

# 激光自外差相干测量中分布反馈半导体激光器电流调谐非线性的补偿方法\*

安颖<sup>1)2)</sup> 杜振辉<sup>1)†</sup> 刘景旺<sup>1)3)</sup> 徐可欣<sup>1)</sup>

1) (天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

2) (河北联合大学信息工程学院, 唐山 063009)

3) (北华航天工业学院基础部, 廊坊 065000)

(2011年7月11日收到; 2011年11月4日收到修改稿)

半导体激光器的电流调谐非线性对自外差相干测量的精度影响很大. 研究了分布反馈半导体 (DFB) 激光器的电流调谐特性, 据此提出一种数学模型补偿方法. 利用已知光程差下的差拍频率, 建立了动态调频系数的数学模型. 以此模型对 DFB 激光器的电流调谐非线性进行补偿, 可以将差拍信号频率预测值的相对误差减小约 3%, 提高了系统的测量精度. 数学模型补偿方法简化了测量系统的结构, 适用于高精度的电流调谐激光在线测量系统.

**关键词:** 自外差相干测量, 分布反馈半导体激光器, 调谐非线性, 数学模型补偿

**PACS:** 42.55.Px, 42.60.Fc, 42.62.Eh

## 1 引言

半导体激光器 (Laser Diode, LD) 由于波长可调谐、体积小、价格低等优势, 成为相干光通信、光测量和光传感等领域的首选光源<sup>[1]</sup>. 其中, 分布反馈半导体激光器 (distributed feedback laser diode, DFB) 具有动态单纵模、边模抑制比高等特点, 在光测量和光传感领域, 如可调谐二极管激光吸收光谱 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 技术、光时域反射计 (optical time domain reflectometer, OTDR)、光频域反射计 (Optical frequency domain reflectometer, OFDR)、光纤干涉仪等系统中广为应用<sup>[2-6]</sup>.

在基于 Mach-Zehnder 干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 的激光自外差测量应用中, 系统的测量精度和分辨率依赖于激光器的调谐特性, 希望半导体激光器的电流调谐特性具有良好的线性<sup>[7,8]</sup>. 目前, 通行的解决方法是光路补偿, 即在测量系统中附加一个辅助的 Mach-Zehnder 干涉仪 (Auxiliary Mach-Zehnder interferometer, AMZI),

用 AMZI 的拍信号作为触发信号, 对测量信号进行采样 (或重采样)<sup>[5,6,9,10]</sup>, 以抵消激光器的调谐非线性. 但是这种补偿方法要求辅助干涉仪的拍信号频率远高于测量信号, 因此可能会限制仪器的测量范围; 同时光路结构复杂, 易于受到环境条件的影响.

实际上, DFB 激光器电流调谐的非线性有着简单、明确的机理, 即源于注入电流的热效应<sup>[11]</sup>. 基于 DFB 激光器的调谐特性, 可以对自外差测量系统进行数学模型补偿.

实验研究了半导体激光器的输出特性, 当 DFB 激光器温度恒定时, 其电流调谐具有明显的非线性特征, 且是固定不变的. 但是, 在自外差测量系统中, 利用输出特性预测差拍频率, 精度难以得到提高. 其原因在于, 差拍频率除了与激光器的调谐特性有关外, 还与光程差以及调制电流的参数 (如电流变化范围、调制频率) 密切相关. 因此, 需要基于 DFB 激光器的输出特性, 对测量系统中 DFB 激光器的实时特性做进一步研究, 达到对激光器调谐非线性进行补偿的目的.

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60938002)、精密测试技术及仪器国家重点实验室探索课题 (批准号: PILT1107)、河北省廊坊市科技支撑计划项目 (批准号: 2010011029) 和北华航天工业学院科研基金项目 (批准号: KY-2010-16) 资助的课题.

† E-mail: duzhenhui@tju.edu.cn

本文设计了激光自外差相干测量实验,确定了差拍频率与光程差、调制电流参数之间的关系,进而得到了动态调频系数的数学模型,利用模型对测量中的差拍信号进行了预测,客观上实现了对DFB激光器电流调谐非线性的补偿,并通过反演光程差对补偿方法进行了验证.

## 2 补偿机理

### 2.1 自外差测量原理

基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的自外差测量原理如图所示,DFB 激光器的输出光由 MZI 中的耦合器 A 分为两束,分别经过 MZI 的两个臂,并在耦合器 B 中发生干涉,由光电探测器转换为电信号,经前置放大、AD 转换后送入到计算机中进行处理.

