

基于小波阈值去噪的偏振模色散测量

沙宇洋¹, 席丽霞^{1*}, 张晓光¹, 唐先锋¹, 张文博²

¹北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;

²北京邮电大学理学院, 北京 100876

摘要 针对固定分析仪法在测量光纤偏振模色散时会引入误差、降低测量精度这一问题, 提出了一种基于小波阈值的去噪方案, 以提升固定分析仪法的测量精度。给出了算法的具体流程, 并详细讨论了小波阈值、阈值函数、基函数以及分解层数的选取原则及方案。搭建了实验平台并进行测定, 将测定结果与常用的傅里叶变换法及商用的偏振模色散测量仪的测量结果进行对比。实验结果表明, 所提出的小波阈值去噪方案能够有效地降低噪声对测量结果的影响, 且对于不同类型、不同长度的测试光纤样本均适用。以商用仪器的测量结果为参考, 本方案测量结果的最大误差为 2.27%, 该数据表明本方案显著提升了固定分析仪法测量偏振模色散的精度。

关键词 光纤光学; 信号处理; 偏振模色散; 小波阈值去噪; 固定分析仪法; 噪声

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1106006

Polarization Mode Dispersion Measurement Based on Wavelet Threshold Denoising

Sha Yuyang¹, Xi Lixia^{1*}, Zhang Xiaoguang¹, Tang Xianfeng¹, Zhang Wenbo²

¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

²School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The fixed analyzer method commonly used for measuring the polarization mode dispersion of optical fibers can introduce errors and reduce measurement accuracy, and thus a novel scheme based on wavelet threshold denoising is proposed to further improve the measurement accuracy. The specific workflow of the scheme is presented and the selection principle and scheme of wavelet threshold, threshold function, mother wavelet and wavelet decomposition layer number are discussed in detail. An experimental platform is built and the measurement is conducted. The measurement results are compared with those by the commonly used Fourier transform method and commercial polarization mode dispersion measurement instruments. The experimental results show that the proposed wavelet threshold denoising scheme can be used to effectively reduce the impact of noises on the measurement results and is also suitable for different types and lengths of test fiber samples. If the measurement results by commercial instruments are taken as the reference standard, the maximum error by the proposed scheme is 2.27%, which indicates the polarization mode dispersion measurement accuracy by the fixed analyzer method is significantly enhanced.

Key words fiber optics; signal processing; polarization mode dispersion; wavelet threshold denoising; fixed analyzer method; noise

OCIS codes 060.2300; 060.2330; 060.2430

1 引言

随着光纤通信技术的不断发展, 偏振模色散 (PMD) 成为制约高速光纤通信技术进步的一个重要因素^[1]。PMD 是光纤的固有特性之一, 在数字通

信系统中会引起脉冲展宽, 造成码间干扰, 导致误码率增加并限制系统的传输距离和带宽。因此, 提高对光纤 PMD 测量的精度十分重要^[2]。

PMD 测量方法主要有光脉冲延迟法、干涉法、琼斯矩阵法、固定分析仪法等^[1]。光脉冲延迟法主

收稿日期: 2018-05-09; 修回日期: 2018-06-18; 录用日期: 2018-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61571057, 61527820)

* E-mail: xilixia@bupt.edu.cn

要基于 Poole 的主态理论,这种方法简单、直观,但是由于受脉冲宽度和示波器精度的限制,该方法只有在测量较大的 PMD 时才比较准确。干涉法适合测量较短光纤和光器件中的 PMD,精度较高,但是由于偏振耦合的存在,该方法并不适合测量长光纤中的 PMD。琼斯矩阵法测量范围宽、精度高,但是测量时间较长、实验仪器价格较高,不适用于实时测量场景。固定分析仪法测量 PMD 的实验系统结构相对简单、操作方便易行,并且具有测量动态范围大、响应速度快等一系列优点^[1],因此成为众多 PMD 测量方法中的首选。该方法通过测量和分析宽带光源在光谱仪上形成的干涉的“极大峰”和“极小谷”的个数,计算光纤 PMD 的测量值,然而,系统链路中存在噪声,会导致许多“假极值”的产生,从而严重影响 PMD 的测量准确度^[3]。因此,有效去除噪声是提高固定分析仪法测量 PMD 精度的一个关键问题^[4]。

