

DOI:10.16136/j.joel.2023.01.0162

# 占空比可调的奈奎斯特脉冲产生

王辉<sup>1,2</sup>, 李佳康<sup>1,2</sup>, 贾东方<sup>1,2\*</sup>, 葛春风<sup>1,2</sup>, 王肇颖<sup>1,2</sup>, 杨天新<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**奈奎斯特(Nyquist)脉冲在光通信、微波光子学、光存储和全光采样等领域中有着重要应用价值。为适应不同的应用场合对Nyquist脉冲的占空比的具体要求,提出了一种基于光谱展宽和啁啾补偿的占空比可调的Nyquist脉冲产生方案。首先,利用相位调制器(phase modulator, PM)作为时间透镜,将强度调制器(intensity modulator, IM)输出的平顶光脉冲变换到频域光谱展宽的平坦光频梳;然后,通过标准单模光纤(standard single-mode fiber, SSF)补偿相位调制引入的近线性啁啾,得到脉宽压缩的无啁啾短脉冲;最后,通过中心波长和带宽可调的光滤波器滤波实现了Nyquist脉冲占空比的连续可调。通过数值仿真实验,在10 GHz的射频信号频率下,获得了周期为100 ps,脉宽为4.0—12.6 ps,占空比在4.0%—12.6%之间可调的Nyquist脉冲,且脉冲的滚降系数较低,在0—0.127之间,与理想Nyquist脉冲的均方根误差为0.16%—0.58%。结果表明,该方案能够实现占空比灵活可调的Nyquist脉冲的产生。

**关键词:**奈奎斯特脉冲; 光学频率梳; 光谱展宽; 啁啾补偿

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)01-0001-09

## Nyquist pulse generation with adjustable duty cycle

WANG Hui<sup>1,2</sup>, LI Jiakang<sup>1,2</sup>, JIA Dongfang<sup>1,2\*</sup>, GE Chunfeng<sup>1,2</sup>, WANG Zhaoying<sup>1,2</sup>, YANG Tianxin<sup>1,2</sup>

(1. School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Nyquist pulses have important applications in the fields of optical communication, microwave photonics, optical storage and all-optical sampling. To meet the specific requirements for the duty cycles of Nyquist pulses in different applications, a scheme for generating Nyquist pulses with adjustable duty cycles based on spectral broadening and chirp compensation is proposed. First, using the phase modulator (PM) as a time lens, the flat-top optical pulse generated by the intensity modulator (IM) is transformed into a flat optical frequency comb with spectral broadening in the frequency domain; Then, the near-linear chirp introduced by the phase modulation is compensated by standard single-mode fiber (SSF), resulting in a pulse-width compressed short pulse without chirp; Finally, continuous adjustment for the duty cycle of Nyquist pulses is achieved using an optical filter with adjustable center wavelength and bandwidth. Nyquist pulses with a period of 100 ps, a pulse width of 4.0 ps to 12.6 ps and an adjustable duty cycle of 4.0% to 12.6% are obtained at the radio frequency of 10 GHz by numerical simulation. The roll-off factors are relatively low, ranging from 0 to 0.127, and the root mean square errors with the ideal pulses are 0.16%—0.58%. The results show that this scheme can realize the generation of Nyquist pulses with flexible and adjustable duty cycles.

**Key words:** Nyquist pulse; optical frequency comb; spectrum broadening; chirp compensation

\* E-mail: jiadf@tju.edu.cn

收稿日期: 2022-03-14 修订日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61975145)资助项目

## 0 引言

奈奎斯特(Nyquist)脉冲<sup>[1]</sup>因其特殊的频谱和脉冲形状,不仅可以用于在光通信系统中实现超高速数据传输速率和高频谱效率的 Nyquist 时分复用技术<sup>[2,3]</sup>,同时在微波光子学、光存储和全光采样等领域也有着巨大的应用潜力。特定的应用场景对 Nyquist 脉冲的重复频率和占空比有具体的要求,且脉冲的质量对其应用也有着很大的影响。因此,如何灵活地产生低滚降系数的高质量 Nyquist 脉冲吸引了越来越多研究者的关注。在数字域,通过发射机中的数字信号处理可以产生参数灵活可调的 Nyquist 脉冲<sup>[4,5]</sup>,但脉冲的质量受采样速率和处理器能力的限制,且难以产生高重复频率和占空比更小的脉冲。在电域,利用透射谱为矩形的模拟电滤波器滤波同样可以产生 Nyquist 脉冲<sup>[6]</sup>,该方案要求滤波器的透射谱有着比较陡峭的前后沿。相较于前二者,通过光域脉冲整形可以产生持续时间更短的 Nyquist 脉冲,且功耗更低。利用光域脉冲整形的方法获得 Nyquist 脉冲,一般来说有两种不同的形式:一种是通过在频域上产生高边模抑制比的平坦光频梳来直接合成 Nyquist 脉冲,其不同之处在于满足特定条件的光频梳是如何产生的,例如利用光参量放大结合相位调制<sup>[7]</sup>、多个射频信号驱动单个调制器<sup>[8]</sup>以及调制器级联<sup>[9-12]</sup>的方法;另一种则是基于激光腔内或者腔外的光谱滤波的脉冲整形,如对锁模激光器的输出进行光谱滤波<sup>[13-15]</sup>,或者在激光腔中加入液晶空间光调制器来控制 Nyquist 脉冲的形成<sup>[16,17]</sup>。基于上述方法产生的 Nyquist 脉冲,在脉冲占空比的可调性方面受到限制,无法在不改变实验装置的条件实现脉冲占空比的连续调节。

本文提出一种基于时间透镜和光谱滤波的脉冲占空比灵活可调的 Nyquist 脉冲产生方案。通过相位调制器(phase modulator, PM)对强度调制器(intensity modulator, IM)产生的光频梳进行光谱展宽,并利用标准单模光纤(standard single-mode fiber, SSMF)补偿 PM 引入的线性啁啾,最后通过光谱滤波实现光频梳梳线数目和脉冲占空比的连续可调。在分析周期 Nyquist 脉冲与光频梳时频变换关系的基础上,通过数值仿真实验验证了该方案的可行性和有效性。

