

基于调制器中置结构的光纤陀螺设计与分析

齐跃峰^{1,2}, 官宸博^{1,2*}, 丛碧彤¹, 刘子萌¹, 胡廷楠¹, 李方柯¹, 贾翠¹

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

²河北省特种光纤和光纤传感器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 提出了一种基于新型相位调制器中置结构的光纤陀螺设计方案,通过新型相位调制器的空间非互易结构,不但从根本上克服了传统光纤陀螺调制频率受限于本征频率的缺点,还可对背向散射噪声和偏振耦合噪声起到抑制作用。理论分析和实验结果表明,该结构可以将背向散射光波引入的相位控制在 10^{-5} 量级,而且对偏振耦合噪声的抑制达到了 $5 \times 10^{-8} (^{\circ})/\text{Hz}^{1/2}$;此外,这种中置结构还可以改善陀螺仪的零偏稳定性,其零偏稳定性从 $0.11878 (^{\circ})/\text{h}$ 提升至 $0.09110 (^{\circ})/\text{h}$ 。本方案克服了当前光纤陀螺仪受本征频率影响的技术难题,为抑制噪声、提高精度提供了一种新的思路。

关键词 光纤光学; 陀螺仪; 相位调制器; 中置结构; 偏振耦合; 本征频率

中图分类号 TN965

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0206003

Design and Analysis of Fiber Optic Gyroscope Based on Modulator Mid-Mounted Structure

Qi Yuefeng^{1,2}, Gong Chenbo^{1,2*}, Cong bitong¹, Liu Zimeng¹, Hu Tingnan¹,
Li Fangke¹, Jia Cui¹

¹College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A fiber optic gyroscope design based on a new phase modulator mid-mounted structure is proposed. The scheme not only can overcome the shortcoming that the modulation frequency of the traditional fiber optic gyroscope is limited to the eigen frequency, but also can suppress the backscatter noise and polarization coupling noise. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed structure can control the phase of the backscattered wave to the order of 10^{-5} , and the polarization coupling noise can be suppressed to $5 \times 10^{-8} (^{\circ})/\text{Hz}^{1/2}$. In addition, this mid-mounted structure can improve the bias stability of the gyroscope, which is increased from $0.11878 (^{\circ})/\text{h}$ to $0.09110 (^{\circ})/\text{h}$. This scheme overcomes the technical problem of the fiber optic gyroscope influenced by eigen frequency, and provides a new way to suppress noise and improve accuracy.

Key words fiber optics; gyroscope; phase modulator; mid-mounted structure; polarization coupling; eigen frequency

1 引言

自 21 世纪以来,光纤陀螺仪由于体积小、测

量范围大、损耗低、精度高等优点被广泛应用于航空、航天、航海等工业领域中^[1]。随着光纤陀螺仪技术的不断完善,传统光纤陀螺仪中出现的问题也逐

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-07-23; 录用日期: 2021-08-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61735011)、河北省科技研发重点项目(19251703D)、中央引导地方科技发展专项(19941708G)

通信作者: *1015019470@qq.com

渐地显露出来,本征频率的限制与偏振耦合^[2-3]的影响也逐渐成为高精度光纤陀螺仪的研究对象。

光纤线圈作为光纤陀螺仪的核心器件,决定着光纤陀螺仪本征频率的大小,其中本征频率与光纤线圈的渡越时间成反比^[4-5]。线圈中沿顺、逆时针方向传输的两束光波通过调制器的时间不同,两束光波抵达调制器的时间差值为光纤线圈渡越时间^[6]。当线圈中的光波传输速度发生变化时,线圈的渡越时间也发生相应的改变,此时沿顺、逆时针方向传输的两束光波经过调制器的时间差发生变化,导致调制器的有效调制深度降低,从而无法满足原有的调制深度,产生调制误差。由此可见这种相位调制方式受光纤线圈本征频率的影响严重^[7-8]。

为了解决传统干涉型光纤陀螺仪受限于本征频率的问题,本文提出了一种基于调制器中置结构的光纤陀螺仪设计方案,所提方案不仅从调制原理方面弥补了原有相位调制器依赖渡越时间的调制弊

端,还从光路结构方面实现对偏振耦合噪声以及背向散射噪声的抑制,为干涉型光纤陀螺仪的调制解调方法以及噪声抑制机制提供了新思路。

2 基本原理

2.1 克服本征频率的原理

基于调制器中置结构的光纤陀螺仪原理如图 1 所示,由工作波长为 1310 nm、频谱宽度为 40 nm 的超辐射发光二极管发出的部分偏振光,经光纤耦合器 1 的一端进入光纤起偏器 1,并以一束线偏振光的形式沿着保偏光纤慢轴传播,再经光纤耦合器 2 形成两束分别沿顺(CW)、逆时针(CCW)方向传播的光。其中 CW 光和 CCW 光分别经光纤线圈中心处的新型相位调制器调制,被调制的光信号继续在光纤线圈中沿原方向传播,当抵达光纤耦合器 2 时产生干涉,干涉信号沿单模光纤耦合器 1 的另一端抵达光电探测器中,并将干涉光信号转化为电信号。

