

基于信号抽运的光纤光参量放大的全光 3R 再生系统*

王菊[†] 于晋龙 罗俊 王文睿 韩丙辰 吴波 郭精忠 杨思泽

(天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072)

(2010 年 10 月 13 日收到; 2010 年 11 月 2 日收到修改稿)

本文研究了利用恶化信号作为抽运的光纤光参量放大效应(FOPA)进行全光判决的全光 3R(再放大、再整形、再定时)再生实验方案,理论上分析了在不同的抽运功率条件下时(分别对应“0”和“1”码)参量放大抑制噪声的不同机理,表明选用合理的实验参数可以同时“0”、“1”码噪声进行抑制. 实验中利用高 Q 值的法布里-珀罗(F-P)滤波器提取了均方根(RMS)抖动仅为 180 fs 的 40 GHz 时钟;完成了对 40 bit/s 的单波长恶化信号的全光判决实验,将恶化信号的信噪比从 4.52 改善为 11.43. 实验验证了理论分析的结论,较好解决了利用参量放大效应进行全光 3R 再生时所出现的再生效果不均衡的问题.

关键词: 光纤通信, 3R 再生, 光纤光参量放大, 全光判决

PACS: 12. 20. Fv, 32. 80. Xx, 42. 60. - v

1. 引言

随着光网络通信速率不断提高,信道中的群速度色散、偏振模式色散、各种非线性效应, WDM 信道间的串扰,光源和光放大器的自发辐射噪声(ASE)等各种因素的影响变得不可忽略,所以对恶化信号的再生显得尤为重要. 基于光-电-光(OEO)的信号再生技术需要将恶化信号先转变为电信号,在电域里完成 3R(再放大、再定时、再整形)再生后再转换为光信号,该技术与全光 3R 再生系统相比结构复杂,随着信号速率和信道数目的增加复杂性和造价将呈指数增长. 全光 3R 再生由于具有透明性、通用性、灵活性和可扩展性等优点成为近几年来国际国内光通信领域研究的一个重要方向.

在国内,清华大学和天津大学就全光 3R 再生技术进行了大量的理论和实验研究. 清华大学利用光纤锁模激光器 + EAM(电吸收调制器)的方法实现了 40 Gbit/s 的全光 3R 再生^[1]. 天津大学利用 F-P 滤波器 + SOA 的方案实现了 40 Gbit/s 的全光 3R 再生^[2,3]. 近年来利用高非线性光纤(HNLF)中的参

量放大效应进行全光信号处理^[4]尤其是全光 3R 再生有大量的相关报道^[5-8],该方案的优点是对于码型(RZ, NRZ)透明,已报道的光纤光参量放大能处理的信号速率可以达到 160 Gbit/s^[9],并且在光纤结构中,有可能实现多波长的全光 3R 再生^[10],更适合应用于现有的 WDM 系统,这些优点是上述方案无法企及的.

在近几年国际上对于利用 HNLF 中的参量放大作用进行全光 3R 再生的实验报道中,一般采用强度时钟的抽运光实现对信号的再定时^[5-7]. 由于参量放大的增益饱和特性,利用时钟抽运可以成功的抑制“1”码噪声;但是由于其指数增益特性,“0”码上的幅度噪声将会被时钟抽运放大,出现了全光 3R 再生中的再生效果不均匀现象.

本文针对这一问题提出了利用恶化信号作为抽运光,时钟为探测光,由参量过程产生的闲频光为再生信号的全光判决方案. 采用此方案,当抽运功率较小时(对应“0”码),参量放大的指数增益特性决定了此时闲频波长处的增益几乎为 0,可以很好的抑制“0”码噪声,这就克服了时钟作为抽运时“0”码噪声无法抑制的问题;该方案与时钟抽运方

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:60736035)和国家高技术研究发展计划(863 计划)(批准号:2007AA01Z272)资助的课题.

