

用差频腔产生覆盖 633 nm 光谱的飞秒激光频率梳

梁志国¹, 魏志义², 韩海年², 张大鹏¹, 叶蓬², 武腾飞¹

(1. 北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095;

2. 中国科学院物理所, 北京 100084)

摘要: 飞秒激光频率梳被认为是连接光频和无线电频率的一个超精密齿轮, 比较了自参考法锁相稳频飞秒激光频率梳和差频法单块结构飞秒激光频率梳的特点, 前者光谱范围宽, 但稳定性较差; 后者稳定性较好, 但光谱范围较窄。在差频腔单块结构飞秒激光频率梳的基础上, 通过使用腔外压缩色散补偿方式压缩激光脉冲宽度, 然后重新注入光子晶体光纤进行光谱扩展, 获得了覆盖 633 nm 波长的更宽的光谱范围, 为 633 nm 波长激光频率测量创造了条件。

关键词: 计量学; 光频率测量; 飞秒激光频率梳; 光谱扩展; 脉宽压缩

中图分类号: TB939

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2013)02-0161-07

A Monolithic Scheme Based Femtosecond Optical Frequency Comb Covering 633 nm Wavelength

LIANG Zhi-guo¹, WEI Zhi-yi², HAN Hai-nian², ZHANG Da-peng¹, YE Peng², WU Teng-fei¹

(1. Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Changcheng Institute of Metrology and

Measurement, Beijing 100095, China; 2. Physics Institute of Chinese Academy of Science, Beijing 100084, China)

Abstract: Femtosecond optical frequency comb is considered as a precise gear between the optical frequency and radio frequency. Both self reference phase lock optical frequency combs and monolithic scheme laser combs are compared, the former has wider spectrum and uglier stability, but the other has better stability and thinner spectrum. Based on the monolithic scheme laser comb, through compressing laser pulse width outside the cavity, then by using photonic crystal fiber widen spectrum, obtain wider spectrum, and the 633 nm wavelength is covered, it can be applied to measure the optical frequency including 633 nm wavelength.

Key words: Metrology; Optical frequency measurement; Femtosecond optical frequency comb; Spectrum widen; Laser pulse width compress

1 引 言

光频率测量一直是一个重要的科学问题,吸引了众多科学家对其进行不懈努力。由于技术复杂和系统过于庞大,经典的谐波光频链方法的效果一直很不理想,仅在少数国家的几个有限的实验室被成

功复现过,准确度也不理想。直到飞秒激光频率梳技术的出现,才使得它成为一个相对容易、可用于工程实践的事情,不仅大大提高了光频测量准确度,还可以将其量值直接溯源到原子钟上^[1~17]。尽管如此,仍然有许多问题需要加以解决,飞秒激光频率梳的长期稳定可靠工作便是其中之一。

由于真空中的光速被认为是一个物理常数,使

收稿日期: 2011-11-18; 修回日期: 2012-03-30

基金项目: 中国航空科学基金资助项目(2006ZD44006)

作者简介: 梁志国(1962-),男,黑龙江巴彦人,北京长城计量测试技术研究所计量与校准技术重点实验室研究员,博士,主要研究方向为数字化测量与校准、模式识别、动态校准、精确测量。Lzg304@sina.com

得光频率测量结果不仅是一个时间频率量,通过光速与光频率的换算,获得的波长量值也是一个长度量,在此基础上显然有望统一国际单位制中的时间量(s)和长度量(m)的定义与复现。633 nm 激光波长是我国计量行业内唯一一直保持量值传递的长度量基准,也是世界上很多国家的长度量值基准,因而633 nm 激光在计量测试行业中拥有特殊的重要地位,其频率测量是体现在实际工作中的长度量和时间量的定义能否统一的问题。本文后续内容,主要讨论一种可以实现较长时间稳定工作的飞秒激光频率梳,其光谱范围覆盖633 nm 激光波长,可用于633 nm 波长激光频率的测量。

2 两种激光频率梳的比较

2.1 f - $2f$ 自参考法锁相稳频飞秒激光频率梳

飞秒激光频率梳是一超短、超稳定的固体脉冲激光器。一个自由运转的固体脉冲激光,它的输出是一种多模并且不相干的光脉冲(脉冲宽度在 μm 到数十 μm , 并且幅度不等)。人们采用各种锁模的

