

文章编号: 0258-7025(2006)06-0791-04

激光型光纤电流传感器频率的零漂

钱景仁, 刘 方, 苏 觉

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系光纤实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要 激光型光纤电流传感器输出的读数是频率之差。首先从理论上分析了无外加电流时频差在零频附近的漂动, 分析了法拉第旋转镜(FRM)旋转角偏离 90° 引起的频率零漂, 并指出这是零漂随温度变化的主要原因, 提出了克服零漂的具体措施。实验证明了上述分析的正确性和这些措施的有效性, 使这种光纤电流传感器在实用化道路上前进了关键的一步。

关键词 光电子学; 零漂; 法拉第旋转镜; 光纤电流传感器; 激光器

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Investigation of Frequency Null-Drift in Polarimetric Fiber Laser Current Sensors

QIAN Jing-ren, LIU Fang, SU Jue

(Optical Fiber Laboratory, Department of Electronics Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract The advantage of the polarimetric fiber laser current sensors over other types of current sensors is direct readout of electrical current, measured as a difference of two beat-frequencies. In this paper, frequency null-drift caused by the deviation of the polarization rotation angle in the Faraday rotation mirror (FRM) from 90° is analyzed, and that it is the main source of instability to variation of temperature is emphasized. Experimental results of this type of current sensors confirm the theoretical predicts and indicate that the suggested method to reduce the frequency null-drift is effective.

Key words optoelectronics; null-drift; Faraday rotation mirror; optical fiber current sensor; laser

1 引 言

随着我国三峡、龙滩等大电站的建设,西电东送的输电容量及距离不断地增加,电压高达 750 kV 的输电线已开通,人们对配电可靠性、电压和电流测量精度提出了更高的要求。目前,包括我国在内的世界各国高压线上的电流测量仍然依靠传统的昂贵复杂、大体积的电磁式电流互感器。20 多年来,随着光电子技术的快速发展,人们利用光纤低耗的传输特性和本身高绝缘性的优势,研究开发出多种光电型的电流互感器,或称光纤电流传感器^[1~3]。J. S. Park 等^[4,5]提出的激光型光纤电流传感系统输出的是激光,检测的是激光频率差,不易在传输过程中受

干扰而造成误差。

另外一个优点是线性变化的动态范围较宽。但是它与普通电流传感器一样存在着温度敏感性。这种传感系统的激光部分包括了一个法拉第旋转镜(FRM),它的引入可以使光腔内光纤模式间互易的耦合互相抵消,从而使光纤内的双折射不起作用。同时,它又保证输出模式是圆偏振的,从而使传感光纤处于发挥磁光效应的最佳状态^[4,5],这些都保证了该传感系统的温度稳定性。但是另一方面,法拉第旋转镜的引入本身却带来了温度的不稳定性。法拉第旋转镜旋转角度是随温度改变的,只能在一个特定的温度上偏振的旋转是正确的 90° 。旋转角偏离 90° 将造成频差测量的严重误差,表现为在无外

收稿日期:2005-11-24

基金项目:国家自然科学基金(60177024)资助项目。

作者简介:钱景仁(1935—),男,江苏省吴江市人,中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授,博士生导师,主要从事光纤有源和无源器件的研究。E-mail:jrqian@ustc.edu.cn

