

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0081-05

基于宽带非相干抽运光源的慢光延迟理论研究

郑狄 潘炜 闫连山 罗斌 叶佳 易安林 江宁
马雅男 张婧 黄钰君

(西南交通大学信息科学与技术学院 信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要 从理论上分析了基于谱分割宽带非相干放大自发辐射(ASE)光源作为抽运信号产生受激布里渊散射(SBS)效应实现慢光延迟的特性。着重考虑了慢光效应对传输系统性能的影响,对 2.5 Gbit/s 的非归零(NRZ)和归零(RZ)伪随机码进行了数值分析,得到了延迟信号眼图、延迟量及 Q 因子在不同谱分割带宽和功率下的变化趋势。结果表明,增大抽运功率和减小谱分割带宽有利于增加信号的延迟,但延迟信号的扰动加大,因而 Q 因子减小,恰当选取抽运功率和谱分割带宽可以在保证延迟量的情况下提高 Q 因子,有助于系统性能的优化。与传统实现宽带抽运脉冲方法相比,使非相干 ASE 光源通过一个光纤布拉格光栅(FBG)滤波器,可以很方便地得到吉赫兹带宽的抽运脉冲,因而大大降低了系统的复杂度及成本,且延迟量可以和传统方法相比拟。

关键词 光纤光学;慢光延迟;非相干抽运;ASE 光源;受激布里渊散射

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200835s2.0081

Theoretical Study on Slow-Light Delays Using Broadband Incoherent Pumping Source

Zheng Di Pan Wei Yan Lianshan Luo Bin Ye Jia Yi Anlin Jiang Ning
Ma Yanan Zhang Jing Hunag Yujun

(Center for Information Photonics & Communications, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract We theoretically analyze characteristics of stimulated Brillouin scattering (SBS)-based slow light using a broadband incoherent and spectrally-sliced ASE source as the pump. Different from most previous literatures where only the delay characteristics of a single pulse are investigated, we concentrate on the transmission system performance when the slow light delay is incorporated. Under different spectrally sliced bandwidths and pump power levels, the output eye diagrams, the trends of the delay time and the Q factor are obtained through numerical analysis for both nonreturn-to-zero(NRZ) and return-to-zero(RZ) data formats modulated by 2.5-Gbit/s pseudo-random bit sequences. The results show that increasing the pump power and reducing the spectrally-sliced bandwidth are both beneficial to the generated delay, while the Q-factor may degrade due to more serious signal perturbation. By properly choosing the pump power and the spectrally-sliced bandwidth, we may optimize the Q-factor without sacrificing the delay time. Using a fiber Bragg grating (FBG) as the filter after the ASE source, we can easily obtain the pumping source with ~GHz bandwidth therefore greatly reduce the system complexity and the cost, with the generated delay still comparable to conventional approaches.

Key words fiber optics; slow-light delay; incoherent pumping; amplified spontaneous emission source; stimulated Brillouin scattering

基金项目: 国家自然科学基金(10174057, 90201011), 教育部科学技术研究重点项目(105148), 宽带光纤传输与通信网络技术教育部重点实验室开放基金(KF2006)资助课题。

作者简介: 郑狄(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事光器件与光通信研究。E-mail: zdsuper_82@163.com

导师简介: 潘炜(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体激光器、光器件与光通信研究。

E-mail: wpan@home.swjtu.edu.cn

1 引 言

近年来,控制光波在介质中的传输速度已经成为光学领域的一个研究热点^[1,2],尤其是基于受激布里渊散射(SBS)效应实现光可控光脉冲延迟(即所谓的慢光)引起了人们的广泛关注,作为未来全光通信网络的一个重要部份,它可以广泛地应用于数据同步、光存储和信号处理^[3~5]。然而本征 SBS 增益带宽只有几十兆赫兹,不能满足现有的光通信网的传输速率,因而如何得到吉赫兹带宽的增益谱,实现对吉赫兹数据信号的延迟,人们对其进行了广泛的研究。已有的拓宽增益谱的方法包括:使用伪随机码或高斯噪声对抽运源直接调制^[6~8]、外部相位调制^[9,10]或利用多个抽运实现增益谱的叠加拓宽^[11,12],但这些方法都是以使用较为昂贵的相干光源和调制器为代价且系统结构复杂。最近文献^[13]提出了一种获得宽带抽运脉冲的简便方法,它利用非相干放大自发辐射(ASE)光源的宽带谱特性,使其通过一个布拉格光栅(FBG)滤波器则可以很方便地得到吉赫兹带宽的抽运脉冲,因而大大降低系统的复杂度和成本。然而文献^[13]仅从实验上证明了使用非相干 ASE 光源实现慢光的可行性,并没对特定参数下的变化趋势做系统分析,因而理论研究不同条件下的慢光延迟特性对实际系统的性能优化有重要意义。

