

基于非线性光纤环形镜的二光平信号 全光分离器

彭拥军 邱 昆 纪四淮

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网络重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要 非线性光纤环形镜(NOLM)在不同抽运条件下具有不同的连续波开关特性,当单抽运 NOLM 在抽运峰值功率大于开关阈值功率时具有反转抽运脉冲峰的特点,在抽运脉冲上升与下降沿处各产生一个脉冲输出;当使用双脉冲抽运在两抽运脉冲除峰值功率和波长不同外其他参数一致时,透射输出由两个脉冲的峰值功率差决定,具有脉冲峰值功率比较作用。基于 NOLM 的这两个特性设计了全光分离两光功率水平信号的方案。利用光子学仿真软件进行了数值仿真,结果显示二光平信号被成功分离,并分别加载到不同波长上。实现了高功率级无基座脉冲输出,表明该方案也具有消除脉冲基座的能力。

关键词 非线性光学;非线性光纤环形镜;全光逻辑运算;交叉相位调制;自相位调制

中图分类号 TN253-34 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0505008

All-Optical Separator for Two-Level Power Signal Based on Nonlinear Optical Fiber-Loop Mirror

Peng Yongjun Qiu Kun Ji Siwei

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The switching characteristics of nonlinear optical fiber-loop mirror (NOLM) for continuous wave are different under different pumping conditions. When the pump peak power is greater than the switching threshold power, it is found that the transmitted waveform of single-pumped NOLM has the feature of inverting pump pulse peak and one transmitted pulse is generated respectively at the corresponding rising and falling edges of the original pump pulse. The double-pumped NOLM has the function of comparing pulse peak power of two input pump pulses which have the same parameters except for the power and wavelength, and output pulse power is determined by the deviation of the peak power of two pump pulses. Based on two above characteristics of NOLM, a scheme is designed for all-optically separating the pulses from the same input signal with two-level power. Numerical simulations are executed by using photonics simulation software. The results show that two-level power signal is separated successfully, and output signals are loaded to different wavelengths respectively. No pedestal is observed at the separated output higher-level power pulses. So the scheme also has the ability to eliminate pulse pedestal.

Key words nonlinear optics; nonlinear optical fiber-loop mirror; all-optical logic operation; cross-phase modulation; self-phase modulation

OCIS codes 190.0190; 060.0060; 230.0230

1 引 言

光纤非线性效应具有超快作用,基于光纤非线性

性效应的全光信号处理技术的研究与开发一直是实现全光、高速传输的现代光纤通信系统的热点研究

收稿日期: 2011-01-26; 收到修改稿日期: 2011-03-05

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z216)和国家 973 计划(2011CB301703)资助课题。

作者简介: 彭拥军(1968—),男,博士研究生,副教授,主要从事光纤非线性信号处理方面的研究。

E-mail: yxpyj@163.com

导师简介: 邱 昆(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: kqiu@uestc.edu.cn

方向。光纤非线性环形镜(NOLM)中正反向传输光在同一路径中传输的特点使其工作稳定性高^[1],在全光信号处理中得到了广泛应用:如基于 NOLM 实现全光异或(XOR)和全光与(AND)等基本逻辑运算,并具有进行级联应用的潜力^[2~4];利用 NOLM 实现光纤环形激光器锁模^[5~8];利用 NOLM 逻辑功能实现全光级联缓存等^[9~11]。在这些应用中,有一个共同特点就是基于光纤非线性用输入抽运光对探测光产生非线性相位调制,通过正反向传输探测光的相干复合将感生相移转化为探测光的幅度调制,用于全光处理依靠幅度承载信息的光信号。当用沿相反方向传输的抽运光对输入 NOLM 的连续探测波进行交叉相位调制时,透射输出主要取决于顺时针和逆时针方向传输探测波的相对相位差,这个相位差由两抽运光的瞬时强度差确定,可以利用 NOLM 的这一特性来检测两抽运光的强度差异,分离多光平信号。基于此,本文将通过分析 NOLM 在不同抽运条件下的输出特性,设计将两功率水平的光信号进行分离的方案,该方案不但能够分离多光平信号,而且具有消除脉冲基座的功能。

2 NOLM 中非线性耦合方程组

当光纤中同时输入具有一定波长差、频谱无交叠、同偏振方向的两路光信号时,每路光信号在传输过程中都会受到光纤群速度色散(GVD)、光纤非线性效应产生的自相位调制(SPM)与另一路信号交叉相位调制(XPM)的共同作用,对这些作用的描述一般采用非线性耦合模方程。如果传输过程中脉冲偏振态保持不变,忽略光纤损耗和四波混频,脉冲演化的非线性耦合模方程组可写为^[11]

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i\beta_{21}}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} = i\gamma_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2)A_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + d \frac{\partial A_2}{\partial T} + \frac{i\beta_{22}}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} = i\gamma_2 (|A_2|^2 + 2|A_1|^2)A_2, \quad (2)$$

