

基于条纹丢失补偿的自混合干涉位移测量算法

叶会英, 朱君瑶, 王珍雪

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 自混合干涉位移传感测试系统在高反馈水平因子条件下会出现条纹丢失现象, 若不加以补偿则将降低位移测量精度. 基于 Lang-Kobayashi 方程, 研究外部物体做周期运动时在高反馈水平因子条件下自混合干涉条纹丢失现象, 得出反馈水平因子 C 和半个周期内条纹丢失数目 m 之间的规律为: $C < 4.6, m = 0$; $4.6 \leq C < 4.8, m = 1$; $4.8 \leq C < 7.9, m = 2$; 并设计基于条纹丢失补偿的自混合干涉位移测量算法, 以提高位移测量精度.

关键词: 位移测量; Lang-Kobayashi 方程; 高反馈水平因子; 条纹丢失补偿

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.014

0 引言

光反馈自混合干涉 (OFSMI) (即自混合干涉) 是指激光器输出光经外部反射体反射或散射后, 其中一部分光又反馈回激光器谐振腔, 反馈光与腔内光相混合, 从而调制激光器输出光^[1]. 由于 OFSMI 信号携带了外部反射体和激光器自身参数的信息, 并且系统装置简单, 所以近年来很多学者应用光反馈自混合干涉系统对物体位移^[2-4]、距离^[5]、速度^[6]、加速度^[7]及激光器自身参数^[8]等的测量进行深入研究.

笔者基于 Lang-Kobayashi 方程建立的 OFSMI 数学模型^[9]:

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

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

$$G(\varphi_f(\tau)) = \cos(\varphi_f(\tau)). \quad (3)$$

式中: α 是半导体激光器线宽展宽因数; $\varphi_0(\tau) = \omega_0\tau$, $\varphi_f(\tau) = \omega_f\tau$; $\omega_f(\tau)$ 、 $\omega_0(\tau)$ 分别是有光反馈和无反馈时激光的角频率; $\varphi_f(\tau)$ 、 $\varphi_0(\tau)$ 分别为有光反馈和无光反馈时的激光器外腔相位; $\tau = 2L/c$, L 是外腔长度, c 是光速; C 是光反馈水平因子; $P(\varphi_f(\tau))$ 和 P_0 分别是有光反馈和无光反馈时半导体激光器的输出功率; m 为调制系数 (典型值为 $m \approx 10^{-3}$); $G(\varphi_f(\tau))$ 是干涉函数, 它体现了外腔光相位对激光输出功率的影响.

C 是模型中的重要参数, 当 $C < 1$ 时, 光反馈水平较弱, 为弱光反馈; 当 $1 < C < 4.6$ 时, 为适度光反馈; 在弱光反馈和适度光反馈的情况下不会出现条纹丢失现象, 此时可利用条纹计数法来测量物体的位移; 当 $C > 4.6$ 时, 为强光反馈, 此时会出现条纹丢失现象^[10]. 本文研究 $C > 4.6$ 条件下的条纹丢失规律, 并进行条纹丢失补偿算法的研究, 提高测量的精度.

1 条纹丢失规律

通过对高反馈水平因子条件下的自混合干涉信号进行行为分析^[11], 发现当 $C < 1$ 时, φ_0 和 φ_f 成一一对应的关系, 此时 OFSMI 信号为正弦波信号, 和传统干涉条纹一致; 当 $1 < C < 4.6$ 时, φ_0 和 φ_f 之间的关系变得比较复杂, 一个 φ_0 对应着 3 到 5 个 φ_f , 此时 OFSMI 信号为锯齿波信号; 当 $C > 4.6$ 时, 一个 φ_0 对应 5 个甚至更多 φ_f , 如图 1 所示, 此时, OFSMI 信号会出现条纹丢失现象.

设外部物体做正弦波运动, 研究高反馈水平因子条件下的自混合干涉条纹丢失规律的步骤:

第一步, 选取 $\varphi_f = 19$, 即外腔的移动位移为一个定值, 然后分别令 $C = 4, 4.7, 4.8, 5, 6, 7.9, 8, 9$, 所对应的 OFSMI 信号如图 2 所示. 从图 2 中可以得出, 对于确定的 φ_f 值, $\varphi_f = 19$, 在半个周期内条纹的数目 N 随 C 值的变化情况: 当 $C < 4.8$

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60871031)

作者简介: 叶会英 (1966-), 河南开封人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事光电测试技术及信号处理等方面的研究, E-mail: iehyye@zzu.edu.com.

