

文章编号: 0258-7025(2009)08-2115-06

减小正弦相位调制菲佐干涉仪多光束干涉影响的方法

李中梁^{1,2} 王向朝¹ 刘英明¹ 唐 锋¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在利用正弦相位调制菲佐干涉仪进行测量时,由于菲佐板及待测物体表面对入射光的多次反射而产生多光束干涉,干涉信号的强度随相位变化不是严格的余弦分布。按照双光束干涉的算法进行相位信息提取,会引入一定的误差。以正弦相位调制菲佐干涉仪纳米精度微小位移测量为应用背景,分析多光束干涉情况下该干涉仪信号解调算法的误差,进而对干涉仪的相关参数进行优化,并通过误差补偿对测量结果进行修正,有效减小了多光束干涉产生的影响。

关键词 测量;多光束干涉;参数优化;误差补偿;正弦相位调制

中图分类号 TH 744.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2115

A Method to Reduce Influence of Multi-Beam Interference in Sinusoidal Phase Modulation Fizeau Interferometer

Li Zhongliang^{1,2} Wang Xiangzhao¹ Liu Yingming¹ Tang Feng¹

¹ Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract In a Fizeau interferometer using sinusoidal phase modulation technique, the variation of interference intensity with optical path difference (OPD) does not follow a rigorous cosine behaviour any more. This is because the presence of multi-reflection between the reference plate and the surface under test leads to multi-beam interferences. If the interference signal is processed according to double-beam interference theory, non-ignorable measurement error can be produced. In this paper, a sinusoidal phase modulation Fizeau interferometer used to measure micro-displacement with nanometer precision is established. The measurement error caused by multi-beam interference is analyzed in detail. Some parameters of the Fizeau interferometer are optimized and the measurement results are corrected using error compensation algorithm, so that the influence of multi-beam interference is reduced effectively.

Key words measurement; multi-beam interference; parameter optimization; error compensation; sinusoidal phase modulation

1 引 言

正弦相位调制干涉仪^[1]利用正弦振动的压电陶瓷(PZT)对参考光束进行调制,使得干涉信号和传统的干涉信号比较,在相位中引入随时间正弦变化的调制项,具有相位调制简单、测量精度高等优点,

得到了广泛的应用^[2~6]。基于菲佐干涉的正弦相位调制干涉仪由于参考光和物光共光路,具有较强的抗干扰能力,在物体微小位移和表面形貌测量等领域得到了很好的应用^[7~9]。但是,在利用正弦相位调制菲佐干涉仪进行测量时,由于菲佐板及待测物

收稿日期: 2008-09-24; 收到修改稿日期: 2008-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60578051)和上海市科委基础研究重点项目(07JC14056)资助课题。

作者简介: 李中梁(1982-),男,博士研究生,主要从事光学干涉检测技术方面的研究。E-mail: lizhongliang@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957-),男,博士生导师,主要从事信息光电子技术方面的研究。E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

体表面对入射光的多次反射容易产生多光束干涉,使得干涉信号的强度随相位变化不是严格的余弦分布。在这种情况下,按照双光束干涉的算法进行相位信息提取,必然会引入一定的测量误差。因此,实验中采取一些措施来减小多光束干涉的影响,如调整光路中菲佐板的角度等。但是这些方法的效果往往并不稳定,所以在对测量精度要求较高的应用中,通常从算法上考虑如何减小多光束干涉的影响^[10,11]。

本文以纳米精度微小位移测量为应用背景,以多光束干涉信号强度随相位分布的规律为基础,分析正弦相位调制菲佐干涉仪信号解调算法的误差。在对干涉仪相关参数优化的基础上,研究算法误差的修正方法,使多光束干涉产生的影响有效减小。

2 理 论

2.1 正弦相位调制双光束干涉解调算法

图 1 所示为用于微小位移测量的正弦相位调制菲佐干涉仪示意图。激光器的中心波长为 λ_0 , 出射的光经透镜(L)准直,再经分束器(BS)后照射到菲

佐板上,一部分光被菲佐板的内表面反射,作为参考光;一部分光透过菲佐板照射到被测物体上,由被测物体表面反射,作为物光。参考光和物光产生的干涉信号由光电探测器检测,检测到的干涉信号送入信号处理系统(SPS),进而得到待测的位移。

