

文章编号: 1001-3806(2009)04-0387-04

光反馈自混合干涉对称折叠算法的精度分析

赵岩, 禹延光*, 叶会英
(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052)

摘要: 为了提高对称折叠算法的精度, 通过对仿真信号的测量, 分析了影响算法精度的几种因素(光反馈水平因子, 外腔的非线性运动, 抽样速率和转折点的定位), 并且给出了改进方法。仿真结果表明, 在测量线宽展宽因子之前, 需保证光反馈水平因子的准确测量, 利用中间干涉条纹进行测量可以减少外腔非线性运动所带来的误差。这一结论对利用对称折叠算法处理实验信号有一定的帮助。

关键词: 测量与计量; 对称折叠算法; 光反馈自混合干涉; 线宽展宽因子

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.015

Accuracy analysis of symmetrical folding algorithm based on optical feedback self-mixing interferometry

ZHAO Yan, YU Yan-guang, YE Hui-ying

(College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The linewidth enhancement factor of a semiconductor laser with moderate and strong feedback was measured by means of folding algorithm based on the optical feedback self-mixing interferometry. The factors affecting the accuracy of the folding algorithm, including the factor of optical feedback level, nonlinear motion of the external target, sampling frequency and location of turning points, was analyzed by processing the simulated signals. It was shown that optical feedback level factor was the premise of accurate measurement of linewidth enhancement factor and the error caused by nonlinear motion of external target could be reduced by using middle interference fringes. The folding algorithm was improved, providing a helpful measure for signal processing.

Key words: measurement and metrology; symmetrical folding algorithm; optical feedback self-mixing interferometry; linewidth enhancement factor

引言

线宽展宽因子 (linewidth enhancement factor, LEF) 又称 α , 是半导体激光器的一个重要参量, 它表示激光器介质复折射率的实部与虚部的变化之比^[1]。其中, 实部的变化是指由载流子浓度变化所导致的光场相位的变化, 虚部的变化是指由载流子浓度变化所导致的介质增益的变化。

LEF 具有很大的研究价值, 因为它影响了半导体激光器的许多特性, 例如谱线宽度、啁啾、注入锁定范围、光反馈效应等。目前, 测量 LEF 的主要方法有线宽法^[2]、调频/调幅法^[3]、注入锁定测量法^[4]、光反馈自混合干涉测量法^[5-8]。其中, 光反馈自混合干涉测量方法不但具有传统干涉测量的分辨率, 而且具有系统

简单、易准直、价格低等优点。因此, 近几十年自混合干涉技术得到较快发展。

光反馈自混合干涉 (optical feedback self-mixing interferometry, OFSMI) 是指激光器输出光照射到外部物体上, 其中一部分激光被反射或散射后又反馈回激光器的谐振腔内, 反馈光与腔内光相干混合后, 从而调制了激光器的输出功率。根据反馈强度的不同, 自混合干涉效应可以粗略地分为 3 类: 弱反馈、适中反馈和强反馈。在弱反馈条件下, OFSMI 信号为连续的类正弦波。在适中反馈和强反馈条件下, 系统处于多模状态, 根据模间竞争原理, 系统将稳定在线宽最窄的模式^[9], 此时 OFSMI 信号产生了滞回现象, 信号变为不连续的类锯齿波。

针对不同的反馈水平, 作者提出了测量 LEF 的不同方法。在弱反馈条件下, XI^[5] 等人根据数据与模型相匹配的原理, 通过使代价函数最小的方法得到了被测参量的最优解。此方法的精度高且抗噪声能力较强。但是, 此方法需要先测量其它几个参量 (例如外腔的振动幅度、频率等), 且只适用于弱反馈的情况,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60871031)

作者简介: 赵岩 (1984-), 男, 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: yanguangyu@zzu.edu.cn

