

光纤参量 2R 再生器的设计和研制

马辉栋 武保剑 文峰 周星宇 许渤

(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 描述了基于数据抽运方案的光纤参量 2R(再放大、再整形)再生器(FOPR)工作原理及其设计原则。从简并四波混频(FWM)抽运带宽、连续探测光波长设置以及功率转移函数(PTF)等方面对 FOPR 进行了仿真设计,指出 FOPR 中采用功率控制单元提升再生器性能的必要性。在此基础上,制作了一台全光 2R 再生器,并对其再生性能进行了实验测试,其 PTF 斜率约为 1.7,消光比(ER)可提升约 5 dB,实验结果与仿真设计一致。

关键词 光通信;全光 2R(再放大、再整形)再生器;四波混频;功率转移函数

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906005

Design and Development of Fiber-Optic Parametric 2R Regenerators

Ma Huidong Wu Baojian Wen Feng Zhou Xingyu Xu Bo

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

Abstract The operating principle and design criterion of fiber-optic parametric 2R (re-amplification, re-shaping) regenerator (FOPR) are described based on data-pump solutions. A FOPR is designed by simulation from degenerate four-wave mixing (FWM) pump bandwidth, wavelength configuration of the probe continuous wave, and power transfer function (PTF), and the necessity of using the power control unit in FOPRs to improve regenerator performance is also pointed out. Then, an all-optical 2R regenerator is developed and the experimental measurement for the regenerability is done. The measurement results show that, the PTF slope is about 1.7 with the extinction ratio (ER) improvement of about 5 dB, and the experimental data are consistent with the simulation results.

Key words optical communications; all-optical 2R (re-amplification, re-shaping) regenerator; four-wave mixing; power transfer function

OCIS codes 060.2330; 190.4370; 190.4380; 230.1150; 070.4340

1 引言

随着光通信速率的不断提高,光脉冲会受到群速度色散、偏振模色散、各种非线性效应、波分复用(WDM)信道间的串扰以及光放大器的放大自发辐射(ASE)噪声等因素的影响而劣化。因此,全光再生技术越来越受到人们的关注。全光再生技术可分为 2R(再放大、再整形)再生和 3R(再放大、再整形、再定时)再生。目前已报道的全光 2R 再生方案可基于半导体光放大器(SOA)^[1-2]、电吸收调制器

(EAM)^[3-4]、高非线性光纤(HNLF)^[5-10]等多种结构实现。基于光纤非线性效应的全光 2R 再生方案有不同的物理实现机理,如交叉相位调制(XPM)、自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)效应等。其中,基于光纤简并四波混频实现的全光信号再生系统具有光控光特性,可实现多波长定时功能,在密集波分复用(DWDM)系统中有着很好的应用前景^[11-12]。

目前,利用 HNLF 参量过程进行全光 2R 再生

收稿日期: 2013-03-25; **收到修改稿日期**: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(61271166)、国家 863 计划(2012AA011304)、国家 973 计划(2011CB301703)

作者简介: 马辉栋(1986—),女,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: yuexing1986@126.com

导师简介: 武保剑(1970—),男,博士,教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn(通信联系人)

(中国光学学会会员号: S0401116415)

的方案主要有两种:1)连续光(CW)抽运方案,即采用连续光作为抽运光对信号探测光进行 2R 再生,由于参量放大的增益饱和特性,该方案可以成功地抑制“1”码上的噪声;2)数据抽运方案,“0”码时抽运功率较小,对应闲频光的增益较小,可以很好地抑制“0”码上的噪声,同时通过合理选择探测光频率、抽运光频率及抽运功率可使“1”码的噪声处于相位失配的状态,从而抑制“1”码上的噪声^[13]。

本文研究了基于数据抽运方案的光纤参量 2R 再生器(FOPR)。描述了 FOPR 的基本结构,给出 FOPR 的一般设计原则;根据 FOPR 的 FWM 波长转换特性,优化设置连续探测光波长,并采用 OptiSystem 软件对 DWDM 信道的功率转移函数(PTF)进行仿真,分析其再生性能;完成了全光 2R 再生器的开发,并对上述设计方案进行实验测试。实验表明,该再生器对光信号的消光比(ER, E_R)、 Q 值和眼图等均有较大改善。

