

doi: 10.3788/gzxb20134201.0038

基于功率转移函数的全光整形器性能评估

安俊鸽, 武保剑, 周星宇

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

摘 要: 基于输入/输出功率转移函数的线性化三段模型, 考察了全光整形器性能的理论评价方法, 通过构建一个光纤四波混频整形仿真系统, 验证了这种方法的合理性. 分析了高斯分布的输入信号对全光整形器输出性能的影响. 根据输入信号特性, 将转移函数曲线由低到高分为五个区域, 当信号“1”的均值落在第五区域时可获得较高的品质因数数值和误码率性能的提升. 最佳工作状态下, 随着转移函数中间段斜率的增加, 全光整形器输出信号品质因数数值和误码率性能的提升会趋于饱和, 但消光比有一个线性的增加.

关键词: 全光整形器; 转移函数; 四波混频; 性能评估

中图分类号: O437.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)01-0038-5

Assessment of Performance for All-optical Reshapers Based on the Power Transfer Function

AN Jun-ge, WU Bao-jian, ZHOU Xing-yu

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications of the Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: According to the linearized three-section model of input/output power transfer function (TF), the theoretical assessment method of all-optical reshapers' performance is investigated and verified by simulation of four-wave-mixing-based scheme. The performance of all-optical reshapers dependent on the input signal of Gaussian distribution is analyzed. The transfer function is divided into five regions from low to high power levels, and a larger improvement of quality factor or BER performance can be obtained for the cases that the average level of mark pulses exists in the fifth region. With the increase of the TF's second-section slope for a desirable reshapers, the gain saturation of quality factor or BER performance will occur and the extinction ratio will be improved linearly.

Key words: All-optical reshapers; Transfer function; Four wave mixing; Assessment of performance

0 引言

在长距离高速光纤通信系统中, 光放大器的自发辐射噪声、群速度色散、偏振模色散和非线性效应等会影响信号的传输质量. 当信号劣化到一定程度, 又要在光网络中继续传输或交换时, 往往需要光中

继再生. 目前较为成熟的是“光-电-光”转换再生方案, 但存在潜在的“电子瓶颈”, 限制了信号速率, 因此全光再生在高速乃至超高速光传输系统有着重要的应用前景^[1]. 全光 2R(Reshape, Reamplify, 2R)再生是指在光域对信号同时进行再整形(Reshape)和再放大(Reamplify)的技术^[2-3], 其中, 实现全光整形

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB301703)、国家高技术研究发展计划(No. 2012AA011304)和国家自然科学基金(No. 61271166)资助

第一作者: 安俊鸽(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信. Email: anjunge_work@163.com

导 师: 武保剑(1970-), 男, 博导, 教授, 主要研究方向为光通信. Email: bjwu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2012-09-10; **录用日期:** 2012-09-21

的技术主要有^[4-8]:1)基于高非线性光纤(High Nonlinear Optical Fiber, HNLF)中自相位调制(Self Phase Modulation, SPM)、交叉相位调制(Cross Phase Modulation, XPM)、四波混频(Four Wave Mixing, FWM)等非线性效应;2)基于半导体光放大器效应(Semiconductor Optical Amplifier, SOA);3)基于电吸收调制器(Electrical Absorption Modulator, EAM)效应等.另一方面,如何有效评价全光再生器性能也成为人们关注的问题.文献[9]理论研究了2R再生器级联对光纤传输系统性能的影响,提出了全光2R再生器转移函数(Transfer Function, TF)的三段模型;本文研究了四波混频实现方案中光纤损耗对全光2R再生器性能的影响,分析了转移函数(TF)与输入信号噪声抖动容限之间的匹配问题^[10].

