

色散随机变化对暗孤子传输系统时间抖动的影响及抑制

李 宏

(湖北师范学院物理系 黄石 435002)

提要 运用守恒量扰动法,研究了色散随机变化对暗孤子传输系统的影响。结果表明:色散随机变化增大了暗孤子到达检测窗口的时间抖动方差而降低了暗孤子传输系统的容量。引入非线性增益可以有效地抑制色散随机变化对暗孤子到达时间抖动的影响。

关键词 暗孤子传输系统,色散随机变化,时间抖动方差,非线性增益

长距离光孤子传输系统用于通信时,常常需要周期性插入光纤放大器来补偿光纤损耗,这样光纤放大器不可避免地产生和放大了自发辐射噪声,引起了光孤子频率随机漂移,导致光孤子脉冲到达检测窗口时产生的时间抖动,限制了光孤子长距离通信容量(G-H 效应)^[1],理论和数值计算已表明:对于明孤子,使用带宽限制放大可以降低光孤子脉冲到达检测窗口的时间抖动,有效地抑制 G-H 效应^[2]。

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,如它的由放大器自发辐射(ASE)噪声引起时间抖动(G-H 效应)比明孤子小 $\sqrt{2}$ 倍^[3],它对各种扰动效应,如内脉冲拉曼散射(IRS)、孤子间相互作用等^[4,5],具有比明孤子更强的抵抗能力和更好的稳定性,在逻辑门和光开关中有着广泛的应用前景。同时用暗孤子进行长距离传输,具有比用明孤子更高的码率,更好的自我修复能力,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。

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速率和容量,但它们传输中产生的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等,它们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^[6-10]。本文利用暗孤子传输系统的守恒量扰动法,研究了色散随机变化引起的暗光孤子脉冲到达时间抖动,并通过引入非线性增益来有效抑制时间抖动。

1 理论分析

在光纤正常色散区中传输的暗孤子脉冲由下列非线性薛定谔方程来描述

$$i \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{D}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \omega^2} + \frac{1 - \exp(-2\Gamma L)}{2\Gamma L} \frac{2\pi n_2 h \omega_0}{\lambda A_{\text{eff}}} |u|^2 u = i\rho |u|^2 u \quad (1)$$

式中 u 为暗孤子包络函数, D 为传输系统的二阶色散(正色散), z 为传输距离, n_2 为非线性折射率, A_{eff} 为光纤的有效截面积, ρ 为非线性增益系数, ω_0 为暗孤子的中心频率, L 为传输放大间距, Γ 为光纤的本征损耗。

一般地, 由于传输线上光纤制作的差异, 它的非线性折射率、光纤数值孔径等光纤参数沿传输方向不是绝对一致, 二阶色散 $D(z)$ 在传输过程中是在一个平均值上下随机起伏的, 这导致暗孤子频率发生漂移, 即暗孤子频率又是传输距离的隐函数, 从精确的角度分析, 二阶色散 D 应该既是传输距离的函数, 又是频率的函数。

当传输距离发生变化 Δz 时, 二阶色散 $D(z + \Delta z, \omega - \omega_0)$ 可以表示为

$$D(z + \Delta z, \omega - \omega_0) = D_0 + \left. \frac{\partial D(z, \omega)}{\partial z} \right|_z \Delta z + \left. \frac{\partial D(z, \omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega = \omega_0} (\omega - \omega_0) \quad (2)$$

其中, D_0 为沿传输方向二阶色散的平均值。方程(2)的右边第二、三项是二阶色散随传输距离、频率的变化关系, 它们满足

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial D(z, \omega)}{\partial z} \right|_z \Delta z &\rightarrow D_1(z) \\ \left. \frac{\partial D(z, \omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega = \omega_0} (\omega - \omega_0) &\rightarrow iD_2(z) \frac{\partial}{\partial \alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, D_1, D_2 是随机变量。

方程(1) 经过无量纲化变换, 可得

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \theta(\xi) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = \gamma |u|^2 u \quad (4)$$

其中, γ 为归一化非线性增益系数, $\xi = z/L_D$, $\tau = t/T_0$, T_0 为暗孤子的脉宽, 并且有

$$\theta(\xi) = 1 + 2\delta_1(\xi) + 2i\delta_2(\xi) \frac{\partial}{\partial \tau} \quad (5)$$