## 1 基本原理

Nyquist 脉冲被定义为 Nyquist 滤波器的脉冲响应。由具有升余弦滚降特性的 Nyquist 滤波器的

脉冲响应和传递函数可以分别给出 Nyquist 脉冲的时域  $h(t)$  和频域  $H(f)$  的一般表达式:

$$h(t) = \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T_s}\right) \cos\left(\frac{\beta\pi t}{T_s}\right)}{\frac{\pi t}{T_s} \left[1 - \left(\frac{2\beta t}{T_s}\right)^2\right]}, \quad (1)$$

$$H(f) = \begin{cases} T_s, & 0 \leq |f| \leq \frac{1-\beta}{2T_s} \\ \frac{T_s}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi T_s}{\beta} \left[|f| - \frac{1-\beta}{2T_s}\right]\right)\right], & \frac{1-\beta}{2T_s} \leq |f| \leq \frac{1+\beta}{2T_s} \\ 0, & |f| \geq \frac{1+\beta}{2T_s} \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $T_s$  为 Nyquist 脉冲的峰值到第一个零点间的持续时间,即主脉冲的过零脉宽  $\tau_p$  的一半,  $\beta$  称为滚降系数,其取值范围为 0—1。根据 Nyquist 第一准则,当要传输的码元速率为  $R_B = 1/T_s$  时,进行无符号间干扰传输所需要的最小带宽称为 Nyquist 带宽。对于理想的低通信道, Nyquist 带宽为  $f_N = 1/(2T_s)$ ,对于理想的带通信道, Nyquist 带宽为  $f_N = 1/T_s$ 。因此,用于描述滚降程度的滚降系数  $\beta$  可以定义为:

$$\beta = \frac{f_\Delta}{f_N}, \quad (3)$$

式中,  $f_\Delta$  为超出 Nyquist 带宽部分的频谱拓展量。

图 1 给出了当  $\beta$  分别为 0.0、0.3、0.6 和 1.0 时, Nyquist 脉冲的时域波形和频谱的对应关系。不同滚降系数的 Nyquist 脉冲,其时域波形和频谱略有不同。 $\beta$  为 0 时其脉冲形状与 sinc 函数的图形相同,因而被称为 sinc 形脉冲; $\beta$  不为 0 时的 Nyquist 脉冲可以称为类 sinc 形脉冲。Nyquist 脉冲在时域上是持续时间无限的脉冲,具有无限的振荡拖尾,因为物理条件的限制,在实际中单个理想的脉冲从未能够实现,在实验演示中通常是使用周期脉冲序列来替代。

由于重复频率为  $\Delta f$  的周期脉冲在频域上对应频率间隔为  $\Delta f$  的光频梳,因此可以考虑光频梳和周期 Nyquist 脉冲的时频变换关系。假设一个有如下特定参数的光频梳:梳线数目为  $N$ ,中心频率为  $f_0$ ,相邻梳线间的频率间隔为  $\Delta f$ ,所有梳线具有相同的幅值  $E_0/N$ ,且  $N$  条梳线的相位均与光频率(或光波长)呈线性关系。那么,满足上述条件的光频梳在时域上的光场包络可以变换为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\sin(\pi N \Delta f t)}{N \sin(\pi \Delta f t)} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^{(N-1)n} \operatorname{sinc}\left[N \Delta f \left(t - \frac{n}{\Delta f}\right)\right]. \quad (4)$$

从式(4)可以看出,该光场包络在时域上相当于周期为  $1/\Delta f$  的无穷多个 sinc 函数的求和,对应于周

期 sinc 形 Nyquist 脉冲。把上述光频梳满足的 3 个条件,即频率间隔相等、梳线幅度大小相等、梳线相位与光频率呈线性关系,称为 Nyquist 脉冲条件。通过在频域产生满足 Nyquist 脉冲条件的光频梳,即可在时域获得对应的 Nyquist 脉冲。

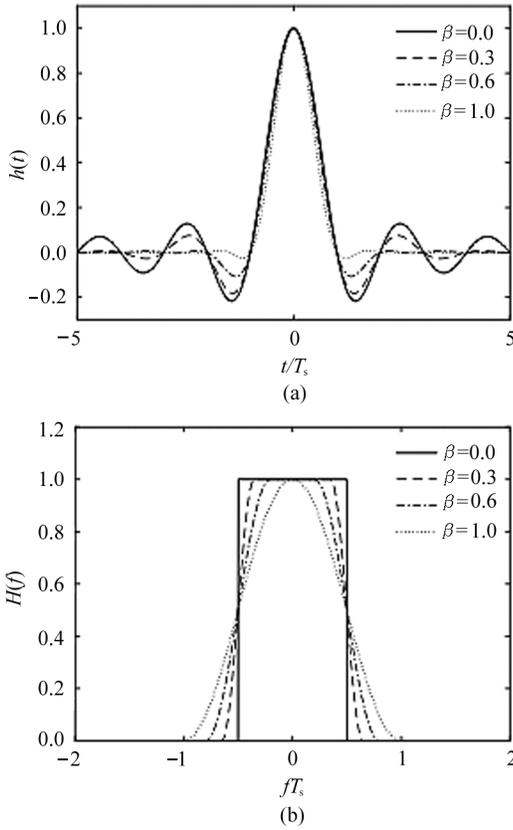


图 1 不同滚降系数的 Nyquist 脉冲:(a) 波形; (b) 频谱  
Fig. 1 Nyquist pulses with different roll-off factors:  
(a) Waveform; (b) Spectrum

## 2 数值仿真实验

### 2.1 光谱展宽平坦光频梳的产生

为了在时域获得周期 Nyquist 脉冲,需要在频域产生满足 3 个 Nyquist 脉冲条件的光频梳。为此,首先研究频域平坦光频梳的产生。利用 Optisystem 与 Matlab 联合仿真搭建如图 2 所示的 IM 级联 PM 的数值仿真实验光路。仿真中,分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)的波长设置为 1550 nm,其输出的连续激光经偏振控制器(PC<sub>1</sub>)通过 IM 进行强度调制,随后经 PC<sub>2</sub> 通过 PM 进行光谱展宽,利用光采样示波器(OSO)和光谱仪(OA)来分别观察最终输出的时域波形和光谱;射频信号 RF<sub>1</sub> 和 RF<sub>2</sub> 要进行同步,二者的频率均为 10 GHz,直流信号(DC)控制 IM 的偏置点,电移相器(PS)用来调整 RF<sub>2</sub> 的相位,使

