

基于光电振荡器结合电选频腔产生线性调频信号

刘莉, 于晋龙*, 王菊, 马闯, 谢田元, 于洋, 方杰, 彭海涛

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

摘要 提出了一种基于光电振荡器结合电选频腔产生线性调频信号的方案, 其中电选频腔由电放大器、电衰减器和移相器组成。通过调节电选频腔中移相器的偏置电压, 利用光电振荡器输出信号与电选频腔输出信号间的频率牵引效应, 能够产生中心频率为 8.3 GHz 的线性调频信号, 频率变化范围约为 550 MHz, 调谐率约为 5.5 MHz/ μ s, 时间带宽积为 5.5×10^4 (带宽 550 MHz, 持续时间 100 μ s), 其相位噪声由光电振荡器的相位噪声决定, 其频率变化范围由移相器的偏置电压范围决定。与已有方法相比, 该方案的系统结构较为简单, 产生的线性调频信号具有较高的频谱纯度, 相位噪声低至 -116 dBc/Hz@10 kHz。

关键词 光学器件; 线性调频信号; 光电振荡器; 电注入锁定; 频率牵引效应

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.032301

Linear Frequency-Modulated Signal Generation Based on Optoelectronic Oscillator Combined with Electrical Frequency-Selected Cavity

Liu Li, Yu Jinlong*, Wang Ju, Ma Chuang, Xie Tianyuan, Yu Yang, Fang Jie, Peng Haitao

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A scheme of linear frequency-modulated signal generation based on optoelectronic oscillator combined with electrical frequency-selected cavity is proposed. The electrical frequency-selected cavity is composed of the electrical amplifier, attenuator, and phase shifter. By adjusting the bias voltage of the phase shifter in the electrical frequency-selected cavity and utilizing the frequency pulling effect between the output signal of optoelectronic oscillator and the output signal of electrical frequency-selected cavity, the linear frequency-modulated signal with a central frequency of 8.3 GHz can be produced, for which the frequency range is as large as 550 MHz, the tuning rate reaches about 5.5 MHz/ μ s, and the time-bandwidth product is up to 5.5×10^4 (bandwidth 550 MHz, duration 100 μ s). Its phase noise depends on phase noise performance of the optoelectronic oscillator, and the frequency range depends on the bias voltage range of the phase shifter. Compared with current methods, the system structure is relatively simple. Linear frequency-modulated signal generated by this scheme has high spectral purity, and its low phase noise is -116 dBc/Hz@10 kHz.

Key words optical devices; linear frequency-modulated signal; optoelectronic oscillator; electrical injection locking; frequency pulling effect

OCIS codes 230.4910; 060.2630

1 引言

线性调频(LFM)信号是雷达系统中常用的一种脉冲压缩信号^[1-2],能够在增大射频脉冲宽度、提高平均发射功率、加大通信距离的同时保持足够的

信号频谱宽度,保证雷达的距离分辨率,实现高精度、高分辨率的绝对距离测量^[3-5],因此在雷达和声呐探测领域得到广泛的应用。脉冲压缩雷达在工作时发射频带宽、持续时间长的 LFM 信号,在接收端对其进行脉冲压缩,获得时域上的窄脉冲,从而提取

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-07-19; 录用日期: 2019-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(61427817,61775162)

* E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

目标的距离信息^[6]。因此,如何产生高质量的 LFM 信号,对脉冲压缩雷达来说是至关重要的。随着雷达技术的发展,越来越多的科研人员开始寻求复杂度低、频谱纯度高的 LFM 信号产生方案。

近年来,国内外研究人员提出了很多 LFM 信号的产生方案,例如直接利用电子器件产生 LFM 信号^[7]。2018 年,Zhang 等^[8]提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的线性频率参数估计产生 LFM 信号的方案,产生了中心频率为 100 MHz、带宽为 80 MHz、处理时间小于 250 ns 的 LFM 信号。然而,由于电子瓶颈效应,微波领域产生的 LFM 信号中心频率较低,频率可调制范围较小,且信噪比难以提高^[9]。

为了能够产生中心频率更高、带宽更宽的 LFM 信号,人们提出了基于光子技术^[10]产生 LFM 信号的方案,为产生高频 LFM 信号提供了新的解决方案。2018 年,朱秋晨^[11]提出了一种基于双平行正交相移键控(DP-QPSK)调制器和相位调制器(PM)产生 LFM 信号的方案,产生了中心频率为 10 GHz、带宽为 2 GHz 的 LFM 信号。但方案中采用了 DP-QPSK 调制器,要同时精确控制 3 个偏置电压,增加了系统的复杂度;另外,系统中光信号的偏振态易受环境影响,导致系统产生的 LFM 信号质量不佳。

