

基于周期极化铌酸锂波导的软件同步光采样

刘茂桐 杨爱英* 孙雨南

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要 随着大于 40 Gb/s 高速光通信系统的出现,为了保证光信号传输质量,需要对光信号进行监测。对于带宽超过传统光电探测器和示波器可测量带宽的高比特率数据光信号,光采样技术是进行时域测量的重要手段。采用固定频差的方法可以用百兆速率的采样脉冲对高速光信号进行采样,降低了对采样后电数据处理系统带宽的要求。在对基于周期极化铌酸锂(PPLN)波导中和频效应的采样过程进行建模仿真的基础上,实现了对 Optsim 获得的光传输线内 10 Gb/s 的非归零码(NRZ)和归零码(RZ)信号的采样。采用软件同步算法对采样数据进行处理,获得信号的眼图,这一方法可使采样系统对硬件的要求降到最低。与理想与门获得的采样结果进行比较,对 PPLN 波导的光采样特性和采样质量进行了分析。

关键词 非线性光学;高速光信号处理;光采样系统建模;周期极化铌酸锂;软件同步光采样

中图分类号 O437.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0283

Software-Synchronized Optical Sampling Based on PPLN Waveguide

Liu Maotong Yang Aiying Sun Yunan

(Department of Opto-Electronic Engineering, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract With the emergence of high speed optical communication system above 40 Gb/s, to ensure the quality of the transmitted optical signal, the optical signal in the transmission line should be monitored. The optical sampling technique is an important tool to perform time-resolved measurements of optical data signals at high bit rates with a bandwidth that cannot be reached by conventional photodetectors and oscilloscopes. The method with a fixed offset frequency can be used to sample the high speed optical signals with the sampling pulses of several hundred MHz. It relaxes the requirements of the bandwidth of electrical data processing system after the sampling. Based on the modeling and simulation of optical sampling process utilizing the sum-frequency generation in periodically poled lithium niobate (PPLN), the optical sampling of 10 Gb/s nonreturn-to-zero (NRZ) and return-to-zero (RZ) signals in the transmission line obtained by Optsim is realized. The sampling results are processed by software-synchronized algorithm and the eye diagram of the signals is constructed. This method requires the least amount of hardware components. Compared with the sampling results of ideal AND gate, the sampling characteristics of PPLN waveguide and the quality of the sampling are analyzed by the obtained eye diagrams.

Key words nonlinear optics; ultrafast optical signal processing; modeling of optical sampling system; periodically poled lithium niobate; software-synchronized optical sampling

1 引 言

现代大容量光通信网络中,如何进一步提高单波长信道的传输速率是光通信研究领域的一项永恒课题。随着传输速率的提高,光纤非线性效应对传输信号质量的影响也变得不可忽略,如何对传输信号的质量进行监测是保证通信网络可靠性的关键问

题。在光域内通过光采样测量光信号的方法是突破电子速度瓶颈限制的重要手段,它是通过用超短光脉冲控制光非线性介质对高速传输的光信号进行采样的。可用于光采样的非线性介质包括半导体光放大器(SOA)^[1],高非线性光纤(HNLF)^[2],KTP晶体^[3]和周期极化铌酸锂(PPLN)^[4]等。采用准相位

基金项目:国家自然科学基金(60777024)资助项目。

作者简介:刘茂桐(1982—),女,博士研究生,主要从事高速光非线性信号处理方面的研究。E-mail:aliceliu_bit@hotmail.com

导师简介:孙雨南(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信与集成光学方面的研究。E-mail:syn@bit.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail:yangaiying@bit.edu.cn

