

# 多电平全光幅度再生器的整形特性

蒋尚龙, 武保剑, 孙 凡, 孔祥健, 邱 昆

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

**摘要** 提出用线性增益和增益斜率分别表征多电平全光幅度再生器的放大和整形特性。利用多电平全光幅度再生器的增益斜率曲线,可确定再生器的整形范围、最佳工作点以及可再生电平数目。重点分析了基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的多电平全光幅度再生器整形特点,其增益斜率曲线是一个余弦振荡函数,信号振幅越小,可再生电平数就越多。结果表明,脉冲幅度调制信号经过 MZI 多电平全光幅度再生器后,幅度噪声可得到有效抑制,但相位抖动增加。

**关键词** 光学器件; 多电平全光幅度再生器; 线性增益; 增益斜率; 噪声抑制

**中图分类号** O437.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.052303

## Reshaping Characteristics of Multilevel All-Optical Amplitude Regenerators

Jiang Shanglong, Wu Baojian, Sun Fan, Kong Xiangjian, Qiu Kun

*Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication Networks (Education Ministry of Education),  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China*

**Abstract** Linear gain and gain slope are proposed to describe the amplification and reshaping characteristics of multilevel all-optical amplitude regenerators. The reshaping range, the optimal operating point, and the number of regenerative levels can be determined based on the gain slope curve of the multilevel all-optical amplitude regenerators. We focus on Mach-Zehnder interferometer (MZI)-based multilevel all-optical amplitude regenerator with a gain slope curve of cosine oscillation. The smaller the signal oscillating amplitude is, the more the regenerative level numbers are. The results show that the amplitude noise of pulse-amplitude-modulating signal which is through MZI multilevel all-optical amplitude regenerator can be suppressed greatly, while the phase jitter is increasing.

**Key words** optical devices; multilevel all-optical amplitude regenerator; linear gain; gain slope; noise suppression

**OCIS codes** 230.1150; 200.4740

## 1 引 言

云计算、大数据和移动互联网等技术的蓬勃发展对核心网中的传输带宽以及频谱效率提出了更高的要求,数字调制格式正从传统的开关键控(OOK)调制向差分相移键控(DPSK)调制、脉冲幅度调制(PAM)、正交振幅调制(QAM)等高阶调制格式转变<sup>[1-3]</sup>。为了降低光纤通信网络中光纤色散和非线性、放大自发辐射噪声、信道间串扰等因素对光信号的劣化,高阶调制信号的全光再生技术越来越受到关注<sup>[4-5]</sup>。

目前,研究人员对 OOK 调制信号的全光幅度再生已有较多的研究,通过自相位调制(SPM)<sup>[6]</sup>、交叉相

**收稿日期:** 2017-01-06; **收到修改稿日期:** 2017-01-22

**基金项目:** 国家自然科学基金(61671108)

**作者简介:** 蒋尚龙(1991—),男,硕士研究生,主要从事多电平全光幅度再生器的实现方案及其性能评估方法方面的研究。

E-mail: 863374579@qq.com

**导师简介:** 武保剑(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光信息处理等方面的研究。

E-mail: bjwu@uestc.edu.cn(通信联系人)

位调制<sup>[7]</sup>、四波混频<sup>[8]</sup>以及可饱和吸收体<sup>[9]</sup>等可实现 OOK 调制信号的全光幅度再生,利用功率转移函数可直观地分析 OOK 调制信号的全光幅度再生过程<sup>[10-11]</sup>。近年来,有人提出一些多电平全光幅度信号的全光再生方案,这些方案主要基于非线性光纤光栅<sup>[12]</sup>、非线性光纤环镜(NOLM)<sup>[13]</sup>和自相位调制的马赫-曾德尔(MZI)干涉仪<sup>[14]</sup>等,而且多电平全光幅度再生器的功率转移函数近似呈阶梯型。

本文研究了多电平全光幅度再生器的性能评估方法,提出用线性增益和增益斜率两个参量分别表征多电平全光幅度再生器的放大和整形性能,并以 MZI 多电平全光幅度再生器为研究对象。研究表明,利用再生器的增益斜率曲线可方便地确定整形范围、最佳工作点以及可再生电平数目。OptiSystem 仿真表明,4PAM 光信号经过 MZI 多电平全光幅度再生器后,幅度噪声得到了有效抑制,噪声抑制比可达 6.79 dB,但该过程增加了再生信号的相位抖动。该分析方法也适用于其他多电平全光幅度再生器的性能评估。