RF<sub>2</sub> 输出的正弦信号的波谷位置尽可能与 IM 输出脉冲的时间窗口重叠。

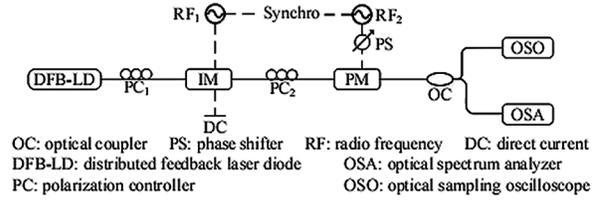


图 2 IM 级联 PM 的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of cascading an IM and a PM

二次射频信号驱动的 PM 能够作为时间透镜,实现从时域平顶光脉冲到频域平坦光频梳的变换。实际中由于理想的二次射频信号通常不易获得,所以在实验中一般使用处于波峰或波谷附近的正弦信号作为二次射频信号的近似。为了在 PM 的输出处获得光谱展宽平坦光频梳,需要对 PM 输入平顶光脉冲。为使连续光波  $E_{in}(t)$  经 IM 调制后获得平顶光脉冲,需要设置 IM 的归一化直流偏置电压  $\epsilon$  数值为  $0.25\pi$ ,以使 IM 工作在其传输曲线的正交点,IM 的归一化直流偏置电压  $\epsilon$  和归一化射频驱动电压  $m$  分别定义为:

$$\epsilon = \frac{\pi V_{DC}}{V_{\pi}}, \quad (5)$$

$$m = \frac{\pi V_{RF1}}{V_{\pi}}, \quad (6)$$

式中,  $V_{DC}$  为 IM 所加的直流电压大小,  $V_{RF1}$  为 RF<sub>1</sub> 输出的正弦信号的幅度大小,  $V_{\pi}$  为 IM 的半波电压。此时 IM 所加的射频信号  $V_{RF1}(t)$  为:

$$V_{RF1}(t) = 0.25\pi \sin(\omega_{RF1}t), \quad (7)$$

式中,  $\omega_{RF1} = 2\pi f_{RF1}$ ,  $f_{RF1}$  为射频信号 RF<sub>1</sub> 的频率,  $0.25\pi$  为其归一化射频驱动电压。此时, IM 的输出为:

$$E_{out}(t) = \cos[0.25\pi \sin(\omega_{RF1}t) + 0.25\pi] E_{in}(t). \quad (8)$$

图 3 为 IM 输出的平顶光脉冲的时域波形和光谱。可以看出,脉冲的周期为 100 ps,半峰全宽(full width at half maxima, FWHM)为 50 ps。将 IM 产生的平顶光脉冲输入到由正弦信号驱动的 PM 中, PM 的调相系数设置为  $2\pi$ ,此时, PM 的输出光谱如图 4 所示。对比图 3(b)可以发现,经过 PM 后输出光谱有了明显展宽,光频梳的梳线数目明显增多。虽然获得的光频梳梳线数目增多了,但从图 4 中可以看出,光谱中心区域的 11 条梳线间的不平坦度为 3.88 dB,且两侧梳线功率较高,形成两个“蝙蝠耳”结

构,因此不满足各梳线幅度大小相等的 Nyquist 脉冲条件。

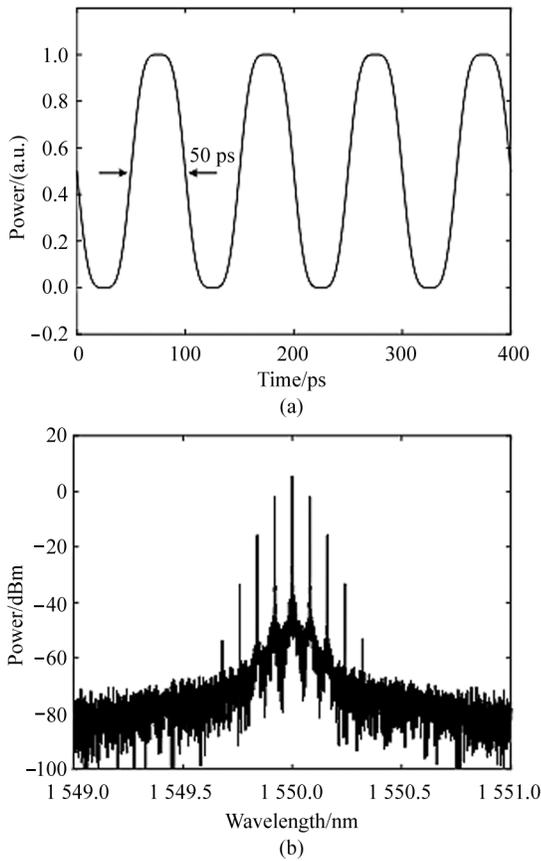


图 3 IM 输出的平顶光脉冲:(a) 波形;(b) 光谱  
Fig. 3 Flat-top optical pulses output of the IM:  
(a) Waveform; (b) Spectrum