式中 $T = t - z/v_{g1}$ 是以速度 v_{g1} 运动参照系中的时间度量,参量 $d = 1/v_{g2} - 1/v_{g1}$ 度量两脉冲间群速度失配, $A_j (j = 1, 2)$ 表示两路光信号幅度, $\beta_{2j} (j = 1, 2)$ 是光纤中两路信号波长处的 GVD, $\gamma_j = n_2\omega_j/(cA_{\text{eff}}) (j = 1, 2)$ 是光纤在两路信号波长处的非线性参量, c 是真空中光速, A_{eff} 是有效模场面积, n_2 是光纤的非线性折射率系数。(1)、(2)两式右边第一项表示 SPM, 第二项表示两束光之间的

XPM, 这两个方程是研究 NOLM 应用的基本方程。

3 两种抽运条件下 NOLM 的输出特性

3.1 单脉冲对连续波的开关作用

由一个 1:1 偏振保持耦合器及长度为 L 的保偏光纤构成的一个非线性光纤环,结构如图 1 所示,其中 PC1、PC2 为偏振控制器,滤波器中心波长为 λ_1 ^[1,12,13]。波长为 λ_1 、平均功率为 P_1 的连续探测波从 NOLM 的左端输入,经过 1:1 耦合器分成两路耦合进环内传输,另一路波长为 λ_2 、脉冲宽度为 T_0 、峰值功率为 P_2 的脉冲通过波分复用器(WDM)从环的左边耦合入环中,沿顺时针方向运动,因此在环内沿顺时针方向传输的连续波受到输入抽运脉冲的强 XPM 作用。根据(1)、(2)式,沿两个方向传输连续波感生的非线性相移为^[11,13]

$$\phi_1(T) = 2\gamma_1 P_2 \int_0^L f(T - zd) dz, \quad (3)$$

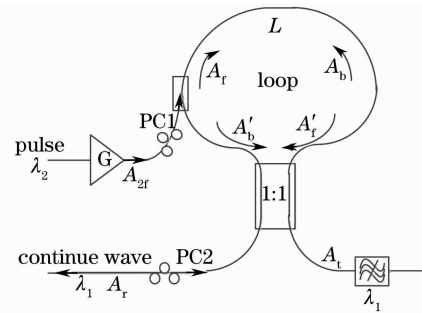


图 1 单抽运结构 NOLM 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of NOLM with single pump 式中 $f(\dots)$ 表示脉冲功率分布函数,如果抽运脉冲为一些特殊形状,则(3)式可以解析积分,否则只能采用数值积分办法求解。当输入抽运脉冲为高斯脉冲时,在不考虑走离效应的情况下相移可以写为: $\phi_1(T) = 2\gamma_1 P_2 L \exp(-\tau^2)$, 输出光功率表示为

$$P_t(L, T) = P_1 \sin^2 \frac{\phi_1}{2}, P_r(L, T) = P_1 \cos^2 \frac{\phi_1}{2}, \quad (4)$$

式中 t 和 r 分别代表透射和反射。由此可见,因为顺时针方向运动的探测波获得了非线性相移,将在 NOLM 的透射端产生受抽运脉冲功率调制的输出脉冲。设置如表 1 参数进行数值模拟,环长 1 km,其中连续探测波平均功率 1 mW(以避免受激布里渊散射及对抽运脉冲 XPM 的影响)。

表 1 参数列表

Table 1 Parameters list

Name of parameters	Value	Name of parameters	Value
f_1	193.1 THz	n_2	$2.6 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$
f_2	194.1 THz	n	1.47
T_0	100 ps	A_{eff}	$45 \times 10^{-12} \text{ m}^2$

输出特性如图 2 所示,图 2(a)和(b)对应放大后抽运脉冲峰值功率为 65 mW 和 130 mW 时的透射输出波形,为对比波形将幅度进行了归一化。图 2(c)和(d)为峰值透射率与输入抽运脉冲峰值功率的关系。从图 2(a)可见,输出脉冲波形有一定的变化,前后沿变得更陡峭,由于随抽运功率增加输出

功率增大,但增加速率不一致,在中间段增加速率最大,在功率较小和较大时增加速率要小一些[见图 2(c)]。从图 2(b)可见,当抽运峰值功率为 130 mW 时,是第一个透射输出最大峰值功率的 2 倍,意味着在抽运脉冲的上升沿感生相位差从 0 变化到 π 以后继续增大为 2π ,所以输出先增大到最大值后又减小,当相位差为 2π 时输出为 0;进入抽运脉冲下降沿时的情况则与此相反,所以透射输出为双脉冲。值得注意的是当超过 NOLM 开关阈值后输出脉冲峰值功率被锁定到探测波平均功率,这有利于在级联应用中进行下一级工作点功率设置。

