

尾纤长度不对称导致的光纤陀螺振动误差分析

张勇刚, 郜中星, 吴 磊

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 如何提高光纤陀螺在振动环境下的精度是光纤陀螺工程化过程中必须考虑的问题。当前, 对于降低光纤陀螺振动误差的方法主要集中在改善光纤陀螺的机械结构和固定光纤环上。然而, Y 波导与光纤环的尾纤长度不对称也是引起光纤陀螺振动误差的一个重要原因。首先根据弹光效应从理论上阐述了由振动所引起非互易相移的原理, 进而分析证明了振动条件下左右两侧的波导尾纤与光纤环的尾纤长度之和不相等, 即尾纤长度不对称是导致振动条件下非互易相移产生的一个重要原因。在此基础上推导出了振动条件下光纤陀螺两侧尾纤长度和之差与陀螺输出误差的理论关系式, 并通过 Matlab 仿真了两侧尾纤长度和之差与陀螺输出漂移的关系曲线。

关键词: 尾纤长度; 不对称; 光纤陀螺; 振动误差

中图分类号: V245.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0476-06

Analysis of vibration error in FOG due to fiber tail length asymmetry

Zhang Yonggang, Gao Zhongxing, Wu Lei

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Improving the precision of fiber optic gyroscope (FOG) in vibration environment is important in the application of FOG. Current research on reducing FOG vibration error are mainly concentrate on improving FOG mechanical structure and reinforcing fiber coil. However, fiber tail length asymmetry also has been demonstrated an important reason which can affect the vibration error of FOG. Firstly, the basic theory of phase shift of FOG caused by elastic-optic effect due to vibration was introduced. Then the length of fiber tail on the left and right asymmetry was shown to be the reason of nonreciprocal phase shift in the condition of vibration. Theoretical formula between the length difference of fiber tail in two directions and the output error of gyroscope was derived. Finally, simulations were performed to show the relationship between fiber tail length asymmetry and FOG output error.

Key words: tail length; asymmetry; FOG; vibration error

收稿日期: 2012-06-12; 修订日期: 2012-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61001154); 哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCF110431, HEUCF041202)

作者简介: 张勇刚(1981-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事高精度光纤陀螺、惯性导航、组合导航等方面的研究。

Email: zhangyg@hrbeu.edu.cn

0 引言

光纤陀螺无运动部件和磨损部件,是一种新型全固态陀螺,具有体积小、质量轻、寿命长、动态范围大、抗冲击能力强等优点,已经成为惯性导航、制导系统中的理想惯性器件^[1]。光纤陀螺应用于工程中要解决的关键问题之一是机械振动对光纤陀螺的影响。光纤陀螺振动会导致输出误差,影响其实际应用,因此从光纤陀螺工程化的角度来看,研究光纤陀螺的振动特性和减小振动导致的光纤陀螺输出误差对提高光纤陀螺的性能有着重要作用。参考文献[2]分析了光纤长度、平均直径和圈数与振动条件下弹光效应误差的关系;参考文献[3]给出了通过四极对称绕法来减小机械振动对陀螺性能的影响;参考文献[4]论证了环圈骨架谐振对闭环光纤陀螺振动误差的影响;参考文献[5]揭示了机械应力对非互易相移的影响。

文中基于光纤陀螺的物理模型和弹光效应原理,首先论述了光纤由于振动所导致的弹光效应,在此基础上进一步分析了在制作光纤陀螺的过程中,当左右两侧的波导尾纤与光纤环的尾纤长度之和不相等时由于振动应力所导致的陀螺输出误差,最后通过 Matlab 对这种振动误差进行了仿真。

1 光纤环振动对陀螺漂移的影响

1.1 弹光效应

当外力或振动作用于弹性体产生应变时,弹性体的折射率发生变化,呈现双折射性质,这种现象即为弹光效应。在振动环境下,光纤环中的光纤会受到彼此间的应力作用,这将会引起相应的应变进而导致光纤折射率的变化。光纤陀螺中所用的保偏光纤为各向同性介质,由材料力学可知,应力 σ 、 τ 与所产生的应变 ε 、 γ 之间的关系如下^[5]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\mu/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & 1/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & -\mu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\sigma_i (i=1,2,3)$ 表示 3 个正交方向的正应力; $\tau_i (i=1,2,3)$ 表示 3 个正交方向的切应力; $\varepsilon_i (i=1,2,3)$ 表示 3 个正交方向的线应变; $\gamma_i (i=1,2,3)$ 表示 3 个正交方向的切应变; E 表示弹性模量; G 表示剪切弹性模量; μ 表示泊松比。