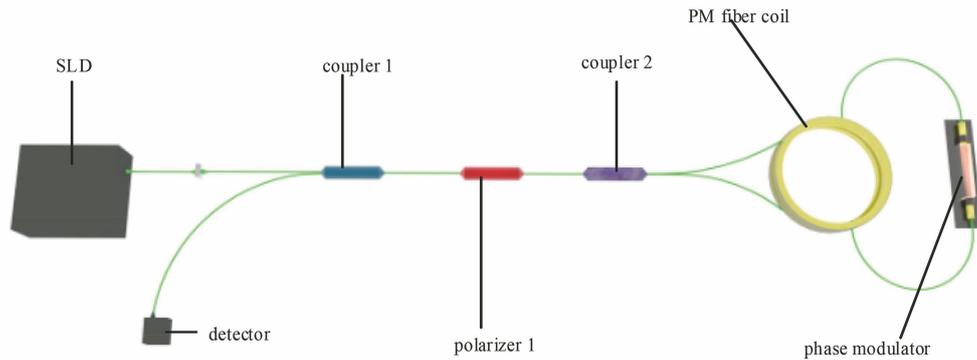


图 1 中置式结构光纤陀螺仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber optic gyroscope with mid-mounted structure

新型相位调制器结构如图 2 所示,经实验测得新型相位调制器的整体插入损耗为 4.23 dB,其中

偏振损耗为 1.21 dB。

沿顺时针方向传输的 CW 光首先经过左侧光

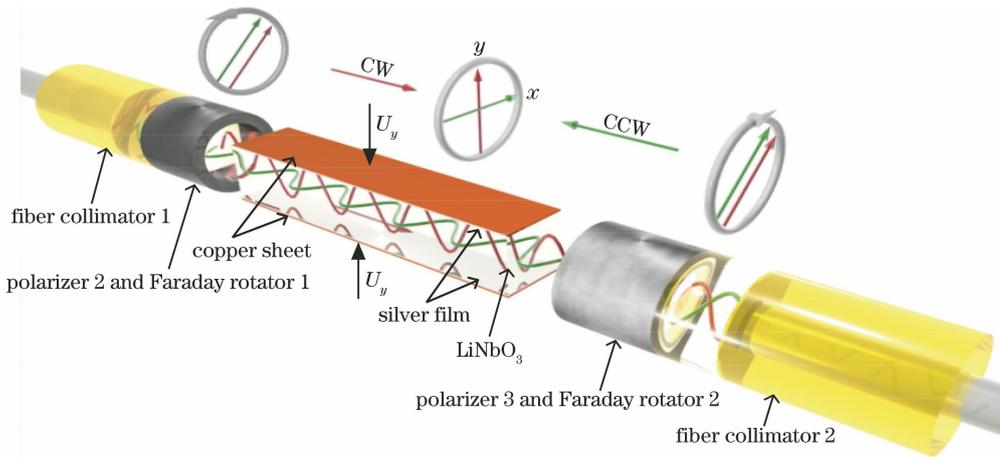


图 2 新型相位调制器结构图

Fig. 2 Structure diagram of new phase modulator

纤准直器 1 以一束平行光射入带有偏振片 2 的左旋 45°法拉第旋光器 1 中。CW 光的偏振方向经法拉第旋光器 1 左旋 45°后,沿铌酸锂晶体双折射主轴 y 轴传播,再经过一组磁场方向相反的左旋 45°法拉第旋光器 2 后,CW 光偏振方向与保偏光纤慢轴一致,其中偏振片 2 和偏振片 3 的透光轴与保偏光纤慢轴之间的夹角为 0° 。若此时沿 y 方向的外加电场强度为 E_y ,则 CW 光经调制器所引入的相位为

$$n_y = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E_y, \quad (1)$$

式中: E_y 为沿铌酸锂晶体 y 向外加的电场强度; γ_{22} 为铌酸锂晶体的线性电光系数; n_o 为铌酸锂晶体寻常光折射率。

同理,沿着线圈逆时针方向传输的 CCW 光经右侧光纤准直器 2 后,以一束平行光射入带有偏振片 3 的左旋 45°法拉第旋光器 2,其偏振方向沿铌酸锂晶体的双折射主轴 x 轴,再经过磁场方向相反的法拉第旋光器 1 旋光后,其偏振方向继续沿保偏光纤慢轴传输,若外加电场强度不变,则 CCW 经调制器引入的相位为

$$n_x = n_o + \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E_y. \quad (2)$$

