

光反馈自混合干涉系统中参数 C 和 α 的测量

孙学群^{1,2}, 叶会英¹

(1. 郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 71677 部队, 河南 安阳 455133)

摘要:提出了一种新的光反馈水平因子 C 和激光器线宽展宽因数 α 的测量算法。基于光反馈自混合干涉模型, 通过深入研究适度光反馈 ($1 < C < 4.6$) 水平下 C 和 α 对干涉条纹的影响, 提出从干涉数据中提取出 3 个特征值, 由数学模型推导出了 C 和 α 与特征值关系的解析表达式。在外腔变化情况未知的情况下, 可同时实现 C 和 α 的高精度测量。

关键词: 自混合干涉; 参数测量; 光反馈水平因子; 线宽展宽因数

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.008

Measurement of parameters C and α in optical feedback self-mixing interference system

SUN Xue-qun^{1,2}, YE Hui-ying¹

(1. School of Information and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. 71677 Troops, Anyang 455133, China)

Abstract: A new measurement method of optical feedback level factor C and laser line width broadening factor α was proposed. Based on the optical feedback self-mixing interference model, the influences of C and α on the interference fringes were studied under the moderate optical feedback ($1 < C < 4.6$) levels. Three characteristic values were extracted from interference data, and analytical expression of three characteristic values, C and α was derived according to the mathematical model. The high accuracy measurements of C and α can be realized simultaneously when the change of the external cavity is unknown.

Key words: self-mixing interference; parameter measurement; optical feedback level factor; linewidth enhancement factor

1 引言

激光器的线宽展宽因数 α 和系统的反馈水平因子 C 是光反馈自混合干涉 (Optical Feedback Self-mixing Interferometry, OFSMI)^[1] 系统的两个重要参数。线宽展宽因数 α 用于描述半导体激光器的性能, 其与激光器的线宽、啁啾、注入锁定范围及动态特性等^[2] 都有关联。反馈水平因子 C 反映 OFSMI

系统反馈光的强弱, C 不同, 干涉信号呈现不同特点, 故 C 是直接影响测量算法设计的一个重要参数, 也是位移、振动等物理量的测量基础。因此 OFSMI 系统的 α 和 C 的测量具有重要意义。

目前, 对 C 和 α 的测量方法已有一些文献报道。文献[3]采用最小成本函数对多个参数进行估算, 实现了弱光反馈下 ($C < 1$) α 的测量, 实验

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (No. 15A510013) 资助。

作者简介: 孙学群 (1983 -), 男, 助理工程师, 硕士学位, 主要研究方向为光电测试技术, 信号处理。E-mail: 61199349@qq.com

通讯作者: 叶会英 (1966 -), 女, 教授, 博士学位, 硕士生导师, 研究方向为光电测试技术, 信号处理。E-mail: iehyye@zzu.edu.cn

收稿日期: 2016-01-05; **修订日期:** 2016-01-16

中 α 的标准差小于 4.58%。文献[4]应用非线性最小二乘法对 α 进行数据拟合,实现了 α 的高精度测量,但也仅限于弱光反馈。文献[5]提出了映射点测量法,实现了不同反馈机制下的 α 值的测量,但需以 C 值已知为前提。文献[6]采用 Powell 法、一线搜索、二次插值法等方法对 C 进行混合估计,但仅适用于适度光反馈水平;文献[7]提出了一种自适应算法实现了 C 值的实时估计,但操作方法相对复杂,计算量较大。文献[8]通过相位的频谱特征测算出了不同的反馈水平下 C 值的大小,相对标准误差仅为 2.11%,但需已知外腔振动频率和激光器的 α 值。文献[9]利用 C 值误差与重构光相位的微分信号幅值之间的关系测得了 3 种反馈水平下的 C 值,相对误差低于 2%。以上方法虽然各有特点,但要求已知 α 和 C 中一个参数或者已知外腔运动状态,在应用上有一定限制,文献[10]采用梯度最优化算法实现了 α 和 C 的同时测量,但仅适用于弱光反馈。

本文基于光反馈自混合干涉系统提出一种新的测量算法,在未知外腔运动状态的情况下,利用干涉条纹的 3 个特征值,可在适度光反馈水平下同时实现 α 和 C 的高精度测量。

