

基于经验模态分解的偏振模色散测量实验研究

潘潘¹, 席丽霞¹, 张晓光¹, 唐先锋¹, 万冬^{1,2}

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北京信息职业技术学院, 北京 100018

摘要 为了消除固定分析仪法测量偏振模色散系统中的噪声, 提高测量精度, 提出了一种基于经验模态分解自适应滤波法的偏振模色散测量方案。该滤波法将信号按照其频谱特征进行多层分解, 获得有限个频率从大到小的本征模态函数, 利用连续均方误差准则进行噪声滤除及信号重构, 有效地消除了噪声对测量结果的影响。实验对比了经验模态分解自适应滤波和维纳滤波2种滤波方案的测量结果, 并与商用偏振模色散测量仪的测量结果进行了比较。结果表明, 对不同种类、长度的光纤, 本方案的测量结果与参考值的误差最大为0.74%, 明显提高了测量结果的精度。

关键词 光通信; 偏振模色散; 经验模态分解; 固定分析仪法

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0106002

Experimental Research on Polarization Mode Dispersion Measurement Based on Empirical Mode Decomposition

Pan Pan¹, Xi Lixia¹, Zhang Xiaoguang¹, Tang Xianfeng¹, Wan Dong^{1,2}

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

²Beijing Information Technology College, Beijing 100018, China

Abstract In order to improve measurement accuracy in the polarization mode dispersion (PMD) measurement system by the fixed analyzer method, the noise in the link should be eliminated. Here, a polarization mode dispersion measurement scheme based on empirical mode decomposition (EMD) adaptive filtering to mitigate noise is proposed. According to signal spectral characteristics, it is decomposed into a finite number of intrinsic mode functions (IMFs), which are arranged by frequency from large to small. The consecutive mean square error (CMSE) criterion is used for noise filtering and signal reconstruction, which effectively eliminates the noise impacting on the measurement results. The experiments compare results based on the EMD adaptive filtering method, Wiener filtering method and commercial instruments. The results show that this scheme is suitable for different types and lengths of fibers, and the maximum relative error between the measured result and the reference value is 0.74%. The measurement accuracy is improved obviously.

Key words optical communications; polarization mode dispersion; empirical mode decomposition; fixed analyzer method

OCIS codes 060.2300; 060.2330; 060.2430

1 引言

偏振模色散(PMD)是光纤的基本属性之一, 它

会引起信号的脉冲展宽, 造成码间干扰, 导致系统误码率升高。随着光纤通信系统向着高速率、大容量、长距离和全光网络方向的发展, 光纤的偏振模色散

收稿日期: 2017-06-15; 收到修改稿日期: 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(61571057, 61527820)

作者简介: 潘潘(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高速光通信光性能监测方面的研究。E-mail: ppan@bupt.edu.cn

导师简介: 席丽霞(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事高速光通信系统方面的研究。

E-mail: xilixia@bupt.edu.cn(通信联系人)

对光通信系统性能的影响越来越严重,精确测量偏振模色散并进行有效补偿的需求也越来越紧迫。

目前,国内外已经研究出了两大类 PMD 测量方法:时域测量和频域测量。时域测量主要包括干涉法^[1-2]和光脉冲延迟法^[3],频域测量主要包括固定分析仪法^[4-7]、琼斯矩阵特征值法^[8-10]和米勒矩阵法^[11-12]。其中,固定分析仪法结构简单,具有测量范围大和测量速度快的优点,且适用于被测光纤链路中含有掺铒光纤放大器的情形。但该方法对链路中产生的噪声敏感,噪声产生的“假极值”会严重影响测量结果的准确度,因此需要找到有效去除噪声的方案以提高 PMD 的测量精度。

本文提出了一种基于经验模态分解(EMD)的自适应滤波方法,用于消除固定分析仪法测量偏振模色散实验方案中的噪声。这种滤波策略完全由测量数据驱动,分解过程中无须知道噪声和有用信号的先验知识,也无须设置基函数,可实现非线性和非平稳信

号的噪声自适应滤波。对测量数据进行处理时,采用该滤波法对信号中的噪声进行滤除,有效消除了噪声产生的“假峰值”对极值个数的影响,明显地提高了利用固定分析仪法测量 PMD 的精度。搭建了实验系统并对不同长度、不同类型的光纤进行了相关验证。

