

基于经验模态分解的自混合干涉相位提取方法研究

张玉燕 周航 闫美素

Study on the phase-extracting method of self-mixing signal based on empirical mode decomposition

Zhang Yu-Yan Zhou Hang Yan Meisu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 054203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.054203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于旋转相位编码与照明光束匹配的叠层衍射成像算法研究

Ptychographical imaging algorithm based on illuminating beam matched with rotational phase encoding

物理学报.2014, 63(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164204>

多种图像采集策略下 X 射线折射信息的提取研究

Simulation of X-ray refraction information extraction using multiple image-collecting strategies

物理学报.2014, 63(10): 104206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104206>

基于光栅分光法的相干衍射成像

Coherent diffractive imaging based on the multiple beam illumination with cross grating

物理学报.2013, 62(18): 184204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184204>

利用相干光照明的纹影成像装置研究飞秒激光脉冲烧蚀铝靶喷射物相位的超快时间演化

Investigation of the ultrafast phase evolution of the ejected material generated during femtosecond laser ablation of aluminum by the coherent light illuminated schlieren apparatus

物理学报.2013, 62(13): 134203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134203>

一种基于角谱理论的改进型相位恢复迭代算法

An ameliorated fast phase retrieval iterative algorithm based on the angular spectrum theory

物理学报.2013, 62(11): 114203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114203>

基于经验模态分解的自混合干涉相位提取方法研究*

张玉燕[†] 周航 闫美素

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

(燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2014年7月7日收到; 2014年8月20日收到修改稿)

为实现光反馈机理下激光自混合干涉信号相位的精确提取, 本文提出了一种基于经验模态分析 (EMD) 的相位提取方法. 首先, 采用 EMD 算法对含噪的自混合干涉信号进行了降噪预处理, 提取有效的干涉信号. 然后在对含有外腔物体运动信息的光反馈相位求解的过程中, 利用希尔伯特黄变换 (HHT) 原理实时提取每一时刻的瞬时相位, 将其去包裹处理后得到真实相位. 在弱、适度、强光反馈条件下, 分别对基于 EMD 的相位提取算法进行了仿真研究. 最后, 搭建了基于自混合干涉效应的微位移测量实验平台, 进行实验研究. 实验结果表明, 利用该方法可以实现对自混合干涉信号的相位提取, 最大误差小于 1.6 rad. 仿真和实验结果的一致性, 说明了 EMD 方法的有效性.

关键词: 光反馈自混合干涉, 经验模态分解, 相位提取, 去噪

PACS: 42.30.Rx, 42.25.Hz, 84.30.Vn

DOI: 10.7498/aps.64.054203

1 引言

光反馈自混合干涉 (optical feedback self-mixing interference, OFSMI) 效应, 是 King 等^[1]发现的一种光干涉现象, 是指在激光应用系统中, 激光器输出光被外部反射体反射或散射后, 其中一部分光被反射回激光器的谐振腔内, 与腔内光相混合产生干涉作用, 调制激光器的输出光功率和频率的效应^[2].

将 OFSMI 系统应用于位移等物理量的测量之中, 对含有被测信息的 OFSMI 信号进行处理时, 通常需要对相位方程进行解算. OFSMI 位移测量的相位解调方法主要有外差相位法和相位测量法等^[3]. 外差相位法要求两个有稳定频率的激光信号来构成外差方案, 其结构较复杂且该方法只适用

于弱光反馈水平, 精度可达 25 nm; 用相位测量法分析信号, 因为引入了调制解调方法, 位移测量精度较高, 精度可以提高到几分之一光波波长^[4,5]. 例如, Servagent 等^[6]提出了相位偏移测量法, 但受噪声和散斑影响较大; 郭冬梅等^[7]在外腔内放置了电光晶体, 提出用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 方法、四像限积分方法提取 OFSMI 信号相位, 该方法增加了系统复杂度, 且只适用在弱反馈机理下; 张照云等^[8]提出用一种基于快速傅里叶变换提取相位来分析 OFSMI 信号的方法, 无需引入外部光学元件, 简化了系统结构. 希尔伯特变换可以求得信号的瞬时相位, 通过该原理 Zweig 等^[9]提出了将希尔伯特变换 (HHT) 应用于单幅干涉条纹图的相位解调. Pereira 等^[10]将经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 应用到 OFSMI 的降噪过程中.

* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20111333120009) 和河北省自然科学基金 (批准号: F2012203184) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yzhang@ysu.edu.cn

本文将EMD算法应用于OFSMI信号相位解调之中,先对带噪声的干涉信号进行预处理,得到纯净的OFSMI基频信号后,进而利用希尔伯特黄变换的自适应相位提取方法提取相位.应用该算法对在弱反馈、适度反馈和强反馈机理下的OFSMI信号进行处理,可在不增加任何外部元件的情况下,提高相位解算精度.

