

矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光中 脉冲失真的分析

张旨遥^{1)†} 周晓军¹⁾²⁾ 石胜辉¹⁾ 梁 锐¹⁾

1) (电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

2) (电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 成都 610054)

(2009 年 8 月 28 日收到; 2009 年 10 月 12 日收到修改稿)

在小信号增益条件下推导出了高斯光脉冲经过矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光系统后输出脉冲时域振幅包络的近似解析表达式, 适用于抽运光频谱具有陡峭上升(下降)沿和平坦顶部的情况. 定量分析和比较了光纤色散以及受激布里渊散射增益不均衡和增益所致色散效应对延迟信号光脉冲失真的影响. 计算结果表明: 当信号光脉冲的频谱处于布里渊有效增益谱内时, 解析解与数值解符合, 布里渊增益所致三阶色散效应是导致延迟信号光脉冲失真的主要物理因素, 制约了窄脉冲延迟量的提高.

关键词: 慢光, 受激布里渊散射, 脉冲失真, 高斯脉冲

PACC: 4265G, 4281D, 4230Q

1. 引 言

自从基于单模光纤中受激布里渊散射(SBS)的慢光效应于 2005 年被 Song 等^[1] 实验观察到以来, 各国学者对它进行了广泛而深入的研究^[2-22]. 与其他类型的慢光效应相比^[23-32], 布里渊慢光具有抽运光功率阈值低、工作波长可调谐、室温下工作以及与光纤通信系统兼容性好等优点, 在实现全光数据缓存、光脉冲精确同步以及微波信号的“真延时”等方面具有潜在应用价值^[33-36].

光纤中的 SBS 是一种阈值很低的非线性光学效应, 如果单模光纤一端注入抽运光, 另一端注入信号光, 当信号光中心角频率相对于抽运光下移布里渊频移量 Ω_B (取决于纤芯材料和波导特性等) 时, 相向传输的抽运光和信号光通过电致伸缩效应引起纤芯材料的密度起伏, 产生与抽运光同向传输的声波场(中心角频率为 Ω_B), 声波场向后散射抽运光, 使信号光和自身得到相干增强. 由于光纤中的声子寿命在纳秒量级, SBS 的本征增益带宽约几十兆赫兹, 且呈洛伦兹线型分布. 根据 Kramers-

Kronig 关系可知, 信号光在获得 SBS 窄带放大的同时, 将经历强烈的正常色散, 表现为群速度的减小(慢光效应), 并且群速度的减小量与增益(以 dB 为单位)成正比^[37], 所以对于固定长度的光纤, 通过改变抽运光功率就能实现对信号光延迟量的控制, 非常适合做可调光纤延迟线.

然而, 当信号光带宽大于 SBS 的本征增益谱带宽时, 如果不采取措施展宽 SBS 的增益谱, 延迟后的信号光会发生严重的失真, 从而制约布里渊慢光在高速(宽带)系统中的应用. 为了克服这一缺点, 各国学者提出了多种扩展 SBS 有效增益带宽的方法, 大体可以分为两大类: 一类是采用具有多谱线结构的抽运光, 利用各谱线提供的本征增益谱叠加形成宽的有效增益谱^[2, 38-40], 但该方法需要均衡抽运光各谱线功率, 通常难以保证叠加后形成的有效增益谱的平滑, 目前已见报道的最大带宽仅为 570 MHz^[40]; 另一类是采用宽带抽运光^[3, 7, 8, 17, 18, 41-43], 该方法中的有效增益谱为抽运光频谱与 SBS 本征增益谱的卷积^[44], 带宽很容易达到 10 GHz 以上, 所以该方法是实现宽带 SBS 增益的有效手段. 在宽带抽运的布里渊慢光中, 抽运光的频谱形状对信号光的延迟特性

† E-mail: zhangzhiyao@uestc.edu.cn

有很大的影响^[44], 频谱具有陡峭上升(下降)沿和平坦顶部的宽带抽运光能有效减小信号光的失真, 已被实验所证实^[42,43].

