

光纤参量放大增益谱边带快慢光特性研究*

赵建朋 罗斌[†] 潘炜 闫连山 朱宏娜 邹喜华 叶佳

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

(2013年9月2日收到; 2013年10月8日收到修改稿)

针对窄带光纤参量放大(FOPA), 区别于以往增益谱的大增益斜率区域, 研究了FOPA增益谱边带脉冲信号的快慢光特性. 首先从理论上推导出了小信号增益条件下信号延时量的解析表达式; 其次, 在低抽运功率条件下($< 1\text{ W}$), 实验研究了10 Gb/s伪随机二进制序列脉冲信号在FOPA增益谱边带的延时特性, 实验结果与理论计算基本符合; 最后, 通过分析研究抽运光功率、光纤色散及非线性系数等参数对信号延时量的影响规律, 可以为FOPA增益谱边带的快慢光延迟线的设计提供参考.

关键词: 慢光, 光纤参量放大, 脉冲信号

PACS: 42.65.Yj, 42.65.Ky

DOI: 10.7498/aps.63.044203

1 引言

慢光效应在全光信号处理、光存储、光延迟和量子计算等方面有着广阔的应用前景^[1-4], 利用光纤中的多种非线性效应, 例如受激布里渊散射(SBS)、四波混频(FWM)等, 可以实现慢光^[5-11]. 其中, 基于FWM原理的光纤参量放大(FOPA)过程, 通过合理的相位匹配, 增益谱宽可以设计得比较大, 因此, 获取的慢光在带宽方面相对于SBS具有一定的优势, 得到了越来越多研究人员的关注^[8-11]. 然而, 直接决定慢光延时量大小的是相位谱特性, 即它能引起群速度多大程度的改变. 事实上, 增益谱和相位谱是相互关联的, 通常情况下, 尖锐的增益谱伴随着相位谱的急剧变化, 可以得到较大的延时; 反之, 过于平坦的增益谱, 反而不利于大延时的获得. 因此, 设计出窄带宽的参量放大器是增大快慢光效应的有效途径. 文献^[8, 9]利用窄带宽的FOPA实现了高速光脉冲信号的延时传输, 但是为了获得拉曼辅助放大的效果以得到大的延时量, 信号光波长必须远离位于通信波段的抽运光波长(信号光波长在1450 nm左右), 不利于

在现有的通信系统中应用. 根据相位匹配关系, 想要对1550 nm通信波段信号的延时进行研究, 参量过程需要发生在反常色散区域($\beta_2 < 0$)^[10,12]. Yi等^[11]在宽FOPA增益区域进行了1550 nm波段高速率归零码数据流的延时传输. Gui等^[13]通过研究FOPA增益谱边带的延时特性, 从理论上分析了近零增益条件下信号光的延时特性. 通过分析, 在增益谱边带位置上存在相对大的相位失配, 正是由于这种特定的相位改变使得信号光在增益谱边带产生了较大的延时量. 因此, 区别于以往增益谱的大增益斜率区域, 本文研究窄带FOPA增益谱边带脉冲信号的快慢光特性. 首先, 从理论上推导出了小信号条件下谱分量延时的解析表达式, 由此利用信号与系统处理方法对脉冲信号在FOPA增益谱边带快慢光的特性进行研究; 随后, 对比了单频信号和脉冲信号在FOPA增益谱边带的延时特性并详细地分析了两产生差异的原因, FOPA增益谱边带窄的延时带宽在很大程度上限制了脉冲信号延时量的提高; 最后, 通过实验测量了10 Gb/s伪随机二进制序列(PRBS)脉冲信号在FOPA增益谱边带的延时量, 得到了不同的抽运波长下脉冲信号的延时曲线. 本文实验数据与数值仿真结果相符

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB315704)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: bluo@home.swjtu.edu.cn

合, 从而为 FOPA 增益谱边带区域的慢光在实际中的应用提供了有效的依据.