2 OFSMI效应

经典的OFSMI系统结构是由半导体激光器LD、自聚焦透镜、外部反射(散射)物组成光学部分,LD调制电路及光电二极管PD信号接收处理电路组成电学系统.本文采用如图1所示的OFSMI系统结构模型图.

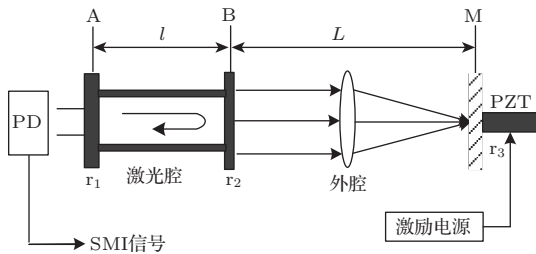


图1 LD OFSMI系统的三镜 F-P 腔模型图

OFSMI信号的数学模型为

$$\varphi_f(\tau) = \varphi_0(\tau) - C \sin[\varphi_f(\tau) + \arctan \alpha], \quad (1)$$

$$P(\tau) = P_0[1 + mF(\tau)], \quad (2)$$

$$F(\tau) = \cos(\varphi_f(\tau)), \quad (3)$$

式中, α 为半导体激光器线宽展宽因数; τ 为光在外腔内飞行的往返时间,且 $\tau = 2L/c$ (L 是外腔长度, c 是光速).由模型(1)式—(3)式看出,外腔长度 L 发生变化时,光输出功率 $P(\tau)$ 也会随之变化.对于

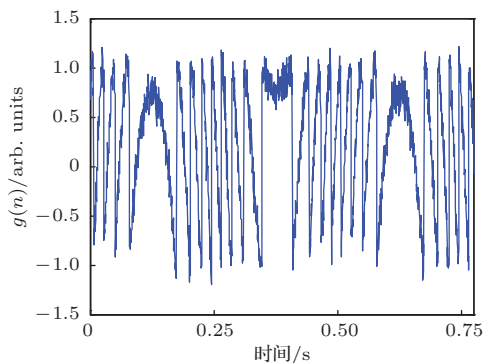


图2 带有高频噪声的实验信号

OFSMI实验装置,采用封装有PD的半导体激光管LD作光源兼探测器,外部振动物体采用压电陶瓷(piezoelectric ceramics, PZT).PZT振动时,使外腔长度 L 改变,照射到PZT的激光,一部分反馈回激光腔内与出射光产生OFSMI现象^[11],检测到的信号不仅携带激光器自身参数的信息,而且可以计算得出物体移动时反映出的相位变化.实验获得的OFSMI信号如图2所示,显然,输出波形带有很多高低不一“毛刺”.

3 基于EMD的OFSMI信号处理原理

EMD方法特别适用于非线性非平稳信号的分析处理,其中包括了去噪和瞬时相位的求取等.OFSMI信号的相位重构过程包括了以上两部分,且OFSMI信号又是一种非线性非平稳干涉信号,所以本文提出利用EMD方法进行OFSMI信号的降噪及相位解算.具体流程如图3所示,其中包括两大部分:信号预处理和相位提取.

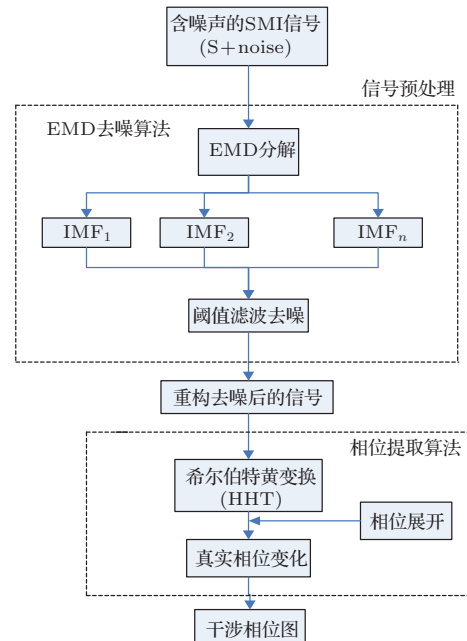


图3 位移重构的流程图

3.1 基于EMD的降噪预处理

EMD是一种新型自适应信号时频处理方法.任何时候,一个信号都可以包含若干个本征模函数(intrinsic mode function, IMF),如果IMF之间相互重叠,便形成复合信号.EMD分解的目的就是为了获取IMF,然后再对各IMF进行希尔伯特变换,

求得相位函数, 从时域角度来看, 信号的瞬时相位是随时间不断变化的.

