

文章编号: 1001-3806(2008)03-0265-03

光反馈自混合干涉信号预处理方法

禹延光, 郭常盈, 叶会英, 袁秀娟
(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052)

摘要: 为了提高参数估计的精确度, 根据光反馈自混合干涉信号的特点, 采用对原始光反馈自混合实验信号进行滤波和归一化等预处理方法, 有效地滤除了噪声, 使信号平坦化, 而且预处理后的实验信号与理论模型仿真数据更加吻合。分别利用原始实验信号和预处理后的信号对参数进行估计, 对比结果表明, 使用预处理后的光反馈自混合信号进行参数估计, 线宽展宽因数和光反馈水平因子 C 的测量精度分别提高了 5.52% 和 4.55%。

关键词: 激光技术; 预处理; 归一化; 光反馈自混合干涉; 线宽展宽因数

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A

Pre-processing for the optical feedback self-mixing interferometric signal

YU Yan-guang, GUO Chang-ying, YE Hui-ying, YUAN Xiu-juan
(College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: For improving the precision of the parameter estimate, a set of pre-processing methods including filtering and normalization were proposed for the initial experimental signal according to the characteristics of the optical feedback self-mixing interference signal. The proposed approach implements filtering of noise effectively and flat the signal. The pre-processed OFSM I experimental signal tallied much with the theoretic signal. Estimating parameters using the initial and the pre-processing signal separately, comparison results show that the latter can make the accuracy of the line width spreading factor and the optical feedback level factor C improve by 5.52% and 4.55% respectively.

Key words: laser technique; pre-processing; normalization; optical feedback self-mixing interferometry (OFSM I); linewidth enhancement factor

引 言

光反馈自混合干涉 (optical feedback self-mixing interferometry, OFSM I) 是指激光器输出光被外部反射体反射或散射后, 其中一部分又反馈回激光器谐振腔, 反馈光与腔内光相干混合后, 调制激光器输出功率的一个过程, 基于这种干涉技术的激光信号被称为 OFSM I 信号。

由于自混合信号不仅携带外部目标体的特性与运动规律的信息, 而且携带激光器自身参数的信息。因此, 光反馈自混合信号主要用于物体运动规律测量^[1-7]和激光器自身的参数测量^[8-10]。利用激光自混合干涉原理设计的各种传感器已被应用于位移、振动、形貌、角度等物体运动规律测量中。而激光器自身的参数测量目前有激光器线宽及其展宽因数。

在测量中, 如何根据 OFSM I 信号高精度获取被测参数, 是实际应用中需要解决的关键问题。由 OFSM I 实验装置直接记录的实验信号含有不同形式的噪声信号, 大大影响了参数信息的精确提取。因此, 在利用 OFSM I 信号进行参数估计之前需要对其预处理, 其中包括滤波和归一化两部分。

本文中基于 OFSM I 效应的基本理论, 结合 OFSM I 信号的特点, 利用窗函数法设计一个有限冲激响应 (finite impulse response, FR) 低通数字滤波器对 OFSM I 信号进行滤波和归一化数据处理, 达到采样数据范围与模型数据相一致, 以便更好地进行参数估计。

1 基本理论

OFSM I 干涉的基本模型为^[9]:

$$\phi_f(\tau) = \phi_0(\tau) - C \sin[\phi_f(\tau) + \arctan \alpha] \quad (1)$$

$$P(\phi_f(\tau)) = P_0 [1 + mG(\phi_f(\tau))] \quad (2)$$

$$G(\phi_f(\tau)) = \cos(\phi_f(\tau)) \quad (3)$$

式中, α 是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); $\phi_0(\tau)$ 表示无反馈外腔光相位, 且 $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau$,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60574098)

作者简介: 禹延光 (1964-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为新型传感理论与技术、数字信号处理。

