

文章编号: 0253-2239(2010)05-1254-07

# 矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光理论研究

张旨遥<sup>1</sup> 周晓军<sup>1,2</sup> 梁锐<sup>1</sup> 石胜辉<sup>1</sup> 秦祖军<sup>1</sup> 刘永<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054  
<sup>2</sup> 电子科技大学宽带光纤传输与通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 对矩形谱宽带光抽运下的布里渊慢光延迟特性进行了理论分析。在小信号增益情况下,得到了高斯脉冲延时量、脉冲展宽因子和增益的解析表达式。计算结果表明,当信号光的 10 dB 带宽小于抽运光带宽的 0.357 时,解析解和数值解吻合,且信号光脉冲能够实现零展宽延迟。单个矩形谱宽带光抽运能达到的最大有效布里渊增益带宽为 20 GHz,可以实现半峰全宽约 100 ps 的高斯光脉冲的零展宽延迟。与高光谱宽带抽运光相比,矩形谱宽带抽运光可减小脉冲失真。

**关键词** 光纤光学;慢光;受激布里渊散射;脉冲展宽

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1254

## Theoretical Study of Brillouin Slow Light Using Broadband Pump with Rectangular Spectrum

Zhang Zhiyao<sup>1</sup> Zhou Xiaojun<sup>1,2</sup> Liang Rui<sup>1</sup> Shi Shenghui<sup>1</sup> Qin Zujun<sup>1</sup> Liu Yong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** The delay characteristic of the Brillouin slow light using broadband pump with rectangular spectrum is analyzed. Analytical expressions of the time delay, the pulse-width broadening ratio and the gain of a Gaussian pulse are deduced under small-signal gain approximation. Calculated results show that the analytical solution and the numerical solution agree well and the Gaussian signal pulse can achieve zero-broadening delay, when its 10 dB bandwidth is not greater than 0.357-fold pump bandwidth. The maximum Brillouin gain bandwidth for a broadband pump with single rectangular spectrum is 20 GHz, indicating that zero-broadening delay of the Gaussian pulse with full-width at half maximum of about 100 ps can be achieved. Broadband pump light with rectangular spectrum is more favorable for reducing the pulse distortion than that with Gaussian spectrum.

**Key words** fiber optics; slow light; stimulated Brillouin scattering (SBS); pulse broadening

## 1 引言

近年来,人们研究了基于多种物理效应的慢光现象<sup>[1,2]</sup>。光纤中的受激布里渊散射虽然已经被广泛研究<sup>[3~8]</sup>,但是由它所引起的慢光效应直到 2005 年才

被首次实验观察到<sup>[9]</sup>。布里渊慢光因具有控制功率阈值低、延时连续可调、工作波长可任意选择、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

收稿日期: 2009-05-20; 收到修改稿日期: 2009-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(60736038)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0152)资助课题。

作者简介: 张旨遥(1983—),男,博士研究生,主要从事基于光纤中非线性效应的全光信号处理方面的研究。

E-mail: zhangzhiyao@uestc.edu.cn

导师简介: 周晓军(1955—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤光学和计算电磁学等方面的研究。

E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn

时”等方面具有潜在应用价值<sup>[10~14]</sup>。然而,在布里渊慢光获得实际应用之前,必须设法克服其两个固有的缺点:1)增益饱和,2)本征增益带宽小(几十兆赫兹)。其中增益饱和带来的延迟饱和甚至减小问题已经被证实可以采用带功率衰减器的级联结构加以解决<sup>[15,16]</sup>,但是本征增益带宽不足带来的脉冲展宽和形变严重制约了布里渊慢光在宽带系统的应用。为此各国学者提出了多种增加有效增益带宽的方法,主要分为两大类:1)采用多谱线结构的激光进行抽运,利用各谱线提供的本征增益谱叠加形成宽的有效增益谱<sup>[17~20]</sup>,但已见报道的最大带宽仅为 570 MHz<sup>[20]</sup>; 2)采用宽带光进行抽运<sup>[21~27]</sup>,该方法很容易实现 10 GHz 以上的有效布里渊增益谱,被公认为扩展布里渊慢光有效增益带宽的最有效方法。

