

非线性光纤环镜在受激布里渊散射慢光级联系统中的可行性研究*

郑狄[†] 潘炜

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

(2010年7月20日收到; 2010年8月4日收到修改稿)

基于非线性光纤环镜(NOLM)的脉冲压缩特性,分析了NOLM在基于受激布里渊散射(SBS)慢光级联系统中对延迟脉冲的影响.利用环形结构来模拟多次级联,有效地降低了系统的复杂度,得到了在不同抽运光功率和级联次数下脉冲的延迟输出特性.理论分析表明,NOLM可以有效地抑制SBS慢光级联系统中延迟脉冲的展宽,抽运光功率决定了展宽因子的变化趋势及最终稳定值的大小,展宽因子在级联4次时趋于稳定值,恰当选取抽运光功率可实现脉冲的零展宽延迟;改变抽运光功率和级联次数可以实现延迟量的连续可调,且延迟量理论上不受限制;增大抽运光功率可以减小因多次级联而加载在延迟脉冲上的频率啁啾.

关键词: 慢光, 脉冲压缩, 非线性光纤环镜, 受激布里渊散射

PACS: 42. 65. Re, 42. 65. Es

1. 引言

近年来,慢光技术由于其潜在的应用价值引起了人们的广泛关注,它可应用于全光信号处理、光存储、光延迟和量子计算等方面^[1-6].实现慢光的方法主要有电磁引入透明(EIT),相干布局震荡(CPO),光参量放大和受激散射过程.这些方法其根本思想是利用在慢光介质的共振频率处存在折射率的突变,产生大的群折射率,因而减慢信号的传播速度.然而折射率的急剧变化总伴随着大的色散,在窄共振频带内由于大的色散和谱滤波作用将引起延迟信号的展宽甚至畸变.基于光纤中受激布里渊散射效应的慢光技术由于其延迟量连续可调、工作在室温条件下和增益谱的形状可随抽运光的频谱形状而改变,因而得到了人们的广泛关注^[7-10].研究发现,通过优化SBS增益谱形状可以减小延迟信号的扰动^[11-16].这些优化方案主要集中于以下两个方面:1)产生具有矩形形状的SBS增益谱,该方案虽然实现了延迟脉冲扰动减小,但延迟量也相应减小;2)利用谱滤波展宽和色散展宽两者

符号相反因而相互抵消实现零展宽甚至压缩,该方案虽然实现了延迟信号的半极大全宽度(FWHM)无展宽,但会出现子脉冲,因而不能完全消除扰动.

最近,文献[17]提出了利用NOLM来完全补偿基于SBS的慢光展宽,该结构在保持延迟量不变的情况下,使压缩后的光脉冲半极大全宽度小于输入光脉冲,对于半极大全宽度为27 ns的高斯光脉冲信号实现了在无展宽下1.3 bit的延迟量.已有结果证明了NOLM对单次延迟展宽的光脉冲具有很好的抑制能力,能否将该结构进行多次级联以实现多比特延迟及多次级联下延迟光脉冲的变化趋势是值得研究的.以此为出发点,本文采用一种环形结构,模拟了多次级联下延迟光脉冲的变化,得到了延迟量、展宽因子和啁啾随抽运光功率和级联次数的变化规律,所得结果证明了高斯光脉冲在无展宽下实现多比特延迟的可行性.

2. 原理

光纤中的受激布里渊散射效应起源于相向传输的强抽运光和弱探测光通过声波相互作用实现

* 四川省应用基础研究计划(批准号:2008JY0064)资助的课题.

[†] E-mail: dzheng.swjtu@gmail.com

的. 抽运光通过电致伸缩效应产生声波, 引起介质折射率周期性的调制, 当两波的频差为布里渊频移时, 声波将得到有效放大, 抽运光的大部分能量将转移到探测光上. 在普通单模光纤中, SBS 的增益谱为洛伦兹型, 其表达式为^[18]

$$g(\omega) = \frac{g_0 I_0 \Gamma_B}{\Gamma_B - i2(\omega + \Omega_B - \omega_p)}, \quad (1)$$

g_0 为中心增益系数, $\Gamma_B/2\pi$ 是增益谱的本征线宽 (FWHM), I_0 是输入抽运光强度, $g(\omega)$ 的实部和虚部分别对应增益和折射率变化. 当不考虑光纤损耗和抽运光损耗时, 延迟信号频谱与输入信号频谱满足关系式 $E(z, \omega) = E(0, \omega) \exp(g(\omega)z/2)$, 这里 z 是慢光介质的长度.

