

近红外谱域显微干涉仪的位移传感特性研究

郑 权¹, 韩志刚², 陈 磊^{1,2*}

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 协同创新中心, 江苏 南京 210094)

摘 要: 为研究近红外谱域显微干涉仪在近红外波段的位移传感特性, 分析了条纹载频对位移量提取的影响, 建立了测量光谱中心波长与干涉仪位移传感范围之间关系公式, 讨论了光源可见光分量对近红外光栅光谱仪所记录条纹的串扰现象并提出抑制方法。构建近红外迈克尔逊型谱域显微干涉实验系统, 单次测量位移量传感精度优于 $0.02\ \mu\text{m}$ 。测量标准台阶板的台阶高度(其标称值为 $7.732\ \mu\text{m}$), 测量偏差为 $0.044\ \mu\text{m}$ 。采用近红外谱域显微干涉装置, 无需轴向扫描即可实现位移量测量, 将光谱仪记录的谱域干涉信号转换为随波数线性变化信号处理能有效提高位移传感精度, 增大中心波长能够有效提高位移传感范围, 在系统中加入短波截止滤光片则能有效抑制可见光分量对近红外光谱域条纹造成的串扰。

关键词: 测量; 干涉测量; 位移量传感; 近红外; 谱域分析

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1017002

Study of displacement sensing technology of near-infrared microscopic interferometry in spectral domain

Zheng Quan¹, Han Zhigang², Chen Lei^{1,2*}

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Corporate Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To research the technology of displacement sensing based on near-infrared microscopic interferometry in spectral domain, the impact of fringe carrier on extracting displacement is analyzed, the formula of spectral central wavelength and displacement range was deduced. Also the crosstalk of interference fringes caused by the visible light from illuminant recorded by the spectrometer was discussed. The near-infrared microscopic interference experiment system of Michelson type in the spectral domain is built up, the precision of displacement sensing at one time is $0.02\ \mu\text{m}$. The measured deviation of a standard step whose nominal value is $7.732\ \mu\text{m}$ can reach $0.044\ \mu\text{m}$. No axial scanning was needed to realize displacement sensing with adopting device of near-infrared microscopic interference in the spectral domain. Through analyzing character of interference fringes in the near-infrared band, a conclusion that the accuracy of displacement sensing will enhance effectually can be drawn if the

收稿日期: 2016-02-10; 修订日期: 2016-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(U1231111); 国家自然科学基金青年基金(61505082); 江苏省自然科学基金(SBK2015041354)

作者简介: 郑权(1990-), 男, 博士生, 主要从事光干涉测量方面的研究。Email: zhengquan_njust@163.com

导师简介: 陈磊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

Email: chenlei@mail.njust.edu.cn

recorded fringes were transformed to fringes of linear carrier frequency for resolving, the range of displacement sensing was increased effectively by enlarging the center wavelength, and the crosstalk of interference fringes caused by the visible light can be restrained with a short-wave pass filter.

Key words: measurement; interferometry; displacement sensing; near-infrared; spectral analysis

0 引言

随着机械制造、光学元件加工、电子工业等领域的发展,对光学元件轮廓、几何尺寸以及表面形貌等测量工作的要求越来越高,各式各样的位移传感技术也应运而生。根据测量探头工作形式,位移传感技术主要分为接触式和非接触式两种。接触式位移传感技术测量过程中,由于测量力的存在,有划伤工件表面的危险,同时在曲面测量中侧向力对测量精度会产生影响^[1]。

