

文章编号: 0253-2239(2008)11-2077-06

光纤中双宽带抽运 SBS 慢光及其脉冲展宽减小的理论研究

刘 宇^{1,2} 任立勇¹ 王士鹤^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

² 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 提出了一种单模光纤中采用双宽带抽运实现宽带受激布里渊散射(SBS)慢光的方法。给出了双宽带抽运的SBS慢光及其脉冲展宽的理论模型。色散分析发现,两抽运光间存在一个最佳的频率间隔,可有效地减少由于群速度色散所引起的脉冲展宽。理论计算表明,该方案所获得的SBS增益带宽和信号脉冲群延迟分别提高到了相同条件下单宽带抽运的1.7倍和2倍。

关键词 光纤光学; 慢光; 受激布里渊散射(SBS); 脉冲展宽; 单模光纤

中图分类号 O437.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082811.2077

Theoretical Study of Stimulated Brillouin Scattering Slow Light and Pulse-Broadening Reduction Using Double Broadband Pump in Optical Fibers

Liu Yu^{1,2} Ren Liyong¹ Wang Shihe^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710119, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A method of realizing the wideband stimulated Brillouin scattering (SBS) slow light was proposed using double broadband pump in a single-mode optical fiber. The theoretical models of this double broadband pump SBS slow light and its pulse broadening are presented. Dispersion analyses indicate that there exists the optimum spectral separation between the central frequencies of the double pump beams with respect to the inherent spectral width of the pump laser, which makes it possible to effectively reduce the signal pulse broadening related to the group velocity dispersion. Theoretical calculations show that the SBS gain bandwidth and the signal pulse's group delay using the proposed scheme can respectively be enhanced to 1.7 and 2 times of those using just one single broadband laser of the two pump beams.

Key words fiber optics; slow light; stimulated Brillouin scatter (SBS); pulse broadening; single-mode fiber

1 引 言

全光数据处理是未来光通信发展的重要支撑技术,其中可调延时的全光缓存技术更是未来超高速大容量光通信网络中实现光包交换和解决网络冲突

的关键技术^[1]。实现全光缓存的一个可能的办法是直接减小光脉冲的传播速度,即光速减慢或慢光(Slow light)^[2]。在超冷原子蒸汽中借助电磁感应透明(Electromagnetically induced transparency,

收稿日期: 2008-03-04; 收到修改稿日期: 2008-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(60778020)资助课题。

作者简介: 刘 宇(1981—),男,硕士研究生,主要从事光纤中慢光机理及其技术等方面的研究。

E-mail: liuyu_bill@hotmail.com

导师简介: 任立勇(1971—),男,副研究员,主要从事非线性光学、计算光子学、特种光纤及其应用等方面的研究。

E-mail: renliy@opt.ac.cn

EIT)效应^[3]以及在室温固体材料中借助相干布居数振荡(Coherent population oscillation,CPO)光谱烧孔效应^[4]均可实现脉冲群速度的减慢,然而,这两种技术均要求材料具有特定的电子能带结构。近年来,单模光纤中基于受激布里渊散射(Stimulated Brillouin scattering,SBS)效应的慢光技术以其操作简单、光功率阈值低、室温环境下工作、与现行光通信系统兼容性好等优点成为了研究热点^[5-8]。该技术还具有被延迟信号波长可通过调节抽运光波长任意选择以及脉冲群延迟量可通过抽运光功率连续调节的特性。