IMF 作为判定条件必须满足两点: 1) 函数在整个时间范围内, 局部极值点和过零点的数目必须相等, 或最多相差一个; 2) 在任意时刻点, 局部最大值的包络(上包络线)和局部最小值的包络(下包络

线)平均必须为0. 原始信号为

$$f(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t). \quad (4)$$

这样就可以把原始信号 $f(t)$ 分解成一系列 IMF 分量^[12].

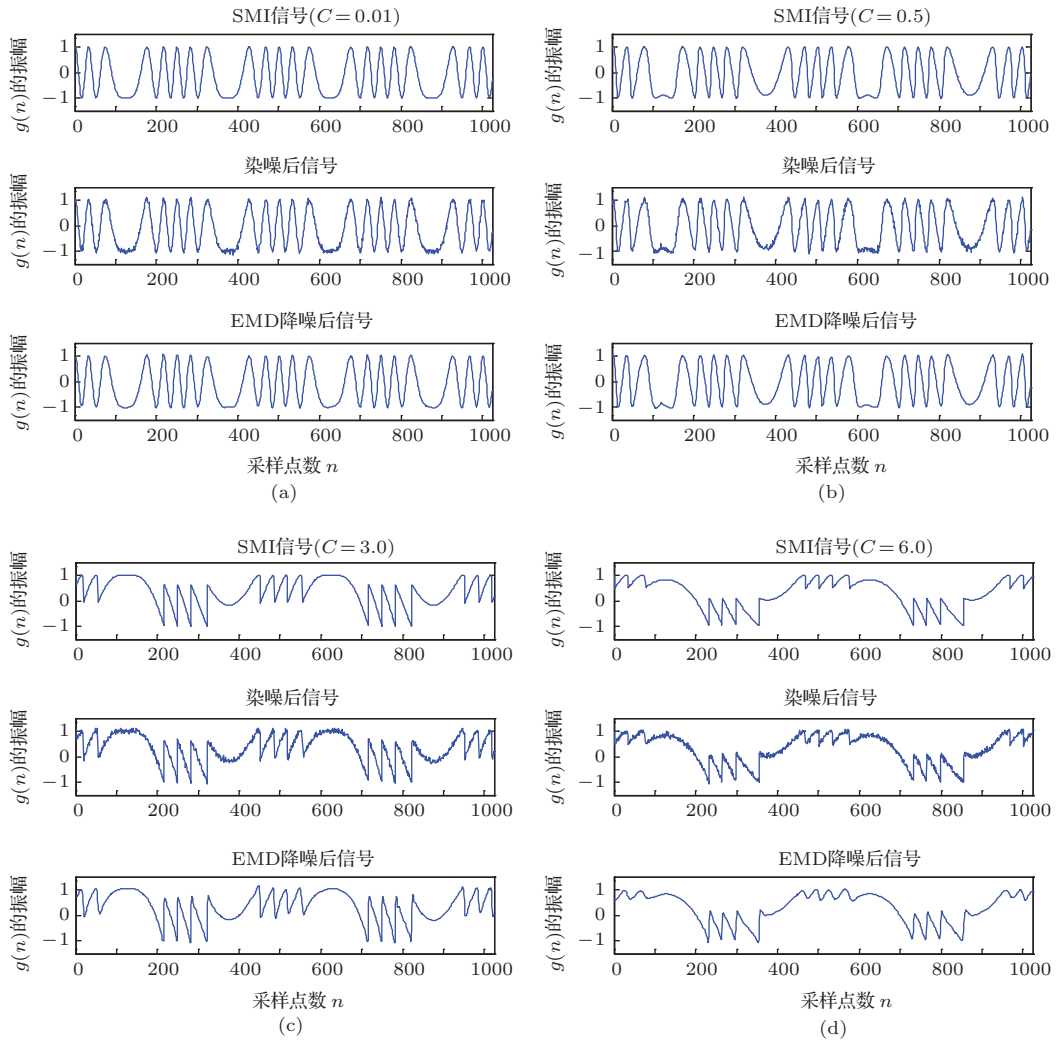


图4 不同反馈水平下 EMD 降噪仿真. (a) $C = 0.01$; (b) $C = 0.5$; (c) $C = 3.0$; (d) $C = 6.0$

本文将 EMD 与小波阈值降噪方法结合起来, 对 OFSMI 信号进行滤波消噪预处理^[13]. 通常用 C 表示光反馈水平, 仿真中 C 取值为 0.01, 0.5, 3.0, 6.0, 分别对应微弱反馈、弱反馈、适度反馈和强反馈机理, 产生的 OFSMI 信号及用 EMD 算法消除噪声后的 OFSMI 信号对比情况如图 4 所示.

由仿真结果可知, 在微弱反馈、弱反馈、适度光反馈和强反馈机理下, EMD 方法可有效地去除 OFSMI 信号中的噪声, 充分保留了信号的局部特征, 达到理想的降噪效果.

