

偏振耦合测试及其振动干扰信号分析

郭振武^{1,2} 张红霞¹ 贾大功¹ 陈信伟¹ 刘铁根¹

(¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

²南开大学滨海学院, 天津 300270

摘要 理论分析了偏振模式耦合的原理,给出了基于白光干涉的偏振耦合检测方法。通过步进电机控制迈克耳孙干涉仪扫描臂的反射镜移动,改变干涉仪两臂之间的光程差(OPD),补偿了由于偏振耦合而形成的两偏振光从保偏光纤(PMF)出射时的光程差,实现了对保偏光纤的偏振耦合强度和位置的测试。扫描过程中扫描臂反射镜的振动会对输出信号产生不良影响,对此振动信号进行了仿真及实验研究,分析了它对输出信号的影响。在不同的扫描速度下,采用 Hilbert 变换和最小二乘高斯非线性回归分析提取白光干涉包络,求解耦合强度,验证了振动信号的幅度和频率与扫描速度有关,以及它对耦合强度检测精度的影响。结果表明该测试系统动镜的扫描速度在 0.7~0.9 mm/s 时,偏振耦合强度的检测误差最小。

关键词 光纤光学;偏振耦合;白光干涉;振动干扰;非线性拟合;误差

中图分类号 TN29;O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0805009

Measurement of Polarization Coupling and Analysis of Vibration Disturbance Signal

Guo Zhenwu^{1,2} Zhang Hongxia¹ Jia Dagong¹ Chen Xinwei¹ Liu Tiegeng¹

(¹College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

²Binhai College, Nankai University, Tianjin 300270, China

Abstract The principle of the mode coupling in polarization maintaining fiber (PMF) is analyzed. The measurement method of polarization coupling based on white-light interferometry with Michelson-interferometer is presented. The optical path difference (OPD) between the two arms of Michelson interferometer, changed by the movement of the scanning arm reflector driven by a step motor, compensates the OPD of the two orthogonal beams resulting from polarization coupling to realize the measurement of polarization coupling intensity and the spatial distribution along the PMF. Analysis and emulation are carried out for the disturbance signal of the mechanical scanning vibration and the influence of the vibration imposed on the output signal. The coupling intensity is calculated from the envelope of the output signal which is extracted by Hilbert transform and least squares Gaussian fitting under different scanning speeds. It's indicated that the vibration amplitude and frequency which affect the detection accuracy are related to the scanning speed. And the detection error reaches the minimum when the scanning speed of the system is from 0.7 to 0.9 mm/s.

Key words fiber optics; polarization coupling; white-light interferometry; vibration disturbance; nonlinear fitting; error

OCIS codes 030.1670; 060.2420; 120.3180; 120.4640

1 引言

保偏光纤(PMF)具有高双折射特性,其传输模为两个偏振方向互相垂直的基模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y ,它们分别具有不同的传输常数,因而能使其偏振轴

一致的方向入射的偏振光保持其偏振性,因此保偏光纤在光纤传感^[1]、光纤器件^[2]、光纤陀螺^[3]等领域中得到越来越广泛的应用。由于保偏光纤本身内部缺陷或者外部扰动,如光纤内部应力区缺陷及外部

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-04-26

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806)和天津市高等学校科技发展基金(20080715)资助课题。

作者简介: 郭振武(1971—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感等方面的研究。E-mail: zw99@sohu.com

扭曲、缠绕等原因,会引起一部分传输光耦合到正交的偏振态上去,即发生偏振耦合^[4]。本文利用白光干涉法^[5]测量保偏光纤的空间分布寄生偏振耦合,系统主要由迈克耳孙干涉仪构成,通过步进电机控制干涉仪扫描臂的反射镜移动,用两臂之间的光程差来补偿保偏光纤中由于偏振耦合引起的两模式光束的光程差,实现了对保偏光纤中偏振耦合点的耦合强度及空间位置分布的检测。对保偏光纤偏振耦合的测量可以检测保偏光纤的保偏能力^[6],也可以构成分布式压力传感系统^[7]。机械式的仪器设备运转时都会产生附加振动,此振动信号会对空间干涉仪产生不良影响^[8],使干涉信号波形改变,影响检测精度。本系统影响检测精度的干扰信号主要是由步进电机带动反射镜扫描时所产生的附加振动和环境因素引起的随机振动,对机械扫描的振动干扰对测试结果的影响进行了理论分析,并进行了仿真和实验验证。

