

基于改进包络提取算法的单模光纤PMD干涉测量研究

王昊¹,涂建坤^{2*},依晓春³,郭汉明¹

(1.上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093;

2.上海电缆研究所有限公司,上海 200093;3.上海赛克力光电技术有限责任公司,上海 200093)

摘要:为了提高光纤链路中偏振模色散(PMD)测量结果的重复性与准确性,设计了一套改进包络提取算法的单模光纤PMD干涉测量系统,并在信号处理环节引入一种结合希尔伯特变换与移动平均滤波的改进包络提取算法,有效抑制了信号波动对群时延差(DGD)计算的影响。实验结果表明:该改进算法将系统测量结果的标准偏差降低至0.003 41 ps;与国外先进仪器EXFO-FTB-5500的对比测试显示,两者在不同类型光纤上的测量结果高度一致。

关键词:单模光纤;偏振模色散;包络提取;干涉法;群时延差

中图分类号:TN818 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)03-0089-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.03.015

Improved envelope extraction algorithm for interferometric PMD measurement in single-mode fibers

WANG Hao¹, TU Jiankun^{2*}, YI Xiaochun³, GUO Hanming¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China;

3. Shanghai SECRI Optics and Electronics Technology Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: To enhance the repeatability and accuracy of polarization mode dispersion (PMD) measurements in optical fiber links, a single-mode fiber PMD interferometric measurement system incorporating an improved envelope extraction algorithm is designed. An enhanced envelope extraction algorithm, combining Hilbert transform with moving average filtering, is introduced in the signal processing stage to effectively suppress the impact of signal fluctuations on the calculation of differential group delay (DGD). Experimental results demonstrate that the improved algorithm reduces the standard deviation of the system's measurement results to 0.003 41 ps. Comparative tests with the advanced foreign instrument EXFO-FTB-5500 show highly consistent measurement results between the two systems across different types of optical fibers.

Key words: single-mode fiber, polarization mode dispersion, envelope extraction, interferometry, group delay difference

0 引言

目前,偏振模色散(PMD)的测量方法主要分为时域法与频域法两大类。时域法(如低相干干涉法、脉冲延迟法)虽然结构简单,适用于多种场景测试^[1],但受限于回波偏振态稳定性,测量精度往往不及频域

法。相比之下,频域法(如斯托克斯参数法、琼斯矩阵特征值法)虽然测量精度较高,但设备复杂且易受噪声干扰^[2-5]。针对上述问题,研究者在信号处理算法上进行了诸多改进:在频域方面,研究者曾尝试利用经验模态分解(EMD)降噪^[6]或引入深度学习建模干涉谱;亦有学者基于光谱周期性特征估算PMD^[7-8],但 these 方法普遍存在设备体积大、现场适应性差等弊端。在时域方面,尽管偏振光时域反射(P-OTDR)技术受到关注,并且通过引入双偏振器结构或借助多波长激光光源来优化性能,但仍难以摆脱系统构造复杂性和测量精度不足的双重束缚^[9-10]。

基于上述背景,本文设计的基于改进包络提取算

收稿日期:2025-06-06。

作者简介:王昊(2001—),男,上海人,硕士研究生,就读于上海理工大学光电信息与计算机工程学院电子信息(光学工程)专业,于上海电缆研究所参与,主要研究方向为光电检测方向。

***通信作者:**涂建坤(1973—),男,本科,教授,主要研究方向为光电检测技术。



法的单模光纤PMD干涉测量系统(简称干涉测量系统),旨在实现对单模光纤PMD的快速高精度测量。

1 系统设计

本系统整体设计分为光路部分与电路部分:光路设计主要负责低相干宽带光源的发射、光信号的分束与干涉,以及干涉信号的有效采集,为信号分析提供基础数据支持;电路设计则围绕信号的高精度采集、处理与控制,确保测量过程的稳定性与自动化。

