

基于迈克耳孙干涉技术的光学电压传感器研究

李丹丹 陈信伟 贺胜男 樊彦恩 王凯 武帅

中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088

摘要 对非平衡光纤迈克耳孙干涉仪(MI)粘接在压电陶瓷块(PZT)表面的体系施加交流电压,构成光学电压传感器。PZT产生的压电形变传递给MI,利用可调谐光纤F-P滤波器对MI输出光强变化进行解调,从而获得被测交流电压信号。实验结果表明,该传感器对交流电压具有良好的线性响应。同时,针对可调谐光纤F-P滤波器的调节精度、MI的消光比对系统探测精度的影响进行探讨。

关键词 光纤光学;光学电压传感器;迈克耳孙干涉;可调谐光纤法布里-珀罗滤波器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.070605

Research on Optical Voltage Sensor Based on Michelson Interferometer

Li Dandan Chen Xinwei He Shengnan Fan Yanen Wang Kai Wu Shuai

China Electronics Technology Group Corporation No.38 Research Institute, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract An optical voltage sensor is constructed by applying the non-balance fiber Michelson interferometer (MI)-piezoelectric ceramics(PZT)system to alternating voltage. Applying a tunable F-P optical filter to demodulate the output optical intensity variation of MI, which due to the transfer of the piezoelectric deformation, the measured alternating voltage can be obtained. The experimental results show that the sensor has good linear response to the alternating voltage. At the same time, the influence of positioning accuracy of tunable fiber F-P filter and extinction ratio of MI on system detection accuracy are investigated.

Key words fiber optics; optical voltage sensor; Michelson interferometer; tunable Fabry-Perot optical filter

OCIS codes 060.2370; 120.3180; 050.2230; 260.2160

1 引言

与传统的电磁式或电容分压式电压传感器相比,光学电压传感器具有抗电磁干扰能力强,绝缘性强和测量带宽高等特点,已经受到了极大关注。而且,光学电压传感器的体积小、重量轻,易于集成到断路器等高压设备上,已成为了智能电网关键设备研制规划中重点推荐的研究方向^[1-2]。

光学电压传感器可以利用逆压电效应、泡克尔斯效应、电光克尔效应进行工作,传感材料除了电光晶体铌酸铍^[3-4]、石英晶体^[5-6]外,还有压电陶瓷(PZT)。可将光纤光栅粘接在PZT上进行电压传感,通过光谱仪直接监测光信号的中心波长漂移量换算出电压变化^[7],或是直接利用工业级光纤光栅解调仪^[8]进行解调,可实现多通道解调。Martinez-Leon等^[9]利用光纤马赫-曾德尔干涉仪粘接在压电陶瓷环上从而获得较高的检测灵敏度,但由传感臂和参考臂太长,系统容易受到外部的干扰。

本文提出了一种利用迈克耳孙干涉技术的光学电压传感器对交流电压进行测量。使用单模光纤耦合器制作了非平衡迈克耳孙干涉仪(MI),并将其固定在PZT上。当外界交流电压加载在传感器上时,就会引起PZT的形变,进而引起干涉仪光程差发生变化。然后采用可调谐F-P对MI输出光强信号进行解调,就可以实现对待测电压的测量。实验结果表明,传感器输出信号值与被测电压成线性关系。并且进一步分析了光纤可调谐F-P滤波器的波长调节精度、MI的消光比对系统测量精度的影响。

2 原理

测量系统基本原理如图1所示,MI沿着PZT的 d_{31} 方向进行粘接,将交流电压施加在柱形PZT的 d_{33} 方向

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-24; 网络出版日期: 2015-06-19

基金项目: 安徽省科技攻关(1206c0805001)、国防计量技术基础科研项目(JSJC2013210C042)

作者简介: 李丹丹(1985—),女,硕士,助理工程师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: work_vivi@126.com

的两端,就会在 d_{31} 方向产生压电应变,进而引起MI干涉谱条纹发生了相移。其中, d 为PZT的压电系数。

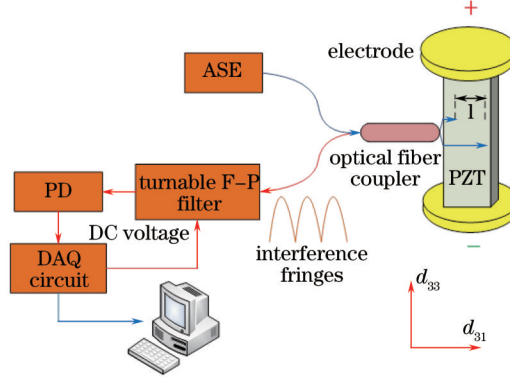


图1 系统示意图

Fig.1 Diagram of system

光由放大自发辐射光源(ASE)发出并入射到MI,经两干涉臂端面反射,输出干涉谱,耦合进入可调谐光纤F-P滤波器进行解调,最后由光电探测器(PD)接收,输出的干涉信号可表示为

