

基于压电陶瓷的光相位调制器的调制系数测量及验证

刘志波^{1,2} 李 阳^{1,2} 苏 耘^{1,2} 刘 艳^{1,2} 谭中伟^{1,2} 马 林^{1,2} 简水生^{1,2}

(¹北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; ²北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要 实现了一种快速简单有效的测量基于压电陶瓷(PZT)的光相位调制器相位调制系数的方法。利用光纤马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪输出光强度与两臂相位差的函数关系,通过 3×3 解调算法可以计算基于PZT的光相位调制器的相位调制系数。实验中在M-Z干涉仪另一臂加上一个基于PZT的相位调制器以减小系统噪声的影响,并在相位生成载波(PGC)解调实验中作为干扰源。最后通过PGC解调方案解调出了 3×3 耦合器的第一路输出信号中的干扰信号,实验验证了所测量的结果,表明该方法是行之有效的。

关键词 测量;光相位调制器;马赫-曾德尔干涉仪; 3×3 解调

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706014

Measurement and Verification of the Modulation Coefficient of the Optical Phase Modulator Based on Piezoelectric

Liu Zhibo^{1,2} Li Yang^{1,2} Su Yun^{1,2} Liu Yan^{1,2} Tan Zhongwei^{1,2}
Ma Lin^{1,2} Jian Shuisheng^{1,2}

¹Key Laboratory of All Optical Networks & Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education of China, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
²Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A new method is proposed to measure the modulation coefficient of the optical phase modulator based on piezoelectric ceramic (PZT). The modulation coefficient of the optical phase modulator based on PZT can be calculated by 3×3 demodulation algorithm, which utilizes the functional relationship between the output optical intensity and the phase difference between the two arms of the Mach-Zehnder (M-Z) interferometer. A second phase modulator is placed on another arm of the M-Z interferometer to decrease the influence of the system noise, and used as the interference source for the next experiment. We finally use the phase generated carrier (PGC) algorithm to demodulate an interfered signal of the M-Z interferometer to test the result. The whole scheme is successfully demonstrated both by numerical simulation and experimental results.

Key words measurement; optical phase modulator; Mach-Zehnder interferometer; 3×3 demodulation

OCIS codes 060.2300; 070.6120; 260.3160

1 引 言

干涉型传感器在温度、应力、水声及电磁场检测等领域有广泛的应用^[1-5]。传感解调技术是光纤传感中的关键技术之一,1982年,Koo等^[6]提出了 3×3 解调方案,利用不同路输出有固定相位差的特点,解决了干涉信号的衰落问题,此干涉仪由 2×2 及 3×3 耦合器构成。Zhao等^[7]改进了 3×3 算法。 3×3 解调方案属于被动解调,是一种应用十分广泛的解调方式。 3×3 解调方案广泛用于干涉型传感

器^[2,7-10]以及光纤 Bragg 光栅复用传感技术^[11]等的相位信号解调中。该解调方案结构简单,对光源要求低,对光的偏振态变化不敏感,适合用于光纤马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪。相位生成载波(PGC)解调法测量M-Z干涉仪两臂之间的相位差变化时,解调电路复杂,且其需要调制光源(价格高)或者一臂加已知的基于压电陶瓷(PZT)的相位调制器;有源零差法需要将两臂的相位差尽量维持在 90° 附近以保证系统在线性区响应,因而实验中需要对一臂加

收稿日期: 2013-03-29; **收到修改稿日期**: 2013-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61177012)、中央高校基本科研业务费(2012YJS009)

作者简介: 刘志波(1988-),男,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 11111026@bjtu.edu.cn

导师简介: 简水生(1929-),男,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要从事光纤通信、光纤传感等方面的研究。