1.1 光路设计

干涉测量系统如图1所示。宽带光源通过1个起偏器后,光的2个偏振态将沿被测光纤中的2个相互垂直的偏振主态分解;输出光再通过1个检偏器,以保证干涉仪输出条纹的清晰度;随后,光束进入干涉仪,被分为2束:一束经固定反射镜反射,另一束则通过可调反射镜反射。当2束光在传播路径上所经历的距离完全一致时,其传播时间相同,此时源于快轴与慢轴、慢轴与慢轴之间的相干叠加而产生最强干涉,出现中央条纹。设每束光中快慢轴的相对群时延为 $\Delta\tau$,可调反射镜引入的附加时延为 Δt 。当可调反射镜位置改变时,该束光的传播将产生额外延迟;随着可调反射镜继续移动,当 $\Delta t=\Delta\tau$ 时,一束光中的快轴将与另一束光中的慢轴满足干涉条件,形成次级干涉峰,位于主峰的一侧;反之,在另一侧同样形成次级峰。最终形成的干涉信号通过放大采集系统转换为电信号,从而在计算机中得到时域干涉谱,干涉谱数据通过后续算法确定PMD值。

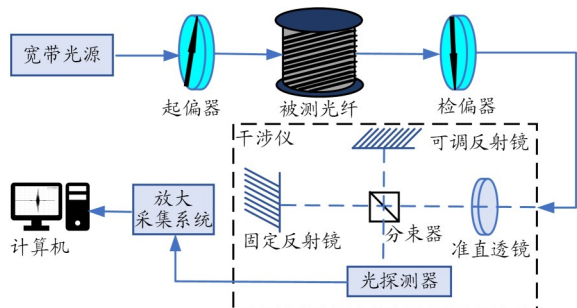


图1 干涉测量系统实验装置图

1.2 电路设计

系统的电路结构框图如图2所示。工控机通过串口控制各个功能模块协同工作:宽带光源驱动单元集成了恒流与温控功能,保障光源输出的稳定性;电机驱动依托高精度定位,实现机械运动的精准控制;光电转换模块采用微弱光信号采集电路,能够有效提升系统对微弱信号的感知能力;放大电路模块设计重点

考虑了低噪声和高增益特性,以确保信号在后续处理环节中具备较高的信噪比;最后,信号采集模块不仅实现了大动态范围信号的实时同步采集,还保证了高精度数据的获取,为系统整体性能提供了有力支撑。

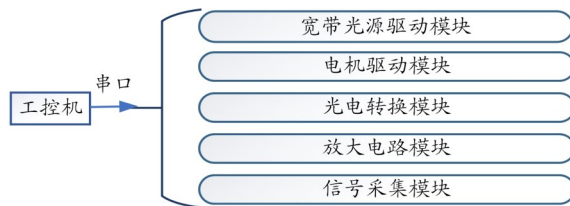


图2 干涉测量系统电路结构框图

2 改进包络算法

2.1 改进包络算法原理与流程图

在干涉法测量光纤PMD的过程中,采用传统包络提取去噪算法(下文简称包络算法)进行处理时,原始干涉信号通常会受到系统噪声、基线漂移和高频扰动等因素的影响,导致信号包络存在明显抖动。这种抖动会直接影响主态群时延差(DGD)等参数的提取精度。因此,本文提出一种改进的包络提取算法(下文简称改进算法)。该改进算法采用希尔伯特变换,并结合特定窗口的移动平均滤波方法,对原始干涉信号进行包络提取与去噪处理。改进算法流程如图3所示。该算法工作原理如下:

1)数据输入。对原始干涉信号进行有效区间截取、延迟坐标转换、异常数据判别及底噪抑制,以改善包络提取前的信号质量。

2)数据处理。结合希尔伯特变换与移动平均处理获得归一化包络,用于后续峰形判别。

3)耦合类型判别。根据主峰与旁峰的相对强度及分离情况,算法进一步选择不同的参数提取路径:当旁峰强度 $\geq$ 主峰强度/2,且三峰结构清晰时,采用弱模耦合模型进行PMD计算;当旁峰强度 $\approx$ 主峰强度/3或更低时,采用强模耦合模型,通过互相关包络区域及其统计特征进行表征;当旁峰完全不可见且包络整体接近高斯分布时,则在强模耦合基础上引入高斯拟合,以提高参数提取的稳定性。

