

文章编号: 0253-2239(2001)08-0939-05

脉冲波形对级联相敏放大器光传输系统性能的影响^{*}

林洪榕 陈如全

(南京邮电学院通信工程系, 南京 210003)

摘要: 研究了相敏光放大器(PSA)中抽运光和信号光之间存在相位漂移时,信号脉冲波形对级联相敏光放大器光纤通信系统传输性能的影响。通过系统仿真,得到了在不同的相位漂移下高速信号脉冲眼图劣化度随光纤色散变化的曲线,以及在给定的光纤色散下放大器有相移与无相移时信号眼图劣化度随信号脉冲指数变化的曲线。由仿真结果可知,脉冲波形不同对系统性能的影响亦不同。采用超高斯脉冲的系统性能优于采用高斯脉冲,而且超高斯脉冲指数存在最佳值。

关键词: 相敏光放大器;色散补偿;相位漂移;脉冲波形

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

高速率、长距离(无中继)传输一直是光纤通信所追求的目标。通过引入光放大器,尤其是掺铒光纤放大器(EDFA),解决了光纤通信中的损耗以及电子放大对系统速率和传输距离的限制。然而,信号速率越高,光纤的色散对光纤通信系统速率和传输距离的限制越明显,因此必须采取相应的措施来抑制色散对传输速率和距离的限制。由于掺铒光纤放大器对光脉冲不具有整形作用,因此不具有色散补偿效果,而且每个掺铒光纤放大器还将附加至少 3 dB 以上的放大的自发辐射(ASE)噪声^[1],级联掺铒光纤放大器的噪声积累严重劣化了系统的信噪比,缩短了系统的传输距离。

相敏光放大器是一种新型的光放大器。其光增益不仅可以补充信号光的能量(补偿光纤损耗),而且增益的相位敏感性对脉冲波形也具有一定的整形作用^[2],因而对光纤色散导致的信号光脉冲展宽起一定的补偿作用。相敏光放大器没有附加的放大自发辐射噪声,理论上具有 0 dB 噪声指数^[3],因而被认为是一种理想的光中继放大器。此外,相敏光放大器具有补偿光纤的正、负色散^[2]、抑制四波混频噪声增强效应引起的调制不稳定^[2],以及应用于孤子系统时可以减小孤子时间抖动效应等优点^[3-5]。这些优势使得应用相敏光放大器的光纤传输系统的无中继传输距离得到显著的延长。

为了充分发挥相敏光放大器的色散补偿效果,通常要求相敏光放大器中抽运光和信号光之间应保持相位一致,即抽运光必须能跟踪信号光的相位。实际的相敏光放大器中由于各种因素不可避免地存在抽运光和信号光之间的相位漂移,从而引起相敏光放大器光传输系统性能的劣化。本文主要研究相敏光放大器中抽运光和信号光之间存在相位漂移时,信号脉冲波形对级联相敏光放大器系统性能的影响。通过系统仿真我们发现,不管相敏光放大器中是否存在相位漂移,采用超高斯脉冲的系统性能都优于采用高斯脉冲,而且超高斯脉冲指数存在最佳值。在此脉冲形状下,信号可以传输更远的距离。此外,当放大器相位漂移较大时,脉冲峰值部分宽度越窄,系统性能的劣化越严重。

2 相敏光放大器的构成及放大原理

实现相敏光放大的物理方法是利用简并光参量放大器(DOPA)作为其核心部分。通常,典型的相敏光参量放大器都要包括三部分^[2,6]:抽运光源、光锁相环以及非线性光纤萨尼亚克(Sagnac)干涉仪。和其他光放大器相同,相敏光放大器也是将抽运光能转化为信号光能使信号光获得放大,只是其机理是利用光简并四波混频效应。光锁相环用来锁定抽运光和信号光之间的相对相位,以使信号光获得最佳的相敏增益和色散补偿效果。采用非线性光纤萨尼亚克干涉仪是因为其与光纤的耦合效率较高,抽运光和信号光在其中混合,发生简并四波混频效应,对信号光进行放大。且由于这种光放大器增益的相

