

· 光电器件与材料 ·

器件的非理想化对光纤陀螺精度的影响

李 冰¹, 唐尊伟², 娄淑琴², 尹国路²

(1. 山东潍坊港华燃气有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 为了提高开环光纤陀螺的测量精度, 研究了干涉式开环光纤陀螺系统中元器件的非理想化对陀螺精度的影响. 根据光纤陀螺系统的结构特点, 给出了陀螺系统不同元器件的矩阵模型, 导出了开环陀螺的输出表达式, 重点分析了光源偏振度和输出光功率波动、耦合器分光比波动以及系统中光纤尾纤熔接点对轴误差造成的偏振误差. 研究表明, 在诸多影响因素中, 光源波动对陀螺系统的影响最大, 耦合器分光比波动次之, 熔接点对轴误差的影响最小.

关键词: 光纤陀螺; 矩阵模型; 零漂; 光源偏振度; 对轴误差

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)04-0054-04

Effect of Nonideal Optical Component on Measurement Accuracy of Open-loop Fiber Gyroscope

LI Bing¹, TANG Zun-wei², LOU Shu-qin², YIN Guo-lu²

(1. Weifang Hongkong & China Gas Company Limited, Weifang 261061, China; 2. Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To improve the measurement accuracy of open-loop fiber gyroscopes, the effects of nonideal optical component on the measurement accuracy are investigated in detail. According to the structural feature, the Jones matrix models of different components in the fiber gyroscope are proposed and the intensity output of the fiber gyroscope is deduced with the methods of coherence matrix of partly polarized broadband source and transferring matrix theoretically. The polarization errors originating from the fluctuation of optical source power and polarization degree, the fluctuation of coupling ratio and alignment errors of the fiber fuse splice are also analyzed. Numerical results demonstrate that the fluctuation of optical source would bring the most distinguish effect on the measurement accuracy of open-loop fiber gyroscopes. The polarization errors originating from the fluctuation of alignment errors of the fiber fuse splice lay the weakest effect on the measurement accuracy.

Key words: fiber gyroscope; matrix model; zero bias drift; polarization degree of optical source; alignment errors

光纤陀螺(FOG)是一种基于 Sagnac 效应的角速度传感器, 与传统的机械陀螺相比, 具有结构简单、无运动部件、启动快、使用寿命长、动态范围大、成本低等优势^[1,2]. 自从第一个光纤陀螺(FOG)诞生以来, 光纤陀螺因为其体积小、质量轻、启动快、结构紧凑、精度高、稳定性好、抗电磁干扰、寿命长等诸

多优点, 在导航制导、空间飞行器定位、精密测量等军事和民用方面都有广泛应用. 在国外, 光纤陀螺经过 20 年的研究拓宽了精度范围, 几乎可以覆盖所有的军事应用领域, 成功取代了传统的机械陀螺, 呈现了广阔的前景.

开环光纤陀螺结构主要由 SLD 宽带光源、保偏

收稿日期: 2010-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(60977033)

作者简介: 李冰, 男, 山东潍坊人, 学士, 主要研究方向为安全检测.

光纤耦合器、偏振器、PZT 相位调制器、光纤环构成。系统中光源的偏振度、输出光功率波动、耦合器分光比波动以及系统中光纤尾纤熔接点对轴误差都将带来偏振误差而影响光纤陀螺的测量精度。因此,研究器件的非理想化对光纤陀螺测量精度的影响,对优化系统结构、减小器件非理想化带来的偏振误差,从而提高开环光纤陀螺的测量精度具有重要的意义。Jesse Zheng 和 Hyang Kyun 等人分别使用一种非误差准确值的表示方法来横向比较不同误差因素所造成的偏振误差的相对大小从而衡量不同误差因素对陀螺输出的影响程度^[3,4]。文献[5,6]考虑 Y 波导尾纤与光纤环和偏振器尾纤熔接的对轴误差,文献[7]研究了光源偏振度对陀螺的偏振误差影响。