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-07-03

从而限制了使用范围。在适中反馈条件下, YU^[6] 等人提出了零点极值测量法。此方法基于 OFSMI 信号中的滞回现象, 利用 OFSMI 信号特征点之间的关系来测量 LEF 的值。但是, 随着反馈强度的增加, OFSMI 信号的一些特征点会消失, 从而此方法失效。于是, 在零点极值法的基础上, YU^[7] 等人分析了强光反馈条件下系统的选模原理, 从而提出了对称折叠算法。此方法在适中反馈和强光反馈条件下, 都可以实现 LEF 的测量。

下面将对影响对称折叠算法精度的几种因素进行分析。

1 基础理论

OFSMI 的数学模型如下^[10]:

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

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

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

式中, $\phi_f(\tau)$ 为有光反馈时外腔处的光相位; $\phi_0(\tau)$ 为无光反馈时外腔处的光相位; $\tau = 2L/c$, L 为外腔的长度, c 为光速; C 为光反馈水平因子; α 为半导体激光器的线宽展宽因子; m 为波动系数; $P(\phi_f(\tau))$ 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; $G(\phi_f(\tau))$ 是干涉函数。

当 $C > 1$ 时, (1) 式为多解。此时, 系统处于多模状态, OFSMI 信号会产生滞回现象, 为类锯齿波。图 1 所示的是 $C = 3, \alpha = 6$ 时, 滞回现象的产生原理, 是干

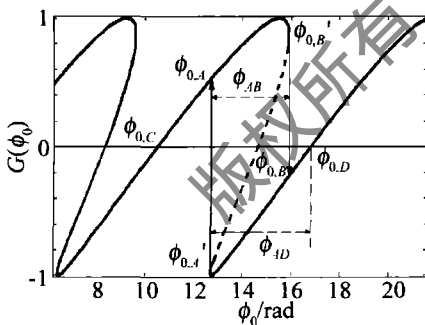


Fig. 1 The hysteresis phenomenon ($C = 3, \alpha = 6$)

涉函数 $G(\phi_0)$ 随初始相位 ϕ_0 变化的情况。随着 ϕ_0 增大, 当 $G(\phi_0)$ 到达点 $\phi_{0,B}$ 时, 它不是沿着虚线的路径变化而是直接跳变到 $\phi_{0,B}$ 点, 从而产生滞回现象; 与此类似, 随着 ϕ_0 的减小, 当 $G(\phi_0)$ 到达 $\phi_{0,A}$ 时, 它将会跳变到 $\phi_{0,A}$ 点; 另外, 当 $\phi_0 = \phi_{0,D}$ 时, 干涉函数 $G(\phi_0) = 0$ 。

根据参考文献[7], 滞回宽度 ϕ_{AB} 和 ϕ_{AD} 与参量 α 和 C 的关系可表示为:

$$\phi_{AB} = \phi_{0,B} - \phi_{0,A} = 2 \times \left[\sqrt{C^2 - 1} + \arccos\left(-\frac{1}{C}\right) - \pi \right] \quad (4)$$

$$\phi_{AD} = \phi_{0,D} - \phi_{0,A} = -\frac{\pi}{2} - \frac{C}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} + \arccos\left(-\frac{1}{C}\right) +$$

$$\arctan \alpha + \sqrt{C^2 - 1} \quad (5)$$

2 测量方法

假设外腔(外部物体)做简谐振动, 运动规律为:

$$L = L_0 + \Delta L \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

式中, L_0 为激光输出镜和外部物体之间的初始距离, ΔL 为外腔简谐振动的幅值, f 为外腔的振动频率, t 为时间变量。

利用外腔调制可以得到 OFSMI 信号。取一个周期的 OFSMI 信号, 先以转折点(图 2 中的 t_r 点)为中心对折 OFSMI 信号, 再定位 OFSMI 信号中的特征点。其中, 特征点包括干涉条纹迅速变化处的跳变点(见图 2b 中的 t_A, t_B), 干涉条纹的零点(见图 2b 中的 t_D)。此外, 还需求出 OFSMI 信号中每个整数条纹的时间间隔(见图 2a 中的 T_1, T_2)。然后, 根据特征点之间的关系得出 ϕ_{AB} 和 ϕ_{AD} 的值, 这部分内容在下面有详细的介绍。最后, 根据(4)式和(5)式得出参量 α 的值。对称折叠算法的具体实现可参见参考文献[7]。图 2 所示的是对折后的 OFSMI 信号以及特征点的位置, 其中, 抽样频率 $f_s = 100\text{kHz}$ 。