^{*} 江苏省自然科学基金资助课题。

敏特性,输出光脉冲相对于输入光脉冲脉宽得到压缩。

一种物理可实现的相敏光放大器原理如图 1 所示^[2]。图 1 中,信号脉冲的大部分能量进入简并光参量放大器进行放大,小部分能量被耦合出来经相

位控制仪控制抽运光脉冲的相位。在参量光放大器的输出端,除了衰减的抽运光和放大的信号光以外,还有一部分信号光能量被耦合出来进入增益控制器以控制相敏光放大器的增益并对抽运脉冲的相位进行调整,使其跟踪信号光脉冲相位。

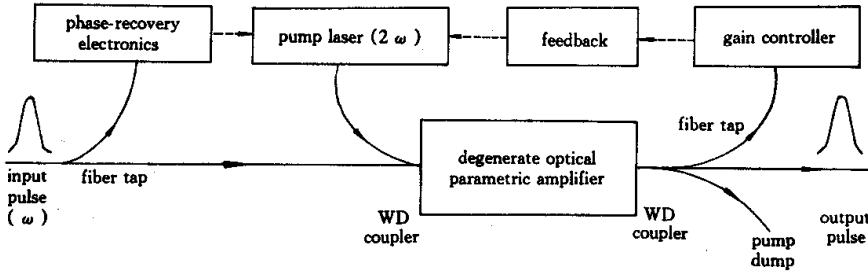


Fig.1 A physically realizable degenerate optical parametric amplification scheme

3 级联相敏光放大器光纤传输系统的理论分析和计算模型

级联相敏光放大器光纤通信系统的配置如图 2 所示。

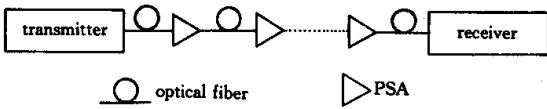


Fig.2 Schematic configuration of a cascaded PSA's transmission system

对非零色散光纤光传输系统,可以采用非线性薛定谔方程(NLSE)来描述^[7]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma|A|^2A. \quad (1)$$

(1)式中, z 为信号传输距离, T 为归一化时间, A 为信号脉冲的电场包络函数, α 为衰减常数, β_2 为一阶色散参量, β_3 为二阶色散参量(方程中忽略了二阶以上色散参量), γ 为非线性系数,其定义为:

$$\gamma = n_2\omega_0/(cS_{eff}),$$

n_2 为克尔常数, ω_0 为光载波的角频率, c 为真空中光速, S_{eff} 为光纤有效纤芯截面。

我们通过求解非线性薛定谔方程来获得 A 随 z 及 T 变化的函数,从而研究光脉冲在非线性光纤中的演变,以及光纤的色散和非线性效应对系统性能的影响。由于此方程中存在非线性项,因此采用分步傅里叶方法对其进行数值解。在计算中,通常采用 D 和其一阶导数 $dD/d\lambda$ 来表示色散,它们分别称为光纤的色散系数和色散斜率。其与 β_2 和 β_3 之间的关

系如下

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

在计算中考虑了光纤的损耗、群速度色散(GVD)和高阶群速度色散以及自相位调制(SPM)效应。脉冲码型采用非归零(NRZ)128 比特伪随机序列(PRBS)码,其计算模型为

$$A(z=0, T) = \sqrt{P_0 \sum_n \alpha_n B(T - nT_p)}. \quad (3)$$

这里, P_0 为脉冲峰值功率, α_n 为伪随机序列, T_p 为脉冲周期, $B(\tau)$ 为超高斯脉冲包络,表达式为

$$B(\tau) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau}{T_0}\right)^{2m}\right]. \quad (4)$$

