

# 光纤陀螺光纤环分布偏振耦合误差预估

谢 泽, 杨远洪, 闫 晗, 杨福铃

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 分析了由光相干域偏振计测得的光纤陀螺保偏光纤环(PMFC)分布偏振耦合测试数据,建立了测量点偏振耦合幅度模型。结果表明,测试数据是实际偏振幅度耦合被宽谱光源相干函数调制的结果,且存在伪偏振耦合测试数据。在此基础上,提出并实现了分布偏振耦合数据处理算法。绕制 PMFC,进行了不同温度条件下分布偏振耦合测试,并提取了真耦合位置和强度信息。通过建立 PMFC 二次偏振耦合误差预估模型,对不同温度下光纤环分布偏振耦合引起的光纤陀螺零漂误差进行了计算预估。利用高精度保偏光纤环分析测试仪对该环进行了对应温度的光纤陀螺零漂测试,零漂预估值与实测结果一致。

**关键词** 光纤光学; 光纤陀螺; 光相干域偏振计; 分布偏振耦合; 零漂; 相干函数

中图分类号 V241.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1006004

## Estimation of Distributed Polarization Coupling Error in Optical Fiber Coil of Fiber Optic Gyroscope

Xie Ze, Yang Yuanhong, Yan Han, Yang Fuling

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** The distributed polarization coupling data measured by optical coherence domain polarizer in polarization maintaining optical fiber coil (PMFC) of fiber optic gyroscope is analyzed, and a polarization coupling amplitude model of measurement point is established. It is found that the polarization amplitude coupling is modulated by broadband source coherence function, and there exists pseudo polarization coupling measurement data. Based on this, a data processing algorithm for distributed polarization coupling data is proposed and implemented. PMFC is fabricated to conduct distributed polarization coupling tests at different temperatures, and the true coupling position and intensity information are extracted. The estimation model of secondary polarization coupling error of PMFC is established, and the bias drift error of fiber optic gyroscope induced by the distributed polarization coupling in fiber coil at different temperatures is estimated. With a high precision polarization maintaining fiber coil analyzer, the bias drift of fiber coil gyroscope is measured at corresponding temperature experimentally. The estimated results agree with the experimental results well.

**Key words** fiber optics; fiber optic gyroscope; optical coherence domain polarizer; distributed polarization coupling; bias drift; coherence function

**OCIS codes** 060.2800; 060.2370; 060.2300; 120.4800

## 1 引 言

光纤环中的偏振耦合会给光纤陀螺引入较大的偏振非互易误差,是影响光纤陀螺精度的主要误差源之

收稿日期: 2017-04-28; 收到修改稿日期: 2017-06-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、国家自然科学基金(61227902, U1637106)、航空科学基金(20140851012)、创新团队发展计划(IRT1203)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2016GZKF001)

作者简介: 谢 泽(1992—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: nanazuimei@buaa.edu.cn

导师简介: 杨远洪(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人)

—<sup>[1]</sup>。为此,主流的光纤陀螺采用保偏光纤环(PMFC),可以很好地抑制偏振非互易误差,但仍存在偏振耦合问题。为了确定和抑制光纤环中的偏振耦合及其影响,提出了多种光纤环分布偏振耦合测量技术,包括基于宽谱偏振光干涉的光相干域偏振计(OCDP)技术、基于布里渊散射的应力和双折射测试技术等<sup>[2-4]</sup>。OCDP技术可直接获得光纤中的分布偏振耦合信息,成为多功能集成光学芯片(MIOC)、保偏光纤(PMF)及光纤环分布偏振耦合测量的有效手段<sup>[5-7]</sup>。1985年 Tsubokawa 等<sup>[8]</sup>发表了基于 OCDP 的 PMF 对接偏振耦合监测技术,1992年 Martin 等<sup>[9]</sup>将 OCDP 检测技术引入 MIOC 和 PMFC 的测试中,取得了很好的效果。近年来,美国 GP(General Potonics)公司与国内哈尔滨工程大学等多个研究组合作开展了 OCDP 的开发<sup>[10-12]</sup>,研制出了实用的 OCDP 测试仪器。目前,采用 OCDP 可以获得 PMFC 中完整的偏振耦合数据,能准确判断 PMFC 的偏振耦合信息和工艺缺陷<sup>[13-16]</sup>,对提高 PMFC 的质量起到重要作用。然而,上述大部分研究工作都只能是定性地分析光纤偏振串扰。

