

基于光纤光参量放大的异步双波长 全光再生技术研究*

于晋龙¹⁾ 罗俊^{1)†} 韩丙辰¹⁾²⁾ 郭精忠¹⁾ 吴波¹⁾ 王菊¹⁾ 张晓媛¹⁾ 杨恩泽¹⁾

1) (天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室, 天津 300072)

2) (山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 037009)

(2009 年 10 月 8 日收到; 2009 年 12 月 14 日收到修改稿)

本文提出了一种新型的多波长全光再生方案, 利用相位时钟光纤光参量放大, 并采用相邻信道偏振正交的方法, 实现对由异步信源产生的双波长信号全光再生. 理论分析了参量放大中的增益饱和现象用于幅度噪声抑制, 以及利用相位时钟及后续色散实现对信号定时的机理. 在这个基础上, 对两个独立信源产生的异步双波长 10 Gbit/s 信号进行再生实验, 实验表明该方案有效的抑制了基于多波长 3R 再生系统中信道间的四波混频与交叉相位调制等非线性干扰. 系统在单波长和双波长情况下分别将两路信号信噪比改善了至少 6.5 dB 与 4.5 dB. 误码率测试结果说明, 与背对背测试结果相比, 无论是在单波长还是双波长条件下, 两路波长的信号经过再生后都实现了约 2 dB 的接收机功率代价的改善.

关键词: 光通信, 多波长全光再生, 光纤光参量放大

PACC: 4230Q, 4265K

1. 引 言

在全光网络中, 信号的全光 3R 再生 (reamplification, reshaping, retiming) 是一个亟待解决的关键问题. 近年来国内外对于 3R 再生技术的研究还主要集中在单波长系统中^[1-4]. 然而单波长全光再生技术无论在性能还是成本上与传统的电再生方案相比都没有优势可言; 并且对于目前广泛应用的波分复用 (WDM) 系统, 如果采用单波长再生技术, 再生系统复杂度将随着信道路数的增加而显著增长. 光从本质讲, 理论上可以在同一系统中对多个波长同时进行 3R 再生的, 而这正是电的再生技术所无法企及的. 因此, 只有能够用于 WDM 系统的多波长全光 3R 技术才可能充分发挥全光技术优势. 但是在多波长 3R 再生系统中, 一个突出的问题是需要单个器件中实现多个波长的时钟信号同时分别对多个波长的数据信号进行判决, 这对判决器件的提出了甚为苛刻的要求; 另外, 为保证不同波长信号再生的独立性, 判决的过程中必须消除各

路信号之间通过交叉相位调制 (XPM) 以及四波混频 (FWM) 等非线性效应引起的相互干扰^[5,6], 而这也是实现多波长判决的主要难题.

迄今为止, 多波长再生技术的研究还主要局限在多波长 2R 再生方面^[6-9], 且国内外相关的报道也并不多见. 一个比较典型的多波长 2R 再生方案是 Mamyshev 再生器^[7], 它是利用光纤中自相位调制效应 (SPM) 及偏移滤波的方法实现对多波长信号的再生. 但是基于 SPM 的 2R 再生器不能实现对恶化信号的再定时功能. 文献 [10] 利用太赫兹光学非对称解复用器 (TOAD) 及串并转换技术, 实现了对多路 WDM 信号的再整形和再定时功能, 但此方案要求各个波长的信号必须拥有相同的时钟信号, 而现有的分组网络中不同的用户间的时钟是相互独立的, 不可能实现精确同步, 所以这种方案并不适用于现有的多信源异步网络. 非线性光纤和非线性光波导理论上讲完全可以实现同时对多波长信号并行处理^[11], 是目前多波长全光再生技术研究的热点. 光纤光参量放大 (FOPA) 效应以其及超快的响应速率非线性增益特性^[12-14], 在全光信号处理中

* 国家自然科学基金 (批准号: 60736035 和 60977053), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2007AA01Z272) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: luojuntju@gmail.com

得到了广泛的应用,比如窄脉冲产生^[15]及单波长的全光 3R 再生^[16]. 但将 FOPA 应用于多波长的 3R 再生系统中时,信道间的 XPM 及 FWM 等非线性串扰仍是一个亟待解决的难题.