NOLM 的基本结构包括一个 X 形的 4 端口耦合器和一个光纤环. 输入光场 E_i 经耦合器后被分成两束相向传播的光场 E_c 和 E_{cc} ^[19]:

$$E_c = \sqrt{k}E_{in}, \quad (2a)$$

$$E_{cc} = i\sqrt{1-k}E_{in}, \quad (2b)$$

这里 k 是功率耦合比, 由于 Kerr 效应, 不同强度的光脉冲在光纤传播时得到自相位调制和交叉相位调制引入的非线性相移:

$$E'_c = E_c \exp[i\phi_0 + i\gamma(|E_c|^2 + 2|E_{cc}|^2)L], \quad (3a)$$

$$E'_{cc} = E_{cc} \exp[i\phi_0 + i\gamma(|E_{cc}|^2 + 2|E_c|^2)L], \quad (3b)$$

其中 $\phi_0 = \beta L$ 是线性相移, L 是环长, β 是环内传输常数, γ 为光纤非线性系数. 它们绕环一周后再次回到耦合器中相干输出, 得到透射光场 E_t 和反射光场 E_r 分别为

$$\begin{pmatrix} E_t \\ E_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{k} & i\sqrt{1-k} \\ i\sqrt{1-k} & \sqrt{k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E'_c \\ E'_{cc} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

本文的慢光级联系统如图 1 所示, 主要由两个部分组成: 一个是慢光单元, 另一个是压缩单元. 光脉冲信号首先进入慢光单元, 由于光纤中的 SBS 作用, 输出光脉冲延迟并展宽. 展宽的延迟光脉冲经过掺铒光纤放大器 (EDFA) EDFA1 和可变光衰减器 (VOA) VOA2 设置到最优输入功率进入 NOLM, 这时光脉冲的中心部分可以有效地透射出去, 而其余部分被反射回去, 因而脉冲被压缩. 压缩后的脉冲再次以输入信号进入慢光单元, 当光脉冲在环形结构中循环一周的时间远远小于输入光脉冲的重复间隔时, 该模型可以有效的模拟多次级联结构, 大大降低实验的复杂度.

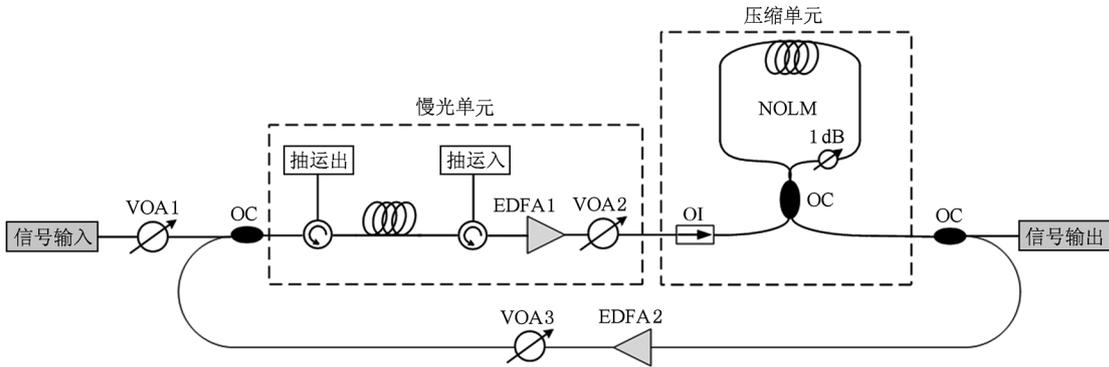


图 1 基于 NOLM 的 SBS 慢光级联系统框图 VOA: 可变光衰减器; EDFA: 掺铒光纤放大器; OC: 光耦合器; OI: 光隔离器

3. 结果与分析

为了使计算得到的数值结果更符合实际情况, 计算用到的参数值与文献[17]中的实验参数完全一致. 慢光介质是 1 km 的标准单模光纤, 布里渊频移为 10.8 GHz, 增益谱带宽为 27 MHz. 在无增益饱和下, 抽运光功率变化范围为 0—30 mW, 输入光脉冲的半极大全宽度为 27 ns. NOLM 的光纤长度为 12 km 的色散位移光纤, 其有效长

