

文章编号: 0258-7025(2008)12-1946-05

# 五阶非线性光纤中光扰动所致超短脉冲串的产生

钟先琼 向安平

(成都信息工程学院光电技术系, 四川 成都 610225)

**摘要** 从光纤中包含五阶非线性效应的扩展非线性薛定谔方程出发, 采用分步傅里叶算法, 数值模拟了连续光波的幅度受到正弦光扰动的调制后在光纤中演化分裂成超短脉冲串的过程, 探讨了五阶非线性效应和正弦调制周期对脉冲串形成和演化特点以及相应频谱的影响。结果表明, 与三阶非线性相比, 正五阶非线性使形成超短脉冲串的最佳光纤长度缩短, 形成的单个脉冲宽度更窄、峰值功率更高, 负五阶非线性则相反。正弦调制周期将影响脉冲串的重复率和最佳光纤距离。随传输距离的增加, 单个脉冲可能分裂成两个甚至三个分脉冲, 在主脉冲之间还可能出现一定数量的峰值功率弱的次脉冲。就频谱特性而言, 正(负)五阶非线性可增多(减小)光波频率成分、加宽(窄化)频谱; 视主脉冲有无分裂以及次脉冲的存在与否, 频谱的形状也会不同。

**关键词** 非线性光学; 超短光脉冲串; 分步傅里叶算法; 五阶非线性; 正弦光扰动

中图分类号 O437; TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083512.1946

## Generation of Ultra-Short Optical Pulse Trains Induced by Optical Perturbations in Optical Fibers with Quintic Nonlinearity

Zhong Xianqiong Xiang Anping

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

**Abstract** Starting from the extended nonlinear Schrödinger equation in which the quintic nonlinearity effect is included, the evolution and splitting process of continuous optical wave which is amplitude perturbed by the sine optical wave into ultra-short optical pulse trains in optical fibers is numerically simulated by adopting the split-step Fourier algorithm. The effects of the quintic nonlinearity and the modulation period of the sine optical wave on the generation and evolution of ultra-short optical pulse trains and the corresponding spectra are investigated. The results show that, in comparison with the case of cubic nonlinearity only, the positive quintic nonlinearity can shorten the optimal fiber length required to form the pulse trains and make every pulse shorter in width and higher in peak power, while the negative quintic nonlinearity takes the opposite. The sine modulation period may influence the pulse repetition rate and the optimal fiber length. With the increase of the propagation distance, every single pulse may split into two and even three sub-pulses. Moreover, some small pulses with weak peak powers may appear among the main pulses. In terms of the frequency spectra, the positive (negative) quintic nonlinearity can make the number of frequency components increase (decrease) and the spectral width wide (narrow). Depending on whether the main pulses split and the small pulses exist or not, the spectra take on different shapes.

**Key words** nonlinear optics; ultra-short optical pulse trains; split-step Fourier algorithm; quintic nonlinearity; sine optical perturbation

## 1 引言

高重复频率超短光脉冲串在高速、大容量光孤

子通信系统以及光计算系统中有重要的应用。因此, 对产生高重复频率超短光脉冲串的深入研究具

收稿日期: 2008-01-15; 收到修改稿日期: 2008-06-11

基金项目: 四川省教育厅自然科学重点项目(2006A124), 四川省科技厅应用基础项目(05JY029-084)和成都信息工程学院科技发展基金(KYTZ20060604)资助项目。

作者简介: 钟先琼(1969-), 女, 四川人, 教授, 博士, 主要研究方向为激光与光通信及非线性光学。

E-mail: zxqlxh@yeah.net

有重要的实际价值和意义。众所周知, 光纤中色散和非线性光 Kerr 效应的相互作用在一定条件下将产生调制不稳定性<sup>[1~4]</sup>, 导致光场的弱扰动随距离呈指数式增长, 使连续或准连续的光分裂成周期性的脉冲序列。因此, 可以利用光纤中的调制不稳定性产生高重复频率的超短光脉冲串。与其他传统的电或光电的方法相比, 该方法简单、方便、不需要昂贵的调制器和电子器件, 是一种全光化的方法, 同时, 获得的脉冲重复频率可以高达几十吉赫兹~几十太赫兹, 而且可通过调节光扰动的调制周期使脉冲重复频率可调<sup>[5]</sup>。利用光纤中的调制不稳定性产生孤子式脉冲串<sup>[5~8]</sup>及制作调制不稳定性激光器<sup>[6, 9, 10]</sup>的研究很多, 但主要限于光纤的三阶非线性效应。研究表明, 当入射光较强, 或在非线性系数相对较高的光纤中, 即使中等强度的光入射, 也需考虑五阶甚至更高阶非线性的影响<sup>[11]</sup>。近年来, 人们对五阶非线性下的光孤子传输<sup>[12]</sup>、调制不稳定性<sup>[13~17]</sup>等进行了研究。