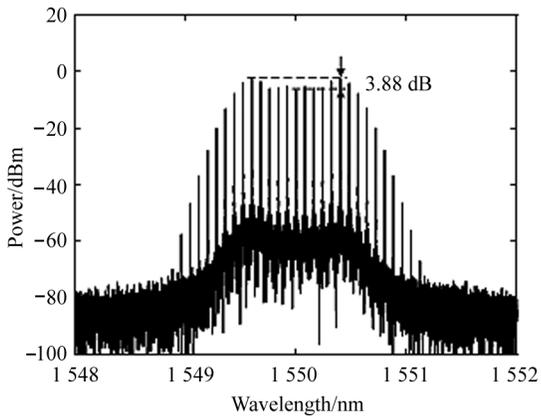


图 4 PM 输出的展宽光谱  
Fig. 4 Broadened spectrum output of the PM

平顶光脉冲经过时间透镜变换后,其光谱之所以不是平坦的光频梳,是因为所使用的平顶光脉冲的脉宽较大。由于 PM 的驱动信号并非理想的抛物

形二次射频信号,而是利用正弦驱动信号的波峰或波谷附近一小段区域来近似的。因而当平顶光脉冲的脉宽过大时,两者时间窗口的重叠部分超过了近似度较高的波峰或波谷区域,结果对光脉冲引入了较多的非线性啁啾,导致出现“蝙蝠耳”结构。PM 输出的光脉冲的相位和啁啾如图 5 所示,可以看出,正弦驱动信号的波谷附近与脉冲时间窗口重叠,因而引入的是正啁啾。实验中可以通过 PS 调节正弦驱动信号的相位来尽可能使波谷附近对齐脉冲的时间窗口。

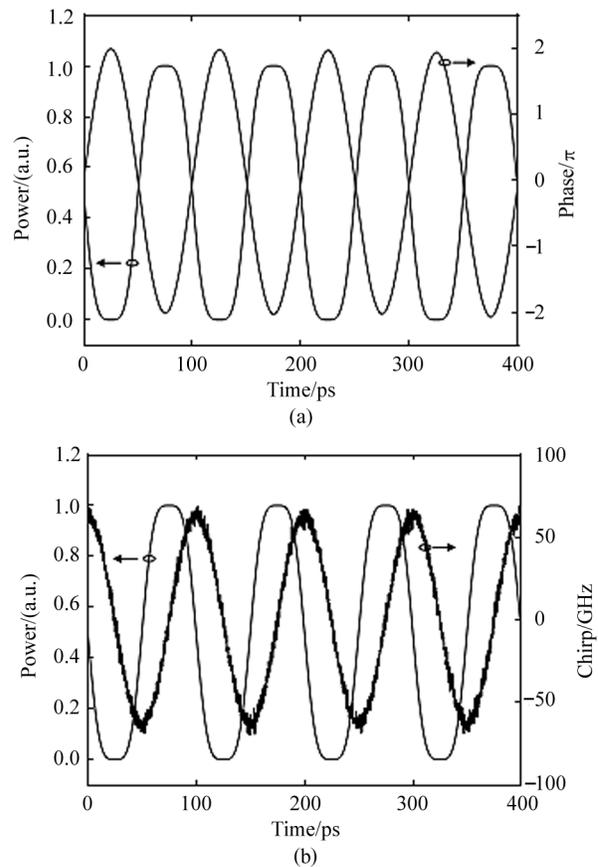


图 5 PM 输出的脉冲:(a) 相位;(b) 啁啾  
Fig. 5 Pulses output of the PM:(a) Phase; (b) Chirp

为了获得尽可能平坦的光频梳,需要窄化 IM 输出的脉冲,以尽可能地引入线性啁啾。通过两个 IM 级联可以使输出脉冲的上升沿和下降沿变得更加陡峭。此时,IM 的输出为:

$$E_{out}(t) = \cos^2[0.25\pi\sin(\omega_{RF1}t) + 0.25\pi]E_{in}(t), \quad (9)$$

为了优化结构,减少调制器的使用,可以采用如下的数学变换:

$$\cos^2[0.25\pi\sin(\omega_{RF1}t) + 0.25\pi] =$$

$$\frac{1}{2} \{1 + \cos[0.5\pi \sin(\omega_{RF1}t) + 0.5\pi]\}. \quad (10)$$

实现脉冲窄化的结构如图 6 所示:输入光通过一个 3 dB 耦合器  $OC_1$  被分为两路,一路通过 IM,另一路通过跳线,两者通过耦合器  $OC_2$  耦合,即可实现减少一个 IM 的目的。

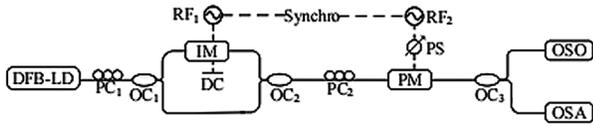


图 6 窄化脉冲的原理图

Fig. 6 Schematic diagram of narrowing the pulse

需要注意的是,此时 IM 的归一化射频驱动电压  $m$  和直流偏置电压  $\epsilon$  均增大了一倍。通过该光路对脉冲窄化后,PM 的输入脉冲如图 7 所示,可以看出,脉冲明显有了窄化,脉宽由 50 ps 减小为 41 ps。此时光谱中央 11 条梳线的不平坦度降低为 1.54 dB。显然,经过窄化脉冲,光谱的平坦度有了明显的改善。

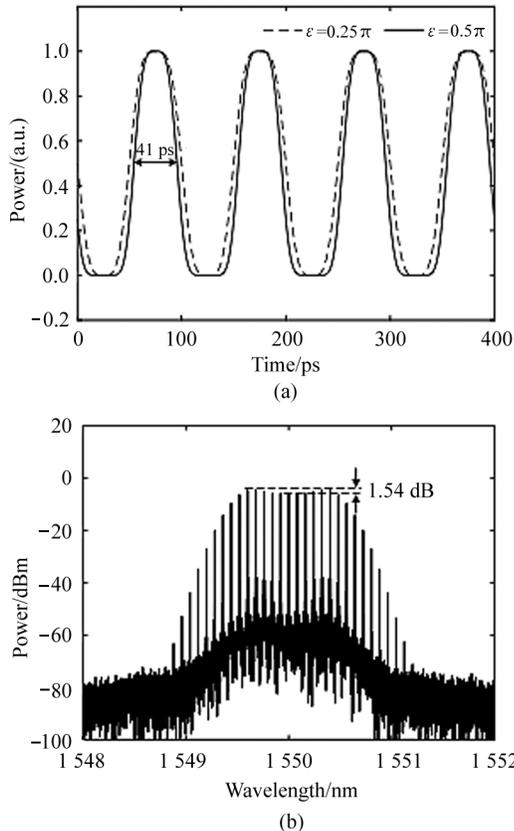


图 7 脉冲窄化的结果:(a) 波形;(b) 光谱  
Fig. 7 The results of narrowing the pulse:  
(a) Waveform; (b) Spectrum

