

## 超低相噪光电振荡器及其频率综合技术研究

刘世锋 徐晓瑞 张方正 刘鹏 康晓晨 杨华山 潘时龙\*

(南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室 南京 210016)

**摘要:** 该文提出一种基于级联相位调制器的注入锁定光电振荡器及其频率综合系统。该文提出的光电振荡器利用相位调制实现调制器输出光谱展宽并保持光纤中传播功率恒定,降低光纤非线性效应引入的强度噪声。采用双输出MZI级联平衡探测器的结构完成相位调制到强度调制的转化,提高系统的信噪比,实现频率为9.9999914 GHz、边模抑制比大于85 dB、10 kHz频偏相位噪声为-153.1 dBc/Hz的超低相位噪声信号输出。此外,还基于所提出的超低相位噪声光电振荡器构建了宽带、高性能频率综合系统。联合DDS和PLL的混合锁相技术,所提出频率综合器的输出频率成功覆盖5.9~12.9 GHz,相位噪声达到-130 dBc/Hz@10 kHz,杂散抑制比优于65 dB,跳频时间小于1.48  $\mu$ s。

**关键词:** 光电振荡器; 相位调制; 频率综合器; 相位噪声

中图分类号: TN752

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)02-0243-08

DOI: 10.12000/JR19029

**引用格式:** 刘世锋, 徐晓瑞, 张方正, 等. 超低相噪光电振荡器及其频率综合技术研究[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 243-250. doi: 10.12000/JR19029.

**Reference format:** LIU Shifeng, XU Xiaorui, ZHANG Fangzheng, *et al.* Ultralow phase noise optoelectronic oscillator and its application to a frequency synthesizer[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 243-250. doi: 10.12000/JR19029.

## Ultralow Phase Noise Optoelectronic Oscillator and Its Application to a Frequency Synthesizer

LIU Shifeng XU Xiaorui ZHANG Fangzheng LIU Peng  
KANG Xiaochen YANG Huashan PAN Shilong\*

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** We propose a novel injection-locked OptoElectronic Oscillator (OEO) with ultralow phase noise based on two cascaded phase modulators, which is further applied to construct a frequency synthesizer. Thanks to the phase modulation, the output optical spectrum expands and the optical power keeps constant while passing through the optical fiber, which dramatically reduces the intensity noise induced by the nonlinear effects of the optical fiber. A dual-output MZI together with a balanced optical detector realizes the phase modulation to intensity modulation conversion and improves the signal to noise ratio of the OEO. The output frequency of the proposed OEO is 9.9999914 GHz with its sidemode suppression ratio larger than 85 dB, and the phase noise reaches -153.1 dBc/Hz at 10 kHz frequency offset which is 38.7 dB lower than that of Keysight E8257D. Moreover, a broadband, high performance frequency synthesizer is established based on the proposed OEO. Combining the DDS and PLL technologies, the proposed frequency synthesizer can cover 5.9~12.9 GHz range. The phase noise is around -130 dBc/Hz@10 kHz, the spur suppression ratio is better than 65 dB, and the frequency hopping time is less than 1.48  $\mu$ s.

**Key words:** OptoElectronic Oscillator (OEO); Phase modulator; Frequency synthesizer; Phase noise

收稿日期: 2019-02-21; 改回日期: 2019-04-12; 网络出版: 2019-04-18

\*通信作者: 潘时龙 pans@nuaa.edu.cn \*Corresponding Author: PAN Shilong, pans@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61527820), 中央高校基本科研业务费专项资金(NC2018005), 江苏省333项目(BRA2018042)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61527820), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (NC2018005), Jiangsu Province "333" Project (BRA2018042)

责任主编: 郑小平 Corresponding Editor: ZHENG Xiaoping

## 1 引言

作为现代通信、探测和测试系统中的核心部件,频率综合器能够在一定带宽范围内灵活输出高精度、高稳定的频率信号,广泛应用于无线通信、雷达探测、测试与计量、卫星等领域<sup>[1-4]</sup>。随着技术的发展,高频率、大带宽、低相噪及低杂散成为新一代高性能频率综合系统的必然演进方向。传统基于微波技术的频率综合技术采用低频晶体振荡器作为参考源,通过倍频锁相的方式产生高频信号,但是所产生的高频信号的相位噪声在倍频锁相过程中被快速恶化( $20\lg N$ ,  $N$ 为倍频因子),难以进一步提升。

