

## 利用循环移频环路产生的倍频因子可调谐太赫兹信号

解陶然,王肇颖,袁 泉,蒋振坤,葛春风

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院,天津 300072)

**摘 要:** 太赫兹(THz)波在电磁波频谱中占有很重要的地位,THz 技术是国际科技界公认的一个非常重要的交叉前沿领域。因此,提出了一种以循环移频环路(RFSL)为基础产生 THz 信号的微波光子学系统。输入光信号经由 RFSL 多次移频后在高速光电探测器中拍频产生 THz 信号。在 RFSL 中,基于射频(RF)控制的单边带(SSB)调制器是光信号移频的主要器件,每经过一次 SSB 调制器,光信号将产生一个与 RF 信号频率相等的移频间隔。THz 信号的倍频因子由光在环路中循环的圈数控制。THz 信号的频率随着倍频因子的增加而增加,频率大小为倍频因子与移频间隔的乘积。实验上实现了 THz 信号的倍频因子从 1~25 可调谐,测量了拍频获得的 5~20 GHz 微波信号光谱和电谱,测量了 20 GHz 信号功率以及中心频率的稳定性,并最终实验获得了 0.25 THz 的信号。

**关键词:** 太赫兹信号; 循环移频环路; 单边带调制器; 倍频因子

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S125001

## Generation of THz signal based on recirculating frequency-shifting loop with tunable frequency multiplication factor

Xie Taoran, Wang Zhaoying, Yuan Quan, Jiang Zhenkun, Ge Chunfeng

(College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Terahertz (THz) waves occupy a very important position in the electromagnetic spectrum. THz technology is recognized as a major cross-cutting frontier in the international scientific and technology community. Photonic generation of THz signal using a recirculating frequency-shifting loop (RFSL) was proposed and experimentally demonstrated. The frequency of optical source was shifted by the RFSL and beats with each other in a high-speed photodetector to generate a THz signal. In the RFSL, the single sideband (SSB) modulator driven by a radio frequency (RF) signal was a key component for frequency-shifting. The frequency multiplication factor (FMF) of the THz signal was controlled by the lap number circulating in the loop. The frequency of the THz signal increased with the improvement of FMF and equals to the frequency multiplication factor multiplied by the frequency of RF signal. Experimentally, tunable signals from 5 GHz to 20 GHz were generated and the FMF was successfully tuned from 1 to 25. The stability of the power and center frequency was detected when the frequency of the signal was 20 GHz. 0.25 THz signal was finally generated by this system.

**Key words:** THz signal; recirculating frequency-shifting loop; single-sideband modulator; frequency multiplication factor

收稿日期:2018-12-01; 修订日期:2019-01-14

基金项目:国家自然科学基金(61275084,61377078);天津市自然科学基金(18JCYBJC16800)

作者简介:解陶然(1993-),男,硕士生,主要从事高频微波信号产生方面的研究。Email:xietaoran@tju.edu.cn

导师简介:王肇颖(1977-),女,副教授,硕士生导师,博士,主要从事光纤光子学和微波光子学方面的研究。Email:wangzy@tju.edu.cn

## 0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)是人类在电磁频谱上开发的最后一段电磁频率,并在电磁波谱线中占有很特殊的位置。THz 信号在辐射计、大气遥感、超导探测以及成像系统等领域<sup>[1-6]</sup>都具有不断增长的应用需求。由光泵浦的 THz 激光器得到较为广泛的研究,但由于输出稳定性受工作温度、腔内压强、腔尺寸等因素的影响,需要较为复杂的设计工艺<sup>[7]</sup>。混频器电路作为另外一种有效产生 THz 信号的方法也得到了较为广泛的应用<sup>[8-9]</sup>。由于混频器电路的性能直接影响接收系统的整体性能,对电路结构设计具有较高的要求。

