

基于注入锁定和时域综合的倍频三角波产生技术

何禹彤¹, 江阳¹, 訾月皎², 吴廷伟¹, 黄凤勤¹, 夏艺¹, 张晓玉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 提出并验证了一种利用载波抑制调制和半导体激光器注入锁定相结合的倍频三角波产生方案。方案中激光器发出的连续光经正弦信号驱动的马赫-曾德尔调制器进行抑制载波调制后分为两路, 一路保持不变, 另一路注入分布反馈激光器锁定放大调制光的高阶谐波分量, 获得六倍频信号。两路信号经相位和功率比控制, 合路后在光电探测器中叠加产生二倍频的三角波信号。实验利用频率为 3 GHz 和 4 GHz 的正弦调制信号产生了 6 GHz 和 8 GHz 的二倍频全占空三角波信号。理论分析和实验结果均证明了此方案的可行性, 避免了复杂的谱线操作, 所提方案更加简单高效, 在高重复频率三角波产生方面有显著优势。

关键词 光通信; 微波光子学; 时域综合; 三角波; 注入锁定

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101005

Frequency Doubled Triangular Waveform Generation Based on Injection Locking and Time-Domain Synthesis

He Yutong¹, Jiang Yang¹, Zi Yuejiao², Wu Tingwei¹, Huang Fengqin¹, Xia Yi¹, Zhang Xiaoyu¹

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

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

Abstract A new approach to generate frequency doubled triangular waveform signals is proposed and verified through the combination of carrier suppression modulation and semiconductor laser injection locking. In the scheme, the continuous wave emitted by the external cavity tunable laser is modulated by a sinusoidal signal through Mach-Zehnder modulator to suppress the optical carrier. The modulated signal is divided into two branches. One signal remains unchanged and the other is launched into a distributed feedback laser to select and amplify higher-order harmonic components for six-fold signal generation. After controlling the relative phase and power ratio of the two signals, we achieve frequency doubled triangular waveform by overlapping the signals in the photodetector. In the experiment, sinusoidal modulation signals at the frequencies of 3 GHz and 4 GHz are applied to generate full duty frequency doubled triangular waveform with a frequencies of 6 GHz and 8 GHz successfully. Both theoretical analysis and experimental results prove that the scheme is feasible. It is a simpler and more efficient way to avoid the complex spectral line operation. Moreover, it has a distinct advantage in high-frequency triangular waveform generation.

Key words optical communications; microwave photonics; time-domain synthesis; triangular waveform; injection locking

OCIS codes 060.4080; 060.4510; 140.3515; 140.3520

收稿日期: 2017-07-18; 收到修改稿日期: 2017-09-08

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项目([2014]32)、贵州省科技创新人才团队项目([2015]4017)

作者简介: 何禹彤(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器注入锁定和微波光子技术等方面的研究。

E-mail: yutong-he@outlook.com

导师简介: 江阳(1975—), 男, 博士, 教授, 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

射频任意波形产生(AWG)技术是一种可以根据需求输出任意射频波形的技术,在无线通信、现代仪器测试、雷达等诸多领域有着广泛的应用。基于电子学的任意波形产生技术受制于电子器件的电子瓶颈,通常难以实现高频率的任意波形输出,产生超高频的波形信号较困难。随着微波光子学技术的发展,光子任意波形产生(OAWG)技术突破了电学技术瓶颈^[1],具有成本低、抗电磁干扰、体积小、质量轻等许多突出的优点,其巨大的潜在应用价值已在世界范围内引起了广泛关注。

