

# 干涉式光纤陀螺中 Shupe 效应与 Sagnac 效应的分离

周柯江, 胡国栋, 刘树俊, 胡科可  
(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**热引入的零偏漂移即 Shupe 效应是提高光纤陀螺精度面临的重大难题。基于 Shupe 效应与光纤陀螺的 Sagnac 效应具有本质的不同特性, 即 Sagnac 效应引起的相移只与几何尺寸有关, 而与光传播的介质特性无关, 提出了一种新型的不受温度梯度影响的光纤陀螺。利用两个偏振模式在光纤陀螺环中交替或同时传播可以将 Sagnac 相移与 Shupe 误差相移分离开来, 基于两种偏振模式分时传播实验, 初步验证了该理论的可行性。并且提出了一种新型的偏振交替干涉式光纤陀螺模型以改进其性能。

**关键词:** Shupe 效应; Sagnac 效应; 干涉式光纤陀螺

**中图分类号:** TN253; V241.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.017

## Separation of Shupe effect and Sagnac effect in interferometric fiber-optic gyroscope

ZHOU Ke-jiang, HU Guo-dong, LIU Shu-jun, HU Ke-ke

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Thermally-induced bias drift, i. e. Shupe effect is one of the challenges that improve the accuracy of interferometric fiber-optic gyroscope (IFOG). A thermally-bias-free scheme for an IFOG is presented, which is based on the different characteristic between the Sagnac effect and the Shupe effect that the Sagnac phase is related only to geometric layout of the sensing loop and is independent of the medium's characteristic of light propagation. This paper exploits light propagations along two eigen-axes of the polarization maintaining fiber of IFOG to separate the rotation phase from the error phase. An experiment is designed based on two polarization mode propagates alternately in the sensing loop, and the feasibility of the theory is preliminarily verified. Meanwhile a detection scheme is also proposed that polarization mode changes alternately to improve the thermal performance of fiber optic gyroscope.

**Key words:** Shupe effect; Sagnac effect; interferometric fiber-optic gyroscope

### 1 引言

干涉式光纤陀螺(IFOG)是一种基于 Sagnac 效应用来测量干涉光路之间相位差变化的光纤干涉仪。由于旋转会使同一个光纤传感环中两束方向相反的光产生相位差, 干涉式光纤陀螺就是通过测量顺时针和逆时针传播的两束光之间的干涉, 从而得到正比于旋转角速度的 Sagnac 相移。在高精度干涉式光纤陀螺仪中, 偏置稳定性是最重要的参数。当寄生偏振误差<sup>[1]</sup>被有效抑制后, 最主要的误差来自于光纤环周围温度的变化。这个现象是 Shupe 首

先描述的<sup>[2]</sup>, 被称为 Shupe 效应。为了尽可能抑制 Shupe 效应, 一般多采用四极对称绕环法<sup>[3]</sup>和热屏蔽法。为了修正误差, 人们已经提出了许多热模型<sup>[4]</sup>。然而, 在现实世界中, 由于光纤环周围随时间变化的温度场不可能被精确描述, 所以干涉式光纤陀螺仪的输出总是 Sagnac 相移和 Shupe 误差相移的和。

作者简介: 周柯江(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤陀螺, 光纤光源和微弱信号检测的研究工作。E-mail: ekjzhou@zju.edu.cn

收稿日期: 2013-12-03

## 2 基本原理

在1999年,就注意到Sagnac相移与Shupe效应的根本区别:Sagnac相移只与光路的几何尺寸有关,而与光传播的介质特性无关<sup>[6-7]</sup>;而Shupe效应与光传播的介质特性有关。可以利用光纤中的两个模式光在环中交替或者同时传播来将Sagnac相移与Shupe误差相移分离开来,具体方案可以有多种。先假设可以得到两个测量值 $\phi_x$ 和 $\phi_y$ ,这两个值分别对应于两个光纤传播模式 $x$ 模式和 $y$ 模式输出。那么可以得到:

$$\phi_i = \phi_s + \phi_{ei} \quad (1)$$

上式中 $i = x, y$ 。

对应于 $i$ 模式的Shupe误差可以表示为<sup>[2]</sup>:

$$\phi_{ei}(t) = \left( \frac{\partial \beta_i}{\partial T} + \alpha \beta_i \right) v_i^{-1} \int \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} (L - 2z) dz \quad (2)$$