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 的实验系统如图 1 所示,其本质上是普通物理学中的偏振光干涉,与干涉法的时域干涉不同,固定分析仪法是频域干涉。宽带光源发出的光经过起偏器形成线偏振光,再通过偏振控制器(PC)进入待测光纤,然后经过检偏器由光谱分析仪(OSA)显示干涉谱。实验中通过调节偏振控制器实现多种偏振态输入,获得多组 PMD 测量值,对这些值求平均,以降低实验误差对测量结果的影响。

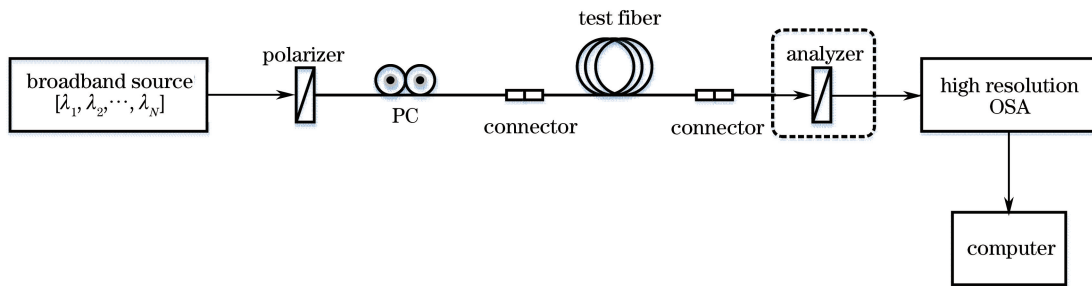


图 1 固定分析仪法测量 PMD 实验系统示意图

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

由于偏振模色散效应的存在,不同频率(波长)的偏振光经光纤传输后产生的相位差不同,经检偏器后可在光谱仪上观察到干涉谱。如果相位差为 2π 的整数倍,则形成干涉极大值,如果相位差是 π 的奇数倍,则形成干涉极小值。

根据图 1 所示的实验装置,分别记录有检偏器和没有检偏器时对应的输出光谱 $P_A(\lambda)$ 和 $P_{TOT}(\lambda)$,得到归一化的 PMD 测量信号 $R(\lambda)$,可表示为

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{TOT}(\lambda)}. \quad (1)$$

经上述处理后得到的 $R(\lambda)$ 如图 2 所示,在一定的波长间隔范围内对 $R(\lambda)$ 曲线上的极值总个数进行统计,进而通过数极值算法得到待测光纤的一阶 PMD 值^[4-5],即

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

式中 κ 为模式耦合因子, $\kappa=1.00$ 时不存在模式耦合, $\kappa=0.805$ 时存在模式耦合, λ_{start} 和 λ_{stop} 分别为测量波长范围的起始波长和结束波长, c 为真空中的光速, N_e 为该波长范围内极值点的总数目。

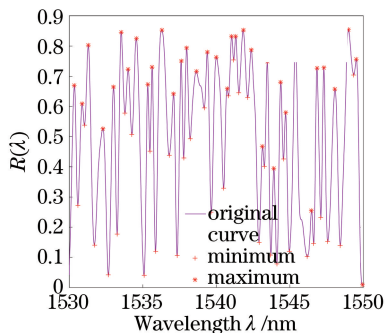


图 2 PMD 测量信号 $R(\lambda)$ 的示意图

Fig. 2 Schematic of PMD measurement signal $R(\lambda)$

2.2 EMD 法去噪声原理及分析

由上述测量过程可知,在用数极值法对数据进

行处理时,最终测量结果的精度与 PMD 测量信号 $R(\lambda)$ 的极值总数目直接相关。在测量过程中,噪声对系统的影响是不可避免的,噪声的存在导致 PMD 测量信号的极值附近出现较多毛刺,进而产生许多“假峰值”。由噪声产生的“假峰值”使得极值个数严重偏离真实值^[5-6]。因此,必须采用一定的方法对噪声进行滤除,以便得到准确的测量结果。为便于表述,首先将 PMD 测量信号 $R(\lambda)$ 中的波长集合 $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N\}$ 一一对应于索引值 m 的集合 $\{m_1, m_2, m_3, \dots, m_N\}$, 可记为: $R(\lambda) \rightarrow R(m)$, N 为测量数据的总个数,其大小由宽带光源的波长范围和光谱仪的分辨率决定。