时, $N=6$; 当 $4.8 \leq C < 5$ 时, $N=5$; 当 $5 \leq C < 7.9$ 时, $N=4$; 当 $7.9 \leq C < 9$ 时, $N=3$.

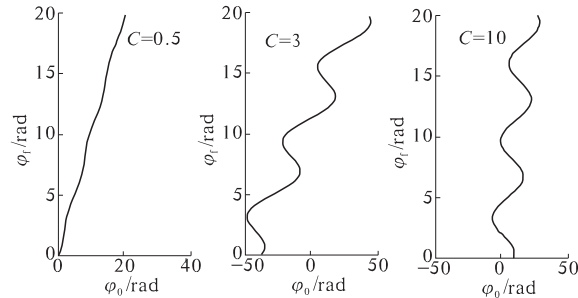


图 1 当 $C=0.5, 3, 10$ 时, φ_f 与 φ_0 的关系

Fig. 1 Relationship between φ_f and φ_0 where $C=0.5, 3, 10$

第二步, 改变 φ_f 的值, 取 $\varphi_f=25$, 按照上述的方法, 令 $C=4, 4.7, 4.8, 5, 6, 7.9, 8, 9$, 所对应的 OFSMI 信号如图 3 所示. 从图 3 可以得出, 当 $C < 4.6$ 时, $N=8$; 当 $4.6 \leq C < 4.8$ 时, $N=7$; 当 $4.8 \leq C < 7.9$ 时, $N=6$; 当 $7.9 \leq C < 9$ 时, $N=3$.

在实验中, 物体位移最大约 $10 \mu\text{m}$, 对应的外腔相位变化最大约 160 rad , 所以在 φ_f 为 $(0, 160)$ 的范围内, 随机取 100 个值, 按照上述的方法研究在半个周期内, 条纹丢失数目 m 随着 C 的变化规律为: $C < 4.6, m=0$; $4.6 \leq C < 4.8, m=1$; $4.8 \leq C < 7.9, m=2$.

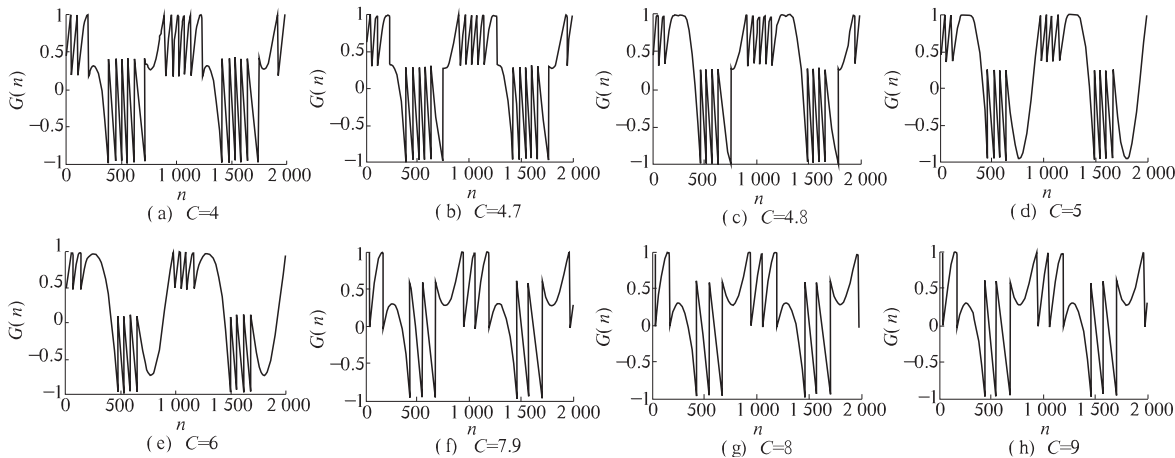


图 2 $\varphi_f=19$ 时 C 取不同值对应的 OFSMI 信号

Fig. 2 Simulated OFSMI signals with different C values corresponding to $\varphi_f=19$

