微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012901

基于光注入半导体激光器的宽带雷达信号产生及应用

周　沛[1,2]，李念强[2]，潘时龙[1*]

（1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院，雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室，南京 211106；
2. 苏州大学 光电科学与工程学院，教育部现代光学技术重点实验室，江苏 苏州 215006）

摘　要： 由于具有动力学特性丰富、体积小和易集成等优点，基于半导体激光器的信号产生技术已成为高性能微波光子信号产生的优选方案之一。半导体激光器在合适的外光注入条件下能够工作在单周期振荡态，可突破本征弛豫振荡频率的限制，产生频率大范围可调的微波信号；进一步动态地控制注入参数，能够生成宽带可重构的微波调频信号，在雷达领域具有重要的应用前景。文章首先介绍了基于光注入半导体激光器的宽带微波信号生成机理并实验产生了大时宽带宽积的微波线性调频信号，其中心频率、带宽、时宽和工作频段均可灵活调谐；然后，构建了延时匹配光电反馈环路，提升了宽带微波调频信号的频谱纯度和梳齿信噪比等性能参数；最后，基于该高性能宽带微波调频信号发生器构建了微波光子雷达验证系统，分析了其在目标探测与成像方面的性能。

关键词： 半导体激光器；微波光子学；光注入；线性调频信号；雷达

中图分类号： TN29　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0012－09

Wideband Radar Signal Generation and Application Based on An Optical Injected Semiconductor Laser

ZHOU Pei[1,2], LI Nianqiang[2], PAN Shilong[1]

(1. Key Lab. of Radar Imaging and Microwave Photonics of the Ministry of Education, College of Electronic and Information Engin., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, CHN; 2. Key Lab. of Modern Optical Technologies of the Ministry of Education, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, CHN)

Abstract: Due to the advantages of rich dynamics, small size and easy integration, semiconductor laser-based signal generation technology has become a potential candidate for high-performance microwave photonic signal generation. Under proper optical injection, semiconductor lasers can operate at the period-one (P1) oscillation state and break through the limitation of the intrinsic relaxation oscillation frequency to realize the generation of the widely tunable microwave signal. In addition, assisted by dynamical control of injection parameters, wideband reconfigurable microwave frequency-modulated (LFM) signals can be generated, which has important applications in radar systems. In this paper, the research progresses of the wideband radar signal generation and application based on an optically injected semiconductor laser were reviewed. Firstly, microwave LFM waveforms with large time-bandwidth products were successfully generated by exploring the controlled P1 dynamics of an optically injected semiconductor laser. The main operating parameters are adjustable, including the central frequency, bandwidth, frequency band, and temporal period. Secondly, a delay-matched optoelectronic feedback structure was introduced to greatly improve the spectral purity and phase coherence of the generated wideband radar

收稿日期：2022－01－29.

基金项目：国家自然科学基金项目(62001317)；江苏省自然科学基金项目(BK20200855).

* **通信作者：**潘时龙　**E-mail：** pans@nuaa.edu.cn

waveform. Finally, by applying the generated wideband waveforms, a microwave photonic radar system was experimentally demonstrated, and its high-resolution target detection and imaging ability were verified.

Key words: semiconductor laser; microwave photonics; optical injection; linear frequency-modulated signal; radar

0　引言

雷达(Radar)作为一种可以感知目标距离、速度、几何分布乃至物质属性的传感器，是人类进行全天候目标探测与识别的主要手段，被广泛应用于军事和民用领域[1]。受限于电子器件的带宽，传统雷达系统的分辨率和处理速度存在着提升瓶颈。近年来，微波光子雷达及其关键技术受到了国内外研究人员的广泛关注[2-5]。凭借光子技术频率高、带宽大、可重构和抗电磁干扰等优势，微波光子雷达能够更好、更快地产生和处理宽带雷达信号，有望突破传统雷达面临的带宽瓶颈，提升雷达系统的目标分辨率、作用距离、响应速度等关键指标，为未来战场低空小型化目标的实时辨识和无人驾驶设备的准确环境感知提供了新的思路。作为微波光子雷达系统的核心部件之一，微波光子线性调频(Linear Frequency-Modulated，LFM)信号产生装置受到了国内外研究人员的广泛关注。依据其实现原理主要可分为微波光子倍频法、频谱整形-频时映射法和微波光子调相法三种[6-12]。微波光子倍频法的基本思想是利用电基带线性调频信号驱动电光调制器，由电光调制的非线性效应激发出高阶谐波，然后选取其中不同的边带拍频，产生高频、宽带的线性调频信号[6-7]。该方法具有结构简单、易于操作等优点，但需要一个高质量的基带雷达波形发生器，且倍频过程会引入噪声和杂散，使得输出信噪比等参数恶化。频谱整形-频时映射法主要应用脉冲光源光谱较宽的优势，首先利用频谱整形器对宽带光谱进行整形，然后通过频时映射将频域的形状映射到时域，得到所需的时域波形[8-10]。基于频谱整形-频时映射法所产生信号的带宽虽然很大，但是受限于现有光谱整形器的频谱整形精度(吉赫兹量级)，信号的时宽非常小(纳秒量级)，进而使所产生线性调频信号的时宽带宽积受到限制，且波形精细度差、线性度低。微波光子调相法通过电光相位调制的方式在两路光载波间引入二次抛物线型的相位差，经过耦合拍频后可产生线性调频信号[11-12]。然而该方法结构复杂，对电基带波形发生器的性能要求高。

