

含自频移啁啾超短脉冲间相互作用的数值研究*

李淑青 李 录 李仲豪 周国生

(山西大学物理电子工程学院,太原 030006)

摘 要 采用拟解法给出了 Ginzberg—Landau 方程类孤波解的参数表达式. 通过数值模拟对啁啾超短脉冲间的相互作用进行了研究. 结果表明, 随着相邻孤子间距离的减小, 它们之间的相互作用变得越来越严重. 传统的不等振幅法在一定程度上可以抑制孤子间的相互作用, 通过选取合适的振幅比, 找到了相邻孤子间相互作用平衡的最小距离, 这对提高光纤传输的比特率具有十分重要的意义. 讨论了多孤子间的相互作用, 找到了抑制四孤子之间相互作用的合适振幅比.

关键词 超短脉冲; 孤子; 相互作用; 数值模拟

中图分类号 TN929. 11 **文献标识码** A

0 引言

超短脉冲在光纤通信中具有很广泛的应用前景, 其中它们之间的相互作用一直都是研究的热点课题之一^[1,2]. 对于超短脉冲, 三阶色散(TOD), 非线性色散(SPM), 自陡峭和自频移(SFS)等效应不可忽略. 这时, 通常的高阶非线性薛定谔(HNLS)方程修正为 Ginzberg-Landau 方程. 许多作者^[3-6]已从不同方面分析了 HNLS 方程, 他们各自考虑了 TOD、SPM 和自陡效应, 甚至有人研究了四阶色散. 我们^[7]研究了带有 SFS 的 Ginzberg-Landau 方程, 给出了在任意参数下飞秒啁啾类孤子解的精确表达式, 并对该解的稳定性进行了讨论, 然而对这些解在光纤中的相互作用至今尚未有人研究.

在光孤子通信中减小脉冲的间距, 对提高信号传输的比特率具有十分重要的意义. 本文针对我们在文献[7]中报道的 Ginzberg-Landau 方程在任意参数下的飞秒啁啾类孤子解, 采用数值模拟的方法研究了它们在传输过程中发生的相互作用. 另外, 我们采用不等振幅法找到了孤子间相互作用平衡的最小距离.

1 Ginzberg—Landau 方程

超短脉冲在光纤中的传输特性可由下面的 Ginzberg-Landau 方程描述^[7,8].

$$E_z - i \frac{D}{2} E_{zz} - i |E|^2 E - \delta E - i \sigma E_t - \varepsilon E_{tt} - \chi |E|^2 E - \lambda E_{ttt} - \mu (|E|^2 E)_t - \nu E (|E|^2)_t = 0 \quad (1)$$

这里 $E(z, t)$ 是电场波包, z 是归一化距离, t 是延迟时间. 系数 $D, \delta, \sigma, \varepsilon$ 和 χ 是实数, λ, μ 和 ν 是复数. 系数 $D = \pm 1$ 分别表示反常色散区和正常色散区. $\delta > 0$ 或 $\delta < 0$ 表示系统的线性增益/损耗. σ 和 λ 的虚部 λ_i 与载频 ω_0 和增益中心频率 ω_g 之差成正比. ε 与滤波效应有关, 它反比于增益和光滤波带宽. χ 是有效非线性增益, 它描述非线性增益或吸收. λ 的实部 λ_r 描述三阶色散. μ 的实部 μ_r 是非线性色散项它主要描述在脉冲沿的自陡效应, μ 的虚部 μ_i 描述非线性增益和吸收过程的综合作用. ν 描述自频移. ν 通常置于零. 方程(1)有如下形式的类孤波解^[7]

$$E(z, t) = A_0 \{ \operatorname{sech} \eta(t - \rho z) \}^{1+\varphi} \cdot \exp [i(\Omega z - Kz)] \quad (2)$$

