

## 激光与光电子学进展

基于双偏振正交相移键控调制器的二倍频  
可变对称三角脉冲信号的生成

王创业, 宁提纲, 李晶\*, 裴丽, 郑晶晶, 王建帅

北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 提出一种基于双偏振正交相移键控(DP-QPSK)调制器的可变对称三角脉冲信号生成方案。通过调节 DP-QPSK 调制器两个子调制器的调制系数和三个电移相器的相移,可生成对称系数可调谐的三角脉冲信号,对称系数可调谐的范围为 0%~100%,生成的三角脉冲信号的重复率等于输入驱动信号频率的两倍,即用较低频率的驱动信号即可生成高重复率的可变对称三角脉冲信号。通过仿真验证了提出方案的可行性,利用均方根误差(RMSE)评估了该方案生成脉冲波形与理想波形的相似度。除三角脉冲信号外,同时验证了该方案还可生成方形脉冲信号。

**关键词** 光通信; 三角脉冲信号; 可变对称; 傅里叶级数; 电移相器

中图分类号 TN913.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222005

## Frequency-Doubled Triangular Pulse Signal Generation with Variable Symmetry Based on a Dual-Polarization Quadrature Phase-Shift Keying Modulator

Wang Chuangye, Ning Tigang, Li Jing\*, Pei Li, Zheng Jingjing, Wang Jianshuai

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** A triangular pulse signal generation scheme with variable symmetry based on a dual-polarization quadrature phase-shift keying (DP-QPSK) modulator is proposed. The triangular pulse signal with a tunable symmetry coefficient can be generated by adjusting the modulation index of two sub modulators of the DP-QPSK modulator and the phase shift of three electrical phase shifters. The tunable range of the symmetry coefficient is 0%–100%, and the repetition rate of the generated triangular pulse signal is twice the frequency of the input driving signal, which shows that a triangular pulse signal with variable symmetry and high repetition rate can be generated using a driving signal with lower frequency. The feasibility of the proposed scheme is verified through a simulation, and the similarity between the pulse waveform generated by the scheme and the ideal waveform is evaluated using the root mean square error (RMSE). The study verifies that, in addition to the triangular pulse signal, the scheme can also generate a square pulse signal.

**Key words** optical communications; triangular pulse signal; variable symmetry; Fourier series; electrical phase shifter

## 1 引言

三角脉冲信号由于在时域上具有线性上升和线性下降脉冲沿的特点,使其在光通信领域有着广泛的应用,例如其可用于频率转换、信号压缩和复制、波长转换等<sup>[1-5]</sup>。传统的基于电子学方法生成三角脉冲信号的方案由于电子学瓶颈使得生成信号存在带宽小、重

复率低等缺陷,已不适应未来的发展。由于光子学天然具有大带宽、高速率、低损耗和抗电磁干扰等优点<sup>[6-8]</sup>,使得利用光子学方法生成三角脉冲信号成为近些年研究的热点。基于此,一些基于光子学方法生成三角脉冲信号的方案被提出,例如基于频谱整形结合频率-时间映射的全光法生成三角脉冲信号<sup>[9-10]</sup>,该方法首先将光信号的频谱在频谱整形器中整形,将频谱

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-07-17; 录用日期: 2022-07-20; 网络首发日期: 2022-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(62005012,61827817)

