

双偏振光纤陀螺光源特性研究

廖恢齐¹ 罗荣亚¹ 邓 圣¹ 彭 超^{1,2*} 赵建业¹ 高繁民¹ 李正斌^{1,2}

¹北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

²区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871

摘要 偏振非互易误差是光纤陀螺中的主要误差来源之一。双偏振光纤陀螺中两正交偏振态所含偏振非互易误差存在反号特性,因此可利用光域补偿抑制偏振非互易误差。基于双偏振光纤陀螺理论和模型,研究光源特性对双偏振光纤陀螺性能的影响,发现相干长度小且偏振度(DOP)低的光源有利于补偿偏振非互易误差,从而改善双偏振光纤陀螺的长时间稳定性性能。实验表明,双偏振光纤陀螺中采用超荧光光纤光源或消偏的超辐射发光二极管,可实现偏振非互易误差的有效补偿。

关键词 光纤光学;光纤陀螺;偏振非互易误差;双偏振

中图分类号 TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0505009

Characteristics of Light Source Based on Dual Polarization Fiber Optic Gyroscope

Liao Huiqi¹ Luo Rongya¹ Deng Sheng¹ Peng Chao^{1,2} Zhao Jianye¹
Gao Fanmin¹ Li Zhengbin^{1,2}

¹School of Electrics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

²State Key Laboratory on Advanced Optical Communication Systems & Networks, Beijing 100871, China

Abstract Polarization nonreciprocal phase error is one of major errors in fiber optic gyroscope (FOG). In dual polarization FOG, the polarization nonreciprocal phase error in two orthogonal polarization modes possesses opposite signs, which can be compensated optically. The influences of light source on performance of dual polarization FOG are discussed based on the dual polarization FOG theory and model, which shows that the bias stability of dual polarization FOG is improved by short coherence length and low degree of polarization (DOP). Experiment results show that super luminescent diode (SLD) or super-fluorescent sources (SFS) can be adopted to compensate polarization nonreciprocal error effectively under conditions of short coherence length and low DOP in dual polarization FOG.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; polarization nonreciprocal error; dual polarization

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2430; 06.2800

1 引 言

光纤陀螺(FOG)是基于 Sagnac 效应用以测量角速度的运动传感器,以其可靠性高、启动快、重量轻、动态范围大等优点,在惯性制导、导航定位、运动姿态控制等方面具有广阔的应用前景^[1]。经过近 40 年的发展,光纤陀螺技术逐步成熟,被广泛应用于军事和民用领域。特别是基于“最小互易结构”的干涉式光纤陀螺,由于其在抑制噪声方面的性能优势而被广泛地研究和使用的,成为绝大多数干涉式光纤陀螺设计的结构基础^[2]。

在干涉式光纤陀螺中,偏振非互易误差会受温度、应力等因素的影响而随机波动,进而严重影响了光纤陀螺的长时间稳定性性能。基于最小互易结构的干涉式光纤陀螺有两种较为成熟的抑制偏振非互易误差方

收稿日期: 2016-01-11; 收到修改稿日期: 2016-02-17

基金项目: 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室自主课题(2015ZZ002)

作者简介: 廖恢齐(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤陀螺方面的研究。E-mail: pkulhq@pku.edu.cn

导师简介: 李正斌(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤陀螺方面的研究。E-mail: lizhengbin@pku.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: pengchao@pku.edu.cn

法。一种是采用保偏光纤环的保偏方案^[3-10],该方案一般采用偏振消光比高的多功能集成光波导调制器(MIOC)和偏振保持能力强的保偏光纤,通过使陀螺工作在单一偏振状态,从而实现高精度的转动传感。另一种是采用单模光纤环的消偏方案,浙江大学和美国 Honeywell 公司等研究小组对此结构开展了富有成效的研究^[11-14],该方案采用起偏器与 Lyot 消偏器,通过消除环内非互易光的相干性,进而抑制偏振非互易性以实现转动传感。上述两种方案的核心思想都是通过偏振保持来抑制偏振非互易误差,提高光纤陀螺的长时间稳定性。