这里 $T(z, t)$ 是指环上坐标为 $z$ 处在时间为 $t$ 时的温度; $L$ 是环的长度; $\alpha$ 是线性膨胀系数; $\beta_i, v_i$ 分别是 $i$ 模式的传播常数和群速度。对于二氧化硅制成的光纤,由于式(2)中第一个括号内的第二项比前一项小一个数量级,可以将式(2)简化为:

$$\phi_{ei} = \frac{2\pi}{\lambda c} \frac{\partial n_i}{\partial T} \int \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} (L - 2z) dz \quad (3)$$

式中, $n_i$ 是有效折射率; $\lambda$ 为光源波长; $c$ 为光在真空中的速度。由式(1)和式(3)可以推出精确的转速为:

$$\phi_s = \phi_x - \left( \frac{\partial n_x}{\partial T} n_x - \frac{\partial n_y}{\partial T} n_y \right)^{-1} \frac{\partial n_x}{\partial T} n_x (\phi_x - \phi_y) \quad (4)$$

$$\phi_s = \phi_y - \left( \frac{\partial n_y}{\partial T} n_y - \frac{\partial n_x}{\partial T} n_x \right)^{-1} \frac{\partial n_y}{\partial T} n_y (\phi_y - \phi_x) \quad (5)$$

也可以由式(4)和式(5)相加推导出双倍灵敏度检测方案:

$$2\phi_s = \phi_x + \phi_y - \left( \frac{\partial n_x}{\partial T} n_x - \frac{\partial n_y}{\partial T} n_y \right)^{-1}$$

$$\left( \frac{\partial n_x}{\partial T} n_x + \frac{\partial n_y}{\partial T} n_y \right) (\phi_x - \phi_y) \quad (6)$$

对于上面的思想,还有几点要说明。在应用于工程时,建议应用两个正交且具有高度双折射偏振模的保偏光纤(PMF)。保偏光纤的温度灵敏度已经有报道<sup>[8]</sup>:单位长度蝴蝶结型保偏光纤当温度变化时相对双折射相位改变为 $7.35 \text{ rad/m/}^\circ\text{C}$ ,熊猫型为 $7.57 \text{ rad/m/}^\circ\text{C}$ 。在波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 时,从 $-20^\circ\text{C}$ 到 $100^\circ\text{C}$ 对应的 $\frac{\partial(n_x - n_y)}{\partial T} = 7.40 \times 10^{-7}$ ,

$7.63 \times 10^{-7}$ 。因为 $n_i$ 以及 $\partial n_i / \partial T$ 接近硅材料折射率 $n = 1.46$ ,并且 $\partial n / \partial T = 9.7 \times 10^{-6}$ ,所以可以估计出 $\left( \frac{\partial n_x}{\partial T} n_x - \frac{\partial n_y}{\partial T} n_y \right)^{-1} \frac{\partial n_i}{\partial T} n_i$ 对于这两种光纤大约为10的量级。

## 3 实验的初步验证<sup>[9]</sup>

为了初步验证以上思想的可行性,同时考虑到易操作性,采用在相同变温条件下,分时测量在两个不同模式传播时光纤陀螺输出,然后再根据上面推导的理论对Sagnac相移进行修正。

实验原理图如图1所示,与普通陀螺类似,采用锁相检测技术。光纤环采用500 m保偏光纤绕在最大外径为98 mm的环形铝支架上,为了增强Shupe效应,光纤环不加盖子,直接裸露在温箱中。陀螺的其他部分放在温箱之外,环与 $\text{LiNbO}_3$ 的两个输出端通过保偏跳线由法兰盘相连。将两个法兰盘上的螺丝拆除,每个法兰盘的分成可以相对转动的两半,利用旋转法兰盘分别至 $0^\circ$ 或者 $90^\circ$ 来实现两个偏振模式在环中分时传输。实验中我们采取同样的温控程序控制温度变化趋势,其趋势如图2所示。第一次实验采用两个法兰盘都置为 $0^\circ$ ,将 $\text{LiNbO}_3$ 的两个输出端同光纤环相连,从而实现 $x$ 模式光的传输,得到数据如图3所示。第二次实验,我们将法兰盘置为两个 $90^\circ$ ,将 $\text{LiNbO}_3$ 输出的 $x$ 模式光转换为 $y$ 模式的光在光纤环中传输,得到数据如图4所示。图中出现的尖峰、毛刺是由于尾纤的抖动产生的。