度为 $L_{\text{eff}} = 4.5 \text{ km}$, 非线性系数 γ 为 $2 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 环中引入功率不相等的衰减器为 $\alpha = 1 \text{ dB}$. 展宽的延迟脉冲在输入 NOLM 前通过 EDFA1 放大到峰值功率为 185 mW, 这时环境具有最大的透射率. 压缩后的脉冲再次循环时, 通过调节 EDFA2 和 VOA3 使输入功率与第一次输入功率一致. 这里假设 NOLM 中耦合器的分光比为理想的 3dB, 且 NOLM 内相向传输的两束光只考虑自相位调制引入的非线性相移量, 由 (2) — (4) 式可知, 透射端的输出幅值表达式为

$$E_t = i \sqrt{\alpha} E_{in} \exp \left[i \frac{\gamma |E_{in}|^2 L_{eff}}{4} (1 + \alpha) \right] \times \sin \left[\frac{\gamma |E_{in}|^2 L_{eff}}{4} (1 - \alpha) \right]. \quad (5)$$

为验证理论模型的可靠性,首先将单次循环下得到的分数延迟 $FD = \Delta T / \tau_{in}$ (ΔT 是绝对延迟量) 和展宽因子 $B = \tau_{out} / \tau_{in}$ (τ_{out} 和 τ_{in} 分别对应输出与输入脉冲的 FWHM) 随信号增益变化的理论计算结果与实验结果进行比较,如图 2 所示. 可以看出,当信号增益小于 20 dB 时,数值结果与实验数据符合很好;在大信号增益下,理论结果与实验数据存在一定偏差,其原因来自于两方面:一方面是受限于所使用实验器件的性能和测量设备的精确度;另一方面,由于模型中没有考虑 EDFA 的自发辐射噪声、NOLM 中交叉相位调制效应和偏振效应引起的非线性相移,而这些因素都将影响 NOLM 的透射谱,即脉冲的压缩特性.

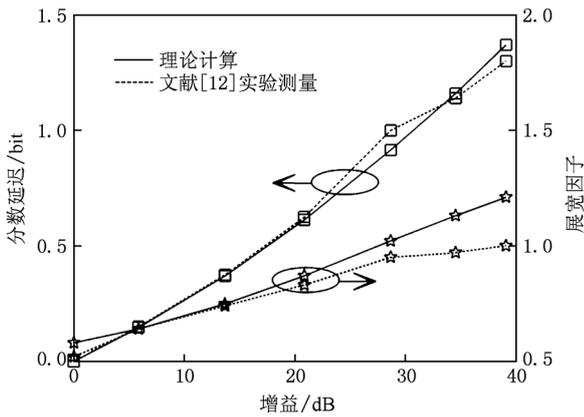


图 2 分数延迟和展宽因子随信号增益的变化

图 3 和图 4 分别是在不同抽运光功率下,脉冲多次级联延迟后的输出波形. 脉冲顶端的数字代表级联次数,0 表示无延迟输出波形. 实线对应多次延迟并压缩后的波形,虚线为延迟一次且无压缩时的输出脉冲波形. 必须指出的是,在数值计算中我们没有考虑从 NOLM 输出到再次进入慢光单元所经历的时间,所有的延迟都是由慢光单元引入的. 当无 NOLM 进行脉冲压缩时,抽运光功率分别为 10, 30 mW 时,延迟脉冲的展宽为 1.35 和 1.9 倍,分数延迟分别为 0.35 和 1.3 bit,这与文献[17]中的实验结果完全一致. 而有 NOLM 时,在多次级联下,延迟脉冲的展宽都得到了很好的抑制. 抽运光功率较大时,多次级联延迟并压缩后的脉冲形状与输入脉冲基本保持一致,输出脉冲具有较好的对称性,且

延迟量等间隔增加. 而抽运光功率较小时,脉冲除被压缩外,多次级联使延迟脉冲具有更陡峭的前沿,延迟量随级联次数的增加经历了逐渐递减并趋于稳定的过程. 其原因是:NOLM 相当于一个饱和吸收体,能反射低强度信号而毫无影响地透射高强度信号. 在慢光单元,输入信号不但获得延迟,而且由于受激布里渊效应得到放大. 因而抽运光功率较小时脉冲能透射出环境的部分明显小于在大抽运光功率下的情况,所以脉冲压缩更为明显. 时域脉冲的压窄对应频谱的增宽,再次输入慢光单元时,在 SBS 增益谱宽度不变的情况下,不但获得延迟量将减小,而且由色散和滤波引入的畸变也增大^[20],最后在慢光单元和压缩单元的相互作用下达到平衡.

