

文章编号 1004-924X(2024)17-2676-10

激光准直测量中的空气随机扰动影响抑制

刁 宽, 刘晓军*, 赵海煜

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 鉴于准直光束在空气中传播, 受空气随机扰动影响, 如温度、湿度和压强的随机变化, 激光直线测量基准存在随机抖动, 从而影响激光准直测量的稳定性和准确性。从激光准直信号滤波的角度出发, 提出了结合经验模态分解(EMD)-最小二乘(LS)拟合的空气随机扰动影响抑制方法; 构建了激光准直信号分解、重构和校正的信号处理方案, 以滤除空气随机扰动引起的干扰信号; 开展了所提出方法在不同条件下对激光直线基准的空气扰动影响抑制实验, 并比较不同方法对激光准直信号的处理效果。实验结果表明, 所提方法对激光漂移补偿后的激光准直信号处理后, 其在水平方向和竖直方向的波动标准偏差分别为 $0.01\ \mu\text{m}$ 和 $0.02\ \mu\text{m}$, 有效解决了激光准直测量中的空气随机扰动对直线测量基准稳定性影响问题。

关键词: 激光准直; 直线基准; 空气扰动; 经验模态分解

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243217.2676

Suppression of effects of air random disturbances in laser collimation measurements

DIAO Kuan, LIU Xiaojun*, ZHAO Haiyu

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China)

Corresponding author, E-mail: mexjl@hust.edu.cn

Abstract: The highly directional laser collimated beam is extensively used as a linear measurement reference in precision measurement. However, random air disturbances like fluctuations in temperature, humidity, and atmospheric pressure can induce jitter, compromising stability and accuracy. This paper introduces a method to counteract these disturbances by using Empirical Mode Decomposition (EMD) combined with Least Squares (LS) fitting for laser collimation signal filtering. The developed signal processing scheme decomposes, reconstructs, and corrects laser signals to remove such interferences. Experiments under various disturbance conditions show that the method proposed results in a standard deviation of fluctuations of $0.01\ \mu\text{m}$ in the horizontal direction and $0.02\ \mu\text{m}$ in the vertical direction after processing the laser alignment signal following laser drift compensation, significantly improves the stability of laser collimation measurements affected by atmospheric randomness.

Key words: laser collimation; linear datum; air disturbances; empirical mode decomposition

收稿日期: 2024-03-11; 修订日期: 2024-04-11.

基金项目: 国家科学挑战专题资助项目 (No. 2018006-0102-02)

1 引 言

激光准直光束因具有良好的指向性和准直特性,作为直线测量基准,广泛用于直线度、平面度等几何误差测量^[1-3]。然而,在实际应用中,由于传播路径中空气随机扰动,直线测量基准发生随机的抖动^[4-6],阻碍了激光准直光束作为直线基准的应用。

针对空气随机扰动对激光直线测量基准的影响,国内外学者提出了系列补偿和抑制方法,如光路屏蔽法^[7-8]、双光束法^[9]、压电驱动补偿法^[10]和数字滤波法^[11-18]等。光路屏蔽方法是通过采用屏蔽管对传播光路进行保护,以隔绝环境对激光光束的干扰。Li^[7]和 Liu^[8]等提出了一种利用屏蔽管将测量光路与外界进行隔离,通过创造稳定的激光光束传播环境,减少空气扰动的影响。然而,这种方法对于一些固定场景的测量具良好的效果,但不适用于现场的移动测量。Yang 等^[9]提出了一种双光束差动激光直线基准校正方法,通过设计两束靠近的光路,即测量光路和补偿光路,从而实现了对测量光路的补偿。其中,测量光路用于测量,补偿光路用于实时监测由于空气随机扰动引起的激光直线基准抖动。然而,尽管测量光路和补偿光路非常接近,但仍存在一定的误差,因此其补偿精度不高。为解决该问题,谭久彬等^[10]提出了采用共光路的压电驱动控制补偿,消除了空气扰动对激光准直直线基准稳定性的影响。但是该方法对压电控制的要求较高,需要快速地跟踪响应速度和精度,否则会影响激光漂移补偿效果,因此控制难度和装置成本较高。近年来,随着计算机技术的发展和进步,神经网络方法逐渐应用于激光准直信号的分类,该方法试图从复杂的激光准直信号中提取出空气干扰成分,以便进行精准剔除或补偿。Chang 等^[11]提出了一种循环神经网络数据驱动的激光准直信号干扰分类方法,以获取空气扰动对激光准线基准的干扰信号,然后,采用压电驱动控制转向镜实时补偿调整准直光路,实现激光直线基准的稳定控制。Hu 等^[12]提出了一种基于卷积神经网络的空气扰动信号干扰分类。尽管神经网络方法可以在不增加光学结构复杂性的情况下显著补偿空气扰动造成的激光直线基准抖动误

差,但是基于神经网络的回归拟合方法往往依赖于大量实验,补偿模型的训练耗时较长。为克服上述问题^[11-12],Nan 等^[13]分析了环境温度从 20 ℃至 30 ℃变化对激光直线基准稳定性的影响,揭示了激光直线基准在各温度节点的抖动是随机且符合正态分布的规律,提出了一种结合多项式拟合和卡尔曼滤波方法,对准直光束进行拟合校正以获取稳定的直线基准。Wang 等^[14]采用 Kalman 滤波器对激光准直测量信号中由空气扰动造成的干扰信号进行滤除。该方法通过建立状态方程及激光跟踪测量方程,再结合卡尔曼滤波器对激光准直信号进行滤波处理,能够有效抑制空气扰动对测量系统稳定性的影响。但是,空气随机扰动引起的干扰信号表现为随机、非平稳且非周期,因此,状态空间模型的确定具有一定的难度。Zhang^[15]和李安结等^[16]提出一种基于均值滤波的准直光束随机抖动抑制方法,从信号处理的角度,采用均值滤波可以有效减小中高频噪声的影响,而对于空气扰动产生以低频为主的干扰信号,其处理效果不佳。