为了消除多波长再生系统中信道间的干扰,本文提出一种新型的基于光纤光参量放大的多波长全光再生方案. 系统利用 FOPA 的增益饱和效应,实现对信号的再整形;并采用相位时钟抽运完成对信号再定时,避免了传统上使用强度时钟抽运而引入的信道间 XPM 串扰;同时,相邻信道偏振正交的方法,也抑制了多波长再生中相邻信道间的 FWM 效应. 通过上述方法,实现了对两个独立信源产生的异步双波长信号的全光再生,有效降低了信道间的非线性串扰,解决了多波长 3R 再生困扰已久的一个关键难题.

2. 系统原理分析

系统的原理示意图如图 1 所示,恶化的 WDM 信号是偏振正交的,首先将各路信号与对应的相位时钟抽运光一起注入高非线性光纤(HNLF)中进行光纤光参量放大. 利用 FOPA 中的增益饱和效应,可以抑制信号幅度的随机起伏,实现对信号的幅度再生. 同时,在参量放大过程中产生的闲频光复制了信号光的编码信息,并被相位时钟抽运光相位调制. 相邻信道的偏振态正交,将抑制信道间的 FWM 效应. 光参量放大后,使用一个光滤波器单独滤出闲频光,并通过一段色散量合适的色散光纤,就可以将闲频光上的相位时钟信息转换为强度时钟信息,从而完成对恶化信号再定时功能.

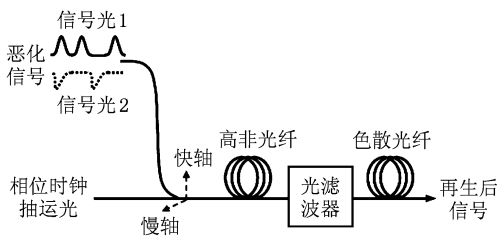


图 1 异步双波长再生系统原理示意图

2.1. 光纤光参量放大的增益饱和效应

在 FOPA 中,对于注入信号光功率 P_s 远小于抽运光功率的情况,往往忽略信号光功率对参量过程中相位匹配条件的影响,此时 FOPA 处于未饱和状

态. 随着信号光功率逐步增加,在计算 FOPA 增益时必须考虑到信号光功率的影响. 设 FOPA 系统中的总功率为 P ,并引入归一化的抽运光功率 $P_p(z) = [A_p(z)^2]/P$,归一化的信号与闲频光幅度 $a_{s,i}(z) = A_{s,i}(z)/P^{1/2}$ (式中下标 s 代表信号光, i 代表闲频光),以及归一化的传输距离 $\xi = z\gamma P$,考虑信号光功率影响的情况下,重新求解耦合模式方程,可以得到参量放大中信号增益为^[14]

$$G(\xi) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{32 \sinh^2(\alpha\xi) + 25\Delta a^2 + 7}{32\Delta a^2 \sinh^2(\alpha\xi) + 25\Delta a^2 + 7} \right], \quad (1)$$

其中, $\alpha = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{7(1 - \Delta a^2) \left(1 + \frac{25}{7} \Delta a^2 \right)}$, $\Delta a^2 = a_s^2 - a_i^2$ 为信号与闲频光功率归一化差值,当 $\Delta a^2 \rightarrow 0$ 时,输入信号光功率很小,可以获得未饱和的信号增益为

$$G_0(z) = 1 + \frac{16}{7} \sinh^2 \left(\frac{\sqrt{7}}{4} \gamma P_p z \right). \quad (2)$$

由于信号光功率相对于系统总功率来说仍然较小,满足 $\Delta a^2 \ll 1$,可以做近似 $\sinh^2(\alpha\xi) \approx \frac{7(G_0 - 1)}{16}$,并将前述归一化公式代入(1)式中,可以得到信号增益随输入信号光功率变化的表达式

$$G(P_{s_{in}}) = \frac{G_0}{1 + 2P_{s_{in}}G_0/P_p} = \frac{G_0}{1 + P_{s_{in}}/P_{sat}}, \quad (3)$$