方法使其变成时间间隔相等、脉冲宽度约数 f_s 到数十 f_s 并且相位相关的一系列频带很宽的光梳。其中克尔镜锁模技术应用最广泛^[18]。

图1是克尔锁模钛蓝宝石飞秒激光器原理结构图。其中,双折射滤光镜起滤波器作用, $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ 为钛蓝宝石激光晶体,用于产生激光和锁模, M_1 和 M_2 为镀有高反射膜的凹面镜,用于反射和汇聚光束, M_3 、 M_4 和 M_5 为镀有高反射膜的平面镜, P_1 、 P_2 为熔融石英玻璃棱镜,用于色散补偿。压电位移控制器控制的倾斜反射镜 M_5 同时用于负群速色散的补偿。 M_4 后面的 PZT 用于平移 M_4 微调激光腔长,调节和稳定飞秒激光重复频率 f_{rep} 。输出耦合镜 M_6 以半反半透方式将飞秒激光输出。该激光的峰值波长在 810 nm 附近,光谱范围数十 nm 左右,脉冲重复频率间隔由数十 MHz 到上 GHz。如图1,通过 PZT 控制激光器腔长改变和稳定其重复频率,以及控制泵浦源的功率和棱镜的相互方位以补偿和稳定由色散引起的频率偏移,得到一个频率稳定的飞秒脉冲激光,它是一个光谱范围比较窄的光频梳。

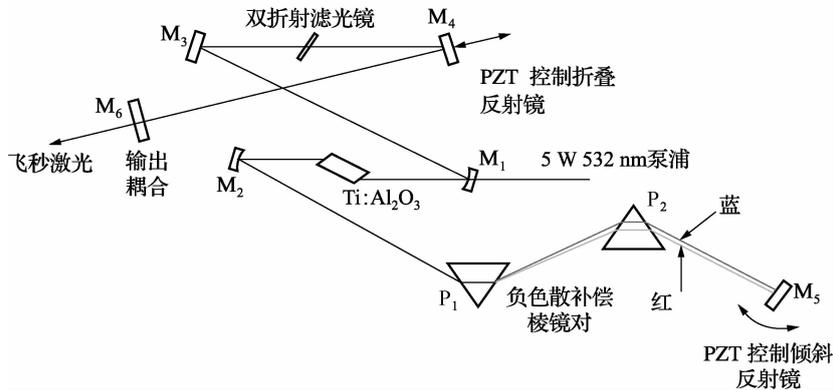


图1 掺钛蓝宝石飞秒激光器结构原理图

由飞秒激光器的原理,其时域输出脉冲如图2

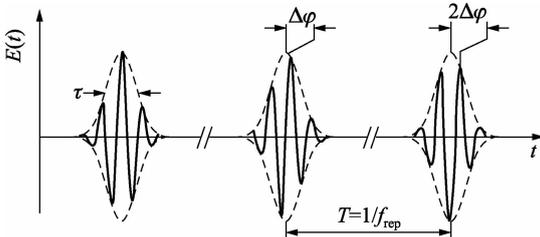


图2 飞秒激光器输出的时域脉冲

所示,可由式(1)表示,

$$E(t) = A(t)e^{-i2\pi f_{\text{rep}}t} \quad (1)$$

式中, $A(t)$ 是输出脉冲的包络函数, f_{rep} 是脉冲重复频率,它是激光在腔中往返行进时间的倒数,由式(2)表示,

$$f_{\text{rep}} = \frac{v_g}{2L} \approx \frac{c}{2L} \quad (2)$$

式中, L 是激光腔长; v_g 是光在腔中行进的速度; c 是真空中光速。

由于腔中物质对光的色散作用,使得群速和相速之间产生延迟,因此包络出现相移

$$\Delta\phi = \frac{2\pi f_0}{f_{\text{rep}}} \quad (3)$$

式中 f_0 是由相移产生的频率偏移。

对 $E(t)$ 进行傅氏变换, 可得其频域特性如图 3 所示。这是一列在频域中等间隔的激光脉冲链。其重复频率 f_{rep} 的量值在几十 MHz 到几个 GHz 范围。由式(3)得频率偏移 f_0