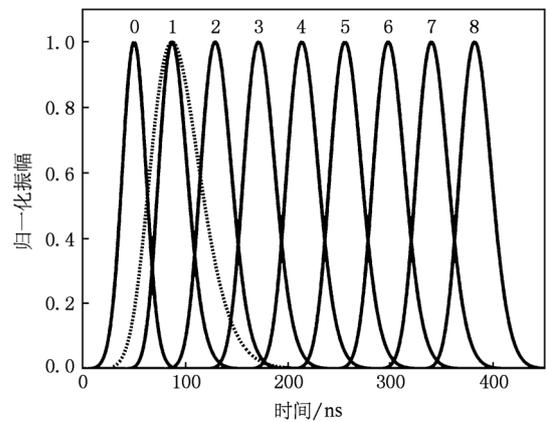


图 3 抽运光功率为 30 mW 时,多次级联下的输出脉冲波形

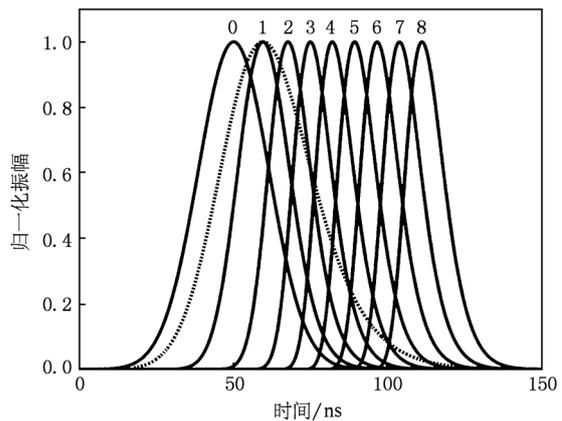


图 4 抽运光功率为 10 mW 时,多次级联下的输出脉冲波形

为了直观地了解 NOLM 在多次级联下对延迟脉冲的影响,图 5 和 6 分别给出了延迟脉冲的分数延迟和展宽因子随级联次数的变化. 对于分数延迟,不同抽运光功率下,延迟量与级联次数都很好

地满足线性关系. 延迟量的斜率大小与抽运光功率成正比, 通过选择恰当的抽运光功率和级联次数可以实现延迟量的连续可调. 另一方面, 虽然在不同抽运光功率下多次级联后的展宽因子趋于稳定值, 但经历了不同的变化趋势. 大抽运光功率下, 输出光脉冲经历了先展宽再趋于稳定的过程, 稳定的脉冲宽度大于输入脉冲的宽度; 而小抽运光功率下, 展宽因子逐级变小并在级联 4 次后趋于稳定. 当抽运光功率约为 20 mW 时, 可实现脉冲零展宽的延迟. 值得注意的是, 当抽运光功率为 30 mW 时, 理论计算得到的只循环一次的展宽因子为 1.2, 略大于实验结果 1. 该误差来源于以下几个方面: 实验中 NOLM 所用的耦合器不是理想的 3 dB 耦合器、EDFA 引入的自发辐射噪声、NOLM 中两路相向传输的信号之间的交叉相位调制或光纤的偏振效应. 这些因素都将影响两路信号获得的非线性相移量, 进而影响 NOLM 的透射率, 因而实验中信号的透射率要略小于在理想情况的理论值, 即实验中延迟脉冲的压缩率要好于理论值.

