

文章编号: 0253-2239(2009)09-2529-05

半导体光放大器全光采样的线性度与转换效率表征

张尚剑 刘 永 张谦述 李和平 刘永智

(电子科技大学光电信息学院, 宽带光纤传输与通信教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要 利用半导体光放大器非线性偏振旋转效应实现全光采样具有采样速度快、输入抽运功率小的优点, 为高速全光模数转换提供了可能途径。提出了半导体光放大器全光采样线性度和转换效率的表征方法, 该方法利用传输曲线的多项式拟合函数表征采样系统, 通过多项式的余弦代换和级数展开, 得到全光采样线性度和转换效率与多项式系数的解析关系, 从多项式系数直接计算线性度和转换效率。该方法无需复杂的傅里叶变换运算, 其计算结果与傅里叶频谱分析结果吻合, 可用于全光采样线性度和转换效率的精确表征, 还可以拓展用于信号调制的非线性失真分析。

关键词 信号处理; 全光采样; 半导体光放大器; 非线性失真; 线性度

中图分类号 TN245 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092909.2529

Characterization on Linearity and Conversion Efficiency of All-Optical Sampling Based on Semiconductor Optical Amplifiers

Zhang Shangjian Liu Yong Zhang Qianshu Li Heping Liu Yongzhi

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, Opto-Electronic Information School, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The all-optical sampling based on the nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers has the advantages of high-speed operation and small pump power, and it shows a possible solution for high-speed all-optical analog-to-digital (A/D) conversion. A novel method to characterize the linearity and efficiency of the all-optical sampling is proposed. The all-optical sampling transfer curve is fitted by a polynomial function, and the sampling system is described by the polynomial function. The efficiency and the harmonic distortion of the sampling process can be analytically expressed by the polynomial coefficients after substitution and expansion of the cosine function. It is not necessary to execute a complicated Fourier transform, and the results from our method are agreeable with those obtained by the Fourier analysis method. This method is simple but accurate and is useful for the full characterization on the linearity and efficiency of all-optical sampling based on semiconductor optical amplifier and can be extended to the nonlinear distortion of the analogue signal modulation.

Key words signal processing; all-optical sampling; semiconductor optical amplifier; nonlinear distortion; linearity

1 引 言

基于半导体光放大器双折射效应产生的非线性偏振旋转特性能够实现模拟光信号的脉冲采样^[1], 该采样方法为高速全光模数转换提供了可能途径^[2~4]。该方案具有采样速率高、抽运功率小的

优点; 在采样过程中, 采样脉冲信号会被放大, 有利于提高信噪比; 最重要的是, III-V 族半导体材料可以在光学芯片上实现大规模的集成。

理想的全光采样系统应该是高效率的线性系统, 即输出采样脉冲的峰值功率与模拟信号光功率

收稿日期: 2008-10-14; 收到修改稿日期: 2009-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(60736038)、国家 863 计划(2007AA01Z269)、预研基金(51302060101)、教育部新世纪人才计划(NCET-06-0805, NCET-07-0152)和四川省杰出青年基金(08ZQ026-12)资助项目。

作者简介: 张尚剑(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事基于半导体光放大器的全光信号处理方面的研究。

E-mail: sjzhang@uestc.edu.cn

呈线性变化关系。由于很多采样系统都是基于非线性效应机理,这一过程必然存在非线性失真^[5,6],因此分析采样系统的线性特性必不可少。在衡量采样系统方面,有线性度和转换效率两个指标。一种方法是利用采样传输曲线衡量采样指标。用传输曲线偏离其最小二乘直线的程度来计算采样线性度。根据拟合直线方法的不同,有端基线性度、独立线性度等不同的方法^[7]。而转换效率,一般是以此拟合直线的斜率来表征。另一方法是广泛用于信号分析的傅里叶频谱分析法^[8~10]。其利用频谱分析仪或者波形分析仪获得输入信号和输出信号的基波和各次谐波的分量,从中得到线性度和转换效率信息。

利用直线拟合传输曲线的方法得到的是传输曲线本身的线性度,并不是真正的采样系统的线性度,该方法具有局限性和不足;傅里叶频谱分析利用傅里叶卷积运算对比分析输入信号和输出信号的频谱,由于输出采样脉冲含有脉冲本身和幅度包络的两种频谱成份,需要剔除脉冲本身频谱,才能得到输入模拟信号与输出脉冲包络的频谱对比,这种方法分析结果准确,但是测量或者计算过程非常繁琐,且仪器成本较高。