匹配 PPLN 波导中二阶非线性相互作用进行采样具有许多显著的优点^[5,6],如不依赖于比特速率、对传输协议和数据格式的严格透明、大转换带宽和高转换效率、无自发辐射噪声和频率啁啾、低串扰等。根据 PPLN 中不同二阶非线性过程,包括和频产生(SFG)、差频产生(DFG)、级联和频/差频(cSFG/DFG)、级联倍频/差频(cSHG/DFG)等,可以构建几种具有不同功能的光采样性能监测(OPM)系统,且 SFG 是实现有效监测的最主要的非线性过程^[7]。本文首先对基于 SFG 的采样过程进行了仿真,实现了对 10 Gb/s 的非归零(NRZ)码和归零(RZ)码传输信号的固定频差光采样^[8]的仿真,被处理信号由 Optsim 仿真获得。应用软件同步算法^[8]对没有同步信息的采样数据进行处理,实现眼图的重构,并计算系统 Q 值,将理想与门采样得到的 Q 值与 Optsim 软件通过传统眼图算法计算的结果进行比较对采样系统模型进行了验证,进而对基于 PPLN 的采样系统进行仿真,通过与理想与门采样结果的对比可以看出 PPLN 中非线性效应对采样的影响。固定频差软件同步采样不需要任何时钟恢复和触发信息,采用软件同步算法从大量冗余数据中提取判决点处的采样信号,从异步采样信号恢复出信号眼图,因此系统对硬件的要求降到了最低^[9],该算法对信号速率和信号调制格式都是透明的,在很短的采样时间内就可以测得高速传输信号的 Q 值,由于不需要硬件时钟恢复,采样脉冲的时间抖动对采样质量的影响降到了最低,甚至可以采用自由运转被动锁模激光器作为采样光源^[10],因此可以说软件同步光采样结合了异步采样和同步采样的优点,摒除了各自的缺点,受到了广泛关注,本文建立的基于 PPLN 的软件同步光采样模型对 OPM 的研究具有一定的实用和参考意义。

2 基于 PPLN 中和频过程的异步采样模型

PPLN 中和频过程的示意图如图 1 所示,其中 $\omega_p, \omega_q, \omega_s$ 和 ω_{PM} 分别为抽运光、信号光、和频光和相位匹配频率。从图 1 可以看出对通信系统的监测可以以一种轮流检测的方式实现,通过调节抽运光波长来满足准相位匹配条件,转换效率在该条件下达到最大,从而获得单波长信道的采样数据。PPLN 中的和频过程可实现信号光与抽运光“与”的功能,该过程可应用耦合波方程加以描述。通过采用慢变

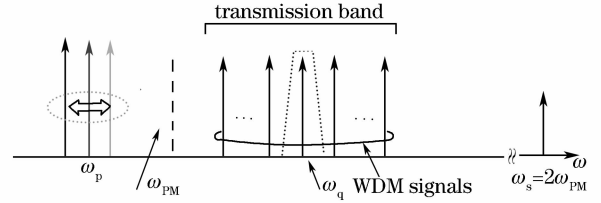


图 1 PPLN 中 SFG 过程示意图

Fig. 1 Schematic description of SFG in PPLN
包络近似,描述 PPLN 中抽运和信号光相互作用的耦合波方程可表示为^[7]

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_{2p} \frac{\partial^2 A_p}{\partial \tau^2} = -\frac{\alpha_p}{2}A_p - i\kappa_p A'_s A_q^*, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_q}{\partial z} + \left(\frac{1}{v_{gq}} - \frac{1}{v_{gp}}\right) \frac{\partial A_q}{\partial \tau} + \frac{i}{2}\beta_{2q} \frac{\partial^2 A_q}{\partial \tau^2} = -\frac{\alpha_q}{2}A_q - i\kappa_q A'_s A_p^*, \quad (2)$$

$$\frac{\partial A'_s}{\partial z} + \left(\frac{1}{v_{gs}} - \frac{1}{v_{gp}}\right) \frac{\partial A'_s}{\partial \tau} + \frac{i}{2}\beta_{2s} \frac{\partial^2 A'_s}{\partial \tau^2} = -\left(\frac{\alpha_s}{2} + i\Delta k\right)A'_s - i\kappa_s A_p A_q, \quad (3)$$

式中 $A_s = A'_s e^{i\Delta k z}$, $A_i(z, \tau)$, $i = p, q, s$ 分别为抽运光、被采样信号和采样结果的慢变包络, $\tau = t - z/v_{gi}$. v_{gi} 是角频率为 ω_i 的光信号的群速度,表示为^[11]

$$v_{gi} = c \left[n_{ei} - \lambda_i \frac{dn_e(\lambda_i, T)}{d\lambda_i} \right]^{-1}, \quad (4)$$

β_{2i} 为群速度色散,且有^[11]

$$\beta_{2i} = \frac{\lambda_i^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 n_e(\lambda_i, T)}{d\lambda_i^2}, \quad (5)$$

