

# 基于两级偏移滤波的波长保持型星上全光信号再生方案

董毅<sup>1</sup> 赵尚弘<sup>1</sup> 张晓燕<sup>1</sup> 郑晓梅<sup>2</sup> 东晨<sup>1</sup> 朱子行<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

(<sup>2</sup> 空军哈尔滨飞行学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 针对分布式卫星光网络的动态路由特性,提出了一种基于两级偏移滤波的波长保持型全光再生方案。该方案利用半导体光放大器(SOA)和高非线性光纤(HNLF)中自相位调制(SPM)效应感应的频率啁啾具有相反符号的特点,对经过其中的信号分别进行红移滤波和蓝移滤波,从而不仅实现了对光信号的两级再生,而且有效抵消了各自滤波造成的频率偏移,实现了再生前后信号波长的连续性。同时该方案具有结构简单、体积小、重量轻等特点,能够满足星上应用对有效载荷的限制。研究表明:该方案能够将信号 Q 因子提高超过 1.5 dB,且与一级再生结果相比较,可以使误码率(BER)进一步降低一个量级。

**关键词** 光通信;全光再生;自相位调制;偏移滤波;波长保持

**中图分类号** TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0705002

## Wavelength-Preserving All-Optical Regenerative Scheme for Satellite Based on Two-Stage Offset Filtering

Dong Yi<sup>1</sup> Zhao Shanghong<sup>1</sup> Zhang Xiaoyan<sup>1</sup> Zheng Xiaomei<sup>2</sup> Dong Chen<sup>1</sup> Zhu Zihang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

(<sup>2</sup> Air Force Harbin Flight Academy, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Aiming at the dynamic routing characteristic of distributed satellite network, a wavelength-preserving all-optical regenerative scheme based on two-stage offset filtering is put forward. By using the property that the signs of chirp induced by self-phase modulation (SPM) are opposite in semiconductor optical amplifier (SOA) and high nonlinear fiber, a red-shifted filtering and a blue-shifted filtering are done respectively on the signals after the SOA and the HNLF, which not only realizes a two-stage regeneration of signals, but also compensates the frequency offset and keeps the wavelength unchanging before and after the regenerator. Meanwhile, the scheme is of simple structure, small volume and light quality, which can satisfy the limitation of satellite to the payloads. The result shows that the Q factor of signals can be improved more than 1.5 dB, and the bit error rate (BER) can be reduced more than one order of magnitude compared with the result of one-stage regenerator.

**Key words** optical communications; all-optical regeneration; self-phase modulation; offset filtering; wavelength-preserving

**OCIS codes** 060.2605; 060.4370

## 1 引言

基于激光链路的分布式卫星系统不仅具有部署

灵活、抗摧毁性强、技术更新换代快等特点,而且结合了光通信传输速率高、保密性强等优势,是空间信

收稿日期: 2013-11-28; 收到修改稿日期: 2014-02-11

作者简介: 董毅(1987—),男,博士研究生,主要从事分布式卫星激光组网关键技术方面的研究。

E-mail: dongyi\_19870129@sina.com

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

E-mail: shangzhao@yahoo.com

息网络发展的必然趋势。然而,分布式卫星系统对星间信息交换和处理提出了更高的要求,卫星接收到的地面信号不仅受到大气衰减、湍流等因素的影响<sup>[1-2]</sup>,而且在空间还要经过多次的卫星转发,各种光学器件的非线性效应将导致信号的严重畸变<sup>[3-4]</sup>。加上平台抖动、背景光辐射以及长距离传输等因素的影响<sup>[5]</sup>,信号质量将严重恶化。因此,对经过星间长距离传输的光信号进行再生放大是非常必要的。

