

振幅调制连续光控制梳状频谱的产生

肖浩 杨华

(湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 利用振幅调制连续波(CW)抽运,数值模拟了在噪声背景下不发生时域混叠的短脉冲序列和梳状频谱的产生。研究表明,振幅调制可以很好地改善短脉冲序列时域稳定性和梳状频谱稳定性,调制参量对输出信噪比和梳状频谱的稳定性起到关键作用;并得到了梳状频谱稳定性好的调制参量区域。

关键词 非线性光学;梳状频谱;调制不稳定性;信噪比

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.031901

Comb-Like Spectrum Generation Controlled by Intensity-modulated Continue Wave Radiation

Xiao Hao Yang Hua

(School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Based on the background noise, the generation of short pulse series and comb-like spectrum are numerically simulated by the amplitude modulation of continuous wave (CW). The results show that the stability of short pulse series and comb-like spectrum can be improved by the amplitude modulation. The modulation parameters play a key role on the output signal-to-noise ratio (SNR) and the stability of comb-like spectrum. The region of modulation parameters with stable comb-like spectrum is also obtained.

Key words nonlinear optics; comb-like spectrum; modulation instability; signal to noise ratio

OCIS codes 190.0190; 060.2310; 020.1670

1 引言

梳状频谱在电磁兼容检测、军事侦察、微波通信、微波电子对抗和制导等方面有着广泛的应用。较好时域结构的梳状频谱同样也能够波分复用系统中得到应用。振幅调制连续光产生的光谱比超连续谱^[1,2]要窄,但其有着其它抽运条件下无法达到的优越性^[3,4]——频谱高功率密度、时域规整性,因此用这种方式产生时域结构规整的梳状频谱变得十分迫切。Ho等^[5]提出集成的光学回路连续调节,以增加输出的谱线。Bennet等^[6]利用相位调制,产生了1.8 MHz的梳状频谱。Gee等^[7]通过激光器内部或者外部的锁模,来增大梳状频谱的带宽和稳定性,但是这些激光设备非常昂贵,并且需要苛刻的隔热和隔音条件。另一种方法是由外部调制连续波(CW)产生边带获得光频梳,装置相对简单且成本较低^[8]。1984年,Hasegawa^[9]首次提出利用拍频的方法实现对连续光的调制。2007年,Solli等^[10]阐述了光学畸形波与海洋畸形波的相似性,并通过实验得知产生光学畸形波与噪声有关,增长最快的噪声是产生光异常波的主要原因,并利用振幅调制的方式产生了光异常波。2008年Dudley等^[11,12]将振幅调制思想应用到皮秒脉冲区域的超连续谱产生,通过这种振幅调制得到了时频域稳定性和相干性^[2]很好的超连续谱,并使用滤波器对随之产生的有时、频域对应关系的异常波大孤子进行驾驭^[12]。同年,Sergey等^[13]研究了噪声对振幅调制连续光产生规则短脉冲的影响,

收稿日期: 2010-06-25; 收到修改稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家自然科学基金中俄合作项目(61011120106)资助课题。

作者简介: 肖浩(1985—),男,硕士研究生,主要从事光通信技术方面的研究。E-mail: haoxiao@hnu.edu.cn

导师简介: 杨华(1973—),女,博士,副教授,主要从事光通信及非线性光学等方面的研究。

E-mail: yanghua01@yahoo.com.cn

并用可容许的信噪比(SNR)对影响程度进行了衡量。随后,Dudley等^[15]利用纳秒脉冲模拟了连续光和调制连续光的频谱展宽和时域结构,并能够与实验结果很好吻合。

频域稳定性、时域规整性、信噪比都是衡量梳状频谱利用价值的标准。然而噪声放大对频域稳定性、相干性和时域稳定性会产生很大影响,因此某些调制参量无法产生规则脉冲序列和有利用价值梳状频谱。本文利用振幅调制连续光得到有利用价值的梳状频谱。所有工作均是在噪声背景下进行,以实现热噪声模拟。首先,比较了连续光与振幅调制连续光的时域结构,并对调制连续光产生梳状频谱的演化过程进行了研究;然后对不同调制参量下的输出信噪比予以分析,研究输出信噪比对频谱和时域结构的影响;最后得到了满足输出信噪比要求的调制参量区域。