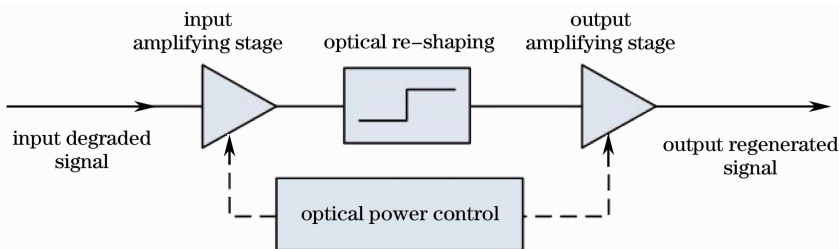


图 1 全光 2R 再生器

Fig. 1 All-optical 2R regenerator

实际应用中,FOPR 的设计可以从如下几个方面考虑:1)当输入/输出光放大级采用掺铒光纤放大器(EDFA)时,FOPR 的输入/输出光波长应处于 C 波段范围;2)从成本角度考虑,可采用 DWDM 解复用器来抑制输入高功率 EDFA 引入的 ASE 和滤出闲频光再生信号;3)在数据抽运的简并 FWM 2R 再生方案中,连续探测光的波长设置需要考虑数据抽运光的工作频率范围,使输出闲频光功率波动控制在 3 dB 内;4)鉴于 DWDM 系统在光纤通信网络中

2 全光 2R 再生器设计

全光 2R 再生器的基本功能就是对信号进行再放大、再整形,通常由输入放大级、光整形单元、输出放大级等几部分组成,如图 1 所示。输入放大级的作用是将输入光信号放大到所需的光功率水平,以使整形单元中的非线性效应能够发生。光整形单元(又称光判决门)是全光 2R 再生器的关键,常用 PTF 来表征。理想的 PTF 曲线呈阶梯状,能够有效抑制信号噪声。输出光放大级将整形后的光信号进一步放大,以满足整个全光 2R 再生器的增益设计指标,有时还要求将发生 FWM 波长转换的整形信号重新转换到原来的波长。此外,为了使全光 2R 再生器工作在优化状态,可采用功率控制单元来控制其输入/输出信号光功率。当输入/输出放大级为理想线性放大器时,全光 2R 再生器的输入输出转移特性由光整形单元决定。

的广泛应用,FWM 中各个光波的中心频率尽可能与 DWDM 标准栅格一致,这样可选择典型的 DWDM 信道来考察 FOPR 的 PTF 特性和再生性能;5)根据不同的应用需求,用户还可能对 FOPR 提出特殊的要求,例如,希望 FOPR 能够用于实验室已有的光分组交换(OPS)平台^[14],该平台基于 200 GHz 频率间隔的八波长 DWDM 系统(Ch21~Ch35)实现,对应于表 1 中的奇数信道。

表 1 16 个 100 GHz 频率间隔的 DWDM 信道

Table 1 16 DWDM channels with an interval of 100 GHz

Channel	Ch21	Ch23	Ch25	Ch27	Ch29	Ch31	Ch33	Ch35
Channel frequency /THz	192.1	192.3	192.5	192.7	192.9	193.1	193.3	193.5
Channel	Ch22	Ch24	Ch26	Ch28	Ch30	Ch32	Ch34	Ch36
Channel frequency /THz	192.2	192.4	192.6	192.8	193.0	193.2	193.4	193.6

3 光纤参量 2R 再生器的设计

3.1 光纤参量 2R 再生器的抽运带宽

在简并 FWM 中,抽运光波长的改变必然影响输

出闲频光功率的变化。闲频光功率降低到最大值的一半(-3 dB)时对应的抽运频率范围,称为抽运带宽。图 2 给出了探测光频率分别为 192.0 THz 和

193.5 THz时,闲频光功率对抽运光频率的依赖性曲线,其中注入抽运功率为 100 mW,探测光功率为 5 mW,高非线性光纤与后面实验中所用光纤参数相同,如表 2 所示。由图 2 可见,抽运带宽的位置会随着探测光频率发生相应移动。研究表明,抽运带宽的大小也会受到探测光频率的影响。