本文在小信号增益条件下, 考虑光纤中的群速度色散(GVD)和三阶色散(TOD)效应, 推导出了高斯光脉冲经过矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光系统后输出脉冲时域振幅包络的近似解析表达式, 且近似解析解与数值解符合; 定量比较了光纤 GVD, TOD 效应以及 SBS 增益不均衡和增益所致色散对信号光脉冲失真的影响, 分析表明 SBS 增益所致 TOD 效应是导致延迟信号光脉冲失真的主要物理因素.

2. 理论分析

2.1. 矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光中延迟高斯脉冲的近似解析表达式

长度 L 的单模光纤中相向传输的宽带抽运光(中心角频率为 ω_{p0})和信号光脉冲(中心角频率为 ω_{s0})满足 SBS 谐振条件 $\omega_{s0} = \omega_{p0} - \Omega_B$. 在小信号增益条件下, 由光波-声波耦合方程^[45]得到角频率域内信号光脉冲的传输关系为

$$\begin{aligned} \tilde{A}_s(\omega, L) = & \tilde{A}_s(\omega, 0) \exp\left(-\frac{\alpha L}{2} + \frac{i\beta_2 L}{2} \Delta\omega^2 + \frac{i\beta_3 L}{6} \Delta\omega^3\right) \\ & \times \exp\left[\frac{g_0 L_{\text{eff}}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I_p(\omega_p)}{1 - i \frac{2(\omega - \omega_p + \Omega_B)}{\Gamma_B}} d\omega_p\right], \end{aligned} \quad (1)$$

其中角频率失谐量 $\Delta\omega = \omega - \omega_{s0}$, $\tilde{A}_s(\omega, 0)$ 和 $\tilde{A}_s(\omega, L)$ 分别为输入和输出信号光脉冲在角频率域内的振幅包络, $\beta_2, \beta_3, g_0, \Gamma_B/2\pi$ 和 α 分别为光纤的 GVD 参数、TOD 参数、峰值布里渊增益系数、本征布里渊增益谱带宽和损耗系数, c 为真空中的光速, $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ 为光纤有效长度, $I_p(\omega_p)$ 为注入光纤的抽运光光强谱密度.

文献[43]中宽带抽运光的频谱具有陡峭的上升(下降)沿和平坦的顶部, 为了便于分析, 可简化为矩形谱, 光强谱密度为

$$I_p(\omega_p) = \begin{cases} \frac{I_0}{\delta\omega_p} & (|\omega_p - \omega_{p0}| \leq \frac{\delta\omega_p}{2}), \\ 0 & (|\omega_p - \omega_{p0}| > \frac{\delta\omega_p}{2}), \end{cases} \quad (2)$$

其中 I_0 为注入光纤的抽运光光强, $\delta\omega_p/2\pi$ 为抽运光的带宽. 将(2)式代入(1)式积分得到

$$\begin{aligned} \tilde{A}_s(\omega, L) = & \tilde{A}_s(\omega, 0) \\ & \times \exp\left[-\frac{\alpha L}{2} + \frac{i\beta_2 L}{2} \Delta\omega^2 + \frac{i\beta_3 L}{6} \Delta\omega^3\right. \\ & \left.+ ip(\Delta\omega) + g(\Delta\omega)\right], \end{aligned} \quad (3)$$

其中, SBS 增益指数 $g(\Delta\omega)$ 和 SBS 附加相移 $p(\Delta\omega)$ 分别为

$$g(\Delta\omega) = \frac{G\Gamma_B}{4\delta\omega_p} \left\{ \arctan\left[\frac{2\left(\Delta\omega + \frac{\delta\omega_p}{2}\right)}{\Gamma_B}\right] - \arctan\left[\frac{2\left(\Delta\omega - \frac{\delta\omega_p}{2}\right)}{\Gamma_B}\right] \right\}, \quad (4)$$

$$p(\Delta\omega) = \frac{G\Gamma_B}{8\delta\omega_p} \cdot \ln \left[\frac{1 + \frac{4\left(\Delta\omega + \frac{\delta\omega_p}{2}\right)^2}{\Gamma_B^2}}{1 + \frac{4\left(\Delta\omega - \frac{\delta\omega_p}{2}\right)^2}{\Gamma_B^2}} \right], \quad (5)$$