E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

相位调制器并用反馈电路控制两束光的相位差。

光纤干涉仪构成的传感器中,对相位的测量至关重要。目前常用的检测技术中,大多能用到基于PZT的光相位调制器,它既可以用于光纤干涉仪中,对外部环境扰动进行补偿以提高稳定性,也可以用于PGC解调技术^[11-17]中,对光相移进行灵敏而线性的检测。因而测量基于PZT的光相位调制器的相位调制系数有十分重要的意义。只有明确光路中相位调制器的相位调制系数才能准确解调外界干扰信号,进而准确判别外界信息。相位生成载波技术在光纤相位传感解调技术中有广泛的应用,具有灵敏度高、动态范围大等优点。而基于PZT的光相位调制器在PGC解调技术中可以作为干涉型传感系统的外调制器件,在PGC解调技术中有广泛的应用。但是人们多注重基于PZT的光纤光相位调制器的应用,对其调制系数的测量研究却甚少。王廷云^[18]研究分析了基于PZT的光相位调制器的相位调制理论并进行了实验验证,但其方法不能计算任意的基于PZT的光相位调制器的调制系数。在这

种背景下,本文设计了一种准确高效且简单易行的测定基于PZT的光相位调制器在不同驱动信号条件下相位调制系数的方法,并进行了理论仿真和实验分析。利用干涉仪输出光强与M-Z干涉仪两臂相位差的关系,通过 3×3 算法解调两臂相位差信号,解调信号幅值就是所求的相位调制系数。最后,利用测出的调制系数,采用PGC解调方法进行了验证,结果表明该方法是可行的。

2 原 理

2.1 基于PZT的光相位调制器调制系数测量原理

由 2×2 和 3×3 耦合器组成的M-Z干涉仪基本原理框图如图1所示,图中DFB LD为分布反馈式激光二极管,C1为 2×2 耦合器,C2为 3×3 耦合器, x_1, x_2, x_3 为解调后的信号。当PZT1外加正弦电压信号时,由文献[18]知干涉仪两臂之间存在正弦变化的相位差,因而可以通过 3×3 解调算法测量该相位调制器的调制系数随外加电压的变化情况。

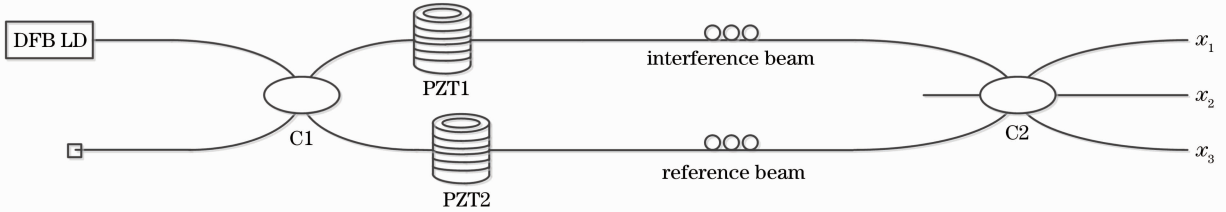


图1 2×2 和 3×3 耦合器构成的M-Z干涉仪

Fig. 1 M-Z interferometer consisting of 2×2 and 3×3 couplers

理想1:1:1的 3×3 耦合器传输矩阵应为

$$T_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & \exp(j \frac{2\pi}{3}) & \exp(-j \frac{2\pi}{3}) \\ \exp(-j \frac{2\pi}{3}) & 1 & \exp(j \frac{2\pi}{3}) \\ \exp(j \frac{2\pi}{3}) & \exp(-j \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

此时三路输出信号形式可表示为

$$I_i = A + B \cos[\Delta\varphi + (i - 1) \times (2\pi/3)], \quad i = 0, 1, 2, \quad (2)$$

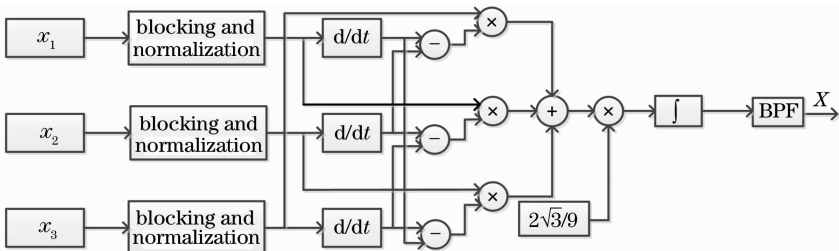


图2 3×3 解调基本原理框图

Fig. 2 Diagram of the basic principle of 3×3 demodulation method

式中 A 为直流输出, B 为交流信号幅度, $\Delta\varphi$ 为干涉仪两路光信号之间的相位差。

3×3 解调的基本原理如图 2 所示。图中 d/dt 为微分器, \int 为积分器, BPF 为带通滤波器。输出 X 即为求解的相位信号。当 PZT 所加驱动信号为正弦信号时, 传感臂相位发生正弦型的变化, 从而使得 M-Z 干涉仪的输出信号为此相位变化的函数, 将输出的信号解调就可得到此相位调制器的调制系数。

