

太赫兹频率测量中高信噪比拍频信号的研究

杨 奕¹, 孙 青², 邓玉强², 冯美琦¹, 赵 昆¹

¹ 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;

² 中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

摘要 采用频率梳方法测量太赫兹频率时,其测量精度取决于重复频率的锁定精度和拍频信号的测量精度。拍频信号频率由频率计数器测量得到,对信号的信噪比(SNR)和信号强度均有要求,且 SNR 越高频率测量精度越高。因此,拍频信号的探测和 SNR 的提高是太赫兹频率测量中最关键的环节。系统地研究了影响拍频信号信噪比的主要因素,包括拍频产生方法、信号放大方案、拍频频率以及被测光源功率对拍频 SNR 的影响。通过全面的系统优化,在实验上获得了 SNR 优于 60 dB 的拍频信号,为太赫兹频率的高精度测量奠定了良好的基础。

关键词 测量; 太赫兹辐射; 拍频信号; 频率梳; 信噪比

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0604006

Study on Beat Signal with High Signal-to-Noise Ratio in Terahertz Frequency Measurement

Yang Yi¹, Sun Qing², Deng Yuqiang², Feng Meiqi¹, Zhao Kun¹

¹ Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

² Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 10029, China

Abstract The measurement accuracy of terahertz frequency by using the frequency comb method depends on the locking accuracy of the repetition rate and the measurement accuracy of the beat signal. The frequency of the beat signal is measured by the frequency counter, so the signal-to-noise ratio (SNR) and the power of the beat signal are required to be high enough. The higher the SNR, the higher the accuracy of the frequency measurement. Therefore, the detection of the beat signal and high SNR are very important in terahertz frequency measurement. The main factors of the SNR of the beat signal are studied systematically, including the generation method of the beat signal, the signal amplification, the beat frequency and the power of the measured terahertz source. Through comprehensive optimization, the beat signal with SNR better than 60 dB is achieved experimentally, which provides a good foundation for the high accuracy measurement of terahertz frequency.

Key words measurement; terahertz radiation; beat signal; frequency comb; signal-to-noise ratio

OCIS codes 120.4800; 040.2235; 350.4800; 140.4050

1 引 言

太赫兹(THz)辐射通常指的是频率在 0.1 THz 到 10 THz(波长在 30 μm 到 3 mm)之间的电磁波,在电磁波谱中位于微波与红外光波之间。THz 在长波段与毫米波相邻,而在短波段与红外光波相邻,由此可见,THz 波在电磁波频谱中占有很特殊的位置。随着 THz 技术的不断发展和进步,THz 技术的应用日益广泛,

收稿日期: 2017-02-24; 收到修改稿日期: 2017-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0200306)、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(AKY1404)、上海市科学技术委员会项目(15DZ0500100)

作者简介: 杨 奕(1992—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹频率测量方面的研究。E-mail: 414781890@qq.com

导师简介: 孙 青(1983—),男,博士,副研究员,主要从事太赫兹时域光谱技术、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(通信联系人)

在人体安检成像、宽带无线通信、生物医学检测、危化品探测以及天文学等领域中都发挥了重要作用^[1-4]。

随着 THz 技术的发展,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。2008 年,日本研究人员利用频率梳测频原理实现了 THz 频率的高精度测量^[5-6],通过飞秒激光激发电导天线产生 THz 频率梳,然后将被测 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得到被测 THz 源的频率,测量精度达到 2.8×10^{-11} 。此后,德国和韩国的研究人员也纷纷开展了基于频率梳原理的 THz 频率测量研究^[7-10]。本实验室也于近期完成了 THz 频率测量系统的构建,并分别利用锁定和非锁定的 THz 频率梳,实现了 THz 频率的精确测量^[11-12]。

在 THz 频率测量中,THz 频率最终由飞秒激光重复频率和拍频信号频率得到,因此 THz 频率的测量精度取决于重复频率的锁定精度和拍频信号的测量精度。其中,重复频率的锁定通过锁相环反馈控制方法实现,技术成熟且锁定精度很高。拍频信号由被测 THz 源与 THz 频率梳相互作用产生,其频率由频率计数器测量得到,频率计数器对输入信号的信噪比和信号强度均有要求,通常情况下信噪比需要达到 30 dB 以上,信号强度需要达到 -10 dBm 以上才能进行准确测量,且信噪比越高频率测量精度越高。因此,拍频信号的探测和信噪比的提高是 THz 频率测量中最关键的环节,高信噪比的拍频信号可以直接提高 THz 频率的测量精度。Yasui 等^[7]采用多种方法产生太赫兹频率梳,获得了信噪比为 29 dB~57 dB 的拍频信号,但并未对影响拍频信号信噪比的其他因素进行研究。