式中 m 为脉冲指数,

$$T_0 = \frac{1}{2}(2\ln 2)^{1/2m}T_p,$$

它是光脉冲强度下降到峰值的 $1/e$ 时的脉冲宽度。

相敏光放大器的输出和输入有如下关系^[8]

$$A_{out}(z, T) = \sqrt{G} \frac{[A_{in}(z, T) + e^{i\varphi}A_{in}^*(z, T)] + [A_{in}(z, T) - e^{i\varphi}A_{in}^*(z, T)]}{2\sqrt{G}}, \quad (5)$$

式中, $A_{in}(z, T)$ 、 $A_{out}(z, T)$ 分别为相敏光放大器输入和输出脉冲的复光场, $A_{in}^*(z, T)$ 为 A_{in} 的复共轭, G 为放大器的增益, φ 为信号光和抽运光之间的相位差。本文只研究增益完全补偿损耗的情形,因此取

$$G = \exp(\alpha z_A),$$

式中 z_A 为放大器的间距。

4 仿真结果及分析

以下通过系统仿真,研究速率为 40 Gbit/s 的级联相敏光放大器光传输系统。放大器间距和传输距离分别取为 40 km 和 320 km。

在系统仿真计算中,考虑了群速度色散、高阶群速度色散和自相位调制效应,所用参数:光载频波长 $\lambda_0 = 1552 \text{ nm}$,非线性系数 $\gamma = 2.16 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ (克尔常数 $n_2 = 2.67 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ W}$,有效纤芯面积 $S_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$),光纤损耗 $\alpha = 0.25 \text{ dB}$,色散斜率 $dD/d\lambda = 0.07 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$,信号入纤功率为 0 dBm (1 mW),其他参数将在下面给定。

我们采用传输信号脉冲眼图劣化度表征系统的传输性能。在研究脉冲波形对级联相敏光放大器系统传输性能的影响之前,首先研究在给定信号脉冲波形的情况下,相敏光放大器在不同的相位漂移时信号眼图劣化度随光纤色散值的变化。这里,信号脉冲为超高斯脉冲,脉冲指数 m 取值为 1.436,并假定各个放大器的抽运光和信号光之间存在正负交替的相位漂移,得到信号眼图劣化度随光纤色散系数的变化曲线如图 3 所示。图 3 给出了没有相位漂移以及相位漂移量分别为 $\pi/16$ 、 $\pi/8$ 和 $\pi/4$ 时信号眼图劣化度随光纤色散变化的情况。由图可以看出,不管放大器是否存在相位漂移,信号眼图劣化度总是随色散值的增大而迅速增大,但相位漂移同样也引起系统性能的劣化。当漂移相位为 $\pi/16$ 时,眼图劣化度曲线几乎与无相位漂移时的曲线重合,表明小的相位漂移量对系统的传输性能没有显著的影响。而当漂移相位达到 $\pi/8$ 和 $\pi/4$ 时,眼图劣化度随相位漂移量的增大而增大,相位漂移量越大,眼图劣化度随相位漂移量的增大越显著。无相位漂移时,能够保持信号眼图劣化度小于 1 dB 时光纤允许的最大色散值为 $0.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,相位漂移量达 $\pi/16$ 和 $\pi/8$ 时则分别为 $0.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和

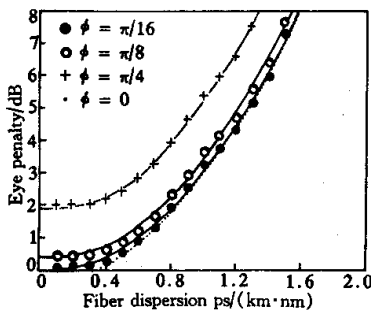


Fig. 3 Eye penalty as a function of fiber dispersion D

$0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,而当相位漂移量达 $\pi/4$ 时,在任何光纤色散值下信号眼图劣化度均大于 1 dB。

