

光模数转换技术及其研究进展

张天航 邱琪 苏君 余振芳 范志强

电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

摘要 在模数转换系统中,光模数转换(OADC)技术可增加系统带宽,提高采样速率,克服电子系统的瓶颈,成为目前研究者们研究的热点。讨论了光模数转换技术的分类,介绍了各类光模数转换技术的基本原理、实现方法以及技术特点。基于高速光采样和光量化,深入分析了采样脉冲生成、多通道并行复用、空间干涉、光学非线性效应应用等关键技术,并介绍了相关技术的研究进展和技术指标。

关键词 信号处理;光模数转换;光采样;光量化

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.120003

Optical Analog-to-Digital Conversion Technology and Its Recent Progress

Zhang Tianhang Qiu Qi Su Jun Yu Zhenfang Fan Zhiqiang

*School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu, Sichuan 610054, China*

Abstract In analog-to-digital conversion systems, the optical analog-to-digital conversion (OADC) technology becomes a research hotspot because it can increase the system bandwidth, improve the sampling rate and overcome the bottleneck of electronic systems. The classification of OADC technology is discussed. The fundamental principle, implementation method and technical feature of various OADC technologies are introduced. Key technologies, which include sampling pulse generation, multichannel parallel multiplexing, space interferometry and optical nonlinear effect application, are deeply analyzed based on high-speed optical sampling and optical quantizing. The research progress and technology index of the related technologies are introduced.

Key words signal processing; optical analog-to-digital conversion; optical sampling; optical quantizing

OCIS codes 070.4560; 320.7140; 230.3990

1 引言

模数转换(ADC)作为自然界模拟量和数字量之间转换的桥梁,在信号处理中起着至关重要的作用。随着数字信号处理技术的高速发展,目前的电子模数转换器的采样速率和系统带宽已难以满足日益飞涨的应用需求。电子模数转换器性能的提升主要受比较器的不确定性以及采样时钟的孔径抖动^[1]这两大因素的限制。此外,由于器件材料特性、制作工艺以及系统结构特性等因素的影响,10 GHz 级别采样速率、10 bit 级别有效位数(ENOB)和 3 GHz 级别系统带宽成为目前电子技术水平的极限,而且采样速率和量化位数两者之间的提升是相互制约的。

光学技术的引入为模数转换技术的发展提供了一条新思路。与电脉冲相比,由锁模激光器产生的光脉冲具有更高的重复频率以及更小的抖动,抖动一般只有数十飞秒,甚至数百阿秒^[2],比电脉冲抖动低几个量

收稿日期: 2016-07-04; **收到修改稿日期:** 2016-07-21; **网络出版日期:** 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61271030)

作者简介: 张天航(1990—),男,博士研究生,主要从事微波光子学和集成光学等方面的研究。

E-mail: simayichen@sina.com

导师简介: 邱琪(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光通信、微波光子学和激光技术等方面的研究。

E-mail: qqiu@uestc.edu.cn(通信联系人)

级。同时,光脉冲的脉宽还可压缩至皮秒乃至飞秒量级,使系统拥有更高的采样速率、更低的系统噪声及更宽的系统带宽。比较器的不确定性导致系统在高速量化过程中产生误差,引入光学技术进行等效降频,或者利用光学过程进行量化,可以抑制或避免不确定性的产生,并提高有效位数。光模数转换技术在系统高速率、高精度、宽带宽方面具有很大发展潜力,已成为高性能 ADC 的主要发展方向之一。

2 光模数转换原理

根据光学技术在模数转换过程中的应用手段,可将光模数转换技术分为光电混合模数转换技术和全光模数转换技术两大类。光电混合模数转换技术又可分为光辅助模数转换技术、光采样电量化模数转换技术、电采样光量化模数转换技术 3 种类型。