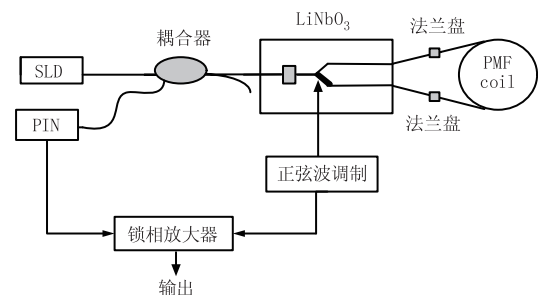


图1 利用法兰盘实现不同模式光在光纤陀螺中传输

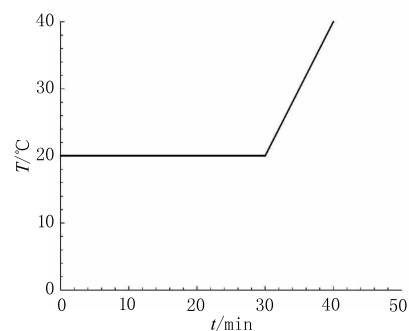


图2 温度变化趋势图

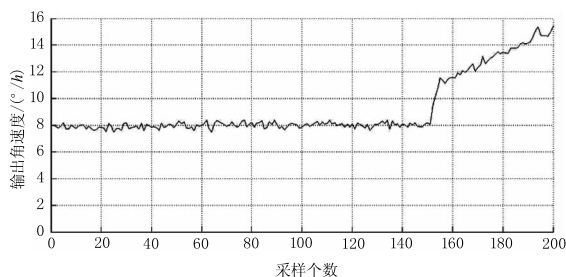


图3 x 模式光传输时陀螺输出

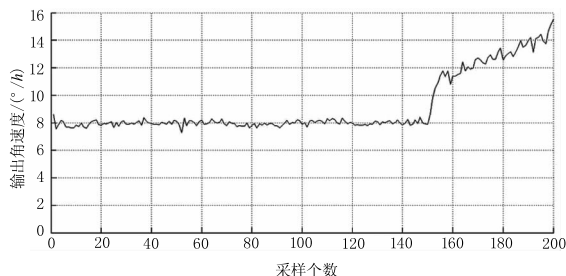


图4 y 模式光传输时陀螺输出

利用上述理论,对  $\phi_x$  和  $\phi_y$  进行修正,得到数据如图 5 所示。

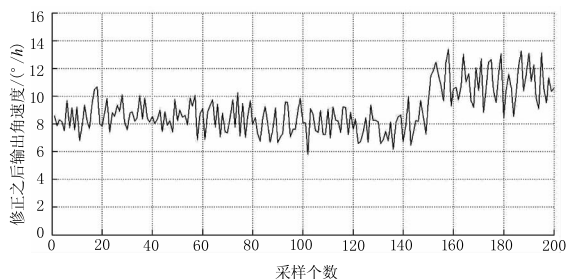


图5 修正之后的陀螺输出

考虑到实验是在分时的情况下进行的,而且降温过程中尾纤的抖动也比较厉害,这在本实验中不属于 Shupe 效应。对 20℃ 到 40℃ 的升温过程进行采样分析。由以上实验数据可以看出,x 模式光单独传输时,恒温 20℃ 时输出平均角速度为 7.973°/h,变温过程出现最大角速度为 15.416°/h,平均角速度为 12.954°/h;而 y 模式光单独传输时,恒温 20℃ 时输出平均角速度 7.967°/h,变温过程出现最大角速度为 15.537°/h,平均角速度为 12.552°/h。经过本方案修正后变温过程中角速度输出最大值为 13.376°/h,平均角速度为 11.028°/h。由以上数据分析可知,在利用两种偏振模式交替传输方案修正之后,Shupe 效应所引起的相位误差得到了较为明显的抑制,同时最终输出数据也呈现出较为平坦的趋势,而且尖峰也得到一定的消除。