本文系统地研究了影响拍频信号信噪比的主要因素,包括拍频产生方法、信号放大方案、拍频频率以及被测光源功率对拍频信噪比的影响。通过全面的系统优化,在实验上获得了信噪比优于 60 dB 的拍频信号,信噪比水平优于目前报道的最优结果^[6],为 THz 频率的高精度测量奠定了良好的基础。

2 原理与装置

图 1 为 THz 频率测量原理图,飞秒激光脉冲在频域上是 $f_{n_opt} = n \cdot f_r + f_0$ 的一系列频率梳齿, f_r 为脉冲重复频率, f_0 为载波包络位相偏移。光电导天线或非线性光学晶体在飞秒激光的激发下产生宽带 THz 频率梳, f_0 在各频率梳齿的差频过程中相互抵消,因此 THz 频率梳可以表示为 $f_{m_THz} = m \cdot f_r (m = 1, 2, 3, \dots)$ 。被测 THz 源的频率可表示为 $f_{THz} = m \cdot f_r \pm f_b$,其中, f_b 为被测 THz 源与 THz 频率梳相互作用产生的拍频信号。调节飞秒激光器腔长改变 THz 频率梳的频率间隔 f_r ,然后通过拍频信号 f_b 的变化即可确定与被测 THz 源频率最近的频率梳齿为

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

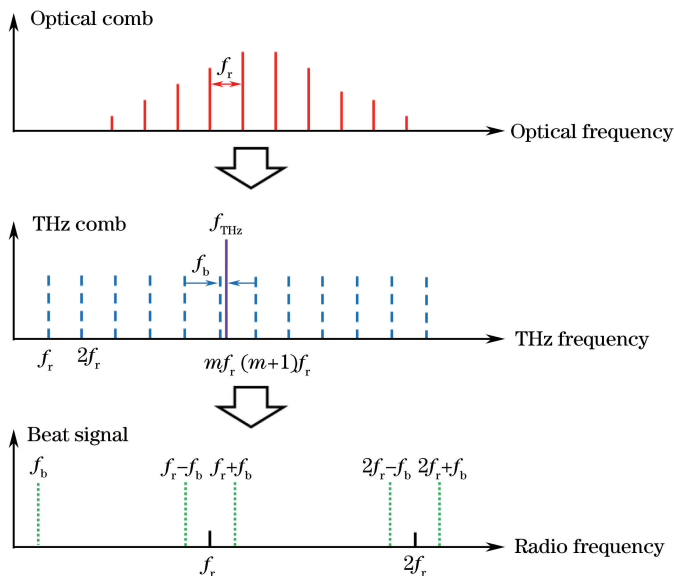


图 1 THz 频率测量原理图

Fig. 1 Principle of terahertz frequency measurement

结合拍频信号频率即可得到被测 THz 源的频率为

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

图 2 为 THz 拍频信号产生方法示意图,分别采用了三种方案实现被测 THz 源与频率梳的相互作用。方案一:采用中心波长为 780 nm 的飞秒激光器激发碲化锌(ZnTe)晶体产生 THz 频率梳,被测 THz 源与频率梳在 ZnTe 晶体中相互作用,然后通过差分探测器探测飞秒激光的偏振变化获得拍频信号。方案二:采用中心波长为 780 nm 的飞秒激光器激发自由空间耦合的光电导天线产生 THz 频率梳,被测 THz 源与频率梳在光电导天线中相互作用,然后探测光电导天线的电流变化获得拍频信号。方案三:采用中心波长为 1550 nm 的飞秒激光器激发光纤耦合型 THz 光电导天线产生 THz 频率梳,被测 THz 源与频率梳在光电导天线中相互作用,然后探测光电导天线的电流变化获得拍频信号。