通信作者: \*lijing@bjtu.edu.cn

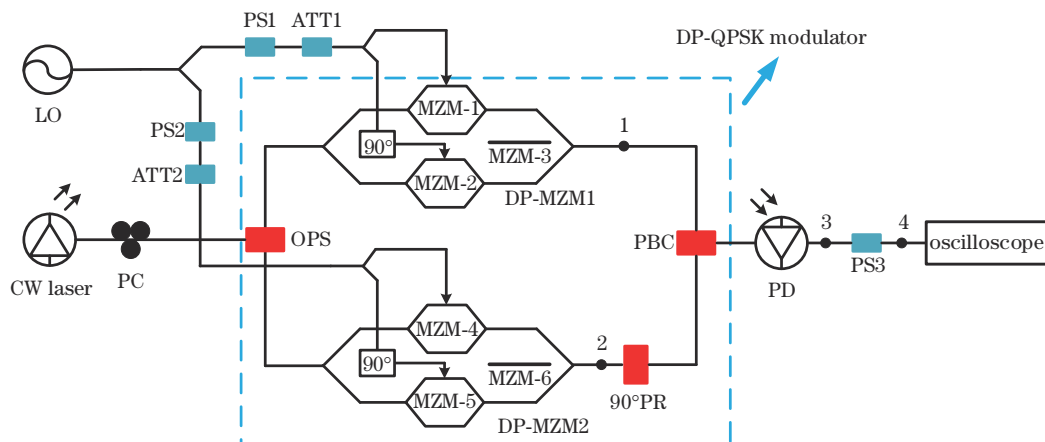
包络整形形成三角形状,随后通过色散介质和光电探测器将整形后的信号从频域映射到时域从而生成三角脉冲信号,该方法具有较强的可重构性,但需要频谱整形器,使得系统成本高、结构复杂,且生成的三角脉冲信号占空比小于1。基于外调制的电光法生成三角脉冲信号是研究者们最常用的一种方法,其结构简单、成本较低、易于实现,使其成为三角脉冲信号生成研究的重点,其原理通常是连续波激光器发出的光信号在调制器内被正弦驱动信号调制,调制后的信号经过光处理单元处理,使得处理后信号的强度近似等于理想三角波形的傅里叶级数展开式,从而生成三角脉冲信号,该方法具体的实现方式很多,例如:2012年, Li等<sup>[11]</sup>提出一种双电极马赫-曾德尔调制器(De-MZM)结合色散光纤生成三角脉冲信号的方案,该方案利用色散光纤对调制信号的功率衰减效应消除掉不需要的谐波分量从而生成三角脉冲信号。2016年, Gao等<sup>[12]</sup>提出一种相位调制器(PM)结合滤波器生成三角脉冲信号的方案,该方案利用滤波器对调制器调制后的信号进行光谱整形,滤除掉特定的光边带,使得输出信号的光强度近似等于理想三角波形傅里叶级数展开式从而生成三角脉冲信号。2020年, Zhang等<sup>[13]</sup>提出一种基于偏振复用双平行马赫-曾德尔调制器(PDM-DPMZM)结合电移相器生成三角脉冲信号的方案,通过合适地调节调制器的直流偏置电压和调制系数以及移相器的相移,可分别生成基频和倍频的对称三角脉冲信号,类似方案还有利用双偏振调制器(DPol-MZM)结合 $90^\circ$ 移相器生成三角脉冲信号<sup>[14]</sup>。同年, Wei等<sup>[15]</sup>利用PM结合偏振器件生成了锯齿(非对称三角)脉冲信号,该方案利用偏振器件使调制信号分为不同偏振状态的两路信号,最后通过两路信号包络的叠加生成了锯齿脉冲信号。2021年, Han等<sup>[16]</sup>利用双平

行相位调制器(DP-PM)和光纤布拉格光栅(FBG)生成了三角脉冲信号和锯齿(非对称三角)脉冲信号。但以上这些方法<sup>[9-16]</sup>都只能生成对称三角脉冲信号或者锯齿(非对称三角)脉冲信号,其对称性不可调谐,这限制了三角脉冲信号的应用范围,2019年, Li等<sup>[17]</sup>提出一种基于单电极马赫-曾德尔调制器(SD-MZM)结合平衡探测器生成可变对称三角脉冲信号的方案,通过调节SD-MZM的偏置电压和光延迟线的延迟可生成对称系数可调谐的三角脉冲信号,随后研究者们又提出了另外一些对称系数可调谐的三角脉冲信号生成方案<sup>[18-20]</sup>,但这些方案<sup>[17-20]</sup>生成的三角脉冲信号的重复率只等于驱动信号的频率。文献[21]中虽然提出一种二倍频可变对称三角脉冲信号生成方案,但该方案用到了三个独立的调制器和一个平衡探测器,使得方案结构复杂、成本很高。

本文提出一种基于双偏振正交相移键控(DP-QPSK)调制器的可变对称三角脉冲信号生成方案,该方案只用到一个独立的调制器即可生成可变对称三角脉冲信号,且生成的三角脉冲信号的重复率是驱动信号频率的两倍,即用较低频率的驱动信号即可生成高重复率的对称三角脉冲信号,同时该方案还可生成方形脉冲信号。

## 2 模型与原理

基于DP-QPSK调制器的可变对称三角脉冲信号生成方案的结构示意图如图1所示,其结构主要由一个DP-QPSK调制器构成,该DP-QPSK调制器是由一个光功率分器(OPS)、两个双平行马赫-曾德尔调制器(DP-MZM1和DP-MZM2)、一个 $90^\circ$ 偏振旋转器( $90^\circ$ PR)和一个偏振合束器(PBC)组合在一起集成的一个调制器。其中,DP-MZM1由两个子调制器(MZM-1和MZM-2)和两个 $90^\circ$ 偏振旋转器组成,DP-MZM2由两个子调制器(MZM-3和MZM-4)和两个 $90^\circ$ 偏振旋转器组成,DP-MZM1和DP-MZM2的输出信号通过PBC合束后由PD探测,PS3和oscilloscope用于信号监测。