光纤在振动情况下,彼此间的相互作用力可分解为水平应力 P_h 和垂直应力 P_v 。沿光纤轴向建立直角坐标系如图 1 所示,其中 P_v 垂直于支撑平面方向, P_h 平行于支撑平面方向。则光纤所受水平应力 $\sigma_1 = P_h$, 垂直应力 $\sigma_2 = P_v$, 将其代入到公式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\mu/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & 1/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & -\mu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_h \\ P_v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (P_h - P_v \mu)/E \\ (P_v - P_h \mu)/E \\ -(P_h + P_v) \mu/E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

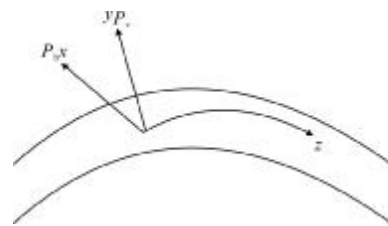


图 1 光纤所受应力原理图

Fig.1 Principle diagram of fiber under stress

对于各向同性材料,有如下关系式^[6]:

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 - B_0 \\ B_2 - B_0 \\ B_3 - B_0 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $P_{44} = \frac{1}{2}(P_{11} - P_{12})$; P_{11} 、 P_{12} 为弹光系数; B_i 为介电不渗透性系数, 表示介电常数的倒数; ε_1 、 ε_2 表示光纤横向应变; ε_3 表示光纤纵向应变。假设光纤不受应力时的折射率为 n , 则 $\Delta B_i = B_i - B_0 = \frac{1}{(\Delta n_i - n)} - \frac{1}{n}$ 。

对公式(3)进行一阶泰勒展开可近似得到:

$$\Delta B_i \approx -\frac{2}{3} \Delta n_i (i=1, 2, 3) \quad (4)$$

式中: ΔB_i 表示介电不渗透性系数的变化量; Δn_i 表示折射率的变化量。联立公式(2)-(4)可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta n_1 \\ \Delta n_2 \\ \Delta n_3 \\ \Delta n_4 \\ \Delta n_5 \\ \Delta n_6 \end{bmatrix} = \frac{n^3}{2E} \begin{bmatrix} P_v(P_{11}\mu - P_{12}(1-\mu)) - P_h(P_{11} - 2P_{12}\mu) \\ P_h(P_{11}\mu - P_{12}(1-\mu)) - P_v(P_{11} - 2P_{12}\mu) \\ (P_h + P_v)(P_{11}\mu - P_{12}(1-\mu)) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

公式(5)表明当光纤受到水平应力和垂直应力作用时会导致沿光纤轴向和径向, 即沿 z 、 x 、 y 方向上的折射率改变。

1.2 振动所引起的非互易相移

根据电磁波理论: 当波长为 λ 的光通过一段折射率为 n 、长度为 L 的光纤后所产生的相位变化为 $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nL$, 其中, L 为沿光纤轴向的长度; n 为偏振光振动方向的折射率, 即 n 沿着光纤的径向。由表达式可知 λ 为常量, n 、 L 为变量, 因此有以下表达式:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda} n\right) \Delta L + \left(\frac{2\pi}{\lambda} L\right) \Delta n \quad (6)$$

其中

$$\Delta L = \varepsilon_3 L = -(P_h + P_v) \mu L / E \quad (7)$$

在保偏光纤中, 光一般选择沿慢轴进行传播^[7], 这里假设慢轴中偏振光的振动与应力轴重合, 即沿着图 1 中的轴方向, 则 $\Delta\varphi$ 是由 ΔL 和 Δn_1 共同作用产生。若取 L 为一长度微元 Δl , 并将公式(5)、(7)代入公式(6)可得:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & \left(\frac{2\pi}{\lambda} nL\right) \varepsilon_3 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} L\right) \Delta n_1 = \\ & -\frac{2\pi n \Delta l \mu}{\lambda E} (P_v + P_h) + \frac{\pi n^3 \Delta l}{\lambda E} L \cdot \\ & (P_v(P_{11}\mu - P_{12}(1-\mu)) - P_h(P_{11} - 2P_{12}\mu)) \end{aligned} \quad (8)$$