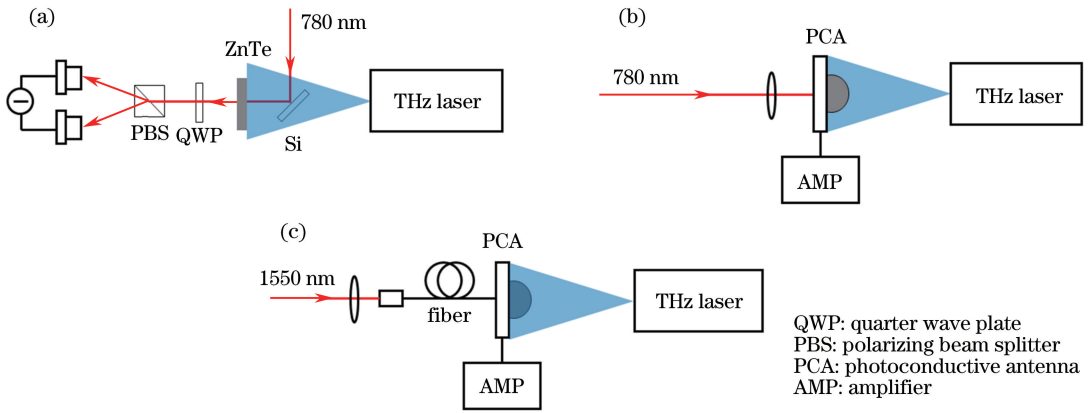


图 2 拍频信号产生方法示意图。(a)方案一;(b)方案二;;(c)方案三

Fig. 2 Schematic of beat signal generation. (a) Scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3

拍频信号经放大后输入测量范围为 9 kHz~3.6 GHz 的频谱仪(N9010A,Keysight 公司,美国),或频率测量上限为 225 MHz 的频率计数器(53132 A ,Keysight 公司,美国)进行测量,频谱仪与频率计数均由输出频率 10 MHz 的铷频率标准(FS725,SRS 公司,美国)同步以保障测量的准确性。实验中采用的被测 THz 源由倍频方法产生,输出频率范围 250 kHz~20 GHz 的频率综合器(E8257D,Keysight 公司,美国)的输出信号经过倍频模块(E8257DV10,VDI 公司,美国)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。

3 结果与讨论

3.1 拍频信号产生方法的影响

由测量原理可知,拍频频率的测量精度直接影响 THz 频率的测量精度。为了实现拍频频率的准确计数,需要获得高信噪比的拍频信号。分别采用了上述三种方案实现被测 THz 源与频率梳的相互作用,并获得了拍频信号。实验中发现方案一获得的拍频信号信噪比最低,难以实现拍频信号的准确计数,且光路调节难度较大。方案二获得的拍频信号信噪虽然较高,但由于光电导天线带隙仅为 10 μm 量级,飞秒激光与 THz 光斑要聚焦到天线带隙上,光路调节难度大且系统不稳定。方案三获得的拍频信号信噪比最高,将飞秒激光耦合进光纤后光路无需调节,系统稳定度高,因此,后续实验中均采用方案三产生 THz 拍频信号。三种方案的优缺点比较如表 1 所示。

表 1 三种拍频信号产生方法优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of three beat signal generation methods

	SNR	Adjustment difficulty	Stability
Scheme 1	Low	Hard	Medium
Scheme 2	High	Hard	Low
Scheme 3	Highest	Easy	High

3.2 拍频信号的放大

图 3 为利用频谱仪测量得到的拍频信号 f_b 与 $f_r - f_b$ 。从图中可以看出,拍频信号幅度较小且信噪比较低,在对数坐标下其信噪比仅约为 15 dB。这并不是拍频信号的真实信噪比,而是由于信号强度太小,因此受限于频谱仪的测量噪声。为了能够采用频率计数器准确测量拍频频率,需要对信号进行放大来提高其强度及信噪比。由于 THz 光电导天线输出的拍频信号为电流信号,因此首先选用带宽为 200 MHz,最大增益为 2×10^4 V/A 的电流放大器(HCA-200M-20K-C,Femto 公司,德国)进行放大。为了更加有效地放大拍频信号,首先对信号进行了低通滤波,滤除了高频噪声。放大后的拍频信号被转换成电压信号,信噪比优于 55 dB,信号强度达到 -42.78 dBm,如图 4(a)所示。为了满足频率计数器的测量要求还需要进一步提高信号强度,采用带宽为 200 MHz,增益为 40dB 的电压放大器(HVA-200M-60-B,Femto 公司,德国)对信号进一步放大。放大后的拍频信号信噪比优于 60 dB,信号强度达到 -1.45 dBm,如图 4(b)所示。信噪比与信号强度均满足频率计数器准确计数条件,且拍频信噪比水平略优于目前报道的最好结果。