目前对光脉冲的频谱进行幅度、相位操控是实现 OAWG 的主流技术,即傅里叶合成技术。此技术通过对谱线的精确操控实现了任意波形的合成产生。2007 年,美国普渡大学的 Weiner 课题组提出了一种基于液晶调制器的光学任意波形产生方案^[2],利用液晶调制器实现了可编程的相位和幅度控制,实现了对 108 条谱线的独立精确控制。通过在时域内对光脉冲进行频谱整形是实现 OAWG 的另一种方法。Ye 等^[3]利用光谱整形结合频率-时域映射(FTTM)实现了三角波的产生,但该方法无法产生全占空三角波信号。典型的时域光脉冲整形(TPS)系统通常由一个脉冲激光器(锁模激光器)、一对具有共轭色散值(即色散值大小相等,色散符号相反)的色散元件和一个电光调制器组成,脉冲谱线以整体的形式进行控制,灵活性不高。此外,利用连续光的外调制也是产生任意波形的有效手段之一,它通过控制调制边带来获得所需波形。这种方式相对简单,近年来得到了广泛研究,其中利用双平行马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)和双电极马赫-曾德尔调制器(DE-MZM)实现三角波产生的报道有很多^[4-8];虽然这些方法都获得了成功,但是 DP-MZM 和 DE-MZM 的成本相对较高,而且需要同时控制多个偏置电压和调制信号,大大增加了实验参数的控制难度。此外,利用光学方法产生三角波的实现方法还有很多^[9-11],但都存在一定缺点,例如,产生波形切换的响应速度慢,产生波形的实验参数精度要求高而难以控制,无法产生全占空比波形,结构复杂成本高等。Ma 等^[12]利用单驱动马赫-曾德尔调制器(MZM)对入射光偏振敏感的特性实现了对光载波和调制边带的独立操控,成功产生了三角波,该方案系统结构简单,但需要辅助滤波系统,偏振稳定性的

控制较难。贾振蓉等^[13]利用受激布里渊散射(SBS)来锁定高阶边带成功实现了三角波信号的输出,Wu 等^[14]在光电振荡器(OEO)系统中利用调制和时域合成技术成功实现了三角波信号的输出^[13-14],但这两种方案受系统固有特性的影响,产生波形信号的可调谐性不理想。

此外,还可以通过时域处理方法得到任意波形。Jiang 等^[15]利用两个 MZM 对激光器输出的连续光(CW)进行多级调制定整形,成功实现了矩形波、三角波和半占空锯齿波的同时输出,并利用复用技术获得了全占空的锯齿波信号,该方案较好地体现了利用时域综合的方法产生任意波形信号的灵活性与高效性。此外,有研究利用工作在正交偏置(QB)点的 MZM 调制外腔激光器发出的连续光展宽频谱后注入分布反馈激光器(DFB),再利用激光器腔内的非线性效应(四波混频)进一步展宽频谱并锁定放大其高阶边带,最后合路进行包络叠加输出三角波,成功实现了 9,10,12 GHz 的三角波输出^[16]。这种方案结构相对简单,对实验参数的控制较为容易,实现其系统的成本低,便于集成。但以上两种方案产生的波形信号频率与调制信号频率相同,当需要更高频的信号时,调制信号的频率也要提高,成本势必会增加。

本文提出并验证了一种更加高效的三角波产生方法,在文献[16]的基础上,采用载波抑制调制(OCS)方法,直接调制产生二倍频信号,然后将该信号注入 DFB 锁定放大其高阶谐波分量,从而产生六倍频信号。当两路信号经过恰当的移相和功率比控制后,在光电探测器(PD)上叠加产生三角波信号。实验从 3 GHz 和 4 GHz 射频信号出发,成功产生了 6 GHz 和 8 GHz 的全占空三角波信号。这种方法为高频任意波形的产生提供了新路径。

2 工作原理

提出的倍频三角波信号产生实验原理如图 1 所示(ω 为调制信号的频率),外腔可调谐激光器(ECL)发出的连续光被正弦信号驱动的 MZM 调制,此时 MZM 的偏置点置于最小传输偏置点(MITB 点),调制后的光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后用耦合比为 20:80 的耦合器分为两路信号,功率较低的一路注入 DFB,锁定放大五阶谐波分量。通过调节光延时线(ODL)和偏振合束器(PBC)前的两个偏振控制器(PC)可使两路信号获得恰当的相移和功率比,经 PD 检测得到倍频输出的三角波。

