

文章编号: 0258-7025(2007)09-1198-05

基于纵模拍频控制的激光稳频技术

王丽霞, 蒋燕义*, 毕志毅, 马龙生

(华东师范大学物理系精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要 介绍了一种新的双纵模激光稳频技术: 基于激光频率与纵模频率间隔的对应关系, 通过精密锁相控制技术将两相邻纵模的拍频频率锁定在射频频率标准上, 以控制激光谐振腔腔长, 实现锁定激光频率的目的。理论分析表明, 激光频率稳定度与两相邻纵模拍频频率的稳定度相同; 实验上以射频频率标准为参考, 精密锁定了 He-Ne 激光两相邻纵模的拍频频率及激光频率, 且对采用该技术稳频的两套 He-Ne 激光系统进行了比对。实验结果表明, 激光频率的稳定度为 5×10^{-10} (1 s 积分时间), 5×10^{-11} (100 s 积分时间)。

关键词 激光技术; 稳频激光; 精密控制; 纵模频率间隔

中图分类号 TN 248.2⁺1 文献标识码 A

Laser Frequency Stabilization Based on Control of Inter-mode Beat Note

WANG Li-xia, JIANG Yan-yi, BI Zhi-yi, MA Long-sheng

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, Department of Physics,
East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract A new frequency-stabilized two-mode laser was introduced. Based on the relationship between optical frequency and intermode beat note, the intermode beat note was locked to the radio frequency standard by precise phase-locking technique to keep the cavity stable, so laser frequency stabilization was realized. Theoretical analysis shows that the stability of the laser frequency is identical with that of the intermode beat note. Experimentally, the intermode beat note of He-Ne laser was precisely locked to the radio frequency standard, and the laser frequency was also locked. The frequencies of two frequency-stabilized He-Ne lasers were compared. The result showed that the laser had a frequency stability of 5×10^{-10} at 1 s of averaging time and 5×10^{-11} in 100 s of averaging time.

Key words laser technique; frequency-stabilized laser; precision control; intermode beat note

1 引言

小型 He-Ne 激光器由于其光斑质量好、运行稳定、寿命长、使用方便等特性, 经稳频后常作为光学频率(波长)标准用于各种干涉仪中, 也可用于校准各类光波长计和光谱仪的参考标准。目前对双纵模 He-Ne 激光稳频多利用相邻纵模偏振态相互垂直

的特性, 通过对激光器腔体加热等方法以控制激光谐振腔腔长, 使得两纵模强度相等, 从而获得激光频率的稳定输出^[1~5]。这种稳频技术装置比较简单, 因而得到了广泛的应用。然而由于其稳频过程存在热滞后, 导致该稳频技术控制精度不高。

本文介绍一种新的双纵模激光稳频技术, 其原理是基于激光频率与纵模频率间隔的对应关系, 通

收稿日期: 2007-03-08; 收到修改稿日期: 2007-04-20

基金项目: 科技部 973 计划(2006CB806005)、国家自然科学基金(60490280)和上海市科学技术委员会(04JC14086)资助项目。

作者简介: 王丽霞(1979—), 女, 黑龙江人, 硕士研究生, 主要从事精密激光光谱及激光稳频技术的研究。

E-mail: wanglixia1979@hotmail.com

导师简介: 毕志毅(1956—), 男, 上海人, 教授, 主要从事精密激光光谱及激光稳频技术的研究。

E-mail: zybi@phy.ecnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yyjiang@phy.ecnu.edu.cn

过精密锁相控制技术将两相邻纵模的拍频频率锁定在射频频率标准上,以控制激光谐振腔腔长,实现锁定激光频率的目的。

2 理论分析

激光腔的谐振频率为^[6]

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

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 为激光谐振腔腔长。根据(1)式,得到相邻纵模的频率间隔为

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

根据(1)和(2)式,激光腔的谐振频率 ν_q , 相邻纵模的频率间隔 $\Delta\nu_q$ 均与谐振腔长度 L 有关,通过控制腔长 L 就可以控制激光腔的谐振频率 ν_q 和相邻纵模的频率间隔 $\Delta\nu_q$ 。反之,对相邻纵模频率间隔 $\Delta\nu_q$ 进行控制,就可以控制谐振腔腔长的变化,从而达到控制激光频率的目的。

