

文章编号: 0258-7025(2009)06-1498-05

# 从激光二极管自混合干涉信号重建振动信号

胡险峰

(四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

**摘要** 激光二极管(LD)自混合干涉用于振动测量的关键技术之一是从自混合干涉信号重建振动信号。用整形后的自混合干涉信号驱动模拟开关,开关电容做电荷转移来实现频率电压变换,用振动的激励信号驱动模拟开关让电容充电电源随振动的相位变化做倒相变换,从激光二极管自混合干涉信号中还原振动信号。还原出的信号的振幅与振动的振幅成正比,还原出的振动信号的波形与振动激励信号的波形一致。只要能从自混合干涉信号实时自动地提取外腔振动的周期及相位信号,该频率电压变换方法可以用于重建任意振动的信号。

**关键词** 光学测量;激光二极管;自混合干涉;信号重建;频率电压变换

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1498

## Reconstruction of Vibration Signal from Laser Diode Self-Mixing Interference Signal

Hu Xianfeng

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** Reconstruction of vibration signal is one of the key technologies for laser diode (LD) self-mixing interference used in measurement of vibration. The vibration signal is retrieved by a frequency-voltage transform from self-mixing interference signal. The transform is realized by switched capacitor through charge transfer. There are two simulative switches in the transform: one driven by self-mixing interference signal making frequency of the switch equal to frequency of self-mixing interference signal, the other driven by stimulating signal of the vibration changing the pole of charging voltage of the capacitor with phase of the vibration. Output signal amplitude of the transform is proportional to vibration amplitude. The vibration waveform rebuilt by the transform is coincident with that of stimulating signal. The frequency-voltage transform can be use to rebuild signal of arbitrary vibration if period and phase of arbitrary vibration can be extracted from self-mixing interference signal.

**Key words** optical measurement; laser diode; self-mixing interference; signal reconstruction; frequency-voltage transform

### 1 引 言

激光器出射光反射回激光器的谐振腔,会引起激光器出光强度和光频发生变化。反射光的光程变化时,激光器出光强度会发生类似双光束干涉形成的光强变化,这一现象被称为激光自混合干涉。激光自混合干涉包含外部反射面运动的信息,可以用于位移直接测量、微小机械振动的无接触直接测量以及速度和表面形貌测量等,而且所用的光学系统简单、光路调节简便、易于集成<sup>[1~3]</sup>。

外部反射面与谐振腔表面构成自混合干涉的外

腔<sup>[4]</sup>,随外腔长度变化速率的改变,自混合干涉信号呈现为类似载波信号的频率为零,调制深度很大的调频信号。反馈光进入谐振腔还会引起与自混合干涉信号叠加在一起的慢变化信号和相位噪声。要从自混合干涉信号重建外腔运动的信号不能采用一般调频信号的解调方法。利用适度反馈光时自混合干涉信号的类锯齿波特征,通过微分自混合干涉信号<sup>[5~8]</sup>,再对微分信号彻底整形后提取外腔振动的周期及相位来重建振动信号。用自混合干涉信号反馈调制激光二极管(LD)工作电流来改变激光波长使自混合干涉的相位锁定的方法来重建振动信

收稿日期: 2008-06-10; 收到修改稿日期: 2008-10-16

作者简介: 胡险峰(1962—),男,副教授,硕士,主要从事基础物理实验教学。E-mail: ruirui@vip.sina.com

号<sup>[9]</sup>。用傅里叶变换测量信号最大频率或条纹计数方法来测量分析振动<sup>[10~12]</sup>。本文介绍用频率电压变换从自混合干涉信号重建外腔振动信号的尝试。

## 2 频率电压变换

频率电压变换用开关电容做电荷转移来实现<sup>[13]</sup>，原理见图 1。当模拟开关  $K_2$  拨向左边时，电容  $C_1$  被充电到  $-E_1$ ， $C_1$  上的电荷为  $Q_1 = -E_1 C_1$ 。然后  $K_2$  拨向右边， $C_1$  放电后电压变为  $-V$ ， $C_1$  上的电荷变为  $Q_2 = -V C_1$ 。 $K_2$  从左边拨向右边转移的电荷为  $\Delta Q = Q_1 - Q_2 = -C_1(E_1 - V)$ ，若  $K_2$  开关的频率为  $f$ ，则单位时间转移的电荷，即电流为  $I = -C_1(E_1 - V)f$ 。再经过用运算放大器构成的电流电压变换，由于运放的同相输入和反相输入虚短路，同相输入接地，则  $V = 0$ ，电流电压变换的输出电压  $U$  与  $K_2$  开关频率  $f$  的关系为