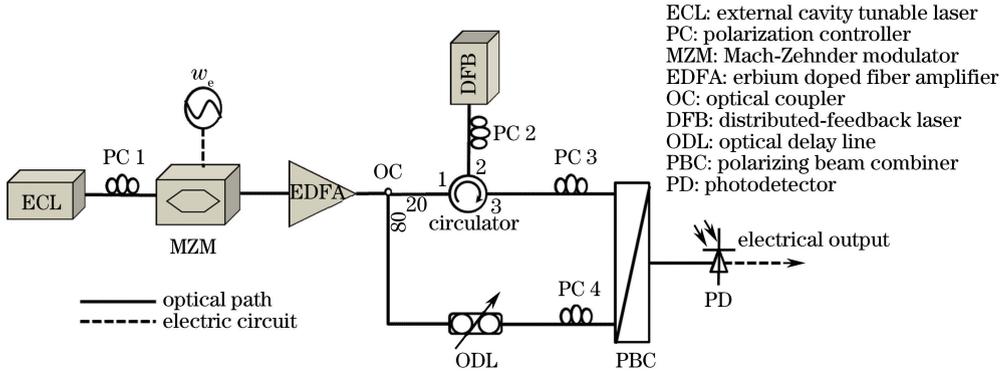


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

根据信号的傅里叶分析方法,任意周期函数都可以用正弦函数和余弦函数构成的无穷级数来表示,一个周期性的三角波的傅里叶展开式可以表示为

$$f(t) = \frac{E}{2} + \frac{4E}{\pi^2} \left[\cos \omega t + \frac{1}{9} \cos 3\omega t + \dots + \frac{1}{(2n-1)^2} \cos(2n-1)\omega t \right], (n=1, 2, 3, \dots), (1)$$

式中 t 为时间, E 为三角波的幅度, ω 为波形的频率, n 为谐波的阶数。由(1)式可知,一个周期性的三角波可以由频率分别为 $\omega, 3\omega, \dots, (2n-1)\omega$ 的余弦函数叠加产生。频率越高的谐波分量,其幅度系数越小,对整个波形包络的影响越小。在大部分情况下,三阶以后的频率分量对波形包络的影响可以忽略,故(1)式可以简写为

$$f(\omega) = Aa \left(\frac{1}{a} + \cos \omega t + \frac{1}{9} \cos 3\omega t \right), (2)$$

式中 A 和 a 为表示幅度的常量。

从(2)式可以看出,存在基频和三倍频分量。换算成相对功率比为

$$L_P = 10 \lg \frac{P_1}{P_3} = 10 \lg \frac{1}{(1/9)^2} = 10 \lg 81 \approx 19.08 \text{ dB}, (3)$$

式中 P_1 为一阶谐波分量的功率, P_3 为三阶谐波分量的功率。可见产生三角波包络信号的一、三倍频功率比约为 19.08 dB。采用载波抑制调制的方式对信号光进行调制,输入到调制器中的光载波电场强度为

$$E_{in}(t) = E_0 \cos \omega_0 t, (4)$$

式中 E_0 为电场强度的振幅, ω_0 为光载波频率。正弦调制信号可表示为

$$V(t) = V_B + V_e \cos(\omega_e t + \phi), (5)$$

式中 V_B 为调制器的偏置电压, V_e 为调制信号的幅

度, ω_e 为调制信号的频率, ϕ 为调制电信号的相位。当 MZM 工作在 MITB 点时,调制器偏置电压为 V_π (半波电压),调制器输出光的电场可以表示为

$$E_{out}(t) = E_0 \cos \omega_0 t \cos[(\pi/2)(1 + \epsilon) + \beta \cos(\omega_e t + \phi)], (6)$$

式中 ϵ 为调制器的归一化基准电压,且有 $V_B = V_\pi(1 + \epsilon)$; β 为相位调制系数。将(6)式用贝塞尔函数展开后,光场输出近似为

$$E_{out}(t) \approx \frac{1}{2} J_0(\beta) E_0 \cos[(\pi/2)(1 + \epsilon)] \cos \omega_0 t + J_1(\beta) E_0 \sin[(\pi/2)(1 + \epsilon)] \{ \cos[(\omega_0 - \omega_e)t - \phi] + \cos[(\omega_0 + \omega_e)t + \phi] \}, (7)$$

当 $V_B = V_\pi$ ($\epsilon = 0$) 时,即 MZM 工作在 MITB 点时,调制器基准电压为半波电压,(7)式的第一项为零,即光载波频率 ω_0 被抑制,而一阶边带得到保留。最后输出光场近似为

$$E_{out}(t) \approx J_1(\beta) E_0 \{ \cos[(\omega_0 - \omega_e)t - \phi] + \cos[(\omega_0 + \omega_e)t + \phi] \}, (8)$$