式中 $G = g_0 I_0 L_{\text{eff}}$. 在无信号失真的理想可调延迟线中, $g(\Delta\omega)$ 为常数, $p(\Delta\omega)$ 为 $\Delta\omega$ 的线性函数, 表现为信号光脉冲振幅包络的线性传递及整体的群时延(当然, 要求光纤自身的色散也为零). 然而, (4), (5)式并不满足上述要求, (4)式中的偶函数 $g(\Delta\omega)$ 存在偶数阶的高阶泰勒展开项, 会导致信号光脉冲中各频率成分所获得的 SBS 增益不均衡; (5)式中的奇函数 $p(\Delta\omega)$ 存在奇数阶的高阶泰勒展开项, 其物理本质为 SBS 增益所致的色散, 两者与光纤自身的色散一样都会引起延迟信号光脉冲的失真. 将(4), (5)式按泰勒级数展开, 忽略四阶以上展开项得到

$$g(\Delta\omega) = \frac{G\Gamma_B}{2\delta\omega_p} \arctan\left(\frac{\delta\omega_p}{\Gamma_B}\right) - \frac{2G\Gamma_B^2}{(\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2} \Delta\omega^2, \quad (6)$$

$$p(\Delta\omega) = \frac{G\Gamma_B}{\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2} \Delta\omega + \frac{4G\Gamma_B(\delta\omega_p^2 - 3\Gamma_B^2)}{3(\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^3} \Delta\omega^3. \quad (7)$$

从后面的计算可以看到,当信号光脉冲的频谱处于SBS增益谱内时,利用(6),(7)式推导得到的近似解析表达式的解与数值解很好地符合,说明四阶以上的SBS增益不平衡和增益所致色散对延迟光脉冲的影响很弱,此情况下只考虑三阶泰勒级数展开式是合理的.

考虑高斯型输入信号光脉冲,其时域和角频率域的振幅包络分别为

$$A_s(T, 0) = A_0 \exp\left(-\frac{T^2}{2t_0^2}\right), \quad (8)$$

$$\tilde{A}_s(\omega, 0) = A_0 \sqrt{2\pi t_0^2} \exp\left(-\frac{t_0^2 \Delta\omega^2}{2}\right), \quad (9)$$

式中 A_0 为信号光脉冲峰值振幅, t_0 为功率下降到峰值功率 $1/e$ 处定义的脉冲半宽度.将(6),(7)和(9)式代入(3)式,并进行傅里叶逆变换,得到输出信号光脉冲时域振幅包络的近似解析表达式为

$$A_s(T, L) = D \exp\left[\frac{2k - 3b^3\left(T - \frac{G\Gamma_B}{\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2}\right)}{3kb^6}\right] \times Ai\left[\frac{k - b^3\left(T - \frac{G\Gamma_B}{\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2}\right)}{kb^4}\right], \quad (10)$$

其中, Ai 为爱里函数,系数 D, k, b 分别为

$$D = \frac{\sqrt{2\pi t_0^2} A_0 \exp\left[-\frac{\alpha L}{2} + \frac{G\Gamma_B}{2\delta\omega_p} \arctan\left(\frac{\delta\omega_p}{\Gamma_B}\right)\right]}{kb}, \quad (11)$$

$$k = \sqrt{\frac{t_0^2}{2} + \frac{2G\Gamma_B^2}{(\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2} - \frac{i\beta_2 L}{2}}, \quad (12)$$

$$b = \left[\frac{4G\Gamma_B(\delta\omega_p^2 - 3\Gamma_B^2)}{(\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^3 k^3} + \frac{\beta_3 L}{2k^3}\right]^{1/3}. \quad (13)$$

从(10)式可以看到,输出信号光脉冲振幅包络已经不再具有高斯线型分布.