本文对 OCDP 测量数据进行了考察,发现由 OCDP 测得的分布偏振耦合数据是实际耦合被宽谱光源相干函数调制的结果,存在伪偏振耦合数据。在此基础上,提出了分布偏振耦合数据提取算法,并建立了 PMFC 二次偏振耦合误差预估模型。绕制 PMFC,通过实际测试对不同温度条件下的偏振耦合数据进行了真值提取和误差预估,同时进行了陀螺零漂测试。

## 2 光纤环分布偏振耦合测量数据分析

图 1 为基于 OCDP 技术的光纤陀螺 PMFC 分布偏振耦合测试系统,由宽谱光源(BBS)、起偏器(P1)、待测 PMFC、检偏器(P2)和读出干涉仪(RI)组成。BBS、P1、PMFC 和 P2 组成典型的偏光干涉仪。RI 为迈克耳孙干涉仪,由固定反射镜(M)、扫描反射镜(SM)和分光镜(BS)组成。通过调节移动臂,补偿 PMF 中双折射引起的光路不平衡,重建对比度<sup>[17]</sup>。BBS 发出的光经 P1 起偏并沿 PMF 一个偏振主轴(如慢轴)传播,当光纤环中存在偏振耦合点(设为 A)时,快轴产生耦合光,两正交偏振光分别沿各自的偏振主轴传输。设从耦合点到光纤端点的长度为  $l_f$ ,PMF 两偏振主轴的折射率差为  $\Delta n$ ,则两偏振光到达光纤端面时的光程差为

$$\Delta f = \Delta n \cdot l_f. \quad (1)$$

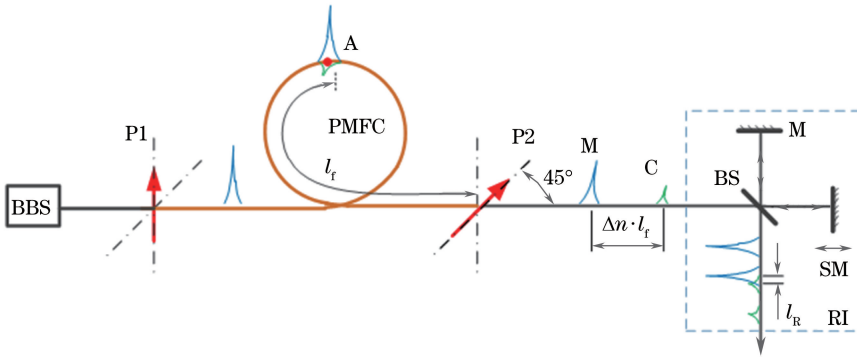


图 1 光纤环分布偏振耦合测试系统

Fig. 1 Test system for distributed polarization coupling in optical fiber coil

P2 设置在光纤输出端,其偏振主轴与 PMF 偏振主轴成  $45^\circ$  夹角,沿 PMF 慢轴和快轴传输的正交偏振光投影到 P2 主轴上的分量进入 RI 后成为相干光,标记为 M 和 C 波列。相干光在 RI 中可发生自干涉和互干涉,两偏振光的传输和干涉情况可用波列叠加形式表示。为了测量 A 点的偏振耦合系数,需要将 RI 移动镜移动到匹配位置,设 RI 中 SM 的移动距离为  $l_R/2$ ,空气折射率为 1,RI 的匹配光程差与  $\Delta f$  相等,可表示为

$$\Delta R = l_R = \Delta f. \quad (2)$$

此时,在 A 点耦合产生的两偏振光的累积相位相同,两波列重合相干,由 RI 的输出计算得到 A 点的偏振光幅度耦合系数<sup>[18]</sup>为

$$\eta = I_C / I_M, \quad (3)$$

式中  $I_C$  为耦合光强度,  $I_M$  为主偏振光强度。OCDP 的输出为偏振光幅度耦合系数, 将其用对数形式表示为

$$h = 20 \lg \eta_0. \quad (4)$$

OCDP 结合了宽谱光的相干长度有限特性和 RI 的相位匹配技术, 可以实现 PMF 中分布偏振耦合测量。为提高分辨率和准确性, OCDP 采用了高精度位移控制技术, 实现了扫描镜高分辨、高精度移动, 能在光源相干长度范围内实现多点测量, 图 2 为单个偏振耦合点(PCs)的测量情况, 所用光谱为宽谱光源, 谱宽为 46.5 nm, 光源归一化相干函数曲线可描述为<sup>[17]</sup>