综上所述,基于信号滤波思想,采用数字滤波的方法对激光准直信号进行滤除或抑制,具有高效便捷和低成本等优势。然而,由于空气随机扰动情况复杂(随机、非平稳且非周期),探测器获取的激光准直信号成分较为复杂,单一的滤波方法对准直光束抖动的抑制作用十分有限。因此,如何基于激光准直信号特点进行有效的空气随机扰动影响抑制,是提高直线基准的稳定性和准确性亟待解决的问题。

本文提出了一种结合经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)与最小二乘(Least Squares, LS)拟合的空气随机扰动影响抑制方法。该方法具有自适应分解的特性,无需预先了解信号特点,分解过程中不需要指定固定的基函数和窗函数,适用于分析和表示非周期和非平稳的激光准直信号。该方法可将信号分解成多个具有不同频率和尺度的固有模态函数成分,对激光准直信号进行解析,以捕捉原始激光准直信号中不同成分(频率)的信号;然后,计算各固有模态成分与原始信号的相关性,并将第一个局部极小值作为信号重构的分界点进行信号重构,最后进行最小二乘拟合校正,从而有效抑制空气

随机扰动对激光准直信号的影响,提高直线测量基准的稳定性。

2 原 理

理想情况下,激光准直光束在真空中传播,光电探测器获取的激光准直信号为 0 Hz 的直流信号。然而,在实际应用中,激光准直光束在空气中传播,受空气随机扰动的影响,激光直线测量基准存在随机抖动。从探测器所获取的激光准直信号角度来看,具体体现为激光准直信号的随机、非周期且非平稳的波动。因此,本文结合经验模态分解和最小二乘方法对准直信号进行数字滤波处理,以抑制空气扰动对直线测量基准的影响,提高其稳定性。该方法的信号处理原理如图 1 所示,EMD-LS 算法主要分为激光准直信号分解、重构和拟合。

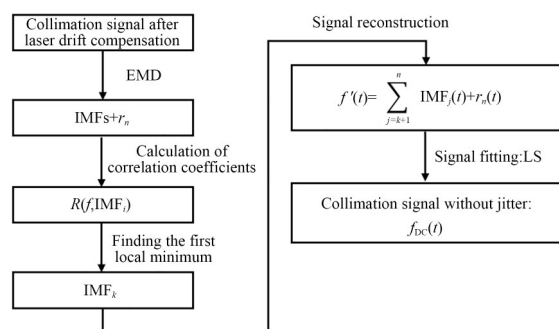


图 1 EMD-LS 方法信号处理原理

Fig. 1 Schematic diagram of signal processing with EMD-LS method

首先,将激光漂移补偿后的准直信号通过 EMD 分解为一组固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMFs)和一个残余项(r_n)。然后,计算每一个 IMF 与原始信号的相关系数,求出其局部极小值作为信号的分界线,并对信号进行重构。最后,利用最小二乘对重构信号进行拟合,即可获得准确稳定的激光准直信号。

2.1 激光准直信号分解

EMD 是一种用于分析和表示非平稳信号的非线性技术。IMF 是一种瞬时频率具有物理意义的序列,其满足条件:(1)序列在时间轴上过零点和极值点的个数相同,或者最多相差一个;(2)序列的局部关于横轴对称,即由极大和极小值点

确定的上下包络线均值为零。

对于给定的激光准直信号,分别求取其极大值 $e^+(t)$ 和极小值 $e^-(t)$,并采用三次样条插值拟合分别对极大值和极小值进行曲线拟合,获得上下包络线并求其均值,得到:

$$m(t) = \frac{e^+(t) + e^-(t)}{2}. \quad (1)$$

在求出上下包络线的均值后,进一步求原始信号与该均值的差值,计算公式如下:

$$h(t) = f(t) - m(t). \quad (2)$$

根据 IMF 的判定准则,如果满足条件,则完成 EMD;否则,继续重复上述步骤。

EMD 对激光准直信号分解时,IMF 并非理想定义。为了 IMF 在幅值及频率上具有物理意义,需限制 IMF 的迭代次数,限制标准如下:

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{e(t)^2}{r(t)^2} = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{h_{k-1}^2(t)} \right] < \epsilon, \quad (3)$$

式中: T 为信号时间长度, ϵ 一般取值 0.2~0.3。当 SD 小于 ϵ 时,停止筛选^[19]。

基于上述准则分离出来的第一个 IMF 分量,利用原始信号减去其第一个 IMF 分量,即得到残余分量,记为:

$$r_1(t) = f(t) - h_1(t). \quad (4)$$

将残余分量作为新的信号,循环上述计算方法和步骤进行分离和判断,得到系列 IMFs,直到最后残余分量 $r_n(t)$ 呈现出常数项或者单调函数,即可停止计算。

最终,信号分解为从高频到低频有限个 IMF 分量以及趋势项之和,即:

$$f(t) = \sum_{j=1}^n imf_j(t) + r_n(t). \quad (5)$$

2.2 信号重构和 LS 拟合校正

根据 EMD 的激光准直信号分解原理可知,对于一个随机且非平稳的激光准直信号经过 EMD 处理后,会得到系列的 IMF 分量和 r_n 。理论上, r_n 为零频信号,即为有效的激光准直信号。然而,由于 IMF 分量存在模态混合,即部分有效的激光准直信号会混叠在 IMF 的某些分量中。直接将 r_n 作为准直信号,其测量精度将会受到影响。因此,为了准确获取噪声分量和有效信号分量的分界点,选择相关系数作为相关性判断的基