2.1 光辅助模数转换技术

针对电模数转换系统中某些性能的局限,光辅助模数转换技术采取相应的光学手段进行优化,信号的采样和量化依然采用电子手段完成。

早期的光辅助模数转换技术主要为光时钟辅助技术,该技术利用光时钟上升快、抖动小的特性取代电时钟^[3],使采样速率更接近电子系统的极限,但该技术并未突破电子系统的瓶颈。目前,关于光辅助模数转换技术的研究主要集中在信号的预处理上,即利用光学手段在时域上拉伸电信号,等效于对信号进行了降频处理^[4],在处理高速信号方面可大幅降低后端电子系统的处理压力。光时域拉伸技术的基本原理如图 1 所示。由于色散效应,超短光脉冲在色散补偿光纤(DCF)中展宽为啁啾光脉冲,利用强度调制方式对电信号采样后,再通过色散效应进行二次拉伸,使光信号进一步拉伸。系统拉伸系数为 $M(M=1+L_1/L_2, L_1$ 和 L_2 分别为两段色散光纤的长度),即信号的频率和带宽降低至信号被拉伸前的 $1/M$ 。

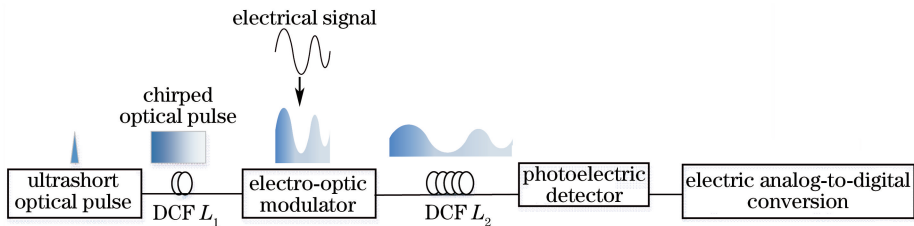


图 1 光时域拉伸技术原理图

Fig. 1 Schematic of optical time-domain stretching technology

时域拉伸技术可通过增大拉伸系数获得较高的采样速率和较宽的有效带宽,且脉冲抖动不会随着拉伸而增大,等效降低了时钟抖动。由于系统色散系数的非线性、调制非线性等因素的影响,信号会产生一定的拉伸畸变,因此抑制信号的畸变将成为时域拉伸技术未来的发展方向。基于该方法的系统拉伸系数大于 250,在捕捉超快瞬态信号时,等效采样速率为 10 TSa/s ^[5]、ENOB 为 4.5 bit。利用搭建的多通道并行系统捕捉连续信号时,可达到采样速率为 200 GSa/s 、模拟带宽为 65 GHz 、有效位数为 3.73 bit ^[6] 的技术水平。

2.2 光采样电量化模数转换技术

光采样电量化模数转换技术为目前主要的光模数转换技术之一,基本原理如图 2 所示。通过电光调制对高速光脉冲序列进行强度调制,实现电信号的采样和保持,生成对应的光信号序列;光信号经过光电探测器,由后端电子 ADC 完成信号的量化和编码。当通过调制采样后的信号序列频率较高时,可通过多通道交

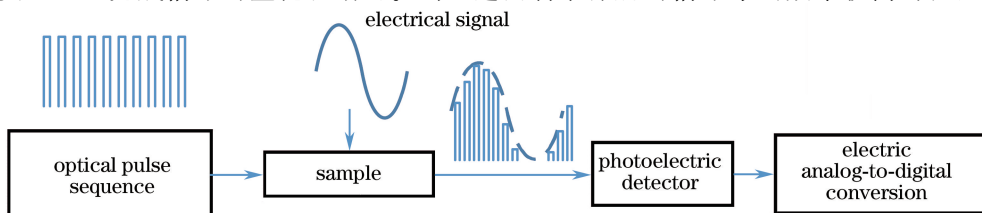


图 2 光采样电量化模数转换技术原理图

Fig. 2 Schematic of analog-to-digital conversion technology of optical sampling and electric quantization

织^[7]等方法并行分路为多路低频信号。

光采样电量化模数转换技术中,光脉冲序列的重复频率即为系统的采样频率,系统的转换精度取决于所采用的电子 ADC 结构。该技术结合了光学前端高速率、低抖动、宽带宽和电子后端工作稳定、低速下量化精度高的优势,提升了系统性能,且相关技术成熟,系统易于集成。研究结果显示,基于该方法并利用光集成器件搭建的多通道系统可以在 40 GSa/s 采样速率下获得 8 bit 的 ENOB^[8],且系统带宽大于 50 GHz。