由以上仿真结果可以看出,虽然相敏光放大器光纤传输系统的性能主要取决于光纤的色散,但光放大器中的相位漂移同样会引起系统性能的劣化。当相位漂移较小时,与无相位漂移时相比,系统性能没有明显变化,而随着相位漂移量的增大,系统性能明显劣化,相位漂移量越大,系统性能劣化越严重。之所以出现这种情况,是由于存在相位漂移的相敏光放大器对信号光进行放大时,完全放大部分和衰减部分相对无相位漂移时发生了改变。当相位漂移量较小时,它仅仅引起脉冲幅度略有减小,而当相位漂移较大时,放大器增益的中心部分严重偏移脉冲中心部分,相敏光放大器的相敏特性将导致信号脉冲波形严重畸变,信号眼图劣化度急剧下降。

由于相敏光放大器特有的增益相敏特性,使得级联相敏光放大器系统具有一定的色散补偿能力;但是,正是由于这种特性,信号脉冲的波形对相敏光放大器的色散补偿效果也产生一定的影响。下面研究脉冲波形不同(脉冲指数 m 值不同)对级联相敏光放大器系统传输性能的影响。

这里,我们仍然研究 40 Gbit/s 高速率光传输系统的情况,放大器间距和传输距离与前面一样。光纤色散系数值取为 $D = 0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,仿真结果得到信号眼图劣化度随信号脉冲指数 m 的变化如图 4 所示。在图 4 中,我们给出了无相位漂移和漂移相位分别为 $\pi/16$ 、 $\pi/8$ 和 $\pi/4$ 时的曲线。图中显示,无论放大器中是否存在相位漂移,高斯脉冲($m = 1$)的眼图劣化度比相同情况下的超高斯脉冲($m > 1$)要严重。对于放大器无相位漂移的相敏光放大器光传输系统,当超高斯脉冲指数 m 取值在 2~2.5 间时,系统具有最佳的性能;大于此范围,信号眼图劣化度则随信号脉冲指数 m 的增大而逐渐增大。对于放大器相位漂移较小($\pi/16$)时,其曲线形

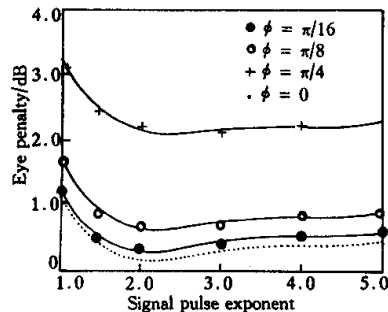


Fig. 4 Eye penalty as a function of signal pulse exponent

状几乎与没有相位漂移时一样,只是眼图劣化程度略有增大;当放大器的相位漂移较大($\pi/4$)时,最佳 m 值的范围有所扩大。并且,当 m 值更大时,信号眼图劣化程度随脉冲指数上升的趋势有所减缓。

为了更清楚地表明在不同的脉冲波形下相位漂移量对级联相敏光放大器系统传输性能的影响,我们绘出存在相位漂移时与无相位漂移时信号眼图劣化度之差随信号脉冲指数变化的曲线,如图 5 所示。图中相位漂移量仍分别取为 $\pi/16$ 、 $\pi/8$ 和 $\pi/4$ 。由图 5 可以看出,放大器相位漂移较小($\pi/16$)时与无相位漂移时的信号眼图劣化度差几乎不随脉冲指数 m 的增大而有所不同,但相位漂移较大($\pi/4$)时,信号眼图劣化度差随脉冲指数 m 的减小而明显增大。

