

## 基于 FOCT 的 3×3 光纤耦合器相位差测量

肖悦娱,王洪伟,颜锦奎,彭 蕾

(上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室,上海 200072)

**摘 要:**提出了一种基于全光纤电流传感器的 3×3 光纤耦合器相位差测量方法。根据萨格奈克干涉仪的原理得到电流传感器的预测响应与耦合器端口之间相位差及干涉对比度这两个参数的关系。通过比较光纤电流传感器的实际测量响应和不同组参数的预测响应之间的误差平方和建立目标函数,并利用优化算法获得使误差函数最小的一组光纤耦合器相位差和对比度参数。采用该方法对一商用 3×3 光纤耦合器进行了实验研究,实验结果与理论估计基本吻合。

**关键词:** 3×3 光纤耦合器; 全光纤电流互感器; 相位差

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1297-04

## Measurement of phase difference in 3×3 fiber coupler based on FOCT

Xiao Yueyu, Wang Hongwei, Yan Jinkui, Peng Lei

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A method to determine the phase difference in a 3×3 fiber coupler by the all fiber optic current transducer was presented. The theoretical model of the response of an all fiber optic current transducer, according to the principle of the Sagnac interferometer, to the parameters of phase difference of a 3×3 fiber coupler and the interference fringe was established. An objective function was constructed by calculating the sum of square error of the measured response and the predicted response with different couples of unknown parameters. An optimization algorithm was used to obtain the phase difference and the interference fringe. Experimental research was carried out on a commercial 3×3 coupler, and the measurement result agrees well with the theoretical estimation.

**Key words:** 3×3 fiber coupler; all fiber optic current transducer; phase difference

收稿日期:2014-08-10; 修订日期:2014-09-21

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61107075);上海市重点学科建设项目(S30108)

作者简介:肖悦娱(1977-),女,助理研究员,博士,主要从事特种光纤和光纤传感器方面的研究。Email: yyx@staff.shu.edu.cn

## 0 引言

3×3 光纤耦合器是一种重要的光纤器件, 可用于干涉式光纤传感器、光纤光栅传感器等信号的解调<sup>[1-2]</sup>。理想的旋转对称型光纤 3×3 耦合器端口间的相位差为 120°, 实际的光纤耦合器分光比不均匀, 受到温度、偏振等因素的影响, 端口间的相位差会偏离理想的 120°。基于 3×3 耦合器的解调方案依赖于三路输出信号间的相位差, 如果实际的相位差偏离 120°, 仍采用理想情况下的解调算法, 得到的信号将会发生失真<sup>[3]</sup>。因此, 确定输出信号的实际相位偏置, 对利用 3×3 耦合器进行信号解调有重要的意义。

目前对 3×3 光纤耦合器相位差进行实验测量的方法均采用一个 2×2 耦合器和一个 3×3 耦合器构成马赫-增德尔干涉仪或迈克尔逊干涉仪, 通过对干涉仪输出的时域或频域信号进行分析, 以确定耦合器的相位差<sup>[4-6]</sup>。文中提出了一种利用基于萨格奈克干涉仪<sup>[7-8]</sup>的全光纤电流互感器(FOCT)来测量 3×3 光纤耦合器相位差的方法。在光纤干涉仪中, 光纤回路中的偏振态变化会影响干涉信号的对比度<sup>[9]</sup>。电流产生的磁场通过磁光效应<sup>[10]</sup>进行相位调制, 对于光纤光路来说是非接触的, 因此对光路的偏振态影响较小, 干涉仪的输出信号较稳定, 有利于降低测量误差。通过参数优化的测量方法, 同时获得相位差和干涉对比度两参数, 进一步降低了光纤环中偏振态波动的影响。

## 1 理论分析

基于 3×3 光纤耦合器的 FOCT 原理如图 1 所示。ASE 光源发出的光通过光纤圆起偏器(CP)<sup>[11]</sup>变成圆偏振光, 进入 3×3 耦合器后, 被分为顺时针和逆时针传播的两束光通过传感光纤环, 最终到达光电

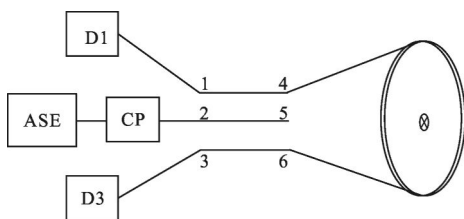


图 1 基于 3×3 耦合器的 FOCT 原理图

Fig.1 Schematic of FOCT based on 3×3 coupler

探测器。忽略光纤的损耗和偏振效应, 则 3×3 耦合器输出和输入光信号的复振幅之间的关系可用传输矩阵  $M_{3 \times 3}$  来描述, 即:

$$[E_4, E_5, E_6]^T = M_{3 \times 3} [E_1, E_2, E_3]^T \quad (1)$$

式中:  $M_{3 \times 3} = [a_{ij} e^{j\phi_{ij}}]$  ( $i=1, 3; j=4, 6$ ),  $a_{ij}$  反映从端口  $i$  到端口  $j$  的光振幅变化,  $\phi_{ij}$  反映相位变化。在磁光效应下, 光顺时针和逆时针通过传感光纤的琼斯矩阵分别为:

$$M_{CW} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{CCW} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为光纤的法拉第旋转角。设入射的圆偏振光为  $E_m$ , 则探测器  $D_1$  接收到的光强为:

$$P_1 = P_0 [a_{24}^2 a_{16}^2 + a_{26}^2 a_{14}^2] + P_0 [2a_{24} a_{16} a_{26} a_{14} \cos(\Delta\varphi + 2\theta)] \quad (4)$$

式中:  $\Delta\varphi = \varphi_{26} + \varphi_{14} - \varphi_{24} - \varphi_{16}$ , 对于理想的旋转对称型 3×3 耦合器,  $\Delta\varphi = 120^\circ$ 。  $P_0 = |E_m|^2$  为入射光光强。

## 2 参数优化测量方法

当被测导线中通入交流电时, 法拉第旋转角为  $\theta(t) = 2VN I_{p0} \sin(\omega t)$ , 其中  $V$  是光纤的韦尔代常数,  $N$  是环绕电流的光纤圈数,  $I_{p0}$  是交流电的幅值。探测器  $D_1$  测得的光强可写为:

$$P_1 = Q_0 \{ 1 + \gamma \cos[2VN I_{p0} \sin(\omega t) + \Delta\varphi] \} \quad (5)$$

式中:  $Q_0 = P_0 [a_{24}^2 a_{16}^2 + a_{26}^2 a_{14}^2]$ ;  $\gamma = 2a_{24} a_{16} a_{26} a_{14} / [a_{24}^2 a_{16}^2 + a_{26}^2 a_{14}^2]$ , 为干涉信号的对比度。将公式(5)进行贝塞尔函数展开可得:

$$P_1 = Q_0 + Q_0 \gamma \cdot \cos\Delta\varphi \cdot J_0(\theta_0) - 2Q_0 \gamma \cdot \sin\Delta\varphi \cdot J_1(\theta_0) \cdot \cos(\omega t) + 2Q_0 \gamma \cdot \cos\Delta\varphi \cdot J_2(\theta_0) \cdot \cos(2\omega t) + \dots \quad (6)$$

式中:  $\theta_0 = 2VN I_{p0}$ 。根据贝塞尔函数的性质, 高次谐波分量的权重随着  $\theta_0$  的增加而增加, 因此对不同的交流信号范围, 交流信号考虑的谐波阶数由其权重决定, 例如, 经估算文中的 FOCT 系统中, 电流范围为 0~2 000 A 时, 3 次以上谐波权重小于 0.05%, 可以不考虑。将直流信号除以交流信号的有效值得:

$$V_s \approx \frac{A}{\sqrt{2} B \gamma} \cdot \frac{1 + \gamma \cos(\Delta\varphi) \cdot J_0(\theta_0)}{\sqrt{\sum_{n=1}^3 f_n(\Delta\varphi) \cdot J_n^2(\theta_0)}} \quad (7)$$

式中:  $f_n(\Delta\varphi) = \cos^2(\Delta\varphi + n\pi/2)$ ;  $A$  和  $B$  为电路参数。  $V_s$

与一次电流之间的关系和耦合器相位差  $\Delta\varphi$  及干涉信号对比度  $\gamma$  有关,与入射光功率无关。假设  $\Delta\varphi$  和  $\gamma$  已知,一次电流的有效值可通过串联在回路中的一个标准电阻两端的电压测量得到,代入公式(7)得到预测信号  $V_s(i, \Delta\varphi, \gamma)(i=1, 2, \dots, N)$ 。测量 FOCT 的实际输出直流电压  $V_{dc}(i)$  和交流电压有效值  $\tilde{V}_{ac}(i)$ , 将他们的比值  $V_{me}(i)$  作为测量信号。比较预测信号  $V_s(i)$  和测量信号  $V_{me}(i)$  的误差平方和:

$$\delta_1(\Delta\varphi, \gamma) = \sum_{i=1}^N |V_s(i, \Delta\varphi, \gamma) - V_{me}(i)|^2 \quad (8)$$

显然使误差平方和  $\delta_1$  最小的一组  $\Delta\varphi_{opt}$  和  $\gamma_{opt}$  即为这两个参数的测量值。