加电流时频差在零点附近的漂移,即零漂。

本文对上述零漂作了理论分析,并提出了解决的方案,即通过改变非传感光纤中的线双折射,有效抑制系统的温度效应。

2 理论分析

激光型光纤电流传感系统的结构如图 1 所示。

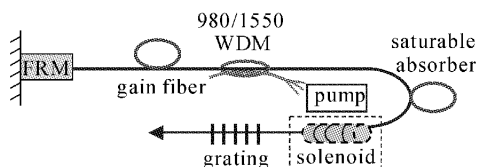


图 1 传感系统结构图

Fig. 1 Experimental configuration for the sensor

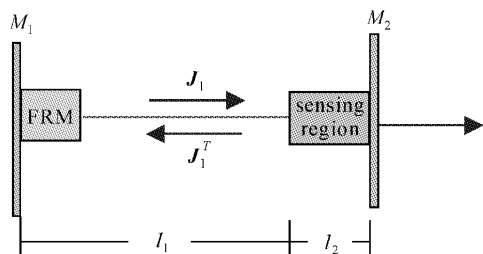


图 2 激光腔结构示意图

Fig. 2 Schematic of the fiber laser cavity

图 2 表示法拉第 90° 旋转镜和光纤光栅组成的激光腔示意图。其中 M_2 代表光纤光栅。该腔用有源光纤作增益介质。由于法拉第旋转镜的存在,腔的两个本征模式为稳定工作的左旋及右旋圆偏振态,不受外界温度影响^[5]。在理想的法拉第旋转镜情况下,如又无外加电流在光纤中产生轴向磁场,则该光腔相邻两本征频率之差恰为自由频谱宽度(FSR)的一半^[5]。下面分析当外加电流存在时,两相邻本征频率是如何改变的。

采用琼斯矩阵法分析谐振腔,首先计算腔内往返一周的琼斯矩阵,得出特征方程,由此确定了光纤中传播的两个正交本征模式:特征值对应两个谐振频率,特征向量表示两种本征偏振态。

先研究理想法拉第旋转镜情况,此时法拉第旋转镜的琼斯矩阵为(右边坐标系,右旋 90°)

$$\mathbf{J}_{\text{FRM}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

图 2 中传感光纤长度为 l_2 ,自身线双折射为 b_2 ,扭率为 τ ,外加电流诱发的圆双折射为 α_H ,光在传感光纤中向左和向右的琼斯矩阵分别为(下标“+”,

“-”分别对应光纤向右和向左传输时的参数和传输矩阵,下同)

$$\mathbf{J}_{2+} = \begin{bmatrix} A_+ & -B_+^* \\ B_+ & A_+^* \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_{2-} = \begin{bmatrix} A_- & -B_-^* \\ B_- & A_-^* \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} A_{\pm} = \cos g_{\pm} l_2 \cos \tau l_2 + \text{sing}_{\pm} l_2 \sin \tau l_2 \sin 2\varphi_{\pm} - \\ \quad j \text{sing}_{\pm} l_2 \cos \tau l_2 \cos 2\varphi_{\pm} \\ B_{\pm} = \pm \cos g_{\pm} l_2 \sin \tau l_2 \mp \text{sing}_{\pm} l_2 \cos \tau l_2 \sin 2\varphi_{\pm} \mp \\ \quad j \text{sing}_{\pm} l_2 \sin \tau l_2 \cos 2\varphi_{\pm} \end{cases}$$

$$\varphi_{\pm} = \frac{1}{2} \arctan \frac{2(\tau \mp K_{2\pm})}{b_2},$$

$$g_{\pm} = \left[\left(\frac{b_2}{2} \right)^2 + (\tau \mp K_{2\pm})^2 \right]^{1/2},$$

$$K_{2-} = \alpha_H / 2 - 0.06\tau,$$

$$K_{2+} = \alpha_H / 2 + 0.06\tau, \quad (3)$$

$K_{2\pm}$ 为光纤中的圆双折射^[6]。 α_H 可表示为

$$\alpha_H l_2 = 2VI_0 N, \quad (4)$$

即 α_H 与电流 I_0 成正比。其中 V 为 Verdet 常数, N 为线圈的匝数。图 2 中 \mathbf{J}_1 为非传感区 l_1 段光纤(包括有源光纤)的正向传输琼斯矩阵,由于 l_1 段光纤是互易的,所以反向传输的琼斯矩阵表示为 \mathbf{J}_1^T ,上标 T 表示矩阵的转置。