$$f_0 = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} f_{\text{rep}}$$

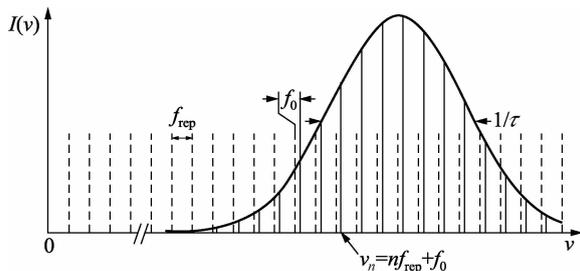


图3 飞秒激光频域分布

由图 3 可知, 飞秒激光梳中任一梳线的频率 ν_n 可以表示为

$$\nu_n = n f_{\text{rep}} + f_0 \quad (4)$$

式中 n 为整数。

它与重复频率 f_{rep} 及频偏 f_0 有关, 而它们又和激光腔长 L 相关, 因而受环境影响较大。要得到频率精确的光频梳对其进行稳定非常重要。

图 1 所示飞秒激光器的光谱范围只有 100 nm 左右, 通过它可直接将 f_{rep} 锁定到原子钟频率上, 方法是将飞秒激光分光到光电探测器接收端获得重复频率 f_{rep} , 将该频率通过锁相环电路与原子钟频率合成的信号进行鉴相, 差异信号以负反馈方式驱动 PZT 变换激光器腔长, 以锁定重复频率 f_{rep} 。

飞秒激光器无法直接实现 f_0 的提取和锁定。将该激光注入到具有多芯结构的光子晶体光纤中, 通过强飞秒激光在该光纤内的非线性效应及四波混频等效应, 可在保持 f_{rep} 和 f_0 不变的情况下将光谱扩展为覆盖 500 ~ 1 200 nm 的宽广范围, 成为飞秒激光频率梳, 如图 4 所示。该光谱的高频激光频率大于低频激光频率的 2 倍, 可用倍频拍频方法 ($f-2f$ 法) 提取和锁定 f_0 频率。使用锁相电路将 f_0 与原子钟频率合成的信号进行鉴相, 差异信号以负反馈方式驱动声光调制器 (AOM) 变换泵浦激光功率, 从而改变偏移频率 f_0 , 达到锁定 f_0 的目的。

由于使用光子晶体光纤进行光谱扩展和锁定 f_0 , 且该光纤直径只有 μm 量级, 而飞秒激光器工作时, 温度漂移、机械震动、气流干扰、环境干扰、锁相环调节信号的信噪比过低等因素的影响很难避免, 导致飞秒激光频率梳的锁定工作时间较短, 通常仅

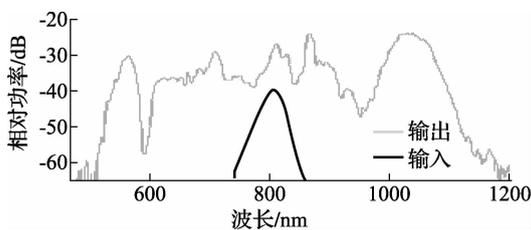


图4 飞秒激光频域光谱分布示意图

40 min 左右, 这是限制其实际应用的主要问题之一, 许多科学家在试图克服该局限^[19]。另外, 受光纤特性的限制, 该方案输出功率较低, 光纤在强激光作用下, 会由于环境灰尘等的作用而在照射端产生烧蚀, 影响系统的正常运行。

光频测量就是被测光和某一梳线进行拍频, 以求出小于重复频率 f_{rep} 的拍频值。而 n 的量, 则由其它方法求出。因此, 作为超高精度的光频发生器的重复频率 f_{rep} 和偏频 f_0 是它的最重要的参数, 而作为测量装置 f_{rep} 和 f_0 的稳定是十分重要的。

2.2 差频腔单块结构飞秒激光频率梳

为了提高系统的长期稳定性, 人们研制出单块结构的差频腔飞秒激光频率梳系统, 如图 5 所示。

泵浦源输出 532 nm 激光经声光调制器 AOM 作用于泵浦钛宝石激光器, 该激光采用啁啾镜进行色散补偿, 重复频率 350 MHz, 输出光谱覆盖了 650 ~ 950 nm 的宽带范围, 如图 6 所示。通过腔外一对啁啾镜及石英尖劈对的进一步色散补偿后, 聚焦到准相位匹配晶体 PP-MgO:LN 上的脉宽小于 7 fs, 如图 7 所示。由于这样短的脉宽相互作用, 在晶体中产生了红外波段的频率成分及与原激光差分的拍频信号^[20], 对该信号及激光重复频率进行有效控制后, 可实现高稳定、高功率的光学频率梳。

图 5 中飞秒激光器腔外的准相位匹配晶体 PPLN 及附属光路即是实现该过程的差频、倍频方案, 通过低通滤波器及光电管后, 将偏移频率 f_0 提取出来, 将该频率与氢原子钟参考的射频信号进行混频锁相, 控制声光调制器 AOM 的输入, 进而控制飞秒激光器的泵浦功率、以改变腔体材料的折射率, 起到补偿色散和稳定群速相位 (频偏 f_0) 的作用, 最终将 f_0 锁定到氢原子钟频率上, 稳定 f_0 。