$\delta_1^*(\xi), \delta_2(\xi)$ 为归一化的随机变量, 满足

$$\begin{aligned} \delta_i^l(\xi) \rangle &= \delta_i^r(\xi) \rangle = \delta_i^l(\xi) \delta_j^r(\xi) \rangle = 0 \quad i = 1, 2 \\ \delta_i^l(\xi) \delta_j^l(\xi') \rangle &= \delta_i^r(\xi) \delta_j^r(\xi') \rangle = 2H_i \delta(\xi - \xi') \delta_{ij} \\ \delta_i^l(\xi_1) \cdots \delta_i^l(\xi_n) \rangle &= \begin{cases} 0 & n = \text{odd} \\ (2H_i)^n \sum_{pd} \delta(\xi_1 - \xi_n) & n = \text{even} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\delta_i^l(\xi), \delta_i^r(\xi)$ 为随机变量的实部和虚部, $H_i (i = 1, 2)$ 为随机变量 $\delta_i(\xi)$ 的均方涨落测量值。

非线性薛定谔方程(1) 归一化为

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = \delta_1(\xi) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + i\delta_2(\xi) \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} + i\gamma |u|^2 u \quad (7)$$

方程(7)的齐次方程的暗孤子解可表示为

$$u(\xi, \tau) = q_0 \{ \eta \tanh[\eta(q_0\tau + q_0^2 k \xi)] + ik \} (\eta - ik) \exp(iq_0 \xi) \quad (8)$$

其中, η, k 为暗孤子的振幅(深度)和速度, 且

$$k^2 + \eta^2 = 1 \quad (9)$$

利用暗孤子传输系统的动量守恒^[4]

$$p = \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[u \frac{\partial u^*}{\partial \tau} - u^* \frac{\partial u}{\partial \tau} \right] d\tau - q_0^2 \arg u(\xi, \tau) \Big|_{\tau=-\infty}^{\tau=\infty} \quad (10)$$

可得暗孤子速度变化关系($q_0 = 1$)

$$\frac{dk}{d\xi} = \frac{4}{3} \delta_2^1 \eta^4 - \frac{2}{3} \gamma \eta^2 k + \sigma(\xi) \quad (11)$$

其中, 方程(11)中已引入暗孤子传输系统的 ASE 噪声 $\sigma(\xi)$, 它满足^[3]

$$\begin{aligned} \langle \sigma(\xi) \rangle &= 0 \\ \langle \sigma(\xi) \sigma(\xi') \rangle &= 2B \delta(\xi - \xi') \end{aligned} \quad (12)$$

$$B = (2\pi c)^3 h \Gamma N_{sp} n_2 T_0^3 / (12A_{eff} D_0^2 \lambda^6)$$

这里, N_{sp} , T_0 , λ 分别为暗孤子传输系统的自发辐射因子、脉宽和暗孤子的波长。

从方程(11)可见, 只有与频率有关的色散随机变化对暗孤子的速度产生影响, 而与传输长度有关的色散随机变化对暗孤子的速度无影响, 这与色散随机变化对明孤子的速度影响不同^[6, 10], 后者与传输长度有关的色散随机变化对明孤子的速度产生影响。

方程(11)是一个非自洽系统, 色散随机变化扰动对暗孤子传输系统的平衡点产生影响, 这里近似认为平衡点从 $(\eta, k) \rightarrow (1, 0)$ (系统无扰动) 变为 $(\eta, k) \rightarrow (\eta_0, k_0)$ (系统有扰动), 将方程(11)在点 (η_0, k_0) 附近线性展开

$$\frac{d\Delta k}{d\xi} = -\frac{16}{3} \delta_2^1 \eta_0^3 \Delta \eta - \frac{2}{3} \gamma \eta_0^2 \Delta k - \frac{4}{3} \gamma \eta_0 k_0 \Delta \eta + \sigma(\xi) \quad (13)$$