为了克服现有方法在复杂度、时宽带宽积和调谐性等方面的缺点，人们提出了一种新型的微波线性调频信号产生方法——光注入半导体激光器法[13-30]。在该方法中半导体激光器工作在单周期(Period-One，P1)振荡态，通过加载高精细的低速电驱动信号动态操控光注入参数，实现单周期振荡频率的线性扫频，进而产生宽带的微波线性调频信号。与现有的方法相比，光注入半导体激光器法无需高速电基带波形发生器和频谱整形器等，而仅需普通商用单模半导体激光器和低频电驱动信号，具有结构简单、控制灵活和易于集成等优点。本文主要综述作者在基于光注入半导体激光器的宽带雷达信号产生及应用的最新研究进展。在阐明基于光注入半导体激光器的宽带微波信号生成机理的基础上，实验产生了大时宽带宽积的微波线性调频信号，其中心频率、带宽、时宽和工作频段均可灵活调谐；然后，介绍了延时匹配反馈环路方法，该方法提升了宽带微波调频信号的频谱纯度和梳齿信噪比等性能参数；最后，基于该高性能宽带微波调频信号发生器构建了微波光子雷达验证系统，分析了其在目标探测与成像方面的性能。

1　基于光注入半导体激光器的微波信号生成原理

半导体激光器在稳定性分类上属于 B 类激光器：在没有外界扰动的情况下，其输出光信号经过短时间的弛豫振荡后会很快达到稳定状态。通过外部光注入的方式，半导体激光器能够被激发到多种非线性动力学状态[13]。光注入半导体激光器系统的基本结构如图 1 所示，主要包含主从结构的两个激光器，其中从激光器为单模半导体激光器。主激光器产生的连续光信号依次通过光衰减器、偏振控制器和光环行器注入从激光器；然后，从激光器的输出光信号由光电探测器(Photodetector，PD)接收并输出微波信号。图 2 展示了光注入半导体激光器的典型动力学状态在注入参数空间的二维分布图[13-15]，

包括稳态锁定(Stable Locking)、单周期振荡(P1)、倍周期振荡(Period-Two,P2)和混沌振荡态(Chaos Oscillation)。如图 2 所示,在由注入强度和失谐频率组成的参数空间中,单周期振荡态存在于较大的范围内。工作在单周期振荡态时,光注入半导体激光器系统能够产生单频微波信号,其频率可以通过改变光注入强度 ξ 和失谐频率 f_i 来实现大范围调谐。本文将探讨基于光注入半导体激光器的微波信号产生技术。

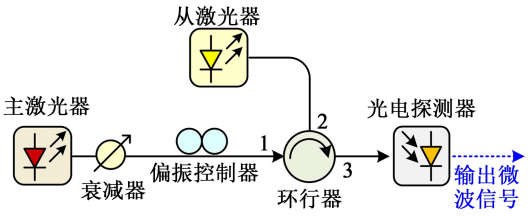


图 1 光注入半导体激光器的基本结构

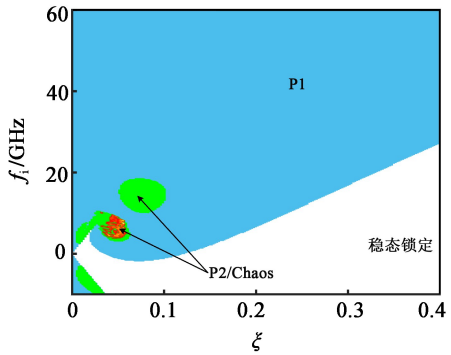


图 2 光注入半导体激光器的动力学状态分布图

图 3 为光注入半导体激光器工作在单周期振荡状态下的典型光谱特性。主从激光器的频率失谐为 $f_i=f_m-f_s$,f_m 和 f_s 分别是主激光器输出频率和从激光器的自由谐振频率。注入光使得腔内振荡锁定在频率 f_m 处,从而从激光器输出频率为 f_m 的分量。同时,在光注入下,从激光器所需的腔内增益也会相应降低;受线宽增强因子的影响,腔内增益介质的折射率会增加,因此激光器的等效腔长会增加,导致腔谐振波长从 f_s 红移到 f'_s。当工作在单周期振荡状态时,这种光注入激发的激光振荡与光注入引起的红移腔谐振动态竞争。在合适的注入条件下,通过 Hopf 分歧会产生频率间距 f_o 的非均匀光学双边带信号,其中 $f_o=f_m-f'_s$ 是单周期振荡频率。经过光电探测后,该单周期振荡态的光信号可以生成频率为 f_o 的单频微波信号;通过改变注入强度和失谐频率,微波信号频率 f_o 能够在数吉赫兹至上百吉赫兹内调谐[16]。

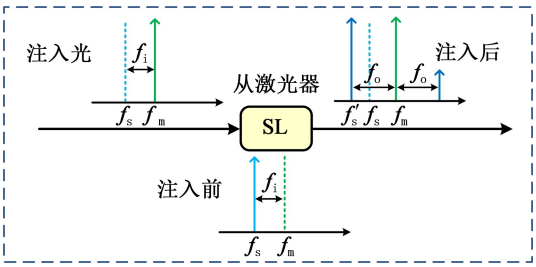


图 3 光注入半导体激光器在单周期振荡态下的光谱特性示意图

2 宽带微波调频信号发生器

21 世纪初以来,研究人员对基于光注入半导体激光器的单频微波信号产生方案进行了广泛的研究[17-20]。值得注意的是,当主从激光器的失谐频率 f_i 固定时,光注入半导体激光器的单周期振荡频率 f_o 在很宽的范围内与注入强度 ξ 线性相关[14];同时,光注入半导体激光器的单周期振荡频率的附加切换时间仅为亚纳秒量级[21-22]。因此,动态地控制注入光强度的变化,可以灵活控制光注入半导体激光器系统输出微波信号的瞬时频率,实现宽带微波调频信号的产生。

