

# 基于级联 MZMs 倍频系数可调的相位编码信号光产生方法

丛雯珊, 余岚, 沃江海, 王安乐, 张进, 徐馨, 罗雄, 杜鹏飞

空军预警学院三系, 湖北 武汉 430019

**摘要** 提出了一种基于级联马赫-曾德尔调制器(MZMs)倍频系数可调的相位编码信号光产生方法。该方法的系统核心器件为级联 MZMs,通过合理选择两个 MZMs 的直流偏置电压和调制指数等参数,可任意选取  $\pm k$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ )阶边带中的一组边带。通过可编程光滤波器滤除 5 阶以上的高阶边带,再结合相位调制,可产生载波 2、4、6、8 和 10 倍频的相位编码信号。该方法是通过改变施加在级联 MZMs 上的射频驱动信号幅度实现倍频系数调节,方案简洁灵活。通过仿真实验验证了利用 4 GHz 的微波信号源分别产生载频 32 GHz 和 40 GHz 的相位编码信号,从而实现了 8 和 10 倍频信号输出,且所生成的相位编码信号具有很好的脉冲压缩性能。

**关键词** 光通信; 相位编码信号; 级联马赫-曾德尔调制器; 倍频系数; 可编程光滤波器

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0432001

## Photonic Approach of Generating Phase-Coded Signal with Tunable Frequency Multiplication Factor Based on Cascaded MZMs

Cong Wenshan, Yu Lan, Wo Jianghai, Wang Anle, Zhang Jin, Xu Xin, Luo Xiong, Du Pengfei

No. 3 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China

**Abstract** We propose a photonic approach to generate phase-coded signal with tunable frequency multiplication factor based on cascaded Mach-Zehnder modulators (MZMs). The key component in the system is the cascaded MZMs. We can select the  $\pm k$ -order ( $k=1, 2, \dots, 5$ ) sidebands by controlling the direct current(DC) bias voltage and modulation index of the two MZMs. We use programmable optical filter to filter the  $\pm k$ -order ( $k > 5$ ) sidebands, and then combined with the phase modulation, can generate the phase-coded signal with frequency multiplication factors of 2, 4, 6, 8, and 10. In the proposed system, we can change the amplitude of the RF-driven signal applied to the cascaded MZMs to adjust the frequency multiplication factor by changing the amplitude of the RF driven signal of the cascaded MZMs. The scheme is more compact and flexible. The feasibility of this approach is demonstrated through a simulation experiment. The simulation results show that we can generate the phase-coded signals with frequencies of 32 GHz and 40 GHz using a 4 GHz microwave signal source. It means that we achieve the frequency multiplication factors of 8 and 10. Meanwhile, the pulse compression capability of the generated phase-coded signal is also demonstrated to be very well.

**Key words** optical communications; phase-coded signals; cascaded Mach-Zehnder modulators; frequency multiplication factor; programmable optical filter

**OCIS codes** 320.5540; 320.5520; 350.4010

收稿日期: 2017-07-17; 收到修改稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61701532)、中国博士后科学基金(2016M592970)

作者简介: 丛雯珊(1989—),男,博士研究生,主要从事射频任意波形光产生、阵列信号处理等方面的研究。

E-mail: congwenshan@sina.com

导师简介: 余岚(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事微波光子技术在雷达、通信中的应用等方面的研究。