近几年,利用微波光子学技术产生 THz 信号的新方式被广泛研究<sup>[10]</sup>。其主要原理是利用电光调制器将低频射频(RF)信号调制到光信号上,经由调制器的电光效应产生多阶光边带。通过调节电光调制器的调制系数等参数以及利用滤波器滤波等手段,挑选出所需的两个相位相关的光边带送入光电探测器(PD)进行拍频,得到倍频微波信号。其中,光边带之间的阶数差称为倍频因子,微波信号的频率为倍频因子与输入低频射频信号频率的乘积。近年来,国内外大量研究机构以及大学的科研团队利用这种方法获得了高频微波及 THz 信号,并提出多种手段提高倍频因子。H.Zhang<sup>[11]</sup>通过调谐单马赫增德尔调制器(MZM)的调制系数等参数得到了 8 倍频的 0.072 THz 信号。D.Liang<sup>[12]</sup>利用两个级联的双平行马赫增德尔调制器(DPMZM)得到了 24 倍频的 0.12 THz 信号。此外,在运用外调制器的基础上,一些团队通过四波混频(FWM)等非线性效应来产生较大的倍频因子,从而实现 THz 信号产生。W.Li<sup>[13]</sup>利用单 MZM 调制器以及 FWM 效应得到了 12 倍频的 0.132 THz 信号。然而,由于受调制器单次移频调制带宽和系统结构限制,上述方法难以产生倍频因子可调谐的 THz 信号,且对 RF 信号源频率范围要求较高。

为了获得倍频因子可调谐的 THz 信号,降低对于 RF 源频率的需求,文中提出了一个利用循环移频环路(RFSL)产生 THz 信号的系统。在该系统中,初始光信号被送入到 RFSL 中,并以一个固定的移频步长在环路中移频,得到一组频率间隔均等于移频

步长的光信号。当光信号在环路中循环  $n$  圈之后,得到  $n+1$  个光信号。将上述光信号送入 PD 中即可得到  $n$  个微波信号,从而实现倍频因子  $1\sim n$  可调谐。在该系统中,可以通过控制光在环路中的移频圈数来精确控制微波信号的倍频因子。因此,可以通过提高光信号的循环圈数来提高倍频因子,从而使得到微波信号的频率提高到 THz 量级。通过实验实现了 THz 信号的倍频因子  $1\sim 25$  可调谐,同时测量了拍频获得的 5~20 GHz 微波信号的光谱以及电谱,并最终获得了 0.25 THz 的信号。

## 1 系统结构设计及其原理

图 1 所示是文中提出的利用循环移频环路(RFSL)产生倍频因子可调谐的 THz 信号系统。其中,DFB 激光器作为初始光源为系统提供初始光信号,送入到 RFSL 中。在 RFSL 中包含 50:50 的光纤耦合器(OC1)、光隔离器(ISO)、偏振控制器(PC)、单边带(SSB)调制器、掺铒光纤放大器(EDFA)以及可调谐的光带通滤波器(OBPF)。SSB 调制器由频率为  $f_m$  的射频(RF)信号控制。EDFA 用来补偿系统中每一圈内的整体损耗使得每圈输出的光能量保持一致。通过调整可调谐 OBPF 通带带宽,可以控制循环腔允许输出的波长范围,控制输出的光信号个数。环路输出的光信号通过光纤耦合器 OC2 分别送入光谱仪(OSA, Anritsu MS9740A)和光电探测器(PD, ALPHALAS UPD-15-IR2-FC)中。通过光谱仪观测得到光信号个数以及光谱带宽。光信号通过 PD 拍频后由电谱仪(ESA, Agilent N9010A)观测到微波信号。

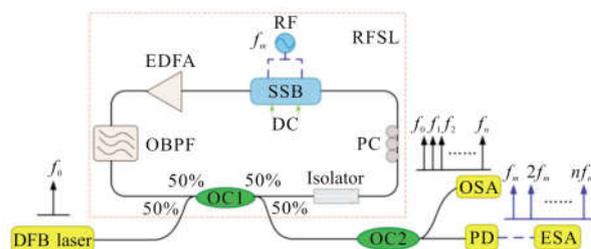


图 1 利用循环移频环路产生倍频因子可调谐的 THz 信号系统

Fig.1 System based on recirculating frequency-shifting loop to generate THz signal with tunable FMF

