

基于光电微波振荡器的三角波和正弦信号发生器

罗浩¹, 江阳¹, 吴廷伟¹, 訾月姣², 马寿虎¹, 胡雨龙¹, 唐哲¹

¹贵州大学物理学院, 贵州 贵阳 550025;

²贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

摘要 利用光电振荡器(OEO)产生微波信号,结合马赫-曾德尔调制器(MZM)的调制偏振敏感特性,设计一种将微波三角波信号产生功能嵌入 OEO 系统的三角波和正弦信号发生器。MZM 工作在最小传输点,光场的偏振角通过偏振控制器调节后与调制器的最佳调制轴成一定夹角,使平行于最佳调制轴的光场受载波抑制调制产生奇阶边带,而正交分量的光场不被调制。两部分光场以符合三角波傅里叶关系的比例通过检偏器投影至同一方向,并在光电探测器(PD)上拍频产生三角波信号。该三角波信号经过电带通滤波器后,得到微波正弦信号输出并反馈完成 OEO 的振荡过程。理论上对三角波的产生原理进行分析和仿真,实验上得到了质量良好的重复频率为 5 GHz 的三角波和正弦信号。本方案只需增加少量器件即可使 OEO 同时产生三角波、正弦信号,结构简单,具有实用性。

关键词 光通信; 光电振荡器; 微波; 三角波信号产生; 正弦信号产生

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0306002

Triangular Waveform and Sinusoidal Signal Generator Based on Optoelectronic Microwave Oscillator

Luo Hao¹, Jiang Yang¹, Wu Tingwei¹, Zi Yuejiao²,

Ma Shouhu¹, Hu Yulong¹, Tang Zhe¹

¹College of Physics, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

²College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract Using the capability that an optoelectronic oscillator (OEO) can generate microwave signals and modulation polarization sensitivity of Mach-Zehnder modulator (MZM), we design a triangular wave and sinusoidal signal generator which is an OEO system embedded by the triangular waveform generator. The bias of the MZM is set at the minimum transmission point, and the polarization angle of the light beam is controlled so that light enters the MZM with an angle for the best modulation axis. The component of the light field parallel to the best modulation axis is modulated by the optical carrier suppression in MZM to generate the odd-order sidebands, but the orthogonal component keeps unchanged. After filtering the negative sidebands and projecting the light field in the same direction by the analyzer, we generate a triangular waveform signal in the photodetector (PD). When the triangular waveform signal passes an electric bandpass filter, the corresponding sinusoidal microwave signal is obtained, which can also complete oscillation feedback for the OEO system. The principle of triangular waveform generation is theoretically analyzed and simulated. In the experiments, a clear and steady triangular waveform signal with a repetition frequency of 5 GHz is generated, meanwhile the sinusoidal microwave signal can be obtained simultaneously. With only a few devices added in OEO, the proposed scheme can generate both triangular waveform and sinusoidal signal simultaneously, which has the advantages of simple structure and practicability.

Key words optical communications; optoelectronic oscillator; microwave; triangular waveform signal generation; sinusoidal signal generation

OCIS codes 060.2320; 060.4080; 060.4510; 140.3515

收稿日期: 2017-10-18; 收到修改稿日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61465002)、贵州省高层次创新型人才项目[2015(4010)]、贵州省普通高等学校创新人才团队[2014(32)]、贵州省科技创新人才团队项目[2015(4017)]、贵州大学大学生创新创业训练计划项目(2016012)、贵州省科技计划项目[(2016)2324]

作者简介: 罗浩(1993—),男,硕士研究生,主要从事微波光子技术等方面的研究。E-mail: 15761629286@163.com

导师简介: 江阳(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统和微波光子技术等方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com(通信联系人)

1 引 言

近年来,随着光子微波技术在无线通信、天文、雷达、信号处理等领域的广泛应用,利用光子技术产生各类函数波形也受到了极大关注^[1-4]。光子技术用于产生函数波形具有大带宽、低损耗、对电磁干扰免疫等优点,具有极大的应用潜力^[5]。其中,三角波作为一种重要的函数波形得到了众多的关注。