2 理论模型

连续光进行抽运的初始阶段,由于其较低的峰值功率和较大的脉冲宽度,高阶色散、高阶非线性项可以忽略。在实验^[15]中提到,大概只有1%的能量转化到广义非线性薛定谔方程中的自陡、拉曼以及高阶色散项,因此在考虑连续波在光纤中传输时,可以采用简单的非线性薛定谔方程^[7]进行理论分析,如果忽略损耗,则非线性薛定谔方程可写为

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

式中 A 表示慢变振幅包络, z 表示光在光纤中的传输距离, γ 为非线性系数, T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度 $T = t - z/v_g$, β_2 为群速度色散参量。选择文献[1]中的光纤参数,非线性系数 $\gamma = 15$ W/km,零色散点在 $\lambda_{ZDW} = 1055$ nm 处,抽运波长 $\lambda_{\text{pump}} = 1320$ nm 处的群速度色散参量 $\beta_2 = -33.16$ ps²/km。从图 1(a)可知,抽运光中心波长离零色散点比较远,并且在振幅调制连续光抽运情况下频谱展宽比较小,因此高阶色散项可以忽略,(1)式可以很好地描述连续光在光纤中的演化过程。

调制不稳定性对孤子阶数非常高的连续光分裂起主导作用^[10],对(1)式进行线性稳定分析^[16~18],可以得到微扰的功率增益为

$$g(\Omega) = |\beta_2 \Omega| (\Omega_c^2 - \Omega^2)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 $\Omega_c^2 = 4\gamma P_0 / |\beta_2|$,最大增益频率 $\Omega_{\text{max}} = \pm (\Omega_c / \sqrt{2}) = \pm 0.262$ THz,增益仅在 $|\Omega| < \Omega_c$ 时存在,也就是只有落在调制不稳定性(MI)增益谱内的频率才能被放大,如图 1(b)所示。减小非线性系数、抽运功率,以及增加二阶色散都能够使增益谱向内收缩,来减小噪声放大增益。

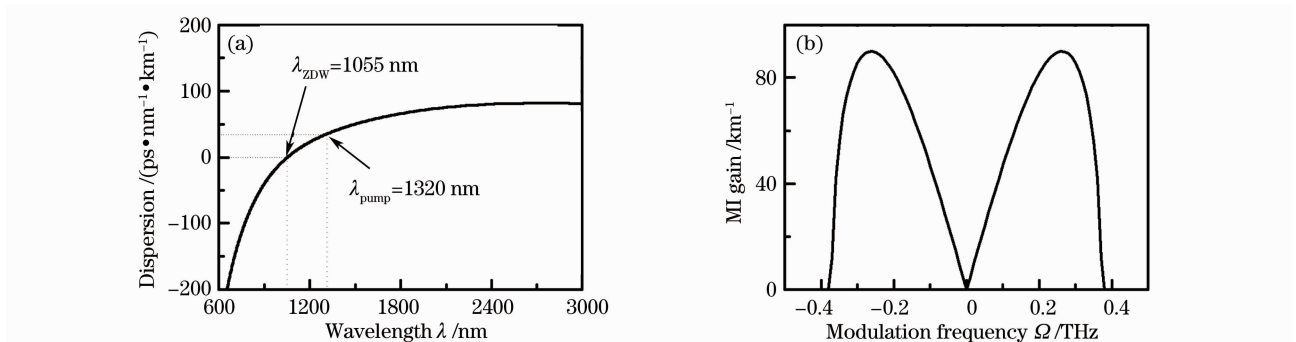


图 1 (a)光子晶体光纤(PCF)的色散曲线图,(b)调制不稳定性(MI)增益谱

Fig. 1 (a) Dispersion profile of the PCF, (b) MI gain spectra in PCF

在对初始连续抽运光进行振幅调制的数值模拟过程中,采用脉宽为 3ns 的超高斯脉冲来表征连续光,初始输入为

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} \exp \left[- \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2m} \right] [1 + a_0 \exp(-i\Omega T)], \quad (3)$$