20 世纪 80 年代,人们提出了双偏振陀螺的构想,即在单模光纤环中利用 2 个偏振模式进行转动传感。美国斯坦福大学的 Palvlath 等^[15]讨论了工作在完全消偏光状态的光纤陀螺的理论可行性;美国海军研究实验室的 Burns 等^[16]用消偏光源和普通单模光纤环实现了可相对稳定工作的干涉式光纤陀螺;俄罗斯科学研究院的 Andronova 等^[17]在对 FOG 偏振态分析的研究工作中,也分析了双偏振工作 FOG 的可用性,他们在 2008 年提出的双偏振 FOG 结构中,采用 500 m 的光纤环,实现了 1°/h 的零偏稳定性^[18]。但相关研究限于可用性论证,得到陀螺精度较低。近年来,基于双偏振的新型陀螺结构成为研究热点,包括利用偏振分束、双倍再入以及双干涉原理的双偏振实现方案等^[19-21]。

本课题组在双偏振光纤陀螺(IFOG)结构方面也展开了大量研究工作,提出了一种不同于“最小互易结构”的新型双偏振光纤陀螺方案。该方案利用两正交偏振态所含偏振非互易误差大小相等符号相反的特性,通过光强叠加以实现光域补偿,进而抑制偏振非互易误差^[22]。本课题组的前期工作表明,在双偏振方案中,传统意义上的非互易端口成为可用的信号端口,甚至可以实现单耦合器陀螺结构,从而大大简化了结构复杂度^[23]。实验表明光域补偿机制在温度变化下仍然有效^[24]。系列研究结果表明,双偏振陀螺简化了光纤陀螺结构,对器件的要求显著降低,从理论和实验上证明了实现低成本、高性能光纤陀螺的可能性。由于避免了使用昂贵的光纤保偏器件,该方案在成本上具有竞争力。

由于在双偏振陀螺的理论和实验研究中均采用了基于掺铒光纤的超荧光光纤光源(SFS),虽然该光源具有光谱范围宽、光谱平坦等优点,但成本略高。而超辐射发光二极管(SLD)作为宽带光源具有尺寸小、成本低等优点,在低成本光纤陀螺中被广泛应用。因此,本文进一步研究光源特性,特别是光源的偏振度(DOP)和相干性,对双偏振光纤陀螺性能的影响。研究表明,采用相干长度小、偏振度低的宽带光源有利于抑制双偏振光纤陀螺中的偏振非互易误差;SFS 和 SLD 具有不同的偏振和相干谱特性,但经适当处理都可在双偏振光纤陀螺中获得相当的性能。

2 基本原理

2.1 双偏振光纤陀螺理论

本课题组提出了双偏振光纤陀螺理论模型^[22-25],典型的双偏振光纤陀螺的光路原理如图 1 所示^[25]。图中 light source 为宽带光源,PIN1、PIN2 为 InGaAs 光电探测器,分别用以探测互易端和非互易端信号,coupler1、coupler2 为 2×2 单模耦合器,D1、D2、D3 是 Lyot 消偏器,PZT 为压电陶瓷,SMF coil 为 2 km 长的单模光纤环。若图 1 中 C 点的光波可以写成不相干的两个偏振态的形式,对光强归一化之后的简化形式即为^[25]

$$E_C = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{(1+d)}{2}} \exp(-j\Delta\phi) \\ \sqrt{\frac{(1-d)}{2}} \end{bmatrix} \exp(j\omega_0 t), \quad (1)$$

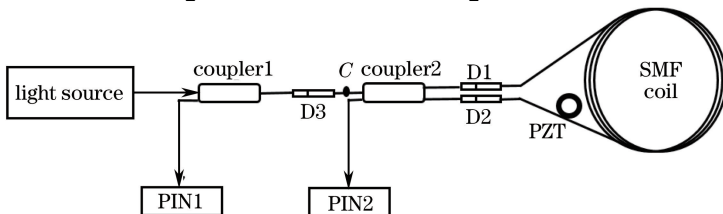


图 1 双偏振光纤陀螺的光路原理图

Fig. 1 Schematic of IFOG

式中 $\Delta\phi$ 为两偏振态之间的相位差, ω_0 为光波频率, d 为 C 点光波的偏振度。

单模光纤环中的随机偏振耦合由多方面原因引起, 包括第 2 个耦合器、相位调制器、光纤环的偏振不理想特性等。顺时针光波(CW 光波)在光纤环中的偏振态变化可以整体写成一个矩阵^[25]:

$$\mathbf{M}_r^+ = \begin{bmatrix} C_{r1} & C_{r2} \\ C_{r3} & C_{r4} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中“+”表示顺时针, 下标中“r”表示的是互易端口, 其中 C_{r1} 、 C_{r2} 、 C_{r3} 、 C_{r4} 为与元器件偏振特性有关的复数。由于顺时针光波与逆时针光波(CCW 光波)经历同样的光路, 在没有外界影响时其传输过程是互易的。暂且忽略 Faraday 效应, 则 CCW 光波所经历的偏振态转移矩阵具有与 CW 光波互易的形式, 即 C_{r1} 和 C_{r4} 保持不变, C_{r2} 和 C_{r3} 位置互换^[25], 其矩阵可写成

$$\mathbf{M}_r^- = \begin{bmatrix} C_{r1} & C_{r3} \\ C_{r2} & C_{r4} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中“-”表示逆时针。CW 光波与 CCW 光波绕环一周后的相位差理论值为 $\phi_r = \phi_s + \Delta\phi(t)$, 其中 ϕ_s 为 Sagnac 相移, $\Delta\phi(t)$ 为调制器引入的动态相位偏置。返回互易端检测的光波成分包括 CW 和 CCW 两部分^[25], 可表示为

$$\mathbf{E}_r^+ = \mathbf{M}_r^+ \mathbf{E}_C \exp(j\phi_r), \quad \mathbf{E}_r^- = \mathbf{M}_r^- \mathbf{E}_C, \quad (4)$$

CW 和 CCW 光波干涉得到用于角速度检测的信号 I_r , 可以写成^[25]

$$I_r = I_{r0} + k \cos(\phi_r - \Delta\phi_r), \quad (5)$$

$$\Delta\phi_r = \arctan \frac{2d |C_{r1} C_{r2}| \Gamma(z_{r23}) \sin\phi_{r23}}{|C_{r1}|^2(1+d) + |C_{r4}|^2(1-d) + 2|C_{r2} C_{r3}| \Gamma(z_{r23}) \cos\phi_{r23}}, \quad (6)$$

式中 I_{r0} 是对检测信号没有直接影响的直流分量, k 为对比系数, $\Delta\phi_r$ 为相位误差, $\Gamma(z)$ 是光源的相干度, z_{r23} 是 $C_{ri} C_{rj}^*$ 引入的等效双折射光程差, ϕ_{rij} 是 $C_{ri} C_{rj}$ 的相位, $i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。

计算过程中假设消相干理想, 即忽略相位差大于 $\Delta\phi$ 的光波彼此间的相干性。由(6)式可知, 若 $d=0$, 即入环的光波两正交偏振态的光不相干且功率均衡时, 则偏振非互易误差得到完美补偿。

双偏振光纤陀螺利用 Lyot 消偏器, 将入射光均衡地分解到正交的 2 个偏振方向上、且 2 个偏振方向上的光互不相干, 形成 1 束双偏振光。当双偏振光从敏感环中出射并发生干涉时, 2 个正交偏振方向上的光波由于不相干, 将分别发生干涉并形成强度叠加效果。因为 2 路干涉的偏振非互易相位误差等大反号, 因此可以通过强度叠加的效果使得偏振非互易误差得到补偿, 从而保证 FOG 能够稳定工作。

2.2 双偏振光纤陀螺对光源的性能要求分析

由双偏振光纤陀螺理论可知, 若入环光波为不相干且功率均衡的双偏振光, 则光纤环中的偏振非互易误差可以得到有效补偿。若要在入环前达到理想双偏振光的状态, 要求光源输出低偏振状态光, 并通过消偏来实现功率均衡。

在光纤传感和光纤陀螺中光纤消偏器一般采用 Lyot 消偏器, 它由 2 段长度比为 1:2 的保偏光纤 45°熔接而成。Lyot 消偏器的作用包括 2 段双折射介质的消相干过程和中间的 1 个偏振旋转过程, 其 Jones 矩阵可以写成如下形式

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\beta L_2) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma_1 & -\sin\gamma_1 \\ \sin\gamma_1 & \cos\gamma_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\beta L_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 L_1 和 L_2 分别为 2 段保偏光纤的长度, γ_1 为 2 段保偏光纤的偏振主轴夹角, $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$ (β_x 和 β_y 为保偏光纤双折射轴的传播常数)。