为了产生高质量的 LFM 信号,人们提出了基于光电振荡器(OEO)产生 LFM 信号^[12-14]的方案。加拿大渥太华大学 Li 等^[15-16]提出了基于可调谐 OEO 和循环相位调制回路(RPML)产生啁啾微波信号的方案,产生了带宽分别为 120, 240, 480, 960, 1920 MHz,调节时间为 15 ns 的 LFM 信号。该方案的优势在于通过多次相位调制可以使啁啾率倍增,继而可以调节 LFM 信号的带宽。但此类方案

产生 LFM 信号的中心频率及带宽受系统中带通滤波器的限制,并且调制器的调制系数较小,限制了时间带宽积的进一步提高。

为了产生高质量 LFM 信号的同时增大其时间带宽积,Zhou 等^[17-18]提出了基于光注入锁定可调谐 OEO 产生 LFM 信号的方案,通过适当地控制光注入强度,可以产生具有大时间带宽积的 LFM 信号。利用此类方案先后产生了频率分别为 7.0 GHz 和 15.6 GHz,持续时间分别为 40.00 ns 和 887.12 ns,时间带宽积分别为 2804.2 和 13839.1 的 LFM 信号。该方案产生的 LFM 信号具有带宽大、调谐速率快及频谱纯度高优点,但是注入锁定时激光器的驱动电流不断调谐变化,注入锁定状态的稳定性难以保持,极大地限制了此方案的实际应用。

本文提出了一种新的基于 OEO 产生 LFM 信号的方案,即在 OEO 环路中加入一个由移相器(PS)、电放大器(EA)及电衰减器(ATT)组成的电选频腔。输出信号的频率由电选频腔决定,通过调节电选频腔中 PS 的偏置电压来产生 LFM 信号;输出信号的相位噪声由 OEO 的相位噪声决定;通过调节电选频腔中的 ATT 有效地优化边模抑制比。本文首先对该方案进行了理论分析,然后进行了实验验证。

2 基本原理

基于 OEO 产生 LFM 信号的原理如图 1 所示。系统构成了 2 个环路;其中 OEO 环路即 loop 1 由马赫曾德尔调制器(MZM)、可调光衰减器(VOA)、光电探测器(PD)、EA、单模光纤(SMF)、微波耦合器(MC)组成;电选频腔即 loop 2 由 EA、PS、ATT 组成。

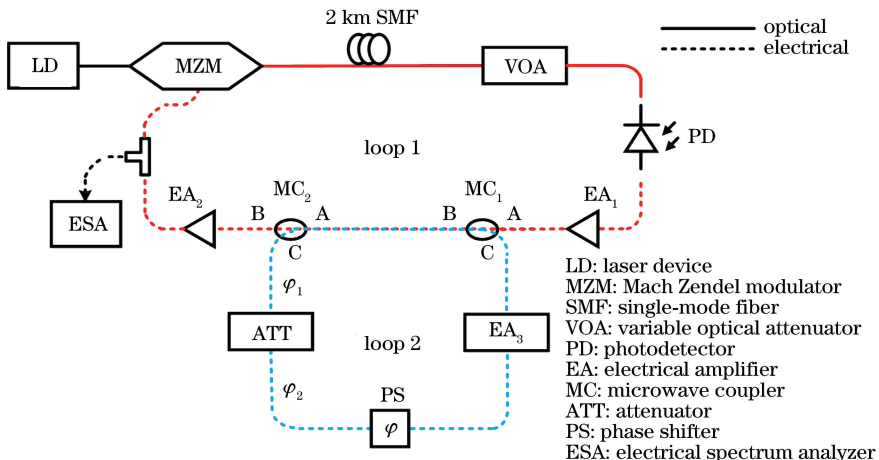


图 1 基于 OEO 产生 LFM 信号的原理

Fig. 1 Schematic of generating LFM signal based on OEO

电选频腔的理论推导公式为^[19-20]

$$P_{out} = \sum_{i=1}^n P_{outi} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\exp(-2i\varphi_1)}{2} \right]^n [G_p \exp(-2i\varphi_2)]^{n-1} P_0, \quad (1)$$