SBS慢光的基本原理可表述如下^[5]:SBS是光纤中一种常见的非线性现象,是抽运光、信号脉冲光和声子相互作用的结果。但它又是一个窄带放大过程:当频率差等于布里渊频移 Ω_B (大小取决于材料的电致伸缩响应特性)时,SBS效应最强,并且增益随频率失谐呈现出洛伦兹分布。在正常色度色散光纤的SBS效应中,将导致脉冲群速度的减小。但是,受限于声波的阻尼时间或者说声子的寿命(单模光纤中约为10 ns),单模光纤的本征SBS带宽只有20~40 MHz,它决定了可延迟的最大光脉冲比特率仅为几十兆比特/秒。超过该传输速率将导致脉冲严重失真,从而增加误码率,难以满足高比特率(>40 Gbit/s)通信系统的需要。为了克服这个缺点,人们已经提出了多种增加光纤SBS慢光带宽的方法^[9-15]。大体可分成两类:一类是采用多抽运线叠加的方法,包括双增益线^[9]、三增益线^[10]和多增益线^[11]等,例如,Lu等^[11]通过构建五个等幅的增益线实现了330 MHz的布里渊带宽;另一类是通过扩展抽运光谱宽的方法,例如,通过直接调制分布反馈(DFB)激光器的注入电流获得了12.6 GHz的带宽^[12],对75 ps(全高半宽,FWHM)脉冲信号实现了47 ps的延迟,脉冲展宽了约40%。当然,也可以联合使用两种方法,最近,通过对两台激光器输出光分别进行振幅调制以获得双宽带抽运光,Yong等^[13]将SBS带宽进一步增加到了25 GHz,并对37 ps的信号脉冲实现了10.9 ps的群延迟。我们近期的研究工作也表明,通过优化双宽带抽运光来构建宽带SBS增益谱可有效地减小慢光脉冲展宽,甚至实现零展宽慢光传输^[14, 15]。

本文提出了一种增加单模光纤SBS带宽的方案。首先,对DFB激光器注入噪声电流以产生高斯型宽带光输出(其带宽取决于高斯噪声源的谱宽);然后,对该连续宽带光进行电光强度调制得到两个

1级边带并以其作为SBS的双宽带抽运光(通过控制电光调制器上所加的直流偏压来抑制载波而仅输出两个1级边带^[16]),两宽带抽运光的频率间隔取决于电光调制频率。本文对于该方案下光纤SBS慢光及其脉冲展宽进行了理论分析,表明:双宽带抽运光间存在一个最佳的相对频率间隔(频率间隔与激光谱宽之比),可有效地减小由群速度色散(Group velocity dispersion,GVD)所引起的脉冲展宽,所获得的SBS增益带宽和信号脉冲群延迟分别是相同条件下单宽带抽运的1.7倍和2倍。由于双宽带抽运光来源于同一台激光器,本方案具有结构简单和双宽带抽运光频率间隔易于精确控制等优点。

2 理论分析

假设经噪声电流调制的DFB半导体激光器输出的高斯宽带光的中心角频率为 ω_{p0} ,其1/e半谱宽为 $\Delta\omega_p$ 。该宽带光再经载频抑制的电光强度调制得到中心角频率为 $\omega_{p0} \pm \Delta$ (Δ 为调制角频率)的两个1级边带^[9, 16]。在SBS作用下,该双宽带抽运光所产生的斯托克斯增益谱和反斯托克斯吸收谱的中心频率分别为 $\omega_{p0} \pm \Delta - \Omega_B$ (增益1和增益2)和 $\omega_{p0} \pm \Delta + \Omega_B$ (吸收1和吸收2),如图1所示。通过适当地选择 $\Delta\omega_p$ 和 Δ ,可以将增益谱与吸收谱很好地分离,总增益谱的中心频率为 $\omega_0 (= \omega_{p0} - \Omega_B)$ 。为了简化分析,假设两个边带具有同样的谱宽($\Delta\omega_p$)、峰值光强(I_{p0})、SBS强度增益系数(g_0)和本征的SBS共振带宽(2γ)。其中, $I_{p0} = P_{p0}/A_{eff}$ 依赖于激光功率 P_{p0} 和单模光纤的有效截面面积 A_{eff} 。

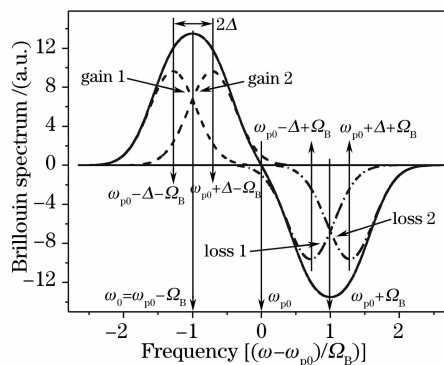


图1 两个斯托克斯增益线(增益1和增益2,虚线)和两个反斯托克斯吸收线(损耗1和损耗2,短点线)构成的布里渊谱(实线)

Fig. 1 Brillouin spectrum (solid curve) constructed by two Stokes gain profiles (gain 1 and gain 2, dashed curves) and two anti-Stokes absorption profiles (loss 1 and loss 2, dashed dot curves)

