



DOI: 10.12086/oe.2018.170625

光纤偏振器件与组件的分布式串音测量研究进展

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: 偏振串音是指光纤偏振器件与组件中两个正交偏振传输模式之间在微扰点发生的能量相互耦合的现象, 而沿传输方向串音的连续分布既能够直接反映其光学偏振性能, 如起偏、椭圆、消偏等特性, 也能间接反映其制备工艺和外部环境状态, 如连接与固定处的应力和应变、温度状态等。因此, 偏振串音是光纤偏振器件与组件的固有性能和环境影响的综合体现, 有望发展成为在线测试、诊断评价光纤偏振器件与组件性能的通用特征参量。基于白光干涉原理的光学相干域偏振测量(OCDP)技术是实现分布式偏振串音检测的最优方法, 它利用扫描式白光干涉仪实现不同偏振模式间的干涉, 对分布式串音发生的空间位置及幅值强度进行精确测量, 具有超高灵敏度、超大动态范围、超长测量长度等优点。本文以光纤偏振器件与组件——保偏光纤环和多功能集成光学调制器作为分布式偏振串音精确测量与应用的范例, 介绍了基于 OCDP 技术的分布式串音测试原理, 回顾了测量误差的来源及相应的抑制方法, 如由测试光路的参数非理想引入的静态误差以及由测试环境变化引入的动态误差, 展示了不同环境温度下光纤偏振器件与组件的精确测试结果。最后, 结合光纤偏振器件与组件复杂多变的工作环境, 对分布式串音测量方法的发展进行了展望。

关键词: 偏振串音; 分布式测量; 光学相干域; 保偏光纤(环); 多功能集成波导调制器

中图分类号: TN253

文献标志码: A

引用格式: 杨军, 苑勇贵, 喻张俊, 等. 光纤偏振器件与组件的分布式串音测量研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170625

Recent progress of accurate measurement for distributed polarization crosstalk of fiber optic polarization component and device

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}¹ Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;² College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;³ College of Information and Communications Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;⁴ College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

收稿日期: 2017-10-09; 收到修改稿日期: 2018-03-26

基金项目: 国家重大科学仪器专项(N2013YQ040815); 国家自然科学基金资助项目(61422505, 61227013); 教育部博士点基金资助项目(20122304110022); 哈尔滨市科技创新人才研究基金资助项目(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

Abstract: The polarization crosstalk of a fiber optic polarization component and device refers to the optical power coupling that occurs at a disturbance point between the two orthogonal polarized modes propagating in it. The distributed polarization crosstalk along with the light propagation direction is directly responsible for the optical polarization properties, for example, the polarization, elliptical polarization, and depolarization properties. It also indirectly reflects the manufacturing technique and the state of the ambient environment, for example, the stress and strain at the joint and fixed position, as well as the temperature. Thus, it is the comprehensive embodiment of the intrinsic performance of the fiber optic polarization component and device and the influence of environment. It is expected to be a general characteristic parameter for online testing, diagnosis, and evaluation of the performance of the fiber optic polarization component and device. The best measurement method for distributed polarization crosstalk till now is the optical coherence domain polarimetry (OCDP). It is based on the white light interferometry and accurately measures the position and amplitude of the distributed polarization crosstalk using a scanning white light interferometer to realize interference between different polarized modes. It has the merits of ultrahigh sensitivity, ultra-wide dynamic range, and ultra-long measurable length. This review paper takes the polarization maintaining fiber coil and multifunctional integrated optical modulator as examples of distributed polarization crosstalk measurement and application. Firstly, the measurement principle of distributed polarization crosstalk based on the OCDP is introduced. Secondly, the measurement error sources and corresponding suppression methods are reviewed. Thirdly, the accurate measurement results of the fiber optic polarization component and device at different temperature are demonstrated. In the end, it outlooks the development of distributed polarization crosstalk measurement considering the complicated and changeable operation environment of the fiber optic polarization component and device.

Keywords: polarization crosstalk; distributed measurement; optical coherence domain polarimetry; polarization maintaining fiber (coil); multi-functional integrated waveguide modulator

Citation: 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

1 引言

1978 年, 贝尔实验室的 Stolen 等首次提出了保偏光纤^[1-2], 解决了普通单模光纤中传输光的偏振态难以控制及保持的难题。由于能够抑制干涉仪中发生的偏振衰落现象, 保偏光纤很快就被广泛地应用于光纤传感领域, 并且给光纤陀螺的性能提升带来了新的发展契机^[3]。随后, 基于保偏光纤的各种光纤偏振器件与组件陆续地被提出, 例如光纤起偏器^[4]、多功能集成光学调制器(Y 波导)^[5]、保偏耦合器^[6]、光纤隔离器^[7]等。光纤偏振器件与组件的串音是指其中传输的两个正交偏振模式在微扰点发生的相互能量耦合现象, 沿传输方向的分布式串音既能够直接反映其光学偏振性能, 如起偏、椭圆偏、消偏等特性, 也能够间接反映其制备工艺和外部环境状态, 比如连接与固定处的应力和应变、温度状态等, 它是光纤偏振器件与组件的固有性能和环境影响的综合体现, 有望发展成为在线测试、诊断评价光纤偏振器件与组件性能的通用特征参量^[8-10]。

光学相干域偏振测量(optical coherence domain polarimetry, OCDP)技术^[11-13]在 20 世纪 90 年代首次被

提出, 它基于白光干涉原理, 利用扫描式白光干涉仪进行光程补偿, 实现不同偏振模式间的干涉, 对分布式串音发生的空间位置及幅值强度进行精确测量。它能够准确地评估待测器件与组件的偏振性能, 甚至对其制造时的工艺参数以及所处环境状态进行部分反演。近十年来, 哈尔滨工程大学攻克了 OCDP 技术中的噪声抑制、光学延迟线损耗波动抑制、延迟线量程拓展等若干关键技术, 以及仪器化过程中的诸多问题, 使系统的探测灵敏度提高至 -105 dB, 动态范围提高至 100 dB^[14], 偏振串音分辨率提高至 0.2 dB^[15], 测量长度提高至超过 5 km^[16]; 使用研制的 OCDP 系统测得的分布式串音结果对光纤偏振器件与组件的研发起到了极大的促进作用, 例如高灵敏度地探测到 Y 波导芯片串音促成了 80 dB 高消光比 Y 波导的成功研制^[17], 高空间分辨率的保偏光纤环的分布式串音被直接用于估算光纤陀螺的零漂以及随机游走性能^[18-19]。最近, 为了进一步提高分布式串音的测试精度, 不同来源的测量误差(比如由测试光路的参数非理想引入的静态误差^[8,20-23]以及由测试环境变化引入的动态误差^[24-26]), 相继被分析以及抑制。