本文提出了一种基于小波阈值的去噪方案,可

以消除固定分析仪法测量 PMD 系统中噪声所引入的“假极值”对 PMD 的精确测量产生的影响。小波变换因具有多分辨率分析特性及对信号良好的表征能力等特点,被广泛应用于信号去噪领域^[5]。本文讨论了小波阈值去噪的算法流程,实验测量了不同类型、不同长度光纤的 PMD 值,验证了该算法的有效性。

2 原理分析

2.1 固定分析仪法测量 PMD 原理

固定分析仪法测量 PMD 的实验系统框图如图 1 所示,宽带光源发出的光信号经过起偏器后进入偏振控制器(PC),然后入射到待测光纤,经检偏器进入高分辨率光谱仪(OSA)模块,最后将光谱仪中的实验数据输出到数字信号处理单元(DSP)。通过调节 PC^[6],测量不同偏振态下光纤的 PMD 值,将所有测量值的均值作为待测光纤 PMD 的最终测量结果。

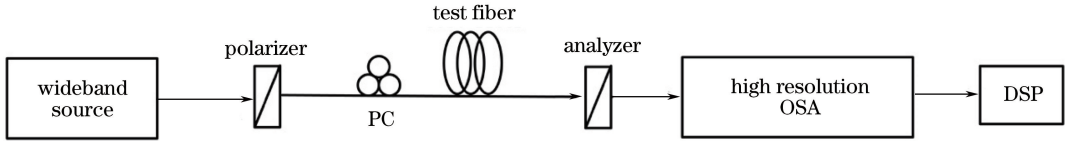


图 1 固定分析仪法测量 PMD 实验系统框图

Fig. 1 Schematic of experimental system for PMD measurement by fixed analyzer method

由于光纤的 PMD,不同波长的偏振光经过光纤后产生不同的相位差,从而在频域上产生干涉现象,测试信号 PMD 的归一化频谱 $R(\lambda)$ 如图 2 所示。光纤 PMD 的大小决定了干涉图谱上“极小谷”和“极大峰”个数,峰谷间的关系满足

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{kN_e\lambda_{\text{start}}\lambda_{\text{stop}}}{2c(\lambda_{\text{stop}} - \lambda_{\text{start}})}, \quad (1)$$

式中: k 为模式耦合因子,当光纤为弱耦合模式时, $k=1.000$,当光纤为强耦合模式时, $k=0.805$ ^[1]; λ_{start}

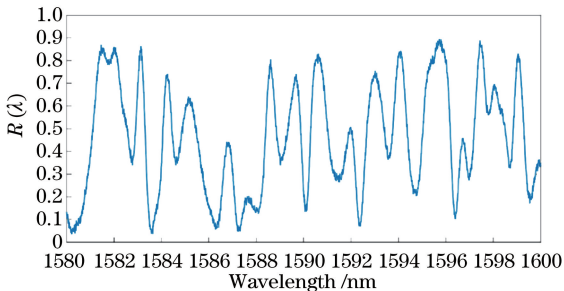


图 2 测试信号 PMD 的归一化频谱 $R(\lambda)$

Fig. 2 Normalized spectrogram $R(\lambda)$ of the PMD of test signal

和 λ_{stop} 分别为测量的起始波长和结束波长; N_e 为该波长范围内的极值点的个数; c 为光速。

实验系统产生的噪声会导致极值点个数的计算不准确,因此固定分析仪法测量 PMD 中最关键的一步就是精确地统计出“极小谷”和“极大峰”的总数^[7]。以下将着重研究去噪算法并进行相关的实验验证和分析。

实验中分别记录不使用检偏器的输出光谱 $P_{\text{TOT}}(\lambda)$ 和使用检偏器的输出光谱 $P_A(\lambda)$, 计算得到 PMD 的归一化频谱 $R(\lambda)$ 为