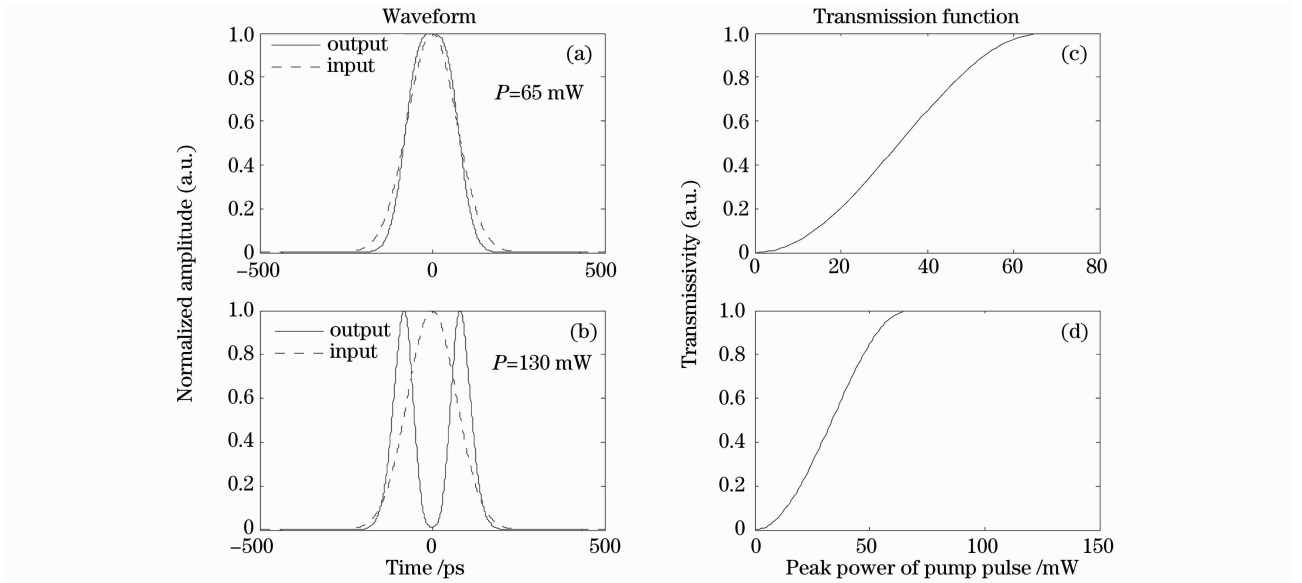


图 2 单抽运时输出特性

Fig. 2 Output characteristics by single pump

3.2 双脉冲抽运情形

结构示意图如图 3 所示,与单抽运情形比较,只是在逆时针方向加入了峰值功率为 P_3 、波长为 λ_3 、宽度为 T_3 的脉冲,相对于抽运脉冲 2 的延迟时间为 T_d 。在环内传输的两路连续探测波分别受到同方

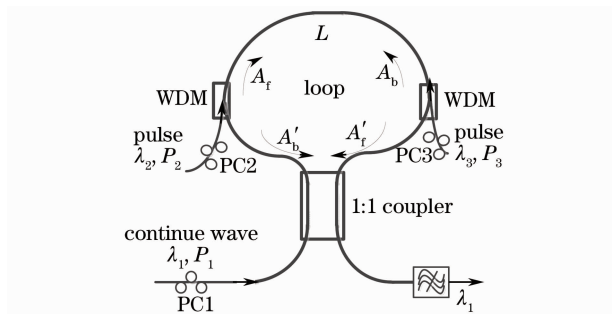


图 3 双抽运结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram with dual pump

向传输抽运脉冲的 XPM,使两个方向传输的探测波都获得感生相移。与单抽运情形类似,顺时针、逆时针方向传输连续波感生的非线性相移为

$$\phi_1(T) = 2\gamma_1 \left[P_2 \int_0^L f_2(T - zd) dz - P_3 \int_0^L f_3(T - zd - T_d) dz \right]. \quad (5)$$

如果输入抽运脉冲为高斯型,输出光功率表达式仍然为(4)式,在不考虑走离效应时相移为

$$\phi_1(T) = 2\gamma_1 LP_2 \exp(-\tau^2) - 2\gamma_1 LP_3 \exp\left[-\frac{(\tau - \tau_d)^2}{\eta^2}\right], \quad (6)$$

式中 $\eta = T_3/T_2$, $\tau_d = T_d/T_2$ 。(6)式表明,输出情况取决于两抽运脉冲间延迟、脉冲宽度、峰值功率等。假定 $2\gamma_1 LP_2 = \pi$,即对应 NOLM 单抽运完全透射

