

# 暗孤子传输系统中调制拉曼泵浦的控制作用\*

李 宏\*\* 杨祥林

(东南大学电子工程系 南京 210096)

刘堂坤

(湖北师范学院物理系 黄石 435002)

**提要** 一种新的暗孤子传输控制方法, 调制拉曼泵浦被用来控制暗孤子的传输。研究结果表明: 在暗孤子传输系统中, 每个放大器后插入调制拉曼泵浦进行传输控制, 不仅可以有效地抑制暗孤子的时间抖动, 同时还明显降低了暗孤子间的相互作用。

**关键词** 暗孤子传输系统, 调制拉曼泵浦, 暗孤子传输控制

## 1 引 言

由于大容量、长距离、高码率通信存在广泛的应用前景, 以光孤子脉冲作为信息载体的全光通信已成为光通信科学研究的焦点<sup>[1]</sup>。

光孤子脉冲在光纤中传输时, 需要用放大器来补偿光纤损耗, 而放大器在补偿光纤损耗的同时, 也产生和放大了放大器自发辐射(ASE)噪声, 引起了光孤子频率随机走移, 限制了光孤子长距离通信容量(G-H 效应)<sup>[2,3]</sup>, 同时光孤子传输系统用于通信时, 孤子间相互作用成为提高系统码率的障碍, 它引起信道间信号串扰, 是通信系统中非 ASE 噪声引起的孤子到达检测窗口的时间抖动的主要来源, 劣化了系统的误码率。抑制 G-H 效应、降低孤子间相互作用的许多方法已被提出, 如带宽限制放大、周期性插入同步幅度调制器或同步相位调制器, 以及光相位共轭等<sup>[4-6]</sup>。

暗孤子是传输在光纤正常色散区中的光孤子脉冲, 它有着不同于传输在光纤负色散区中的明光孤子脉冲的各种特性, 具有比明孤子更强的抗扰动的能力, 更佳的传输稳定性, 更高的传输码率和更好的脉冲形状自我修复能力, 因而在超高码率、超长距离的未来通信中潜在诱人的应用前景。暗孤子在传输中, 由于暗孤子的振幅和速度是相关联的, 滤波器不能有效地抑制暗孤子的频率漂移和降低暗孤子间相互作用, 非线性增益和同步相位调制被用来起传输控制作用<sup>[7,8]</sup>。

文献[9]提出一种新的孤子控制方法——调制拉曼泵浦方法来有效地抑制明孤子传输系统中 ASE 噪声引起的到达检测窗口的时间抖动, 它的实质是同步幅度调制和同步相位调制的联合作用, 同时通过分析拉曼效应在传输过程中对信号的补偿作用<sup>[10]</sup>, 可知强的调制喇曼泵浦是可以代替孤子传输系统中起补偿作用的掺铒光纤放大器的, 因此它是一种理想的孤子控制

\* 国家自然科学基金资助项目。

\*\* 联系单位: 湖北师范学院物理系。

收稿日期: 1996—12—06; 收到修改稿日期: 1997—03—10

方法。本文采用调制拉曼泵浦来控制暗孤子传输系统, 研究结果表明, 它也是暗孤子传输系统中理想的控制方法。

## 2 理论公式

用调制拉曼泵浦进行暗孤子传输控制方案的设计为: 在暗孤子传输系统中, 暗孤子的放大周期远小于孤子周期, 每个放大周期里, 调制拉曼泵浦置于每一个掺铒光纤放大器的后面, 放大器起着补偿光纤损耗的作用, 调制拉曼泵浦起孤子控制的作用, 引入非线性增益是为了暗孤子的稳定传输, 滤波器在这里仅起过滤剩余调制拉曼泵浦的作用, 这与明孤子传输系统不同, 在明孤子传输系统中, 滤波器不仅起着过滤剩余调制拉曼泵浦的作用, 而且起着稳定明孤子传输的作用。

