

文章编号: 0258-7025(2005)03-0411-07

# 应用相敏光放大器抑制光孤子互作用的研究

林洪榕, 杨爱霞, 钱 胜, 迟晓玲, 李跃辉

(南京邮电学院通信工程系, 江苏 南京 210003)

**摘要** 通过计算机系统仿真研究了应用相敏光放大器(PSA)作为在线放大器抑制光孤子传输系统中孤子间的互作用,并与相应的掺铒光纤放大器(EDFA)光孤子系统进行比较。仿真中考虑了平均孤子和动态孤子两种传输方案。结果表明,应用相敏光放大器代替掺铒光纤放大器作为在线放大器能有效地抑制孤子系统中脉冲的展宽和孤子间的互作用。对于平均孤子,在没有附加其他孤子控制措施的情况下,相敏光放大器系统中孤子间互作用得到有效的抑制,孤子对稳定传输距离得到极大的延长。对动态孤子,相敏光放大器亦表现出良好的抑制孤子间互作用的效果,但孤子脉冲的幅度经长距离传输后显著下降。

**关键词** 光通信;光孤子传输;相敏光放大器;掺铒光纤放大器;孤子互作用;系统仿真

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Research on Suppressing Soliton Interaction Using Phase-Sensitive Amplifiers

LIN Hong-rong, YANG Ai-xia, QIAN Sheng, CHI Xiao-ling, LI Yue-hui

(Department of Communication Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract** Using phase-sensitive amplifiers (PSA) as in-line amplifiers to suppress soliton interaction in soliton transmission system was theoretically analyzed by computer simulation. For comparison, the interaction of soliton in the system using erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) as in-line amplifiers was also simulated. The simulation considered both average-soliton regime and dynamic-soliton regime. The results show that using PSAs instead of EDFAs as in-line amplifiers can effectively suppress the pulse broadening and soliton interaction. For average-soliton, without additional control techniques, the interaction between solitons can be suppressed and the steady transmission distance can be lengthened greatly. For dynamic-soliton system, PSA also has a good behavior of suppressing soliton interaction. But after long distance transmission, the amplitude of soliton pulse descends significantly.

**Key words** optical communication; optical soliton transmission; phase-sensitive amplifier; erbium-doped fiber amplifier; solitons interaction; computer simulation

## 1 引 言

在高速光孤子通信系统中,为了提高系统的通信容量,常通过缩短相邻孤子脉冲间的间距(即提高信道速率),采用光时分复用(OTDM)、波分复用(WDM)等技术来实现。当相邻孤子靠近后,由于

光纤的非线性效应等诸多因素将引起相邻孤子间的相互作用,孤子波形发生畸变,传输特性恶化,传输速率下降,传输距离缩短<sup>[1]</sup>。因此,在高速光孤子通信中,抑制光孤子间的相互作用是一个十分重要的问题。目前光孤子传输实验大多采用掺铒光纤放大器(EDFA)作为在线放大器来补偿光纤损耗导致的

收稿日期:2003-12-23;收到修改稿日期:2004-04-12

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2002032)资助项目。

作者简介:林洪榕(1943—),男,福建福州人,南京邮电学院通信工程系教授,目前主要从事高速光纤通信、光子器件和技术、光纤非线性效应及应用等领域的教学和科研工作。E-mail:linhr@njupt.edu.cn

孤子能量损失。掺铒光纤放大器中的放大的自发辐射(ASE)噪声也是影响孤子间相互作用的主要因素<sup>[2]</sup>。这种孤子系统中常采用频域滤波、非线性增益和同步调制等技术来抑制孤子间的相互作用<sup>[3~5]</sup>。

相敏光放大器(PSA)是利用介质二阶或三阶非线性效应实现光参量放大的一种光放大器。其光增益具有相敏特性,即它仅对脉冲的主相位分量进行放大,而衰减其正交相位分量。因此,相敏光放大器不仅能够实现光脉冲的能量放大,而且还同时具有相位滤波功能,即能够抑制光脉冲的展宽,或者说具有一定的色散补偿效果<sup>[6~8]</sup>。相敏光放大器由于其特定的光放大机理而不会产生放大自发辐射噪声,理论上具有 0 dB 的噪声指数<sup>[9,10]</sup>。应用相敏光放大器作为光孤子传输系统的在线放大器时,在无需附加其他孤子控制技术下,不仅可以抑制孤子脉冲的展宽,而且本文的研究结果表明也可以显著地减小孤子间的相互作用。