设定输入光信号的表达式为:

$$E_{in} = E_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中:  $E_0$ ,  $f_0$  和  $\varphi_0$  分别表示光信号的振幅、频率以及初始相位。加载在 SSB 调制器上的 RF 信号设为:

$$V_{RF} = 2V_A \cos(2\pi f_m t) \quad (2)$$

式中:  $2V_A$  和  $f_m$  分别是 RF 信号的电压以及频率。由于实验环路中有 50% 的信号在 OC1 的一个端口作为输出信号输出, 进入环路的光信号为初始信号的一半,  $E_{in}' = 0.5E_{in}$ 。由参考文献[14]的推论可知, 在 SSB 调制器上施加适当的 RF 信号电压以及直流(DC)偏压, 可使得输入光被调制器调制为:

$$E_{out} = E_{in}' \exp(j\Delta\varphi) [J_1(m) \exp(-j2\pi f_m t) - J_3(m) \exp(j6\pi f_m t)] \quad (3)$$

式中:  $\Delta\varphi$  为调制器引入的相位变化;  $m = \pi V_A / V_\pi$  称为调制系数;  $V_\pi$  为调制器的半波电压;  $J_k(m)$  为一阶贝塞尔函数( $k=1, 2, 3, \dots$ )。根据公式(3)可以知每经过一次 SSB 调制器, 调制器将引入一个移频的传递函数  $T$ :

$T = \exp(j\Delta\varphi) [J_1(m) \exp(-j2\pi f_m t) - J_3(m) \exp(j6\pi f_m t)]$  (4)  
式中: 上述传递函数中第一项对应-1 阶边带, 第二项对应+3 阶边带。通过选择适当的调制系数  $m$  可得到  $J_1(m) \gg J_3(m)$ , 此时+3 阶边带可以视作-1 阶边带的噪声, 从而得到的单边带移频传递函数化简为:

$$T = \exp(j\Delta\varphi) [J_1(m) \exp(-j2\pi f_m t)] \quad (5)$$

每次移频后的光在 OBPF 之内即可由循环腔输出, 因此通过调谐 OBPF 的通带带宽, 决定了信号可以调谐光信号在环路中的移频圈数  $n$ , 也就是说, 该系统中利用可调谐 OBPF 控制光信号在环路中的移频圈数。同时, 由于环路中 EDFA 补偿了每圈中的损耗, 当光信号在环路中经过  $n$  圈之后, 得到的  $n+1$  个光信号可以表示为:

$$E_{out-n} = E_{in}' \cdot (1 + T + T^2 + \dots + T^n) = E_{in}' \cdot (1 + \sum_{l=1}^n T^l) = E_{in}' \cdot \{1 + \sum_{l=1}^n [J_1(m) \exp(-j2\pi l f_m t)] \exp(jl\Delta\varphi)\} \quad (6)$$

其中第一根光信号  $E_1 = E_{in}'$  为 OC2 直接输出的初始光信号, 未参与移频过程。将得到的频率间隔相等的  $n+1$  个光信号通入到 PD 中, 由拍频原理可得产生的微波信号的强度为:

$$I \propto \sum_{l=1}^n (n+1-l) A \cos[2\pi l f_m t + l\Delta\varphi] \quad (7)$$

式中:  $A$  为一个常数, 由  $E_{in}$  的振幅以及 PD 的响应度决定。OBPF 通带带宽通过控制移频圈数大小, 精确控制拍频得到的微波信号的倍频因子大小。由公式(7)可知, 经过 PD 拍频之后, 可以得到一组倍频因子为  $1 \sim n$  的微波信号。在公式(7)中, 小于  $n$  倍频的信号由多个信号相互拍频而成,  $n$  倍频信号则是由第  $n$  圈环路中产生的移频信号与初始频率信号拍频得到, 因此只受两根光信号抖动影响, 得到的微波信号受相位噪声和幅度噪声影响相对较小。当得到的倍频因子  $n$  的值足够大时, 即可获得 THz 量级拍频信号。

## 2 实验结果与分析

文中利用基于图 1 的实验装置验证和分析了利用 RFSL 产生倍频因子可调谐的 THz 信号系统。系统的初始光源是一个中心波长为 1 549.15 nm 的 DFB 激光器。首先, 以 5 GHz 以及 10 GHz 的 RF 信号为例, 验证 SSB 调制器对输入光信号的单边带移频效果。将 DFB 输出信号送入 RFSL 中, 并在 SSB 调制器输出端探测一次移频信号, 其移频结果如图 2 所示。在图 2 中, 红色实线是 DFB 直接输出的原