非接触式位移传感技术大多采用光学探头,测量精度高,不会损伤测量面。常见的传感技术包括点光源自准直法^[2]、激光三角反射法^[3]、光谱共焦法^[4]以及白光干涉法等^[5-7]。传统白光干涉法通过参考镜或者测试镜的时域扫描,得到白光干涉信号随光程差的变化关系,由干涉信号的包络极值位置(即零光程差位置)定位待测镜面。U Schnell^[8]等最早报道了白光谱域干涉测试装置,由多通道光谱仪接收白光迈克尔逊干涉仪的干涉光强随波长的变化关系,根据载频谱域干涉条纹位相随波长变化的斜率关系实现位移传感,测量过程中无需扫描参考镜或者测试镜,提高了位移量测量的效率。Igor 采用傅里叶变换法处理光强随波长变化的光谱干涉图,但因干涉信号随波长呈非线性变化,其傅里叶频谱一级旁瓣较宽不易精确提取,特别是对于高载频谱域条纹,其相位计算结果有着很大的不确定度^[9]。薛晖^[10]等提出解包络线方法获取光谱干涉信号的主值,由光程差与棱镜折射率色散线性关系的斜率和截距同时求得迈克尔逊干涉仪中分光棱镜的等效厚度和两参考镜之间的绝对距离。Debnath S^[11]等将谱域干涉装置和 Mirau 型干涉显微物镜相结合,提高了谱域干涉的位移传感横向分辨率,同时单次可以获得被测面的一条线轮廓,但需要结合时域扫描方式从干涉条纹中解调位移信息,增加了测量的复杂性。白光谱域干涉装置^[12-14]研究的光谱中心波长多为可见光波段,

对于近红外波段谱域显微干涉装置位移传感特性的研究还未见报道。

文中研究谱域显微干涉仪在近红外波段的位移传感特性,采用迈克尔逊型干涉物镜获得高载频谱域干涉条纹,提高了位移传感范围。对位移量提取的数据处理方式以及在近红外波段位移传感过程中出现的谱域条纹串扰现象进行分析和讨论。

1 原理

图 1(a)给出了近红外谱域显微干涉位移传感系统的结构,图 1(b)为载频随位移量增加而变大。光源发出的宽带光进入干涉显微物镜,分别由参考镜 RM 和测试镜 TM 反射形成参考光束和测试光束,经滤光片滤除短波成分,依次通过成像透镜和光纤进入光谱仪,由光谱仪记录两支光束干涉光强随波长的变化关系,谱域干涉光强表示为:

$$I(z, \lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \cos[\phi(z, \lambda)] \quad (1)$$

式中: $a(\lambda)$ 为干涉信号的背景分量; $b(\lambda)$ 为干涉信号

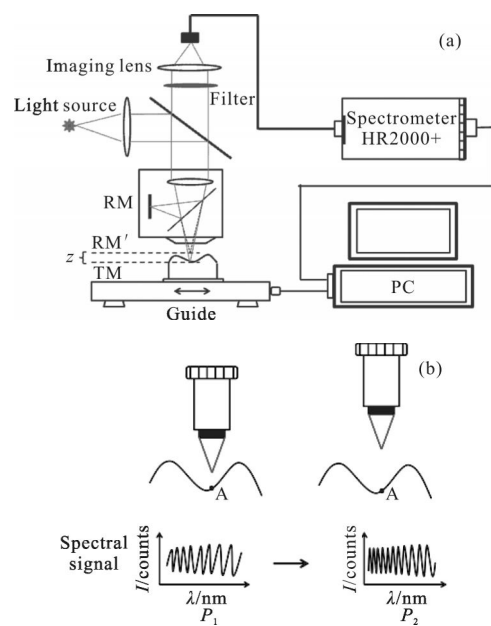


图 1 近红外谱域显微干涉仪的位移传感原理
Fig.1 Principle of displacement sensing of near-infrared light microscopy interference in spectral domain

交流分量的幅值; λ 为波长; $\phi(z, \lambda)$ 为参考光与测试光之间的相位差函数。

$$\phi(z, \lambda) = 4\pi z \lambda^{-1} = 2\pi f_0 \lambda^{-1} \quad (2)$$

式中: z 为待测位移量; $f_0 = 2z$ 为谱域干涉条纹空域载频。 $\phi(z, \lambda)$ 与波长变化成反比, 使得谱域干涉信号正弦变化的周期随波长增大; $\phi(z, \lambda)$ 与位移量成正比, 使得干涉条纹的空域载频随位移量增加, 如图 1(b) 所示。因此, 确定谱域干涉信号的相位差随波长倒数的变化关系即可实现位移量传感。