2 偏振耦合测试原理

保偏光纤偏振耦合干涉仪原理如图 1 所示。

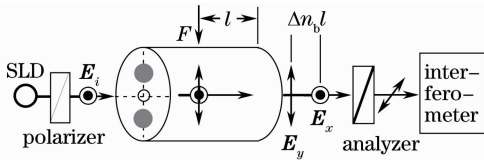


图 1 偏振耦合原理

Fig. 1 Principle of polarization coupling

宽光谱(SLD)光源出射的光经起偏器后进入保偏光纤,使入射偏振光偏振方向与保偏光纤的一个透光轴相同,则只有这一种偏振模式的光在光纤中传播。当光纤上一点存在外界压力(图 1 中的外力 F),则会在该点发生偏振耦合,一部分光将耦合到正交的偏振态上去。由于双折射效应,两偏振模式的光以不同的速度沿光纤传播。从光纤出射时,产生光程差 $\Delta n_b l$, Δn_b 为保偏光纤两光轴的折射率差, l 为耦合点至光纤出射端的距离。

假设 $\mathbf{E}_i = A \exp(j\varphi_0)$, φ_0 为初相位, A 为振幅。经过耦合点处,发生偏振耦合,产生偏振方向相互垂直的两光束,从光纤出射时,将分别有相移 $\varphi = kn_x l$, $\varphi' = kn_y l$, n_x 和 n_y 为光纤两透光轴的折射率, k 为真空中的波数。二者的相位差 $\Delta\varphi = kn_x l - kn_y l = \Delta n_b k l$ 。此时两偏振光波矢量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_x = A_1 \exp[j(\varphi_0 + \varphi)] \\ \mathbf{E}_y = A_2 \exp[j(\varphi_0 + \varphi + \Delta\varphi)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $A^2 = A_1^2 + A_2^2$, 忽略能量损耗。

经检偏器后,两偏振光投影至与它们成 45° 角的方向上,投射比例均为 $1/\sqrt{2}$ 。此时由于白光光源相干长度 L_c 很小,当 $\Delta n_b l$ 远大于 L_c 时,两光束没有干涉现象,进入迈克耳孙干涉仪,如图 2 所示。

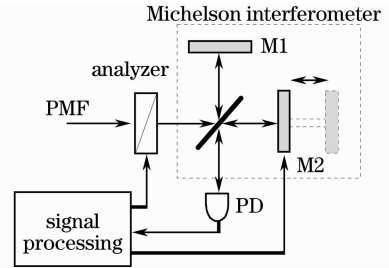


图 2 偏振耦合测试

Fig. 2 Diagram of polarization coupling measurement

两偏振光先后经分光棱镜,再分别分成两束光,经 M_1 、 M_2 反射镜反射,再次经分光棱镜,到达探测器,则此时的光波分别为 $\mathbf{E}_1 = [1/(2\sqrt{2})](\mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y)$ 和 $\mathbf{E}_2 = [1/(2\sqrt{2})](\mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y) \exp(jk\Delta z)$, 其中 Δz 为干涉仪两臂引入的光程差。探测光强为

$$I = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)(\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^*. \quad (2)$$

对于宽带光,由部分相干理论可知双光束干涉条纹强度的交流分量的波形和幅度取决于复时间相干度^[9],复时间相干度与光源功率谱函数互为傅里叶变换与反变换的关系,SLD 光源功率谱符合高斯分布^[10],则其傅里叶变换也为高斯型,因此本系统的复时间相干度的幅值函数可以表示为 $C(\Delta z) = \exp[-(2\Delta z/L_c)^2]$ ^[11],再考虑到 $\Delta n_b l \gg L_c$ 的因素,则(2)式可表示为

$$I = \frac{A^2}{4} [1 + C(\Delta z) \cos(k\Delta z) + \frac{A_1 A_2}{A^2} C(\Delta z + \Delta n_b l) \cos(k\Delta z + k\Delta n_b l) + \frac{A_1 A_2}{A^2} C(\Delta z - \Delta n_b l) \cos(k\Delta z - k\Delta n_b l)]. \quad (3)$$