2.3 电采样光量化模数转换技术

电采样光量化模数转换技术仍然通过传统的电子方式完成信号的采样和保持,利用光学方法完成采样后信号的量化,以避免由电子比较器的不确定性带来的误差。由于电信号的变化需直接转换为光信号的变化,因此电光可调谐器件为该技术的核心。利用采样后的电信号作为电光可调谐器件的控制信号,使产生的光信号某方面的特性(如强度、相位、波长等)随着控制电信号的变化产生相应的改变。利用光学手段计算测得的光信号对应的特性相较于标准光信号的改变量,以完成信号的量化和编码。根据所采用的电光可调谐器件在功能和特性上的不同,可以设计出多种不同的技术方案。

电采样光量化模数转换技术结构简单,可直接输出不同规格的二进制编码,简化了量化过程。但是,该技术未利用光学技术在采样速率提升方面的优势,且系统的性能受电光可调谐器件的响应速度、控制精度和器件带宽的制约,难以实现较高的量化精度。当采样速率为 10 GSa/s 时,理论上该技术的 ENOB 可达到 8 bit,受目前电光可调谐器件的制造技术限制,实际获得的 ENOB 仅为 3~4 bit。

2.4 全光模数转换技术

全光模数转换技术利用光学手段实现信号的采样保持和量化,使电子系统的性能突破电子瓶颈。全光模数转换技术的处理对象可以是传统的电信号,也可以是在信号传输中使用越来越广泛的光信号。对于电信号,可以采用电光强度调制完成光脉冲序列的采样;对于光信号,可以通过全光采样技术完成光脉冲序列的采样。采样后,光信号某方面的特性携带了原始信号的幅度、相位等信息。系统中光学器件的工作特性、光传播特性、非线性效应等因素的影响,使得光信号的特性发生改变。利用光学手段解析信号特性的改变量,建立改变量与原始信号之间的映射关系,对改变量进行阈值判决,根据映射关系对判决结果进行编码输出,从而完成信号量化。

全光模数转换技术中,采样部分和量化部分相互独立。合理设计系统结构和使用高精度光学器件,可以提高采样速率和有效位数。相较于光电混合模数转换技术,全光模数转换技术无需光信号到电信号的转换,从而避免了转换过程中引入的误差。研究结果显示,对于全光模数转换技术,采样速率可达到 100 GSa/s, ENOB 大于 6 bit,系统带宽达到 150 GHz^[9]。

3 关键技术及进展

3.1 光采样技术

3.1.1 采样脉冲的生成

高重复频率的光脉冲序列是光模数转换技术实现高采样速率的基础。通过调制激光振幅或相位,主动谐波锁模激光器可产生重复频率大于 40 GHz 的皮秒脉冲序列,被动锁模激光器产生的脉冲序列的重复频率更高;相较于主动锁模,被动锁模激光器的脉冲抖动受外界环境因素的影响更小,且器件成本较低,易于集成^[10]。

采用棱镜色散补偿、谐振腔优化、环形腔结构等技术的被动锁模 Nd:LuVO₄ 固体激光器可以获得重复频率为 10 GHz、脉宽为 7.9 fs 的脉冲序列,而且可以选择和控制输出偏振态。利用半导体可饱和吸收镜、碳纳米管、石墨烯等辅助器件的被动锁模激光器,可获得重复频率超过 100 GHz、脉宽为 1.1 ps 的脉冲序列^[11]。

3.1.2 多通道并行技术

在高重复频率下,锁模激光器产生的光脉冲序列的稳定性下降。采用重复频率相对较低、较稳定的脉冲序列并利用多通道复用技术,可获得高重复频率,以满足高采样速率的需求。通过上述方式获得的脉冲序列在调制采样后可被分割为多个并行通道,从而降低了后端处理压力。多通道并行技术的原理如图 3 所示。

