

基于有效信号提取的白光干涉信号快速处理方法

马 龙, 贾 焱, 裴 昕, 胡 艳 敏, 周 航, 孙 凤 鸣

(中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300)

摘要: 针对白光扫描干涉术在垂直大范围扫描过程中的测量效率问题, 提出了一种基于有效信号提取的白光信号快速处理方法。使用白光 LED 光源, 建立了双峰频谱分布模型, 并使用该模型进行了仿真实验, 给出了不同算法在特定采样步长下所需的最小采样区间长度确定方法, 在不改变测量精度的条件下减少了解算所需的数据量, 并使得轮廓解算可以在采样结束前开始。针对垂直大范围扫描过程中的背景值波动问题, 给出了一种基于背景集合的白光干涉信号背景分离方法, 并通过与几种常见信号处理方法的比较, 证明了背景值提取的完整性, 有效消除了背景值波动现象对测量精度造成的影响。最后将上述方法应用于自主设计开发的白光轮廓仪, 使用傅里叶变换法精确测量了 U 盘接口表面形貌特征。测量结果表明: 从扫描开始到获得表面高度信息的总时间减少了 49.02%。

关键词: 白光扫描干涉术; 垂直大范围扫描; 有效采样区间; 背景值提取

中图分类号: TH741.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1013002

Fast white light interference signal processing method based on effective signal extraction

Ma Long, Jia Jun, Pei Xin, Hu Yanmin, Zhou Hang, Sun Fengming

(Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Focusing on the measurement efficiency of white light interferometry in vertical large-scale scanning process, a fast white light interference signal processing method based on effective signal extraction was proposed. The bimodal spectrum distribution model of the white LED light source was established, and the simulation experiments were carried out by using this model. From the simulation results, the minimum sampling interval length required by different algorithms at a specific sampling step was given, which reduced data volume without changing the measurement accuracy and allowed the calculation to start before the end of sampling. To eliminate the fluctuation of background value in vertical large-scale scanning process, a background value extraction method based on background set was introduced. By comparing with several signal processing methods, it was proved that the extraction method can effectively eliminate the influence on measurement accuracy. Finally, the proposed method was applied to the self-designed white light interferometer and a U disk interface was tested in using Fourier transform method. The results show that the total time from scanning to obtaining surface height information is reduced by 49.02%.

Key words: white light interferometry; vertical large-scale scanning; effective sampling interval; background value extraction

收稿日期: 2019-05-05; 修訂日期: 2019-06-15

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助(U1633101); 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122018Z002)

作者简介: 马龙(1983-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学无损检测方面的研究。Email:longma@cauc.edu.cn

0 引言

作为超精密检测的重要手段，白光扫描干涉术具有非接触、分辨力高等特点，被广泛应用在 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 产品检测、表面粗糙度测量、膜厚测量等领域^[1-4]。目前，针对白光扫描干涉术的相关研究一直非常活跃，其应用领域不断扩展^[5-6]，形成了新的研究热点。

随着精密测量技术的进步，测量对象从微观尺度向宏观尺度扩展。Maniscalco 等^[7]研究了白光扫描干涉术在三维取证分析中的应用。邹文栋等^[8]在合金韧窝断口微观三维形貌的检测中使用了白光扫描干涉术。事实上，上述工作正是利用了白光扫描干涉术垂直测量范围上的巨大优势。然而，在大范围扫描过程中，大量采集的图像数据给计算机带来的存储压力与计算效率的下降也逐步显现出来。为解决该问题，采用亚采样扫描策略及提升系统硬件性能成为了两类重要的解决方案。Bian^[9]基于纳米测量机提出了一种针对大尺度台阶结构的变速扫描方法，通过扫描前获取上下表面位置来动态确定扫描步长从而实现快速扫描，但该方法依赖对焦评价区域的选择，只适用于具有特殊规整结构的样品测量。同时，以局部区域对焦为标准进行台阶上下表面的对焦不具备全局特性，易丢失数据。Pavlicek^[10]提出了基于亚采样的快速测量方法，较好的解决了信息效率低的问题，但亚采样不可避免的降低了测量结果的可靠性。Pacholik 等人^[11]研究了 GPU(Graphics Processing Units) 与 FPGA(Field Programmable Gate Arrays) 作为高性能计算单元在白光干涉信号处理中的运用，通过对干涉信号的并行处理极大的提高了高度解算速度。提出了 GPU、FPGA 作为计算单元在构建大范围、高效率的干涉仪系统中的重要技术思路。You J. 等^[12]基于 GPU 实现了白光干涉信号快速解算，初步提出了扫描过程中进行同步数据处理的方法，但该方法不对信号的质量进行判断，测量可靠性有待提高，且该方法必须采用加权的重心法，受限于算法本身特点，在相同硬件条件下，其测量精度较低。