相比之下,光子技术具有低噪声、低损耗和大带宽等关键优势,因此通过光子技术实现频率综合已获得人们的广泛重视<sup>[5-9]</sup>。光域实现微波频率综合技术主要包括双光频梳锁定技术<sup>[5]</sup>,飞秒锁模激光器锁相技术<sup>[6]</sup>,半导体激光器注入锁定技术<sup>[7]</sup>和基于光电振荡器(Opto-Electronic Oscillator, OEO)的锁相技术<sup>[8,9]</sup>等。双光频梳锁定技术和飞秒锁模激光器锁相技术本质上都需要选出两个光波长进行拍频,将拍频产生的微波信号作为频率综合器的参考信号。这两种技术都能产生高稳定的参考信号,但为了保证选出的两个波长的频率稳定性,需要对光频梳对或者锁模激光器进行复杂的控制,很难具有实用性。而基于半导体激光器的注入锁定技术<sup>[7]</sup>能够实现宽带频综信号产生,但是由于主光波长和从光波长之间无法严格相位锁定,因此产生的频综信号相位噪声性能较差。与前3种技术不同,基于OEO的频率综合技术采用OEO输出的高频、低相位噪声的微波频率作为参考信号,利用锁相环技术将频率综合器的输出信号和光电振荡频率进行相位锁定,进而实现宽带高性能的频率综合信号产生。基于该机理,Peng等人<sup>[8]</sup>利用锁相OEO实现了高频率分辨率的X波段频率综合器,输出频率范围覆盖8~10 GHz。该技术避免了传统倍频锁相技术引入的相噪恶化,但其OEO输出频率的相位噪声仅为-100 dBc/Hz@10 kHz,极大地限制了频率综合器性能的提升。此外,Beltchicov等人<sup>[9]</sup>基于振荡频率为10.2 GHz的OEO及锁相技术也实现了9~18 GHz的频率综合器。该系统通过频率合成输出的10 GHz信号相位噪声约为-120 dBc/Hz@1 kHz以及-140 dBc/Hz@10 kHz,具有很好的相噪性能。值得注意的是,该方案中采用的OEO相位噪声约为-122 dBc/Hz@1 kHz和-151 dBc/Hz@10 kHz,从根本上保证了频率综合器输出信号的频谱纯度及噪声性能。综上所述,基于超低相位噪声

OEO的频率综合技术为实现高性能先进频率综合系统提供了有效新思路。

本文提出了一种基于级联相位调制器(Phase Modulator, PM)的注入锁定OEO及其频率综合系统。与传统的OEO<sup>[10-12]</sup>相比,本文利用相位调制技术展宽光谱并保持光功率恒定,降低振荡环路中光纤引入的受激布里渊散射<sup>[13]</sup>、自相位调制<sup>[14]</sup>以及四波混频<sup>[15]</sup>等非线性影响。采用注入信号和光电振荡信号分别独立调制的方式,隔离注入信号对振荡环路微波器件的反向干扰,从而消除微波链路中反射干扰对振荡信号的影响。双输出马赫曾德尔干涉器(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)实现相位调制到强度调制的转化,之后通过平衡探测的方式消除系统共模强度噪声,大幅提升系统信噪比。此外,本文基于所提出的OEO,联合直接数字频率合成(Direct Digital frequency Synthesis, DDS)与锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)的混合锁相技术,实现了宽带、高性能频率综合信号的产生。本文中,首先提出并分析基于级联相位调制器的注入锁定OEO的结构、机理及其性能,然后提出基于上述OEO的频率综合系统结构与原理,最后搭建基于级联相位调制器的注入锁定OEO的频率综合实验系统,并对其产生信号的性能开展研究与分析,证实所提OEO及其频综系统的可行性与技术优势。

## 2 基于级联PM的注入锁定光电振荡器

图1所示为基于级联相位调制器的注入锁定OEO结构示意图,主要由光源,相位调制器(PM1, PM2),光纤,双输出MZI,平衡探测器(Balanced PhotoDetector, BPD),放大器,窄带带通滤波器(BandPass Filter, BPF),压控移相器(Voltage-Controlled Phase Shifter, VCPS),注入源以及锁相环等各部分组成。PM1将注入源输出的信号相位调制到光源输出的光载波上,输出的相位调制光信号在级联的PM2中相位调制上光电振荡信号,并输出级联相位调制后的光信号。PM2输出的光信号经

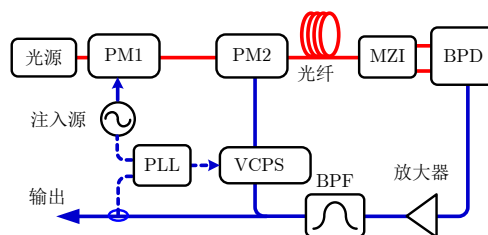


图1 基于级联PM的注入锁定OEO结构示意图

Fig. 1 Configuration of the injection-locked OEO based on the cascaded phase modulators

过长光纤延时后，在双输出MZI中实现相位调制到强度调制的转化，输出两路差分的强度调制光信号，并在BPD中进行平衡探测，实现光信号到电信号的转化。平衡探测后的微波信号经过放大器、带通滤波器及压控移相器后连接至PM2的射频端口形成振荡环路。若注入源信号关闭，当反馈环路满足自由振荡条件后<sup>[16]</sup>，OEO将输出频率为带通滤波器中心频率附近的振荡信号，但是自由振荡的OEO输出频率不固定，且边模抑制较差。