锁模激光器产生具有一定光谱宽度的光脉冲序列,初始脉冲间隔为 T 。利用波分器件将光脉冲分割为

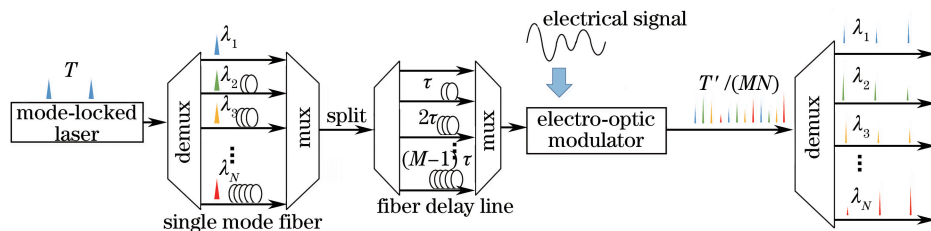


图3 多通道并行技术原理图

Fig. 3 Schematic of multi-channel parallel technology

多个波长通道(设通道总数为 N), 经过单模光纤传输后复用。由于光纤群速度色散作用, 不同中心波长通道的光脉冲在时域上间隔均匀。脉冲自身预啾啾与光纤色散啾啾符号相反时可将脉冲压缩。通过精确控制光纤延迟线阵列, 进一步实现时分复用, 以获得更高的脉冲重复频率。 $T'/(MN)$ 为复用后的光脉冲间隔 (T' 为单位延迟)。利用时分或波分器件, 可将调制采样后产生的高频信号序列分割为多个并行低速信号进行处理。

多通道并行系统具有结构搭建方便、实现难度低、实用性强、相对性能提升效果明显等优点, 采用的波分复用、光延迟控制等技术较为成熟, 对应的光学器件成本较低且易于集成。由参数差异和环境扰动引起的各个通道之间的通道失配带来的误差成为限制系统性能提升最主要的因素。多通道并行技术具有广阔的发展前景, 主要发展方向为提升通道数量的同时优化通道间匹配以及实现高度集成化。

2012年, Wiberg等^[12]实现了单脉冲采样再波分, 减小了孔径抖动带来的影响。研究发现, 系统在10 GHz速率下的ENOB为6.5 bit, 在40 GHz速率下的ENOB为5.9 bit; 利用硅基光波导元件在40 GHz速率下的ENOB为5.2 bit^[13]; 引入子采样结构后, ENOB可提高至8 bit。2013年, Chen等^[14]由集成光学器件连接而成的实验系统采样41 GHz的信号时, ENOB可达7 bit。但是, 由于光纤与芯片的耦合引起失配问题, 片上系统精度有所下降, ENOB仅为3.5 bit^[15]。

3.1.3 全光采样技术

目前, 多数光模数转换技术利用电光强度调制器完成电信号的采样。由于直接处理光信号可降低系统复杂度, 减少转换过程中的能量损耗, 因此迫切需要对光信号进行直接处理。光信号的直接处理技术的核心在于全光采样门的实现。

基于非线性效应的采样为当前全光采样研究的主要方向, 由于非线性效应的作用, 信号光和采样光在介质中产生包含信号光幅度信息的新频率分量, 通过滤波获得该频率分量即可完成采样。根据具体的非线性效应, 可采用多种滤波方式。利用晶体介质中的和频或差频效应, 可得到亚皮秒级的采样窗口, 采样速率高达640 GSa/s^[16]; 利用高非线性光纤中的交叉相位调制和四波混频等特性, 采样速率可以超过400 GSa/s^[17]。半导体光放大器(SOA)具有较强的非线性效应, 且易于集成。利用SOA的增益饱和特性可产生非线性偏振旋转, 采样速率可达160 GSa/s^[18]。

基于非线性效应的全光采样只可调制光信号的幅度, 光信号的相位调制需采用线性光采样技术。该技术利用相干探测中的零差检测, 将采样光脉冲作为本振, 仅存在本振脉冲时发生混频干涉, 并且可同时得到信号的相位信息, 提高采样灵敏度。目前, 基于非线性效应的全光采样方法的采样速率可达160 GSa/s^[19]。

目前, 全光采样技术处于研究阶段, 在偏振噪声控制、辐射噪声控制、系统集成方面存在不足。光信号的直接处理降低了系统损耗, 简化了系统结构, 可促进全光采样技术的实现。