3.2 光纤参量 2R 再生器探测光的频率选择

对于简并 FWM 的 FOPR,探测光频率确定时,闲频光与抽运光之间的频率关系可用图 3 所示的三

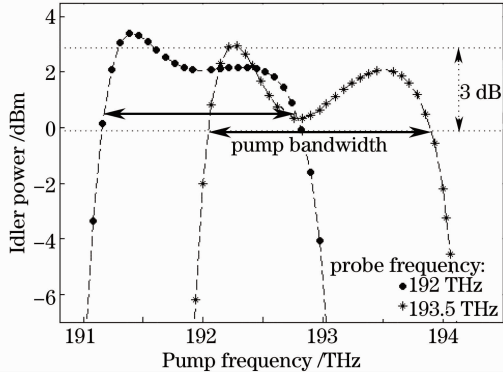


图 2 闲频光功率对抽运光频率的依赖性曲线
Fig. 2 Dependence curves of idler power on pump frequency

表 2 HNLFF 参数

Table 2 Specifications for the HNLFF

Parameter	Value
Fiber length L / km	1.02
Fiber loss α / (dB/km)	0.898
Zero dispersion frequency f_0 / THz	191.11
Effective area $A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	13.01
Nonlinear refractive index n_2 / (m^2/W)	3.2×10^{-20}
Dispersion slope S / [$\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$]	0.0179

角形表示,三角形的中线和底边分别对应于抽运带宽和相应的输出闲频光频率范围。图 3 给出了探测光频率分别为 $f_{\text{probe}} = 193$ THz (Ch30) 和 $f_{\text{probe}} = 193.5$ THz (Ch35) 时, FOPR 抽运带宽和输出闲频光频率范围的对应关系。其中波长的优化设置以实验室 OPS 平台的八个 DWDM 波长 (Ch21~Ch35) 为参考,抽运带宽范围均覆盖了 Ch21~Ch35,即图 3(a)和(b)对应的抽运频带上限和下限分别为 Ch35 和 Ch21。可见,只有当探测光频率在 193~193.5 THz 范围时,抽运带宽才可覆盖 Ch21~Ch35,然而,它们对应的闲频光却有一部分落在了 C 波段之外。即,如果要保证闲频光均处于 C 波段,必须对相应的抽运光频率加以限制。

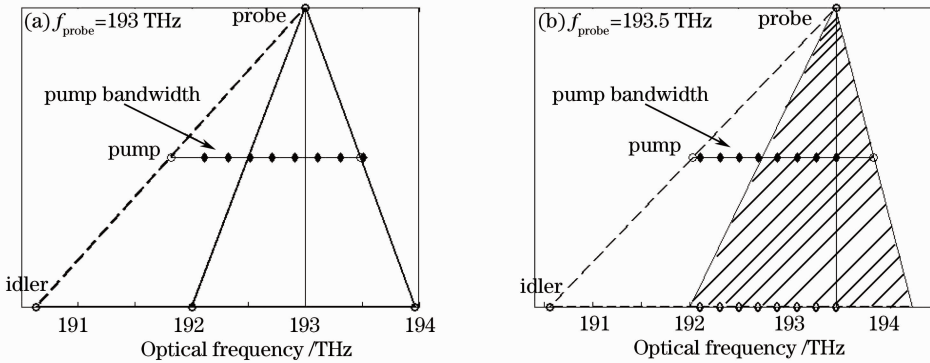


图 3 简并 FWM 中探测光、抽运光及闲频光之间的频率关系

Fig. 3 Frequency relationship between probe, pump and idler light in degenerate FWM

另一方面,可使再生信号波长与实验室的 OPS 平台波长一致,使闲频光尽可能处于 Ch21~Ch35 波长,即选择图 3(b)所示的波长设置方案(阴影部分所示)。这样,抽运光波长可选择频率间隔为 100 GHz 的 DWDM 信道(见表 1)。选用 Ch35 为探测光,对频率间隔为 100 GHz 的 Ch28~Ch34 (7 个)抽运信道进行全光 2R 恢复,输出信号是频率间隔为 200 GHz 的 Ch21~Ch33。

3.3 光纤参量 2R 再生器的密集波分复用信道功率转移特性

全光 2R 再生器的再生性能可以由 PTF 描述,

其消光比或 Q 因子(幅度抖动)性能可通过以 dBm 为单位的 PTF 进行定性分析。

一方面,信号消光比的提升可由对应 PTF 曲线的斜率 S_{PTF} 近似得到,即

$$E_{R,\text{out}} = S_{\text{PTF}} \cdot E_{R,\text{in}}, \quad (1)$$

式中 $E_{R,\text{in}}$ 和 $E_{R,\text{out}}$ 分别为输入和输出消光比。显然,要实现消光比提升,PTF 曲线的中间区域应有 $S_{\text{PTF}} > 1$ 。针对图 3(b)所示的波长设置方案,图 4 给出了 7 个数据抽运信道 PTF 的 OptiSystem 仿真曲线,图中也标出了各信道饱和点位置。仿真中,抽运光是 10 Gb/s 的伪随机二进制序列 (PRBS),序列长

