

文章编号: 0258-7025(2010)03-0748-04

# 利用光纤挤压器实现的移相光模数转换器

彭 越 张洪明 吴庆伟 傅 鑫 姚敏玉

(清华大学电子工程系, 清华大学信息科学与技术国家实验室, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要** 提出了一种新型移相光量化方案, 利用光纤挤压器使光纤传输截面产生应力双折射, 从而实现移相量化编码。在实验中实现了 4 bit 移相光量化器, 用 10 GHz 重复频率采样脉冲对 2.5 GHz 正弦信号进行量化, 获得量化结果的信噪比为 23.9 dB, 对应的有效比特位为 3.68 bit。同已有的方案相比, 此方案结构简单, 只需要一个相位调制器, 避免了多调制器工作输入信号的同步问题; 利用光纤挤压器实现移相, 控制精度高且成本低, 可以实现高于 6 bit 的理论量化精度; 并且可以通过光脉冲复用技术实现更高的采样速率。

**关键词** 信号处理; 模数转换; 光量化; 偏振干涉; 光纤挤压器

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0748

## Phase-Shifted Photonic Analog-to-Digital Converter by Using Fiber Squeezer

Peng Yue Zhang Hongming Wu Qingwei Fu Xin Yao Minyu

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** In this paper, a novel phase-shifted photonic analog-to-digital conversion (PADC) scheme is presented. In order to realize the phase-shifted quantization, the phase difference between two polarizations is produced by press-induced birefringence in fiber squeezer. A 4-bit optical phase-shifted analog-to-digital system is demonstrated experimentally with 10 GS/s sampling rate, and 2.5 GHz sinusoidal electrical signal is sampled and quantized, achieving a signal-to-noise of 23.9 dB and an effective number of bits of 3.68 bits. Comparing with existing PADC methods, this scheme has a simple structure, and only needs one phase modulator, which avoids the problem of input signal synchronization; using the fiber squeezer as phase-shift module, the quantization resolution of higher than 6-bit can be achieved with high control precision and low cost; this scheme has the potential to realize higher sampling rate with optical pulses multiplex technology.

**Key words** signal processing; analog-to-digital conversion; optical quantization; polarization interference; fiber squeezer

## 1 引 言

随着超宽带通信技术、超宽带雷达以及电子对抗技术的发展, 所需要处理的信号带宽急剧增加, 对模数转换器(ADC)采样速率和量化精度的要求也越来越高。由于采样保持电路的带宽和采样脉冲时间抖动等因素的限制, 传统的电 ADC 已经不能满足高采样速率下高量化精度的要求<sup>[1]</sup>, 因此 ADC

也就成为现代数字信号处理系统中的瓶颈。而随着光电技术的发展, 可以通过光时分复用(OTDM)、光波分复用(WDM)等复用技术实现上百 GS/s 采样率<sup>[2,3]</sup>, 同时以锁模脉冲光源为代表的采样光脉冲源可以实现飞秒量级的时间抖动<sup>[4,5]</sup>, 因此利用光电技术来实现模数转换功能在最近 20 年内已经受到国际上的广泛关注<sup>[6~13]</sup>。1975 年

收稿日期: 2009-04-15; 收到修改稿日期: 2009-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(60607008)和国家 863 计划(2007AA01Z271)资助项目。

作者简介: 彭 越(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光模数、数模转换方面的研究。

E-mail: y-peng05@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介: 姚敏玉(1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光通信及全光信号处理等方面的研究。

E-mail: yaomy@ee. tsinghua. edu. cn

文献[7]提出了一种利用并行强度调制器的光 ADC (PADC)方案,但是因需要多个半波电压递减的调制器而限制了此方案的应用。2006 年文献[10]提出了一种基于相位调制器并利用空间光探测的移相光量化编码方案,大大降低了系统的实现难度。此后文献[11~13]分别提出了利用光纤拉伸器、多波长色散以及引入不同光衰减量来实现移相编码的改进型移相光量化系统。本文提出了一种基于光纤挤压器的移相光模数转换方案,并实验验证了 10 GS/s光脉冲采样下对 2.5 GHz 正弦信号的全光量化。利用光纤挤压器作为光移相模块结构简单,移相精度高且易于控制,降低了系统的复杂度。

## 2 工作原理及实现方案

图 1 为一个 4 通道移相量化的原理示意图,其编码原则如图左上所示。移相光量化的基本原理是实现  $N$  个通道的传输特性曲线,相邻通道的传输特性曲线之间具有  $\pi/N$  的相移,之后对每个通道的输出信号进行阈值判决,高于阈值时判断为逻辑信号“1”,反之为逻辑信号“0”,则可以得到  $N$  个通道对应的量化输出码以及相应的数字电平值,实现对输