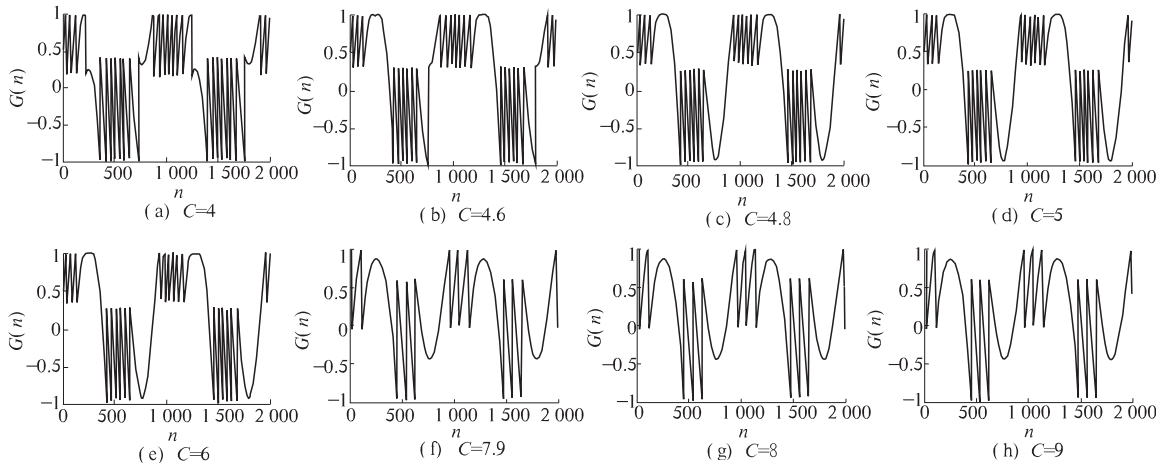


图 3 $\varphi_f=25$ 时 C 取不同值对应的 OFSMI 信号

Fig. 3 Simulated OFSMI signals with different C values corresponding to $\varphi_f=25$

2 位移重构

光反馈自混合干涉的基本规律是: 当 $\varphi_f(\tau)$ 有 2π 相位的变化 (即外腔移动半个光波波长 $\lambda_0/2$) 时, 则 $G(\tau)$ 产生一个周期波动的信号, 称之为一个整数条纹; 小于 2π 相位的 $\varphi_f(\tau)$ 的变化, 所

产生的 $G(\tau)$ 变化量, 称之为小数条纹. 因此把 $\varphi_f(\tau)$ 的变化 $\Delta\varphi_f(\tau)$ 分为两部分, 记做: $\Delta\varphi_f(\tau) = A_I + A_D$. 其中, A_I 为整数干涉条纹所对应的相位, $A_I = 2N\pi$, N 为整数条纹的个数; A_D 为小数条纹所对应的相位. 物体位移 $D(t)$ 与外腔相位变化量 $\Delta\varphi_f(\tau)$ 之间的关系为^[12]

$$D(t) = \Delta\varphi_f(\tau) \times \lambda_0 / (4\pi).$$
 (4)

利用锯齿段的最小二乘线性拟合,可得出小数条纹 $G(A_D)$ 表达式为^[13]

$$G(A_D) = -0.95 + 0.39A_D.$$
 (5)

由实验的自混合干涉信号测得 $G(n_A)$ 和 $G(n_B)$ 如图 4 所示.

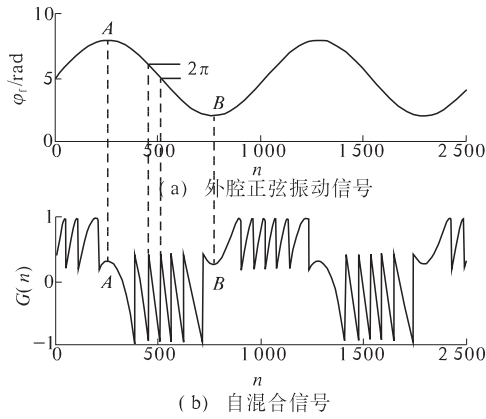


图 4 外腔正弦振动信号及其对应的自混合信号

Fig. 4 Sinusoidal displacement of an external object OFSMI signal

把 $G(n_A)$ 和 $G(n_B)$ 代入 $G(A_D)$, 可计算出相应的小数相位, 分别记做 A_{DA} 和 A_{DB} , 则一个小数条纹所对应的相位为 $(A_{DA} + A_{DB}) / 2$.