根据(1)式推得 ν_q 和 ν_{q+1} 的频率稳定度分别为

$$\frac{d\nu_q}{\nu_q} = -\frac{dL}{L} - \frac{dn}{n}, \quad (3a)$$

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

根据(2)式推得相邻纵模频率间隔 $\Delta\nu_q$ 的频率稳定度为

$$\frac{d(\Delta\nu_q)}{\Delta\nu_q} = -\frac{dL}{L} - \frac{dn}{n}。 \quad (4)$$

综合(3a), (3b)和(4)式,相邻纵模频率间隔 $\Delta\nu_q$ (微波频率)的稳定度与任一纵模的频率(光学频率)稳定度相同。可见采用该稳频技术,对激光频率锁定的过程,也同时实现了射频频率标准向光学频率标准的传递^[7]。

3 实验装置

双纵模 He-Ne 激光稳频的实验装置如图 1 所示。激光器为半外腔结构,激光管放置在由热胀系数较小的大理石制成的“V”型槽内,放电管端口有布儒斯特(Brewster)窗,输出光为线偏振光。He-Ne 激光的增益带宽约为 1500 MHz,相邻纵模的频率间隔 $\Delta\nu_q = \frac{c}{2nL}$,所以选择合适的谐振腔长,就可在增益带宽内出现双纵模的概率较大。实验选定腔长 L 为 230 mm,则双纵模的频率间隔约为

652 MHz,输出功率为 1.4 mW。用高频光电探测器(DET)对输出光进行光外差探测得到两相邻纵模的光拍频信号后,经分配器(Distributor)将其分为两路,其中一路送至频率计(Counter)经计算机进行计数;另外一路送至双平衡混频器(DBM),与频率综合发生器(RF Synthesizer)提供的射频频率标准进行鉴相,获得两相邻纵模拍频频率与射频频率标准之间的频率偏差即误差信号,经伺服控制系统(Servo Control)和高压驱动(PZT Driver)控制激光腔体上的压电陶瓷(PZT)以调节激光谐振腔腔长,实现两相邻纵模拍频频率 $\Delta\nu_q$ 与射频频率标准之间的精密相位锁定,最终实现激光频率的锁定。其中双平衡混频器型号为 Mini-Circuits 公司生产的 SRA-2CM,频率综合发生器型号为 Agilent 公司生产的 E4400B,频率计型号为 Agilent 53131A。

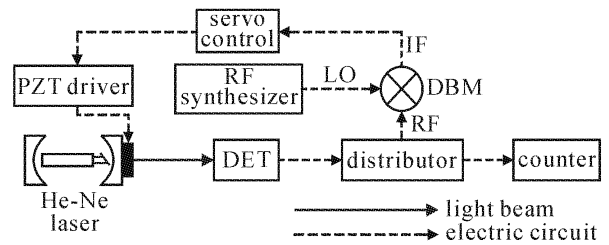


图 1 双纵模 He-Ne 激光稳频实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency-stabilized two-mode He-Ne laser

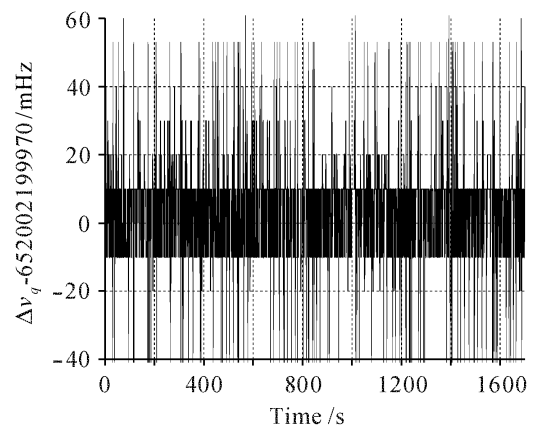


图 2 两相邻纵模的拍频频率 $\Delta\nu_q$

Fig. 2 Intermode beat note $\Delta\nu_q$

频率计经由计算机所采集的锁定在射频频率标准上的两相邻纵模拍频频率如图 2 所示。受频率计 Agilent 53131A 的有效位数所限,两相邻纵模的拍频频率 $\Delta\nu_q$ 精确到 10 mHz。采样门控时间为 1 s,总采集时间为 1700 s。

