

# 载波调制法提高保偏光纤偏振耦合检测的信噪比

张红霞, 叶雯婷, 陈信伟, 温国强, 贾大功, 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:**保偏光纤偏振耦合系统能有效检测保偏光纤中偏振耦合点的空间位置及耦合强度, 因而可被广泛地应用于应力、应变、温度和位置的分布式传感中。由于噪声影响, 测试系统中的信噪比和耦合强度检测灵敏度会下降。为了改善系统信噪比, 提高保偏光纤中弱耦合点的检测能力, 将铌酸锂外调制技术应用于白光干涉保偏光纤耦合测试系统。调制后的信号经光电探测器接收, 用数字解调算法进行数据处理。实验结果表明: 在电机扫描速度为 0.75 mm/s, 调制频率为 9.1 kHz, 采样率为 140 kHz 时, 载波调制时信噪比提高了 8 dB, 解调耗时仅 1.12 s。

**关键词:** 光纤光学; 保偏光纤; 白光干涉; 载波调制; 信噪比; 偏振耦合

中图分类号: TN29 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.013

## Application of carrier modulation in polarization coupling measurement to improve SNR

ZHANG Hong-xia, YE Wen-ting, CHEN Xin-wei, WEN Guo-qiang, JIA Da-gong, ZHANG Yi-mo

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University,

Key Lab. of Opto-Electronic Information and Technical(Tianjin University),

Ministry of Education Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The position and intensity of polarization coupling points in polarization-maintaining fibers (PMFs) caused by stress and twist can be detected effectively by Polarization Coupling Measurement (PCM), so the distributed PMFs sensing system of stress, strain, temperature and position can be realized. However, the Signal Noise Ratio (SNR) and the detection sensitivity of Polarization Coupling Measurement will decrease due to various noise sources. In order to improve SNR of the measurement system, external carrier modulation using LiNbO<sub>3</sub> modulator is implemented. The modulated signal is received by the photodiode and digital demodulation algorithm is used for data processing. The experimental results show that the measurement sensitivity is obviously improved when scanning speed is 0.75 mm/s, modulation frequency is 9.1 kHz and samples frequency is 140 kHz. The gain of SNR is 8 dB and the demodulation algorithm spends only 1.12 s.

**Key words:** fiber optics; polarization-maintaining fiber; white light interferometry; carrier modulation; signal noise ratio; polarization coupling

### 1 引言

保偏光纤偏振耦合测试系统采用白光干涉, 实现了对保偏光纤陀螺绕组中偏振耦合点的耦合强度及空间位置的有效检测<sup>[1-2]</sup>。该系统能在单根光纤上实现分布式传感, 因而可被广泛地应用于应力、应

变、温度和位置传感<sup>[3-8]</sup>。利用保偏光纤偏振耦合

基金项目: 国家“973”计划 (No. 2010CB327806); 教育部新教师博士点基金项目 (No. 200800561022) 资助。

作者简介: 张红霞 (1977 -), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感及光电检测方面的研究。E-mail: hxzhang@tju.edu.cn

收稿日期: 2011-07-14

原理实现物理量传感的有偏振时域反射法 (POTDR)、迈克尔逊白光干涉法、调频载波 (FMCW) 法、锁模光纤环激光器法、基于 Kerr 效应检测法、波长检测干涉法及合成光学相干函数法<sup>[9-13]</sup>。其中白光迈克尔逊干涉法以其结构简单, 测量精度高而被广泛应用。

由于保偏光纤不可避免地存在各种内部缺陷或者外部扰动, 如光纤内部应力区缺陷及外部扭曲、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, 这将降低光纤偏振保持能力, 影响系统性能。一般而言, 外界扰动很小, 微弱的耦合模容易被环境噪声淹没, 导致无法直接用探测器检测。因此, 优化系统、抑制噪声以提高系统信

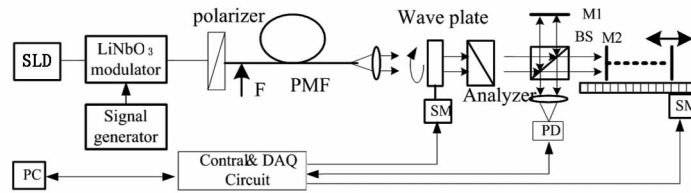
噪比, 实现微弱耦合点的检测是需要着力解决的问题。在先前的研究工作中已提出了采用小波变换法来提高测试系统的信噪比<sup>[14]</sup>。