本文通过传输曲线的多项式函数来表征全光采样系统,利用多项式系数直接计算得到输出采样脉冲包络谐波信息,实现全光采样的线性度和转换效率全面评价。该方法无需对输入、输出信号进行傅里叶频谱分析。为了验证本方法的有效性,将计算结果与傅里叶谐波分析法结果进行了对比。

2 理论与方法

基于半导体光放大器双折射效应产生的偏振旋转特性实现全光采样的基本方案如图 1 所示^[11]。将波长为 λ_p 脉冲探测光和波长为 λ_s 的模拟信号光通过光纤耦合器耦合同向注入半导体光放大器中,入射的模拟信号光将调制半导体光放大器中的载流子浓度和增益,使得采样脉冲光的偏振态发生旋转,通过检偏器把脉冲光的偏振态调制转换为强度调制,光滤波器把输入的模拟信号光滤掉,只让调制后

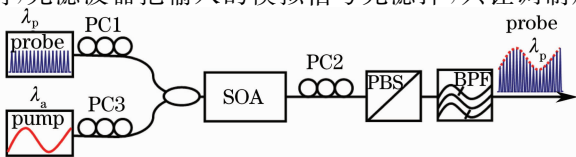


图 1 基于半导体光放大器偏振旋转的全光采样原理

Fig. 1 Scheme of all-optical sampling based on nonlinear polarization rotation

的高速脉冲光通过,从而实现高重频脉冲光对模拟信号光的高速采样。

设模拟信号光输入强度为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 且 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, 取值范围 $x_i \in [x_1, x_r]$, 采样光脉冲输出峰值强度为 y_i , 取值范围 $y_i \in [y_1, y_r]$, 由采样点 (x_i, y_i) 可得到采样传输曲线, 如图 2 所示, 在 $[x_1, x_r]$ 范围内可以用具有普遍意义的多项式函数来近似, 设为

$$y = T(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i, x \in [x_1, x_r], y \in [y_1, y_r], \quad (1)$$

其中 m 为多项式阶次 ($m < n, m, n$ 均为正整数), $a_i (i = 0, \dots, m)$ 为多项式系数。当 $m = 1$ 时, 传输曲线是一条直线; 若 $m = 1$ 且 $a_0 = 0$, 则为理想的线性采样。

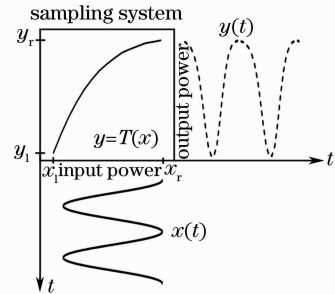


图 2 多项式方法示意图

Fig. 2 Scheme of the proposed polynomial method

通常, 多项式的系数 $a_i (i = 0, \dots, m)$ 确定由最小二乘法获得, 即使得

$$\sigma_m^2 = \sum_{j=1}^n (y_j - \sum_{i=0}^m a_i x_j^i)^2 \quad (2)$$

达到最小值; 而多项式的阶次 m 由不同 m 拟合时的相关系数 R^2 确定, 相关系数以回归偏差占总偏差的比率来表示, 是回归模型拟合优度的评价指标, 其定义为

$$R_m^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\sum_{i=0}^m a_i x_j^i - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

式中 y_j 表示实际值, \bar{y} 表示 y_j 的平均值^[12]。随着 m 的增加, 相关系数 R^2 也将增加并逐渐接近 1, 因此定义判决容限 ϵ , 当相关系数 R_m^2 的相对增加小于判决容限 $\epsilon_m \leq \epsilon$ 时, 此时 m 作为多项式的阶次。

根据信号分析理论, 周期信号通过傅里叶级数展开其频谱为离散谱; 非周期信号通过傅里叶变换其频谱为连续谱; 周期信号与非周期信号, 傅里叶级数与傅里叶变换, 离散谱与连续谱, 在一定条件下可以互

相转化并统一起来^[13]。因此对于单个频率信号采样失真足讨论任意模拟信号光采样失真的基础。

假定模拟信号光为满足输入条件的单频率 ω 时变信号,即

$$x(t) = c_0 + c_1 \cos(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

其中

$$x_1 \leq c_0 - |c_1| \leq c_0 + |c_1| \leq x_r, \quad (5)$$

则输出采样脉冲光信号包络为

$$y(t) = T[c_0 + c_1 \cos(\omega t + \varphi)] = \sum_{i=0}^m p_i \cos^i(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