与 $f-2f$ 锁相稳频方案相比, 该方案的飞秒激光频率梳舍去了扩频用光子晶体光纤, 通过准相位匹配晶体 PPLN 进行提取和锁定 f_0 , 没有了端面注入光子晶体光纤这个容易受干扰的环节在锁相环内, 其时间稳定性大为提高, 可以稳定工作 9 h 以上, 可

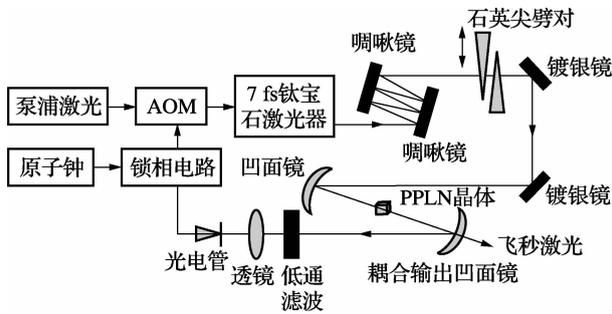


图 5 啁啾镜色散补偿的飞秒激光频率梳原理框图

用光功率也大为提高。但由于掺钛蓝宝石的辐射光谱范围为 660 ~ 1 050 nm, 吸收光谱范围为 400 ~ 600 nm, 原理上, 该激光物质构造的激光腔的辐射光谱将很难包含 660nm 以下波长, 通常约为 660 ~ 950 nm, 作为长度量计量基准的 633 nm 波长激光频率无法用差频腔飞秒激光频率梳直接测量。限制了该方法在几何量计量中的工程应用。

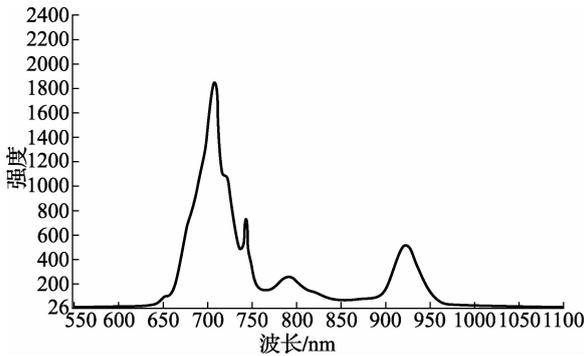


图 6 飞秒激光输出光谱

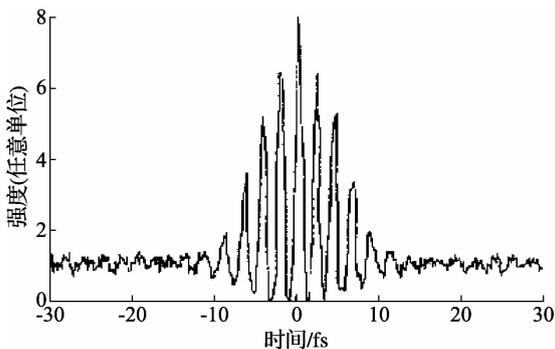


图 7 补偿后的最窄激光脉宽示意图

差频腔单块结构飞秒激光频率梳重复频率的稳定原理和方法与 $f-2f$ 法相同, 而其偏移频率的稳定方法则有较大不同。

差频光梳稳定 f_0 的原理以及特性如图 8 所示, 飞秒激光频率梳中存在众多光频, 光谱范围约为

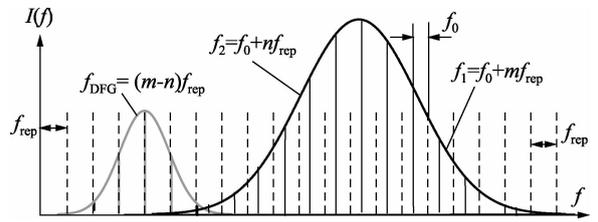


图 8 差频光梳原理特性的频域示意图

650 ~ 950 nm, 其中, 原始光谱中的两个频率(较高频率的 f_1 和较低频率的 f_2) 的差频 f_{DFG} 将落到红外光波段, 它不含有频率偏移分量 f_0 , 其倍频与光梳自身的另一条梳频(频率量值为 $2(m-n)(f_{rep} + f_0)$ 之差将产生频率 f_0 , 从而可以不需要有 2 倍频宽度的光谱即可以实现频率偏移分量 f_0 的测量与获取。