目前,全光再生技术在地面光纤网络中已经得到了广泛的研究,然而有关星上的再生方案仍未见报道。与地面光纤网路由相对固定不同,星上路由是动态变化的,因此对再生器的性能也有其新的要求。首先,信号经过再生器后其波长不能发生改变。目前几乎所有的再生方案在实现信号再生的同时往往使其中心波长发生改变<sup>[6-8]</sup>。对于路由相对固定的地面光纤网,这个问题可以通过事先约定的方法有效解决,但是星上路由是根据网络资源的使用情况动态变化的,不同的路由经历的放大次数不同,到达接收端的波长就可能不同,当经过多次放大时甚至会导致接收端探测器无法响应。其次,星间距离的动态变化使得接收端的光功率也是动态变化的,因此要求再生器能够对更大功率范围的信号进行有效再生。同时,由于受星上载荷的限制,再生器的体积、重量和成本都要进行严格的限制。

本文利用半导体光放大器(SOA)与高非线性光纤(HNLF)中自相位调制(SPM)效应感应的频率啁啾具有相反符号的特点,先通过 SOA 结合红移滤波对信号进行一级再生,然后再通过 HNLF 结合蓝移滤波进行二级再生。由于两次偏移滤波的方向相反,经过合理的设计可以使前后两次滤波的偏移量相抵消,从而实现无波长变化的信号再生。与文献<sup>[9]</sup>中设计的两次经过 HNLF 的再生方案相比较,本文提出的再生方案不仅结构简单,功率损耗小,而且避免了信号光同时在 HNLF 中的相向传输,减小了交叉相位调制(XPM)等非线性效应的影响。

## 2 再生方案理论分析

忽略 SOA 内部损耗的影响,光脉冲经 SOA 放大后任意一点处的功率和相移可以表示为

$$P_{\text{out1}}(\tau) = P_{\text{in1}}(\tau) \exp[h(\tau)], \quad (1)$$

$$\varphi_1(\tau) = -\frac{1}{2}ah(\tau), \quad (2)$$

式中  $P_{\text{in1}}(\tau)$ 、 $P_{\text{out1}}(\tau)$  分别为输入与输出的光脉冲

功率, $\phi_1(\tau)$  为 SOA 引起的信号相移, $a$  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  $h(\tau) = \int_0^L g(z, \tau) dz$ , 其中,  $g(z, \tau)$  为 SOA 中某一点处的瞬时增益,  $L$  为有源区的长度。当光脉冲的半峰全宽  $\tau_p$  与 SOA 的载流子恢复时间  $\tau_c$  满足  $\tau_p/\tau_c \ll 1$  时,  $h(\tau)$  可以写为

$$h(\tau) = -\ln\left\{1 - \left[1 - \frac{1}{\exp(g_0 L)}\right] \exp\left[-\frac{U_{\text{in}}(\tau)}{E_{\text{sat}}}\right]\right\}, \quad (3)$$

式中  $g_0$ 、 $E_{\text{sat}}$ 、 $U_{\text{in}}(\tau)$  分别代表 SOA 的小信号增益、饱和能量以及某一时刻注入 SOA 的总能量,可分别表示为

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

$$E_{\text{sat}} = \hbar\omega_0 \omega d / \Gamma a, \quad (5)$$

$$U_{\text{in}}(\tau) = \frac{1}{2} E_{\text{in}} [1 + \text{erf}(1.665\tau/\tau_p)], \quad (6)$$

式中  $\Gamma$  为模式限制因子,  $a$  为微分增益系数,  $N_0$  为透明载流子粒子数,  $I$  为 SOA 的注入电流,  $I_0 = qVN_0/\tau_c$  为透明电流,  $q$  为电子电荷,  $V = L\omega d$  表示 SOA 有源区的体积,  $\omega$ 、 $d$  分别为有源区的宽度和厚度,  $\hbar\omega_0$  表示光子能量,  $E_{\text{in}}$  为输入光脉冲能量。