在适度光反馈及强光反馈下, 利用条纹计数法测量物体位移时, 把得到的 OFSMI 信号进行微分处理, 得到正负脉冲信号 $D(n)$, 如图 5 所示. 图中正脉冲表示物体沿正方向移动, 负脉冲表示物体沿反方向移动. 在没有考虑条纹丢失情况时, 位移算法的流程图如图 6^[14].

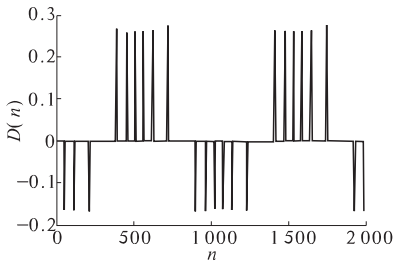


图 5 OFSMI 信号进行微分得到的正负脉冲信号

Fig. 5 Differential signal of the OFSMI signal

用 $s(n)$ 表示检测到的脉冲信号的正负, n 表示检测到的脉冲数目, $n = 1, 2, 3, \dots$. 当 $s(n) = 1$, 表示检测到的第 n 个条纹是正脉冲; $s(n) = -1$, 表示检测到的第 n 个条纹为负脉冲.

对正负脉冲信号进行检测, 当 $s(n)$ 等于 $s(n-1)$, 表示脉冲的方向没有发生改变, 此时用 $s(n) * 2\pi$ 表示, 输入到累加模块中; 当 $s(n)$ 不等

于 $s(n-1)$, 表示脉冲的方向发生改变, 则表示为 $s(n) * [2\pi + (A_{DA} + A_{DB}) / 2]$, $(A_{DA} + A_{DB}) / 2$ 表示一个小数条纹代表的相位, 输入到累加模块中, 把累加模块中的数据求和, 然后乘上 $\lambda_0 / (4\pi)$ 得到物体的移动位移 $D(t)$.

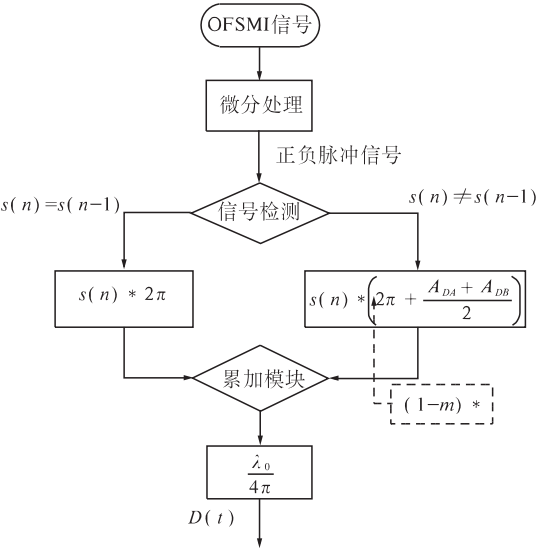


图 6 未考虑条纹丢失的位移算法
Fig. 6 The displacement algorithm without considering the fringe-loss

为提高条纹计数法测位移的精度, 则需考虑条纹丢失并进行条纹丢失补偿, 重构位移算法的模式加入虚框图中的系数.

当检测到的 $s(n)$ 不等于 $s(n-1)$, 表示检测到的脉冲信号的方向发生改变, 此时要对丢失的条纹进行补偿, 有 $s(n) * [(1+m) * 2\pi + (A_{DA} + A_{DB}) / 2]$, m 表示半个周期内条纹丢失的数目, 输入到累加模块中, 把累加模块中的数据求和, 然后乘上 $\lambda_0 / (4\pi)$ 得到物体的位移 $D(t)$.

3 实验结果

在仿真实验中, 分别取 $C = 4.7$ 和 $C = 7$ 时, 对算法 1 (未考虑条纹丢失所测位移) 和算法 2 (考虑条纹丢失并进行补偿所测位移 (位移重构)) 进行对比, 如表 1 所示.

从表 1 可得出, 在未考虑条纹丢失时, 所测得的物体的移动位移与实际位移相差较大, 精度不高; 考虑条纹丢失现象并进行补偿时, 测得的物体的移动位移与物体的实际位移相差约 $0 \sim 0.2 \mu\text{m}$, 测量的精确度有了很大的提高. 笔者提出的算法更适合用于条纹计数法测量物体的位移.