这里,我们定义为饱和输入功率 $P_{sat} = P_p/2G_0$,为信号增益将由下降为未饱和增益的一半时的输入信号光功率. 由上述分析可知,输入信号功率的增加将使信号增益达到饱和并开始下降,而输出信号功率也随之达到一个稳定值. 图 2 显示了根据前述分析计算得出 FOPA 增益随输入信号光功率变化曲线(计算中,假设 HNLF 的非线性系数为 $10 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$,长度为 500 m). 可以看出,一方面,随着信号光功率的增加,信号光增益由最初的某一固定值开始下降,当信号光功率 $P_{s_{in}} = P_{sat}$ 时,信号增益将下降 3 dB,此时增益达到饱和,输出信号功率开始趋于恒定值;另一方面,比较不同抽运光功率条件下的变化曲线可以看出,随着抽运光功率的增加,增益饱和和状态也越容易达到. 在 3R 再生系统中,利用 FOPA 的这种增益饱和效应,可以实现对输入信号幅度抖动的抑制作用,完成对信号的再整形;并且提高抽运光的功率,可以降低达到饱和所需的信号光功率.

2.2. 基于相位时钟光纤光参量放大的再定时

在基于 FOPA 的全光 3R 再生系统中,一般采用

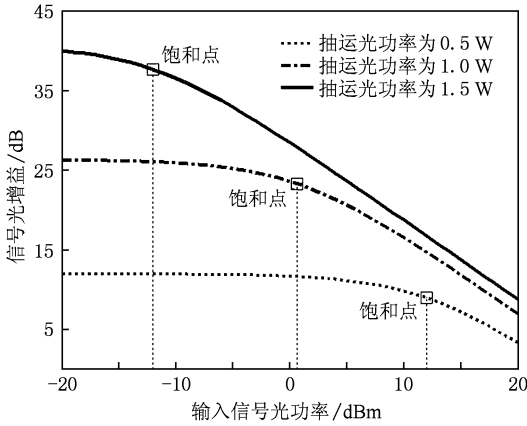


图2 参量放大增益随输入信号功率变化的仿真曲线

强度时钟的抽运光实现对信号的再定时. 但这种方法对于多波长的再生并不适用, 因为多个强度时钟抽运光同时注入到 HNLf 中, 其剧烈的光强起伏将不可避免引入信道间的 XPM 效应, 这种非线性串扰将降低系统的再生效果. 为了抑制这种干扰, 我们提出利用相位时钟抽运来实现对恶化信号的再定时功能. 由于相位时钟抽运的光强理论上是一个恒定值, 没有强烈的强度起伏, 将有效的消除由抽运光引入的 XPM 效应. 下面分析利用相位时钟的抽运光对信号进行的再定时的原理.

设在参量放大中相位时钟抽运光中心频率为 ω_p , 当抽运光被相位时钟调制后, 其瞬时相位可表示为 $\varphi_p(t) = \omega_p t + K_m \cos(2\pi f_m t)$, 其中 K_m 为相位调制度, f_m 为相位时钟调制的微波频率. 由已知, 参量放大后得到的闲频光瞬时相位 $\varphi_i(t) = 2\varphi_p(t) - \varphi_s(t)$, 其中信号光的瞬时相位 $\varphi_s(t) = \omega_s t$, 因此有

$$\varphi_i(t) = \omega_i t + 2K_m \cos(2\pi f_m t), \quad (4)$$

式中 $\omega_i = 2\omega_p - \omega_s$, 可见当抽运光被相位调制时, 得到的闲频光亦被同频的微波频率相位调制, 且其相位调制度变为抽运光的 2 倍. 闲频光瞬时频率为

$$\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = \frac{\omega_i}{2\pi} + 2K_m f_m \sin(2\pi f_m t). \quad (5)$$

由(5)式可以看出, 得到的闲频光是一个带啁啾的信号, 且在 $f_m t = n/2 + 1/4$ (n 为整数) 附近, 光波的频率啁啾接近于线性变化, 对应最大啁啾率为

$$(\partial \nu(t) / \partial t)_{\text{extremum}} = \pm 4\pi f_m^2 K_m. \quad (6)$$

当这个带啁啾的闲频光通过适当的色散介质后, 闲频光将被压窄, 其携带的相位时钟信息将转换为强度时钟信息. 色散对带啁啾光场的压窄作用

可以用参数 B 表示为^[15,17]

$$\begin{aligned} B &= -(\text{频率啁啾}) \times (\text{群延时色散}) \\ &= -(\partial \nu(t) / \partial t)_{\text{extremum}} \times (\partial \tau / \partial \nu) \\ &= \mp 2\pi f_m^2 \Delta \theta (\partial \tau / \partial \nu). \end{aligned} \quad (7)$$

当 $|(\partial \tau / \partial \nu)| \approx -1 / (\partial \nu / \partial t)_{\text{extremum}}$ 时, 闲频光的频率啁啾可以得到最佳补偿, 对应的脉冲宽度最窄, 由此我们可以计算出所需最佳的色散量. 并且可以看出, 采用正或负色散介质对补偿的结果没有影响.