目前,常用的信号去噪声方法有维纳滤波法^[13-14], 该方法是利用广义平稳随机过程的相关特性和频谱特性对混有噪声的信号进行滤波,其流程如下:对于含有噪声的 PMD 测量信号 $R(m) = x(m) + \omega(m)$, 设计 1 个 M 阶的有限冲激响应滤波器,通过求解维纳-霍夫方程获得滤波器最佳加权系数,实现信号的最佳线性估计,其中 $x(m)$ 是真实信号, $\omega(m)$ 是噪声。本文中 $20 \leq M \leq 30$, 通过滤波器的输出信号

为 $Y(m) = \sum_{k=0}^M h(k)R(m-k)$, 其中 $h(k)$ 为滤波器的加权系数。去噪的目标是使线性系统的输出 $Y(m)$ 尽可能地逼近真实信号 $x(m)$, 二者之间的误差函数为 $e(m) = x(m) - Y(m)$, 则均方误差的表达式为

$$E[e^2(m)] = E\left\{ \left[x(m) - \sum_{k=0}^M h(k)R(m-k) \right]^2 \right\}.$$

维纳滤波的要求为最小化均方误差,对上式微分求解得到维纳-霍夫方程 $\sum_{k=0}^M \varphi_{rr}(m-k)h(k) = \varphi_{rs}$, $0 \leq m \leq M$, 其中 φ_{rr} 表示测量信号的自相关序列, φ_{rs} 是测量信号和真实信号的互相关序列,通过求解维纳-霍夫方程获得滤波器最佳加权系数,进而实现滤波。利用上述方法获得的信号,将保证最大限度地去掉噪声 $\omega(m)$ 所引起的信号失真。但该方法需要设置合理的滤波器阶数,阶数越大滤波过程越复杂,此外还需预先获得噪声和有用信号的先验知识,而这些因素往往依赖于外界的输入信号和干扰情况,一般较难获得,因此缺乏自适应性,使用方面也受限制。

根据大多数被噪声污染的信号的特性可知,被噪声污染的 PMD 测量信号的能量主要集中在低频段,越高频段信号含有的能量就越少,噪声含有的能量越多。此外,根据数极值算法的特性,只须有效地恢复出 PMD 测量信号的极值情况,无须准确地恢复出信

号的幅值、相位等信息。因此,利用频率的大小找到信号主导模态和噪声主导模态的分界点,实现信噪分离,进而实现 PMD 测量信号极值的准确恢复。

本文提出的基于 EMD 自适应滤波法^[15-19], 首先根据 PMD 测量信号的频谱特征对其进行多层自适应分解,获得有限个频率从大到小且来源于测量信号自身的本征模态函数(IMF),接着利用连续均方误差(CMSE)准则获得 PMD 测量信号中信号与噪声的分界点 j_{\min} , 然后对信号进行噪声滤除及信号重构^[17-19], 最后在重构信号的基础上利用数极值算法进行计算,进而得到 PMD 的测量值。

图 3 给出了将 $R(m)$ 信号进行 EMD 自适应分解及滤波重构的实现流程,具体描述如下。

1) 判断 $R(m)$ 信号是否满足 IMF 的 2 个条件^[18]: 在整个信号上,极值点的个数和过零点的个数相差不大于 1; 在任一点处,由极大值构成的上包络和极小值构成的下包络的均值为 0。若不满足,找出 $R(m)$ 的所有极大值和极小值点,利用三次样条函数分别拟合出极大值和极小值的包络,分别记为 $E_{\text{up}}(m)$ 和 $E_{\text{low}}(m)$, 计算得到临时余量:

$$R_t(m) = R(m) - \frac{1}{2}[E_{\text{up}}(m) + E_{\text{low}}(m)]. \quad (3)$$

2) 计算

$$S = \frac{\sum_{m=1}^N [R(m) - R_t(m)]^2}{\sum_{m=1}^N R^2(m)}, \quad (4)$$

判断 S 是否满足分解停止准则^[18-19]: $S < \epsilon$ 。理想情况下 ϵ 为 0, 本文中 $0.2 \leq \epsilon \leq 0.3$ 。如果不满足分解停止准则,则重复上述步骤直至完成一次分解;若满足分解停止准则或者 $R(m)$ 信号满足 IMF 的条件,则获得第 j 阶的分解信号 $F_j(m)$ 。其后,计算得到剩余信号:

$$R'(m) = R(m) - F_j(m). \quad (5)$$

3) 统计该剩余信号的极值个数 L_N 。若 $L_N \geq 2$ 则继续进行分解,得到下一个 IMF 信号;否则分解过程结束。整个分解过程获得 J 个 IMF 信号和 1 个余量信号 $R_c(m)$, 即得到 PMD 测量信号 $R(m)$ 的分解式:

$$R(m) = \sum_{j=1}^J F_j(m) + R_c(m). \quad (6)$$

4) 采用连续均方误差准则(CMSE)^[18-19] 对上述由 EMD 自适应分解获得的 PMD 测量信号进行重构及滤波处理。

$$P(R_j, R_{j+1}) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [R_j(m_i) - R_{j+1}(m_i)]^2 \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F_j(m_i)]^2, \quad j=1, 2, 3, \dots, J, \quad (7)$$

式中 $P(R_j, R_{j+1})$ 表示第 j 个分解信号的 CMSE 值, N 是测量数据的总个数, J 是 EMD 分解为 IMF 的总个数。该方法的关键之处是找到使(7)式取得

最小值的分界点 j_{\min} 。分界点 j_{\min} 可表示为

$$j_{\min} = \arg \min_{1 \leq k \leq J-1} [P(R_j, R_{j+1})], \quad (8)$$

利用分界点 j_{\min} 之后的 IMF 对信号进行恢复与重建, 则滤除噪声后的 PMD 重建信号:

$$R_i(m) = \sum_{j=j_{\min}}^J F_j(m) + R_c(m). \quad (9)$$

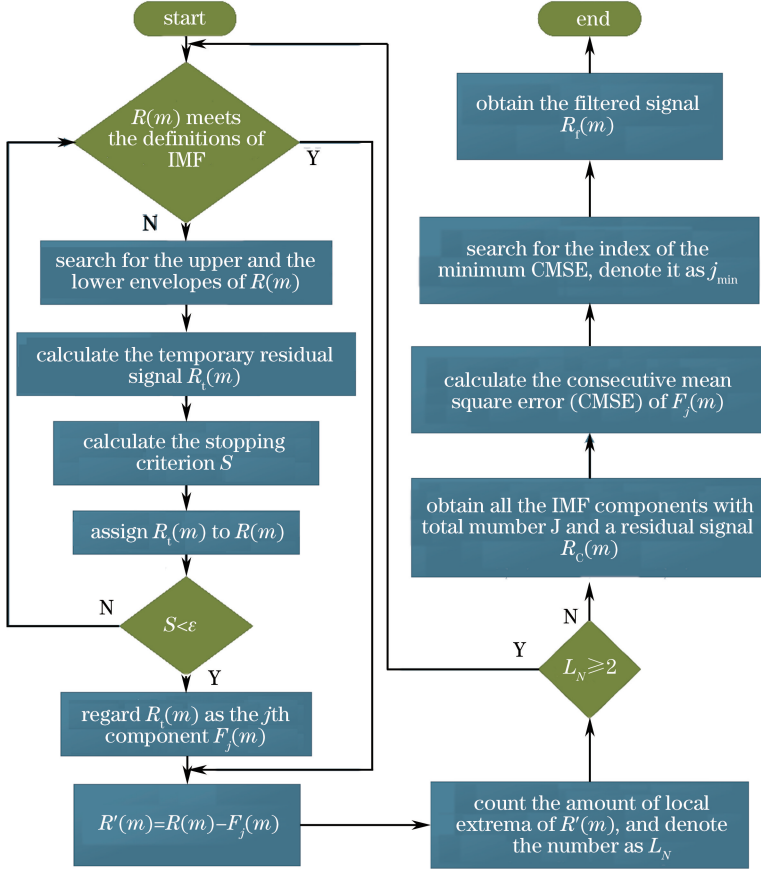


图 3 PMD 测量信号进行 EMD 自适应分解及滤波的流程图

Fig. 3 Flow chart of PMD measurement signal for EMD adaptive decomposition and filtering

