

基于移相光量化的任意波形全光模数转换

王 杨 张洪明 马 超 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 全光模数转换器(ADC)在高速信号处理领域有重要应用。研究了基于偏振光干涉的移相光量化(PSOQ)全光模数转换器的频率响应特性。实验中将不同频率的正弦信号经过 4 bit 移相光量化全光模数转换器量化编码后,得到对应的数字信号。通过离散傅里叶变换,获得各个频率点的频谱。对频谱进行分析,得到不同频率下全光模数转换器的响应范围为 74.07~74.22 dB,响应起伏小于 0.15 dB。在此基础上,对频率为 1 GHz 的三角波信号进行全光量化,并得到 3.31 bit 的有效量化精度。结果表明,移相光量化方案的频率响应特性较好,验证了该方案应用于任意波形全光量化的可行性。

关键词 信号处理;全光模数转换;偏振干涉;移相

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0909002

Arbitrary Waveform All-Optical Analog-to-Digital Conversion Based on Phase-Shifted Optical Quantization

Wang Yang Zhang Hongming Ma Chao 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 All optical analog-to-digital converters (ADC) are key devices in high speed signal processing. The frequency response characteristic of all optical ADC based on polarization-differential interference and phase-shifted optical quantization (PSOQ) is experimentally demonstrated. Different frequency sinusoidal signals are quantized by a 4 bit photonic ADC. The frequency spectra of digital signals are obtained and analyzed by discrete Fourier transform. The results show that the rang of frequency response is from 74.07 dB to 74.22 dB. The fluctuation of the frequency response is less than 0.15 dB. Then a 1 GHz triangular waveform is sampled and all-optical quantized, and the effective number of bits (ENOB) of 3.31 bit is obtained. The experimental results show that the frequency response of the PSOQ is better, and the application of PSOQ in arbitrary waveform is feasible.

Key words signal processing; all optical analog-to-digital conversion; polarization-differential interference; phase-shifted

OCIS codes 060.4080; 320.7085; 250.4110

1 引 言

近年来,全光模数转换器(ADC)以其高采样速率和高带宽的优点,受到了研究者的普遍关注。自 1979 年, Taylor^[1]率先提出一种利用并行强度调制器的全光模数转换系统后,世界各国科学家对全光

采样、量化系统进行了深入研究^[2~8]。本实验室在先前的研究中提出基于偏振光干涉的移相光量化全光模数转换方案^[9,10]。全光 ADC 的优势在于可实现高采样率和高量化精度,并可应用于高速宽带波形的测量。2010 年,大阪大学的 Miyoshi 等^[6]报道

收稿日期: 2012-05-17; **收到修改稿日期**: 2012-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(60977003,61032005)资助课题。

作者简介: 王 杨(1986—),男,博士研究生,主要从事全光信号处理和光模数转换等方面的研究。

E-mail: wang-yang08@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和全光信号处理等方面的研究。

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

了基于非线性光环境的全光量化方案,在正弦信号输入的条件下获得了 4.41 bit 的量化精度。2011 年, Konishi 等^[8]利用光孤子自频移效应,对正弦信号进行测量获得了 4.27 bit 的量化精度。这些文献的研究重点主要是提高量化精度,报道了系统对单一频率正弦信号进行采样、量化的结果,而对于任意波形的测量则鲜有报道。

本文研究了基于移相光量化模数转换系统的频率响应特性,通过对 1.0~2.5 GHz 范围内不同频率的正弦信号做 4 bit 全光量化,分析移相光量化全光模数转换器的频率响应特性。结果表明该系统的频率响应起伏小于 0.15 dB。还对 1 GHz 的三角波信号进行了 4 bit 全光量化,获得了有效比特为 3.31 bit 的量化精度。

