

# 光纤陀螺温度补偿方案研究\*

延凤平 蓝慧娟 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘 要** 从理论上分析了光纤陀螺敏感环的热致非互易相位噪声, 建立了光纤环温度分布模型。针对四种通常的光纤敏感环绕制方法(ZYL, SYM, DIP, QUA), 对于由外界环境温度变动所引起的光纤陀螺零位漂移进行了数值模拟与比较, 并给出了对应于外界环境温度变化过程中的光纤陀螺零位漂移补偿方案。

**关键词** 光纤陀螺, 零位漂移, 噪声。

## 1 引 言

光纤陀螺是一种基于光学塞纳克氏(Sagnac)效应的测量仪表, 它利用固态的全光纤结构实现载体自转角速度的测量, 克服了机电陀螺及激光陀螺在构造上或因需要一定的高速旋转质量, 而导致动态性能及寿命的降低, 或因光路谐振要求过于苛刻, 而使工艺复杂化及成本过高等一系列缺点, 从而成为当今最具竞争力的新型陀螺。

当光纤陀螺工作环境的温度发生变化时, 在陀螺的输出信号中将产生热致非互易相位噪声。这种噪声将导致光纤陀螺的零点位置发生漂移并引起其标度因子的不稳定, 严重制约着光纤陀螺检测精度的提高。

然而, 对于实用化的光纤陀螺, 一般要求其具有较宽的工作温度范围。但是, 陀螺对环境温度的变化很敏感。从实测的温度曲线上看, 当环境温度发生变化时, 陀螺的零位漂移明显加剧, 标度因子的线性度也明显恶化<sup>[1, 2]</sup>。由此可见, 对光纤陀螺实施温度补偿是提高陀螺检测精度, 使陀螺走向实用化的必要环节。

本文从理论上分析了光纤敏感环引入的热致非互易相位噪声特性, 建立了光纤环温度分布模型。针对四种通常的光纤敏感环绕制方法, 对于由外界环境温度变动所引起的光纤陀螺零位漂移进行了数值模拟、分析与比较, 并给出了对应于外界环境温度变化过程中的光纤陀螺零位漂移补偿方案。

## 2 热致非互易噪声产生机理

当光束以传输常数  $\beta(z)$  通过长为  $L$  的介质时, 其相位延迟为:

\* 国家自然科学基金重点项目资助(批准号: 69637020)。

收稿日期: 1998-04-06; 收到修改稿日期: 1998-06-15

$$\Phi = \int_0^L \beta(z) dz = \int_0^L \beta_0 n(z) dz \quad (1)$$

式中  $\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  为光在真空中的传输常数,  $n(z)$  为  $z$  点处的折射率。就光纤环而言, 环境温度的变化将使石英材料的折射率及媒质(包括纤芯、包层和涂覆层)的热膨胀系数发生改变, 从而影响光的传输特性。于是有:

$$\Phi = \beta_0 n L + \beta_0 \left( \frac{\partial n}{\partial T} + n\alpha \right) \int_0^L \Delta T(z) dz \quad (2)$$

式中  $n$  为光纤有效折射率,  $\frac{\partial n}{\partial T}$  为石英材料的折射率温度系数,  $\alpha$  为折射率热膨胀系数,  $\Delta T(z)$  为沿着光纤的温度分布的变化量。

在塞纳克氏干涉仪中, 两束干涉光分别以顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向通过同一长度为  $L$  的光纤。设顺时针方向的光波在  $t$  时刻到达光纤的输出端, 则该光波到达某一坐标点  $z$  的时刻为:  $t' = t - (L - z)/c$ , 其中  $c = c_0/n$  为波导中的波速。由(2)式可得这两束干涉光波到达  $z$  点的相位延迟分别为:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\text{ccw}}(t) &= \beta_0 n L + \beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \Delta T(L - z, t - z/c) dz \\ \Phi_{\text{cw}}(t) &= \beta_0 n L + \beta_0 \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L \Delta T(z, t - z/c) dz \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

于是检测得到的热致非互易相位误差为:

$$\Delta\Phi_E = \frac{\beta_0}{c_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{\frac{L}{2}} [\Delta T(z) - \Delta T(L - z)] (2z - L) dz \quad (4)$$