式中 P_0 表示抽运光功率, a_0 表示调制深度, Ω 表示调制频谱即两光差频,信号光功率 $P_s = a_0^2 P_0$ 。在进行数值模拟之前光纤长度必须确定,假定噪声功率为 P_{noise} ,在光纤中的传输时,噪声与振幅调制光同时被调制不稳

定性放大,假设在 z 处时,信号光功率达到抽运光的功率,即 $P_0 = P_s \exp[z \cdot g(\Omega)]$, 得光纤长度为

$$z = \frac{1}{g(\Omega)} \ln \frac{1}{a_0^2}. \quad (4)$$

然而由于在整个过程中抽运功率会发生变化,会存在一定的误差,但这个误差在 20% 以内^[13]。从(4)式可知,减小放大增益会使传输距离变长。经过距离 z 传输后,信号功率为 $P_s \exp[z \cdot g(\Omega)]$;数值模拟时噪声在整个频谱都存在,取最快增长频率处的增益对噪声功率进行计算,得到噪声功率为 $P_{\text{noise}} \exp[z \cdot g(\Omega_{\text{max}})]$ 。因此信噪比为

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \frac{P_0}{P_{\text{noise}}} + \frac{5\gamma P_0}{|\beta_2 \Omega| (\Omega^2 - 4\gamma P_0 / |\beta_2|)} \lg a_0. \quad (5)$$

3 数值模拟与结果分析

3.1 在噪声背景下调制对输出的影响

噪声放大对频谱展宽的初始阶段产生了至关重要的作用,所以产生子脉冲的波长、能量、脉宽都具有随机性。为了符合实际,每次数值模拟的噪声都随机输入,因此每次的噪声都不同。

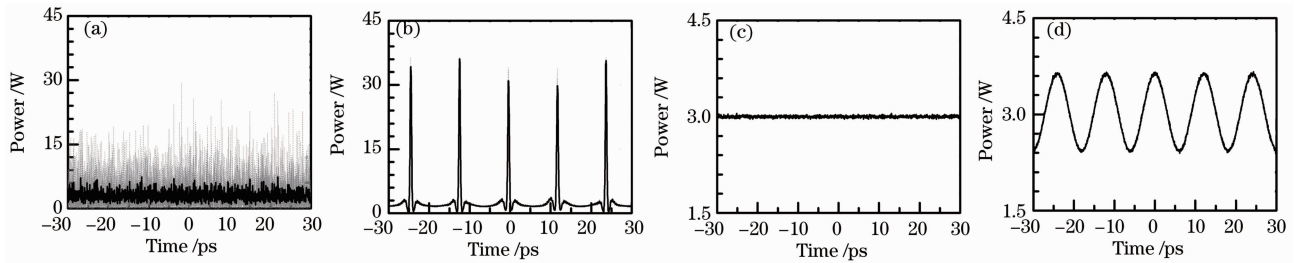


图 2 噪声背景下,未加调制(a),(c)与加调制(b),(d)时域图

Fig. 2 Simulation results for temporal characteristics with (a), (c) no input modulation and (b), (d) with modulation

如图 2 所示,图中灰色虚线为 10 次数值模拟的叠加,黑色实线为 10 次数值模拟的均值。由图 2(c) 可以看到在连续光上有微弱的噪声扰动,图 2(d) 同样也能够隐约看到加了振幅调制后的连续光上有噪声扰动。图 2(a) 表示 10 次数值模拟噪声输入下的输出,经过一段传输距离后,时域结构的稳定性非常差,并且显得杂乱无章,这是随机噪声被调制不稳定性放大产生的结果。在图 2(b) 中,虽然在短脉冲峰值位置出现了一些扰动,但并没有影响其规整的时域结构,振幅调制被调制不稳定性放大,并可以对连续光的能量分布进行引导,在一定程度上抑制了噪声放大,因此的灰色虚线和黑色实线几乎重合。噪声放大和调制信号的放大是相互竞争的过程,通过振幅调制可以将抽运光的能量转移至调制信号上,使噪声获得的能量减少,因此利用振幅调制连续光可以明显的改善时域稳定性。