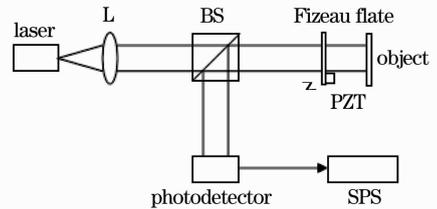


图 1 正弦相位调制菲佐干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sinusoidal phase modulation Fizeau interferometer

PZT 在角频率为 ω_c 的正弦电压信号的驱动下产生振动,使菲佐板产生幅度为 a 的同频振动。设菲佐标准板、待测物体表面的振幅反射率分别为 R_1 和 R_2 , 入射光照射到菲佐标准板时的振幅为 A_0 , 待测物体的位移为 d 。对于较低准确度的测量,当反射面的反射率较低时,忽略多次反射对干涉光强的影响,近似认为是双光束干涉,干涉信号为

$$I_D = A_0^2 [R_1^2 + R_2^2 (1 - R_1^2)^2 - 2R_1R_2 (1 - R_1^2) \cos\Phi] = S_{D0} + S_{D1} \cos[z \cos(\omega_c t) + \alpha] = S_{D0} + S_{D1} \cos \alpha [J_0(z) - 2J_2(z) \cos(2\omega_c t) + \dots] - S_{D1} \sin \alpha [2J_1(z) \cos(\omega_c t) - 2J_3(z) \cos(3\omega_c t) + \dots], \quad (1)$$

其中,

$$S_{D0} = A_0^2 [R_1^2 + R_2^2 (1 - R_1^2)^2];$$

$$S_{D1} = -2A_0^2 R_1 R_2 (1 - R_1^2);$$

$\Phi = z \cos(\omega_c t) + \alpha$ 为两干涉光束的相位差; $z = 4\pi a/\lambda_0$ 为正弦相位调制深度; $\alpha = 4\pi(D_0 + d)/\lambda_0$, D_0 为菲佐板和待测物体均静止时两者之间的距离; $J_n(z)$ 表示 n 阶贝塞尔函数。

采用如图 2 所示的信号处理系统对于干涉信号进行处理^[5]。将干涉信号 I_D 和 PZT 的驱动信号 $V = V_0 \cos(\omega_c t)$ 输入到乘法器 1(MUL1);将 PZT 的驱动信号 $V = V_0 \cos(\omega_c t)$ 送入二倍频电路(2FT)中,再将二倍频信号 $V_0 \cos(2\omega_c t)$ 和 I_D 输入到乘法器 2(MUL2),低通滤波器 1(LPF1)和低通滤波器 2(LPF2)的输出信号分别为

$$P_{D1} = -K_1 S_{D1} V_0 J_1(z) \sin \alpha, \quad (2)$$

$$P_{D2} = -K_2 S_{D1} V_0 J_2(z) \cos \alpha, \quad (3)$$

式中 K_1, K_2 分别为乘法器 1 和低通滤波器 1、乘法器 2 和低通滤波器 2 对信号产生的增益。

将信号 P_{D1} 和 P_{D2} 同时输入除法器(DIV),当增

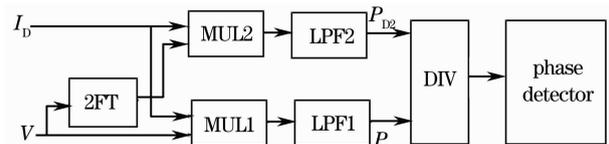


图 2 信号处理系统

Fig. 2 Signal processing system

益 K_1 和 K_2 相等时,由(2)和(3)式可得

$$\alpha = \arctan \left[\frac{P_{D1}/J_1(z)}{P_{D2}/J_2(z)} \right], \quad (4)$$

忽略相位 α 中的直流项,即不考虑菲佐板和待测物体的初始距离,则待测物体的位移为

$$d = \frac{\lambda_0}{4\pi} \alpha = \frac{\lambda_0}{4\pi} \arctan \left[\frac{P_{D1}/J_1(z)}{P_{D2}/J_2(z)} \right]. \quad (5)$$