CW laser: continuous-wave laser; PC: polarization controller; LO: local oscillator; PS: electrical phase shifter; ATT: electrical attenuator; DP-QPSK modulator: dual-polarization quadrature phase-shift keying modulator; OPS: optical power splitter; PR: polarization rotator; PBC: polarization beam combiner; PD: photodetector

图1 提出方案结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of proposed scheme

MZM2由两个子调制器(MZM-4和MZM-5)和一个主调制器(MZM-6)组成。连续波激光器(CW laser)发出的光载波首先经过一个偏振控制器(PC)后输入进DP-QPSK调制器。本地振荡器(LO)输出的驱动信号首先被一个电功分器分为两路电信号,两路电信号分别经过一个电移相器(PS)和一个电衰减器(ATT),再经过一个90°电桥后分别加载在DP-MZM1和DP-MZM2的两个子调制器的射频输入端。DP-QPSK调制器输出的调制信号进入光电探测器(PD)中进行拍频,拍频后的电信号再经过一个电移相器(PS3)后输出目标信号。

假设 CW laser 输出光载波信号的表达式为  $E_{in}(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t)$ , 其中  $E_0$  和  $\omega_0$  分别为光信号的幅度和角频率。LO 输出的驱动信号的表达式为  $V_{LO}(t) = V_{LO} \cos(\omega t)$ , 其中  $V_{LO}$  和  $\omega = 2\pi f$  分别为驱动信号的幅度和角频率,  $f$  为驱动信号的频率。电移相器 PS1、PS2 和 PS3 引起的电信号的相移分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$ 。通过调整调制器的直流偏置电压, 使 MZM-1、MZM-2、MZM-3、MZM-4、MZM-5 和 MZM-6 分别偏置于最大传输点 (MATP)、MATP、最小传输点 (MITP)、MATP、MITP 和 MITP, 则 DP-MZM1 和 DP-MZM2 输出光信号的表达式分别为

$$\begin{cases} E_1 = \frac{1}{2} E_{in}(t) \{ \cos[m_1 \cos(\omega t + \theta_1)] - \cos[m_1 \sin(\omega t + \theta_1)] \} \\ E_2 = \frac{1}{2} E_{in}(t) \{ \cos[m_2 \cos(\omega t + \theta_2)] + j \sin[m_2 \sin(\omega t + \theta_2)] \} \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $m_1 = \rho_1 \pi V_{LO} / (2\sqrt{2} V_\pi)$  和  $m_2 = \rho_2 \pi V_{LO} / (2\sqrt{2} V_\pi)$  分别为 DP-MZM1 和 DP-MZM2 的调制系数,  $V_\pi$  为 MZM 的半波电压,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为 ATT1 和 ATT2 的衰减系数。将式(1)通过 Jacobi-Anger 展开式展开得

$$\begin{cases} E_1 = E_{in}(t) \sum_{n=1}^{\infty} \{ [(-1)^n - 1] J_{2n}(m_1) \cos[2n(\omega t + \theta_1)] \} \\ E_2 = \frac{1}{2} E_{in}(t) \left\{ J_0(m_2) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \{ (-1)^n J_{2n}(m_2) \cos[2n(\omega t + \theta_2)] \} + 2j \sum_{n=1}^{\infty} \{ J_{2n-1}(m_2) \sin[(2n-1)(\omega t + \theta_2)] \} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

图 2 为第一类贝塞尔函数 0~6 阶函数值。由图可知, 当  $m < 2.3$  时, 4 阶和更高阶的贝塞尔函数值几乎可以忽略不计。对于式(2)来说, 当  $m < 2.3$  时, DP-MZM1 和 DP-MZM2 输出光信号中的  $\pm 4$  阶光边带和更高阶光边带可以忽略不计, 可只考虑光载波、 $\pm 1$  阶光边带、 $\pm 2$  阶光边带和  $\pm 3$  阶光边带, 此时 DP-MZM1 和 DP-MZM2 输出信号的光强度可以表示为

$$\begin{cases} I_1(t) \approx 2E_0^2 J_2^2(m_1) + 2E_0^2 J_2^2(m_1) \cos(4\omega t + 4\theta_1) \\ I_2(t) \approx \frac{1}{4} E_0^2 - \frac{1}{2} E_0^2 J_2(2m_2) \cos(2\omega t + 2\theta_2) - \frac{1}{2} E_0^2 J_6(2m_2) \cos(6\omega t + 6\theta_2) \end{cases} \quad (3)$$

