

## 激光与光电子学进展

## 光频域分布式光学偏振测试技术及应用(特邀)

喻张俊<sup>1,3,4†</sup>, 杨军<sup>1,3,4\*†</sup>, 邹晨<sup>2</sup>, 林蹉富<sup>2</sup>, 王云才<sup>1,3,4</sup>, 秦玉文<sup>1,3,4</sup><sup>1</sup>广东工业大学信息工程学院先进光子技术研究院, 广东 广州 510006;<sup>2</sup>哈尔滨工程大学物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;<sup>3</sup>通感融合光子技术教育部重点实验室, 广东 广州 510006;<sup>4</sup>广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006

**摘要** 光频域偏振测量(OFDP)是一种基于扫频激光干涉原理的分布式光纤偏振测试技术,它能够精确获取保偏光纤、器件、组件与光路的偏振特性及其空间分布,实现高性能器件与光路的性能测试与质量评价,以及缺陷分析与故障诊断。OFDP优点是兼顾超高测量灵敏度、超大测量范围、高精细度、长测量距离、动态快速测量等,已逐渐发展成为性能最优的分布式光纤测量技术之一。本文回顾了OFDP的测量原理,定量分析了分布式偏振串音的测量极限,综述了分布式偏振测试性能提升的若干关键技术,给出了高精度偏振器件与光路的测试典型应用,并讨论了其技术挑战和未来潜在的研究方向。

**关键词** 光频域偏振测量; 分布式光学测量; 偏振串音; 保偏光纤与器件; 光纤陀螺

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232272

## Optical Frequency Domain Distributed Polarization Measurement Technology and Applications (Invited)

Yu Zhangjun<sup>1,3,4†</sup>, Yang Jun<sup>1,3,4\*†</sup>, Zou Chen<sup>2</sup>, Lin Cuofu<sup>2</sup>, Wang Yuncai<sup>1,3,4</sup>, Qin Yuwen<sup>1,3,4</sup><sup>1</sup>*Institute of Advanced Photonics Technology, School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;*<sup>2</sup>*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;*<sup>3</sup>*Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education of China, Guangzhou 510006, Guangdong, China;*<sup>4</sup>*Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China*

**Abstract** Optical frequency domain polarimetry (OFDP) is a distributed fiber polarization measurement technique based on optical frequency domain interferometry principles. It accurately measures the spatial distribution of polarization crosstalk and polarization extinction ratio for polarization maintaining fibers, components and devices, and optical fiber system, thereby achieving performance tests, quality evaluation, defect analysis, and fault diagnosis for high-performance polarization maintaining components. Its advantages include ultra-high polarization crosstalk measurement sensitivity, ultra-large dynamic range, high spatial resolution, long measurement distance, and agile measurement. Thus, it becomes one of the distributed fiber measurement technologies with the best overall performances. This paper reviews the measurement principle of OFDP technology, quantitatively analyzes the measurement accuracy limit of distributed polarization crosstalk. Then, the performance improvement technologies for distributed polarization measurement are summarized. Finally, OFDP's applications for measuring typical high-precision polarization maintaining devices are demonstrated, and the technology challenges and future development directions are discussed.

**Key words** optical frequency domain polarimetry; distributed optical measurements; polarization crosstalk; polarization maintaining fiber and devices; fiber optic gyro

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2023-11-22; 录用日期: 2023-11-29; 网络首发日期: 2023-12-09

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3205200)、国家杰出青年科学基金(61925501)、国家自然科学基金青年科学基金(62005054)

通信作者: \*yangj@gdut.edu.cn

† 共同第一作者

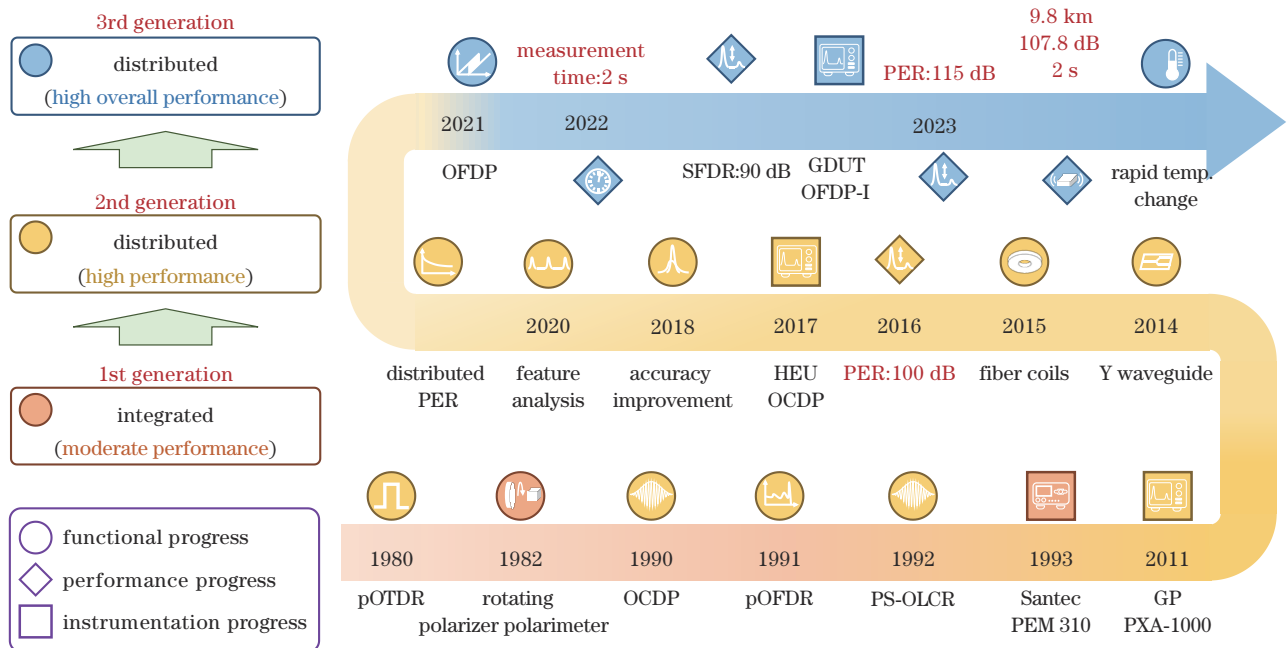
# 1 引言

分布式偏振测量技术<sup>[1]</sup>能够对光纤器件与组件沿传输方向的分布式偏振串音发生的位置、强度<sup>[2-3]</sup>进行精准定位与精确测量,进而提取其偏振消光比(PER)特征<sup>[4]</sup>。它不仅能够表征被测对象的固有光学偏振性能<sup>[5-8]</sup>(如双折射系数<sup>[9]</sup>、拍长、偏振串音、偏振消光比<sup>[10]</sup>等),还能够反映其制备工艺和外部环境状态(如横向应力<sup>[11]</sup>、应力角度<sup>[12]</sup>、环境温度<sup>[13]</sup>等)。测量参量中,偏振消光比<sup>[14-16]</sup>和偏振串音<sup>[17-18]</sup>是评价保偏光纤和偏振光学器件性能最基础的参数、最核心的技术指标。偏振串音由内部缺陷或外部应力引起,它会降低保偏光纤的传输性能,增加光芯片、光路模块等的传输损耗<sup>[19]</sup>,改变偏振相关损耗并引入额外的非线性效应<sup>[20]</sup>。因此,分布式偏振测量技术可以准确评估光纤、器件与光路的性能和质量,评价外界环境的影响、诊断故障产生的原因,为光纤器件研发与生产检测、制备工艺优化与改进等提供了不可或缺的测试手段和方法指导。

分布式偏振测试技术在测量灵敏度、动态范围、测试距离、测量速度等性能方面都面临着极大的挑战,例如,偏振消光比接近 50 dB 的薄膜铌酸锂器件<sup>[21]</sup>、消光比超过 60 dB 的集成偏振分束器<sup>[22]</sup>、高达 80 dB 的多功能集成波导调制器(Y波导)<sup>[23]</sup>、偏振串音低至 -110 dB/0.1 m 的反谐振空芯保偏光纤<sup>[24]</sup>,以

及 10 km 级长距离保偏敏感环<sup>[8,25]</sup>等超高性能光纤与光学偏振器件不断涌现。此外,单一性能的提升已经无法完全满足当前的测试需求。例如,在宽温域、快温变下,研究长距离、低串音的保偏传感光路或敏感环的性能退化规律时,亟需发展兼顾高精度、长距离、宽范围、动态快速的分布式测试方法与技术。

光纤偏振测试技术共经历了三代的发展(图 1),第一代是集总式测试技术,第二代是高性能分布式测试技术,第三代则是新兴的全性能分布式测试技术。集总式偏振测试技术的起源,可以追溯至 1982 年,美国海军研究实验室对椭圆芯双折射光纤的偏振消光比进行测量<sup>[26]</sup>。该方法通过旋转输入起偏器和输出检偏器,分别调整它们与被测光纤的对轴角度,同时监测输出光功率,最后将最大与最小输出光功率之比作为被测光纤的偏振消光比。在实际应用过程中,利用偏振主轴的正交特性,将最小输出光功率状态下的检偏器旋转 90°,即可测得最大输出光功率。随后,该方法被广泛采用<sup>[27-29]</sup>,并发展成为成熟的消光比测试仪器,例如,日本 Santec 公司的 PEM-310 型<sup>[30]</sup>、美国 General Photonics 公司(现被美国 Luna 公司收购)的 ERM-101 型<sup>[31]</sup>等。然而,上述基于功率检测的旋转偏振法,由于光路中器件偏振消光比的限制<sup>[32]</sup>,其偏振消光比测量范围一般不超过 50 dB。此外,集总式的测量方法无法获取光纤中的偏振串音分布,不能用于缺陷分析与故障诊断。



