

基于高非线性光纤中四波混频效应对混沌激光的采样

梁俊强 王娟芬 李 璞 王云才

(太原理工大学物理与光电工程学院, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要 针对混沌光相干性差以及偏振态随机起伏的问题,提出了一种基于高非线性光纤中的四波混频效应对混沌激光偏振不敏感的采样方案,并通过数值的方法对波长为 1550 nm,功率范围为 0~10 mW 的混沌光进行了采样。经研究发现,当抽运光功率为 2 W,波长为 1557 nm,光纤长度取 60 m 时,可使四波混频采样达到最佳。采用上述参数,数值实现了对混沌光的偏振不敏感采样,采样速率为 5 GHz,采样的同时也起到了光放大的作用,增益系数约为 10.8 dB。该结果可为实验上进一步实现混沌光的四波混频采样提供一定的理论依据。

关键词 激光光学;混沌激光;全光采样;四波混频;非线性光纤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0402009

Optical Sampling of Chaotic Laser Based on Four-Wave Mixing in Highly Nonlinear Fiber

Liang Junqiang Wang Juanfen Li Pu Wang Yuncai

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract Based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber, a scheme to chaotic laser sampling independent of polarization is proposed due to poor coherence of chaotic laser, and random fluctuations of polarization state. And the chaotic laser with wavelength of 1550 nm and power range from 0~10 mW is sampled by numerical method. It can be found that the four-wave mixing sampling can be optimal for the pump light with wavelength of 1557 nm and power of 2 W when the fiber length is 60 m. Using the above parameters, polarization insensitive sampling for chaotic laser is implemented with sample rate of 5 GHz. The peak power of the chaotic pulse is amplified. The gain coefficient is approximately 10.8 dB. The results can provide a theoretical basis for the further experiment.

Key words laser optics; chaotic laser; all-optical sampling; four-wave mixing; nonlinear fiber

OCIS codes 140.1540; 190.4380; 190.4370; 230.1150

1 引 言

混沌是指在确定性系统中出现的一类随机行为。由于它具有确定性、随机性和复杂性的特点,因而在各个领域中具有很重要的应用。在光通信领域中,混沌光在雷达探测^[1]、通信检测^[2]以及保密通信^[3]等方面都受到了广泛的关注。基于混沌光信号可以产生高带宽、高质量的随机数,而随机数对保密

通信^[4]、蒙特卡罗模拟^[5]、数值计算^[6]等领域都有着重要的应用。近年来,本课题组基于混沌光实验产生了 1.44 Gbit/s 的高速随机数^[7],并研发出一个速率为 2.87 Gbit/s 的样机。值得注意的是,上面产生随机数的方法是将混沌光信号转换成电信号,然后在电域中产生随机数。随机数在产生过程中必将受到电子瓶颈的影响,为了提高随机数速率以及

收稿日期: 2012-11-22; 收到修改稿日期: 2013-01-02

基金项目: 国家自然科学基金专项基金(60927007)和国家自然科学基金青年基金(61001114)资助课题。

作者简介: 梁俊强(1987—),男,硕士研究生,主要从事混沌激光的应用方面的研究。

E-mail: liangjunqiang12@yahoo.com.cn

导师简介: 王娟芬(1981—),女,博士,副教授,主要从事混沌激光的应用、光学传输等方面的研究。

E-mail: wangjuanfen@126.com(通信联系人)

使随机数与全光通信网络更好地兼容,随后提出了在全光领域中产生随机数的方案^[8]。而在全光领域中产生随机数的过程中,首要工作就是对混沌信号进行全光采样。

目前的全光采样技术都是基于非线性介质的非线性效应来实现的,具体的方案有:基于非线性晶体中的二阶非线性效应实现全光采样^[9];基于交叉相位调制并结合相干干涉原理实现全光采样^[10~12];基于非线性介质中的四波混频效应实现全光采样^[13~15]等。上述采样都要求信号光偏振态稳定且相干性良好。混沌光在产生以及传输过程中,由于非线性介质的双折射效应,光功率的随机起伏会引起混沌光偏振态的随机变化;混沌光产生过程中反馈引起的半导体激光器工作状态的变化以及外界一些因素的变化(如温度、振动等)对光纤的影响都会导致混沌光束偏振态随时间发生改变;同时混沌光线宽宽,相干性弱^[16]。这些因素都使得对混沌光的全光采样需要特殊分析。