### 3 光纤敏感环温度分布模型

假定光纤环的温度只存在沿径向变化而沿光纤环的轴向温度保持不变(即绕制在同一层上的光纤温度分布相同), 并假设光纤环内表面绝热。若已知外层光纤温度随时间变化量为  $\Delta T(0, t)$ , 则光纤环的温度分布表达式  $\Delta T(x, t)$  满足热传导方程:

$$\left. \begin{aligned} K \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Delta T(x, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \Delta T(x, t) \\ \Delta T(x, 0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中  $K = \frac{r}{\rho b}$ ,  $r$  为导热率,  $\rho$  为物体的密度,  $b$  为比热。对(5)式作拉普拉斯变换、求解方程并作逆向拉普拉斯变换, 得到光纤环温度分布表达式为:

$$\Delta T(x, t) = \int_0^t \Delta T(0, t - t') g(t') dt' \quad (6)$$

$$g(t) = \exp\left(-\frac{x^2}{4Kt}\right) \left(\frac{x^2}{4Kt}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{\pi t}} \quad (7)$$

由上式可知光纤环的温度分布不仅与外界温度分布有关, 而且与光纤环的结构(主要指绕制层数)以及光纤材料的热传导特性(在这里指  $K$  值)有关。对于一种特殊的温度变化情况, 即:

$$\Delta T(0, t) = \begin{cases} k_0 t & 0 < t < t_0 \\ k_0 t_0 & t > t_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $k_0$  为一常数, 它代表光纤敏感环外侧的温度变化率。

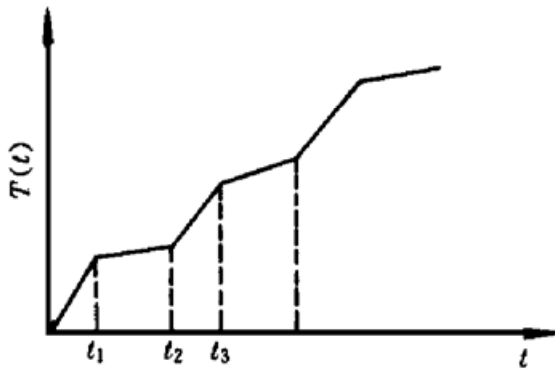
1) 当  $t \leq t_0$  时, 由(6)式、(7)式可得:

$$\Delta T^o(x, t) = \frac{\partial \Delta T(x, t)}{\partial t} = k_0 \int_0^t \exp\left(-\frac{x^2}{4Kt'}\right) \left(-\frac{x^2}{4Kt'}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{t' \sqrt{\pi}} dt' = k_0 \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4Kt}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \quad (9)$$

2) 当  $t \geq t_0$  时,

$$\Delta T^o(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_{t-t_0}^t k_0(t-t')g(t')dt' + \int_0^{t-t_0} k_0 t_0 g(t')dt' \right] = k_0 \int_{t-t_0}^t g(t')dt' = k_0 \left\{ \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4Kt}\right)^{\frac{1}{2}}\right] - \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4K(t-t_0)}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \right\} \quad (10)$$

在陀螺实际使用过程中, 外界环境温度是随机变化的。为得到光纤敏感环的温度分布模式, 可将外界温度分布按时间分割成若干段, 在每一段内温度的变化呈线性趋势(如图 1 所示)。



各区段温度变化可近似表示为:

$$\left. \begin{aligned} T(t) &= \frac{T(t_1) - T(0)}{t_1} t = k_1 t, & 0 \leq t \leq t_1 \\ T(t) &= \frac{T(t_2) - T(t_1)}{t_2 - t_1} (t - t_1) + k_1 t = \\ & k_2(t - t_1) + k_1 t, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ T(t) &= \frac{T(t_3) - T(t_2)}{t_3 - t_2} (t - t_2) \\ & + k_2(t_2 - t_1) + k_1 t_1 = \\ & k_3(t - t_2) + k_2(t_2 - t_1) + k_1 t_1 & t_2 \leq t \leq t_3 \\ & \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