为了提取位移量信息, 首先需要获得干涉信号相位随波长的变化关系。傅里叶变换法是常用的确定干涉信号相位的方法。如图 1(b) 所示, 谱域干涉信号交流分量的周期随波长变化, 其傅里叶变换的信号谱带宽较宽, 易与背景信号谱发生混叠^[15]。将公式(1)改写为:

$$I(z, k) = a(k) + b(k) \cos(2\pi f_0 k) \quad (3)$$

式中: $k = \frac{1}{\lambda}$ 为波数; $f_0 = 2z$ 为谱域干涉条纹空域载频, 相位 $\phi'(z, k) = 2\pi f_0 k = 4\pi z k$, 随波数线性变化。公式(1)中, $I(z, \lambda)$ 随波长变化, 表示光谱干涉信号在波长域; 公式(3)中, $I(z, k)$ 随波数变化, 表示光谱干涉信号被转换至波数域。将公式(3)改写为复数形式:

$$I(z, k) = a(k) + \frac{1}{2} b(k) \exp(j \cdot 2\pi f_0 k) + \frac{1}{2} b(k) \exp(-j \cdot 2\pi f_0 k) \quad (4)$$

对公式(4)作一维 FFT 变换, 有:

$$F\{I(z, k)\} = S(z, f) = A(f) + B(f - f_0) + B^*(f + f_0) \quad (5)$$

式中: $F\{\}$ 表示傅里叶变换; $(*)$ 表示复共轭, 且有 $A(f) = F\{a(k)\}$ 。一级旁瓣:

$$B(f - f_0) = F\left\{\frac{1}{2} b(k) \exp(j \cdot 2\pi f_0 k)\right\} \quad (6)$$

公式(3)中 $a(k)$ 、 $b(k)$ 、 $\phi'(z, k)$ 随着波数的变化相比于载频引入的变化要缓慢的多, 容易提取频谱一级旁瓣, 则干涉条纹的相位信息可以表示为:

$$\phi'(z, k) = \arctan \frac{\text{Im}\{F^{-1}[B(f - f_0)]\}}{\text{Re}\{F^{-1}[B(f - f_0)]\}} \quad (7)$$

式中: F^{-1} 表示取傅里叶逆变换; $\text{Im}()$ 和 $\text{Re}()$ 分别表示取复数的虚部和实部。则位移量可以表示为:

$$z = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \phi'(z, k)}{\partial k} \quad (8)$$

采用傅里叶变换法计算相位, 只需处理单帧谱

域干涉图, 避免了干涉仪在位移传感过程中的轴向扫描。将谱域干涉光强转换至波数域处理, 使得其傅里叶频谱与背景分量的频谱易于分离, 有利于位移传感精度的提高。

2 数值仿真

测量系统采集的谱域干涉条纹的载频数受位移量大小调制, 对于不同的载频条纹傅里叶变换法有着不同的解算精度。选取波长范围为 700~1 000 nm, 采样数 2 048 等参数, 并假设光源光谱背景分量满足高斯分布, 生成干涉信号进行仿真, 表 1 给出了傅里叶算法在不同位移量时的解算精度, 对应的关系曲线见图 2。从图中可以看出, 在 50~750 μm 的位移范围内, 误差一直稳定在 0.001 μm 量级, 为算法最优解算精度范围。值得注意的是, 该范围并非实际测量时的位移量范围, 可以通过加入一定的“偏置位移量”, 即人为增大实际位移传感范围, 将位移量调整至最佳测量范围内以保证位移传感精度。

表 1 位移量大小与测量误差关系

Tab.1 Relationship between displacement and measurement error

Displacement/ μm	<2.5	2.5-10	10-50	50-750	750-855	855-870	>870
Magnitude of error/ μm	1	0.1	0.01	0.001	0.01	0.1	1

