

振幅调制连续光产生高功率超短脉冲串的研究

何俊寅 杨 华

(湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 高功率超短脉冲串需求广泛,但是有限的平均功率和能量的低利用率限制了超短脉冲串的应用。基于不同于锁模机制的非线性孤子效应,利用振幅调制连续光抽运,数值模拟了光纤中高功率超短脉冲串的稳定产生。分别研究各输入参数如抽运功率、调制深度、调制频率以及光纤参数包括非线性系数、群速度色散系数等对高功率超短脉冲串输出特性的影响规律。为了综合考量各参数对抽运效率的影响,以利于光纤参数和调制参数的选择,引入了归一化调制频率。研究表明:选择具有小非线性及较大群速度色散的光纤,适当增加调制频率和调制深度,都可以在保证高平均功率输出的同时获得相对高的抽运效率,而较小抽运功率则有利于能量提取。

关键词 光纤光学;调制不稳定性;光纤;高功率;超短脉冲串;振幅调制

中图分类号 TN202 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.040602

Generation of High-Power Ultra-Short Pulse Train Induced by Intensity-Modulated Continuous Wave

He Junyin Yang Hua

(School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract High-power ultra-short pulse train is highly demanded in many areas, however, the limited average power and low energy utilization constrain the application of ultra-short pulse train. Our method is based on nonlinear soliton effect, which is different from locking mechanism. Using an amplitude-modulated continuous wave radiation as pumping source, we numerically simulate the stable generation of high-power ultra-short pulse train. The input parameters such as pump power, modulation depth, modulation frequency and the optical fiber parameters including nonlinear coefficient, group velocity dispersion coefficient, are studied, respectively. In order to comprehensively consider how various parameters affect the pumping efficiency, we introduce the normalized modulation frequency. The results show that choosing a fiber with a small nonlinear coefficient and a large group velocity dispersion, introducing an appropriate increase in modulation frequency and modulation depth, high average power output can be ensured and a relatively high pumping efficiency is obtained. However, a smaller pump power is beneficial to energy extraction.

Key words fiber optics; modulation instability; fiber; high power; ultra-short pulse train; intensity modulation

OCIS codes 060.2310; 020.1670

1 引 言

飞秒脉冲是目前能于实验室条件下在可见光至近红外波段获得的超短脉冲,它以其独具的持续时间极短、峰值功率极高和光谱宽度极宽等优点,在物理学、生物学、化学、光通信、外科医疗、精细加工制造及超小器械制造等领域得到很广泛的应用^[1,2]。而皮秒脉冲应用于激光特种加工(精细钻孔和细微切割等)、LED、液晶显示器以及薄膜太阳能等行业的高端设备精密加工^[3,4]。然而平均功率受限以及能量的低利用率,限制了这些超短脉冲串的应用。脉冲激光的平均功率取决于单脉冲能量和重复频率,而单脉冲峰值功率受到非线性效应、光损伤等因素的限制难以提高。所以增加超短脉冲串的重复频率是实现高平均功率超短脉冲串的有效途径。常规超短脉冲串一般是通过锁模方法实现的^[5]。由于受到腔长的制约,重复频率一般在几

