

基于光电振荡器的高速率光采样技术

包文强¹, 于晋龙¹, 王文睿^{2*}

¹天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

²浙江大学航空航天学院, 浙江 杭州 310027

摘要 提出了一种基于光电振荡器的高速光采样技术。光电振荡器直接产生高重复频率、低时间抖动的采样脉冲, 避免了对低重复频率采样脉冲的时域复用, 可降低系统复杂性, 提高系统效率。利用此光脉冲对信号进行时域傅里叶变换采样, 信号在不同时刻的幅度信息被调制到不同波长的探测光上, 再经过波分复用器或可调滤波器滤出不同中心波长的光, 实现高速实时采样及串并转换, 可与低速率的电模数转换量化匹配。实验产生重复频率为 10 GHz、时间抖动为 195 fs 的光脉冲, 并对三种不同波形的信号进行采样, 得到采样波形, 采样速率达到 40 GSa/s。实验结果表明提出的基于光电振荡器的光采样技术是可行的。

关键词 信号处理; 光模数转换; 光电振荡器; 光采样; 光窄脉冲; 时域傅里叶变换

中图分类号 TN29 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060701

High-Rate Optical Sampling Based on Optoelectronic Oscillator

Bao Wenqiang¹, Yu Jinlong¹, Wang Wenrui²

¹School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Aeronautics and Astronautics Institute, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A high-speed optical sampling technique based on optoelectronic oscillators is proposed. Optoelectronic oscillators generate sampling pulses with high repetition rates and low time jitter directly, as a result, the time-domain multiplexing of low repetition rate sampling pulses is avoided, the system complexity is reduced, and the system efficiency is improved. The generated pulses are used to sample signals by time-domain Fourier transform, the amplitude information of the signals at different moments are modulated to the detection light at different wavelengths, then the light with different central wavelengths is filtered by wavelength division multiplexer or tunable filters, thus high-speed real-time sampling and serial-parallel conversion are realized, and electronic analog-to-digital conversion quantization with low rate is well matched. The optical pulses with repetition rate of 10 GHz and time jitter of 195 fs are generated in the experiments. Three kinds of signals with different waveforms are sampled, the sampling waveform is obtained, and the optical sampling rate of 40 GSa/s is reached. The experimental results show the feasibility of the proposed optical sampling technique based on optoelectronic oscillators.

Key words signal processing; optical analog-to-digital conversion; optoelectronic oscillator; optical sampling; narrow optical pulse; time-domain Fourier transform

OCIS codes 070.4560; 250.3140; 230.0250

1 引言

灵活性大、可靠性高的数字信号处理技术为人类社会的方方面面带来了革命性的进展。要实现模

拟信号到数字信号的转化, 模数转换(ADC)是其中的关键技术。随着人们对信息认知、获取、传输的速率和精度的要求不断提升, 对高带宽、高采样率、高精度精度的 ADC 技术的需求也日益迫切。然而传

收稿日期: 2017-10-20; 收到修改稿日期: 2017-11-14

作者简介: 包文强(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电振荡器方面的研究。E-mail: 492522173@qq.com

导师简介: 于晋龙(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangwenrui@zju.edu.cn

统电 ADC 技术受限于电子孔径抖动和电子渡越时间不确定性,其采样速率和带宽无法同时提升。所以,为了克服电 ADC 的瓶颈问题,研究人员开始采用光学采样的方法提高 ADC 的采样速率。结合光学采样和电量化技术构建的新型光子 ADC 可以突破电 ADC 的速率瓶颈^[1],是 ADC 技术达到高速度、高精度的可靠途径,也是目前国内外研究的热点之一。

光子 ADC 中的两项关键技术是光采样脉冲源技术和光串并转换技术。光采样脉冲源大多采用光纤被动锁模激光器,可产生重复频率达兆赫兹量级的采样脉冲,为了达到 GSa/s 量级的采样速率,需要利用复用技术。然而,随着光子 ADC 采样速率的提升,光采样速率和电 ADC 器件量化速率之间的失配问题日益凸显。研究人员开始采用通信中的复用技术,利用光信号的高速度、高精度等特性进行采样的同时,利用光域的解复用器件,在不同的光路上分配采样后的信号,经光电转换后再经过电 ADC 器件量化^[2-4]。2009 年,天津大学王菊等^[5]实现了 8 波长的波时分源并用于光串并转换;2010 年,上海交通大学 Wu 等^[6]则实现了一种用于光采样的 18 波长的波时分光源;2013 年,Uenohara^[7]利用光控光开关实现了串并转换比为 10 的光采样。目前,大部分光子 ADC 系统都需要利用多次复用技术,这无疑增加了系统的复杂度并且降低了系统的稳定性。所以最理想的方案便是直接产生可以匹配电 ADC 量化速率的光窄脉冲,并用一种简单易实现的技术进行光串并转换。

光电振荡器(OEO)是一种高品质的微波源,可以直接产生重复频率达吉赫兹量级的微波信号,结合 OEO 与直调激光器和相位调制器,直接产生与电 ADC 采样速率相匹配的脉冲信号。OEO 系统产生的微波信号具有较低的相位噪声,因此其对应