假设双宽带抽运光在单模光纤中沿 $-z$ 方向传播, 脉冲信号光沿 $+z$ 方向传播, 当脉冲载频置于 SBS 共振频率处, 即 $\omega_c = \omega_0$ 时, 抽运光会被声波场后向散射并引起信号脉冲的指数放大。在小信号增

益(线性)下, 输出脉冲的复振幅 $E(z, \omega)$ 和输入脉冲的复振幅 $E(0, \omega)$ 间存在如下的关系:

$$E(z, \omega) = E(0, \omega)H(\omega), \quad (1)$$

式中 $H(\omega)$ 是光纤的传输函数, 可表示为

$$H(\omega) = \exp[ik(\omega)z] = \exp(in_0\omega/c) \cdot \exp[g(\omega)/2], \quad (2)$$

式中 $k(\omega)$ 为复波数, n_0 为背景折射率, c 为真空中的光速, $g(\omega)$ 为 SBS 复增益函数。对于宽带抽运, $g(\omega)$ 为本征 SBS 增益光谱 $g_0(\omega)$ 和抽运光 $I_p(\omega)$ 的卷积^[12]:

$$g(\omega) = g_0(\omega) * I_p(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_0(\omega - \omega_p) I_p(\omega_p) d\omega_p, \quad (3)$$

式中,

$$g_0(\omega - \omega_p) = \frac{g_0 z}{1 - i[\omega - (\omega_p - \Omega_B)]/\gamma}, \quad (4a)$$

$$I_p(\omega_p) = \frac{I_{p0}}{\sqrt{\pi}\Delta\omega_p} \left\{ \exp\left\{-\left[\frac{\omega_p - (\omega_{p0} - \Delta)}{\Delta\omega_p}\right]^2\right\} + \exp\left\{-\left[\frac{\omega_p - (\omega_{p0} + \Delta)}{\Delta\omega_p}\right]^2\right\} \right\}. \quad (4b)$$

把(4a)式和(4b)式代入(3)式中, 并考虑到 $\gamma/\Delta\omega_p \ll 1$ (宽带抽运情形满足该条件), 增益函数可近似为

$$g(\omega) = G[\exp(-\xi_1^2)\operatorname{erfc}(-i\xi_1) + \exp(-\xi_2^2)\operatorname{erfc}(-i\xi_2)], \quad (5)$$

式中 $\xi_{1,2} = [(\omega - \omega_0) \pm \Delta]/\Delta\omega_p$, erfc 是互补误差函数, $G = \pi^{1/2} g_0 I_{p0} z \gamma / (\Delta\omega_p)$ 是单宽带抽运波的增益指数。经过 SBS 作用后, 信号脉冲的增益[取决于 $H(\omega)$ 的实部]和附加相移[取决于 $H(\omega)$ 的虚部]可分别表示为

$$|H(\omega)|^2 = \exp\{\operatorname{Re}[g(\omega)]\} = \exp\{G[\exp(-\xi_1^2) + \exp(-\xi_2^2)]\}, \quad (6)$$

$$\arg H(\omega) = \operatorname{Im}[g(\omega)/2] = G \left[\exp(-\xi_1^2) \int_0^{\xi_1} \exp(t^2) dt + \exp(-\xi_2^2) \int_0^{\xi_2} \exp(t^2) dt \right] / \sqrt{\pi}. \quad (7)$$

可以看出, 布里渊增益和附加相移均强烈地依赖于频率。从(5)式和(7)式, 可以得到载频为 ω_c 的信号脉冲的群延迟(定义为有抽运光和无抽运光情况下, 脉冲通过光纤时的传输时间之差)为^[12]

$$\Delta T_d(\omega_c) = \left. \frac{d \operatorname{Im}[g(\omega)/2]}{d\omega} \right|_{\omega_c} = \frac{2G}{\sqrt{\pi}\Delta\omega_p} \left[1 - \xi_1 \exp(-\xi_1^2) \int_0^{\xi_1} \exp(t^2) dt - \xi_2 \exp(-\xi_2^2) \int_0^{\xi_2} \exp(t^2) dt \right], \quad (8)$$