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{\text{TOT}}(\lambda)}. \quad (2)$$

2.2 小波阈值去噪算法原理

采用极值计数法计算 PMD 值时,面临的最大问题就是系统噪声导致干涉图谱出现“毛刺”,这些“毛刺”可能被误判为极值点,从而严重影响测量结果的准确度。因此,为了提高光纤 PMD 的测量准确度和精确度,必须采用合理且有效的去噪算法对测量信号进行去噪处理^[8]。

小波阈值去噪的工作原理是:根据真实信号和

噪声信号的小波系数在不同尺度下的不同性质,先使用小波分解算法将采集到的信号分解到各个尺度中,再利用阈值函数对带有噪声信号的小波系数进行处理。小波阈值去噪的主要流程为:1) 确定去噪的临界阈值 K ,当小波分解系数不大于 K 时,可以认定此时的小波分解系数主要是由噪声引起的,可

以将其舍弃;2) 当小波分解系数大于 K 时,认为小波系数主要由信号产生,此时的小波分解系数可以不进行任何处理(硬阈值函数处理方式),或是按照某个固定的数值向零收缩(软阈值函数处理方式);3) 利用新获得的小波系数进行信号重构,得到去噪后的信号^[9]。小波阈值去噪流程图如图 3 所示。

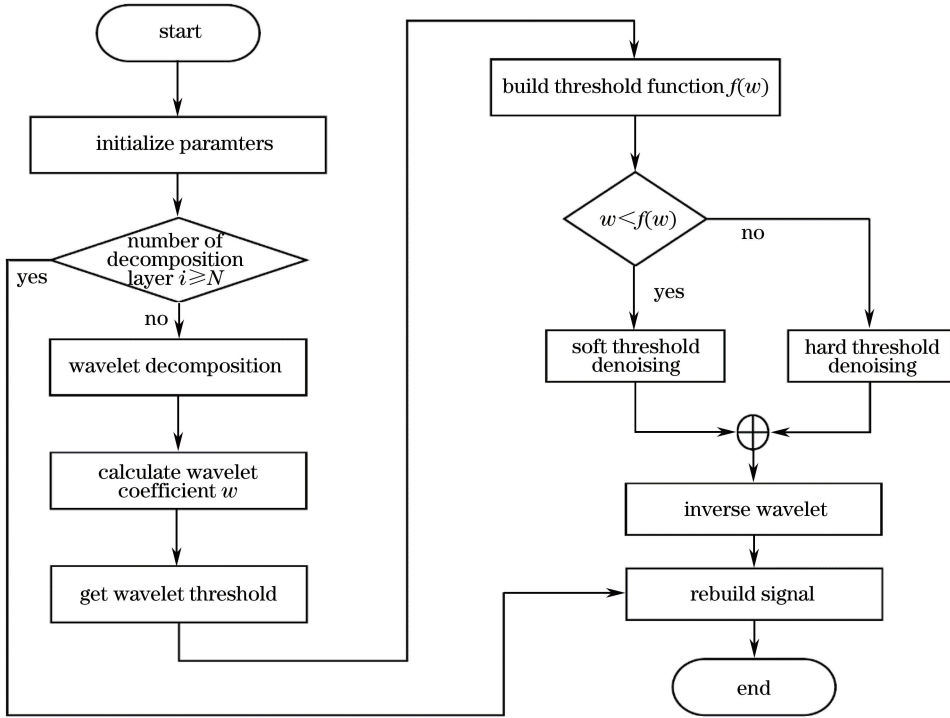


图 3 小波阈值去噪流程图

Fig. 3 Flow chart of wavelet threshold denoising

对于不同的应用场景,小波阈值去噪算法需要选择不同的阈值、阈值函数、基函数以及分解层数。以下针对固定分析仪法测量 PMD 这一应用场景,深入研究小波阈值去噪算法。

2.2.1 小波阈值的构建

小波阈值决定了信号在小波分解的过程中所获得的小波系数是否由噪声引起^[10]。若阈值设定过小,则噪声去除不完全,去噪后的信号仍然有噪声残留;若阈值设定过大,会导致部分真实信号被当作噪声去掉,从而使判断结果出现偏差。噪声的小波系数随着分解尺度的增加而减小,因此对信号进行去噪时,不同的分解层的阈值选取也有所差异,阈值应随着分解尺度的增加而减小^[11]。以下采用随分解层数而变化的小波阈值^[12],第 j 层的小波阈值为