为了进一步改善所得光频梳的平坦度,可以通过调整归一化直流偏置电压来改变 IM 的偏置点,利用 IM 的非线性调制效应来抵消正弦驱动信号中高次项的影响。为此,调整  $\epsilon$  的大小,调整范围为  $0.5\pi-0.7\pi$ ,步进为  $0.025\pi$ ,仿真结果如图 8 所示。

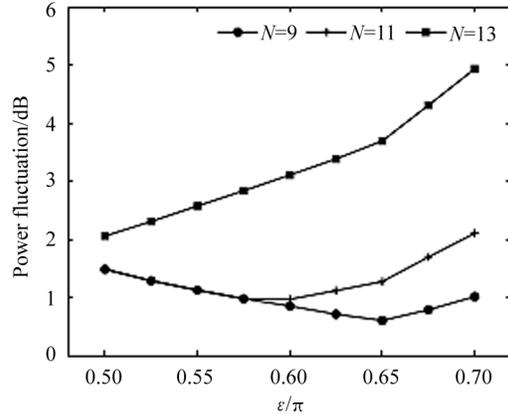
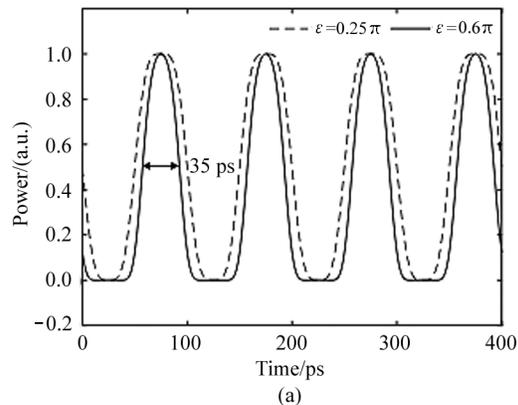


图 8 不同  $\epsilon$  值下梳线的功率波动  
Fig. 8 Power fluctuation of the comb lines at different values of  $\epsilon$

可以看出,随着  $\epsilon$  值的增加,梳线数目  $N=13$  的光频梳的不平坦度由 2.10 dB 增加到 5.00 dB;梳线数目  $N=11$  的光频梳的不平坦度先降低后增加,当  $\epsilon=0.6\pi$  时,达到最小值 0.97 dB;梳线数目  $N=9$  的光频梳的不平坦度同样先降低后增加,最小值为 0.80 dB。虽然  $N=9$  时光频梳的不平坦度最小,但却以减少梳线数目为代价。综合考虑梳线数目和不平坦度后,此处选择归一化直流偏置电压  $\epsilon=0.6\pi$  进行仿真。此时,PM 的输入脉冲波形和输出光谱如图 9 所示,可以看出,脉宽减小为 35 ps,光谱中央 11 条梳线的功率变化不超过 0.97 dB。通过上述的仿真,获得了 11 条梳线功率变化不超过 0.97 dB 的平坦光频梳,但梳线数目  $N$  仍然较少。为此,通过级联两个



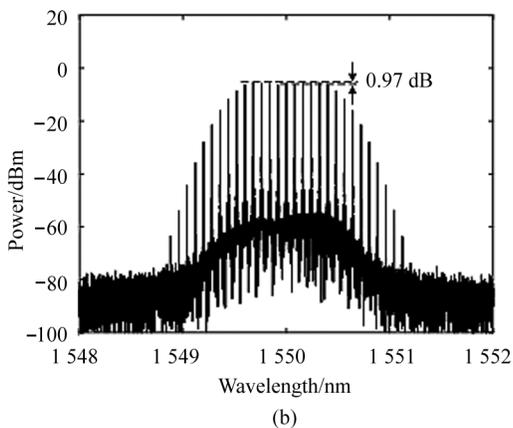


图9  $\varepsilon=0.6\pi$  时的结果:(a) 波形; (b) 光谱  
Fig. 9 The results when  $\varepsilon=0.6\pi$ :  
(a) Waveform; (b) Spectrum

PM 来进一步展宽光谱,两个 PM 的调相系数均为  $2\pi$ 。两个 PM 级联后的输出光谱如图 10 所示,相较于图 9(b),此时光谱平坦的梳线数目增加到了 23 条,且功率变化不超过 1.1 dB。

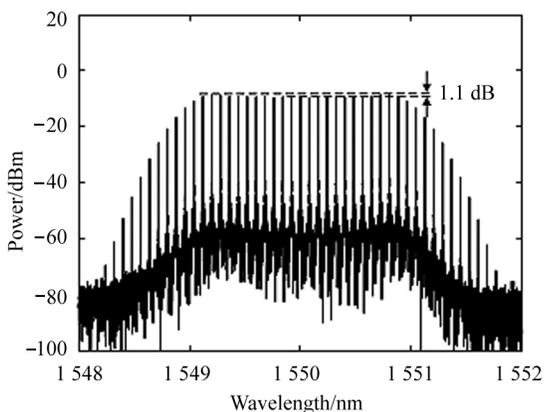


图 10 两个 PM 级联的输出光谱  
Fig. 10 The output spectrum of cascading two PMs

### 2.2 占空比可调的 Nyquist 脉冲产生

通过前面的仿真得到了梳线数目  $N=23$  的平坦光频梳,但由于 PM 引入了近线性啁啾,导致梳线的相位不满足 Nyquist 脉冲条件,为此需要补偿该线性啁啾。图 5 中,正弦驱动信号的波谷与脉冲的时间窗口重叠,故引入了线性正啁啾,因此可以利用在 1550 nm 附近处于负色散的 SSMF 补偿该啁啾。

图 11(a)给出了利用 SSMF 补偿啁啾之前,两个级联 PM 的输出脉冲波形和啁啾,此时脉宽为 35 ps,可以看出在脉冲持续时间内有近线性的正啁啾。图 11(b)为经过 1.08 km SSMF 补偿啁啾后的脉冲波形和啁啾,可以看出,此时的脉冲近乎无啁啾,脉宽