本文采用脉冲对传输波形演变来研究应用相敏光放大器作为在线放大器的光孤子传输系统中孤子间的相互作用,并且与相应的掺铒光纤放大器光孤子系统进行比较。仿真了平均孤子和动态孤子两种传输方案。

## 2 级联光放大器光孤子传输系统的理论分析和计算模型

对于色散位移光纤( $\beta_2 < 0, \beta_3 > 0$ ),孤子光脉冲在光纤中的波形演变可以由归一化传输方程,又称为广义非线性薛定谔方程给出<sup>[11]</sup>

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} + iU + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - i\delta \frac{\partial^3 U}{\partial \tau^3} = -N^2 |U|^2 U, \quad (1)$$

式中采用归一化定义

$$U = \frac{A}{\sqrt{P_0}}, \quad \xi = \frac{z}{L_D}, \quad \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0}, \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{\alpha}{2} L_D, \quad \delta = \frac{\beta_3}{6|\beta_2|T_0^3},$$

式中  $U, \xi, \tau$  分别为归一化包络幅度变量、距离变量和时间变量,  $\Gamma$  和  $\delta$  分别为光纤的归一化损耗和高阶色散参量。而  $A$  为信号脉冲的电场包络函数,  $P_0$  和  $T_0$  分别为初始脉冲的峰值功率和脉宽,  $z$  为信号传输距离,  $t$  为时间,  $v_g$  为光波群速度,  $\alpha$  为光纤损耗系数,  $\beta_2$  为一阶色散参量,  $\beta_3$  为二阶色散参量(方程中忽略了二阶以上色散参量),  $L_D$  为色散长度, 定义

$L_D = T_0/|\beta_2|$ 。式(1)参量  $N$  由下式给出

$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{\gamma P_0 T_0^2}{|\beta_2|}, \quad (3)$$

式中定义  $L_{NL} = 1/(\gamma P_0)$ ,  $\gamma$  为光纤非线性系数。  $N \geq 1$ 。当  $N = 1$  时形成基态光孤子。对于基态光孤子, 孤子峰值功率  $P_0$  应满足  $P_0 = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2} = \frac{1}{\gamma L_D}$ 。当  $N \geq 2$  时形成高阶光孤子。这里还给出孤子周期  $z_0 = \frac{\pi}{2} L_D$ 。

通过数值求解广义非线性薛定谔方程,即计算机系统仿真方法可以给出光孤子在光纤中的传输特性。在系统仿真中分别考虑了平均孤子[归一化放大器间距  $z_a (= L_a/z_0) \ll 1, L_a$  为放大器间距]和动态孤子( $z_a \approx 1$ )两种传输方案。仿真中均采用了预加重措施。

采用了等幅、同频、同相孤子对传输表征孤子间的相互作用。引入孤子间的归一化间距  $q_0$ , 有<sup>[11]</sup>

$$q_0 = \frac{1}{2BT_0} = \frac{0.8325}{BT_{FWHM}}, \quad (4)$$

式中  $B$  为传输比特率,  $T_{FWHM}$  为脉冲的半峰全宽。初始光脉冲采用高斯脉冲, 则有  $T_0 = 1.665 T_{FWHM}$ 。

仿真中表征光纤色散的是色散系数  $D$  和色散斜率  $dD/d\lambda$ , 它们和  $\beta_2$  及  $\beta_3$  之间的关系为

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D, \quad \beta_3 = \frac{\lambda^3}{(2\pi c)^2} \left( 2D + \lambda \frac{dD}{d\lambda} \right), \quad (5)$$

由信号脉冲包络在光纤中的传输方程可以导出,相敏光放大器的输出和输入之间有如下关系<sup>[6,12]</sup>

$$A_{out}(z, T) = \sqrt{G} \frac{[A_{in}(z, T) + e^{i\phi} A_{in}^*(z, T)]}{2} + \frac{[A_{in}(z, T) - e^{i\phi} A_{in}^*(z, T)]}{2\sqrt{G}}, \quad (6)$$