的情况,改变峰值功率差、脉冲宽度和脉冲延迟时间获得 NOLM 透射输出脉冲波形如图 4 所示,其他参数设置如表 1 所示。

在两抽运脉冲间无延迟,脉冲宽度一致的情况下,只改变其中一个抽运脉冲峰值功率,输出脉冲如图 4(a)~(d)中实线所示。此时,沿顺时针、逆时针方向运动的探测波所获得的相位差为 $\Delta\phi = 2\gamma_1 L \exp(-\tau^2)(P_2 - P_3)$, 主要由两抽运脉冲峰值功率差确定。可见,随着峰值功率差的加大,XPM 感生的相位差增大,输出脉冲的幅度也增加,且脉冲宽度变小。

在两抽运脉冲峰值功率,脉冲宽度一致的情况下,只改变两脉冲间的延迟,输出脉冲如图 4(e)~(h)中实线所示。此时,沿顺时针、逆时针方向运动的探测波所获得的感生相位差为 $\Delta\phi = 2\gamma_1 L P_2 \{ \exp(-\tau^2) - \exp[-(\tau - \tau_d)^2] \}$, 相位差的变化与任何一个抽运脉冲都不一致,在两抽运脉冲前后沿的交叠区中感生相位差最大形成输出脉冲的波峰,但是在抽运脉冲时域曲线的交点上,无感生相位差,没有透射输出,形成输出脉冲的波谷,输出脉

冲为双脉冲。

在两抽运脉冲无延迟,宽度比为 0.5 的情况下,改变其中一个脉冲的峰值功率,输出脉冲如图 4(i)~(l)中实线所示。此时,沿顺时针、逆时针方向运动的探测波所获得的感生相位差为 $\Delta\phi = 2\gamma_1 L [P_2 \exp(-\tau^2) - P_3 \exp(-4\tau^2)]$, 相位差的变化不会与抽运脉冲功率分布一致,在脉冲的上升与下降沿附近,功率差更大,输出脉冲形成双波峰,在脉冲中心形成波谷,但是随着功率差的增大,波谷深度减小最后消失。

综上所述,当单抽运脉冲对连续探测波进行开关时,如果峰值功率为开关阈值的 2 倍时透射输出为 0,将超过开关阈值部分波形进行反转且中心输出为 0,在上升沿与下降沿处各产生一个脉冲。双抽运 NOLM 的输出脉冲体现了两抽运脉冲的峰值功率差,这个差异表现为第三波长的连续探测波所感生到的相位差,最终形成探测波脉冲输出,同时也可以看到如果抽运脉冲间没有时延、没有脉冲宽度间的差异,检测结果将直接由透射输出的单脉冲体现。

