

切割超连续谱实现实时、高速全光量化

郭亚^{1,2}, 李璞^{1,2,3,4*}, 郭龔强^{1,2}, 郭园园^{1,2}, 郭晓敏^{1,2}, 刘香莲^{1,2}, 刘义铭^{3,4}, 王云才^{1,2}

¹太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

²太原理工大学物理与光电工程学院光电工程研究所, 山西 太原 030024;

³保密通信重点实验室, 四川 成都 610041;

⁴中国电子科技集团公司第三十研究所, 四川 成都 610041

摘要 实验从时域上研究了切割超连续谱实现实时、高速全光量化的方案。利用光滤波器对不同强度的光采样脉冲产生的超连续谱进行光谱分割, 从而实现对光采样脉冲的实时量化。具体来讲, 重复频率为 10 GHz 的光采样脉冲经功率放大后耦合到 400 m 的高非线性光纤中产生超连续谱, 采用 3 个可调谐的光滤波器对其进行不同波长的光谱切割, 实现采样率为 10 GSa/s、量化精度为 2 bit 的实时全光量化, 量化后脉冲时序的消光比可达 10 dB 以上。

关键词 信号处理; 全光模数转换; 光采样; 光量化; 超连续谱

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100701

Real-Time and High-Speed All-Optical Quantization by Slicing Supercontinuum Spectrum

Guo Ya^{1,2}, Li Pu^{1,2,3,4*}, Guo Yanqiang^{1,2},

Guo Yuanyuan^{1,2}, Guo Xiaomin^{1,2}, Liu Xianglian^{1,2}, Liu Yiming^{3,4}, Wang Yuncai^{1,2}

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

³Science and Technology on Communication Security Laboratory, Chengdu, Sichuan 610041, China;

⁴No. 30 Institute of China Electronic Technology Corporation, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract A real-time and high-speed all-optical quantization scheme by slicing supercontinuum spectrum is studied experimentally in time domain. The optical filters are used to slice the supercontinuum spectrum generated by different intensity optical sampling pulses, so as to realize the real-time quantization of the optical sampling pulses. Optical sampling pulses with the repetition rate of 10 GHz are coupled into a 400-m highly nonlinear fiber after power amplification to generate supercontinuum spectrum, which is sliced by three tunable optical filters at different wavelengths. Real-time all-optical quantization with sampling rate of 10 GSa/s and quantization accuracy of 2 bits is realized based on slicing supercontinuum spectrum, and the extinction ratio among the quantized outputs can reach up to more than 10 dB.

Key words signal processing; all-optical analog-to-digital converter; optical sampling; optical quantization; supercontinuum

OCIS codes 070.4560; 320.7140; 070.1170

收稿日期: 2018-03-30; 修回日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61505137, 61775158, 61505136, 61705159, 61731014)、国家密码局“十三五”国家密码发展基金(MMJJ20170127)、山西省自然科学基金(2015021088)、中国博士后科学基金资助项目(2018M630283)

* E-mail: lipu8603@126.com

1 引言

模数转换器(ADC)可将模拟信号转换成数字信号,主要包括采样及量化两个核心环节,在光纤通信、卫星导航、医学成像及电子侦察等领域发挥着至关重要的作用^[1-2]。人工智能、雷达系统、宽带通信等应用都要求ADC的采样速率达到十GSa/s量级以上,且相应的精度要求也越来越高^[3]。

实现模数转换功能主要有两种方法。一种是基于电子技术的ADC,简称电子ADC。受限于“电子瓶颈”,这类ADC难以满足高速信号处理的需要。另一种是基于光子技术的ADC,简称光学ADC。其能克服电子ADC在电-光和光-电转换中采样速率和量化精度不能兼得的难题,基于锁模激光脉冲的高重复频率、超低抖动,其采样率可达100GSa/s甚至更高^[4-5]。然而,需要指出的是,在大多数光学ADC方案中,量化环节仍需利用传统电学量化器实现。

