

文章编号: 0253-2239(2004)09-1274-5

# 光纤色散参量对光孤子系统传输性能的影响\*

林洪榕 钱 胜 杨爱霞 李跃辉

(南京邮电学院通信工程系, 南京 210003)

**摘要:** 采用计算机系统仿真方法研究光纤色散参量对应用相敏光放大器(PSA)作为在线放大器并采用平均孤子传输方案的光孤子通信系统传输性能的影响。研究表明:由于相敏光放大器增益的相敏特性,光纤色散导致孤子脉冲主瓣幅度下降,脉宽展宽,出现旁瓣。光纤色散值越大,经长距离传输后,孤子脉冲主瓣的幅度下降和脉宽展宽越显著;旁瓣的幅度越高,宽度越大。显然,对这种系统,要实现长距离传输,必须采用较低色散系数光纤。

**关键词:** 光孤子传输;相敏光放大器;平均孤子;光纤色散;系统仿真

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## Effect of The Fiber Dispersion Parameter on the Performance of Average-Soliton Transmission System

Lin Hongrong Qian Sheng Yang Aixia Li Yuehui

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

(Received 4 June 2003; revised 16 October 2003)

**Abstract:** The effect of optical fiber dispersion parameter on the performance of average-soliton transmission system using PSA as in-line amplifiers has been analyzed theoretically by computer simulation. The simulation results show that because of the phase-sensitive nature of PSA's gain, fiber dispersion will cause soliton pulse amplitude descending and its width broadening. Moreover it will result in pulse wings presenting. The larger the fiber dispersion is, the more significant the pulse amplitude descending and its width broadening are, as well as the higher the wing's amplitude is and the wider its width is, after long distance transmission. So for this system, in order to realize long distance transmission, the optical fiber dispersion coefficient must be small.

**Key words:** optical soliton transmission; phase-sensitive amplifiers; average soliton; optical fiber dispersion; computer simulation

## 1 引 言

相敏光放大器(PSA)<sup>[1]</sup>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(main quadrature)进行放大,而衰减其正交相位分量(orthogonal quadrature)。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<sup>[2]</sup>。相对于掺铒光纤放大器(EDFA),相敏光放大器不存在光放

大的自发辐射(ASE)噪声,理论上具有 0dB 的噪声指数<sup>[3,4]</sup>。因此,对采用相敏光放大器作为在线放大器的光孤子传输系统,无需附加其它的孤子控制技术即可突破 Gordon-Haus 限制<sup>[5~7]</sup>以及抑制孤子间的相互作用<sup>[7]</sup>,相对于掺铒光纤放大器孤子系统,孤子的稳定传输距离得到极大的延长<sup>[7]</sup>。此外,相敏光放大器增益的相敏特性还使其具有一定的色散补偿效果<sup>[2,8]</sup>,由此可以抑制孤子被放大和衰减时产生的色散辐射。

但是,相敏光放大器也有其不足的一面。应用相敏光放大器作为在线放大器的光通信系统,不仅对放大器抽运光和信号光之间相移的大小有较严格的要求<sup>[9]</sup>,而且由于相敏光放大器增益的相敏特性,脉冲

\* 江苏省自然科学基金(BK2002032)资助课题。

E-mail: linhr@njupt.edu.cn

收稿日期:2003-06-04;收到修改稿日期:2003-10-16

经相敏光放大器放大后会出现旁瓣<sup>[2]</sup>。过大的旁瓣高度将导致相敏光放大器光传输系统性能的劣化。

本文通过计算机系统仿真方法研究光纤色散参量的大小对采用相敏光放大器作为在线放大器的平均光孤子系统传输性能的影响。仿真中采用单脉冲波形演变表征孤子系统的传输性能。研究表明:由于相敏光放大器增益的相敏特性,光纤色散导致孤子脉冲主瓣的幅度下降,脉宽展宽,出现旁瓣。光纤色散值越大,经长距离传输后,孤子脉冲主瓣的幅度下降和脉宽展宽越显著;旁瓣的幅度越高,宽度也越大。因此,对孤子传输性能的影响越显著。

