

文章编号: 0253-2239(2010)11-3270-06

基于啁啾周期极化铌酸锂波段可选择光采样研究

宁春梅 杨爱英* 沈世奎 吴翔宇 孙雨南

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 对利用啁啾周期极化铌酸锂(CPPLN)波导的和频效应(SFG),实现能覆盖整个 C 波段和 L 波段的光采样技术进行了研究。从耦合模方程开始,对转换效率和带宽进行了数值计算和仿真。对传输速率为 10 Gb/s 的光信号 NRZ 序列采样,通过软件同步算法恢复采样结果,得到了清晰的眼图和高质量的 Q 因子。从仿真结果可以看出应用 CPPLN 波导比周期极化铌酸锂(PPLN)波导具有更宽的带宽,在调谐的抽运光下,可以对 C 波段和 L 波段范围内的任何波段进行选择采样,且波段的宽窄可以根据需要,通过调节波导长度和波导啁啾系数进行任意调节。与 PPLN 波导中的 SFG 相比,啁啾周期极化铌酸锂(CPPLN)波导的 SFG 具有更宽的采样带宽、更灵活的波段选择性。

关键词 非线性光学;光采样;固定频差采样;周期极化铌酸锂波导

中图分类号 TN252; TN913.7; O437.1; TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3270

Study on Waveband Optional Optical Sampling Based on Chirped Periodically Poled LiNbO₃ Waveguide

Ning Chunmei Yang Aiyong Shen Shikui Wu Xiangyu Sun Yunan

(School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Optical sampling covering C band and L band based on sum frequency generation (SFG) in chirped periodically poled LiNbO₃ (CPPLN) is studied. Based on coupled-wave equations, the simulations and numerical computations of the transmission rate and bandwidth are carried out. NRZ sequences of the signal pulses with the transmission rate of 10 Gb/s are sampled. Distinct eye diagrams and quality factor Q are obtained by software-synchronized algorithm. The results show that arbitrary waveband inside C and L band can be sampled by tuning pump wavelength and that the bandwidth of the waveband is controllable by adjusting the waveguide length and the chirped coefficient of CPPLN waveguide. SFG in CPPLN waveguide used for optical sampling system has broader bandwidth and more flexible selectivity than that in PPLN waveguide.

Key words nonlinear optics; optical sampling; fixed offset frequency asynchronous sampling; chirped periodically poled LiNbO₃ waveguide

1 引 言

随着光通信系统复杂度、光网络传输容量和传输距离的不断增加,对光网络进行精确的全面的监测的需求也在不断增加。光采样技术是一种十分有效的光网络监测的解决方案。而对网络全面监测要求能够对涵盖 C 波段(1525~1565 nm)和 L 波段

(1565~1620 nm)的每一个传输波长均能监测到。可用于光采样的非线性介质有半导体光放大器(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。用 PPLN 波导的准相位匹配原理实现二阶非线性相互作用进行采样具有很多优点,如对传输协议和数据格式的严格透

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(60777024,60978007)资助课题。

作者简介: 宁春梅(1979—),女,博士研究生,主要从事非线性光学和光性能监测等方面的研究。

E-mail: mavlous@bit.edu.cn

导师简介: 孙雨南(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信及高速光信号处理等方面研究。

E-mail: syn@bit.edu.cn

* 通信联系人。 yangaiying@gmail.com

明、不依赖于比特速率、较高的转换效率、无自发辐射噪声和频率啁啾以及低串扰等^[5~7]，因此被广泛应用。但是无论利用前面提到的哪种非线性介质，均受到波长的限制，很难利用一个器件对 C 波段和 L 波段的所有波长实现监测。而本文讨论的啁啾周期极化铌酸锂 (CPPLN) 波导在具有 PPLN 波导的优点的同时，比相同长度的 PPLN 波导在带宽上还有明显的优势^[7,8]，为波分复用 (WDM) 系统的全面监测带来了可能性。

2 单脉冲采样原理和仿真

图 1 为 PPLN 和 CPPLN 中和频过程的示意图，其中 ω_p 、 ω_s 、 ω_{SFG} 和 ω_{PM} 分别为抽运频率、信号频率、和频频率和相位匹配频率。从图 1(a) 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^[9]。和频过程可实现信号光与抽运光“与”的功能。从图 1(b) 可以看出，相对于 PPLN 来说，应用 CPPLN 时，调节抽运光波长时，一个抽运

