

文章编号: 0258-7025(2008)03-0378-05

一种采用并行光强度调制器的模数转换方法

章壮前 张洪明 傅鑫 姚敏玉

(清华大学工程系,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 提出了一种采用并行光强度调制器实现移相光量化的方法。利用对光强度的衰减实现量化曲线的相移,解决了现有移相光量化方案中相位调制器对环境、温度较为敏感,量化曲线相移控制精度以及脉冲走离的问题。采用两个铌酸锂强度调制器并行连接,每个光耦合器分成 4 个通道,每个通道中插入光衰减器,通过调节光衰减器实现通道间调制曲线的相移,构成 8 通道 4 bits 的光量化器。实验中对 10 GHz 的正弦信号进行了光量化测试,量化结果的有效比特数(ENOB)为 3.7 bits,仅低于理想分辨率 0.3 bits。实验结果表明该方案可行,与一般移相光量化方案相比,具有较高的有效比特数。

关键词 激光技术;光模数转换;光强度调制器;有效比特数

中图分类号 TN 29 **文献标识码** A

A New Approach for Analog to Digital Conversion Based on Double Parallel Optical Intensity Modulator

Zhang Zhuangqian Zhang Hongming 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 A novel approach of a phase shifted all-optical analog-to-digital converter with double parallel intensity modulator is proposed and demonstrated. The phase shift of quantization curve is simply realized by optical attenuation. The proposed scheme can solve the problem of pulse walk-off, and low precision of phase shift in the present phase shifting quantization schemes as well as the influence of environment and temperature. In this scheme, the outputs of two parallel LiNbO₃ intensity modulators are split into 4 channels with an optical attenuator inserted in each channel. By appropriately adjusting the optical attenuators, the phase shift between two adjacent channels is achieved, thus 8-channel optical quantizer is realized with resolution of 4 bits. In the experiment, a 10 GHz sinusoidal input signal is quantized using this scheme with an effective number of 3.7 bits. The deviation from the ideal case is only 0.3 bits. This result donates that the proposed approach is feasible, and has a relatively high effective number of bits compared with the present schemes.

Key words laser technique; optical analog to digital conversion; optical intensity modulator; effective number of bits

1 引言

数字处理技术的迅速发展对模数转换(ADC)器的工作带宽和采样率提出了越来越高的要求,传统的电子模数转换器件受到电子“速度瓶颈”的限制^[1],采样速度提高缓慢。光子技术以其在复用、超

低抖动脉冲源产生^[2,3]和处理速度上的显著优势正被越来越多地用于新型高速模数转换器的研究。目前国际上提出的主要的模数转换方案有光取样和光量化两种。光取样方案由于采用电模数转换器进行量化,限制了其工作带宽的进一步提高^[4~8];而光量

收稿日期:2007-09-10;收到修改稿日期:2007-10-15

基金项目:国家自然科学基金(60477021,60607008)资助项目。

作者简介:章壮前(1983—),男,江苏人,硕士研究生,主要从事高速光信号处理方面的研究。

E-mail: zhangzq05@mails. thu. edu. cn

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

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

化方案的工作带宽仅仅受光探测器和调制器带宽的限制,可以实现超高速高性能的模数转换,目前受到越来越多的重视^[9-13]。其中,Johan Stigwall 等^[11]提出移相光量化的基本原理,并采用空间光干涉的方法实现了对 1.25 GHz 微波信号的 40 G 次/s 采样,得到的系统有效比特数(ENOB)为 3.7 bits。此方案经改进,对 2.2 GHz 微波信号实现了有效比特数为 4.1 bits 的量化,并且解决了空间光干涉方案的高插入损耗以及高空间分辨率光探测器阵列的难题^[13],但此方案中两个正交偏振态相移的精确控制、脉冲走离和温漂将成为影响量化精度的主要因素。本文提出一种新型的移相光量化方案,采用强度调制器取代相位调制器,克服了由于相位调制及相干引入的温度敏感等缺点,并且量化曲线的相移易于控制,同时解决了脉冲走离问题。对高达 10 GHz 的正弦信号进行了量化实验,实验结果表明该方案具有比较高的有效量化比特数。

