

双光程光纤陀螺偏振误差模型与仿真

徐宏杰 张文艳 徐小斌 宋凝芳 胡永康

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 光路系统的偏振误差极大地制约着双光程光纤陀螺精度的提高。为了提高新型双光程光纤陀螺的精度,利用相干矩阵和琼斯矩阵对光路中光学器件和熔接点的光学参数进行描述,通过分析顺时针光波与逆时针光波中耦合次波列与主波列间的相干叠加机理,建立了相应的偏振误差模型。利用 Matlab 以接近于工程实际的参数设置,对光路系统中熔接点、各光学器件缺陷对偏振误差的影响进行了仿真分析,并在此基础上提出了一种可有效抑制双光程光纤陀螺偏振误差的尾纤匹配法。仿真结果表明,通过适当的尾纤长度匹配,双光程光纤陀螺的偏振误差由 $0.145^\circ/\text{h}$ 减小为 $0.017^\circ/\text{h}$,其随温度变化的峰谷值也由 $0.25^\circ/\text{h}$ 减小至 $3 \times 10^{-4}^\circ/\text{h}$,双光程光纤陀螺的偏振误差得到有效抑制。

关键词 光纤光学;光纤陀螺;偏振误差;相干矩阵;耦合次波;双光程

中图分类号 TP212.14; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.1006002

Polarization Bias Error Model and Simulation of Fiber-Optic Gyroscope with Double Optical Length

Xu Hongjie Zhang Wenyan Xu Xiaobin Song Ningfang Hu Yongkang

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The polarization error of optical system limits the accuracy of fiber-optic gyroscope with double optical length. In order to improve the precision, the models of optical devices and fused points in the new gyroscope are described by using coherent matrix and Jones matrix. Based on the model mentioned above and interference analysis between secondary coupled wave-trains and principal wave-trains in the clockwise and counter clockwise direction, a physical model of polarization bias error of fiber-optic gyroscope with double optical length is established. With practical parameters setting, the influences of some apparatus on polarization noise are simulated and discussed, and furthermore, a new method of matching pigtailed is especially presented, which can be used for decreasing the polarization error effectively. Simulation results demonstrate that the polarization bias error can be suppressed from $0.145^\circ/\text{h}$ to less than $0.017^\circ/\text{h}$, and its peak-valley value of variation with temperature can be suppressed to less than $3 \times 10^{-4}^\circ/\text{h}$, through matching fiber length. The polarization bias error is suppressed effectively.

Key words fiber optics; fiber-optic gyroscope; polarization bias error; coherent matrix; secondary wave-trains; double optical length

OCIS codes 060.2800; 060.2420; 060.2370; 030.1640; 060.2380

1 引言

光纤陀螺是一种基于萨格纳克(Sagnac)效应^[1]的角速度传感器,具有可集成性高、启动快、抗电磁干扰等优越的性能,已广泛应用于航空、航海等领

域^[2]。目前研究最为成熟的是单光程干涉式光纤陀螺,这种干涉仪虽然结构简单,有许多固有优点,但随着对光纤陀螺精度和轻小化要求的不断提高,其体积、重量和精度之间的矛盾及环境适应性方面的

收稿日期: 2014-04-22; 收到修改稿日期: 2014-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(61205077)

作者简介: 徐宏杰(1968—),男,博士,副教授,主要从事光纤陀螺技术、新型光纤传感技术、光纤器件设计等方面的研究。

E-mail: 18911906570@189.cn

* 通信联系人。E-mail: ywzwy123@126.com

弱点日益凸显^[3]。双光程光纤陀螺是在单光程干涉式光纤陀螺的基础上提出的,与传统单光程光纤陀螺相比,其有效光程加倍^[4],从而同等精度下体积更小。而此新型双光程光纤陀螺在光纤环中依次利用了保偏光纤的两个轴顺序传输两圈,其偏振误差更为复杂,制约了陀螺精度的提高。

本文针对此新型双光程光纤陀螺,利用琼斯矩阵和光路系统中光波的传输特性,计算出光路系统中的各耦合次波的数学表达式;通过对耦合次波与主波间的干涉机理分析,建立此新型光纤陀螺的偏振误差模型;结合闭环光纤陀螺的调制解调原理,利用 Matlab 编制相关软件,对熔接角度、光学器件参数、以及温度变化对偏振误差的影响进行了仿真分析,并提出了减小双光程光纤陀螺偏振误差的措施。

