引用格式：ZHANG Fangzheng, YU Xiaoyue, PAN Shilong, et al. Reconfigurable Radar Waveform Generation by P1 Dynamics of Optically Injected Semiconductor Laser (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(3):0355109
张方正，余肖月，潘时龙，等. 基于光注入半导体激光器的宽带可重构雷达波形产生研究(特邀)[J]. 光子学报，2026，55(3)：0355109

基于光注入半导体激光器的宽带可重构雷达波形产生研究(特邀)

张方正[1]，余肖月[1]，潘时龙[1]，孔嘉渊[1]，许祯瑜[2]，范君杰[2]
(1 南京航空航天大学 电子信息工程学院，南京 211106)
(2 上海卫星工程研究所，上海 201100)

摘 要：在对半导体激光器单周期振荡进行理论与仿真的基础上，进行了基于光注入半导体激光器单周期振荡态产生单频信号与宽带雷达波形的实验研究，验证了利用所提方法产生可调谐单频信号与宽带可重构雷达波形的可行性。此外，针对产生信号性能受限于半导体激光器本征噪声等问题，在单频信号产生系统中引入双环路光电反馈结构，有效抑制了单频信号相位噪声；在宽带雷达波形产生系统中引入傅里叶域锁模结构，有效提升了信号带内信噪比与频率稳定度。最后，利用光注入半导体激光器单周期振荡的波形产生系统构建了单发单收与多发单收阵列雷达系统，发射信号为 8 GHz(10～18 GHz)带宽的线性调频信号，通过目标探测实验验证了基于光注入半导体激光器单周期振荡的雷达波形产生在实现高分辨目标探测应用中的可行性。

关键词：微波光子学；半导体激光器；雷达；波形产生；光注入
中图分类号：TN248.4 **文献标识码**：A **doi**：10.3788/gzxb20265503.0355109

0 引言

随着作战环境日趋复杂，探测手段日益丰富，低空/超低空突防、综合电子干扰、高速反辐射导弹和隐身目标已经成为现代雷达对防空系统的四大核心威胁[1]。未来战场要求雷达系统除了具备高分辨率探测能力之外，还必须集成高灵敏探测、低截获设计、宽频段可重构、多功能一体化、认知自适应以及微型化等特征[2]。为了满足以上需求，雷达发射波形正朝着多波段、多种类、多功能快速发展，以适应多变的战场环境和对抗策略。常用的雷达信号包括线性调频信号、三角调频信号、步进频率信号以及随机跳频信号等。其中，线性调频信号具有良好的脉冲压缩特性和可控的多普勒分辨率，在雷达定位和测速等领域发挥着重要作用；三角调频信号因其交替线性上调和下调的特性受到广泛的关注，可以有效解决距离-多普勒耦合问题；步进频率信号的瞬时带宽较窄，可以在有限的发射脉冲条件下合成较大的带宽，有效降低数字信号处理的硬件要求；跳频信号具有理想的图钉型模糊函数，瞬时带宽窄易于接收、平均传输功率高、探测范围大并可以有效抑制杂波，能够有效应对宽带干扰、瞄准式干扰和跟踪式干扰。因此，探究高性能的可重构波形产生方法可以从源头上为下一代雷达系统发展提供切实可行的解决方案。

传统的电子信号发生器主要采用模拟法和数字法实现：模拟法通常指电压驱动压控振荡器的方法，产生的信号频段较低，稳定性差且系统结构复杂；数字法通常指基于数字频率综合器的方法，可对产生的信号灵活调谐，但其杂散高，带宽一般为数百 MHz，难以适应宽带雷达的需求[3]。近年来基于微波光子的信号产生技术受到广泛关注。微波光子技术以光波为信息载体，通过将微波信息调制到光域上进行传输和处理，

基金项目：国家自然科学基金(62371224)，上海航天科技创新基金(SAST2024-023)，江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX25_0591)
第一作者：张方正，zhangfangzheng@nuaa.edu.cn
收稿日期：2025-08-08；**录用日期**：2025-09-30

具有大带宽、频率高、传输响应平坦、远距离传输损耗低等许多优点，逐渐应用到微波/毫米波系统中，实现射频信号的产生、传输与处理[4-9]。基于微波光子技术的雷达波形产生可以有效克服传统电子器件的技术瓶颈，有望应用于下一代高性能雷达系统。

早在20世纪80年代末，美国国防部高级研究计划局就开始了微波光子雷达相关的研究，并设立了“光任意波形发生器”、“高精度光子微波谐振器”等项目，旨在利用微波光子技术实现雷达信号产生与处理。随后，国内外研究人员提出了多种基于微波光子技术的方案来产生宽带微波信号。常用的微波光子雷达波形产生方法包括频谱整形-频时映射法[10]、微波光子倍频法[11]、微波光子调相法[12]、光外差法[13-14]、光数模转换法[15-16]等，具有大带宽、高载频等突出优势，但仍面临着体积较大、系统复杂、难以调谐，频率精细度差和信号质量差等问题，限制了其在实际系统中的应用。因此，亟需发展新型微波光子宽带信号产生技术，以解决现有方案在带宽、噪声等方面的局限性。近年来，基于半导体激光器动力学的微波信号产生技术受到广泛关注。半导体激光器具有丰富的非线性动力学特性，将其用于微波信号产生时具有信号带宽大、波形可重构等突出优势。目前，国内外高校，如美国加利福尼亚大学[17-20]、香港城市大学[21-26]、西南大学[27-28]、陆军工程大学[29-30]、苏州大学[31-32]及南京航空航天大学[33-37]等均开展了相关的研究工作，内容涉及半导体激光器理论模型、非线性动力学状态分析以及不同种类微波信号的产生方法等。然而，现有报道大多针对光注入半导体激光器系统的某一方面特性研究或针对某一种信号产生实现与性能研究，尚缺少对光注入半导体激光器系统及应用于可重构雷达波形产生的系统性研究。在此背景下，本文系统研究了基于光注入半导体激光器单周期振荡特性的宽带雷达波形产生方案，介绍了光注入半导体激光器非线性动力学状态特性、可调谐单频微波信号产生、可重构宽带雷达波形产生及参数调控、基于傅里叶域锁模的宽带信号性能提升技术以及宽带微波光子可重构雷达系统的构建和目标探测应用。

1 理论分析

半导体激光器工作的基本原理是通过一定的激励方式，使腔内实现非平衡的载流子粒子数反转，当满足增益阈值条件时，即可输出连续激光。研究人员发现，在光注入[17,24,33-37]、光反馈[21,38]以及光电反馈[19-20]等外部扰动方式下，可以激发半导体激光器丰富的非线性动力学状态。其中，光注入方式通过引入一个外部激光源作为扰动，注入到半导体激光器中，使激光器从自由运行状态转变为非线性状态，具有可控性强、操作灵活、可激发的非线性状态丰富等优点，逐渐成为探究半导体激光器非线性机理及系统应用的优选方式。

图1为光注入半导体激光器系统的典型结构图。主激光器(Master Laser, ML)输出的连续波光信号通过偏振控制器(Polarization Controller, PC)后经光环形器(Optical Circulator, CIR)注入到从激光器(Slave Laser, SL)中。其中偏振控制器被用来调节注入光的偏振态，从激光器为半导体激光器，其光信号经光环形器3端口输出。其中一部分输出光信号在光域进行光谱特性分析，另一部分输出光信号被送往光电探测器(Photodetector, PD)经光电转换后得到微波信号。通过调节注入参数，从激光器可以激发出不同的非线性动力学状态，包括稳态锁定(Stable Locking, S)、单周期振荡态(Period-one Oscillation, P1)、双周期振荡态(Period-two Oscillation, P2)、倍周期振荡态(Period-N Oscillation, PN)和混沌态(Chaos)等[17]，其中本文主要研究基于单周期振荡态的光注入半导体激光器非线性特性及信号产生技术。

由于半导体激光器主要是靠电流注入激励，通过光子与载流子直接进行能量转换的器件，因此可以用归一化的激光场复振幅的实部a_r、虚部a_i和载流子密度$\bar{n}$的耦合一阶差分速率方程来表示其动态特性[22]

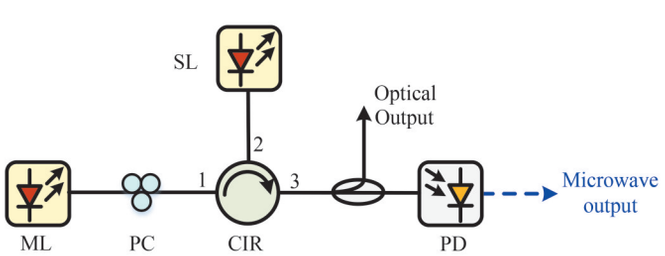


图1 光注入半导体激光器系统的典型结构图

Fig. 1 Typical schematic diagram of the optically injected semiconductor laser system

$$\frac{\mathrm{d}a_\mathrm{r}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{2}\left[\frac{\gamma_\mathrm{n}\gamma_\mathrm{c}}{\gamma_\mathrm{s}\tilde{J}}\tilde{n}-\gamma_\mathrm{p}(a_\mathrm{r}^2+a_\mathrm{i}^2-1)\right](a_\mathrm{r}+ba_\mathrm{i})+\xi\gamma_\mathrm{c}\cos(2\pi f_\mathrm{i}t) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}a_\mathrm{i}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{2}\left[\frac{\gamma_\mathrm{n}\gamma_\mathrm{c}}{\gamma_\mathrm{s}\tilde{J}}\tilde{n}-\gamma_\mathrm{p}(a_\mathrm{r}^2+a_\mathrm{i}^2-1)\right](-ba_\mathrm{r}+a_\mathrm{i})-\xi\gamma_\mathrm{c}\sin(2\pi f_\mathrm{i}t) \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\tilde{n}}{\mathrm{d}t}=-\left[\gamma_\mathrm{s}+\gamma_\mathrm{n}(a_\mathrm{r}^2+a_\mathrm{i}^2)\right]\tilde{n}-\gamma_\mathrm{s}\tilde{J}(a_\mathrm{r}^2+a_\mathrm{i}^2-1)+\frac{\gamma_\mathrm{s}\gamma_\mathrm{p}}{\gamma_\mathrm{c}}\tilde{J}(a_\mathrm{r}^2+a_\mathrm{i}^2)(a_\mathrm{r}^2+a_\mathrm{i}^2-1) \tag{3}$$

式中，γ_n是差分载流子驰豫率（Differential carrier relaxation rate），γ_c为腔体衰变速率（Cavity decay rate），又称为光子寿命，γ_s是自发辐射速率（Spontaneous carrier relaxation），γ_p是非线性载流子驰豫率（Nonlinear carrier relaxation rate），b为线宽增强因子（Linewidth enhancement factor），又称为反波导因子，可以表征激光场相位和振幅的耦合情况，ξ是光注入强度（Injection strength），定义为注入光信号幅度相对于自由运行从激光器的光信号幅度的比值，f_i是失谐频率（Detuning frequency），定义为主激光器与自由运行的从激光器的频率差值，$\tilde{J}$是超出阈值电流的归一化注入电流。

式（1）～（3）反映了半导体激光器腔内光子与载流子的相互作用过程，其中式（1）和（2）表示受激辐射、自发辐射以及外部光注入扰动下的光子密度增加，减去因内部损耗、镜面损耗及热损耗等引起的光子密度减少。式（3）表示自发载流子辐射复合、受激发射复合以及非辐射复合引起的载流子浓度降低，加上因注入电流泵浦引起的腔内有源区内载流子浓度的增加[39]。

