

# 基于频率梳的太赫兹频率精密测量方法研究

孙青<sup>1</sup> 杨奕<sup>2</sup> 孟飞<sup>3</sup> 邓玉强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100029

**摘要** 利用光纤飞秒激光器与光纤耦合型太赫兹光电导天线, 构建了一套全光纤太赫兹频率梳系统。基于锁相技术实现了对频率梳重复频率信号的高稳定度锁定, 在取样时间为 100 s 时锁定精度达到  $3.3 \times 10^{-13}$ , 并获得了信噪比优于 50 dB 的太赫兹拍频信号。基于频率梳测试方法实现了太赫兹频率的高精度测量, 测量不确定度为  $5 \times 10^{-11}$ 。

**关键词** 测量; 太赫兹; 频率梳; 频率计量; 锁相技术

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0412002

## High-Precision Measurement of Terahertz Frequency Based on Frequency Comb

Sun Qing<sup>1</sup> Yang Yi<sup>2</sup> Meng Fei<sup>3</sup> Deng Yuqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

<sup>3</sup>Division of Time and Frequency, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**Abstract** A terahertz frequency comb system is built by using a commercial femtosecond fiber laser and a fiber coupled terahertz photoconductive antenna. The repetition rate frequency of the comb is highly stabilized based on phase-locked technique and the tracking stability is  $3.3 \times 10^{-13}$  at sampling time of 100 s. The beat signal between terahertz test source and terahertz frequency comb is achieved with the signal to noise ratio being superior to 50 dB. The absolute frequency of terahertz test source is measured based on the frequency comb method with measuring uncertainty of  $5 \times 10^{-11}$ .

**Key words** measurement; terahertz; frequency comb; frequency metrology; phase-locked technology

**OCIS codes** 040.2235; 120.4800; 140.4050

## 1 引言

太赫兹(THz)是指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 在电磁波谱中位于微波和红外之间。由于 THz 处在特殊电磁波段位置, 因而它具有许多独特而优越的特性, 在应用方面与其他波段的电磁波有非常强的互补特征。随着人们对 THz 辐射光源和探测技术的不断发展和创新, THz 技术的应用领域日益拓宽, 比如在材料测试、安检成像、生物医学、产品质量检查、环境监测、空间通信以及天文学等领域中都将发挥重要作用<sup>[1-3]</sup>。然而, 长期以来对 THz 计量的研究领域一直处于空白。随着 THz 技术的发展和广泛应用, THz 的计量需求日益增加, 因此建立 THz 参数的计量标准迫在眉睫。

频率是电磁波最重要的一个基本物理量, 研究 THz 频率的精确测量方法并建立 THz 的频率计量标准, 对

收稿日期: 2015-09-16; 网络出版日期: 2015-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(61205099, 11274282)、中国计量科学研究院基本科研业务费项目(AKY1160, AKY1404)、上海市科学技术委员会项目(15DZ0500100)

作者简介: 孙青(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事太赫兹时域谱技术、太赫兹功率计量、太赫兹频率计量方面的研究。E-mail: sunqing@nim.ac.cn

于推动 THz 技术的发展、扩展 THz 的应用范围,具有十分重要的意义。由于 THz 频率计量的重要性,国外很多研究机构都已开展这方面的研究工作。2007 年,美国研究人员在 Nature 杂志上报道了采样非同步电光采样技术,实现了对频率为 28 THz 的连续 CO<sub>2</sub> 激光器的频率准确测量<sup>[4]</sup>,但该方法的系统信噪比较低,不适用于功率较低的 THz 辐射源。采用谐波混频方法可以大大扩展频谱分析仪的测量范围,扩频后最大测量频率可达 500 GHz,但仍然远远无法覆盖整个 THz 波段。此外,英国国家物理实验室的研究人员分别采用法布里-珀罗(F-P)标准具法、气体吸收法和单色仪法,对 THz 时域光谱系统进行频率校准<sup>[5-6]</sup>,但都不能实现对 THz 频率的绝对测量,因此人们还在继续探索新的 THz 频率测量方法。

