

特邀文章

基于光电振荡器的低相噪光生微波技术及其应用*

潘时龙 刘世锋 朱丹 杨丽

(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 211106)

摘要: 光电振荡器通过自振荡产生超低相位噪声微波信号, 具有光、电两种输出, 有望从源头突破现有雷达、电子战等射频系统性能瓶颈。文章介绍了光电振荡器的基本结构和理论模型, 回顾了光电振荡器相位噪声、边模抑制比、工作频率、稳定性和小型化等关键性能提升的研究进展, 并讨论了光电振荡器的功能拓展及光电振荡器在雷达等领域的应用。

关键词: 光电振荡器, 相位噪声, 本振, 任意波形产生

Low-Phase-Noise Microwave Signal Generation Based on Optoelectronic Oscillators and Its Application

PAN Shi-long, LIU Shi-feng, ZHU Dan, YANG Li

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Optoelectronic oscillators (OEOs) generate microwave signals with ultra-low phase noise through self-oscillation, which have both optical and electrical outputs. As one of the highest-performance microwave sources, the OEO is expected to be a promising solution to improve the key performance of existing RF systems such as radars and electronic warfare systems. This paper introduces the basic structure and the theoretical models of the OEO, and overviews the research progresses to improve the key characteristics of the OEO, including phase noise, sidemode suppression ratio, frequency range, stability, and size. Studies to extend the functions of the OEO are reviewed, and its applications, especially in radar systems, are discussed.

Key words: optoelectronic oscillator, phase noise, local oscillation, arbitrary waveform generation

引言

微波源是无线基站、雷达、测量仪表、无线感知等系统的基础单元, 其相位噪声直接影响着无线系统的通信容量、雷达系统的探测能力、测量仪表的灵敏度和无线感知的精度等射频系统关键参数^[1]。光生微波技术为高质量微波信号的产生提供了有效途径^[2]。光电振荡器 (Optoelectronic Oscillator, OEO) 是一种通过自振荡方式产生超低相位噪声微波/毫米波信号的光生微波装置^[3]。它用光电谐振腔代替电学谐振腔, 得益于电光调制技术的宽带特性和光波导的低损耗特性, 在宽带范围内都具有高的品质因子, 从而在微波、毫米波等高频频段仍能产

生极低相位噪声、高稳定的信号。此外, 光电振荡器具有光、电两种输出, 与传统电子学系统和光子学系统都能无缝衔接。通过外注入信号或对其腔体进行调控, 光电振荡器还可实现多种复杂的信号产生和处理功能, 因此有望实现信号产生和处理技术的融合, 支撑新型射频系统架构的实现。本文将着重介绍光电振荡器的基本结构和理论模型、关键性能参数的提升方法、宽带波形产生方法以及光电振荡器在雷达等领域的应用情况等。

1 光电振荡器的基本结构和理论模型

图 1(a) 为光电振荡器的基本结构, 其中光源、

* 收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(61971222, 62271249); 江苏省杰出青年基金(BK20220076); 江苏省卓越博士后计划基金(2022ZB237)

光电调制器、光储能介质、光电探测器顺次连接, 光电探测器的电输出经过电带通滤波器, 反馈至光电调制器的射频输入端, 形成振荡环路。环路中通常还包括光或电放大器, 用于提供增益。

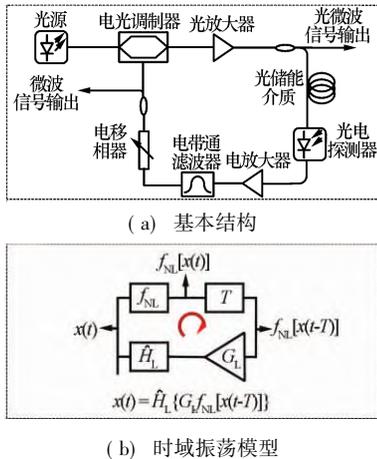


图 1 光电振荡器的基本结构及时域振荡模型

光电振荡器一般从噪声开始起振, 通过电带通滤波器选择振荡模式, 能量在环路中以光电两种形式交替循环。理论上增益大于 1 且满足相位匹配条件的模式都有可能起振, 但由于增益介质的饱和效应和光电调制器中的非线性效应, 最终只有一个模式的增益能够略大于 1, 形成稳定振荡, 产生高质量的振荡信号。得益于光储能介质(如光纤或光谱振荡器等)的超低传输损耗特性, 光电振荡环路的腔长(或等效腔长)可以很长, 能够形成非常高的 Q 值。因此, 光电振荡器所产生的信号具有极低的相位噪声。