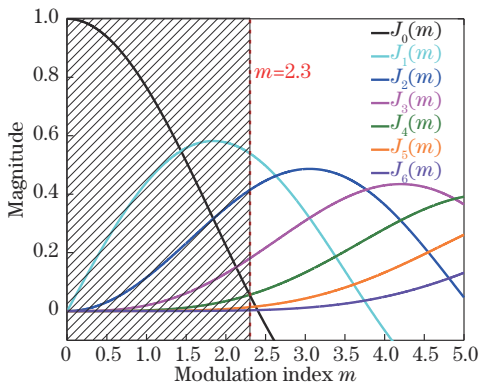


图 2 第一类贝塞尔函数的函数值

Fig. 2 Function values of Bessel function of first kind

此时 PD 输出电流可表示为

$$I_3(t) \approx 2\Re E_0^2 J_2^2(m_1) + \frac{1}{4} \Re E_0^2 + \frac{1}{2} \Re E_0^2 \left\{ \begin{aligned} & -J_2(2m_2) \cos(2\omega t + 2\theta_2) \\ & + 4J_2^2(m_1) \cos(4\omega t + 4\theta_1) \\ & - J_6(2m_2) \cos(6\omega t + 6\theta_2) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

式中,  $\Re$  代表 PD 的灵敏度。从 PD 输出的电流经过 PS3 后可表示为

$$I_4(t) \approx 2\Re E_0^2 J_2^2(m_1) + \frac{1}{4} \Re E_0^2 + \frac{1}{2} \Re E_0^2 \left\{ \begin{aligned} & -J_2(2m_2) \cos(2\omega t + 2\theta_2 + \theta_3) \\ & + 4J_2^2(m_1) \cos(4\omega t + 4\theta_1 + \theta_3) \\ & - J_6(2m_2) \cos(6\omega t + 6\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由文献[17]可知, 任意对称系数三角波形的傅里叶级数展开式都可以表示为无限正弦函数项的加权和, 如下式所示:

$$T_{tri}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\Omega t) \approx b_1 \sin(\Omega t) + b_2 \sin(2\Omega t) + b_3 \sin(3\Omega t) \quad (6)$$

由式(3)可知, DP-MZM1 输出信号光强度中包含四阶谐波分量, DP-MZM2 输出信号光强度中包含二阶和六阶谐波分量。由于 DP-MZM1 和 DP-MZM2 输出的信号在 PD 中分别拍频(两信号以正交偏振的状态进入 PD), 从而同时生成了二、四、六阶谐波分量, 如

式(4)所示,后经过 PS3 进行相位调整生成的信号如式(5)所示,由此式看出,信号中同时包含二、四、六阶谐波分量。对比式(6)(一倍频三角波形傅里叶级数展

开式中包含一、二、三阶谐波分量)可看出,本系统可生成二倍频三角脉冲信号。将式(5)转化为正弦项叠加和的形式为

$$I_4 \approx DC + a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2 + a_3 \sin \phi_3$$

$$DC = 2\Re E_0^2 J_2^2(m_1) + \frac{1}{4} \Re E_0^2 \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Re E_0^2 J_2^2(2m_2) \\ \frac{2}{(-1)^k} \Re E_0^2 J_2^2(m_1) \\ -\frac{1}{2(-1)^l} \Re E_0^2 J_6^2(2m_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\omega t + 2\theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2} \\ 4\omega t + 4\theta_1 + \theta_3 + \frac{\pi}{2} + k\pi \\ 6\omega t + 6\theta_2 + \theta_3 + \frac{\pi}{2} + l\pi \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中,  $k, l$  为整数。对比式(7)和式(6),为使方案生成不同对称系数三角脉冲信号,需满足:

$$\begin{cases} a_1 : a_2 : a_3 = b_1 : b_2 : b_3 \\ \phi_2 = 2\phi_1 + 2u\pi \\ \phi_3 = 3\phi_1 + 2v\pi \end{cases}, \quad (8)$$