3 差频腔单块结构飞秒激光频率梳的光谱扩展

为了解决差频腔单块结构飞秒激光频率梳无法测量 633 nm 光频问题, 曾经试图使用的方法是直接将差频腔输出的飞秒激光直接注入光子晶体光纤进行光谱展宽, 多次实验均未获得成功, 原因可能是此时光谱非常宽, 导致局部光谱峰值功率不够高, 影响了光子晶体光纤的非线性效应的结果。

本文采用了腔外色散补偿压缩脉冲的方法, 将差频腔飞秒激光频率梳产生的已经由于在空气中传播导致脉宽增大到 ps 量级的光梳, 重新压缩到几十 fs 的宽度后, 注入光子晶体光纤, 利用光子晶体光纤的强非线性等效效应展宽光谱范围, 其原理如图 9 所示。

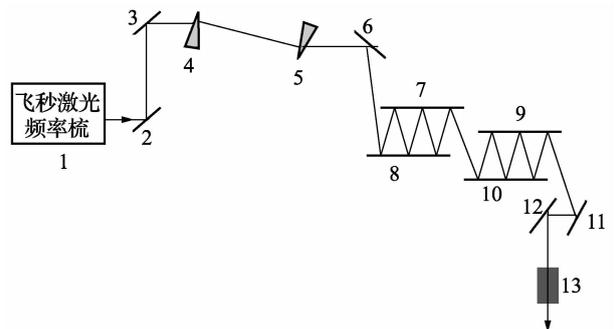


图 9 飞秒激光频率梳腔外压缩扩谱原理图

图 9 中, 1 为差频腔原理的飞秒激光频率梳, 用于提供光谱范围约 650 ~ 950 nm 的飞秒脉冲激光, 出射激光脉宽为 ps 量级, 2, 3, 6, 11, 12 皆为平面反射镜, 4, 5 为色散补偿棱镜对, 用于飞秒激光的 2 阶

色散补偿以进行脉宽压缩,7、8 为色散补偿啁啾镜对,9、10 为色散补偿啁啾镜对,用于飞秒激光的 3 阶色散补偿以进行脉宽压缩,13 为光子晶体光纤,用于飞秒激光光谱展宽,使其光谱范围达到 600 ~ 1 000 nm。

从模块 1 差频腔飞秒激光频率梳产生的飞秒激光脉冲,经过平面镜 2、3 反射后,注入色散补偿棱镜对 4、5 进行色散补偿和脉冲压缩,棱镜对 4 与 5 之间的光程为 70 cm,可以计算其引入色散量^[21,22]。而后经过平面镜 6 反射后,注入色散补偿啁啾镜对 7、8 和 9、10 继续进行色散补偿和脉冲压缩,啁啾镜对采用 Layertec 公司产品,在 640 ~ 1 000 nm 波段镀有高反膜,反射率高于 99.8%,在 680 ~ 940 nm 波段群速度色散量为 -50 fs^2 ,经计算及实际光路分析啁啾镜反射次数为 24 次,引入色散量约为 $-1\,200 \text{ fs}^2$ 。完成色散补偿和脉冲压缩后将飞秒激光脉宽由 ps 压缩至几十 fs,经过平面镜 11、12 反射注入光子晶体光纤 13 进行光谱展宽,获得更宽光谱的飞秒激光脉冲。其中,飞秒激光频率梳脉冲重复频率约为 350 MHz,从 1 发射的飞秒激光平均功率约 350 mW,色散补偿棱镜对 4 与 5 之间的光程为 70 cm,其余路径以尽量简短为原则。

4 实验验证

按图 9 所示构建的飞秒激光频率梳及腔外压缩光谱扩展装置,泵浦源为 Verdi-V8 型激光器,输出功率稳定性 1% 以内的 532 nm 泵浦激光,实际泵浦功率 4.9 W,原子钟为 TF9502C 型蓝宝石氢原子频标,1000 s 阿伦标准偏差为 4×10^{-14} ,频率计数器为 53132 A 型通用计数器,频率合成器为 E8257D 型低相位噪声微波信号源。光谱仪为 Ocean HR4000 CG-UV-NIR 型光谱仪。飞秒激光频率梳重复频率 350 MHz、偏移频率 20 MHz、平均功率 400 mW、脉宽 710 fs、光谱范围 650 ~ 950 nm、锁定时间大于 9 h。

如图 10 所示为使用本文所述方法获得的光谱扩展后的飞秒激光频率梳光谱实测图,从中可见,扩谱后的飞秒激光光谱可覆盖 600 ~ 1 000 nm 范围,甚至可以扩出 600 nm 以下波长的光谱,是差频腔直接输出无法获得的结果。实验表明,经过上述方法展宽后的光频梳可以用来直接测量 633 nm 稳频激光频率,并仍然保持可长时间稳定工作的特性,具有原理简洁明确、成本相对低廉、容易实

