

利用非锁定飞秒激光实现太赫兹频率的精密测量

孙青 杨奕 邓玉强 孟飞 赵昆

High-precision measurement of terahertz frequency using an unstabilized femtosecond laser

Sun Qing Yang Yi Deng Yu-Qiang Meng Fei Zhao Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 150601 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.150601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.150601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用

Development and application of communication band narrow linewidth lasers

物理学报.2015, 64(19): 190601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190601>

铯玻色子的掣□ 綱波长光晶格装载实验研究

Experimental research on loading strontium bosons into the optical lattice operating at the "magic" wavelength

物理学报.2015, 64(13): 130601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130601>

基于光纤的光学频率传递研究

Study of optical frequency transfer via fiber

物理学报.2015, 64(12): 120602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120602>

振动不敏感球形光学参考腔研究

Study of a spherical vibration-insensitive optical reference cavity

物理学报.2014, 63(9): 090601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.090601>

利用非锁定飞秒激光实现太赫兹频率的精密测量*

孙青^{1)†} 杨奕²⁾ 邓玉强¹⁾ 孟飞³⁾ 赵昆²⁾

1)(中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029)

2)(中国石油大学(北京), 油气光学探测技术北京市重点实验室, 北京 102249)

3)(中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100029)

(2016年3月18日收到; 2016年5月18日收到修改稿)

频率是电磁波最重要的一个基本物理量, 随着 THz 技术的发展, 在光源研制、宽带通信、超精细光谱测量等领域都对 THz 频率的高精度测量提出了要求. 传统的 Fabry-Perot 干涉法与外差探测法难以实现 THz 频率的高精度测量, 频率梳方法虽然测量精度很高, 但测量系统复杂. 本文提出一种利用重复频率自由漂移的飞秒激光器实现太赫兹频率精密测量的新方法. 通过对非锁定的飞秒激光器的重复频率和 THz 拍频频率进行同时连续采集与计算, 得到被测 THz 频率, 测量精度可以达到 10^{-10} 量级. 无需对飞秒激光重复频率进行复杂的锁定控制, 测量系统大大简化.

关键词: 太赫兹, 频率梳, 频率计量, 重复频率

PACS: 06.20.-f, 06.30.Ft, 95.55.Sh, 87.50.U-

DOI: 10.7498/aps.65.150601

1 引言

太赫兹 (THz) 在电磁波谱中位于微波和红外之间, 具有很多独特而优越的特性, 在应用方面相对于其他波段的电磁波有非常强的互补特征. 随着 THz 技术的不断发展和创新, THz 技术的应用领域日益拓宽, 在材料测试、安检成像、无线通信、生物医学、环境监测以及天文学等领域中都将发挥重要作用^[1-3].

频率是电磁波最重要的一个基本物理量, 研究 THz 频率精确测量方法并建立 THz 的频率计量标准, 对于推动 THz 技术的发展, 扩展 THz 的应用具有十分重要的意义. 随着 THz 技术的发展, 在 THz 光源研制、宽带无线通信、超精细光谱测量等领域都对 THz 频率的高精度测量提出了需求. 传统的 Fabry-Perot (F-P) 干涉法测量精度有限无法满足应用需求, 微波与毫米波波段常用的外差探测法

由于缺乏 THz 本振源也难以推广到 THz 波段. 在光波波段, 飞秒光学频率梳早已被用于光波频率计量^[4], 具有非常高的准确性和稳定性. 2008年, 日本研究人员利用飞秒激光激发电导天线产生 THz 频率梳, 实现了 THz 频率的高精度测量, 测量精度达到 10^{-11} 量级^[5]. 这之后, 日本和韩国的研究人员继续开展了深入的研究^[6-9]. 产生频率稳定可控的 THz 频率梳需要对飞秒激光器重复频率进行精密锁定控制, 因此需要对飞秒激光器进行特殊设计, 同时需要参考信号源、伺服控制模块、高压驱动模块、温度控制模块等重复频率控制装置^[10,11], 系统较为复杂. 德国研究人员提出一种利用重复频率非锁定的飞秒激光器实现 THz 频率精密测量的方法^[12], 但是需要额外引入一路参考频率用于校正重复频率的漂移, 测量系统并未得到太大简化, 并且需要进行特殊算法对数据进行分析.