$$\gamma(l_R) = \exp[-(l_R/l_C)^2], \quad (5)$$

式中  $l_C$  为光源的相干长度。图 2 中横坐标同时用 RI 的 SM 移动距离  $l_R$  和 PMF 对应长度  $l_f$  表示, 所用 PMF 的双折射率约为  $6.01 \times 10^{-4}$ 。  $l_R$  与  $l_f$  的对应关系由(1)、(2)式确定, 一般定义相干函数值小于 3% 时对应的光程为光源去相干长度  $l_{dc}$ , 对应的 PMF 去相干长度为  $l_d$ ,  $l_{dc}$  和  $l_d$  分别为  $48.2 \mu\text{m}$  和  $80.3 \text{ mm}$ 。设坐标零点为两相干光 M 和 C 累计相位差为零的匹配干涉点, 相干函数值为 1, 对应的偏振幅度耦合测量值为  $\eta_0$ 。RI 中的 SM 进行扫描时, 两波列的关系如图 2 所示, 设动镜以等步长移动, 步长为  $s$ , 测量位置离零光程匹配点的距离为  $ms$  ( $m$  为整数,  $ms < l_{dc}$ ), 输出值可表示为

$$\eta(m) = \eta_0 \gamma(ms) = \eta_0 \exp[-(ms/l_C)^2]. \quad (6)$$

(6)式表明, 当波列 M 和 C 的累计光程差为零时,  $\eta$  为 A 点真实的偏振光幅度耦合系数; 当累计光程差不为零且小于光源去相干长度时, 光纤环仍能输出偏振耦合测量数据, 且输出值为  $\eta_0$  经光源相干函数调制后的值。在 OCDP 中, SM 移动产生的光程步长  $s$  为  $\mu\text{m}$  量级, 在  $(0, l_{dc})$  范围内可有几十个输出值, 但只有零相位差位置的测量值为真实的偏振耦合值, 其他位置的输出值均为伪偏振耦合数据, 并且该数据范围内的极大值点近似为真偏振耦合点。

当一个去相干长度内存在两个 PCs 时, 将同时存在 3 个相干的波列, 即在测试点 q (主波扫描到 q 点) 的主波列 M 和耦合波列 C1 与 C2, 如图 3 所示。设在 C1 和 C2 耦合点的偏振光幅度耦合系数分别为  $\eta_1$  和  $\eta_2$ , M、C1 和 C2 的幅度分别为  $E_0$ 、 $E_1$  和  $E_2$ , M 与 C1、C2 的相位差分别为  $\delta_1$  和  $\delta_2$ , 则测试位置 q 处的光场可表示为

$$E_q = E_0 + E_1 + E_2. \quad (7)$$

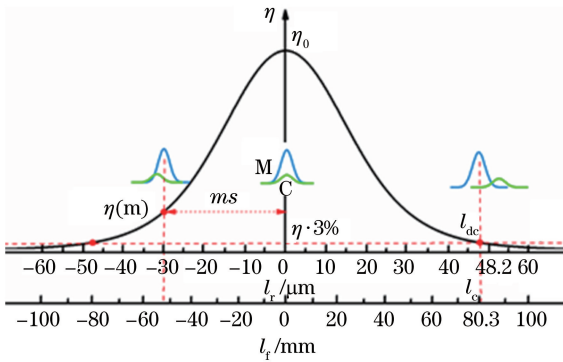


图 2 单 PCs 测量值曲线

Fig. 2 Measurement curve of single PCs

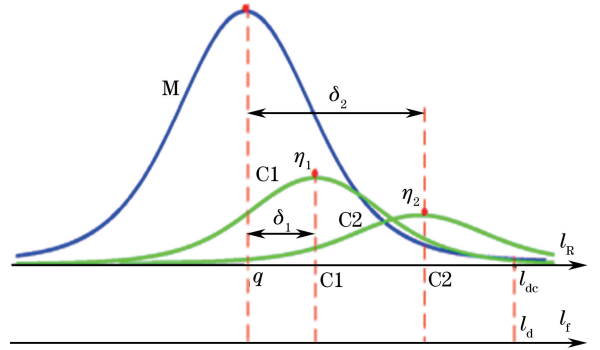


图 3 存在双 PCs 时的波列

Fig. 3 Wave trains of two PCs

考虑宽谱光源的相干函数, 得到测试位置的光强为

$$I_q = E_q E_q^* / 2 = \frac{1}{2} [E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + 2\gamma(\delta_1) E_0 E_1 \cos \delta_1 + 2\gamma(\delta_2) E_0 E_2 \cos \delta_2 + 2\gamma(\delta_1 - \delta_2) E_1 E_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)], \quad (8)$$