2.1 宽带微波调频信号产生方案

2016 年,南京航空航天大学潘时龙课题组提出了基于光注入半导体激光器的宽带微波线性调频信号发生器[23]。如图 4 所示,它利用电控制信号 $S(t)$ 驱动强度调制器(Intensity Modulator,IM)来控制注入光信号的幅度,相应的输出微波频率 f_o 也随之变化。当 $S(t)$ 被设置为类锯齿波时,注入光信号具有线性增加的注入强度 ξ,经过光电探测后输出微波信号的瞬时频率也随时间线性增加,即产生了微波线性调频信号。该方案中,增大注入光幅度的变化范围可以增大线性调频信号的带宽,降低注入光幅度的调谐速度可以增大线性调频信号的时宽。因此,通过设置合适的光注入参数,该方案能够生成具有大时宽带宽积的宽带微波线性调频信号。随后,香港城市大学 Chan 课题组[24]和美国空军研究实验室 Usechak 等[22]采用低速正弦信号调制光注入强度,实现了微波正弦调频信号的生成。2017 年,南京航空航天大学潘时龙课题组对调制光注入半导体激光器方法生成宽带微波调频信号的时频特性进行了详细的研究,获得了可重构的宽带微波调频信号[25]。他们通过对光注入半导体激光器系统的幅度-频率传输函数进行研究,精准地设计电控制

信号 $S(t)$的波形，不仅实现了输出信号中心频率、带宽和时宽等参数的灵活调谐，更进一步获取了宽带微波跳频序列、三角调频信号、非线性调频信号、双啁啾线性调频信号等不同类型的雷达发射信号[21,26-28]。

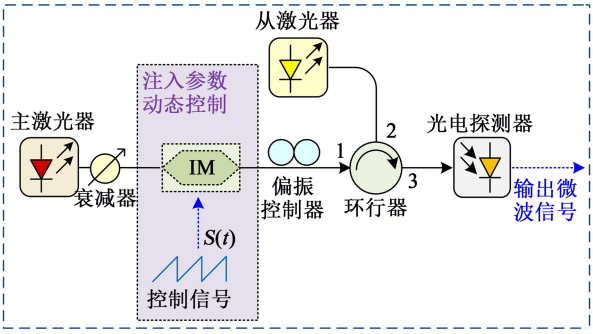


图 4　基于光注入半导体激光器的线性调频信号发生器

2.2　宽带微波线性调频信号产生实验结果

基于图 4 所示的方案进行了宽带线性调频信号产生的实验验证[23]。当失谐频率 $f_i=5.7$ GHz 且注入强度 $\xi=1.19$ 时，光注入半导体激光器工作在单周期振荡态的光谱图如图 5 所示[25]。实验中注入强度 ξ 定义为注入光信号与自由谐振从激光器输出光信号功率比的平方根，即两者的幅度比。从图中可以观察到，单周期振荡态光谱包含两个主要光波长分量，其间隔等于单周期振荡频率 $f_o=22.6$ GHz。作为比较，图 5 还给出了注入光和自由谐振从激光器的光谱。图 6 显示了当失谐频率 f_i 分别为 5.7，16.2，25.7 和 35.5 GHz 时，单周期振荡频率 f_o 与注入强度 ξ 的关系。从图 6 中可以得出，当失谐频率 f_i 固定时，单周期振荡频率 f_o 随着注入强度 ξ 的增加而几乎呈线性增加。此外，当注入强度 ξ 固定时，单周期振荡频率 f_o 随着频率失谐 f_i 的增加而相应增加。

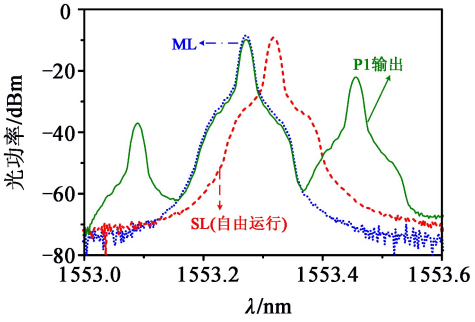


图 5　单周期振荡态的光谱图

图 7 显示了基于光注入半导体激光器生成宽带微波线性调频信号的结果[23]。此时，强度调制器 IM 偏置在正交点。为补偿系统中幅度传递函数的非线性，加载在 IM 上的控制信号 $S(t)$设置为频率为 1 MHz、幅度为 2.5 V 的类锯齿状信号[23]，如图 7(a)所示。输出微波线性调频信号的周期为 1 μs，其波形如图 7(b)所示，插图是每个周期的开始和结束位置的详细波形。图 7(c)是基于希尔伯特变换恢复的瞬时频率曲线，其中红色虚线是线性拟合结果。可以看出，该线性调频信号的中心频率为 16 GHz，带宽为 12 GHz(10～22 GHz)；对应的啁啾率为 12 GHz/μs，时宽带宽积为 1.2×10^4。为验证脉冲压缩能力，计算了所得线性调频信号的自相关函数。如图 7(d)所示，在自相关曲线中可以清楚地观察到一个窄峰，其半高全宽为 92 ps，对应的脉冲压缩比为 10 870。

