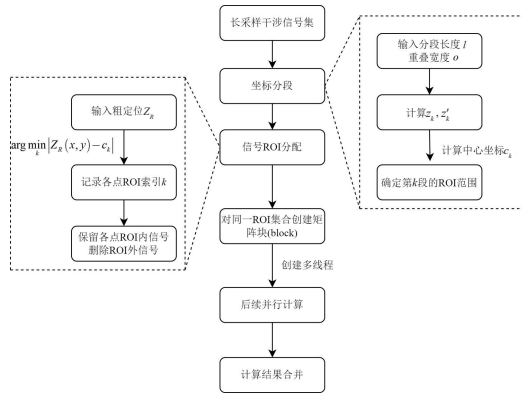


图4 信号分段处理流程

3 仿真实验

3.1 拟合精度验证

为了验证上述信号拟合算法的有效性, 本章节通过计算机模拟生成白光干涉信号, 并对提出的方法在拟合精度和计算速度方面进行测试分析。模拟所用的白光高斯光源中心波长 λ_0 为 560 nm, 光谱宽度 $\Delta\lambda$ 为 80 nm, 系统沿垂直方向以 60 nm 的固定步长进行扫描。为模拟真实振动环境下非均匀采样的情形, 垂直扫描步长中引入一定随机位移误差。各像素干涉信号的峰值位置在扫描范围内随机分布, 并叠加幅值为峰值光强 1% 的高斯白噪声以模拟传感器实际采样过程中的噪声干扰。

基于上述模型, 生成采样长度为 120 帧和 1000 帧的模拟干涉信号, 其大小为 600 pixel×800 pixel, 并以此对算法的性能进行评估。对采样长度为 1000 帧的数据, 分别采用传统的直接傅里叶拟合与本文提出的分段拟合方法, 在拟合精度和计算耗时上进行对比分析。根据式 (3) 计算可知, 本次模拟中白光光源相干长度对应的采样点数约为 65 帧, 因此将 ROI 分段长度设定为 120 帧, 各分段之间的重叠宽度设定为 80 帧。为进一步量化算法在非均匀采样条件下对不同长度信号的拟合重构精度, 将各算法所得拟合结果与无振动误差及无噪声干扰的理想信号进行对比, 计算所有信号数据点的均方根误差 (RMSE), 表示为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [f(z_i) - I_{\text{ideal}}(z_i)]^2} \quad (10)$$

式中, $I_{\text{ideal}}(z_i)$ 为理想信号在位置 z_i 处的值。为了避免过拟合对评估结果造成干扰, 拟合结果经过 5 倍插值处理, 并与插值后密集采样的理想信号归一化对比验证, 每组拟合数据仅取分段内的有效区域参与 RMSE 计算。此外, 采用 Intel i7-13700K 处理器, 内存容量为 32 GB, 在 Matlab 编译环境下实

现以上算法, 同时记录拟合过程所需的计算时间, 具体测试结果如表 1 所示。

表1 RMSE 值与计算耗时对比

采样长度/帧	直接拟合计算(RMSE)	耗时 t/s	ROI后拟合(RMSE)	耗时 t/s
120	0.0024	0.27	/	/
1000	0.0058	5.54	0.0023	0.62

表 1 中, 不同长度信号的拟合阶数依次为 30, 250。当采样长度为 120 帧时, 直接傅里叶拟合即可在 0.27s 内完成, RMSE 为 0.0024, 计算负荷较轻, 故未采用分段处理。采样长度增至 1000 帧后, 整体拟合耗时增至 5.54s, 且 RMSE 升至 0.0058。引入本文的 ROI 分段策略后, 拟合耗时缩短约 9 倍, 同时 RMSE 有一定下降。结果表明, 分段方法在大数据量条件下既能显著降低计算时间, 又可提高拟合稳定性。

3.2 面型复原验证

为了验证经过本文所提分段拟合方法后的面型复原精度, 本章节通过计算机仿真生成了台阶高度 10 μm 的理想台阶上下表面的干涉信号, 扫描步长 60 nm, 模拟白光光源设定与上文仿真相同, 单次位移误差服从均值为 0, 标准差为 $\lambda_0/16$ 的正态分布, 图像分辨率 600 pixel×800 pixel, 共生成 400 帧图像, 并添加偏差为最大幅度值 1% 的高斯噪声以模拟传感器噪声。图 5 呈现了非均匀扫描与理想扫描的位移对比情况, 以及扫描间隔误差。从图 5 (b) 看出, 此次扫描偏离线性扫描位置的最大距离约为 -500 nm 和 450 nm, 分别出现在约 195 帧和 350 帧附近, 这表明采样非均匀性带来的影响较为显著。