由(3)式可见,对应于零光程差的干涉峰幅值最大,为干涉主峰,它包括所有光程相同的光的互相干涉;在主峰左右对称位置,出现干涉次峰,它是传输光与耦合光的干涉。所有干涉峰的包络均为高斯

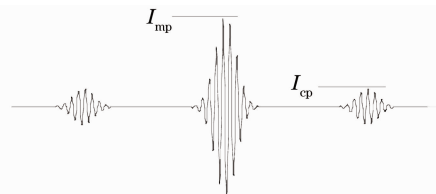


图 3 偏振耦合干涉图

Fig. 3 Interference waveform when coupling occurs

型。由于耦合光光强较弱,干涉次峰的幅度较小,如图3所示。

只要得出干涉条纹的主、次峰的最大值,以及干涉次峰对应的迈克耳孙干涉仪两臂的光程差,则可得耦合强度及耦合点的位置^[12]:

$$\begin{cases} h(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{I_{\text{cp}}}{I_{\text{mp}}}\right)^2 \\ l = \frac{\Delta z L_b}{\lambda_0} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 I_{cp} 为干涉次峰的最大幅值, I_{mp} 为干涉主峰的最大幅值; L_b 为保偏光纤的拍长, λ_0 为光源的中心波长。

3 包络提取

由(4)式可知,耦合强度是由干涉信号的峰值得到的,但由于干涉峰受到 M2 的振动以及其他各种噪声的干扰,实际上不能精确定位信号的最大值点,而是需要恢复出高斯型包络,才能确定极大值及其位置。

Hilbert 变换是一种常用的包络解调方法^[13], 实信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换定义为^[14]

$$\hat{x}(t) = x(t) \otimes \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (5)$$

$x(t)$ 的解析信号为 $z(t) = x(t) + j\hat{x}(t)$, 解析信号 $z(t)$ 的幅值就是信号 $x(t)$ 的包络, $|z(t)| = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}$ 。

对于有噪声干扰的信号,由 Hilbert 变换得到的包络波动比较剧烈,因此要对包络进行非线性拟合分析。针对本系统输出信号的特点,采用高斯曲线回归分析。

高斯分布模型为

$$f(x) = a \exp\left[-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right], \quad (6)$$

式中 a 为包络的幅度, b 代表包络的中心位置, c 为包络的宽度。用最小二乘法来拟合,得到干涉包络的幅度、中心位置和宽度 3 个参数。保偏光纤在一个应力点发生偏振耦合,由拟合模型的参数 a 可以得到耦合强度,由 b 可以得到耦合点的位置。

4 振动干扰信号分析与实验验证

本系统为机械扫描式白光干涉系统,反射镜在步进电机的驱动下沿导轨移动扫描,有多种因素影响其测试精度^[15]: 反射动镜 M2 的振动、机械扫描步长、光源的稳定性、导轨定位精度等。下面对反射

动镜 M2 振动的影响进行理论分析与验证。

以干涉主峰为例,由(3)式可得其表示式

$$I_m = \frac{A^2}{4} \exp[-(2\Delta z/L_c)^2] \cos(k\Delta z), \quad (7)$$

Δz 是式中唯一的变量,在实际检测中,步进电机的转动对 M2 产生冲击,会引进 M2 的振动,这种振动表现为对光程差的干扰。设物体的振动描述为一种简谐振动,因此(7)式可表示为

$$I_m(t) = \frac{A^2}{4} \exp\{-\{2[\Delta z + 2B\cos(2\pi f_1 t)]/L_c\}^2\} \times \cos\{k[\Delta z + 2B\cos(2\pi f_1 t)]\}, \quad (8)$$

