文章编号:1001-5078(2020)06-0675-07

· 激光应用技术 ·

基于 EMD 算法的双外腔激光自混合微振动测量

高丙坤1,刘径舟1,张子超2

(1. 东北石油大学电气信息工程学院,黑龙江大庆 163318;2. 廊坊市中燃宏胜能源科技有限公司,河北 廊坊 065000)

摘 要:基于激光自混合理论,提出了一种双外腔激光自混合干涉信号分离的方法,以实现两 路微振动的同时测量。用 EMD 算法对不同频率的两路激光自混合信号进行分离。以原始信 号和各 IMF 分量的互相关系数作为判断依据,选择出高频一路所需的 IMF 分量。根据两路自 混合信号具有线性叠加的性质,原始信号减去高频一路信号即得低频一路信号。对分离出的 每一路信号进行频谱分析,利用主频阶次判定法实现振幅重构。结果表明,仿真和实验信号均 能有效被分离。

关键词:激光传感器;两路自混合干涉;EMD;互相关;主频阶次判定法 中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.06.005

Two-external-cavity laser self-mixing micro-vibration measurement based on EMD algorithm

GAO Bing-kun¹, LIU Jing-zhou¹, ZHANG Zi-chao²

(1. School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;2. Zhongran Hongsheng Energy Technology Corporation, Langfang 065000, China)

Abstract:Based on the theory of laser self-mixing, a two-external-cavity laser self-mixing interference signal separation method is proposed to achieve simultaneous measurement of two-external-cavity micro-vibration. The EMD algorithm is used to separate the two laser self-mixing signals of different frequencies. The correlation coefficient between the original signal and each IMF component is used as the judgment basis, and the IMF component required for the high frequency is selected. According to the linear superposition property of the two-external-cavity self-mixing signal having a linear superposition, the high-frequency signal is subtracted from the original signal to obtain the low-frequency signal. Then, the spectrum analysis is performed on each of the separated signals, and the amplitude reconstruction is realized by dominant harmonic order determination algorithm. The results show that both the simulated and experimental signals can be effectively separated.

Keywords: laser sensor; two-way self-mixing interference; EMD; cross-correlation; dominant harmonic order determination algorithm

1 引 言

激光自混合干涉(SMI)现象是指激光器发出的 激光照射到外部振动目标上,经反射或散射后一部 分携带了目标振动信息的激光反馈回激光腔并与腔 内激光进行混合,使得激光器输出光功率发生变化, 从而形成激光自混合干涉。因反馈光会改变激光参数而导致测量误差,因此早期的研究者们将从外部物体表面反馈回激光器谐振腔的光视为干扰因素,致力于减轻反馈光对激光器的输出特性产生的不利影响。随着研究的逐渐深入,研究人员发现反馈回

作者简介:高丙坤(1962-),男,博士,教授,从事通信工程和控制工程技术开发研究。 通讯作者:刘径舟(1995-),女,硕士研究生,从事激光自混合测量方面的研究。E-mail:1690866348@ qq. com 收稿日期:2019-09-05;修订日期:2019-09-28

基金项目:黑龙江省科学基金项目(No. E2016013)资助。

的激光携带有外部振动物体的运动状态信息,于是 开始不断探索激光自混合信号的特性及其应用。

从20世纪80年代开始,激光自混合干涉技术 逐渐应用于测量领域。随着激光器种类的不断丰 富^[1]以及激光器技术的完善,如今激光自混合干涉 技术已经逐渐趋于成熟。之前的研究工作主要围绕 着半导体激光二极管的自混合干涉展开。由于半导 体激光器易于产生自混合现象,并因其具有精度高、 易准直、成本低等特点,在很多领域都有应用,例如, 对目标物体的振动进行测量^[2-4],距离测量^[5]以及 速度测量等^[6-9]。在齿轮箱故障诊断^[10-11]以及管 道泄漏检测^[12]等工业领域也有着广泛的应用前景。 近年来,研究人员在测量装置上进行了部分改 进^[13-15]。已经开始利用全光纤自混合干涉仪进行 自混合干涉的研究。光纤具有优越的可靠性,抗电 磁干扰能力和长距离传输能力^[16]。目前对自混合 信号的研究已拓展到双外腔结构[17],并构造了含有 两路反馈外腔结构的自混合干涉模型,证实了两路 反馈外腔结构的自混合干涉信号为幅度周期性变化 的类正弦波或类锯齿波^[18]。两路外腔反馈的激光 自混合干涉,即采用一个激光二极管,外腔由一路拓 展到两路。在激光器数量不变的情况下能够采集到 含有两路振动信息的激光自混合干涉信号,拓展了 测量通道。但由于两路外腔自混合信号在频域上混 叠,频谱分析方法难于彻底分离两路信号,使得已有 的单路自混合干涉信号的微位移测量方法无法直接 应用于两路信号振动信息的提取。宦海等人利用希 尔伯特变换方法实现了两路合成信号的重构,但是 其中的小波基及阈值函数不容易选择^[19]。