基于宽带光抽运的布里渊散射理论<sup>[28]</sup>表明,有效增益谱为抽运光谱与本征布里渊增益谱的卷积;在抽运光谱带宽远大于本征布里渊增益谱带宽的情况下,有效增益谱与抽运光谱形状基本相同。因此,布里渊慢光的延时特性与抽运光的频谱形状密切相关,详细的理论分析对设计高性能的可调延迟线是

十分重要的。目前已有报道的理论研究工作主要针对高斯谱宽带光抽运的布里渊慢光<sup>[24~27]</sup>。具有近似矩形谱的宽带抽运光虽已被用于布里渊慢光实验<sup>[22]</sup>,但至今还未见相关的理论研究报道。

本文对矩形谱宽带光抽运下的布里渊慢光延迟特性进行了理论分析;在小信号增益情况下得到了高斯光脉冲延时量、脉冲展宽因子和增益的解析表达式;并借助数值解和解析解对矩形谱宽带光抽运下的布里渊慢光延迟特性进行了详细讨论。

## 2 理论分析

### 2.1 矩形谱宽带光抽运下高斯光脉冲延迟特性解析解

中心角频率为  $\omega_{p0}$  的宽带连续抽运光和中心角频率为  $\omega_{s0}$  的信号光脉冲分别沿光纤轴的  $-z$  和  $+z$  方向传输,且两者满足谐振条件  $\omega_{s0} = \omega_{p0} - \Omega_B$ ,其中  $\Omega_B$  为布里渊频移,则信号光脉冲将获得布里渊增益而放大。在小信号增益情况下,由光波-声波振幅耦合方程<sup>[29]</sup>得到角频率域内输出信号光脉冲振幅  $\tilde{A}_s(\omega, L)$  和输入信号光脉冲振幅  $\tilde{A}_s(\omega, 0)$  的关系为

$$\tilde{A}_s(\omega, L) = \tilde{A}_s(\omega, 0) \exp \left[ i \frac{nL}{c} (\omega - \omega_{s0}) - \frac{\alpha L}{2} + \frac{g_0 L_{\text{eff}}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I_p(\omega_p)}{1 - i \frac{2(\omega - \omega_p + \Omega_B)}{\Gamma_B}} d\omega_p \right], \quad (1)$$

式中  $g_0$  和  $\Gamma_B$  分别为峰值布里渊增益系数和本征布里渊增益带宽(角频率域内),  $n$  和  $\alpha$  分别为光纤的折射率和损耗系数,  $c$  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。

带线性啁啾的连续光的频谱具有平坦的顶部及陡峭的上升沿和下降沿,可简化为下式表示的矩形谱:

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

式中  $I_0$  为注入光纤的抽运光光强,  $\delta\omega_p$  为抽运光的带宽。将(2)式代入(1)式得到

$$\tilde{A}_s(\omega, L) = \tilde{A}_s(\omega, 0) \exp \left[ i \frac{nL}{c} (\omega - \omega_{s0}) - \frac{\alpha L}{2} + ip(\omega) + g(\omega) \right], \quad (3)$$

$$p(\omega) = \frac{G\Gamma_B}{8\delta\omega_p} \ln \left[ \frac{1 + \frac{4(\omega - \omega_{s0} + \frac{\delta\omega_p}{2})^2}{\Gamma_B^2}}{1 + \frac{4(\omega - \omega_{s0} - \frac{\delta\omega_p}{2})^2}{\Gamma_B^2}} \right], \quad (4)$$

$$g(\omega) = \frac{G\Gamma_B}{4\delta\omega_p} \left\{ \arctan \left[ \frac{2(\omega - \omega_{s0} + \frac{\delta\omega_p}{2})}{\Gamma_B} \right] - \arctan \left[ \frac{2(\omega - \omega_{s0} - \frac{\delta\omega_p}{2})}{\Gamma_B} \right] \right\}, \quad (5)$$