为了进一步探究光注入半导体激光器的非线性动力学状态，本文采用四阶龙格库塔（Runge-Kutta）法对速率方程（1）～（3）进行数值求解，仿真步长设定为0.25 ps，仿真时长为0.1 μs。在仿真中，参数取值如表1所示[22]。根据求解得到的激光场振幅a_r，a_i和载流子密度$\tilde{n}$可以得到系统的输出信号，其中光谱由激光场的振幅$a=a_\mathrm{r}+ia_\mathrm{i}$的傅里叶变换得到；时序图可以由激光场振幅即$|a|^2$得到；电谱图通过对时序图做傅里叶变换得到；相图由给定时间序列中的峰值强度值表示，其横纵坐标分别是$p(n)$和$p(n+1)$，可以用来演示系统非线性动力学状态的演化轨迹[26]。通过改变注入强度和失谐频率，可以使半导体激光器激发出不同的非线动力学状态。

表1　光注入半导体激光器的仿真参数值

Table 1　Parameters in the simulation based on optically injected semiconductor laser

Parameter	Symbol	Value
Cavity decay rate	γ_c	$5.36\times10^{11}\,\mathrm{s}^{-1}$
Spontaneous carrier relaxation rate	γ_s	$5.96\times10^{9}\,\mathrm{s}^{-1}$
Differential carrier relaxation rate	γ_n	$7.53\times10^{9}\,\mathrm{s}^{-1}$
Nonlinear carrier relaxation rate	γ_p	$1.91\times10^{10}\,\mathrm{s}^{-1}$
Linewidth enhancement factor	b	3.2
Normalized bias current density	$\tilde{J}$	1.222
Injection strength	ξ	0～0.6
Detuning frequency	f_i	−30～30 GHz

首先，设置失谐频率f_i为5GHz，注入强度为ξ为0.08，此时从激光器为单周期振荡态，其输出信号的仿真结果如图2所示。图2（a）为从激光器输出光谱图，包含注入再生的光载波、红移边带以及四波混频效应，其中光边带间隔相等，为单周期振荡频率f_o。在光注入条件下，由于线宽增强因子b的作用，从激光器腔内增益介质折射率增加，等效腔长也会增加，导致谐振波长发生红移效应，因此使得单周期振荡频率f_o远大于失谐频率。而且考虑到从激光器的增益放大作用，红移边带的幅度明显大于另一侧光边带的幅度，形成了非均匀双边带效应。图2（b）为输出信号的强度时序图，为恒定幅度的周期振荡信号。图2（c）为输出信号的频谱图，测得单周期振荡频率为13.69 GHz。由于四波混频效应，频谱中也包含了二次谐波及高次谐波。图2（d）是输出信号的相图，由图（b）的时序图计算得到，表现为清晰的一个圆点，证明信号在连续时间内的峰值强度为固定值，即信号处于单周期振荡态。

为了综合分析注入强度和失谐频率对光注入半导体激光器非线性动力学状态的影响，图3展示了在给

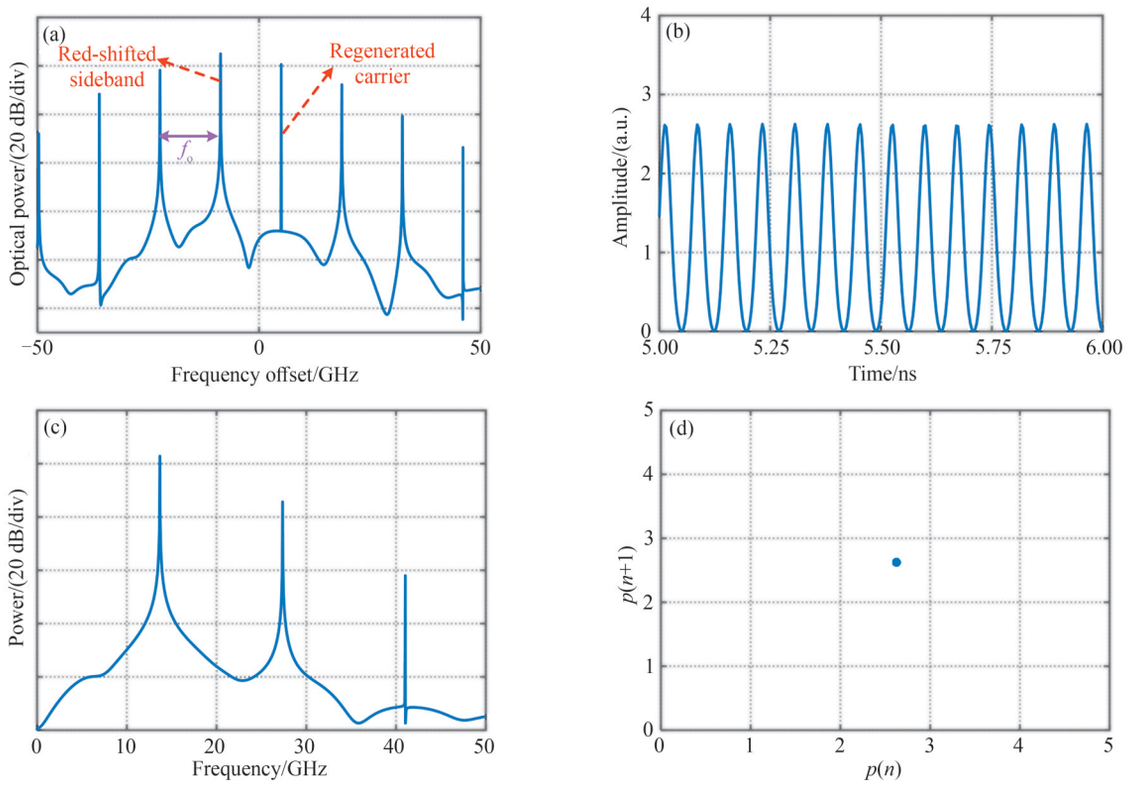


图2 单周期振荡态的仿真结果。(a)从激光器输出光谱图;(b)输出信号的强度时序图;(c)输出信号的频谱图;(d)输出信号的相图

Fig. 2 Simulation results for P1 oscillation dynamics. (a) Optical spectrum; (b) Time-domain waveform; (c) Electrical spectrum; (d) Phase portrait

定表1参数下的半导体激光器非线性动态相对于注入强度和失谐频率的二维分布,包括稳态锁定(Stable Locking,S)、单周期振荡态(Period-one Oscillation, P1)、双周期振荡态(Period-two Oscillation, P2)、倍周期振荡态(Period-N Oscillation, PN)和混沌态(Chaos)。可以观察到,不同注入参数下,从激光器被激发在不同的非线性动力学态。其中单周期振荡态为主要的非线性状态,存在于正失谐频率及负失谐频率弱注入强度范围内,且沿霍普分叉线与注入锁定态分隔。倍周期振荡态与混沌态主要嵌在单周期振荡态范围内,且广泛存在于弱注入强度区域,这为后续微波信号产生提供了理论支撑。

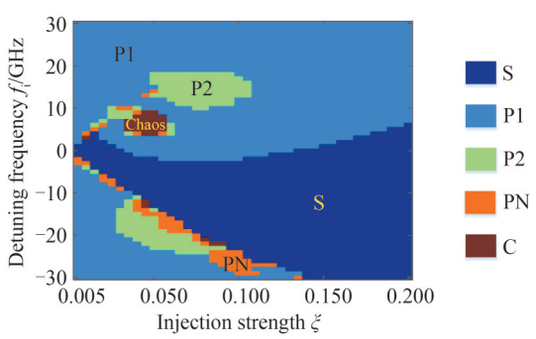


图3 光注入半导体激光器相对于注入参数的非线性动态二维分布

Fig. 3 Mappings of the nonlinear dynamics as a function of the injection strength ξ and the detuning frequency f_i

接着,本文仿真了在固定失谐频率情况下,单周期振荡频率f_o随注入强度ξ的变化关系。如图4所示,固定失谐频率分别为5,15,25,35和45 GHz,注入强度从0连续增加至0.6。可以观察到,随着注入强度的增加,单周期振荡频率f_o近似线性增加。而且通过进一步增加失谐频率,可实现更大范围的频率连续调谐,充分证明了基于光注入半导体激光器系统产生连续频率调谐微波信号的可行性。

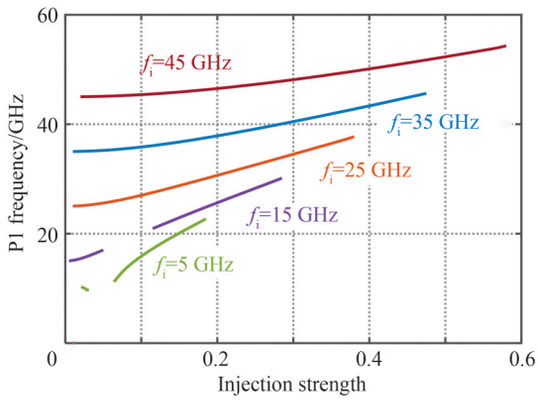


图4　仿真分析的不同失谐频率下P1振荡信号频率与注入强度的关系

Fig. 4　Simulation results for the P1 oscillation frequency as a function of the injection strength ξ subject to different detuning frequencies

进一步地，在固定主从激光器失谐频率的情况下，引入随时间变化的注入强度，通过连续动态改变光注入强度使产生的单频微波信号的频率也随之快速切换，可以实现宽带调频信号的产生。在仿真中，固定失谐频率f_i为18 GHz，设置注入强度为连续变化的多电平信号，即分别为0.1，0.15，0.2，0.25和0.3，如图5(a)所示。图5(b)是相应的光强度序列图，图5(c)是经短时傅里叶变换得到的信号瞬时频率变化图，可以观察到产生调频信号的瞬时频率随时间跳变增加，频率范围是21.7～31.7 GHz，信号总带宽为10 GHz。为了进一步探究半导体激光器的频率切换特性，图5(d)展示了注入强度的细节变化曲线。当注入强度在0.15和0.20之间切换时，测得切换时间为0.25 ps，与仿真求解步长保持一致。图5(e)是光强时间序列的细节图，当注入强度切换时，系统输出两个不同的单周期振荡频率。测量相邻峰值之间的间隔分别为40.9 ps和37.5 ps，对应信号单周期振荡频率分别为24.4 GHz和26.7 GHz。图5(f)是对应的细节瞬时频率变化图，观察到P1频率随着注入强度的变化在24.4 GHz和26.7 GHz之间切换。与图5(d)相比，图5(f)中瞬时频率的切换时间为160 ps，因此单周期振荡频率的附加切换时间仅为159.75 ps。证明了基于光注入半导体激光器的信号产生可以实现快速频率切换。因此，通过动态调节光注入强度可以实现微波信号瞬时频率快速调控并产生宽带扫频微波信号。

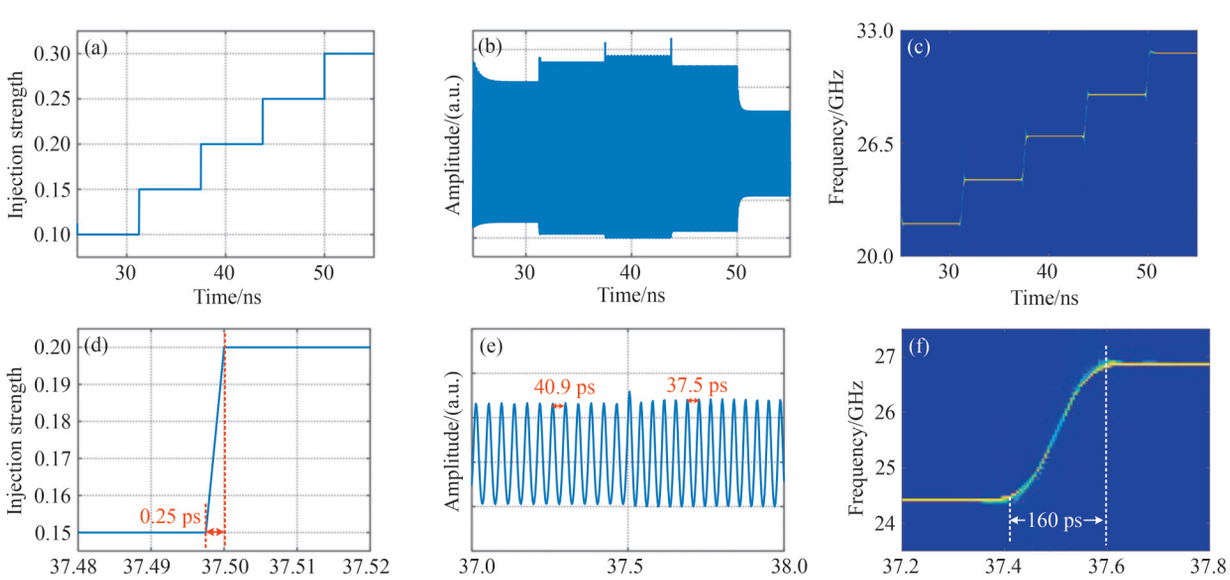


图5　光注入半导体激光器产生宽带跳频信号的仿真结果。(a) 注入强度；(b) 光强度序列；(c) 信号瞬时频率变化；(d) 注入强度的细节变化曲线；(e) 光强时间序列的细节；(f) 细节瞬时频率变化