本文在 THz 频率梳方法的基础上, 提出一种利用飞秒激光器重复频率的自由漂移实现 THz 频率

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFF0200306)、国家自然科学基金 (批准号: 61205099, 11274282)、中国计量科学研究院基本科研业务费项目 (批准号: AKY1404)、上海市科学技术委员会项目 (批准号: 15DZ0500100) 和国家质量监督检验检疫总局公益性行业科研专项 (批准号: 201410025) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunqing@nim.ac.cn

精密测量的新方法. 通过对非锁定的飞秒激光器的重复频率和 THz 拍频信号进行同时连续采集与计算得到被测 THz 频率, 测量精度可以达到 10^{-10} 量级. 相比于锁定激光器重复频率的方法, 测量精度虽然下降一个量级, 但系统大为简化, 无需特殊设计的飞秒激光器与复杂的重复频率控制装置, 同时这样的测量精度仍足以满足大部分 THz 频率高精度测量需求.

2 原理与装置

飞秒激光包含频率为 $f_{n_opt} = n \cdot f_r + f_0$ 的一系列频率梳齿, f_r 为激光脉冲重复频率, f_0 为载波包络位相偏移. 光电导天线在飞秒激光的激发下产生宽带 THz 辐射, f_0 在各频率分量的差频过

程中被相互抵消掉, 因此 THz 频率梳可以表示为 $f_{m_THz} = m \cdot f_r$ ($m = 1, 2, 3 \dots$).

如图 1 所示, 被测 THz 源的频率可表示为 $f_{THz} = m \cdot f_r \pm f_b$, f_b 为被测 THz 源与 THz 频率梳的拍频信号, 式中 f_r 和 f_b 均可通过频率计数器直接测量, 只有 m 为未知量, 为了确定被测 THz 源的频率必须知道 m 的数值. 如果 THz 频率梳的频率间隔由 f_r 改变为 $f_r + \delta f_r$, 则拍频信号由 f_b 改变为 $f_b + \delta f_b$, 且 $|\delta f_b| = |m \cdot \delta f_r|$, 因此可以得到:

$$m = \text{int} \left(\left| \frac{\delta f_b}{\delta f_r} \right| \right). \quad (1)$$

被测 THz 源的频率可表示为

$$f_{THz} = \begin{cases} m \cdot f_r + f_b, & \delta f_b / \delta f_r < 0, \\ m \cdot f_r - f_b, & \delta f_b / \delta f_r > 0. \end{cases} \quad (2)$$