设光源的偏振度为 d_s , 其本征偏振轴为 (x_s, y_s) , Lyot 消偏器第 1 段保偏光纤的偏振轴为 (x, y) , θ_s 为 (x_s, y_s) 轴与 (x, y) 轴的夹角, 则光源经过 Lyot 消偏器后的偏振度可以写为

$$d_r = d_s \{ \cos^2 2\theta_s [\cos^2 2\gamma_1 + \gamma^2(L_2) \sin^2 2\gamma_1] + \sin^2 2\theta_s [\gamma^2(L_1 + L_2) \cos^4 \gamma_1 + 2\gamma(L_2 - L_1)\gamma(L_1 + L_2) \sin^2 \gamma_1 \cos^2 \gamma_1 + \gamma^2(L_2 - L_1) \cos^4 \gamma_1] + \sin^2 2\theta_s \sin^2 2\gamma_1 \cos^2(\Delta\beta L_1) [\gamma^2(L_1) - \gamma(L_2 - L_1)\gamma(L_1 + L_2)] - \sin 4\theta_s \sin 2\gamma_1 \cos(\Delta\beta L_1) \cdot [\gamma(L_2)\gamma(L_1 + L_2) \cos^2 \gamma_1 - \gamma(L_1) \cos 2\gamma_1 - \gamma(L_2)\gamma(L_2 - L_1) \sin^2 \gamma_1] \}^{1/2}, \quad (8)$$

式中 $\gamma(L)$ 为光波的互相干函数,与保偏光纤的消偏长度 L_d 有关:

$$\gamma(L) = \exp\left\{-\left[\frac{\pi L}{2\sqrt{\ln(2L_d)}}\right]^2\right\}. \quad (9)$$

为简化起见,假设(9)式满足条件^[26]:

$$\begin{cases} \gamma(L) = 0, & L \geq L_d \\ \gamma(L) = 1, & L < L_d \end{cases}, \quad (10)$$

当且仅当 $\min(L_1, L_2, L_2 - L_1) \geq L_d$ 时,输出光的偏振度为

$$d_T = d_s |\cos 2\theta_s| |\cos 2\gamma_1|. \quad (11)$$

由(8)式、(9)式可知,Lyot 消偏器的消偏效果与光源的相干长度有关。Lyot 消偏器的长度一定时,光源的相干长度应尽量小。由(11)式可知,Lyot 消偏器的光纤长度足够长时,Lyot 消偏器的消偏效果主要取决于光源的偏振度及 Lyot 消偏器两段保偏光纤的熔接精度。因此,在 Lyot 消偏器长度固定时,低偏振度且相干长度低的光源可以获得功率更均衡的消相干光,更有利于补偿光纤环内的偏振非互易误差,提高双偏振光纤陀螺的零偏稳定性。

3 实验与讨论

3.1 实验方案

为验证光源偏振度对双偏振光纤陀螺长时间稳定性的影响,采用 SFS 和 SLD 两种宽带光源,在不同光源偏振度情况下,分别测试光纤陀螺输出的稳定性。

由于发光的物理机制不同,上述两种光源具有不同的物理特性。超荧光是一种放大的自发辐射,掺杂光纤被光抽运到准连续的高能级上以建立较大的光学增益,某些自发辐射的光子被掺杂光纤纤芯俘获并沿光纤传播时被放大,进而输出宽谱荧光。通过引入长周期光纤光栅等技术,该类光源具有很好的光谱平坦性。但由于一般掺杂光纤不是偏振保持的(本实验采用非保偏掺铒光纤),因此超荧光光纤光源输出光的偏振度通常很低。

与 SFS 不同,SLD 是基于行波放大的半导体光源。通过注入电流到半导体增益介质产生光放大,并尽量抑制端面反射以支持光波单程放大的受激辐射,其输出特性介于激光二极管和发光二极管之间。由于该光源中光在波导中传播,因此输出光一般为具有较高偏振度的部分偏振光。为了模拟低偏振度的 SLD,实验中设计了在光源后加消偏器的结构。