Fig. 5　Simulation results of generated frequency-coding signal based on optical injection. (a) Injection strength; (b) Time-domain waveform ; (c) Time-frequency diagram; (d) Detailed injection strength; (e) Detailed time-domain waveform; (f) Detailed time-frequency diagram

2 基于单周期振荡态的单频信号产生

为了验证所提系统的可行性，本文开展了基于光注入半导体激光器的单频信号产生实验研究，系统结构如图1所示。实验中主激光器（TeraXion PS-TNL）为窄线宽激光器，波长可以从1 528.77 nm调谐至1 563.86 nm。从激光器（Wave Optics，DFBM-1550-10-SM-ISN）为商用分布式反馈（Distributed Feedback，DFB）激光器，其偏置电流设置为31.1 mA，约为阈值电流的5倍。此时从激光器自由运行的输出波长和功率分别为1 542.284 nm和3.4 dBm。实验中，通过调节主激光器波长及输出功率，使从激光器处于单周期振荡态。首先，设置失谐频率为0.5 GHz，注入强度为0.6，此时采用分辨率为0.02 nm的光谱仪（OSA，Yokogawa AQ70C）对从激光器的输出光信号进行光谱测量，结果如图6(a)所示。图6(a)光谱中包含了注入再生的光载波以及均匀分布的边带，频率间隔为6.3 GHz。作为对比，主激光器输出信号及自由运行的从激光器输出信号也通过光谱仪进行了测量，可以观察到从激光器输出信号相对于自由运行状态出现了明显的红移现象。进一步，保持失谐频率不变，增加注入强度至ξ=0.81，此时从激光器输出信号光谱如图6(b)所示。注入再生载波与红移边带之间的频率间隔为16.14 GHz，相比于图6(a)结果，红移效果明显增加。此结果表明，通过调节注入参数可实现单周期振荡频率调谐。随后，从激光器的输出光信号经光电探测器（Discovery，DSC40S）转换为微波信号，并采用频谱仪（Keysight N9030A）对其进行分析。当注入强度为0.81时，产生的微波信号频率为16.14 GHz，其频谱如图7所示，图中设置的分辨率带宽（RBW，Resolution Bandwidth）为100 kHz。

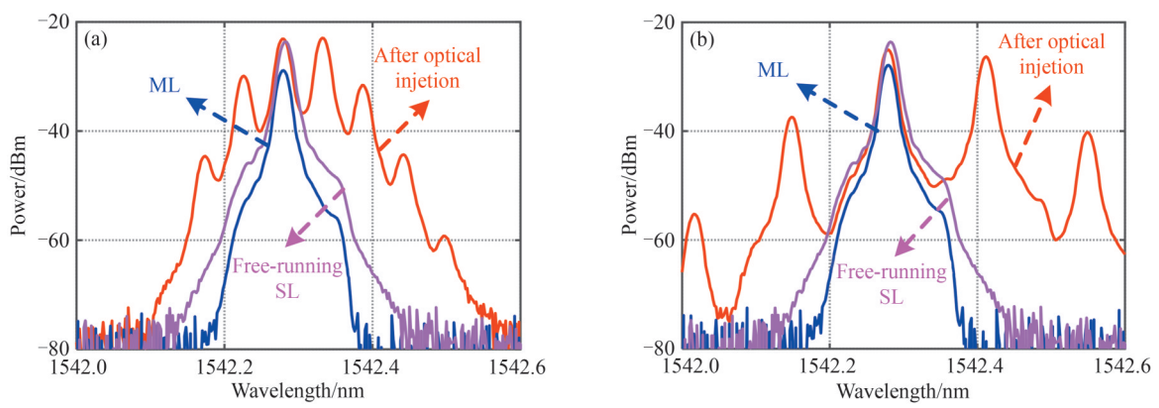


图6 产生单频信号的光谱。(a) 注入强度为0.6时的光谱；(b) 注入强度为0.81时的光谱

Fig. 6 Optical spectrum of single-frequency microwave signal. (a) Optical spectrum with the injection strength of 0.6; (b) Optical spectrum with the injection strength of 0.81

对图7结果分析可知，所产生信号的3 dB线宽较大，约为0.6 MHz，主要原因是半导体激光器存在的自发辐射噪声、闪烁噪声等因素引起的光场相位/强度起伏。为了增强该微波信号在雷达领域的实用性，必须采取频谱压窄技术以改善其性能。为此，提出了一种基于双环路光电反馈的技术来提升产生微波信号的性能，系统结构如图8所示。从激光器的输出经过一段长光纤（L1）延时后经耦合器等分成两路，其中一路信号被引入另一段长光纤（L2）。之后，两路光信号输入至平衡光电探测器转换为电信号，经放大器在电域进行功率放大后，最终送入马赫增德尔调制器（Mach-Zehnder Modulator，MZM）的射频调制端口，即构成了完整的双环路（L1，L1+L2）光电反馈系统。由于两个反馈环路延时不同，其环路滤波响应之间构成游标效应，可以对公共模式之外的其它边模进行有效抑制。同时，系统采用平衡光电探测，可以消除两路信号中的共模噪声，从而进一步提升信号质量[40,41]。实验中，采用的两段单模光纤长度分别是2 km和200 m，通过双环路光电反馈结构产生信号的频谱如图9所示。图9(a)中，产生信号的频率为16.14 GHz，边模抑制比提高到了65.5 dB。图9(b)展示了信号中心频率处的细节频谱图，此时Span设置为10 kHz，RBW为100 Hz。相比于图7所示的结果，信号3-dB线宽被显著压窄。随后，采用信号源分析仪（R&S RSWP-50）对产生信号的相位噪声进行测量，结果如图10所示。其中，信号相位噪声在1 kHz频偏处为−88.20 dBc/Hz，在10 kHz频偏处为−125.35 dBc/Hz。

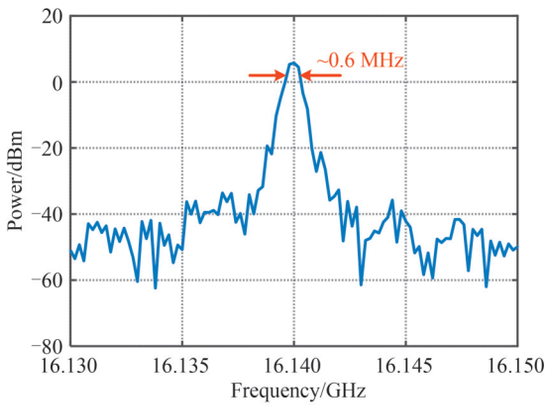


图7　基于光注入半导体激光器产生单频信号的频谱

Fig. 7　Measured electrical spectrum of generated single-frequency signal based on optically injected semiconductor laser

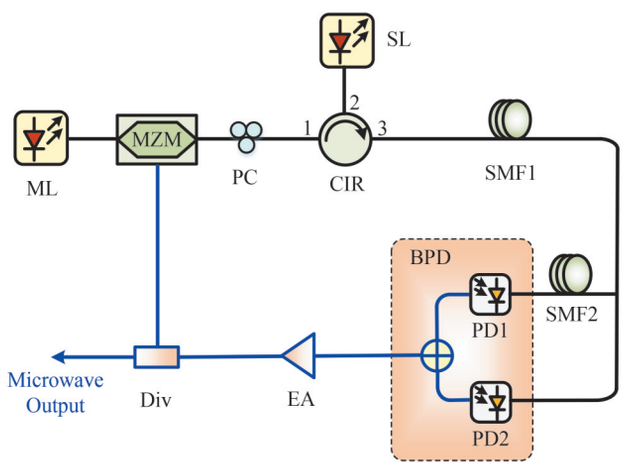


图8　加载双环路光电反馈的光注入半导体激光器系统结构框图

Fig. 8　Schematic diagram of the single-frequency signal generation system based on optically injected semiconductor laser combined with optoelectronic feedback dual-loop

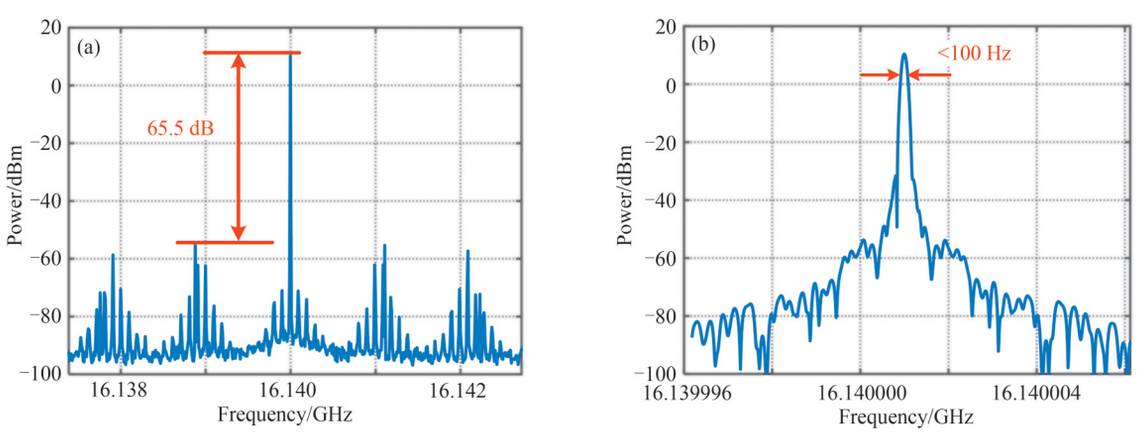


图9　基于双环路光电反馈的频谱。(a) Span=5 MHz，RBW=300 Hz；(b) Span=10 kHz，RBW=100 Hz

Fig. 9　Measured electrical spectrum with optoelectronic feedback dual-loop. (a) Span=5 MHz, RBW=300 Hz; (b) Span=10 kHz, RBW=100 Hz

进一步，通过调节注入强度及失谐频率，实验产生了频率从7.34 GHz连续调谐至18.68 GHz的微波信号，其频谱如图11(a)。图11(b)展示了各频点信号的相位噪声测量结果。可以发现，信号相位噪声在1 kHz频偏处低于－83.80 dBc/Hz，在10kHz频偏处低于－124.10 dBc/Hz。该结果进一步表明了基于光注入半导体激光器结合双环路光电反馈结构能够产生性能良好的可调谐单频微波信号。