## 2 多电平全光幅度再生器的性能参数

多电平全光幅度再生器的功率转移函数表征了输出功率  $P_{n-out}$  与输入功率  $P_{n-in}$  之间的关系。对于电平间隔(步长)为  $P_0$  的多电平输入光信号,理想的全光幅度再生器的功率转移函数为阶梯型(图 1),可表示为

$$P_{n-out} = G_0 [P_{n-in} - \text{mod}(P_{n-in}, P_0)] = G_0 P_{n-in} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi n P_{n-in}/P_0)}{\pi n P_{n-in}/P_0} \right] - \frac{G_0 P_0}{2}, \quad (1)$$

式中  $G_0$  为线性增益,  $\text{mod}(\cdot)$  表示取两数相除的余数。由于偏置项  $G_0 P_0/2$  对输出结果起上、下平移的作用,不影响再生器的整形性能,故下面的分析将省略该偏置项<sup>[14]</sup>。

为了更好地分析整形特性,将再生器的增益  $G$  分解为线性增益  $G_0$  和非线性增益  $G_{NL}$  两部分,并用归一化输入功率  $p_{n-in} = P_{n-in}/P_0$  和归一化输出功率  $p_{n-out} = P_{n-out}/(G_0 P_0)$  表示,即

$$G = \frac{P_{n-out}}{P_{n-in}} = G_0 \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi n P_{n-in}/P_0)}{\pi n P_{n-in}/P_0} \right] = G_0 + G_{NL} = G_0 \frac{p_{n-out}}{p_{n-in}}, \quad (2)$$

(2)式中的线性增益  $G_0$  不依赖于输入光功率,可表征再生器的放大能力;非线性增益  $G_{NL}$  依赖于输入功率,与再生器的整形特性密切相关。由(1)、(2)式可知,归一化功率转移函数可表示为

$$p_{n-out} = p_{n-in} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi n p_{n-in})}{\pi n p_{n-in}} \right]. \quad (3)$$

归一化功率转移函数对应的转移曲线如图 1 所示,包括理想再生器的功率转移曲线、再生器归一化线性输出功率曲线以及归一化非线性增益  $g_{NL}$  随输入功率变化的曲线。可以看出,理想多电平全光幅度整形器的归一化功率转移函数是一个周期为 1 的阶梯曲线,对应的实际输入信号电平间隔为  $P_0$ 。根据直线  $p_{n-out} = p_{n-in}$ ,可得到再生器的线性增益  $G_0$ 。为了便于描述,将(3)式中  $n=1$ 、 $n \leq 2$  和  $n \rightarrow \infty$  时所对应的再生器分别称为一级近似再生器、二级近似再生器和理想再生器。

归一化增益  $g$  可表示为

$$g = \frac{p_{n-out}}{p_{n-in}} = \frac{G}{G_0} = 1 + \frac{G_{NL}}{G_0} = 1 + g_{NL}, \quad (4)$$

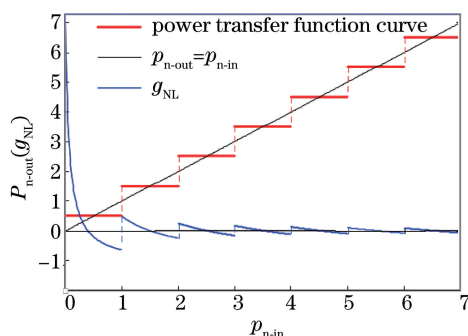


图 1 理想再生器的归一化转移函数对应的转移曲线

Fig. 1 Transfer curves corresponding to normalized power transfer function of ideal regenerator

式中  $g_{NL} = G_{NL}/G_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi n p_{n-in})}{\pi n p_{n-in}} = \frac{p_{n-out}}{p_{n-in}} - 1$ , 与再生器的整形特性密切相关, 如图 1 所示。

用增益斜率参数  $\beta$  来表征再生器的整形特性,  $\beta$  可定义为

$$\beta = \frac{dg}{dp_{n-in}} = \frac{d(1 + g_{NL})}{dp_{n-in}} = \frac{dg_{NL}}{dp_{n-in}}. \quad (5)$$