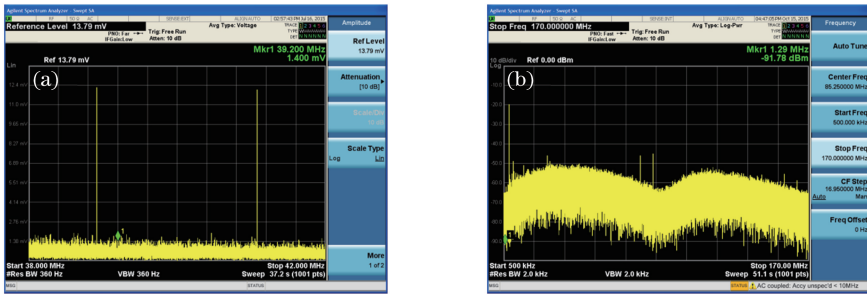


图 3 被测 THz 源与频率梳的拍频信号。(a)线性坐标;(b)对数坐标

Fig. 3 Beat signal between measured THz source and frequency comb. (a) Linear coordinate; (b) logarithmic coordinate

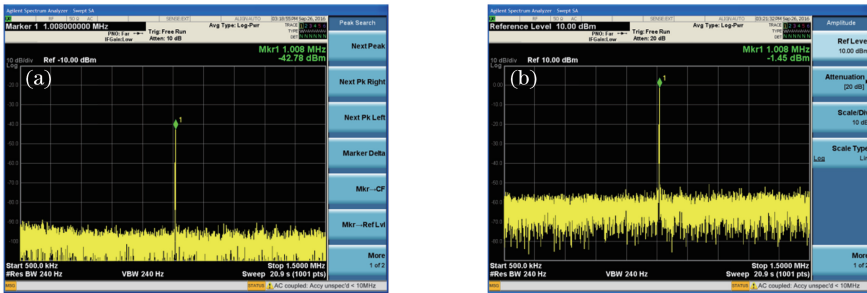


图 4 放大后的拍频信号。(a)经电流放大器后;(b)经电压放大器后

Fig. 4 Amplified beat signal. (a) After current amplifier; (b) after voltage amplifier

3.3 拍频信号频率的影响

实验中改变飞秒激光器重复频率并测量了一系列拍频信号,如图 5 所示。从图中可以看出,当拍频频率较低,即被测 THz 源的频率与 THz 频率梳的某一梳齿较为靠近时,拍频信号强度大幅增加同时噪声明显减

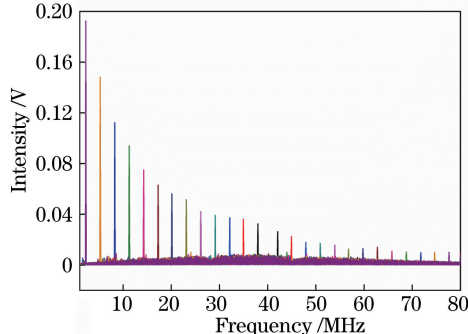


图 5 拍频信号强度随频率变化趋势

Fig. 5 Intensity of beat signal along beat frequency

小。当拍频频率为 2 MHz 时,相比于拍频频率为 38 MHz 时,信号强度增加了约 5 倍,噪声幅度减小了约 10 倍,拍频信号的信噪比得到了显著提高。因此,为了获得高信噪比的拍频信号,在测量 THz 频率时应将拍频信号频率控制在低频范围内。然而,在光学频率梳测量激光频率的研究中并没有报道过类似的现象,拍频信号的信噪比与其频率并没有直接联系。排除了电流放大器与电压放大器的带宽限制影响,可以认为实验中观察到的这种现象是由于 THz 光电导天线的响应带宽限制所造成的。