其中方程(2)中的各参数 $A_0, \eta, \Omega, \beta, \rho$ 和 K 分别用来刻画脉冲的振幅、脉宽的倒数、脉冲频率、脉冲的啁啾效应、脉冲的峰值移动和波数, 它们分别由

$$A_0 = \eta \left[\frac{6\lambda_r(1-\beta^2) - \lambda_i\beta(11-\beta^2)}{3\mu_r - \mu_i\beta + 2\nu_r} \right]^{1/2},$$
$$\eta = \left[\frac{-\sigma - 2\varepsilon\Omega + 3\lambda_r\Omega^2}{\lambda_r(1-\beta^2) + 2\lambda_i\beta} \right]^{1/2},$$
$$\rho = \Omega + 3\lambda_r\Omega^2 + [2\lambda_i\beta - \lambda_r(1-\beta^2)]\eta^2,$$
$$K = \frac{1}{2}\Omega^2 + \lambda_r\Omega^3 - \frac{1}{2}[(1+6\lambda_r\Omega)(1-\beta^2) + 4(\varepsilon - 3\lambda_i\Omega)\beta]\eta^2$$

和下面的相容性条件

$$3(\mu_r + \mu_i\beta + 2\nu_r)A_0^2 = [6\lambda_r(1-\beta^2) - \lambda_i\beta(11-\beta^2)]\eta^2,$$
$$(\chi - \mu_r\Omega)A_0^2 = [(\varepsilon - 3\lambda_i\Omega)(2-\beta^2) - \frac{3}{2}(1+6\lambda_r\Omega)\beta]\eta^2,$$

$$(1 + \mu_r\Omega)A_0^2 = \left[\frac{1}{2}(1 + 6\lambda_r\Omega)(2 - \beta^2) + \right.$$

*山西省留学归国基金项目
Tel: 13303460395 Email: wycf@vip.sina.com
收稿日期: 2003-12-02

$$3(\varepsilon - 3\lambda_r \Omega)\beta] \eta^2, \\ \delta - \sigma \Omega - \varepsilon \Omega^2 + \lambda_r \Omega^3 = [(-\varepsilon + 3\lambda_r \Omega)(1 - \beta^2) + \\ (1 + 6\lambda_r \Omega)\beta] \eta^2$$

来确定. 由上述表达式可以看出, 解的存在与啁啾参数 β 的取值有关. 这样, 我们可以通过求解上述代数方程, 确定出系统的有效参数.

本文采用数值演化的方法讨论形如式(2)的类孤波解的相互作用. 为了提高精度, 采用下述对称的分步傅里叶变换算法

$$E(z+h, t) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)\exp(h\hat{N}) \cdot \\ \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)E(z, t)$$

其中线性算符为

$$\hat{D} = i\frac{D}{2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \delta + i\sigma\frac{\partial}{\partial t} + \varepsilon\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \lambda\frac{\partial^3}{\partial t^3},$$

它包括二阶色散、增益/损耗、滤波以及三阶色散等效应, 而非线性算符为

$$\hat{N} = i|q|^2 + \chi|q|^2 + \mu\bar{q}\frac{\partial q}{\partial t} + (\mu + \nu)\frac{\partial |q|^2}{\partial t},$$

其中包括自相位调制、有效非线性增益、自陡峭和自频移等非线性效应. 计算取如下数值^[7]: 脉宽141 fs, 峰值功率138.6 W, 线性损耗1.3152 m⁻¹, 饱和吸收系数0.63153 W⁻¹km⁻¹, 非线性指数1.3 × 10⁻²² (m/v)², 群速色散-6.3761 ps⁻¹km⁻¹, 三阶色散0.79535 ps³km (在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处), 小信号增益1.3147 m⁻¹, 增益带宽20.335 THz, 饱和增益吸收系数0.19411 W⁻¹km. 此时对应于方程(1)中的各系数分别为: $\delta = -0.00151, \sigma = 0.06293, \varepsilon = 0.50967, \chi = 0.19158, \lambda_r = -0.03204, \lambda_l = 0.00772,$

$\mu_r = -0.04137$ 和 $\nu_r = 0.0256, \mu_l = 0, \nu_l = 0$. 我们取初始的脉冲形状为如下形式的同相相邻孤子

$$E(0, t) = A_0 \left\{ \text{sech} \left[\eta \left(t - \frac{q_0}{2} \right) \right] \right\}^{1+\nu} \exp(i\Omega t) + \\ rA_0 \left\{ \text{sech} \left[\eta \left(t + \frac{q_0}{2} \right) \right] \right\}^{1+\nu} \exp(i\Omega t) \quad (3)$$

式中 r 为两个孤子的相对振幅, q_0 是相邻孤子的间距.