2.2. 引起延迟脉冲失真的物理因素

引起(10)式所示输出信号光脉冲失真的物理

因素包括光纤的GVD, TOD效应以及SBS二阶增益不平衡(简称为SOGD-SBS)和增益所致TOD(简称为TOD-SBS)效应.其中,GVD和SOGD-SBS效应使信号光脉冲发生展宽;TOD及TOD-SBS效应使信号光脉冲发生形变不再对称,并且在脉冲前沿(负的TOD参数)或后沿(正的TOD参数)产生振荡结构.为了定量比较上述四种物理效应对信号光脉冲失真的影响,引入与 β_2 等效的参数 β_{2-SBS} 来量化SOGD-SBS效应、与 β_3 具有相同定义的参数 β_{3-SBS} 来量化TOD-SBS效应,两者的计算式分别为

$$\beta_{2-SBS} = i \frac{4G\Gamma_B^2}{L(\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2}, \quad (14)$$

$$\beta_{3-SBS} = \frac{8G\Gamma_B(\delta\omega_p^2 - 3\Gamma_B^2)}{L(\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^3}. \quad (15)$$

以 $L=5$ km的SMF-28光纤作为布里渊增益媒质,它在波长1550 nm处的参数如下: $g_0=5 \times 10^{-11}$ m/W, $\Gamma_B/2\pi=40$ MHz, $\beta_2=-21.7$ ps²/km, $\beta_3=0.13$ ps³/km, $\alpha=0.05$ km⁻¹,有效模场面积 $A_{\text{eff}}=50$ μm²;假设抽运光功率为 $P_{\text{pump}}=500$ mW,带宽为 $\delta\omega_p/2\pi=20$ GHz(保证SBS增益谱和吸收谱不交叠的最大带宽),则由(14),(15)式计算得到 $\beta_{2-SBS}=i \times 0.45$ ps²/km, $\beta_{3-SBS}=3567$ ps³/km.注意到 $|\beta_2| \gg |\beta_{2-SBS}|$, $|\beta_{3-SBS}| \gg |\beta_3|$,所以GVD效应和TOD-SBS效应分别是引起延迟信号光脉冲展宽和形变的主要物理因素.

分别以特征长度 L_{GVD} 和 $L_{\text{TOD-SBS}}$ 来量化GVD和TOD-SBS效应对高斯型输入信号光脉冲在光纤中演变的影响,计算式为

$$L_{\text{GVD}} = \frac{t_0^2}{|\beta_2|}, \quad (16)$$

$$L_{\text{TOD-SBS}} = \frac{t_0^3}{|\beta_{3-SBS}|}. \quad (17)$$

则对于上面的计算参数,当 $t_0 < 164.4$ ps(半峰全宽 $t_{\text{FWHM}} < 274$ ps)时,始终有 $L_{\text{TOD-SBS}} < L_{\text{GVD}}$,例如, $t_{\text{FWHM}}=100$ ps($t_0 \approx 60$ ps)的高斯型输入信号光脉冲, $L_{\text{GVD}} \approx 166.2$ km, $L_{\text{TOD-SBS}} \approx 60.7$ km.对于固定长度的光纤,特征长度短的物理效应会对脉冲的演变产生更明显的影响,并且GVD效应引起的脉冲展宽可利用色散补偿光纤进行完全补偿,所以随抽运光功率变化的TOD-SBS效应是导致信号光脉冲失真的主要物理因素;特别地,当增益光纤长度接近或大于 $L_{\text{TOD-SBS}}$ 时(例如,为了提高延迟量的级联布里渊慢光系统^[46]),TOD-SBS效应引起的脉冲形变会变得十

分明显. 虽然从(15)式看到 $\beta_{3,\text{SBS}}$ 随抽运光功率的减小而线性减小,但是需要注意的是信号光脉冲的延迟量与其所获得的增益(以 dB 为单位)成正比,小的抽运光功率意味着需要更长的增益光纤以实现相同的延迟量(即延迟量与 $P_{\text{pump}}L$ 成正比),所以 TOD-SBS 的积分效应($\beta_{3,\text{SBS}}L$)是与延迟量大小相对应的,不能依靠降低抽运光功率来有效减小 TOD-SBS 效应引起的脉冲失真.