为了验证 EMD 自适应滤波法测量结果的可靠性与准确性, 将同组数据用维纳滤波法进行了去噪声处理, 1520~1620 nm 波段的处理结果如图 4 所示。其中, 图 4(a)是用维纳滤波法去噪声后与原信号的比较图, 该方法一定程度消除了噪声, 但不能较好地恢复出信号的幅度, 对极值恢复也不准确; 图 4(b)是用 EMD 自适应滤波法去除噪声后与原信号的比较图, 该方法有效地去除了噪声的影响, 较好地恢复了信号的幅度和极值。

3 有效性验证

本实验采用宽带光源, 波长范围为 1520~1620 nm, 光谱仪的分辨率为 0.01 nm。分别测量了

色散补偿光纤(DCF)、色散位移光纤(DSF)、单模光纤(SMF)和保偏光纤(PMF)的偏振模色散值。调节偏振控制器使 10 种随机偏振态逐次输入待测光纤, 利用 OSA 记录每种偏振态下的数据用于后续的离线滤波处理, 对获得的 10 组 PMD 值取平均值作为滤波处理的最终测量值。同时利用商用 PMD 测试仪(型号为 FTB-5500B)对同种光纤的 PMD 进行了同步测量, 对获得的 10 组 PMD 值取平均值作为评估滤波处理结果的最终参考值。此外, 将同组数据用维纳滤波法作去噪声处理, 并将 EMD 自适应滤波法去噪声测量结果、维纳滤波去噪声测量结果与商用仪器的测量结果进行了比较, 绘制了每种光纤的 3 种测量结果曲线, 如图 5 所示。此外, 求得

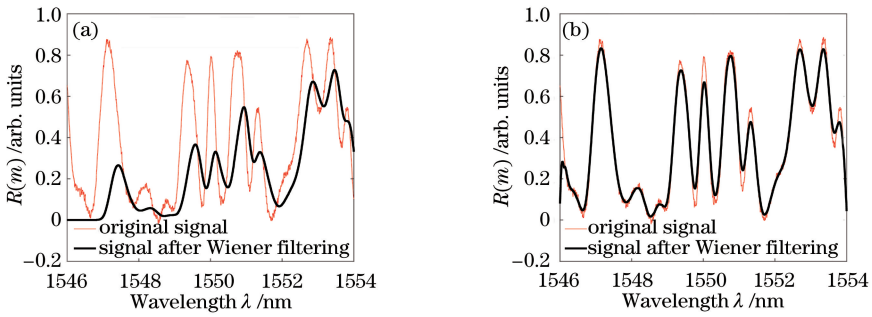


图 4 两种去噪声方法结果比较。(a)维纳滤波法;(b) EMD 自适应滤波法

Fig. 4 Comparison of two methods for noise removal. (a) Wiener filtering method;
(b) EMD adaptive filtering method

