

文章编号: 1001-3806(2006)05-0479-04

三五阶非线性光纤中光脉冲的啁啾和频谱

钟先琼¹, 向安平¹, 陈建国², 马再如²

(1. 成都信息工程学院 光电技术系, 成都 610041; 2. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 为了探讨光纤的五阶非线性对光脉冲传输的影响, 利用同时考虑三阶和五阶非线性效应的非线性薛定谔方程, 在忽略光纤色散的情况下, 解析并计算研究了超高斯光脉冲的非线性相移、频率啁啾。数值模拟了光脉冲传输的功率频谱。结果表明, 与只有三阶非线性折射率的情形相比, 正五阶非线性折射率的存在使光脉冲在光纤中传输的非线性相移和最大频率啁啾增大, 使无啁啾光脉冲的频谱宽度变宽, 谱峰数目增多, 高斯脉冲初始啁啾对频谱的影响与三阶非线性折射率的情形类似; 负五阶非线性折射率则使光脉冲传输的非线性相移和频率啁啾呈现新的特点, 并使无啁啾光脉冲的频谱宽度变窄, 谱峰数目减少。

关键词: 非线性光学; 三五阶非线性; 频率啁啾; 功率频谱

中图分类号: O437; TN929.11

文献标识码: A

Frequency chirps and spectra of optical pulses propagating in optical fibers with cubic-quintic nonlinearity

ZHONG Xian-qiong¹, XIANG An-ping¹, CHEN Jian-guo², MA Zai-nu²

(1. Department of Optoelectronics and Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The aim of the paper is to study the effect of the quintic nonlinearity of an optical fiber on the propagation of optical pulses. Utilizing the cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation in which the dispersion of optical fibers is neglected, the nonlinear phase shifts and frequency chirps of super-Gaussian optical pulses are calculated and investigated analytically. The power spectra of optical pulses are numerically simulated as well. The results show that the positive quintic nonlinear refractive index makes the nonlinear phase shifts and the maximum frequency chirps of optical pulses larger, the spectral width of unchirped optical pulses wider and the number of spectral peaks more than those of cubic nonlinear refractive index. The influence of initial chirps of Gaussian optical pulses on the spectra is similar to that of cubic nonlinear refractive index. In case of the negative quintic nonlinear refractive index, the nonlinear phase shifts and frequency chirps take on new characteristics. The negative quintic nonlinear refractive index also makes the width of unchirped optical pulses narrower and the number of spectral peaks less.

Key words: nonlinear optics; cubic-quintic nonlinearity; frequency chirps; power spectra

引 言

折射率的非线性效应一直受到人们的广泛关注^[1~4], 该效应可通过自相位调制^[1~3]或交叉相位调制^[3]体现出来。在空域中, 自相位调制将导致光束的自聚焦或自散焦, 若与衍射效应平衡, 可形成空间光孤子^[4]。在时域中, 自相位调制将导致光脉冲的频谱展宽^[3]。在 DWDM 技术中, 交叉相位调制将导致不同信道间的串扰和源信号能量的损失, 致使系统性能下降, 但若使自相位调制或交叉相位调制与一定特性的色散

效应相平衡, 则可形成时间光孤子^[3], 用于光孤子通信。因此, 深入研究折射率的非线性效应具有重要的理论和实际意义。

形如 $n = n_0 + \gamma_1 I$ 的 Kerr 非线性或三阶非线性已得到广泛的研究^[1~6]。但当光功率较高, 或对于某些非线性系数相对较大的介质, 如双掺杂光纤、有机聚合物等, 即使是中等大小的光功率也需考虑五阶甚至更高阶非线性折射率的影响^[7]。近年来, 人们对这种三五阶非线性同时存在时的时间^[7,8]或空间光孤子^[9]的传输特性以及调制不稳定性^[10~12]产生了较大的兴趣。作者在忽略光纤色散的情况下, 利用计及三五阶非线性效应的非线性薛定谔方程, 解析并数值研究了超高斯光脉冲的非线性相移、频率啁啾。数值模拟了光脉冲的功率频谱。结果表明, 与只有三阶非线性折射率的情形相比, 正五阶非线性折射率的存在使光脉冲在

基金项目: 四川省科技厅应用基础基金资助项目 (05JY029-084)

