

633 nm 稳频激光器波长校准装置建立与应用

马建敏 余培英 赵玉茹 武鹏

上海市计量测试技术研究院, 上海 201203

摘要 建立了 633 nm 波长标准装置, 已为各行各业的激光干涉仪、激光跟踪仪等测量设备提供精准的长度校准服务。采用稳频激光器波长校准的拍频原理, 将测量值溯源到长度波长基准。该激光器波长校准装置包括: 参考激光器、被检激光器、合束镜、光电探测器、带宽放大器、频谱分析仪、频率计以及微机数据采集系统。分析了提高检测精度的影响因素。给出了拍频实验输出结果时间频率采样图。解析了波长、频率、稳频特性等检定项目的判定依据。

关键词 测量; 校准装置; 拍频; 频率稳定度; 阿伦方差

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.071201

Establishing and Applications of Wavelength Calibrating Equipment of 633 nm Frequency Stabilized Laser

Ma Jianmin Yu Peiying Zhao Yuru Wu Peng

Shanghai Institute of Measurement and Test Technology, Shanghai 201203, China

Abstract Established wavelength calibrating equipment has been used for precise length calibrating service of measurement devices of laser interferometers and laser trackers for many users. In term of beat frequency for laser wavelength calibrating its measurement value can be traced to the source as length wavelength standard. The wavelength calibrating equipment consists of reference laser, detected laser, optical elements of combined beam, photoelectric detector, wide band amplifier, spectrum analyzer, frequency counter and computer data acquisition system. Influence factors of improving the accuracy of detection are analyzed. Time sampling diagrams of results of beat frequency experiment are given. The basis of judging of relationship between wavelength, frequency and characteristic of frequency stability is also analyzed.

Key words measurement; calibrating equipment; beat frequency; frequency stability; Allan variance

OCIS codes 120.3940; 120.1880; 120.4640; 140.3425; 140.6810; 040.1345

1 引言

1983年第十七届国际计量大会通过了新的米定义, 将“米”定义为: 光在真空中在 $1/299792458$ s 时间间隔内传播的程长。复现米定义有三种方式, 其中最常用的是, 引用国际计量委员会推荐的 21 条激光谱线之一所对应的真空波长值或频率值, 并按给定的不确定度使用。在所推荐的 21 条激光谱线中, 碘稳频 633 nm He-Ne 激光辐射的复现稳定可靠, 激光器制造工艺相对简单, 而且其波长与作为工作标准的 633 nm He-Ne 稳频激光波长接近, 可以通过比较简单的拍频测量法将长度基准传递到工作标准, 因此世界各国均将其作为经常保持运转状态的长度基准^[1]。

我国也将碘稳频 633 nm He-Ne 激光辐射作为法定长度基准, 工作标准 633 nm He-Ne 稳频激光器则作为一种光源在各种干涉系统中得到广泛的应用, 包括激光干涉比长仪、激光量块干涉仪、激光跟踪仪、激光小角度测量仪、洛氏硬度国家基准、振动国家基准、激光绝对重力仪等专用激光干涉系统以及用于各种数控机床、三坐标测量机校准和工程安装定位的各种激光干涉仪, 以上这些激光器都是将 633 nm He-Ne 稳频激光器辐射的激光波长作为长度度量的基准^[2-4]。

目前国内外同行对于精密测控和计量的稳频激光器及其应用开展了广泛和深入的探索研究^[5-11], 取得

收稿日期: 2015-01-22; 收到修改稿日期: 2015-03-18; 网络出版日期: 2015-04-28

作者简介: 马建敏(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事几何量精密测量、光学仪器校准、工程基线测量等方面的研究。

E-mail: majm@simt.com.cn

诸多的重要成果可供借鉴。本文涉及比较多的 633 nm 稳频激光器有:兰姆凹陷稳频激光器、双纵模稳频激光器、利用谱线在磁场内塞曼分裂和频率牵引效应进行稳频的双频激光器、采用双纵模稳频的单频激光器及热稳频激光器等。这些激光的波长相对不确定度在 10^{-7} 或 10^{-8} 数量级,而其溯源到的长度基准波长的相对不确定度已达到 10^{-10} 或 10^{-11} 数量级。

在光干涉领域,通常将光的“波长 λ ”作为长度度量的标准量,而在稳频激光器的研究中,更经常用到的是“频率 f ”。实际上,使用频率 f 或波长 λ 是等效的,因为两者之间通过不变的真空光速 c 而有确定的联系,即 $c = \lambda f$ 。因此,可以将碘稳频 633 nm He-Ne 激光器的激光辐射作为标准量,通过拍频测量将各种 633 nm He-Ne 稳频激光器的激光波长溯源到长度基准。