传输在正常色散区中的暗孤子和调制拉曼泵浦的归一化的耦合方程为<sup>[11]</sup>

$$i \frac{\partial u_s}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_s}{\partial \tau^2} + (|u_s|^2 + 2|u_p|^2) u_s = i(g_s |u_p|^2 + \delta) u_s + i\gamma |u_s|^2 u_s + i\beta \frac{\partial^2 u_s}{\partial \tau^2} \quad (1)$$

$$i \left[ \frac{\partial u_p}{\partial z} + d \frac{\partial u_p}{\partial \tau} \right] + \frac{\rho}{2} \frac{\partial^2 u_p}{\partial \tau^2} + R(|u_p|^2 + 2|u_s|^2) u_p = -ig_p |u_s|^2 u_p \quad (2)$$

其中,  $u_s$  和  $u_p$  是暗孤子和调制拉曼泵浦波的包络函数;  $\delta$  是系统的净增益;  $\beta$  是滤波器的二阶系数;  $\gamma$  是非线性增益系数;  $\rho = |k_p''|/|k_s''|$ ,  $k_p''$ ,  $k_s''$  是调制泵浦和孤子的二阶色散;  $R = \omega_p/\omega_s$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_s$  是调制泵浦和孤子的频率;  $g_p = g_s \omega_p/\omega_s$ ,  $g_s$  是喇曼增益;  $d$  是群速度偏离系数, 它与暗孤子和调制拉曼泵浦波的群速度有关。

在暗孤子传输过程中, 调制拉曼泵浦的表达式为

$$u_p = A \cos(2\pi\tau/T_m) \quad (3)$$

其中,  $A$  是调制幅度,  $T_m$  是调制周期。

暗孤子在传输中, 由于暗孤子的振幅和速度是相关联的(在归一化方程中两者的平方和为 1<sup>[7]</sup>), 滤波器不能有效地抑制暗孤子的频率漂移和降低暗孤子间的相互作用, 非线性增益和同步相位调制可以被用来起传输控制作用, 本文中, 为了暗孤子脉冲传输的稳定性, 引入了非线性增益。

利用暗孤子传输系统的守恒量(动量)扰动法<sup>[7, 11, 12]</sup>, 调制拉曼泵浦与暗孤子传输系统的参数之间满足

$$\delta - \gamma - \frac{4\pi g_s A}{T_m} \operatorname{cosech} \left[ \frac{\pi^2}{T_m} \right] = 0 \quad (4)$$

下面, 我们利用光束传播法, 对初始输入单个暗孤子时传输中的暗孤子的平均位置、平均频率及初始输入两个暗孤子时暗孤子间的相对间隔随传输距离变化关系进行了计算, 并分析了所得结果。

## 3 结果讨论

在传输过程中, 调制拉曼泵浦置于传输线上每一个掺铒光纤放大器的后面, 到一个放大周期时, 假设剩余的泵浦被滤波器完全过滤掉, 新的调制拉曼泵浦被注入。在数值模拟中, 所取的系统参数为: 暗孤子的波长  $\lambda_s = 1550 \text{ nm}$ , 调制泵浦的波长  $\lambda_p = 1450 \text{ nm}$ , 暗孤子的初始脉宽

为 25 ps, 暗孤子和泵浦的峰值功率为 3 mW, 1.5 mW, 暗孤子和调制泵浦的光纤本征损耗率均为 0.2 dB/km, 光纤有效锥面积  $S_{\text{eff}} = 25 \mu\text{m}^2$ , 光纤的零色散波长为  $\lambda_0 = 1500 \text{ nm}$ , 非线性折射率  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m/W}$ , 拉曼增益为  $6.4 \times 10^{-14} \text{ m/W}$ , 调制泵浦和暗孤子的二阶色散分别为  $k_p'' = 3.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $k_s'' = 3.2 \text{ ps}^2/\text{km}$ , 暗孤子系统的放大周期为 20 km, 调制拉曼泵浦的调制幅度为  $A = \sqrt{2}/2$ , 调制周期  $T_m = 40$ 。

### 3.1 暗孤子的平均位置随传输距离的变化关系

定义传输系统中暗孤子的平均位置

$$\langle \hat{r} \rangle = \int (\tau |u_s|^2) d\tau / \int |u_s|^2 d\tau \quad (5)$$

