

基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生*

周沛¹⁾²⁾ 张仁恒¹⁾ 朱尖¹⁾ 李念强^{1)2)†}

1) (苏州大学光电科学与工程学院, 苏州 215006)

2) (苏州大学, 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 教育部现代光学技术重点实验室, 苏州 215006)

(2022年7月1日收到; 2022年7月21日收到修改稿)

提出了一种基于双路光电反馈下, 光注入半导体激光器的高性能微波线性调频信号产生方案, 并进行了实验验证. 在合适的注入参数下, 光注入半导体激光器可工作于单周期振荡态, 生成频率由注入强度和失谐频率决定的可调谐微波信号. 通过加载波形为类三角波的电压信号控制注入强度, 光注入半导体激光器可生成宽带微波线性调频信号. 进一步通过引入延时匹配的双路光电反馈环路, 来提升光注入半导体激光器生成线性调频信号的质量: 分别基于傅里叶域模式锁定原理和自注入锁定技术, 引入短环光电反馈和长环光电反馈, 以同时实现线性调频信号的梳齿信噪比提升和线宽窄化. 在验证实验中, 本方案产生了带宽为 8 GHz (18—26 GHz) 的线性调频信号, 其梳齿信噪比达到 40 dB, 梳齿线宽为 1 kHz. 实验结果证明了本方案能够生成同时具有大带宽、高梳齿信噪比、窄线宽且相位关系稳定的高性能微波线性调频信号.

关键词: 半导体激光器, 光注入, 线性调频信号, 光电反馈

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf, 42.60.Fc, 84.40.-x

DOI: 10.7498/aps.71.20221308

1 引言

线性调频 (linear frequency-modulated, LFM) 信号已广泛应用于现代雷达系统和通信系统. 特别是在雷达系统中, 借助脉冲压缩处理等手段, 大带宽线性调频信号能够提高雷达系统的距离分辨率, 因此成为雷达系统中最常用的发射信号之一^[1-6]. 传统线性调频信号主要在电域通过数模转换器根据所需信号的相位或幅度信息生成^[7]. 然而, 受时钟速率和数模转换速率等的限制, 传统电学方法所产生线性调频信号的频率和带宽等均较低. 因此, 为了获取高频、宽带的线性调频信号, 研究人员提出了多种基于光子技术的线性调频信号产生方案^[8-13],

其中主要包括频谱整形-频时映射法、微波光子倍频法和微波光子调相法. 频谱整形-频时映射法中通常包含脉冲光源、光频谱整形器和色散元件^[8,9]. 该方法利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谱特征映射到时域, 得到所需的时域波形. 然而受现有光频谱整形器件精度的限制, 基于该方法生成的线性调频信号的波形精细度较差, 调谐困难, 难以满足实际应用需求. 微波光子倍频法的基本原理是利用电域产生的基带线性调频信号驱动电光调制器, 生成不同谐波边带, 然后选取其中不同的光信号拍频, 产生高频、宽带线性调频信号^[10,11]. 该方法的优点在于结构和操作方式简单. 然而, 微波光子倍频法的倍频系数有限, 导致对基带波形发

* 国家自然科学基金 (批准号: 62001317, 62004135, 62171305)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20200855) 和江苏省高等学校自然科学基金研究项目 (批准号: 20KJB510011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: nli@suda.edu.cn

生器的要求很高. 微波光子调相法则通过电光相位调制等光学手段对微波信号引入二次抛物线型的相位变化, 产生所需的线性调频信号^[12,13]. 该方法的主要缺陷是生成线性调频信号的时宽带宽积受限于调制器的调制系数, 通常不超过 10.

近年来, 人们提出了基于主从激光器结构的光注入半导体激光器法产生宽带微波线性调频信号^[14]. 在适当的注入条件下, 半导体激光器可工作在单周期 (period-one, P1) 振荡态, 生成频率由注入强度和失谐频率决定的可调谐微波信号^[14]. 通过加载低速电压信号控制注入强度, 实现单周期振荡频率的线性扫频, 光注入半导体激光器可生成宽带微波线性调频信号^[15–19]. 该方案的主要缺点是受限于主从激光器的固有自发辐射噪声, 所生成微波信号的频谱纯度较差, 具体表现为信号的梳齿信噪比低, 梳齿线宽较宽^[20]. 针对该问题, 研究人员基于傅里叶域模式锁定 (Fourier domain mode locking, FDML) 原理引入延时匹配反馈结构以实现线性调频信号的性能提升, 包括延时匹配的光电反馈结构^[20,21]和全光反馈结构^[22]. 然而, 上述方法难以同时获得具有高梳齿信噪比和窄线宽的线性调频信号.

本文提出了一种基于双路光电反馈下, 光注入半导体激光器的高性能微波线性调频信号产生方案. 本方案中首先通过加载波形为类三角波的电压信号控制注入强度, 使得光注入半导体激光器生成宽带微波线性调频信号; 然后通过引入延时匹配的双路光电反馈环路, 来全面提升生成线性调频信号的质量: 分别基于傅里叶域模式锁定原理和自注入锁定技术, 引入短环光电反馈和长环光电反馈以同时提升线性调频信号的频谱纯度和相位稳定性. 在验证实验中, 本方案产生了带宽为 8 GHz (18–26 GHz) 的线性调频信号, 其梳齿信噪比达到 40 dB, 梳齿线宽为 1 kHz. 实验结果证明了本方案能够生成同时具有大带宽、高梳齿信噪比、窄线宽且相位关系稳定的高性能微波线性调频信号.