公式(8)反映了水平应力和垂直应力导致产生

非互易相移的原理。

在三轴一体化光纤陀螺中包含 x 、 y 、 z 3 个光纤敏感环, 这里仅以 z 轴方向光纤环为研究对象, 由于对称性, x 轴、 y 轴方向光纤环的分析与 z 轴方向类似。光纤环的振动特性非常复杂, 受光纤环绕制方法、胶的特性、光纤长度、直径等因素的影响。为简化分析, 文中假设光纤环上各点受到上下、左右、前后 3 个方向的正弦振动且振动应力在光纤环各点的分布相同, 均为 $P \sin(\omega t)$ ^[8], 其中, P 表示振动应力的幅值, ω 表示振动应力的角频率。由于尾纤是单根光纤, 其受到相互间的振动应力可忽略不计。在光纤陀螺实际制作过程中往往不能保证顺时针与逆时针 Y 波导的尾纤与光纤环的尾纤长度之和对应相等, 若顺时针与逆时针的尾纤长度和之差为 a , 则两束光到达光纤环振动区域所需的时间会不相同, 这样就会导致非互易相移的产生。如图 2 所示, 光纤环总长度为 L , 取任意一点 A , 则到达 A 点光顺时针传播的时间为 $t_{cw} = \frac{L-l+a}{c}$, 逆时针传播时间为 $t_{ccw} = l/c$ ^[9]。由于假设振动应力在光纤环各点的分布相同, 可以将振动应力沿整个光纤环进行线性积分, 这样就可以得到对应的非互易相移。

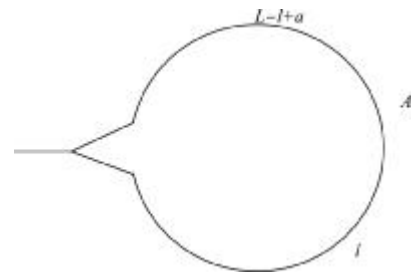


图 2 光纤环示意图

Fig.2 Schematic diagram of fiber coil

光纤陀螺所受到的振动可分为以下三种情况。

(1) 沿 z 轴轴向振动

沿 z 轴轴向振动情况下光纤仅受到垂直应力的影响, 水平应力为零, 即 $P_v = P$, $P_h = 0$, 代入公式(8)中得:

$$\Delta\varphi_1 = -\frac{2\pi n \Delta l \mu}{\lambda E} P + \frac{\pi n^3 \Delta l}{\lambda E} P (P_{11}\mu - P_{12}(1-\mu)) = K_1 P \Delta l, \text{ 其}$$

中, $K_1 = -\frac{2\pi n \mu}{\lambda E} + \frac{\pi n^3}{\lambda E} (P_{11}\mu - P_{12}(1-\mu))$, 沿整个光纤环进行积分可得:

$$\varphi_1 = K_1 P \int_0^L \sin\left(\omega\left(t + \frac{L-l+a}{c}\right)\right) - \sin\left(\omega\left(t + \frac{1}{c}\right)\right) dl = \frac{4cK_1 P}{w} \sin\left(\frac{wa}{2c}\right) \sin\left(\frac{wL}{2c}\right) \cos\left(\omega t + \frac{wa}{2c} + \frac{wL}{2c}\right) \quad (9)$$

由于 $\frac{wa}{2c}$ 和 $\frac{wL}{2c}$ 都是小量, 公式 (9) 可化简为 $\frac{awLK_1 P}{c} \cos\left(\omega t + \frac{wa}{2c} + \frac{wL}{2c}\right)$, 非互易相移的幅值与不对称长度和振动频率基本呈线性关系。

非互易相移 φ_1 可分解为两部分: 顺时针方向的 $K_1 P \int_0^L \sin\left(\omega\left(t + \frac{L-l+a}{c}\right)\right) dl$ 和逆时针方向的 $K_1 P \cdot \int_0^L \sin\left(\omega\left(t + \frac{1}{c}\right)\right) dl$ 。当 $a=0$ 时, 由公式 (9) 可知振动应力所产生的非互易相移可以完全抵消掉; 当 $a \neq 0$ 时, 对下式进行一阶泰勒展开: $\sin\left(\omega\left(t + \frac{L-l+a}{c}\right)\right) \approx \sin\left(\omega\left(t + \frac{L-l}{c}\right)\right) + \cos\left(\omega\left(t + \frac{L-l}{c}\right)\right) \frac{wa}{c}$, 将其带入公式 (9) 中可得: $\varphi_1 \approx K_1 P \int_0^L \cos\left(\omega\left(t + \frac{L-l}{c}\right)\right) \frac{wa}{c} dl$, 此时振动应力所产生的非互易相移只有部分被抵消掉。沿 x 、 y 轴轴向振动情况下的分析与之类似。