在光波波段,飞秒光学频率梳早已被用于光波频率计量<sup>[7-8]</sup>,是因为其具有非常高的准确性和稳定性。2008 年,日本的研究人员将频率梳的概念推广到 THz 波段<sup>[9]</sup>,通过钛宝石飞秒激光激发电导天线来获得 THz 频率梳,然后将被测的 THz 源与频率梳相互作用,通过测量相互作用产生的拍频信号来得到被测 THz 源的频率,该方法具有很高的准确性和测量精度,展现了其作为 THz 频率计量标准的良好前景。在这之后,日本、德国和韩国的研究人员继续开展了深入的研究<sup>[10-14]</sup>。目前,国内对光学频率梳的研究已经开展较多工作<sup>[15-17]</sup>,然而还未见应用频率梳技术实现对 THz 频率精确测量的相关报道。

本文采用光纤飞秒激光器与光纤耦合型 THz 光电导天线方便地产生了稳定的 THz 频率梳。通过对 THz 拍频信号进行滤波和两级放大,从而获得了高信噪比的拍频信号和准确计数,实现了 THz 频率的高精度和高准确度测量,并且对 THz 频率测量不确定度进行了分析评估。

## 2 原理与装置

图 1 为 THz 频率梳原理图,飞秒激光实际上是频率为  $f_{n,opt} = n \cdot f_r + f_0$  的频率序列,其中  $f_r$  为脉冲重复频率,  $f_0$  为载波包络相位偏移,只有将  $f_r$  和  $f_0$  同时锁定才可称为飞秒光学频率梳。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  $f_{m,THz} = m \cdot f_r, (m = 0, 1, 2, \dots)$ 。可见获得 THz 频率梳比获得光学频率梳要简单一些,只需要将重复频率  $f_r$  锁定,而不需要控制  $f_0$ 。

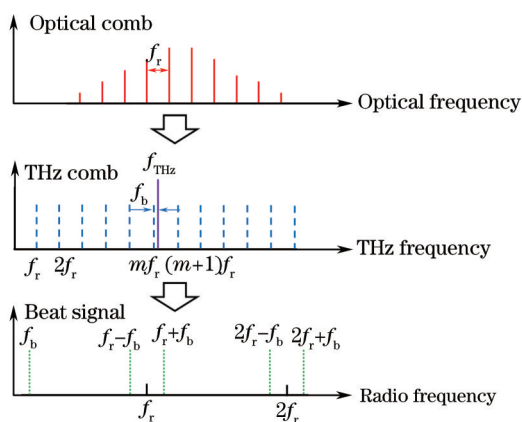


图 1 THz 频率梳原理图

Fig.1 Principle of terahertz frequency comb

图 2 为 THz 频率测量原理图,被测 THz 源的频率可表示为  $f_{THz} = m \cdot f_r \pm f_b$ ,式中  $f_r$  和  $f_b$  均可通过测量仪器直接测量,只有  $m$  为未知量,为了确定被测 THz 频率必须知道  $m$  的数值。从图 2 中可以看出,通过微调飞秒激光器腔长,将 THz 频率梳的频率间隔  $f_r$  改变为  $f_r + \Delta f_r$ ,那么拍频信号由  $f_b$  改变为  $f_b + \Delta f_b$ ,且  $|\Delta f_b| = |m \cdot \Delta f_r|$ ,因此可以得到:

