

全光模数转换的原理及进展

韩顺利 胡为良 张鹏

(中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘要 由于电路时钟抖动和比较器弛豫等内禀属性的影响,传统的电子模数转换器已经不能满足高带宽数字信号处理的发展。模数转换主要包括采样、量化和编码。全光模数转换引入光子技术来对模拟电信号采样和量化,可以提高数字信号处理系统的性能,满足高速和高分辨率的需求,从而解决电子模数转换器的技术瓶颈问题。针对目前主要研究的全光模数方案,如泰勒方案、空间光干涉和偏振干涉的移相光量化方案、孤子自频移的方案、对称双波导长周期波导光栅和波导阵列光栅的方案等,介绍了其基本原理及实验方案,并对各种方案的特点进行了分析。

关键词 信号处理;全光模数转换;光采样;光量化;电光调制器

中图分类号 TN911

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.080025

Principle and Progress of All-Optical Analog-to-Digital Conversion

Han Shunli Hu Weiliang Zhang Peng

(*Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China*)

Abstract Due to the inherent timing jitter of the electronic clocking circuits and comparator ambiguity, the traditional electronic analog-to-digital conversion (ADC) cannot fulfill the development of high bandwidth digital signal processing. Analog-to-digital conversion consists of sampling, quantizing and coding. Introducing photonic technologies for sampling and quantization of the electrical analog signal, all-optical ADC can improve the performance of the digital signal processing system to achieve high sampling rate and high resolution. Hence, it solves the bottleneck problem of electronic ADC. The main recently developed all-optical analog-to-digital converters, such as those based on Taylor scheme, interferometric and polarization interference, phase-shifted optical quantization (PSOQ), soliton self-frequency shift, long-period waveguide grating (LPWG) and arrayed waveguide grating (AWG), are introduced. Meanwhile, the characteristics of different methods are analyzed.

Key words signal processing; all-optical analog-to-digital conversion; optical sampling; optical quantization; electro-optical modulator

OCIS codes 070.4560; 060.4510; 070.1170

1 引言

数字信号在处理和传输方面有着诸多模拟信号所不具备的优势。高性能模数转换器作为模拟传感器与数字信号处理系统之间的纽带,性能指标要求也越来越高,无论是瞬息变化过程的观测与记录,还是超宽带通信、电子对抗、超宽带雷达接收机、人工智能系统、电子侦察、导航、核武器检测、飞行器身份识别、软件无线电等应用领域^[1-2],都要求 GS/s 量级以上的采样速率,而且相应的精度要求也越来越高。因此模数转换(ADC)技术的研究越来越成为现代数字信号处理中非常核心的关键技术。

由于器件本身的限制,电子 ADC 在采样保持电路弛豫时间、采样时钟精度等诸多方面存在着无法克服的瓶颈问题,不能满足高速高精度模数转换的需求,限制了电子 ADC 的发展。而利用光子技术实现模数转换在复用、脉冲时间抖动、处理信号带宽、抗干扰、远距离传输等方面表现出显著优势,因此随着锁模激光器、光学器件和全光量化编码方案的不断发展进步,将光子计数引入到对模拟电信号的采样和量化过程中,突破

收稿日期: 2013-03-08; 收到修改稿日期: 2013-04-28; 网络出版日期: 2013-07-11

作者简介: 韩顺利(1982—),男,博士,工程师,主要从事光电测量仪器及红外技术等方面的研究。

E-mail: eiqd@ei41.com

电子 ADC 的瓶颈,实现高速信号模数转换,逐渐成为全世界的研究热点。国内主要是清华大学、电子科技大学、上海交通大学等科研机构进行了先期研究,并取得了一定的成果。本文对目前主要的全光 ADC 方案研究予以总结,介绍了各方案的基本原理,并分析了它们的特点。

2 基本原理

全光模数转换是利用全光的方法,实现高速光采样并在光域完成量化的过程。利用锁模激光器产生高重复频率的采样光脉冲序列,然后采样光脉冲对待测模拟电信号进行电光采样,利用光子技术对采样后的光脉冲进行全光量化和编码,通过特定的阈值判决电路和软件处理,最终得到与之对应的数字信号。由于采样以及量化编码过程都是通过引入了光子技术的全光量化方案,因此可以从原理上避开电子 ADC 的瓶颈问题。

