

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.03.04

宽带可调谐光源瞬时波长测量方法研究

武腾飞, 赵春播, 薛莉

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 激光波长作为“米”基准的重要实现途径之一, 其量值准确性在计量校准、精密测量以及光谱探测等领域具有十分重要的意义。目前基于标准物质吸收谱线的波长基准仅能用于单一波长的计量校准, 对于宽带光源波长校准手段有限。本文开展宽带连续调谐激光波长校准技术研究, 利用飞秒激光频率梳宽光谱、光频可溯源至原子频率标准、稳定性高的特点, 对宽带调谐光源在调谐输出时的连续光波长进行测量, 最终实现了 1 nm 带宽下可调谐激光器调谐输出过程中瞬时值的测量, 并利用该结果对可调谐激光器在 121 GHz 带宽的调频非线性度进行了评价。

关键词: 可调谐激光; 飞秒光学频率梳; 瞬时波长

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)03-0023-07

Research on instantaneous wavelength measurement method of broadband tunable light source

WU Tengfei, ZHAO Chunbo, XUE Li

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China)

Abstract: As one of the important ways to realize the "meter" benchmark, the accuracy of laser wavelength is of great significance in the fields of metrological calibration, precision measurement and spectral detection. However, at present, the wavelength reference based on the absorption spectrum of reference materials can only be used for the metrological calibration of single wavelength, and the calibration methods for the wavelength of broadband light source are limited. This paper mainly researches on broadband continuous tuning laser wavelength calibration technology. Using the characteristics of wide spectrum, optical frequency traceable to atomic frequency standard and high stability of femtosecond laser frequency comb, the continuous optical wavelength of broadband tunable light source during tuning output is measured. Finally, the measurement of instantaneous value of the tunable laser in the tuning output process under the bandwidth of 1 nm is realized. Meanwhile, the frequency modulation nonlinearity of tunable laser in 121 GHz bandwidth is evaluated by using the measurement results.

Key words: tunable laser; femtosecond optical frequency comb; instantaneous wavelength

0 引言

随着现代科技和制造工艺的不断发展, 高精度测量需求大量涌现, 激光作为光学精密测量系统的光源, 对其波长进行准确测量具有重要意义。

目前, 激光干涉比长仪、量块干涉仪、激光跟踪仪、激光小角度测量仪、绝对重力仪等专用的激光干涉系统光源的校准依赖于碘稳频 633 nm 等波长基准, 而以其他波长作为光源的测量系统也需要对应的标准物质吸收谱线作为量值的依

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-05-10

基金项目: 航空科学基金(KJJ82004580)

引用格式: 武腾飞, 赵春播, 薛莉. 宽带可调谐光源瞬时波长测量方法研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (3): 23-29.

Citation: WU T F, ZHAO C B, XUE L. Research on instantaneous wavelength measurement method of broadband tunable light source [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (3): 23-29.



据^[1-7]。随着新原理、新技术的发展,特别是在宽带扫频连续光源应用领域,波长的非线性校准需求愈加迫切^[8],以单一标准具完成单一波长的测试和校准已经难以满足要求,针对宽带光源波长参数的精密测量手段和方法越来越受到研究人员的关注。

20世纪80年代,随着稳频激光技术的发展,逐渐形成了以碘稳频、甲烷稳频、钙束稳频等不同标准物质谱线的波长基准或标准装置,可用于不同波长点的计量校准^[9-10]。20世纪90年代末,研究者利用微波原子频标结合相位锁定的电子振荡器与不同的激光器建立起了规模庞大且复杂的激光频率链^[11-12],其光学频率间隔在10 GHz以上,仍然无法实现对光学频率的连续直接测量。在21世纪初,锁模激光器发展成熟,锁模脉冲激光器的稳定性得到了极大的改善^[13],研究人员通过控制锁模脉冲激光器的重复频率,提取脉冲载波和包络之间的相移频率,并将其锁定在微波频率上,获得了稳定的可溯源至微波原子频标的光学频率梳^[14],光学频率测量技术因此迎来了重大突破,光学频率梳作为一把“光学尺寸”,使宽带光源波长的连续测量有了参考依据。

本文在飞秒光学频率梳技术的基础上,利用飞秒光学频率梳宽光谱、高稳定性的特点^[15-16],针对宽带调频连续波激光器调谐输出时的瞬时波长测量方法和原理进行了研究,并搭建了实验系统,根据获得的实验结果和数据,对激光器的调频非线性进行了评价。