E-mail: yulann@163.com

## 1 引 言

近年来,随着微波光子技术的快速发展,利用微波光子技术产生高频、大带宽和大调频范围的线性调频和相位编码等微波信号已成为微波光子学领域的一个重要部分<sup>[1-4]</sup>。针对高载频、大调频范围相位编码信号的产生,国内外学者展开了广泛研究,并提出了一些解决方法<sup>[5-16]</sup>。根据其原理、结构等可分为光脉冲频谱整形与频时映射<sup>[5-7]</sup>、光载波相移<sup>[8-10]</sup>和外光电相位调制<sup>[11-16]</sup>等方法。其中,基于空间光调制器的相位编码信号产生方法尽管可以灵活控制产生的波形,但由于引入了空间光,系统复杂且损耗高<sup>[5]</sup>;文献[11]利用马赫-曾德尔调制器(MZM)和萨格纳克(Sagnac)环实现了载波倍频相位编码信号的产生,但其倍频系数仅为2,载频依然很低。为提高载频频率,文献[13]利用保偏光纤光栅产生了载频范围为40~50 GHz相位编码信号,但受到保偏光纤光栅的限制,其频率调谐范围较窄;为获得更高的调频范围,双级联MZMs<sup>[7]</sup>、正交相移键控调制器(QPSKM)<sup>[8]</sup>和双平行MZM(DPMZM)<sup>[12]</sup>等器件被用于相位编码信号的产生,文献[9]和文献[10]分别采用单个偏振调制器(PolM)和级联PolMs生成了调频范围分别为4~24 GHz和10~40 GHz的相位编码信号。为实现更高倍频系数相位编码信号产生,文献[14]和文献[15]采用DPMZM生成了载波四倍频的相位编码信号,文献[16]利用偏振复用双臂MZM(PDM-DMZM)和PDM-DPMZM产生了载波八倍频相位编码信号。然而,上述方法产生相位编码信号的倍频系数最大为8,且倍频系数不可调,难以同时产生高频、大调频范围的相位编码信号。

本文提出了一种基于级联MZMs、倍频系数可调的相位编码信号光产生方法,该方法通过级联MZMs,在产生的边带中选取 $\pm k$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ )阶边带中的一组边带,再通过可编程光滤波器滤除5阶以上的高阶边带,并结合相位调制产生倍频系数可调的相位编码信号。相比于以前的倍频相位编码信号产生方法,该方法所产生相位编码信号的倍频系数调谐是通过调节施加到级联MZMs上的调制信号幅度来实现的,无须改变系统中滤波器等器件的参数,因此倍频系数可灵活控制。通过仿真实验,验证了该方法的可行性。实验中,利用4 GHz微波信号源分别生成了32 GHz和40 GHz的相位编码信号,相邻码元之间的相位跳变均为 $180^\circ$ ,并产生了13位巴克码的相位编码信号,通过自相关处理,

证实所生成信号具有很好的压缩性。该结果对于利用光学方法产生高频、大调频范围的相位编码信号提供了一种新的途径。

## 2 原 理

产生相位编码信号光的系统原理图如图1所示。光源(LD)发出的光经过一个偏振控制器(PC1)送入由两个MZM(MZM1和MZM2)级联的调制器中调制,调制信号是由同一射频源(RF)产生,并通过电耦合器(EC)分为两路,一路直接施加在MZM1上,另一路通过一个电相移器(EPS)和衰减器(ATT)施加到MZM2上。通过调节MZM两臂上的直流偏置电压使其工作在最大偏置点(MATB)或最小偏置点(MITB),同时控制驱动信号的大小和ATT的衰减系数使MZM2的输出边带中包含 $\pm k$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ )阶边带中的一组边带与5阶以上边带的组合,经可编程光滤波器(POF)滤除5阶以上的边带,输出只包含 $\pm k$ 阶的两个边带,这两个边带经掺铒光纤放大器(EDFA1)放大后,再经光隔离器(OI)送入三端口环形器(circulator),由端口1输入到端口2,而后啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)对两个边带进行分离,其中一个边带(上边带)直接透射后经PC2送到相位调制器(PM)中进行编码,另一个边带(下边带)被反射回去经环形器端口3输出,两个光边带经光耦合器(OC)耦合后送入EDFA2进行功率放大,并通过光电探测器(PD)进行拍频,从而得到倍频系数可调的相位编码信号。

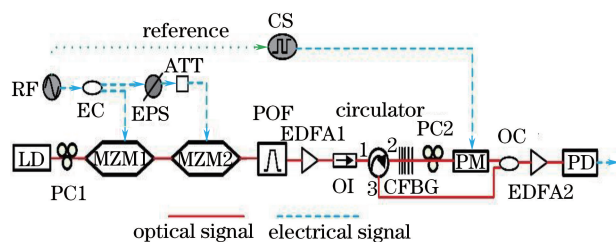


图1 系统原理框图

Fig. 1 Schematic of the system

该系统的主要器件为级联MZMs和CFBG,级联MZMs实现光边带的抑制和选取,CFBG对级联MZMs选取边带的正负边带进行分离。由文献[12]可知,通过合理设置MZM的直流偏置电压可调整其偏置点。其中,当MZM工作在MATB点和MITB点时,分别可以实现奇数次边带和偶数次边带的抑制,其对输入光信号的强度调制函数 $e_{IM}(t)$ 可表示为

