

光学相干域偏振测量技术及其在高精度 光纤陀螺器件测量中的应用

杨军^{1,2}, 苑勇贵^{1,3}, 喻张俊^{1,2}, 李寒阳^{1,2}, 侯长波^{1,3}, 张浩亮^{1,2}, 苑立波^{1,2,4}

¹哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

³哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

⁴桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

摘要 光学相干域偏振测量(OCDP)技术是一种基于白光干涉原理,利用保偏光纤器件和组件中的偏振传输模式之间存在的能量耦合(偏振串扰)实现分布式偏振特性精确表征的测试方法,具有超高偏振测量灵敏度(偏振串扰为 $-100\sim-90$ dB)、高空间分辨率($5\sim 10$ cm)、超宽测量动态范围($10^9\sim 10^{10}$)和长光纤测量距离(数千米)等优点,可以满足包括光纤陀螺核心器件和光路在内的保偏光纤器件与组件的超高偏振性能测试需求。回顾 OCDP 原理与关键技术,包括分布式偏振串扰的测试原理与精确建模方法以及 OCDP 仪器化若干关键技术;展示 OCDP 技术在超高消光比集成波导调制器、超长陀螺敏感环定量测试与诊断、评估中的应用;针对高性能光纤传感器复杂多变的应用环境,展望 OCDP 技术在高精度光纤陀螺的核心器件与整机光路测试中未来的发展方向。

关键词 测量; 光学相干域偏振测量; 偏振串扰测试; 光纤陀螺; 多功能集成波导调制器; 光纤敏感环

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328007

Optical Coherence Domain Polarimetry Technology and Its Application in Measurement for Evaluating Components of High Precision Fiber-Optic Gyroscopes

Yang Jun^{1,2}, Yuan Yonggui^{1,3}, Yu Zhangjun^{1,2}, Li Hanyang^{1,2},

Hou Changbo^{1,3}, Zhang Haoliang^{1,2}, Yuan Libo^{1,2,4}

¹Key Laboratory of Integrated Optics Fiber, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

²College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

³College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

⁴College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Optical coherence domain polarimetry (OCDP) is a measurement method based on white light interferometry and accurately measures distributed polarization characteristics of polarization maintaining fiber devices and components by energy coupling (polarization crosstalk) in polarization transmission modes. It has advantages of ultra-high polarization sensitivity (polarization crosstalk is from -100 dB to -90 dB), high spatial resolution ($5\sim 10$ cm), ultra-wide dynamic range ($10^9\sim 10^{10}$), and large scanning range (several kilometers), which meet ultra-high performance measurement requirements for polarization maintaining fiber devices and components including key components and optical circuits of fiber-optic gyroscopes. The principle and key technique of OCDP

收稿日期: 2017-11-01; 收到修改稿日期: 2017-12-27

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ040815)、国家自然科学基金(61422505,61227013)、教育部博士点基金(20122304110022)、哈尔滨市科技创新人才研究基金(2015RAYXJ009)

作者简介: 杨军(1976—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤器件测试与传感方面的研究。

E-mail: yangjun@hrbeu.edu.cn

are reviewed including the measurement principle and accurate modeling method of distributed polarization crosstalk, and several key techniques of OCDP instrumentation. The application of OCDP in quantitative measuring as well as diagnosing and evaluating the integrated waveguide modulator with ultra-high extinction ratio and ultra-large length sensing fiber coil is demonstrated. An outlook of future developments of OCDP in measurement of key components and total optical circuits of high precision fiber-optic gyroscopes is provided aiming at complicated and changeable application environment of high performance optical fiber transducers.

Key words measurement; optical coherence domain polarimetry; polarization crosstalk measurement; fiber-optic gyroscope; multi-functional integrated waveguide modulator; sensing fiber coil

OCIS codes 120.5790; 120.5410; 120.3180; 130.3120

1 引 言

现代惯性导航系统中最基础、核心、关键的元件之一是基于 Sagnac 原理的光学角速度测量装置——光学陀螺。特别是利用长距离光纤线圈作为敏感元件的光纤陀螺^[1-2],由于它内部没有机械旋转元件,因此具有工作寿命长、启动时间短、稳定性好、动态范围大、质量小、易于微型化、性价比较高等众多优点,已被世界各国列为惯性技术领域重点发展的核心和关键技术^[3-5]。经过 40 多年的发展,光纤陀螺的性能已经有望接近其理论预测的极限,并在零偏噪声和长期稳定性方面超过了其竞争对手——激光陀螺^[6-7]。其性能不断提升的基础是高性能多功能集成光学调制器^[8](简称 Y 波导)和超长距离保偏光纤敏感环^[9]。通常,Y 波导的芯片偏振消光比至少需要达到 80 dB,而光纤敏感环的长度也要超过 3 km,甚至达到 5 km。“工欲善其事,必先利其器”,高性能光纤陀螺器件的研发对光学测试技术与检测仪器的性能提出极端严苛的要求。

针对应用于超高精度/精密级光纤陀螺的 Y 波导和长距离光纤敏感环的测试需求,发展的测试方法必须具有分布式测量能力、超高探测灵敏度、超大动态范围,以及超长距离的光纤测量能力^[10]。随着光学相干域测量原理与技术的发展,如光学相干域反射技术^[11-13](也称为光学低相干反射技术^[14-16])、光学相干域层析技术^[17-18]的发展,一些相关技术,如偏振时域反射(POTDR)技术^[19-20]、光频域反射(OFDR)技术^[21-22]、光学相干域偏振测量(OCDP)^[23-25]技术在 20 世纪 90 年代应运而生。OCDP 技术基于白光干涉原理,通过扫描式光学干涉仪进行光程补偿来实现不同偏振模式间的干涉,可对偏振耦合点的空间位置、偏振耦合信号强度进行高精度的测量与分析。与其他分布式测试方法、技术相比,OCDP 技术完全符合光纤陀螺的测试需求,它具有超高偏振测量灵敏度(偏振串扰为 $-100 \sim -90$ dB)、高空间分辨率($5 \sim 10$ cm)、超大测量动态范围($10^9 \sim 10^{10}$)和

较长的光纤测量距离(可达几千米)等优点,可用于光纤陀螺各种核心器件和光路的高性能测试,如保偏光纤/光纤敏感环、Y 波导、光纤耦合器、光路连接点等^[26-28]。特别是近 10 年来,随着我国光纤陀螺精度的快速提升,OCDP 技术得到了迅猛发展,已经能够满足超高精度/精密级光纤陀螺核心器件与光纤光路测试与诊断的需求。

以下将详细介绍 OCDP 技术及其在集成波导调制器和光纤敏感环测试中的应用。首先回顾与 OCDP 技术相关的分布式偏振串扰测量方法及理论建模方法;然后介绍用于高精度陀螺器件测试的若干 OCDP 仪器化关键技术,包括探测灵敏度提升、光学延迟线损耗波动抑制及量程拓展、双折射色散测量及补偿,并展示分别用于高消光比 Y 波导测试及长距离光纤敏感环测试的 OCDP 仪器;最后,介绍 OCDP 技术在 Y 波导及光纤敏感环测试中的应用,尤其是其在器件研发中起到的至关重要的作用。

2 分布式高精度偏振测试原理

2.1 偏振串扰及其分布式测量方法

光纤陀螺器件中的偏振串扰是指其非简并的两个正交线偏振模式在传输过程中发生能量相互耦合的现象,也称为偏振模式耦合^[27]。偏振串扰通常发生在器件内部的缺陷点或者外部扰动点处,因此,对偏振串扰进行分布式测量可以用于评估光纤陀螺器件的性能。

以一段熊猫型保偏光纤的偏振串扰测量为例,OCDP 技术的原理图如图 1 所示,其中 SLD 为超辐射发光二极管,DUT 为待测器件,PD 为光电二极管,PMF 为保偏光纤。一束宽谱偏振光沿熊猫型保偏光纤某一偏振轴(快轴或慢轴)方向注入,在该偏振轴方向形成激发模,并沿光纤向前传输^[29]。若在距离保偏光纤末端长度为 L 处存在一个微扰点,则激发模将在此处发生偏振串扰,产生耦合模,通常使用偏振耦合系数 ρ^2 来评价该微扰点的偏振耦合能力。由于保偏光纤两个偏振轴的有效模式折射率不

同(两者的差值称为双折射 Δn),因此沿光纤传输的激发模与耦合模在经过距离 L 后会产生一定的光程差 $S = \Delta nL$ 。使用一个 45° 检偏器将这两个模式耦合到普通单模光纤中就会产生两个功率不同且具有一定光程差 S 的波列。最后使用 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)或 Michelson 干涉仪(MI)对这两个波列进行探测,一个 50:50 的 2×2 耦合器将这两个波列分别耦合入干涉仪的两臂(参考臂与扫描臂)。

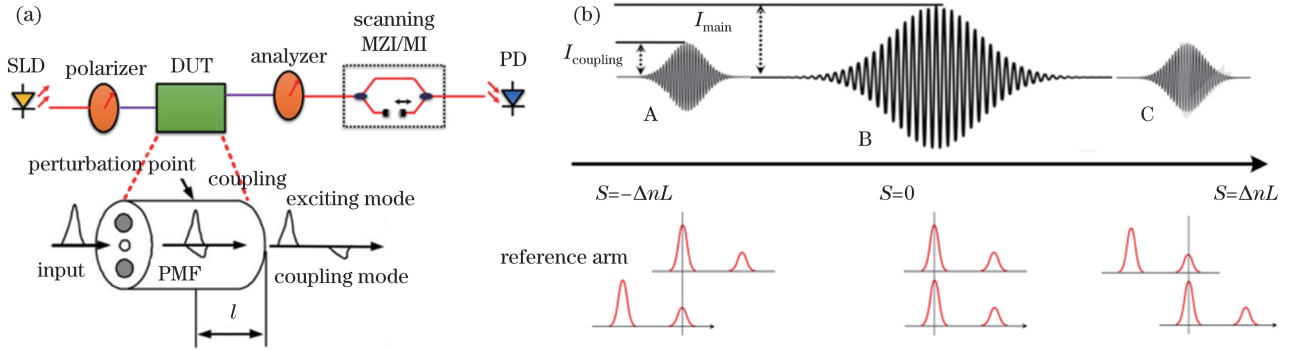


图 1 OCDP 技术的原理图。(a) OCDP 系统简图;(b) OCDP 典型测量结果

Fig. 1 Schematic of OCDP technology. (a) OCDP system; (b) typical result of OCDP system