## 2 级联相敏光放大器光孤子传输系统的理论分析和仿真模型

对色散位移光纤 ( $\beta_2 < 0, \beta_3 > 0$ ), 孤子光脉冲在光纤中传输的波形演变可以通过求解以下广义非线性薛定谔方程 (NLSE) 给出<sup>[10]</sup>:

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

上式采用以下归一化定义:

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

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

式中  $U, \xi$  和  $\tau$  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归一化高阶色散参量。而  $A$  是信号脉冲的电场包络函数,  $z$  是信号传输距离,  $t$  为时间,  $\alpha$  为光纤衰减常量,  $\beta_2$  是一阶色散参量,  $\beta_3$  是二阶色散参量(方程中忽略了二阶以上色散参量),  $v_g$  为光波群速度,  $T_0$  和  $P_0$  分别为初始脉冲的脉宽和峰值功率。  $L_D$  称为光纤色散长度,  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ 。

(1) 式中参量  $N$  由下式给出:

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

式中  $L_{NL}$  称为光纤非线性长度,  $L_{NL} = 1/\gamma P_0$ 。其中  $\gamma$  是光纤非线性系数, 定义为:  $\gamma = n_2 \omega_0 / (cS_{eff})$ , 而  $n_2$  是克尔常量,  $\omega_0$  为光载波的角频率,  $c$  是真空中光速,  $S_{eff}$  为光纤有效纤芯截面。(3) 式中  $N \geq 1$ 。当  $N = 1$  时, 对反常色散 ( $\beta_2 < 0$ ) 光纤, 在忽略光纤损耗和高阶色散情况下, 光脉冲可以保形、保速传输, 即形成基态光孤子。对于基态孤子, 脉冲峰值功率  $P_0$  应满足  $P_0 = |\beta_2| / (\gamma T_0^2) = 1/(\gamma L_D)$ 。当  $N \geq 2$  时形成高阶光孤子。高阶孤子在某个传输距离内将经历分裂、合并、分裂, 最后恢复到初始状态。该距离称为孤子周期  $z_0, z_0$

$= \pi L_D/2$ 。

本文通过分布傅里叶方法数值求解非线性薛定谔方程, 即计算机系统仿真方法来研究光孤子在光纤中的传输特性。考虑的是色散位移光纤加周期性级联集总相敏光放大器的光孤子传输系统。仿真中采用孤子传输性能研究中常用的单脉冲传输波形演变表征孤子系统的传输性能。考虑到孤子脉冲在光纤中经一定距离传输后自身会演变成标准的双曲正割型脉冲, 因此本文初始脉冲波型采用孤子系统仿真中常用的高斯型光脉冲。系统仿真中考虑的是平均孤子 [ $z_a (= L_a/z_0) \ll 1, L_a$  为放大器间距] 传输方案, 并采用了预加重措施。长谷川等<sup>[11~13]</sup> 曾给予证明, 对于  $N \approx 1$  的平均孤子, 预加重因子  $Q$  应满足

$$Q = \left[ \frac{\Gamma z_0}{1 - \exp(-2\Gamma z_0)} \right]^{1/2},$$

这种情况下在一个放大器周期内脉冲的路径平均功率为无损光纤中的基态孤子功率。而对动态孤子 ( $z_a \approx 1$ ), 对应于(3) 式中的参量  $N$  应取值在  $1 < N < 2$ <sup>[13]</sup>。考虑到对动态孤子传输方案, 系统中产生的色散波要比平均孤子方案大的多, 孤子脉冲经长距离传输后幅度显著下降<sup>[7]</sup>, 因此本文仅讨论平均孤子传输方案。系统仿真中采用的表征光纤色散的参量是色散系数  $D$  和色散斜率  $dD/d\lambda$ 。它们和  $\beta_2$  及  $\beta_3$  之间的关系为

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D, \quad \beta_3 = \frac{\lambda^3}{(2\pi c)^2} \left[ 2D + \lambda \frac{dD}{d\lambda} \right], \quad (6)$$

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>[2,14]</sup>:

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

$$[A_{in}(z, T) - \exp(i\phi) A_{in}^*(z, T)] / (2\sqrt{G}), \quad (7)$$

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,  $\phi$  是信号光和抽运光之间的相位差。假定抽运光和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如下

$$A_{out}(z, T) = \sqrt{G} \text{Re}\{A_{in}(z, T)\} +$$

$$(1/\sqrt{G}) \text{Im}\{A_{in}(z, T)\}, \quad (8)$$

(7) 式和(8) 式表明了相敏光放大器增益的相位敏感性。对于理想情况, 即抽运光与信号光无相位漂移 ( $\delta\phi = 0$ ) 情况下, 相敏光放大器对脉冲中心部分进行放大。而在脉冲中心的两侧, 相差为  $\pi/2, 3\pi/2, \dots$  的地方光能量被相敏光放大器衰减, 而相差为  $\pi, 2\pi, \dots$  的地方得到放大。这样当大量的相

敏光放大器级联时,即长距离传输情况下,传输脉冲波形将被改变,两侧出现旁瓣。当旁瓣较小时,对系统的传输性能影响较小,可以忽略。而过大的旁瓣将导致系统传输性能的显著劣化。

本文研究放大器增益完全补偿光纤损耗的情形,因此相敏光放大器的增益取为  $G = \exp(\alpha z_A)$ , 式中  $z_A$  是放大器的间距。

### 3 仿真结果和分析

在这个部分,我们利用计算机系统仿真方法研究

Table 1 The value of simulation parameters

$D / (\text{ps}/\text{km} \cdot \text{nm})$	$L_D/\text{km}$	$L_a/\text{km}$	$L_a/L_D$	$Q$	$P_0/\text{mW}$
0.2	571.35	40	$0.07 \ll 1$	1.5988	2.096
0.5	228.56	40	$0.175 \ll 1$	1.5988	5.1635
0.8	142.84	20	$0.14 \ll 1$	1.2976	5.4552
1.0	114.28	20	$0.175 \ll 1$	1.2976	6.9032
1.3	88.11	20	$0.2262 \ll 1$	1.2976	8.8394

图 1 给出光纤色散参量  $D=0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  时,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传输 10000 km 过程中的演变情况。其它参量取值如表 1 所示。从图中我们可以看到,孤子传输 10000 km,即约相当于 20 个色散距离时,脉冲幅度仍然保持得相当好,波形亦很稳定。虽然在传输到大约 4000 km 时已出现较为明显的旁瓣,而且随着传输距离的增加,旁瓣幅度、宽度都有增加的趋势。但是,即使传输长达 10000 km,旁瓣的幅度仍然很低,宽度亦不大。显然,这种情况下,旁瓣对系统的传输性能影响较小,可以忽略。

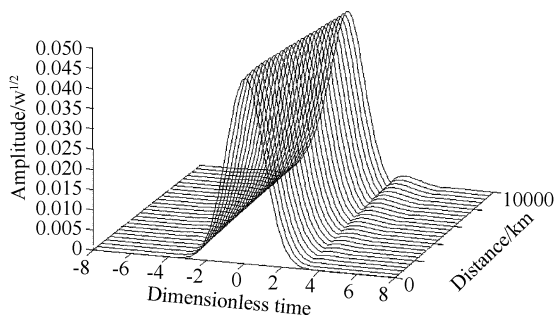


Fig. 1 Evolution of pulse shape in PSA average-soliton system transmission over 10000 km for  $D = 0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$

图 2 给出光纤色散参量  $D=1.0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  时,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传输 10000 km 过程中的演变情况。对应的其它参量取值如表 1 所示。从图中我们可以

应用相敏光放大器作为在线放大器的平均孤子系统通信系统中光纤色散参量对系统传输性能的影响。仿真计算中考虑了群速度色散、高阶群速度色散和自相位调制效应,并且采用了预加重措施。仿真中采用的参量如下:光载频波长  $\lambda_0 = 1552 \text{ nm}$ ,信号速率  $B = 10 \text{ Gbit/s}$ ,光纤损耗系数  $\alpha = 0.25 \text{ dB/km}$ ,色散斜率我们假定不变,均取为  $dD/d\lambda = 0.07 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ,非线性系数  $\gamma = 2.16 \text{ W} \cdot \text{km}$ (克尔常数  $n_2 = 2.67 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}$ ,光纤有效纤芯面积  $S_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ ),脉冲半峰全宽  $\tau_s = 20 \text{ ps}$ 。其他参量的选取如表 1 所示。