对 DFB 激光器进行频率(波长)调谐后的电场强度为

$$E = E_0 \cos [2\pi f(t) \cdot t + \phi], \quad (1)$$

其中  $E_0$  为场振幅,  $f(t)$  为 DFB 激光器被调制后的输出频率.

忽略光纤和耦合器的损耗,光电探测器输出的电流值为

$$I(t) = \frac{1}{4} E_0^2 \eta \cos \{2\pi [f(t_m) - f(t_c)] t\}, \quad (2)$$

其中  $\eta$  为探测器决定的变换常数,  $t_m$  和  $t_c$  是  $t$  时刻两光纤臂输出的光频率的相对时间,满足  $t_m - t_c = \tau$ , 而  $\tau = \Delta L/c$ , 是两光纤臂相对光程差  $\Delta L$  产生的时延,  $c$  为真空中的光速.

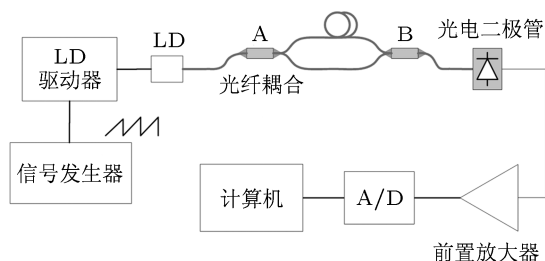


图1 基于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的自外差测量系统

差拍信号的频率可表示为

$$f_B = f(t_m) - f(t_c) = \int_{t_c}^{t_m} \frac{df}{dt} dt. \quad (3)$$

对于激光器线性频率调制,  $f(t) = \beta t + f_0$ , 由(2)式的差拍信号幅值得到待测物的光传输损耗,由其频率可以反推得到光在 MZI 的两臂传输的

光程差  $\Delta L$ :

$$\Delta L = c f_B / \beta, \quad (4)$$

其中  $\beta$  为激光器的调制速率.

当激光器调谐存在非线性时,传输光程差与拍信号频率之间存在复杂的非线性关系,(4)式是不成立的,为了抵消非线性误差,提高测量精度,需要进行补偿.

### 2.2 DFB 激光器的调谐机理与特性

蝶形封装的 DFB 内集成了热敏电阻、热电制冷器,通常工作于恒温方式.DFB 的注入电流调谐,源于激光器有源区内的载流子浓度变化和注入电流的热效应<sup>[11,12]</sup>. 激光器的频率(波长)是注入电流的 2 次多项式的形式.

$$f = ai^2 + bi + c, \quad (5)$$

其中  $a, b, c$  是激光器的调谐系数,与激光器的类型、结构有关.但就某个激光器而言,在温度恒定时调谐系数为常数<sup>[11]</sup>.

对(5)式求导,可以得到激光器的电流调频系数

$$\alpha(i) = \frac{df}{di} = 2ai + b, \quad (6)$$

由(6)式可以看出,对 DFB 激光器的电流调谐,其频率变化率与电流的大小有关,在应用(3)式时,光程差与拍信号频率之间存在非线性,影响了测量的精度.

### 2.3 基于调谐特性的数学模型补偿方法

基于 DFB 激光器调谐特性的补偿方法,是以先验的电流调谐特性为依据,在自外差实验中,获取多组不同调制参数下的差拍信号频率,在足够小的光程差下,得出动态电流调频系数,再利用多组动态调频系数,确定其与光程差及调制参数之间的数学方程,然后利用这个数学模型对 DFB 的调谐非线性进行补偿.

对 DFB 激光器进行注入电流调谐时,激光器的频率虽然是随时间变化的,但其实质是随注入电流而变化,因此,以注入电流来表示差拍信号是最根本和最直接的方法.即,将拍信号从时域转换到电流域:

$$f_B = f(i_m) - f(i_c) = \int_{i_c}^{i_m} \frac{df}{di} di, \quad (7)$$

其中  $i_m, i_c$  分别为  $t_m, t_c$  对应的电流值.

