

全光模数转换中的量化技术分析

吴显理, 李和平, 廖进昆, 唐雄贵, 刘永智
(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要:全光模数转换在高速光信息处理领域具有重要的应用, 量化是模数转换中的关键技术。文章综述了全光模数转换中量化技术的发展情况, 重点讨论了基于光纤非线性效应的全光量化原理、系统结构、性能特点及在实际应用中需要考虑的因素。

关键词:全光模数转换; 量化; 非线性效应; 孤子效应

中图分类号: TN911 文献标识码: A

Analysis of quantization techniques in all-optical analog-to-digital conversion

WU Xian-li, LI He-ping, LIAO Jin-kun, TANG Xiong-gui, LIU Yong-zhi

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: All-optical analog-to-digital conversion has been found wide applications in high-speed optical signal processing. Optical quantization is a key step in all-optical analog-to-digital conversion. In this paper, the advances of the optical quantization methods are summarized. The novel optical-quantization schemes based on different nonlinear effects in optical fiber are presented. A comparison of these quantization techniques is given.

Key words: all-optical analog-to-digital conversion; quantization; nonlinear optics; soliton effect

1 引言

数字化技术得到迅速的发展与推广, 几乎所有信息领域(包括通信、传感、信息存储与显示等)都向数字化方向发展。从电子学发展起来的二进制技术是数字技术的核心, 对于光信息领域也同样重要。通常, 自然界的信号是以连续形式存在的(即模拟信号), 为便于信号的存储、处理和传输, 须将模拟信号转换成数字信号, 其核心器件是以二进制技术为基础的模数转换器(Analog-to-digital converter, ADC), 它是将模拟世界同数字世界联系起来不可替代的桥梁和纽带。ADC的采样速率与转换精度(有效位数)是衡量ADC性能的重要技术指标, 其中量化技术是决定转换精度的关键。电子ADC的巨大进步得益于微电子技术的发展, 但由于其内部载流子迁移速率及导线尺度的限制而使ADC性能难以进一步提高。虽有25 GS/s(Giga-samples-per-second)、3bits电子ADC的报道^[1], 但受采样孔径抖动和

判决器不确定性的限制, 很难达到几十GS/s的采样速率并保证高的有效位数^[2-3], 难以满足高速信号处理的需要。锁模激光器的时间稳定性非常好, 将光学方法引入到ADC中能克服电子瓶颈, 1975年Taylor首次提出使用Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪阵列对电信号进行光学量化^[4-5]。随着全光通信网络的发展, 要求光信号全部在光域进行处理, 减少光-电-光转换, 由此便催生了全光ADC技术的发展, 将模拟的光信号转化为数字信号进行高速光学处理。由于ADC的有效位数 N 与量化阶数 M 的关系为 $N = \log_2 M$, 即要增加有效位数必须增加量化阶数, 同时尽可能减小量化误差和量化噪声, 量化作为ADC最重要的一环, 其技术受到特别关注, 本文主要对近

基金项目: “863”计划项目(No. 2007AA01Z269)资助。

作者简介: 吴显理(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤中的非线性效应及其应用研究。E-mail: xianliw@uestc.edu.cn

收稿日期: 2009-04-15

年来报道的利用孤子自频移、超连续谱产生、高阶孤子分裂、自相位调制、交叉相位调制等光纤中的非线性效应进行全光量化的技术进行概述和分析。

2 量化方法及分析

2.1 基于 M-Z 干涉仪阵列的光量化

由于集成电子学和集成光学在发展程度上的差异,人们首先不可能完全脱离电子 ADC 的范畴,而是通过两者间的相互作用将频率极高的光子技术引入到电子学领域中。Taylor^[5] 利用 4 个 M-Z 干涉仪电极长度的差异来改变光通过调制器后光强的变化,如图 1 所示,干涉仪电极长度以 2 倍递增,从而