式中 n_e 为波导有效折射系数,由文献[12]给出

$$n_e^2(\lambda, T) = A + BT^2 + \frac{C + DT^2}{\lambda^2 - (E + FT^2)^2} + G\lambda^2, \quad (6)$$

计算参数 $A = 4.5567, B = 2.605 \times 10^{-7}, C = 0.97 \times 10^{-13}, D = 2.70 \times 10^{-20}, E = 2.01 \times 10^{-7}, F = 5.4 \times 10^{-14}, G = -2.24 \times 10^{10}$. α_i 为传输损耗,假定其在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段为 0.3 dB/cm , 在 780 nm 波段为 0.6 dB/cm ^[13]. κ_i 为 SFG 耦合因子,并定义为^[14]

$$\kappa_i = d_{\text{eff}} \sqrt{\frac{8\pi^2}{n_e(\lambda_p, T)n_e(\lambda_q, T)n_e(\lambda_s, T)c \epsilon_0 \lambda_i^2 A_{\text{eff}}}}, \quad (7)$$

Δk 为 SFG 过程的相位失配,定义为^[14]

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda_s} n_e(\lambda_s, T) - \frac{2\pi}{\lambda_p} n_e(\lambda_p, T) - \frac{2\pi}{\lambda_q} n_e(\lambda_q, T) - \frac{2\pi}{\Lambda(\lambda_{PM}, T)}, \quad (8)$$

根据二次谐波产生(SHG)过程的相位匹配条件

$$\frac{2\pi}{\lambda_{2PM}} n_e(\lambda_{2PM}, T) - 2 \frac{2\pi}{\lambda_{PM}} n_e(\lambda_{PM}, T) - \frac{2\pi}{\Lambda(\lambda_{PM}, T)} = 0, \quad (9)$$

可以求出 PPLN 的极化周期 Λ , 其中 $\lambda_{2PM} = \lambda_{PM}/2$, λ_{PM} 为相位匹配波长。计算中用到的其他参数定义及取值如表 1 所示。

表 1 PPLN 波导 SFG 过程仿真参数

Table 1 Simulation parameters of SFG process in PPLN waveguide

Parameters	Value
Probe (pump) wavelength $\lambda_q, \lambda_p / \mu\text{m}$	1.55, 1.572
Effective nonlinear coefficient $d_{\text{eff}} / (\text{pm/V})$	17.189
Effective interaction area $A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	46.5
Crystal temperature T / K	300

基于 PPLN 波导中的 SFG 过程对通信系统中的传输信号进行固定频差采样, 采样原理示意图如图 2 所示^[9]。

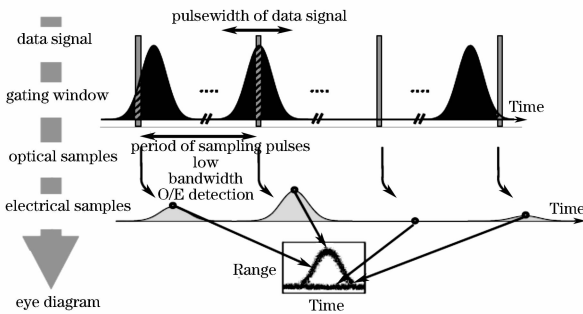


图 2 固定频差采样原理

Fig. 2 Principle of optical sampling with a fixed offset frequency

速率为 B 的数据序列和短采样脉冲一起注入到非线性介质中, 采样脉冲的重复频率为 $f_s = (B - \Delta f)/M$, 其中 Δf 为采样脉冲与待测信号的频差, 它决定了每比特的扫描速率, M 为降频因子。光器件中的非线性过程产生一个新的频率分量, 具有采样脉冲的重复频率, 这串脉冲正比于与采样脉冲重叠处的数据信号的能量, 通过光带通滤波器可将其滤出, 并由一个低带宽的光电探测器进行探测。每个短脉冲产生一个幅度正比于短脉冲能量的脉冲响应, 最后, 电信号被计算机以频率 $k \cdot f_s$ 采样, 其中 $k \geq 1$ 为每个脉冲的采样点数, 应用每个电脉冲的峰值和扫描速率 Δf 即可构造原始信号的眼图。一般将频差表示为等效时间差 $\Delta t = 1/f_s - M/B$, 软件同步算法的目的就是要通过异步采样数据提取出精确的时间差信息来重构眼图。以半峰全宽(FWHM)为 1 ps 的高