在激光器温度恒定情况下, 电流调频系数是电流的函数, 由此, 差拍频率可以表示为

$$f_B = \int_{i_c}^{i_m} \frac{df}{di} di = \int_{i_c}^{i_m} \alpha(i) di. \quad (8)$$

当光程差对应的电流变化量足够小时, (8) 式可以采用数值计算来替代:

$$f_B(i_n) = \alpha(i_n) I_\tau, \quad (9)$$

其中  $n$  为电流离散值的个数,  $I_\tau$  为时延  $\tau$  对应的等效电流变化量, 采用锯齿波电流调制时, 对应光程差的等效电流变化量为

$$I_\tau = k\tau = \frac{di}{dt}\tau = (I_m - I_0)f_m\tau, \quad (10)$$

其中  $k$  是锯齿波电流的斜率,  $I_0$  为注入的起始电流,  $I_m$  为终止电流,  $f_m$  为调制频率,  $\tau$  是光程差对应的时延. 显然,  $k$  描述了注入电流的调制参数, 而  $I_\tau$  则是综合了光程差及调制参数的物理量.

由 (10) 式可知, 改变注入电流 (电流变化范围、调制频率) 时,  $I_\tau$  会随之变化, 若能检测到与之对应的差拍频率  $f_B$ , 利用 (11) 式即可得到 DFB 激光器的多组动态调频系数离散值:

$$\alpha(i_n) = f_B(i_n)/I_\tau. \quad (11)$$

研究确定动态调频系数与光程差及调制参数的数学关系, 就可以实现对 DFB 激光器调谐非线性补偿.

## 3 实验结果

### 3.1 DFB 激光器的调谐特性

使用光谱分析仪 (Agilent: 86142B) 测量了 DFB 激光器 (Furukawa: FOL15DDBA-A31, 线宽约为 10 MHz) 的输出特性. 由激光控制器 (ILX Lightwave: LDC3908) 对激光器做温度控制和注入电流驱动. 激光器温度恒定在 25 °C 时, 输出光频率与注入电流的关系如图 2 所示.

对图 2 的实验数据, 按照 (12) 式做曲线拟合:

$$f = -5.3679 \times 10^6 i^2 - 2.8646 \times 10^8 i + 1.8972 \times 10^{14}. \quad (12)$$

相关系数  $R^2=0.9998$ , 标准差  $SD = 5.037 \times 10^8$ , 拟合公式与实验结果符合得非常好, 说明 (5) 式给出的电流调谐特性完全符合 DFB 激光器.

当温度变化时, 相同的调制电流下, 温度越高, 输出的光频率越高, 但输出光频率与注入电流的关系依然呈二阶函数关系, 曲线具有相似的形状.

由 (12) 式得到的电流调频系数为

$$\alpha_0(i) = \frac{df}{di} = -10.73 \times 10^6 i - 2.86 \times 10^8. \quad (13)$$

(13) 式描述了 DFB 激光器输出频率对注入电流的变化率, 称为输出模型. 输出模型不能反映激光器在自外差相干测量系统中的实时特性, 由此模型预测的差拍频率值误差很大.

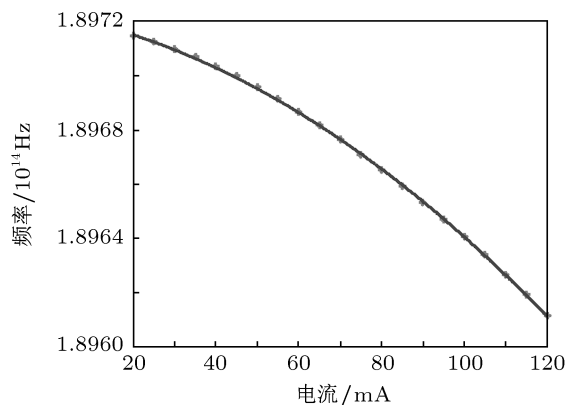


图 2 输出光频率与注入电流的关系曲线 (25 °C)

### 3.2 激光自外差测量实验

在图 1 所示的实验系统中, 设定 DFB 激光器温度 25 °C, 对激光器的注入电流做锯齿波调制, 调制频率为 20—1000 Hz (步长为 20 Hz), 起始电流为 20 mA, 终止电流是 60—100 mA (步长为 10 mA). 全光纤 MZI 的两臂长度差分别为 100 mm 和 200 mm. 在此条件下得到了多组差拍信号, 图 3 为 MZI 两臂光纤长度差为 100 mm, 调制频率为 40 Hz, 锯齿波电流变化范围为 20—80 mA 时, 一个锯齿周期内的拍信号波形.

