

一种降低反射式光纤电流计零漂的方法

周柯江¹, 魏兵¹, 朱敬礼¹, 李宇波^{1,2}

(1. 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学唐仲英传感材料及应用中心, 浙江 杭州 310027)

摘要:提出了一种降低反射式光纤电流计零漂的方法。该方法通过倒向使用铌酸锂 Y 波导集成光学器件取代原系统中的耦合器及起偏器, 提高了系统的偏振消光比。实验结果表明, 倒向使用 Y 波导后, 零漂从 11.1A 降低到 1.58A。本文为推动反射式光纤电流计的实用化提供了理论和实验依据。

关键词:光纤电流计; 零漂; Y 波导; 消光比

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.009

Method to reduce the drift of reflective fiber-optic current sensor

ZHOU Ke-jiang¹, WEI Bing¹, ZHU Jing-li¹, LI Yu-bo^{1,2}

(1. ZJU Department of Information Science & Electronic Engineering, Hangzhou 310027, China;

2. Cyrus Tang Center for Sensor Materials and Applications Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A method to reduce the drift of reflective fiber-optic current sensor (RFOCS) is proposed. By employing Y-waveguide to instead the coupler-polarizer part in the RFOCS system, the extinction ratio of the system is enhanced. The experiment results show that the drift of the RFOCS is reduced from 11.1A to 1.58A after employing Y-waveguide, which provides the theoretical and experimental basis for the practical application of RFOCS.

Key words: fiber optic current sensing; drift; Y waveguide; extinction ratio

1 引言

反射式光纤电流计因安全性高、无磁滞饱和、测量范围大、结构简单等优点, 受到各国研究者的重视。我国发改委今年起准备投资 18 亿支持全光纤电流计的研制及产业化。

目前, 由于实际系统中的光学器件不是完全理想的, 系统存在偏振光之间的串扰, 表现为引入了非法拉第相移的其他非互易相移, 在无电流情况下, 系统输出不为零, 即出现零漂现象。对于零漂大的电流计, 无法判断其输出是漂移还是有较小的电流, 成为产业化过程中亟待解决的问题。因此, 有必要对反射式光纤电流计的零漂进行研究。

本文针对反射式光纤电流传感系统, 首先分析了起偏器消光比对系统标度因子的影响, 接着通过分析系统偏振串扰得到了提高消光比可降低零漂的结论, 进而提出了一种降低反射式光纤电

流计零漂的方法, 并通过实验对该方法的有效性进行了验证。

2 系统原理与结构

反射式光纤电流计系统框图如图 1^[1-3]所示。由光源发出的光经过 3dB 耦合器, 再经过起偏器后变为线偏振光, 后经 45° 熔接点, 一束线偏振光变为两束相互垂直的线偏振光, 分别沿保偏光纤的 X 轴及 Y 轴传播, 经 1/4 波片后两束线偏振光分别转变为左旋圆偏振光及右旋圆偏振光, 当两束圆偏振光通过传感光纤时, 由于电流产生磁场的法拉第效应, 两束光之间产生法拉第相差; 接着两束圆偏振光传输到光纤末端, 由于反射镜的作用, 两束光偏振态发

基金项目:国家自然科学基金(No. 61178065)项目资助。

作者简介:周柯江(1962-), 男, 教授, 主要研究方向为光纤陀螺及光纤传感。

收稿日期:2013-07-24

生翻转并按原光路返回,再次经过传感光纤时,两束光由于法拉第效应而产生的相位差加倍,传至 1/4 波片处圆偏振光转变为两束模式正交的线偏振光,最后携带法拉第相移的光在起偏器处发生干涉。干涉后的光进入光电探测器,得到光强信号,经过信号处理可解调出被测电流大小。