本文建立的 633 nm 波长标准装置包括:参考激光器、被检激光器、合束镜、光电探测器、带宽放大器、频谱分析仪、频率计以及微机数据采集系统。分析了提高检测精度的影响因素,给出了拍频实验输出结果时间频率采样图,解析了波长、频率、稳频特性等检定项目的判定依据。

2 激光拍频技术

由国际计量委员会推荐的、用于复现米定义的 633 nm 碘稳频激光^[12-13]基准是一种自然基准,它是用碘的非线性饱和吸收方法进行稳频的,即以碘的 633 nm 吸收谱线的超精细结构分量作为参考频率,将激光的输出频率稳定到此参考频率上,其给定的测量相对标准不确定度为 $U_r = 2.5 \times 10^{-11}, k = 1$ 。

我国的长度基准实验室具有 3 台以上达到国际计量委员会规定条件的同等性能碘稳频 He-Ne 激光器,通过经常的两两拍频,进行基准的自校,维持基准的长期运转。实际操作时,按照国际计量委员会规定的条件,用电子伺服系统检测 633 nm He-Ne 激光碘分子饱和吸收信号并锁定激光的频率。因为激光的波长与频率的乘积为常数,因此对稳频激光来说,其频率的稳定也等同于波长的稳定。由此,达到了复现米定义的目的。

2.1 “拍”现象

由于光的频率达到 10^{14} Hz 量级,没有一种光电接收器件可以接收到这样高的频率,因此,人们利用“拍”的物理原理,使频率降至光电接收器可以接收到的量级。当两束光满足频率一致等 3 个条件时即产生光的干涉现象,而当振幅相等、而频率相差很小的两束单色光波迭加且波前重合时将产生光学上很有意义的“拍”现象,利用“拍”的物理原理对激光频率(波长)进行的测量即是拍频测量。

2.2 拍频标准装置的组成

如图 1 所示,633 nm 波长标准装置是一套典型的激光拍频系统,主要由碘稳频 He-Ne 激光器、被检激光器、光学组件(包括:半透半反镜、反射镜)、快速响应光电管接收器、带宽放大器和频谱分析仪、频率计以及一套微机系统组成。在该拍频装置中,碘稳频 He-Ne 激光器是主标准器,光电管接收器和带宽放大器分别用于接收和放大拍频信号,频率计数器是测量设备,用于对频差的测量,其带宽要求为 0.5 MHz~1.5 GHz,频谱分析仪是监测设备,用于观察谱线的模式、拍频的幅度及放电噪声等,其带宽要求同频率计都为 0.5 MHz~1.5 GHz,微机用于数据的采集和处理。

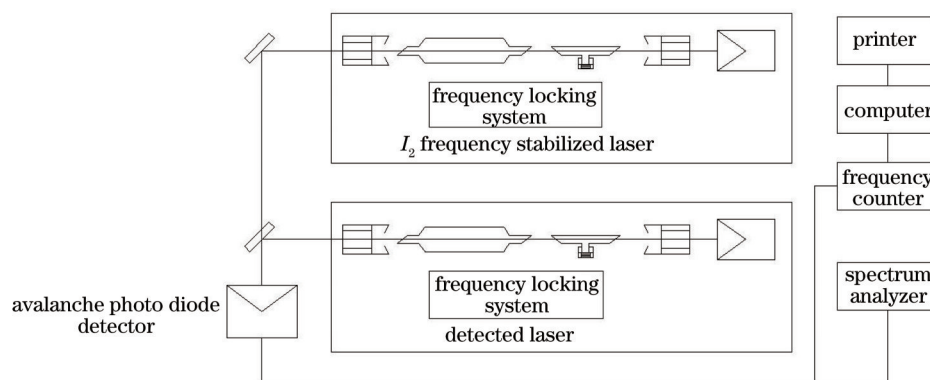


图 1 拍频装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the beat-frequency principle

2.3 数据处理

依据 JJG353-2006 633 nm 稳频激光器检定规程^[2], 采样间隔为 0.1 s, 连续 3 h 拍频。实际拍频测量时, 参考激光的辐射频率(波长)被看作已知, 通过测量和下列公式的计算, 即可求得被检激光的真空波长值 λ_x 和相对频率稳定度 σ 。测量数据和结果由计算机自动采集并给出。