础,通过比较除趋势项分量外的 IMF 分量与原始信号之间的相关性,在以噪声为主和以有效信号为主的两个 IMF 分量处会出现最小极值点。相关系数的计算公式如下:

$$R(f, imf_j) = \frac{\sum_{g=1}^N [f(t_g) - \overline{f(t)}][imf_j(t_g) - \overline{imf_j(t)}]}{\sqrt{\sum_{g=1}^N [f(t_g) - \overline{f(t)}]^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{n-1} [imf_j(t_g) - \overline{imf_j(t)}]^2}}, \quad (6)$$

式中: $\overline{f(t)} = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N f(t_g)$, $\overline{imf_j(t)} = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N imf_j(t_g)$, N 为信号采样长度。

根据式(6),假设 R 的第一个极小值对应于 IMF_k ,则 IMF_k 定义为高频分量和低频分量的分界点。高频分量被认为是噪声,采用硬阈值处理方法,即 0 到 k 的 IMF 分量设为零。对 IMF_{k+1} 至 IMF_n 分量进行信号的重构,得到:

$$f'(t) = \sum_{j=k+1}^n \sum_{g=1}^N (imf_j(t_g) + r_n(t_g)). \quad (7)$$

理想情况下,激光准直信号为 0 Hz 的直流信号。理论上重构后的信号即为所求的激光准直信号,但由于 EMD 方法是根据信号局部的极值点来确定固有模态函数,并且在信号的两个极值点之间进行线性插值。随机噪声使得局部极值点可能受到噪声的干扰,导致分解重构后的信号在局部区域内出现波动。因此,为了更准确地获取激光准直信号,需要进行基线校正。这里通过最小二乘法来拟合激光准直信号,得到:

$$f_{DC}(t) = \frac{\sum_{g=1}^N f'(t_g) \sum_{g=1}^N t_g^2 - \sum_{g=1}^N f'(t_g) t_g \sum_{g=1}^N t_g}{N \sum_{g=1}^N t_g^2 - (\sum_{g=1}^N t_g)^2} + \frac{N \sum_{g=1}^N f'(t_g) t_g - \sum_{j=1}^N f'(t_g) \sum_{g=1}^N t_g}{N \sum_{g=1}^N t_g^2 - (\sum_{g=1}^N t_g)^2} t_g. \quad (8)$$

3 实 验

激光器工作时自身温度变化引起的激光谐

振腔变形会导致准直光束平行漂移和角度漂移,因此在激光准直信号滤波处理前,需要消除激光热漂移的影响。为此,设计了基于四象限探测器的激光准直信号获取光路,如图 2 所示。半导体激光器出射的准直光束,在空气中向前传播。准直光束经过分光棱镜 BS1 和 BS2,被分成三束准直光束,分别被不同的探测器接收。其中,四象限探测器 QD1 和位置敏感探测器 PSD 用于测量由于温度变化引起的激光谐振腔变形所导致的准直光束平行漂移和角度漂移。然后基于 QD1 和 PSD 的测量结果,对 QD2 进行补偿,以消除激光热漂移的影响。最后,再采用所提方法对 QD2 的激光准直信号进行信号滤波处理。实线表示在无激光热漂移情况下,准直光束沿直线传播,光斑中心与探测器中心重合。当受热漂移影响,准直光束变为虚线,光斑中心与探测器中心发生相对偏移。探测器 QD2 获取的准直信号包含激光热漂移,可通过探测器 QD1 和 PSD 的测量结果进行补偿修正。故补偿后探测器 QD2 测量的准直信号可表示为:

$$\begin{cases} x = x^{QD2} - l_1 \frac{x^{PSD}}{f} - \left(x^{QD1} - l_2 \frac{x^{PSD}}{f} \right) \\ y = y^{QD2} - l_1 \frac{y^{PSD}}{f} - \left(y^{QD1} - l_2 \frac{y^{PSD}}{f} \right) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: l_1 为激光从准直器出发传播至探测器 QD2 的光程, l_2 为激光从准直器出发传播至探测器 QD1 的光程,在方案设计时具体给出; x, y 分别表示处理后的激光光斑中心与 QD2 中心在水平方向、竖直方向的相对距离; f 为凸透镜焦距; x^{QD1}, y^{QD1} 分别表示探测器 QD1 在水平和竖直方向的准直信号; x^{QD2}, y^{QD2} 分别表示探测器 QD2 在水平和竖直方向的准直信号; x^{PSD}, y^{PSD} 分别表示探测器 PSD 在水平和竖直方向的准直信号。

实验装置如图 2(b) 所示,主要包括半导体激光器((KLS1550, Thorlabs, USA),光纤准直器((F280FC-B, Thorlabs, USA),四象限探测器(PDQ80A, Thorlabs, USA)和位置探测器(PDP90A, Thorlabs, USA)。固定端和测量端的安装距离为 300 mm。实验环境为:温度 $T = (20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 压强 $P = 103.5 \text{ kPa} \pm 5 \text{ Pa}$, 湿度 $F = 50\%$ 。实验开始时,调整光路使激光光斑中心与探测器中心重合。信号采样频率设置为 10