(2) 沿 x 轴轴向振动

沿 x 轴轴向振动情况下光纤仅受到水平应力的影响, 垂直应力为零, 即 $P_v=0, P_h=P$, 将水平应力投影到沿光纤径向, 则 $P'=P\cos(l/R)$, 代入公式 (8) 中得:

$$\Delta\varphi_2 = -\frac{2\pi n \Delta l \mu}{\lambda E} P \cos(l/R) - \frac{\pi n^3 \Delta l}{\lambda E} P \cos(l/R)$$

$$(P_{11} - 2P_{12}\mu) = K_2 P \cos(l/R) \Delta l$$

式中: $K_2 = -\frac{2\pi n \mu}{\lambda E} + \frac{\pi n^3}{\lambda E} (P_{11} - 2P_{12}\mu)$ 。沿整个光纤环进行积分可得:

$$\begin{aligned} \varphi_2 = & K_2 P \int_0^L \sin\left(\omega\left(t + \frac{L-l+a}{c}\right)\right) \cos\left(\frac{l}{R}\right) - \\ & \sin\left(\omega\left(t + \frac{1}{c}\right)\right) \cos\left(\frac{l}{R}\right) dl = \\ & \frac{2}{\frac{w}{c} + \frac{1}{R}} \sin\left(\frac{L}{2R} + \frac{wL}{2c}\right) \sin\left(\frac{wa}{2c} - \frac{L}{2R}\right) \cos\left(\omega t + \right. \\ & \left. \frac{wL}{2c} + \frac{wa}{2c}\right) - \frac{2}{\frac{w}{c} - \frac{1}{R}} \sin\left(\frac{L}{2R} - \frac{wL}{2c}\right) \sin\left(\frac{wa}{2c} - \frac{L}{2R}\right) \cdot \\ & \cos\left(\omega t + \frac{wL}{2c} + \frac{wa}{2c}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

从公式 (10) 可以看出, 当 w 和 a 发生变化时, 对非互易相移的影响可忽略不计, 即沿 x 轴轴向的振动对 z 轴的振动误差影响较小。

(3) 沿 y 轴轴向振动

沿 y 轴轴向振动情况下光纤仅受到水平应力的影响, 垂直应力为零, 即 $P_v=0, P_h=P$, 将水平应力投影到沿光纤径向, 则 $P'=P\sin\left(\frac{l}{R}\right)$, 代入公式 (8) 中得:

$$\Delta\varphi_3 = -\frac{2\pi n \Delta l \mu}{\lambda E} P \sin\left(\frac{l}{R}\right) - \frac{\pi n^3 \Delta l}{\lambda E}$$

$$P \sin\left(\frac{l}{R}\right) (P_{11} - 2P_{12}\mu) = K_3 P \sin\left(\frac{l}{R}\right) \Delta l$$

其中 $K_3 = K_2$ 。沿整个光纤环进行积分可得:

$$\begin{aligned} \varphi_3 = & K_3 P \int_0^L \sin\left(\omega\left(t + \frac{L-l+a}{c}\right)\right) \sin\left(\frac{l}{R}\right) - \\ & \sin\left(\omega\left(t + \frac{1}{c}\right)\right) \sin\left(\frac{l}{R}\right) dl = \\ & \frac{2}{\frac{w}{c} + \frac{1}{R}} \sin\left(\frac{L}{2R} + \frac{wL}{2c}\right) \cos\left(\frac{wa}{2c} - \frac{L}{2R}\right) \cdot \\ & \cos\left(\omega t + \frac{wL}{2c} + \frac{wa}{2c}\right) + \frac{2}{\frac{w}{c} - \frac{1}{R}} \sin\left(\frac{L}{2R} - \frac{wL}{2c}\right) \cdot \\ & \cos\left(\frac{wa}{2c} + \frac{L}{2R}\right) \cos\left(\omega t + \frac{wL}{2c} + \frac{wa}{2c}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

从公式 (11) 可以看出, 当 w 和 a 发生变化时, 对非互易相移的影响可忽略不计, 即沿 y 轴轴向的振动对 z 轴的振动误差影响较小。

以上给出了沿 3 个正交方向振动时分别导致的 z 轴光纤环中的非互易相移。这 3 个非互易相移叠加即可给出振动环境下, 左右两侧的波导尾纤与光纤环的尾纤长度之和不相等时 z 轴光纤环总的非互易相移。同理可得出 x 轴和 y 轴光纤环的非互易相移。

