

# 时间波长交织光模数转换幅度校正方法

叶雷 吴龟灵 苏斐然 陈建平

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 通道内幅度噪声和通道间幅度不匹配是限制时间波长交织光模数转换系统(TWIPADC)性能的主要因素。提出了一种基于自适应干扰对消的 TWIPADC 幅度校正方法。该方法采用自适应干扰对消原理实时消除光源抖动和光时分复用模块引入的通道内幅度噪声,同时采用基于标定的方案对波分复用(WDM)模块等引入的通道间幅度不匹配进行校正。给出了基于所提幅度校正方案的 TWIPADC 系统结构,通过建立相应的数学模型,理论分析了所提幅度校正方案的原理和流程。仿真结果表明:基于自适应对消理论,可以有效实时消除 TWIPADC 中光源以及 OTDM 模块引入的幅度噪声;所提幅度校正方案可以将 16 通道、32 GS/s TWIPADC 系统的信纳比提升 30 dB 以上。

**关键词** 光通信;时间波长交织;自适应对消;光模数转换;幅度校正;通道标定

**中图分类号** TN911.7 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0505001

## Amplitude Correction Method of Time-Wavelength Interleaved Photonic Analog-to-Digital Conversion

Ye Lei Wu Guiling Su Feiran Chen Jianping

*Sate Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

**Abstract** In-channel amplitude noise and inter-channel amplitude mismatch are main factors limiting the performance of time-wavelength interleaved photonic analog-to-digital conversion (TWIPADC) system. An amplitude correction method based on adaptive noise cancellation principle for TWIPADC is proposed. In the scheme, the in-channel amplitude noise introduced by unstability of the laser source and optical time division multiplexing (OTDM) module is eliminated in real time by using the adaptive interference cancellation principle, while the inter-channel amplitude mismatch introduced by the wavelength division multiplexing module is corrected by adopting a calibration procedure. The structure of TWIPADC system based on the proposed correction scheme is presented. The proposed amplitude correction principle and procedure are analyzed theoretically by building the corresponding mathematical model. The simulation results show that the amplitude noise of TWIPADC caused by optical source and OTDM module can be eliminated in real time effectively by the proposed adaptive cancellation scheme. The signal-to-noise-and-distortion ratio of a 32 GS/s TWIPADC system with 16-channel can be improved more than 30 dB by using the proposed amplitude correction method.

**Key words** optical communications; time wavelength interleave; adaptive noise cancellation; photonic analog-to-digital conversion; amplitude correction; channel calibration

**OCIS codes** 060.5625; 060.2330; 070.2025; 220.4830; 120.2440

## 1 引言

光模数转换利用光子学技术的高带宽、高精度、低抖动等优势,具备突破“电子瓶颈”、大幅提升模数转换

**收稿日期:** 2015-11-03; **收到修改稿日期:** 2016-01-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(61127016,61535006)

**作者简介:** 叶雷(1992-),女,硕士研究生,主要从事光模数转换方面的研究。E-mail: YLei\_1011@sjtu.edu.cn

**导师简介:** 吴龟灵(1971-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光模数转换及光子信息处理方面的研究。

E-mail: wuguilin@sjtu.edu.cn (通信联系人)

器性能的巨大潜力<sup>[1-4]</sup>,在通信、雷达、科研等领域具有广泛的应用前景。时间波长交织光模数转换方案(TWIPADC)能同时发挥光子学和电子学的优势,得到广泛的关注和研究<sup>[5-8]</sup>。光源的幅度抖动、时分复用(OTDM)倍增模块和波分复用(WDM)倍增模块、波长相关性等引起的通道内幅度噪声和通道间不均匀性是限制 TWIPADC 系统性能的主要因素之一<sup>[9]</sup>。由于实际制作工艺和精度的限制,单纯靠提升光学器件性能来提高系统性能面临的挑战很大且成本很高,目前已提出的很多方法主要是基于相位调制的实现方案<sup>[10-11]</sup>。Twichell 等<sup>[12]</sup>提出了一种有效消除光采样时钟幅度噪声影响的相位编码采样方案;Williamson 等<sup>[13]</sup>提出了通过系统标定对相位编码 TWIPADC 中的幅度不均匀性进行校正的方案。但相位编码 TWIPADC 系统结构复杂,且接收通道数增加一倍。