$$U = C_1 E_1 f \frac{R \cdot Z_{C_2}}{R + Z_{C_2}}, \quad (1)$$

电容  $C_2$  的作用是抑制高频噪声。当  $C_2$  较小时， $U = C_1 E_1 R f$ ，即  $U$  正比于  $f$ 。当模拟开关  $K_1$  往下拨时， $C_1$  的充电电压倒相，则  $U = -C_1 E_2 R f$ ，令  $E_1 = E_2 = E$ ， $C_1$  的充电电压倒相前后频率电压变换输出电压的绝对值相等。

用整形后的自混合干涉信号驱动模拟开关  $K_2$ ，自混合干涉信号的正半周驱动开关  $K_2$  使电容  $C_1$  充电，负半周驱动开关  $K_2$  使电容  $C_1$  放电。开关的

频率就是自混合干涉信号的频率，频率电压变换的输出电压随自混合干涉信号的频率而变化。当外腔长度做正弦振动时，振幅最大时自混合干涉信号的频率近似为 0<sup>[14]</sup>，振动速率最大时（过平衡位置）自混合干涉信号的频率最大。自混合干涉信号的频率与外腔振动速率的关系为

$$f = 4\pi \frac{A_v}{\lambda} |\cos 2\pi f_e t|, \quad (2)$$

其中  $A_v = A f_e$  为外腔振动速率的振幅， $A$  为外腔振幅， $f_e$  为外腔振动频率， $\lambda$  为激光波长。由(1)式和(2)式，频率电压变换输出电压为外腔振动速率的全波整流波形，如图 2(a)所示，其中细线为外腔振动的激励信号。

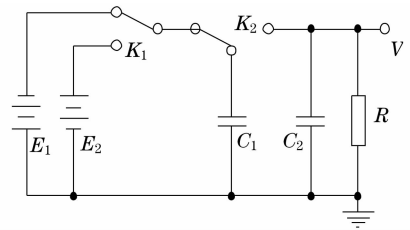


图 1 频率电压变换

Fig. 1 Frequency-voltage converter

将激励外腔振动的激励信号经过零检波整形为矩形波来驱动图 1 中的模拟开关  $K_1$ ，使  $C_1$  的充电电压随外腔振动的正负半周变化做倒相变换，则频率电压变换输出的电压随时间变化与外腔振动的正弦波形一致，如图 2(b)所示。

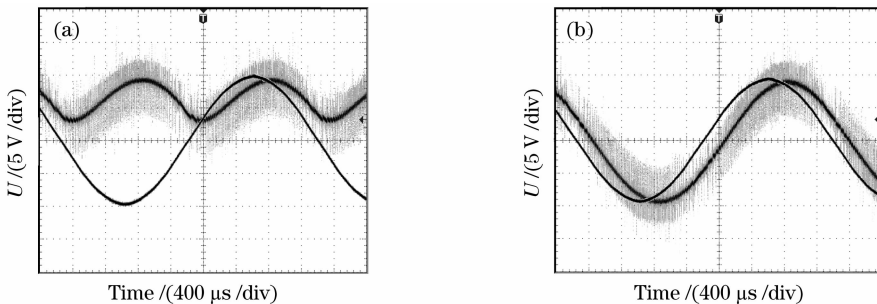


图 2 倒相变换前后频率电压变换输出信号的波形

Fig. 2 Output signal waveforms of the frequency-voltage converter before and after phase reverse

由于要保持频率发生较大范围变化时，频率电压变换的输出电压与频率之间有好的线性关系，图 1 中  $C_2$  取值较小，经频率电压变换后输出的信号中仍然叠加有与自混合干涉信号的频率相同的高频噪声，需要经过低通滤波来消除该噪声，得到振动信号平滑的波形。

## 3 振动信号重建

当激励信号与外腔谐振频率 (316 Hz) 一致时，激励信号与自混合干涉信号有图 3 所示的相位关系。激励信号达到幅值时，自混合干涉信号的频率最大（振动过平衡位置），激励信号过 0 时，自混合干涉信号的频率最小（振动幅度最大）。这是因为外腔

