

光孤子传输特性研究综述

蔡托, 桑田, 潘晓慧, 罗元辉

(黔南民族师范学院物理与电子科学系, 贵州 都匀 558000)

摘要:在分别研究了高阶色散、五阶非线性、孤子振幅、孤子相位及孤子间隔对其传输特性的影响之后,对诸多因素的综合影响及其在某种程度上的相互制约关系进行了综述,给出了孤子保形传输的数值计算结果。

关键词:光孤子;传输特性;综述

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.18

Review of optical soliton transmission characteristics

CAI Tuo, SANG Tian, PAN Xiao-hui, LUO Yuan-hui

(Dept. of Physics & Electronic Science, Qiannan Normal College for Nationalities, Duyun 558000, China)

Abstract: After the effect of high order dispersion, five order nonlinearity, soliton amplitude, soliton phases and soliton space on transmission characteristics is studied respectively, the synthetical effect of various factor and the relation of restrict each other various factors are discussed, the numerical results of optical soliton conformal transmission are given.

Key words: soliton; transmission character; comprehensive description

1 引言

随着现代通信流量需求的迅速增长,大容量、高比特速率及超长距离的光通信已成为迫切需求。光孤子通信由于其具有高容量传输、长距离、误码率低、抗噪声能力强等优点,因而它是满足和实现这一需求的最佳候选者。自1973年人们提出利用光孤子实现光纤通信以来,国内外的科学家和工程师们都对此进行了深入的理论和实验研究^[1]。近几年来,光孤子通信研究不断取得突破性进展,系统试验不断深化。美、日、英等国都建立了光孤子回路试验系统。回路上均匀设置许多光放大器,信号绕回路若干次,模拟几千千米甚至几万千米的长距离传输。随着光纤通信领域中其他关键器件的相继问世,如锁模激光器、滑频滤波器、采样调制器和掺铒光放大器(EDFA)等的出现和实用化,光纤孤子通信中存在的问题正在逐步得以解决并将最终走向商用^[2]。

光孤子通信的全部研究可归结为如何实现其长

距离的保形传输。在超长距离波分复用传输系统和飞秒(fs)脉冲传输中,适当地提高入纤光功率,可以在增加传输距离的同时保持足够好的传送质量。但实践表明,当光脉冲的脉宽窄到皮秒(ps)甚至飞秒(fs)量级或载波波长处于光纤零色散波长附近时,三阶以上色散的影响将不容忽略;当入射光功率较大,或在有相对较高非线性光学系数的材料中,即使是中等光强的光入射,它在与光纤介质的相互作用过程中也必然会引起非线性效应。

在过去几年的研究工作中,笔者对光孤子的传输特性进行了较为全面的探讨,对影响其传输特性的主要因素进行了解析分析或数值计算,探讨了各因素之间可能存在的必然联系或相互制约关系。本

基金项目:贵州省教育厅自然科学基金(No. 2010092)资助课题;国家自然科学基金(No. 11064010)资助。

作者简介:蔡托(1953-),男,教授,研究方向为基本粒子理论。近年来主要致力于非线性光学和光孤子通信的理论探讨。

E-mail: ct163001@sina.com

收稿日期:2013-02-07

文是在作者自己多年研究的基础上,对各阶段的单项研究结果进行综述和总结,所归纳的结论或许对光孤子通信的实践研究具有一定的理论借鉴意义。

2 各因素单独影响的研究结论

所有计算和仿真依据均是基于非线性薛定谔方程:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{i}{24}\beta_4 \frac{\partial^4 A}{\partial T^4} = i\gamma |A|^2 A + i\eta |A|^4 A \quad (1)$$

采用的方法主要是分步对称傅里叶法,所有计算结果及图像均由 MATLAB 给出。

2.1 高阶色散与五阶非线性对孤子传输特性影响的结论

在只考虑至三阶色散及五阶非线性情形下,式(1)简化为^[3]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma |A|^2 A + i\eta |A|^4 A \quad (2)$$

采用对称分步傅里叶法,选取入纤信号为如下带啁啾的高斯脉冲:

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} \exp\left[-\frac{1}{2}(1 + ik)(T/T_0)^2\right] \quad (3)$$

利用 MATLAB 进行数值计算可得如下结果^[4-5],如图 1 所示。

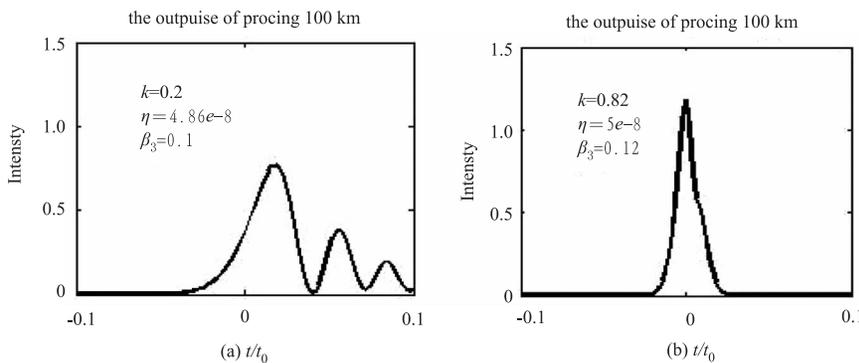


图 1 三阶色散和五阶非线性同时存在时对啁啾高斯脉冲传输特性的影响

Fig. 1 effect of third-order dispersion and fifth-order non-linearity on chirp Gauss pulse propagation character

由图 1 可见,输入脉冲啁啾、三阶色散和五阶非线性是相互影响并在一定范围内具有制约作用的。图 1(a)表明,当脉冲啁啾、三阶色散和五阶非线性分别取图中数值时,信号传输 100 km 后的输出脉冲峰值明显下降,脉冲波形发生严重畸变,而三阶色散是使脉冲中心产生偏移和引起前沿或后沿(取决于 β_3 的正负号)振荡的主要因素,五阶非线性的存在则加剧了拖尾振荡。进一步计算表明^[6-7],当进一步增大五阶非线性参数时,脉冲峰值进一步下降,拖

尾振荡愈加剧烈,这将会使更多的脉冲能量逸出比特时间以外,脉冲峰值进一步降低,同时由于脉冲的展宽而形成码间干扰,导致信噪比(SNR)降低。而由图 1(b)却发现,当输入脉冲的啁啾参数、三阶色散和五阶非线性系数分别在某一特定值(如图中标示的数值)附近时,能导致脉宽压缩增益和整形作用,就这一点而言,当输入高斯脉冲的啁啾参数一定时,选择具有不同高阶色散和五阶非线性系数的光纤,或对于具有确定高阶色散和高阶非线性系数的光纤,通过调整输入脉冲的啁啾参数,都有可能使光孤子的传输质量得到较好的改善。

2.2 孤子振幅、间隔及相差对其传输特性影响的结论

在光孤子光纤通信中,由于载体是孤子串,要确保它们无畸变地传输,必须避免相邻孤子之间发生相互作用。计算表明^[8],相邻光孤子间的振幅比、孤子间的间隔及相邻两孤子间的相位关系是决定光孤子在光纤传输过程中发生相互作用最为敏感的因素。

计算的理论依据仍然是非线性薛定谔方程:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = 0 \quad (4)$$

其中, ξ 和 τ 分别为归一化距离和归一化时间。为突出本节所述因素的影响,忽略了光纤的高阶色散和高阶非线性效应。方程(4)可利用逆散射法进行解析求解,但在本文中采用数值计算。注入初始脉冲

$$u(0, \tau) = \text{sech}(\tau + \tau_0) + \gamma \text{sech}(\tau - \tau_0) \cdot \exp(i\psi_0) \quad (5)$$