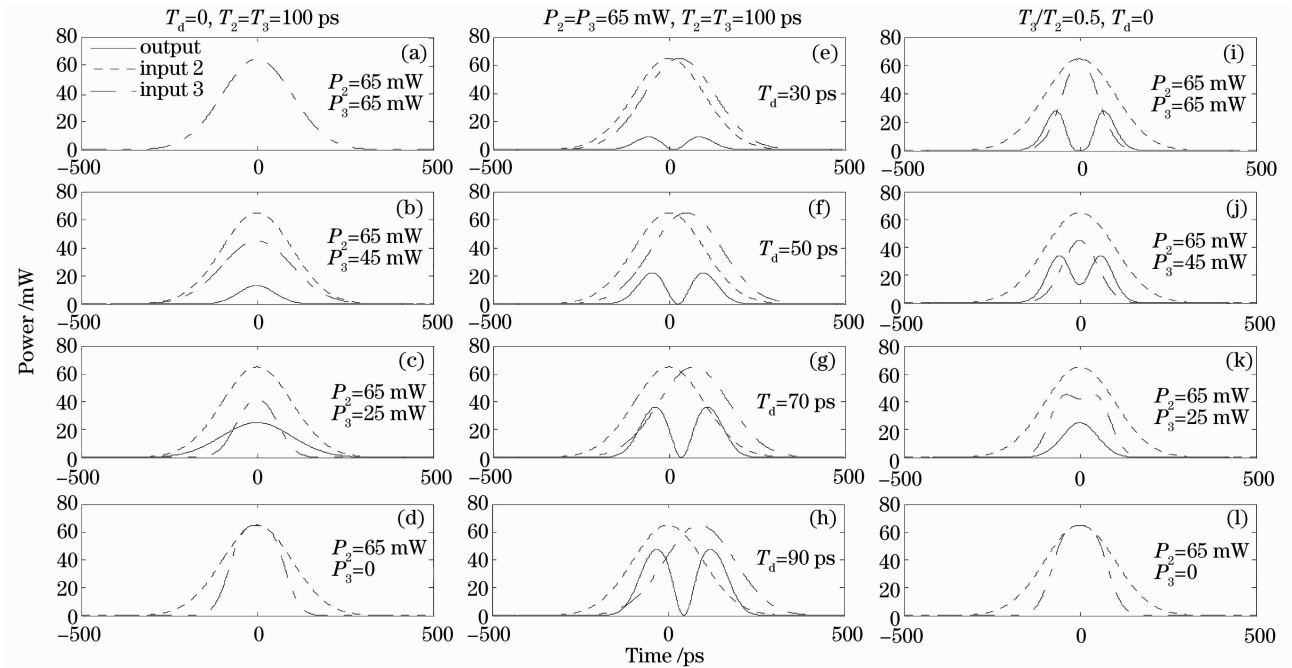


图 4 双抽运时透射输出波形
Fig. 4 Transmitted waveforms under dual pump

4 二光平信号分离器

4.1 分离器基本原理

当输入脉冲是一个带基座的信号时,采用如图 5 所示的基本结构分离器,其中包含了 2 个长度

不同的 NOLM, loop 1 实现单抽运光开关, loop 2 完成双脉冲抽运的信号幅度比较,使用高功率线性放大器进行抽运功率调整。将需要处理的脉冲信号经放大后作为抽运光分别通过波分复用器耦合进两个

环中,耦合进第二个环时要加入延迟使其与第一个环的输出同步。该分离器将两级功率水平分离并加载到波长为 λ_1 和 λ_3 上的基本原理是:将 loop 1 的工作条件设计为整个抽运脉冲最高峰值处于环的第一个反射峰,在 loop 1 的透射端则只有低功率脉冲输出;通过耦合器分出一部分经过放大器后耦合入

loop 2 中作为第二路抽运脉冲,要求分离出来的低功率脉冲放大后的幅度和耦合入 loop 2 的低功率脉冲幅度一致,将 loop 2 的环长设为输出高功率脉冲,通过 loop 2 进行功率比较,将低功率脉冲反射而透射的是高功率脉冲且加载到 λ_3 上,通过这样两级 NOLM 来分离两级功率水平的光脉冲信号。

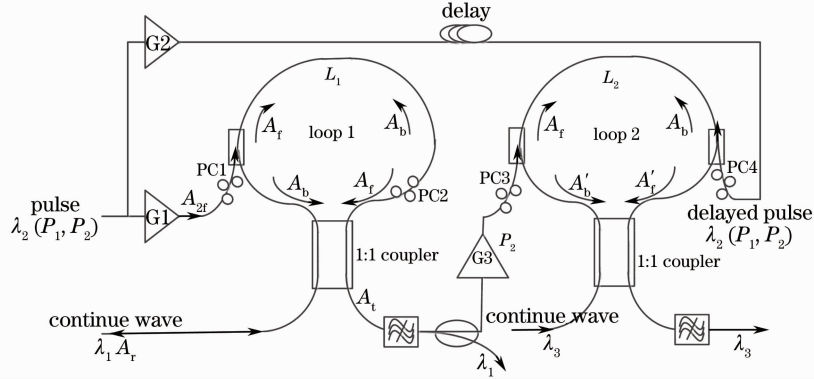


图 5 分离器基本结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of separator with elementary structure

4.2 二光平信号分离器结构

当输入脉冲是无基座二光平信号时,采用如图 6 所示的分离器,其中包含了 4 个长度不同的 NOLM, loop 1, loop 2 和 loop 4 均为单抽运 NOLM 光开关, loop 3 完成双脉冲抽运的信号幅度比较,与图 5 方案一样使用高功率线性放大器进行抽运功率调整。将需要处理的脉冲信号放大后作为抽运光分别通过波分复用器耦合进 loop 1, loop 3 两个环中,耦合进 loop 3 时要加入延迟使其与第一个环输出同步。该分离器基本工作原理是:将 loop 1 的工作条件设计为整个抽运脉冲的最高峰值处于环的第一个反射峰,在 loop 1 的透射端则只有波长为 λ_3 的低功率脉冲输出,通过耦合器分出一部分经放大后耦合入 loop 2 中作为抽运脉冲,当系统输入为低功率脉冲时, loop 2 为完全透射状态,产生波长为 λ_1 的与原输入脉冲同样的输出,然而当系统输入为高功率脉冲时,由于 loop 1 透射端无输出, loop 2 为完全反射状态且在透射端无输出,这样在 loop 2 的透射端输出仅代表低功率脉冲信号;设定 loop 3 的工作点为:系统输入为高功率脉冲时,经延迟后波长为 λ_2 的抽运脉冲功率与经 G1 放大分束后波长为 λ_3 的脉冲峰值功率之差使 loop 3 处于完全透射状态,而系统输入为低功率脉冲时波长为 λ_2 和 λ_3 的信号功率相等为完全反射状态,这样 loop 3 的输出就代表了高功率水平脉冲,经 loop 4 开关后将高功率脉冲加载到波长为 λ_3 的输出脉冲上。