两相邻纵模拍频频率的稳定度如图 3 所示。为了检验输出激光的频率稳定性,将采用该技

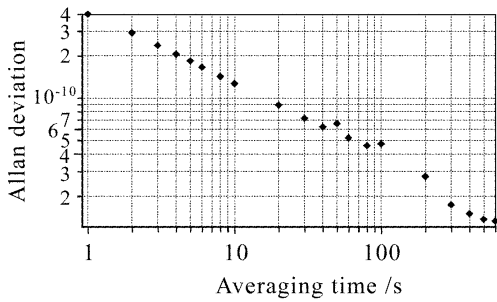


图 3 两相邻纵模拍频频率 $\Delta\nu_q$ 的阿仑方差

Fig. 3 Allan deviation of the intermode beat note $\Delta\nu_q$

术稳频的两套 He-Ne 激光系统进行了比对^[8],如图 4 所示。为使在增益带宽内两台激光器 (He-Ne Laser₁ 与 He-Ne Laser₂) 出现双纵模的概率均较大且二者的双纵模频率间隔值相近,选定两台激光器的腔长约为 235 mm,双纵模的频率间隔分别为 643 MHz,640 MHz且分别受控于频率综合发生器 Agilent E4400B 和 Agilent E4423B,输出功率分别为 1.4 mW 和 1.8 mW。输出的稳频激光分别经半透半反射镜 M_1, M_3 , 共轴耦合至高频探测器 (DET₃)

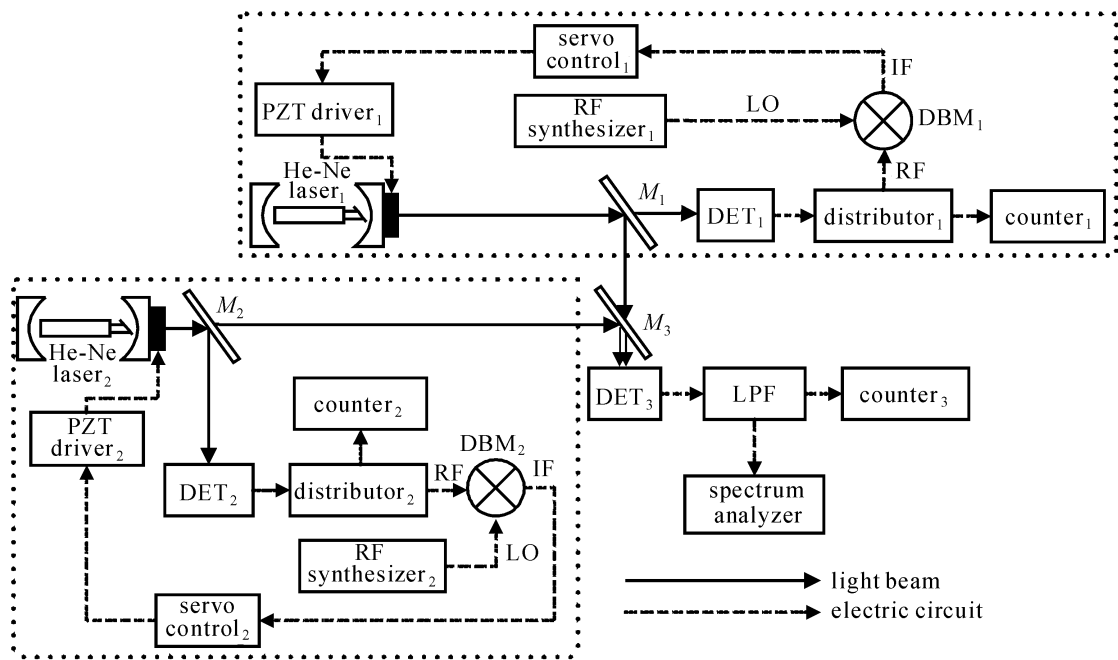


图 4 两套双纵模稳频 He-Ne 激光系统之间的比对

Fig. 4 Comparison between two two-mode frequency-stabilized He-Ne lasers

进行光外差探测。由于两台激光器的输出光中各含有两个纵模,所以高频探测器 (DET₃) 输出的信号中除了两路输出激光交叉相拍获得的光拍频信号外,还包含它们各自的光拍频信号。用低通滤波器 (LPF) 选出两路输出激光交叉相拍获得的光拍频信号中频率相对较低的信号 ν_1 , 送至频率计 (Counter₃) 进行计数,同时送至频谱分析仪 (Spectrum Analyzer) 进行观测。He-Ne Laser₁ 与 He-Ne Laser₂ 各自的光拍频信号分别送至 Counter₁ 与 Counter₂ 中进行计数。其中 Counter₁ 与 Counter₃ 的型号为 Agilent 53131A, Counter₂ 的型号为 Agilent 53132A, 频率综合发生器和频率计的时间基准 (Time Base) 均取自频率计 53132A。