作者简介: 钟先琼 (1969-), 女, 讲师, 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

收稿日期: 2005-07-14; 收到修改稿日期: 2005-09-27

光纤中传输的非线性相移和最大频率啁啾增大,使无啁啾光脉冲的频谱宽度变宽,谱峰数目增多,高斯脉冲初始啁啾对频谱的影响与三阶非线性折射率的情形类似;负五阶非线性折射率则使光脉冲传输的非线性相移和频率啁啾呈现新的特点,使无啁啾光脉冲的频谱宽度变窄,谱峰数目减少。

1 理论分析

光脉冲脉宽较宽时,可忽略光纤的色散效应^[3],此时,考虑三五阶非线性效应时光脉冲包络的慢变振幅 A 满足下列非线性薛定谔方程^[7]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma_1 A^2 A + i\gamma_2 A^4 A \quad (1)$$

式中, A 为光脉冲的慢变振幅包络, γ_1 和 γ_2 分别为光纤的三阶和五阶非线性系数, α 是光纤损耗系数。作下列变换: $A(z, T) = P_0 \exp(-\alpha z/2) U(z, T)$ (2) 式中, $U(z, T)$ 为光脉冲的归一化振幅, P_0 为输入光脉冲的峰值功率,则 (1) 式成为:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = i \operatorname{sgn}(\gamma_1) \frac{\exp(-\alpha z)}{L_{n1}} |U|^2 U + \operatorname{sgn}(\gamma_2) \frac{\exp(-2\alpha z)}{L_{n2}} |U|^4 U \quad (3)$$

式中, sgn 表符号函数, $L_{n1} = 1/|\gamma_1 P_0|$, $L_{n2} = 1/|\gamma_2 P_0^2|$ 。

令 $U = V \exp(i\phi_n)$, 代入 (3) 式并分离实虚部后得: $\frac{\partial V}{\partial z} = 0$,

$$\frac{\partial \phi_n}{\partial z} = \operatorname{sgn}(\gamma_1) \frac{\exp(-\alpha z)}{L_{n1}} V^2 + \operatorname{sgn}(\gamma_2) \frac{\exp(-2\alpha z)}{L_{n2}} V^4。$$

可见,和只有三阶非线性情形一样,振幅 V 不随距离而变,对相位式积分得:

$$U(z, t) = U(0, T) \exp[i\phi_n(z, T)] \quad (4a)$$

式中,非线性相移 $\phi_n(z, T)$ 为:

$$\phi_n(z, T) = \operatorname{sgn}(\gamma_1) \frac{L_{\text{eff1}}}{L_{n1}} |U(0, T)|^2 + \operatorname{sgn}(\gamma_2) \frac{L_{\text{eff2}}}{L_{n2}} |U(0, T)|^4 \quad (4b)$$

式中, $L_{\text{eff1}} = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$, $L_{\text{eff2}} = [1 - \exp(-2\alpha z)]/2\alpha$ 。由 (4a) 式和 (4b) 式可见,三五阶非线性效应存在时,仍然只使光脉冲产生一个非线性相移,而不改变脉冲的形状。

由 (4b) 式可知, $\phi_n(z, T)$ 与时间有关,故将产生频率啁啾,导致光脉冲的频谱展宽,啁啾量为:

$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial \phi_n}{\partial T} = -\operatorname{sgn}(\gamma_1) \frac{L_{\text{eff1}}}{L_{n1}} \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^2 - \operatorname{sgn}(\gamma_2) \frac{L_{\text{eff2}}}{L_{n2}} \frac{\partial}{\partial T} |U(0, T)|^4 \quad (5)$$

由 (4b) 式和 (5) 式可见,非线性相移和频率啁啾均与输入光脉冲的初始啁啾无关。对 (4a) 式进行傅里叶

变换可得到三五阶非线性效应所致光脉冲功率频谱:

$$S(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} U(0, T) \exp[i\phi_n(z, T) + i(\omega - \omega_0)T] dT \right|^2 \quad (6)$$

输入任意一形状的脉冲,利用 (4) 式、(5) 式、(6) 式 3 式即可讨论三五阶非线性效应所致的非线性相移、频率啁啾和功率频谱。

设以超高斯光脉冲输入:

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right], (m \geq 1) \quad (7)$$