式中 B 为动镜振动的振幅, f_1 为动镜振动的频率。由(8)式可见,干涉波形是在余弦信号的基础上增加了一个随时间变化的相位波动,同时信号包络也受到振动的影响有所起伏。

除此之外,空间干涉仪对外界环境的干扰十分敏感,微弱的环境振动会导致干涉条纹的抖动,外界环境的干扰是随机性的,这种随机干扰 $\text{rand}(\Delta d)$ 仍然表现为是对光程差 Δz 的扰动。则(8)式的时域表达式又进一步表示为

$$I_m(t) = \frac{A^2}{4} \exp\{-\{4[v t + \text{rand}(\Delta d) + B\cos(2\pi f_1 t)]/L_c\}^2\} \times \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda_0}[v t + \text{rand}(\Delta d) + B\cos(2\pi f_1 t)]\right\}, \quad (9)$$

式中 $v = \Delta z/(2t)$ 是动镜的扫描速度。

由(9)式可见,反射动镜的扫描速度决定干涉信号的频率和包络的宽度,扫描速度越快,干涉信号频率越高,包络越窄。M2 的振动是由步进电机转动激发的,其幅度和频率也与扫描速度有关,扫描速度越快,振动频率越快;在实际环境中,物体振动的振幅与频率是成反比的,也就是说扫描速度越快,振动幅度应该越小。图4显示了在不同扫描速度下的仿真波形与实测波形的主包络细节部分。

图4(b)是在 $v = 0.2 \text{ mm/s}$ 的扫描速度下测得的,可以得到干涉信号的频率为 305 Hz,图4(d)是在 $v = 0.75 \text{ mm/s}$ 的扫描速度下测得的,干涉信号的频率为 1145 Hz。从图4可以看到,高斯包络下的干涉信号受到另外一个信号的调制,使干涉信号的频率周期性改变。由(9)式分析可知,图4中波形的疏密间隔的距离是由这个调制信号的频率决定的,波形的疏密程度是由其振幅决定的。该调制信号是由干涉仪的扫描镜的振动引起的,由图4中两种速度下的仿真波形和实测波形均可看出,步进电机的转动速度较快时,M2 的振动频率较高,振幅较小。

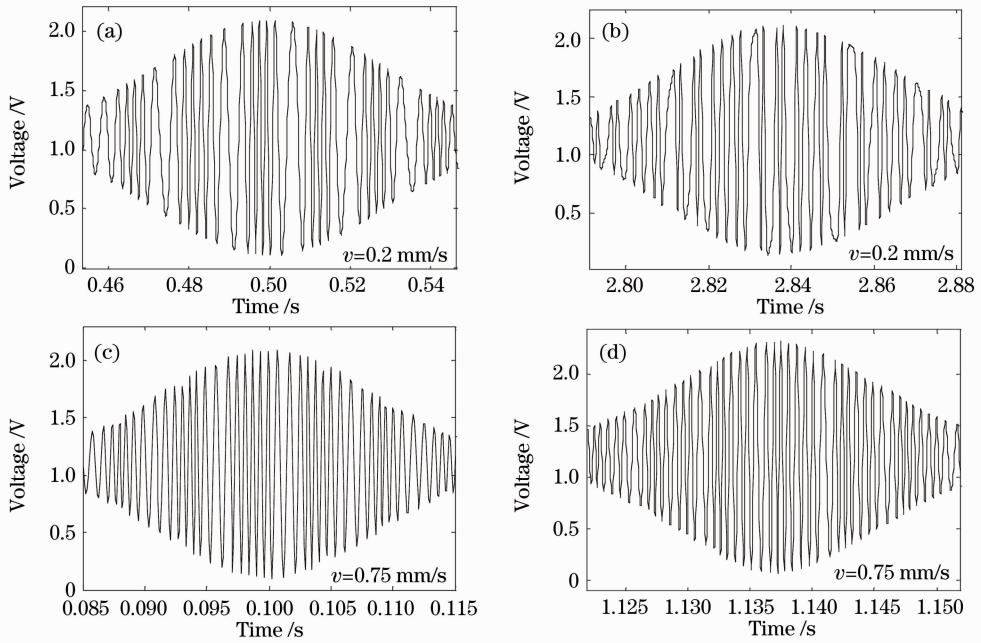


图 4 不同扫描速度下干涉主峰波形比较。(a) $v=0.2$ mm/s 仿真波形;(b) $v=0.2$ mm/s 实测波形;
(c) $v=0.75$ mm/s 仿真波形;(d) $v=0.75$ mm/s 实测波形