3.2 相位提取

3.2.1 相位重构算法

由 OFSMI 信号的数学模型可知, 当反馈光存在时, 激光器输出功率不仅随注入电流变化, 而且随外腔长度变化而变化, 而外腔的长度又与外部反射物体的运动有关, 最终可以表现为 OFSMI 信号相位的变化. 由 (1)—(3) 式可推导出如下关系式:

$$L = \frac{c\varphi}{4\pi\nu_0}, \quad (5)$$

上式中 v_0 表示无光反馈时的光频率, c 为光速, φ 为相位偏移量. 由该式明显可以看出 OFSMI 信号相位的测量精度直接决定了位移测量精度, 实现相位的准确测量是 OFSMI 位移测量研究的关键问题之一.

仿真中, 按照图 5 所示的流程框图仿真 OFSMI 信号. 框图中, $L(n)$ 表示外部反射体的位移; λ_0 为激光器的波长; $F[\varphi_0(n), C, \alpha]$ 为含有反馈时的相位 $\varphi_f(n)$ 与无光反馈时的相位 $\varphi_0(n)$ 之间对应的关系式.

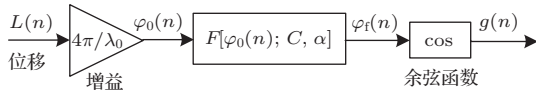


图 5 产生 SMI 信号的流程框图

最后, OFSMI 函数的表达式如下:

$$g(n) = \cos(\varphi_f(n)). \quad (6)$$

本文将含有噪声的 OFSMI 信号进行 EMD 分解, 滤除噪声分量后, 对重构出的连续的 OFSMI 信号做希尔伯特变换形成解析信号函数 $z(n) = g(n) + j \{Hg(n)\}$, 其中 $g(n)$ 和 $Hg(n)$ 互为复共轭关系. 由解析函数, 可求得函数 $z(n)$ 的瞬时相位, 公式如下:

$$\varphi'_f(n) = a \tan 2 \left[\frac{Hg(n)}{g(n)} \right]. \quad (7)$$

因为本文提出的相位提取算法中用到反三角函数, 不可避免的涉及到相位展开的问题. 仿真中通过 $a \tan 2$ 函数得到每一时刻的瞬时相位, 加上变量的分子、分母符号判断, 在一个周期内, 信号中相位值域范围为 $(-\pi, \pi]$, 相位跳变幅度为 2π ^[14], 通过 $a \tan 2$ 解调出的相位 $\varphi'_f(n)$ 是被限制在了 $(-\pi, \pi]$ 范围内的包裹相位, 它并不能真正反映出运动物体的相位变化. 为了将包裹相位恢复成各个时刻的真实相位, 就必须对包裹相位作展开处理^[15]. 因瞬时相位 $\varphi_f(n)'$ 呈现出许多不连续的点, 称之为相位跳变点, 相邻二个不连续点的相位差为 2π , 每到一个不连续点, 相位的增减性发生一次改变, 这时就要用加减 2π 的方法进行修正^[16,17].

经过上述分析, 得到的相位展开算法操作步骤如下:

- 1) 通过 $g(n)$ 计算包裹相位 $\varphi'_f(n)$,

$$\varphi'_f(n) = a \tan 2 \left[\frac{\text{Im}(h(g(n)))}{\text{Re}(h(g(n)))} \right], \quad (8)$$

$h(g(n))$ 表示对 OFSMI 信号进行希尔伯特变换.

- 2) 依据相位展开原理, 计算真实相位 $\varphi_f(n)$,

$$\varphi_f(n) = (-1)^{m_1} \times |\varphi'_f(n)| + 2\pi m_2, \quad (9)$$

m_1 和 m_2 均为整数, m_1 取值为 0 或 1, m_2 可取 1 或 -1.

- 3) 计算得到 $\varphi_0(\tau)$

$$\varphi_0(n) = \varphi_f(n) + C \sin[\varphi_f(n) + \arctan \alpha]. \quad (10)$$

3.2.2 算法仿真

假设外腔物体在不同反馈条件下做简谐运动, 根据 $\varphi_0(n) = 4\pi \frac{L(n)}{\lambda_0(n)}$, 有

$$\begin{aligned} \varphi_0(n) &= \frac{4\pi \left(L_0 + L_m \sin \left(2\pi \frac{f_t}{f_s} n \right) \right)}{\lambda_0(n)} \\ &= \varphi_0 + A \sin \left(2\pi \frac{f_t}{f_s} n \right), \end{aligned}$$

其中, 令 φ_0 为外腔初始相位, f_t 为反射体的振动频率, f_s 为采样频率, n 为采样点数; 令 $A = 4\pi L_m / \lambda_0$ 表示外腔无反馈相位波动幅度.