如图 3 所示, 利用相位时钟抽运光的参量放大, 可以将相位时钟信息转移到新产生的闲频光上, 合适调整编码信号与时钟抽运之间的相对延时, 可以使得到的闲频光每个码元中心部分恰好对应负啁啾, 而其余部分则对应正啁啾; 参量放大后滤出闲频光并通过合适色散量的正常色散介质(例如色散补偿光纤 DCF), 光脉冲带负啁啾部分将被压窄, 而正啁啾部分则被展宽, 形成脉冲的基底, 由此消除了码元两个边沿的抖动, 完成对信号的再定时功能. 由于色散只对信号负啁啾部分压窄, 因此利用这种方法定时后的信号的脉冲宽度也将有效减小, 但同时脉冲基底的形成也将使再生后信号的消光比一定程度的恶化.

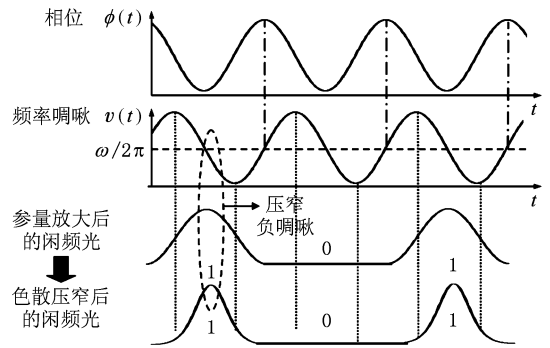


图3 利用相位时钟对信号进行再定时的原理示意图

3. 实 验

3.1. 实验装置

基于光纤光参量放大的异步双波长 10 Gbit/s 全光再生实验装置图如图 4 所示, 两路信号分别由两个分布式反馈半导体激光器 (DFB-LD1, DFB-LD2) 产生, 波长为 1550.9 nm (信号光 1) 与 1552.5 nm (信号光 2), 并被两个不同的微波源产生的 10 GHz 微波时钟进行强度调制及后续的编码而得到

的. 得到异步信号双波长信号经 EDFA 放大后, 注入到 30 km 普通单模光纤中进行传输, 以模拟实际通

信线路中存在的传输恶化, 恶化后的信号随后进入全光判决单元.

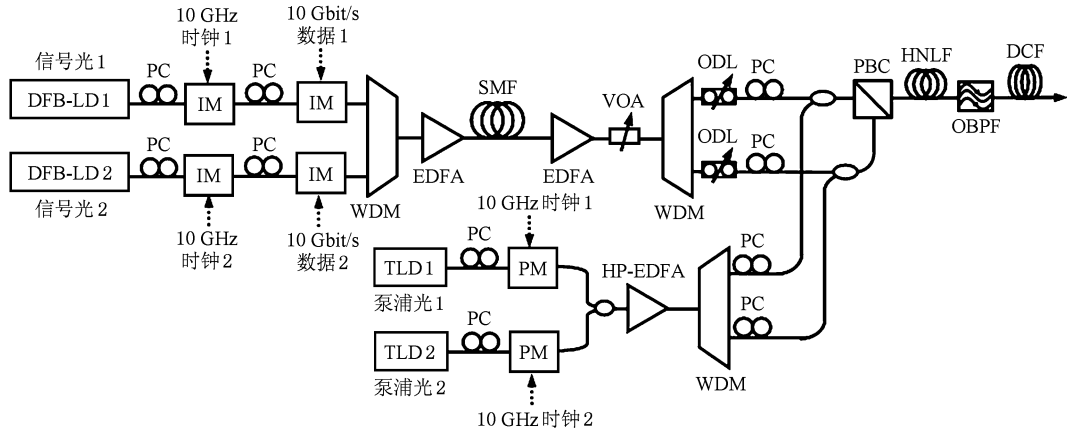


图4 异步双波长 10 Gbit/s 全光再生实验装置图(DFB-LD 为分布式反馈半导体激光器;PC 为偏振控制器;IM 为强度调制器;PM 为相位调制器;EDFA 与 HP-EDFA 分别为普通掺铒光纤放大器与高功率掺铒光纤放大器;WDM 为波分复用器;PBC 为偏振合束器;HNLF 为高非线性光纤;SMF 与 DCF 分别单模光纤与色散补偿光纤;OBPF 为光带通滤波器)

