

文章编号: 1001-3806(2004)05-0554-03

高阶色散效应对孤子和孤子对传输的影响

沈廷根^{1,2}, 谢秉川¹, 姚洁², 方云团³

(1. 江苏大学 物理系, 镇江 212013; 2. 南京师范大学 江苏省光电中心实验室, 南京 210097; 3. 镇江船艇学院 物理系, 镇江 212003)

摘要: 用数值法求解含高阶色散效应的光孤子 NLS 方程, 数值求解发现三阶色散效应使孤子脉座单边振荡和四阶色散效应使孤子脉座的双边振荡, 导致临近的脉冲相互重叠和脉冲形状畸变, 在孤子对间激起次脉冲, 从而造成系统误码, 提出重点应对三阶色散进行补偿以减小系统误码。

关键词: 数值解; 孤子; 高阶色散; 误码

中图分类号: O431.2; TN929.11 **文献标识码:** A

The effect of high-order dispersion on soliton and the effect of soliton on propagation

SHEN Ting-gen^{1,2}, XIE Bing-chuan¹, YAO Jie², FANG Yun-tuan³

(1. Department of Physics, Jiangsu University, Zhenjiang 212003, China; 2. Photoelectricity Central Laboratory of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China; 3. Department of Physics, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Numerical solutions to the soliton nonlinear Schrödinger (NLS) equation of higher-order dispersion effect find the third order dispersion effect causing the soliton pulse seat to oscillate on a single side and the fourth order effect causing it to oscillate on both sides, which result in the neighboring optical pulses overlapping and the shapes of the optical pulses distorting. The secondary pulses are evoked between the pair of optical soliton, therefore, cause systematic error code. We suggest that the third order dispersion should be compensated on purpose in order to reduce systematic error code.

Key words: numerical solution; soliton; high order dispersive; error code

引 言

在过去的 10 年中, 掺铒光纤放大器(EDFA) 实现光纤中多路光信号的同时放大, 大大降低了光中继的成本; 同时可与传输光纤实现良好的耦合, 具有高增益低噪声等优点。目前, 全世界约有 5×10^7 km 常规光纤(G652 光纤)。随着 EDFA 的出现, 损耗已降为比较次要的因素。光纤色散已成为当前高速光纤通信的主要限制因素, 如 G652 光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处色散约为 $15 \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \sim 17 \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 对于 10Gbit/s 的系统, 色散限制的理论距离只有 60km 。光纤色散, 特别是高阶色散使脉冲展宽, 传输距离越长, 脉冲展宽越大, 误码越多, 从而限制系统总的信

号速率和传输距离。

通过数值模拟, 较仔细地研究了三阶色散效应和四阶色散效应, 得出三阶色散效应使孤子脉座单边振荡和四阶色散效应使孤子脉座的双边振荡的拖尾现象, 导致临近的脉冲相互重叠和脉冲形状畸变, 在孤子对间激起次脉冲, 从而造成系统误码, 直接影响到通信的质量和容量, 三阶色散效应对孤子的影响远大于四阶色散效应, 重点应对三阶色散进行补偿以减小系统误码, 它对光孤子通信的研究和光孤子通信系统的设计有一定的参考价值。

1 计算原理

在光纤中自相位调制效应与群速色散相互作用, 使光脉冲演变为光孤子, 光纤中传输的光孤子行为由经典的非线性薛定谔方程描述。不考虑高阶色散, 并假定光损耗可由周期放大器提供的增益抵消, 则光孤子的传输规律可由如下的标准非线性薛定谔

作者简介: 沈廷根(1951-), 男, 教授, 长期从事光通信研究工作。

E-mail: stg123stg@sina.com

收稿日期: 2003-08-30; 收到修改稿日期: 2003-10-16

方程描述^[1-3]:

$$i \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{1}{2} m \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} - ip \frac{\partial^3 q}{\partial t^3} - g \frac{\partial^4 q}{\partial t^4} + b |q|^2 q = 0 \quad (1)$$