#### 4 双偏振交替光纤陀螺方案<sup>[5]</sup>

由于以上实验是在分时的条件下进行的,无法

保证完全同步,很多因素都会引起实验结果的不准确。在此,提出一种新型双偏振交替传输光纤陀螺模型。

图 6 显示的是带有偏振转换器以及双信号处理电路<sup>[10]</sup>改进后的干涉式光纤陀螺仪框图。这个陀螺仪在传感环与传统的 LiNbO<sub>3</sub> 芯片之间集成了偏振转换器。偏振转换器能够用一个周期为  $\tau$  的方波的驱动来同时改变顺时针光与逆时针光的偏振面, $\tau$  为光在光纤环中传播的时间。在方波的前  $\tau/2$  半个周期里电路 1 工作,此时陀螺的输出信号为  $\phi_x$ 。在后  $\tau/2$  半个周期,由于方波的调制,偏振转换器将改变 LiNbO<sub>3</sub> 输出的顺时针光和逆时针光的偏振面,此时陀螺输出的信号为  $\phi_y$ 。这里的  $\tau$  是两种偏振模式的平均渡越光纤环的时间。根据 Lefevre 的电路框图,这两个信号处理单元将输出  $\phi_x$  与  $\phi_y$ ,再用数字信号处理芯片按式 (6) 计算出准确的 Sagnac 相位值。TE↔TM 偏振转换器是一个关键技术,需要用钛扩散工艺制作 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 波导,这已经有了成功的案例<sup>[11]</sup>,在设计时的考虑要点应包括电极位置、中心波长、带宽以及转换效率。

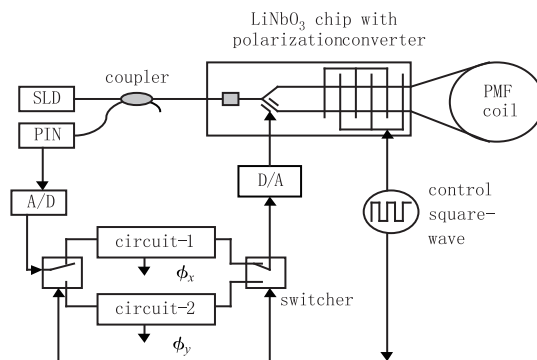


图6 带有偏振转换以及双线路的干涉式光纤陀螺仪框图

#### 5 总结

本文首先提出了一种新颖的利用两个模式在光纤环中交替或者同时传播来得到光纤陀螺精确转速的方法,去除了时变温度梯度引入的 Shupe 误差,初步验证了该原理的可能性。最后提出了带有偏振转换器和双信号处理电路模型的干涉式陀螺仪结构,应用这种结构在原则上就可以得到完全不受 Shupe 效应的影响的准确转速。这也可以使人们在制作光纤陀螺环时,不用将大量的时间浪费在繁琐的四极对称绕环法上。

致谢:江苏华富电子有限公司帮助完成了部分实验。

## 参考文献:

- [1] E T Kinter. Polarization control in optical-fiber gyroscopes [J]. *Opt. Lett.*, 1981, 6(3): 154 – 156.
- [2] D M Shupe. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19: 654 – 655.
- [3] N J Frigo. Compensation of linear sources of non-reciprocity in Sagnac interferometers [J]. *Proc. SPIE*, 1983, 412: 268 – 271.
- [4] Oliver F J Tirat, et al. Reduction of nonreciprocity noise in wound fiber optic interferometers [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(8): 2675 – 2679.
- [5] KejiangZHOU. IFOG Scheme with a polarization converter and double electronic circuits [P]. *China*, No. 99118027. 5. (in Chinese)  
周柯江. 偏振交替光纤陀螺 [P]. *中国*, No. 99118027. 5.
- [6] E J Post. Interferometric path-Length changes due to motion [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, 162(2): 234 – 239.
- [7] H J Arditty, H C Lefevre. Sagnac effect in fiber optic gyroscope [J]. *Optics Letters*, 1981, 06: 401 – 403.
- [8] F Zhang, J W Lit. Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization-maintaining fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 24: 2213 – 2218.
- [9] 刘树俊. Sagnac 干涉仪的若干问题和光源控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [10] H C Lefevre. *The fiber-optic gyroscope* [M]. Norwood. MA: Artech House, 1993.
- [11] R C Alferness, L L Buhl. Electrooptic waveguide TE ↔ TM mode converter with low drive voltage [J]. *Opt. Lett.*, 1980, 5: 473 – 475.