入信号的量化。在移相光量化中, $N$  个移相量化通道可以实现  $2N$  个量化等级,即理论量化精度为  $\text{lb}(2N)$  bit。当输入的模拟电信号的幅度为 2 倍调制器半波电压时,4 个移相量化通道可以实现 3 bit 共 8 个量化等级的模数转换。每个移相通道的传输特性可以表示为

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{in}}}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \pi \frac{V(t)}{V_{\pi}} + \theta_i \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $I_{\text{out}}, I_{\text{in}}$  分别为第  $i$  通道的输出光强度、输入光强度,  $V_{\pi}$  为调制器半波电压,  $V(t)$  为输入模拟信号,  $\theta_i$  为第  $i$  通道传输曲线的固定相移量,且

$$\theta_i = (i - 1) \cdot \frac{\pi}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

如何实现各个传输通道的固定移相量是移相光量化方案的关键。本文方案中固定移相量  $\theta_i$  是通过基于电控压电陶瓷的光纤挤压器来实现的,其基本原理是用电压控制压电陶瓷膨胀对光纤产生径向压力,使光纤在其传输截面产生应力双折射,从而使传输光的两个正交偏振态之间产生相移。应力双折射量  $B_f$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$B_f = 3.63 \times 10^{-12} \frac{f}{A}, \quad (3)$$

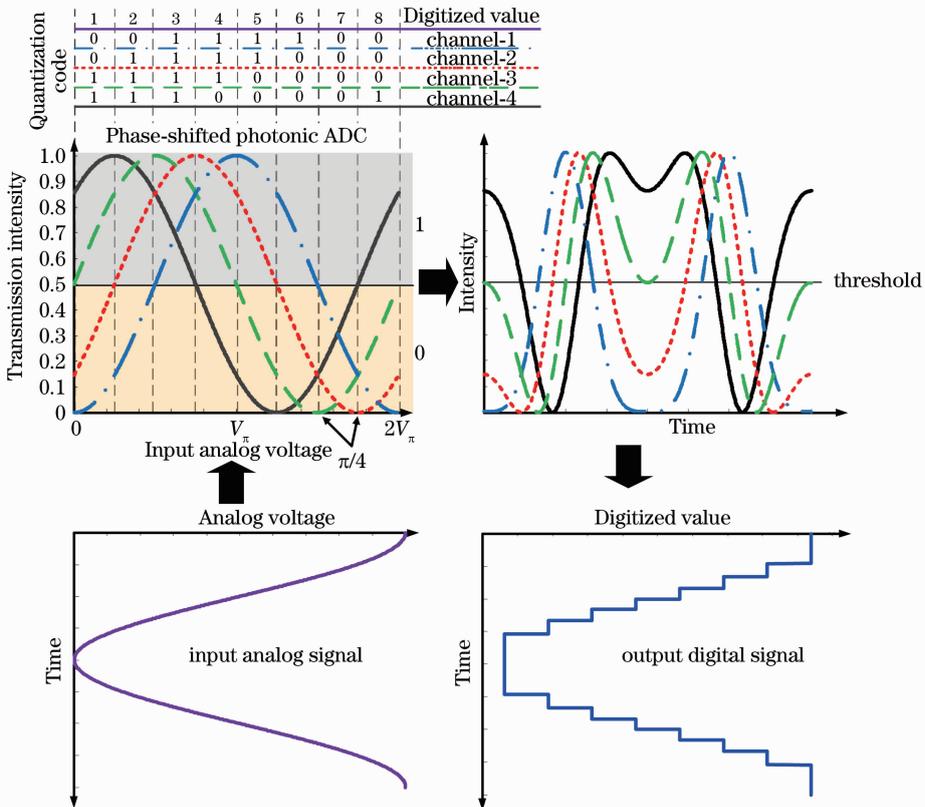


图 1 移相光量化原理

Fig. 1 Principle of phase-shifted optical quantization

式中  $f$  为径向压力,  $A$  为光纤半径。图 2 为实验中所用的光纤挤压器的压电陶瓷控制电压与应力双折射所产生的相移的对应关系。从图中可以看到利用此方法可以实现的移相精度高于  $\pi/32$ , 对应的理论量化精度超过 6 bit。