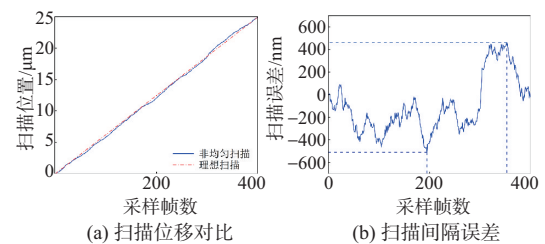


图5 仿真扫描偏差

对获得的仿真数据采取图 4 所示流程进行分段拟合估计, 分段长度 120 帧, 重叠宽度 80 帧, 并对获得的重构信号进行等间距采样, 使用包络曲线法对其求解, 计算包络峰位置实现面型复原, 计算得到的复原面形如图 6 (a) 所示, 重构台阶高度为 9.97 μm , 与理想值 10 μm 的误差为 0.3%, 验证了算法高精度。图 6 (b) 所示为仅使用传统包络曲线法对非均匀采样信号计算所得的面型分布, 可见其具有明显的波纹误差。

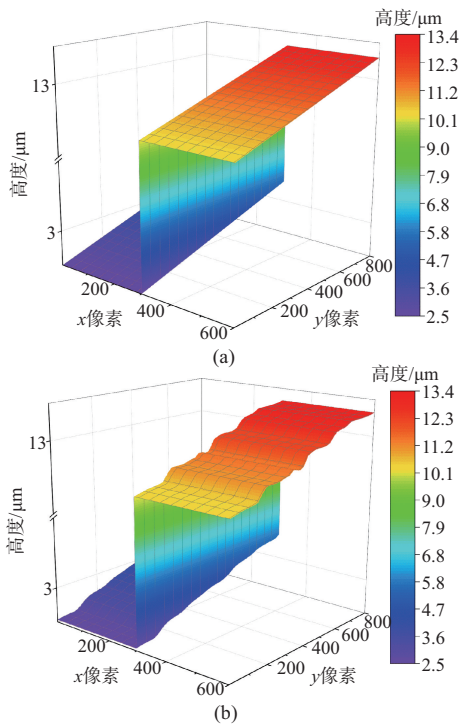


图 6 仿真复原面型

进一步分析算法效率，使用本文方法后的最终耗时为 1.16s，而不进行分段直接进行拟合，再进行峰值解算的耗时为 5.23s，耗时降低约 4.5 倍。

4 实验结果

4.1 测量系统结构

本文所使用的干涉光路为 Mirau 结构，其工作原理如图 7 所示，在扫描过程中，导轨接受由控制器所发出的脉冲信号并产生步进，驱动干涉物镜沿光轴方向产生垂直位移，从而改变光程差。样品表面各位置因光程差变化而产生的不同强度的干涉信号经由成像光路逐帧被 CMOS 相机采集，并被传输至计算机以进行后续处理。为了得到扫描过程中由振动等因素导致的扫描随机波动误差，在本文的显微镜结构中，额外安装了与相机拍摄同步触发的高精度光栅尺组件，其分辨率为 1 nm。根据光栅尺读数，即可获得对应的非均匀采样信号。