1.3 仿真分析

在此选取仿真参数: 平均波长 $\lambda = 1.55 \times 10^{-6} \text{ m}$; 弹性模量 $E = 7 \times 10^{10} \text{ Pa}$; 泊松比 $\mu = 0.17$; 光纤折射率 $n = 0.456$; 真空光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$; 弹光系数 $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$; 光纤环长度 $L = 1000 \text{ m}$; 振动幅值和频率为 $A = 1 \text{ g}$, $f = 60 \text{ Hz}$; 光纤环直径 $D = 0.14 \text{ m}$ 。为检验不同的不对称长度对非互易相移的影响, 仿真中分别设置了五种不同的不对称长度, 分别为 $a_1 = 0.02 \text{ m}$, $a_2 = 0.04 \text{ m}$, $a_3 = 0.06 \text{ m}$, $a_4 = 0.08 \text{ m}$, $a_5 = 0.10 \text{ m}$ 。根据设置的仿真参数对公式 (9)~(11) 分别进行仿真, 并将得

到的非互易相移除以系数 $\frac{2\pi LD}{\lambda c}$ 转化为陀螺的输出角速率, 分别如图 3-5 所示。

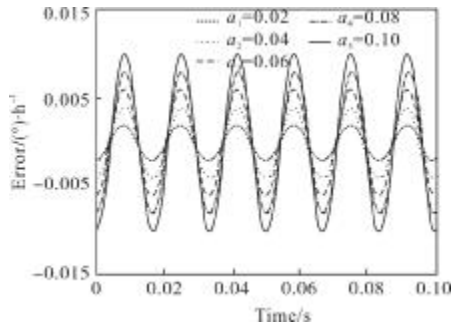


图 3 沿 z 轴轴向振动导致陀螺漂移与长度误差的关系

Fig.3 Relationship between FOG drift and fiber tail asymmetry by z axis vibration

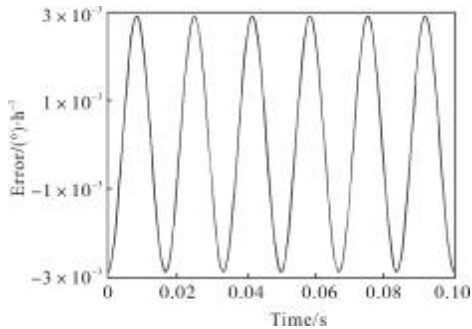


图 4 沿 x 轴轴向振动导致陀螺漂移与长度误差的关系

Fig.4 Relationship between FOG drift and fiber tail asymmetry by x axis vibration

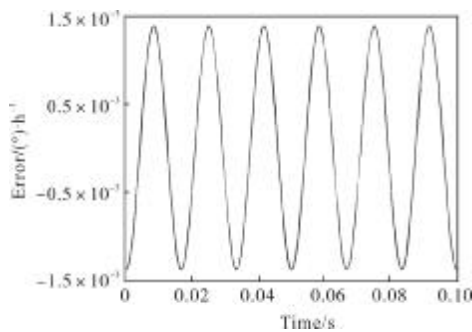


图 5 沿 y 轴轴向振动导致陀螺漂移与长度误差的关系

Fig.5 Relationship between FOG drift and fiber tail asymmetry by y axis vibration

在 3 个轴共同振动的情况下, 得到陀螺 z 轴的漂移随时间变化的规律如图 6 所示。

仿真结果表明: 由振动所导致的光纤陀螺 z 轴的输出漂移主要取决于沿 z 轴轴向的振动, 且漂移的大小和尾纤的不对称长度近似呈线性关系, 如图 3

所示; 而沿 x,y 轴轴向的振动对陀螺 z 轴的输出影响较小, 图 4、图 5 中不同不对称长度条件下陀螺输出误差近似相等。不难推论, 由振动所导致的 x 轴的输出漂移主要取决于沿 x 轴轴向的振动, 由振动所导致的 y 轴的输出漂移主要取决于沿 y 轴轴向的振动。

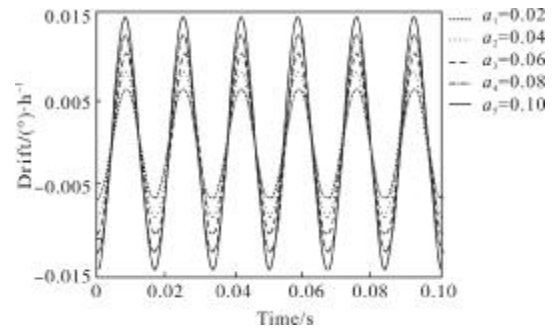


图 6 三轴共同振动导致陀螺漂移与长度误差的关系

Fig.6 Relationship between FOG drift and fiber tail asymmetry by three axis vibration