度为 $2^7 - 1$, 占空比为 50%; 连续探测光功率为 7.82 dBm(与后面实验设置保持一致)。由图 4 可计算出以 dBm 为单位表示的 PTF 曲线斜率 S_{PTF} 为 1.6170~1.9381, 因此能够提升再生信号的消光比。

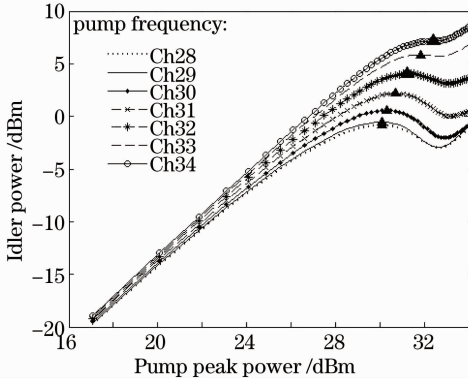


图 4 PTF 曲线

Fig. 4 Curves of PTF

另一方面, 从 PTF 曲线的局部来看, S_{PTF} 越接近于 0, 脉冲幅度抖动抑制效果越好, 饱和点的 $S_{PTF} = 0$ 。图 5 给出了各信道饱和点输入/输出功率对抽运频率的依赖性。根据图 5, 通过如图 1 所示的 FOPR 功率控制单元, 来使各信道输入光脉冲峰值功率与 PTF 饱和点相匹配, 可抑制“1”码上的噪声, 从而使 FOPR 工作在最优状态。

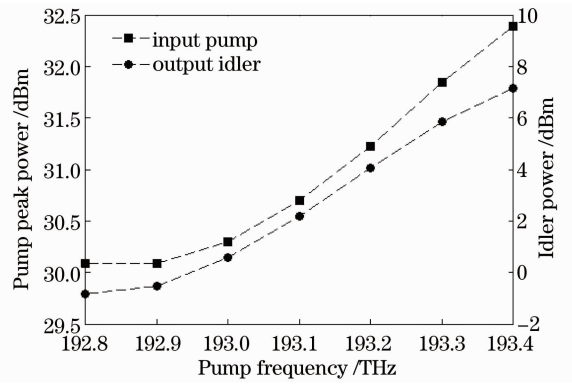


图 5 各信道饱和点输入/输出功率对抽运频率的依赖性

Fig. 5 Input and output power's dependences at saturation points of each channel on pump frequency

WDM 光源产生的连续光通过马赫-曾德尔调制器 (MZM) 两次调制后形成脉宽为 50 ps 的 PRBS 光脉冲序列, 调整调制器的偏置电压降低信号消光比, 然后通过 EDFA 放大并引入 ASE 噪声, 采用信道间隔为 100 GHz 的 1×8 的解复用器 (DE-MUX) 或可调带通滤波器 (TBPF) 对数据光滤波, 得到所需的劣化信号; 劣化光信号经高功率 EDFA (HP-EDFA) 放大后作为数据抽运信号, 与探测光通过 DWDM 复用器 (MUX) 耦合进入 HNLf (光纤参数如表 2 所示)。连续探测光功率为 7.82 dBm (Ch35), 由 FOPR 内置激光器提供。实验中采用偏振控制器 (PC) 可使劣化信号光与探测光的偏振方向一致, 光隔离器 (ISO) 则保证劣化信号光的单向传输。再生信号光通过频率间隔为 200 GHz 的 1×8 解复用器从 HNLf 的输出端滤出, 再通过 EDFA 放大送入信号接收端 (RX)。