波长能够得到更宽的相位匹配带宽。从而可以实现匹配带宽范围内对任意波段进行采样的自由选择。

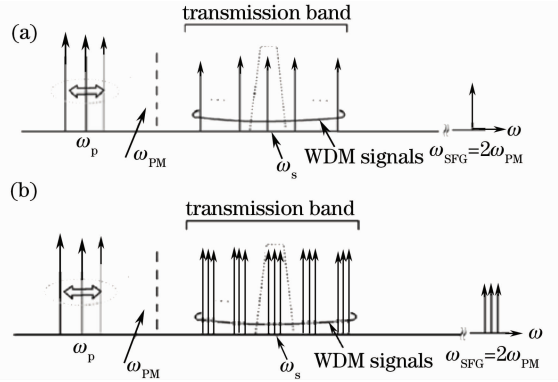


图 1 PPLN (a) 和 CPPLN (b) 中和频效应 (SFG) 示意图

Fig. 1 Schematic description of sum frequency generation (SFG) in PPLN (a) and CPPLN (b)

该过程可应用耦合波方程加以描述。通过采用慢变包络近似，从 PPLN 波导的倍频耦合波方程^[10]演变出和频耦合波方程，并增加归一化非线性系数 $\bar{d}(z)$ ，得到 CPPLN 中抽运光，信号光及和频光相互作用的耦合波方程为

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \beta_1^p \frac{\partial A_p}{\partial t} + \beta_2^p \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_p}{2} A_p - j\omega \kappa_{\text{SFG}} A_{\text{SFG}} A_s^* \bar{d}(z) \exp(-j\Delta k z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \beta_1^s \frac{\partial A_s}{\partial t} + \beta_2^s \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_s}{2} A_s - j\omega \kappa_{\text{SFG}} A_{\text{SFG}} A_p^* \bar{d}(z) \exp(-j\Delta k z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_{\text{SFG}}}{\partial z} + \beta_1^{\text{SFG}} \frac{\partial A_{\text{SFG}}}{\partial t} + \beta_2^{\text{SFG}} \frac{\partial^2 A_{\text{SFG}}}{\partial t^2} = -\frac{\alpha_{\text{SFG}}}{2} A_{\text{SFG}} - j\omega \kappa_{\text{SFG}} A_p A_s \bar{d}(z) \exp(-j\Delta k z), \quad (3)$$

式中 A_i 为包络函数， i 分别代表抽运光 (p)，信号光 (s)，和频光 (SFG)，相位匹配光 (PM) 和相位匹配光的倍频光 (PM2)。信号光和抽运光均为高斯脉冲，抽运光峰值功率 (包络函数绝对值的平方) 为 100 mW，脉宽 5 ps，信号光峰值功率为 1 mW，脉宽 100 ps。 β_1^i, β_2^i 分别为相应光的一阶和二阶群速度色散系数^[10]：

$$\beta_1^i = \frac{1}{c} \left(n_e^i + \omega \frac{d^2 n_e^i}{d\omega^2} \right) = \frac{n_e^i}{c} - \frac{dn_e^i}{d\lambda}, \quad (4)$$

$$\beta_2^i = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn_e^i}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n_e^i}{d\omega^2} \right) = \frac{\lambda^3}{2\pi c} \frac{d^2 n_e^i}{d\lambda^2}, \quad (5)$$

$$\Delta k = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{SFG}}} n_{e\text{SFG}} - \frac{2\pi}{\lambda_p} n_{ep} - \frac{2\pi}{\lambda_s} n_{es} - k_m, \quad (6)$$

$$k_m = 2\pi m / \Lambda,$$

$$\Lambda = 2\pi / \left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{PM}}} n_{\text{PM}} - \frac{2\pi}{\lambda_{\text{PM2}}} n_{\text{PM2}} \right), \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{PM2}} = \lambda_{\text{PM}} / 2, \quad (8)$$

$$\kappa_{\text{SFG}} = \frac{d_{\text{eff}} \sqrt{2\mu_0/c}}{\sqrt{n_{ep} n_{es} n_{e\text{SFG}} A_{\text{eff}}}}, \quad (9)$$

$$n_{ei}^2(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda_i^2 - C} - D\lambda_i^2, \quad (10)$$

$$\bar{d}(z) = \exp[j\Delta k_m(z - L/2) + D_g(z - L/2)^2] \text{rect}(z/L - 1/2). \quad (11)$$