2 实验装置及工作原理

图 1 为本文提出的基于光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生装置示意图, 主要包含光注入和光电反馈两个模块. 光注入模块主要包含一个主激光器 (master laser, ML) 和一个从激光器 (slave laser, SL), 其中从激光器为单模半导体

激光器. 主激光器输出的连续光信号依次通过光衰减器 (Att1)、双驱动马赫-曾德尔调制器 (dual-drive Mach-Zehnder modulator, DMZM)、偏振控制器 (polarization controller, PC) 和光环行器 (optical circulator, CIR) 后注入到从激光器中. 其中 Att1 用于控制 ML 的输出光功率, PC1 用于调整注入光信号的偏振态, 以获得最优的注入效率. 在适当的光注入条件下, SL 可工作在单周期振荡态. 该单周期振荡态的光信号输入到光电探测器 (photodetector, PD) 后可生成频率可调的单频微波信号, 其频率等于单周期振荡频率 f_0 . 通过改变注入强度 ξ 和主从失谐频率 Δf , 单周期振荡频率 f_0 可在数 GHz 至上百 GHz 的范围内调谐^[23]. 其中, 注入强度 ξ 定义为 $\xi = \sqrt{P_{in}/P_{sl}}$, P_{in} 和 P_{sl} 分别是注入光功率和从激光器输出功率. 对于给定的失谐频率 Δf , 单周期振荡频率 f_0 与注入强度 ξ 近似成线性关系. 因此, 通过施加波形为类锯齿波或者类三角波的控制信号 $S(t)$ 驱动 DMZM 实现对注入强度的动态控制, 使得注入光具有随时间线性变化的注入强度 ξ , 生成微波信号的瞬时频率 f_0 也将随时间线性变化, 即生成了宽带微波线性调频信号.

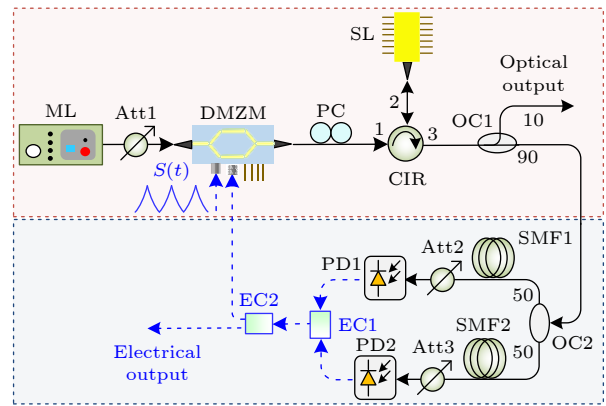


图 1 实验装置示意图 (ML, 主激光器; SL, 从激光器; Att, 光衰减器; PC, 偏振控制器; DMZM, 双驱动马赫-曾德尔调制器; $S(t)$, 控制信号; CIR, 光环行器; OC, 光耦合器; SMF, 单模光纤; PD, 光电探测器; EC, 电耦合器)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup. ML, master laser; SL, slave laser; Att, optical attenuator; PC, polarization controller; DMZM, dual-drive Mach-Zehnder modulator; $S(t)$, control signal; CIR, optical circulator; OC, optical coupler; SMF, single-mode fiber; PD, photodetector; EC, electrical coupler.

为了提升线性调频信号的质量, 本方案进一步引入了光电反馈模块. 该光电反馈模块包括分别基于傅里叶域模式锁定原理和自注入锁定技术构建

的延时匹配的双路光电反馈环路. 每个光电反馈环路均包含一段单模光纤 (single-mode fiber, SMF)、光衰减器和光电探测器. 其中单模光纤用于提供反馈环路的延迟, 光衰减器用于调节反馈回路的光功率, 而光电探测器的功能是实现光电转换获得延迟后的微波线性调频信号. 上下两路线性调频信号合成后反馈调制 DMZM 的射频端口形成闭环光电反馈. 需要指出的是: 上路的光电反馈回路具有较短的环路延时 τ_u , 其目的是建立傅里叶域模式锁定, 提升线性调频信号的梳齿信噪比; 该反馈环路的延时 τ_u 需等于控制信号 $S(t)$ 周期 τ_m 的整数倍, 即 $\tau_u = n\tau_m$ (n 为正整数)^[24]. 下路的光电反馈回路则具有较长的环路延时 τ_d , 即 $\tau_d > \tau_u$, 其作用是通过自注入锁定机制来进一步降低线性调频信号的线宽和相位噪声. 本方案中, 为了维持上路短环光电反馈回路建立的傅里叶域模式锁定振荡状态, 下路长环光电反馈回路需满足: 1) 下路长反馈环路的延时 τ_d 等于上路短反馈回路延时 τ_u 的整数倍, 即: $\tau_d = N\tau_u$ (N 为正整数); 2) 下路长反馈回路中反馈光信号的功率 P_d 小于上路短反馈回路中反馈光信号的功率 P_u , 即 $P_d < P_u$. 在上述双路光电反馈回路的作用下, 本方案能够生成同时具有大带宽、高梳齿信噪比和窄线宽的高性能微波线性调频信号.

