

## 激光与光电子学进展

## 基于微波锁模的超低噪声微波频率梳的产生

毛新丹, 于晋龙\*, 王菊, 马闯

天津大学电气自动化与信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072

**摘要** 提出了一种利用微波主动锁模的光电振荡器产生微波频率梳的方案, 该方案采用传统的光电振荡器(OEO)作为振荡器, 利用混频器从外部加入微波调制信号, 形成对光电振荡器振荡模式的模式锁定, 从而实现微波主动锁模, 此时振荡器就产生了一系列频率间隔相等的频率梳。在腔长为 1 km 时, 实验得到了频率间隔为 201.2 kHz 的微波频率梳信号, 其一阶边带相位噪声小于  $-97.2$  dBc/Hz@1 kHz 和  $-116.721$  dBc/Hz@10 kHz, 单个频率的线宽约为 10 Hz。与传统的微波频率梳产生方式相比, 该方案的相位噪声指标有很大提高, 并且通过改变 OEO 腔长以及调制信号频率, 实现了高次谐波锁模, 得到了从 100 kHz 到 6 MHz 的不同信号间隔的微波频率梳信号。

**关键词** 激光器; 微波锁模; 光电振荡器; 微波频率梳; 微波光子学

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0514002

## Generation of Ultra-Low Noise Microwave Frequency Comb Based on Microwave Mode-Locking Technology

Mao Xindan, Yu Jinlong\*, Wang Ju, Ma Chuang

*College of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** This paper proposes a microwave mode-locking frequency comb scheme using active mode-locking technology and photoelectric oscillator. The scheme uses traditional optoelectronic oscillators (OEO) as oscillators, and uses a mixer to add microwave modulation signals from outside to form an optoelectronic oscillator. The mode-locking of the oscillator oscillation mode realizes the microwave active mode-locking. At this time, the oscillator generates a series of frequency combs with equal frequency intervals. When the system loop cavity is 1 km long, low-phase-noise microwave comb signals with a frequency interval of 201.2 kHz are obtained through experimental analysis. The first-order carrier phase noise of the microwave comb signal is  $-97.2$  dBc/Hz@1 kHz and  $-116.721$  dBc/Hz@10 kHz, and the line width is approximately 10 Hz. The scheme is considerably improved in the phase-noise index compared to the conventional microwave frequency comb generation method. Furthermore, microwave frequency combs signals with a tunable frequency interval ranging from 100 kHz to 6 MHz can be obtained by changing the cavity length and modulation signal frequency of OEO.

**Key words** lasers; microwave mode locking; photoelectric oscillator; microwave frequency comb; microwave photonics

## 1 引言

微波频率梳(MFC)由一系列频率间隔相等的

离散微波信号构成,可以在一个频率带宽内同时产生多个不同频率的微波信号<sup>[1]</sup>。微波频率梳具有谱线数目多、频率范围宽、谱线间距精密度高等优点,

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-05-05; 录用日期: 2021-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(62005194, 61775162)

通信作者: \*yujinlong@tju.edu.cn

在通信、传感等领域都有重要的应用<sup>[2-3]</sup>。

目前,微波频率梳的主要产生方法有基于电学方式和光电方式两种。其中电学方式产生微波频率梳的方法主要是利用电子器件的非线性效应,如采用阶跃恢复二极管<sup>[4-6]</sup>、变容二极管<sup>[7]</sup>或非线性传输线<sup>[8]</sup>等非线性器件,在低频信号的驱动下产生窄脉冲信号,从而在频域得到微波频率梳。然而,这些非线性元件对偏置电压、温度等外界条件的变化非常敏感,其产生的频率梳在频率稳定性、相位噪声等方面还有待进一步提高。

随着微波光子学的发展,研究人员提出了基于光电方式产生微波频率梳的方法。该方法主要是基于半导体激光器的非线性、基于锁模激光器的模式锁定<sup>[9-10]</sup>以及外调制法<sup>[11-13]</sup>等。2007年,美国加州大学的 Chan 等<sup>[14]</sup>提出了基于谐波频率锁定产生精密微波频率梳的方案,实验中还利用微波频率合成器注入单个功率较小且频谱纯净的外部微波,来减小微波频率梳的线宽,最后得到带宽为 3 GHz、谱线数目为 9 条、梳线线宽小于 1 kHz 的频率梳;2015 年 Zhao 等<sup>[15]</sup>利用非相干光反馈半导体激光器产生了可调谐宽带微波频率梳,该方案是一种全光方案,产生的微波频率梳线宽在十几 kHz 左右;2017 年西南大学 Fan 等<sup>[16]</sup>提出了基于光电注入半导体激光器生成可调谐超宽带微波频率梳的方案,产生 60 GHz 超宽带可调谐微波频率梳,其中一阶单边带噪声低于 -93 dBc/Hz@10 kHz;2018 年,浙江大学麻艳娜等<sup>[17]</sup>提出了基于双环混频光电振荡器的可调谐微波频率梳产生方案,实现了间隔 797.4 MHz 的稳定的微波频率梳信号,一阶载波相位噪声低于 -101.7 dBc/Hz@10 kHz。以上这些技术方案各具优势,但也有明显的不足之处,比如产生的微波频率梳线宽较宽,在 kHz 量级,相位噪声指标也有待提高。