图 3 拍信号的初始阶段是调制信号由锯齿波回程导致的弛豫 (虚线框内), 在数据处理时要剔除. 随后的差拍频率呈现单调增趋势. 针对差拍信号的正弦波特性, 对平滑滤波后的信号采用了时域的处理方法.

首先选择完整注入电流周期内的差拍信号, 其次确定差拍信号每个差拍周期的峰值点, 然后对每个差拍周期用三角函数进行拟合, 表达式如下:

$$f(t) = A \sin(2\pi Bt + C) + D. \quad (14)$$

经过拟合后,  $A$  为每个差拍信号的幅度值,  $B$  为其频率值,  $C$  为相位差,  $D$  为叠加其上的直流分量. 用这种方法, 得到了不同实验条件下的差拍幅度值与频率值. 由于光强同时受到了调制, 差拍幅值  $A$  成线性上升趋势, 而由于 DFB 激光器的调谐非线性

性, 差拍频率  $B$  并不恒定, 是逐渐增大的.

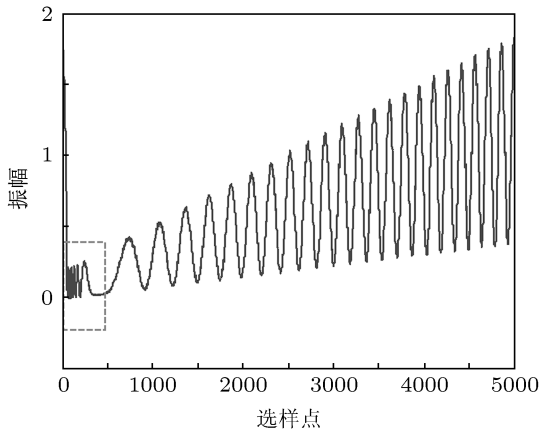


图3 一个锯齿周期的拍信号波形, 虚线框内为锯齿波回程时的信号弛豫

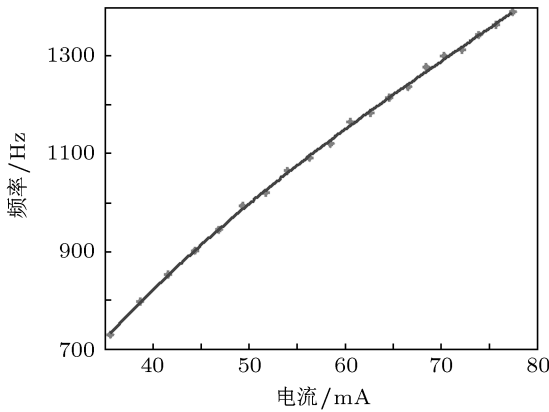


图4 差拍信号的频率对电流的拟合曲线

### 3.3 补偿结果及验证

(11) 式是求解动态调频系数的理论依据, 成立的条件是等效电流变化量  $I_\tau$  足够小. 实验中, 利用 DFB 激光器的输出特性 (3.1 节的实验结果), 分别依据 (8) 和 (9) 式计算差拍频率, 使相对差异在  $10^{-8}$  数量级上时, 同时考虑计算速度, 确定了合适的  $I_\tau$  和  $n$  的数值, 并将结果用于动态调频特性的研究中.

由 3.2 节得到的差拍频率值, 是随时间 (实际上是电流) 递增的, 因此可以在电流量里描述差拍频率, 即将差拍频率对电流进行拟合. 由于每个差拍周期只有一个频率值, 故在一个差拍周期上选取电流变化的中间值, 做 3 阶线性拟合 ( $R^2 > 0.99$ ), 即可得到差频电流方程. 等效电流变化量  $I_\tau$  不同时, 差频电流方程的各阶系数也不同. 对图 3 所示的差拍信号的差拍频率值对电流进行拟合, 拟合曲线如

图 4 所示. 将电流按选取的  $n$  离散化, 可以计算得出  $f_B(i_n)$ .

再依据 (10),(11) 式得到了不同实验条件下的多组动态调频系数  $\alpha(i_n)$ . 观察离散值  $\alpha(i_n)$  随电流的变化情况, 具有明显的线性特征, 与 (6) 式描述的 DFB 的调谐特性相符. 图 5 是图 3 所示信号的动态调频系数变化趋势图.