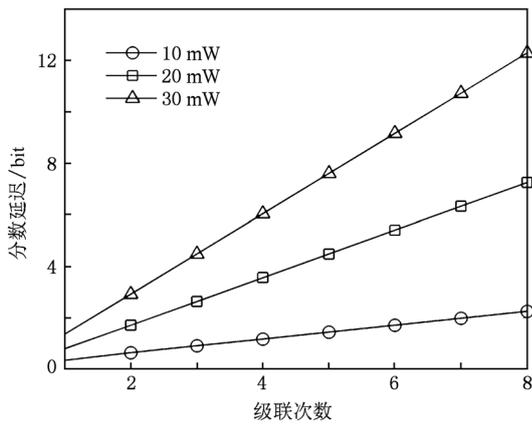


图5 在不同抽运光功率下, 压缩光脉冲的分数延迟随级联次数的变化

在 NOLM 中由 SPM 引入的脉冲压缩效应会给出输出光脉冲引入啁啾, 啁啾的大小与正负将影响脉冲形状在光纤传输中的变化, 因而需要对输出光脉冲的啁啾进行分析, NOLM 引入的啁啾表达式如 (6) 式. 由前面已知, 延迟脉冲的形状在级联 4 次时已趋于稳定, 这里给出在不同抽运光功率下, 经过 1, 2 和 4 次级联压缩后脉冲的啁啾随时间的变化, 如图 7 所示. 为了便于观察, 已将输出光脉冲的峰值对应于 0 时刻. 可以看到, 输出的压缩脉冲在中心部分引入了斜率为负的线性啁啾. 在大功率抽运光下, 多次级联的输出脉冲其啁啾几乎没有变化; 而

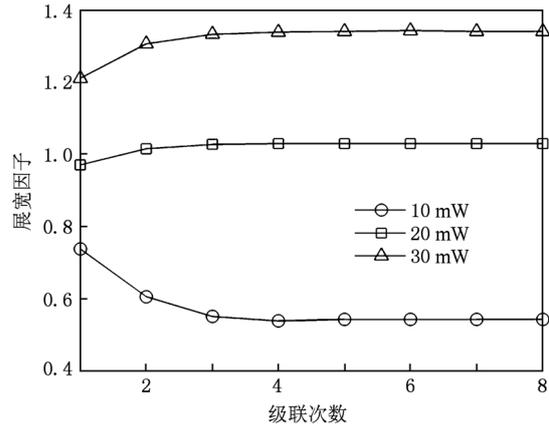


图6 在不同抽运光功率下, 压缩光脉冲的展宽因子随级联次数的变化

抽运光功率较小时, 随着级联次数的增大, 在脉冲峰值两侧的啁啾逐渐增大. 其原因由 (6) 式可知, 啁啾的大小与输出光脉冲的强度无关, 而与幅度随时间的变化率成正比. 在低抽运光功率下, 级联光脉冲的前后沿相对于高抽运光功率时具有更大的陡峭度, 因而输出啁啾更大. 在实验中, 恰当的增大抽运光功率有利于减小多次级联对延迟脉冲引入的啁啾.

$$\delta\omega(t) = \frac{\gamma L_{\text{eff}}(1 + \alpha)}{4} \frac{d}{dt} |E_{\text{in}}(t)|^2. \quad (6)$$

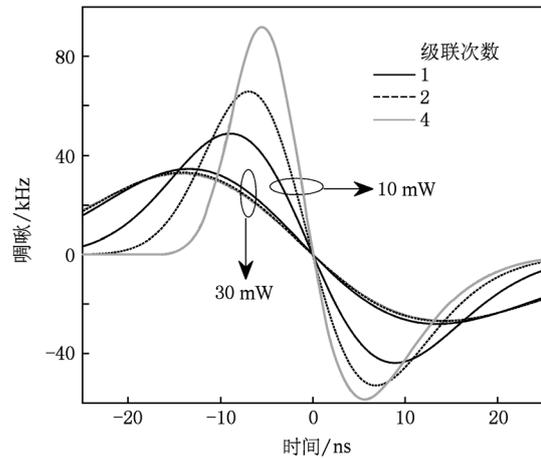


图7 在不同抽运光功率下, 输出光脉冲的啁啾随时间的变化

4. 结 论

基于光纤中 SBS 慢光延迟随抽运光功率连续可调和 NOLM 的脉冲压缩特性, 将两者结合, 实现

了多次级联下光脉冲的多比特延迟. 在单次循环下, 数值结果与实验数据能较好地拟合, 证实了理论模型的正确性与有效性. 输出脉冲的展宽因子在级联 4 次时达到稳定值, 抽运光功率的大小决定了其变化趋势和最终值是否大于 1. 恰当选取抽运光功率, 可实现光脉冲的无展宽延迟. 在大抽运光功

率下, 不但可以在单次级联中获得更多的延迟量, 而且有利于减小多次级联引入的啁啾. 这里提出的环形结构可以有效地模拟多次级联, 在实验上可以简化装置和操作难度, 该结构所具有的多比特延迟及连续可调的特性在光存储和光延迟方面有潜在的应用价值.