由(8)式可知,经过抑制载波调制产生了两个相位相关且频差为 $2\omega_e$ 的光边带。

连续光经工作在 MITB 偏置点的 MZM 调制后的信号光只有奇数阶边带(正、负一阶)得到保留,经 PD 拍频检测后得到倍频的光电流输出。如图 2 所示,抑制载波调制产生的含有两个光边带的信号光再注入 DFB,由于激光器腔内的非线性效应会产生高阶谐波分量,如果此时其中的一个谐波分量恰好落入锁定区域,则 DFB 的自由振荡频率和相位将会跟随该谐波分量,相当于选择并放大一个高阶边带^[17-20]。本方案使调制光的五阶谐波分量落入从激光器的锁定区,放大后的五阶边带与负一阶边带经 PD 检测后得到六倍频的光电流输出。六倍频信号包络与二倍频信号包络经过恰当的相位延时和功率

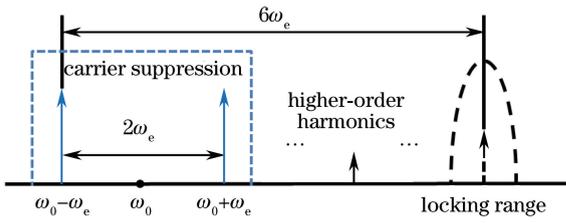


图 2 注入锁定产生倍频信号的原理图

Fig. 2 Schematic of frequency doubled triangular waveform generation by injection locking

比后叠加,就可以获得所需倍频三角波信号。

3 实验及分析

为了验证上述分析的可行性,按图 1 所示方案进行实验。实验中,ECL 输出波长为 1549.68 nm 的连续光,其被 3 GHz 正弦信号驱动的 MZM 调制,此时 MZM 置于 MITB 点,经过调制后的信号光是重复频率为 6 GHz 的正弦信号,波形、电谱和光谱如图 3 所示。从电谱图中可知该信号的中心频率为 6 GHz,高低谐波分量的抑制比都在 30 dB 以上。从光谱图可知信号光载波被抑制,此时正负一阶边带的功率最高。抑制载波调制后的信号光被分成上下两路,上路的光场通过光环形器的 1 口,从 2 口

输出。置于光环形器 2 口处的 PC 2 用于控制注入信号光的偏振态,实验所用半导体激光器为多量子阱结构,只有横电磁波(TE 模)才能获得明显的注入锁定效果^[21],因此实验通过控制 DFB 前的 PC 来实现锁定状态的调控。调节 DFB 的中心波长使信号光的五阶边带刚好落入到其锁定区,锁定放大后得到了中心频率为 18 GHz 的包络信号,其波形、电谱和光谱如图 4 所示。由于注入锁定输出信号包含多个谐波分量,其波形并不是标准的正弦信号,含有一定的抖动和噪声,这是因为实验用主激光的工作稳定性不理想,输出光场的幅度和波长缓慢变化,从而引起从激光器锁定后的光场出现不稳定,最终表现为拍频信号的抖动。改用性能更佳的激光器后这一现象将会有明显改善。从电谱图中可以看出六倍频分量明显强于其他分量,其抑制比超过了 9 dB,这种波形的起伏变化对最后叠加产生三角波的影响不大。图 4(c)给出了注入锁定前后的光谱图比较。信号光注入前,从激光器工作在 1549.79 nm 波长处,如图中点线所示;注入锁定后,由于非线性效应,激光器的输出表现出较多谐波分量,从激光器波长发生红移^[18],激光模式位于 1549.8 nm 波长处,正好被五阶边带锁定,如图中实线所示。

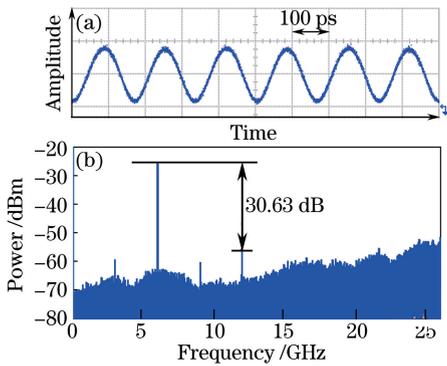


图 3 载波抑制调制信号。(a)波形;(b)电谱;(c)光谱

Fig. 3 Carrier suppression signal. (a) Waveform; (b) electrical spectrum; (c) optical spectrum