多电平全光幅度再生器的整形作用就是对输入脉冲信号的噪声进行抑制, 其微分增益应满足条件  $|dP_{n-out}/dP_{n-in}| \leq G_0^{[11,15]}$ , 即

$$\left| \frac{dP_{n-out}}{G_0 dP_{n-in}} \right| = \left| 1 + \frac{G_{NL}}{G_0} + \frac{P_{n-in} dG_{NL}}{G_0 dP_{n-in}} \right| = |1 + g_{NL} + p_{n-in} \beta| \leq 1. \quad (6)$$

根据(6)式, 得到增益斜率参数  $\beta$  的取值范围为

$$\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2, \quad (7)$$

式中  $\beta_1 = (-2 - g_{NL})/p_{n-in}$ ,  $\beta_2 = -g_{NL}/p_{n-in}$ , 增益斜率参数上下限之间的差值  $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 2/p_{n-in}$ 。根据(7)式可分析再生器的整形范围、最佳工作点和可再生电平数等特性。

下面详细考察 MZI 多电平全光幅度再生器的线性增益和增益斜率曲线的特征, 重点揭示参数  $\beta$  对多电平全光幅度再生器设计的指导作用。为了便于比较, 图 2 给出了一级近似再生器、二级近似再生器和理想多电平全光幅度再生器的增益斜率曲线, 它们都具有振荡周期为 1 的阻尼振荡特性。

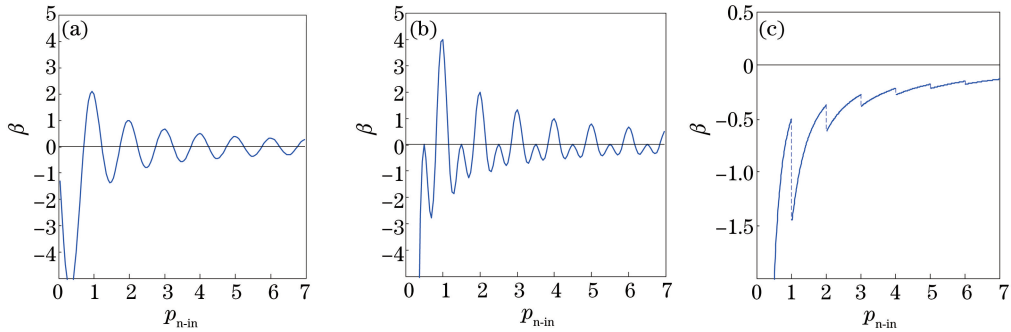


图 2 多电平全光幅度再生器的增益斜率曲线。(a)  $n=1$ ; (b)  $n=2$ ; (c)  $n \rightarrow \infty$

Fig. 2 Gain slope curves of multilevel all-optical amplitude regenerators. (a)  $n=1$ ; (b)  $n=2$ ; (c)  $n \rightarrow \infty$

### 3 MZI 多电平全光幅度再生器的整形特性

基于自相位调制的 MZI 多电平全光幅度再生器结构如图 3 所示, 由端口 A 进入的多电平信号被定向耦合器  $C_1$  分成两路, 分别经过上臂的自相位调制单元和下臂的相位延迟单元的传输后, 在定向耦合器  $C_2$  中发生双光束干涉, 最后由端口 B 输出再生信号。要实现多电平全光幅度再生功能, MZI 的结构参数应满足如下幅度条件和相位条件<sup>[14]</sup>:

$$\frac{1}{\pi p_{ref}} = \frac{2R_1 R_2 \sqrt{\rho_1 \rho_2 (1 - \rho_1)(1 - \rho_2)}}{\rho_1 (1 - \rho_2) R_1^2 + \rho_2 (1 - \rho_1) R_2^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\pi}{2} \pm \Delta\varphi + 2m\pi = 2\pi p_{n-in}, \quad (9)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  分别为上下臂的振幅透射系数,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为前后耦合器的直通效率,  $\Delta\varphi$  为两臂的相位差,  $p_{ref}$  为再生器的参考功率点(与可再生电平数密切相关)。此时, MZI 多电平全光幅度再生器的线性增益  $G_0 = \rho_1 (1 - \rho_2) R_1^2 + \rho_2 (1 - \rho_1) R_2^2$ , 归一化功率转移函数可表示为

$$p_{n-out} = p_{n-in} \left[ 1 + \frac{\sin(2\pi p_{n-in})}{\pi p_{ref}} \right]. \quad (10)$$

