

基于并联马赫-曾德尔调制器的锯齿波生成方法

袁牧野¹, 刘波¹, 王天亮^{1,2}, 徐志康¹

¹上海卫星工程研究所, 上海 200240;

²上海航天技术研究院北京研发中心, 北京 100081

摘要 介绍了基于微波光子技术的射频锯齿波产生技术的应用背景和技术类型。为克服电子波形生成办法的电子瓶颈,以外调制方法作为技术基础,提出了一种基于并联马赫-曾德尔调制器(MZM)的锯齿波生成的新方法。调整 MZM 直流偏置电压和射频信号幅度,以满足正交偏置点和调制系数的要求,保证经光电平衡二极管后生成的光电流各频率分量特性符合锯齿波函数分解的傅里叶级数。建立了数学仿真模型,进行了实验验证。引入方均根误差对结果进行衡量,并分析了消光比和电压漂流对输出信号性能的影响。结果表明,所提方案灵活,具有优秀的可扩展性,通过简单操作即可完成波形生成和正负斜率切换。

关键词 信号处理; 微波光子学; 马赫-曾德尔调制器; 锯齿波; 任意波

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.070701

Sawtooth Waveform Generation Based on Two Parallel Mach-Zehnder Modulators

Yuan Muye¹, Liu Bo¹, Wang Tianliang^{1,2}, Xu Zhikang¹

¹Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China;

²Shanghai Academy of Spaceflight Technology Beijing R&D Center, Beijing 100081, China

Abstract The application background and techniques to generate sawtooth wave based on photonic approaches are introduced. To overcome the electronic bottleneck of electronic waveform generation methods, we propose a novel method to generate sawtooth waveforms by using two parallel Mach-Zehnder modulators (MZMs) based on external modulation. We adjust the voltage of the direct current source and the intensity of the radio frequency source in order to make MZMs to operate under conditions of quadrature transmission point (QTP) and proper modulation index. Thus, the frequency components' characteristics of the photocurrent from optoelectronic balance diode are coincident with the Fourier series of sawtooth. A mathematical model is built, and the scheme is verified experimentally. The root mean square error is used to evaluate the simulated and experimental results. In addition. The influences of the extinction ratio and the drift voltage on the output signal are analyzed. The results show that the proposed system is flexible and has strong scalability. The waveform generation and slope switching can be realized through simple actions.

Key words signal processing; microwave photonics; Mach-Zehnder modulator; sawtooth waveform; arbitrary waveform

OCIS codes 070.6020; 350.4010; 060.5625; 190.2620

1 引言

现代科学研究中,任意波形的应用已经深入到

各个角落,以三角波、锯齿波、方波为代表的任意射频波形已被广泛应用于现代生产生活中。其中,锯齿波作为被广泛使用的任意波形之一,受到了研究

收稿日期: 2017-12-13; **收到修改稿日期:** 2018-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61671305)、上海航天技术研究院“八院自主研发项目”

作者简介: 袁牧野(1994—),男,硕士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: yuanmysn@163.com

导师简介: 王天亮(1981—),男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事微波光子学和通信卫星总体技术的研究。

E-mail: tianliangwang@21cn.com(通信联系人)

学者们的重视,在信号测试、信号扫描等多个领域扮演着重要角色。

目前生成射频锯齿波的电子学方法均存在着电子瓶颈的问题,生成的波形频率只能在吉赫兹(GHz)范围之内,制约着电子学相关产业的发展。而微波光子学作为微波和光电子的交叉学科给科研工作者们提供了新的解决思路^[1-3],它将电域操作移植到光域中进行处理,克服了如带宽限制^[4]、电磁干扰^[5]、损耗等电子学方法难以解决的问题,并且在信号频率方面也有很大的进步,在实验室环境中可以达到几十吉赫兹的范围。因此,微波光子技术作为未来可能替代电子学技术的新兴学科,吸引着各国科研工作者的关注^[6-7]。