[†] E-mail: wangjtu@126.com

案噪声抑制机理的另一个重要区别是:由于此时是以带噪声的信号作为抽运,无法像时钟抽运方案一样利用增益饱和和效益抑制“1”码噪声. 在研究中发现当抽运功率增大引起的相位变化会导致参量过程中的相位匹配的变化,合理选择抽运光的波长和功率可以使得“1”码的噪声处于相位失配的状态,导致闲频转换效率下降,从而抑制“1”码噪声. 在此分析的基础上我们进行了实验验证,实现了对恶化信号的“1”码和“0”码上的幅度噪声进行了均衡的再生.

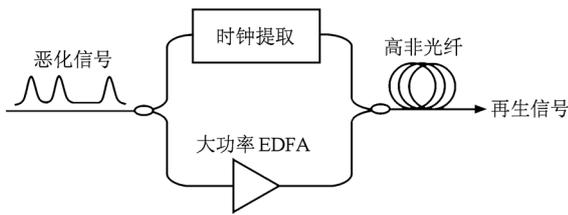


图1 40 Gbit/s 全光 3R 再生系统原理框图

2. 系统原理

系统的基本原理框图如图1所示,将恶化的信号通过耦合器分为两路,一路用于时钟提取,另一路经过大功率掺铒光纤放大器(HP-EDFA)放大后和提取出来的时钟一起注入高非线性光纤中进行参量放大完成再定时和再整形,在高非线性光纤的输出端用一个滤波器滤出闲频光部分就得到了全光 3R 再生信号.

2.1. 基于信号抽运的光纤光参量再生特性的理论分析

在基于 FOPA 的全光 3R 再生系统中,为了实现恶化信号的再定时功能,往往采用强度时钟的抽运光,实现对信号的定时. 这种方法往往不能对“0”码噪声进行抑制,甚至还可能将“0”码噪声进行放大. 为解决这一问题,本文采用了以恶化信号作为抽运进行全光判决的方案.

恶化信号、时钟、以及再生信号的波长位置关系如图2所示,由于再生信号的波长处于闲频位置,所以以下分析均以闲频波长为主. 首先分析光纤光参量放大的指数增益特性对恶化信号“0”码噪声的抑制.

在高非线性光纤(HNLF)的参量放大中,闲频

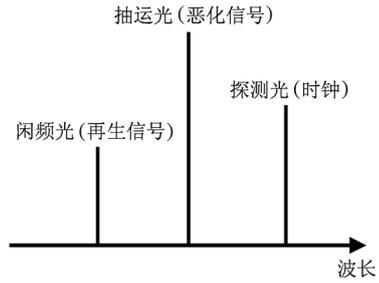


图2 恶化信号、时钟、再生信号的波长位置关系

光的转换效率可以近似认为与闲频光波长处的参量放大增益成正比,为了测试方便,以下均分析测试闲频光波长处的增益,即参量放大后闲频波长处的信号功率与参量放大前闲频波长处的信号功率的比值. 当输入的信号功率较小,在不考虑光纤损耗的情况下,参量放大的增益可以描述为^[11]

$$G_0 = \left[1 + \left(\gamma P_p L \frac{\sinh gL}{gL} \right)^2 \right], \quad (1)$$

在这里, γ 为 HNLF 的非线性系数, P_p 为抽运功率, L 为光纤长度, g 为参量增益系数. g 决定于探测光、抽运光和闲频光之间的传播常数的差值 $\Delta\beta$, 它们的关系可以描述为

$$g^2 = -\Delta\beta \left(\frac{\Delta\beta}{4} + \gamma P_p \right), \quad (2)$$

而 $\Delta\beta$ 又决定于 HNLF 的零色散波长 λ_0 和色散斜率 $S = dD/d\lambda$, 同时和抽运光和被放大光的波长位置有关.

$$\Delta\beta = -\frac{2\pi c_0 S}{\lambda_0^2} (\lambda_{\text{pump}} - \lambda_0) (\lambda_{\text{pump}} - \lambda_s), \quad (3)$$

在满足相位匹配条件的情况下, $\Delta\beta = -2\gamma P_p$, 此时的闲频增益将达到最大,可以描述为

$$G_{0,\text{max}} = \frac{1}{4} \cdot \exp(2\gamma P_p L). \quad (4)$$

由(4)式可以看出,在光纤长度一定的情况下,闲频处的增益随着抽运功率的增大呈指数增长状态. 当恶化信号的“0”码作为抽运出现时,此时的抽运功率很低,相应的闲频增益接近0,可以抑制“0”码上的幅度噪声.