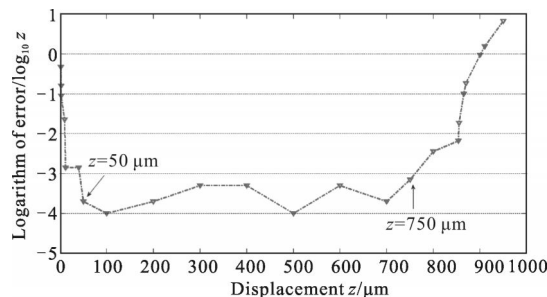


图 2 位移量和测量误差关系

Fig.2 Relationship between displacement and measurement error

3 实验

3.1 实验装置

构建如图 3 所示的近红外谱域显微干涉位移传感系统。采用直流调压卤钨灯(大恒光学, GCI 0601)作为系统光源, 由干涉显微镜(物镜为迈克尔逊型 2X,

SM598136-1, 焦深 1.67 mm) 产生干涉信号, 通过光纤导光束 (海洋光学, QP600-2-UV-VIS) 导入光谱仪 (海洋光学, HR2000+, 光谱探测范围为 700~1 100 nm, 光谱分辨率 0.33 nm)。光谱仪狭缝宽度 5 μm , 光栅为 600 线对闪耀光栅, 探测器采用 2 048 像素的线阵 CCD, 所有光谱数据的采集在室温 (24 ± 1 $^{\circ}\text{C}$) 情况下进行。导轨 (NSK, HS0010-902) 每 100 mm 的直线度优于 2 μm 。

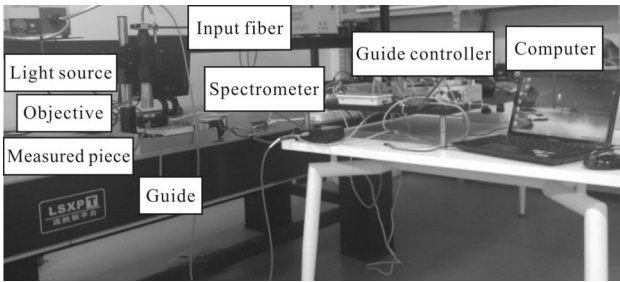


图 3 近红外谱域显微干涉位移传感实验装置
Fig.3 Experimental facility of displacement sensing of near-infrared light microscopy interference in spectral domain

3.2 位移量提取

图 4 给出了位移量的提取过程。光谱仪采集的原始数据如图 4(a)所示, 在 0.72~0.76 μm 范围存在 8 根条纹, 而在 0.82~0.86 μm 范围仅有 5.5 根条纹, 可见干涉信号随波长非线性变化。将干涉信号变换至波数域, 并进行三次样条插值, 使得测量数据呈等间隔分布如图 4(b)所示, 在 1.2~1.25 μm^{-1} 范围存在

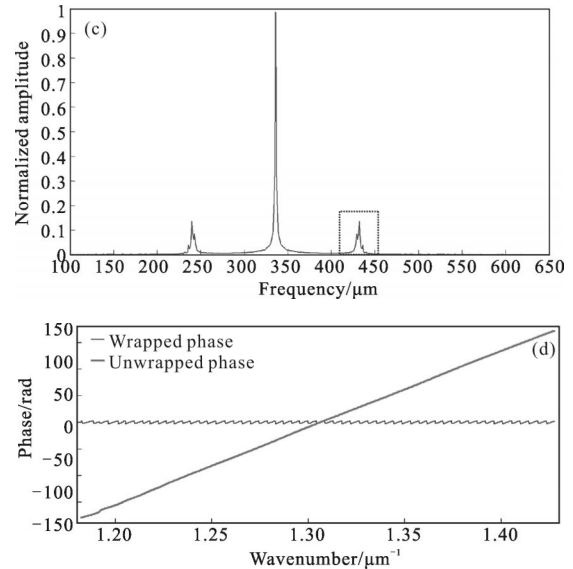
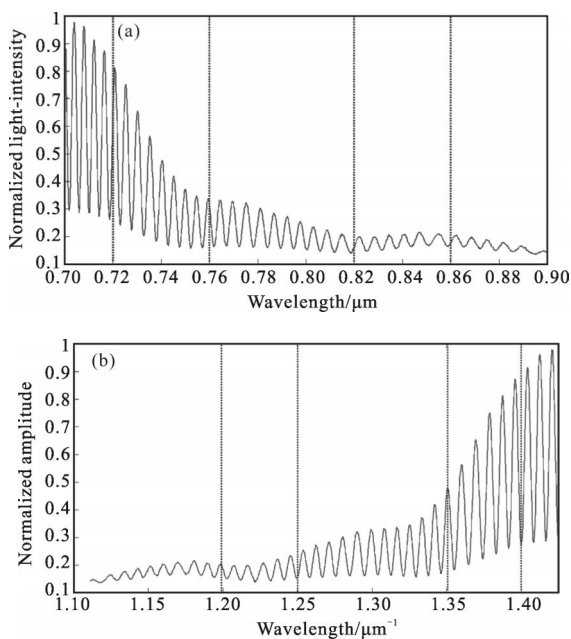