近年来,国内外相继发表了关于基于微波光子学的射频任意波生成技术的报道^[8-16],Zhang等^[17]以光电振荡器(OEO)为核心,使两路反馈信号分别经过可调带通滤波器滤出目标频率分量,并利用功率衰减器和相位调制器匹配功率和相位要求,生成任意波形,但该系统易受环境噪声影响,结果易出现偏差。Xiang等^[18]将经偏振调制器(PolM)调制的光信号等功率分成两路,一路通过可调光纤延时线(ODL)以获得相位差,两路信号经耦合后通过光电二极管(PD)将目标波形中不需要的频率分量抵消掉,但该方案的可调性较差,不利于频率范围的扩展,同时光纤信道易受到温度、人为扰动等影响,从而产生较大的传输时延抖动,因此系统的稳定性较差^[19]。Liu等^[20]使用萨格纳克(Sagnac)环结构,利用PolM完成信号正逆时针的调制,利用色散补偿模块对耦合信号的相位进行调节,满足了任意波形的相位要求,但该方案对可调谐的色散模块的要求较高,需有较大的调谐范围,但当前可调谐色散补偿技术在偏振相关性、带宽、补偿范围之间难以兼顾^[21-22],因此增加了系统的复杂度和不稳定性。

本文采用基于并联马赫-曾德尔调制器(MZM)的外调制方法,并针对目标波形进行了理论推导、系统仿真和实验证明。此外,还分析了电压漂移和消光比两个参数对输出信号性能的影响,对后续基于微波光子学的任意波形生成研究具有指导意义。

2 基本原理

图1为基于并联MZM的射频锯齿波生成方案图。方案中所需的器件主要包括:抽运激光器(LD)、偏振控制器(PC)、MZM、直流源(DC)、微波源(RF)、光电平衡二极管(BPD)。

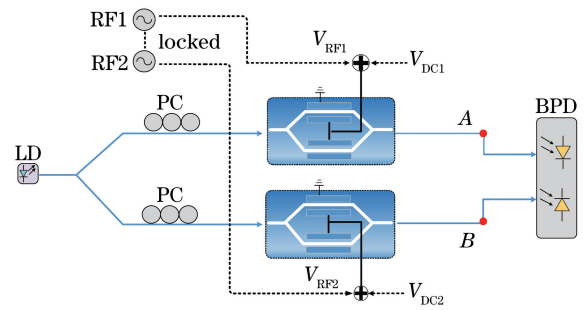


图1 基于并联MZM的射频锯齿波生成方案图

Fig. 1 Schematic of sawtooth waveform generation based on two parallel MZMs

激光器产生振幅为 E_0 、中心角频率为 ω_c 的激光,经耦合器等功率分成两路,经PC后进入并联的MZM(MZM1和MZM2),MZM1加载角频率为 ω_s 的微波信号(RF1),MZM2加载角频率为 $2\omega_s$ 的微波信号(RF2),两个微波源采用锁相技术保证相位一致,则两路光信号可分别表示为

$$E_{\text{upper}} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \exp(j\omega_c t) \times \cos\left\{ \frac{\pi [V_{\text{RF1}} \sin(\omega_s t) + V_{\text{DC1}}]}{2V_\pi} \right\} \exp\left(j \frac{\pi V_{\text{DC1}}}{2V_\pi} \right), \quad (1)$$

$$E_{\text{lower}} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \exp(j\omega_c t) \times \cos\left\{ \frac{\pi [V_{\text{RF2}} \sin(2\omega_s t) + V_{\text{DC2}}]}{2V_\pi} \right\} \exp\left(j \frac{\pi V_{\text{DC2}}}{2V_\pi} \right), \quad (2)$$

式中: V_{RF1} 和 V_{RF2} 分别为微波源1和2的幅度; ω_s 为微波源角频率; V_{DC1} 和 V_{DC2} 分别为加载在2个马赫-曾德尔调制器的偏置电压; V_π 为半波电压。