收稿日期: 2011-09-30; **收到修改稿日期**: 2011-11-02; **网络出版日期**: 2012-01-19

作者简介: 何俊寅(1986—),男,硕士研究生,主要从事光通信技术方面的研究。E-mail: 49571473@qq.com

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

E-mail: yanghua01@yahoo.com.cn

十兆赫兹至几百兆赫兹,难于再提高,而且环境的变化会导致锁模状态的破坏,使得激光器不能有效工作。与其他传统的电或者光电方法相比,利用非线性孤子效应的振幅调制方法简单、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^[6]。同时,获得的脉冲重复频率可以高达几十吉赫兹甚至几十太赫兹,而且可以通过调节扰动的调制周期使脉冲重复频率可调^[7]。在光纤激光技术中,已成功地利用孤子效应产生了规则稳定的超短脉冲。1992年,Agrawal^[8]采用掺铒光纤放大器利用连续光源产生高重复频率的飞秒脉冲串输出。2005年,Kobtsev等^[9]研究了在连续波抽运下通过调制不稳定性产生的皮秒脉冲,发现由于噪声的作用导致单个脉冲的能量和频率存在随机性。2006年,Dudley等^[3]分别研究了短脉冲和长脉冲超连续谱的产生机制,同时证明了噪声对长脉冲形成超连续谱过程存在较大影响。2007年,Kobtsev等^[4]提出在连续波传输中引入噪声通过调制不稳定性依然可以产生脉冲串,但是不稳定性和结构的不规则性是它的最大缺点,引入振幅调制后,抑制噪声作用仍可产生稳定规则的脉冲串。2010年,Zhang等^[10]利用被动锁模的掺铒光纤激光器,根据调制不稳定性原理,产生重复频率在54~118 GHz可控的低功率皮秒脉冲串。

高重复频率的稳定超短脉冲串在当今的很多领域特别是光通信领域的应用越来越多,因此,对于这种超短脉冲串产生机制的研究非常重要。在连续波作为抽运光源产生高重复频率超短脉冲串的过程中,会受到抽运功率、加入振幅调制的调制深度和调制频率以及光纤参数如非线性系数、二阶色散等参数的影响,导致产生脉冲串的特性包括平均功率、单个脉冲宽度、峰值功率以及抽运效率等的不同。本文基于调制不稳定性的微扰放大理论,主要研究各项参数对超短脉冲输出特性的影响。由于振幅调制抑制噪声作用,为了使输出结果特性更明显,均未加入噪声效果。引入归一化调制频率,综合考量各参数对抽运效率的影响。最终给出一组优化参数,利用尽量低的抽运功率实现高抽运效率得到较高平均功率超短脉冲串。

2 理论模型

在抽运的初始阶段,即使选用高功率的连续光抽运,相对于皮秒脉冲之类的超短脉冲,仍具有较低的峰值功率和较大的脉冲宽度,并且在本文的数值模拟计算中所选取的二阶色散系数均远离零色散点,所以高阶色散和高阶非线性项可以忽略。此外,Vanholsbeeck等^[11]的实验证明仅有1%的能量转化为广义非线性薛定谔(NLS)方程中的自陡、拉曼以及高阶色散项,因此在计算中可利用简单的NLS方程建立模型^[12],如果忽略损耗项,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, T 表示脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的传播时间, $T = t - z/v_g$, β_2 为群速度色散参量。

调制不稳定性对于长脉冲在光纤中的传播起主要作用,对(1)式进行线性稳定性分析^[13~15],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 $\Omega_c = 4\gamma P_0 / |\beta_2| = 4/|\beta_2 L_{NL}|$ 为调制不稳定性的增益谱范围, P_0 为抽运光功率, L_{NL} 为非线性长度。只有落在调制不稳定性增益谱范围内的频率才能被放大,即满足 $|\Omega| < \Omega_c$ 。在增益谱范围内存在最大增益频率 $\Omega_{max} = \pm (\Omega_c / \sqrt{2}) = \pm (2\gamma P_0 / |\beta_2|)^{1/2}$, 落在最大增益频率处可以得到最大功率增益 $g_{max} \equiv g(\Omega_{max}) = 1/2 (|\beta_2| \Omega_c^2) = 2\gamma P_0$ 。

