

基于半导体光放大器的光控器件中 控制光的性能分析*

李亚捷^{1)†} 吴重庆¹⁾ 王拥军¹⁾ 唐清善²⁾

1) 北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

2) 中国科学院声学研究所, 北京 100080)

(2006 年 3 月 30 日收到, 2006 年 9 月 28 日收到修改稿)

在 O-RPR (optical resilient packet ring) 光弹性分组环的基础上分析了在双环耦合全光缓存器这一基于半导体光放大器 (SOA) 的光控器件中要顺利实现数据的读写控制对光控制层功率提出的要求及其影响因素, 讨论了由于信号光脉冲形状不是理想方波而造成的啁啾及脉冲压缩现象, 分析了控制光功率波动及其信噪比对输出数据造成的影响. 得到的结论对其他基于 SOA 的光控器件同样具有借鉴意义.

关键词: O-RPR 光弹性分组环, 基于 SOA 的光控器件, 双环耦合全光缓存器, 控制层光功率

PACC: 4280S, 4265, 4290

1. 引言

全光网是通信网络发展的一个重要趋势, 要实现全光包交换, 需要解决的关键技术是要把所有由电子电路来完成的第一层 (物理层) 和第二层 (数据链路层 MAC 与 LLC) 的功能在光域内完成, 这意味着所有的被控器件必须是光控的, 例如光分组信头的识别与装配、冲突的解决、光信号的缓存、波长变换等. 在这些光控器件中, 有许多是以半导体光放大器 (SOA) 作为非线性元件, 利用其交叉相位调制 (XPM)、交叉增益调制 (XGM)、四波混频 (FWM) 等来实现光逻辑处理, 如基于 SOA 的全光开关逻辑门^[1]、基于 SOA 的全光缓存器^[2]以及基于 SOA 的波长变换器^[3]等. 已经有许多文献对这些器件的输入输出性能作了详细的分析^[4,5], 但对于控制光的性能要求分析较少, 通常认为控制光在控制过程中是理想的. 但在实际全光网中控制光不是来自理想光源而是来自其他逻辑器件, 因此控制光的性能不是十分理想, 分析控制光对于光控器件性能的影响从而降低对控制光的性能要求是非常重要的. O-RPR 光弹性分组环是我们提出的一种基于全光缓存器的包

交换技术, 在 O-RPR 中不仅用户数据直接在光域中被处理, 而且对其中的缓存器进行“读写”控制的也是光信号. 双环耦合全光缓存 (dual loop optical buffer, DLOB)^[6]是 O-RPR 的核心器件, 它就是一个利用在 SOA 中发生的 XPM 实现数据读写操作的光控器件. 本文将结合 DLOB 来讨论控制光的性能对于整个缓存器性能的影响. 内容包括对控制光的功率要求、由于信号码型不是理想方波而导致的啁啾及脉冲压缩现象, 此外还分析了控制光的功率波动对光控器件输出数据的影响. 本文得到的结论对其他基于 SOA 的光控器件同样具有借鉴意义.

2. DLOB 的工作原理

DLOB 利用一个 3×3 光纤耦合器的两侧端口经过光纤反馈构成双环^[7] (其结构见图 1), 耦合器的 2 端口作为信号的写入和读出端口. 偏离右环中心放置的 SOA 是用于产生相移的非线性元件, 其两侧的波分复用器 (WDM) 用于引入和导出控制光, 环中的偏振控制器 (PC) 用来调节信号光的偏振态. 当功率为 P_{in} 的信号光经由环行器进入到 3×3 光纤耦合器的 2 端口时, 它的分光比为 50:0:50, 也就是将被分

* 国家自然科学基金 (批准号: 60577020) 和北京交通大学优秀博士生科技创新基金资助的课题.