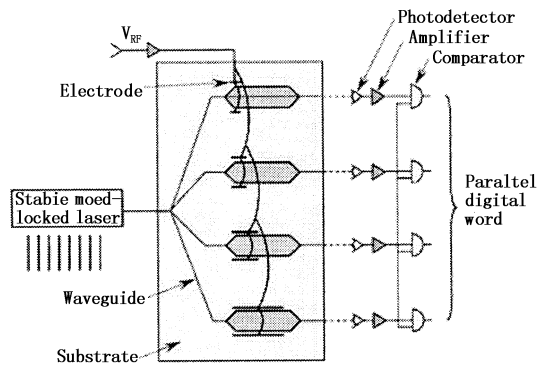


图 1 Taylor 提出的多干涉仪电光 ADC 结构,干涉仪的电极长度以 2 倍递增

这些系统中每一有效位均需要一组量化器和比较器,结构复杂,成本较高,虽然有报道只使用一个 M-Z 干涉仪进行量化的结构^[10],但只要使用 M-Z 干涉仪结构就需要施加外部调制电压,而在现有的波导制备技术下很难将其半波电压 V_{π} 降到很低,这样限制了有效位数的进一步提高,因此应用这类方法进行模数转换称之为电光 ADC,而非全光 ADC。由于电子集成化程度已经很高,光电集成技术、波导技术也正得到快速的发展^[11],在材料和结构方面都有很多新的成果,因此这种量化方法有其优势,仍然得到很大的关注。

2.2 基于光纤非线性效应的全光量化

全光采样技术及超短脉冲激光器的出现,人们开始寻求在光域内直接对脉冲光信号进行量化。要

使输出光强随外部调制电压变化的周期以 2 倍递减,输出端用比较器进行判决产生格雷码。在这一思想提出之后,很多学者对此结构进行了探索,Takizawa 实现了将 60 V 峰-峰值、频率为 11 MHz 的模拟信号转换成 3 bits 格雷码^[6];Becker 实现了 1 GS/s 采样速率时 4 bits 的量化精度,同时对这种结构的局限性进行了详细的分析^[7];M. Currie 利用相位调制和光的偏振效应实现了模数转换^[8];Hao Chi 的系统中使用的 M-Z 干涉仪阵列中电极长度全部相同^[9],通过施加不同的直流偏置来改变转移函数,实现了 4 位有效位数的量化。

将不同幅值的光脉冲信号直接用无源器件进行识别,一种有效的方法就是把脉冲幅值的不同转化为频率(波长)的差别,然后利用光滤波器等器件对波长不同的信号进行区分,再经过判决器将模拟信号变成离散的数字信号。随着高重复频率锁模光纤激光器的发展,采样速率已经能够超过 100 GS/s,要实现高速采样信号的模数转换,必须尽可能提高量化和编码阶段的处理速度。随着光纤非线性效应研究的深入,已将响应时间仅为飞秒量级的非线性 Kerr 效应及拉曼效应等应用到全光量化中。

2.2.1 交叉相位调制

1997 年 P. P. Ho 等人利用光纤中的交叉相位调制(XPM)效应实现了 5 GS/s 采样速率时 4 bits 的量化精度^[12]。原理如图 2 所示,频率为 ω_1 的采样

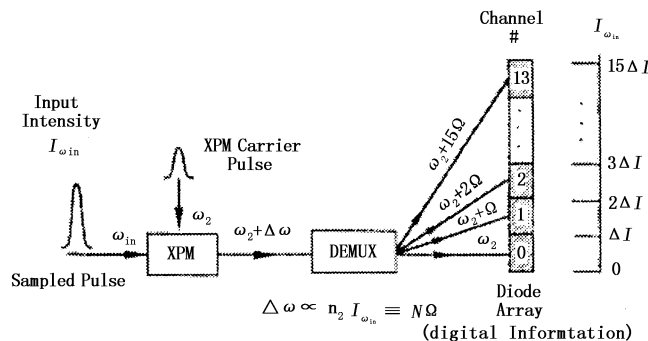


图 2 P. P. Ho 的模数转换结构示意图

脉冲作为信号波,频率为 ω_2 的脉冲作为探测波,通过在一段非线性光纤中的相互作用,不同强度的信号脉冲使探测波产生不同的相移,该相移量与信号脉冲的强度相关,将导致探测波瞬时频率变化,实现了由光强度变化到频率变化的转移,探测波频率变化量为:

$$\Delta\omega_2(\text{XPM}) \sim 2Z\omega_2 n_2(\omega_1) [E_1(t)]^2 / C \quad (1)$$