利用光子技术产生任意波形的经典方法是傅里叶合成法^[6],它通常以光频梳(OFC)作为光源,通过操控各条谱线的幅度和相位得到所需的波形。然而,这种方法需要利用空间光路来对谱线的参数进行逐一控制,系统复杂,光场相位也易受环境扰动的影响。频率-时间映射(FTTM)^[7-8]也是傅里叶方法中的常见技术。它通过频谱整形元件,获得恰当的频谱包络,再利用色散对频谱进行相位调控后,由FTTM映射得到时域波形。虽然该方法相对简单,但由于频谱分量作为总体被控制,因此产生波形的准确性和灵活性受到限制。此外,上述两种技术由于采用光窄脉冲作为光源,在产生三角波时,所得波形的占空比小于1。

为了避免使用光窄脉冲,另一种产生任意波形的有效手段是外调制法。它从连续光出发,经调制作用在光场上产生所需频率分量再通滤波、相移等手段合成所需的波形^[9-11]。该方法相对简单,相关研究也有较多报道,如利用双平行马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)^[12-13]或双电极马赫-曾德尔调制器(De-MZM)^[14-15]配合色散或滤波,这类方案中多使用DP-MZM或De-MZM,调制器的调节参数比较复杂。

采用外调制法成功产生三角波的报道有很多,其中外部时钟驱动信号是三角波产生的基础。考虑到光电振荡器(OEO)能自主产生微波信号,将三角波产生和OEO结合成为一个研究方向。2015年,Wang等^[16]演示了基于OEO的三角波产生系统,用偏振调制器(PolM)代替MZM,滤除偶数阶边带,保留奇数阶边带,最后用偏振分束器使微波信号分解为偏振正交的两个方向,通过控制下路的延时让两路光叠加,产生所需的三角波信号。2016年,Zhang等^[17]提出偏振多路OEO结构产生三角波信号的方案。2017年,Dai等^[18]提出基于双平行MZM的OEO三角波振荡器方案,OEO系统产生的微波信号分别经MZM1和MZM2进行调制后发生干涉,控制其偏振角,最后滤除负阶边带经光电探测器

(PD)检测得到三角波。这些方案虽然都成功利用OEO自主产生微波信号的特点,但在三角波产生环节,往往与OEO系统相互独立,融合度不高或参数调节复杂。

为了更好地利用外调制法和OEO各自的优势,本文提出一种能同时产生三角波和正弦信号的OEO系统。利用MZM的偏振相关性,使OEO系统中注入光场的偏振方向与MZM最佳调制轴成一定角度,当MZM被偏置在最小传输点时,最佳调制轴方向上的光场分量产生奇数阶调制边带,而其正交光场分量不被调制,作为载波保留。通过检偏器(POL)的投影作用,调制边带和光载波可以投影在相同的偏振方向上,并最终在PD上拍频产生三角波信号。该方案的优点在于系统中使用单电极MZM,避免了复杂的偏压控制。在传统OEO系统的基础上通过增加少量器件,便构成三角波和正弦信号产生融于一体的自振荡系统。实验中成功获得了5 GHz频率的微波正弦信号和三角波信号。

2 基于OEO的三角波/正弦信号发生器构成原理

系统方案如图1所示。激光器(LD)发出的线偏振光经过偏振控制器(PC1)控制后与MZM的最佳调制轴成一定的角度。由于MZM是偏振敏感器件,因此与最佳调制轴平行的光场分量将得到理想调制,与其正交的偏振分量将不被调制。工作时,设置MZM工作在载波抑制工作点,使被调制部分光场产生载波抑制调制输出。MZM的输出光场通过一个具有矩形窗口的光滤波器滤除调制信号的负阶边带,以保证后续产生三角波时拍频相位的正确性。掺铒光纤放大器(EDFA)在对光信号功率补偿后,被调制和未被调制的光场分量通过PC2进行偏振控制并进入检偏器。该过程等效于在载波抑制调制光场中重新输入光载波,而载波和边带的功率比可通过调节PC2实现。通过恰当控制各部分参数,光场在PD上拍频后可得到三角波输出。当三角波信号经过电带通滤波器滤出振荡分量后,又反馈进入MZM,完成OEO系统的循环振荡。

从数学上看,三角波的傅里叶级数展开式为

$$T_{tr}(t) = I_{DC} + \sum_{k=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{1}{k^2} \cos(k\omega t), \quad (1)$$

