

光纤陀螺消偏结构与偏振度关系的研究

柳建春^{1,2} 高立民¹ 李 康^{1,2} 邱仁峰^{1,2} 王 骏^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中科院研究生院, 北京 100039)

摘 要 利用在光源出端加单段保偏光纤和在消偏器后端加 Loya 消偏器, 可以使进入光纤线圈的光的偏振度降到 10^{-3} 数量级, 降低了因外界因素对线圈中光偏振态的影响而产生的光纤陀螺偏振误差。并用琼斯矩阵计算的方法, 分析了光路中四个胶合角与偏振度的关系及每个角度的取值范围。最后探讨了工艺上胶合角度测量与实现。

关键词 光纤陀螺; 消偏; 偏振度; 琼斯矩阵

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

光纤陀螺是一种基于光的 Sagnac 效应原理的新型惯性导航器件。相对于传统机电陀螺而言, 光纤陀螺具有尺寸小、功耗低、抗振动、抗电磁干扰、噪声小、线性度好、动态范围宽、灵敏度高、成本低等优点, 广泛地应用于军事和民用各领域^[1,2]。

光纤陀螺从 1976 年诞生至今不足 30 年, 但发展迅猛。采用全保偏数字斜波闭环检测方案的光纤陀螺零偏稳定性已经优于 $0.01^\circ/\text{h}$, 可满足战略级要求^[3]。在中等精度要求 ($0.1^\circ/\text{h}$) 的应用领域采用保偏光纤陀螺方案成本较高。目前国内外提出采用普通通信单模光纤的消偏方案, 具有非常明显的低成本优势, 在精度和稳定性等方面也取得很大进展。国外 Honeywell 公司和国内浙江大学对消偏光纤陀螺已进行多年研制^[4~8], 本文在他们研究的基础上提出一种新的结构和分析方法。

1 消偏原理

光纤陀螺要求系统具有互易性, 光在通过偏振器后, 不可能成为完全偏振光, 与起偏方向正交的方向上有少量光通过。由于外部环境的影响, 光在光纤线圈中传输将产生不确定的双折射, 正、逆程传播的光产生非互易相位差。光纤线圈中的两正交的偏振态之间的耦合使通过偏振器输入到光电检波器的光强幅度发生随机变化, 干涉条纹的分辨率降低, 从而限制了陀螺的精度。为了减小这种误差, 在光路中适当位置加入消偏器, 光源发出的光波(常为部分偏振光)经消偏器后, 成为完全非偏振光, 外界因素对它的影响变得不明显。

消偏常用 Loya 型光纤消偏器, 它由长度比为

1:2, 对应双折射主轴夹角为 45° 的两段高双折射保偏光纤构成。如图 1。其工作原理^[9~11]是: 偏振光通过偏振器后, 光的不同波长成份在输出端产生一个随机偏振态, 外界因素(主要是光纤弯曲和温度变化不均)引起的残余光纤双折射在所有可能的偏振态上均匀分布, 不能补偿消偏器产生的延迟, 输出光仍保持消偏。

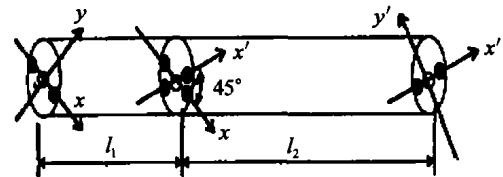
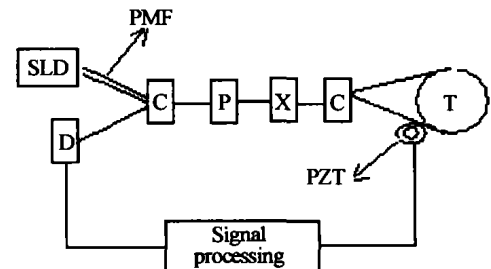


图 1 Loya 消偏器示意图
Fig. 1 Loya depolarizer

2 光纤陀螺光路结构计算

光纤陀螺消偏结构有以下几种: a、光纤线圈一端加消偏器; b、光纤线圈两端都加消偏器; c、光源后、光纤线圈单端均加消偏器。本文提出一种改进模型: 在光源与偏振器之间加入单段保偏光纤, 在偏振器与第二耦合器之间加入消偏器, 见图 2。



SLD: Photosource; D: Detector; C: Coupler; P: Polarizer; X: Depolarizer; PMF: Polarization Maintaining Fiber; PZT: Piezoelectric Transducer; T: Fiber Optic Coil

图 2 光纤陀螺结构简图
Fig. 2 FOG schematic diagram

通过计算发现, SLD 光源和分束/耦合器对采用不同消偏方案具有相同的影响, 统一作如下近似处理: SLD 发出理想线偏振光; 分束/耦合器分束比

为理想的 50 : 50.