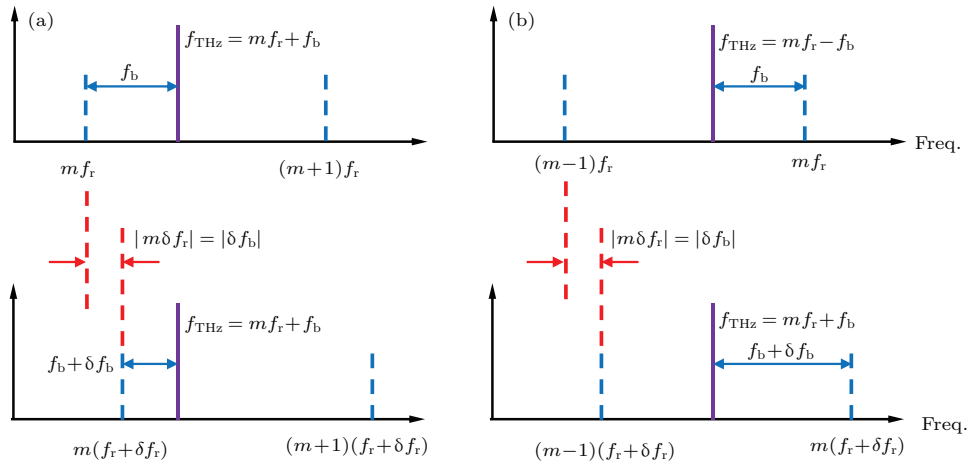


图 1 THz 频率测量原理图

Fig. 1. Principle of terahertz frequency measurement.

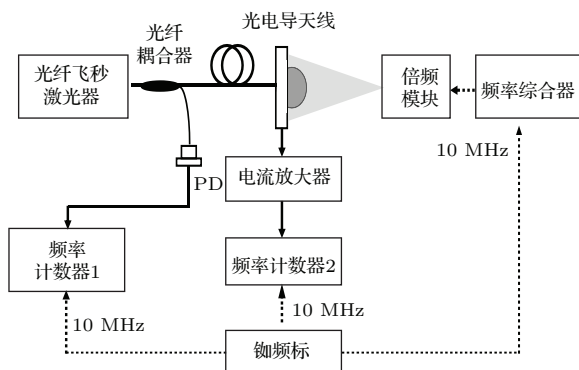


图 2 THz 频率测量系统示意图

Fig. 2. Schematic of the THz frequency measurement system.

图 2 为测量系统示意图. 飞秒激光器采用德国 Toptica 公司的光纤飞秒激光器, 输出中心波

长 1550 nm, 脉冲宽度约 80 fs, 脉冲重复频率约 80 MHz. 飞秒激光输出后经过光纤耦合器分为两束, 其中一束与光纤耦合型 THz 光电导天线连接, 激发电导天线的带隙从而产生 THz 频率梳. 另外一束激光由高速光电二极管探测, 将获得的电脉冲信号输入频率计数器 1 测量飞秒激光器重复频率. 频率综合器的输出信号经倍频模块六倍频后产生频率 75—110 GHz 的 THz 信号. THz 信号照射到光电导天线表面, 经硅透镜聚焦后与 THz 频率梳相互作用. 获得的拍频信号经放大后输入频率计数器 2 进行测量. 测量系统中的频率计数器与频率综合器均参考至铷频率标准 (秒稳定性优于 2×10^{-11} , 准确度 5×10^{-11}), 以保证测量结果的准确性.

3 结果与讨论

首先连续测量了飞秒激光器开机后 6 h 内的重复频率变化, 如图 3 所示. 从图中可见重复频率持续降低, 在 6 h 内降低了约 8 kHz, 这是由于激光器开机后温度持续升高, 热胀冷缩效应导致激光器腔长变长, 因此重复频率降低. 随着时间推移, 激光器逐渐接近热平衡状态, 重复频率降低速度逐渐变慢, 在开机 3 h 后达到相对稳定的状态, 随环境温度变化在 100 Hz 范围内波动, 如图 3 中插图所示.

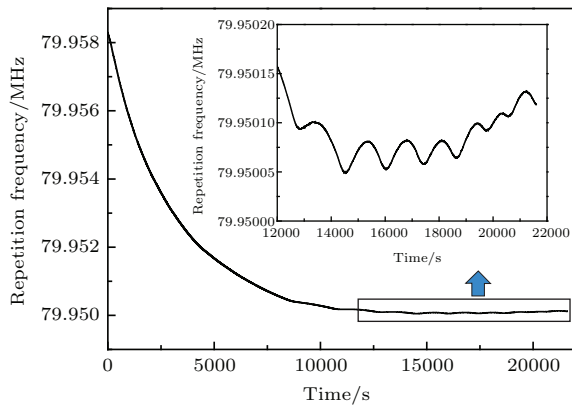


图 3 连续 6 h 测量飞秒激光器开机后的重复频率变化
Fig. 3. Variation of repetition frequency in 6 h after the femtosecond laser switched on.

