

# 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

董毅 赵尚弘 李勇军 邓博于

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 针对分布式卫星网络中由于多跳转发导致光信号严重损伤的问题,提出了一种基于级联半导体光放大器(SOA)结合两级偏移滤波结构的波长保持型全光再生方案。该方案利用光脉冲经过不同载流子恢复时间的SOA时频谱展宽方向不同的特点,通过在两个级联的SOA之后分别进行红移滤波和蓝移滤波,不仅实现了对光信号的两级再生,而且两次偏移滤波产生的波长偏移相互抵消,使再生前后信号的波长保持不变。研究表明:再生方案能够有效地抑制信号幅度噪声和功率起伏,信号 $Q$ 因子改善最高可达到8 dB。

**关键词** 光通信; 全光再生; 自相位调制; 偏移滤波; 波长保持;  $Q$ 因子改善

中图分类号 TN929.13

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0506008

## Wavelength-Shift-Free Optical Regeneration on Satellite Using Cascading SOA with Two-Stage Offset Filter

Dong Yi Zhao Shanghong Li Yongjun Deng Boyu

*Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China*

**Abstract** Aiming at solving the problem of signal injury caused by multi-retransmission in distributed satellite optical network, a wavelength-shift-free regenerative scheme based on cascading semiconductor optical amplifier (SOA) with two-stage offset filter is presented. Making use of the characteristic of optical pulse after the SOA with different recovery times of carrier can lead to different spectral shifts. The scheme imposes a red-shifted and a blue-shifted filter on signals respectively after two cascading SOAs, which not only gives the two times regeneration for optical pulse, but also compensates the wavelength shift caused by each regeneration. The results show that the amplitude noise and power jitter can be suppressed effectively, and the  $Q$  factor of signals can be improved 8 dB at most.

**Key words** optical communications; optical regeneration; self-phase modulation; offset filter; wavelength-shift-free;  $Q$  factor improvement

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 190.3270; 230.4320

## 1 引言

基于激光链路的分布式卫星系统,由于能够提供雷达探测所需要的各种基线组合,具有抗摧毁性强、技术更新快、成本低等优势,同时兼具光通信高速率、宽带宽的特点,在未来的军事和民用领域都具有很好的应用价值<sup>[1-3]</sup>。然而,在分布式卫星系统中,光信号从产生到传输至目的节点,中间往往要经过多次转发,噪声和光学器件的非线性等因素将使光信号严重恶化,从而限制传输的距离和通信的质量<sup>[4-5]</sup>。为了解决这一问题,研究星上全光再生技术是非常必要的。

收稿日期: 2014-12-31; 收到修改稿日期: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(61401502)

作者简介: 董毅(1987—),男,博士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: dongyi\_19870129@sina.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与光通信等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com

与地面全光再生技术不同,星上环境对再生技术有着特殊的要求。1) 信号波长在再生前后必须保持不变。一方面,星上路由是不断变化的,不同路由的信号经过的再生次数不同,如果每次再生都使信号波长改变,那么到达接收端时信号波长将各不相同,一旦某一信号波长超出了探测器的响应范围,该信号将无法被探测<sup>[6-7]</sup>;另一方面,对于波分复用系统,如果再生后信号波长改变到已经被占用的波长上,将会导致拥塞的出现<sup>[8]</sup>。2) 针对星上载荷受限的特点,再生方案还应满足体积小、重量轻和功耗低的要求。