仿真中， d_{eff} 为有效非线性系数，取 16.5×10^{-12} m/V， A_{eff} 为波导的有效横截面积，取 $45 \mu\text{m}^2$ ， $A = 4.55$ ， $B = 0.09$ ， $C = 0.04$ ， $D = 0.03$ ^[10]，波导长度 L 取为 45 mm，极化周期 Λ 可以通过匹配波长 λ_{PM} 和匹配波长的倍频光波长 λ_{PM2} 得出， $\bar{d}(z)$ 为 CPPLN 波导的归一化非线性系数，其中 D_g 为波导啁啾系数，它决定了波导的啁啾结构。

转换效率表达式为

$$\eta = \frac{\sum P_{\text{SFG}}}{\sum P_s} \times 100\%, \quad (12)$$

式中 P_{SFG} 和 P_s 分别为输出光和信号光功率。

由(6)~(10)式,选取匹配波长分别为 1570 nm 和 1550 nm 时,调整抽运光,即可得到相位失配量随信号光波长变化的曲线,如图 2 所示。调节抽运光波长,可以得到所需采样波长的信号光。比较图中两条曲线,可以看出,当匹配波长 $\lambda_{\text{PM}} = 1570$ nm 时,信号光的波长范围均在 C 波段和 L 波段内,比匹配波长 $\lambda_{\text{PM}} = 1550$ nm 时更具有应用价值。故以下仿真中匹配波长 λ_{PM} 均选择 1570 nm。

由(1)~(3)式和(12)式可以计算出当抽运光波长固定为 1570 nm 时,应用 PPLN 波导和啁啾系数为 0.06 mm^{-2} 的 CPPLN 波导所对应的信号光匹配

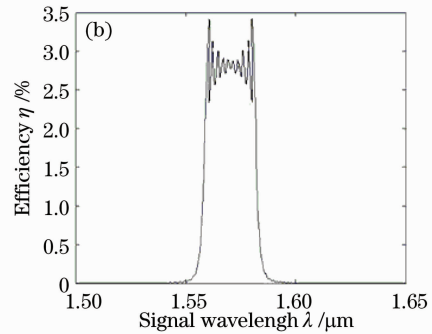
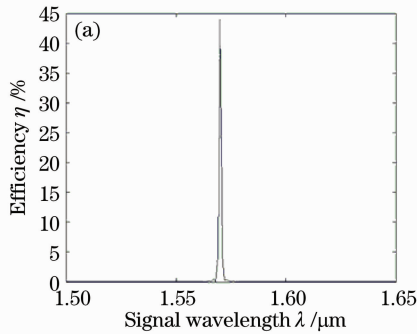


图 3 PPLN (a)和 CPPLN (b)所对应的和频效应匹配光谱

Fig. 3 SFG PM spectrum of PPLN (a) and CPPLN (b)

由(1)~(3)式和(12)式仿真计算还可以得到不同啁啾系数下转换效率随波长的变化情况,如图 4 所示。在不同啁啾系数 D_g 下,转换效率和带宽随波导长度的变化而变化。对于啁啾系数不为零的 CPPLN 波导,当啁啾系数为一定值时,随波导长度的加长,转换效率增加有限,但是带宽加宽明显。啁啾系数固定,波导加长时,波导两端的最大极化周期和最小极化周期差加大,使能够满足相位匹配的波长范围加大,因而匹配带宽增加。而相邻极化周期间的周期差不变,所以对于一个固定的匹配波长来说,非线性相互作用的长度变化不大,所以转换效率增加有限。对于长度一定的波导,啁啾系数增加时,转换效率减小,带宽增加。波导长度一定,啁啾系数越大时,波导相邻极化周期间的周期差越大,导致转换效率减小。同时,波导两端的最大极化周期和最小极化周期差加大引起匹配带宽增加。

另外,图 2 显示,当 $\lambda_{\text{PM}} = 1570$ nm 时,调节抽运光波长,得到的信号光的相位匹配宽度为 1533~1608 nm。而从图 4 中又可以