† E-mail: springyajie@126.com

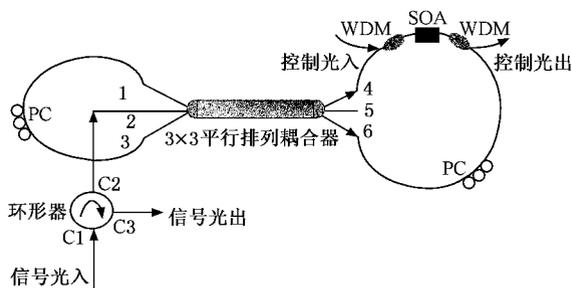


图1 双环耦合全光缓存器结构图

为等强度的两束光分别沿顺时针和逆时针方向在右侧光纤环中传输(分别记为 CW 和 CCW),此时和 CW 完全同步的控制光也经由 WDM 进入到光纤环. 经过 SOA 时由于 XPM 和 XGM 的作用,两束光将经历不同的相移和增益,可用光场复振幅所对应的复增益来表示:

$$g_{cw}(t) = |g_{cw}(t)| \exp[-j\varphi_{cw}(t)], \quad (1)$$

$$g_{ccw}(t) = |g_{ccw}(t)| \exp[-j\varphi_{ccw}(t)], \quad (2)$$

其中 $G_{cw} = |g_{cw}|^2$, $G_{ccw} = |g_{ccw}|^2$ 分别代表 CW 和 CCW 的(功率)增益, φ_{cw} , φ_{ccw} 是获得的非线性相移, 增益和相移之间的关系可表示为^[8]

$$\varphi_{cw} - \varphi_{ccw} = -\frac{\alpha}{2} \ln\left(\frac{G_{cw}}{G_{ccw}}\right), \quad (3)$$

记 $\varphi_{cw} - \varphi_{ccw} = \Delta\varphi$, 即在“写”控制光的作用下 CW 和 CCW 间产生 $\Delta\varphi$ 的相移差, 如果用 P 和 P' 分别表示进入和离开耦合器的光功率, 它们绕行右环一周返回耦合器干涉后的结果为

$$\begin{aligned} P'_1 &= P'_3 \\ &= \frac{1}{8} G_{ccw} K_1 P_{in}(t - t_1) \left[1 - 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos\Delta\varphi \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 α 是 SOA 的线宽增强因子, t_1 为右侧光纤环对应时间, K_1 代表右环的损耗(包括各器件的插入损耗, 左环仅由光纤构成, 损耗很小可以忽略). 实验中所使用的 SOA 其 $\alpha = 5.31$, 由(4)式可知当 $\Delta\varphi = 2.84$ 时, 1, 3 端口获得相等且最大的输出, 这样信号就被“写”入了 DLOB. 此后信号将会一直在 8 字形光纤环中环形, 这就是存储效应. 当信号被缓存 m 圈后需要被读出时, 控制层将会发出同步“读”控制脉冲, 此时 CW 和 CCW 间的相移差达到 $2\Delta\varphi$, 耦合器的干涉结果可表示为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\frac{\sqrt{2}}{8} E_{in}(t - mt_d) \sqrt{G_{ccw}^{m+1} K_1^{m+1}} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \exp(2i\Delta\varphi) \right) \\ \frac{1}{4} E_{in}(t - mt_d) \sqrt{G_{ccw}^{m+1} K_1^{m+1}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \exp(i\Delta\varphi) \right)^2 \\ -i\frac{\sqrt{2}}{8} E_{in}(t - mt_d) \sqrt{G_{ccw}^{m+1} K_1^{m+1}} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \exp(2i\Delta\varphi) \right) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 t_2 为左侧光纤环长对应时间, $t_d = t_1 + t_2$ 为信号被缓存一圈所对应的延迟时间, 读出信号的功率为

$$\begin{aligned} P'_2 &= \frac{1}{16} G_{ccw}^{m+1} K_1^{m+1} P_{in}(t - mt_d) \\ &\times \left\{ \left[1 - 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos\Delta\varphi \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \cos 2\Delta\varphi \right]^2 \right. \\ &\quad \left. + \left[\exp\left(-\frac{2\Delta\varphi}{\alpha}\right) \sin 2\Delta\varphi \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2\exp\left(-\frac{\Delta\varphi}{\alpha}\right) \sin\Delta\varphi \right]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

同样当 $2\Delta\varphi = 2 \times 2.84$ 时, P'_2 达到最大值, 这样信号将会从 2 端口经由环形器被读出.