本文以光纤偏振器件与组件——保偏光纤环和多

功能集成光学调制器作为分布式偏振串音精确测量与应用的范例,介绍了基于 OCDP 技术的分布式串音测试原理,回顾了测量误差的来源及相应的抑制方法,展示了不同环境温度下光纤偏振器件与组件的精确测试结果。最后,结合光纤偏振器件与组件复杂多变的工作环境,对分布式串音测量方法的发展进行了展望。

2 分布式偏振串音测试原理

2.1 光纤保偏性能测试原理

首先,以一段保偏光纤为例介绍保偏光纤环的分布式偏振串音的测试原理。宽谱光源的输出光经过一个 0° 起偏器后被注入保偏光纤的一个偏振轴(慢轴或者快轴),在其中激发 LP_{01x} 或者 LP_{01y} 模式,称为激发模。由于保偏光纤的两个正交偏振模式的有效模式折射率差(即双折射) Δn 大于 10^{-4} 量级,所以,在传输的过程中,其偏振态能够保持不变。但是,若保偏光纤中存在一个微扰点(内部缺陷或者外部压力等),激发模中的能量将向另一个偏振轴(快轴或者慢轴)耦合,产生耦合模。如图 1(a)所示,用红色与蓝色的高斯曲线分别来表示激发模与耦合模的波列。由于两个偏振模式的有效模式折射率不同,它们在保偏光纤中传输

的群速度会存在差异,这也是与它们对应的偏振轴被分别称为快轴与慢轴的原因。同时,这两个偏振模式在保偏光纤中经历的光程也不相同,光程差为 $\Delta S = L\Delta n$,其中 L 为微扰点与保偏光纤末端之间的距离。

一般使用的宽谱光源的中心波长为 1550 nm,光谱的半高全宽为 50 nm,其相干长度约为 50 μm 。对于双折射为 5×10^{-4} 的保偏光纤,若微扰点距离保偏光纤末端超过 0.1 m,则激发模与耦合模之间的光程差将大于相干长度。为此,需要在检偏器后使用一个光程匹配干涉仪来实现它们之间的干涉。如图 1(a)所示,一个分光比为 50 : 50 的 2×2 耦合器将激发模与耦合模分为功率相同的两个部分,分别进入干涉仪的固定臂和扫描臂。虽然并不能改变每一臂中的激发模与耦合模之间的光程差,但是可以通过改变扫描臂的光程,使扫描臂中的耦合模与固定臂中的激发模发生光程匹配,生成干涉峰 A;或者使扫描臂中的激发模与固定臂中的激发模发生光程匹配,生成干涉峰 B;又或者使扫描臂中的激发模与固定臂中的耦合模发生光程匹配,生成干涉峰 C,如图 1(b)所示。通常,将激发模与激发模发生干涉形成的干涉峰,即干涉峰 B,称为

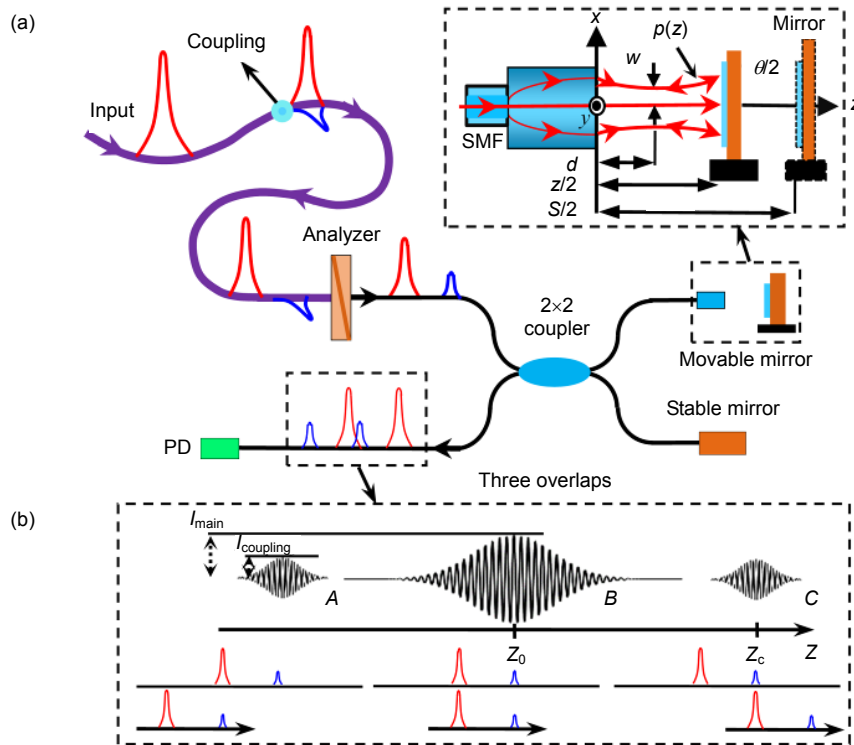


图 1 保偏光纤环分布式偏振串音的测试原理^[15]

Fig. 1 Schematic diagram of measuring the distributed polarization crosstalk of a polarization maintaining fiber coil^[15]

主峰；而将激发模与耦合模发生干涉形成的干涉峰，即干涉峰 A 与 C ，称为耦合峰。耦合峰是成对出现的，且对称地出现在主峰两侧。因此，一般只测量主峰某一侧的耦合峰，这样可以更有效地利用位移台的光程扫描范围。

从图 1(b)中还可以看出，干涉峰 A 与干涉峰 B 之间的扫描光程恰好等于激发模与耦合模之间的光程差。此外，干涉峰 A 的峰值功率与干涉峰 B 的峰值功率之比就是耦合模与激发模的振幅之比，即微扰点的振幅耦合系数。当待测保偏光纤存在多个微扰点时，上述结论仍然成立，而且这些微扰点形成的耦合峰是依光程分布的。因此，待测保偏光纤的分布式偏振串音 $I(s)$ ，可以表示为^[27]

$$I(s) = \operatorname{Re}\left\{i \int_0^L \Gamma_0(\eta) \left\{ \int_0^{+\infty} G(\omega) \cdot \exp[i\omega s + i\Delta\beta(\omega)(L-\eta)] d\omega \right\} d\eta\right\}, \quad (1)$$

其中： s 表示扫描光程差， $\operatorname{Re}[\cdot]$ 为取实部运算， i 为虚数单位， L 为保偏光纤总长度， $\Gamma_0(\eta)$ 是位置 η 处的串音幅度， $G(\omega)$ 表示光源光谱， ω 表示光角频率， $\Delta\beta(\omega)$ 是待测保偏光纤两个偏振模式的传播常数差。

2.2 Y 波导偏振性能测试原理

Y 波导由一段输入保偏尾纤、Y 波导芯片以及一段输出保偏尾纤组成，如图 2(a)中点 A 至点 D 之间的部分所示。Y 波导具有“通快阻慢”的特性，即快轴中传输的光将几乎无损通过，而慢轴中传输的光将以