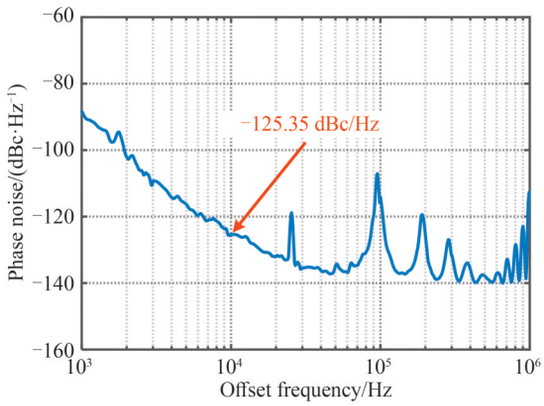


图 10 基于双环路光电反馈的相位噪声

Fig. 10 Measured phase noise with optoelectronic feedback dual-loop

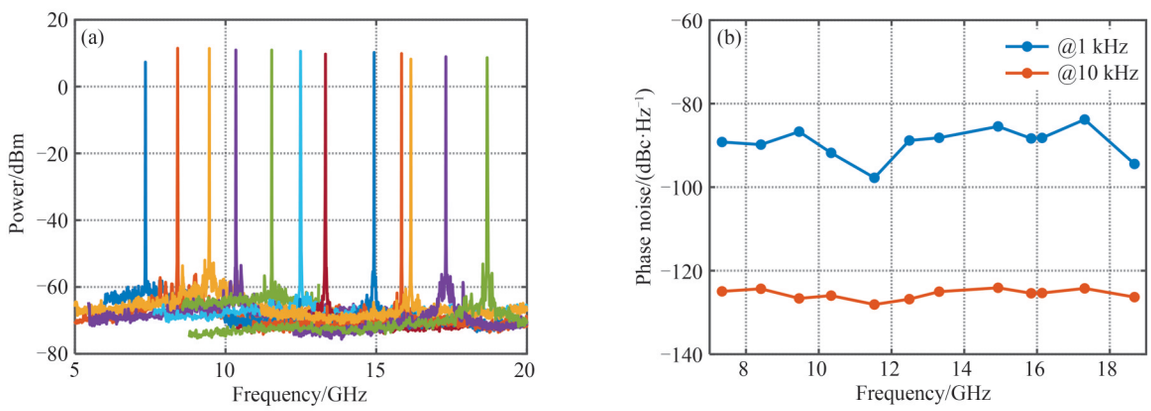


图 11 产生可调谐单频信号的频谱图及相位噪声。(a)单频信号;(b)相位噪声

Fig. 11 Measured electrical spectrum and phase noise of generated frequency-tunable microwave signals. (a) Electrical spectrum; (b) Phase noise

3 基于单周期振荡态的宽带雷达波形产生

基于光注入半导体激光器单周期振荡特性不仅能产生频率可调谐的单频信号,还可以产生宽带可重构的雷达波形。本节首先研究基于光注入半导体激光器单周期振荡的可重构雷达波形产生特性,然后针对激光器的本征噪声问题,开展基于傅里叶域锁模机制的雷达波形性能提升研究。

3.1 宽带雷达可重构波形产生

图 12 是基于光注入半导体激光器单周期振荡的雷达波形产生实验系统结构。与图 1 所示系统相比,图 12 中系统增加了“注入强度控制单元”,以实现对从激光器光注入强度的快速切换[42]。该单元由一个低速信号发生器(Electrical Signal Generator, ESG)和一个马赫增德尔调制器组成。其中,低速信号发生器产生的控制信号 $S(t)$ 用于驱动调制器,以实现对注入光信号的强度调制,从而快速改变从激光器的光注入强度。

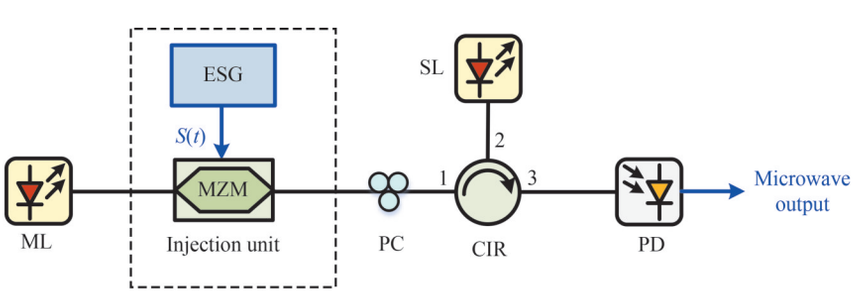


图 12 基于光注入半导体激光器的宽带雷达波形产生系统结构

Fig. 12 Schematic diagram of the reconfigurable radar waveform generation system based on optically injected semiconductor laser

实验中，主激光器（ID Photonics CoBriteDX4）的输出光功率和波长分别为16 dBm和1 550.60 nm。从激光器（69 SENSOR BF14-DFB）的电流和温度由一个电流温度控制器（THORLABS CLD1015）进行控制，其偏置电流为25.9 mA。此时自由运行的从激光器输出光信号波长为1 550.64 nm，对应主从激光器间的失谐频率为5.0 GHz。为了产生宽带调频信号，实验中采用低速信号发生器（RIGOL DG4062）产生周期性锯齿波信号以驱动调制器（Fujitsu，FTM7937EZ，40 GHz），其对应采样速率为500 MSa/s。此时从激光器的输出光谱如图13所示，可以观察到其输出包括注入再生的光载波、扫频红移边带以及四波混频效应产生的频率分量。低速信号发生器输出的锯齿波信号如图14（a）所示，其重复频率为100 kHz，单个周期内信号幅度从1.306 V连续增加至3.055 V。从激光器输出光信号经过光电探测器（Discovery，DSC40S）实现光电转换后即得到雷达调频信号。通过采样率为80 GSa/s的实时示波器（Oscilloscope，OSC，Keysight DSO-X 92504A）对其进行观测得到产生雷达调频信号的时域波形，如图14（b）所示。图中信号周期为10 μs，与控制信号周期一致。图14（c）为经短时傅里叶变换得到的时频图，可以观察到产生了10至18 GHz的宽带扫频信号。然而，受到MZM的非线性调制响应（sine函数）的影响，当加载锯齿波控制信号时，产生的宽带调频信号频率随时间也是非线性变化的。

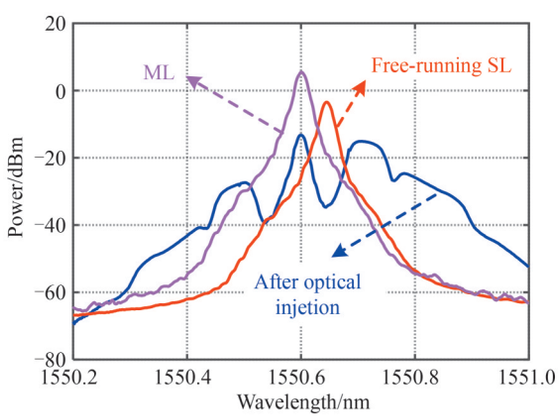


图13　产生宽带雷达波形的光谱图

Fig. 13　Measured optical spectrum of the generated broadband radar signal

为了提升宽带调频信号的调频线性度，本文提出了一种基于注入强度预补偿的调频非线性补偿方法。该方法首先通过在周期性锯齿波驱动MZM条件下，建立驱动电压与输出信号瞬时频率的映射关系，进而反演推算出产生线性调频信号需要的控制信号幅度，以补偿系统固有的非线性频率调制[43]。图15（a）展示了采用上述预补偿方法得到的MZM驱动信号波形，图15（b）和（c）分别为产生的调频信号的时域波形及时频图。可以看出，所产生信号为10～18 GHz的线性调频信号，对应时宽带宽积为8.0×10^{4}。进一步计算分析表明，产生信号的调频线性度由图14（c）中的0.12提升至6.1×10^{-3}，即通过所提预补偿方法，调频线性度提升了约2个数量级。

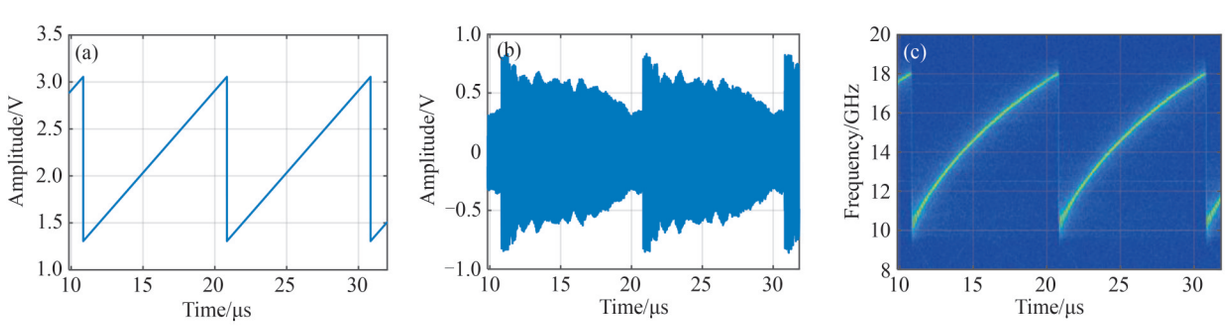


图14　加载锯齿波控制信号时产生宽带雷达波形的结果。（a）控制信号；（b）时域波形；（c）时频图

Fig. 14　The results of generated broadband signal when the control signal is sawtooth wave. (a) Control signal; (b) Time-domain waveform; (c) Time-frequency diagram

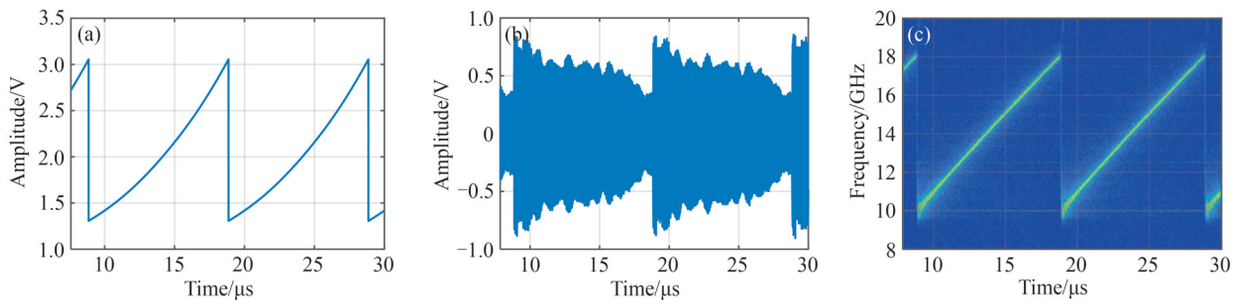


图 15 加载预补偿后控制信号时产生宽带雷达波形的结果。(a)控制信号;(b)时域波形;(c)时频图

Fig. 15 The results of generated broadband signal when the control signal is pre-compensated. (a) Control signal; (b) Time-domain waveform; (c) Time-frequency diagram

在采用光注入半导体激光器产生宽带雷达信号时,可以通过调节光注入强度、主从激光器失谐频率以及控制信号参数,对产生信号的瞬时带宽、中心频率、占空比以及时宽等参数进行灵活调控。为了验证此方面性能,开展了宽带波形参数调控的实验研究。首先,在图 15 的信号产生参数基础上,保持控制信号幅度不变,将控制信号周期调整为 20 μs,如图 16(a)所示。此时产生的线性调频信号带宽仍为 8 GHz(10~18 GHz),但时间周期相应改变为 20 μs,与控制信号一致。随后,将控制信号电平幅度修改为 1.51 V 至 2.476 V,此时产生的线性调频信号的带宽变为 4 GHz(12~16 GHz),结果如图 16(b)所示。进一步地,将从激光器驱动电流和温度修改为 21.1 mA 和 28.32 ℃,其自由运行输出波长为 1 550.74 nm,对应主从激光器间的失谐频率为 17.47 GHz。同时将控制信号幅度调整为从 1.014 V 调谐至 5.062 V,产生的线性调频信号如图 16(c)所示,其瞬时频率从 18 GHz 线性增加至 26 GHz,实现了工作频段的调谐。最后,通过设计控制信号波形使最其低电平对应的单周期振荡频率位于带通滤波器(Talent Microwave,TLBF-10G-18G)的通带之外,可以实现占空比可调的雷达波形产生。实验中,控制信号在图 15(a)的基础上增加了一段低电平恒定信号(幅度设定为 0.6 V),如图 16(d)所示,此时产生的线性调频信号占空比为 50%。因此,上述实验表明,通过综合调控光注入强度、失谐频率以及控制信号波形,可以实现对宽带雷达信号多个关键参数的灵活调控。