式中  $A_{in}(z, T), A_{out}(z, T)$  分别为放大器输入和输出脉冲的复电场,  $A_{in}^*(z, T)$  是  $A_{in}(z, T)$  的复共轭,  $G$  为放大器的增益,  $\phi$  为信号光和抽运光之间的相位差。假定抽运光与信号光的相位完全一致,即  $\phi = 0$ , 则输入和输出的关系可简化为

$$A_{out}(z, T) = \sqrt{G} \text{Re}[A_{in}(z, T)] + \frac{1}{\sqrt{G}} \text{Im}[A_{in}(z, T)], \quad (7)$$

式中  $\text{Re}[A_{in}(z, T)], \text{Im}[A_{in}(z, T)]$  分别表示输入信号光的实部和虚部。式(6), (7)表明了相敏光放大器增益的相位敏感性。即对  $\phi = 0$ , 相敏光放大器仅对信号脉冲电场的实部提供增益, 而对其虚部则提供衰减。

对掺铒光纤放大器则有<sup>[12]</sup>

$$A_{\text{out}}(z, T) = \sqrt{G} A_{\text{in}}(z, T). \quad (8)$$

考虑放大器增益完全补偿光纤损耗的情况,增益取值为  $G = \exp(\alpha L_a)$ 。对掺铒光纤放大器孤子系统的仿真中考虑了放大自发辐射噪声,噪声功率谱密度为  $2h\omega_0(G-1)$ ,其中  $h$  为普朗克常数,  $\omega_0$  为角频率。噪声系数取值为  $F_n = 4.5$  dB。

### 3 计算结果及分析

通过数值求解广义非线性薛定谔方程,即计算机系统仿真的方法来研究光孤子传输系统中孤子的相互作用。采用的是色散位移光纤(DSF)加周期性级联光放大器的孤子传输系统。为了表明相敏光放大器应用于光孤子系统的优越性,分别仿真了相敏光放大器和掺铒光纤放大器两种孤子传输系统,并进行了比较。仿真中采用脉冲对传输的波形和频谱演变来表征系统中孤子间的相互作用。初始脉冲波形为高斯型光脉冲。仿真中均考虑了群速度色散、高阶群速度色散和自相位调制效应,并且采用了孤子预加重措施。

对于平均或是动态孤子传输,系统的某些基本参量是相同的。仿真中用到的基本参量有:光载频波长  $\lambda_0 = 1552$  nm,光纤损耗系数  $\alpha = 0.25$  dB/km,色散系数  $D = 0.2$  ps/(nm·km),色散斜率  $dD/d\lambda = 0.07$  ps/(nm<sup>2</sup>·km),非线性系数  $\gamma = 2.16$ /(W·km)(克尔常数  $n_2 = 2.67 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup>/W,有效芯面积  $S_{\text{eff}} = 50$  μm<sup>2</sup>)。

#### 3.1 应用于平均孤子传输方案

在对平均孤子传输方案的仿真中取参量如下:孤子脉宽  $\tau_s = 12.5$  ps,放大器间距  $L_a = 25$  km,色散长度  $L_D \approx 221$  km,对应归一化放大器间距  $Z_a = 0.1134$  ( $Z_a \ll 1$ ),加重因子  $Q = 1.346$ 。对于信号速率为  $B = 20$  Gbit/s 的系统,孤子归一化间距为  $q_0 = 3.33$ ,系统传输距离取为 10000 km。

首先每隔 500 km(每 20 个放大器后)取样一次,输出一组高斯脉冲对的时域波形和频谱,观察脉冲对在传输过程中的演化,绘出波形图 1 和频谱图 2。其中图 1(a)和图 2(a)为掺铒光纤放大器孤子系统的仿真结果,图 1(b)和图 2(b)为相敏光放大器孤子系统的仿真结果。