文中均选取脉宽为3 ns,抽运波长在1320 nm处的超高斯脉冲包络表征连续光,初始输入为

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

式中 $a_0 \exp(-i\Omega T)$ 为加入的调制项, P_0 为抽运光功率, c 为啁啾系数, a_0 为调制深度。采用文献^[16]所用方法引入振幅调制连续波,输入总功率取抽运光功率与调制信号光功率的总和,即 $\sum P = P_0 + P_s$, 并且信号光功率 $P_s = a_0^2 P_0$, $0 \leq a_0 \leq 1$ 。在总功率不变的条件下,随着调制深度的增加,信号光 $P_s = [a_0^2 / (1 + a_0^2)] \sum P$ 的功率会不断增加,但是抽运光 $P_0 = [1 / (1 + a_0^2)] \sum P$ 的功率不断减小,将影响调制不稳定性的增益谱和

利用最大增益频率进行归一化的调制频率 Ω/Ω_{\max} 。

3 数值模拟与结果分析

3.1 光纤非线性系数影响

非线性系数的大小表征非线性效应的强弱,改变非线性系数会导致输出超短脉冲串的特性不同。保持群速度色散系数为 $\beta_2 = -90 \text{ ps}^2/\text{km}$,调制频率为 $\Omega = 50 \text{ GHz}$,调制深度 $a_0 = 0.3$,连续波功率为 $P_0 = 120 \text{ W}$ 不变,改变光纤非线性系数 γ ,从而改变非线性效应的强弱,起到调节调制不稳定性增益谱位置以及增益大小的作用,分析非线性系数对峰值功率、脉宽、抽运效率和平均功率的影响规律。由图 1 可见,随着非线性系数的增大,非线性效应增强,脉冲压缩加剧,峰值功率变大,脉冲的非线性效应变得越强,相应地需要使脉宽变窄以增强色散作用、平衡非线性效应。脉冲压缩同时造成间隔增大,从而导致抽运效率及平均功率降低,脉宽减小,形成脉冲串所需的最佳光纤长度缩短。

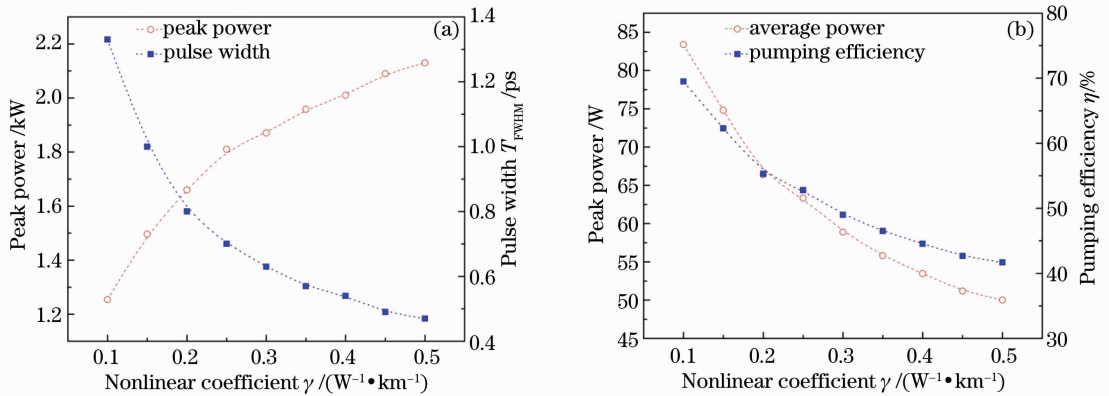


图 1 (a)非线性系数对输出峰值功率和脉冲宽度的影响;(b)非线性系数对输出平均功率和抽运效率的影响
Fig. 1 (a) Effect of nonlinear coefficient on peak power and pulse width; (b) effect of nonlinear coefficient on average output power and pumping efficiency