的光窄脉冲也具有超低的瞬时抖动,如天津大学贾石等^[8]实现了时间抖动为 60.1 fs 的光窄脉冲。对 OEO 产生的光脉冲进行时域傅里叶变换,形成带有线性啁啾的光脉冲信号,即频率随着时间发生线性变换的光脉冲信号,利用此光脉冲进行采样,被采样信号不同时刻的幅度信息被调制到不同中心波长的光脉冲上,并利用可调滤波器将采样信号分到多路,从而实现超高速光采样。天津大学王文睿等^[9]通过时域傅里叶变换采样的方法完成了 40 GSa/s 的高速率光采样。

本文设计了一种基于波长双环路 OEO 的高速率光采样系统。在实验中,利用 OEO 产生了重复频率为 10 GHz 的光脉冲,用此光脉冲对信号进行时域傅里叶变换采样,实现了采样速率为 40 GSa/s 的光采样。

2 基本原理

2.1 基于直调激光器和相位调制器的光窄脉冲产生原理

基于直调激光器与相位调制器的光窄脉冲产生原理如图 1 所示。一般认为微波信号对直调激光器直接调制后,直调激光器输出的光信号近似为高斯形,光脉冲经过一定延时,到达相位调制器后,再次受到频率为 f_m 信号的相位调制,此时,其电场可以表示为^[10]

$$E_{PM}(t) = E_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\Delta T} \right)^2 \right] \exp \{ -i [\omega_0 t + \alpha_1 \cos(2\pi f_m t) + \alpha_2 \cos 2\pi f_m (t + \Delta t)] \}, \quad (1)$$

式中 E_0 为电场幅度, ΔT 为脉冲幅度在 $1/e$ 处的半宽度, ω_0 为光的角频率, f_m 为调制信号频率, α_1 为直调激光器的等效相调指数, α_2 为相位调制指数, Δt 为光脉冲经过的延时时间。

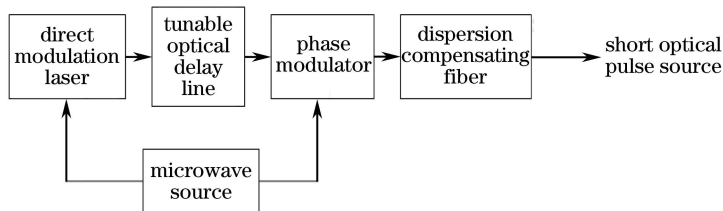


图 1 直调激光器和相位调制器产生光窄脉冲示意图

Fig. 1 Schematic of narrow light pulses produced by a direct tuning laser and a phase modulator

此时,信号的瞬时频率为

$$V_{PM}(t) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \left(\frac{\omega_0}{2\pi} \right) - f_m \alpha_1 \sin(2\pi f_m t) - f_m \alpha_2 \sin 2\pi f_m (t + \Delta t). \quad (2)$$

对瞬时频率求导,可以得到光脉冲的啁啾:

$$\frac{\partial V_{PM}}{\partial t} = -2\pi f_m^2 \{ \alpha_1 \cos(2\pi f_m t) + \alpha_2 \cos [2\pi f_m (t + \Delta t)] \}. \quad (3)$$

从(3)式可知,当 $f_m \Delta t = k$ 、 $f_m t = n$ (k 和 n 为整数)时,光脉冲的啁啾有最大值,即

$$\left(\frac{\partial V_{\text{PM}}}{\partial t} \right)_{\text{max}} = -2\pi f_m^2 (\alpha_1 + \alpha_2). \quad (4)$$

所以通过调节相位调制器和直调激光器之间的光延时线,可以使直调激光器和相位调制器两部分的啁啾增强,并且绝对值趋于最大。同时分析可得,相位调制器的引入增强了直调激光器产生光脉冲的啁啾。以 OEO 结构代替图 1 原理图中的微波源, OEO 结构可以产生超低相位噪声的微波信号,所以其对应的光窄脉冲具有良好的抖动特性。

2.2 时域傅里叶变换采样原理

光子 ADC 的采样速率取决于电量化速率和光串并转换比的乘积。目前的电 ADC 量化技术已经非常成熟,可以做到对吉赫兹量级的采样信号进行高精度的量化,所以串并转换技术成为制约光子 ADC 采样速率提升的关键。采用线性啁啾光信号进行光采样,简化了光串并转换的过程。实现此方案的关键因素是线性啁啾光信号的产生。因此,采用一种简单、低成本的方案解决窄带光脉冲的线性啁啾问题,利用光脉冲在色散介质中实现频-时变换的方法得到线性啁啾光脉冲信号。

窄带光脉冲在色散介质(如光纤)中的冲激响应可以表示为^[11]

$$h(t_R) = h_{\text{time}} \exp\left(-j \frac{1}{2\dot{\Phi}_0} t_R^2\right), \quad (5)$$

式中 $t_R = t - \dot{\Phi}_0$, $h_{\text{time}} = H_0(j\dot{\Phi}_0) \exp(1/\sqrt{j2\pi\dot{\Phi}_0})$, $\Phi_0 = \Phi(\omega_0)$ 为光相位, $\dot{\Phi}_0 = \partial\Phi/\partial\omega$ 为群时延, $\ddot{\Phi}_0 = \partial^2\Phi/\partial\omega^2$ 表示传输介质的一阶色散。

已有研究指出,光脉冲在色散介质中的传输方程类似于旁轴光束在空间传播时在夫琅禾费近似(一种远场近似)条件下的传输方程。旁轴光束在空间中传播时,在夫琅禾费近似条件下,当传输距离 d 足够大时, $z=d$ 平面的旁轴上得到的光场强度是 $z=0$ 平面上光场强度的二维傅里叶变换^[12]。