这样光传播一周的琼斯矩阵为

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}_2 \mathbf{J}_1 \mathbf{J}_{\text{FRM}} \mathbf{J}_1^T \mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} B^* A_v + AB_v & -B^* B_v^* + AA_v^* \\ -A^* B_v + BB_v & A^* B_v^* + BA_v^* \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由(5)式右边矩阵的行列式特征方程可得特征值 λ_1 和 λ_2 满足方程

$$\lambda_1 + \lambda_2 = B^* A_v + AB_v + A^* B_v^* + BA_v^* = 2W,$$

$$\text{和} \quad \lambda_1 \lambda_2 = 1, \quad (6)$$

其中

$$W = \cos g_+ l_2 \text{sing}_- l_2 \sin 2\varphi_- - \text{sing}_+ l_2 \cos g_- l_2 \sin 2\varphi_+ + \text{sing}_+ l_2 \text{sing}_- l_2 \sin 2\tau l_2 \cos 2\varphi_+ \cos 2\varphi_-, \quad (7)$$

在无外加电流时, $\alpha_H = 0$,由(6),(7)式可得

$$\lambda_1 = e^{j\frac{\pi}{2}}, \quad \lambda_2 = e^{-j\frac{\pi}{2}}, \quad (8)$$

加入电流后,两本征模式之间产生 ϕ 的附加相移,所以

$$\lambda_1 = e^{j\frac{\pi}{2} + \phi}, \quad \lambda_2 = e^{-j\frac{\pi}{2} + \phi}, \quad (9)$$

由(6)~(9)式得

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 2 \sin \frac{\phi}{2} = 2W, \quad (10)$$

其相应的频率偏移如图 3 所示,其中 f_{FSR} 为自由频谱宽度, SOP1 和 SOP2 分别代表光腔中的两个本征偏振态。

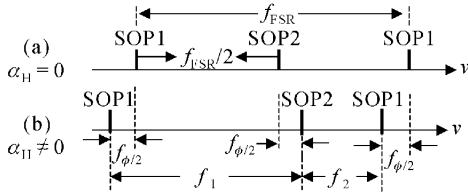


图 3 纵模分布变化图

Fig. 3 Variation of longitudinal mode spacings

由图 3 可知,与 2ϕ 相应的频移 f_p 由拍频 f_1 和 f_2 之差确定,即

$$f_p = f_1 - f_2 = 4f_{\phi/2} = (c/2nL)(\phi/\pi), \quad (11)$$

其中 c 为真空中的光速, n 为光纤的等效折射率, $L = l_1 + l_2$ 。

通常在激光器内传感光纤短且平直满足 $b_2 l_2 \ll 1$ 及 $\tau = 0$, 此时,由(7),(10)式得

$$f_p = \frac{c}{n\pi L}(\alpha_H l_2), \quad (12)$$

(12)式表明 f_p 与 $\alpha_H l_2$ 之间是线性关系,并且具有较宽的动态范围(即 $\alpha_H l_2$ 可在 0 至 $\pi/2$ 之间变化)。当然由于线双折射的存在 $b_2 l_2 \neq 0$, 所以当 $\alpha_H l_2$ 在 0 至 $\pi/2$ 的范围内变化时, f_p 与 $\alpha_H l_2$ 之间的关系会与(12)式的线性关系有所偏差。对一个确定的 $b_2 l_2$ 的值,当 $\alpha_H l_2 = \pi/2$ 时, f_p 的偏差最大。若 $b_2 l_2$ 分别取 0.01 rad , 0.05 rad , 0.1 rad , 对应的 f_p 的最大偏差分别为 0.4% , 2% , 4% 。当 $b_2 l_2 < 0.003 \text{ rad}$ 时,最大偏差小于 0.1% , 通常由于传感光纤很短,所以 f_p 可以很好地满足(12)式,具有良好的线性。若要取得更好的线性度,只需把传感光纤部分稍加扭转。

法拉第旋转镜的旋转角不仅与波长有关,而且随温度变化。当系统温度随环境温度改变时,偏离会对测量产生严重的影响。设 θ 为偏差角(右旋为正),则旋转角为 $(90^\circ - \theta)$, 此时法拉第旋转镜的琼斯矩阵为

