

基于谱过滤方法的 Kuznetsov-Ma 孤子 向准基态孤子转化研究

杨光晔¹ 李 禄² 田晋平³

¹山西医科大学物理教研室, 山西 太原 030001; ²山西大学理论物理研究所, 山西 太原 030006

³山西大学计算机中心, 山西 太原 030006

摘要 基于非线性薛定谔方程的 Kuznetsov-Ma 孤子解, 得出零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子形式, 给出零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子与准基态孤子之间的关系。利用谱过滤的方法研究单模光纤中 Kuznetsov-Ma 孤子到准基态孤子转化的动力学行为。结果表明: 在 Kuznetsov-Ma 孤子的最大压缩位置处获取的零背景脉冲能够以准基态孤子的形式在光纤中稳定地传输, 并且随着 Kuznetsov-Ma 孤子物理行为控制参数的增大, 更加接近于基态孤子的形式。通过稳定性分析发现, 在小的初始白噪声扰动下, 准基态孤子会以一定速度稳定传输。

关键词 非线性光学; 非线性薛定谔方程; Kuznetsov-Ma 孤子; 谱过滤方法; 准基态孤子

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0619002

Study on Transformation of Kuznetsov-Ma Soliton to Quasi-Fundamental Soliton Based on Spectral-Filtering Method

Yang Guangye¹ Li Lu² Tian Jinping³

¹Department of Physics, Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030001, China

²Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

³The Computer Center, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract Based on the Kuznetsov-Ma soliton solution of the nonlinear Schrödinger equation, the Kuznetsov-Ma soliton with zero background is investigated. The relation between the Kuznetsov-Ma soliton with zero background and the quasi-fundamental soliton is concluded. The dynamics of the Kuznetsov-Ma soliton to the quasi-fundamental soliton in the single mode fiber by means of the spectral-filtering method is considered. The results show that the pulse with zero background extracted from the Kuznetsov-Ma soliton at the maximally compressed position can propagate stably in optical fiber in form of quasi-fundamental soliton. And the pulse tends to the form of the fundamental soliton with the increase of the physical behavior governing parameter. Through the analysis of stability, it is found that the quasi-fundamental soliton has a stable propagation velocity under small random perturbations applied to the initial condition.

Key words nonlinear optics; nonlinear Schrodinger equation; Kuznetsov-Ma soliton; spectral-filtering method; quasi-fundamental soliton

OCIS codes 190.4360; 060.5530; 190.5530

1 引 言

非线性薛定谔(NLS)方程是描述非线性物理现象的一个重要模型, 被广泛地应用于光学、凝聚态物理、等离子体等诸多方面。特别地, 在光学中 NLS 方程可以用来描述光波在克尔介质中的传输特性。研究表明, 在反常色散介质中, NLS 方程存在亮孤子解, 它的形成源自于反常色散和非线性克尔效应的精确平

收稿日期: 2016-02-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61505101, 61475198)、山西医科大学博士启动基金(03201401)、山西医科大学基础医学院“331 基础医学科技培植基金计划”(201427)、山西医科大学青年基金(02201302)

作者简介: 杨光晔(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非线性动力学方面的研究。E-mail: yang_gy@sohu.com

衡^[1-2]。除此之外,NLS 方程还存在一类有限背景的孤子解,包括 Akhmediev 呼吸子^[3]、Peregrine 怪波^[4]以及 Kuznetsov-Ma 孤子^[5-6]。这类孤子解的相关研究最近被相继报道^[7-16]。

Akhmediev 呼吸子是嵌于连续波中的脉冲串。由于连续波的调制不稳定性致使嵌于其中的脉冲串呈指数增长,故而不能在介质中稳定传输^[17-18]。这样,如何从有限背景孤子中获取能够稳定传输的脉冲串就成为人们研究的热点之一。早在 20 世纪 80 年代,人们就开始关注利用调制不稳定性获取孤子脉冲串的问题^[19-20]。最近,Mahnke 等^[21]研究了由连续波的调制不稳定性形成的 Akhmediev 呼吸子衰变为孤子的可能性。实际上,孤子与有限背景孤子主要的不同是背景波的植入,所以消除背景波是问题的关键。基于此,人们提出了利用偏振技术或者拉曼效应消除背景波的方法^[22-23]。最近,有实验报道了可以利用延迟线干涉来消除背景^[24]。同时,在理论上提出可以利用谱过滤去除背景波的方法^[25]。