Fig. 4 Main interference signal waveform at different speeds. (a) Simulated waveform at $v=0.2$ mm/s; (b) experimental waveform at $v=0.2$ mm/s; (c) simulated waveform at $v=0.75$ mm/s; (d) experimental waveform at $v=0.75$ mm/s

为了进一步证实振动调制信号的存在,对检测信号进行自相关运算,仿真信号与实测信号的自相关波形如图 5 所示。从图中可以看出,原检测信号中包含两种频率成分的周期信号,一个是频率较高的干涉信号,另一个是频率较低的振动调制信号,其频率值可从图中读出。

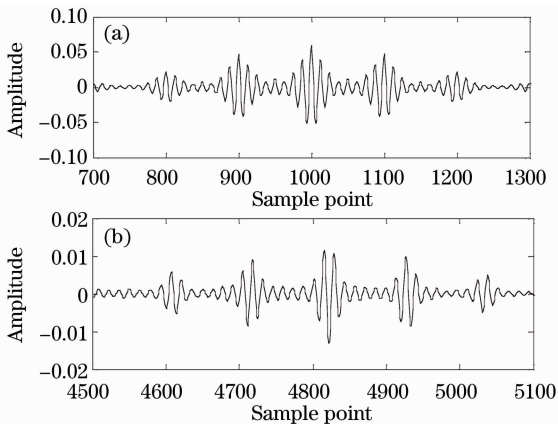


图 5 信号的自相关波形。(a) 仿真信号;(b) 检测信号
Fig. 5 Autocorrelation waveform of detecting signal.

(a) Simulated signal; (b) experimental signal

将检测到的干涉信号用 Hilbert 变换提取包络,并进行高斯拟合,图 6 是在两种不同扫描速度下的干涉主峰的包络提取及其对包络的拟合波形图。

图 6(a)显示,扫描速度慢,包络点波动大,拟合

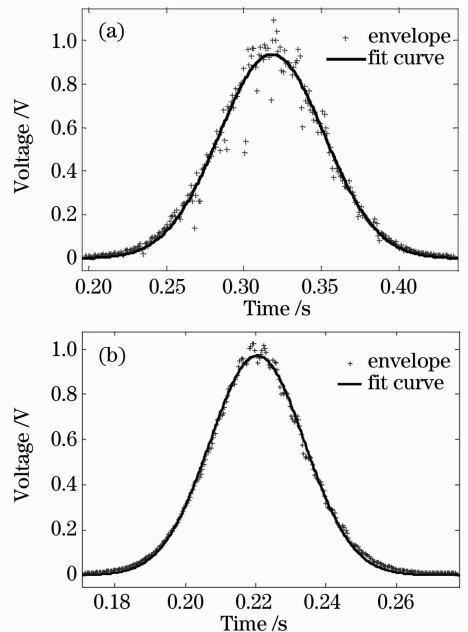


图 6 高斯拟合曲线。(a) $v=0.2$ mm/s;
(b) $v=0.75$ mm/s

Fig. 6 Gaussian fitting curve. (a) $v=0.2$ mm/s;
(b) $v=0.75$ mm/s

后幅度的均方根误差(RMSE)为 0.08176;图 6(b)显示,扫描速度快,包络点波动小,其拟合后幅度的均方根误差为 0.01816。进一步证实了扫描速度越快,振动干扰越小。但包络的位置参数和宽度参数,

在考虑扫描起始点和速度因素后,两个图拟合结果几乎一致。也就是说,振动干扰信号只影响耦合强度的检测精度,而不影响对耦合点位置的检测。

在一系列扫描速度下,测量干涉峰峰值,分析扫描速度的影响。以 $v=0.75$ mm/s 的速度扫描 20 次测量包络幅值,取其平均值作为实际值。在每个速度下测量 5 次包络幅值,同样取平均值作为测量值,将测得的包络幅值相对误差及其拟合均方根误差绘于图 7 中。

