

# Research on Degenerate-Four-Wave-Mixing-Based All-Optical Reshaping Using Polarization Multiplexing\*

Fengfeng Tian, Baojian Wu, Heng Zhou, Kun Qiu

Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks of the Ministry of Education,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu  
Email: [bjwu@uestc.edu.cn](mailto:bjwu@uestc.edu.cn)

Received: Nov. 29th, 2011; revised: Dec. 16th, 2011; accepted: Dec. 29th, 2011

**Abstract:** According to the four wave mixing (FWM) process of three input light beams in highly nonlinear fiber (HNLF), the major crosstalk factors occurring in the FWM-based multi-wavelength all-optical regenerators are analyzed. A new two-channel all-optical reshaping scheme based on degenerate FWM is proposed, in which the linear polarization states of two high-power data light are orthogonal each other and are controlled at  $45^\circ$  relative to that of continuous wave. It is shown by simulation that the non-degenerate FWM crosstalk components can be greatly suppressed by optimizing the HNLF birefringence and both the extinction ratio and Q-factor of regenerated signal are improved to a great extent.

**Keywords:** All-Optical Amplitude Reshaping; Multi-Channel Regeneration; FWM; Polarization Multiplexing

## 基于简并四波混频的偏振复用全光整形研究\*

田丰洋, 武保剑, 周恒, 邱昆

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都  
Email: [bjwu@uestc.edu.cn](mailto:bjwu@uestc.edu.cn)

收稿日期: 2011年11月29日; 修回日期: 2011年12月16日; 录用日期: 2011年12月29日

**摘要:** 根据三束光注入高非线性光纤所发生的四波混频(FWM)过程, 分析了基于 FWM 的多波长全光再生方案中串扰的主要来源。提出了一种新的基于简并四波混频的双波长全光幅度整形方案, 连续辅助光的偏振方向与两路偏振正交的高功率数据光偏振方向呈  $45^\circ$  夹角。仿真研究表明, 通过优化高非线性光纤的双折射值, 非简并四波混频串扰可以得到较好的抑制, 再生信号的消光比和 Q 因子均有大幅度提升。

**关键词:** 全光整形; 多信道再生; 四波混频; 偏振复用

### 1. 引言

光信号再生是增强光纤传输系统传输距离和提升光网络设计灵活性和扩展性的关键功能。现行的再生器还依赖于光/电/光再生技术, 其扩展性受到了电处理速度的制约, 因此人们越来越关注全光再生技术的研究。目前已提出几种具有较好再生性能的全光信

号再生技术<sup>[1-4]</sup>, 但是这些方案大多仅支持单信道的再生<sup>[2-6]</sup>。随着 WDM 系统通信容量的不断提升, 高速多信道全光再生成为研究的热点。其中, 最为关键的问题是如何将多信道之间的串制扰抑到足够低的水平。目前基于高非线性光纤实现多波长全光信号再生的方案目前主要包括两类, 一是基于光纤中的自相位调制(Self-phase modulation, SPM)所引起的频谱展宽效应以及偏移滤波来实现<sup>[7,8]</sup>, 二是基于光参量放大和四波混频(Four-wave mixing, FWM)<sup>[4-6]</sup>, 通过波长变换后

\*资助信息: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(批准号: 2011CB301703); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-08); 国家高科技研究发展计划(863 计划)(课题编号: 2009AA01Z216)。

得到复制了所有信号信息，质量更好的闲频波。基于 FWM 的方案能够同时实现 RZ 或 NRZ 信号的整形和时钟恢复，非常具有吸引力<sup>[9]</sup>。一种方案是将调制了信号的数据光作为泵浦，采用时分复用，通过合理的设置脉冲宽度和信号之间时延的方案<sup>[10]</sup>，但这种方法对脉冲宽度要求较高。另一种是采用偏振复用方案实现双波长全光信号的 3R 再生<sup>[11]</sup>，但这种方案要求每束数据光都有一束对应的连续光作为辅助光，增加了实现的难度，再生信道越多引起的串扰越大，可控性也就越差。

