

# 脉冲扰动下连续波的演化及超短脉冲串产生

钟先琼 向安平 程科 蔡青

(成都信息工程学院光电技术学院, 四川 成都 610225)

**摘要** 从光纤中非线性薛定谔方程出发,采用分步傅里叶算法数值模拟了具有高斯型连续谱的光脉冲扰动下连续波在光纤中的波形和频谱演化。结果表明,在光纤负色散区,由于调制不稳定性,该脉冲扰动下的连续波也可能像正弦波扰动下的那样演化成高重复率超短脉冲串,但构成脉冲串的各脉冲并不像正弦波扰动时那样等宽、等高、等间距。当孤子参数太小或在正色散区时,则不能形成脉冲串,只能形成衰减的振荡结构。随着孤子参数的不同,超短脉冲串及振荡结构的特点也会不同。这些演化规律与传统正弦光扰动连续波及高光脉冲的情形明显不同。

**关键词** 非线性光学;脉冲扰动;调制不稳定性;超短脉冲串

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.081903

## Evolutions of Continuous-Wave Perturbed by Pulse and Generation of Ultra-Short Pulse Trains

Zhong Xianqiong Xiang Anping Cheng Ke Cai Qing

(College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology,  
Chengdu, Sichuan 610225, China)

**Abstract** Based on the nonlinear Schrödinger equation and the stepped Fourier method, the shape and spectrum evolutions of continuous-wave perturbed by an optical pulse with Gaussian-typed continuum spectrum in an optical fiber are numerically simulated. The results show that, due to modulation instability in the anomalous dispersion region of the optical fiber, this pulse perturbed continuous-wave can also evolve into high-repetition-rate pulse trains, which is similar to the case of sine perturbed one. Being different from the latter case, however, the generated pulses are not equal to each other in terms of widths, intensities, and intervals. When soliton parameters are too small or the optical wave is in the normal dispersion region, only attenuation oscillation structures instead of pulse trains can be generated. And the characteristics of pulse trains or oscillation structures will vary with the soliton parameters. These evolution characteristics are obviously different from those of conventional sine perturbed continuous-waves and Gaussian optical pulses.

**Key words** nonlinear optics; pulse perturbation; modulation instability; ultra-short pulse train

**OCIS codes** 190.4370; 190.3100; 190.5530; 190.4380

## 1 引言

光在各种新型介质<sup>[1]</sup>及光纤<sup>[2~4]</sup>中的非线性传输在超短脉冲串产生、超连续谱产生及脉冲压缩等众多领域有着广泛的应用。其中,高重复率的超短光脉冲串在高速光通信系统、频率计量<sup>[5]</sup>以及光学成像和现代仪器<sup>[6]</sup>等诸多领域有重要的应用。为此,人们发展了多种技术来获得高重复率的超短光脉冲串。典型的有各种被动和主动锁模的激光器,尤其是光纤激光器<sup>[7~10]</sup>,还有增益开关的激光二极管<sup>[11]</sup>,基于偏振调制器和强度调制器的方法<sup>[6]</sup>。另一种方法是应用光纤中的调制不稳定性效应,该方法不需要昂贵的调制器和电子设备,重复率可调,是一种结构简单、方便有效的全光化方法。在数值验证调制不稳定性产生高重复率的超短光脉冲串时,人们通常在连续波背景上加上弱的正弦波作为光扰动<sup>[12~14]</sup>,实际上即是假设光扰动具有离

收稿日期: 2011-02-28; 收到修改稿日期: 2011-03-10; 网络出版日期: 2011-06-20

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(210186)资助课题。

作者简介: 钟先琼(1969—),女,博士,教授,主要从事激光与光通信及非线性光传输等方面的研究。

E-mail: zxqlxh@yeah.net

散的双色频谱。罕见连续谱光扰动的报道<sup>[15]</sup>。而更一般、更实际的光扰动应具有连续谱,例如当用具有洛伦兹型或高斯型频谱的弱激光脉冲去扰动强背景连续波时即属于此情况。在文献[15]中,虽然在具有连续谱的光脉冲扰动下进行了数值模拟,但仅限于一阶孤子参数及光纤负色散区的情形。本文在文献[15]的基础上,分正色散和负色散区,数值研究了脉冲扰动下连续波在光纤中的波形和频谱演化,并进行了比较分析。