为了实现两路微位移的同时测量,本文新提出 了一种方法,用经验模态分解(EMD)算法对不同频 率的两路激光自混合信号进行分离,对比于希尔伯 特变换方法,具有算法简洁的优势。以原始信号和 各基本模式分量(IMF)的互相关系数作为判断依 据,选择出高频一路所需的 IMF 分量。对分离得到 的两路自混合信号分别进行傅里叶变换,根据各自 的频谱进行分析,从而提取出两路信号所携带的各 路外部运动物体的振动信息。

2 两路自混合原理

两路自混合信号的外腔结构如图1所示,激光 器发出的光束通过分光镜分成两束,一束折射到目 标物体1上,一束透射到目标物体2上。经目标运 动物体反射回分光镜处,最终返回激光器内腔,形成 了两路自混合干涉。



图 1 两路自混合外腔结构光路图 Fig. 1 Optical schematic of the laser SMI with the structure of two-external-cavity feedback

已有文献[20]的研究表明,双外腔自混合信号 为两个单路自混合信号的叠加。叠加能够保留两路 信号各自的波动趋势,这是以下用 EMD 方法进行两 路自混合信号分离的基础。

3 理论分析

EMD 方法的本质可以理解为对信号进行平稳 化处理,然后逐级分解出信号中含有的不同尺度的 波动或者趋势,分解出的各个分量称作固有模态函 数 IMF。IMF 分量通常在某一时刻只存在一种固定 的频率成分^[21]。

固有模态函数一般需要满足下面的条件。在 IMF 中不能出现大于零的极小值以及小于零的极大 值。理想的信号应当局部均值为零。按定义,每次 分解运算得到的 IMF 分量振荡的模式不可复杂,应 为单一模式,且为存在有意义的瞬时频率的单分量 信号。EMD 分解过程如下^[22]:

确定两路自混合信号 *S* 的所有局部极值点,构造上下包络线,即将所有局部极大值点用三次样条线连接起来形成上包络线,将所有局部极小值点用 三次样条线连接起来形成下包络线。对上下包络线 取的平均,记为 *M*₁。若原始信号减去 *M*₁ 为 IMF 分量,记:

$$IMF_1 = I_1 = S - M_1 \tag{1}$$

若 I_1 不为IMF分量,则对 I_1 继续取包络求得平均值 M_{11}

$$I_{11} = I_1 - M_{11} \tag{2}$$

$$I_{1n} = I_{1(n-1)} - M_{1n} \tag{3}$$

)

重复 n 次直到 I_{1n}满足固有模态函数条件。此时得 到第一个高频分量

$$IMF_1 = I_{1k} \tag{4}$$

使原始两路自混合信号去掉第一个高频分量得 到的信号命名为 L₁。重复上面步骤。

$$L_1 = S - IMF_1 \tag{5}$$

$$L_n = L_{n-1} - \mathrm{IMF}_n \tag{6}$$

当L_n单调递增或递减时分解结束。

$$S = \sum_{i=1}^{o} IMF_i + \sum_{j=o+1}^{n} L_j$$
 (7)

若忽略噪声影响,则等式右侧的两部分分别为 分离出的高频与低频信号。

对分离出的信号进行傅里叶变换与频谱分析, 由公式(8)可求得两路目标的振幅。其中 n_d为主频 阶次。

$$A = \frac{n_d + 1.2}{0.95} \times \frac{\lambda_0}{4\pi}$$
(8)

4 仿真数据处理

仿真数据为微弱反馈水平(C≪1)的信号。如 图 2 所示,频率分别为 10 Hz 与频率为 300 Hz 的 SMI 信号,以及由这两路 SMI 构成双外腔激光混合 信号的仿真图。由图可以看出,双外腔自混合干涉 信号近似于两路自混合干涉信号的叠加。