除线性调频信号外,基于光注入半导体激光器单周期振荡特性还可用于产生其它类型的调频信号。图 17 展示了利用所提方法产生三角波线性调频信号的结果图。其中,图 17(a)为控制信号波形,其电平幅度

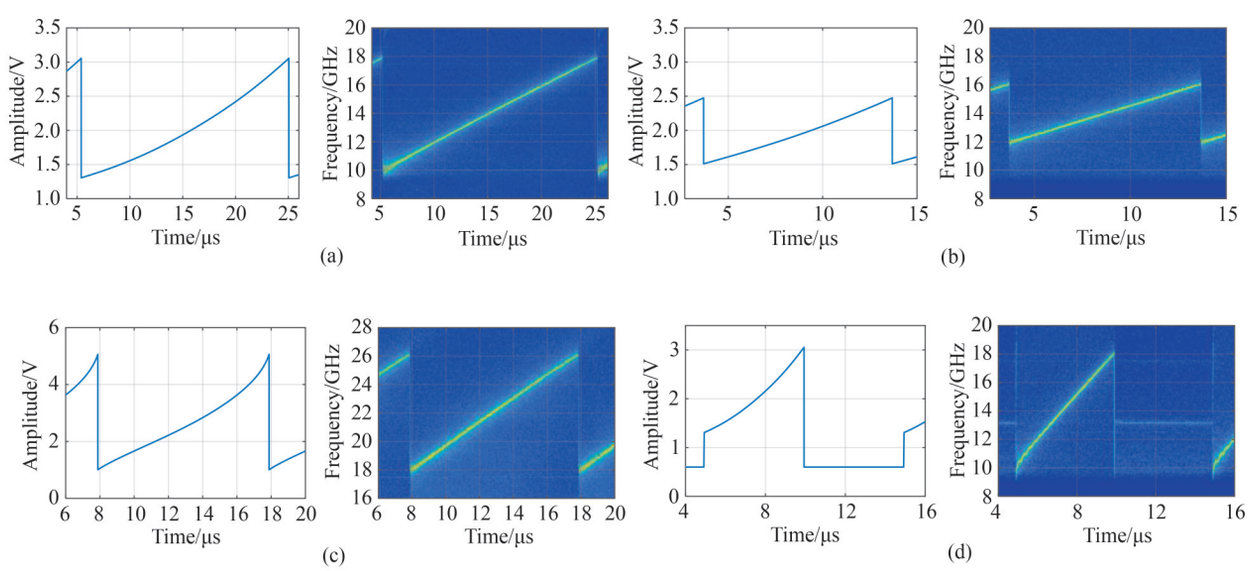


图 16 宽带雷达波形参数调控实验结果。(a)调整后的时间周期;(b)调整后的带宽;(c)调整后的工作波段;(d)调整后的占空比

Fig. 16 The experimental results of broadband waveform parameter regulation. (a) Modifying the time period; (b) Modifying the bandwidth; (c) Modifying the operating band ; (d) Modifying the duty cycle

变化范围为1.306 V至3.055 V，周期为10 μs。此时产生的三角波线性调频信号的时域波形、频谱图及时频图分别如图17(b)、(c)、(d)所示。可以发现，产生信号的频率范围为9.9 GHz至18.1 GHz，对应带宽为8.2 GHz，周期为10 μs。进一步修改控制信号为多电平信号，如图18(a)所示，其电平幅度从1.306 V阶跃跳变至3.055 V。此时产生信号的时域波形、频谱图及时频图分别如图18(b)、(c)、(d)所示。可以观测到产生了16频点的步进频信号，频率从10 GHz调谐至18 GHz，步进频率间隔为500 MHz。

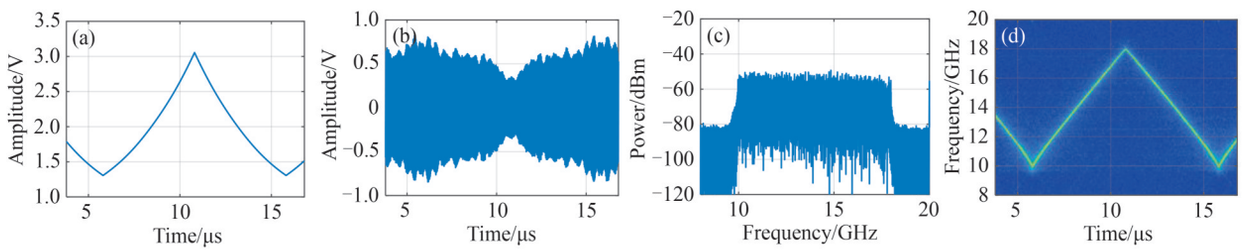


图17　产生三角波调频信号的实验结果。(a)控制信号；(b)时域波形；(c)频谱图；(d)时频图

Fig. 17　The experimental results of generated triangular frequency modulated signal. (a) Control signal; (b) Time-domain waveform; (c) Electrical spectrum; (d) Time-frequency diagram

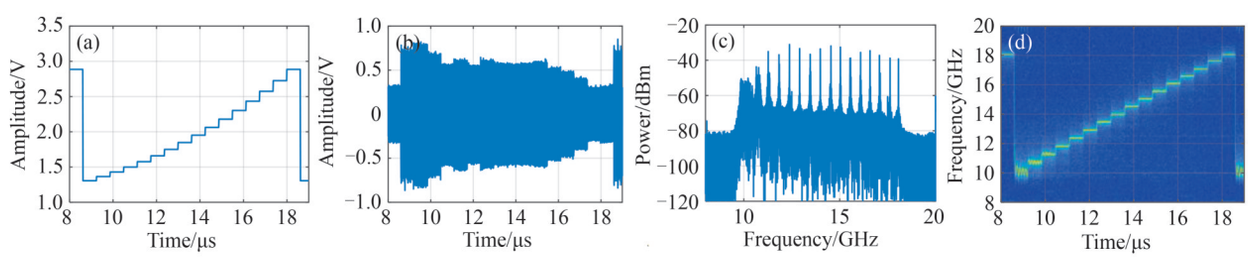


图18　产生步进频信号的实验结果。(a)控制信号；(b)时域波形；(c)频谱图；(d)时频图

Fig. 18　The experimental results of generated stepped-frequency signal. (a) Control signal; (b) Time-domain waveform; (c) Electrical spectrum; (d) Time-frequency diagram

随后，将控制信号设置为频率编码多电平信号，如图19(a)所示，其信号幅度在1.306 V至3.055 V随机跳变，跳频点数为16。产生信号的时域波形、频谱图与时频图分别如图19(b)、(c)、(d)所示。图19中结果表明产生的信号为频率编码信号，频率在10.0 GHz至18.08 GHz范围跳变，共16个频点，信号总带宽为8.08 GHz。最后，将控制信号设置为如图20(a)所示的波形信号，可以产生频率编码型的线性调频信号。图20(a)中的四段连续变化的控制信号电平幅度分别为1.306 V至1.576 V、2.434 V至3.055 V、1.952 V至2.434 V以及1.576 V至1.952 V。图20(b)、(c)、(d)分别为产生信号的时域波形、频谱图与时频图。可以发现，产生的频率编码型线性调频信号的频率变化范围为10 GHz至12.19 GHz、16.17 GHz至18.15 GHz、14.37 GHz至16.17 GHz以及12.19 GHz至14.37 GHz，总带宽为8.15 GHz。

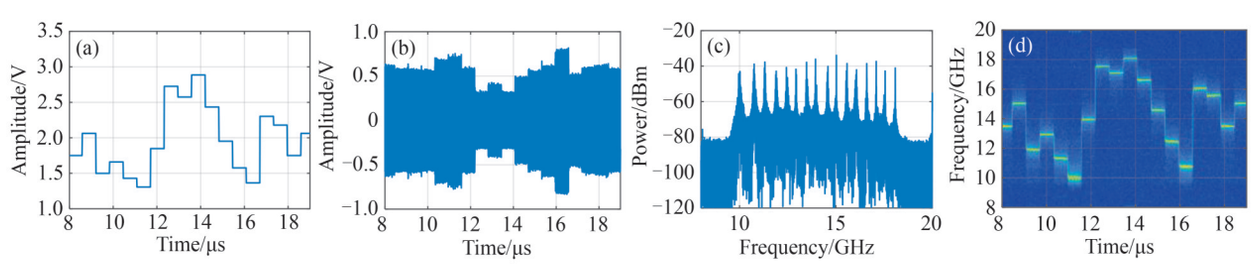


图19　产生频率编码信号的实验结果。(a)控制信号；(b)时域波形；(c)频谱图；(d)时频图

Fig. 19　The experimental results of generated frequency-coded signal. (a) Control signal; (b) Time-domain waveform; (c) Electrical spectrum; (d) Time-frequency diagram

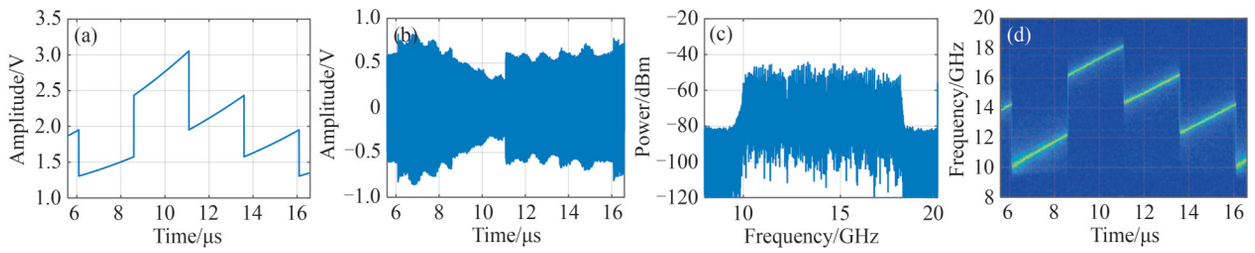


图 20 产生频率编码型线性调频信号的实验结果。(a)控制信号;(b)时域波形;(c)频谱图;(d)时频图

Fig. 20 The experimental results of generated frequency-coded linear frequency modulated signal. (a) Control signal; (b) Time-domain waveform; (c) Electrical spectrum; (d) Time-frequency diagram

3.2 基于傅里叶域模式锁定的宽带雷达波形性能优化

与单频信号产生系统中激光器本征噪声恶化信号性能类似,激光器的本征幅度和相位噪声也会影响产生的宽带雷达信号性能,主要表现为信噪比变差。为解决此问题,本文设计了基于傅里叶域模式锁定(Fourier Domain Mode Locking, FDML)的信噪比提升方案,其系统结构如图 21 所示。系统中的电光调制器采用了双驱动马赫曾德尔调制器(Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator,DMZM),低速信号发生器产生的控制信号 $S(t)$ 输入到 DMZM 的一个射频输入端口。经过光注入后,光环行器的输出信号经过一段长光纤后输入到光电探测器中完成光电转换,产生的微波信号经过电放大器增益放大后,由电功分器后分为两路,一路反馈输入至双驱动调制器的另一个射频端口,形成闭合光电反馈环路,另一路信号作为微波信号输出。为了实现傅里叶域模式锁定,控制信号 $S(t)$ 的周期(τ_{mod})与光电反馈环路的延时(τ_{cav})需保持时域匹配,即当满足条件 $\tau_{cav}=N\tau_{mod}$(N 为正整数)时,产生的信号在环路中循环一圈后经电光调制刚好可以再次注入锁定从激光器的红移边带,此时系统输出信号的频率将以环路纵模间隔为步长依次扫描。该机制能够有效抑制环路噪声,从而显著提高产生扫频信号的信噪比[44,45]。