由于  $\Delta v(\tau) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial \tau}$ , 将(1)~(6)式代入,可得 SPM 效应引起的啁啾为

$$\Delta v_1(\tau) = -\frac{\alpha(G_0 - 1)}{4\pi G_0} \frac{P_{\text{out1}}(\tau)}{E_{\text{sat}}} \exp\left[-\frac{U_{\text{in}}(\tau)}{E_{\text{sat}}}\right], \quad (7)$$

式中  $G_0 = \exp(g_0 L)$  表示非饱和的增益。

光脉冲在光纤内传输时,其脉冲任意一点处由 SPM 效应引起的非线性相移可表示为

$$\phi_2(\tau) = P_{\text{in2}}(\tau)(L_{\text{eff}}/L_{\text{NL}}), \quad (8)$$

式中  $P_{\text{in2}}$  为输入光脉冲的功率,  $L_{\text{eff}}$  和  $L_{\text{NL}}$  为光纤的有效长度和非线性长度,可分别表示为

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\beta)]/\beta, \quad (9)$$

$$L_{\text{NL}} = 1/(\gamma P_0), \quad (10)$$

式中  $\beta$  为光纤损耗系数,  $l$  为光纤长度,  $\gamma$  为非线性系数,  $P_0$  表示脉冲的峰值功率。与 SOA 中类似, SPM 感应的频率啁啾是相位的时间相关性的直接结果,可以写为

$$\Delta v_2(\tau) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi_2}{\partial \tau} = -\frac{1}{2\pi} \frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{NL}}} \frac{\partial P_{\text{in2}}(\tau)}{\partial \tau}. \quad (11)$$

以高斯脉冲为例,图 1 给出了不同增益或峰值功率时 SOA 和 HNLF 中 SPM 效应感应的啁啾和频谱特性对比情况,其中 SOA 中  $\tau_c = 200$  ps,  $\alpha = 5$ ,

HNLF 长度  $L = 1 \text{ km}$ ,  $\gamma = 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。图 1 (a)、(b) 为两种 SPM 效应感应的啁啾随脉冲功率变化的时域分布情况, 从图中可以看出两种情况下的啁啾特性存在着明显的不同。1) SOA 中 SPM 效应引起了频率向低频方向的偏移, 即产生了负的啁啾, 且最大啁啾位于光脉冲峰值处, 脉冲峰值越大, 啁啾值越大; 2) HNLF 中 SPM 效应使脉冲前沿

产生负的啁啾, 脉冲后沿产生正的啁啾, 最大啁啾位于光脉冲峰值两侧, 峰值处啁啾为零, 并且随峰值功率增大, 啁啾值也不断增大。图 1(c)、(d) 给出了两种 SPM 效应作用下信号频谱的特性, 其中  $\nu_0$  为信号中心频率。可以看出, 基于 SOA 的 SPM 效应使频谱向低频方向发生了展宽, 而基于 HNLF 的 SPM 效应使频谱向低频和低频两个方向同时展宽。