其中, $E_1(t)$ 为信号光的幅值; z 为脉冲间相互作用长度; $n_2(\omega_2)$ 为光纤非线性折射率。

2005年 Ikeda^[13]等人应用 Sagnac 干涉仪输出/输入比值与顺、逆时针两列波相位差的正弦型周期关系,不同强度的输入脉冲使探测波产生不同的相移量,从而转移函数具有不同的周期,通过适当选取每个干涉仪中非线性光纤的长度和非线性系数,实现了 10 GS/s 采样速率时 3bits 的量化精度,但每比特输出都分别需要干涉仪进行量化和比较,系统显得非常复杂; Jeonga^[14]同样利用光纤中的 XPM 效应实现了 3 bits 精度,两者都采用了 Sagnac 干涉仪作为量化主体代替了 M-Z 干涉仪,与 Taylor 提出的量化方案比较,不需外加调制电压而是用一束光控制另一束光。

为了提高量化精度,使探测波产生足够大的频率变化量,必须增加在光纤中的作用长度和脉冲强度,但随着这些量增加到一定程度,其他的高阶非线性

效应将起显著作用,导致量化方法的失效。值得指出的是,由于产生 XPM 效应的两列波之间波长存在差异,将受到脉冲“走离”的影响,这将限制产生 XPM 效应的光纤有效长度的增加。

2.2.2 孤子自频移

2002年, Konishi 等人提出利用光纤中拉曼自频移效应实现量化的方案^[15],原理如图3所示,基于孤子自频移(SSFS)理论^[16],由于采样后的孤子短脉冲频谱很宽,波长间隔在拉曼增益范围之内,通过一段高非线性光纤时,受脉冲内的拉曼散射作用,孤子的高频分量对低频分量进行泵浦,从而不断的将能量转移给低频分量,最后导致脉冲中心波长红移即向长波长侧移动,频率变化方程如下:

$$\frac{d\kappa}{dz} = \frac{8}{15}\sigma_R\eta^4 \quad (2)$$

式中, κ 为脉冲中心频率; z 为光纤长度; σ_R 为拉曼效应系数; η 为输入脉冲幅度。式(2)表明频率变化量与输入脉冲幅度 4 次方成正比,因此可以利用脉冲通过高非线性光纤后,不同幅值的脉冲波长移动量不同来实现脉冲的量化,将频移后的脉冲串输入 AWG 中使不同波长的脉冲分离,再进行编码。Konishi 采用脉宽、重复频率、最大平均功率和中心波长分别为 300 fs, 50 MHz, 5 mW, 1560nm 的光脉冲经过 50 m 色散位移光纤后实现了 3 bits 的量化精度。

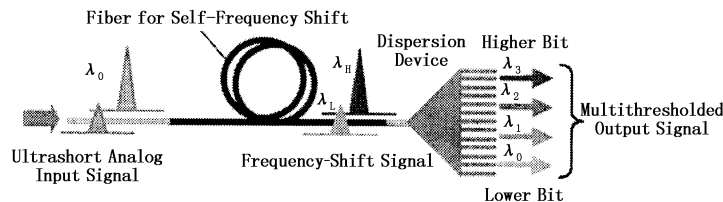


图3 孤子自频移全光量化示意图

2003年, Chris Xu 等人也提出了类似的量化方法,结合梳状光滤波器实现了二进制码数字信号输出^[17]。为了提高量化阶数, Xu 提出用色散渐减光纤(DDF)对输入脉冲进行压缩以增大频移量,同时用色散渐增光纤(DIF)对自频移后的脉冲光谱进行压缩以减小相邻脉冲频谱的交叠,提高判决的准确度。近来, Nishitani 等人在 Konishi 的研究基础上通过对量化系统进行优化^[18],采用脉宽、中心波长和最大峰值功率分别为 530 fs, 1558 nm 和 33.5 W 的脉冲,用高非线性光纤(非线性系数 $\gamma = 16\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)作为孤子自频移介质,并且利用啁啾脉冲的自相位调制(SPM)效应进行谱宽压缩实现了 4 bits 的量化