本文提出了一种基于自适应干扰对消的 TWIPADC 幅度校正方法。对光源抖动以及 OTDM 模块分光比等引入的通道内幅度噪声,利用自适应对消原理进行实时校正;对 WDM 模块和波长相关性等引入的通道间幅度不匹配,采用基于标定的方案进行校正。

## 2 基于自适应对消的 TWIPADC 幅度校正原理

基于自适应干扰对消的 TWIPADC 系统结构如图 1 所示。锁模激光器(MLL)发出光脉冲序列,经过多级 OTDM 倍增模块之后,重复频率增到  $M$  倍并分为两路。一路作为自适应校正的参考信号经光电探测和数字化后进入信号处理模块;另一路输入系统的  $N$  路 WDM 倍增模块得到更高重复率的光采样时钟。光采样时钟通过马赫-曾德尔调制器(MZM)对输入的射频(RF)信号进行采样,并经解复用模块分为  $N$  路。解复用模块的每路输出在经过光电探测器(PD)、电模数转换器(EADC)和数字处理后,重构出 RF 信号。

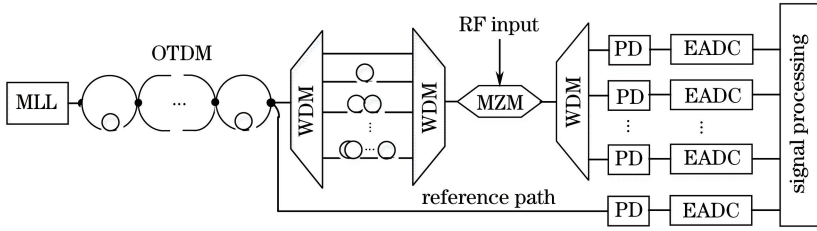


图 1 基于自适应校正的 TWIPADC 系统结构

Fig. 1 Structure of TWIPADC system based on adaptive correction

锁模激光器发出的光脉冲序列可以表示为

$$I_{MLL}(t) = I_0 [1 + \sigma_{MLL}(t)] \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT_s), \quad (1)$$

式中  $T_s$  和  $I_0$  分别为光源的重复周期和平均光强,  $\sigma_{MLL}(t)$  为光源的幅度噪声(定义为光脉冲强度波动的峰-峰值与平均光强之比),  $\delta(t)$  为单位冲击响应。

经过 OTDM 模块后的光脉冲序列可表示为

$$I_{TDM}(t) \propto \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left\{ I_{MLL} \left( t - \frac{iT_s}{M} \right) \cdot [1 + \sigma_{TDM}(t)] \right\}, \quad (2)$$

式中  $M$  为 OTDM 倍频数,  $\sigma_{TDM}(t)$  为 OTDM 模块引入的幅度波动, 主要与 OTDM 模块中各耦合器分光比的不均匀性以及不同支路衰减的不一致性有关。

将 OTDM 倍增产生的光信号分到采样通路和参考通路。采样通路中的光功率要控制在一定范围内, 以避免非线性对系统性能的影响<sup>[9]</sup>。此时, WDM、光纤及 PD 的响应可看作是线性的, WDM 解复用模块第  $k$  路信号经 PD 之后可表示为

$$s_k(n) \propto \frac{I_0}{MN} \left\{ 1 + \sigma_{MLL} \left[ \text{floor} \left( \frac{n}{M} \right) \cdot \frac{T_s}{M} \right] \right\} \cdot \left[ 1 + \sigma_{TDM} \left( \frac{nT_s}{M} \right) \right] \cdot [1 + \sigma_{WDM}(k_n)] \cdot T(k_n, \lambda_k), \quad (3)$$

式中  $\text{floor}(\cdot)$  为取整运算,  $n = 0, 1, 2, \dots, L, k_n = \left( \frac{nT_s}{M} + \frac{kT_s}{MN} \right)$ ,  $\sigma_{WDM}(t)$  表征 WDM 通道间的不一致(包括 WDM 各个通道中光路衰减和光电探测响应等的不一致)引入的幅度不均匀性(定义为不同波长通道接收到