基于光电振荡器的基本结构, 目前已经发展出多种理论模型, 应用广泛的包括 1996 年由 Yao 和 Maleki 提出的准线性理论模型^[3]以及从 Ikeda 模型发展而来的延时反馈振荡模型^[4]。这两种模型均以如图 1(b) 所示的光电振荡器时域振荡模型为基础发展而来^[5]。时域振荡模型主要考虑四个基本参数的影响, 即线性增益 G_L 、非线性传输响应 f_{NL} 、线性滤波响应 $H_L(i\omega)$ 和时间延迟 T 。稳态条件下, 光电振荡环路中的信号 $x(t)$ 经过环路循环一周, 其表达式应当保持不变, 因此可以得到如下时域方程:

$$x(t) = \hat{H}_L \{ G_L f_{NL} [x(t-T)] \} \quad (1)$$

式中, $\hat{H}_L \{ \cdot \}$ 是线性滤波响应的时域算子。对式 (1) 进行傅里叶变换, 得到其频域表达式:

$$X(i\omega) = H_L(i\omega) G_L F_{NL}(i\omega) e^{-i\omega T} \quad (2)$$

式中, $X(i\omega)$ 和 $F_{NL}(i\omega)$ 分别为 $x(t)$ 和 $f_{NL}[x(t)]$ 的傅里叶变换。

利用式 (2) 可以降低滤波器时域传输函数的复杂度, 但非线性函数的傅里叶变换过程非常复杂, 求解解析解带来巨大的挑战。为此, 人们提出了准线性理论模型^[3]和延时反馈振荡模型^[4], 对式 (1) 和 (2) 进行合理简化。其中, 准线性理论模型采用线性化小信号模型来简化非线性传输函数 $f_{NL}[x(t)]$, 使光电振荡系统近似为一个窄带的线性反馈系统, 从而可解析获得振荡阈值、闭环响应、稳态模式和相位噪声等重要参数。准线性理论模型还被进一步拓展, 用以对光电振荡器进行时频域数值分析。延时反馈振荡模型则将滤波器传输函数 $H_L(i\omega)$ 简化成时域微分积分算子, 从而可构建出具有多时间尺度的延时反馈微分积分方程, 对宽带、窄带光电振荡器进行稳态和动态行为分析。

2 光电振荡器的关键特性提升

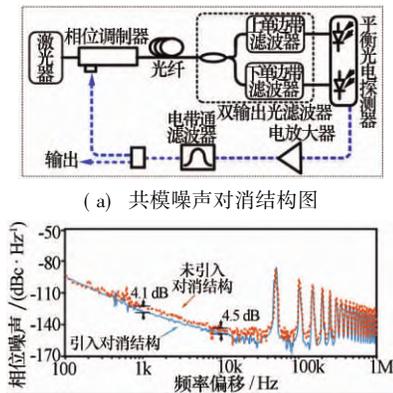
作为一种高性能微波本振源, 光电振荡器的关键性能参数包括相位噪声、边模抑制比、工作频率和稳定度等。

2.1 光电振荡器的相位噪声优化

相位噪声是衡量微波信号源品质的重要参数之一, 定义为信号源相位的随机起伏, 主要表征信号源的短期频率稳定性^[6]。光电振荡器中的相位噪声主要由系统噪声与光电振荡器环路中的滤波响应相互作用形成, 其中系统噪声由光电环路中激光器的相对强度噪声、光电探测器的散粒噪声和热噪声、光纤散射噪声, 以及放大器等器件的白噪声和闪烁噪声等组成。因此, 通过优化光电振荡器中关键器件的噪声特性和工作状态, 能够有效改善相位噪声特性^[7-8]。