4 光纤参量 2R 再生器的研制及其再生性能测试

根据上述分析, 搭建了全光 2R 再生实验系统, 并制作了 FOPR 设备, 结构框图如图 6 所示。

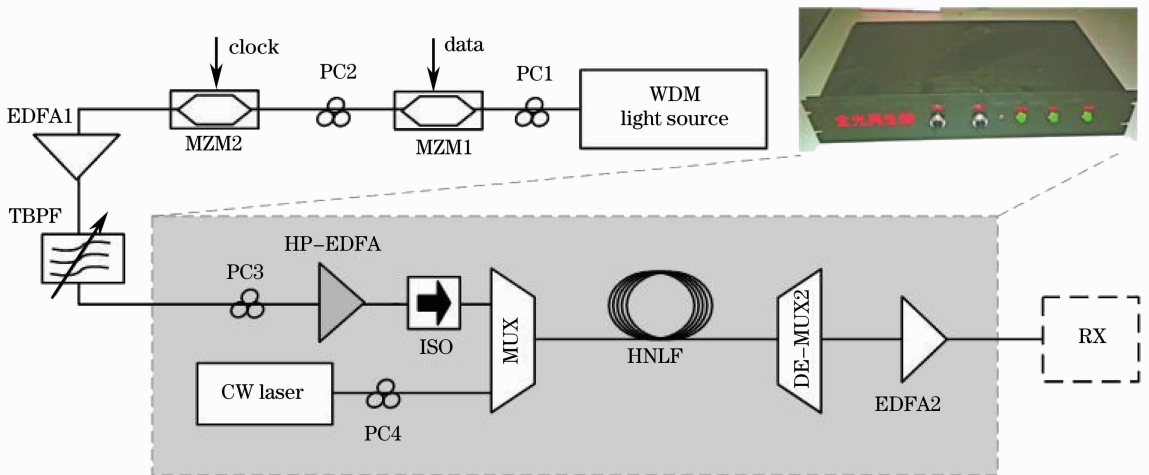


图 6 FOPR 实验框图

Fig. 6 Diagram of experimental setup for FOPR

实验测试了 Ch31 和 Ch33 抽运信道的平均功率转移曲线,如图 7 所示。由于实验中使用的 HP-EDFA 饱和输出光功率有限,为了保证抽运信号具有足够的功率获得 PTF 函数的饱和特性,实验中降低了伪随机序列“1”码发生概率,将其设置为 0.125,其他条件与图 4 的仿真条件相同。图 7 中相应的仿真曲线取自图 4,它们表示的是脉冲峰值功率转移曲线。由图 7 可知,平均值与峰值 PTF 曲线之间有一个平移,平移大小与序列脉冲的形状、占空比以及概率等因素有关^[15]。此外,线性光放大器的作用也会引起 PTF 曲线的平移。可见,实验和仿真 PTF 曲线的斜率相同(斜率 S_{PTF} 在 1.75 左右),由(1)式可知,两者之间的平移关系不影响对再生器 ER 提升性能的分析,这也是用 dBm 表示 PTF 曲线的好处所在。

图 8 给出了该 FOPR 在 Ch31 和 Ch33 两个抽运信道的再生性能,包括 ER、Q 值及眼图等,它们

的抽运功率均为 14.9 dBm。由图 8 可以看出,两个信道的 ER 分别提高了 5.1 dB 和 4.94 dB,Q 值也有不同程度的提高。根据图 7 的实验结果,Ch31 和 Ch33 信道的 PTF 斜率分别为 $S_{PTF} = 1.7266$ 和 $S_{PTF} = 1.7767$,代入(1)式,可得到与实验数据吻合的计算结果(如图 8 所示),从而表明了仿真设计与实验结果的一致性。

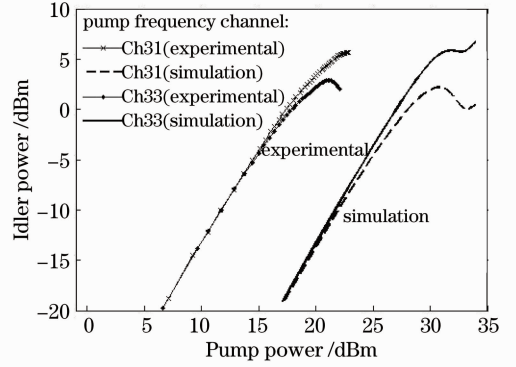


图 7 PTF 曲线对比

Fig. 7 Comparison of PTF curves

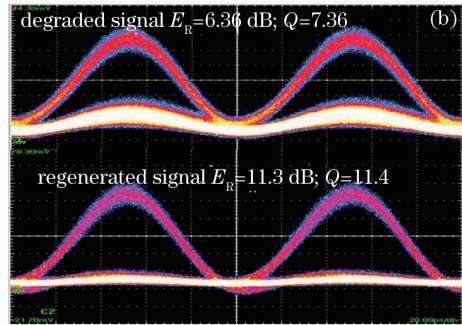
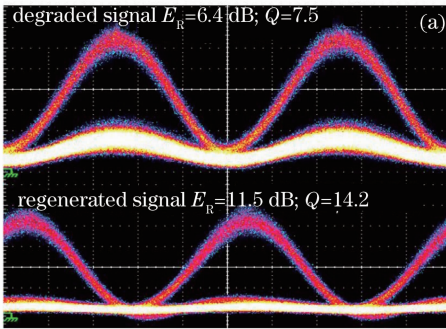