3 实验结果

根据图 1 所示实验装置进行了实验验证. 从激光器是阈值电流为 8.0 mA 的商用分布反馈半导体激光器 (Wuhan 690s Inc.). 从激光器的工作温度和偏置电流分别设置为 25.0 °C 和 32.0 mA, 其输

出功率和频率分别为 8.0 dBm 和 193.246 THz. 主激光器为可调谐激光器 (Newkey Photonics Inc.), 其输出频率设置为 193.242 THz, 对应的频率失谐 $\Delta f = -4$ GHz. 实验中所用的 DMZM (Fujitsu FTM 7937EZ) 和 PD (Fiber-Photonics MPD-40) 的 3 dB 带宽均为 30 GHz. 当注入强度 $\xi = 0.89$ 时, 光注入半导体激光器的单周期振荡态光谱如图 2(a) 所示, 光谱中包含两个主要的光波长分量, 其频率间隔等于单周期振荡频率 $f_o = 15.7$ GHz. 作为比较, 图 2(a) 中还给出了主激光器和自由谐振从激光器的光谱图. 在实验中, 通过改变 DMZM 偏置电压的大小可实现注入功率的快速调谐. 图 2(b) 是频率失谐 $\Delta f = -4$ GHz 时, 单周期振荡频率 f_o 与 DMZM 偏置电压的关系. 从图 2(b) 可以得出, 光注入半导体激光器输出微波频率受 DMZM 的偏置电压控制, 且随着偏置电压值的增加而单调递增.

基于图 2(b) 所示的 P1 频率-电压关系曲线, 首先设计了类三角波状的电控制信号 $S(t)$ 以精确控制输出微波信号的瞬时频率, 实现线性调频信号产生^[17]. 如图 3(a1) 所示, $S(t)$ 的周期为 1.14 μ s, 幅度为 0.3 V. 在不连接反馈回路的情况下, 光注入半导体激光器生成的线性调频信号的时域波形如图 3(a2) 所示. 图 3(a3) 是对时域波形进行短时傅里叶变换后得到的瞬时频率图. 从图 3(a3) 可以看出, 该线性调频信号的瞬时频率随时间交替地线性上升与下降: 带宽是 4 GHz (13—17 GHz), 周期为 1.14 μ s. 图 3(b) 和图 3(c) 分别是仅接入上路短环光电反馈回路和接入双路光电反馈回路时生成线性调频信号的结果. 从图 3(b) 和图 3(c) 可以观察到, 接入单环光电反馈和双环光电反馈并未对线性调频信号的瞬时频率和带宽造成明显影响.

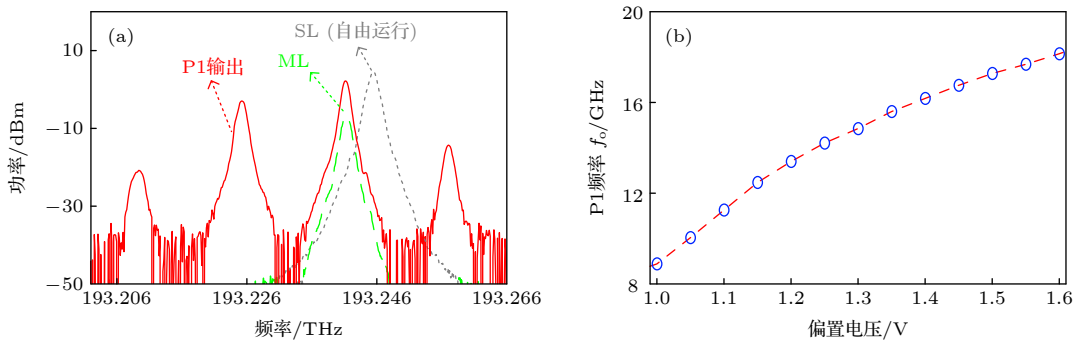


图 2 单周期振荡态光谱图与频率调谐特性 (a) 单周期振荡态光谱图; (b) 单周期振荡频率 f_o 随 DMZM 偏置电压的变化

Fig. 2. Optical spectra and frequency tuning curve of the P1 oscillation state: (a) Optical spectra of the P1 oscillation state; (b) the relationship between the microwave frequency f_o and the bias voltage applied to DMZM.