2 基本原理

图 1 为双光程光纤陀螺光路结构图, $\theta_1 \sim \theta_{17}$ 是

器件各尾纤之间的熔接点, $L_1 \sim L_{14}$ 为各光学器件之间的光纤长度。放大自发辐射(ASE)光源发射的部分偏振光依次通过耦合器、Y 波导,并经过两个偏振分束器(PBS1、PBS2)进入保偏光纤环。由于 PBS1、PBS2 各自的合光尾纤的快轴、慢轴分别与其分光尾纤的快轴耦合连接,所以从 PBS1 输出的顺时针(CW)光波首先沿保偏光纤快轴传播,经过环中 90° 熔点处后,变为慢轴传播,通过 PBS2 后变为快轴传播,光波再次传输到 PBS1 后,进行第二圈的传输,再次经 90° 熔点后,由慢轴传输变为快轴传播,再次经过 PBS2 时输出;逆时针(CCW)光波同理,从而实现有效光程加倍,理论上陀螺的精度加倍。

保偏光纤环中顺时针光波和逆时针光波的光程轨迹图如图 2 所示,可知顺时针光波和逆时针光波的光程均为 $(n_f + n_s) \cdot (L_7 + L_8 + L_9 + L_{10}) + n_f \cdot (L_{11} + L_{12})$, 二者光路互易。

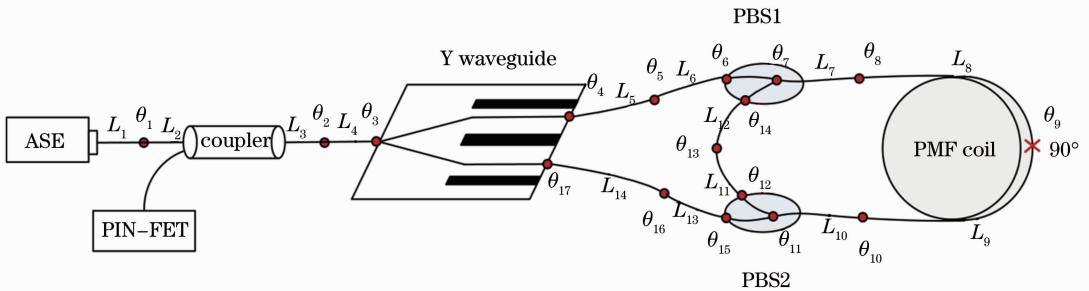


图 1 双光程光纤陀螺光路结构图

Fig. 1 Optical structure of the fiber-optic gyroscope with double optical length

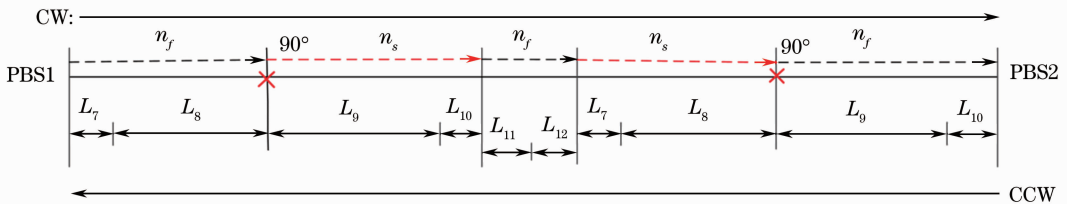


图 2 保偏光纤环中顺、逆时针光波光程轨迹图

Fig. 2 Effective optical length of clockwise and counter-clockwise light

考虑到双光程光纤陀螺光路系统中存在偏振串扰,光源发射的光波传输至某交叉耦合点时,部分光波会耦合至与主波正交的偏振轴中进行传输,由此产生的耦合波列为一次耦合波列^[5];此一次耦合波列在此后的偏振交叉耦合点发生耦合时会产生在保偏光纤快轴或慢轴中传输的二次耦合波列。根据光波干涉原理,当两束光波的光程差小于光源的去相干长度时,耦合次波列与主波列之间或者耦合次波

列之间将会发生干涉,从而产生偏振误差。

3 模型建立

3.1 光路器件模型

双光程光纤陀螺光路系统中的光学器件等偏振串扰点的琼斯矩阵^[6-8]如下所示:

1) 考虑光源的实际情况,ASE 光源的输出光

波为部分偏振光,其琼斯矩阵为: $\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x \\ \mathbf{E}_y \end{bmatrix}$,其中
 $\mathbf{E}_x = E_x \cos(\omega t + \varphi_x)$, $\mathbf{E}_y = E_y \cos(\omega t + \varphi_y)$, E_x 、 E_y 分