2 移相光量化原理

移相光量化是利用光学方法实现一系列周期相同具有等间隔相移的量化曲线,然后对输出光功率进行 0/1 阈值判决实现对输入信号的量化。

如图 1 所示,图中 4 个通道对应的 4 条量化曲线相移间隔为 $\pi/4$,如果以最大输出光功率的 1/2 (图中所示为 $I_0/2$) 为阈值进行 0/1 判决,高于阈值判决为 1,低于阈值判决为 0,则可以得到 4 个通道对应的量化输出码以及相应的数字电平值,实现对输入电信号的量化,量化输出码为格雷码。4 通道的透过特性曲线可以实现 8 个量化数字电平值,即分辨率为 3 bits。

如果有 N 个通道的输出光功率 I_{out}^i 满足

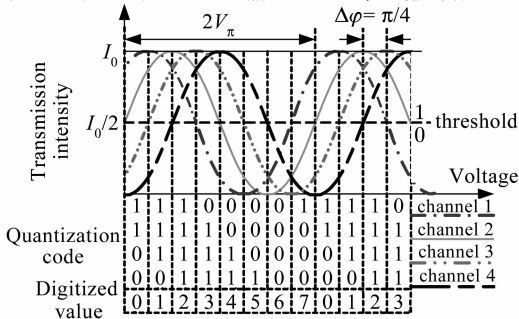


图 1 4 通道移相透过特性曲线及相应的量化输出码和数字电平值

Fig. 1 Transmission characteristics for 4 channels, below are the corresponding quantization codes and digitized value

$$I_{out}^i = I_{th} + I_0 \cos \left[\pi \frac{V(t)}{V_\pi} + \phi_i \right], \quad (1)$$

其中 I_{th} 为 0/1 判决阈值, I_0 为常数, V_π 为半波电压, $V(t)$ 为输入电压, ϕ_i 为量化曲线的偏置相位, 并且

$$\phi_i = (i - 1) \frac{\pi}{N} + k\pi, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad k \in Z, \quad (2)$$

则此 N 个通道可以对输入电信号实现 $\text{lb}(2N)$ bits 分辨率的量化。

3 方案设置和工作原理

基于并行光强度调制器的移相光量化方案工作原理如图 2 所示。输入光脉冲经过光耦合器分束, 分别进入两个并行的 LiNbO₃ 光强度调制器, 受模拟信号调制后再经过可调光衰减器(VOA)适当衰减进入偏振合波器(PBC), 最后由光探测器(PD)转换成电信号进行处理。图 2 中两个并行光强度调制器分别偏置在 0 和 $V_\pi/2$, 通过适当地控制两个并行光路中的可调光衰减器的衰减, 就可以实现移相光量化。图中黑色粗线代表保偏光纤, 以保证两个并行光路均为单偏振态工作。

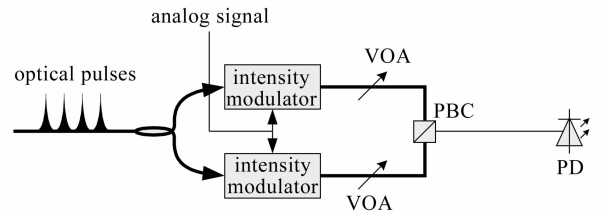


图 2 系统工作原理示意图

Fig. 2 Illustration of the operation principal of proposed optical ADC

如图 2 所示,在不考虑微波信号调制的情况下, 设经过可调光衰减器后两并行光路的光功率分别为 $\gamma_1 I_{in}, \gamma_2 I_{in}$, 其中 I_{in} 为总的输入光功率。由于两个并行光强度调制器的输出光是通过偏振合波器合波到其输出端光纤的两个正交偏振态上, 不会发生干涉, 因此进入探测器的总光功率应该是两个并行光强度调制器的输出光功率的叠加。考虑微波信号的调制作用, 进入光探测器的总光功率为

$$I_{PD}(t) = \gamma_1 I_{in} \cos^2 \left[\pi \frac{V(t)}{2V_\pi} \right] + \gamma_2 I_{in} \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{2V_\pi} \left[V(t) + \frac{V_\pi}{2} \right] \right\} = \frac{1}{2} I_{in} \gamma_1 \text{seca} \left\{ \sqrt{2} \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{4} \right) + \cos \left[\pi \frac{V(t)}{V_\pi} + \alpha \right] \right\} = I_{th} + I_0 \cos \left[\pi \frac{V(t)}{V_\pi} + \phi \right], \quad (3)$$