采用消偏方案的目的是为了消除光在线圈中传输的偏振性,因而可以通过考察进入光纤线圈的光的偏振度判断消偏方案的优劣.

用琼斯矩阵表示光路器件的数学模型:光源琼斯矩阵为

$$E_{in} = E(\omega) \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

偏振方向与第一段保偏光纤主轴夹角为 α , 偏振器琼斯矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix} \quad (2)$$

偏振器消光比: $\eta = -10 \lg \epsilon^2 / \text{dB}$

保偏光纤琼斯矩阵

$$T = \begin{bmatrix} e^{j\beta_1 l} & 0 \\ 0 & e^{j\beta_2 l} \end{bmatrix} \quad (3)$$

变换矩阵

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

消偏器传输矩阵

$$X = T(L_2)R(\theta)T(L_1) \quad (5)$$

出射光

$$E_{out} = \begin{bmatrix} E_{ax} \\ E_{ay} \end{bmatrix} = XR(u)PR(\gamma)t(l)E_{in} \quad (6)$$

γ 为保偏光纤快(慢)轴与偏振器通过轴之夹角, u 为偏振器通过轴与消偏器第一段保偏光纤快(慢)轴之夹角.

计算出射光矩阵向量得

$$E_{ax} = [\cos \theta \cos u \cos \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_1 l_1) + \cos \theta \cos u \sin \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_2 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_1 l_1) - \epsilon \cos \theta \sin u \cos \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_1 l_1) + \epsilon \cos \theta \sin u \sin \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_2 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_1 l_1) - \sin \theta \sin u \cos \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_2 l_1) - \sin \theta \sin u \sin \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_2 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_2 l_1) - \epsilon \sin \theta \cos u \cos \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_2 l_1) + \epsilon \sin \theta \cos u \sin \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_2 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_2 l_1)] E(\tilde{\omega}) \quad (7)$$

$$E_{ay} = [-\sin \theta \cos u \cos \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_1 l_1) - \sin \theta \cos u \sin \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_2 l + j\beta_2 l_2 + j\beta_1 l_1) + \epsilon \cos \theta \sin u \cos \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_1 l_2 + j\beta_1 l_1) - \epsilon \sin \theta \sin u \sin \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_2 l + j\beta_2 l_2 + j\beta_1 l_1) - \cos \theta \sin u \cos \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_2 l_2 + j\beta_2 l_1) - \cos \theta \sin u \sin \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_2 l_2 + j\beta_2 l_1) - \epsilon \cos \theta \cos u \cos \alpha \sin \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_2 l_2 + j\beta_2 l_1) + \epsilon \cos \theta \cos u \sin \alpha \cos \gamma \exp(j\beta_1 l + j\beta_2 l_2 + j\beta_2 l_1)] E(\tilde{\omega}) \quad (8)$$

出射光的相干矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = E_{out} E_{out}^* = \begin{bmatrix} \langle E_{ax} E_{ax}^* \rangle & \langle E_{ax} E_{ay}^* \rangle \\ \langle E_{ay} E_{ax}^* \rangle & \langle E_{ay} E_{ay}^* \rangle \end{bmatrix},$$

$\langle \rangle$ 为时间平均 (9)

在计算相干矩阵的过程中,光源发出的非单色光具有一定的谱宽,所以保偏光纤传播系数也为光波频率的函数.从光源发出的线偏振光在传输轴上可以看作两个正交简并的偏振光的合成,光进入光纤线圈前经过三段保偏光纤(与光源连接处一段、消偏器两段),在垂直传输轴的两正交方向上沿时间分别拉开成 2^3 个波列,因为每个波列都有一定谱宽(光源谱宽),为了使光进入线圈后每个波列之间不相干,只存在强度上的相加,就要设计单段保偏光纤的长度,使相干度可以忽略不计.

第一段保偏光纤长度只要大于它的消偏长度即可^[1],对于采用 $\lambda = 1310 \text{ nm}$ 、谱宽 $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$ 的 SLD 光源,拍长 $p = 2.5 \text{ mm}$ 的保偏光纤,计算消偏长度 $d = \frac{p\lambda}{\Delta\lambda} \approx 12 \text{ cm}$,为了达到较好的效果和屏蔽外界影响,需要适当延长,取保偏光纤长度为 50 cm .