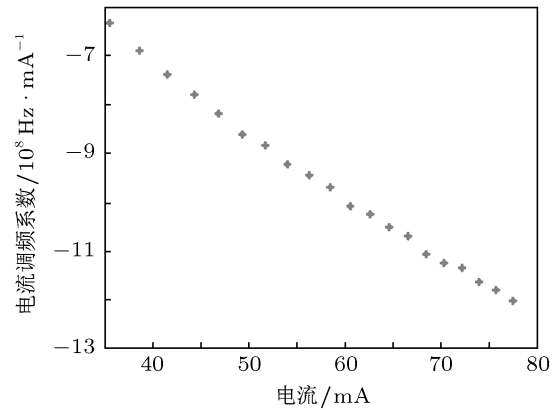


图5 电流调频系数随电流的变化趋势

选取实验中光程差 100 mm, 改变调制参数使等效电流变化量在  $7.7013 \times 10^{-7} - 2.089 \times 10^{-5}$  mA 范围里的 120 组数据, 分别对电流进行了一阶拟合 ( $R^2 > 0.97$ ). 拟合后, 等效电流变化量  $I_\tau$  不同时, 各动态调频系数方程的各阶项系数不同. 究其原因, 是由于光程差和注入电流的调制参数不同造成的. 与两者有关的参量有  $I_\tau$ 、 $k$  和  $f_m$ , 将一阶项与常数项系数分别对这些物理量做回归, 选择最优的结果, 建立动态调频系数回归方程如下:

$$\alpha(i) = (1.32 \times 10^{16} I_\tau^2 - 4.00 \times 10^{11} I_\tau - 1.32 \times 10^7) i - 309.59 f_m^2 + 9.41 \times 10^5 f_m - 2.30 \times 10^8, \quad (15)$$

(15) 式称为动态补偿模型. 与输出模型 (13) 式相比, 显然动态补偿模型更贴近 DFB 激光器在自外差相干测量系统中工作的真实情况, 用此模型预测差拍频率时, 更细致地描述了差拍频率与光程差、注入电流调制参数之间的物理关系.

分别利用输出模型与动态补偿模型对差拍频率进行预测, 动态补偿模型预测值的相对误差在  $10^{-2}$  数量级上, 平均相对误差比输出模型下降 3% 左右.

图 6 是图 3 所示差拍信号的频率值与分别利用输出模型、动态补偿模型预测值相比较的结果, 动态补偿模型预测值平均相对误差为 2.49%, 而输

出模型预测值平均相对误差为 5.66%. 在电流范围取 50—65 mA 时, 动态补偿模型预测值的平均相对误差为 1.79%, 扩大了精密测量中电流的动态调谐范围.

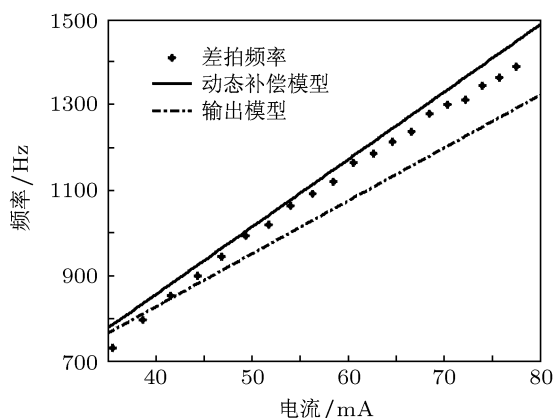


图 6 差拍频率预测值与实测值

为了验证动态补偿模型的准确度, 利用模型进行了光程差的反演. 光程差的离散值为

$$\Delta L_0(i_n) = \frac{I_\tau(i_n) \cdot c}{n \cdot k}, \quad (16)$$

其中  $n = 1.444$  为光纤的折射率, 而  $I_\tau(i_n)$  通过 (17) 式计算:

$$I_\tau(i_n) = f_B(i_n) / \alpha(i_n). \quad (17)$$

实验中, 利用调制电流范围在 20—90 mA, 调制频率 220—320 Hz (步长为 20 Hz), 光程差 200 mm 时的差拍信号频率值, 用输出模型和动态补偿模型依据 (16), (17) 式对光程差进行反演, 平均值分别为 192.45 mm 和 199.26 mm, 精度分别为 3.8% 和 0.37%.

由此说明, 动态补偿模型降低了预测值的相对误差, 提高了精度, 客观上达到了对测量系统中 DFB 激光器调谐非线性进行补偿的目的.