减小为 3.1 ps。为了验证此时光频梳各梳线的相位与波长的关系,比较了脉冲通过 SSMF 补偿啁啾前后各梳线的相位,如图 12 所示。

从图 12 可以看出,SSMF 补偿啁啾前各梳线间的相位关系并非线性的,但是通过 1.08 km 的 SSMF 后,各梳线的相位表现为对波长的线性依赖关系,线性拟合的  $R^2$  值为 0.999 97,可以认为满足 Nyquist 脉冲条件。由于脉冲的光谱未经滤波,受平坦梳线外的光谱范围的影响,此时时域波形也并非周期 sinc 形 Nyquist 脉冲。为此在 SSMF 后接入一个可调谐光滤波器 (tunable optical filter, TOF),通过选择 TOF 的通带带宽和中心波长来进行光频梳的梳线数目选择,以便在输出处获得梳线数目  $N$  不同的 Nyquist 脉冲,整个系统如图 13 所示。相比图 6 的装置,此处增加了  $PM_2$  来进一步展宽光谱,并在  $PM_2$  的输出端加入适当长度的 SSMF 来补偿啁啾,最后再通过 TOF 进行光谱滤波。

仿真中 TOF 选择 9 阶超高斯型 TOF,其在不同 FWHM 带宽的滚降特性与商用的型号为“EXFO XTA-50 Wide”的光平顶滤波器相类似。首先设置

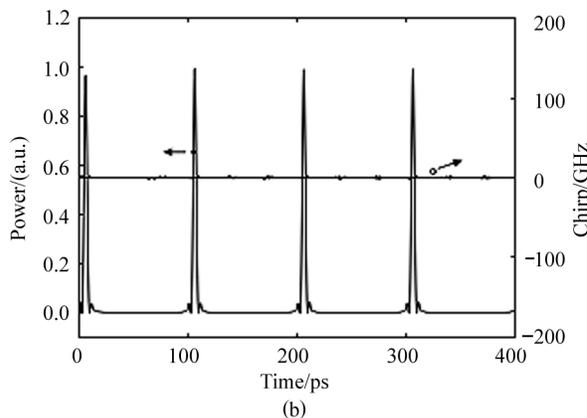
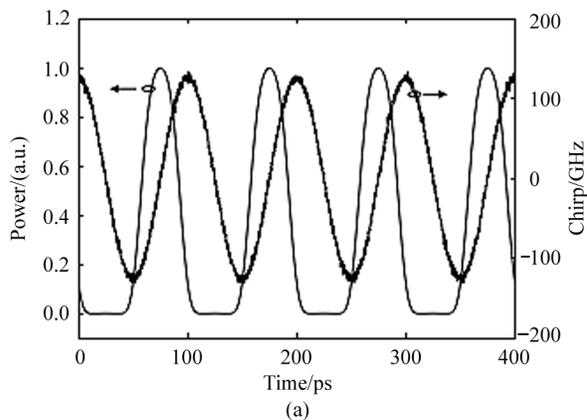


图 11 SSMF 前后的脉冲:(a) 输入; (b) 输出  
Fig. 11 Pulses before and after the SSMF:  
(a) Input; (b) Output

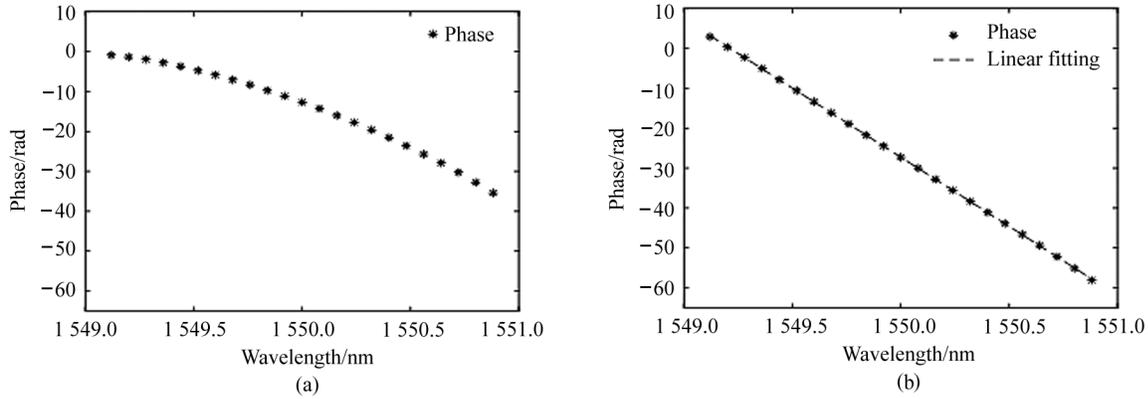


图 12 SSMF 前后梳线的相位:(a) 输入; (b) 输出

Fig. 12 The phase of comb lines before and after the SSMF: (a) Input; (b) Output

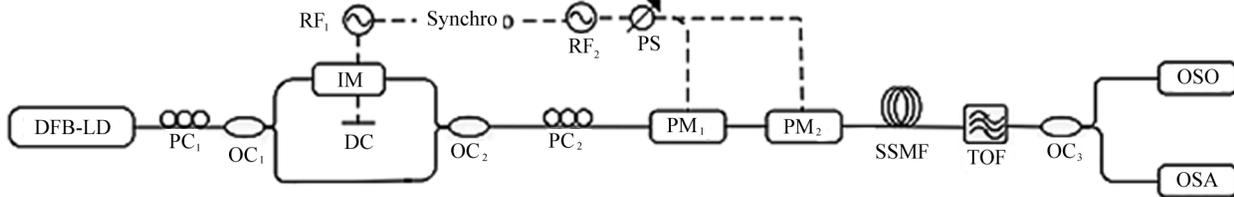


图 13 占空比可调的 Nyquist 脉冲产生原理图

Fig. 13 Schematic diagram of Nyquist pulses generation with adjustable duty cycle