$$m = \left| \frac{\Delta f_b}{\Delta f_r} \right|, \quad (1)$$

被测 THz 源的频率可表示为

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

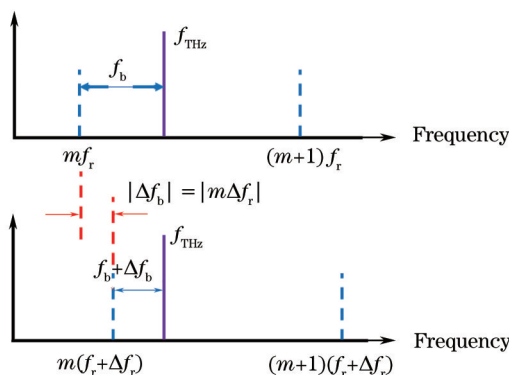


图2 THz频率测量原理图

Fig.2 Principle of terahertz frequency measurement

图3为THz频率测量系统示意图。飞秒激光器采用德国Toptica公司的光纤飞秒激光器,输出中心波长为1550 nm,输出功率大于350 mW,脉冲宽度约为80 fs,脉冲重复频率约为80 MHz。激光器腔内装有压电位移装置和步进电机,用于调节激光器腔长,压电位移器最大位移约为10 μm,对应重复频率调节范围约为400 Hz,步进电机可对重复频率进行大范围地调节。输出的飞秒激光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(PCA,探测范围为0.05~3 THz)连接,激发光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(PD)探测,将获得的电脉冲信号输入频率计数器(53132A,KeysightInc,频率测量上限为225 MHz)来测量飞秒激光器重复频率。

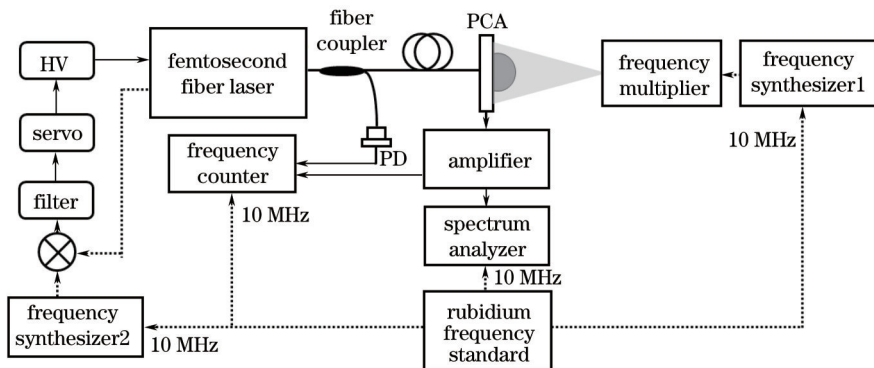


图3 THz频率测量系统示意图

Fig.3 Experimental setup of terahertz frequency measurement system

频率综合器1(E8257D, KeysightInc, 输出频率范围为250 kHz~20 GHz)的输出信号经过倍频模块(E8257DV10, VDIInc),六倍频后产生频率为75~110 GHz的THz信号,最大输出功率为20 mW。THz信号照射到THz光电导天线表面,经硅透镜聚焦后与THz频率梳相互作用。由于THz光电导天线测量到的拍频信号是电流信号,因此首先选用电流放大器(HCA-200M-20K-C, FemtoInc,带宽为200 MHz,最大增益为 $2 \times 10^4$  V/A)进行放大,放大后的拍频信号被转换成电压信号,但信噪比仍不够高,因此为了实现对拍频信号的准确计数,需要采用电压放大器(HVA-200M-60-B, FemtoInc,带宽为200 M,增益为40 dB)对信号进一步放大。为了更加有效地放大拍频信号,放大前对信号进行了低通滤波处理以滤除无关信号,放大后的拍频信号输入频谱分析仪(N9010A-503, AgilentInc,测量范围9 kHz~3.6 GHz)或频率计数器进行测量。

测量系统中的频谱仪、频率综合器与频率计数器均参考铷原子频率标准(FS725, SRSInc,输出频率为10 MHz,秒稳定性优于 $2 \times 10^{-11}$ ,频率准确度优于 $5 \times 10^{-11}$ ),以保证测量结果的准确性。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 重复频率锁定

由测量原理可知,飞秒激光的重复频率 $f_r$ 的稳定性直接影响对THz频率测量的准确度,因此需要对 $f_r$

进行精确锁定控制。将激光器内置的重复频率输出端口处的输入混频器与参考信号进行鉴相,产生误差信号,再将误差信号通过低通滤波器后输入伺服控制器,伺服控制器的输出信号输入高压驱动器(HV)来驱动激光器腔内的压电位移器伸缩,进而改变激光器腔长,从而实现对  $f_r$  的锁定。