本文提出了一种基于高非线性光纤中的四波混频效应实现对混沌光信号偏振不敏感的全光采样方案。该方案不仅可以改善混沌偏振态随机起伏以及相干性差对全光采样的影响;而且采样的同时还可

以起到对信号光放大的作用,在实际应用中,可以省去光放大器,节约成本。

2 采样原理

图 1 为基于四波混频效应实现对混沌光的偏振不敏感采样的原理图。锁模激光器(MLL)产生的脉冲序列作为强抽运光,混沌源(CHAOS)产生的混沌激光作为信号光,抽运光与信号光通过光耦合器(OC)耦合进入偏振分束器(PBS),o光和e光分离。抽运光的o光与信号光的o光在高非线性光纤(HNLF)中沿逆时针方向传输并相互作用实现对信号光o光的采样;抽运光的e光与混沌光的e光沿顺时针方向传输,实现信号光e光的四波混频采样。两路光在偏振分束器另一端口叠加输出,最后通过滤波器(BPF)滤波得到新的四波混频闲频光进入示波器(OSA)中,即实现了抽运光对混沌光的偏振不敏感采样。关于这种偏振不敏感的处理方法,斯坦福大学的 Marhic 等^[17]利用此方法已实现了单抽运光纤参量的放大,并在理论和实验上做了详细地讨论,本文主要针对混沌源的特性,采用此方法对混沌光进行全光采样。

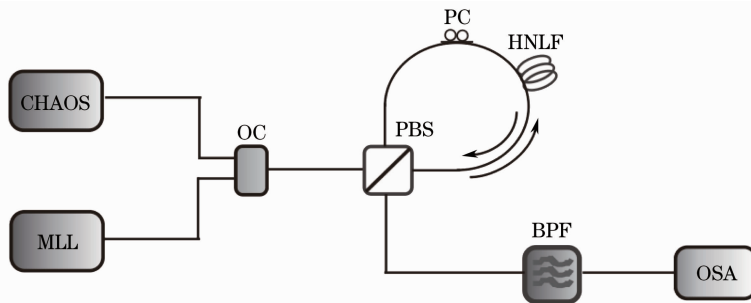


图 1 基于高非线性光纤中四波混频效应实现对混沌光的采样原理图

Fig. 1 Schematic diagram of chaotic laser sampling based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber

3 混沌源的特性

方案中采用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌光^[18,19]。混沌光产生过程中,激光器有源介质中光子与自由载流子密度随时间变化的速率方程为^[20]

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N}{\tau_N} - G[N(t), S(t)]S(t) + F_N(t), \quad (1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{\beta \Gamma N(t)}{\tau_N} + \Gamma G[N(t), S(t)]S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} +$$

$$2 \frac{\kappa}{\tau_1} \sqrt{S(t)S(t - \tau_L)} \cos[\theta(t)] + F_S(t), \quad (2)$$

(1)式和(2)式中 k 为反馈强度分量, $F_N(t)$, $F_S(t)$

为 Langevin 噪声项; N 和 S 分别为激光器腔内载流子密度和光子密度; e 为电子电量; V 为有源区体积; τ_N 为载流子寿命, τ_L 为反馈光延迟时间, τ_1 为空内光子往返时间, τ_p 为光子寿命; Γ 为限制因子; β 为自发辐射因子。

$$G[N(t), S(t)] = \frac{G_N[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon S(t)}, \quad (3)$$

式中 G_N 为微分增益, N_0 为透明载流子密度, ϵ 为增益饱和系数, 反馈光引入的相位延迟

$$\theta(t) = \frac{2\pi c}{\lambda} \tau_L + \phi(t) - \phi(t - \tau_L), \quad (4)$$

式中 c 为光速; λ 为波长。

图 2 给出了光反馈半导体激光器产生的混沌光的时序图、频谱图和自相关曲线。仿真中采用的主要参数为：反馈光延迟时间 $\tau_L = 0.27$ ns, 光场限制因子 $\Gamma = 0.4$, 线宽增强因子 $\alpha = 5.5$, 阈值载流子密度 $N_{th} = 9.9 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 。从图 2(a) 中可以看出混沌光在时序上具有类噪声的随机变化, 其平均功率为 2.46 mW, 峰值功率为 9.58 mW; 图 2(b) 中可看出混沌光具有连续宽带的频谱特性, 其带宽为