对于调制频率为 0.08 THz,深度为 -20 dB 时的频谱演化图 3(a1)~(a5) 和时域演化图 3(b1)~(b5) 图 3 具体演示了随着传输距离的改变,振幅调制连续光产生梳状频谱和周期短脉冲序列的演变过程。图 3(a1) 中初始输入为两单色光,频率间隔为 0.08 THz,在时域图 3(b1) 表现为周期为 12 ps 的振幅调制。随着传输距离的增加,信号光能量的增强导致混频作用相应增强,使得图 3(a2) 中在抽运波的另一侧也出现了一根谱线;到达(a3) 位置时频谱分量进一步增加,时域开始压缩; (a4) 位置时出现了比较明显的压缩,在 -50 dB 以上的谱线出现了十多根;直到(a5) 呈现出三角形的梳状频谱,其频率间隔为调制频谱 0.08 THz,因此可以通过改变调

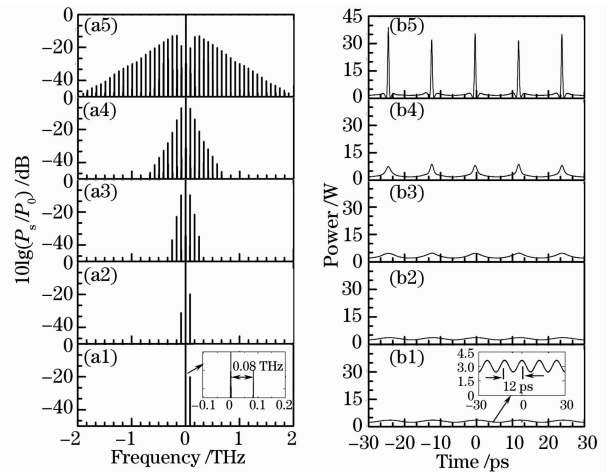


图 3 梳状频谱产生的频谱演化图(a)和时域演化图(b)

Fig. 3 (a) Spectrum evolution and (b) temporal characteristics evolution of comb frequency generation

制频率来实现对梳状频谱的频率间隔(即频谱密集度)进行控制。在这样的抽运条件下的最大增长频率 $\Omega_{\max} = 0.262$ THz,即约3倍调制频率处,靠外侧谱线正好在最大增益附近,因此紧挨抽运的两根谱线反而比稍靠外的功率低,如图3(a5)所示。并且时域已经形成了周期为12 ps的短脉冲序列,然而短脉冲序列的峰值功率并不是一致,原因在于演化的过程中噪声同时也被放大从而影响到了时域的结构。

图3结果比文献[7]线宽产生的梳状谱窄、谱线多。梳状频谱基于旁瓣产生而形成,在整个过程中旁瓣不断产生旁瓣,从而使得谱线不断的增加;单个脉冲相位一致,并且相邻脉冲相位相差 π ,这样确保了整个脉冲串是无啁啾,就使得脉冲输出相对稳定。

3.2 不同调制参量对信噪比的影响

由图3(b)可见噪声对时域结构存在影响,本节主要讨论影响程度的参量——信噪比,它意味着周期脉冲序列的能量,“有用”的短脉冲能量与噪声能量之比,以及频谱的相干性。图4给出了调制频率(Ω/Ω_{\max})²在0.02~0.8之间,调制深度在-70~-5 dB之间的输出信噪比。在调制频率较低时,由于其增益较低,要达到较高的抽运转化效率,光纤长度必须增大,这样就导致了噪声放大的能量增加,从而使得输出的信噪比下降;同样,较低的调制深度也会使输出信噪比下降。当然,高密集度的梳状频谱的产生,必需较低的调制频率,但此时的增益将会下降,并且由图(4)可以看出调制频率降至 $(\Omega/\Omega_{\max})^2 = 0.04$ 时,即调制频率为1/5最大增益频率时,信噪比几乎都在10 dB以下。