E-mail: yanguangyu@zzu.edu.cn

收稿日期: 2007-03-06; 收到修改稿日期: 2007-04-20

$\phi_f(\tau)$ 表示有反馈外腔光相位,且 $\phi_f(\tau) = \omega_f(\tau)$ ($\omega_f(\tau), \omega_0(\tau)$ 分别是有、无反馈时激光器的角频率); C 是光反馈水平因子; $P(\phi_f(\tau))$ 和 P_0 分别是有外腔和无外腔时半导体激光器的输出功率, m 为调制系数 (典型值为 $m \approx 10^{-3}$); $G(\phi_f(\tau))$ 是干涉函数, 表示外腔光相位对输出功率的调制。

由模型 (1) 式 ~ (3) 式看出, 通过改变外腔长度 L , 可以得到 $P(\phi_f(\tau))$ 。对于 OFSM I 实验装置, 采用激光管 HL7851G 作光源兼探测器, 使其直流偏置于远高于阈值工作点 (保证单模运行); 外部振动物体采用扬声器或压电陶瓷 (piezoelectric ceramics, PZT), 对其照射激光部分反馈回激光腔。振动改变了外腔 L , 从而产生 OFSM I 信号 $P(\phi_f(\tau))$ 。连续可调衰减器控制光反馈水平, 使系统工作在要求的反馈水平状态。由此获得的 OFSM I 信号如图 1 所示。显然, 波形中包含很大的“毛刺”且不平坦。

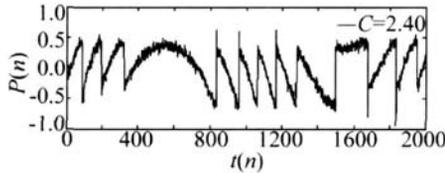


Fig 1 Initial sampled OFSM I waveform

2 OFSM I 信号预处理

2.1 滤波设计分析

在实验过程中, 温度变化和空气流的扰动及电子噪声都会给 OFSM I 干涉信号带来干扰。因此, 原始采样得到的 OFSM I 信号伴随有大量的随机噪声。高频噪声

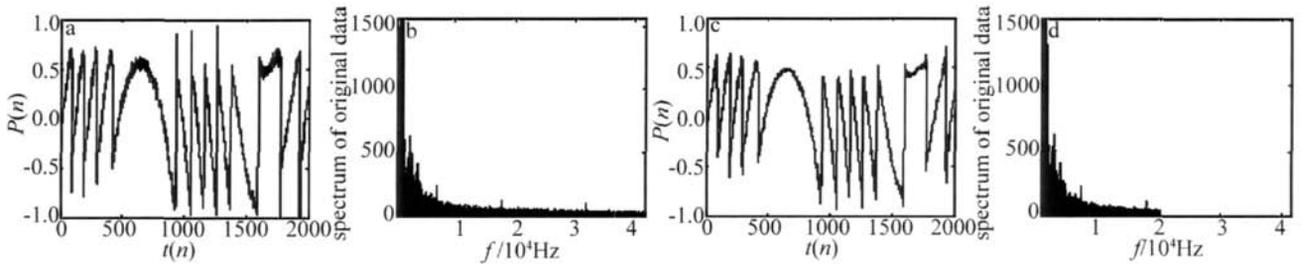


Fig 3 OFSM I waveform and its Fourier spectrum

a—initial OFSM I signal b—the Fourier spectrum of the initial OFSM I signal c—the filtered OFSM I signal d—Fourier spectra of the filtered OFSM I signal

此滤波器实现了目标要求。

2.2 归一化处理

在 OFSM I 实验中, 通过改变外腔长度, 可以得到 $P(\phi_f(\tau))$ 和 τ 的关系曲线, 即 OFSM I 信号。通常的测量理论采用 $G(\phi_f(\tau))$ 来描述 OFSM I 信号。因此需要对实验数据进行归一化处理。