鉴于此,全光量化器受到国际、国内学者的广泛关注。例如,Ho等^[6]利用光纤中的交叉相位调制(XPM)效应实现了对采样脉冲的光量化;Konishi等^[7]提出了一种基于超短光脉冲在光纤中的拉曼自频移(RSFS)效应的光量化方案;Xu等^[8]提出了基于孤子自频移(SSFS)效应和光谱分插滤波的光量化方案;瑞典Stigwall等^[9]提出了一种基于空间干涉的移相光量化方案;日本Osaka大学的Ikeda等^[10]利用非线性光纤Sagnac环来实现光量化的功能。国内上海交通大学^[11]、清华大学^[12-13]、电子科技大学^[14]、北京邮电大学^[15]等科研机构也对全光量化进行了先期研究,笔者所在课题组也理论论证了多种全光量化方案^[16-17]。然而,上述光量化方案中,基于XPM效应的光量化方案需要增加光纤长度和脉冲强度以获得足够的频移量,同时其他的高阶非线性效应也会影响量化效果^[18-19];采用SSFS效应的光量化方案,在孤子产生频移的同时限制了量化精度的进一步提升^[19];应用Sagnac环干涉仪实现多位量化要求每比特输出都分别采用干涉仪进行量化、比较,量化系统较复杂^[19]。

切割超连续谱(SC)实现全光量化的方案可在一定程度上克服上述光量化方案的局限性。该量化方案量化精度主要与滤波器精度和SC脉冲谱宽有关,对系统的复杂性要求不高。2005年,Oda

等^[20-21]首次提出基于切割SC实现全光量化的方案,并根据实验获得超连续谱,离线证明了采样率为25MSa/s光量化的可行性。北京邮电大学Kang等^[22-23]理论论证了基于新型波导材料产生SC的全光量化优化方案。

本文从时域角度实验研究基于切割SC实现全光量化的方案。以重复频率为10GHz的光采样脉冲为光源,将其功率放大后输入到400m的高非线性光纤(HNLF)中产生SC。采用3个可调谐光滤波器对具有宽谱特性的SC进行不同波长的光谱切割、脉冲分离,在时域中实现了采样率为10GSa/s、量化精度为2bit的在线、实时全光量化,且量化后的脉冲时序消光比可达10dB以上。在实验中,量化后输出的脉冲时序和原始采样脉冲时序实现了很好的同步,通过数字示波器可实时在线监测。对量化后的输出时序进行编码,有脉冲输出为“1”,无脉冲输出为“0”,实现了光域内的实时编码。

2 实验装置及量化原理

基于切割SC实现实时、高速全光量化的实验系统如图1所示,该系统主要分为两部分:光采样和光量化。以锁模脉冲激光器(MLL,Pritel,UOC-05-14G-E)输出的锁模光脉冲作为采样光脉冲,微波信号源输出的正弦波信号作为被采样的射频(RF)信号。锁模光脉冲和正弦波信号分别经电光调制器(EOM,Photline,MXAN-LN-10)的“IN”和“RF”端口输入电光调制器。通过控制EOM的偏置电压即可实现采样脉冲信号对正弦RF信号的高质量采样。

将采样脉冲经功率放大后注入到HNLF中传输,其时域和频域演化不仅受自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)和受激拉曼散射(SRS)等诸多非线性效应的影响,还受光纤色散性质的影响。非线性和色散之间的相互作用引起的调制不稳定性效应(MI)^[24-25]会导致光脉冲频谱展宽产生SC。选择合适的滤波中心与滤波带宽对产生的SC进行滤波,同时,滤波输出的SC光脉冲时序经光电探测器(PD,U2T,XPDV2120RA)光电转换后接入数字示波器(OSC,Lecroy,LabMaster10-36Zi)进行实时同步监测。通过滤波后的时序判断入射采样脉冲的光强,实现对采样脉冲的精准量化。