本文采用铌酸锂外调制技术把测量信息的频率迁移到载波频率上, 并在信号处理中通过数字解调法恢复被测信息, 从而避开各种干扰和过滤掉各种噪声, 实现高精度测量。实验中, 对一段长为 3 m 的保偏光纤进行了分布式检测, 对比了调制和未调制下的系统信噪比、耦合强度测试灵敏度及弱耦合点的检测能力。

## 2 载波调制偏振耦合测试系统

### 2.1 偏振耦合检测原理

载波调制实验系统结构如图 1 所示。



SLD: superluminescent diode, BS: beam splitter, PD: photodiode, SM: step motor

图 1 载波调制的偏振耦合测试原理图

Fig. 1 principle of polarization coupling detection system with carrier modulation

SLD 输出光经电光调制后通过起偏器进入待测保偏光纤, 使入射偏振方向与保偏光纤的一个特征轴相同, 则只有一种偏振模式被激发。当光纤中一点发生偏振耦合时, 一部分光能将耦合到正交的偏振态上, 形成耦合模式。由于双折射效应或偏振模色散, 两偏振模式以不同的速度沿光纤传播, 从光纤出射时产生光程差。在光纤出射端, 控制半波片和检偏器将两偏振模式  $45^\circ$  等比例投影至同一偏振态, 并经过由分束棱镜、固定反射镜和移动反射镜、线性位移机械系统、聚焦光学系统和光电探测器构成的迈克尔逊干涉仪。通过数据采集卡得到的干涉光强直接输入到计算机进行数据处理。其中, 扫描臂的移动由步进电机控制, 半波片由电机控制以保证  $45^\circ$  投影。实验时通过铌酸锂调制器配合信号发生器对 SLD 光源的输出光进行调制, 使得调制光信号具有与背景不同的特征, 可抑制背景光、固有噪声等干扰, 能有效提高系统信噪比, 增强抗干扰能力。

### 2.2 解调算法

经过  $\text{LiNbO}_3$  晶体调制后, 探测器接收到的干涉信号光强为:

$$I_{\text{out}} = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[ - \left( \frac{d}{L_c} \right)^2 \right] \cos(k_0 d) + \sqrt{h - h^2} \exp \left( - \frac{L_c^2 d^2}{2} \right) \cos(\Delta\beta l + k_0 d) \right\} \cos(\omega_c t + \varphi) \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为干涉直流分量;  $\Delta\beta$  为保偏光纤两特征轴传播常数差;  $L_c$  为光源相干长度;  $d$  为迈克尔逊干涉仪两臂光程差;  $k_0$  为光在真空中的波数;  $h$  为耦合强度;  $l$  为耦合点距光纤出射端的长度;  $\omega_c$  是调制频率;  $\varphi$  为探测器接收的干涉信号相位。

将已调信号乘上一个同频同相的载波信号  $\cos(\omega_c t + \varphi)$  得:

$$I_2 = I_{\text{out}} \cos(\omega_c t + \varphi) = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[ - \left( \frac{d}{L_c} \right)^2 \right] \cos(k_0 d) + \sqrt{h - h^2} \exp \left( - \frac{L_c^2 d^2}{2} \right) \cos(\Delta\beta l - k_0 d) \right\} \cos^2(\omega_c t + \varphi) = \frac{1}{2} I_0 \cdot \left\{ 1 + \exp \left[ - \left( \frac{d}{L_c} \right)^2 \right] \cos(k_0 d) + \sqrt{h - h^2} \exp \left( - \frac{L_c^2 d^2}{2} \right) \cdot \cos(\Delta\beta l - k_0 d) \right\} [1 + \cos 2(\omega_c t + \varphi)] \quad (2)$$

令:  $I = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[ - \left( \frac{d}{L_c} \right)^2 \right] \cos(k_0 d) + \right.$

$$\sqrt{h-h^2} \exp\left(-\frac{L_c^2 d^2}{2}\right) \cos(\Delta\beta l - k_0 d) \Big\}$$

$$\text{则: } I_2 = \frac{1}{2} I [1 + \cos 2(\omega_c t + \varphi)]$$

经过低通滤波器可得到解调后的干涉信号  $I$ , 从它的条纹信息中能得到保偏光纤中耦合点的位置和强度信息, 图 2 表示光纤中有一个耦合点的解调后干涉图。左边干涉条纹为两光束中激发波列的干涉, 对应保偏光纤的出射端。右边的干涉条纹为激发波列和耦合波列的干涉, 对应保偏光纤中发生偏振耦合的位置。