2 实验和测量装置

实验装置如图 1 所示。虚线框内为基于偏振光干涉的 4 bit 移相光量化全光模数转换系统,有 8 个

量化通道。直流光源波长为 1550 nm,经偏振控制器(PC)调节后进入偏振调制器(PolM),使偏振方向与调制器 x 、 y 轴的夹角为 45° 。加载于偏振调制器上的微波信号对直流光进行相位调制。调制器中两个正交偏振直流光分量的相位差受到所加载微波信号的调制,其相位差与微波信号幅度呈线性关系。被调制的直流光经过一个 1×8 耦合器分成 8 路,通过光纤的挤压调节各量化通道间的固定相位差^[11]。对于 4 bit 移相光量化,相邻量化通道之间的固定相位差为 $\pi/8$ 。经 45° 放置的偏振器实现偏振干涉,由光电探测器得到 8 条移相量分别为 $0, \pi/8, 2\pi/8, \dots, 7\pi/8$ 的传输曲线。用数字存储示波器对这 8 个信道的输出波形进行记录,再经过阈值判决和编码就可以得到相应的信号幅度值和对应的数字信号。对量化结果进行离散傅里叶变换,得到其频谱。通过调节微波源的信号频率,就可以得到不同频率信号经全光量化后的频谱,从频谱中测得不同频率的信号峰值从而分析该量化系统的频率响应特性。

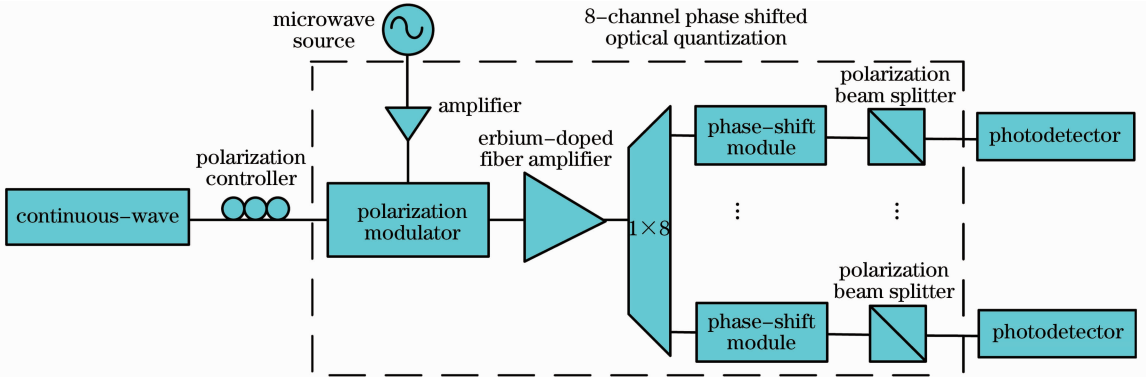


图 1 4 bit 移相光量化实验装置图

Fig.1 Experimental setup of 4 bit phase-shifted optical quantization

3 实验结果及分析

在 4 bit 移相光量化中,要求输入模拟信号的幅度为 2 倍调制器的半波电压,可以实现有效比特为 4 bit 的量化精度。实验中所用偏振调制器 (Versawave 40 Gbit/s PolM Electro-Optic Mode Converter) 的半波电压为 3.5 V,因此输入微波信号需要经过微波放大器 (JDS Uniphase H301 series) 放大,使加载到调制器上的微波信号功率为 21 dBm。实验中对 1.0、1.3、1.6、2.0、2.2、2.5 GHz 的微波信号进行全光量化,不同量化通道传输特性曲线通过实时示波器 (TekDSA71254C, 带宽为 12.5 GHz) 进行记录,对得到的传输曲线进行阈值判决和编码,恢复出原信号。图 2(a) 是 2 GHz

正弦信号的 8 路量化通道的传输特性曲线。对图 2(a) 中的传输曲线进行阈值判决和编码,得到相应的数字信号如图 2(b) 所示,对实验结果进行正弦拟合计算^[12],得到有效比特位为 3.57 bit。

对不同频率微波信号全光量化后的时域波形进行离散傅里叶变换,获得对应的数字信号频谱,其中图 3 为 2 GHz 正弦信号经全光量化后的频谱。从图中可以看到其频率响应为 74.22 dB。图 4 给出了不同频率下透射强度对输入强度变化的响应曲线。从图中纵轴的示值可以看到,对于 1.0~2.5 GHz 范围内,不同频率信号的响应在 74.07~74.22 dB 之间,其频率响应起伏小于 0.15 dB。需要说明的是由于实验系统中微波放大器和调制器带