以上主要基于 Akhmediev 呼吸子来研究孤子脉冲串的获取,其中孤子脉冲串的稳定性和间距的制约。然而,对于 Kuznetsov-Ma 孤子相关的研究很少。本文从 Kuznetsov-Ma 孤子动力学特征出发,利用谱过滤方法研究 Kuznetsov-Ma 孤子转化为孤子的可能性。

2 NLS 方程的 Kuznetsov-Ma 孤子

在皮秒范畴,光脉冲在无损耗的单模光纤中的传输可以用 NLS 方程来描述^[1-2]:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \gamma |\psi|^2 \psi = 0, \quad (1)$$

式中, $\psi(z, t)$ 是脉冲包络的慢变振幅, z 和 t 是群速度移动参考系下的距离和时间。 γ 是非线性系数, β_2 是群速度色散系数。在反常色散区下,即 $\beta_2 < 0$,该方程有一个特殊的 Kuznetsov-Ma 孤子解^[5-6]:

$$\psi(a, Z, t) = \sqrt{P_0} [1 - M(a, Z, t)] \exp(iZ), \quad (2)$$

$$M(a, Z, t) = \frac{2(2a - 1)\cos(bZ) + ib\sin(bZ)}{\sqrt{2a} \cosh(\omega t) - \cos(bZ)}, \quad (3)$$

式中, P_0 是入射光场功率, $Z = (z - z_0)/L_{NL}$,其中归一化于非线性长度 $L_{NL} = T_0^2/|\beta_2|$,时间尺度 $T_0 = (|\beta_2|/\gamma P_0)^{1/2}$, z_0 为一个任意实数。 a 为大于 1/2 的实的控制参数,用于确定 Kuznetsov-Ma 孤子物理行为的调制频率 ω 和指数增长与衰减率 b ,分别满足关系 $\omega = \sqrt{2a - 1}\omega_c$ 和 $b = \sqrt{8a(2a - 1)}$,式中 $\omega_c = 2/T_0$ 。

Kuznetsov-Ma 孤子解是一个在时间上局域、空间上周期变化的具有背景呼吸孤子,其中周期为 $z_{mod} = 2\pi L_{NL}/b$,并且在 $z = nz_{mod} + z_0$ (n 为整数)处达到极大峰值,产生一个最大压缩脉冲,其表达式为:

$$\psi_{max}(a, Z', t) = \sqrt{P_0} (1 - M_{max}) \exp(iZ'), \quad (4)$$

$$M_{max} = \frac{2(2a - 1)}{\sqrt{2a} \cosh(\omega t) - 1}, \quad (5)$$

式中 $Z' = 2n\pi/b$ 。图 1(a)给出了(2)式表示的 Kuznetsov-Ma 孤子的呼吸演化图,其中呼吸周期为 $z_{mod} = 1.851$ km。图 1(a)子图给出了其最大压缩位置 $z = 1.298$ km 处,最大压缩脉冲 ψ_{max} 的强度分布,其中 $P_0 = 1$ W, $z_0 = 5$, $a = 1$ 。这里选用了标准商用石英 SMF-28 光纤的参数,其中在 1550 nm 波长的群速度色散 $\beta_2 = -21.4$ ps²/km,非线性参数 $\gamma = 1.2$ W⁻¹ · km⁻¹^[10,26]。从图中可以看出存在一个非零的背景波 $\psi_B = \sqrt{P_0} \exp(iZ')$ 。这表明 Kuznetsov-Ma 孤子是由 1 个孤子和 1 个连续波背景叠加而形成的^[27]。正是由于这个连续波背景所引起的调制不稳定性致使孤子脉冲在时间上压缩和展宽,形成呼吸的演化特性。

下面考虑去除掉这个连续波背景 $\psi_B = \sqrt{P_0} \exp(iZ')$ 后,它的动力学演化特性。在这种情况下,可以得到一个零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子,其表达式如下:

$$\psi'(a, Z, t) = \sqrt{P_0} M(a, Z, t) \exp(iZ). \quad (6)$$

图 1(b)给出了(6)式表示的零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子的演化图,其中呼吸周期也为 $z_{mod} = 1.851$ km。同样地,图 1(b)子图给出了零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子在最大压缩位置 $z = 1.298$ km 处,最大压缩脉冲 $\psi'_{max}(a, Z', t) = \sqrt{P_0} M_{max} \exp(iZ')$ 的强度分布。需要说明的是这个零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子