式中 α 为常数, 并且 $\tan\alpha = \gamma_2/\gamma_1$, $V(t)$ 为输入微波信号,

$$I_{th} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{in} \gamma_1 \sec\alpha \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{4}\right),$$

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{in} \gamma_1 \sec\alpha, \quad \phi = \alpha.$$

(3) 式的形式与(1)式相同, 因此只需要通过控制两个并行光路的衰减, 使得 α 满足(2)式的要求即可实现移相光量化。

但是利用衰减的方法得到的量化曲线的相移 α 满足 $\gamma_2/\gamma_1 = \tan\alpha > 0$, 只能实现相移 $\alpha \leq \pi/2$ 的通道, 即图 1 中的 channel 3, channel 4。而 channel 1, channel 2 无法实现, 利用双输出的光强度调制器可以解决这一问题。具体原理如下, 假设偏置在 $V_\pi/4$ 的强度调制器具有双互补输出端, 则利用其第二个输出端与偏置在 0 的强度调制器的输出端合波, 进入光探测器的总光功率为

$$I'_{PD}(t) = \gamma_1 I_{in} \cos^2\left[\pi \frac{V(t)}{2V_\pi}\right] + \gamma_2 I_{in} \left\{ 1 - \cos^2\left[\frac{\pi}{2V_\pi}\left[V(t) + \frac{V_\pi}{2}\right]\right] \right\} = I'_{th} + I'_0 \left\{ \cos\left[\pi \frac{V(t)}{V_\pi} - \alpha'\right] \right\}, \quad (4)$$

其中 $I'_{th} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{in} \gamma_1 \sec\alpha' \sin\left(\alpha' + \frac{\pi}{4}\right)$,

$I'_0 = \frac{1}{2} I_{in} \gamma_1 \sec\alpha'$, 等效的 $\alpha = -\alpha' < 0$ 。

基于以上分析, 以 4 通道并行光强度调制器移相光量化系统为例, 实现 3 bits 分辨率光量化的完整框图如图 3 所示, 双端输出的光强度调制器 b 的两个输出端分别用分束器分为 2 路, 然后进入偏振合波器与调制器 a 的 2 路分束输出合波, 探测器将合波后的光信号转化为电信号进行阈值判决和处理。图中用黑色曲线表示保偏光纤。由图 3 可以扩展到

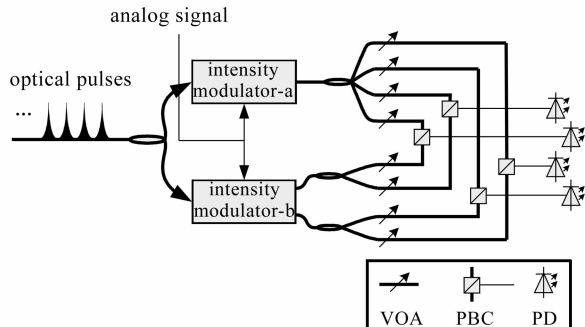


图 3 4 通道并行光强度调制器量化方案的示意图
Fig. 3 Schematic setup of the proposed optical ADC with 4 channels

N 通道的情況。

4 实验结果和讨论

对并行光强度调制器的光量化方案进行实验验证, 实验装置如图 4 所示。分布反馈(DFB)激光器输出的直流光经 1:1 的耦合器分束和掺铒光纤放大器(EDFA)放大后分别进入两个强度调制器, 然后进入偏振合波器合波, 再由光探测器转化成电信号, 用数字示波器记录调制后的波形。偏振控制器 PC-a1, PC-b1 控制进入强度调制器的光的偏振态, PC-a2, PC-b2 控制进入偏振合波器的光的偏振态。由于偏振合波器对输入光具有检偏作用, 通过调节 PC-a2, PC-b2 就可以调节两个并行光路进入偏振合波器的光功率, 即可以代替可调光衰减器。