光电振荡器(OEO)是近年来得到快速发展的一种高频谱纯度的新型微波信号发生器,其利用长光纤构成超长距离的光电振荡回路,使得其 Q 值高达  $10^{10}$  量级,从而大大降低了所产生微波信号的相位噪声(可低至 -160 dBc/Hz@10 kHz<sup>[18-19]</sup>)。而在激光领域,锁模技术利用调制技术或者借助饱和吸收体的作用,使谐振腔内各振荡纵模之间建立固定的位相关系,从而产生峰值功率高、脉宽极窄的相干超短脉冲<sup>[20-22]</sup>,表现在频域上即为光学频率梳。这就带来一种可能性,即在光电振荡器内引入锁模

的方法,从而直接在振荡器中产生微波频率梳,其既有 OEO 超低相噪、窄线宽的优点,相对于光学频率梳又有结构简单、低成本的优势。而具体的方法就是在传统的 OEO 中,利用混频器从外部加入微波调制信号,通过此信号对 OEO 可振荡模式进行模式锁定,实现微波主动锁模,在频域上产生一系列频率间隔相等的频率梳。由于 OEO 系统产生的微波信号相位噪声低,线宽可以降低到赫兹量级。而通过调节外调制信号的频率和 OEO 腔长可以实现高次谐波锁模,能够得到更高信号间隔的微波频率梳。

## 2 实验结构与原理

基于微波锁模的超低噪声微波频率梳的方案原理图如图 1 所示,它是一个包含连续光激光器(CWL)、马赫-曾德尔调制器(MZM)、光纤、光电探测器(PD)、微波带通滤波器(BPF),混频器(M)和多个微波放大器(EA)的光电混合的反馈回路。其中混频器的本振频率(LO)输入端口和中频(IF)输出端口分别作为输入输出端口接入 OEO 环路,射频信号(RF)输入端口用于外部调制微波信号  $f_m$  的输入端口,起到微波调制作用。为了保证混频器的正常工作以及 OEO 起振,混频器前后均需加入微波放大器。实验中,当振荡条件满足时,信号在腔内多次反馈产生振荡信号  $f_0$ ,该信号在混频器的 IF 端口调制信号  $f_m$  ( $f_m = n f_b$ ,  $f_b$  为振荡环路的模式间隔,即谐振腔基频,  $n$  为自然数)的调制下,引发谐振腔内其他模式的信号起振,实现对 OEO 的可振荡模式的模式锁定,从而得到频率间隔为  $n f_b$  的锁模脉冲序列。

该实验方案的核心在于微波锁模技术,其原理与主动锁模激光器类似。实验系统搭建的 OEO 环路在波长满足 OEO 腔长的整数倍的情况下均能起振,相邻的可振荡模式间隔  $f_b$  为

$$f_b = \frac{c}{n_0 L}, \quad (1)$$

式中:  $c$  为光速;  $L$  为环形腔的腔长;  $n_0$  为环形腔的折射率。因此可知 OEO 模式间隔与腔长成反比,环路中的长光纤将导致很小的模式间隔,假设在 OEO 工作的增益带宽内包含有  $N$  个纵模,总电场可表示为