本文关注全光整形器性能评估方法,其目的是通过一套有效的方法获取与全光整形器性能指标相联系的物理信息,并证明其可靠性,进而优化全光2R再生器的具体实现方案.本文将通过概率密度函数(Probability Density Function)分析全光整形器输入/输出信号的品质因数(Q值)、消光比(R)和误码率(BER)性能,并建立转移函数与性能指标之间的联系.然后,采用OptiSystem仿真软件构建了基于四波混频的全光2R再生系统,验证了上述分析过程的正确性.最后,讨论了全光整形器的输入特性,给出了输入信号与转移函数匹配时,转移函数曲线陡峭程度对全光整形器性能的影响.

1 全光整形器的理论模型

在长距离光纤传输系统中,级联设计的全光2R再生段由整形单元、光放大器、传输光纤三个基本功能单元组成(如图1所示).其中整形单元可基于光纤和半导体等多种非线性介质实现,其核心是提供非线性的输入输出功率转移函数关系;光放大器单元,一方面补偿整形单元对输入信号功率的衰减,另一方面执行全光2R再生器的再放大功能,将功率提升到所需的输出电平要求;传输光纤的作用是将光信号进行长距离传输,同时也是损耗、色散、非线性等劣化因素的来源.在全光2R再生器级联设计时,每一级再生段的输入光信号功率通常都相等.本

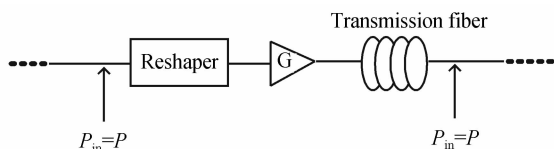


图1 全光2R再生段模型
Fig. 1 Model of all-optical 2R regenerators

文只研究实现全光2R再生器的整形单元性能,其转移函数(TF)采用三段线性模型来简化分析.

一般而言,全光2R再生器的输入“0”和“1”电平的功率值 x 不是常量,而是具有一定概率分布,其概率密度函数(PDF)通常假设为高斯分布^[9],即

$$p_{in}(x) = g(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中 μ 和 σ 是输入信号电平上的均值和方差.经过非线性的“S”型转移函数 $y = T(x)$ 后,输出信号电平 y 的概率密度函数不再是高斯分布,它与输入PDF之间满足式(2)的关系.

$$p_{in}(x)dx = p_{out}(y)dy \quad (2)$$

代入转移函数得到

$$p_{in}(x)dx = p_{out}(y)T'(x)dx \quad (3)$$

即

$$p_{out}(y) = p_{in}(x)[T'(x)]^{-1} \quad (4)$$

将 $x = T^{-1}(y)$ 代入式(4)得输出PDF为

$$p_{out}(x) = p_{in}[T^{-1}(x)][T'[T^{-1}(x)]]^{-1} \quad (5)$$

为简化分析,将整形单元的转移函数按线性化的三段模型处理,每段上的转移函数用如下直线方程表示^[9]为

$$y = k_i x + y_i, (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

式中, k_i 和 y_i 分别为直线的斜率和截距,下标 $i=1, 2, 3$ 依次对应于三个直线段,它们之间的连接点分别记为 (x_a, y_a) 和 (x_b, y_b) ,即 $x_a = -(y_2 - y_1)/(k_2 - k_1)$, $x_b = -(y_3 - y_2)/(k_3 - k_2)$.将式(6)带入式(5),可得空号(space)和传号(mark)输出信号的PDF分别为

$$p_{out}^s(y) = g(y, \mu_y^{s,1}, \sigma_y^{s,1})H(y - y_a) + g(y, \mu_y^{s,2}, \sigma_y^{s,2})H(y - y_b) \quad (7)$$

$$p_{out}^m(y) = g(y, \mu_y^{m,2}, \sigma_y^{m,2})H(y - y_b) + g(y, \mu_y^{m,3}, \sigma_y^{m,3})H(y - y_b) \quad (8)$$