式中： P_{out} 为 OEO 环路产生的一个随机信号在电选频腔中振荡 n 次后输出的微波信号的功率； P_0 为 OEO 环路产生的随机信号的功率； G_p 是电选频腔的功率增益； φ_1 是 loop 2 上半部分的延迟相位变

化； φ_2 是 loop 2 下半部分的延迟相位变化。

利用 MATLAB 2014 软件对(1)式进行仿真,仿真结果如图 2(a)所示。从图中可以看到,电选频腔输出微波信号的中心频率振荡于约 8.3 GHz 处,微波信号线宽较宽,稳定性较差。设定电选频腔的腔长为 0.3 m,当 PS 的偏置电压增加 1 V 时,对应的腔长增加了 0.0033 m,电选频腔输出信号的中心频率减小了 55 MHz,如图 2(b)所示。调节 PS 的偏置电压,等效于改变电选频腔的腔长,从而可以改变电选频腔输出微波信号的中心频率,改变 OEO 的输出频率。

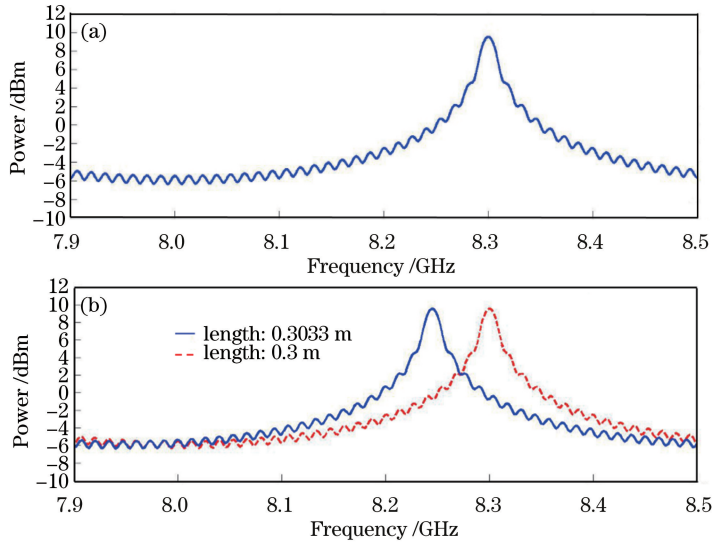


图 2 电选频腔仿真图。(a)频谱图;(b)腔长变化频谱图

Fig. 2 Simulation of electrical frequency-selected cavity. (a) Spectrum; (b) spectrum of frequency-selected cavity with length variation

OEO 输出频率信号的模式间隔 Δf 为

$$\Delta f = c / (nL), \quad (2)$$

式中： L 为 OEO 腔长； n 为等效折射率； c 为真空中光速。可知 OEO 频率间隔与 OEO 腔长成反比^[21]。图 1 所示 loop 1 中包括 2 km 长 SMF,所以 loop 1 中的频率模式间隔很小,loop 2 的腔长比 loop 1 小得多,所以频率模式间隔比较大。两个环路的频率间隔如图 3 所示,其中 $f_{n\pm i}$ ($i=1,2,3$) 为 OEO 稳定输出信号振荡频率,即被注入源信号振荡频率； f_m 为电选频腔输出信号振荡频率,即电注入信号振荡频率。

当有外部信号注入时,频率牵引效应使得电注入信号与被注入信号之间会发生相互作用^[22]。根据 Paciorek^[23] 和 Adler^[24] 的理论推导可以得出,当电注入信号与被注入信号之间的频率差小于锁定带宽 ω_L ,即两个信号的频率差满足

$$|f_m - f_n| \leq \omega_L \quad (3)$$

时,电注入信号与被注入信号相位同步,可实现电注入锁定^[25]。(3)式中 f_n 为与 f_m 最相邻的 OEO 起振模式的频率。最终输出微波信号的频率由电注入信号的频率决定,输出微波信号的相位噪声由 OEO 的相位噪声决定。与电选频腔产生的微波信号相比,电注入锁定后,最终输出微波信号的相位噪声性能变好,线宽变窄,稳定性变好。