一般将激发模与激发模发生干涉产生的干涉峰称为主峰。在测试结果中,考察其他干涉峰(如 A)与主峰之间的光程差就可以获得微扰点的位置信息,而考察该干涉峰与主峰之间的幅度之比则能够获得微扰点的偏振耦合系数。当待测器件中存在多个缺陷点时,激发模与不同的耦合模之间干涉形成的干涉峰将依光程差分布。因此,该测试方案可以对光纤陀螺器件的偏振串扰进行分布式测量。

对于解调结构中光纤偏振态随机效应引起的干涉衰落,可以通过使用基于法拉第旋转镜的光纤 Michelson 干涉仪来抑制。解调结构中的偏振模耦合会引入一些额外的干涉峰,这些干涉峰通常被称为“鬼峰”,会对测试结果产生干扰;但是,可以通过合理选择干涉仪各部分的光纤长度,将这些“鬼峰”与待测器件的干涉峰分离^[30]。

2.2 偏振串扰的理论建模与分析

在 OCDP 的定量建模与分析中,常用的建模方法有两种:琼斯矩阵法^[27]与光程追踪法^[31]。其中,琼斯矩阵法侧重于将待测器件分解为较小的单元,而光程追踪法则侧重于分析传输光的各个波列。下面详细论述这两种分析方法。

2.2.1 琼斯矩阵法

琼斯矩阵法分为 3 个步骤:列举光路中各个单元的琼斯矩阵、给出输出光矢量的琼斯矩阵、计算干涉信号及其包络表达式。首先,光路中各个单元的

改变扫描臂的臂长来调节干涉仪两臂的臂长差,从而使两臂中的波列发生干涉。如图 1(b)所示,当干涉仪的臂长差 $S = 0$ 时,激发模在参考臂中的副本与激发模在扫描臂中的副本发生干涉,并形成干涉峰 B,幅度为光强 I_{main} ;而当干涉仪的臂长差 $S = -\Delta nL$ ($S = \Delta nL$) 时,激发模(耦合模)在参考臂中的副本与耦合模(激发模)在扫描臂中的副本发生干涉,并形成干涉峰 A(C),幅度为光强 I_{coupling} 。

琼斯矩阵可以表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{\text{pol}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \delta_{\text{pol}} & \epsilon_{\text{pol}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{\rho} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\rho^2} & \rho \\ -\rho & \sqrt{1-\rho^2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_l = \begin{bmatrix} E(t'_x) & 0 \\ 0 & E(t'_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-in_x kL) & 0 \\ 0 & \exp(-in_y kL) \end{bmatrix} \end{array} \right., \quad (1)$$

式中 t 为时间, \mathbf{E}_{in} 为宽谱光源的输出琼斯矩阵, $E_x(t)$ 和 $E_y(t)$ 分别为宽谱光源输出在待测器件快轴和慢轴上的偏振模式分量, \mathbf{T}_{pol} 为输入起偏器、输出检偏器的琼斯矩阵, ϵ_{pol} 为起偏器、检偏器的消光比, δ_{pol} 为起偏器、检偏器中因工艺缺陷而产生的散射项, \mathbf{T}_{θ} 为起偏器(或检偏器)和待测器件传输主轴之间旋转角度 θ 后的琼斯矩阵, \mathbf{T}_{ρ} 为待测器件中微扰点产生偏振耦合的琼斯矩阵, ρ 为微扰点的振幅耦合系数, \mathbf{T}_l 为一段保偏光纤的琼斯矩阵, l 为对应保偏光纤的长度, n_x 和 n_y 为保偏光纤快轴和慢轴的折射率, k 为真空中的波数。一般地,对于理想状态有

近似关系 $\epsilon_{\text{pol}} = \delta_{\text{pol}} = 0$; 对于起偏器, 有 $\theta_1 = 0^\circ$, 对于检偏器, 有 $\theta_2 = 45^\circ$ 。另外, 由于 $\rho \ll 1$, 因此 $\sqrt{1 - \rho^2} \approx 1$ 。

给出各器件的琼斯矩阵后, 图 1(a) 过程中的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(t) = \mathbf{T}_{\text{pol}} \mathbf{T}_{45^\circ} \mathbf{T}_{f(L)} \mathbf{T}_\rho \mathbf{T}_{f(L)} \mathbf{T}_{0^\circ} \mathbf{T}_{\text{pol}} \mathbf{E}_{\text{in}}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{T}_{f(L)}$ 和 $\mathbf{T}_{f(l)}$ 分别为微扰点前、后光纤段的琼斯矩阵。输出光场 \mathbf{E}_{out} 在干涉仪中的输出耦合器处发生干涉。干涉仪一个臂的光束被延迟时间为 τ 。忽略干涉信号的直流项, 其交流信号可以表示为

$$I(\tau) \propto \left\langle \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{E}_{\text{out}}(t) \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{E}_{\text{out}}^*(t - \tau) \right\rangle, \quad (3)$$

式中符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示时间平均, 上标 * 表示复共轭。对干涉信号取包络, 有

$$\frac{I(\tau)}{I(0)} \approx R(\tau) + \rho R(\tau + \tau_L) + \rho R(\tau - \tau_L), \quad (4)$$

式中 $R(\tau)$ 为光源的自相关函数; τ_L 为时间延迟差, 对应发生位置分别在微扰点与输出光纤端面之间。由(4)式可以看出, 在延时分别为 $-\tau_L$ 、 0 、 τ_L 处分别出现 3 个干涉峰, 对应的干涉幅值分别为 ρ 、 1 、 ρ 。

2.2.2 光程追踪法

随着耦合点或偏振器件数量增加, 琼斯矩阵分析方法将以 2 的指数级迅速变得非常复杂。通常, 只关注微扰点处偏振串扰的耦合强度和对应的发生位置。参考图 1(a) 所示的图解法发展了一种基于枚举的光程追踪法, 该方法可以用来简化分析偏振光在偏振器件中的传输行为。光程追踪法同样可以分为 3 个步骤: 枚举波列路径、枚举波列干涉组合、代入起偏器与检偏器角度。

如图 2 所示, 用一个简单的模型——仅考虑保偏光纤中的一个微扰点——来简要说明。保偏光纤 MN 中含有一个微扰点 X。线偏振光通过起偏器后, 在 M 点被耦合到保偏光纤的快轴和慢轴中。红色线为有较大有效模式折射率的慢轴, 蓝色线为有较小有效模式折射率的快轴。直线的每一个转弯表示两个偏振模式之间的一次耦合, ρ_X 为 X 点的耦合系数。绘出如图 2 所示的所有波列的路径后, 还有必要给出每个波列的传输时间以及幅度, 如表 1 所示, 其中 $t_{f,MX}$ 为快轴光在 MX 段光纤中传输的时间, $t_{f,XN}$ 为快轴光在 XN 段光纤中传输的时间, $t_{s,MX}$ 为慢轴光在 MX 段光纤中传输的时间, $t_{s,XN}$ 为慢轴光在 XN 段光纤中传输的时间。

4 个波列在干涉仪的两个臂上生成两组副本 $1', 2', 3', 4'$ 与 $1'', 2'', 3'', 4''$ 。这两组副本中的任意一个波列都可以与另一组中的任意一个波列发生干

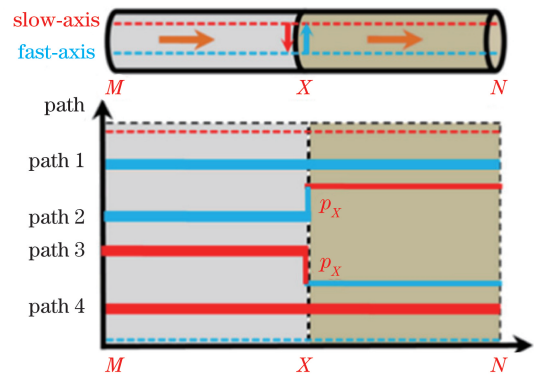


图 2 光程追踪法示意图

Fig. 2 Schematic of optical path tracking method

表 1 单一微扰点的一段保偏光纤中所有波列的传输时间和幅度

Table 1 Transmission time and amplitude of all wave trains for a PMF with one perturbation point

Path	Transmission time	Normalized amplitude
1	$t_{f,MX} + t_{f,XN}$	$\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sqrt{1 - \rho_X^2}$
2	$t_{f,MX} + t_{s,XN}$	$\rho_X \cos \theta_1 \sin \theta_2$
3	$t_{s,MX} + t_{f,XN}$	$\rho_X \sin \theta_1 \cos \theta_2$
4	$t_{s,MX} + t_{s,XN}$	$\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sqrt{1 - \rho_X^2}$

涉。由于具有对称性, 因此只列出其中 10 组干涉组合, 如表 2 所示。其中归一化串扰的强度来自于发生干涉的 2 个波列的幅度乘积, 并且利用了近似关系 $\sqrt{1 - \rho^2} \approx 1$ 。表 2 中, τ_{XN} 为光在 XN 段光纤快慢轴中传输的时间差, τ_{MX} 为光在 MX 段光纤快慢轴中传输的时间差。

表 2 单一微扰点的一段保偏光纤的干涉组合

Table 2 Normalized time-delay difference and amplitude of interferogram for a PMF with one perturbation point