式中  $G = g_0 I_0 L_{\text{eff}}$ 。对于无信号失真的理想可调延迟线,附加相移  $p(\omega)$  为  $\omega$  的线性函数,增益指数  $g(\omega)$  为常数。

图 1 所示为矩形谱宽带光抽运下附加相移  $p(\omega)$  和增益指数  $g(\omega)$  随  $\omega$  的变化曲线,由图 1 可知,在约  $0.6\delta\omega_p$  的频率范围内, $p(\omega)$  和  $g(\omega)$  近似满足上述理想可调延迟线的要求,所以没有明显的因色散或增益不平衡引起的脉冲失真。

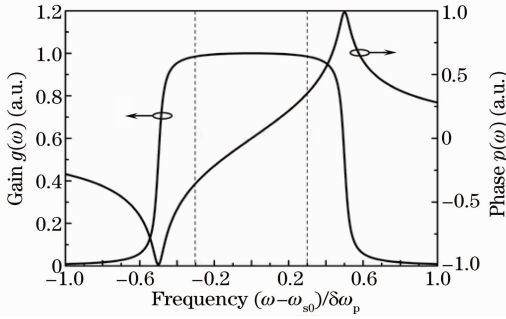


图 1 矩形谱宽带光抽运下的增益指数和附加相移  
Fig. 1 Gain exponent and additional phase shift for broadband pump with rectangular spectrum

将(4)式和(5)式在信号光脉冲中心角频率  $\omega_{s0}$  处按泰勒级数展开,式中  $p(\omega)$  的偶数阶泰勒级数展开项系数为 0, $g(\omega)$  的奇数阶泰勒级数展开项系数为 0。当信号光脉冲频谱在图 1 所示的  $0.6\delta\omega_p$  频率

范围内时,可忽略三阶以上的高阶泰勒级数展开项,得到  $p(\omega)$  和  $g(\omega)$  的近似表达式为

$$p(\omega) = \frac{G\Gamma_B}{\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2} (\omega - \omega_{s0}), \quad (6)$$

$$g(\omega) = \frac{G\Gamma_B}{2\delta\omega_p} \arctan\left(\frac{\delta\omega_p}{\Gamma_B}\right) - \frac{2G\Gamma_B^2}{(\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2} (\omega - \omega_{s0})^2. \quad (7)$$

与群速度色散(GVD)有关的  $p(\omega)$  二阶泰勒级数展开项系数为 0,所以信号光脉冲的失真主要来源于  $g(\omega)$  的二阶泰勒级数展开项系数,即信号光各频率成分增益的不均衡。需要特别指出的是,当信号光频谱超过上述近似理想的  $0.6\delta\omega_p$  频率范围时,高阶色散[与  $p(\omega)$  奇数阶泰勒展开项系数有关]和高阶非线性布里渊增益[与  $g(\omega)$  偶数阶泰勒展开项系数有关]所带来的脉冲失真逐渐变得明显,在这种情况下,准确的分析需要考虑三阶以上的泰勒级数展开。

在忽略三阶以上泰勒级数展开项的情况下,考虑高斯型输入信号光脉冲,其时域和角频率域的振幅为

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

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

式中  $\Delta\omega = \omega - \omega_{s0}$ ,  $A_0$  为信号光脉冲振幅, $t_0$  为功率下降到峰值功率  $1/e$  处定义的脉冲半宽度,且信号光脉冲频谱处于上述近似理想的  $0.6\delta\omega_p$  频率范围内。将(6)式、(7)式和(9)式代入(3)式,并进行傅里叶逆变换,得到输出信号光脉冲振幅为

$$A_s(t, L) = \frac{A_0 \exp\left[-\frac{aL}{2} + \frac{G\Gamma_B}{2\delta\omega_p} \arctan\left(\frac{\delta\omega_p}{\Gamma_B}\right)\right]}{\sqrt{1 + \frac{4G\Gamma_B^2}{t_0^2 (\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2}}} \exp\left\{-\frac{\left(t - \frac{nL}{c} - \frac{G\Gamma_B}{\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2}\right)^2}{2t_0^2 \left[1 + \frac{4G\Gamma_B^2}{t_0^2 (\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2}\right]}\right\}, \quad (10)$$