3.2 光量化技术

3.2.1 基于电光调谐的量化技术

基于电光调谐器件的量化是最早提出的光量化技术, 原理简单, 容易实现, 核心思想为建立控制信号电压强度与出射光中心波长之间的线性映射。

基于电光调谐器件的光量化的主要方式包括可调谐激光器控制和可调谐滤波器控制两种。可调谐激光器控制利用信号电压控制可调谐激光器, 以改变输出波长; 利用光栅将不同波长的出射光偏转到不同位置, 探测阵列根据偏转位置进行判决编码。可调谐滤波器控制利用信号电压控制双波长长周期波导光栅的折射

率,滤波宽谱光脉冲,得到与控制信号对应的不同中心波长的光脉冲,利用阵列波导光栅将光脉冲分离,在不同的波长通道完成判决编码。

该类技术的量化等级与电光可调谐器件的波长分辨率相关,不考虑器件的工作非线性产生的误差,为达到 7 bit 的量化等级,要求电光可调谐器件在高速运行下可精确分辨出至少 128 个波长带^[20]。受限于光学器件制造水平和电光可调谐器件的成本,该类技术处于理论实验阶段,目前无法实用化。

3.2.2 基于相位编码的量化技术

基于相位编码的光量化技术是作为全光量化的解决方案提出的。最初的方案基于马赫-曾德尔(M-Z)电光调制器的输出光强随驱动电压的变化呈周期性变化的特点,利用多个调制特性曲线呈周期倍增的调制器进行并行调制采样,对输出光强进行判决编码。该技术量化精度高,但是有效位数受调制电极长度的制约^[21]。随后,出现了调制电极分段光耦合方案、级联 M-Z 调制器方案、串行多点检测方案、光纤挤压移相等改进方案,但 ENOB 都未突破 4 bit^[22]。

空间干涉技术为相位编码光量化提供了新思路,原理如图 4 所示。利用双臂结构的 M-Z 调制器的结构特性,M-Z 调制器一个臂上的光脉冲序列为标准脉冲,另一臂上的光脉冲序列通过相位调制器对模拟信号进行采样。在输出端,两个臂上的光信号产生干涉,不同位置的空间探测器可检测到不同光强,合理配置探测器阵列,使相邻探测器的传输特性曲线之间的相位差固定。对探测器阵列检测到的光强进行阈值判决,输出格雷码,完成量化。2006 年,Stigwall 等^[23]在采样速率为 40 GSa/s 的条件下,获得 3.6 bit 的 ENOB。2007 年,Li 等^[24]采用正交偏振模进行干涉,减少了外界因素对空间光干涉臂的干扰,降低了误差,得到的采样速率为 40 GSa/s,ENOB 为 3.45 bit。2011 年,Chi 等^[25]通过外加静态偏置电压调节相位差,使输出编码为优化的线性码。2013 年,Tait 等^[26]完成了基于微环谐振器的非对称 M-Z 干涉仪集成化结构,实现对频率为 50 GHz 的信号采样。

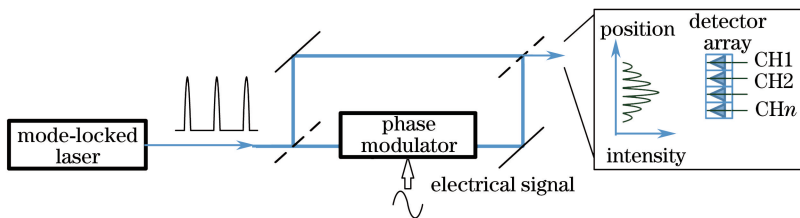


图 4 基于空间干涉的移相光量化原理图

Fig. 4 Schematic of phase-shifted optical quantization based on space interference

基于空间干涉的移相光量化技术结构简单,可扩展性强,无需考虑复杂系统中的器件协调性问题。但是,由于空间光干涉臂易受干扰,量化精度受探测器位置的制约,需要一定空间来完成干涉和探测,因此系统难以小型化、集成化。