对光窄脉冲在色散介质中的传输进行分析。基于光脉冲在色散介质中传输与旁轴光束在空间中传播的相似性,可以利用色散元件(如光纤)对光脉冲信号进行频域到时域的傅里叶变换,此时输出表达式为

$$\hat{a}_2(t_R) = h_{\text{time}} \exp\left(j \frac{1}{2\dot{\Phi}_0} t_R^2\right) \cdot [\hat{A}_1(\omega)]_{\omega=t_R/\dot{\Phi}_0}, \quad (6)$$

式中 $\hat{A}_1(\omega) = F[\hat{a}_1(t)]$ 为输入信号 $\hat{a}_1(t)$ 的傅里叶

变换。由(6)式可以看出输出波形信号 $\hat{a}_2(t_R)$ 与输入波形信号 $\hat{a}_1(t)$ 的傅里叶变换成正比,此时色散系数 $\ddot{\Phi}_0$ 足够大,由(6)式可以得出脉冲在色散元件中走离成接近恒幅的线性啁啾脉冲。因此,只要能提供足够大的色散系数,光脉冲就可以走离成带有线性啁啾的恒幅脉冲信号。光采样实验中采用的线性色散元件为长光纤,宽谱窄脉冲的不同频谱分量在长光纤中走离,从而输出所需的带有线性啁啾的光信号。

假设通过长光纤后,光脉冲经时域傅里叶变换变为理想恒幅线性啁啾脉冲,则(5)式中的输出波形解析信号可以写为^[9]

$$A_L(t) = \exp\left[i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)t\right], \quad (7)$$

式中 $t' = t - kT$, k 为整数,且满足 $-T/2 < t' \leq T/2$; ω_0 为光载波的中心频率; $\Delta\omega_L$ 为光载波的谱宽; $\Delta\omega_L/T$ 为光信号通过时域傅里叶变换后的啁啾大小。利用此理想恒幅光脉冲对信号 $a(t)$ 进行采样,则采样后的时域信号为

$$A_S(t) = a(t) \cos\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)t, \quad (8)$$

为了方便后续计算,采样后的信号用解析信号的形式表示为

$$A_S(t) = a(t) \exp\left[i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)t\right]. \quad (9)$$

信号通过一个中心频率为 ω_i , 带宽为 ω_{BPF} , 频率响应函数为 $H(\omega)$ 的滤波器,则输出信号为

$$A_i(t) = \left\{ a(t) \exp\left[i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)t\right] \right\} \otimes h(t), \quad (10)$$

式中 $h(t)$ 为 $H(\omega)$ 的傅里叶逆变换。因为一般光载波频率远高于被采样信号频率,所以(10)式可以近似为

$$A_i(t) = a(t) \cdot \left\{ \exp\left[i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)t\right] \otimes h(t) \right\} = a(t) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)(t - \tau)\right] h(\tau) d\tau = a(t) \exp\left[i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)t\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)\tau\right] h(\tau) d\tau. \quad (11)$$

$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-i\left(\omega_0 + \frac{t'}{T} \Delta\omega_L\right)\tau\right] h(\tau) d\tau$ 为滤波器在频率 $\omega_0 + \Delta\omega_L t'/T$ 处的频率响应函数。经过光电探测器后,信号的包络可以表示为

$$A_i(t) = a(t)H\left(\omega_0 + \frac{t'}{T}\Delta\omega_L\right). \quad (12)$$

从(12)式可以看出,被采样信号 $a(t)$ 在不同时刻的幅度信息被调制到不同中心波长的光脉冲上。 $\Delta\omega_L/T$ 为色散介质展宽后光脉冲的啁啾,(12)式中采样脉冲频率的变化区间为 $[\omega_0 - \Delta\omega_L/2, \omega_0 + \Delta\omega_L/2]$,所以中心频率的变化为 $\Delta\omega_L$,滤波器的通带间隔为 $\Delta\omega_{\text{BPF}}$, $\Delta\omega_L/\Delta\omega_{\text{BPF}}$ 表示此傅里叶变换采样系统的光串并转换比。理论上,当谱宽足够大的光脉冲经过时域傅里叶变换后,成为大线性啁啾光脉冲信号,此时可以实现较大的光串并转换比。目前的技术可以实现十几纳米的宽谱窄脉冲,而 25 GHz 标准的密集波分复用器(DWDM)的带宽为 0.2 nm。因此,时域傅里叶变换采样方案有实现上百光串并转换比的采样系统的潜力。

3 实验结果与分析

基于波长双环路 OEO 光窄脉冲源的光采样实验装置如图 2 所示。装置中有两个激光器,分别为可调激光器(TL)和直调激光器(DML)。直调激光器发出波长为 1550 nm 的连续光,可调激光器发出波长为 1535 nm 的连续光。直调激光器发出的光经过可调光延时线(ODL)和光偏振控制器(PC)后,与可调激光器发出的光经光耦合器(OC)耦合为一路光信号输入相位调制器(PM)中。直调激光器和可调激光器的光经过光偏振控制器是为了使两种激光器的光偏振态与相位调制器的输入偏振轴保持一致。为增大环路增益,使环路增益大于 1,相位调制