本文从光纤中包含五阶非线性效应的扩展非线性薛定谔方程出发, 采用分步傅里叶算法, 数值模拟了连续光波的幅度受到正弦光扰动的调制后在光纤中演化分裂成超短脉冲串的过程, 探讨了五阶非线性效应和正弦调制周期对脉冲串形成和演化特点的影响, 对脉冲形成和演化过程中相应的频谱也作了数值模拟和分析。

## 2 理论模型

光纤中包含五阶非线性的扩展非线性薛定谔方程可表示为<sup>[13]</sup>

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma_1 |A|^2 A + \gamma_2 |A|^4 A = 0, \quad (1)$$

式中,  $A$  为光脉冲慢变包络,  $T$  为脉冲坐标系中的时间,  $z$  为光纤传输距离,  $\beta_2$  为二阶群速度色散系数,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  分别为光纤的三阶和五阶非线性系数。作下列变量代换

$$U = \frac{A}{\sqrt{P_0}}, \xi = \frac{z}{L_D} = \frac{z |\beta_2|}{T_0^2}, \tau = \frac{T}{T_0}, \quad (2)$$

式中,  $U$ ,  $\xi$  和  $\tau$  分别为归一化光振幅、归一化光纤长度和归一化时间,  $L_D$  为光纤色散长度,  $P_0$  为光的入纤功率,  $T_0$  为脉冲宽度。将(2)式代入(1)式, 可得

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + a_1 |U|^2 U + a_2 |U|^4 U = 0, \quad (3)$$

式中  $\text{sgn}$  表示符号函数, 参数  $a_1 = L_D/L_{NL1}$ , 光纤的三阶非线性长度  $L_{NL1} = 1/(\gamma_1 P_0)$ ,  $a_2 = \text{sgn}(\gamma_2) L_D/L_{NL2}$ , 光纤的五阶非线性长度  $L_{NL2} = 1/(|\gamma_2| P_0^2)$ 。光纤中调制不稳定性一般发生在负色散区, 故应有  $\beta_2 < 0$ 。从(1)式出发, 利用线性稳定性分析法<sup>[1, 14]</sup>, 可推知五阶非线性下的调制不稳定性功率增益为

$$g(\Omega) = |\beta_2 \Omega| \sqrt{\Omega_c^2 - \Omega^2}, \quad (4)$$

式中,  $\Omega$  为调制角频率, 截止角频率  $\Omega_c$  满足

$$\Omega_c^2 = \frac{4\gamma_1 P_0}{|\beta_2|} + \frac{4\gamma_2 P_0^2}{|\beta_2|}. \quad (5)$$

设初始条件是幅度受到外界正弦光扰动调制的连续波, 即满足<sup>[8]</sup>

$$U(0, \tau) = 1 + A_m \sin\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_m}\right), \quad (6)$$

式中,  $A_m$  为调制深度,  $\tau_m$  为调制周期。在初始条件(6)式下, (3)式很难获得解析解, 但是, 根据讨论调制不稳定性产生脉冲串的常用方法<sup>[8]</sup>, 即对(3)式采用分步傅里叶算法数值求解可获得受扰动的连续波在光纤中的波形和频谱演化过程。