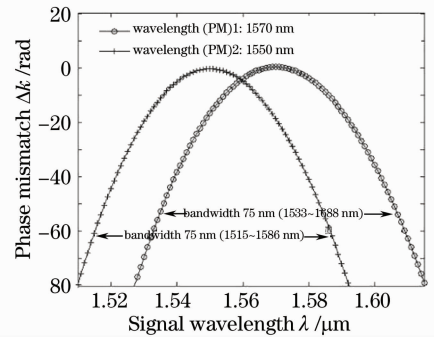


图 2 相位失配量随波长变化图

Fig. 2 Phase mismatching versus signal wavelength

带宽,如图 3 所示。图 3 显示,应用 CPPLN 波导,一个抽运光所对应的信号光波长的匹配带宽远远高于利用 PPLN 波导所得到的带宽。

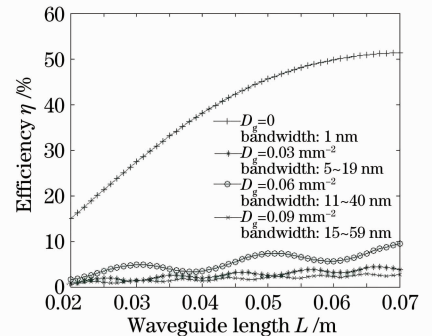


图 4 不同啁啾系数 D_g 下转换效率随波长的变化

Fig. 4 Conversion efficiency of SFG in CPPLN waveguide versus signal wavelength with different chirped coefficients D_g

抽运波长,用 45 mm 的 CPPLN 波导产生和频,当 $D_g = 0.06 \text{ mm}^{-2}$ 时匹配带宽为 26 nm,即一个抽运光对应 26 nm 宽的信号光,若调节抽运光,每一个抽运光都可以对应 26 nm 信号光,则可以得到的总带宽为 1520~1621 nm;同理,当 $D_g = 0.09 \text{ mm}^{-2}$ 时匹配带宽为 37 nm,可以得到的总带宽为 1515~

1626 nm, 均能完全覆盖了 C 波段和 L 波段。同时, 可以通过调节抽运光, 对被采样的波段进行任意选择。

3 脉冲序列光采样

对信号光脉冲序列进行非线性采样处理。采样方法为固定频差法, 其原理如图 5 所示。速率为 V 的信号光序列和采样脉冲序列一起注入到非线性介质中, 采样脉冲的重复频率为 f , $f = (V - \Delta f) / M$, 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, 详见文献[11]。采用(1)~(3)式仿真, 用 CPPLN 波导的非线性作用采样。以半峰全宽(FWHM)为 5 ps 的高斯脉冲序列作为采样脉冲, 被采样信号为非归零(NRZ)序列, 长度为 $2^6 \sim 1$, 传输速率为 10 Gb/s, 共有 10000 段基本序列, 总采样时间为 0.063 ms。选择的抽运光和信号光波长均为 1570 nm, 信号光总传输长度为 200 km, 其中 35 km 为色散补偿光纤, 其他器件(如放大器, 光电转换器等)参数为 Optisim 软件的通用数值。传输后的被采样信号峰值功率约为 0.7 mW, 采样脉冲峰值功率约为 100 mW。被采样信号数据由 Optisim 仿真软件输出。CPPLN 波导长度为 45 mm。选择 $M=2$, 经过非线性仿真计算, 可获得如图 6 所示的采样结果。从图 6 可以看到 CPPLN 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。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。通过软件同步算法^[9,12], 将采样点重新排列, 恢复出眼图。图 7 为与图 6 相同波长的情况下, 通过软件同步算法进行理想采样得到的眼图, Q 因子为 25.49 dB; 由 Optisim 仿真得到的 Q 因子为 25.50 dB, 两者基本相符。 Q 因子的计算公式可以表示为