目前,大部分再生方案都使输出信号的波长发生改变<sup>[9-11]</sup>,只有个别文献对波长保持的全光再生进行了研究。Matsumoto<sup>[12]</sup>利用高非线性光纤的自相位调制(SPM)效应,通过两次偏移滤波补偿了信号波长的改变;该方案的缺点是需要接近 2 km 的光纤来提供足够高的非线性,体积和功耗太大。Fagotto 等<sup>[13]</sup>通过在两个半导体光放大器(SOA)中前后两次发生四波混频效应来保证信号波长不发生改变,缺点是需要额外增加两个探测光源。Vladimir 等<sup>[14]</sup>论证了一种基于 Sagnac 环和单个 SOA 来实现对差分移相键控(DPSK)信号再生放大的方案,由于主要利用 SOA 的增益饱和特性,方案结构较为简单,但是对进入 SOA 的两路光脉冲具有严格的同步要求。本文提出了一种基于级联 SOA 结合两级偏移滤波的波长保持型全光再生方案,该方案通过对信号光进行分路来提供探测光,具有体积小、功耗低的特点。分析了再生方案的工作原理,讨论了 SOA 参数对再生性能的影响,重点对低输入功率条件下再生器性能进行了仿真研究。

## 2 方案原理

由于具有高的单程增益和偏振不敏感特性,SOA 逐渐成为通信系统中具有很好应用前景的一种光学器件。忽略 SOA 的内部损耗,光信号经过 SOA 后,其功率、相移和增益分别表示为

$$P_{out}(\tau) = P_{in}(\tau)\exp[h(\tau)], \quad (1)$$

$$\phi(\tau) = -\frac{1}{2}\alpha h(\tau), \quad (2)$$

$$\frac{\partial g(z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{g_0 - g(z, \tau)}{\tau_c} - \frac{g(z, \tau)P}{E_{sat}}, \quad (3)$$

式中  $P_{in}(\tau)$ 、 $P_{out}(\tau)$  分别为输入与输出的光脉冲功率;  $\phi(\tau)$  为 SOA 引起的信号相移,  $\alpha$  为线宽增强因子,  $h(\tau)$  代表光脉冲沿 SOA 传输的单程增益, 表示为  $h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz$ ,  $g(z, \tau)$  为 SOA 中某一点处的瞬时增益,  $L$  为有源区的长度;  $g_0$ 、 $\tau_c$  和  $E_{sat}$  分别为小信号增益、载流子恢复时间与饱和能量, 定义为

$$g_0 = \Gamma a N_0 (I/I_0 - 1), \quad (4)$$

$$\tau_c = \frac{1}{A + BN + CN^2}, \quad (5)$$

$$E_{sat} = h\nu wd/\Gamma a, \quad (6)$$

式中  $\Gamma$  为模式限制因子,  $a$  为微分增益系数,  $N_0$  为透明载流子浓度,  $I$  为 SOA 的注入电流,  $I_0 = qVN_0/\tau_c$  为透明电流,  $q$  为电子电荷,  $V=Lwd$  表示 SOA 有源区的体积,  $w$ 、 $d$  分别为有源区的宽度和厚度。其中  $A$ 、 $B$  和  $C$  分别为无辐射、自发辐射以及俄歇过程的复合系数,  $h\nu$  表示光子能量。

如果对(3)式两边沿放大器长度积分, 则  $h(\tau)$  为下面微分方程的解:

$$\frac{dh(\tau)}{d\tau} = \frac{g_0 L - h(\tau)}{\tau_c} - \frac{P_{in}(\tau)}{E_{sat}} \{ \exp[h(\tau)] - 1 \}. \quad (7)$$

如果输入脉冲宽度  $\tau_p$  (半峰全宽) 远远小于载流子恢复时间  $\tau_c$ , 则(7)式等号右侧第一项可以忽略。在这种情况下, 即  $\tau_p/\tau_c \ll 1$  时, 可以求出(7)式的解为

$$h(\tau) = -\ln \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{\exp(g_0 L)} \right] \exp \left[ -\frac{U_{in}(\tau)}{E_{sat}} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中  $U_{in}(\tau)$  为某一时刻注入 SOA 的总能量, 可表示为

$$U_{in}(\tau) = \frac{1}{2} E_{in} [1 + \text{erf}(\tau/\tau_0)], \quad (9)$$

式中  $E_{in}$  为输入光脉冲能量,  $\tau_0$  表示脉冲宽度,  $\tau_p \approx 1.665\tau_0$ 。利用方程  $\Delta v(\tau) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial \tau}$ , 并结合(1)~(9)式, 可