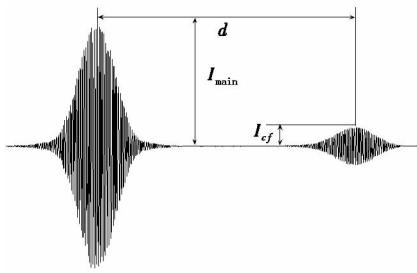


图 2 一个耦合点时解调后干涉图

Fig. 2 read out of the interferogram of one coupling point

由式(1)可得耦合点位置为:

$$l = \frac{k_0 d}{\Delta\beta} = \frac{dL_b}{\lambda} \quad (3)$$

式中,  $L_b$  为保偏光纤的拍长。耦合强度与干涉信号包络的幅值有如下关系<sup>[15]</sup>:

$$h = 10 \log(I_{cf}/I_{main})^2 \quad (4)$$

式中,  $I_{cf}$  为激发模与耦合模干涉包络的幅值;  $I_{main}$  为激发模干涉包络的幅值。

干涉图的振动周期为一个工作波长 1310 nm, 即光程差改变 1310 nm, 对应扫描平面反射镜平移 650 nm。据采样定理, 必须采样两次以上才可以恢复信号的周期曲线, 则最小采样间隔为:

$$\Delta_{main} = \frac{\lambda}{2} \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  为 1310 nm, 最小采样间隔为 327.5 nm。

### 3 实验结果与讨论

系统使用 General Photonics 公司的 SLD - 101 光源, 输出中心波长为 1310 nm, 功率可达到 10 mW。通过铌酸锂调制器配合信号发生器对 SLD 光源进行光电调制, 其中, 用 DH1718D - 4 双路跟踪稳压稳路电源为调制器提供 6 V 直流电压, 用 NI 的 USB6251 进行数据采集。对比实验中, 调节 SLD 输出光电流在 240 mA, 光电探测器输出接采集卡的模拟差分输入端口, 动镜的扫描速度设置为 0.75 mm/s,

信号发生器选择 9.1 kHz 的正弦波作为调制信号输出, 数据采集卡采样率设置为 140 kHz, 实验系统如图 3 所示。

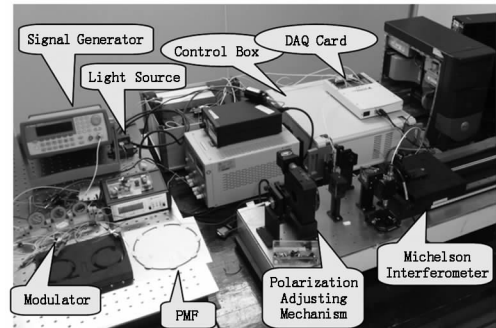


图 3 实验系统照片

Fig. 3 photo of experimental system

#### 3.1 参数设置对系统信噪比的影响

载波调制过程中, 迈克尔逊干涉仪动镜的扫描速度, 采集卡的采样率, 信号发生器产生的载波调制频率等参数对调制结果均有影响。通过几个实验, 详细分析了它们的变化对系统信噪比的影响。

##### 3.1.1 扫描速度对系统信噪比的影响

图 4 显示了不同调制频率和采样率下, 系统信噪比与扫描速度的关系曲线。其中,  $f_m$  是调制频率,  $f_s$  是采样频率,  $f_{sc}$  是扫描速度。

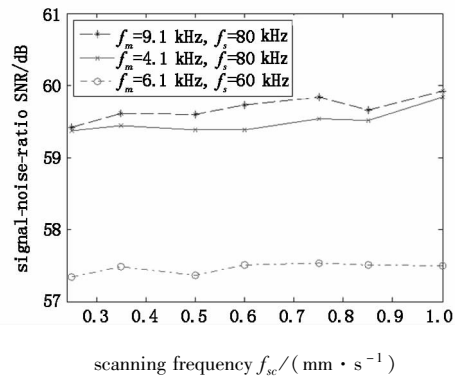


图 4 不同扫描速度下的信噪比

Fig. 4 SNR of different scanning speed

可以看出, 随着扫描速度的增大, 系统信噪比相差不到 1 dB。扫描速度的增大要求相应地增加采样率, 否则会导致欠采样, 无法正确恢复干涉信号。而且由于电机运行速度太高会导致轻微震颤而影响整个系统的稳定性和可重复性, 所以对比实验中仍选取 0.75 mm/s 的扫描速度。