式中 $\xi_{1,2} = [(\omega_c - \omega_0) \pm \Delta]/\Delta\omega_p$ 。从(8)式可以看出, ΔT_d 依赖于布里渊增益 G 、宽带抽运光谱宽 $\Delta\omega_p$ 、调制频率 Δ 、抽运光强度 I_{p0} 和频率失谐量 $\omega_c - \omega_0$ 。当 $\omega_c = \omega_0$ (即 $\xi_1 = -\xi_2 = \Delta/\Delta\omega_p$) 时, 脉冲将经历最大的时间延迟

$$\Delta T_d(\omega_0) = \frac{2G}{\sqrt{\pi}\Delta\omega_p} \left[1 - 2\xi_1 \exp(-\xi_1^2) \int_0^{\xi_1} \exp(t^2) dt \right]. \quad (9)$$

下面借助色散分析来讨论 SBS 慢光的脉冲失真。对于理想的传输介质, 其传播常数具有 $k(\omega) = k_0 + k_1(\omega - \omega_c)$ 的形式, 其中 k_0 和 k_1 是实数。可见, 理想色散介质的传输函数 $H(\omega)$ 具有常数的振幅及随频率线性变化的相位, 此时输出光脉冲的波形相对于输入光脉冲而言不会产生任何失真, 仅仅表现为整体的相移和群延迟。然而, 在 SBS 过程中, 由于传播常数存在高阶泰勒展开项, 即 $k(\omega) = \sum_{j=0}^{\infty} k_j(\omega - \omega_c)^j / j!$, 式中 $k_j \equiv d^j k(\omega) / d\omega^j$, 所以脉冲群延迟总是伴随着脉冲失真。通常, SBS 慢光脉冲的主要失真来源于 $k(\omega)$ 的二阶项 k_2 和三阶项 k_3 ^[20]。对于双宽带抽运情形, 在 $\omega_c = \omega_0$ 的情况下, 从(2)式和(5)式可得

$$k_1 = \left. \frac{d}{d\omega} \left[\frac{g(\omega)}{2iz} \right] \right|_{\omega_0} = \frac{n_0}{c} + \frac{\Delta T_d(\omega_0)}{z}, \quad (10)$$

$$k_2 = \left. \frac{d^2}{d\omega^2} \left[\frac{g(\omega)}{2iz} \right] \right|_{\omega_0} = \frac{2iG}{z(\Delta\omega_p)^2} (1 - 2\xi_1^2) \exp(-\xi_1^2), \quad (11)$$

$$k_3 = \left. \frac{d^3}{d\omega^3} \left[\frac{g(\omega)}{2iz} \right] \right|_{\omega_0} = \frac{8G}{z\sqrt{\pi}(\Delta\omega_p)^3} \left[(3\xi_1 - 2\xi_1^3) \exp(-\xi_1^2) \int_0^{\xi_1} \exp(t^2) dt + \xi_1^2 - 1 \right], \quad (12)$$

(10)式表明 k_1 为一个实数,它对应着信号脉冲群速度的倒数。从(11)式和(12)式可知,恰当地选择 ξ_1 (即 $\Delta/\Delta\omega_p$)可以消除二阶和三阶脉冲失真。

SBS 慢光脉冲的失真主要表现为脉冲展宽,它限制了脉冲信号的最大相对延迟^[18]。脉冲展宽现象主要源自两种机制:依赖于增益的展宽和依赖于 GVD 的展宽^[19]。假设输入的信号脉冲具有高斯型光强分布,在时域和频域可分别表示为

$$I_{in}(t) = I_0 \exp[-(t/\delta_{in})^2],$$

$$I_{in}(\omega) = I_0 \delta_{in}^2 \exp[-\delta_{in}^2(\omega - \omega_c)^2],$$

式中 δ_{in} 和 $1/\delta_{in}$ 分别为时域和频域的 $1/e$ 半宽。经过 SBS 的指数放大,输出脉冲可表示为

$I_{out}(\omega) = I_{in}(\omega) |H(\omega)|^2 = I_{in}(\omega) \exp\{\text{Re}[g(\omega)]\}$, 近似地具有高斯分布^[20]。假设信号脉冲的载频置于增益谱的中心频率处,即 $\omega_c = \omega_0$,并设在频率偏 $\Delta\omega_{out}$ 处时光强降到了中心频率处的 $1/e$,即