3. 控制光所需的光功率分析

进行“写-读”操作时, 在同步控制光的作用下 CW 和 CCW 经过 SOA 时各自所经历的增益为

$$G_{cw} = G_0 \exp\left[\left(1 - G_{cw}\right) \frac{P_{cw} + P_c}{P_s}\right], \quad (7)$$

$$G_{ccw} = G_0 \exp\left[\left(1 - G_{ccw}\right) \frac{P_{ccw}}{P_s}\right], \quad (8)$$

G_0 , P_s 分别是 SOA 的小信号增益和有源层饱和功率, P_c 代表控制光功率. 当调节控制光功率使信号光间的相位差达到 2.84 时, 其增益差由(3)式可得

$$\frac{G_{cw}}{G_{ccw}} = \exp\left(-\frac{2 \times 2.84}{\alpha}\right), \quad (9)$$

利用(7)–(9)式就可计算出 DLOB 顺利进行“写-

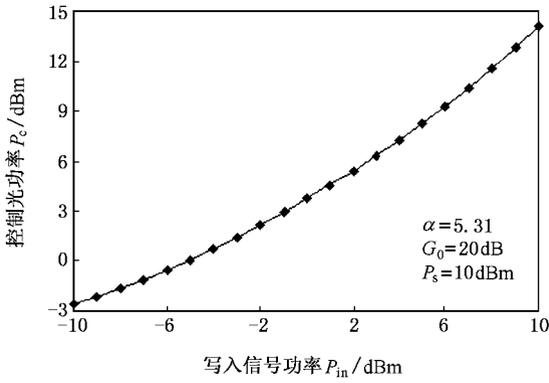


图 2 输入信号功率变化时所需控制光功率

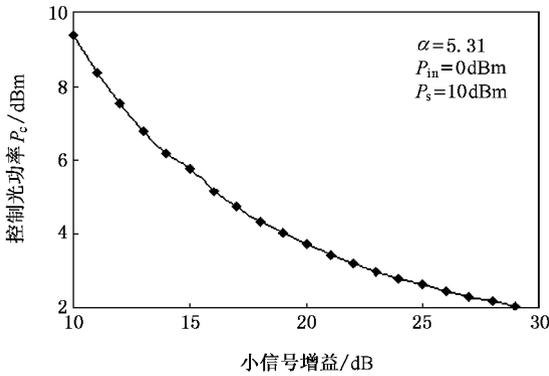


图 3 小信号增益变化时所需控制光功率

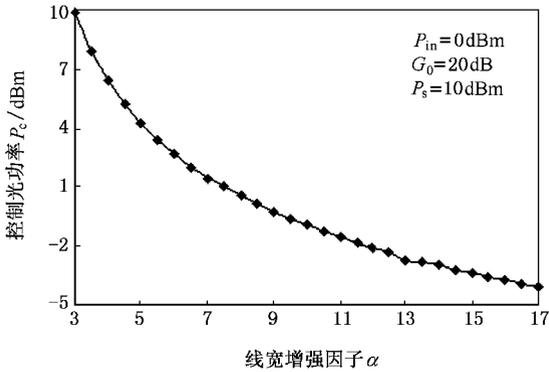


图 4 线宽增强因子变化时所需控制光功率

读”操作时所需要的控制光功率,其数值和 G_0, P_s 以及 P_{in} 相关联. 图 2 所示的是 SOA 线宽增强因子为 5.31, 小信号增益为 $G_0 = 20$ dB, 饱和功率 $P_s = 10$ dBm 的情况下所需控制光功率 P_c 随输入信号功率 P_{in} 的变化, 由图 2 可知随着 P_{in} 的增加, 进行读写操作所需要的控制光功率 P_c 也随之增加, 当 $P_{in} = 0$ dBm 时 $P_c = 3.73$ dBm. 图 3 给出了当 $\alpha = 5.31$,