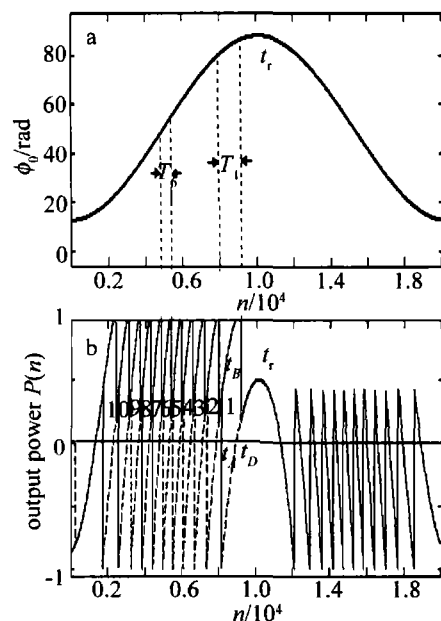


Fig. 2 a—phase variation of external cavity b—signal and characteristics of folded OFSMI ($C = 4, \alpha = 3$)

3 精度分析

3.1 光反馈水平对 α 测量值的影响

由(5)式可知, 在利用对称折叠法测量 α 时, 需要先测量 C 的值。根据(5)式, 得到了 C 分别为 2.9, 3, 3.1 时, ϕ_{AD} 与 α 的关系图(见图 3a)。由图 3a 可知, 当 ϕ_{AD} 的值相同时, 如果 C 的测量值存在误差, 则 α 的测量值将受到影响。为了分析 C 值对 α 测量结果的

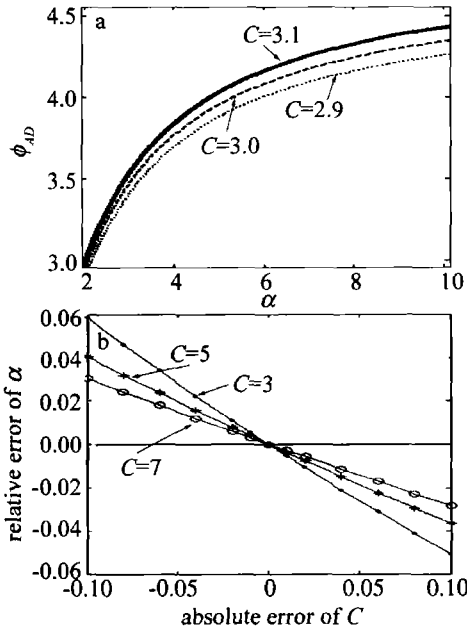


Fig. 3 a— ϕ_{AD} versus α for various C b—relative error of α versus absolute error of C

影响程度,先假设标准值为 $C = 3, \alpha = 3$, 此时 $\phi_{AD} = 3.4686$ 。然后,固定 ϕ_{AD} 不变,使 C 的值从 2.9 逐渐增大到 3.1,步长为 0.02,再由(5)式得出相应的 α 值。图 3b 所示的是标准值为 $\alpha = 3, C$ 分别为 3, 5, 7 时, α 相对误差与 C 绝对误差的关系。

由图 3b 可知,随着 C 的测量误差的增大, α 的测量误差也相应增大。当 C 的误差为 0.1 时, α 测量值的相对误差可高达 0.06。所以,在测量 α 的值时,需首先考虑 C 的测量值是否准确。