在光电振荡器系统中, 进入光电探测器的噪声包括加性噪声和乘性噪声, 限制了相位噪声的进一步优化。其中, 加性噪声决定了远频端相位噪声的极限, 其可以通过共模噪声对消^[9]来进行抑制, 从而改善相位噪声特性。典型结构示意图如图 2(a) 所示, 激光源、相位调制器、双输出光滤波器、平衡光电探测器共同组成了共模噪声对消结构。典型实验结果如图 2(b) 所示, 引入对消结构后, 光电振荡器输出 10 GHz 信号的相位噪声在 1 kHz 和 10 kHz 频偏处分别为 -126.5 dBc/Hz 和 -150.2 dBc/Hz, 相比于未引入对消结构的情况, 相位噪声分别改善了 4.1 dB 和 4.5 dB。

除此之外, 利用长光纤的低损耗特性形成高 Q 值谐振腔, 是降低光电振荡器相位噪声的直接方式。例如, OEwaves 公司在光电振荡器环路中引入 16 km



(a) 共模噪声对消结构图
(b) 引入和未引入对消结构情况下的相位噪声对比
图2 共模噪声对消结构及实验结果

光纤,产生了10 GHz的微波信号,相位噪声达到 $-163 \text{ dBc}/\text{Hz}$ @ 6 kHz^[10]。但长光纤的引入将导致模式间隔小,进而给边模抑制带来挑战。

2.2 光电振荡器的边模抑制

光电振荡器环路中存在多个满足振荡相位条件的模式,以固定的频率间隔分布在主振荡模式两边,即为边模。主振荡模式与最大边模的功率比即为边模抑制比,其决定了光电振荡器的频谱纯度。边模抑制比由光电振荡环路中滤波器的 Q 值、通带特性以及振荡模式间隔等参数决定。

抑制边模的方案之一是使用高 Q 值光微谐振器代替长光纤,有效增大模式间隔。典型的光微谐振器包括回音壁模式谐振器^[11]等,其周长可达亚毫米级, Q 值可达 10^{10} ,等同于数 km 光纤形成的 Q 值,但存在耦合困难等挑战。利用多环路结构的游标效应增大等效振荡模式间隔^[12-14],是抑制边模、实现单一模式起振的最常用方法。例如,基于偏复用构建的双环结构可将光电振荡器的边模抑制比从 60 dB 提升至 78 dB^[15]。

2.3 光电振荡器的频率稳定性提升

光电振荡器的频率稳定性对其实用化至关重要。典型的稳定性提升可以基于锁相环、注入锁定、延时反馈控制等技术来实现^[16-19]。

基于锁相环以及基于注入锁定的稳定性提升技术,均是光电振荡器的输出信号与频率稳定的外参考信号进行相位锁定,以实现光电振荡器输出信号的稳定。锁相环法是将光电振荡器的输出信号与外参考信号进行相位比较,利用相位误差反馈控制腔内相位或者延时,实现光电振荡器振荡频率的稳定^[16];而注入锁定是向光电振荡器注入一个外部参考信号,通过光电振荡腔的非线性效应将振荡频率牵引至外参考信号的频率上,实现频率的稳定^[17]。基于延时反

馈控制的稳定性提升技术^[18-19]则是通过提取光电振荡环路中相位或者延时的变化,获得光电振荡器输出信号的不稳定特性,进而改变环路的延时来抵消此变化,从而提升光电振荡器的稳定性。

2.4 光电振荡器的工作频率拓展

在单频光电振荡器的工作频率拓展方面,主要思路有倍频和调谐两种。倍频光电振荡器是在维持光电振荡环路基频振荡的同时,在输出臂利用电光调制器^[20]、半导体放大器^[21]等器件的非线性效应实现工作频率的倍数拓展,例如在基于电光偏振调制器的光电振荡器的输出臂进行偏振态控制实现偏振调制到强度调制转换状态的切换,结合光滤波器,实现基频信号和四倍频信号的同时产生^[22]。该方法基于 10 GHz 的电器件,将光电振荡器的工作频率拓展至 40 GHz。倍频光电振荡器可以有效缓解高频微波/毫米波信号产生对宽带光电器件的需求。