由测量原理可知, 当被测 THz 源的频率不变时, 重复频率 f_r 的改变会导致拍频信号 f_b 也随之变化. 图 4(a) 和图 4(b) 为同时连续 40 min 测量 f_r 和 f_b 的两组结果. 当 $f_{\text{THz}} > m \cdot f_r$ 时, 拍频频率与重复频率变化趋势相反, 如图 4(a) 所示, 而当测 $f_{\text{THz}} < m \cdot f_r$ 时, 拍频频率与重复频率变化趋势相同, 如图 4(b) 所示, 分别对应图 1 中的两种情况.

根据测量得到的重复频率和拍频频率数据, 采用如下算法计算出 m 值:

$$m = \text{int} \left(\frac{1}{N - M} \sum_{n=1}^{N-M} \left| \frac{f_b(n + M) - f_b(n)}{f_r(n + M) - f_r(n)} \right| \right), \quad (3)$$

式中 N 为数据总数, M 为选取的数据间隔. 计算中发现当 M 值较小时, 计算出的 m 值误差较大, 当 $M > 20$ 时, 可以得到十分准确的 m 值.

被测 THz 源的频率值根据下式进行计算:

$$f_{\text{THz}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m \cdot f_r(n) \pm f_b(n). \quad (4)$$

两次测量中, THz 频率的设定值分别为 91546980000 Hz 和 92741460000 Hz, 根据 (4) 式计算出的结果分别为 91546979971 Hz 和 92741459985 Hz, 测量误差分别 29 Hz 和 15 Hz, 相对误差分别为 3.2×10^{-10} 和 1.6×10^{-10} .

由测量原理可知, m 的准确性会对 THz 频率测量结果的准确性产生很大影响, 当 m 与真值相差 1 时, THz 频率测量结果就会产生一倍 f_r 的测量误差. 测量过程重复频率处于自由漂移状态, 因此每个数据点的测量精度有限, 计算得到的 m 值也会误差较大. 上面的计算方法实际上是对重复频率与拍频频率进行了多组测量, 每组测量数据都可以得到一个误差较大的 m 值, 通过对多组测量数据计算结果的平均就可以得到十分准确的 m 值. 另外, 由 (2) 式可知, THz 频率的测量误差还来源于重复频率和拍频频率的测量误差, 其中重复频率的测量误差乘以 m 值后将被放大很多倍. 同样通过对多组测量数据计算结果的平均使得 THz 频率的测量误差大大降低, 因此增加测量时间增大数据量可以提高测量精度.

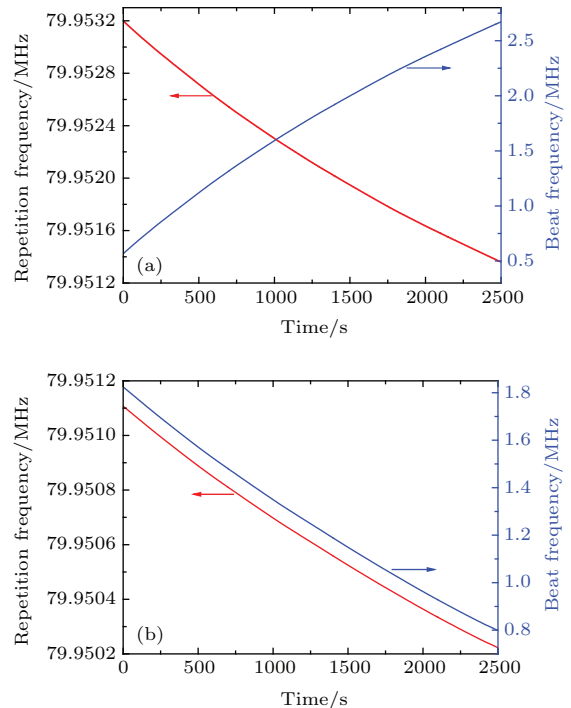


图 4 重复频率和拍频信号同时连续测量结果 (a) 变化趋势相反; (b) 变化趋势相同

Fig. 4. Results of continuous measurement of repetition frequency and beat frequency signal in the same period: (a) Opposite variation trend; (b) same variation trend.