机械振动与激励信号谐振时,激励信号与外腔振动的相位差为 $\pi/2$ <sup>[15]</sup>。激励信号整形成矩形波后驱动图1中的模拟开关 $K_1$ ,使 $C_1$ 的充电电压随外腔振动变换极性,经频率电压变换和低通滤波重建的振动速率波形与激励信号波形一样,见图4。其中A为重建的振动波形,B为激励信号,两者的振幅成正比,见图5。图5中 $I_{sp}$ 为流过驱动外腔振动的扬声器动圈的激励电流, $U$ 为峰值检测电路的输出电压。扬声器的振幅与激励信号的振幅成正比<sup>[14]</sup>,图3中扬声器驱动信号的频率为316 Hz,驱动电流的幅度5 mA,A点之间的干涉条纹数为45.5,即扬声器振幅约为11.4个激光波长 $\lambda$ 。由此可以标定峰值检测电路输出电压与扬声器振动速率的关系为

$$U = 2.14 \times 10^{-4} \frac{v}{\lambda} + 0.28, \quad (3)$$

其中 $v$ 为扬声器振动速率,即扬声器振动速率每秒 $22056\lambda$ ,峰值检测电路输出电压为5 V。用方波或三角波激励外腔到谐振状态时,经上述变换重建的振动速率的波形仍然是正弦波形,重建的振动波形和激励信号两者的振幅仍然成正比。

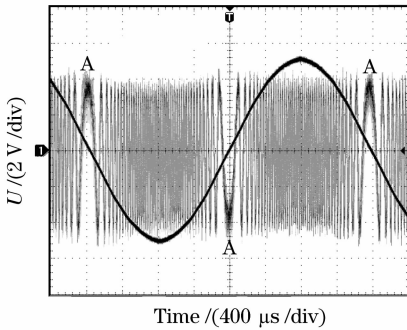


图3 外腔随激励信号谐振时的自混合干涉信号

Fig. 3 Self-mixing interference signal with external cavity resonant with the stimulating signal

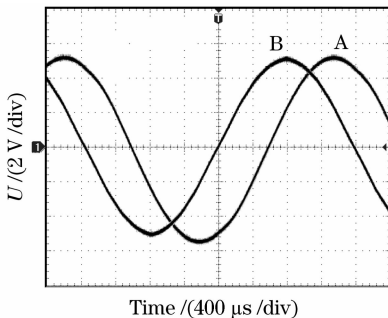


图4 重建的外腔振动信号与外腔振动激励信号

Fig. 4 Retrieved vibrating signal and the stimulating signal of external cavity vibration

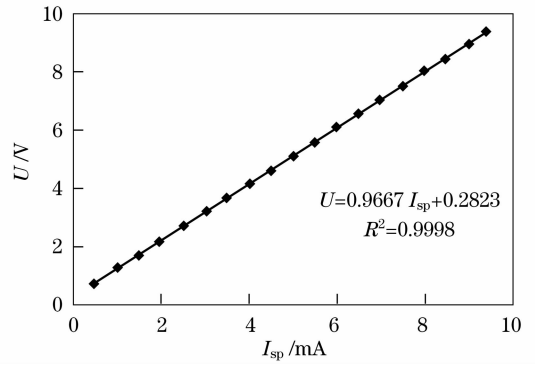


图5 频率电压变换输出信号与外腔振动激励信号成正比  
Fig. 5 Output signal of frequency-voltage converter proportional to the stimulating signal of external cavity vibration

当激励信号与外腔谐振频率不一致时,激励信号与自混合干涉信号就没有图3所示的相位关系。因为,随激励信号的频率偏离外腔谐振频率,激励信号与外腔振动的相位差逐渐趋向0或 $\pi$ <sup>[15]</sup>。当激励信号中包含谐波成分时,机械振动与激励信号的关系就比较复杂。例如,激励信号的频率为外腔谐振频率的1/3时,方波、正弦波和三角波激励扬声器使外腔振动观察到的自混合干涉信号的波形见图6。从自混合干涉信号的疏密变化可以分析,正弦波激励时外腔按激励信号的频率振动,激励信号与外腔振动的相位差为0。方波激励时外腔按自身谐振频率作阻尼振动,外腔振动频率是激励信号的3倍。三角波激励时外腔按自身谐振频率振动,其振幅逐渐增加的包络为锯齿波形,外腔振动频率也是激励信号的3倍。这时用激励信号驱动频率电压变换重建的振动速率的信号波形就与激励信号的波形不一致,但两者的最大值仍然保持正比关系,即激励信号的振幅越大振动的速率也越大。