图 5 中每种类型光纤在不同偏振态下 3 种测量结果的标准差,如表 1 所示。从表 1 可以得知,改变偏振

态对测量值的影响符合实际情况,验证了测量结果的可靠性。

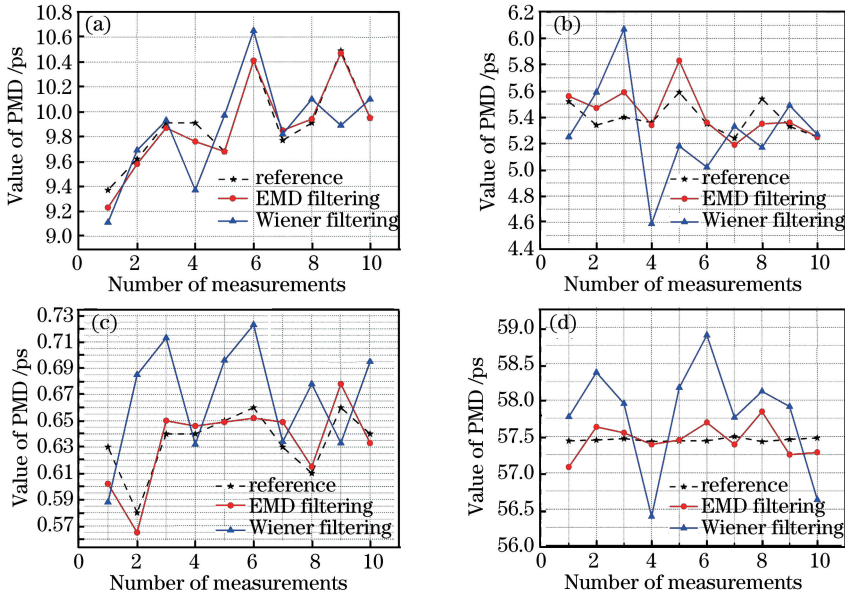


图 5 4 种光纤测量结果曲线。(a) 6.3 km DCF;(b) 38.8 km DSF;(c) 50.4 km SMF;(d) 50 m PMF

Fig. 5 Curves of four fiber measurement results. (a) 6.3 km DCF; (b) 38.8 km DSF;
(c) 50.4 km SMF; (d) 50 m PMF

图 5(a)是长度为 6.3 km 的 DCF 的 3 种测量方式结果对比,从中可以看出,利用 EMD 滤波法的结果与参考值的最大差值是 0.15 ps,优于维纳滤波法的最大误差值 0.62 ps;图 5(b)是长度为 38.8 km 的 DSF 的 3 种测量方式结果对比,可发现使用 EMD 滤波法的结果与参考值的最大差值为 0.24 ps,同样优于维纳滤波法最大误差值 0.77 ps;图 5(c)是长度为 50.4 km 的 SMF 的 3 种测量方法结果对比,可以看出采用 EMD 滤波法的结果与参考值的最大误差为 0.02 ps,优于维纳滤波法的最大误差 0.11 ps;图 5(d)是长度为 50 m 的 PMF 的 3 种测量方法结果对比,可以看出采用 EMD 滤波法的结果与参考值的最大误

差为 0.37 ps,优于维纳滤波法的最大误差 1.46 ps。

为了进一步验证滤波结果的准确性,还具体比较了 2 种滤波法去噪声测量结果与商用仪器测量结果的误差,如表 2 所示。从表 2 中数据可知,对于长度为 6.3 km 的 DCF,EMD 滤波法的 PMD 测量误差为 0.20%,优于维纳滤波法的 0.40%;对于长度为 38.8 km 的 DSF,EMD 滤波法的 PMD 测量误差为 0.74%,优于维纳滤波法的 1.67%;对于长度为 50.4 km 的 SMF,EMD 滤波法的 PMD 测量误差为 0.48%,远优于维纳滤波法的 6.03%;对于长度为 50 m 的 PMF,EMD 滤波法的 PMD 测量误差为 0.07%,优于维纳滤波法的 0.59%。

表 1 不同偏振态下 3 种测量结果的标准差

Table 1 Standard deviations of the three measured results under different polarization states

Fiber type	DCF	DSF	SMF	PMF
Fiber length /km	6.30	38.80	50.40	0.05
Standard deviation of the results of reference value /ps	0.34	0.12	0.02	0.02
Standard deviation of the results of EMD filtering /ps	0.37	0.19	0.03	0.22
Standard deviation of the results of Wiener filtering /ps	0.43	0.38	0.04	0.76

表 2 2 种滤波方法测量结果与商用仪器测量结果(参考值)的比较

Table 2 Comparison of the results of the two filtering methods with the measured results of the commercial instrument (reference value)

Fiber type	DCF	DSF	SMF	PMF
Fiber length /km	6.30	38.80	50.40	0.05
Reference value /ps	9.90	5.39	0.63	57.46
Average of the results of EMD filtering /ps	9.880	5.430	0.633	57.500
Average of the results of Wiener filtering /ps	9.860	5.300	0.668	57.800
Relative error of measurement result between EMD filtering and reference value /%	0.20	0.74	0.48	0.07
Relative error of measurement result between Wiener filtering and reference value /%	0.40	1.67	6.03	0.59