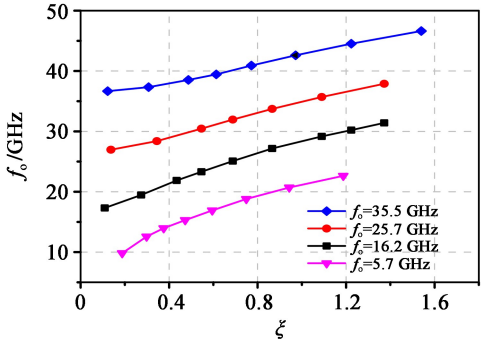
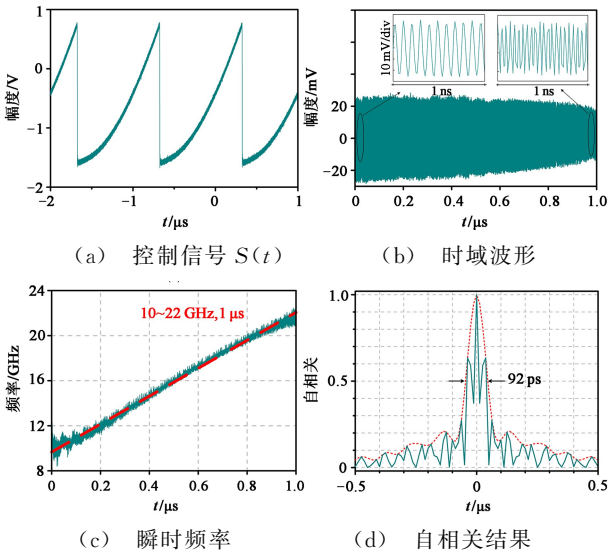


图 6　在不同频率失谐时，单周期振荡频率随注入强度的变化关系



(a)　控制信号 $S(t)$　　(b)　时域波形

(c)　瞬时频率　　(d)　自相关结果

图 7　所产生的线性调频信号的结果

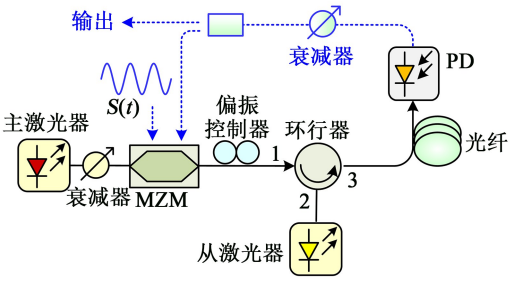
3　基于延时匹配反馈的性能提升

基于光注入半导体激光器的宽带调频信号产生方案的一个主要缺点是输出信号的频谱纯度较差：

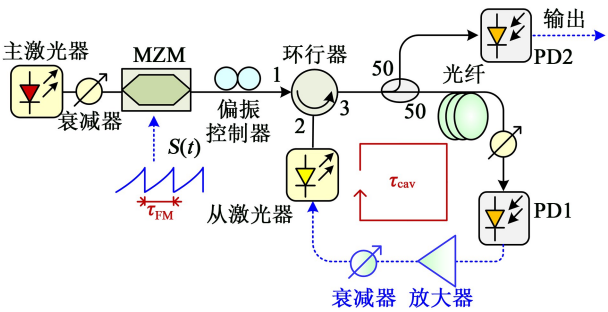
由于注入激光器的固有自发辐射噪声的限制，所产生的微波信号具有相对较大的 3 dB 微波线宽，通常为 1～10 MHz 量级。然而，由于宽带微波调频信号具有瞬时频率随时间变化的特点，单频微波信号产生中的信号纯度提升手段，如注入锁定、光锁相环、光电反馈等难以直接应用[18-20]。为了解决该问题，研究人员提出了基于“延时匹配”反馈的信号纯度提升方案[24,29-30]。此类方案的关键在于，反馈环路的延迟时间 τ_{cav} 需要与微波调频信号的周期 τ_{FM} 相匹配。当满足该条件（即 $\tau_{cav}=\tau_{FM}$）时，系统将形成近似稳态的工作模式，从而能够降低线性调频信号的相位噪声。这是因为：一方面反馈回路将产生一系列间隔为 $1/\tau_{cav}$ 的本征模式；另一方面当本征模式通过反馈回路一周时，宽带微波调频系统的工作频率也切换到完全相同的频谱位置，从而实现了有效的反馈增强。这意味着反馈回路可以将整个微波调频信号存储在延迟线中。这种工作原理，也被称为傅里叶域模式锁定（Fourier Domain Mode Locking，FDML），最早由 Huber 等[31]于 2006 年提出并用于实现高质量的扫频光纤激光器。理想情况下，输出信号的频率将以腔长重复频率为步长进行扫描，并具有固定的相位关系。此时系统产生的宽带微波调频信号将具有更好的频谱纯度和相位噪声性能。