fig. 1 Environmental temperature distribution

由(6)式、(7)式、(10)式、(11)式可得光纤敏感环各层在各时间区间的温度变化率分布表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T^o(t) &= k_1 \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4Kt}\right)^{\frac{1}{2}}\right], & t_1 > t \geq 0 \\ \Delta T^o(t) &= k_2 \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4K(t-t_1)}\right)^{\frac{1}{2}}\right] + k_1 \left\{ \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4Kt}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \right. \\ & \left. - \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4K(t-t_1)}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \right\}, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \Delta T^o(t) &= k_3 \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4Kt}\right)^{\frac{1}{2}}\right] + k_2 \operatorname{erfc}\left\{ \left[ \frac{x^2}{4K(t-t_1)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \\ & - k_2 \operatorname{erfc}\left\{ \left[ \frac{x^2}{4K(t-t_1-t_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + k_1 \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{x^2}{4Kt}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \\ & - k_1 \operatorname{erfc}\left\{ \left[ \frac{x^2}{4K(t-t_1)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, & t_2 \leq t \leq t_3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

## 4 光纤环绕制方法对陀螺性能的影响

为减少热致非互易性, 同时考虑到微弯损耗, 通常采用 ZYL、SYM、DIP、QUA 等四种光纤环绕制方法<sup>[3, 4]</sup>。其构成思想和特点阐述如下:

1) ZYL(cylinder): 先将光纤的一端绕在线圈架的边缘, 并将光纤紧贴着线圈架外壁以螺旋方式向前绕制, 直到绕完第一层。然后开始绕第二层, 从线圈架的一端绕回到起始端, 再依次绕第三层、第四层……。这种方法的特点是: 绕制工艺简单, 但光纤陀螺输出端相位检测噪声受外界温度影响很大。

2) SYM(symmetry): 将光纤中部紧贴置于线圈架的一侧, 先用  $l < L/2$  的部分顺序绕制第一、二…层, 直到绕完为止。再用  $l > L/2$  的部分顺序绕制, 直到绕完为止。其特点是距对称中心点近的两对称部分离开比较远, 而光纤的两端则紧贴在一起。这种绕制方法工艺比较复杂, 光纤陀螺输出端相位检测噪声受温度变化的影响比 ZYL 方法的小。

3) DIP(dipole): 先将光纤中心 ( $L/2$ ) 点置于线圈架的边缘, 用  $l < L/2$  部分绕完第一层, 再用  $l > L/2$  部分绕第二层。然后用  $l < L/2$  部分绕第三层, 再用  $l > L/2$  部分绕第四层, 依次更替直到绕完为止。这种绕制方法可使关于中心点对称的部分温度变化率几乎相等, 因而可有效地减小由于外界温度变化通过光纤敏感环而引入的光纤陀螺输出端相位检测噪声。

4) QUA(quadrupole): 先将光纤中心 ( $L/2$ ) 点置于线圈架的边缘, 用  $l < L/2$  部分绕完第一层。再用  $l > L/2$  部分绕第二层。然后用  $l > L/2$  部分绕第三层。再用  $l < L/2$  部分绕第四层。依次类推直到绕完为止。与 DIP 方法相类似, QUA 绕制方法亦可有效地抑制外界环境温度变化引起的光纤陀螺输出端相位检测噪声。

当外界温度发生变化时, 热量由外到里传递需要一个过程, 因而在同一时刻光纤敏感环各层的温度分布是不同的。于是, 同样光纤长度不同绕法的光纤环, 或同样绕法不同光纤长度的光纤环所产生的热致非互易相位噪声大小也不同。