以得到由自相位调制引起的啁啾为

$$\Delta v(\tau) = -\frac{\alpha(G_0 - 1) P_{out}(\tau)}{4\pi G_0 E_{sat}} \exp\left[-\frac{U_{in}(\tau)}{E_{sat}}\right], \quad (10)$$

式中  $G_0 = \exp(g_0 L)$  为非饱和的单程增益。从(10)式可以发现, 由于通常情况下  $G_0 > 1$ , 所以 SOA 引起的啁啾始终为负。

然而, 当  $\tau_p / \tau_c \gg 1$  时, 结果将有所不同。由于  $\tau_p \gg \tau_c$ , 功率放大消耗的载流子能够在相对于脉冲宽度很小的时间内迅速恢复,  $g(z, \tau)$  几乎不随  $\tau$  发生改变, 因此忽略(7)式等号左侧的偏分项, 可以得到  $h(\tau)$  的隐式解为

$$h(\tau) = g_0 L - \frac{P_{in}(\tau)}{P_{sat}} \{\exp[h(\tau)] - 1\}, \quad (11)$$

式中  $P_{sat} = E_{sat} / \tau_c$  为饱和功率。

将(11)式代入到(2)式, 并利用(1)式进行替代, 可以得到 SOA 引起的非线性相移为

$$\phi_{out}(\tau) = \frac{\alpha}{2} \frac{P_{out}(\tau) - P_{in}(\tau)}{P_{sat}}, \quad (12)$$

经过 SOA 放大后通常有  $P_{in}(\tau) \ll P_{out}(\tau)$ , 因此对(12)式两边求导, 可以得到 SOA 引起的啁啾近似为

$$\Delta v = \frac{\alpha}{2P_{sat}} \cdot \frac{\partial P_{out}(\tau)}{\partial \tau}. \quad (13)$$

与(10)式不同, (13)式表明 SOA 在脉冲的前沿产生负的啁啾, 在脉冲的后沿产生正的啁啾。

图 1(a)和(b)分别给出了  $\tau_p / \tau_c$  取不同值时无啁啾高斯脉冲经过 SOA 后波形和频谱的变化情况, 仿真过程中 SOA 的增益设置为  $G_0 = 30$  dB。当  $\tau_p / \tau_c = 0.05$  时, 脉冲波形明显向前沿发生了倾斜。这是因为相对于脉冲宽度, 载流子恢复时间太长, 被脉冲前沿消耗的载流子在脉冲后沿到达时仍然不能恢复, 从而造成脉冲前沿放大倍数大, 后沿放大倍数小, 出现了波形上的倾斜。当  $\tau_p / \tau_c = 1$  时, 脉冲倾斜程度略有缓解, 同时脉冲的宽度明显变宽。这是由于载流子恢复时间与脉冲宽度大小相当, 前沿消耗的载流子在后沿到达时有一定程度的恢复, 因此后沿的强度增大, 导致脉冲变宽。当  $\tau_p / \tau_c = 3$  时, 随着载流子恢复时间变得更短, 输出脉冲的波形也变得更宽, 并且从倾斜逐渐变得前后对称。从图 1(b)可以看出, 当  $\tau_p / \tau_c = 0.05$  时, 脉冲频谱完全向低频方向发生了展宽(即产生了负的啁啾)。随着  $\tau_p / \tau_c$  增大, 频谱向低频方向的展宽逐渐减小, 同时向高频方向的展宽(即产生了正的啁啾)逐渐增大。当  $\tau_p / \tau_c = 3$  时, 向高频展宽的频谱分量已经接近于低频方向, 频谱呈现出近似于对称的结构。

