

文章编号: 1001-3806(2010)04-0573-04

模拟信号在 SOA 中的交叉相位调制特性研究

李亚捷

(长沙理工大学 物理与电子科学学院, 长沙 410114)

摘要: 为了研究模拟光信号在半导体光放大器中的交叉相位调制特性,以正弦波和三角波两种模拟光信号为例,采用数值计算的方法,详细分析了交叉相位调制过程中模拟信号的增益、非线性相移差和啁啾。结果表明,当信号光和控制光之间采用帧同步方式时,信号光脉冲各点的增益及增益差出现波动,非线性相移差将围绕理想值 π 出现不同程度的偏离;采用比特同步方式可使信号光脉冲各点非线性相移差均衡,此时所需的控制光脉冲和信号光脉冲波形类似。

关键词: 光通信; 光纤通信技术; 半导体光放大器; 交叉相位调制; 非线性相移差; 啁啾

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.037

Research of analog signal's cross phase modulation in SOA

LI Ya-jie

(School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Taking example for sine wave and triangle wave, this paper analyzes analog optical signal's cross phase modulation characteristics in semiconductor optical amplifier, including gain, nonlinear phase difference and chirp. Analysis shows that when using the frame synchronization between signal light and optical control pulse, the gain and gain difference at each point of signal pulse will fluctuate, the nonlinear phase difference also will deviate from the ideal value of π . In order to obtain the same nonlinear phase difference at different point of signal pulse, bit synchronization mode should be used, and the needed optical control pulse has the similar waveform to optical signal pulse.

Key words: optical communication; optical fiber communication technology; semiconductor optical amplifier; cross phase modulation; nonlinear phase difference; chirp

引言

目前已提出的应用于全光通信网络的全光处理器多数是采用半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)作为非线性元件,利用其内部的交叉相位调制(cross phase modulation, XPM)这一非线性效应,以光脉冲作为控制信号来实现全光缓存^[1-2]、全光开关^[3]以及异或门^[4]等逻辑操作。在已经报道的试验中,这些器件的处理对象均是高速率的串行数字光信号,对模拟信号并未涉及。而实际的全光交换网络链路中在传输数字信号的同时还会传输模拟信号,如典型的模拟副载波复用(subcarrier modulation, SCM)光波系统^[5]。因此,各种全光处理器件应同时具备处理模拟光信号的能力及优良的性能。以正弦波和三角波这两种典型的模拟信号为例,作者对信号光和控制

光之间采用不同的同步方式(帧同步和比特同步)时信号光脉冲各点的增益、非线性相移差和啁啾等做了详细分析,这对全光处理器在模拟光纤系统中的应用具有参考意义。

1 理论分析

图1中给出了SOA交叉相位调制效应的应用方式:

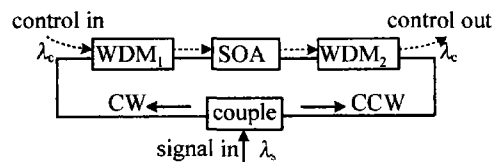


Fig. 1 The application mode of XPM in SOA

在SOA的左右两侧放置波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM) WDM_1 和 WDM_2 , 分别用于引入和导出网络控制单元发出的控制光脉冲。控制光和顺时针方向(clockwise, CW)信号光必需同时到达SOA,且当逆时针(counter-clockwise, CCW)方向的信号光进入SOA时,控制光早已离开SOA,即控制光只和CW信号光在SOA中作用产生时域重叠。通过调节控制光功率使得两束信号光之间的非线性相移差

作者简介:李亚捷(1980-),女,讲师,博士,主要从事光纤通信及信号处理方面的研究。

E-mail: springgajie@126.com

收稿日期:2009-12-11;收到修改稿日期:2010-03-04

(nonlinear phase difference, NPD) 达到 π , 即可实现对信号光的各种逻辑功能。如图 2 所示, 两者之间的同步

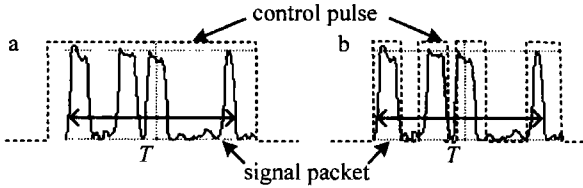


Fig. 2 The synchronization diagram between signal packet and optical control pulse

a—frame synchronization b—bit synchronization

步方式有两种: 帧同步和比特同步。

帧同步的特点是以宽度为 T 的整个数据帧为控制对象, 在一个数据帧上加载一个方波控制光脉冲, 作用于整个数据的控制光功率恒定; 而比特同步则是以每比特信号光脉冲为控制对象, 在 T 时段内每个控制光脉冲的波形将取决于它所控制的信号光脉冲的形状。