宽内的频率响应曲线并非十分平坦,所以实验中测得的不同频率点的频率响应值会存在误差,并对多频信号的量化精度产生一定的影响。可以通过对

1 GHz的三角波信号的测试,进一步说明基于偏振光干涉的移相光量化的频率响应特性。

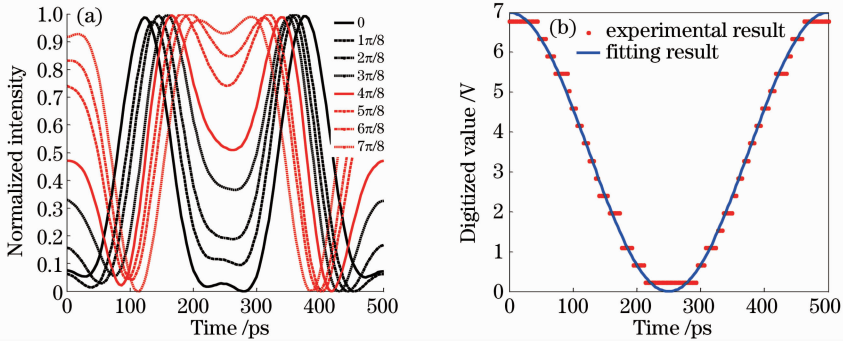


图 2 (a) 实验中获得的 8 信道调制曲线; (b) 实验量化结果以及拟合曲线

Fig. 2 (a) Experimental modulated curves of 8 channels; (b) obtained digital results and corresponding sinusoidal fitting curve

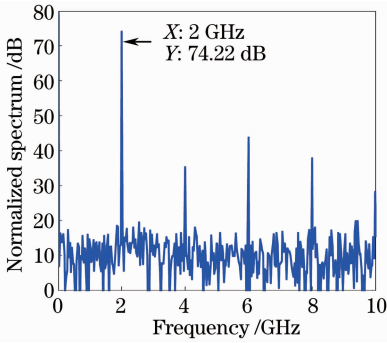


图 3 经全光量化后的信号频谱

Fig. 3 Spectra of the recovered signal

实验中加载在偏振调制器上的 1 GHz 的三角波信号由任意波形发生器 (TekAWG7122C) 产生。图 5 给出了移相量分别为 $3\pi/8$ 和 $4\pi/8$ 的两个量化通道在输入波形是三角波信号下的传输特性曲线, 由于此时输入为三角波信号, 其输出的调制曲线与正弦波输入有所不同, 对照图 2(a) 给出的相应移相量的正弦波传输曲线可以看出, 图 5 所示的三角波输出调制曲线中含有更多频谱分量。对 8 个量化通

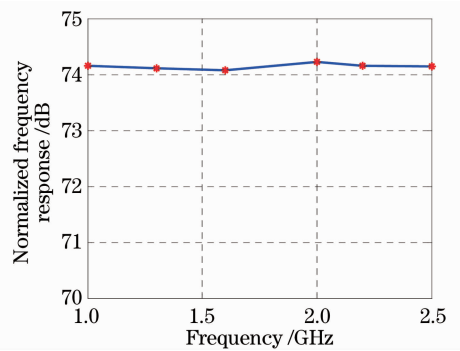


图 4 全光量化系统的频响特性

Fig. 4 Frequency response of the all optical ADC

道的输出结果进行阈值判决和编码, 得到对应的数字信号如图 6 所示。对实验结果进行拟合计算, 可以得到有效比特位为 3.31 bit。正如前面的分析, 受微波放大器和偏振调制器的频率响应特性的影响, 在对类似三角波这样的宽频信号进行移相光量化时, 系统的有效比特位 (3.31 bit) 相比于单频正弦信号 (3.57 bit) 有所降低。