## 3 数值模拟结果及讨论

计算中的参数为  $A_m = 0.2$ ,  $a_1 = 1$ 。图 1 给出了不同参数  $\tau_m$  和  $a_2$  下的光波波形演化图, 每个小图都由六个分图构成。若假设  $\gamma_1$  和  $P_0$  给定, 则  $a_2$  参数值的变化即反映了五阶非线性系数  $\gamma_2$  的变化。由图 1(a)~(f)可见, 随着传输距离的增加, 受正弦光扰动调制的连续光波由于感应调制不稳定性而逐渐演化成等高等宽脉冲序列, 且每个脉冲的宽度逐渐变窄, 峰值功率逐渐增大, 在某个最佳距离处达到最窄。按照图 1(a)~(f)的次序, 形成最窄脉冲的最佳归一化光纤长度依次约为 2.0, 2.3, 3.9, 3.0, 3.8, 5.1, 这些值作为精确值的一种数值逼近和实际中的一种参考是具有一定意义的。可见, 当调制周期相等时, 与只有三阶非线性情形相比, 正五阶非线性使形成超短脉冲串的最佳光纤长度缩短, 连续波演化成超短脉冲的过程加快。同时, 还可以看出, 正五阶非线性也使形成的单个脉冲宽度更窄, 峰值功率更高。而负五阶非线性的作用则相反。光扰动调制周期越短, 或调制频率越高, 则脉冲重复频率越高, 且脉冲重复频率与光扰动调制频率相等。因此, 正五阶非线性的存在以及高调制频率(或短调制周期)的选取更有利于产生高重复频率超短脉冲串从而更有利于高速光纤通信系统的需要。但由图 1

(g)~(i)可见,当光扰动的调制频率过高时,光波随传输距离的增加而周期性振荡,不能产生超短脉冲串,这与线性稳定性分析中调制不稳定性一般存在着截止频率的结论是一致的,所以形成的超短脉冲串的重复率是有上限的。用这种感应调制不稳定性法产生脉冲串的缺点在于,脉冲含有较高的连续波基座。图1显示,在最佳传输距离之后,随传输距离的继续增加,脉冲串中的每个单脉冲可能分裂成两个甚至三个亚脉冲,这种脉冲分裂在五阶非线性为

正和扰动调制周期较大时显得更为明显,在某些传输距离处,分裂成的两个或三个亚脉冲变得几乎等高宽,如图1中(d4),(e4),(d6)。另外,在主脉冲之间还可能出现一定数量峰值功率较弱的次脉冲,随距离的增加,次脉冲的数量和强度都会变化,在某些距离处,次脉冲可能变得较强。这种次脉冲的产生和变强在负五阶非线性时较为明显。当没有五阶非线性且其他参数的选取与文献[8]中的一致时,模拟结果与该文献一致。