$P_{in} = 0$ dBm, $P_s = 10$ dBm, SOA 小信号增益 G_0 变化时 P_c 的变化情况, 随着 G_0 的增加 P_c 呈下降趋势. 图 4 描述了在 $P_{in} = 0$ dBm, $G_0 = 20$ dB, $P_s = 10$ dBm 的情况下, 当 α 取不同数值时 P_c 的变化规律. 由图 4 可知 α 越大, 所需要的控制光功率 P_c 越小.

4. 控制光与信号光功率比引起的信号啁啾

定义 $\eta = P_c/P_{in}$ 为控制光与信号光功率的比值. 根据上述分析, 当 $P_{in} = 0$ dBm, $G_0 = 20$ dB, $P_s = 10$ dBm 时, $\eta = 3.73$ dB. 但此功率是针对信号脉冲的峰值功率而言的, 由于被存储的数据流不可能是理想的方波, 在脉冲边沿处的 η 将大于 3.73 dB, 这就造成了在同一功率控制光的作用下一个数据脉冲内各点产生的非线性相移不同, 亦即会出现啁啾现象. 考虑输入信号是如下形式的高斯、超高斯脉冲:

$$P_{in}(T) = P_{in} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right] \quad (n = 1, 2, 3),$$

其中 T_0 为脉冲半宽度(光强度峰值的 $1/e$ 处). 则 CW 信号光脉冲中各点经过 SOA 时在控制光作用下产生的非线性相移为

$$\Delta\varphi = \frac{\alpha}{2} \left\{ [1 - G_{cw}(T)] \frac{\frac{1}{2} P_{in} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right]}{P_s} - [1 - G_{cw}(T)] \frac{\frac{1}{2} P_{in} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right] + P_c}{P_s} \right\}, \quad (10)$$

由图 5 可以看出信号脉冲中心处的相移为 2.84, 前后沿由于功率的下降, 达到脉冲中心处相同的相移

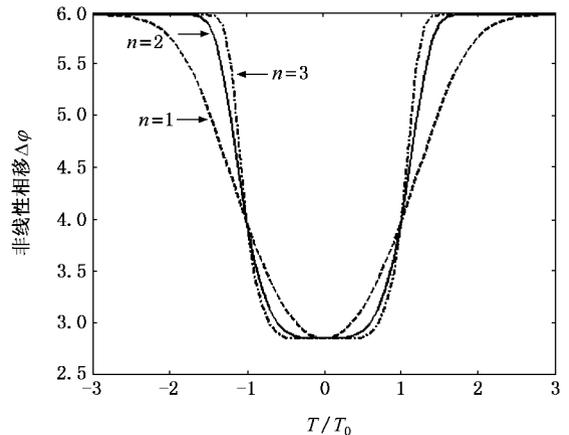


图 5 输入信号脉冲各点非线性相移 $\Delta\varphi$

所需要的控制光功率(见图 2)也随之下降,但实际上对其作用的控制光功率仍和脉冲中心处相同,这就

使得其相移大于 2.84. 啁啾描述为相移对时间的依赖关系:

$$\delta\omega = -\frac{\partial\Delta\varphi}{\partial T} = -\frac{\alpha}{2} \left\{ \frac{[G_{ccw}(T) - 1] \frac{nP_{in}}{T_0 P_s} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n-1} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right]}{1 + G_0 \frac{P_{in}}{2P_s} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right]} \exp\left\{ [1 - G_{ccw}(T)] \frac{\frac{1}{2} P_{in} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right]}{P_s} \right\} - \frac{[G_{cw}(T) - 1] \frac{nP_{in}}{T_0 P_s} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n-1} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right]}{1 + G_0 \frac{\frac{1}{2} P_{in} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right] + P_c}{P_s}} \exp\left\{ [1 - G_{cw}(T)] \frac{\frac{1}{2} P_{in} \exp\left[-\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2n}\right] + P_c}{P_s} \right\} \right\} \quad (11)$$