从(10)式可以看到,对于高斯脉冲而言, $g(\omega)$  的非零二阶泰勒展开项系数引起的脉冲失真表现为脉冲的展宽。比较(10)式与(8)式得到信号光脉冲的功率增益  $G_{\text{SBS}}$  (以 dB 为单位)、增益所致延时  $T_d$  和脉冲展宽因子  $B$  (定义为输出脉宽与输入脉宽之比) 分别为

$$G_{\text{SBS}} = 10 \lg \left\{ \frac{\exp\left[-aL + \frac{G\Gamma_B}{\delta\omega_p} \arctan\left(\frac{\delta\omega_p}{\Gamma_B}\right)\right]}{1 + \frac{16 \ln 2 \cdot G\Gamma_B^2}{\tau_{\text{in}}^2 (\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2}} \right\}, \quad (11)$$

$$T_d = \frac{G\Gamma_B}{\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2}, \quad (12)$$

$$B = \sqrt{1 + \frac{16 \ln 2 \cdot G\Gamma_B^2}{\tau_{\text{in}}^2 (\Gamma_B^2 + \delta\omega_p^2)^2}}, \quad (13)$$

式中  $\tau_{\text{in}} = 2\sqrt{\ln 2} t_0$  为高斯脉冲的半峰全宽(FWHM)。

利用(11)~(13)式可以在满足理想频率范围的条件下计算出利用矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光

小信号增益延迟特性。

## 2.2 矩形谱与高光谱宽带光抽运下高斯脉冲延迟特性的比较

从 2.1 节的分析知道, 信号光脉冲的失真主要来源于增益不均衡引起的脉冲展宽, 而宽带抽运光的谱型对脉冲展宽有很大的影响, 因此需要对矩形谱和高光谱宽带光抽运下的布里渊慢光延迟性能进行比较。

在  $\delta\omega_p \gg \Gamma_B$  的宽带抽运情况下, (12) 式和 (13) 式可近似为

$$T_d = \frac{G\Gamma_B}{\delta\omega_p^2}, \quad (14)$$

$$B = \sqrt{1 + \frac{16\ln 2 \cdot G\Gamma_B^2}{\tau_m^2 \cdot \delta\omega_p^4}}. \quad (15)$$

利用 (14) 式和 (15) 式可以得到矩形谱宽带光抽运下的延迟时间

$$T_{d\text{Rec}} = \frac{(B^2 - 1)\tau_m^2\delta\omega_p^2}{16\ln 2 \cdot \Gamma_B} \approx 0.0902 \frac{(B^2 - 1)\tau_m^2\delta\omega_p^2}{\Gamma_B}, \quad (16)$$

另外, 利用 Zhu 等<sup>[24]</sup> 关于高光谱宽带光抽运下布里渊慢光的延迟特性的解析表达式得到

$$T_{d\text{Gau}} = \frac{(B^2 - 1)\tau_m^2\delta\omega_p^2}{8\sqrt{\ln 2}\sqrt{\pi}\Gamma_B} \approx 0.0847 \frac{(B^2 - 1)\tau_m^2\delta\omega_p^2}{\Gamma_B}, \quad (17)$$

式中  $T_{d\text{Gau}}$  为高光谱宽带光抽运下的延迟时间,  $\delta\omega_p$  为以高斯型频谱强度  $1/e$  定义的带宽。比较 (16) 式和 (17) 式可以发现, 在相同的  $B$  和  $\delta\omega_p$  下, 矩形谱宽带光抽运比高光谱宽带光抽运的布里渊慢光延时量大 6.5%。图 2 为高光谱宽带光抽运下的增益指数和附加相移随频率的变化曲线, 对比图 1 和图 2 可以看到, 矩形谱宽带光在更宽的频率范围内满足理想可调延迟线对附加相移和增益指数的要求。因此, 采用矩形谱宽带抽运光可减小延时脉冲的失真。