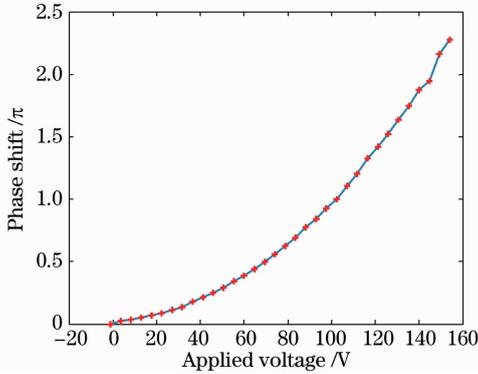


图 2 光纤挤压器中压电陶瓷所加电压和应力双折射相移的关系

Fig. 2 Relation between the press-induced phase-shift and applied voltage in fiber squeezer

为了实现移相光量化方案, 搭建了一个基于偏振干涉和光纤挤压器的移相光模数转换实验系统, 如图 3 所示。采样光脉冲首先通过一个和  $x, y$  方向成  $45^\circ$  的起偏器, 使得光脉冲分为  $x$  方向和  $y$  方向两个幅度相等的偏振态, 通入到相位调制器中。在相位调制器上加载的输入模拟电信号使得采样光脉冲  $x$  方向偏振态和  $y$  方向偏振态之间产生  $\pi \frac{V(t)}{V_\pi}$  的相位差。从相位调制器输出的光信号被均分为  $N$  个通道, 每个通道经过一个压电陶瓷光纤挤压器

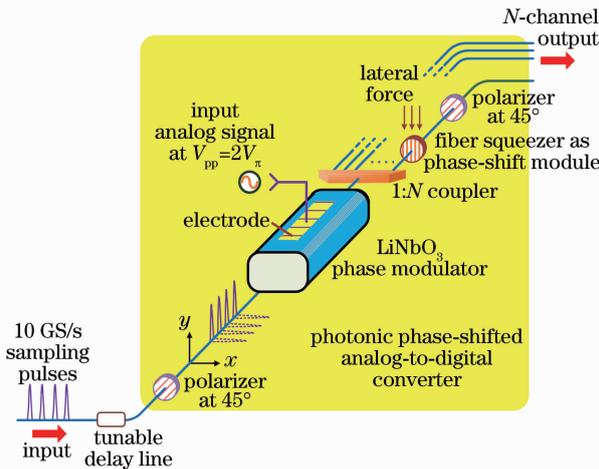


图 3 基于偏振干涉和光纤挤压器的移相量化器系统框图

Fig. 3 Schematic of phase-shifted PADC based on polarization interference and fiber squeezer

作为固定移相模块, 使采样脉冲的两个偏振态之间再引入  $(i-1)\pi/N$  的固定相位差, 其中  $i$  代表第  $i$  个输出通道。最后每个通道经过一个  $45^\circ$  的检偏器检偏输出, 使采样脉冲  $x$  方向和  $y$  方向两个偏振态在输出端发生干涉, 就得到了(1)式中所示的移相光量化传输特性曲线。

### 3 实验结果及分析

实验中采用的采样脉冲光源为 10 GHz 重复频率的 SOA-EAM 主动锁模激光器, 其输出脉冲宽度约为 11 ps, 如图 4 所示。所用调制器为  $\text{LiNbO}_3$  相位调制器, 半波电压约为 5 V。待测模拟电信号为 2.5 GHz 正弦信号, 经过微波放大器放大后峰-峰值为调制器半波电压的 2 倍。实验中实现了 8 个输出通道的量化输出, 通过调整光纤挤压器上的控制电压使得相邻两通道之间的移相量差为  $\pi/8$ , 理论量化精度为 4 bit。为了能够得到更多的采样数据便于数据处理, 通过改变可调光延迟线, 每隔 25 ps 记录一次输出信号的波形, 这样可以模拟 40 GS/s 采样率时的输出采样脉冲波形。图 5 为 8 个移相量化通道所输出的采样脉冲波形。

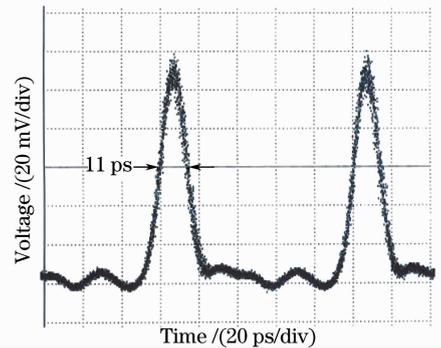


图 4 主动锁模激光器输出脉冲序列, 脉宽约为 11 ps  
Fig. 4 Optical pulses from active mode-locked laser with a pulse width of about 11 ps