4)结果输出。完成PMD的计算后,系统输出最终结果并同步显示样品的测试数据。

该流程能够适应不同耦合状态下的信号特征,为PMD测量结果的准确提取提供方法支撑。

2.2 2种算法去噪结果对比

本文以原始信号为基准,分别对比了包络提取去

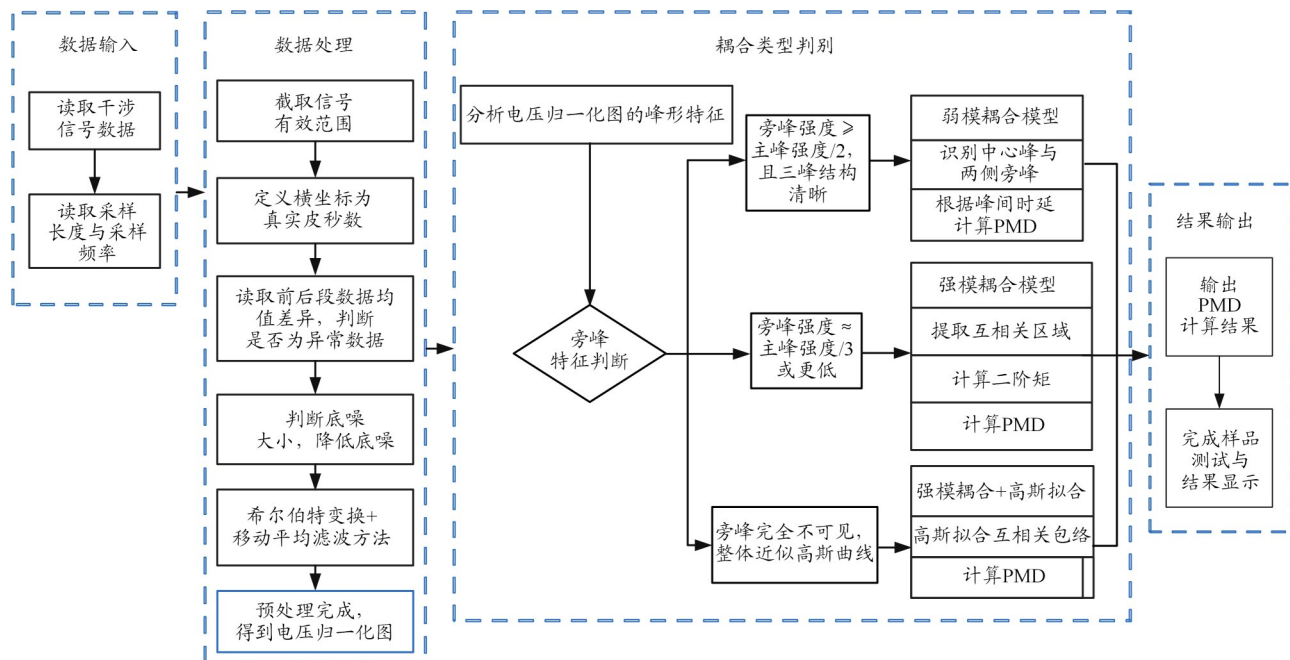


图3 改进算法流程图

噪算法与改进算法的去噪效果,结果如图4所示。可以看出,经传统包络提取去噪算法处理后,PMD测量值有所降低;而采用改进算法后,PMD值进一步下降,且曲线波动幅度显著收敛。经计算,2种算法处理后的标准偏差分别降至0.006 24 ps与0.003 41 ps,表明信号的稳定性与可重复性得到有效提升。结果直观验证了改进算法在抑制PMD提取结果抖动方面的有效性,显著增强了系统测量的可靠性与抗干扰能力。