的电信号间幅度波动的峰-峰值与平均幅度之比),  $N$  为 WDM 倍频数,  $\lambda_k$  为第  $k$  路的波长。  $T(k_n, \lambda_k)$  为调制器的传递函数<sup>[14]</sup>

$$T(k_n, \lambda_k) = p + q \cos \left\{ \frac{\pi [V_{RF}(k_n) + V_B]}{V_\pi(\lambda_k)} \right\}, \quad (4)$$

式中  $p, q$  与调制器内部耦合器分光比以及衰减等有关,  $V_{RF}(t)$  为 RF 信号电压,  $V_\pi(\lambda_k)$  为调制器在波长  $\lambda_k$  处的半波电压,  $V_B$  为偏置电压。为了提高采样线性度, 调制器一般工作在  $\pi/2$  偏置点上。

(3)式中, 光源和 OTDM 引入了通道内幅度噪声, WDM 倍增、光电探测以及调制器波长相关性使通道间幅度不匹配。图 2 为 TWIPADC 系统幅度校正方案。首先对每个通道进行通道内幅度校正, 消除光源和 OTDM 引起的  $\sigma_{MII}$  和  $\sigma_{TDM}$ ; 然后, 再进行通道间幅度的校正, 消除通道间不匹配。

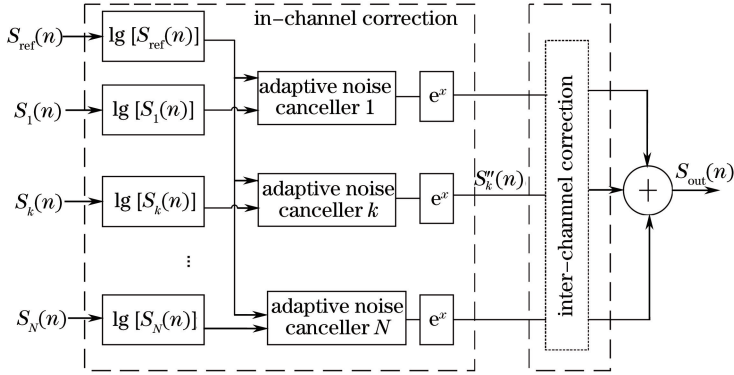


图 2 TWIPADC 幅度校正方案

Fig. 2 Amplitude correction scheme of TWIPADC

对通道内的幅度噪声, 采用一种基于自适应对消的校正方法, 如图 3(a) 所示。1) 对每个通道以及参考通道的输入信号取对数将乘性噪声变为加性噪声。由(3)式可知, 取对数处理后, 通道内噪声、通道间噪声以及包含信号的调制器响应变为相加的关系。此时, 各解复用通道中的通道内噪声与参考通道中的噪声是相关的, 可以用自适应对消的方法来消除<sup>[15]</sup>。图 3(a)中, 取对数处理后的每路解复用信号和参考通道信号同时输入相应的自适应噪声对消器, 消除通道内噪声。2) 再通过指数运算, 恢复出已消除通道内幅度噪声的输出信号。基于最小均方(LMS)算法的  $R$  阶有限响应自适应滤波器的递推表达式为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} s'_k(n) \propto \lg [s_k(n)] - y(n) \\ y(n) \propto \mathbf{w}^H(n-1) \lg [\mathbf{S}_{ref}(n)] \\ \mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \Delta(n) \\ \Delta(n) = \mu(n) s'_k(n) \lg [\mathbf{S}_{ref}(n)] \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $y(n)$  为自适应滤波器的输出,  $\mathbf{w}(n)$  为抽头系数向量,  $\mathbf{H}$  表示转置,  $\mu(n)$  为自适应更新的步长,  $\mathbf{S}_{ref}(n) = [s(n), s(n-1), \dots, s(n-R+1)]$  为参考通道光脉冲的序列向量。

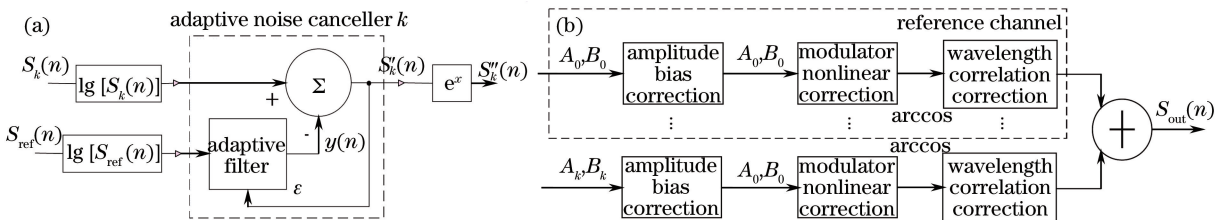


图 3 过程示意图。(a) 自适应对消; (b) 通道间幅度校正

Fig. 3 Process schematic. (a) Adaptive correction; (b) inter-channel amplitude correction