当沿铌酸锂晶体 y 向外加电压时,理想情况下,铌酸锂晶体的电致双折射主轴 x' 、 y' 与铌酸锂晶体的双折射主轴 x 、 y 方向相同^[9]。所以 CW 光和 CCW 光经相位调制器所引入的相位延迟为

$$\Delta\varphi_m = \frac{2\pi}{\lambda}(n_x - n_y)l = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{22}U_y \frac{l}{d}, \quad (3)$$

式中: l 为铌酸锂晶体 z 向长度; d 为铌酸锂晶体 y 向厚度; U_y 为沿铌酸锂晶体 y 向外加的电压值。

当铌酸锂晶体参数以及光源参数固定时,CW 光与 CCW 光之间引入的相位延迟与电压信号成正比,与光纤线圈的渡越时间 τ 无关。其中传统相位调制器所引入的相位延迟表达式为^[10]

$$\Delta\varphi = \varphi_m(t) - \varphi_m(t - \tau), \quad (4)$$

式中: $\varphi_m(t)$ 为传统相位调制器 t 时刻引入的调制相移。

当采用调制深度为 β_m 的正弦信号调制时^[11-12],传统相位调制器所引入的相位延迟可以表示为

$$\Delta\varphi = \beta_m \sin t - \beta_m \sin(t - \tau) = 2\eta_c \cos \left[2\pi f_m \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right], \quad (5)$$

$$\eta_c = \beta_m \sin \left(\frac{f_m \pi}{2f_c} \right), \quad (6)$$

$$f_c = \frac{1}{2\tau}, \quad (7)$$

式中: η_c 为有效调制深度; f_m 为调制频率; f_c 为光波本征频率。

因此结合(3)、(5)式可以看出新型相位调制器所引入的空间非互易相位延迟与渡越时间 τ 无关,与铌酸锂晶体 z 向长度、 y 向厚度、 y 向外加电场强度以及光源中心波长相关,因此将这种空间非互易结构应用于光纤陀螺中可以克服本征频率的限制。

2.2 背向散射噪声分析

由于线圈中存在多个散射点,且散射点具有随机性,因此需要将光路中背向散射光波引入的相位控制在 10^{-5} 量级,从而达到提升精度的目的。基于中置式结构的陀螺仪由于不在本征频率下调制,所以采用偏置式结构无法抑制距离中心点附近的背向散射噪声^[13]。为解决上述技术问题,本文采用中置式结构,在不基于本征频率的条件下也能抑制背向散射误差。

背向散射光波原理图如图 3 所示,在光纤线圈中心点 $\pm L_c/2$ 附近有一个异常点 Z ,沿顺、逆时针方向传输的光在该点发生背向散射,其背向散射光波分别为 e_{cw} 波和 e_{ccw} 波。由于采用调制器中置结构,所以两束背向散射光波中, e_{ccw} 波未经过相位调制器直接返回耦合器,则 e_{ccw} 波的传递函数表达式为

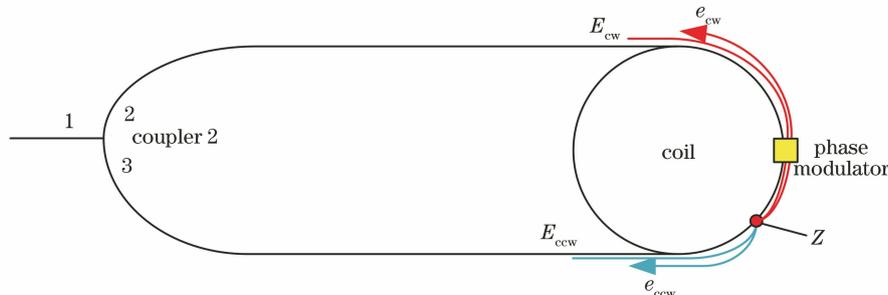


图 3 背向散射光波原理图

Fig. 3 Schematic diagram of backscattered waves

$$e_{\text{ccw}} = \alpha_{13}\alpha_{31}A(z)E_0 \cdot F_{\text{ccw}}^{\text{b}}(t) \cdot \exp[-\alpha(2z)/2], \quad (8)$$

$$F_{\text{ccw}}^{\text{b}}(t) = \exp[i\omega_0(t_0 + 2z \cdot v^{-1})], \quad (9)$$

式中: α 为光纤线圈的衰减系数; α_{ij} 为耦合器 2 的不同路径的衰减系数, 其中 $i, j \in \{1, 2, 3\}$; ω_0 为光波角速度; z 为 Z 点到耦合器 2 之间的距离; v 为光纤基模传输速率; $A(z)$ 为散射衰减系数; $F_{\text{ccw}}^{\text{b}}(t)$ 为散射光波 e_{ccw} 的相位变化函数。