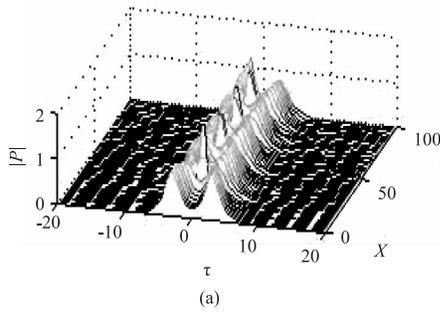
选择不同的 γ (两孤子振幅比)、 τ_0 (两孤子间隔)和 ψ_0 (相差)值,利用 MATLAB 进行数值计算可分别得到如下不同的结果与结论,如图 2、图 3 所示。

由图 2(a)、(b)、(c)、(d)

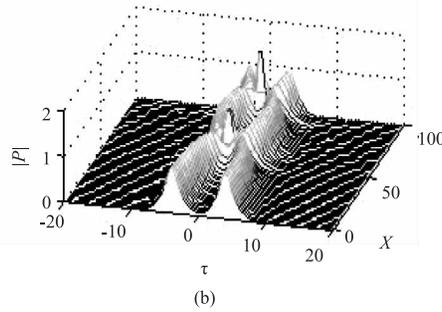
可见,随着孤子间相对间隔的增大(从 $\tau_0 = 3 \sim \tau_0 = 6$,为使结果更能说明问题,(c)、(d)两图的传输距离采用了更大的标度),其碰撞周期随之增大。当 $\tau_0 = 6$ 时,两孤子各自沿着自己原来的方向保形传输,它们间不再发生相互作用。

图 3 是在孤子相对间隔保持为 $\tau_0 = 3$ 、两孤子振幅比分别为 $\gamma \approx 1/2$ 、 $\gamma \approx 0.75$ 、 $\gamma \approx 0.85$ 和 $\gamma \approx 0.97$ 时两相邻孤子的传输演化情况,图 3(a)表

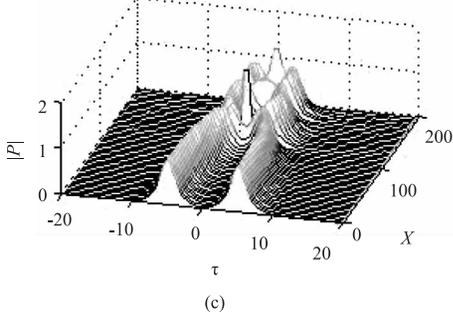
the waveform of optical soliton interaction when $\tau_0=3$