精度。在 Nishitani 的实验中光脉冲经自频移量化后采用光交叉互连进行编码,其编码方案在文献[18]~[20]中均有较详细的阐述。

与利用 XPM 的量化方法比较,孤子自频移过程中只有采样后的信号光脉冲本身,避免了量化中因波长不同而产生的“走离”现象。利用孤子自频移能达到的量化阶数与频移量的关系如下^[18]:

$$N = \frac{\lambda_{\text{shift}} + \Delta\lambda_{\text{FWHM}}}{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}} \quad (3)$$

其中, λ_{shift} 和 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 分别为中心波长的最大移动量和经 SSFS 后脉冲谱宽,同时由式(2)可知中心波长(频率)移动量与脉冲幅度及拉曼效应系数的关系,

因此,通过提高输入脉冲强度、选择具有大拉曼效应系数的光纤来增大频移量,并压缩 SSFS 后的谱宽,可以增加量化阶数。经自频移后,由于群速度色散(GVD)的影响,波长不同的脉冲串在光纤传输时传播速度不同,到达判决系统存在时延现象,因此必须通过适当的色散补偿使脉冲同步,防止误判的发生。

2.2.3 高阶孤子分裂

2004 年,Sho-ichiro Oda 等提出了另一种基于孤子效应实现全光量化的方法^[21],系统原理如图 4 所示。首先采样光脉冲通过四波混频(FWM)效应对模拟光信号进行采样,采样后不同强度的脉冲在反

常色散光纤中传输时形成不同阶数的孤子,孤子阶数是脉冲强度的阶梯函数,然后使高阶孤子与对连续波(CW)采样后的脉冲碰撞而分裂成基孤子,通过判定基孤子的个数来区分脉冲强度的大小,从而达到量化的目的。高阶孤子在传输中具有周期性,每个周期内脉冲都经历一次变窄和分裂再回到初始状态的过程,同时高阶孤子分裂成基孤子是通过与连续波的采样脉冲进行非线性相互作用产生的,因此整个过程必须对光纤长度进行精确的选择。产生高阶孤子需要很高的脉冲能量,该方法能达到的量化阶数受到限制。

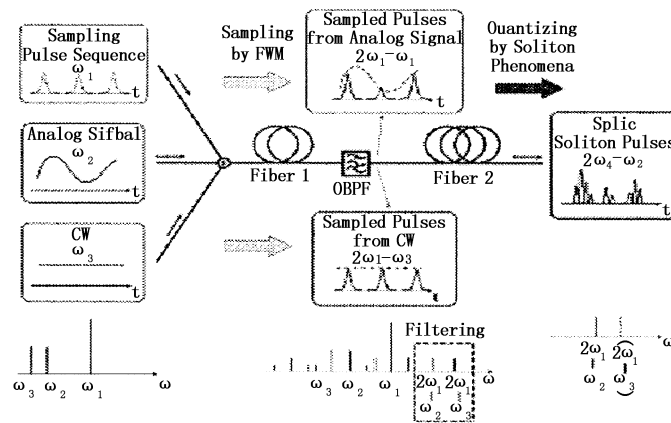


图4 FWM 采样和高阶孤子现象量化示意图

2.2.4 超连续谱

2005 年,Oda 等人提出一种利用切割超连续谱进行全光量化的方案,实现了 2bits 的精度^[22-23],原理如图 5 所示。输入脉冲的重复频率、脉宽、中心波长分别为 25 MHz, 530 fs, 1560 nm, 峰值功率在 0.5 ~ 30 W 之间,经过滤波和放大后通过一段色散平坦光纤(DFP),由于非线性效应的作用而产生超连续谱,其超连续谱的谱宽依赖于输入脉冲的峰值功率,然后使用阵列波导光栅(AWG)将超连续谱进行切割成不同的波长的信号并对每个波长通道进行

探测,根据探测到的波长数目来判定输入脉冲的强度,从而实现量化功能。

Oda 指出通过适当选择 AWG 的中心波长及通道间隔可以使系统获得最大的量化阶数,而使用低色散、高非线性的 DFP 可以降低对高重复频率信号平均功率的要求。目前已有报道,利用色散平坦型光子晶体光纤在 1550 nm 波段能产生谱宽达 1000 nm 的超连续谱^[24]。通过优化光子晶体光纤的结构参数,有望进一步提高超连续谱的宽度,因此,这种量化方案具有相当大的实用价值和前景。