文中根据光纤陀螺系统的结构特点,给出了陀螺系统不同元器件的矩阵模型,导出了开环陀螺的输出表达式,重点分析了光源偏振度和输出光功率波动、耦合器分光比波动以及系统中光纤尾纤熔接点对轴误差造成的偏振误差,研究结果为进一步优化系统结构、减小器件非理想化带来的偏振误差、提高光纤陀螺的精度提供有益的参考。

1 理论模型

开环光纤陀螺结构如图 1 所示,SLD 光源经过第二个耦合器分光进入光纤环,经过相位调制器提供相位偏置,最后再经过回路从第一个耦合器产生相干输出。

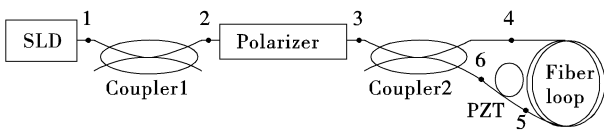


图 1 开环光纤陀螺结构示意图

1.1 器件的矩阵模型

在不考虑克尔效应、法拉第效应,并假设保偏光纤环是理想的无串扰,理论推导出各光元件的矩阵模型。光源使用部分偏振的宽带 SLD,部分偏振光可以用相干矩阵表示,在笛卡尔坐标系中的光强幅值图为近椭圆形,其相干矩阵元与光源的椭圆度角 φ 和椭圆方位角 θ 有关,理想情况下椭圆度角和椭圆方位角都为零,光源相干矩阵可简化为

$$C_{in} = \frac{I_0}{2} \begin{pmatrix} 1+d & 0 \\ 0 & 1-d \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, I_0 为光强; d 为光源偏振度。

保偏耦合器的性能参数包括附加损耗、消光比和分光比。目前耦合器的附加损耗小于 0.1 dB,对光纤陀螺性能影响小。因此,在分析中可以忽略附加损耗,直通臂和耦合臂琼斯矩阵分别表示为^[7,8]

$$C_T = \sqrt{ae^{j\frac{\pi}{4}}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$C_C = \sqrt{1-ae^{-j\frac{\pi}{4}}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, a 为分光比,直通臂和耦合臂相位差为 $\pi/2$ 。

理想的偏振器能产生线偏振光,实际上不可能产生理想的线偏振光,当消光比达到 40 dB 即振幅消光系数 ϵ 为 0.01 的时候能产生很好的线偏振光。偏振器的琼斯矩阵^[9]表示为

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{pmatrix} \quad (4)$$

目前陀螺一般使用保偏光纤,光纤的弯曲会产生应力双折射,扭曲会导致快慢轴的旋转,这使得快慢轴的光矢量发生耦合从而产生偏振误差。理想的光纤环只会产生快慢轴的相位差而不会在快慢轴之间产生耦合,由于光矢量经过光纤环产生的绝对相对输出没有影响,所以在此只计及二者的相对相位差 ζ 以及 Sagnac 相移 ϕ_s ,顺时针和逆时针方向的矩阵表示为

$$T_{CW} = e^{j\phi_s/2} \begin{pmatrix} e^{j\zeta} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$T_{CCW} = e^{-j\phi_s/2} \begin{pmatrix} e^{j\zeta} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

在不同器件的尾纤熔接时会出现对轴误差,设第 i 个熔接点的对轴误差角度为 θ_i 。按照坐标变换的方法易得到旋转矩阵为

$$R(\theta_i) = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

文中所使用的是 PZT,顺时针和逆时针方向光矢量经过 PZT 有时间差 τ ,其琼斯矩阵为

$$M_{CW} = \begin{pmatrix} e^{j\phi_m(t)} & 0 \\ 0 & e^{j\phi_m(t)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$M_{CCW} = \begin{pmatrix} e^{j\phi_m(t-\tau)} & 0 \\ 0 & e^{j\phi_m(t-\tau)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