图7为在激励信号的幅度相同的情况下,方波、正弦波和三角波激励扬声器使外腔振动,改变激励频率测量到的外腔振动速率的振幅随激励频率变化的谐振曲线,图中 $U$ 为峰值检测电路的输出电压。随谐振峰下降依次为方波、正弦波和三角波激励的情况。方波激励时,在方波的频率为外腔谐振频率的1,1/3,1/5和1/7时出现谐振峰,三角波激励在同样频率处也会观察到谐振峰只是峰高很低。说明方波和三角波的频谱是按其基频的奇数倍展开的,三角波的倍频分量较弱。当激励信号的倍频与外腔振动的谐振频率一致时外腔随之谐振,振动速率的振幅达到极大值。

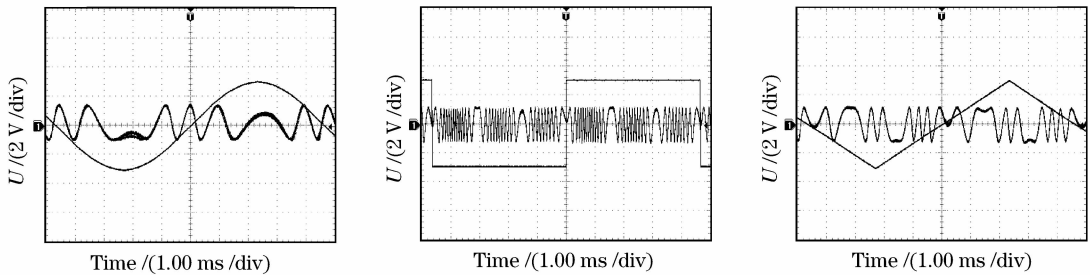


图 6 激励信号的频率为扬声器谐振频率的 1/3 时的自混合干涉信号

Fig. 6 Self-mixing interference signal with frequency of stimulating signal equal to one-third of resonant frequency of external cavity

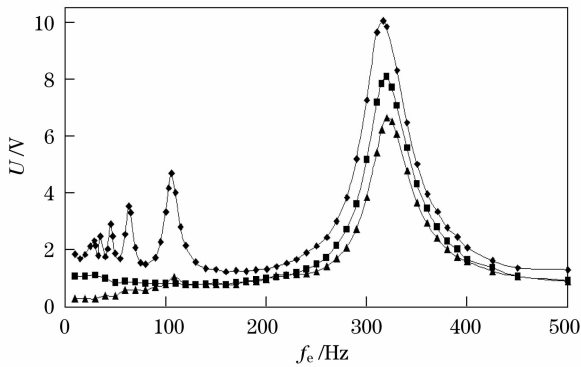


图 7 外腔振动速率的谐振曲线

Fig. 7 Resonant curve of vibrating speed of external cavity

## 4 讨 论

用频率电压变换重建振动信号的关键是从自混合干涉信号中提取外腔振动的周期及相位信号。具体地说就是要提取自混合干涉信号的频率近似为零时的相位和其重复的周期,即图 3 中 A 位置的相位和重复周期,用其作为触发信号驱动图 1 中的模拟开关  $K_1$ ,使  $C_1$  的充电电压随外腔振动变换极性,才能重建外腔振动的波形。利用适度反馈光时自混合干涉信号类锯齿波特征,通过微分自混合干涉信号,再对微分信号彻底整形可以提取外腔振动的周期及相位信号<sup>[5~8]</sup>。但是,要做到对任意振动信号实现实时自动地提取周期及相位信号技术上有一定难度。例如,测量不同激励频率下外腔振动的波形,谐振时外腔振动的振幅较大,自混合干涉信号的频率也较大,这时在一定的微分参数和彻底参考电压下正确地取得了外腔振动的周期及相位信号。当激励信号低于或高于谐振频率时,由于外腔振动的振幅和振动频率均发生变化,在同样的微分参数和彻底参考电压下取得的外腔振动的相位会发生偏移。

用自混合干涉信号反馈调制激光二极管工作电流来改变激光波长使自混合干涉的相位锁定<sup>[9]</sup>,可

以避免任意振动信号的周期及相位从自混合干涉信号中实时自动提取的困难。

采用本文介绍的方法已经能对最大频率在 5~80 kHz 自混合干涉信号作频率电压变换,重建的信号与振动信号有良好的线性关系。对于 300 Hz 的正弦振动,自混合干涉信号最大频率 5~80 kHz 对应振幅约为  $1.5\lambda \sim 21\lambda$ 。由于自混合干涉信号中存在的噪声和测量处理电路的噪声的影响,自混合干涉信号的最大频率低于 5 kHz 时,频率电压变换输出信号与振动信号的线性关系较差。振幅测量的上限与自混合干涉信号测量元件和电路的频带宽度有关,还与外腔的静态长度和激光的相干长度有关。