现等特点。

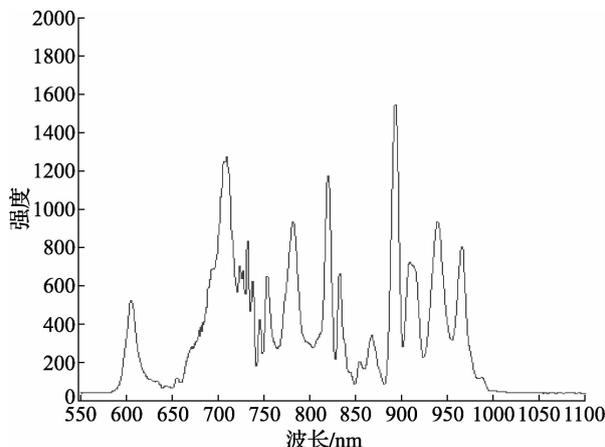


图 10 飞秒激光频率梳扩谱后的光谱范围

使用氢原子钟锁定以后,飞秒激光频率梳的重复频率 f_{rep} 稳定性采样测量结果如图 11 所示。9 h 时间阿伦标准偏差为 0.22 mHz。偏移频率 f_{ceo} 稳定性采样测量结果如图 12 所示。9 h 时间阿伦标准偏差为 2.6 mHz。

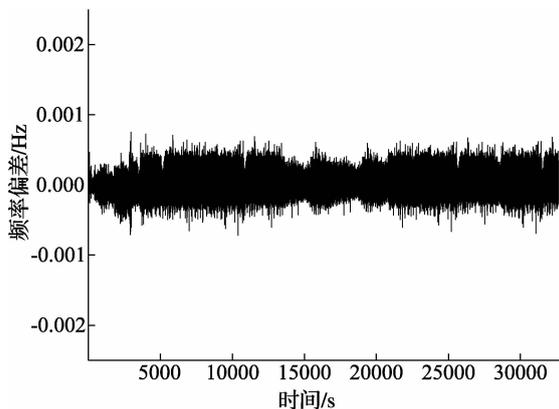


图 11 飞秒光频梳重复频率 f_{rep} 偏差时域采样图

图 13 为光频测量实际系统组成图, f_1 为测量被测激光源的频率,它由几何量国家副基准 633 nm 波长激光装置提供。光频梳输出一束稳定的梳光,频率为 f_n 。用它和被测量的光 f_1 去拍频,经过光电转换器后转化为电频率信号,信号频率为两束光频率之差,用 f_{beat} 表示。这样被测光的频率 f_1 为

$$f_1 = f_n \pm f_{\text{beat}} = n f_{\text{rep}} \pm f_0 \pm f_{\text{beat}} \quad (5)$$