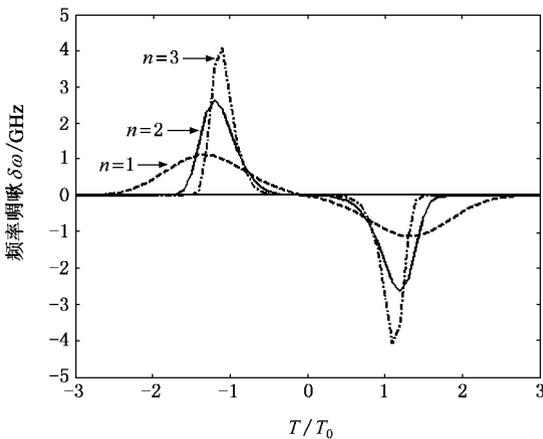


图 6 输入信号脉冲各点啁啾

图 6 给出了脉冲各点的啁啾特点 $\delta\omega$ 在前沿附近是正的(蓝移),到后沿附近则变为负的(红移);其次,当 $n=1$ 时,在脉冲中心较大的范围内啁啾是线性的,而当 n 不是 1 时,啁啾明显地发生在脉冲的前后沿,中间段基本很小;第三,对有较陡前后沿的

脉冲,其啁啾显著增大;第四,超高斯脉冲的啁啾仅发生在脉冲沿附近且不是线性变化.

由于脉冲各点所产生的相移有差异,由(6)式可知读出后脉冲各点的功率值和写入时相比较将会产生偏离,由于前后沿处的 $\Delta\varphi$ 大于 2.84,所以各对应点干涉时不能获得最大的读出光功率,其功率差值如图 7 所示,此偏离值随 n 的减小而增加,且在脉冲边沿达到最大,出现了脉冲压缩现象.图 8 是实验中观察到的 622 Mb/s 的数据包缓存一圈读出后 1 比特数据的细节,由此图可以清晰看到脉冲出现了压缩.为避免脉冲压缩,应尽量使写入的信号光脉冲形状接近理想方波.

5. 控制光功率波动及其信噪比对信号光的影响

在实际网络控制中必须考虑控制光功率自身波动对网络节点所带来的不良影响.图 9 给出了当控制光功率在所需功率值附近 $-21.64\% \sim -20.71\%$ 范

