Vol. 50, No. 8 August, 2020

文章编号:1001-5078(2020)08-0899-08

·综述与评论·

## 白光干涉垂直扫描测量算法综述

汝洪武<sup>1,2</sup>,张文喜<sup>2</sup>,吴玲玲<sup>1</sup>

(1. 西安工业大学光电工程学院,陕西西安710021;

2. 中国科学院空天信息创新研究院计算光学室重点实验室,北京100094)

**摘 要:**白光干涉测量是采用具有一定光谱宽度的白光代替单色光作为干涉光源进行测量的 特殊干涉测量技术。根据白光干涉信号的相干长度短、相干峰非常明显的特性,采用了垂直扫 描干涉测量的方式获取干涉信号。相干峰寻址法是在垂直扫描测量的基础上提出的,具有较 高的计算精度和较大的适用性。本文将相干峰寻址法的11种算法分为直接求解法、包络曲线 拟合法和加权平均法三类进行阐述,并通过仿真每种算法分析各种算法的优缺点以及适用性 和局限性。

关键词:白光干涉测量;相干峰寻址法;垂直扫描干涉

中图分类号:TH744.3 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.08.001

# A survey of white light interference vertical scan measurement algorithms

RU Hong-wu<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-xi<sup>2</sup>, WU Ling-ling<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technoligical University, Xi'an 710021, China;

2. Key Laboratory of Computational Optics Room, Institute of Aerospace Information Innovation,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: White light interferometry is a special interferometry technique that uses white light with a certain spectral width instead of monochromatic light as an interference source. According to the characteristics that the coherence length of the white light interference signal is short and the coherence peak is very obvious, the interference signal is obtained by the vertical scanning interferometry. The coherent peak addressing method is proposed based on the vertical scanning measurement, and has high calculation accuracy and large applicability. In this paper, the 11 algorithms of the coherent peak addressing method are divided into direct solution method, envelope curve fitting method and weighted average method. The advantages and disadvantages of various algorithms, as well as applicability and limitations are analyzed by simulating each algorithm.

Keywords: white light interference; coherent peak addressing method; vertical scanning interference

收稿日期:2019-09-16;修订日期:2019-10-18

**作者简介:**汝洪武(1995-),男,硕士研究生,主要从事白光干涉测量方面的研究。E-mail:ruhongwu\_nic@163.com 通讯作者:张文喜(1979-),男,博士,博士生导师,主要从事计算光学干涉测量方向的研究。

E-mail:zhangwenxi@ aoe. ac.  $cn_{\circ}$ 

#### 1 引 言

白光干涉测量解决了单色激光干涉测量的量程 较小,精度不足的问题,在干涉定位和非接触式测量 方面有广泛的应用<sup>[1]</sup>。白光干涉多采用垂直扫描 法进行测量,如图1所示。光源出射光准直后被分 光镜(BS)分束,分别到达测试面和标准面后得到表 面信息,反射光束再被 BS 合束后到探测器,采用压 电陶瓷(PZT)线性位移机构调整参考光路的光程差 进行扫描测量。白光干涉测量不同于单色光源干涉 测量,白光光源一般功率大、光谱较宽<sup>[2]</sup>。两路相 同波段的激光重合时会产生干涉现象,把这两路激 光称为"激光对",单色光干涉产生的条纹对比度是 稳定的[3-5]。白光干涉是无数不同波段的"激光 对"的干涉的相互叠加,且不同波段的干涉条纹宽 度不同,随着光程差的增大干涉光强被均匀化,光强 对比度为零,只有在参考光与测试光光程差为零时 无数条激光干涉的波峰在同一处重合,此处光强 最强。



图1 迈克尔逊白光干涉系统 Fig. 1 Michelson white light interference system 稳定双光束干涉的光强信号可以表示为<sup>[6]</sup>:  $I(z) = I_{bg} \left\{ 1 + g(z - h)\gamma \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda_0} (z - h) - a_{add} \right] \right\}$ 