在全光判决单元中, 两路抽运光由两个可调激光器 (TLD1, TLD2) 产生, 波长为 1548.7 nm (抽运光 1) 与 1554.1 nm (抽运光 2), 并分别被前述信号产生部分同频的两个 10 GHz 微波时钟进行相位调制, 一齐经大功率 EDFA 放大, 与相应的信号光经过一个 3 dB 耦合器后, 分别输入到偏振合束器 (PBC) 的两个输入端口, 并随后注入到高非线性光纤 (HNLF) 中. PBC 的使用可以保证相邻信道的偏振态正交, 抑制相邻信道间的 FWM 干扰. 在 FOPA 中通过增益饱和效应抑制信号幅度噪声, 同时将抽运光的时钟信息转移到闲频光上. 利用一个带宽为 1 nm 的光带通滤波器 (OBPF) 分别滤出两路信号光对应的闲频光, 并通过一段色散值为 -158 ps/nm 的色散补偿光纤 (DCF) 将相位时钟转换为强度信息. 如前述第二节的分析, 最终完成对双波长信号的再整形与再定时, 实现双波长同时再生.

3.2. 实验结果与讨论

实验首先测试了注入抽运光功率在 18 dBm 条件下 FOPA 的输入输出曲线. 如图 5 所示, 可见当信号光 1 与信号光 2 的输入光功率分别达到 -1.2 dBm 与 0.2 dBm 时, FOPA 开始出现增益饱和现象. 在双波长再生实验中, 为了确保 FOPA 的深度饱和, 我们将注入的信号光功率保持在 2.5 dBm 左右.

为了验证系统对抽运光引起的 XPM 效应的抑制效果, 我们在一束连续抽运光 (p_1) 与连续信号光 (s_1) 进行光纤光参量放大时, 注入另一束抽运光

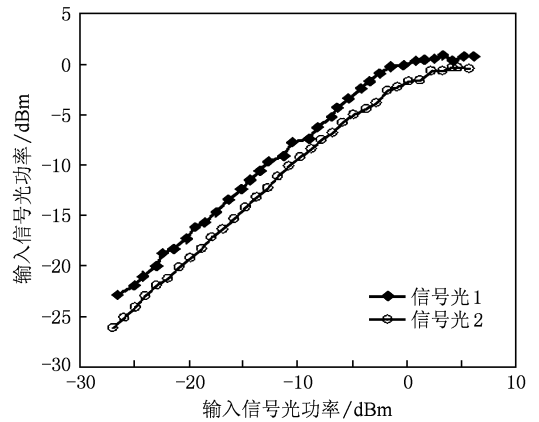


图5 FOPA 的输入输出曲线

(p_2), 观察当 p_2 分别为强度时钟、相位时钟以及关闭三种情况下其对由 p_1 与 s_1 作用产生的闲频光 (i_1) 的影响. 三种情况下 FOPA 后的光谱图如图 6 所示, 右上角的小图显示了 s_1 , p_1 及 i_1 的光谱细节, 可以看出 p_2 为强度时钟时, i_1 的光谱显著展宽, 而当 p_2 为相位时钟时, 得到 i_1 的光谱宽度与关闭 p_2 的结果相近, 可以看出当采用相位时钟时, 由抽运光引入的 XPM 得到了明显的抑制.