3.3 不同信噪比情况下的时域和频谱

在不同信噪比下,噪声对时域和频谱的影响不同,图5模拟了调制频率为0.08 THz[即 $(\Omega/\Omega_{\max})^2 = 0.1$]时,调制深度分别在-10, -30和-40 dB时的时域结构与频谱图。灰色虚线为10次数值模拟的叠加,黑色实线为10次数值模拟的均值。由图5可见,调制深度在-10 dB时[如图5(a1)],输出信噪比为70 dB,时域结构相当规整,并且短脉冲的归一化峰值功率达到了18;调制深度在-30 dB时[如图5(a2)],输出信噪比为30 dB,子脉冲序列的峰值出现了略微的起伏;调制深度在-40 dB时[如图5(a3)],输出信噪比降到了10 dB,时域结构与未加调制时(图2)的情形很相似,已经变得非常不规则,长得最高的几处间隔仍然是12 ps。同样可以看到有调制作用的存在,频谱结构在梳状频谱下出现了很大一部分的灰色区域,频谱稳定性非常差,因此无法对图4中黑色区域(信噪比为10 dB)产生的梳状频谱进行有效利用。调制深度对调制信号的初始能量起到决定作用,调制信号能量越大,噪声放大的速度将不及调制光放大的速度,因此调制深度越大,抑制噪声放大的效果会越好,频谱的稳定性也越好。

4 结 论

利用振幅调制可以很好地改善梳状频谱稳定性和时域稳定性,并可以通过改变调制频率对梳状频谱密集度进行控制。要产生高密集度的梳状频谱需要较低的调制频率,但这将导致输出信噪比的下降,当输出信

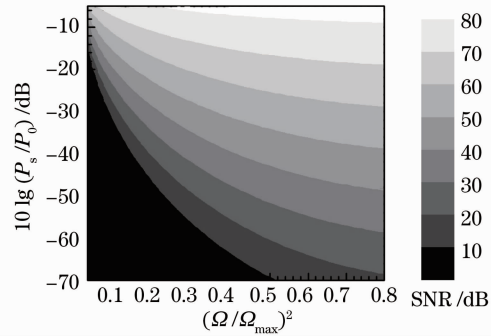


图4 不同调制频率和调制深度下的输出信噪比图

Fig. 4 NSR values at the area of different modulation frequency and depth

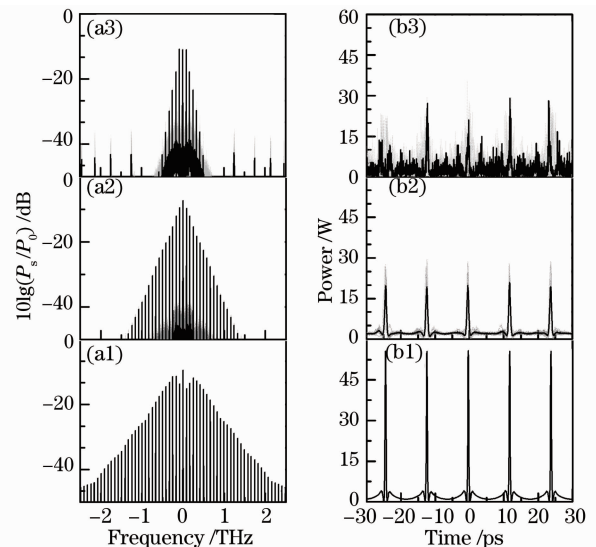


图5 不同调制深度下的频谱(a1)~(a3)与时域图(b1)~(b3)

Fig. 5 Spectrum (a1)~(a3) and temporal characteristics (b1)~(b3) at different modulation depth