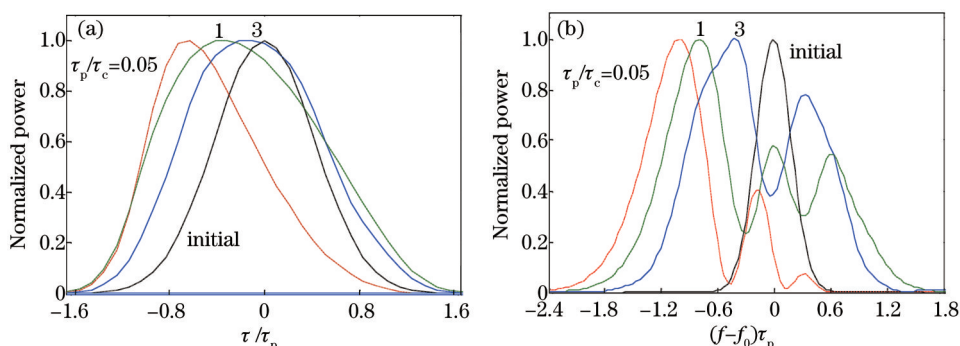


图 1 经 SOA 传输后的光脉冲波形和频谱。(a) 脉冲波形; (b) 脉冲频谱

Fig.1 Waveform and spectrum of pulse after SOA. (a) Waveform of the pulse; (b) spectrum of the pulse

基于以上分析, 当脉冲通过一个载流子恢复时间大于脉冲宽度的 SOA 时, 其频谱将向低频方向偏移(红移分量), 并且靠近脉冲中间的部分由于功率较高, 偏移较大; 脉冲边缘和“0”码处由于功率较低, 偏移较小。如果让频谱偏移后的输出信号再经过一个红移滤波器, 那么脉冲中间部分将出现很小的功率衰减, 而边缘部分和“0”码处则衰减严重。由于边缘部分和“0”码处主要为噪声成分, 因此输出信号的信噪比将明显提高。同理, 如果让光脉冲依次经过一个载流子恢复时间小于脉冲宽度的 SOA 和一个蓝移滤波器, 同样会使输出信号的信噪比增大。利用这些性能, 本文的再生方案如图 2 所示。第一级再生由 SOA 和红移滤波器组

成,第二级再生由SOA和蓝移滤波器组成。只要通过合理的参数设置,使光带通滤波器(OBPF<sub>1</sub>)和OBPF<sub>2</sub>的偏移量相同,那么该方案不仅能够使信号得到两次再生,而且两次再生产生的波长偏移相互抵消,使输出信号的波长保持不变。

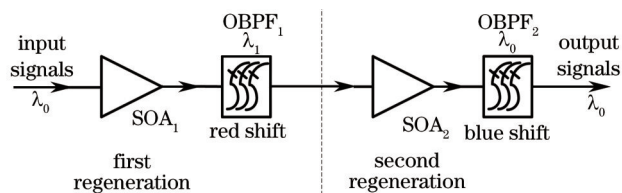


图2 波长保持型再生方案

Fig.2 Wavelength-shift-free regenerative scheme

### 3 仿真分析

采用Optisystem软件对再生方案性能进行验证,图3给出了仿真场景。码元速率为10 Gb/s的归零码(RZ)伪随机序列用于模拟信源信息。激光器中心波长为1550 nm,线宽为10 MHz,经调制后输出光脉冲半峰全宽为30 ps。虚线框内部分用于模拟链路噪声,通过调节掺铒光纤放大器(EDFA)和衰减器参数可以调整输出信号的功率和光信噪比(OSNR)。OBPF<sub>0</sub>可以滤除一部分带外噪声,其中心波长与激光器相同,3 dB带宽为40 GHz。OBPF<sub>1</sub>中心频率较激光器频率向低频偏移50 GHz,3 dB带宽为25 GHz。OBPF<sub>2</sub>为中心波长1550 nm,3 dB带宽为25 GHz。SOA<sub>1</sub>参数如表1所示,载流子恢复时间为400 ps;SOA<sub>2</sub>载流子恢复时间依据文献[15-16]中的实验参数,取为25 ps,注入电流0.11 A,其他参数与SOA<sub>1</sub>相同。误码分析仪(BER)用于对第一级和第二级再生信号的性能进行分析。