看到,这种情况下,孤子传输 400 km,即约不到 4 个色散距离时,已出现明显的旁瓣。而且,孤子脉冲在传输过程中主瓣的幅度不断减小,脉宽不断增大。旁瓣的高度和宽度也不断增大。传输 10000 km 后,脉冲主瓣的幅度已减小到约初始值的一半,脉宽的半峰全宽也增大到初始值的约 1.5 倍。而且,左右旁瓣的宽度都已增大到约等于初始脉冲的宽度。幅度也高达脉冲主瓣幅度的 1/7。显然,光纤色散参量的大小对这种系统的传输性能有较大的影响。

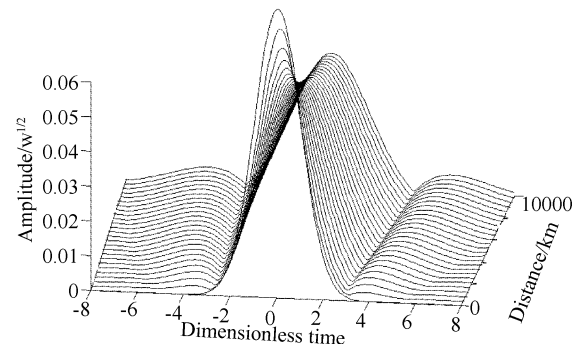


Fig. 2 Evolution of pulse shape in PSA average-soliton system transmission over 10000 km for  $D = 1.0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$

为了进一步表明光纤色散参量对应用相敏光放大器作为在线放大器的平均孤子系统传输性能的影响,我们仿真了在不同的光纤色散参量下,相敏光放大器平均孤子系统孤子脉冲传输 10000 km 后的情况,并对脉冲幅度进行了归一化处理。图 3 示出在不同的光纤色散参量下平均孤子传输 10000 km 后

的脉冲波形。从图中我们可以看到, 孤子脉冲主瓣的幅度随光纤色散参量的增大而下降, 而脉宽随光纤色散参量增大而增大。脉冲旁瓣的高度和宽度也随光纤色散参量增大而增大。这种现象是由于相敏光放大器增益的相敏特性所决定的。在抽运光与信号光无相位漂移( $\delta\phi=0$ )的理想情况下, 相敏光放大器对脉冲中心部分提供增益。而在脉冲中心的两侧, 相敏光放大器衰减脉冲电场的虚部。虽然, 这可以抑制脉冲传输过程中由于光纤色散而出现的展宽, 但同时也引起孤子能量的损失。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下降和脉宽的展宽。此外, 脉冲经相敏光放大器放大后会出现旁瓣。脉冲旁瓣中心处, 相敏光放大器仍会提供增益。因此, 随着传输距离的延长, 相敏光放大器数量的增多, 旁瓣的高度和宽度会不断增大。如果传输光纤的色散系数较小, 这种现象表现的并不明显。而对大色散系数光纤, 随着传输距离的增加, 这种现象会越发显著。

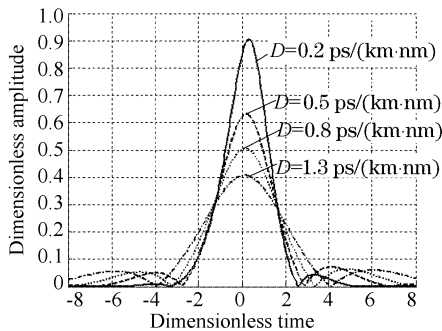


Fig. 3 Pulse shapes in PSA average-soliton system after transmission 10000 km with different  $D$