2 原理

光纤中简并光参量过程由下面的耦合波方程决定^[14-16]:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{\alpha_p}{2} A_p = i\gamma[|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_i|^2]A_p + 2i\gamma A_p^* A_i A_s \exp(i\Delta\beta z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{\alpha_s}{2} A_s = i\gamma[2|A_p|^2 + |A_s|^2 + 2|A_i|^2]A_s + i\gamma A_p^2 A_i^* \exp(-i\Delta\beta z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} + \frac{\alpha_i}{2} A_i = i\gamma[2|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + |A_i|^2]A_i + i\gamma A_p^2 A_s^* \exp(-i\Delta\beta z), \quad (3)$$

其中, 式中下标 p, s, i 用于区分抽运光、信号光和闲频光, A_p , A_s 和 A_i 分别表示抽运光、信号光和闲频光的幅度, α 表示光纤的损耗, γ 是光纤的非线性系数, $\Delta\beta = \beta_2(\omega_s - \omega_p)^2 + \beta_4(\omega_s - \omega_p)^4/12$ 表示线性相位失配因子, 其中 β_2 是二阶色散参量, β_4 是四阶色散参量.

在抽运光能量远大于信号光的能量及忽略抽运损耗的情况下, 抽运光幅度满足:

$$A_p = \sqrt{P_p} \exp(i\gamma P_p z). \quad (4)$$

将方程(4)代入(2), (3)式, 可得到关于信号光和闲

频光的线性耦合方程:

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = 2i\gamma P_p A_s + i\gamma P_p A_i^* \times \exp[i(2\gamma P_p - \Delta\beta)z], \quad (5)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} = 2i\gamma P_p A_i + i\gamma P_p A_s^* \times \exp[i(2\gamma P_p - \Delta\beta)z]. \quad (6)$$

求解方程(5), (6), 信号光和闲频光的复增益表达式可以表示为

$$G_s = \left(\cosh(gz) + \frac{i\kappa}{2g} \sinh(gz) \right) \exp(i\theta z), \quad (7)$$

$$G_i = \frac{i\gamma}{g} P_p \sinh(gz) \exp(i\theta z), \quad (8)$$

其中, $\kappa = 2\gamma P_p + \Delta\beta$, $g^2 = (\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)^2$, $\theta = (2\gamma P_p - \Delta\beta)/2$.

(7)式即为信号光在 FOPA 中的传递函数, 其实部代表参量增益, 虚部代表非线性相移. 而信号光的延时量主要来自于相位随频率的改变. 因此为了进一步得出信号光的延时量, 将信号光的传递函数(7)式写成如下的形式: $G_s(\omega) = A(\omega) \exp(i\varphi(\omega))$, 其中

$$A(\omega) = \sqrt{(\cosh(gz))^2 + \left(\frac{i\kappa}{2g} \sinh(gz) \right)^2}, \quad (9)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\kappa \sinh(gz)}{2g \cosh(gz)} + \theta z. \quad (10)$$

通过对相位部分(10)式求导得到信号光的延时量为

$$\begin{aligned} \Delta T(\omega) &= \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \omega} \\ &= \frac{\left\{ \left[\frac{1}{2}g + \frac{1}{2g} \left(\gamma P_p + \frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 \right] \sinh(gz) \cosh(gz) - \frac{z}{2} (\gamma P_p)^2 \cosh^2(gz) \right\} \frac{\partial \Delta\beta}{\partial \omega}}{(\gamma P_p)^2 \cosh^2(gz) - \left(\gamma P_p + \frac{\Delta\beta}{2} \right)^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中,

$$\frac{\partial \Delta\beta}{\partial \omega} = 2\beta_2(\omega - \omega_p) + \beta_4(\omega - \omega_p)^3/3.$$

通过对(11)式进一步分析, 当抽运光波长远离信号光波长(即 $\Delta\beta < -4\gamma P_p$) 时, (11)式可以简化, 分子中包含 $\sin(2hz)$ 项, 导致增益谱边带延时量呈现一定的周期性, 其中, $h = \sqrt{(\kappa/2)^2 - (\gamma P_p)^2}$. 所以增益谱边带的延时带宽与 γ , P_p 和 β_2 密切相关, 通过合理选择 γ , P_p 和 β_2 , 在保证延时量的前提下,

降低周期 h 的大小, 从而扩展延时带宽.