极高的消光比被衰减，该消光比是 Y 波导芯片的一个重要性能指标。为了同时测得 Y 波导的芯片消光比、各个连接点的串音信息、以及各个部分的双折射等偏振特性，需要使用如图 2(a)所示的测试方案。宽谱光经过一个 45° 起偏器(有别于光纤环方案中的 0° 起偏器)，相同的光功率被同时注入起偏器尾纤 PMF1 的快轴和慢轴。对于高消光比 Y 波导，可以忽略那些既通过 Y 波导芯片慢轴，同时还在某些连接点发生了偏振耦合的波列。在图 2(b)中，列举了所有需要考虑的波列 M, D, C, A, B, Y ，并且给出了这些波列在快轴和慢轴的路径。其中，波列 M 和波列 Y 分别对应快轴与慢轴的激发模；波列 D 与波列 C 对应快轴的激发模分别在熔接点 D 与连接点 C 发生了功率耦合形成的耦合模；波列 A 与波列 B 对应慢轴的激发模分别在熔接点 A 与连接点 B 发生了功率耦合形成的耦合模。

在图 2(b)右侧，依光程大小给出了这些波列的相对位置。而实际上，若不指定器件尾纤的长度，一般只能确定波列 M 与波列 Y 的光程分别为最小和最大，其他波列的光程大小关系需要根据器件尾纤长度来确定。例如，波列 D 与波列 A 的光程大小需要根据尾纤 PMF1 和 PMF4 的长度来确定。为此，在实际的测试过程中，一般选择起偏器尾纤 PMF1 的长度约为 20 m，而检偏器尾纤 PMF4 的长度约为 2 m^[9]。这样，它们的光程大小将满足图中的关系。与图 1(b)类似，接下来可以分析这些波列发生干涉产生的干涉峰。

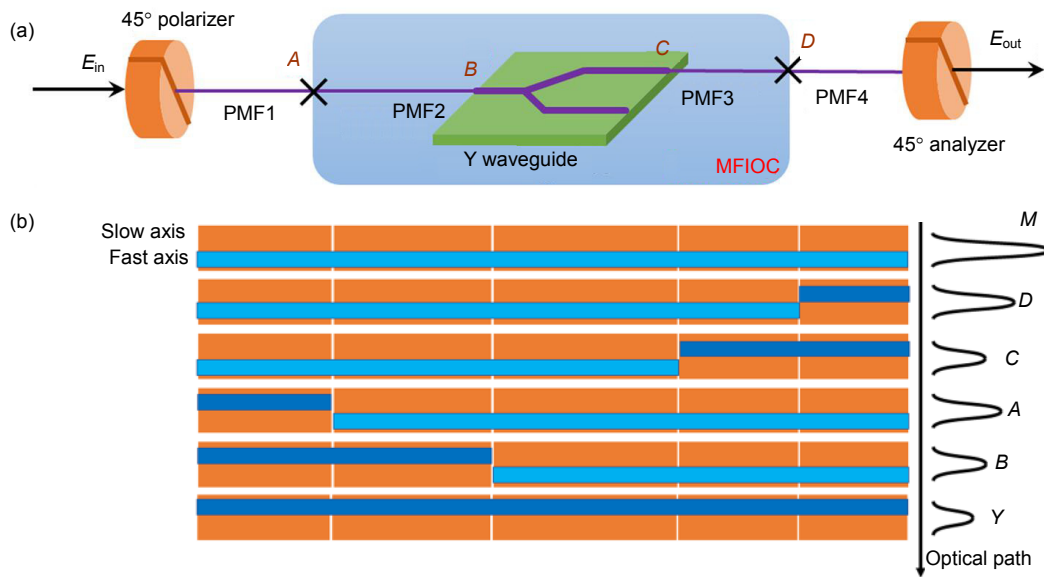


图 2 Y 波导分布式偏振串音测试原理

Fig. 2 Schematic diagram of measuring the distributed polarization crosstalk of Y waveguide

2.3 关键挑战

干涉拍噪声抑制技术使系统动态范围提升至 100 dB, 解决了难以测到高消光比的难题; 光学延迟线损耗波动抑制技术使偏振串音分辨率提升至 0.2 dB, 解决了测量精度难以提升的难题。但 OCDP 技术仍面临测试结果失真的关键挑战, 这主要是因为光纤偏振器件与组件的分布式偏振串音测试中存在多种误差。在未考虑这些测量误差之前, 含有误差的测试结果一度被认为是真实的测量结果。

测试误差可以分为两类: 静态误差与动态误差。其中, 静态误差主要是由于测试光路的参数非理想导致, 例如待测光纤偏振器件或组件的尾纤与起偏器、检偏器的尾纤之间的对轴角度(受限于熔接机的对轴角度的精度), 起偏器与检偏器自身的起偏与检偏角度

(受限于器件制作工艺), 以及待测器件或组件中的双折射色散。而动态误差主要是由于测试环境, 特别是温度的快速变化而导致的误差。此外, 动态误差主要影响那些需要进行多次测量的应用需求, 例如保偏光纤环的正、反向测量, 以及 Y 波导的双通道测量。

3 分布式偏振串音测试误差及抑制方法

3.1 静态误差及其抑制

根据光纤环与 Y 波导的测试原理可知, 分布式偏振串音测试需要在待测器件的两端分别熔接一个起偏器与检偏器, 图 3 展示了以 Y 波导测试为例的连接示意图^[28]。在介绍测试原理时, 一方面假设了起偏器的起偏角度与检偏器的检偏角度都是理想的, 另一方面