本文提出采用一束连续光作为辅助光来实现双波长再生的方案。其中辅助光偏振方向与两束偏振正交的数据光偏振方向呈 45°，并一起注入高非线性双折射光纤，通过设置光纤的双折射值来实现对各个 FWM 过程相位失配的控制，从而达到消除串扰的目标。最后，仿真验证了这个方案的可行性。

## 2. FWM 串扰分析

到目前为止，利用 FWM 实现单波长全光信号幅度整形的方案有两种：一是通过利用 FWM 产生的高阶闲频波来实现幅度整形，分别利用高阶闲频波功率的平方依赖性和泵浦耗尽现象实现了“0”和“1”信号上面的噪声压缩、消光比提升<sup>[4,5]</sup>；另一种是将信号调制到泵浦光上实现全光幅度整形的方案<sup>[6]</sup>。本文将在第二种单信道再生方案基础上实现双波长再生，着重分析两束高功率数据光与一束低功率连续光(辅助光)同时注入光纤时所发生的 FWM 过程。

当频率为  $\omega_1$  的辅助光和频率为  $\omega_2, \omega_3$  的两束数据光同时注入光纤中且满足较好的相位匹配条件时，在光纤三阶极化率的作用下，通过 FWM 会产生 9 束新的光<sup>[12]</sup>，具体通过仿真可以得到结果见图 1。其中， $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k, i, j, k = 1, 2, 3$ 。

从图 1 中可以看出，两类 FWM 产生了新频率光，一是简并四波混频(Degenerate Four-wave Mixing, DFWM)，二是非简并四波混频(Non-degenerate Four-wave Mixing, NDFWM)。对整个再生系统，需要的再生过程为两个 DFWM 过程，相应的闲频光频率分别为  $\omega_{221}$  和  $\omega_{331}$ ，其他的 FWM 过程和闲频光均可视为串扰，可分为以下三类：

第一类串扰是数据光之间的四波混频  $\omega_{223}$  和  $\omega_{332}$ 。具有较大功率的多个数据光在高非线性光纤中

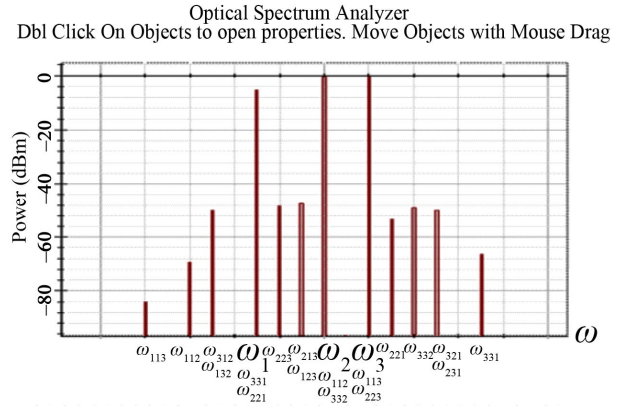


Figure 1. The new waves at different frequencies produced by FWM processes when 3 waves are injected  
图 1. 三束光输入时 FWM 过程的频率分量示意图

同向传输可能会发生显著的 FWM。一方面，这些 FWM 过程会产生新频率的闲频光，若产生的闲频光与某个数据光的频率重叠，则会对该数据光产生干扰，例如当辅助光与多个数据光的频率为等间隔分布时，这类串扰体现得最为明显；另一方面，发生 FWM 过程的两个数据光之间会产生功率的相互调制，从而对数据光产生串扰。

第二类串扰是多个数据光对辅助光的幅度调制，表现为 NDFWM 过程产生的  $\omega_{i \neq j \neq k}$  以及 DFWM 过程在频率  $\omega_1$  处对应的  $\omega_{331}, \omega_{221}$ ，频率  $\omega_2$  处对应的  $\omega_{112}$ ，频率  $\omega_3$  处对应的  $\omega_{113}$ 。为了避免系统过于复杂，多波长幅度整形系统一般采用单一辅助光，即当多个数据光与单个辅助光发生 FWM 产生新的闲频光，从而实现波长转换和幅度整形。然而，各个数据光在与辅助光发生四波混频的同时，会分别地对连续辅助光的功率产生一定程度的调制，又因为各个数据光的幅度调制码型是不同的，因此各个数据光可能会通过对辅助光的幅度调制产生相互间的串扰。