$$I_{out}(\omega_0 \pm \Delta\omega_{out}) = I_{out}(\omega_0) e^{-1},$$

于是得到了输出脉冲频域的 $1/e$ 半宽为 $\Delta\omega_{out}$,相应的时域 $1/e$ 半宽为 $\delta_{gain} = 1/\Delta\omega_{out}$ 。这样,得到与增益有关的脉冲展宽因子 $B_{gain} = \delta_{gain}/\delta_{in}$ 。另外,如(8)式所示,脉冲的不同频率成份在 SBS 过程中将经历不同的群延迟(也即具有不同的群速度),这种 GVD 所引起的脉冲展宽可用 ω_0 和 $\omega_0 \pm \Delta_{out}$ 处的时间延迟之差来表示。于是定义 GVD 展宽因子 $B_{GVD} = [\Delta T_d(\omega_0) - \Delta T_d(\omega_0 \pm \Delta_{out})]/\delta_{in}$ 。实际的光通信系统要求输出脉冲宽度不能超过输入脉冲的 2 倍,即脉冲的总展宽因子须满足 $B = B_{gain} + B_{GVD} \leq 2$ ^[5,19]。

3 结果和讨论

计算中所用的参数如下:采用 SMF-28 标准单模光纤,工作波长为 1550 nm, $A_{eff} = 50 \mu\text{m}^2$, $n_0 = 1.45$, $\Omega_B/(2\pi) = 10.8 \text{ GHz}$, $g_0 = 5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$, $\gamma/(2\pi) = 20 \text{ MHz}$ 和 $z = 3.5 \text{ km}$ 。除特别指出外,一般选择抽运光功率 P_{p0} 为 0.1 W,信号脉冲 $1/e$ 半宽 $\delta_{in} = 22 \text{ ps}$ [相应的全高半宽 $T_{in} = 2(\ln 2)^{1/2} \delta_{in} = 37 \text{ ps}$]。在慢光研究中,往往采用被 T_{in} 归一化的群延迟即相对群延迟来表示脉冲的延迟程度,它的物理含义是延迟量能代表或容纳多少个比特的脉冲。本文将采用相对群延迟来描述双宽带抽运的脉冲延迟特性。

图 2 给出了归一化脉冲群延迟 $\Delta T_d(\omega_0)$ 随双增益谱相对谱间隔 $\Delta/\Delta\omega_p$ 的变化。可以看出,当

$\Delta/\Delta\omega_p < 0.92$ 时, $\Delta T_d(\omega_0) > 0$,说明产生了慢光;而当 $\Delta/\Delta\omega_p > 0.92$ 时, $\Delta T_d(\omega_0) < 0$,意味着产生了快光。通过改变调制频率 Δ 和抽运激光谱宽 $\Delta\omega_p$ 可以满足这些条件。

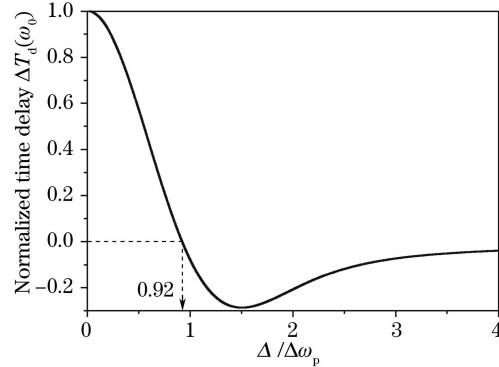


图 2 信号脉冲载频 ω_c 置于增益谱中心频率 ω_0 处时, 归一化脉冲群时延随 $\Delta/\Delta\omega_p$ 的变化

Fig. 2 Normalized group delay of the signal pulse as a function of $\Delta/\Delta\omega_p$, where the carrier frequency of signal pulse, ω_c , is set at the central frequency of gain spectrum, ω_0

下面通过色散分析,详细研究 $k(\omega)$ 的 Taylor 展开项 k_j 的物理意义。从(5)式可以看出, $g(\omega)$ 的实部和虚部分别是 $(\omega - \omega_0)$ 的偶函数和奇函数。再结合(2)式,可知在频率 ω_0 处, j 为偶数时 k_j 为纯虚数,而 j 为奇数时 k_j 为实数。需要特别注意的是,实数的 k_j 与信号脉冲的色散(从而相位失真)有关,而纯虚数的 k_j 则与信号脉冲的增益(从而幅度失真)有关。如(11)式和(12)式所示, k_2 为一个纯虚数而 k_3 为一个实数。图 3 给出了归一化 k_2 和 k_3 对 $\Delta/\Delta\omega_p$ 的依赖关系。可见,在慢光条件 ($\Delta/\Delta\omega_p < 0.92$) 下,当 $\Delta/\Delta\omega_p$ 分别为 0.707 和 0.596 时, k_2 和 k_3 分别零。从(11)式可以看出,当 $k_2 = 0$ 时,可以得到平顶的增益谱;而从(8)式和(12)式可以看出,当