图 2 中三路输入形式为(2)式, 理想条件下三路信号相位两两相差 $2\pi/3$ 。首先对三路信号分别进行隔直及归一化处理, 按照流程图 2 顺序进行差分、减法、乘法、加法、乘法、积分运算后推导可以得到

$$X = \Delta\varphi + C, \quad (3)$$

式中 C 为常数。

图 2 中信号的隔直及归一化采取数字化处理的方式, 其基本原理框图如图 3 所示。图中, \max 及 \min 分别表示输入数组的最大值和最小值。最大值和最小值分量分别求和、差为直流分量及交流分量幅值的 2 倍。将输入数组与直流分量求差后除以交流分量幅值可以得到输入数组的归一化值。

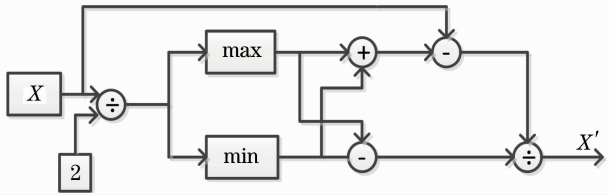


图 3 隔直及归一化方法框图

Fig. 3 Diagram of the blocking and normalized method

2.2 PGC 解调原理

一般的 PGC 的解调原理框图如图 4 所示。其中输入为 M-Z 干涉仪输出, LPF、HPF 分别为低通、高通滤波器。假设干涉仪输出光信号形式为

$$I = A + B\cos[c\cos(\omega_c t) + \varphi_s(t)], \quad (4)$$

式中 c 为相位调制系数, ω_c 为相位调制器调制频率, $\varphi_s(t)$ 为外界干扰信号。将(4)式以 Bessel 函数展开

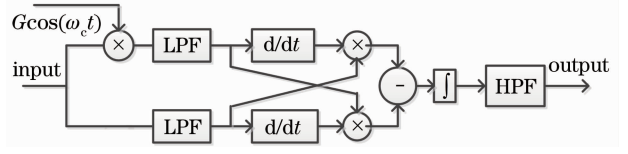


图 4 PGC 解调框图

Fig. 4 Diagram of the method of PGC demodulation

$$I = A +$$

$$B \left\{ \left[J_0(c) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(c) \cos(2n\omega_c t) \right] \cos \varphi_s(t) - 2 \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(c) \cos(2n+1)\omega_c t \right] \sin \varphi_s(t) \right\}, \quad (5)$$

式中 $J_n(c)$ 为第一类 n 阶 Bessel 函数。当 ω_c 远大于 $\varphi_s(t)$ 频率时, 将(4)式乘以 $G\cos(\omega_c t)$, 并分别通过低通滤波器以滤除 ω_c 及其所有倍频项, 可得

$$BJ_0(c) \cos \varphi_s(t), \quad (6)$$

$$-BGJ_1(c) \sin \varphi_s(t). \quad (7)$$

(6)式与(7)式微分并交叉相乘后相减得到

$$B^2GJ_1(c)J_2(c) \frac{d\varphi_s(t)}{dt}. \quad (8)$$

将(8)式积分后得到

$$B^2GJ_1(c)J_2(c)\varphi_s(t), \quad (9)$$

式中 $B^2GJ_1(c)J_2(c)$ 为常数, 从而可以线性解调出 $\varphi_s(t)$ 信号。

3 仿真实验与结果

仿真实验装置图如图 5 所示。两相位调制器都加正弦调制信号, 其中 PZT2 作为系统的干扰信号。最后通过滤波器将其滤除, 可以有效减小系统噪声。仿真中假设两个调制器都用正弦信号驱动, 其调制系数分别为 0.6 rad 和 0.5 rad , 信号频率分别为 13.6 kHz 和 500 Hz 。假设耦合器为严格理想的, 即其分光比分别为 $1:1$ 和 $1:1:1$ 。忽略光在传播中的损耗、光电探测及放大器件的不理想以及光纤传输时延。

