

文章编号: 0253-2239(2009)05-1301-04

双纵模 He-Ne 激光器的拍频稳定度分析

梁 晶 龙兴武

(国防科技大学光电学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘要 对 He-Ne 双纵模激光器中两纵模的拍频稳定度进行了讨论。理论上分析了影响双纵模激光拍频稳定度的因素,推导出在考虑了频率牵引效应后双纵模的拍频稳定度和单模频率稳定度之间的关系。计算结果表明对于 632.8 nm 波长的 He-Ne 激光器,当频率牵引参量 σ_i 为 10^{-3} 时,双纵模的拍频稳定度约为其中任一单模频率稳定度的 1000 倍。实验证明当单纵模频率稳定度为 1×10^{-9} 时,其拍频稳定度为 3.3×10^{-6} 。

关键词 干涉测量; 双纵模; 拍频; 模牵引效应

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1301

Stability Analysis of Beat Frequency in Double-Longitudinal-Mode He-Ne Laser

Liang Jing Long Xingwu

(*Department of Opto-Electronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering,*
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The stability of beat frequency in the double-longitudinal-mode He-Ne laser is discussed. Considering the mode-pulling effect, the relation between the stability of the single mode and that of the beat frequency is deduced theoretically. The stability of the beat frequency in 632.8 nm He-Ne laser is 1000 times of that of the single mode with the frequency pulling parameter of 10^{-3} . The experimental results show that the stability of the beat frequency is 3.3×10^{-6} , when the single-mode stability reaches 1×10^{-9} .

Key words interference measurement; double-longitudinal-mode; beat frequency; mode-pulling effect

1 引 言

干涉计量是迄今基准测量和各种精密计量中最精确的方法。He-Ne 激光器由于具有高稳定度、体积小、光斑质量好、寿命长等优点,被广泛用作干涉计量中的光源,并作为参考标准。双纵模 He-Ne 激光器输出两正交线偏振光,频率相差一个纵模间隔,目前普遍采用热稳频或压电陶瓷(PZT)控制腔长使得两纵模强度相等的方法来稳频,以获得激光频率的稳定输出。稳频后双纵模激光器的拍频输出可以作为干涉计量中一个很好的合成波长。文献[1~8]都给出了用双纵模激光拍频作干涉测量的例子。

既然作为标准,那么两个纵模的拍频稳定度就

是一个需要讨论的问题。本文从理论上在考虑频率牵引效应后,分析了影响双纵模激光输出拍频稳定度的因素,推导出拍频稳定度和其中任一纵模频率稳定度之间的关系,并用实验来验证。

2 理论分析

很多文献对双纵模 He-Ne 激光器做了充分的研究^[9~14],在激光器中腔体的谐振频率为

$$\nu_q = \frac{qc}{2nL} \quad (1)$$

式中 q 为纵模的阶次, c 为光在真空中的传播速度, n 为介质的折射率, L 为激光谐振腔的腔长,根据

收稿日期: 2008-08-03; **收到修改稿日期**: 2008-12-08

作者简介: 梁 晶 (1979-)男,博士研究生,主要从事新型激光器技术,激光干涉测量等方向的研究。

E-mail: iamliangjing@126.com

导师简介: 龙兴武 (1958-)男,教授,博士生导师,主要从事光电检测技术,光学元件加工工艺学,薄膜光学与技术,新型激光器技术、激光在惯性制导技术中的应用等方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com

(1)式得到相邻纵模的频率间隔为

$$\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{(q+1)c}{2nL} - \frac{qc}{2nL} = \frac{c}{2nL}, \quad (2)$$

式中的频率 $\Delta\nu_q$ 即为拍波的频率,它可以作为干涉仪的一个合成波长 λ_s ($\lambda_s = \frac{c}{\Delta\nu_q}$) 进行干涉计量。

根据(1)式和(2)式得到

$$\frac{d\nu_q}{\nu_q} = \frac{d\nu_{q+1}}{\nu_{q+1}} = \frac{d\Delta\nu_q}{\Delta\nu_q} = -\frac{dL}{L} - \frac{dn}{n}. \quad (3)$$