2 计算结果及分析

2.1 两个孤子之间的相互作用

2.1.1 等幅时相邻孤子间相互作用平衡的最短距离

在光孤子通信中, 为了提高传输的比特率, 希望孤子之间的距离越小越好. 为此首先在等幅即 $r = 1$ 的条件下寻找孤子之间相互作用平衡的最小距离. 当相邻孤子的间距 $q_0 = 14$, 发现相邻孤子间的相互作用达到平衡, 可以稳定传输, 如图1(a)所示. 当 $q_0 = 7$ 时, 我们传输了1000个色散长度单位, 从中发现, 由于孤子之间的相互作用, 导致振幅刚开始迅速增大, 之后逐渐减小, 约400个色散长度后趋于平衡, 此时由于孤子间的排斥作用致使孤子之间的距离略微增大, 但在400个色散长度之后距离保持不变, 如图1(b)所示. 进一步缩小相邻孤子的间距, 当 $q_0 = 6.8$ 时, 我们发现, 由于孤子之间的相互作用, 同样导致振幅刚开始迅速增大, 但是在传输约250个色散长度后变成了单孤子, 同时振幅逐渐减小趋于稳定, 如图1(c)所示. 由上述的数值结果可以得到, 等幅时相邻孤子间相互作用平衡的最小间距应为 $q_0 = 7$.

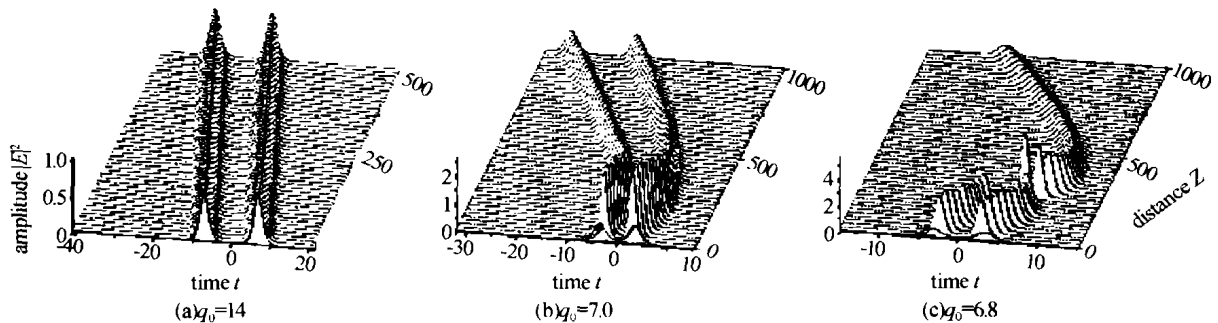


图1 等幅时, 对于不同间隔的相对孤子的演化图

Fig.1 The evolution plots of the neighboring solitons with equal amplitude for different separation

从上面的数值计算结果可以看出, 由方程(2)确定的啁啾超短脉冲间的相互作用与通常的皮秒孤子、飞秒孤子及源啁啾飞秒孤子的相互作用完全不同, 它们不会出现周期性离合, 也不会出现孤子的裂变, 较之源啁啾孤子更稳定, 所以研究它具有重要的实际意义. 通常人们抑制孤子之间的相互作用采用

不等振幅法、不等相位法以及不同偏振法^[9], 其中不等振幅法是最为实用的方法. 下面将采用这种方法来讨论不等振幅对相邻孤子间相互作用的影响.

2.1.2 不同的振幅比对相互作用的影响

大量的数值计算表明: 相邻孤子间的相互作用对振幅比十分敏感, 我们分下列四种情况来讨论:

1) 当 $r = 1.03, 1.07, 1.14, 1.23, 1.27, 1.31, 1.32$ 时, 出现如图 2(a) 的情况: 两个孤子相互碰撞后, 能量聚积, 最终导致两个孤子合而为一. 2) 当 $r = 1.06, 1.15, 1.17, 1.19, 1.26$ 时, 出现了一个新奇的现象, 如图 2(b) 所示, 两个孤子相互碰撞后, 能量弥散, 当传输一定距离后, 能量又重新逐渐聚积, 约 450 个色散长度单位后, 其中一个孤子又逐渐出现. 3) 当 $r = 1.00, 1.01, 1.02, 1.04, 1.05, 1.08, 1.09, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13, 1.18$ 时, 出现了如图 1(b) 所

示的情况, 相邻孤子的振幅在刚开始迅速增大然后逐渐减小最终趋于平衡. 4) 当 $r = 1.16, 1.20, 1.22$ 时, 如图 2(c) 所示, 相邻孤子的振幅刚开始没有明显增大, 而是在约 50 个色散长度单位后迅速增大, 之后逐渐趋于平衡, 并保持相邻孤子的间距不变. 另外, 当振幅比大于 1.33 时相邻孤子的相互作用变得更加严重导致不能继续传输. 因此实际中必须选择合适的振幅比.