此时, 仿真的 3×3 耦合器三路输出结果如图 6

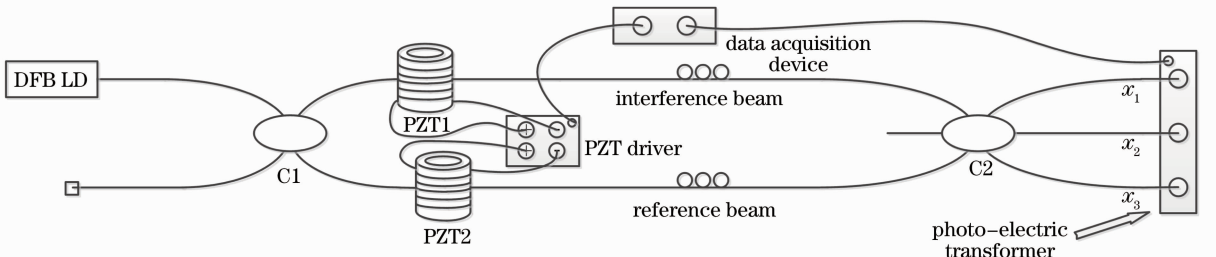


图 5 实验装置图

Fig. 5 Diagram of the experiment

所示。从图中可以看出存在两个不同频率的相位调制信号,且三路信号幅值基本相等。

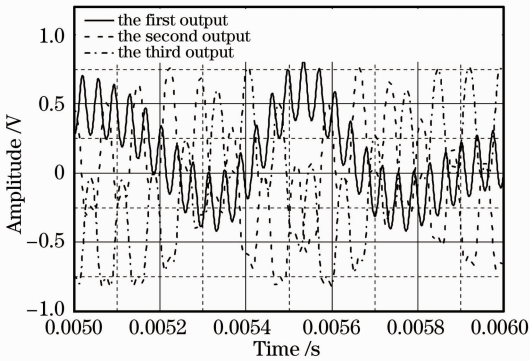


图 6 仿真中 3×3 耦合器三路信号输出

Fig. 6 Outputs of the 3×3 coupler in simulation

将其中一路信号用 PGC 方案解调(载波频率为 13.6 kHz, PZT2 驱动信号作为干扰)。干扰信号与其解调结果如图 7 所示。解调信号幅值为 6.258×10^{-3} , 与在理想状况下解调输出的幅值[由 (9) 式求得]相同。由图 7 中可以看出解调信号与原始信号有良好的一致性, 表明了方法的可行性。

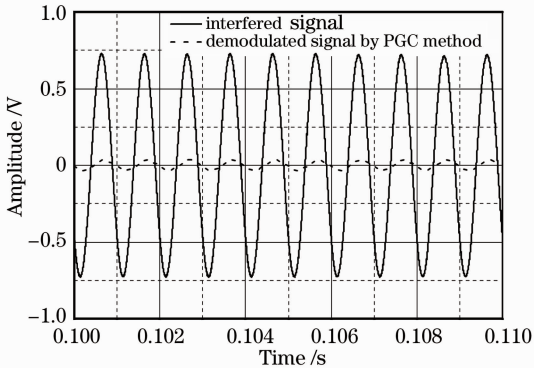


图 7 仿真的干扰信号与解调信号

Fig. 7 Interfered and demodulated signal in simulation

4 实验结果与分析

4.1 相位调制器调制系数测试

搭建实验平台, PZT 上施加的电压信号由函数发生器提供。由分布反馈式激光器提供光源, 其中中心波长为 1546.131 nm, 线宽为 10 MHz。两个 PZT 上缠绕光纤长度都为 100 m, PZT 的内、外径分别为 34.81 mm 和 29.74 mm, 高度为 50.87 mm, PZT 的谐振频率都为 13.6 kHz。光源发出信号经过 2×2 耦合器分成两束, 传输后经过 3×3 耦合器时发生干涉, 然后通过光电转换系统将光信号转变为电信号, 送入美国国家仪器有限公司(NI)采集卡, 最终转换为数字信号。系统中所用 NI 采集卡