通过调整直流偏压,使直流偏压1(DC1)、直流偏压2(DC2)分别为 $mV_\pi/2$ 和 $nV_\pi/2$,其中 m 、 n 为正整数。此时MZM1和MZM2均工作在正交偏置点。

两个电光调制器的输出光谱,即图1中A、B两点信号的输出光谱,如图2所示。理论上,由所设置的偏置电压推导可得,两个MZM出口的光信号频谱中存在多个波峰,且相邻波峰之间相位相差 $\pi/4$ 。相对激光频率对称的两波峰,相位差总为 $i\pi/2$,其中 i 为整数。

MZM1在A点的输出可表示为

$$E_{\text{upper}} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \exp(j\omega_c t) \times \cos\left[\frac{\pi}{4} m + \frac{V_{\text{RF1}}}{2V_\pi} \sin(\omega_s t) \right] \exp\left(j \frac{\pi}{4} m \right) =$$

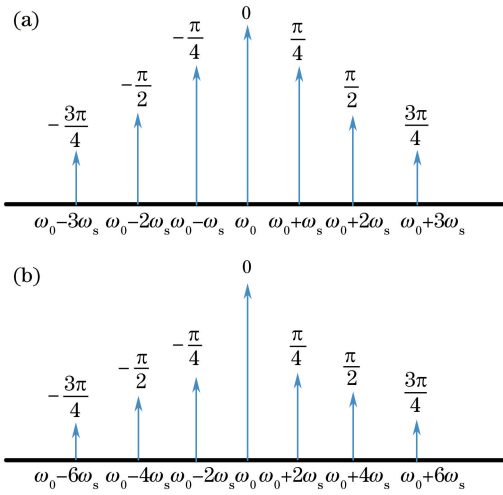


图2 图1中A、B两点信号的输出光谱。(a) A点;(b) B点
Fig. 2 Spectra of signal at A and B points in Fig. 1. (a) A point; (b) B point

$$\frac{1}{2} E_0 \exp\left(j\omega_c t + j\frac{\pi}{4}m\right) \times \left\{ \cos\left[\frac{V_{RF1}}{2V_\pi} \sin(\omega_s t)\right] + \sin\left[\frac{V_{RF1}}{2V_\pi} \sin(\omega_s t)\right] \right\}, \quad (3)$$

MZM2在B点的输出可表示为

$$E_{\text{lower}} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 \exp(j\omega_c t) \times \cos\left[\frac{\pi}{4}n + \frac{\pi V_{RF2}}{2V_\pi} \sin(2\omega_s t)\right] \exp\left(j\frac{\pi}{4}n\right) = \frac{1}{2} E_0 \exp\left(j\omega_c t + j\frac{\pi}{4}n\right) \times \left\{ \cos\left[\frac{\pi V_{RF2}}{2V_\pi} \sin(2\omega_s t)\right] \pm \sin\left[\frac{\pm V_{RF2}}{2V_\pi} \sin(2\omega_s t)\right] \right\}. \quad (4)$$

两路已调制信号的被送入BPD中进行拍频,得到的光电流可表示为

$$I_{\text{out}} \propto \sin[2p \sin(\omega_s t)] + \sin[2q \sin(2\omega_s t)], \quad (5)$$

或

$$I_{\text{out}} \propto \sin[2p \sin(\omega_s t)] - \sin[2q \sin(2\omega_s t)], \quad (6)$$

式中: $p = \pi V_{RF1} / V_\pi$; $q = \pi V_{RF2} / V_\pi$.