1 基本原理

开展宽带可调谐光源在调谐输出时瞬时波长测量工作,首先需研究其某一时刻输出波长与飞秒光学频率梳的拍频作用过程^[6],宽带可调谐光源在某一时刻调谐输出时的瞬时波长相对位置分布以及光学频率梳在频域上的相对位置分布如图1所示,其中 n_{p-1} 至 n_{q+2} 为光学频率梳在频域上的相对位置分布, E_{field} 为每个频谱对应的幅值, f_r 为梳齿间隔位重复频率, f_n 为第 n 个梳齿的频率。

由于飞秒光学频率梳在频域上是一系列等间隔的频率梳梳齿,因此, f_n 的计算公式为^[9]

$$f_n = nf_r + f_0 \quad (1)$$

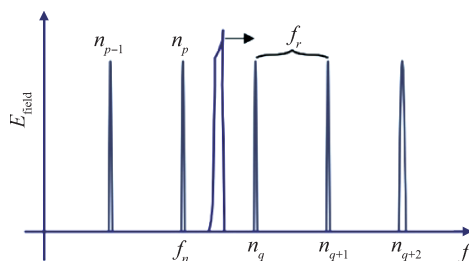


图1 飞秒光学频率梳与宽带光源拍频时频分布示意图
Fig.1 Schematic diagram of beat frequency time-frequency distribution of femtosecond optical frequency comb and broadband light source

式中: n 为梳齿序数; f_0 为频率梳齿的起始位置频率。图1描述了可调谐激光器在静态下输出波长与飞秒光学频率梳在频域上的相对位置,图中蓝色具有一定线宽的梳齿为可调谐激光器输出波长 f_r 所在位置,在静态时其停留在飞秒光学频率的两梳齿之间,其相邻的左右两侧的梳齿序数分别为 n_p 和 n_q ,假设 f_r 更接近于第 n_p 根梳齿,则可调谐激光器静态下的激光波长与相邻光学频率梳梳齿的拍频结果在频域上的分布如图2所示。

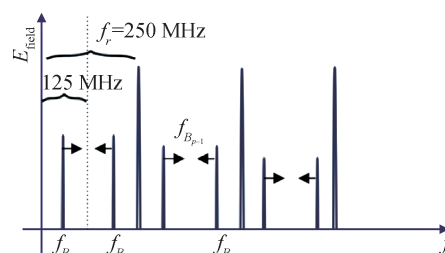


图2 可调谐光源输出波长与相邻梳齿拍频频率位置分布图
Fig.2 Distribution diagram of output wavelength of tunable light source and beat frequency position of adjacent comb teeth

假设飞秒光学频率梳的重复频率为250 MHz,可调谐激光器输出波长 f_r 与左侧相邻最近的第 n_p 根梳齿拍频频率值最小,靠近0频处,位于图2中 f_{B_p} 处。第 n_q 根梳齿的拍频频率位置位于图2中的 f_{B_q} 处, f_r 与飞秒光学频率梳左右两根梳齿的拍频频率值的位置相对于125 MHz对称,两拍频频率值之和为250 MHz, f_r 与次相邻的光学频率梳梳齿拍频频率位置的分布分别为图2中的 $f_{B_{p-1}}$ 和 $f_{B_{q+1}}$,其他梳齿依此类推。

假设可调谐激光器输出波长 f_r 与第 n_p 根梳齿拍频频率为 f_b ,则有

$$f_b = f_r - f_{n_p} = f_r - n_p f_r - f_0 \quad (2)$$

则

$$f_T = n_p f_r + f_0 + f_b \quad (3)$$

如图1所示,当 f_T 位于飞秒光学频率梳第 n_p 根梳齿的右侧,且更靠近第 n_p 根梳齿时,此时增大重复频率使其为 f_{r1} , f_b 减小为 f_{b1} ,此时

$$f_T = n_p f_{r1} + f_0 + f_{b1} \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)可得 n_p 和 f_T 。

