

# 激光与光电子学进展

## 基于双平行相位调制器的微波光子波形生成研究

韩一石, 罗吴金\*, 谢胜超, 曾昶盛, 范翊轩, 李忠坤

广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

**摘要** 提出一种结构简单、重复频率可调的任意波形光子生成方案。系统由双平行相位调制器、光纤布拉格光栅和平衡探测器组成。激光经双平行相位调制器调制后,由光纤布拉格光栅获取两路光信号,光信号经平衡探测输出方波和梯形微波信号。同时,通过使用额外的 $90^\circ$ 移相器,可获得三角形和锯齿微波信号。仿真结果表明,通过调节射频驱动信号的电压和频率,输出的微波光子信号的频率可实现 $10\sim 25$  GHz连续输出,且信号均方根误差(RMSE)小于 $0.33$ 。此外,实验分析了调制指数 $\beta$ 和 $90^\circ$ 电桥相位平衡 $\Delta\theta$ 对微波光子波形质量的影响,当 $\beta$ 在标准值 $\pm 0.15$ 范围内变化,或 $\Delta\theta$ 在 $\pm 3^\circ$ 范围内变化时,波形信号RMSE均小于 $0.42$ ,验证了所设计系统具有较好的稳定性。

**关键词** 光纤光学; 微波光子波形; 双平行相位调制器; 平衡探测; 倍频; 重复频率可调

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2306007

### Photonic Generation of Microwave Waveforms Based on Dual Parallel Phase Modulator

Han Yishi, Luo Wujin\*, Xie Shengchao, Zeng Changsheng, Fan Chixuan, Li Zhongkun

*School of Information Engineering, Guangdong University of Technology,*

*Guangzhou, Guangdong 510006, China*

**Abstract** In this study, an arbitrary waveform photonic generation scheme with simple structure and repeat rate tunability is proposed. The scheme consists of a dual parallel phase modulator, fiber Bragg grating, and balanced detector. The dual parallel phase modulator modulates the laser, and two optical signals obtained by fiber Bragg grating can output as square and trapezoid microwave signals via balanced detection. Meanwhile, a  $90^\circ$  phase shifter is used to obtain triangular and sawtooth microwave signals. By adjusting the voltage and frequency of the radio frequency drive signal, the simulation results show that the frequency of the output microwave photonic signal can achieve 10 to 25 GHz with the root mean square error (RMSE) of less than 0.33. In addition, the effects of modulation index  $\beta$  and  $90^\circ$  hybrid phase balance  $\Delta\theta$  on microwave photonic waveform quality are analyzed experimentally. The RMSE of waveform signals is less than 0.42 when the standard value  $\beta$  varies by standard value  $\pm 0.15$  or  $\Delta\theta$  varies by  $\pm 3^\circ$ , which verifies that the designed system has a good stability.

**Key words** fiber optics; microwave photonic waveform; double parallel phase modulator; balanced detection; frequency doubling; repetition rate tunability

**OCIS codes** 060.5625; 070.6020; 190.2620; 350.4010

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-04-03; 录用日期: 2021-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61471130)、广东省重点领域研发项目(2019B010138004)

通信作者: \*752417010@qq.com

## 1 引言

任意波形微波信号被广泛地应用于现代雷达系统、射频通信系统、全光微波信号处理系统和医学成像系统等领域,且微波信号质量很大程度上决定了相应的系统性能表现<sup>[1]</sup>。传统的微波波形通常在电子领域形成,由于采样率受限,产生的微波频率低且带宽小<sup>[2]</sup>。在此背景下,凭借微波光子波形带宽高、频率高、频率可调范围大、抗电磁干扰等优点<sup>[3]</sup>,一些微波光子波形方案相继被提出,如脉冲整形<sup>[4-6]</sup>、频率-时间映射<sup>[7-9]</sup>、外部调制<sup>[10-20]</sup>等方案。其中,连续波(CW)光信号的外调制具有成本低、波形灵活性强等优点,日益受到相关研究人员的关注。

利用外部调制方式产生微波波形,其核心是利用光电调制器的非线性效应,获得设定相位和幅值信息的各阶谐波信号,由此合成微波光子波形信号。例如,文献[13-15]使用简单的马赫-曾德尔调制器(MZM)和色散光纤相互作用产生三角波微波信号,这类方法结构简单、成本低,但系统采用的色散光纤引入的相移与频率有关,导致系统输出的微波信号的频率范围和灵活性受限,且只能获得特定波型微波信号,如三角波、方波。文献[16-17]基于级联调制器结构生成重复频率可调的三角波、方波信号,但级联调制器结构相对复杂,稳定性较低,且生成的波形单一。文献[18-20]提出了一种采用集成双偏振正交相移键控(DP-QPSK)调制器的光子波形产生方法,这个方法的优点是结构相对简单,可生成三角波、方波和锯齿波信号。但是 DP-QPSK 调制器需要多个直流电偏置,容易受到偏置漂移的影响,稳定性较差。总体上分析,通过 MZM 产生对应谐波信号的相位和幅值的这类方法容易受调制器直流电压偏移的影响,系统稳定性较差。

针对微波光子方法生成的微波信号波形单一、重复频率范围小且系统稳定差的问题,本文提

出一种利用双平行相位调制器实现重复频率可调的任意波形光子生成方案。首先利用双平行相位调制器生成偏振正交的边带,后通过光纤布拉格光栅(FBG)分离两路信号,最后经平衡探测后可输出方波和梯形波信号。此外,90°移相器能实现三角形和锯齿波信号输出。通过调节射频驱动信号的电压和频率,输出微波信号可实现频率10~25 GHz连续变化,信号均方根误差(RMSE)均小于0.33。由于结构中双平行相位调制器无需施加直流偏置电压,系统不受偏置漂移的影响。相比于其他微波光子生成方案,本方案有良好的重复频率可调谐性和生成波形多样性,且系统相对稳定。