式中, I_{DC} 为常数项,表示直流电流; ω 为角频率。由于三角波高阶分量系数下降较快,因此在傅里叶级数展开式中,只需要考虑第1阶和第3阶即可获得

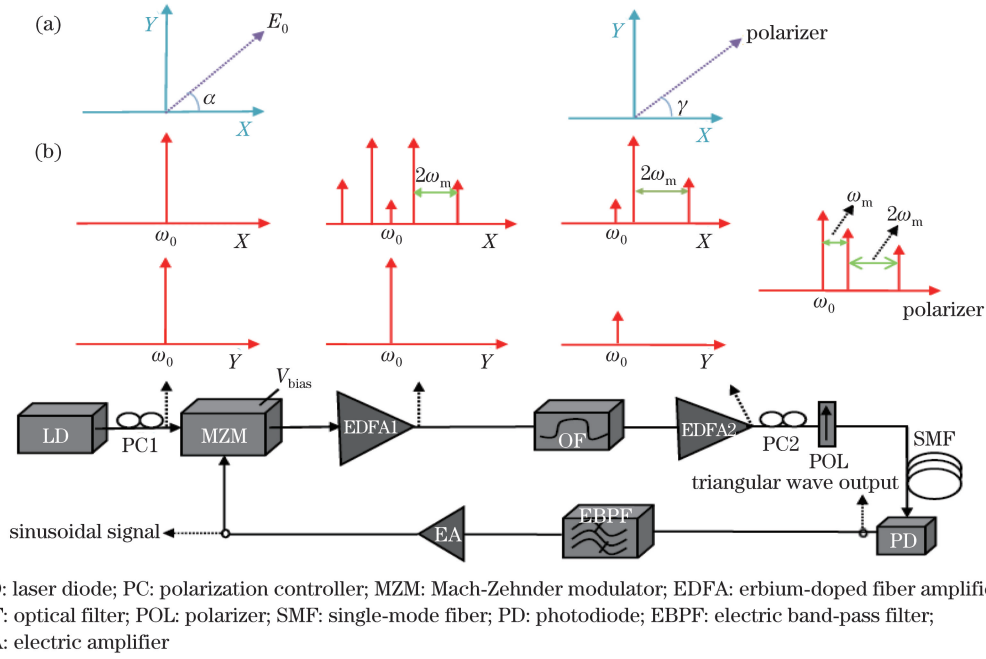


图 1 基于 OEO 环路的三角波/正弦信号产生系统及其系统中光场的演变。

(a) 光场与各轴的偏振角情况; (b) 系统中各点的光谱情况

Fig. 1 Scheme of triangular waveform/sinusoidal signal generator based on OEO system and evolution of optical field in system.

(a) Polarization angle of the optical field with each polarization axis; (b) corresponding optical spectra in the system

较为理想的三角波信号,即(1)式可简化为

$$T_{tr}(t) = I_{DC} + \cos(\omega t) + \frac{1}{9} \cos(3\omega t), \quad (2)$$

如图 1(a)所示, LD 发出的光场经过 PC1 与 MZM 的最佳调制轴(X 方向)形成一定的角度 α 。

若 MZM 被一个正弦信号 $V(t) = V_m \cos(\omega_m t)$ 驱动,光场的 X 方向分量经 MZM 调制后可表示为

$$E_{MZM(X)} = E_{0X} \cos\left[\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi V(t)}{2V_\pi}\right] \cos(\omega_0 t), \quad (3)$$

式中, V_m 为驱动信号的振幅, ω_m 为驱动信号角频率, E_{0X} 为光场在 X 方向分量的振幅, V_π 为半波电压, $\varphi = \pi V_{bias}/V_\pi$ 由直流偏置电压决定,若定义 $\beta = \pi V_m/2V_\pi$ 为 MZM 的调制系数,则(3)式可写为

$$E_{MZM(X)} = E_{0X} \cos\left[\frac{\varphi}{2}\right] \cos(\omega_0 t) \cos[\beta \cos(\omega_m t)] - E_{0X} \sin\left[\frac{\varphi}{2}\right] \cos(\omega_0 t) \sin[\beta \cos(\omega_m t)]. \quad (4)$$