由(3)式似乎可以得出结论相邻纵模拍频 $\Delta\nu_q$ 的频率稳定度与任一纵模的频率稳定度相同。但实验结果却与此大相径庭。

仔细观察(2)式可以发现,其实(2)式是在忽略模牵引效应后得出的结果,如果考察拍频稳定度,并且尝试用拍频作测量标准时,频率值的一阶无穷小量——频率牵引效应所带来的频率改变则不能忽略。可以作如下计算,设双纵模实际的拍频为 $\Delta\nu'_q$,则

$$\Delta\nu'_q = \Delta\nu_q - \Delta\nu^{(p)}, \quad (4)$$

式中 $\Delta\nu_q$ 为纵模间隔所带来的频率差, $\Delta\nu^{(p)}$ 则是考虑了模牵引效应所带来的修正项。以 $L=160$ mm 的双纵模 He-Ne 激光器为例,纵模拍频频率 $\Delta\nu_q$ 为 935 MHz,而模牵引带来的频率改变量 $\Delta\nu^{(p)}$ 在 1 MHz 左右。诚然 $\Delta\nu_q$ 的稳定度可以很高并达到与任一单纵模频率稳定度相同的水平,但 $\Delta\nu^{(p)}$ 也可以达到那么高的稳定度么? 下面理论分析考虑了模牵引效应后的拍频稳定度公式。

3 考虑了模牵引效应后拍频公式的修正

有源腔内的激光工作物质在增益曲线中心频率 ν_0 附近呈现强烈的色散,如图 1 所示:

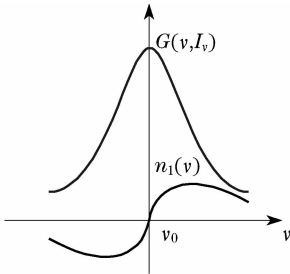


图 1 增益曲线和色散曲线

Fig. 1 Gain curve and dispersion curve

增益系数不为零时折射率是频率的函数,记为 $n(\nu)$:

$$n(\nu) = n_0 + n_1(\nu) = n_0 + \frac{c(\nu - \nu_0)}{\Delta\nu_H 2\pi\nu} G, \quad (5)$$

式中 n_0 是增益系数为零时的折射率, $n_1(\nu)$ 为折射率随频率和增益 G 的变化部分。

考虑 He-Ne 激光器的增益曲线为非均匀加宽线形,可以得到^[15]

$$n_1(\nu) = \frac{c(\nu - \nu_0)}{\pi^{3/2} \nu \Delta\nu_D} \sqrt{\ln 2} G_i^0(\nu_0) e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2}, \quad (6)$$

式中 ν_0 为增益曲线中心频率, $\Delta\nu_D$ 为多普勒线宽, $G_i^0(\nu_0)$ 为 ν_0 处小信号增益系数。

在无源腔中,纵模频率如(1)式所示,但在考虑有源腔内色散存在的影响后,模式分布如图 2 所示。

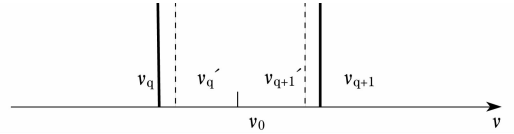


图 2 谐振腔中模式分布

Fig. 2 Distribution of modes in the cavity

图 2 中实线表示的纵模频率 ν_q 和 ν_{q+1} 为无源腔内纵模分布,虚线表示的纵模频率 ν'_q 和 ν'_{q+1} 则是考虑了频率牵引效应后,有源腔内实际的模频率。对(1)式作如下修正得到

$$\nu'_q = \frac{qc}{2n(\nu)L} = \frac{qc}{2[n_0 + n_1(\nu)]L}. \quad (7)$$

显然它将偏离无源腔的纵模频率,偏离量为

$$\nu'_q - \nu_q = \frac{qc}{2[n_0 + n_1(\nu)]L} - \frac{qc}{2n_0L} \approx -\frac{n_1(\nu)}{n_0} \nu_q. \quad (8)$$

把(6)式代入(8)式,并化简,最终得到

$$\nu'_q - \nu_q = -2 \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_D} \sqrt{1 + \frac{I_{\nu_q}}{I_s}} (\nu'_q - \nu_0), \quad (9)$$

式中 $\Delta\nu_c$ 为腔体线宽,引入频率牵引参量

$$\sigma_i = -\frac{\nu'_q - \nu_q}{\nu'_q - \nu_0} = 2 \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_D} \sqrt{1 + \frac{I_{\nu_q}}{I_s}}, \quad \text{得到}$$

$$\nu'_q - \nu_q = -\sigma_i (\nu'_q - \nu_0). \quad (10)$$

由于在双纵模激光器频率近似稳定时,有如下关系近似成立:

$$\nu'_{q+1} - \nu_{q+1} = \nu_q - \nu'_q = \sigma_i (\nu'_q - \nu_0) = -\sigma_i (\nu'_{q+1} - \nu_0). \quad (11)$$