$$e_{\text{IM}}(t) = \begin{cases} 2 \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^{k+1} J_{2k+1}(m) \cos[(2k+1)(\omega_{\text{RF}}t + \phi_{\text{RF}})] & , \text{MITB} \\ J_0(m) + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k J_{2k}(m) \cos[2k(\omega_{\text{RF}}t + \phi_{\text{RF}})] & , \text{MATB} \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $m = \pi V_{\text{RF}}/V_{\pi}$  为 MZM 的调制指数,  $V_{\text{RF}}$ 、 $\omega_{\text{RF}}$  和  $\phi_{\text{RF}}$  分别为射频调制信号的幅度、角频率和相位,  $V_{\pi}$  为 MZM 的半波电压,  $J_n(x)$  为  $n$  阶贝塞尔函数。当级联 MZMs 工作在 MATB-MITB 和 MATB-MATB 时, 输入 MZM1 和 MZM2 射频调制信号的相位差为  $\pi/2$ , 此时调制后的输出光场  $E_{\text{out}}(t)$  可表示为

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \begin{cases} e_{\text{IM1-MATB}}(t) \times e_{\text{IM2-MITB}}, & \text{MATB-MITB} \\ e_{\text{IM1-MATB}}(t) \times e_{\text{IM2-MATB}}, & \text{MATB-MATB} \end{cases} = E_{\text{in}}(t) \begin{cases} A_1(m_1, m_2) \cos(\omega_{\text{RF}}t) + \dots + A_{2n+1}(m_1, m_2) \cos[(2n+1)\omega_{\text{RF}}t], & \text{MATB-MITB} \\ A_0(m_1, m_2) + A_2(m_1, m_2) \cos(2\omega_{\text{RF}}t) + \dots + A_{2n}(m_1, m_2) \cos(2n\omega_{\text{RF}}t), & \text{MATB-MATB} \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $E_{\text{in}}(t) = E_0 \exp[j(\omega_0 t + \phi_0)]$  为 MZM1 输入的光信号,  $E_0$ 、 $\omega_0$  和  $\phi_0$  分别为输入光信号的幅度、角频率和相位,  $e_{\text{IM1-MATB}}(t)$  为 MZM1 工作在 MATP 时对输入光信号的强度调制函数,  $e_{\text{IM2-MATB}}(t)$  和  $e_{\text{IM2-MITB}}(t)$  分别为 MZM2 工作在 MATP 和 MITP 时对输入光信号的强度调制函数,  $A_{2n+1}(m_1, m_2)$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ) 和  $A_{2n}(m_1, m_2)$  分别为级联 MZMs 工作在 MATP-MITP 和 MATP-MATP 时  $2n+1$  和  $2n$  阶边带的系数, 记  $A_n = A_n(m_1, m_2)$ 。  $A_n$  为  $m_1$  和  $m_2$  的二元多次函数,  $m_1$  和  $m_2$  分别为 MZM1 和 MZM2 的调制指数。图 2(a) 给出了  $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_5$  和  $A_7$  随  $m_1$  和  $m_2$  的变化情况, 图 2(b) 给出了  $A_0$ 、 $A_2$ 、 $A_4$  和  $A_6$  随  $m_1$  和  $m_2$  的变化情况。由数学知识可知, 二元一次函数可以解两个方程, 因此, 为了获得  $\pm k$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ ) 阶边带中的一组边带, 就必须使其他 4 组边带同时为零或远远小于选取的边带, 即满足  $\begin{cases} A_n = 0 & n \neq k \\ A_n \neq 0 & n = k \end{cases}$  或  $A_n \ll A_k$  ( $n, k=1, 2, \dots, 5; n \neq k$ )。以获得  $\pm 5$  阶这组边带为例, 即  $\begin{cases} A_n = 0, & n \neq 5 \\ A_n \neq 0, & n = 5 \end{cases}$  或  $A_n \ll A_5$  ( $n=1, 2, 3, 4$ ), 由 (2) 式可知, 级联 MZMs 需满足 MZM1 工作在 MATB, MZM2 工作在 MITB, 且需使  $A_1$  和  $A_3$  满足  $\begin{cases} A_1 = 0 \\ A_3 = 0 \end{cases}$  或  $\begin{cases} |A_1| \ll |A_5| \\ |A_3| \ll |A_5| \end{cases}$ , 由于  $A_n$  ( $n=1, 2, \dots, 5$ ) 为  $m_1$  和  $m_2$  二元多次函数, 无法求出满足  $\begin{cases} A_1 = 0 \\ A_3 = 0 \end{cases}$  的解, 同时由于  $\begin{cases} |A_1| \ll |A_5| \\ |A_3| \ll |A_5| \end{cases}$  不是等式, 也无法求出需要的解, 但  $\begin{cases} A_1 = 0 \\ A_3 = 0 \end{cases}$  和  $\begin{cases} |A_1| \ll |A_5| \\ |A_3| \ll |A_5| \end{cases}$  可以等价于  $\min(|A_1| + |A_3|)$ , 因此只需求出满足