器输出的光通过一个掺铒光纤放大器(EDFA)。之后混合光信号被波分复用器 1(WDM1)分为两路光信号,中心波长分别为 1550 nm 和 1535 nm,分别经过长度为 710 m 和 3 km 的单模光纤。710 m 一路为 OEO 双环中的短臂,可以获得较大的 OEO 起振模式间隔。3 km 一路为长臂,可以使 OEO 获得较高品质因子(Q 值)。双环路 OEO 边模抑制的阈值条件是两路光功率相同,所以为了平衡光功率,在经过 3 km 单模光纤的光路中加入一个 EDFA,通过调节 EDFA,可以平衡两路光的光功率。中心波长为 1550 nm 的光载波经耦合器分为两路,一路作为光脉冲信号输出,用于后续光采样,另一路与中心波长为 1535 nm 的光信号经 WDM2 再次耦合,然后进入光电探测器(PD),转化为电微波信号。之后经过微波放大器,微波放大器为整个环路提供环路增益。用一个中心频率为 10 GHz、带宽为 1 MHz 的带通滤波器滤出 10 GHz 的正弦微波起振信号,该信号经过射频功分器 1 分为两路信号。一路作为待采样的 10 GHz 正弦信号输出。另一路经过射频功分器 2 分成两部分,分别被注入直调激光器和相位调制器中,构成反馈回路,完成基于 OEO 的光采样脉冲产生。采样脉冲源产生的光脉冲信号先经过一段 10 km 的长光纤,进行时域傅里叶变换,得到恒幅线性啁啾光脉冲,之后通过光偏振控制器到达马赫-曾德尔调制器(MZM)对信号进行调制。调制光信号经可调带通滤波器(TBPF)滤出 4 种不同中心波长的光信号,可调滤波器的后方与微波示波器(Agilent 86109B)相连接,记录实验结果,完成采样。

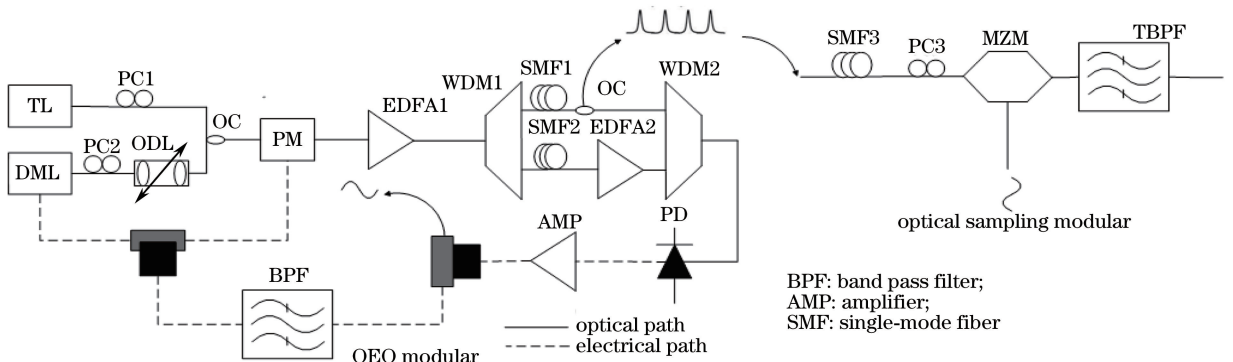


图 2 基于波长双环 OEO 的光采样实验

Fig. 2 Optical sampling experiment based on dual-wavelength OEO

基于波长双环路 OEO 的光窄脉冲源由光脉冲产生部分和 OEO 结构组成。由 OEO 结构产生的 10 GHz 微波正弦信号调制直调激光器,直调激光器产生光脉冲,通过调节光延迟线,使其啁啾达到最大,此时光脉冲的谱宽也达到最大值,相位调制器起

到了增强啁啾的作用。系统产生光脉冲的光谱图由光谱仪 Anritsu MS9710C 测得,当环路中没有接入相位调制器时,产生的光脉冲的半峰全宽为 0.479 nm,中心波长在 1550.832 nm 附近,如图 3(a)所示。环路中接入相位调制器后,产生的光

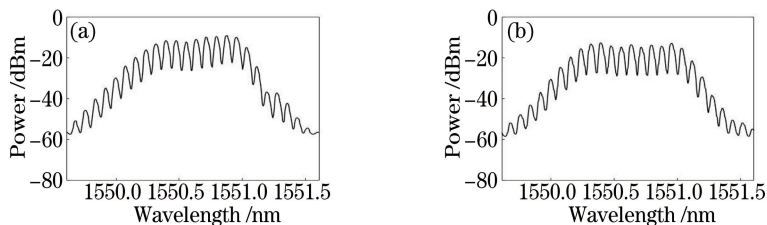


图3 (a)未接入相位调制器时的光脉冲谱宽;(b)接入相位调制器时的光脉冲谱宽

Fig. 3 (a) Pulse width without phase modulator; (b) pulse width with phase modulator

脉冲的半峰全宽增加到 0.821 nm, 中心波长在 1550.799 nm附近, 如图 3(b)所示。可见, 接入相位调制器使光脉冲的啁啾增强, 在光谱中表现为光谱半峰全宽增加了 0.342 nm。