假设初始( $z = 0$ ) 输入的孤子脉冲为

$$u_s(\tau, 0) = \tanh(\tau) \quad (6)$$

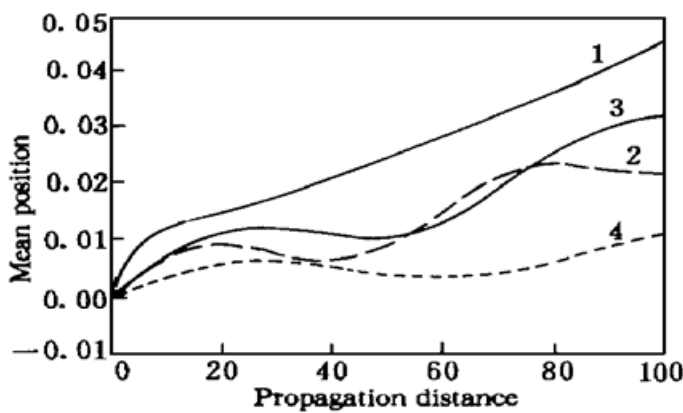


图 1 平均位置的绝对值与传输距离的关系

1: 无调制泵浦,  $\gamma = 0.05$ ; 2: 有调制泵浦,  $d = 5$ ,  $\gamma = 0.05$ ; 3: 有调制泵浦,  $d = 25$ ,  $\gamma = 0.05$ ; 4: 有调制泵浦,  $d = 25$ ,  $\gamma = 0.15$

Fig. 1 Absolute mean position versus propagation distance

1: without modulated Raman pump,  $\gamma = 0.05$ ; 2: with modulated Raman pump,  $d = 5$ ,  $\gamma = 0.05$ ; 3: with modulated Raman pump,  $d = 25$ ,  $\gamma = 0.05$ ; 4: with modulated Raman pump,  $d = 25$ ,  $\gamma = 0.15$

图 1 是暗孤子的平均位置的绝对值随传输距离的变化关系, 平均位置偏离零点越大, 相应地由 ASE 噪声引起的暗孤子到达检测窗口的时间抖动越大。从图中不难看出, 没有插入调制拉曼泵浦时, 暗孤子的平均位置随传输距离增大; 当插入调制拉曼泵浦, 且群速度偏离系数  $d = 5$  时, 暗孤子的平均位置随传输距离的变化关系为周期性振荡增加, 其变化幅度明显小于没有插入调制拉曼泵浦情形; 当群速度偏离系数  $d = 25$  时, 平均位置周期性振荡的幅度增大, 说明调制泵浦的控制作用被削弱; 当增强非线性增益时, 平均位置周期性振荡变化幅度减小, 这正是非线性增益对暗孤子传输系统 ASE 噪声的抑制作用<sup>[7]</sup>。

### 3.2 暗孤子的平均频率随传输距离的变化关系

定义传输系统中暗孤子的平均频率

$$\langle \omega \rangle = \int \left[ i \frac{\partial}{\partial \tau} |u_s|^2 \right] d\tau / \int |u_s|^2 d\tau \quad (7)$$

图 2 是暗孤子的平均频率随传输距离的变化关系, 平均频率偏离零点(平衡点)越大, 说明由 ASE 噪声引起的暗孤子到达检测窗口的时间抖动越大 ( $d(\delta\tau)/dz = \omega$ )。从图中不难看出, 没有插入调制拉曼泵浦时, 暗孤子的平均频率随传输距离增大而单调增大; 当插入调制拉曼泵浦, 且群速度偏离系数  $d = 5$  时, 暗孤子的平均频率随传输距离的变化关系为围绕着平衡点作周期起伏振荡, 其变化幅度明显小于没有插入调制拉曼泵浦情形, 并随着传输距离的增大, 振荡幅度略有变小; 当群速度偏离系数  $d = 25$  时, 平均频率变化幅度增大; 当增强非线性增益时, 平均频率周期性振荡变化明显减缓, 变化幅度减小, 基本上是在平衡点附近, 这正是非线性增益对暗孤子传输的稳定作用, 非线性增益类似于“弹性回复力”的作用, 当平均频率偏离平衡点时, 它就把平均频率拉回到平衡点。从图 1 与图 2 中可以看到非线性增益可以有效地抑制暗孤子脉冲到达时间抖动, 而调制拉曼泵浦的作用要受到群速度偏离系数的影响。