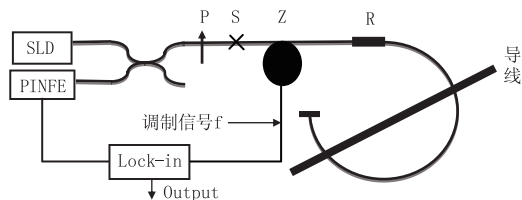


图1 反射式光纤电流计系统框图

3 仿真与分析

3.1 系统建模

在起偏器不理想并假设系统中其他器件均为理想器件的情况下,可用以下琼斯矩阵表示光路中各偏振器件的偏振特性^[4-5]。

(1) 光纤起偏器 P

$$G_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \varepsilon \end{bmatrix}$$

其中, ε 表示电矢量在消光轴和透光轴方向上各自的振幅比,用 $T = -10\log\varepsilon^2$ 表示消光比。

(2) 45°熔接点字母 S

$$G_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(3) 相位调制器 Z

$$G_{Z_{in}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\psi(t-\tau)} \end{bmatrix}$$

$$G_{Z_{out}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\psi(t)} \end{bmatrix}$$

式中, $\psi(t-\tau)$ 表示 $t-\tau$ 时刻相位调制器的调制相位; $\psi(t)$ 表示 t 时刻相位调制的调制相位。

(4) 四分之一波片 R

$$G_{R_{in}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$$

$$G_{R_{out}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$$

(5) Faraday 效应

$$G_{F_{in}} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$G_{F_{out}} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

其中, $\theta = VNI$; V 表示费尔德常数; N 为传感光纤匝数; I 为被测电流。

(6) 末端反射镜 M

$$G_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

输出光矢量的表达式:

$$E_{out} = G_p G_s G_{Z_{out}} G_{R_{out}} G_{F_{out}} G_M G_{F_{in}} G_{R_{in}} G_{Z_{in}} G_s G_p E_{in}$$

其中, E_{in} 为输入光,表示为 $E_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

则输出光强:

$$I_{out} = 0.5 [(1 + \varepsilon^2)^2 + (\varepsilon^2 - 1)^2 \cos(\Delta\varphi + 4\theta)] \quad (1)$$

其中, $\Delta\varphi = \psi(t-\tau) - \psi(t)$, 表示由于相位调制引入的非互易相位差。

对于开环解调方案,解调之后的相位差为:

$$\varphi = \arcsin((1 - \varepsilon^2)^2 \sin(4\theta)) \quad (2)$$

归一化标度因子:

$$\varphi/4F = \arcsin((1 - \varepsilon^2)^2 \sin(4\theta)/4\theta) \quad (3)$$

通过仿真可得归一化标度因子与消光比的关系

如图2所示。

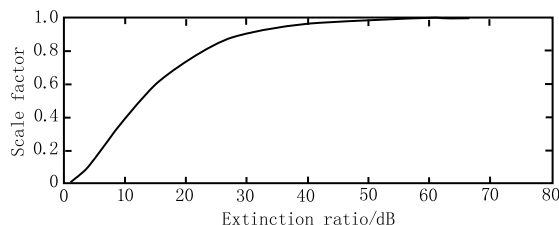


图2 归一化标度因子与消光比的关系

归一化标度因子反映了实际测试结果与理想结果的比例关系。可见,当消光比越大时,归一化标度因子越接近于1,即消光比越大,测试结果越接近理想值。

3.2 系统偏振串扰分析

上述分析未考虑系统中的偏振耦合点,实际的反射式全光纤电流计系统存在偏振串扰问题,我们考虑如图3所示的系统。在距离 45°熔点 l_1 长度之后有一偏振耦合点 Q,耦合点之后的所有器件看作偏振器件 N,耦合点 Q 之后部分,长度记为 l_2 。

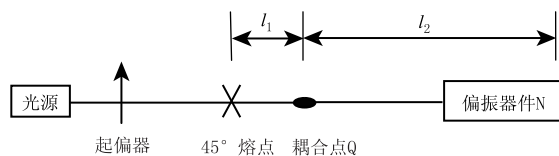


图3 系统偏振耦合模型图

由于起偏器消光比不理想,输入光波经过起偏器后变为沿透光轴方向的光波 A_1 和沿消光轴方向的光波 A_2 ,经过 45°熔点后这两束光波分别分解为偏振方向垂直的光波 A_{11}, A_{12} 和 A_{21}, A_{22} ,这四束光波继续传播,经过偏振耦合点 Q 及偏振器件 N。为了简