将(10)式代入(4)、(5)式, 可推导出 MZI 多电平全光幅度再生器的增益斜率  $\beta$  和归一化非线性增益  $g_{NL}$ , 即

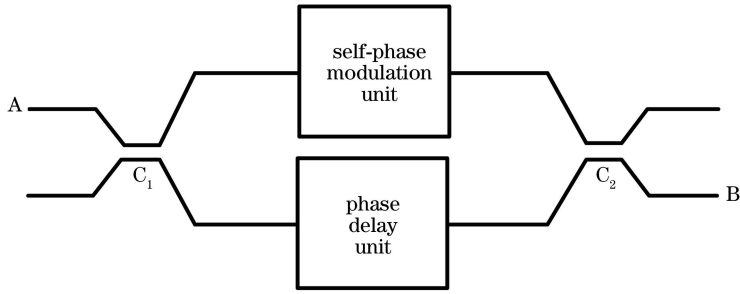


图3 MZI多电平全光幅度再生器结构

Fig. 3 Structural diagram of MZI-based multilevel all-optical amplitude regenerator

$$\beta = \frac{2\cos(2\pi p_{n-in})}{p_{ref}}, \quad (11)$$

$$g_{NL} = \frac{\sin(2\pi p_{n-in})}{\pi p_{ref}}. \quad (12)$$

接下来,着重分析增益斜率曲线对 MZI 多电平全光幅度再生器设计的指导意义。这里主要从增益斜率曲线的特点、整形范围和最佳工作点等方面进行分析。

### 1) 增益斜率曲线的特点

MZI 多电平全光幅度再生器的增益斜率曲线如图 4 所示,曲线围绕着零点余弦振荡,振荡周期为 1,意味着输入信号的电平间隔为  $P_0$ ;由(11)式可知,增益斜率曲线的振荡幅度  $\beta_m = 2/p_{ref}$ ,为定值。分析表明, $\beta_m$  决定了可再生电平数。比较图 2、4 可以看出,MZI 整形器的增益斜率曲线与一级近似再生器比较接近,但 MZI 整形器具有更佳的噪声抑制性能<sup>[14]</sup>。

### 2) 整形工作范围

根据(7)式所要求的再生器的整形范围,增益斜率参数只有处于  $\beta_1$  和  $\beta_2$  之间时才具有整形功能。由图 4 可以看出, $\beta_2$  在零点附近小幅度波动, $p_{n-in}$  越大, $\beta_2$  的波动幅度越趋近于 0,即可再生区域的增益斜率应为负值。由于增益斜率参数上下限之间的差值  $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 2/p_{n-in}$ ,因此随着  $p_{n-in}$  增加, $\beta_1$  曲线逐渐靠近增益斜率曲线,直到两者相交。可见,要使再生器在整形区域有规律地工作,最佳输入功率电平应选择在增益斜率的极小值点  $\beta_{min} (\beta_{min} \geq \beta_1)$ ,且输入噪声功率不超过  $0.5P_0$ 。

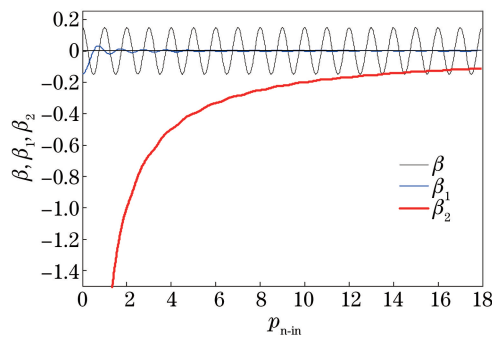


图4 MZI多电平全光幅度再生器的整形特性

Fig. 4 Reshaping characteristic of MZI-based multilevel all-optical amplitude regenerator

### 3) 最佳工作点

实际上,输入的多电平劣化信号在相应电平均值附近上下波动。为了达到良好的再生效果,需要将输入的信号特性与整形范围匹配,因此工作点的选取至关重要。对于 MZI 多电平全光幅度再生器,将这些电平工作点设置在增益斜率曲线的最低点处,即

$$\beta_{min} = \frac{2\cos(2\pi p_{n-in})}{p_{ref}} = -\frac{2}{p_{ref}}. \quad (13)$$