其中, $\Delta \eta$, Δk 分别为暗孤子的振幅(深度)和速度偏离 (η_0, k_0) 的量。

由方程(9)可得暗孤子的振幅(深度)和速度偏离量的关系

$$\eta_0 \Delta \eta + k_0 \Delta k = 0 \quad (14)$$

由方程(13)和(14), 可得

$$\frac{d\Delta k}{d\xi} = \frac{16}{3} \delta_2^1 \eta_0^2 k_0 \Delta k - \frac{2}{3} \gamma \eta_0^2 \Delta k + \frac{4}{3} \gamma k_0^2 \Delta k + \sigma(\xi) = A \delta_2^1 \Delta k - C \Delta k + \sigma(\xi) \quad (15)$$

$$A = \frac{16}{3} \eta_0^2 k_0 \quad C = \frac{2}{3} \gamma \eta_0^2 - \frac{4}{3} \gamma k_0^2$$

由方程(15), 可得

$$\Delta k(\xi) = \exp \left[\int_0^\xi -C + A \delta_2^1(x_1) dx_1 \right] \int_0^\xi \sigma(x) \exp \left[\int_0^x C - A \delta_2^1(x_2) dx_2 \right] dx \quad (16)$$

利用方程(6)和(12), 并考虑到随机变量 $\delta_2^1, \delta(\xi)$ 之间是互不关联的, 可得^[11]

$$\langle \Delta k(\xi) \rangle = 0$$

$$\langle \Delta k(\xi) \Delta k(\xi') \rangle = \frac{B}{C - 2A^2 H_2} \times$$

$$\left[\exp[-(C - A^2 H_2)|\xi + \xi'|] - \exp[-(C - 2A^2 H_2)(\xi + \xi') - A^2 H_2|\xi - \xi'|] \right] \quad (17)$$

利用 $\frac{d\delta\tau}{d\xi} = \Delta k(\xi)$, 可得暗孤子系统的时间抖动方差

$$\begin{aligned} \langle \delta\tau^2 \rangle &= \iint_{0,0}^{\xi,\xi} \Delta k(x_1) \Delta k(x_2) dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{B}{2(C - A^2 H_2)(C - 2A^2 H_2)} \times \end{aligned}$$

$$\left\{ 2\xi - \left[\frac{2}{C - A^2 H_2} + \frac{1}{C - 3A^2 H_2} - \frac{H_2}{(C - 3A^2 H_2)(C - 2A^2 H_2)} \right] + \right. \\ \left. 2 \left[\frac{1}{C - A^2 H_2} + \frac{1}{C - 3A^2 H_2} \right] \exp[-(C - A^2 H_2)\xi] - \right. \\ \left. \frac{1}{C - 3A^2 H_2} \left[1 + \frac{H_2}{C - 2A^2 H_2} \right] \exp[-2(C - 2A^2 H_2)\xi] \right\} \quad (18)$$

如果 $C \rightarrow 0$ 即暗孤子系统中无非线性增益, 方程(18) 变成

$$\delta\tau^2 = \frac{B}{12(A^2 H_2)^3} [12A^2 H_2 \xi + 15 - 16\exp(A^2 H_2 \xi) + \exp(4A^2 H_2 \xi)] \quad (19)$$

如果 $H \rightarrow 0$ 即暗孤子系统中无色散随机变化, $(\eta_0, k_0) \rightarrow (1, 0)$, 则方程(18) 变为

$$\delta\tau^2 = \frac{B}{C^3} [2C'\xi - 3 + 4\exp(-C'\xi) - \exp(-2C'\xi)] \quad (20)$$

其中, $C' = 2\gamma/3$, 这与文献[12]相吻合。由文献[13]可见, 在暗孤子传输系统中, 非线性增益具有明孤子传输系统中滤波器相同的作用。

如果 $H \rightarrow 0$ 和 $C \rightarrow 0$ 即暗孤子系统中既无色散随机变化, 又无非线性增益, 方程(18) 变成

$$\delta\tau^2)_0 = \frac{2}{3} B \xi^3 \quad (21)$$

这正是暗孤子系统中由 ASE 噪声引起的时间抖动方差。

2 结果讨论

为了描述色散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, 我们取参数 $N_{sp} = 2$, $n_{20} = 3.25 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $T_0 = 3.55 \text{ ps}$, $A_{\text{eff}} = 32.5 \text{ } \mu\text{m}^2$, $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$, $D_0 = 0.45 \text{ ps/km} \cdot \text{nm}$, $\Gamma = 0.22 \text{ dB/km}$, $\eta \approx 1$, $k = 0.1$, 作图 1 予以说明。