$$E(t) = \sum_{q=0}^N E_q \cos(2\pi f_q t + \varphi_q), \quad (2)$$

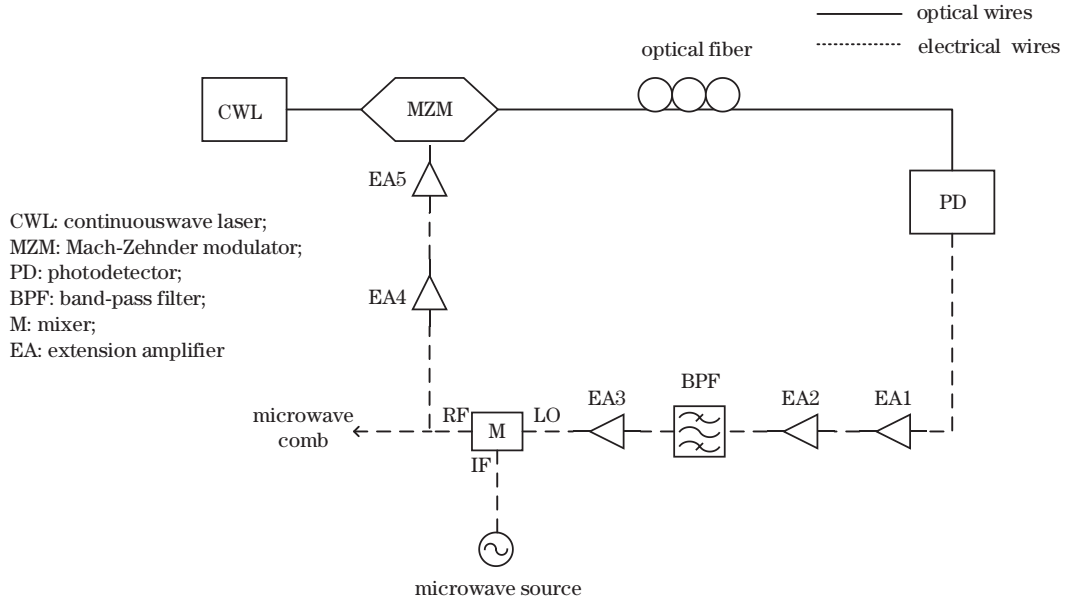


图 1 微波频率梳信号产生原理图

Fig. 1 Schematic of microwave frequency comb signal generation

式中： $q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N$ ，是 OEO 内  $(2N + 1)$  个振荡模中第  $q$  个纵模的序数； $E_q$  是纵模序数为  $q$  的场强； $f_q$  及  $\varphi_q$  是纵模序数为  $q$  的模的频率及相位。当没有通过混频器进行模式锁定时，所有模式都独立运转，其相位间没有确定关系。而在 OEO 自由运转模式下，可振荡模式之间存在模式竞争，最终只有一个模式能够形成稳定振荡，而其余模式在一定程度上受到抑制。但这种优势并不稳定，会出现随机的模式跳变即跳模现象。因此为了产生微波频率梳，需要将其他模式的模激发起来，实现微波锁模。

而在锁模的条件下，各纵模相位同步，任意相邻纵模的相位差固定为一常数值  $\varphi$ ，即  $\varphi_n - \varphi_{n-1} = \varphi$ 。这种相位关系意味  $\varphi_n = n\varphi + \varphi_0$ ；模式频率可写为  $f_n = f_0 + f_b$ 。因此为了实现微波锁模，通过混频器 IF 端口输入外部调制微波信号为

$$b(t) = A_m \sin(2\pi f_m t), \quad (3)$$

式中： $A_m$  和  $f_m$  分别为调制信号的振幅和频率，将混频器放入腔内，腔内的电场受到混频器 IF 端口的调制信号的作用变为

$$E(t) = A_c \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + A_c \cos[2\pi(f_0 + f_m)t + \varphi_0] + A_c \cos[2\pi(f_0 - f_m)t + \varphi_0], \quad (4)$$

式中： $A_c$  为电场的振幅，该式表明中心频率为  $f_0$  的模与外部调制信号进行混频后，除了原有频率为  $f_0$

的振动以外，还在附近激发了两个边频振动，其频率分别为  $(f_0 + f_m)$  和  $(f_0 - f_m)$ ，它们与中心频率为  $f_0$  的模具有相同的初位相，由于调制信号的调制频率  $f_m = nf_b$  ( $n$  倍的频率间隔)，因此经过混频器混频后产生的边频实际上是与  $f_0$  相邻的两个纵模频率，同样地，这两个边频经过与调制信号混频后又进一步产生以它们为中心的另外两对边频，直至将增益带宽内的所有纵模都激发起来，它们具有确定的振幅和与  $f_0$  相同的相位关系，频域上产生一系列频率间隔相等的频率梳，时域上的波形为窄电脉冲<sup>[23]</sup>。而由于外部信号调制频率  $f_m$  是微波信号频率间隔  $f_b$  或者其整数倍  $nf_b$ ， $f_b$  又与 OEO 腔长成反比，因此只要改变 OEO 的腔长以及外部调制信号频率，就可以改变微波频率梳的频率间隔。由于采用 OEO 结构，该方案产生的微波频率梳的相位噪声极低，相位噪声是指系统在各种噪声的作用下引起的系统输出信号相位的随机变化，是衡量微波频率梳频稳质量的重要指标之一，因此在后续实验过程中通过搭建实验系统验证了该方案可行性并对产生的微波频率梳的相位噪声进行了测量。

### 3 分析与讨论

为了验证上述方案的可行性，按照如图 1 所示的结构搭建了实验系统，如图 2 所示。

实验中所使用的激光器的波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ，接



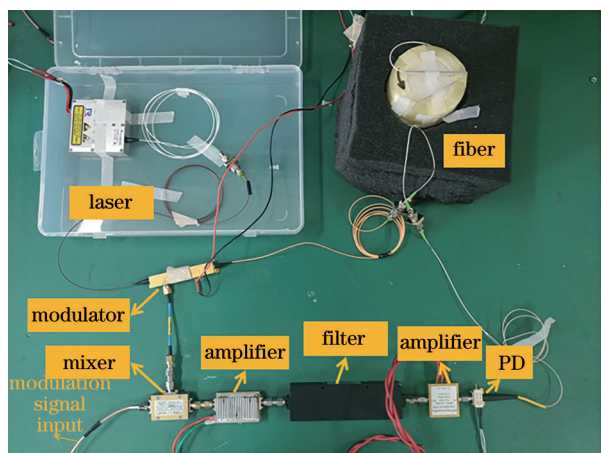


图 2 微波频率梳信号产生系统

Fig. 2 System of microwave frequency comb signal generation  
 入振荡环路的光纤长为 1 km,带通滤波器的中心频率为 9.9 GHz,带宽为 20 MHz,外部调制信号使用任意波形信号发生器(AWG, DG1062,北京普源精电科技有限公司,北京)产生,在输出端通过频谱分析仪(ESA, 8564EC, Aglient, 美国)及采样示波器