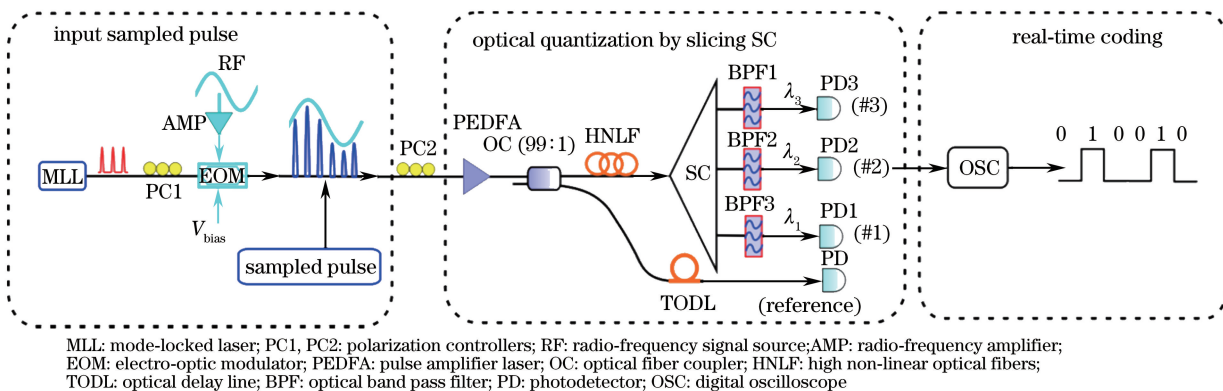


图1 切割 SC 实现实时、高速全光量化实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of real-time and high-speed all-optical quantization by slicing SC

在实验中,为实现 2-bit 精度的量化,选用 3 个光带通滤波器(BPF, Yenista XTM-50)对产生的 SC 进行波长分割。具体来讲,通过不同的滤波输出监测量化后的输出脉冲数目,根据原始采样脉冲数目与量化后输出的脉冲数目关系来判定最后的量化效果。

此外,在实施本量化方案的过程中,将采样脉冲 1% 端口输出的脉冲信号作为 SC 量化的参考信号,通过可调光延时线(TODL)来实现对原始采样脉冲序列与量化后输出脉冲序列的同步,并通过示波器实时监测。

3 实验结果

3.1 光采样脉冲序列

在实验中,MLL 输出重复频率为 10 GHz,半峰全宽(FWHM)为 3 ps,中心波长为 1556.2 nm,时延抖动小于 50 fs,对频率为 500 MHz 的正弦 RF 波进行电光调制采样,结果如图 2 所示。图 2(a)为 MLL 输出的激光脉冲信号的时序;图 2(b)为经电光调制后得到的采样脉冲序列的时序。其中,蓝色虚线对应采样脉冲序列的幅度包络。如图 2(b)所示,光采样脉冲序列的幅度包络与模拟 RF 完全一致,说明本实验方案可以高质量地对正弦信号进行光学采样。

3.2 超连续光谱的产生

超连续光谱指一束强度极大的超短光脉冲通过非线性材料后出射,出射光谱中产生许多新的频率成分,使得光谱宽度远远大于入射光谱宽度,一般可达几百纳米甚至上千纳米^[24-25]。图 3 为不同功率采样脉冲通过 400 m 的 HNLF (非线性系数: $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 零色散波长: 1550 nm) 传输后产生的 SC。随着采样脉冲峰值功率的增加,产生的 SC 也会得到不同程度的展宽。频谱展宽因子的表达式为

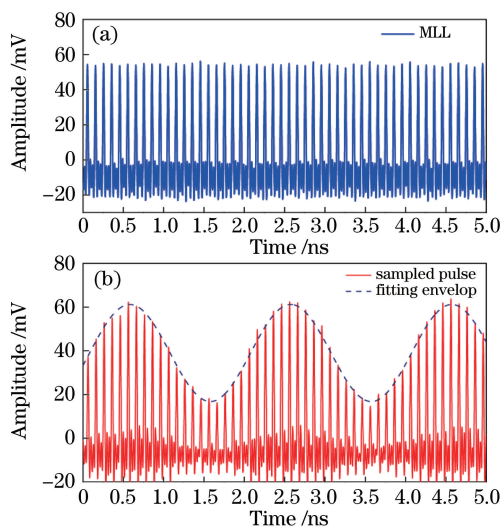


图2 正弦波实时光采样结果。

(a) 锁模激光脉冲时序; (b) 光采样脉冲时序

Fig. 2 Real-time optical sampling results of the sinusoidal wave. (a) Temporal waveform of the mode-locked laser pulses; (b) temporal waveform of the optical sampling pulses