3.4 被测太赫兹源功率的影响

实验中进一步研究了被测 THz 源功率对拍频信号强度的影响。通过对倍频信号源施加直流电压可以调节其输出功率,在不同输出功率比例下分别测量了拍频信号的强度,得到拍频信号强度及信噪比与被测 THz 源功率对应关系,如图 6 所示。当被测 THz 源输出功率比分别为 100%、94%、87%、77%、65%、50%、33%、18%时,对应的拍频信号强度分别为 17.3 dBm、16.9 dBm、16.4 dBm、15.7 dBm、14.6 dBm、13.1 dBm、10.5 dBm、6.4 dBm。可见,随着 THz 源功率的减小,拍频信号强度与信噪比也随之降低。因此,要想获得高信噪比的拍频信号,应尽量提高被测 THz 源的功率。若以频率计数器要求的最低信噪比 30 dB 为测量下限,则可推算出系统可测量的 THz 源功率下限约为 0.1 mW。

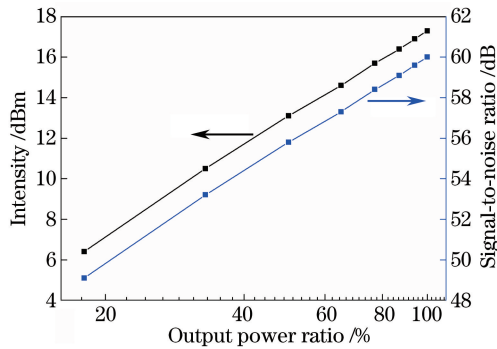


图 6 拍频信号强度及信噪比随被测 THz 源功率变化曲线

Fig. 6 Intensity and signal-to-noise ratio of beat signal versus the power of measured THz source

4 结 论

采用频率梳方法测量 THz 频率时,拍频信号的探测和信噪比的提高是 THz 频率测量中最关键的环节。实验上系统地研究了影响拍频信号信噪比的主要因素,包括拍频产生方法、信号放大方案、拍频频率以及被测光源功率对拍频信噪比的影响。实验中发现,采用光纤耦合型 THz 光电导天线产生 THz 频率梳,获得的拍频信号信噪比最高且系统稳定度最高。通过电流电压两级滤波放大有效提升了拍频信号的信号强度与信噪比,使之能够满足频率计数器的准确计数条件。实验中还发现,要想获得高信噪比的拍频信号,应将拍频频率控制在 5 MHz 以下,另外,应尽量提高被测 THz 源的功率。总之,通过全面的系统优化,在实验上获得了信噪比优于 60 dB 的拍频信号,为 THz 频率的高精度测量奠定了良好的基础,对于 THz 光源研制、宽带无线通信、超精细光谱测量等领域具有重要的促进意义。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] Pickwell E, Wallace V P. Biomedical applications of terahertz technology[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(17): R301-R310.
- [4] Gaal P, Raschek M B, Reimann K, et al. Measuring optical frequencies in the 0-40 THz range with non-synchronized electro-optic sampling[J]. Nature Photonics, 2007, 1(10): 577-580.
- [5] Yokoyama S, Nakamura R, Nose M, et al. Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13052-13061.
- [6] Ihara A, Inaba H, Minoshima K, et al. Real-time monitoring of continuous-wave terahertz radiation using a fiber-based

- terahertz-comb-referenced spectrum analyzer[J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 17034-17043.
- [7] Yasui T, Yokoyama S, Inaba H, *et al.* Terahertz frequency metrology based on frequency comb[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 191-210.
- [8] Ito H, Nagano S, Kumagai M, *et al.* Terahertz frequency counter with a fractional frequency uncertainty at the 10⁻¹⁷ level[J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(6): 102202.
- [9] Fuser H, Judaschke R, Bieler M. High-precision frequency measurements in the THz spectral region using an unstabilized femtosecond laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(12): 121111.
- [10] Yee D S, Jang Y D, Kim Y C, *et al.* Terahertz spectrum analyzer based on frequency and power measurement[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2532-2534.
- [11] Sun Qing, Yang Yi, Deng Yuqiang, *et al.* High-precision measurement of terahertz frequency using an unstabilized femtosecond laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(15): 150601.
孙 青, 杨 奕, 邓玉强, 等. 利用非锁定飞秒激光实现太赫兹频率的精密测量[J]. *物理学报*, 2016, 65(15): 150601.
- [12] Sun Qing, Yang Yi, Meng Fei, *et al.* High-precision measurement of terahertz frequency based on frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412002.
孙 青, 杨 奕, 孟 飞, 等. 基于频率梳的太赫兹频率精密测量方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412002.