利用贝塞尔(Bessel)展开,(5)式和(6)式可转化为

$$I_{\text{out}} \propto \sin(2p \sin \omega_s t) \pm \sin(2q \sin \omega_s t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2p) \sin[(2n-1)\omega_s t] \pm 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2q) \sin[(2n-1) \times 2\omega_s t], \quad (7)$$

式中: $J_{2n-1}(\cdot)$ 为第 $2n-1$ 阶贝塞尔级数。锯齿波的傅里叶展开可表示为

$$T_{\text{tr}}(t) = x_{\text{DC}} + \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\Omega t) \pm \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\Omega t), \quad (8)$$

式中: x_{DC} 为直流信号; Ω 为基频的角频率。

在实际中,高阶谐波衰减迅速,因此可以只利用前3个谐波进行模拟。则(8)式可以简化为

$$T_{\text{tr}}(t) = x_{\text{DC}} + \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\Omega t) \pm \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\Omega t), \quad (9)$$

由(7)式和(9)式可知,需调整调制系数 p 和 q , 使 $J_1(p) : J_2(q) : J_3(p) = 6 : 3 : 2$, 经分析可得,当 $p = 2.3, q = 1.65$ 时,可满足锯齿波的1阶、2阶和3阶的比例关系,从而生成锯齿波。

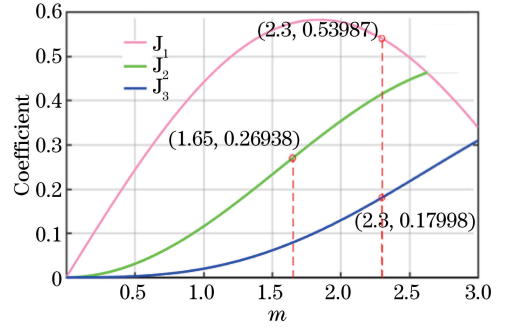


图3 J_1, J_2, J_3 的值与调制系数 m 的关系
Fig. 3 J_1, J_2, J_3 versus modulation index m

3 仿真与实验分析

3.1 仿真分析

根据上文原理进行仿真,仿真中将基频设为10 GHz,则最终可生成10 GHz的锯齿波。图4为仿真输出信号的频谱图。由图4可见,仿真得到的

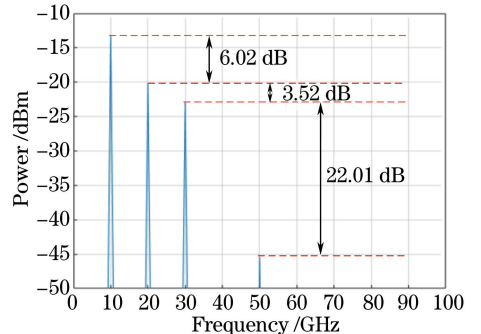


图4 仿真输出信号的频谱图

Fig. 4 Frequency spectrum of simulated output signal

锯齿波信号频谱中二次谐波相较于基频的功率相差 6.02 dB, 三次谐波相较于二次谐波, 其功率相差 3.52 dB, 与理论值相同。实验中基频、二次谐波、三次谐波的幅度比值满足 6:3:2, 符合傅里叶分析下的锯齿波分解的各个谐波幅度比。其他谐波的功率相对于三次谐波的功率, 相差至少 20.01 dB, 在数据

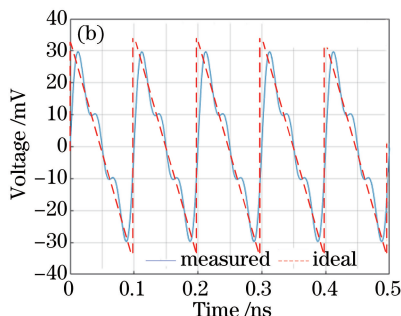
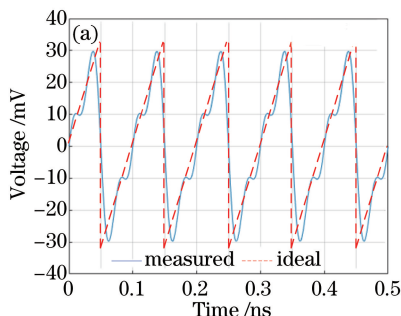


图 5 仿真输出信号波形。(a)正斜率;(b)负斜率

Fig. 5 Waveforms of simulated output signal. (a) Positive slope; (b) negative slope