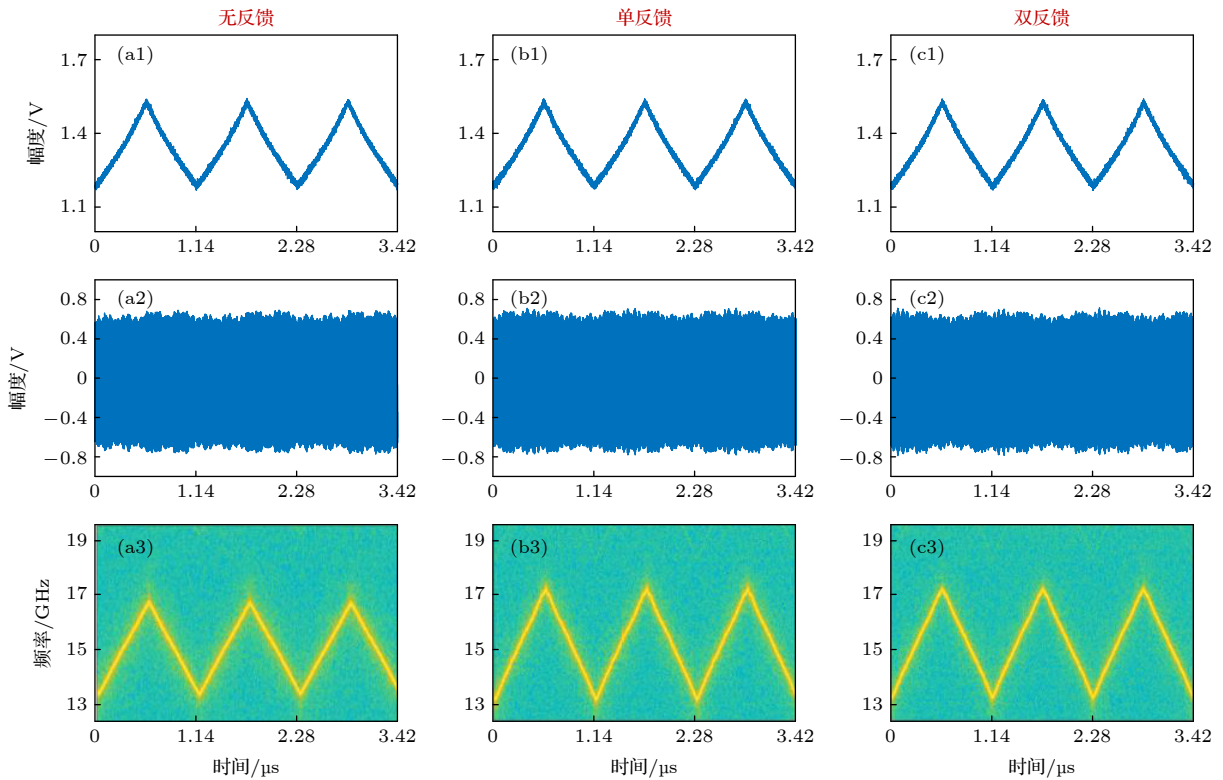


图 3 所产生线性调频信号的结果 (控制信号 $S(t)$ (第一行); 时域波形 (第二行); 瞬时频率 (第三行)) (a) 无反馈情形; (b) 单反馈情形; (c) 双反馈情形

Fig. 3. Results of the generated LFM microwave signals (Control signals $S(t)$ (the first row); temporal waveforms (the second row); instantaneous frequencies (the third row)): (a) Without feedback; (b) single-loop feedback; (c) dual-loop feedback.

这是因为实验中光电反馈回路并未改变光注入半导体激光器的单周期振荡动力学状态, 其作用主要是负责提升线性调频信号的频谱纯度等性能. 实验中光电反馈回路的参数设置以及其对线性调频信号的性能提升将在下文详细介绍.

图 4 是产生线性调频信号的频谱图. 理想线性调频信号的频谱表现为一系列离散的频率梳分量, 其梳齿间隔等于线性调频信号周期的倒数. 然而, 由于主从激光器之间存在相位不相关以及受到激光器自发辐射噪声的影响, 在无反馈的情况下, 光注入半导体激光器系统直接产生的微波线性调频信号的信号纯度较差, 如图 4(a1) 所示. 图 4(a2) 和图 4(a3) 是对图 4(a1) 频谱图的局部放大, 其频谱显示范围 (span) 分别为 5 MHz 和 500 kHz, 可以看出, 频谱中无明显的梳齿分量. 作为对比, 首先连接上路较短延时的光电反馈回路, 并且设置反馈回路的延迟时间 τ_u 等于控制信号 $S(t)$ 的周期 τ_m , 即 $\tau_u = \tau_m = 1.14 \mu\text{s}$, 以实现傅里叶域模式锁定. 如图 4(b) 所示, 得益于傅里叶域模式锁定带来的相位噪声降低, 线性调频信号的频谱纯度得到了

明显的提升. 如图 4(b2) 和图 4(b3) 所示, 梳齿信噪比达到 35 dB, 其中单根梳齿的 3 dB 线宽为 10 kHz. 为了进一步提升线性调频信号的质量, 加载了延时匹配的双路光电反馈环路, 其中上路短延时的光电反馈回路的延迟 τ_u 保持不变, 下路较长延时的光电反馈回路的延迟时间设置为 $\tau_d = 22\tau_u = 25.08 \mu\text{s}$. 值得注意的是, 为了不破坏由短延时反馈回路建立的模式锁定或者使 FDML 振荡模式由第一反馈回路来主导, 下路长反馈回路中反馈光信号的功率 P_d 需小于上路短反馈回路中反馈光信号的功率 P_u ; 实验中, 上下两路反馈光信号的功率, 即光电探测器的输入光功率分别为 $(P_u, P_d) = (1.5 \text{ dBm}, -1.5 \text{ dBm})$. 实验结果如图 4(c) 所示, 线性调频信号的梳齿信噪比达到 40 dB, 同时梳齿线宽窄至 1 kHz, 这是下路长延时光电反馈回路所实现的自注入锁定效果. 图 4 的实验结果表明, 相比于单一光电反馈回路所建立的傅里叶域模式锁定, 本文提出的基于傅里叶域锁模和自注入锁定的双路光电反馈方案可以同时实现梳齿对比度的提高和梳齿线宽的降低, 全面提升光注入半导体激光器生成线性调频信号的性能.