当 f_T 位于飞秒光学频率梳第 n_p 根梳齿的右侧,且更靠近第 n_q 根梳齿时,有

$$f_b = f_{n_q} - f_T = n_q f_r + f_0 - f_T \quad (5)$$

$$f_T = n_q f_r + f_0 - f_b \quad (6)$$

此时增大重复频率使其为 f_{r1} , f_b 增大为 f_{b1} ,则

$$f_T = n_q f_{r1} + f_0 - f_{b1} \quad (7)$$

联立式(6)和式(7)可得 n_q 和 f_T 。

由于测得的拍频率值始终为绝对值,且一般通过低通滤波器选取较小值作为最终的拍频结果,无法通过拍频频率值的大小确定可调谐激光器输出波长相对于最近相邻梳齿的位置,因此需要通过改变飞秒光学频率梳的重复频率,并观察拍频频率变化,确定其相对于最近相邻梳齿的位置。

当利用单梳对可调谐激光器调谐输出时的瞬时波长进行测量时,需利用上述方法获得初始时刻波长及其梳齿序数,取得先验信息。通过获取瞬时变化的拍频频率值,结合调谐光源的调谐方向、拍频频率值的峰值和谷值确定调谐光源在调谐输出时与其拍频的梳齿序数,并根据梳齿序数、飞秒光学频率梳的重复频率和偏移频率计算出可调谐光源在调谐输出时的精确校准值,实现瞬时波长的重构。上述过程中须选择待测波长与飞秒光学频率梳最近相邻梳齿的拍频结果作为计算的拍频频率,即拍频频率值始终在 $0 \sim \frac{1}{2} f_r$ 之间变化。以重复频率值250 MHz为例,获得拍频频率值变化规律如图3所示。

由于拍频信号呈周期变化,梳齿序数加减位置又处在拍频信号的峰值点处,且拍频信号 f_b 在重构函数中的符号取决于极值点的位置,因此在获取拍频频率信号后需要求取峰值点和谷值点对应的位置,即进行寻峰和寻谷,搜索原理如图4所示。

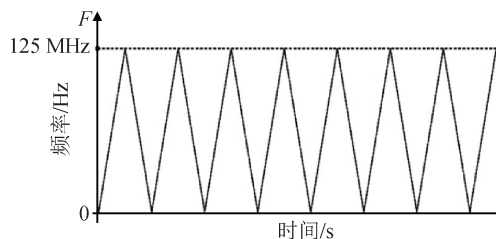


图3 调谐输出时拍频频率变化规律示意图

Fig.3 Schematic diagram of beat frequency variation during tuning output

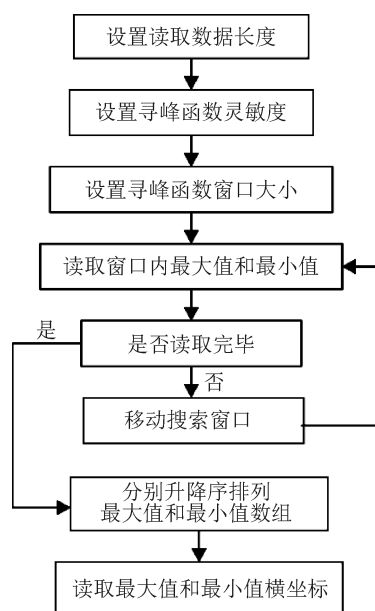


图4 拍频频率峰值和谷值搜索原理流程图

Fig.4 Principle flow chart of beat frequency peak and valley search

2 实验系统

利用飞秒光学频率梳对可调谐激光器在调谐过程中的瞬时波长进行测量的实验系统如图5所示。其中飞秒光学频率梳重复频率为250 MHz,偏移频率为20 MHz,分别通过重复频率锁定装置和偏移频率锁定装置将两者的稳定度溯源至原子钟上,光学频率梳1 s的稳定度为 2×10^{-12} (通过与1542 nm 乙炔稳频激光器拍频测得),可调谐激光器采用TOPTICA CTL1550作为测试激光器,可调谐激光器与飞秒光学频率梳输出均为单模光纤输出,可调谐激光器输出光依次经过隔离器、偏振控制器和衰减器,之后进入一个2×2的耦合器。其中隔离器可防止反射光耦合回激光器带来隐患;偏振控制器用于改变可调谐激光器出射光的偏振态,通过调节偏振控制器优化拍频信号的信噪比;