针对上述问题，文中提出了一种基于信号有效采样区间长度分析的白光干涉扫描测量方法。首先，从双波长白光 LED(Light Emitting Diode) 光谱模型

出发对白光干涉信号进行建模，分析了不同解算方法和采样步长条件下对有效干涉信号采样长度的要求，给出了最小采样区间长度的确定方法。其次，针对垂直大范围扫描中扫描时间长、光源频谱波动等因素造成白光干涉信号背景强度变化，进而引起干涉信号质量下降的问题，给出了一种快速、高效、具有实时处理能力的干涉信号背景强度提取方法。最后在自主构建的系统中采用了多核多线程技术，通过 FIFO(First In First Out) 队列管理不同像素点的高度解算进程，完成了对 U 盘接口表面的轮廓解算。测量结果表明，从扫描开始到获得表面高度信息的总时间减少了 49.02%。

1 白光干涉信号分析

1.1 双峰频谱分布模型

目前，白光干涉轮廓仪普遍采用白光 LED 光源作为照明系统。在考虑光源的光谱对干涉信号的影响时，干涉信号 $I(z)$ 可以表示为^[13]：

$$I(z)=C_1 \int \int_0^{\theta_0} \{k^2 \times \cos[2k(z-z_0)\cos\theta+\phi] \times \sin\theta \cos\theta d\theta\} F(k) dk \quad (1)$$

式中： C_1 为常数； λ 为波长； $k=2\pi/\lambda$ 为角波数； z 为采样位置； z_0 与轮廓表面高度； θ 为光线与光轴间的夹角，数值孔径 $NA=n\sin\theta_0$ ； ϕ 为反射引入的附加相位； $F(k)$ 为 LED 光源频谱分布函数。白光 LED 的双峰频谱分布模型 $F(k)$ 可以表示为：

$$F(k)=A_1 e^{-\left(\frac{k-k_1}{\sigma_1}\right)^2} + A_2 e^{-\left(\frac{k-k_2}{\sigma_2}\right)^2} \quad (2)$$

式中： A_1, A_2 为比例系数； k_1, k_2 为双峰中心角波数； σ_1, σ_2 为与频谱宽度相关的系数。

如图 1 所示，使用双峰频谱分布模型对实验计

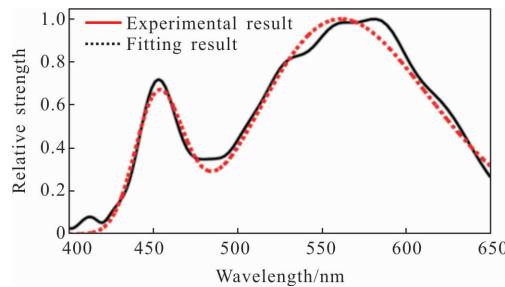


图 1 实验光源光谱与双峰频谱分布模型

Fig.1 Spectrum of experimental light source and bimodal spectrum distribution model

算得到的白光 LED 光谱分布曲线进行最小二乘拟合, 拟合结果为 $A_1/A_2=1.561$, $k_1=11.197 \text{ rad}/\mu\text{m}$, $k_2=13.861 \text{ rad}/\mu\text{m}$, $\sigma_1=1.425 \text{ rad}/\mu\text{m}$, $\sigma_2=0.617 \text{ rad}/\mu\text{m}$ 。

将拟合得到的双峰频谱分布模型 $F(k)$ 代入公式(1)中, 通过计算可建立白光干涉信号的理论模型。图 2 展示了实验采集的白光干涉信号与理论模型的计算结果。显然, 在相干峰附近, 理论模型能够较好地描述实际白光信号, 验证了双峰干涉模型的正确性。