为了使OEO输出固定频率且具有高杂散抑制比，本文将注入源信号打开，调制到PM1上，并通过PM2、光纤、双输出MZI和BPD进入至光电振荡环路，且注入信号频率与带通滤波器的中心频率保持一致。得益于注入信号的牵引与对其它振荡模式的抑制作用，OEO将在注入信号频率处形成振荡，并在带通滤波器输出端口输出高杂散抑制比的振荡信号<sup>[10]</sup>。此外，为了提高环路信号的信噪比以及降低振荡信号的相位噪声，光源输出功率需要尽可能提高。但是基于传统强度调制的OEO方案，随着光源功率提高，进入到光纤中的强度调制光信号功率也将提升，容易激发光纤中的各类非线性效应<sup>[14,17]</sup>，比如受激布里渊散射、自相位调制及四波混频等。本文在进入长光纤前采用相位调制方式，将光载波的能量分散到各个调制边带上，降低了光纤中受激布里渊散射的影响<sup>[17]</sup>。同时相位调制不影响输出光信号强度，保持光能量在光纤传播中不随时间变化，从而降低光纤克尔非线性引入的噪声影响。此外，为了提升OEO的频率稳定性，本文将OEO输出频率相位锁定到注入源信号上，即采用PLL技术将OEO的输出频率与注入源信号鉴相并将获得的误差信号控制VCPS的相位变化，从而反馈控制光电振荡环路的相位，最终实现OEO输出频率的稳定。值得注意的是，本文引入的双输出MZI级联平衡探测器的方法拥有两倍于基于传统强度调制OEO的光功率，光电转化后产生的微波功率提升6 dB<sup>[18]</sup>，可大幅提升振荡信号的信噪比。接下来对其进行理论分析，令通过PM1、PM2以及光纤后，输入MZI的光场为

$$E(t) = E_0 \exp[j\omega_c(t - \tau_0) + j\theta(t - \tau_0)] \quad (1)$$

其中， $E_0$ 为进入MZI的光场幅度， $\omega_c$ 为光载波角频率， $\theta(t)$ 为经过PM1和PM2后相位调制总和， $\tau_0$ 为光纤引入的时延。假设双输出MZI的两臂之间引入的时延差为 $\tau_d$ ， $\varphi_d$ 为MZI中两臂引入的相位差，那么MZI两臂输出光场 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 分别为(忽略MZI本征长度)

$$\left. \begin{aligned} E_1(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} [e^{j\varphi_d} E(t - \tau_d) + E(t)] \\ E_2(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} [e^{j\varphi_d} E(t - \tau_d) - E(t)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

双输出MZI的两路输出光信号分别注入到BPD中，通过BPD转化成电信号，并输出差分后的光电流 $i(t)$ ，可表示为

$$i(t) = 2\Re \cos[\theta(t - \tau_0) - \theta(t - \tau_0 - \tau_d) + \omega_c \tau_d + \varphi_d] \quad (3)$$

其中， $\Re$ 为BPD中单个探测器的响应度。由于光电振荡器输出的信号为单频信号，所以可以令 $\theta(t) = \beta \cos(\omega_0 t)$ ，其中 $\omega_0$ 为振荡信号的角频率， $\beta$ 为小信号调制系数。调节MZI的延时使得 $\omega_0 \tau_d = (2n - 1)\pi$ ，其中 $n$ 为整数，同时调节MZI的相对相位差使得 $\omega_c \tau_d + \varphi_d = \pi/2$ ，最终由式(3)可得(忽略高阶分量)

$$i(t) = 4\Re \beta \sin(\omega t - \omega \tau_0) \quad (4)$$

由式(2)、式(3)、式(4)式可得，BPD输出的信号比单路PD输出微波信号功率提升了4倍，从而大幅度提升了系统的信噪比。

根据图1的原理结构，搭建了基于级联PM的注入锁定OEO，输出信号频率为9.9999914 GHz，其结果如图2所示。图2(a)为OEO输出信号在频率范围为1 MHz、RBW为1 kHz的频谱图。由图2(a)可知，OEO输出信号杂散抑制比大于85 dB，表明该系统具有很低的杂散分量。这些杂散分量主要来自于光电振荡环路中残余的竞争模式。接下来对本文所提的OEO输出频率的相位噪声进行分析，如图2(b)中蓝色曲线所示，系统产生的光电振荡信号在1 kHz频偏处的相位噪声为-127.2 dBc/Hz，10 kHz频偏处的相位噪声为-153.1 dBc/Hz，振荡模式模式间隔为46 kHz左右。作为对比，红色曲线为商用基于微波技术实现的高性能微波源(E8257D, Keysight)在同频点处的相位噪声曲线，其相位噪声为-105 dBc/Hz@1 kHz以及-114.4 dBc/Hz@10 kHz。对比分析可知，本文所提出的基于级联PM的注入锁定OEO在1 kHz和10 kHz频偏处的相位噪声比E8257D分别低22.2 dB和38.7 dB，表明本系统实现了超低相位噪声信号的产生。