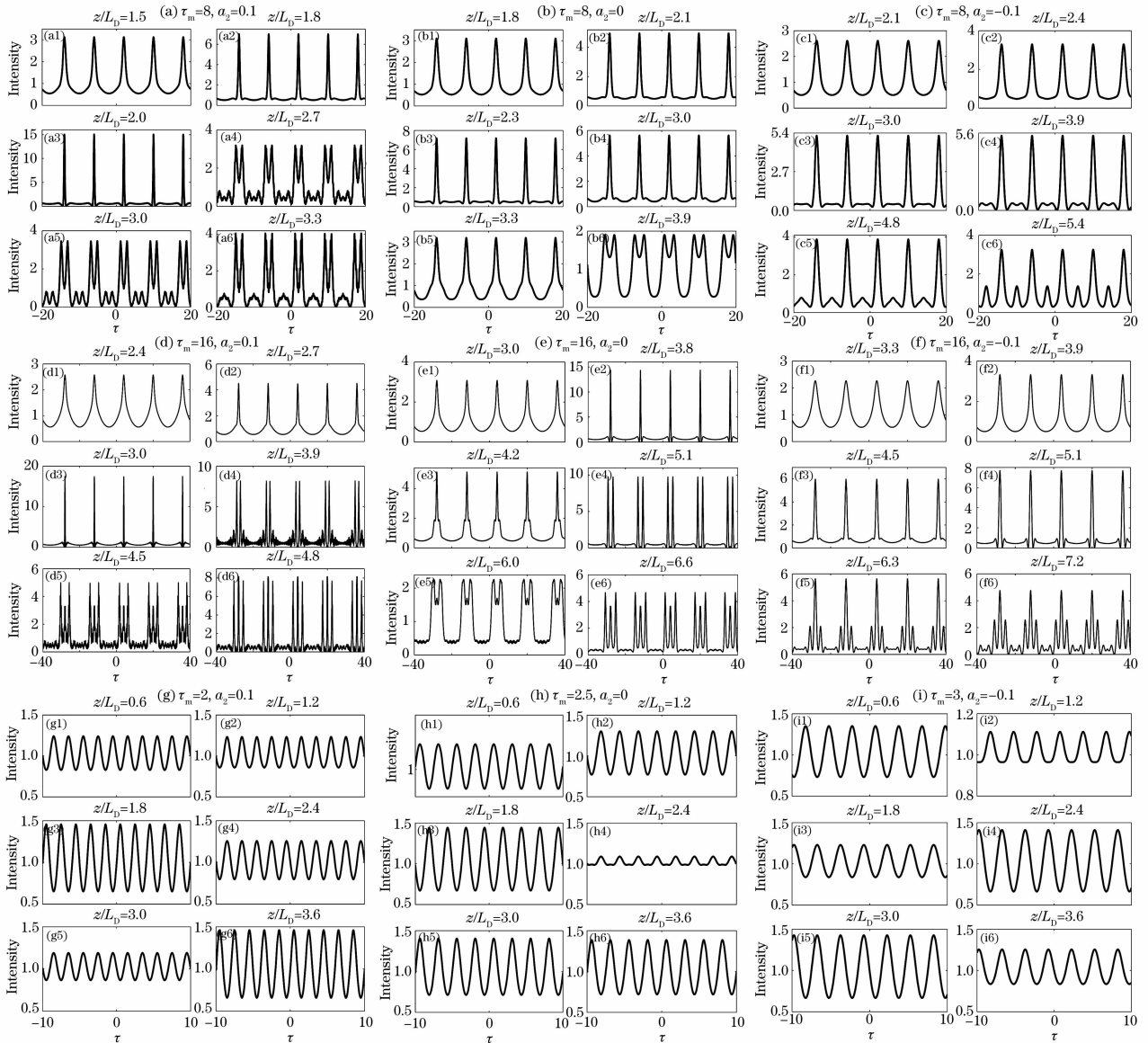


图1 不同调制周期  $\tau_m$  和参数  $a_2$  下光波的波形演化

Fig.1 Shape evolution of optical wave for different modulation periods  $\tau_m$  and parameters  $a_2$

从频域来看,超短脉冲串的形成与调制不稳定性引起的谱线旁瓣产生密切相关。因此,图2给出了不同参数  $\tau_m$  和  $a_2$  下的光波频谱演化图,每个小图也由六个分图构成,参数分别与图1中各分图对

应。由图2(a)~(f)可见,光波演化中形成的是离散的对称频谱,相比较而言,当五阶非线性为正时,新的频率成分最多,频谱最宽,五阶非线性为负时,情况相反,无五阶非线性时的情形则介于两者之间。

在形成最佳超短光脉冲之前,随距离增加,新的频率成分增多,频谱变宽。在最佳距离处,中心频率即连续波的能量一般消耗得很厉害,如图(b3), (c4), (f4)所示。在主脉冲无分裂和主脉冲间无次脉冲的情况下,一般是越靠近中心的频率成分能量越大,但对于有主脉冲分裂和有次脉冲的情况,则频谱形状

可能呈现不同的特点,即某些频率成分的能量非常小甚至为零,而在远离中心频率的某些地方,又出现一些频率成分,如图2中(a4)~(a6), (d4)~(d6)。而由图2(g)~(i)可见,当光扰动的调制频率过高而不能产生超短脉冲串时,对应的频谱中产生的新频率成分很弱很少,几乎观察不到。