GP: General Photonics; HEU: Harbin Engineering University; GDUT: Guangdong University of Technology; SFDR: spurious free dynamic range; PER: polarization extinction ratio; temp.: temperature

图 1 光纤偏振测试技术的研究进展

Fig. 1 Development of optical fiber polarization measurement technology

为了克服上述缺点,多种高性能的分布式偏振测试技术应运而生,例如:1980年,英国中央电力研究所

提出的偏振光时域反射技术<sup>[33]</sup>(pOTDR);1990年,英国伦敦国王学院提出的光相干域偏振测试技术

(OCDP)<sup>[34]</sup>;1991年,前苏联科学院提出的偏振光频域反射技术<sup>[35]</sup>(pOFDR);1992年,美国麻省理工学院提出的偏振敏感光学低相干反射计(PS-OLCR)等。随后的二十多年间,由于测量精度高的优势,用于分布式偏振串音和消光比测量的光相干域偏振测试技术逐渐脱颖而出,得到了持续的发展<sup>[36-41]</sup>。在此期间,不仅偏振消光比测量动态范围突破 100 dB<sup>[42]</sup>,而且在测量对象(Y波导<sup>[43]</sup>、光纤环<sup>[44]</sup>)、测量功能(测量精度提升<sup>[45-46]</sup>、特征分析<sup>[8]</sup>、分布式偏振消光比<sup>[47]</sup>)、测量仪器<sup>[48]</sup>等方面,都取得了较大的进展。测试仪器方面,法国 Photonetics 公司开发了 WIN-P 系列分布式偏振串音测试仪,韩国 FIBERPRO 公司开发了 ICD 系列光相干域偏振测试仪,美国 General Photonics 公司推出了 PXA-1000 型高精度分布式偏振串音测试仪<sup>[49]</sup>,国内哈尔滨工程大学(HEU)推出了 OCDP 系列分布式偏振串音分析系统。

OCDP 技术的各项技术指标之间具有显著的相互制约关系,需要根据测量对象与场景进行选择与均衡。例如:对于超高消光比 Y 波导,需要测量的距离短、但偏振串音灵敏度高;对于长距离保偏光纤敏感环,只需使用偏振串音灵敏度适中、但测量长度超长的方法。此外,由于 OCDP 技术使用了光功率密度较低的宽谱光源,以及扫描速度缓慢的机械式光程延迟线,其偏振串音灵敏度、动态范围、测试距离、测量速度等单一和综合性能的提升都遇到了无法突破的瓶颈。为了解决上述问题,本课题组提出了一种全新的分布式偏振测试方法——光频域偏振计<sup>[50]</sup>(OFDP)。它可以兼顾超高偏振串音灵敏度(优于 -110 dB)、超大动态范围(优

于 105 dB)、高空间分辨率(优于 6 cm)、短测量时间(优于 10 s),以及长测量距离(优于 10 km)等优势于一体,有望满足超高性能光纤与器件的测试与诊断需求,特别是宽温快变等恶劣环境下的测试需求。

本文围绕 OFDP 的测试原理与方法、性能优化技术以及测试应用,尝试着梳理和建立超高精度 OFDP 的理论与技术框架,包括偏振串音测量极限、测量信噪比增强、噪声抑制与误差校正等,展示高性能保偏光纤与器件的典型测试应用,以求抛砖引玉。

## 2 分布式光纤偏振测试原理

### 2.1 光频域偏振串音测试原理

光频域偏振串音测试技术(OFPD)利用光频域干涉测量原理来实现偏振串音的强度与位置测量。光频域干涉测量原理如图 2(a)所示。可调谐光源(TLS)发出的线性扫频光注入一个非平衡马赫-曾德尔干涉仪(MZI)中,如图 2(b)所示,干涉仪的输出信号可以表示为

$$I_0(t) = 2E_0^2 \cos[2\pi\gamma\tau_0 t + \varphi(t + \tau_0) - \varphi(t) + c_{\text{const}}], \quad (1)$$

式中: $E_0$ 是光电场强度; $\gamma$ 是光源的调谐速率; $\tau_0$ 是 MZI 的延迟光纤对应的时延; $\varphi(t)$ 是光源相位噪声; $c_{\text{const}}$ 为常数。由式(1)可知,干涉信号  $I_0(t)$  的频率为  $\gamma\tau_0$ ,与时延(即位置信息)一一对应,因此对干涉信号  $I_0(t)$  进行傅里叶变换可得到包含空间分辨率、动态范围和噪声本底等信息的特征干涉峰,进而获得待测器件中缺陷位置的分布,实现缺陷的精准定位和测试。

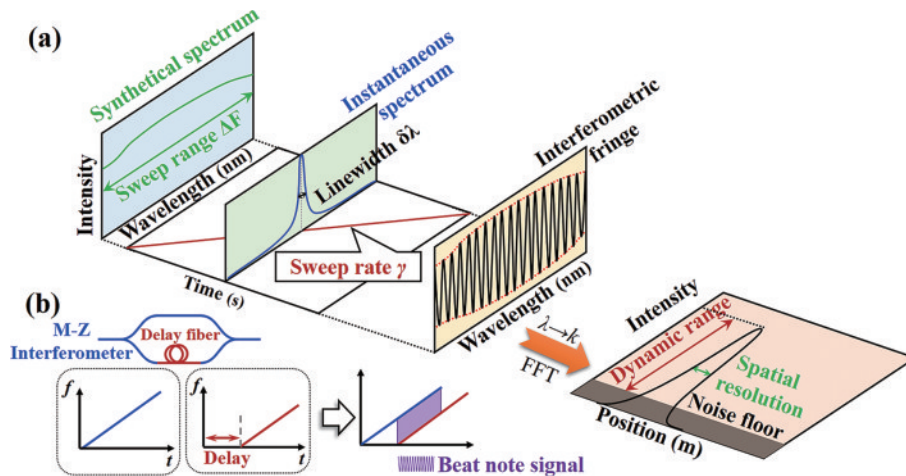


图 2 光频域干涉测量原理示意图<sup>[51]</sup>

Fig. 2 Measurement schematic diagram of the optical frequency domain interferometry<sup>[51]</sup>

基于 OFDP 的保偏光纤分布式偏振串音的测量原理如图 3 所示。首先,可调谐激光器发出线性扫频光注入待测器件(DUT)中。光束经 0°起偏器起偏后注入待测器件的某一偏振轴形成激发模 EM。距离待测器件末端  $l_i$  处的扰动点会使激发模在此处发生偏振

串音,能量耦合到另一个偏振轴上产生耦合模  $CM_i$  并继续向前传输。由于两个偏振轴的有效模式折射率不同,激发模和耦合模之间产生  $L_i = l_i \Delta n$  的光程差(OPD), $\Delta n$ 是保偏光纤的双折射系数。经过 45°检偏器后,激发模和耦合模之间在待测器件中形成的光程

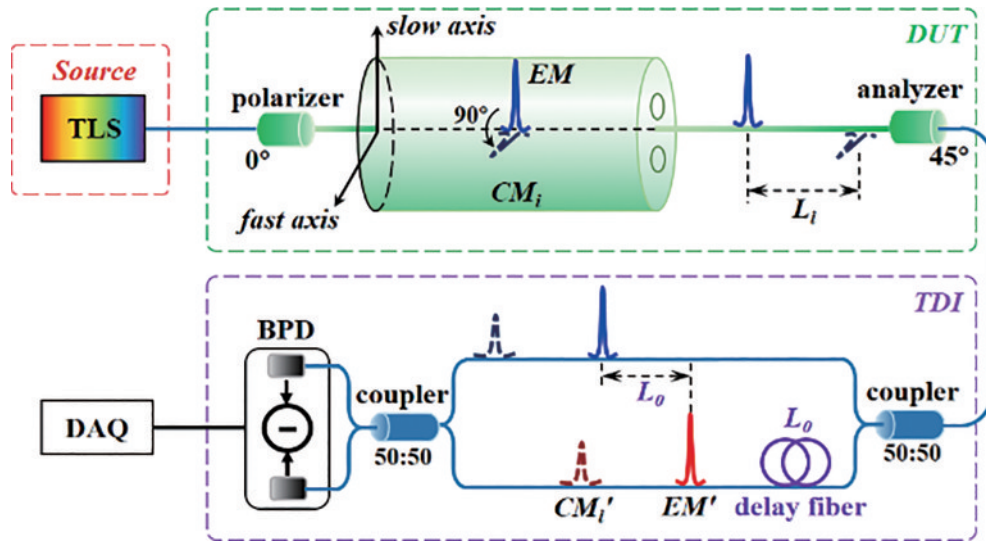


图 3 保偏光纤分布式偏振串音的光频域测量原理示意图<sup>[52]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of the optical frequency domain measurement for polarization crosstalk of a polarization maintaining fiber<sup>[52]</sup>

差(即  $L_i$ )将被保持,其功率比(即偏振串音强度  $\rho_i^2$ )也同样保持, $\rho_i$ 为偏振串音的振幅耦合系数。然后,它们进入光程差为  $L_0$  的时延干涉仪(DLI)中,激发模和耦合模分别产生时延激发模  $EM'$  和时延耦合模  $CM_i'$ ,这些模式之间的干涉信号经探测器光电转换后,可以通过傅里叶变换来提取待测器件的分布式偏振串音信息。

### 2.2 OFDP 测量的理论极限

OFDP 的核心性能指标包括:测量距离、空间分辨率、测量时间以及动态范围。理论上,OFDP 的光纤空间分辨率  $\Delta L$  和最长干涉光纤距离  $L_{co}$ <sup>[53]</sup> 分别表示为

$$\begin{cases} \Delta L = \frac{c}{\Delta n \Delta F} \\ L_{co} \propto \frac{c}{\Delta n \Delta \nu} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\Delta F$  是频率扫描范围; $\Delta \nu$  是光源线宽。式(2)表明,干涉特征峰的空间分辨率受限于光源扫描范围,激光最长干涉距离受限于光源线宽。在理论上,测量距离和空间分辨率之间没有制约关系,但在实际测量中,OFDP 由于采用频率扫描干涉法,严重的相位噪声使光源不能兼顾宽调谐范围与窄线宽,从而在这两种性能指标之间产生了新的制约关系。