2 适度光反馈水平下测量模型建立

光反馈自混合干涉的“三腔法”等效模型如图 1 所示^[11],等效数学模型为^[10]:

$$\Phi = \Phi_0 - C \cdot \sin(\Phi + \tan^{-1}\alpha) \quad (1)$$

$$P = P_0(1 + m\cos\Phi) \quad (2)$$

其中, Φ_0 为初始光相位; Φ 为混合光相位; P 和 P_0 分别表示有反馈和无反馈时激光器输出功率; m 为调制系数。

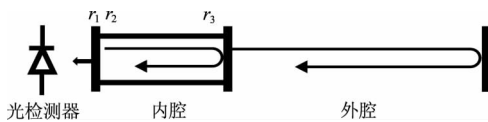


图 1 光反馈自混合干涉系统等效模型图

Fig. 1 Equivalent model chart of optical feedback self-mixing interference system

将式(1)等效变形可得 Φ_0 关于 Φ 的函数,函数图像如图 2 所示。将式(2)归一化处理可得干涉信号: $G = \frac{P - P_0}{mP_0} = \cos\Phi$ 。适度光反馈水平下 ($1 < C$ < 4.6) 时,干涉图像如图 3 所示。

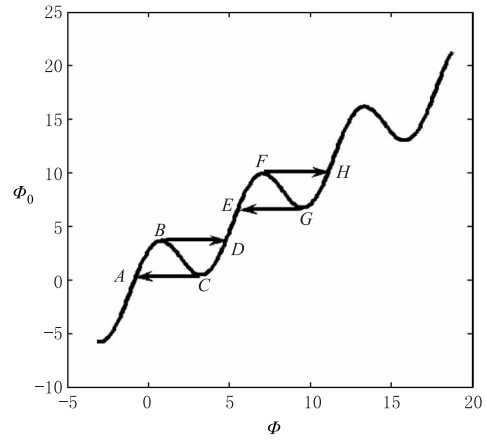


图 2 混合光相位与初始光相位关系图

Fig. 2 Plot of relationship between Φ and Φ_0

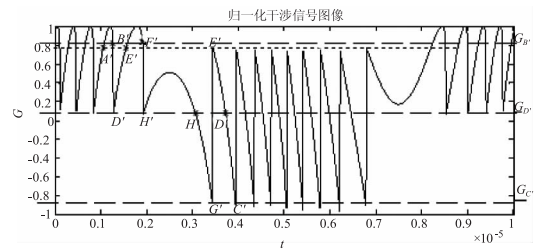


图 3 归一化干涉信号图像

Fig. 3 Normalized self-mixing interference signal

当外腔发生变化时, Φ_0 随之变化, Φ 随 Φ_0 沿图 2 中的曲线变化,产生干涉图像如图 3 所示,可分为 4 种情况:1) $D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow H$ 为正向运动的一个整条纹;2) $G \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow C$ 为反向运动的一个整条纹;3) $D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow E$ 为先正后反的小数条纹;4) $E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow D$ 为先反后正的小数条纹。其中, BC 、 FG 段在实际的物理过程中并不存在; CA 、 BD 、 GE 、 FH 均为单向跳跃,不可逆;图 2 中的点 $A-H$ 与图 3 中的点 $A'-H'$ 分别对应;图 3 中主要标出了前 2 种情况。

3 算法原理

设点 $A-H$ 的坐标分别为 $(\Phi_A, \Phi_0^A), \dots, (\Phi_H, \Phi_0^H)$, 令 $\frac{d\Phi_0}{d\Phi} = 0$, 解方程可求出极值点 B 、 C 、 F 、 G 等点对应的混合光相位: $2k\pi + \cos^{-1}(-\frac{1}{C}) - \tan^{-1}\alpha$, 其中 $k = 1, 2, 3, \dots$ 。根据 $\frac{d^2\Phi_0}{d\Phi^2}$ 的符号不同可分别求出极大值点对应的混合光相位 $\Phi_B, \Phi_F = 2k\pi + \cos^{-1}(-\frac{1}{C}) - \tan^{-1}\alpha$ 和极小值点对应的混合光相

