

# 增益随机变化对分布放大暗孤子 传输系统的影响\*

李 宏\*\* 杨祥林

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**摘 要** 基于分布放大暗孤子传输系统中存在增益随机变化, 利用守恒量扰动法, 研究了增益随机变化对暗孤子到达检测窗口时间抖动的影响。结果表明, 增益随机变化对暗孤子速度产生了影响, 并增大了暗孤子到达时间的抖动。引入非线性增益可以有效抑制增益随机变化增大的暗孤子到达时间的抖动。

**关键词** 暗孤子传输系统, 增益随机变化, 时间抖动, 非线性增益。

## 1 引 言

光孤子通信是以稳定的光孤子脉冲作为信息载体, 完全摆脱了光纤色散对信号传输速率的限制, 是一种未来的高速长距离全光通信优选方案。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, 而放大器在放大补偿光纤损耗的同时, 也产生和放大了自发辐射噪声, 引起了光孤子频率随机走移, 限制光孤子长距离通信容量(Gordon-Haus 效应)<sup>[1, 2]</sup>。

光纤中光孤子在一定的条件下, 以明孤子或暗孤子的形式进行传输, 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, 如它的由放大的自发辐射噪声引起的时间抖动比明孤子小  $\sqrt{2}$  倍<sup>[2]</sup>, 它对各种扰动效应, 如拉曼自频移<sup>[3]</sup>、孤子间相互作用等<sup>[4]</sup>, 具有比明孤子更强的抵抗能力、更好的稳定性, 在逻辑门和光开关中有着一定的应用前景。同时用暗孤子进行长距离传输, 它可能比用明孤子具有更高的码率, 更好的自我恢复能力, 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。

当光孤子脉冲用于光孤子长距离通信时, 可大大提高系统的通信码率和容量, 但存在于它们传输中一些随机扰动效应对孤子系统有着明显的影响, 如随机色散效应、随机滤波器滑频效应、随机增益变化等, 增大了光孤子脉冲到达检测窗口的时间抖动, 降低了系统的通信容量, 劣化了系统的误码率<sup>[5-8]</sup>。本文利用暗孤子系统的守恒量扰动法, 研究了分布放大过程中增益随机变化引起的暗光孤子脉冲到达时间的抖动, 并通过引入非线性增益来有效抑制

\* 国家自然科学基金资助项目。

\*\* 现在通讯地址: 湖北师范学院物理系, 黄石 435002。

收稿日期: 1996 年 11 月 11 日; 收到修改稿日期: 1997 年 1 月 3 日

增益随机变化引起的时间抖动。

## 2 理论分析

在光纤正常色散区中传输的暗孤子脉冲由非线性薛定格方程来描述:

$$i\partial u/\partial \zeta - (1/2)\partial^2 u/\partial \tau^2 + |u|^2 u = i\delta u \quad (1)$$

式中,  $u$  为无量纲包络函数,  $\zeta = z/L_a$ ,  $\tau = t/T_0$ ,  $L_D = T_0^2/|D|$ ,  $g = G/Z_0$ ,  $Z_0 = L_a/L_D$ ,  $L_a$ 、 $L_D$  分别为传输放大系统的放大周期和色散周期,  $\delta = g - \Gamma$  为系统传输线  $\zeta$  处的纯增益,  $g(\zeta)$  为增益,  $\Gamma(\zeta)$  为光纤的本征损耗。

在分布放大技术研究中发现<sup>[9, 10]</sup>, 长距离传输中分布式放大具有比集总式放大更低的噪声, 在整个传输过程中, 信号(光孤子)幅值起伏较小, 系统具有更好的稳定性, 它保证了系统的透明传输(系统的增益为 1), 是一种长距离传输理想的光放大器。采用分布式放大, 此时暗孤子传输和放大同时在传输线上进行。为了系统的稳定性, 传输过程通过选择光纤结构参数, 使得传输系统的传输线  $\zeta$  处纯增益  $\delta(\zeta) = g(\zeta) - \Gamma(\zeta)$  具有较小的起伏, 这样纯增益起伏可以看作沿传输方向随机变化, 本文就是研究这种随机变化对暗孤子传输系统的影响。