此时,由于 MZM 的偏振敏感性,Y 方向的光场分量不会被调制。当 $V_{bias} = V_\pi/2$, 即 $\varphi = \pi/2$ 时,经雅克比级数展开, MZM 输出的两个正交光场可写为

$$\mathbf{E}_{MZM} = \begin{bmatrix} E_{MZM(X)} \\ E_{MZM(Y)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} E_{0X} \cos \alpha \exp(j\omega_0 t) \cdot (A+B) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} E_{0Y} \sin \alpha \exp(j\omega_0 t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $A = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n+1}(\beta) \times \exp[j(2n+1)\omega_m t]$, $B =$

$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n}(\beta) \exp(j2n\omega_m t)$, $J_n(\beta)$ 为 n 阶贝塞尔函数。

需要注意的是,两路正交光场通过 MZM 后,传输常数不同会引入一个固定的相位差,该相位差仅改变后续光场拍频的初相位,对最终结果没有影响,因此在分析中忽略这一因素。当 X 方向分量处于载波抑制调制状态时,(5)式可表示为

$$\mathbf{E}_{MZM} = \begin{bmatrix} E_{MZM(X)} \\ E_{MZM(Y)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} E_{0X} A \cos \alpha \exp(j\omega_0 t) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} E_{0Y} \sin \alpha \exp(j\omega_0 t) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

从(6)式可以看出,X 方向的光场光谱仅包含奇阶边带,载波得到抑制,而 Y 方向的分量保持载波自身不变,经过 EDFA1 功率补偿后, X、Y 两路正交光场光谱情况如图 1(b)所示。由于两路光场偏振正交,混合光场通过 PD 检测时仅表现为两路光场的强度叠加,载波与边带之间不会产生拍频,最终表现为叠加有直流分量的二倍频信号。

为了产生三角波,让此光场通过一个矩形窗口的滤波器进行滤波,将载波左边的负阶边带全部滤掉,光谱情况如图 1(b)所示,此时的光场变为

$$\mathbf{E}_{\text{MZM}} = \begin{bmatrix} E_{\text{MZM}(X)} \\ E_{\text{MZM}(Y)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} E_{0X} C \cos \alpha \exp(j\omega_0 t) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} E_{0Y} \sin \alpha \exp(j\omega_0 t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $C = \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\beta) \exp[j(2n+1)\omega_m t]$ 。

此光场经 PC2 调节后通过 POL。如图 1(a) 所示, 检偏器的方向和 X 方向的夹角为 γ , 经过 POL 后的输出光场光谱情况如图 1(b) 所示, 此时光场可以表示为

$$E_{\text{POL}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{E_{0X}^2 + E_{0Y}^2} \exp(j\omega_0 t) \times [P + QJ_1(\beta) \exp(j\omega_m t) + QJ_3(\beta) \exp(j3\omega_m t)], \quad (8)$$