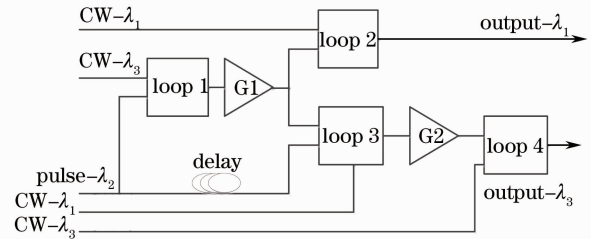


图 6 二光平信号分离器结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the separator of two-level power signal

4.3 数值仿真

首先,在光子学仿真软件中按照图 5 所示结构建模,设定参数为: L_1 为 1 km, L_2 为 0.74 km; 开关键控 (OOK) 光发射机功率 5 mW, 数据速率为 40 Gb/s, 将调制器调制指数设定为 -0.5 以产生二光平信号; 连续波光发射机功率 1 mW; 设定 3 个线性放大器增益为: 17.2 dB, 17.2 dB 和 18.1 dB; 其他参数如表 1 所示, 仿真结果如图 7 所示, 输入波形以 65 mW, 输出波形以 1 mW 进行归一化。图 7(a) 和 (c) 分别对应非归零 (NRZ) 和归零 (RZ) 低功率信号分离后加载到波长为 1553.6 nm 的输出波形, 图 7 (b) 和 (d) 对应 NRZ 和 RZ 高功率信号分离后加载到波长为 1549.6 nm 的输出波形。从图中可见, 两功率级的信号被完全分开, 在高功率级, 分离出来的信号消光比高, 而低功率级信号分离出来后消光比低, 特别是在低功率级输出上脉冲有精细结构, 这主要是由于 XPM 和 SPM 产生的频率啁啾导致脉冲

分裂。如果仅仅看高功率级输出,则该分离方案能够再生高功率级脉冲并完整消除基座。若采用多级

NOLM 功率比较器级联,则可以实现多光平信号分离。

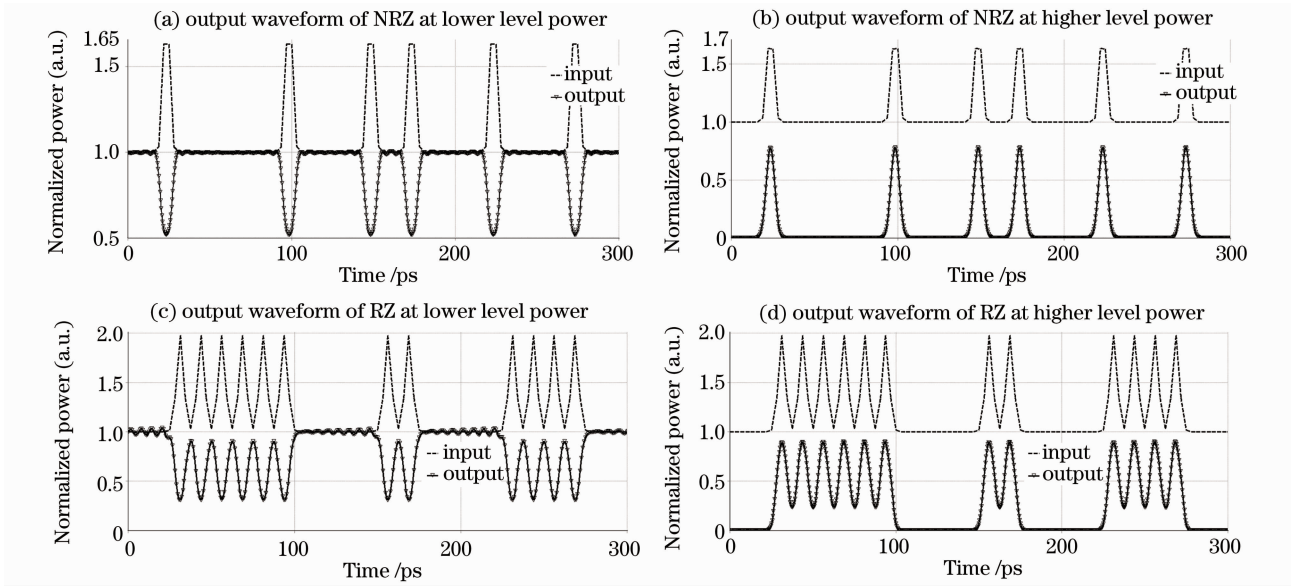


图 7 NRZ 和 RZ 信号经分离器后的输出波形

Fig. 7 Output waveforms of NRZ and RZ signals after separator

其次,按照图 6 所示的结构建模,将“0”、“1”码交替输出的 OOK 光发射机输出功率分别调整为 2.5 mW 和 5 mW 代表两种功率水平,脉冲进入系统前用增益为 17.2 dB 的高功率线性放大器放大;3 个连续波输出激光器平均输出功率设置为 1 mW;设定高功率线性放大器 G1 和 G2 的增益分别为 21.1 dB 和 18.1 dB;光纤参数见表 1,loop 1,loop 2 和 loop 4 长度均为 1 km,对应完全开关功率为 65 mW,loop 3 的长度则为 500 m,对应完全开关功率为 130 mW;3 个波长分别为:1553.60,1547.19