式中,  $u, v$  为整数。式(8)可进一步表示为

$$\begin{cases} \frac{\frac{1}{2} \Re E_0^2 J_2^2(2m_2)}{\frac{2}{(-1)^k} \Re E_0^2 J_2^2(m_1)} = \frac{b_1}{b_2} \\ \frac{\frac{1}{2} \Re E_0^2 J_2^2(2m_2)}{-\frac{1}{2(-1)^l} \Re E_0^2 J_6^2(2m_2)} = \frac{b_1}{b_3} \\ 4\omega t + 4\theta_1 + \theta_3 + \frac{\pi}{2} + k\pi = 2\left(2\omega t + 2\theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2}\right) + 2u\pi \\ 6\omega t + 6\theta_2 + \theta_3 + \frac{\pi}{2} + l\pi = 3\left(2\omega t + 2\theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2}\right) + 2v\pi \end{cases}. \quad (9)$$

不同对称系数三角波形对应的  $b_1, b_2$  和  $b_3$  值由文献[19]可知,通过式(9)可计算得出不同对称系数三角

表1 不同对称系数三角脉冲信号生成的条件

Table 1 Conditions for generating triangular pulse signals with different symmetry coefficients

$\delta / \%$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$m_1$	$m_2$
0	$\pi/4$	0	$\pi/2$	1.25	2.22
10	$\pi/4$	0	$\pi/2$	1.26	2.19
20	$\pi/4$	0	$\pi/2$	1.30	2.07
30	$\pi/4$	0	$\pi/2$	1.32	1.67
40	$3\pi/8$	$\pi/4$	0	1.07	1.81
50	0	$\pi/4$	0	0	1.95
60	$\pi/8$	$\pi/4$	0	1.07	1.81
70	$\pi/2$	0	$\pi/2$	1.32	1.67
80	$\pi/2$	0	$\pi/2$	1.30	2.07
90	$\pi/2$	0	$\pi/2$	1.26	2.19
100	$\pi/2$	0	$\pi/2$	1.25	2.22

脉冲信号生成条件的一组特征解如表1所示。

除三角脉冲信号外,此方案还可生成方形脉冲信号,方形的傅里叶级数展开式为

$$T_{\text{squ}}(t) = DC + \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\Omega t) \approx \sin(\Omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\Omega t). \quad (10)$$

对比式(10)与式(7),为生成方形脉冲信号,需满足:

$$\begin{cases} m_1 = 0 \\ \frac{\frac{1}{2} \Re E_0^2 J_2^2(2m_2)}{-\frac{1}{2(-1)^l} \Re E_0^2 J_6^2(2m_2)} = 3 \\ 6\omega t + 6\theta_2 + \theta_3 + \frac{\pi}{2} + l\pi = 3\left(2\omega t + 2\theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2}\right) + 2v\pi \end{cases}. \quad (11)$$

由式(11)可解出方形脉冲信号生成条件的一组特征解,如表2所示。

表2 方形脉冲信号的生成条件

Table 2 Conditions for generating square pulse signal

Pulse signal type	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$m_1$	$m_2$
Square	0	0	$\pi/2$	0	2.22

### 3 仿真验证与分析

通过仿真软件 OptiSystem 对方案进行验证。系统结构如图1所示,其中, CW laser 的波长为 1550.12 nm, 功率为 20 dBm; MZM 的消光比为 30 dB, 插入损耗为 5 dB; PD 的灵敏度为 1 A/W, 热噪声系数为  $10^{-21}$  W/Hz; MZM-1、MZM-2、MZM-3、MZM-4、MZM-5 和 MZM-6 分别偏置于 MATP、MATP、MITP、MATP、MITP 和 MITP; LO 输出驱动信号的频率为 10 GHz。

#### 3.1 不同对称系数三角脉冲信号的生成

当移相器的相移、DP-MZM1 和 DP-MZM2 的调制系数设置如表1所示时,仿真生成了对称系数为 0%~100% 的三角脉冲信号,其对应的时域波形如图3所示。