的采样率为 1 MHz。

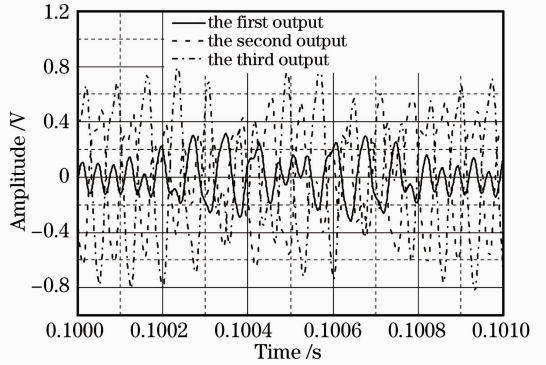


图 8 实验中 3×3 耦合器三路输出信号

Fig. 8 Outputs of the 3×3 coupler in the experiment

搭建实验平台后实验的三路输出的采集信号如图 8 所示。此时, PZT2 由 0.5 V、500 Hz 的正弦信号驱动(作为干扰信号), 而所测光相位调制器由 310 mV、13.6 kHz 的正弦信号驱动。

3×3 耦合器三路输出的光强度有差异, 而仿真结果显示三路信号振幅相等。这可能是由两个耦合器分光比并不是严格的 1:1 和 1:1:1, 以及光电转换器与放大电路不一致造成的。且在仿真实验三路输出结果图 6 中可以明显看到有两个频率的信号, 而在图 8 中并不明显, 这可能是由于实验中两个相位调制器所加调制信号时域上不同步引起的, 可以通过傅里叶变换将采集信号变换为频域信号观察两相位调制器的频率信息。图 9 为 3×3 耦合器的第一路输出的频谱图, 可以清晰地看出在频率为 13.6 kHz 信号左右分别有 13.1 kHz 和 14.1 kHz 的信号(两个信号混频), 这说明传输的光信号被两个频率的信号调制。

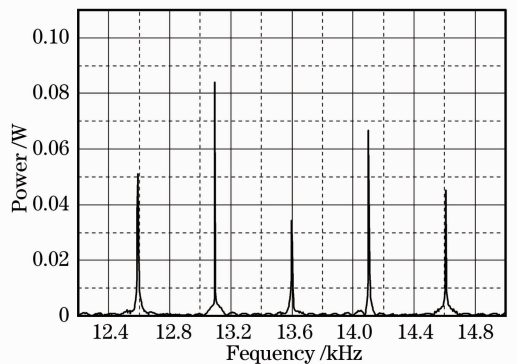


图 9 3×3 耦合器的第一路输出频谱图

Fig. 9 Power spectrum of the first output of the 3×3 coupler

图 10 为所测调制器的驱动信号(虚线)及由 3×3 解调方案解调出来的信号(实线)。此时驱动信

号幅度为 310 mV。可以看出,调制器驱动信号与解调信号一致性良好,而解调信号的幅值便是实验中所求的基于 PZT 的光纤相位调制器的相位调制系数,此时调制系数为 0.56 rad。在图 10 中解调信号与调制器驱动信号之间有时延,这是因为解调信号经过了一系列的积分与微分的运算导致了初始相位的不同,而调制器驱动信号是直接通过采集卡采集的。

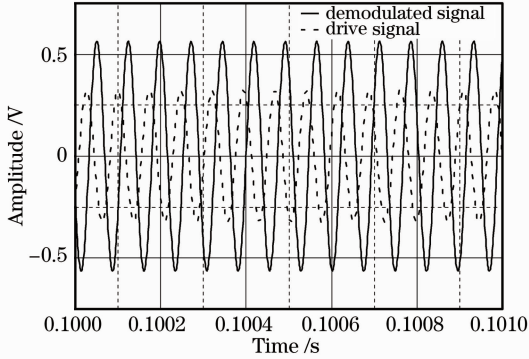


图 10 PZT 驱动信号与 3×3 解调信号

Fig. 10 Drive signal and demodulated signal

实验中,保证 PZT2 驱动信号不发生变化(信号经过滤波后可以滤除),在所测调制器驱动信号频率(PZT1 的谐振频率为 13.6 kHz)不变的前提下,变化调制器驱动信号的电压值,变化范围为 50~410 mV(信号峰峰值),分别采集数据,计算光相位调制器在各电压值下的调制系数。为保证测量值的准确性,在每个驱动电压值采集十组数据,取所测数据的均值,得到结果如图 11 所示。