3.2 群速度色散的影响

群速度色散主要引起时域效应,但通过自相位调制其作用将传递到频域,因此群速度色散作用对于调制不稳定性也有很大影响。保持调制频率为 $\Omega = 50 \text{ GHz}$,调制深度 $a_0 = 0.3$,非线性系数 $\gamma = 0.1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 不变,改变二阶色散参数,分析群速度色散对峰值功率、脉宽、抽运效率和平均功率的影响规律。由图 2 可见,随着二阶色散降低至逐渐接近零色散点,群速度色散作用逐渐减弱,使频率分量走离减弱,峰值功率增加,脉宽变窄,因此输出平均功率将随着群速度色散的减弱而减小,同时抽运效率降低,形成脉冲串所需最佳

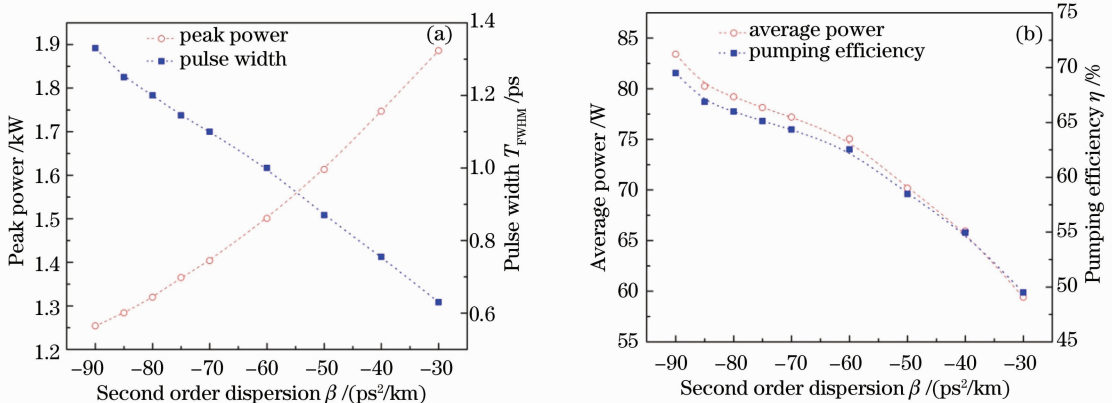


图 2 (a)二阶色散对输出峰值功率和脉冲宽度的影响;(b)二阶色散对输出平均功率和抽运效率的影响
Fig. 2 (a) Effect of the second-order dispersion on the peak power and pulse width; (b) effect of the second-order dispersion on the average output power and pumping efficiency

光纤长度增加。

3.3 调制频率的影响

调制频率改变脉冲序列的重复频率,从而通过改变输出频谱获得不同的调制不稳定性增益。保持光纤非线性系数为 $\gamma=0.1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,二阶色散为 $\beta_2 = -90 \text{ ps}^2/\text{km}$,调制深度为 $a_0=0.3$ 不变,改变调制频率,分析调制频率对峰值功率、脉宽、抽运效率和平均功率的影响规律。由图 3 可知,增加调制频率,归一化调制频率增加,脉冲串重复频率增加,单位时间内脉冲数变多,单个脉冲获得能量变少,脉冲峰值功率下降,使非线性效应降低。为了维持单脉冲稳定,保持孤子状态,色散作用必须减弱,因此脉冲宽度增加。输出平均功率将随着调制频率的增加而增加,所需最佳光纤长度变短。