为了分析光纤非线性效应对OEO相位噪声的影响，本文在相位调制器为小信号调制状态且输出光功率为15.5 dBm情况下，依次在环路光纤前端和后端增加光衰减器，测试不同光衰减量下的相位噪声情况。如图3所示，蓝色曲线和红色曲线分别为在环路光纤的前端和后端增加光衰减器、对应



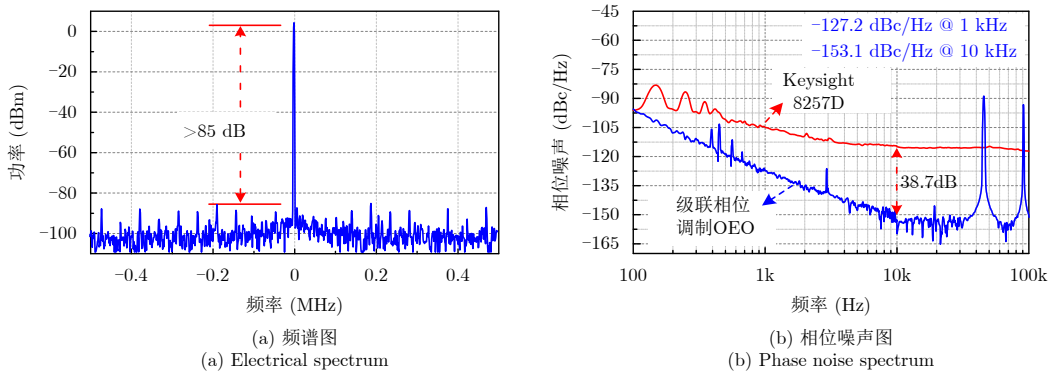


图2 所提出OEO输出信号结果图  
Fig. 2 Output results of the proposed OEO

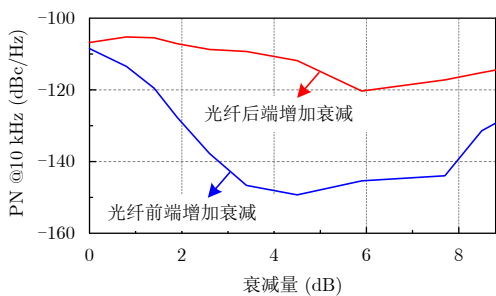


图3 光纤非线性效应对OEO相位噪声影响  
Fig. 3 Influence of the nonlinear effects in the optical fiber on the phase noise of the OEO

OEO在10 kHz频偏处的相位噪声随光衰减量的变化情况。对比两条曲线可知，当光衰减量从0~5 dB变化时，红色曲线对应的相噪变化较小，而蓝色曲线对应的相位噪声值比红色曲线有了极大的提升，且逐步接近-150 dBc/Hz。表明高功率的调制光信号激发了光纤中的非线性效应，严重地恶化了OEO的相位噪声。通过在光纤前端增加光衰减，降低进入光纤的光功率，可达到降低光纤非线性效应影响、提升OEO性能的效果。当光衰减量从5.0~8.8 dB变化时，蓝色曲线对应的OEO逐渐从最优的相位噪声恶化至-130 dBc/Hz左右，恶化的

主要来源为环路衰减引起的信噪比损失。而红色曲线对应的相位噪声仍然比蓝色曲线高近20 dB，表明光纤非线性效应对相位噪声的影响在红色曲线中仍然表现显著。所以，为了实现最优化的相位噪声性能，需要提高系统信噪比同时尽可能降低光纤中非线性效应的影响。

### 3 基于超低相噪OEO的频率综合系统

目前，实现频率综合器的主要方式包括直接模拟频率合成、DDS、混频法频率合成以及锁相环频率合成等几种途径<sup>[19]</sup>。结合第2节所提出的基于级联PM的注入锁定OEO，本文利用DDS与锁相环技术实现宽带、高性能频率综合系统，输出频率为5.9~12.9 GHz，其系统结构如图4所示。

基于级联PM的注入锁定OEO为本文所提出频率综合系统提供高性能参考信号。如图4所示，OEO输出的9.999914 GHz信号通过功分器分为A、B、C 3路，其中A路输出信号与压控振荡器 (Voltage-Controlled Oscillator, VCO) 在混频器1中混频产生0.1~1.1 GHz的中频信号。B路输出信号经过10分频器分频后，产生多个次谐波分频分量，其中1 GHz, 2 GHz, 3 GHz的分频分量分别由对应的带通滤波器选出。频率为3 GHz的分频分量被选