相敏光放大器孤子系统的脉冲波形不仅和光纤色散值有关, 而且和传输距离, 即放大器总增益有关。图 4 示出在两种不同的色散参量下相敏光放大器孤子脉冲主瓣幅度和脉冲旁瓣幅度随传输距离的变化。由图中可以看出, 脉冲主瓣幅度随传输距离的增大而逐渐下降, 而旁瓣幅度却随传输距离的增大而逐渐增高。研究表明, 可以采用适当增加相敏光放大器增益的方法来补偿由于相敏光放大器增益的相敏特性而导致的孤子脉冲能量的损失, 使孤子脉冲的幅度和宽度在长距离传输过程中得以保持。这在小色散系数光纤系统中取得良好效果<sup>[7]</sup>。但对大色散系数光纤, 情况则不同。图 4 也示出对光纤色散系数  $D=1.0$  ps/nm·km 的相敏光放大器孤子系统, 通过适当增加相敏光放大器增益后, 孤子脉

冲主瓣幅度和旁瓣幅度随传输距离的变化。而图 5 示出在两种不同的放大器增益下, 传输 10000 km 后, 脉冲波形和初始脉冲的比较。由两图中可以看出, 虽然增加相敏光放大器增益可以使孤子脉冲主瓣幅度和脉宽在长距离传输过程中得以保持, 但脉冲旁瓣幅度随传输距离的增加却更为迅速。传输 10000 km 后, 旁瓣幅度已经接近主瓣幅度 1/2。显然, 通过微调放大器增益来补偿由于应用相敏放大器所带来的功率补偿不足, 对较大色散系数光纤的相敏光放大器孤子系统是不可取的。

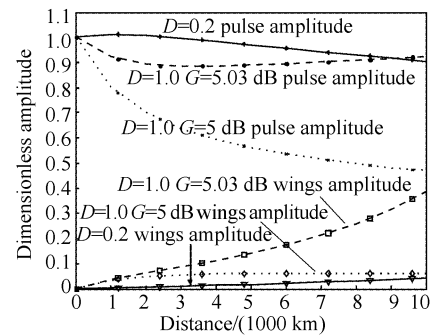


Fig. 4 Amplitude of soliton pulse and wings as a function of transmission distance with different  $D$

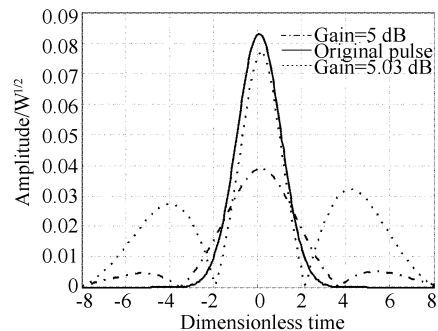


Fig. 5 Pulse shapes in PSA average-soliton system after transmission 10000 km with different amplifier gains for  $D=1.0$  ps/(nm·km)

实际的光孤子通信系统, 传输的当然不是单脉冲, 而是信号脉冲序列。这时相邻孤子脉冲旁瓣的叠加使得旁瓣对系统传输性能的影响更为显著。图 6 给出光纤色散参量分别为  $D=0.2$  ps/(nm·km),  $D=0.5$  ps/(nm·km) 和  $D=1.0$  ps/(nm·km) 时, 孤子脉冲对传输 10000 km 后的波形。作为参照, 我们也给出了初始脉冲的波形。图中横坐标表示归一化时间, 纵坐标为孤子脉冲归一化幅度值。当色散较小 [ $D < 0.5$  ps/(nm·km)] 时, 由于脉冲旁瓣的幅度较小, 叠加后幅度亦不大, 旁瓣对平均孤子传输系统性能的影响可以忽略。当色散参量较大 [ $D \geq 0.5$  ps/(nm·km)] 时, 相邻孤子脉冲旁瓣的

叠加使得旁瓣影响更大,系统传输性能的劣化也就更为显著。

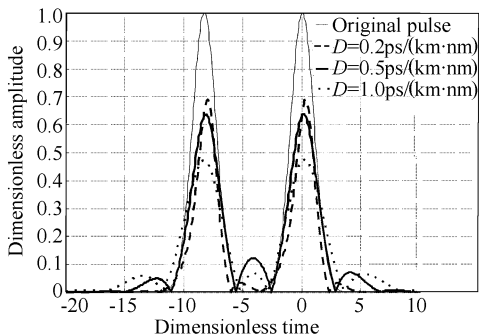


Fig. 6 Soliton pair shapes in PSA average-soliton system after transmission 10000 km with different  $D$