对于总长度为  $L$ 、每层长度为  $l_0$ 、总层数为  $N$  的四种不同绕制方法下的光纤敏感环由于外界温度变化而造成的相位噪声分别为:

$$\begin{aligned} \text{ZYL: } \Delta\Phi_E &= \frac{B_0}{C_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{m=1}^{N/2} [\Delta T(m) - \Delta T(N+1-m)] [Ll_0 - (2m-1)l_0^2] = \\ &L \sum_{m=1}^{N/2} [\Delta T(m) - \Delta T(N+1-m)] \left[ l_0 - \frac{l_0(2m-1)}{N} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{SYM: } \Delta\Phi_E &= \frac{B_0}{C_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{m=1}^{N/2} [\Delta T(m) - \Delta T(N+1-m)] [Ll_0 - (N+1-2m)l_0^2] = \\ &L \frac{B_0}{C_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{m=1}^{N/2} [\Delta T(m) - \Delta T(N+1-m)] \left[ l_0 - \frac{(N+1-2m)l_0}{N} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{DIP: } \Delta\Phi_E &= \frac{B_0}{C_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{m=1}^{N/2} [\Delta T(2m-1) - \Delta T(2m)] [Ll_0 - (2m-1)l_0^2] = \\ &L \frac{B_0}{C_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{m=1}^{N/2} [\Delta T(2m-1) - \Delta T(2m)] \left[ l_0 - \frac{(2m-1)l_0}{N} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{QUA: } \Delta\Phi_E &= \frac{B_0}{C_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{m=1}^{N/2} (-1)^{m+1} [\Delta T(2m-1) - \Delta T(2m)] [Ll_0 - (2m-1)l_0^2] = \\ &L \frac{B_0}{C_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{m=1}^{N/2} [\Delta T(2m-1) - \Delta T(2m)] \left[ l_0 - \frac{(2m-1)l_0}{N} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

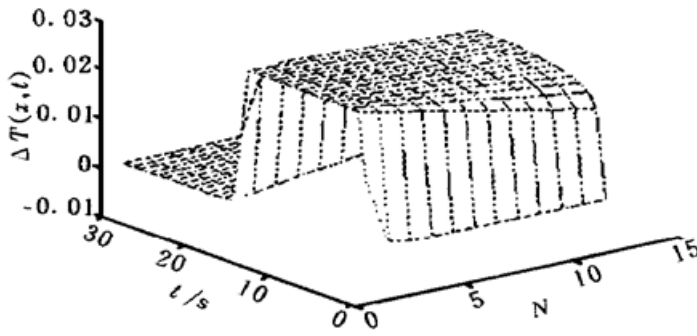


Fig. 2 Temperature distribution of the fiber sensing coil  $N = 12$ ,  $k_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C/h}$ ,  $t_0 = 1500 \text{ s}$

在如(9)式所表示的一种特殊的外界温度变化情况下(其中  $k_0 = 10^\circ\text{C/h}$ ,  $t_0 = 1500 \text{ s}$ ), 对于光纤外径为  $250 \mu\text{m}$ 、光纤环直径为  $75 \text{ mm}$ 、光纤长度分别为  $800 \text{ m}$  和  $200 \text{ m}$ 、层数为 12 层的光纤敏感环, 几种不同绕制方法下  $\Delta T(x, t)$  的分布曲线如图 2 所示(有关参数见表 1)。

Table 1. Parameters of the fiber sensing coils

$n$	$\frac{\partial n}{\partial T}$	$\rho$	$b$	$R$	$\lambda_0$	$K$
refractive index	temperature coefficient of the refractive index	density	specific heat capacity	heat conduction ratio	operating wavelength	$R/\rho c$
1.447	$1.35 \times 10^{-5}/\text{K}$	$1.22 \sim 1.54 \text{ g/cm}^3$	$\sim 880 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$	$0.3 \sim 0.36 \text{ W/km}$	$1300 \text{ nm}$	$10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

将  $\Delta T(x, t)$  代入式(13)~(16)式可得各种结构的光纤环由于外界温度变化而产生的热致非互易相位噪声, 如图 3 所示。表 2 给出了对应于两种光纤长度( $200 \text{ m}$ ,  $800 \text{ m}$ )及四种绕制方法下的光纤环在外界温度以  $10^\circ\text{C/h}$  变化时产生的温度噪声极大值。