2.2 多光束干涉信号强度分布公式

图 3 所示为菲佐干涉仪中多光束干涉示意图。 B_1, B_2 分别为菲佐板和待测物体。在实际使用中光束近似垂直入射,菲佐标准板 B_1 的初次反射光和经 B_1, B_2 多次反射的透射光彼此平行。各透射光线的振幅 $A_1, A_2, A_3 \dots$ 分别表示为

$$\begin{aligned}
 A_1 &= R_1 A_0; \\
 A_2 &= R_2 (1 - R_1^2) A_0; \\
 A_3 &= R_1 R_2 [R_2 (1 - R_1^2) A_0]; \\
 &\vdots \\
 A_n &= (R_1 R_2)^{n-2} [R_2 (1 - R_1^2) A_0]; \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

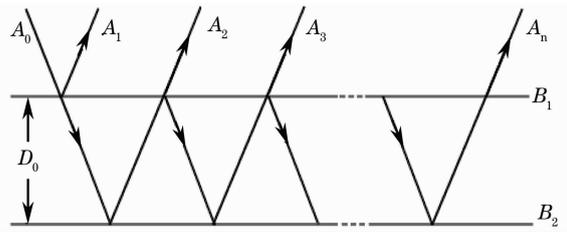


图 3 菲佐干涉仪中多光束干涉示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-beam interferences in Fizeau interferometer

若取初次反射光的初相位为 0, 则各透射光的相位依次为 $\Phi, 2\Phi, 3\Phi, 4\Phi, \dots$ 。当 n 趋于无穷大也就是考虑所有的反射光束时, 多光束干涉信号的强度分布为

$$\begin{aligned}
 I_M &= A_0^2 \{ R_1 - R_2 (1 - R_1^2) e^{-i\Phi} - R_1 R_2 [R_2 (1 - R_1^2)] e^{-2i\Phi} - \dots - (R_1 R_2)^{n-2} [R_2 (1 - R_1^2)] e^{-i(n-1)\Phi} \} \times \\
 &\quad \{ R_1 - R_2 (1 - R_1^2) e^{i\Phi} - R_1 R_2 [R_2 (1 - R_1^2)] e^{2i\Phi} - \dots - (R_1 R_2)^{n-2} [R_2 (1 - R_1^2)] e^{i(n-1)\Phi} \} = \\
 &\quad \sum_{k=0}^{n-1} [S_{Mk} \cos(k\Phi)] = \sum_{k=0}^{n-1} \{ S_{Mk} \cos \{ k [z \cos(\omega_c t) + \alpha] \} \},
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

其中,

$$S_{Mk} = \begin{cases} \sum_{m=0}^{n-1} A_{mH}^2, & k = 0 \\ -2A_1 A_{k+1} + 2 \sum_{m=2}^{n-k} (A_m A_{m+k}), & k \geq 1 \end{cases}
 \tag{8}$$

以用于纳米精度微小位移测量的正弦相位调制菲佐干涉仪为例, 研究多次反射光对干涉信号强度的影响。该干涉仪菲佐反射板的光强反射率为 0.04; 待测物体为单晶硅, 表面的光强反射率为 0.35; 使用的半导体激光器波长为 785 nm, 输出功率为 2 mW。

根据(1)和(7)式分别得到双光束干涉和严格的多光束干涉的信号强度。当正弦相位调制频率为 1 kHz, 正弦相位调制深度为 $z=2.38$ rad 时, 双光束干涉与严格的多光束干涉信号强度的相对误差 $\frac{I_M - I_D}{A_0^2} = \frac{\Delta I}{I_0}$ (其中 $I_0 = A_0^2$) 随待测相位 α 变化的曲线如图 4 所示。

可见, 由于忽略了多次反射的光束, 干涉信号强

度的最大误差接近 10%, 而干涉光相位差的测量是通过强度的测量实现的, 这在高精度的测量中将给结果带来较大误差。因此, 利用正弦相位调制菲佐干涉仪进行高精度测量时, 即使反射面的反射率较低, 也需要考虑多次反射光对干涉信号强度的影响。

