

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2014.04.14

633 nm 波长副基准光频绝对测量实验

张大鹏¹, 梁志国¹, 张志权¹, 韩海年², 严家骅¹, 魏志义²

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 中国科学院 物理研究所, 北京 100080)

摘要: 为了进行光频的绝对测量实验研究, 本课题组研制了基于 MgO:PPLN 晶体的“单块”结构飞秒激光频率梳, 在利用稳频电路将重复频率 f_{rep} 和载波包络相移频率 f_{ceo} 同时锁定到氢原子钟上后, 其光频齿的频率稳定度同步于氢原子钟。利用该高稳定度“单块”结构钛宝石飞秒激光频率梳对编号为 NO.02 的 633nm 激光波长国家副基准装置进行了激光频率的绝对测量实验, 得到了 5 个峰的测量结果, 各光频测量结果相对偏差为 10^{-11} 量级。

关键词: “单块”结构飞秒激光频率梳; 633 nm 波长副基准; 光频测量

中图分类号: TB96; TH744.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1674-5795 (2014) 04-0056-04

Absolute Frequency Measurement of 633nm Wavelength Secondary Standard

ZHANG Dapeng¹, LIANG Zhiguo¹, ZHANG Zhiquan¹, HAN Hainian², YAN Jiahua¹, WEI Zhiyi²

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A monolithic scheme Ti:sapphire femtosecond optical synthesizer was developed for absolute frequency measurement. After referencing the f_{rep} and f_{ceo} frequency to an H atomic clock, the frequency stability of the single optical tooth is synchronous to the atomic frequency reference. An absolute optical frequency measurement of the 633nm wavelength secondary standard, with a serial number NO.02, was carried out. As a result, five different frequency peaks, c, d, e, g, h, were achieved. In this experiment, the relativity deviation of the value is about 10^{-11} .

Key words: monolithic scheme femtosecond optical synthesizer; 633nm wavelength secondary standard; absolute frequency measurement

0 引言

¹²⁷I₂ 饱和吸收稳频的 633nm He-Ne 激光波长为复现米定义的标准^[1], 目前我国现行有效的 633nm 长度基准和副基准装置分别保存在三个单位。其中, 基准装置(编号为 D1)保存在中国计量科学研究院(NIM), 副基准装置分别保存在中航工业北京长城计量测试技术研究所(CIMM)和中国测试技术研究院(NIMTT), 其编号分别为 NO.02 和 NIMTT-1^[2]。为了验证波长基准与副基准装置运行状况, 国家质检总局于 2006 年组织开展了对 633 nm 激光波长基准和副基准的量值比对, 此次基准与副基准之间的比对在国内尚属首次^[3]。随着激光技术的发展, 飞秒激光频率梳建立了微波频率与光波频率的直接链接, 为解决光学频率直接绝对

测量提供了技术手段^[4-5]。鉴于此, 本研究小组研制了重复频率为 350 MHz、波长范围为 600~950 nm 波段、各光频齿频率稳定度同步于氢原子钟的“单块”结构钛宝石飞秒激光频率梳, 并利用该飞秒激光频率梳对编号为 NO.02 的波长副基准装置进行了光频绝对测量实验。

1 飞秒激光频率梳测量光频基本原理

图 1 给出了飞秒激光脉冲在时、频域中的分布特性。如图 1(a) 所示, 飞秒激光脉冲在时域中表现为等时间间隔为 τ 的巨脉冲序列, τ 为激光脉冲在谐振腔内往返一次的时间, 有

$$\tau = 2l_c/v_g \quad (1)$$

式中: l_c 为激光器腔长; v_g 为腔内群速度。

由于谐振腔内色散的存在会引起激光脉冲群速度与相速度的不同, 这将导致激光脉冲在腔内每往返一次后, 载波与包络之间产生相位的差值, 称为载波包络相移 $\Delta\phi$, 有

收稿日期: 2014-05-09

基金项目: 国家“十一五”技术基础科研项目(07A401008)