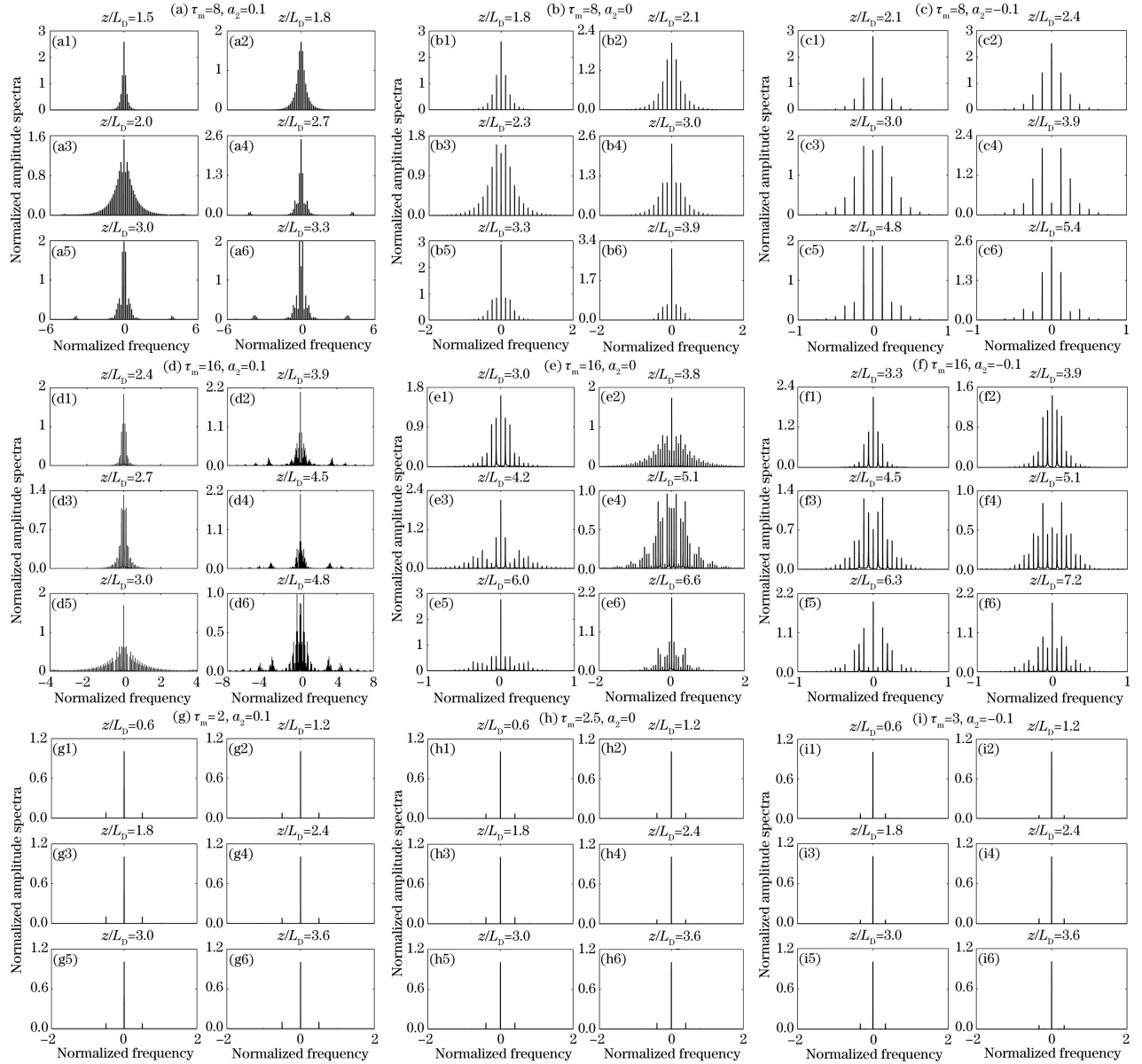


图2 不同调制周期  $\tau_m$  和参数  $a_2$  下光波的频谱演化

Fig. 2 Spectra evolution of optical wave for different modulation periods  $\tau_m$  and parameters  $a_2$

## 4 结论

在考虑五阶非线性的情况下,采用分步傅里叶算法,数值模拟和讨论了连续光波的幅度受到正弦光扰动的调制后在光纤中演化分裂成超短脉冲串时的波形和频谱特点,分析了五阶非线性对脉冲串波

形和频谱演化的影响。结果表明,正五阶非线性的存在以及高调制频率(或短调制周期)的选取更有利于产生高重复频率超短脉冲串从而更有利于高速光纤通信系统的需要。负五阶非线性则使形成超短脉冲串的最佳光纤长度变长,形成的单个脉冲宽度变

宽,峰值功率变小。当调制频率过高时,超短脉冲串无法产生,即所形成的超短脉冲串的重复频率存在上限。另外,随传输距离的增加,单个脉冲可能分裂成两个甚至三个分脉冲,在主脉冲之间还可能出出现一定数量的峰值功率弱的次脉冲。正(负)五阶非线性可增多(减小)光波频率成分、加宽(窄化)频谱;视主脉冲有无分裂以及次脉冲的存在与否,频谱的形状也会不同,当调制频率过高而不能产生超短脉冲串时,频谱中产生的新频率成分弱而少,几乎观察不到。