## 2 基本原理

所提重复频率可调的任意波形光子生成方案的系统结构和不同位置频谱如图1所示。

在图1(a)中,可调激光器(TSL)发出的光载波经偏振控制器(PC)1输入到集成的双平行相位调制器(DP-PM)中,射频(RF)信号分别输入到两个子偏振调制器(PM)中,且保持 $\pi/2$ 的相位差。

假设 TSL 发出的光波可以表示为

$$E_{in}(t) = E_0 \exp(j\omega_c t), \quad (1)$$

式中: $E_0$ 和 $\omega_c$ 分别表示光载波的振幅和角频率。

输入 PM1 和 PM2 的 RF 驱动信号分别为  $V_{RF} \cos(\omega_{RF} t)$ ,  $-V_{RF} \sin(\omega_{RF} t)$ , 其中  $V_{RF}$ ,  $\omega_{RF}$  分别为驱动信号幅值和角频率,利用公式推导,可得 DP-PM 的输出信号为

$$E_A(t) = \begin{bmatrix} E_{AX} \\ E_{AY} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} \begin{bmatrix} \exp(j\beta \cos \omega_{RF} t) \\ \exp(-j\beta \sin \omega_{RF} t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

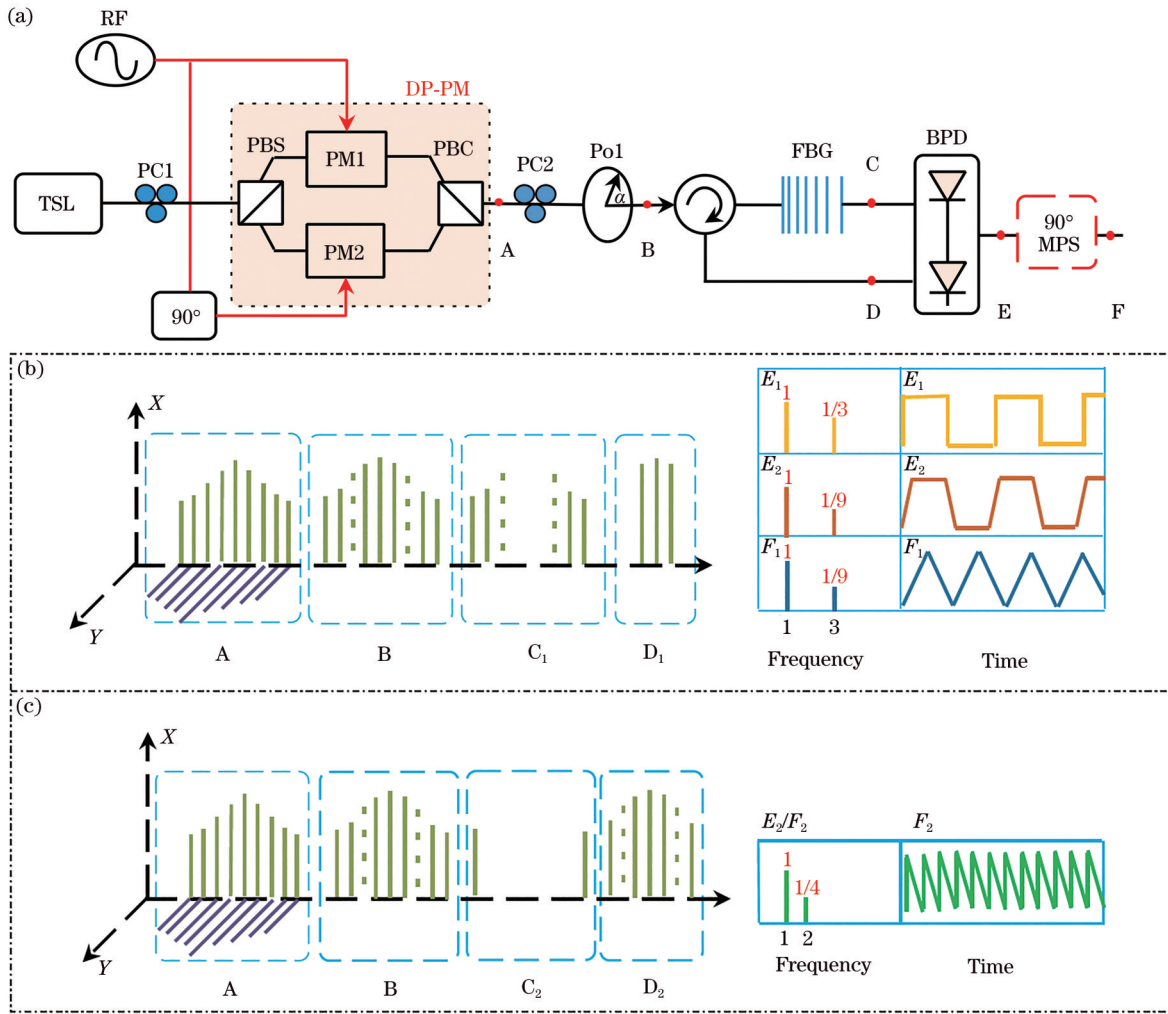
式中: $E_{AX}$ 、 $E_{AY}$ 分别为 DP-PM 沿 X、Y 轴偏振方向输出的信号;DP-PM 的调制指数  $\beta = \pi V_{RF} / V_{\pi}$ ,  $V_{\pi}$  为半波电压。

经 45° 检偏器将偏振方向检偏在同一偏振方向,抑制 $\pm 2$ 阶边带,B点输出信号用贝塞尔函数展开,可以表示为

$$E_B(t) = E_{AX} \sin 45^\circ + E_{AY} \cos 45^\circ = \frac{1}{2} E_{in} \left[ \exp(j\beta \cos \omega_{RF} t) + \exp(-j\beta \sin \omega_{RF} t) \right] = \frac{1}{2} E_{in} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} [j^m + (-1)^m] J_m(\beta) e^{jm\omega_{RF} t}, m \neq 2, \quad (3)$$