第三类串扰是数据光本身的自相位调制和数据光之间的交叉相位调制。数据光本身的自相位调制和数据光之间的交叉相位调制效应会导致各个数据光频谱展宽，若某一信号的频谱展宽后与另一信号的频谱发生交叠，则二者都会受到严重的干扰。

上述几种串扰当中，对多波长信道幅度整形再生影响最为严重的是 1 和 2 类串扰。如何克服和避免这些串扰，是实现多波长幅度整形的关键。根据矢量非线性薛定谔方程，具有正交偏振的两束线偏光之间不会发生 DFWM，因此，将两束数据光正交是消除 1

类串扰的较好的方法。因此，本文采用将两束线偏振数据光 D1(对应频率  $\omega_2$ )和 D2(对应频率  $\omega_3$ )垂直偏振的方案来避免二者之间发生四波混频，从而避免了 1 类串扰，如图 2 所示。而辅助光 A(对应频率  $\omega_1$ )与两束垂直的数据光之间呈一定的角度  $\theta$  偏振，这样就可以保证在每一个数据光的偏振方向上都存在辅助光(A1 为 x 轴方向，A2 为 y 轴方向)，进而在该偏振方向上发生简并四波混频并产生闲频光，即 DFWM 过程是正交的。这样就避免了 2 类串扰中 DFWM 过程产生的串扰，从而实现双波长信道的全光信号幅度整形。

然而，根据 FWM 矢量模型，尽管数据光 D1 和 D2 为垂直偏振，D1、D2 与辅助光 A 之间会通过光纤的三阶极化率相互耦合，在一定的相位匹配条件下会发生 NDFWM。这样，D1、D2 就会发生 4 个 NDFWM 过程<sup>[12]</sup>，产生第 2 类串扰  $\omega_{i \neq j = k}$ ：1) D1  $\perp$  A2  $\parallel$  D2，产生对应闲频波  $\omega_{312}, \omega_{132}$ 。2) D2  $\perp$  A1  $\parallel$  D1，产生对应闲频波  $\omega_{213}, \omega_{123}$ 。3) D1  $\perp$  D2  $\parallel$  A2，产生对应闲频波  $\omega_{231}, \omega_{321}$  上的 x 方向闲频波。4) D1  $\perp$  D2  $\perp$  A1，产生对应闲频波  $\omega_{231}, \omega_{321}$  上的 y 方向闲频波。

这样，当采用本文方案时，一共发生 8 个 FWM 过程，另外四个为 DFWM 过程，分别是：5) D1  $\parallel$  A1，D1 作为泵浦光，A1 作为斯托克斯光，产生对应两束闲频光  $\omega_{221}$ 。6) A1  $\parallel$  D1，A1 作为泵浦光，D1 作为斯托克斯光，产生对应两束闲频光  $\omega_{112}$ 。7) D2  $\parallel$  A2，D2 作为泵浦光，A2 作为斯托克斯光，产生对应两束闲频光  $\omega_{331}$ 。8) A2  $\parallel$  D2，A2 作为泵浦光，D2 作为斯托克斯光，产生对应两束闲频光  $\omega_{113}$ 。

通过前面的分析可以知道，DFWM 过程 5)和 7)是幅度整形所需要的，所以剩余的 6 个 FWM 过程均可视为串扰，而过程 6)和 8)实际上还是数据光和相应辅助光在对应偏振方向上发生的 DFWM 过程，所以对幅度整形而言无不利影响。因此，数据光偏振正交后的主要串扰来源为四个 NDFWM 过程。

### 3. NDFWM 过程抑制

在单模光纤中，一种重要的相位匹配技术是利用线双折射，它源于两正交偏振传输波的不同有效模折射率，其折射率差为  $\delta n = \Delta n_x - \Delta n_y$ ，其中， $\Delta n_x, \Delta n_y$  分别为对沿光纤慢，快轴方向偏振的光场的折射率(材料折射率)变化<sup>[13]</sup>。根据前文描述可知，四个 DFWM 过程中的数据光与对应辅助光都是沿慢轴或快轴偏振的，没有模式双折射引起的相位失配。只有四个 NDFWM 过程中有模式双折射引起的相位失配。