此外,需要特别指出的是, SOGD-SBS 效应引起脉冲展宽的物理本质(幅度失真)与 GVD 效应(相位失真)完全不同,所以这种展宽无法用通常的色散补偿方法进行弥补. 以 $L_{\text{SOGD-SBS}}$ 表示 SOGD-SBS 效应的特征长度(其定义与 GVD 效应特征长度相同),采用上面的计算参数,则当 $t_0 < 3.97$ ns 时,始终有 $L_{\text{TOD-SBS}} < L_{\text{SOGD-SBS}}$,并且对于亚纳秒量级的高斯光脉冲满足 $L_{\text{TOD-SBS}} \ll L_{\text{SOGD-SBS}}$ (例如,对于 $t_{\text{FWHM}} = 100$ ps,即 $t_0 \approx 60$ ps 的高斯型输入信号光脉冲, $L_{\text{SOGD-SBS}} \approx 8000$ km, $L_{\text{TOD-SBS}} \approx 60.7$ km),所以虽然 SOGD-SBS 效应引起的脉冲展宽不易补偿,但是它的作用远弱于 TOD-SBS 效应,脉冲的失真仍然主要来源于 TOD-SBS 效应. 当然,对于频谱超出 SBS 有效增益谱的高斯脉冲,光纤自身和 SBS 增益所致四阶以上色散以及 SBS 四阶以上增益不平衡引起的脉冲形变会变得明显,但是其作用仍然远小于 TOD-SBS 效应.

3. 计算结果及讨论

本节对带可变光衰减器(VOA)的级联布里渊慢光系统(如图1所示)进行一些计算以验证上述理论分析. 为了保证计算的有效性,在选择计算所用参数的时候,需要注意以下两点:第一,在采用单个矩形谱宽带抽运光的布里渊慢光系统中,为了避免 SBS 增益谱和吸收谱的交叠,最大增益带宽(抽运光带宽)为布里渊频移量的两倍,例如,SMF-28 光纤中的最大增益带宽约为 20 GHz;第二,考虑到实

际系统对信噪比的要求,每一级布里渊慢光系统的输入信号光脉冲功率不能太小,所以单级 SBS 小信号增益不可能太大,通常不超过 40 dB^[1,3,4,9,36,47],这就对每一级布里渊慢光系统中光纤长度和抽运光功率的选取提出了要求. 基于以上两点考虑,下面的计算采用 $L = 5$ km 的 SMF-28 光纤作为每一级布里渊慢光系统的增益媒质,抽运光带宽为 $\delta\omega_p/2\pi = 20$ GHz,功率为 $P_{\text{pump}} = 500$ mW(计算得到单级 SBS 小信号增益约为 30 dB).

图2(a),(b)分别给出了 t_{FWHM} 为 100 ps 和 50 ps 时的高斯型输入信号光脉冲通过级联布里渊慢光系统($N = 12$)后的归一化输出脉冲功率包络. 图中曲线 a 为利用快速傅里叶变换算法数值求解(3)~(5)式的计算结果,包括 GVD, TOD, SOGD-SBS, TOD-SBS 以及 SBS 四阶以上的增益不平衡和增益所致色散效应的影响;曲线 b 为利用(10)式所示解析表达式的计算结果,包括 GVD, TOD, SOGD-SBS 和 TOD-SBS 效应的影响;曲线 c 为考虑(4),(5)式的二阶泰勒级数展开式时,数值求解(3)式的计算结果,包括 GVD, TOD 和 SOGD-SBS 效应的影响;曲线 d 为考虑(4),(5)式的一阶泰勒级数展开式且假设 $\beta_2 = 0$ ps²/km, $\beta_3 = 0$ ps³/km 时,数值求解(3)式得到的理想延迟线输出. 图2(a)显示,曲线 a 与 b 很好地符合,曲线 c 与 d 差别也很小,而曲线 a 与 c 差异很大,这说明在最大增益带宽下, GVD, TOD, SOGD-SBS 及 SBS 四阶以上的增益不平衡和增益所致色散效应对 $t_{\text{FWHM}} = 100$ ps 的高斯型输入信号光脉冲影响很弱,脉冲失真主要是由 TOD-SBS 效应引起的脉冲不对称和后沿振荡. 图2(b)中曲线 c 与 d 的差异较大,这是因为对于 $t_{\text{FWHM}} = 50$ ps 的高斯型输入信号光脉冲, GVD 效应开始变得明显(级联慢光系统的总光纤长度 60 km 大于 GVD 效应的特征长度 $L_{\text{GVD}} = 41.5$ km),此情况下脉冲失真主要为 GVD 效应引起的脉冲展宽及 TOD-SBS 效应引起的脉冲不对称和后沿振荡. 另外,图2(b)中曲线 a 和 b 的脉冲后沿振荡结构有所差异,这是因为输入