13 GHz, 混沌光波长 $\lambda = 1550$ nm; 图 2(c) 显示出混沌光的自相关曲线呈类 δ 函数形状, 相关时间 τ 仅为 0.1 ns。正因为混沌光具有这些特性, 所以可作为很好的随机熵源产生随机数。由于要求产生的随机数之间没有相关性, 因此从自相关曲线上可知在全光采样过程中所允许的采样脉冲重复速率最高不超过 10 GHz。下面通过数值的方法讨论四波混频效应对混沌光的偏振不敏感采样。

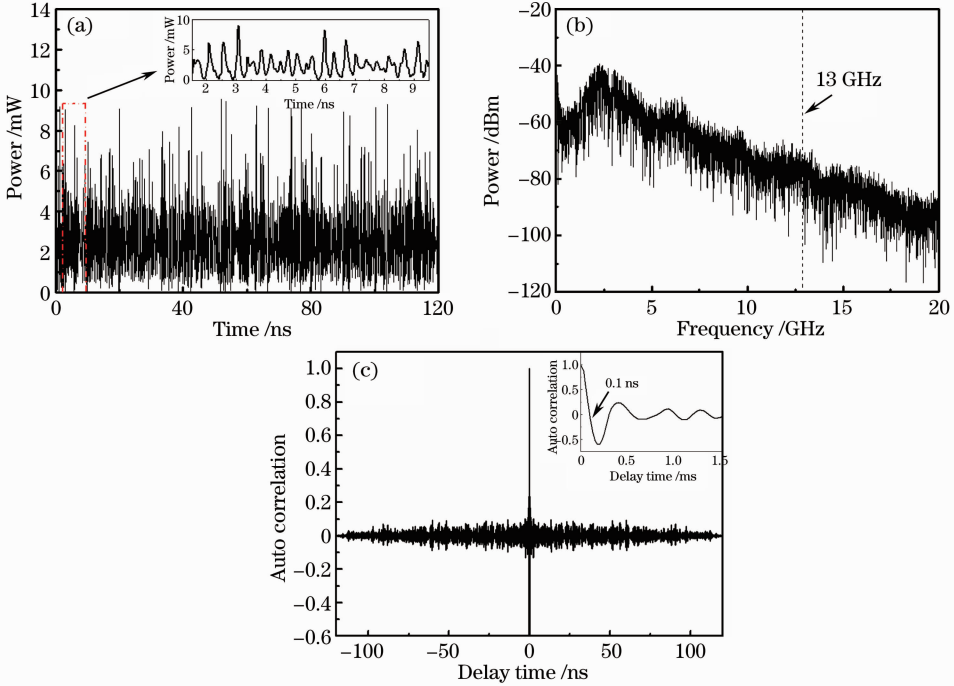


图 2 超宽带混沌光。(a) 时序; (b) 频谱图; (c) 自相关曲线

Fig. 2 Ultrawide bandwidth chaotic laser. (a) Time series; (b) power spectrum; (c) autocorrelation curve

4 混沌光的四波混频采样

4.1 四波混频原理

四波混频是介质中的一种三阶非线性效应。在介质中传输时, 参与四波混频的抽运光、信号光、以及闲频光所满足的传输方程^[21,22]为

$$\frac{dA_p}{dz} = i\gamma[(|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_f|^2)A_p + 2A_p^* A_f A_s \exp(i\Delta kz)] - \frac{LA_p}{2}, \quad (5)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = i\gamma[(|A_s|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_f|^2)A_s + A_p^2 A_f^* \exp(-i\Delta kz)] - \frac{LA_s}{2}, \quad (6)$$

$$\frac{dA_f}{dz} = i\gamma[(|A_f|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_s|^2)A_f + A_p^2 A_s^* \exp(-i\Delta kz)] - \frac{LA_f}{2}, \quad (7)$$

式中 A_p 、 A_s 、 A_f 分别表示抽运光、信号光、闲频光的振幅; L 为光纤损耗系数; γ 表示光纤的非线性系数; Δk 为光纤材料色散以及波导色散引起的相位失配, 即

$$\Delta k = -(2\pi c/\lambda_p^2)D_\lambda(\lambda_s - \lambda_p)^2(\lambda_p - \lambda_0), \quad (8)$$