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (13)$$

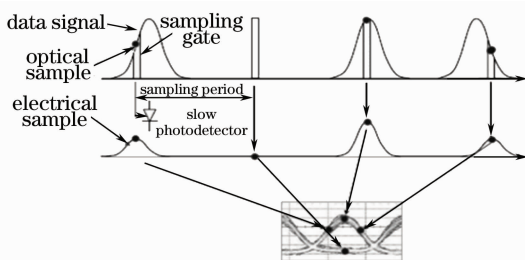


图 5 固定频差采样原理

Fig. 5 Principle of optical sampling with fixed offset frequency

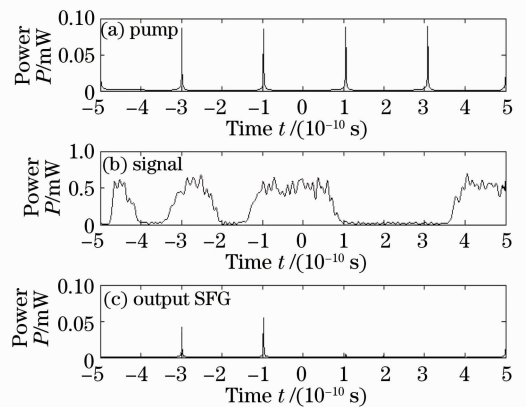


图 6 对基本序列的采样结果

Fig. 6 Sampling results of the signal pulse

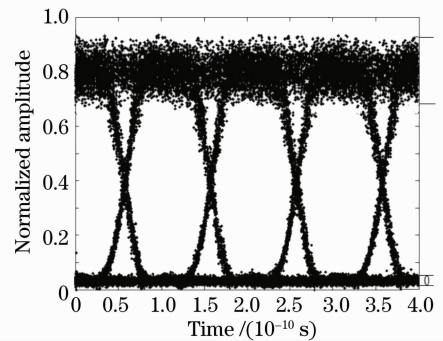


图 7 理想采样眼图

Fig. 7 Ideal sampling eye diagram

式中 I_1 和 I_0 分别为眼图中高电平(图 7 中的 1 区)和低电平(图 7 中 0 区)处点的平均值, σ_1 和 σ_0 分别为高电平和低电平处各点对平均值的均方根。

当 D_g 为 0.06 mm^{-2} , 抽运光波长为 1570 nm 时不同波长信号光的眼图情况如图 8 所示。信号光波长为 1581 nm 和 1559 nm 时[图 8(a), (b)], 对于 1570 nm 的抽运光波长, 均在 CPPLN 波导的匹配带宽范围内, 因此 Q 因子分别为 22.80 dB 和 22.88 dB, 而信号光波长 1588 nm 时[图 8(c)], 已经超出了 CPPLN 的匹配带宽范围, 因此眼图质量明显下降, Q 因子也降为 17.43 dB。当信号光波长在 CPPLN 的匹配带宽范围内时 Q 因子比理想采样情况下降值小于 3 dB, 这主要是由 CPPLN 中的损耗、非线性等造成的。用 PPLN 波导进行光采样所得到 Q 因子比理想采样得到的 Q 因子小 5 dB 左右^[9], 而用 CPPLN 波导只减小了 3 dB 左右。这主要是由于在 CPPLN 波导中色散和走离效应得到补偿, 脉宽未被展宽的原因^[13~16]。当信号光波长在 CPPLN 波导的匹配带宽范围外时, 非线性的转换效率会明显降低, 导致了眼图质量的下降和 Q 因子的降低。抽运光一定时, 要选择 CPPLN 波导匹配

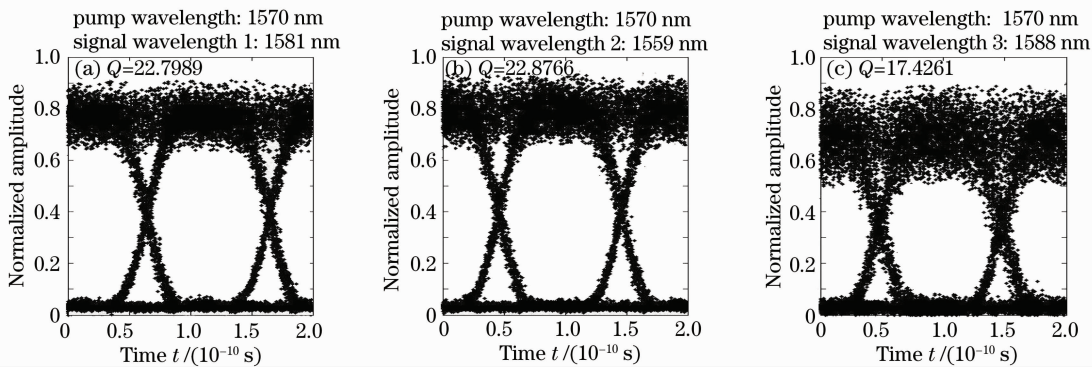


图 8 $D_g=0.06 \text{ mm}^{-2}$,抽运光波长为 1570 nm 时不同波长信号光的眼图情况

Fig. 8 Eye diagrams of different signal wavelengths under 1570 nm pump wavelength and $D_g=0.06 \text{ mm}^{-2}$