Wave strain	Wave strain	Time-delay difference	Normalized crosstalk amplitude
1'	1''		$\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2$
2'	2''	0	$\rho_X^2 \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2$
3'	3''		$\rho_X^2 \sin^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2$
4'	4''		$\sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2$
1'	2''	τ_{XN}	$\rho_X \cos^2 \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_2$
3'	4''	τ_{XN}	$\rho_X \sin^2 \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_2$
1'	3''	τ_{MX}	$\rho_X \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_2$
2'	4''	τ_{MX}	$\rho_X \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin^2 \theta_2$
1'	4''	$\tau_{MX} + \tau_{XN}$	$\cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_2 \sin \theta_2$
2'	3''	$\tau_{MX} - \tau_{XN}$	$\rho_X^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_2$

最后将起偏器与检偏器角度 ($\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 45^\circ$) 代入, 就可以得到最终的干涉峰位置与串扰强度, 如表 3 所示。可以看出, 尽管表 2 看似复杂, 但最终简

化为表 3。在实际应用光程追踪法时,可以直接在第 1 个步骤枚举波列路径时就代入起偏器与检偏器的角度。

表 3 干涉峰的时延差与归一化串扰幅度

Table 3 Time-delay difference and normalized crosstalk amplitude of interferogram

Time-delay difference	Normalized crosstalk amplitude
0	1
τ_{XN}	ρ_X

3 OCDP 关键技术及仪器化

3.1 白光干涉测量噪声抑制技术

在光学相干域测量系统中,系统噪声^[32]可以表示为

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{receiver}}^2 + 2q\eta(P_1 + P_2)\Delta f + N_{\text{RIN}}\eta^2(P_1 + P_2)^2\Delta f, \quad (5)$$

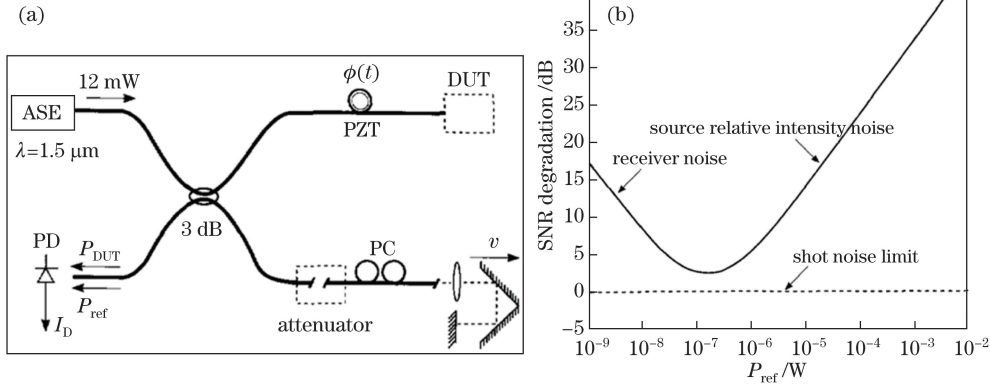


图 3 (a) 具有功率衰减器的白光干涉仪; (b) 信噪比衰减与参考臂光功率的关系
Fig. 3 (a) White light interferometer with power attenuator; (b) relationship between SNR degradation and light power of reference arm

常用的相对强度噪声抑制方案为平衡探测技术,也称为差分探测技术。平衡探测光路如图 4(a)所示,其中 α 为分光比,干涉仪输出耦合器的两个端口均使用 1 个光电探测器。平衡探测方案的使用将相对强度噪声项 $N_{\text{RIN}}\eta^2(P_1 + P_2)^2\Delta f$ 转化为拍噪

式中 σ 为系统噪声标准差, σ_{receiver} 为探测器噪声标准差, q 为单位电荷, η 为探测器的响应度, P_1 和 P_2 分别为探测到的干涉仪两个臂的光功率, Δf 为探测器的带宽, N_{RIN} 为相对强度噪声。式中 3 项分别表示探测器噪声、散粒噪声、相对强度噪声的贡献。

3.1.1 相对强度噪声抑制技术

对于一个受限于散粒噪声的系统,如图 3(a)所示的光学低相干干涉仪^[32],适当地增加干涉仪参考臂的光功率能够提高信噪比(SNR)。在图 3(a)中, ASE 为放大自发辐射光源, PZT 为相位调制器, PC 为偏振态控制器, λ 为中心波长, $\phi(t)$ 为测量臂的光相位, I_D 为测得的光电流, P_{DUT} 为待测器件的功率, P_{ref} 为参考臂光的功率, v 为反射镜的移动速度。信噪比衰减与参考臂光功率的关系如图 3(b)所示。由图 3(b)可以看出,当总功率足够大时,相对强度噪声将成为主要的限制因素。

声项 $2P_1P_2N_{\text{RIN}}\eta^2\Delta f$, 进而提高了信噪比^[33]。理论信噪比与耦合器 1 分光比的关系如图 4(b)所示,其中 a_1 为差分探测的信噪比随耦合器 1 分光比变化的曲线^[34]。调节耦合器 1 的分光比使两臂的光功率尽可能相等,从增大信号强度的角度提高了信噪比。

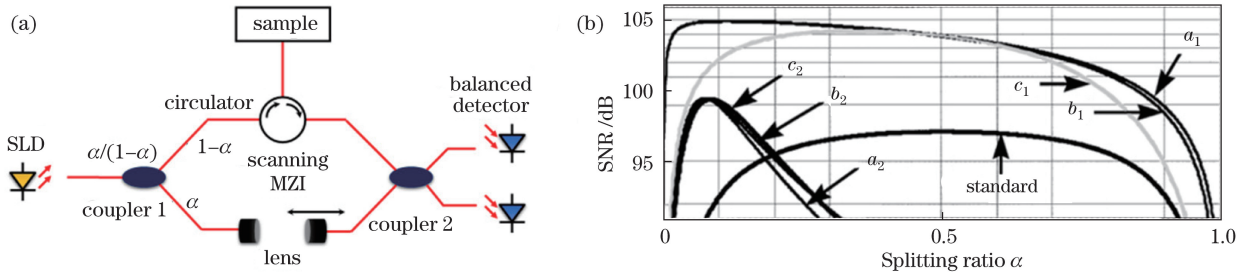


图 4 (a) 平衡探测光路; (b) 理论信噪比与耦合器 1 分光比的关系^[34]
Fig. 4 (a) Balanced detection optical path; (b) relationship between theoretical SNR and splitting ratio of coupler 1^[34]

3.1.2 干涉拍噪声抑制技术

图 4(a)所示的优化后的光路结构抑制了相对强度噪声,但是残留的拍噪声仍然限制了系统的动态范围。此外,在实际应用中,针对不同反射率的样品,可能需要选用不同分光比的耦合器 1 来达到最优的信噪比。最近,一种基于偏振分束器(PBS)的光路结构从抑制干涉拍噪声的角度实现了 105 dB 的探测灵敏度^[35],偏振分束器标定方法原理图如图 5(a)所示,其中 DFB 为分布反馈激光器,WDM 为波分复用器,ISO 为隔离器,SPU 为信号处理单元,DAQ 为数据采集卡,C0 是分光比为 98:2 的耦合器,C2 是分光比为 50:50 的耦合器,M 为扫描反射镜。偏振分束器标定法与传统方法结果对比如图 5(b)所示,其中 OPD 为光程差, P_0 为起偏器对应的干涉峰, O' 为 Y 波导输出尾纤与 PBS 连接

点对应的干涉峰, C' 为 Y 波导芯片与其输出尾纤连接点对应的干涉峰, ϵ' 为 Y 波导消光比对应的干涉峰, A 、 A_2 分别为起偏器与 Y 波导输入尾纤连接点对应的一阶干涉峰和二阶干涉峰, B 、 B_1 、 B_2 分别为 Y 波导芯片与其输入尾纤连接点对应的一阶干涉峰和二阶干涉峰。该结构与传统 OCDP 系统的区别在于使用一个偏振分束器替代了原来的检偏器与干涉仪输入耦合器。在传统方案中,耦合器将检偏器输出的光以 50:50 的分光比耦合至干涉仪的两臂;而在偏振分束器的方案中,较大功率的激发模被耦合至干涉仪的一个臂,极小功率的耦合模被耦合至干涉仪的另一个臂。从拍噪声项 $2P_1P_2N_{\text{RIN}}\eta^2\Delta f$ 的角度来看,在保持总功率不变的情况下,显著提升两臂光功率的差异能够抑制拍噪声。

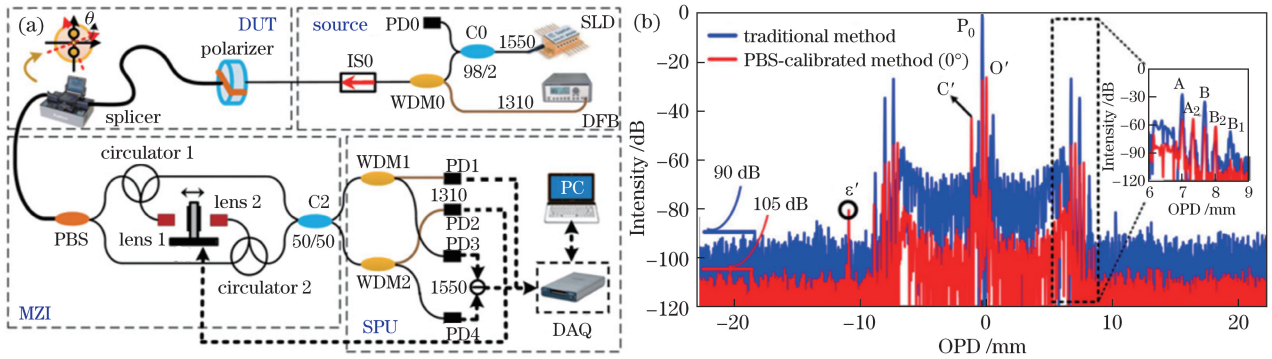


图 5 (a)偏振分束器标定方法原理图;(b)偏振分束器标定法与传统方法结果对比

Fig. 5 (a) Schematic of PBS-calibrated method; (b) comparison between results of PBS-calibrated method and traditional method