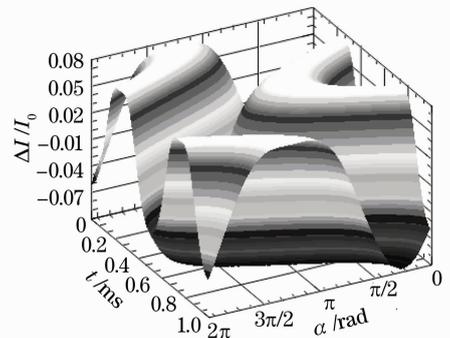


图 4 $\Delta I / I_0$ 随待测相位的变化曲线

Fig. 4 Variation of $\Delta I / I_0$ with the phase to be measured

2.3 正弦相位调制菲佐干涉仪的参数优化

将(7)式展开可得

$$\begin{aligned}
 I_M &= \sum_{k=0}^{n-1} \{ S_{Mk} \cos \{ k [z \cos(\omega_c t) + \alpha] \} \} = \\
 &\quad \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ S_{Mk} \cos(k\alpha) [J_0(kz) - 2J_2(kz) \cos(2\omega_c t) + \dots] - \right. \\
 &\quad \left. S_{Mk} \sin(k\alpha) [2J_1(kz) \cos(\omega_c t) - 2J_3(kz) \cos(3\omega_c t) + \dots] \right\},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

(9)式所示的干涉信号经过图 2 所示的信号处理电路后, 得到

$$\begin{aligned}
 P_{M1} &= -K_1 V \{ S_{M1} J_1(z) \sin \alpha + S_{M2} J_1(2z) \sin(2\alpha) + \dots + S_{M(n-1)} J_1[(n-1)z] \sin[(n-1)\alpha] \} = \\
 &\quad -K_1 V \sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_1(kz) \sin(k\alpha)],
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

$$P_{M2} = -K_2 V \{ S_{M1} J_2(z) \cos \alpha + S_{M2} J_2(2z) \cos(2\alpha) + \cdots + S_{M(n-1)} J_2[(n-1)z] \cos[(n-1)\alpha] \} = -K_2 V \sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_2(kz) \cos(k\alpha)], \quad (11)$$

由(10)和(11)式可得

$$\alpha_M = \arctan\left(\frac{P_{M1}/K_{S1}}{P_{M2}/K_{S2}}\right) = \arctan \frac{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_1(kz) \sin(k\alpha)]/J_1(z)}{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_2(kz) \cos(k\alpha)]/J_2(z)}, \quad (12)$$

可得到物体的位移为

$$d_M = \frac{\lambda_0}{4\pi} \arctan \frac{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_1(kz) \sin(k\alpha)]/J_1(z)}{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_2(kz) \cos(k\alpha)]/J_2(z)}. \quad (13)$$

则由于多光束干涉引起的算法误差为

$$\Delta d = d_M - d = \frac{\lambda_0}{4\pi} (\alpha_M - \alpha) = \frac{\lambda_0}{4\pi} \left[\arctan \frac{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_1(kz) \sin(k\alpha)]/J_1(z)}{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_2(kz) \cos(k\alpha)]/J_2(z)} - \alpha \right]. \quad (14)$$

以用于纳米精度微小位移测量的正弦相位调制菲佐干涉仪为例,在调制深度 z 分别为 1.9, 2.1, 2.38, 2.72 和 3.04 rad 处,算法误差 Δd 随待测相位 α 的变化如图 5 所示。可知,在某一固定调制深度处, Δd 随 α 发生周期为 2π 的变化。当 $\alpha = n\pi$ 时, $\Delta d = 0$; 当 $\alpha = (2n+1)\pi/2$ 时, Δd 达到峰值(其中 n 为整数)。

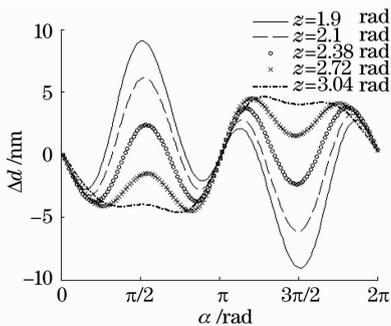


图 5 误差 Δd 随待测相位 α 的变化

Fig. 5 Variation of measurement error Δd with the phase to be measured α

待测相位在 $0 \sim 2\pi$ 范围内时,算法误差 Δd 在不同待测相位下的均方根(RMS)值 Δd_{RMS} 为

$$\Delta d_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\int_0^{2\pi} (\Delta d)^2 d\alpha}{2\pi}}, \quad (15)$$