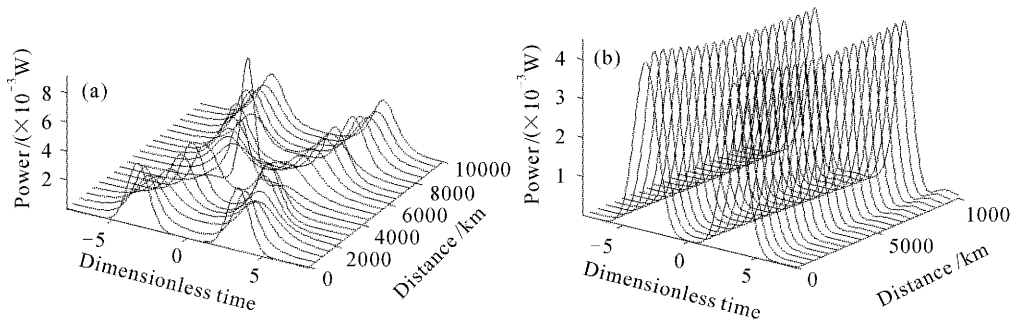


图 1 平均孤子传输 10000 km 的波形演变

(a) 光放大器为掺铒光纤放大器;(b) 光放大器为相敏光放大器

Fig. 1 For average-soliton system, the pulse shape evolution in 10000 km transmission

(a) using EDFAs as in-line amplifiers; (b) using PSAs as in-line amplifiers

从图 1(a)中可以看出掺铒光纤放大器孤子系统的经典孤子对之间的相互作用过程:吸引、碰撞、分离。图 2(a)的频谱演变也对应地反映了这一过程。由于色散波的影响,频谱结构渐趋复杂。同时注意到,随着传输距离的增长,掺铒光纤放大器的放大自发辐射噪声的积累效应在频谱中的表现变得更为明显。具体表现为频谱的毛刺更多更大,谱宽呈现一种抖动状态,最终使频谱变化的规律性淹没在噪声毛刺之中而十分不明显。再观察图 1(b)和图 2(b),显然相敏光放大器系统的性能要远远优于掺铒光纤

放大器系统。在时域方面,在 10000 km 的传输过程中高斯脉冲对没有碰撞,而且孤子间距甚至两个孤子相对定时中点的距离几乎都没有发生变化,时域的稳定非常好。在频谱方面,没有像掺铒光纤放大器系统频谱那样复杂的变化过程,只是在传输后相对初始频谱,中心谱瓣能量降低,两个旁瓣能量增加,中心谱瓣的能量有向两个旁瓣转移的趋势,谱宽没有明显的变化。以上对比表明了平均孤子传输方案中应用相敏光放大器作为光孤子在线放大器可以有效地抑制孤子间的相互作用,极大地延长孤

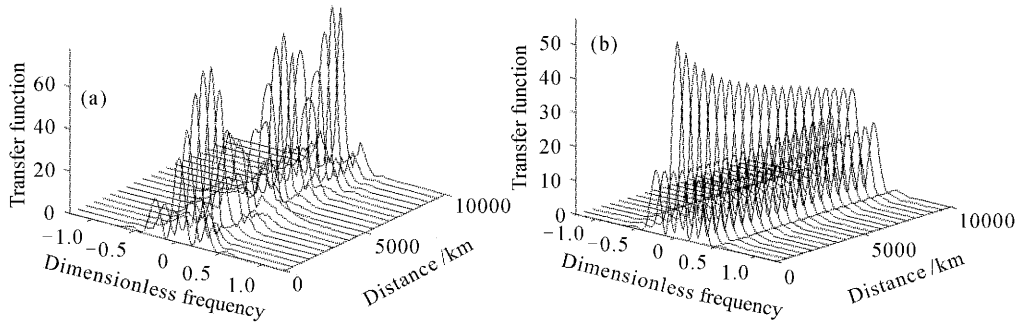


图 2 平均孤子传输 10000 km 的频谱演变

(a) 光放大器为掺铒光纤放大器; (b) 光放大器为相敏光放大器

Fig. 2 For average-soliton system, the spectrum evolution in 10000 km transmission