作者简介: 张大鹏(1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光频标、激光干涉测量方面的研究。

$$\Delta\phi = \left(\frac{1}{v_g} - \frac{1}{v_p}\right) \cdot l_c \cdot \omega_c \quad (2)$$

式中： v_p 为腔内相速度； ω_c 为载波频率。如图1(b)所示，飞秒激光脉冲在频域中表现为等频率间隔为 f_{rep} 的梳状光频谱线， f_{rep} 为重复频率， $f_{rep} = 1/\tau$ 。 f_{ceo} 为载波包络相移频率，对应时域中的载波包络相移 $\Delta\phi$ ，在频域中表现为飞秒激光脉冲梳状光频谱线相对于零频整体向右偏移的频率量。总之，飞秒激光脉冲在频域中表现为等频率间隔的孤立的梳状光频齿序列，第 N 条光频齿的频率值 f_N 表达式为 $f_N = Nf_{rep} + f_{ceo}$ 。本实验将600 ~ 950 nm 波段钛宝石飞秒激光脉冲的 f_{rep} 与 f_{ceo} 信号参考至氢原子钟 10 MHz 参考频率标准上，因此飞秒激光频率梳每条光频齿的频率稳定性同步于氢原子钟^[6-8]。

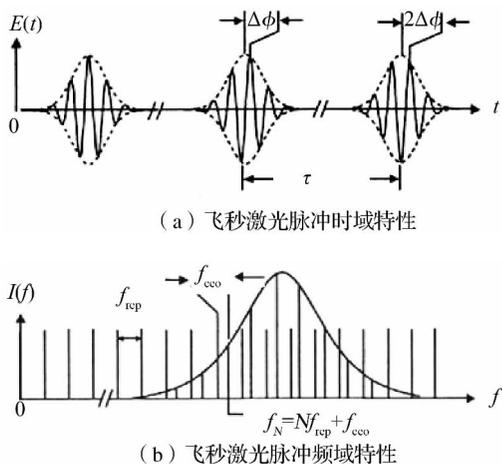


图1 飞秒激光脉冲在时、频域中的分布特性

如图2所示，在利用飞秒激光频率梳测量待测光频 f_x 时，飞秒激光频率梳中频率值最接近于 f_x 的光频齿 f_N 与其相干拍频，产生的频率差值为 f_{beat} ，因此待测光频 f_x 可以表示为 $f_x = f_N + f_{beat}$ ^[9-11]，实际进行光频测量实验时， f_{rep} 、 f_{ceo} 、 f_{beat} 三个频率值均由光电探测器给出，均为标量值，只给出数值大小，待测光频 f_x 的表达式为 $f_x = Nf_{rep} \pm f_{ceo} \pm f_{beat}$ ，在每次进行光频测量时，式中中正负号的选择由 f_{rep} 、 f_{ceo} 、 f_{beat} 的变化规律给出判定。

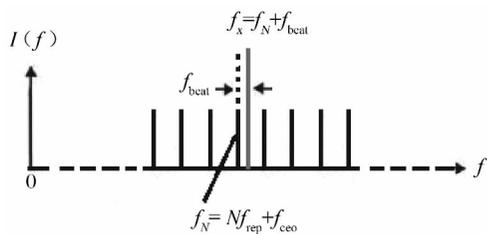


图2 频域中光频测量拍频示意图

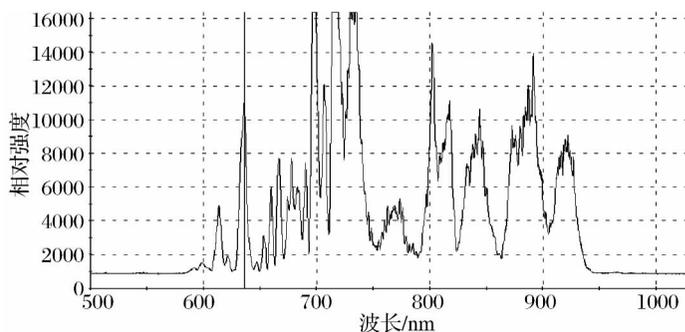
2 光频测量实验装置

图3为利用飞秒激光频率梳测量编号为NO.02的波长副基准装置绝对光频值所用实验装置，图中1为飞秒激光频率梳系统^[12]，2为待测光频NO.02系统，3为脉宽压缩系统，4为光子晶体光纤扩谱装置，5为专用拍频装置^[13]。