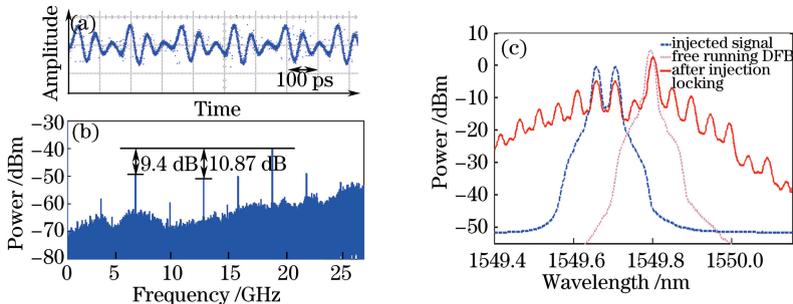
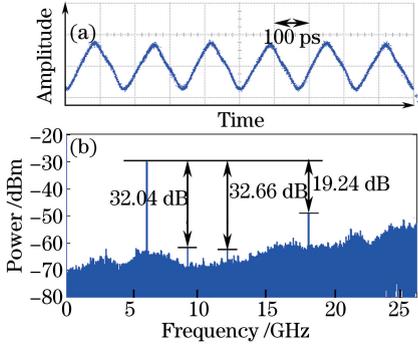


图 4 注入锁定信号。(a)波形;(b)电谱;(c)光谱

Fig. 4 Injection locking signal. (a) Waveform; (b) electrical spectrum; (c) optical spectra

下路调制信号光经过可调光延时线可调节与上路锁定放大后的六倍频信号间的包络相位关系,再分别利用两个偏振控制器(PC 3 和 PC 4)控制两路光经偏振合束器(PBC)后的功率比,达到了合成三角波的目的。合路后的信号光最后在 PD 处叠加产生倍频的三角波信号。

通过对各实验参数的调节,在 PD 端成功检测



到了三角波,其波形、电谱和光谱如图 5 所示。从图 5(a)可知该信号为一三角波信号,频率为 6 GHz,是调制信号频率的两倍;从电谱图中可看出信号的基频与三倍频的功率比为 19.24 dB,接近理论值 19.08 dB,其他谐波分量的抑制比都在 10 dB 以上,产生的信号符合三角波包络信号的频谱特性。合路后的输出光谱也与理论分析的预期结果相符。

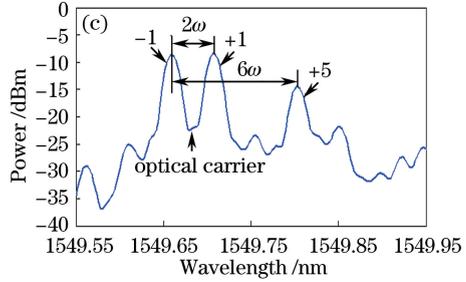


图 5 重复频率为 6 GHz 的三角波。(a) 波形;(b) 电谱;(c) 光谱

Fig. 5 Triangular waveform with repetition rate of 6 GHz. (a) Waveform; (b) electrical spectrum; (c) optical spectrum

为了验证本方案的可调谐性,进行了调制信号频率为 4 GHz 的重复实验,成功产生了重复频率为 8 GHz 的三角波,波形和电谱如图 6 所示,与预期相符。

域进行包络叠加产生倍频三角波的方案,进行了理论分析和实验验证。实验成功利用重复频率为 3 GHz 和 4 GHz 的调制信号产生了重复频率为 6 GHz 和 8 GHz 的二倍频三角波射频信号。本方案结合调制特性和注入锁定过程来实现各包络信号的产生,最终叠加生成了三角波信号,是更为简单、高效、稳定的系统,对高频信号的产生表现出了巨大潜力。

参 考 文 献

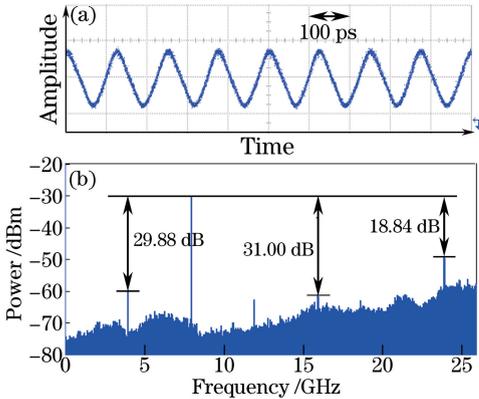


图 6 重复频率为 8 GHz 三角波。(a) 波形;(b) 电谱

Fig. 6 Triangular waveform with repetition rate of 8 GHz.