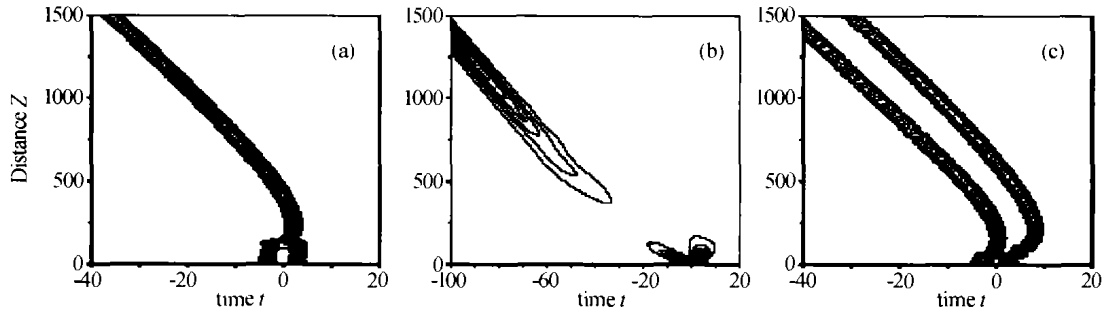


图 2 当时 $q_0 = 7.0$, 不等振幅的相邻孤子随距离演化的等高图

Fig. 2 The contour plots of the neighboring solitons with unequal amplitude for $q_0 = 7.0$

2.1.3 不等幅相邻孤子间相互作用平衡的最小距离

经过进一步的数值计算我们发现选择合适的振幅比可以进一步减小相邻孤子间相互作用平衡的距离. 如图 3 所示, 给出了当 $r = 1.1, q_0 = 6.0$ 时, 相邻孤子的演化情况. 从图中可以看出, 在经过一段距离的调整后, 相邻孤子的间距保持不变. 这个结果表明, 通过选取合适的振幅比找到了相邻孤子间相互作用平衡的最小距离. 这对提高传输的比特率具有十分重要的意义.

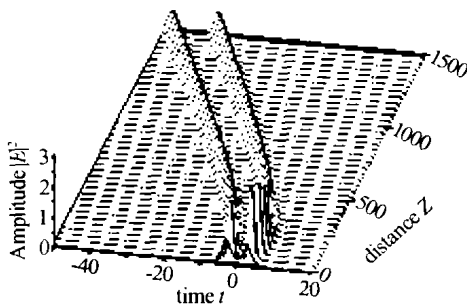


图 3 当 $q_0 = 6.0, r = 1.1$ 时, 相邻孤子的演化图

Fig. 3 The evolution plot of the neighboring solitons for $q_0 = 6.0, r = 1.1$

2.2 多孤子之间的相互作用

由于实际系统中传输的信息是大量的脉冲串, 这就涉及到多孤子之间的相互作用, 为此有必要研究一下多孤子之间的相互作用. 取相邻四孤子的初始脉冲形式如下

$$E(0, t) = r_1 A_0 \left\{ \operatorname{sech} \left[\eta \left(t - \frac{3}{2} q_0 \right) \right] \right\}^{1+i\theta} + r_2 A_0 \left\{ \operatorname{sech} \left[\eta \left(t - \frac{1}{2} q_0 \right) \right] \right\}^{1+i\theta} + r_3 A_0 \left\{ \operatorname{sech} \left[\eta \left(t + \frac{1}{2} q_0 \right) \right] \right\}^{1+i\theta} + r_4 A_0 \left\{ \operatorname{sech} \left[\eta \left(t + \frac{3}{2} q_0 \right) \right] \right\}^{1+i\theta},$$