式中: $J_m(\cdot)$ 为第一类贝塞尔函数, $m$ 为阶数。光边带经 FBG 产生两路信号,如图1(b)所示,调节 FBG

带宽,将 B 点输入信号透射成一路 $\pm 3$ 、 $\pm 4$ 阶  $E_{D1}(t)$  边带信号,另外一路被反射为光载波、 $\pm 1$ 阶  $E_{C1}(t)$



TSL: tunable semiconductor laser; RF: radio frequency; PBS: polarization beam splitter; PBC: polarization beam combiner; FBG: fiber Bragg grating; BPD: balanced photodetector; MPS: microwave phase shifter

图 1 任意波形光子生成方案系统结构及不同位置频谱。(a)系统结构图;(b)生成方波、梯形波、三角波边带及波形图;(c)生成锯齿波边带及波形图

Fig. 1 System structure and optical spectra at different positions of photonic arbitrary waveform generation scheme. (a) Structure of the proposed system; (b) optical spectra of generating square, trapezoid, and triangular waveforms; (c) optical spectra of generating sawtooth waveform

边带信号;如图 1(c)所示,或调节 FBG 带宽,将 B 点输入信号分离为一路 ±4 阶边带信号  $E_{D2}(t)$ ,另外一路被反射为光载波、±1 阶、±3 阶  $E_{C2}(t)$  边带信号。由于高边带的功率较小,这里只考虑 ±3 阶,±4 阶信号。C 点输出信号为

$$\begin{cases} E_{C1}(t) = \frac{1}{2} E_{in} \sum_{m=-1}^{+1} [j^m + (-1)^m] J_m(\beta) e^{jm\omega_{RF}t} \\ E_{C2}(t) = \frac{1}{2} E_{in} \sum_{m=-3}^{+3} [j^m + (-1)^m] J_m(\beta) e^{jm\omega_{RF}t} \end{cases} \quad (4)$$

D 点输出信号为

$$\begin{cases} E_{D1}(t) = \frac{1}{2} E_{in} \left\{ \sum_{m=-4}^{-3} [j^m + (-1)^m] J_m(\beta) e^{jm\omega_{RF}t} + \sum_{m=+3}^{+4} [j^m + (-1)^m] J_m(\beta) e^{jm\omega_{RF}t} \right\} \\ E_{D2}(t) = \frac{1}{2} E_{in} \left\{ [j^{-4} + (-1)^{-4}] J_m(\beta) e^{-j4\omega_{RF}t} + [j^4 + (-1)^4] J_m(\beta) e^{j4\omega_{RF}t} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

最后 C 点和 D 点信号输入平衡探测器(BPD),平衡探测输出二、六阶倍频  $I_{E_1}(t)$  信号;或平衡探测

输出二、四阶倍频  $I_{E_2}(t)$  信号。平衡探测在 E 点产生的光电流表示为

$$I_{E_1}(t) \approx J_0^2(\beta) + J_1^2(\beta) - 2\sin(2\omega_{RF}t)J_1^2(\beta) + 4\sin(6\omega_{RF}t)J_3^2(\beta), \quad (6)$$

$$I_{E_2}(t) \approx J_0^2(\beta) + J_1^2(\beta) - 2\sin(2\omega_{RF}t)J_1^2(\beta) + 4\cos(4\omega_{RF}t)J_1(\beta)J_3(\beta), \quad (7)$$

式中： $\eta$ 是BPD的响应率。利用有限数目的傅里叶级数分量来近似波形信号，可生成方波和梯形波信号。此外，额外的 $90^\circ$ 移相器(MPS)可实现三角形和锯齿波信号输出。

为了能够生成方波、三角形波、梯形波和锯齿波信号，需要对E点输出的倍频信号功率及相位进行调控。典型的方波、梯形波、三角形波和锯齿波序列的傅里叶级数展开式可以表示为

$$\begin{cases} T_{sq}(t) = A_{sq}(t) + B_{sq} \sum_{k=1,3,5}^{+\infty} \frac{1}{k} \sin(k\Omega t) \\ T_{tra}(t) = A_{tra}(t) + B_{tra} \sum_{k=1,3,5}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \sin(k\Omega t) \\ T_{tri}(t) = A_{tri}(t) + B_{tri} \sum_{k=1,3,5}^{+\infty} \frac{1}{k^2} \cos(k\Omega t) \\ T_{saw}(t) = A_{saw}(t) + B_{saw} \sum_{k=1,2,3}^{+\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin(k\Omega t) \end{cases}, \quad (8)$$

式中： $A$ 和 $B$ 为常数； $\Omega$ 为角频率。

为了研究傅里叶级数数目对波形质量的影响，仿真了傅里叶级数数目为2,3,⋯,10的近似波形与理想波形之间的误差。在仿真中，参考理想波形的峰峰值为2，衡量波形质量使用RMSE。

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (V_{observed,t} - V_{predicted,t})^2}, \quad (9)$$

式中： $N$ 为在一个周期内波形的数目； $V_{observed,t}$ 为近似波形幅值， $V_{predicted,t}$ 为理想波形幅值。

根据(8)式，设定傅里叶级数数目为2,3,⋯,10，得到各种近似波形与理想波形之间的RMSE关系，如图2所示。显然，随着傅里叶级数分量数目的增加，RMSE减小，波形更接近理想波形。由图2(a)、(d)可见，对于三角波形和梯形波，两个傅里叶级数数目的波形与理想波形的RMSE为0.02，接近理想波形情况。由图2(b)、(c)可见，傅里叶级数数目为10的方波、锯齿波还未达到相同水平0.04的RMSE，由此可得，方波和锯齿波则需要更多的傅里叶级数数目。然而，利用两个傅里叶级数数目拟合的方波或锯齿波已有理想波形的包络，因此考