具有超低的时间抖动是光采样突破传统电采样的关键因素, 所以时间抖动是超窄光窄脉冲源(SOPS)最重要的指标之一。通过测量 OEO 系统产生的微波信号的相位噪声, 可以计算对应 SOPS 的时间抖动。相位噪声的测试通过频谱分析仪 Agilent N9030A 完成, 单边带相位噪声功率谱为 $L(f)$, 如图 4 所示。从图中可以看出, 10 kHz 处的相位噪声为 -108.6 dBc/Hz。噪声功率谱 $L(f)$ 的频率偏移为 100 Hz~1 MHz。对 $L(f)$ 进行积分得

到信号的时间抖动, 计算公式为^[13]

$$\sigma_{\text{jitter}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{osc}}} \sqrt{2 \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} L(f) df}, \quad (13)$$

式中 f_{osc} 为 OEO 的振荡频率; f_{min} 为频率偏移下限, 一般为 100 Hz; f_{max} 为频率偏移上限, 一般为 1 MHz。将(13)式与测得的相位噪声数据编入 MATLAB 中进行计算, 可得实验产生的光窄脉冲的时间抖动为 195 fs。

通过示波器得到基于 OEO 系统产生的光脉冲信号的时域波形, 如图 5 所示, 可以看出脉冲宽度为 22 ps。最终得到的光脉冲的线宽为 22 ps, 谱宽为 0.821 nm, 通过频谱仪测得其在 10 kHz 处的相位噪声为 -108.6 dBc/Hz, 经计算时间抖动为 195 fs。

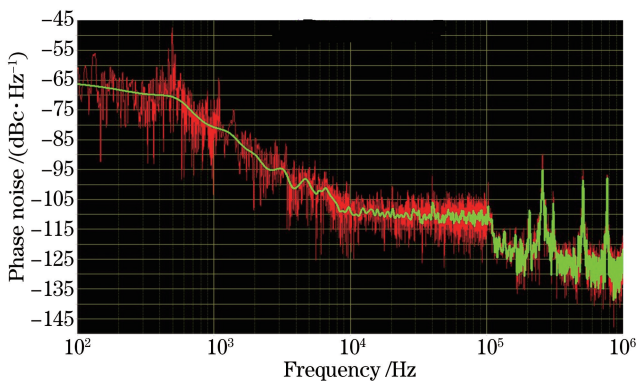


图4 实验产生微波信号的相位噪声

Fig. 4 Phase noise of microwave signals generated in experiments

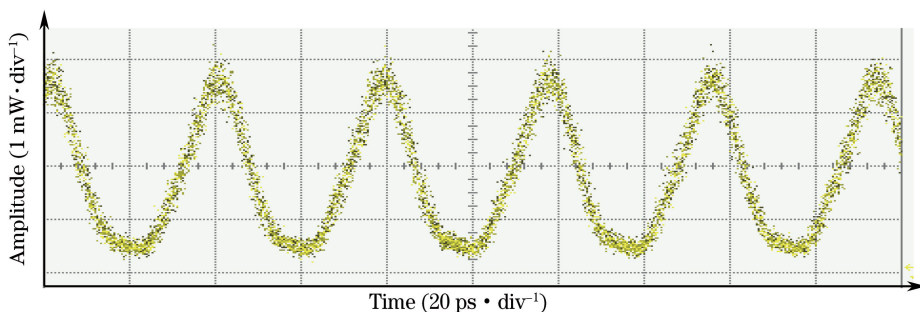


图5 实验产生脉冲的时域波形图

Fig. 5 Time-domain waveform of pulses generated in experiments

OEO 系统产生的光脉冲经过一段 10 km 的长光纤,在光纤中实现时域傅里叶变换,进行展平,形成恒幅线性啁啾光脉冲。利用恒幅线性啁啾光脉冲对信号进行采样,通过可调滤波器 Alnair Labs BVF-200CL,滤出 4 种不同中心波长的采样光信号,所以其串并转换比为 4,而采样光的重复频率为 10 GHz,因此采样率为 40 GSa/s。为了验证光脉冲是否展平,首先需要对直流信号进行采样。因为采样光为线性啁啾光,啁啾光的频率随着时间线性改变,所以被采样信号在不同时刻的幅度信息被调制到不同频率的采样光脉冲上,即中心波长不同的采样光脉冲。连接可调滤波器滤出的 4 种不同中心波长的光的顶点,即可恢复被采样信号。对直流信号进行 5 次采样,每次采样得到 4 组采样数据,对应 4 种不同中心波长的采样光信号。之后对 OEO 系统产生的 10 GHz 正弦微波信号进行 5 次采样,每次采样得到 4 组采样数据。最后,对 2.5 GHz 方波进行 5 次采样,

每次得到 4 组采样数据。在 10 GHz 正弦微波信号与 MZM 之间连入一个四分频器,可得到 2.5 GHz 方波信号。10 GHz 正弦波信号和 2.5 GHz 方波信号的原始信号波形如图 6 所示。直流信号采样结果(滤波器滤出的光信号)如图 7 所示,图中 4 种波形分别对应 4 个中心波长,其光谱如图 8 所示。

图 8(a)~(d)分别为图 7(a)~(d)中采样光信号的光谱图。从图 8 可以看出,图 7(a)~(d)对应的采样光信号的中心波长分别为 1550.4,1550.6,1550.8,1551.0 nm。滤出的 4 种不同中心波长的采样光信号的时域波形可由示波器 Agilent 86109B 观察得到,同时可以通过示波器得到所有采样光信号的数据信息。为了更直观地体现信号的纹波特性和采样结果,先计算得到 4 组数据不同次采样的误差,可得平均误差为 0.01124 mW,所以直流信号的纹波为 0.01124 mW。将采样数据放入 MATLAB 中绘图,可以得到图 9 所示恢复信号。