将电选频腔嵌入 OEO 环路中,当 OEO 与电选频腔完成电注入锁定后,由于频率牵引效应^[22],可以通过电注入锁定来实现电选频腔与 OEO 的频率匹配,即通过改变电选频腔的频率进而改变 OEO 输出振荡频率,实现 LFM 信号的输出,具体过程如图 3 所示。调节电选频腔中 PS 的偏置电压,电选频腔的输出频率由 f_m 变为 f_m' ,此时, OEO 的输出频率由 f_n 牵引到 f_n' ,仍满足 $|f_m' - f_n'| \leq \omega_L$,最终输出频率由电注入信号频率 f_m' 决定。

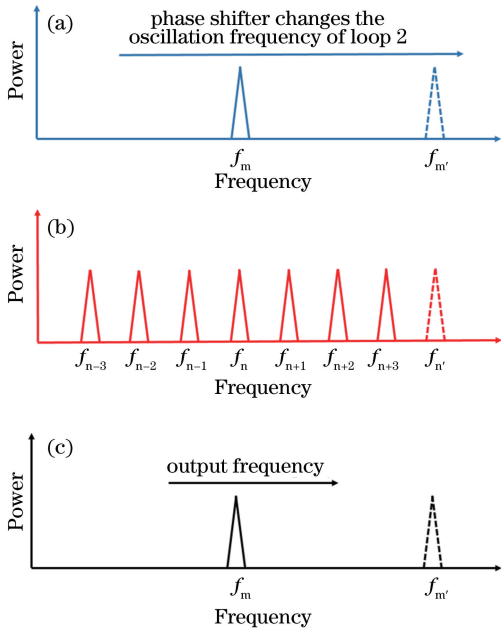


图 3 基于 OEO 产生 LFM 信号的过程。(a)电选频腔；
(b) OEO 谐振腔；(c)最终振荡频率
Fig. 3 Diagram of generating LFM signal based on OEO. (a) Electrical frequency-selected cavity; (b) OEO cavity; (c) final oscillation frequency

3 分析与讨论

基于 OEO 产生 LFM 信号的原理如图 1 所示，

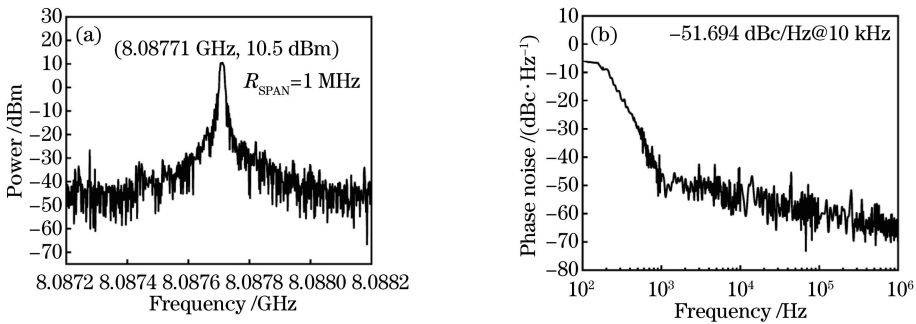


图 4 电选频腔输出微波信号。(a)频谱图, $R_{SPAN} = 1$ MHz; (b)相位噪声
Fig. 4 Output microwave signal of the electrical frequency-selected cavity. (a) Spectrum, $R_{SPAN} = 1$ MHz; (b) phase noise

当断开图 1 中 EA_3 的输入时,图 1 所示系统中仅有 OEO 环路即 loop 1 工作,此时在 R_{SPAN} 为 250 kHz 的情况下测得的 OEO 输出信号的频谱图和相位噪声图如图 5 虚线所示。从图中可以看出,输出微波信号的中心频率约为 8.29156 GHz,功率为 0 dBm,边模抑制比为 40 dB,信号在 10 kHz 处的相位噪声为 -115 dBc/Hz。

当图 1 所示系统中 loop 1 和 loop 2 同时工作

该系统由波长为 1550 nm 的半导体激光器、调制速率为 20 Gb/s 的 MZM、2 km 长 SMF、VOA、工作带宽为 20 MHz 且 1550 nm 波长处响应度为 0.85 A/W 的 PD、增益为 20 dB 的 EA、衰减值为 11 dB 的 ATT、PS 及功分比为 50 : 50 的 MC 等器件组成。200 MHz 的任意波形发生器 (AWG, RIGOL DG1062) 输出 PS 的偏置电压信号,在输出端通过频谱分析仪 (ESA, Agilent 8564EC) 及实时示波器 (Agilent Infiniium MSO8104A) 观测 LFM 信号。其中激光器输出的 1550 nm 连续光进入 MZM 进行调制,调制光经过一段 SMF,通过 VOA 进行放大,再通过 PD 将光信号转换成电信号,电信号被 MC_2 均分成两部分,一部分通过 MC_2 的 B 口反馈给强度调制器作为调制信号,另一部分由 MC_2 的 C 口进入电选频腔。在电选频腔中,PS 用于改变电选频腔中的相位延时量,ATT 用于调节边模抑制比,从而改变电选频腔振荡频率。