对光电振荡器的调谐范围拓展,主要思路包括振荡模式频率调谐和滤波器中心频率调谐两种。当滤波器的中心频率固定时,通过调节光电振荡环路的延时或相位,可实现振荡模式频率的精细调谐,但调谐范围一般较小;而当振荡模式频率固定时,通过改变滤波器(微波滤波器或微波光子滤波器)的中心频率选择不同阶的振荡模式,可实现工作频率的大范围步进调谐。将倍频和滤波器中心频率调谐相结合,则可以进一步提升调谐范围^[22]。目前可调谐光电振荡器的研究虽已覆盖 0~60 GHz 的各个频段,但与固定频率光电振荡器相比,可调谐光电振荡器的相位噪声相对较差,且对系统的频率控制及频率锁定要求更高。另外,大部分可调谐光电振荡器的研究工作专注于提高调谐范围、降低相位噪声和提高边模抑制比,对调谐速度的研究较少。因此,快速调谐的光电振荡器也是值得研究的方向。

此外,人们对光电振荡器的宽带振荡也开展了广泛的研究,提出了多种途径打破光电振荡器的单频振荡状态。目前实现光电振荡器多频振荡的方法主要有两类:一类是在单个光环路中通过电光调制器的非线性调制效应或者多通带微波光子滤波器实现多频信号的产生,即串行结构的多频光电振荡器^[23];另一类则是通过多个光环路的复用结构实现多个不同频率的振荡,即并行结构的多频光电振荡器^[24]。基于典型的串行结构,可实现 10 GHz 和 40 GHz 的双频信号产生^[23];而结合同行结构和频率调谐,可实现频率可调谐双频信号的振荡,所输出的双频信号可在 4~8 GHz 和 8~12 GHz 范围内调谐^[24]。

2.5 光电振荡器的集成小型化

微型化和集成化是光电振荡器集成度提升的两个不同发展阶段,其中微型化是指通过微组装工艺将光电振荡器中的关键器件或芯片通过微焊互联组装在管壳中,而集成化是指通过半导体微纳加工工艺将光电振荡器中的器件整体或部分集成到芯片中。光电振荡器的核心集成技术主要包括低损耗光波导、高 Q 值光学微腔和集成微波光子滤波器。根据选用谐振腔的方式不同,目前微型化/集成化光电振荡器主要使用高 Q 值光学微腔^[25] 以及集成微波光子滤波器^[26] 等技术路径。光电振荡器集成度的提升是其适装小型化平台的基础,也是学术界目前的研究热点。

3 光电振荡器的功能拓展

光电振荡器可用作高性能本振信号驱动频率综合器,也可以通过结构设计,实现光脉冲、线性调频信号、混沌信号、跳频信号、三角波信号、相位编码信号等复杂波形的产生。

在频综信号产生方面,以高频率、低相噪光电振荡器为本振信号,结合直接频率合成及锁相环,可实现宽频率范围的低相噪信号产生,其原理结构如图 3(a) 所示,对应的实物如图 3(b) 所示。其中光电振荡器通过分频、混频的形式参与到压控振荡器的锁相过程中。光电振荡器的低相噪特性和分频带来的相噪优化得益,可大幅优化压控振荡器的输出性能,进而实现低相噪的频率综合信号输出,如图 3(c) 所示。当锁相环路稳定时,压控振荡器可输出频率为 5.9~12.9 GHz 的信号,其 10 kHz 频偏处相位噪声在工作频率范围内均低于 -125 dBc/Hz,最低可达 -135 dBc/Hz,表明该系统在宽频范围下都能保持低相位噪声的信号输出。

基于光注入半导体激光器的扫频光电振荡器可实现宽带、低相位噪声的微波线性调频信号产生^[27]。图 4(a) 是基于光注入半导体激光器的扫频光电振荡器的原理图。其基本原理是向从激光器注入来自于主激光器的连续波,使其工作在单周期振荡态^[28]。通过调节注入强度/频率失谐,使得从激光器输出波长产生红移效应,红移频率范围可达 100 GHz^[29]。在此基础上构建光电反馈环路以形成基于光注入半导体激光器的光电振荡器。该光电振荡器的频率可以通过调节注入强度和/或频率失谐来实现。通过调节控制信号 $S(t)$ 的周期来匹配光电反馈环路的延时形成光电环路的频域模式锁定,改善产生线性