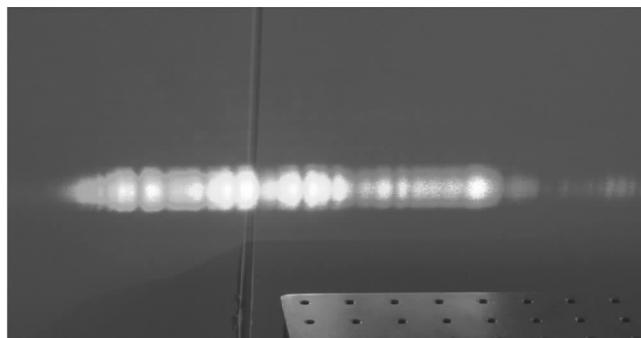


图3 光频测量实验装置

飞秒激光频率梳的平均输出功率为50 mW，重复频率为350 MHz，单根光频梳齿的平均功率为95 nW，光谱范围为600 ~ 950 nm，图4展示的为该光脉冲宽带光谱分布对应情况。其中图4(a)为光谱仪所测600 ~ 950 nm飞秒激光频率梳光谱曲线图，图4(b)为经衍射光栅分光后光谱空间分布照片，其与图4(a)波段分布相对应，最右侧为红光波段，最左侧为绿光波段。



(a) 600~950 nm 飞秒激光频率梳光谱曲线图



(b) 宽度光谱各波段空间分布情况

图4 飞秒激光脉冲宽带光谱分布图

待测碘稳频 633 nm 激光器参与拍频的功率为 80 μW，两束参与拍频的光源经专用拍频装置 5 优化后得到拍频信号 f_{beat} 的信噪比大于 30 dB，以满足频率计数器的强度要求。三个频率量值的读取由 3 台同时参考至氢原子钟 10 MHz 参考频率标准上的频率计数器完成，计数时采用 GPIB-USB 数据线将三台计数器同步

连接以保证测量的准确性。

3 光频测量结果

本实验分别测量了 NO.02 激光器的 c 峰、d 峰、e 峰、g 峰、h 峰的绝对光频值，表 1 给出各峰值的测量结果，各峰值光频测量结果相对偏差为 10^{-11} 量级。

表 1 各峰值光频测量结果

被测光频	测量时长 /s	f_{rep} 均值 /MHz	f_{ceo} 均值 /MHz	f_{633} 实测均值 /MHz	f_{633} 理论值 /MHz	相对偏差
c 峰	607	349.457109199999	18.3924739652337	473612497.7240	473612497.712	2.53×10^{-11}
d 峰	571	349.463093000004	19.4146162776403	473612379.8362	473612379.822	2.99×10^{-11}
e 峰	4202	349.464371533348	21.8415232199160	473612367.0004	473612366.961	8.31×10^{-11}
g 峰	1391	349.471831866671	20.5571665803931	473612340.4103	473612340.400	2.17×10^{-11}
h 峰	410	349.448805533335	20.9452993628143	473612237.0038	473612237.005	-2.60×10^{-11}

以 g 峰为例，其光频测量时间为 1391 s，期间三台频率计数器同步记录 f_{rep} 、 f_{ceo} 、 f_{beat} 三个频率值，得到其均值分别为

$$\begin{aligned} f_{rep} &= 349.471831866671 \text{ MHz} \\ f_{ceo} &= 20.5571665803931 \text{ MHz} \\ f_{beat} &= 96.56960960583 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (3)$$