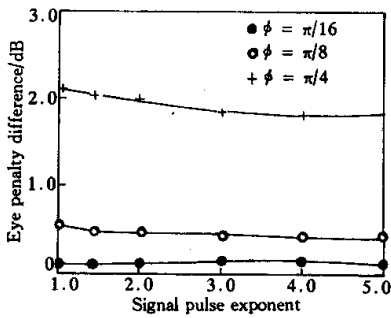


Fig. 5 Eye penalty difference as a function of signal pulse exponent

我们认为,级联相敏光放大器系统的传输性能之所以随信号脉冲波形不同(脉冲指数 m 值不同)而不同是由相敏光放大器增益的相敏特性所决定的。相敏光放大器只对信号脉冲的中心部位完全放大,两翼则由于与抽运光的相位差而得到较小的放大甚至衰减。相敏光放大器的这种对信号脉冲的压缩作用显然对脉冲峰值部分较宽(脉冲指数 m 值较大)的脉冲表现得更为明显。因此采用超高斯脉冲比采用高斯脉冲系统具有更佳的传输性能。当放大器发生双向相位漂移时,由于完全放大的部分不再是信号脉冲中心而有所偏移(交替双向偏移),由此引起脉冲波形的畸变。当相位漂移量较小时波形的畸变主要表现为脉冲幅度略有减小,对系统传输性能影响较小,而相位漂移量较大时,脉冲波形将显著展宽,系统的传输性能显著劣化。这在脉冲峰值部分较窄(脉冲指数 m 值较小)时表现得尤为显著。

结论 本文通过应用分步傅里叶方法解非线性薛定谔方程,模拟信号在光纤中的传输来研究级联相敏光放大器系统的性能。得到了速率为 40 Gbit/s、放

大器具有不同程度的相位漂移时系统的信号眼图劣化程度随光纤色散值变化的曲线,以及给定光纤色散值下放大器发生双向相位漂移时,信号眼图劣化程度随信号脉冲指数变化的曲线。通过对仿真结果的分析,我们得到如下结论:

1) 虽然级联相敏光放大器系统的性能主要取决于光纤的色散,但是相位漂移同样会引起系统性能的劣化。

2) 相敏光放大器的相位漂移较小时,与无相位漂移时相比,系统性能没有明显变化。而随着相位漂移量的增大,系统性能显著劣化。相位漂移越大,系统性能劣化越严重。

3) 脉冲的波形对相敏光放大器光传输系统的性能也有一定影响,信号光为超高斯脉冲可比高斯脉冲传输更远的距离。对级联相敏光放大器传输系统,不管相敏光放大器有无相位漂移,信号脉冲指数均存在最佳值。在此脉冲形状下,信号可以传输更远的距离。

4) 放大器相位漂移较小时与无相位漂移时相比,信号眼图劣化程度几乎不随脉冲指数 m 的增大而有所不同。但相位漂移较大时,信号眼图劣化程度随脉冲指数 m 的减小而明显增大。

参 考 文 献

- [1] Loudon R. Theory of noise accumulation in linear optical-amplifier chains. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(7):766~773
- [2] Li R D, Kumar P, Kath W L. Dispersion compensation with phase-sensitive optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3):541~549
- [3] Yuen H. Reduction of quantum fluctuations and suppression of the Gordon-Haus effect with phase-sensitive amplifiers. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1):73~75
- [4] 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
- [5] Imajuku W, Takada A. Reduction of fiber-nonlinearity-enhanced amplifier noise by means of phase-sensitive amplifiers. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1):31~33
- [6] Imajuku W, Takada A. In-line phase-sensitive amplifier with optical-PLL-controlled internal pump light source. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(25):2155~2156
- [7] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic, 1989
- [8] Imajuku W, Takada A. Theoretical analysis of system limitation for AM-DD/NRZ optical transmission system using in-line phase-sensitive amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(7):1158~1170

Effect of Signal Pulse Shape on Transmission Performance of Cascaded In-Line PSA Optical Fiber Communication System

Lin Hongrong Chen Ruquan

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

(Received 19 May 2000 ; revised 13 July 2000)

Abstract : The effect of signal pulse shape on the transmission performance is studied for an optical fiber communication system with cascaded in-line optical phase-sensitive amplifiers(PSA's) having phase shifting between pumping and signal light. Computer simulation shows that at different phase shifting the eye-pattern degradation of high-speed signal increased rapidly with the accretion of fiber dispersion , and changed with signal pulse shape for given fiber dispersion. From the simulating results , it is known that signal pulse shape also affect the system performance. The system transmission performance of using super Gaussian pulse is superior to that of using Gaussian pulse , and super Gaussian pulse has an optimum pulse exponent for best transmission performance.

Key words : phase sensitive amplifier ; dispersion compensation ; phase-shifting ; signal pulse shape