(Infiniium DCA86100A, Aglient, 美国)观测信号。在没有加外部调制信号时,环路相当于一个传统的 OEO 结构,激光器输出的 1550 nm 连续光进入 MZM 进行调制,信号在腔内多次反馈并经过 PD 拍频最终形成稳定的输出,OEO 环路输出的微波信号中心频率为 9.9 GHz,包含多个边模,模式间隔约为 200 kHz。

基于主动谐波锁模理论,信号发生器产生的频率应为纵模间隔的整数倍,因此调节信号发生器,使其产生一个频率为 200 kHz(即  $f_b$ )的正弦信号,并通过微调该信号频率,使得调制信号频率与模式间隔严格一致,达到锁模条件。由于实验环境以及理论与实际操作中存在的误差,调制信号频率与模式间隔无法满足精确匹配,但是本实验中产生的信号模式间隔在 kHz~MHz 量级,而使用的信号发生器产生的调制频率在 Hz 量级调节,因此产生的误差可以忽略不计,能达到稳定的锁模状态,输出的信号在频域是一系列频率间隔相等的频率梳,如

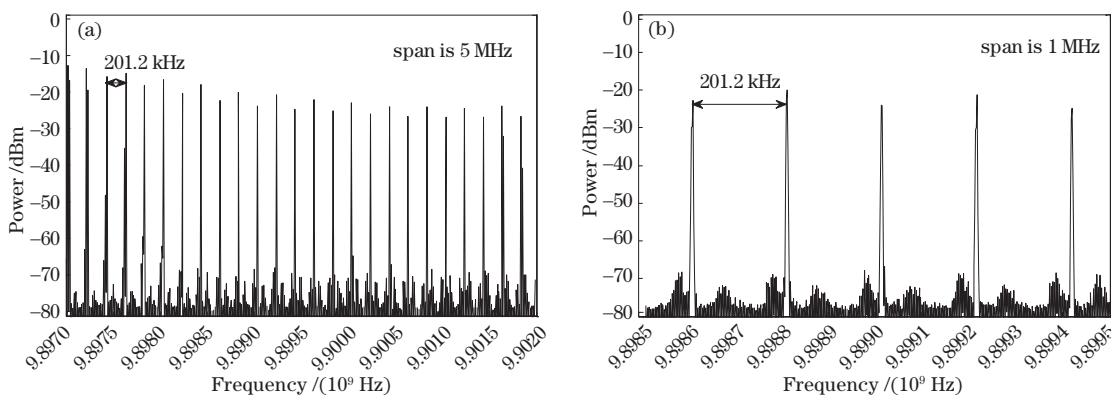


图 3 腔长为 1 km 时,信号间隔为 201.2 kHz 的微波频率梳信号。(a) 5 MHz;(b) 1 MHz

Fig. 3 Microwave frequency comb signal with 201.2 kHz interval in cavity length of 1 km. (a) 5 MHz; (b) 1 MHz

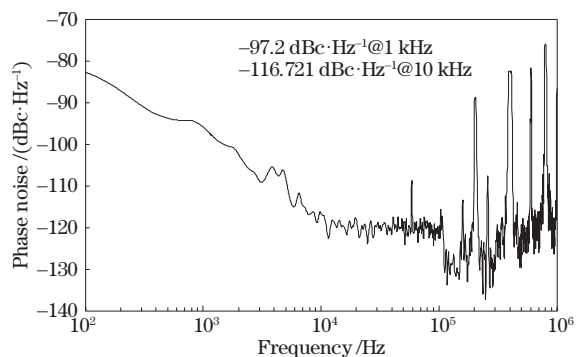


图 4 微波频率梳相位噪声测量

Fig. 4 Phase noise measurement of microwave frequency comb

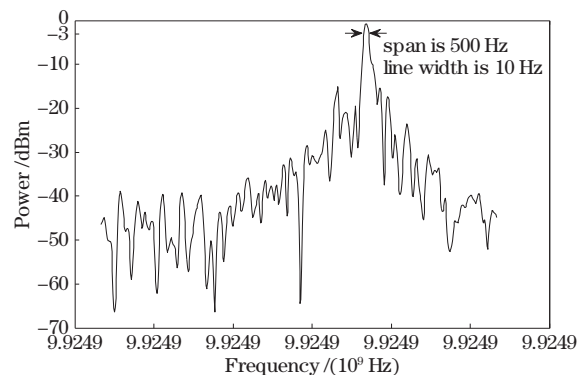


图 5 腔长为 1 km 时,信号间隔为 201.2 kHz 的微波频率梳信号线宽

Fig. 5 Line width of microwave frequency comb signal with 201.2 kHz interval in cavity length of 1 km