如上所述,采用信号作为抽运的参量放大方案,如果只考虑指数型增益,则随着抽运功率的增加,闲频处的光功率也应随着抽运功率的增大而指数增大,不会出现饱和现象,从而恶化“1”码噪声. 但指数型增益是假设满足相位匹配条件下的结论. 在实际情况下当抽运功率继续增大时,需要考虑以

下两个因素:1)抽运光增大会引入非线性相移的变化,从而逐步破坏相位匹配条件.2)随着抽运功率的进一步提高,向更高阶的闲频光的能量转移也会抑制闲频光的增益的提高.以上两个因素会导致闲频增益在大功率抽运的条件下偏离理想的指数增益曲线,出现饱和甚至下降的趋势.

首先分析参量过程的产生需要满足相位匹配条件^[12]

$$k = (\tilde{n}_{\text{probe}}\omega_{\text{probe}} + \tilde{n}_{\text{idler}}\omega_{\text{idler}} - 2\tilde{n}_{\text{pump}}\omega_{\text{pump}})/c = 0, \quad (5)$$

其中 \tilde{n} 代表有效折射率, ω 代表频率.相位匹配条件 $k = 0$ 还可以写为

$$k = \Delta k_M + \Delta k_W + \Delta k_{NL} = 0, \quad (6)$$

式中, Δk_M , Δk_W , Δk_{NL} 分别代表由材料色散、波导色散、非线性效应引起的相位失配.若把有效折射率写成

$$\tilde{n}_j = n_j + \Delta n_j, \quad (7)$$

则 Δk_M 和 Δk_W 可以从方程(5)中得出,式中 Δn_j 是由波导引起的材料折射率 n_j 的变化.由材料色散、波导色散、非线性效应引起的相位失配可以分别表示为

$$\Delta k_M = [n_{\text{probe}}\omega_{\text{probe}} + n_{\text{idler}}\omega_{\text{idler}} - 2n_{\text{pump}}\omega_{\text{pump}}]/c, \quad (8)$$

$$\Delta k_W = [\Delta n_{\text{probe}}\omega_{\text{probe}} + \Delta n_{\text{idler}}\omega_{\text{idler}} - 2\Delta n_{\text{pump}}\omega_{\text{pump}}]/c, \quad (9)$$

$$\Delta k_{NL} = 2\gamma P_{\text{pump}}. \quad (10)$$

在单模光纤中,由于对所有的波近乎有相同的 Δn ,则 $\Delta k_W = 0$,当抽运波长大于零色散波长时($\lambda_{\text{pump}} > \lambda_0$), Δk_M 变为负值,这就允许对 λ_0 附近的 λ_{pump} 实现相位匹配.

针对本文研究的内容,当抽运的功率继续增大时,将会带来非线性相移 $\Delta k_{NL} = 2\gamma P_{\text{pump}}$ 的改变,相位匹配条件被破坏,会使闲频波长处的参量放大的增益降低.

随着抽运功率的增大,抽运光与输入光之间的四波混频的转换效率增强,与由(4)式决定的指数增益成正比,所以抽运光的能量被转移到更远的波长上,抑制了闲频处光增益的增加.

以上两点原因将会使闲频光波长处的增益出现饱和甚至下降,这对应于参量放大过程中,闲频的转换效率出现了类似饱和甚至降低的现象.信号的“1”码对应于大功率的情况,所以当“1”码功率被放大到闲频增益出现饱和的情况时,“1”码上的幅

度噪声将会被抑制.