另一束背向散射光波 e_{cw} 首先以顺时针方向经过相位调制器, 再以逆时针方向经过相位调制器, 设这一束散射光波两次经过相位调制器的时间间隔为

$$\Delta t = 2\Delta z \cdot v^{-1}, \quad (10)$$

式中: Δz 为 Z 点到新型相位调制器之间的距离。

结合(1)、(2)式, 可得散射光波 e_{cw} 的传递函数表达式为

$$e_{\text{cw}} = \alpha_{12}\alpha_{21}A(L-z)E_0 \cdot F_{\text{cw}}^{\text{b}}(t) \cdot \exp[-\alpha 2(L-z)/2], \quad (11)$$

$$F_{\text{cw}}^{\text{b}}(t) = \exp\{i[\omega_0 t_0 + 2\omega_0(L-z) \cdot v^{-1}] - kU(t) + kU(t + \Delta t) + 2k_0\}, \quad (12)$$

$$k_0 = \frac{2\pi l}{\lambda} n_o, \quad (13)$$

$$k = \frac{\pi l}{\lambda d} \gamma_{22} n_o^3, \quad (14)$$

式中: $U(t)$ 为 t 时刻所施加的调制信号电压值。

当采用锯齿波调制时, 根据锯齿波信号的线性变化趋势, 可以得出 e_{cw} 波第二次经过相位调制器时施加的调制信号为

$$kU(t + \Delta t) = kU(t) + kU(\Delta t). \quad (15)$$

结合(12)、(15)式可得, 此时 e_{cw} 波引入的相位为

$$F_{\text{cw}}^{\text{b}}(t) = \exp\{i[\omega_0(t_0 + \Delta t) + kU(\Delta t) + 2k_0]\}. \quad (16)$$

可以看出 e_{cw} 波所引入的相位与时间间隔 Δt 成正比, 即新型相位调制器与到异常点 Z 之间的距离 Δz 决定了散射光波引入相位的大小。其中铌酸锂晶体寻常光折射率 $n_o = 2.286$ 、线性电光系数 $\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 、晶体 z 向长度 $l = 40 \text{ mm}$ 、晶体 y 向厚度 $d = 1.5 \text{ mm}$ 。由此可以得出散射光波引入的相位随 Δz 的变化关系, 如图 4 所示。

当调制器与散射点之间的距离 Δz 小于 5 m 时, 散射光波引入的相位小于 $3.5 \times 10^{-5} \text{ }^\circ$, 其中背向散射对陀螺仪系统的影响主要体现在零偏以及零偏稳定性方面, 而陀螺仪的零偏主要取决于地球自转角速度沿陀螺仪输入轴的角速度分量。通过计算

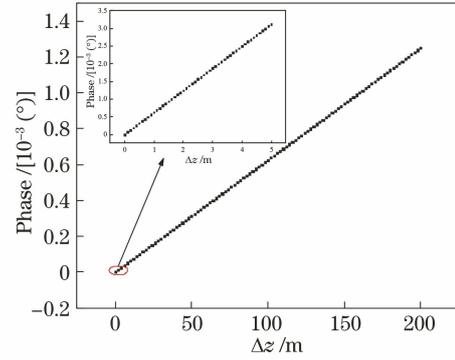


图 4 背向散射光波引入的相位随距离 Δz 的变化
Fig. 4 Relationship between phase introduced by backscattered wave and distance Δz

得出地球自转分量引入的陀螺仪的相位大小为 $1.07 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$, 此时散射光波所引入的相位与地球自转分量所引入的相位相差两个数量级, 满足中高精度光纤陀螺仪对背向散射误差的要求。

2.3 偏振耦合噪声分析

光纤线圈中存在 N 个退偏长度, 其中陀螺仪的偏振误差主要来自光纤线圈第一退偏长度 L_D 内的偏振交叉耦合^[14-15]。根据光源的性能参数, 可以得出光纤线圈的第一退偏长度 $L_D = 0.03 \text{ m}$, 因此对第一退偏长度 L_D 内的光波偏振态进行分析。

光纤陀螺仪第一退偏长度内的光波偏振态如图 5 所示, 一束部分偏振光先经过光纤起偏器 1 后变为偏振方向分别沿保偏光纤慢、快轴传输的 E_x 波和 E_y 波, 其中 E_x 波为主波, E_y 波为误差信号, 这里 E_x 波与 E_y 波的幅值比等于光纤起偏器 1 的消光比 η 。 E_x 波与 E_y 波经耦合器 2 各自分为两束沿线圈顺时针和逆时针方向传播的线偏振光, 则出射光的偏振方向可以分成 4 类光波, 分别为 E_{xx} 、 E_{yx} 、 E_{xy} 以及 E_{yy} 。

1) E_{xx} 对应的是光纤陀螺仪中的主波, 在传输过程中只会引入损耗, 并不会引入额外的偏振耦合光波, 则主波传输函数表达式为

$$E_{xx}^{\text{cw}} = \alpha_{12x}\alpha_{31x}E_x \exp[-(\alpha_x/2)L + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_y)], \quad (17)$$

$$E_{xx}^{\text{ccw}} = \alpha_{13x}\alpha_{21x}E_x \exp[-(\alpha_x/2)L + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_x)], \quad (18)$$