以 Δd_{RMS} 为优化目标函数,对用于纳米精度微小位移测量的正弦相位调制菲佐干涉仪的调制深度 z 进行优化选择。 Δd_{RMS} 随正弦相位调制深度 z 的变化

如图 6 所示。由图 6 可见,当 z 在 1.8 和 3 rad 之间时, Δd_{RMS} 的最大值为 5.354 nm; 而 z 在 2.38 rad 处时, Δd_{RMS} 取得最小值, 仅为 2.33 nm, 对测量结果的影响较小。

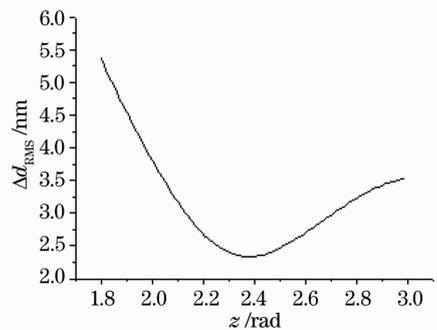


图 6 误差 Δd_{RMS} 值随 z 的变化

Fig. 6 Variation of Δd_{RMS} with the modulation depth z

因此由 $z = 4\pi\alpha/\lambda_0$ 可知,利用正弦相位调制菲佐干涉仪进行微小位移测量时,通过调节 PZT 的驱动电压信号幅度可以改变菲佐板的振动幅度 a , 使得调制深度 $z = 2.38$ rad, 可以有效减小多光束干涉对测量的影响。

2.4 误差补偿

Δd 是周期为 2π 的周期性误差,当调制深度和待测相位为定值时, Δd 为常数。为了满足更高精度的测量要求,通过误差补偿的方法对测量结果 d_M

进行修正。由(14)式可得

$$d = d_M - \Delta d, \quad (16)$$

由于算法误差 Δd 与待测物体表面的反射率有关,而在实际应用中,待测物体表面的反射率难以精确获得,所以修正值只能对误差进行有限程度的补偿。而在不同的调制深度处,算法误差 Δd 不同,因此,选择一个合适的调制深度才能使误差补偿的效果较好。在 $z=2.38$ rad 处,多光束干涉引起的算法误差最小,此时进行误差补偿可以得到较好的结果。

以用于纳米精度微小位移测量的正弦相位调制菲佐干涉仪为例,当 $z=2.38$ rad 时

$$\alpha_m = \arctan \frac{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_1(2.38k) \sin(k\alpha)] / J_1(2.38)}{\sum_{k=1}^{n-1} [S_{Mk} J_2(2.38k) \cos(k\alpha)] / J_2(2.38)}, \quad (17)$$

由(17)式可得到测量相位值 α_M 随待测相位值 α 变化的曲线,进而通过 $\Delta d = d_M - d = (\alpha_M - \alpha)\lambda_0/4\pi$ 可以得到算法误差 Δd 随测量相位值 α_M 变化的曲线,如图 7 所示。按照曲线上相位 α_M 对应的误差对位移 d_M 进行误差补偿,即可得到修正后的位移结果 d 。假设已知反射率 R_1 和 R_2 与其真实值之间有 10% 的误差,此时通过误差补偿对结果进行修正后, Δd_{RMS} 的值由修正前的 2.33 nm 减小到修正后的 0.2 nm。可见,如需更高的测量精度,可通过误差补偿的方法对测量结果进行修正,进一步减小多光束干涉的影响。

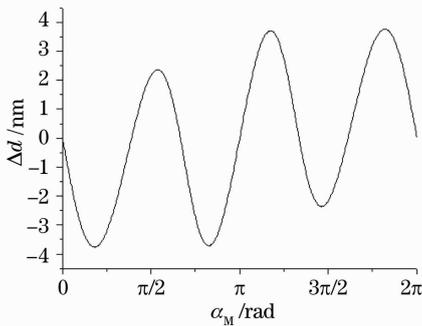


图 7 $z=2.38$ rad 时不同相位 α_M 对应的误差值

Fig. 7 Error of different phase value α_M when $z=2.38$ rad

3 实 验

激光器的波长 λ_0 为 785 nm,输出功率为 2 mW;菲佐板在压电陶瓷(PZT1)的驱动下正弦振动的频率为 1 kHz;菲佐板内表面的反射率为 0.04;待