斯脉冲序列作为采样脉冲, 被采样信号由传输速率 10 Gb/s 长度为 $2^6 - 1$ 的随机序列作为基本序列构成, 总共对 10000 段基本序列进行采样, 采用这种分段采样的仿真方法可以大大提高模型的运算效率。总采样时间为 0.063 ms, 取 $M = 10$, 则可获得如图 3 所示的固定频差异步采样结果。信号光总传输长度为 240 km, 其中 40 km 为色散补偿光纤, 传输后的被采样信号峰值功率约为 1 mW, 采样脉冲峰值功率约为 1 W, PPLN 波导长度为 40 mm。从图 3(a) 可以看到 PPLN 中的 SFG 效应实现了与门功能, 获得了记录信号光强度的采样脉冲序列; 图 3(b) 中由固定频差异步采样获得的采样信号是随机分布的, 不能看出周期性信息。

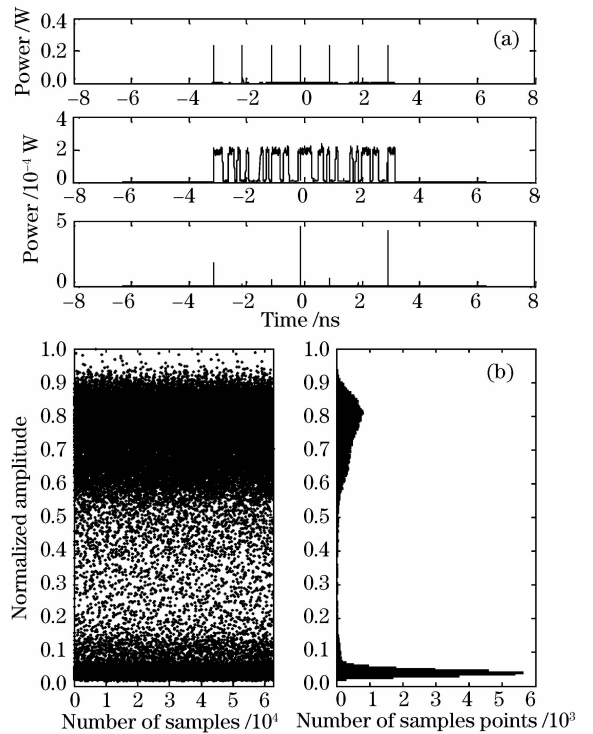


图 3 基于 SFG 过程的 10 Gb/s NRZ 信号光采样结果。(a) 对基本序列的采样结果及抽运光和信号光的 PPLN 输出结果; (b) 对 10000 段基本序列的采样结果

Fig. 3 Sampling results of 10 Gb/s NRZ optical signal based on SFG process. (a) sampling result for basic sequence and the outputs of pump and probe from PPLN; (b) sampling results of 10000 basic sequences

3 采样结果的软件同步处理

软件同步算法主要分三步^[8]: 基于傅里叶变换的粗同步; 基于时间抖动的统计算法搜索出精确的

等效时间差;恢复眼图。以下以10 Gb/s信号的理想与门采样结果为例逐步进行说明。首先为了获得周期性信息,对采样结果进行傅里叶变换得到等效采样比特数 S ,由 $\Delta t_{\text{coarse}} = S/(BN)$ 即可计算出粗等效时间差,其中 N 为总采样点数,在傅里叶变换前需要对数据进行方差变换^[8],使变换结果出现一个强频谱分量,变换结果如图4所示。采样获得的 $N = 62580$, S 取频谱峰值对应的频率,由此可计算出 NRZ 和 RZ 信号的 Δt_{coarse} 为6.71784 ps,仿真中实际取的等效时间差为6.71734 ps。根据获得的粗等效时间差将采样点在眼图窗口内进行排列可得如图5所示的粗同步眼图。把眼图的时间轴分成 n 份,统计每个时间区内振幅处于 $[1/4, 1/3]$ (采样数据归一化后) 内的采样点数 $k_i (i = 1, 2, \dots, n)$,并求平方和得到眼图同步误差系数 $\sum_{i=1}^n k_i^2$,对 Δt_{coarse} 附近每个扫描到的 Δt 进行计算可得如图6所示的关系曲线,可见该系数对眼图同步质量有很大灵敏度,可从图6中明显找到 RZ 系统最佳等效时间差 $\Delta t_{\text{accurate}}$ 为