由于陀螺是一个环形光路,返回的光矢量需要在原来的坐标系统中研究,因此需要一个坐标变换矩阵 T ,其表示为

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

1.2 输出表达式

使用传输矩阵的方法得到光纤陀螺的输出相干矩阵,输出相干矩阵的迹即为输出光强.顺时针和逆时针的传输矩阵分别为

$$E_{CW} = C_T R(-\theta_2) P R(-\theta_3) C_T T R(\theta_6) M_{CW} R(\theta_5) T_{CW} R(\theta_4) C_C R(\theta_3) P R(\theta_2) C_C R(\theta_1) \quad (11)$$

$$E_{CCW} = C_T R(-\theta_2) P R(-\theta_3) C_C T R(\theta_4) T_{CCW} R(\theta_5) M_{CCW} R(\theta_6) C_T R(\theta_3) P R(\theta_2) C_C R(\theta_1) \quad (12)$$

总输出矩阵 E 为顺时针输出矩阵和逆时针输出矩阵的和,输出相干矩阵为

$$C_{out} = E C_{in} E^+ \quad (13)$$

输出光强为输出相干矩阵的迹,在理想的情况下陀螺输出表达式为

$$I_{out} = \frac{I_0}{16} (1 + \cos(\phi_s + \phi_m(t) - \phi_m(t - \tau))) \quad (14)$$

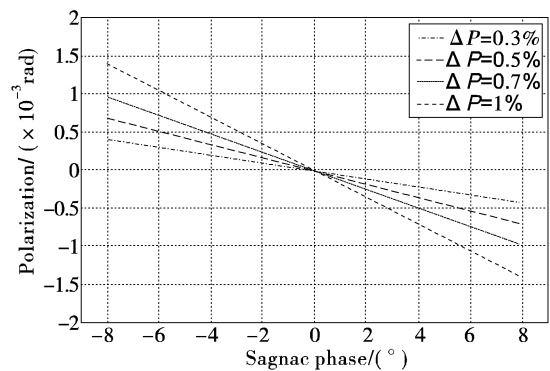
2 输出特性研究

在实际陀螺系统中,由于不同器件的偏离理想特性,不可避免的带来偏振误差,从而影响光纤陀螺的测量精度.在上述矩阵模型的基础上,重点讨论光源的偏振度和输出光功率波动、耦合器分光比波动以及系统中光纤尾纤熔接点对轴误差造成的偏振误差.文中所使用的理想参数和条件如下:光源中心波长 1310 nm,谱宽 50 nm,光强 10 cd,偏振度 0.6;光耦合器附加损耗为零,分光比 50:50;偏振器的振幅消光系数 ϵ 取零,即完全消光;光纤环无快慢轴的耦合,即理想保偏;标度因数不受波长稳定性的影响,即标度因数为常数.

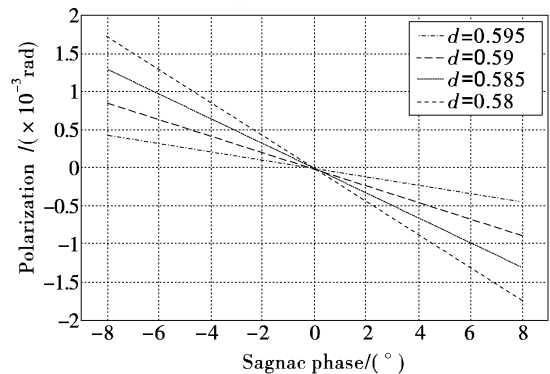
2.1 光源波动的影响

光源是陀螺系统中的关键器件,光功率的大小影响陀螺的灵敏度,光功率、光偏振度以及波长的稳定性影响陀螺的零偏^[9-11].光功率受工作温度的影响,工作温度呈现出平均值上下的随机波动的特点,因此光源的两个重要参数也具有随机波动的特性,基于这一点在做陀螺输出分析的时候一般需要对光源波动导致的误差做一个统计性的处理.图2给出光源波动对系统偏振误差的影响.从图2a可以看出,随着光源的波动增大,系统的偏振误差将增加,在 $-8^\circ \sim 8^\circ$ 的动态测量范围内,当功率波动小于 0.7%,偏振度波动小于 0.01 的时候最大平均漂移可以控制在 $50^\circ/h$ 内,