式中, $H(x)$ 是单位阶跃函数, $\mu_y^{s(m),i} = k_i \mu_x^{s(m)} + y_i$, $\sigma_y^{s(m),i} = k_i \sigma_x^{s(m)}$, $\mu_x^{s(m)}$ 和 $\sigma_x^{s(m)}$ 分别为对应于输入“0”和“1”功率电平的均值和方差.由于输出信号的PDF不满足高斯分布,因此对于输出信号的均值和方差需要通过定义式(9)来计算.

$$\mu_{out}^{s(m)} = \int_{-\infty}^{+\infty} y p_{out}^{s(m)}(y) dy \quad (9)$$

$$\sigma_{out}^{s(m)} = \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \mu_{out}^{s(m)})^2 p_{out}^{s(m)}(y) dy$$

根据以上各式,也就将参量转移函数里面的参量反映到输出信号的PDF上,在给定输入“0”和“1”电平的均值和方差时,通过全光整形器模型,就可以计算出输出“0”和“1”电平的PDF,而品质因数、消光比和误码率(其中误码率也与阈值有关)都与PDF相关,继而可以计算输出信号性能指标的数

值.

品质因数定义为^[11]

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (10)$$

其中 $\mu_{0(1)}$ 是“0”和“1”电平功率的均值, $\sigma_{0(1)}$ 是“0”和“1”电平功率的方差.

消光比定义为

$$R = \mu_1 / \mu_0 \quad (11)$$

误码率定义为^[9]

$$\text{BER}(y_{\text{th}}) = \frac{1}{2} \left[\int_{y_{\text{th}}}^{+\infty} p_{\text{out}}^s(y) dy + \int_{-\infty}^{y_{\text{th}}} p_{\text{out}}^m(y) dy \right] \quad (12)$$

式中 $p_{\text{out}}^s(y)$ 和 $p_{\text{out}}^m(y)$ 分别是经过全光整形器模型以后空号和传号电平的 PDF 表达式; $y_{\text{th}} = (\mu_1 + \mu_0) / 2$ 是选取的判决电平.

眼图高度定义为

$$E_H = (\mu_1 - 3\sigma_1) - (\mu_0 - 3\sigma_0) \quad (13)$$

眼图幅度定义为

$$E_A = \mu_1 - \mu_0 \quad (14)$$

由以上分析可知, 利用式(10)、(11)、(13)、(14)

可以计算出空号和传号电平的均值和方差为

$$\mu_0 = \frac{E_A}{R-1}; \sigma_0 = \frac{E_A}{2Q} - \frac{E_A - E_H}{6} \quad (15)$$

$$\mu_1 = E_A + \frac{E_A}{R-1}; \sigma_1 = \frac{E_A}{2Q} + \frac{E_A - E_H}{6} \quad (16)$$

这样, 利用式(15)和(16), 可将实际测量或仿真中给出的性能参量结果与理论分析方法联系起来. 下面将利用 OptiSystem 仿真软件搭建了一个基于光纤四波混频(FWM)效应的全光整形器系统, 来验证上述理论分析方法的可靠性.

2 OptiSystem 软件仿真验证

基于四波混频的全光整形方案主要有两种实现方式, 即高功率泵浦光分别为辅助的连续光(Continuous Light, CW)^[2-3]和待整形的信号光^[12]. 本文以后者为例, 搭建了如图2所示的仿真系统. 工作波长为 1 549.3 nm 的 10Gbps RZ-OOK 信号源, 经过掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) ASE 噪音的劣化后作为待整形信号, 进入全光整形器模块, 与波长为 1 557.3 nm 的连续泵浦光耦合进高非线性光纤中, 发生简并四波混频(Degenerate Four Wave Mixing, DFWM), 在光纤传输的末端经过光带通滤波器滤出波长为 1 541.3 nm 的闲频光, 作为整形输出信号. 通过眼图分析仪可观察该全光整形器输入、输出信号的波形, 如图3所示, 输出的空号和传号电平上的噪音均得到了一定的压缩, 可以观察到比较明显的整形效果. 具体的仿真参量如表1所示.