式中 \* 表示共轭。由于波列 C1 和 C2 均为小量的偏振耦合光, 其相干项  $(E_1 E_2)$  可以忽略, 实际测量值为相干函数的包络。(8)式中  $\cos \delta_i$  ( $i=1, 2$ ) 可以取 1, 隔离直流量, 并用偏振耦合系数描述, 测量点的偏振光幅度耦合系数为

$$\eta_q = \gamma(\delta_1) \eta_1 + \gamma(\delta_2) \eta_2. \quad (9)$$

从(9)式可以看出,当去相干长度范围内存在两个耦合点时,OCDP在测量点测得的偏振耦合幅度值为两个耦合点的单独包络幅度值在测量点的总和,这个结论可以推广到去相干长度内多点耦合的情况。设耦合点个数为  $N$ ,则偏振光幅度耦合系数可表示为

$$\eta = \sum_1^N \gamma(\delta_i) \eta_i. \quad (10)$$

为了验证上述结论,进行了实测数据的拟合分析,图4为3 km PMFC的偏振耦合测试数据,测试光源、待测光纤和RI干涉仪的主要参数为: $\Delta\lambda = 46.5 \text{ nm}$ ,  $l_c = 36.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $l_{dc} = 48.2 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\Delta n = 6.01 \times 10^{-4}$ ,  $l_d = 80.3 \text{ mm}$ ,  $s = 0.96 \text{ }\mu\text{m}$ 。

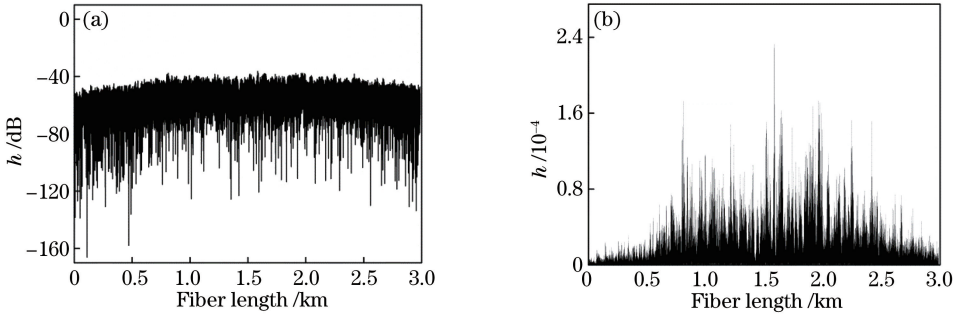


图4 PCs测量数据。(a)对数坐标;(b)线性坐标

Fig. 4 PCs measurement data. (a) Logarithmic coordinate; (b) linear coordinate

以光源去相干长度为依据,从图4中选取了一组含1个偏振耦合点和另一组含3个偏振耦合点的测试数据,如图5、6中实线所示。根据上述模型,图5中实线为去相干长度内只有一个偏振耦合点的情况,从图中可以直接读出真偏振耦合的位置和大小,用 $(l_f, \eta)$ 形式描述,即 $(81.205, 3.7 \times 10^{-5})$ 。以这组参数为输入,计算结果如图5中虚线所示,其与测量结果相吻合。图6中实线表明3个偏振耦合点两两相邻间距小于去相干长度,为确定3个偏振耦合点位置和大小,至少需要6个方程,为此,在峰值一半的位置选取6个测量点,代入(6)、(9)式,列出6个方程,可计算出3个偏振耦合点位置和耦合强度,分别为 $(1352.819, 2.2 \times 10^{-6})$ ,  $(1352.903, 1.8 \times 10^{-6})$ ,  $(1352.973, 1.0 \times 10^{-6})$ 。采用同样的方法计算所有测量点的理论耦合强度值,计算结果如图6中虚线所示,其与测量结果相吻合,表明上述理论模型正确,可以作为分析测量数据的基础。

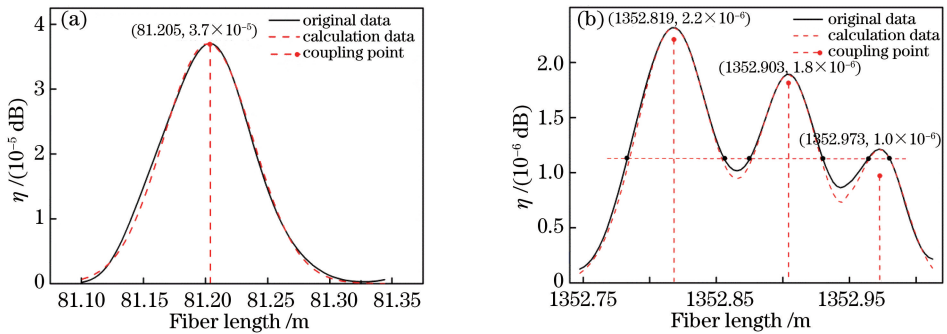


图5 测量值与计算值对比。(a)单偏振耦合点;(b)三偏振耦合点

Fig. 5 Comparison of measured and calculated values. (a) Single PCs; (b) three PCs