## 5 结 论

自混合干涉信号是无载频的调频信号,其频率可在 0 到几百千赫兹甚至更高的范围内变化,其波形为类正弦波形,或类锯齿波形。采用频率电压变换,直接将频率计数转换成电压幅度及波形,测量则更加方便直观。本文介绍的激光自混合干涉应用方案可以用于有确定激励方式的振动特性测量,如研究扬声器振动特性等。

用频率电压变换从自混合干涉信号重建外腔振动信号的关键是从自混合干涉信号中提取外腔振动的周期及相位信号。要实现从自混合干涉信号实时自动地提取外腔振动的周期及相位信号技术上有一定难度。若能从自混合干涉信号实时自动地提取外腔振动的周期及相位信号,本文介绍的频率电压变换方法可以用于重建任意振动的信号。

## 参 考 文 献

- Zhang Shulian. Laser feedback technique and its development [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(11): 65~71  
张书练. 激光回馈技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(11): 65~71
- Zhang Shulian, Liu Gang, Zhu Jun *et al.*. Self-mixing

- interference effect and progress for measuring displacement application[J]. *Progress in Nature Science*, 2005, **15**(7): 788~798
- 张书练,刘刚,朱钧等.自混合干涉效应及其在位移测量应用中的进展[J].*自然科学进展*, 2005, **15**(7):788~798
- 3 Mao Wei, Zhang Shulian, Zhang Lianqing *et al.*. Optical feedback effect and the optical feedback interferometry for sensing application[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1):16~22
- 毛威,张书练,张连清等.激光回馈效应及其传感应用研究的进展[J].*光学技术*, 2007, **33**(1):16~22
- 4 P. J. Groot, G. M. Gallatin, S. H. Macomber. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter modulated laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 4475~4480
- 5 D. Silvano, G. Giuliani, S. Merlo *et al.*. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**: 113~119
- 6 Zhang Guangna, Ye Huiying, Xue Qi *et al.*. Displacement measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(3):66~70
- 张广娜,叶会英,薛琦等.基于适度光反馈自混合干涉技术的位移测量系统[J].*激光与光电子学进展*, 2008, **45**(3):66~70
- 7 Xue Qi, Ye Huiying, Yu Yanguang. Reconstruction of arbitrary vibration signal based on optical feedback self-mixing interference [J]. *Microcomputer information*, 2007, **23**(31):273~275
- 薛琦,叶会英,禹延光.基于光反馈自混合干涉的任意振动信号重构[J].*微计算机信息*, 2007, **23**(31):273~275
- 8 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1430~1434
- 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, **27**(8):1430~1434
- 9 Guido Giuliani, Simone Bozzi-Pietra, Silvano Donati. Self-mixing laser diode vibrometer[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**: 24~32
- 10 Noel Servagent, Thierry Bosch, Marc Lescure. A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**(4):847~850
- 11 Lu Hansheng, Hiroshi Kodera, Masao Sumi. Laser Doppler small vibration measurement based on frequency analysis[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, **22**(2): 231~233
- 芦汉生,古寺博,角正雄.基于频率分析的激光多普勒微小振动测量[J].*北京理工大学学报*, 2002, **22**(2): 231~233
- 12 Ji Xinxin, Liu Jinsong, Wang Cheng *et al.*. Vibration characteristic of loudspeaker researched with self-mixing interference fringe counting method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(1):97~101
- 季新昕,刘劲松,王程等.利用自混合干涉效应的条纹计数法对扬声器振动特性的实验研究[J].*应用光学*, 2007, **28**(1):97~101
- 13 Linear Technology Corp. LTC1044/7660 switched capacitor voltage converter. 5-12~5-13
- 14 Hu Xianfeng. Experimental observation of self-mixing interference in laser diode and micro vibration [J]. *College Physics*, 2006, **25**(11):44~48
- 胡险峰.激光二极管自混合干涉和微振动的实验观测[J].*大学物理*, 2006, **25**(11):44~48
- 15 Qi Anshen, Du Chanying. *Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. 315
- 漆安慎,杜婵英.力学[M].北京:高等教育出版社, 2005. 315