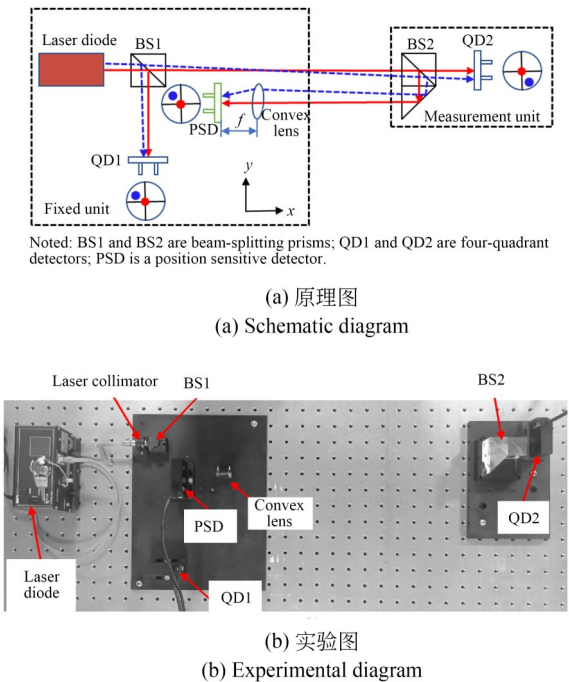


图2 空气环境随机扰动下的激光直线基准测试实验
Fig.2 Laser linear reference test experiment under random disturbance of air environment

Hz,采样时间设置为20 min,连续同步采样,测量结果如图3所示。从图3可以看出,在未进行激光漂移补偿时,对于测量端上的QD2激光准直信

号,随着测量时间的增加,无论是在水平方向还是在垂直方向,激光光束都会沿着固定的方向漂移;在经过补偿后,激光漂移得到消除。

在进行激光漂移补偿后,针对空气随机扰动对激光准直信号的影响,采用EMD-LS法对补偿后的激光准直信号进行处理。首先,利用EMD对准直信号进行分解和傅里叶变换(FFT)分析,结果如图4所示。

补偿后的激光准直信号被分解成系列的IMF和 r_n 分量。IMF1分量以全频段的随机噪声为主, r_n 分量为0 Hz的信号。理论上,激光准直信号应为0 Hz的直流分量,故 r_n 代表着所期望的有效激光准直信号。但EMD分解时,由于算法本身的局限性,IMF分量存在模态混叠现象,即有效的激光准直信号可能会混合在部分的IMF分量中。因此,为了准确地获得激光准直信号,采用式(6)计算其噪声信号和有效信号的分界点。对于空气扰动所引起的噪声信号,则采用硬阈值方法进行处理,阈值设置为0。对于有效信号,则利用式(7)进行信号重构,重构后的信号如图5所示。由图5的重构结果可知,信号仍存在一定的波动,该现象主要由于EMD方法本身存在的局限性所导致。因此,需要进一步利用式