式中 $P = \sin \alpha \sin \gamma$, $Q = \cos \alpha \cos \gamma$ 。

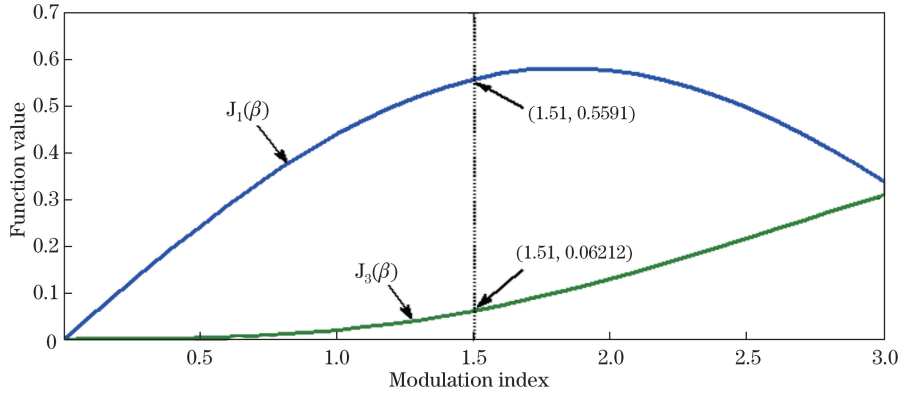


图 2 1 阶、3 阶谐波项与 MZM 的调制系数关系

Fig. 2 $J_1(\beta)$ and $J_3(\beta)$ versus modulation index of MZM

3 实验结果和讨论

为了验证所提出方案的可行性, 进行了如图 1 实验。激光器中心波长为 1547 nm, 经 PC1 调节其偏振态与 MZM 最佳调制轴成一定角度后注入 OEO 环路。OEO 结构中, MZM 工作于最小工作点, 由于 MZM 的调制偏振敏感性, 平行于最佳调制轴的光场分量被载波抑制调制, 其正交分量未被调制。OEO 系统中所用电带通滤波器中心频率为 5 GHz, 带宽 80 MHz, 因此当 OEO 振荡建立后可产生 5 GHz 的微波振荡信号输出。此时, 设置 MZM 的调制系数为 1.51, 测得 MZM 后的信号波形、电谱、光谱分别如图 3(a)、(b)、(c) 所示。实验中所用测试设备为光电示波器 (DCA-X 86100D Infiniium)、电谱仪 (N9010A Agilent) 和光谱仪 (AQ6370C Yokogawa)。从波形图中可以看出, 此

此时, 光载波与调制边带具有相同的偏振方向, 将会对拍频产生贡献。从图 1 可以看出, α 的大小可以由 PC1 独立调节, 而 PC2 可独立控制 γ , 因此当 $\alpha = \gamma = \pi/4$ 时, 满足 $P = Q$, 此时经过 PD 后的光电流可以表示为

$$i(t) = (E_{\text{POL}})^2 \propto I_{\text{DC}} + J_1(\beta) \cos(\omega_m t) + J_3(\beta) \cos(3\omega_m t). \quad (9)$$

图 2 给出了 $J_1(\beta)$ 、 $J_3(\beta)$ 和 MZM 的调制系数关系, 当调制 $J_1(\beta)$ 和 $J_3(\beta)$ 的关系比率满足 $J_1(\beta)/J_3(\beta) = 9:1$ 时, 也即调制系数为 1.51 时, (9) 式可以写为

$$i(t) \propto I_{\text{DC}} + \cos(\omega_m t) + \frac{1}{9} \cos(3\omega_m t), \quad (10)$$

显然此为一个三角波信号。若该三角波信号通过中心频率为 ω_m 的电带通滤波器, 则 3 阶分量将被滤除, 得到频率为 ω_m 的正弦信号。

波形的重复频率为 10 GHz, 且叠加了一个较强的直流分量。从电谱上可以看出, 该信号的中心频率为 10 GHz, 谐波抑制比达 13.82 dB。通过光谱可以明显看到光载波分量和较强的正负 1 阶和 3 阶边带, 该现象符合前面的理论分析结果, 即光谱上虽然存在被调制光场和未被调制光场, 但由于偏振正交, 不会通过拍频在时域包络上体现。为了使该混合光场能通过拍频获得所需的三角波信号, 在 MZM 后利用滤波器滤除光谱中的负阶边带, 并由 PC2 调节光场的偏振态后, 经过 POL 使两部分光场在同一方向上按一定比例投影。

信号在进入 PD 前测得光场的光谱如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 光谱仅保留载波和正 1、正 3 阶边带, 符合光子三角波信号的特点。所得信号的波形由图 5(a) 给出, 从波形上看, 此时所得信号为重复频率 5 GHz 的全占空三角波形, 对应的电谱