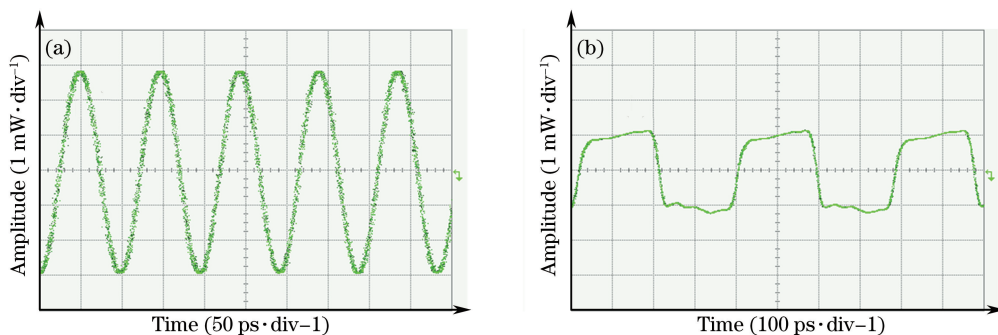


图 6 (a) 10 GHz 正弦波原始波形; (b) 2.5 GHz 方波原始波形

Fig. 6 (a) Original waveform of 10 GHz sine wave; (b) original waveform of 2.5 GHz square wave

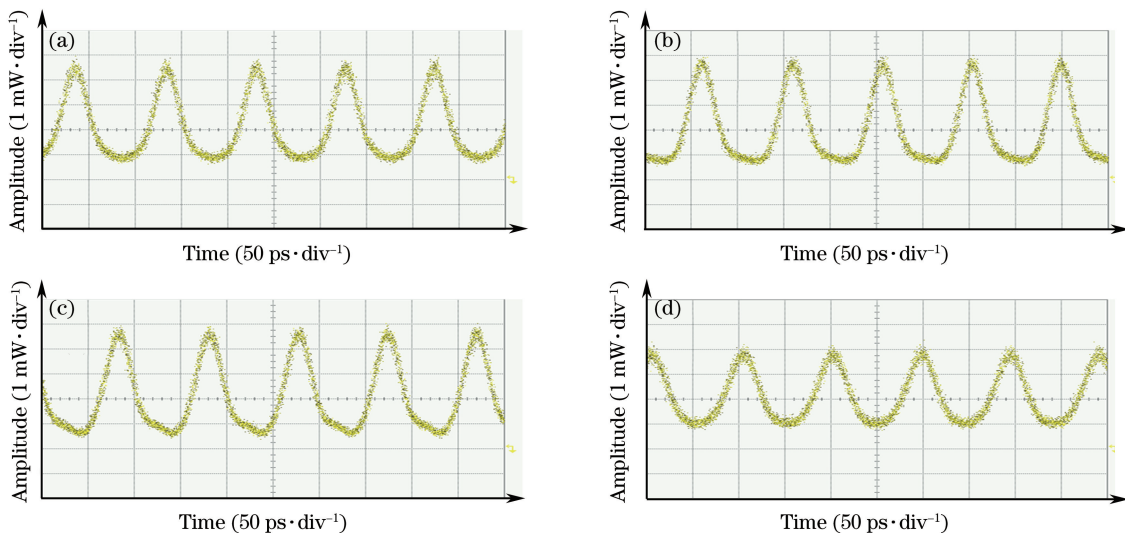


图 7 直流信号采样结果。(a) 1550.4 nm; (b) 1550.6 nm; (c) 1550.8 nm; (d) 1551.0 nm

Fig. 7 Sampling results of DC signals. (a) 1550.4 nm; (b) 1550.6 nm; (c) 1550.8 nm; (d) 1551.0 nm

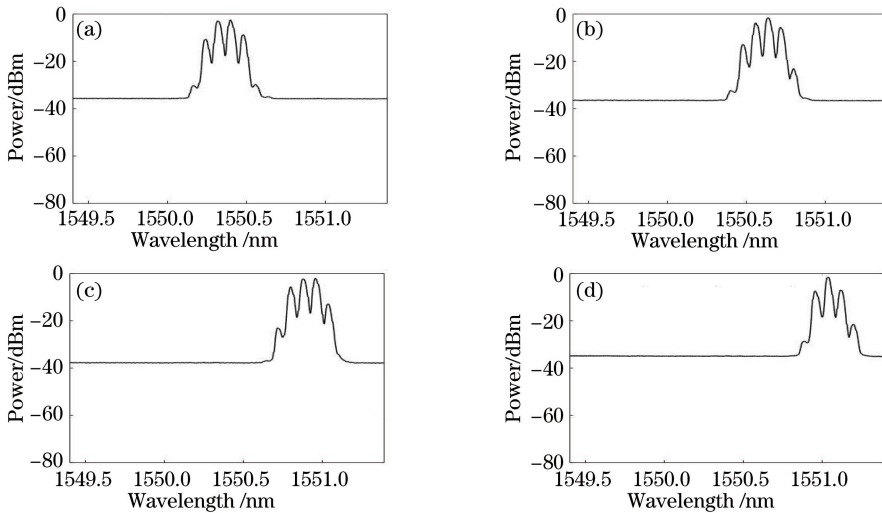


图 8 直流采样结果对应的光谱图。(a) 1550.4 nm;(b) 1550.6 nm;(c) 1550.8 nm;(d) 1551.0 nm

Fig. 8 Spectra corresponding to DC sampling results. (a) 1550.4 nm; (b) 1550.6 nm; (c) 1550.8 nm; (d) 1551.0 nm