3.1 基于延时匹配反馈的性能提升方案

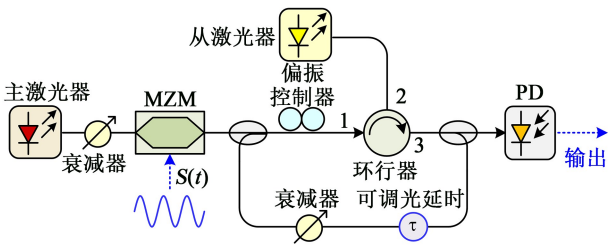
2016 年，香港城市大学 Chan 课题组提出采用延时匹配的光电反馈方案来提升光注入半导体激光器法生成的正弦调频信号的性能，其结构如图 8(a)所示[24]。该结构中光注入半导体激光器的输出被分成两路，其中一路经过一段光纤延迟线后输入 PD，经过光电探测后，反馈调制到马赫曾德尔调制器（Mach-Zehnder Modulator，MZM）的 RF 端口，形成一个光电反馈环路。实验中微波调频信号的梳齿信噪比提升到 45 dB，梳齿线宽降低为约 20 kHz。2018 年，南京航空航天大学潘时龙课题组报道了改进的延时匹配光电反馈方案，获得了性能提升的宽带线性调频信号[29]。如图 8(b)所示，该方案中线性调频信号光电反馈调制到从激光器而非 MZM 的 RF 端口，因此能够降低对 MZM 的带宽需求，并获取更高的调制效率。2019 年，西南大学吴正茂课题组报道了基于延时匹配的全光反馈方案提升光注入半导体激光器法生成的正弦调频信号的性能[30]，如图 8(c)所示。相比于光电反馈方案，该全光反馈环路中无需光电探测器和电功率调节器件。然而，由于反馈光信号与注入光信号耦合引起的干涉效应，该方案生成宽带微波调频信号的梳齿信噪略低。



(a) 延时匹配的光电反馈方案一



(b) 延时匹配的光电反馈方案二



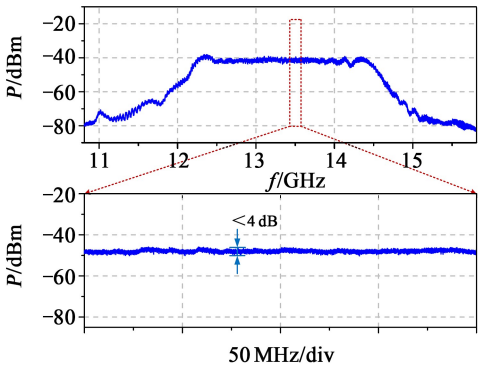
(c) 延时匹配的全光反馈方案

图 8 基于延时匹配反馈的性能提升方案

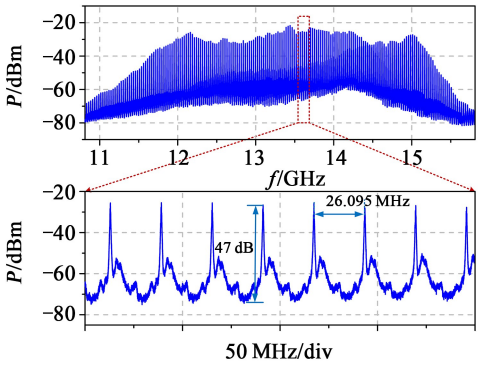
3.2 基于延时匹配光电反馈的性能提升实验结果

图 9 给出了基于图 8(b)中延时匹配光电反馈方案提升线性调频信号性能的结果图[30]。实验中，电控制信号 $S(t)$ 的频率为 26.095 MHz，幅度约为 1 V。该调制频率 26.095 MHz 是根据反馈回路的延迟精确选择的，满足 $\tau_{FM}=\tau_{cav}$。理想周期性线性调频波形的频谱是频率间隔为 $1/\tau_{FM}$ 的微波频率梳。如图 9(a)所示，当光电反馈回路未加载时，由于存在较大的相位噪声且相位不相干，线性调频信号频谱中的梳齿信噪比 R 不超过 4 dB。作为对比，当加载延时匹配的光电反馈回路后，图 9(b)的线性调频信号频谱中出现了一系列明显的梳齿分量，梳齿间隔为 $1/\tau_{cav}$。由于 FDML 带来的固定相位关系和降低的相位噪声，梳齿信噪比 R 显著提高到 47 dB。与图 9(a)相比，延时匹配光电反馈结构将

梳齿信噪比提高了 43 dB。



（a）　无光电反馈



（b）　有光电反馈

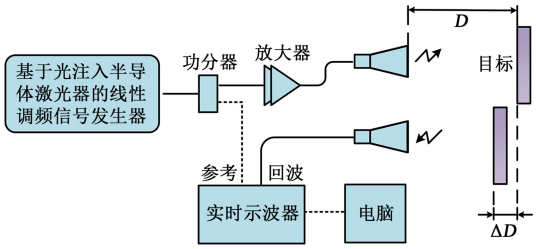
图 9　延时匹配光电反馈方案产生线性调频信号的频谱

4　微波光子雷达验证

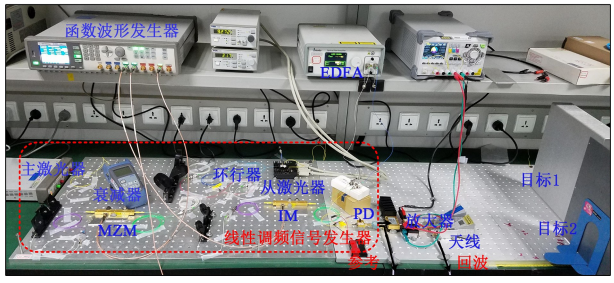
为了进一步验证基于光注入半导体激光器的宽带微波调频信号产生器的性能，研究人员构建了多种基于光注入半导体激光器的微波光子雷达验证系统，并进行了实验研究[25,32-35]，实现了高分辨率的目标探测和成像。