和 1545.60 nm。数值仿真结果如图 8 所示,图 8(a)和(b)分别对应高功率信号输入时端口 1 和 2 的输出波形;图 8(c)和(d)分别对应低功率信号输入时端口 1 和 2 的输出波形。从图中可见,两功率级的信号被完全分开,但是在高功率级时代表低功率输出的端口有输出脉冲,对应到输入脉冲的上升及下降沿,这是因为在高功率信号输入 loop 1 时在上升与下降沿各经历了一次完全透射,输入脉冲越接近方波残余脉冲输出越小,同时也可以改变 loop 2 的参数对这个残余脉冲进行抑制;输入为低峰值功率

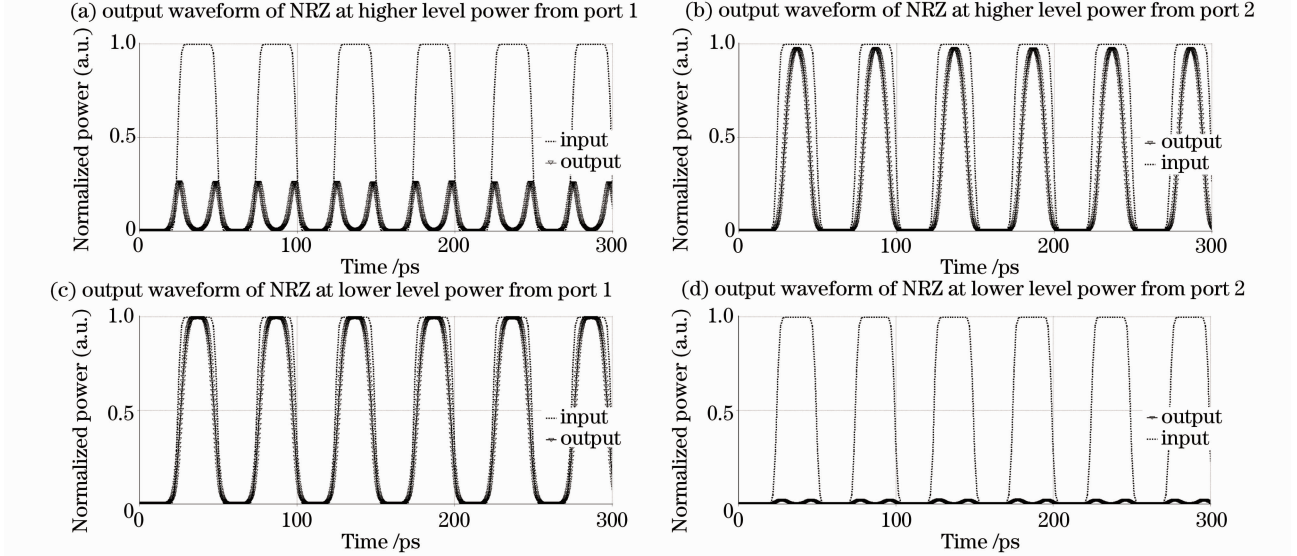


图 8 二光平信号经分离器后的输出波形

Fig. 8 Output waveforms of two-level power signal after separator

脉冲时,在端口 2 没有输出,主要是在 loop 3 的幅度比较中已经抵消掉 loop 1 在抽运脉冲上升与下降过程所产生的输出,在 loop 4 没有透射输出产生。由此可见,采用图 6 的方案即实现了高低功率水平脉冲的完全分离。

4.4 光纤色散的影响

当光纤中的色散不可忽略时,会导致脉冲在传输过程中不仅受到非线性调制,同时也会受到光纤色散的影响,设光纤的色散为 $2 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$,对 NRZ 信号,用图 5 简化结构和参数进行数值仿真,结果如图 9 所示。图 9(a)对应低功率级输出,与无色散情况对比可见,消光比下降;图 9(b)对应高功

率级输出,输出幅度明显下降;两图均表现出脉冲向前有统一时移,主要是由于正色散导致后沿红光分量传输比前沿蓝光分量快,意味着在脉冲前沿部分非线性作用更强,体现出输出脉冲整体上有一个时间前移;从高功率级输出来看,由于 loop 2 输出取决于抽运功率之差,因此色散的影响体现在输出幅度上,没有出现因为频率啁啾产生的脉冲内精细结构;如果输入脉冲不对称,这样的色散作用会产生脉冲的定时抖动,为此,应尽量消除脉冲受色散的影响,可以使用一段正常和反常色散光纤构成环,使整个环的总色散为零。