下面以串扰过程(1)为例进行分析。由于引入了线双折射，辅助光 A 在 x 轴和 y 轴上的传播常数不再一致。为方便表示，将辅助光 A 的两个分量分别表示为  $\omega_{1x}$  和  $\omega_{1y}$ 。根据相位失配的计算方法，可以得到该过程的相位失配为：

$$\Delta\beta_{(1)} = \beta(\omega_2) + \beta(\omega_{1y}) - \beta(\omega_3) - \beta(\omega_2 + \omega_{1y} - \omega_3)$$

其中， $\beta(\omega_i), i = 1x, 1y, 2, 3$  表示频率为  $\omega_i$  的光波的传播常数，注意，对于辅助光 A，有  $\omega_{1x} = \omega_{1y} = \omega_1$ ，但在光纤双折射的作用下， $\beta(\omega_{1x}) \neq \beta(\omega_{1y})$ 。考虑光纤具有线性的材料色散分布，并将  $\beta(\omega_i)$  在光纤的零色散角频率(ZDF)  $\omega_0$  处展开，可以得到：

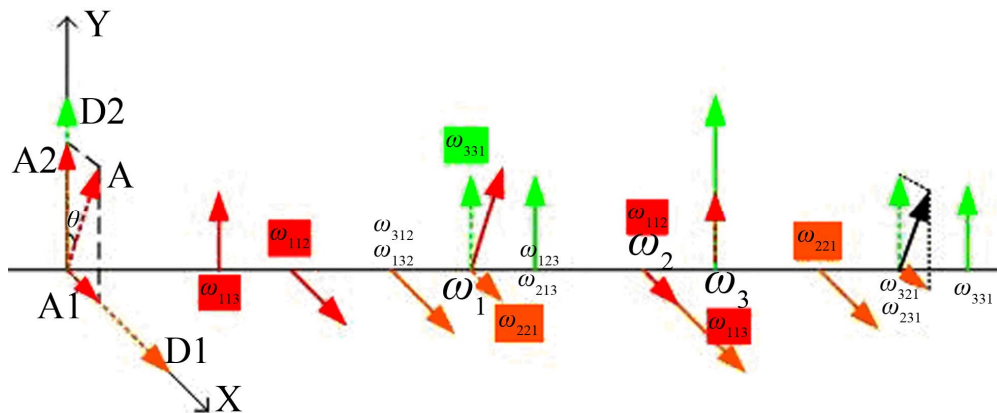


Figure 2. The FWM processes when 2 polarization orthogonal data wave are injected with a continuous wave with a polarization angle  $\theta$   
 图 2. 两数据光偏振正交且与辅助光呈角度  $\theta$  时 FWM 示意图

$$\Delta\beta_{(1)} = -\frac{\lambda^4}{8\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} \underbrace{\{(\omega_2 - \omega_0) + (\omega_{1y} - \omega_0)\}}_{K_M} \cdot (\omega_2 - \omega_3)(\omega_{1y} - \omega_3) + \underbrace{\frac{(\omega_3 - \omega_{1y})\delta n}{c}}_{K_W}$$

其中,  $K_M$  和  $K_W$  分别是材料色散和波导色散引起的相位失配。同样的, 可以得到 FWM 过程 2)~8)

$$\Delta\beta_{(2)} = -\frac{\lambda^4}{8\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} \{(\omega_3 - \omega_0) + (\omega_{1x} - \omega_0)\} \cdot (\omega_3 - \omega_2)(\omega_{1x} - \omega_2) + \frac{(\omega_{1x} - \omega_2)\delta n}{c}$$

$$\Delta\beta_{(3)} = -\frac{\lambda^4}{8\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} \{(\omega_2 - \omega_0) + (\omega_3 - \omega_0)\} \cdot (\omega_2 - \omega_{1y})(\omega_3 - \omega_{1y}) + \frac{(\omega_{1y} - \omega_3)\delta n}{c}$$

$$\Delta\beta_{(4)} = -\frac{\lambda^4}{8\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} \{(\omega_2 - \omega_0) + (\omega_3 - \omega_0)\} \cdot (\omega_2 - \omega_{1x})(\omega_3 - \omega_{1x}) + \frac{(\omega_2 - \omega_{1x})\delta n}{c}$$