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \end{pmatrix}. \quad (13)$$

先研究 θ 引起的零漂 f_0 。此时无外加电流,即 $\alpha_H = 0$ 。用(13)式替代(1)式,采用推导(12)式相同的方法,得零漂 f_0 (假定 $\theta \ll 1$)

$$f_0 = \frac{c}{n\pi L}[\arcsin(\cos b_1 l_1 \cdot \sin\theta)], \quad (14)$$

其中 b_1 为 l_1 光纤固有的线双折射。由(14)式可见,当法拉第旋转镜旋转偏离 90° 时,谐振腔内光纤的线双折射的影响不会完全自补偿而出现零漂,又因 θ 是温度敏感的(约 $0.09^\circ/\text{C}$),因此零漂随温度变化。而这种变化又与腔内线双折射 $b_1 l_1$ 有关,当 $\cos b_1 l_1 = 1$, θ 引起的最大零漂为

$$f_{0\text{max}} = \frac{c}{n\pi L}\theta = \frac{2}{\pi} \cdot f_{\text{max}} \cdot \theta, \quad (15)$$

若在线圈中通过被测电流,用相同的方法可得

$$f_p' = \frac{c}{n\pi L}(\arcsin W'), \quad (16)$$

在 $b_2 l_2 \ll 1$ 的条件下,在 θ 的一次近似下

$$W' = W + \cos b_1 l_1 \cdot \sin\theta.$$

$$\left[\cos^2 gl_2 - \frac{\sin^2 gl_2}{(gl_2)^2} \cdot \left(\frac{\alpha_H l_2}{2} \right)^2 \right], \quad (17)$$

其中 W 可用(7)式表示。将(17)式代入(16)式,在 θ 的一次近似下,可得

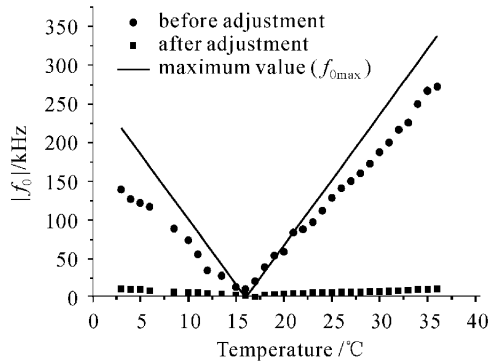
$$f_p = f_{p0} + f_0, \quad (18)$$

其中 f_{p0} (为不考虑法拉第偏角引起的 f_0 时的 f_p)和 f_0 分别用(12)和(14)式表示。

由(18)式可见,零漂 f_0 似乎相当于叠加在 f_{p0} 上的偏置,可以预先测量而消除。实际上 f_0 随环境温度变化极快,相当于一严重的噪声源。

现在用具体数值来估计零漂的严重性。法拉第旋转镜中的晶体是温度敏感元件,导致其旋转角随温度而改变。本实验中采用的法拉第旋转镜产品厂商给出的转角偏转温度系数为 $0.09^\circ/\text{C}$, 由式(15),用本实验中激光腔自由频谱宽度为 14.85 MHz 的数据,可以算出 $f_{0\text{max}}$ 随温度的变化约为 $15 \text{ kHz}/\text{C}$, 而该电流传感器本身的灵敏度由(12)式可知约为几十赫兹每安匝,相比之下,零漂远大于被测电流引起的 f_p 。除非线圈上的电流大于 $10^5 \text{ A} \cdot \text{N}$, 否则 f_p 会淹没在 f_0 的噪声中。由此可见,零漂是激光型电流传感器温度效应的最主要因素,把零漂减至最小是这一类电流传感器实用化的首要步骤。