令 $\varphi_0 = 100\pi$, $A = 5\pi$, $f_t = 20$ Hz, $f_s = 2000$ Hz, $n = 200$, 固定 $\alpha = 3$, C 在三种反馈水平下随机取值, 图 6 分别给出了无光反馈相位 $\varphi_0(n)$ 、有反馈外腔相位 $\varphi_f(n)$ 以及产生的相应 OFSMI 信号波形图.

由 OFSMI 信号仿真结果可见, 各反馈水平下的自混合干涉信号都能很好的得到. C 越大, 上半部分与下半部分干涉条纹振幅的差值越大, 但是一个完整的干涉条纹依旧对应着 2π 的相移.

光反馈水平因子 C 分别取为 0.5, 3.0, 6.0, 其他参数值不变, 用希尔伯特变换相位提取算法对仿真得到的 SMI 信号进行相位提取, 分别得到在不同反馈条件下相位提取结果.

- 1) 弱反馈: $0 < C < 1.0$

仿真中 C 取 0.5, 结果如图 7 所示.

- 2) 适度反馈: $1.0 < C < 4.6$

仿真中 C 取 3.0, 结果如图 8 所示.

- 3) 强反馈: $4.6 < C < 7.8$

仿真中 C 取 6.0, 结果如图 9 所示.

由仿真结果可知, 在弱反馈、适度反馈和强反馈条件下, 利用本文提出的算法都能很好的重构出相位信息, 重构出的反映外腔物体作正弦曲线运动的相位曲线较平滑, 效果良好, 并且误差较小. 其中, 弱反馈条件下重构出相位信号最大误差为

1.56 rad. 适度反馈条件下, 误差最大约为2.4 rad, 在强反馈条件下误差最大约为4 rad, 相对弱反馈

和适度反馈条件, 误差较大, 但平均误差较小, 约为2.9 rad.