在分布放大系统中, 纯增益  $\delta(\zeta) = g(\zeta) - \Gamma(\zeta)$  的起伏看作是增益随机变化, 它满足

$$\begin{aligned} \delta(\zeta) \rangle &= 0, & \delta(\zeta)\delta(\zeta') \rangle &= 2H\delta(\zeta - \zeta') \\ \delta(\zeta) \cdots \delta(\zeta_n) \rangle &= \begin{cases} 0 & n = \text{odd} \\ (2H)^n \sum_{pd} \delta(\zeta - \zeta_p) & n = \text{even} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $H$  为随机变量  $\delta(\zeta)$  的均方涨落尺度。若(1)式的右边为零, 则其暗孤子解可表示为

$$u(\zeta, \tau) = q_0 \{ \eta \tanh[\eta(q_0 + q_0^2 k \zeta)] + ik \} (\eta - ik) \exp(iq_0^2 \zeta) \quad (3)$$

式中  $\eta$ 、 $k$  分别表示暗孤子的振幅(深度)和速度, 且

$$\eta^2 + k^2 = 1 \quad (4)$$

(1)式的右边随机项作为扰动, 使  $\eta$ 、 $k$  随  $\zeta$  缓变, 由动量守恒<sup>[3]</sup>

$$p = \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} (u \frac{\partial u^*}{\partial \tau} - u^* \frac{\partial u}{\partial \tau}) d\tau - q_0^2 \arg u(\zeta, \tau) \Big|_{\tau=-\infty}^{\tau=\infty} \quad (5)$$

即

$$\frac{dk}{d\zeta} = \frac{1}{2} \text{Im} \int_{-\infty}^{\infty} \eta \delta u \sec^2 h^2[\eta(q_0 \tau + q_0^2 k \zeta)] (\eta + ik) \exp(-iq_0^2 \zeta) d\tau \quad (6)$$

可得暗孤子速度的演化关系(已取  $q_0 = 1$ ) 为

$$dk/d\zeta = k\delta + \sigma(\zeta) \quad (7)$$

(7)式中已引入了暗孤子的放大的自发辐射噪声  $\sigma(\zeta)$ , 它满足<sup>[2]</sup>

$$\langle \sigma(\zeta) \rangle = 0, \quad \langle \sigma(\zeta)\sigma(\zeta') \rangle = 2B\delta(\zeta - \zeta'), \quad B = (2\pi c)^3 h \Gamma N_{sp} n_2 T_0^3 / 12 A_{eff} D^2 \lambda^6 \quad (8)$$

式中,  $N_{sp}$ 、 $T_0$ 、 $\lambda$ 、 $n_2$ 、 $A_{eff}$ 、 $D$  分别代表分布放大系统中放大器的自发辐射噪声因子、暗孤子的初始脉宽、波长、光纤的非线性折射率、有效纤锥面积和二阶色散。

从(7)式可以看出, 随机增益变化对暗孤子的速度有影响, 这与明孤子传输系统不同, 随机增益变化对明孤子的速度是没有影响的<sup>[8]</sup>。(7)式是一个自治系统, 有平衡点  $(\eta, k) \rightarrow (\eta_0, 0)$ , 随机扰动不改变暗孤子系统的平衡点。

利用初始条件  $k(0) = 0$ , 可以得到(7)式的解为:

$$k(\zeta) = \exp \left[ \int_0^{\zeta} \delta(x_1) dx_1 \right] \int_0^{\zeta} \sigma(x) \exp \left[ \int_0^x -\delta(x_2) dx_2 \right] dx \quad (9)$$