3.2 超大量程超高精度的光程扫描技术

3.2.1 光学延迟线损耗波动抑制技术

干涉仪扫描臂中的光学延迟线是 OCDP 系统中唯一的运动部件。差分光学延迟线结构如图 6(a)所示,其中 SMF 为单模光纤,GRIN 为自聚焦透镜, x 、 y 、 z 为左侧自聚焦透镜端面坐标系的三个坐标轴(其中 x 为竖直坐标轴, y 为垂直纸面的坐标轴, z 为水平坐标轴), z_0 为使用单端延迟线结构时扫描反射镜左侧对应的光程差, z_{max} 为扫描反射镜右侧对应的最大光程差, z_1 为使用差分延迟线结构时左侧对应的光程差, z_2 为右侧对应的光程差。在光学延迟线中,单模光纤中的基模光通过一个自聚焦透镜进入自由空间形成一个束腰形的光场;光束被一个平面镜反射后,重新进入自聚焦透镜并返回单模光纤中,如图 6(a)左半部分所示^[36]。显然,当反射镜与透镜端面存在一定倾角时,随着反射镜前后移动,干涉仪扫描臂的插入损耗发生波动,如图 6(b)中绿色点划线所示。这对分布式偏振串扰

测试是致命的,因为同样大小的偏振串扰若发生在不同位置,系统测量的结果将是不同的。

为了抑制光学延迟线中插入损耗的波动,本课题组提出了一种差分延迟线结构,其完整结构如图 5(a)中干涉仪部分所示^[37]。此时的干涉仪已经没有参考臂与扫描臂之分,每个臂的光程都随着位移台的移动而变化。同时,与传统结构相比,在使用相同位移台的情况下,两臂的光程差增大了 1 倍。在图 6(a)所示的差分延迟线结构中,当反射镜远离左侧自聚焦透镜而导致左端插入损耗增大的同时,反射镜实际上是靠近右端自聚焦透镜的,即右端插入损耗减小,如图 6(b)中红色虚线所示。差分延迟线结构导致干涉峰幅度的波动如图 6(b)中蓝色线所示。需要注意的是,蓝色线对应的数值并非是绿色点划线与红色虚线对应数值的平均值,而是近似为两者乘积的平方根。可以看出,尽管差分延迟线结构在整个扫描过程中的插入损耗都较大,但其波动却由单端结构的 1.2 dB 减小到了 0.2 dB。

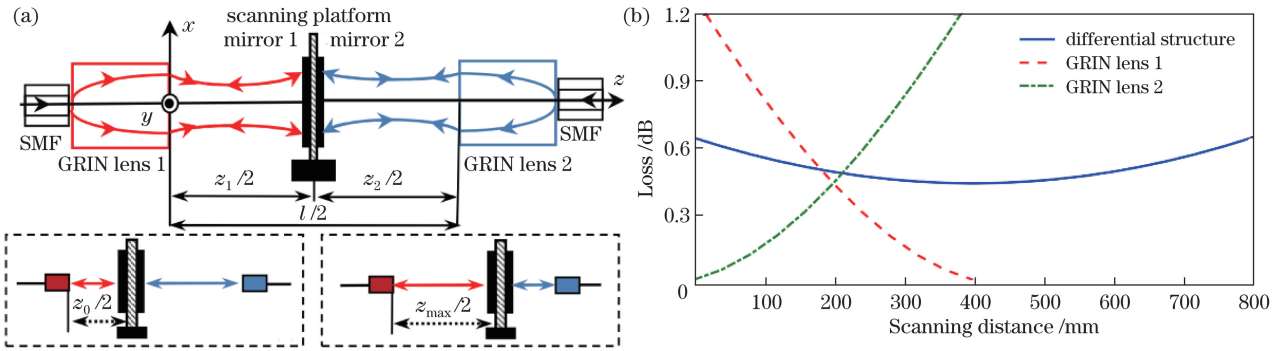


图 6 (a) 差分光学延迟线结构; (b) 差分结构与单端结构的插入损耗波动对比

Fig. 6 (a) Structure of differential optical delay line; (b) comparison of insertion loss fluctuation between differential structure and single GRIN lens

3.2.2 光学延迟线量程拓展技术

光学延迟线的量程决定了光纤环的最大可测长度。在 2.1 节中给出了扫描光程 S 与待测器件长度 L 的关系 $S = \Delta n L$, 待测器件的线性双折射 Δn 的典型值为 5×10^{-4} ; 而光纤陀螺中光纤环的长度越大, 光纤陀螺的精度越高; 因此, 有必要尽可能大地提升光学延迟线的量程。使用 2 个 1×16 光开关可实现最大 37.2 m 且损耗波动为 ± 0.15 dB 的超大量程光学延迟线^[38]。该方案的光路如图 7(a) 所示, 其中 G1~G4 为自聚焦透镜, F1 和 F2 为光纤连接器, FRM 为法拉第旋转镜, S 为光纤环的长度, $L_1 \sim L_{16}$ 为延迟光纤长度, X_0 为连续延迟量程, $\Delta X_1 \sim \Delta X_{15}$

为冗余延迟光纤长度。若不考虑 2 个光开关及其中间的部分, 以及耦合器 C_2 处的光纤环路, 整个光路就是一个典型的差分结构的 Michelson 干涉仪。其中, 20 cm 移动范围的位移台上安装了多个反射镜, 使延迟线具有连续延迟量程 $X_0 = 2.4$ m。而两个光开关及其中间相连的光纤则提供了阶跃式的延迟, 与位移台提供的连续延迟组合, 最终将量程拓展至 37.2 m。此外, 测试臂中光程为 S 的光纤环路实现了该光路结构的光程自校准, 校准模式下最终的测量结果如图 7(b) 所示, 其中 S_{2k-1}, S_{2k} 为端口 k 对应的两个干涉峰, $S_{(2k)-(2k+1)}$ 表示端口 k 与端口 $k+1$ 校准后的干涉峰。

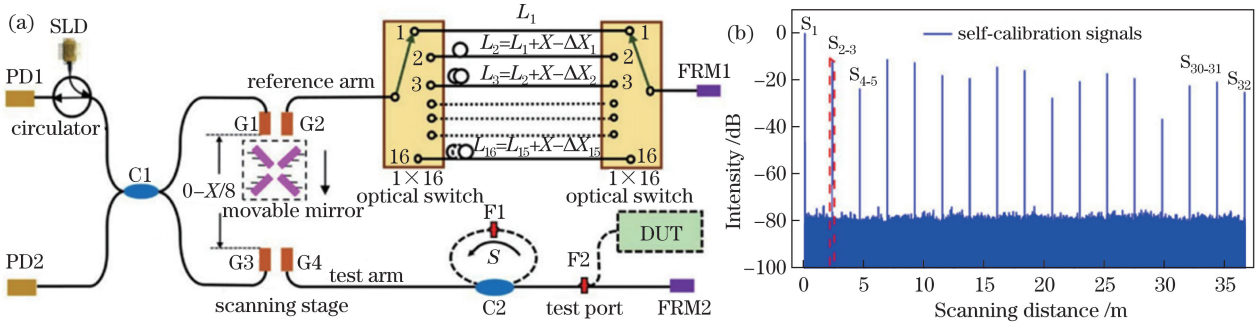


图 7 (a) 光学延迟线拓展原理图; (b) 延迟线拓展后的自校准信号

Fig. 7 (a) Schematic of range extension of optical delay line; (b) self-calibration signals after range extension of optical delay line

3.3 色散测量及抑制技术

保偏器件中传输的两个正交偏振模式都具有色度色散, 并且两者之间存在一定差异, 主要原因是两个偏振方向的芯-包层折射率差 $\Delta(\lambda) = n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}}$ 是随波长变化的, 而色度色散又与折射率差关于波长的导数有关^[39]。这两个正交偏振模式的色散之差称为双折射色散(与通常称两者的有效模式折射率差为双折射类似)^[40-41]。在光学相干域偏振测试中, 二阶双折射色散(SBD)将导致干涉峰展宽

并且幅度降低, 这不仅降低了系统的空间分辨率, 而且引入了偏振串扰的幅度误差^[42-43]。另外, 三阶双折射色散(TBD)导致干涉峰形状产生畸变(不再是对称的高斯型), 这会对确定偏振串扰发生的位置产生影响, 如图 8(a) 中蓝色曲线所示^[44], 其中 PER 为偏振消光比。因此, 有必要对待测器件的双折射色散进行测量, 并抑制其对偏振串扰测试的影响(称为色散补偿)^[45]。针对陀螺器件 Y 波导与光纤环的差异, 将双折射色散测量与抑制技术分为两类: 准分布

式^[43,46]与分布式^[26,41]。

3.3.1 准分布式双折射色散测量及抑制技术

在 Y 波导测试中,测试结果是一些对应器件各部分连接点的偏振串扰干涉峰,通常数量较少,且都是孤立的。对于任意一个干涉峰,可以通过傅里叶变换得到其相位谱,然后对其进行(加权)三次多项式拟合就能得到相应的双折射色散系数,如图 8(b)