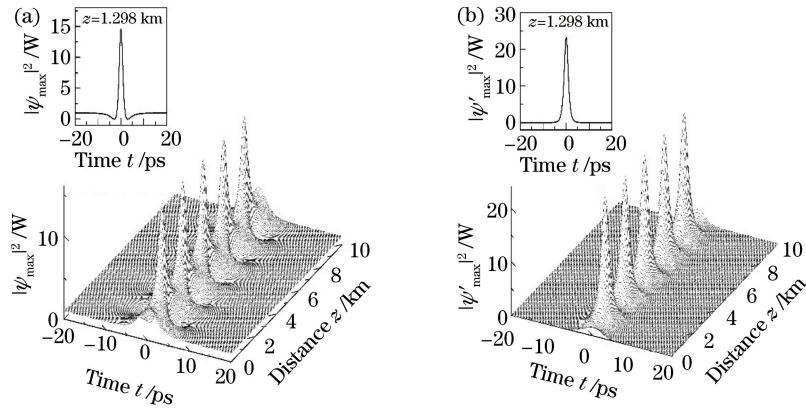


图 1 (a) (2)~(3)式表示的 Kuznetsov-Ma 孤子的演化图,子图为最大压缩位置 $z=1.298$ km 处的强度分布;

(b) (6)式表示的零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子的演化图,子图为最大压缩位置 $z=1.298$ km 处的强度分布

Fig. 1 (a) Evolution of Kuznetsov-Ma soliton given by Eq. (2) ~ (3), subgraph is corresponding distributions of intensities at maximally compressed position at $z=1.298$ km; (b) evolution of Kuznetsov-Ma soliton with zero background given by Eq. (6); subgraph is corresponding distributions of intensities at maximally compressed position at $z=1.298$ km

$\psi'(a, Z, t)$ 不是(1)式 NLS 方程的解,这表明在光纤中不存在这种形式的传输行为。所以,需要考虑在特定位置处的脉冲在光纤中的传输特性,具体考虑零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子在最大压缩位置处脉冲的传输行为,并讨论其转化为基态孤子的可能性^[21]。

为此,计算零背景的 Kuznetsov-Ma 孤子在最大压缩位置处脉冲 ψ'_{\max} 的峰值功率 P 和半峰全宽 (FWHM) B ,分别为:

$$P = |\psi'_{\max}(a, Z', 0)|^2 = 4P_0 (\sqrt{2a} + 1)^2, \quad (7)$$

$$B = \frac{2}{\omega} \operatorname{arccosh} \left[\frac{\sqrt{2}(\sqrt{2a} - 1) + 1}{\sqrt{2a}} \right]. \quad (8)$$

众所周知,无量纲的孤子阶数 N 与 sech 型脉冲的峰值功率 P' 和半峰全宽 B' 有如下关系:

$$N = \sqrt{\frac{\gamma P'}{|\beta_2|}} \frac{B'}{2 \ln(1 + \sqrt{2})}, \quad (9)$$

根据孤子理论,当孤子阶数 N 在 $0.5 < N < 1.5$ 之间时,任意形状的脉冲都将最终趋于基态孤子 ($N=1$)^[1-2], 此过程可以看作是准基态孤子的演化。按照这个理论,假设零背景的最大压缩脉冲具有与 sech 型孤子相似的特征,并根据(7)~(9)式,可以粗略计算出它的孤子阶数为:

$$N = \frac{\sqrt{2a} + 1}{\sqrt{2a} - 1 \ln(1 + \sqrt{2})} \operatorname{arccosh} \left[\frac{\sqrt{2}(\sqrt{2a} - 1) + 1}{\sqrt{2a}} \right]. \quad (10)$$