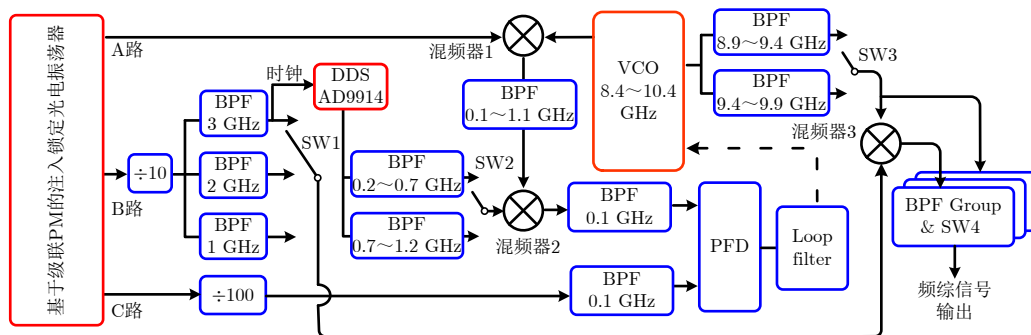


图4 基于超低相噪OEO的频率综合器系统结构示意图  
Fig. 4 Configuration of the frequency synthesizer based on the ultra-low phase noise OEO

出用作DDS的外部参考时钟。DDS的输出频率通过编程控制, 可实现0.2~1.2 GHz的频率输出。DDS输出信号与来自混频器1中的中频信号再次混频, 输出频率为100 MHz的中频信号, 并与C路的光电振荡频率100次分频后的信号一起输入至鉴相鉴频器中(Phase-Frequency Detector, PFD)。PFD输出的误差信号经由带宽为1 MHz的环路滤波器(Loop Filter, LF)提取, 并反馈至VCO, 进行频率稳定控制, 从而实现VCO到OEO的相位锁定。当锁相环路稳定后, VCO可输出频率为8.9~9.9 GHz的信号。然后, 通过将VCO输出信号与OEO的10分频信号中1 GHz, 2 GHz或3 GHz的分频分量在混频器3处混频, 实现频率为5.9~12.9 GHz的频率输出。

此外, 为了实现宽频谱范围内频率的快速切换, 系统引入射频开关(SW1, SW2, SW3及SW4), 并通过FPGA对其快速控制。由于频综系统中引入了多个混频器, 混频器输出的交调分量将会恶化系统的杂散抑制度, 因此在信号输出端引入带宽为500 MHz的带通滤波器组(BPF Group)对杂散信号进行滤除, 抑制残余的杂散分量。本系统通过引入高频、超低相位噪声参考源, 可实现频率综合器锁相环路中分频系数的大幅降低, 避免相位噪声的倍频恶化, 从而保证了系统信号的高性能输出。

#### 4 实验及结果分析

基于图4所示结构图, 搭建了基于超低相位噪声OEO的频率综合器系统, 其中OEO采用基于级联PM的注入锁定技术, 输出频率与注入源频率同频(9.9999914 GHz)。OEO中激光器(Emcore 1782)输出波长为1550.2 nm, 输出光功率为20 dBm。环路中光纤为单模光纤, 类型为G652D, 模场直径为9.3  $\mu\text{m}$ 。光纤长度约为4.4 km且注入至光纤中的光功率约为13 dBm。为保证注入信号不对光电振荡器相位噪声造成影响, 注入功率低于-15 dBm,

对应信号的相位噪声为-118 dBc/Hz @1 kHz以及-122 dBc/Hz @10 kHz。此外, 该频率综合系统主要还包括VCO(Hittite-HMC511), DDS(ADI-AD9914), PFD(Hittite-HMC439), 分频器, 混频器, 低噪声放大器, 带通滤波器, 功分器和射频开关等。实验过程中, 采用相噪分析仪(FSWP-50, R&S)对频率综合信号的频谱和相位噪声进行分析, 使用实时示波器(Keysight DSOX93304, 采样率80 GSa/s)对跳频信号进行采样与分析。

为了验证以基于级联PM的注入锁定OEO为参考源, 锁相后VCO的输出信号性能, 调节DDS参数, 使其输出599.9914 MHz信号用于VCO的鉴相鉴频, 从而使VCO输出9.4 GHz的微波信号, 其频谱图如图5(a)所示。由图5(a)可知, VCO成功产生了频率为9.4 GHz的微波信号, 且杂散抑制比在10.0 MHz的频率范围内达到74.3 dB。需要注意的是, 在9.4 GHz频率两侧频偏大约1 MHz处有两个较高的噪声包络, 该噪声包络主要由带宽为1 MHz的锁相环引入。此外, 本文还对VCO输出9.4 GHz信号的相位噪声进行了分析, 图5(b)给出了锁相前VCO输出相噪曲线(黑线), 锁相后VCO输出相噪曲线(红线)以及OEO信号的相噪曲线(蓝线)。由图可知, 锁相后输出信号的相位噪声在1 kHz和10 kHz频偏处分别为-115.3 dBc/Hz和-130.7 dBc/Hz, 比锁定前信号的相位噪声分别低65.2 dB和47.3 dB, 表明VCO输出信号锁相至OEO后相位噪声比锁相前有了极大的提升。值得注意的是, 锁相后VCO信号的相位噪声相对于OEO相噪仍然有较大的差距, 在1 kHz和10 kHz频偏处比OEO的相位噪声分别高11.9 dB和22.4 dB, 其主要原因在于VCO本征噪声、DDS本征噪声和锁相环带内噪声的总噪底比OEO的噪底要高。为进一步降低VCO输出信号的相位噪声, 可通过引入更低本征噪声的VCO和DDS, 并优化锁相环的有源噪声。