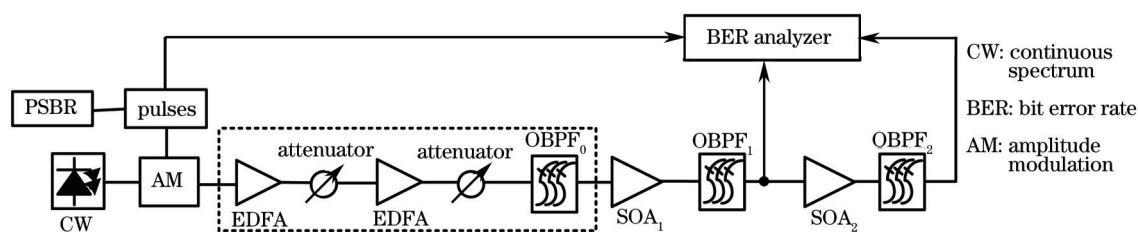


图3 仿真场景

Fig.3 Setup of the simulation

表1 SOA<sub>1</sub>参数

Table 1 Parameters of SOA<sub>1</sub>

Name	Symbol	Value
Injection current	$I/A$	0.12
Active region length	$L/m$	0.0005
Active region width	$W/m$	$2 \times 10^{-7}$
Active region thickness	$d/m$	$1 \times 10^{-7}$
Optical confinement factor	$\Gamma$	0.3
Differential gain	$a/m^2$	$2.78 \times 10^{-20}$
Carrier density at transparency	$N_0/m^3$	$1.4 \times 10^{24}$
Recombination coefficient A	$A/(1/s)$	$1.43 \times 10^8$
Recombination coefficient B	$B/(m^3/s)$	$1 \times 10^{-16}$
Recombination coefficient C	$C/(m^6/s)$	$3 \times 10^{-41}$
Linewidth enhancement factor	$\alpha$	5

图4给出了再生前、第一级再生和第二级再生后信号的波形图和眼图对比情况,仿真中,信号平均输入功率为-21 dBm。从图中可以看出,再生前信号波形和频谱在幅度上都有显著的起伏,而且脉冲底部和“0”码处也存在明显的噪声,Q因子为6.1。经过第一级再生后,脉冲底部和“0”码处的噪声几乎得到了消除;偏



移滤波使幅度起伏也得到一定的缓解,  $Q$  因子提高到 9.5。但是从眼图中可以看到, 脉冲波形向前沿发生了明显的抖动。这是因为初始脉冲幅度上的起伏经过第一级红移滤波后转换成了时间上的抖动。从第二级再生后的结果可以看到, 由于蓝移滤波相反的转换效果, 脉冲的时延抖动被很好地抑制; 同时, 幅度起伏也变得更为不明显,  $Q$  因子提高到 14.1。需要指出的是, 再生后脉冲宽度较再生前变窄, 这与偏移滤波器的带宽有关。带宽越宽, 输出脉冲波形越窄; 当带宽恰好等于  $1/\tau_p$  时, 输入脉冲宽度与初始脉宽相同。但滤波器带宽与输出信号的信噪比也密切相关, 因此需要综合考虑。