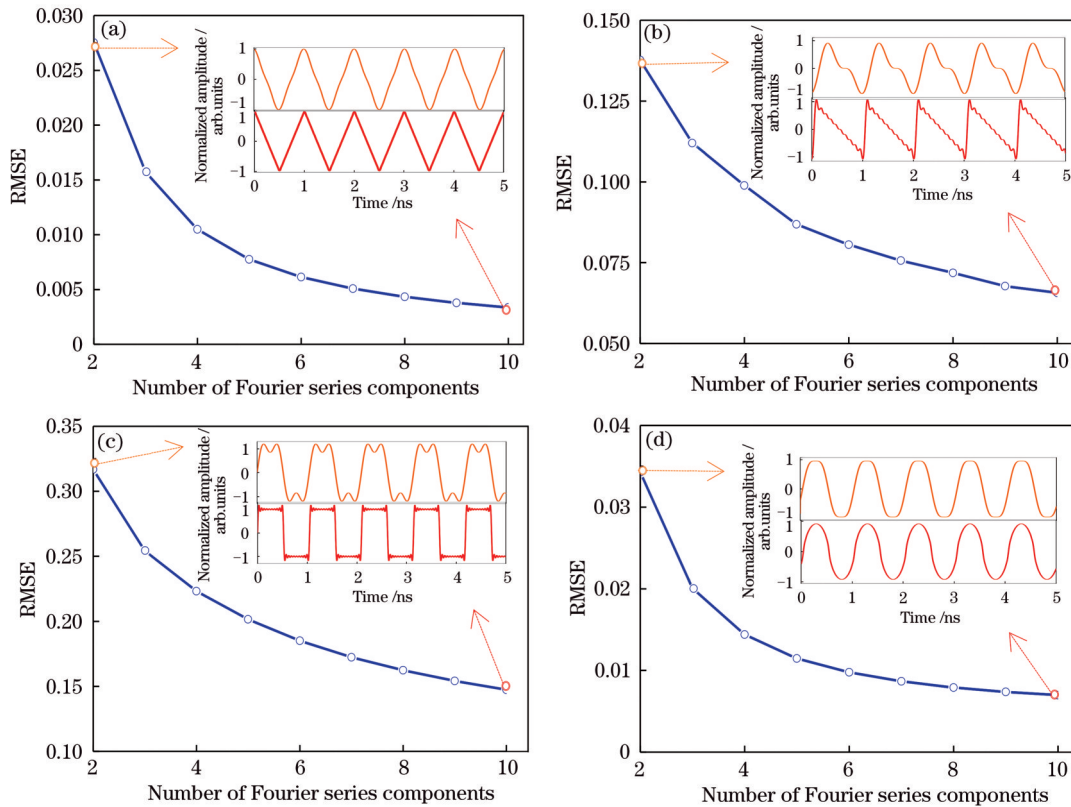


图2 各波形RMSE曲线与傅里叶级数分量的数量关系。(a)三角波；(b)锯齿波；(c)方波；(d)梯形波

Fig. 2 Relationship between RMSE curves of each waveform and number of Fourier series components. (a) Triangular waveform; (b) sawtooth waveform; (c) square waveform; (d) trapezoid waveform

考虑两个傅里叶级数数目拟合波形信号。通过调节射频驱动电压,实现对 E 点输出的倍频信号功率及相位的调控,以满足关系:

$$\begin{cases} T_{sq}(t) \approx \sin(\Omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\Omega t) \\ T_{tra}(t) \approx \cos(\Omega t) + \frac{1}{9} \cos(3\Omega t) \\ T_{tri}(t) \approx \cos(\Omega t) + \frac{1}{9} \cos(3\Omega t) \\ T_{saw}(t+t_0) \approx \sin[\Omega(t+t_0)] - \frac{1}{2} \sin[2\Omega(t+t_0)] \\ \xrightarrow{\Omega t_0 = \pi/2} \cos(\Omega t) - \frac{1}{2} \sin(2\Omega t) \end{cases} \quad (10)$$

通过比较(6)、(7)和(10)式,满足(11)式时,可以分别生成方形波、梯形波、三角波和锯齿波信号。

$$\begin{cases} \frac{2J_1^2(\beta)}{4J_3^2(\beta)} = \frac{1}{3} \\ \frac{2J_1^2(\beta)}{4J_3^2(\beta)} = \frac{1}{9} \\ \frac{2J_1^2(\beta)}{4J_3^2(\beta)} = \frac{1}{9} \quad \sin(2\omega_{RF}t) \Rightarrow \cos(2\omega_{RF}t) \\ \frac{2J_1^2(\beta)}{4J_3^2(\beta)} = \frac{1}{9} \quad \sin(6\omega_{RF}t) \Rightarrow \cos(6\omega_{RF}t) \\ \frac{2J_1^2(\beta)}{4J_1(\beta)J_3(\beta)} = \frac{1}{2} \quad \sin(2\omega_{RF}t) \Rightarrow \cos(2\omega_{RF}t) \\ \quad \cos(4\omega_{RF}t) \Rightarrow \sin(4\omega_{RF}t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \beta = 2.72 & \text{square waveform} \\ \beta = 2.32 & \text{trapezoid waveform} \\ \beta = 2.32, 90^\circ \text{MPS} & \text{triangular waveform} \\ \beta = 2.10, 90^\circ \text{MPS} & \text{sawtooth waveform} \end{cases} \quad (12)$$

(12)式是其中的一组解,可以看出在生成三角波和锯齿波信号时,需要通过90°相移来拟合它们的相位关系。

### 3 多波形微波信号产生

为了验证所生成波形信号的重复频率可调性,按照图1所示结构搭建仿真实验系统。系统参数设置如下:光源 TSL 中心频率  $\omega_c = 193.1$  THz,线宽为 0.1 MHz,输出光功率为 6 dBm,DP-PM 中的 PM1、PM2 的驱动信号频率相等,分别设置为 5, 7.5, 10, 12.5 GHz,且相位相差  $\pi/2$ 。由于输入双平行相位调制器的射频信号相位差为 90°,且两子偏振调制器的调制指数相同,抑制了二阶边带。图3~6分别表示生成重复频率为 10, 15, 20, 25 GHz 的三角波、梯形波、方波信号及锯齿波信号的时频图,并使用 RMSE 评判产生波形的质量。