$q = q(x, \tau)$ 为光纤中孤子的归一化场包络函数, 首先令二阶色散系数 $m = 1$, p 为三阶色散系数, g 为四阶色散系数, b 为光纤非线性系数, a 为五阶非线性系数, x, t 分别为归一化传输距离和传输时间。实践已证明, 分步傅里叶积分法是求解 NLS 方程有效的数值方法^[4]。利用该方法, (1) 式可等效为:

$$i \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial x} = - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + ip \frac{\partial^3 q}{\partial t^3} + g \frac{\partial^4 q}{\partial t^4} \quad (2)$$

$$i \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial x} = - (b |q|^2 q) \quad (3)$$

光脉冲在光纤中由 x 传输到 $x + h$ 分两步计算, 在前半部分 $[x, x + h/2]$ 上先让 (3) 式起作用, 并忽略 $|q|^2$ 在该区间的变化, 解得:

$$q(t, x + h/2) = \exp[i(b |q|^2 q) h] q(t, x) \quad (4)$$

对 (4) 式两边关于 t 求傅里叶变换得:

$$Q(\omega, x + h/2) = \mathcal{F} \{ \exp[i(b |q|^2 q) h] q(t, x) \} \quad (5)$$

再让 (2) 式在前半部分区间 $[x + h/2, x + h]$ 上起作用, 并让 q 关于 t 求傅里叶变换, 经变换得:

$$Q(x + h) = \exp[-i(\omega^2 + p\omega^3 + g\omega^4)h/2] \times Q(x + h/2) \quad (6)$$

把 (5) 式代入 (6) 式后再求傅里叶逆变换得:

$$q(t, x + h) = \mathcal{F}^{-1} \{ \exp[-i(\omega^2 + p\omega^3 + g\omega^4)h/2] \times \mathcal{F} \{ \exp[i(b |q|^2 q) h] q(t, x) \} \} \quad (7)$$

上式即为分步傅里叶变换法求解 (1) 式的数值演化的依据。计算中, 一阶孤子的初始注入脉冲为双曲正割函数 $q(t, 0) = \text{sech}(t)$, 而孤子对初始注入脉冲为 $q(t, 0) = \text{sech}(t + 6) + \text{sech}(t - 6)$, 对一阶孤子 $b = 1$ 。

2 数值研究结果与分析

2.1 单个孤子

(1) 对单个的一阶孤子, $m = 1, p = g = 0$, 由图 1 可见, 无高阶色散效应时单个孤子为等幅无变形

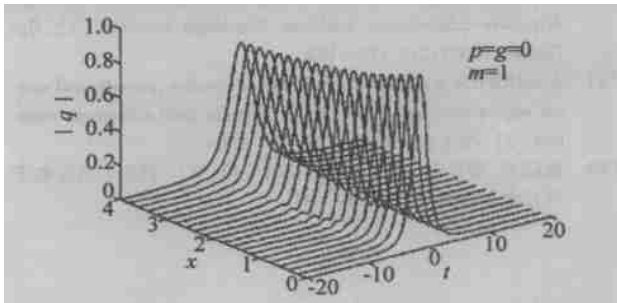


Fig. 1 The shapes of the optical pulses no distorting $g = p = 0$

双曲正割脉冲。

(2) 三阶色散系数 $p = 100, m = 1$ 时, 由图 2a 可见, 在传输阶段, 在孤子底座 $t > 0$ (右半边) 段产生剧烈振荡, 引起严重形变, 图 2b 中描绘了图 2a 中 $p = 100, m = 1$ 时 2 个孤子取样状态图, 更直观描绘了孤子脉座单边振荡情况, 但三阶色散对孤子幅值无影响, 并传输距离越长, 脉宽展宽, 振荡和形变越严重。