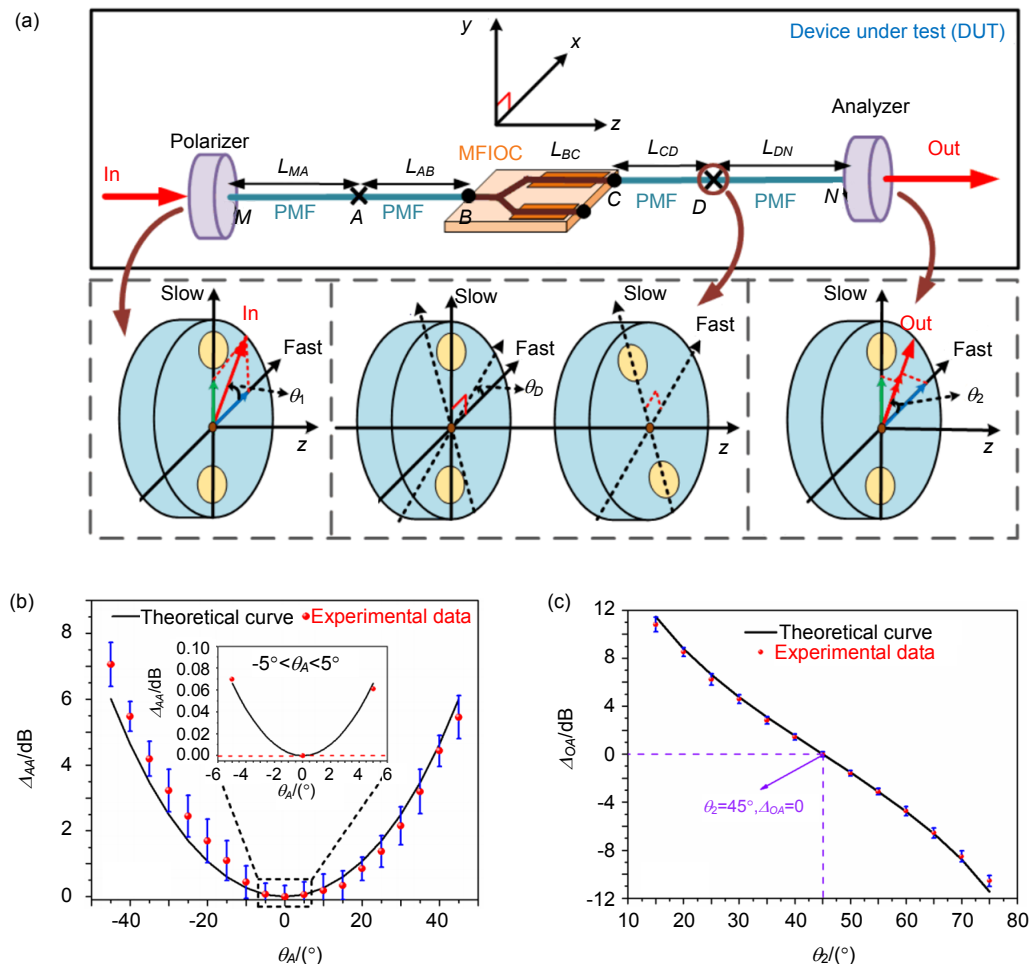


图 3 (a) 待测器件连接示意图; (b) 尾纤之间的熔接角度与 Y 波导消光比测试误差的关系; (c) 起偏器起偏角度与 Y 波导消光比测试误差的关系^[28]

Fig. 3 (a) Connection schematic diagram of DUT; (b) Relationship between the splicing angle and the measurement error of polarization extinction ratio of a Y waveguide; (c) Relationship between the oriented angle of the polarizer and the measurement error of polarization extinction ratio of a Y waveguide^[28]

假设了在熔接时, 熔接机的对轴角度是没有误差的, 并且熔接点的偏振耦合很小。然而, 在实际测试中使用的器件性能并没有那么理想。因此, 起偏器的起偏角度、检偏器的检偏角度以及器件尾纤之间的熔接角度与理想情况的偏差都会给测试结果带来误差, 如图 3(b)与图 3(c)所示。由于起偏器的起偏角度不能调节, 所以这里用一个 0° 起偏器与其尾纤上一个特定角度的焊点来模拟该特定起偏角度的起偏器。

图 3(b)中的结果不仅展示了熔接角度与 Y 波导消光比测试误差的关系, 而且也提供了一种熔接角度误差的抑制方法: 在标称的熔接角度附近选择多个不同角度进行测量, 将结果拟合为抛物线后, 使用抛物线顶点所对应的角度对熔接角度进行修正。同样地, 图 3(c)中的结果不仅展示了起偏器起偏角度与 Y 波导消光比测试误差的关系, 而且也提供了一种抑制该误差的方法。从图中可以看出, 两个互补的角度偏差(角度之和为 90°)对应的测量误差正好相反。因此, 可以将图 3(a)中焊点 A 与 D 的对轴角度同时调至 0° 进行一次测量, 然后同时调至 90° 再次测量, 将两次测量的结果进行平均, 该平均值就是消除起偏器对轴角度误差

后的结果。

双折射色散是光纤偏振器件与组件的两个正交偏振模式的色度色散之差, 是待测器件的一个固有属性, 它的存在将导致测得干涉峰的幅度降低、包络展宽甚至畸变^[28-29], 从而在分布式偏振串音的测试结果中引入幅度及位置误差, 如图 4(a)所示。此外, 不同类型器件的双折射色散大不相同, 而同一类型器件的不同个体的双折射色散之间也可能存在较大差异。所以, 基于硬件来抑制该误差的方案不仅装置复杂, 而且具有很大的局限性^[30], 这促成了基于软件的色散补偿方案的快速发展^[8, 22-23]。一种可行的方案是利用器件的双折射色散系数, 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 4(b)所示。待测器件的双折射色散系数可以通过一些数据处理的方式, 从原始的测量数据中精确地获得^[20-21]。经过色散补偿后的结果如图 4(c)所示。

3.2 动态误差及其抑制

对于保偏光纤环的分布式偏振串音测试方法而

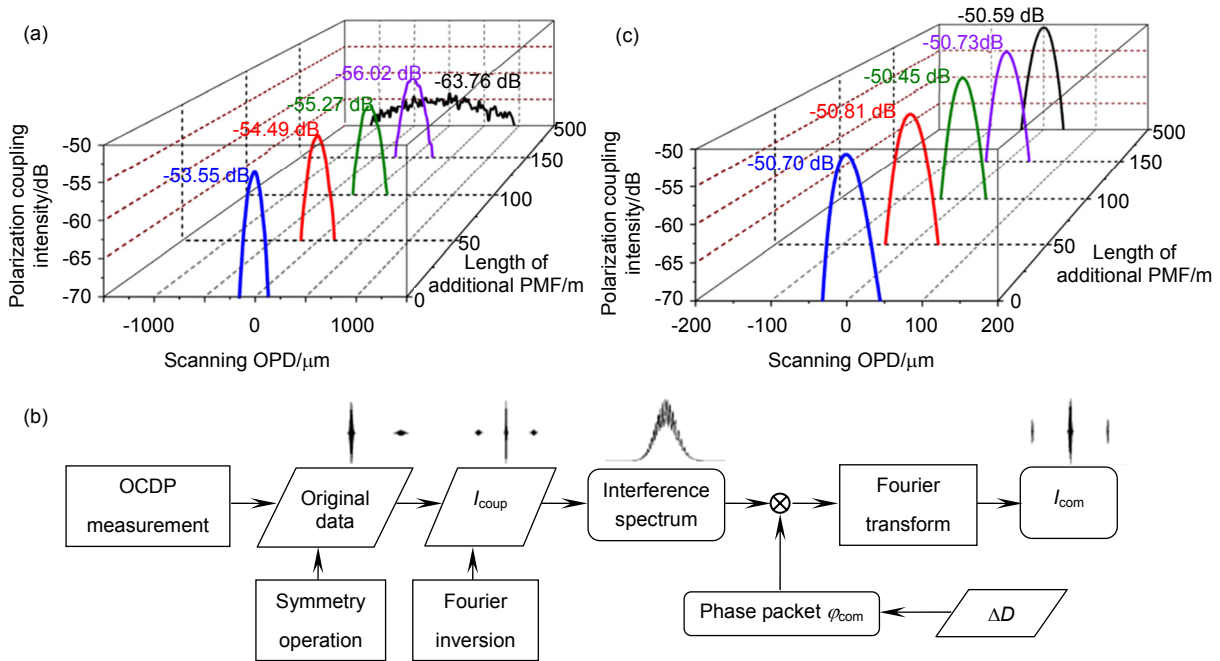


图 4 (a) 不同长度保偏光纤的双折射色散对 Y 波导芯片消光比测试结果的影响^[28]; (b) 双折射色散补偿算法流程图^[22]; (c) 色散补偿后的 Y 波导芯片消光比测试结果^[28]