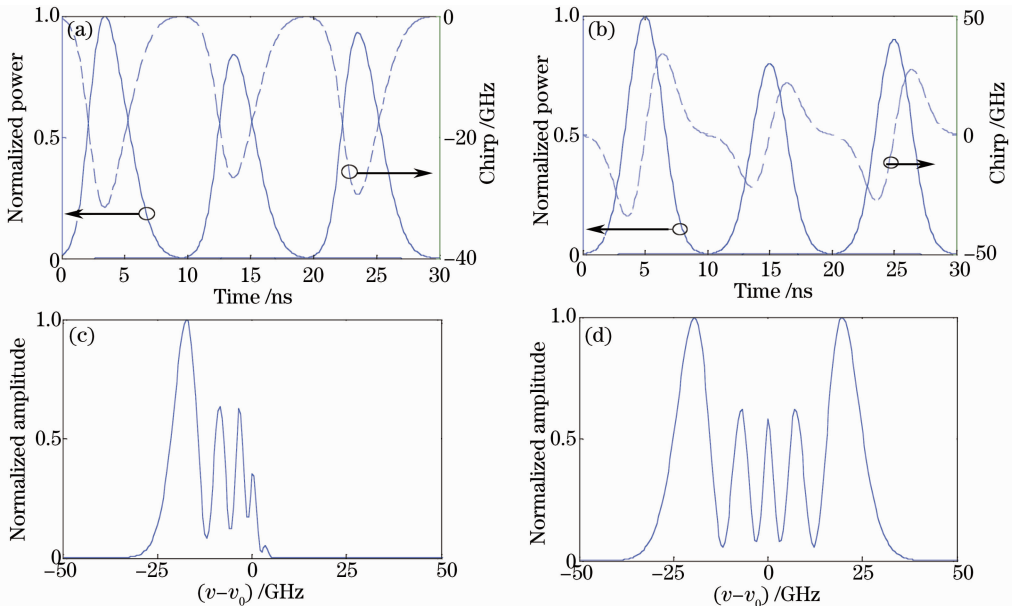


图 1 两种 SPM 效应感应啁啾及频谱特性对比。(a) SOA 啁啾特性; (b) HNLF 啁啾特性; (c) SOA 频谱; (d) HNLF 频谱

Fig. 1 Contrast of chirp and spectrum characteristics induced by SPM. (a) Chirp characteristic of SOA; (b) chirp characteristic of HNLF; (c) spectrum of SOA; (d) spectrum of HNLF

根据以上分析, 如果对经 SOA 放大后的光信号进行红移滤波, 那么功率较高的部分红移啁啾较大, 经滤波后衰减较小, 而功率较低的部分红移啁啾较小, 经滤波后衰减较大。由于功率较低的部分包含了大量的噪声, 因此滤波后信号的信噪比将被提高。同理, 对经 HNLF 传输后的光信号无论进行红移滤波还是蓝移滤波, 其信噪比也都会得到提高。依据这样一种思路, 本文设计的无波长变换的全光再生方案如图 2 所示。该方案主要由两级再生结构组成: 第一级再生由 SOA 和进行红移滤波的带通滤波器(OBPF1)组成, 第二级再生由 HNLF 和进行蓝移滤波的 OBPF2 组成。只要合理设置 SOA 和 HNLF 的参数, 保证两次滤波的偏移量相等, 那么该方案不仅可以使再生信号的波长保持不变, 而且经过两次再生, 信号质量也将进一步提高。

图 3 为两级再生前后的信号波形, 其中 SOA 中

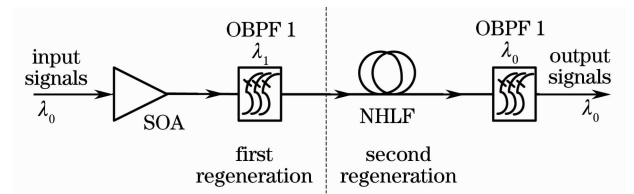


图 2 波长保持型全光再生方案  
Fig. 2 Wavelength-preserving all-optical regenerative scheme

$\tau_c = 120 \text{ ps}$ ,  $\alpha = 4$ , HNLF 长度  $L = 1.3 \text{ km}$ ,  $\gamma = 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 第一级光滤波器相对脉冲中心频率的偏移量为  $50 \text{ GHz}$ , 第二级滤波器中心频率与信号相同。从图中可以看出, 恶化的原始信号经第一级再生后信号幅度的抖动和噪声都得到了明显的改善; 而第二级再生使信号进一步得到整形, 抖动和噪声几乎完全消除。