式中 λ_p 、 λ_s 、 λ_0 分别表示抽运光、信号光、光纤零色散波长, D_λ 表示光纤在零色散波长处的色散斜率。

当强抽运光与信号光在高非线性光纤中相互作用时, 由于光纤克尔效应对光纤非线性折射率的影响, 从而导致四波混频相位失配量随抽运光功率变化而变化。此时, 四波混频相位失配量应为

$$K = \Delta k + 2\gamma P_p, \quad (9)$$

式中 P_p 表示抽运光功率。

4.2 数值模拟与结果

四波混频相位失配量是四波混频转换效率的重要技术参数, 当失配量接近 0 时, 可使四波混频采样

效率达到最高。因此在采样过程中,为了提高采样效率,要求相位失配量达到最小。由(8)式可以看出,抽运光功率及抽运光、信号光波长的选择都会对相位失配量产生影响。抽运光功率对相位失配量的影响从(8)式可以看出为线性关系,取抽运光功率为2 W。图3给出了抽运光波长与相位失配量的关系曲线,信号光波长为图2中的混沌光波长1550 nm。从图中可以看出,当抽运光波长为1557 nm时,得到的相位失配量为0.002,接近0,四波混频采样效率较高。因而在采样过程中,选取抽运光功率为

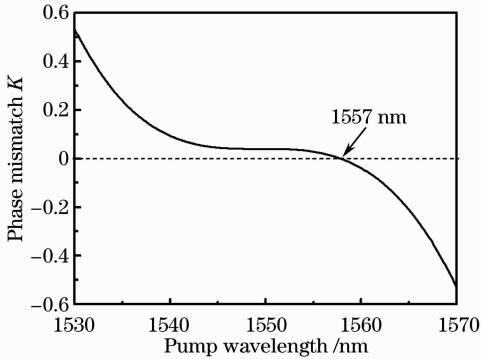


图3 相位失配量 K 与抽运光波长的关系曲线
Fig. 3 Relation curve between phase mismatch K and the wavelength of pump light

2 W,波长为1557 nm。

另外,从图2(a)中可以看到作为信号光的混沌光,其功率是随机起伏的,变化范围大概是0~10 mW。所以在采样过程中必须考虑在注入不同的信号光功率下,抽运光、信号光、四波混频闲频光在光纤中传输时功率的转换情况。图4给出了抽运光、信号光、四波混频闲频光随光纤长度的变化,其中取光纤零色散波长为1550 nm,抽运光功率为2 W,抽运光波长为1557 nm,信号光波长为混沌光波长1550 nm,注入的信号光功率分别为4,6,8,10 mW。从图4(a)中可以看出,当注入信号光功率为4 mW,在90 m位置处,信号光、四波混频闲频光功率达到最大值,即此时四波混频采样效率最高。当3种光在光纤中继续传输,抽运光、信号光、闲频光功率会相互转化,各自出现类正弦的能量交替,总的光子能量也会随着光纤传输的损耗而降低。同理在图4(b)~(d)可以看出,当注入信号光功率分别取6,8,10 mW时,相对应的信号光、四波混频闲频光分别在84,79,77 m的位置处功率最大。在对如图2所示混沌光的采样过程中,若选取的光纤长度大于77 m,很容易引起采样失真,所以对混沌光信号采样时选用的光纤长度应在0~77 m范围内。