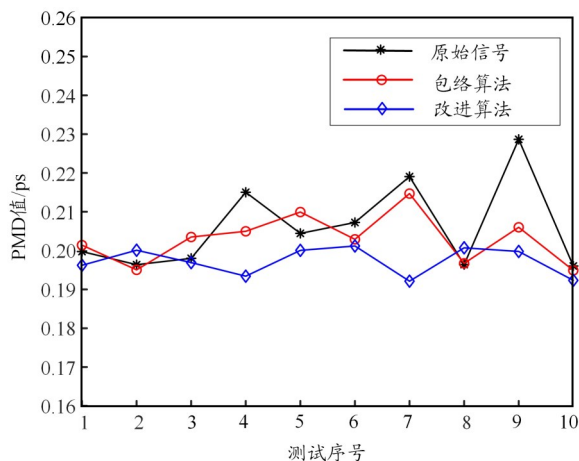


图4 2种算法去噪结果对比

3 实验验证

为验证本文所提干涉测量系统PMD的准确性与稳定性,分别选取以下样品进行多次重复性测试:弱模耦合、DGD标定(下文简称标定)为0.2 ps的光纤;强

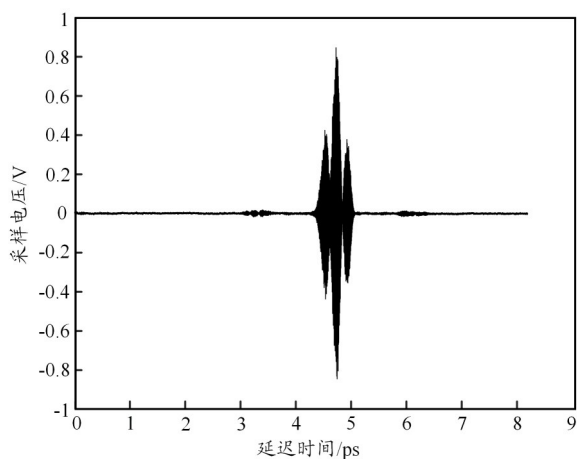
模耦合的25 km和50 km单模光纤;以及标定为0.4 ps的器件。每组样品均独立完成至少6次PMD测量,并将结果与国外PMD测试仪器EXFO FTB-5500平台的测试数据进行对比分析。测量系统经改进算法处理前后的信号对比如图5所示,测量结果如表1~表3所示。

图5(a)为采集到的原始干涉信号。可以看出,在延迟时间约4.5~5 ps附近存在明显的高幅度干涉条纹,采样电压在-0.8~0.8 V内变化,且条纹整体结构清晰。这说明光纤主态保持良好,信号中未出现明显的耦合随机化现象,符合弱模耦合的理论特征。但是,原始干涉信号的峰值位置存在不可忽略的噪声与“假极值”。这些都会对后续的DGD参数提取带来干扰,影响PMD测量的精度和重复性。经测量系统改进算法处理后,从图5(b)可以看出,主峰和2个旁峰结构在-0.3~0.3 ps内,2个旁峰位于主峰两侧±0.2 ps附近、归一化电压峰值约为0.4~0.5,在保留原始信号细节特征的同时变得更为清晰。对于弱模耦合情形,DGD可通过包络图中旁峰相对于主峰之间的时延差进行直接计算。

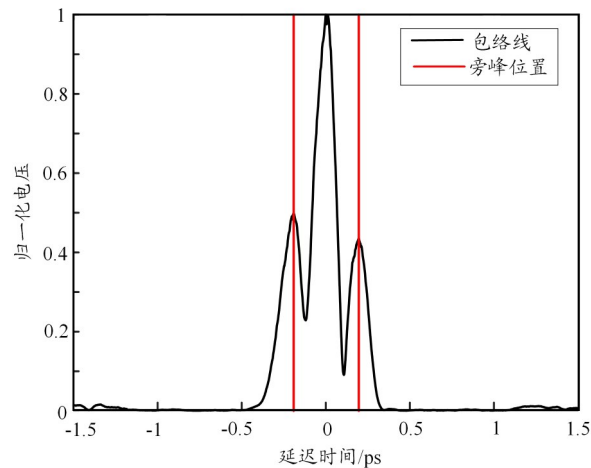
图5(c)中的原始信号仍主要集中在中心延迟附近,主要能量分布在3.5~4.5 ps内,采样电压峰谷值约接近±2 V;但与标定0.2 ps的样品相比,其主峰两侧响应已明显减弱,原本较易辨认的旁峰结构开始变得不再突出。这表明该样品已不再满足弱模耦合旁峰强度超过主峰强度一半的特征,而是进入了强模耦合特

征开始显现的过渡状态。从图5(d)可以看出,包络提取后互相关区域被较好分离,红线所标示的互相关包络区域位置能够稳定识别,其边界大致位于 -0.6 、 0.6 ps附近,此时更适合按照强模耦合条件对互相关包络进行表征,并基于包络宽度及二阶矩特征完成PMD参数