$\min(|A_1| + |A_3|)$  的  $m_1$  和  $m_2$  的值即可, 解出的  $m_1$  和  $m_2$  的值分别为  $m_1 = 1.916$ ,  $m_2 = 3.318$ 。依此类推, 为了获得  $\pm k$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ ) 阶边带中的一组边带, 所需 MZM1 和 MZM2 直流工作状态和调制指数  $m_1$  和  $m_2$  的值如表 1 所示, 且给出了各阶边带系数  $A_n$  ( $n=1, 2, \dots, 5$ ) 的值。

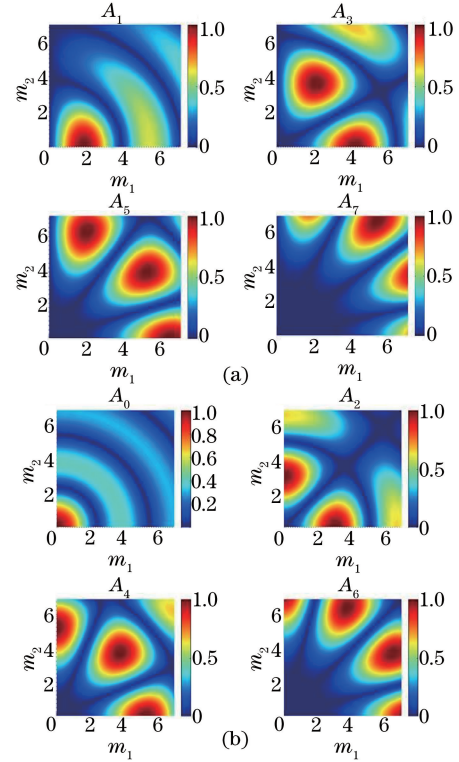


图 2  $n$  阶边带的系数。(a) 当两个 MZMs 工作于 MATP-MITP 时, 1 阶、3 阶、5 阶和 7 阶边带系数; (b) 当两个 MZMs 工作于 MATP-MATP 时, 0 阶、2 阶、4 阶和 6 阶边带系数

Fig. 2 Coefficient of  $n$ -order sidebands. (a) Coefficients of the 1st, 3rd, 5th, and 7th sidebands, when two MZMs are biased at the MATP-MITP; (b) coefficients of 0th, 2nd, 4th, and 6th sidebands, when two MZMs are biased at the MATP-MATP

表 1 各阶边带系数

Table 1 Coefficient of  $n$ -order sidebands

	$m_1$	$m_2$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
	0.209	0.362	0	0.3542	0	$1.49 \times 10^{-8}$	0	$5.72 \times 10^{-6}$
MATP-MITP	3.100	2.252	0	$2.88 \times 10^{-5}$	0	0.7998	0	$6.74 \times 10^{-5}$
	1.916	3.318	0	$1.63 \times 10^{-4}$	0	$2.01 \times 10^{-4}$	0	-0.1961
MATP-MATP	1.7005	1.7005	$2.32 \times 10^{-5}$	0	0	0	-0.1295	0
	2.222	0.920	$5.37 \times 10^{-5}$	0	0.6108	0	$7.60 \times 10^{-5}$	0