图 4 位移量的提取

Fig.4 Extraction of displacement

5.5 根条纹, 在 1.35~1.4 μm^{-1} 范围也有 5.5 根条纹, 可见干涉信号随波长线性变化。采用傅里叶变换法提取相位, 其频谱如图 4(c)所示, 对相位进行解包裹使得相位连续变化, 如图 4(d)所示。

3.3 单点重复测量

为研究单点位移传感精度及测量的重复性, 以面形良好的一级平晶为被测件进行实验, 将标准平面镜置于精密导轨上, 对于同一点进行测量, 实验每隔 2 min 采集一次数据, 共采集 30 组数据, 测量结果如图 5 所示, 尽管受到环境的影响, 三次重复性测量的 RMS 值仍均小于 0.02 μm , 由此反映了系统装置的位移传感精度。

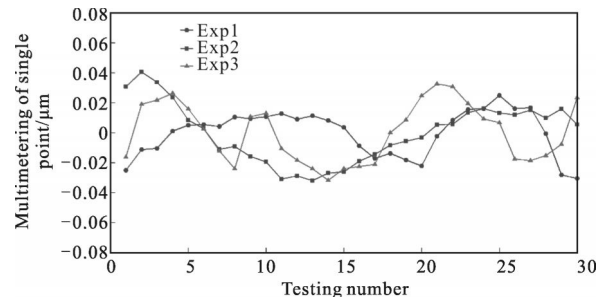


图 5 重复测量结果

Fig.5 Result of repeated measurement

3.4 标准台阶板测量

使用近红外谱域显微干涉位移传感系统测量标准台阶板, 将台阶板置于精密导轨上, 导轨推动台阶板横向移动, 使得探头以垂直于台阶边缘方向进行

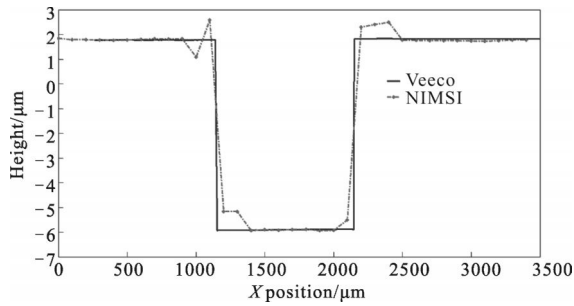


图 6 近红外谱域干涉法测量台阶结果与 Veeco 测量结果对比
Fig.6 Contrast of measurement result of the step by near-infrared microscopic spectral interference method and Veeco

横向扫描,每隔 100 μm 采集一次数据,实验测量数据长度 3.5 mm。测量结果如图 6 所示,该实验系统测得的台阶高度为 7.776 μm,其标称值经商用轮廓仪 (Bruker, Veeco NT9100, 10X 物镜) 标定为 7.732 μm,测量误差为 0.044 μm。

从图 6 可以看出,在台阶的边缘附近测量结果出现异常,这是由于实验系统采集的干涉信号是通过光纤接收并导入光谱仪,光纤有一定的纤芯直径,其对应的物面有一定的测量区域范围,光谱仪记录的谱域干涉光强是物面测量区域干涉光强的积分,在此区域内面形必须连续分布,若面形存在突变,导致光程差分布不连续,存在阶跃跳变,则会使谱域干涉条纹发生异变,提取的位移量存在异常。异常区域大小取决于物面测量区域大小,对于该系统,光纤纤芯直径越大,系统放大倍率越小,位移量出现异常的区域越大。