随着输入样本的增多, 经过多次迭代, 自适应滤波器系数逐步趋于稳定。此时, 在最小均方的意义上,  $y(n)$  为  $\lg [s_k(n)]$  中通道内幅度噪声的最优逼近。经过相减, 即可实现针对光源幅度噪声和 OTDM 不均匀性的校正。

由(3)式可知,自适应校正后各通道输出可表示为

$$\begin{cases} s_k''(n) \propto A_k + B_k \cos\left\{\frac{\pi[V_{RF}(n) + V_B]}{V_\pi(\lambda_k)}\right\} \\ A_k = \frac{pI_0}{MN} [1 + \sigma_{WDM}(k_n)], \quad B_k = \frac{qI_0}{MN} [1 + \sigma_{WDM}(k_n)] \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $A_k$  和  $B_k$  分别为第  $k$  个通道的偏置量和增益量,对应通道间的幅度不匹配。

通道间的幅度不匹配采用标定方法来校正,如图 3(b)所示。输入已知频率的标准正弦信号,对各通道经自适应校正后的数据进行傅里叶变换,由于偏置量对应于频谱中的直流分量,幅度量对应于频谱中的信号分量,故通过频谱得到对应通道的偏置量和增益量 ( $A_k, B_k$ ),  $k = 1, 2, \dots, N$ 。任选其中一个通道作为通道间校正的参考通道,所有通道的偏置量和增益量利用文献[17]中的方法校正为与参考通道相同的量 ( $A_0, B_0$ )。为进一步校正强度调制器传递函数  $T(k_n, \lambda_k)$  的余弦响应及波长相关性,对偏置和增益调整后的各通道信号进行反余弦运算。由(4)式可见,反余弦校正后调制器传递函数波长相关性的影响可等效为通道间的偏置和幅度的不均匀性。因此,可采用同样的方法对调制器的波长相关性进行校正。

### 3 性能仿真分析

对上述幅度校正方案进行了仿真分析。TWIPADC 系统中,锁模激光器的重复频率为 250 MHz,采用 8 倍 OTDM 和 16 路 WDM。系统总的采样率为 32 GS/s。通过系统的信纳比(SINAD)来衡量系统的性能。SINAD 表达式为<sup>[18]</sup>

$$R_{\text{SINAD}} = 10 \lg [P_s / (P_n + P_d)], \quad (7)$$

式中  $P_s, P_n, P_d$  分别为信号功率、噪声功率以及谐波失真功率。仿真中,对恢复的时域信号数据进行傅里叶变换,利用频谱得到  $P_s, P_n, P_d$ ,进而计算出  $R_{\text{SINAD}}$ 。

为了分析自适应干扰抵消方法的性能,首先仿真了系统中所有通道都匹配且没有波长相关性的情况。自适应校正前后系统 SINAD 随光源幅度噪声的变化如图 4 所示。OTDM 中每个光耦合器的分光比分别为 49.5/50.5 和 49/51,调制器的调制深度为 20%,设光源噪声符合零均值的均匀分布。在给定的  $\sigma_{\text{MLL}}$  下,产生随机的幅度波动,叠加到幅度均匀的光采样时钟上,得到幅度噪声为  $\sigma_{\text{MLL}}$  的光采样时钟。由图 4 可见,自适应校正之后系统的 SINAD 显著提高,大于 30 dB;而且校正后系统的 SINAD 基本不随光源幅度噪声和 OTDM 中光耦合器的分光比变化。这表明自适应校正方法能有效消除由光源和 OTDM 模块引入的通道内幅度噪声。在没有自适应校正的情况下,分光比的不均匀性越大,系统的 SINAD 越低。这是由于耦合器分光比的均匀性越差,OTDM 引入的通道内幅度不均匀性越大。系统的 SINAD 基本不随光源幅度噪声的增加而增加,主要是因为仿真情况下限制 SINAD 的主要因素是分光比的不均匀性。