由 OFSM I 干涉理论模型 (2) 式、(3) 式得:

$$G(\phi_f(\tau)) = \frac{P(\phi_f(\tau)) - P_0}{m P_0} \quad (4)$$

(4) 式就是所谓的归一化方程。实际记录的 OFSM I 信

及低频波动。为了准确地提取参数信息, 首先需要进行滤波处理。这需要设计一个 FR 数字滤波器对自混合实验信号进行滤波。FR 数字滤波器设计方法有多种, 如窗函数设计法、频率采样法和 Chebyshev 逼近法等。

根据需要滤波信号的特点, 设定一些技术指标, 利用 MATLAB 的信号处理工具箱仿真实现所设计的滤波器, 得到其幅频特性和相频特性, 以验证设计结果是否满足指标要求。然后仿真实现对信号的滤波, 通过滤波结果来分析判断。

根据实验, 滤波器技术指标如下: 通带截止频率为 19100Hz, 阻带截止频率为 20100Hz, 采样频率为 $1024 \times 64 \times 2 = 131072\text{Hz}$; 阻带衰减 $\delta_2 \geq 105\text{dB}$ 。利用计算机仿真实现所设计滤波器的幅频、相频响应曲线, 如图 2 所示。由此图可见, 设计结果满足指标要求。

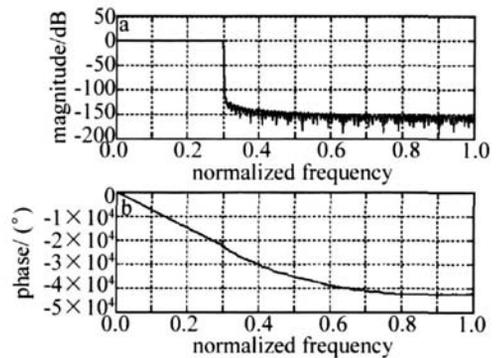


Fig 2 Characteristic diagram of low pass filter

下面, 利用所设计的滤波器来验证滤波效果。滤波效果如图 3 所示。观察时域和频域图可知: 高频噪声则被滤除, 滤波后的信号更加平滑, 这进一步说明了

号是时间的函数, 记做 $G(t)$, 根据滤波后 OFSM I 信号的特点, 归一化处理的具体步骤如下: (1) 去除直流分量; (2) 寻找所有峰值点记作 peak; (3) 确定正负峰值点的幅值及个数分别为 $A_p, A_n, \text{counter1}, \text{counter2}$; (4) 分别求出正负峰值点的平均幅值分别为 M_p, M_n ; (5) 找出正负峰值点平均幅值的中心位置记做 P_n , 即 $P_n = (M_p + M_n) / 2$, 平移水平零基线到这个中心位置; (6) 对所有数据进行归一化处理, 即 $G(t) = G_0(t) / D$ 。其中, $G_0(t)$ 表示滤波后的自混合干涉实验样本数据, $G(t)$ 表示预处理后的自混合干涉实验样本数据, D 代表

了归一化数值,且 $D = \frac{|M_p| + |M_n|}{2}$ 。

上述方法用计算机仿真实现,归一化效果见图 4。

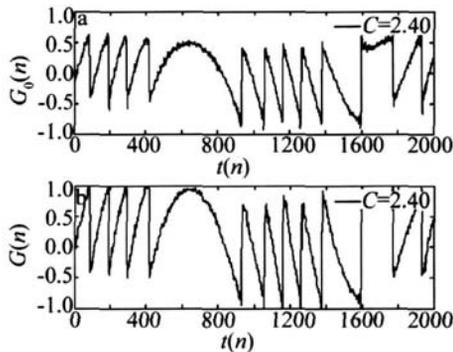


Fig 4 a—without normalized OFSM I waveform b—normalized OFSM I waveform

3 性能验证

为了评估上述方法的有效性和精确性,从图 1 实验中所获得的 3 组不同 OFSM I 实验信号及其预处理后的信号如图 5 所示,连续取 5 个周期,按照文献 [4] 中的参数测量方法,分别用原始 OFSM I 信号和预处理后 OFSM I 信号进行半导体激光器参数线宽展宽因数 α 和光反馈因子 C 的估计,测量结果见表 1。由于所获得的