为研究测量过程中导轨的直线度对测量结果的影响,以面形良好的一级平晶为被测件进行测量,实验过程中保持平面镜相对导轨位置不变,导轨横向平移使得探头对平面进行扫描,测量数据长度为 4 mm。图 7 给出了导轨直线度误差的测量结果,

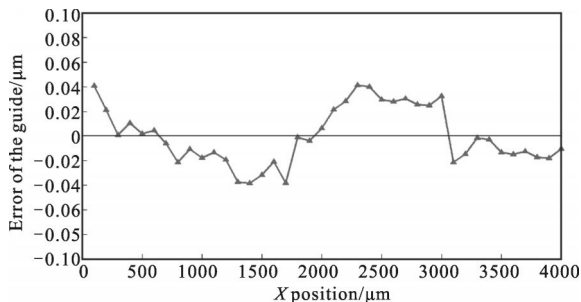


图 7 导轨引入的误差

Fig.7 Error introduced by the guide

RMS 值为 0.023 μm, PV 值为 0.071 μm。可见在 4 mm 的测量数据范围内,尽管导轨在测量过程中引入了一定的误差,但相比于图 5 的重复性测量结果,多次位移传感结果的 RMS 值并未出现明显变化。

4 讨论

4.1 位移传感范围

近红外谱域干涉系统中,最小位移传感量与光谱仪的光谱测量范围有关。为了计算出一个有效的位移量 z ,光谱仪至少需要记录两根谱域干涉条纹,则:

$$\Delta\varphi = 4\pi z_{\min} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) \geq 4\pi \quad (9a)$$

$$z_{\min} = \frac{\lambda_{\max} \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (9b)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为光谱仪的光谱带宽; λ_0 为中心波长; λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为波长最大值和最小值; $\Delta\varphi$ 为带宽范围内引入的相位差; z_{\min} 为最小位移传感量。

系统最大位移传感量与光谱仪的波长分辨率有关,对于每个条纹周期应至少存在 3 个独立的采样点,相邻采样点之间的相位差由光谱仪衍射光栅的波长分辨率确定:

$$\Delta\varphi_{\text{sr}} = 4\pi z_{\max} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \leq \frac{2\pi}{3} \quad (10a)$$

$$z_{\max} = \frac{1}{6} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda_0^2}{6\Delta\lambda_{\text{sr}}} \quad (10b)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{sr}}$ 为光谱仪波长分辨率; λ_1 、 λ_2 分别为相邻采样点处的波长值; $\Delta\varphi_{\text{sr}}$ 为相邻采样点间引入的相位差; z_{\max} 为最大位移传感量。

因此,干涉仪的位移传感范围为:

$$\Delta z = z_{\max} - z_{\min} = \frac{\lambda_0^2 (\Delta\lambda - 6\Delta\lambda_{\text{sr}})}{6\Delta\lambda \Delta\lambda_{\text{sr}}} \quad (11)$$

可见,在光谱分辨率和带宽确定的情况下,提高中心波长可增大位移量传感范围。

4.2 谱域干涉信号的串扰

多通道型光栅光谱仪是常用的谱域干涉信号采集装置,其结构如图 8 所示。宽带光干涉信号经过狭缝及准直镜后入射到光栅上,经光栅分光并折转反射后,由线阵探测器记录光强分布。这种光谱仪结构能够同时记录干涉光强随波长的变化,但是当待测干涉信号具有较大光谱范围时,短波光束与长波光