测物体为单晶硅,表面的反射率为 0.35,由另一个压电陶瓷(PZT2)驱动,产生频率为 50 Hz,振幅为 100 nm 的正弦振动。

当调制深度 z 分别为 1.92, 2.38, 2.72 和 3.04 rad 时,得到的位移结果 d_M 与理想位移 d 之间

误差的均方根值 $\left[\sqrt{\frac{\int_0^T (d_M - d)^2 dt}{T}} \right]$ 如表 1 所示。

表 1 不同调制深度 z 下位移测量误差的均方根值

Table 1 RMS value of the displacement measurement error with different modulation depth z					
Modulation depth z / rad	1.9	2.1	2.38	2.72	3.04
RMS value/ nm	6.3	2.65	2.25	2.75	3.74

由表 1 可知,与其他调制深度相比, $z=2.38$ rad 时多光束干涉引起的误差最小。此时通过误差补偿对测量结果 d_M 进行修正,得到的结果与理想位移之间的误差的均方根值为 0.53 nm,测量精度得到进一步提高。

4 结 论

正弦相位调制菲佐干涉仪由于在菲佐板和待测物体表面之间产生了光束的多次反射,导致了双光束干涉信号解调算法不再精确成立。以正弦相位调制菲佐干涉仪纳米精度微小位移测量为应用背景,分析了多束光干涉情况下该干涉仪信号解调算法引起的误差。研究表明,利用正弦相位调制菲佐干涉仪进行微小位移测量时,通过选择正弦相位调制深度和对测量结果进行修正可以使多光束干涉产生的影响有效减小。

参 考 文 献

- Peng Bu, Xiangzhao Wang, Osami Sasaki. Dynamic full-range Fourier-domain optical coherence tomography using sinusoidal phase-modulating interferometry[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(10): 105603
- Sasaki Osami, Saito Akihiro, Suzuki Takamasa *et al.*. Extension of distance measurement range in a sinusoidal wavelength-scanning interferometer using a liquid-crystal wavelength filter with double feedback control[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5800~5804
- Xiangzhao Wang, O. Sasaki, T. Suzuki *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface by an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4593~4597
- He Guotian, Wang Xiangzhao, Tang Feng. Sinusoidal phase modulating interferometry based on low frame rate area array CCD[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 265~271
何国田,王向朝,唐 锋. 基于低速面阵 CCD 的正弦相位调制干涉测量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 265~271
- Li Zhongliang, Wang Xiangzhao, Liu Yingming *et al.*. All fiber-optic sinusoidal phase-modulating interferometer insensitive to the

- intensity modulation of the light source[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1267~1270
- 李中梁, 王向朝, 刘英明等. 消除正弦相位调制干涉仪中光强调制影响的全光纤干涉仪[J]. *中国激光*, 2007, **27**(9): 1267~1270
- 6 Bu Peng, Wang Xiangzhao, Osami Sasaki. Fourier-domain optical coherence tomography based on sinusoidal phase modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1470~1474
- 步 鹏, 王向朝, 佐佐木修己. 正弦相位调制的频域光学相干层析成像[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1470~1474
- 7 Xiangzhao Wang, Osami Sasaki, Yuuichi Takebayashi *et al.*. Sinusoidal phase-modulating Fizeau interferometer using a self-pumped phase conjugator for surface profile measurements[J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(8): 2670~2674
- 8 Sasaki Osami, Okamura Toshiaki, Nakamura Takanori. Sinusoidal phase modulating Fizeau interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(4): 512~515
- 9 Sasaki Osami, Takuhide Takahashi. Sinusoidal phase modulating interferometer using optical fibers for displacement measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(19): 4139~4142
- 10 Luo Zhiyong, Yang Lifeng, Chen Yunchang. Phase-shift algorithm research based on multiple-beam interference principle[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3051~3057
- 罗志勇, 杨丽峰, 陈允昌. 基于多光束干涉原理的相移算法研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3051~3057
- 11 Satoshi Denno. Multibeam Interference cancellation based on multibeam order extended fast algorithm[J]. *IEIC Technical Report*, 2001, **100**(559): 37~44