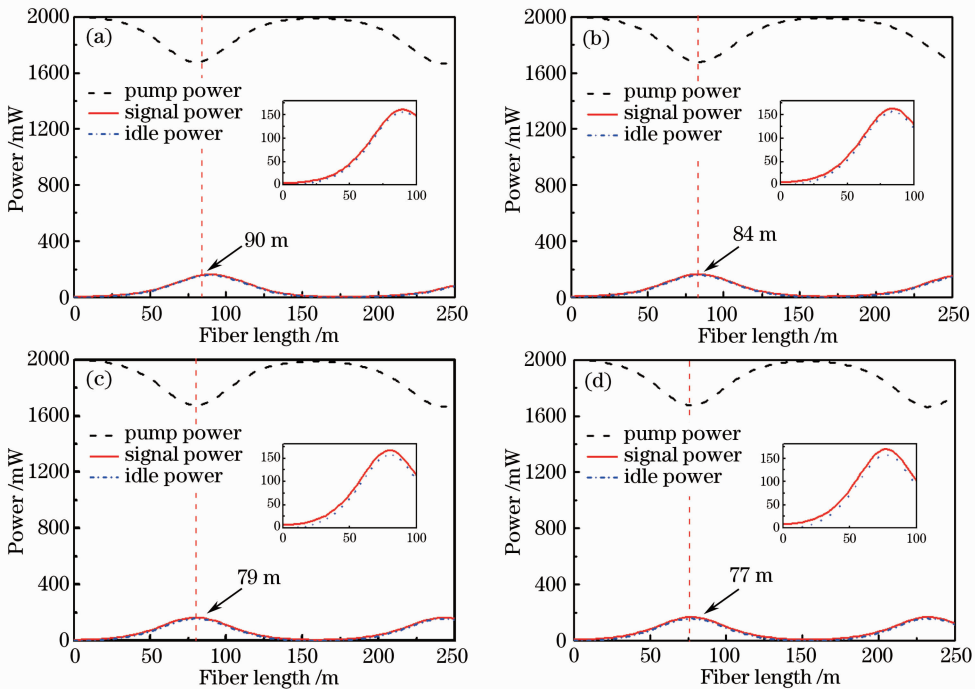


图4 抽运光、信号光、四波混频闲频光功率随光纤长度的变化曲线。其中注入信号光功率分别为
(a) 4 mW;(b) 6 mW;(c) 8 mW;(d) 10 mW

Fig. 4 Powers of pump light, signal light and idle light versus fiber length under different injected signal powers.
(a) 4 mW;(b) 6 mW;(c) 8 mW;(d) 10 mW

为了进一步确定对图 2 所示的混沌光信号采样所需的光纤长度,研究了在不同光纤长度下输出的四波混频闲频光功率随注入信号光功率的变化曲线如图 5 所示,其中信号光功率范围选在混沌光的功率范围 0~10 mW。从图 5 中可以看出,当光纤长度为 77 m 时,输出的四波混频闲频光功率随注入信号光功率呈明显的非线性关系,此时对混沌光采样时会出现明显的信号失真,这一点在采样过程中非常不利;当光纤长度为 40 m 时,输出的四波混频闲频光功率随注入信号光功率呈明显的线性关系,但在这种情况下,得到的四波混频闲频光功率相对较低;当取光纤长度为 60 m 时,输出的四波混频闲频光功率随注入信号光功率有较好的线性关系,具有相对稳定的采样增益,且增益系数约为 10.8 dB。因此对图 2 中的混沌信号采样时,采用的光纤长度定为 60 m。

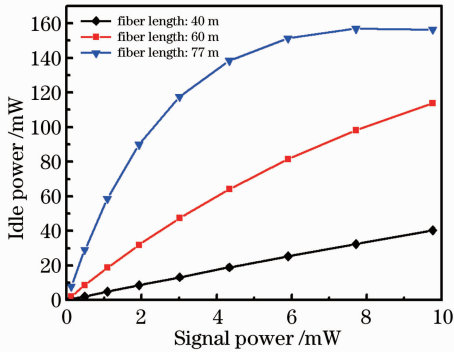


图 5 在不同光纤长度下输出的四波混频闲频光功率随信号光功率的变化曲线

Fig. 5 Outputted idle power versus the injected signal power with different fiber lengths

结合以上参数的分析,基于(5)~(9)式,通过数值的方法对如图 2 所示的混沌光进行四波混频采样。采样中,如图 2(c)所示,采用的混沌信号所允许的采样速率最高为 10 GHz,为了得到随机性良好