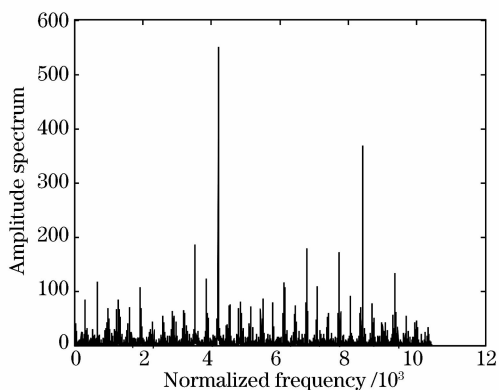


图4 NRZ 信号采样结果的傅里叶变换

Fig. 4 Fourier transform of NRZ sampling results

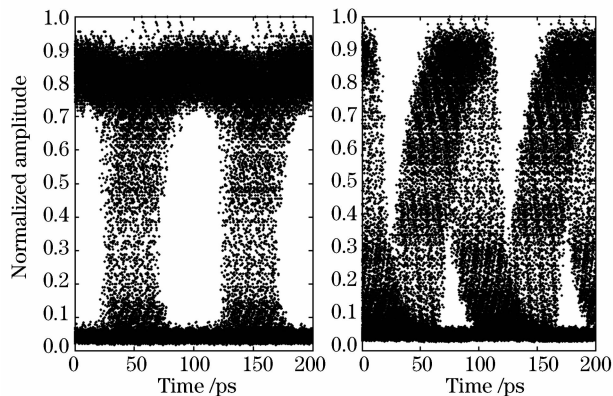


图5 NRZ(a)和RZ(b)信号的粗同步眼图

Fig. 5 Eye diagram of coarse synchronization for NRZ (a) and RZ (b) signals

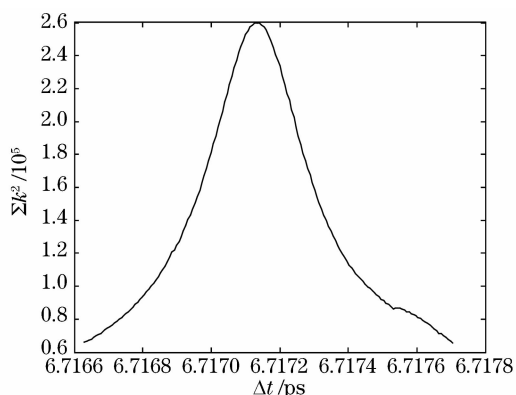


图6 RZ 信号同步误差系数 Δt 曲线

Fig. 6 Synchronization error coefficient as a function of Δt for RZ signals

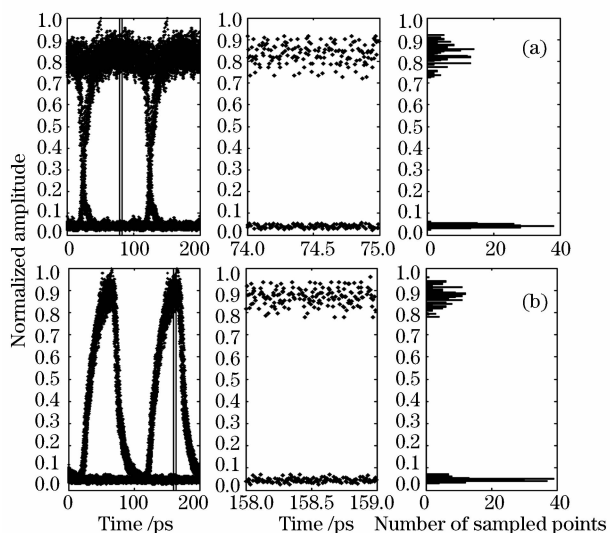


图7 软件同步后的眼图。(a) NRZ;(b) RZ

Fig. 7 Eye diagram after software synchronization

(a) NRZ; (b) RZ

6.71741 ps,同理得到 NRZ 系统的 $\Delta t_{\text{accurate}}$ 为6.71727 ps,该值与仿真中实际设定值基本相等,由此可获得图7精同步后的眼图,相比于图5有了明显改善。