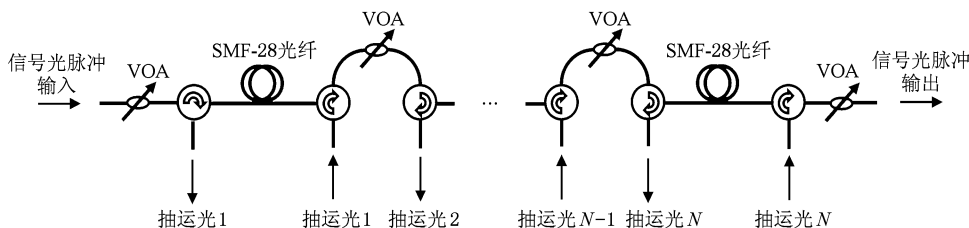


图1 带功率衰减器的级联布里渊慢光系统结构示意图

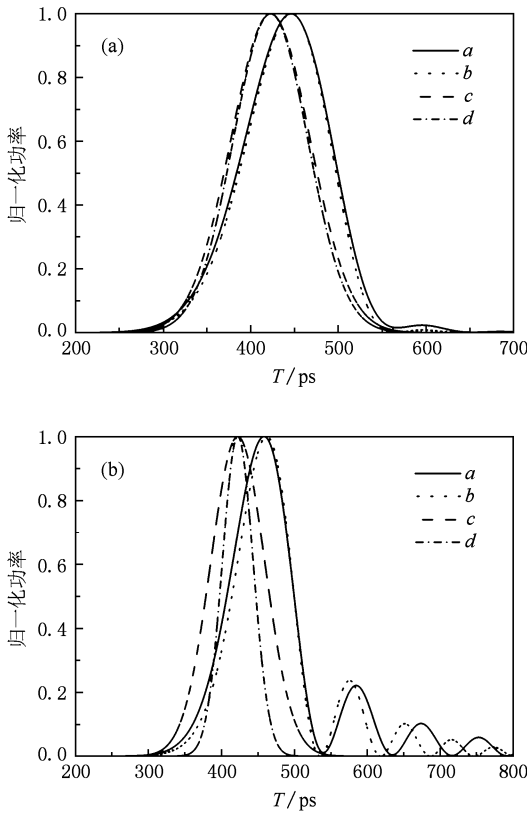


图2 具有不同宽度的高斯型输入信号光脉冲通过级联布里渊慢光系统 ($N=12$) 后的归一化输出脉冲功率包络 (a) $t_{\text{FWHM}} = 100$ ps, (b) $t_{\text{FWHM}} = 50$ ps

信号光脉冲 ($t_{\text{FWHM}} = 50$ ps) 的频谱部分超出 SBS 有效增益谱 (如图 3 所示), 此时 SBS 四阶以上的增益不均衡和增益所致色散效应开始变得明显, 并且对于更窄的脉冲会更加显著, 但是对比图 2 (a) 和 (b) 可以看到, TOD-SBS 效应仍然是制约窄脉冲延迟量提高的首要物理因素。