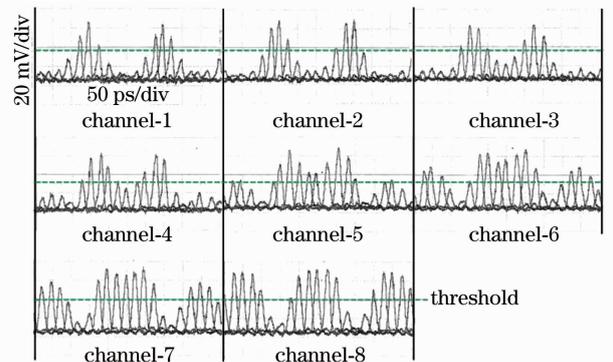


图 5 8 个通道输出的采样脉冲波形  
Fig. 5 Output waveforms from 8 output channels

图 6 表示对每个通道输出的光脉冲进行阈值判决得到数字信号之后, 所获得采样点的数字值以及恢复出的正弦信号。通过计算得到量化结果的信噪比为 23.9 dB, 对应的有效比特位为 3.68 bit。

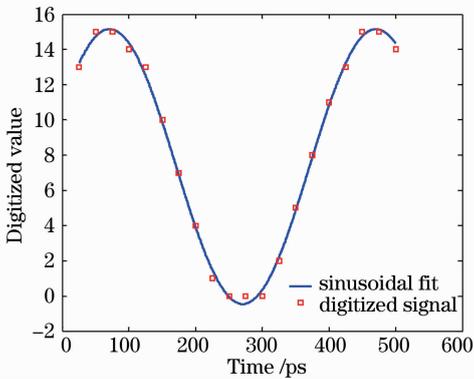


图 6 采样点对应的数字值以及恢复出的正弦信号  
Fig. 6 Digitized values and fitting sine-curve wave

## 4 结 论

提出了一种利用光纤挤压器实现移相的全光移相量化方案, 并在实验中验证了 10 GS/s 采样率, 理论 4 bit 的移相光模数转换系统, 实现了对 2.5 GHz 正弦输入信号的量化, 量化结果的信噪比为 23.9 dB, 对应的有效比特位为 3.68 bit。相对于已有的移相光量化方案, 本文所提出的量化方案只需要一个相位调制器, 结构简单, 成本低; 利用光纤挤压器作为光移相模块, 移相精度高且易于控制, 并且可以通过波分复用和时分复用等光脉冲复用技术扩展得到更高的采样率。

## 参 考 文 献

1 R. H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1999, **17**(4):539~550

2 T. R. Clark Jr., M. L. Dennis. Toward a 100-Gsamples/s photonic A-D conversion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3):236~238

3 P. W. Juodawlkis, T. C. Twichell, G. E. Betts *et al.*. Optically sampled analog-to-digital converters [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2001, **49**(10):1840~1853

4 Peng Can, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. 10 GHz actively mode-locked fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):101~104  
彭 璨, 姚敏玉, 张洪明 等. 10 GHz 主动锁模激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):101~104

5 Wang Jing, Zhang Hongming, Zhang Jun *et al.*. Passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):163~165  
王 旌, 张洪明, 张 壘 等. 基于饱和吸收镜的被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):163~165

6 G. C. Valley. Photonic analog-to-digital converters [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5):1955~1982

7 H. F. Taylor. An electrooptic analog-to-digital converter [C]. *Proc. IEEE*, 1975, **63**(10):1524~1525

8 B. Jalali, Y. M. X. Optical folding-flash analog-to-digital converter with analog encoding [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18):1901~1903

9 K. Ikeda, J. M. Abdul, H. Tobioka *et al.*. Design considerations of all-optical A/D conversion: nonlinear fiber-optic sagnac-loop interferometer-based optical quantizing and coding [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**:2618~2628

10 J. Stigwall, S. Galt. Demonstration and analysis of a 40 gigasample/s interferometric analog-to-digital conversion [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(3):1247~1256

11 Wangzhe Li, Hongming Zhang, Qingwei Wu *et al.*. All-optical analog-to-digital conversion based on polarization-differential interference and phase modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8):625~627

12 Qingwei Wu, Minyu Yao, Hongming Zhang *et al.*. All-optical analog-to-digital conversion using inherent multiwavelength phase shift in LiNbO<sub>3</sub> phase modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12):1036~1038

13 Zhang Zhuangqian, Zhang Hongming, Fu Xin *et al.*. A new approach for analog to digital conversion based on double parallel optical intensity modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):378~382  
章壮前, 张洪明, 傅 鑫 等. 一种采用并行光强度调制器的模数转换方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):378~382

14 Luc B. Jeunhomme. *Single-Mode Fiber Optics: Principles and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 1983