2.3.1 被检激光在测量时间内的平均真空波长值

$$\lambda_x = \frac{c}{f_s + \Delta f}, \quad (1)$$

式中 λ_x 为被检激光在测量时间内的平均真空波长值, f_s 为碘稳频激光推荐的频率值, $\overline{\Delta f}$ 为在测量时间内被检激光与参考激光的平均频差, c 为真空中的光速值, 其值为 299792458 m/s。

2.3.2 被检激光在测量时间内的相对频率稳定度

频率稳定度拍频测量一般通过连续 3 h 测量获得, 取样时间分别为 0.1、1、10、100、1000 s。按照阿伦方差公式估算相对频率稳定度 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N f_x^2} \sum_{i=0}^N (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2}, \quad (2)$$

式中 σ 为用阿伦方差计算的相对频率稳定度, N 为总测量次数, f_x 为被检激光在测量时间内的平均真空频率值, Δf_i 为在一定采样时间内, 被检激光与参考激光在第 i 次测量时的平均频差。

碘稳频激光器由 633 nm He-Ne 激光器、碘分子饱和吸收室和频率控制系统组成, 激光输出功率要求在 50 μ W 以上(实际应用中 AI-04 型碘稳频激光器输出的线偏振激光功率为 200 μ W)。如图 2 所示, 碘室温度控制到 15 $^{\circ}$ C 时, 可以观察到 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 、 j 、 k 、 l 、 m 、 n 等多个吸收峰。碘稳频激光器利用成熟的碘的非线性饱和吸收方法技术进行稳频, 以碘的 633 nm 吸收谱线的超精细结构分量作为参考频率, 将激光的输出频率稳定到此参考频率上。



图2 吸收峰间隔示意图

Fig.2 Schematic diagram of the absorption peak interval

633 nm 碘分子饱和吸收稳频激光器需预热 3 h 以上, 室温波动小于 1 $^{\circ}$ C, 将标准参考激光锁定在相应的吸收峰上, 就能提供标准参考频率的激光, 与被检激光发生干涉后, 用于测量频差。

例如, 参考激光锁定在 d 峰上, 被检激光器锁频指示灯亮起开始计时, 实验时间为 3 h。如图 3 所示, 被检稳频激光器开机预热, 当稳频指示灯亮起时作为拍频实验开始时间点, 故以时间为横坐标、频率为纵坐标的采样数据图直观记录被检激光器的稳频控制曲线, 反映了一个频率控制连续振荡收敛直至平衡的过程。由此可见, 收敛时间越短, 被检激光器稳频计量性能越好。

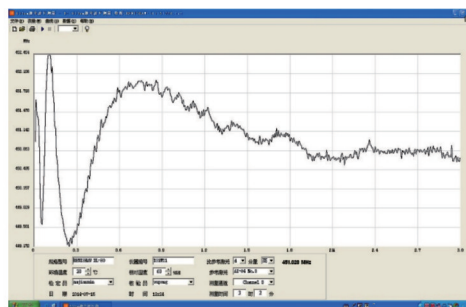


图3 计算机统计采样数据图

Fig.3 Schematic diagram of the computer statistical sampling data

3 激光拍频技术的应用

3.1 两束激光的合束调整

将两束稳频激光(参考激光、被检激光)进行拍频实验,须先配置合束光学系统,将这两束激光进行合束调整。两个反射镜和1个半透半反镜可组合成一套激光合束系统。系统中使用2个反光镜,第一个反光镜用于反射标准激光束到分束镜表面,经分束镜反射后的激光束与被检激光经分束镜透射后的激光束方向一致,通过微调反光镜的角度,可以将两束激光调至重合。第二个反光镜再将调至重合的两束光一并反射到光电接收器上。半透半反镜是一种表面镀有分光膜,作分束镜使用,既可以反射标准激光束,又可以透射被检激光束,最后将两束光调至重合且方向一致,相干涉后形成拍。

3.2 被检工作激光器

作为基准的碘稳频激光器可对工作激光器进行拍频量值传递,面向的工作激光器品种主要有:塞曼效应稳频激光器、兰姆凹陷稳频激光器、双纵模稳频激光器。以上这些激光器发出的都是以633 nm波长为标准的激光束。对于633 nm稳频激光器的拍频实验,塞曼分裂双频激光频率差一般为2 MHz左右,可采用偏振分光镜(PBS)对被检光束的起偏,以实现被检激光与参考激光偏振方向的一致性。