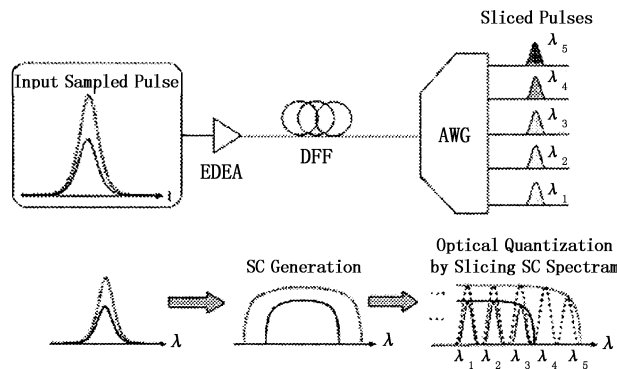


图5 Oda 用切割脉冲产生的超连续谱方法量化示意图

2.2.5 自相位调制

Goto 等人最近提出了一种利用自相位调制 (SPM) 实现光脉冲的量化方法^[25], 首先将信号光脉冲整形转换成超高斯脉冲, 然后通过一段高非线性光纤, 由于超高斯脉冲顶部的宽平坦性, 在传输过程中 SPM 效应将不会引起脉冲中央部位的频率啁啾, 脉冲强度变化几乎不影响峰值功率而只改变频谱的平坦宽度, 因此根据频谱的平坦宽度即可进行强度量化。Oda 也报道了利用自相位调制效应实现 2 bits 的量化精度^[26], 与 Goto 提出的方法不同在于不需要将孤子脉冲整形形成超高斯脉冲。

2.3 其他全光量化方法

Binglin Miao 等人利用光子晶体实现了 4 阶量化阶度^[27]。光在光子晶体中传输时, 沿传播方向分别在光子晶体的三个不同位置引入缺陷, 该缺陷的作用类似于光分束器, 每个位置的反射比不相同, 通过反射光与阈值强度比较判为 1 或 0 而得到四种不同的状态, 从而实现量化。Sakata 等人提出了采用 F-P 腔结构的量化方案^[28], 在输出端镜面设定透过阈值作为判决器, 反射光信号在腔内循环后再次经过输出镜, 以透射次数判定脉冲的强度, 实现了对输入脉冲的量化。但这两种方案实现的量化阶数都是非常有限的。

以上分析表明, 光纤中非线性效应的超快响应使其在全光 ADC 应用中具有特别的优势, 能够满足高速信号处理的要求, 并且量化过程完全在光域内进行。为了达到更高的量化精度, 必须合理控制输入脉冲串的功率和脉冲宽度, 并选择适当的非线性光纤参数, 使光脉冲串在传输过程中按预期产生足够强的非线性效应, 才能发挥这类方法的优势。

3 小 结

利用 M-Z 干涉仪阵列结构进行模数转换的量化, 是 ADC 发展的一个新的突破, 为电信号转换为光信号进行高速处理提供了纽带, 至今仍得到积极的探索, 在结构和性能指标上都有很大进步。全光 ADC 的发展为高速光信号处理提供了关键支持, 利用光纤中的非线性效应实现了全光量化, 具有良好的发展前景和应用价值。随着光学技术的不断进步, 相信还会有新的全光量化方法出现, 以实现超高速、高性能的全光 ADC。

参考文献:

[1] H Nosaka, M Nakamura, K Sano, et al. A 24-Gsps 3-bit

Nyquist ADC using HBTs for DSP-based electronic dispersion compensation [J]. IEICE Trans. Electron., 2005, 88(6):1225-1232.