### 3 真偏振耦合位置和强度提取算法

OCDP测得的PMFC分布偏振耦合数据可用于预估光纤陀螺中由偏振非互易误差引入零漂的基础数据。为获得准确的结果,需要确定真偏振耦合位置和强度。基于以上研究结果,总结出真偏振耦合位置和强度的计算方法,计算流程如图6所示。

输入数据中包含背景噪声,  $-75 \text{ dB}$  以下的偏振耦合强度数据可认为是噪声<sup>[19]</sup>, 先行剔除;应用(4)式将

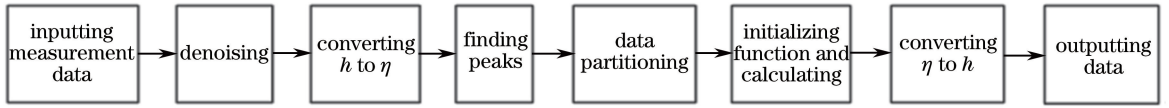


图 6 计算流程

Fig. 6 Flow chart of calculation

$h$  转换为  $\eta$ , 应用寻峰程序获取  $\eta$  序列偏振耦合幅度数据的峰值信息; 以 PMF 去相干长度  $l_d$  为尺度并结合峰值位置信息, 将数据划分为 3 类, 即残余噪声、单耦合点和多耦合点, 数据种类和判据如表 1 所示。对于单耦合点情况, 可以直接读出耦合幅度和位置信息, 在数据划分完成后, 只需对多耦合点情况列方程并求解偏振耦合点位置和强度, 最后整合有效数据并输出结果。

表 1 PCs 数据划分

Table 1 Data partitioning of PCs

Serial number	Data type	Typical legend	Basic criterion	Handling method
1	Residual noise		Having peak, width is not larger than $2l_d$	Elimination
2	Single PCs		Having peak, width is about $2l_d$	Direct extraction
3	Multiple PCs		Multiple peaks, width is lower than $2l_d$	Initialing solving equations

从图 4 测试曲线中选取从 1515.2~1524.8 m 范围内的一段约 10 m 测试数据进行了算法验证研究。计算前后对比曲线如图 7 所示, 计算前的偏振耦合数据点有 2946 个, 去除伪偏振耦合点后, 得到 65 个真耦合点, 并且实现了真实偏振耦合强度的解算, 多点耦合情况下单个耦合点的耦合强度值变小, 偏振耦合值更准确。

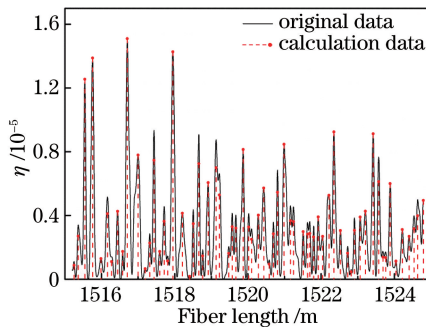


图 7 计算前后对比曲线

Fig. 7 Contrast curves of before and after calculation

## 4 光纤陀螺偏振二次耦合误差估计

### 4.1 二次偏振耦合误差模型

光纤环中主要存在上述的单点耦合和多点耦合情况, 其中单点耦合情况在 PMF 去相干长度内只有一个偏振耦合点, 很难形成寄生干涉, 可认为其对光纤陀螺零漂无贡献; 多点耦合指 PMF 去相干长度内存在多个偏振耦合点以及连续多个相邻间隔小于去相干长度的偏振耦合点, 能形成复杂的高次偏振耦合寄生干涉现象<sup>[18]</sup>, 是影响光纤陀螺零漂的主要因素之一。图 8 显示了多点耦合寄生干涉的典型情形, 图中 CW 代表连续波, CCW 代表以顺时针方向传播的连续波,  $C_1$  和  $C_2$  之间的距离小于光纤环去偏长度  $l_d$ 。当  $E_0$  为 PMF 慢轴顺时针传输的主波时, 经过  $C_1$  和  $C_2$  后会产生快轴耦合波  $E_1$ 、 $E_2$ ; 当  $E_0$  为逆时针传输的主波时, 经过  $C_2$  和  $C_1$  后会产生快轴耦合波  $E_2$ 、 $E_1$ 。顺时针传输的快轴耦合光  $E_1$  在  $C_2$  点也会发生偏振耦合, 产生二次耦合光  $E''_1$ , 同样逆时针传输的  $E_2$  在  $C_1$  点会产生二次耦合光  $E''_2$ 。在这些光波中, 只有沿慢轴传输的二次耦