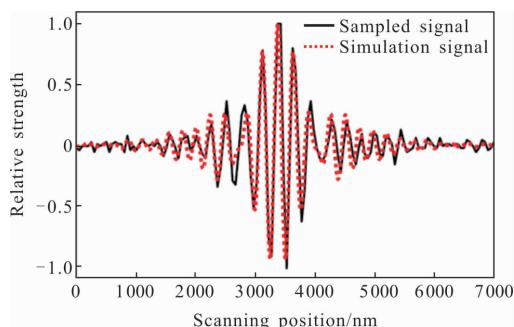


图 2 实验干涉信号与双峰干涉信号模型

Fig.2 Experimental interference signal and bimodal spectrum distribution model interference signal

1.2 最小采样长度分析

白光干涉信号的高度解算算法为白光干涉术的核心, 主要方法有: 重心法^[14]、希尔伯特变换法^[15]、傅里叶变换法^[16]、空间频域法^[17]等。本节使用双峰干涉信号模型构建了仿真实验, 比较分析了上述四种算法在不同采样步长条件下获得准确高度所需的最小采样数。

如图 3 所示, 将以干涉信号最大值位置为中心, 对称分布的采样长度记为采样区间长度 l , 将整个可观察到干涉信号强弱变化的区间长度称为相干长度 L_c 。有效采样区间定义为可准确解算轮廓高度的区

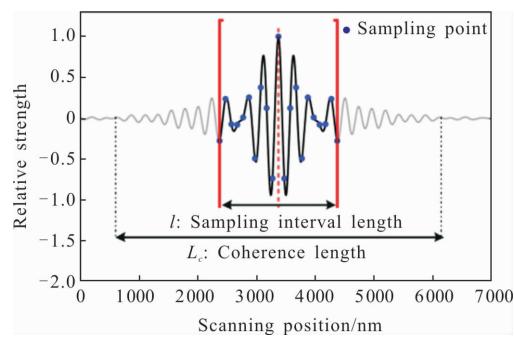


图 3 相干长度和采样区间

Fig.3 Interference length and sampling interval

间, 该区间包括全部有效白光干涉信号, 本节旨在通过仿真分析确定其最小值 l_m 。

将仿真结构高度设置为 6370 nm, 使用傅里叶变换法分别计算采样步长为 25、50、75 nm 时的结构高度, 并选择了数十个采样区间进行了多次计算, 绘制了傅里叶变换法计算结果与采样区间长度的关系图, 如图 4 所示。显然, 对于不同的采样步长, 当采样区间长度增大时计算结果均趋近于实际高度; 当采样区间长度 $l>3.5 \mu\text{m}$ 后, 采样长度增加对结果准确性无明显提升。

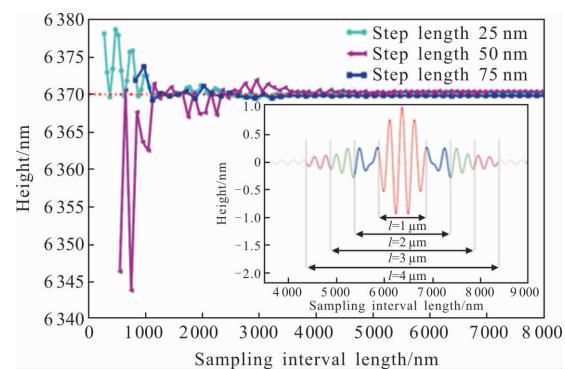


图 4 不同采样区间下傅里叶算法计算结果

Fig.4 Computing result of Fourier algorithm under different sampling intervals

对于另外三种解算方法, 同样使用双峰干涉信号模型对高度为 6370 nm 的结构进行了仿真实验。其解算结果与采样步长及采样区间长度的关系如图 5 所示。实验说明: 重心法采样区间长度 $l>3 \mu\text{m}$ 后计算结果基本稳定; 希尔伯特变换法采样区间长