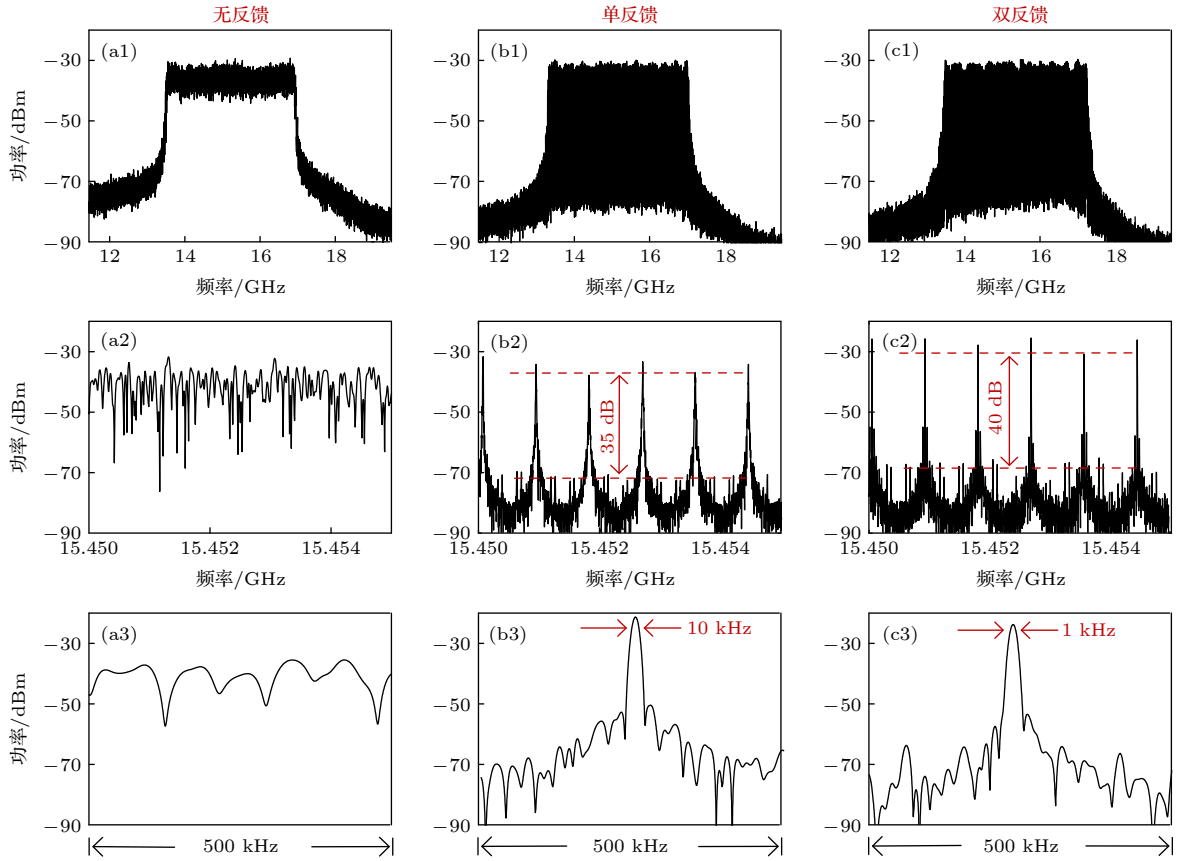


图 4 线性调频信号的频谱图(频谱图(第一行); 细节频谱图(第二、三行)) (a) 无反馈情形; (b) 单反馈情形, 延时 $\tau_u = 1.14 \mu\text{s}$; (c) 双反馈情形, 延时 $(\tau_u, \tau_d) = (1.14 \mu\text{s}, 25.08 \mu\text{s})$

Fig. 4. Electrical spectra of the generated LFM microwave signals (Electrical spectra (the first row); the zoomed-in views of the electrical spectra (the second and third row)): (a) Without feedback; (b) single-loop feedback with $\tau_u = 1.14 \mu\text{s}$; (c) dual-loop feedback with $(\tau_u, \tau_d) = (1.14 \mu\text{s}, 25.08 \mu\text{s})$.

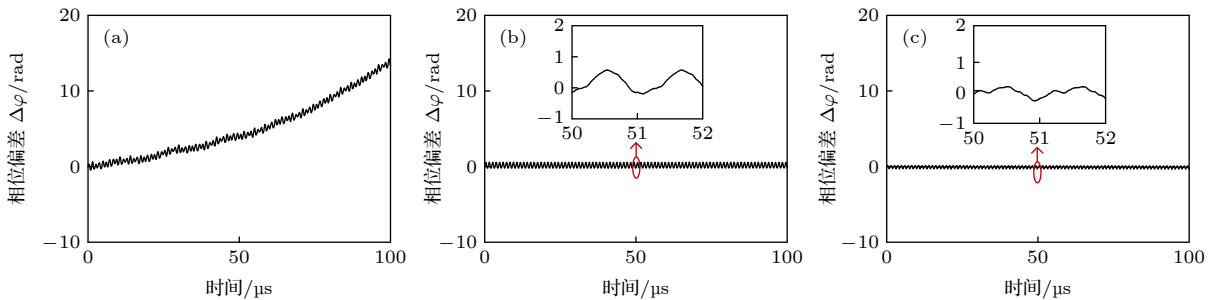


图 5 线性调频信号的相位偏差图 (a) 无反馈情形; (b) 单反馈情形; (c) 双反馈情形; 插图为相位偏差细节

Fig. 5. Phase deviation of the generated LFM microwave signals: (a) Without feedback; (b) single-loop feedback; (c) dual-loop feedback. Insets: the zoomed-in views of the phase deviation.