Fig. 4 (a) The influence of birefringence dispersion of polarization maintaining fibers with different length on the result of polarization extinction ratio of a Y waveguide; (b) Flow chart of compensation algorithm for birefringence dispersion; (c) The result of polarization extinction ratio of a Y waveguide with birefringence dispersion compensation

言,为了确保色散补偿技术恢复的干涉条纹是真实的,同时为了评价色散补偿的效果,通常需要将光纤环正、反向测量结果进行比对,重合度越好,则说明色散补偿效果越好。这是因为对于保偏光纤中的同一个微扰点,正向测得干涉峰与反向测得干涉峰受到的色散完全不同,但它们的理论空间分辨率是相同的。使用标

准的光学相干域偏振测试仪器,若想获取正向与反向的保偏光纤环的分布式偏振串音,需要分两次测量。由于需要断开待测光纤与起偏器、检偏器的尾纤之间的焊点,并重新焊接,所以两次测量的间隔时间并不短,外界环境的微小变化最终将影响正、反向测量数据的对比结果,难以区分两者的差异来源于各自的测试过

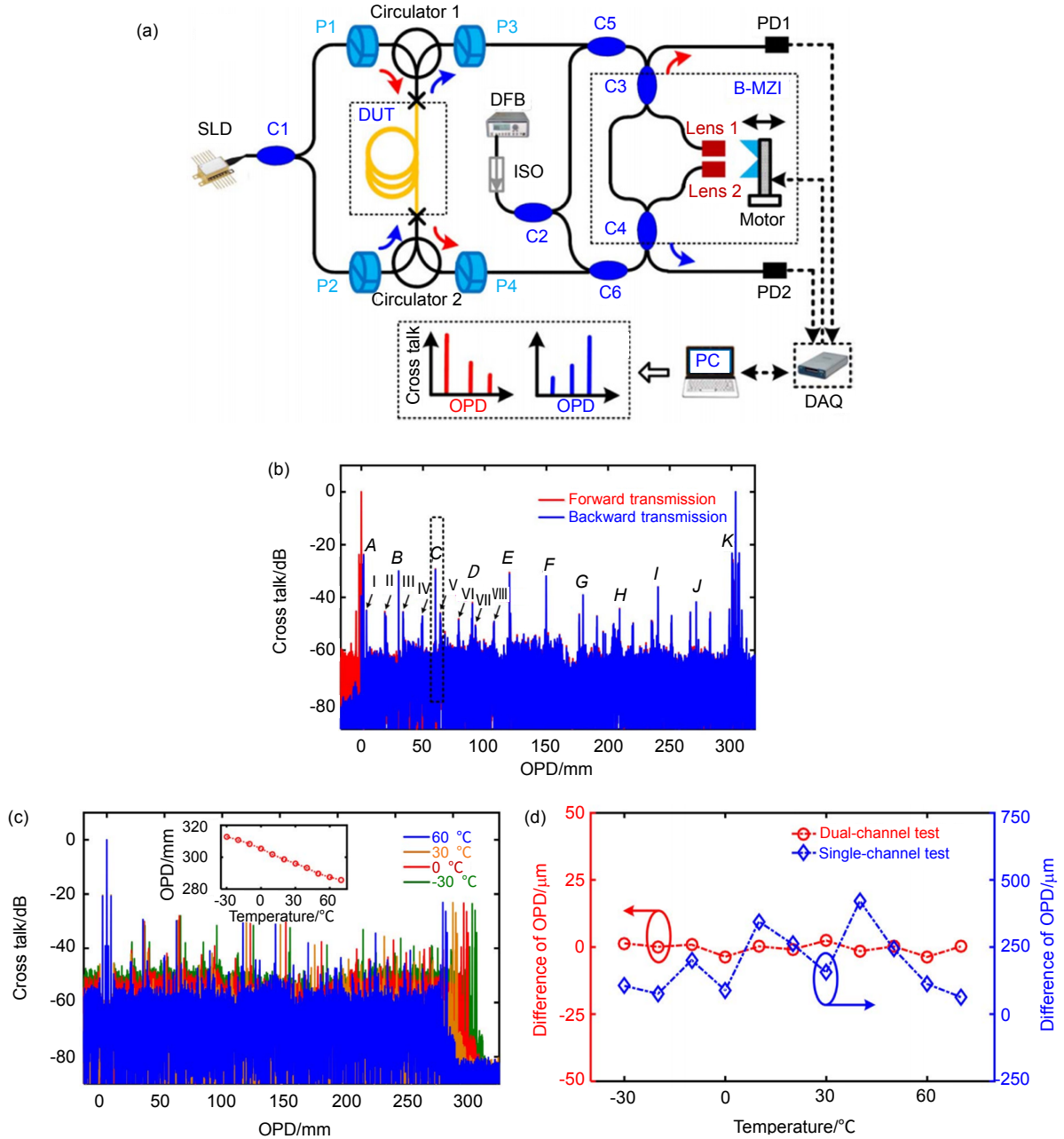


图 5 (a) 保偏光纤环正反向同时测量装置; (b) 光纤环正反向同时测量结果; (c) 不同温度下依光程分布的保偏光纤环的串音; (d) 正反向光程差的差异随温度的变化^[26]

Fig. 5 (a) Setup for simultaneously measuring both directions of the polarization maintaining fiber coil; (b) Results of simultaneously measuring both directions of the polarization maintaining fiber coil; (c) Temperature dependent distributed polarization crosstalk of the polarization maintaining fiber coil; (d) Scanning OPD differences between the forward and backward transmissions versus temperature^[26]

程、色散补偿过程,还是外界环境的变化。最近报道的一种几何对称的光路结构实现了对保偏光纤环的正、反向同时测量^[26],如图 5(a)所示,该结构利用两个环形器巧妙地共用了同一个光程补偿干涉仪,其测量结果如图 5(b)所示。保偏光纤在温度变化时,其分布式偏振串音的测试结果如图 5(c)所示。可以看出在温度变化时,不同位置的干涉峰其幅度和光程都有明显变化。最后,图 5(d)展示了正反向同时测量的显著

