

文章编号: 1001-3806(2010)06-0847-04

光反馈自混合干涉系统反馈水平的研究与测量

朱红伟, 叶会英*

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为了能够较为准确地获得光反馈自混合干涉测量系统的反馈水平, 采用仿真分析光反馈自混合干涉信号和求解 Lang-Kobayashi 方程的方法, 得出反馈水平越高, 光反馈自混合干涉信号上干涉条纹的谷值与下干涉条纹峰值之差越大, 当反馈水平因子大于 7.8 时, 一些干涉条纹将消失; 同时由滞回现象可以推导出反馈水平因子的测量公式, 建立了测量模型, 并进行了仿真和实验验证。结果表明, 光反馈自混合干涉信号干涉条纹幅度受反馈水平影响; 利用提出的测量模型可以判断光反馈自混合干涉实验信号的反馈水平机制, 当光反馈水平因子介于 1 和 7.8 之间时可以测出具体光反馈水平因子值。

关键词: 测量与计量; 光反馈水平因子; 滞回现象; 光反馈自混合干涉

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.034

Research and measurement of feedback strength of optical feedback self-mixing interferometry systems

ZHU Hong-wei, YE Hui-ying

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

Abstract: In order to obtain feedback strength of optical feedback self-mixing interferometry (OFSMI) systems exactly, OFSMI signals were simulated and analyzed and Lang-Kobayashi equations were solved. It is found that separation between the minimum of the up-side interferometric fringes and the maximum of down-side interferometric fringes grows as the optical feedback strength factor increases. Some interferometric fringes disappear when the factor is greater than 7.8. Besides, a formula about feedback strength factor was deduced from hysteresis phenomenon and a measurement model was set up. The simulation and experimental results show that OFSMI signal fringes are related to the optical feedback strength factor. The proposed model based on the formula about the factor can be used to judge regimes of OFSMI measurement systems and the value of optical feedback strength factor can be figured out when it is between 1 and 7.8.

Key words: measurement and metrology; optical feedback strength factor; hysteresis; optical feedback self-mixing interferometry

引言

光反馈自混合干涉 (optical feedback self-mixing interferometry, OFSMI) 效应是指激光器输出光被外部物体反射或散射后, 其中一部分光又被反馈回激光器的谐振腔, 与激光腔内的光相干涉, 从而引起激光器输出功率和频率变化的效应。OFSMI 技术应用于测量主要基于两方面考虑: 一方面激光器的输出光经外部物体反射或散射以后, 其反馈光会携带外部物体运动和状态信息, 故可将其用于外部物体的几何及机械量的测量, 如位移^[1]、振动^[2]、速度^[3]等

测量; 另一方面, OFSMI 也携带了半导体激光器自身参量的信息, 也可用于激光器参量测量, 如线宽、线宽展宽因数^[4]等测量。OFSMI 系统具有与传统光干涉仪相同的相位灵敏度, 且系统结构更为简单紧凑、易准直, 因此, 光反馈自混合干涉技术吸引了越来越多的学者的关注和研究。

光反馈水平因子 C 是光反馈自混合干涉测量系统中的一个重要参量, 表征了系统的反馈强度。反馈水平在不同程度上影响着激光的强度噪声、谱效应、线宽展宽等。根据反馈强度的不同, 自混合干涉效应可以分为 3 类: 弱反馈、适度反馈和强反馈。不同光反馈水平下的 OFSMI 信号特性不同, 因此, 目前大多数 OFSMI 测量技术都只适用于特定的光反馈水平。而实际上由于 C 值受很多因素影响, 所以在实际测量过程中, 很难保证系统始终处于相应的光反馈水平。鉴于此, 作者首先分析并量化了反馈水平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60871031)

作者简介: 朱红伟 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新型传感理论与技术。

* 通讯联系人。E-mail: iehyye@zzu.edu.cn

收稿日期: 2009-12-17; 收到修改稿日期: 2010-04-02

因子对光反馈自混合干涉仿真信号的影响,然后基于 Lang-Kobayashi 方程讨论了不同反馈机制下的相位方程和滞回现象,并建立了 C 的测量模型,这对光反馈自混合干涉测量系统的实际应用具有推动作用。

1 基础理论

OFSMI 效应的基本模型^[4]:

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

$$G(\phi_r(\tau)) = \cos(\phi_r(\tau)) \quad (2)$$

$$P(\phi_r(\tau)) = P_0[1 + mG(\phi_r(\tau))] \quad (3)$$

(1)式称为系统的相位方程,(2)式表示输出强度与外腔光相位的关系。 $G(\phi_r(\tau))$ 为干涉函数,即 OFSMI 信号; $\phi_r(\tau) = \omega_r \tau$,为存在光反馈时外腔的光相位; $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau$,为无光反馈时外腔的光相位; ω_r, ω_0 分别为有、无光反馈时的激光角频率; $\tau = 2L_e/c, L_e$ 为外腔长度, c 为真空中光速; $P(\phi_r(\tau))$ 为有光反馈时激光器的辐射功率, P_0 为无光反馈时的辐射功率, m 为调制系数, C 为光反馈水平因子。

光反馈水平因子 C 定义为^[5]: $C = \xi r_3 (1 - r_2^2) \times \sqrt{1 + \alpha^2} \frac{\tau}{\tau_{sl} r_2}$ 。其中, ξ 为内外腔之间的光耦合系数; α 为半导体线宽展宽因子; r_2 为激光器内腔镜的幅值反射率; r_3 为外部反射物的幅值反射率; $\tau_{sl} = 2L_{sl}/c$ 表示光在激光器内腔往返飞行时间; L_{sl} 为激光器内腔长度。根据 C 值可将 OFSMI 效应划分如下: $0 < C < 1$ 时称为弱光反馈机制,此时的 OFSMI 信号为正弦波,与传统干涉信号类似; $1 < C < 4.6$ 时为适度光反馈机制, OFSMI 信号为类锯齿波; $C > 4.6$ 时为强光反馈机制,此时系统进入一个较复杂的情况,但仍然能够反映外腔的基本波动规律。

2 反馈水平与相位方程的解

C 值大小直接影响着相位方程解的个数,图 1 中给出了 $\alpha = 4, C$ 分别为 0.8, 3 和 7 时 ϕ_0 与 ϕ_r 的关系。 $C < 1$ 时,相位方程有单一解,即 ϕ_0 和 ϕ_r 一一对应(见图 1a); $C > 1$ 时,方程存在多个解,其中 $1 < C < 4.6$ 时存在 3 个解或 1 个解(见图 1b); $4.6 < C < 7.8$ 时存在 3 个解或 5 个解(见图 1c)。实际上,当 $7.8 < C < 14.0$ 时,相位方程有 5 个解或 7 个解,当 $14.0 < C < 20.3$ 时,相位方程会有 7 或 9 个解^[6]。

当 ϕ_0 和 ϕ_r 一一对应时,系统处于单稳态;当相位方程有多个解时,系统进入多模状态,产生模间竞争。根据模跳准则^[5,6],系统始终稳定在线宽最窄的模式,而各个稳态模的相对稳定性强弱随反馈相位的变化而

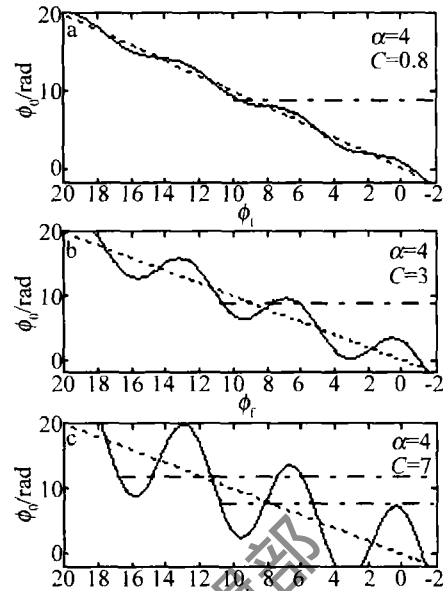


Fig. 1 The relationship between ϕ_0 and ϕ_r at different feedback strength 不同,从而产生模跳现象,如图 2 所示。随着 ϕ_0 的增大, ϕ_r 到达 B 点时将会直接跳变至 C 点,相位曲线的轨迹为 A-B-C-a-b-c;随着 ϕ_0 减小, ϕ_r 到达 d 点时将直接跳变至 a 点,曲线轨迹为 c-d-a-C-D-A。

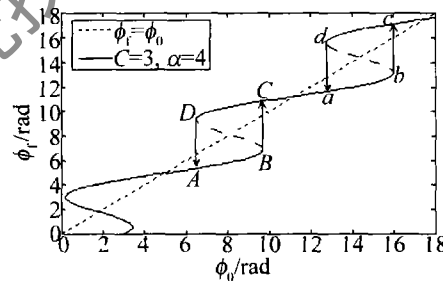


Fig. 2 Phase jumping and hysteresis under bistable condition

3 不同反馈水平下的 OFSMI 信号

为了分析 C 对 OFSMI 信号的影响,其它参量不变,只改变 C 值,观察 OFSMI 信号的变化。图 3 中给出 $\alpha = 4$ 时,不同反馈机制下 OFSMI 仿真信号波形。