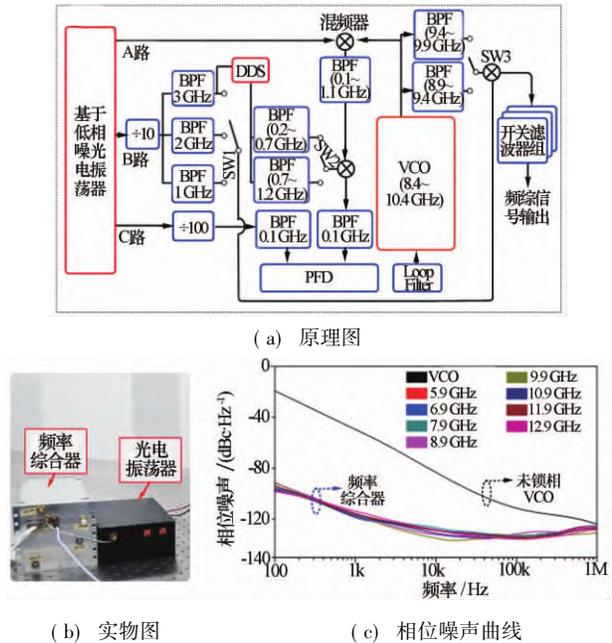


图 3 基于光电振荡器的频率综合器原理、实物及相位噪声曲线图

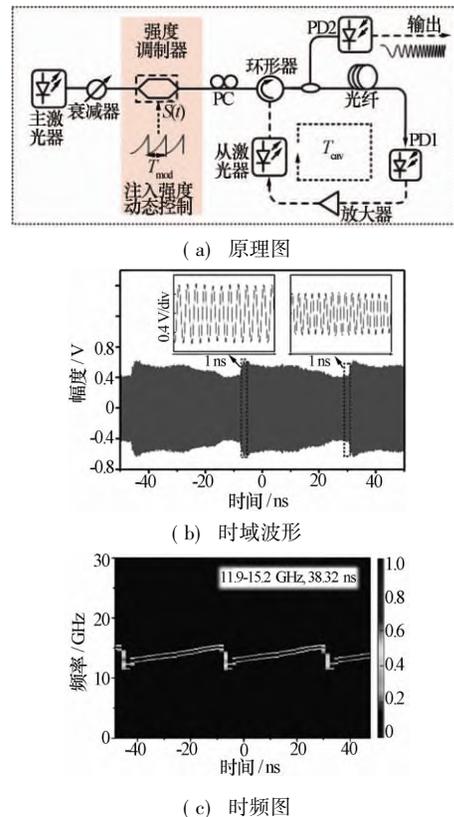


图 4 基于光注入半导体激光器的扫频光电振荡器的原理图及时域波形、时频图

调频信号的纯度,降低其相位噪声。在理想状态下,输出信号的频率将以腔长重复频率为步长扫描,且具有固定的相位关系。此时,系统产生的线性调频信号具有更好的相位噪声性能。基于该结构,可实现周期为 3832 ns,带宽为 33 GHz (119~152 GHz) 线

性调频信号产生,结果如图4(b) — (c)所示。此外,该方案所产生线性调频信号的带宽、周期和频率范围均可以单独调节。

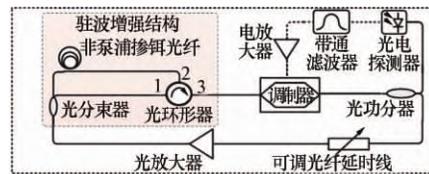
研究人员还将傅里叶域模式锁定技术引入光电振荡器,陆续构建了基于相位调制与相移布拉格光栅^[30]等方案的傅里叶域锁模光电振荡器,可实现光电振荡腔内的宽带扫频振荡,产生宽带微波调频信号。基于傅里叶域锁模光电振荡器,人们也探索了其他类型宽带微波调频信号的产生,如二倍频的线性调频信号^[31]、双啁啾线性调频信号^[32]、相位编码的调频信号等^[33]。