## 2 数值计算与讨论

光波在光纤中传输时满足下列非线性薛定谔方程

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + a_1 |U|^2 U = 0, \quad (1)$$

式中  $U$  是归一化的慢变光振幅,  $\beta_2$  是光纤的二阶群速度色散系数,  $a_1$  是与孤子阶数  $N$  相关的孤子参数且为  $a_1 = L_D/L_{NL} = N^2$ ,  $L_D$  和  $L_{NL}$  分别是光纤的色散长度和非线性长度,  $\xi = z/L_D$  和  $\tau$  分别是归一化的距离和时间,  $z$  为距离。sgn 表示符号函数。假设(1)式的输入为下列受到高斯脉冲扰动后的连续波<sup>[15]</sup>:

$$U(0, \tau) = 1 + A_m \exp(-\tau^2/2), \quad (2)$$

式中  $A_m$  是扰动的幅度。由(2)式可见,该输入的频谱形状是高斯函数与一个中心频率处的冲击函数相加,前者即代表扰动具有高斯型连续谱。以(2)式为输入,对(1)式采用分步傅里叶算法,即可数值研究该连续谱扰动下的连续波的波形和频谱演化特征。

### 2.1 负色散区 ( $\beta_2 < 0$ )

由图 1 可见,当孤子参数  $a_1$  较小时,如图 1(a), (b) 所示,脉冲扰动下的连续光波在传输中形成中心为一

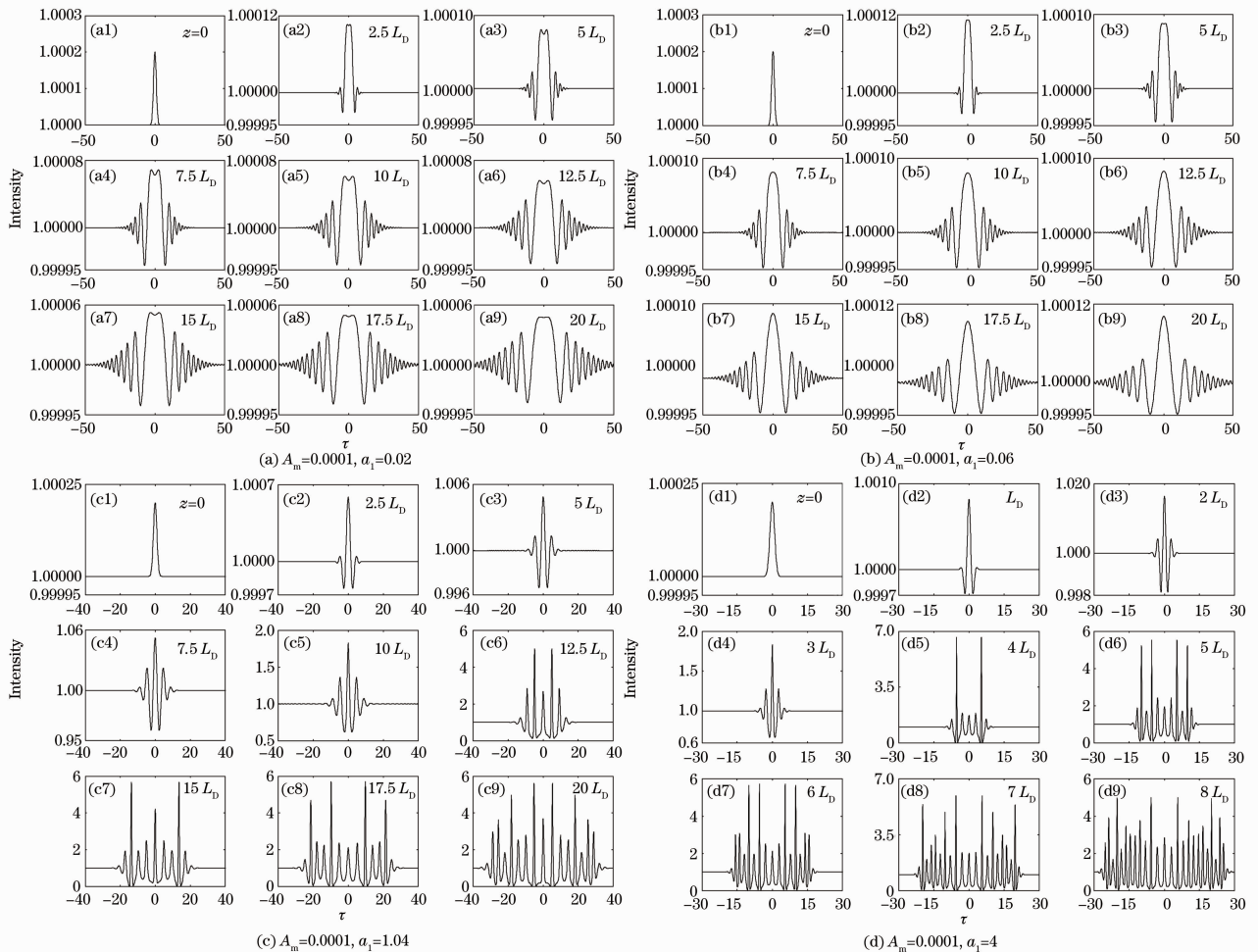


图 1 不同孤子参数  $a_1$  下光纤负色散区的光波波形演化