图 2 给出了零背景的最大压缩脉冲的峰值功率 P 、半峰全宽 B 和孤子阶数 N 随控制参数 a 的变化关系,其

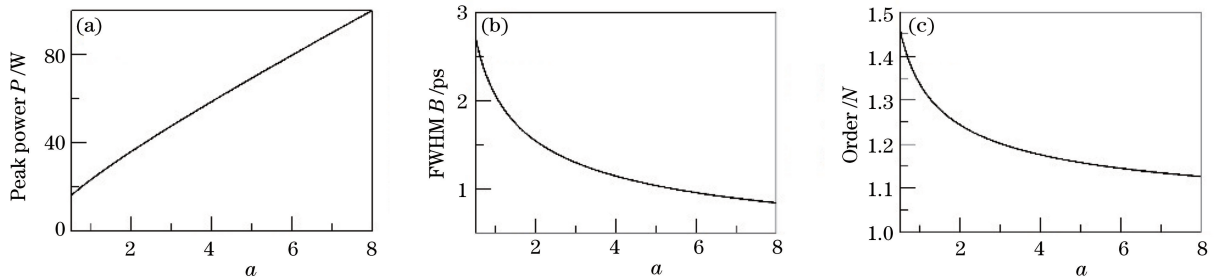


图 2 零背景最大压缩脉冲的(a) 峰值功率 P ; (b) 半峰全宽 B ; (c) 孤子阶数 N 分别随控制参数 a 的变化

Fig. 2 (a) Peak power P ; (b) FWHM B ; (c) soliton order N of maximally compressed pulse with zero background versus the governing parameter a

中 $P_0=1$ W。这里 $a=1/2$ 时,属于极值情况,对应的是由 Peregrine 怪波获取的零背景最大压缩脉冲的特征参数 $P=16$ W, $B=2.72$ ps, $N=1.46$ 。从中可以看出,当 $a>1/2$ 时,随着 a 的增加,峰值功率近似线性地增大,半峰全宽非线性地变窄,同时孤子阶数逐渐趋近于 1。因此,这里将零背景的最大压缩脉冲看作为一个准基态孤子。

3 谱过滤产生的零背景准基态孤子脉冲及其演化

本节研究 Kuznetsov-Ma 孤子在最大压缩位置处消除背景波后所得到的零背景脉冲的传输情况,其中去除背景波的方法为谱过滤法。为此,对(4)~(5)式表示的 Kuznetsov-Ma 孤子的最大压缩处的脉冲进行傅立叶变换,得到其在频域中的表达式如下:

$$\tilde{\Psi}_{\max} = \sqrt{P_0} [\delta(\nu) - \tilde{M}_{\max}] \exp(iZ'), \quad (11)$$

$$\tilde{M}_{\max} = \frac{2\pi \sinh[2\pi \arccos(-1/\sqrt{2a})\nu/\omega]}{\sinh(2\pi^2\nu/\omega)}, \quad (12)$$

式中, ν 代表频域中的频率, $\delta(\nu)$ 是 δ 函数,对应于时域(4)~(5)式中的连续波背景 $\psi_B = \sqrt{P_0} \exp(iZ')$ 的部分。这样,当从频谱中把这一部分消去之后,在时域中就可以得到零背景的最大压缩脉冲。

在数值模拟中具体做法是:取(2)~(3)式表示的 Kuznetsov-Ma 孤子在 $z=z_{\text{mod}}/4+z_0$ 处的形式为初始激发脉冲:

$$\psi_{\text{in}}(a, Z'', t) = \sqrt{P_0} [1 + \chi \operatorname{sech}(\omega t) \exp(-i\pi/2)] \exp(iZ''), \quad (13)$$

式中 $\chi = b/\sqrt{2a}$, $Z'' = \pi/2b$ 。该初始脉冲是一个双曲正割脉冲和一个平面波的叠加,并且它们之间有一个相位差 $\pi/2$ 。然后,通过数值求解(1)式表示的 NLS 方程,并获取在最大压缩位置处脉冲的频域表达式。在该表达式中消去连续波背景所对应的频谱(该过程在实验上可以通过特殊制备的长周期光纤光栅来实现^[28-29]),从中获取的零背景的最大压缩脉冲,并让其在光纤中传输,结果如图 3 所示。从中可以看出 Kuznetsov-Ma 孤子到准基态孤子的演化过程,其中图 3(a)给出了 Kuznetsov-Ma 孤子在第 5 个最大压缩位置($z=8.792$ km)处通过谱过滤方法获取的零背景最大压缩脉冲的演化图;可以看出由 Kuznetsov-Ma 孤子所获取的准基态孤子可以稳定地传输。图 3(b)给出了对应的频谱演化图,从中可以看出时域的压缩对应着频域的展宽,最后转化为宽频的准基态孤子;图 3(c)给出了去除背景前后最大压缩脉冲的强度分布,黑实线