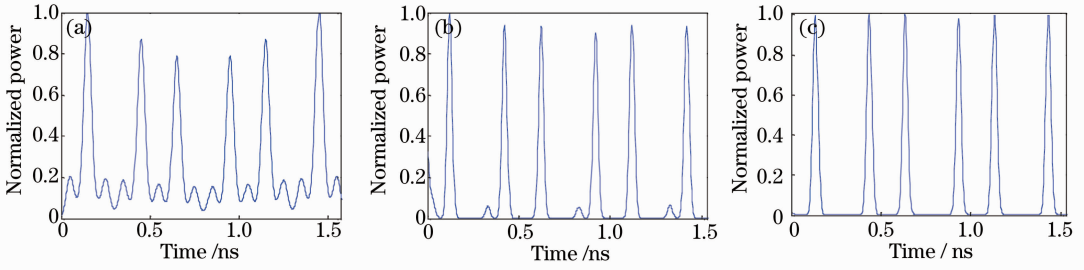


图 3 再生前后信号波形图。(a) 原始信号；(b) 第一级再生后；(c) 第二级再生后  
Fig. 3 Waveform before and after regeneration. (a) Initial signals; (b) after first regeneration; (c) after second regeneration

### 3 仿真实验分析

为了进一步研究再生方案的性能,仿真实验场景设置如图 4 所示。二进制伪随机序列(PNSR)产生器用来模拟信源,产生速率为 10 Gb/s,长度为  $2^{31}-1$  的比特序列,并经电脉冲形成器转换成脉冲序列。激光器带宽为 10 MHz,中心波长为 1550 nm,经电脉冲调制后产生信号。宽带高斯光噪声与幅度调制(AM)信号耦合后一起进入光带通滤波器(OBPF),滤波器中心波长为 1550 nm,3 dB 带宽为 60 GHz。为了充分对比再生方案的性能,恶化后的信号被分为 3 路:第 1 路只经过 OBPF2,其

结果用来作为对比;第 2 路进行 SOA 结合偏移滤波的再生,用于观察第一级再生的性能;第 3 路送入两级偏移滤波的再生结构。其中,OBPF2 和 OBPF5 的中心波长与信号相同,OBPF3 和 OBPF4 的频率偏移量为 50 GHz,3 dB 带宽均为 30 GHz。为了避免由于功率大小不同造成的影响,可调衰减器用来调节进入误码率(BER,  $R_{BE}$ )分析仪的功率,并使其保持一致。HNLF 长度为 2 km,衰减系数为 0.2 dB/km,色散系数为 0.3 ps/(nm/km),非线性系数为  $10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。SOA 的参数设置如表 1 所示。