$$I = I_1 R_1 + I_2 R_2 + 2\sqrt{I_1 R_1 I_2 R_2} \cos \phi(\lambda_0), \quad (1)$$

$$\phi(\lambda_0) = \frac{4\pi n l}{\lambda_0} + \varphi_0, \quad (2)$$

式中 I_1 和 I_2 分别是光入射到干涉仪两个臂的光强, R_1 和 R_2 分别是两干涉臂端面的反射率。 n 是光纤的折射率, l 是臂长差, φ_0 是干涉谱初始相位。沿PZT的 d_{33} 方向施加电压 $U(t)$,干涉仪的相位就会发生变化:

$$\Delta\phi(\lambda_0) = \frac{4\pi n(l + \Delta l)}{\lambda_0} + \varphi_0, \quad (3)$$

式中 Δl 是臂长差的变化。被测电压 $U(t)$ 可表示为

$$U(t) = V_0 \cos(2\pi f_0 t), \quad (4)$$

式中 V_0 和 f_0 分别是被测电压的振幅和频率。臂长差的变化 Δl 和被测电压 $U(t)$ 是近似线性的,所以 Δl 可表示为

$$\Delta l = K V_0 \cos(2\pi f_0 t), \quad (5)$$

式中 K 是应变系数,因此(1)式又可以表示为

$$I = I_1 R_1 + I_2 R_2 + 2\sqrt{I_1 R_1 I_2 R_2} \cos \left[\frac{4\pi n l}{\lambda_0} + \frac{4\pi n K V_0 \cos(2\pi f_0 t)}{\lambda_0} + \varphi_0 \right], \quad (6)$$

通过调节光纤F-P滤波器使得中心波长 λ_0 与臂长差 l 之间满足 $4\pi n l / \lambda_0 + \varphi_0 = \pi/2$,也就是滤波器的中心波长刚好处于MI反射光谱干涉条纹的斜率最大的 $\pi/2$ 处,定义该点为最佳偏置点,这样,(6)式就可以表示为

$$I(t) = A - B \sin \left[\frac{4\pi n K V_0 \cos(2\pi f_0 t)}{\lambda_0} \right]. \quad (7)$$

传感器的响应特性如图2所示,其中灰色区域是线性响应区。

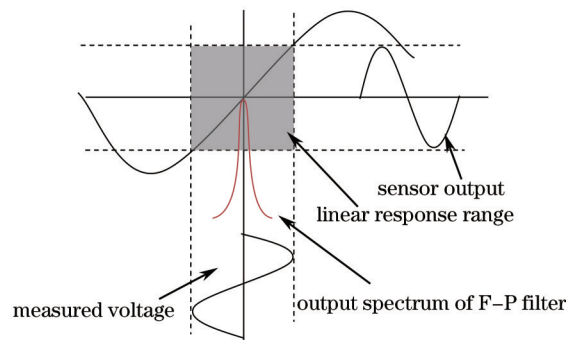


图2 信号解调原理图

Fig.2 Schematic diagram of signal demodulation

3 实验结果和分析

3.1 系统设计

电压传感器实验装置由光源、传感系统、解调系统和数据采集系统组成,如图1所示。ASE发出的光进入一个 2×2 的光纤耦合器构成的MI,输出干涉条纹耦合进入可调谐光纤F-P滤波器进行解调,最后被PD接收并由数据采集系统进行数据处理。调节可调谐光纤F-P滤波器两端的直流偏置电压,保证系统稳定在最佳偏置点。

由图1可知,非平衡迈克耳孙干涉仪MI是由一个 2×2 的单模光纤耦合器制作而成,两干涉臂端面通过银镜反应涂覆上高反膜,反射率大于95%。为了减少环境波动的影响,MI两干涉臂应尽可能短,选择MI臂长约为10 mm。图3为MI输出干涉光谱,干涉条纹的周期为3.01 nm,对应的臂长差为274 μm ,干涉光谱消光比为18 dB。

传感材料选择了发射型压电陶瓷,通过压电系数以及耐压系数计算后,选择其尺寸为长40 mm(d_{33} 方向),横截面积10 mm \times 10 mm。将MI两干涉臂沿着PZT的 d_{31} 方向表面平放后,使用紫外固化光学胶粘接在PZT表面。PZT的两端分别固定两个可使电场均匀分布的跑道状紫铜电极^[5]。实验制作成的电压传感器如图4所示。