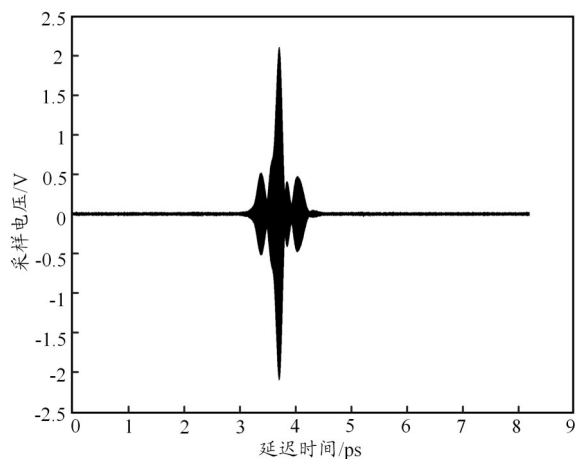
提取。图5(e)所对应的50 km光纤样品中,干涉条纹主要集中在延迟 $1.5 \sim 2.5$ ps附近,采样电压峰谷值约接近 ± 2 V。从耦合类型判别来看,该样品同样处于强模耦合适用范围。从图5(f)可以看出,经改进算法处理后,互相关区域及其边界范围仍能够较为明确地界



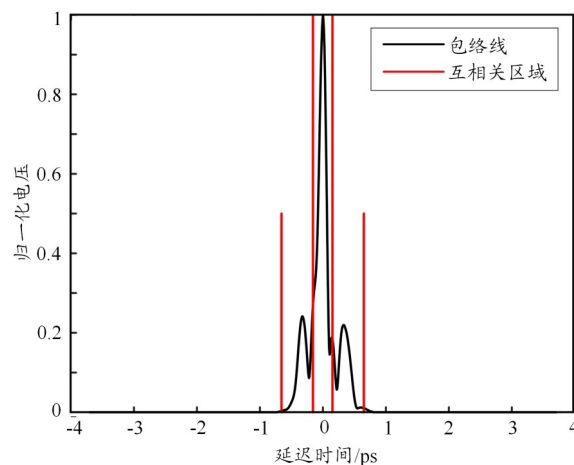
(a) 标定0.2 ps的单模光纤原始信号



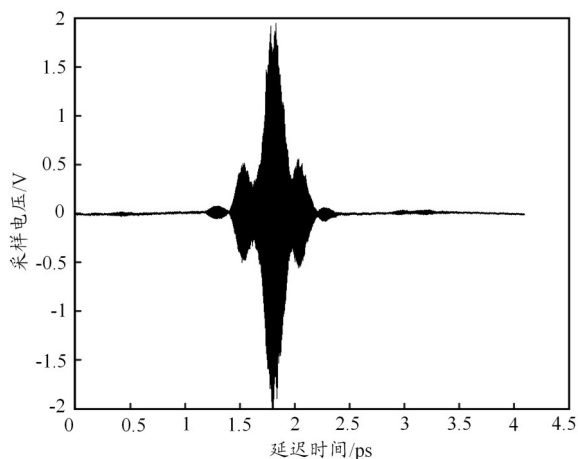
(b) 处理后标定0.2 ps的包络信号



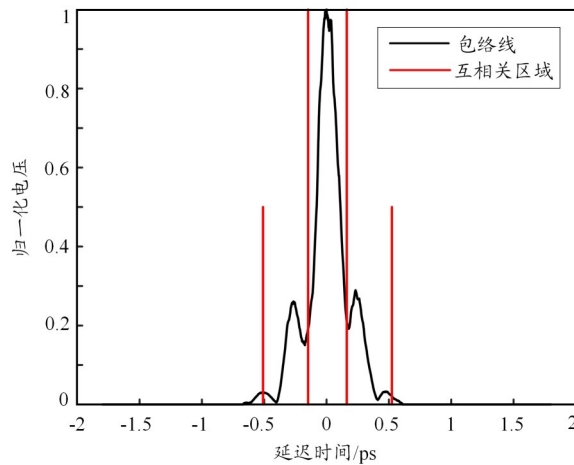
(c) 25 km 光纤原始信号



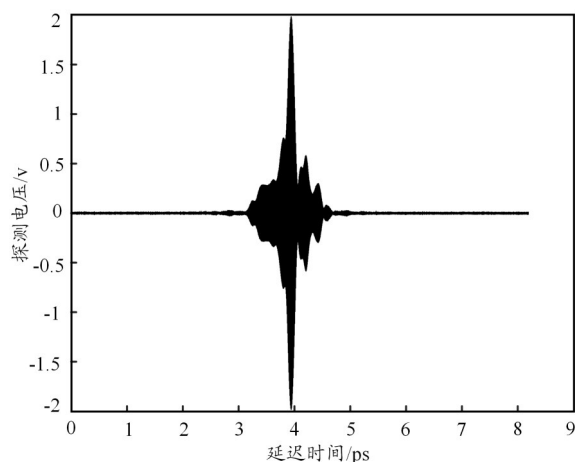
(d) 处理后25 km 光纤的包络信号



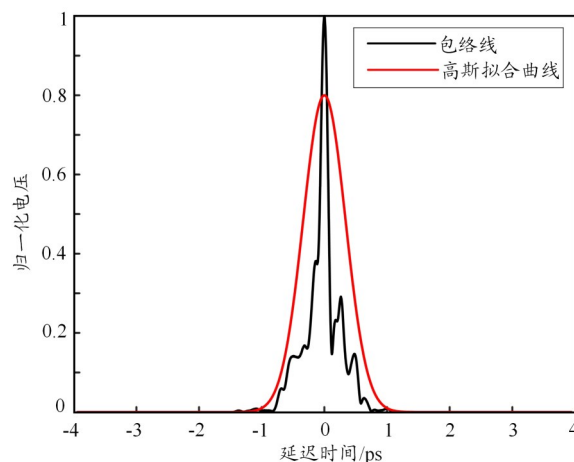
(e) 50 km 光纤原始信号



(f) 处理后50 km 光纤的包络信号



(g) 0.4 ps 器件原始信号



(h) 处理后 0.4 ps 器件包络信号

图5 测量系统经改进算法处理前后的信号对比

定,红线标示的主要互相关边界约为 -0.5 、 0.5 ps,与图5(d)相比,更小的互相关边界范围表明PMD值也会更低。图5(g)中的原始干涉信号已高度集中于中心区域,干涉条纹主要集中在延迟 $3.5 \sim 4.5$ ps附近,外围几乎看不到清晰可辨的旁峰结构,说明模式耦合已经变为较强的随机化状态,信号不再具有弱模耦合条件下典型的三峰对应关系。从耦合判别角度看,这类信号不仅属于强模耦合范围,而且进一步表现出旁峰完全不可见、整体轮廓趋于单峰高斯曲线的特征。从图5(h)可以看出,处理后的包络曲线整体接近高斯型分布,红色高斯拟合曲线峰值约为 0.8 ,与黑色包络主轮廓具有较好的一致性,能有效表征其展宽特性。对于这种耦合进一步增强、旁峰信息基本消失的情况,引入高斯拟合,用拟合后的有效宽度对PMD进行估计。