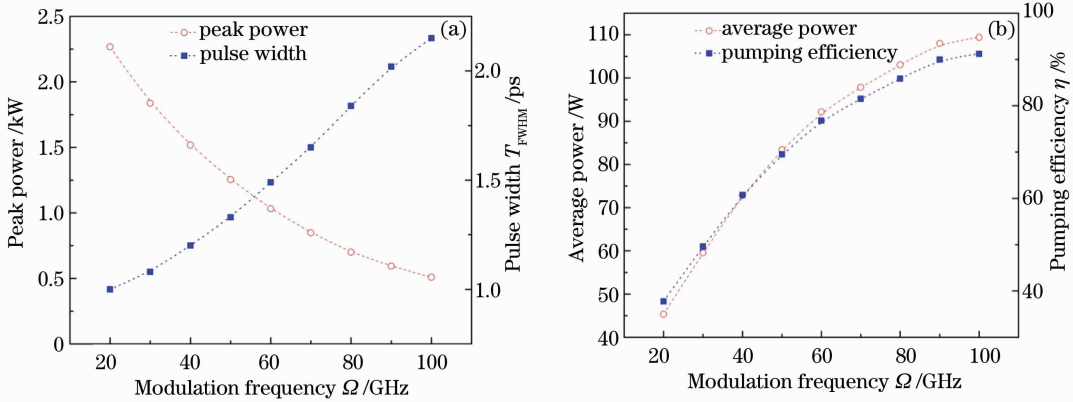


图 3 (a) 调制频率对输出峰值功率和脉冲宽度的影响; (b) 调制频率对输出平均功率和抽运效率的影响

Fig. 3 (a) Effect of modulation frequency on peak power and pulse width; (b) effect of modulation frequency on average output power and pumping efficiency

3.4 调制深度的影响

调制深度影响输入总功率的分配 $\sum P = P_0 + P_s$, 并且 $P_s = a_0 P_0$, 其中 $1 \leq a_0 \leq 1$ 。在总功率不变的情况下,调制深度的增加会增大信号光所分得的功率,抽运光所分得的功率减小,使调制不稳定性增益谱向内收缩,最大增益频率减小。由图 4 可知,随着调制深度的增加,信号能量光越来越接近抽运光,有效增强混频过程,因此频率分量会随着调制深度的增加而增加,提高了抽运效率。同时由于频谱分量增加,脉冲变得陡峭,增强了色散效应,因此峰值功率将变大来平衡增强的色散效应,所需最佳光纤长度变短。

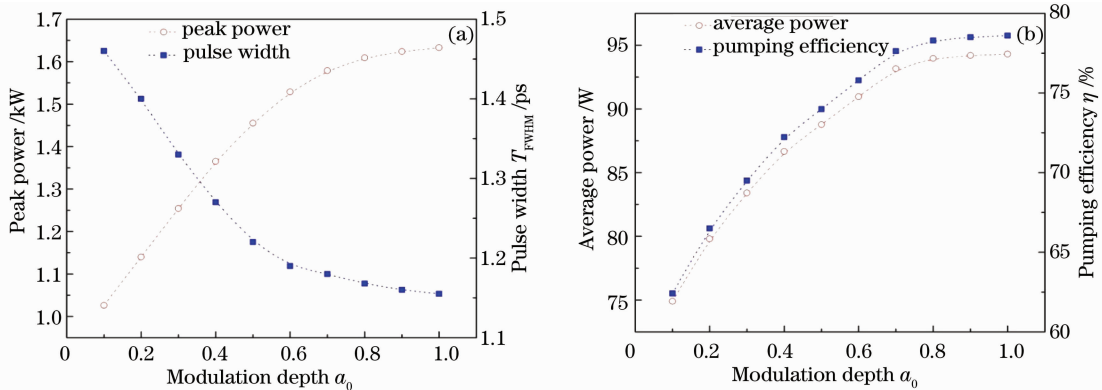


图 4 (a) 调制深度对输出峰值功率和脉冲宽度的影响; (b) 调制深度对输出平均功率和抽运效率的影响

Fig. 4 (a) Effect of modulation depth on peak power and pulse width; (b) effect of modulation depth on average output power and pumping efficiency

3.5 抽运功率的影响

保持群速度色散为 $\beta_2 = -90 \text{ ps}^2/\text{km}$,调制频率 $\Omega=50 \text{ GHz}$,非线性系数 $\gamma=0.1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,调制深度 $a_0=0.3$ 。通过改变抽运功率 P_{pump} ,分析抽运功率对峰值功率、脉宽、抽运效率和平均功率的影响规律。抽