此外,OFDP 系统与其他光学相干测量系统(例如 OCDP)一样,还存在电噪声、散粒噪声、光源相对强度噪声(RIN)等典型噪声来源<sup>[42]</sup>。理论上,系统的噪声功率谱密度(PSD)<sup>[54-55]</sup> 可以表示为

$$P_{PSD\ noise} = P_{PSD\ th} + P_{PSD\ shot} + P_{PSD\ RIN} + P_{PSD\ phase} = \frac{4KTG^2}{R_{eff}} + 4eRG^2P_e + \sigma_{RIN}P_e^2 + 4\pi\Delta\nu R^2G^2P_e^2\tau_0^2, \quad (3)$$

式中: $K$ 、 $T$ 、 $R_{eff}$ 、 $G$  分别是玻尔兹曼常数、热力学温度、有效电阻和跨阻抗增益; $P_e$  是激发模的光功率; $\sigma_{RIN}$  是 RIN 噪声方差; $\tau_0$  是时延干涉仪的时延; $\Delta \nu$  为光源线

宽。电阻热噪声是电噪声中的主导噪声,由硬件的本征性能决定;散粒噪声不仅与探测器的响应度和跨阻增益等参数有关,还与注入探测器的光功率成正比,理论上降低注入探测器的光功率可以降低散粒噪声;光源相对强度噪声是由激光功率波动产生的,与白光不同,由于频率扫描和模式跳变,激光的 RIN 噪声存在波长依赖性,故而光频域干涉系统中的 RIN 噪声需要实测,差分探测也能有效抑制 RIN 噪声;另外,光频域系统中的强度噪声除了散粒噪声和光源强度噪声外,还存在由光源偏振态波动、器件光谱响应、光源残余振幅调制等原因导致的寄生强度调制噪声,可以通过监控光源输出信息,对待测信号进行强度校正;系统中最严重的噪声是相位噪声,包括可调谐激光器引入的扫频非线性噪声和光源随机相位噪声,以及环境噪声也以相位噪声的形式存在于信号中。

OFDP 系统不同的噪声如图 4 所示,结果表明,在不同注入光功率的情况下,电噪声、散粒噪声、强度噪声等均在  $-115$  dB 以下,相位噪声是光频域偏振测试系统的主导噪声,是制约 OFDP 系统性能提升的主要

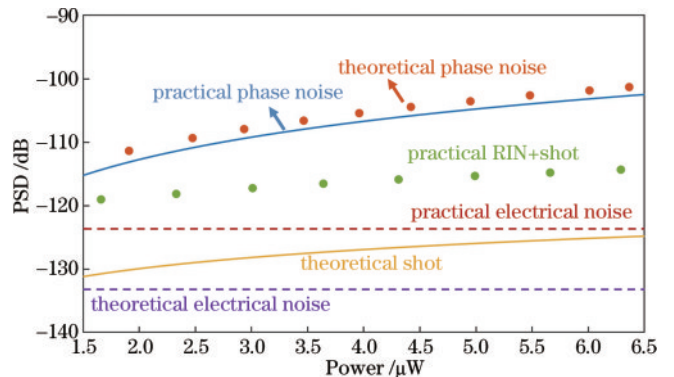


图 4 不同噪声随光功率的变化曲线

Fig. 4 Noises vary with the optical power

原因。为了定量表征 OFDP 系统的测量极限与性能制约关系,根据相位噪声主导下的 OFDP 系统中理论噪声功率谱密度,可得受限于相位噪声的 OFDP 动态范围<sup>[52]</sup>的理论表达式为

$$D_{DR} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{\pi \Delta \nu} \cdot \frac{c^2}{L_0^2} \cdot \frac{\Delta F}{\gamma} \right) \quad (4)$$

当光源的线宽与调谐范围固定时,OFDP 系统的动态范围反比于扫频速率和时延干涉仪的光程差。因此,优化设计干涉仪光程差(OPD)和扫频速率是提升 OFDP 测量灵敏度和动态范围的必要手段。上述关系通过了实验验证,实验中通过调整扫频范围、扫频速率及光程差,逐一验证了系统参数对动态范围的影响,结果如图 5 所示。通过上述分析可以发现,OFDP 的核心性能指标之间存在内在的相互制约的关系,如图 6 所示。

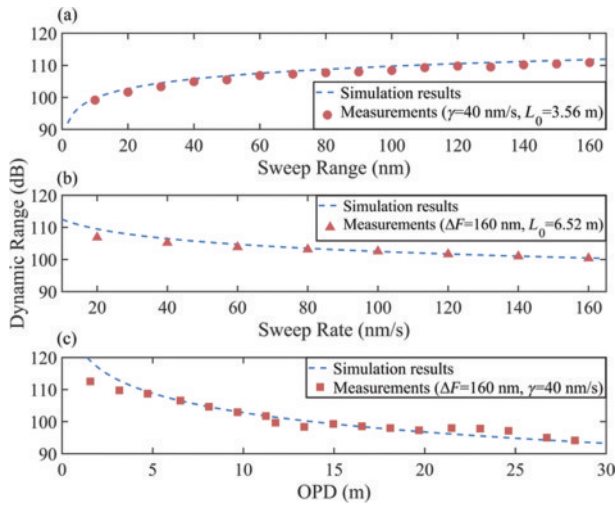


图 5 动态范围的变化曲线<sup>[52]</sup>。(a)波长扫描范围的影响;(b)波长扫描速率的影响;(c)光程差的影响  
Fig. 5 Variation of dynamic range<sup>[52]</sup>. (a) Effect of the wavelength sweep range; (b) effect of the wavelength sweep rate; (c) effect of the optical path difference

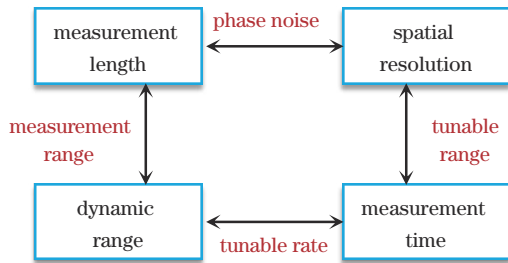


图 6 OFDP 测试技术核心性能指标关系示意图  
Fig. 6 Relationship diagram of OFDP measurement performance

### 3 光频域偏振测试关键技术

#### 3.1 动态范围提升技术

基于 OFDP 的分布式偏振测试技术具有光频域

测量原理所固有的高测量精度、大动态范围等优势。但是由于光源固有的扫频非线性问题,在低扫频速率和短光程下会发生信号展宽与频谱混叠,实际动态范围不能达到理论最优值测量动态范围。尽管在光频域测试系统中已有大量的抑制扫频非线性的方法<sup>[56-60]</sup>,但没有从本质上扩大频域测量系统的动态范围。近期,广东工业大学(GDUT)从理论上探究了光源扫频非线性对信号展宽、频谱混叠以及动态范围的影响,并以此对测量动态范围的模型进行修正,将 OFDP 的动态范围提升至 115 dB<sup>[51]</sup>。

在光源扫频非线性的影响下,扫速波动比  $\alpha$  和时延干涉仪的光程差  $L_0$  同时决定了信号展宽的程度。为避免信号混叠影响,能减小干涉相位误差和相位噪声补偿后的残余相位噪声的最优光程差为  $L_0 = 2L_{dut}/(1-\alpha)$ ,  $L_{dut}$  为待测器件光程。修正的 OFDP 测量动态范围<sup>[51]</sup>可以表示为

$$D_{DR\text{ amend}} = 10 \log_{10} \left[ \frac{c^2}{2\pi} \cdot \Delta F \cdot \frac{1}{L_{mr}^2} \cdot \frac{1}{\gamma_0} \cdot \frac{1}{\Delta \nu} \cdot (1-\alpha)^2 \right] \quad (5)$$

式中:  $\Delta \nu$  为光源线宽;  $L_{mr}$  为 OFDP 系统的测试量程;  $\Delta F$  为扫频范围;  $\gamma_0$  为预设的扫频速率。

基于该方法构建的 OFDP 系统的测量动态范围如图 7 所示,该结果基于外腔式可调谐激光器(Santec, TSL-770, 线宽为 60 kHz, 扫频范围为 160 nm)光源测量得到。动态范围随着扫频速率  $\gamma_0$  和测试量程  $L_{mr}$  的减小而增大,在引入光源非线性影响的动态范围理论指导下,通过参数设计和优化将 OFDP 的动态范围扩展至 115 dB,能够满足高性能光学偏振器件对高精度测试的要求。需要注意的是,图 7(b)的拐点表明,在超低扫频速率区域,严重扫频非线性问题会导致信号混叠和信噪比下降,劣化动态范围,同时 3 dB 的偏差来源于该实验参数下的硬件设施水平限制。

#### 3.2 寄生调幅抑制技术

寄生调幅引起的杂散峰问题普遍存在于调频连续波雷达领域,一般来源于系统中的有源振荡器、门电路等<sup>[61-62]</sup>。在 OFDP 系统中,光源偏振态波动、器件光谱响应、光源残余振幅调制等原因也会导致寄生调幅现象,引入杂散信号<sup>[63-64]</sup>,严重制约系统的无杂散动态范围(SFDR),干扰待测器件的特征信息辨识。