4.1　微波光子雷达方案

2017 年，南京航空航天大学潘时龙课题组报道了基于光注入半导体激光器的高分辨雷达测距系统，如图 10(a)所示[25]。图 10(b)是系统实物图，光注入半导体激光器系统生成的 K 波段线性调频信号(18.3～26.4 GHz)分成两路：一路经过功率放大后输送到发射天线辐射到探测空间；另一路作为参考信号与被接收天线收集的回波信号同时被示波器采集。通过对参考信号和回波信号进行互相关计算，可以获得目标的距离信息。实验中该雷达验证系统获得了约 2.46 cm 的距离分辨率。在上述高分辨雷达测距系统的基础上，2020 年，他们将实验中线性调频信号的带宽增大为 12 GHz（15～27 GHz），并利用改进的后向投影（Back Projection，BP）成像算法，实现了基于光注入半导体激光器的高分辨率雷达成像[32]。2021 年，他们进一步采用光子下变频技术，在光注入半导体激光器实验中获得了频率范围为 1.5～20 GHz 的微波非线性调频信号。基于该 18.5 GHz 带宽的非线性调频信号，实现了分辨率高达 8.1 mm 的穿墙雷达成像[33]。



（a）　结构原理图



（b）　系统实物图

图 10　基于光注入半导体激光器的雷达测距系统

由于基于光注入半导体激光器生成的雷达波形信号的带宽较大，上述微波光子雷达方案的接收端数据量较大，导致处理速度受限。针对该问题，2021 年，作者实现了基于光注入半导体激光器的快速、高分辨成像雷达验证系统[34-35]。图 11 是该微波光子雷达验证系统的结构图，主要包括基于光注入半导体激光器单周期振荡的线性调频信号发射机以及基于双臂 MZM(Dual-Drive MZM，DMZM)的光子去斜接收机。主激光器输出的连续光信号经 80∶20 光分束器后分别作为发射机和接收机中的光载波。在发射机中，主激光器、光衰减器、DMZM1、环行器、从激光器、PD1 构成了基于光注入半导体激光器的线性调频信号产生单元。为了提升所生成线性调频信号的相位噪声性能，构建了第 3 节中研究的延时匹配光电反馈环路[24]。经过将反馈环路延迟时间与线性调频信号的周期匹配，达成傅里叶模式锁定条件，可以获得性能增强的线性调频信号。该雷达发射信号经电功率放大器后分成两路：一路输入接收机作为去斜的参考信号，另一路输送至发射天线辐射至探测空间。在接收机中，雷达回波信号先后经过接收天线收集和电放大器放大，随后和参

考信号分别驱动 DMZM2 的两臂进行电光调制；调制光信号经过 PD2 进行光电探测完成光电混频。经过低通滤波器滤波后，使用低速模数转换器（Analog-to-Digital Converter，ADC）进行采样，接着使用数字信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）进行简单频谱分析即可获得去斜信号的频谱及目标的距离信息。该方案由于采用了光子去斜的预处理，使得接收端需要处理的数据量大为减少，仅需低速 ADC 和 DSP，能够大大提高雷达的处理速度。

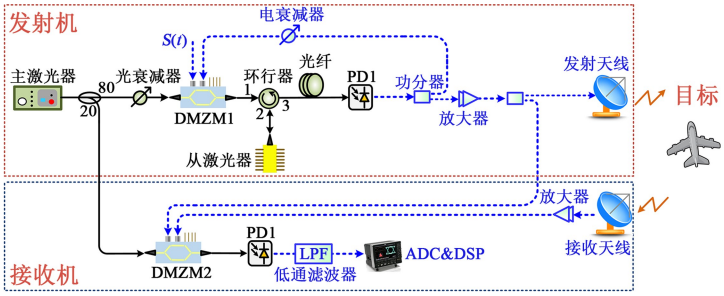
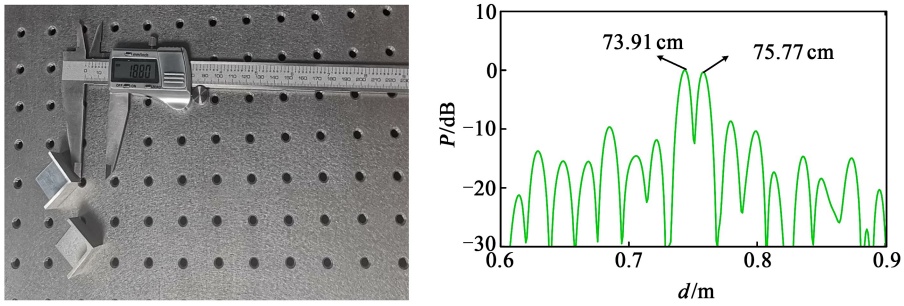