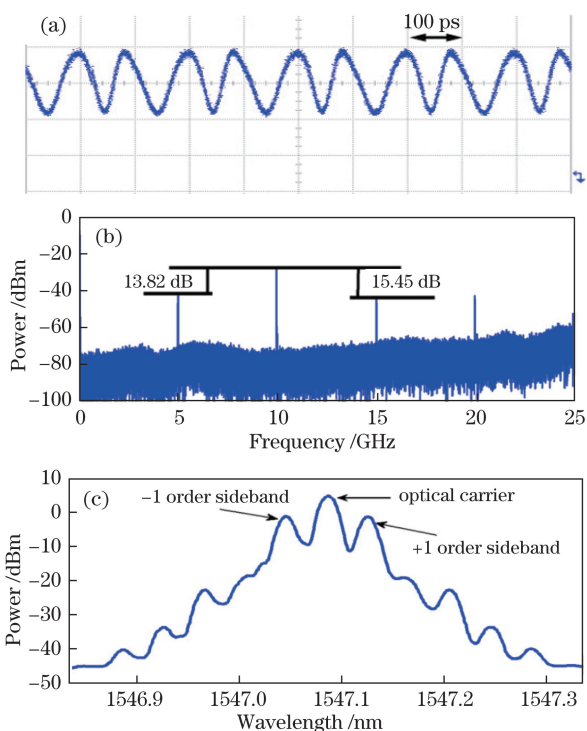


图 3 5 GHz 信号调制时的(a)波形图、
(b)电谱图和(c)光谱图

Fig. 3 (a) Waveform diagram, (b) electrical spectrum, and (c) optical spectrum under 5 GHz signal modulation

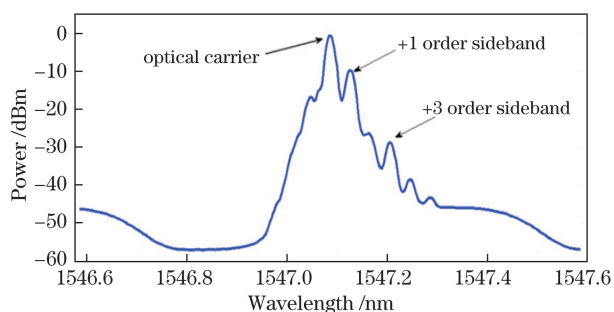


图 4 5 GHz 重复频率三角波光谱图

Fig. 4 Optical spectrum of triangular waveform with repetition frequency of 5 GHz

如图 5(b)所示。电谱图显示此波形包含 5 GHz 频率的 1,3 阶分量,且功率比为 19.24 dB,接近 19.08 dB 的理论结果。

所产生的三角波信号经电带通滤波器滤除 3 阶分量后可得到频率为 5 GHz 的正弦信号并完成反馈振荡。在电带通滤波器后的信号测试结果如图 6(a)、(b)所示。由图 6(a)可看出此信号为 5 GHz 重复频率的理想正弦信号波形;图 6(b)电谱显示该信号中心频率为 5 GHz,3 阶分量已被滤除。

通过前面的分析和实验结果可以看出,在传统的 OEO 结构基础上,通过增加少量无源器件获得了自振荡产生的三角波和正弦信号系统。实验中虽

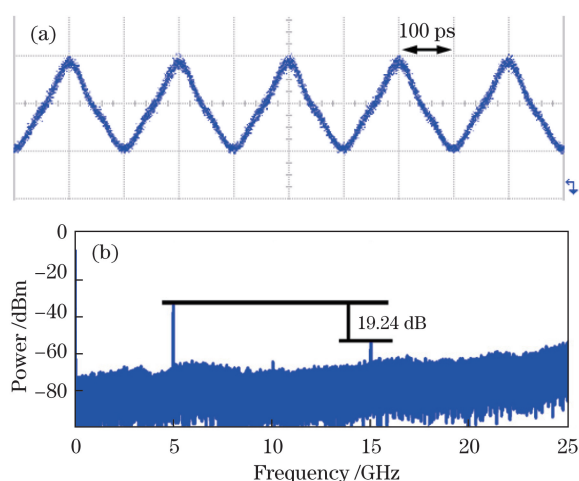


图 5 (a) 5 GHz 重复频率三角波波形图;
(b) 5 GHz 三角波电谱图

Fig. 5 (a) Waveform diagram and (b) electrical spectrum of triangular waveform with repetition frequency of 5 GHz

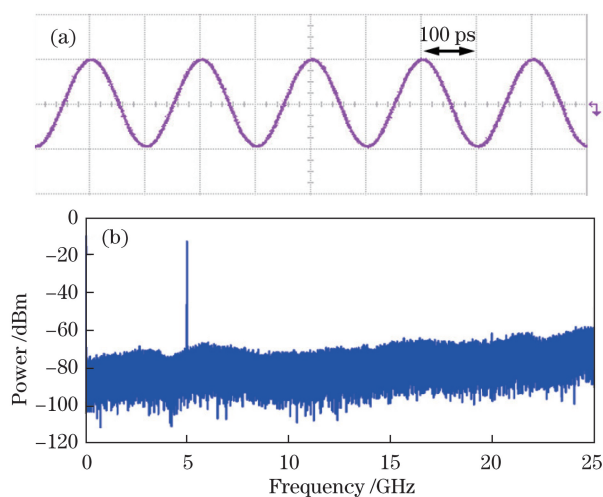


图 6 (a) 5 GHz 正弦信号;(b)电谱图

然仅演示了系统工作频率为 5 GHz 时的情况,但从原理上看,可通过替换电带通滤波器产生不同频率的三角波和正弦信号,其最大工作带宽受限于调制器和 PD 的工作带宽。按照目前的商用器件水平,可以较容易地获得重复频率 10 GHz 以上的信号输出。