为了有效克服幅度畸变,广东工业大学杨军教授团队<sup>[65]</sup>提出了包络去趋势法实现寄生强度调制噪声的抑制和杂散信号的消除。在通过重采样算法补偿光源扫频非线性后,借助希尔伯特变换提取参考干涉仪信号的包络,在其中提取光源强度波动曲线,从而动态地监测光源输出的原始偏振态波动、振幅调制等信息。然后利用此信息对探测到的包含待测器件信息的干涉信号进行强度校正处理,从而实现无杂散动态范围的提升。而且当参考干涉仪的延迟与待校正信号的延迟

相同时,能够获得最佳的校正结果,如图 8 所示。

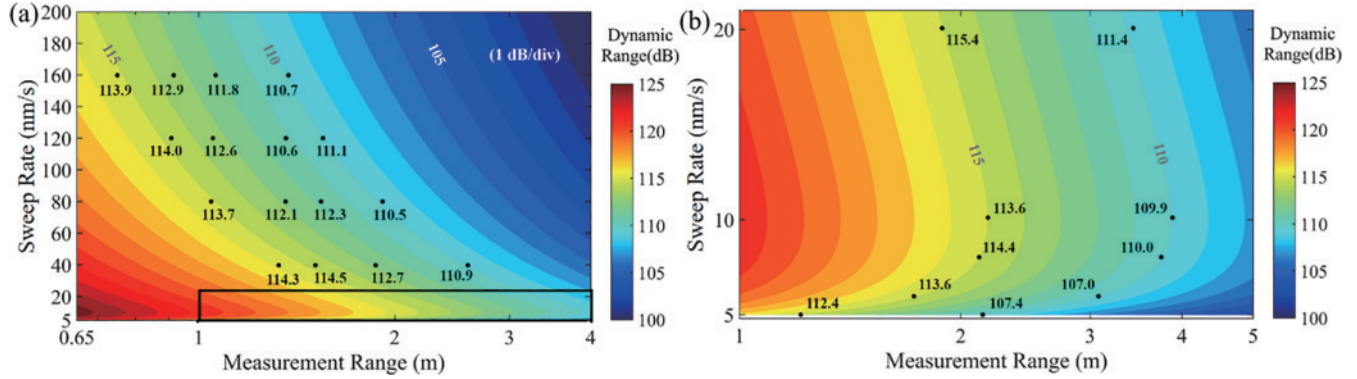


图 7 修正的 OFDP 系统动态范围<sup>[51]</sup>。(a)动态范围仿真结果(彩色背景)与相应条件下的实测值(黑点);(b)光源扫频非线性特性导致的动态范围拐点验证

Fig. 7 Dynamic range limit model of the OFDP system<sup>[51]</sup>. (a) Dynamic range fitting results (color background image) and the measurements (black dots) under corresponding condition; (b) verification of inflection point induced by the frequency sweep nonlinearity characteristic

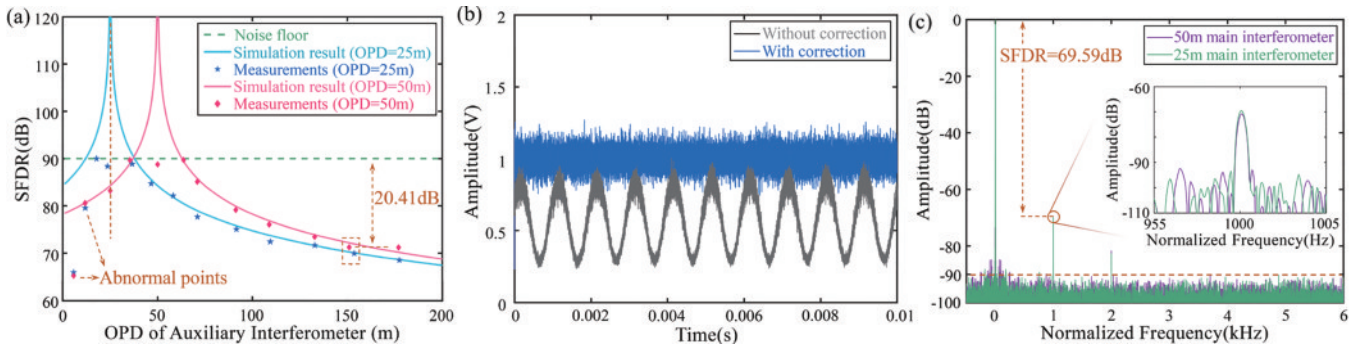


图 8 包络去趋势法实验结果<sup>[65]</sup>。(a)不同 OPD 的参考干涉仪对校正后 SFDR 的影响;(b)校正前后主干涉仪包络;(c)信号严重不匹配时的校正结果

Fig. 8 Experimental results for the envelope detrending method<sup>[65]</sup>. (a) Influence of different auxiliary interferometer OPDs on the corrected SFDR; (b) envelopes of main interferometer signal before and after correction; (c) correction results for severe signal mismatch

在最优的光路参数设计与选择的前提下,幅度畸变校正前、后的 OFDP 系统点扩展函数如图 9<sup>[65]</sup>所示, SFDR 可达 90.2 dB, 证明该技术能够有效地抑制幅度噪声导致的杂散信号, 提高信号质量, 大幅扩大

系统的无杂散动态范围, 为实现高精度光纤器件诊断提供支撑。

### 3.3 环境噪声抑制技术

在系统中的主要噪声得到补偿后, 来源于测量环境的噪声, 如音频噪声或者振动扰动, 也将表现为测得信号中的相位噪声<sup>[66]</sup>, 会导致信号频谱进一步展宽, 严重劣化空间分辨率、限制测试量程等系统性能。一般采用防震箱来降低外界环境对信号的影响<sup>[67]</sup>, 然而从结果来看, 200 Hz 以下频率的低频环境噪声无法完全被屏蔽<sup>[66]</sup>。2011 年日本 NTT 公司的研究人员通过提高扫频速度并且结合频带分割的方式减小了音频噪声的影响<sup>[68]</sup>。2012 年以色列特拉维夫大学的研究人员通过内联辅助点使参考干涉仪和测量干涉仪共用同一光路, 实现对环境噪声和相位噪声的同时抑制<sup>[69]</sup>。然而受限于瑞利散射, 内联辅助反射仪的信噪比仅有 50 dB, 削弱了光源相位噪声的抑制能力, 导致系统的动态范围难以提升。

共光路干涉仪(CPI)是剔除外界环境噪声对测试结果干扰的一种有效手段<sup>[70]</sup>, 其测量原理如图 10(a)

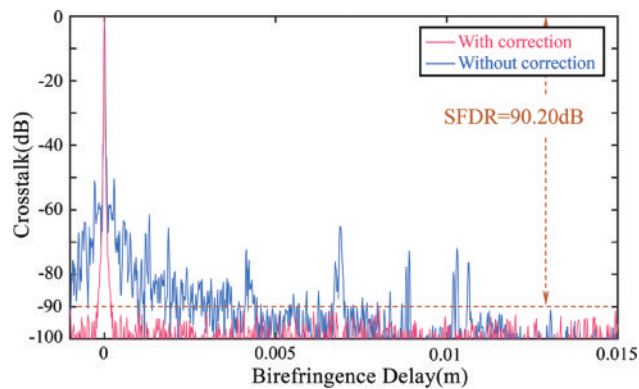


图 9 幅度畸变校正前后的 OFDP 系统点扩展函数<sup>[65]</sup>

Fig. 9 Point spread functions of OFDP system with and without distortion correction<sup>[65]</sup>

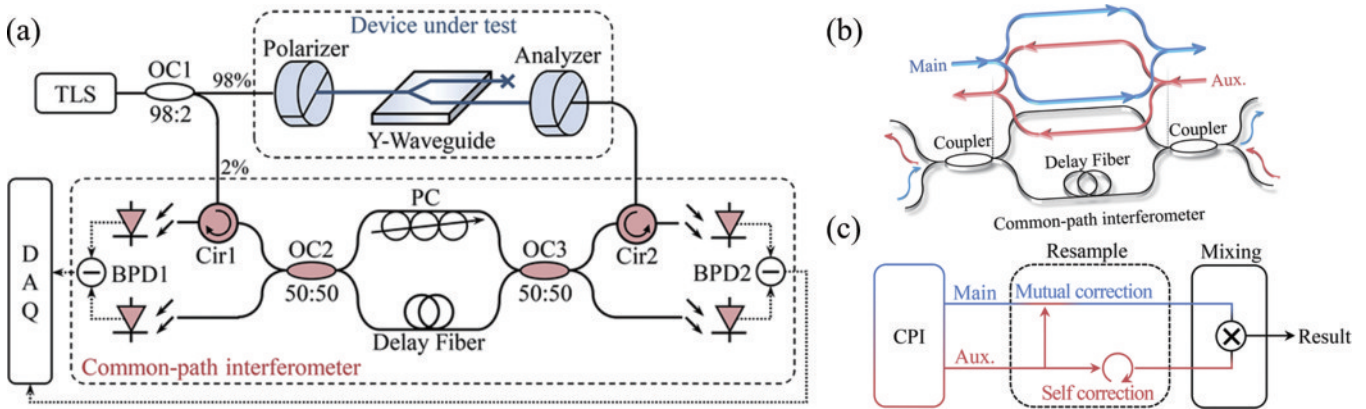


图 10 CPI方法的测试原理<sup>[70]</sup>。(a)实验装置图;(b)原理示意图;(c)相位噪声消除过程

Fig. 10 Measurement principle of CPI method<sup>[70]</sup>. (a) Experimental setup; (b) schematic diagram of principle; (c) phase noise elimination process

所示。该方法移除了传统方案中分离式的参考干涉仪模块,利用双向注入的非平衡马赫-曾德尔干涉仪如图 10(b)所示,实现了测量干涉仪和参考干涉仪在同一套光路硬件中的复用,保证测量和参考干涉仪能够检测到完全相同的外界环境干扰。为避免信号混叠,需要先使用重采样算法对信号的扫频非线性做预校正,完整的相位噪声消除过程如图 10(c)所示。