Fig. 1 Shape evolutions of optical waves in anomalous dispersion region of optical fibers for different soliton parameters  $a_1$

个较宽脉冲、两边呈衰减式振荡的结构,随着距离的增加,衰减式振荡结构增加,而不能形成超短脉冲串。随着参数  $a_1$  变小,中心脉冲变宽,振荡结构的衰减速度变慢。当孤子参数  $a_1$  较大时,如图 1(c),(d)所示,脉冲扰动下的连续光波在传输中将逐渐演变成高重复率的超短脉冲串,随着距离的增加,脉冲数目增多。更多的数值模拟还表明,参数  $a_1$  越大,形成相同数目脉冲所需光纤距离越短,脉冲宽度越小,脉冲串的重复率也越高。与正弦波扰动情形相比,此处形成的脉冲串的各脉冲不再是等宽、等高、等间距的。

以上特征可以根据调制不稳定性特性得到一定解释。当光纤的群速度色散系数、非线性系数给定后,最大不稳定性功率增益系数及参数  $a_1$  均与光功率成正比,故最大不稳定性功率增益系数与参数  $a_1$  成正比。当参数  $a_1$  较小时,不稳定性功率增益系数很小,即扰动的增长非常慢,这点也可从图 2(a),(b)中变化很小的频谱演化图明显看到。而且相对于较弱的非线性效应而言,此时色散的主导作用将导致光波中心脉冲展宽,超短脉冲串不能形成。当参数  $a_1$  较大时,不稳定性功率增益系数大,扰动的增长很快,如图 2(c),(d)的频谱演化图所示,而且从频谱开始出现的两个优势边带峰也可以判断是调制不稳定性作用的结果,同时还可看出,随着距离的增加,基阶边带增长足够时将带动更高阶边带出现,但由于此处光波具有连续频谱,则除了最快增长的扰动外,其他扰动频率也会获得一定程度的增长。而且参数  $a_1$  越大,扰动增长越快,非线性效应导致的正啁啾与负色散区色散的共同作用使脉冲更快地压缩并促使超短脉冲串更早形成。