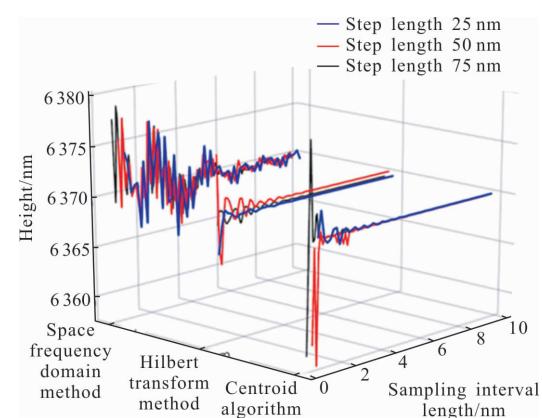


图 5 不同解算算法和采样区间下的仿真结果

Fig.5 Simulation results of different algorithms and sampling intervals

度 $l > 4 \mu\text{m}$ 后计算结果基本稳定；对空间频域法，只有当 $l > 6 \mu\text{m}$ 后计算结果才具有一定稳定性。

1.3 白光干涉信号采样区间选取

对于确定的光源和显微干涉物镜，干涉信号的表现形式是一定的。进而对所选定算法及采样步长而言，基于特定应用场景的精度需要，根据仿真实验结果，所需最小采样区间 l_m 是可以确定的。在实际应用时，必须考虑振动、色散、位移器偏移等因素带来的噪声问题，所选定的采样区间应当适度放宽。

对采样步长为 Δz 的 N 点白光干涉信号 $I(z_i)$ 而言，在所选定的采样区间 l_m 上，其采样窗函数为：

$$W(i)=\begin{cases} 1 & N_c-\frac{l_m}{2\Delta z} < i < N_c+\frac{l_m}{2\Delta z} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中： i 为采样点序数； $N_c=\text{argmax}(I(z_i))$ 为相干峰的最近采样位置； $I(z_i)$ 为第 i 次采样时的干涉信号强度。

1.4 干涉信号背景值提取

基于上述分析，在垂直大范围扫描过程中，解算信号区间的缩短使得计算数据量大幅下降，有效提升了运行速度。但由于光源不稳定、环境杂散光、位移器移动等因素，干涉信号具有如图 6 所示的背景值波动现象。理想情况下，使用未经背景值剔除的白光干涉信号直接解算不会影响最终的测量结果，但背景值波动现象的存在影响了解算结果的准确性。为解决该问题，文中提出了一种全新的白光干涉信号背景值提取方法。

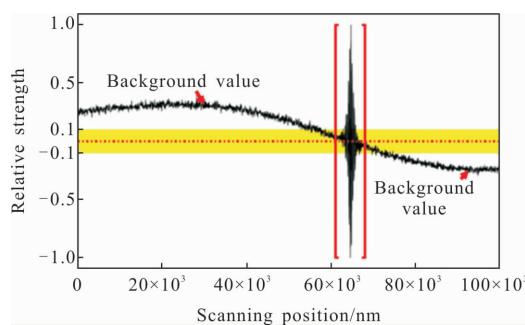


图 6 垂直大范围扫描时的干涉信号

Fig.6 Interference signal in wide range of vertical scanning

为采样序数为 i ，强度为 $I(z_i)$ 的采样点建立由 n 个元素组成的背景对比集合 $M(i)$ ，则：

$$M(i)=\{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (4)$$

当 $i=1$ 时，取 $v_k=I(z_1), k \in [1, n]$ 。

记 $M(i)$ 的平均值 $\text{average}(M(i))$ 为 $I(z_i)$ 的背景光

强，则提取的干涉信号强度可表示为：

$$I_{\text{ext}}(z_i)=I(z_i)-\text{average}(M(i)) \quad (5)$$

集合 $M(i)$ 内的元素随干涉信号序数 i 的变化可能会更新，更新过程中使用到了如下的三个判据：

$$\text{card}(M(i) \cap [I(z_i)-D, I(z_i)+D]) > U \quad (6)$$

$$\text{card}(M(i) \cap [I(z_i)+D, +\infty]) > U \quad (7)$$

$$\text{card}(M(i) \cap [-\infty, I(z_i)-D]) > U \quad (8)$$

设 D 背景亮度比阈值，用于确定两个分界点 $I(z_i)-D$ 和 $I(z_i)+D$ ；设 U 为背景对比集合更新阈值，是一个小于 n 的正整数；设 K 为偏移累计更新阈值，是一个较小的正整数； card 表示集合的基数。

其具体更新方式如下：

(1) 若背景对比集合 $M(i)$ 中有大于 U 个元素在区间 $[I(z_i)-D, I(z_i)+D]$ 中，即满足公式(6)，则将 $M(i)$ 中的第 $k \in [1, n-1]$ 个元素标记为第 $k+1$ 个并同 $v_i=I(z_i)$ 一起构成集合 $M(i+1)$ ；