衰减器一方面可通过提升或降低幅值优化拍频信号,另一方面可以调整输出功率防止探测器饱和。光学频率梳输出光依次进入隔离器和衰减器后进入2×2的耦合器。选择2×2的耦合器作为拍频光路的目的是实现两路拍频光的平衡探测以消除共模噪声,提高拍频信号的信噪比^[17]。选取Thorlabs公司生产的PDB435C平衡探测器对耦合器输出的

两路光进行平衡探测,探测器输出通过一个125 MHz的低通滤波器滤取拍频信号,并经过高速频率计数器完成对瞬时变化的拍频频率值的记录,计数器选择53230A的高速测量通道,数据记录在频率计的板载内存上,然后通过计数器GPIO接口读取,并结合先验信息,通过重构算法对可调谐激光器输出瞬时波长(频率)进行重构。

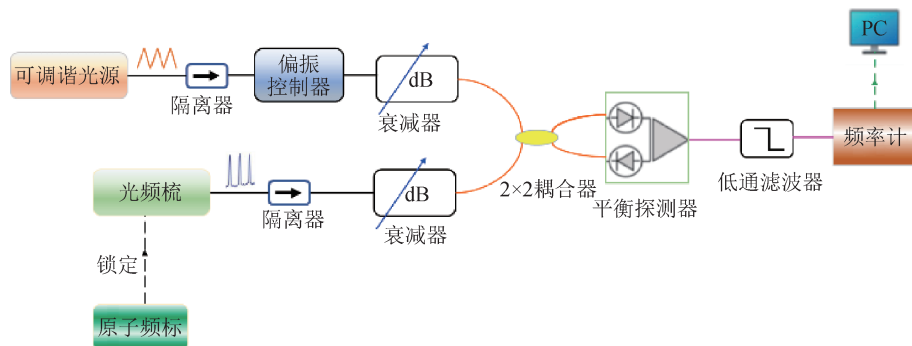


图5 可调谐激光器瞬时波长校准实验装置图

Fig.5 Experimental device diagram of instantaneous wavelength calibration of tunable laser

在实验系统搭建和前期光路调试中,需要特别注意飞秒光学频率梳输出功率和可调谐激光器功率的匹配,以避免产生谐波和毛刺影响信噪比和拍频频率值的提取。

3 实验结果

本实验系统中,可调谐激光器起始扫描位置为1550 nm,以0.2 nm/s的扫描速度扫描约1 nm带宽,得到的拍频瞬时频率结果如图6所示,可以看出拍频频率在接近调制终点时出现不规则振荡现象,这是由于可调谐光源调谐输出末端电机减速和震颤导致的,在可调谐光源使用过程中调制末端的数据需要根据实际情况进行取舍,在可调谐激光器调谐输出时,电机的加速和减速也是导致调频非线性的主要因素之一。

为更精细地研究宽带可调谐光源的输出特性,记录拍频频率结果的部分数据,结果如图7所示。

从图7可以看出,拍频瞬时频率实测结果与原理分析中的预期基本一致,由于实验系统重复频率为250 MHz,所以拍频频率始终在0~125 MHz之间往复运动变化。本实验系统中使用的可调谐激光器电机最小步长为8 pm,而图7中每隔1 GHz左右就会出现不规则抖动,这个长度与电机最小步进间隔一致,可以判定是由于最小步长变化引起