3.3 拍频结果输出

上海市计量测试技术研究院研究建立的633 nm波长标准装置,是华东和上海地区计量标准,已为各行各业的激光干涉仪、激光跟踪仪等测量设备提供精准的长度校准服务。图4为对某被检激光干涉仪拍频输出的测量结果。

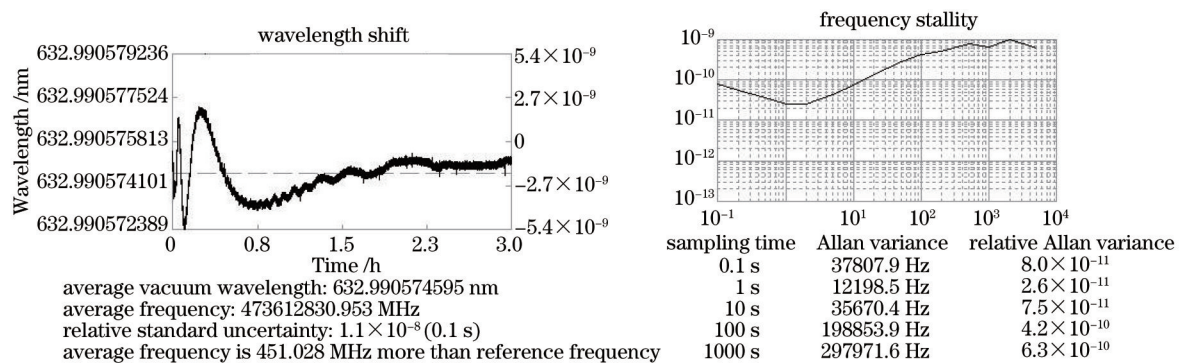


图4 计算机打印输出的拍频测量结果

Fig.4 Beat-frequency measurement result of computer printout

3.4 检定结果与判定

依据JJG353-2006 633 nm稳频激光器检定规程中的相关要求,判定被检稳频激光器是否合格。

3.4.1 平均频率值和真空波长值

被检633 nm稳频激光器的平均频率值应在473610551.9~473614014.6 MHz之间,被检633 nm稳频激光器的真空波长值应在632.9889926~632.9936206 nm之间。

3.4.2 激光波长相对扩展不确定度

激光波长相对不确定度根据实际工作要求,提出的相对扩展不确定合格判定技术要求见表1^[2-3]。

表1 激光波长相对扩展不确定度

Table 1 Expanded relative uncertainty of laser wavelength

Type of frequency stabilized laser	Relative uncertainty of wavelength
Iodine saturated absorption method	$\leq 5 \times 10^{-10}$
Dual longitudinal mode	$\leq 7 \times 10^{-8}$
Zeeman effect method	$\leq 7 \times 10^{-8}$
Lamb dip method	$\leq 7 \times 10^{-8}$
Other method	$\leq 7 \times 10^{-8}$

3.4.3 不同取样时间的频率稳定度

事实上,不同取样时间输出激光的频率稳定度为最终拍频结果不确定度分量的主要误差来源,其稳定

度合格判定技术要求见表2。

表2 不同取样时间的频率稳定度

Table 2 Frequency stability of different sampling time

Type of frequency stabilized laser	0.1 s	1 s	10 s	100 s	1000 s
Iodine saturated absorption method	$\leq 5 \times 10^{-10}$	$\leq 1 \times 10^{-10}$	$\leq 5 \times 10^{-11}$	$\leq 5 \times 10^{-11}$	$\leq 5 \times 10^{-11}$
Dual longitudinal mode	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$
Zeeman effect method	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$
Lamb dip method	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-9}$
Other method	$\leq 3 \times 10^{-8}$	$\leq 3 \times 10^{-8}$	$\leq 1 \times 10^{-8}$	$\leq 1 \times 10^{-8}$	$\leq 1 \times 10^{-8}$

4 影响检测精度的诸多因素分析

影响检测精度的主要因素有：

1) 参考激光为碘饱和吸收稳频 He-Ne 激光器(中国计量科学研究院制造)^[13],其频率稳定度比被检测激光器的频率稳定度通常高 2~3 个数量级,参考激光对测量精度影响一般可以忽略不计。光电探测器必须有足够的带宽,本装置使用日本 Hamamatsu 公司的高速光电探测器 C5658,其带宽为 50 Hz~1000 MHz。

2) 工作环境影响包括:温度变化、空气折射率变化、机械振动以及周边磁场的影响等,都会导致光学谐振腔长度的变化,使得频率稳定度的测试精度受到影响。为尽量避免上述环境因素影响,本装置在地下室高档次光学平台上进行,环境温度保持在 $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了减少环境变化影响,被检测激光束与参考激光束在空气中的光程差应尽量减小。