##### 3.1.2 采样频率对系统信噪比的影响

图 5 显示了不同扫描速度和调制频率下, 系统信噪比与采样率的关系曲线。

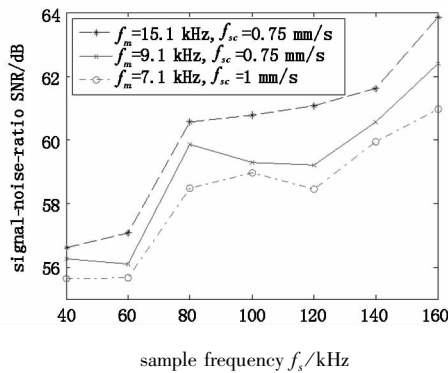


图5 不同采样率下的信噪比

Fig. 5 SNR of different sampling frequency

从图5可以看出,随着采样率的增大,系统信噪比呈现上升趋势,160 kHz时系统的信噪比最好。由Nyquist采样定理,为了保留信息,避免频谱折叠,选取的采样率应尽量大。采样频率越高,扫描相同长度的光纤采集的点就越多,实际是采用了过采样技术使调制的干涉信号越接近于真实值,从而会有较好的信噪比。但是采样率越高,数据量越大,对后续数据处理要求越高,同时受系统硬件的限制,采样率不能无限增大,所以最终调制系统的采样率选定为140 kHz。

### 3.1.3 调制频率对系统信噪比的影响

图6显示了不同扫描速度和采样频率下,系统信噪比与调制频率的关系曲线。可以看出,系统信噪比随着调制频率的增大呈现缓慢上升的趋势。

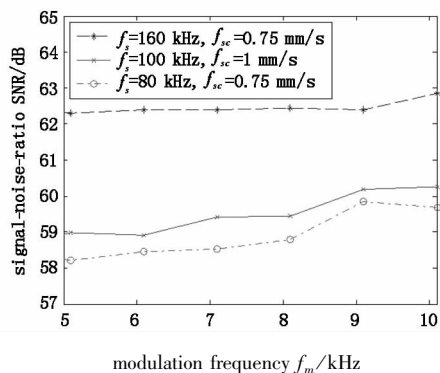


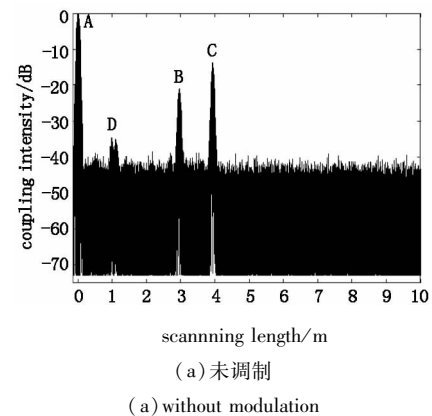
图6 不同调制频率下的信噪比

Fig. 6 SNR of different modulation frequency

### 3.2 耦合测试灵敏度的比较

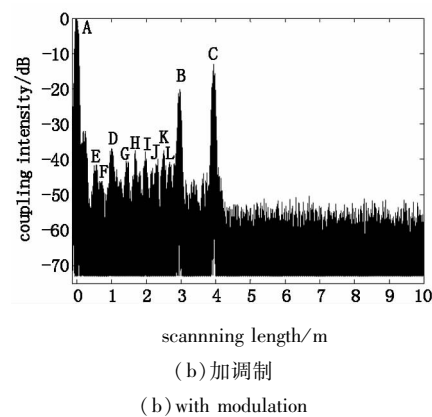
选取了一段3 m的保偏光纤进行实验。图7为处理得到的耦合强度图。其中图7(a)为未调制情况下,选取0.75 mm/s的扫描频率、140 kHz的采样率得到的耦合强度测试图,计算得到系统信噪比为52.91 dB。图7(b)为利用载波调制技术,选取0.75 mm/s的扫描频率、9.1 kHz的调制频率、140 kHz的采样率,计算得到系统信噪比为