## 4 结论

在基于 Mach-Zehnder 干涉仪的自外差测量系统中, 半导体激光器的电流调谐非线性对测量精度的影响是非常大的. 而 DFB 激光器的电流调谐非线性来源于电流热效应, 当工作于恒定温度 (目前都是对激光器进行恒温控制) 时, 激光辐射频率与注入电流有着高精度的对应性, 具有数学模型补偿的可实现性.

而在自外差测量系统中, 差拍频率值受调谐特性的影响, 与光程差的关系具有非线性, 同时与注入电流的调制参数有关. 在获知 DFB 激光器输出特性的基础上, 通过对激光自外差相干测量系统中实时差拍信号的研究, 将测量拍信号表达为注入电流的函数, 确定动态调频系数与等效电流变化量及电流调制参数的关系, 建立了动态补偿模型, 达到了对测量系统中 DFB 激光器调谐非线性做高精度补偿的效果.

虽然这种补偿方法对激光器的调谐特性有很强的依赖性, 需要事先测量激光器的调谐特性, 并对激光器长期工作老化可能产生的波长漂移进行修正, 但是数学模型补偿不需要附加的补偿装置, 光路结构简单, 对系统的工作环境没有特别要求, 适用于所有依赖激光频率 (波长) 调谐特性的高精度测量系统.

- [1] Hao X Q, Chen G X 2010 *Opt. Commun. Tech.* **34** 4 (in Chinese) [郝秀晴, 陈根祥 2010 光通信技术 **34** 4]
- [2] Wang M, Zhang Y J, Liu J G, Liu W Q, Kan R F, Wang T D, Chen D, Chen J Y, Wang X M, Xia H, Fang X 2006 *Chin. Opt. Lett.* **4** 363
- [3] Tarsitano C G, Webster C R 2007 *Appl. Opt.* **46** 6923
- [4] Manuel R M, Shlyagin M G, Miridonov S V 2008 *Opt. Exp.* **16** 20666
- [5] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F 2007 *Opt. Lett.* **32** 3227
- [6] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, Froggatt M E 2005 *Opt. Exp.* **13** 666
- [7] Buus J, Markus C A, Daniel J B 2005 *Tunable Laser Diodes and*

- Related Optical Sources* (New York: John Wiley & Sons) p59
- [8] Cui H X, Qi R B, Chen W L, Xu K X 2008 *Chin. J. Laser* **35** 1558 (in Chinese) [崔厚欣, 齐汝宾, 陈文亮, 徐可欣 2008 中国激光 **35** 1558]
- [9] Koshikiya Y, Fan X Y, Ito F 2008 *J. Lightwave Tech.* **26** 3287
- [10] Boukari O, Hassine L, Bouchriha H, Ketata M 2010 *Opt. Commun.* **283** 2214
- [11] Liu J W, Du Z H, Li J Y, Qi R B, Xu K X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074213 (in Chinese) [刘景旺, 杜振辉, 李金义, 齐汝宾, 徐可欣 2011 物理学报 **60** 074213]
- [12] Du Z H, Zhai Y Q, Li J Y, Hu B 2009 *Spectrosc. Spec. Anal.* **29** 3199

# A method to compensate the tuned nonlinearity of DFB diode laser in the laser self-heterodyne coherent measuring system\*

An Ying<sup>1)2)</sup> Du Zhen-Hui<sup>1)†</sup> Liu Jing-Wang<sup>1)3)</sup> Xu Ke-Xin<sup>1)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*College of Information Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China*)

3) (*North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China*)

(Received 11 July 2011; revised manuscript received 4 November 2011)

## Abstract

The measuring accuracy of self-heterodyne coherent measuring system can be deteriorated by the tuning nonlinearity of the diode laser with injection current. The tuning characteristics of a DFB laser were analyzed, and a mathematical model for compensating Mach-Zehnder interferometer based self-heterodyne system was presented. The dynamic frequency modulation coefficient of the model was built by prior beat frequency of foregone optical path difference. The relative error of predicted beat frequency is reduced about 3%. This method could simplify the setup of the system, and is especially suited for online tunable laser measurement system.

**Keywords:** self-heterodyne coherent measure, DFB diode laser, tuned nonlinearity, mathematical model compensate

**PACS:** 42.55.Px, 42.60.Fc, 42.62.Eh

---

\* Project supported by the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 60938002), the Project of State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, China (Grant No. PILT1107), the Science and Technology Support Project of Langfang City, China (Grant No. 2010011029), and the Science Foundation of North China Institute of Aerospace Engineering, China (Grant No. KY-2010-16).

† E-mail: duzhenhui@tju.edu.cn