在上述实验的基础上, 我们将两路恶化信号注入如图 4 描述的再生实验装置中, 分别测试了在单波长和双波长条件下, 系统对两路信号的再生效果. 图 7 显示了在两种情况下, 信号光再生前后的眼图. 恶化后的两路信号如图 7(a), (d) 所示, 经过 30 km 传输恶化后, 信号光 1 的信噪比为 8.5 dB, 定时

抖动为 2.73 ps, 信号光 2 的信噪比为 8.99 dB, 定时抖动为 2.71 ps. 单波长的再生实验结果如图 7(b), (e) 所示, 再生后信号光 1 的信噪比与信号光 2 的信噪比平均改善了 6.5 dB. 而在双波长条件下, 再生后信号光 1 和信号光 2 的信噪比分别为 13.48 dB

与 13.44 dB (信号眼图见图 7(c), (f)), 与恶化信号相比, 再生后两路信号的信噪比改善了约 4.9 dB 及 4.5 dB. 可见无论是在单波长还是双波长条件下, 两路波长的信号经过再生后, 信号质量都得到了明显的改善.

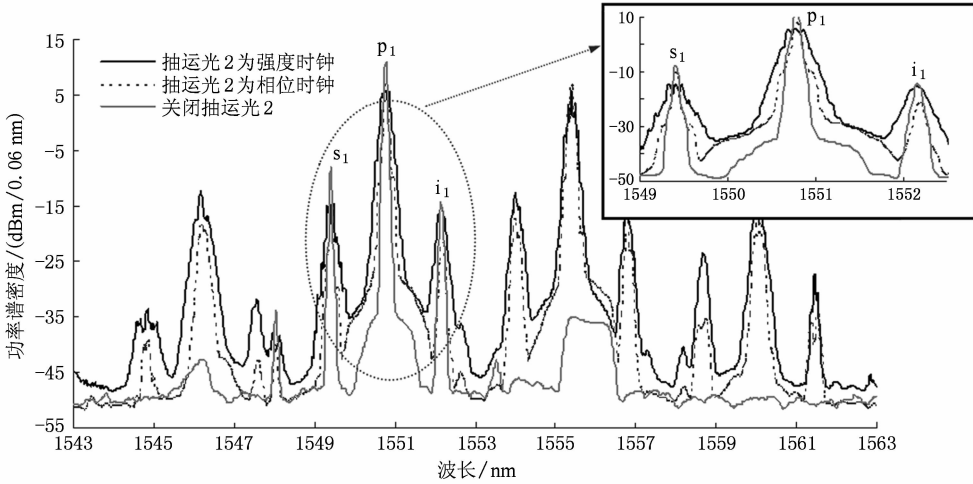


图 6 当抽运光 2 (p_2) 为不同情况时, FOPA 后的光谱图

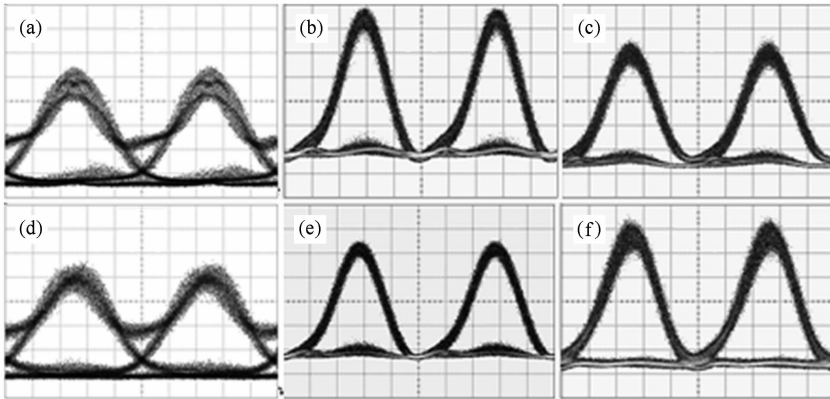


图 7 单波长与双波长条件下再生前后信号光眼图 (20 ps/div) (a), (b), (c) 为信号光 1; (d), (e), (f) 为信号光 2; (a), (d) 恶化信号; (b), (e) 单波长再生信号; (c), (f) 双波长再生信号