60.75 dB,信噪比提高了8 dB。图中A为干涉仪两臂光程差为零的位置,B,C为起偏器接头产生的耦合点。图7(a)中耦合强度大于-40 dB的耦合点能被测试系统检测出来,比如保偏光纤中的耦合点D,其耦合强度大小为-34.45 dB。图7(b)中耦合强度小于-40 dB的耦合点也能被识别出来,系统的耦合测试灵敏度得到了明显改善,D,E,F,G,H,I,J,K,L均是保偏光纤中存在的固有耦合点,强度最小的耦合点F大小为-46.15 dB。未调制时,仅能将耦合强度较大的D点检测出来,在载波调制下,保偏光纤中E、F等弱耦合点也能被识别出来,该条件下用Labview编写的软件解调程序仅耗时1.12 s。



(a) 未调制

(a) without modulation



(b) 加调制

(b) with modulation

图7 耦合强度图

Fig. 7 comparison diagram of coupling intensity

## 4 结论

为了提高测试系统的微弱耦合探测能力,提出了将载波调制方法应用于保偏光纤偏振耦合检测。调制实验表明,系统信噪比提高了8 dB,保偏光纤中的弱耦合点被有效识别出来,大大提高了耦合强度测试的灵敏度,该算法的解调程序运行仅耗时1.12 s,验证了载波调制的可行性。这种调制解调方法的抑制噪声的能力,同样适应于其他干涉式传感系统。

## 参考文献:

- [1] Zhou Kejiang, Wang Tao. Research on fiber white-light interferometer [J]. *Laser & Infrared*, 1997, 27 (4): 242 - 244. (in Chinese)  
周柯江, 王涛. 光纤白光干涉仪的研究 [J]. *激光与红外*, 1997, 27(4): 242 - 244.
- [2] Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong, et al. Spectral-domain measurement of chromatic dispersion difference of polarization modes in polarization-maintaining fibers [J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(1): 26 - 31.
- [3] Denis Donlagic, Miran Lesic. All-fiber quasi-distributed polarimetric temperature sensor [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(22): 10245 - 10254.
- [4] Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong, et al. Implementation of distributed polarization maintaining fiber polarization coupling pressure sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1467 - 1472. (in Chinese)  
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.
- [5] Gabriela Statkiewicz, Tadeusz Martynkien, Wacaw Urbanczyk. Measurements of modal birefringence and polarimetric sensitivity of the birefringent holey fiber to hydrostatic pressure and strain [J]. *Opt. Commun*, 2004, 241: 339 - 348.
- [6] Zhang Hongxia, Liu Haitao, Jing Wencai, et al. Research of stress sensing based on measurement of polarization coupling in polarization maintaining fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(11): 1442 - 1445. (in Chinese)  
张红霞, 刘海涛, 井文才, 等. 保偏光纤偏振耦合应力传感器的研究. [J]. *光电子 · 激光*, 2008, 19(11): 1442 - 1445.
- [7] Serge Caron, Claude Pare, Patrick Paradis, et al. Distributed fiber optics polarimetric chemical sensor [J]. *Meas. Sci. Technol*, 2006, 17: 1075 - 1081.
- [8] He Ning, Jiang Hongyan. Research on the coherent detection for frequency based on acousto-optic deflection [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(11): 1188 - 1192. (in Chinese)  
何宁, 蒋红艳. 基于声光偏转的载频相干探测研究 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(11): 1188 - 1192.
- [9] J G Ellison, A S Siddiqui. A fully polarimetric optical time-domain reflectometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10(2): 246 - 248.
- [10] Gang Zheng, Michael Campbell, Peter Wallace. Reflectometric frequency-modulation continuous-wave distributed fiber-optic stress sensor with forward coupled beams [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(28): 5722 - 5726.
- [11] Shinji Yamashita, Kazuo Hotate. Distributed pressure sensor with a mode-locked fiber-ring laser [J]. *Optics Lett.*, 2001, 26(9): 590 - 592.
- [12] M Shlyagin, A Khomenko, D Tentori. Remote measurement of mode-coupling coefficients in birefringent fiber [J]. *Optics Lett.*, 1994, 19(12): 913 - 915.
- [13] Zuyuan He, Kazuo Hotate. Distributed fiber-optic stress-location measurement by arbitrary shaping of optical coherence function [J]. *J. Lightwave Technol*, 2002, 20(9): 1715 - 1723.
- [14] Jing Wencai, Li Xiaojing, Liu Kun, et al. Enhancement of signal-noise-ratio in a distributed polarization mode coupling detection system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, 3: 57 - 61.
- [15] Jing Wencai, Zhang Yimo, Zhou Ge, et al. Rotation angle optimization of the polarization eigenmodes for detection of weak mode coupling in birefringent waveguides [J]. *Opt. Express*, 2002, 10(18): 972 - 977.