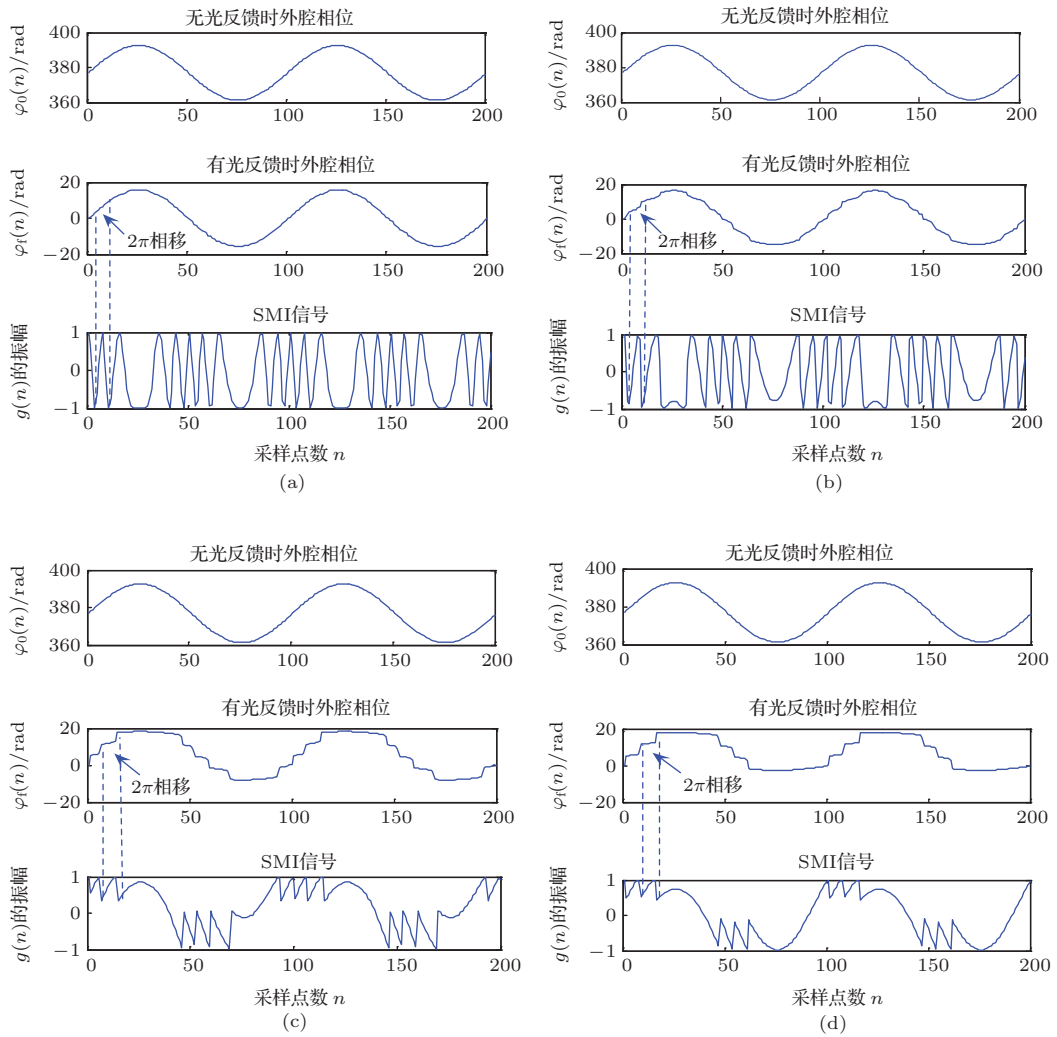


图6 各反馈水平下产生的 OFSMI 信号仿真图 (a) $C = 0.2$; (b) $C = 0.5$; (c) $C = 3.0$; (d) $C = 6.0$

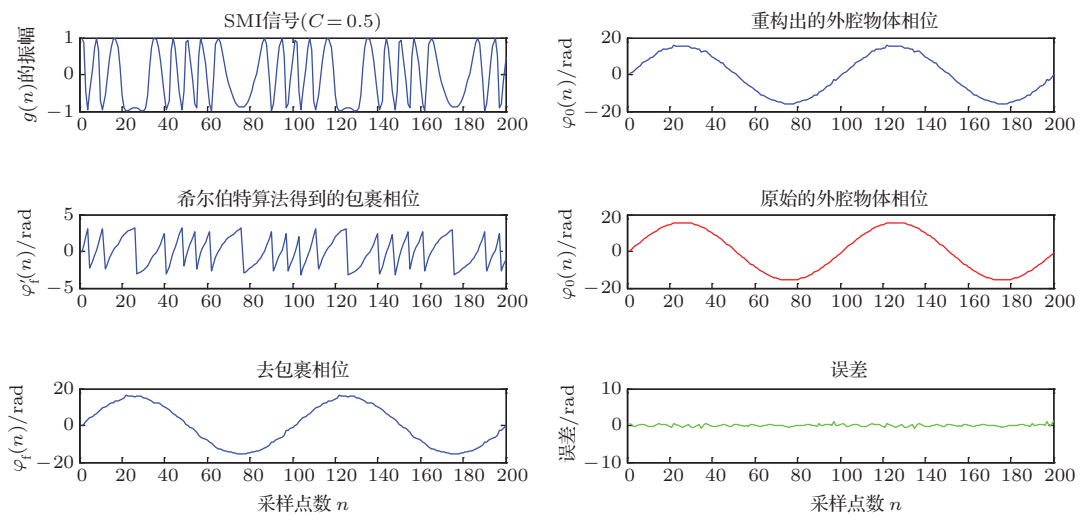


图7 弱反馈条件下相位提取算法仿真 ($C = 0.5$)

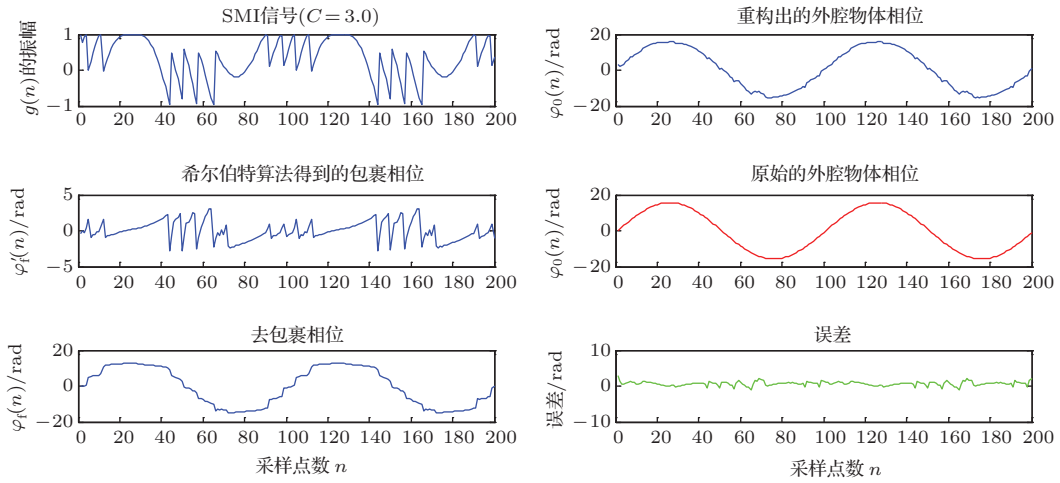


图8 适度反馈条件下相位提取算法仿真 ($C = 3.0$)