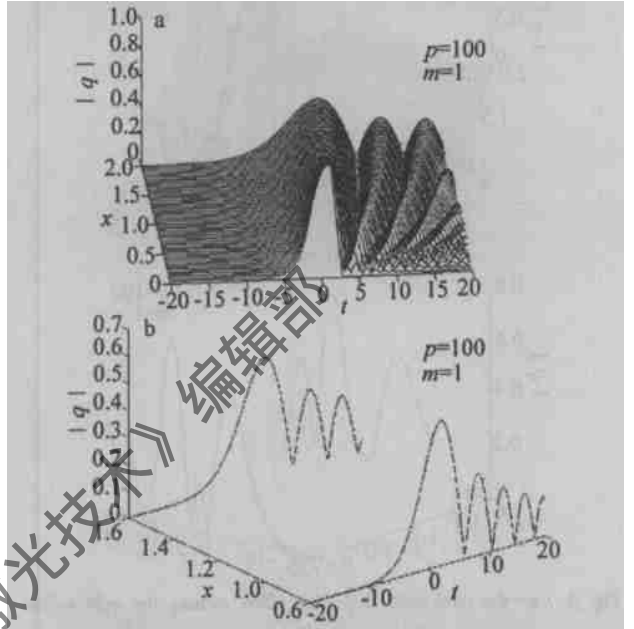


Fig. 2 a—the third order dispersion effect causing the soliton pulse seat to single side oscillate b—taking two solitons in Fig. 2a

(3) 四阶色散系数 $g = 100, p = 0, m = 1$, 由图 3a 和图 3b 可见, 直观描绘了四阶色散效应使孤子脉座

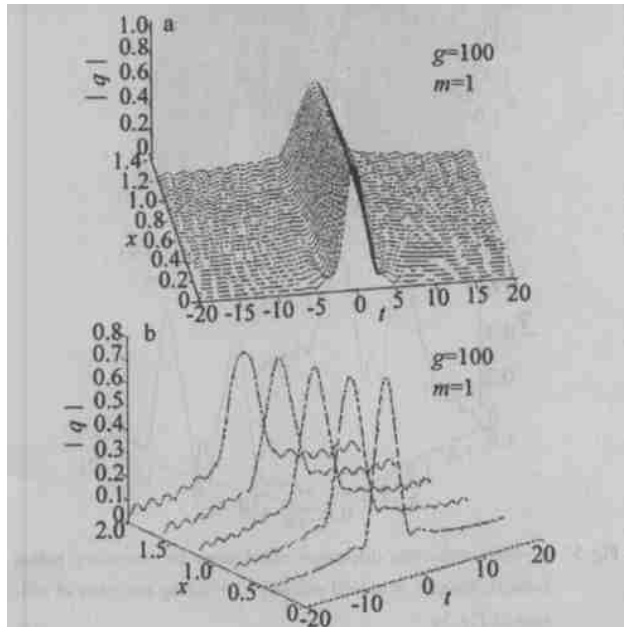


Fig. 3 a—the fourth order dispersion effect causing the soliton pulse seat to double side oscillate b—taking five solitons in Fig. 3a

双边振荡的情况, 传输距离越长, 振荡越严重, 并双

边振荡的幅度远远低于存在三阶色散效应的孤子脉座单边振荡幅度。

2.2 孤子对

(1) 首先, 令 $p = 100$, $m = 1$, 输入初始脉冲 $q(t, 0) = \text{sech}(t + 6) + \text{sech}(t - 6)$, 此为幅度相同且同相的孤子对, 其数值解结果如图 4 所示, 它明显反映了三阶色散效应引起孤子脉座单边振荡集中于始端

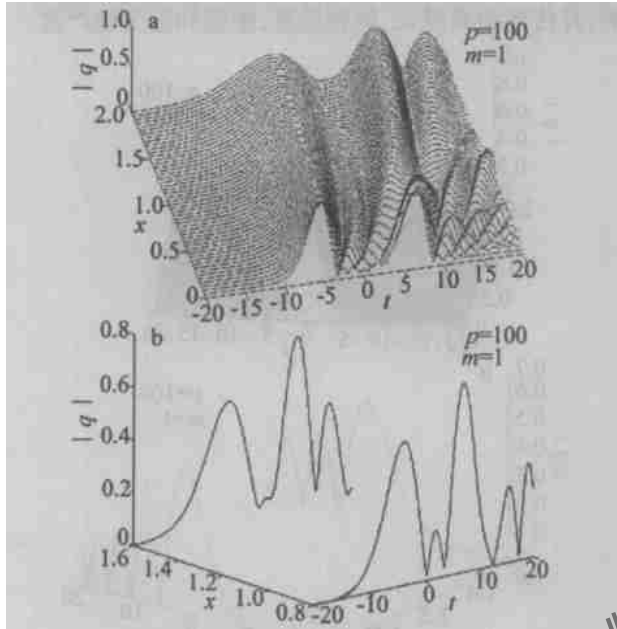


Fig. 4 a—the third order dispersion effect causing the right soliton pulse seat to single side oscillate and arose secondary pulses b—taking two pairs of solitons in Fig. 4a