对于消偏器的设计,结合文献[4]的结论, $l_1 = 1.6 \text{ m}$, $l_2 = 3.2 \text{ m}$,取 2 m 和 4 m .经过上面设计,波列之间的相干性可忽略为零

但考察式(7)、(8)发现,各自 8 个波列中第一第三项、第二第四项、第五第七项、第六第八项四对式子的指数项相同,也就是说不论怎么设计保偏光纤长度,都不能使它们完全拉开,存在相干项,但是相干度为 1,光强等于强度相加.

计算相干矩阵项得

$$J_{11} = \cos^2 \theta \cos^2 u \cos^2 \alpha \cos^2 \gamma + \cos^2 \theta \cos^2 u \cdot \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \cos^2 \theta \sin^2 u \cos^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \cdot \cos^2 \theta \sin^2 u \sin^2 \alpha \cos^2 \gamma + \sin^2 \theta \sin^2 u \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma + \sin^2 \theta \sin^2 u \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \sin^2 \theta \cdot \cos^2 u \cos^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \sin^2 \theta \cos^2 u \sin^2 \alpha \cos^2 \gamma - \frac{1}{2} \epsilon \cos 2\theta \sin 2u \cos 2\alpha \sin 2\gamma \quad (10)$$

$$J_{22} = \sin^2 \theta \cos^2 u \cos^2 \alpha \cos^2 \gamma + \sin^2 \theta \cos^2 u \cdot \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \sin^2 \theta \sin^2 u \cos^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \cdot \sin^2 \theta \sin^2 u \sin^2 \alpha \cos^2 \gamma + \cos^2 \theta \sin^2 u \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma + \cos^2 \theta \sin^2 u \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \cos^2 \theta \cdot \cos^2 u \cos^2 \alpha \sin^2 \gamma + \epsilon^2 \cos^2 \theta \cos^2 u \sin^2 \alpha \cos^2 \gamma + \frac{1}{2} \epsilon \cos 2\theta \sin 2u \cos 2\alpha \sin 2\gamma \quad (11)$$

$$J_{12} = J_{21}^* \quad (12)$$

偏振度

$$P = \sqrt{1 - \frac{4 \det J}{(\text{tr} J)^2}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{tr}J &= J_{11} + J_{22} = M_0 \\ \det J &= |J| = J_{11}J_{22} - |J_{12}|^2 \end{aligned} \tag{14}$$

分别将式(10)、(11)、(12)、(14)代入式(13),可以得到偏振度的表达式,用来衡量消偏方案的优劣.

3 分析讨论

在光源出口处加保偏光纤的目的是把进入光路系统的光在两个正交偏振方向上沿时间轴拉开,去相关性.对保偏光纤的长度进行设计后,两正交偏振光相干度近似为零.另外,由于偏振器的不理想,保偏光纤前后分别与光源和偏振器连接的对准角 α 对 γ 进入线圈光的偏振度也有影响.因为偏振器消光系数不能为零,所以总有一部分光在垂直于偏振器通过轴的方向上有分量,又因为消偏器两段保偏光纤对准角 θ 不严格为 45° ,不能对任意输入偏振态的光都消偏,所以要求尽量降低这一方向上光的通过量,除采用高消光比的偏振器外,通过调节进入消偏器的光的偏振化方向也可以实现.对于消偏器的不理想,通过调节偏振器通过轴与消偏器第一段保偏光纤快(慢)轴的夹角 u 来补偿.

出射光的偏振度是 $\alpha, \gamma, \theta, u$ 四个角度值的函数,对式(14)赋值计算发现,只有消偏器两保偏光纤的对准角 θ 严格为 45° ,才能做到对任意偏振态的光消偏.目前消偏器对准角可以做到 $45^\circ \pm 1^\circ$ 范围内,以最大偏差 44° 计算,考察其他三个角度值对偏振度贡献的大小.因为四元方程无法用空间坐标系表示,所以把偏振度用颜色深度表示,可以粗略看出三个角度量对偏振度的影响.如图 3.