别为光源沿两个偏振方向输出光波的振幅。

2) 考虑熔接过程的模式耦合,熔接点处的琼斯矩阵为

$$\mathbf{R}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 17. \quad (1)$$

3) 长度为 L_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 14$) 沿快轴、慢轴传播的保偏光纤的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{F}_{if} = \begin{bmatrix} \beta_0 n_f L_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{is} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \beta_0 n_s L_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 14. \quad (2)$$

3.2 偏振误差模型

根据上述各光学器件模型,结合光波在光路系统中传播时的路径,得顺时针和逆时针主波^[9]

$$\begin{aligned} A_1 &= k_1 E_x \cos[\omega t + \varphi_x - \beta_0 n_f (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8 + L_9 + L_{10} + L_{11} + L_{12} + L_{13} + \\ & L_{14}) - \beta_0 n_s (L_7 + L_8 + L_9 + L_{10}) + \varphi_0], \\ A'_1 &= k'_1 E_x \cos[\omega t + \varphi_x - \beta_0 n_f (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8 + L_9 + L_{10} + L_{11} + L_{12} + L_{13} + \\ & L_{14}) - \beta_0 n_s (L_7 + L_8 + L_9 + L_{10}) + \varphi'_0 + \varphi_s], \end{aligned} \quad (3)$$

其相应的幅值系数为

$$\begin{aligned} k_1 &= k'_1 = t \sqrt{1-r} \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 \cos^2 \theta_7 \cos^2 \theta_8 \sin^2 \theta_9 \cos^2 \theta_{10} \cos^2 \theta_{11} \cdot \\ & \sin \theta_{12} \cos \theta_{13} \sin \theta_{14} \cos \theta_{15} \cos \theta_{16} \cos \theta_{17}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 r 为耦合器交叉耦合率, t 为振幅衰减系数, φ_0 、 φ'_0 为相应的调制相位。理想情况下(即无耦合波列时),两主波间进行干涉叠加,通过探测器输出光强如下式所示:

$$I_{\text{main}} = (k_1 E_0)^2 + (k'_1 E_0)^2 + 2k_1 k'_1 E_0^2 \cos(\varphi'_0 - \varphi_0 + \varphi_s) = 2k_1^2 E_0^2 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_s\right) \right]. \quad (5)$$

考虑到光学系统中器件的性能缺陷以及熔接点的对轴误差,经分析计算,该光路系统中有 40 个一次耦合次波列,338 个二次耦合次波列,由于篇幅限制,未列出这 378 个耦合次波的表达式。而这些耦合次波间的干涉以及耦合次波与主波间的干涉将对主波干涉产生影响,总的干涉光强为

$$I_{\text{total}} = \sum_{i,j=1}^{380} \gamma_m k_i k_j E_0^2 \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (6)$$

式中 γ_m 为任意两波列间的相干系数,与两波列间的光程差有关,取值范围(0,1)。 φ_i 、 φ_j 为相应波列的总相位,包括光路传播相位延迟、调制相位以及 Sagnac 相移 φ_s 。总干涉光强与主干涉光强之间的差别部分所对应的即为耦合次波引起的偏振误差 $\Delta\varphi_e$:

$$\Delta\varphi_e = f(k_1, k_2, \dots, k_{190}; k'_1, k'_2, \dots, k'_{190}; \varepsilon, t, r, E_x, E_y). \quad (7)$$

(7)式双光程光纤陀螺的偏振误差函数表达式,可见偏振误差 $\Delta\varphi_e$ 是光路损耗、各光学器件和熔接点缺陷共同作用的结果。这些参数的变化,如 Y 波导的振幅消光系数 ε 、耦合器的交叉耦合率 r 等都将影响陀螺的精度。

4 仿真分析

4.1 偏振误差仿真

由于光路系统中耦合次波较多,利用 Matlab 建立所有一次耦合波列、二次耦合波列与主波列干涉的数学模型,结合干涉式光纤陀螺的调制解调原理,对双光程光纤陀螺的偏振误差模型^[10]进行仿真。仿真计算时,将光纤陀螺作为一个整体^[11],以待分析的影响因素为变量,根据实际情况设置除此之外的其他参数值,在此情况下分析该变量与偏振误差的关系,将更接近工程实际。