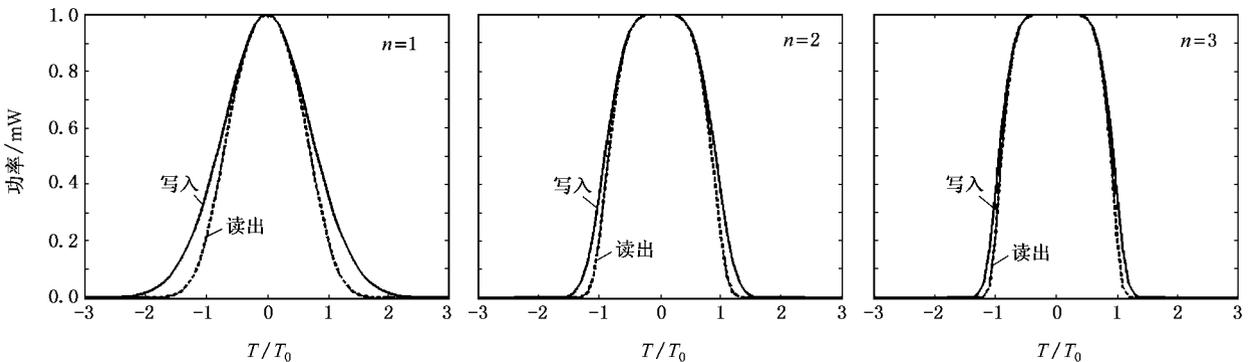


图 7 写入和读出脉冲的功率对比图

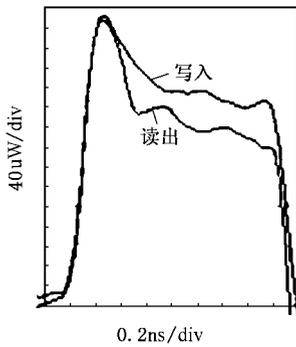


图 8 实验中观察到的脉冲压缩现象

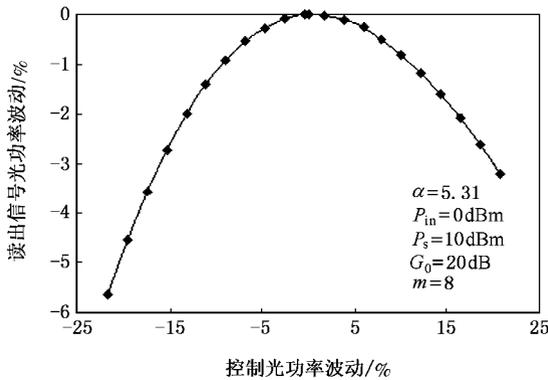


图 9 控制光功率波动时“读出”信号的功率波动

围内波动时输出的信号功率变化情况,对应的“读出”信号的光功率波动为 -5.64% — -3.19% ,且此范围将会随着控制光功率波动范围的增加而增加。

此外,上述的分析结果均是在控制光没有附加噪声的情况下得出的。若控制层发出的控制光本身附带一定功率 $P_{cn,0}$ 的噪声,当对数据进行“写”操作时,此噪声随控制光进入 SOA 后将会被进一步放大,当数据在 DLOB 中存储时当前圈被放大后的噪声将会成为下一圈的输入噪声再次被放大,如此循环累积最终使得读出信号的信噪比也随之降低。利用我们提出的分析 DLOB 噪声的简化模型可以计算出当控制光信噪比 $SNR_{control}$ 变化时信号光信噪比 SNR_{signal} 的变化情况^[9]。当信号缓存 m 圈时累积在环路内的噪声包括经过 SOA 时和信号光一起被放大的前一圈的噪声和当前圈所产生的新的加性噪声两部分,其功率和可用下式表示:

$$P_{n,m} = G_m G_{m-1} \dots G_1 K_1^m (P_{cn,0} + P_{sn,0}) + G_m G_{m-2} \dots G_2 K_1^m P_{na,1} + \dots + G_m K_1^2 P_{na,m-1} + K_1 P_{na,m}, \quad (12)$$

其中 $P_{na,m}$ 是信号缓存第 m 圈时光纤环路产生的加性噪声,其值可由下式计算:

$$P_{na,m} = \left[\left(\frac{G_m}{1 - G_m} - 2G_m n_{sp} \right) \ln \left(\frac{G_m}{G_0} \right) P_{\Delta\nu} P_s \right]^{1/2}, \quad (13)$$

其中, n_{sp} 是 SOA 的自发辐射因子, $P_{\Delta\nu} = h\nu\Delta\nu$ 是“滤波器带宽内(亦即 WDM 带宽范围内)的光子平均功率, $P_{sn,0}$ 为写入信号的附加噪声, G_m 是考虑噪声后第 m 圈的环路增益。而此时环内的信号可表示为

$$P_{s,m} = G_m G_{m-1} \dots G_1 K_1^m P_{s,0}, \quad (14)$$

在实验中所使用的 SOA 其 $n_{sp} = 1.6$, 环路中 WDM 的带宽 $\Delta\nu = 50$ GHz。当 $m = 8$, $P_{in} = 0$ dBm, 写入信号信噪比为 30 dB 时具体计算结果如图 10。若控制光所附带的噪声功率为 0 时,则 $SNR_{signal} = 23.473$ dB, 当 $SNR_{control} = 35$ dB 时 SNR_{signal} 下降为 23.25 dB。随着 $SNR_{control}$ 的降低 SNR_{signal} 也迅速减小,当 $SNR_{control} = 10$ dB 时, SNR_{signal} 已下降到了 6 dB, 此时下一节点的接收单元已无法正确接收 DLOB 缓存后输出的数据。为使得网络的误码率 $BER < 10^{-9}$, 必须满足 $SNR_{control} > 25$ dB。