图 5 所示为 Counter₃ 经由计算机所采集的两路输出激光交叉相拍获得的光拍频信号 ν_1 , 采样门

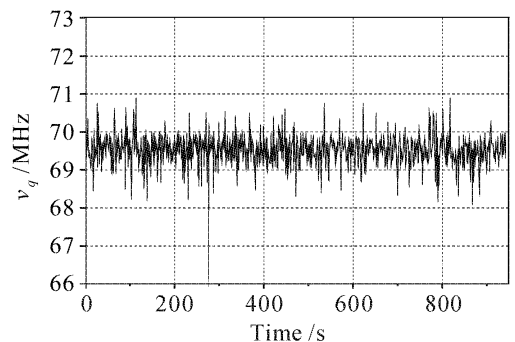


图 5 激光比对光拍频频率 ν_1

Fig. 5 Beat note ν_1 between two lasers

控时间为 1 s, 总采集时间为 950 s。

两套稳频 He-Ne 激光系统比对结果如图 6 所示。

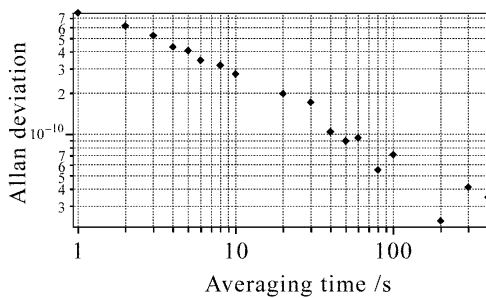


图6 激光频率的阿伦方差

Fig. 6 Allan deviation of laser frequency

4 实验结果和讨论

4.1 实验结果

根据图3,积分时间为1 s时两相邻纵模拍频频率的稳定度为 4×10^{-10} ,积分时间100 s时为 5×10^{-11} ;图6中1 s积分时间对应频率稳定度为 7×10^{-10} ,100 s积分时间对应频率稳定度为 7×10^{-11} ,将测量的频率稳定度折算到每台被测激光器上,则积分时间为1 s时激光频率稳定度为 5×10^{-10} ,积分时间100 s时为 5×10^{-11} 。可见,激光频率的稳定度与两相邻纵模拍频频率的稳定度基本在同一个数量级,与理论分析基本相符。

4.2 讨论

1) 两相邻纵模拍频频率及激光频率二者的稳定度,最终取决于射频频率标准的稳定度及电子伺服系统的工作状态。实验中的射频频率标准由频率综合发生器 Agilent E4400B 和 Agilent E4423B 提供,稳定度可达 10^{-11} ;同时在实验中选择比较伺服电路各相关参数的影响,修改环路的增益特性和相频特性,使稳频控制系统响应速度及控制精度提高,锁定误差最小,达到最佳控制状态^[9,10]。实验还存在一些可改进的地方:激光腔体上的压电陶瓷体积和激光器前反镜质量均较大,影响了压电陶瓷的高频响应特性,在抵抗外界快速干扰时控制力不强;同时由于激光器采用半外腔结构,也增加了腔的不稳定性。如果采取措施消除这些因素的影响,两相邻纵模拍频频率和激光频率二者的稳定度还可以进一步提高。

2) 该稳频技术通过将两相邻纵模间的拍频频率精密锁定在高稳定度、高精度的射频频率标准上,获得了激光频率的稳定输出,实现了射频频率标准向光学频率标准的传递;反之可以将激光的任一纵模精密锁定在另外一台超稳的激光器上,通过纵模拍频方法,获得高稳定度、高精度的射频频率标准,

实现光学频率标准向射频频率标准的传递。

3) 该稳频技术还可以扩展到腔长较长、多纵模输出激光器的频率锁定。由 $\Delta\nu_q = c/(2nL)$,对于腔长一定的激光器,其相邻纵模的频率间隔为一常数,即腔的纵模在频率上是等间隔排列的,可通过精密锁相控制其任意两纵模间的拍频频率(微波频段)以控制激光谐振腔腔长,实现激光频率的稳定输出。

4) 采用该稳频技术,输出激光的频率在增益带宽一定范围内可连续、精密调谐;改变射频标准频率的频率值,纵模的拍频频率就会跟踪锁定在不同值点,由纵模频率间隔与激光频率的对应关系可知,输出激光的频率值就可跟踪锁定在不同值点,即可实现激光频率的连续、精密调谐。

5 结论

介绍了一种新的双纵模激光稳频方法,通过精密锁相控制两相邻纵模的拍频频率,实现了 He-Ne 激光的频率锁定,频率稳定度达到 5×10^{-10} (1 s积分时间), 5×10^{-11} (100 s积分时间)。整个稳频系统结构简单、操作方便,且激光频率在增益带宽曲线一定范围内可连续、精密调谐,在实际应用中,可用作稳频激光标准。