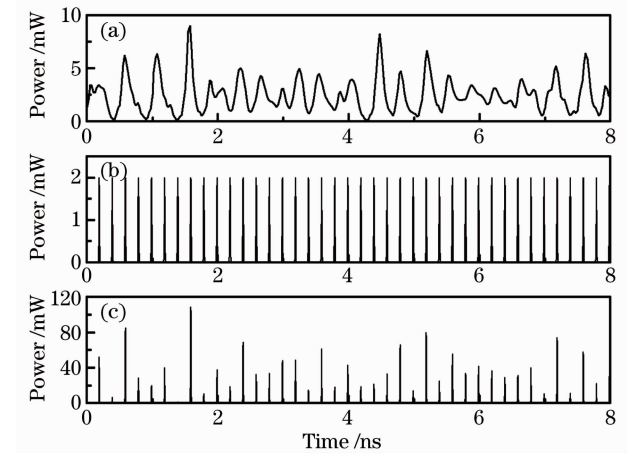
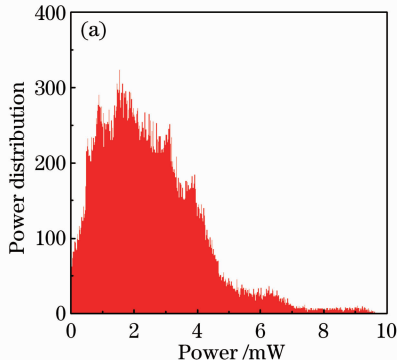


图 6 四波混频效应实现对混沌光采样的数值结果。(a) 混沌信号时序图;(b)抽运脉冲序列;(c)四波混频采样仿真得到的混沌脉冲序列

Fig. 6 Numerical results of chaotic laser sampling based on four-wave mixing. (a) Chaotic laser time diagram; (b) pump pulses strain; (c) chaotic pulses strain sampled based on four-wave mixing

的随机脉冲信号,采用由锁模激光器产生的重复速率为 5 GHz 的脉冲序列作为抽运光,其脉宽为 12.5 ps,峰值功率为 2 W;高非线性光纤损耗系数为 0.2 dB/km,非线性系数为 $10 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$,零色散波长为 1550 nm,零色散波长处色散斜率为 $0.03 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,光纤长度为 60 m。图 6 为基于高非线性光纤中四波混频效应对混沌光的偏振不敏感采样结果。图 6(a)为从图 2 中提取出来的 1.5~9.5 ns 混沌光信号;图 6(b)为重复速率 5 GHz,脉宽 12.5 ps,峰值功率 2 W 的抽运脉冲;图 6(c)为采样得到的混沌脉冲序列。从图中可以看出,该方案不仅可以实现对混沌信号的偏振不敏感采样,而且采样得到的混沌脉冲相对原混沌光信号有所增益,增益系数大致为 10.8 dB,在实际应用中,该采样装置在采样的同时也起到了光放大的作

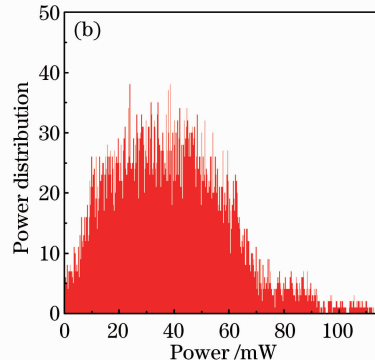


图 7 (a)混沌光功率分布图;(b)混沌脉冲峰值功率分布图

Fig. 7 (a) Optical power distribution of chaotic laser; (b) peak power distribution of chaotic pulses

用。图7给出了原混沌激光功率分布图和采样得到的混沌脉冲峰值功率分布图。由图中可以看出采样后混沌脉冲峰值功率分布要比混沌光的功率分布对称一些。从图7(b)中看到,采样得到的混沌脉冲信号峰值功率在0~80 mW范围内基本呈对称分布,只有个别点不对称分布在80~115 mW范围内。若要得到分布对称的混沌脉冲幅值分布图,可以通过改善超宽带混沌源,或对信号进行必要的差分、异或等处理。

5 结 论

提出了一种基于高非线性光纤中的四波混频效应对混沌激光偏振不敏感的全光采样方案,改善了混沌光偏振态随机起伏以及相干性低对全光采样的影响,并通过数值的方法对波长为1550 nm,功率范围为0~10 mW的混沌光进行了采样。通过相位匹配条件,确定了抽运光功率为2 W,抽运光波长为1557 nm,相位失配量接近于0,可使四波混频转换效率达到最佳;分析了不同光纤长度下,四波混频闲频光随信号光功率的关系曲线,研究发现当光纤长度取60 m时,四波混频采样增益相对稳定,增益系数约为10.8 dB。基于上面参数的分析,数值实现了对混沌光的偏振不敏感采样,采样速率为5 GHz,采样的同时还起到了光放大的作用,在实际应用中可以省去光放大器,节约工程成本。该结果对实验上进一步实现混沌光信号的四波混频采样提供了一定的理论依据。