研究消光比和电压漂移对输出信号的影响。图 6 为输出信号的 RMSE 随消光比的变化。由曲线图可以看出, 随着消光比的增大, 输出信号的 RMSE 随之减小, 当消光比大于 40 dB 时, 可以认为处于理想状态。图 7 为系统发生电压漂移时, 不同的漂移电压对输出信号 RMSE 的影响, 进行二次多项式拟合, 观察结果可见, 漂移电压的数值, 无论正负, 对输出信号的性能影响相同, 而电压漂移只要发生, 都会对 RMSE 产生消极影响, 两者关系呈抛物线状。

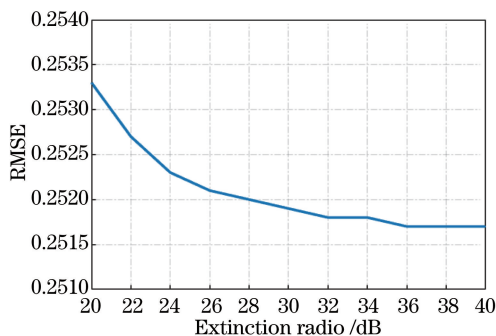


图 6 输出信号的 RMSE 随消光比的变化

Fig. 6 RMSE of output signal versus different extinction ratios

3.2 实验研究

根据图 1 所示的原理框图, 搭建实验框架。激光源 (公司: TeraXion, 型号: NLL04) 波长为 1550.134 nm, 功率为 24 dBm。马赫-曾德尔调制器 (公司: Fujitsu, 型号: FTM7980) 为商业级推挽式器件, 其 3 dB 带宽为 30 GHz, 半波电压为 3.5 V。

分析中可以忽略。

仿真得到的输出信号波形如图 5 所示。其中, 图 5(a) 为正斜率锯齿波, 图 5(b) 为负斜率锯齿波, 利用虚线标注理想锯齿波。经计算, 正斜率和负斜率波形的方均根误差 (RMSE) 均为 0.240, 表明实验结果与理想波形契合度较好。

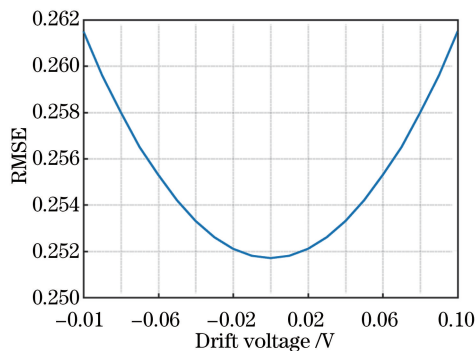


图 7 输出信号的 RMSE 随漂移电压的变化

Fig. 7 RMSE of output signal versus different drift voltages

两个单音信号均由微波源 (公司: Keysight, 型号: 5183N) 产生, 且两微波源间进行锁相。光电二极管 (公司: u2t, 型号: XPDV21xxRA) 带宽为 40 GHz, 灵敏度为 $0.65 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。电域频谱和波形分别由电频谱仪 (公司: ESA, 型号: R & SFSV40, 带宽: 10~40 GHz) 和实时示波器 (公司: Keysight, 型号: DSO-X 92504A) 进行采集。

实验中设射频信号频率为 1 GHz, 实验中输出信号频谱图和信号波形图分别如图 8 和图 9 所示。基频和二次谐波的功率差为 5.97 dB, 接近 6.02 dB 的理想值。三次谐波相较于一次谐波, 被抑制 9.40 dB, 与理论值 9.54 dB 相近。图 9 中包括实验波形和理想波形的曲线对比图, 其中图 9(a) 为正斜率的锯齿波波形图。通过调整直流偏置电压即可完成锯齿波在正负斜率之间的调整, 得到负斜率的锯齿波波形图如图 9(b) 所示。正斜率下, 计算得到的 RMSE 为 0.254,