图3(a)、(e)是由 10 GHz 的二阶谐波和 30 GHz

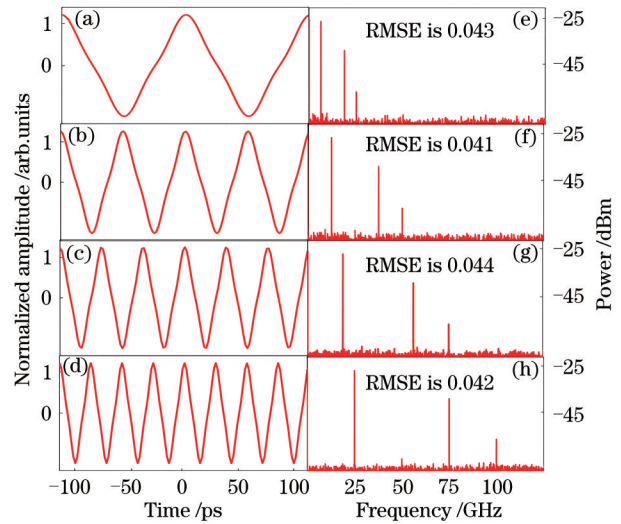


图3 不同重复频率的三角波时频图。(a)(e) 10 GHz;

(b)(f) 15 GHz;(c)(g) 20 GHz;(d)(h) 25 GHz

Fig. 3 Time-frequency diagrams of triangular waveform with different repetition rate. (a)(e) 10 GHz; (b)(f) 15 GHz; (c)(g) 20 GHz; (d)(h) 25 GHz

的六阶谐波组成的三角波的时频图。从图3(a)可以看出,生成波形的重复频率为 10 GHz,是射频驱动信号频率的 2 倍,实现了重复频率的倍频。从图3(e)可以看出,六阶谐波功率比二阶谐波低 19.10 dB,与(10)式中的理论值 19.08 dB 相吻合,并抑制了四阶谐波信号,生成的三角波 RMSE 为 0.043,仿真波形与理论波形相吻合。

对于生成 15, 20, 25 GHz 的三角波信号, RMSE 分别为 0.041, 0.044, 0.042, 与理论 RMSE(0.028) 有点偏差,差异是仿真中生成不需要的八阶谐波造成的,但仿真波形与理论波形相吻合,证明所设计系统生成的三角波重复频率具有可调谐性。如图4所示,由于三角波与梯形波仅相差 90°移相,生成梯形波的仿真结果和三角波类似。

如图5所示,调节调制指数为 2.72,生成重复频率为 10, 15, 20, 25 GHz 的方波。如图5(a)所示,方波由 10 GHz 的二阶谐波和 30 GHz 的六阶谐波组成,两者相差 9.60 dB,与理论值 9.54 dB 相吻合;如图5(e)所示,生成的方波信号对不需要的八阶谐波抑制较好,比二阶谐波功率低 34.72 dB,生成的方波 RMSE 为 0.329,与理论方波信号相吻合。对于生成 15, 20, 25 GHz 的方波信号, RMSE 分别为 0.328, 0.330, 0.328, 与理论 RMSE(0.315) 相差不大,波形与理论波形相吻合。当射频驱动信号频率设置为 12.5 GHz 时,所生成波形的重复频率为

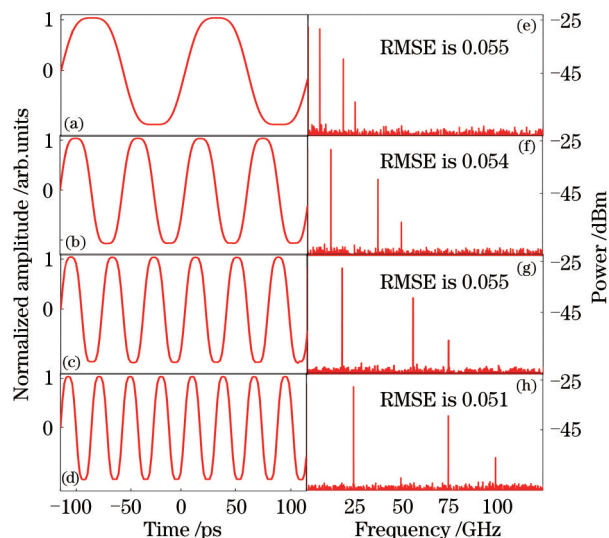


图4 不同重复频率的梯形波时频图。(a)(e) 10 GHz; (b)(f) 15 GHz; (c)(g) 20 GHz; (d)(h) 25 GHz  
Fig. 4 Time-frequency diagrams of trapezoid waveform with different repetition rate. (a)(e) 10 GHz; (b)(f) 15 GHz; (c)(g) 20 GHz; (d)(h) 25 GHz

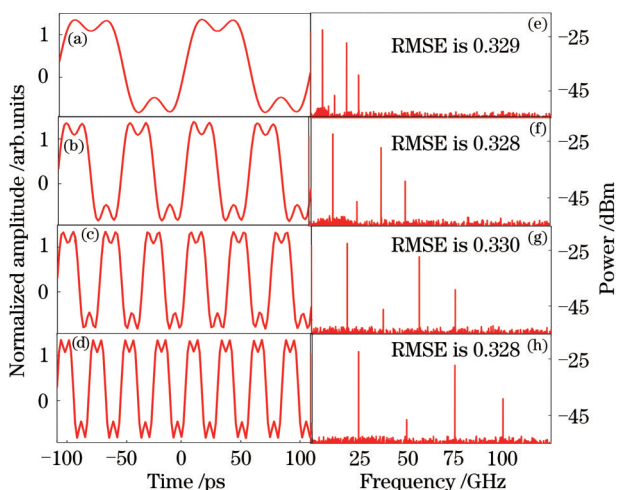


图5 不同重复频率的方波时频图。(a)(e) 10 GHz; (b)(f) 15 GHz; (c)(g) 20 GHz; (d)(h) 25 GHz  
Fig. 5 Time-frequency diagrams of square waveform with different repetition rate. (a)(e) 10 GHz; (b)(f) 15 GHz; (c)(g) 20 GHz; (d)(h) 25 GHz