根据图7可以计算出系统 Q 值,由文献^[8]可知,对于10 Gb/s系统,最佳计算眼图时间窗口为1 ps,即为比特宽度的1/100,选取眼图最佳张开处1 ps内的采样点进行统计得到10 Gb/s NRZ 和 RZ 系统 Q 值分别为24.501 dB,25.925 dB,与 Optsim 通过传统方法获得的 Q 值($Q_{\text{NRZ}} = 25.538$ dB, $Q_{\text{RZ}} = 26.958$ dB)基本相符。

4 PPLN 采样结果的比较与分析

对 PPLN 的采样结果进行眼图恢复,图8(a), (b)所示为应用40 mm长 PPLN 波导对 NRZ 和 RZ

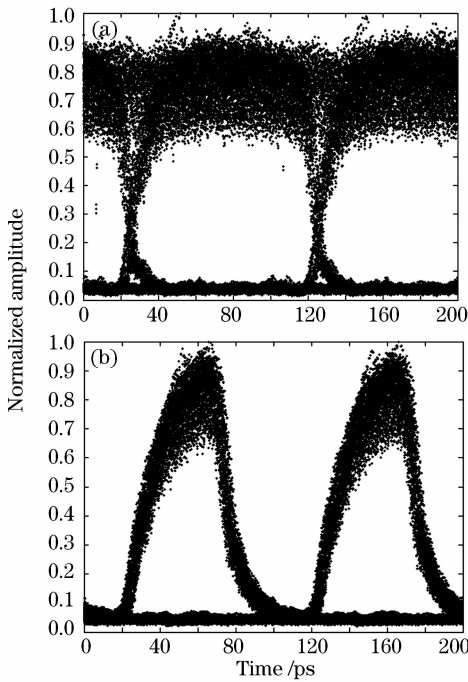


图 8 通过 40 mm PPLN 采样数据恢复的眼图。

(a) NRZ 和 (b) RZ 信号采样结果

Fig. 8 Eye diagrams reconstructed via the samples obtained from 40 mm PPLN. Sampling results for

(a) NRZ and (b) RZ signals

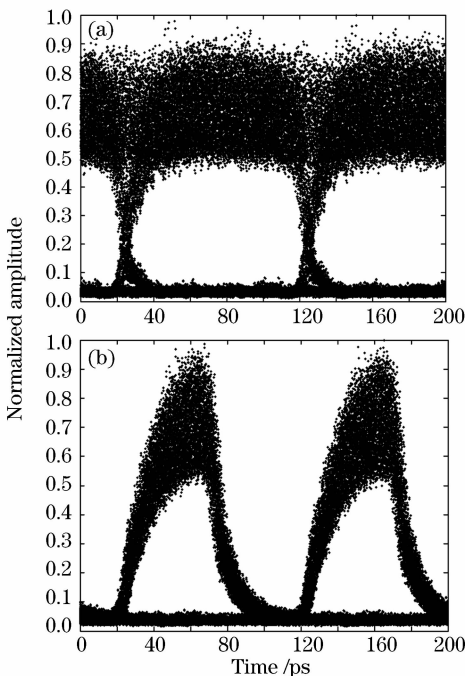


图 9 通过 10 mm PPLN 采样数据恢复的眼图。

(a) NRZ 和 (b) RZ 信号采样结果

Fig. 9 Eye diagrams reconstructed via the samples obtained from 10 mm PPLN. Sampling results for