可以满足速率级的要求,目前,光源温控水平普遍能达到将功率波动水平控制在小于 0.7%;当功率波动小于 0.3%,偏振度波动小于 0.005 时的最大平均漂移接近 $10^\circ/h$,接近中等精度的要求.从图2b给出如果不考虑光功率波动,当偏振度分别为 0.595、0.59、0.585、0.58 时偏振误差随 sagnac 相移的变化曲线,当偏振度波动小于 0.01 时,最大平均漂移可以控制在 $50^\circ/h$ 内,满足速率级的要求;当偏振度波动小于 0.005 时,最大平均漂移接近 $10^\circ/h$,也接近中等精度的要求.



(a) 功率波动的影响



(b) 偏振度波动的影响

图2 光源波动对偏振误差的影响

2.2 耦合器分光比波动的影响

保偏光纤耦合器分光比具有温度依赖性、波长依赖性、双折射依赖性、偏振依赖性、耦合长度依赖性^[12-15]等多种影响因素,通常温度对保偏光纤耦合器分光比影响较为显著,文献[15]测量了温度变化对耦合器的分光比的影响,测量结果表明耦合器的分光比具有较强的温度敏感性.图3给出了在不同分光比下对应的系统偏振误差,随着耦合器分光比偏离理想值 50:50,其偏振误差将随着偏离度的增加而增加,而且随着测量角度而增大.但就目前生

产工艺而言,生产的耦合器的分光比普遍能达到 49:51,对比图 2 和图 3 可以看到,在普遍生产工艺条件下分光比波动相比光源波动所造成的偏振误差小一个数量级.对于速率级的陀螺仪而言,只要能达到 48:52 的分光比就能满足性能要求.接近 49.5:50.5 的耦合器完全可满足战术级的要求.

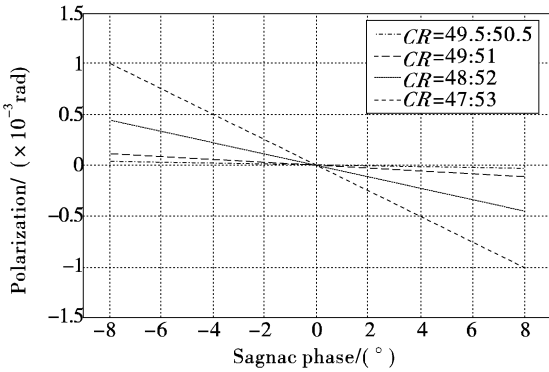


图 3 分光比与偏振误差

2.3 熔接点对轴误差的影响

在图 1 所示的开环光纤陀螺系统中,各器件的熔接点如 SLD 光源与耦合器的熔接点、耦合器与偏振器的熔接点及耦合器与光纤环间的熔接点等势必

存在对轴误差,从而影响光纤陀螺的测量精度.这里,在假设其他器件是理想的情况下,数值分析了各熔接点的对轴误差对系统的偏振误差的影响.图 4 给出了不同熔接点的对轴误差对系统偏振误差的影响.

从图 4 可以看出,随着熔接点对轴误差增加,系统的偏振误差增加,而且在同一对轴误差下,随着测量角度的增大,偏振误差线性增加.熔接点 3 对轴误差大约为其他熔接点的 3 倍,这说明耦合器 2 与偏振器尾纤的连接最为重要,在实际系统中应尽力缩小该熔接点的对轴误差.数值模拟过程显示熔接点 1、2 的误差相同,这表明耦合器 1 两端的熔接误差是完全对称的,同时这也与仿真研究时耦合器参数的理想化有关.熔接点 4、5、6 偏振误差相同,这说明光路的互易性,即对称位置的熔接点误差相同.