基于上述共光路方法的实验结果如图 11 所示,其

中 Case 1 代表分离式参考干涉仪,Case 2 代表共光路干涉仪。结果表明,共光路干涉仪能够有效地抑制包含环境噪声的相位噪声,同时消除了环境噪声引起的杂散峰,并且与分离辅助干涉仪相比具有更大的优势,这一技术为进一步扩大系统的动态范围提供了可能。该方法的局限性在于,光路中的后向散射光与前向传输光混合后会抬升噪声本底,阻碍了 OFDP 技术在长距离测试中的应用。

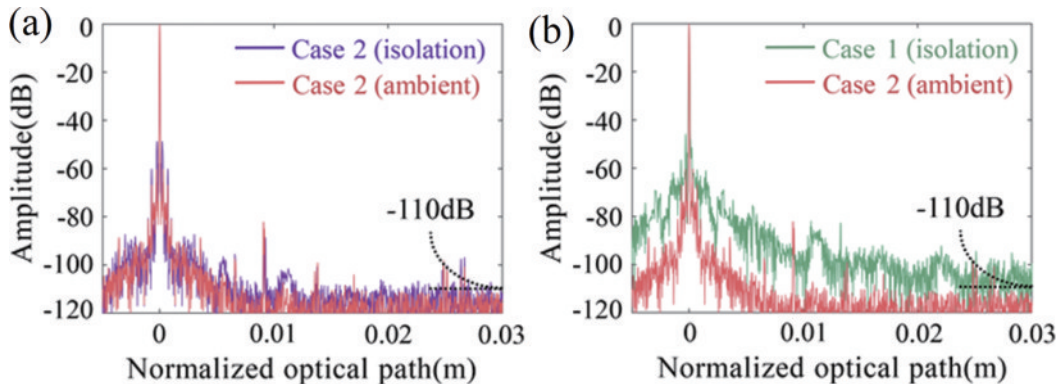


图 11 共光路方法测试结果<sup>[70]</sup>。(a)Case 2下施加环境噪声前后的结果对比;(b)隔离环境噪声的 case 1 和带有环境噪声的 case 2 的结果对比

Fig. 11 Compensation result of CPI method<sup>[70]</sup>. (a) Results of case 2 with and without ambient noise; (b) result comparison of case 1 without ambient noise and case 2 with ambient noise

### 3.4 OFDP 系统的仪器化

国内外多种典型的光纤偏振测试商用仪器如图 12 所示,其各自性能指标对比如表 1 所示。如前所述,基于功率检测的旋转偏振法<sup>[71-73,32]</sup>最先发展为成熟的集总式消光比测试仪器,如图 12(a)和(b)所示,由于起偏器、聚焦透镜等光学器件的偏振消光比限制,其动态范围难以超过 50 dB,且无法获取分布式的偏振串音信息。随后,随着光学相干域偏振测试技术日趋成熟,国内外用于分布式偏振测试的高性能商用测量仪器,大多基于该技术设计而成,如图 12(c)~(f)所示。然而,在光纤陀螺迅猛发展的今天,基于白

光干涉原理的商用仪器在偏振串音灵敏度、动态范围和测试距离等指标上已经跟不上陀螺器件性能提升的步伐。而新兴的光频域偏振测试技术,由于其具有优异的综合性能,能够在偏振性能评价、生产工艺改进等方面,给予光纤陀螺核心器件研发巨大的帮助。

图 12(g)是广东工业大学研制的 OFDP-I 型光频域偏振测试系统,该系统主要由可调谐光源、偏振串音测量干涉仪、辅助干涉仪、光电探测与信号处理子系统四大部分组成。在攻克提升系统性能的关键技术(包括动态范围提升、环境噪声抑制等技术)后,将其集成、移植到测试系统中,并结合机箱设计、搭建等工作,实

表 1 偏振测试仪器性能对比  
Table 1 Performance of polarization measurement instruments

Classification	Principle	Country	Manufacturer	Model	Length /km	Sensitivity /dB	Dynamic range /dB
Integrated (moderate performance)	Rotating-polarizer	USA	Luna Inc.	ERM-202	-	-	50
		Japan	Santec	PER 340	-	-	50
Distributed (high-performance)	Coherence domain	France	Photonics	WIN-P400	1.6	-80	80
		USA	Luna Inc.	PXA-1000	2.56	-95	75
		Korea	FiberPro	ICD800	1.0	-80	80
		China	HEU	OCDP	5	-100	100
Distributed (high overall-performance)	Frequency domain	China	GDUT	OFDP-I	10	-110	105



图 12 典型光纤偏振测试商用仪器。(a)美国 Luna 公司 ERM-202 型消光比测试仪；(b)日本 Santec 公司 PER-340 消光比测试仪；(c)法国 Photonics 公司 WIN-P400 型分布式偏振测试仪；(d)韩国 FiberPro 公司 ICD800 型分布式偏振测试仪；(e)美国 Luna 公司 PXA-1000 型分布式偏振测试仪；(f)哈尔滨工程大学 OCDP 型分布式偏振测试仪；(g)广东工业大学 OFDP-I 型光频域偏振计

Fig. 12 Typical commercial instrument for polarization measurement of optical fiber. (a) Luna ERM-202; (b) Santec PER-340; (c) Photonics WIN-P400; (d) FiberPro ICD800; (e) Luna PXA-1000; (f) HEU OCDP; (g) GDUT OFDP-I

现光频域偏振测试系统的仪器化。该测试系统能够对多种参数,包括分布式偏振串音、分布式偏振消光比、保偏光纤敏感环的几何特征等进行测试,并且已经能够应用于 Y 波导调制器、保偏光纤敏感环等高性能的光纤偏振器件与组件的质量检测,以及对其内部结构、核心指标、工艺过程、故障缺陷进行超精细模型表征。

OFDP 系统的主要特色是将偏振串音灵敏度扩展到  $-110$  dB,是目前测量灵敏度最高仪器,并且可以兼顾优于  $105$  dB 的超大动态范围和优于  $10$  km 的长测量距离。与集总式测试仪器相比,系统性能与测试指标全面提升,成本相应增加,对于需求仅为集总消光比读取的测试场合来说,集总式测试仪器无疑是更便捷的;与基于 OCDP 技术的仪器相比,OFDP 系统对光源的要求更加苛刻,目前大范围无跳模的可调谐激光器还无法做到自主可控,同时超高精度的测量对仪器的校准与标定提出了更高的要求。

### 3.5 OFDP 仪器的校准

作为一种高精度的测量仪器,使用前的校准过程是必不可少的,以确保获得真实准确的分布式偏振测量结果<sup>[74-75]</sup>。校准光路如图 13(a)所示,将两个偏振消光比量值均为  $42.5$  dB 的标定器连接到一个光

路中,校准标定器和测试标定器分别对应校准点 A 和测试点 B,测试完成后先读取校准点 A 的测量结果,通过与校准标定器的标准 PER 值对比可以得到 OFDP 的系统误差,利用这一误差对 OFDP 进行校准。然后读取测试点 B 校准后的测量结果,再将校准结果与测试标定器的标准 PER 值对比,即可确定 OFDP 系统的校准结果。校准结果如图 13(b)所示,经校准前后误差对比,将 OFDP 系统的测量误差由最高接近  $0.9$  dB 抑制到低于  $0.1$  dB,有效消除了测试仪器的误差,大幅度提升了 OFDP 系统测量结果的准确性与有效性。

## 4 光纤器件测试应用

光频域偏振计可应用于超高精度的光学偏振器件测试,例如:铌酸锂波导调制器(又称 Y 波导),保偏敏感环等,能够实现偏振器件的高性能评估,对其质量测试、故障缺陷定位、工艺迭代起指导作用,对光纤陀螺和光纤水听器偏振光学系统的性能提升具有重要的推动作用<sup>[76-77]</sup>。本节将列举 OFDP 系统在光纤器件测试领域应用的典型案例,测试装置如图 14<sup>[51]</sup>所示。



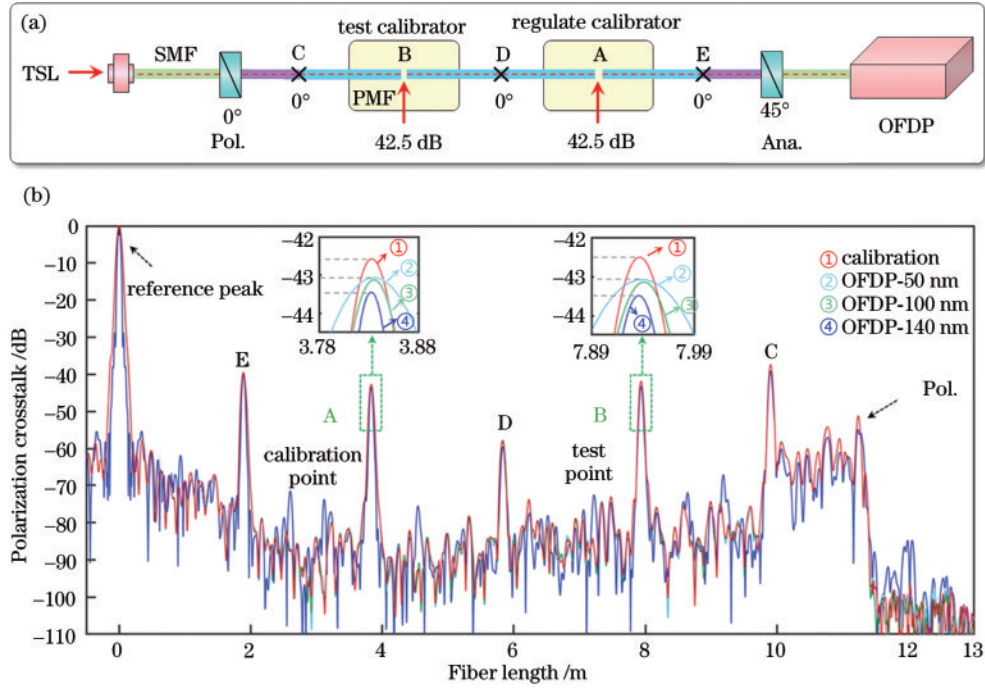


图 13 OFDP 系统的校准。(a)校准光路;(b)校准结果

Fig. 13 Calibration of OFDP system. (a) Calibration optical structure; (b) calibration results