带宽范围内的信号光波长进行采样,才能获得较高的 Q 因子。

$D_g=0.09 \text{ mm}^{-2}$,抽运光波长为 1570 nm 时不同波长信号光的眼图情况如图 9 所示。同样信号光波长为 1588 nm 和 1595 nm 时[图 9(a),(b)],均在 CPPLN 的匹配带宽范围内,因此 Q 因子分别为 21.89 dB 和 21.70 dB,而信号光波长 1552 nm 时

[图 9(c)],超出了 CPPLN 的匹配带宽范围,眼图质量下降,Q 因子也降为 16.04 dB。从图 9 和图 8 的比较中可以看出,当啾啾系数 D_g 增加时,一个固定的抽运波长对应的信号光匹配带宽加宽,但是 Q 因子和眼图质量有所下降,这和前面的仿真结果图 4 相吻合。实际采样时应在 Q 因子和带宽之间进行合理的选择,达到期望的结果。

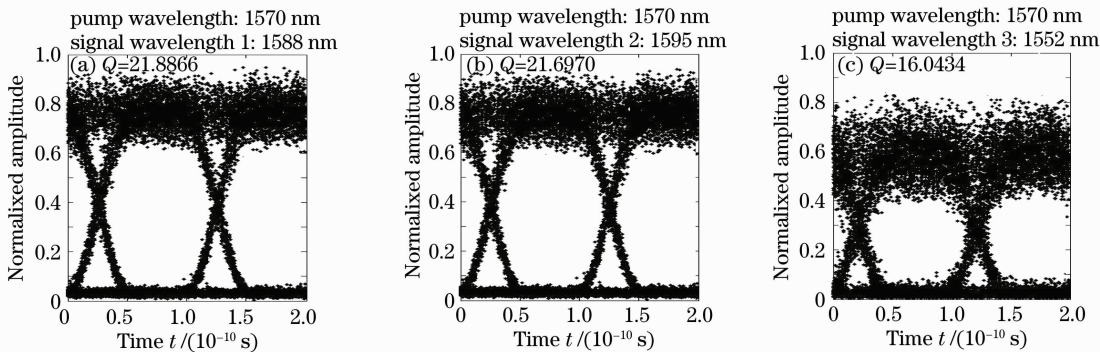


图 9 $D_g=0.09 \text{ mm}^{-2}$,抽运光波长为 1570 nm 时不同波长信号光的眼图情况

Fig. 9 Eye diagram of different signal wavelengths under 1570 nm pump wavelength and $D_g=0.09 \text{ mm}^{-2}$

图 10 为当 $D_g=0.06 \text{ mm}^{-2}$ 时,不同抽运光,不同信号光的采样眼图和 Q 因子的情况。选择的信号光波长是 C 波段的最短波长 1525 nm,L 波段的

最长波长 1620 nm 和两波段的中间波长 1570 nm,均得到了质量较好的眼图和 Q 因子。因此,调谐抽运光,只要满足相位匹配,就可以对 C 波段和 L 波段内

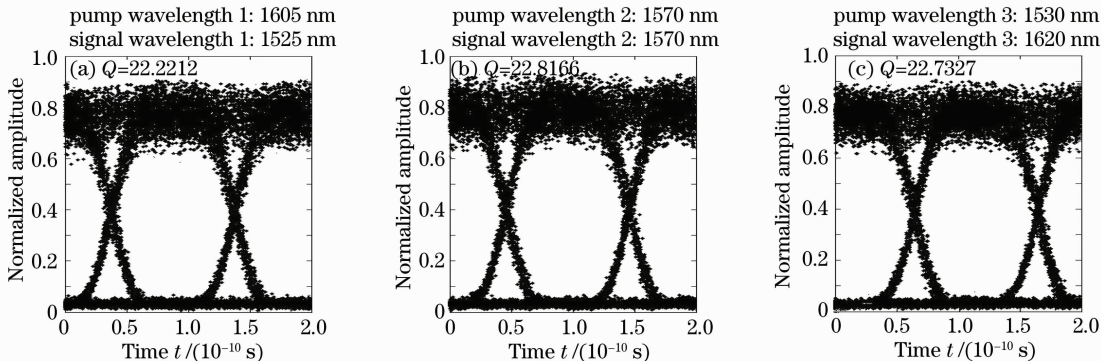


图 10 $D_g=0.06 \text{ mm}^{-2}$ 时不同抽运光,不同信号光的采样眼图

Fig. 10 Eye diagram of different pump and signal wavelengths with $D_g=0.06 \text{ mm}^{-2}$