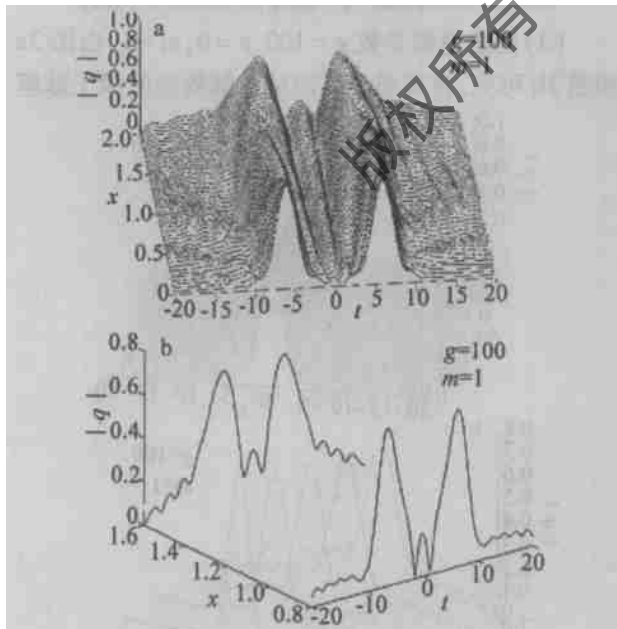


Fig. 5 a—the fourth order dispersion effect arose the secondary pulses between the pair of optical solitons b—taking two pairs of solitons in Fig. 5a

和 $t > 0$ (右半边) 段的 $\text{sech}(t + 6)$ 孤子, 以后脉座单边振荡分裂为多次脉冲, 左边 $\text{sech}(t - 6)$ 孤子始端脉宽收缩, 以后随传输距离增加脉宽开始展宽, 波形的畸变较小。

(2) 令 $g = 100$, $m = 1$, 输入初始脉冲 $q(t, 0) = \text{sech}(t + 6) + \text{sech}(t - 6)$, 其数值解结果如图 5 所示, 仍保持双孤子平行传输特征, 各波形的畸变较小。孤子对的孤子脉座双边振荡, 在孤子对间激起次脉冲。

综上所述, 三阶色散效应对孤子的影响远大于四阶色散效应。

上述各图中坐标轴上物理量分别为归一化的, 因此, 取无量纲单位。

3 结论

根据上述数值模拟结果, 在孤子通信过程中, 因存在三阶色散效应使孤子脉座单边振荡和四阶色散效应使孤子脉座的双边振荡(即拖尾现象), 引起脉冲展宽, 导致临近的脉冲相互重叠和脉冲形状畸变, 在孤子对间激起次脉冲, 从而造成系统误码。高阶色散越强, 导致脉冲的交叠部分越大, 造成系统误码机会变大, 直接影响到通信的质量和容量, 三阶色散效应对孤子的影响远大于四阶色散效应, 因此, 重点应对三阶色散进行补偿以减小系统误码。

对高阶色散进行补偿, 减小误码的有效方法是采用非零色散位移光纤、负色散及负色散斜率光纤, 除了光纤本身外, 还可用其它方式进行色散补偿。另外, 在一个实际的带有级联 EDFA 的高速 WDM 系统中, 色散补偿应结合(抑制或利用)光纤非线性效应综合考虑, 通常称为色散管理。这些效应的仔细分析, 通常相当复杂, 一般要经过数值模拟。

参 考 文 献

- [1] BISWAS A. Quasi-stationary optical with parabolic law nonlinearity [J]. Opt Commun, 2003, 216: 427~ 437.
- [2] HONG W P. Modulational instability of optical waves in the high dispersive cubic quintic nonlinear Shrodinger equation [J]. Opt Commun, 2002, 213: 173~ 182.
- [3] ANKIEWICA A, MARUNO K I. Nail akhmediev, periodic and optical soliton solutions of the quintic complex swift-hohenberg equation [J]. Phys Lett, 2003, A308: 397~ 404.
- [4] 陈陆君, 梁昌洪. 孤子理论及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997. 84~ 91.