图 11 基于光注入半导体激光器的高速高分辨微波光子成像雷达验证系统

4.2 基于光注入半导体激光器的高速高分辨成像雷达实验结果

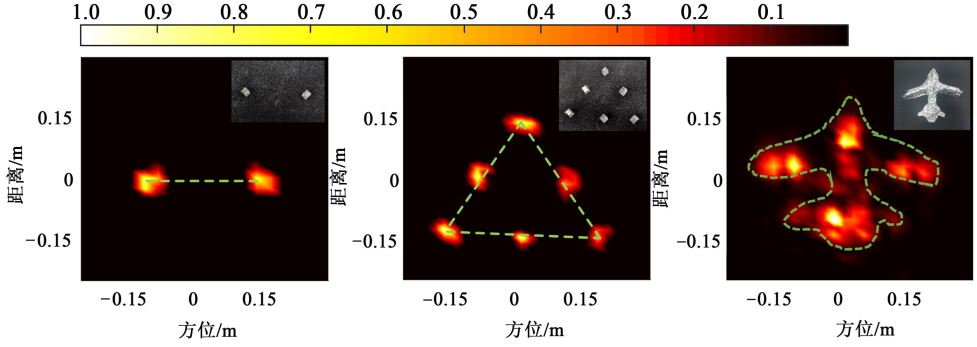
基于图 11 所示的方案进行了微波光子雷达实验验证[35]。实验中，微波光子雷达工作在 Ku 波段，发射信号为带宽 4 GHz（频率为 13～17 GHz），时宽 2.65 μs 的三角调频信号。如图 12(a)所示，首先将两个间隔为 1.88 cm 的金属角反射器沿着测量方向布置，进行了双目标探测实验以分析雷达系统的距离分辨率。经过采样率为 100 MS/s 的低速 ADC 采样和 DSP 分析后，可以获得光子去斜信号的频谱。如图 12(b)所示，两个频谱峰值分别位于 73.91 和 75.77 cm，即间距约为 1.86 cm，与实际值非常接近。该结果表明系统能够达到 1.88 cm 的极高距离分辨率。



（a） 距离分辨率测量实物图 （b） 去斜信号的频谱图

图 12 微波光子雷达实验结果

随后，基于光注入半导体激光器的微波光子雷达进行了逆合成孔径雷达（Inverse Synthetic Aperture Radar，ISAR）成像实验。图 13 是 ISAR 二维成像结果图，其中插图为实际目标的照片，其二



（a） 双目标 （b） 多目标 （c） 飞机模型

图 13 二维成像结果图

维成像分辨率高达约 1.88 cm×2.00 cm。图 13(a)是间隔为 30 cm 的两个角反射器的成像结果；图 13(b)是对六个角反射器组合的成像结果，这些角反射器构成等边三角形形状。图中可以观察到清晰的目标图像，且各目标间的距离与实际值一致。图 13(c)则是对尺寸为约 30 cm×30 cm 的飞机模型的成像结果，依然能够观察到清晰的目标图像。上述成像结果再次证明了该基于光注入半导体激光器的微波光子雷达具有高速、高分辨率的目标探测与成像能力。

5　总结与展望

基于光子技术实现宽带雷达波形产生具有巨大的优势，是突破电子技术瓶颈，实现高频、宽带微波信号产生的重要发展方向。与现有方法相比，论文研究的光注入半导体激光器法无需高速电基带波形发生器、复杂的频谱整形器，仅需普通商用单模半导体激光器和低频电驱动信号，结构更简单、控制更灵活。文中综述了本课题组在此方面的研究进展，从宽带线性调频信号产生、基于延时匹配反馈的性能提升、微波光子雷达验证三方面展现了此技术在高性能微波光子信号产生方面的特点。论文在阐明基于光注入半导体激光器的宽带微波信号生成机理的基础上，实验产生了大时宽带宽积的微波线性调频信号，其中心频率、带宽、时宽和工作频段均可灵活调谐；然后，构建了延时匹配光电反馈环路提升宽带微波调频信号的频谱纯度、梳齿信噪比等性能参数；最后，基于该高性能宽带微波调频信号发生器构建了高速高分辨率的微波光子成像雷达验证系统，实现了高达约 1.88 cm×2.00 cm 的二维成像分辨率。为满足未来雷达系统在多功能、一体化方面的应用需求，未来可进一步研究基于光子集成技术的光注入半导体激光器系统，实现高性能宽带微波调频信号产生。

参考文献：

[1] Skolnik M I. Introduction to Radar[M]. New York: Mc Graw Hill Professional, 1962: 1-29.

[2] Pan S, Zhang Y. Microwave photonic radars[J]. J. Lightwave Technol., 2020, 38(19): 5450-5484.

[3] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. Nature, 2014, 507: 341-345.

[4] Zhang F, Guo Q, Wang Z, et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging[J]. Opt. Express, 2017, 25(14): 16274-16281.

[5] Li R, Li W, Ding M, et al. Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing[J]. Opt. Express, 2017, 25(13): 14334-14340.

[6] Li X, Zhao S, Zhu Z, et al. Photonic generation of frequency and bandwidth multiplying dual-chirp microwave waveform [J]. IEEE Photon. J., 2017, 9(3): 1-14.

[7] Wang A, Wo J, Luo X, et al. Ka-band microwave photonic ultra-wideband imaging radar for capturing quantitative target information[J]. Opt. Express, 2018, 26(16): 20708-20717.

[8] Li Y, Rashidinejad A, Wun J M, et al. Photonic generation of W-band arbitrary waveforms with high time-bandwidth products enabling 3.9 mm range resolution[J]. Optica, 2014, 1(6): 446-454.

[9] Moslemi P, Rochette M, Chen L R. Simultaneous generation of WDM chirped microwave waveforms using integrated spectral shapers in silicon photonics[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(23): 5498-5504.

[10] Zhang H, Zou W, Chen J. Generation of a widely tunable linearly chirped microwave waveform based on spectral filtering and unbalanced dispersion[J]. Opt. Lett., 2015, 40(6): 1085-1088.