式中, f_{rep} 为飞秒激光频率梳的重复频率, f_0 为频率偏移, n 为光梳齿序数。 f_{beat} 可使用时间频率计数器直接测量。

被测激光 f_1 由 NPBS 反射后与飞秒激光频率梳输出的光 f_n 在偏振分光镜 PBS 上合光并发生干涉,

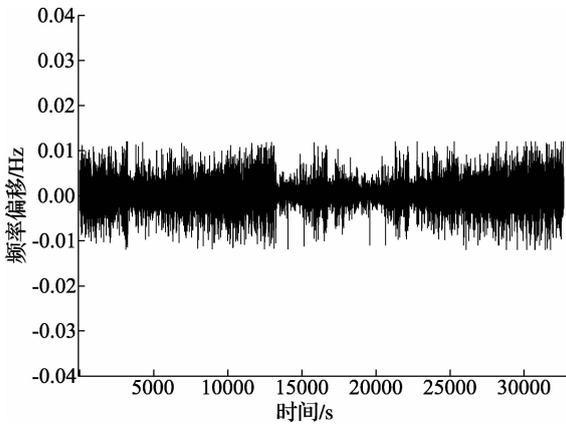


图 12 飞秒光频率梳偏移频率 f_0 偏差时域采样图

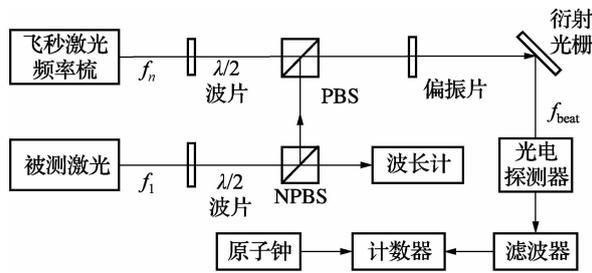


图 13 光频测量原理图

再由光电探测器探测其拍频信号从而获得 f_{beat} 。通过调节两个 $\lambda/2$ 波片可使飞秒激光频率梳的梳光和被测激光分别被 PBS 完全透射和反射。两束光合光时由于偏振方向互相垂直,无法发生干涉,因此在 PBS 后加入偏振片使两束光的偏振方向相同。光电探测器探测到的信号中,只有和被测激光频率距离最近的光梳梳齿的拍频才是有用的信号,与其它光梳齿或其它光梳齿之间的相互拍频都只会产生噪声,由于衍射光栅只针对闪耀波长发生衍射作用,因此使用衍射光栅将没用的光梳梳齿滤掉,只保留有用频率光。滤波器也起同样的作用,通过选择合适的带通滤波器,使得有效拍频 f_{beat} 通过滤波到达计数器,而滤掉其它不需要的拍频信号,达到提高信噪比和有效测量光频率的目的。

调整被测激光频率为碘稳频 633 nm 激光频率的 d 峰,即

$$f_d = 473\ 612\ 353\ 599.9(1.6)\ \text{kHz}$$

用频谱分析仪获得的重复频率谱线值约为 350 MHz。用计数器记录它的 3 次谐波与 1 050 MHz 稳定频率混频结果值为:

$$f_{\text{rb}} = 644.721\ 000\ 033\ 211\ \text{kHz}$$

其标准偏差为:

$$s_{\text{rb}} = 7.428 \times 10^{-7}\ \text{kHz}$$

重复频率 f_r 的测量结果为:

$$\begin{aligned} f_r &= (f_{\text{rb}} + 1\ 050\ 000)/3 \\ &= 350\ 214.907\ 000\ 011\ 07\ \text{kHz} \end{aligned}$$

用计数器直接测量获得偏移频率 f_0 的测量结果为:

$$f_0 = 20.600\ 876\ 869\ 891\ 6\ \text{MHz}$$

其标准偏差为:

$$s_0 = 1.619 \times 10^{-7}\ \text{MHz}$$

用计数器直接测量获得光梳频率与被测 633 nm 激光 d 峰拍频结果为:

$$f_{\text{beat}} = 28.686\ 81\ \text{MHz}$$

其标准偏差为:

$$s_b = 0.13\ \text{MHz}$$

则

$$n = f_d/f_r = 1\ 352\ 348$$

被测光频:

$$f = n \times f_r \pm f_0 \pm f_{\text{beat}}$$

通过微动重复频率和偏移频率可以判定符号,得被测光频^[23]:

$$\begin{aligned} f &= n \times f_r - f_0 - f_{\text{beat}} = 473\ 612\ 351\ 077.154\ 10\ \text{kHz} \\ \text{差异值:} \end{aligned}$$

$$\delta = \frac{f - f_d}{f_d} = -5.3 \times 10^{-9}$$

5 结 论

本文主要内容,是使用了腔外压缩色散补偿光路,成功实现了已经由于空气中传输而变宽到 ps 量级的飞秒激光脉冲的再压缩,使其脉宽重新压缩到几十 fs 量级,并注入光子晶体光纤,依靠其强非线性效应等进行光谱扩展,以便获得覆盖 633 nm 激光频率的光谱,同时,在作为国家长度副基准的 633 nm 波长稳频激光器上进行了光频率测量实验。实验表明,经过上述方法展宽后的光频率梳可以获得预期效果,由于此时虽然也使用了光子晶体光纤,但由于其不在锁相环之内,对光梳的时间稳定性影响大大降低,并仍然保持可长时间稳定工作的特性。该方法具有原理简洁明确、成本相对低廉、容易实现等特点,可用于我国长度量计量基准的直接测量,具有明显的实用价值。