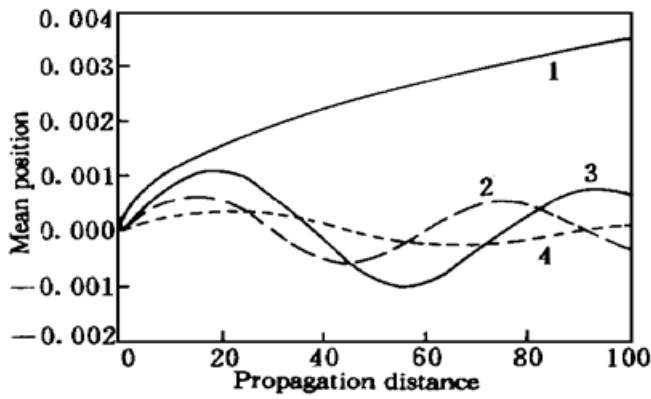


图 2 平均频率与传输距离的关系

1: 无调制泵,  $\gamma = 0.05$ ; 2: 有调制泵,  $d = 5, \gamma = 0.05$ ; 3: 有调制泵,  $d = 25, \gamma = 0.05$ ; 4: 有调制泵,  $d = 25, \gamma = 0.15$

Fig. 2 Mean frequency versus propagation distance

1: without modulated Raman pump,  $\gamma = 0.05$ ; 2: with modulated Raman pump,  $d = 5, \gamma = 0.05$ ; 3: with modulated Raman pump,  $d = 25, \gamma = 0.05$ ; 4: with modulated Raman pump,  $d = 25, \gamma = 0.15$

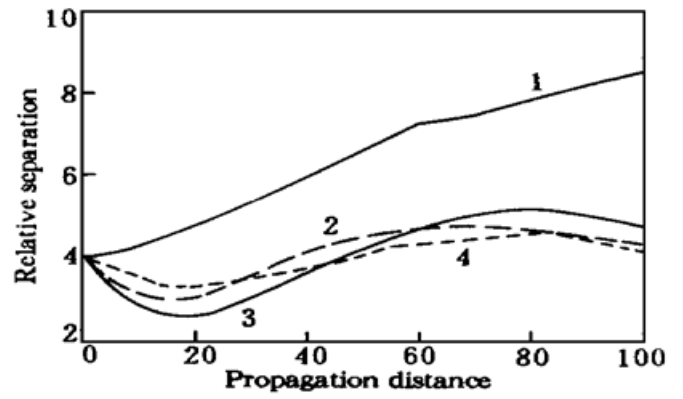


图 3 相对间隔与传输距离的关系

1: 无调制泵,  $\gamma = 0.05$ ; 2: 有调制泵,  $d = 5, \gamma = 0.05$ ; 3: 有调制泵,  $d = 25, \gamma = 0.05$ ; 4: 有调制泵,  $d = 25, \gamma = 0.15$

Fig. 3 Relative separation versus propagation distance

1: without modulated Raman pump,  $\gamma = 0.05$ ; 2: with modulated Raman pump,  $d = 5, \gamma = 0.05$ ; 3: with modulated Raman pump,  $d = 25, \gamma = 0.05$ ; 4: with modulated Raman pump,  $d = 25, \gamma = 0.15$