(2) 干涉信号序数 i 逐渐增大过程中，记满足公式(7)的次数为 p ，满足公式(8)的次数为 q 。若 $|p-q| > K$ ，则将 $M(i)$ 中的第 $k \in [1, n-1]$ 个元素标记为第 $k+1$ 个并同 $v_i=I(z_i)$ 一起构成集合 $M(i+1)$ ；

(3) 若上述两步均未更新背景集合，则直接将 $M(i)$ 记为 $M(i+1)$ 。

针对垂直大范围扫描过程，使用上述方法计算了整个干涉信号的背景值强度，并与常用的中值滤波、均值滤波、高斯滤波方法进行了比较，如图 7 所示。该实验表明该方法具有良好的适用性，能够较为准确的获得背景值强度。

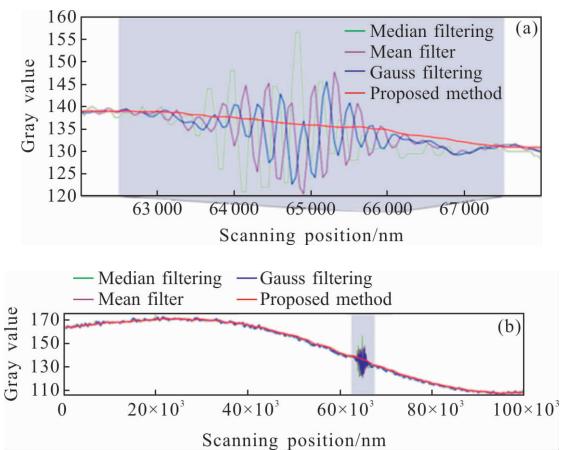


图 7 干涉信号背景提取算法测试结果

Fig.7 Test results of interference signal background extraction algorithm

2 测量与分析

2.1 实验系统

图 8 为构建的 Michelson 型显微干涉系统的结构示意图。系统主要由白光 LED 光源、准直光路、分光棱镜、Michelson 显微干涉物镜、CCD 相机构成。光源发出的宽频谱光经 L_1, L_2, L_3 准直后入射到分光棱镜，在分光棱镜被反射进入显微干涉物镜，在物镜中又被分为两束，即参考光和测量光，测量光经过显微物镜后投射到样品表面再反射回到分光镜，参考光在参考镜表面反射后同样回到分光镜，两路返回光在分光镜处叠加产生干涉，干涉信号离开物镜并穿过分光棱镜和 L_4 最终被 CCD 阵列捕获。