$\beta_{min}$  对应的电平功率(最佳工作点)  $p_n = n + 0.5$ ,其中  $n$  取正整数。此时,每个电平的输入噪声容限  $\Delta p_n \approx 0.25$ 。

## 4) 最大可再生电平数

由  $\beta_{\min} \geq \beta_1$  可知,  $n \leq p_{\text{ref}} - 0.5$ 。因此, MZI 的最大可再生电平数为

$$n_{\max} = \lfloor p_{\text{ref}} - 0.5 \rfloor = \lfloor 2/\beta_m - 0.5 \rfloor, \quad (14)$$

式中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整。显然, 最大可再生电平数与再生器增益斜率曲线的振幅  $\beta_m$  成反比,  $\beta_m$  越小, 可再生电平数越多, 该结论与文献[14]的数值计算结果吻合。

## 4 MZI 多电平全光幅度再生器性能仿真

利用 MZI 多电平全光幅度再生器的功率转移函数, 可以静态地分析再生器的工作特点, 常用于连续波近似下的数值计算<sup>[14]</sup>。事实上, 更精确的分析应该基于随机的多电平脉冲信号, 且采用动态仿真方法更能接近实际的整形过程。为此, 通过 OptiSystem 仿真平台搭建了一个 MZI 多电平全光幅度再生系统, 并考察了 4PAM 光信号的整形性能。

对于 4PAM 再生器 ( $n_{\max} = 4$ ), 由 (14) 式可知, 参考功率点  $p_{\text{ref}} = 4.5$ ; 根据 (13) 式得到 4PAM 光信号的最佳归一化电平功率分别为 1.5, 2.5, 3.5, 4.5。为了构造相应的多电平全光幅度再生器, 还需要根据幅度和相位条件 (8)、(9) 式来确定 MZI 的结构参数。设输入 PAM 光信号的多电平功率间隔  $P_0 = 0.3 \text{ W}$ , 损耗系数  $\alpha = 0.21 \text{ km}^{-1}$ , 非线性系数  $\gamma = 12 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ , 当高非线性光纤长度  $L = 2.4 \text{ km}$  时, MZI 的两个耦合器的耦合系数分别为  $\rho_1 = 92.58\%$  和  $\rho_2 = 0.95\%$ 。

对于 MZI 多电平全光幅度再生器仿真系统, 通过幅度光调制器将伪随机的 4PAM 方波电信号调制到连续光上, 可获得一个平均功率为 9 mW 的 4PAM 光信号 (符号速率为 10 Gbaud), 4 个电平的功率分别为 4.5, 7.5, 10.5, 13.5 mW; 然后通过一个增益为 20 dB、噪声指数为 10 的掺铒光纤放大器对 4PAM 光信号进行放大, 并引入放大自发辐射噪声。输入再生器的 4PAM 劣化信号的波形图如图 5(a) 所示, 平均归一化幅度噪声  $\sigma_{n,\text{in}} = 0.0224$ 。劣化信号经过 MZI 多电平全光幅度再生器后, 输出的 4PAM 再生信号的波形图如图 5(b) 所示, 平均归一化幅度噪声  $\sigma_{n,\text{out}} = 0.0103$ 。噪声抑制比  $K = 20 \lg(\sigma_{n,\text{in}}/\sigma_{n,\text{out}}) = 6.79 \text{ dB}$ , 可有效抑制输入信号的幅度噪声。