本文建立了基于非相干 ASE 光源的 SBS 慢光模型,重点研究了 2.5 Gbit/s 的归零(RZ)和非归零(NRZ)伪随机码的延迟特性,得到了延迟后的信号眼图,并分析了在不同抽运功率、不同谱分割带宽(对应于 FBG 带宽)时延迟量和 Q 因子的变化规律,所得结论与已有实验结果吻合,表明了模型的有效性。

2 理论模型

数据脉冲在光纤中与抽运脉冲相向传输,当它的载波频率正好落在抽运信号 SBS 效应产生的放大共振区,即增益谱带宽内时,数据信号将经历慢光效应。在小信号区域,输出数据脉冲的频谱可以通过公式(1)与输入脉冲频谱相关联^[14]

$$E(z=L, \omega) = E(z=0, \omega) \exp[g(\omega)L/2], \quad (1)$$

这里 L 是实现慢光效应的光纤长度, $g(\omega)$ 是 SBS 的复增益函数,它的实部和虚部分别对应增益和折射率。在理想情况下,抽运光认为是单色光,因而复增益函数可以表示为 $g(\omega) = g_0 I_0 / [1 - i(\omega + \Omega_B$

$-\omega_{p0})/(\Gamma_B/2)]$,增益谱形状为 Lorentzian 型。当考虑宽带抽运源时, $g(\omega)$ 满足本征增益谱 $g_0(\omega)$ 和抽运信号功率谱 $I_p(\omega_p)$ 的卷积关系^[8]

$$g(\omega) = g_0(\omega) \otimes I_p(\omega_p) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g_0 I_p(\omega_p)}{1 - i(\omega + \Omega_B - \omega_p)/(\Gamma_B/2)} d\omega_p, \quad (2)$$

一般情况下, $g_0(\omega)$ 的带宽只有几十兆赫兹,如果把抽运信号频率调制到吉赫兹范围,那么得到的 SBS 增益谱宽度将主要由抽运脉冲的谱宽决定,达到吉赫兹范围,公式(2)中的参数含义与文献^[8]相同。 $G = g(\omega)L/2$ 为增益参量,它的指数是小信号增益系数,文献^[12]已证明在 $G \leq 10$ 时可以很好地拟合实验结果,而本文所选参数都满足小信号区域。

从公式(2)可以看出,对于本征增益谱 $g_0(\omega)$ 和拓宽的抽运脉冲功率谱 $I_p(\omega_p)$ 之间的卷积,其谱线间的相位没有严格要求,这一点也可以从文献^[8]中的实验看出,利用高斯光对信号源进行调制,将使输出脉冲频谱间的相位随机化。正是基于这一思想,使用一个非相干 ASE 光源通过一个 FBG 滤波器,就能很方便地得到吉赫兹范围的抽运脉冲,简化了系统结构。

基于谱分割非相干 ASE 光源的慢光系统如图 1 所示,抽运脉冲由 FBG 滤波器对非相干 ASE 光源进行谱分割得到,它的带宽由 FBG 的带宽决定,这里选取其谱形状为高斯型。高功率 EDFA 提供抽运信号的功率放大实现 SBS 慢光效应,通过环形器 I 进入高非线性光纤(HNLF)。数值分析所用的 OOK 数据(NRZ 和 RZ)由电光调制器产生,在 HNLF 内与抽运信号相向传输,延迟后的信号通过环形器 I 的 3 端口输出。

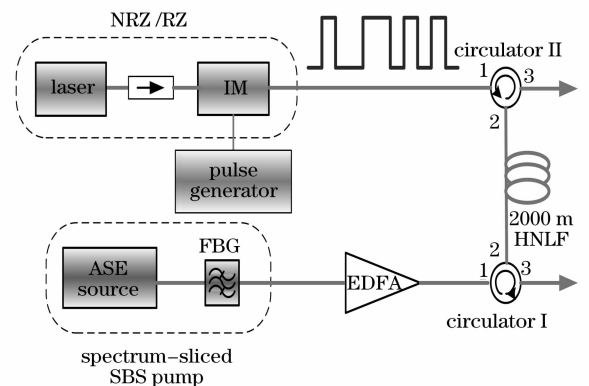


图 1 基于谱分割非相干抽运光源的 SBS 慢光系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SBS slow light based on spectrally sliced incoherent pump