3 全光模数转换的研究进展

3.1 泰勒全光模数转换方案

全光模数转换中最著名的方案当属 Taylor^[3]提出的相位编码光采样的光学 ADC 方案。其基本原理如图 1 所示,锁模激光器产生稳定的窄采样光脉冲,利用马赫-曾德尔(M-Z)型电光调制器输出光强随调制器驱动电压变化而周期性变化的特点,通过并行的电光调制器组成光学采样器对光脉冲进行强度调制,实现对模拟电信号的光采样;利用电极长度依次加倍的调制器阵列产生周期倍增的调制特性曲线,对调制器的输出光强进行阈值判决,如果大于最大输出光强的一半则输出 1,反之则输出 0,从而实现对 $0 \sim 2V_{\pi}$ (V_{π} 为半波电压)电压范围的 3 bit 量化。目前 Taylor 方案已经能实现量化精度 4 bit、采样率 1 GS/s 和量化精度 3 bit、采样率 10 GS/s 的全光 ADC。

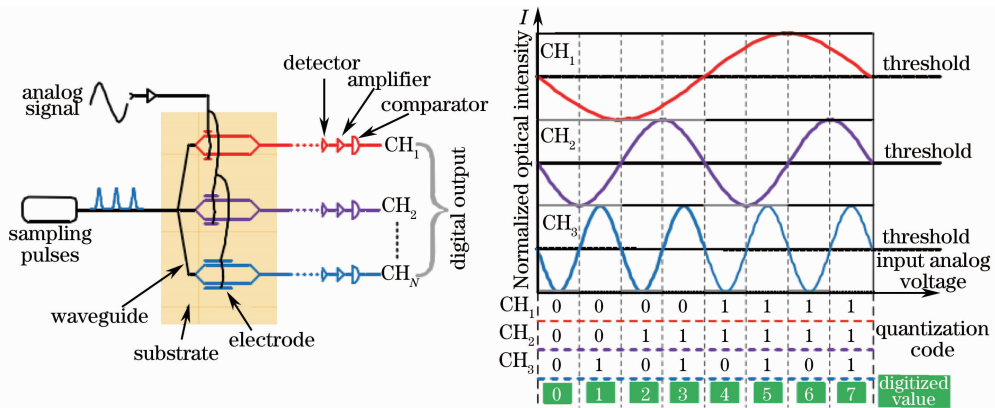


图 1 泰勒全光模数转换原理图

Fig.1 Schematic of Taylor all-optical ADC

此方案结构简单,编码效率高;但系统量化精度的提高需要通过成倍增加调制曲线的周期数目,要求多路并行的电光调制器的半波电压之间成倍增的关系,这就要求最高位调制器的半波电压随量化精度的增加而指数上升,设计难度大。

3.2 基于空间光干涉的移相光量化 ADC

瑞典 Chalmers 大学 Stigwall 等^[4]提出了基于相位调制空间干涉的移相光量化方案。其基本原理是:模拟电信号通过 M-Z 调制器(MZM)一臂中的相位调制器来调制该路光脉冲的相位,利用空间探测器阵列探测输出光的强度。通过精密调节空间位置,使任意相邻两个探测器由空间位置引起的附加相移的差值为 π/N ,从而使得 N 个探测器测得的输出光强与相位调制器所加载电压幅度之间的输出特性曲线有 π/N 的相移。以 4 个探测器为例,移相光量化传输特性曲线及编码原理如图 2 所示。目前该方案已经能实现有效比特位 3.6 bit,采样率 40 GS/s 的量化结果。由于噪声的影响以及量化通道数的限制,输出位数通常小于 4 bit。

此方案提高量化精度只需要通过精确调整探测器的空间位置减小相邻通道之间的相位差,不需要多个相位调制器实现复杂的倍增多周期调制特性曲线,避免了多个相位调制器之间信号同步和频响一致性的问