位 $\Phi_C, \Phi_H = 2k\pi - \cos^{-1}(-\frac{1}{C}) - \tan^{-1} \alpha$ 。

为分析方便以 Φ_B 代表极大值点对应的混合光相位,以 Φ_C 代表极小值点对应的混合光相位,分别带入 $\cos(\Phi_B + \Phi_C)$ 、 $\cos(\Phi_B - \Phi_C)$,整理得:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{2}{\cos\Phi_B \times \cos\Phi_C \mp \sqrt{1 - \cos^2\Phi_B} \times \sqrt{1 - \cos^2\Phi_C}}}} - 1 \quad (3)$$

$$C = \frac{\sqrt{\frac{2}{\cos\Phi_B \times \cos\Phi_C \pm \sqrt{1 - \cos^2\Phi_B} \times \sqrt{1 - \cos^2\Phi_C}}}} - 1 \quad (4)$$

其中, $\cos\Phi_B$ 和 $\cos\Phi_C$ 分别对应干涉条纹中点 B' 、 C' 的值 $G_{B'}$ 和 $G_{C'}$, 可从干涉数据中提取, 利用公式 (3)、(4) 便可分别求出 α 和 C 的两组可能值, 其中有一组为伪值, 一组为真值。

将两组可能解分别代入式 (1), 解方程求出两个 Φ_D , 则其对应的干涉值 $\cos\Phi_D$ 应该等于点 D' 的值 $G_{D'}$ 。可以此为判据, 从干涉图像中提取 $G_{D'}$, 若 $G_{D'} = \cos\Phi_D$ 则取之, 若 $G_{D'} \neq \cos\Phi_D$ 则舍之。该方法需要从干涉图像中提取 $G_{B'}$ 、 $G_{C'}$ 和 $G_{D'}$ 三类能表征 α 和 C 的特殊值, 故可称为“特征值测量法”。

4 算法设计及实现

算法主要包括特征值提取、参数解算和伪值排除 3 个部分, 具体流程如图 4 所示。

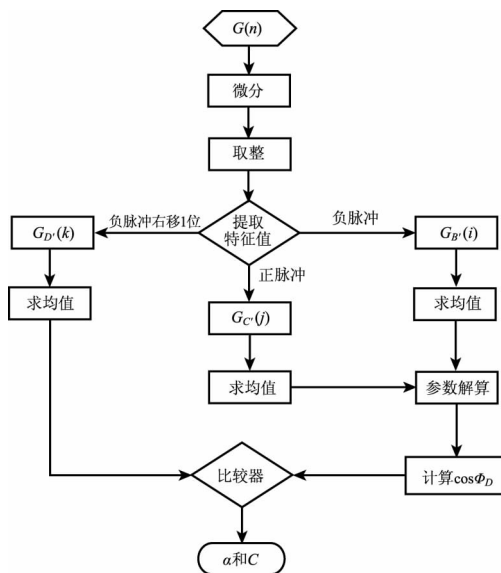


图 4 特征值测量法流程图

Fig. 4 Flow chart of characteristic value measurement

1) 干涉信号微分。如图 3 所示 $G_{B'}$ 为每个正向运动条纹中“跳变”前一点取值, $G_{C'}$ 为每个反向运动条纹“跳变”前一点的取值, $G_{D'}$ 为每个正向运动条纹中“跳变”后一点取值。对图 3 中的干涉数据微分确定每个条纹“跳变”的位置, 如图 5 所示。

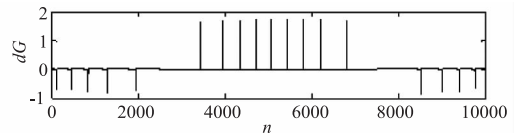


图 5 干涉条纹的微分信号

Fig. 5 Differential signal of interference fringe

2) 微分信号整形。对干涉信号的特征值提取进行取整、归一化得到特征值的整形脉冲, 如图 6 所示。

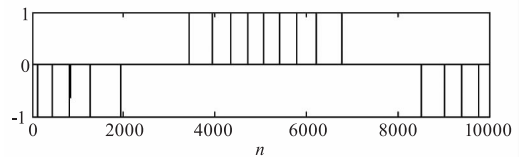


图 6 整形脉冲

Fig. 6 Shaping pulse

3) 提取特征值。特征选取脉冲的负脉冲与干涉信号相乘, 提取特征值 $G_{B'}(i)$, 如图 7 所示; 整形脉冲的正脉冲与干涉信号相乘, 提取特征值 $G_{C'}(j)$, 如图 8 所示。