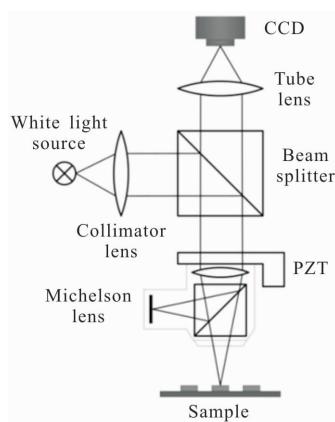


图 8 白光显微干涉系统结构示意图

Fig.8 Schematic of white light microscopic interferometer system

图 9 为系统框图，其中测头部分主要包括 Basler

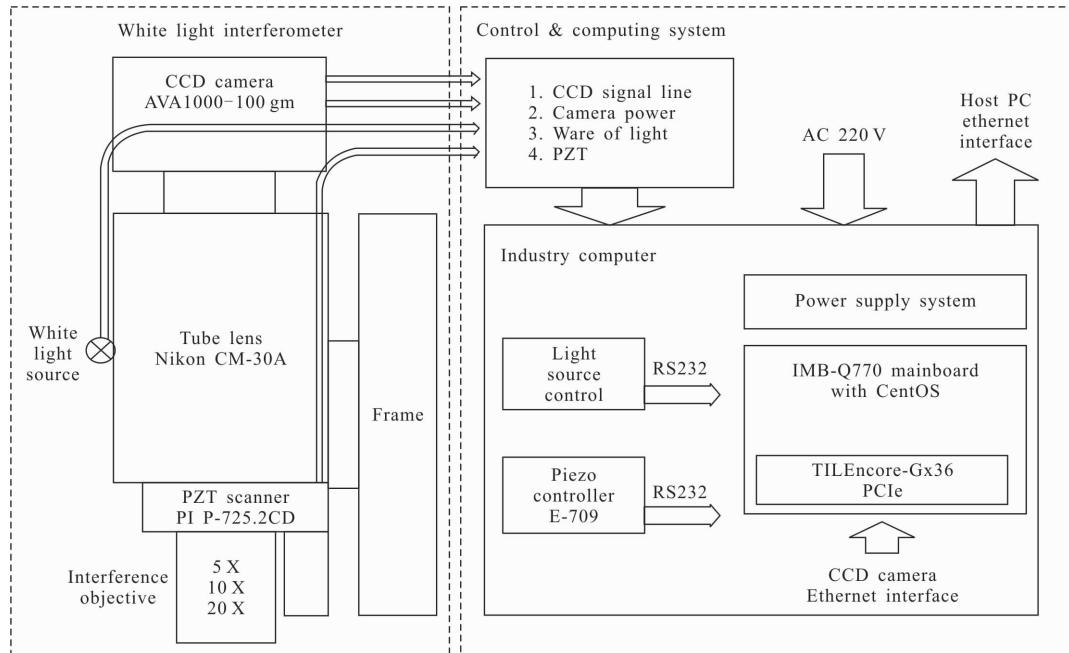


图 9 硬件系统框图

Fig.9 Block diagram of the hardware system

公司的 AVA1000-100gm 型工业相机，分辨率为 1024×1024 ，灰度等级为 8 bit，数据接口为千兆以太网。NIKON 公司的 CM-30A 型落射显微镜。PI 公司的 P-721 型压电陶瓷物镜移相器，闭环定位精度 0.7 nm，行程 100 μm 。NIKON 公司的 5 倍 Michelson 型显微干涉物镜。计算控制系统由各型驱动器、电源和搭载 Linux 系统的工控机组成，具备四核 3.1 GHz 处理器和 8 GB 内存。本设备已使用 182 nm 标准台阶进行了标定，重复性测量误差小于 1%。图 10 为白光干涉轮廓仪实物图。



图 10 白光轮廓仪

Fig.10 White light profiler

系统采用了多核多线程技术减少系统运行时间开销, 主要线程为: 图像采集线程、采样完整性判断线程和高度解算线程。系统引入了 FIFO 队列用于管理各像素点的高度解算顺序, 避免高度解算过程短时间内占用大量 CPU 资源, 进而影响其他线程运行速度。图 11 描述了文中多核多线程技术的实现方

式。图像采集线程以采样间隔 Δt 进行干涉图像的采集, 并将获取的干涉图像保存在缓冲区中。采样完整性判断线程在采样间隔内完成对像素点信号的最小采样区间完整性分析, 将判定为完整的干涉信号压入 FIFO 队列中。高度解算线程从 FIFO 队列中获取可计算的干涉信号, 完成高度解算并保存解算结果。