经测算，与 g 峰光频进行拍频的梳齿序列号为 $N = 1355223$ ，又由频率测量前 f_{rep} 、 f_{ceo} 、 f_{beat} 的变化规律，得到待测光频绝对频率值计算公式为

$$f_{633-g} = Nf_{rep} - f_{ceo} + f_{beat} \quad (4)$$

将公式 (3) 中各频率值代入 (4) 式，最终计算得到 g 峰实测光频绝对值为

$$f_{633-g} = 473612340.4103 \text{ MHz}$$

经计算，本次测量标准偏差为

$$s_{633-g} = 6.6359 \times 10^{-2} \text{ MHz}$$

相对于理论值的差值为 $\Delta f_{633} = 0.0103 \text{ MHz}$ ，相对于理论值的相对偏差为 $\Delta f_{633} / f_{633} = 2.17 \times 10^{-11}$ 。

对于测量期间各频率值的频率稳定度由不同门时间的阿伦偏差给出，本次测量频率计数器的计数间隔为 1 s，图 5 为 1，10，100 s 门时间对应的阿伦偏差。

由图分析， f_{rep} 频率值 1 s 及 10 s 门时间的阿伦偏差为 10^{-13} 量级，100 s 时阿伦偏差为 10^{-14} 量级，同步于氢原子钟。待测对象 2012 年检定结果（由国家波长基准装置 D1 完成检定）中频率稳定度由图 6 给出。

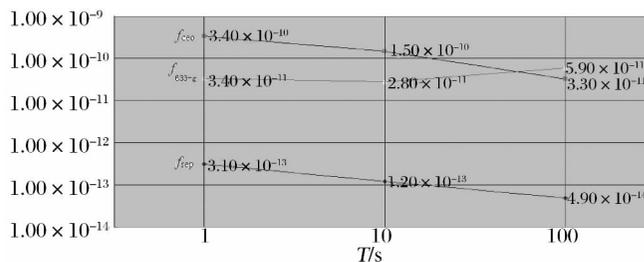


图 5 f_{rep} 、 f_{ceo} 、 f_{beat} 阿伦偏差

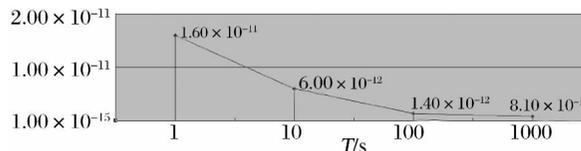


图 6 待测光频阿伦偏差

在本次光频绝对测量实验中，作为光频测量工具的飞秒激光频率梳，其频齿频率稳定度同步于氢原子钟，优于待测对象。待测光频实测值相对参考值的相对偏差在 10^{-11} 量级，且 2012 年检定结果中待测光频频率稳定度优于本次测量。这是由于对于一个碘稳定的 He-Ne 激光系统而言，激光频率的调制宽度、碘室的冷指温度以及腔内单程功率的改变都会引起输出激光频率的变化。这三个参数分别被称为调制位移参数、温度位移参数和功率位移参数。在前文所述国内比对及由国家波长基准装置进行检定溯源时，这三个参数都调节到国际计量委员会 (CIPM) 推荐的技术参数和运行条件。本次测量实验时待测对象的运行状态处于

为完成其对更低频率稳定性和波长不确定度的热稳频激光器检定而设定的参数状态，其偏离最佳参数。

4 结论与展望

本实验利用重复频率为 350 MHz、波长范围为 600 ~ 950 nm 波段的“单块”结构钛宝石飞秒激光频率梳，对编号为 NO.02 的 633 nm 波长国家副基准装置进行了初步的光频测量实验，得到了 5 个峰的测量结果，验证了用飞秒激光频率梳直接进行光频绝对测量的可行性，为进一步研究下一代光频标准——“光钟”提供了技术积累。另一方面，本次实验测量结果与国际推荐值存在 10 kHz 量级的频率偏差值，并且光频测量时长小于飞秒激光频率梳自身稳定时长^[12]，这是由于实验室环境温湿度没有得到精确控制及副基准装置未工作于国际计量委员会（CIPM）推荐的技术参数和运行条件。鉴于此，后续实验研究将在温湿度环境控制理想的超净间中进行，副基准装置的工作状态将严格按照国际推荐参数进行设置，以期得到更佳的测量结果。