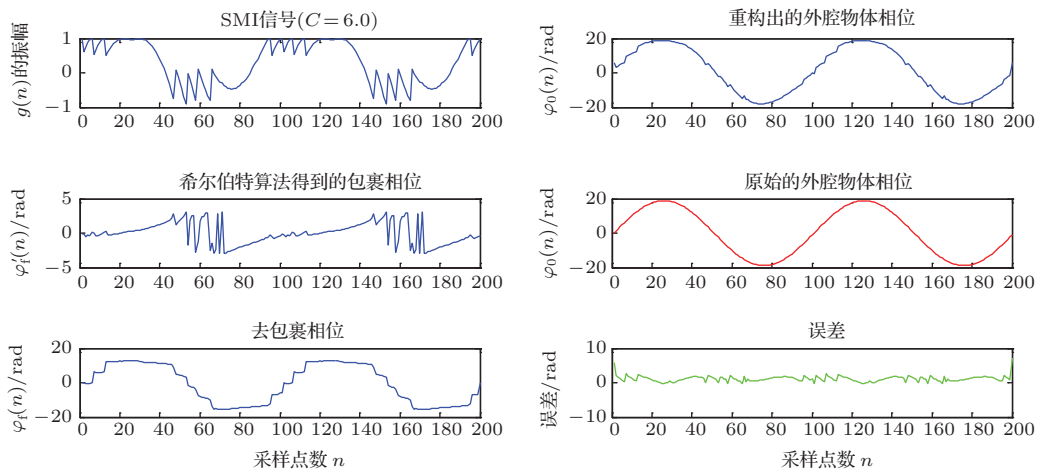


图9 强反馈条件下相位提取算法仿真 ($C = 6.0$)

4 实验验证分析

本文实验使用型号为HL7851G半导体激光器, 发出的光波长为785 nm. 实验研究中用正弦电压信号驱动压电陶瓷做微位移运动, 通过数据采集卡采集产生的OFSMI信号数据, 耦合至计算机通过上述EMD方法处理得到相位信息. 通过调节可调衰减器, 控制光反馈水平在弱反馈条件 ($0.0 < C < 1.0$) 下, 实验获得的一组OFSMI信号如图10所示, 其中PZT为正弦运动, 振幅为1500 nm, 频率为2 Hz. 利用光反馈相位频谱特征测量反馈水平因子 C 方法, 求取上述OFSMI信号中的参数 C 值为0.589.

图10中给出了基于EMD算法对OFSMI信号重构出的相位信息. 图11为相位误差分布曲线. 由图11可以看出采用HHT相位提取算法重

构出的OFSMI信号相位误差较小, 误差基本分布在1.6 rad以内, 换算成位移值在纳米量级. 将经过

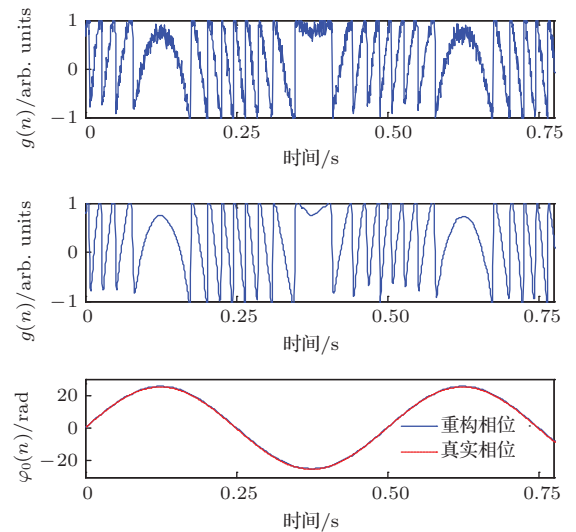


图10 (网刊彩色) 相位提取结果

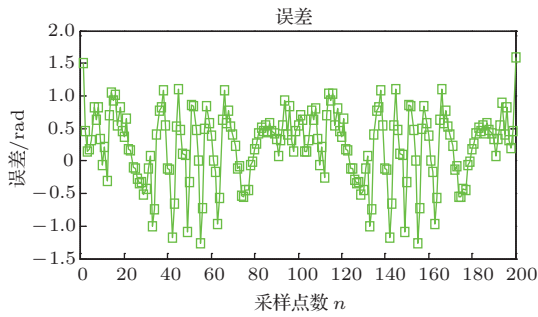


图 11 相位误差曲线

EMD 降噪后的 OFSMI 信号相位展开后得到的相位曲线比较平滑, 很好地恢复了 PZT 运动时反映出的相位变化. 上述仿真结果和此实验结果相符合, 表明了 EMD 方法的有效性.