(a) Waveform; (b) electrical spectrum

理论分析和实验结果说明了该方案的可行性。所提方案充分利用了注入锁定倍频信号产生与时域合成波形的优势,与传统谱线操作方法相比,所提方案中时域包络控制的方法简单高效,提高了系统的稳定性、灵活性和可调谐性。通过增加注入锁定支路的数量,有望实现更复杂函数波形信号的合成产生。

4 结 论

提出了利用载波抑制调制和注入锁定过程在时

- [1] Yao J P. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2011: 12220169.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, 2013, 31(1): 145-151.
- [6] 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.
- [7] Li J, Ning T G, Pei L, *et al.* Optical single sideband modulation with continuously tunable optical carrier-to-sideband ratio by employing a dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22): 224210.
李晶, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于双平行马赫曾德调制器的动态可调光载波边带比光单边带调制: 理论分析与实验研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(22): 224210.
- [8] 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): 14347881.
- [9] Wang Y, Pei L, Gao S, *et al.* Review on photonic method for generating optical triangular pulses [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2013, 6(2): 127-133.
- [10] 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.
- [11] Wang H. Experimental research of triangular optical pulse generation in normal dispersive fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(12): 124212.
王华. 三角形光脉冲在正色散光纤中产生的实验研究 [J]. 物理学报, 2012, 61(12): 124212.
- [12] Ma C, Jiang Y, Bai G, *et al.* Photonic generation of microwave triangular waveform based on polarization-dependent modulation efficiency of a single-drive Mach-Zehnder modulator [J]. Optics Communications, 2016, 363: 207-210.
- [13] 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.
贾振蓉, 江阳, 马闯, 等. 基于 SBS 和光场包络叠加的三角波产生技术 [J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405004.
- [14] Wu T, Jiang Y, Ma C, *et al.* Simultaneous triangular waveform signal and microwave signal generation based on dual-loop optoelectronic oscillator [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 8(6): 7805610.
- [15] Jiang Y, Ma C, Bai G, *et al.* Photonic microwave waveforms generation based on time-domain processing [J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19442-19452.
- [16] Jiang Y, Ma C, Bai G, *et al.* Photonic generation of triangular waveform utilizing time-domain synthesis [J]. Photonics Technology Letters, 2015, 27(16): 1725-1728.
- [17] Jiang Y, Wen J H, Tang Y L, *et al.* Robust photonic radio frequency multiplication technique by utilizing Fabry-Perot laser diode injection locking [J]. Optical Engineering, 2011, 50(7): 075006.
- [18] Miao W Y, Fang N, Wang L T. Single-side band effect based on optically injected semiconductor laser [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0214001.
缪婉仪, 方捻, 王陆唐. 光注入半导体激光器产生单边带效应的研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0214001.
- [19] Guo J Z, Yu J L, Wang W R, *et al.* Optical frequency up-conversion by injection locking semiconductor laser with directly modulated baseband signal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0205003.
郭精忠, 于晋龙, 王文睿, 等. 利用基带直调信号注入锁定半导体激光器产生全光上变频信号的研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205003.
- [20] Ma C, Jiang Y, Jia S, *et al.* All-optical clock extraction based on injection-locked semiconductor laser [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0306001.
马闯, 江阳, 贾石, 等. 基于半导体激光器注入锁定的全光时钟提取 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0306001.
- [21] Han B C, Yu J L, Wang W R, *et al.* Experimental study of continuously tunable photonic microwave frequency multiplication based on distributed feedback injection locking [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1205004.
韩丙辰, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于分布反馈注入锁定的连续可调光子微波倍频实验研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205004.