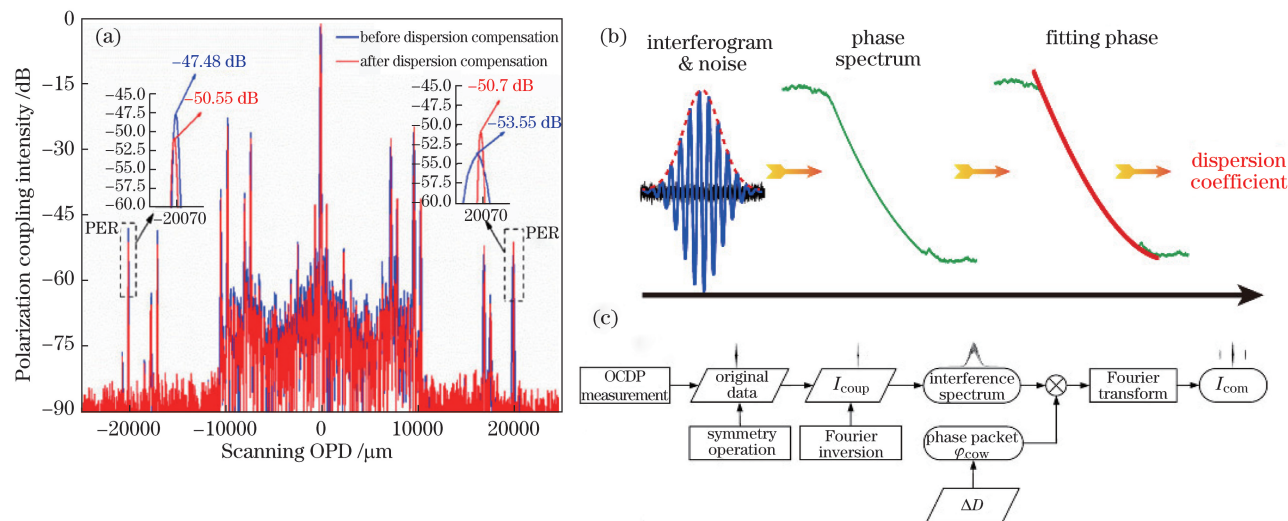


图 8 (a)色散补偿前后的 Y 波导的典型测试结果;(b)色散测量示意图;(c)色散补偿流程图

Fig. 8 (a) Typical test results of Y waveguide before and after dispersion compensation; (b) schematic of dispersion measurement; (c) flow chart of dispersion compensation

3.3.2 分布式双折射色散测量及抑制技术

与 Y 波导测试结果不同,保偏光纤敏感环的每一匝都会在测试结果中产生一个干涉峰(这可能是每一匝受力不同导致的)。此外,在一些区域,这些干涉峰甚至会连成一片。而且,即使每一匝产生的干涉峰都是孤立的,双折射导致的干涉峰展宽也将会使它们连成一片。因此,将单一干涉峰截取出,并进行傅里叶变换的操作可能难以实施。为此,本课题组提出了一种闭环色散测量方法。该方法来源于在进行准分布式色散补偿过程中,发现使用错误的色散参数构造相位包进行色散补偿也能使干涉峰的形状发生变化。结果可能是色散被补偿了一部分,也可能是受色散影响更严重,如图 9(a)所示。而对于色散补偿的结果提出了一个判据函数,该函数能够区分补偿结果的优劣,并且当色散被完全补偿时,该函数取得最大值。这样,色散测量过程就转化为一个寻找判据函数最大值的过程,这可以通过算法实现,如图 9(a)所示。

更关键的是,该算法不仅适用于一个孤立的干涉峰,还适用于如图 9(d)中蓝色曲线所示的一片受色散影响的干涉峰,其判据函数曲面如图 9(b)所

所示。从测量过程中可以看出,实际上双折射色散只影响干涉峰的傅里叶变换相位谱,而不影响其幅度谱。相应地,利用测得的双折射色散系数,构造一个不含色散的相位包,与原始信号的幅度谱组合后再进行傅里叶逆变换,就能得到色散抑制(补偿)后的干涉信号,算法流程如图 8(c)所示。色散补偿后的 Y 波导测试结果如图 8(a)中的红色曲线所示。

示,其横坐标为二阶双折射色散,纵坐标为三阶双折射色散。使用极值点对应的二阶、三阶双折射色散对图 9(d)中蓝色曲线对应的信号进行色散补偿,将得到对应的红色曲线所示的一系列干涉峰。此外,该色散值对应其中幅值最大的干涉峰的色散,其余干涉峰的色散与之相差甚少。若要精确获知其余干涉峰的双折射色散,可以将其截取出,继续使用闭环色散测量算法,也可以使用前述的相位谱三次多项式拟合方法。当然,如果截取的一段干涉信号,如图 9(e)蓝色曲线所示(其中 R 是与干涉峰 P 色散量相同的一个干涉峰),存在双折射色散差异较大的干涉峰,那么其判据函数曲面将存在多个极大值点,即一个全局极大值(最大值)、一个或多个局部极大值,如图 9(c)所示。使用最大值点对应的色散进行色散补偿后将得到图 9(e)中的红色曲线,其中的 P 标注的干涉峰对应该色散值,而 Q 标注的干涉峰则对应该局部极大值点(这个结论可以通过截取补偿一次后的数据继续分析其判据函数曲面来获得)。

白光干涉解调技术的理论空间分辨率(或补偿算法的极限分辨率)是光源的相干长度 $l_c = 4 \ln 2 \cdot \lambda^2 / (\pi \Delta \lambda)$, 其中 λ 为光源中心波长。对于中

心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 、半谱宽度为 50 nm 的光源,其相干长度约为 $42 \mu\text{m}$ 。若待测器件的线性双折射以典型值 $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ 计算,则理论上的空间分

辨率约为 8 cm 。色散补偿的作用在于保证在全量程范围内,空间分辨率不发生劣化,能够保持在 8 cm 左右。

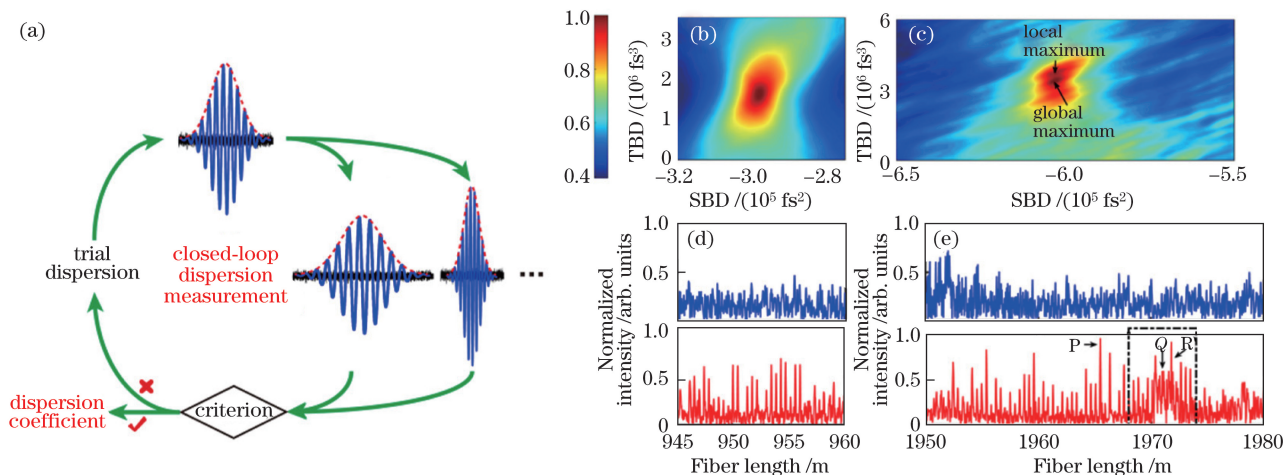


图 9 (a)闭环色散补偿示意图;待测保偏光纤(b) 945~960 m 段与(c) 1950~1980 m 段数据对应的判据函数曲面;待测保偏光纤(d) 945~960 m 段与(e) 1950~1980 m 段原始测量数据(蓝色线)与色散补偿后的数据(红色线)

Fig. 9 (a) Schematic of closed-loop dispersion compensation; criterion function surface corresponding to PMF in range of (b) 945-960 m and (c) 1950-1980 m; original data (blue curve) and its counterpart after dispersion compensation (red curve) corresponding to PMF in range of (d) 945-960 m and (e) 1950-1980 m

3.4 OCDP 系统的仪器化

光学相干域偏振测试系统主要由宽谱光源、偏振串扰测量干涉仪、光电探测与信号处理子系统三大部分组成。在提升测试系统性能的单元关键技术被攻克后,系统仪器化研制的关键是如何在保持单元技术性能的基础上,将其平行移植到测试系统中。对于某些特殊测试的需求,如待测器件自身就含有光源或者系统光源不能满足测试要求时,测量干涉仪和光电探测与信号处理子系统也可以独立构成测试系统。

本课题组研制的用于长距离光纤环测试的 OCDP 系统如图 10(a)所示。除了对保偏光纤敏感环的消光比进行测试外,该测试系统还可以对多种

参数进行测试,包括分布式偏振串扰及其均匀性和对称性(分布曲线)、偏振串扰的劣化特性、应变导致的分布式消光比的劣化特性曲线、应力分布的对称性、绕环张力的一致性、绕环导致的折射率均匀性的劣化,以及上述参数的温度特性。

本课题组研制的用于超高消光比的 Y 波导测试的 OCDP 系统如图 10(b)所示。该系统可以对 Y 波导的全光学参数进行测试与评估,如以下特性的测量:波导芯片的消光比、线性双折射,输入/输出光纤与波导芯片的耦合串音,输入/输出光纤的线性双折射,波导两输出通道的芯片消光比差异、波导(光程)长度差异、波导分光比,以及温度对上述参数的影响等。