5 结 论

本文将 EMD 算法应用于 OFSMI 信号相位解算中, 不仅解决了实验获取的 SMI 信号常带有噪声的问题, 而且实现了基频信号相位的精确提取, 将提取出的 OFSMI 信号经希尔伯特黄自适应相位提取算法处理后, 正确恢复出了含有光反馈的相位分布. 因为该方法求解的是每一时刻的瞬时相位, 不需要任何基函数, 故自适应性较强. 仿真和实验数据的一致性表明 EMD 降噪方法可以快速有效消除干涉信号中的噪声干扰, 实现了在多种光反馈机理下 OFSMI 信号的相位解算, 进一步可重构出外腔物体的运动波形.

参考文献

[1] King P G R, Steward G J 1963 *New Sci.* **17** 180

- [2] Mao W, Zhang S L, Zhang L Q, Zhu J, Li Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4704 (in Chinese) [毛威, 张书练, 张连清, 朱钧, 李岩 2006 物理学报 **55** 4704]
- [3] Zhu J, Zhao Y, Jin G F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2979
- [4] Ji J Y, Ye H Y, Yu Y G 2011 *Laser & Infrared* **41** 89 (in Chinese) [姬静毅, 叶会英, 禹延光 2011 激光与红外 **41** 89]
- [5] Yang Y, Li X F, Kou K, Wang C 2012 *Optics and Precision Engineering* **20** 1740 (in Chinese) [杨颖, 李醒飞, 寇科, 王错 2012 光学精密工程 **20** 1740]
- [6] Servagent N, Bosch T, Lescure M 2000 *Selected Topics in Quantum Electronics* **6** 798
- [7] Guo D M, Tan S Q, Wang M 2006 *Acta Optica Sinica* **26** 845 (in Chinese) [郭冬梅, 谈苏庆, 王鸣 2006 光学学报 **26** 845]
- [8] Zhang Z Y, Gao Y, Zhao X H, Zhao X 2010 *Laser & Optoelectronics Progress* **2010** 96 (in Chinese) [张照云, 高杨, 赵兴海, 赵翔 2010 激光与光电子学进展 **2010** 96]
- [9] Zweig D A, Hufnagel R E 1990 *Advanced Optical Manufacturing and Testing*, San Diego, July 01 1990 p295
- [10] Pereira T, Vaz P, Oliverira T, Santos I, Pereira H C, Almeida V, Correia C, Cardoso J 2013 *Physiological Measurement* **34** 3
- [11] Liu G, Zhang S L, Xu T, Zhu J, Li Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4701 (in Chinese) [刘刚, 张书练, 徐亭, 朱钧, 李岩 2005 物理学报 **54** 4701]
- [12] Zou M W, Feng G L, Gao X Q 2006 *Chin. Phys. B* **15** 1384
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q, Yen N C, Tung C C, Liu H H 1998 *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **454** 903
- [14] Wang F P, Zou W F, Ying Z 2009 *Opto-Electronic Engineering* **36**(4) 92 (in Chinese) [王凤鹏, 邹万芳, 尹真 2009 光电工程 **36**(4) 92]
- [15] Kong W, Xiao J, Chang Z T 2012 *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance* **32** 189 (in Chinese) [孔伟, 肖剑, 常增田 2012 弹箭与制导学报 **32** 189]
- [16] Andrade A O, Nasuto S, Kyberd P 2006 *Biomedical Signal Processing and Control*. **1** 44
- [17] Wei L, Xi J, Yu Y, Chicharo J 2006 *Intelligent Signal Processing and Communications*, Yonago, Dec 12–15 2006 p780

Study on the phase-extracting method of self-mixing signal based on empirical mode decomposition*

Zhang Yu-Yan[†] Zhou Hang Yan Meisu

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Key Lab of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 7 July 2014; revised manuscript received 20 August 2014)

Abstract

In order to achieve precise extraction of the phase with a light feedback mechanism, based on empirical mode decomposition (EMD) algorithm, an adaptive phase extraction method is proposed in this paper. First of all, the EMD algorithm is acted on the self-mixing interference (SMI) mixed noise signals, then using the principle of HHT to extract the instantaneous phase information in the SMI signal in time and retrieve the true phase of the object from the wrapped phase. In this paper, the phase extraction algorithm based on EMD are simulated under different optical feedback conditions. Finally, an experimental setup based on SMI has been given for demonstration. Experimental results show that this method is correct in principle and can be used in the precise extraction and its maximum error is less than 1.6 rad. The simulation results are consistent with the experimental data, which show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: optical feedback self-mixing interference, phase extraction, EMD, denoising

PACS: 42.30.Rx, 42.25.Hz, 84.30.Vn

DOI: [10.7498/aps.64.054203](https://doi.org/10.7498/aps.64.054203)

* Project supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20111333120009), and the Natural Science Foundation of Hebei Province (Grant Nos. F2012203184).

[†] Corresponding author. E-mail: yyzhang@ysu.edu.cn