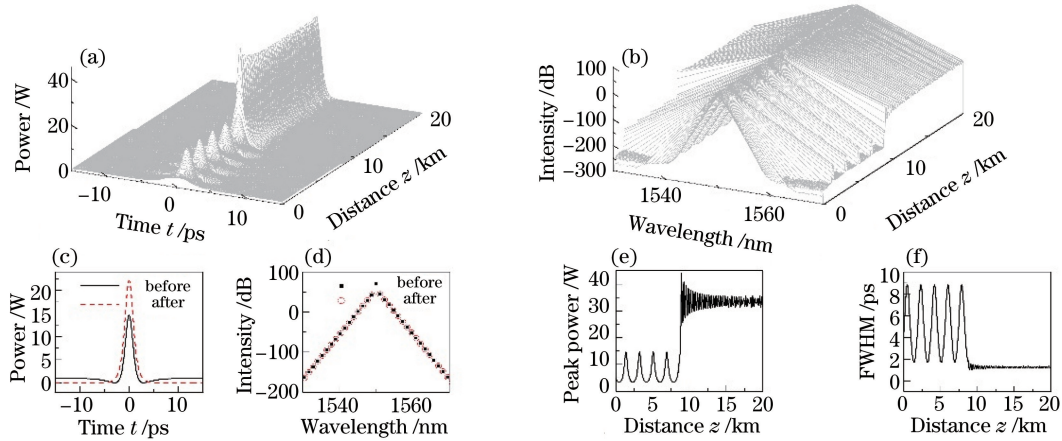


图 3 (a) Kuznetsov-Ma 孤子在第 5 个最大压缩位置 $z=8.792$ km 处通过谱过滤方法所获取的准基态孤子的演化图; (b) 对应的频谱强度演化图; (c) 谱过滤前后最大压缩脉冲的强度分布; (d) 谱过滤前后的频谱强度分布; (e) 对应的峰值功率演化; (f) 对应的半峰全宽演化

Fig. 3 (a) Evolution of quasi-fundamental soliton extracted from Kuznetsov-Ma soliton at the fifth maximally compressed position at $z=8.792$ km by means of spectral-filtering method; (b) corresponding evolution for spectral intensity; (c) profiles of maximally compressed pulse before and after spectral-filtering; (d) spectral profiles of maximally compressed pulse before and after spectral-filtering; (e) corresponding evolution of peak power; (f) corresponding evolution of FWHM

代表之前的脉冲,红虚线代表之后的脉冲;图 3(d)给出了谱过滤前后相应的频谱强度分布,黑点代表之前的脉冲频谱,红圈代表之后脉冲频谱,其中波长为1550 nm处的谱中心的振幅被消除;图 3(e)给出了演化过程中峰值功率的变化,从图中可以看出在第 5 个最大峰值处去除背景波后,脉冲峰值在一定值附近振荡;图 3(f)给出了演化过程中脉冲半峰全宽的变化。这里参数和图 1 参数一致。

为了进一步考察 Kuznetsov-Ma 孤子向准基态孤子转化的稳定性,考虑了在噪声干扰下的长距离传输。图 4(a)给出了当(13)式表示的初始条件加入相对振幅 0.05% 的白噪声之后,50 km 距离的传输情况。从中发现在噪声干扰下通过谱过滤法从 Kuznetsov-Ma 孤子的最大压缩位置处获取的准基态孤子同样可以稳定传输。所不同的是此时具有一定传输速度。这是因为当小的白噪声存在时,在该最大压缩位置处所获取的零背景脉冲的中心位置发生偏移所致。如图 4(a)子图所示,黑实线代表过滤之前的脉冲,红虚线代表过滤之后脉冲。同样地,从图 4(b)和(c)可以看出,小的白噪声对脉冲峰值功率演化后的影响较大,而对半峰全宽演化后的影响较小。这里参数和图 1 参数一致。