(11)式反映的是频率 ω 处单频信号的延时量. 然而, 对于含有丰富频谱分量的脉冲信号, (11)式已经不能准确地反映延时量的变化. 脉冲信号利用 FOPA 产生慢光延时的分析过程如图 1 所示, 时域信号经傅里叶变换 (FFT) 后与所求得的 FOPA 传递函数相乘: $\tilde{E}_{in}(\omega)G_s(\omega)$, 得到的输出信号频谱经逆傅里叶变换 (IFFT) 后即及时域慢光延时信号^[17].

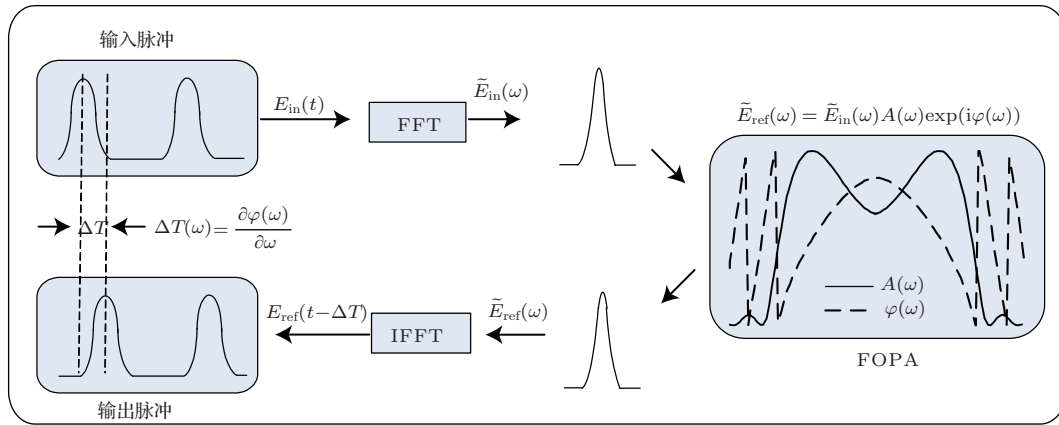


图1 FOPA 中脉冲信号延时过程示意图

3 数值模拟

计算中, 单模光纤(SMF)各参数如下: 光纤长度 $L = 5000 \text{ m}$, 群速度色散参量 $\beta_2 = -23 \text{ ps}^2/\text{km}$, 四阶色散参量 $\beta_4 = -10^{-5} \text{ ps}^4/\text{km}$, 非线性系数 $\gamma = 2.4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 损耗 $\alpha = 0.3 \text{ dB/km}$.

在低抽运光功率 ($P_p = 0.15 \text{ W}$) 条件下对小信号光 ($P_s = -20 \text{ dBm}$) 的增益和延时量用下面两种方法进行求解: 1) 直接用耦合模方程(1)–(3)进行数值仿真; 2) 用得到的信号增益和延时量的表达式(9)和(11)进行解析求解. 结果如图2所示.

图2(a)和(b)给出了信号光波长 $\lambda_s = 1556.94 \text{ nm}$ 时, 小信号光情况下单频信号的增益和延时量的数值解和解析解, 可以看出两种方法得出的增益谱及延时量几乎一致. 这说明在小信号输入情况下, (9)和(11)式可以有效地反映信号的增益和延时量的变化. 图2(c)给出了两个不同的抽运光波长时信号光的延时带宽. 从图2(a)和(b)可以看出, 信号最大时延的位置并没有出现在最大增益斜率的位置, 相反当信号光在FOPA中近零增益附近的某个频率区域, 由于特殊的相位关系使得信号光产生大的信号延时或时间超前[13].