而负斜率下,计算得到的 RMSE 为 0.274。

实验结果证明,当基波为 1 GHz 的状况下,实验结果与理想锯齿波之间吻合度较高,但仍与仿真值有差距。经分析,原因可能为:1) 激光源、光电二极管等器件引入噪声;2) 电光调制器的半波电压在仿真中被设定为固定值,但实际中随着驱动信号频率增加,半波电压会升高,因此同时需要提高驱动信号功率以保证调制系数不变;3) 电光调制器的消光比一般可达 40 dB 以上,但是连接其他器件后一般只能达到 20 dB ~ 30 dB。

为继续提高输出信号质量,可采取的方案有:1) 采用性能更优越的光、电器件,包括选择半波电压更小的电光调制器^[23]、功率上限更高的微波源等;2) 在方案中增加并联 MZM,让输出信号的 4 次及

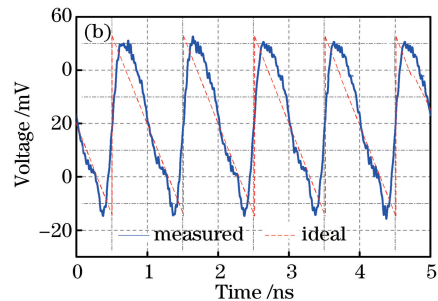
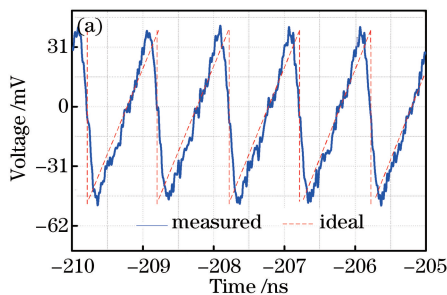


图 9 实验输出信号波形图。(a)正斜率;(b)负斜率

Fig. 9 Waveforms of experimental output signal. (a) Positive slope; (b) negative slope

4 结 论

面向现阶段中科学应用和工程实践里对锯齿波的高要求,提出了一种基于并联 MZM 的射频锯齿波生成方案。完成了方案中 MZM 偏置点原理推导和锯齿波生成原理的证明,同时通过仿真和实验证明了方案的可行性,计算得到仿真实况下输出信号的 RMSE 为 0.240,实验状况下为 0.254 和 0.274。此外,分析得到消光比、电压漂移与输出信号 RMSE 的关系,其中电压漂移幅度与输出信号的 RMSE 之间呈抛物线关系。本方案未使用滤波器,调制器之间相对独立,具有良好的可扩展性。通过调整直流偏置电压即可完成锯齿波在正负斜率之间的切换,方法简单有效。

致谢 感谢南京航空航天大学雷达成像与微波光子教育部重点实验室研究人员提供相关器材,给予实验指导。

参 考 文 献

[1] Capmany J, Novak D. Microwave photonics

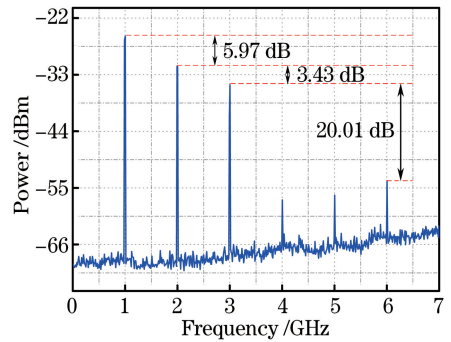


图 8 实验中输出信号频谱图

Fig. 8 Frequency spectrum of experimental output signal

以上谐波的相位和幅度符合锯齿波傅里叶级数分析^[24];3) 添加偏压控制模块^[25],防止电压漂移。

combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1 (6): 319-330.

[2] Du J B, Li D J, Ma M, *et al.* Vibration estimation and imaging of synthetic aperture laser radar based on interference processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910003.

杜剑波, 李道京, 马萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910003.

[3] Feng Y, Jiang H W, Zhang L, *et al.* Advances in high power Raman fiber laser technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201005.

冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201005.

[4] Tao S X, Deng X Y, Li J Z, *et al.* Real-time measurement of light beat-frequency signal with bandwidth of 56.978 GHz[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306004.