图 4(a)为  $f_r$  锁定 2 h 的计数曲线,在连续采样 2 h 的重复频率平均值  $\bar{f}_r$  为 79.998700 MHz,标准差  $\sigma$  为 0.41 mHz。图 4(b)为  $f_r$  锁定后的相对 Allan 方差曲线,1 s 采样时间处的  $f_r$  频率的相对 Allan 方差为  $5.6 \times 10^{-12}$ ,100 s 采样时间处的相对 Allan 方差为  $3.3 \times 10^{-13}$ 。

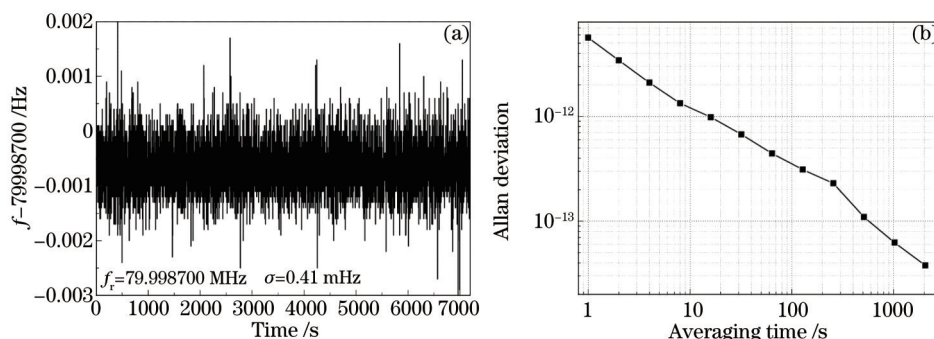


图 4 (a)  $f_r$  锁定 2 h 的计数曲线; (b)  $f_r$  锁定后的相对 Allan 方差曲线

Fig.4 (a) Frequency fluctuation of locked  $f_r$  in 2 hours; (b) Allan deviation of  $f_r$  at different averaging time

### 3.2 太赫兹频率测量

图 5 为响应带宽  $f_{RBW}$  为 360 Hz 下利用频谱仪测量得到线性坐标下的拍频信号  $f_b$  与  $f_r - f_b$ , 信号幅度较大但信噪比较低,在对数坐标下其信噪比仅约为 10 dB。由于对  $f_b$  信号的测量精度直接影响对 THz 频率的测量精度,因此为了准确测量  $f_b$  需要尽可能地提高其信噪比。实验中发现通过调节  $f_r$  使  $f_b$  频率往低频移动,即当被测 THz 源的频率与 THz 频率梳的某一频率梳齿较为靠近时,可以显著增加  $f_b$  的信噪比,因此在测量 THz 频率时将  $f_b$  的频率控制在 1 MHz 附近。在光学频率梳测量激光频率中并不会出现类似的现象,  $f_b$  的信噪比也与其频率并没有直接联系,因此本文实验中观察到的这种现象可能是由于 THz 光电天线的响应带宽限制引起,但该影响因素还需要进一步深入研究并确认。

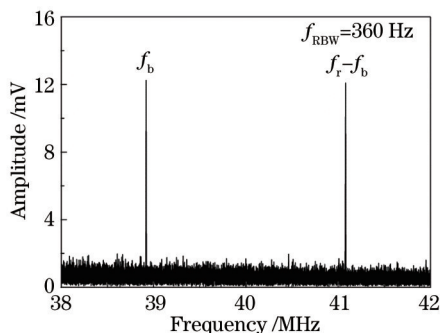


图 5 被测 THz 源与频率梳的拍频信号

Fig.5 Spectrum of beat signal between terahertz test source and terahertz frequency comb

图 6 为改变  $f_r$  前后由频谱仪测量得到的  $f_b$  信号,  $f_b$  的信噪比优于 50 dB。将  $f_b$  信号输入频率计数器,经 30 min 后测量得到的平均值  $\bar{f}_b$  分别为 931500.025 Hz 和 1044000.018 Hz,图 7(a)为  $f_b$  的计数曲线,两次测量对应的  $\bar{f}_r$  分别为 79998700 Hz 和 79998800 Hz。由(1)式可以得到:

$$m = \left| \frac{\Delta f_b}{\Delta f_r} \right| = \left| \frac{1044000.018 - 931500.025}{79998800 - 79998700} \right| = 1124.99993 \approx 1125,$$