利用(2)式和(8)式,并注意到随机变量  $\delta(\zeta)$ 、 $\sigma(\zeta)$  是非关联的,可得<sup>[5,7]</sup>

$$\langle k(\zeta) \rangle = 0$$

$$\langle k(\zeta) k(\zeta') \rangle = (B/2H) \{ \exp [2H(\zeta + \zeta') - H|\zeta - \zeta'|] - \exp [H|\zeta - \zeta'|] \} \quad (10)$$

利用  $d\delta\tau/d\zeta = k(\zeta)$ ,可以得到暗孤子系统的到达检测窗口的时间抖动方差为

$$\begin{aligned} \langle \delta\tau^2 \rangle &= \iint_0^{\zeta} \langle k(x_1) k(x_2) \rangle dx_1 dx_2 \\ &= (B/12H^3) [12H\zeta + 15 - 16 \exp(H\zeta) + \exp(4H\zeta)] \end{aligned} \quad (11)$$

如果  $H \rightarrow 0$  即暗孤子系统中无增益随机变化,则(11)式变为

$$\langle \delta\tau^2 \rangle_0 = (2/3)B\zeta^3 \quad (12)$$

这正是暗孤子系统中由放大的自发辐射噪声引起的时间抖动方差(Gordon-Haus 效应)<sup>[12]</sup>。

从(11)式不难看出增益随机变化增大了暗孤子到达检测窗口的时间抖动,这样就影响了暗孤子传输系统的稳定性和增大了系统的误码率。

对于明孤子传输系统,为了有效地抑制孤子到达检测窗口的时间抖动,可以在传输过程中周期性地插入滤波器<sup>[11]</sup>。从(4)式不难看出,对于暗孤子而言,它的振幅(深度)和速度是相关的,在传输过程中周期性地插入滤波器就不能有效地抑制暗孤子的时间抖动,这里在暗孤子系统中通过引入非线性增益来有效地抑制暗孤子的时间抖动。

在孤子分布放大传输系统中,非线性增益可以源于有源光纤(如分布式掺铒光纤)的增益的非线性,它可以由非线性光学环境等技术产生<sup>[12]</sup>,为了讨论方便,采用归一化方程。

包括非线性增益和增益随机变化,描述暗孤子传输的非线性薛定格方程为:

$$i\partial u/\partial \zeta - (1/2)\partial^2 u/\partial \tau^2 + |u|^2 u = i\delta u + i\gamma |u|^2 u \quad (13)$$

式中,  $\gamma$  为归一化非线性增益系数。由动量守恒(5),暗孤子的速度满足

$$dk/d\zeta = - (2/3)k(1 - k^2)\gamma + k\delta(\zeta) + \sigma(\zeta) \quad (14)$$

将(14)式线性化展开

$$dk/d\zeta = - 2\gamma k/3 + k\delta + \sigma \quad (15)$$

利用初始条件  $k(0) = 0$ ,可得(15)式的解为:

$$k(\zeta) = \exp \left[ \int_0^{\zeta} -A + \delta(x_1) dx_1 \right] \int_0^{\zeta} \sigma(x) \exp \left[ \int_0^x A - \delta(x_2) dx_2 \right] dx \quad (16)$$

其中,  $A = 2\gamma/3$ 。利用(2)式和(8)式,并注意到随机变量  $\delta(\zeta)$ 、 $\sigma(\zeta)$  是互不关联的,可得<sup>[5,7]</sup>

$$\langle k(z) \rangle = 0$$

$$\begin{aligned} \langle k(\zeta) k(\zeta') \rangle &= [B/(A - 2H)] \{ \exp [-(A - H)|\zeta + \zeta'|] \\ &\quad - \exp [-(A - 2H)(\zeta + \zeta') - H|\zeta - \zeta'|] \} \end{aligned} \quad (17)$$