的任意波长采样。

5 结 论

分析了和频过程中 CPPLN 波导长度和啁啾系数对采样效率和带宽的影响。基于 CPPLN 波导中和频过程,利用固定频差光采样法和软件同步算法,成功恢复了 10 Gb/s 的 NRZ 信号的眼图。和 PPLN 波导相比,CPPLN 中的采样过程会使采样带宽明显增加,Q 因子和眼图质量也有所提高。带宽的大小可以由啁啾系数和波导长度调节,这为设计带来了方便。在实际设计时可先对采样系统的特性进行分析,选择合适的带宽和波导的啁啾系数。在系统应用中,通过采样分析传输线内信号质量时,可以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,这一工作有助于将 CPPLN 波导采样系统更好地应用于光性能监测领域。

参 考 文 献

- Liu Maotong, Yang Aiyong, Sun Yunan. Optica 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
- Peter A. Andrekson, Mathias Westlund, Henrik Sunnerud *et al.*. Nonlinearity-based all-optical sampling of ultrahigh-bandwidth optical signal[C]. *SPIE*, 2004, **5596**: 319~331
- I. Shake, E. Otani, H. Takara *et al.*. Bit rate flexible quality monitoring of 10 to 160 Gb/s optical signals based on optical sampling technique [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36** (25): 2087~2089
- S. Kawanishi, T. Yamamoto, M. Nakazawa *et al.*. High sensitivity waveform measurement with optical sampling using quasi-phasematched mixing in LiNbO₃ waveguide[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(13): 842~844
- J. Wang, J. Sun, C. Luo *et al.*. Flexible all-optical wavelength conversions of 1.57 ps pulse exploiting cascaded sum- and difference frequency generation (cSFG/DFG) in a PPLN waveguide[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(4): 543~548
- Yu Song, Gu Wanyi. Wavelength conversions in quasi-phase matched LiNbO₃ based on double-pass cascaded $\chi^{(2)}$ SFG+DFG interactions[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40** (11): 1548~1554
- Nobuhide Yamada, Seiji Nogiwa, Hiroshi Ohta. 640-Gb/s OTDM signal measurement with high-resolution optical sampling system using wavelength-tunable soliton pulses [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1125~1127
- S.-D. Yang, Z. Jiang, A. M. Weiner. Extremely low-power intensity autocorrelation and chromatic dispersion monitoring for 10-GHz, 3-ps optical pulses by aperiodically poled lithium niobate (A-PPLN) waveguide [C]. Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series, San Diego County, 2005, **3**: 491~493
- Liu Maotong, Yang Aiyong, Sun Yunan. Software-synchronized optical sampling based on PPLN waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 283~288
刘茂桐, 杨爱英, 孙雨南. 基于周期极化铌酸锂波导的软件同步光采样[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 283~288
- Jorge Fonseca-Campos, Yong Wang, Bo Chen. 40-GHz picosecond-pulse second-harmonic generation in an MgO-Doped PPLN waveguide[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24** (10): 3698~3708
- Carsten Schmidt-Langhorst, Hans-Georg Weber. Optical sampling techniques[J]. *J. Opt. Fiber. Commun. Rep.*, 2005, **2**(1): 86~114
- 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
- M. A. Arbore, O. Marco, M. M. Fejer. Pulse compression during second-harmonic generation in aperiodic quasi-phase-matching gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 865~867
- Gao Yanxia, Zhao Gaiqing, Wu Jingqing. Numerical analyses on walk-off effect in periodically poled lithium niobate [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8): 1279~1282
高艳霞, 赵改清, 吴景清. 周期极化 LiNbO₃ 脉冲走离效应分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(8): 1279~1282
- Luo Chuanhong, Sun Junqiang, Guan Aihong *et al.*. Wavelength conversion based on cascaded SFG+DFG in pulsed pumping[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12): 66~71
罗传红, 孙军强, 管爱红等. 走离效应对级联和频与差频波长转换的影响[J]. *光电工程*, 2007, **34**(12): 66~71
- Lin Fei, Wang Tao, Qian Liejia. Beam quality improved diode laser beams in aperiodic PPLN [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(6): 485~488
林飞, 王韬, 钱列加. 利用非周期 PPLN 晶体改善半导体激光束质量[J]. *中国激光*, 2002, **29**(6): 485~488