2.2. 基于信号抽运的光纤参量增益特性的实验验证

为了验证2.1中的理论分析,对HNLF的参量特性进行了如下的分析.

测试HNLF的增益特性的实验装置如图3所示.

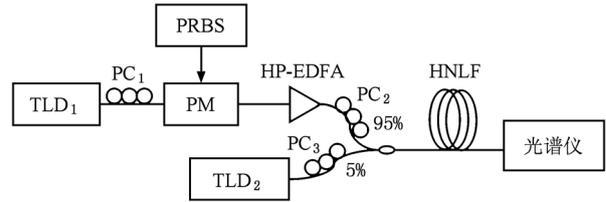


图3 HNLF增益特性测试实验装置图(TLD为可调激光器;PC为偏振控制器;PM为相位调制器;PRBS为伪随机码序列;HP-EDFA为大功率掺铒光纤放大器;HNLF为高非线性光纤)

在图3中,激光器TLD₁的波长设为1548.5 nm作为抽运光,经由偏振控制器PC₁后进入相位调制器,由一个700 Mbit/s的伪随机码序列对其进行相位调制,以抑制受激布里渊散射SBS,经过相位调制器的抽运光经过大功率掺铒光纤放大器HP-EDFA后经由95%的耦合器口进入高非线性光纤HNLF中;可调激光器TLD₂作为探测光经由5%的耦合器口进入高非线性光纤.在测试中使用的HNLF的非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$,长度为500 m,零色散点为1545 nm,色散斜率小于 $0.035 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$.

在该测试中,拟使用的探测光的波长为1554.1 nm,抽运光波长为1548.5 nm,则产生的闲频光波长应为1542.9 nm,所以实验主要对此波长的增益特性进行研究.设定TLD₂的波长为1542.9 nm,强度为 $20 \mu\text{W}$.抽运光功率分别为22 dBm(158 mW),23 dBm(200 mW),24 dBm(251 mW),25 dBm(316 mW),26 dBm(398 mW),26.5 dBm(447 mW),27 dBm(501 mW),27.5 dBm(562 mW),28 dBm(630 mW),模拟信号抽运的功率变化.HNLF输出的光经由光谱仪测试闲频1542.9 nm处被放大光的光强,从而测定该波长处的增益,将9个功率点处的增益采用用6次多项式拟合,得到如图4的曲线.由图4可以看出当抽运功率小于300 mW时,由(4)式知闲频指数增益增长缓慢,几乎为0.利用抽运开关的这一特性,可以抑制恶化信号“0”码上的幅度噪声,理论与实验完全符合.