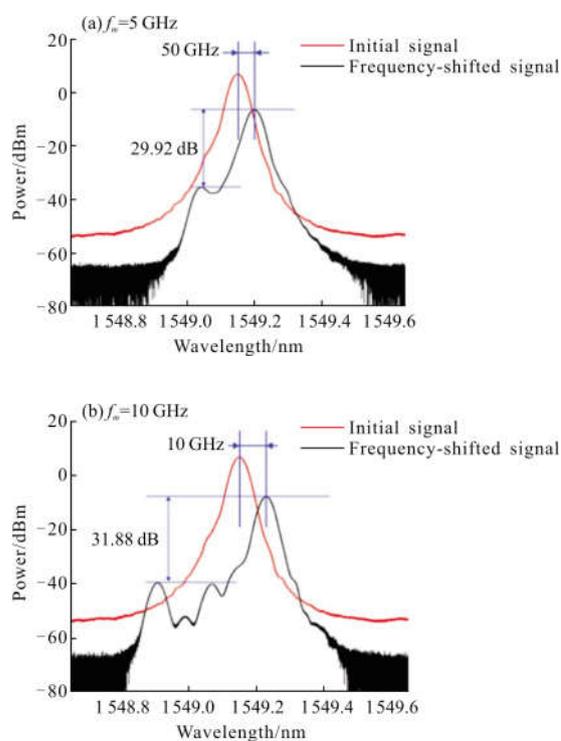


图 2 初始光经 SSB 调制器一次移频后得到的输出光谱

Fig.2 Frequency-shifted signals spectrum by SSB modulator for once shifting

始信号。如图 2(a)所示,当 RF 信号频率为 5 GHz 时,调制后产生了-1 阶边带以及+3 阶边带的移频信号。其中,-1 阶与+3 阶边带之间的边模抑制比(SMSR)为 29.92 dB。因此,可以将+3 阶边带看做是-1 阶边带的噪声。同理,图 2(b)为 RF 信号频率为 10 GHz 时的移频结果,其-1 阶边带与+3 阶边带之间的 SMSR 约为 31.88 dB。同时,对比调制信号和初始信号功率,经过调制器后的移频信号存在 15 dB 左右的调制损耗,因此在环路实验中需要利用 EDFA 补偿损耗。

其次,对倍频因子的可调谐性以及拍频产生 THz 信号的可行性进行了实验与探究。将 RF 信号频率设定为 5 GHz,将 RFSL 输出的信号分别送入 OSA 和 ESA 中观测结果,同时通过调节可调谐 OBPF 控制倍频因子的大小。当控制 BPF 带宽约为 0.08 nm 时,得到了一组两圈移频( $n=2$ )后产生的三个频率分量光信号光谱图,如图 3(a)所示。其中,第一个光信号为初始光信号,其余两个光信号为每圈移频后得到的移频信号。将所得到的三个光信号经由 PD 输入到 ESA 中探测,得到了两个频谱分量,频率分别为

5 GHz 和 10 GHz,如图 3(b)所示。这一实验结果与公式(6)、(7)中给出的推导结果是一致的。调节 OBPF 的带宽,使其扩大至 0.16 nm,得到了一组四圈移频( $n=4$ )后产生的五个频率分量光信号光谱图,如图 4(a)所示。将五个光信号经由 PD 输入到 ESA 中探测,得到了四个频谱分量,频率分别为 5、10、15、20 GHz,如图 4(b)所示。通过公式(6)可知,小于第  $n$  圈的倍频信号是由多个信号相互拍频得到,因此虽然拍频信号功率有所提高,但信号质量会下降。这一点通过对比图 3(b)与图 4(b)中的 10 GHz 微波信号就可以看出,图 4(b)中 10 GHz 的微波信号功率明显高于图 3(b)中的 10 GHz 信号功率,但图 4(b)中 10 GHz 微波信号的噪声却明显增大。