为了使 f_0 在工作温度范围内减至最小,由(14)式和(18)式可知,要求 θ 和 $\cos b_1 l_1$ 尽可能同时小。法拉第旋转镜旋转角是随工作波长和温度而改变的,通常可以选择激光器的波长使法拉第旋转镜在某一工作温度上 $\theta = 0$, 但当温度稍有偏离,零漂迅速上升(见图 4)。因此需要同时调整谐振腔内光纤(包括铒光纤)弯曲的曲率半径,调整到 $\cos b_1 l_1 \cong 0$, 且尽量使 b_1 随温度变化较慢,从而实现在整个工作温度范围内减小零漂。

图 4 f_0 随温度变化图Fig. 4 Experimental results of the null-drift f_0 versus temperature

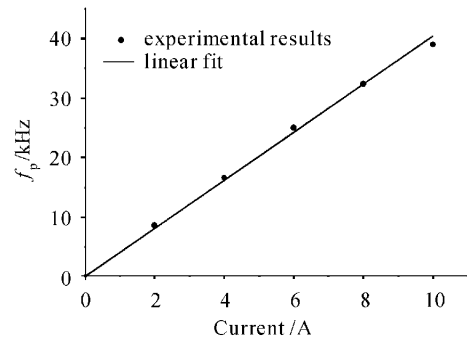
3 减小零漂的实验研究

实验装置如图 1 所示,采用 980 nm 的激光器作为抽运源,约 2 m 的低掺杂铒光纤作为饱和吸收体,约 1 m 的高掺杂的铒光纤作为增益介质,激光腔内一端放置法拉第旋转镜,另一端为光栅,通电线圈内约 20 cm 的光纤作为传感光纤,线圈匝数约为 150。光栅中心波长为 1549.942 nm。其中未抽运的掺铒光纤,可利用空间烧孔效应形成饱和吸收,进行窄带滤波,从而达到压窄带宽,控制模式数量的目的,并且其对优势模的追迹作用,也有利于提高系统的稳定性。

采用以上系统,在实验中得到了稳定的如图 2 所示的三纵模输出。使用 TDS-7104 型示波器的频谱测量装置测量输出三纵模的拍频,由 $f_0 = f_1 - f_2$ 得到频率零漂(此时无外加电流)。同时对法拉第旋转镜进行温度控制,测得在变温条件下, $|f_0|$ 对温度的实验数据如图 4。由于在测量中无法分辨 f_0 的正负,所以都取 f_0 的绝对值。

图 4 中三种数据变化的斜率分别为 15 kHz/°C, 12 kHz/°C 及小于 0.6 kHz/°C。可见,光纤调整后频率零漂明显减小,从而显著地提高了测量电流的精度。

在调整光腔内光纤的曲率半径,使 $\cos b_1 l_1$ 保持近似等于 0 后,在线圈中通入直流电,测得 $|f_0|$ 与 I

图 5 f_p 随电流的变化图Fig. 5 Experimental results of the shift of f_p versus current

的变化关系如图 5 所示。线性系数为 3.05 kHz/A。线性度很好,看不到随温度变化的频率零漂对它的影响。

4 结 论

理论分析和实验结果都证明激光型光纤电流传感器中法拉第旋转镜旋转偏离 90° 是该传感器随温度零漂的主要原因,其数值可达 10 kHz/°C 以上,严重影响该传感器的实用化。采用调整光腔内光纤双折射和合理设计激光器参数可降低零漂一个量级以上。

参 考 文 献

- 1 A. Papp, H. Harms. Magneto optical current transformer [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(22):3729~3745
- 2 J. R. Qian, L. Li. Current sensors using highly-birefringent bow-tie fibers [C]. *Proc. of OFS'86*, TOKYO, 1986. 62~65
- 3 K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring *et al.*. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2):267~275
- 4 J. S. Park, S. H. Yun, S. J. Ahn *et al.*. Polarization- and frequency-stable fiber laser for magnetic-field sensing [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(14):1029~1031
- 5 J. S. Park, W. J. Lee, S. H. Yun *et al.*. Dual-polarization single-mode fiber laser [C]. Tuesday Morning/CLEO'97, 1997. 81
- 6 R. Ulrich, A. Simon. Polarization optics of twisted single-mode fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(13):2241~2251