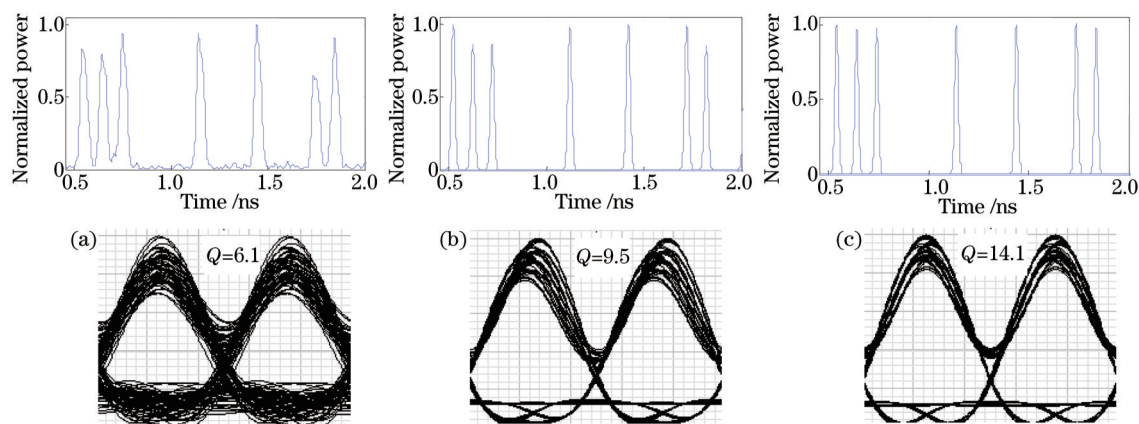


图 4 信号波形和眼图。(a) 初始时; (b) 一级再生后; (c) 两级再生后

Fig.4 Waveforms and eye diagrams of signals. (a) Initial; (b) after first stage; (c) after second stage

图 5 给出了不同节点处光信号频谱图的对比情况。从图中可以看出, 初始信号在通过  $SOA_1$  之后向低频方向发生了明显展宽, 经  $OBPF_1$  滤波后, 输出信号的中心频率相对于初始信号向低频方向偏移约 50 GHz。经过  $SOA_2$  之后, 信号频谱向两侧发生了展宽, 并且向低频方向的展宽要强于高频方向, 这与仿真中选择的脉冲宽度和载流子恢复时间的相对大小有关。最后经过  $OBPF_2$  滤波后, 输出信号的中心波长与初始信号基本保持一致。

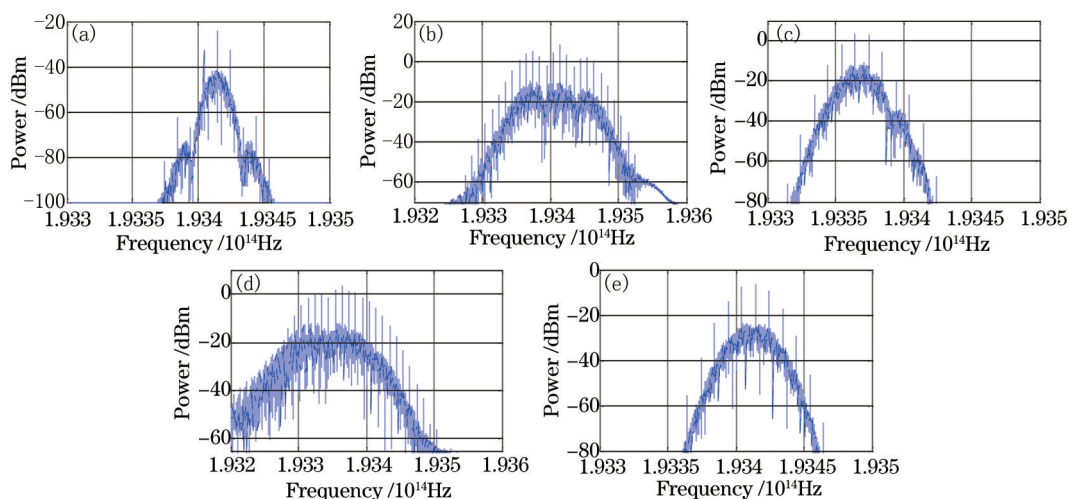


图 5 不同节点处的信号频谱图。(a) 初始频谱; (b)  $SOA_1$  之后; (c)  $OBPF_1$  之后; (d)  $SOA_2$  之后; (e)  $OBPF_2$  之后