(1)

式中, h 为待测点的高度信息; z 为相干长度内发生 干涉的位置;  $I_{bg} = I_1 + I_2$  为干涉信号的背景光强;  $g(z - h) = \exp\{-[(z - h_0)(2\pi/I_c)]^2\}$  为白光干 涉光强的高斯包络函数;  $I_c$  为干涉信号相干长度;  $\lambda_0$  为白光光源的中心波长;  $\gamma = 2 \sqrt{I_1I_2}/(I_1 + I_2)$ 为干涉条纹的可见度;  $a_{add}$  为测量过程中引入的附 加相位。根据式(1)所仿真得到白光干涉信号如图 2 所示,光源中心波长 633 nm,相干长度 5  $\mu$ m。白 光干涉信号受正弦调制的长度周期较短,在每个周期内至少要采集到三个点才能获得相对可靠的数据 信息和有效的数据处理。

相干峰寻址法根据白光信号相干长度短、相干 峰明显的特性提出的:以高度不同的两点为例,扫描 测量的过程中两点依次出现相干峰,以相干峰峰值 点的位置为参照,两个相干峰峰值点在 Z 轴上的差 值就是两点的高度差,如图 3 所示。实现相干峰寻 址法的具体算法很多,不同的算法具有不同的相干 峰定位精度和不同的特性,选择合适的算法尤为 重要。











#### 2 白光扫描干涉信号算法

将相干峰寻址法分为三大类:直接求解法、包络 曲线拟合法和加权平均法。不同算法的特性直接决 定了白光干涉信号的相干峰定位精度。在同等算法 的条件下,采样点越密集精度越高。

2.1 直接求解法

2.1.1 插值法

插值法在相干峰峰值点处选取三个干涉数据, 代入一元二次方程后求得极值点横坐标代替对应的 峰值点位置<sup>[7]</sup>。表面高度信息 h 的计算表达为:

$$h = \frac{I_{i-1} - I_{i+1}}{2I_{i-1} - 4I_i + 2I_{i+1}}$$
(2)

其中,*i*为光强最大值处的横坐标值;*I<sub>i</sub>*为对应位置 *i*处光强值。插值法每组数据只用了峰值附近的三 个数据点,计算速度快、精度低,适用于精度不高的 应用场合,提高插值法的测量精度可以通过多次测 量求均值、提高步进精度、减小白噪声误差或减小扫 描间隔。

2.1.2 移相法

移相算法根据白光干涉光强公式的基础上得出,在峰值附近选取几个采样点,解方程计算出峰值点的相位 *φ*,如式(3)所示,再通过光源参数计算求得表面高度。移相法又有三步移相法、四步移相法、五步移相法等多步移相法<sup>[8-9]</sup>。以四步相移法为例,计算公式如式(4)所示。

$$\tan \varphi = \frac{\sqrt{\left[ (I_1 - I_4) + (I_2 - I_3) \right] \left[ 3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4) \right]}}{\left| \left[ (I_2 + I_3) - (I_1 + I_4) \right] \right|}$$
(3)

$$h = \frac{\varphi \lambda_0}{4\pi} \tag{4}$$

移相法利用峰值附近的几个数据,计算速度快, 充分利用了光强和相位两种信息,计算精度高。因 为数据点较少,分母上差值准确性降低,分母较小时 受到白噪声影响较大。移相计算方式可以在一定程 度上不受扫描间隔大小的影响,降低对高精度移动 平台的依赖。

#### 2.1.3 空间频域法

空间频域法 Peter de Groot 等人提出<sup>[10]</sup>,是现阶 段计算精度相对较高的方法<sup>[11-12]</sup>。只通过白光干 涉信号的相位信息计算待测面形。单色光发生干涉 时相位与波数和光程差成正比,白光干涉信号是很 多单波长光产生干涉信号的叠加,将其相位在空间 角频率 *k*<sub>0</sub> 处用泰勒级数展开,得到:

$$\Phi = \Phi_0 + (k - k_0) \left. \frac{d\Phi}{dk} \right|_{k_0} + \frac{(k - k_0)^2}{2} \left. \frac{d^2 \Phi}{dk^2} \right|_{k_0} + \cdots$$
(5)