式中: α_x 为保偏光纤内 x 轴的光纤衰减系数; φ_x 为偏振方向沿铌酸锂晶体 x 轴的光波经过调制器引入的相位; φ_y 为偏振方向沿铌酸锂晶体 y 轴的光波经过调制器引入的相位; L 为光纤线圈长度; α_{ijx} 为光波由不同路径经过耦合器 2 中慢轴的衰减系数; $\Delta\varphi_s$ 为 Sagnac 效应所引入的相移量。

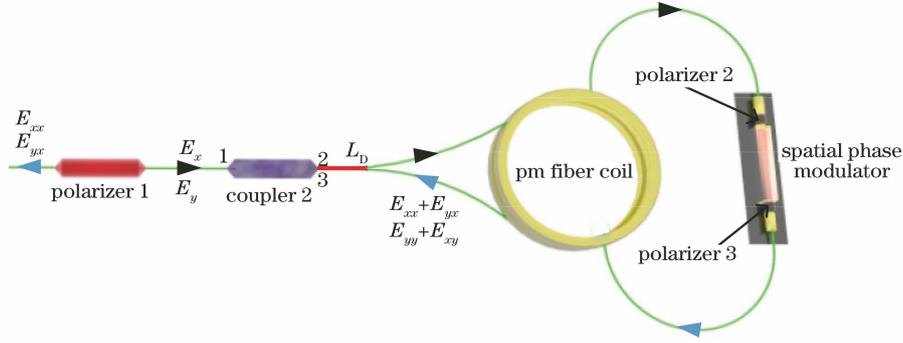


图 5 光纤陀螺仪的光波偏振态分析图

Fig. 5 Analysis diagram of wave polarization state of fiber optic gyroscope

2) E_{yx} 对应的是偏振方向沿保偏光纤 y 向进入光纤线圈,在第一退偏长度 L_D 内被耦合到 x 方向的耦合光波。 E_{yx} 是一种与消光比 η 成正比的振幅型误差信号,其中 E_{yx} 波的传输函数为

$$E_{yx}^{cw} = \alpha_{12y} \alpha_{31x} \eta \rho_{in} \sqrt{h} E_x \exp[-(\alpha_y/2)x - (\alpha_x/2)(L-x) + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_y + \Delta\varphi_n/2)], \quad (19)$$

$$E_{yx}^{ccw} = \alpha_{13y} \alpha_{21x} \eta \rho_{in} \sqrt{h} E_x \exp[-(\alpha_y/2)x - (\alpha_x/2)(L-x) + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_x + \Delta\varphi_n/2)], \quad (20)$$

式中: α_y 为保偏光纤 y 轴的光纤衰减系数; α_{ijy} 为耦合器 2 中沿 y 轴传输的光波在不同路径下的衰减系数,其中 $i, j \in \{1, 2, 3\}$; ρ_{in} 为偏振耦合系数; h 为保偏光纤的双折射系数,即 $h = 10^{-5} \text{ m}^{-1}$; $\Delta\varphi_n$ 为光纤传递系数不同所引入的额外相位差。

3) E_x 在第一退偏长度 L_D 内发生偏振耦合,原来沿光纤 x 方向传输的偏振光被耦合到 y 向上,经过新型相位调制器内的偏振片 2 和偏振片 3 两次消光,以及光纤起偏器 1 的再次消光,最终的 E_{xy} 波是一种与消光比 η 成三次方的强度型误差信号。 E_{xy} 波的传输函数为

$$E_{xy}^{cw} = \alpha_{12x} \alpha_{31y} \eta^3 \rho_{in} \sqrt{h} E_x \exp[-(\alpha_y/2)(L-x) - (\alpha_x/2)x + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_x + \Delta\varphi_n/2)], \quad (21)$$

$$E_{xy}^{ccw} = \alpha_{13x} \alpha_{21y} \eta^3 \rho_{in} \sqrt{h} E_x \exp[-(\alpha_y/2)(L-x) - (\alpha_x/2)x + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_y + \Delta\varphi_n/2)]. \quad (22)$$

4) 误差信号 E_y 在光纤线圈中未发生偏振耦合,其偏振方向一直沿 y 方向传播,最终得到 E_{yy} 。经新型相位调制器消光 2 次和光纤起偏器 1 消光 2 次后, E_{yy} 是一种与消光比 η 成 4 次方的强度型误差信号, E_{yy} 波的传输函数为

$$E_{yy}^{cw} = \alpha_{12y} \alpha_{31x} \eta^4 E_x \exp[-(\alpha_y/2)L + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_x + \Delta\varphi_n/2)], \quad (23)$$

$$E_{yy}^{ccw} = \alpha_{13y} \alpha_{21x} \eta^4 E_x \exp[-(\alpha_y/2)L + i(\Delta\varphi_s/2 + \varphi_y + \Delta\varphi_n/2)]. \quad (24)$$