由图 2 及表 1 可知,通过合理设置级联 MZMs 直流偏置点和调制指数,可以得到  $\pm k$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ ) 阶边带中的一组边带与高于 5 阶边带的奇数次边带或偶数次边带的组合。例如,当级联 MZMs 工作于 MATP-MITP 时,使  $m_1=1.916, m_2=3.318$ , 可得到  $\pm 5$  阶边带与  $\pm(2k+1)$  ( $k>3$ ) 阶边带的组合; 又如,当级联 MZMs 工作在 MATP-MATP 时,使  $m_1=1.7005, m_2=1.7005$ , 可得到  $\pm 4$  阶边带与  $\pm 4k$  ( $k>2$ ) 边带的组合。当调制后的光信号经过 POF 时,通过将 POF 的中心波长设置为 LD 的中心波长,带宽设置为 11 倍的射频信号频率,可以得到 POF 的输出  $E_{\text{POF}}(t)$  为

$$E_{\text{POF}}(t) = \frac{E_0 A_k}{2} \exp[j(\omega_0 + k\omega_{\text{RF}})t] + \frac{E_0 A_k}{2} \exp[j(\omega_0 - k\omega_{\text{RF}})t], \quad (3)$$

式中,  $A_k$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ ) 为第  $k$  阶边带的边带系数。图 3(a)、(b) 分别给出在输入射频信号频率  $f_m=10$  GHz 时,级联 MZMs 工作在 MATP-MITP 和 MATP-MATP 下,不同调制指数时 POF 输出  $\pm n$  ( $n=1, 2, \dots, 5$ ) 阶边带光谱图。

POF 输出的两个边带送入 EDFA1 进行放大后,经 OI 后送入光环行器进入 CFBG,CFBG 的透射谱和反射谱如图 4 所示。

由图 4 可知,送入 CFBG 的两个光边带(以  $\pm 5$  阶边带为例),其中  $+5$  阶边带落入 CFBG 的透射峰,因此  $+5$  阶经 CFBG 和 PC2 后送入 PM 进行编码,调制后的  $+5$  阶边带与经 CFBG 反射后经光环行器的  $-5$  阶边带在 OC 处耦合,因此,OC 的输出  $E_{\text{OC}}(t)$  为

$$E_{\text{OC}}(t) = \frac{E_0 A_5 \eta_1}{2} \exp[j(\omega_0 + 5\omega_m)t + j\beta s(t)] + \frac{E_0 A_5 \eta_1}{2} \exp[j(\omega_0 - 5\omega_m)t], \quad (4)$$

式中,  $\eta_1$  为 EDFA1 的放大倍数,  $\beta = \pi V/V_\pi$  为 PM 的调制指数,  $V$  为 CS 产生编码信号的幅度,  $V_\pi$  为 PM 的半波电压。OC 输出经 EDFA2 放大后送到

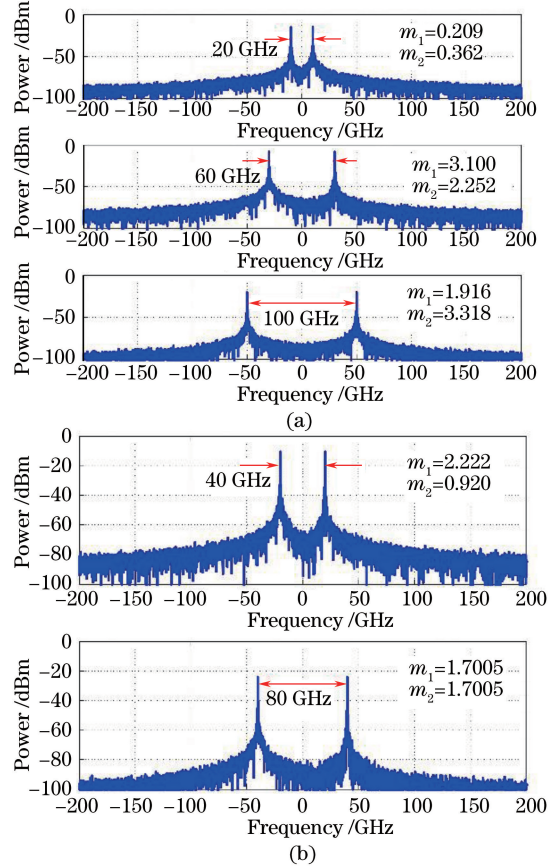


图 3 (a)  $\pm 1$  阶、 $\pm 3$  阶和  $\pm 5$  阶边带光谱图; (b)  $\pm 2$  阶和  $\pm 4$  阶边带光谱图

Fig. 3 Optical spectra of (a) the  $\pm 1$ st,  $\pm 3$ rd, and  $\pm 5$ th sidebands and (b) the  $\pm 2$ nd and  $\pm 4$ th sidebands