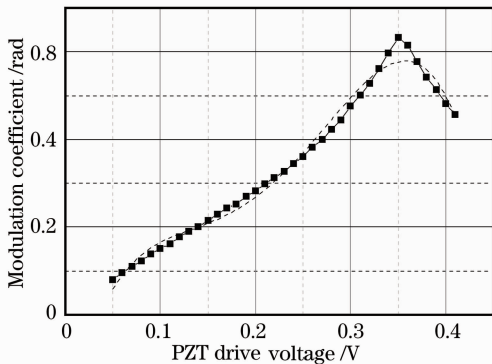


图 11 调制系数与 PZT 驱动电压(频率固定)关系图

Fig. 11 Relationship between the modulation coefficient and the drive voltage

图 11 中虚线为四阶多项式拟合结果。当电压峰峰值大于 350 mV 时,此相位调制器的相位调制系数开始下降。而从文献[18]中可以看出,在其他因素未发生变化时, $\Delta l/l$ 的变化与驱动信号 $u(t)$ 的幅值的变化成正比。但是由于光纤的弹性系数与

PZT 的谐振频率及幅值不能完全匹配,使得所加驱动信号电压超过定值时,由于 PZT 振动幅度较大,使得光纤不再能随 PZT 的振动同步伸缩,从而使相位调制器的相位调制系数并不随信号电压的加大而一直变大。

4.2 调制系数测试实验及分析

在 PGC 解调实验中,利用上述实验测得的数据,所测 PZT1 由 350 mV、13.6 kHz 信号驱动。另一臂的 PZT2 由 0.5 V、500 Hz 正弦信号驱动,测得其调制系数为 0.8008 rad。利用 PGC 解调算法解调采集的数据(3×3 耦合器某一路输出),解调出的信号如图 12 所示。

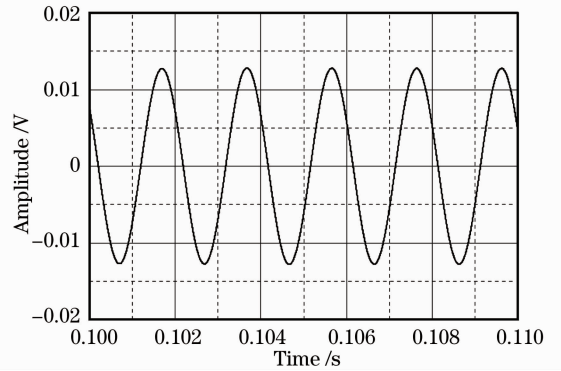


图 12 解调信号

Fig. 12 Demodulated signal

图 12 中解调信号幅值为 1.302×10^{-2} V,而在理想条件下应输出为 1.31×10^{-2} V[由(9)式计算所得],误差为 0.6%。这表明测得的调制系数值是相当准确的。实验中发现当两臂相位调制器同时用正弦信号驱动时,该相位调制器输出偏振态变稳定,这可能是由于正弦信号驱动的相位调制器起到扰偏作用。图 12 为通过 PGC 解调的干扰信号,可以看出其周期为 0.002 s($f=500$ Hz)。

5 结 论

提出了一种实时的且准确快速的测量基于 PZT 的光相位调制器调制系数的方法,并利用该方法测量了一个基于 PZT 的相位调制器的调制系数随电压的变化曲线(驱动信号频率不变)。然后利用测得的在驱动信号电压为 350 mV,频率为 13.6 kHz 时的调制系数,对 3×3 耦合器的一路输出信号用 PGC 方案解调另一臂调制器的相位调制信号,解调信号幅值与理想状况下的误差可以达到 0.6%。实验表明,这种方法可以较为快速简单准确地测量出基于 PZT 的光相位调制器的相位调制系数。