另一方面, 线性调频信号性能的提升还可以通过计算产生线性调频信号的相位偏差来验证. 通过将图 3 中实验获得的线性调频信号的时域波形与对应的理想线性调频信号进行混频, 即以理想线性调频信号的相位作为参考, 比较了实验信号与理想信号的相位差, 获得了产生线性调频信号的相位偏差 $\Delta\varphi$. 图 5 给出了不同情形下产生线性调频信号

在 100 μs 时长内的相位偏差计算结果. 如图 5(a) 所示, 无反馈情况下产生的线性调频信号具有较大的相位偏差, 相位波动明显. 图 5(b) 是仅采用单路短延时光电反馈的结果. 可以看出, 得益于傅里叶域模式锁定, 线性调频信号的相位偏差得到显著降低: $\Delta\varphi$ 的波动幅度不超过 $5\pi/8$. 如图 5(c) 所示, 采用延时匹配的双环光电反馈回路后, 产生线性调

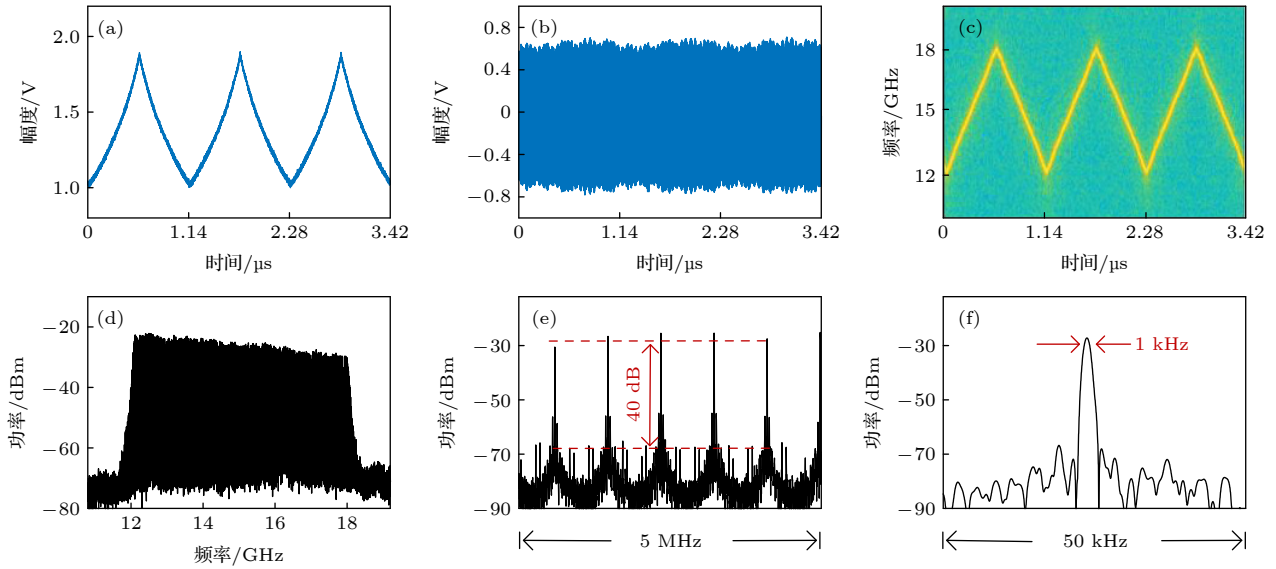


图 6 Ku 波段线性调频信号产生结果 (a) 控制信号 $S(t)$; (b) 时域波形; (c) 瞬时频率; (d) 频谱图; (e) 5 MHz 频谱图; (f) 50 kHz 频谱图

Fig. 6. Results of the Ku-band LFM microwave signal: (a) Control signal $S(t)$; (b) temporal waveform; (c) instantaneous frequency; (d) electrical spectrum; (e) 5 MHz electrical spectrum; (f) 50 kHz electrical spectrum.

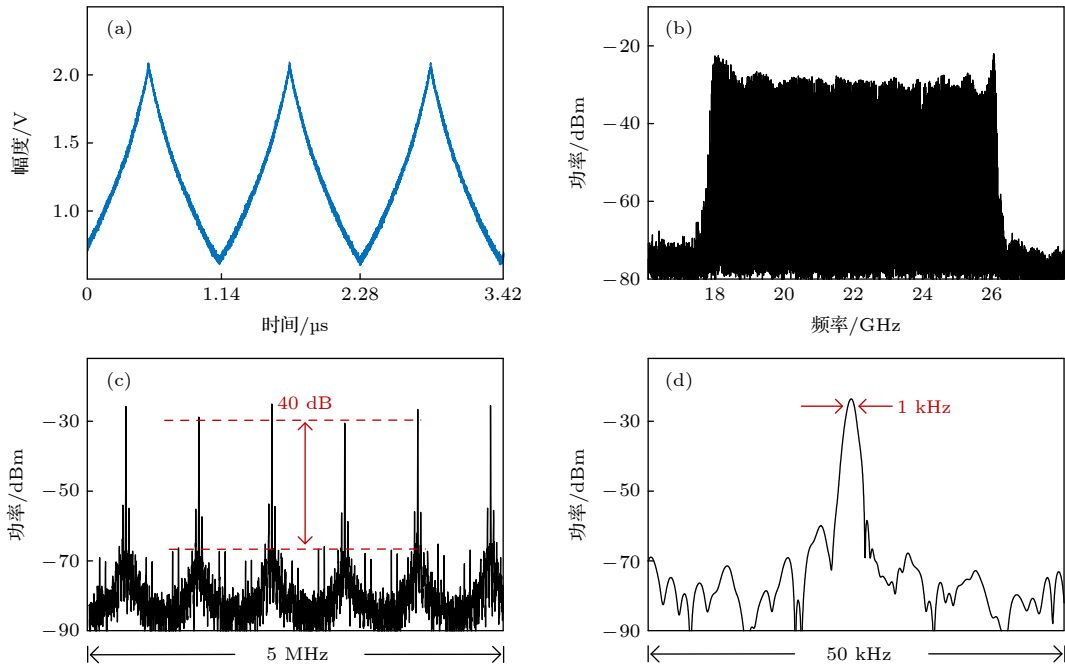


图 7 K 波段线性调频信号产生结果 (a) 控制信号 $S(t)$; (b) 频谱图; (c) 5 MHz 频谱图; (d) 50 kHz 频谱图

Fig. 7. Results of the K-band LFM microwave signal: (a) Control signal $S(t)$; (b) electrical spectrum; (c) 5 MHz electrical spectrum; (d) 50 kHz electrical spectrum.