此外,利用光电振荡器的非线性动力学特性可产生宽带混沌信号^[34]。该方案具有功率谱平坦和关联维数高等优点,并且易于实现正交混沌信号的产生,可应用于多发多收定位系统中^[35-37]。

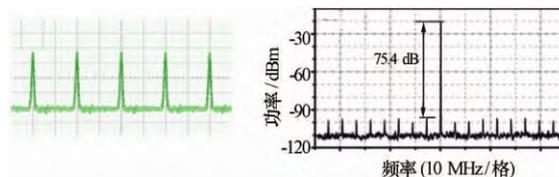
另一方面,基于光电振荡器可实现低抖动、高重频的光脉冲产生。其基本原理是在光域将光电振荡器产生的微波信号转换为光脉冲,从而将其高频和低相位噪声特性映射为光脉冲的高重频和低时间抖动特性。基于光电振荡器产生光脉冲有两种典型思路:一种是改变光电振荡器环路中的光电调制特性,通过光电调制形成的开关窗口^[38],或者利用工作在增益开关或外注入条件下的半导体激光器作为光电振荡器的光源,无需额外的调制器即可得到光脉冲^[39];另一种思路是使用具有主动锁模结构的耦合光电振荡器产生低时间抖动、高重频的光脉冲。图5(a)是基于非泵浦掺铒光纤增强结构的耦合光电振荡器原理图。其基本原理是在非泵浦掺铒光纤上形成驻波效应^[40],从而有效地抑制超模噪声。实验中实现了10 GHz工作时,超模抑制比达到75.4 dB,边模抑制比达到90.7 dB,相位噪声为 -130.5 dBc/Hz @ 10 kHz,主要实验结果如图5(b) — (e)所示。此外研究人员进行了基于光锁相环和倍频机制^[41],以及基于保偏光纤和色散位移光纤结构的耦合光电振荡器产生光脉冲^[42]的研究。

4 光电振荡器的应用

光电振荡器在微波、光学以及两者的交叉领域均有着重要应用,可应用于雷达、通信、传感和测量等多个领域。在信号产生领域,光电振荡器既可用于高性能本振信号来驱动频率综合器,也可直接产生线性调频信号、三角函数、相位编码信号等复杂波形;在信号处理领域,光电振荡器可提取输入信号中的时钟,实现码型变换、频率变换和分频等处理功

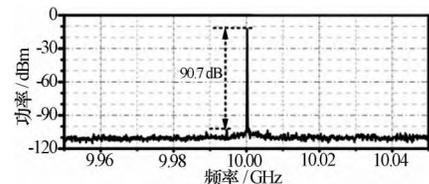


(a) 原理图

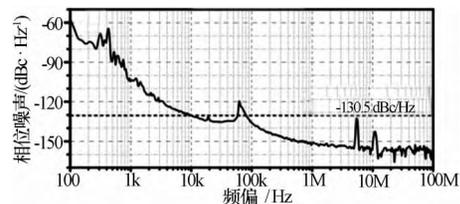


(b) 光脉冲波形

(c) 超模抑制比



(d) 微波信号边模抑制比



(e) 微波信号相位噪声

能;通过与波分复用技术、光载无线技术等相结合,光电振荡器还可实现多通道并行处理、分布式传输处理等,在新一代通信系统中具有巨大的应用潜力;在传感领域,光电振荡器可将光纤上的应变、温度等信息转换为输出微波信号的频率信息,通过精细的频率解调手段实现高精度的传感。

在雷达应用方面,美国 OEwaves 公司推出了多款实用化的光电振荡器,并成功在洛克希德·马丁公司的拓展区域防御与生存系统的微型直接碰撞拦截弹^[43]中演示验证;南京航空航天大学构建出光电振荡器样机,如图6所示,其工作频率为10 GHz时相位噪声在10 kHz频偏处低于 -153 dBc/Hz,经过了振动和温度实验验证,并于2020年安装于机载雷达,完成了飞行测试,显著提升了雷达在强杂波下的探测能力。