10 GHz 射频驱动信号生成波形的 1.25 倍, 为 7.5 GHz 射频驱动信号生成波形的 1.67 倍, 为 5 GHz 射频驱动信号生成波形的 2.50 倍。可见提高射频驱动信号频率后可提高生成波形重复频率。

如图 6 所示, 通过调节光纤布拉格光栅的带宽, 生成重复频率为 10, 15, 20, 25 GHz 的锯齿波。图 6(a) 是由 5 GHz 的二阶谐波和 10 GHz 的四阶谐波组成的锯齿波信号, 四阶谐波功率比二阶谐波低 6.10 dB, 与

理论值 6.02 dB 相吻合; 六阶谐波功率比二阶谐波低 18.17 dB, 与理论值 9.54 dB 相差 8.6 dB。图 6(a) 中生成的锯齿波 RMSE 为 0.178, 而理论 RMSE 为 0.138。虽然两者有偏差, 但已经有一个近似的锯齿波信号。由于锯齿波由二阶谐波和四阶谐波信号组成, 生成锯齿波的重复频率同样是射频信号的 2 倍。对于生成 15, 20, 25 GHz 的锯齿波信号, RMSE 分别为 0.181, 0.182, 0.180。仿真波形与理论波形相吻合, 证明所设计系统生成的锯齿波重复频率具有可调谐性。

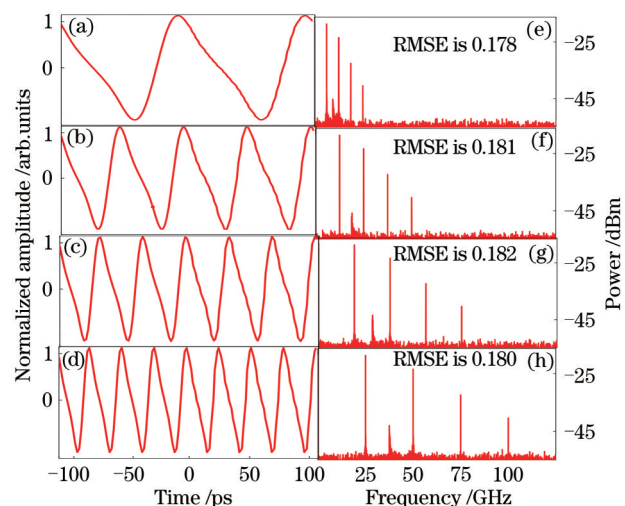


图6 不同重复频率的锯齿波时频图。(a)(e) 10 GHz; (b)(f) 15 GHz; (c)(g) 20 GHz; (d)(h) 25 GHz  
Fig. 6 Time-frequency diagrams of sawtooth waveform with different repetition rate. (a)(e) 10 GHz; (b)(f) 15 GHz; (c)(g) 20 GHz; (d)(h) 25 GHz

#### 4 系统稳定性分析

本方案仅使用一个射频信号源并且没有直流偏置电压, 生成的波形不受偏置漂移的影响, 为了进一步验证系统的稳定性, 首先分析调制器调制指数  $\beta$  对微波光子波形信号质量的影响。从(12)式可以看出, 调制指数  $\beta$  作为偏振调制器的一个重要参数, 当其他条件不变时,  $\beta$  为 2.72, 系统输出方波信号;  $\beta$  为 2.32 时, 则输出梯形波信号。可见  $\beta$  值变化对光生微波光子有着较大影响。

当  $\beta$  在标准值  $\pm 0.15$  范围内变化时, 得到生成的近似波形、两谐波功率差  $\Delta P$  及 RMSE 的对应关系, 如图 7~8 所示, 其中图 7 为三角波、梯形波信号, 图 8 为方波、锯齿波信号。从图 7(a) 可见, 当  $\beta$  在  $2.32 \pm 0.15$  范围内变化时, 两谐波功率差  $-16.70 \text{ dB} \leq \Delta P \leq$

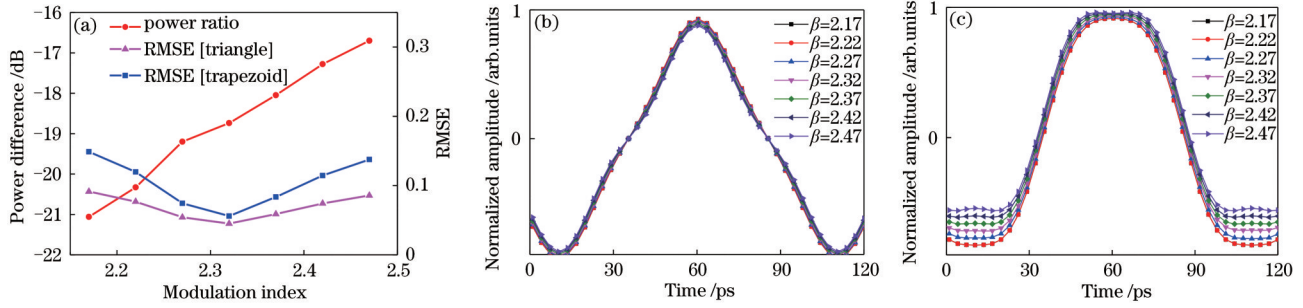


图 7  $\beta$  在标准值  $\pm 0.15$  范围内生成的三角波、梯形波信号。(a) 功率差和 RMSE; (b) 三角波波形; (c) 梯形波形

Fig. 7 Triangular and trapezoid waveforms within  $\beta$  in the standard value  $\pm 0.15$  range. (a) Power difference and RMSE; (b) triangular waveform; (c) trapezoid waveform