TOF 的中心波长为 1550 nm,带宽分别为 70 GHz、130 GHz 和 210 GHz,输出结果如图 14 所示。在输出处可以获得  $N$  为 7、13 和 21 的平坦光频梳,但由于 TOF 并非理想矩形的滚降特性,产生的脉冲也并非滚降为 0 的周期 sinc 形 Nyquist 脉冲。在图 14 (a)、(b)和(c)中,均以下降沿一侧零点附近的脉冲波形的放大形式来表现脉冲与理想 Nyquist 脉冲的差异,其完整波形如插图所示。从图 14(d)、(e)和(f)可以看出,对应的光频梳的边模抑制比分别为 32.8 dB、10.8 dB 和 6.3 dB,不平坦度分别为 0.41 dB、0.62 dB 和 0.94 dB。当梳线数目分别为 7、13 和 21 时,利用最小二乘法拟合的脉冲滚降系数分别为 0、0.127 和 0.053,与理想脉冲的均方根误差分别为 0.34%、0.16% 和 0.16%。脉冲的周期均为 100 ps,FWHM 分别为 12.6 ps、6.5 ps 和 4.0 ps,因而对应的脉冲占空比分别为 12.6%、6.5% 和 4.0%。

当将 TOF 的中心波长由 1550 nm 调整为 1550.04 nm,通带宽度分别设置为 80 GHz、140 GHz 和 200 GHz 时,可以在输出处获得  $N$  分别为 8、14 和 20 的平坦光频梳,仿真结果如图 15 所示。在图 15(a)、(b)和(c)中,同样以下降沿一侧零点附近的脉

冲波形的放大形式来表现脉冲与理想 Nyquist 脉冲的差异,完整波形如插图所示。从图 15(d)、(e)和(f)中可以看出,此时光频梳的边模抑制比分别为 24.5 dB、9.8 dB 和 5.9 dB,不平坦度分别为 0.49 dB、0.76 dB 和 1.04 dB。脉冲的周期同样为 100 ps,当梳线数目分别为 8、14 和 20 时,拟合的滚降系数分别为 0、0.124 和 0.067,均方根误差分别为 0.58%、0.29% 和 0.18%。脉冲的 FWHM 分别为 10.8 ps、6.0 ps 和 4.2 ps,对应的占空比分别为 10.8%、6.0% 和 4.2%。

通过上述仿真研究,成功实现了梳线数目  $N$  的连续调节,证明了利用该方案可以产生占空比可调的 Nyquist 脉冲,后续研究可以通过实验进一步验证该方案的可行性。

### 3 结 论

本文提出了一种应用于光通信系统中的脉冲占空比灵活可调的低滚降系数 Nyquist 脉冲产生方案。通过利用正弦信号驱动的 PM 作为时间透镜,将 IM 输出的平顶光脉冲变换为光谱展宽的平坦光频梳;利用 SSMF 补偿近线性啁啾,并通过随后的 TOF 进

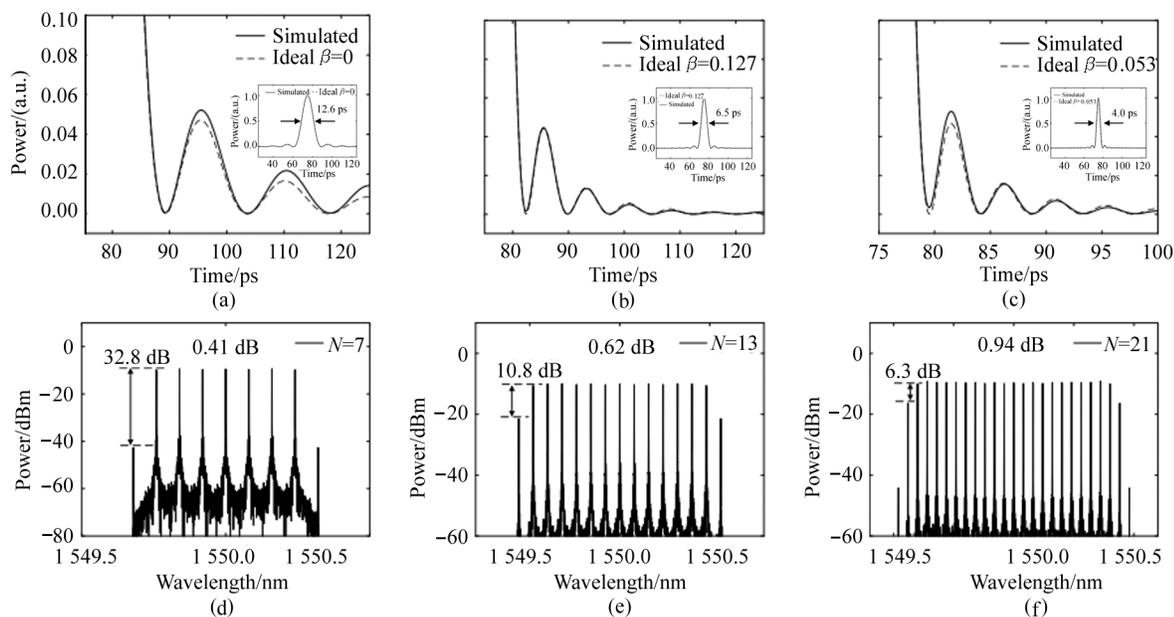


图 14 不同梳线数目对应的 Nyquist 脉冲波形(插图为完整波形)和光谱:(a)(d)  $N=7$ ; (b)(e)  $N=13$ ; (c)(f)  $N=21$

Fig. 14 Waveforms(the insets show the complete waveforms) and spectra of Nyquist pulses for different comb lines:

(a)(d)  $N=7$ ; (b)(e)  $N=13$ ; (c)(f)  $N=21$

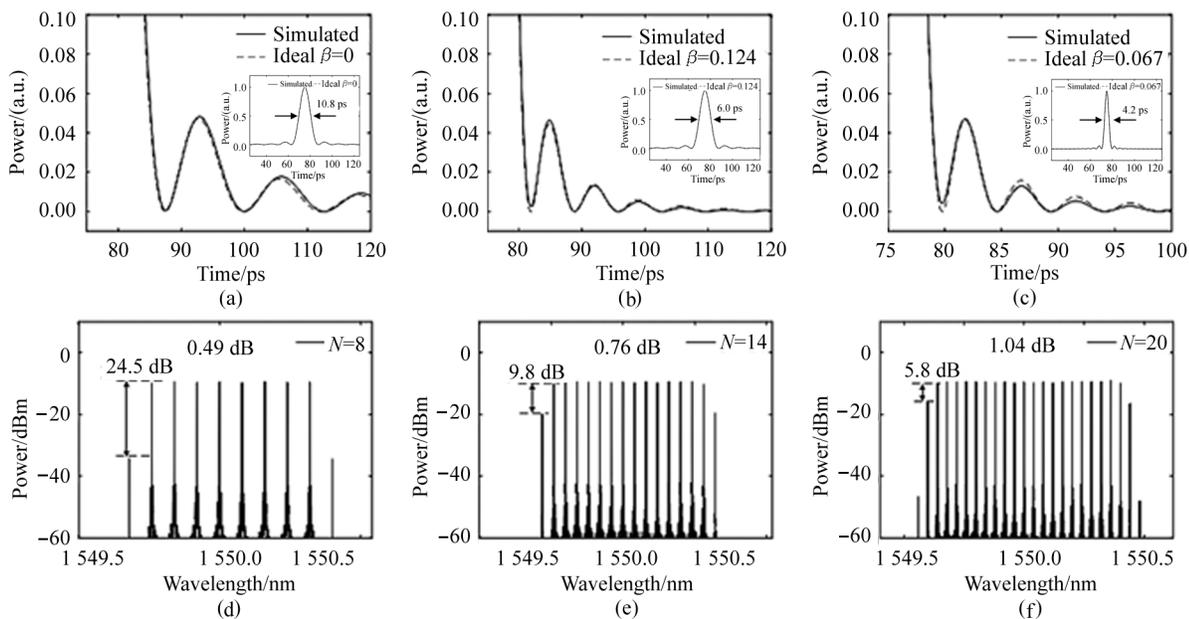


图 15 不同梳线数目对应的 Nyquist 脉冲波形(插图为完整波形)和光谱:(a)(d)  $N=8$ ; (b)(e)  $N=14$ ; (c)(f)  $N=20$

Fig. 15 Waveforms(the insets show the complete waveforms) and spectra of Nyquist pulses for different comb lines:

(a)(d)  $N=8$ ; (b)(e)  $N=14$ ; (c)(f)  $N=20$

行光谱滤波,实现了 Nyquist 脉冲占空比的可调。仿真结果表明,产生的 Nyquist 脉冲占空比可在 4.0%—12.6% 之间调节,脉冲的滚降系数均小于 0.127,与理想 Nyquist 脉冲的均方根误差均小于 0.58%,证明了该方案产生占空比可调、低滚降系数

的高质量 Nyquist 脉冲的可行性和有效性。

参考文献:

[1] NYQUIST H. Certain topics in telegraph transmission theory[J]. Transactions of the American Institute of Electrical

- Engineers, 1928, 47(2): 617-644.
- [2] SCHMOGROW R, WINTER M, MEYER M, et al. Real-time Nyquist pulse generation beyond 100 Gbit/s and its relation to OFDM[J]. Optics Express, 2012, 20(1): 317-337.
- [3] RENFORS M, MESTRE X, KOFIDIS E, et al. Orthogonal waveforms and filter banks for future communication systems[M]. New York: Academic Press, 2017: 129-135.
- [4] SCHMOGROW R, HILLERKUSS D, WOLF S, et al. 512QAM Nyquist sinc-pulse transmission at 54 Gbit/s in an optical bandwidth of 3 GHz[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6439-6447.
- [5] VERCESI V, ONORI D, DAVIES J, et al. Electronically synthesized Nyquist pulses for photonic sampling of microwave signals[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29249-29259.
- [6] SCHMOGROW R, BEN-EZRA S, SCHINDLER P C, et al. Pulse-shaping with digital, electrical, and optical filters—a comparison[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(15): 2570-2577.
- [7] VEDADI A, SHOAI M A, BRES C S. Experimental investigation of pulse generation with one-pump fiber optical parametric amplification[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27344-27354.
- [8] HU J, FABBRI S J, BRÈS C-S. Optical sinc-shaped Nyquist pulse source based on a single Mach-Zehnder modulator[C]//Proceedings of the 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks, July 2-6, 2017, Girona, Spain. New York: IEEE, 2017: 1-4.
- [9] SOTO M A, ALEM M, AMIN SHOAI M, et al. Optical sinc-shaped Nyquist pulses of exceptional quality[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 2898-2908.
- [10] WU S, LIU N, CUI Y. Highly flexible optical Nyquist pulses generation based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator and intensity modulator[J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(3): 361-368.
- [11] ZHOU X, JI W, LI J, et al. A modified 160 Gbit/s OTDM system based on QPSK Nyquist pulses and coherent detection[J]. Optics Communications, 2020, 455(1): 124551-124556.
- [12] LIU S, WU K, ZHOU L, et al. Optical frequency comb and Nyquist pulse generation with integrated silicon modulators[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(2): 1-8.
- [13] HIROOKA T, RUAN P, GUAN P, et al. Highly dispersion-tolerant 160 Gbaud optical Nyquist pulse TDM transmission over 525 km[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15001-15007.
- [14] WANG D, HUO L, JIANG X, et al. Multicolor optical Nyquist pulse generation based on self-phase modulation without line-by-line control[J]. Optics Communications, 2016, 381(1): 91-99.
- [15] NITTA J, YOSHIDA M, KIMURA K, et al. Single-channel 384 Tbit/s, 64 QAM coherent Nyquist pulse transmission over 150 km with a spectral efficiency of 106 bit/s/Hz[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15199-15207.
- [16] NAKAZAWA M, YOSHIDA M, HIROOKA T. The Nyquist laser[J]. Optica, 2014, 1(1): 15-22.
- [17] NAKAZAWA M, HIROOKA T. A generalized mode-locking theory for a Nyquist laser with an arbitrary roll-off factor part I: master equations and optical filters in a Nyquist laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2021, 57(3): 1-17.

#### 作者简介:

贾东方 (1971—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤通信、非线性光纤光学等方面的研究。