图 3~5 所示,频率梳输出信号间隔 201.2 kHz,一阶相位噪声达到  $-97.2 \text{ dBc}/\text{Hz}@1 \text{ kHz}$  和  $-116.721 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ ,线宽约为 10 Hz。该信号在时域上表现为重复频率为 201.2 kHz, 9.9 GHz 载波的窄电脉冲信号,波形如图 6 所示。实验结果表明,该系统实现了锁模运行。

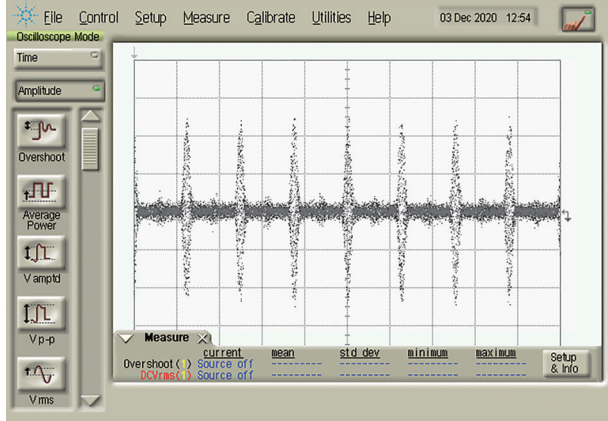


图 6 微波频率梳的电脉冲信号

Fig. 6 Electric pulse signal of microwave frequency comb

为了研究腔长对微波频率梳的影响,将系统中的光纤长度依次更换为 100 m、200 m、400 m、2 km,改变调制信号频率实现锁模后,分别得到了输出信号间隔为 2.153 MHz、1.145 MHz、511.2 kHz、101.4 kHz 的微波频率梳,即更短的光纤长度(腔长)可以得到输出信号间隔更高的微波频率梳信号。但更短的腔长降低了微波频率梳的相噪指标,从而丧失了 OEO 本身的优势。在实验中,当光纤长度增加为 2 km 时,其产生的微波频率梳一阶相位噪声能达到  $-99.55 \text{ dBc}/\text{Hz}@1 \text{ kHz}$  和  $-124.8 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ (图 7);而当光纤长度减小到 100 m 时,相应的一阶相位噪声仅有  $-85.2 \text{ dBc}/\text{Hz}@1 \text{ kHz}$  和  $-92.563 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ (图 8)。

而在实际应用中,往往既需要产生信号间隔较大(通常在百兆赫甚至吉兆赫)的微波频率梳,同时又要求信号的噪声足够低。因此,在基频锁模  $f_m = f_b$  条件下,单纯依靠短腔来提高频率梳的频率间隔就不可行了。

为了解决上述问题,本实验继续研究了 OEO 环路的高次谐波锁模,将调制信号  $f_m$  调谐到 OEO 的模式间隔  $f_b$  的整数倍上,在该情况下,每  $N$  个振荡模式中有一个可以起振其余模式被抑制,与主动锁模激光器中的高次谐波锁模振荡类似。由于调制信号是  $f_m$  可以是模式间隔  $f_b$  的任意整数倍,因此该

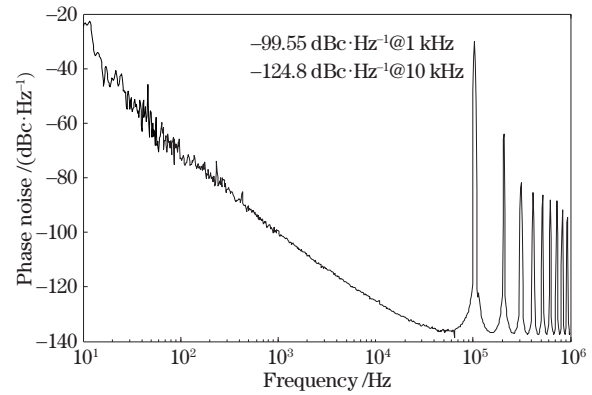


图 7 腔长为 2 km 时,信号间隔为 101.4 kHz 的微波频率梳相位噪声测量

Fig. 7 When cavity length is 2 km, measurement of microwave frequency comb phase noise with signal interval of 101.4 kHz

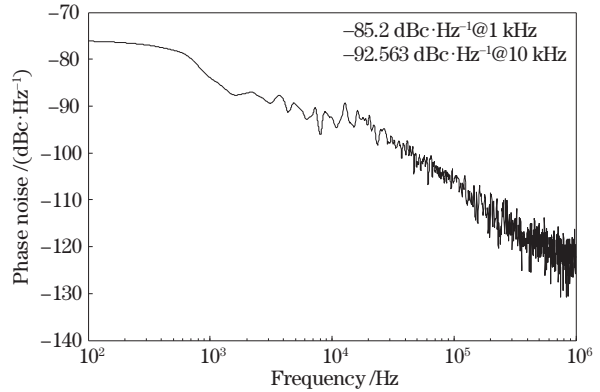


图 8 腔长为 100 m 时,信号间隔为 2.153 MHz 的微波频率梳相位噪声测量

Fig. 8 Microwave frequency comb phase noise measurement at 2.153 MHz with cavity length of 100 m