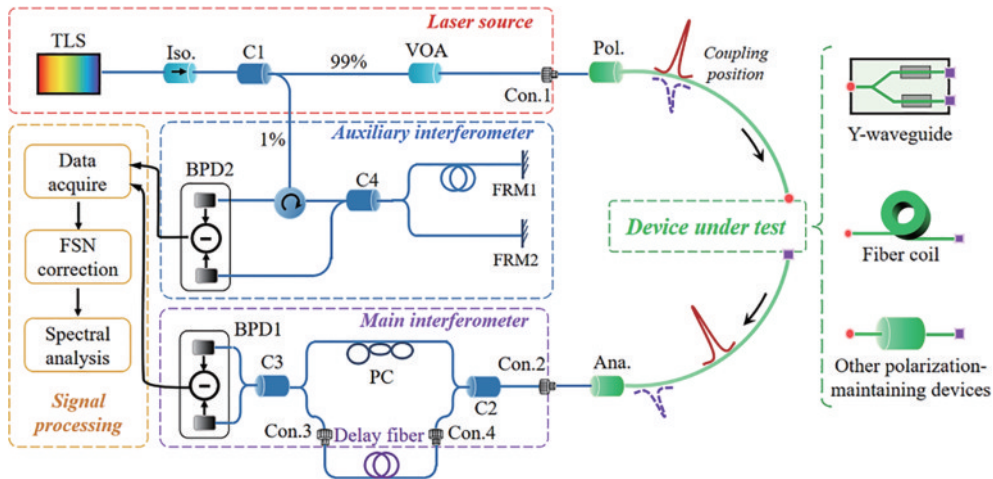


图 14 OFDP 测试光路<sup>[51]</sup>

Fig. 14 Test optical path of OFDP<sup>[51]</sup>

#### 4.1 Y波导的分布式偏振串音测试

Y波导是光纤陀螺核心器件之一,其性能直接决定了陀螺系统和惯性导航系统的精度。利用 OFDP 系统能够对 Y波导进行高精度的性能测试与评估。系统实现高性能测试的前提是参数的优化与权衡,在受限于相位噪声动态范围的理论测量极限的指导下,对实验参数进行匹配设计后进行高精度 Y波导芯片的分布式偏振串音测试,结果如图 15 所示,以三倍标准差评估的系统动态范围高达 110.5 dB<sup>[52]</sup>。

根据修正的系统动态范围极限,再次对系统参数进行优化后,能够进一步扩展测量的动态范围。在理论动态范围指导下,通过权衡与调整扫频速率与测试量程等参数,可使系统在不同长度量程下均保持优于

115 dB 的动态范围,如图 16(a)所示。参数优化后 Y波导的分布式偏振串音测试结果如图 16(b)所示,可以观测到消光比高达 108.4 dB 的干涉峰,与 OCDP 系统相比动态范围提升了一个量级<sup>[51]</sup>。

#### 4.2 长距离保偏光纤的偏振性能测试

保偏敏感环是超高精度光纤陀螺中的另一核心器件,保偏敏感环的长度决定了光纤陀螺的传感精度。目前主流的敏感环长度一般为 3 km 甚至 7 km,同时要求偏振串音小于 -70 dB。更长距离、更低偏振串音的光纤敏感环是发展下一代高精度光纤陀螺迫切需求,这需要 OFDP 系统具有长距离、大动态范围的测试能力从而精确地评估长距离保偏光纤的偏振能力。

由于 OFDP 测试系统中使用扫频光源,光源的相

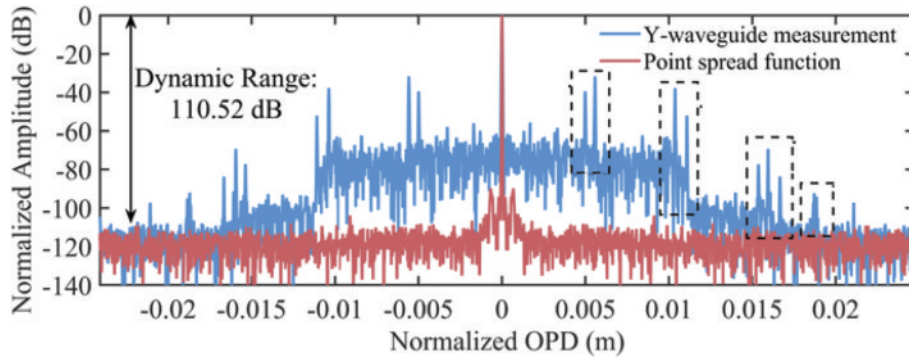


图 15 铌酸锂波导调制器的分布式偏振串音测试结果和 OFDP 系统的点扩展函数<sup>[52]</sup>

Fig. 15 Distributed polarization crosstalk measurement results of a LiNbO<sub>3</sub> waveguide modulator and the point spread function of the OFDP system<sup>[52]</sup>

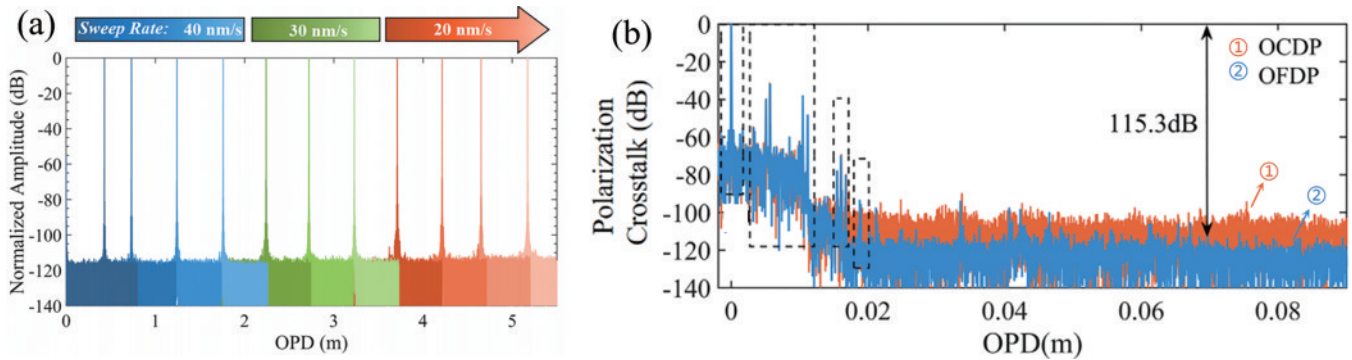


图 16 参数优化下的动态范围<sup>[51]</sup>。(a)不同光程差和扫描速率下优化的 OFDP 动态范围；(b)参数优化后 Y 波导的偏振串音测试结果

Fig. 16 Dynamic range with optimized parameters<sup>[51]</sup>. (a) Optimized dynamic OFPD range with various sweep rates and optical path differences; (b) polarization crosstalk measurement results of optimized Y-waveguide

位噪声制约了测量的距离。对于长距离保偏光纤的高精度测试,广东工业大学提出基于单向注入结构共光路的自参考 OFDP 测量方法<sup>[78]</sup>,能够同时消除残余相位噪声和环境噪声的影响,在保持测量精度的同时增加了测量距离。该技术抑制了后向瑞利散射的影响,

消除了大量的杂散峰,在超长距离测量上显现出巨大的优势。典型测量结果如图 17 所示,在 9.8 km 的测量距离下突破性地获得了 107.8 dB 的动态范围<sup>[78]</sup>,而且测量时间只需要 2 s。这项技术有望在高性能和长距离保偏光纤的制造中发挥关键作用。

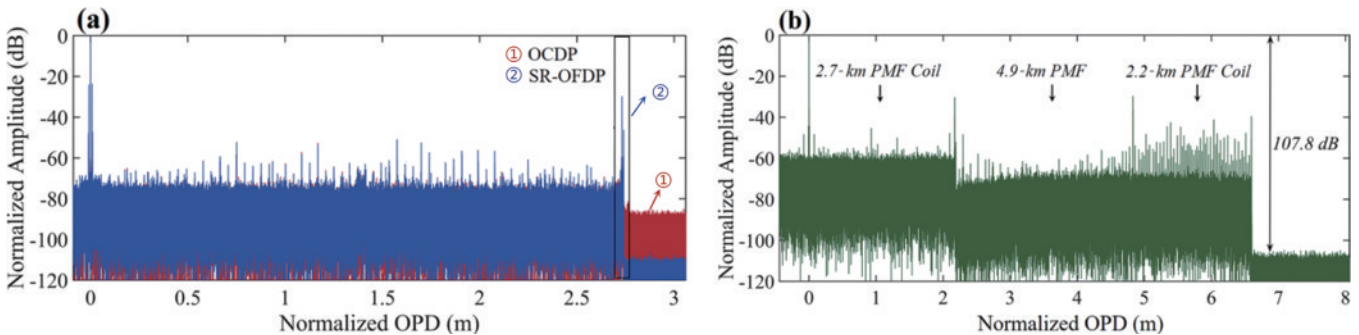


图 17 长距离保偏光纤测试应用<sup>[78]</sup>。(a)OCDP 和共光路 OFDP 测试结果对比；(b)9.8 km 超长距离保偏光纤的单向注入共光路 OFDP 测试结果

Fig. 17 Long polarization-maintaining optical fiber measuring applications<sup>[78]</sup>. (a) Comparison of OCDP and common-path OFDP; (b) measurement result of an 9.8 km ultra-long distance polarization-maintaining optical fiber