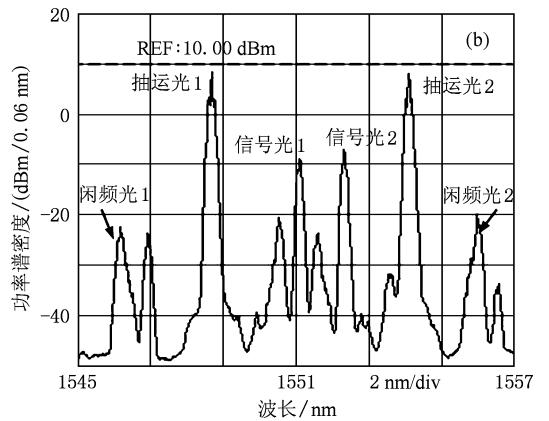
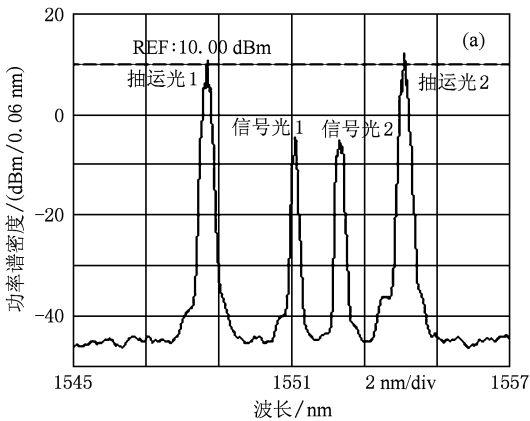


图 8 双波长条件下 FOPA 前后的光谱图 (a) FOPA 前; (b) FOPA 后

图 8 显示了在双波长条件下, FOPA 前后的光谱图, 可以看出由于相邻的信道偏振正交, 信道间的 FWM 得到了抑制, 虽然由于同一信道内抽运光与信号光的拍频对其他信道的调制, 仍产生了额外的分量但与所需要的闲频光并不重叠, 对再生信号的质量影响不大, 当信道数增加时, 采用在非线性

光纤中加入色散管理的办法, 可以一定程度的抑制这种拍频调制的作用^[6]. 误码测试结果如图 9 所示, 与背靠背测试相比, 无论是在单波长还是双波长的再生实验中, 再生后信号的接收机功率代价的改善接近 2 dB. 可见信道间的非线性干扰得到抑制后, 多波长再生后的信号质量也获得保证.

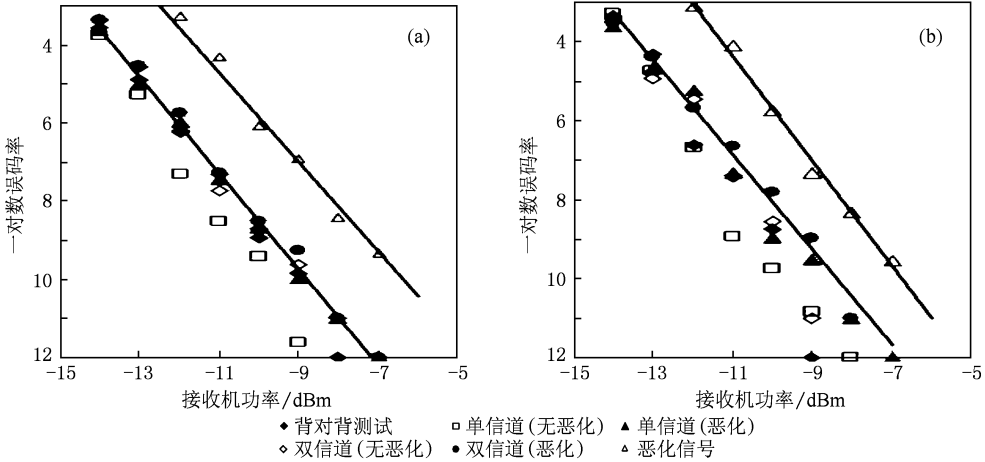


图 9 单波长与双波长条件下信号再生前后的误码率测试结果 (◆ 背靠背测试; □ 单信道(无恶化); ▲ 单信道(恶化); ◇ 双信道(无恶化); ● 双信道(恶化); △ 恶化信号) (a) 信号光 1; (b) 信号光 2

4. 结 论

提出了一种利用相位时钟抽运光的光纤光参量放大实现异步双波长再生的新型方案. 从理论上分析了利用 FOPA 的增益饱和效应抑制信号幅度噪声以及利用相位时钟结合相应色散实现对恶化信号再定时的机理. 实验利用两个独立相位时钟抽运光, 并采用相邻信道偏振正交的方式, 实现了对两

个独立信源产生的异步双波长 10 Gbit/s 信号的再生. 实验测得在单波长条件下, 再生后两路信号信噪比改善至少 6.5 dB, 而双波长条件下再生后信噪比改善约 4.5 dB. 误码率测试结果说明, 与背靠背测试结果相比, 无论是在单波长还是双波长条件下, 两路波长的信号经过再生后都实现了约 2 dB 的接收机功率代价的改善. 可见该方案有效的解决了多波长再生面临的信道间的 FWM 及由抽运光导致的 XPM 非线性串扰问题, 保证了多波长再生后的信号质量.