为了更好地研究脉冲信号在FOPA增益谱边缘位置快慢光的特性, 用图1给出的研究方法对高斯脉冲信号进行数值仿真并与单频信号情况下的延时量进行对比分析. 计算中, 高斯脉冲信号为: $\exp(-t^2/T_0^2)$, 其中 $T_0 = 100 \text{ ps}$. 图3(a)给出了不同的抽运光波长情况下高斯脉冲信号的归一化波形; 图3(b)给出了单频信号和高斯脉冲信号的延时量. 这里将脉冲信号的延时量定义为归一化幅度等于0.5时的延时量的均值.

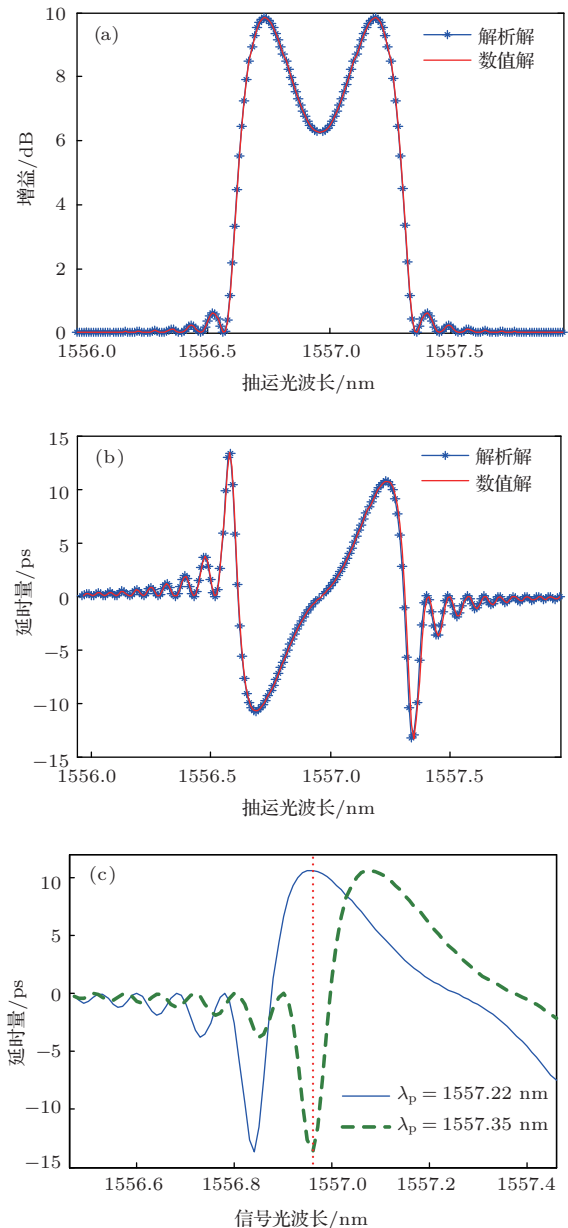


图2 信号光增益与延时量随光波长的变化曲线 (a) 增益随抽运光波长的变化; (b) 延时量随抽运光波长的变化; (c) 延时量随信号光波长的变化

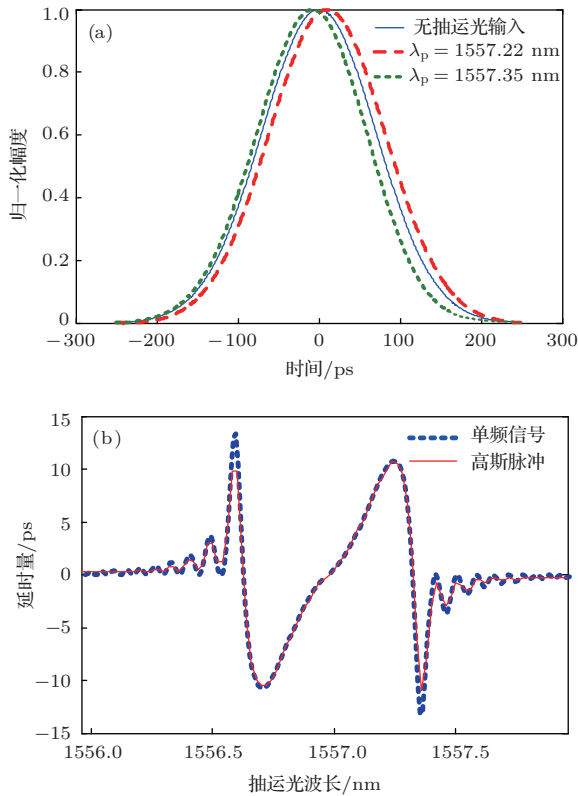


图3 (a) 不同抽运波长脉冲信号归一化波形; (b) 单频信号和高斯脉冲信号的延时量随抽运波长的变化

由图3(b)看出, 高斯脉冲信号和单频信号的延时量存在比较大的差异, 这是因为当抽运光波长不同时, 所对应的信号光的延时带宽不同引起的. 以抽运光波长大于信号光波长的区域来看, 信号光延时和超前最大时(抽运光波长分别对应 $\lambda_p = 1557.22 \text{ nm}$ 和 $\lambda_p = 1557.35 \text{ nm}$) 延时带宽如图2(c)所示, 当抽运光波长 $\lambda_p = 1557.22 \text{ nm}$ 时, 信号光有较大的延时带宽, 而 $\lambda_p = 1557.35 \text{ nm}$ 时, 信号光的延时带宽较小. 由于脉冲信号含有丰富的频谱分量, 所以在不同的频谱分量上的延时量是不同的, 尤其当延时带宽非常窄时, 导致脉冲信号的延时量与单频信号的延时量差异较大.