$$\Delta\beta_{(5)} = -\frac{\lambda^4}{4\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} (\omega_2 - \omega_{1x})^2 (\omega_2 - \omega_0); \quad \Delta\beta_{(6)} = -\frac{\lambda^4}{4\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} (\omega_{1x} - \omega_2)^2 (\omega_{1x} - \omega_0)$$

$$\Delta\beta_{(7)} = -\frac{\lambda^4}{4\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} (\omega_3 - \omega_{1y})^2 (\omega_3 - \omega_0); \quad \Delta\beta_{(8)} = -\frac{\lambda^4}{4\pi^2 c^2} \frac{dD_c}{d\lambda} (\omega_{1y} - \omega_3)^2 (\omega_{1y} - \omega_0)$$

根据上述公式可以根据输入参数计算得到各项线性相位失配值。显然, 要想通过偏振复用方案来实现双波长的信号全光幅度整形, 需要  $\Delta\beta_{(5)}, \Delta\beta_{(7)}$  很小, 保证两束数据光与辅助光之间高效的 DFWM 过程, 而  $\Delta\beta_{(1)} \sim \Delta\beta_{(4)}$  远大于  $\Delta\beta_i$ , 使产生串扰的非简并四波混频过程效率很低, 达到抑制串扰的效果。通过计算不难发现, 如果排除  $\Delta\beta_{(1)} \sim \Delta\beta_{(4)}$  中双折射引起的相位失配项, 则  $\Delta\beta_{(1)} \sim \Delta\beta_{(4)}$  和  $\Delta\beta_{(5)}, \Delta\beta_{(7)}$  相差并不大, 所以, 利用偏振复用实现双信道信号再生的关键在于光纤双折射  $\delta n$  的取值。

值得注意的是, 当采用这种方法对 NDFWM 过程进行抑制后, 利用 FWM 高阶项实现单波长全光信号幅度整形的方案也可以扩展到双波长, 但高阶项的存在会引入更复杂的 FWM 过程, 从而引起更多的串扰; 从单波长的幅度整形效果来看, 这种方案与数据光作泵浦光的方案相比也有差距。

#### 4. 仿真结果

根据前文所述, 对该方案进行了仿真, 仿真中采用的光纤参数如表 1 所示, 光纤长度为 1 km。

图 3 画出了这种方案的结构示意图, 数据光 1 和 2 对应波长分别为 1548 nm 的 x 偏振光和 1547.5 nm 的 y 偏振光, 二者均为 10 Gb/s 的 RZ 信号, 平均功率分别为 17.05 dBm 和 15.75 dBm; 辅助光为偏振角度

的相位失配, 具体如下:

45° 的连续光, 其波长为 1555 nm, 功率为 10 dBm。三束光通过起偏器确定其偏振态, 再通过波分复用器一起注入高非线性双折射光纤, 最后通过波分解复用器和检偏器在波长 1541 nm 和 1540 nm 处得到 x 轴和 y 轴方向上的再生光。

在这里定义一个参数  $\kappa = \min\{|\Delta\beta_{(1-4)}/\Delta\beta_{(5,7)}|\}$ , 通过分析可以知道  $\kappa$  与光纤双折射值  $\delta n$  呈线性关系, 如图 4(a)和(b)所示。可以看出, 随着  $\delta n$  的增大, 再生后信号的 Q 值和消光比都在增加, 这说明对串扰的抑制越来越明显。当  $\delta n$  的取值使得  $\kappa \geq 110$  时, 可以较好地抑制非简并四波混频带来的串扰, 实现双信道的全光信号幅度整形。

为了更加直观地看到在不同双折射值下的再生效果, 通过仿真得到了信号再生前后的眼图对比,

Table 1. Parameters of the high nonlinear fiber  
表 1. 高非线性色散位移光纤参数

参数名称	参数符号和单位	参数大小
有效模场面积	$A_{eff} (\mu\text{m}^2)$	12.6923
零色散波长	$\lambda_0 (\text{nm})$	1556
色散斜率	$S (\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km})$	0.0168
光纤衰减系数	$\alpha (\text{dB}/\text{km})$	0.936
光纤非线性折射率	$n_2 (\text{m}^2/\text{w})$	$3.4575 \times 10^{-20}$