3 结果与讨论

在本文分析中，抽运信号由 ASE 光源通过一个 FBG 光滤波器得到，其功率谱形状为高斯型，可表示为

$$I_p(\omega_p) = \frac{I_0}{\sqrt{\pi}\Delta\omega_p} \exp\left[-\left(\frac{\omega_p - \omega_{p0}}{\Delta\omega_p}\right)^2\right], \quad (3)$$

$\Delta\omega_p$ 是抽运信号的功率谱半峰全宽(FWHM)，其宽度可由 FBG 很方便地调节。数值分析中所使用的 HNLf 的长度为 $L=2000$ m，有效模面积 $A_{\text{eff}} = 14.5 \mu\text{m}^2$ ，SBS 中心增益系数 $g_0 = 5 \times 10^{-11}$ m/W，本征增益带宽 $\Gamma_B/2\pi = 40$ MHz，光纤折射率 $n_g = 1.45^{[15]}$ 。

为了对基于非相干 ASE 光源实现 SBS 慢光有一个更直观的认识，首先得到了 FBG 的带宽取 2 GHz 和 4 GHz 时，2.5 Gbit/s 的 NRZ 和 RZ 码延

迟后的眼图，如图 2, 3 所示。这里定义时延量为脉冲峰值点的漂移。从图 2 和 3 中可以看出，在相同带宽下，增加抽运功率，可以增大延迟；相同比特速率下，NRZ 码的延迟要大于 RZ 码，这是由于 RZ 码的频谱宽度大于 NRZ，因而不同频率间的延迟差较大，引起整个脉冲的延迟减小。抽运功率保持不变，减小谱分割带宽，延迟增大，但输出脉冲的扰动增强，且抽运功率越大，脉冲畸变越明显。其原因可从公式(3)看出，减小 FBG 的带宽，在相同抽运功率下，抽运信号的功率谱峰值增大，因而卷积后的增益谱虽然带宽变窄，但峰值增大，与其他频谱分量相比，位于增益谱中心位置的数据脉冲的频谱分量将获得更大的延迟和增益，因而输出信号产生畸变。数值分析结果与文献[13]的结论一致。

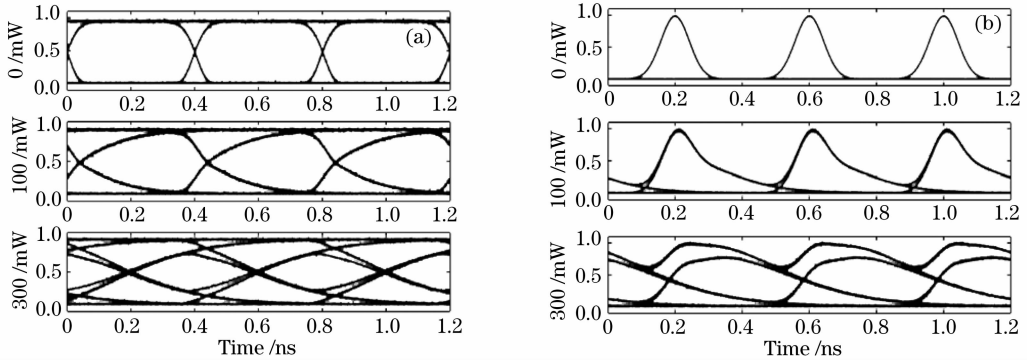


图 2 2.5 Gbit/s NRZ (a)和 RZ (b)码在 2 GHz 谱分割抽运带宽下的眼图

Fig. 2 Eye diagram of slow light delay on both 2.5 Gbit/s NRZ (a) and RZ (b) signals using 2 GHz spectral-sliced pump