图4(a)给出了 $L = 5000 \text{ m}$, $P_p = 0.15 \text{ W}$, $\beta_2 = -23 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $\gamma = 2.4 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 情况下, 信号延时量随抽运光波长的变化情况. 分别改变 $P_p = 0.25 \text{ W}$, $\gamma = 3 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $\beta_2 = -8 \text{ ps}^2/\text{km}$, 固定其他参数不变, 得到信号延时量随抽运光波长的变化分别如图4(b), (c)和(d)所示. 如果仅从增益谱边带单频光延时量来看, P_p , γ 和 β_2 的绝对值越大越好, 但是随着 P_p , γ 和 β_2 绝对值的增加, 增益谱边带区域的延时带宽变得越来越窄, 反而不利于高速率宽带脉冲信号延时量的提高.

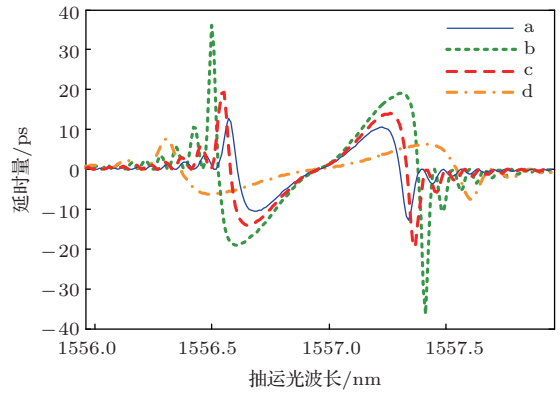


图4 在不同参数下, 延时量随抽运光波长的变化

4 实验结果

实验系统如图5所示, 两台可调光源 TL1 和 TL2 分别作为抽运光和信号光. TL1 自身带有 S-Bs 效应抑制功能, 抽运光首先通过偏振控制器 (PC1) 进入掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行放大. 信号光经过 PC2 进入马赫曾德尔调制器 (MZM) 产生 10 Gb/s 的 PRBS 脉冲信号. 随后抽运光和信号光通过 90/10 的耦合器 (OC) 输入到 5 km 的 SMF 中发生光参量过程产生延时. 光纤光栅 (FBG) 和环形器 (CIRC) 用来分离信号光, CIRC 后连接可调滤波器 (TF) 用来滤除信号功率以外的剩余的抽运功率. 光谱分析仪 (OSA) 和示波器 (oscilloscope) 分别用来观察信号光的增益和延时量.