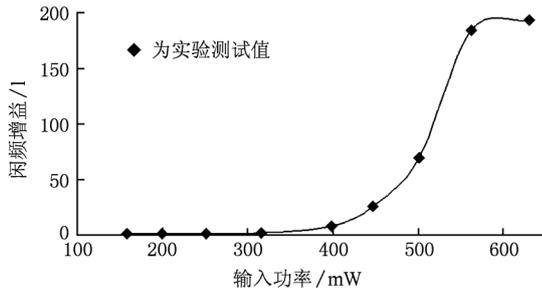


图4 闲频波长处增益随输入抽运功率的变化

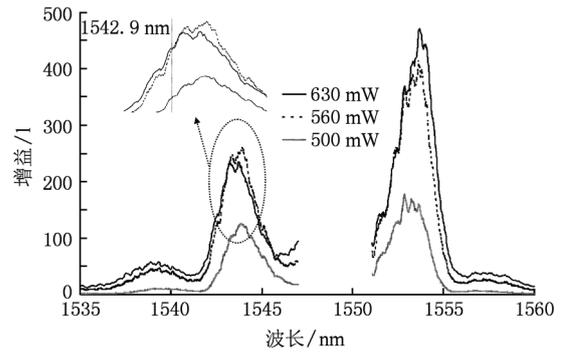


图5 不同功率时的参量放大增益特性曲线

图5 为在实验装置图3中,抽运功率分别为630 mW,560 mW,500 mW时,扫描LD₂的波长从1535—1560 nm,步长为0.035 nm,得到的HNLF的增益特性曲线.由图5可以看出,随着抽运功率的增加,参量放大的增益峰值远离了抽运的中心波长,这是由于抽运功率的增加导致的非线性相移破坏了相位匹配条件,使得参量放大的增益峰值远离抽运波长来达到新的相位匹配条件.在本实验中的闲频光位置位于1542.9 nm,随着抽运功率的增大引起增益峰的偏移,导致了信号增益增大减缓,如图4所示.

通过仔细选择波长值和抽运光的功率,可以有效控制增益的增大或减小,利用这种方式产生的转换效率降低的现象则可以用于抑制恶化信号的“1”码噪声.在本测试中,调节抽运功率在550—600 mW处将可以有效的抑制恶化信号的“1”码噪声.

基于以上分析,利用恶化信号作为抽运,滤出闲频的参量放大效应可以对恶化信号的“1”码和“0”码都有再生的可行性,在此基础上进行了以下的实验验证.

3. 再生系统实验

3.1. 实验装置

系统实验装置图如图6所示.在本实验中,经过10 km 光纤传输恶化后的40Gbit/s的信号波长为1548.5 nm,经过耦合器以后分两路,其中一路连同一束探测光(连续光)注入半导体光放大器SOA₁中进行波长变换,经过滤波器OBPF₁滤出的探测光注入精细度为1000的F-P滤波器进行时钟提取,提取出来的时钟含有部分低频分量,可以通过SOA₂的自增益调制作用滤除低频噪声^[13].通过改变探测光的波长对准F-P滤波器,最终确定时钟波长为1554.1 nm.另外一路恶化信号经过大功率EDFA(HP-EDFA)放大,HP-EDFA的输出功率为28.7 dBm,放大后的恶化信号做抽运与时钟一起耦合进入HNLF进行全光判决.由于FOPA效应与偏振态相关,所以时钟与恶化信号进入HNLF前都经过了偏振控制器PC,由OBPF₃滤出闲频波长便可得到经过再定时和再整形的再生信号.

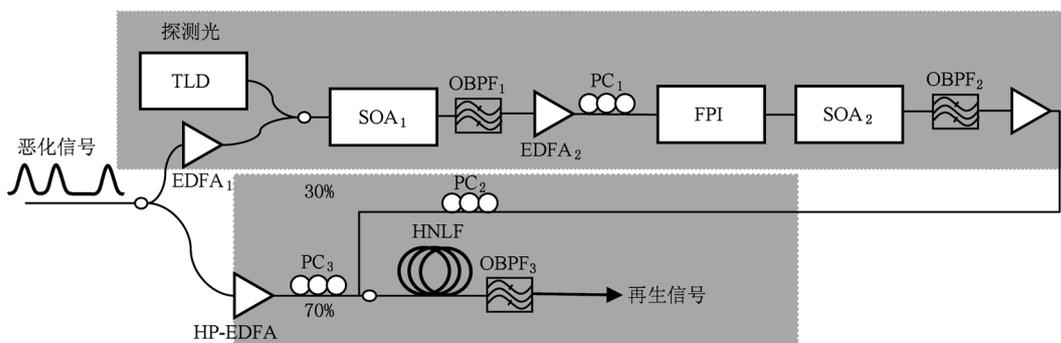


图6 40Gbit/s全光3R再生实验装置图(TLD为可调激光器;EDFA为掺铒光纤放大器;HP-EDFA为大功率掺铒光纤放大器;SOA为半导体光放大器;OBPF为光滤波器;PC为偏振控制器;FPI为法布里-珀罗滤波器;HNLF为高非线性光纤)

3.2. 实验结果与讨论

在本实验中首先进行的时钟提取单元,提取的时钟谱图、波形图以及利用电谱仪测得的相位噪声分析分别如图 7(a), (b), (c) 所示. 利用电谱仪所测试的相位噪声曲线计算得到的时钟定时 RMS 抖动仅为 180 fs^[14].