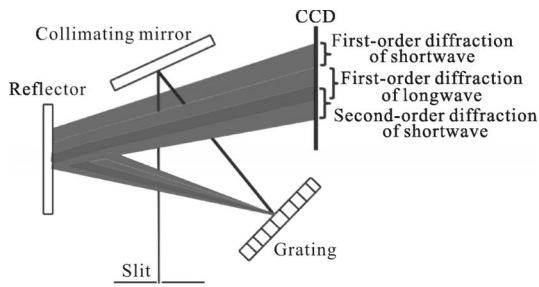


图 8 光谱信号间的串扰

Fig.8 Crosstalk between the spectrum signal

束的不同级次衍射分量会形成光谱串扰，影响所记录的谱域干涉信号的准确性。根据光栅衍射公式：

$$d \sin \varphi_m = \pm m \lambda \quad (12)$$

式中： d 为光栅常数； m 为衍射级次； φ_m 为衍射角。当长波光束的波长为短波光束波长的两倍时，长波光束的一级衍射分量与短波光束的二级衍射分量具有相同的衍射角。测量过程中，为了抑制短波谱域干涉信号对长波信号的干扰，可在系统中加入短波截止滤光片以滤除干涉信号的短波分量。

由于可见光二级衍射谱的影响，光谱仪记录的谱域干涉信号为近红外光的一级衍射分量和可见光的二级衍射分量的非相干叠加，如图 9(a) 所示。其傅里叶频谱存在多组旁瓣，其中一级旁瓣为近红外光一级衍射光频谱，二级旁瓣为可见光二级衍射光频谱，两者与中心主极大距离为倍数关系，如图 9(b) 所示。在系统中加入短波截止滤光片（大恒光学，

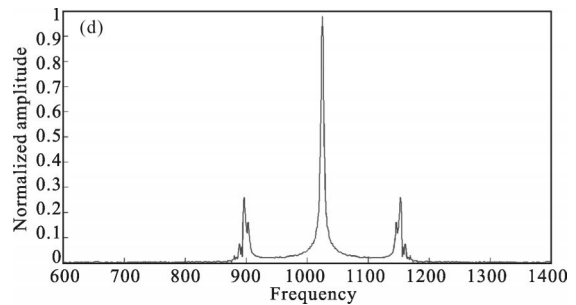
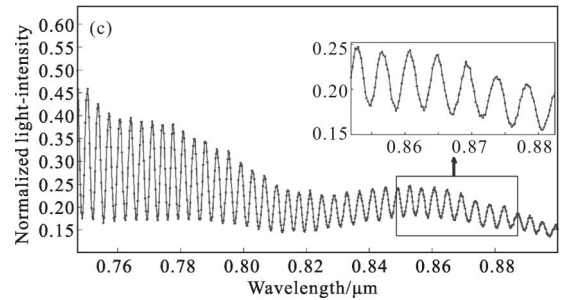


图 9 光谱干涉条纹串扰抑制

Fig.9 Restrain of crosstalk of spectral interference fringes

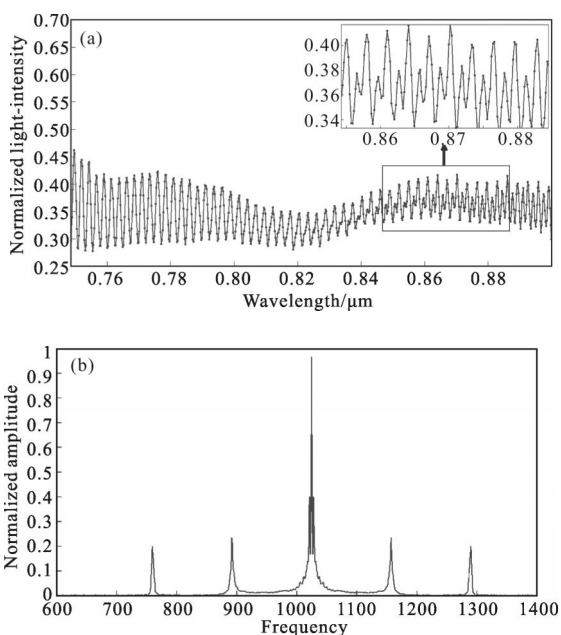
GCC300601, 透过波段 720~2 500 nm, 截止波段 200~630 nm), 谱域条纹表现为规整的余弦干涉信号, 如图 9(c) 所示, 其傅里叶频谱的二级旁瓣被滤除, 如图 9(d) 所示。可见在系统中加入短波截止滤光片, 能有效抑制可见光二级衍射谱对近红外光谱域条纹造成的串扰。