效果,其正向与反向测量结果的光程差的差异随温度的波动可以忽略不计。

在 Y 波导的分布式偏振串音测试中,典型的测试结果中所包含的基本都是相互不重叠的干涉峰。由于理论空间分辨率是已知的,所以这些干涉峰在完全没有色散时的宽度就是确定的。因此,不需要进行正反向同时测量来验证色散补偿的性能。不过, Y 波导面临另一类多次测量的问题——双通道测量。由于在实

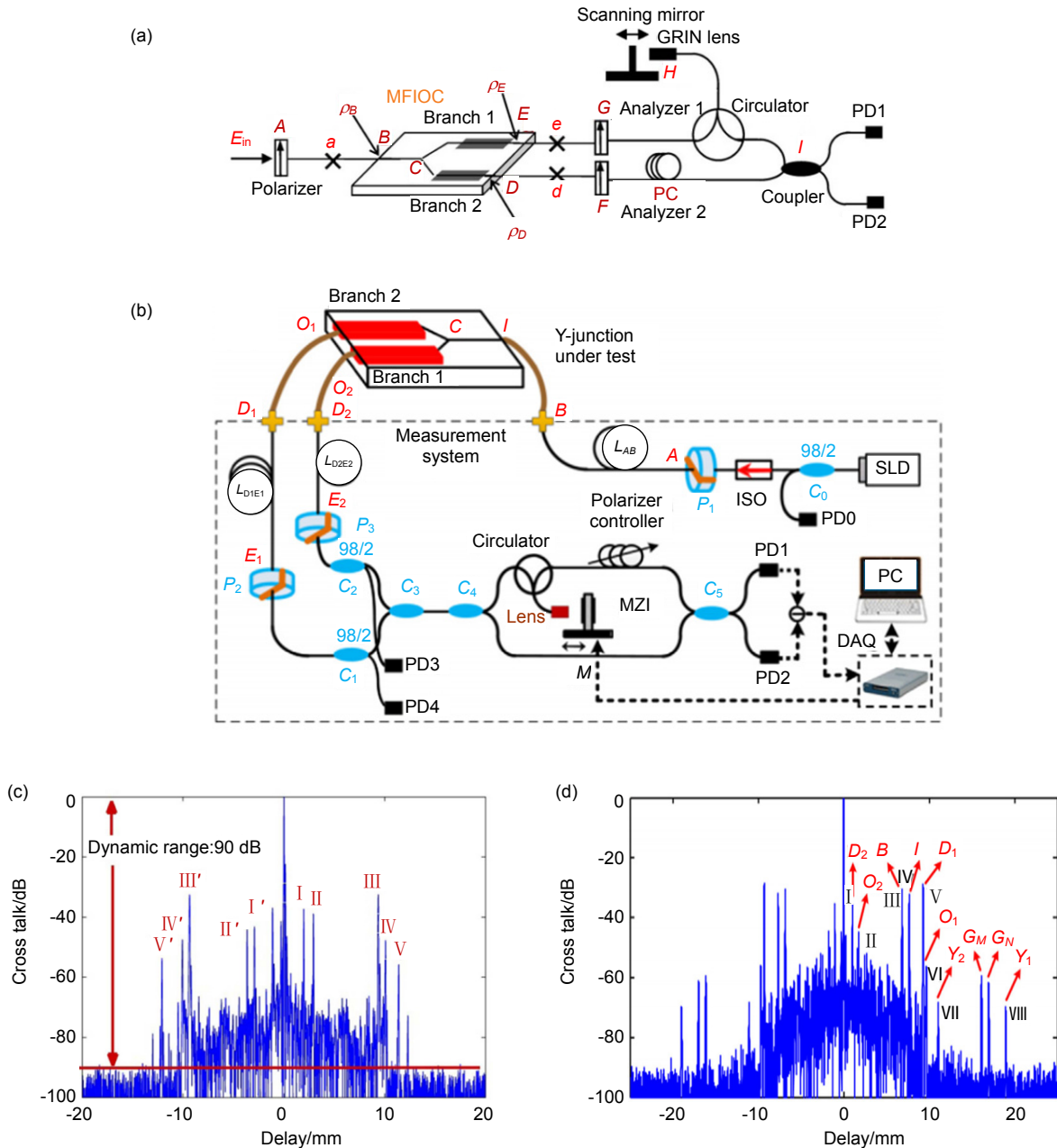


图 6 (a)~(b) Y 波导双通道同时测量的两种光路结构; (c)~(d) 相应的精确测量结果^[24-25]

Fig. 6 (a)~(b) Two different structures for simultaneously measuring both channels of Y waveguide; (c)~(d) The accurate measurement results^[24-25]

实际的工作环境中, Y 波导的两臂是同时工作的, 而传统的测试方案都是单独测量某一臂, 很难比较两臂的串音信息的差异。所以, 有必要设计新的测量方案来实现双通道同时测量。最近, 报道了两种用于 Y 波导双通道同时测量的结构^[24-25]。一种是如图 6(a)所示的超简结构, 另一种是如图 6(b)所示的改进型结构。在第一种结构中, Y 波导的每一个通道分别是干涉仪某一臂的组成部分, 即 Y 波导一个通道中输出的波列将会与另一个通道输出的波列发生干涉形成干涉峰。测量结果将受到 Y 波导分光比的影响, 若两个通道的功率比并非 50:50, 将引入较大的系统误差。而第二种改进型的结构则不存在这种问题, 它首先将两个通道

的波列混合后再进入干涉仪的两臂。当然, 这里需要对耦合器 C_1 与 C_2 的尾纤长度进行筛选, 以使 Y 波导两个通道的波列在光程上完全分离。两种结构的典型测量结果分别如图 6(c)与图(d)所示。

4 高精度分布式偏振串音测试结果

4.1 保偏光纤环的分布式偏振串音

在考察保偏光纤的分布式偏振串音时, 一般更关心依光纤长度分布的结果, 而不是依光程分布的结果。通常近似地认为保偏光纤的双折射与空间位置无关, 然后将依光程分布的结果线性地映射成依光纤长度分布的结果。图 7(a)显示了三个不同温度下, 一个 3 km