又由于  $\frac{\Delta f_b}{\Delta f_r} > 0$ ,因此由(2)式可以得出被测 THz 源的频率值:

$$f_{\text{THz}} = m \cdot f_r - f_b = 1125 \times 79998700 \text{ Hz} - 931599.025 \text{ Hz} = 89997605999.975 \text{ Hz}.$$



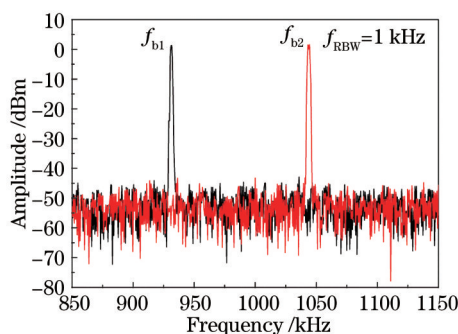


图6 改变  $f_r$  前后两次测量得到拍频信号  $f_b$

Fig.6 Measured beat frequency of  $f_b$  before and after change of  $f_r$

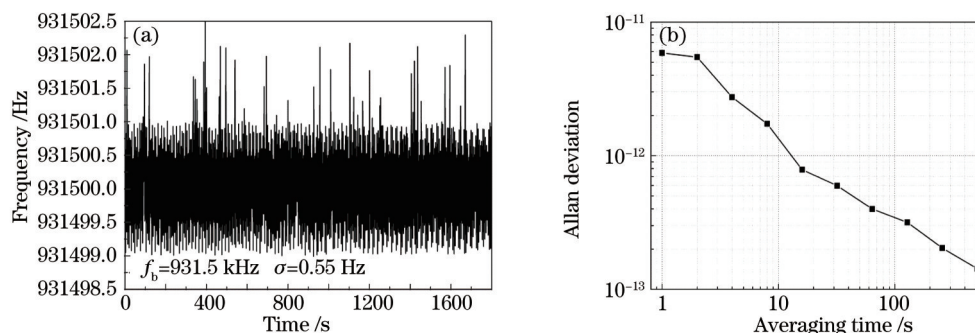


图7 (a)  $f_b$  的在 0.5 h 内的计数曲线; (b)  $f_b$  相对于被测 THz 源的 Allan 不同时刻的方差曲线

Fig.7 (a) Frequency fluctuation of  $f_b$  in half an hour; (b) Allan deviation of  $f_b$  at different averaging time

由(2)式可知, THz 绝对频率测量的不确定度主要来自重复频率  $f_r$  的锁定精度和拍频信号  $f_b$  的测量精度, 在采用时间为 100 s 时,  $f_r$  信号锁定引入的不确定度分量为  $3.3 \times 10^{-13}$ 。图 7(b) 为  $f_b$  相对于被测 THz 源的 Allan 方差曲线, 在 1 s 采样时间处的相对 Allan 方差为  $5.9 \times 10^{-12}$ , 在 100 s 采样时间处的相对 Allan 方差为  $3.4 \times 10^{-13}$ , 因此  $f_b$  引入的不确定度分量为  $3.4 \times 10^{-13}$ , 整个测量系统的合成不确定度为  $4.7 \times 10^{-13}$ 。实验中频率综合器的频率设定值为 14999601000 Hz, 因此经六倍频后得到的 THz 频率应为  $f_{\text{THz}} = 6 \times 14999601000 \text{ Hz} = 89997606000 \text{ Hz}$ , 与测量结果的差值为 0.025 Hz, 相对误差为  $2.8 \times 10^{-13}$ , 位于测量不确定度范围内。

但是, 由于整个系统均参考铷原子频率标准, 其频率会随时间变化产生漂移, 频率准确度为  $5 \times 10^{-11}$ , 因此 THz 频率的实际测量不确定度受限于铷原子频率标准的频率准确度, 也为  $5 \times 10^{-11}$ , 如将铷原子频率标准替换为频率准确度更高的氢钟, 则 THz 频率的测量不确定度可提高至  $10^{-13}$  量级。