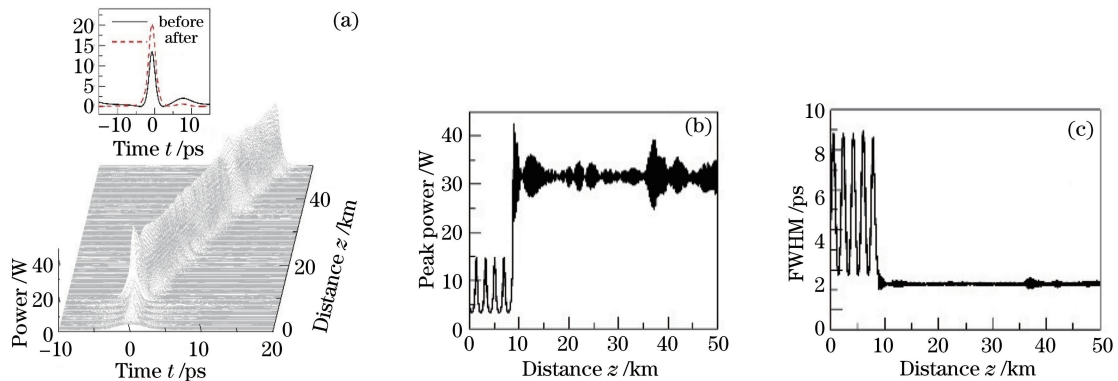


图 4 (a) (13)式表示的初始条件加入相对振幅 0.05% 的白噪声后,在 $z=8.792$ km 处获取的准孤子的演化图,其子图表示谱过滤前后的脉冲强度分布;(b) 对应的峰值强度演化;(c) 对应的半峰全宽演化

Fig. 4 (a) Evolution of quasi-fundamental soliton at $z=8.792$ km under perturbing initial condition in Eq. (13) by added white-noise at amplitude level of 0.05%, subgraph is pulse intensity distribution before and after spectral-filtering; (b) corresponding evolution of peak power; (c) corresponding evolution of FWHM

4 结 论

综上所述,根据 NLS 方程的 Kuznetsov-Ma 孤子解的特征,阐明了 Kuznetsov-Ma 孤子和准基态孤子之间的联系。通过对 Kuznetsov-Ma 孤子最大压缩位置处的非零背景脉冲频谱分析,给出了中心频率和连续背景波之间的关系。利用谱过滤的方法,实现了 Kuznetsov-Ma 孤子到准基态孤子的转化。结果表明,通过利用一个简单的初始激发产生 Kuznetsov-Ma 孤子,然后对最大压缩位置处非零背景脉冲的中心频率进行过滤,获取的零背景脉冲可以以准基态孤子的形式在光纤中稳定地传输,并且随着控制参数 a 的增大,越接近于基态孤子的形式。通过稳定性研究发现,小的噪声扰动下,最大压缩脉冲中心位置的漂移会使转化的准基态孤子具有一定速度的传输。结果对光纤中 Kuznetsov-Ma 孤子的应用性研究具有一定理论指导作用。

参 考 文 献

- 1 Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. Boston: Elsevier Academic Press, 2007, 120-140.
- 2 Mitschke F. Fiber optics: physics and technology[M]. Heidelberg: Springer, 2009: 160-173.
- 3 Akhmediev N N, Korneeov V I. Modulation instability and periodic solutions of the nonlinear Schrödinger equation[J]. Theor Math Phys, 1986, 69(2): 1089-1093.
- 4 Peregrine D H. Water waves, nonlinear Schrödinger equations and their solutions[J]. J Aus Math Soc Ser B, 1983, 25(1): 16-43
- 5 Kuznetsov E A. Soliton in a parametrically unstable plasma[J]. Sov Phys Dokl, 1977, 22(9): 507-508.
- 6 Ma Ya C. The perturbed plane-wave solutions of the cubic nonlinear Schrödinger equation[J]. Stud Appl Math, 1979, 60(1): 43-58.