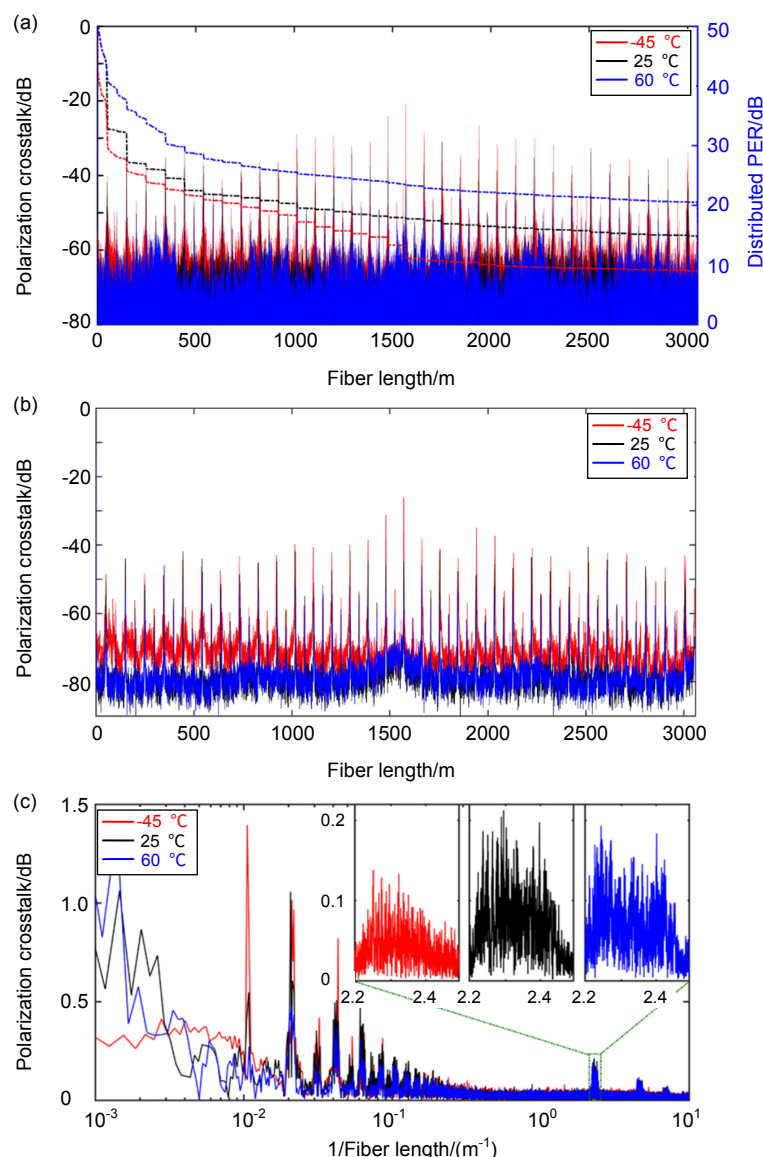


图 7 保偏光纤分布式偏振串音的温度特性

Fig. 7 Temperature dependent distributed polarization crosstalk of the polarization maintaining fiber coil

长的保偏光纤的分布式偏振串音。同时,其中还展示了该光纤环的分布式消光比随温度变化的特性(图中虚线所示)。分布式消光比与串音的关系可以表示为

$$P(s) = 10 \lg \left[\frac{\int_{-s_0}^{s_0} I^2(\sigma) d\sigma}{\int_0^s I^2(\sigma) d\sigma} \right], \quad (2)$$

其中: $I(\sigma)$ 是依光纤长度分布的串音, $-s_0$ 与 s_0 之间是主峰, s 表示光纤长度。可以看出,随着温度的升高,光纤环的分布式消光比整体提高。

前面提到过,保偏光纤环的串音主要是由内部缺陷或者外部压力导致。基于此,这里将测试结果也分为了两部分:光纤环本底与串音峰。其中光纤环本底体现的是光纤本身的偏振特性,而串音峰则能体现光纤环相邻匝之间的受力差异。由于光纤环绕匝的周期性,串音峰也是周期性地出现,所以,使用数字滤波器可以将串音峰与光纤环本底分离开。图 7(b)展示了不同温度的光纤环本底,其中保留了那些幅度较大的换层峰(一层约 50 m)用于位置标定。由于周期性的换匝引起的串音峰数量众多(一匝约半米),直接分析并不方便。这里将分布式偏振串音 $I(\sigma)$ 进行傅里叶变换,得到如图 7(c)所示的结果,其中三个插图对应的就是换匝串音峰在不同温度下的信息。结合图 7(b)可以看到一个有趣的现象,当温度较低时(-45°C),光纤环本底的串音幅度升高,但是换匝峰的幅度降低,说明光纤环内部的应力更大,但是分布更均匀。

4.2 Y 波导的分布式偏振串音

Y 波导的分布式偏振串音的测试目的并不只是为了精确地获取 Y 波导的芯片消光比,Y 波导芯片与其输入、输出尾纤的连接处的偏振耦合特性也是一个很

重要的测量参数。此外,由于 Y 波导的应用环境存在较大的温度变化,所以这些参数随温度的变化规律也广受关注。最近,得益于 Y 波导双通道同时测量方案的提出^[24-25],Y 波导的芯片消光比,Y 波导芯片与其输入、输出尾纤连接处的串音的温度特性得以测量。一个典型的测量结果如图 8 所示,可以看出,Y 波导的芯片消光比在其工作温度内基本保持不变,输入尾纤与芯片的连接点的偏振耦合随温度的波动也较小。但是,两个通道的输出尾纤与芯片的连接处的偏振耦合随温度的波动较大,并且有不同的变化规律。

5 总结与展望

本文以光纤偏振器件与组件——保偏光纤环和多功能集成光学调制器作为分布式偏振串音精确测量与应用的范例,首先,介绍了基于 OCDP 技术的分布式偏振串音测试原理,包括测试装置以及测试结果分析方法;随后,回顾了分布式偏振串音测量误差的来源,包括由测试光路的参数非理想引入的静态误差,例如相邻器件的尾纤在熔接时的对轴角度、待测器件中的双折射色散等,以及由测试环境变化引入的动态误差,针对不同来源的误差还介绍了相应的误差抑制方法;然后,展示了不同环境温度下光纤偏振器件与组件的精确测试结果。测试结果不仅回答了光纤偏振器件与组件的偏振性能是否能够在大幅度的温度变化中得到保持这个问题,而且揭示出了那些工作性能有待优化的部分,为器件的制造工艺的进一步改进指明了方向。

为了更真实地评估光纤偏振器件与组件在实际工作中的性能,器件与组件的测试已经不再满足于前面讨论的静态测量,或者近乎稳态的温度相关测量。在

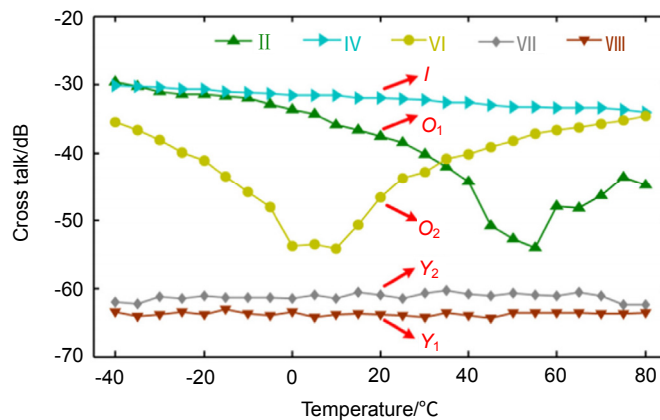


图 8 Y 波导分布式偏振串音的温度特性^[25]