虽然理想的矩形谱宽带光并不存在, 但通过以下两种方法可以获得具有近似矩形谱的宽带光: 直接电流调制的分布反馈 (DFB) 激光器具有近似线性啁啾特性, 很容易获得 10 GHz 以上的近似矩形谱宽带光; 采用 DFB 激光器外加相位调制器的方法, 通过设计调制器驱动电压波形为连续光引入线性啁啾, 也能获得近似矩形谱宽带光。

## 3 计算结果与讨论

以下计算选用长度  $L = 1$  km 的 SMF-28 单模光纤作为布里渊增益媒质, 其在工作波长 1550 nm

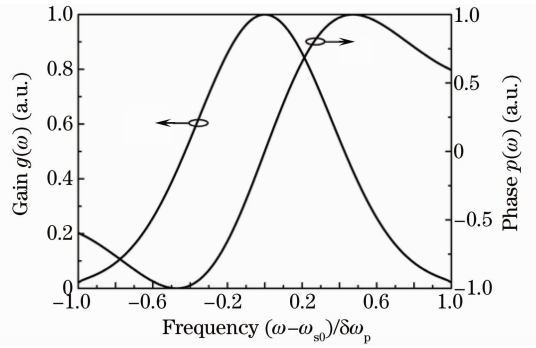


图 2 高光谱宽带光抽运下的增益指数和附加相移

Fig. 2 Gain exponent and additional phase shift for broadband pump with Gaussian spectrum

处的参数如下:  $g_0 = 5 \times 10^{-11}$  m/W,  $\Gamma_B/2\pi = 40$  MHz,  $\alpha = 0.05$  km<sup>-1</sup>, 有效模场面积  $A_{\text{eff}} = 50$   $\mu\text{m}^2$ 。此外, 输入信号光脉冲为无啁啾高斯脉冲, 假设其峰值功率足够低, 因此在下面的计算中均满足小信号增益条件。但实际应用中需要考虑对信噪比的要求, 所以输入信号光峰值功率不能太小, 通常情况下最大的小信号增益不超过 35 dB, 在以下计算中选择抽运光功率时也作此考虑。

### 3.1 数值解与解析解的比较

解析表达式 (11) ~ (13) 式是在忽略三阶以上泰勒级数展开式近似下推导得到的, 由第 2 节的理论分析知道, 当信号光带宽接近抽运光带宽时, 三阶以上泰勒级数展开项的忽略会使解析解偏离数值解。为了检验解析表达式在计算高斯脉冲延迟特性时的准确度以及寻求解析解的适用条件, 对不同宽度信号光脉冲延迟特性的数值和解析计算结果进行了比较, 数值解由快速傅里叶变换算法求解式 (3) ~ (5) 式得到, 计算所用的矩形谱宽带光的带宽为  $\delta\omega_p/2\pi = 5$  GHz, 功率为 600 mW, 计算结果如图 3 所示。

从图 3 可以看到, 对于固定带宽的抽运光, 随着信号光脉冲宽度的减小 (带宽的增加), 解析解与数值解的偏离加大, 这种偏离与推导解析表达式过程中忽略三阶以上泰勒级数展开项有关; 当  $\tau_m \geq 450$  ps (10 dB 带宽  $\delta\omega_{10\text{ dB}} \leq 0.357\delta\omega_p$ ) 时, 数值解和解析解很好地吻合 ( $B$ ,  $G_{\text{SBS}}$  和  $T_d$  数值解和解析解的最大偏差分别小于 0.3%, 0.7% 和 7%), 且信号光脉冲在约 31 dB 的增益下能实现零展宽延迟 (脉冲展宽小于 1%)。从数值计算结果还发现,  $\tau_m = 250$  ps ( $\delta\omega_{10\text{ dB}} \approx 0.643\delta\omega_p$ ) 时的脉冲展宽约 10%, 在对脉冲失真要求不太高的应用中, 这样的结果是可以接受的。