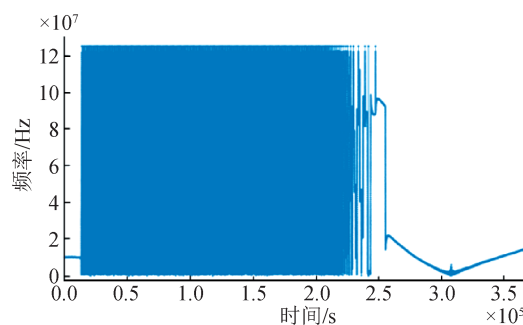


图6 1 nm带宽下拍频瞬时频率结果

Fig.6 Instantaneous frequency result of beat frequency under bandwidth of 1 nm

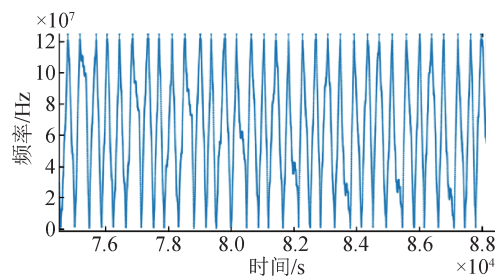


图7 部分拍频瞬时频率结果

Fig.7 Partial instantaneous frequency results of beat frequency

拍频频率结果的抖动,此外以可调谐激光器进行三角波调制为例,在多周期测量的观测结果中发现,输出波长调谐速率在端点处均存在加速和减速现象。

图8展示了利用拍频瞬时频率结果结合初始时刻的先验信息对可调谐激光器在调谐输出过程中的瞬时波长值进行重构的具体过程。在数据处理过程中,偏移频率为 f_0 ,初始时刻梳齿序数为 n_0 ,可调谐激光器瞬时输出波长为 f_{tunable} , Δf 为飞秒光学频率梳移动时其某一梳齿 n_q 与宽带可调谐光源在某一时刻调谐输出时的瞬时波长的频率差, Δf_0 为飞秒光学频率梳某一梳齿 n_q 的初始位置与宽带可调谐光源在某一时刻调谐输出时的瞬时波长的频率差, Δf_m 为飞秒光学频率梳某一梳齿 n_q 的 m 位置处与宽带可调谐光源在某一时刻调谐输出时的瞬时波长的频率差, $L=\Delta f_1-\Delta f_0$,通过 L 的正负判断 Δf_0 的位置。

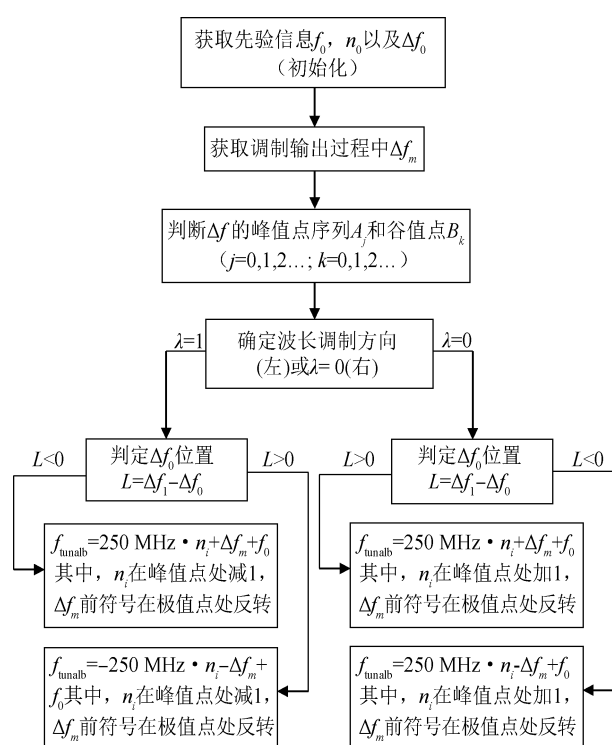


图8 瞬时波长重构数据处理方法流程图

Fig.8 Flow chart of instantaneous wavelength reconstruction data processing method

由于可调谐激光器无法显示调谐过程中输出波长的瞬时值,仅能设置初始波长和调谐速率,因此可根据初始条件计算得到的瞬时频率值作为示值,将根据飞秒光学频率梳拍频结果得到的重构值作为测得的校准值。下面将可调谐激光器在调谐输出过程中的瞬时频率(波长)示值与测得的校准值绘制在同一幅图上进行结果对比,本实验中扫频带宽为1 nm,在1550 nm处转换成频

率约为121 GHz,数据量庞大,在全带宽下视野无法观测到细节信息,为更清晰直观地对比示值与校准值结果的区别,选取整体带宽(121 GHz)和局部带宽(1/128)下的示值和校准值结果进行对比分析。

1 nm带宽下校准值与示值对比如图9所示,可以看出在整体带宽视野下,示值与校准值差异被掩盖,校准值相对于示值在尾端出现轻微翘起,且差异较大,这是由于在激光器调谐输出末端,电机减速震颤等因素造成的,此时校准值反映了激光器实际输出情况。