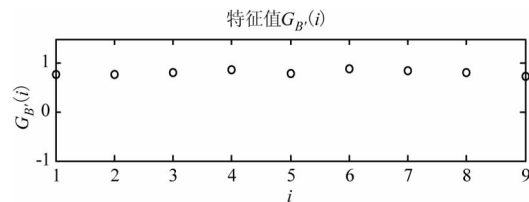


图 7 第一类特征值 $G_{B'}(i)$

Fig. 7 The first kind of characteristic value $G_{B'}(i)$

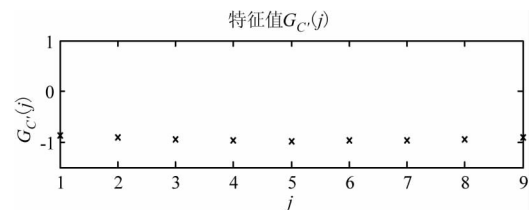
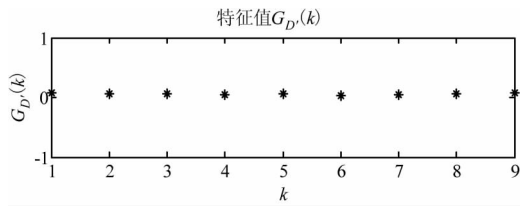


图 8 第二类特征值 $G_{C'}(j)$

Fig. 8 The second kind of characteristic value $G_{C'}(j)$

特征选取脉冲的负脉冲右移 1 位与干涉信号相乘, 提取特征值 $G_{D'}(k)$, 如图 9 所示。再分别提取三类特征值在每个振动周期的最小值 $G_{MB'}(i)$ 、 $G_{MC'}(j)$ 、 $G_{MD'}(k)$ 。

图9 第三类特征值 $G_D'(k)$ Fig.9 Third kind of characteristic value $G_D'(k)$

4) 特征参数估值。分别对每个振动周期的最小特征值 G_{MB}' 、 G_{MC}' 、 G_{MD}' 求均值作为特征参数的估值,令:

$$\cos \hat{\Phi}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G'_{MB}(i)$$

$$\cos \hat{\Phi}_C = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n G'_{MC}(j)$$

$$\cos \hat{\Phi}_D = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n G'_{MD}(k)$$

5) 参数求解。将第4步估计的特征参数带入式(3)和式(4),分别求出两组可能解: $\alpha(1)$ 、 $C(1)$ 和 $\alpha(2)$ 、 $C(2)$ 。

6) 计算 $\cos \Phi_D$ 。将 $\alpha(1)$ 、 $C(1)$ 和 $\alpha(2)$ 、 $C(2)$ 分别带入式(1),令 $\Phi_0 = F(\Phi_B) + \delta$ (δ 为无穷小,可取 $\delta \leq 10^{-3}$),解方程得到 $\Phi_D(1)$ 和 $\Phi_D(2)$,求出 $\cos \Phi_D(1)$ 和 $\cos \Phi_D(2)$ 。

7) 估计 α 和 C 。分别取 $\cos \Phi_D(1)$ 、 $\cos \Phi_D(2)$ 和 $\cos \hat{\Phi}_D$ 差值,差值绝对值小的一组为 α 和 C 的估值:

若 $|\cos \Phi_D(1) - \cos \hat{\Phi}_D| > |\cos \Phi_D(2) - \cos \hat{\Phi}_D|$, 则 $\hat{\alpha} = \alpha(1)$, $\hat{C} = C(1)$;

若 $|\cos \Phi_D(1) - \cos \hat{\Phi}_D| < |\cos \Phi_D(2) - \cos \hat{\Phi}_D|$, 则 $\hat{\alpha} = \alpha(2)$, $\hat{C} = C(2)$ 。

5 算法仿真

仿真环境:波形为正弦波,振幅为 1800 nm,频率为 100 Hz;外腔长度 0.1 m,干涉数据采样率为 100 MHz; α 仿真值分别取 2, 3, C 仿真范围为:1.1 ~ 4.5。