综上所述,光纤陀螺仪中偏振耦合误差主要为 E_{yx} , 最终干涉信号的表达式为

$$I_{out} = |E_{xout}|^2 = I_p(t) + I_{r_1}(t) + I_{r_2}(t), \quad (25)$$

式中: $I_p(t)$ 为主波与主波之间干涉的光场强度; $I_{r_1}(t)$ 为主波与耦合光波之间干涉的光场强度,体现为振幅型误差信号; $I_{r_2}(t)$ 为耦合光波与耦合光波之间干涉的光场强度,体现为强度型误差信号。

忽略强度型误差,可知干涉信号中主要的振幅型误差信号为 $I_{r_1}(t)$, 其光强大小与光纤起偏器 1 的消光比 η 成正比,根据偏振耦合误差公式^[16-17]:

$$\sigma_\varphi = \eta \rho_{in} \sqrt{h} K_s \sqrt{\frac{L\tau_c}{2}}, \quad (26)$$

$$K_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c}, \quad (27)$$

式中: K_s 为光纤陀螺仪 Sagnac 的标度因数; τ_c 为光源相干时间; ρ_{in}^2 为偏振耦合系数, $\rho_{in}^2 = -26 \text{ dB}$; η 为光纤起偏器以及偏振片的消光比, $\eta = -28 \text{ dB}$ 。

可以得出采用调制器中置式结构的光纤陀螺仪 E_{yx} 波在不同长度下的偏振耦合噪声随光源相干时间的变化关系,如图 6 所示。

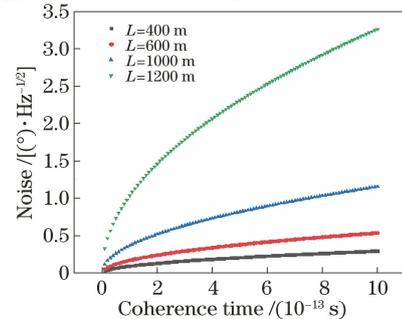


图 6 不同线圈长度下偏振耦合噪声随光源相干时间的变化
Fig. 6 Relationship between polarization coupling noise and source coherence time for different coil lengths

从图中可以看出,当陀螺仪采用长度为 400 m 的光纤线圈时, E_{yr} 波引起的偏振耦合噪声被控制在 $5 \times 10^{-8} (^{\circ})/\text{Hz}^{1/2}$ 以内,可以很好地抑制偏振耦合噪声。

3 分析与讨论

为了证明理论的科学性,本文采用光纤长度为 400 m 的熊猫型保偏光纤线圈,分别对调制器中置式光纤陀螺仪的标度因数、零偏稳定性以及随机游走系数进行测试。结合图 1 所示的结构图,对调制器中置式结构的光纤陀螺仪进行实物搭建,连接好的光纤陀螺仪实物图如图 7 所示。其中实验环境温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,光路的各个熔接点对轴误差角控制在 $\pm 0.2^{\circ}$ 以内,调制信号采用频率为 200 Hz 的锯齿波信号,采样周期为 20 ms。

根据光纤陀螺仪标度因数的标定方法^[18]:1)将调试好的光纤陀螺仪整套系统通电预热;2)标定转台沿逆时针方向旋转并使输出值为正,沿逆时针方向旋转并使输出值为负;3)使转台以某一角速度 Ω_i 沿逆时针方向旋转;4)停止转动,等待系统稳定后,再以相同角速度 Ω_i 沿顺时针方向旋转;5)重复步骤 3)和步骤 4),使角速度逐渐增大,且角速度变化不少于 10 组;6)分别去除系统预热时间与结束时间的角速度输出值;7)计算得到陀螺仪的输出拟合曲线,该曲线可表示为

$$F'_i = K_s \cdot \Omega_i + F_0 + v_i; \quad (28)$$

8)计算陀螺仪的 Sagnac 标度因数,计算式为

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^M \Omega_i \cdot F_i - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \Omega_i \cdot \sum_{i=1}^M F_i}{\sum_{i=1}^M \Omega_i^2 - \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^M \Omega_i \right)^2} \quad (29)$$

(28)、(29)式中 F'_i 为 i 时刻的拟合函数值; F_0 为拟合函数的拟合零位; v_i 为拟合函数的线性误差量; M 为实验次数。图 7 为光纤陀螺仪实物图。

通过多组测量与数据分析可得,当输入角速度



图 7 光纤陀螺仪实物图

Fig. 7 Physical map of fiber optic gyroscope

从 $-100 (^{\circ})/\text{s}$ 变化到 $100 (^{\circ})/\text{s}$ 时,检测相位随输入角速率的变化如图 8 所示。图中 6 组标度因数均值为 0.25643,且 6 组拟合曲线的拟合系数 R^2 均大于 0.99995。根据(27)式,可以算出理想状态下光纤陀螺仪的 Sagnac 标度因数为 0.25667,二者相差 0.00024。