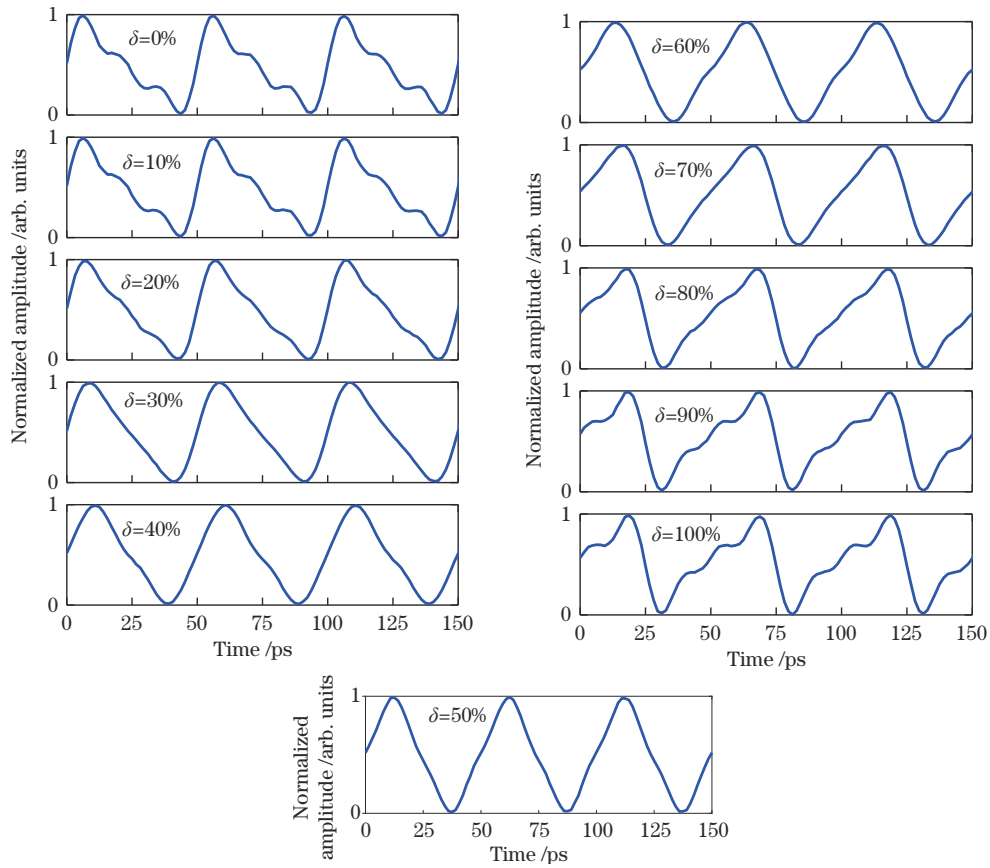


图 3 生成的对称系数为 0%~100% 的三角脉冲信号的时域波形

Fig. 3 Generated temporal waveforms of triangular pulse signals with  $\delta$  from 0% to 100%

图 4 为生成的对称系数为 30% 的三角脉冲信号对应的电谱和时域波形。由图 4(a) 可知, 生成的对称系数为 30% 的三角脉冲信号对应的电谱中二阶谐波与四阶谐波和六阶谐波的功率比分别约为 10.80 dB 和 27.57 dB, 非常接近理论值 10.64 dB 和 27.45 dB (理

论幅度比分别为: 1. 2263:0. 3604 和 1. 2263:0. 0520)。由图 4(b) 可知, 生成的三角脉冲信号的重复率为 20 GHz (对应周期为 50 ps), 等于驱动信号频率 (10 GHz) 的两倍, 与之前的理论分析一致。

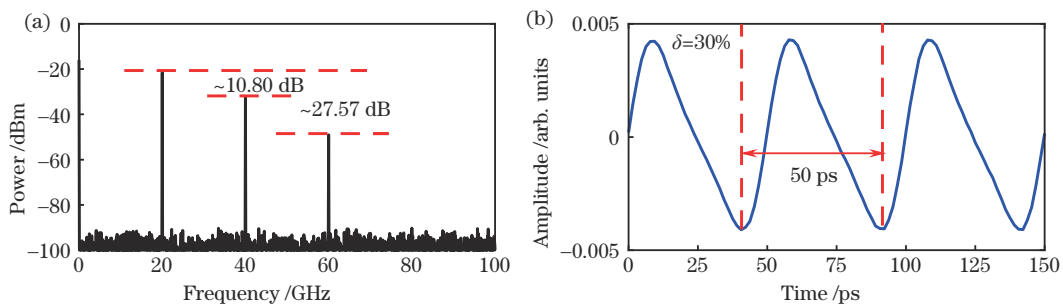


图 4 生成的对称系数为 30% 的三角脉冲信号。(a) 对应的电谱; (b) 时域波形

Fig. 4 Generated triangular pulse signal with  $\delta = 30\%$ . (a) Corresponding electrical spectrum; (b) temporal waveform

图 5 为对称系数为 30% 的三角脉冲信号的合成示意图。其中  $I_1$  和  $I_2$  分别为 DP-MZM1 和 DP-MZM2 的输出光包络, 两者在 PD 中拍频叠加生成的时域波形如图 5 中  $I_3$  所示, 时域波形 ( $I_3$ ) 经过 PS3 后, 进行相位调整, 生成目标波形, 目标波形如图 5 中  $I_4$  所示。

