

# 通路不对称对基于平衡探测的光模数转换系统性能的影响

刘锐, 吴龟灵, 苏斐然, 金钰韬, 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** 平衡探测器的两输入通路在增益和时延上的不对称会对基于平衡探测的光模数转换(PADC)系统的性能产生影响。建立了基于平衡探测的 PADC 系统的数学模型,理论上分析了系统有效比特位(ENOB)与平衡探测器两输入通路的增益和时延的不对称性,并仿真分析了增益和时延的不对称对系统 ENOB 的影响,同时进行了相应的实验验证。结果表明,在相同调制深度下,系统的 ENOB 随着两输入通路的相对增益和相对时延的增加而减小。当平衡探测器两输入通路在增益和时延上完全一致时,系统的 ENOB 随着调制深度的增加而逐渐减小;当平衡探测器两输入通路在增益和时延上存在偏差时,系统的 ENOB 随着调制深度的增加先增大后减小。

**关键词** 信号处理; 光模数转换; 平衡探测; 增益不对称; 时延不对称

中图分类号 TN203

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0506001

## Effect of Path Asymmetry on Performance of Optical Analog-to-Digital Conversion System Based on Balanced Detection

Liu Rui, Wu Guiling, Su Feiran, Jin Zhengtao, Chen Jianping

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

**Abstract** The asymmetry of gain and time delay in two input paths of the balanced detector will affect the performance of the optical analog-to-digital conversion (PADC) system based on balanced detection. A mathematical model of the PADC system based on balanced detection is built. The relationship between the effective number of bits (ENOB) of the system and the asymmetry of gain and time delay in two input paths of the balanced detector is given. The effect of asymmetry of gain and time delay on ENOB of the system is analyzed by simulation, and corresponding confirmatory experiments are carried out. The results show that ENOB of the system decreases with the increase of relative gain and relative time delay in two input paths under the same modulation depth. When the gain and the time delay in two input paths of the balanced detector are exactly the same, ENOB of the system decreases with the increase of modulation depth. When the gain and the time delay in two input paths of the balanced detector are different, ENOB of the system increases at first with the increase of modulation depth and then decreases.

**Key words** signal processing; optical analog-to-digital conversion; balanced detection; gain asymmetry; time delay asymmetry

**OCIS codes** 060.2360; 060.5625; 040.5160

## 1 引言

电模数转换器(eADC)的性能受时钟抖动、比较器模糊等限制,已接近理论极限<sup>[1]</sup>,难以进一步提升。光子

收稿日期: 2016-12-19; 收到修改稿日期: 2017-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(61535006)

作者简介: 刘锐(1990—),男,硕士研究生,主要从事光模数转换方面的研究。E-mail: rliu25176@sjtu.edu.cn

导师简介: 吴龟灵(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事微波光子信息处理方面的研究。

E-mail: wuguiling@sjtu.edu.cn(通信联系人)

学技术具有大带宽、超低抖动等优点,具备突破电模数转换瓶颈、实现高速高精度模数转换的极大潜力<sup>[2]</sup>。随着光电子器件和光子学技术的进步,结合光子学技术的光模数转换技术引起了越来越多的关注<sup>[3-7]</sup>。

时间波长交织光模数转换器是当前光模数转换器的主要方案之一<sup>[8]</sup>。由于光采样脉冲具有非负的特点,以及调制深度( $m$ )受电光调制器线性度的限制,直接利用光电探测器进行光电转换得到的已调信号含有携带直流的分量,从而占用后端量化的量程,严重限制了光模数转换器的有效比特位(ENOB)。Nejadmalayeri 等<sup>[9-10]</sup>提出了一种基于马赫-曾德尔(MZM)双端口调制器的平衡探测方案,该方案使得探测输出的信号中携带的直流分量相互抵消,从而充分利用后端量化的量程来提高系统的 ENOB。在实际应用中,平衡探测器的两输入通路存在相对增益偏差和相对时延,从而导致两路携带直流的分量不能完全相消。残留的携带直流的分量会影响后端模数转换器(ADC)的量化量程有效利用率,从而影响系统的 ENOB。本文从理论上推导了基于平衡探测的光模数转换系统的 ENOB 与平衡探测两路增益和时延不一致的关系,并仿真分析了不同调制深度下两路增益和时延的不一致性对系统 ENOB 的影响,同时进行了实验验证。