### 4.3 变温环境下光纤敏感环的偏振测试

光纤敏感环作为光纤陀螺的敏感单元,其绕制质量与变温特性直接决定了光纤陀螺系统的精度<sup>[79-80]</sup>。

通过分析光纤敏感环的分布式偏振串音测试结果,可以对其换层峰特征、换匝峰特征、光纤串扰本底等多种光学性能特征参量<sup>[81]</sup>进行定量评价,进而对光纤敏感

环偏振性能与温度性能进行全面评价,实现光纤敏感环内部结构以及缺陷位置的定量分析。

广东工业大学凭借 OFDP 的高测试速度的特性,对光纤环分别在  $-40\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温变过程中的偏振串音进行连续测试,测试结果如图 18 所示。在温变过程中,低温异常串扰的产生过程如图 18(b) 所示,

低温下光纤环冷缩产生挤压力,串扰值越大,受外力影响下的变化越小<sup>[82]</sup>,同时,温度越低,挤压力越大,串扰随着温度的降低而变大,如图 18(c) 所示。温变下的串扰数据反映光纤敏感环的真实绕环质量,观察到环内缺陷的产生过程,从而能够指导光纤敏感环工艺的优化。

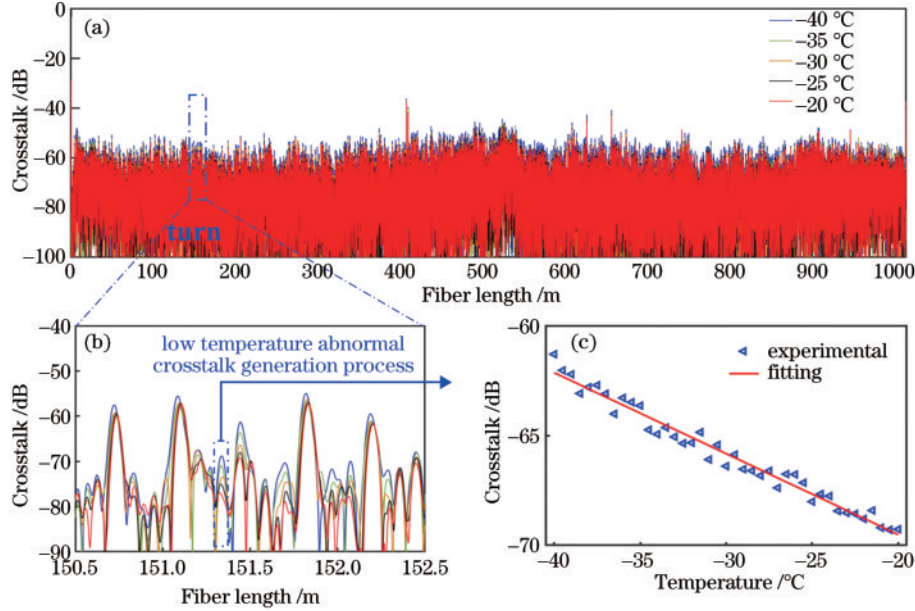


图 18 光纤敏感环的测试结果。(a)分布式偏振串音测量结果( $-40\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );(b)低温异常串扰产生过程;(c)偏振串音随温度变化的关系

Fig. 18 Test results of fiber sensing coils. (a) Distributed polarization crosstalk measurement result ( $-40\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); (b) low temperature abnormal crosstalk generation process; (c) polarization crosstalk as a function of temperature

## 5 结束语

近年来,随着高精度光纤陀螺的发展,对分布式偏振串音测试技术的各项核心指标与综合性能提出了更高的要求。尤其是,为厘清高精度光纤陀螺在快速变温环境下的误差机理,亟需一种测量灵敏度优于  $-100\text{ dB}$ 、动态范围超过  $100\text{ dB}$ 、测量长度超过  $10\text{ km}$ 、测试时间在秒级的分布式偏振串音测试技术。传统的分布式偏振串音测量技术(如 OCPD),仅能在单一技术指标上满足上述需求,而新兴的光频域偏振测试技术则能兼具上述各项指标需求,具备非常优异的综合性能。因此,OFDP 技术将在保偏光纤及其器件的生产制造和故障检测中发挥关键作用,为超高精度光纤陀螺性能的诊断与评估提供有效的测试手段。

在未来,随着光学偏振器件与组件的精度、性能不断提升,测试需求的不断扩展,对分布式偏振串音测试方法提出了更为严苛的挑战。

首先,就 OFDP 测试技术本身而言,还存在着一些亟需突破的挑战:1)测试系统中核心组件的性能亟待提高,以进一步提升 OFDP 的综合测试性能。例如,提高可调谐激光器扫频速率和降低可调谐激光器的扫频非线性等;2)测试系统需要向集成化、便携式方

向发展,以扩大 OFDP 的应用场景。发展手持式 OFDP 设备代替台式测量仪器使其能够在任何使用光学偏振器件与组件的场景下发挥作用,极大地缩短故障排除的时间;3)需要解决测试系统中多维度精度相互制约的问题,以进一步提高分布式偏振串音测量精度。由于双折射色散的存在,分布式偏振串音测量的幅值精度与位置精度还存在相互制约的问题。

其次,就 OFDP 的超高精度测试应用而言,也还存在挑战:1)随着测量灵敏度的提升与动态范围的扩大,需要发展与之性能匹配的标定与校准方法,对于低于  $-80\text{ dB}$  的偏振串音,目前还没有可以溯源至国际单位制的标准方法。可以考虑基于马吕斯定律或者高阶偏振串音,发展一种有效的超高精度偏振串音标校方法。2)针对全面表征光学器件偏振性能的需求,发展基于光频域测量的透反射同时测量技术。尤其针对 Y 波导透反射同时测量的空白问题,结合其光学偏振与反射特性实现对波导内部结构的反演,获得其真实性能以推动其研发与生产。3)光频域偏振计是用于光学偏振器件与组件的“CT”机,但目前缺乏能解读测量结果的“医生”。亟需基于大数据和人工智能技术,发展基于分布式偏振串音测试的故障分析与诊断方法。4)提升仪器的环境抗干扰性,发展更有效的相位噪声

抑制技术以克服环境噪声带来的扰动,保证测试的精度、扩展测试的距离。

综上所述,发展具有超高灵敏度和超长测量距离等高性能的 OFDP 技术,是推动光纤、器件、组件和光路向着更高精度、更高性能发展的测试手段和方法之一。

### 参 考 文 献

- [1] Yu Z J, Yang J, Lin C F, et al. Distributed polarization measurement for fiber sensing coils: a review[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 3699-3710.
- [2] Penninckx D, Beck N. Definition, meaning, and measurement of the polarization extinction ratio of fiber-based devices[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(36): 7773-7779.
- [3] Liao R L, Wang C D, Tang M, et al. Measurement of polarization mode coupling distribution in polarization maintaining fibers using microwave photonic filter technique [C]//2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 23-26, 2017, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [4] 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.
- [5] Takada K, Mitachi S. Polarization crosstalk dependence on length in silica-based waveguides measured by using optical low coherence interference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(8): 1413-1422.
- [6] Wang C D, Tang M, Fu S N, et al. Multiplexed polarization-OTDR system for multi-event detection[C]//2015 Optoelectronics Global Conference (OGC), August 29-31, 2015, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2015.
- [7] Corsi F, Galtarossa A, Palmieri L. Polarization mode dispersion characterization of single-mode optical fiber using backscattering technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(10): 1832-1843.
- [8] Takada K, Noda J, Sasaki Y. Measurement of spatial distributions of mode coupling in polarisation-maintaining fibres[J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(3): 119-121.
- [9] Costa L, Magalhães R, Palmieri L, et al. Fast and direct measurement of the linear birefringence profile in standard single-mode optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 623-626.
- [10] Nakazawa M, Tokuda M, Negishi Y. Measurement of polarization mode coupling along a polarization-maintaining optical fiber using a backscattering technique[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(10): 546-548.
- [11] Wei C J, Chen H X, Chen X J, et al. Distributed transverse stress measurement along an optic fiber using polarimetric OFDR[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2819-2822.
- [12] Zhang H X, Wang Y Y, Wen G Q, et al. Frequency measurement of dynamic stress in polarization maintaining fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7102511.
- [13] Ding D L, Feng T, Zhao Z W, et al. Demonstration of distributed fiber optic temperature sensing using polarization crosstalk analysis[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2016: JTU5A.105.
- [14] Lin Z J, Lin Y M, Li H, et al. High-performance polarization management devices based on thin-film lithium niobate[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 93.
- [15] Yang Y M, Kelley K, Sachet E, et al. Femtosecond optical polarization switching using a cadmium oxide-based perfect absorber[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 390-395.
- [16] Bao Q L, Zhang H, Wang B, et al. Broadband graphene polarizer[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 411-415.
- [17] Yang J, Yuan Y G, Yu Z J, et al. Recent progress of accurate measurement for distributed polarization crosstalk of fiber optic polarization component and device [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170625.
- [18] Georgieva G, Seiler P M, Mai C, et al. 2D grating coupler induced polarization crosstalk in coherent transceivers for next generation data center interconnects [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021, June 6-11, 2021, Washington, DC. Washington, DC.: Optica Publishing Group, 2021: W1C.4.
- [19] Dai D X, Liu L, Gao S M, et al. Polarization management for silicon photonic integrated circuits[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3): 303-328.
- [20] Chen Y Z, Chen J D, Li W H, et al. Modeling and mitigation of polarization crosstalk-induced nonlinearity for the polarization-multiplexed carrier self-homodyne system[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(6): 1423-1426.
- [21] Xu H N, Dai D X, Liu L, et al. Proposal for an ultra-broadband polarization beam splitter using an anisotropy-engineered Mach-Zehnder interferometer on the x-cut lithium-niobate-on-insulator[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 10899-10908.
- [22] Ahmed S Z, Ahmed I, Mia M B, et al. Ultra-high extinction ratio polarization beam splitter with extreme skin-depth waveguide[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2164-2167.
- [23] Liu J Q, Zhang C X, Gao F Y, et al. Method for improving the polarization extinction ratio of multifunction integrated optic circuits[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28096-28103.
- [24] Taranta A, Fokoua E N, Mousavi S A, et al. Exceptional polarization purity in antiresonant hollow-core optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 504-510.
- [25] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 828-832.
- [26] Rashleigh S, Marrone M. Polarization holding in elliptical-core birefringent fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10): 1515-1523.
- [27] Shute M W, Sr, Brown C S, Ritger A J. A study of the polarization properties of AT&T's rectangular polarization-maintaining fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 1987, 0841: 358-366.