显然,包络函数 $y(t)$ 是关于 $\cos(\omega t)$ 的多项式函数,利用三角函数公式,可以展开倍角和差的形式^[13]

$$y(t) = \frac{q_0}{2} + \sum_{k=1}^m q_k \cos[k(\omega t + \varphi)], \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, m$$

(7)式表示了输出采样脉冲包络的信号构成,将(4)式和(7)式对比可得到全光采样的效率为

$$E_t = q_1/c_1, \quad (8)$$

该采样过程产生的 k 次谐波失真

$$D_k = |q_k/q_1|, k = 2, 3, \dots, m \quad (9)$$

可以看出利用多项式函数表示采样系统可计算出全光采样脉冲包络的基波放大倍数,即谐波失真和转换效率,实现对全光采样线性度和转换效率的评价。

3 仿真计算

本文计算所用的半导体光放大器的器件参数由文献[10]给出,半导体光放大器的偏置电流 400 mA,探测光为重频高斯脉冲,重复频率为 2 GHz,峰值功率为 0.1 mW,脉冲半高全宽(FWHM)为 0.08 ns。模拟信号光为 100 MHz 的余弦信号,峰值功率 0.9 mW,谷值功率 0.2 mW。两束光的入射偏振角均为 45°。

图 3 给出了采样传输曲线。当 $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 时,对传输曲线进行拟合,相关系数 R_m^2 分别为 0.908356, 0.995572, 0.999936, 0.999947, 0.999957, 0.999957, 相关系数的相对增加分别为 9.60%, 0.44%, 0.0011%, 0.0001%。设判决容限 ϵ 为 0.002%,因此选定 $m = 4$ 作为多项式阶数,此时采样传输曲线多项式函数为

$$T(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4,$$

式中 $a_0 = -1.4405, a_1 = 12.115, a_2 = -13.631, a_3 = 6.5348, a_4 = -1.0307$ 。在模拟信号光输入下输出采样光的包络可表示为

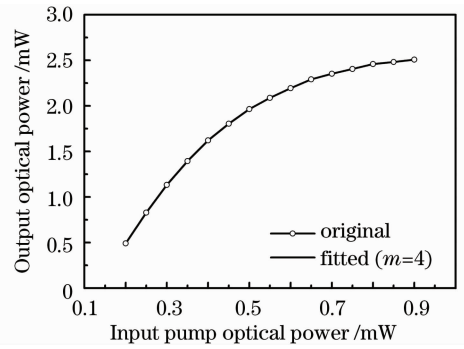


图 3 全光采样传输曲线及其多项式拟合

Fig. 3 Transfer curve and the polynomial fitted curve of all-optical sampling

$$y(t) = T[c_0 + c_1 \cos(\omega_0 t + \varphi)] =$$

$$\sum_{k=0}^4 q_k \cos[k(\omega_0 t + \varphi)],$$

其中 $c_0 = 0.55$ mW, $c_1 = 0.35$ mW。利用三角函数变换公式可得到系数 q 的值

$$q_0 = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i c_0^i + 2c_1^2 \times \left(\frac{1}{4} a_2 + \frac{3}{4} a_3 c_0 + \frac{3}{2} a_4 c_0^2 \right) + \frac{3a_4 c_1^4}{8},$$

$$q_1 = \sum_{i=1}^4 i a_i c_1 c_0^{i-1} + 6c_1^3 \left(\frac{1}{8} a_3 + \frac{1}{2} a_4 c_0 \right),$$

$$q_2 = 2c_1^2 \left(\frac{1}{4} a_2 + \frac{3}{4} a_3 c_0 + \frac{3}{2} a_4 c_0^2 \right) + \frac{a_4}{2} c_1^4,$$

$$q_3 = 2c_1^3 \left(\frac{1}{8} a_3 + \frac{1}{2} a_4 c_0 \right),$$

$$q_4 = \frac{a_4}{8} c_1^4$$

代入多项式系数 a_i 得到 $q_0 = 1.7972, q_1 = 0.9649, q_2 = -0.2968, q_3 = 0.0457, q_4 = -0.0019$ 。利用(8)式和(9)式计算出全光采样的效率和谐波失真,结果如表 1 所示。