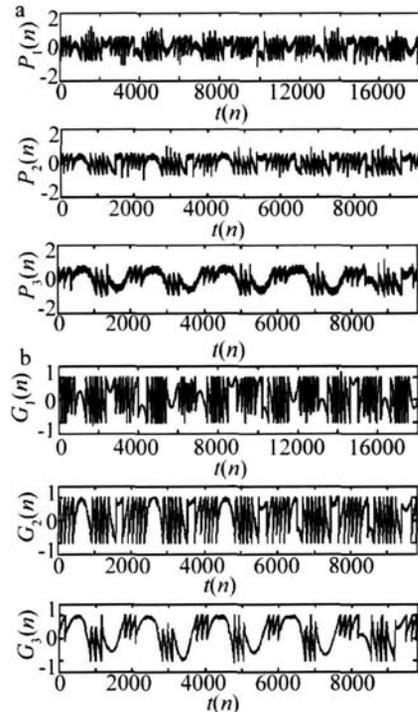


Fig 5 Three OFSM I experimental signals a—initial experimental signal b—the pre-processed signals

Tabel 1 The estimating results for α and C

measured parameter	OFSM I signal 1		OFSM I signal 2		OFSM I signal 3	
	initial	pre-processed	initial	pre-processed	initial	pre-processed
α	3.8897	3.5745	4.1183	3.7761	3.9723	3.6745
δ_α / α	10.02%	3.18%	8.65%	3.21%	7.83%	3.54%
\hat{C}	2.4227	2.3963	2.2448	2.3699	3.2134	3.1363
δ_C / \hat{C}	6.10%	1.15%	6.14%	1.21%	5.67%	1.91%

OFSM I 实验信号包含 5 个周期,每一个周期均可计算出一个 α 和一个 C ,表中参数估计结果用 5 个周期计算结果的平均值表示,即 $\alpha = (\sum_{i=1}^5 \alpha_i) / 5, \hat{C} = (\sum_{i=1}^5 \hat{C}_i) / 5$,估计精度分别用 $\delta_\alpha / \alpha, \delta_C / \hat{C}$ 来描述,其中, δ_α, δ_C 是 α 和 C 的标准差。

从表 1 比较结果可以看出,利用预处理后的数据进行 α, C 参数估计,估计精度有了明显的提高。

4 结论

根据 OFSM I 信号的特点,提出对原始 OFSM I 实验信号进行滤波和归一化预处理。将所提出的预处理算法应用到实验上获得的 OFSM I 信号,结果表明,预处理后的信号比较平滑,消除了噪声信号,利用预处理后的信号进行参数 α 和 C 估计,可以较大地提高参数估计的精度。

参考文献

- [1] GU DO GL, M CHELE N, SLVANO D, *et al* Laser diode self-mixing technique for sensing applications [J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2002, 4 (6): 283-294.
- [2] LORENZO S, YU Y G, GU DO GL, *et al* Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53 (1): 223-232.
- [3] YU Y G, CHENG M, QIANG X F. Self-mixing interference effects in laser diode with multiple optical feedback [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21 (9): 1093-1098 (in Chinese).
- [4] NOËL S, THIERRY B, LESCURE M. Design of a phase-shifting optical feedback interferometer using an electrooptic modulator [J]. IEEE J Q E, 2000, 36 (5): 789-802.
- [5] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J, *et al* Interference of two beams in a He-Ne laser with optical feedback [J]. Laser Technology, 2003, 27 (5): 470-472 (in Chinese).
- [6] SLVANO D, GU DO G, SAB NA M. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. IEEE J Q E, 1995, 31 (1): 113-119.