$$\phi_{\max} = \gamma P_0 L_{\text{eff}}, \quad (1)$$

式中: γ 为光纤的非线性系数; P_0 为脉冲的峰值功率; L_{eff} 为光纤的有效长度。因此, SC 光谱宽度取决于输入到 HNLF 中的采样脉冲峰值功率,从而决定了波分器件可利用的输出通道数目。

利用光谱分析仪(AQ6370C, YOKOGAWA, OSA)获得超连续光谱,如图 3 所示,随着采样脉冲峰值功率的增加,产生的 SC 不断地展宽:当抽运脉冲的平均功率小于 50 mW 时,光谱展宽较小;当抽运脉冲的平均功率大于 50 mW 时,产生的 SC 会发生明显展宽。在本量化实验中,输入 400 m 的 HNLF 之前的采样脉冲峰值功率为 1.7 W (对应平均功率为 50 mW)。

后,只有每个正弦周期内的 10 个高幅值采样脉冲时序可通过 BPF_2 的滤波通道(即为原始采样脉冲总数的 $2/4$,如图 6(b)中的“quantized outputs”所示)。类似地, BPF_1 滤波后的时序结果如图 6(c)所示,恰有原始采样脉冲数的 $3/4$ (15 个脉冲)能通过 BPF_1 的滤波通道; BPF_3 滤波后的时序结果如图 6(a)所示,恰有原始采样脉冲数的 $1/4$ (5 个脉冲)能通过 BPF_3 的滤波通道。

4 结 论

受限于实验室现有的滤波条件,本实验仅实现了 2-bit 的量化精度。但是,从本量化方案的原理可以看出,产生的 SC 光谱越宽、滤波器件的调谐范围越大,则能实现的量化位数越高。区别于以往的频域离线分析方案,本文提出的实时在线编码方案有以下不同。1) 量化方法不同。Oda 等^[20-21]的量化方案是对光谱功率的量化,本文是对采样脉冲幅值的量化;2) 量化过程及效果不同。Oda 等^[20-21]的量化方案是针对光谱功率采集的离线后处理,本文是对采样脉冲幅值的实时在线分析;3) 量化速率也获得进一步提升。

由图 3 所示的 SC 光谱可知,当采样脉冲序列进入 HNLF 前的平均功率为 190 mW(对应的峰值功率为 6.3 W)时,产生的 SC 光谱宽度已达 150 nm(1470~1620 nm,20 dB 带宽)。实验中,以 3 个可调谐光滤波器作为量化阈值判决器,对产生的 SC 进行不同波长分割、脉冲分离,无需电信号处理的引入即可实现采样率达 10 Sa/s、量化精度为 2-bit 的全量化,且量化后的脉冲时序消光比可达 10 dB 以上。该方法可直接根据量化后输出脉冲的有、无,编码为“1”、“0”,无需额外的阈值判决器和编码器即可完成实时量化、编码。需要指出的是,注意到皮秒光采样脉冲抽运 HNLF 产生的 SC 光谱宽度可达几百纳米,因此,若采用更高性能的滤波器件,本方案有望实现量化精度的进一步提高。

参 考 文 献

[1] Maruta A, Oda S I. Optical signal processing based on all-optical analog-to-digital conversion[J]. *Optics and Photonics News*, 2008, 19(4): 30-35.
 [2] Walden R H. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(4): 539-550.
 [3] Nishitani T, Konishi T, Itoh K. Optical coding scheme using optical interconnection for high

sampling rate and high resolution photonic analog-to-digital conversion [J]. *Optics Express*, 2007, 15 (24): 15812-15817.