式中 r_1, r_2, r_3, r_4 是相邻四孤子的相对振幅, q_0 是相邻孤子间距. 数值分析表明: 相邻四孤子的演化情况更为复杂. 如图 4(a) 给出了初始振幅比为 1.00:1.00:1.00, 孤子间距为 $q_0 = 7.0$ 的演化图, 图中出现了中间的两个孤子先合成单孤子, 之后又和右边的孤子结合到一起的复杂情形. 如果保持间距不变取初始振幅比为 1.41:1.00:1.41:1.00, 虽然可以抑制孤子之间的碰撞但不能消除它们之间的相互作用, 从图 4(b) 中可以看出, 中间两个孤子在传输约 900 个色散长度单位后又合到了一起. 如果取初始振幅比为 1.00:1.10:1.00:1.10, 就可以抑制孤子之间的相互作用, 如图 4(c) 所示; 尽管右边两个孤子在传输到约 100 个色散长度时振幅有明显增大, 但经过一定距离的调整后, 演化为相互分离的形式. 在数值计算中我们还发现不同的振幅分配, 对孤子传输的抑制效果也不一样, 当取初始振幅比为 1.00:1.10:1.00:1.10 时, 情况与图 4(c) 完全不同, 右边两个孤子一开始就完全消失. 由此可见, 在实际的光孤子传输过程中必须选择合适的振幅比, 而且振幅比的顺序不能颠倒.

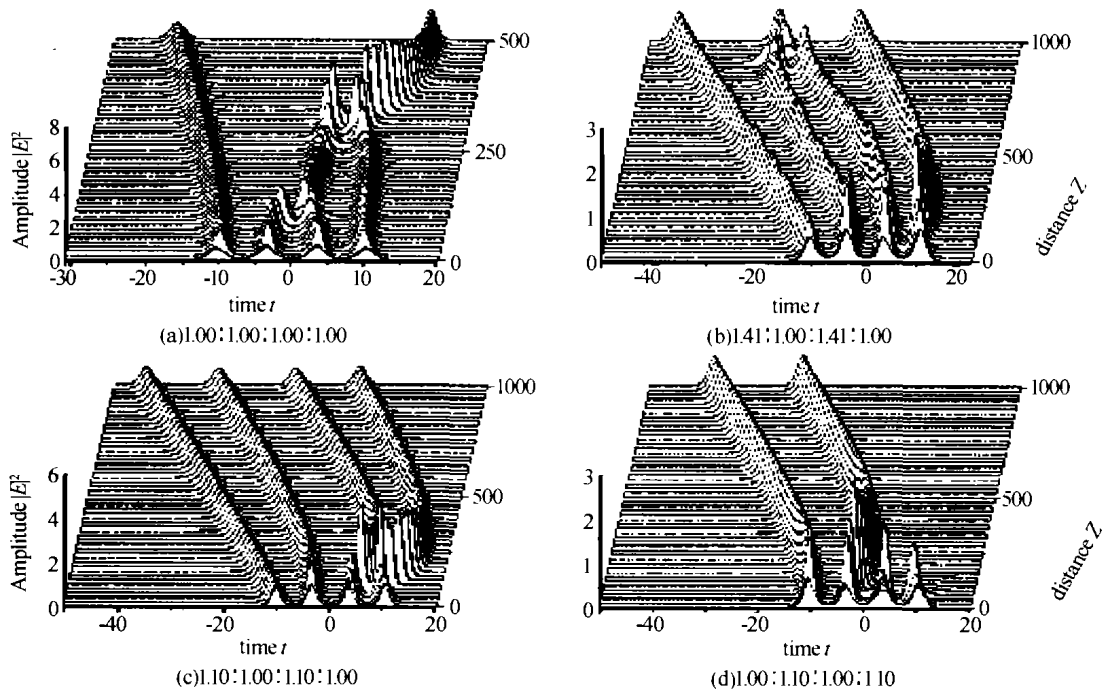


图4 等间隔不同振幅比的相邻四孤子相互作用的演化图

Fig. 4 The evolution plots of four neighboring solitons with unequal amplitudes

2.3 无啁啾脉冲的演化情况

从上面的图中可以看出,不论怎样选取振幅比都不能消去最初的振幅增大,为此我们取如下形式的无啁啾初始脉冲

$$E(0, t) = A_0 \operatorname{sech} \left[\eta \left(t - \frac{q_0}{2} \right) \right] + A_0 \operatorname{sech} \left[\eta \left(t + \frac{q_0}{2} \right) \right]$$

如图5所示,仍不能消去开始振幅增大的现象,可见不是啁啾引起,而应该是系统本身所决定的.