由此可得包含非线性增益的暗孤子系统的时间抖动方差为:

$$\begin{aligned} \langle \delta\tau^2 \rangle &= \frac{B}{2(A - H)(A - 2H)} \left\{ 2\zeta - \left[ \frac{2}{A - H} + \frac{1}{A - 3H} - \frac{H}{(A - 3H)(A - 2H)} \right] \right. \\ &\quad + 2 \left( \frac{1}{A - H} + \frac{1}{A - 3H} \right) \exp [-(A - H)\zeta] \\ &\quad \left. - \frac{1}{A - 3H} \left( 1 + \frac{H}{A - 2H} \right) \exp [-2(A - 2H)\zeta] \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

如果  $A \rightarrow 0$ , 即暗孤子系统中无非线性增益, (18) 式变成(11) 式。

如果  $H \rightarrow 0$ , 即暗孤子系统中无增益随机变化, 则(18) 式变为

$$\langle \delta\tau^2 \rangle = (B/A^3) [2A\zeta - 3 + 4 \exp(-A\zeta) - \exp(-2A\zeta)] \tag{19}$$

由文献[11]可见, 在暗孤子分布放大传输系统中, 非线性增益具有明孤子放大传输系统中滤波器类似的作用。

### 3 结果讨论

为了描述增益随机变化对暗孤子系统的时间抖动的影响和非线性增益对时间抖动的抑制作用, 引入比例因子

$$R = \langle \delta\tau^2 \rangle / \langle \delta\tau^2 \rangle_0 \tag{20}$$

其中,  $\langle \delta\tau^2 \rangle_0$  为暗孤子系统中由放大的自发辐射噪声引起的时间抖动方差。

图 1 是不同条件下, 暗孤子的时间抖动比例因子随传输距离  $\zeta$  的变化关系。从图中不难看出, 增益随机变化增大了系统的时间抖动, 随着传输距离  $\zeta$  的增大, 影响越明显, 而且随机强度越大(即  $H$  越大), 增益随机变化引起的抖动越大。非线性增益对时间抖动有明显的抑制作用, 当非线性增益不够大( $\gamma = 0.05$ ) 时, 它不能有效地抑制暗孤子系统的时间抖动, 当非线性增益足够大( $\gamma = 0.12$ ) 时, 它就能有效地抑制暗孤子系统的时间抖动, 并且随着传输距离  $\zeta$  增大, 时间抖动可以抑制到很低的水平。非线性增益对暗孤子传输系统时间抖动的抑制是由于它对暗孤子的频率偏离有控制作用, 就象“弹性回复力”, 强度足够大时, 每当频率偏离“平衡位置”时, 它总是把频率拉回到“平衡位置”。

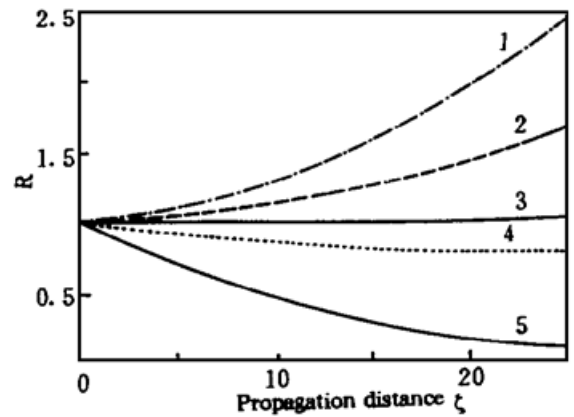


Fig. 1 The ratio factor versus the propagation distance  $\zeta$  1:  $H = 10^{-2}, \gamma = 0$ ; 2:  $H = 0.5 \times 10^{-2}, \gamma = 0$ ; 3:  $H = 0, \gamma = 0$ ; 4:  $H = 10^{-2}, \gamma = 0.05$ ; 5:  $H = 10^{-2}, \gamma = 0.12$

**结 论** 本文在暗孤子分布放大传输系统中建立了增益随机变化模型, 利用暗孤子的守恒量扰动法, 研究了增益随机变化对暗孤子系统的时间抖动的影响。结果表明: 增益随机变化对暗孤子的速度有影响, 增大了暗孤子的到达检测窗口的时间抖动, 因而影响了暗孤子传输系统的稳定性和增大了系统的误码率。引入非线性增益能够有效地抑制暗孤子的时间抖动。