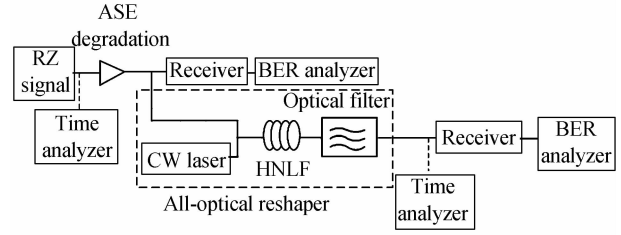


图2 基于四波混频的全光整形器及其 OptiSystem 仿真系统
Fig. 2 OptiSystem simulation system for all-optical reshaper based on four wave mixing

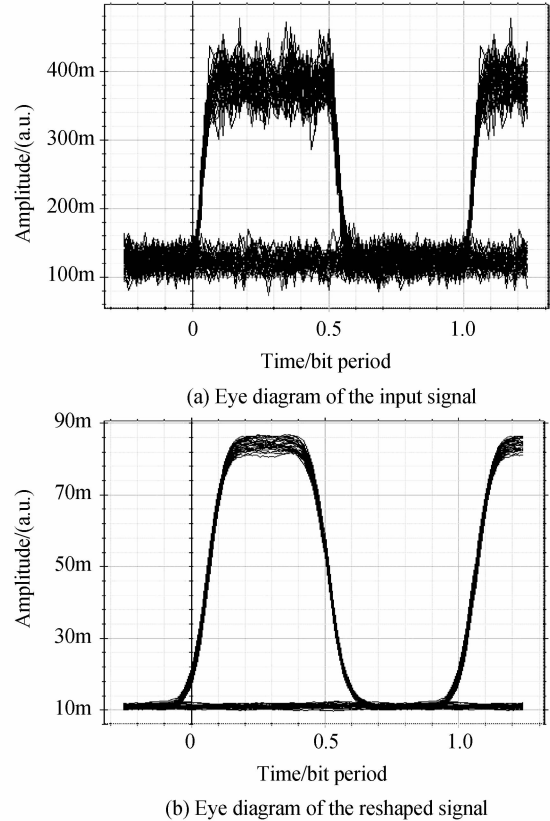


图3 全光整形器的 OptiSystem 仿真结果
Fig. 3 OptiSystem simulation results for the all-optical reshaper

表1 OptiSystem 仿真系统的参量取值

Parameter	Value
Fiber length; L/km	1.01
Fiber loss; $\alpha/(\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$	0.936
Zero dispersion wavelength; λ_0/nm	1 556
Effective area; $A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	12.692 3
Refractive index; $n_2/(\text{m}^2 \cdot \text{w}^{-1})$	$3.457 5 \times 10^{-20}$
Dispersion slope; $S(\text{ps} \cdot \text{nm}^2 \cdot \text{km}^{-1})$	0.016 8
Input signal power; P_1/mW	600
CW laser power; P_2/mW	5

在上述 OptiSystem 仿真中, 输入信号光从 1 mW 变化到 600 mW, 用时域分析仪分别记录下信号脉冲随时间变化的峰值功率, 通过提取采样点处的信号功率值可得到输入/输出信号功率的“S”型转移函数, 如图4所示. 图中还给出了对应的线性化

三段转移函数曲线,相应的连接拐点以最大输出闲频光功率 $P_{\text{out}}^{\text{max}}$ 为基准给出,即 $y_b = 0.9P_{\text{out}}^{\text{max}}$ 和 $y_a = 0.1P_{\text{out}}^{\text{max}}$, 并取 $k_1 = k_3$. 从眼图分析仪上读取输入信号的性能参量,利用公式(15)和(16)可计算出输入信号的性能参量,同时作为上述理论分析方法的输入条件,进而利用式(10)~(14)计算输出信号的性能指标,结果如表 2 所示,与该四波混频整形系统的 OptiSystem 仿真输出结果相比,理论计算误差小于 10%.