理论模型表明,实现光域补偿要求光源具有消相干且功率平衡特性。实验表明,具有低偏振、宽光谱的 SFS 光源是一种适应双偏振方案的理想光源。实验光路结构如图 1 所示,其中光源部分分为 4 种不同的情况,分别为 SFS 光源、SFS 光源加起偏器、SLD 光源、SLD 光源加消偏器,如图 2 所示。SFS 为中心波长 1550 nm、谱宽 29.6 nm 的掺铒光纤光源,SLD 的中心波长为 1550 nm,谱宽为 55.0 nm。

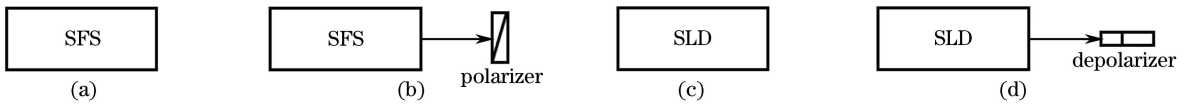


图 2 不同的光源组合

Fig. 2 Schematic of different light sources

实验采用开环谐波检测方案解调旋转角速度,以地球自转角速度为测试对象。实验装置水平静置于光学平台上。实验室所在纬度为 39.99° ,所对应的地球自转角速度理论投影值为 $9.666^\circ/\text{h}$ 。陀螺输出信号采用 22 位精度、2 MHz 采样速率的 NI 数字卡(NI PXI 5922)采集。通过 Labview 平台采集陀螺互易端和非互易端输出信号。

3.2 光源偏振度对双偏振光纤陀螺的影响

实验中使用的 SFS 光源经偏振分析仪(PSGA-101-A)测试其偏振度为 1.6%,证实了该类型光源的低偏振特性。为模拟同样光谱形态下的高偏振 SFS 光源,如图 2(b)所示在光源后引入一个额外的起偏器,偏振

分析仪测试起偏后偏振度为 98%。同样,偏振分析仪测得 SLD 光源为偏振度为 99% 的高偏光源。为降低 SLD 的偏振度,如图 2(d)所示在光源后引入了一个消偏器。实验测量经消偏后的光源偏振度为 8.7%。

对不同特性的光源分别进行了 3 h 的长时间测试,其解调角速度时域数据如图 3 所示。图 3(a)中,由于 SFS 光源的偏振度较低,经 Lyot 消偏器 D3 后,入环光波的两正交偏振态是消相干且功率均衡的,根据光域补偿理论,互易端和非互易端的偏振非互易误差都能得到较好的补偿,陀螺解调数据在时域上较平稳。对比图 3(b),SFS 光源在经过起偏器后偏振度较高,虽然 Lyot 消偏器 D3 具有一定的消偏效果,但 C 点的光波两正交偏振态功率仍不够均衡,两偏振态产生的偏振非互易误差大小不一致,所以偏振非互易误差无法完全补偿,陀螺输出含有较大误差。

本实验中使用的 SLD 光源具有与 SFS 光源可比拟的谱宽性能,但偏振度显著高于 SFS 光源。在图 3(c),采用高偏振度的 SLD 光源无法完全补偿偏振非互易误差,对比图 3(a),图 3(c)展现出时域上有明显波动,表明采用高偏 SLD 光源后陀螺的长时间稳定性明显恶化了。

上述结果表明,光源偏振度对双偏振陀螺的稳定性能至关重要。图 3(d)显示,高偏振度的 SLD 光源经消偏器后输入双偏振光纤陀螺,其性能明显改善。由于偏振度的降低,经 Lyot 消偏器 D3 消偏后入环的光波两偏振态之间的功率足够均衡,因此两偏振态光波在光纤环中产生的非互易偏振误差的光域补偿更为有效,与图 3(a)的结果类似,陀螺输出在时域上较平稳。