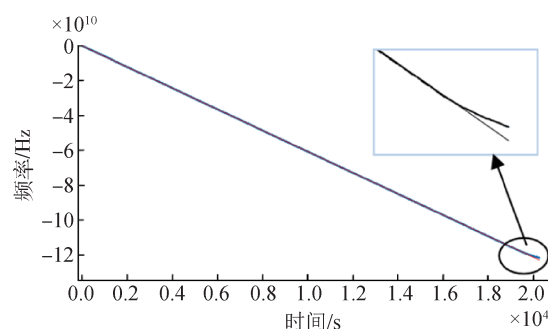


图9 1 nm带宽下校准值与示值对比

Fig.9 Comparison between calibration value and indication value under 1 nm bandwidth

图10为局部带宽(1/128)下校准值与示值的对比,从图10中可以看出利用飞秒光学频率梳通过拍频结果重构得到的激光器瞬时输出示值与校准值的接近程度,可以反映出可调谐激光器的瞬时特性,该方法观测手段分辨力更高,也能更灵敏地反映可调谐激光器输出波长的变化。

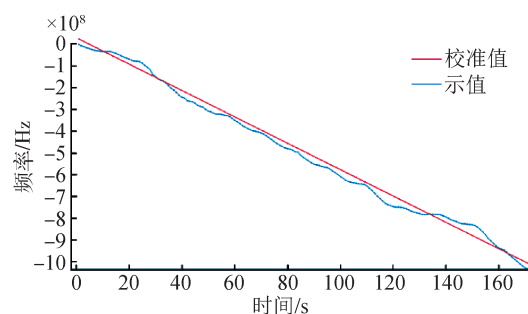


图10 局部带宽(1/128)下校准值与示值对比

Fig.10 Comparison between calibration value and indication value under local bandwidth (1/128)

在利用可调谐激光器进行扫频测量等实际应用中,可调谐激光器的调谐非线性也是重要的观

测参数之一,能够为非线性步长和结果修正提供数据参考,因此本文也对可调谐激光器在1 nm带宽下的调频非线性进行了评价,结果如表1所示。

表1 调频非线性计算结果

Tab.1 Calculation results of frequency modulation nonlinearity

带宽/GHz	调频非线性度/%
121	10.0
119	1.8
100	2.0
60	3.5
40	5.4
20	10.0

根据表1可以看出,随着带宽的增大调频非线性减小,这和扫频测量中带宽增大测量分辨率增加的规律一致,但是在全带宽下非线性出现极大的回调,这是由于单周期扫描中激光器末端调谐减速和震颤引起的,在实际应用中需要根据实际情况尽量避免利用尾端数据参与测量。

4 结论

针对宽带光源波长校准手段有限的问题,探索了利用飞秒光学频率梳对宽带可调谐激光器调谐输出时的瞬时波长进行测量的方法。根据可调谐光源输出波长与相邻梳齿拍频频率的位置关系,研究了调谐光源调谐方向、拍频频率值峰值和谷值的特点,确定了调谐光源在调谐输出时与其拍频的梳齿序数。根据梳齿序数、飞秒光学频率梳的重复频率和偏移频率计算了可调谐光源在调谐输出时的精确校准值,最终实现1 nm带宽下可调谐激光器在调谐输出过程中瞬时值的测量,并利用该结果对可调谐激光器在121 GHz带宽的调频非线性度进行了评价。该方法能够为调频连续波非线性校准、精密光谱学测量、气溶胶雷达等应用提供准确可靠的数据支撑,对提高上述系统的测量精度具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 刘婷婷,赵新丽,李艳,等.基于动态光电瞄准的2 m激光干涉比长仪研究[J].机电信息,2021(17):29-31.
- LIU T T, ZHAO X L, LI Y, et al. Research on 2 m la-

ser interferometer based on dynamic photoelectric aiming[J]. Electromechanical information, 2021(17):29-31. (in Chinese)

- [2] 蒋秀兰,祝逸庆,马建敏,等.双波长激光量块干涉仪减小量块中心长度测量不确定度的措施[J].上海计量测试,2010(6):27-29.

JIANG X L, ZHU Y Q, MA J M, et al. Several measures for reducing the uncertainty of measurement on developing of the laser interferometer for gauge block measurement with double wavelengths[J]. Shanghai metrology and testing, 2010(6):27-29. (in Chinese)

- [3] 甘霖,李晓星.激光跟踪仪现场测量精度检测[J].北京航空航天大学学报,2009(5):612-614,

GAN L, LI X X. Site measuring accuracy testing of laser tracker[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2009(5):612-614. (in Chinese)

- [4] ZHANG X. Investigation of measurement uncertainty of calibrating coupled image level using small angle measuring instrument[J]. Aviation metrology and measurement technology, 2001.