(a) using EDFAs as in-line amplifiers; (b) using PSAs as in-line amplifiers

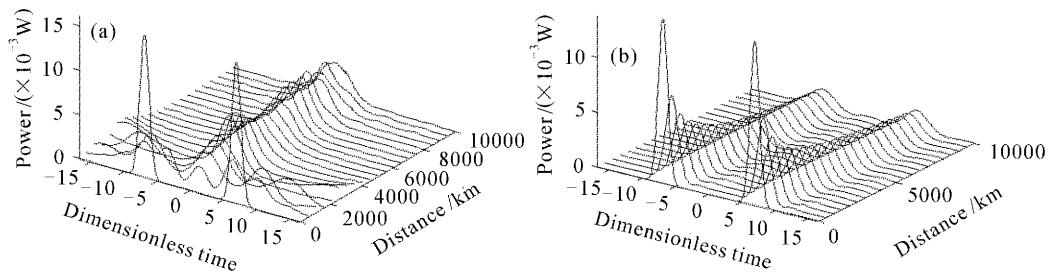


图 3 动态孤子传输 10000 km 的波形演变

(a) 光放大器为掺铒光纤放大器; (b) 光放大器为相敏光放大器

Fig. 3 For dynamic-soliton system, the pulse shape evolution in 10000 km transmission

(a) using EDFAs as in-line amplifiers; (b) using PSAs as in-line amplifiers

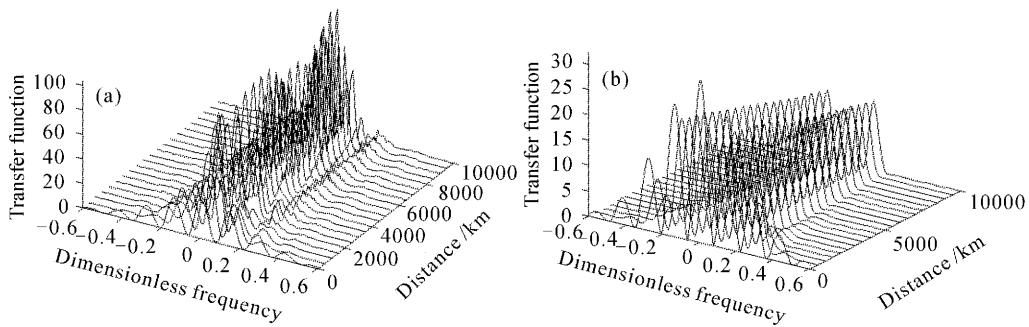


图 4 动态孤子传输 10000 km 的频谱演变

(a) 光放大器为掺铒光纤放大器; (b) 光放大器为相敏光放大器

Fig. 4 For dynamic-soliton system, the pulse spectrum evolution in 10000 km transmission

(a) using EDFAs as in-line amplifiers; (b) using PSAs as in-line amplifiers

子的稳定传输距离。

### 3.2 应用于动态孤子传输方案

对动态孤子传输方案的仿真中取参量如下:初始脉冲峰值功率 16 mW,也就是 12.041 dBm,此时系统的参量  $N = 1.325 (1 < N < 2)$ ,  $\tau_s = 6$  ps,  $L_a = 50$  km,  $L_D = 50.81$  km,对应  $z_a = 0.984 (z_a \approx 1)$ ,对于信号速率为  $B = 20$  Gbit/s 的系统,孤子归

一化间距为  $q_0 = 6.9375$ ,传输距离仍为 10000 km。

仍然选择每隔 500 km(每 20 个放大器后)取样一次,输出一组高斯脉冲对的时域波形和频谱,绘出波形图 3 和频谱图 4,观察脉冲对在传输过程中的演化。其中图 3(a)和图 4(a)为掺铒光纤放大器孤子系统的仿真结果,而图 3(b)和图 4(b)为相敏光放大器孤子系统的仿真结果。

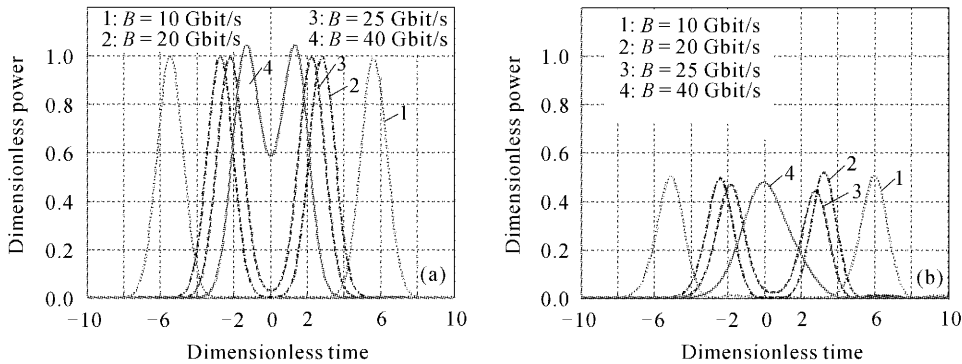


图 5 不同传输速率下孤子脉冲对的初始波形和传输 10000 km 后的波形

(a) 初始波形; (b) 传输 10000 km 后的波形

Fig. 5 Original pulse shapes and the pulse shapes after transmitting 10000 km of soliton pair for different bit-rate