当断开图 1 中 PD 的输入时,图 1 所示系统中仅有电选频腔即 loop 2 工作,此时在扫描宽度 (R_{SPAN}) 为 1 MHz 的情况下测得的电选频腔输出信号的频谱图和相位噪声图如图 4 所示。从图中可以看出,输出信号的中心频率约为 8.08771 GHz,功率为 10.5 dBm,信号在 10 kHz 处的相位噪声为 -51.694 dBc/Hz,频谱质量较差。

时,PS 的偏置电压 $V_{\varphi} = 0$ V,在 R_{SPAN} 为 250 kHz 的情况下测得的系统输出信号的频谱图和相位噪声图如图 5 实线所示。从图中可以看出,系统输出微波信号的中心频率为 8.29160 GHz,功率为 11.67 dBm,边模抑制比为 53 dB,在 10 kHz 处,系统产生的微波信号相位噪声为 -116 dBc/Hz。

对比图 5 中实线虚线可知,加入 OEO 环路的系统输出微波信号与电选频腔(图 4)及 OEO 环路

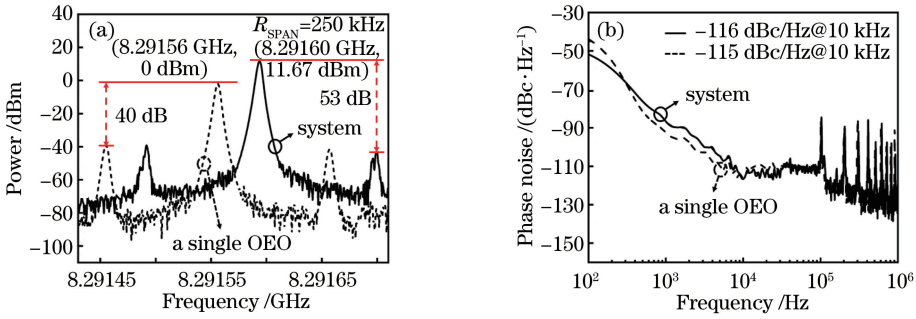


图 5 系统与 OEO 产生微波信号的比较。(a) 频谱, $R_{SPAN}=250$ kHz; (b) 相位噪声

Fig. 5 Comparison of microwave signal generated by the proposed system and OEO. (a) Spectrum, $R_{SPAN}=250$ kHz; (b) phase noise

(图 5 虚线)输出的微波信号相比,信号质量出现明显提高,边模也得到了很好的抑制;并且 OEO 环路与系统产生微波信号的相位噪声基本一致,通过 OEO 环路与电选频腔之间的相互作用,整体系统输出的微波信号的质量、相位噪声性能、稳定性与电选频腔输出的微波信号相比,都有非常明显的提高。

利用图 6(a)虚线所示线性电压控制信号(电压变化范围是 0~10 V,周期为 100 μ s)调节 loop 2 中的 PS,系统产生的 LFM 信号的时域波形图和频谱分别如图 6(a)、(b)所示。从频谱图中可以看出,LFM 信号的频率从 8.025 GHz 变化到 8.575 GHz,频率变化范围约为 550 MHz,其调谐率约为 5.5 MHz/ μ s,时间带宽积为 5.5×10^4 (带宽 550 MHz,持续时间 100 μ s)。从时域波形图中也可以看出,随着 PS 偏置电压的增加,LFM 信号的周期从 0.11756 ns 变化到 0.125 ns,恰好与频率变化相对应。

为了验证产生的调频信号的线性程度,在实验过程中测得系统输出信号频率与 PS 电压之间的关系,如图 7(a)所示。可以看出系统产生的调频信号频率与 PS 偏置电压呈线性关系;由于实验过程中 PS 偏置电压随时间线性变化,因此,系统所产生的