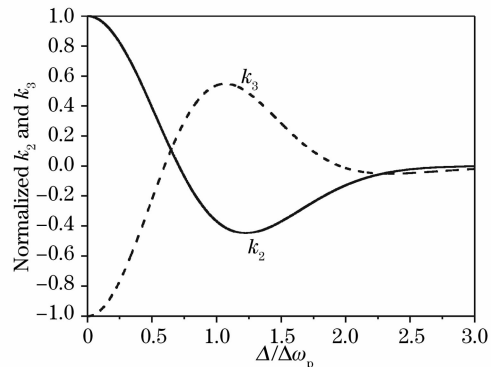


图 3 归一化的 k_2 和 k_3 对 $\Delta/\Delta\omega_p$ 的依赖关系

Fig. 3 Dependence of the normalized k_2 and k_3 on $\Delta/\Delta\omega_p$

$k_3=0$ 时, $\Delta T_d(\omega_c)$ 表现出对频率的弱依赖性, 因此提供了减小脉冲 GVD 展宽的可能性。

为了看出 k_j 对消除脉冲低阶失真的影响, $k_2=0$ 和 $k_3=0$ 时的布里渊增益谱、布里渊相移和脉冲相对群延迟分别给出在图 4 和图 5 中, 两图同时给出了相同情况下采用单宽带抽运时的结果。从图 4(a) 中可以看出, 由于 $k_2=0$, 产生了宽的平顶增益谱。这说明, 信号脉冲的不同频率成份将经历相同的指数放大, 从而表现出较小的幅度失真^[9]。图 4(a) 还表明, 在共振频率 ω_0 附近, 双宽带抽运获得了更宽的近线性布里渊相移, 其 SBS 带宽可达 13.8 GHz, 是相同参数情形下单宽带抽运的 1.7 倍。从图 4(b) 可知道, 对于单宽带抽运, 在共振频率 ω_0 处相对群延迟最大, 随着频率失谐量的增加相对群延迟迅速

减小, 从而必然产生较大的 GVD 展宽; 而双宽带抽运在 ω_0 附近较宽的范围具有接近的相对群延迟, 从而 GVD 展宽得到有效减小。同样, 图 5(a) 表明, 在 $k_3=0$ 时双宽带抽运获得的带宽比单宽带抽运带宽大大增加了。特别是在图 5(b) 中, 相对群延迟在 ω_0 附近产生了一个宽的平顶, 即脉冲不同频率成份将具有相近的群延迟, 从而将经历一个较小的 GVD 展宽。比较图 5(a) 和图 4(a), 可以看出在 $k_3=0$ 时的布里渊相移具有更好的线性特性, 也就是脉冲将表现出更小的相位失真。还需要说明的是, 为了充分地分离增益谱与吸收谱(如图 1 所示), 在 $k_2=0$ (即 $\Delta/\Delta\omega_p=0.707$) 时, 选择 $\Delta\omega_p=0.453\Omega_B$; 而在 $k_3=0$ (即 $\Delta/\Delta\omega_p=0.596$) 时, 选择了 $\Delta\omega_p=0.477\Omega_B$ 。