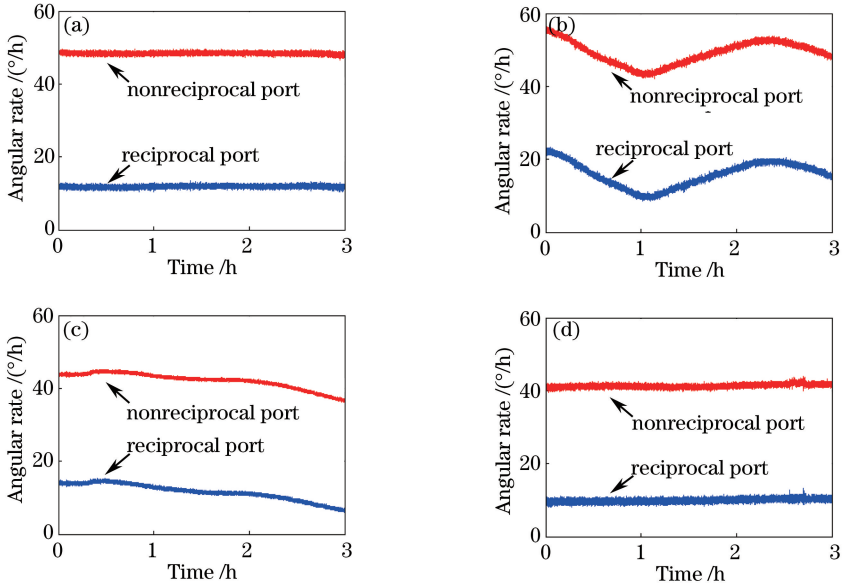


图 3 采用图 2 中不同光源组合时的陀螺输出

Fig. 3 IFOG output results under different light sources in Fig. 2

上述实验表明,SFS 光源与消偏后的 SLD 光源都可用于双偏振方案中。对上述情形如图 3(a)和 3(d)所示 2 组平稳测试结果做 Allan 方差分析,结果如图 4 所示。采用低偏振度 SFS 光源时,互易端和非互易端

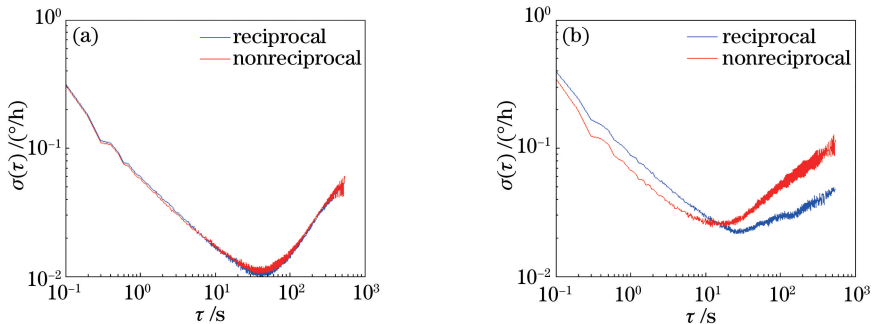


图 4 图 3(a)和(b)中 2 组平稳测试结果的 Allan 方差曲线

Fig. 4 Allan variance analysis curves of smooth test results in Fig. 3 (a) and Fig. 3 (b)

的零偏稳定性 $\sigma(\tau)$ 均达到了 $0.01^\circ/\text{h}$, 采用 SLD 光源加消偏器模拟的低偏振度光源时, 互易端的零偏稳定性达到了 $0.02^\circ/\text{h}$ 。

实验结果表明, 无论采用 SFS 光源还是 SLD 光源, 过高的偏振度都会在双偏振光纤陀螺中残留较大的偏振非互易误差。降低光源的偏振度, 有利于补偿偏振非互易误差, 提高双偏振光纤陀螺零偏稳定性。采用消偏后的 SLD 光源可以获得与 SFS 光源相比拟的性能。

3.3 光源相干性对双偏振光纤陀螺的影响

由双偏振光纤陀螺理论可知, 入环点 C 处的光波要求为互不相干的双偏振光。采用宽带光源能够有效降低光源相干性。本文采用的 SFS 光源和 SLD 光源谱宽分别为 29.6 nm 和 55.0 nm , 对应相干长度约为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 和 $26\text{ }\mu\text{m}$ 。用于制作 Lyot 消偏器的保偏光纤双折射效应对应的折射率差为 5×10^{-4} , 这样只需要 0.030 m 和 0.052 m 保偏光纤即可克服光源的相干性, 这一条件在实验上容易保证。此外, Lyot 消偏器产生的消偏光在普通光纤中传播时, 需要考虑光纤环残余双折射对快轴和慢轴传播的光的影响。实验中光纤环采用直径为 0.14 m 的 2 km 长单模光纤环。若要抵消此光纤环中弯曲导致的双折射^[26], 所用 Lyot 消偏器中的保偏光纤的长度及其差值都应大于 1.25 m 。