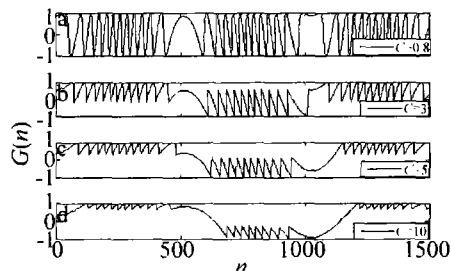


Fig. 3 The simulated OFSMI waveforms at different feedback strength 在一个周期($0 < n < 1000$)内,作者把左边的干涉条纹称为上干涉条纹,右边的干涉条纹称为下干涉条纹。 $0 < C < 1$ 时, OFSMI 信号为类正弦波(见图 3a); $C > 1$ 时 OFSMI 信号为类锯齿波,干涉条纹出现跳变点(见图 3b,图 3c 和图 3d),其中当 $C > 7.8$ 时,一些干涉条

纹将消失(见图3d)。这说明反馈水平高到一定程度时,一些干涉条纹会消失,从而一个干涉条纹对应半个光波波长的关系不再成立。如果 $0 < C < 7.8$ 时 OFSMI 信号有 M 个干涉条纹,那么 $7.8 < C < 14.0$ 时,干涉条纹数变成 $M/2$, $14.0 < C < 20.3$ 时,变成 $M/3$,以此类推。相应的,OFSMI 波形的每个条纹相对于外腔长度的变化将是 $\lambda_0/2, \lambda_0, 3\lambda_0/2 \dots$ [6]。

从图3还可看出,OFSMI 信号斜率随着 C 的增加而变大,上条纹逐渐上移,下条纹逐渐下移。本文中称上干涉条纹的谷值与下干涉条纹的峰值之差称为上下干涉条纹谷峰值。可以看出,该谷峰值随着 C 的增大而增大,故可根据谷峰值来获取 C 的信息(见图4)。

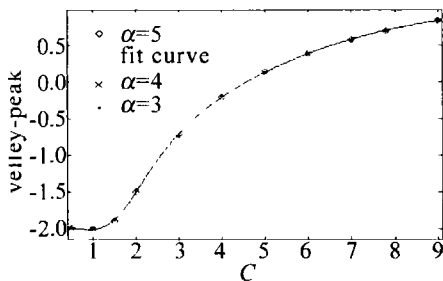


Fig. 4 Influence of the feedback strength on valley-peak

图4是 α 分别为3,4,5时,OFSMI 信号上下干涉条纹谷峰值与 C 的对应关系。从图上可以看出,3种情况下的数据点几乎重合在一起,这说明 α 的改变对该 C 与谷峰值关系影响不大。同时可以看出,谷峰值与 C 值一一对应并几乎呈线性关系。fit curve 为拟合曲线,拟合方程为: $f(x) = (-0.02052x^4 + 0.5051x^3 - 2.885x^2 + 6.298x - 7.75)/(x^2 - 2.938x + 3.857)$ 。当 $C < 1$ 时,谷峰值接近 -2,这与理论分析相符合,也可以作为系统是否处于弱光反馈水平的判断标准。

4 滞回现象与测量模型的建立

图5中给出了干涉函数 $G(\phi_0)$ 随初始相位 ϕ_0 而

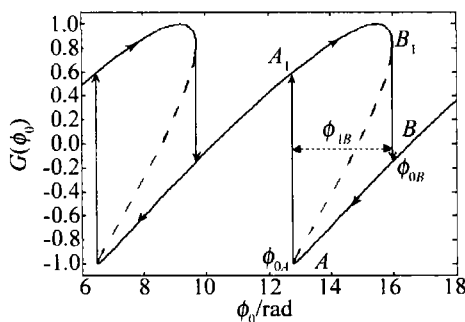


Fig. 5 Jumping points and hysteresis phenomenon of OFSMI signals

变化的情况。随着 ϕ_0 增大,当 $G(\phi_t)$ 到达 B_1 点时,它不是沿着虚线的路径变化而是直接跳变到 ϕ_{0B} 点,即沿着 A_1-B_1-B 进入下一周期;当 $G(\phi_0)$ 随着 ϕ_0 的减小