致谢:本文所述工作获得了中国航空科学基金的资助;在光频测量实验过程中,得到了长度量国家副基准主管张志权高工的热情支持与鼎力协助。在

此一并致谢。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang Wei, Han Hainian, Zhao Yanying, *et al.* A 350MHz Ti: sapphire laser comb based on monolithic scheme and absolute frequency measurement of 729nm laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(8): 6059 – 6067.
- [2] Lea S N, Rowley W R C, Margolis H S, *et al.* Absolute frequency measurements of 633nm iodine-stablized helium-neon lasers[J]. *Metrologia*, 2003, 40(2): 84 – 88.
- [3] Ma L S, Picard S, Zucco M, *et al.* Direct measurement of the absolute frequency of the international reference laser BIPM4[J]. *Metrologia*, 2004, 41(1): 65 – 68.
- [4] Bernard J E, Madej A A, Siemsen K J, *et al.* Absolute frequency measurement of the HeNe/I₂ Standard at 633 nm[J]. *Optics Communications*, 2001, 187(1): 211 – 218.
- [5] Yoon T H, Ye J, Hall J L, *et al.* Absolute frequency measurement of the iodine-stabilized He-Ne laser at 633nm[J]. *Applied Physics B Laser and Optics*, 2001, 72(2): 221 – 226.
- [6] Madej A A, Marmet L, Bernard J E, *et al.* Sub-kilohertz linewidths and absolute frequency measurement for the single Sr⁺ atom at 445 THz [C]// 13th International Conference on Laser Spectroscopy (THICOLS '97), Hangzhou, 1997, 102 – 105.
- [7] Ye J, Yoon T H, Hall J L, *et al.* Accuracy Comparison of Absolute Optical Frequency Measurement between Harmonic-Generation Synthesis and a Frequency-Division Femtosecond Comb[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3797 – 3800.
- [8] Ma L S, Zucco M, Picard S, *et al.* A new method to determine the absolute mode number of a mode-locked femtosecond-laser comb used for absolute optical frequency measurement [J]. *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(4): 1066 – 1071.
- [9] Holzwarth R, Nevsky A Y, Zimmermann M, *et al.* Absolute frequency measurement of iodine lines with a femtosecond optical synthesizer[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2001, 73(3): 269 – 271.
- [10] Rovera G D, Ducos F, Zondy J J, *et al.* Absolute frequency measurement of an I₂ stabilized Nd: YAG optical frequency standard [J]. *Measurement Science Technology*, 2002, 13(6): 918 – 922.
- [11] Klein A A, Vigue H, Chardonnet C. Absolute frequency measurement of ¹²C¹⁶O₂ Laser lines with a femtosecond laser comb and new determination of the ¹²C¹⁶O₂ molecular constants and frequency grid [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2004, 228(1): 206 – 212.
- [12] Hong F L, Ishikawa J, Zhang Y, *et al.* Frequency reproducibility of iodine-stabilized Nd :YAG laser at 532nm, *Optics Communications* [J]. *Optics Communications*, 2004, 235(4 – 6): 377 – 385.
- [13] Ducos F, Hadjar Y, Rovera G D, *et al.* Progress toward absolute frequency measurements of the ¹²⁷I₂-stabilized Nd : YAG laser at 563.2 THz/532 nm [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(2): 539 – 542.
- [14] Diddams S A, Jones D J, Ye J, *et al.* Direct link between Microwave and Optical Frequencies with a 300THz Femtosecond Laser Comb[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102 – 5105.
- [15] Hong F L, Diddams S, Guo R X, *et al.* Frequency measurements and hyperfine structure of the R(85)33 – O transition of molecular iodine with a femtosecond optical comb [J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2004, 21(1): 88 – 95.
- [16] Ma L S, Robertsson L, Picard S, *et al.* The BIPM laser standards at 633nm and 532nm simultaneously linked to the SI second using a femtosecond laser in an optical clock configuration [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, 52(2): 232 – 235.
- [17] Reichert J, Holzwarth R, Udem T, *et al.* Measuring the frequency of light with mode-locked lasers[J]. *Optics Communications*, 1999, 172(1 – 6): 59 – 68.
- [18] Diddams S A, Jones D J, Ye J, *et al.* Direct RF to Optical frequency measurements with a femtosecond laser comb [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(2): 552 – 555.
- [19] Fang Z, Lin B, Wang Q, *et al.* Phase lock of frequency comb's f_{-(ceo)} using servo-controlled pcf coupling technique [C]// CPEM. CPEM 2006 Digest, Conference on Precision Electromagnetic measurements (W328), Torino, Italy, 2006, 306 – 307.
- [20] 韩海年, 赵研英, 张炜, 等. PPLN 晶体差频测量飞秒激光脉冲的载波包络相移[J]. *物理学报*, 2007, 56(5): 2756 – 2759.
- [21] 王专. 克尔透镜锁模飞秒钛宝石激光器前沿技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [22] 向望华, 王乘, 陆向荣, 等. 单棱镜色散补偿自锁模钛宝石激光器[J]. *光学学报*, 1999, 19(10): 1318 – 1322.
- [23] 张炜. 基于飞秒钛宝石激光的新型单块光学频率梳及光频测量研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.