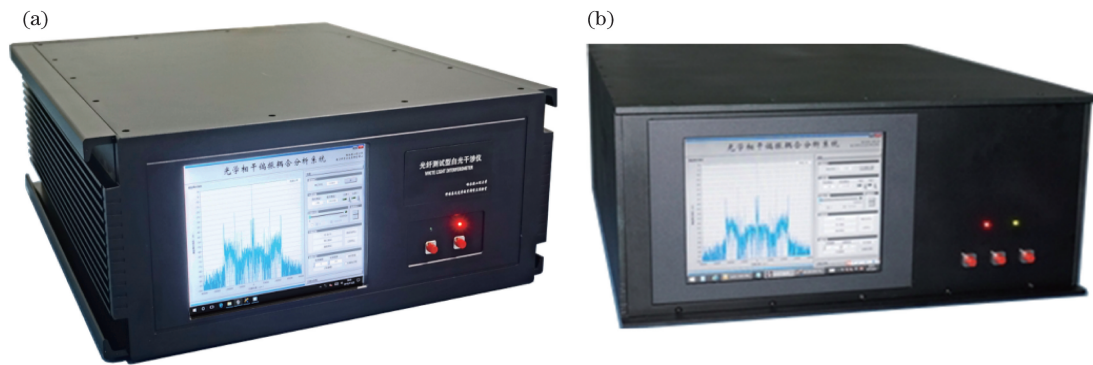


图 10 (a)光纤环测试型与(b) Y 波导测试型白光干涉测试系统

Fig. 10 Prototype of white-light interferometric measurement system for (a) fiber coil and (b) Y waveguide

光纤环测试型与 Y 波导测试型白光干涉仪测试系统的性能指标,以及与国外同类仪器的性能对比如表 4 所示^[47]。空间光路结构具有体积大、容易受外界振动扰动、光路装配调节困难的缺点;相比之下,纤维集成光路不存在空间光路结构所具有的组装问题,也无需调整光轴或者磨合它们之间的相对位置,可以保持稳定的组合,因此对振动和温度等环境因素的适应性也比较强。本课题

组研制的系统与国外系统在关键技术上的差异已在 3.1 节与 3.2 节进行了详述,具体为相对强度噪声抑制技术(提高探测灵敏度至 -105 dB)、干涉拍噪声抑制技术(扩大动态范围至 100 dB)、延迟线损耗波动技术(提高测量分辨率至 0.2 dB)、延迟线量程拓展技术(增大测量长度超过 5 km)、色散测量与抑制技术(保证全量程范围内的高空间分辨率为 8 cm)。

表 4 本课题组提出的白光干涉测试系统与国外同类仪器性能的对比

Table 4 Performance of white-light interferometric measurement system proposed by our subject group comparing with foreign similar instruments

Country	Organization	Model	Technical configuration	Wavelength /nm	Sensitivity /dB	Dynamic range /dB	Spatial resolution /cm	Measurement length /m ($\Delta n = 5 \times 10^{-4}$)	Dispersion compensation function
France	Photonics Company	WIN-P400	Bulk optic	850, 1310 or 1550	-80	80	10	1600	None
USA	General Photonics Company	PXA-1000	Fiber optic	1310 or 1550	-95	75	5	1300 or 2600	None
South Korea	FIBERPRO Company	ICD800	Bulk optic	1310 or 1550	-80	80	10	1000	None
China	Harbin Engineering University	OCDP-F-SLD	Fiber optic	1310 or 1550	-105	100	8 (Full range)	5000	Yes

4 光纤陀螺核心器件测试应用

4.1 Y 波导测试方法

4.1.1 Y 波导完全偏振特性测量方法

由于 Y 波导具有“通快阻慢”的特性,如果使用 0°起偏器或者 90°起偏器,则很难测到 Y 波导芯片消光比的信息,因此,一般使用 45°起偏器与 45°检偏器的组合进行 Y 波导测试,如图 11(a)所示,其中 MFIOC 为多功能集成光学芯片,A、B、C、D 分别为连接点。为了测量 Y 波导的完全偏振特性,需要对起偏器和检偏器尾纤长度进行选择,一般分别选为 20 m 和 2 m 左右。典型的测量结果如图 11(b)所示,其中标注的干涉峰 D、C、A、B、Y 与图 11(a)所示的 4 个连接点以及 Y 波导的芯片消光比一一对应,D'、C'、A'、B'、Y'分别为对应的对称干涉峰。色散的影响使得主峰 M 右侧的干涉峰在一定程度上展宽。

起偏器与检偏器尾纤长度决定了图 11(b)中所述干涉峰 A、B、C、D 的位置,关于 A、B、C、D 这 4 个干涉峰的光程差的计算,可以参见 2.2.2 节中的光

程追踪法。对于给定的待测 Y 波导,其输入、输出尾纤长度已经给定,则干涉峰 A、B 的相对位置以及干涉峰 C、D 的相对位置是不变的,可以通过改变起偏器与检偏器尾纤长度来调整干涉峰 A(B)与 C(D)的相对位置,因此,一般需要起偏器和检偏器的尾纤长度相差较大,如分别选为 20 m 和 2 m 左右;但这并不是必须的,如图 11(b)所示的结果中,起偏器和检偏器的尾纤分别约为 20 m 和 15 m;但是,需要保证能够正确分辨出每个干涉峰对应的待测器件中的连接点。

4.1.2 Y 波导双通道同时测量方法

Y 波导完全偏振特性测量方法仅对其中一个输出臂进行了测试,而 Y 波导的两个输出端口存在一定差异,因此为了更准确地模拟实际的 Y 波导工作环境,有必要对 Y 波导的两臂同时进行测量。一种超简结构的双臂同时测试方案如图 12(a)所示,其中, ρ_B 、 ρ_D 、 ρ_E 分别为连接点 B、D、E 的消光比。Y 波导的一个臂中的波列经过检偏器后进入干涉仪的该臂中,同时,Y 波导另一个臂中的波列经过另一个检偏器后进入干涉仪的该臂中,最后这些波列进行

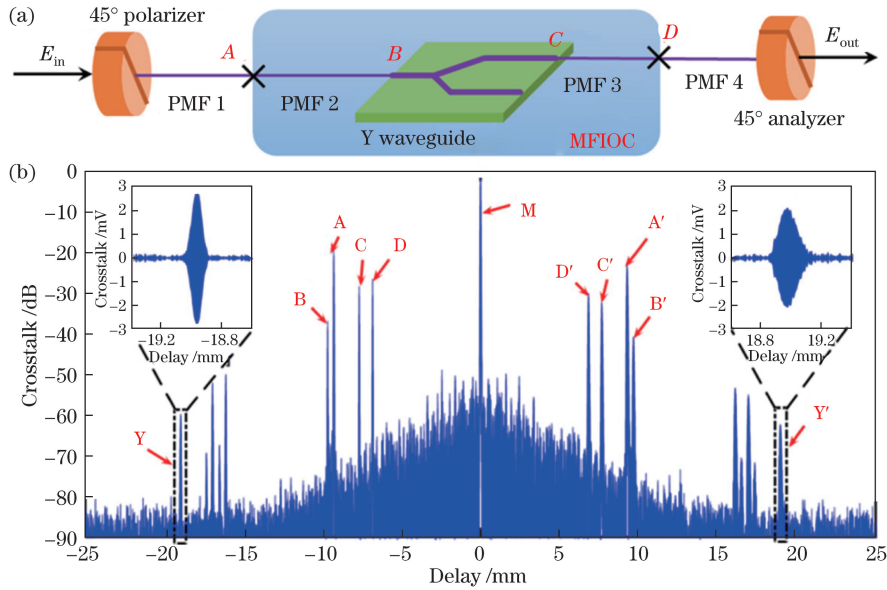


图 11 (a) Y 波导测试方法示意图; (b) 典型的 Y 波导测试结果

Fig. 11 (a) Schmetic of measurement method for Y waveguide; (b) typical test result of Y waveguide

干涉^[48]。实际上,这种光路结构的测量结果假定 Y 波导两臂的消光比、插入损耗都是相同的。另一种改进的光路结构如图 12(b)所示,其中 O_1 、 O_2 为 Y 波导芯片与输出尾纤的连接点, D_1 、 D_2 为测试仪器与多功能集成光学芯片之间的连接点, E_1 、 E_2 为检偏器与延长光纤之间的连接点, $P1 \sim P3$ 为检偏器,

$C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 、 $C4$ 、 $C5$ 为耦合器, I 为 Y 波导芯片与输入尾纤之间的连接点, PD 为光电二极管, DAQ 表示数据采集。Y 波导每个臂的所有波列都将经过耦合器 $C3$ 耦合至一段单模光纤中^[31]。只要对耦合器 $C3$ 的尾纤长度进行合理选择, 两组波列就能够在光程上完全分离, 并最终进入干涉仪。

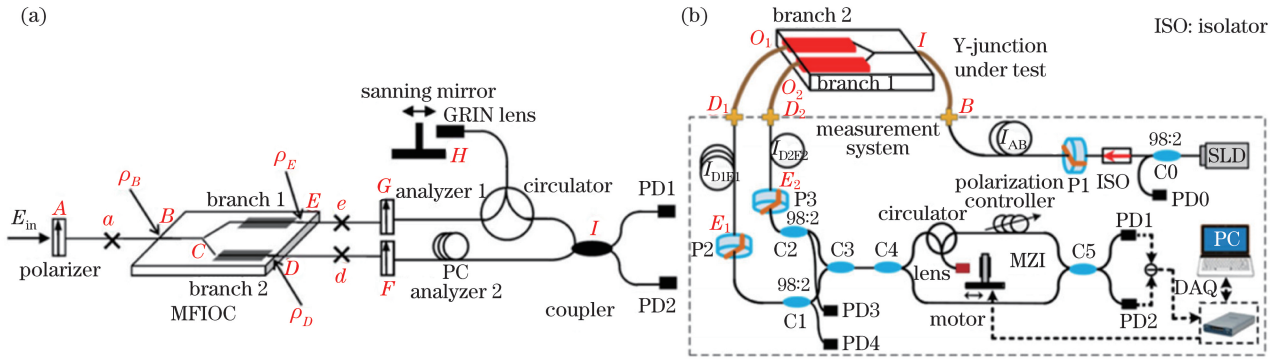


图 12 (a) 超简结构和 (b) 改进的 Y 波导双臂同时测试原理图

Fig. 12 Schematics of (a) ultra-simple structure and (b) improved structure for simultaneous measurement of both arms of Y waveguide