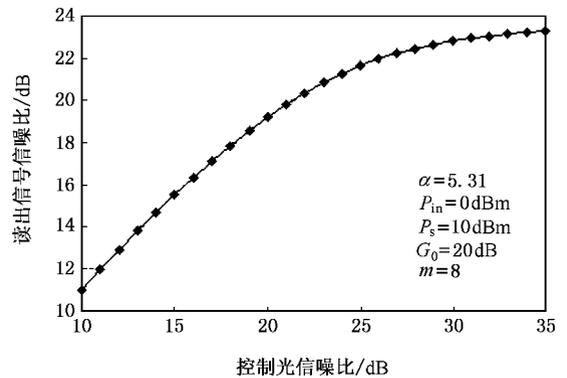


图 10 控制光信噪比变化时读出信号信噪比的变化情况

6. 结 论

由以上分析可知在 O-RPR 中要顺利实现数据包在光域内的缓存对控制层光功率提出了一定的要求,且适当选取小信号增益及线宽增强因子数值大的 SOA 可以有效降低所需要的控制光功率。此外,写入信号光脉冲形状不是理想的方波会造成各点非线性相移不一致从而出现啁啾及脉冲压缩现象。文章还讨论了控制光功率波动及信噪比对读出信号光的影响, $SNR_{control}$ 必需大于 25 dB 才能保证网络的误

码率 $BER < 10^{-9}$. 这些结论对其他基于 SOA 的光控器件同样具有借鉴意义.

- [1] Pereira A A , Martinez M A G 2003 *Proceedings SBMO/IEEE MIT-S IMOC* 2003 p657
- [2] Langenhorst R , Eiselt M 1996 *J. Lightwave Tech.* **14** 324
- [3] Stubkjaer K E , Durhuus T 1994 *ECOC '94* p635
- [4] Zhang X L , Dong J J , Wang Y , Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2066 (in Chinese)[张新亮、董建绩、王颖、黄德修 2005 物理学报 **54** 2066]
- [5] Zhang X L , Sun J Q , Liu D M , Huang D X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741 (in Chinese)[张新亮、孙军强、刘德明、黄德修 2000 物理学报 **49** 741]
- [6] Liu A M , Wu C Q 2004 *Photonics Tech. Lett.* **16** 2129
- [7] Liu A M , Wu C Q 2003 *Conference on the Optical Internet (COIN)* p373
- [8] Eiselt M , Pieper W 1995 *J. Lightwave Tech.* **13** 2099
- [9] Li Y J , Wu C Q *Journal of Optoelectronics laser.* accepted (in Chinese)[李亚捷、吴重庆 光电子激光 已接收]

Performance analysis of control pulse in optical controlled apparatus based on semiconductor optical amplifier^{*}

Li Ya-Jie^{1)†} Wu Chong-Qing¹⁾ Wang Yong-Jun¹⁾ Tang Qing-Shan²⁾

1) (*Institute of Optical Information , School of Science , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China*)

2) (*Institute of Acoustics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

(Received 30 March 2006 ; revised manuscript received 28 September 2006)

Abstract

On the basis of optical resilient packet ring (O-RPR) , this paper analyzes the control optical power needed for dual loop optical buffer (DLOB) to achieves ' write-read ' successfully , and discusses the influencing factors on this power. Then we discuss the pulse compression and chirp caused by the signal pulse not being ideally square , and analyze the influence of power fluctuation and signal-to-noise ratio (SNR) of control light on output data.

Keywords : optical resilient packet ring (O-RPR) , optical controlled apparatus based on SOA , dual loop optical buffer , optical power of control layer

PACC : 4280S , 4265 , 4290

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577020) and the Foundation of Beijing Jiaotong University for outstanding Ph. D. .

[†] E-mail : springyajie@126.com