Fig. 2 Two-external-cavity SMI simulation signal

对两路自混合信号进行 EMD 分解,得到由高频 到低频的 13 个 IMF 分量。对 IMF 分量做互相关运 算,其中相关系数越高相关程度越大。由表 1 中可 看出 IMF₁ 分量即为高频一路的 SMI 信号。根据双 外腔自混合信号的线性叠加性,低频一路的 SMI 信 号为其余 12 个 IMF 分量叠加。其分离出的两路 SMI 信号如图 3 所示。 表1 各个 IMF 分量与原始两路信号的互相关系数

Tab. 1 The correlation coefficient between each IMF

component and the original two-external-cavity

SMI signal

分量名	系数	分量名	系数	分量名	系数
IMF_1	0. 6724	IMF ₂	0.0631	IMF ₃	0. 0969
IMF_4	0. 1474	IMF ₅	0. 4829	IMF ₆	0. 3036
IMF_7	0. 3101	IMF ₈	0. 1670	IMF ₉	0. 1765
IMF_{10}	0.0428	IMF ₁₁	0.0003	IMF ₁₂	0.0005
IMF ₁₃	0.0004				

在 EMD 相关计算中,由于分离出的 IMF 分量 均应具有局部对称性,所以需要用极大值和极小值 定义的包络的局部均值来替换实际的均值。这可以 避免由于信号的非平稳性所产生的影响,但是也会 由于信号的非线性变形而引入一些假频。这就是图 3(c)和3(d)中存在毛刺的原因。





Fig. 3 Simulation comparison chart of single-channel original self-mixing signal and separated two-external-cavity signal

对原始信号与分离出的信号进行互相关,可得 到原始高频信号与分离出的高频信号的相关系数为 0.9565,原始低频信号与分离出的低频信号的相关 系数为0.9523,信号得以分离。

对 EMD 分解后的信号进行 FFT 变换,频谱图 如图 4 以及图 5 所示。





Fig. 4 The spectrum of lower frequency SMI signal decomposed by EMD 一般地,基波频率就是载波频率,为频谱图中第 一个尖峰处。从图 4 可提取出基波频率 f_b 为 10 Hz, 主频 f_{dl} 为 170 Hz, 计算得到主频阶次 n_d 值为 17。



Fig. 5 The spectrum of higher frequency SMI signal decomposed by EMD

从图 5 可提取出基波频率 f_b 为 300 Hz, 主频 f_{d1} 为 5100 Hz, 计算得到主频阶次 n_d 值为 17。根据公式(8)可以计算出重构振幅值为 0.99 μ m, 其中 λ_0 为 650 nm。

双外腔激光自混合的两个目标的振动频率改变 时,使用 EMD 分解算法的测量误差结果如表 2 所 示,两路目标的微振幅的重构误差均小于1%。

> 表 2 利用 EMD 算法对不同频率的仿真 信号振动重构的误差测量结果

Tab. 2 Deviation measurement results of vibration reconstruction of simulated signals with different

frequencies using EMD algorithm

第一路信号 频率/Hz	第二路信号 频率/Hz	第一路信号 重构误差/%	第二路信号 重构误差/%
2	50	0. 99	0. 99
5	100	0. 99	0. 99
10	300	0. 99	0. 99

5 实验数据处理

实验装置为简单的光纤传输自混合干涉测量系 统。其配置包括光纤耦合激光器(THORLABS, S3FC1550),配有热电冷却器,可将其温度保持在恒 定值,以稳定输出波长。耦合器(THORLABS, 10202A - 50 - FC),定焦准直器(F220FC - 1550)两 个固定了反射镜的压电传感器(PZT)(P753.1 CD, Physik Instrumente,Karlsruhe,德国)和(P752.1 CD, Physik Instrumente,Karlsruhe,德国),光电二极管 (THORLABS. PDA10CS - EC),以及数据采集卡 [National Instrument(NI),USB - 4431]。其中 PZT 是由正弦电压信号驱动的。

图 6 为实验装置图, PZT 表面贴有反光镜, 由电脑控制振动。



的信号如图7所示。



Fig. 7 Two-external-cavity self-mixing experimental signal after denoising EMD 分解去噪后的两路自混合实验信号得到 7