$$T_j = \frac{\sigma^2 \sqrt{2 \lg N}}{\lg(j+1)}, \quad (3)$$

式中: σ^2 为噪声的方差; N 为采集信号的长度; j 为分解层数。 σ^2 可利用 Donoho 提出的稳健中值算法^[12]进行计算,表达式为

$$\sigma = \frac{\text{median}(|\omega|)}{0.6745}, \quad (4)$$

式中: ω 为小波系数; $\text{median}(\cdot)$ 表示取中值。

2.2.2 阈值函数的构建

经典的小波阈值函数主要有硬阈值函数和软阈值函数。硬阈值函数能够很好地去除噪声,但是会造成重构信号的不连续性。软阈值函数虽然能够弥补硬阈值函数所导致的不连续性,但会导致信号丢失很多重要特征^[13]。

使用固定分析仪法测量 PMD 时,主要是通过统计极值点的总数计算被测光纤 PMD 的测量值,不连续的信号会导致极值点的个数与正常值产生偏差,影响测量精度。构造阈值函数

$$f(\omega) = \begin{cases} \omega - \exp\left[(T - \omega + \alpha)\ln\frac{T}{\alpha}\right], & \omega \geq T \\ 0, & |\omega| < T \\ \omega + \exp\left[(T + \omega + \alpha)\ln\frac{T}{\alpha}\right], & \omega \leq -T \end{cases}, \quad (5)$$

式中： α 为参数，可以通过改变 α 值的大小来调节阈值函数 $f(\omega)$ 的收敛程度； T 为阈值。该函数 $f(\omega)$ 在 ω 和 $-\omega$ 处均连续，在小波系数较小的部分使用软阈值函数进行处理，克服了硬阈值函数造成的不连续性；在小波系数较大的部分使用硬阈值函数进行处理，保留信号的更多细节^[13]。

2.2.3 小波基函数的选取和分级层数的确定

目前还没有成熟的理论可指导小波基函数的选取。大量实践证明：对于数字信号，symN、dbN 等基函数通常可以获得比较理想的结果。使用该研究中所确定的阈值和阈值函数，从均方误差 δ_{RMSE} 和信噪比 R_{SN} 两个角度，对去噪后的信号进行分析以确定小波基函数的阶数和分解层数。 δ_{RMSE} 表示经过小波分解、重构后的信号与原信号之间的均方误差，该数值表征去噪后的信号与原始信号之间的差异，该值越小，表示信号去噪的效果越好^[14]。 R_{SN} 是衡量原始信号中噪声大小的一个指标，该值经常被用来评价算法去噪的效果，信噪比数值越大，算法去噪效果越好^[15]。

经过多次实验分析发现：对于强耦合模式光纤，使用 sym8 小波基函数，分解层数为 8 时， δ_{RMSE} 出现极小值而 R_{SN} 出现极大值；对于弱耦合模式光纤，使用 db4 小波基函数，分解层数为 4 时， δ_{RMSE} 出现极小值而 R_{SN} 出现极大值。因此分别选择上述小波基函数和相应的分解层数对获得的数据进行处理。

2.2.4 小波阈值去噪算法数据处理结果

使用上述确定的参数对采集的实验数据进行处理。图 4 为小波阈值去噪算法处理结果图，图中给出了使用小波阈值去噪算法前后数据的对比。由图 4 可以看出，小波阈值去噪算法能有效地去除噪声，使干涉图谱变得平滑。

2.3 傅里叶变换算法原理

傅里叶变换法是将归一化频谱 $R(\lambda)$ 变换为时域信号^[16]，从而获得光到达时间 $\delta\tau$ 的相关信息。对时域数据进行处理，可以计算出被测光纤期望的 PMD 值 $\langle\Delta\tau\rangle$ 。