噪比降到 10 dB 时,时域结构变得比较紊乱,从而会限制梳状谱在时域高要求场合的应用。但可以通过降低非线性系数、抽运功率以及增大二阶色散的方式,使实现调制不稳定性增益谱向内收缩,使噪声放大增益相同程度下降,然而这样做的结果会导致光纤的变长,功率损耗相应变大,抽运功率的下降也会导致输出功率谱密度的下降。在现实的非线性系数、二阶色散不可随意改变情况下,利用改变调制参量是定制梳状频谱的最佳选择,输出信噪比大于 10 dB 的参量区域就变得相当有意义。

参 考 文 献

- 1 R. R. Alfano, S. L. Shapiro. Emission in the region 4000 to 7000Å via four-photon coupling in glass[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **24**(11): 584~587
- 2 John M. Dudley, Goëry Genty, Stéphane Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- 3 S. M. Koltsev, S. V. Smirnov. Supercontinuum fiber sources under pulsed and CW pumping[J]. *Laser Physics*, 2007, **17**(11): 1303~1305
- 4 S. M. Koltsev, S. V. Smirnov. Temporal structure of a supercontinuum generated under pulsed and CW pumping[J]. *Laser Physics*, 2008, **18**(11): 1260~1263
- 5 K. Ho, J. M. Kahn. Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(6): 721~725
- 6 S. Bennett, B. Cai, E. Burr *et al.*. 1.8-THz bandwidth, zero-frequency error, tunable optical comb generator for DWDM applications[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(5): 551~553
- 7 S. Gee, F. Quinlan, S. Ozharar *et al.*. Simultaneous optical comb frequency stabilization and super-mode noise suppression of harmonically mode-locked semiconductor ring laser using an intracavity etalon[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 199~201
- 8 J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann *et al.*. Optical generation of very narrowlinewidth millimeterwave signals[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(25): 2309~2311
- 9 D. R. Solli, C. Ropers, P. Koonath *et al.*. Optical rogue waves[J]. *Nature*, 2007, **450**(7172): 1054~1058
- 10 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics. Principle & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dengfang *et al.* Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 88~93
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方译. 北京:电子工业出版社, 2002. 88~93
- 11 G. Genty, J. M. Dudley, B. J. Eggleton. Modulation control and spectral shaping of optical fiber supercontinuum generation in the picosecond regime[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **94**(2): 187~194
- 12 J. M. Dudley, G. Genty, B. J. Eggleton. Harnessing and control of optical rogue waves in supercontinuum generation[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 3644~3651
- 13 Sergey M. Koltsev, Sergey V. Smirnov. Influence of noise amplification on generation of regular short pulse trains in optical fibre pumped by intensity-modulated CW radiation[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 7428~7434
- 14 J. M. Dudley, G. Genty, F. Dias *et al.*. Modulation instability, akhmediev breathers and continuous wave supercontinuum generation[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21497~21508
- 15 F. Vanholsbeeck, S. Martin-Lopez, M. González-Herráez *et al.*. The role of pump incoherence in continuous-wave supercontinuum generation [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6615~6625
- 16 Zhang Hua, Han Wen, Wen Shuangchun *et al.*. Influence of stimulated scattering on modulation instability in single-mode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 32~37
张 华, 韩 文, 文双春 等. 单模光纤中受激喇曼散射对调制不稳定性的影响[J]. 光子学报, 2005, **34**(1): 32~37
- 17 Chen Chenying, Zhang Jinggui, Wen Jianguo *et al.*. Influence of noise on the propagation character of femtosecond pulse in photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1981~1985
陈春英, 张景贵, 文建国 等. 噪音对飞秒脉冲在光子晶体光纤中传输特性的影响[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 1981~1985
- 18 Deng Chunlian, Wen Shuangchun. Breakup mechanisms for chirped pulse in the single-mode fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1035~1040
邓春年, 文双春. 单模光纤中啁啾脉冲的分裂机制[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1035~1040