从表1可以看出,本文所提干涉测量系统所得

表1 标定0.2 ps弱模耦合器件PMD测量结果 单位:ps

序号	干涉测量系统			EXFO-FTB-5500-平台		
	PMD	平均值	标准偏差	PMD值	平均值	标准偏差
1	0.196			0.204		
2	0.200			0.205		
3	0.197			0.196		
4	0.193			0.195		
5	0.200	0.197 3	0.003 41	0.194	0.198 7	0.003 63
6	0.201			0.195		
7	0.192			0.198		
8	0.201			0.199		
9	0.200			0.200		
10	0.192			0.201		

PMD值为 $0.192 \sim 0.201$ ps,标准偏差为 $0.003\ 41$ ps,表现出良好的稳定性和重复性。与EXFO-FTB-5500平台的10次测量结果相比,其PMD值变化范围为 $0.194 \sim 0.205$ ps,二者所得平均PMD值仅相差 0.36% 。

由表2和表3可以看出,在强模耦合条件下,当光纤长度分别为 25 、 50 km时,本文系统与EXFO-FTB-5500平台对2种光纤及标准器件的PMD测量平均值高度一致。具体而言,本文系统与EXFO-FTB-5500平台在 25 km和 50 km光纤上的测量标准偏差差值分别为 $0.000\ 53$ ps与 $0.006\ 4$ ps;对于标定值为 0.4 ps的标准器件,采用高斯拟合方法处理其干涉包络特征后,两者标准偏差差值为 $0.000\ 57$ ps。测量结果表明,