图 5 为经不同校正处理后系统的 SINAD 与波分复用通道间幅度不匹配程度的关系。光源幅度波动为

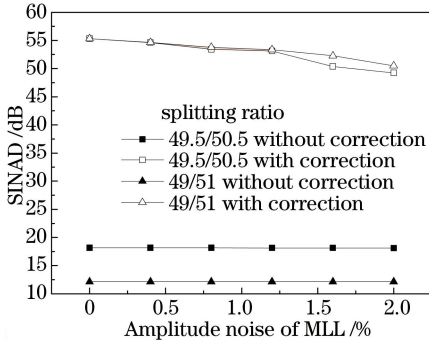


图 4 通道间完全匹配的情况下,自适应校正前后 TWIPADC 系统 SINAD 随光源幅度噪声的变化

Fig. 4 Without inter-channel mismatch, SINAD of TWIPADC system as a function of amplitude noise of MLL with and without correction

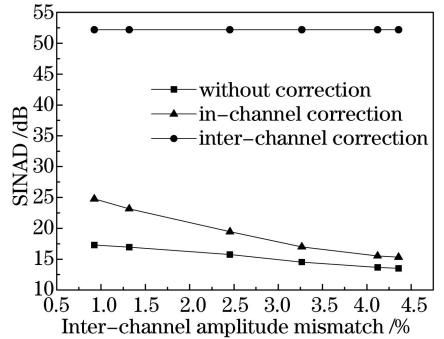


图 5 不同校正处理后,系统 SINAD 随通道间幅度不匹配的变化

Fig. 5 SINAD of TWIPADC system as a function of inter-channel amplitude mismatch after different correction processings



1%, OTDM 中每个耦合器的分光比为 49.5/50.5, 调制深度为 20%, 设通道间的幅度噪声符合均值为零的均匀分布。在给定的  $\sigma_{\text{WDM}}$  下, 随机产生每个通道的幅度噪声, 并叠加到理想情况下每个通道的光脉冲上, 得到幅度噪声为  $\sigma_{\text{WDM}}$  的光脉冲序列。在自适应校正之前, 系统 SINAD 随着通道间幅度不匹配的增大而逐渐下降。自适应校正通道内幅度噪声之后, 由于消除了通道内幅度噪声的影响, 系统 SINAD 有一定的增加。但是由于通道间幅度不匹配仍然存在且一直在增加, 所以系统 SINAD 仍然比较低, 且随着通道间幅度不匹配的增大而逐渐下降。经过通道间的幅度校正之后, SINAD 提升至 53 dB 左右且基本不再随着通道间幅度不匹配的增加而增加, 系统性能明显提升。

幅度校正前后调制深度对 TWIPADC 系统 SINAD 的影响如图 6 所示。仿真中, 激光光源的幅度抖动为 1%, OTDM 中耦合器的分光比为 49.5/50.5, 通道间的幅度不均匀为 1%。由图 6 可见, 在没有幅度校正的情况下, 系统 SINAD 随着调制深度的增加先逐渐提升达到最大值(约 25 dB), 然后下降。这是由于随着调制深度增加, 信号的幅度和调制器的非线性同时增加共同作用所致。调制深度较小时, 调制器响应近似为线性。此时, 调制深度越大, 信号的幅度越大, 系统 SINAD 越高。随调制深度的增加, 调制器的余弦响应引起的非线性越来越大, 最终抵消了信号幅度随着调制深度增加的效果, 并进一步恶化系统的 SINAD。在自适应校正之后, 系统的 SINAD 有所提高, 但随调制深度变化的趋势与没有校正时的类似。调制深度越大, 自适应校正的改进效果越不明显。这是因为随着调制深度的增加, 调制器的非线性成为主要的限制因素。经通道间幅度校正之后, 系统的 SINAD 显著提高, 且基本不随调制深度的增加而恶化。表明通道间校正中的反余弦处理可以有效校正调制器非线性的影响。