the waveform of optical soliton interaction when $\tau_0=4$



the waveform of optical soliton interaction when $\tau_0=5$



the waveform of optical soliton interaction when $\tau_0=6$

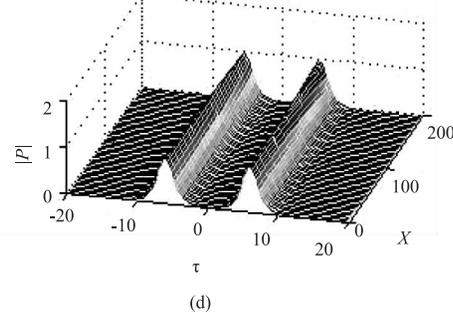


图2 不同 τ_0 值对孤子对互作用的影响

Fig. 2 the soliton interaction of different τ_0

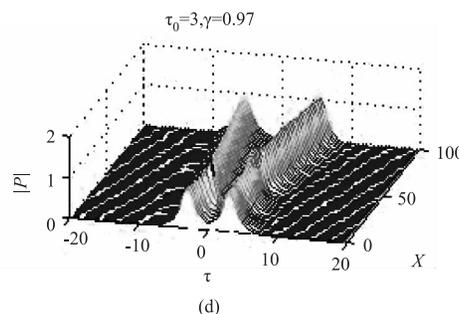
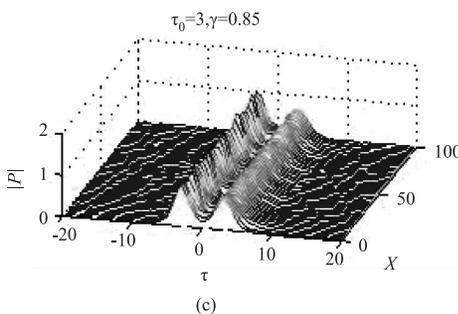
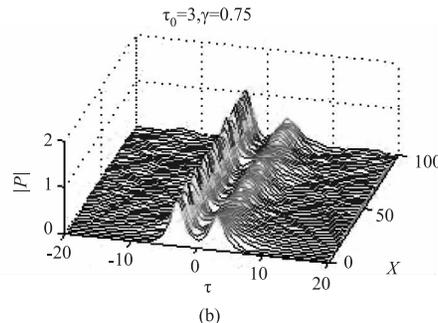
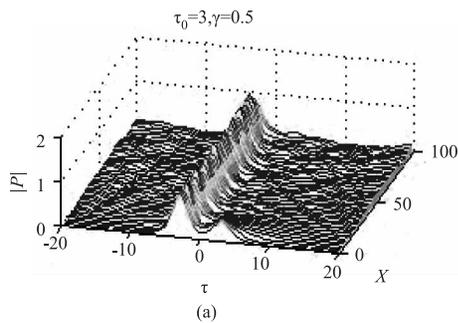


图3 不同 γ 值对孤子对互作用的影响

Fig. 3 the soliton interaction of different γ

明:当 $\gamma \approx 1/2$ 时,振幅小的孤子很快就被振幅大的孤子吸引过去而变成单孤子传输;而当 $\gamma \approx 0.97$ 时(图3(d)),两孤子开始时发生吸引,随之是相互排斥。详细计算表明:在保持 $\tau_0 = 3$ 不变的情况下,选择两孤子 $\gamma \approx 0.85$ 的振幅比是既能保证通信比特速率又能保证传输质量的一个理想的解决方案。

在式(5)中,分别取不同的 τ_0 、 γ 和 Ψ_0 值时,可

得到如下几个典型的结果,如图4所示。

由图4可见,孤子相对间隔 τ_0 、振幅比 γ 和相差 Ψ_0 是导致孤子互作用的关键因素,详细的计算表明:当两孤子脉冲的间隔 $\tau_0 \leq 2$ 时,无论采取什么措施,都无法避免其传输过程中频繁的吸引与排斥(图4(a));由图4(b)~4(d)可知,此三种情形下孤子对的间距和振幅比均为 $\tau_0 = 2.5$, $\gamma = 1.25$,但唯有两孤子反相($\Psi_0 = \pi$)时才能避免相互作用并得以保形传输(图4(b)),而当 $\Psi_0 = \pi/2$ 和 $\Psi_0 = 4\pi/3$ 时(或其他非 π 值),脉冲中心分别发生了右移和左移(相应于频谱的蓝移与红移),并伴随着相互排斥或吸引。

3 综述

光纤孤子通信中,影响光孤子传输质量的因素是多方面的。上述计算分析表明:对于不同的光纤,选择具有不同啁啾和宽度的入纤脉冲可使其传输质量得到很好的改善;为避免孤子间的相互

作用,精细调整入纤孤子间的振幅比和相位差,可使孤子间的相对间距减小到 $\tau_0 = 2.5$ 以内,这将在保证光孤子传输质量不受影响的前提下极大地提高系统的通信容量。详细计算还表明:在影响孤子传输质量的诸多因素之间无法得到它们相互联系与制约的一个解析关系。下一步笔者将试图采用数值优化法给出各因素之间的数值图表解。