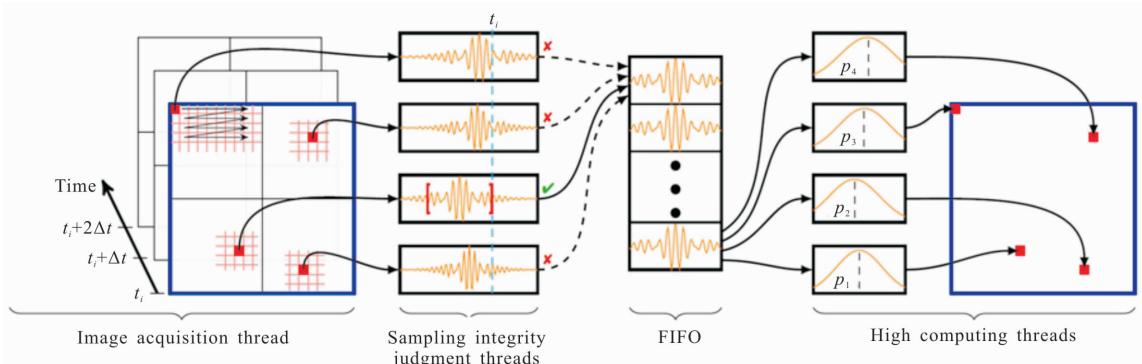


图 11 系统多核多线程实现策略

Fig.11 Multi-core and multi-thread strategy in system

2.2 U 盘接口测量

实验使用了上述测量系统和文中所述白光干涉信号处理方法对图 12 所示的 U 盘接口划痕进行了测量, 其中实验测量区域已在图中进行标记。

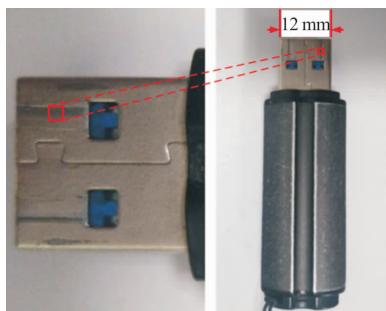


图 12 测试样本与测量区域

Fig.12 Test sample and measurement area

测量过程所使用的扫描参数如下:(1) 扫描步长为 50 nm;(2) 采样帧率为 10 Hz;(3) 垂直扫描范围为 100 μm;(4) 扫描区域为 1 024 pixel×1 024 pixel。

根据扫描参数, 实验中需要等距采集 2 000 帧图片。使用所提出的背景值提取方法完成干涉信号提取, 考虑到实际测量过程中噪声的存在, 此次测量使

用具备较强抗噪能力的傅里叶变换法完成表面轮廓的解算, 采样区间长度设定为 $l_m=4 \mu\text{m}$ 。

图 13 中每个点的颜色代表该点完整获取最小的采样区所需的采样帧数, 从第 996 帧时第一个像素点完成最小采样区间数据采样, 到 1 391 帧时, 包含最小采样区间的干涉信号已全部获取。

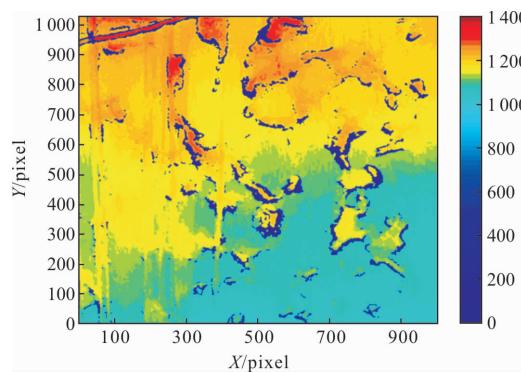


图 13 各像素点的必需采样帧数

Fig.13 Necessary frames for each pixel

表面形貌的测量结果如图 14 所示。多核多线程技术的引入使得系统在获得像素点解算所需的最小的采样区后即可开始高度解算, 无需等待全部帧信号采样完毕。

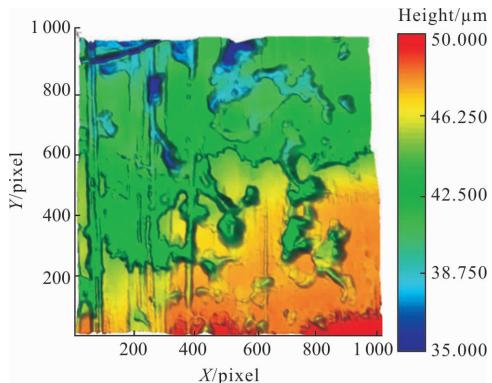


图 14 U 盘接口表面测量结果

Fig.14 Measurement result of the U disk interface

文中方法优化前和优化后的 CPU 利用率随扫描时间变化的曲线如图 15 所示。其中 top 命令监视的为当前 CPU 使用率, 对应于图中右侧纵坐标; ps 命令监视的为历史 CPU 使用率, 对应于图中左侧纵坐标。需要注意的是 top 命令在拥有多核处理器的系统中的最大值为核数乘以 100%。优化前扫描过程和高度解算过程是串行执行的, 仅利用了单个 CPU 计算核心, 而优化后的同步扫描策略通过充分利用了采样间隔的空闲 CPU 资源。与采用该方法之前相比, 扫描开始到获得表面高度信息的总时间减少了 49.02%。