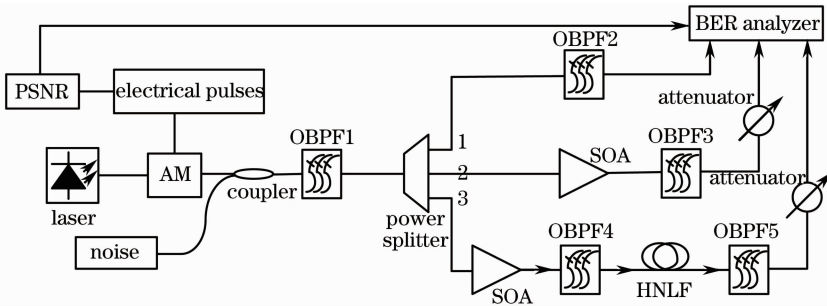


图 4 仿真实验场景  
Fig. 4 Setup of simulation

表 1 SOA 参数设置  
Table 1 Parameters of SOA

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

图 5 给出了第一级再生和两级再生后 Q 因子

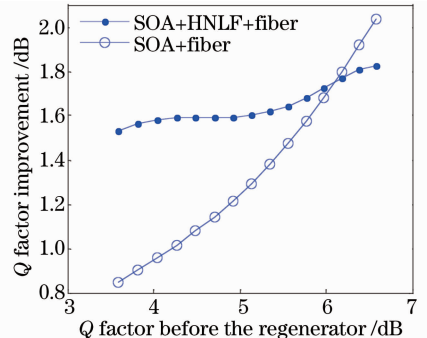


图 5 Q 因子改善  
Fig. 5 Improvement of Q factor

的改善情况。从图中可以看出随着输入信号  $Q$  因子的提高,第一级再生后  $Q$  因子的改善量有一个剧烈上升的过程,而两级再生后  $Q$  因子的改善量保持相对稳定,并始终超过 1.5 dB。同时,当输入信号的  $Q$  因子大于 6.2 时,两级再生的  $Q$  因子改善量逐渐小于一级再生。造成这种现象的主要原因是当输入信号的  $Q$  因子较高时,HNLF 中色散和其他非线性效应对信号影响的比重增大。图 6 给出了光信号经不同器件后的频谱图。从图 6(a)中可以看出,

OBPF1 输出的恶化信号中心波长为 193.414 THz (1550 nm),经 SOA 放大后,图 6(b)中信号频谱向低频方向发生了偏移,并且在 50 GHz 偏移量处具有最大输出功率。图 6(c)中 OBPF4 滤除了偏移量较小的噪声部分。图 6(d)中 HNLF 使信号频谱向两边发生了展宽,但是由于啁啾的存在,向高频方向的展宽要明显强于低频方向。图 6(f)为二次偏移滤波得到信号的最终频谱,与图 6(a)的原始结果基本保持一致。

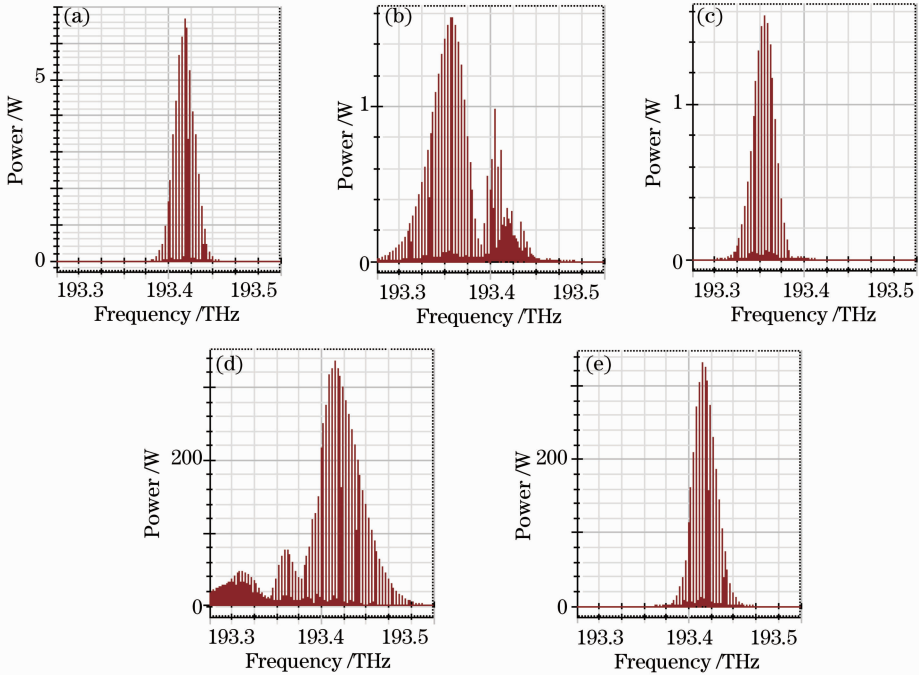


图 6 信号频谱图。(a) OBPF1 后;(b) SOA 后;(c) OBPF4 后;(d) HNLF 后;(f) OBPF5 后

Fig. 6 Spectra of signals. (a) After OBPF1; (b) after SOA; (c) after OBPF4; (d) after HNLF; (f) after OBPF5

图 7 给出了在噪声功率保持不变的条件下,误码率随再生器输入功率的变化特性以及信号眼图的对比情况。从图中可以看出,与无再生时相比较,经第一级再生放大之后信号误码率显著降低;在此基