3.2 外腔非线性运动对 α 测量的影响

由(4)式和(5)式可知,需要根据外腔的相位变化 ϕ_{AB} 和 ϕ_{AD} 来求得 α 的值。但是, OFSMI 实验信号是以时间为变量的,所以,在实际测量中,用时间间隔来代替相位间隔。由于每个整数条纹对应于外腔 2π 的相位变化,所以,只有当外腔相位与时间成线性关系时(见图 4), ϕ_{AB} 与 ϕ_{AD} 可以表示为^[7]:

$$\phi_{AB} = 2\pi t_{AB}/T \quad (7)$$

$$\phi_{AD} = 2\pi t_{AD}/T \quad (8)$$

式中, t_{AB} 和 t_{AD} 表示与 ϕ_{AB} 和 ϕ_{AD} 所对应的时间间隔, T 是整数条纹的时间间隔。

在实际测量中,很难实现外腔的线性往返运动,所以用正弦运动来代替线性运动。此时外腔相位与时间为非线性关系,因此,在用时间间隔代替相位间隔的过程中引入了误差,从而影响了 α 的测量结果。图 2 所示的是当外腔做正弦周期运动时,得到的 OFSMI 仿真信号。由图 2 可知,由于外腔做非线性运动,从而导致了 OFSMI 信号中整数条纹的间隔不均匀。

参考文献[7]中的算法是以第 1 对干涉条纹的

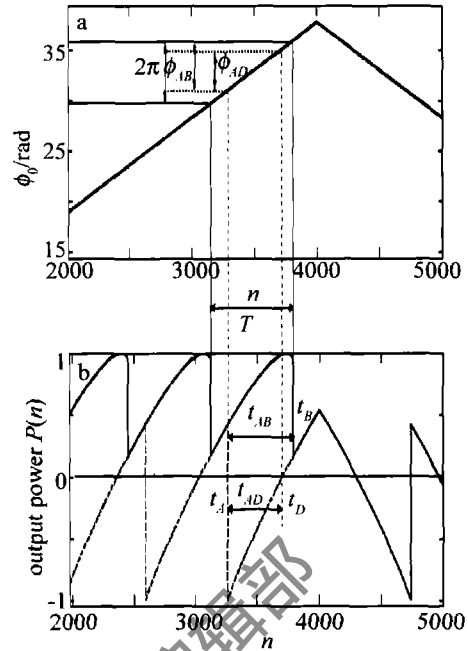


Fig. 4 Relationship between time interval and phase interval for linear motion

征点来计算相位变化。但是当外腔做正弦运动时,在第 1 对条纹所对应的时间间隔内,外腔相位与时间的线性关系比较差。为了分析外腔非线性运动的影响,分别以每对干涉条纹为研究对象(见图 2),利用与其相对应的特征点进行测量。同时,为了排除 C 测量值对 α 测量结果的影响,在测量过程中只使用 C 的真实值,而不是测量值。图 5 所示的是 $\alpha = 3, C$ 分别为 4, 5 时,由不同干涉条纹得到的 α 相对误差的测量结果。

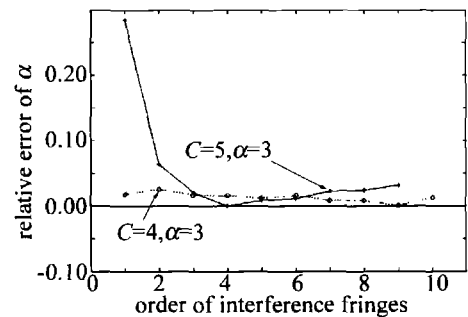


Fig. 5 Relative error of α for different interference fringes

由图 5 可以看出,由中间干涉条纹测量得到的 α 相对误差较小,这是因为中间条纹对应于外腔的平衡点位置,此时,外腔相位与时间的线性关系较好(见图 2 中的第 6 个条纹)。例如 $C = 5$ 时,由第 5 对条纹测量得到的 α 相对误差为 0.0081,而由第 1 对条纹所得到的 α 误差高达 0.2846。由此可知,由中间干涉条纹测量得到的 α 误差较小。但是,在实际测量中,由于 C 测量值的干扰,中间条纹的测量结果有时并不是最佳的。