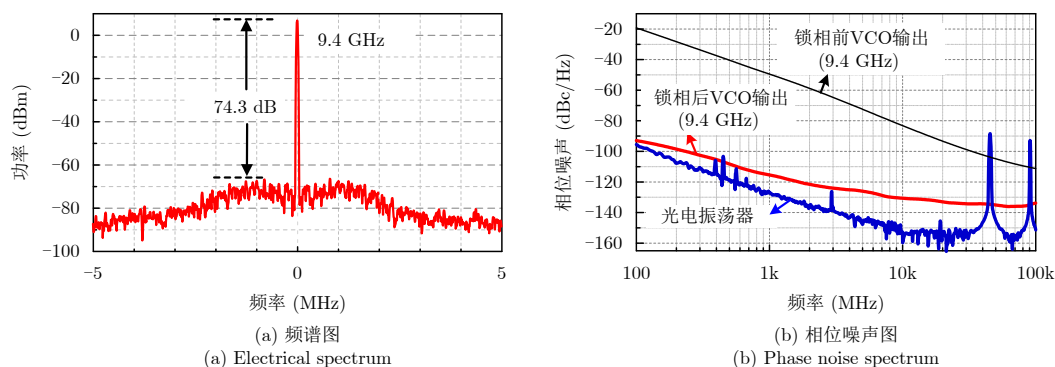


图5 VCO输出频率为9.4 GHz信号的结果图

Fig. 5 Output results of the 9.4 GHz signal generated by the VCO

改变DDS输出频率，VCO输出频率也会随之变化。图6为VCO输出信号频率为8.9~9.9 GHz、步进为0.1 GHz的相位噪声和杂散抑制情况。由图6(a)可知，VCO输出各频点在10 kHz频偏处的相位噪声值为-130 dBc/Hz左右，表明VCO锁相至超低相噪OEO后实现了宽带、低相噪信号的产生。图6(b)为VCO输出各频点的杂散抑制情况，从图中可知，各频点杂散抑制比都大于70 dB，说明该系统具有高频谱纯度。

由于VCO输出的频率范围有限，为进一步拓展频率综合系统的输出频率范围，将VCO的输出信号与OEO的10分频后的次谐波分量(分别为1 GHz, 2 GHz, 3 GHz)进行混频，从而实现了5.9~12.9 GHz的频率合成，其结果如图7所示。图7(a)为本文所提出频率综合系统输出频率为5.9~12.9 GHz、步进为1 GHz情况下的相位噪声曲线。由图7(a)可知，频率综合系统输出信号的相位噪声在5.9~12.9 GHz范围内具有高一致性，且在近频偏处相对于VCO有极大提升。图7(b)分析了该频率综合系统的在不同频率下、10 kHz频偏处的相位噪声值和杂散抑制情况。由图可得，其10 kHz频偏处相位噪声在5.9~12.9 GHz范围内均低于-125 dBc/Hz，最低能到-135 dBc/Hz，表明该系统在更大工作频率范围下仍然能保持低相位噪声的信号输出。值得注意的

是，输出信号的杂散抑制比随频率在65~70 dB范围内变化，比图6(b)恶化了5 dB左右，主要原因在于混频器是非线性器件，混频后的信号中包含众多交调分量，恶化了系统杂散性能。此外，还对频率综合系统的跳频时间进行了分析，如图7(c)所示，从9.04 GHz到9.02 GHz的跳频时间低于1.48 μs，表明该系统具有快速跳频性能。

### 5 结束语

本文提出一种基于级联PM的注入锁定OEO及其频率综合系统。该OEO利用相位调制输出光信号具有光谱宽、功率恒定的特点，降低了光纤中的非线性效应引入的强度噪声。还利用双输出MZI级联BPD的结构实现相位调制到强度调制的转化并有效提高了系统的信噪比。为了降低光电振荡信号的边模抑制比，采用在PM1中注入信号的方式，实现了注入锁定OEO，其输出频率为9.999914 GHz，其相位噪声分别为-127.2 dBc/Hz@1 kHz和-153.1 dBc/Hz@10 kHz，比Keysight E8257D在相同频点、相同频偏处分别低22.2 dB和38.7 dB，具有超低相位噪声性能。此外，本文还基于所提出的超低相位噪声OEO构建了一个宽带频率综合系统。该频率综合系统采用DDS和PLL混合技术，实现了VCO锁相至OEO中，并输出8.9~9.9 GHz信号，且相位噪声保持在-130 dBc/Hz@