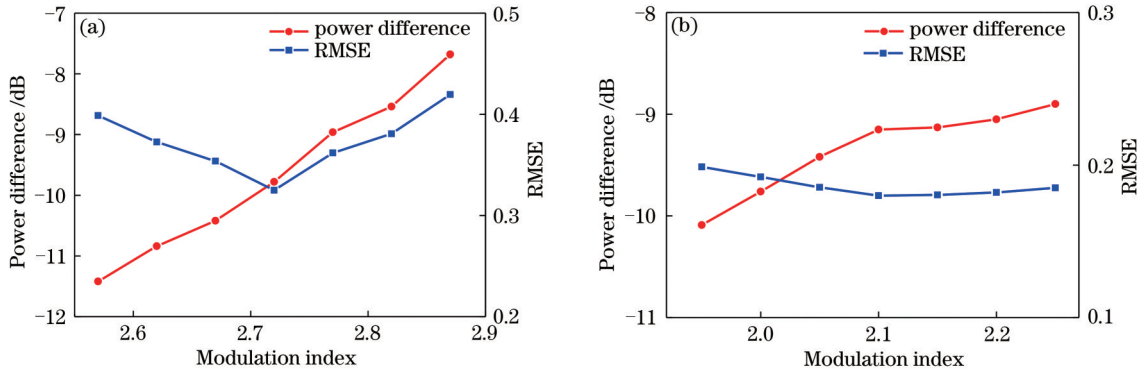


图 8  $\beta$  在标准值  $\pm 0.15$  范围内生成波形信号的功率差及 RMSE。(a) 方波; (b) 锯齿波

Fig. 8 Power difference and RMSE of square and sawtooth waveforms within  $\beta$  in the standard value  $\pm 0.15$  range. (a) Square waveform; (b) sawtooth waveform

- 21.06 dB, 三角波  $0.045 \leq E_{\text{RMS}} \leq 0.091$ , 方波  $0.056 \leq E_{\text{RMS}} \leq 0.148$ 。对比图 7(b)、(c) 可得, 当  $\beta$  在  $2.32 \pm 0.15$  范围内变化时, 对三角波的波形影响较小, 而对梯形波的幅值有影响。由图 8 发现, 当  $\beta$  在标准值  $\pm 0.15$  范围内变化时, 方波的  $0.325 \leq E_{\text{RMS}} \leq 0.419$ , 锯齿波的  $0.185 \leq E_{\text{RMS}} \leq 0.198$ 。可见,  $\beta$  对方波的影响与梯形波情况相似, 而对锯齿波的影响与三角波情况相似。总体来说,  $\beta$  在标准值  $\pm 0.15$  范围内变化时, 对波形的质量有影响, 但是影响不大。

在前文分析中, 假定使用  $90^\circ$  电桥为理想器件引入  $90^\circ$  相位差, 即 DP-PM 的两个子 PM 保持  $90^\circ$  相位差。但在实际情况中,  $90^\circ$  电桥可能出现相位不平衡情况, 这里分析  $90^\circ$  电桥相移平衡漂移对信号质量的影响。

假设实际中  $90^\circ$  电桥的相位为  $\theta$ , 则相位平衡即为  $\Delta\theta = 90^\circ - \theta$ 。当  $87^\circ \leq \theta \leq 93^\circ$  时, 生成的近似波形、两谐波功率差  $\Delta P$  和 RMSE 的对应关系如图 9、10 所示, 其中图 9 为三角波、梯形波信号, 图 10 为方

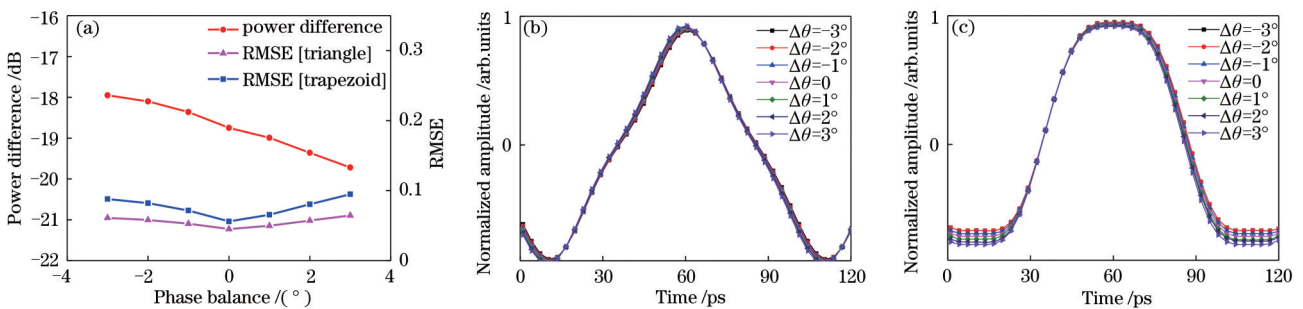


图 9  $\Delta\theta$  在  $\pm 3^\circ$  范围内生成的三角波、梯形波信号。(a) 功率差及 RMSE; (b) 三角波波形; (c) 梯形波形

Fig. 9 Triangular wave and trapezoid waveforms within  $\Delta\theta$  in the  $\pm 3^\circ$  range. (a) Power difference and RMSE; (b) triangular waveform; (c) trapezoid waveform

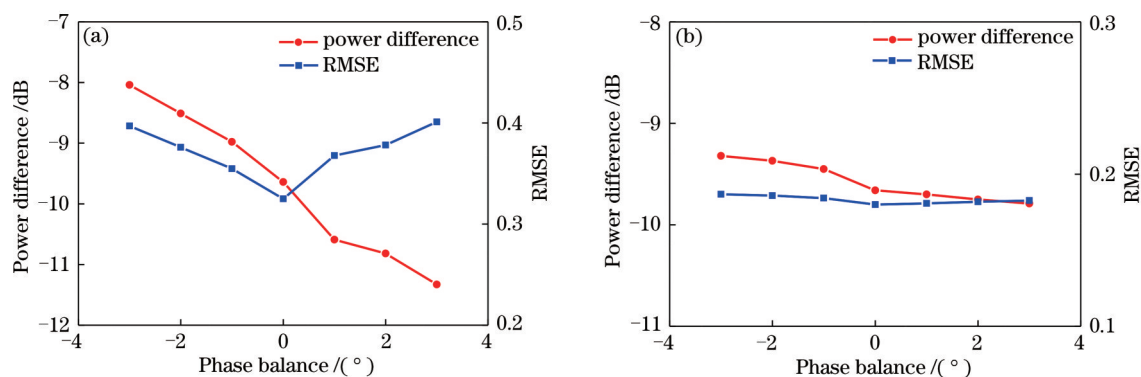


图 10  $\Delta\theta$  在  $\pm 3^\circ$  范围内生成波形信号的功率差及 RMSE。(a) 方波; (b) 锯齿波

Fig. 10 Power difference and RMSE of square and sawtooth waveforms within  $\Delta\theta$  in the  $\pm 3^\circ$  range. (a) Square waveform; (b) sawtooth waveform