运功率的增加将导致光纤中光传输的非线性效应增强,扩大调制不稳定性的增益谱和最大增益频率。因此随着抽运功率的增加,脉冲宽度将变窄,峰值功率增加,所需最佳光纤长度变短,抽运效率降低,如图5所示。可见小功率抽运的能量的利用率较高。

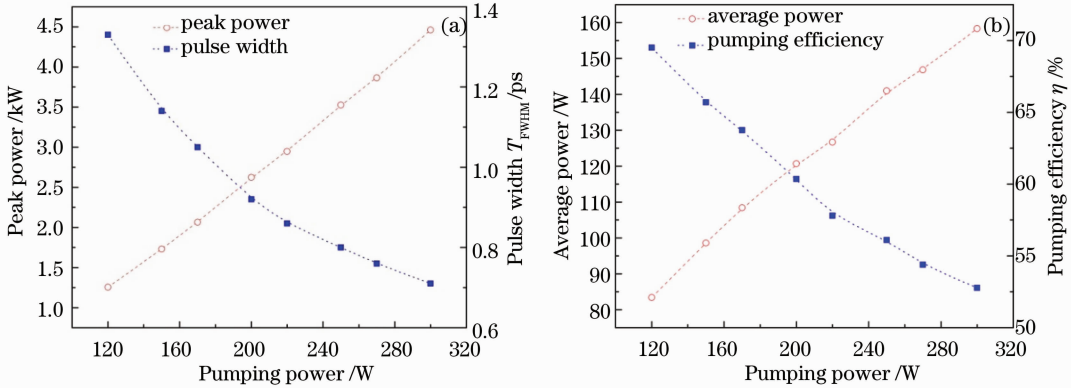


图5 (a)抽运功率对输出的峰值功率和脉冲宽度的影响;(b)抽运功率对输出平均功率和抽运效率的影响
Fig. 5 (a) Effect of pump power on peak power and pulse width; (b) effect of pump power on average output power and pumping efficiency

3.6 结果分析

改变 P_{pump} 、 a_0 、 Ω 、 β_2 和 γ 都会影响调制不稳定性增益谱或频率增益的变化,从而造成输出超短脉冲串的特性不同。由前面的数值研究结果综合分析可知,若想得到高功率超短脉冲输出,需要光纤有较小的非线性系数和较大的群速度色散系数,以及较高的抽运功率、较大的调制深度和调制频率,而较小抽运功率则有利于能量提取。为了提高能量的利用率,必须在获取高平均功率和相对较高的抽运效率之间取得平衡。

为减小影响研究问题的变量维数,引入一个变量,即归一化调制频率 $\Omega/\Omega_{\text{max}}$,使抽运效率 $\Omega/\Omega_{\text{max}}$ 的变化归结到该变量的变化,并使研究更具有普遍性。根据归一化调制频率表达式可以计算出非线性系数的增加、群速度色散的增加以及抽运功率的增加都会使归一化调制频率减小,而调制频率和调制深度的增加会使归一化调制频率增大。各参量 P_{pump} 、 γ 、 β_2 、 Ω 和 a_0 影响归一化调制频率 $\Omega/\Omega_{\text{max}}$,也同时影响着抽运效率 η ,因此 $\Omega/\Omega_{\text{max}}$ 与 η 的关系可以根据上述两组关系间接的获得。如图6所示,数值模拟得到的抽运效率数据点的分布较有规律,随着归一化调制频率的增大,抽运效率增加,并且在后期其增加速度减缓,最大达到90%左右。在数值模拟过程中存在着数据读取误差,使得某些数据点偏离拟合曲线,但是这已足够表现出抽运效率随归一化调制频率变化的规律性。引入归一化调制频率和抽运效率的关系,更有利于选取合适的抽运条件,实现高效率抽运。