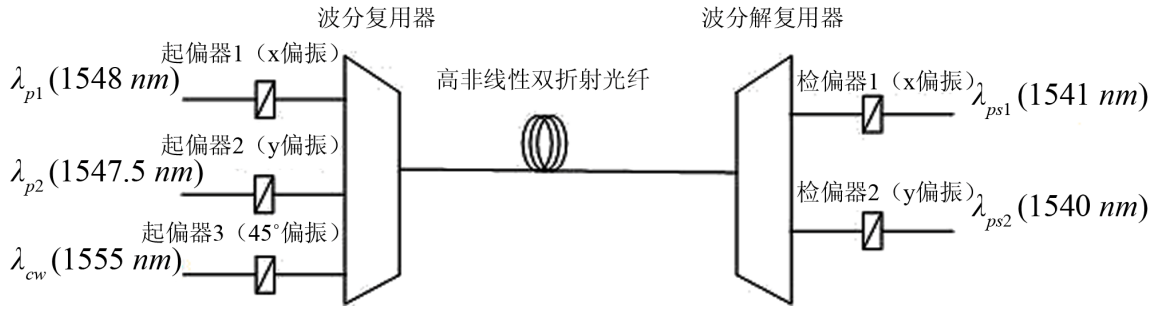


Figure 3. A schematic diagram of polarization multiplexing scheme  
图 3. 偏振复用方案结构示意图

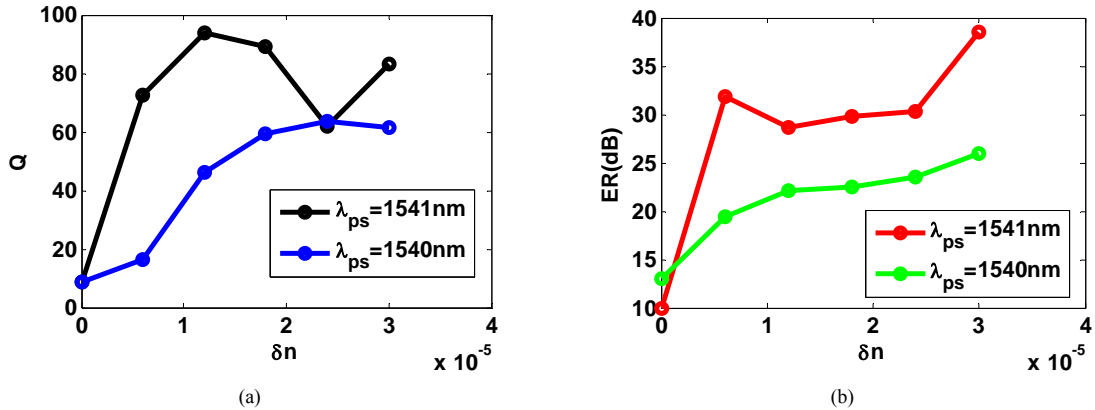


Figure 4. The influence to Q-factor and ER of reshaped signal by the change of  $\delta n$ : (a) Q-factor changes with  $\delta n$ ; (b) ER value changes with  $\delta n$

图 4.  $\delta n$  变化对再生信号 Q 值, ER 值的影响: (a) Q 值随  $\delta n$  的变化; (b) ER 值随  $\delta n$  的变化

具体见图 5。其中(a)为两束数据光的输入眼图, (b)~(f)为不同光纤双折射取值对应的再生后的信号, 由眼图可以直观地看到再生效果随着  $\delta n$  增大在逐渐地增强。通过图 5 的仿真结果可以看出, 当不引入双折射, 即  $\delta n = 0$  时, 两路信号均没有得到再生, 与输入信号相比甚至得到恶化, 这说明这种情况下串扰对信号整形的影响比较严重。而随着  $\delta n$  的增加, 从眼图中可以直观地看出信号质量在不断变好, ER 值和 Q 值的变化也充分地说明了这一点, 当  $\delta n = 3.0 \times 10^{-5}$  时, 两路信号的上下两部分噪声均得到很好的抑制, ER 分别得到 28.5 dB 和 16.1 dB 的提升, 这时对应的  $\kappa = 110$ , 所以, 如前文所述, 当  $\kappa \geq 110$  时, 串扰可以得到较好的抑制, 实现全光信号整形。