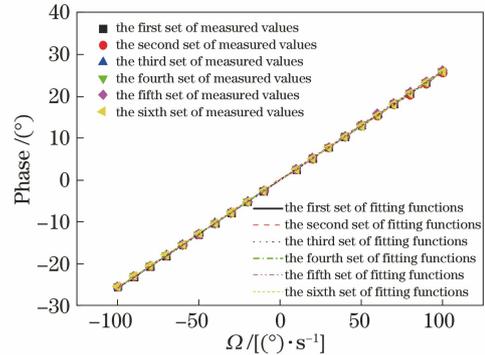


图 8 检测相位随输入角速度的变化

Fig. 8 Relationship between detected phase and input angular velocity

将 6 组实验测得的标度因数平均值与 1.5 h 内陀螺仪零转速的输出量相结合,可得零偏稳定性与随机游走系数的计算公式^[19]为

$$B_s = \frac{1}{K_s} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (30)$$

$$R_{WC} = N_{ER}(\tau_b) \cdot \tau_b^{1/2}, \quad (31)$$

式中: F_i 为 i 时刻陀螺仪的输出值; \bar{F} 为陀螺仪在 1.5 h 内的输出均值; n 为采样点数; $N_{ER}(\tau_b)$ 为噪声等效速率; τ_b 为采样时间。

计算出 1.5 h 内 5 组采用调制器中置式结构的光纤陀螺仪的零偏稳定性与随机游走系数结果,如表 1 所示。

表 1 中置式结构的光纤陀螺仪零偏稳定性与随机游走系数数据

Table 1 Zero-bias stability and random walk coefficient of fiber optic gyroscope with mid-mounted structure

Number of experiments	Zero-bias stability $B_s / [(^{\circ}) \cdot \text{h}^{-1}]$	Random walk coefficient / $[(^{\circ}) \cdot \text{h}^{-1/2}]$
1	0.11388	0.00620
2	0.07054	0.00380
3	0.09242	0.00405
4	0.10441	0.00643
5	0.07424	0.00653
Average value	0.09110	0.00541

理论分析结果与表 1 所示的测试结果证明了这种结构的实际可行性,在不受本征频率限制的条件

下,该结构的精度水平可以达到现有产品化陀螺仪的精度水平。

当调制器采用传统偏置式结构时,此时新型相位调制器与光纤线圈中心点的距离为 200 m,从图 4 中数据可以得出背向散射光波引入的相位为 $1.25 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$,该相位近似于地球自转角速度分量引入陀螺仪中的相位,由于散射光波具有随机性,因此该相位的引入会降低陀螺仪的零偏稳定性。

重新标定偏置式陀螺仪的标度因数,结合(30)、(31)式,测得 1.5 h 内偏置式结构的光纤陀螺仪零偏稳定性和随机游走系数,实验数据如表 2 所示。

表 2 偏置式结构的光纤陀螺仪零偏稳定性与随机游走系数数据

Table 2 Zero-bias stability and random walk coefficient of fiber optic gyroscope with offset structure

Number of experiments	Bias stability $B_s / [(\text{ }^\circ) \cdot \text{h}^{-1}]$	Random walk coefficient / $[(\text{ }^\circ) \cdot \text{h}^{-1/2}]$
1	0.15339	0.00537
2	0.11809	0.00589
3	0.09157	0.00415
4	0.12232	0.00629
5	0.10855	0.00508
Average value	0.11878	0.00536

结合表 1 和表 2 的数据可以看出,采用调制器中置式结构的光纤陀螺仪的零偏稳定性均值小于调制器偏置式结构的光纤陀螺仪的零偏稳定性均值,且中置结构的零偏稳定性整体偏低,与理论相符。

4 结 论

利用新型相位调制器所引入的空间非互易相移解决了传统陀螺仪调制频率受限于本征频率的弊端,进一步的研究发现这种基于调制器中置式结构的光纤陀螺仪不仅能够将背向散射光波引入的相位控制在 10^{-5} 量级,而且可将光路中偏振耦合噪声抑制为 $5 \times 10^{-8} (\text{ }^\circ) / \text{Hz}^{1/2}$,这满足了中高精度光纤陀螺仪的要求。同时,通过对比实验证实了采用调制器中置式结构的陀螺仪可以有效地将光纤陀螺仪的零偏稳定性提升至 $0.09110 (\text{ }^\circ) / \text{h}$ 。该研究体现了调制器中置式结构的优势,为光纤陀螺仪后续的研究提供了新方案。

参 考 文 献

[1] Liu L F, Chen G, Jin G L. Principle and classification of optic fiber gyroscope [J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(2): 59-64.