(a) the original pulse shape; (b) the pulse shape after transmitting 10000 km

由图 3(a), (b) 和图 4(a), (b) 可见, 在掺铒光纤放大器光孤子系统中, 脉冲的幅度衰减很快, 且由于孤子间的相互作用使得孤子的波形发生畸变, 两个孤子脉冲很快汇合成一个脉冲向前传输, 脉冲的形状也出现复杂的变化, 反映出典型的两个孤子间相互作用的现象。其频谱的变化与时域波形变化相对应, 频谱中也同时出现了很多毛刺。而对于相敏光放大器系统, 两个孤子间的相互作用很弱, 孤子间距保持得很好, 没有明显的变化。但经长距离传输后, 孤子脉冲的幅度显著下降。其频谱的演变也是平稳的。频谱的主瓣能量减弱, 旁瓣能量增加, 主瓣能量有向旁瓣转移的趋势, 但经短距离传输后很快趋于稳定并基本保持不变。

由以上仿真结果可以看出, 相对于掺铒光纤放大器孤子系统, 采用相敏光放大器作为中继放大器的孤子传输系统中孤子间的相互作用可以得到有效的抑制。这是由于相敏光放大器不存在导致孤子相互作用因素之一的放大自发辐射噪声。而且相敏光放大器增益的相敏特性使其具有抑制脉冲展宽作用, 即具有一定的色散补偿作用, 由此抑制了孤子间的相互作用。此外, 还可以看出, 对相敏光放大器孤子系统, 动态孤子的传输性能不如平均孤子。动态孤子经长距离传输后脉冲幅度的下降比平均孤子要显著得多。这归因于, 相对于平均孤子传输, 动态孤子传输中的色散波较大<sup>[13]</sup>, 相敏光放大器对色散波的衰减导致孤子能量的损失, 经长距离传输后脉冲幅度显著下降。因此, 如何保持孤子脉冲的幅度是这种系统中孤子能否实现长距离稳定传输的关键。

### 3.3 相敏光放大器对孤子相互作用的抑制程度

为了进一步研究相敏光放大器应用于光孤子系

统时对于孤子相互作用的抑制程度, 重新选取了部分参量做了进一步的仿真, 仿真中仅考虑平均孤子传输方案。

首先考虑给定孤子脉宽, 改变传输速率情况。取  $D = 0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,  $\tau_s = 15 \text{ ps}$ ,  $L_a = 50 \text{ km}$  ( $L_D = 317.57 \text{ km}$ ,  $z_a = 0.157$ ),  $P_0 = 4.4457 \text{ mW}$ , 即  $6.479 \text{ dBm}$ ,  $Q = 1.7463$ 。仍考虑放大器增益恰好补偿光纤损耗, 则  $G = 12.5 \text{ dB}$ 。传输速率  $B$  分别为  $10 \text{ Gbit/s}$ ,  $20 \text{ Gbit/s}$ ,  $25 \text{ Gbit/s}$  和  $40 \text{ Gbit/s}$ , 其对应的孤子归一化间距  $q_0$  分别为  $5.55$ ,  $2.775$ ,  $2.22$  和  $1.388$ 。

图 5(a) 和 (b) 分别给出孤子脉冲对的初始波形和传输 10000 km 后的波形。图中选取两个脉冲的中心位置为原点。横坐标采用归一化的时间变量, 纵坐标采用归一化功率。对比图 5(a) 和 (b) 可以看出, 对应用相敏光放大器作为在线放大器的平均孤子系统, 孤子脉冲经长距离传输后脉宽保持得非常好, 几乎没有展宽。即使在孤子脉冲间距很小的情况下, 孤子脉冲间距的变化依然很小, 甚至脉冲相对定时中点的距离也没有明显的变化。以上结果表明, 相敏光放大器对孤子间的相互作用有显著抑制效果。即使孤子间距相当小, 经长距离传输后孤子脉冲的间距依然得到良好的保持。但是, 从图 5(a) 和 (b) 亦可看出, 如果初始脉冲间已存在能量交叠 ( $\tau_s = 15 \text{ ps}$ ,  $B = 40 \text{ Gbit/s}$  情况), 则孤子间的相互作用难以得到有效抑制。对其仿真的结果表明, 这种情况下孤子间的相互作用非常明显, 传输约 6000 km 后孤子间已出现碰撞而汇合成一个脉冲传输。因此, 对相敏光放大器孤子系统, 为实现高速率传输, 应该相应减小孤子的初始脉宽。