这种方案与已存在的实现全光信号再生的偏振复用方案<sup>[11]</sup>相比, 将输入光从四束变化三束, 减少整个信号整形过程中的变量, 增强了可控性, 从性能上讲也得到较大的提升。缺点是暂时未能实现 3R 再生, 从可扩展性上来讲也有所欠缺。

## 5. 总结

本文分析了当三束光在高非线性光纤中传输时的 FWM 过程, 并讨论了当其中两束作为数据光, 剩余一束作为辅助光实现双信道全光幅度整形时的串扰来源。提出了将两束数据光正交偏振, 辅助光与数据光分别呈 45 度入射, 并通过高非线性光纤的双折射来控制各个 FWM 过程相位失配的方案来实现串扰的抑制。最后通过数值计算和仿真对这种方案进行了进一步的研究, 结果表明, 当双折射值使得作为串扰来源的非简并四波混频相位失配与再生所需四波混频相位失配之比大于 110 时, 串扰可以得到较好的抑制, 信号的消光比平均可以提升 22 dB, 而品质因子平均可以从 8.6 提升到 70, 较好地实现了双信道全光信号幅度整形。

## 6. 致谢

感谢国家重点基础研究发展计划(973 计划)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-08)以及国家

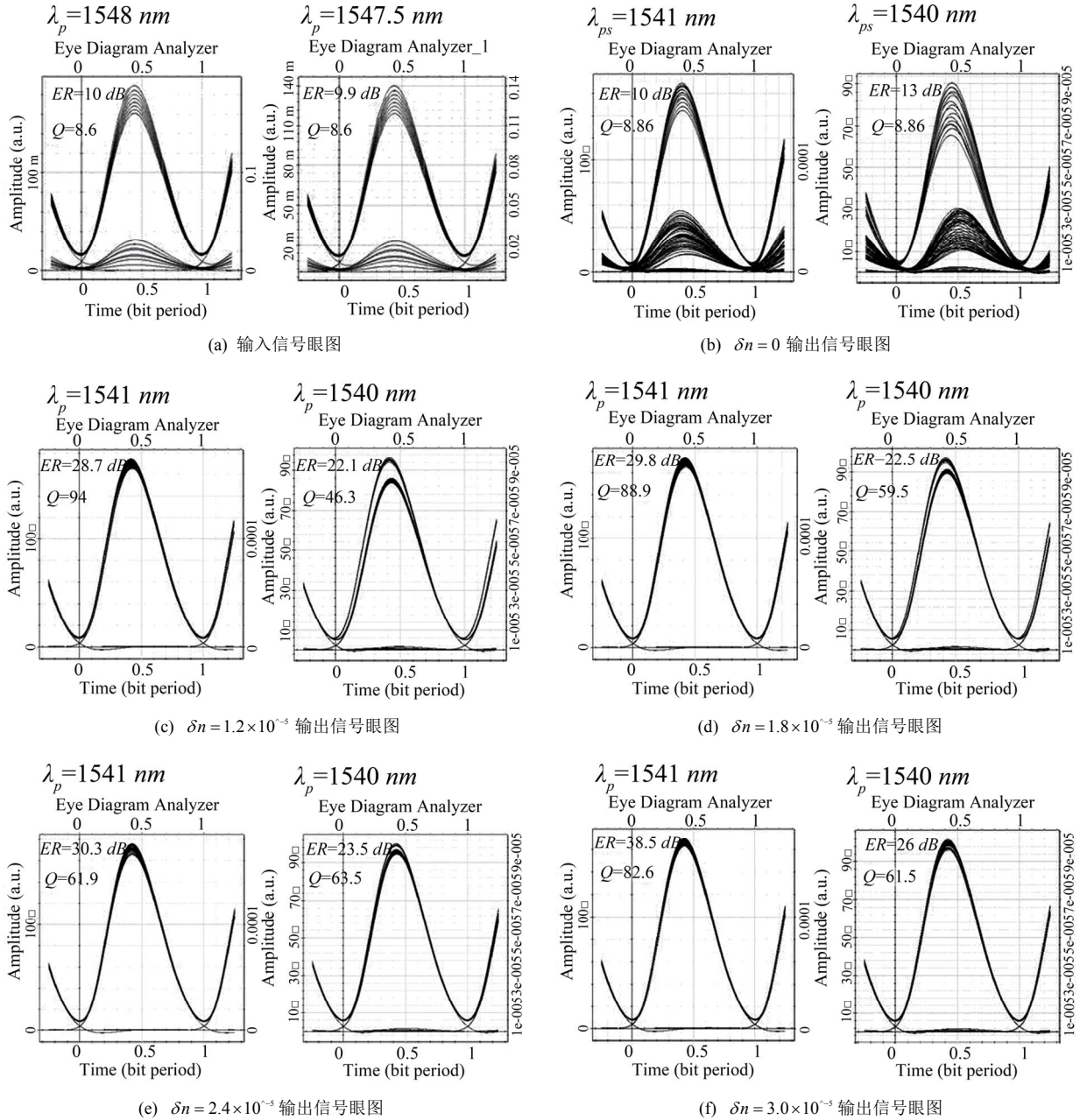


Figure 5. The Eye diagrams of input and output signals. (a) is the diagram of input signal. (b)-(f) are diagrams of output signals with different  $\delta n$

图 5. 采用偏振复用实现双信道 2R 再生时的输入输出眼图, (a)为输入信号眼图, (b)-(f)为不同  $\delta n$  取值时输出信号眼图

高科技研究发展计划(863 计划)对本课题研究的资助和支持。

### 参考文献 (References)

[1] H. Hu, E. Palushani, M. Galili, H. C. H. Mulvad, A. Clausen, L. K. Oxenlowe and P. Jeppesen. 640 Gbit/s and 1.28 Tbit/s polarization insensitive all optical wavelength conversion. Optics Express, 2010, 18(10): 9961-9966.

[2] M. Jinno, M. Abe. All optical regenerator based on nonlinear fibre Saganac interferometer. Electronic Letters, 1992, 28(14): 1350.

[3] J. K. Lucek, K. Smith. All optical signal regenerator. Optics Letters, 1993, 18(15): 1226.

[4] E. Ciaramella, S. Trillo. All-optical signal reshaping via four-wave mixing in optical fibers. IEEE Photonic Technology Letters, 2000, 12(7): 849-851.