式中, C 为啁啾参量, m 为超高斯脉冲的阶数,当 $m=1$ 时为高斯脉冲。将 (7) 式分别代入 (4b) 式和 (5) 式可得非线性相移和频率啁啾的解析式为:

$$\phi_n(z, T) = \operatorname{sgn}(\gamma_1) \frac{L_{\text{eff1}}}{L_{n1}} \exp\left[-\frac{T^{2m}}{T_0^{2m}}\right] + \operatorname{sgn}(\gamma_2) \frac{L_{\text{eff2}}}{L_{n2}} \exp\left[-2\frac{T^{2m}}{T_0^{2m}}\right] \quad (8)$$

$$\delta\omega(T) = \operatorname{sgn}(\gamma_1) \frac{2mL_{\text{eff1}}}{T_0 L_{n1}} \frac{T^{2m-1}}{T_0} \exp\left[-\frac{T^{2m}}{T_0^{2m}}\right] + \operatorname{sgn}(\gamma_2) \frac{4mL_{\text{eff2}}}{T_0 L_{n2}} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m-1} \exp\left[-2\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right] \quad (9)$$

当 $\gamma_2=0$ 时, (8) 式和 (9) 式分别转化为三阶非线性时的非线性相移和频率啁啾^[3]。

2 计算与讨论

下面的计算分析都针对三阶非线性为正即 $\gamma_2 > 0$ 的情况。

2.1 非线性相移和频率啁啾

图 1 中给出了五阶非线性 γ_2 为正 (见图 1a)、为负 (见图 1b), 且 $L_{\text{eff1}}/L_{n1} = L_{\text{eff2}}/L_{n2} = 1$ 时, 一阶、三阶、五阶、七阶超高斯光脉冲的非线性相移。由图可见,

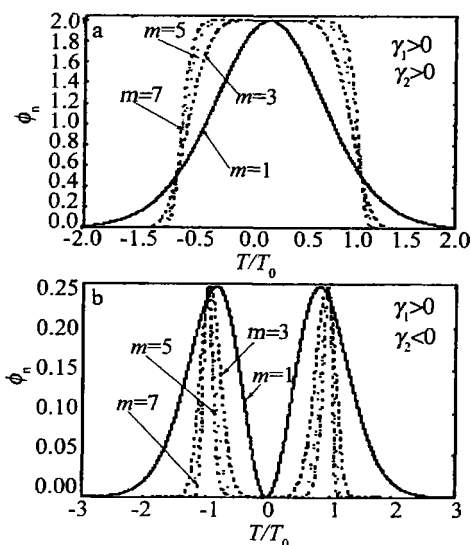


Fig 1 Nonlinear phase shifts of optical pulses induced by cubic-quintic nonlinearity

$\gamma_2 > 0$ 时的非线性相移图与 $\gamma_2 = 0$ ^[3] 的形状相似, 而峰值却变大了, 这是由于增加了五阶非线性所致相移的贡献。当 $\gamma_2 < 0$ 时 (对应饱和非线性), 非线性相移图出现了两个相对于脉冲中心对称的峰, 与 $\gamma_2 = 0$ 的情形相比, 由于非线性效应的饱和, 使最大相移变小。

图 2 中给出了五阶非线性 γ_2 为正 (见图 2a)、为负 (见图 2b), 且 $L_{\text{eff}}/L_{n1} = L_{\text{eff}}/L_{n2} = 1$ 时, 一阶、三阶、五阶、七阶超高斯光脉冲的频率啁啾图。由图 2a 可