## 2 理论分析

基于平衡探测的时间波长交织光模数转换系统结构示意图如图 1 所示。光采样脉冲发生器产生高稳定度的采样光脉冲序列,利用波分复用(WDM)可使重复率倍增<sup>[8]</sup>。利用光放大器对高重复率的光采样脉冲序列进行放大,通过双端口强度调制器对射频信号进行采样,输出两路相位相差  $180^\circ$  的调制光脉冲序列。将调制器的两路输出分别输入 WDM 以进行解复用。两个 WDM 输出相同波长的信号进入平衡探测器(BPD),将 BPD 输出的电信号输入到 eADC 以进行量化重构。

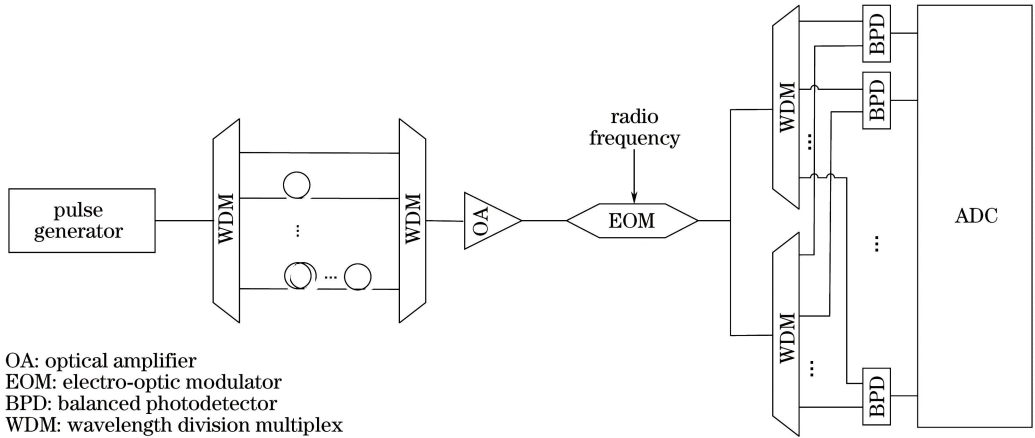


图 1 基于平衡探测的时间波长交织光模数转换系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of time wavelength intertwined optical analog-to-digital conversion system based on balanced detection

WDM 第  $n$  个通道的光采样脉冲序列可表示为<sup>[11]</sup>

$$P_n(t) = P_A \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} P_s(t - mT_s), \quad (1)$$

式中  $P_A$  为单通道光采样脉冲序列的平均功率,  $P_s$  为归一化采样脉冲波形,  $T_s$  为单通道采样周期,  $t$  为时间。双端口 MZM 调制器的响应为余弦函数<sup>[12]</sup>, 当输入调制信号很小时, 双端口强度调制器的响应函数可近似表示为

$$t_M(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\pi C}{2V_\pi} V_{IN}(t) \\ \frac{1}{2} - \frac{\pi C}{2V_\pi} V_{IN}(t) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $V_\pi$  为调制器的半波电压,  $C$  为调制器的对比系数,  $V_{IN}(t)$  为输入的射频信号。设平衡探测器两输入通路的相对增益偏差为  $k$  (定义为上、下两路增益的差值与上通路增益的比值), 相对时延为  $\tau_0$ , 则平衡探测器

输出的电信号可表示为

$$V_{\text{BPD}}(t) = \frac{1}{2}R_{\text{D}}R_{\text{L}}[h_{\text{E}}(t) * P_n(t) - (1-k)h_{\text{E}}(t - \tau_0) * P_n(t - \tau_0)] + \frac{\pi C}{2V_{\pi}}R_{\text{D}}R_{\text{L}}\{h_{\text{E}}(t) * [P_n(t)V_{\text{IN}}(t)] + (1-k)h_{\text{E}}(t - \tau_0) * [P_n(t - \tau_0)V_{\text{IN}}(t - \tau_0)]\}, \quad (3)$$

式中  $R_{\text{D}}$  为平衡探测器的响应度,  $R_{\text{L}}$  为负载阻抗,  $h_{\text{E}}(t)$  为后端电路的频率响应,  $P_n(t)$  为 WDM 第  $n$  个通道的光采样脉冲序列。(3) 式中, 第一项携带直流分量, 第二项携带信号分量, 分别记为  $V_{\text{DC}}$  和  $V_{\text{AC}}$ 。根据 IEEE 标准 1057<sup>[13]</sup>, 对于 ENOB 为  $N$ 、量程以 0 对称的 eADC, 系统的 ENOB 可表示为

$$B_{\text{ENOB}} = N + \log_2 \left\{ \frac{\max\{|V_{\text{AC}}(t)|\}}{|V_{\text{DC}}(t)| + \max\{|V_{\text{AC}}(t)|\}} \right\}. \quad (4)$$