陶世兴, 邓向阳, 李建中, 等. 带宽为 56.978 GHz 光拍频信号实时测量[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0306004.

[5] Zhou D P, Dong Y. Anti-interference of current sensing fiber in all-fiber current sensors [J]. Acta

- Optica Sinica, 2017, 37(10): 1006002.
- 周东平, 董毅. 全光纤电流传感器中电流传感光纤的抗干扰研究[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1006002.
- [6] Urick V J, Williams K J, McKinney J D. Fundamentals of microwave photonics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [7] Lezekiel S. Microwave photonics: devices and applications [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [8] Chou J, Han Y, Jalali B. Adaptive RF-photonics arbitrary waveform generator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(4): 581-583.
- [9] Jalali B, Kelkar P, Saxena V. Photonic arbitrary waveform generator[J]. Proceeding of IEEE, 2001: 7268077.
- [10] Cundiff S T, Weiner A M. Optical arbitrary waveform generation[J]. Proceeding of IEEE, 2010: 11428470.
- [11] 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.
- [12] Yao J P. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. Optics Communications, 2011, 284(15): 3723-3736.
- [13] McKinney J D, Leaird D E, Weiner A M. Millimeter-wave arbitrary waveform generation with a direct space-to-time pulse shaper [J]. Optics Letters, 2002, 27(15): 1345-1347.
- [14] Yilmaz T, DePriest C M, Turpin T, *et al.* Toward a photonic arbitrary waveform generator using a modelocked external cavity semiconductor laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(11): 1608-1610.
- [15] Lin I S, McKinney J D, Weiner A M. Photonic synthesis of broadband microwave arbitrary waveforms applicable to ultra-wideband communication [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(4): 226-228.
- [16] Jiang Z, Leaird D E, Weiner A M. Line-by-line pulse shaping control for optical arbitrary waveform generation [J]. Optics Express, 2005, 13(25): 10431-10439.
- [17] Zhang F Z, Gao B D, Zhou P, *et al.* Triangular pulse generation by polarization multiplexed optoelectronic oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(15): 1645-1648.
- [18] Xiang P, Guo H, Chen D L, *et al.* A novel approach to photonic generation of periodic triangular radio frequency waveforms[J]. Optica Applicata, 2015, 45(3): 381-391.
- [19] Zhang C X, Zhang X Q, Hu S L. Development of application research on fiber delay lines[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2234-2244. 张春熹, 张晓青, 胡姝玲. 光纤延迟线应用研究动态[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2234-2244.
- [20] Liu W L, Yao J P. Photonic generation of microwave waveforms based on a polarization modulator in a Sagnac loop [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3637-3644.
- [21] Jia D G, Guo Q, Ma C B, *et al.* Tunable dispersion compensation on optical fiber communication system [J]. Laser and Infrared, 2011, 41(1): 15-22. 贾大功, 郭强, 马彩滨, 等. 光纤通信系统中的可调谐色散补偿技术[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 15-22.
- [22] Zhang X, Yang Z, Li Q L, *et al.* Research on temperature tuning properties of chirped fiber grating [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0505002. 张新, 杨直, 李强龙, 等. 啁啾光纤光栅的温度调谐特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505002.
- [23] Wu Z L. The research of high dynamic range microwave photonic link and all-optical frequency down-conversion technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012. 吴钟乐. 大动态微波光子链路与全光下变频技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- [24] Chen Y, Wen A, Guo J, *et al.* A novel optical mm-wave generation scheme based on three parallel Mach-Zehnder modulators [J]. Optics Communications, 2011, 284(5): 1159-1169.
- [25] Feng Z H, Fu S N, Tang M, *et al.* Investigation on agile bias control technique for arbitrary-point locking in Lithium Niobate Mach-Zehnder modulators [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206002. 冯振华, 付松年, 唐明, 等. LiNbO₃ 马赫-曾德尔调制器任意偏置工作点锁定技术的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206002.