其中,第一项  $\Phi_0 = k_0 Z_0$ ,为 $k = k_0$ 处的相位分量;  $Z_0$ 为 $k_0$ 的相速度光程差。通过相位解包裹的方法 消除周期性  $2\pi$ 的相位模糊,保证相位计算的连续 性。将常数项 $k_0 Z_0$ 来进行优化,该常数项通过直线 拟合后的直线函数信息获得。优化后如下<sup>[13]</sup>:

 $\Delta h' = \frac{1}{2n} \left[ \frac{(\Phi_0 - \alpha)}{k_0} - \frac{2\pi}{k_0} \operatorname{Int} \left\{ \frac{(\Phi_0 - \alpha) - 2k_0 \Delta hn}{2\pi} \right\} \right]$ (6) 其中, *n* 为传播介质的反射率系数; *a* 为相位补偿

 $量; n, \alpha$  由材料所决定。

空间频域法摆脱白光干涉测量对干涉光强对比 度的依赖,仅在频域内进行处理,以相位与空间角频 率之间关系的斜率求得待测面形信息,计算精度高, 相比傅里叶变换和高斯拟合具有更小的运算量,信 号处理迅速。在信号处理时,即使测量时存在一定 的 2π 周期的相位模糊也并不影响斜率的计算,因 此采样过程中采样间隔 π/2 与 5π/2,计算结果一 致,可用于欠采样时的情况下。

2.2 加权平均法

2.2.1 重心法

重心法是基于加权平均提出的,把光强值看作 为权值,对应的横坐标看作待求平均的数据,得到的 加权平均的值就是相干峰的坐标值<sup>[14-16]</sup>。即相干 峰峰值的横坐标信息可以表示为:

$$h(i) = \frac{\sum_{i} |I_{i}| \times i}{\sum_{i} |I_{i}|}$$
(7)

但是上式的计算精度受白光干涉信号的背景光强值影响较大。Veeco的Ai等人对重心法进行了改进,有效降低了背景光强的影响<sup>[17]</sup>,如下式:

$$h_m(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} m(z) \times z dz}{\int_{-\infty}^{+\infty} m(z) dz}$$
(8)

其中,令 $m_i = (I_i - I_{i-1})^2$ 代替原始信号的光强值作为权值,重心算法的速度和效率都很高,但受背景光强的影响很大,适用于背景光强相对较小的测量环境。改进后的重心法能有效的降低背景光强的影响,使用重心法求解的过程中尽可能峰值所处的位置在于数据的中心位置,可以有效的提高重心法的计算精度。

#### 2.2.2 相干相关算法

相干相关算法(Coherence Corelation Interferometry, CCI)由泰勒霍普森公司提出<sup>[18-19]</sup>。首先根据 采用的光源的参数模拟出参考白光干涉光强信号 *a<sub>i</sub>*,将模拟信号与实际采集到的扫描信号点对点相 乘,然后将参考信号沿 X 轴方向逐步平移,记录下 每步参考信号 a<sub>i</sub> 与白光干涉光强 I<sub>i</sub> 的乘积,用该数 据代替白光干涉信号<sup>[20]</sup>。具体如下式:

$$A_i = \sum_{i=1}^n a_i I_i \tag{9}$$

*A<sub>i</sub>* 呈高斯分布,对其高斯拟合后找到高斯拟合曲线的最大值的横坐标即待测表面高度。

相干相关算法与小波变换包络拟合法极为相 似,但是没有小波变换的灵活度高。适用于欠采样 的情况,能保持相对可观的计算精度。由于每组数 据都需要多次计算,并且再进行拟合取极值横坐标 值,计算量很大,相对较为耗时。