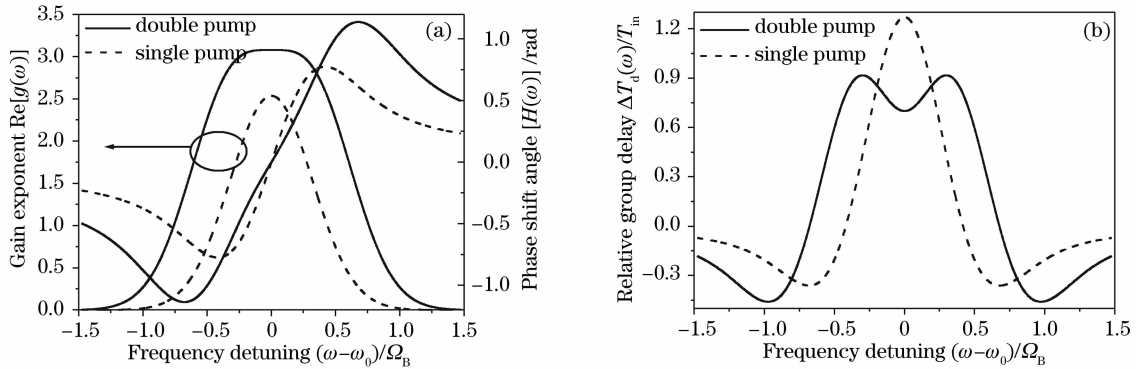


图 4 $k_2=0$ 情况下的(a)布里渊增益、相移和(b)相对群延迟的谱分布

Fig. 4 Spectral dependences of (a) the Brillouin gain and phase shift and (b) the relative group delay when $k_2=0$

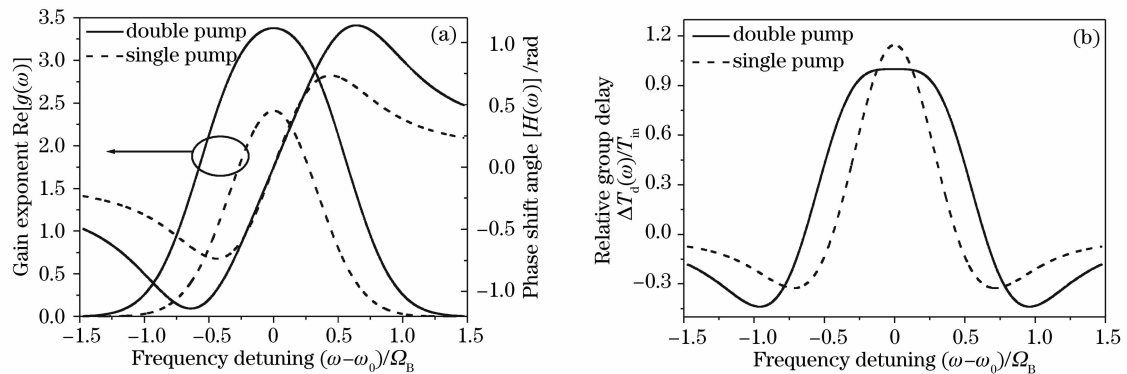


图 5 $k_3=0$ 情况下的(a)布里渊增益、相移和(b)相对群延迟的谱分布

Fig. 5 Spectral dependences of (a) the Brillouin gain and phase shift and (b) the relative group delay when $k_3=0$

为了定量地研究 $k_3=0$ 情况下的脉冲展宽, 图 6(a) 和图 6(b) 分别给出了双宽带情况下脉冲的相对群延迟和展宽因子随信号增益(以分贝为单位)的变化。信号脉冲宽度 T_{in} 为 37 ps, 抽运激光谱宽 $\Delta\omega_p$ 为 $0.477\Omega_B$ 。需要注意的是, 以分贝为单位的增益 $G(\text{dB})$ 与增益指数 G 之间的关系为: $G(\text{dB})=10\lg[\exp(G)]=4.343G$ 。图 6 同时给出了单宽带

抽运情形下的对比结果。从图 6(a) 可知, 当不超过允许展宽量 $B=2$ 时, 单宽带抽运和双宽带抽运允许的最大增益分别为 3 dB 和 10 dB, 其群延迟斜率分别为 2.5 ps/dB 和 4.02 ps/dB。单宽带抽运时斜率较大是因为群延迟与增益带宽成反比^[18]。图 6(b) 表明, 在最大允许展宽 $B=2$ 时, 对于单宽带抽运, 最大相对群延迟量为 0.33; 而对于双宽带抽运,