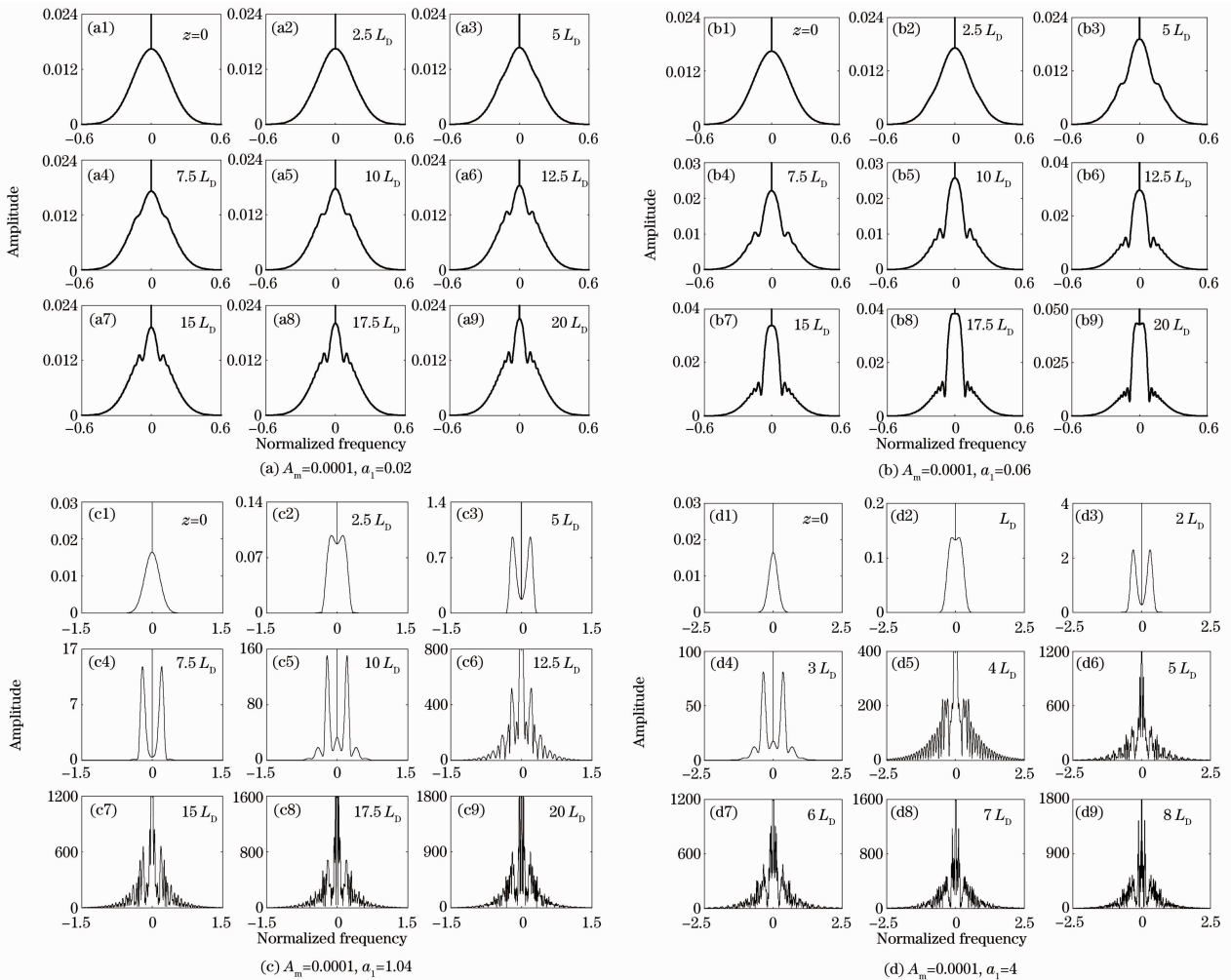


图 2 不同孤子参数  $a_1$  下光纤负色散区的光波频谱演化

Fig. 2 Spectral evolutions of optical waves in anomalous dispersion region of optical fibers for different soliton parameters  $a_1$

## 2.2 正色散区 ( $\beta_2 > 0$ )

在正色散区无调制不稳定性,超短脉冲串无法形成,也只能形成衰减式振荡结构,如图 3 所示。不同于图 1(a),(b)的是,随着距离的增加,中心脉冲变宽并分裂成明显的两部分,而且随着参数  $a_1$  增大,中心分开

的两个脉冲相距变远,两边振荡结构减少。尽管此时无调制不稳定性,但从频谱图4可以看出,靠近载频的扰动成分仍会出现一定程度的增长,参数 $a_1$ 越大,扰动增长速度越快,并在两侧出现尖峰状结构。相比于负色散区形成衰减式振荡结构的情形,当其他参数相同时,正色散时扰动增长得更快些,且参数 $a_1$ 及距离越大,扰动增长速度及频谱形状的差异也越大。与正弦光扰动连续波及单纯的高斯光脉冲的情形相比可知,这里的时域和频谱演化规律具有明显的不同。