合波和主波形成的寄生干涉会给 IFOG 带来零漂<sup>[20]</sup>, 尽管更高阶的耦合也会形成这样的寄生干涉, 但由于高次耦合信号强度非常小, 可以忽略。设  $C_1$  与  $C_2$  的距离为  $l_{12}$ , 由光纤双折射引入的相位差  $\delta_{12}$  可表示为

$$\delta_{12} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n l_{12}, \quad (11)$$

式中  $\lambda$  为光源的中心波长。

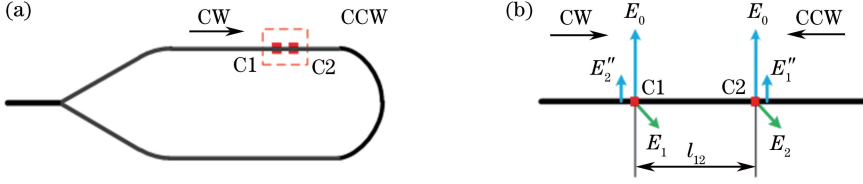


图 8 光纤环二次偏振耦合误差模型。(a) 光纤环简化模型; (b) 图 8(a) 虚线框放大图

Fig. 8 Secondary polarization coupling error model of optical fiber coil. (a) Simplified model of optical fiber coil; (b) enlarged drawing of dotted box in Fig. 8(a)

发生二次耦合时,  $\eta = (\eta_1 \eta_2)^{1/2}$ 。由参考文献[17-18]可得二次偏振耦合引入的相位误差为

$$\varphi_e = 2\eta \sin \delta \gamma(\delta) / [1 + \eta^2 + 4\eta \gamma(\delta) \cos \delta]. \quad (12)$$

利用真偏振耦合位置和强度进行计算, 可获得待预估光纤环内分布偏振耦合信息, 进一步剔除不产生零漂误差的单耦合点, 结合(11)、(12)式计算得到每个多点耦合区域产生的零漂误差。由于不同耦合区域互不影响, 产生的总相位误差  $\varphi_{\text{sum}}$  为每对二次偏振耦合产生的相位误差  $\varphi_i$  之和, 设环中有  $N_1$  对二次偏振耦合, 则  $\varphi_{\text{sum}}$  可表示为

$$\varphi_{\text{sum}} = \sum_1^{N_1} \varphi_i. \quad (13)$$

设陀螺标度系数为  $K$ , 则由相位误差引起的陀螺零漂预估值为

$$\Omega_{\text{ED}} = K \varphi_{\text{sum}}. \quad (14)$$

#### 4.2 光纤环二次偏振耦合误差预估与实验验证

为了验证上述理论和算法, 用熊猫型 PMF 绕制了两只光纤环(编号分别为 1、2), 光纤长度分别为 2942.6 m 和 2953.8 m, 用四级对称方法绕制 76 层, 环平均直径为 165 mm。在 5 个不同温度点(-30, -10, +25, +40, +60 °C)用 OCDP 测试获得了不同静态温度下 PMFC 的偏振耦合数据。运用上述真值提取算法和偏振二次耦合误差估计模型, 对光纤环偏振耦合相位误差进行了预估, 计算出由误差相位引起的零漂。为获得该环实际的零漂, 采用自研的光纤环测试与分析仪, 如图 9 所示, 该仪器能实现不同长度(100~5000 m)光纤环的陀螺特性测试, 半波电压、特征频率和其他重要检测参数直接由信号采集计算机软件设置, 而且检测精度高, 能实现对单光纤环和光纤环加调制器等不同状态的检测。在本实验中, 仅将光纤环置于温控转台上, 在 -30, -10, +25, +40, +60 °C 温度点进行了静态测试, 实测陀螺零漂为  $\Omega_{\text{MD}}$ , 记  $\Omega_{\text{Ori}}$  为未经过数据处理而直接利用误差模型预估的陀螺零漂, 零漂预估与测试结果如表 2、3 所示。