目前,较高精度的保偏熔接机消光比大于 40 dB 即对轴误差小于 0.6° ,一般的熔接机能达到 1.5° 的对轴误差.在约 1.5° 对轴误差的条件下,偏振误差(取熔接点 3 的误差约 2×10^{-4} rad)与耦合器波动所造成的偏振误差(49:51 分光比条件下的最大误差约 1×10^{-4} rad)属于同一个数量级,能满足中等精度陀螺的要求.

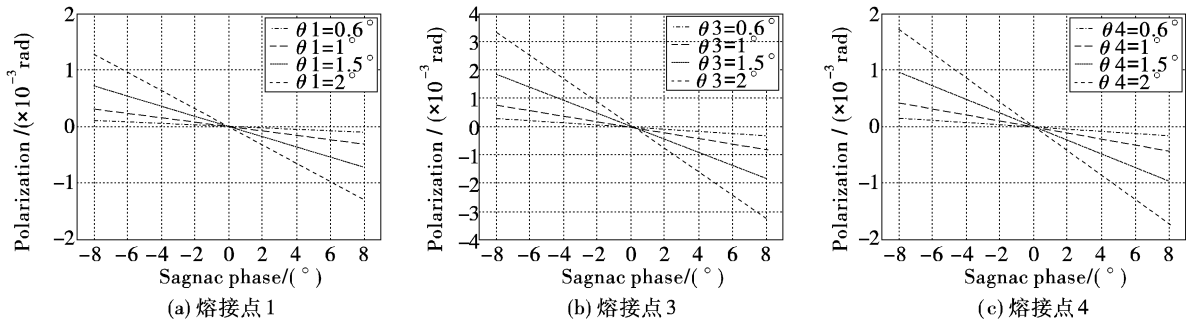


图 4 不同熔接点的对轴误差对系统偏振误差的影响

3 结 束 语

在开环光纤陀螺系统中,器件的非理想化将带来偏振误差,从而影响光纤陀螺的测量精度.文中根据光纤陀螺系统的结构特点,给出了陀螺系统不同元器件的矩阵模型,导出了开环陀螺的输出表达式,分析了光源偏振度和输出光功率波动、耦合器分光比波动以及系统中光纤尾纤熔接点对轴误差造成的偏振误差.分析结果表明,在诸多影响因素中,光源波动对陀螺系统的影响最大,耦合器分光比波动次

之,熔接点对轴误差的影响最小.因此在实际构建光纤陀螺系统时,应选择高稳定度的光源以保证光纤陀螺系统的测量精度,同时减小器件非理想化带来的偏振误差可有效保证光纤陀螺的测量精度,研究结果对进一步优化光纤陀螺系统结构,提高测量精度具有重要的意义.

参考文献

[1] LEFEVRE H. The Fiber Optic Gyroscopes[M]. Norwood: ArtechHouse, 1993.

门电平,用来驱动 DMOS 源端的门.其实现方法是在 CP1 和 CP2 之间接一个 $0.22 \mu\text{F}$ 的陶瓷电容.同时 VCP 和 VBB 间也需要一个 $0.22 \mu\text{F}$ 的陶瓷电容作为一个蓄能器,用来操作 DMOS 的高端设备.