频信号的相位偏差得到进一步降低: 在 $100 \mu\text{s}$ 时长内, $\Delta\varphi$ 的波动幅度不超过 $\pi/3$. 相位偏差的分析结果表明, 本文提出的双路光电反馈环路能够有效提升光注入半导体激光器生成线性调频信号的相位稳定性.

在图 3—图 5 结果的基础上, 本方案产生线性

调频信号的带宽和工作频段均可灵活调节. 如图 6 所示, 在双路光电反馈环路结构下, 增加控制信号 $S(t)$ 的幅度至 0.9 V , 产生线性调频信号的带宽可增加至 6 GHz ($12\text{--}18 \text{ GHz}$), 覆盖整个 Ku 波段. 图 6(a) 是控制信号 $S(t)$ 的波形, 产生线性调频信号的时域波形和瞬时频率特性分别如图 6(b) 和

图 6(c) 所示. 图 6(d)—(f) 为该线性调频信号的频谱结果, 可以观察到梳齿信噪比为 40 dB 且梳齿线宽为 1 kHz. 进一步调整频率失谐 Δf 和控制信号 $S(t)$ 的振幅, 可以获得更高频段、更大带宽的线性调频信号. 如图 7 所示, 通过增加频率失谐 Δf 到 6 GHz, 并将控制信号 $S(t)$ 的幅度增加至 1.5 V, 可产生带宽为 8 GHz(18—26 GHz) 的 K 波段线性调频信号. 图 7(a) 给出了控制信号 $S(t)$ 的波形, 产生 K 波段线性调频信号的频谱结果如图 7(b)—(d) 所示. 需要说明的是, 受限于示波器的带宽限制 (20 GHz), 实验中并未采集该线性调频信号的时域波形. 得益于延时匹配的双环光电反馈回路, 该 K 波段线性调频信号依然保持了高频谱纯度的特点: 梳齿信噪比达到 40 dB, 单根梳齿的线宽是 1 kHz.

4 结 论

本文提出了一种基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能微波线性调频信号产生方案并进行了实验验证. 本方案中首先通过加载波形为类三角波的电压信号控制注入强度, 使得光注入半导体激光器生成宽带微波线性调频信号; 然后通过引入延时匹配的双路光电反馈环路, 来全面提升生成线性调频信号的质量: 分别基于傅里叶域模式锁定原理和自注入锁定技术, 引入短环光电反馈和长环光电反馈, 以同时实现线性调频信号的梳齿信噪比提升和梳齿线宽窄化. 在验证实验中, 通过对本方案产生线性调频信号的频谱质量和相位偏差分析得到, 其梳齿信噪比达到 40 dB, 梳齿线宽为 1 kHz, 且最大相位偏差不超过 $\pi/3$. 此外, 本方案产生线性调频信号的带宽和中心频率等参数能够灵活调谐, 实验中产生了带宽最大为 8 GHz (18—26 GHz) 的线性调频信号. 研究结果证明了, 本方案能够生成同时具有大带宽、高梳齿信噪比、窄线

宽和相位关系稳定的高性能微波线性调频信号. 本方案具有结构简单、信号质量高和调谐灵活等优势, 因此有望在宽带雷达和高速通信等射频系统中得到应用.

参考文献

- [1] Pan S L, Zhang Y M 2017 *Sci. Technol. Rev.* **35** 36 (in Chinese) [潘时龙, 张亚梅 2017 科技导报 **35** 36]
- [2] Cao J M, Chong Y H, Mei L, Zhu Y P, Duan Z M 2021 *Electron. Sci. Technol.* **34** 36 (in Chinese) [曹继明, 崇毓华, 梅理, 朱宇鹏, 段宗明 2021 电子科技 **34** 36]
- [3] Li G 2019 *Electron. Technol. Software Eng.* **15** 60 (in Chinese) [李刚 2019 电子技术与软件工程 **15** 60]
- [4] McKinney J D 2014 *Nature* **507** 310
- [5] Pan S L, Zhang Y M 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 5450
- [6] Zhang F Z, Guo Q S, Pan S L 2017 *Sci. Rep.* **7** 13848
- [7] Wang B B, Wang Z P 2021 *Video Eng.* **45** 90 (in Chinese) [王贝贝, 王志鹏 2021 电视技术 **45** 90]
- [8] Zhang H, Zou W W, Chen J P 2015 *Opt. Lett.* **40** 1085
- [9] Sun Y, Wang D Y, Deng C Y, Lu M J, Huang L, Hu G H, Yun B F, Cui Y P 2022 *Opt. Lett.* **47** 1077
- [10] Li R M, Li W Z, Ding M L, Wen Z L, Li Y L, Zhou L J, Yu S S, Xing T H, Gao B W, Luan Y C, Zhu Y T, Guo P, Tian Y, Liang X D 2017 *Opt. Express* **25** 14334
- [11] Zhu D, Yao J P 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 1410
- [12] Zhang Y M, Ye X W, Guo Q S, Zhang F Z, Pan S L 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 1821
- [13] Li W Z, Yao J P 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 3573
- [14] Zhou P, Li N Q, Pan S L 2022 *Photonics* **9** 227
- [15] Zhou P, Zhang F Z, Guo Q S, Pan S L 2016 *Opt. Express* **24** 18460
- [16] Usechak N G, Suelzer J S, Haefner J W 2017 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **29** 1132
- [17] Zhou P, Zhang R H, Li K X, Jiang Z D, Mu P H, Bao H L, Li N Q 2020 *Opt. Express* **28** 32647
- [18] Tseng C H, Hung Y H, Hwang S K 2019 *Opt. Lett.* **44** 3334
- [19] Zhou P, Chen H, Li N Q, Zhang R H, Pan S L 2020 *Opt. Lett.* **45** 1342
- [20] Zhuang J P, Li X Z, Li S S, Chan S C 2016 *Opt. Lett.* **41** 5764
- [21] Zhou P, Zhang F Z, Pan S L 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 3726
- [22] Lin X D, Xia G Q, Shang Z, Deng T, Tang X, Fan L, Gao Z Y, Wu Z M 2019 *Opt. Express* **27** 1217
- [23] Chan S C, Hwang S K, Liu J M 2006 *Opt. Lett.* **31** 2254
- [24] Hao T F, Cen Q Z, Dai Y T, Tang J, Li W, Yao J P, Zhu N H, Li M 2018 *Nat. Commun.* **9** 1839