到达 A 点时,它将会跳变到 A_1 点,即沿着 $B-A-A_1$ 进入下一个周期;由于跳变点位置不同,出现滞回现象 [7-8],滞回区为 $A-B-A_1-B_1-A$,这里滞回区宽度 ϕ_{AB} 是指 ϕ_{0A} 与 ϕ_{0B} 之间的相位差,其大小由 C 值决定。两者之间的关系为: $\phi_{AB} = \phi_{0B} - \phi_{0A} = 2[\sqrt{C^2 - 1} + \arccos(-1/C) - \pi]$, ($1 < C < 7.8$)。推导过程如下。

令 $y = \omega_1 \tau, x = \omega_0 \tau$,代入相位方程,求微分、整理可得:

$$dy/dx = -[1 + C \cos(y + \arctan \alpha)]^{-1} \quad (4)$$

由于跳变点处 dy/dx 趋于无穷大,故令: $1 + C \cos(y + \arctan \alpha) = 0$,则: $\cos(y + \arctan \alpha) = -1/C$ (5)

因为 $G = \cos y$ 以 2π 为周期,所以可将其中一个跳变点的反馈相位 y_1 选定在 $(0, 2\pi)$ 范围内,所以:

$$y_1 = -\arctan \alpha + \arccos(-1/C) \quad (6)$$

$$y_2 = 2\pi - \arctan \alpha -$$

$$\arccos(-1/C) + 2N\pi, (N = 0, 1, \dots) \quad (7)$$

当 $1 < C < 7.8$ 时, y_1 与 y_2 在同一个周期内, $N=0$ 。

由(5)式得到: $C \sin(y + \arctan \alpha) = \pm \sqrt{C^2 - 1}$,将 y_1 和 y_2 代入(1)式可得:

$$x_1 = -\arctan \alpha + \arccos(-1/C) + \sqrt{C^2 - 1} \quad (8)$$

$$x_2 = 2\pi - \arctan \alpha - \arccos(-1/C) - \sqrt{C^2 - 1} \quad (9)$$

从而得到滞后区的宽度 ϕ_{AB} :

$$\phi_{AB} = \phi_{0B} - \phi_{0A} = x_1 - x_2 =$$

$$2\sqrt{C^2 - 1} + 2\arccos(-1/C) - 2\pi \quad (10)$$

当 $1 < C < 7.8$ 时,只要获得了 ϕ_{AB} ,就可以计算出 C 值。

5 C 的测量步骤

由(10)式可见,根据外腔的相位变化即可求得 C 值。由于 OFSMI 信号是以时间为变量的,所以在实际测量中,应用时间差来代替相位差。图6中虚线部分

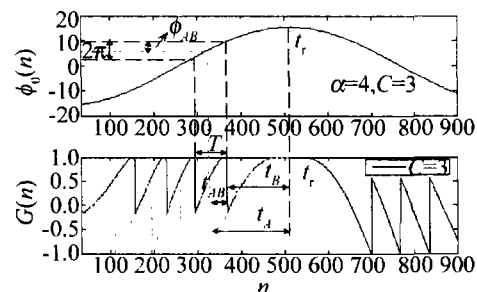


Fig. 6 The correspondence between time and phase intervals when ϕ_0 changes approximate linearly

与右边的下干涉条纹关于 OFSMI 信号的中心点 t_r 对称,可以看出, ϕ_{AB} 对应着时间差 t_{AB} [9]。由于每个整数条纹对应于外腔 2π 的相位变化,所以,当外腔做线性运动时, ϕ_{AB} 可以表示为 (T 是整数条纹的时间间隔):

$$\phi_{AB} = \frac{2\pi l_{AB}}{T} \quad (11)$$

C 的测量步骤归纳如下:(1)读取 OFSMI 实验信号,并进行数据处理;(2)取一个周期的 OFSMI 信号并归一化;(3)确定中心点 t_c 与跳变点;(4)计算干涉条纹谷峰值,判断反馈水平机制;(5)根据(11)式计算 ϕ_{AB} ;(6)根据(10)式计算 C 。

6 实验

作者采用如图 7 所示的 OFSMI 系统。实验中通过调节透镜来改变反馈光的强度,从而得到不同反馈水平下的 OFSMI 信号(见图 8),使用其中 10 组数据对 C 进行测量,测量结果见表 1 中的 \hat{C} 。