4 结 论

在传统固定分析仪法的基础上,采用基于经验模态分解的自适应滤波法对实验得到的 PMD 测量信号进行去噪声处理与信号重建,消除了噪声对极值的影响,实现了偏振模色散的精确测量。通过测量 DCF、DSF、SMF 和 PMF 这 4 种类型的光纤,并将 EMD 自适应滤波结果同维纳滤波结果、商用 PMD 测量仪的结果进行了比较分析,实验结果表明:利用 EMD 自适应滤波法的测量误差小于维纳滤波法的测量误差,测量结果的稳定性和可靠性优于维纳滤波法;利用 EMD 自适应滤波法去噪声结果与参考值的最大误差为 0.74%,能够较好地测得光纤的 PMD 值。因此,基于经验模态分解的自适应滤波法能够更好地消除由噪声产生的“假峰值”对极值数目的影响,准确恢复出不受噪声干扰的 PMD 测量信号,明显提高了测量精度。适用于当前及未来高速光纤通信系统中采用固定分析仪法进行偏振模色散测量的场景。

参 考 文 献

[1] Artiglia M, Caponi R, Potenza M, *et al.* Interferometer measurement of polarization-mode dispersion statistics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(8): 1374-1381.

[2] 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.

[3] Poole C D, Giles C R. Polarization-dependent pulse compression and broadening due to polarization dispersion in dispersion-shifted fiber [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(2): 155-157.

[4] Poole C D, Favin D L. Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(6): 917-929.

[5] Williams P A, Wang C M. Corrections to fixed analyzer measurements of polarization mode dispersion [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(4): 534-541.

[6] Jaworski M, Borzycki K. Accurate polarization mode dispersion measurements using fixed analyzer method with averaging[C]. *IEEE International Conference on Transparent Optical Networks*, 2006: 9429433.

[7] Hui R, O' Sullivan M. Fiber optic measurement techniques[M]. Burlington: Academic Press, 2009: 409-438.

[8] Zheng Y, Liu Y M, Yang B J, *et al.* Study of the statistical characteristics of second-order polarization mode dispersion by Jones transfer matrix method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(1): 45-48. 郑远, 刘玉敏, 杨伯君, 等. 用琼斯传输矩阵法研究二阶偏振模色散的统计特性[J]. *中国激光*, 2003, 30(1): 45-48.

[9] Heffner B L. Accurate, automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones matrix eigenanalysis[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(7): 814-817.

[10] Do T, Dong H, Shum P. Measurement of the complex polarization mode dispersion vector using Jones matrix analysis[J]. *Applied Optics*, 2007, 46

- (6): 916-921.
- [11] Dong H, 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.
- [12] Jiang J, Liu T, Li M, *et al.* High-speed polarization mode dispersion measurement using digital polarization-state generators and Mueller matrix method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(7): 639-641.
- [13] Li D B, Li G P, Teng G W, *et al.* A new method of adaptive Wiener filtering [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2012, 18(6): 555-560.
李东兵, 李国平, 滕国伟, 等. 一种新的自适应维纳滤波方法[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2012, 18(6): 555-560.
- [14] Zhang F, Ma S X, Shi X F. Research on denoising algorithm of vibration signal based on circular Wiener filtering[J]. *Computer Technology & Development*, 2014, 24(6): 49-51.
张峰, 马舒啸, 石现峰. 基于循环维纳滤波的振动信号去噪算法研究[J]. *计算机技术与发展*, 2014, 24(6): 49-51.
- [15] Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [16] Cui B B, Chen X Y, Song R. Application of EMD threshold filtering for fiber optical gyro drift signal de-noising[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0207001.
崔冰波, 陈熙源, 宋锐. EMD 阈值滤波在光纤陀螺漂移信号去噪中的应用[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0207001.
- [17] Boudraa A O, Cexus J C, Saidi Z. EMD-based signal noise reduction [J]. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2007, 1(2): 321-324.
- [18] Boudraa A O, Cexus J C. EMD-based signal filtering [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2007, 56(6): 2196-2202.
- [19] Xu H, Feng Y, Yuan J, *et al.* Intelligent bandwidth-estimation technique for orthogonal frequency division multiplexing-based elastic optical networking [J]. *Journal of Optical Communications & Networking*, 2016, 8(12): 938-946.