在全光判决单元,恶化信号、再生信号的眼图

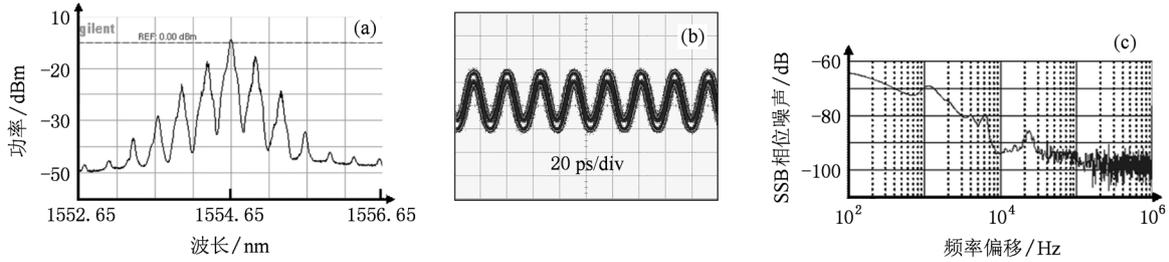


图 7 输出时钟(a)谱图(b)眼图和(c)时钟的相位噪声分析图

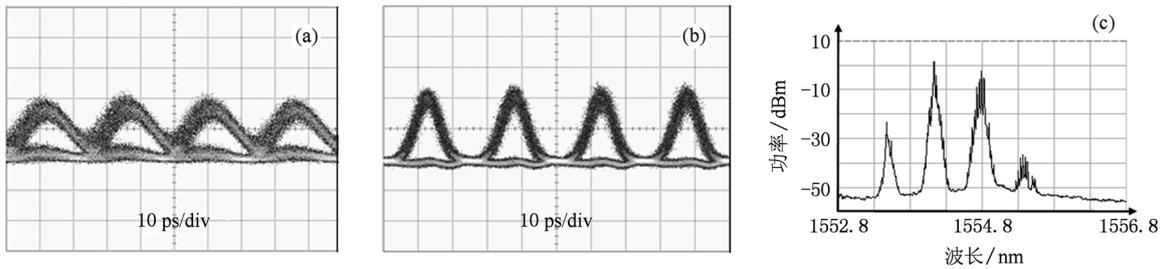


图 8 (a)恶化信号眼图(b)再生信号眼图(c)全光判决的谱图

本文提出了一种基于 HNLF 中的参量放大效应,以恶化信号作为抽运开关的全光 3R 再生实验方案,完成了对单路 40Gbit/s 的恶化信号进行全光再生的 3R 实验,提取的时钟均方根 (RMS) 抖动仅为 180 fs,再生前信号的信噪比为 4.52,再生以后信

和全光判决的光谱图分别如图 8(a), (b), (c) 所示. 再生之前信号的示波器测得的信噪比为 4.52,再生信号的示波器测得的信噪比改善为 11.43,示波器测得的再生信号的抖动小于 1 ps,考虑到示波器自身抖动的极限为 1ps,实际的再生信号的抖动应小于 1ps,从图 8 可以看出恶化信号的“1”码和“0”码都得到了明显的再生.

号的信噪比改善为 11.43. 较为遗憾的是由于实验条件的限制,没有对再生系统进行误码测试.