因此双纵模实际的拍波频率 $\Delta\nu'_q$ 可以表示为

$$\Delta\nu'_q = \Delta\nu_q - \Delta\nu^{(p)} = \frac{c}{2n_0L} - 2\sigma_i (\nu'_{q+1} - \nu_0), \quad (12)$$

(12)式即为考虑了频率牵引后得出的拍频表达式,进而可以得出拍频稳定度表达式

$$\frac{d\Delta\nu'_q}{\Delta\nu'_q} = \frac{\frac{c}{2n_0L}\left(-\frac{dL}{L} - \frac{dn_0}{n_0}\right) + 2\sigma_i\left(-\frac{d}{L} - \frac{dn_0}{n_0}\right)\nu'_{q+1}}{\frac{c}{2n_0L} - 2\sigma_i(\nu'_{q+1} - \nu_0)} =$$

$$\left(-\frac{dL}{L} - \frac{dn_0}{n_0}\right) \frac{\frac{c}{2n_0L}[1 + 2\sigma_i(q+1)]}{\frac{c}{2n_0L} - 2\sigma_i(\nu'_{q+1} - \nu_0)} \approx \left(-\frac{dL}{L} - \frac{dn_0}{n_0}\right)[1 + 2\sigma_i(q+1)], \quad (13)$$

式中 $\left(-\frac{dL}{L} - \frac{dn_0}{n_0}\right)$ 即为单纵模的频率稳定度 $\frac{d\nu_q}{\nu_q}$,

因此拍频的稳定度可以看成单纵模频率稳定度乘上因子 $[1 + 2\sigma_i(q+1)]$, 中括号中第一项 1 为原先不考虑频率牵引时拍频稳定度表达式, 第二项 $2\sigma_i(q+1)$ 则为考虑了频率牵引后所作的修正。对于 632.8 nm He-Ne 激光器, σ_i 的数量级约为 10^{-3} ^[15], 由于纵模阶次 q 为一个很大的数, 对腔长 $L = 160$ mm 的 He-Ne 激光器, q 值大约为 5.056×10^5 , 把上述数据代入(13)式可以得出在考虑了频率牵引效应后, 双纵模的拍频稳定度为其中任一单纵模频率稳定度的 1000 倍。

4 实验验证

实验采用由本教研室生产的 633 nm 双纵模 He-Ne 激光器, 腔体材料为热膨胀系数较小的微晶玻璃, 腔长 160 mm, 由压电陶瓷 PZT 控制腔长来稳频。稳频原理图如图 3 所示。

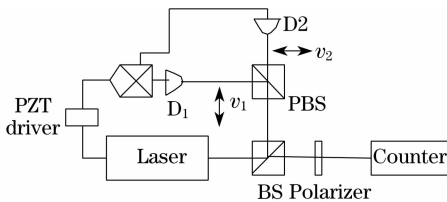


图 3 双纵模 He-Ne 激光器稳频原理图

Fig. 3 Schematic diagram of frequency-stabilized two-longitudinal-mode He-Ne laser

图 3 中, 双纵模 He-Ne 激光器发出的双频激光, 经 BS 分成两束, 其中一束经检偏器, 入射至频率计, 记录二纵模的拍频; 另外一束经过 PBS 分为两个偏振方向的光分别入射至 D_1, D_2 光电管, 伺服系统通过比较 D_1, D_2 的光强控制 PZT, 把腔长稳定在 $D_1 = D_2$ 处来稳定激光频率。

该激光器曾送至中国计量科学研究院光学处进行碘稳频测试, 单纵模频率稳定度可以达到 1×10^{-9} 。拍频稳定度测试在教研室进行, 拍频 936.841 MHz, 激光器稳定后, 2 小时内拍频不确定

度 3 KHz, 换算成拍频稳定度为 3.3×10^{-6} 与理论推导同一量级。

作为对比印证, 文献[1]中使用双纵模激光器作为外差干涉测量的光源, 采用热稳频的方法给激光器稳频。单纵模频率稳定度达到 2×10^{-9} , 双纵模的拍频稳定度可以达到 4.0×10^{-6} 。所得结果与理论推导也基本符合。