下面考虑给定传输速率,改变脉宽情况。仿真中选取的相同参数如下: $D = 0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,  $L_a = 50 \text{ km}$ ,  $G = 12.5 \text{ dB}$ 。而传输速率取为  $B = 20 \text{ Gbit/s}$ , 孤子脉宽  $\tau$  分别取  $12.5 \text{ ps}$ ,  $15 \text{ ps}$ ,  $17.5 \text{ ps}$

和  $20 \text{ ps}$  ( $L_D$  分别为  $220.54 \text{ km}$ ,  $317.57 \text{ km}$ ,  $423.24 \text{ km}$  和  $564.56 \text{ km}$ , 而  $z_a$  分别为  $0.2267$ ,  $0.157$ ,  $0.1157$  和  $0.0886$ ), 其对应的孤子归一化间距  $q_0$  分别为  $3.33$ ,  $2.775$ ,  $2.379$  和  $2.081$ 。

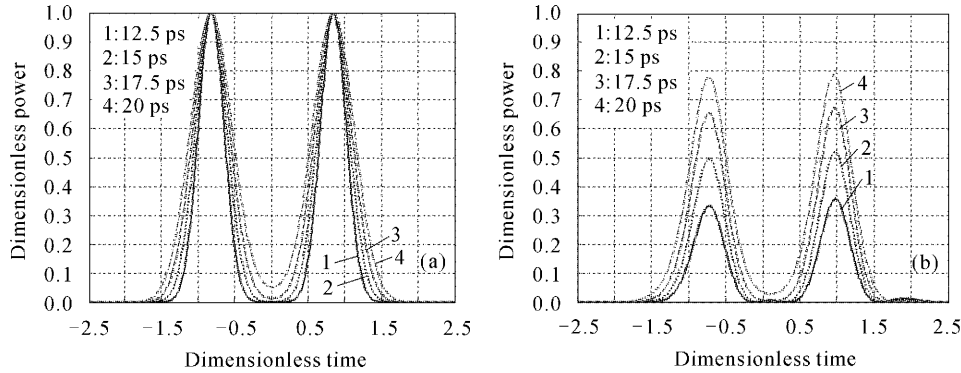


图 6 不同脉宽下孤子脉冲对的初始波形和传输 10000 km 后的波形

(a) 初始波形; (b) 传输 10000 km 后的波形

Fig. 6 Original pulse shapes and the pulse shapes after transmitting 10000 km of soliton pair for different pulse width

(a) the original pulse shape; (b) the pulse shape after transmitting 10000 km

图 6(a)和(b)分别给出这种情况下孤子脉冲对的初始波形和传输 10000 km 后的波形。仿真结果亦反映了相敏光放大器对孤子间相互作用的显著抑制效果。即只要初始的孤子脉冲间不存在显著的能量交叠,即使孤子间距很小,长距离传输后仍然没有呈现明显的孤子相互作用。

从图 5 和图 6 中均可以直观地看出,孤子脉冲经长距离传输后幅度出现显著下降。孤子脉宽越窄,幅度下降越显著。之所以出现这种现象是由于相敏光放大器增益的相敏特性所决定的。从相敏光放大器输入输出的公式可以看出,应用相敏光放大器作为在线放大器,当信号光和抽运光相位完全一致时,相敏光放大器仅放大输入信号的实部而衰减其虚部,也就是放大了信号光的无啁啾部分而衰减了有啁啾部分。虽然,这可以抑制脉冲传输过程中由于光纤色散而引起的脉冲展宽,但同时也使孤子能量出现损失。随着传输距离的延长,相敏光放大器数量的增多,孤子能量的损失的积累会破坏非线性效应和光纤色散之间的平衡,最终导致孤子脉冲幅度的显著下降。孤子脉宽  $\tau$  越窄,色散距离  $L_D$  就越短,归一化放大器间距  $z_a$  越大,相应地越偏离平均孤子传输条件 ( $z_a \ll 1$ ),系统中色散波辐射越大,经相敏光放大器放大引起孤子能量的损失越多,长距离传输后脉冲幅度下降越显著。为此,提出了一个略微增加放大器增益的办法来补偿由于相敏光放大器增益的相敏特性所引起的孤子能量损失,这在一