Table 2. The maximum value of the thermal induced non-reciprocal phase noise with different fiber sensing coil manufacture methods

manufacture methods	ZYL	SYM	DIP	QUA
fiber length				
$L = 200 \text{ m}$	$19.380^\circ/\text{h}$	$14.899^\circ/\text{h}$	$5.144^\circ/\text{h}$	$5.136^\circ/\text{h}$
$L = 800 \text{ m}$	$40.660^\circ/\text{h}$	$30.069^\circ/\text{h}$	$20.575^\circ/\text{h}$	$20.542^\circ/\text{h}$

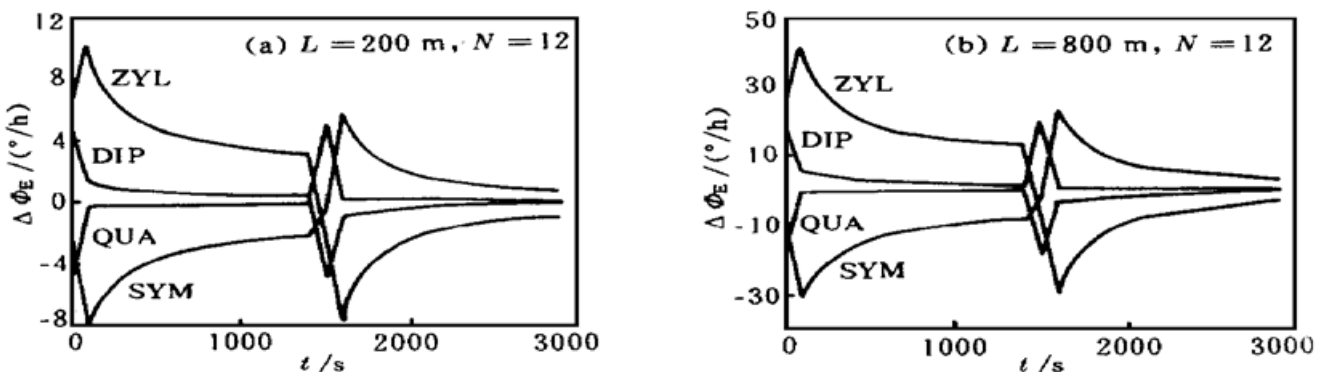


Fig. 3 The curve of the thermal induced non-reciprocal phase noise. (a)  $L = 200 \text{ m}$ ,  $N = 12$ , (b)  $L = 800 \text{ m}$ ,  $N = 12$

由图 3 可知:

1) 在相同的外界温度环境下, 对于同样参数的光纤环, ZYL 绕制方法产生的光纤环热致非互易相位噪声最大, 其次是 SYM 绕制方法, QUA 绕制方法产生的光纤环热致非互易相位噪声最小。

2) 外界温度变化率每次发生改变，将导致相位噪声明显加剧，然后噪声值逐渐减小并趋向于缓和。

由上述分析可知，外界环境温度的变化作用于光纤敏感环将产生相当大的光纤陀螺检测噪声，这种噪声引起光纤陀螺零点位置的漂移，从而导致检测精度的下降。因此对于光纤陀螺采取温度补偿措施是非常必要的。

从上述分析过程还可以得出，虽然增加光纤环尺寸(环的直径，环中光纤的总长度)可提高光纤陀螺的检测灵敏度，但在增加光纤长度的同时光纤环热致非互易相位噪声也随着增加，它反过来制约着检测灵敏度的提高。因而在实际设计中，要针对精度的要求合理地选择光纤环的尺寸。

### 5 温度补偿方案

从上述分析可以看出，光纤陀螺热致非互易相位噪声的大小不仅与外界环境温度的分布及其变化状况有关，而且还与光纤敏感环的参数及绕制方法有关；给定的光纤陀螺在一定的外界环境温度变化情况下产生的非互易相位噪声是确定的。这就为首先测试光纤敏感环的环境温度以及光纤陀螺的输出信号、在外部通过软件进行温度补偿提供了理论基础。