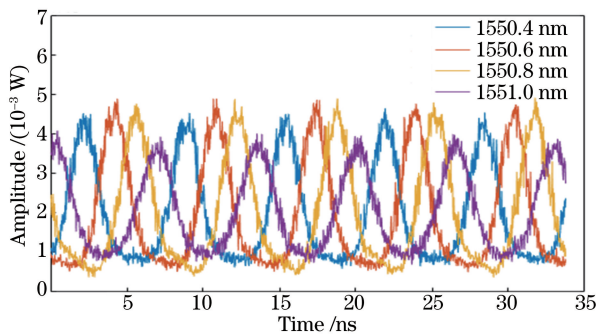


图 9 直流信号采样结果恢复图

Fig. 9 Recovery diagram of DC signal sampling results

由于缺少可调色散模块,实验中只能利用离散的光纤段对窄脉冲源进行展宽,未能实现色散参数的最优化并得到时域恒定幅值的线性啁啾脉冲。从图 9 采样结果可以看出,4 个波长的幅值不完全一致,光脉冲顶点的连线不是一条直线,中心波长 1550.4, 1550.8, 1551.0 nm 的光载波信号幅度小于中心波长 1550.6 nm 的光载波信号的幅度,所以要对这 4 种不同中心波长的光进行修正。由于实验条件限制,无法进一步优化色散参数,因此以直流采样结果作为参照,得到各个波长的修正参数,通过后续数值处理的方式修正不同波长下幅值不一致引入的采样误差。将中心波长 1551.0 nm 的光的采样数据乘以修正因子 1.2,中心波长 1550.4 nm 的光的采样数据乘以修正因子 1.08,中心波长 1550.6 nm 的光的采样数据乘以修正因子 0.92,中心波长 1550.8 nm 的光的采样数据乘以修正因子 1.05,最终修正后的结果如图 10 所示。将各个脉冲的顶点相连,此时最高点的连线是一条近似平稳的直线,以此代替光脉冲的

展平。后续实验中,可以通过严格控制滤出光信号中心波长与直流光保持一致,利用该组修正因子,对采样后恢复的波形进行修正,得到恢复结果。

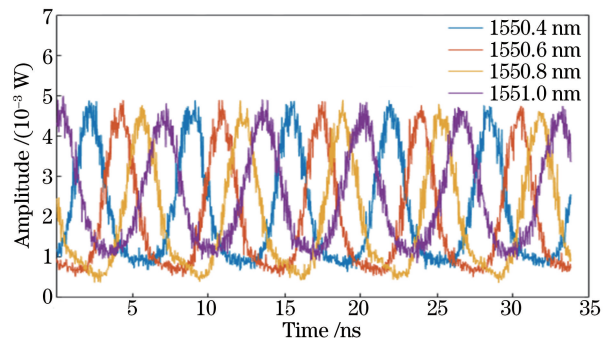


图 10 直流信号采样结果修正图

Fig. 10 Corrected results of DC signal sampling

与直流信号处理方式相同,10 GHz 正弦波和 2.5 GHz 方波还原波形及其通过修正因子修正的波形的顶点连线如图 11 所示。可见,通过修正可以将波形大致还原,证明对 10 GHz 正弦波和 2.5 GHz 方波的采样实验获得成功。所以实验完成了重复频率为 10 GHz 的光窄脉冲的产生和采样速率为 40 GSa/s 的高速率光采样。实验所用 OEO 系统的相位噪声为 -108.6 dBc/Hz,经计算其时间抖动为 195 fs。目前市售主动锁模激光器产生重复频率为 10 GHz 的光脉冲的时间抖动一般为几十至几百飞秒,时间抖动越小,造价越昂贵,但主动锁模激光器需要外在微波源,外在微波源的品质会影响输出光脉冲的时间抖动。而实验产生的光脉冲不需要外在微波源,OEO 系统的相位噪声特性直接决定了光脉冲的时间抖动,所以稳定性高于主动锁模激光器。