### 参 考 文 献

- G. P. Agrawal, Jia Dongfang, Yu Zhonghong *et al.* trans. . Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 88~93  
G. P. Agrawal, 贾东方, 余震虹 等译. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社. 2002. 88~93
- Jia Weiguang, Shi Peiming, Yang Xingyu *et al.* . Modulation instability of fiber Bragg gratings with raised cosine apodization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 930~934  
贾维国, 史培明, 杨性愉 等. 升余弦边迹布拉格光纤光栅中的调制不稳定性[J]. 中国激光, 2007, **34**(7): 930~934.
- Xianqiong Zhong, Anping Xiang . Effects of group-velocity mismatch and cubic-quintic nonlinearity on cross-phase modulation instability in optical fibers [J]. *Chin. Opt. Lett.* , 2007, **5**(9): 534~537
- Cai Wangyang, Wen Shuangchun, Chen Lin. Modulation instability in fiber grating with nonlinearity management [J]. *Acta Optica Sinica* , 2006, **26**(9): 1387~1391  
蔡汪洋, 文双春, 陈 林. 非线性管理光纤光栅中的调制不稳定性研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(9): 1387~1391
- K. Tai, A. Tomita, J. L. Jewell *et al.* . Generation of subpicosecond solitonlike optical pulses at 0.3 THz repetition rate by induced modulation instability [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 1986, **49**(5): 236~238
- T. Sylvestre, S. Coen, P. Emplit *et al.* . Self-induced modulation instability laser revisited: normal dispersion and dark-pulse train generation [J]. *Opt. Lett.* , 2002, **27**(7): 482~484
- E. M. Dianov, P. V. Mamyshev, A. M. Prokhorov *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
- A. Hasegawa, Generation of a train of soliton pulses by induced modulation instability in optical fibers [J]. *Opt. Lett.* , 1984, **9**(7): 288~290
- P. Honzatko, P. Peterka, J. Kanka. Modulation instability  $\sigma$ -resonator fiber laser [J]. *Opt. Lett.* , 2001, **26**(11): 810~812
- C. J. S. de Matos, D. A. Chestnut, J. R. Taylor. Low-threshold self-induced modulational instability ring laser in highly nonlinear fiber yielding a continuous-wave 262-GHz soliton train [J]. *Opt. Lett.* , 2002, **27**(11): 915~917
- D. Pushkarov, S. Tanev. Bright and dark solitary wave propagation and bistability in the anomalous dispersion region of optical waveguides with third- and fifth-order nonlinearities [J]. *Opt. Commun.* , 1996, **124**(3-4): 354~364
- S. L. Palacios, J. M. Fernández-Díaz. Black optical solitons for media with parabolic nonlinearity law in the presence of fourth order dispersion [J]. *Opt. Commun.* , 2000, **178**(4-6): 457~460
- F. H. Ndzanaa, A. Mohamadou, T. C. Kofané. Modulational instability in the cubic - quintic nonlinear Schrödinger equation through the variational approach [J]. *Opt. Commun.* , 2007, **275**(2): 421~428
- Ren Zhijun, Wang Jing, Yang Ailing *et al.* . Effect of quintic nonlinearity on modulation instability in the anomalous dispersion regime of fiber [J]. *Chinese J. Laser* , 2004, **31**(5): 595~598  
任志君, 王 晶, 杨爱玲 等. 五次非线性对光纤反常色散区调制不稳定性的影响[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 595~598
- 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
- Zhong Xianqiong, Xiang Anping, Cai Qing *et al.* . Modulation instability induced by cross-phase modulation in case of high-order dispersion and quintic nonlinearity [J]. *Chinese J. Laser* , 2006, **33**(9): 1200~1205  
钟先琼, 向安平, 蔡 青 等. 高阶色散和五阶非线性下的交叉相位调制不稳定性[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1200~1205
- Zhong Xianqiong, Chen Jianguo, Li Dayi. Modulation instability induced by cross-phase modulation in fibers with cubic-quintic nonlinearity [J]. *Chinese J. Laser* , 2005, **32**(8): 1035~1039  
钟先琼, 陈建国, 李大义. 三、五阶非线性光纤中的交叉相位调制非稳研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(8): 1035~1039