表 1 中 \hat{C} 是实验信号反馈水平的测量结果; C 由谷峰值拟合曲线得到; ε 表示实验信号反馈水平测量结果的误差。

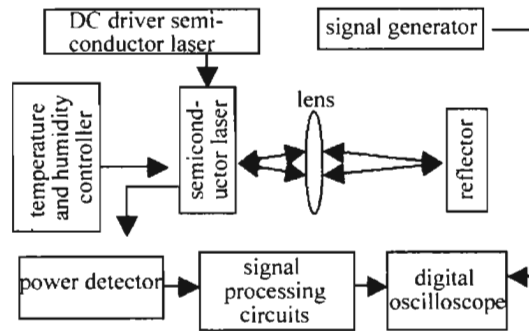


Fig. 7 The OFSMI experimental system

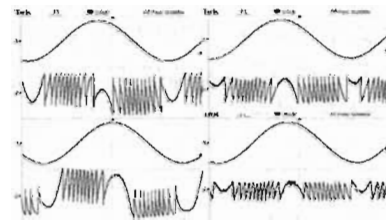


Fig. 8 OFSMI experimental signals at difference feedback strength

Table 1 Measurement results of valley-peak and C in experiments

	data 1	data 2	data 3	data 4	data 5	data 6	data 7	data 8	data 9	data 10
\hat{C}	1.8	1.9	2.7	2.9	3.1	3.3	3.7	4.3	6.2	8.3
valley-peak	-1.7	-1.6	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.3	0.7
C	1.7	1.9	2.9	2.9	2.9	3.4	3.8	4.5	5.7	8.1
ε	5.8%	0.0%	-0.7%	0.0%	0.2%	-2.9%	-2.6%	-4.4%	8.8%	2.5%

7 压电陶瓷的滞后效应对 OFSMI 信号滞回宽度的影响分析

本文中提供的数据是采用压电陶瓷为外腔反射物的情况下得到的。在实验系统中,分别使用了压电陶瓷和扬声器来实现外腔相位的改变,两种情况下都能观察到 OFSMI 信号滞回效应,均验证了本文中的理论分析,可见该滞回效应与压电陶瓷并无直接的联系;另外,本实验室所采用的压电陶瓷驱动型号为 Thorlabs 公司的 MDT694,体积小、精度高,由滞后效应引起的误差在 5% 左右,可见其对 OFSMI 信号滞回宽度的影响很小。

8 结论

综上所述,通过对 OFSMI 信号的仿真分析得出,根据自混合干涉信号上干涉条纹的谷值和下干涉条纹的峰值之差,可以测出光反馈水平因子 C 的值,而谷峰值点的准确定位是影响算法精度的关键因素。通过对相位方程在不同反馈水平下的求解和对滞回现象的分析发现,光反馈水平因子 C 与 OFSMI 信号的滞回宽度一一对应,从而得到了对 OFSMI 实验信号测量反馈水平因子的方法。这两种测量方法精度与自混合干涉信号极值点,跳变点位置提取的准确性有关,因此,对实验信号的预处理也尤为重要。为了判断测量结果的

准确性,将两种方法应用于同一组 OFSMI 实验信号,得到了一致的测量结果。

参考文献

- [1] NORGIA M, DONATI S. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry[J]. IEEE Trans Instrum & Measure, 2003, 52(6):1670-1675.
- [2] CHOLLT F, HEGDE G M, ZHANG X M, et al. Vibration measurement with a micromachined mirror in a very-short external cavity laser [J]. Sensors and Actuators, 2004, A116(2):232-240.
- [3] RAOUL X, BOSCH T, PLANTIER G, et al. A double laser diode on board sensor for velocity measurements [J]. IEEE Trans Instrum & Measure, 2004, 53(1):95-101.
- [4] XI J T, YU Y G, CHICHARO J F, et al. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry [J]. IEEE J Q E, 2005, 41(8):1058-1064.
- [5] YU Y G, YE H Y, YAO J Q. Self-mixing interference effects in a multi-mode LD: experimental observation and theoretical analysis [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(11):1190-1193 (in Chinese).
- [6] YU Y G, XI J T, CHICHARO J F. Optical feedback self-mixing interferometry with a large feedback factor C : behavior studies [J]. IEEE J Q E, 2009, 45(7):840-848.
- [7] YU Y G, YE H Y, YAO J Q. Steady solution to a self-mixing interference system for measuring displacement [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1):80-84 (in Chinese).
- [8] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. IEEE J Q E, 1980, 16(3):347-355.
- [9] ZHAO Y, YU Y G, YE H Y. Accuracy analysis of symmetrical folding algorithm based on optical feedback self-mixing interferometry [J]. Laser Technology, 2009, 33(4):387-390 (in Chinese).