表2 强模耦合器件PMD测量结果 单位:ps

光纤类型	序号	干涉测量系统			EXFO-FTB-5500平台		
		PMD	平均值	标准偏差	PMD	平均值	标准偏差
25 km 光纤	1	0.283			0.288		
	2	0.282			0.289		
	3	0.283	0.282 4	0.000 43	0.287	0.287 5	0.000 96
	4	0.282			0.286		
	5	0.282			0.287		
	6	0.282			0.288		
50 km 光纤	1	0.224			0.231		
	2	0.223			0.238		
	3	0.221	0.223 0	0.001 29	0.222	0.229 7	0.007 69
	4	0.222			0.218		
	5	0.223			0.230		
	6	0.225			0.239		

王昊,涂建坤,依晓春,等:基于改进包络提取算法的单模光纤PMD干涉测量研究

表3 标定0.4 ps强模耦合器件PMD测量结果 单位:ps

序号	干涉测量系统			EXFO-FTB-5500平台		
	PMD	平均值	标准偏差	PMD	平均值	标准偏差
1	0.399			0.401		
2	0.399			0.399		
3	0.399	0.398 5	0.000 5	0.398	0.399 2	0.001 07
4	0.398			0.398		
5	0.398			0.399		
6	0.398			0.400		

本文系统对3种样品的测量标准偏差均低于EXFO-FTB-5500平台,说明其在保持高准确度的同时,测量结果离散度更小、重复性更优。

4 结束语

本文针对光纤PMD测量,设计了基于干涉法的测试系统,并采用改进算法,有效提升了干涉信号包络的提取精度与抗噪性能。实验对弱模耦合、标定值为0.2 ps的光纤,以及强模耦合的25、50 km光纤和标定值为0.4 ps的器件进行了多次重复测试。结果表明,本文方法与EXFO FTB-5500平台的PMD测量结果高度一致,重复性与一致性表现优异。改进算法将测量结果的标准偏差降低至0.003 41 ps以内。在具体样品测试中,本文系统的标准偏差分别为0.000 43 ps(25 km光纤)和0.001 29 ps(50 km光纤),均优于对比的测试离散度。

上述结果充分说明,本文所构建的系统在保持高准确度的同时,具备更优的测量重复性,为国产高性能光纤色散测量仪器的自主研发提供了有力的技术支撑与实验依据。所提出的改进算法显著增强了系

统对色散参数的分辨能力,进一步提升了现场测试的稳定性与实用性。

参考文献:

- [1] Cyr N. Polarization-mode-dispersion measurement: generalization of the interferometric method to any coupling regime[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(3): 794-805.
- [2] Poole C D, Favin D L. Polarization-mode-dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 12(6): 917-929.
- [3] Heffner B L. Accurate, automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones matrix eigenanalysis[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 5(7): 814-817.
- [4] Dong Hui, Shum P, Yan M, et al. Generalized Mueller matrix method for polarization mode dispersion measurement in a system with polarization-dependent loss or gain[J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5067-5072.
- [5] Jaworski M, Borzycki K. Accurate polarization mode dispersion measurements using fixed Analyzer method with averaging[C]//IEEE. Proceedings of 2006 International Conference on Transparent Optical Networks. Nottingham: IEEE, 2006: 205-208.
- [6] 潘潘,席丽霞,张晓光,等. 基于经验模态分解的偏振模色散测量实验研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 212-218.
- [7] Yuan Xueguang, Zhang Yangan, Wang Cuicui, et al. Polarization mode dispersion measurement using fixed analyzer method with deep neural network[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102147.
- [8] Xin Lei, Yang Zhongming, Dou Jiantai, et al. Hilbert transform-based envelope substitution method for non-uniform-sampling signal correction in white-light interferometry[J]. OSA Continuum, 2020, 3(4): 824-834.
- [9] Wang Xuefeng, Zhao Can, Wu Hao, et al. Fading-free polarization-sensitive optical fiber sensing[J]. Optics Express, 2020, 28(25): 37334-37342.
- [10] Huo Jiahao, Wang Jian, Wang Yaping, et al. Vector distribution measurement of PMD in optical-fiber links employing a wavelength-tunable SOP-OTDR[J]. Applied Optics, 2022, 61(13): 3754-3760.