2 结论

文中通过对光纤陀螺的振动特性进行分析以及仿真程序验证得到了如下结论:

(1) 在振动环境下, 光纤环中的光纤会受到彼此间的应力作用而引起折射率的变化和长度变化, 进而由弹光效应会导致非互易相移的产生。

(2) 制作光纤陀螺时, 若左右两侧的波导尾纤与光纤环的尾纤长度之和不相等, 即存在两侧尾纤长度之和不对称, 则在振动环境下会使陀螺的输出叠加一个以振动频率变化的正弦漂移, 该漂移大小与尾纤不对称程度有关。

文中分析了当左右两侧的波导尾纤与光纤环的尾纤长度之和不相等条件下振动所导致的输出误差, 并仿真显示了振动条件、两侧尾纤长度和之差与陀螺输出误差的关系。因此, 在光纤熔融焊接的过程中要尽可能地保证两侧尾纤的长度和相等以减小振动误差对陀螺输出的影响, 这对实际应用中光纤陀螺的装配具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Chen Wenhai, Mou Xudong, Shu Xiaowu, et al. Study on characteristic of vibration of fiber optical gyroscope [J]. Optical Instrument, 2003, 25(5): 19-23. (in Chinese)

- 陈文海, 牟旭东, 舒晓武, 等. 光纤陀螺的振动特性研究 [J]. 光学仪器, 2003, 25(5): 19-23.
- [2] Xu Wenyuan, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Photo elasticity and the Error of the Loop optic fiber coil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30 (6): 103-107. (in Chinese)
许文渊, 张春熹, 李立京, 等. 多圈光纤环的弹光效应及误差 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 103-107.
- [3] Wu Yanji, Huang Xianlin. Influence of mechanical vibration on FOG and reducing measure [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 363-365. (in Chinese)
吴衍记, 黄显林. 机械振动对光纤陀螺的影响及减小措施 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 363-365.
- [4] Liu Shurong, Wu Yanji, Xu Lei. Relationship between vibration error and structural resonance in closed-loop FOG [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 256-259. (in Chinese)
刘淑荣, 吴衍记, 徐磊. 结构谐振对闭环光纤陀螺振动性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 256-259.
- [5] Ruffin P B, Lpfts C M, Hamilton J S. Analysis of temperature and stress effects in fiber optic gyroscope [C]// SPIE, 1992, 1585: 293-297.
- [6] Department of Tongji University. Material Mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008: 14-45. (in Chinese)
同济大学教研部. 材料力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2008: 14-45.
- [7] Liao Yanbiao. Optical Fiber of the Light [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 186-188. (in Chinese)
廖延彪. 光纤光学 [M]. 清华大学出版社, 2000: 186-188.
- [8] Zhang Guicai. The Principle and Technology of Fiber Optic Gyroscope [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2010: 98-102. (in Chinese)
张桂才. 光纤陀螺原理与技术 [M]. 国防工业出版社, 2010: 98-102.
- [9] Sun Qiaoying. Research on vibration characteristics of fiber optic gyroscope strap-down system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 24-26. (in Chinese)
孙巧英. 光纤陀螺捷联系统振动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 24-26.

下期预览

环烯烃共聚物多孔太赫兹纤维的设计与特性模拟

马 天, 孔德鹏, 姬江军, 王光珍, 王丽莉

(中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要: 太赫兹纤维波导是太赫兹系统中重要的组成元件。为了实现太赫兹辐射的低损耗低色散传输, 设计了一种以环烯烃共聚物为基质的多孔太赫兹纤维, 并利用基于全矢量有限元法的商业软件 COMSOL 分析了该多孔太赫兹纤维的传输特性, 着重考察了亚波长多孔纤芯的结构参数对传输特性的影响。结果表明: 这种太赫兹纤维可以将模场能量很好的限制在亚波长多孔纤芯中传输, 具有较小的有效模场面积、低的传输损耗和平坦近零色散等优良的传输特性; 同时, 通过增大多孔纤芯的占空比, 可以将更多的模场能量限制在亚波长直径的空气孔洞中传输, 并减小太赫兹纤维的有效模场面积和有效模式损耗, 但同时会增大限制损耗和色散。