根据文献 [18] 中对均方根误差 (RMSE) 的定义来计算仿真生成脉冲波形与理想波形的相似度。计算结

果如图 6 所示, 图中圆点代表仿真生成波形的 RMSE, 曲线为方案理论上生成波形的 RMSE。由图可知, 圆点分布在曲线附近, 说明仿真生成脉冲波形的 RMSE 与方案理论生成波形的 RMSE 非常接近。由曲线可知, 当对称系数范围为  $13\% < \delta < 87\%$  时, 波形的 RMSE 始终小于 0.05, 此时可认为生成波形与理想波形相似度高; 当  $\delta < 13\%$  或  $\delta > 87\%$  时, 波形的 RMSE

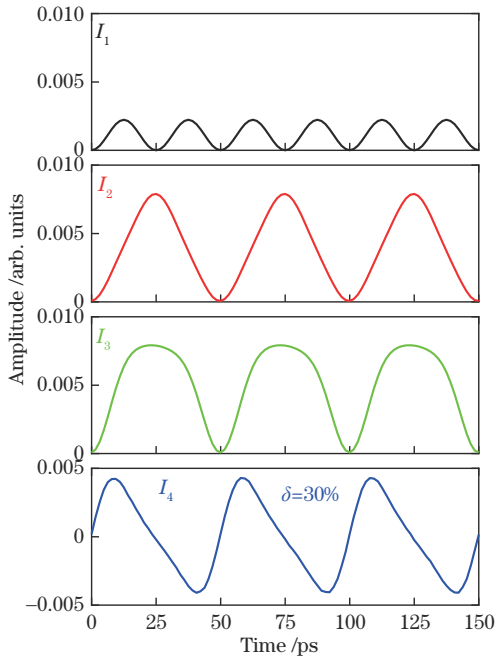


图 5 生成的对称系数为 30% 的三角脉冲信号的合成示意图  
Fig. 5 Synthesis schematic diagram of generated triangular pulse signal with  $\delta=30\%$

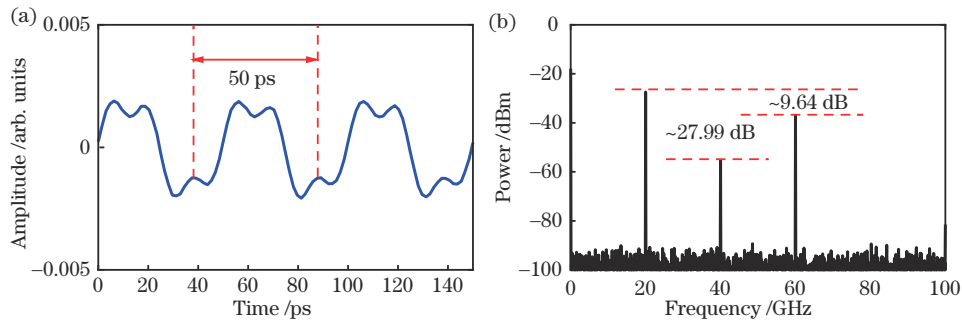


图 7 生成的方形脉冲信号。(a) 时域波形；(b) 对应的电谱  
Fig. 7 Generated square pulse signal. (a) Temporal waveform; (b) corresponding electrical spectrum

由图 7(a) 可知,生成方形脉冲信号的周期为 50 ps,对应重复率为 20 GHz,重复率等于驱动信号频率(10 GHz)的两倍。由图 7(b)可知,生成的方形脉冲信号对应电谱中二阶谐波与六阶谐波的功率比约为 9.64 dB,与理论值 9.54 dB 非常接近(理论上二阶谐波与六阶谐波的幅度比为 3:1),二阶谐波与四阶谐波(无关谐波)的功率比约为 27.99 dB,说明无关谐波得到了较好的抑制。通过计算可知,仿真生成的方形脉冲信号的 RMSE 为 0.136。

## 4 结 论

提出一种基于 DP-QPSK 调制器的二倍频对称系数可调谐的三角脉冲信号生成方案。通过适当地调节 DP-MZM1 和 DP-MZM2 的调制系数以及三个移相器的相移,可生成对称系数范围在 0%~100% 的三角脉冲信号,生成脉冲信号的重复率是驱动信号频率的两倍。该方案同时还可以生成方形脉冲信号。通过仿真