但是通过分析可知,当一次电流的范围较小时,直流信号的变化量较小,预测信号  $V_s(i, \Delta\varphi, \gamma) \propto 1/\{\gamma \cdot g(\Delta\varphi) \cdot I_{p0}(i)\}$ ,  $\gamma$  和  $\Delta\varphi$  这两个参数难以区分,因此在实际的 FOCT 中,一次电流的范围或光纤的圈数受其他因素的影响,不能取到足够大时,可同时比较预测信号  $V_s(i)$  和测量信号  $V_{me}(i)$  中直流分量的曲线形状以提高测量结果的可靠性,即:

$$\delta_2(\Delta\varphi, \gamma) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_{DC}(i, \Delta\varphi, \gamma)}{\bar{V}_{DC}(\Delta\varphi, \gamma)} - \frac{V_{dc}(i)}{\bar{V}_{dc}(i)} \right|^2 \quad (9)$$

式中:  $V_{DC}(i)$  和  $V_{dc}(i)$  分别为预测信号和测量信号中的直流分量;  $\bar{V}_{DC}$  和  $\bar{V}_{dc}$  代表信号的平均值。

### 3 实验结果及讨论

图 2(a) 为测量装置的框图,包括一次电流发生器、萨格奈克干涉光路、检测电路和测量仪器等。图 2(b) 为萨格奈克干涉光路的实物照片。传感光纤为自制特种光纤,韦尔代常数实测为  $V=0.788 \mu\text{rad}/\text{A}$  [12],

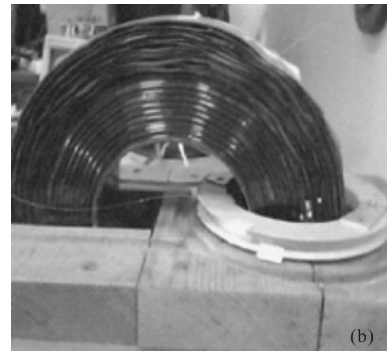
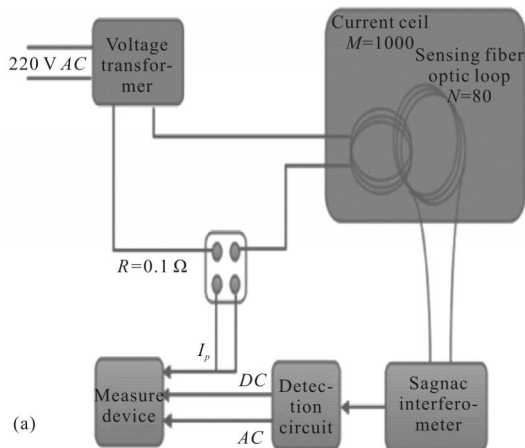


图 2 测量系统框图(a)和萨格奈克干涉仪实物图(b)  
Fig.2 Schematic of measuring system(a) and picture of Sagnac interferometer (b)

光纤圈数为 80 圈,电路参数实测为  $B/A=5$ 。一次电流和 FOCT 输出信号中的交流信号有效值由示波器测量,直流信号用安捷伦数字万用表测量。FOCT 的归一化直流信号与归一化交流信号有效值随一次电流的变化关系如图 3 所示,图 3 中实线为当  $\Delta\varphi=120^\circ$ 、 $\gamma=1$  时的预测信号(归一化指使信号均值相等)。

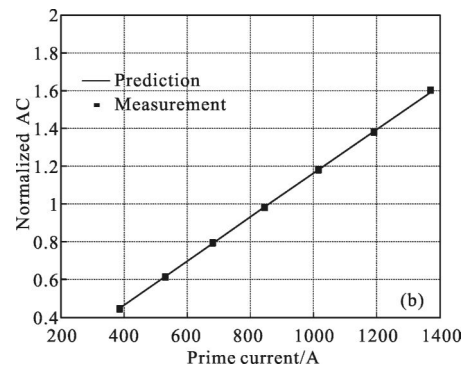
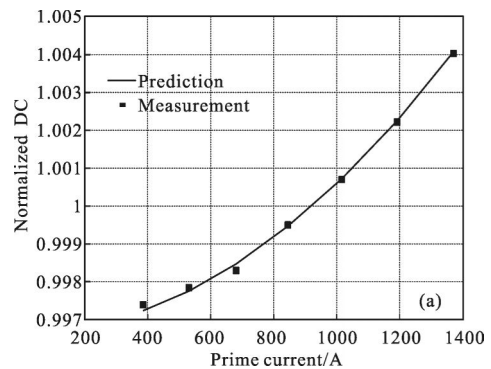


图 3 FOCT 归一化直流信号和交流信号与输入电流的关系  
Fig.3 Normalized DC signals and AC signals with respect to prime currents

以  $y=\delta_1 \times \delta_2$  为目标函数,利用 Matlab 优化工具箱中的区间优化函数  $fminbnd()$ ,取  $\Delta\varphi$  的初值为  $120^\circ$ ,