- [28] Veasey D L, Batchman T E, Hickernell R K, et al. Waveguide polarizers with hydrogenated amorphous silicon claddings[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(10): 717-719.
- [29] Lutz D R. Fiber optic depolarizer[C]//*Optical Fiber Sensors*, Monterey, CA. Washington, DC: OSA, 1992: P15.
- [30] Santec. Polarization extinction ratio meter PEM-310 optical measurement test system[EB/OL]. [2023-05-06]. [https://www.artisanng.com/info/PEM310\\_AppNotes.pdf](https://www.artisanng.com/info/PEM310_AppNotes.pdf).
- [31] Photonics Media[EB/OL]. [2023-05-06]. [https://www.photonics.com/Products/POLARIZATION\\_EXTINCTION/pr24602](https://www.photonics.com/Products/POLARIZATION_EXTINCTION/pr24602).
- [32] Sears F M. Polarization-maintenance limits in polarization-maintaining fibers and measurements[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(5): 684-690.
- [33] Rogers A J. Polarisation optical time domain reflectometry [J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(13): 489-490.
- [34] Chen S, Giles I P. Optical coherence domain polarimetry: intensity and interferometric type for quasi-distributed optical fiber sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1370: 217-225.
- [35] Shatalin S, Juskaity R, Listvin V. Polarization optical frequency-domain reflectometry[C]//*Optical Fiber Communication*, San Diego, California. Washington, DC: OSA, 1991: WL1.
- [36] Zhang H X, Xu T H, Jia D G, et al. Effects of angular misalignment in interferometric detection of distributed polarization coupling[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(9): 095112.
- [37] Xu T H, Tang F, Jing W C, et al. Distributed measurement of mode coupling in birefringent fibers with random polarization modes[EB/OL]. (2016-02-22)[2023-05-06]. <https://arxiv.org/abs/1602.06974.pdf>.
- [38] Guo Z W, Zhang H X, Chen X W, et al. Influence of vibration disturbance during polarization coupling measurement of polarization-maintaining fiber[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(20): 3553-3558.
- [39] Zhang H X, Ye W T, Chen X W, et al. Coupling intensity measurement based on white light interferometry in the distributed long PMF sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(9): 2905-2909.
- [40] 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.
- [41] 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[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9233: 92332D.
- [42] 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.
- [43] 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): 4243-4252.
- [44] Li Z H, Yao X S, Chen X J, et al. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed polarization analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(2): 372-380.
- [45] Yu Z J, Yang J, Yuan Y G, et al. High-resolution distributed polarization crosstalk measurement for polarization maintaining fiber with considerable dispersion [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 29712-29723.
- [46] 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.
- [47] Yu Z J, Hou C C, Yuan Y G, et al. High accuracy distributed polarization extinction ratio measurement for a polarization-maintaining device with strong polarization crosstalk[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(7): 2177-2186.
- [48] 杨军, 苑勇贵, 喻张俊, 等. 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[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328007.
- Yang J, Yuan Y G, Yu Z J, et al. Optical coherence domain polarimetry technology and its application in measurement for evaluating components of high precision fiber-optic gyroscopes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328007.
- [49] Laser Focus World. Crosstalk analyzer from General Photonics characterizes PM fiber[EB/OL]. [2023-06-05]. <http://www.laserfocusworld.com/home/article/16562408/crosstalk-analyzer-from-general-photonics-characterizes-pm-fiber>.
- [50] Yu Z J, Zhuang Q Q, Zhu T Y, et al. Distributed polarization crosstalk measurement based on optical frequency domain polarimetry[C]//2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 23-27, 2021, Qufu, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [51] Zhuang Q Q, Lin C F, Yu Z J, et al. SNR improvement of optical frequency domain polarimetry against laser frequency sweep nonlinearity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(17): 5614-5621.
- [52] Yu Z J, Zhuang Q Q, Lin Y, et al. Optical frequency domain polarimetry for distributed polarization crosstalk measurement beyond a 110 dB dynamic range[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(16): 4271-4274.
- [53] Yang J, Zou C, Lin C F, et al. Noise compensation methods for optical fiber frequency sweeping interferometry: a review[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(13): 4035-4050.
- [54] Salehi M R, Cabon B. Theoretical and experimental analysis of influence of phase-to-intensity noise conversion in interferometric systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(6): 1510-1518.
- [55] Goldberg B D, Vakoc B J, Oh W Y, et al. Performance of reduced bit-depth acquisition for optical frequency domain imaging[J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16957-16968.
- [56] Ahn T J, Lee J Y, Kim D Y. Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain

- reflectometer by use of Hilbert transformation[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7630.
- [57] Yuksel K, Wuilpart M, Mégret P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5845-5851.
- [58] Ding Z Y, Liu T G, Meng Z, et al. Note: improving spatial resolution of optical frequency-domain reflectometry against frequency tuning nonlinearity using non-uniform fast Fourier transform[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 066110.
- [59] Xing J J, Zhang Y, Wang F, et al. A method based on time-scale factor for correcting the nonlinear frequency sweeping in an OFDR system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 7101808.
- [60] Guo Z, Han G C, Yan J Z, et al. Ultimate spatial resolution realisation in optical frequency domain reflectometry with equal frequency resampling[J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4632.
- [61] Laloue A, Nallatamby J C, Prigent M, et al. An efficient method for nonlinear distortion calculation of the AM and PM noise spectra of FMCW radar transmitters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(8): 1966-1976.
- [62] Porranszl M, Wagner C, Jaeger H, et al. On-wafer noise characterization of an automotive monostatic radar transceiver with self-interference evaluation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(8): 3494-3505.
- [63] Gorju G, Crozatier V, Lavielle V, et al. Experimental investigation of deterministic and stochastic frequency noises of a rapidly frequency chirped laser[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2005, 30(3): 175-183.
- [64] Ayhan S, Scherr S, Bhutani A, et al. Impact of frequency ramp nonlinearity, phase noise, and SNR on FMCW radar accuracy[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(10): 3290-3301.
- [65] Lin C F, Yang J, Yu Z J, et al. Increased spurious-free dynamic range in frequency sweeping interferometry by suppression of parasitic amplitude modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(21): 7191-7199.
- [66] Koshikiya Y, Fan X Y, Ito F. Influence of acoustic perturbation of fibers in phase-noise-compensated optical-frequency-domain reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3323-3328.
- [67] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, et al. Method for improving spatial resolution and amplitude by optimized deskew filter in long-range OFDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(5): 7902811.
- [68] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Centimeter-level spatial resolution over 40 km realized by bandwidth-division phase-noise-compensated OFDR[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19122-19128.
- [69] Sagiv O Y, Arbel D, Eyal A. Correcting for spatial-resolution degradation mechanisms in OFDR via inline auxiliary points[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27465-27472.
- [70] Lin C F, Zou C, Mou T L, et al. Phase noise elimination in frequency sweeping interferometry based on a common-path interferometer[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(18): 4810-4813.
- [71] Williams P A, Rose A H, Wang C M. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6466-6472.
- [72] Goldstein D H. Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(31): 6676-6683.
- [73] Williams P A. Rotating-wave-plate Stokes polarimeter for differential group delay measurements of polarization-mode dispersion[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6508-6515.
- [74] Zhu H B, Yang J, Zhang H L, et al. Metrological traceability of high polarization extinction ratio (PER) based on precision coaxial rotating polarization-maintaining fiber[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1003210.
- [75] Zhu H B, Yang J, Zhang H L, et al. Influence of position deviations on the performance of 80 dB adjustable polarization extinction ratio generator[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 74: 103135.
- [76] 胡琪浩, 朱小谦, 马丽娜, 等. 无源干涉型光纤布拉格光栅水听器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(11): 1106015.
- Hu Q H, Zhu X Q, Ma L N, et al. Advances in passive-interferometric type fiber Bragg grating-based hydrophones[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 1106015.
- [77] 邱嘉萃, 王磊, 黄腾超, 等. 干涉式光纤陀螺技术发展综述[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1706004.
- Qiu J L, Wang L, Huang T C, et al. Review of development of interferometric fiber-optic gyroscopes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1706004.
- [78] Zhuang Q Q, Lin Y C, Lin C, et al. Optical frequency domain polarimetry based on a self-referenced unbalanced Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 2817-2820.
- [79] Pillon J, Louf F, Boiron H, et al. Thermomechanical analysis of the effects of homogeneous thermal field induced in the sensing coil of a fiber-optic gyroscope[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2022, 212: 103826.
- [80] 高天香, 李俊, 蓝士祺, 等. 变温环境下谐振式光纤陀螺偏振误差研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(19): 1906007.
- Gao T X, Li J, Lan S Q, et al. Study on polarization error of resonant fiber optical gyroscopes in varying temperature environments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(19): 1906007.
- [81] 侯成城. 分布式偏振串扰测量误差分析与抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- Hou C C. Error analysis and suppression method of distributed polarization crosstalk measurement[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [82] 卢磊. 基于偏振模耦合的分布式应力传感研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- Lu L. Research on distributed stress sensing based on polarization mode coupling[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.