化分析过程,我们只考虑光波第一次经过耦合点 Q 时发生偏振耦合的情况,而不考虑返回过程的偏振耦合。这样当光波再次返回 45°熔点时可分为三类,分别是未发生任何耦合但偏振态翻转的主光波对 A_{11} , A_{12} 和 A_{21} , A_{22} , 由光波 A_{11} , A_{12} 分别耦合到正交偏振轴后的耦合光波对 A_{112} , A_{121} , 由光波 A_{21} , A_{22} 分别耦合到正交偏振轴后的耦合光波对 A_{212} , A_{221} , 这 4 对光波经过 45°熔点后分解为 16 束光波如图 4 所示。

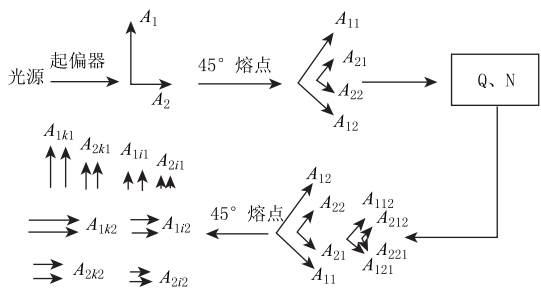


图 4 系统偏振态演变图

所有光波到达起偏器处干涉情况如下

(1) 由主光波对 A_{11} , A_{12} 及 A_{21} , A_{22} 分解得到的光波对 A_{1k1} , A_{2k1} 及 A_{1k2} , A_{2k2} ($k = 1, 2$), 产生主干涉信号, 干涉相位差仅为传感头部分引入的非互易相位差。

(2) 耦合光波对 A_{112} , A_{121} 因经历了一次偏振耦合, 经整个传输过程后其光程不相同, 这两束光的相移分别为

$$\varphi_{112} = \beta_x l_1 + \beta_y l_2 + \beta_x l_2 + \beta_x l_1 = \beta_x (l_2 + 2l_1) + \beta_y l_2 \quad (4)$$

$$\varphi_{121} = \beta_y l_1 + \beta_x l_2 + \beta_y l_2 + \beta_y l_1 = \beta_y (l_2 + 2l_1) + \beta_x l_2 \quad (5)$$

式中, β_x 为保偏光纤 X 偏振轴传播常数, β_y 为保偏光纤 Y 偏振轴传播常数。两束光波之间的非互易相位差表示为:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_{112} - \varphi_{121} = 2(\beta_x - \beta_y)l_1 \quad (6)$$

由公式(6)知, 耦合点距离 45°熔点越近, 产生的非互易相差就越小。光波 A_{112} , A_{121} 经过 45°熔点后分解为 A_{1i1} , A_{1i2} ($i = 12, 21$), 光波 A_{1i1} 与 A_{1k1} 偏振方向相同, A_{1i2} 与 A_{1k2} 偏振方向相同, 它们之间发生干涉, 总的相位误差正比于 ε [6]。同理, 耦合光波 A_{212} , A_{221} 经过 45°熔点, 分解后的光波的干涉及它们与对应主波干涉所引入的相位误差也正比于 ε 。

4 实验测试与分析

由以上分析可知, 当反射式光纤电流计系统的起偏器消光 T 越大时, 系统归一化影响因子越趋于 1, 且引入的相位误差越小, 即系统的零漂降低, 稳定性提高。目前, 光纤起偏器的消光比在 25 dB 左右,

难以满足高精度光纤电流计的要求。铌酸锂 Y 波导集成光学器件具有低损耗、低电压、单偏振、宽工作温度范围、高稳定性等优点 [7], 尤其是其偏振消光比可达到 60 dB 以上, 被广泛应用于光纤陀螺系统中。该器件制作工艺成熟, 为此, 将其应用于光纤电流计系统中, 提高系统性能。