补偿方案构成及补偿流程图分别如图 4 和图 5 所示。

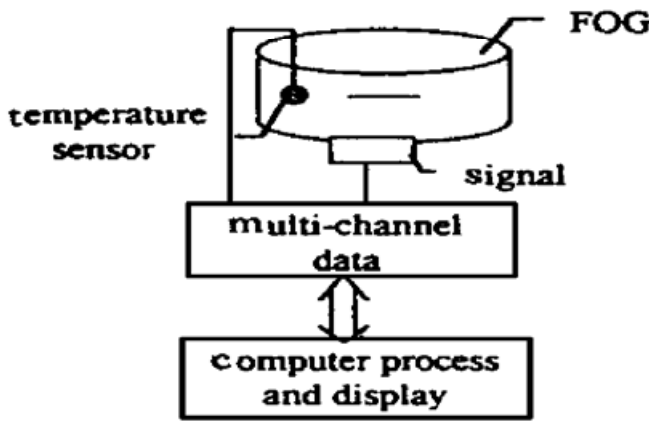


Fig. 4 Composing of the temperature compensation method

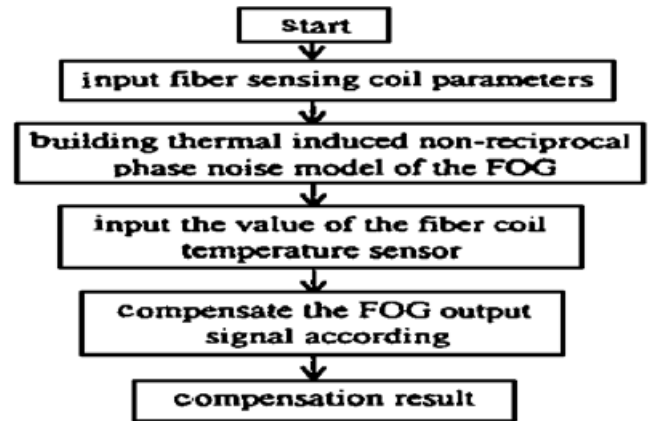


Fig. 5 Technical progress chart of the compensation software

在光纤陀螺敏感环的外层光纤处设置热电偶式温度传感器，将其输出的模拟信号与光纤陀螺经锁相解调后的输出直流电压信号一起通过多路数据采集卡转换成数据信号后进入相应的处理通道。在计算机内部将数据进行分析、过滤，剔除大误差信号。根据所建立的敏感环温度分布模型及其热致非互易相位噪声模型，利用所测得的敏感环外层温度信号对光纤陀螺的输出进行补偿。

**结 论** 环境温度的变化所导致的光纤敏感环的非互易性是引起光纤陀螺零位漂移和标度因子不稳定的主要原因，这种非互易性与光纤敏感环的参数及绕制方法有密切的关系。本文针对四种常用的敏感环绕制方法，得出了外界环境温度变化所引起的光纤敏感环热致非互易相位噪声表达式以及由这种噪声所导致的光纤陀螺温零位漂移特性，进行了相应的数值模拟、分析与比较，并给出光纤陀螺温度补偿方案及补偿软件编制流程图。

## 参 考 文 献

- [1] Chomat M. Efficient suppression of thermally induced nonreciprocity in fiber optic sagnac interferometers with novel double-layer winding. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(11) : 2289~ 2291
- [2] Ruffin P B, Smith R H. Fiber winding approaches for environmentally robust IFOG sensor coils. Components for fiber optic applications, *Proc. SPIE*, 1992, **1792** : 179~ 189
- [3] Sawyer J, Ruffin P B, Sung C C. Investigation of the effects of temporal thermal gradients in fiber optic gyroscope sensing coils. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(1) : 29~ 34
- [4] Wanser K H. Fundamental phase noise limit in optical fibers due to temperature fluctuations. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(1) : 53~ 54

## Investigation of the Temperature Compensated Method for Fiber Optic Gyros

Yan Fengping      Lan Huijuan      Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 6 April 1998; revised 15 June 1998)

**Abstract** the characteristic of thermal induced non-reciprocal phase noise was analyzed theoretically, and the temperature distribution model was derived for the fiber sensing coil. The zero point drift of the fiber optic gyros (FOG) induced by outside temperature fluctuation was simulated numerically and compared with the four types of fiber sensing coil manufacture methods (ZYL, SYM, DIP, QUA). The related zero point drift compensated method was proposed.

**Key words** fiber optic gyros, zero point drift, noise.