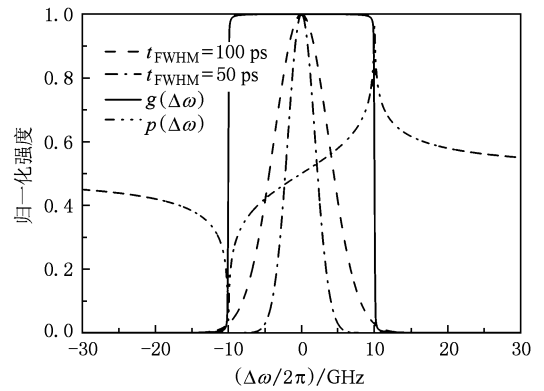


图3 $t_{\text{FWHM}} = 100, 50$ ps 时的高斯型输入信号光脉冲频谱和 SBS 增益谱

4. 结 论

将频谱具有陡峭上升 (下降) 沿和平坦顶部的宽带光近似为具有矩形谱, 并在小信号增益条件下推导出了高斯光脉冲经过矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光系统后输出脉冲时域振幅包络的近似解析表达式, 其中包括了 GVD, TOD, SOGD-SBS 和 TOD-SBS 的影响. 定量分析和比较了光纤 GVD, TOD 效应以及各阶 SBS 增益不均衡和增益所致色散对信号光脉冲失真的影响, 计算结果表明: 当信号光脉冲的频谱处于 SBS 有效增益谱内时, 解析解与数值解符合; GVD 和 TOD-SBS 效应分别是引起延迟信号光脉冲展宽和形变的主要物理因素; GVD 效应引起的脉冲展宽可利用色散补偿光纤进行完全补偿, 所以随抽运光功率变化的 TOD-SBS 效应是导致信号光脉冲失真的首要物理因素, 制约了窄脉冲延迟量的提高。

[1] Song K Y, Herréuz M G, Thévenaz L 2005 *Opt. Express* **13** 82
 [2] Stenner M D, Neifeld M A, Zhu Z M, Dawes A M C, Gauthier D J 2005 *Opt. Express* **13** 9995
 [3] Herréuz M G, Song K Y, Thévenaz L 2006 *Opt. Express* **14** 1395
 [4] Song K Y, Abedin K S, Hotate K, Herréuz M G, Thévenaz L 2006 *Opt. Express* **14** 5860
 [5] Schneider T, Junker M, Lauterbach K U 2006 *Opt. Express* **14** 11082
 [6] Chin S H, Herréuz M G, Thévenaz L 2006 *Opt. Express* **14** 10684
 [7] Song K Y, Hotate K 2007 *Opt. Lett.* **32** 217

[8] Zhu Z M, Dawes A M C, Gauthier D J, Zhang L, Willner A E 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 201
 [9] Yi L L, Jaouën Y, Hu W S, Su Y K, Bigo S 2007 *Opt. Express* **15** 16972
 [10] Yu C Y, Luo T, Zhang L, Willner A E 2007 *Opt. Lett.* **32** 20
 [11] Yi L L, Zhan L, Hu W S, Xia Y X 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 619
 [12] Dong Y K, Lu Z W, Li Q, Gao W 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1586
 [13] Zhang B, Yan L S, Fazal I, Zhang L, Willner A E, Zhu Z M, Gauthier D J 2007 *Opt. Express* **15** 1878