设计如下实验, 验证光源相干性对双偏振光纤陀螺的影响。实验结构同图 1 所示, 其中, 光源部分为 SFS 光源加一段 Lyot 消偏器 D4。D4 的第 1 段保偏光纤长度为 0.5 m , 第 2 段保偏光纤的长度为 1 m , 光纤陀螺光路结构的其余部分均保持不变。由于 D4 的保偏光纤长度太短, 不足以抵消光纤环中残余的双折射, 因此消相干条件被破坏, 入环的光波不再是消相干的双偏振光, 实验结果如图 5 所示。与图 3(a) 相比, 可以发现, 双偏振光纤陀螺的互易端和非互易端时域输出均存在较大的波动, 陀螺的长时间稳定性明显恶化。这是由于消相干不充分, 当两路正交偏振的输出实行光域补偿时, 残留相干性使得二者仍然包含了与偏振非互易相移有关的干涉成分, 无法保证大小相等符号相反的特性。这一实验验证了保持消相干条件对双偏振陀螺的重要性。

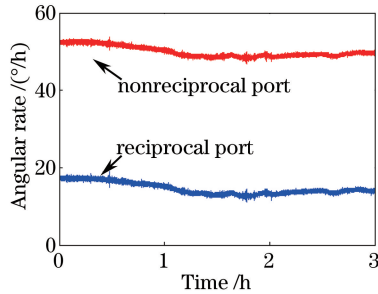


图 5 破坏消相干条件后的光纤陀螺输出结果

Fig. 5 FOG output results after decoherence conditions are damped

3.4 双偏振结构中的互易端和非互易端

前期理论工作表明, 对于双偏振光纤陀螺, 其互易端和非互易端都能通过光域补偿抑制偏振非互易性, 因此都可以稳定工作^[23]。与传统光纤陀螺结构不同, 双偏振光纤陀螺中的互易端和非互易端在光域补偿意义上是等价的, 非互易端仅比互易端多出一项相对稳定的耦合器引入的非互易相移^[23]。可以看到图 3 和图 5 的结果中, 无论偏振度和相干性是否破坏双偏振陀螺的稳定性, 每组实验中互易端和非互易端的输出总保持了极高的相干性。二者之间保持了一个固定的偏差, 这一偏差即耦合器非互易相移。

4 结 论

基于双偏振光纤陀螺理论和模型, 研究了双偏振方案中光源特性对光纤陀螺性能的影响。双偏振陀螺方案要求光源具有低相干性和低偏振度, 这样就保证了两个正交偏振态下的输出信号中偏振非互易误差具有大小相等、符号相反的特性, 从而可以通过光域补偿抑制噪声。本文设计了一系列实验对比研究了 SFS 和 SLD 两种宽带光源对光纤陀螺性能的影响, 实验结果表明, 保持消相干条件对双偏振陀螺十分重要。在满足消相干条件下, 采用低偏振度 SFS 光源和加消偏器的 SLD 光源的双偏振陀螺均能实现 $0.01^\circ/\text{h}$ 级别的