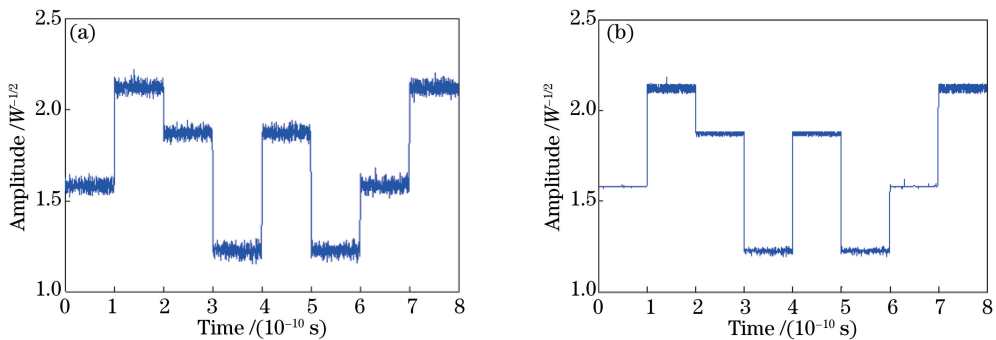


图5 MZI 多电平全光幅度再生器的仿真结果。(a)输入信号波形图;(b)再生信号波形图

Fig. 5 Simulation results of MZI-based multilevel all-optical amplitude regenerator.

(a) Waveform of input signal; (b) waveform of regenerated signal

## 5 结 论

通过分析理想整形器功率转移曲线的特点, 提出用线性增益和增益斜率两个参量分别表征多电平全光幅度再生器的放大和整形性能, 并用归一化功率表示增益斜率。根据整形功能满足的微分增益条件, 推导出增益斜率曲线的取值范围, 从而可方便地确定 MZI 多电平全光幅度再生器的最佳工作点和最大可再生电平数。MZI 多电平全光幅度再生器的增益斜率曲线是一个余弦振荡函数, 振幅越小, 再生电平数就越多。OptiSystem 仿真结果表明, 4PAM 光信号经过 MZI 多电平全光幅度再生器后, 幅度噪声得到了有效抑制, 噪声抑制比可达 6.79 dB, 但再生信号的相位抖动增加。

## 参 考 文 献

- [1] Szczerba K, Westbergh P, Karlsson M, *et al.* 70 Gbps 4-PAM and 56 Gbps 8-PAM using an 850 nm VCSEL[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 33(7): 1395-1401.
- [2] Sjödin M, Eriksson T, Andrekson P A, *et al.* Long-haul transmission of PM-2PPM-QPSK at 42.8 Gbit/s[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2013: 13582275.
- [3] Yu J. Advanced modulation formats for high-capacity transmission system at 100 G and beyond[C]. *SPIE*, 2012, 8283: 828303.
- [4] Roethlingshoefer T, Hierold M, Sponsel K, *et al.* Phase-preserving multilevel amplitude regeneration using modified nonlinear amplifying loop mirrors[C]. *36<sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2010: 11636766.
- [5] Lucek J K, Smith K. All optical signal regenerator[J]. *Optical Letters*, 1993, 18(15): 1226-1228.
- [6] Mamyshev P V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect[C]. *24<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication*, 1998: 6299799.
- [7] Wang W, Poulsen H N, Rau L. Raman-enhanced regenerative ultrafast all-optical fiber XPM wavelength converter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(3): 1105-1115.
- [8] Meng Tianhui, Yu Jinlong, Wang Ju, *et al.*  $2 \times 40$  Gb/s all-optical 3R regeneration system based on four wave mixing effect in dispersion shifted fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0806004.  
孟天晖, 于晋龙, 王 菊, 等. 基于色散位移光纤中四波混频效应的  $2 \times 40$  Gb/s 全光 3R 再生系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0806004.
- [9] Dong Yi, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.* Wavelength-shift-free optical regeneration on satellite using cascading SOA with two-stage offset filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 506008.  
董 毅, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于级联 SOA 结合两级偏移滤波的波长保持型星上全光再生方案[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 506008.
- [10] Lakoba T I. BER Degradation by signal-resampling processors with noninstantaneous response[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(10): 1379-1386.
- [11] An Junge. Study on the power transfer characteristics of all-optical 2R regenerator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2013.  
安俊鸽. 全光 2R 再生器的功率转移特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [12] Wan Q Y, Wu B J, Zhou X Y, *et al.* Magnetically-controllable optical multi-stability in magneto-optic fiber Bragg gratings with potential applications to multi-level all-optical regeneration[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 24: 89-92.
- [13] Sorokina M. Design of multilevel amplitude regenerative system[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2499-2502.
- [14] Kong X, Wu B, Zhou X, *et al.* Design of all-optical multi-level regenerators based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2016, 380: 377-381.
- [15] Sorokina M A, Sygletos S, Turitsyn S K. Optimization of cascaded regenerative links based on phase sensitive amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4378-4381.