表 1 全光采样效率和线性度

Table 1 Calculated results with our method and the Fourier spectrum

	E_t	D_2	D_3	D_4
Our method	2.7571	0.3082	0.0482	0.0026
Fourier spectrum	2.822	0.3092	0.0510	0.0024

为了验证该结果的准确性,我们对全光采样的模拟信号光波形、输出采样信号进行傅里叶频谱分析。模拟信号光、输出采样光信号波形如图 4 所示。将图 4 信号包络进行归一化离散傅里叶变换,如图 5 所示。通过傅里叶频谱幅度可以计算出全光采样信号的谐波分量,从而得到全光采样线性度和转换效率结果,如表 1 所示。从表 1 可以看出,本文方法

与谐波分析得到的线性度和转换效率的计算结果两者吻合很好,其偏差在 5% 以内,偏差主要是由于多项式的有限阶数引起的截断误差,通过提高多项式阶数可以进一步减少偏差。

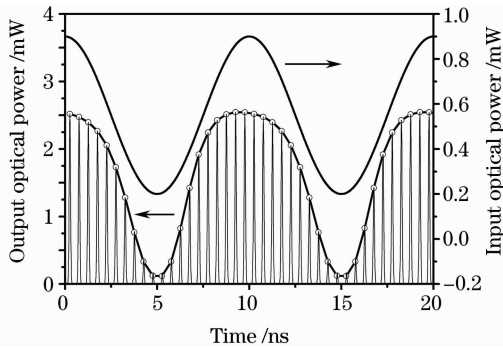


图 4 全光采样输入信号和输出信号波形

Fig. 4 Waveform of input and output signals by all-optical sampling

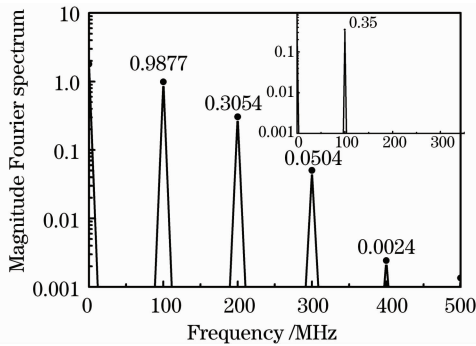


图 5 全光采样输入信号和输出信号波形频谱

Fig. 5 Fourier spectrum of all-optical sampling input and output signal waveform

在基于半导体光放大器偏振旋转的全光采样中,探测光的输入偏振角对采样传输曲线具有影响。作为例子,我们利用本文方法对不同输入偏振角下采样线性度和转换效率进行评价。图 6 给出了模拟信号光在 0.2~0.7 mW 时不同输入偏振角下的采

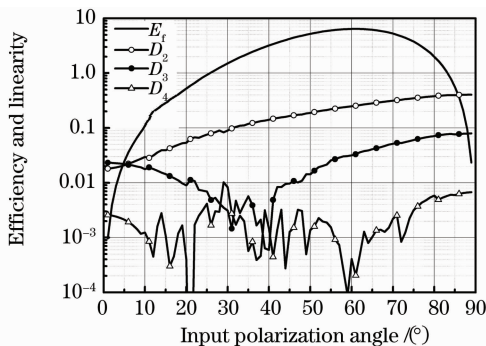


图 6 不同输入偏振角下全光采样的线性度和转换效率

Fig. 6 Conversion efficiency and linearity of all-optical sampling at different input polarization angles

样线性度和转换效率的计算结果。从图 6 中可以看出采样效率随着输入偏振角的增加先增大,在 62° 达到最大,之后逐渐减小。采样二次谐波失真随着输入偏振角增大而单调增大,与之相对,三次谐波和四次谐波失真比二次谐波失真要小至少一个数量级,其变化是先减小而后增大。假如要使得采样二次谐波失真小于 10% (-10 dBc),则输入偏振角约为 30°,此时采样效率为 1.7。

4 讨 论

如果被采样信号不是单一频率的正弦或者余弦信号,而是一般的模拟信号,应用本方法进行采样失真分析需要先将模拟信号通过傅里叶级数或者傅里叶变换进行展开。理论上,傅里叶展开存在无限项,实际带宽限制,只取有限项表征,故存在截断误差。为了减小误差,一方面需要增加采样脉冲的工作频率,使得模拟信号的高频细节充分体现,这样传输曲线的采样点将增加。另一方面,为了更精确表征采样系统,需要提高多项式拟合的阶次 m 。此时,多项式方法仍然可行,但是这两方面会增加计算工作量。