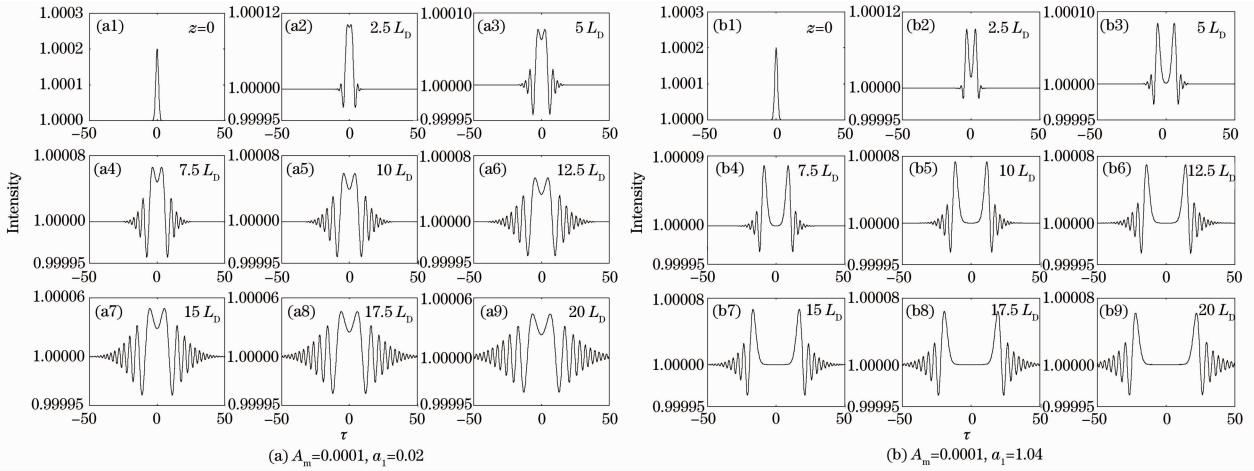


图3 不同孤子参数 $a_1$ 下光纤正色散区的光波波形演化

Fig. 3 Shape evolutions of optical waves in normal dispersion region of optical fibers for different soliton parameters  $a_1$

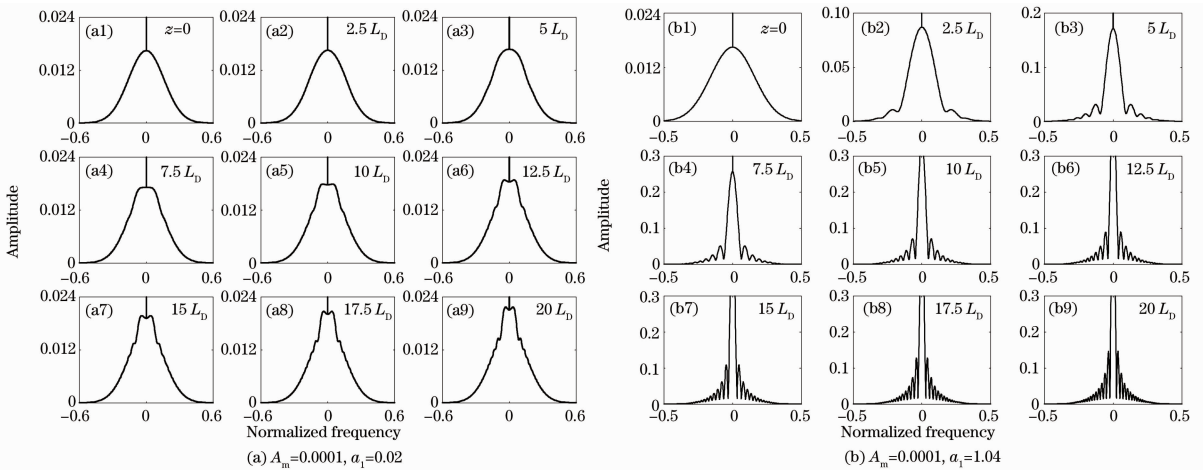


图4 不同孤子参数 $a_1$ 下光纤正色散区的光波频谱演化

Fig. 4 Spectral evolutions of optical waves in normal dispersion region of optical fibers for different soliton parameters  $a_1$