2.3 包络曲线拟合法

包络曲线拟合法根据白光干涉包络曲线的形状 拟合的函数曲线,或利用经过各种变换处理后的包 络曲线进行拟合,用该曲线的峰值点来代替实际相 干峰的峰值点,很大程度上提高了白光干涉的相干 峰定位精度,主要包括以下几种算法。

2.3.1 多项式拟合

多项式拟合法由 Park 和 Kim 提出<sup>[20]</sup>,根据白 光干涉光强的包络曲线符合高斯分布,在峰值附近 的包络曲线接近于一个一元二次方程的函数曲线在 峰值附近的包络形状,因此用二次多项式对白光干 涉光强的包络曲线进行拟合。具体过程如下所示:  $I(z) = I_{be} - I_{be}(a_1 + a_2z + a_3z^2)(\cos\theta \cos\rho + \sin\theta \sin\rho)$ 

 $I(2) = I_{bg} = I_{bg}(u_1 + u_2 2 + u_3 2)(\cos \theta + \sin \theta \sin \theta)$ 

$$h = -\frac{a_2}{2a_3} \tag{11}$$

多项式拟合宜取相干长度范围内的数据用以拟 合,便于保证实际数据与二次曲线的重合程度更高, 提高拟合结果的逻辑缜密性。多项式拟合法优势在 于对数据利用更充分,具有相对较强的白噪声抑制 能力。但是数据量更丰富的同时计算量增大、计算 时间变长。

2.3.2 高斯拟合法

白光干涉光强曲线符合高斯包络调制,对白光 干涉光强的高斯包络进行拟合,取其极值点的横坐 标就是该点对应的相干峰的坐标 h<sup>[21]</sup>。其计算公 式如下:

$$I(z) = I_{\rm bg} \left\{ 1 + g(z-h)\gamma \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda_0}(z-h) - a_{\rm add}\right] \right\} \quad (12)$$

高斯拟合算法相对简单,当扫描间隔稳定时计 算精度也相对较高,还适用于欠采样的测量过程,当 扫描间隔较大时可以采取对数据先减其均值后再取 绝对值,数据密度增加了一倍,高斯拟合法对扫描间 隔的依赖性较低。高斯拟合法对扫描间隔的大小要 求相对较低,但是当扫描间隔过大时精度也随之降 低,且高斯拟合法计算量大,计算时间较长。 2.3.3 傅里叶变换

傅里叶变换法是适用性比较广泛的一种算法, 将采集到的白光干涉信号傅立叶变换,滤去正弦调 制项的频率,逆变换后得到白光干涉数据的高斯包 络曲线的相干峰峰值点坐标。傅里叶变换法本质上

I. F. T. 
$$[I(z)] = \frac{\gamma}{2} e^{a_{add}j} g(z) * \delta(z - h)$$
  
$$= \frac{1}{2} e^{a_{add}j} g(z - h)$$
(13)

是滤除自身载波的影响,因此也被称作傅里叶滤波

其中,\*表示对函数的卷积。白光干涉信号的包络 曲线与傅里叶逆变换后得到的幅值曲线成正比,即 白光信号的峰值点与该曲线的峰值点重合,对上式 的幅值曲线高斯拟合即得表面高度。

傅里叶变换算法的计算精度高,对白噪声抑制 能力强,不足之处需进行正反两次变换和高斯拟合, 计算量大,计算时间长,且傅里叶变换只反映整体信 息,对局部窗口的信息反应不够全面。傅里叶变换 法要求扫描间隔不能过大,否则可能会导致采样频 率提取无效,只适用于采样间隔相对不大的测量 环境。

2.3.4 希尔伯特变换

(10)

法,分析如下式<sup>[22-23]</sup>:

希尔伯特变换法将原始信号加上经过希尔伯特 变换的虚部信号构成的复信号,得到的信号的频率 全是正频部分<sup>[24]</sup>。提取信号包络的过程通过希尔 伯特变换完成,即希尔伯特变换可得白光干涉测量 的峰值点。设 *I*<sub>ac</sub> 为白光干涉信号的交流部分,变换 后 *I*<sub>ac</sub> 产生了-90°的相移。在调制信号逐渐变化、 载波信号迅速变化的情况下,交流信号的希尔伯特 变换近似表示为<sup>[7]</sup>:

$$H(I_{\rm ac}) = g(z-h)\gamma \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda_0}(z-h) + a_{\rm add}\right]$$
(14)

希尔伯特变换与傅里叶变换的计算精度相近, 要求采集信号中的背景光强足够稳定。实际测量 时,参考面的移动过程当中距离光源的位置发生改 变,背景光强随之改变。但希尔伯特变换法是一种 时域内的变换,不需要从频域向时域的逆变换和高 斯拟合过程,相比傅里叶变换法就有更快的计算速 度,更容易引入测量误差。

2.3.5 小波变换法

小波方法是在傅里叶变换的基础上优化出的。 傅里叶变换仅采用正弦波作为变换的基础波形,而 小波变换采用特殊的曲线线段或者向量作为变换的 基础波形,可以用自己定义的一个波形作为变换的 基,扩大了频域信号分析方法中的时频适用 性<sup>[25-26]</sup>。小波变换有两个可变的参量,所以小波变 换具有对目标信号进行有选择性的分段分析,实现 不同波段进行不同频率滤波的功能。设 $\Psi(t)$ 为一 个小波族的基波,则将小波族定义为:

$$\Psi(t,a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{15}$$

式中, *a*, *b* 为常数。通过调整参数 *a*, *b* 来调整上式的幅值大小和坐标位置。小波变换定义为:

$$WT(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
 (16)

其中, *X*(*t*)为任意平方可积函数。针对小波变换双 参数可调的特性,提出了两个白光干涉信号的峰值 点的寻址方法:小波包络峰值点提取以及连续小波 变换法。

(1)小波包络提取

根据不同使用情况下选择适合的基,小波包络 提取时直接选择白光干涉信号的波形作为母小波。 由法国地震学家 J. Morle 提出的 Morlet 小波<sup>[25]</sup>,它 是一个受复数信号调制的高斯包络信号,通过提取 包络信号的极值点对应的横坐标,得到变换的目标 结果<sup>[25]</sup>。由下式所示:

$$|WT_{m}(a,b)| = \sqrt{WT_{mr}^{2}(a,b) + WT_{mi}^{2}(a,b)}$$
(17)

定义 | WT(a,b) | 为小波系数,其中 WT<sub>mr</sub>(a, b)和WT<sub>mi</sub>(a,b)分别为小波系数的实数部分和虚 数部分,调整 b 的大小实现子小波与实际信号会发 生小距离的错位,当小波系数最大时,小波函数的峰 值点与白光光强包络的峰值点重合,子小波峰值点 的位置代替干涉峰峰值点所在的位置。模拟的小波 包络如下式:

$$g_{\omega t}(t) = \exp\left[-\left(\frac{i \times \Delta z}{l_w}\right)^2\right] * g(z - h) \quad (18)$$

#### (2)连续小波变换

连续小波变换充分利用小波变换的两个可变尺 度参数 *a* 调整光源的中心波长, *b* 调整相干峰位置。 当小波函数与干涉光强曲线 *I*(*z*) 在频域与时域都 重合时,小波系数最大<sup>[26]</sup>。此时的相干峰信息确定 方式如下式<sup>[26]</sup>:

$$h = h' - \frac{\varphi \lambda_0}{4\pi} \tag{19}$$

其中, h'为对应着小波系数最大时小波函数峰值点 对应的坐标,相位信息通过下式可得:

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\operatorname{Im} \left[ WT_m(a_0, b_0) \right]}{\operatorname{Re} \left[ WT_m(a_0, b_0) \right]} \right\}$$
(20)

其中, [WT(a,b)] 是小波系数的最大值, 表示  $b_0$  处 Morlet 小波与 I(z) 之间的相位差。

小波变换法相对于傅里叶变换法具有较强噪声 平滑作用,对噪声具有很强的抑制效果的同时不损 伤数据的边缘信息,能够获得每个频段的完整信 息<sup>[27-28]</sup>。小波变换在时域和频域中同时具有非常 好的调控能力,可以针对目标信号的任意波段进行 分析,有利于更全面的对所获得的数据获取更多的 信息,在科学研究中应用非常广泛。但是小波变换 算法的计算量相对较大,计算速度较慢。

2.3.6 基于采样定理的平方包络函数估计算法 (SEST)

基于采样定理的平方包络函数测量(SEST)方 法的提出是为了解决白光干涉测量时数据量庞大的 问题,有效地降低了白光干涉测量对高密度采样的 依赖性,在欠采样测量过程中应用比较广泛<sup>[29]</sup>。用 采样数据信号点 *Y<sub>m</sub>* (*m* = *l*,2,…,*M*)定义一个新的 向量如式(21),作为原始干涉信号进行处理。

$$f(z) = \sum_{m=1}^{M} y_m \varphi_m(z)$$
 (21)

式中, f(z) 是干涉光强分布中的干涉项, 可以定义 为  $y_m = f(z_m), z_m$  是第 m 个采样点。则  $\varphi_m(z)$  定 义为:

$$\varphi_m(z) = \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi(z-z_m)}{2\Delta}\right] \cos\left[\frac{4\pi(z-z_m)}{\lambda_c}\right]$$
(22)

sinc(z) = 
$$\begin{cases} \frac{\sin \pi z}{\pi z} & (z \neq 0) \\ 1 & (z = 0) \end{cases}$$
 (23)

式中,  $\Delta$  是采样间隔。找到包络曲线的峰值点就能 解算出待测面的面形信息, 不需要严格的复现干涉 图的信息, 式(24) 是一个基于采样数据对 r(z) 的估 算值  $r_B(z)$ , 其包络曲线最大值对应的横坐标就是 对应坐标点的表面高度 h。当 z 是其中的一个采样 点, 定义:  $z = z_i(j = 1, 2, 3, \dots M)$ 。

$$r_B(z_j) = (y_j)^2 + (4/\pi^2) \left\{ \sum_{m=1}^M \{y_m/(j-m)\} \right\}^2$$
(24)

SEST 算法是针对扫描间隔较大的情况提出的, 适用于欠采样的测量过程中,虽然小幅度增加了计 算时间,但是大幅度减少了采样时间,另外可以适用 于生产线上的快速测量,降低了垂直扫描干涉法对 高精度移动平台的高度依赖,并且具有较高的计算 精度。

#### 3 计算结果

表1是在一组仿真的白光干涉信号,仿真光强的中心波长为633 nm,相干长度为50 µm,扫描长度为80 µm,单组数据有120 个光强值,从计算精度、扫描步长、运算速度和白噪声影响四个方面对各种算法做了仿真分析,得到以下结果。

#### 表1 各种算法的性能对比

Tab. 1	Per	formance	comparison	of	various	algori	thms
--------	-----	----------	------------	----	---------	--------	------

	Accuracy /nm	Effection of step length	Computing speed/s	Noise effect
Interpolation	15	stronger	0. 162	stronger
Center of gravity	0. 03	weaker	0. 153	weak
Fourier	0.7	weak	0. 447	weaker
Gaussian fitting	0.002	weak	0. 401	weak
Hilbert	0.02	weak	0. 195	strong
Polynomial fitting	10	strong	0. 189	weak
Wavelet	0.3	weak	0. 585	weak