础上,第二级再生后的误码率又降低了一个数量级。对比 a、b、c 三点处的眼图可以发现,经 SOA 和红移滤波之后,信号幅度的抖动得到了明显改善,“0”码处的功率也有所降低,而第二级再生后脉冲幅度上的抖动进一步得到了抑制。

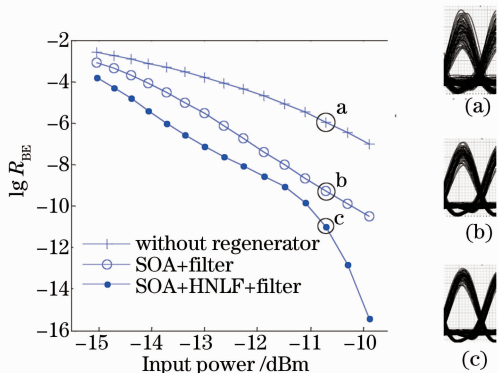


图 7 误码率及眼图对比

Fig. 7 Contrast of BER and eye diagram

## 4 结 论

再生放大技术是光信息远距离传输的保证,也是实现分布式卫星系统,构建卫星光信息网络的关键技术之一。尽管在光纤网络中全光再生技术已经得到了深入的研究,但是空间动态的网络特性对再生器的性能有其特殊的要求。本文针对星上光网络的动态路由特性,提出了一种无波长改变的全光再生方案,该方案利用 SOA 和 HNLF 中 SPM 效应引起的啁啾具有相反符号的特性,通过分别对恶化信号进行红移滤波和蓝移滤波实现了两级再生,并有

效抵消了单独滤波时的频率偏移。研究表明,该方案不仅在体积、重量等方面能够满足星上环境对有效载荷的限制,其再生性能也较一次偏移滤波的方案有明显提高。

### 参 考 文 献

- 1 Han Kai, Zhang Xiaoxin, Fu Fuxing, *et al.*. Effect of turbulence strength on phase characteristics and physical limit of phase correction of laser beams in turbulence [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010101.  
韩开, 张晓欣, 付福兴, 等. 湍流强度对大气传输光束的相位特性及其相位校正物理极限的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010101.
- 2 Huang Yinbo, Wei Heli, Mei Haiping, *et al.*. Effects of atmospheric channel on system performance of infrared laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 646—651.  
黄印博, 魏合理, 梅海平, 等. 大气信道对红外激光通信系统性能影响的实验研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 646—651.
- 3 Yuqiang Yang, Qiqi Han, Liying Tan, *et al.*. Research on bit error rate in the presence of local wavefront aberration in intersatellite laser communications[J]. *J Lightwave Technology*, 2011, 29(19): 2893—2898.
- 4 S Yamakawa, T Araki, H Morikawa. Analysis of noises generated in high-power-operated erbium doped fiber amplifiers and their influences on IM-DD/coherent OIC system performance [C]. *SPIE*, 2000, 3932: 196—204.
- 5 Jing Ma, Fang Zhao, Liying Tan, *et al.*. Degradation of single-mode fiber coupling efficiency due to localized wavefront aberrations in free-space laser communications [J]. *Opt Eng*, 2010, 49(4): 045004.
- 6 Masayuki Matsumoto. A fiber-based all-optical 3R regenerator for DPSK signals[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(5): 273—275.
- 7 J Leuthold, B Mikkelsen, R E Behringer, *et al.*. Novel 3R regenerator based on semiconductor optical amplifier delayed-interference configuration[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(8): 860—862.
- 8 A Striegler, B Schmauss. All-optical DPSK signal regeneration based on cross-phase modulation[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(4): 1083—1085.
- 9 M Matsumoto, H Sakaguchi. DPSK signal regeneration using a fiber-based amplitude regenerator[J]. *Opt Express*, 2008, 16(15): 11169—11175.

栏目编辑: 王晓琰