方案增大了产生的微波频率梳的信号间隔。实验中,接入振荡环路的光纤仍为 1 km,此时 OEO 环路的模式间隔约为 201.2 kHz,调整调制信号频率为 402.4 kHz(即  $2f_b$ )的正弦信号,此时形成了二次谐波锁模。同样地,改变调制信号 603.6 kHz(即  $3f_b$ ), 804.8 kHz(即  $4f_b$ ), 1.006 MHz(即  $5f_b$ ), 1.207 MHz(即  $6f_b$ ),则可以产生信号间隔为纵模间隔  $f_b$  的整数倍的微波频率梳信号,通过电谱仪测得的电谱如图 9 所示。

可见,采用高次谐波锁模可以产生更高频率间隔的频率梳。当更换腔长为 200 m 时,可实现 6 次谐波锁模,产生信号间隔为 6.87 MHz 的微波频率梳信号,进一步将腔长增加为 2 km 时,可实现 5 次谐波锁模,产生信号间隔为 507 kHz 的微波频率梳

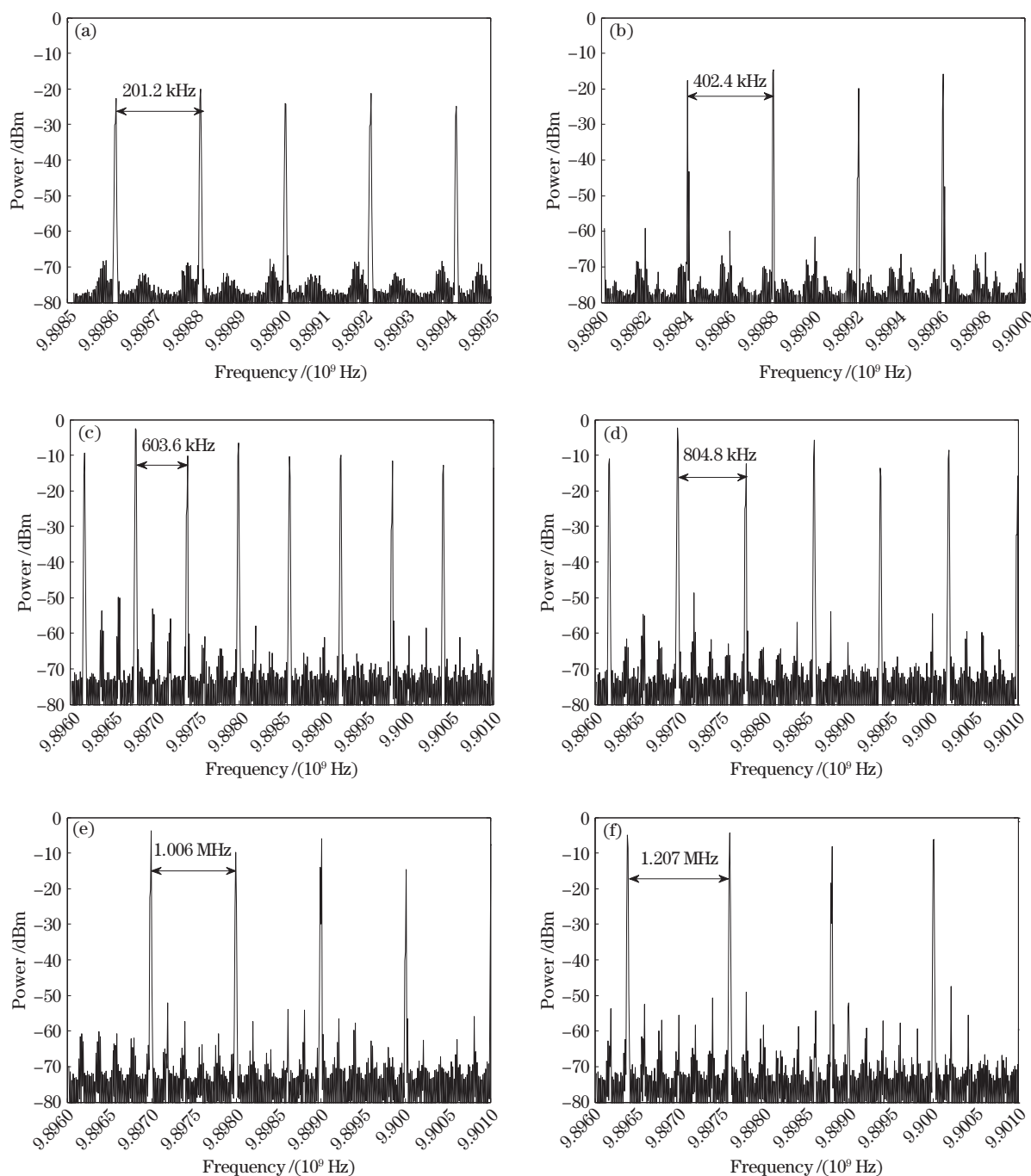


图9 腔长为1 km时,信号间隔从201.2 kHz~1.207 MHz的微波频率梳信号。(a) 201.2 kHz;(b) 402.4 kHz;(c) 603.6 kHz;  
(d) 804.8 kHz;(e) 1.006 MHz;(f) 1.207 MHz