[5] E. Ciaramella, F. Curti. All-optical signal reshaping by means of four-wave mixing in optical fibers. IEEE Photonic Technology Letters, 2001, 13(2): 142-144.

[6] A. Bogris, D. Syvridis. Regenerative properties of a pump-modulated four-wave mixing scheme in dispersion-shifted fibers.

- IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(9): 1892-1902.
- [7] M. Nakazawa, E. Yamade, H. Kubota and K. Suzuki. 10 Gbit/s soliton transmission over one million kilometers. *Electronic Letters*, 1991, 27(14): 1270-1272.
- [8] O. Leclerc, B. Lavigne, E. Balmefrezol, P. Brindel, L. Pierre, D. Rouvillain and F. Segueineau. Optical Regeneration at 40 Gbit/s and Beyond. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(11): 2779-2790.
- [9] K. Inoue, T. Mukai. Signal wavelength dependence of gain saturation in a fiber optical parametric amplifier. *Optics Letters*, 2001, 26(1): 10-12.
- [10] N. S. M. Shah and M. Matsumoto. 2R Regeneration of time-interleaved multiwavelength signals based on higher order four-wave mixing in a fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 14: 10339-10344.
- [11] 于晋龙, 罗俊, 韩丙辰, 郭精忠, 吴波, 王菊, 张晓媛, 杨恩泽. 基于光纤光参量放大的异步双波长全光再生技术研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6138-6144.
- [12] J. Hansryd, A. A. Peter, M. Westlund, et al. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(3): 506-520.
- [13] G. P. Agrawal. *Nonlinear fiber optics*. New York: Academic Press, 2001.