致谢：在利用飞秒激光频率梳进行光频测量的实验研究中，华东师范大学马龙生老师多次给出建设性方案，并亲临本实验室进行现场指导，北京工业大学李港老师和中国计量科学研究院钱进老师也多次给予帮助，在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] Shen Naicheng, Wei Zhiyi, Nie Yuxin. History, present situation and future of optical frequency standard and optical frequency measurements [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21 (2): 139 - 145.
 [2] 钱进, 刘秀英, 黄晓荣, 等. 633 nm 激光波长基准副基准比对 [J]. 计量学报, 2008, 29 (S1): 127 - 130.
 [3] 国家质量监督检验检疫总局. 关于 633nm 激光波长基准/副基准比对结果的公告: 2007 年第 64 号 [EB/OL].

[2014-04-20]. http://www.aqsiq.gov.cn.
 [4] Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology [J]. Nature, 2002, 416: 233 - 237.
 [5] Steven T Cundiff, Jun Ye. Femtosecond optical frequency combs [J]. Reviews of Modern Physics, 2003, 75: 325 - 342.
 [6] Jun Ye, Harald Schnatz, Leo W Hollberg. Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control [J]. IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 2003, 9 (4): 1041 - 1058.
 [7] John L Hall, Jun Ye. Ultrasensitive Spectroscopy, the Ultrasensitive Lasers, the Ultrafast Lasers, and the Seriously Nonlinear Fiber: A New Alliance for Physics and Metrology [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37 (12): 1482 - 1492.
 [8] Steven T Cundiff, Jun Ye, John L Hall. Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers [J]. Rev. Sci. Instrum., 2001, 72 (10): 3749 - 3763.
 [9] Fortier T M, Bartels A, Diddams S A. Octave-spanning Ti:sapphire laser with a repetition rate - 1 GHz for optical frequency measurements and comparisons [J]. Opt. Lett., 2006, 31: 1011 - 1013.
 [10] Yoon T H, Ye J, Hall J L, et al. Absolute frequency measurement of the iodine-stabilized He-Ne laser at 633 nm [J]. Appl. Phys. B., 2001, 72: 221 - 226.
 [11] Scott A Diddams, David J Jones, Ma Longsheng, et al. Optical frequency measurement across a 104 THz gap with a femtosecond laser frequency comb [J]. Optics Letters, 2000, 25 (3): 186 - 188.
 [12] 张大鹏, 梁志国, 张志权, 等. 光频测量用飞秒激光频率梳光谱扩展实验研究 [J]. 计测技术, 2014, 34 (2): 36 - 38.
 [13] 张大鹏, 韩海年, 梁志国, 等. 一种用于激光频率测量的拍频装置: 中国, 201110086112 [P]. 2011 - 11 - 16 [2014-04-16].

(上接第 17 页)

强度，减少不确定因素。8 探头空间场强测量装置采用多探头、空间全向、光纤传输测量方式，频率范围为 10 MHz ~ 18 GHz，幅度测量范围为 0.5 ~ 200 V/m，频率响应允许误差在 10 MHz ~ 3 GHz 频段为 ±1.5 dB，3 GHz 以上为 ±2 dB，填补了国内宽频带辐射场强测量仪空白，其应用前景广阔。

参 考 文 献

[1] 张林昌. 混响室及其进展: 上 [J]. 安全与电磁兼容,

2001 (4): 2 - 8.
 [2] 张林昌. 混响室及其进展: 下 [J]. 安全与电磁兼容, 2002 (1): 11 - 13.
 [3] 王晓伟, 朱云. 混响室校准及辐射抗扰度测试 [J]. 电声技术, 2006 (8): 69 - 73.
 [4] 朱传焕. 电磁环境监测系统设计 [J]. 计测技术, 2005, 25 (1): 12 - 15.
 [5] 朱传焕. 多通道智能场强计的研制 [J]. 航空计测技术, 1999, 19 (3): 32 - 34.