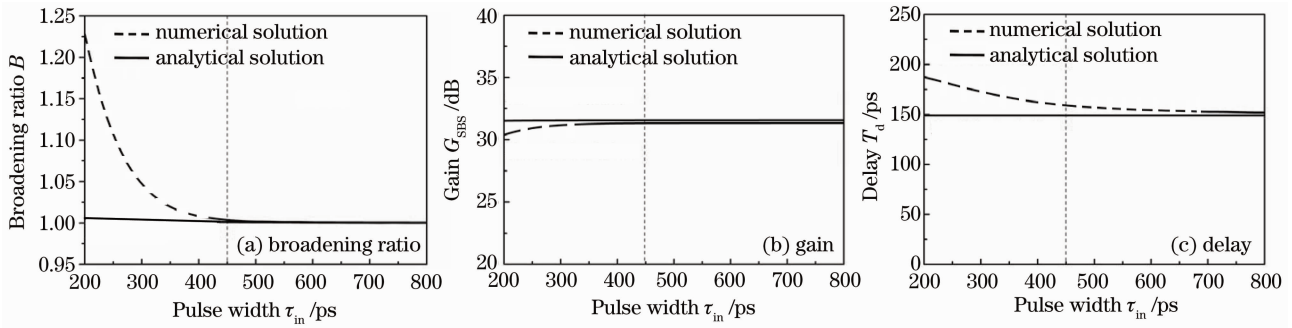


图 3 不同脉冲宽度信号光脉冲的延迟特性

Fig. 3 Delay characteristic of signal pulse with different pulse widths

### 3.2 不同抽运光带宽下的延迟性能

由 3.1 节的讨论知道,当  $\delta\omega_{10, \text{dB}} \leq 0.357\delta\omega_p$  时,信号光脉冲在约 31 dB 的增益下能实现零展宽延迟,计算考虑  $\delta\omega_{10, \text{dB}} = 0.357\delta\omega_p$ ,因此,对于不同的抽运光带宽,计算所用的信号光脉冲宽度也不同,且其半峰全宽满足关系式

$$\tau_{\text{in}} = 4 \sqrt{\ln 2 \cdot \ln 10} / (0.357\delta\omega_p).$$

另外,考虑到光纤中布里渊频移量只有约 10 GHz,当抽运光带宽大于 2 倍布里渊频移量时,会出现增益谱和吸收谱的重叠,布里渊有效增益带宽的扩展受限,因此,计算所用的最大抽运光带宽为  $\delta\omega_p/2\pi = 20$  GHz,从而无需考虑吸收谱的影响,这样(11)~(13)式有效。基于以上假设,图 4 给出了不同抽运光带宽下信号光脉冲的延迟性能,计算中采用的抽运光功率为 600 mW,延时斜率  $T_{d-\text{slope}}$  定

义为  $T_d$  与  $G_{\text{SBS}}$  之比。从图 4 可以看到,  $G_{\text{SBS}}$  与  $\delta\omega_p$  近似成反比关系,而  $T_d$  与  $\delta\omega_p$  的二次方近似成反比关系,因此  $T_{d-\text{slope}}$  与  $\delta\omega_p$  近似成反比关系。这意味着,随着抽运光带宽的增加,虽然可以实现更窄的信号光脉冲的零展宽延迟(最大抽运光带宽 20 GHz 时对应的信号光脉冲半高全宽为  $\tau_{\text{in}} = 112$  ps),但为了获得相同的延时量,窄脉冲需要的增益大于宽脉冲,因此需要更高的抽运光功率或更长的光纤;同时,还需要降低输入峰值功率以避免增益饱和和带来的延时受限问题。