- [5] 吴彬,林佳宏,张凯军,等.基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量[J].物理学报,2020,69(6):25-32.

WU L, LIN J H, ZHANG K J, et al. Vehicle mounted static absolute gravity measurement based on atomic gravimeter[J]. Journal of physics, 2020, 69(6):25-32. (in Chinese)

- [6] 张大鹏,梁志国,张志权,等.飞秒激光频率梳测量光频用拍频装置的实验研究[J].计测技术,2014,34(2):36-38.

ZHANG D P, LIANG Z G, ZHANG Z Q, et al. Experimental study on beat frequency device for measuring optical frequency with femtosecond laser frequency comb[J]. Metrology and measurement technology, 2014, 34(2):36-38. (in Chinese)

- [7] 初世玉,白翔龙,仲志英.633 nm碘稳定的氦氖激光[J].四川激光,1980.

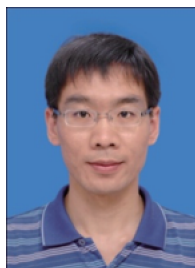
CHU S Y, BAI X L, ZHONG Z Y. 633 nm iodine stabilized He Ne laser[J]. Laser journal, 1980. (in Chinese)

- [8] 陈金华,方晓惠,丁志群,等.光纤激光器中基于偏振控制器的脉宽可调平顶光脉冲生成技术[J].光子学报,2014(5):38-42.

CHEN J H, FANG X H, DING Z Q, et al. Flat-top pulse generation with pulsewidth tunable based on polarization controller in fiber laser[J]. ACTA photonica si-

- nica, 2014(5): 38-42. (in Chinese)
- [9] 魏志义. 2005 年诺贝尔物理学奖与光学频率梳[J]. 物理, 2006, 35(3): 213-217.
- WEI Z Y. 2005 Nobel Prize in physics and optical frequency comb[J]. Physics, 2006, 35(3): 213-217. (in Chinese)
- [10] SANJUAN J, ABICH K, BLUEMEL L, et al. Simultaneous laser frequency stabilization to an optical cavity and an iodine frequency reference [J]. Optics letters, 2020, 46(2).
- [11] JING H, XIA B, XIE Y, et al. A subminiature microwave cavity for rubidium atomic frequency standards [C]// IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the European Frequency and Time Forum. IEEE, 2007.
- [12] 钱进, 刘忠有, 张小平, 等. 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.
- QIAN J, LIU Z Y, ZHANG X P, et al. A new iodine stabilized 633 nm He-Ne laser system [J]. Acta metrologica sinica, 2008, 29(1): 10-13. (in Chinese)
- [13] 陈本永, 杨万福, 严利平. 激光频率(波长)测量技术研究现状及发展[J]. 激光杂志, 2009(2): 1-3.
- CHEN B Y, YANG W F, YAN L P. Review on laser frequency (wavelength) measurement [J]. Laser journal, 2009(2): 1-3. (in Chinese)
- [14] 沈乃澂, 魏志义, 聂玉昕. 光频标和光频测量研究的历史, 现状和未来[J]. 量子电子学报, 2004, 21(2): 139-148.
- CHEN N C, WEI Z Y, NIE Y X. History, present situation and future of optical frequency standard and optical frequency measurement research[J]. Chinese journal of quantum electronics, 2004, 21(2): 139-148. (in Chinese)
- [15] 邵晓东. 基于光学频率梳的激光频率稳定性传递研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2019.
- SHAO X D. Transfer of laser frequency stability based on optical frequency comb [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [16] FERREIRO T I, SUN J, REID D T. Frequency stability of a femtosecond optical parametric oscillator frequency comb[J]. Optics express, 2011, 19(24): 159-164.
- [17] 苗健宇, 段吉安, 帅词俊, 等. 新型 2×2 单模光纤耦合器研究[J]. 甘肃科技, 2005, 21(8): 74-76.
- MIAO J Y, DUAN J A, SHUAI C J, et al. Research on new type 2 × 2 single mode fiber coupler[J]. Gansu science and technology, 2005, 21(8): 74-76. (in Chinese)

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者:武腾飞(1983—),男,研究员,博士,研究方向为飞秒激光频率梳、飞秒激光几何量测量、激光光谱测量等。