定范围内一定程度上可以稳定孤子的传输,显著改善系统的性能。但是,在过大的归一化放大器间距  $z_a$  (过小的孤子脉宽、过大的光纤色散、过长的放大器间距)下,经相敏光放大器放大后孤子脉冲将出现显著的旁瓣,长距离传输后旁瓣能量的积累将导致严重的孤子相互作用,劣化系统的传输性能。

## 4 结 论

通过计算机系统仿真研究了应用相敏光放大器作为在线放大器时光孤子对之间的相互作用,并与相应的掺铒光纤放大器光孤子系统作了比较。仿真了平均孤子和动态孤子两种传输方案。研究结果表明,1) 由于相敏光放大器不存在放大自发辐射噪声,而且具有一定的抑制脉冲展宽,即一定的色散补偿作用,在光孤子传输系统中应用相敏光放大器代替掺铒光纤放大器作为在线放大器,能够显著地抑制孤子间的相互作用。2) 对平均孤子系统,在没有附加其他孤子稳定措施的情况下,应用相敏光放大器作为在线放大器能够很好地抑制脉冲的展宽,减小孤子间的相互作用,从而极大地延长了孤子稳定传输距离。3) 对动态孤子系统,相敏光放大器亦表现出良好的抑制脉冲展宽和减小孤子间相互作用的效果。但是,不可忽视的是这种系统中孤子脉冲的幅度经长距离传输后显著下降。因此,如何保持孤子脉冲的幅度是这种系统中孤子能否实现长距离稳定

传输的关键。

### 参 考 文 献

- 1 D. Anderson, M. Lisak. Bandwidth limits due to mutual pulse interaction in optical soliton communication systems [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(3):174~176
- 2 T. Georges, F. Favre. Influence of soliton interaction on amplifier noise-induced jitter: A first-order analytical solution [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21):1656~1658
- 3 Y. Kodama, S. Wabnitz. Analysis of soliton stability and interactions with sliding filters [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 162~164
- 4 L. Francois, T. Georges. Reduction of averaged soliton interaction forces by amplitude modulation [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(8):583~585
- 5 N. J. Smith, W. J. Firth, K. J. Blow *et al.*. Suppression of soliton interactions by periodic phase modulation [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1):16~18
- 6 R. D. Li, P. Kumar, W. Kath. Dispersion compensation with phase-sensitive optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3):541~549
- 7 Lin Hongrong, Chen Ruquan. The transmission performance of non-zero dispersion shifted fiber communication systems using in-line phase-sensitive amplifiers [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2001, **8**(2):5~10
- 8 Lin Hongrong, Chen Ruquan. Effect of signal pulse shape on the transmission performance of cascaded in-line PSA optical fiber communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):939~943  
林洪榕,陈如全. 脉冲波形对级联相敏放大器光传输系统性能的影响[J]. 光学学报, 2001, **21**(8):939~943
- 9 I. H. Deutsch, I. Abram. Reduction of quantum noise in soliton propagation by phase-sensitive amplification [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(11):2303~2313
- 10 W. Imajuku, A. Takada. Reduction of fiber-nonlinearity-enhanced amplifier noise by means of phase-sensitive amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1):31~33
- 11 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 1989
- 12 W. Imajuku, A. Takada. Theoretical analysis of system limitation for AM-DD/NRZ optical transmission systems using in-line phase-sensitive amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(7):1158~1170
- 13 Lin Hongrong, Qian Sheng, Yang Aixia *et al.*. Effect of the fiber dispersion parameter on the performance of average-soliton transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1274~1278  
林洪榕,钱 胜,杨爱霞 等. 光纤色散参量对光孤子系统传输性能的影响[J]. 光学学报, 2004, **24**(9):1274~1278