对于弱耦合模式的光纤，傅里叶变换得到一组离散尖峰输出概率分布 $P(\delta\tau)$ ，该分布函数的矩心

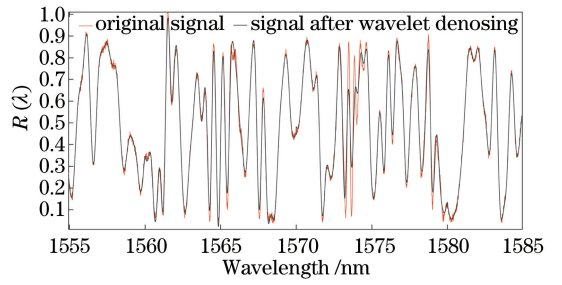


图 4 小波阈值去噪算法处理结果图

Fig. 4 Processing results by wavelet threshold denoising algorithm

即是被测光纤 PMD 值 $\langle\Delta\tau\rangle$ ，可表示为

$$\langle\Delta\tau\rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)\delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} P_e(\delta\tau)}, \quad (6)$$

式中： M' 为超过阈值 T (测量系统均方根噪声点评为 200%) 尖峰的总数。

在强耦合模式的情况下，对 $R(\lambda)$ 进行傅里叶变换后得到一个分布函数 $P(\delta\tau)$ 。被测光纤的 PMD 测量值可以使用 $\langle\Delta\tau\rangle$ 的二阶矩平方根，即^[16]

$$\sigma_R = \left\{ \frac{\sum_{j=0}^{M'} [P_j(\delta\tau)\delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M'} [P_j(\delta\tau)]} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

式中： M' 为超过阈值 T 尖峰的总数； M'' 为阈值内的最后一个尖峰。

傅里叶变换算法虽然是当前最成熟的测量 PMD 的方法，但是该方法对采集数据的动态范围要求较高；此外，该方法在测量较小 PMD 值时误差较大。

3 分析与讨论

实验中使用 C+L 波段的宽带光源作为信号源，波长范围选择为 1520~1620 nm，使用分辨率为 0.01 nm 的光谱仪采集数据。分别测量色散补偿光纤(DCF)、单模光纤(SMF)和保偏光纤(PMF)的 PMD 值。随机调节偏振控制器改变输入偏振态，使用频谱仪采集不同偏振态下的数据，分别使用小波阈值去噪算法和傅里叶变换法进行处理。重复 10 次实验，对获得的 10 组数据的处理结果求平均，将均值作为最终的测量结果。同时使用商用 PMD 测试仪(型号为 EXFO FTB-5500B)对光纤 PMD 进行测量，作为参考值。将使用小波阈值去噪算法、傅里叶变换法和商用 PMD 测试仪得到的测量结果进行

比较,绘制出了不同类型、不同长度的光纤的测量结果对比图,不同光纤的测量结果对比图如图 5 所示。

图 5(a)为 1.700 km 长 DCF 的 3 种测量结果的曲线图,从图中可以看出,使用小波阈值去噪算法的测量结果与参考值之间的最大误差为 0.21 ps,优于傅里叶变换法的最大误差 1.00 ps;图 5(b)为 39.00 km 长 SMF 的 3 种测量结果的曲线图,小波阈值去噪算法的测量结果与参考值之间的最大误差为

0.03 ps,优于傅里叶变换法的最大误差 0.10 ps;图 5(c)为 2.500 km 长 SMF 的 3 种测量结果的曲线图,小波阈值去噪算法的测量结果与参考值之间的最大误差为 0.03 ps,优于傅里叶变换法的最大误差 0.07 ps;图 5(d)为 0.054 km 长 PMF 的 3 种测量结果的曲线图,小波阈值去噪算法的测量结果与参考值之间的最大误差为 1.25 ps,略优于傅里叶变换法的最大误差 1.35 ps。