5 结论

本文对基于光电振荡器的低相噪光生微波源的机理、技术进展,以及应用进行了阐述和分析。在相位噪声和工程化方面,国内基于光电振荡器的光生微波源得到长足的发展,实现了10 GHz频率处相噪低于 -153 dBc/Hz @ 10 kHz的超低相噪指标,并构

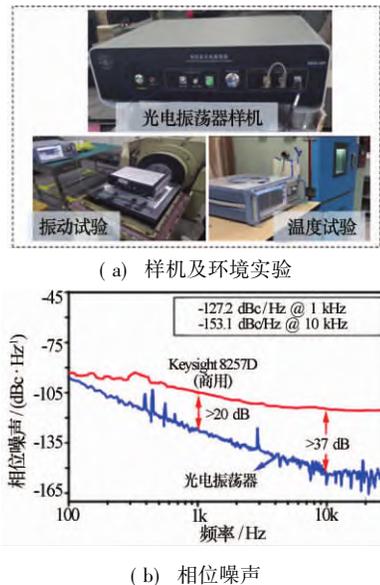


图 6 南京航空航天大学光电振荡器样机及实验结果

建了工程样机,相应指标可以比肩甚至超过国外同型号的产品。随着技术的进步,特别是微波光子集成技术的发展,低相噪光生微波源有望在雷达、通信、测量与传感等领域得到广泛应用。

参考文献

- (1) 周志鹏. 固态微波毫米波器件技术进展 [J]. 微波学报, 2020, 36(1): 74-77
Zhou Z P. The development of microwave and millimeter-wave semiconductor device [J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(1): 74-77
- (2) Yao J. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335
- (3) Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. Journal of the Optical Society of America B (Optical Physics), 1996, 13(8): 1725-1735
- (4) Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system [J]. Optics Communications, 1979, 30(2): 257-261
- (5) 刘世锋. 基于对消结构的光电振荡器及其应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022
Liu S F. Research and Application of opto-electronic oscillator based on cancellation structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022
- (6) IEEE Std 1139-1999 IEEE standard definitions of physical quantities for fundamental frequency and time metrology-random instabilities [S]. New York: IEEE Standards Association, 1999
- (7) 苑泽. RoF 链路中平衡探测降低 RIN 噪声的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017
Yuan Z. The research on decreasing relative intensity noise using balanced-detection method in ROF link [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017
- (8) Marazzi L, Boletti A, Parolari P, et al. Relative intensity noise suppression in reflective soas [J]. Optics Communications, 2014, 318: 186-188
- (9) Tang H, Yu Y, Zhang X. Widely tunable optoelectronic oscillator based on selective parity-time-symmetry breaking [J]. Optica, 2019, 6(8): 944-950
- (10) Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 449-456
- (11) Ilchenko V S, Matsko A B. Optical resonators with whispering-gallery modes - part II: applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(1): 15-32
- (12) Yao X S, Maleki L. Multiloop optoelectronic oscillator [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(1): 79-84
- (13) Lee K H, Kim J Y, Choi W Y. Hybrid dual-loop optoelectronic oscillators [A]. 2007 International Topical Meeting on Microwave Photonics [C], Victoria Canada, 2007
- (14) Jia S, Yu J, Wang J, et al. A novel optoelectronic oscillator based on wavelength multiplexing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 27(2): 213-216
- (15) Cai S, Pan S, Zhu D, et al. Coupled frequency-doubling optoelectronic oscillator based on polarization modulation and polarization multiplexing [J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1140-1143
- (16) Bluestone A, Spencer D T, Srinivasan S, et al. An ultra-low phase-noise 20 GHz PLL utilizing an optoelectronic voltage-controlled oscillator [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(3): 1046-1052
- (17) Razavi B. A study of injection locking and pulling in oscillators [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(9): 1415-1424
- (18) Tseng W H, Feng K M. Enhancing long-term stability of the optoelectronic oscillator with a probe-injected fiber delay monitoring mechanism [J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1597-1607
- (19) Teng C, Zou X, Li P, et al. Fine tunable PT-symmetric optoelectronic oscillator based on laser wavelength tuning [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 32(1): 47-50
- (20) Lin C T, Shih P T, Chen J, et al. Optical millimeter-wave signal generation using frequency quadrupling technique and no optical filtering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(12): 1027-1029