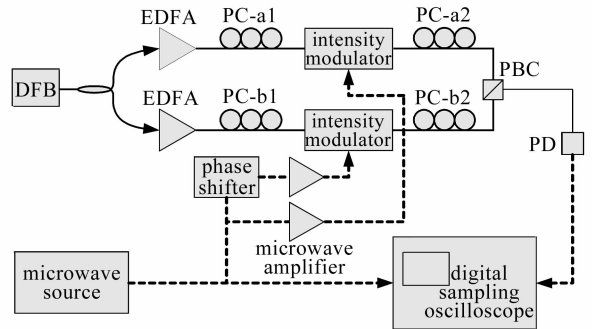


图 4 单通道原理验证实验装置图

Fig. 4 Single channel proof-of-principle experimental setup of the proposed optical ADC

受实验条件的限制, 实验中只采用一个通道, 通过调节不同衰减然后记录数据的方法模拟多通道情况下对应的量化输出。实验中使用的两个强度调制器均为单端输出, 利用将其中一个强度调制器先后分别偏置在 0 和 V_π 的方法来模拟双端输出的强度调制器。为了直观观察调制后的输出波形, 光源采用直流光, 记录输出波形后采用软件的方法对结果进行采样、阈值判决和译码(得到量化输出码对应的数字电平值)。

为了方便比较, 本文模拟了 8 通道正弦信号调制的情况下系统的输出, 计算中忽略各通道判决阈值不同(见(3)式)的影响, 假设各通道阈值均为最大输出功率的 1/2, 如图 5 所示。图 5(a)为 8 通道的量化曲线, 图 5(b)为输入的正弦信号, 图 5(c)为在图 5(a)的正弦信号调制的情况下, 8 个通道对应的调制后的输出波形。

实验中对微波源输出的 10 GHz 的正弦信号进行了 8 通道 4 bits 分辨率的量化, 输入强度调制器的

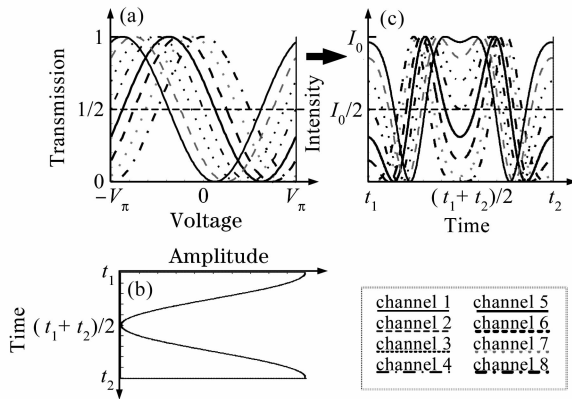


图 5 模拟 8 通道正弦调制情况下的量化输出波形
Fig. 5 Simulated outputs of 8 channels with sinusoidal input

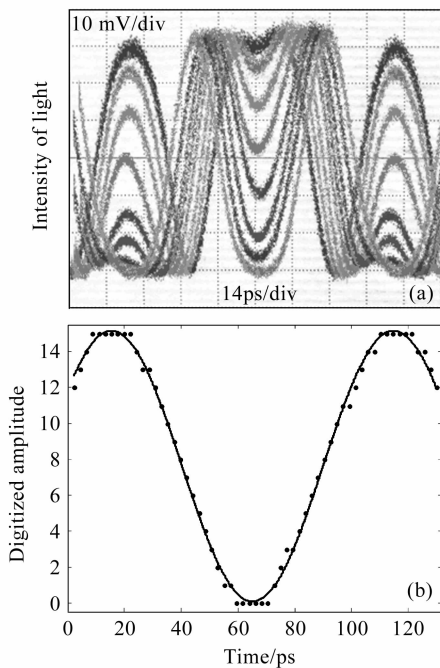


图 6 (a) 10 GHz 正弦调制情况下 8 通道的输出波形;
(b) 对 (a) 进行软件采样和阈值判决后得到的数字幅度(点)以及拟合得到的正弦曲线(线)