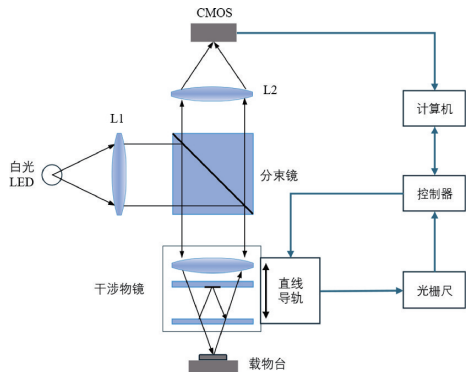


图 7 光路示意图

4.2 实验数据分析

为了进一步分析所提分段拟合优化方法在实际测量中的性能，实验样本选用两块标准量块，其高度差约为 200μm。两块量块采用面对面紧密贴合的方式放置，使其上表面形成一个清晰的阶跃结构作为测量对象。在该摆放方式下，样品表面由上下两个平整区域及其间的台阶过渡区组成，可为本文方法提供大高差条件下的干涉信号测试场景，步进距离设置为 100nm，整个扫描过程共采集 2180 张 1200pixel×1650pixel 大小的干涉图像，其中，部分干涉图像分别由图 8 所示，上表面 1、下表面 1、上表面 2 和下表面 2 干涉图采集时刻，光栅尺读数分别为 203.419μm、4.518μm、203.522μm 和 4.605μm，去除部分拼接缝隙部分的无信号区，最终需要解算的图像分辨率为 1200pixel×1350pixel。通过选取单个像素点并提取其对应的光强信号曲线可观察到，此时信号的有效占比极低，绝大多数采样位置并未包含干涉信息，呈现为背景强度信号，如图 9 所示。此时对信号直接进行全局拟合十分低效。

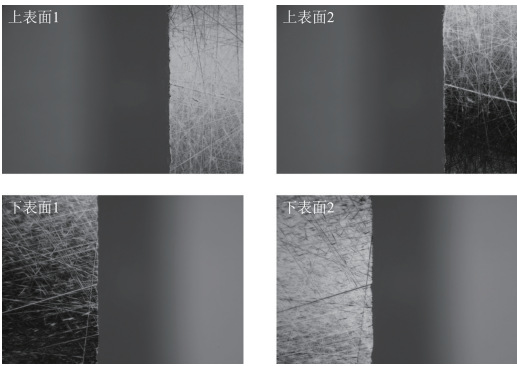


图 8 大高差台阶的上下表面的白光干涉图像

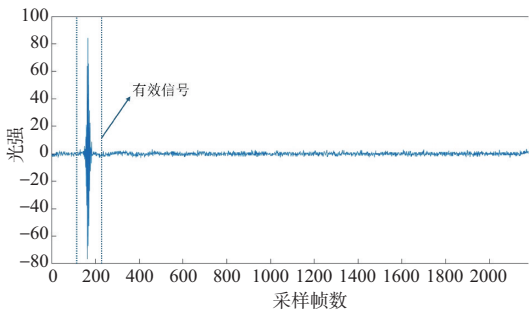


图 9 随机某点干涉信号示意图

因此，本文首先对原始干涉信号进行 ROI 分段处理，剔除各像素点中不包含干涉条纹的无效区间。依据式 (3) 进行计算，将重叠宽度设置为 50 帧、分段长度设定为 150 帧，最终划分得到 21 个 ROI 分段区域。各区域中所包含的有效信号点数量如图 10 所示。结果显示，信号主要集中于 Label1 和 Label21 所对应的上下台阶表面区域，而其余大部分中间区域仅含有少量零散信号。通过该分段操

作,数据量得到显著压缩,最终保留用于拟合重构和后续解算的信号总量仅为原始数据集的约1/14,大幅降低了后续处理的计算负荷与内存需求。

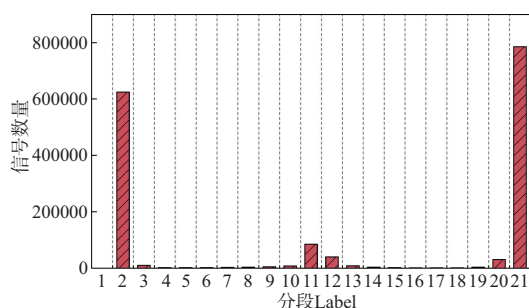


图10 ROI分段信号分布

在完成 ROI 分段后,先对各子段信号执行傅里叶级数拟合,后用包络曲线法进行面型复原,复原结果如图11所示。最终求得台阶高度为199.541 μm ,误差小于0.5%,可认为满足高精度测量要求。整个计算流程在Intel I7-13700K/32GB RAM的环境下,仅耗时3.85秒。作为对比,若直接对单精度的原始2180pixel $\times$ 1200pixel $\times$ 1650pixel的完整信号进行全局拟合,将导致计算过程中内存溢出,使得完整计算耗时达到了约170秒,提高约44倍,难以满足快速测量的需求。结果表明,分段拟合结合包络法在保证纳米级精度的同时,大幅降低了计算负担,为超大行程白光干涉测量提供了一种兼顾效率与准确性的高可行性方案。