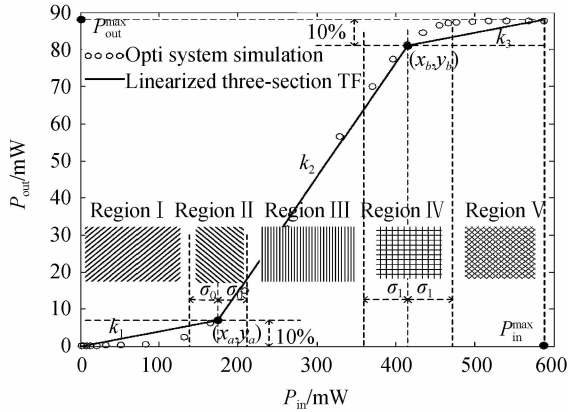


图 4 转移函数及其线性化三段模型

Fig. 4 Transfer function and linearized three-section model

表 2 理论分析与 OptiSystem 仿真结果的比较

Table 2 Comparison of theoretical analysis and OptiSystem simulation

Parameters	Input data	Output results	
		OptiSystem simulation	Theoretical analysis
Q	5.29	13.29	12.52
R	3.13	8.14	7.51
log(BER)	-7.82	-12.16	-11.43
E_H/mW	156.86	67.74	67.28
E_A/mW	258.98	73.09	72.65

3 全光整形器的输入特性

在线性化三段转移函数曲线基础上,增加区域 $x_a \pm \sigma_0$ 和 $x_b \pm \sigma_1$, 即将转移函数从低到高划定五个区域,“0”和“1”的均值可分别落在区域(I)、(II)、(III)和区域(III)、(IV)、(V),如图 4 所示. 图 5 和表 3 给出了相对于转移曲线而言、具有不同高斯分布的输入信号对全光整形器输出信号品质因数、消光比、误码率的影响,其中输入空号和传号的方差分别为 $\sigma_0 = 10 \text{ mW}$ 和 $\sigma_1 = 26 \text{ mW}$. 对输入信号的 9 种组合特性分析可知,消光比的改善 $\Delta R = R_{\text{out}} - R_{\text{in}}$ 会依次减小;当传号的均值落在第五区域时可获得较高的 Q 值和误码率性能的提升(用 $\Delta Q = Q_{\text{out}} - Q_{\text{in}}$ 和 $\Delta \log(\text{BER}) = \log(\text{BER}_{\text{out}}) - \log(\text{BER}_{\text{in}})$ 表示),而且两者的改变也是一致的. 显然,待整形高斯信号的空号和传号均值分别落在区间(I)和(V)时(对应于