为了验证提高消光比可以降低零漂, 提高系统稳定性, 搭建了两套系统, 分别如图 1 和图 5 所示。图 5 系统将 Y 波导集成光学器件倒向使用, 三个端口分别与 SLD, PINFET 及相位调制器熔接, 其余部分与原系统(图 1)一致。

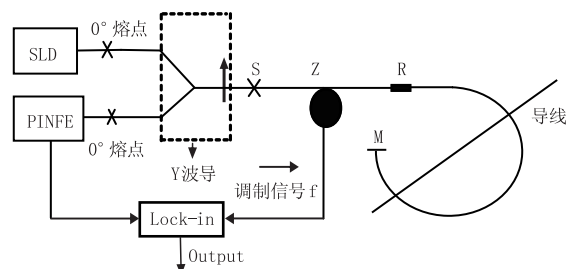


图 5 倒向使用 Y 波导结构系统框图

实验过程中, 使用光源为 1310 nm SLD, PINFET 型号为 MFT915, 锁相放大器为 SR830, 通过数据采集卡分别采集两套系统的零漂数据, 每系统测试 3 h, 图 6 是实验得到的长期零漂测试结果, 通过计算实验数据可得, 系统零漂从 11.1 A 降到 1.58 A, 利用 Y 波导结构明显降低了零漂, 提高了反射式光纤电流计输出稳定性。这与理论分析是一致的。

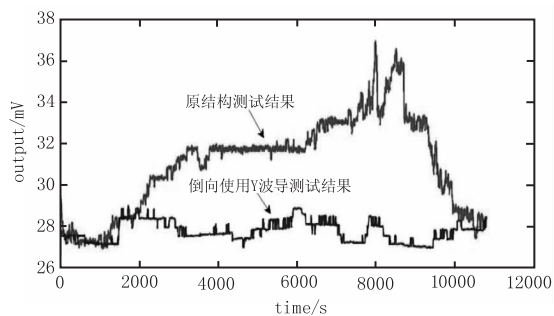


图 6 长期零漂测试结果

5 结论

针对反射式光纤电流计的零漂问题, 首先推导了反射式光纤电流计系统起偏器消光比与归一化标度因子的关系式, 接着分析了消光比对偏振串扰的影响, 在此基础上得出了提高消光比可减低零漂, 改善系统稳定性的结论。最后搭建了两种结构的实验系统, 通过实验发现, 倒向使用 Y 波导后, 系统零漂从 11.1 A 降低到 1.58 A, 该结果有力验证了理论的正确性。

参考文献:

- [1] Jiang Yi. Advanced fiber optical sensing technology[M]. Beijing: Science Press, 2009: 226 - 230. (in Chinese)
江毅. 高级光纤传感[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 226 - 230.
- [2] Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang, et al. A new all digital closed-loop fiber optic current transformer [J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30 (16): 77 - 80. (in Chinese)
王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (16): 77 - 80.
- [3] K Bohert, P Gabus, J Nehring. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Light wave Technology, 2002, 20(2): 267 - 276.
- [4] S X Short, U de Arruda, A Tselikov, et al. Elimination of birefringence induced scale factor errors in the in-line sagnac interferometer current sensor[J]. Light wave Technology, 1998, 16(10): 1844 - 1850.
- [5] G Frosio, R Dandliker. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor[J]. Appl. Opt, 1994, 33(25): 6111 - 6122.
- [6] Wang Wei. Interferometric fiber optic gyroscope technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010: 69 - 86. (in Chinese)
王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 69 - 86.
- [7] Wu Jijiang, Gao Jinxia. A Y-branch waveguide with a tapered multimode transitional section[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(2): 173 - 176. (in Chinese)
武继江, 高金霞. 一种带有锥形多模过渡区的 Y 分支波导[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 173 - 176.