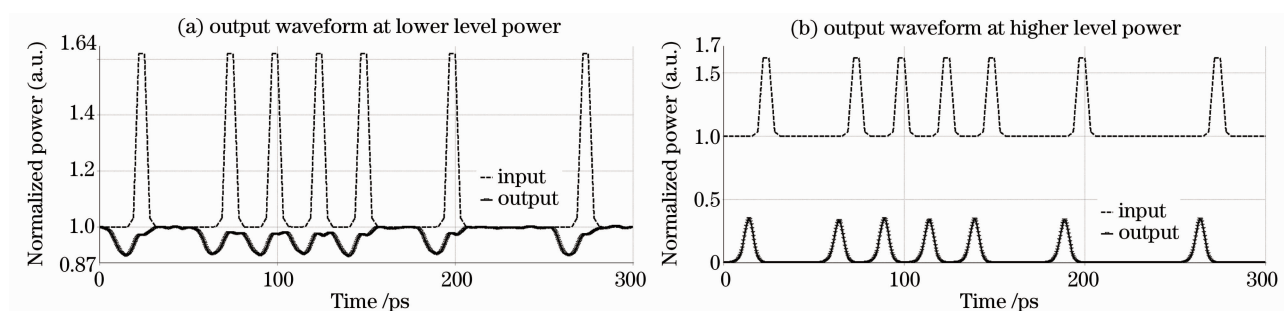


图 9 光纤色散的影响

Fig. 9 Effect of fiber dispersion on the output waveform

5 结 论

设计了将两功率水平的信号按照功率水平的不同来进行分离的方案,包括基本结构分离器和二光平信号分离器两种。从对基本结构进行数值仿真的结果看,在信号的低功率级输出脉冲消光比低,同时易受到如光纤色散等因素的影响,但在高功率级输出脉冲消光比大且没有基座,因此,这种方案也可用于光信号处理中消除脉冲基座;利用图 6 结构对二光平信号进行分离时,低功率信号具有很好的分离输出特性,当输入为高功率脉冲时需要图 6 中 loop 2 进行优化以抑制残余脉冲。

参 考 文 献

- 1 M. Jino, T. Matsumoto. Ultrafast, low power, and highly stable all-optical switching in an all polarization maintaining fiber Sagnac interferometer[J]. *IEEE J. Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(5): 349~351
- 2 M. Jino, T. Matsumoto. Ultrafast all-optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 220~222
- 3 A. Huang, N. Whitaker, H. Avramopoulos *et al.*. Sagnac fiber logic gates and their possible applications: a system perspective [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(26): 6254~6267
- 4 N. A. Whitaker, Jr., M. C. Gabriel, H. Avramopoulos *et al.*. All-optical, all-fiber circulating shift register with an inverter[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24): 1999~2001

- 5 Tian Jiajun, Yao Yong, Sun Yunxu *et al.*. Study on generation of the multiwavelength laser using the symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 787~792
- 田佳峻,姚勇,孙云旭等. 利用对称非线性光纤环境产生多波长激光的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 787~792
- 6 Su Jue, Hong Lei, Qian Jingren. Tunable dual-frequency Er-doped fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 643~646
- 苏觉,洪蕾,钱景仁. 可调双频光纤环形腔激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 643~646
- 7 Hu Zongfu, Wang Hao. Multi-wavelength laser generated by an active fiber ring resonator incorporating an optical phase modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 833~838
- 胡宗福,王浩. 有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 833~838
- 8 Gao Yuxin, Xu Wencheng, Luo Zhichao *et al.*. Characteristics of the sideband asymmetry in a fiber ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 132~136
- 高玉欣,徐文成,罗智超等. 环形腔光纤激光器中光谱边带不对称性特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 132~136
- 9 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da *et al.*. Investigation on the large dynamic variable delay range of the optical buffer based on double loop configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 47~53
- 王拥军,吴重庆,疏达等. 基于双环耦合全光缓存器的大动态延迟范围的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 47~53
- 10 Wang Yongjun, Wu Chongqing, Shu Da *et al.*. Cascaded all-optical buffer based on double-loop configure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 597~601
- 王拥军,吴重庆,疏达等. 双环结构级联型全光缓存器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 597~601
- 11 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics Second Edition*[M]. Jia

- Dongfang , Yu Zhenhong Transl. . Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009, 179~470
- 阿戈瓦. 非线性光纤光学(第四版)及非线性光纤光学应用(第二版)[M]. 贾东方, 余震虹 译. 北京: 电子工业出版社, 2009, 179~470
- 12 M. Jinno. All optical signal regularizing/regeneration using a nonlinear fiber sagnac interferometer switch with signal-clock walk-off[J]. *J. Lightwave Technol.* , 1994, **12**(9): 1648~1659
- 13 K. J. Blow, N. J. Doran, B. K. Nayar *et al.*. Two-wavelength operation of the nonlinear fiber loop mirror[J]. *Opt. Lett.* , 1990, **15**(4): 248~250