- (21) Wang Q, Rideout H, Zeng F, et al. Millimeter-wave frequency tripling based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(23): 2460-2462
- (22) Zhu D, Pan S, Ben D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 24(3): 194-196
- (23) Zhou P, Zhang F, Pan S. A Multi-frequency optoelectronic oscillator based on a single phase-modulator [A]. CLEO: Applications and Technology [C], San Jose, USA, 2015
- (24) Gao B, Zhang F, Zhou P, et al. A frequency-tunable two-tone RF signal generator by polarization multiplexed optoelectronic oscillator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(2): 192-194
- (25) Ilchenko V S, Byrd J, Savchenkov A A, et al. Miniature oscillators based on optical whispering gallery mode resonators [A]. 2008 IEEE International Frequency Control Symposium [C], Honolulu, USA, 2008
- (26) Tang J, Hao T, Li W, et al. Integrated optoelectronic oscillator [J]. Optics Express, 2018, 26(9): 12257-12265
- (27) Zhou P, Zhang F, Guo Q, et al. Linear frequency-modulated waveform generation based on a tunable optoelectronic oscillator [A]. 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) [C], Beijing, China, 2017
- (28) Simpson T, Liu J, Huang K F, et al. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers [J]. Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B, 1997, 9(5): 765
- (29) Zhou P, Zhang F, Guo Q, et al. Reconfigurable radar waveform generation based on an optically injected semiconductor laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-9
- (30) Hao T, Cen Q, Dai Y, et al. Breaking the limitation of mode building time in an optoelectronic oscillator [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 1-8
- (31) Zhou P, Zhang F, Pan S. Generation of linear frequency-modulated waveforms by a frequency-sweeping optoelectronic oscillator [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(18): 3927-3934
- (32) Hao T, Tang J, Shi N, et al. Dual-chirp Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator [J]. Optics Letters, 2019, 44(8): 1912-1915
- (33) Li Y, Hao T, Li G, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signals based on Fourier domain mode locking [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(9): 433-436
- (34) Callan K E, Illing L, Gao Z, et al. Broadband chaos generated by an optoelectronic oscillator [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(11): 113901
- (35) Yao T, Zhu D, Ben D, et al. Distributed MIMO chaotic radar based on wavelength-division multiplexing technology [J]. Optics Letters, 2015, 40(8): 1631-1634
- (36) 朱丹, 徐威远, 陈文娟, 等. 基于光波分复用网络的分布式多目标定位系统 [J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 171-177
Zhu D, Xu W Y, Chen W J, et al. Distributed multi-target localization system based on optical wavelength division multiplexing network [J]. Journal of Radars, 2019, 8(2): 171-177
- (37) 徐威远. 基于光纤网络架构的分布式多目标定位系统 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017
Xu W Y. Research on distributed localization system based on optical fiber network [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017
- (38) Lasri J, Devgan P, Tang R, et al. Self-starting optoelectronic oscillator for generating ultra-low-jitter high-rate (10 GHz or higher) optical pulses [J]. Optics Express, 2003, 11(12): 1430-1435
- (39) Zhou P, Zhang F, Gao B, et al. Optical pulse generation by an optoelectronic oscillator with optically injected semiconductor laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17): 1827-1830
- (40) Zhu D, Du T, Pan S. A coupled optoelectronic oscillator with performance improved by enhanced spatial hole burning in an erbium-doped fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3726-3732
- (41) Williams C, Davila-Rodriguez J, Mandridis D, et al. Noise characterization of an injection-locked COEO with long-term stabilization [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(19): 2906-2912
- (42) Salik E, Yu N, Maleki L. An ultralow phase noise coupled optoelectronic oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(6): 444-446
- (43) OEwaves' micro-opto-electronic oscillator supports successful interceptor flight [OL]. <https://www.microwave-journal.com/articles/19901>



潘时龙 男, 1982年生, 教授。主要研究方向: 微波光子学, 光电测量, 集成光子学等。
E-mail: pans@nuaa.edu.cn