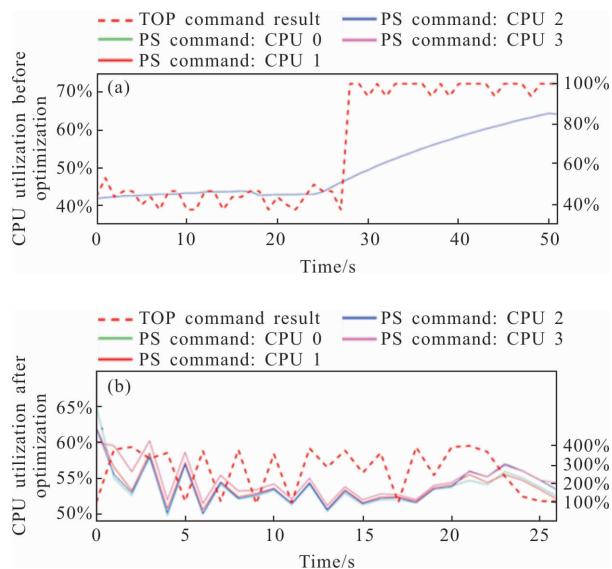


图 15 优化前后的 CPU 占用率情况

Fig.15 CPU utilization before and after the optimization

3 结 论

文中面向白光扫描干涉术在垂直大范围扫描中

的测量效率问题, 提出了一种基于有效信号提取的白光信号快速处理方法。所提出的白光干涉信号背景值提取方法能够很好地消除背景值波动对解算结果的影响, 同时由于该方法只依赖前序采样信号, 使得系统在扫描过程中可以同步进行处理, 不影响解算运行速度; 有效测量区间的应用减小了所需处理的数据量, 使得轮廓高度解算可在扫描结束前开始, 有效提升了傅里叶变换法的处理速度且不会造成测量精度下降; 多核多线程技术的应用有效整合了上述处理方法, 使得采样过程和解算过程衔接更加紧密。U 盘接口表面测量实验中, 该方法的应用使得测量时间减少了 49.02%, 表明了该方法在垂直大范围扫描过程中具备快速处理能力和良好的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] Spengen W M V. MEMS reliability from a failure mechanisms perspective [J]. *Microelectronics Reliability*, 2003, 43 (7): 1049–1060.
- [2] Wu Junjie, Lei Lihua, Chen Xin, et al. A three-dimensional microdisplacement sensing system based on MEMS bulk-silicon technology [J]. *Sensors*, 2014, 14: 20533–20542.
- [3] Bojan M, Apostol D, Iordache I, et al. R3 measurement by white light interferometry [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8411(5): 1–24.
- [4] Maniscalco B, Kaminski P M, Walls J M. Thin film thickness measurements using scanning white light interferometry[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 550: 10–16.
- [5] Dubey V, Singh V, Ahmad A, et al. White light phase shifting interferometry and color fringe analysis for the detection of contaminants in water [C]//Quantitative Phase Imaging II. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [6] Xie Jin, Liu Xuran, Wu Keke, et al. Adaptive-orientation measurement and micro-machining accuracy of micro-ground pyramid-structured smooth surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 376–382. (in Chinese)
- [7] Heikkinen V, Kassamakov I, Häggström E, et al. Scanning white light interferometry, -A new 3D forensics tool [C]// IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security. IEEE, 2011: 332–337.
- [8] Zou Wendong, Huang Changhui, Zhen Qiang, et al. Measurement of microscopic surface topography of alloy dimple fracture by scanning white-light interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1612–1619.

(in Chinese)

- [9] Bian Y, Guo T, Li F, et al. Large step structure measurement by using white light interferometry based on adaptive scanning[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8759: 87594T.
- [10] Popolek-Masajada A, Urbanczyk W, Pavliček P, et al. White-light interferometry with high measurement speed[C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9441: 944115.
- [11] Pacholik A, Muller M, Fengler W, et al. GPU vs FPGA: example application on white light interferometry [C]//International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAS. IEEE, 2011: 481–486.
- [12] You J, Kim Y J, Kim S W. GPU-accelerated white-light scanning interferometer for large-area, high-speed surface profile measurements [J]. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2012, 8(1/2): 31–39.
- [13] Chong W K, Li X, Soh Y C. Spectral effects of dual wavelength low coherence light source in white light interferometry [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(6): 651–655.
- [14] Ai C, Novak E L. Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry: US, US5633715 [P]. 1997-05-27.
- [15] Chim S S C, Kino G S. Three-dimensional image realization in interference microscopy [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(14): 2550–2553.
- [16] Hart M, Vass D G, Begbie M L. Fast surface profiling by spectral analysis of white-light interferograms with Fourier transform spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (10): 1764.
- [17] Groot P D, Lega X C D. Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(25): 4821–4830.