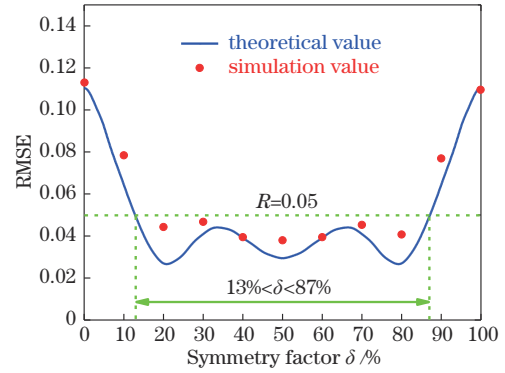


图 6 仿真生成的不同对称系数的三角脉冲信号的 RMSE  
Fig. 6 RMSE of triangular pulse signals with different symmetry coefficients generated by simulation

始终大于 0.05,此时可认为生成波形与理想波形相似度低。

## 3.2 方形脉冲信号的生成

在 OptiSystem 中将三个移相器的相移和两个 DP-MZM 的调制系数设置为表 2 所示时,可生成方形脉冲信号,其时域波形和对应的电谱分别如图 7(a) 和 7(b) 所示。

验证了该方案的可行性,同时利用 RMSE 评估了方案生成脉冲波形与理想波形的相似度。结果显示,当三角脉冲信号的对称系数范围为  $13\% < \delta < 87\%$  时,该方案生成的三角脉冲波形与理想波形的相似度高。

## 参 考 文 献

- [1] Verschueren N, Finot C. Pulse doubling and wavelength conversion through triangular nonlinear pulse reshaping [J]. Electronics Letters, 2011, 47(21): 1194-1196.
- [2] Parmigiani F, Ibsen M, Petropoulos P, et al. Efficient all-optical wavelength-conversion scheme based on a sawtooth pulse shaper [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(24): 1837-1839.
- [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] Parmigiani F, Ibsen M, Ng T T, et al. An efficient wavelength converter exploiting a grating-based saw-

- tooth pulse shaper[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(17): 1461-1463.
- [5] Latkin A I, Boscolo S, Bhamber R S, et al. Optical frequency conversion, pulse compression and signal copying using triangular pulses[C]//2008 34th European Conference on Optical Communication, September 21, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2008: 1-2.
- [6] Yao J P. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [7] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [8] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [9] Ye J, Yan L S, Pan W, et al. Photonic generation of triangular-shaped pulses based on frequency-to-time conversion[J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1458-1460.
- [10] 李敏, 牟宏谦, 王目光, 等. 基于线性啁啾光栅简化设计和频率-时间映射理论的任意波形产生技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2006001.
- Li M, Mu H Q, Wang M G, et al. Arbitrary waveform generation based on simple design of linearly chirped fiber Bragg grating and frequency-to-time mapping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2006001.
- [11] Li J, Zhang X P, 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.
- [12] Gao Y S, Wen A J, Liu W Y, et al. Photonic generation of triangular pulses based on phase modulation and spectrum manipulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-9.
- [13] 张昆, 赵尚弘, 蒋炜, 等. 基于光偏振复用调制的可重构三角波和方波产生的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170603.
- Zhang K, Zhao S H, Jiang W, et al. Reconfigurable triangular and square waveforms generation using optical polarization division modulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170603.
- [14] Albert C B, Huang C J, Chan E H W. A simple technique for triangular waveform generation based on a dual-polarization modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1-9.
- [15] Wei C, Jiang Y, Luo H, et al. Tunable microwave sawtooth waveform generation based on one single-drive Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8098-8107.
- [16] 韩一石, 罗吴金, 谢胜超, 等. 基于双平行相位调制器的微波光子波形生成研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2306007.
- Han Y S, Luo W J, Xie S C, et al. Photonic generation of microwave waveforms based on dual parallel phase modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2306007.
- [17] Li J, Ning T G, Pei L, et al. Photonic generation of triangular-shaped waveform signal with adjustable symmetrical coefficient[J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(13): 1457-1465.
- [18] 王创业, 宁提纲, 李晶, 等. 基于双偏振调制的可变对称三角波形的生成[J]. 物理学报, 2021, 70(22): 224211.
- Wang C Y, Ning T G, Li J, et al. Triangular-shaped waveform generation with variable symmetry based on dual-polarization modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(22): 224211.
- [19] Wang C Y, Ning T G, Li J, et al. Photonic generation of triangular-shaped waveform with tunable symmetry factor based on two single-drive Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 1-11.
- [20] Li J, Wang C Y, Pei L, et al. Generation of an optical triangular-shaped pulse train with variable symmetry by using an I/Q modulator[J]. Optics Letters, 2020, 45(6): 1411-1414.
- [21] Chen H Y, Ma J X. Photonic generation of flexible and adjustable microwave waveforms based on a dual-polarization Mach-Zehnder modulator[J]. Applied Optics, 2021, 60(27): 8299-8306.