(a) NRZ and (b) RZ signals

信号进行采样的结果,与理想与门采样结果相比可

以明显看出眼图质量劣化,眼开度减小,计算出 NRZ 和 RZ 系统的 Q 值分别为 18.752 dB, 20.193 dB,分别比理想采样结果减小了 5.749 dB, 5.732 dB.这主要是由 PPLN 中的损耗、非线性 and 相互作用光间由于群速度不同引起的走离效应造成的。将波导长度减小到 10 mm 进行仿真,结果如图 9 (a),(b)所示。从图 9 中可以看出虽然减少 PPLN 长度可以减少损耗和走离,但是由于非线性作用长度的减少造成了转换效率的降低,NRZ 信号采样结果的强度均值从 0.24 mW 减小到 0.1 mW,RZ 信号采样结果的强度均值从 0.11 mW 减小到 0.044 mW,这使得采样质量没有改善反而有明显下降,NRZ 和 RZ 信号采样 Q 值分别减小到 15.401 dB,15.567 dB,RZ 码的 Q 值优势已经不明显。因此,在采用短波导的同时还需提高抽运光强度以改善采样质量。在应用 PPLN 中光采样过程对通信系统中传输信号进行质量监测时应该考虑到采样过程本身带来的信号质量劣化,以尽可能真实地反映信号质量的优劣。

5 结 论

建立了基于 PPLN 波导中和频过程的软件同步固定频差光采样系统模型,采用分段采样的计算方法大大提高了运算效率,成功恢复了 10 Gb/s NRZ 和 RZ 信号的眼图,通过与理想与门采样结果进行对比可以看出 PPLN 中的采样过程会给采样结果带来附加影响,降低了系统 Q 值。在实际系统应用中,可先对采样系统的特性进行分析,在通过采样分析传输线内信号质量时,减去采样系统带来的影响,从而获得较为准确的信号质量参数,更深入的采样系统特性分析工作正在进行中,这一工作有助于 PPLN 采样系统在光性能监测领域的应用研究。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Peter A. Andrekson, Mathias Westlund, Henrik Sunnerud *et al.*. Nonlinearity-based all-optical sampling of ultrahigh-bandwidth optical signals [C]. *SPIE*, 2004, **5596**:319~331
- 3 I. Shake, E. Otani, H. Takara *et al.*. Bit rate flexible quality monitoring of 10 to 160 Gbit/s optical signals based on optical sampling technique [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**:2087~2089
- 4 S. Kawanishi, T. Yamamoto, M. Nakazawa *et al.*. High sensitivity waveform measurement with optical sampling using quasi-phaseshifted mixing in LiNbO₃ waveguide [J]. *Electron.*

- Lett.*, 2001, **37**:842~844
- 5 J. Wang, J. Sun, C. Luo *et al.*. Flexible all-optical wavelength conversions of 1.57-ps pulses exploiting cascaded sum- and difference frequency generation (cSFG/DFG) in a PPLN waveguide [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**:543~548
 - 6 Yu Song, Gu Wanyi. Wavelength conversions in quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide based on double-pass cascaded $\chi^{(2)}$ SFG+DFG interactions [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(11):1548~1554
 - 7 Liu Maotong, Yang Aiyong, Sun Yu-nan. Optical sampling using a PPLN waveguide for optical performance monitoring [C]. *SPIE*, 2007, **6837**:1~9
 - 8 Mathias Westlund, Henrik Sunnerud, Magnus Karlsson *et al.*. Software-synchronized all-optical sampling for fiber communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3):1088~1098
 - 9 Carsten Schmidt-Langhorst, Hans-Georg Weber. Optical sampling techniques [J]. *J. Opt. Fiber. Commun. Rep.*, 2005, **2**:86~114
 - 10 Thanakom Kiatchanog, Koji Igarashi, Takuo Tanemura *et al.*. Real-time all-optical waveform sampling using a free-running passively mode-locked fiber laser as the sampling pulse source [C]. *Proc. Of OFC*, 2005, Paper OWN1
 - 11 Jorge Fonseca-Campos, Yong Wang, Bo Chen *et al.*. 40-GHz picoseconds-pulse second-harmonic generation in an MgO-doped PPLN waveguide [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(10):3698~3708
 - 12 Dieter H. Jundt, Martin M. Fejer, Robert L. Byer. Optical properties of lithium-rich lithium niobate fabricated by vapor transport equilibration [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(1):135~138
 - 13 Carlo Liberale, Ilaria Cristiani, Vittorio Degiorgio *et al.*. Cross-phase modulation due to a cascade of quadratic interactions in a PPLN waveguide [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(3):405~411
 - 14 Yong Wang, Chang-Qing Xu. Picosecond-pulse wavelength conversion based on cascaded sum-frequency generation/difference-frequency generation in PPLN waveguides [C]. *SPIE*, 2006, **6343**:1~10