刘兰芳,陈刚,金国良. 光纤陀螺仪基本原理与分类 [J]. 现代防御技术, 2007, 35(2): 59-64.

- [2] Xie Z, Yang Y H, Yan H, et al. Estimation of distributed polarization coupling error in optical fiber coil of fiber optic gyroscope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006004.
谢泽,杨远洪,闫晗,等. 光纤陀螺光纤环分布偏振耦合误差预估 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006004.
- [3] Lin H Z, Yao Q, Hu Y M. Testing system of fiber polarization coupling based on polarization maintaining structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1794-1799.
林惠祖,姚琼,胡永明. 全保偏结构的光纤偏振耦合测试系统 [J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1794-1799.
- [4] Tian H T, Zhang C X, Jin J, et al. Effect of modulation frequency jitter on coherent detection and its elimination algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(4): 604-610.
田海亭,张春熹,金靖,等. 调制频率抖动对相干检测的影响及消除算法(英文) [J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 604-610.
- [5] Song N F, Zhang J B, Ma D Y, et al. Test method for FOG loop eigen frequency [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 318-321.
宋凝芳,张金保,马东营,等. 光纤陀螺本征频率的测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 318-321.
- [6] Dai Q, Song N F, Wang X X, et al. Research on high precision online automatic tracking technology of optical fiber gyroscope [J]. Laser Journal, 2019, 40(4): 31-35.
代琪,宋凝芳,王夏霄,等. 光纤陀螺本征频率高精度在线自动跟踪技术研究 [J]. 激光杂志, 2019, 40(4): 31-35.
- [7] Ono K, Nishiura Y, Nishikawa M. Phase-modulated fiber optic gyroscope with wide dynamic range and linear scale factor [J]. Applied Optics, 1991, 30(9): 1070-1073.
- [8] Qi Y F, Zhang X, Wang Y T, et al. Application of a novel spatial non-reciprocal phase modulator in fiber optic gyroscope [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 58: 102258.
- [9] Shi S X, Wang X E, Ma L. Physical optics and applied optics [M]. 3rd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2014: 297-301.
石顺祥,王学恩,马琳. 物理光学与应用光学 [M]. 3 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 297-301.
- [10] Yang F L, Yang Y H, Han Z H, et al. Correlation of wavelength and temperature with the half-wave

- voltage for Y branch optical modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0606002.
- 杨福铃, 杨远洪, 韩宗虎, 等. Y 分支光学调制器半波电压与波长和温度相关性研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0606002.
- [11] Zou H H, Yao X T, Yu C, et al. Test method for LiNbO₃ integrated Y-waveguide based on polarization crosstalk analyzer [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0613001.
- 邹欢欢, 姚晓天, 于超, 等. 基于偏振串扰分析仪的 LiNbO₃ 集成 Y 波导的测试方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0613001.
- [12] Chen H Y, Zheng Y, Kong L H, et al. Self-inspection of detection circuit crosstalk of miniaturized high-precision fiber-optic gyroscopes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104005.
- 陈和宇, 郑月, 孔令海, 等. 小型化高精度光纤陀螺的检测电路串扰自检测 [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104005.
- [13] Lloyd S W, Digonnet M J F, Fan S H. Modeling coherent backscattering errors in fiber optic gyroscopes for sources of arbitrary line width [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2070-2078.
- [14] Burns W. Phase error bounds of fiber gyro with polarization-holding fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(1): 8-14.
- [15] Wang X Q, Zhang T, Liang L J, et al. Testing technique of polarization-coupling distribution of fiber coil and beat length of used fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230602.
- 王学勤, 张彤, 梁兰菊, 等. 光纤环偏振耦合分布及绕环光纤拍长测试技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230602.
- [16] Chamoun J N, Digonnet M J F. Noise and bias error due to polarization coupling in a fiber optic gyroscope [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2839-2847.
- [17] Jiang X Y, Gao Y. Research on the surveying way for surface deflection of digital dam [J]. Journal of Yanshan University, 2004, 28(1): 52-54, 58.
- 蒋学英, 高源. 数字式水坝面板挠度的测量方法研究 [J]. 燕山大学学报, 2004, 28(1): 52-54, 58.
- [18] Li X Y, Zhang C M, Hong Y, et al. The analysis of measurement methods of FOG's scale factor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2211-2217.
- 李绪友, 张春梅, 洪勇, 等. 光纤陀螺标度因数测试方法分析 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2211-2217.
- [19] Zhang L, Ye S, Zhou S D, et al. Study on the methods for test and evaluation of FOG's scale factor and bias [J]. China Measurement & Test, 2016, 42(12): 1-7.
- 张龙, 叶松, 周树道, 等. 光纤陀螺标度因数与零偏测试及评价方法研究 [J]. 中国测试, 2016, 42(12): 1-7.