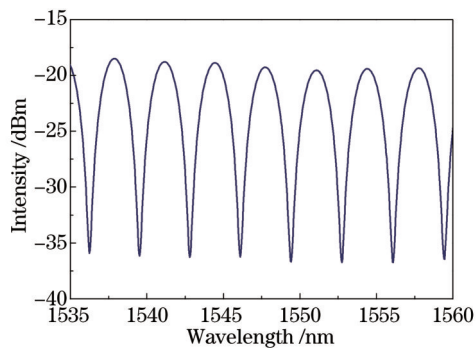


图3 MI的输出光谱图

Fig.3 Output spectrum of MI

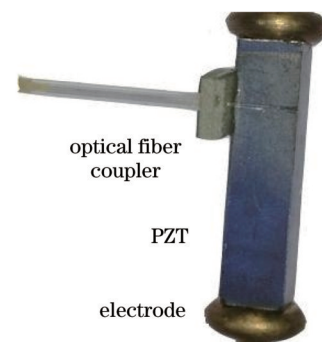


图4 电压传感器的照片

Fig.4 Photograph of the voltage sensor

3.2 高压实验

在电压传感器电极两端加上幅值为10 kV的交流电压,系统解调得到的波形与交流高压源的输出波形吻合较好。同时,在不同电压下对电压传感系统进行了测量,经过数据处理后得到实验结果如图5所示。图中横坐标为被测电压幅值,纵坐标为PD输出的电压信号 V_{p-p} 。如图5可知,在数据处理时,标定的误差线范围为0.2,被测电压和PD输出电压近似为线性关系,线性相关系数为0.9976。经计算,系统测量的标准差是0.163。

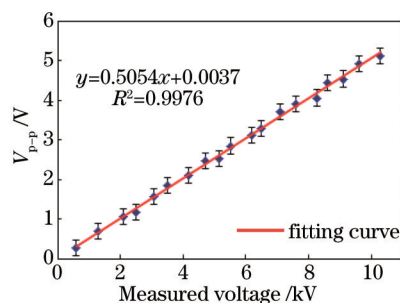


图5 输出信号与被测电压幅值的关系

Fig.5 Relationship between output signal and measured voltage amplitude

3.3 信号精度分析

电压传感器非常重要的一个性能指标就是测量精度。在解调系统中,可调谐光纤F-P滤波器波长调节精度会对系统测量精度产生影响。设MI周期为3.01 nm,对应的臂长差为274 μm ,对不同偏置点处解调出的信号 V_{p-p} 与最佳偏置点处信号 V_{p-p} 的差值 $D-V_{p-p}$ 及系统得到的电压分辨率进行数据模拟分析后得到图6。由图6可知,可调谐光纤F-P滤波器波长调节精度越差,即最佳偏置点定位越差,计算得到的 $D-V_{p-p}$ 越

大,系统测量精度就会越差。

同时,由(7)式可知,干涉条纹曲线斜率 B 越大,对应的MI消光比也越大,因此也可通过提高消光比的方法来使系统测量精度最优化。图7仿真了不同消光比情况下,得到的信号与最佳偏置点处信号的差值 $D-V_{p-p}$ 。仿真定义了可调谐光纤F-P滤波器波长调节精度为0.04 nm,MI周期为3.01 nm,对应的臂长差为274 μm 。如图7所示,当消光比为30 dB时,仿真得到的 $D-V_{p-p}$ 最小;当消光比为15 dB时,仿真得到的 V_{p-p} 与最佳偏置点处信号 V_{p-p} 相差很大。因此,提高消光比可以相应提高系统测量精度。

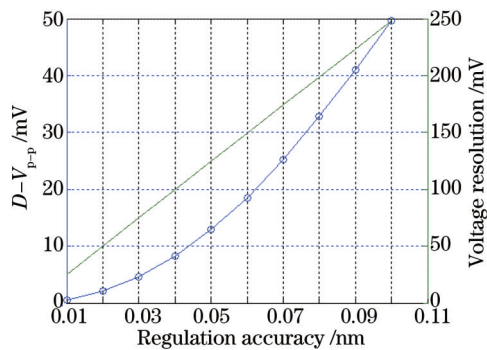


图6 输出信号偏差与F-P滤波器调节精度的关系

Fig.6 Relationship between deviation of output signal and regulation accuracy of F-P filter