### 3.3 两个暗孤子间的相对间隔随传输距离变化的关系

取拉曼泵浦的调制周期与输入的暗孤子脉冲串的周期一致, 假设初始 ( $z = 0$ ) 输入的暗孤子脉冲为

$$u_s(\tau, 0) = \tanh(\tau + T_0/2) + \tanh(\tau - T_0/2) \tag{8}$$

其中,  $T_0$  是两暗孤子间的初始相对间隔。

图 3 是初始相对间隔  $T_0$  四倍于暗孤子脉宽时, 两暗孤子的相对间隔随传输距离的变化关系, 从图中不难看出, 没有插入调制拉曼泵浦时, 暗孤子的相对间隔随传输距离的变化关系近似为单调增大, 说明此时两暗孤子是相互排斥, 相互作用较强; 当插入调制拉曼泵浦, 且群速度偏离系数  $d = 5$  时, 暗孤子的相对间隔随传输距离的变化关系为围绕着四倍脉宽间距周期起伏变化, 其幅度远小于没有插入调制拉曼泵浦的情形, 说明暗孤子间相互作用表现为在四倍脉宽间距的地方周期性相互排斥和吸引, 并被明显削弱; 当群速度偏离系数  $d = 25$  时, 相对间隔的起伏变化增大, 说明暗孤子间相互作用有所增强; 当增强非线性增益时, 相对间隔周期起伏变化减缓, 变化幅度减小, 两暗孤子的相对间隔基本上是保持四倍于暗孤子脉宽。

## 4 结 论

本文中, 调制拉曼泵浦被用来控制暗孤子传输, 数值模拟结果表明: 暗孤子传输系统中, 在每个放大器后插入调制拉曼泵浦来进行暗孤子传输控制, 不仅可以有效地抑制暗孤子传输系统中由 ASE 噪声引起的暗孤子到达检测窗口的时间抖动, 同时还明显降低了暗孤子间相互作用。本文结果表明: 调制拉曼泵浦也是暗孤子传输系统中理想控制方案, 强的调制拉曼泵浦是可以代替暗孤子传输系统中起补偿光纤损耗作用的掺铒光纤放大器。

## 参 考 文 献

- 1 K. Kurokawa, M. Nakazawa. Femtosecond soliton transmission characteristics in ultralong erbium-doped fiber amplifier with different pumping configuration. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, **QE-28** : 1922~ 1929
- 2 J. P. Gordon, H. A. Haus. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10) : 665~ 667
- 3 Y. S. Kivshar, M. Haelterman, P. Emplit *et al.*. Gordon-Haus effect on dark solitons. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1) : 19~ 21
- 4 I. M. Uzunov, M. Golles, L. Leine *et al.*. The effect of bandwidth limited amplification on soliton interaction. *Opt. Commun.*, 1994, **110**(15) : 465~ 474
- 5 王发强, 陈明华, 杨祥林. 同步幅度调制控制孤子系统中的孤子相互作用. 中国激光, 1996, **A23**(6) : 509 ~ 512
- 6 S. Wen, S. Chi. Reduction of the soliton interaction and the Gordon-Haus effect by optical phase conjugation. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9) : 976~ 978
- 7 M. Mastumoto, H. Ikeda, A. Hasegawa. Reduction of G-H effect on dark solitons by means of nonlinear gain. *Electr. Lett.*, 1995, **31**(6) : 482~ 483
- 8 A. Maruta, Y. Kodama. Suppression of interactions between adjacent optical dark solitons by means of synchronized phase modulation. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(17) : 1752~ 1754
- 9 S. Kumar, A. Hasegawa. Suppression of the Gordon-Haus noise by a modulated Raman pump. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18) : 1856~ 1858
- 10 Li Hong, Chen Haijuan, Yang Xianglin. Compensation of stimulated Brillouin scattering effect with stimulated Raman effect in d-EDFA. *Chinese J. Lasers*, 1996, **B5**(5) : 409~ 414
- 11 A. Hasegawa, Y. Kodama. Solitons in Optical Communication. Oxford : Oxford U. Press, 1995, 143~ 147
- 12 I. M. Uzunov, V. S. Gerdjikov. Self-frequency shift of dark solitons in optical fibers. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(2) : 1582~ 1585

## The Control Role of the Modulated Raman Pump in a Dark Soliton Transmission System

Li Hong Yang Xianglin

(Dept. Electron. Eng. Southeast University, Nanjing 210096)

Liu Tangkun

(Dept. Phys. Hubei Normal University, Huangshi 435002)

**Abstract** In this paper, a new method of dark soliton transmission control by means of modulated Raman pump is presented. The results show: when the modulated Raman pump is sited following each amplifier, the random walk of dark solitons induced by amplifier spontaneous emission noise is reduced apparently, and the interaction between two dark solitons is suppressed well.

**Key words** dark soliton transmission system, modulated Raman pump, dark soliton transmission control