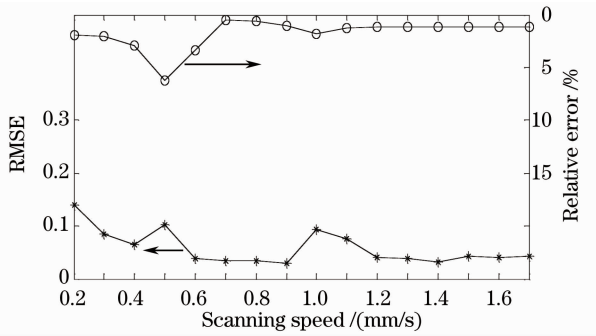


图 7 扫描速度与峰值检测误差和拟合均方根误差的关系

Fig. 7 Scanning speed versus peak value relative error and RMSE of fitting

从图 7 可以看出,在 $v=0.5$ mm/s 时,峰值检测误差最大,说明在此速度下有共振发生(其时域图见图 8),当 $v=1$ mm/s 时,仍然存在谐波共振,测量误差也稍显偏大。

扫描速度在 $0.2\sim 0.7$ mm/s 期间,峰值检测误差与拟合均方根误差总体呈现递减趋势(不考虑共振影响),这是因为扫描速度越快, M2 的振幅越小;同时扫描速度越快,干涉峰越窄,随机干扰发生在干涉峰期间的几率越小,因此输出信号越理想,检测误差也越小。当扫描速度在 $0.7\sim 0.9$ mm/s 时,误差达到最小,相对误差小于 0.5% ;在 $1.2\sim 1.7$ mm/s 之间时,检测波形比较平稳,误差较小,说明在此段动镜的振动幅度已经很小,峰值检测误差几乎不再随扫描速度变化而改变。

但如果再持续增速,干涉峰包络变得很窄,包络上升和下降的速度很快,微小的振动会使高斯包络的起伏开始显现并随速度的增加而逐渐增大,如图 8(c)所示,在 $v=2$ mm/s 的速度下,包络的起伏已经很明显。同时电机高速运转的机械噪声也出现增大趋势,峰值拟合受到影响,误差变大。

图 8(a)说明在 $v=0.5$ mm/s 时有共振发生,与图 8(b) $v=0.75$ mm/s 相比,波形的疏密程度很明显,说明动镜振动幅度很大,相应的检测误差也