5 结 论

文中提出一种近红外谱域显微干涉位移传感系统，研究谱域显微干涉仪在近红外波段的位移传感特性，以提高干涉仪的位移传感范围。在系统中加入短波截止滤光片进行滤光，解决了可见光分量对于近红外光谱域干涉条纹的串扰问题；将波长域光谱干涉信号转换至波数域，使其随波数线性变化，提高了谱域显微干涉仪的位移传感范围和精度。实验系统位移传感精度优于 0.02 μm，将该系统应用于标准台阶板的高度测量，测量偏差为 0.044 μm。结果表明，近红外谱域显微干涉位移传感技术测量动态范围大，无需轴向扫描，有望应用于大中型光学元件的轮廓在线检测。

参考文献：

[1] Jia Lide, Zheng Ziwen, Dai Yifan, et al. Principle and



- experiments of swing arm profilometer [J]. *Opt Precision Eng*, 2007, 15(4): 499–504. (in Chinese)
- 贾立德, 郑子文, 戴一帆, 等. 摆臂式非球面轮廓仪的原理与试验[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 499–504.
- [2] Yang Zhen, Li Guangyun, He Lei. Measurement methods and precision analysis of optical collimation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 282–286. (in Chinese)
- 杨振, 李广云, 贺磊. 光学准直测量方法与精度分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 282–286.
- [3] Ding Xiaokun, Liu Tiegeng, Song Dianyou. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0208006. (in Chinese)
- 丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208006.
- [4] Ma Xiaojun, Gao Dangzhong, Yang Mengsheng, et al. Measurement of thickness of metal thin film by using chromatic confocal spectral technology [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(1): 17–22. (in Chinese)
- 马小军, 高党忠, 杨蒙生, 等. 应用白光共焦光谱测量金属薄膜厚度[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 17–22.
- [5] Dong Jingtao. Sensitivity analysis of thin-film thickness measurement by vertical scanning white light interferometry [J]. *Appl Opt*, 2013, 51(23): 5668–5675.
- [6] Paul K Upputuri, Li Gong, Wang Haifeng. Measurement of large discontinuities using single white light interferogram[J]. *Opt Express*, 2014, 22(22): 27373–27380.
- [7] Young-Sik Ghim, Angela Davies. Complete fringe order determination in scanning white-light interferometry using a Fourier-based technique[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(12): 1922–1928.
- [8] Schnell U, Zimmermann E, Dandliker R. Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channelled spectrum interferometry[J]. *Pure Appl Opt*, 1995, 4: 643–651.
- [9] Igro Gurov, Petr Hlubina, Vladimir Chugunov. Evaluation of spectral modulated interferograms using a Fourier transform and the iterative phase-locked loop method [J]. *Meas Sci Technol*, 2003, 14: 122–130.
- [10] Xue Hui, Shen Weidong, Gu Peifu, et al. Thickness measurement of thin film based on white-light spectral interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29 (7): 1877–1880.
- 薛晖, 沈伟东, 顾培夫, 等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1877–1880.
- [11] Debnath S K, Kothiyal M P, Kim S W. Evaluation of spectral phase in spectrally resolved white-light interferometry: Comparative study of single-frame techniques [J]. *Opt Lasers Eng*, 2009, 47(11): 1125–1130.
- [12] Soonyang Kwon. Critical dimension measurement of transparent film layers by multispectral imaging [J]. *Opt Exp*, 2014, 22 (14): 17370–17381.
- [13] Zilio S C. Simultaneous thickness and group index measurement with a single arm low-coherence interferometer [J]. *Opt Exp*, 2014, 22(22): 27392–27397.
- [14] Sanjit K D, Mahendra P K. Improved optical profiling using the spectral phase in spectrally resolved white-light interferometry[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(27): 6965–6972.
- [15] Li Jinpeng, Song Le, Chen Lei. Quadratic polar coordinate transform technique for the demodulation of circular carrier interferogram[J]. *Opt Commun*, 2015, 336: 166–172.