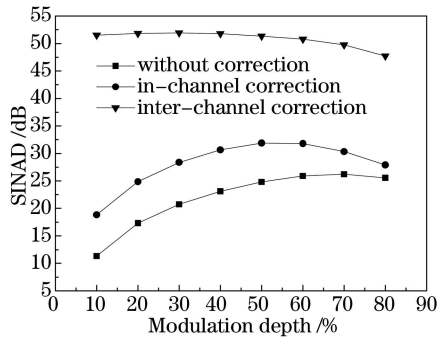


图 6 不同校正处理后, 系统 SINAD 随调制深度的变化

Fig. 6 SINAD of TWIPADC system as a function of modulation depth after different correction processings

## 4 结 论

针对 TWIPADC 系统中的通道内幅度噪声和通道间幅度不匹配, 提出了一种基于自适应对消的幅度校正方案。给出了基于所提幅度方案的 TWIPADC 系统结构, 理论分析了通道内和通道间幅度校正的原理, 并给出了相应的处理流程。在一个 8 倍 OTDM、16 路 WDM 通道、32 GS/s 的 TWIPADC 系统中, 仿真验证了幅度校正方案的性能。结果表明: 自适应对消校正可以有效消除 TWIPADC 中光源以及时分复用模块引入的通道内幅度噪声; 经通道内和通道间幅度校正后, 系统的 SINAD 可提升 30 dB 以上。

## 参 考 文 献

- 1 Walden R H. Performance trends for analog to digital converters[J]. Communications Magazine IEEE, 1999, 37(2): 96-101.
- 2 Khilo A, Spector S J, Grein M E, et al.. Photonic ADC: Overcoming the bottleneck of electronic jitter[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4454-4469.
- 3 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.

- 4 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.
- 5 Valley G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 1955-1982.
- 6 Han Shunli, Hu Weiliang, Zhang Peng. Principle and progress of all-optical analog-to-digital conversion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080025.  
韩顺利, 胡为良, 张鹏. 全光模数转换的原理及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080025.
- 7 Wu G, Li S, Li X, *et al.*. 18 wavelengths 83.9 GS/s optical sampling clock for photonic A/D converters[J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21162-21168.
- 8 Gao H, Chen M, Chen H, *et al.*. Time and wavelength interleaved pulse trains generation based on pure phase processing of optical spectral comb[J]. *Optics Communications*, 2014, 312(4): 275-279.
- 9 Valley G C, Hurrell J P, Sefler G A. Photonic analog-to-digital converters: Fundamental and practical limits[C]. *SPIE*, 2004, 5618: 584164.
- 10 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.
- 11 Wei Zhaolin, Hu Shuling, Wang Xinlong, *et al.*. Development of research on phase modulation to intensity modulation conversion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 110003.  
魏朝林, 胡姝玲, 王鑫龙, 等. 相位调制到强度调制转换技术的研究动态[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 110003.
- 12 Twichell J C, Helkey R. Phase-encoded optical sampling for analog-to-digital converters [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2000, 12(9): 1237-1239.
- 13 Williamson R C, Younger R D, Juodawlkis P W, *et al.*. Precision calibration of an optically sampled analog-to-digital converter[C]. *Holey Fibers and Photonic Crystals/Polarization Mode Dispersion/Photonics Time/Frequency Measurement and Control*, 2003 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings IEEE, 2003: MC4.2/22-MC4.2/23.
- 14 Liu Zengji. Optical fiber communication[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001: 67-76.  
刘增基. 光纤通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 67-76.
- 15 Widrow B, Glover J R, McCool J M, *et al.*. Adaptive noise cancelling: Principles and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1975, 63(12): 1692-1716.
- 16 Zhang Xianda. Signal analysis and processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 278-282.  
张贤达. 信号分析与处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 278-282.
- 17 Shen Xiangming, Wu Guiling, Li Siqi, *et al.*. Correction of amplitude fluctuation for optical analog-to-digital conversion systems[J]. *Optical Communication Technology*, 2011, 35(1): 1-3.  
神祥明, 吴龟灵, 李思其, 等. 光模数转换系统中幅度不均匀性的校正[J]. *光通信技术*, 2011, 35(1): 1-3.
- 18 Waveform Generation Measurement and Analysis Technical Committee of the IEEE Instrumentation & Measurement Society. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters: IEEE Std 1241™-2010[S/OL]. 2011-01-20[2015-10-25]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=5692956>.