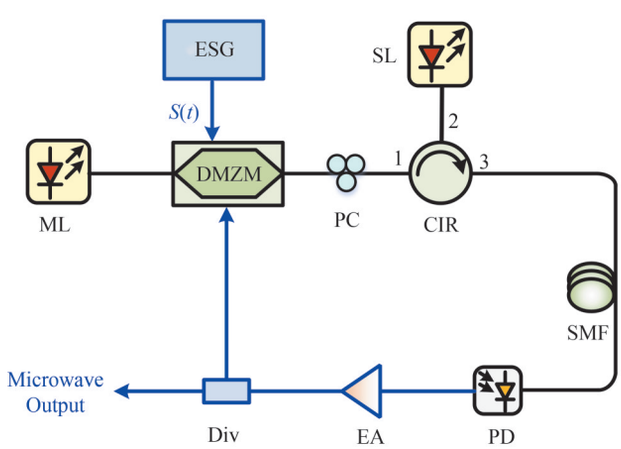


图 21 基于傅里叶域模式锁定的宽带信号性能提升系统结构

Fig. 21 Schematic diagram of the performance improvement system based on Fourier domain mode-locking mechanism

为了研究傅里叶域锁模机制对信号性能提升效果,首先分析了传统光注入半导体激光器系统,即断开图 21 中的反馈环路时产生宽带线性调频信号的性能。实验结果如图 22 所示,图(a)和(b)分别为产生线性调频信号的时频图和频谱图,其带宽为 6.3 GHz(12.0~18.3 GHz)。为了测量宽带信号的带内信噪比,图 22(c)展示了在 15 GHz 频率附近的细节频谱图。可以发现,由于激光器本征噪声影响,产生的线性调频信号带内信噪比较差。作为对比,实验选用了一段约 1 km 的长光纤,构建了光电反馈环路系统。为了实现环路延时匹配,将控制信号 $S(t)$ 的重复频率设定为 206.845 kHz。图 23(a)展示了在傅里叶域模式锁定条件下测试得到的线性调频信号时频图,图 23(b)为相应的频谱图。图 23(c)给出了带宽范围内的细节频谱图,在 15 GHz 频率处带内信噪比为 47.44 dB,相比于图 22(d)中传统光注入半导体激光器系统的结果,基于傅里叶域模式锁定的光电反馈系统显著提升了宽带信号带内信噪比。

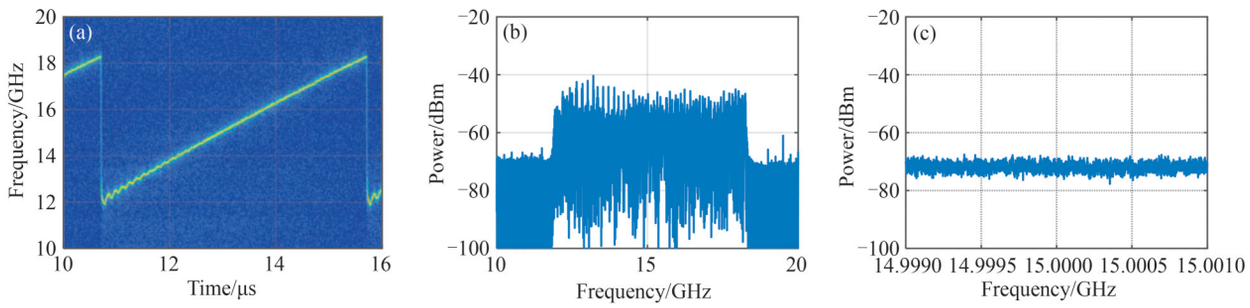


图22　未加载傅里叶域模式锁定时产生线性调频信号的实验结果。(a)时频图；(b)频谱图；(c)细节频谱图

Fig. 22　The experimental results of generated linear frequency modulated signal without Fourier domain mode-locking. (a) Time-frequency diagram; (b) Electrical spectrum; (c) Detailed electrical spectrum

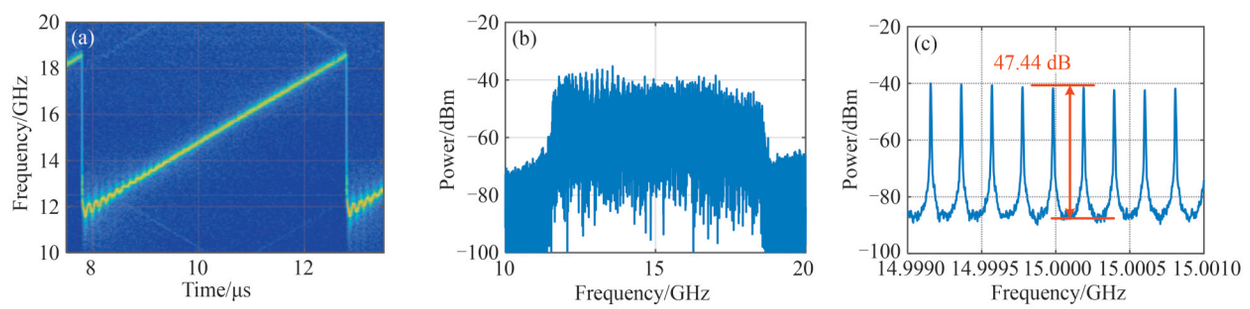


图23　引入傅里叶域模式锁定时产生线性调频信号的实验结果。(a)时频图；(b)频谱图；(c)细节频谱图

Fig. 23　The experimental results of generated linear frequency modulated signal with Fourier domain mode-locking. (a) Time-frequency diagram; (b) Electrical spectrum; (c) Detailed electrical spectrum

除此之外，在产生宽带雷达信号时，半导体激光器需要在不同单周期振荡态之间快速切换。受限于半导体激光器的瞬态特性，其光学响应在达到稳态之前会存在较长的弛豫过程，具体表现为光子对注入载流子的激射延迟、张弛振荡、自持振荡等特性[46]。这种现象会对产生雷达信号的频率稳定度造成一定的影响，即在信号频率发生较大的突变时易引起频率的波动，这一点在产生步进频或跳频信号时尤其明显。图24(a)所示为利用常规光注入半导体激光器系统产生频率范围为12～18 GHz，周期为5 μs的步进频信号的时频图。可以观察到当信号频率从18 GHz快速切换至12 GHz时，信号发生明显的弛豫振荡现象，造成信号频率准确度和稳定度的恶化。此信号的频谱如图(b)所示，在12 GHz频率附近出现了明显的频率不稳定现象。

研究发现，引入傅里叶域模式锁定环路也可以有效抑制上述弛豫振荡现象。原因主要包括两个方面：首先，傅里叶域模式锁定通过调节控制信号，使其与环路周期保持时间匹配，确保了在反馈环路中循环的微

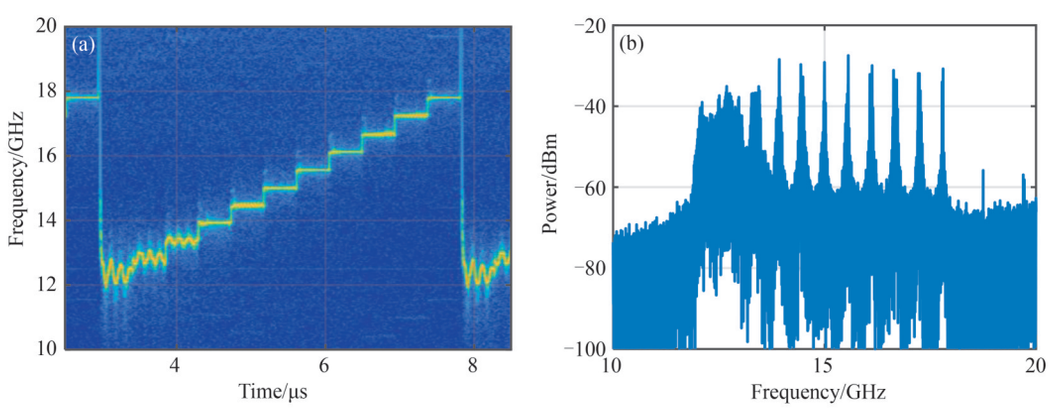


图24　未加载傅里叶域模式锁定时产生步进频信号的实验结果。(a)时频图；(b)频谱图

Fig. 24　The experimental results of generated stepped-frequency signal without Fourier domain mode-locking. (a) Time-frequency diagram; (b) Electrical spectrum

波信号都能相位锁定于同一频率，从而显著提升了周期信号的相干性；其次，光电反馈环路通过电光调制可以引入相干光调制边带，经光注入使得从激光器有源层载流子密度和增益降低，从而可以抑制阻尼振荡。在实验中，选用了长度为1 km的光纤作为光电反馈环路延时，并通过基于傅里叶域锁模的光注入半导体激光器系统产生了频率覆盖12～18 GHz的步进频信号。图25(a)为产生信号的时频图，可以观察到低频附近的驰豫振荡被有效抑制。图25(b)展示了信号的频谱图，各个频点的线宽被明显压榨，以上结果再次验证了傅里叶域锁模机制在改善信号信噪比的同时，还能显著提升信号频率准确度。

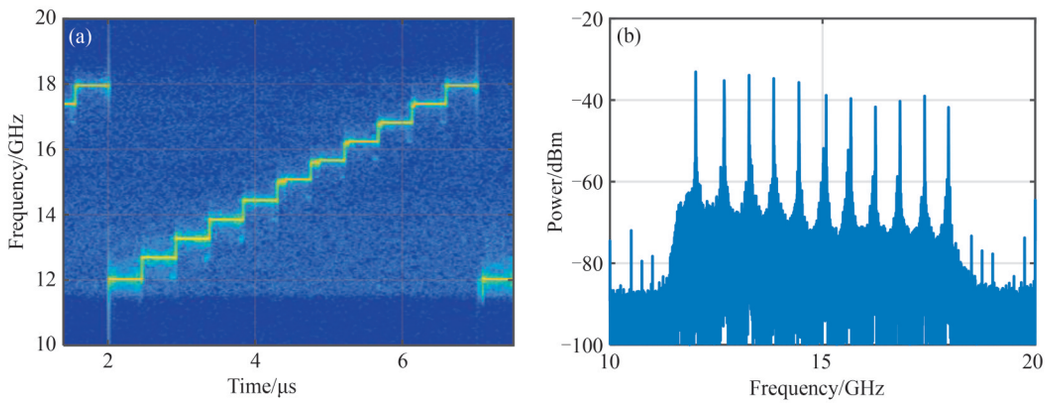


图25 引入傅里叶域模式锁定时产生步进频信号的实验结果。(a)时频图；(b)频谱图

Fig. 25 The experimental results of generated stepped-frequency signal with Fourier domain mode-locking. (a) Time-frequency diagram; (b) Electrical spectrum

4 基于光注入半导体激光器的雷达系统验证

为了验证所提可重构雷达波形产生系统的实用性，搭建了基于光注入半导体激光器的单发单收宽带雷达系统。如图26所示，产生的宽带线性调频雷达波形分为两路，一路经电放大器（AT microwave，PA-0226-3827X，2-26 GHz）功率放大后经喇叭天线（Tx）传输进行目标探测。另一路信号作为参考信号送往电IQ混频器（Marki MMIQ-0626L，6-26 GHz）的本振端。雷达回波由另一个喇叭天线（Rx）收集，经低噪声放大器（AT microwave，LNA-0226-3804C，2-26 GHz）功率放大后输入到电IQ混频器的射频端口。混频器的输出被送往数据采集与处理单元，实现宽带雷达信号的正交混频，并经傅里叶变换得到目标距离信息。系统中主激光器波长和输出功率设定为1 550.788 nm和13 dBm，从激光器偏置电流和稳定设定为21 mA和27.45 ℃。修改控制信号及注入参数，产生的宽带雷达波形如图27(a)所示，信号周期为5 μs，占空比为50%。信号的时频图如图27(b)所示，图中信号频率从10 GHz线性变换至18 GHz，即信号瞬时带宽为8 GHz。