需要指出,我们的全光采样方法是基于半导体光放大器的增益饱和效应工作,因此本文多项式方法已经表征了半导体光放大器增益饱和对小信号脉冲光峰值功率的变化;但是,增益饱和也会导致小信号脉冲本身的形状变化,在本文中由于输入采样脉冲功率很小,这一变化可以忽略。当在小信号脉冲功率较大时,这一问题的讨论需要通过分析输入脉冲和输出脉冲形状的频谱组成得到。

另外,实际采样过程,被采样模拟信号的最高频率与采样脉冲的重复频率满足奈奎斯特采样定理,而本文的工作信号频率较低且侧重于评价方法研究,故未讨论半导体光放大器的载流子恢复过程^[14,15]。如要对更高频率的模拟信号进行采样,此时需要考虑载流子恢复时间测量高频信号下的传输曲线进行,得到修正传输曲线后应用本文方法仍可实现采样评价。

5 结 论

本文对全光采样中的采样效率和线性度评价方法进行了研究,提出了用传输曲线的拟合多项式函数来表征采样系统,通过多项式系数直接计算得到谐波失真和转换,实现全光采样的线性度和转换效率全面评价新方法。该方法避免了对采样输入、输

出信号进行傅里叶频谱分析,计算过程简单,结果准确。该方法可以用于全光采样效率和线性度的精确表征,也可以拓展用于信号调制的非线性失真分析。

参 考 文 献

- 1 Zhang Q. S, Zhang S. J, Huang L. *et al.*. All-optical high speed sampling based on nonlinear polarization rotation in a semiconductor optical amplifier[C]. *SPIE*, 2007, **6838**: 68381L
- 2 Valley G. C. Photonic analog-to-digital converters[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**: 1955~1982
- 3 Juodawlkis P. W, Twichell J. C, Betts G. E *et al.*. Optically sampled analog-to-digital converters [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 2001, **49**(10): 1840~1853
- 4 Alistair J. P. SOA-Based all optical processing [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2007
- 5 J. Shim, B. Liu, J. Piprek *et al.*. Nonlinear properties of traveling-wave electroabsorption modulator[C]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1035~1037
- 6 Liu Maotong, Yang Aiyang, Sun Yunan. Optical sampling based on four-wave mixing theory in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 151~158
刘茂桐, 杨爱英, 孙雨南. 基于半导体光放大器四波混频原理的光采样[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 151~158
- 7 Wang Hong, Ma Junxing. Research of experiment curve linearity [J]. *Henan Science*, 2005, **23**(1): 26~28
王 虹, 马俊兴. 实验曲线的线性度研究[J]. *河南科学*, 2005, **23**(1): 26~28
- 8 Yang J. Z, Yu C. H, Liu C. W. A new method for power signal harmonic analysis [J]. *IEEE Trans. Power Delivery*, 2005, **20**(2): 1235~1239
- 9 Zhang S. J, Zhu N. H, Pun E. Y. B *et al.*. Rate-equation-based circuit model of high-speed semiconductor lasers[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(3): 539~542
- 10 Chung Y. D, Kang Y. S, Choi K. S *et al.*. RF gain and IMD characteristics of electroabsorption modulator for analog applications [C]. *Microwave Photonics*, 2005 *International Topical Meeting on*, 2005, 153~156
- 11 Zhang Shangjian, Zhang Qianshu, Li Heping *et al.*. All-optical sampling using nonlinear polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier[J]. *Chinese. J. Semicond.*, 2008, **29**(6): 1031~1035
- 12 Busemeyer J. R, Wang Y. M. Model comparisons and model selections based on generalization criterion methodology[J]. *J. Mathematical Psychology*, 2000, **44**(1): 171~189
- 13 Edward W. K, Bonnie S. Heck. *Fundamentals of Signals and Systems Using the Web and Matlab (Third Edition)* [M]. Prentice Hall, 2007
- 14 Cheng Mu, Wu Chongqing, Zhao Rui *et al.*. All-optical buffer based on polarization rotation in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1898~1902
程 木, 吴重庆, 赵 瑞等. 基于半导体光放大器偏振旋转的全光缓存器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1898~1902
- 15 Liu Jian, Hu Yonghong, Zhang Shangjian *et al.*. Frequency response measurement of semiconductor optical amplifiers based on direct-subtracting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 871~874
刘 戡, 胡永红, 张尚剑等. 直接扣除法测量半导体光放大器频率响应[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 871~874