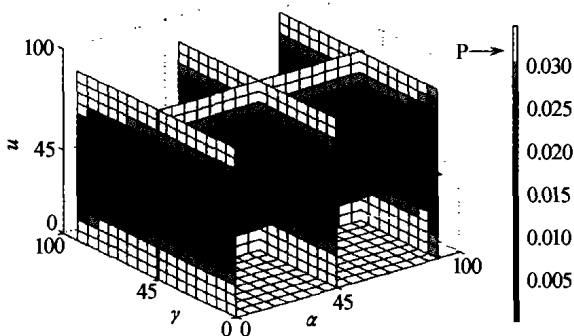


图 3 三个角度值对偏振度 P 的影响
Fig. 3 Influence of three angles to polarization

从图 3 可以看出,在 $u = 45^\circ$ 颜色最深,对偏振度影响最大的是 u 值,而角度 α 和 γ 影响不明显.

固定角度 α 和 γ (随机代入一组角度值), θ 和 u 对偏振度的影响如图 4.

只有当 θ 和 u 在 45° 附近,偏振度值接近于零.虽然 θ 或 u 分别等于 45° 都可以降低偏振度值,但对于偏离 45° 的情况, θ 和 u 可以互相校正对方的偏离情况,降低偏振度.

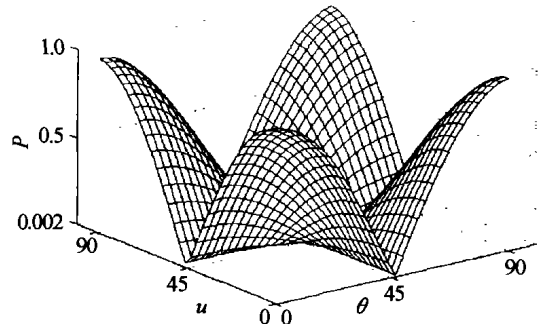


图 4 角度 θ 和 u 对偏振度的影响
Fig. 4 Influence of θ & u to polarization

固定 $\theta = 44^\circ$ (精度较高) $u = 43^\circ$ (精度较低). 考察角度 α 和 γ 对偏振度的影响,如图 5.

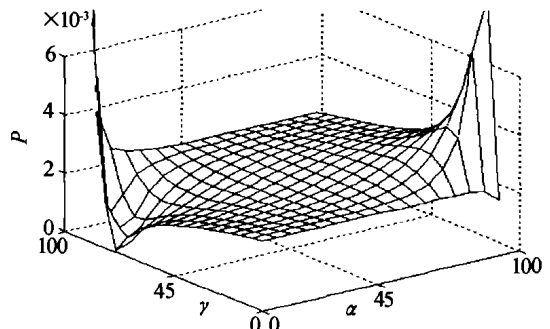


图 5 角度 α 和 γ 对偏振度的影响
Fig. 5 Influence of α & γ to polarization

因为消偏器能做到 $\epsilon = 0.01$ 以下,在垂直于起偏方向的光通过量非常小,角度 α 和 γ 变化对偏振度影响相对比较小,但是在点 $(0^\circ, 90^\circ)$ 和 $(90^\circ, 0^\circ)$ 附近偏振度急剧升高.而且在这两种情况下,从光源发出的偏振光通过保偏光纤进入偏振器的光能量非常小,讨论消偏没有意义.但光在平行于偏振器起偏方向的分量越大,通过光能量越多,所以角度 α 和 γ 要做到尽量小.

以目前工艺精度, α 和 γ 可做到 $0^\circ \pm 3^\circ$ (低要求), θ 可做到 $45^\circ \pm 1^\circ$ (高要求), u 可做到 $45^\circ \pm 2^\circ$ (较高要求) 范围.取各自的最大偏差, $\alpha = \gamma = 3^\circ$, $\theta = 44^\circ$, $u = 43^\circ$,代入前面偏振度计算公式,可以得到偏振度 $p = 0.24\%$.对于同等工艺水平,光源后不加保偏光纤,偏振器后加消偏器,入射到光纤线圈的光的偏振度 $p = 0.247\%$,偏振度变化不大,但是加入保偏光纤保证了入射光能量和系统初始端偏振保持;光源后加消偏器,偏振器后也加消偏器,射入光纤线圈光的偏振度 $p = 0.24\%$,偏振度值相等但系统多增加了一个消偏器,增加成本.可以看出,采用这种结构可以在不影响消偏效果的情况下保证了入射光功率,节约了成本.