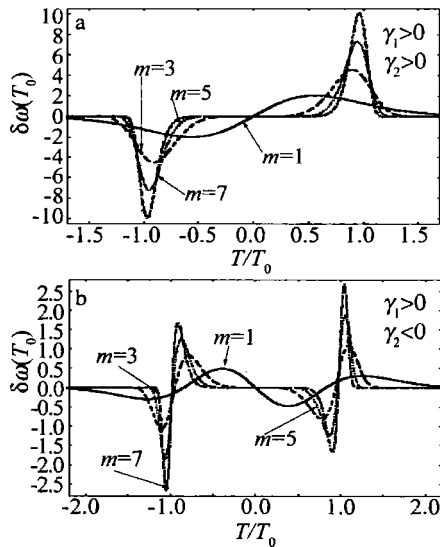


Fig 2 Frequency chirps of optical pulses induced by cubic-quintic nonlinearity

见, 当 $\gamma_2 > 0$ 时, 由于非线性效应的增强, 最大啁啾量比 $\gamma_2 = 0$ 时^[3] 的要大, 但脉冲前沿和后沿均与 $\gamma_2 = 0$ 时一样分别为红移和蓝移啁啾。在脉冲中心较小范围内高斯脉冲的啁啾仍近似为线性且为正, 其它高阶超高斯脉冲的啁啾几乎为 0。由图 2b 可见, 当 $\gamma_2 < 0$ 时, 无论是脉冲的前沿还是后沿, 都是先出现红移啁啾, 后出现蓝移啁啾, 且高斯脉冲在脉冲中心较小范围内近似为负的线性啁啾, 这是与 $\gamma_2 > 0$ 和 $\gamma_2 = 0$ 的情形完全不同的。但无论是哪种情形, 最大频率啁啾都随超高斯脉冲阶次的增大而增大, 但由于超高斯光脉冲在离脉冲中心很长时间段内均具有近似均匀的光强, 故啁啾出现的时间范围要随超高斯脉冲阶次的增大而缩短。

2 2 脉冲功率频谱

2 2 1 无初始啁啾的情形 ($C = 0$) 图 3 和图 4 中分别给出了高斯和二阶超高斯光脉冲在五阶非线性系数取不同符号时, 功率频谱随参数 $\Phi_m = L_{\text{eff}}/L_{n1} = L_{\text{eff}}/L_{n2}$ 的变化规律。改变传输距离或输入光脉冲的峰值功率可使 Φ_m 改变。由图可见, 对同一阶超高斯脉冲, 无论五阶非线性系数的符号如何, 参数 Φ_m 的增大都利于脉冲的频谱变宽, 谱峰数目增多, 边带峰增强。与低阶脉冲相比, 高阶超高斯光脉冲虽然谱宽范围较宽, 但谱峰形状不如低阶的尖锐, 而且边带峰强度较弱, 这也是因为高阶超高斯光脉冲的啁啾出现在离

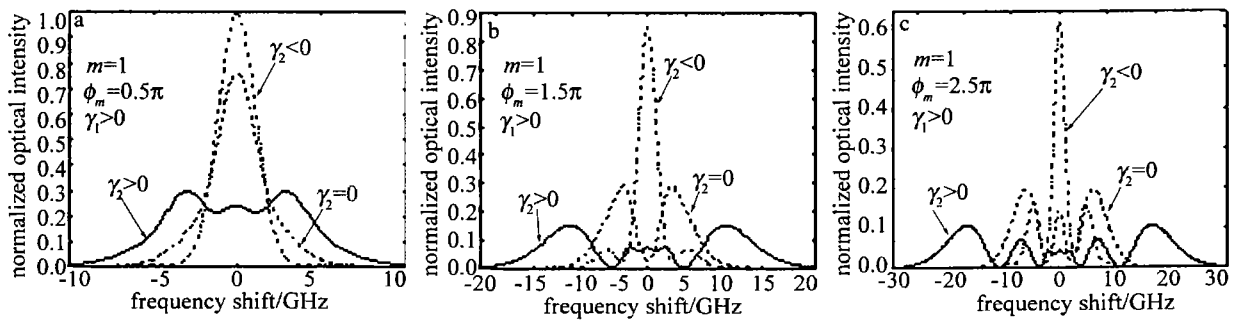


Fig 3 Power frequency spectra of Gaussian optical pulses without initial frequency chirps in case of cubic-quintic nonlinearity