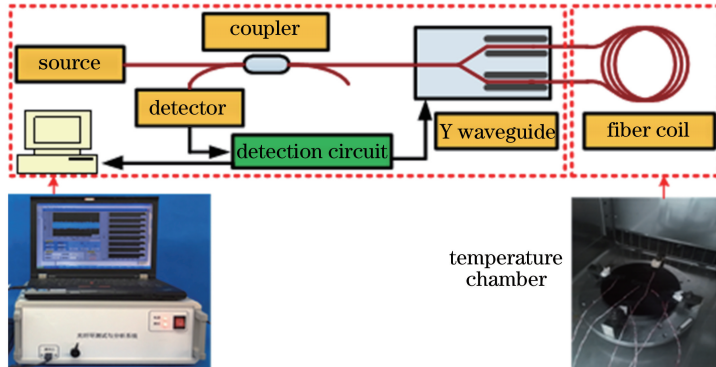


图 9 光纤环测试与分析系统

Fig. 9 Test and analysis system for optical fiber coil

表 2 1号光纤环零漂预估与测试结果

Table 2 Estimated and measured bias drifts of optical fiber coil 1

Temperature / °C	$\varphi_{\text{sum}} / (10^{-7} \text{ rad})$	$\Omega_{\text{ED}} / [10^{-3} (^\circ) \cdot h^{-1}]$	$\Omega_{\text{MD}} / [10^{-3} (^\circ) \cdot h^{-1}]$	$\Omega_{\text{Ori}} / [(^\circ) \cdot h^{-1}]$
-30	8.38	2.17	2.48	0.0846
-10	7.62	1.97	2.15	0.0631
25	5.06	1.26	1.74	0.0542
40	6.31	1.72	2.08	0.0843
60	8.15	2.13	2.39	0.0746

表 3 2号光纤环零漂预估与测试结果

Table 3 Estimated and measured bias drifts of optical fiber coil 2

Temperature / °C	$\varphi_{\text{sum}} / (10^{-7} \text{ rad})$	$\Omega_{\text{ED}} / [10^{-3} (^\circ) \cdot h^{-1}]$	$\Omega_{\text{MD}} / [10^{-3} (^\circ) \cdot h^{-1}]$	$\Omega_{\text{Ori}} / [(^\circ) \cdot h^{-1}]$
-30	7.45	1.93	2.13	0.0849
-10	7.19	1.86	1.99	0.0651
25	5.46	1.36	1.65	0.0544
40	6.57	1.52	1.88	0.0562
60	7.23	1.89	2.06	0.0983

图 10 描述了表 2、3 中经数据处理后的零漂和测试数据,表明光纤环分布偏振耦合误差预估值与实测数据较为一致。由于光纤环分布偏振耦合误差只是陀螺整体零漂的一部分,预估值小于实测值是合理的。若对偏振串扰数据直接使用二次偏振耦合误差预估模型,则会有大量的误差信息和无用信息的使用,此时计算的  $\Omega_{\text{Ori}}$  远大于实际测量值。因此,未经过数据处理的偏振串扰数据并不适用于二次偏振串扰误差预估模型。

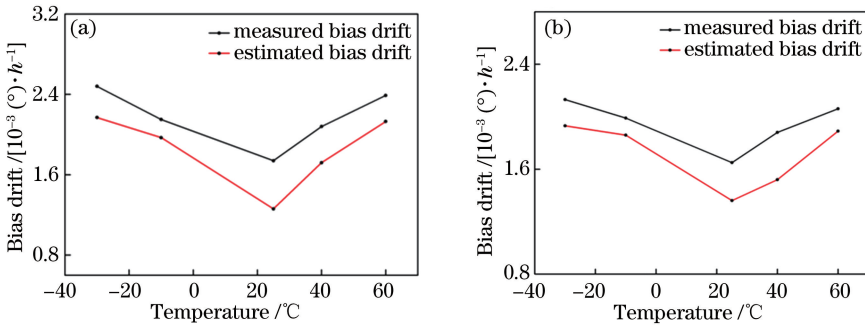


图 10 零漂预估与测试结果。(a)光纤环 1号;(b)光纤环 2号

Fig. 10 Estimated and measured results of bias drifts. (a) Fiber coil 1; (b) fiber coil 2

## 5 结 论

为实现光纤陀螺 PMFC 分布偏振耦合引起的零漂误差的预估,基于白光偏振干涉测量理论,分析考察了由 OCDP 测得的光纤陀螺 PMFC PCs 数据,建立了测量点偏振耦合幅度模型。结果表明,测试数据是实际偏振耦合被宽谱光源相干函数调制的结果,在 OCDP 测试数据中存在伪 PCs 数据,因此测试数据不能直接用于误差评估。为此提出了 PCs 数据处理算法,利用该算法在不同温度条件下对实际绕制的 PMF 环进行 PCs 测试,经处理获得真耦合位置和强度信息。基于建立的 PMFC 二次偏振耦合误差预估模型,实现了光纤环分布 PCs 引起的光纤陀螺零漂误差预估。利用高精度光纤环分析测试仪对该环进行了对应温度的光纤陀螺零漂实际测试,零漂预估值与实测结果一致,理论和算法得到了验证。该研究为基于分布 PCs 数据实现 PMFC 质量定量评估和光纤陀螺性能预估和优化提供了重要的理论依据和实施技术。