作为一个计算实例,考虑抽运光带宽为 20 GHz、功率为 700 mW, SMF-28 光纤长度  $L = 4$  km,表 1 列出了不同宽度信号光脉冲延迟特性的数值计算结果。

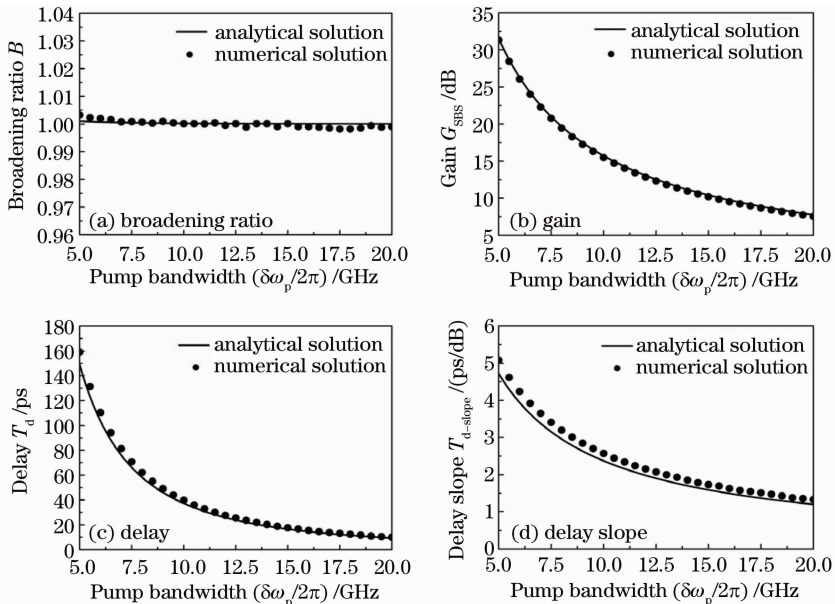


图 4 不同抽运光带宽下的延迟性能

Fig. 4 Delay performance for pump with different bandwidths

表 1 不同脉冲宽度信号光脉冲的延迟特性

Table 1 Delay characteristic of the signal pulses with different pulse widths

$\tau_{in}/ps$	$B$	$G_{SBS}/dB$	$T_d/ps$
110	1.0014	32.8	43.2
100	1.0037	32.8	43.9
90	1.0146	32.8	44.8
80	1.0312	32.7	46.0
70	1.0627	32.6	47.4
60	1.1245	32.4	49.1
50	1.2350	31.9	50.8

从表 1 可以看到,在 20 GHz 的有效增益带宽和约 32 dB 的增益下,矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光可实现  $\tau_{in}$  约 100 ps 的高斯光脉冲的零展宽延时(脉冲展宽小于 1%)。

## 4 结 论

对矩形谱宽带光抽运下的布里渊慢光延迟特性进行了详细的理论分析和讨论;在小信号增益情况下,得到了高斯脉冲延时量、脉冲展宽因子和增益的解析表达式。计算结果表明,当信号光脉冲的 10 dB 带宽小于抽运光带宽的 0.357 倍时,解析解与数值解吻合,且信号光脉冲能实现零展宽延迟;单个矩形谱宽带光抽运的布里渊慢光最大有效增益带宽为 20 GHz,能实现半峰全宽约 100 ps 的高斯脉冲的零展宽延迟。研究结果还表明,有效增益带宽的增加是以牺牲延迟斜率为代价的,即与宽脉冲相比,窄脉冲需要更大的增益以实现相同的延迟量,且需要更低的入射峰值功率以避免增益饱和带来的延时受限问题;与高斯谱宽带抽运光相比,矩形谱宽带抽运光可以减小延时脉冲的失真。