- 7 Dudley J M, Genty G, Dias F, *et al.*. Modulation instability, akhmediev breathers and continuous wave supercontinuum generation[J]. *Opt Express*, 2009, 17(24): 21497-21508.
- 8 Kibler B, Fatome J, Finot C, *et al.*. The peregrine soliton in nonlinear fibre optics[J]. *Nat Phys*, 2010, 6(10): 790-795.
- 9 Hammani K, Kibler B, Finot C, *et al.*. Peregrine soliton generation and breakup in standard telecommunications fiber [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(2): 112-114.
- 10 Kibler B, Fatome J, Finot C, *et al.*. Observation of Kuznetsov-Ma soliton dynamics in optical fibre[J]. *Sci Rep*, 2012, 2: 463.
- 11 Kibler B, Chabchoub A, Gelash A, *et al.*. Superregular breathers in optics and hydrodynamics: omnipresent modulation instability beyond simple periodicity[J]. *Phys Rev X*, 2015, 5(4): 041026.
- 12 Zhong W P, Belic M, Malomed B A. Rogue waves in a two-component Manakov system with variable coefficients and an external potential[J]. *Phys Rev E*, 2015, 92(5): 053201.
- 13 Toenger S, Godin T, Billet C, *et al.*. Emergent rogue wave structures and statistics in spontaneous modulation instability [J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 10380.
- 14 Wang Y, Song L J, Li L, *et al.*. High-power pulse trains excited by modulated continuous waves[J]. *J Opt Soc Am B*, 2015, 32(11): 2257-2263.
- 15 Zhang Jiefang, Lou Jihui. Line optical rogue wave and transmission controlling in inhomogeneous nonlinear wave guides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0919001.
张解放, 楼吉辉. 非均匀非线性波导中线光学畸形波及其传播控制[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0919001.
- 16 Hu Wencheng, Zhang Jiefang, Huang Wenhua, *et al.*. Transmission control of line optical rogue waves in two-dimension graded-index waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0719001.
胡文成, 张解放, 黄文华, 等. 二维梯度折射率光波导中线光畸形波的传播控制[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0719001.
- 17 Dianov E M, Mamyshev P V, Prokhorov A M, *et al.*. Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 1989, 14(18): 1008-1010.
- 18 Mamyshev P V, Chernikov S V, Dianov E M, *et al.*. Generation of a high-repetition-rate train of practically noninteracting solitons by using the induced modulational instability and Raman self-scattering effects[J]. *Opt Lett*, 1990, 15(23): 1365-1367.
- 19 Hasegawa A. Generation of a train of soliton pulses by induced modulational instability in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 1984, 9(7): 288-290.
- 20 Greer E J, Patrick D M, Wigley P G J, *et al.*. Generation of 2 THz repetition rate pulse trains through induced modulational instability[J]. *El Lett*, 1989, 25(18): 1246-1248.
- 21 Mahnke C, Mitschke F. Possibility of an Akhmediev breather decaying into solitons[J]. *Phys Rev A*, 2012, 85(3): 033808.
- 22 Stolen R H, Botineau J, Ashkin A. Intensity discrimination of optical pulses with birefringent fibers[J]. *Opt Lett*, 1982, 7(10): 512-514.
- 23 Mamyshev P V, Chernikov S V, Dianov E M, *et al.*. Generation of a high-repetition-rate train of practically noninteracting solitons by using the induced modulational instability and Raman self-scattering effects[J]. *Opt Lett*, 1990, 15(23): 1365-1367.
- 24 Fatome J, Kibler B, Finot C. High-quality optical pulse train generator based on solitons on finite background[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(10): 1663-1665.
- 25 Yang G Y, Li L, Jia S T, *et al.*. Control of high power pulse extracted from the maximally compressed pulse in a nonlinear optical fiber[J]. *Rom Rep Phys*, 2013, 65(3): 902-914.
- 26 Erkintalo M, Hammani K, Kibler B, *et al.*. Higher-order modulation instability in nonlinear fiber optics[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107(25): 253901.
- 27 Yang G Y, Li L, Jia S T. Peregrine rogue waves induced by the interaction between a continuous wave and a soliton[J]. *Phys Rev E*, 2012, 85(4): 046608.
- 28 Song Dawei, Zhao Wen, Liu Yanlei, *et al.*. Long period fiber grating fabricated at 200 °C based on high temperature metal glue[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(5): 050603.
宋大伟, 赵 雯, 刘艳磊, 等. 利用高温金属胶 200 °C 下制备长周期光纤光栅[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(5): 050603.
- 29 Lu Jianguo, Gu Zhengtian, Gao Kan. Spectral characteristics of cascaded tilted long period fiber gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(10): 1005005.
陆建国, 顾铮天, 高 侃. 级联倾斜长周期光纤光栅传输谱特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1005005.