表 1 $C=4.7,7$ 时算法 1 和算法 2 的比较

Tab.1 Comparison of algorithm 1 and 2 with $C=4.7,7$

C	物体实际 位移/ μm	算法 1 位移/ μm	算法 2 位移/ μm	算法 2 精度
4.7	1.62	1.18	1.57	3.0%
	2.38	1.96	2.36	0.8%
	3.33	2.75	3.14	5.7%
	4.00	3.53	3.92	2.0%
	4.75	3.92	4.71	0.8%
7	1.62	0.79	1.50	7.4%
	2.38	1.57	2.11	11.3%
	3.33	2.36	3.04	10.0%
	4.00	3.14	3.82	4.5%
	4.75	3.92	4.63	2.5%

4 结束语

在高反馈水平因子条件下,会出现条纹丢失现象,此时利用条纹计数测位移的精度比较低. 本文研究了在 $0 < C < 7.9$ 范围内,条纹丢失的条数,并在重构位移时进行条纹丢失补偿,同时本文提出的算法考虑到小数条纹所代表的位移,使得测得的物体位移更精确,为下一步高光反馈水平因子条件下的其他研究奠定了基础.

参考文献:

[1] 赵岩,禹延光,叶会英. 基于光反馈自混合干涉的对称折叠算法的精度分析[J]. 激光技术,2009,33(4):387-390.

[2] 杨振宇,王鸣,夏巍,等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析[J]. 光学学报,2013,33(4):0412007(1-7).

[3] 杨颖,李醒飞,寇科,等. 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用[J]. 光学精密工程,2012,20(8):1740-1746.

[4] ZABIT U, BERNAL O D, BOSCH T. Mixing laser sensor for large displacement signal recovery in the pres-

ence of speckle[J]. IEEE Sensor Journal, 2013, 13(2):824-831.

[5] 胡险峰. 用激光二极管自混合干涉测量距离[J]. 物理实验,2013,33(1):26-29.

[6] 张照云,高杨,赵兴海,等. 半导体激光自混合变速测量的离散 Chirp-Fourier 变换方法[J]. 红外与激光工程,2012,41(4):1074-1077.

[7] 杨颖,李醒飞,李洪宇,等. 基于激光自混合效应的加速度传感器[J]. 光学学报,2013,33(2):0228003(1-7).

[8] 张玉燕,胡伟,监雄,等. 一种自混合干涉位移测量系统中参数 C 的测量方法[J]. 光电子·激光,2013,24(6):1150-1157.

[9] BES C, PLANTIER G, BOSCH T. Displacement measurements using a self-mixing laser diode under moderate feedback[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(4):1101-1105.

[10] ZABIT U, BONY F, BOSCH T. A self-mixing displacement sensor with fringe-loss compensation for harmonic vibrations[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(3):410-412.

[11] YU Yan-guang, XI Jiang-tao. Optical feedback self-mixing interferometry with a large feedback factor C : behavior studies[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(7):840-848.

[12] MAGNANI A, NORGIA M, PESATORI A. Optical displacement sensor based on novel self-mixing reconstruction method[C]//IEEE SENSORS 2010 Conference. Kona, HI:IEEE Press. 2010:517-520.

[13] 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]. 光学学报,2007,26(8):1430-1434.

[14] SERVAGENT N, GOUAUX F, BOSCH T. Measurements of displacement using the self-mixing interference in a laser diode[J]. Optical, 1998, 29(6):168-173.

A Self-Mixing Interference Displacement Measurement Algorithm
with Fringe-Loss Phenomenon and Compensation

YE Hui-ying, ZHU Jun-yao, WANG Zhen-xue

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The disappearance of self-mixing interference fringes in the high feedback-regime decreases the displacement measurement accuracy. The proposed method based on Lang-Kobayashi equation detects the fringe-loss with a large optical feedback factor C . And the relationship between C and m which represents the number of fringe-loss in half cycle is obtained: $C < 4.6, m = 0$; $4.6 \leq C < 4.8, m = 1$; $4.8 \leq C < 7.9, m = 2$. A self-mixing interference displacement measurement algorithm is presented that is able to remedy the influence of fringe-loss. The measurement accuracy is improved greatly.

Key words: displacement measurement; lang-kobayashi equation; high feedback regime; fringe-loss compensation