下面通过以下三种简单情况下,偏振误差引起的陀螺漂移随 Y 波导的振幅消光系数 ε 的变化情况进行说明:

1) 光源的偏振度为 0.5,光强为单位光强;熔接误差为 0.5° ,PBS 的消光比为 25 dB,其他参数为理想值。

2) 光源的偏振度为 0.45,光强为单位光强;熔接误差为 0.5° ,PBS 的消光比为 30 dB,其他参数为理想值。

2) 光源的偏振度为 0.5,光强为单位光强;熔接

为理想熔接(熔接误差为 0°), PBS 的消光比为 25 dB,其他参数为理想值。

可以得到这三种情况下双光程光纤陀螺光纤环偏振误差随 Y 波导的振幅消光系数的变化规律,如图 3 所示。从图中可以看出,同样是分析 Y 波导的消光比对偏振误差 $\Delta\varphi_e$ 的影响,虽然 3 种情况下曲线的变化趋势相同,但其数值大小是不同的。因此需根据工程实际,将整个光路系统作为一个整体进行分析,所得到的结果才会更加准确。

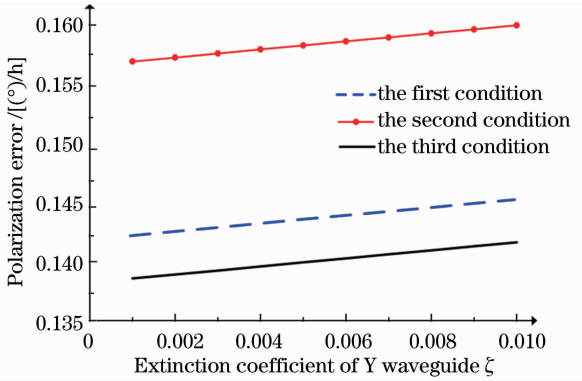


图 3 $\Delta\varphi_e$ 随 ϵ 变化的曲线

Fig. 3 Polarization bias error $\Delta\varphi_e$ versus the extinction coefficient of Y waveguide

4.2 偏振误差抑制措施

实际应用中,通常可通过减小熔接点的熔接误差^[12-13],提高 PBS、Y 波导等光学器件的性能等来降低偏振误差;然而其参数精度要求非常高,较难实现。为此提出了一种尾纤匹配法,以减小其偏振误差。由于双光程光纤陀螺两主波间光程差为 0,小于光源相干长度 L_{dc} ,满足相干条件。那么将此 380 个波列(包括主波列)的相位两两相减,可得任意两波列间的光程差 $\Delta d_{\text{opd}} = (\varphi_i - \varphi_j) \cdot \lambda / (2\pi) (n = 1, 2, 3, \dots, 72010)$,通过调整各尾纤 L_i 的长度,使得光路系统中 378 个耦合次波列与 2 个主波列之间以及耦合次波列之间,尽可能满足去相干条件,从而减小耦合次波对主干涉光强的影响。

当外界温度变化时,保偏光纤快、慢轴折射率将发生变化^[14],进而影响陀螺的偏振误差。图 4 是尾纤长度匹配前后,双光程光纤陀螺偏振误差随温度变化的仿真结果图,仿真中设光纤环的温变速率为 $\partial T / \partial t = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, Y 波导的消光比为 60 dB,熔接点熔接误差均为 0.5° 。随着温度变化量 ($\Delta T = \Delta t \cdot \partial T / \partial t$) 的逐渐增大,双光程光纤陀螺的偏振误差会产生波动。尾纤长度匹配前,偏振误差随温度变化波动较大,此时陀螺的偏振非互易误差较大,其偏振

误差为 $0.145 \text{ } ^\circ/\text{h}$;将各尾纤长度匹配后,偏振误差减小为 $0.117 \text{ } ^\circ/\text{h}$,且此时的偏振误差随温度变化较为平缓,其随温度变化的峰谷值小于 $3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{h}$,表明此时双光程光纤陀螺的偏振误差得到了有效抑制。