				(续表)
	Accuracy /nm	Effection of step length	Computing speed/s	Noise effect
Wavelet fitting	0.3	strong	0. 529	weaker
CCI	0.4	weaker	0. 423	strong
SEST	0.5	weaker	0. 458	weak
Phase shift	0.01	weak	0. 161	stronger
Space frequency domain	0.002	weaker	0. 209	weaker

#### 4 结 论

白光干涉测量具有算法精度高、量程大等优点, 广泛应用于各种高精度、大量程的干涉测量当中。 白光干涉测量算法种类较多,需要根据实际测量的 条件和环境灵活选择适合的算法,也可采用多种算 法组合使用。了解各种白光干涉测量算法的特性、 选择适当的算法对提高白光测量的精度具有非常重 要的意义。

根据仿真结果得出几点结论:①相干相关算法、 空间频域法、移相法、小波变换法和采样定理的平方 包络函数估计算法在未知光源参数的情况下不能使 用,可优先采用其他几种算法;②相移法和插值法只 需要峰值附近的几个数据就可实现测量,计算精度 快,可在在线测量或者快速测量的情况下优先采用。 其中相移法测量精度相对较高;③重心法、相干相关 算法、空间频域法和 SEST 法受扫描步长的影响较 小,可用于欠采样情况下;④傅里叶变换法、小波变 换法和空间频域法具有较强的噪声滤除能力,可用 于探测器噪声相对较大的情况。

### 参考文献:

- [1] Yang Jun, Pei Yapeng, Liu Zhihai, et al. Accurate measurement of arm length difference of fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 28(9):1060 1064. (in Chinese)
  杨军,裴雅鹏,刘志海,等. 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 臂长差的精确测量[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 28(9):1060 1064.
- [2] Yang Tianbo, Guo Hong, Li Dacheng. A Survey of white light scanning interferometry algorithms[J]. Optical Technology,2006,32(1):115-120. (in Chinese)
  杨天博,郭宏,李达成,白光扫描干涉测量算法综述
  [J]. 光学技术,2006,32(1):115-120.

[3] Liu Xuelian, Feng Baohua, Lin Bin, et al. Research on SAW detection system based on optical interference technology[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(4):464-468. (in Chinese)

刘雪莲,冯保华,林滨,等. 基于偏振差分干涉技术声 表面波检测系统研究[J]. 激光与红外,2018,48(4): 464-468.

[4] Liu Gangming, Yu Xuecai, Ren Huaxi, et al. Three-dimensional shape measurement method based on laser shearing interference [J]. Laser & Infrared, 2018, 48 (4): 464 – 468. (in Chinese)

刘光明,余学才,任华西,等.激光剪切干涉三维形貌 测量[J].激光与红外,2018,48(4):464-468.

- [5] Hu Chaohui, Yang Ting, Qi Lu. Design of lazer frequency and power control in atom interferometer[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(6):614-618. (in Chinese) 胡朝辉, 杨婷, 亓鲁. 原子干涉仪中激光频率和光强控 制系统的设计[D]. 激光与红外, 2014, 44(6): 614-618.
- [6] Ma Long. Research on white light scanning interferometry method and system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
  马龙. 白光扫描干涉测量方法与系统的研究[D]. 天 津:天津大学,2011.
- [7] Deng Lingjuan. Research on measurement system and processing algorithm of white light interferometry[D]. Hang-zhou: Chinese Metrology, 2013. (in Chinese)
  邓林涓. 白光干涉术的测量系统与处理算法的研究
  [D]. 杭州:中国计量学院, 2013.
- [8] Akira Hirabayashi, Hidemitsu Ogawa. Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory [J]. Applied Optics, 2002, 41 (23):4876-4883.
- [9] Groot P d, Lega XCD, Kramer J, et. al. Determination of fringe order in white-light interferometry microscopy [J]. Appl. Opt., 2002,41(22):4571-4578.
- [10] Groot P d, Lega XCD Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy [J]. Appl. Opt., 2004,43(25):4821-4830.
- [11] Groot P d, Deck L. Surface profiling by analysis of whitelight interferograms in the spatial frequency domain [J].
   J. Mod. Opt. ,1995,42(2):389-401.
- [12] Deng Qinyuan, Tang Yan, Zhou Yi, et al. High precision