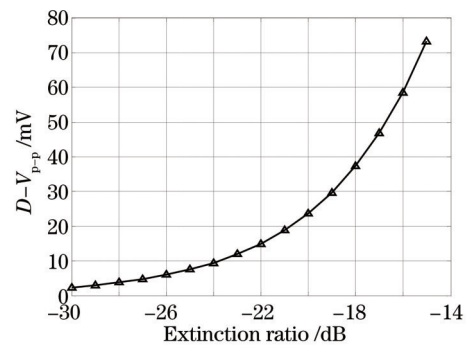


图7 输出信号偏差与消光比的关系

Fig.7 Relationship between deviation of output signal and extinction ratios

影响消光比的主要因素是两干涉臂中传输光的光强、偏振态,两干涉臂端面的反射率间的差异,还有环境温度的影响。其中,两干涉臂中传输光的光强、偏振态的一致性,可通过选择分光比为50:50,误差不超过1%,并且偏振敏感损耗(PDL)低的单模光纤耦合器进行提高。两干涉臂端面的初始反射率可通过精密切割的方式(切割角度应小于 0.5°)进行控制,镀膜后的反射率可通过控制银镜反应来提高。

环境温度对消光比的影响如图8所示,实验中,温度在 -15°C ~ 50°C 范围内来回变化一次,消光比随着温度的上升而变小,并且在 -10°C ~ 15°C 范围内变化较大,在 15°C ~ 50°C 范围内保持不变。在 -15°C ~ 50°C 温度范围内,消光比变化了2 dB,变化规律可重复,可以通过算法进行补偿。

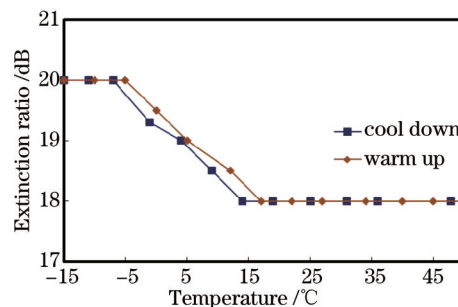


图8 消光比与温度的关系

Fig.8 Relationship between extinction ratios and temperature

此外,由于传感材料选用PZT,其固有的迟滞特性会引起传感器解调结果的波动,从而影响输出信号精度,但从图5的实验结果表明,该传感器系统的误差小于0.5%,满足工程应用要求。

4 结 论

通过将单模光纤耦合器制作成的MI固定在PZT表面上来制作电压传感器,对交流电压进行了测量。被测交流电压加在压电陶瓷 d_{33} 方向的两端后,逆压电效应产生的形变传递给MI,引起干涉条纹相位差的变化。通过光纤F-P滤波器解调实现了交流电压的测量。实验结果表明传感器输出信号值与被测电压成线性关系。并通过讨论可知,通过提高可调谐光纤F-P滤波器的调节精度,或是增大MI的消光比等方法可提高系统测量精度。该电压传感系统结构简单,避免了光纤弯曲损耗因素的影响,并具有成本低,实现与调试方便的优点。

参考文献

- 1 Luo Sunan, Ye Miaoyuan, Li Kaicheng, *et al.*. Advances in optical voltage transformers[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2000, (1): 32-35.
罗苏南, 叶妙元, 李开成, 等. 光学电压互感器的研究进展[J]. *电工电能新技术*, 2000, (1): 32-35.
- 2 Li Changsheng, Cui Xiang, Li Baoshu, *et al.*. A review of optical potential transducers[J]. *High Voltage Engineering*, 2000, 26(2): 40-43.
李长胜, 崔翔, 李宝树, 等. 光纤电压传感器研究综述[J]. *高电压技术*, 2000, 26(2): 40-43.
- 3 H Li, L Cui, Z Lin, *et al.*. Signal detection for optical AC and DC voltage sensor based on pockels effect[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2013, 13(6): 2245-2252.
- 4 K Bohnert, M Ingold, J Kostovic. Fiber-optic voltage sensor for SF6 gas-insulated high-voltage switch gear[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(10): 1926-1933.
- 5 Liu Feng, Bi Weihong, Wang Jian. Structure of sensor head for optical high voltage transducer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(5): 43-47.
刘丰, 毕卫红, 王建. 光学高压电压互感器传感头结构的研究[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(5): 43-47.
- 6 Lou Fengwei, Zheng Shengxuan, Xi Zhenghong. Transducer probe design of optical fiber voltage transducers[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2004, 12(3): 3-5.
娄凤伟, 郑绳植, 席政宏. 光纤电压传感器传感头的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2004, 12(3): 3-5.
- 7 C H Cheng, K L Cheng, W F Liu. A reactive power sensor based on fiber bragg grating and a piezoelectric transducer[J]. *Microwave and Optical Technology Letter*, 2013, 55(7): 1992-1996.
- 8 R C da Silva Barros, M M Werneck. Optical high-voltage sensor based on fiber Bragg grating and PZT piezoelectric ceramics[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(6): 2118-2125.
- 9 L Martinez-Leon, A Diez, J L Cruz. Frequency-output fiber-optic voltage sensor for high-voltage lines[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2001, 13(9): 996-998.

栏目编辑: 苏岑