图 8 信号再生前后眼图对比。(a) Ch31; (b) Ch33

Fig. 8 Eye diagrams before and after regeneration of the signal. (a) Pumped by Ch31; (b) pumped by Ch33

5 结 论

为了使全光 2R 再生器工作于 C 波段,并使其输出波长与实验室 OPS 系统工作波长尽可能一致,以便于构建具有再生功能的光交换节点,设计和开发了一款 FOPR,利用简并 FWM 中输入抽运光与输出闲频光之间的“S”型 PTF 关系实现全光 2R 再生。具体设计中,考虑了光放大级的工作范围、DWDM 波长栅格、实验室 OPS 平台工作波长限制,以及探测光的频率设置对 PTF 斜率的影响等因素。根据 PTF 曲线的饱和特性,在 FOPR 中增加功率控制单元可使输入/输出信号光功率与 PTF 相匹配,有助于提升再生信号质量。以抽运频率为 Ch31 和 Ch33 的信道为例,对所设计的 FOPR 进行了实验测试,再生信号 ER 提升了 5 dB,Q 值提升了 4~

7,实验数据与仿真分析结果一致。

参 考 文 献

- 1 D Wolfson, P B Hansen, T Fjelde, *et al.*. 40 Gbit/s all-optical 2R regeneration in an SOA-based all-active Mach-Zehnder interferometer [C]. 5th Asia-Pacific Conference on Communications and 4th Optoelectronics and Communications Conference, 1999, 1: 456-457.
- 2 Luo Caiyun, Wang Tong, Huo Li, *et al.*. Research on 10 Gb/s all-optical 3R regeneration[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 27-29.
娄采云,王桐,霍力,等. 10 Gb/s 全光 3R 再生的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(1): 27-29.
- 3 P S Cho, D Mahgerefteh, J Coldhar. All-optical 2R regeneration and wavelength conversion at 20 Gb/s using an electroabsorption modulator[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11(12): 1662-1664.
- 4 Yu Jinlong, Wang Yaotian, Zhang Aixu, *et al.*. Experimental study on 40 Gb/s all optical 3R regeneration[J]. Acta Optica

- Sinica, 2007, 27(5): 801–806.
- 于晋龙, 王耀天, 张爱旭, 等. 40 Gb/s 信号全光 3R 再生实验[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 801–806.
- 5 P V Mamyshev. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect[C]. 24th European Conference on Optical Communication, 1998, 1: 475–476.
- 6 R Salem, A S Lenihan, G M Carter, *et al.*. Techniques for polarization-independent cross-phase modulation in nonlinear birefringent fibers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2008, 14(3): 540–550.
- 7 J Suzuki, T Tanemura, K Kikuchi. All-optical regenerator based on XPM-induced wavelength shift in highly-nonlinear fiber at 40 Gb/s[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005, 300–302.
- 8 C Ito, I Monfils, J Cartledge. All-optical 3R regeneration using higher-order four-wave mixing in a highly nonlinear fiber with a clock-modulated optical pump signal[C]. 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2006, 223–224.
- 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 Han Bingchen, Yu Jinlong, 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.
- 11 T Torounidis, M Westlund, H Sunnerud, *et al.*. Signal generation and transmission at 40, 80, and 160 Gb/s using a fiber-optical parametric pulse source[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(2): 312–314.
- 12 T Torounidis, H Sunnerud, P O Hedekvist, *et al.*. Amplification of WDM signals in fiber-based optical parametric amplifiers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(8): 1061–1063.
- 13 Wang Jun, Yu Jinlong, Luo Jun, *et al.*. An all-optical 3R regenerator for 40-Gbit/s system based on signal-pump fiber optical parametric amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9): 091201.
- 王 菊, 于晋龙, 罗 俊, 等. 基于信号抽运的光纤光参量放大的全光 3R 再生系统[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 091201.
- 14 Zhang Chongfu, Qiu Kun, He Yin. Experiment and processing of MOOC sequences-based optical labels for optical packet switching [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 1769–1774.
- 张崇富, 邱 昆, 贺 音. 光分组交换网络中多组正交码组合光标签识别处理及实验[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 1769–1774.
- 15 Ian A Glover, Peter M Grant. Digital Communications (Second Edition)[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 22–66.

栏目编辑: 王晓琰