surface topography measurement based on white light interference frequency domain analysis[J]. Chinese Journal of Laser, 2018, 45(6):106-112. (in Chinese) 邓钦元,唐燕,周毅,等. 基于白光干涉频域分析的高 精度表面形貌测量[J].中国激光, 2018, 45(6): 106-112.

- [13] Wu Yujing. Research on surface 3D shape detection system based on white light interference[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2017. (in Chinese)
  吴宇婧. 基于白光干涉的表面三维形貌检测系统研究
  [D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- [14] Chen S, Palmer A W, Grattan KTV. Digital signal processing techniques for electronically scanned optical fiber white-light interferometry[J]. Appl. Opt. ,1992,31(28): 6003-6010.
- [15] Ai C, Novak E L. Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry [P]. U. S patent:5633715,1997.
- [16] Wang Wencheng, Xu Jianqiang, Si Shuchun, et al. Application of an improved center of gravity method in the extraction of optical strip center [J]. Photoelectron Laser, 2005,16(10):1239-1242. (in Chinese)
  王文成,徐建强,司书春,等. 一种改进的重心法在光带中心提取中的应用[J]. 光电子・激光,2005,16(10):1239-1242.
- [17] Zhang Xiaoyan, Wang Xiaoqiang, Bai Fuzhong, et al. Improved gray centroid method for extracting the centre-line of light-stripe[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(6):622 626. (in Chinese)
  张小艳, 王晓强, 白福忠, 等. 基于改进灰度重心法的 光带中心提取算法[J]. 激光与红外, 2016, 46(6):622 626.
- [18] Shi Lili. Research on measurement of microscopic surface topography of objects based on white light vertical scanning interferometry [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology,2011. (in Chinese) 师丽丽. 基于白光垂直扫描干涉法测量物体微观表面 形貌的研究[D]. 南京;南京理工大学,2011.
- [19] Wang Jun. Application of short-phase dry light interference in measurement of crystal characteristic parameters and microscopic surface topography[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese) 王军. 短相干光干涉在晶体特性参数和微观表面形貌

测量中的应用研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.

- [20] Park M, Kim S. Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms[J]. Opt. Eng. 2000, 39:952-959.
- [21] Liu Bo. Research on 3D microscopic contour measurement technology based on white light phase shift interferometry
  [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

刘泊.基于白光相移干涉法的表面三维微观轮廓测量 技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.

- [22] Deck L, Groot Pd. High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry [J]. Appl. Opt, 1994,33(31):7334-7338.
- [23] Hart M, Vass D G, Begbie M L. Fast surface profiling by spectral analysis of white-light interferograms with fourier transform spectroscopy [J]. Appl. Opt., 1998, 37 (10):

1764 – 1769.

- [24] Larkin K G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(4):832 - 843.
- [25] Recknagel R J. Analysis of white light interferograms using wavelet methods [J]. Optics Communications, 1998, 148:122-128.
- [26] Bankhead A. Surfaee profiling apparatus [P]. UK Patent: GB2386417B,2004.
- [27] Liu Gan, Shao Xinjie. Denoising of structured light stripe image based on wavelet transform[J]. Laser & Infrared, 2017,47(11):1433-1437. (in Chinese)
  刘干,邵新杰. 基于小波变换的结构光光条图像去噪 方法[J]. 激光与红外,2017,47(11):1433-1437.
- [28] Sandoz P. Wevelet transform as processing tool in whitelight interferometry[J]. Opt. Lett., 1997, 22:1065 - 1067.