在实验过程中,还存在一些问题:1)采样中,如图6所示,当其他条件一定时,得到的四波混频闲频光功率与信号光功率并非是很好的线性关系,这会影响到混沌信号采样的采样精度;2)在四波混频采样中,受激拉曼散射、受激布里渊散射也是影响四波混频抽运光功率的选取以及采样效率的一个重要因素。这些因素都将是下一步工作需要考虑的问题。

参 考 文 献

- 1 Wang Bingjie, Qian Jianjun, Zhao Tong *et al.*. Anti-jamming performance of chaotic lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514002
王冰洁, 钱建军, 赵彤等. 混沌激光雷达的抗干扰性能分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0514002
- 2 Yuncai Wang, Bingjie Wang, Angbang Wang. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19): 1636~1638
- 3 Apostolos Argyris, Dimitris Syvridis, Laurent Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**: 343~346

- 4 J. M. Amigó, L. Kocarev, J. Szczepanski. Theory and practice of chaotic cryptography[J]. *Phys. Lett. A*, 2007, **366**(3): 211~216
- 5 Nicholas Metropolis, S. Ulam. The Monte Carlo method[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1949, **44**(247): 335~341
- 6 Keiji Kanazawa, Daphne Koller, Stuart Russell. Stochastic simulation algorithms for dynamic probabilistic networks[C]. *Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, 1995. 346~351
- 7 Xue Lugang, Zhang Jianzhong, Liu Ming *et al.*. Robust fast physical random bit generator[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2011, **56**(33): 2746~2752
薛璐刚, 张建忠, 刘明等. 鲁棒的高速物理随机数发生器[J]. *科学通报*, 2011, **56**(33): 2746~2752
- 8 Yuncai Wang, Pu Li, Jiangzhong Zhang. Fast random bit generation in optical domain with ultrawide bandwidth chaotic laser[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(22): 1680~1682
- 9 Nobuhide Yamada, Hiroshi Ohta, Seiji Nogiwa. Polarization-insensitive optical sampling system using two KTP Crystals[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 215~217
- 10 Masataka Okazaki, Toshihiko Hiraooka, Guan Pengyu *et al.*. All-optical demultiplexing of 640-Gb/s OTDM-DPSK signal using a semiconductor SMZ switch[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(20): 1574~1576
- 11 C. H. Kwok, K. K. Chow, C. Shu *et al.*. All-optical sampling system using nonlinear optical loop mirror with soliton self-frequency shifted control pulses[C]. *Lasers and Electro-Optics*, 2005. 1358~1359
- 12 Wang Zhuoran, Yu Jinlong, Wang Xinbing *et al.*. Experimental analysis of 40 Gb/s all optical switch using ultrafast nonlinear interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 987~992
王卓然, 于晋龙, 王新兵等. 40 Gb/s 超快非线性干涉仪的实验分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 987~992
- 13 Sho-ichiro Oda, Akihiro Maruta, Ken-ichi Kitayama. All-optical quantization scheme based on nonlinearity fiber[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 587~589
- 14 Liu Yuanshan, Zhang Jianguo, Tang Dingkan. Prototype of an optical sampling oscilloscope with subpicosecond temporal resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0107002
刘元山, 张建国, 唐定康. 亚皮秒级时间分辨率的光取样示波器实验样机[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0107002
- 15 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
- 16 Fang Nian, Guo Xiaodan, Wang Chunhua *et al.*. The characteristic of polarization chaos and coherence of semiconductor optical amplifier based fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 128~131
方捻, 郭小丹, 王春华等. 半导体光放大光纤环形激光器的偏振混沌与相干性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 128~131
- 17 M. E. Mayhac, K. Uesaka, L. G. Kazovsky. Polarization-independent one-pump fiber-optical parametric amplifier[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11): 1506~1508
- 18 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Zheng Jianyu *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405002
张明江, 刘铁根, 郑建宇等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405002
- 19 Yang Congyuan, Wang Anbang, Wang Yuncai. Correlation optical fiber fault locator based on chaotic laser and its experimental application research[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011,