上面两次测量过程中重复频率的变化速度不同, 在相同时间内分别改变了1.8 kHz和0.9 kHz, 这也导致了THz频率测量精度的不同. 为了确定重复频率变化速度对测量精度的影响, 在激光器开机后进行了连续多次测量, 测量时间均为10 min, 在此过程中重复频率持续降低, 且降低速度逐渐变慢. 根据(3)和(4)式分别计算出被测THz频率值并与设定值进行比较, 得到THz频率测量误差与重复频率变化量的对应关系, 如图5所示. 从图中可见, 随着重复频率变化速度逐渐减慢, 测量误差逐渐减小, 10 min内重复频率变化量为933 Hz时, 测量误差为210 Hz, 相对误差为 2.3×10^{-9} , 重复频率变化量为120 Hz时, 误差减小为17 Hz, 相对误差为 1.9×10^{-10} , 可见减小重复频率变化速度可以提高测量精度. 这是由于数据采集过程中无法做到绝对同时测量重复频率与拍频频率, 每组测量数据并非严格意义上的对应关系, 当重复频率变化较快时, 拍频频率变化也更快, 因此计算得到的THz频率存在更大的误差.

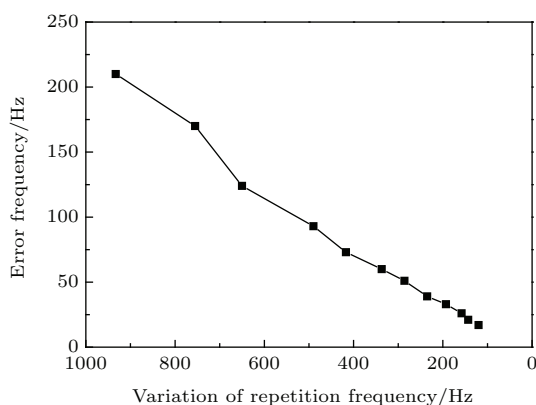


图5 THz频率测量误差与重复频率变化量的对应关系
Fig. 5. Relationship between measurement error of THz frequency and the variation of repetition frequency.

相比文献[6—9]报道的结果, 采用本文的方法测量精度虽然从 10^{-11} 量级下降为 10^{-10} 量级, 但测量系统大大简化, 无需对激光器重复频率进行复杂的锁定控制, 只需要两个频率计数器对重复频率和拍频频率进行同时采集. 当测量精度要求较低时, 只需要测量很短的时间, 而当测量精度要求较高时, 可通过增加测量时间或者选择重复频率变化较慢时进行测量. 事实上还可以通过简单的温控装

置实现对激光器重复频率的变化速度的控制.

4 结 论

传统的F-P干涉法与外差探测法难以实现THz频率的高精度测量, 频率梳方法虽然测量精度很高, 但测量系统复杂. 通过对重复频率非锁定的飞秒激光器的重复频率和THz拍频信号进行同时连续采集, 实现了被测THz频率的高精度测量. 通过减小重复频率速度或增加测量时间可提高测量精度, 测量精度可以达到 10^{-10} 量级. 相比于锁定激光器重复频率的方法测量精度虽然有所下降, 但系统大大简化, 无需特殊设计的飞秒激光器与复杂的重复频率控制装置, 同时这样的测量精度仍足以满足在THz光源研制、宽带无线通信、超精细光谱测量等领域对THz频率的高精度测量需求. 因此, 该方法将极大地扩展采用频率梳方法进行THz频率测量的适用范围.