Fig. 9 Microwave frequency comb signal with signal interval from 201.2 kHz to 1.207 MHz in cavity length of 1 km.

(a) 201.2 kHz; (b) 402.4 kHz; (c) 603.6 kHz; (d) 804.8 kHz; (e) 1.006 MHz; (f) 1.207 MHz

信号,如图10所示。

但通过实验发现,当调制频率进一步提高时,超模噪声变得越来越大,难以实现更高次谐波锁模,腔长200 m时高次谐波锁模情况较好能产生几十兆到百兆赫频率间隔的微波频率梳,但腔长较长时最高仅能产生几十兆频率间隔的微波频率梳,其原因一方面是OEO本身腔长增加后,系统的稳定

性变差,后续如果在系统环路内加入锁相环控制OEO的腔长,则有望解决这个问题。另一方面,后续实验中可以通过增加光电探测器的带宽来增大输出频率梳的带宽,以及尽量提高腔长与波长匹配的精确度从而提高产生的微波频率梳的信号质量,另外还需要进一步降低由于光纤的振动等环境因素带来的系统误差。

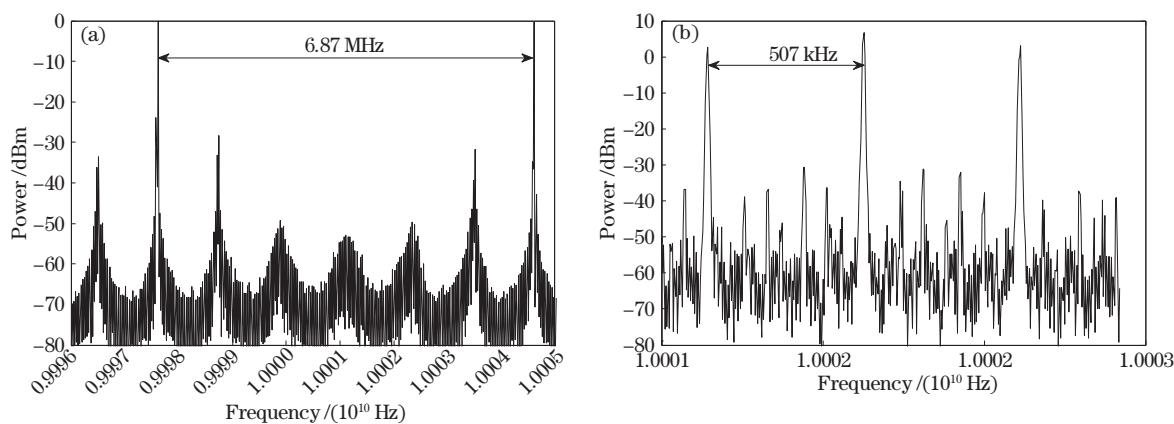


图 10 信号间隔为 6.87 MHz 和 507 kHz 的微波频率梳信号。(a) 6.87 MHz; (b) 507 kHz

Fig. 10 Microwave frequency comb signal with signal interval of 6.87 MHz and 507 kHz. (a) 6.87 MHz; (b) 507 kHz