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback*

Zhou Pei¹⁾²⁾ Zhang Ren-Heng¹⁾ Zhu Jian¹⁾ Li Nian-Qiang^{1)2)†}

1) (*School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

2) (*Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

(Received 1 July 2022; revised manuscript received 21 July 2022)

Abstract

Linear frequency-modulated (LFM) waveforms have numerous applications in high-resolution radar detection, high-speed wireless communication, and high precision measurement. The generation of LFM microwave signals based on conventional electronic technologies is limited in their center frequency and bandwidth, which are usually less than a few gigahertz. Fortunately, the inherently large bandwidth offered by photonic technology is very hopeful of breaking through the electronic bottleneck. A variety of photonics-based approaches to generating the LFM waveforms have been reported, including the frequency-to-time mapping method and the external modulation method. However, these solutions suffer poor tunability or expensive RF sources. In recent years, the LFM waveform generation based on optically injected semiconductor lasers (OISLs) has attracted increasing attention. By introducing a low-speed electrical signal to control the period-one (P1) dynamics of an OISL, the LFM waveforms with a large bandwidth are generated. Nonetheless, the generated microwave signal has poor spectral purity, which restricts its many practical applications.

In this work, a high-performance microwave LFM waveform generation scheme based on an OISL with dual-loop optoelectronic feedback is proposed and demonstrated experimentally. In this scheme, the optical injection strength of an OISL is controlled first by a triangular-like voltage signal to generate LFM waveforms with a large bandwidth. Then, the quality of the generated LFM signal is comprehensively improved by introducing a delay-matched dual-loop optoelectronic feedback structure. Based on the Fourier domain mode locking principle (FDML) and the self-injection locking technique, both a short-delay optoelectronic feedback loop and a long-delay optoelectronic feedback loop are introduced to simultaneously improve the spectral purity and phase stability of the generated LFM signals. In the proof-of-concept experiment, by analyzing the spectral quality and phase deviation of the generated LFM signal, a comb contrast of 40 dB, a comb linewidth of 1 kHz, and a phase deviation $\Delta\varphi$ of less than $\pi/3$ are simultaneously obtained. In addition, the parameters such as bandwidth and center frequency of the generated LFM signal generated can be flexibly tuned, and an LFM signal with a large bandwidth up to 8 GHz (18–26 GHz) is generated in the experiment. The proposed scheme features a simple and compact structure, high spectral quality and flexible tuning, thus may find applications in broadband radar and high-speed communication systems.

Keywords: semiconductor lasers, optical injection, linear frequency-modulated signals, optoelectronic feedback

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf, 42.60.Fc, 84.40.–x

DOI: 10.7498/aps.71.20221308

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62001317, 62004135, 62171305), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20200855), and the Natural Science Research Project of Jiangsu Higher Education Institutions of China (Grant No. 20KJB510011).

† Corresponding author. E-mail: nli@suda.edu.cn



基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生

周沛 张仁恒 朱尖 李念强

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback

Zhou Pei Zhang Ren-Heng Zhu Jian Li Nian-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 214204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221308

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221308>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽

Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output from semiconductor laser

物理学报. 2020, 69(9): 090501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191881>

自混沌光相位调制光反馈半导体激光器输出光的混沌特性

Chaotic characteristics of output light from semiconductor laser with self-chaotic phase modulation and optical feedback

物理学报. 2022, 71(15): 150502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220204>

基于激光器阵列后处理的混沌熵源获取高品质随机数

High-quality random number sequences extracted from chaos post-processed by phased-array semiconductor laser

物理学报. 2021, 70(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202034>

Parity-time对称性对电注入半导体激光器的模式控制

Mode control of electrically injected semiconductor laser with parity-time symmetry

物理学报. 2020, 69(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191351>

半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽

Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser

物理学报. 2018, 67(14): 140501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180035>

一种结合增益耦合分布反馈光栅的多模干涉波导半导体激光器的研制

Design of a multimode interference waveguide semiconductor laser combining gain coupled distributed feedback grating

物理学报. 2019, 68(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190744>