参 考 文 献

- Zhang Hui, Shen Naizheng. Studies on the spectrum and frequency repetition of double-mode He-Ne laser with frequency stabilization [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(7):1009~1012
张辉,沈乃微. 双纵模稳频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
- Zhou Zhaofei, Zhang Tao, Zhu Mucheng *et al.*. Research on the laser beat-wave interferometry [J]. *Chinese 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
- Li Wenjie, Zhou Zhaofei, Jin Chongjiu. Thermal frequency-stabilizing light source for double longitudinal mode laser [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6):94~97
李文杰,周肇飞,晋崇九. 双纵模激光热稳频光源[J]. *光电工程*, 1998, **25**(6):94~97
- Zhu Mucheng, Zhang Tao, Yin Bobiao *et al.*. Research on the control system of thermal frequency stabilization of laser with double longitudinal mode [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(4):581~582
朱目成,张涛,尹伯彪等. 双纵模激光器的热稳频控制系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(4):581~582
- Cai Peng, Zhou Zhaofei, Zhang Tao *et al.*. Fuzzy PID control of thermal frequency-stabilizing laser light source with double-longitudinal mode [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, **38**(1):154~158
蔡鹏,周肇飞,张涛等. 双纵模热稳频激光源的模糊 PID

- 控制研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, **38**(1):154~158
- 6 Chen Yuqing, Wang Jinghuan. Principles of Optics [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002. 60~64
陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002. 60~64
- 7 Jiang Yanyi, Bi Zhiyi, Ma Longsheng. Optical frequency synthesizer [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2005, **11**(3): 133~138
蒋燕义,毕志毅,马龙生. 光学频率合成器[J]. 量子光学学报, 2005, **11**(3):133~138
- 8 Shen Naicheng, Zhang Zhiquan. Comparison measurement of 633 nm Iodine-stabilized laser as a length primary standard (standard) [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2002, **22**(1):7~9
沈乃澄,张志权. 633 nm 碘稳定激光器作为长度基(标)准的比对测量[J]. 航空计测技术, 2002, **22**(1):7~9
- 9 Bi Zhiyi, Ding Jingxin, Zheng Wenqiang. Manufacture on mini-Nd:YVO₄ stabilized laser with frequency modulation spectrum [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(22):2461~2464
毕志毅,丁晶新,郑文强. 用频率调制光谱技术研制 Nd:YVO₄ 稳频激光器[J]. 科学通报, 2000, **45**(22):2461~2464
- 10 Su Pengsheng, Jiao Lianwei. The Principle of Automatic Control [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 131~138
苏鹏声,焦连伟. 自动控制原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2003. 131~138

第十八届全国激光学术会议在哈尔滨召开

第十八届全国激光学术会议于8月13~17日在哈尔滨工业大学科学园国际会议中心顺利召开。大会名誉主席由周炳琨院士担任,会议主席为范滇元院士和周寿桓院士。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办,哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江省光学学会共同承办,上海光学精密机械研究所等13家单位协办。

本次会议邀请了徐至展、周寿桓等11位院士和专家作大会邀请报告。会议内容精彩纷呈,院士和专家们介绍了我国近年来激光领域的重大研究进展,为今后激光领域的发展指明了方向。其中徐至展院士分析了超强超短激光与强场超快科学中面临的重大问题,对国家科技进步一等奖“小型化 OPCPA 超短超强激光装置”在强场超快科学中的应用做了展望。祝世宁教授介绍了该小组在光学超晶格及其在激光技术应用中的研究进展,该研究也是国家自然科学基金一等奖“介电体超晶格材料的设计、制备、性能和应用”应用中非常重要的一方面。另外共有300多名来自高校、研究所以及公司激光领域的工作者参加了本次会议。按照研究方向大会共设四个分会场,分别是激光物理、非线性光学及量子光学;全固态激光器及新型激光器;激光应用,激光材料、薄膜及元器件;光束传输、控制及光束特性。大会共收到来自全国各地投稿350多篇,涉及科研院所、大专院校、高新企业90多家单位,其中国家实验室及国家重点实验室17个,部级重点实验室11个,会议共录用口头报告249篇,张贴报告56篇,到会代表330多人。除了学术报告之外,大会邀请了相干公司做了关于激光器及各种激光产品的介绍报告。最后大会还邀请与会人员参观了哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室。

全国激光学术会议自1962年开始举办,是国内光学界非常重要的学术会议,并以其很高的会议质量和论文水平,得到光学界专家学者的一致肯定。全国激光学术会议每两年召开一次,下次会议时间为2009年,地点为北京。

本次会议的优秀论文将由《中国激光》正式出版。

《中国激光》编辑部