题,极大地简化了系统构成;但是 MZM 双臂空间光干涉易受外界各种扰动的影响,量化精度受到空间探测器位置的限制,且编码效率低于周期倍增型泰勒全光量化方案。

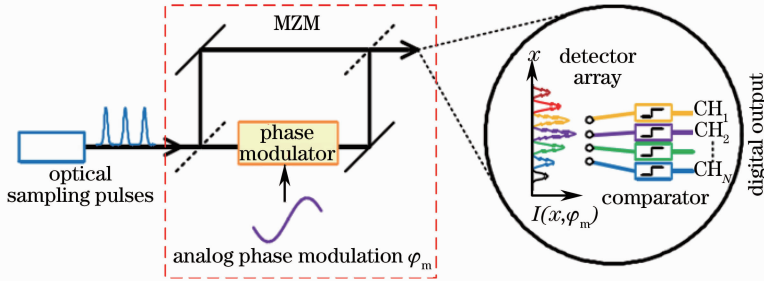


图 2 基于空间光干涉的移相光量化 ADC 原理图

Fig. 2 Schematic of interferometric-based PSOQ all-optical ADC

3.3 基于偏振干涉的移相光量化 ADC

清华大学彭越等^[5-6]提出一种基于偏振干涉的移相光量化(PSOQ)ADC 方案,如图 3 所示。其基本原理是:首先利用偏振控制器调节采样光脉冲的偏振态,使其在相位调制器中成 45° 入射;其次,待量化的模拟电信号经过驱动放大后通过相位调制器对寻常光(o 光)和非常光(e 光)进行相位调制,利用耦合器将采样光脉冲均分到 N 个信道,通过固定移相模块使每个信道之间引入 π/N 的附加相移;最后,采用偏振分束器实现偏振干涉,在平衡接收机中进行自适应阈值判决。目前该方案已实现采样率 40 GS/s、有效比特数 3.4 bit 的实验结果。此方案采用偏振干涉和自适应阈值判决减少了判决误差,增加了接收机灵敏度,改善了系统信噪比。

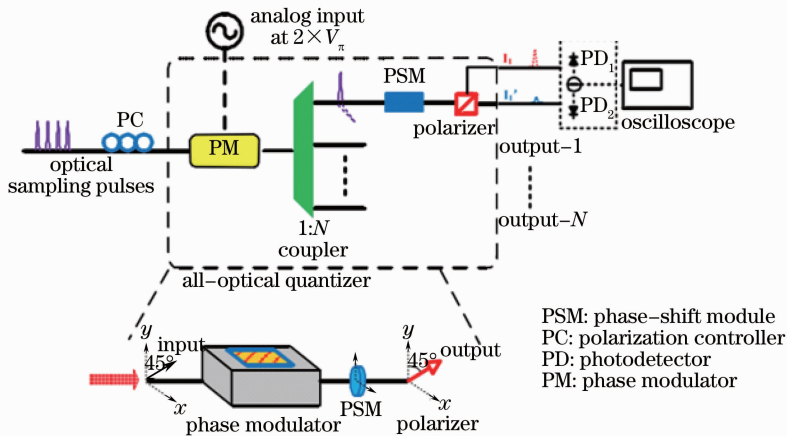


图 3 基于偏振干涉的移相光量化 ADC 原理图

Fig. 3 Schematic of polarization interference-based PSOQ all-optical ADC

3.4 基于孤子自频移的全光 ADC

Xu 等^[7]提出了一种基于孤子自频移(SSFS)的光谱编码全光 ADC 方案。其基本原理是:首先,脉冲源发出的超短光脉冲经过 M-Z 强度调制器后对模拟信号进行采样,采样后的各点光脉冲强度正比于采样时间点的模拟电压值;之后,采样光脉冲经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后输入到一高非线性光纤(HNLF)内,在高非线性光纤输出端由于孤子自频移效应会引起采样光脉冲的光谱偏移,偏移量的大小正比于采样光脉冲的强度,从而实现了光谱的偏移量和待测模拟信号幅度之间的映射;最后,通过波分复用器和交织滤波器进行光谱量化编码,获得二进制的数字信号输出。图 4 给出了 3 bit 量化精度的量化编码原理。目前该方案对正弦信号进行测量已获得了 4.27 bit 的量化精度^[8]。

此方案利用周期翻倍多个交织滤波器实现对光谱移动量的量化编码,规避了泰勒方案实现多周期调制曲线的难题;缺点是孤子自频移量比较有限,难以实现较高精度的模数转换。

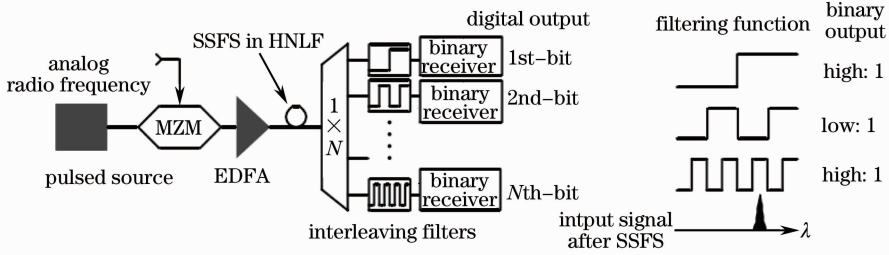


图 4 基于孤子自频移的全光 ADC 原理图

Fig. 4 Schematic of all-optical ADC using SSFS

3.5 基于对称双波导长周期波导光栅和波导阵列光栅的全光 ADC

电子科技大学的张谦述^[9]提出了一种基于对称双波导长周期波导光栅 (LPWG) 和阵列波导光栅 (AWG) 的全光 ADC 方案,如图 5 所示。其基本原理是:利用电光效应改变对称双波导 LPWG 可调谐滤波器的波导折射率来选择滤出对应于不同信号电压的中心波长不同的采样光脉冲;然后利用具有 $2N$ 个输出的 AWG 作为波长量化器,将不同波长的光采样脉冲从不同的输出端口输出,利用光学编码阵列对其进行编码,输出数字信号,完成波长量化过程。该方案理论值有望实现 10 bit、10 GS/s 和 8 bit、40 GS/s 的量化,但 LPWG 和 AWG 的实用化设计难度很大。