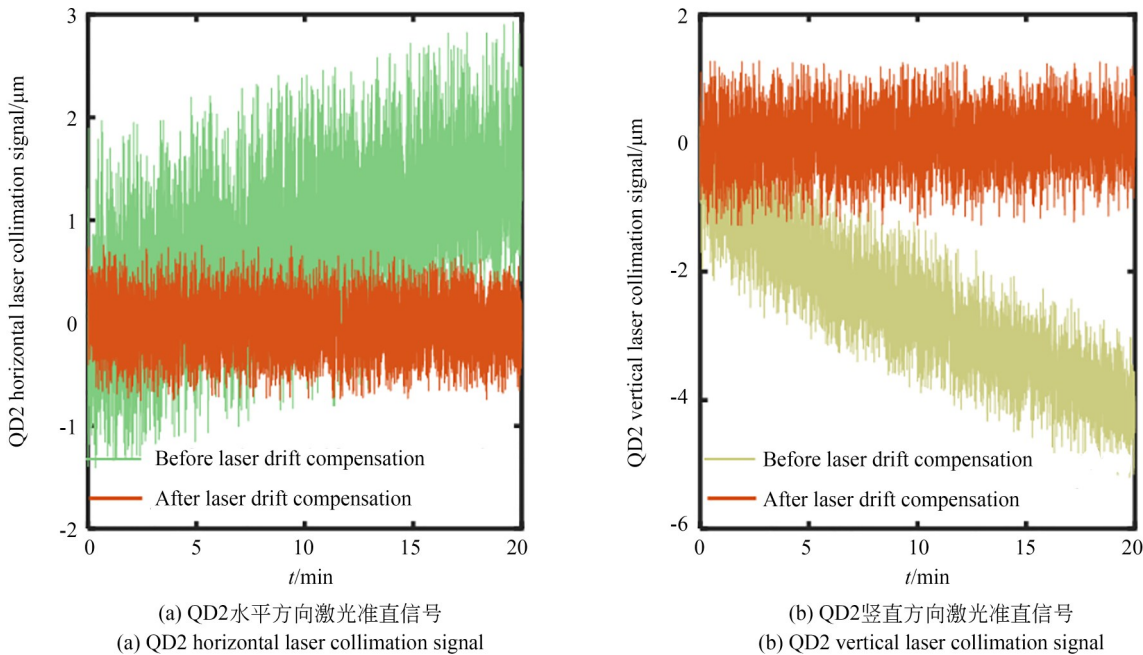
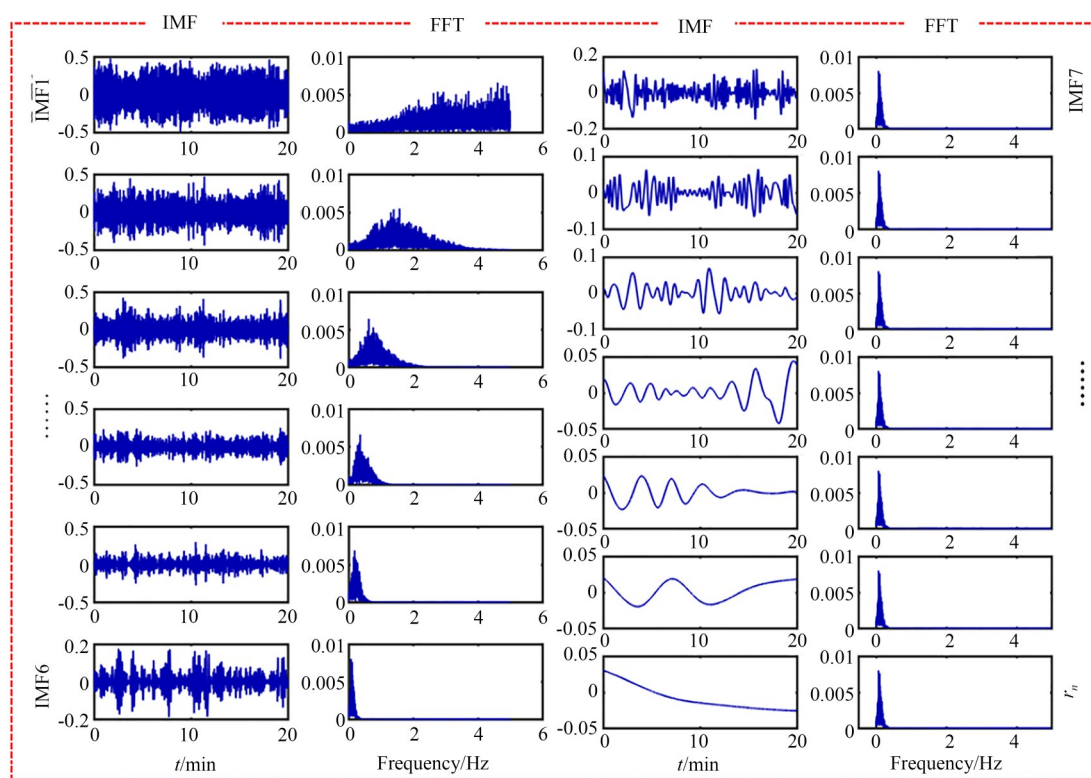
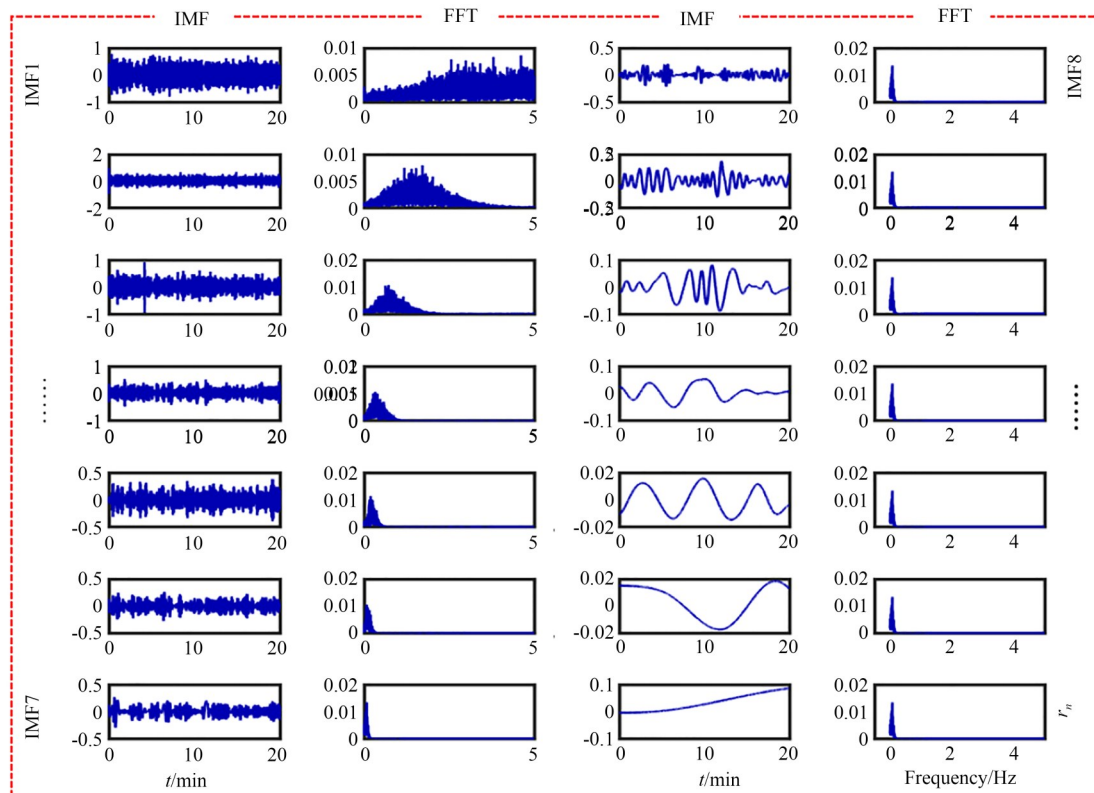