波、锯齿波信号。由图 9(a) 可见,  $\Delta\theta$  在  $\pm 3^\circ$  范围内变化时, 两谐波功率差  $-17.95 \text{ dB} \leq \Delta P \leq -19.72 \text{ dB}$ , 三角波  $0.045 \leq E_{\text{RMS}} \leq 0.061$ , 方波的  $0.056 \leq E_{\text{RMS}} \leq 0.095$ 。对比图 9(b)、(c) 可得,  $\Delta\theta$  在  $\pm 3^\circ$  范围内变化时, 对三角波的波形影响较小, 而对梯形波的相位有影响。由图 10 可知, 电桥的相位变化对方波的影响和梯形波情况相似, 而对锯齿波的影响与三角波情况相似。总体来说, 当  $\Delta\theta$  在  $\pm 3^\circ$  范围内变化时, 对波形的质量有影响, 但是影响相对较小。

## 5 结 论

提出一种重复频率可调的任意波形光子生成方案, 当激光光源经双平行相位调制器调制, 及平衡探测后可输出方波和梯形波信号。此外,  $90^\circ$  移相器的引入能实现三角形和锯齿波信号输出。本方案没有直流偏置电压, 生成的波形不受偏置漂移的影响。仿真实验中, 通过调节射频驱动电压和频率, 可实现频率为  $10 \sim 25 \text{ GHz}$  的一系列连续三角波形、方波、梯形波和锯齿波微波信号输出, 且 RMSE 均小于 0.33。同时, 实验分析了系统关键器件的非理想情况对输出微波信号质量的影响, 结果表明, 当调制器调制指数值在  $\pm 0.15$  内,  $90^\circ$  电桥相位在  $\pm 3^\circ$  内变化时, 波形信号 RMSE 均小于 0.42, 对波形的质量影响相对较小, 验证了该系统具有较好的稳定性。

## 参 考 文 献

[1] Yao J P. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. Optics Communications, 2011, 284(15): 3723-3736.  
 [2] Zhang W, Wen A J, Wang Q, et al. Simple and flexible photonic microwave waveform generation with low RMSE of square waveform[J]. IEEE Photonics

Technology Letters, 2019, 31(11): 829-832.

- [3] Zhu Z H, Zhao S H, Li X, et al. Photonic generation of versatile frequency-doubled microwave waveforms via a dual-polarization modulator[J]. Optics Communications, 2017, 384: 1-6.  
 [4] 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.  
 [5] Liao S S, Ding Y H, Dong J J, et al. Arbitrary waveform generator and differentiator employing an integrated optical pulse shaper[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12161-12173.  
 [6] Tan M X, Xu X Y, Boes A, et al. Photonic RF arbitrary waveform generator based on a soliton crystal micro-comb source[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(22): 6221-6226.  
 [7] 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.  
 [8] Zhang F Z, Ge X Z, Pan S L, et al. Photonic generation of pulsed microwave signals with tunable frequency and phase based on spectral-shaping and frequency-to-time mapping[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4256-4259.  
 [9] Jiang H Y, Yan L S, Ye J, et al. Photonic generation of impulse ultrawideband signals with switchable shapes and polarities based on frequency-to-time mapping[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5052-5054.  
 [10] Sun Y Y, Bai G F, Hu L. Triangular photonic microwave-signal generation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator and influence factors of its similarity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110602.



- 孙亚园, 白光富, 胡林. 双平行马赫-曾德尔调制器产生三角形光子微波及相似度影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110602.
- [11] 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.  
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.
- [12] Peng H T, Wang J, Ma C, et al. Arbitrary waveform generation of enhanced high-order harmonics based on injection locking[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0419001.  
彭海涛, 王菊, 马闯, 等. 基于注入锁定增强高次谐波的任意波形产生[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0419001.
- [13] Yuan J, Ning T G, Li J, et al. A photonic-assisted periodic triangular-shaped pulses generator based on FWM effect in an SOA[J]. Optics Communications, 2016, 381: 450-456.
- [14] 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.
- [15] Yuan J, Ning T G, Li J, et al. Research of photonic-assisted triangular-shaped pulses generation based on quadrupling RF modulation[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(3): 207-212.
- [16] Li Y Y, Wen A J, Zhang W, et al. A simple and tunable photonic generation of frequency-doubled triangular waveform based on two cascaded modulators[J]. Optics Communications, 2019, 445: 231-235.
- [17] Zhai W L, Wen A J, Shan D J. Photonic generation and transmission of frequency-doubled triangular and square waveforms based on two Mach-Zehnder modulators and a Sagnac loop[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(9): 1937-1945.
- [18] Chen Y. Photonic generation and transmission of triangular and square waveforms with a large repetition rate tunable range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3293-3301.
- [19] Zhu Z H, Zhao S H, Li X, et al. Frequency-doubled microwave waveforms generation using a dual-polarization quadrature phase shift keying modulator driven by a single frequency radio frequency signal[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 397-403.
- [20] Li X R, Wen A J, Tu Z Y, et al. Photonic generation of microwave waveforms based on a dual-polarization quadrature phase-shift-keying modulator[J]. Applied Optics, 2018, 57(25): 7398-7401.