以上结果表明该方案可以较为理想的对恶化信号进行再生,并验证了通过优化波长值和抽运功率可以达到均衡的再生效果. 参考文献

[1] Lou C Y, Wang T, Huo L, Gao Y Z, Zhang E Y 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 1467 (in Chinese) [娄采云、王桐、霍力、高以智、章恩耀 2005 光学学报 **25** 1467]
 [2] Yu J L, Wang Y T, Zhang A X, Zhang Y D, Zhu L K, Li Y N, Hu H, Wang W R, Wang Z R, Lü J, Wang X B, Zhang L T, Yang E Z 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 801 (in Chinese) [于晋龙、王耀天、张爱旭、张艳冬、朱利凯、李亚男、胡浩、王文睿、王卓然、吕捷、王新兵、张立台、杨恩泽 2007 光学学报 **27** 801]
 [3] Wang Y T, Yu J L, Zhu L K, Zhang Y D, Yang E Z 2005 *Asia-Pacific Optical Communications (APOC)* Shanghai, China,

November 6—10 2005 p6021B-1
 [4] Jiang Y, Yu J L, Hu H, Zhang A X, Zhang L T, Wang W R, Yang E Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2994 (in Chinese) [江阳、于晋龙、胡浩、张爱旭、张立台、王文睿、杨恩泽 2008 物理学报 **57** 2994]
 [5] Li Y, Li G 2003 *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)* Atlanta, America, March 23—28, 2003 p349
 [6] Yu C, Luo T, Zhang B, Pan Z, Adler M, Wang Y, McGeehan J E, Willner A E 2005 *Optical Fiber communication/National*

- Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)* Los Angeles, America, March 6—11, 2005 pOTU01
- [7] Su Y K, Wang L J, Agarwal A, Kumar P 2000 *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)* Baltimore, America, March 7—10, 2000 pMG4-1
- [8] Yu J L, Luo J, Han B C, Guo J Z, Wu B, Wang J, Zhang X Y, Yang E Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6139 (in Chinese) [于晋龙、罗俊、韩丙辰、郭精忠、吴波、王菊、张晓媛、杨恩泽 2010 物理学报 **59** 6139]
- [9] Torounidis T, Westlund M, Sunnerud H, Olsson B, Andrekson P A 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 312
- [10] Miao X R, Gao S M, Gao Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7699 (in Chinese) [苗向蕊、高士明、高莹 2008 物理学报 **57** 7699]
- [11] Kylemark P, Sunnerud H, Karlsson M, Andrekson P A 2006 *IEEE J. Lightwave Technol.* **24** 3471
- [12] Agrawal G P 2002 *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* Third Edition (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p246 (in Chinese) [阿戈沃 2002 非线性光纤光学原理及应用(北京:电子工业出版社)第246页]
- [13] Inoue K 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 338
- [14] Demir A 2006 *IEEE Transactions on Circuits and Systems.* **53** 1869

An all-optical 3R regenerator for 40-Gbit/s system based on signal-pump fiber optical parametric amplification *

Wang Ju[†] Yu Jin-Long Luo Jun Wang Wen-Rui Han Bing-Chen Wu Bo Guo Jing-Zhong Yang En-Ze

(*Optical Fiber Communication Laboratory, School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 13 October 2010; revised manuscript received 26 October 2010)

Abstract

A novel scheme of all-optical 3R regeneration has been proposed in this paper. Using degraded data signal rather than clock as a pump, all-optical 40Gbps 3R regeneration based on a fiber optical parametric amplification effect (FOPA) is realized with improved performance compared with previous regeneration schemes. Theoretical analysis of the noise suppression mechanism under different pump power (corresponding to “0” code or “1” code) is provided. By properly adjusting the parameters of FOPA, amplitude noise on both “0” code and “1” code can be suppressed simultaneously. The clock extraction is based on wavelength conversion and a Fabry-Pérot (F-P) filter with a high Q value of 1000. The theoretical analysis conclusions are verified through experiments, and the imbalance of the 3R regeneration using fiber optical parametric amplification is eliminated. The root mean square (RMS) jitter of the clock extracted is only 180fs. The signal-to-noise ratio of the regenerated signal is improved from 4.52 to 11.43.

Keywords: optical communication, 3R regeneration, fiber-optic parametric amplification, optical decision

PACS: 12.20.Fv, 32.80.Xx, 42.60.-v

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60736035) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA01Z272).

[†] E-mail: wangjtu@126.com