4.1.3 高消光比 Y 波导的研发与测试

为了克服钛扩散铌酸锂通道波导技术中的光泄漏问题, 目前通常使用质子交换技术制造铌酸锂 Y 波导^[49-50]。理论上, 质子交换铌酸锂 Y 波导的消光比高达 90 dB, 但是基底底面的全反射导致 Y 波导的消光能力被大大削弱^[10], 如图 13(a) 所示。本课题组使用 OCDP 仪器对这样的 Y 波导进行测试, 测得其中的底面反射干涉峰如图 13(b) 所示, 证实了该理论的正确性。基于该结果, 本课题组

的合作单位提出了一种高消光比 Y 波导的制造方案^[51], 即在底面全反射光的路径上镀一层吸收膜, 并最终成功研制了消光比超过 80 dB 的 Y 波导, 测试结果如图 5(b) 所示。

4.2 保偏光纤敏感环测试方法

4.2.1 高空间分辨率的长距离保偏光纤敏感环测试

与 Y 波导测试不同, 在光纤环测试中, 通常选择 0° 起偏器和 45° 检偏器。从表 3 中已经可以看出, 这种选择使测试结果中的干涉峰数量大幅减少,

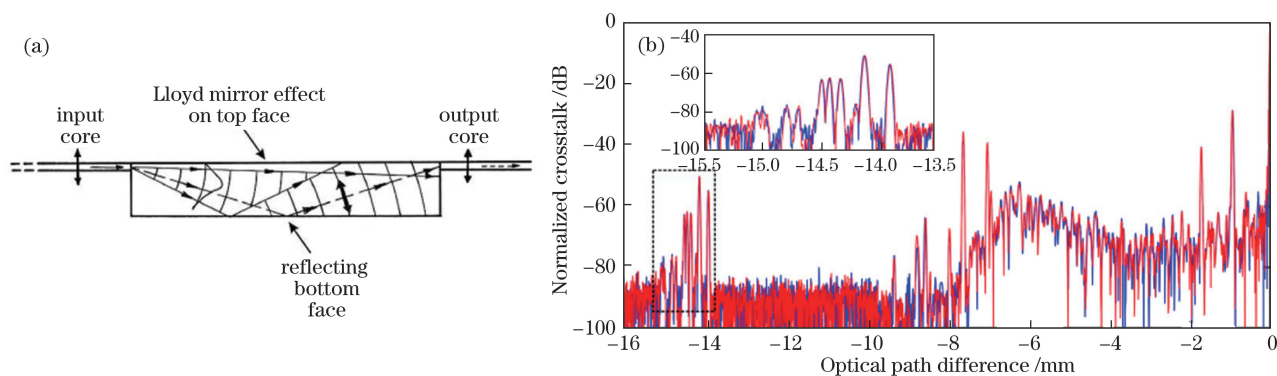


图 13 Y 波导芯片基底反射模式的(a)示意图与(b)测试结果

Fig. 13 (a) Schematic and (b) measurement result of reflection modes from substrate of Y waveguide core

一个微扰点将仅产生一个干涉峰,因此,这里不再对光纤环的测试过程进行建模,而是直接给出测试结果。图 14 所示为长度超过 3 km 的保偏光纤敏感环的测试结果($\Delta n = 6.2 \times 10^{-4}$)。由图 14 可知,色散补偿后空间分辨率显著提升。

4.2.2 保偏光纤敏感环测试结果分析

由图 14(b)的插图(b1)以及图 9(d)、图 9(e)可以看出,光纤环的测试结果中明显存在梳齿状的干涉峰,每个“梳齿”对应缠绕着的光纤环中的一匝。基于光纤环几何结构上的周期性,本课题组对色散补偿后的测试结果进行傅里叶分析,结果如图 15 所示。傅里叶变换能够获取空域分布的偏振串扰中的

周期性信息,例如图 14(b)中每隔约 90 m 出现的 1 个较大的串扰峰,每 2 个大串扰峰之间还存在 1 个相对较小的串扰峰,这是由光纤环绕制过程中的换层导致的。这两者对应图 15 中标注的 $1/(48.43 \text{ m})$ 与 $1/(93.02 \text{ m})$ 处的峰。而色散补偿后的蓝色线中, $1/(0.456 \text{ m})$ 与 $1/(0.399 \text{ m})$ 之间的区域对应那些较小的梳齿状的干涉峰,这些信息在色散补偿前是看不到的。

5 结束语

回顾了近年来发展的 OCDP 技术,包括分布式偏振串扰的测试原理与光路精确建模方法、白光干

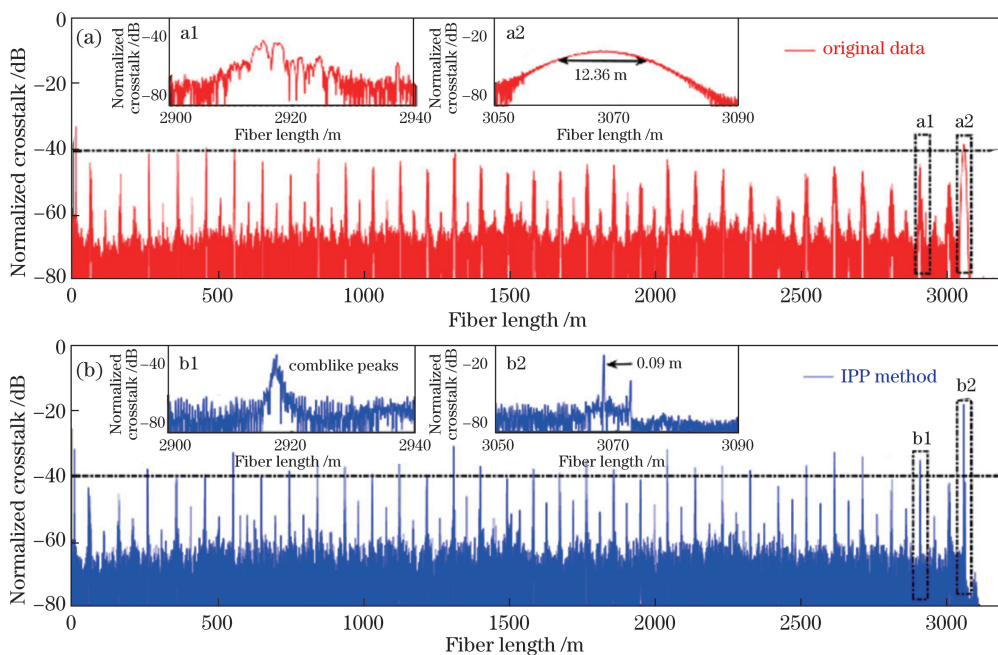


图 14 长度超过 3 km 的保偏光纤环的分布式偏振串扰。(a)含有色散的直接测试结果;

(b)色散补偿后的测试结果(IPP:迭代相位包方法)

Fig. 14 Distributed polarization crosstalk of PMF coil with length greater than 3 km. (a) Measurement results with dispersion; (b) measurement results after dispersion compensation (IPP method: iterative phase packet method)

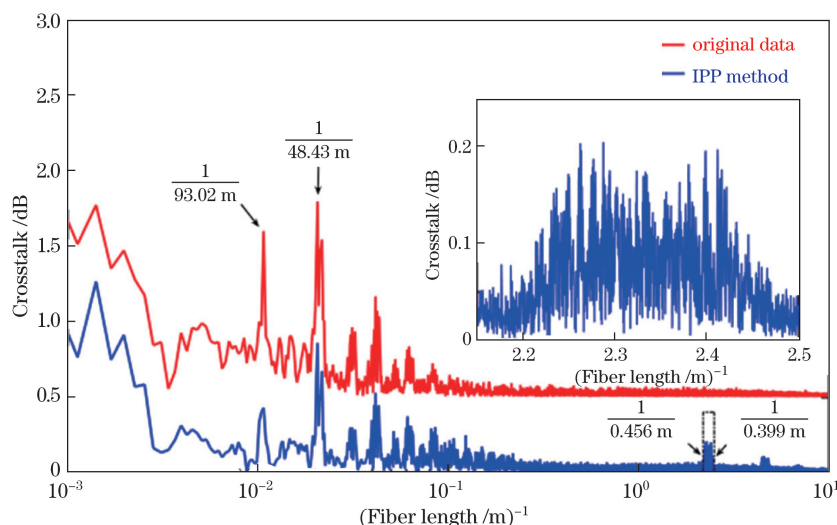


图 15 光纤环测试结果的傅里叶分析

Fig. 15 Fourier analysis of fiber coil measurement results

涉测量噪声抑制、超大量程超高精度的光程扫描、光纤色散对测量影响的抑制,以及 OCDP 仪器化关键技术等。展示了 OCDP 技术在高精度光纤陀螺核心器件——超高芯片消光比集成波导调制器(Y 波导)和超长距离光纤敏感环性能测试中的应用。近 10 年来,在超高精度/精密级光纤陀螺研发的迫切需求下,国内光纤分布式偏振串扰测试技术在偏振串扰(偏振消光比)测量灵敏度与分辨率、动态范围、(全量程内不失真)空间分辨率,以及保偏光纤测量长度等核心技术指标与综合性能方面得到迅猛发展,全面超越了国外,形成了具有完全自主知识产权的高精度光纤陀螺核心器件检测技术;研发的高精度光纤陀螺检测与诊断仪已经能够满足超高消光比 Y 波导和超长光纤敏感环自身器件性能和制备工艺影响的测试需求,为光纤陀螺光路整体性能的在线与非破坏性诊断与评估、超高精度/精密级光纤陀螺的研发和生产提供了有效的测试手段和测试方法。

在未来,随着光纤陀螺精度与环境适应性等研发要求的不断提升,基于 OCDP 的光纤陀螺测试与诊断技术也持续需要在测试性能与功能、测试方法的普适性和简易性等方面不断改进。首先,希望发展基于 OCDP 双向同时测量技术,在较大程度上可以抑制测量中的随机干扰,从而提高测量的准确性;其次,需要尽可能地减少陀螺器件的测试时间,提升测量仪器的测试速度,增强其动态测量能力,实现在真实环境状态下,特别是在迅速变化的温度场中光纤陀螺器件与光路的测试与诊断问题亟待加强。最后,在高精度核心器件测量的基础上,最好能够利用陀螺自身光源进行半闭合和闭合光纤光路的

测量,以极大地弥补光纤陀螺整机光路缺乏测试手段的现状。

综上所述,将保偏光纤、器件与组件中本征的分布式偏振串扰作为描述光纤组件偏振特性及其光路连接有效性评价的特征量,借助于分布式偏振测试方法与技术,有望将 OCDP 测量方法与技术发展成为光纤偏振器件、组件与光路的高性能、通用、在线测试方法和测试标准。与发达国家相比,其关键技术与测试设备研发水平的全面超越必将对我国以光纤陀螺为代表的高性能光纤传感技术的进一步深入研发、高精度光纤传感系统工程化与产业化,以及实际应用等方面赶超国际先进水平产生巨大的促进作用。

致谢: 研究中的部分光纤陀螺器件由中国电子科技集团第四十四研究所、中国航天科工集团湖北三江红峰控制有限公司、北京世维通科技有限公司、中国兵器工业集团导航控制研究所、中航工业西安飞行自动控制研究所、中国航天科技集团北京航天时代光电科技有限公司、中国航天科工集团第三十三研究所、中船重工河北汉光重工有限责任公司、北京航空航天大学等单位提供,特此致谢!