图 1 是不同条件下, 暗孤子的时间抖动方差随传输长度 ξ 的变化关系。从图中不难看出, 色散随机变化增大了系统的时间抖动, 随着传输长度 ξ 的增大, 增大越明显, 可见色散随机变化对暗孤子传输系统有明显的影响, 它影响了暗孤子传输系统的稳定性和增大了系统的误码率。非线性增益对时间抖动有明显的抑制作用, 随着传输长度 ξ 增大, 时间抖动仍可以抑制在很低的水平。

3 结 论

本文在暗孤子传输系统中建立了色散随机变化模型, 利用暗孤子的守恒量扰动法, 研究了色散随机变化对暗孤子系统的时间抖动的影响。结果表明: 与频率相关色散随机变化对暗孤子的速度有影响, 增大了暗孤子到达检测窗口的时间抖动, 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。

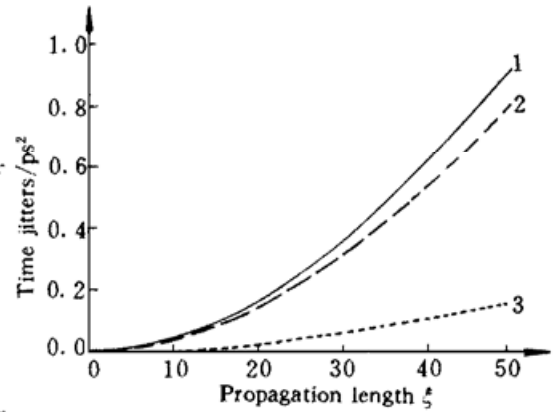


图 1 暗孤子传输系统时间抖动与传输长度 ξ 的关系

Fig. 1 Relation of time jitters of a dark soliton transmission system versus the propagation length ξ

1: $H_2 = 10^{-1}$, $\gamma = 0$; 2: $H_2 = 0$, $\gamma = 0$;

3: $H_2 = 10^{-1}$, $\gamma = 0.125$

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 M. Matsumoto, A. Hasegawa. Numerical study of reduction of instability in bandwidth-limited amplified soliton transmission. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11) : 897~ 899
- 3 Yu. 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, V. S. Gerdjikov. Self-frequency shift of dark solitons in optical fibers. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(2) : 1582~ 1585
- 5 R. N. Thurston, A. M. Weiner. Collisions of dark solitons in optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(2) : 471~ 477
- 6 Yang Xianglin, Wen Yanjing, Zhang Mingde. *Science in China (Series A)* (中国科学(A)), 1995, **25**(5) : 543~ 549 (in Chinese)
- 7 Wen Yangjing, Chen Minghua, Zhang Mingde *et al.*. *Chinese Scienc Bulletin* (科学通报), 1995, **40**(11) : 1047~ 1050 (in Chinese)
- 8 Wen Yangjing, Chen Minghua, Zhang Mingde *et al.*. The fiber soliton communication system with stochastic variation of gain. *Chinese J. Lasers*, 1995, **B4**(3) : 241~ 245
- 9 Li Hong, Chen Minghua, Yang Xianglin. Stochastic high order effects on soliton transmitting system. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(6) : 531~ 535 (in Chinese)
- 10 Li Hong, Cheng Minghua, Yang Xianglin. Influence of stochastic dispersion variation on bright soliton transmission system. *Chinese J. Lasers*, accepted and to be published
- 11 J. N. Elgin. Stochastic perturbations of optical solitons. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1) : 10~ 12
- 12 M. Mastumoto, H. Ikeda, A. Hasegawa. Reduction of Gourdon-Haus effect on dark solitons by means of nonlinear gain. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(6) : 482~ 483
- 13 Y. Kodama, A. Hasegawa. Generation of asymptotically stable optical solitons and suppression of the Gordon-Haus effect. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(1) : 31~ 33

The Influence of Stochastic Dispersion Variation on Time Jitters of a Dark Soliton Transmission System and its Suppression

Li Hong

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

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

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