- [1] Khurgin J B, Tucker R S 2009 *Slow Light: Science and Applications* (New York: CRC Press)
- [2] Zhu Z M, Gauthier D J, Boyd R W 2007 *Science* **318** 1747
- [3] Firstenberg O, Shuker M, Davidson N, Ron A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 43601
- [4] Shi Z M, Boyd W R, Camacho R M, Vudyasethu P K, Howell J C 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 240801
- [5] Camacho R M, Broadbent C J, Ali-Khan I, Howell J C 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 43902
- [6] Qiu W, Zhang Y D, Ye J B, Tian H, Wang N, Wang H, Wang J F, Yuan P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2242 (in Chinese) [邱巍、掌蕴东、叶建波、田赫、王楠、王号、王金芳、袁萍 2008 物理学报 **57** 2242]
- [7] Zheng D, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Jiang N, Ma Y N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1040 (in Chinese) [郑狄、潘炜、闫连山、罗斌、邹喜华、江宁、马雅男 2010 物理学报 **59** 1040]
- [8] Zheng D, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Wen K H, Jiang N 2010 *Chin. Phys. Lett.* **26** 124202
- [9] Xing L, Zhan L, Yi L L, Xia Y X 2007 *Opt. Express* **15** 10189
- [10] Lu Z W, Dong Y K, Li Q 2007 *Opt. Express* **15** 1871
- [11] Pant R, Stenner M D, Neifeld M A, Gauthier D 2008 *Opt. Express* **16** 2764
- [12] Zadok A, Eyal A, Tur M 2006 *Opt. Express* **14** 8498
- [13] Wang S, Ren L Y, Liu Y, Tomita Y 2008 *Opt. Express* **16** 8067
- [14] Schneider T, Wiatrek A, Henker 2008 *Opt. Express* **16** 15617
- [15] Wang S H, Ren L Y, Liu Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3943 (in Chinese) [王士鹤、任立勇、刘宇 2009 物理学报 **58** 3943]
- [16] Zhang Z Y, Zhou X J, Shi S H, Liang R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4694 (in Chinese) [张旨遥、周晓军、石胜辉、梁锐 2010 物理学报 **59** 4694]
- [17] Chin S, Herraes M G, Thévenaz L 2009 *Opt. Express* **17** 21910
- [18] Zhu Z M, Dawes A M C, Gauthier D J, Zhang L, Willner A E 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 201
- [19] Agrawal G P 2007 *Applications of Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press) p111
- [20] Herraes M G, Thévenaz L 2009 *Opt. Express* **17** 4732

Feasibility study of nonlinear optical loop mirror in the cascaded stimulated Brillouin scattering-based slow light system *

Zheng Di[†] Pan Wei

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 20 July 2010; revised manuscript received 4 August 2010)

Abstract

Based on the pulse compression characteristics in the nonlinear optical loop mirror (NOLM), the effect of NOLM on a cascaded stimulated Brillouin scattering based slow light system is analyzed. In this paper, a ring structure is adopted to simulate the cascaded system, so the complexity of system is reduced effectively, and the delay characteristics for various numbers of cycles and pump powers are studied. Analysis shows that the NOLM can effectively suppress the pulse-broadening in the cascaded slow light system, pump power determines the tendency and the final steady-state value of the broadening factor, and the broadening factor trends to the steady-state value after 4 cycles. Furthermore, zero-broadening can be obtained by optimizing the pump power; the delay time is continuously adjustable and without any limit in theory through changing the pump power and the number of cycles; through augmenting the pump power, the multiple-cascaded-induced chirp can be reduced.

Keywords: slow light, pulse compression, nonlinear optical loop mirror, stimulated Brillouin scattering

PACS: 42.65.Re, 42.65.Es

* Project supported by the Applied Basic Research Programm of Sichuan Province, China (Grant No. 2008JY0064).

[†] E-mail: dzheng.swjtu@gmail.com