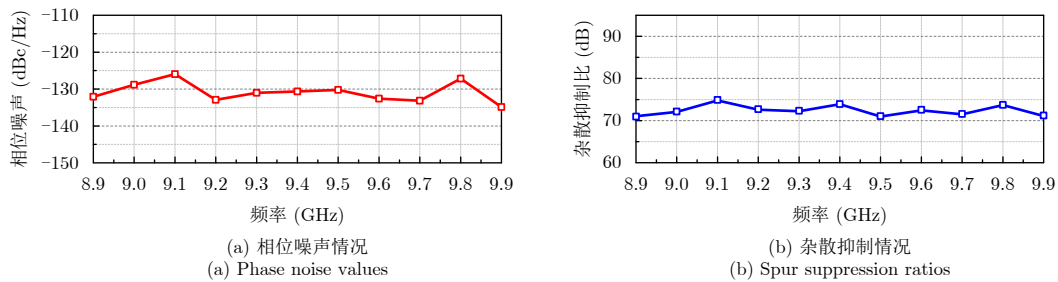


图 6 频率合成输出为8.9~9.9 GHz的情况

Fig. 6 Frequency synthesizing performance within 8.9~9.9 GHz

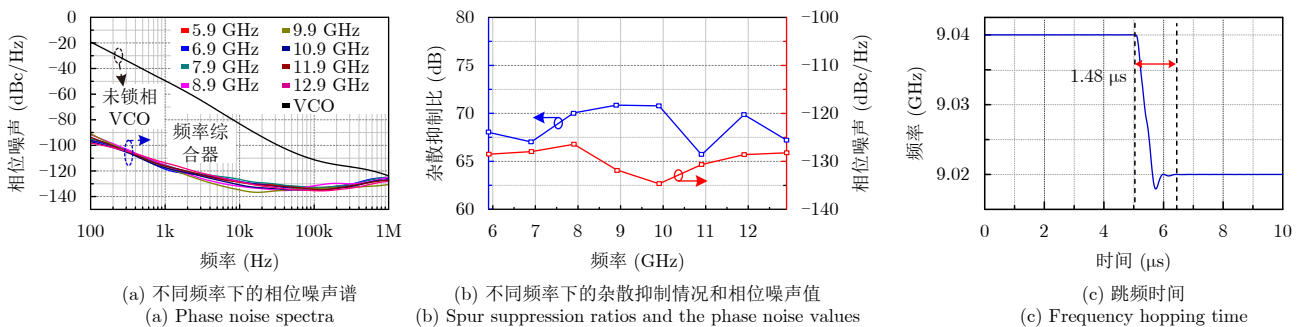


图 7 频率合成输出为5.9~12.9 GHz的情况

Fig. 7 Frequency synthesizing performance within 5.9~12.9 GHz

10 kHz附近, 杂散抑制比优于70 dB。最后, 本文通过引入电混频器、带通滤波器组及射频开关, 将频率综合系统的工作频率进行了拓展, 实现了5.9~12.9 GHz的频率输出, 对应的10 kHz频偏处相位噪声仍然为-130 dBc/Hz附近, 跳频时间小于1.48  $\mu$ s, 且杂散抑制比优于65 dB。值得注意的是, 通过改善或者引入更高性能VCO、DDS和锁相环, 可进一步提升该频率综合系统的相位噪声性能。综上所述, 本文所提出的基于级联PM的注入锁定OEO及其频率综合系统具有宽带、超低相位噪声、低跳频时间等特性, 可应用于现代卫星通信、电子战系统、雷达探测以及高端仪器仪表等领域。