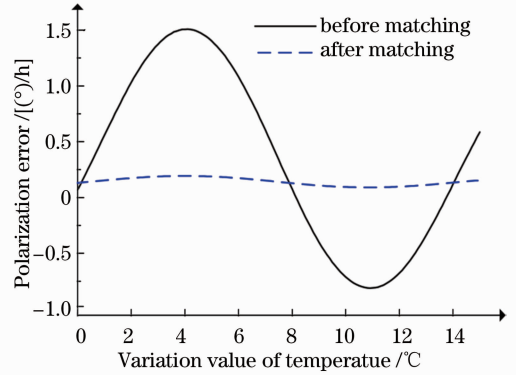


图 4 尾纤匹配前后偏振误差随温度变化曲线

Fig. 4 Polarization bias error $\Delta\varphi_e$ versus the temperature

5 结 论

以相干矩阵和琼斯矩阵为工具,针对双光程光纤陀螺光路中存在的缺陷,在传统光纤陀螺偏振误差研究的基础上,利用光波相干机理,建立了双光程光纤陀螺的偏振误差模型;讨论了光纤与器件之间的对轴角度、PBS 等光学器件引起的偏振串扰以及外界温度变化对偏振误差的影响,并提出了相应的抑制措施。还提出一种尾纤匹配法,通过适当的尾纤长度匹配,可有效抑制双光程光纤陀螺偏振误差。此分析方法也可用于传统的单光程干涉式光纤陀螺。

参 考 文 献

- Zhang Guicai, Wang Wei. The Fiber-Optic Gyroscope [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 28-58.
张桂才,王巍. 光纤陀螺仪[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 28-58.
- J Nayak. Fiber-optic gyroscope: from design to production [J]. Appl Opt, 2011, 50(25): 152-161.
- Zha Feng, Gao Jingdong, Xu Jiangning, et al.. Overview on strapdown inertial system consisted by optical gyros [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 33-40.
查峰,高敬东,许江宁,等. 光学陀螺捷联惯性系统的发展和展望[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 33-40.
- Changsheng Li, Chunxi Zhang, Ningfang Song, et al.. Polarization-maintaining fiber loop with double optical length and its application to fiber optic gyroscope [J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(2): 1498-1550.
- Xu Xiaobin, Zhang Chunxi, Song Jingming. Bias error caused by broad-spectrum source and birefringence effect in fiber optical gyroscope [J]. Optik, 2009, 120(14): 726-730.
- Wang Xin, Chen Shufen, Fang Wei. Theory analysis of polarization in interferometry fiber-optic gyroscope [J]. Optical

- Technology, 2005, 31(2): 187-189.
- 王新, 陈淑芬, 方伟. 干涉式光纤陀螺光路偏振特性的理论分析[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 187-189.
- 7 Qin Yifan, Hu Zhixiong, Ge Chunfeng, *et al.*. Analysis on polarization noise of interferometry fiber-optic gyroscope [J]. Optoelectronic Technology, 2006, 26(3): 181-184.
- 秦一帆, 胡志雄, 葛春风, 等. 干涉式光纤陀螺的偏振噪声分析[J]. 光电子技术, 2006, 26(3): 181-184.
- 8 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng, *et al.*. Effect of polarization light interference on fiber-optic gyroscope [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(8): 1140-1144.
- 米剑, 张春熹, 李铮, 等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1140-1144.
- 9 Wang Wei. The Technology of Interferometry Fiber Optic Gyroscope [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010. 86-93.
- 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 86-93.
- 10 C Seidel, G F Trommer. Modeling of bias errors in fiber-optic gyroscopes with advanced simulation tool [J]. Electron Lett, 2004, 40(3): 166-167.
- 11 Han Biao, Liu Jifang, Ma Lin, *et al.*. Physical model of light path system in fiber optic gyroscopes [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(4): 626-631.
- 韩彪, 刘继芳, 马琳, 等. 干涉式光纤陀螺光路系统的物理模型[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 626-631.
- 12 Wang Xiaoning, Xu Jiadong. Theory analysis on polarization noise of fiber-optic gyroscope [J]. J Northwestern Polytechnical University, 2000, 18(3): 425-428.
- 王小宁, 许家栋. 光纤陀螺的光路偏振噪声的理论分析[J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(3): 425-428.
- 13 Rong Weibin, Zhang Wei, Wang Lefeng, *et al.*. Simulation and experiment on automatic polarization alignment of fine polarization maintaining fibers [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1205002.
- 荣伟彬, 张伟, 王乐峰, 等. 细径保偏光纤自动对轴的仿真与实验[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1205002.
- 14 Li Xuyou, Zhang Chen, He Zhou, *et al.*. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1053-1057.
- 李绪友, 张琛, 何周, 等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环境温度性能的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1053-1057.

栏目编辑: 何卓铭