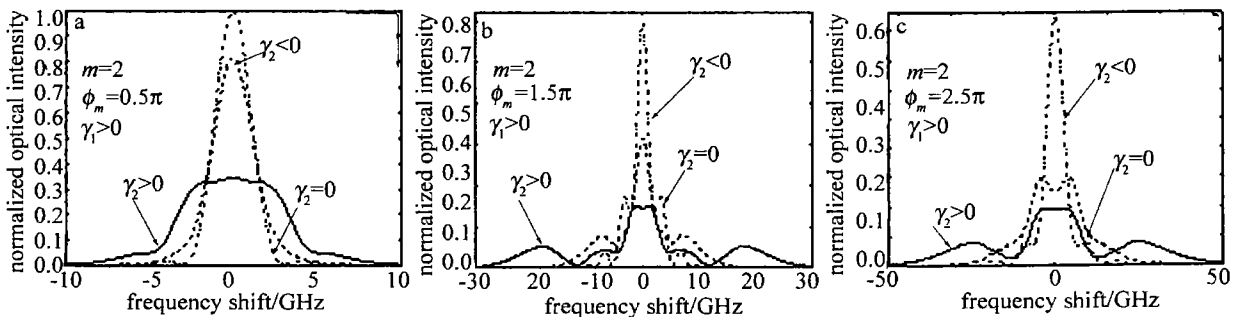


Fig 4 Power frequency spectra of second-order super-Gaussian optical pulses without initial frequency chirps in case of cubic-quintic nonlinearity

脉冲中心较远且较窄的时间段内的缘故。对于高斯光脉冲, 由于非线性效应的增强 (减弱), 正 (负) 五阶非线性的存在使频谱谱峰变多 (少), 谱宽变宽 (窄); 对于二阶超高斯光脉冲, 正 (负) 五阶非线性的存在使谱

宽变宽 (窄), 谱形变得较肥大 (尖锐)。

2 2 2 有初始啁啾的情形 ($C \neq 0$) 图 5 是 $\gamma_2 > 0$ 时, 具有正负初始啁啾的高斯光脉冲在不同 Φ_m 参数下的功率频谱。由图可见, 无论初始啁啾的正负如何, 随着

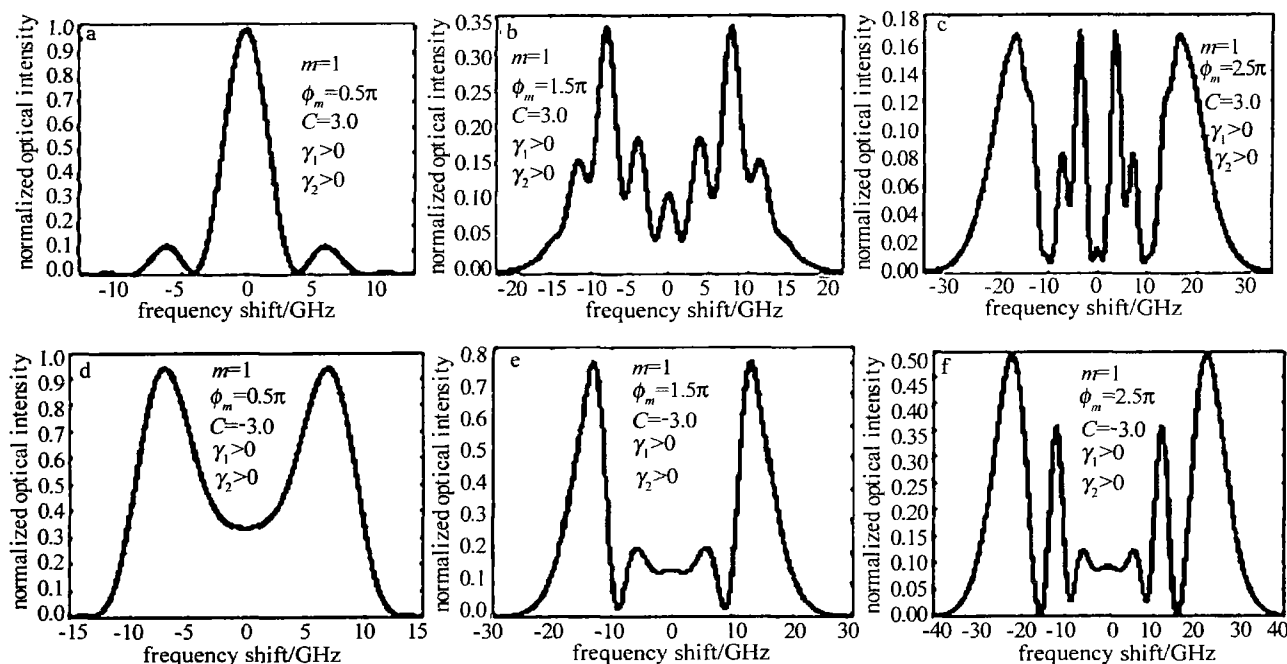


Fig 5 Power frequency spectra of chirped optical pulses in the case of cubic-quintic nonlinearity