- [4] Ng W, Stephens R, Persechini D, *et al.* Ultra-low jitter modelocking of Er-fibre laser at 10 GHz and its application in photonic sampling for analogue-to-digital conversion[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37 (2): 113-115.
 [5] Bhushan A S, Coppinger F, Jalali B, *et al.* 150 Gsample/s wavelength division sampler with time-stretched output[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(5): 474-475.
 [6] Ho P P, Wang Q Z, Chen J, *et al.* Ultrafast optical pulse digitization with unary spectrally encoded cross-phase modulation [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (15): 3425-3429.
 [7] Konishi T, Tanimura K, Asano K, *et al.* All-optical analog-to-digital converter by use of self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19 (11): 2817-2823.
 [8] Xu C, Liu X. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 986-988.
 [9] Stigwall J, Galt S. Interferometric analog-to-digital conversion scheme [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(2): 468-470.
 [10] Ikeda K, Abdul J, Namiki S, *et al.* Optical quantizing and coding for ultrafast A/D conversion using nonlinear fiber-optic switches based on Sagnac interferometer [J]. *Optics Express*, 2005, 13(11): 4296-4302.
 [11] Shen R G, Li B Z, Ruan L Z, *et al.* Integrated optic Mach-Zehnder analog-to-digital converter [J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, 12(7): 652-656.
 沈荣桂, 李宝贞, 阮丽真, 等. 集成光学 Mach-Zehnder 型模数转换器 [J]. *光学学报*, 1992, 12(7): 652-656.
 [12] Wang Y, Zhang H M, Wu Q W, *et al.* Improvement of photonic ADC based on phase-shifted optical quantization by using additional modulators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24 (7): 566-568.
 [13] Wu Q W, Zhang H M, Peng Y, *et al.* 40 GS/s Optical analog-to-digital conversion system and its improvement [J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9252-9257.

- [14] Zhang Z Y, Li H P, Zhang S J, *et al.* Analog-to-digital converters using photonic technology [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(22): 2666-2671.
- [15] Kang Z, Yuan J H, Zhang X T, *et al.* On-chip integratable all-optical quantizer using strong cross-phase modulation in a silicon-organic hybrid slot waveguide[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19528.
- [16] Li P, Yi X G, Liu X L, *et al.* All-optical analog comparator[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 31903.
- [17] Li P, Sang L X, Zhao D L, *et al.* All-optical comparator with a step-like transfer function [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(23): 5034-5040.
- [18] Wu X L, Li H P, Liao J K, *et al.* Analysis of quantization techniques in all-optical analog-to-digital conversion[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1034-1039.
吴显理, 李和平, 廖进昆, 等. 全光模数转换中的量化技术分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1034-1039.
- [19] 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.
- [20] Oda S, Maruta A. A novel quantization scheme by slicing supercontinuum spectrum for all-optical analog-to-digital conversion [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(2): 465-467.
- [21] Oda S, Maruta A. Two-bit all-optical analog-to-digital conversion by filtering broadened and split spectrum induced by soliton effect or self-phase modulation in fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(2): 307-314.
- [22] Kang S, Yuan J H, Kang Z, *et al.* All-optical quantization scheme by slicing the supercontinuum in a chalcogenide horizontal slot waveguide[J]. Journal of Optics, 2015, 17(8): 085502.
- [23] Zhang Y L, Mei C, Zhang X T, *et al.* All-optical quantization by slicing supercontinuum in a $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ rib waveguide[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10019: 100191A.
- [24] Liu C. Optical fiber based long-pulse pumped supercontinuum laser source and its stability research [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 12-45.
刘楚. 长脉冲泵浦光纤超连续谱光源及其稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 12-45.
- [25] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. Jia D F, Ge C F, Wang Z Y, *et al.*, Transl. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 388-394.
阿戈沃. 非线性光纤光学[M]. 贾东方, 葛春风, 王肇颖, 等, 译. 5版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 388-394.