由(4)式可见, 携带直流分量部分(本身为脉冲信号, 不能由隔直器滤除)的存在会占用 eADC 的量程, 降低光模数转换系统的 ENOB。

### 3 仿真分析

考虑到无通道失配的多通道光模数转换系统可以等效为单通道光模数转换系统<sup>[11]</sup>, 且平衡探测通路不一致对不同波长通道的影响是相同的, 系统仿真采用如图 2 所示的基于平衡探测的单波长通道光模数转换系统结构。经过双端口调制器输出的光脉冲序列共分为两路, 上路经过光可调衰减器和光可调延迟线后, 与下路的光脉冲序列一起进入平衡探测器进行光电转换, 探测输出的电信号经放大器放大到 eADC 的满量程, 最后在 eADC 中进行量化处理。主要仿真参数如下: 光采样脉冲序列为重复频率为 250 MHz、脉宽为 10 ps 的高斯脉冲序列, 调制的射频信号为 10 MHz 的正弦信号, 后端电路带宽为 1 GHz, eADC 的 ENOB 为 11 位。

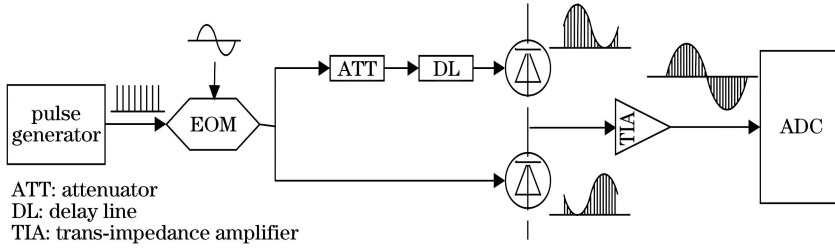


图 2 基于平衡探测的单波长通道光模数转换系统结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of single wavelength channel optical analog-to-digital conversion system based on balanced detection

图 3 给出了基于平衡探测的光模数转换系统的 ENOB 在不同调制深度下与相对增益偏差的关系。仿真过程中, 保持两路时延完全一致, 调制深度分别为 0.05, 0.12, 0.15, 0.23, 0.40。可以看出, 在较小的调制深度下, 系统的 ENOB 在相对增益偏差为 0 时可接近 eADC 的 ENOB(11 位), 并随着两路相对增益偏差的增大而逐渐减小。这是因为当相对增益偏差为 0 时信号中携带直流的分量可被完全消除, 在可近似为线性的较小调制深度下, 系统的 ENOB 接近 eADC 的 ENOB; 随着相对增益偏差的增加, 残留的携带直流的分量越来越大, 其占用的量化量程也越来越大, 系统的 ENOB 随之下降。随着调制深度的增大, 在相对增益偏差为 0 处系统的 ENOB 逐渐减小, 而在相对增益偏差不为 0 处系统的 ENOB 先增大后减小, 如图 4 所示。这是因为当相对增益偏差为 0 时, 系统的 ENOB 仅受调制器的非线性影响; 而在相对增益偏差不为 0 的情况下, 系统的 ENOB 同时受携带信号的分量大小和调制器非线性的影响。当调制深度较小时, 系统的 ENOB 主要由携带信号的分量大小决定, 携带信号的分量随调制深度的增大而增大, 系统的 ENOB 也随之增大; 随着调制深度的增大, 调制器的非线性影响越来越大, 系统 ENOB 的增加逐渐变缓; 当调制深度增大到一定程度后, 调制器的非线性成为限制系统 ENOB 的主要因素, 系统的 ENOB 随着调制深度的增大而逐渐减小。从图 3 可以看出, 随着调制深度的增大, 系统的 ENOB 随着两路相对增益偏差的增大而减小的趋势逐渐变缓。这是由于随调制深度的增大调制器非线性的逐渐增大抵消了一部分携带信号的分量对系统 ENOB 的贡献。

图 5 给出了系统的 ENOB 在不同调制深度下与两路相对时延的关系。仿真中, 保持两路增益完全一

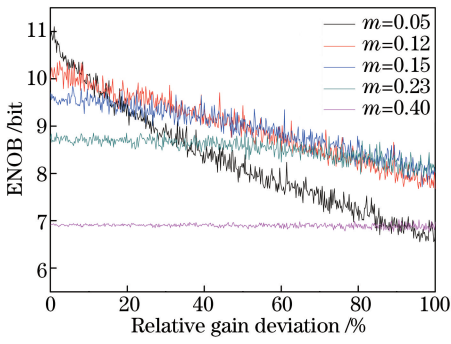


图3 系统的 ENOB 在不同调制深度下随相对增益偏差的变化

Fig. 3 Variation in ENOB of system with relative gain deviation under different modulation depths