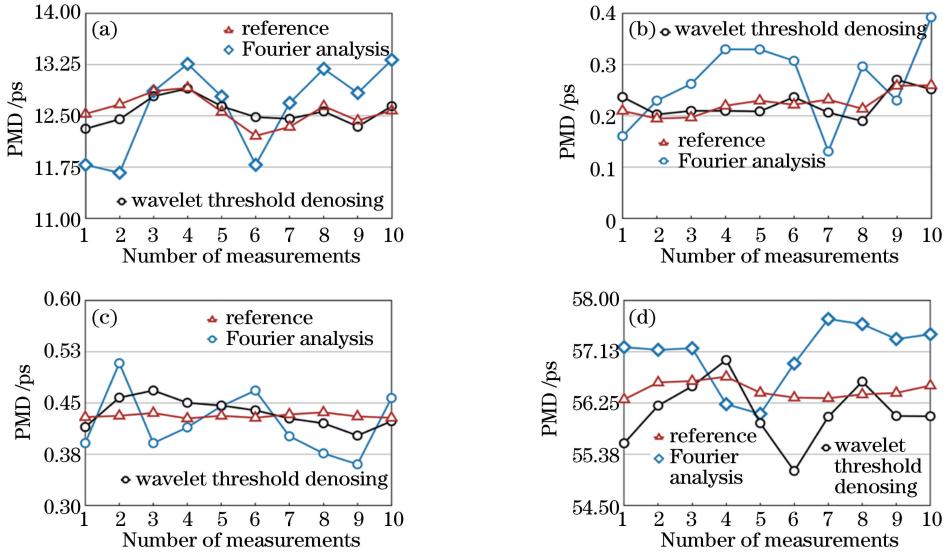


图 5 不同光纤测量结果对比图。(a) 1.7 km, DCF; (b) 39 km, SMF; (c) 2.5 km, SMF; (d) 0.054 km, PMF

Fig. 5 Comparison among measurement results of different fibers. (a) 1.7 km, DCF; (b) 39 km, SMF;

(c) 2.5 km, SMF; (d) 0.054 km, PMF

对测量结果进行分析,计算获得每种测量方法的标准差(SD),分析结果如表 1 所示。

表 1 3 种测量方法的标准差

Table 1 SDs of three kinds of measurement methods

| Fiber type | Fiber length /km | SDs of method /ps | | |
|------------|------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | | Commercial instrument measurement | Wavelet threshold denoising | Fourier analysis |
| DCF | 1.700 | 0.22 | 0.28 | 0.64 |
| SMF | 39.000 | 0.02 | 0.02 | 0.08 |
| SMF | 2.500 | 0.01 | 0.02 | 0.05 |
| PMF | 0.054 | 0.14 | 0.54 | 0.55 |

从表 1 可以看出,小波阈值去噪算法测量结果的标准差与傅里叶变换法相比较小,说明小波阈值去噪算法稳定性更好。

为了进一步证明所提出算法的正确性,将小波阈值去噪算法和傅里叶变换法获得的结果与商用 PMD 分析仪的测量结果进行对比,结果如表 2 所示。对于 1.700 km 长的 DCF,小波阈值去噪算法与参考值的相对误差为 0.47%,优于傅里叶变换法 0.64%的相对误差;对于 39.00 km 的 SMF,小波阈值去噪算法与参考值得相对误差为 2.27%,远优于傅里叶变换法 14.09%的相对误差;对于 2.500 km

表 2 两种测量方法的结果与参考值的对比

Table 2 Comparison between reference value and measurement results by two kinds of methods

| Fiber type | Fiber length /km | Reference value | Wavelet threshold denoising | | Fourier analysis | |
|------------|------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | | Average /ps | Relative error /% | Average /ps | Relative error /% |
| DCF | 1.700 | 12.57 | 12.51 | 0.47 | 12.65 | 0.64 |
| SMF | 39.000 | 0.22 | 0.22 | 2.27 | 0.25 | 14.09 |
| SMF | 2.500 | 0.43 | 0.44 | 1.39 | 0.42 | 7.19 |
| PMF | 0.054 | 56.47 | 56.09 | 0.67 | 57.08 | 1.00 |