考虑图 3 所示的正弦波和三角波两种模拟光信

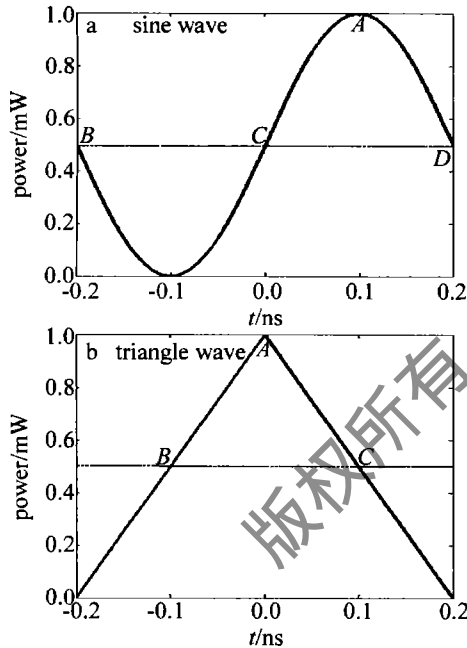


Fig. 3 The waveform of sine wave and triangle wave

号, 峰值功率均为 1mW, 脉冲周期 0.4ns, 时间 t 以 ns 为单位, 波形表达式分别为:

$$P_{in,sin}(t) = \frac{1}{2} \sin(5\pi \cdot t) + \frac{1}{2} \quad (1)$$

$$P_{in,triangle}(t) = -5|t| + 1 \quad (2)$$

信号光经耦合器后分为等功率的两束光分别沿 CW 和 CCW 方向在光纤环中行进。当 CW 和 CCW 方向的信号光经过 SOA 时获得的光场的功率增益 g_{cw}, g_{ccw} 根据参考文献 [6] 可表示为:

$$g_{cw} = g_0 \exp \left[\left(1 - g_{cw} \right) \frac{P_{cw} + P_c}{P_s} \right] \quad (3)$$

$$g_{ccw} = g_0 \exp \left[\left(1 - g_{ccw} \right) \frac{P_{ccw}}{P_s} \right] \quad (4)$$

式中, $P_{cw} = P_{ccw} = P_{in}/2, g_0$ 为 SOA 小信号增益, P_c 为控制光功率, P_s 为 SOA 有源区的饱和功率。注入光功率将引发 SOA 内部载流子浓度变化, 载流子浓度的变化一方面会使光场获得一净增益, 另一方面会使光场的相位发生变化 [7]。增益与非线性相移差 $\Delta\phi$ 之间的关系为 [8]:

$$\frac{g_{cw}}{g_{ccw}} = \exp \left(-\frac{2\Delta\phi}{\alpha} \right) \quad (5)$$

式中, α 为 SOA 线宽增强因子。当信号光功率 P_{in} 固定时, P_c 的数值直接决定着 $\Delta\phi$ 的大小; 当 $\Delta\phi = \pi$ 为常数时, P_c 随 P_{in} 的增加单调增加。对非归零 (non-return-to-zero, NRZ) 调制方式的数字光信号而言, 帧周期内 P_{in} 恒定, 采用帧同步方式时, 方波形式的控制光脉冲其功率 P_c 也唯一, 帧周期内控制光与信号光之间的功率比值始终为常数, 这样就可以保证信号光脉冲各点的 NPD 都同时达到理想的 π 。但对于模拟光信号, 脉冲各点功率不再相同而是连续变化, 唯一的 P_c 将不能满足信号光脉冲各点的 $\Delta\phi$ 都同时达到 π 。