因此,对应用相敏光放大器作为在线放大器并采用平均孤子传输方案的光孤子通信系统,要实现长距离传输,必须选用小色散系数光纤。

**结论** 本文应用分步傅里叶方法数值求解非线性薛定谔方程,即采用计算机系统仿真研究光纤色散参量对应用相敏光放大器作为在线放大器并采用平均孤子传输方案的光孤子通信系统中孤子传输性能的影响。通过系统仿真分析,得到以下结论:

1) 应用相敏光放大器作为平均孤子传输系统在线放大器时,由于相敏光放大器增益的相敏特性,光纤色散将导致孤子脉冲主瓣的幅度下降,脉宽展宽,出现旁瓣。

2) 当光纤色散参量较小时,孤子脉冲经长距离传输后,脉冲幅度仍然保持的相当好,波形亦很稳定。旁瓣幅度较小,宽度亦不大,对系统传输性能的影响可以忽略。

3) 当系统色散参量较大时,孤子脉冲经长距离传输后,不仅脉冲幅度有较大的衰减,脉宽亦有明显的展宽,而且脉冲旁瓣的幅度和宽度也都显著增大。此外,相邻孤子脉冲间旁瓣的叠加会使系统传输性能进一步恶化。

4) 虽然可以采用适当增大相敏光放大器增益的方法使孤子脉冲经长距离传输后,脉冲主瓣幅度和脉宽都得以保持基本不变,但脉冲旁瓣的幅度和宽度增大的趋势却更加明显。

显然,对应用相敏光放大器作为在线放大器的平均光孤子传输系统,要实现长距离传输,必须采用小色散系数光纤。

## 参 考 文 献

- 1 Imajuku W, Takada A. In-line phase-sensitive amplifier with optical-PLL-controlled internal pump light source. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(25): 2155~2156
- 2 Li R D, Kumar P, Kath W. Dispersion compensation with phase-sensitive optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3): 541~549
- 3 Mecozzi A, Tombesi P. Parametric amplification and signal-to-noise ratio in optical transmission lines. *Opt. Commun.*, 1995, **75**(3): 256~262
- 4 Imajuku W, Takada A. Reduction of fiber-nonlinearity-enhanced amplifier noise by means of phase-sensitive amplifiers. *Opt. Lett.*, 1997, **2**(1): 31~33
- 5 Yuen H P. Reduction of quantum fluctuation and suppression of the Gordon-Haus effect with phase-sensitive linear amplifiers. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1): 73~75
- 6 Deutsch I H, Abram I. Reduction of quantum noise in soliton propagation by phase-sensitive linear amplifiers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, **11**(3): 2303~2313
- 7 Lin Hongrong, Yang Aixia, Qian Sheng *et al.*. Using PSAs as in-line amplifiers to overcome the Gordon-Haus restriction and to suppress soliton interaction in soliton transmission system. APOC2003, paper APOC 03-88
- 8 Lin Hongrong, Chen Ruquan. The transmission performance of non-zero dispersion shift fiber communication system using in-line phase-sensitive amplifiers. *The J. China Universities of Posts and Telecommunications*, 2001, **8**(2): 5~10
- 9 Lin Hongrong, Chen Ruquan. The effect of signal pulse shape on the transmission performance of cascaded in-line PSA optical fiber communication system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(8): 939~943 (in Chinese)
- 10 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic Press, 1989
- 11 Hasegawa A, Kodama Y. Guiding-center soliton in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(24): 1443~1445
- 12 Hasegawa A, Kodama Y. Guiding-center soliton. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(2): 161~164
- 13 Yang Xianglin, Wen Yangjing. *Fundamental Theories of Optical Fiber Soliton Communications*. Beijing: National Defence Industry Press, 2000 (in Chinese)
- 14 Imajuku W, Takada A. Theoretical analysis of system limitation for AM-DD/NRZ optical transmission systems using in-line phase-sensitive amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(7): 1158~1170