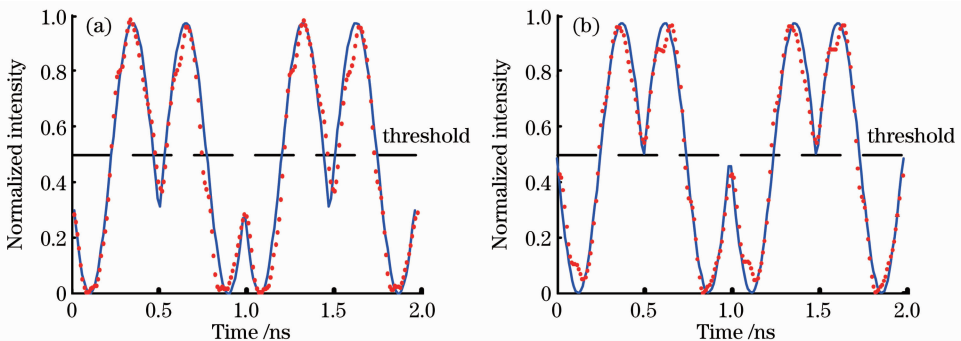


图 5 输入信号为三角波时的调制曲线, 相移量为 $3\pi/8$ (a) 和 $4\pi/8$ (b)

Fig. 5 Experimental modulated curves of triangular waveform input with phase shifts of $3\pi/8$ (a) and $4\pi/8$ (b)

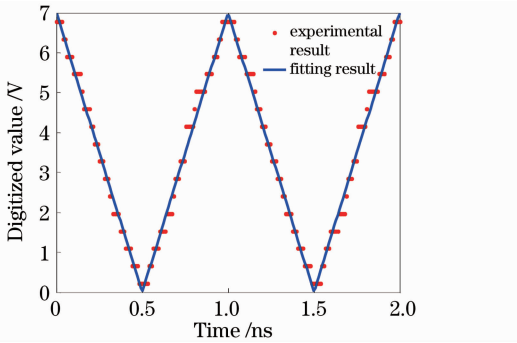


图 6 实验量化结果和拟合曲线

Fig. 6 Obtained digital results and corresponding sinusoidal fitting curve

4 结 论

研究了基于偏振光干涉的移相光量化全光模数转换系统的频率响应特性,测量了 1.0~2.5 GHz 信号的频率响应,结果表明其频率响应起伏小于 0.15 dB. 对 1 GHz 三角波信号进行了全光量化,获得了有效比特为 3.31 bit 的实验结果,验证了移相光量化方案应用于任意波形全量化的可行性。

参 考 文 献

- 1 H. Taylor. An optical analog-to-digital converter—design and analysis [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(4): 210~216
- 2 B. Jalali, Y. M. Xie. Optical folding-flash analog-to-digital converter with analog encoding[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18): 1901~1903
- 3 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

- 4 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
- 5 Wu Xianli, Li Heping, Liao Jinkun *et al.*. Analysis of quantization techniques in all-optical analog-to-digital conversion [J]. *Laser and 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
- 6 Y. Miyoshi, S. Takagi, S. Namiki *et al.*. Multiperiod PM-NOLM with dynamic counter-propagating effects compensation for 5-bit all-optical analog-to-digital conversion and its performance evaluations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(4): 415~422
- 7 Dou Yujie, Zhang Hongming, Fu Xin *et al.*. Optical analog-to-digital conversion by time-interweaved sampling based on mode-locked-pulse and high-speed optical switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105006
窦玉杰, 张洪明, 傅鑫等. 基于锁模脉冲源和高速光开关的时分抽样模数转换[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105006
- 8 T. Konishi, K. Takahashi, H. Matsui *et al.*. Five-bit parallel operation of optical quantization and coding for photonic analog-to-digital conversion [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(17): 16106~16114
- 9 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
- 10 Yang Wang, Hongming Zhang, Qingwei Wu *et al.*. Improvement of photonic ADC based on phase-shifted optical quantization by using additional modulators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(7): 566~568
- 11 Peng Yue, Zhang Hongming, Wu Qingwei *et al.*. Phase-shifted photonic analog-to-digital converter by using fiber squeezer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 748~751
彭越, 张洪明, 吴庆伟等. 利用光纤挤压器实现的移相光模数转换器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 748~751
- 12 R. H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, **17**(4): 539~550

栏目编辑: 王晓琰