## 参 考 文 献

- [1] Wang X F, Wang W. Scanning interferometer for measurement of polarization cross-coupling in fiber-optic gyroscope [C]. SPIE, 2006, 6357: 635744.
- [2] Nakazawa M, Shibata N, Tokuda M, *et al.* Measurements of polarization mode couplings along polarization-

- maintaining single-mode optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1984, 1(3): 285-292.
- [3] Dong Y K, Zhang H Y, Lu Z W, *et al.* Long-range and high-spatial-resolution distributed birefringence measurement of a polarization-maintaining fiber based on Brillouin dynamic grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(16): 2981-2986.
- [4] Yang Yuanhong, Yi Xiaosu, Meng Zhaokui. Experimental study on strain distribution in fiber coil used in fiber optic gyroscope[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, 27(2): 98-101.  
杨远洪, 伊小素, 孟照魁. 光纤陀螺用光纤环的应力分布实验研究[J]. *压电与声光*, 2005, 27(2): 98-101.
- [5] Yang J, Yuan Y G, Zhou A, *et al.* Full evaluation of polarization characteristics of multifunctional integrated optic chip with high accuracy[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(22): 3641-3650.
- [6] Gao Yangyang, Zhou Weining, Lei Lili, *et al.* Research on polarization characteristic of SLD start-up used in fiber optic gyroscope and its effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 112302.  
高洋洋, 周卫宁, 雷莉莉, 等. 光纤陀螺用超辐射发光二极管启动偏振特性及其影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 112302.
- [7] Zhen Hongxu, Yang Dewei, Yao Tianlong, *et al.* Polarization axis measurement in direct coupling of Y waveguide modulator to the polarization-maintaining fiber coil[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112004.  
甄洪旭, 杨德伟, 姚天龙, 等. 光纤环和 Y 波导调制器直接耦合偏振轴测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1112004.
- [8] Tsubokawa M, Shibata N, Seikai S. Evaluation of polarization mode coupling coefficient from measurement of polarization mode dispersion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(4): 850-854.
- [9] Martin P, Boudec G L, Lefevre H C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry[C]. *SPIE*, 1992, 1585: 173-179.
- [10] General Photonics. Distributed polarization X-talk measurement for the production of polarization-maintaining fiber coils.[EB/OL]. (2005-10-12)[2017-04-03]. <http://www.generalphotonics.com/downloads/techpubs>.
- [11] Li Z H, Meng Z, Liu T G, *et al.* Complete measuring the polarization parameters of polarization-maintain fiber using distributed polarization crosstalk test method[C]. *SPIE*, 2014, 9233: 92332D.
- [12] Han Shuxin. Research on testing methods for polarization maintaining fiber and fiber loop of fiber optical gyroscope [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 20-30.  
韩书新. 光纤陀螺用保偏光纤及光纤环测试方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 20-30.
- [13] Liu H L, Li R Y, Wang J J. White light interferometry test and analysis of LiNbO<sub>3</sub> polarizer[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(19): 3891-3894.
- [14] 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.
- [15] Li C, Yang J, Yu Z J, *et al.* High-order interference effect introduced by polarization mode coupling in polarization-maintaining fiber and its identification[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 419.
- [16] Silva A C D, Mateus C F R. Measurements of polarization cross-coupling in a tension-coiled polarization-preserving fiber by optical coherence domain polarimetry[C]. *Microwave and Optoelectronics Conference*, 1999: 638-640.
- [17] Arditty H J, Lefevre H C. *Fiber-optic gyroscope*[M]. France: Artech House, 1993: 206-218.
- [18] Yuan Libo, Yang Jun. *The principle and application of fiber-optic white light interference*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 340-350.  
苑立波, 杨军. *光纤白光干涉原理与应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 340-350.
- [19] Ding Zhenyang. *Study of complete quality measurement for FOG fiber coils*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 20-30.  
丁振扬. *陀螺用光纤环全面质量检测研究*[D]. 天津: 天津大学, 2010: 20-30.
- [20] Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng, *et al.* Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance[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.