[1] Leclerc, Lavigne B, Balmefrezol E, Brindel P, Pierre L, Rouvillain D, Seguiné F 2003 *IEEE J. Lightwave Technol.* **21** 2779

[2] Wolfson D, Kloch A, Fjelde T, Janz C, Dagens B, Renaud M 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 332

[3] Yu J L, Hu H, Zhang A X, Wang Y T, Zhu L K, Wang W R, Zhang L T, Yang E Z, Jing W C, Jia D G 2008 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **50** 1807

[4] Wang W R, Yu J L, Zhang A X, Han B C, Hu H, Zhang L T, Yang E Z 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 466

[5] Du J X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1046 (in Chinese) [杜建新 2009 物理学报 **58** 1046]

[6] Vasilyev M, Lakoba T I, Patki P G 2008 *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*

[7] Mamyshev P V 1998 *24th European Conference on Optical Communication (ECOC)*

[8] Provost L, Kouloumentas C, Parmigiani F, Tsolakidis S, Tomkos I, Petropoulos P, Richardson D J 2008 *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*

[9] Provost L, Parmigiani F, Petropoulos P, Richardson D J 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 270

[10] Huang Y K, Glesk I, Shankar R, Prucnal P R 2006 *Opt. Express* **14** 10339

- [11] 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]
- [12] Liu H J, Chen G F, Zhao W, Wang Q S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 105 (in Chinese) [刘红军、陈国夫、赵卫、王屹山 2004 物理学报 **53** 105]
- [13] Liu H J, Song X Z, Wang Y S, Zhao W 2008 *Chin. Phys. B* **17** 271
- [14] Kylemark P, Sunnerud H, Karlsson M, Andrekson P A 2006 *IEEE J. Lightwave Technol.* **24** 3471
- [15] 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]
- [16] Radic S, McKinstrie C J, Jopson R M, Centanni J C, Chraplyvy A R 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 957
- [17] Kobayashi T, Yao H, Amano K, Fukushima Y, Morimoto A, Sueta T 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 382

Investigation on all-optical regeneration of asynchronous dual-wavelength signals based on fiber-optic parametric amplification *

Yu Jin-Long¹⁾ Luo Jun^{1)†} Han Bing-Chen¹⁾²⁾ Guo Jing-Zhong¹⁾ Wu Bo¹⁾ Wang Ju¹⁾
Zhang Xiao-Yuan¹⁾ Yang En-Ze¹⁾

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

2) (School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

(Received 8 October 2009; revised manuscript received 14 December 2009)

Abstract

With the continued development of the wavelength division multiplexing (WDM) network, there arises an urgent demand for the research of multi-wavelength all-optical 3R regeneration. In this paper, a novel multi-wavelength all-optical regeneration scheme has been proposed. Using phase clock in the fiber-optic parametric amplification and polarization multiplexing, all-optical regeneration of dual-wavelength signals generated by two independent WDM transmitter is realized. Theoretical analysis is carried out for the operation mechanism of the amplitude noise suppression using the gain saturation of the parametric amplification, and re-timing using phase modulation with cascading dispersion. Dual-wavelength 10 Gbit/s signal optical regeneration is demonstrated experimentally. Experimental results show that the inter-channel nonlinearities like four-wave mixing and cross phase modulation are effectively reduced. In the single and dual-wavelength cases, signal to noise ratio improvements of at least 6.5 dB and 4.5 dB have been achieved, respectively, after regeneration. Bit error rate test shows that about 2 dB power penalty improvement is obtained in both single- and dual-wavelength operations.

Keywords: optical communication, multi-wavelength optical regeneration, fiber-optic parametric amplification

PACC: 4230Q, 4265K

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60736035 and 60977053), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA01Z272).

† Corresponding author. E-mail: luojunju@gmail.com