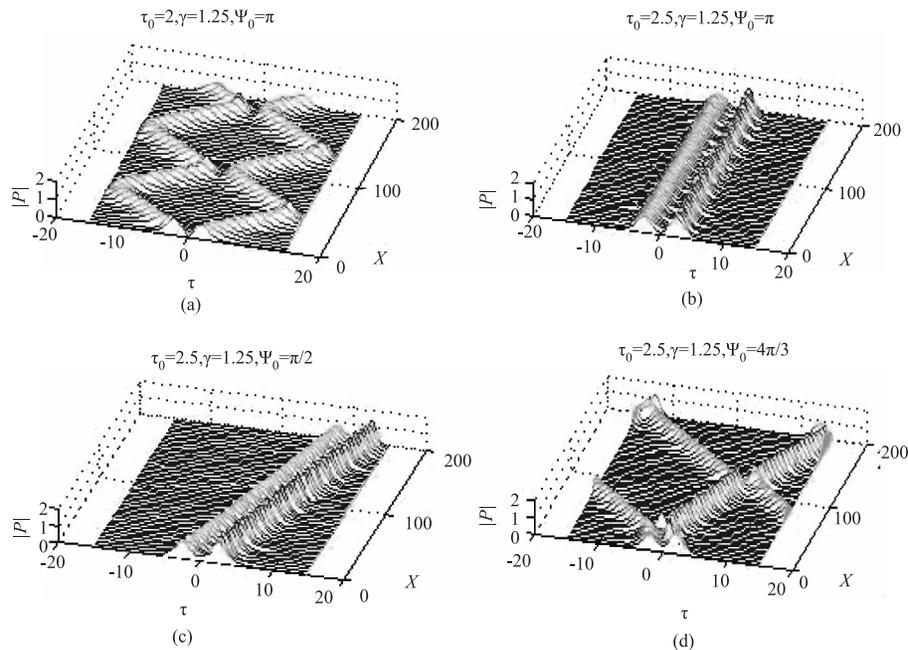


图4 分别取不同的 τ_0 值、 γ 值和 Ψ_0 值时孤子对的相互作用情况

Fig. 4 the solitons interaction to different τ_0 , γ and Ψ_0

参考文献:

- [1] Wang Zhibin. Experimental study of the optical soliton propagation[J]. Applied Laser, 2007, 27(6): 504 - 507. (in Chinese)
王志斌. 光孤子传输的实验研究[J]. 应用激光, 2007, 27(6): 504 - 507.
- [2] Gui Houyi. Soliton communication and looks into the distance[J]. Technology Forward Position, 2005 (3): 19. (in Chinese)
桂厚义. 光孤子通信及其展望[J]. 技术前沿, 2005 (3): 19.
- [3] Gan Guirong, Luo Kai-ji. Variational study on influence of high-order dispersion and fifth-order nonlinearity on propagation properties of Gaussian pulse in optical fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1041 - 1046. (in Chinese)
甘桂蓉, 罗开基. 用变分法研究高阶色散和五阶非线性对高斯脉冲在光纤中传输特性的影响[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1041 - 1046.
- [4] Cai Tuo, Zhao Hua. Simulation the effect of high order dispersion and nonlinear on optical soliton transmission [J]. The Journal of Light Scattering, 2009, 21 (2): 115 - 120. (in Chinese)
蔡托, 赵华. 数值模拟高阶色散和非线性对光孤子传输的影响[J]. 光散射学报, 2009, 21 (2): 115 - 120.
- [5] Cai Tuo, Sang Tian, Zhao Hua. Analysis and discussions on the factors affecting optical soliton propagation [J]. The Journal of Light Scattering, 2009, 22 (1): 11 - 18. (in Chinese)
蔡托, 桑田, 赵华. 影响光孤子传输的因素分析和可能的解决方案[J]. 光散射学报, 2010, 22(1): 11 - 18.
- [6] Cai Tuo, Sang Tian, Zhang Xiaowei. Theoretical analysis on dispersion and non-linearity affecting gauss pulse propagation[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 829 - 833. (in Chinese)
蔡托, 桑田, 张小伟. 色散和非线性效应对高斯脉冲综合影响的理论分析[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 829 - 833.
- [7] Cai Tuo. Analysis and discussions of high order chromatic dispersion and non-linearity on the Gauss chirp pulse propagation[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 401 - 404. (in Chinese)
蔡托. 高阶色散与非线性对高斯脉冲传输特性的影响与讨论[J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 401 - 404.
- [8] Cai Tuo, Sang Tian, Chen Xiuxia, et al. A comprehensive study which eliminate the solitons interaction[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(2): 195 - 199. (in Chinese)
蔡托, 桑田, 陈秀霞, 等. 消除孤子相互作用的综合研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 195 - 199.