3.2.3 基于非线性效应的全光量化技术

基于非线性效应的全光量化技术可直接量化光信号,无需电光转换过程,成为近年来研究者们关注的热点。由于拉曼效应的影响,光脉冲信号在非线性光纤中传输时,脉冲能量不断向低频转移,在频谱方面表现为脉冲波长不断向长波长移动,称为孤子自频移(SSFS)效应。SSFS 使频谱成分发生变化,信号中心波长的频移变化量与信号能量线性相关,利用光信号强度与频移的线性映射关系,再经过滤波器件进行波长筛选后实现编码量化。

2013 年,Takahashi 等^[27]利用优化比较步径技术,提升了量化精度,在采样速率为 100 GSa/s 条件下,得到的 ENOB 为 5.74 bit;改进上述优化技术,理论推导了采样速率为 172 GSa/s 条件下实现 6.3 bit ENOB 的可行性。SSFS 在产生频移的同时,还产生频谱展宽。2015 年,Wu 等^[28]利用多种频谱压缩技术补偿孤子自频移产生的频谱展宽,推导了采样频率为 50 GHz 条件下实现 7.02 bit ENOB 的可行性。基于非线性效应的光量化技术的量化线性度好,系统结构和所采用的光学器件可集成度高。目前,由非线性效应产生的频移量较小,无法满足更高的量化等级需求。该技术的进一步发展对滤波器的分辨率、光脉冲脉宽和啁啾的控制等因素都提出了更高的要求。

4 结束语

电子模数转换技术存在时钟抖动和比较器不确定性两大问题。针对这两个问题,引入了光学技术,使得时钟抖动和比较器不确定性得到较好的改善,系统带宽普遍达到数十吉赫兹,采样速率得到了大幅提升。光采样电量化模数转换技术的采样速率一般可超过 40 GSa/s,全光模数转换技术的采样速率可达 100 GSa/s,时域拉伸技术的采样速率甚至可超过 200 GSa/s。但由于光器件制造水平的限制,与电子系统相比,光模数转换技术的 ENOB 较低。光辅助模数转换技术和电采样光量化模数转换技术的有效位数一般不超过 5 bit,光采样电量化模数转换技术和全光采样模数转换技术的有效位数一般为 5~8 bit。目前,实用性较高的技术方案为在光域进行采样和保持,利用光学手段实现降频,并由电子系统完成量化。

随着光学器件制造水平的提高,将可实现太赫兹级别带宽、有效位数至少为 10 bit 的光模数转换系统。结合全光采样和量化技术,可以直接实现光信号的模数转换。光模数转换系统的集成化研究也逐见成效,小体积、低功耗、超宽带宽、高精度的光模数转换系统将广泛应用于各个领域。

参 考 文 献

- Walden R H. Analog-to-digital conversion in the early twenty-first century[M]. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, 2008: 234-237.
- Song Y J, Kim C, Jung K, *et al.* Timing jitter optimization of mode-locked Yb-fiber lasers toward the attosecond regime [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14518-14525.
- Johnstone A, Lewis M F, Hares J D, *et al.* High-speed opto-electronic transient waveform digitiser [J]. Computer Standards & Interfaces, 1999, 23(2): 73-84.
- Xia Nan, Chen Ying, Chen Xiangning, *et al.* Impact of nonlinearity effect on the performance of photonic time-stretch analog-to-digital converter system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0606002.
夏楠, 陈颖, 陈向宁, 等. 光纤非线性效应对光子时间拉伸模数转换系统性能的影响 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0606002.
- Chou J, Boyraz O, Solli D, *et al.* Femtosecond real-time single-shot digitizer [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(16): 161105.
- Qian Aquan, Zou Weiwen, Wu Guiling, *et al.* Design and implementation of multi-channel photonic time-stretch analog-to-digital converter [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0505001.
钱阿权, 邹卫文, 吴龟灵, 等. 光子时间拉伸模数转换系统的多通道化设计与实现 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0505001.
- Bell J A, Hamilton M C, Leep D A, *et al.* Extension of electronic A/D converters to multi-gigahertz sampling rates using optical sampling and demultiplexing techniques [C]. 23rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 1989, 2: 289-293.
- Wiberg A O. Progress in photonic sampled analog-to-digital conversion [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2015: M2E.1.
- Nagashima T, Hasegawa M, Konishi T. Sampling rate independent resolution upgrade for all-optical analog-to-digital conversion [C]. Asia Communications and Photonics Conference, 2015: AM1B.6.
- Zhong Yihui, Zhang Zuxing, Tao Xiangyang. Research progress of passively mode-locked fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 46-51.
钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 46-51.
- Oehler A E H, Sudmeyer T, Weingarten K J, *et al.* 100-GHz, 1.1-ps pulse train at 1.5 μm from a passively modelocked Er, Yb:glass laser [C]. 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2010: 11636807.
- Wiberg A O J, Tong Z, Liu L, *et al.* Demonstration of 40 GHz analog-to-digital conversion using copy-and-sample-all parametric processing [C]. Collocated National Fiber Optic Engineers Conference on Optical Fiber Communication, 2012: OW3C.2.
- Yang M H, Kuo B P P, Gholami F, *et al.* 40-GHz analog-to-digital converter based on sampling gate of silicon waveguide with ultra-low loss and high conversion efficiency [C]. CLEO: Science and Innovations, 2014: SW3M.5.
- Chen J, Hoyt J L, Smith H I, *et al.* Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter [J]. Optics Express,