### 参考文献

- [1] LI Yongke. The design of wide BW frequency synthesizer based on the DDS&PLL hybrid method[C]. 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Beijing, China, 2009: 2-689-2-692. doi: 10.1109/ICEMI.2009.5274484.
- [2] CHENAKIN A. Frequency synthesis: Current solutions and new trends[J]. *Microwave Journal*, 2007, 50(5): 256-260.
- [3] Zhao Z Y, Li X Y, and Chang W G. LFM-CW signal generator based on hybrid DDS-PLL structure[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(6): 391-393. doi: 10.1049/el.2012.2852.
- [4] ROMASHOV V V, ROMASHOVA L V, KHRAMOV K K, et al. Wide-band hybrid frequency synthesizer with improved noise performance[C]. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2018: 1-4.
- [5] LI J, YI X, LEE H, et al. Electro-optical frequency division and stable microwave synthesis[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 309-313. doi: 10.1126/science.1252909.
- [6] WEI J, KWON D, ZHANG S, et al. All-fiber-photonics-based ultralow-noise agile frequency synthesizer for X-band radars[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(1): 12-17. doi: 10.1364/PRJ.6.000012.
- [7] ZHOU P, ZHANG F, GUO Q, et al. Linearly chirped microwave waveform generation with large time-bandwidth product by optically injected semiconductor laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18460-18467. doi: 10.1364/OE.24.018460.
- [8] PENG H, XU Y, GUO R, et al. High frequency resolution X-Band frequency synthesizer based on a Phase-Locked optoelectronic oscillator[C]. 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Hangzhou, China, 2018: 1-3. doi: 10.1109/ACP.2018.8596011.
- [9] BELTCHICOV S, DZISIAK A, and GULETSKIY I. A low phase noise octave band synthesizer using an X-Band frequency reference[J]. *Microwave Journal*, 2014, 57(5): 104-112.
- [10] ZHOU W M and BLASCHE G. Injection-locked dual optoelectronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(3): 929-933. doi: 10.1109/TMTT.2004.842489.
- [11] LELIÈVRE O, CROZATIER V, BERGER P, et al. A model for designing ultralow noise single- and dual-loop 10-GHz optoelectronic oscillators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(20): 4366-4374. doi: 10.1109/JLT.2017.2729018.
- [12] ELIYAHU D, SEIDEL D, and MALEKI L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an optoelectronic oscillator[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(2): 449-456. doi: 10.1109/TMTT.2007.914640.
- [13] HOROWITZ M, CHRAPLYVY A R, TKACH R W, et al. Broad-band transmitted intensity noise induced by stokes and anti-stokes brillouin scattering in single-mode fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(1): 124-126. doi: 10.1109/68.554530.
- [14] VASSILIEVA O, KIM I, and IKEUCHI T. Enabling technologies for fiber nonlinearity mitigation in high capacity transmission systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 50-60. doi: 10.1109/JLT.2018.2877310.
- [15] YANG T, DONG J, LIAO S, et al. Comparison analysis of optical frequency comb generation with nonlinear effects in highly nonlinear fibers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8508-8520. doi: 10.1364/OE.21.008508.
- [16] YAO X S and MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator[J]. *Journal of the Optical Society of America B (Optical Physics)*, 1996, 13(8): 1725-1735. doi: 10.1364/JOSAB.13.001725.
- [17] LIU Y, LV Z, DONG Y, et al. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multi-frequency phase modulation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(1): 29-31. doi: 10.3788/COL20090701.0029.
- [18] CALLAHAN P T, DENNIS M L, and CLARK T R. Experimental demonstration of a phase-modulated optoelectronic oscillator using balanced detection[C]. 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, San Francisco, CA, USA, 2011: 1-4. doi: 10.1109/FCS.2011.5977742.
- [19] ZHU Y, ZHANG H, and HONG W. A frequency agile synthesizer using DDS and PLL techniques for FMCW radar[C]. 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Nanjing, China, 2015, 2: 1-3. doi: 10.1109/APMC.2015.7413219.



## 作者简介



刘世锋(1989-), 男, 湖南人, 南京航空航天大学博士研究生, 研究方向为光电振荡器、微波光子频率综合技术以及微波光子测量技术等。

E-mail: sfliu\_nuaa@nuaa.edu.cn



康晓晨(1995-), 男, 山西人, 南京航空航天大学硕士研究生, 研究方向为光电振荡器的技术应用。

E-mail: kangxc@nuaa.edu.cn



徐晓瑞(1989-), 男, 黑龙江人, 南京航空航天大学硕士研究生, 研究方向为微波光子信号产生及频率综合技术。

E-mail: xuxiaorui@nuaa.edu.cn



杨华山(1993-), 男, 四川成都人, 南京航空航天大学博士研究生, 研究方向为微波光子学信号产生及光电振荡器的技术应用。

E-mail: yanghuashan2019@nuaa.edu.cn



张方正(1984-), 河北人, 博士, 副教授。2013年在北京邮电大学取得通信与信息系统工学博士学位(2009年至2010年新加坡南洋理工大学联合培养博士), 现为南京航空航天大学电子信息工程学院副教授。2013年6月至今在南京航空航天大学电子信息工程学院工作(2017至2018年为日本东京大学访问学者)。研究方向为光通信、微波光子学、光信号处理等, 主持国际自然科学基金、江苏省自然科学基金、研发预研项目等10余项科研项目。入选江苏省“六大人才高峰”高层次人才计划、江苏省青年科技人才托举工程。已发表SCI期刊论文75余篇(第1/通信作者论文46篇), 在国际会议作特邀报告10次, 获得国际最佳会议论文奖2次, 已授权国家发明专利(排名第1)5项。担任MWP2019, IEEE-RWS 2017-2019, ICAIT 2018-2019等国际会议技术委员会成员。

E-mail: zhangfangzheng@nuaa.edu.cn



潘时龙(1982-), 男, 安徽人, 博士, 教授。2008年在清华大学电子工程系获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授。主要研究方向为基于微波光子技术的新体制雷达、无线通信、测量系统和集成微波光子学等。发表SCI论文210余篇, SCI他引2500余次, 授权发明专利38项(含美国专利2项)。成果获日内瓦国际发明展特别金奖(最高奖项)、中国国际工业博览会大会银奖、中国光学工程学会创新科技奖一等奖、教育部自然科学奖二等奖等。曾入选国际光学学会会士(SPIE Fellow), 英国工程技术学会会士(IET Fellow), 国家万人计划科技创新领军人才。

E-mail: pans@nuaa.edu.cn



刘 鹏(1986-), 男, 山东人, 博士。2013年于北京理工大学获得光学工程专业博士学位, 2013年到2018年就职于中船重工第724研究所, 现为南京航空航天大学电子信息工程学院全职博士后。研究方向为微波光子信号处理的创新和系统应用。

E-mail: pengliu1986@nuaa.edu.cn