本文结果表明, 在设计孤子分布放大传输系统时, 孤子传输控制是十分重要的<sup>[11~16]</sup>, 它也是光孤子通信实用化的基础, 对于暗孤子传输系统, 非线性增益是暗孤子传输控制有效手段之一。同时设计孤子传输线时, 要尽量减小传输过程中的增益随机变化, 例如文献[14]通过选择分布式掺铒光纤放大器的结构参数, 如掺杂铒离子浓度等, 把分布放大传输系统中孤子幅值变化有效地控制在 2% 左右。

### 参 考 文 献

[1] J. P. Gordon, H. A. Haus, Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10) : 665~ 667

- [2] Y. S. Kivshar, M. Haelterman, P. Emplit *et al.*, Gordon-Haus effect on dark solitons. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1) : 19~ 21
- [3] I. M. Uzunov, V. S. Gerdjikov, Self-frequency shift of dark solitons in optical fibers. *Phys. Rev. (A)*, 1993, **47**(2) : 1582~ 1585
- [4] R. N. Thurston, A. M. Weiner, Collisions of dark solitons in optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(2) : 471~ 477
- [5] J. N. Elgin, Stochastic perturbations of optical solitons. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1) : 10~ 12
- [6] 温扬敬, 陈明华, 张明德等, 脉冲频率漂移对孤子传输系统的影响. 科学通报, 1995, **40**(6) : 1047~ 1050
- [7] 杨祥林, 温扬敬, 张明德, 光纤随机色散对孤子系统通信容量的影响及抑制. 中国科学(A), 1995, **25**(5) : 544~ 549
- [8] Wen Yang Jing, Chen Ming Hua, Zhang Ming De *et al.*, The fiber soliton communication system with stochastic variation of gain. *Chinese J. Lasers*, 1995, **B4**(3) : 241~ 244
- [9] 李 宏, 陈海涓, 杨祥林, 沿传输方向掺杂浓度渐变分布式掺铒光纤放大器的模型. 通信学报, 1996, **17**(5) : 83~ 87
- [10] Li Hong, Chen Hai Juan, Yang Xiang Lin, Compensation of SBS effect with SRE in d-EDFA. *Chinese J. Lasers*, 1996, **B5**(5) : 409~ 414
- [11] Y. Kodama, A. Hasegawa, Generation of asymptotically stable optical solitons and suppression of the Gordon-Haus effect. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1) : 34~ 36
- [12] A. Hasegawa, Y. Kodama, *Solitons in Optical Communication*. Oxford, Oxford Univ. Press, 1995 : 143
- [13] H. Kubota, M. Nakazawa, Soliton transmission control in time and frequency domains. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(7) : 2189~ 2195
- [14] S. Wen, S. Chi, Undoing of soliton interaction by optical phase conjugation. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(8) : 663~ 664
- [15] A. Mecozzi, J. D. Moores, H. A. Haus, Soliton transmission control. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12) : 1841~ 1843
- [16] M. Mastumoto, H. Ikeda, A. Hasegawa, Reduction of G-H effect on dark solitons by means of non-linear gain. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(6) : 482~ 483

## Influence of Gain Stochastic Variation On Dark Soliton Transmission System

Li Hong      Yang Xianglin

(*Department of Electronics Engineering Southeast University, Nanjing 210096*)

(Received 11 November 1996; revised 3 January 1997)

**Abstract** The model of stochastic gain variation is built for a dark soliton transmission system, and the influence is studied of the stochastic gain variation on time jitters of the dark soliton. The results show that the stochastic gain variation apparently leads to the time jitters in arrival, and reduces the capacity of dark soliton transmission system. The nonlinear gain can suppress effectively the influence.

**Key words** dark soliton transmission system, stochastic gain variation, time jitters in arrival, nonlinear gain.