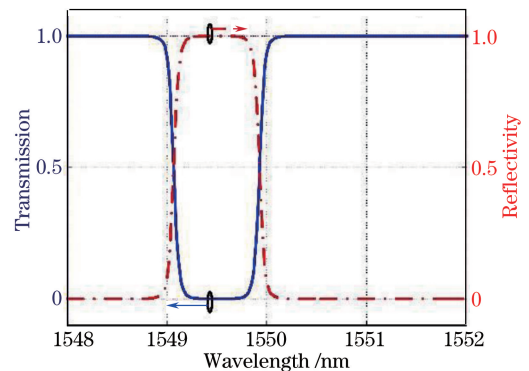


图 4 CFBG 的透射谱与反射谱

Fig. 4 Transmission and reflection spectra of the CFBG

PD 进行平方率探测,则 PD 的输出  $I_{PD}(t)$  为

$$I_{PD}(t) = E_{OC} E_{OC}^* = \frac{RE_0^2 A_3^2 \eta_1^2 \eta_2^2}{2} \cos[10\omega_m t + \beta s(t)], \quad (5)$$

式中,  $*$  为共轭运算,  $\eta_2$  为 EDFA2 的放大倍数,  $R$  为 PD 的响应度。由(5)式可以看出,当控制  $\beta s(t)$  在 0 和  $\pi$  之间变化时,将产生倍频系数为 10 的相位编码信号,且信号波形由编码信号发生器(CS)产生的编码形状  $s(t)$  决定。因此,通过控制级联 MZMs 的直流偏置电压和调制深度,可以生成倍频系数为  $2k$  ( $k=1,2,\dots,5$ ) 的相位信号,同时可以设置  $s(t)$  的形状生成任意序列的相位编码信号。

### 3 仿真实验结果与讨论

按照图 1 的系统框图,利用 Matlab 软件进行仿真,并设置仿真参数如下:LD 产生光信号的波长为 1550 nm, MZM1 和 MZM2 的半波电压均为 5 V,射频信号的频率和初始相位分别为 4 GHz 和  $0^\circ$ , POF 的中心波长为 1550 nm,带宽为 11 倍的射频频率,即为 44 GHz, EDFA1 和 EDFA2 的增益均为 20 dB, EPS 的相移为固定相移  $\pi/2$ , CFBG 的中心波长为 1549.2 nm,带宽为 200 GHz, PM 的半波电压为 3.5 V。

根据第 2 节分析可知,为得到 4 倍频和 8 倍频的信号输出,需使 MZM1 和 MZM2 均工作于最大偏置点。以输出 8 倍频信号为例,RF 射频信号的幅度为 3.8275 V,衰减器的衰减系数为 1。当 PM 的驱动信号波形如图 5 所示时,在 PD 输出端可得到载频为 32 GHz 的相位编码信号,如图 6(a)所示。其中,信号时宽为 8 ns,从放大图可以看到在 1 ns 处信号有明显的跳变,利用希尔伯特变换恢复出波形的相位信息如图 6(b)所示,不同码元信号之间的相位差为  $180^\circ$ 。

为得到 2、6 和 10 倍频的信号输出,需使 MZM1 工作在最小偏置点、MZM2 工作在最大偏置点。以 10 倍频为例,RF 射频信号的幅度为 7.4681 V、衰减器的衰减系数为 0.5774 时,得到载频为 40 GHz 的相位编码信号,如图 7(a)所示。信号的时宽为 8 ns,从放大图可以看到在 1 ns 处信号有明显的跳变,利用希尔伯特变换恢复出波形的相位信息如图 7(b)所示,不同码元信号之间的相位差为  $180^\circ$ 。