取 $g_0 = 18.3\text{dB}, P_s = 10.14\text{mW}$ (此 SOA 为 Inphenix 公司产品, SN: 860402059), $\alpha = 5.31$ [9], 当以图 3 中标注的脉冲峰值点 A 为参考点 (即 $P_{in} = 1\text{mW}$)、当 A 点处的 $\Delta\phi = \pi$ 时, 利用 (3) 式 ~ (5) 式可得所需的方波控制光脉冲功率为 $P_c = 3.313\text{mW}$ 。图 4 中给出了引入控制光后, 模拟信号光脉冲各点通过 SOA 时获

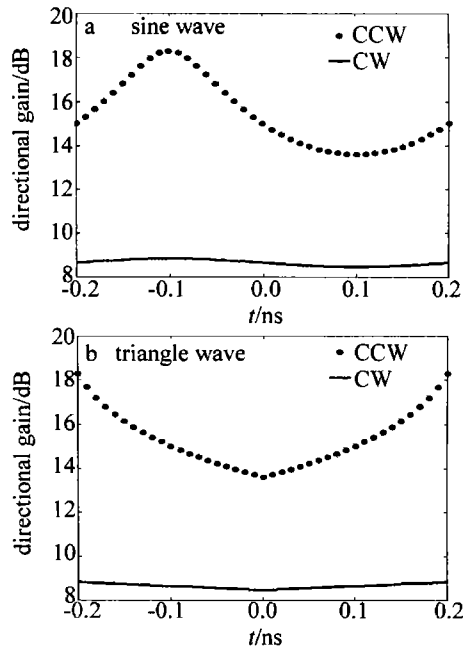


Fig. 4 The gain distribution of optical signal pulse under the condition of frame synchronization

得的增益分布。由图可明显看到, 不论是 CW 方向还是 CCW 方向的信号光, 其增益都不再像 NRZ 方式调制的数字光信号那样保持固定值, 而是出现了明显的波动。由于控制光和 CW 方向信号光始终同步, 控制

光的存在使 SOA 处于增益饱和状态,所以 CW 方向信号光的增益波动范围要远小于 CCW 方向信号光,图中的增益变化曲线较为平缓。由(5)式可知,信号光脉冲中各点的增益不一致,也预示着脉冲各点的非线性相移差各异,不可能同时达到 π 。

若加控制光时,以图 3 标注的脉冲中值 B 点、C 点和 D 点(即 $P_{in} = 0.5\text{mW}$)为参考点,这些点的 $\Delta\varphi = \pi$ 时所需注入的方波控制光脉冲功率为 2.009mW 。图 5 中给出了这两种情况下、采用帧同步方式时信号光脉

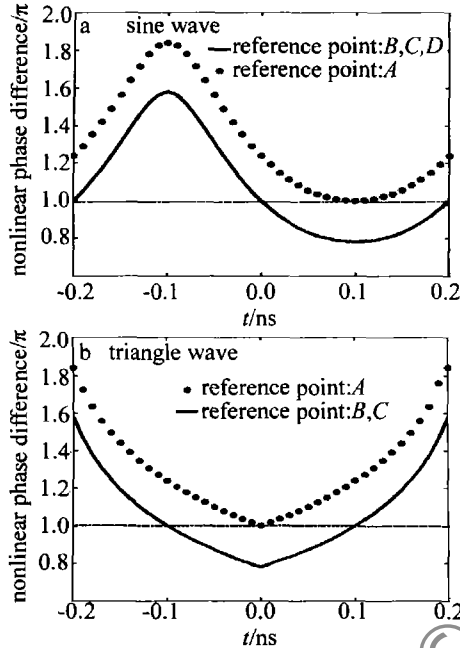


Fig. 5 The nonlinear phase difference distribution of optical signal pulse under the condition of frame synchronization

冲中各点的非线性相移差分布情况。由图可知,当以脉冲峰值点为参考点注入控制光,此时仅有峰值点的 NPD 为 π ,其余各点所加的控制光功率都大于其实际所需值,所以这些点的 NPD 均大于 π 。以信号光脉冲中值点为参考点时,同样只有中值点的 NPD 为 π ,功率大于 0.5mW 的信号脉冲点其 NPD 小于 π ,功率小于 0.5mW 的信号脉冲点其 NPD 则大于 π 。不论以何点为参考点,帧同步方式都不能使模拟信号光脉冲各点获得统一的 π 相移, NPD 同样会出现不同程度的波动。