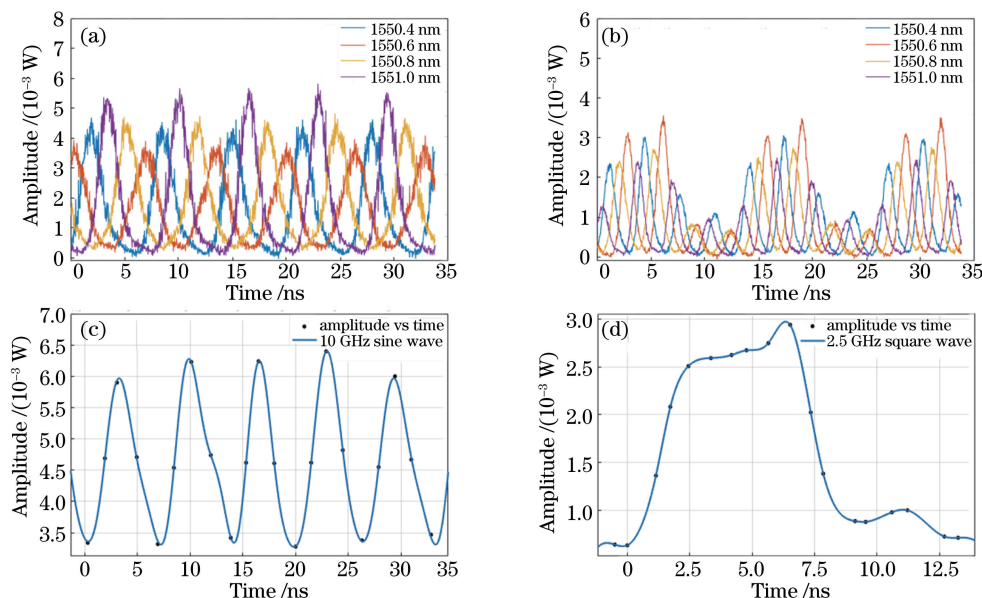


图 11 波形图。(a) 10 GHz 正弦波采样波形恢复图；(b) 2.5 GHz 方波采样波形恢复图；
(c) 10 GHz 正弦波采样波形修正图；(d) 2.5 GHz 方波采样波形修正图

Fig. 11 Waveforms. (a) Waveform recovery diagram of 10 GHz sine wave sampling; (b) waveform recovery diagram of 2.5 GHz square wave sampling; (c) corrected waveform of 10 GHz sine wave sampling; (d) corrected waveform of 2.5 GHz square wave sampling

4 结 论

提出了一种新型的基于波长双环 OEO 的采样方案,分析了该方案的原理,并进行了实验验证和测试。将 OEO 与直调激光器和相位调制器相结合,产生光窄脉冲,利用此光窄脉冲对信号进行时域傅里叶变换采样。实验中通过 OEO 系统直接产生了重复频率为 10 GHz、时间抖动为 195 fs、脉宽为 22 ps 的采样光脉冲,利用此光脉冲完成了串并转换比为 4、采样速率为 40 GSa/s 的实时取样。实验为光采样技术提供了一种新思路,即如果可以产生谱宽足够大的线性啁啾光窄脉冲,利用此线性啁啾光窄脉冲进行采样,通过分离不同中心波长的采样光脉冲,即可完成光串并转换,匹配 ADC 较低的量化速率。因为谱宽足够大,所以可以分离多种不同中心波长的光,实现大的串并转换比,简化了实现大串并转换比的过程,提高了光采样速率。

参 考 文 献

- [1] Ye L, Wu G L, Su F R, *et al.* Amplitude correction method of time-wavelength interleaved photonic analog-to-digital conversion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0505001.
叶雷, 吴龟灵, 苏斐然, 等. 时间波长交织光模数转

换幅度校正方法 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505001.

- [2] Zhang T H, Qiu Q, Su J, *et al.* Optical analog-to-digital conversion technology and its recent progress [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120003.
张天航, 邱琪, 苏君, 等. 光模数转换技术及其研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120003.
- [3] Yariv A, Koumans R G M P. Time interleaved optical sampling for ultra-high speed A/D conversion [J]. Electronics Letters, 1998, 34(21): 2012-2013.
- [4] Huang Y, Fu S N, Liu B, *et al.* Optimization of linear optical sampling analog front-end and test for 128 Gb/s signals [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0206002.
黄炎, 付松年, 刘彬, 等. 线性光采样模拟前端研制与 128 Gb/s 信号测试 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0206002.
- [5] Wang J, Yu J L, Luo J, *et al.* Investigation of 40 Gb/s all-optical serial to parallel conversion to 8-channel 5 Gb/s [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0506001.
王菊, 于晋龙, 罗俊, 等. 40 Gb/s 至 8 路 5 Gb/s 全光串并转换实验研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0506001.

- [6] Wu G, Li S, Li X, *et al.* 18 wavelengths 83.9 Gs/s optical sampling clock for photonic A/D converters [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21162-21168.
- [7] Uenohara H. Investigation of an interleaver for all-optical analog-to-digital conversion [C]. 18th Optoelectronics and Communications Conference Held Jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching, 2013: 13768890.
- [8] Jia S, Yu J L, Wang J, *et al.* Research of optical short pulse source with tunable repetition rate and ultra-low timing jitter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 184201.
贾石, 于晋龙, 王菊, 等. 重复频率可调谐的超低抖动光窄脉冲源的研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 184201.
- [9] Wang W R, Yu J L, Luo J, *et al.* High speed real-time optical sampling system based on optical parametric amplification [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 104220.
王文睿, 于晋龙, 罗俊, 等. 基于光参量放大的高速实时光取样技术 [J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 104220.
- [10] Hu H, Yu J, Zhang L, *et al.* Pulse source based on directly modulated laser and phase modulator [J]. *Optics Express*, 2007, 15(14): 8931-8937.
- [11] Azana J, Muriel M A. Real-time optical spectrum analysis based on the time-space duality in chirped fiber gratings [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 36(5): 517-526.
- [12] Goodman J W, Huggins E. Introduction to Fourier optics, second edition [J]. *Optical Engineering*, 1996, 28(4): 595-599.
- [13] Jiang Y, Yu J L, Hu H, *et al.* Phase-modulator-based optoelectronic oscillator for generating short optical pulse and microwave signal [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(9): 090502.