- 2012, 20(4): 4454-4469.
- 15 Kartner F X, Khilo A, Nejadmalayeri A H. Progress in photonic analog-to-digital conversion [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2013: OTh3D.5.
- 16 Yamada N, Nogiwa S, Ohta H. 640-Gb/s OTDM signal measurement with high-resolution optical sampling system using wavelength-tunable soliton pulses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 1125-1127.
- 17 Westlund M. Fiber-based all-optical sampling[C]. IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007: CThAA1.
- 18 Gao Song, Sheng Xinzhi, Feng Zhen, *et al.* Capability of single optical buffer loop implementing all-optical time slot interchange based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(8): 084205.
高松, 盛新志, 冯震, 等. 基于半导体光放大器中非线性偏振旋转效应单一光缓存环全光时隙交换处理能力研究[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 084205.
- 19 Sunnerud H, Sköld M, Westlund M, *et al.* Characterization of complex optical modulation formats at 100 Gb/s and beyond by coherent optical sampling[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3747-3759.
- 20 Zmuda H, Hayduk M J, Bussjager R J. Wavelength-based analog-to-digital conversion[C]. SPIE, 2002, 4547: 134-145.
- 21 Currie M, Clark T R, Matthews P J. Photonic analog-to-digital conversion by distributed phase modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(12): 1689-1691.
- 22 Li Bo, Wu Guiling, Su Feiran, *et al.* Analysis and experimental study on phase-encoded photonic analog-to-digital conversion based on phase modulator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0505002.
李博, 吴龟灵, 苏斐然, 等. 基于相位调制器的相位编码光模数转换分析和实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0505002.
- 23 Stigwall J, Galt S. Demonstration and analysis of a 40-gigasample/s interferometric analog-to-digital converter [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(3): 1247-1256.
- 24 Li W Z, Zhang H M, Wu Q W, *et al.* All-optical analog-to-digital conversion based on polarization-differential interference and phase modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(8): 625-627.
- 25 Chi H, Li Z, Zhang X M, *et al.* Proposal for photonic quantization with differential encoding using a phase modulator and delay-line interferometers[J]. Optics Letters, 2011, 36(9): 1629-1631.
- 26 Tait A N, Shastri B J, Fok M P, *et al.* The DREAM: an integrated photonic thresholder [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(8): 1263-1272.
- 27 Takahashi K, Matsui H, Nagashima T, *et al.* Resolution upgrade toward 6-bit optical quantization using power-to-wavelength conversion for photonic analog-to-digital conversion[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4864-4867.
- 28 Wu Kan, Chen Ying, Chen Xiangning, *et al.* Investigation on high-bit all optical quantization based on soliton self-frequency shift effect[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0319004.
吴侃, 陈颖, 陈向宁, 等. 基于孤子自频移现象的高比特全光量化仿真研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0319004.