为验证产生相位编码信号的压缩性,将调制到 PM 上的信号设置为 13 位巴克码的相位编码信号,即序列数为 1111100110101,其余仿真条件不变。

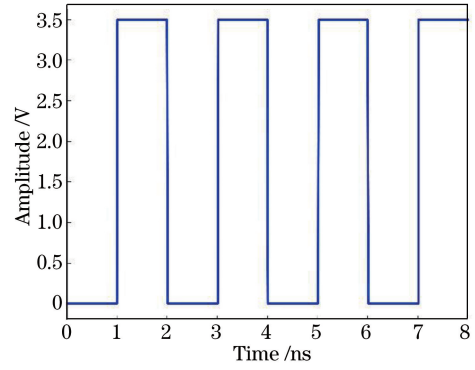


图 5 PM 的驱动信号波形

Fig. 5 Drive signal waveform of PM

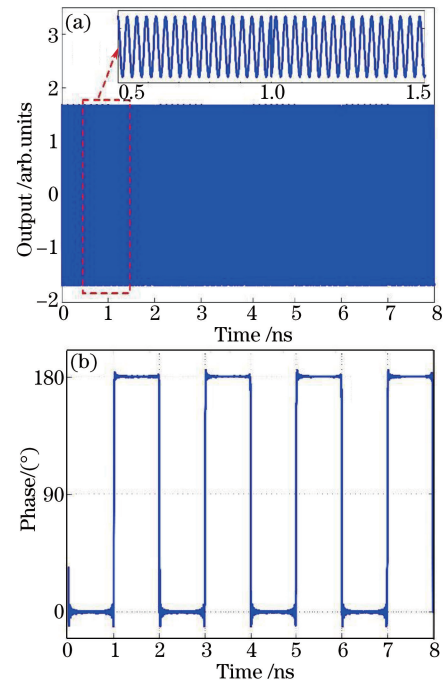


图 6 频率为 32 GHz 的相位编码信号的(a)信号波形和 (b)相位信息

Fig. 6 (a) Signal waveform and (b) phase information of phase-coded signal with a frequency of 32 GHz

图 8(a)为所产生时宽为 13 ns 的相位编码信号波形(实线)和对应的相位变化信息(虚线),其相位跳变为  $180^\circ$ 。对相位编码信号进行自相关处理,得到的压缩脉冲如图 8(b)所示,其半峰全宽为 1 ns,由于信号脉冲压缩前的时宽为 13 ns,因此信号的脉冲压缩比为 13,其峰值旁瓣比为 11.13 dB,与理论值吻合较好,证实所生成的相位编码信号具有很好的压缩性。

从上述 3 个仿真可以看出,该相位编码信号产生方法在不改变可编程光滤波器的情况下,通过设置射频源输出信号的幅度和衰减器的衰减系数,可灵活控制载频 2、4、6、8 和 10 倍频相位编码信号的产生。由上面的分析可知,该方法产生相位编码信

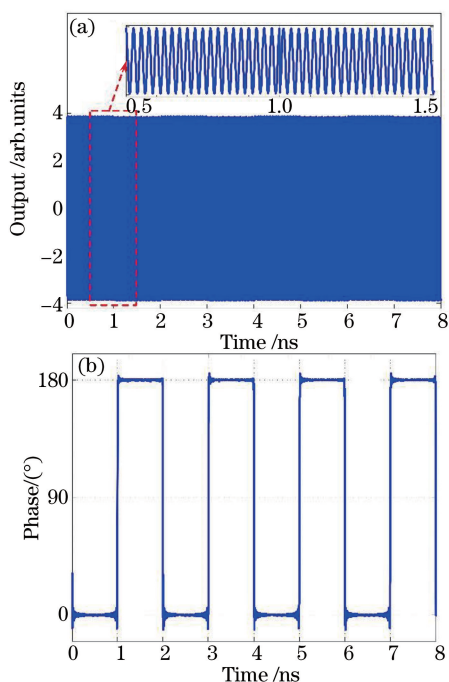


图 7 频率为 40 GHz 的相位编码信号的 (a) 信号波形和 (b) 相位信息

Fig. 7 (a) Signal waveform and (b) phase information of phase-coded signal with a frequency of 40 GHz

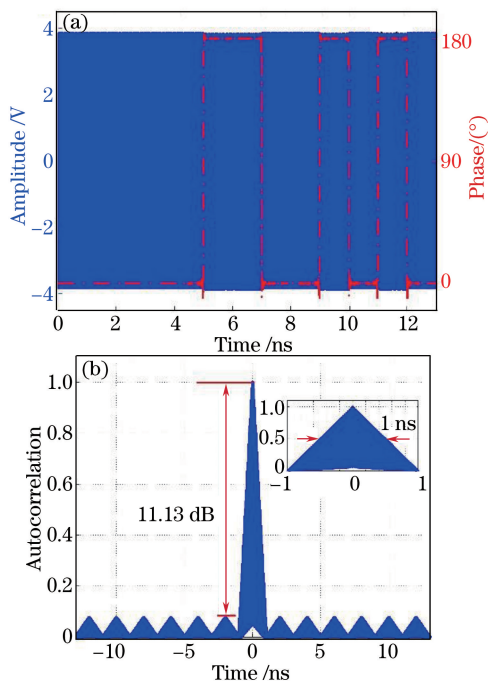


图 8 13 位巴克码的相位编码信号 (a) 信号波形 (实线) 和 (b) 自相关函数

Fig. 8 (a) Signal waveform (solid line) and phase information (dash dotted line) and (b) autocorrelation of phase-coded signal with 13-bit Barker code