Fig.5 Spectra at different points. (a) Initial spectrum; (b) after  $SOA_1$ ; (c) after  $OBPF_1$ ; (d) after  $SOA_2$ ; (e) after  $OBPF_2$

图 6 给出了  $Q$  因子改善随输入信号平均功率变化的情况。可以看出, 第二级再生在第一级再生的基础上进一步提高了信号的  $Q$  因子。同时, 两级再生的  $Q$  因子改善都随输入功率的增加逐渐减小。这主要是两个原因造成的: 1) 低功率时输入信号信噪比低, 噪声所占的比重较大, 因此经偏移滤波后, 滤除的噪声成分比重也比较大; 2) 随着输入功率的增加,  $SOA$  造成的频率偏移逐渐增大并超过偏移滤波器的偏移量, 使再生性能降低。图 7 为  $Q$  因子改善随输入光信噪比(OSNR)的变化情况。从图中也可以看出, 两级再生的  $Q$  因子改善随输入 OSNR 增大而逐渐减小, 这与对图 6 的分析相一致。

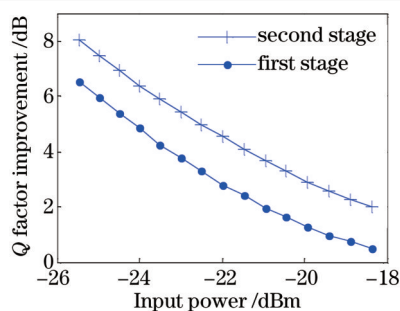


图 6  $Q$  因子改善随输入功率变化

Fig.6  $Q$  factor improvement versus input power

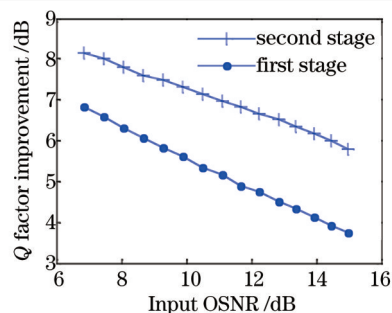


图 7  $Q$  因子改善随输入 OSNR 变化

Fig.7  $Q$  factor improvement versus input OSNR

图 8 给出了  $SOA_1$  和  $SOA_2$  输入电流变化对两级再生后  $Q$  因子改善的影响情况。从图中可以看出,分别增大  $SOA_1$  和  $SOA_2$  输入电流,  $Q$  因子的改善出现了相反的变化趋势。这是 SOA 的载流子恢复时间大小不同造成的。对于  $SOA_1$ , 由于载流子恢复时间比较长, 脉冲后半部分因为载流子来不及恢复容易陷入饱和, 所以增加输入电流将使  $SOA_1$  内部产生的噪声迅速增大; 对于  $SOA_2$ , 由于载流子恢复时间比较短, 消耗的载流子总是能及时恢复, 因此增加输入电流将使信号的功率进一步放大。