实验中将信号光的波长固定在 FBG 的中心波长 1556.94 nm 处, 抽运光经过 EDFA 放大后功率调节为 $P_p = 0.15 \text{ W}$. 实验中, 抽运光在 1556.47—1557.45 nm 范围内以 0.01 nm 的步长进行调谐.

图6(a)给出了抽运光波长大于信号光波长时, 信号光延时和超前最大时(抽运波长 $\lambda_p = 1557.22 \text{ nm}$ 和 $\lambda_p = 1557.35 \text{ nm}$) 脉冲信号的实验波形. 从图中可以看出, 当抽运光波长 $\lambda_p = 1557.22 \text{ nm}$ 时, 脉冲信号几乎没有畸变, 并且延时量较大. 而当抽运光波长 $\lambda_p = 1557.35 \text{ nm}$ 时, 脉冲信号不但有比较大的畸变, 而且延时量较小. 实验中采用的是 10 Gb/s 的 PRBS 脉冲信号发生器, 通过改变连“0”和连“1”的数量将码率降到 2 Gb/s, 使脉宽达到 500 ps. 这样脉冲顶部较为平坦, 便于测量延时量. 事实上, 由图6(a)可以看出实验中脉冲信号的边沿还是非常陡峭的, 其带宽与 10 Gb/s 的信号(或 100 ps 脉冲信号)是相当的. 为了和实验结果对比, 将实验中用到的信号脉冲数值