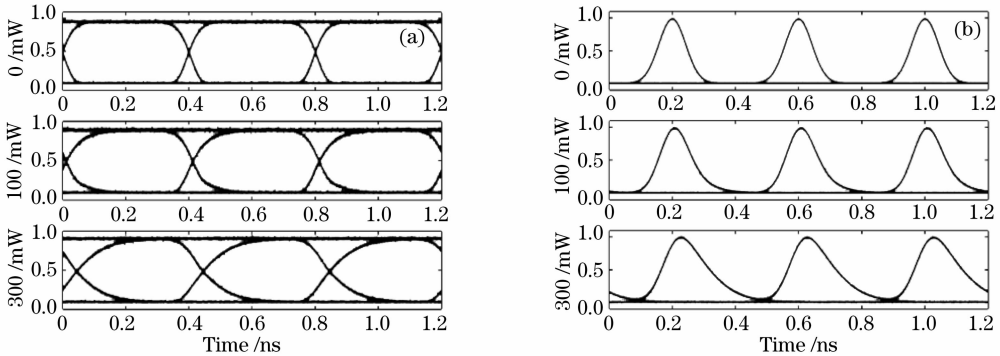


图 3 2.5 Gbit/s NRZ (a) 和 RZ (b) 码在 4 GHz 谱分割抽运带宽下的眼图，(a) NRZ，(b) RZ

Fig. 3 Eye diagram of slow light delay on both 2.5Gbit/s NRZ (a) and RZ (b) signals using 4 GHz spectral-sliced pump

图 4 是在不同的谱分割带宽下信号延迟随抽运功率的变化，(a)和(b)分别对应 2.5 Gb/s 的 NRZ 和 RZ 码。可以看出在谱分割带宽较宽时，信号的延迟量与抽运光功率几乎满足线性关系，这有利于在实际通信系统中通过改变抽运功率对信号的延迟

量进行精确控制。当抽运功率较大时，窄带宽引起延迟脉冲较大的扰动畸变，因此延迟增长量有所放慢。当非相干光源的谱宽为 2 GHz，抽运功率为 300 mW 时，NRZ 和 RZ 码的延迟分别达到 181 ps 和 98 ps，这一结果已接近于使用传统抽运展宽获

得的最大延迟量。

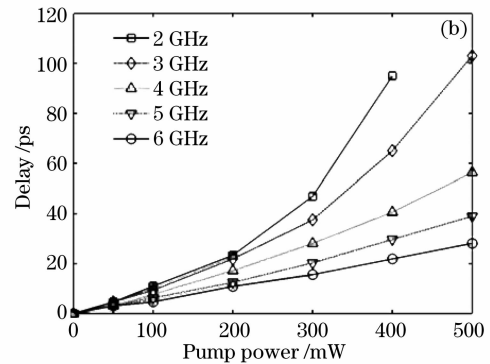
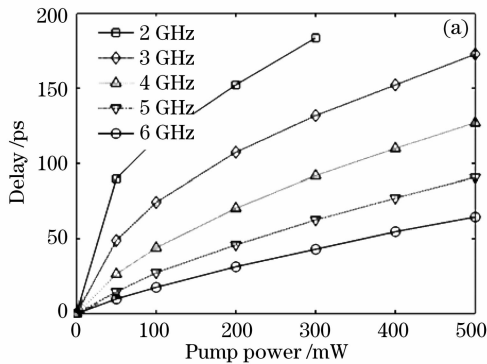


图 4 不同谱分割带宽下延迟随抽运功率的变化。(a) NRZ; (b) RZ

Fig. 4 Slow-light delay versus pump power for different spectrally-sliced conditions. (a) NRZ; (b) RZ

信号的延迟必然伴随着脉冲的展宽甚至畸变,通过慢光介质后的信号质量对接收系统能否准确判断数据至关重要,因而分析延迟信号的 Q 因子有重要意义。图 5 是不同抽运功率下,延迟信号的 Q 因子随归一化带宽(谱分割带宽与信号比特速率的比值)的变化,(a)和(b)分别对应 2.5 Gb/s 的 NRZ 和 RZ 码。可以看出 Q 因子的质量与带宽成正比,与抽运光功率成反比。在相同带宽下,随着抽运功

率的增加 Q 因子逐渐减小,其原因有两个方面:一是由于抽运功率的增加,增益谱的峰值功率也增加,位于增益谱中心位置的频谱与其两边的频谱相比,获得增益和延迟的差异将增大;二是与码型相关的扰动,连“1”比特与单个“1”比特相比,其频谱更接近于增益谱中心,因而延迟后脉冲的幅度要大于单个“1”比特。上两种机制增大了输出信号的扰动, Q 因子减小。