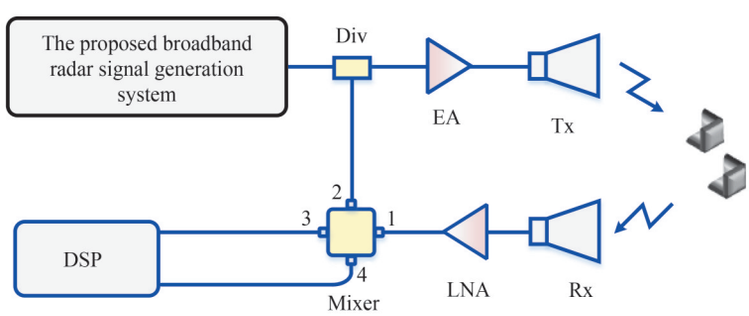


图26 基于光注入半导体激光器的单发单收雷达系统结构

Fig. 26 Schematic diagram of the established single-input single-output radar system based on optically injected semiconductor laser

基于搭建的单发单收宽带雷达系统，展开了双目标探测实验，实验场景如图28(a)所示，将两个大小尺寸为1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm的金属角反放置在距离天线0.5 m左右位置处，两角反射器间隔约为2.8 cm。图28(b)为示波器记录的IQ混频器正交混频后的输出时域波形，图28(c)给出了测得的目标距离像。可以

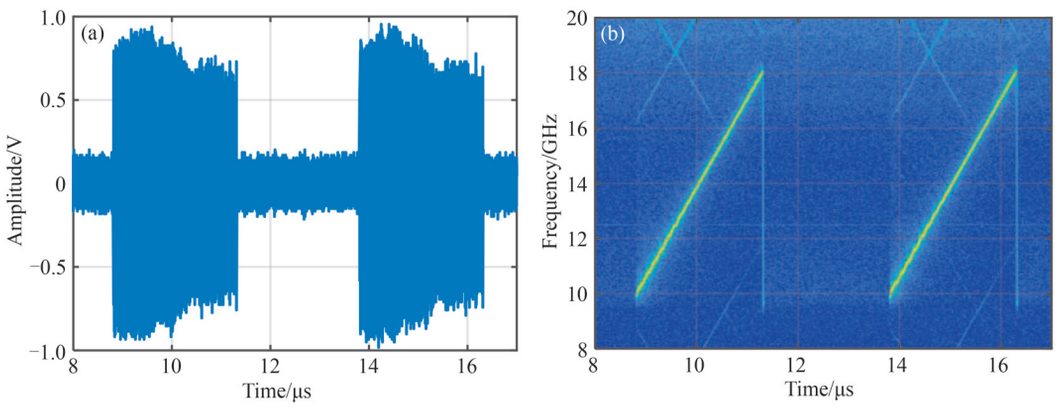


图 27　基于光注入半导体激光器产生雷达信号的实验结果。(a)波形;(b)时频图

Fig. 27　The experimental results of generated radar signal based on optically injected semiconductor laser. (a) Time-domain waveform; (b) Time-frequency diagram

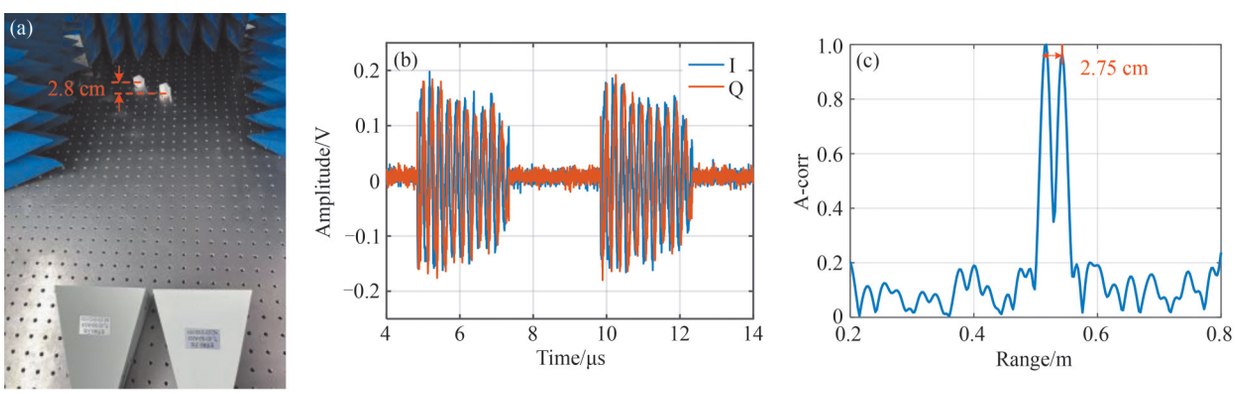


图 28　双目标雷达测距实验结果。(a)实验场景;(b)IQ混频器正交混频后的输出时域波形;目标距离像

Fig. 28　The experimental results of dual-targets radar detection. (a) Detection scene; (b) Time-domain waveform after IQ mixing; (c) The range profile of dual targets

观察到两个目标被清楚地区分开,距离间隔为2.75 cm,与实际距离吻合。这表明该雷达系统实现高分辨率目标探测的可行性。

进一步,搭建了基于光注入半导体激光器的多发单收阵列雷达系统,结构如图29所示。产生的宽带雷达波形经过1×8的电开关进行通道切换,其中电开关与宽带雷达波形产生系统的控制信号保持时钟同步。

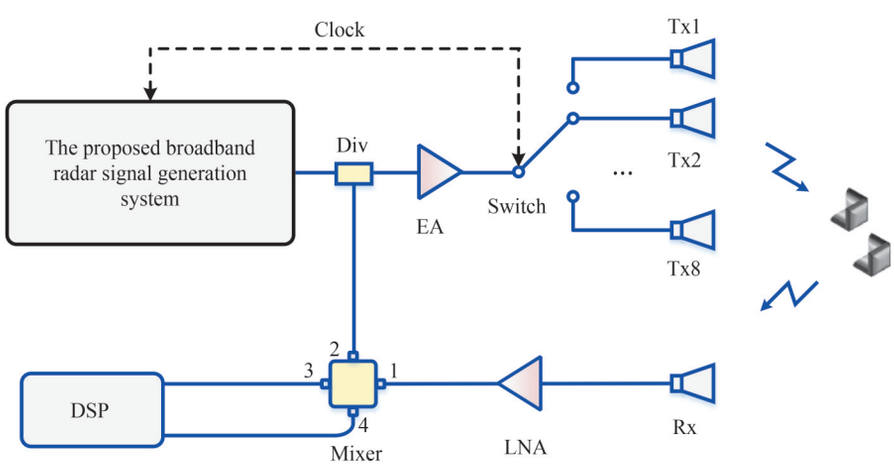


图 29　基于光注入半导体激光器的阵列雷达系统结构

Fig. 29　Schematic diagram of the established multiple-input single-output radar system based on optically injected semiconductor laser

8个通道采用时分复用的方法，经喇叭天线发射至探测区域。雷达回波被单个喇叭天线接收后与参考信号进行IQ混频处理，进而完成数据采集与信号处理功能。图30(a)所示为搭建的基于光注入半导体激光器信号产生的微波光子阵列雷达实物图，主要由发射天线阵列、接收天线、功率放大器模块、微波光子收发机、数据采集与处理模块构成。利用此阵列雷达对单个小型无人机进行了探测，探测场景及结果如图30(b)所示。图中探测结果与预设的无人机目标位置吻合，进一步验证了利用光注入半导体激光器产生雷达信号在实际应用中的可行性。

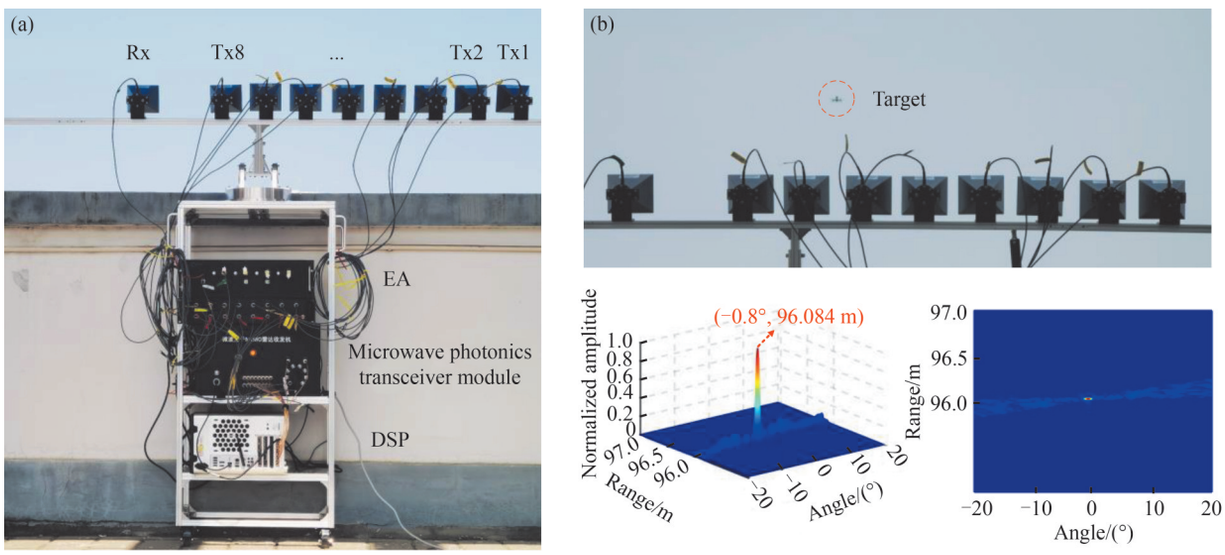


图30 微波光子阵列雷达及目标探测结果。(a)雷达系统图；(b)目标探测结果

Fig. 30 Microwave photonic array radar and target detection result. (a) Photograph of the radar system; (b) Detection scene and results

5 结论

本文通过理论仿真和实验验证探究了基于光注入半导体激光器产生可重构宽带雷达波形的可行性。首先通过非线性速率方程仿真分析了光注入半导体激光器单周期振荡态的特性，为后续产生连续调谐的微波信号提供了理论基础。然后，实验验证了基于光注入半导体激光器的微波单频信号产生及频率可调谐性，并提出了基于双环光电反馈环路抑制激光器本征噪声，改善信号频谱纯度。同时，通过引入电光调制实现了注入强度的连续调谐，产生了波形可重构、参数可控制的宽带雷达波形信号，并提出了基于注入强度预补偿的扫频线性度提升方案及基于傅里叶域锁模的宽带信号信噪比性能优化技术。最后基于提出的雷达波形产生方法构建了宽带雷达实验系统，完成了目标探测演示验证，证明了所提方法在雷达探测实际应用的可行性。

参考文献

[1] ZHU Huabang, DU Juan. Analysis of radar survival and countermeasure under "four main threats" environment[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2005, (1): 61-64.
朱华邦，杜娟.“四大威胁”环境下雷达生存与对抗技术浅析[J].飞航导弹，2005，(1)：61-64.

[2] SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. 3rd Edition. New York: McGraw Hill, 2008: 1-24.

[3] JIA Yingxin, WANG Yanfei. Design and implementation of wideband exciter for an ultra-high resolution airborne SAR system[J]. Journal of Radars, 2008, 37(2): 210-213.
贾颖新，王岩飞. 超高分辨率机载SAR宽带激励源设计与实现[J]. 雷达学报，2008，37(2)：210-213.

[4] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319 - 330.

[5] PAN Shilong, ZHNAG Yamei. Microwave photonic radars[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5450-5484.

[6] PAN Shilong, ZHANG Yamei. Microwave photonic radar and key technologies[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(20): 36-52.
潘时龙，张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. 科技导报，2017，35(20)：36-52.