Fig. 6 (a) outputs of 8 channels with 10 GHz sinusoidal signal applied to the modulator; (b) digitized amplitude (dot) acquired by thresholding the discrete intensity at fixed time interval and the sinusoidal fit (line)

微波功率为 25.6 dBm, 约为调制器半波电压的 2 倍(调制器半波电压为 6.1 V), 如图 5(b)。得到的量化输出波形如图 6(a) 所示, 与图 5(c) 所示的理想情况下的输出波形基本一致。

图 6(b) 是利用软件的方法对图 6(a) 所示的 8 通道输出波形进行等时间间隔采样和阈值判决后得到的量化结果, 以及对量化结果进行拟合得到的正

弦曲线。比较拟合得到的正弦曲线和量化结果, 计算得到量化结果的信噪比为 24.3 dB, 对应的有效比特数为 3.7 bits, 8 个量化通道对应的理想分辨率为 4 bits, 实验结果偏离理想值 0.3 bits。

在实验中由于每个通道的插入损耗不同, 因此每个通道的输出光功率大小不同, 相应的判决阈值为每个通道最大输出功率的 1/2, 图 6(b) 中的量化结果已经考虑了阈值差异的影响。对于本方案, 如果采用脉冲光对微波信号进行取样, 需要控制两个并行光路的光程相同, 以保证两个调制器输出的光脉冲同时到达光探测器。这可以通过在焊接时控制两个并行光路的光纤长度或在其中某一光路中加入可调光延迟线来解决。

5 结 论

提出了一种采用并行光强度调制器实现移相光量化的方法。利用对光强度的衰减实现量化曲线的相移, 相移易于控制。并行光强度调制器的结构易于解决脉冲走离问题, 并且由于采用光强度调制器对光信号进行调制, 系统对温漂的敏感度要小于采用光相位调制器的方案。对高达 10 GHz 的正弦信号进行了 8 通道 4 bits 的全光量化实验, 得到了有效比特数 3.7 bits 的量化结果, 仅低于理想分辨率 0.3 bits, 表明该方案具有比较高的有效量化比特数。且方案没有利用任何非线性效应和色散效应, 其速度仅仅受限于强度调制器、光探测器以及电比较器。现有的商用光强度调制器的微波响应带宽已达 40 GHz, 因此利用该方案可以实现工作带宽高达 40 GHz 的实时超高速光模数转换。

参 考 文 献

- 1 Robert H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis [C]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1999, **17**(4): 539~550
- 2 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 主动锁模光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 101~104
- 3 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 璠 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
- 4 Paul W. Juodawlkis, Jonathan C. Twichell, Gary E. Betts *et al.*. Optically sampled analog-to-digital converters [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(10): 1840~1853
- 5 M. P. Fok, K. L. Lee, C. Shu. 4×2.5 GHz repetitive photonic sampler for high-speed analog-to-digital signal

conversion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 876~878

6 J. U. Kang, R. D. Esman. Demonstration of time interweaved photonic four-channel WDM sampler for hybrid analogue-digital converter [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(1):60~61

7 Yan Han, Bahram Jalali. Time-bandwidth product of the photonic time-stretched analog-to-digital converter [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2003, **51**(7):1886~1892

8 Zhang Hongming, Yao Minyu, Zhang Jianfeng *et al.*. Optical A/D conversion by time-interweaved sampling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(12):1096~1098
张洪明,姚敏玉,张剑锋等. 光时分抽样 A/D 转换[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(12):1096~1098

9 Marc Currie. Optical quantization of microwave signals via distributed phase modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2):827~833

10 Kensuke Ikeda, Jalil Mohaminad Abdul, Shu Namiki *et al.*. Optical quantizing and coding for ultrafast A/D conversion using nonlinear fiber-optic switches based on Sagnac interferometer [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11):4296~4302

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

12 Takashi Nishitani, Tsuyoshi Konishi, Kazuyoshi Itoh. All-optical analog-to-digital conversion using optical interconnection for gray code coding [C]. *SPIE*, 2006, **6353**: 63530H-1~63530H-6

13 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



《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

《中国激光》编辑部