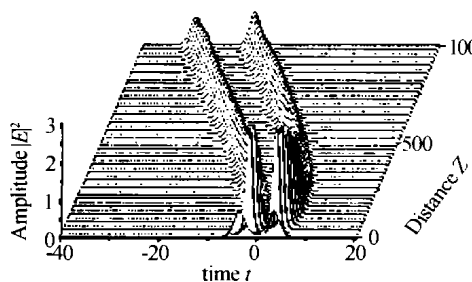


图5 当 $q_0 = 7, r = 1.0$ 时,无啁啾相邻二孤子的演化图

Fig. 5 The evolution plot of the neighboring solitons

的意义. 在研究四孤子相互作用时,我们也找到了孤子间相互作用平衡的合适振幅比而且发现振幅比的顺序不能颠倒.

参考文献

- 1 Hasegawa A, Kodama Y. Solitons in optical communications. New York: Oxford University Press, 1995
- 2 Agrawal G P. Nonlinear fiber optics. New York: Academic Press, 1995
- 3 Li Z H, Li L, Tian H P, et al. New types of solitary wave solutions for the higher order nonlinear Schrodinger equation. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**(18): 4096 ~ 4099
- 4 田惠平, 李仲豪, 王刚, 等. 飞秒光脉冲间相互作用的数值研究. *光子学报*, 2001, **1**(5): 513-517
Tian H P, Li Z H, Wang G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **1**(5): 513-517
- 5 薄明霞, 李仲豪. 源啁啾飞秒孤子间相互作用的数值研究. *量子光学学报*, 2002, **8**(1): 1-7
Bo M X, Li Z H. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2002, **8**(1): 1-7
- 6 许志勇, 李录. 高阶效应影响下飞秒孤子间的相互作用. *光子学报*, 2002, **31**(z2): 335 ~ 339
Xu Z Y, Li L. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(z2): 335 ~ 339
- 7 Li Z H, Li L, Tian H P, et al. Chirped femtosecond solitonlike laser pulse form with self-frequency shift. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**(26): 263901-1 ~ 263901-4
- 8 Gagnon L, Blanger P A. Adiabatic amplification of optical solitons. *Phys Rev A*, 1991, **43**(11): 6187 ~ 6193
- 9 杨祥林, 赵阳. 非线性单模光纤中源啁啾孤子相互作用的数值研究. *光学学报*, 1997, **26**(Z1): 513-516
Yang X L, Zhao Y. *Acta Optica Sinica*, 1997, **26**(Z1): 513 ~ 516

3 结论

以上的分析表明:啁啾超短脉冲之间的相互作用既不会像皮秒孤子一样周期性离合,也不会像飞秒孤子一样先吸引后一直排斥,更不会像源啁啾飞秒孤子一样产生分裂,它们在经过一定距离的调整后达到稳定状态. 传统的不等振幅法可以在一定程度上可以抑制孤子之间的相互作用. 当选取合适的振幅比时,我们找到了相邻孤子相互作用平衡的最小距离,这对提高光纤传输的比特率具有十分重要

Numerical Research on the Interaction of Chirped Ultrashort Laser Pulses with Self-frequency Shift

Li Shuqing, Li Lu, Li Zhonghao, Zhou Guosheng

College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006

Received date: 2003-12-02

Abstract The interaction of chirped ultrashort laser pulses with self-frequency shift is investigated by numerical simulation method. The results show that unequal amplitude method can reduce the interaction between neighboring solitons with chirp. At the same time, the shortest separation between neighboring solitons by unequal amplitude method is found, which is very important to increase byte rate in optical soliton telecommunication systems.

Keywords Ultrashort laser pulse; Interaction; Soliton; Numerical method



Li Shuqing was born in Oct. 1978 in Shanxi Province, China. She received B. S degree from Shanxi University in 2002. She is studying for M. S. degree in College of Physics and Electronics Engineering of Shanxi University. Her research is mainly focused on soliton telecommunication in optical fiber.