38(2); 0208002

杨从渊, 王安帮, 王云才. 混沌激光相关法光纤断点定位仪及其应用的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0208002

20 Zhang Yuanfang, Yang Lingzhen. Theoretical and experimental study of chaos generation with single optical feedback in the He-Ne lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, 39(1): 0102003

张元芳, 杨玲珍. 单反馈 He-Ne 激光器混沌激光产生的理论及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102003

21 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Berlin: Springer-Berlag, 2000. 195~211

22 Gong Lei, Yin Feifei, Chen Hongwei *et al.*. All-optical wavelength conversion based on four-wave mixing in photonic crystal fiber [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(9): 1320~1323

龚磊, 尹飞飞, 陈宏伟等. 基于光子晶体光纤四波混频的波波长变换[J]. 光电子·激光, 2010, 21(9): 1320~1323

栏目编辑: 王晓琪

国内首次实现瓦级全光纤中红外超连续谱光源

中红外超连续谱(SC)光源在工业过程控制、环境监测、生物医学等众多领域有着广泛的应用,是目前国内外的研究热点。在中红外 SC 产生的抽运源上,随着 $2\ \mu\text{m}$ 波段脉冲激光的发展,用长波长脉冲源抽运软玻璃光纤产生超连续谱是中红外 SC 光源发展的一个新尝试。目前, $2\ \mu\text{m}$ 脉冲激光可经由掺铥光纤放大器实现高功率输出,经由 $2\ \mu\text{m}$ 波段的脉冲源抽运软玻璃光纤是实现高平均功率中红外 SC 的一个有效方式。法国、丹麦等国的研究小组基于 $2\ \mu\text{m}$ 波段的脉冲激光,以 ZBLAN(组分为 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) 氟化物光纤为非线性介质,实现了中红外 SC 输出。其中,法国 M. Duhant 和 M. Eckerle 等分别于 2011 年和 2012 年实现了 490 mW 和 1.08 W 的输出平均功率,但是中红外 SC 的长波边未突破 $3.8\ \mu\text{m}$; 2012 年,丹麦 P. M. Moselund 等获得了光谱覆盖 $1.75\sim 4.4\ \mu\text{m}$ 的中红外 SC,但是输出平均功率仅为 550 mW。而国内尚未见瓦级中红外 SC 的实验报道。

2012 年 6 月,国防科学技术大学光电科学与工程学院于国内首次实现了 $1.9\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 全光纤中红外 SC 光源,输出平均功率为 185 mW。之后,研究小组采用 $2\ \mu\text{m}$ 波段的脉冲激光器作为抽

运源,于 2012 年 12 月 5 日实现了输出平均功率为 1.2 W 的全光纤结构中红外 SC 光源。实验中种子激光的中心波长为 1958 nm,脉冲半峰全宽值约为 2 ns,脉冲重复频率为 50 kHz。种子激光经过放大后获得 3.3 W 的输出平均功率,用于抽运 ZBLAN 光纤,最终获得了输出平均功率为 1.2 W 的中红外 SC,其中波长大于 2500 nm 的光对应的输出功率约为 340 mW。当输出平均功率为 1.2 W 时,实验测得的光谱如图 1 所示,光谱范围覆盖 $1.8\sim 4.3\ \mu\text{m}$,输出光谱及输出平均功率具有较高的稳定性。

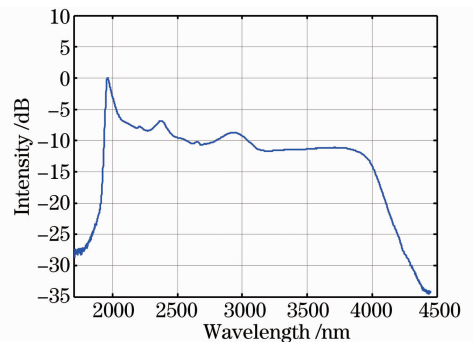


图 1 当输出平均功率为 1.2 W 时 ZBLAN 光纤输出的中红外 SC 光谱

Fig. 1 Mid-IR SC spectrum from ZBLAN fiber with average output power of 1.2 W

杨未强 张斌 侯静* 殷科 刘泽全
(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

* E-mail: houjing25@sina.com

收稿日期: 2012-12-20; 收到修改稿日期: 2013-01-29