(下转第 271 页)

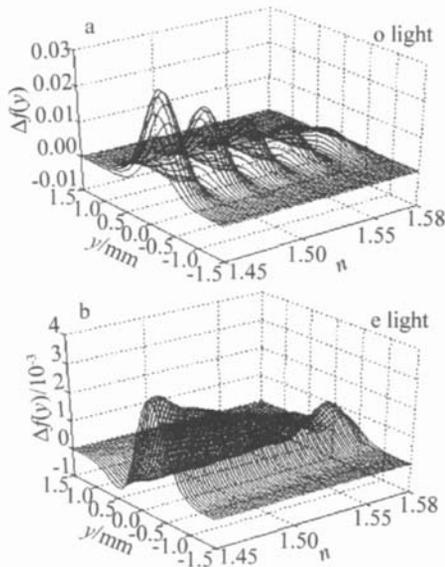


Fig 4 Effects of refraction of the transmitter in the cementing layer to the light intensity of single-mode Gaussian beam
射率的变化对透射光束光强分布的影响很小。

3 结 论

由于光的干涉效应,导致了单模高斯光束通过 Semamont 棱镜后,棱镜会对透射光束的光强分布产生影响,这种影响除了与入射光本身的性质,如波长、腰斑半径等有关以外,还与棱镜的结构角、胶合层的厚度以及胶合层介质的折射率有关。当三者确定其二时,这种影响均会随另一参量的变化而呈现周期性振荡,且振荡的状态也会相应的发生变化。总体上看,棱镜对透射光束光强分布的影响均小于 3%,所以,在要

求不是太严格的应用中,可以忽略 Semamont 棱镜对高斯光束光强分布的影响。

参 考 文 献

- [1] WANG T, WU F Q, MA L L. Effect of air-gap polarizing prism on distribution of light intensity of single-mode gaussian beam [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26 (9): 1335-1339 (in Chinese).
- [2] FAN J Y, LI H X, WU F Q. A study on transmitted intensity of disturbance for air-spaced Glan-type polarizing prisms [J]. Opt Commun, 2003, 223: 11-16
- [3] MA L L, LI G H. Polarized light expressed by poicare sphere [J]. Laser Technology, 2003, 27 (4): 302-303 (in Chinese).
- [4] LI H X, WU F Q, FAN J Y. Thermodynamic effect on transmitted intensity perturbation of air-gapped Glan-type polarizing prisms [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52 (8): 2081-2086 (in Chinese).
- [5] WANG T, WU F Q, MA L L. Transmitting characteristics of deferring girding radius single mode Gaussian beam [J]. Journal of Qufu Normal University (Nature Science), 2006, 32 (4): 72-74 (in Chinese).
- [6] LI J Zh, LI G H, XIAO Sh G, et al. Spectrophotometer polarization spectrum measurement [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 1994, 14 (5): 121-126 (in Chinese).
- [7] TANG H J, WU F Q, DENG H Y. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. Laser Technology, 2006, 30 (2): 215-217 (in Chinese).
- [8] REN Sh F, WU F Q, ZHAO P, et al. Ternary parallel beam splitter combined of iceland and glass [J]. Laser Technology, 2006, 30 (3): 311-316 (in Chinese).
- [9] WU F Q, ZHENG Ch H, XUE D. Characteristic study of backward-use of the rochan prism [J]. Journal of Optoelectronic · Laser, 2002, 13 (10): 1010-1012 (in Chinese).
- [10] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, et al. Laser principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 71-74 (in Chinese).
- [11] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978: 61-71 (in Chinese).
- [12] YU Y G, GU DO G, SILVANO D. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self-mixing effect [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16 (4): 990-992.
- [13] LI Sh Y, YU Y G, YE H Y, et al. The estimation of the parameters in the model of the self-mixing effect in semiconductor lasers [J]. Laser Technology, 2005, 29 (5): 519-521 (in Chinese).

(上接第 267 页)

- [7] DING Y Ch, ZHANG Sh L, LI Y, et al. Experimental study on the self-mixing interference with orthogonal polarized He-Ne light [J]. Laser Technology, 2004, 28 (1): 33-35 (in Chinese).
- [8] GU DO G, MICHELE N. Laser diode linewidth measurement by means of self-mixing interferometry [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 2000, 12 (8): 1028-1030.