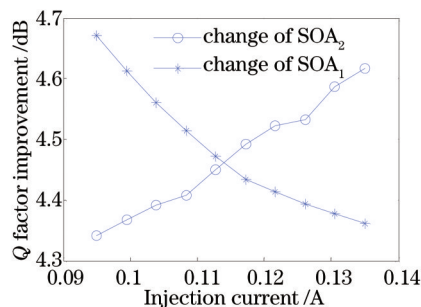


图 8 输入电流对  $Q$  因子改善影响

Fig.8 Influence of injection current on  $Q$  factor improvement

## 4 结 论

提出了一种级联 SOA 结合两级偏移滤波结构的波长保持型星上全光再生方案, 并通过仿真对其性能进行了验证。研究表明: 经过两级偏移滤波, 光脉冲底部和“0”码处的噪声能够较好地消除, 脉冲幅度上的起伏也一定程度地抑制; 通过选取合适的参数, 前后两级偏移滤波造成的波长偏移能够相互抵消, 实现波长保持的目的, 同时输出信号  $Q$  因子改善最高可达到 8 dB; 受载流子恢复时间大小的影响, 改变两级 SOA 输入电流的大小, 输出信号  $Q$  因子改善具有相反的变化趋势。由于结构简单, 且 SOA 本身具有体积小、技术成熟等优点, 该方案在未来分布式卫星光网络中具有一定的潜在应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Dang Zhaohui, Zhang Yulin. Optimization of communication network topology for navigation sharing among distributed satellites[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(1): 143–152.
- 2 Tan Liying, Yang Qinglong, Ma Jing, et al.. Wavelength dimensioning of optical transport networks over nongeosynchronous satellite constellations[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(4): 166–174.
- 3 Li Shiqiang, Yu Weidong. Implementation and verification for phase synchronization of distributed satellite SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(2): 356–360.  
李世强, 禹卫东. 分布式卫星 SAR 相位同步的实现方案及试验验证[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 356–360.
- 4 Benoît Clouet, Michel Joindot, Jean Claude Simon. OSNR margin brought by nonlinear regenerators in the presence of PMD and amplified spontaneous emission noise[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(2): 201–208.
- 5 Koichi Narahara. Characterization of nonlinear transmission lines for short pulse amplification[J]. International Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010, 31(4): 411–421.

- 6 Michael Gould, Tom Baehr-Jones, Ran Ding, *et al.*. Bandwidth enhancement of waveguide-coupled photo-detectors with inductive gain peaking[J]. *Opt Express*, 2012, 20(7): 7101-7111.
- 7 Dong Yi, Zhao Shanghong, Zhang Xiaoyan, *et al.*. Wavelength-preserving all-optical regenerative scheme for satellite based on two-stage offset filtering[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0705002.  
董毅, 赵尚弘, 张晓燕, 等. 基于两级偏移滤波的波长保持型星上全光信号再生方案[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0705002.
- 8 C Yu, T Luo, B Zhang, *et al.*. Wavelength-shift-free 3R regenerator for 40-Gb/s RZ system by optical parametric amplification in fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(24): 2569-2571.
- 9 Meng Tianhui, Yu Jinlong, Wang Ju, *et al.*. 2×40 Gb/s All-optical 3R regeneration system using four-wave mixing 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2×40 Gb/s全光3R再生系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0806004.
- 10 Kise T, Nguyen K N, Garcia J M, *et al.*. Cascadability properties of MZI-SOA-based all optical 3R regenerators for RZ-DPSK signals[J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9330-9335.
- 11 K Cvecek, K Sponsel, G Onishchukov, *et al.*. 2R-Regeneration of an RZ-DPSK signal using a nonlinear amplifying loop mirror[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(3): 146-148.
- 12 Masayuki Matsumoto. Efficient all-optical 2R regeneration using self-phase modulation in bidirectional fiber configuration[J]. *Opt Express*, 2006, 14(23): 11018-11023.
- 13 Fagotto E A M, Abbade M L F. Wavelength shift-free all-optical 2R regenerator based on four-wave mixing[C]. *International Microwave and Optoelectronics Conference*, 2011: 679-683.
- 14 Vladimir S Grigoryan, Myunghun Shin, Preetpaul Devgan, *et al.*. SOA-based regenerative amplification of phase-noise-degraded DPSK signals: Dynamic analysis and demonstration[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 135-142.
- 15 Zhang Litai. Research on High-Speed All-Optical Signal Processing Based on Semiconductor Optical Amplifier[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.  
张立台. 基于半导体光放大器的高速全光信号处理技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- 16 Zhang Litai, Yu Jinlong, Hu Hao, *et al.*. All-optical regenerative multicasting at 4×10-Gb/s based on a SOA and a single optical source[C]. *SPIE*, 2007, 6783: 67832G.

栏目编辑: 王晓琰