- [2] Robert H Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 1999, 17(4):539-550.
- [3] G C Valley. Photonic analog-to-digital converters [J]. Optics Express, 2007, 15(5):1955-1982.
- [4] H F Taylor. An electro-optic analog-to-digital converter [J]. Proc. IEEE, 1975, 63:1524-1525.
- [5] H F Taylor. An optical analog-to-digital converter-design and analysis [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1979, 15(4):210-216.
- [6] K Takizawa, M Okada. Analog-to-digital converter: a new type using an electrooptic light modulator [J]. Applied Optics, 1979, 18(18):3148-3151.
- [7] R A Becker, C E Woodward, F J Leonberger, et al. Wide-band electro-optic guided-wave analog-to-digital converters [J]. Proc. IEEE, 1984, 72:802-819.
- [8] Currie M, Clark T R, Matthews P J. Photonic analog-to-digital conversion by distributed phase modulation [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2000, 12(12):1689-1691.
- [9] Hao Chi, Jianping Yao. A photonic analog-to-digital conversion scheme using Mach-Zehnder modulators with identical half-wave voltages [J]. Optics Express, 2008, 16(2):567-572.
- [10] Chris Sarantos, Nadir Dagli. A photonic analog-to-digital converter based on an unbalanced Mach-Zehnder quantizer microwave photonics, microwave photonics [C]. 2007 IEEE International Topical Meeting on, 2007:58-61.
- [11] Amnon Yariv. The beginnings of optoelectronic integrated circuits-A personal perspective [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(9):1172-1175.
- [12] P P Ho, Q Z Wang, J Chen, et al. Alfano, ultrafast optical pulse digitization with unary spectrally encoded cross-phase modulation [J]. Appl. Opt., 1997, 36(5):3425-3429.
- [13] K Ikeda, J M Abdul, H Tobioka, et al. Design consideration so fall-optical A/D conversion: Non-linear ber-optic Sagnac-loop interferometer-based optical quantizing and coding [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(7):2618-2628.
- [14] J M Jeonga, M E Marhica. All-optical analog-to-digital and digital-to-analog conversion implemented by a nonlinear fiber interferometer [J]. Optics Communications, 1992, 91(1-2):115-122.

- [15] T Konishi, K Tanimura, K Asano. All-optical analog-to-digital converter by use of self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, 19(11): 2817 – 2823.
- [16] J P Gordon. Theory of the soliton self-frequency shift [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(10): 662 – 664.
- [17] Chris Xu, Xiang Liu. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 986 – 988.
- [18] Takashi Nishitani, Tsuyoshi Konishi, Kazuyoshi Itoh. Resolution improvement of all-optical analog-to-digital conversion employing self-frequency shift and self-phase-modulation-induced spectral compression [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, 34(3): 724 – 732.
- [19] T Nishitani, T Konishi, K Itoh. Optical coding scheme using optical inter-connection for high sampling rate and high resolution photonic analog-to-digital conversion [J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 15812 – 15817.
- [20] T Nishitani, T Konishi, K Itoh. All-optical M-ary ASK signal demultiplexer based on a photonic analog-to-digital conversion [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17025 – 17031.
- [21] S I Oda, A Maruta, K I Kitayama. All-optical quantization scheme based on fiber nonlinearity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(2): 587 – 589.
- [22] S I Oda, A Maruta. A novel quantization scheme by slicing super-continuum spectrum for all-optical analog-to-digital conversion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(2): 165 – 167.
- [23] S I Oda, A Maruta. 2-bit all-optical analog-to-digital conversion by slicing supercontinuum spectrum and switching with nonlinear optical loop mirror and its application to quaternary ASK-to-OOK modulation format converter [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 2005, E88 – B(5): 1963 – 1967.
- [24] Boucon Anne, Fotiadi Andrei, Megret Patrice, et al. Low-threshold all-fiber 1000 nm super-continuum source based on highly non-linear fiber [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(15 – 16): 4095 – 4098.
- [25] Goto H, Konishi T, Nishitani T, et al. All optical intensity equalizer based on effective control of spectral modulation induced by self-phase-modulation using super-Gaussian signals [C]//Transparent Optical Networks, 2008. IC-TON 2008. 10th Anniversary International Conference on, 2008, 1: 124 – 127.
- [26] S I Oda, A Maruta. 2-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.
- [27] Binglin Miao, Caihua Chen, Ahmed Sharkway, et al. Two bit optical analog-to-digital converter based on photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7966 – 7973.
- [28] Hajime Sakata. Photonic analog-to-digital conversion by use of nonlinear Fabry-Perot resonators [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(2): 240 – 248.