3.3 抽样频率对 α 测量的影响

抽样频率也是影响测量精度的因素之一,因为它决定物体的相位误差,从而影响了 α 的测量结果。

OFSMI 信号中每个整数条纹对应外腔 2π 的相位变化。因此,相位误差可近似表示为 $\delta = 2\pi/M$,其中, M 是整数条纹中的抽样个数。由此,根据误差要求和信号波形选择合适的抽样频率,其表达式为:

$$f_s = (N + 2) \times f_l \times 2\pi/\delta \quad (9)$$

式中, f_s 是抽样频率, N 是一个周期 OFSMI 信号的整数条纹的个数, f_l 是外部物体的振动频率, δ 是外部物体的相位误差。图 6 所示的是在不同相位误差条件下,参量 α 的相对误差的测量结果。

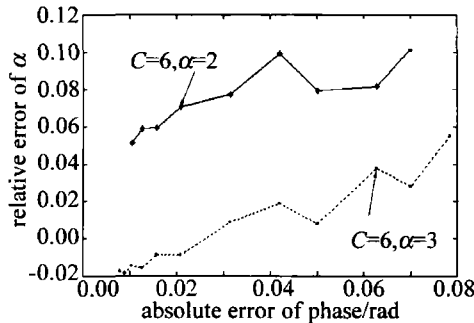


Fig. 6 Relative error of α versus error of phase

由图 6 可知,随着相位误差的增大, α 的测量误差也将增大。所以需根据不同的精度要求,选择合适的抽样频率。

3.4 转折点定位对 α 测量的影响

OFSMI 信号的转折点对应于外腔改变运动方向的时刻(例如图 2 的 t_i 点)。在对折 OFSMI 信号时,信号转折点的准确定位很重要,尤其在处理实验信号时,此因素更加突出。图 7 所示的是由转折点定位不准所引起的 α 测量误差。其中,仿真信号参量为 $f_l = 195\text{Hz}$, $f_s = 1000\text{kHz}$ 。

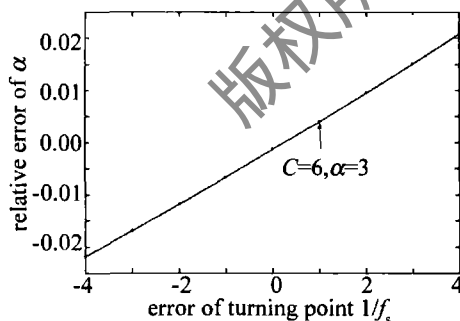


Fig. 7 Relative error of LEF versus the turning point

由图 7 可知,当转折点偏离一个抽样点时, α 将产生 0.005 的相对误差。所以在折叠信号时,需准确定位转折点。此外,还可以增大抽样频率来减少转折点偏离所带来的误差。

4 结论

通过对仿真信号的测量,分析了影响对称折叠算法精度的几种因素。其中,反馈水平因子 C 的测量是线宽展宽因子 α 准确测量的前提,利用中间条纹进行测量可以减少外腔非线性运动所带来的误差。此外,抽样频率和转折点的定位也对算法精度有一定的影响。

参考文献

- [1] OSINSKI M, BUUS J. Linewidth broadening factor in semiconductor lasers—an overview [J]. IEEE J Q E, 1987, 23(1): 9-29.
- [2] SIGNORET P, MARIN F, VICIANI S, et al. 3.6MHz linewidth 1.55 μm monomode vertical-cavity surface-emitting laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(4): 269-271.
- [3] MOLLER B, ZEEB E, FIEDLER U, et al. Linewidth enhancement factor of vertical-cavity surface-emitting laser diodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(8): 921-923.
- [4] MIYAMA K, HAYASHI K, IDA Y. Simple method for measuring the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers by optical injection locking [J]. Opt Lett, 1992, 17(16): 1128-1130.
- [5] 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.
- [6] YU Y G, GIULIANI G, DONATI S. 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.
- [7] YU Y G, XI J T, CHICHARO J F, et al. A new approach for measuring the line-width enhancement factor [C]//Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2008. Sydney: University of Wollongong, 2008: 471-474.
- [8] 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).
- [9] SCHUNK N, PETERMANN K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback [J]. IEEE J Q E, 1988, 24(7): 1242-1247.
- [10] WANG W M, GRATAN K T V, PALMER A W, et al. Self-mixing interference inside a single mode diode laser for optical sensing applications [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(9): 1577-1587.