最大相对群延迟量为 0.68, 达到了前者的 2 倍。

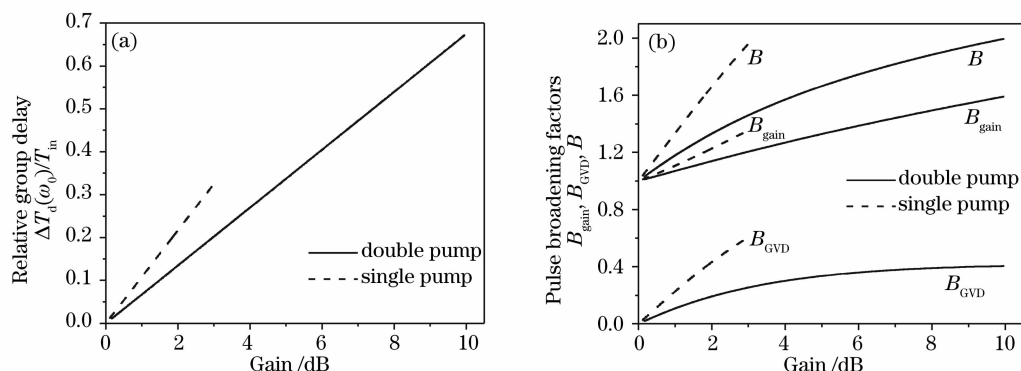


图 6 信号脉冲的 (a) 相对群延迟和 (b) 展宽量与增益的依赖关系

Fig. 6 Gain dependences of (a) the relative group delay and (b) the broadening factors of the signal pulse

4 结 论

本文提出了增加单模光纤受激布里渊散射增益带宽的一种双宽带抽运方案, 从理论上分析了布里渊增益和色散特性。通过优化双宽带抽运峰之间的频率间隔得到了一个平顶的增益, 这个平顶增益谱有利于减小脉冲幅度失真和脉冲展宽。在相同抽运功率下, 该方案的受激布里渊增益带宽可以增加至 13.8 GHz, 是单宽带抽运情况下的 1.7 倍, 而其信号脉冲的相对群延迟可达单宽带抽运的 2 倍。

参 考 文 献

- Haijun Yang, S. J. Ben Yoo. All-optical variable buffering strategies and switch fabric architectures for future all-optical data routers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(10): 3321~3330
- D. Dahan, G. Eisenstien. Tunable all optical delay via slow and fast light propagation in a Raman assisted fiber optical parametric amplifier: a route to all optical buffering[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(16): 6234~6248
- Lihui Jin, Shangqing Gong, Yueping Niu *et al.*. Electromagnetically induced transparency and controllable group velocity in a five-level atomic system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5): 252~254
- Zhang Yundong, Fan Baohua, Yuan Ping *et al.*. Observation of slow light propagation in solid state material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1688~1690
掌蕴东, 范保华, 袁萍等. 红宝石晶体中慢光现象的实验观测[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1688~1690
- 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**(15): 153902-1
- M. G. Herráez, K. Y. Song, L. Thévenaz. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(4): 1395~1400
- M. G. Herráez, K. Y. Song, L. Thévenaz. Optically controlled

- slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(8): 081113-1
- D. J. Gauthier. Slow light brings faster communications[J]. *Phys. World*, 2005, **18**: 30~32
- M. D. Stenner, M. A. Neifeld, Z. M. Zhu *et al.*. Distortion management in slow-light pulse delay[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(25): 9995~10002
- T. Schneider, M. Junker, K. U. Lauterbach *et al.*. Distortion reduction in cascaded slow light delays[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(19): 1110~1111
- Zhiwei Lu, Yongkang Dong, Qiang Li. Slow light in multi-line Brillouin gain spectrum[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(4): 1871~1877
- Zhaoming 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
- K. Y. Song, K. Hotate. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 217~219
- Liyong Ren, Y. Tomita. Reducing group-velocity-dispersion-dependent broadening of stimulated Brillouin scattering slow light in an optical fiber by use of a single pump laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(5): 741~746
- S. H. Wang, L. Y. Ren, Y. Liu *et al.*. Zero-broadening SBS slow light propagation in an optical fiber using two broadband pump beams[J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(11): 8067~8076
- M. Niklès, L. Thévenaz, P. A. Robert. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10): 1842~1851
- M. Abramowitz, I. A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions* [M]. ch. 7, p. 297, Issued June 1964, Tenth Printing, December 1972, National Bureau of Standards
- R. W. Boyd, D. J. Gauthier, A. L. Gaeta *et al.*. Maximum time delay achievable on propagation through a slow-light medium[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(2): 023801
- R. M. Camacho, M. V. Pack, J. C. Howell. Low-distortion slow light using two absorption resonances[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **73**: 063812
- B. Macke, B. Ségard. Pulse normalization in slow-light media[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **73**(4): 043802-1