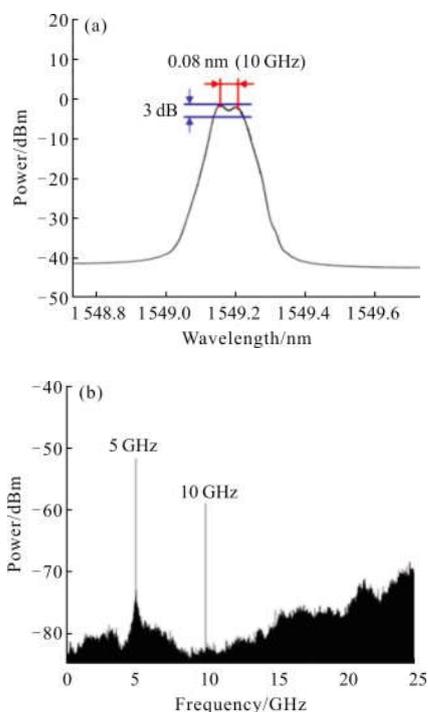


图 3 RF 信号频率为 5 GHz、移频圈数  $n=2$  时(a)光信号的光谱图和(b)拍频微波信号的电谱图

Fig.3 (a) Optical signals in spectral domain and (b) microwave signals in electric spectrum when  $f_m=5$  GHz and  $n=2$

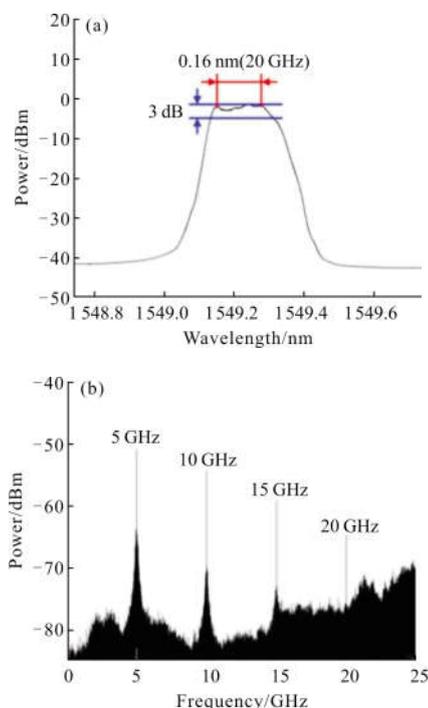


图 4 RF 信号频率为 5 GHz、移频圈数  $n=4$  时(a)光信号的光谱图和(b)拍频微波信号的电谱图

Fig.4 (a) Optical signals in spectral domain and (b) microwave signals in electric spectrum when  $f_m=5$  GHz and  $n=4$

在上述实验的基础上,以图 4(b)中 20 GHz 的微波信号为例,测量其中心频率,如图 5 所示。每隔 10 min 用 ESA 记录一次 20 GHz 信号谱线,共测量了 20 组数值,来衡量信号的中心频率以及功率稳定性。20 组拍频微波信号中心频率和功率的时间稳定性如图 6(a)和图 6(b)所示。如图 6 所示,中心频率的平均值与标准差分别为 19 999 999 989 Hz 以及