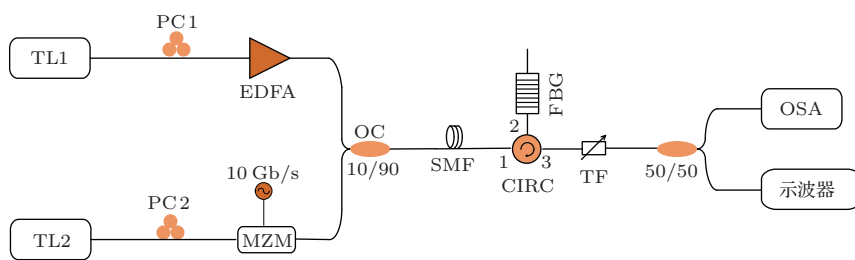


图5 基于FOPA的慢光系统框图

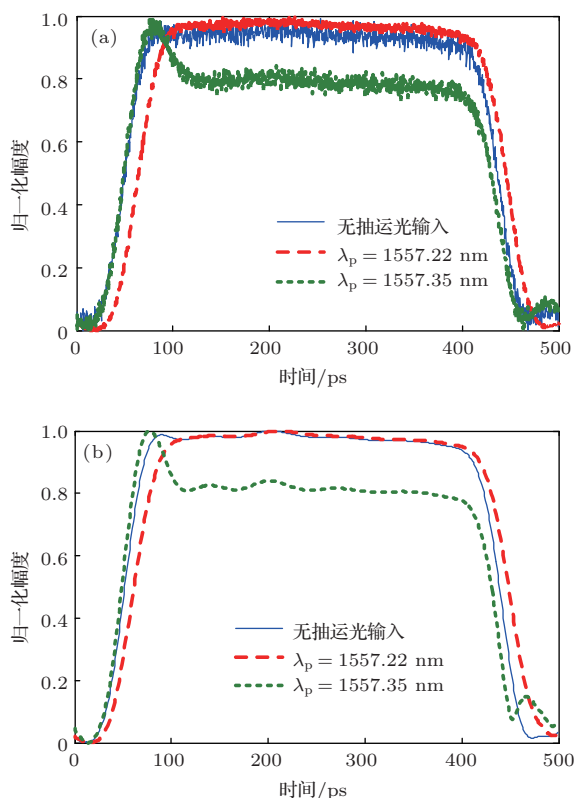


图6 信号光延时和超前最大时脉冲信号的(a)实验波形; (b)理论波形

拟合后,再用图1给出的研究方法进行理论仿真,结果如图6(b)所示.

图6(b)给出了信号光延时和超前最大时(抽运波长 $\lambda_p = 1557.22 \text{ nm}$ 和 $\lambda_p = 1557.35 \text{ nm}$) 脉冲信号的理论波形. 对比图6(a)和(b)可以看出, 脉冲信号的实验波形和理论波形符合得很好. 图2(c)可以解释图6(a)和(b)中脉冲信号波形的变化. 当抽运光波长 $\lambda_p = 1557.22 \text{ nm}$ 时, 此时信号延时带宽较大, 可以使得脉冲信号几乎没有畸变的通过, 而且每个频谱分量的延时量变化不大, 从而导致脉冲信号的延时量较大. 而当抽运光波长 $\lambda_p = 1557.35 \text{ nm}$ 时, 信号延时带宽很小导致脉冲信号不但有较大的畸变, 而且每个频谱分量的延时量变化很大, 从而使得脉冲信号的延时量较小.

图7给出了脉冲信号在不同抽运光波长的条件下实验测得和理论计算的延时量. 由于滤波器性能的限制, 如果抽运波长距离信号波长过近, 信号光和抽运光将无法分离, 所以在信号光 $\pm 0.2 \text{ nm}$ 的范围内没有进行实验. 由图7可以看出, 实验值与理论值基本符合. 当抽运光和信号光的距离比较近时, 它们的失配量比较小, 所以这时候信号的增益比较大, 在高增益区域增益斜率最大的位置有最大的延时量 10 ps . 而在抽运光距离信号光较远的区域时, 由于信号光和抽运光的相位失配已经比较大, 所以信号的增益不大, 由于此时相位存在一定的变化导致在这个区域也有较大的延时量, 但是因为此时信号的延时带宽非常窄, 导致高码率的脉冲信号在此处得到的延时量并不是很大, 最大延时只有 -5.5 ps .

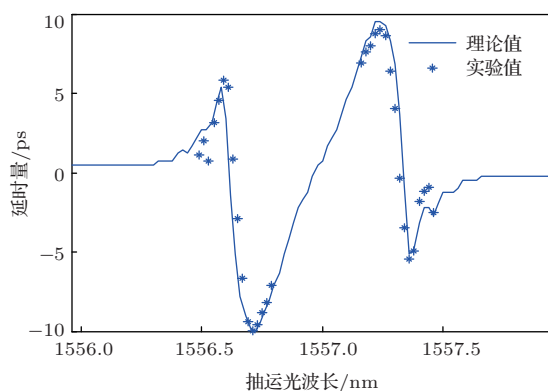


图7 信号延时量随抽运光波长的变化

5 结论

本文从理论上推导了小信号光条件下增益和延时量的解析表达式, 并对比分析了解析解和数值解. 在小信号增益情况下, 推导出的增益谱和延时量的解析表达式可以有效地反映增益和延时量的变化. 通过对上面表达式进行数值仿真, 理论上分析了低抽运功率的条件下, FOPA 增益谱边带附近脉冲信号的延时量, 并通过实验对理论研究进行了

验证. 可以看出在增益谱边带的低增益区域, 由于在某个波长处存在尖锐的相位变化, 从而产生大的延时. 另一方面, 延时带宽也是慢光延时应用中的重要因素, 它对高速率宽带脉冲信号的波形质量有着非常明显的影响. 因此, 如何优化参数以便进一步增加延时带宽, 发挥 FOPA 增益谱边带大延时的潜在优势, 将在今后的工作中进行研究.