## 4 结 论

利用光纤飞秒激光器与光纤耦合型 THz 光电导天线, 构建了一套 THz 频率梳系统, 方便地产生了稳定的 THz 频率梳。基于锁相技术实现了频率梳重复频率信号的高稳定度锁定, 取样时间为 100 s 时锁定精度达到  $3.3 \times 10^{-13}$ 。通过对 THz 拍频信号进行滤波和两级放大获得了高信噪比的拍频信号和准确计数, 能够得到信噪比优于 50 dB 的拍频信号。利用频率梳方法实现了对太赫兹频率的高精度测量, 测量不确定度为  $5 \times 10^{-11}$ 。如果将测量系统中的频谱仪、频率综合器与频率计数器参考稳定度更高的氢钟, 则可进一步提高系统测量不确定度。在该测量系统的基础上可进一步建立我国 THz 的频率计量标准, 对于推动 THz 在宽带通信、天文学以及高精度光谱测量等领域的应用将起到重要作用。

## 参 考 文 献

- 1 M Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- 2 B Ferguson, X C Zhang. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.

- 3 E Pickwell, V P Wallace. Biomedical applications of terahertz technology[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2006, 39(17): R301.
- 4 P Gaal, M B Raschek, K Reimann, *et al.*. Measuring optical frequencies in the 0–40 THz range with non-synchronized electro-optic sampling[J]. *Nature*, 2007, 1(10): 577–580.
- 5 M Naftaly, R A Dudley, J R Fletcher, *et al.*. Frequency calibration of terahertz time-domain spectrometers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(7): 1357–1362.
- 6 M Naftaly, R A Dudley, J R Fletcher, *et al.*. An etalon-based method for frequency calibration of terahertz time-domain spectrometers (THz TDS)[J]. *Opt Commum*, 2010, 283(9): 1849–1853.
- 7 T Udem, R Holzwarth, T W Hansch. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(14): 233–237.
- 8 Meng Fei, Cao Shiyong, Cai Yue, *et al.*. Study of femtosecond fiber comb and absolute optical frequency measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 100601.  
孟 飞, 曹士英, 蔡 岳, 等. 光纤飞秒光学频率梳的研制及绝对光学频率测量[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 100601.
- 9 S Yokoyama, R Nakamura, M Nose, *et al.*. Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb[J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 13052–13061.
- 10 T Yasui, R Nakamura, K Kawamoto, *et al.*. Real-time monitoring of continuous-wave terahertz radiation using a fiber-based terahertz-comb-referenced spectrum analyzer[J]. *Opt Express*, 2009, 17(19): 17034–17043.
- 11 T Yasui, S Yokoyama, H Inaba, *et al.*. Terahertz frequency metrology based on frequency comb[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 17(1): 191–201.
- 12 H Ito, S Nagano, M Kumagai, *et al.*. Terahertz frequency counter with a fractional frequency uncertainty at the  $10^{-17}$  level[J]. *Appl Phys Express*, 2013, 6(10): 102202.
- 13 H Fuser, R Judaschke, M Bieler. High-precision frequency measurements in the THz spectral region using an unstabilized femtosecond laser[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99(12): 121111.
- 14 D S Yee, Y D Jang, Y C Kim, *et al.*. Terahertz spectrum analyzer based on frequency and power measurement[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(15): 2532–2534.
- 15 Meng Fei, Cao Shiyong, Zhao Guangzhen, *et al.*. Application of an Er-doped fiber comb for Sr lattice clock[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0702012.  
孟 飞, 曹士英, 赵光贞, 等. 掺饵光纤光梳在锶晶格中的应用研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0702012.
- 16 Wang Guochao, Wei Chunhua, Yan Shuhua. Wavelength selection and non-ambiguity range analysis for optical-comb-referenced multi-wavelength absolute distance measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0412002.  
王国超, 魏春华, 颜树华. 光梳多波长绝对测距的波长选择及非模糊度量程分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0412002.
- 17 Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.*. Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0412002.  
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0412002.

栏目编辑: 张 雁