160.443 34 Hz，功率的平均值与标准差分别为 -64.722 38 dBm 和 0.099 59 dBm。

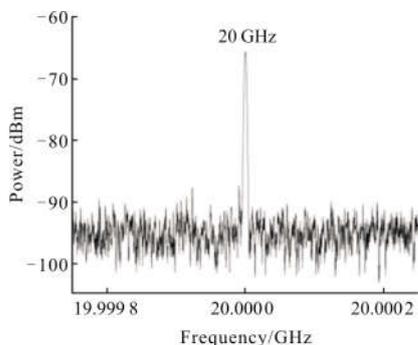


图 5 20 GHz 微波信号电谱图

Fig.5 20 GHz microwave signal in electric spectrum

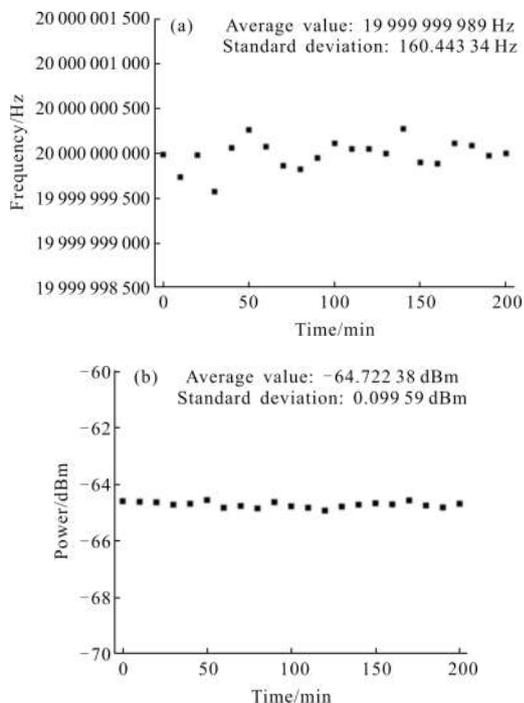


图 6 20 GHz 微波信号(a)中心频率以及(b)功率与时间的散点图

Fig.6 Scatter diagram of 20 GHz microwave signal (a) center frequency and (b) power versus time

上述实验说明，通过调整 OBPF 的带宽可以控制光循环移频的圈数，从而调谐拍频得到的微波信号的倍频因子。为了得到 THz 量级的微波信号，将 RF 信号的频率设定为 10 GHz，并扩大 OBPF 的通带带宽至 2 nm。由于实验室 PD 的响应带宽有限 (1~26 GHz)，无法响应 THz 拍频信号。因此，通过 OSA 探测得到的光信号如图 7 所示，其移频圈数  $n$

为 25 圈，得到的第 25 圈信号与初始信号之间的移频差为 0.25 THz。由于实验中所用的 EDFA 在高增益区间的谱线不平坦，为了实现输出较为平坦的移频信号，实验中选用了 EDFA 增益谱线较为平坦但增益较低的一段谱线(只有 23 dB 增益)。因此，为了匹配 EDFA 的增益，初始信号的功率也不能过大。由前文所述实验可知，光信号拍频产生的信号的频率与两个光信号的移频差相等。因此，文中得到的最大 THz 信号为 0.25 THz。而且，经由前文实验可以证明，通过调整 OBPF 带宽得到不同的倍频因子，信号可以由 0.1~0.25 THz 灵活调谐，充分体现了该系统的灵活可调谐性。该系统的 RFSL 一圈长约为 40 m，光子在环路内循环一圈的时间约为 200 ns。

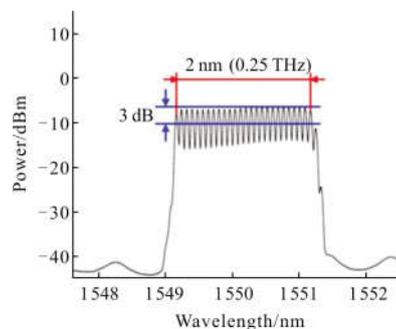


图 7 RF 信号频率为 10 GHz，移频圈数  $n=25$  时的光谱图

Fig.7 Optical signals in spectral domain when  $f_m=10$  GHz and  $n=25$

为了验证经过 25 圈移频之后得到的光信号没有超出初始光信号的线宽范围，仍可以达到拍频效果，做了以下的验证实验。用一个 1 km 的单模光纤模拟 25 圈的移频腔长，将 10 GHz 的移频信号通过 1 km 光纤后与初始信号拍频得到一个 10 GHz 的微波信号，如图 8 所示。由此可以验证，在经历 25 圈移频之后的

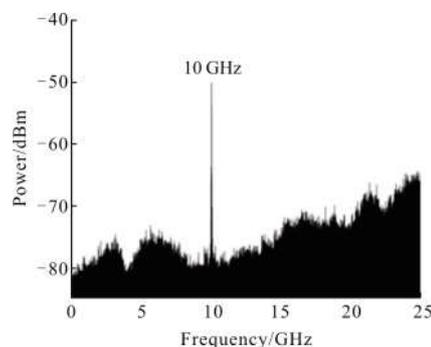


图 8 10 GHz 移频信号经由 1 km 单模光纤后与初始信号的拍频结果  
Fig.8 Beat signal generated by initial signal and 10 GHz frequency-shifted signal after 1 km single mode fiber