- [14] Schneider T, Henker R, Lauterbach K U, Junker M 2008 *Opt. Express* **16** 8280
- [15] Sakamoto T, Yamamoto T, Shiraki K, Kurashima T 2008 *Opt. Express* **16** 8026
- [16] Pant R, Stenner M D, Neifeld M A, Gauthier D J 2008 *Opt. Express* **16** 2764
- [17] Wang S H, Ren L Y, Liu Y, Tomita Y 2008 *Opt. Express* **16** 8067
- [18] Liu Y, Ren L Y, Wang S H 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 2077 (in Chinese) [刘宇、任立勇、王士鹤 2008 光学学报 **28** 2077]
- [19] 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]
- [20] Ren L Y, Tomita Y 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 1281
- [21] Wiatrek A, Henker R, Preubler S, Ammann M J, Schwarzbacher A T, Schneider T 2009 *Opt. Express* **16** 797
- [22] Zheng D, Pang 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]
- [23] Qiu W, Zhang Y D, Ye J B, Tian H, Wang N, Wang J F, Yuan P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7009 (in Chinese) [邱巍、掌蕴东、叶建波、田赫、王楠、王金芳、袁萍 2007 物理学报 **56** 7009]
- [24] 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]
- [25] Yu T B, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3049 (in Chinese) [于天宝、刘念华 2004 物理学报 **53** 3049]
- [26] Lu H, Tian H P, Li C H, Ji Y F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2049 (in Chinese) [鲁辉、田慧平、李长红、纪越峰 2009 物理学报 **58** 2049]
- [27] Liu H Y, Meng Z M, Dai Q F, Wu L J, Lan S, Liu S H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4702 (in Chinese) [刘海英、蒙自明、戴峭峰、吴立军、兰胜、刘颂豪 2009 物理学报 **58** 4702]
- [28] Du X Y, Zheng W H, Zhang Y J, Ren G, Wang K, Xing M X, Chen L H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7005 (in Chinese) [杜晓宇、郑婉华、张冶金、任刚、王科、刑名欣、陈良惠 2008 物理学报 **57** 7005]
- [29] Fan B H, Zhang Y D, Yuan P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4692 (in Chinese) [范保华、掌蕴东、袁萍 2005 物理学报 **54** 4692]
- [30] Yao M, Zhu K D, Yuan X Z, Jiang Y W, Wu Z J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1769 (in Chinese) [姚鸣、朱卡的、袁晓忠、蒋逸文、吴卓杰 2006 物理学报 **55** 1769]
- [31] Su X M, Zhuo Z C, Wang L J, Gao J Y 2002 *Chin. Phys.* **11** 1175
- [32] Jiang T, Zhang Y P, Nie Z Q, Li L, Li P Z, Shen L J, Fu X, Gan C L, Zhao R K, Song J P, Lu K Q 2007 *Chin. Phys.* **16** 2984
- [33] Willner A E, Zhang B, Zhang L, Yan L S, Fazal I 2008 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **14** 691
- [34] Zhang B, Yan L S, Yang J Y, Fazal I, Willner A E 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 1081
- [35] Zhang B, Zhang L, Yan L S, Fazal I, Yang J Y, Willner A E 2007 *Opt. Express* **15** 8317
- [36] Zadok A, Raz O, Eyal A, Tur M 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 462
- [37] Zhu Z M, Gauthier D J, Okawachi Y, Sharping J E, Gaeta A L, Boyd R W, Willner A E 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 2378
- [38] Schneider T, Junker M, Lauterbach K U, Henker R 2006 *Electron. Lett.* **42** 1110
- [39] Lu Z W, Dong Y K, Li Q 2007 *Opt. Express* **15** 1871
- [40] Dong Y K, Lu Z W, Li Q, Liu Y F 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** C109
- [41] Ren L Y, Tomita Y 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 741
- [42] Zadok A, Eyal A, Tur M 2006 *Opt. Express* **14** 8498
- [43] Granado E C, Calderón O G, Melle S, Gauthier D J 2008 *Opt. Express* **16** 16032
- [44] Lichtman E, Waarts R G, Friesem A A 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 171
- [45] Agrawal G P 2007 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Academic Press) p345
- [46] Song K Y, Herráez M G, Thévenaz L 2005 *Opt. Lett.* **30** 1782
- [47] Jáuregui C, Petropoulos P, Richardson D J 2007 *Opt. Express* **15** 5126

Analysis of pulse distortion in Brillouin slow light using broadband pump with rectangular spectrum

Zhang Zhi-Yao^{1)†} Zhou Xiao-Jun¹⁾²⁾ Shi Sheng-Hui¹⁾ Liang Rui¹⁾

1) (*School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

2) (*Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks of Ministry of Education,*

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 28 August 2009; revised manuscript received 12 October 2009)

Abstract

Assuming a Gaussian-shaped input signal pulse, we deduced the analytical expression of the output-pulse amplitude envelope in the Brillouin slow light system utilizing broadband pump with a rectangular spectrum under small-signal gain approximation. The expression is applicable in case that the pump spectrum has a sharp rising or trailing edge and a flat top. The influence of the fiber dispersion, the stimulated Brillouin scattering (SBS) gain non-uniformity and the SBS-gain-induced dispersion on the pulse distortion has also been quantitatively analyzed. The calculated results show that the analytical solution agrees well with the numerical one if the spectrum of the signal pulse lies in the pump spectrum. SBS-gain-induced third-order dispersion is the main physical factor responsible for the pulse distortion, which also limits the retardation increase of the short pulse in the cascaded Brillouin slow light system.

Keywords: slow light, stimulated Brillouin scattering, pulse distortion, Gaussian pulse

PACC: 4265C, 4281D, 4230Q

† E-mail: zhangzhiyao@uestc.edu.cn