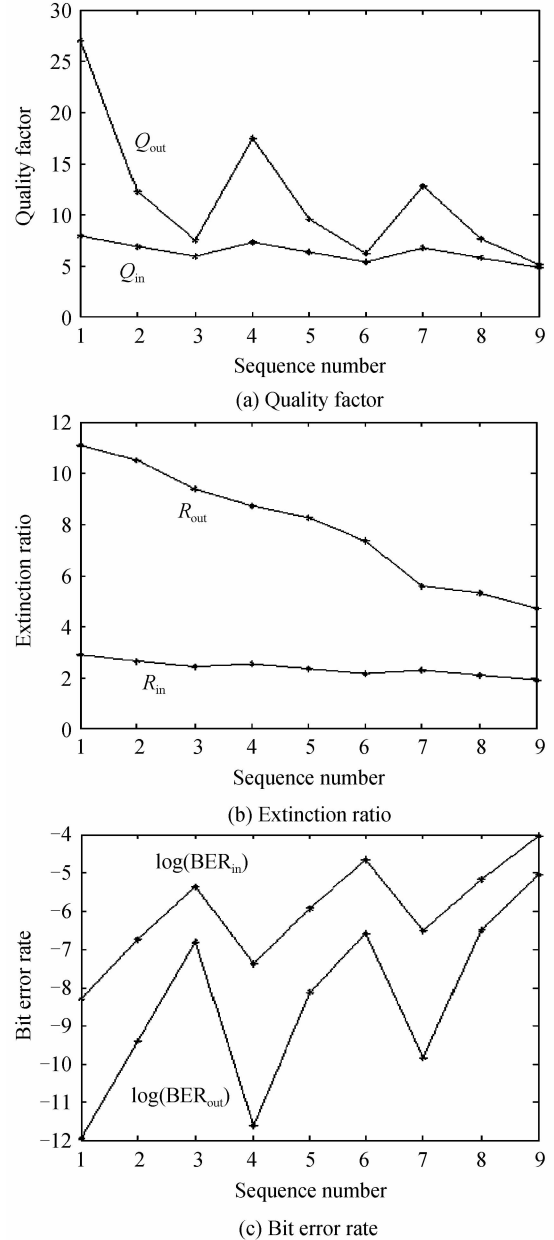


图 5 九种组合输入特性对全光整形器性能的影响

Fig. 5 Performance of the all-optical reshaper for nine typical input signals

表 3 输入信号的九种组合类型与全光整形器性能的提升
Table 3 Performance improvement of the all-optical reshaper for nine typical input signals

Sequence number	(Region μ_0 (mW), Region μ_1 (mW))	ΔR	ΔQ	$\Delta \log(\text{BER})$
1	(I, V) $\mu_0 = 150; \mu_1 = 435$	8.21	19.18	-3.65
2	(I, IV) $\mu_0 = 150; \mu_1 = 400$	7.87	5.33	-2.66
3	(I, III) $\mu_0 = 150; \mu_1 = 365$	6.95	1.57	-1.44
4	(II, V) $\mu_0 = 170; \mu_1 = 435$	6.17	10.12	-4.25
5	(II, IV) $\mu_0 = 170; \mu_1 = 400$	5.93	3.19	-2.21
6	(II, III) $\mu_0 = 170; \mu_1 = 365$	5.23	0.82	-1.92
7	(III, V) $\mu_0 = 190; \mu_1 = 435$	3.31	6.01	-3.34
8	(III, IV) $\mu_0 = 190; \mu_1 = 400$	3.21	1.83	-1.32
9	(III, III) $\mu_0 = 190; \mu_1 = 365$	2.81	0.24	-1.03

表3中的第1种情况,即转移函数的平缓区间),全光整形器具有最佳的工作状态,整形效果最好,或者说输入信号与转移函数完全匹配。

在图4所示的线性化三段转移函数基础上,只改变 y_b 的大小,可使转移函数曲线中间段斜率 k_2 发生变化。在最佳工作状态下(第1种信号输入情形),整形输出信号的性能改善随 k_2 的变化规律如图6所示,可以看出,随着转移函数中间段斜率的增加,全光整形器输出信号Q值和误码率性能的提升会趋于饱和,但消光比有一个线性的增加。