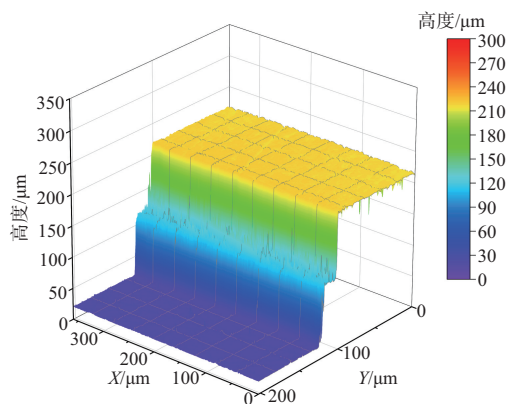


图11 复原面型

5 结 论

本文针对白光干涉扫描测量中因非均匀采样导致的信号畸变与傅里叶级数拟合计算效率低的问题。提出了一种基于信号区域分段的傅里叶拟合优化策略。通过有效识别并提取包含干涉信息的ROI区域,将冗余数据从拟合过程剔除,在确保信号完整性的同时显著降低了参与计算的数据量。此外,结合多线程并行处理方法,进一步提升了整体计算效率。通过仿真和实际实验,验证

了本方法在高数据量测量任务中的实用性和可靠性,具有良好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 张超,张永红,毛树根,范琛晰.航空燃油喷嘴设计构造及光学检测技术研究[J].中国机械,2024,(09):10—13.
Zhang Chao, Zhang Yonghong, Mao Shugen, et al. Study on the structural design and optical inspection techniques of aviation fuel nozzles[J]. China Mechanical Engineering, 2024, (09):10—13.
- [2] Zhang W, Zhang H, Meng K, et al. Research on coherent light measurement based on white light interferometry for semiconductor industry[C]//Speckle 2023: VIII International Conference on Speckle Metrology:SPIE, 2024:166—171.
- [3] Bhatt S, Butola A, Kanade S R, et al. High-resolution single-shot phase-shifting interference microscopy using deep neural network for quantitative phase imaging of biological samples[J]. Journal of Biophotonics, 2021, 14(7):e202000473.
- [4] 王盛,赵清亮,王生,等.蓝宝石复杂表面光学元件精密-超精密磨削机理及关键技术研究进展[J].航空制造技术,2022, 65(09):69—80.
Wang Sheng, Zhao Qing Liang, Wang Sheng, et al. Research progress on precision and ultra-precision grinding mechanism and key technology on sapphire optical elements with complex surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(09): 69—80.
- [5] Tereschenko S, Lehmann P, Zellmer L, et al. Passive vibration compensation in scanning white-light interferometry[J]. Applied Optics, 2016, 55(23):6172-6182.
- [6] Ai C, Novak E L. Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry:U S 5633715[P].1997-5—27.
- [7] Sandoz P. Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry[J]. Optics letters, 1997, 22(14):1065—1067.
- [8] 薛亮,郭仁慧,刘杨,等.基于非均匀快速傅里叶变换的抗振动白光干涉测量方法[J].光学学报,2024,44(04):204—214.
Xue Liang, Guo Renhui, Liu Yang, et al. Anti-vibration white light interferometry based on non-uniform fast fourier transform [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(04):204—214.
- [9] 马雨濛.白光干涉信号解调性能优化方法研究[D],哈尔滨:哈尔滨工业大学,2024.
Ma Yumeng. Study on optimization methods for demodulation-performance of white light interference signals[D], Harbin:Harbin Engineering University, 2024.
- [10] Luo S, Suzuki T, Sasaki O, et al. Signal correction by detection of scanning position in a white-light interferometer for exact surface profile measurement[J]. Applied Optics, 2019, 58(13): 3548—3554.
- [11] Breinbjerg O. Derivative sampling of periodic and non-periodic band-limited signals-fourier spectrum and interpolation formula [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72 (10):7821—7829.
- [12] 苏榕,刘嘉宇,乔潇悦,等.用于表面形貌测量的扫描白光干涉技术进展[J].激光与光电子学进展,2023,60(03):70—90.
Su Rong, Liu Jiayu, Qiao Xiaoyue, et al. Advances in scanning white light interferometry for surface topography measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(03):70—90.
- [13] Coppé V, Huybrechs D. Efficient function approximation on general bounded domains using splines on a Cartesian grid[J]. Advances in Computational Mathematics, 2022, 48(5):62.