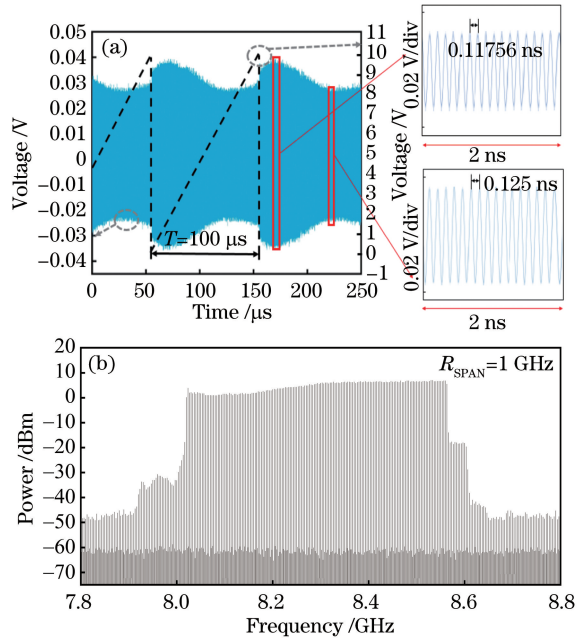


图 6 LFM 信号。(a) 时域波形图; (b) 频谱, $R_{SPAN}=1$ GHz

Fig. 6 LFM signal. (a) Time-domain waveform; (b) spectrum, $R_{SPAN}=1$ GHz

调频信号的频率也随时间线性变化,如图 7(b)所示。

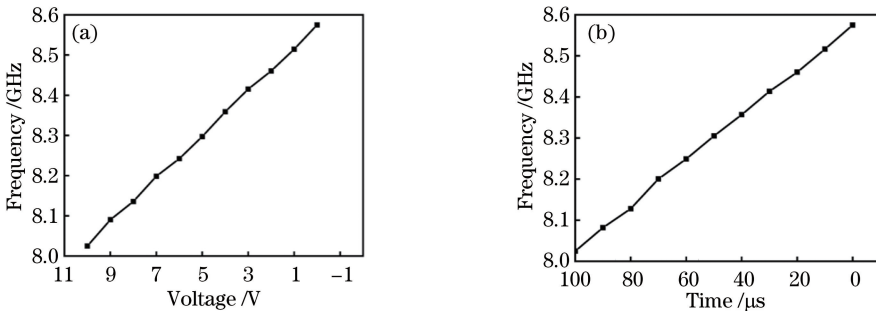


图 7 LFM 信号。(a) 频率-电压关系图; (b) 频率-时间关系图

Fig. 7 LFM signal. (a) Frequency-voltage diagram; (b) frequency-time diagram

4 结 论

提出了一种基于 OEO 结合电选频腔产生 LFM 信号的方案,通过理论推导和系统实验验证了该方案的可行性。利用 OEO 环路的结构,LFM 信号的频谱纯度得到了明显提高,通过调节 PS 的偏置电压可改变输出信号的频率,以产生 LFM 信号。实验验证结果表明,本方案可以产生中心频率为 8.3 GHz、频率变化范围约为 550 MHz 的 LFM 信号,其调谐率约为 $5.5 \text{ MHz}/\mu\text{s}$,时间带宽积为 5.5×10^4 (带宽 550 MHz,持续时间 100 μs)。本方案的系统结构较为简单,成本较低,产生的 LFM 信号具有较高的频谱纯度,相位噪声低至 $-116 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ 。