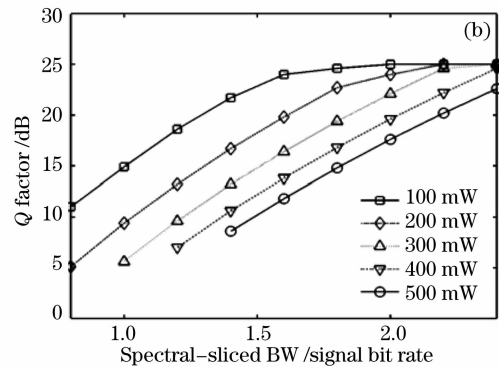
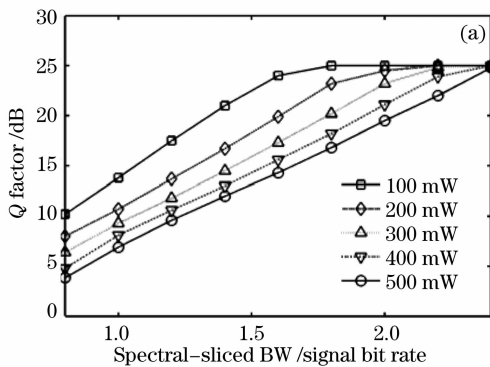


图 5 不同抽运功率下 Q 因子随归一化带宽的变化。(a) NRZ; (b) RZ

Fig. 5 Q factor versus normalized slow-light bandwidth. (a) NRZ; (b) RZ

4 结 论

对基于谱分割非相干 ASE 光源的宽带 SBS 慢光进行了理论分析,得到了不同谱分割宽度和抽运功率下的眼图、延迟量及 Q 因子变化曲线。结果表明延迟量随谱分割宽度的增大而减小,随抽运功率的增大而增大, Q 因子恰好相反。调节抽运功率可连续地改变延迟量,2.5 Gb/s 的 NRZ 和 RZ 码最大延迟达到 181 ps 和 100 ps,可与传统的抽运拓宽方法相比拟。数值结果与实验结果基本吻合,所得结论有助于实际系统的优化。

参 考 文 献

- Ye Jianbo, Zhang Yundong, Qiu Wei *et al.*. Effect of Ion density on slow light propagation in erbium-doped optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 563~566
叶建波, 掌蕴东, 邱 魏等. 掺铒光纤中浓度效应对光脉冲群速的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 563~566
- Qiu Wei, Zhang Yundong, Ye Jianbo *et al.*. Research on group velocity slowdown in erbium-doped optical fiber under controllable absorption loss [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2242~2247
邱 魏, 掌蕴东, 叶建波等. 损耗可控条件下掺铒光纤中光速减慢现象的研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(4): 2242~2247
- Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**: 153902~153905
- L. Xing, L. Zhan, L. L. Yi *et al.*. Storage capacity of slow-

- light tunable optical buffers based on fiber Brillouin amplifiers for real signal bit streams[J]. *Opt. Express.*, 2007, **15**(16): 10189~10195
- 5 A. E. Willner, B. Zhang, L. Zhang *et al.*. Optical signal processing using tunable delay elements based on slow light[J]. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(3): 691~705
- 6 V. P. Kalosha, L. Chen, X. Bao. Slow and fast light via SBS in optical fibers for short pulses and broadband pump [J]. *Opt. Express.*, 2006, **14**(26): 12693~12703
- 7 M. G. Herráez, K. Y. Song, L. Thévenaz. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers [J]. *Opt. Express.*, 2006, **14**(4): 1395~1400
- 8 Z. Zhu, A. M. C. Dawes, D. J. Gauthier *et al.*. Broadband SBS slow light in an optical fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 201~206
- 9 Z. Liu, Y. Dong, Q. Li. Slow light in multi-line Brillouin gain spectrum[J]. *Opt. Express.*, 2007, **15**(4): 1871~1877
- 10 L. L. Yi, L. Zhan, W. H. Hu *et al.*. Delay of broadband signals using slow light in stimulated Brillouin scattering with phase-modulated pump [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8): 619~621
- 11 Z. Shi, R. Pant, Z. Zhu *et al.*. Design of a tunable time-delay element using multiple gain lines for increased fractional delay with high data fidelity[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(14): 1986~1988
- 12 M. D. Stenner, M. A. Neifeld, Z. Zhu *et al.*. Distortion management in slow-light pulse delay[J]. *Opt. Express.*, 2005, **13**(25): 9995~10002
- 13 B. Zhang, L. S. Yan, L. Zhang *et al.*. Broadband SBS slow light using simple spectrally-sliced pumping [C]. Proc. ECOC2007, Berlin, Germany, paper P025
- 14 Z. Zhu, D. J. Gauthier, Y. Okawachi *et al.*. Numerical study of all-optical slow-light delays via stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2378~2384
- 15 B. Zhang, L. S. Yan, J. Y. Yang *et al.*. A single slow-light element for independent delay control and synchronization on multiple Gb/s data channels[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(14): 1081~1083