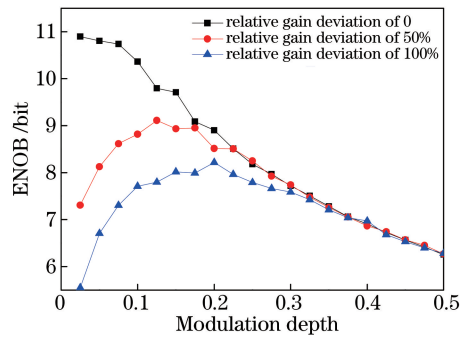


图4 系统的 ENOB 在不同相对增益偏差下随调制深度的变化

Fig. 4 Variation in ENOB of system with modulation depth under different relative gain deviations

致,调制深度分别为 0.05,0.12,0.15,0.23,0.40。可以看出,在较小的调制深度下,系统的 ENOB 随着两路相对时延的增大先迅速减小,然后趋于不变。这是因为较小的相对时延对应于两个电脉冲峰值附近的相互偏移,而较大的相对时延对应于两个电脉冲边缘的相互偏移。对高斯脉冲来说,脉冲峰值对相对时延变化更加敏感,从而导致两路相消的结果对两路相对时延的变化也越敏感。随着调制深度的增加,调制器的非线性逐渐成为限制系统 ENOB 的主要因素,系统的 ENOB 随之下降,且 ENOB 随相对时延的增大而减小的趋势逐渐变缓。当调制深度增大到一定程度(如  $m=0.40$ )时,ENOB 基本不随相对时延的变化而变化。当相对时延为 0 时,系统的 ENOB 随着调制深度的增大而减小;当相对时延不为 0 时,系统的 ENOB 随着调制深度的增大先增大后减小。

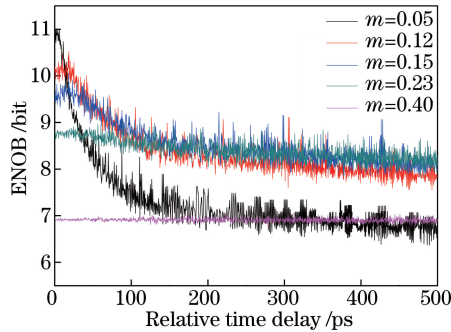


图5 系统的 ENOB 在不同调制深度下随相对时延的变化

Fig. 5 Variation in ENOB of system with relative time delay under different modulation depths

## 4 实验结果

根据图 2 所示的框图搭建实验系统。锁模激光器(MLL)作为脉冲发生器,产生重复率为 250 MHz 的光采样时钟;经过双端口调制器加载 10 MHz 射频信号,产生两路互补的被调制光脉冲序列;机械可调衰减器(MVOA)的调节精度为 0.02 dB;可调光延迟线的调节范围为 560 ps,精度为 0.2 ps;平衡探测器的带宽为 1 GHz;使用的电放大器的带宽为 10~1200 MHz,增益范围为 -26 dB~34 dB;用采样率为 20 GHz 的示波器完成后端电量化。

图 6 给出了系统的 ENOB 在不同调制深度下随平衡探测器两路相对增益偏差的变化。由图可见,当调制深度较小时,系统的 ENOB 随平衡探测器的两路相对增益偏差的增大而逐渐减小,并且变化趋势随着调制深度的增加逐渐变缓。随着调制深度的增加,在相对增益偏差为 0 处,系统的 ENOB 受调制器非线性的影响随调制深度的增大而减小;在相对增益偏差不为 0 处,系统的 ENOB 随调制深度的增大先增大后减小(由于测试曲线有限,在靠近增益偏差为 0/100%的位置,只显示出系统的 ENOB 随调制深度的单调减小/增加)。对比图 3、4 可以看出,上述实验的变化趋势与仿真分析结果是一致的。