参 考 文 献

- [1] Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, 2(2): 91-107.
- [2] Sanders G A, Szafraniec B, Liu R Y, *et al.* Fiber optic gyros for space, marine, and aviation applications[C]. SPIE, 1996, 2837: 61-71.
- [3] Divakaruni S, Sanders S. Fiber optic gyros: A

- compelling choice for high precision applications[C]// Proceedings of the Optical Fiber Sensors, 2006: MC2.
- [4] Martin P, le Boudec G, Lefevre H C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry[C]. SPIE, 1992, 1585: 173-179.
- [5] Sanders S J, Strandjord L K, Mead D. Fiber optic gyro technology trends—a Honeywell perspective[C]// Proceedings of the Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002: 5-8.
- [6] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope: Actually better than the ring-laser gyroscope?[C]. SPIE, 2012, 8421: 842104.
- [7] Lefèvre H C. Potpourri of comments about the fiber optic gyro for its 40th anniversary, and how fascinating it was and it still is![C]. SPIE, 2016, 9852: 985203.
- [8] Findakly T, Bramson M. High-performance integrated-optical chip for a broad range of fiber-optic gyro applications[J]. Optics Letters, 1990, 15(12): 673-675.
- [9] Nayak J. Fiber-optic gyroscopes: From design to production[J]. Applied Optics, 2011, 50(25): E152-E161.
- [10] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Norwood: Artech House, 2014.
- [11] Youngquist R C, Carr S, Davies D E N. Optical coherence-domain reflectometry: A new optical evaluation technique[J]. Optics Letters, 1987, 12(3): 158-160.
- [12] Brinkmeyer E, Ulrich R. High-resolution OCDR in dispersive waveguides[J]. Electronics Letters, 1990, 26(6): 413-414.
- [13] Swanson E A, Huang D, Hee M R, *et al.* High-speed optical coherence domain reflectometry[J]. Optics Letters, 1992, 17(2): 151-153.
- [14] Hamel P, Jaouën Y, Gabet R, *et al.* Optical low-coherence reflectometry for complete chromatic dispersion characterization of few-mode fibers[J]. Optics Letters, 2007, 32(9): 1029-1031.
- [15] Bourquin S, Monterosso V, Seitz P, *et al.* Video-rate optical low-coherence reflectometry based on a linear smart detector array[J]. Optics Letters, 2000, 25(2): 102-104.
- [16] Sorin W V, Gray D F. Simultaneous thickness and group index measurement using optical low-coherence reflectometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(1): 105-107.
- [17] Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.* Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [18] Liu X M, Cobb M J, Li X D. Rapid scanning all-reflective optical delay line for real-time optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 80-82.
- [19] Tardy A, Jurczyszyn M, Bruyere F, *et al.* Fiber PMD analysis for optical-fiber cable using polarization OTDR[C]. Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference, 1995: ThD2.
- [20] Gisin B. Distributed PMD measurement with a polarization-OTDR in optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(10): 1843-1848.
- [21] Passy R, Gisin N, von der Weid J P, *et al.* Experimental and theoretical investigations of coherent OFDR with semiconductor laser sources[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(9): 1622-1630.
- [22] Glombitza U, Brinkmeyer E. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(8): 1377-1384.
- [23] Chen S, Giles I P. Optical coherence domain polarimetry: Intensity and interferometric type for quasi-distributed optical fibre sensors[C]. SPIE, 1990, 1370: 217-225.
- [24] Chen S, Giles I P, Fahadiroushan M. Quasi-distributed pressure sensor using intensity-type optical coherence domain polarimetry[J]. Optics Letters, 1991, 16(5): 342-344.
- [25] Chen S, Giles I P. 'On-spot' interferometric optical coherence domain polarimetry for quasi-distributed temperature sensors[J]. Electronics Letters, 1990, 26(19): 1607-1608.
- [26] Li Z H, Meng Z, Chen X J, *et al.* Method for improving the resolution and accuracy against birefringence dispersion in distributed polarization cross-talk measurements[J]. Optics Letters, 2012, 37(14): 2775-2777.
- [27] Jun Y, Yuan Y G, Ai Z, *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.
- [28] Bing W, Yang J, Yuan Y G, *et al.* Performance tests of PM optical fiber coupler based on optical coherence domain polarimetry[C]. SPIE, 2012, 8421: 8421A2.
- [29] Tang F, Wang X Z, Zhang Y M, *et al.* Characterization of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers by use of white-light interferometry[J]. Applied Optics, 2007, 46(19): 4073-4080.
- [30] Yuan Y G, Cheng Y Q, Yang J, *et al.* Suppression of interference noise caused by Fresnel reflection in all-fiber white-light interferometer[J]. Applied Optics, 2017, 56(31): 8732-8737.
- [31] Li C, Yuan Y G, Yang J, *et al.* Inconsistency

- measurement between two branches of LiNbO₃ integrated optic Y-junction[J]. *Optics Communications*, 2016, 369: 152-158.
- [32] Sorin W V, Baney D M. A simple intensity noise reduction technique for optical low-coherence reflectometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(12): 1404-1406.
- [33] Haskell R C, Liao D, Pivonka A E, *et al.* Role of beat noise in limiting the sensitivity of optical coherence tomography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(11): 2747-2755.
- [34] Rollins A M, Izatt J A. Optimal interferometer designs for optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1484-1486.
- [35] Li C, Yang J, Yu Z J, *et al.* Dynamic range beyond 100 dB for polarization mode coupling measurement based on white light interferometer[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16247-16257.
- [36] Tang F, Wang X Z, Zhang Y M, *et al.* Distributed measurement of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(23): 3411-3413.
- [37] Li C, Yang J, Yuan Y G, *et al.* A differential delay line for optical coherence domain polarimetry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(4): 045102.
- [38] Yuan Y G, Lu D C, Yang J, *et al.* Range extension of the optical delay line in white light interferometry[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4598-4605.
- [39] Kasap S O. *Optoelectronics and photonics: Principles and practices*[M]. Upper Saddle River: Pearson Education India, 2009.
- [40] Flavin D A, McBride R, Jones J D C. Dispersion of birefringence and differential group delay in polarization-maintaining fiber[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(12): 1010-1012.
- [41] Yu Z J, Yang J, Yuan Y G, *et al.* High-resolution distributed dispersion characterization for polarization maintaining fibers based on a closed-loop measurement framework[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 7103508.
- [42] Tang F, Wang X Z, Zhang Y M, *et al.* Influence of birefringence dispersion on distributed measurement of polarization coupling in birefringent fibers[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(7): 075006.
- [43] Yu Z J, Yang J, Yuan Y G, *et al.* Quasi-distributed birefringence dispersion measurement for polarization maintain device with high accuracy based on white light interferometry[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1587-1597.
- [44] Zhang H L, Yang J, Li C, *et al.* Measurement error analysis for polarization extinction ratio of multifunctional integrated optic chips[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(24): 6873-6880.
- [45] Jin J, Wang S, Song J M, *et al.* Novel dispersion compensation method for cross-coupling measurement in PM-PCF based on OCDP[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(5): 495-500.
- [46] Zhang H X, Chen X W, Ye W T, *et al.* Mitigation of the birefringence dispersion on the polarization coupling measurement in a long-distance high-birefringence fiber[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(2): 025203.
- [47] Corp G P. PXA-1000 - distributed polarization crosstalk analyzer[EB/OL]. [2017-10-28]. <http://www.general-photonics.com>.
- [48] Yuan Y G, Li C, Yang J, *et al.* Simultaneous evaluation of two branches of a multifunctional integrated optic chip with an ultra-simple dual-channel configuration[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 115-118.
- [49] Bortz M L, Fejer M M. Annealed proton-exchanged LiNbO₃ waveguides[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(23): 1844-1846.
- [50] Korkishko Y N, Fedorov V A, Feoktistova O Y. LiNbO₃ optical waveguide fabrication by high-temperature proton exchange[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(4): 562-568.
- [51] Hua Y, Shu P, Zheng D S, *et al.* Method for improving the polarization extinction ratio of Y waveguide used in fiber optic gyroscope: CN 103267998 B[P/OL]. (2015-06-17) [2013-08-28]. <http://www.patexplorer.com/patent/view.html?patid=CN201310185490.2&.sc=&.q=%E5%8D%8E%E5%8B%87%20%E8%88%92%E5%B9%B3&.fq=&.sort=&.sortField=&.page=1&.rows=10#1/CN201310185490.2/detail/abst>.