参考文献

- [1] Khurgin J B, Tucker R S 2009 *Slow Light: Science and Applications* (New York: CRC Press) p293
- [2] Zhu Z M, Gauthier D J, Boyd R W 2007 *Science* **318** 1748
- [3] Firstenberg O, Shuker M, Davidson N, Ron A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 043601
- [4] Camacho R M, Broadbent C J, Ali-Khan I, Howell J C 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 043902
- [5] Alic N, Windmiller J R, Coles J B, Radic S 2008 *IEEE Sel. Topics Quantum Electron.* **14** 681
- [6] Okawachi Y, Bigelow M S, Sharping J E, Zhu Z M, Schweinsberg A, Gauthier D J, Boyd R W, Gaeta A L 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 153902
- [7] Sharping J E, Okawachi Y, Gaeta A L 2005 *Opt. Express* **13** 6092
- [8] Dahan D, Eisenstein G 2005 *Opt. Express* **13** 6234
- [9] Shumarkher E, Willinger A, Blit R, Dahan D, Eisenstein G 2006 *Opt. Express* **14** 8540
- [10] Marhic M E, Wong K K Y, Kazovsky L G 2004 *IEEE Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 1133
- [11] Yi L L, Hu W S, Su Y K, Gao M Y, Leng L F 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2575
- [12] Li Y Z, Qian L J, Lu D Q, Fan D Y, Chen G H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 205
- [13] Gui L, Xu K, Wang D P, Yin J, Wu J, Hong X B, Dai Y T, Zhang J Y, Lin J T 2011 *Opt. Commun.* **284** 3095
- [14] Agrawal G P 2007 *Applications of Nonlinear Fiber Optics* (3rd Ed.) (New York: Academic Press) p245
- [15] Hansryd J, Andrekson P A, Westlund M, Li J, Hedekvist P O 2002 *IEEE Sel. Topics Quantum Electron.* **8** 506
- [16] Zhu H N, Luo B, Pan W, Yan L S, Zhao J P, Wang Z Y, Gao X R 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 074206
- [17] Ma Y N, Luo B, Pan W, Yan L S, Zou X H, Yi A L, Ye J, Wen K H, Zheng D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 014215 (in Chinese)[马雅男, 罗斌, 潘炜, 闫连山, 邹喜华, 易安林, 叶佳, 温坤华, 郑狄 2012 物理学报 **61** 014215]

Characteristics of the slow and fast light in the band-edge of gain spectrum of the fiber-optic parametric amplification*

Zhao Jian-Peng Luo Bin[†] Pan Wei Yan Lian-Shan
Zhu Hong-Na Zou Xi-Hua Ye Jia

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

(Received 2 September 2013; revised manuscript received 8 October 2013)

Abstract

Compared to the large slope of the gain spectrum, in this paper, the characteristics of the slow and fast light on the band-edge of gain spectrum of the narrow-band fiber-optic parametric amplification (FOPA) are analyzed. Firstly, we derive the analytical solution of the signal delay under the condition of small-signal gain. Secondly, the characteristics of 10 Gb/s pseudo-random binary sequence pulse signal delay are investigated experimentally under the condition of low pump power (< 1 W). Finally, the factors that influence the signal delay, such as pump power, dispersion, nonlinear coefficient, etc. are analyzed. The results obtained in this paper provide a detailed theoretical reference for designing slow and fast delay line in band-edge of gain spectrum of FOPA.

Keywords: slow light, fiber-optic parametric amplification, pulse signal

PACS: 42.65.Yj, 42.65.Ky

DOI: [10.7498/aps.63.044203](https://doi.org/10.7498/aps.63.044203)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB315704).

[†] Corresponding author. E-mail: bluo@home.swjtu.edu.cn