相移对时间的依赖关系性可用啁啾描述,对正弦波,用(1)式、(3)式~(5)式计算可得其啁啾 $\delta\omega_{\text{sin}}$ 为:

$$\delta\omega_{\text{sin}} (\text{GHz}) = -\frac{\alpha}{2} \frac{5\pi\cos(5\pi \cdot t)}{4P_s} \times \left\{ \frac{1-g_{\text{CCW}}}{1+g_{\text{CCW}} \frac{\sin(5\pi \cdot t)+1}{4P_s}} - \frac{1-g_{\text{CW}}}{1+g_{\text{CW}} \frac{1}{4} \sin(5\pi \cdot t) + \frac{1}{4} + P_c} P_s \right\} \quad (6)$$

同理可得三角波的啁啾 $\delta\omega_{\text{triangle}}$:

$$\delta\omega_{\text{triangle}} (\text{GHz}) = \pm \frac{\alpha}{2} \frac{2.5}{P_s} \times \left\{ \frac{1-g_{\text{CCW}}}{1+g_{\text{CCW}} \frac{-5|t|+1}{2P_s}} - \frac{1-g_{\text{CW}}}{1+g_{\text{CW}} \frac{-2.5|t|+\frac{1}{2}+P_c}{P_s}} \right\}, \begin{cases} t < 0, \text{取} - \\ t > 0, \text{取} + \end{cases} \quad (7)$$

图 6 中给出了采用帧同步方式、以脉冲峰值点为参考

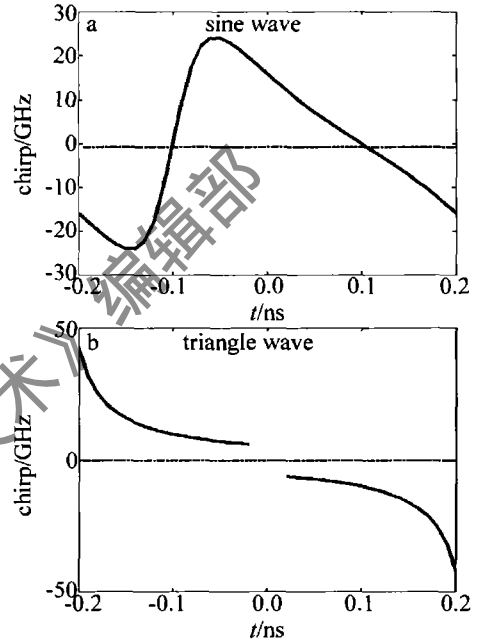


Fig. 6 The chirp distribution of optical signal pulse under the condition of frame synchronization

点时两种模拟光信号的啁啾分布。对正弦光信号,当 $|t| < 0.1$ 时, $\delta\omega_{\text{sin}} > 0$, 表现为蓝移; $|t| > 0.1$ 时, $\delta\omega_{\text{sin}} < 0$

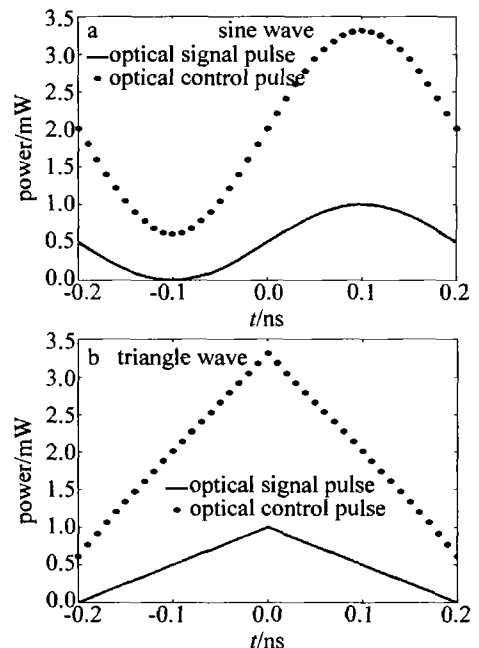


Fig. 7 The waveform comparison between needed optical control pulse and optical signal pulse under the condition of bit synchronization

0,表现为红移。对三角波而言,当 $t < 0$ 时, $\delta\omega_{\text{triangle}} > 0$,表现为蓝移; $t > 0$ 时, $\delta\omega_{\text{triangle}} < 0$,表现为红移, $t = 0$ 处为非连续点,故未表示该点啁啾。以脉冲中值点为参考点时啁啾分布情况和以峰值点为参考点时差别不大,两条曲线几乎重合。