## 参 考 文 献

- Li Yuanyuan, Hou Xun, Bai Jintao *et al.*. Two-photon Dike-narrowing selective reflection spectroscopy in thin atomic vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1623~1627  
李院院,侯 洵,白晋涛等. 薄原子蒸汽的双光子 Dicke 窄化选择反射谱[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1623~1627
- 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 巍等. 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
- Hu Shuling, Zhang Chunxi, Gao Chunqing *et al.*. Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 6~10  
胡姝玲,张春熹,高春清等. 包层抽运掺铒光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 6~10

- Wang Chuncan, Zhang Fan, Lu Yuchun *et al.*. Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1630~1635  
王春灿,张 帆,陆玉春等. 单频大功率光纤放大器中抑制受激布里渊散射的理论分析 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1630~1635
- Xiao Zhigang, Li Bincheng. Combined multi- and single-mode fiber relay for laser beam transportation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 855~860  
肖志刚,李斌成. 多模与单模光纤级联系统对激光束的传输 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 855~860
- Zhang Feng, Chen Ming, Qin Xi *et al.*. All optical clock recovery from degraded non-return-to-zero data stream [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1101~1105  
张 峰,陈 明,秦 曦等. 恶化非归零码的全光时钟恢复 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1101~1105
- Huang Lin, Dai Zhiyong, Liu Yongzhi *et al.*. Q-switched fiber laser with a ring interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 987~991  
黄 琳,代志勇,刘永智等. 基于干涉环结构的调 Q 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 987~991
- Xing Lei, Feng Xue, Zhang Lei *et al.*. Stimulated Brillouin scattering hybrid Q-switched Er-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 338~342  
刑 磊,冯 雪,张 磊等. 受激布里渊散射主被动混合调 Q 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 338~342
- K. Y. Song, M. G. Herráez, L. Thévenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 82~88
- A. E. Willner, B. Zhang, L. Zhang *et al.*. Optical signal processing using tunable delay elements based on slow light [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2008, **14**(3): 691~705
- B. Zhang, L. S. Yan, I. Fazal *et al.*. Slow light on Gbit/s differential-phase-shift-keying signals [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1878~1883
- L. L. Yi, Y. Jauouën, W. S. Hu *et al.*. Improved slow-light performance of 10 Gb/s NRZ, PSBT and DPSK signals in fiber broadband SBS [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16972~16979
- L. L. Yi, L. Zhan, W. S. 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
- A. Zadok, O. Raz, A. Eyal *et al.*. Optically controlled low-distortion delay of GHz-wide radio-frequency signals using slow light in fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(7): 462~464
- Z. M. 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
- K. Y. Song, M. G. Herráez, L. Thévenaz. Long optically controlled delays in optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1782~1784
- M. D. Stenner, M. A. Neifield, Z. M. Zhu *et al.*. Distortion management in slow-light pulse delay [J]. *Opt. Express*, 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
- Z. W. Lu, Y. K. Dong, Q. Li. Slow light in multi-line Brillouin gain spectrum [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1871~1877
- Y. K. Dong, Z. W. Lu, Q. Li *et al.*. Broadband Brillouin slow light based on multifrequency phase modulation in optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(12): C109~C115

- 21 M. G. Herráez, K. Y. Song, L. Thévenaz. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4): 1395~1400
- 22 A. Zadok, A. Eyal, M. Tur. Extended delay of broadband signals in stimulated Brillouin scattering slow light using synthesized pump chirp [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(19): 8498~8505
- 23 K. Y. Song, K. Hotate. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 217~219
- 24 Z. M. 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
- 25 L. Y. 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
- 26 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. Express*, 2008, **16**(11): 8067~8076
- 27 Liu Yu, Ren Liyong, Wang Shihe. Theoretical study of stimulated Brillouin scattering slow light and pulse-broadening reduction using double broadband pump in optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2077~2082  
刘 宇,任立勇,王士鹤. 光纤中双宽带抽运 SBS 慢光及其脉冲展宽减小的理论研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2077~2082
- 28 Lichtman, R. G. Waarts, A. A. Friesem. Stimulated Brillouin scattering excited by a modulated pump wave in single-mode fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(1): 171~174
- 29 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 2007, 344~346