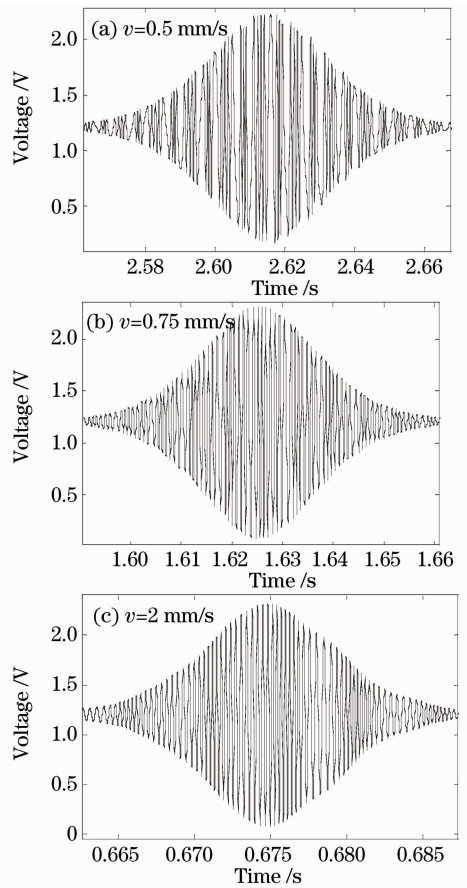


图 8 不同速度下实测波形对比

Fig. 8 Measured waveform comparison of different speeds

很大。

综上所述,考虑误差、共振和采样频率(数据量)等因素本扫描检测系统的最佳扫描速度在 $0.7\sim 0.9$ mm/s 之间。

5 结 论

分析了保偏光纤耦合强度的测试原理,给出了测试系统的结构。对于机械扫描式干涉仪,机械振动是引起测量误差的主要原因,经对振动信号的分析 and 实验表明,振动信号的幅度和频率与扫描速度有关,随着扫描速度的增大,耦合强度检测误差经历了从逐渐减小到逐渐增大的过程。欲使耦合强度检测误差最小,测试系统的扫描速度应为 $0.7\sim 0.9$ mm/s。本结论在白光干涉仪法测试中具有普遍意义,同样适用于其他白光干涉机械扫描仪器,不同仪器的最佳扫描速度由实验测定。

另外对于机械扫描式干涉仪,应采取主动抗振措施。动镜 M2 受激振动的频率和幅度与它自身的机械尺寸、形状以及步进电机的转动速度、步长、电

机本身的振动噪声等有关,为减小扫描动镜的振动,应完善动镜的支架结构,合理选择步长,采用适当的扫描速度,避开其共振点等。

参 考 文 献

- 1 Yuanhong Yang, Haiyun Xia, Wei Jin. Practical polarization maintaining optical fibre temperature sensor for harsh environment application [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(10): 3235~3240
- 2 Pei Li, Zhao Ruifeng, Ning Tigang *et al.*. Controllable birefringent polarization-maintaining fiber Bragg grating with high precision[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1028~1032
裴 丽, 赵瑞峰, 宁提纲 等. 高精度双折射可控保偏光纤光栅研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1028~1032
- 3 Xiaobin Xu, Chunxi Zhang, Xiong Pan. Study of reflection error in closed-loop polarization-maintained interferometric fiber optic gyroscope [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, **121**(13): 1170~1175
- 4 Juichi Noda, Katsunari Okamoto, Yutaka Sasaki. Polarization-maintaining fibers and their applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(8): 1071~1089
- 5 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1413~1420
江 毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1413~1420
- 6 Ding Zhenyang, X. Steve Yao, Liu Tiegeng *et al.*. Improving the quality of polarization-maintaining fiber coils using distributed polarization crosstalk testing [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(3): 430~434
丁振扬, 姚晓天, 刘铁根 等. 采用分布式偏振串扰检测保偏光纤环质量的研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(3): 430~434
- 7 Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong *et al.*. Implementation of distributed polarization maintaining fiber polarization coupling pressure sensing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1467~1472
陈信伟, 张红霞, 贾大功 等. 分布式保偏光纤偏振耦合应力传感系统的实现[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1467~1472
- 8 J. C. Wyant. Vibration insensitive interferometric optical testing [C]. in *Frontiers in Optics*, OSA Technical Digest (CD), 2004, paper OTuB2
- 9 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th Ed. Yang Jiasun Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 459~525
玻 恩, 沃尔夫. *光学原理*[M]. 第七版, 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 459~525
- 10 Chen Weimin, Wang Ning, Zhu Yong *et al.*. Experimental study on the affection of Gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 88~92
陈伟民, 王 宁, 朱 永 等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 88~92
- 11 Yunjiang Rao, David A. Jackson. Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(7): 981~999
- 12 Hongxia Zhang, Tianhua Xu, Dagong Jia *et al.*. Effects of angular misalignment in interferometric detection of distributed polarization coupling [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(9): 095112
- 13 E. A. Feilat. Detection of voltage envelope using prony analysis-Hilbert transform method [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, **21**(4): 2091~2093
- 14 Xiong Liudong, Jia Shuhai, Du Yanfen. A novel Hilbert transform algorithm for phase evaluation from fringe pattern [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1678~1681
熊六东, 贾书海, 杜艳芬. 基于希尔伯特变换的干涉条纹相位解调新算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9): 1678~1681
- 15 Wencai Jing, Yimo Zhang, Ge Zhou *et al.*. Analysis of the influence of opto-electro-mechanical devices on the measurement accuracy of a distributed polarization detection system [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(3): 294~300