参 考 文 献

- 1 Gregor Weihs, Michael Reck, Harald Weinfurter, *et al.*. All-fiber three-path M-Z interferometer[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(4): 302–304.
- 2 Gregg A Johnson, Michael D Todd, Bryan L Althouse, *et al.*. Fiber Bragg grating interrogation and multiplexing with a 3×3 coupler and a scanning filter[J]. *J Lightwave Technol*, 2000, 18(8): 1101–1105.
- 3 Li Zhaoying, Xie Fang, Ma Sen, *et al.*. Research on an optical-fiber low-coherence interferometric sensing system based on multiplexing interferometric technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0612004.
李昭莹, 谢芳, 马森, 等. 基于复合干涉的光纤低相干干涉传感系统研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0612004.
- 4 Kee P Koo, G H Sigel. An electric field sensor utilizing a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVF2) film in a single-mode fiber interferometer[J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 1982, 18(4): 670–675.
- 5 Wang Lin, He Jun, Li Fang, *et al.*. Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0405001.
王林, 何俊, 李芳, 等. 用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0405001.
- 6 K P Koo, A B Tveten, A Dandridge. Passive stabilization scheme for fiber interferometers using (3×3) fiber directional couplers[J]. *Appl Phys Lett*, 1982, 41(7): 616–618.
- 7 Zhiqiang Zhao, M Süleyman Demokan, Mark MacAlpine. Improved demodulation scheme for fiber optic interferometers using an asymmetric 3×3 coupler[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(11): 2059–2068.
- 8 Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. High stability fiber 3×3 coupler interferometric displacement measurement system[J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2010, 21(2): 235–239.
李敏, 谢芳, 陈志敏. 高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉位移测量系统[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(2): 235–239.
- 9 Michael A Choma, Changhui Yang, Joseph A Izatt. Instantaneous quadrature low-coherence interferometry with 3×3 fiber-optic coupler[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(22): 2162–2164.
- 10 Zhang Huayong, Wang Liwei, Shi Qingping, *et al.*. A new demodulation method for time division multiplexing system of fiber-optic hydrophone using a 3×3 coupler [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0505011.
张华勇, 王利威, 施清平, 等. 光纤水听器时分复用系统通过 3×3 耦合器信号解调的一种新算法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505011.
- 11 Yu Li, Junbin Huang, Hongcan Gu, *et al.*. All-digital real time demodulation system of fiber laser hydrophone using PGC method [C]. *Proceeding of the Measuring Technology and Mechanics Automation (ICMTMA)*, 2011, 1: 359–362.
- 12 Yang Liu, Liwei Wang, Changdong Tian, *et al.*. Analysis and optimization of the PGC method in all digital demodulation system [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(18): 3225–3233.
- 13 Ni Ming, Cao Chunyan, Hu Zhengliang, *et al.*. Polarization diversity technology and its application in fiber optic sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0706005.
倪明, 曹春燕, 胡正良, 等. 偏振分集技术及其在光纤传感器中的应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0706005.
- 14 Jun He, Lin Wang, Fang Li, *et al.*. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(22): 3258–3265.
- 15 Li Yang, Su Xiaoxing, Liu Yan, *et al.*. A PGC demodulation method based on the fundamental frequency mixing [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2012, 23(5): 933–938.
李阳, 苏晓星, 刘艳, 等. 基于基频混频的相位生成载波调制解调方法研究[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(5): 933–938.
- 16 Shi Qingping, Wang Liwei, Zhang Min, *et al.*. Frequency-modulated phase generated carrier demodulation for eliminating companion amplitude modulation[J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2011, 22(2): 180–184.
施清平, 王利威, 张敏, 等. 一种消除伴生调幅的光源调频型相位生成载波解调方法[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(2): 180–184.
- 17 Zhang Nan, Meng Zhou, Rao Wei, *et al.*. Analysis on upper limit of dynamic range of fiber optic interferometric hydrophone using digital heterodyne detection scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806011.
张楠, 孟洲, 饶伟, 等. 干涉型光纤水听器数字化外差检测方法动态范围上限研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806011.
- 18 Wang Tingyun. Fiber-optic phase modulation theory and experiment analysis with PZT cylinder [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(2): 134–137.
王廷云. 用压电陶瓷实现的光纤相位调制理论与实验分析[J]. *光子学报*, 1999, 28(2): 134–137.

栏目编辑: 王晓琰