对准角度值精度很大程度上决定了消偏结构的消偏效果.角度对准主要是针对保偏光纤的焊接工艺或保偏接头连接精度.对角度 α 和 γ 的连接如图 5,满足低偏振情况下,采用光功率计寻找光强最

大点,理论上在 $\alpha=\gamma=0^\circ$ 点. θ 角属于消偏器性能参数,对它的对准精度控制可以采用线偏振光入射,在出射端检测如果在各个偏振方向光强一样,则达到理想消偏. 从上面计算看出,在 $\theta=45^\circ$ 理论上完全消偏. 对于 u 角也采用上面方法边检测边控制,在理想位置再固定连接.

4 结论

Loyt 消偏器两段保偏光纤快慢轴对准精度和其他光路器件连接的角度对准问题决定了消偏型光纤陀螺的性能. 文章提出一种新的方法,通过衡量光纤线圈前光的偏振度大小判定消偏结构的性能优劣. 对文中提到的结构,采用琼斯矩阵法计算,偏振度达到 10^{-3} 量级,与其它光路结构得到的偏振度值保持同一数量级,但结构简单,成本降低. 最后通过分析和计算,得出每个光纤对准角与出射光偏振度的关系,为光纤陀螺研制提供理论依据.

参考文献

- 1 Hever C. Iefevere (法)著. 张桂,王巍译. 光纤陀螺仪. 北京:国防工业出版社,2002. 15~17
Hever C. Iefevere. The Fiber-Optic Gyroscope. Zhang Guicai, Wang Wei transl. Beijing: National Defence Industry Press,2002. 15~17
- 2 杨建春,张桂才. 光纤陀螺—一种重新的全固态惯性仪表. 光子学报,2000,29(21):307~312
Yang J C, Zhang G C. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(21):307~312
- 3 曾桂林. 光纤陀螺技术发展及军需分析. 应用光学,2001, 22(1):1~4

- Zeng G L. *Apply Optics*, 2001, 22(1):1~4
- 4 张桂才,王巍,杨宏,等. 闭环消偏光纤陀螺研究. 导航与控制,2003,2(4):41~50
Zhang G C, Wang W, Yang H, et al. *Navigation and Control*, 2003, 2(4):41~50
 - 5 延风平,姚毅,简水生. 基于 Lyot 型光纤消偏器的理论研究. 光学学报,1996,16(6):848~852
Yan F P, Yao Y, Jian S S. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(6):848~852
 - 6 周柯江,王涛. 具有低长期漂移的单模光纤陀螺. 仪器仪表学报,1996,17(6):584~587
Zhou K J, Wang T. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1996, 17(6):584~587
 - 7 叶伟,周柯江. 中高精度光纤陀螺的分形噪音研究. 光子学报,2000,29(6):517~521
Ye W, Zhou K J. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(6):517~521
 - 8 牟旭东,周柯江. 消偏光纤陀螺的理论和实验研究. 光子学报,2002,31(9):810~813
Mou X D, Zhou K J. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(9):810~813
 - 9 Pavlath G A, Shaw H J. Birefringence and polarization effects in fiber gyroscope. *Appl Opt*, 1982, 21(10):1752~1757
 - 10 Bogdan Szafraniec. Theory of Polarization Evolution in Interferometric Fiber-Optic Depolarized. *J Light Technol*, 1999, 17(4):579~590
 - 11 苏广文,马恒坚. 光纤消偏器的原理及性能分析. 光子学报,1997,26(10):924~928
Su G W, Ma H J. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(10):924~928

Research on the Relationship Between Depolarized Structure of Fiber Optic Gyros and Degree of Polarity

Liu Jianchun^{1,2}, Gao Limin¹, Li Kang^{1,2}, Qiu Renfeng^{1,2}, Wang Jun^{1,2}

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School Chinese Academy of Science, Beijing 100039

Received date: 2004-10-14

Abstract By adding Polarization Maintaining Fiber on output terminal of SLD and Loyt depolarizer behind polarizer, the Degree of polarity can be reduced to 10^{-3} , and influence of outside conditions to light-wave state of polarization can be reduced too. And by calculating with Jones matrix, the relationship between four joint angles and polarization was discussed, and range of four joint angles was limited. In the end, how to link the fiber-optic and measure the joint angles was discussed.

Keywords Fiber-optic gyroscope; Depolarization; Degree of polarity; Jones matrix

Liu Jianchun was born in 1980. He received B. S. degree from Xi'an Science and Technology University. Now he is working towards the M. S. degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His researches focus on fiber-optic sensor.