5 结 论

作为干涉仪的长度标准之一, 有必要对双纵模激光拍波的频率稳定度作讨论。本文从理论上推导出考虑了模牵引效应后, 拍波稳定度和单纵模频率稳定度之间表达式; 解释了拍波频率稳定度比单纵模频率稳定度低 3 个数量级的原因; 最后再由实验验证结果的正确性。本文的理论推导方法也可推广于其它双纵模激光器拍频稳定度的讨论。

参 考 文 献

- 1 Min-Seok kim, Seung-Woo Kim. Two-longitudinal-mode He-Ne laser for heterodyne interferometers to measure displacement[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(28): 5938~5942
- 2 G. Margheri, C. Giunti. Double-wavelength superheterodyne interferometer for absolute ranging with submillimeter resolution: results obtained with a demonstration model by use of rough and reflective targets[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6211~6216
- 3 R. Dandliker, R. thalmann, D. Prongue. Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(5): 339~341
- 4 Zhao Yang, Zhou Ting, Li Dacheng. Study on a dual-wavelength absolute distance heterodyne interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1374~1378
赵洋, 周挺, 李达成. 双波长绝对距离外差干涉仪的研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1374~1378
- 5 Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin. Study on a new kind of multi-wavelength absolute distance interferometer [J]. *Opt. Technique*, 2008, **34**(5): 681~683
梁晶, 龙兴武, 张斌. 一种新型多波长绝对距离干涉测量系统的研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(5): 681~683
- 6 Zhou Zhaofei, Zhang Tao, Zhu Mucheng *et al.*. Research on the laser beat-wave interferometry [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 101~104
周肇飞, 张涛, 朱目成等. 双纵模激光拍频干涉仪的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 101~104
- 7 Yin Chunyong. *Modern Interferometric Measuring Technique*

- [M]. Tianjin; Tianjin university Press, 1999; 194~230
 殷纯永. 现代干涉测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999; 194~230
- 8 Jin Guo Fan, Li Jing Zhen. *Laser in Measurements*[M]. Beijing: Science Press. 1998
 金国藩、李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社 1998
- 9 Suo Rui, Fan Zhijun, Li Yan *et al.*. Dual-frequency laser interferometer present state and development [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(4): 251~253
 所 睿, 范志军, 李 岩 等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. 激光与红外, 2004, **34**(4): 251~253
- 10 Deng Luogen. Absolute distance interferometry using multiwavelength lasers: theories and progress review[J]. *Laser Technol.*, 1997, **21**(2): 65~71
 邓罗根. 多波长激光绝对距离干涉计量术的原理与发展[J]. 激光技术, 1997, **21**(2): 65~71
- 11 Zhang Hui, Shen Naizheng. Studies on the spectrum and frequency repletion of double-mode He-Ne laser with frequency stabilization[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(7): 1009~1012
 张 辉, 沈乃徵. 双纵模氦氖激光器的光谱与频率复现性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(7): 1009~1012
- 12 Lu Kecheng, Ba Enxu, Zhang Chungping. Competition effect of polarization in two-mode internal mirror He-Ne lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(1): 45~49
 吕可诚, 巴恩旭, 张春平. 内腔双纵模 He-Ne 激光器偏振方向的竞争效应[J]. 光学学报, 1984, **4**(1): 45~49
- 13 Yin Jianping. TC time-spectrum method for frequency and power stabilization on two-mode He-Ne laser (theory part) [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(5): 397~403
 印建平. 双纵模 He-Ne 激光器稳频稳幅的时间相干时谱法(理论部分)[J]. 光学学报, 1988, **8**(5): 397~403
- 14 Wang Lixia, Jiang Yanyi, BI Zhiyi *et al.*. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1198~1202
 王丽霞, 蒋燕义, 毕志毅 等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1198~1202
- 15 周炳琨, 高以智, 陈家骅 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 152~154

第二届光子与光电子学会议(POEM2009)

第二届光子与光电子学会议将于 2009 年 8 月 8~10 日在中国武汉华中科技大学召开。本届会议为期 3 天, 内容涉及光纤通信与传感技术, 工业激光及应用技术, 光电子器件与集成, 光存储及新型存储技术, 太阳能电池、固态照明与信息显示技术, 生物医学光子学与成像技术等六个领域。

会议网址: <http://www.wnlo.cn/poem>