仿真结果如表 1 所示,绝对误差控制在 0.2 以内,相对误差在 1% 左右。

表 1 α 和 C 估计仿真结果Tab. 1 Simulation of α and C measurement results

| 参数仿真值 | | 提取特征值 | | | 参数估计值 | | 估计误差 | |
|----------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|-----------|----------------|------------|
| α | C | $\cos \hat{\Phi}_B$ | $\cos \hat{\Phi}_C$ | $\cos \hat{\Phi}_D$ | $\hat{\alpha}$ | \hat{C} | $\Delta\alpha$ | ΔC |
| 2 | 1.1 | -0.0423 | -0.7805 | -0.9715 | 1.9740 | 1.0984 | -0.026 | -0.0016 |
| 2 | 1.5 | 0.3766 | -0.9682 | -0.7984 | 1.9883 | 1.5189 | -0.0117 | 0.0189 |
| 2 | 2 | 0.5453 | -0.9987 | -0.4180 | 1.9572 | 2.0066 | -0.0428 | 0.0066 |
| 2 | 2.5 | 0.6371 | -0.9986 | -0.1347 | 1.9882 | 2.4855 | -0.0118 | -0.0145 |
| 2 | 3 | 0.6948 | -0.9911 | 0.0703 | 1.9798 | 3.0424 | -0.0202 | 0.0424 |
| 3 | 3.5 | 0.8235 | -0.9989 | 0.0827 | 2.9748 | 3.6330 | -0.0252 | 0.1330 |
| 3 | 4 | 0.8389 | -0.9961 | 0.2030 | 2.9070 | 4.1375 | -0.0930 | 0.1375 |
| 3 | 4.5 | 0.8536 | -0.9952 | 0.2990 | 2.9907 | 4.4807 | -0.0093 | -0.0193 |

6 结论

基于适度光反馈下的光反馈自混合干涉系统,推导出了线宽展宽因数 α 和反馈水平因子 C 的解析表达式,设计了一种 α 和 C 的新测量算法。根据干涉条纹的变化特征提取出 3 个特征值,利用 α 和 C 的解析表达式,仅依靠干涉条纹实现了 α 和 C 的高精度测量。算法不需提前获取外腔运动情况,不需提前已知其他参数,结构简单,容易实现,精度较高。仿真结果验证了其有效性,绝对误差控制在 0.2 以内,相对

误差在 1% 左右。

参考文献:

- [1] Giulian G, Norgia M, Donati S, et al. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, 4(6): 283-294.
- [2] R Lang, K Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- [3] Yanguang Yu, Jiangtao Xi, et al. Toward automatic meas-

- urement of the linewidth enhancement factor using optical feedback self-mixing interferometry with weak optical feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(7): 527 - 534.
- [4] YU Yanguang, LI Shiyang, et al. Estimation for parameters of semiconductor lasers using self-mixing effects in semiconductor lasers [C]//Proceedings of the Third International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2004, 2: 665 - 670.
- [5] YE Huiying, WANG Yanhua, YU Yanguang. New measurement method for linewidth enhancement factor based on self-mixing interferometry [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(2): 155 - 159. (in Chinese)
叶会英, 王艳花, 禹延光. 一种新的半导体激光器线宽展宽因数测量算法 [J]. 激光与红外, 2011, 41(2): 155 - 159.
- [6] U Zabit, T Bosch, F Bony. A fast derivative-less optimization of the feedback coupling coefficient for a self-mixing laser displacement sensor [C]. Circuits and Systems and TA/SA Conference, 2009: 1 - 4.
- [7] Yuanlong Fan, Yanguang Yu, et al. Improving the measurement performance for a self-mixing interferometry-based displacement sensing system [J]. Applied Optics, 2011, 50(26): 5064 - 5072.
- [8] ZHANG Yuyan, HU Wei, et al. A measurement method of parameter C in self-mixing interference displacement measuring system [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(6): 1150 - 1156. (in Chinese)
张玉燕, 胡伟, 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 - 1156.
- [9] ZHAO Wen, YE Huiying, et al. Real-time measurement algorithm of feedback strength factor of optical feedback interferometry systems [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 638 - 641. (in Chinese)
赵闻, 叶会英, 等. 光反馈干涉系统反馈水平因子的实时测量算法 [J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 638 - 641.
- [10] Jiangtao Xi, Yanguang Yu, et al. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(8): 1058 - 1064.
- [11] Silvano Donati, Guido Giuliani, Sabina Merlo. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(1): 113 - 119.