$\Delta\varphi$  的搜索区间为  $\Delta\varphi \in [96^\circ, 144^\circ]$ , 对对比度  $\gamma$  在区间  $\gamma \in [0.9, 1]$  内的值进行逐一扫描, 经优化得到  $\Delta\varphi_{\text{opt}}=122.2^\circ, \gamma_{\text{opt}}=1$ 。根据该  $3 \times 3$  耦合器的出厂测试数据和参考文献[13]给出的分析方法, 可得到耦合器输出相位的理论估算范围为  $119.80^\circ < \Delta\varphi < 122.69^\circ$ , 与测量结果基本吻合。

最后分析文中方法的测量精度。假设耦合器相位差  $\Delta\varphi=120^\circ$ , 对比度  $\gamma=1$ , 一次电流的有效值范围为  $500 \sim 2\,000\text{ A}$ , 测量随机误差限为最小信号值的  $0.4\%$ , 利用文中提出的方法, 进行 500 次优化, 所得到的相位差  $\Delta\varphi_{\text{opt}}$  的统计分布情况如图 4 实线所示, 统计结果  $\Delta\varphi_{\text{opt}}$  的平均值为  $120.13^\circ$ , 标准差为  $0.2^\circ$ 。在传统测量方法<sup>[4]</sup>中, 假设由于偏振效应、分光比等因素造成的交流信号有效值波动为  $5\%$ <sup>[9]</sup>时, 测得相位差的标准差约为  $0.6^\circ$ , 如图 4 虚线所示。

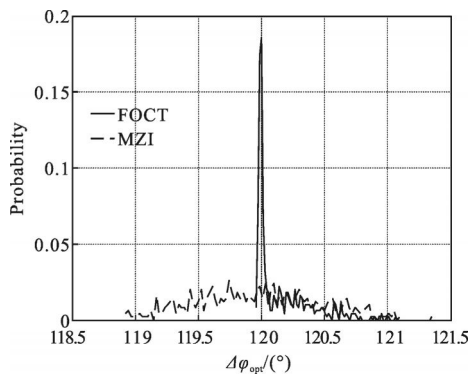


图 4 相位差优化解的概率分布

Fig.4 Probability distribution of optimum phase difference

## 4 结论

文中提出了一种利用基于萨格奈克干涉仪的全光纤电流互感器来测量旋转对称  $3 \times 3$  光纤耦合器端口间相位差的方法。实验测量结果与通过耦合器插入损耗分析的理论估算结果基本吻合, 该方法对基于  $3 \times 3$  光纤耦合器的无源解调技术的研究有一定的现实意义。

## 参考文献:

[1] Koo K P, Dandridge B T A. Passive stabilization scheme for fiber interferometers using  $3 \times 3$  fiber directional coupler [J].

*Appl Phys Lett*, 1982, 41: 616-618.

- [2] Johnson G A, Todd M D, Althouse B L, et al. Fiber bragg grating interrogation and multiplexing with a  $3 \times 3$  coupler and a scanning filter [J]. *J Lightwave Technol*, 2000, 18(8): 1101-1105.
- [3] Todd M D, Seaver M, Bucholtz F. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using  $3 \times 3$  coupler [J]. *Electron Lett*, 2002, 38(15): 784-786.
- [4] Schliep F, Hereth R, Schiffner G. Phase sensitive investigations of  $3 \times 3$  singlemode fiber directional couplers [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(1): 68-70.
- [5] He Jun, Xiao Hao, Feng Lei, et al. Analysis of phase characteristics of fiber michelson interferometer based on a  $3 \times 3$  coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28 (10): 1867-1873. (in Chinese)
- [6] Yi Jiang, Liang P J, Jiang T F. Direct measurement of optical phase difference in a  $3 \times 3$  fiber coupler [J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16: 135-139.
- [7] Yang Yuanhong, Shen Tong, Guo Jinjin. Fiber optic gyroscope technology and application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 626-631. (in Chinese)
- [8] Wang Xin, Song Zhangqi, Zhang Xueliang, et al. Sensing characteristic of optical fiber hydrophone based on sagnac interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (5): 446-449. (in Chinese)
- [9] Chen Desheng, Xiao Ling, Cui Jie, et al. Analysis of  $3 \times 3$  coupler demodulation method for optical fiber interferometer and polarization fading [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(5): 523-525. (in Chinese)
- [10] Wu Yiming, Gao Limin, Chen Liangyi. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)
- [11] Kopp V I, Churikov V M, Singer J, et al. Chiral fiber Gratings [J]. *Science*, 2004, 305: 74-75.
- [12] Zhuang Jing, Xiao Yueyu, Peng Lei, et al. Measurement of verdet constant in fiber optical current transducer using an optimization method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 32(11): 1128003. (in Chinese)
- [13] Zhang Jinghua. Effect of loss on output phase differences of optical fiber couplers [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1999, 6: 17-21. (in Chinese)