[7] GHELF P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. Photonics in radar systems: RF integration for state-of-the-art

functionality[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(8):74-83.
[8] ZHANG Fangzheng, GUO Qingshui, WANG Ziqain, et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16274-16281.
[9] SUN Guanqun, ZHANG Fangzheng, YU Xiaoyue, et al. Photonics-based broadband single-input-multiple-output OAM coincidence imaging[J]. IEEE Transactions on Radar Systems, 2024, 2: 690-698.
[10] MCKINNEY J D, SEO D, LEAIRD D E, et al. Photonically assisted generation of arbitrary millimeter-wave and microwave electromagnetic waveforms via direct space-to-time optical pulse shaping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3020-3028.
[11] GUO Qingshui, ZHANG Fangzheng, ZHOU Pei, et al. Dual-band LFM signal generation by optical frequency quadrupling and polarization multiplexing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(16): 1320-1323.
[12] ZHANG Yamei, YE Xingwei, GUO Qingshuo, et al. Photonic generation of linear frequency-modulated waveforms with improved time-bandwidth product based on polarization modulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 1821-1829.
[13] LI Ming, YAO Jianping. Photonic generation of continuously tunable chirped microwave waveforms based on a temporal interferometer incorporating an optically pumped linearly chirped fiber Bragg grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(12): 3531-3537.
[14] WUN J M, WEI C C, CHEN J, et al. Photonic chirped radio frequency generator with ultra-fast sweeping rate and ultra-wide sweeping range[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11475-11481.
[15] LIAO Jinxin, WEN He, ZHENG Xiaoping, et al. Novel bipolar photonic digital-to-ana‐log conversion employing differential phase shift keying modulation and balanced detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 126-128.
[16] GAO Bindong, ZHANG Fangzhneg, PAN Shilong. Experimental demonstration of arbitrary wave-form generation by a 4-bit photonic digital-to-analog converter[J]. Optics Communications, 2017, 383: 191-196.
[17] SIMPSON T B, LIU J M, HUANG K F, et al. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers[J]. Journal of the European Optical Society Part B, 1995, 9(5): 765.
[18] SIMPSON T B. Mapping the nonlinear dynamics of a distributed feedback semiconductor laser subject to external optical injection[J]. Optics Communications, 2003, 215: 135-151.
[19] LIN F Y, LIU J M. Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. Optics Communications, 2003, 221(1): 173-180.
[20] LIN F Yi, LIU J M. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(4): 562-568.
[21] ZHUANG Junping, CHAN S C. Tunable photonic microwave generation using optically injected semiconductor laser dynamics with optical feedback stabilization[J]. Optics Letters, 2013, 38(3): 344-346.
[22] HWANG S K, LIU J M, WHITE J K. Characteristics of period-one oscillations in semiconductor lasers subject to optical injection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004,10(5): 974-981.
[23] CHAN S C. Analysis of an optically injected semiconductor laser for microwave generation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 46(3): 421-428.
[24] CHAN S C, HWANG S K, LIU J M, Period-one oscillation for photonic microwave transmission using an optically injected semiconductor laser[J]. Optics Express, 2007,15: 14921-14935.
[25] TSENG S H, HUNG Y H, HWANG S K, Frequency-modulated continuous-wave microwave generation using stabilized period-one nonlinear dynamics of semiconductor lasers[J]. Optics Letters,2019, 44(13): 3334-3337.
[26] HUNG Y H, HWANG S K. Photonic microwave stabilization for period-one nonlinear dynamics of semiconductor lasers using optical modulation sideband injection locking[J]. Optics Express, 2015,23(5): 6520-6532.
[27] XIA Guangqiong, WU Zhengmao, LIAO Jianfei. Theoretical investigations of cascaded chaotic synchronization and communication based on optoelectronic negative feedback semiconductor lasers[J]. Optics Communications, 2009, 282(5): 1009-1015.
[28] FAN Li, XIA Guangqiong, CHEN Jianjun, et al. High-purity 60GHz band millimeter-wave generation based on optically injected semiconductor laser under subharmonic microwave modulation[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18252-18265.
[29] WU Gengze, ZHENG Jiling, TAO Pu, et al. Four-channel all-optical wavelength conversion unit based on nonlinear effect of three-section monolithically integrated semiconductor lasers[J]. Applied Optics, 2023, 62(7): 1689-1694.
[30] LI Jin , ZHENG Jilin, PU Tao, et al. Photonic generation of frequency-modulated continuous-wave signal using sideband amplification injection locking effect based on the integrated mutually injected semiconductor laser[J]. Optik, 2022, 254: 168629.
[31] ZHOU Pei, ZHU Jian, ZHANG Renheng, et al. Bandwidth-enhanced LFM waveform generator based on dynamic control of an optically injected semiconductor laser[J]. Optics Letters, 2022, 47(15): 3864-3867.

[32] ZENG Yao, WANG Youming, GU Shuangquan, et al. Chaotic characteristics enhancement by introducing optical feedback into a sole intensity modulation optical injection system[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2023, 40(7): 1726-1734.
[33] YU Xiaoyue, ZHANG Fangzheng, YAN Xin, et al. Microwave generation by P2 dynamics of optically injected semiconductor laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(10): 4895-4902.
[34] WU Gengze, ZHANG Fangzheng, YU Xiaoyue, et al. Bandwidth-enhanced LFM signal generation by period-one dynamics in a directly modulated semiconductor laser[J]. Optics Letters, 2025, 50(11): 3572-3575.
[35] YU Xiaoyue, SUN Guanqun, ZHANG Fangzheng, et al. Frequency-modulated microwave signal generation by dual-wavelength-injection period-one laser dynamics[J]. Optics Letters, 2022, 47(22): 5921 - 5924.
[36] SUN Guanqun, ZHANG Fangzheng, PAN Shilong. Millimeter-level resolution through-the-wall radar imaging enabled by an optically injected semiconductor laser[J]. Optics Letters, 2021, 46(22): 5659-5662.
[37] ZHOU Pei, Research on Microwave Generation Based on Optically Injected Semiconductor Lasers[D]. Nanjing, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
周沛. 基于光注入半导体激光器的微波信号产生研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
[38] YE Shuying, OHTSUBO Junji. Experimental investigation of stability enhancement in semiconductor lasers with optical feedback[J]. Optical Review, 1998, 5(5): 1998.
[39] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京,电子工业出版社, 2000.
JIANG Jianping. Semiconductor laser[M]. Beijing, Publishing House of Electronics Industry, 2000.
[40] ZHOU Pei, ZHANG Fangzheng, ZHANG Daocheng, et al. Performance enhancement of an optically-injected-semiconductor-laser-based optoelectronic oscillator by subharmonic microwave modulation[J]. Optics Letters, 2018, 43(21): 5439-5442.
[41] YU Xiaoyue, ZHANG Fangzheng, WU Boyang, et al. Frequency-tunable microwave generation with parity-time symmetry period-one laser dynamics [J]. Optics Letters, 2023, 48(16): 1355-1358.
[42] YU Xiaoyue, ZHANG Fangzheng, LI Xinyi, et al. Broadband stepped-frequency radar waveform generation by Fourier domain mode-locking period-one laser dynamics[J]. Optics Letters, 2024, 49(15): 4266-4269.
[43] ZHOU Pei, ZHANG Fangzheng, PAN Shilong. Generation of linear frequency-modulated waveforms by a frequency-sweeping optoelectronic oscillator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3726-3732.
[44] HUBER R, WOJTKOWSKI M, FUJIMOTO J G. Fourier Domain Mode Locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography[J]. Optics Express, 2006, 14(8): 3225-3237.
[45] YU Xiaoyue, ZHANG Fangzheng, XIONG Qing, et al. Broadband frequency-hopping radar with Fourier domain mode-locking period-one laser dynamics [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(19): 1105-1108.
[46] ARNOLD G, RUSSER P. Modulation behavior of semiconductor injection lasers [J]. Applied Physics, 1977, 14: 255-268.

Reconfigurable Radar Waveform Generation by P1 Dynamics of Optically Injected Semiconductor Laser (Invited)

ZHANG Fangzheng[1], YU Xiaoyue[1], PAN Shilong[1], KONG Jiayuan[1], XU Zhenyu[2], FAN Junjie[2]
(1 *College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016, *China*)
(2 *Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai*, 201100, *China*)

Abstract: To meet the demands of future high-performance radar systems with superior resolution, agility and adptability, a reconfigurable radar waveform generation method based on the period-one (P1) oscillation dynamics of optically injected semiconductor laser is comprehensively investigated. The underlying principle involves perturbing the oscillation state of semiconductor laser through the injection of external continuous wave light. This perturbation alters the intracavity photons and carrier densities of laser, thereby exciting various nonlinear dynamics. Among these, P1 oscillation state exhibits asymmetric sideband modulation, which provides a theoretical basis for microwave signal generation.

Firstly, the characteristics of P1 oscillation, including the frequency tunability and fast frequency-switching capability, are numerically analysed by solving the nonlinear rate equations. Simulation results demonstrate that the transition between distinct oscillation frequencies can be achieved with a switching

speed on the order of ns level, highlighting the inherent agility of the optical injection system. The evolution routing of the nonlinear dynamics is also explored through the dynamical map as a function of injection strength and detuning frequency, which provides a guide to achieve and maintain the desired P1 oscillation state. Based on this, the experimentally generation of broadband radar signals are demonstrated. To generate broadband radar signal, a dynamical control unit of injection parameters is proposed to manipulate the instantaneous frequency of generated wideband waveform. By programming the control signals, various broadband radar signals are generated successfully, including linear frequency modulated signal, triangular wave signal, stepped-frequency signal, frequency-codded signal, frequency-codded linear and frequency modulated signal. The key waveform parameters of broadband signal such as bandwidth, time period, operating band and duty cycle, can also be flexibly adjusted by tuning the injection parameters, which further validate the feasibility of the proposed system. However, the optical injection system in application falls short in performance due to a challenge induced by the intrinsic noise of semiconductor lasers. to address this, approaches for enhancing the system performance are proposed and demonstrated. For single-frequency signal generation, a dual-loop optoelectrical feedback structure incorporating balanced photodetection is employed to improve the Side-Mode Suppression Ratio (SMSR) and phase noise of generated signals.

Compared with conventional optical injection system, the linewidth of generated signal based above method is significantly narrowed by three-orders of magnitude. The SMSR is enhanced by about 65.5 dB due to the Vernier effect. In addition, the system maintains excellent frequency tunability while achieving a phase noise of below −124.10 dBc/Hz at 10 kHz offset. For broadband radar waveform generation, pre-compensation of the injection intensity and Fourier Domain Mode Locking (FDML) mechanism are incorporated, through which the in-band Signal-to-Noise Ratio (SNR) and frequency accuracy of generated radar waveforms are significantly improved. In the experiment, a broadband signal with a bandwidth of 6.3 GHz is generated, of which in-band SNR is improved by about 47 dB. In addition, limited by the transient properties of semiconductor laser, when the P1 oscillation frequency is fast changed with a large frequency step, strong damping oscillation of the output frequency occurs, resulting in deterioration of the frequency stability and accuracy. The application of the FDML mechanism is shown to effectively suppress the damping oscillation, once again underscoring the advantages of the proposed signal generation method.

To validate the practical utility of the proposed radar waveform generation method, both Single-Input Single-Output (SISO) radar and a Multiple-Input Single-Output (MISO) radar systems are established. Firstly, based on the proposed SISO radar system, high resolution radar ranging is successfully realized, clearly distinguishing two closely spaced targets. The measured result shows excellent agreement with the actual distance. For MISO radar system, in the transmitter, the generated signal is emitted by means of time-division multiplexing across multiple transmitter channels. In the receiver, broadband de-chirp processing is performed via IQ mixing. When detecting a drone in an experimental scenario, the target is precisely located, which verifies that the proposed radar waveform generation system is a promising solution to construct efficient and low-complexity microwave photonic radars.

Key words: Microwave photonics; Semiconductor laser; Radar; Waveform generation; Optical injection

OCIS Codes: 140.5960; 280.5600; 350.4010; 250.5960

CSTR: 32255.14.gzxb20265503.0355109

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62371224), Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Fund (SAST2024-023), Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX25_0591)