图 7 给出了系统的 ENOB 在不同调制深度下随平衡探测器两路相对时延的变化。由图可见,当调制深

度较小时,在相对时延为 0~120 ps 的范围内,系统的 ENOB 随着相对时延的增大而快速减小;在相对时延为 120~300 ps 的范围内,系统的 ENOB 随相对时延的增大而缓慢减小。当调制深度增大到一定程度时,调制器的非线性成为限制系统 ENOB 的主要因素,系统的 ENOB 基本不随相对时延的变化而变化。当相对时延为 0 时,调制深度越大,系统的 ENOB 则越小。在相对时延小于 100 ps 的范围内,系统的 ENOB 随调制深度的增大先增大后减小。上述实验的变化趋势与图 5 中的仿真结果是一致的。在相对时延大于 100 ps 的范围内,系统的 ENOB 随调制深度的增大而增大,其原因是在实验所采用的调制深度范围内,相对于由调制深度增大引起的调制器非线性对系统 ENOB 的恶化作用,携带信号分量的增大对系统 ENOB 的改善更加显著。如果进一步增加调制深度,调制器的非线性将逐渐取代携带信号的分量而成为影响系统 ENOB 的主要因素,且系统的 ENOB 将随之减小。对比图 5 可以看出,上述实验结果的变化趋势与仿真分析结果是一致的。

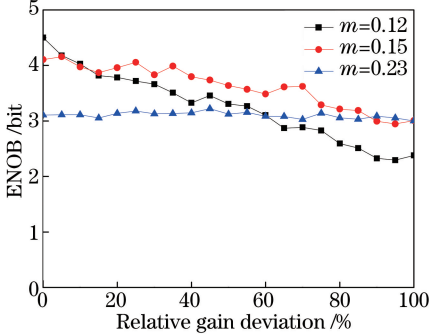


图 6 ENOB 随相对增益偏差变化的实验结果

Fig. 6 Experimental results of variation in ENOB with relative gain deviation

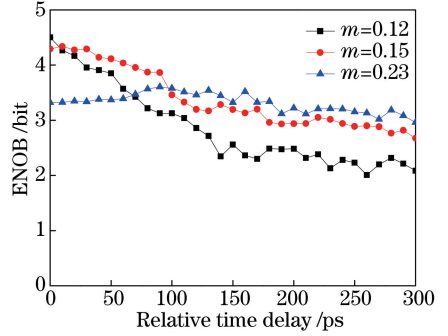


图 7 ENOB 随相对时延变化的实验结果

Fig. 7 Experimental results of variation in ENOB with relative time delay

与仿真结果相比,实验得到的系统 ENOB 较小。这主要受限于以下因素:1) 光采样脉冲幅度抖动<sup>[14]</sup>; 2) 实验中采用高速采样的方式获取采样点,没有进行严格同步,每个脉冲上取样点的位置存在偏差;3) 电后端放大电路引入的噪声和示波器的自身噪声。

## 5 结 论

针对基于平衡探测的光模数转换系统中平衡探测器的两输入通路在增益和时延上的不对称对系统性能的影响进行了分析。通过理论推导,给出了系统的 ENOB 与平衡探测器两输入通路的增益和时延不一致的数学关系。仿真分析了系统的 ENOB 随平衡探测器两输入通路相对增益偏差和相对时延的变化,并通过实验验证了部分仿真结果。

## 参 考 文 献

[1] Walden R H. Analog-to-digital converters and associated IC technologies[C]. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, 2008: 10323621.

[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] Valley G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 1955-1982.

[4] Gao H B, Chen M H, Chen H W, *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.

[5] 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.

[6] 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.

- [7] Ye Lei, Wu Guiling, Su Feiran, *et al.* Amplitude correction method of time-wavelength interleaved photonic analog-to-digital conversion[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0505001.  
叶 雷, 吴龟灵, 苏斐然, 等. 时间波长交织光模数转换幅度校正方法[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505001.
- [8] Clark T R, Kang J U, Esman R D. Performance of a time- and wavelength-interleaved photonic sampler for analog-to-digital conversion[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(9): 1168-1170.
- [9] Nejadmalayeri A H, Grein M E, Khilo A, *et al.* A 16-fs aperture-jitter photonic ADC: 7.0 ENOB at 40 GHz[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2011: 12255715.
- [10] Kim J, Park M, Perrott M H, *et al.* 7-ENOB resolution photonic analog-to-digital conversion of narrowband microwave signal at 40 GHz[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2008: 10172185.
- [11] Su F R, Wu G L, Ye L, *et al.* Effects of the photonic sampling pulse width and the photodetection bandwidth on the channel response of photonic ADCs[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 924-934.
- [12] Juodawlkis P W, Twichell J C, Betts G E, *et al.* Optically sampled analog-to-digital converters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2001, 49(10): 1840-1853.
- [13] Souders M, Blair J, Boyer W. IEEE Std 1057-1994[J]. IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders, 1994, 12: 19-21.
- [14] Gao Feng. Study on signal correction for time-wavelength interleaved photonic analog-to-digital conversion[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.  
高 峰. 时间波长交织光模数转换信号校正技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.