图3 激光光束漂移补偿结果
Fig.3 Results of laser beam drift compensation



(a) QD2在水平方向的激光准直信号
(a) Laser collimation signal of QD2 in horizontal direction



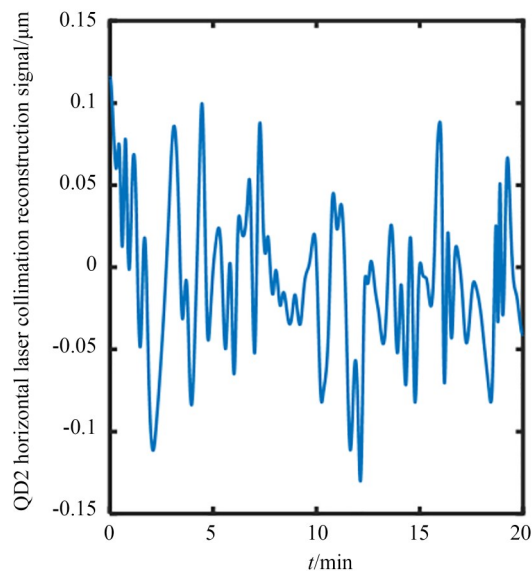
(b) QD2在竖直方向的激光准直信号
(b) Laser collimation signal of QD2 in vertical direction

图 4 激光准直信号 EMD 及时频分析结果

Fig. 4 EMD and time-frequency analysis results of laser collimation signal

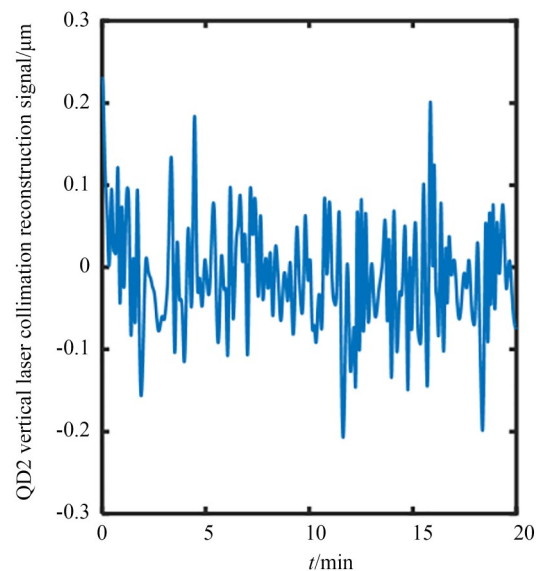
(8)对信号进行拟合校准,结果如图6所示。实验结果表明,EMD-LS处理后的准直光束在水平方

向和竖直方向的标准偏差分别为 $0.01\ \mu\text{m}$ 和 $0.02\ \mu\text{m}$ 。



(a) QD2在水平方向的激光准直重构信号

(a) Laser collimation reconstruction signal of QD2 in horizontal direction

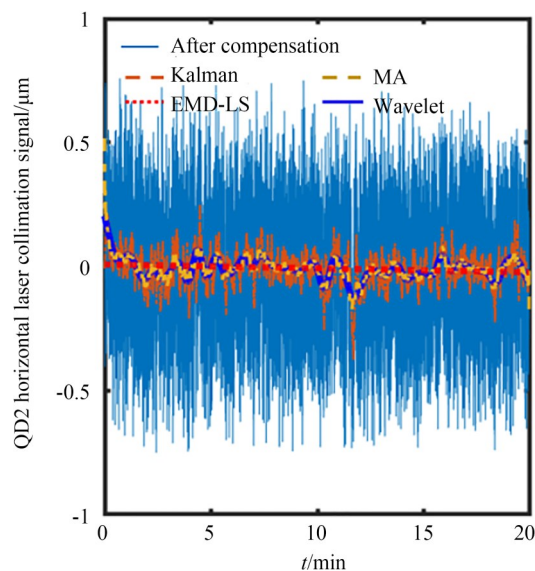


(b) QD2在竖直方向的激光准直重构信号

(b) Laser collimation reconstruction signal of QD2 in vertical direction

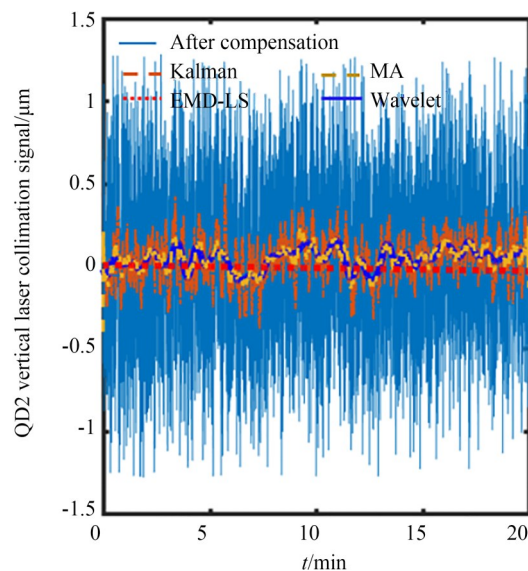
图5 激光准直信号的重构结果

Fig. 5 Reconstruction results of laser collimation signal



(a) QD2在水平方向的激光准直信号

(a) Laser collimation signal of QD2 in horizontal direction



(b) QD2在竖直方向的激光准直信号

(b) Laser collimated signal of QD2 in vertical direction

图6 温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 压强为 $103.5\ \text{kPa} \pm 5\ \text{Pa}$, 湿度为 50% 时不同方法对激光准直信号的滤波结果