## 4 结 论

基于光电振荡器以及主动锁模激光器的技术原理,提出了一种微波锁模方法,通过搭建新型的 OEO 结构,可以产生一系列频率间隔相等的微波频率梳,对应的时域波形即为电窄脉冲,可广泛应用于通信、传感等领域。本文提出的方案利用 OEO 结构 Q 值高、相位噪声低的优点,在系统腔长为 1 km 时,实验得到一阶相位噪声  $-97.2 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$ 、 $-116.721 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ ,频率间隔为 201.2 kHz 的微波频率梳信号,线宽约为 10 Hz。相比于传统的微波频率梳产生方式,这种方式所得到的相位噪声指标有很大提高,并且通过实验实现了高次谐波锁模,得到了从 100 kHz 到 6 MHz 的不同信号间隔的微波频率梳信号。实验中也发现,由于系统的稳定性不好,在高次谐波锁模条件下存在着超模噪声的问题,后续通过提高锁相环改进系统的稳定性可进一步提升系统的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Nicolodi D, Bouchand R, Lours M, et al. Ultra-low phase noise frequency-comb-based microwave generation and characterization[C]//2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), May 9-12, 2016, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [2] Wang W T, Liu J G, Sun W H, et al. Multi-band local microwave signal generation based on an optical frequency comb generator[J]. Optics Communications, 2015, 338: 90-94.
- [3] Yang X W, Xu K, Yin J, et al. Optical frequency comb based multi-band microwave frequency conversion for satellite applications[J]. Optics Express, 2014, 22 (1): 869-877.
- [4] Li Q L, Jiang W S, Xu Y F, et al. Analysis and design of wide-band comb generator based on SRD [C]//2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), May 5-8, 2012, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2012: 1-3.
- [5] Haggmann M J, Taylor A J, Yarotski D A. Observation of 200th harmonic with fractional linewidth of  $10^{-10}$  in a microwave frequency comb generated in a tunneling junction[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(24): 241102.
- [6] Haggmann M J, Stenger F S, Yarotski D A. Linewidth of the harmonics in a microwave frequency comb generated by focusing a mode-locked ultrafast laser on a tunneling junction[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(22): 223107.
- [7] Giannakidis K, Sgourenas S, Kanteres A, et al. A 17.5–22.5 GHz fractional: N wideband frequency synthesizer in 65 nm CMOS technology[C]//2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), October 3-4, 2016, London, UK. New York: IEEE Press, 2016: 209-212.
- [8] Lilis G N, Park J, Lee W, et al. Harmonic generation using nonlinear LC lattices[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(7): 1713-1723.
- [9] Deng Z C, Yao J P. Photonic generation of microwave signal using a rational harmonic mode-locked fiber ring laser[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 763-767.
- [10] Haggmann M J, Henage T E, Azad A K, et al.



- Frequency comb from 500 Hz to 2 THz by optical rectification in zinc telluride[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(23): 1459-1460.
- [11] Shao Q. Research on the generation technology of optical frequency comb based on external modulation and microwave frequency comb[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.  
邵茜. 基于外调制器的光梳产生技术与微波频率梳产生技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [12] Wu D X, Xue X X, Li S Y, et al. Photonic generation of multi-frequency phase-coded microwave signal based on a dual-output Mach-Zehnder modulator and balanced detection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14516-14523.
- [13] Liu Q. Research of microwave frequency comb generation technology based on optical recirculating acousto-optic frequency shift[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.  
刘谦. 基于光学声光频移回路的微波频率梳产生技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [14] Chan S C, Xia G Q, Liu J M. Optical generation of a precise microwave frequency comb by harmonic frequency locking[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1917-1919.
- [15] Zhao M R, Wu Z M, Deng T, et al. Tunable and broadband microwave frequency combs based on a semiconductor laser with incoherent optical feedback[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(5): 054207.
- [16] Fan L, Xia G Q, Tang X, et al. Tunable ultra-broadband microwave frequency combs generation based on a current modulated semiconductor laser under optical injection[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 17764-17771.
- [17] Ma Y N, Huang T T, Wang W R, et al. Tunable microwave frequency comb generation based on double-loop mixing-frequency optoelectronic oscillator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(23): 238401.  
麻艳娜, 黄添添, 王文睿, 等. 基于双环混频光电振荡器的可调谐微波频率梳产生[J]. *物理学报*, 2018, 67(23): 238401.
- [18] Fang J, Wang J, Yu J L, et al. A tunable optoelectronic oscillator based on laser external modulation[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(5): 592-597.  
方杰, 王菊, 于晋龙, 等. 基于激光外调制的频率可调谐光电振荡器[J]. *激光与红外*, 2020, 50(5): 592-597.
- [19] Liu L, Yu J L, Wang J, et al. Linear frequency-modulated signal generation based on optoelectronic oscillator combined with electrical frequency-selected cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 032301.  
刘莉, 于晋龙, 王菊, 等. 基于光电振荡器结合电选频腔产生线性调频信号[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 032301.
- [20] Wu B, Yang B J. Research on principle and stability of actively mode-locked erbium-doped fiber ring laser[J]. *Photon Technology*, 2005(3): 124-127, 130.  
吴斌, 杨伯君. 主动锁模掺铒光纤环激光器的原理和稳定性研究[J]. *光子技术*, 2005(3): 124-127, 130.
- [21] Shi Y H, Cheng Z C, Peng Z G, et al. Sub-picosecond NALM mode-locked fiber laser with 21 MHz-100 kHz repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501013.  
石宇航, 程昭晨, 彭志刚, 等. 21 MHz~100 kHz 重复频率亚皮秒 NALM 锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 0501013.
- [22] Han D D, Zhang J Y, Gao Q, et al. Switchable multi-wavelength passively mode-locked all-fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0506002.  
韩冬冬, 张佳月, 高琼, 等. 可切换多波长全光纤被动锁模光纤激光器[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0506002.
- [23] Wu B, Yang B J. Research on actively mode-locked fiber ring laser[J]. *Modern Transmission*, 2005(4): 97-100.  
吴斌, 杨伯君. 主动锁模光纤环激光器的研究[J]. *现代有线传输*, 2005(4): 97-100.