参考文献

- [1] Tonouchi M 2007 *Nature Photon.* **1** 97
- [2] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nature Mater.* **1** 26
- [3] Pickwell E, Wallace V P 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** R301
- [4] Udem Th, Holzwarth R, Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [5] Yokoyama S, Nakamura R, Nose M, Araki T, Yasui T 2008 *Opt. Express* **16** 13052
- [6] Yasui T, Nakamura R, Kawamoto K, et al. 2009 *Opt. Express* **17** 17034
- [7] Yasui T, Yokoyama S, Inaba H, et al. 2011 *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **17** 191
- [8] Ito H, Nagano S, Kumagai M, et al. 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 102202
- [9] Yee D S, Jang Y D, Kim Y C, Seo D C 2010 *Opt. Lett.* **35** 2532
- [10] Sun Q, Yang Y, Meng F, Deng Y Q 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 0412002 (in Chinese) [孙青, 杨奕, 孟飞, 邓玉强 2016 光学学报 **36** 0412002]
- [11] Meng F, Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Cao J P, Li T C, Fang Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100601 (in Chinese) [孟飞, 曹士英, 蔡岳, 王贵重, 曹建平, 李天初, 方占军 2011 物理学报 **60** 100601]
- [12] Fuser H, Judaschke R, Bieler M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 121111

High-precision measurement of terahertz frequency using an unstabilized femtosecond laser*

Sun Qing^{1)†} Yang Yi² Deng Yu-Qiang¹ Meng Fei³ Zhao Kun²

1) (Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

2) (Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

3) (Division of Time and Frequency, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

(Received 18 March 2016; revised manuscript received 18 May 2016)

Abstract

Frequency is one of the most important physical quantities of electromagnetic (EM) waves. With the development of terahertz (THz) technology, high-precision measurement of THz frequency is required in THz laser development, wireless communication and ultra fine spectrum measurement. The traditional Fabry-Perot (F-P) interferometry and heterodyne detection method are both difficult to achieve high-precision measurement of THz frequency. Within the range of light wave band, the femtosecond optical frequency comb has long been applied to the light wave frequency measurement due to its extremely high accuracy and stability. By using frequency comb method, measurement with accuracy in the order of 10^{-11} can also be achieved in THz band. To generate THz frequency combs with stable and controllable frequency, it is required to conduct precise stabilization control on repetition frequency of the femtosecond laser. As a result, some special designs are needed for the femtosecond laser in addition to repetition frequency control devices, including the reference signal source, servo-control module, HV drive module, temperature control module, etc., resulting in a rather complicated system. In this paper, a new method for THz frequency measurement by using an unstabilized femtosecond laser is introduced. The laser is free running and the repetition frequency continuously reduces approximately 8 kHz in 6 h, which is the result of a lengthened laser cavity due to the thermal expansion caused by temperature rise after the laser has been switched on. The repetition frequency and beat signal frequency are simultaneously and continuously measured by two frequency counters. The THz frequency can be calculated from the data with accuracy in the order of 10^{-10} . Although the measurement precision is reduced by one order compared with that obtained by using stabilized femtosecond laser, the system is greatly simplified. The femtosecond laser and complicated repetition frequency control devices no longer need to be specifically designed. This new method will greatly expand the applicable scope of the frequency comb method in measuring THz frequency.

Keywords: terahertz, frequency comb, frequency metrology, repetition rate

PACS: 06.20.-f, 06.30.Ft, 95.55.Sh, 87.50.U-

DOI: 10.7498/aps.65.150601

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFF0200306), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61205099, 11274282), the Projects of National Institute of Metrology, China (Grant No. AKY1404), the Project of Shanghai Science and Technology Committee, China (Grant No. 15DZ0500100), and the Special Foundation of ACSIQ for Public Sectors, China (Grant No. 201410025).

† Corresponding author. E-mail: sunqing@nim.ac.cn