Fig. 6 Filtering results of laser collimated signals by different methods with temperature of $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, pressure of $103.5\ \text{kPa} \pm 5\ \text{Pa}$ and humidity of 50%

更进一步地,为了验证所提出方法在不同温度、压强和湿度下,仍具有良好的空气扰动抑制效果,使用外置热源和吹风机改变测量环境的温度和压强。在周围环境温度 $T=(23\pm1)^{\circ}\text{C}$,压强 $P=103.5\text{ kPa}\pm 20\text{ Pa}$,湿度 $F=55\%$ 下,不同方法对激光准直信号的滤波结果如图 7 所示。不同

环境条件下,不同方法对空气扰动影响下的激光准直信号处理结果如表 1 所示。实验结果表明,在 300 mm 位置处激光光束的准直精度在二维方向上 20 min 内可以达到 $0.67\times 10^{-7}\text{ rad}$ 。针对空气环境温度、压强和湿度变化造成的激光直线基准抖动,EMD-LS 法具有良好的抑制效果。

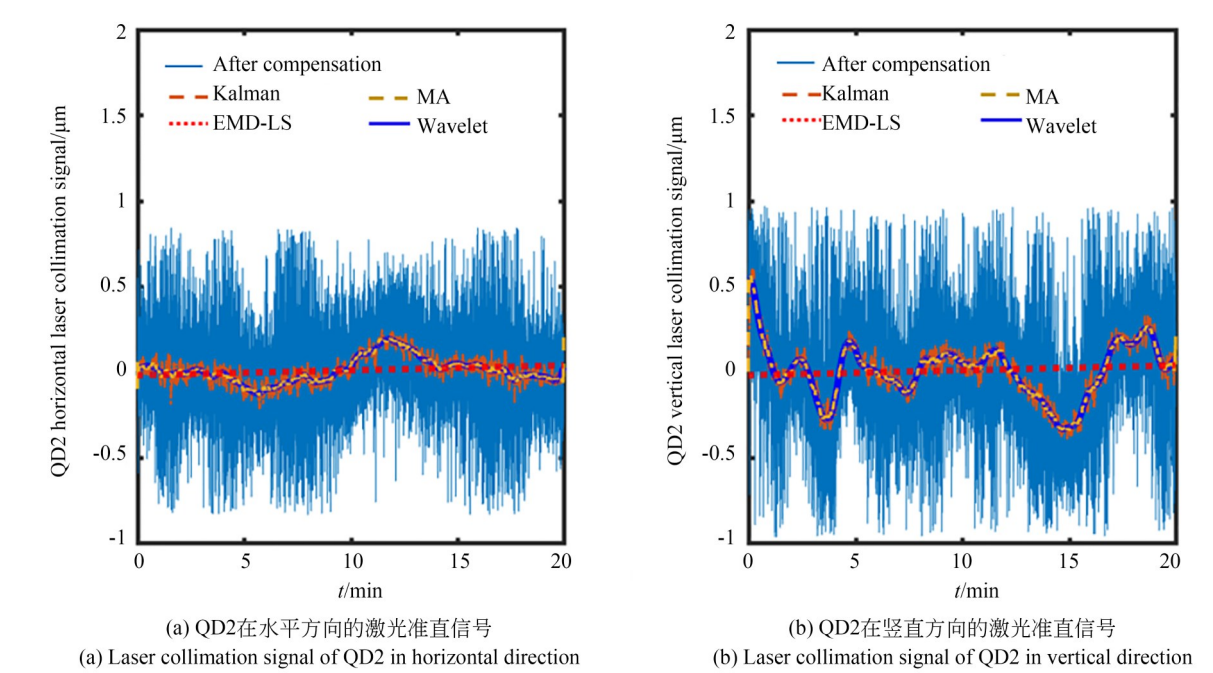


图 7 温度为 $(23\pm1)^{\circ}\text{C}$,压强为 $103.5\text{ kPa}\pm 20\text{ Pa}$,湿度为 55% 时不同方法对激光准直信号的滤波结果

Fig. 7 Filtering results of laser collimation signals by different methods with temperature of $(23\pm1)^{\circ}\text{C}$, pressure of $103.5\text{ kPa}\pm 20\text{ Pa}$ and humidity of 55%

表 1 不同方法对激光准直实测信号的处理结果的标准差				
Tab. 1 Standard deviation of results of different methods for processing the measurement signals of laser collimation(μm)				
Method	$T=(20\pm0.5)^{\circ}\text{C}, P=103.5\text{ kPa}\pm 5\text{ Pa}, F=50\%$		$T=(23\pm1)^{\circ}\text{C}, P=103.5\text{ kPa}\pm 20\text{ Pa}, F=55\%$	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Measurement signals	0.25	0.41	0.32	0.51
Kalam	0.07	0.13	0.08	0.16
Wavelet	0.04	0.06	0.07	0.16
Moving Average(MA)	0.04	0.07	0.07	0.16
EMD-LS	0.01	0.02	0.02	0.02