[11] Li W, Yao J. Generation of linearly chirped microwave waveform with an increased time-bandwidth product based on a tunable optoelectronic oscillator and a recirculating phase modulation loop[J]. J. Lightwave Technol., 2014, 32(20): 3573-3579.

[12] Zhang Y, Ye X, Guo Q, et al. Photonic generation of linear-frequency-modulated waveforms with improved time-bandwidth product based on polarization modulation[J]. J. Lightwave Technol., 2017, 35(10): 1821-1829.

[13] Simpson T, Liu J M, Huang K F, et al. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers [J]. Quantum Semiclassical Opt., 1997, 9(5): 765-784.

[14] Hwang S K, Liu J M, White J K, et al. Characteristics of period-one oscillations in semiconductor lasers subject to optical injection[J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 1997, 9(5): 765-784.

[15] Chan S C, Hwang S K, Liu J M. Period-one oscillation for photonic microwave transmission using an optically injected semiconductor laser[J]. Opt. Express, 2007, 15(22): 14921-14935.

[16] Chan S C, Hwang S K, Liu J M. Radio-over-fiber AM-to-FM upconversion using an optically injected semiconductor laser[J]. Opt. Lett., 2006, 31(15): 2254-2256.

[17] Qi X Q, Liu J M. Photonic microwave applications of the dynamics of semiconductor lasers[J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2011, 17(5): 1198-1211.

[18] Chan S C, Liu J M. Tunable narrow-linewidth photonic

microwave generation using semiconductor laser dynamics [J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2004, 10(5): 1025-1032.

[17] Suelzer J S, Simpson T B, Devgan P, et al. Tunable, low-phase-noise microwave signals from an optically injected semiconductor laser with opto-electronic feedback[J]. Opt. Lett., 2017, 42(16): 3181-3184.

[18] Zhou P, Zhang F, Zhang D, et al. Performance enhancement of an optically-injected-semiconductor-laser-based optoelectronic oscillator by subharmonic microwave modulation[J]. Opt. Lett., 2018, 43(21): 5439-5442.

[19] Zhou P, Zhang F, Ye X, et al. Flexible frequency-hopping microwave generation by dynamic control of optically injected semiconductor laser[J]. IEEE Photon. J., 2016, 8(6): 5501909.

[20] Usechak N G, Suelzer J S, Haefner J W. High-speed wideband voltage-controlled oscillator via an injection-locked laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2017, 29(13): 1132-1135.

[21] Zhou P, Zhang F, Guo Q, et al. Linearly chirped microwave waveform generation with large time-bandwidth product by optically injected semiconductor laser[J]. Opt. Express, 2016, 24(16): 1821-1829.

[22] Zhuang J P, Li X Z, Li S S, et al. Frequency-modulated microwave generation with feedback stabilization using an optically injected semiconductor laser[J]. Opt. Lett., 2016, 41(24): 5764-5767.

[23] Zhou P, Zhang F, Guo Q, et al. Reconfigurable radar waveform generation based on an optically injected semiconductor laser[J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2017, 23(6): 1801109.

[24] Zhang B, Zhu D, Zhou P, et al. Tunable triangular frequency modulated microwave waveform generation with improved linearity using an optically injected semiconductor laser[J]. Appl. Opt., 2019, 58(20): 5479-5485.

[25] Zhou P, Zhang R, Li K, et al. Generation of NLFM microwave waveforms based on controlled period-one dynamics of semiconductor lasers[J]. Opt. Express, 2020, 28(22): 32647-32656.

[26] Zhou P, Chen H, Li N, et al. Photonic generation of tunable dual-chirp microwave waveforms using a dual-beam optically injected semiconductor laser[J]. Opt. Lett., 2020, 45(6): 1342-1345.

[27] Zhou P, Zhang F, Pan S. Generation of linear frequency-modulated waveforms by a frequency-sweeping optoelectronic oscillator[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(17): 3726-3732.

[28] Lin X D, Xia G Q, Shang Z, et al. Frequency-modulated continuous-wave generation based on an optically injected semiconductor laser with optical feedback stabilization[J]. Opt. Express, 2019, 27(2): 1217-1225.

[29] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G. Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography[J]. Opt. Express, 2006, 14(8): 3225-3237.

[30] Sun G, Zhang F, Pan S. Photonic-assisted high-resolution incoherent back projection synthetic aperture radar imaging [J]. Opt. Commun., 2020, 466: 125633.

[31] Sun G, Zhang F, Pan S. Millimeter-level resolution through-the-wall radar imaging enabled by an optically injected semiconductor laser[J]. Opt. Lett., 2021, 46(22): 5659-5662.

[32] Zhou P, Zhang R, Jiang Z, et al. Demonstration of a RF-source-free microwave photonic radar based on an optically injected semiconductor laser[C]// Proc. of 2021 Optical Fiber Communication Conference (OFC 2021). Optical Society of America, 2021: Th1A. 11.

[33] Zhou P, Zhang R, Li N, et al. An RF-source-free reconfigurable microwave photonic radar with high-resolution and fast detection capability[J]. J. Lightwave Technol., 2022, doi: 10.1109/JLT.2022.3142992.

作者简介：

周　沛(1990—)，男，博士，讲师，主要研究方向为微波光子学、激光器非线性动力学与激光混沌；

李念强(1985—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为激光器非线性动力学、激光混沌与微波光子学；

潘时龙(1982—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事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方面的研究。