零偏稳定性。

参 考 文 献

- 1 Wang Wei. The technologies of interferential fiber optic gyroscope[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010: 1-6.
王 巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 1-6.
- 2 Andronova I A, Malykin G B. Physical problems of fiber gyroscope based on the Sagnac effect[J]. Physics-Uspekhi, 2002, 45(8): 849-873.
- 3 Ulrich R, Johnson M. Fiber-ring interferometer: Polarization analysis[J]. Optics Letters, 1979, 4(5): 152-154.
- 4 Du S, Sun Z, Zhang Z, *et al.*. Noise analysis of solid-core polarization-maintaining photonic interferometer fiber optic gyroscope[J]. Optical Review, 2011, 18(3): 284-286.
- 5 Zhang Weixu, Du Xinzheng. Experimental research of a closed-loop fiber-optic gyroscope [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1991, 12(4): B148-B153.
张惟叙, 杜新政. 闭环光纤陀螺研究[J]. 航空学报, 1991, 12(4): B148-B153.
- 6 Ma Jing, Zhang Weixu. Research of open-loop all PM-fiber gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, 20(3): 351-356.
马 静, 张维叙. 开环全保偏光纤陀螺研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1994, 20(3): 351-356.
- 7 Suo Xinxin, Yang Yuanhong, Yang Mingwei, *et al.*. Relative intensity noise characteristic of broadband sources and its effect on performance of closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605009.
索鑫鑫, 杨远洪, 杨明伟, 等. 宽谱光源相对强度噪声及对闭环光纤陀螺影响研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605009.
- 8 Yang Yuanhong, Meng Chenxue. Research on the characteristic of bias error and noise analysis method of fiber optic gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1206006.
杨远洪, 孟晨雪. 光纤陀螺零偏误差特性及噪声分析方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1206006.
- 9 Wang Xiaoxiao, Qin Yi, Yu Jia, *et al.*. Study on geometrical axial magnetic field sensitivity in PM optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120601.
王夏霄, 秦 祎, 于 佳, 等. 光纤陀螺保偏光纤环几何轴向磁敏感性理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120601.
- 10 Zhang Dengwei, Dong Dandan, Chen Kan, *et al.*. Research on the vertical magnetic drift in fiber optical gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105004.
张登伟, 董丹丹, 陈 侃, 等. 光纤陀螺正交磁漂移研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105004.
- 11 Sanders S J, Strandjord L K, Mead D. Fiber optic gyro technology trends-a honeywell perspective[C]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002: 5-8.
- 12 Szafraniec B, Blake J. Polarization modulation errors in all-fiber depolarized gyroscopes [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(9): 1679-1684.
- 13 Zhou Kejiang. Research and test on a close-loop single mode fiber gyros[J]. Laser and Infrared, 1997, 27(3): 177-178.
周柯江. 单模闭环光纤陀螺的研制和测试[J]. 激光与红外, 1997, 27(3): 177-178.
- 14 Wang Shumin, Liu Cheng, Mu Xudong, *et al.*. Study on nonreciprocal phase error in depolarized gyros[J]. Laser and Infrared, 2002, 32(5): 336-338.
王淑敏, 刘 承, 牟旭东, 等. 消偏光纤陀螺的非互易性相位误差的研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(5): 336-338.
- 15 Pavlath G A, Shaw H J. Birefringence and polarization effects in fiber gyroscopes[J]. Applied Optics, 1982, 21(10): 1752-1757.
- 16 Burns W K, Moeller R P, Villarruel C A. Observation of low noise in a passive fibre gyroscope[J]. Electronics Letters, 1982, 18(15): 648-650.
- 17 Andronova I A, Gelikonov V M, Gelikonov G V. All-fiber optical gyroscopes on orthogonal polarizations [J]. Radiophysics & Quantum Electronics, 1998, 41(11): 980-988.
- 18 Gelikonov V M, Gelikonov G V, Andronova I A. Double-polarization fiber ring interferometer based on a single-mode isotropic fiber for gyroscopy[J]. Radiophysics & Quantum Electronics, 2008, 51(4): 296-300.
- 19 Zhou K, Pan S, Liu S, *et al.*. Fiber gyroscope with a double sensitivity employing a polarization splitter[J]. Optics Letters, 2013, 38(8): 1337-1339.
- 20 Li Changsheng, Zhang Chunxi, Song Ningfang, *et al.*. Polarization-maintaining fiber loop with double optical length and its application to fiber optic gyroscope[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(2): 020604.

- 21 Xu Hongjie, Zhang Wenyan, Xu Xiaobin, *et al.*. Polarization bias error model and simulation of fiber-optical gyroscope with double optical length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1006002.
徐宏杰, 张文艳, 徐小斌, 等. 双光程光纤陀螺偏振误差模型与仿真[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1006002.
- 22 Wang Z, Yang Y, Lu P, *et al.*. Optically compensated polarization reciprocity in interferometric fiber-optic gyroscopes [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 4908-4919.
- 23 Wang Z, Yang Y, Lu P, *et al.*. Dual-polarization interferometric fiber-optic gyroscope with an ultra-simple configuration [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2463-2469.
- 24 Ping L, Wang Z, Luo R, *et al.*. Polarization nonreciprocity suppression of dual-polarization fiber-optic gyroscope under temperature variation[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1826-1829.
- 25 Wang Z, Yang Y, Lu P, *et al.*. All-depolarized interferometric fiber-optic gyroscope based on optical compensation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(1): 7100208.
- 26 Zhang Guicai. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 272-276.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 272-276.