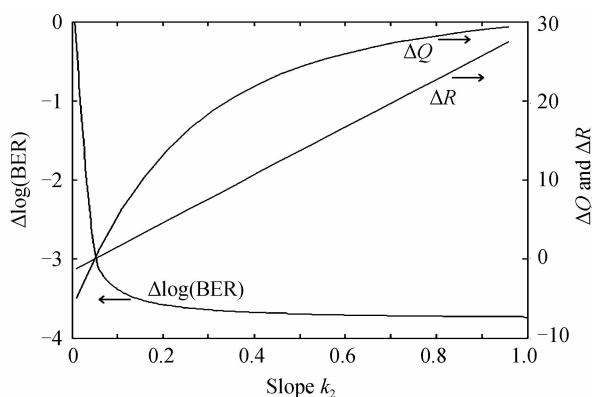


图6 转移函数斜率 k_2 对全光整形器性能指标的影响

Fig. 6 The slope dependences of the all-optical reshaper's performance

4 结论

本文研究了一种基于功率转移函数的全光整形器性能评估方法,建立了转移函数三段线性化的理论模型,得到输入、输出信号概率密度函数(PDF)之间的解析转换关系。其优点在于一方面能解析的求出消光比、品质因数和误码率等衡量信号质量的参量;另一方面转移函数三段线性的方法能够清晰地体现再生器降低幅度抖动,提高消光比对应的物理含义,具有很强的代表性。并利用转移函数的三段直线模型,讨论了输入信号与转移函数之间的匹配特性,整形器在有限的输入信号情形下才会表现出一定的再生能力,在整形器最佳工作状态下,计算了输出信号性能对转移函数陡峭斜率 k_2 的依赖关系,随着 k_2 的逐渐增大,全光整形器输出信号Q值和误码率性能的提升会趋于饱和,但消光比有一个线性的增加。本文研究了一种有效的通过传递函数分析再生器性能的方案,对基于四波混频(FWM)效应的全光再生系统的优化具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] WEI Yan-fen, ZHANG Xia, XU Yong-zhao, *et al.* All-optical regeneration based on highly nonlinear microstructured fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 414-418.
卫艳芬,张霞,徐永钊,等. 基于高非线性微结构光纤的全光再生研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 414-418.
- [2] CIARAMELLA E, TRILLO S. All-optical signal reshaping via four-wave mixing in optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(7): 849-851.
- [3] CIARAMELLA E, TRILLO S. All-optical signal reshaping by means of four-wave mixing in optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(2): 142-144.
- [4] HAN Bing-chen, YU Jin-long, LUO Jun, *et al.* Experimental research on dual wavelength all-optical decision based on fiber-optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1576-1580.
韩丙辰,于晋龙,罗俊,等. 利用光参变放大同时实现双波长全光判决的实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1576-1580.
- [5] HAN Bing-chen, YU Jin-long, LUO Jun, *et al.* Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(11): 2962-2965.
韩丙辰,于晋龙,罗俊,等. 基于光纤光参量放大的多通道全光非归零/归零码转换器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2962-2965.
- [6] DONG Jian-ji, ZHANG Xin-liang, HUANG De-xiu. Experimental study of wavelength conversion at various modulation formats based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1327-1332.
董建绩,张新亮,黄德修,等. 基于半导体光放大器四波混频效应的多种调制格式的波长转换实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1327-1332.
- [7] TANEMURA T, LEE Ju, WANG De-xiang, *et al.* Polarization-insensitive 160-Gb/s wavelength converter with all-optical repolarizing function using circular-birefringence highly nonlinear fiber [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(4): 1408-1412.
- [8] ROCHETTE M, KUTZ J N, BLOWSL J L, *et al.* Bit-error-ratio improvement with 2R optical regenerators [J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(4): 908-910.
- [9] HAINBERGER R, HOSHIDA T, WATANABE S, *et al.* BER estimation in optical fiber transmission systems employing all-optical 2R regenerators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(3): 746-754.
- [10] AN Jun-ge, WU Bao-jian, LI Zhi, *et al.* Influence of fiber loss on optical parametric process with pump depletion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0619001.
安俊鸽,武宝剑,李智,等. 光纤损耗对抽运消耗光纤参变过程的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0619001.
- [11] DOWNIE J D. Relationship of Q penalty to eye-closure penalty for NRZ and RZ signals with signal-dependent noise [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(6): 2031-2038.
- [12] BOGRIS A, SYVRIDIS D. Regenerative properties of a pump-modulated four-wave mixing scheme in dispersion-shifted fibers [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(9): 1892-1902.