参 考 文 献

- [1] Xu N, Liu L R, Lu W. Compensation of nonlinear chirp in synthetic aperture imaging radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 22-27.
许楠, 刘立人, 鲁伟. 合成孔径激光成像雷达中的非线性啁啾补偿[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 22-27.
- [2] Zeng Z Y, Zhang X Y, Jia X. Measurement of linear frequency-modulated continuous-wave laser radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(2): 022802.
曾朝阳, 张晓永, 贾鑫. 线性调频连续波激光雷达测量方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(2): 022802.
- [3] Ji N K, Zhang F M, Qu X H, et al. Ranging technology for frequency modulated continuous wave laser based on phase difference frequency measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1104002.
吉宁可, 张福民, 曲兴华, 等. 基于相位差测频的调频连续波激光测距技术[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1104002.
- [4] Li Y T, Zhang F M, Pan H, et al. Simulation of vibration compensation in frequency-modulated continuous-wave laser ranging system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104001.
李雅婷, 张福民, 潘浩, 等. 调频连续波激光测距系统的振动补偿仿真研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104001.
- [5] Shi C Z, Zhang F M, Pan H, et al. Distance measurement technique of large bandwidth laser frequency modulated continuous wave under sinusoid frequency modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201002.
史春钊, 张福民, 潘浩, 等. 正弦调频下大带宽激光调频连续波测距技术[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1201002.
- [6] Zeng Z X, Shi S J. LFM pulse compression of a CO₂ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1996, 23(11): 981-985.
曾昭信, 史双瑾. 线性调频 CO₂ 激光的脉冲压缩[J]. *中国激光*, 1996, 23(11): 981-985.
- [7] Samarah A. A 320 MHz digital linear frequency modulated signal generator for radar applications using FPGA technology [C] // 2014 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, November 14-16, 2014, Bhopal, India. New York: IEEE, 2014: 966-972.
- [8] Zhang P, Wang P, Cheng J L. Time-domain approach for LFM signal parameter estimation based on FPGA [J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(13): 846-848.
- [9] Ding M L, Liang X D, Tang L, et al. Wideband LFM generator based on tracking PLL[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(2): 39-42.
丁满来, 梁兴东, 唐蹊, 等. 基于锁相跟踪技术的宽带线性调频产生方法研究[J]. *微波学报*, 2018, 34(2): 39-42.
- [10] Wang C, Li M, Yao J P. Continuously tunable photonic microwave frequency multiplication by use of an unbalanced temporal pulse shaping system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(17): 1285-1287.
- [11] Zhu Q C. Photonic generation of wideband chirped microwave signal and the performance analysis of pulse compression [D]. Xi'an: Xidian University, 2018: 45-48.
朱秋晨. 宽带线性调频信号的光学生成技术及脉冲压缩性能分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 45-48.
- [12] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(8): 1725-1735.
- [13] Bao W Q, Yu J L, Wang W R. High-rate optical sampling based on optoelectronic oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060701.
包文强, 于晋龙, 王文睿. 基于光电振荡器的高速率光采样技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060701.
- [14] Xu O, Fu X S. Temperature-insensitive method for

- interrogating fiber grating sensor using dual phase-shifted fiber grating and optoelectronic oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 150601.
- 许鸥, 符瑕珊. 基于双相移光纤光栅的光电多频振荡生成及温度不敏感传感解调方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 150601.
- [15] Li W Z, Kong F Q, Yao J P. Arbitrary microwave waveform generation based on a tunable optoelectronic oscillator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3780-3786.
- [16] Li W Z, Yao J P. 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]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3573-3579.
- [17] Zhou P, Zhang F Z, Guo Q S, et al. Linear frequency-modulated waveform generation based on a tunable optoelectronic oscillator [C] // 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 23-26, 2017, Beijing, China. New York: IEEE, 2017: 17415828.
- [18] Zhou P, Zhang F Z, Gao B D, et al. Optical pulse generation by an optoelectronic oscillator with optically injected semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(17): 1827-1830.
- [19] Teng Y C, Zhang B F, Wu C X, et al. Novel mini optoelectronic oscillator based on electrical gain ring resonator cavity[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0520008.
- 滕义超, 张宝富, 吴传信, 等. 基于电增益环腔选频特性的小型光电振荡器[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0520008.
- [20] Teng Y C, Zhang B F, Wu C X, et al. Precise tunable optoelectronic oscillator based on electrical gain ring resonator cavity [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(11): 2074-2078.
- 滕义超, 张宝富, 吴传信, 等. 精细调谐电增益环腔光电振荡器[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(11): 2074-2078.
- [21] Jiang Y, Yu J L, Hu L, et al. Performance and applications of optoelectronic oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(10): 39-45.
- 江阳, 于晋龙, 胡林, 等. 光电振荡器的性能及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(10): 39-45.
- [22] Wang D S, Zhang B F, Lu L, et al. A novel scheme of injection locked optoelectronic oscillator for high-frequency stability [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(8): 1456-1460.
- 王德双, 张宝富, 卢麟, 等. 新型注入锁定光电振荡器高频率稳定性研究[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(8): 1456-1460.
- [23] Paciorek L J. Injection locking of oscillators [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(11): 1723-1727.
- [24] Adler R. A study of locking phenomena in oscillators [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 61(10): 1380-1385.
- [25] Tang K, Yu J L, Wang J, et al. Stable control of dual-cavity in regenerative mode-locking fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051402.
- 汤轲, 于晋龙, 王菊, 等. 再生锁模光纤激光器的双腔稳定控制[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051402.