号的最小载频主要由可编程光滤波器决定,为可编程光滤波器带宽的 1/10,若可编程光滤波器的带宽

为 10 GHz,其最小载频理论上可达 1 GHz;而载频的最大频率主要受微波源和调制器等器件的频率和带宽影响,若调制器等器件的带宽为 40 GHz,其最大载频理论值可达 400 GHz。

## 4 结 论

提出了一种基于级联 MZMs、倍频系数可调的相位编码信号光产生方法,该方法利用级联 MZMs 与相位调制产生倍频系数为 2、4、6、8 和 10 的相位编码信号,由于该方法是通过调整施加在级联 MZMs 上调制信号的幅度来实现倍频系数的改变,不需要改变光滤波器和啁啾光纤布拉格光栅的参数,与现有基于外电光相位调制产生相位编码信号的方法相比,可实现倍频系数的灵活控制,并通过仿真实验验证了该方法的可行性。该方法产生相位编码信号理论载频调谐范围为 1~400 GHz,为利用光学方法产生高频、大调频范围的相位编码信号提供了一种新的途径。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang J J, Liu W L, Yao J P. A photonic integrated microwave waveform generator for linearly chirped microwave waveform generation[C]. IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, Long Beach, USA. 2016: 301-304.
- [2] 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.
- [3] Chi H, Yao J P. Photonic generation of phase-coded millimeter-wave signal using a polarization modulator [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(5): 371-373.
- [4] Liu S, Qian Z P, Wang R, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signal with large frequency tunability [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406004.  
刘双, 钱祖平, 王荣, 等. 光生频率大范围可调的相位编码微波信号 [J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406004.
- [5] Chou J, Han Y, Jalali B. Adaptive RF-photonic arbitrary waveform generator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(4): 581-583.
- [6] Wang C, Yao J P. Phase-coded millimeter-wave waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(17): 1493-1495.
- [7] Cong W S, Yu L, Wo J H, et al. Photonic

- generation of continuously tunable carrier frequency phase-coded waveform based on cascaded Mach-Zehnder modulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1232001.
- 丛雯珊, 余岚, 沃江海, 等. 基于级联马赫-曾德尔调制器的载频连续可调相位编码波形光产生 [J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1232001.
- [8] Yu Y, Dong J J, Jiang F, *et al.* Photonic generation of precisely  $\pi$  phase-coded microwave signal with broadband tunability [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(24): 2466-2469.
- [9] Chen Y, Wen A J, Yao J P. Photonic generation of frequency tunable binary phase-coded microwave waveforms [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(23): 2319-2322.
- [10] Gao L, Chen X F, Yao J P. Photonic generation of a phase-coded microwave waveform with ultrawide frequency tunable range [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 899-902.
- [11] Li Z, Li W Z, Chi H, *et al.* Photonic generation of phase-coded microwave signal with large frequency tunability [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 712-714.
- [12] Li W, Wang L X, Li M, *et al.* Photonic generation of binary phase-coded microwave signals with large frequency tunability using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 5501507.
- [13] Li Z, Li M, Chi H, *et al.* Photonic generation of phase-coded millimeter-wave signal with large frequency tunability using a polarization-maintaining fiber Bragg grating [J]. *IEEE Microwave and Wireless Component*, 2011, 21(12): 694-696.
- [14] Li X, Zhao S H, Zhang Y M, *et al.* Generation of a frequency-quadrupled phase-coded signal with large tunability [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(18): 1980-1983.
- [15] Chen W, Wen A J, Gao Y S, *et al.* Photonic generation of binary and quaternary phase-coded microwave waveforms with frequency quadrupling [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 5500808.
- [16] Zhang Y M, Zhang F Z, Pan S L. Generation of frequency-multiplied and phase-coded signal using an optical polarization division multiplexing modulator [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(2): 651-660.