RC1 和 RC2 引脚为内部 PWM 电路提供固定截止时间.截止时间 T_{off} 就由 RC1 和 RC2 引脚对地所接的电阻 R_t 和电容 C_t 决定,即

$$T_{\text{off}} = R_t \times C_t \quad (2)$$

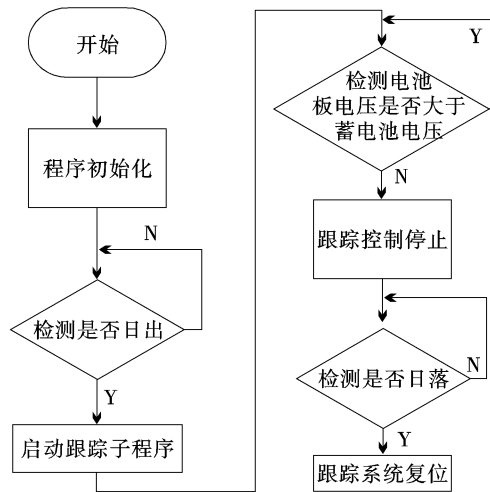


图6 跟踪主程序流程

式(2)中,电阻 R_t 和电容 C_t 的取值范围分别为 $12 \sim 100 \text{ k}\Omega$ 及 $470 \sim 1\,500 \text{ pF}$.

3 系统软件设计

单轴跟踪装置的整个工作过程完全由软件控制实现,具体控制流程如图6所示.

4 结 论

通过采用单片机控制步进电机带动太阳能电池板的旋转,有效提高了太阳能光伏系统的发电量,同时单轴跟踪具有技术难度低、经济性好、稳定性高的优点,尤其适用于 $100 \sim 1\,000 \text{ W}$ 功率范围内的光伏发电系统.而此类系统多应用于光伏照明及互用电源系统,由于此类光伏系统市场数量巨大,比单轴太阳能跟踪系统具有广阔的市场推广前景.

参考文献

- [1] 李学海. PIC 单片机使用教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [2] 张崇巍,郑昌瑜. 太阳能电池板自动跟踪系统的设计[S]. 天津:仪器仪表用户,2007.

(上接第57页)

- [2] 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(5): 256 - 259.
- [3] Jesse Zheng. All-fiber single-mode fiber frequency-modulated continuous-wave Sagnac gyroscope[J]. Optics Letters, 2005, 30(1): 17 - 19.
- [4] Hyang Kyun Kim, Member, Michel J F, et al. Air-Core Photonic-Bandgap Fiber-Optic Gyroscope[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(8): 3169 - 3171.
- [5] 张延顺. 干涉式光纤陀螺(IFOG)的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2002: 38 - 65.
- [6] 杨学礼,王雪峰,张蔚,等. 对准误差对光纤陀螺输出的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(7): 1658 - 1661.
- [7] 王琳. 偏振保持光子晶体光纤及其在光纤陀螺中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009: 103 - 112.
- [8] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 2006: 217 - 223.
- [9] G A Pavlath, H J Shaw. Birefringence and polarization effects in fiber gyroscopes [J]. Apply Optics, 1982, 21(10): 1752 - 1757.
- [10] 李彦,张春熹,欧攀,等. 光源偏振度对光纤陀螺零漂影响的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(6): 893 - 895.
- [11] G E Sandoval - Romero. Study of a superluminescent fiber radiator as a pumping source for a fiber-optic gyroscope[J]. J. Opt. Technol, 2007, 74(8): 573 - 577.
- [12] Itaru Yokohama, Kazunori Chida, Juichi Noda. Low excess conditions of polarization-maintaining fiber couplers[J]. Applied Optics, 1988, 27(23): 4807 - 4812.
- [13] Yoshinori Namihira, Toshio Kawazawa, Hiroharu Wakabayashi, et al. Incident polarization angle and temperature dependence of polarization and spectral response characteristics in optical fiber couplers[J]. Applied Optics, 1991, 30(9): 1062 - 1069.
- [14] 刘军号,黄榜才,段云峰. 熔锥型保偏光纤耦合器分光比的偏振依赖研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1524 - 1527.
- [15] 黄榜才,旁璐,李瑞辰,等. 光纤陀螺用小尺寸高温度稳定性保偏光纤耦合器的研制[J]. 光子学报, 2008, 37(2): 242 - 246.