光信号没有超出初始光信号的线宽,因此第 25 圈光信号可以与初始信号拍频获得 0.25 THz 的信号。

### 3 结论

文中提出的系统利用微波光子学技术,克服传统调制器方法对于倍频因子调谐性的限制,提出了利用循环移频环路产生倍频因子可调谐的 THz 信号。相较于传统调制器的方法,文中利用循环移频环路对光信号进行多次移频,减小了对调制器调制深度的要求,大幅度提升了倍频因子的调谐范围。所得到的倍频因子实现了 1~25 倍可调谐。通过实验对拍频产生微波信号进行了验证和测试,得到了 5~20 GHz 调谐范围信号的光谱图和电谱图,并对 20 GHz 微波信号中心频率和功率的时间稳定性进行了测量分析。同时,将微波信号提升至 THz 量级并最终得到了 0.25 THz 的信号。由于实验中应用的 EDFA 增益谱平坦部分的增益较低,为了保证环路输出信号的平坦度,只能选用功率较低的输出信号,得到的 THz 信号功率也相对较低。因此在后续的优化实验中,将选用平坦高功率增益的 EDFA 并提高 DFB 的输出功率,实现较高功率的 THz 信号输出。

### 参考文献:

- [1] Lee Y S. Principles of Terahertz Science and Technology [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [2] Xia Zuxue, Liu Falin, Deng Hu, et al. Frequency adjustable THz microstructured photoconductive antennas [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0520002. (in Chinese)  
夏祖学, 刘发林, 邓璇, 等. 频率可调太赫兹微结构光电导天线[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 0520002.
- [3] Li Jing, Zhang Wen, Miao Wei, et al. Development of ultra high sensitivity superconducting THz detectors [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 122–130. (in Chinese)  
李婧, 张文, 缪巍, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测技术发展 [J]. 中国光学, 2017, 10(1): 122–130.
- [4] Hu Weidong, Ji Jinjia, Liu Ruiting, et al. Terahertz atmosphere remote sensing [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 656–665. (in Chinese)  
胡伟东, 季金佳, 刘瑞婷, 等. 太赫兹大气遥感技术 [J]. 中国光学, 2017, 10(5): 656–665.
- [5] Guo Lihan, Wang Xinke, Zhang Yan. Terahertz digital holographic imaging of biological tissues [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 611–615. (in Chinese)  
郭力茜, 王新柯, 张岩. 生物组织的太赫兹数字全息成像 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 611–615.
- [6] Ren Jiaojiao, Li Lijuan, Zhang Dandan, et al. Terahertz time domain spectral reflective tomography technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0225002. (in Chinese)  
任姣姣, 李丽娟, 张丹丹, 等. 太赫兹时域光谱反射式层析成像技术 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0225002.
- [7] Li Ting, Guo Xiaoyang, Meng Qinglong, et al. Analysis of impact factors of output characteristics for optically pumped THz lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 1980–1985. (in Chinese)  
李婷, 郭晓阳, 孟庆龙, 等. 光泵 THz 激光器输出特性的影响因素分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 1980–1985.
- [8] Yang Dabao, Wang Junlong, Zhang Lisen, et al. Development of 0.1 THz finline fundamental single-balanced mixer circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0420004. (in Chinese)  
杨大宝, 王俊龙, 张立森, 等. 0.1 THz 鳍线单平衡式基波混频电路研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0420004.
- [9] Wang Junlong, Yang Dabao, Xing Dong, et al. Research of 0.22 THz wide-hand mixing circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1125003. (in Chinese)  
王俊龙, 杨大宝, 邢东, 等. 0.22 THz 宽带混频电路研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1125003.
- [10] Yao J. Microwave photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314–335.
- [11] Zhang H, Cai L, Xie S, et al. A novel radio-over-fiber system based on carrier suppressed frequency eightfold millimeter wave generation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 2731620.
- [12] Liang Dong, Tan Qinggui, Jiang Wei, et al. Efficient THz generation via optical frequency 24-tupling without optical filter [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015.
- [13] Li W, Yao J. Microwave and terahertz generation based on photonically assisted microwave frequency twelvvetupling with large tunability [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(6): 954–959.
- [14] Takesue H, Horiguchi T, Kobayashi T. Numerical simulation of a lightwave synthesized frequency sweeper incorporating an optical SSB modulator composed of four optical phase modulators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(11): 1908–1917.