3) 参考激光束与被检测激光束二者合束精度要求高,另外参考与被检测激光器二者必须都为基模运转,偏振方向、光斑直径、功率大小要尽可能一致,达到改善检测信噪比,提高频率稳定度测试精度目标。

4) 随机误差影响:阿伦方差是激光频率稳定度的时域表征,两个相邻频率测量值的误差由两部分组成,一是被测量激光器的频率漂移,主要由温度、大气折射率变化、振动等导致的腔长变化引起,二是由各种随机噪声引起,例如激光器自发发射噪声、模式竞争噪声、激光电源和氦氖激光管放电引起的不稳定,造成激光上能级粒子数脉动形成的噪声等,优良品质的激光管和相应稳定的电子学设备是提高检测精度的关键。

5 结 论

碘稳频 633 nm He-Ne 激光辐射是我国法定长度基准,633 nm He-Ne 稳频激光器则作为一种光源在各种干涉系统中得到广泛的应用。建立 633 nm 波长标准装置,通过拍频测量方法将长度基准传递到工作标准和作用于激光干涉计量器具。

随着稳频激光科技的进步,世界上许多发达国家都开始尝试以 543 nm(绿光)作为另一条溯源路径的长度基准,目的是为了可以通过小数重合的方法去证明结果的正确,以提高计算结果的可靠程度。

参 考 文 献

- 1 Quinn T J. International report-practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001)[J]. Metrologia, 2003, 40(2): 103-133.
- 2 Qian Jin, Liu Xiuying, Shi Chunying. JJG353-2006 Verification Regulation of 633 nm Frequency Stabilized Lasers[S]. 2006. 钱进,刘秀英,石春英. 中华人民共和国国家计量检定规程 JJG353-2006 633 nm 稳频激光器[S]. 2006.
- 3 National Institute of Metrology, National Institute of Measurement and Testing Technology and 304 Institute of Aviation Industry Corporation of China. 633 nm Laser Wavelength Reference/Deputy Reference Comparison Report[S]. [2007-3-23]. 中国计量科学研究院、中国测试技术研究院、中国第一航空集团公司第 304 研究所联合编写. 633 nm 激光波长基准/副基准比对报告[S]. [2007-3-23].
- 4 Qian Jin, Liu Zhongyou, Ni Yucai, et al.. 633 nm Iodine frequency stabilized lasers wavelength measurement comparison[J]. Modern Measurement and Test, 1999, (6):17-21. 钱进,刘忠有,倪育才,等. 633 nm He-Ne 碘稳频激光波长的国际比对[J]. 现代计量测试, 1999, (6): 17-21.
- 5 Zhu Ruogu. Laser Application Technology[M]. Beijing: National Defence of Industry Press, 2006.

- 朱若谷. 激光应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- 6 Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai, *et al.*. Research of laser frequency stabilization[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081401.
- 苑丹丹, 胡姝玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 081401.
- 7 Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, *et al.*. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer system[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0408004.
- 池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉仪测量中的环境补偿技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0408004.
- 8 Wu Xuejian, Li Yan, Wei Haoyun, *et al.*. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030001.
- 吴学健, 李岩, 尉昊贇, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030001.
- 9 Zhang Yin, Wang Qing. Research of automatic frequency stability diode laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0602001.
- 张胤, 王青. 自动稳频半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0602001.
- 10 An Yang, Feng Hao, Zhang Jingchuan, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706005.
- 安阳, 封皓, 张景川, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706005.
- 11 Li Guangyun, Fan Gang, Li Zongchun. The application of laser interferometer in automatic accuracy testing of EDM[J]. *Journal of PLA Institute of Surveying and Mapping*, 1999, 16(3): 161-164.
- 李广云, 樊钢, 李宗春. 双频激光干涉仪在测距仪精度自动检测中的应用[J]. *解放军测绘学院学报*, 1999, 16(3): 161-164.
- 12 Quinn T J, Chartier J M. A new type of iodine cell for stabilized lasers[J]. *IEEE Transactions Instrum Measure*, 1993, 42(2): 405-406.
- 13 Qian Jin, Liu Zhongyou, Zhang Xiaoping. A new style iodine frequency stabilized 633 nm He-Ne laser system[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(1): 10-13.
- 钱进, 刘忠友, 张小平. 一种新型的碘稳定 633 nm He-Ne 激光系统[J]. *计量学报*, 2008, 29(1): 10-13.

栏目编辑: 何卓铭