### 3 结 论

分光纤正色散区和负色散区,数值研究了在具有高斯型频谱的脉冲扰动下连续波的波形和频谱演化,并作了一定分析。研究表明,视所在色散区及孤子参数 $a_1$ 的不同,可能演化成高重复率孤子脉冲串,但形成的脉冲并不像正弦波扰动时那样等宽、等高、等间距,脉冲数目有限且随距离的增大而增多;也可能形成两边为衰减式振荡的结构。在负色散区,当孤子参数 $a_1$ 较大时,扰动增长速度快,光波会逐渐演化成脉冲数目随距离增加的高重复率超短脉冲串,频谱也将出现明显的调制不稳定性优势边带峰,且高阶边带峰也会随基阶边带峰的增强而出现。参数 $a_1$ 越大,扰动增长越快,形成相同数目脉冲所需光纤距离越短,脉冲宽度越小,脉冲串的重复率也越高。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Jinggui, Wen Shuangchun, Xiang Yuanjiang *et al.*. Influence of dispersive magnetic permeability on spatiotemporal instability in metamaterials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2908~2913  
张景贵, 文双春, 项元江 等. 超常介质中色散磁导率对时空不稳定性的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2908~2913
- 2 Deng Ying, Wang Jianjun, Lin Honghuan *et al.*. Analysis of the temporal and spectral characteristics of output pulse for an optical pulse cleaner under different initial pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105001  
邓颖, 王建军, 林宏焕 等. 初始脉冲对光克尔脉冲净化器时谱特性影响分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0105001
- 3 Sun Tingting, Wang Zhi, Li Chuanqi. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by using quasi-continuous pump [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 154~159  
孙婷婷, 王志, 李传起. 准连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 154~159
- 4 Qu Kenan, Zhang Weigang, Liu Zhuolin *et al.*. Dispersion compensation in ultra-short optical pulse compression system and transmitting system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 449~453  
屈柯南, 张伟刚, 刘卓琳 等. 超短光脉冲压缩系统和传输系统的色散补偿[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 449~453
- 5 D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka *et al.*. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, **288**(5466): 635~639
- 6 S. L. Pan, J. P. Yao. Generation of a chirp-free optical pulse train with tunable pulse width based on a polarization modulator and an intensity modulator[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(14): 2186~2188
- 7 K. K. Gupta, N. Onodera, K. S. Abedin *et al.*. Pulse repetition frequency multiplication via intracavity optical filtering in AM mode-locked fiber ring lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **14**(3): 284~286
- 8 J. Azana, M. A. Muriel. Temporal self-imaging effects: theory and application for multiplying pulse repetition rates[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2001, **37**(4): 728~744
- 9 Y. D. Gong, P. Shum, D. Y. Tang *et al.*. 660 GHz soliton source based on modulation instability in a short cavity[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2480~2485
- 10 Y. D. Gong, P. Shum, D. Y. Tang *et al.*. Closed spaced ultra-short bound solitons from DI-NOLM figure 8 fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**(4-6): 297~302
- 11 M. Suzuki, H. Tanaka, K. Utaka *et al.*. Transform-limited 14 ps optical pulse generation with 15 GHz repetition rate by InGaAsP electroabsorption modulator[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(11): 1007~1008
- 12 W. P. Hong. Modulation instability of optical waves in the high dispersive cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **213**(1-3): 173~182
- 13 Zhong Xianqiong, Xiang Anping. Generation of ultra-short optical pulse trains induced by optical perturbations in optical fibers with quintic nonlinearity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1946~1950  
钟先琼, 向安平. 五阶非线性光纤中光扰动所致超短脉冲串的产生[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1946~1950
- 14 A. Hasegawa. Generation of a train of soliton pulses by induced modulation instability in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(7): 288~290
- 15 Xianqiong Zhong, Anping Xiang. Generation of high-repetition-rate pulse trains through the continuous-wave perturbed by a weak Gaussian pulse in an optical fiber[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(1): 014203