个 IMF 分量。对分离出的 IMF 分量与原始两路自 混合信号进行互相关运算得到相关系数并绘出折线 图。由图 8 可看出第四个分量与原始信号最为接 近,第一个分量其次。以此为分界,较高频率一路信 号为前三个 IMF 分量加和,较低频率一路信号为后 四个分量叠加。图 9 为分离后的两路实验信号图。





Fig. 8 The correlation coefficient between each IMF component and the original two-external-cavity SMI experimental signal



对分离后的两路激光自混合实验信号进行傅里 叶变换得到频谱图分别如图 10、图 11 所示。



从图 10 可提取出基波频率 f_b 为 60.42 Hz,主 频 f_{d1} 为 423.7 Hz,计算得到主频阶次 n_d 值为 7。根 据公式(8)可以计算出重构振幅值为 1.066 μ m,其 中 λ_0 为 650 nm。由于设置的实际振动为 1 μ m,求 得误差为 6.6 %。



图 11 EMD 分解出的较低频率的一路 SMI 信号频谱 Fig. 11 The spectrum of lower frequency SMI signal decomposed by EMD

从图 11 可提取出基波频率 f_b 为 0.4612 Hz,主 频 f_{d1} 为 6.457 Hz,计算得到主频阶次 n_d 值为 14。 根据公式(8)可以计算出重构振幅值为求得: 1.975 μm,其中 λ_0 为 1550 nm,由于设置的实际振 动为 2 μm,求得误差为 1.25 %。

6 结 论

在微弱反馈水平条件下,基于两路自混合信号的线性叠加性,提出了一种双外腔自混合信号的分离方法,实现了两路微振动的同时测量。用 EMD 算法分离两路自混合信号,采用互相关算法, 以原始的两路自混合信号与各 IMF 分量的互相关 系数作为判断依据,以得到相关系数最高的 IMF 分量为分界,前半部分 IMF 分量的叠加为高频一 路所需的信号。低频一路信号由原始信号减去高 频一路信号得到,也可由后半部分 IMF 分量的叠 加求得。对分离出的两路信号进行傅里叶变换, 利用主频阶次判定法重构目标物体振幅。仿真及 实验结果表明,基于 EMD 的分离方法能够有效分 离两路自混合信号。

参考文献:

Zhou Weiqi, Gao Longyue, Zhang Yanhua, et al. 978 nm
 Yb : CaNb₂O₆ laser pumped by 940 nm LD and the second-harmonic generation [J]. Laser & Infrared, 2016, 46 (10):1230 - 1233. (in Chinese)

周玮琦,高龙岳,张艳华,等.940 nm LD 泵浦 Yb:CN 978 nm 激光器及其二次谐波[J].激光与红外,2016, 46(10):1230-1233.

Huang Zhen. Research and application on vibration measurement based on laser diode self-mixing interference
 D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

黄贞.基于半导体激光自混合干涉的振动测量研究与应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

- [3] Jiang Chunlei. Reserch of vibration measurement technology based on multiple self-mixing interference[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2017. (in Chinese)
 姜春雷.基于多重反馈自混合干涉的振动测量技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [4] Luo Huifu, Wang Yanghong, Zhu Wei, et al. Measurement of micro-vibration based on laser self-mixing interference
 [J]. Trans Beijing Inst Technol, 2017, 37(6):584 589. (in Chinese)

罗会甫,王扬红,朱炜,等.基于激光自混合干涉法的 微振动测量[J].北京理工大学学报,2017,37(6): 584-589.

- [5] Gao Bingkun, Zheng Renqian. A new ranging method based on two feedback laser self-mixing [J]. Optical Technique, 2017, 43(3):239-242, 247. (in Chinese) 高丙坤,郑仁谦. 基于二次反馈激光自混合新型测距 方法[J]. 光学技术, 2017, 43(3):239-242, 247.
- [6] Zhang Zhaoyun, Gao Yang, Zhao Xinghai, et al. Velocity measurement by the self-mixing effect [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (S3): 182 – 187. (in Chi-

nese)

张照云,高杨,赵兴海,等.激光自混合干涉测速技术 [J].红外与激光工程,2008,37(S3):182-187.