长的 SMF,小波阈值去噪算法与参考值的相对误差为 1.39%,优于傅里叶变换法 7.19%的相对误差;对于 0.054 km 长的 PMF,小波阈值去噪算法与参考值的相对误差为 0.67%,优于傅里叶变换法 1.00%的相对误差。因此可以得出,小波阈值去噪算法在测量 PMD 值时,无论是稳定性还是精确度都优于傅里叶变换法,测量较小 PMD 值时优势更加明显。

4 结 论

基于固定分析法测量 PMD 的方案,采用小波阈值去噪算法对实验采集的信号进行去噪,有效克服了系统噪声产生的“假极值”对极值点个数统计的影响,提升了固定分析法测量 PMD 的精度。实验中测试了不同长度、不同类型光纤的 PMD 值,并与现有成熟的傅里叶变换算法和商用 PMD 分析仪的测量结果进行对比。实验分析表明,使用小波阈值去噪算法所得 PMD 测量值的误差小于使用傅里叶变换法所得结果;小波阈值去噪算法的稳定性和测量小 PMD 值时的准确度都优于傅里叶变换算法。因此,基于小波阈值去噪算法的固定分析法能够更好地消除由系统噪声所产生的“假极值”对极值点的总数的影响,显著提升了测量准确度和精度。

参 考 文 献

- [1] Zhang X G. Polarization mode dispersion in fiber principle, measurement, and adaptive compensation [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2017.
张晓光. 光纤偏振模色散原理、测量与自适应补偿技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2017.
- [2] Gordon J P, Kogelnik H. PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, 97(9): 4541-4550.
- [3] Pan P, Xi L X, Zhang X G, *et al.* Experimental research on polarization mode dispersion measurement based on empirical mode decomposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0106002.
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): 0106002.
- [4] Xu H Y, Zhang X G, Tang X F, *et al.* Joint scheme of dynamic polarization demultiplexing and PMD compensation up to second order for flexible receivers [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-15.
- [5] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J].

- IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [6] Hui R, O'Sullivan M S. Fiber optic measurement techniques [M]. Netherlands: Academic Press/Elsevier, 2009: 495-510.
- [7] Xi L X, Zhang X G, Yu L, *et al.* Techniques of adaptive compensation for two-second polarization mode dispersion [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(8): 924-928.
席丽霞, 张晓光, 于丽, 等. 二阶偏振模色散自适应补偿的关键技术 [J]. 光电子 • 激光, 2004, 15(8): 924-928.
- [8] Tian F, Xi L X, Zhang X F, *et al.* An experiment of PMD compensation in 40-Gb/s PSBT transmission system [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(9): 816-818.
- [9] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445-3462.
- [10] Liu L, Yu M, Yang R J, *et al.* Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0605005.
刘磊, 于淼, 杨瑞娟, 等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605005.
- [11] Song X D, Zhou C K, Hepburn D M, *et al.* Second generation wavelet transform for data denoising in PD measurement [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1531-1537.
- [12] Wang H Y, Lang Y, Han H H, *et al.* Denoising algorithm of express way floating car data based on wavelet threshold [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(7): 717-720, 770.
汪宏宇, 郎莹, 韩海花, 等. 基于小波阈值的浮动车数据消噪算法 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(7): 717-720, 770.
- [13] Hou H H, Gui Z G. Denoising processing of ECG signal based on wavelet entropy [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2010, 29(1): 22-28, 34.
侯宏花, 桂志国. 基于小波熵的心电信号去噪处理 [J]. 中国生物医学工程学报, 2010, 29(1): 22-28, 34.
- [14] Daamouche A, Hamami L, Alajlan N, *et al.* A wavelet optimization approach for ECG signal classification [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2012, 7(4): 342-349.
- [15] Sun Z, Chang C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(10): 1354-1361.
- [16] Xu K, Xie S Z. PMD in high bitrate optical fiber communications and its compensation technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2000, 21(1): 1-5.
徐坤, 谢世钟. 高速光纤通信中的偏振模色散及其补偿技术 [J]. 半导体光电, 2000, 21(1): 1-5.