4 结 论

本文针对空气随机扰动导致直线测量基准发生随机抖动,提出了结合 EMD 与 LS 拟合的空气随机扰动影响抑制方法。从激光准直信号滤

波的角度,结合激光准直信号的特点以及空气随机扰动对激光准直信号产生随机且非平稳的影响规律,采用具有自适应分解特性的 EMD 和 LS 法,对激光准直信号进行滤波处理。实验结果表明,所提方法对激光漂移补偿后的激光准直信号

处理后,其在水平方向和竖直方向的波动标准偏差分别为 $0.01\ \mu\text{m}$ 和 $0.02\ \mu\text{m}$ 。相较于其他常规的信号滤波方法,所提方法具有优异的滤波效

果。该方法有效提高了激光准直光束的方向稳定性,对以激光准直光束作为直线基准的测量方法应用和仪器开发具有实际的指导意义。

参考文献:

- [1] LO C C, HSU W H, LIU C S. Six-degree-of-freedom geometrical errors measurement system with compensation of laser beam drifts and installation errors for linear stage[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 162: 107407.
- [2] 林荣炜,程真英,何亚雄,等. XY工作台六自由度误差在线测量和补偿[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(12): 1761-1773.
LIN R W, CHENG ZH Y, HE Y X, *et al.* On-line six-degree-of-freedom errors measurement and compensation for XY stages[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(12): 1761-1773. (in Chinese)
- [3] 沈正祥,余俊,王晓强,等. 面向激光探测的精密光机系统研制及应用[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(21): 2737-2751.
SHEN Z X, YU J, WANG X Q, *et al.* Development and application of precision optical system for laser detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(21): 2737-2751. (in Chinese)
- [4] 龙飞,郑发家,贾培智,等. 激光多自由度同时测量研究现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 191-208.
LONG F, ZHENG F J, JIA P ZH, *et al.* Research status and development trend of laser multi-degree-of-freedom simultaneous measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 191-208. (in Chinese)
- [5] CAI Y D, SANG Q, LOU Z F, *et al.* Error analysis and compensation of a laser measurement system for simultaneously measuring five-degree-of-freedom error motions of linear stages[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 3833.
- [6] 翟玉生,柳文龙,王新杰,等. 激光准直测量中的光漂补偿方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 198-203.
ZHAI Y SH, LIU W L, WANG X J, *et al.* Methods for laser beam drift compensation in laser alignment measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 198-203. (in Chinese)
- [7] LI R J, WANG Y J, TAO P, *et al.* Drift reduction of a 4-DOF measurement system caused by unstable air refractive index [J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6329.
- [8] LIU W Z, ZHANG C, DUAN F J, *et al.* A method for noise attenuation of straightness measurement based on laser collimation[J]. *Measurement*, 2021, 182: 109643.
- [9] YANG H W, TAO W, YIN X Q, *et al.* Differential correction system of laser beam directional dithering based on symmetrical beamsplitter[J]. *Optical Review*, 2018, 25(1): 10-17.
- [10] HU P C, MAO S, TAN J B. Compensation of errors due to incident beam drift in a 3 DOF measurement system for linear guide motion[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28389-28401.
- [11] CHANG H, GE W Q, WANG H C, *et al.* Laser beam pointing stabilization control through disturbance classification [J]. *Sensors*, 2021, 21(6): 1946.
- [12] HU Z H, LIANG G Q, XIU Q L, *et al.* A PID algorithm based on convolutional neural network for pointing stabilization control of synchrotron radiation beams [C]. *Fourth International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing, and Automation Technology (MEMAT 2023)*. October 20-22, 2023. Guilin, China. SPIE, 2024, 13082: 855-860.
- [13] NAN Z J, TAO W, ZHAO H. Laser pointing error analysis and compensation method of low-power laser diode source applied to triangulation ranging system [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(10): 103001.
- [14] WANG M L, DONG X M, QIN C J, *et al.* Adaptive H^∞ Kalman filter based random drift modeling and compensation method for ring laser gyroscope[J]. *Measurement*, 2021, 167: 108170.
- [15] ZHANG L X, WANG R L, LIN W M, *et al.* Compensation method for random drifts of laser beams based on moving average feedback control [C]. *6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and*

- Equipment. Xiamen, China. SPIE*, 2012, 8417: 156-162.
- [16] 李结安, 谭久彬, 崔继文. 基于滤波的准直光束漂移反馈补偿方法研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(2): 336-342.
- LI J A, TAN J B, CUI J W. Study on method of feedback compensation drift of collimation beam based on filter[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, 24(2): 336-342. (in Chinese)
- [17] 王亚勇. 激光精密测量中光束抖动抑制技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WANG Y Y. *Research on Beam Jitter Suppression Technology in Laser Precision Measurement* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [18] 朱东济, 蔡红维, 高蓉. 基于贝叶斯推理的激光光斑漂移特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041411.
- ZHU D J, CAI H W, GAO R. Laser spot drift characteristics based on Bayesian inference[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54 (4) : 041411. (in Chinese)
- [19] HUANG N E, WU Z H. A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical studies [J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(2): e2007rg000228.

作者简介:



刁 宽(1992—),男,广西玉林人,博士研究生,主要研究方向为光学精密测量技术及仪器、机床误差检测和表面形貌检测等。E-mail:875262952@qq.com

通讯作者:



刘晓军(1968—),湖北天门人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为光学精密测量技术及仪器、表面测量及分析、精密工程、纳米材料性能测试及应用。E-mail:mexjl@hust.edu.cn