- [7] Ji Jingyi, Ye Huiying, Yu yanguang. Based on the optical feedback self-mixing interference displacement measurement algorithm design and filering[J]. Laser & Infrared, 2011,41(1):89-92.(in Chinese) 姬静毅,叶会英,禹延光.基于光反馈自混合干涉的位移测量算法设计及滤波[J].激光与红外,2011,41(1):89-92.
- [8] Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. Acta Optica Sinica, 2007, (8): 1430 1434. (in Chinese)
 禹延光,郭常盈,叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉 技术 的 振 动 测 量 [J]. 光 学 提, 2007, (8): 1430 1434.
- [9] Sun Hui, Liu Jigou, Zhang Quan, et al. Self-mixing interferometry for rotational speed measurement of servo drives
 [J]. Appl. Opt, 2016, 55(2):236-241.
- [10] Jiang Chunlei, Han Jiaming. Vibration signal analysis of gear local fault based on laser self-mixing senor[J]. Optical Technology, 2016, 42(4):306-311. (in Chinese) 姜春雷, 韩加明. 基于激光自混合传感器的齿轮局部 故障振动信号分析[J]. 光学技术, 2016, 42(4): 306-311.
- [11] Jiang Chunlei, Zhou Xuming. Application of laser selfmixing interference technology and wavelet transform in gearbox fault diagnosis [J]. Optical Technology, 2017, 43 (1):83-86. (in Chinese)
 姜春雷,周旭明. 基于激光自混合干涉技术和小波变 换的齿轮箱故障诊断[J]. 光学技术, 2017, 43(1): 83-86.
- [12] Yin Shuxin, Duan Yubo, Tian Maoming. Vibration displacement reconstruction algorithm and its application in pipeline leakage detection based on self-mixing interference[J]. Control and Instruments In Chemical Industry, 2018,45(7):541-545. (in Chinese)
 尹淑欣,段玉波,田茂铭. 自混合干涉的振动位移重构 算法及其在管道泄漏检测中的应用[J]. 化工自动化 及仪表,2018,45(7):541-545.
- [13] Zhu Wei, Chen Qianghua, Wang Yanghong, et al. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2018, 105:

150 - 158.

- [14] Liu Bin, Ruan Yuxi, Yu Yanguang, et al. Laser self-mixing fiber bragg grating sensor for acoustic emission measurement[J]. Sensors, 2018, 18(6):1956.
- [15] Guo Dongmei, Jiang Haiqing, Shi Liheng, et al. Laser selfmixing grating interferometer for MEMS accelerometer testing[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, (99):1-1.
- [16] Suleiman, M., Seat, H. C., Bosch, T. Interrogation of fiber bragg grating dynamic strain sensors by self-mixing interferometry [J]. Sensors Journal, IEEE, 2008, 8 (7): 1317-1323.
- [17] Lu Dong, Zhu Zhongqiang, Xia Guangqiong, et al. Chaotic signal generation with low time-delay signature based on a semiconductor laser subject to double filtered optical feedback[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(10):1014003. (in Chinese)

卢东,钟祝强,夏光琼,等.用双滤波反馈半导体激光 器产生低延时特征的混沌信号[J].光子学报,2016, 45(10):1014003.

[18] Huan Hai, Zhang Yu, Lu Song, et al. Theoretical and experimental study on laser self-mixing interference with two feedback external cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6):142 - 147. (in Chinese)

宦海,张雨,卢松,等.两路反馈外腔结构激光自混合 干涉理论及实验观察[J].激光与光电子学进展, 2015,52(6):142-147.

- [19] Huan Hai, Guo Kelun, Zhang Yu, et al. Phase-extracting method of laser self-mixing interference signal with two feedback external cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, (6):159 166. (in Chinese) 宦海,郭克伦,张雨,等. 两路反馈外腔自混合干涉信 号的相位提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, (6):159 – 166.
- [20] Chen Peng, Liu Yuwei, Gao Bingkun, et al. Modeling and experimental verification of laser self-mixing interference phenomenon with the structure of two-external-cavity feedback [J]. Optics Communications, 2018, 410:690-693.
- [21] Shi Mengqi, Shi Xibin, Zhang Zhi, et al. Analysis of the error signals based on EMD [J]. Electric Switchgear, 2017,55(6):90-92. (in Chinese) 施梦奇,施希斌,张智,等. 基于 EMD 的误差信号分解 [J]. 电气开关,2017,55(6):90-92.
- [22] Liu Yijiao. Time domain hilbert transform method [D]. Chongqing:Chongqing University,2016. (in Chinese) 刘译胶. 一种时域希尔伯特变换方法[D]. 重庆:重庆 大学,2016.