Fig. 8 Temperature dependent distributed polarization crosstalk of the Y waveguide^[25]

未来, 分布式偏振串音测试应该面向满足具有快速的动态测量需求, 并且能够进行半闭合和闭合光路测量的方向发展。前者能够解决在迅速变化的温度场中光纤偏振器件与组件的测试与诊断问题, 而后者则可以极大地弥补复杂光纤偏振光路缺乏测试手段的不足。

参考文献

- [1] Ramaswamy V, French W G, Standley R D. Polarization characteristics of noncircular core single-mode fibers[J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(18): 3014–3017.
- [2] Stolen R H, Ramaswamy V, Kaiser P, et al. Linear polarization in birefringent single - mode fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, **33**(8): 699–701.
- [3] Bergh R, Lefevre H, Shaw H. An overview of fiber-optic gyroscopes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, **2**(2): 91–107.
- [4] Eickhoff W. In-line fibre-optic polariser[J]. *Electronics Letters*, 1980, **16**(20): 762–764.
- [5] Arditty H J, Papuchon M, Puech C. Reciprocity properties of a branching waveguide[M]//Ezekiel S, Arditty H J. *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technologies*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982: 102–110.
- [6] Nayar B K, Smith D R. Monomode-polarization-maintaining fiber directional couplers[J]. *Optics Letters*, 1983, **8**(10): 543–545.
- [7] Okamoto K, Miyazawa H, Noda J, et al. Novel optical isolator consisting of a YIG spherical lens and PANDA-fibre polarisers[J]. *Electronics Letters*, 1985, **21**(1): 36–38.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Bing W, Yang J, Yuan Y G, et al. Performance tests of PM optical fiber coupler based on optical coherence domain polarimetry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8421**: 8421A2.
- [11] Chen S, Giles I P, Fahadroushan M. Quasi-distributed pressure sensor using intensity-type optical coherence domain polarimetry[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(5): 342–344.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Hua Y, Shu P, Zheng D S, et al. Method for improving extinction ratio of Y-waveguide chip for fiber-optic gyroscope: 103267998B[P]. 2013-08-28.
- [18] Xie Z, Yang Y H, Yan H, et al. Estimation of distributed polarization coupling error in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(10): 1006004.
谢泽, 杨远洪, 闫晗, 等. 光纤陀螺光纤环分布偏振耦合误差预估[J]. *中国激光*, 2017, **44**(10): 1006004.
- [19] Li Z Z, Li Z H, Yao X T, et al. Research on influence of polarization crosstalk on the zero drift and random walk of fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(12): 1206001.
李子忠, 李志宏, 姚晓天, 等. 偏振串扰对光纤陀螺零漂及随机游走影响的研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(12): 1206001.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Peng F, Li C, Yang J, et al. Symmetry evaluation for an interferometric fiber optic gyro coil utilizing a bidirectional distributed polarization measurement system[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(20): 5614–5619.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Smith E D J, Zvyagin A V, Sampson D D. Real-time dispersion compensation in scanning interferometry[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(22): 1998–2000.

Recent progress of accurate measurement for distributed polarization crosstalk of fiber optic polarization component and device

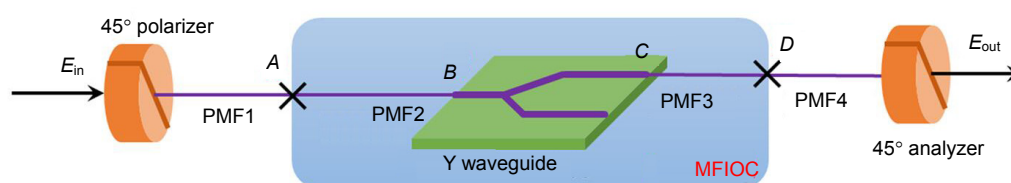
Yang Jun^{1,2*}, Yuan Yonggui^{1,3}, Yu Zhangjun^{1,2}, Li Hanyang^{1,2},
Hou Changbo^{1,3}, Zhang Haoliang^{1,2}, Yuan Libo^{1,2,4}

¹Key Lab of In-fiber Integrated Optics, 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 Communications Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

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



Distributed polarization crosstalk measurement for a Y waveguide

Overview: The polarization crosstalk, also termed polarization mode coupling, of a fiber optic polarization component and device refers to the optical power coupling that occurs at a disturbance point between the two orthogonal polarized modes propagating in it. The distributed polarization crosstalk along with the light propagation direction is directly responsible for the optical polarization properties, for example, the polarization, elliptical polarization, and depolarization properties. It also indirectly reflects the manufacturing technique and the state of the ambient environment, for example, the stress and strain at the joint and fixed position, as well as the temperature. Thus, it is the comprehensive embodiment of the intrinsic performance of the fiber optic polarization component or device and the influence of environment. It is expected to be a general characteristic parameter for online testing, diagnosis, and evaluation of the performance of the fiber optic polarization component and device.

The optimal measurement method for distributed polarization crosstalk till now is the optical coherence domain polarimetry (OCDP). It is based on the white light interferometry and accurately measures the position and amplitude of the distributed polarization crosstalk using a scanning white light interferometer to realize interference between different polarized modes. It has the merits of ultra-high sensitivity, ultra-wide dynamic range, and ultra-long measurable length. Over the past decade, our research group developed suppression technique for interferometric beat noise to enhance the dynamic range beyond 100 dB, developed suppression technique for insertion loss fluctuation of optical delay line to reduce the measurement resolution below 0.2 dB, developed range extension technique of the optical delay line to enlarge the measurement length over 5 km, and so on.

This review takes the polarization maintaining fiber coil and multifunctional integrated optical modulator as examples of distributed polarization crosstalk measurement and application. Firstly, the measurement principle of distributed polarization crosstalk based on the OCDP is introduced. Secondly, the measurement error sources and corresponding suppression methods are reviewed. Thirdly, the accurate measurement results of the fiber optic polarization component and device at different temperature are demonstrated. In the end, it outlooks the development of distributed polarization crosstalk measurement considering the complicated and changeable operation environment of the fiber optic polarization component and device, as well as the semi-closed and closed light path measurement.

Citation: 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

Supported by the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project (2013YQ040815), the National Natural Science Foundation of China (61422505, 61227013), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20122304110022), and the Harbin technological innovation talent research fund (2015RAYXJ009)

* E-mail: yangjun@hrbeu.edu.cn