Φ_m 参数的增大,谱峰数目和谱宽都变大。与 Φ_m 参数相同的初始啁啾为负的情况对应相比,初始啁啾为正时的谱峰数目较多,这是由于初始啁啾与三五阶非线性所致啁啾在脉冲中心部分同号而使频谱振荡加强的缘故;相反,对初始啁啾为负的情况,两种啁啾在脉冲中心部分反号使频谱振荡减弱,频谱最外边出现的强峰是由脉冲前后沿未削弱的残余啁啾形成的,当 Φ_m 参数达到一定程度时,非线性所致啁啾逐渐占上风,谱峰数目又将增多。可见,三五阶非线性下初始啁啾对高斯脉冲频谱的影响特点与三阶非线性下的情形类似。对于 $\gamma_2 < 0$ 及 $m > 1$ 的超高斯情形,由于三五阶非线性所致啁啾的复杂性以及脉冲初始啁啾的非线性使二者的叠加变得复杂,此时的脉冲频谱宽度和谱峰数目也难以给出直观的解释,在此不予讨论。

3 结 论

对超高斯光脉冲在三五阶非线性光纤中的非线性相移、频率啁啾和功率频谱的研究表明:与只有三阶非线性折射率的情形相比,正五阶非线性折射率的存在使光脉冲在光纤中传输的非线性相移和最大频率啁啾增大,使无啁啾光脉冲的频谱宽度变宽,谱峰数目增多,高斯脉冲初始啁啾对频谱的影响与三阶非线性折射率的情形类似;负五阶非线性折射率则使光脉冲传输的非线性相移和频率啁啾呈现新的特点,并使无啁啾光脉冲的频谱宽度变窄,谱峰数目减少。

参 考 文 献

[1] TZOAR N, JAN M. Self-phase modulation in long geometry optical

waveguides [J]. Phys Rev, 1981, A23 (3): 1266 ~ 1270.

- [2] HEBER R C, HICKMANN J M, GOUVEA NETO A S. Self-phase modulation and induced phase modulation of noisy radiation in single-mode optical fibers [J]. Phys Rev, 1992, A45 (11): 8268 ~ 8276.
- [3] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 2nd ed, New York: Academic Press, 1995. 89 ~ 101, 238 ~ 276.
- [4] SUKHORUKOV A A, KIVSHAR Y S, EISENBERG H S *et al*. Spatial optical solitons in waveguide arrays [J]. IEEE J Q E, 2003, 39 (1): 31 ~ 50.
- [5] WANG X, LU D, LIN X D *et al*. Power gain of perturbation traveling inside amplifying nonlinear media in terms of Breakup-integral [J]. Laser Technology, 2002, 26 (6): 466 ~ 467, 470 (in Chinese).
- [6] LI D Y, HAN S, TANG Y L *et al*. Propagation of chirped pulses inside self-action temporal guide [J]. Laser Technology, 1999, 23 (2): 109 ~ 112. (in Chinese).
- [7] TANEV S, PUSHKAROV D I. Solitary wave propagation and bistability in the normal dispersion region of highly nonlinear optical fibers and waveguides [J]. Opt Commun, 1997, 141: 322 ~ 328.
- [8] PALACIOS S L, FERNÁNDEZ-DÍAZ J M. Black optical solitons for media with parabolic nonlinearity law in the presence of fourth order dispersion [J]. Opt Commun, 2000, 178: 457 ~ 460.
- [9] DMITREVSKI K, REMHULT E, SVENSSON E *et al*. Analysis of stable self-trapping of laser beams in cubic-quintic nonlinear media [J]. Phys Lett, 1998, A248 (5/6): 369 ~ 376.
- [10] ZHONG X Q, CHEN J G, LI D Y. Modulation instability in the decreasing dispersion fibers with quintic nonlinearity [J]. Laser Technology, 2006, 30 (1): 27 ~ 30 (in Chinese).
- [11] REN Z J, WANG J, YANG A L *et al*. Effect of quintic nonlinearity on modulation instability in the anomalous dispersion regime of fiber [J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 31 (5): 595 ~ 598 (in Chinese).
- [12] HONG W P. Modulation instability of optical waves in the high dispersive cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation [J]. Opt Commun, 2002, 213: 173 ~ 182.