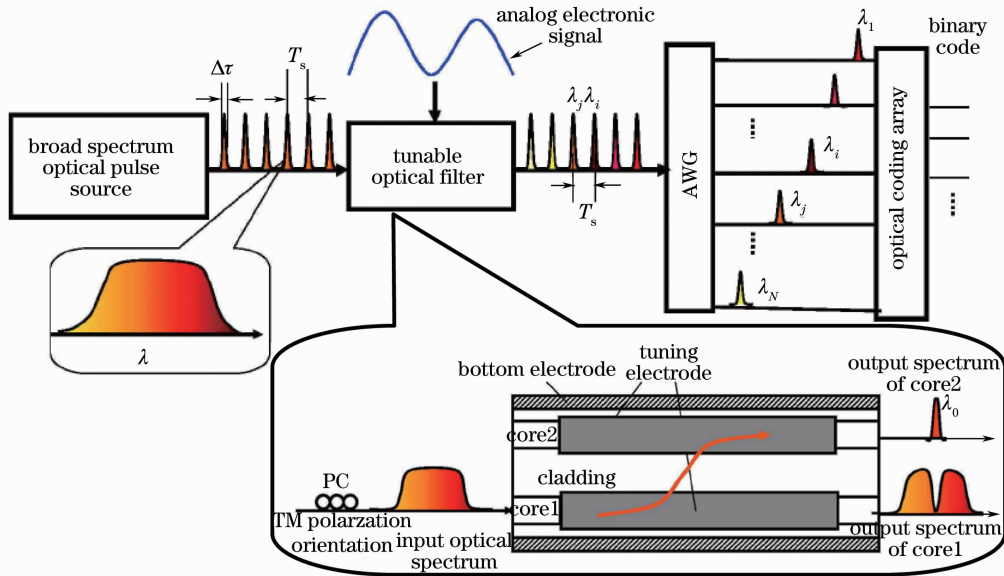


图 5 基于对称双波导长周期波导光栅和波导阵列光栅的全光 ADC 原理图

Fig. 5 Schematic of all-optical ADC based on LPWG and AWG

此方案波长采样与量化的采样速率取决于光脉冲重复频率,而量化精度仅受到采样光脉冲定时抖动和脉冲宽度的限制,降低了对采样脉冲光源功率及强度噪声的要求。但是对称双波导 LPWG 可调谐滤波器电极、波导和 LPWG 光栅的制作、器件的耦合封装、测试等技术还不完善。

4 结束语

全光 ADC 在高速、宽带信号的处理上具有广阔的发展和前景,随着光电子技术和集成技术的发展,全光 ADC 的研究会越来越受到关注,因此加强全光 ADC 的研究具有重要的学术价值和现实意义。目前全光 ADC 还处于探索阶段,没有真正成熟,需要进一步研究新型的全光量化和编码技术,更快地推动全光 ADC 的快速发展,更好地适应 21 世纪这个信息爆炸的时代。

参 考 文 献

- 1 R H Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis[J]. IEEE J Sel Area Commun, 1999, 17(4): 539–550.
- 2 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.
- 3 H F Taylor. An electro-optic analog-to-digital converter[J]. Proc IEEE, 1975, 63(10): 1524–1525.
- 4 Johan Stigwall, Sheila Galt. Interferometric analog-to-digital conversion scheme[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(2): 468–470.
- 5 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.
- 6 Peng Yue. Phase-Shifted Optical Quantization and All Optical Digital-to-Analog Conversion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. 11–12, 63–64.
彭越. 移相光量化与全光数模转换[D]. 北京: 清华大学, 2010. 11–12, 63–64.
- 7 Chris Xu, Xiang Liu. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters [J]. Opt Lett, 2003, 28(12): 986–988.
- 8 Wang Yang, Zhang Hongming, Ma Chao, *et al.*. Arbitrary waveform all-optical analog-to-digital conversion based on phase-shifted optical quantization[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0909002.
王杨, 张洪明, 马超等. 基于移相光量化的任意波形全光模数转换[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0909002.
- 9 Zhang Qianshu. The Research for Microwave Signal Optical Analog-to-Digital Conversion [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005. 63–68.
张谦述. 微波信号光学模数转换方法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2005. 63–68.