若信号光和控制光之间采用比特同步方式,要想使信号光脉冲各点的NPD都同时达到 π ,计算得到的每比特信号光实际所需的控制光脉冲波形如图7所示。若信号光脉冲为正弦波,其控制光波形类似正弦波,峰值点功率3.313mW,中值点功率2.009mW。三角波所需的控制光脉冲同样为三角波,峰值点功率3.313mW,波形斜率为 ± 13.5 ,是信号光斜率的2.7倍。

2 结论

模拟光信号在SOA中进行交叉相位调制时,若仍采用数字光信号系统常用的帧同步方式,将导致信号光脉冲各点通过SOA时所获增益出现波动,进而导致脉冲各点的非线性相移差异,偏离各种全光处理器所要求的理想值。信号光和控制光之间采用比特同步方式,可使模拟光信号脉冲各点的非线性相移同时达到理想值,此时每比特信号光所需的控制光波形和信号光相似。对其它形式的模拟光信号如余弦波、锯

齿波等均有相似的结论。

参考文献

- [1] LIU A M, WU Ch Q, GONG Y D. Dual loop optical buffer (DLOB) based on 3×3 collinear fiber couple[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(9): 2129-2131.
- [2] ZHANG L J, WU Ch Q, LI Y J. Novel read/write independently controlled all-optical buffer based on dual-semiconductor optical amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(11): 1945-1949(in Chinese).
- [3] LIU A M, WU Ch Q, GONG Y D, *et al.* All-optical switch with double switched ports based on semiconductor optical amplifier [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(5): 28-31(in Chinese).
- [4] PAN W, ZOU L F, LUO B, *et al.* Theoretical study of all optical XOR using Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(3): 339-347(in Chinese).
- [5] YANG X L. Optical fiber communication system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 245-248(in Chinese).
- [6] YANG X L. Optical amplifier and its application [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2000: 108(in Chinese).
- [7] HENRY C. Theory of the linewidth of semiconductor lasers [J]. IEEE J Q E, 1982, 18(2): 259-264.
- [8] EISELT M, PIEPER W, WEBER H G. SLALOM: semiconductor laser amplifier in a loop mirror [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(10): 2099-2112.
- [9] GAO H L, WU Ch Q, LI Y J, *et al.* Measurement of linewidth enhancement factor of SOA using fiber Sagnac ring [J]. Optoelectronics Letters, 2006, 2(2): 142-144.
- [5] POLLOCK D H. The infrared & electro-optical systems handbook, volume 7: countermeasure systems [M]. Bellingham, Wash: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 77-140.
- [6] AN X Q, ZHU B, QING R Sh. Detective power of photoelectric imaging system on $1.06\mu\text{m}$ laser facula[J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 441-445(in Chinese).
- [7] ZHANG B D, QIN Sh Q, JIA H J, *et al.* Measurement model and uncertainty analysis of pulsed laser far field energy density based on CCD imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1417-1420(in Chinese).
- [8] DONG J H, HU Q Q. Analysis of working distance of CCD gaze imaging tracking system in space[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 173-177(in Chinese).
- [9] COLEMAN C I. Laser warning system: US, 2187335 [P]. 1987-09-03.
- [10] GUO Zh H, XU D Sh, WANG Sh P, *et al.* Effect of atmospheric turbulence on laser beam propagation[J]. Laser Technology, 1992, 16(2): 65-72(in Chinese).

(上接第560页)

的具体位置,这些因素都会对CCD的成像像素值有一定的影响,但对成像的趋势变化影响不大,因此,本文中的结论具有一定的参考价值,但在具体的使用中,还需根据所使用的CCD的型号及性能进行进一步的分析。

参考文献

- [1] YUAN X C. Application optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 179-180(in Chinese).
- [2] WANG Y Zh. Fish-eye lens optics [M]. Beijing: Science Press, 2006: 42-46, 61-64(in Chinese).
- [3] GE Q Sh, GE Q L, GONG Ch K. Research on sensitivity of vehicular laser warning device [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(4): 473-476(in Chinese).
- [4] ZHOU Zh L. Study on complete airspace staring laser threat imaging detection techniques [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2008: 20-25(in Chinese).