4 结 论

本文设计并实现了一种基于 OEO 的正弦信号/三角波产生系统。该系统充分利用了 OEO 自主振荡产生正弦信号的能力,借助 MZM 的偏振敏感特性,获得所需的调制边带和载波;以恰当角度进入检偏器后,完成载波和边带的功率控制,成功产生了三角波信号,进而获得正弦信号。理论分析和实验

证均表明了该方案的可行性,实验上得到了重复频率为 5 GHz 的三角波信号和正弦信号的同时输出,并表现出良好的性能。此方案结构简单,可将三角波信号产生机制与 OEO 系统有机融合,拓展了 OEO 系统的应用能力和领域。

参 考 文 献

- [1] Bhamber R S, Latkin A I, Boscolo S, *et al.* All-optical TDM to WDM signal conversion and partial regeneration using XPM with triangular pulses[C]. IEEE European Conference on Optical Communication, 2008: 1-2.
- [2] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, *et al.* Optical frequency conversion, pulse compression and signal copying using triangular pulses[C]. IEEE European Conference on Optical Communication, 2008: 10426256.
- [3] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, *et al.* Doubling of optical signals using triangular pulses[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(8): 1492-1496.
- [4] Kong F, Yao J, Li W. Arbitrary microwave waveform generation based on a tunable optoelectronic oscillator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3780-3786.
- [5] Yao J. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. Optics Communications, 2011, 284(15): 3723-3736.
- [6] Jiang Z, Huang C B, Leaird D E, *et al.* Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines[J]. Nature Photonics, 2007, 1(8): 463-467.
- [7] Ye J, Yan L, Pan W, *et al.* Photonic generation of triangular-shaped pulses based on frequency-to-time conversion[J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1458-1460.
- [8] Jiang H Y, Yan L S, Sun Y F, *et al.* Photonic arbitrary waveform generation based on crossed frequency to time mapping[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6488-6496.
- [9] Jia Z R, Jiang Y, Ma C, *et al.* Triangular waveform generation technology based on SBS and superposition of optical field envelopes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0405004.
- [10] Chen B, Jia S, Wang J, *et al.* Optical short pulse with dual wavelength and high stability based on optoelectronic oscillator and soliton compression[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0519002.
- 陈斌, 贾石, 王菊, 等. 基于光电振荡器和孤子压缩的双波长、高稳光窄脉冲[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0519002.
- [11] Liu X, Pan W, Zou X, *et al.* Photonic generation of triangular-shaped microwave pulses using SBS-based optical carrier processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3797-3802.
- [12] Li W, Wang W T, Zhu N H. Photonic generation of radio-frequency waveforms based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 1-8.
- [13] Zhang F, Ge X, Pan S. Triangular pulse generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator driven by a single-frequency radio frequency signal[J]. Optics Letters, 2013, 38(21): 4491-4493.
- [14] Li J, Zhang X, Hraimel B, *et al.* Performance analysis of a photonic-assisted periodic triangular-shaped pulses generator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(11): 1617-1624.
- [15] Dai B, Gao Z, Wang X, *et al.* Generation of versatile waveforms from CW light using a dual-drive Mach-Zehnder modulator and employing chromatic dispersion[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 31(1): 145-151.
- [16] Wang W Y, Li W, Sun W H, *et al.* Triangular microwave waveforms generation based on an optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(5): 522-525.
- [17] Zhang F, Gao B, Zhou P, *et al.* Triangular pulse generation by polarization multiplexed optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(15): 1645-1648.
- [18] Dai J, Xu X, Ke J, *et al.* Self-oscillating triangular pulse generator based on 90° photonic-assisted phase shifter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(3): 271-274.