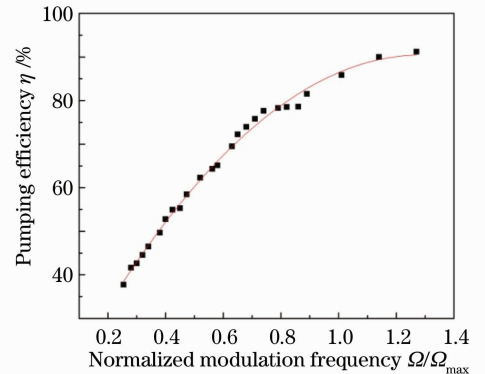


图6 归一化调制频率和抽运效率的关系
Fig. 6 Relation between pumping efficiency and normalized modulation frequency

在许多领域尤其是在光通信系统中,对于平均功率在100 W左右的高重复频率超短脉冲串的需求最多。选取合适的参数最方便高效地得到这样的脉冲串十分重要。在数值计算中增加调制频率、减小非线性系数、采用较大的群速度色散系数、增加调制深度和减小抽运功率都可以得到相对高的抽运效率,选取120 W的连续光抽运,加入100 GHz的振幅调制, $a_0=0.3$ 已经满足现实中较大的振幅调制深度,可以得到的峰值功率为0.5 kW,重复频率为100 GHz,平均功率可达109.4 W,实现了非常高的抽运效率(91.2%),得到理想的输出结果。根据不同的需求可以适当牺牲抽运效率,选取抽运功率在120~150 W之间变化,调制深度在0.1~0.3之间变化,保持高调制频率以及非线性系数和群速度色散不变,可以使平均功率100~140 W可调,抽运效率仍保持在80%以上。

4 结 论

对于振幅调制连续波在光纤中传输、利用调制不稳定性产生高功率的超短脉冲串,整个过程中不同的初始参数会对输出结果产生不同的影响。改变 P_{pump} 、 a_0 、 Ω 、 β_2 和 γ 都会影响调制不稳定性增益谱或频率增益的变化,从而造成输出脉冲串的特性不同。由数值研究结果综合分析可知,若想得到高功率超短脉冲串输出,需要光纤有较小的非线性系数和较大的群速度色散系数,以及较高的抽运功率、较大的调制深度和调制频率,而较小抽运功率则有利于能量提取。引入一个变量——归一化调制频率 $\Omega/\Omega_{\text{max}}$,各个参量的改变均引起它的改变。随着归一化调制频率的增大,抽运效率会随之增加,但在后期抽运效率的增加速度减缓。引入归一化调制频率和抽运效率的关系,更有利于选取合适的抽运条件,实现高效率抽运,对高功率超短脉冲串的产生有一定的理论意义。

参 考 文 献

- 1 Akira Hasegawa. Generation of a train of soliton pulse by induced modulational instability in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(7): 288~290
- 2 P. Peterka, P. Honzatko, J. Kanka *et al.*. Generation of high repetition rate pulse trains in a fiber laser through a twin-core fiber [C]. *SPIE*, 2003, **5036**: 376~381
- 3 John M. Dudley, Goëry Genty, Stéphane Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- 4 S. M. Kobtsev, S. V. Smirnov. Supercontinuum fiber sources under pulsed and CW pumping [J]. *Laser Physics*, 2007, **17**(11): 1303~1305
- 5 S. Gee, F. Quinlan, S. Ozharar *et al.*. Simulation 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
- 6 K. Tai, A. Tomita, J. L. Jewell *et al.*. Generation of subpicosecond solitonlike optical pulse at 0.3 THz repetition rate by induced modulation instability [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(5): 236~238
- 7 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. 五阶非线性光纤中扰动所致超短脉冲串的产生 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1946~1950
- 8 G. P. Agrawal. Modulation instability in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(6): 562~564
- 9 S. M. Kobtsev, S. V. Smirnov. Modelling of high-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion shifted fibers at CW pump [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6912~6918
- 10 S. M. Zhang, S. X. Gao, C. J. Jin *et al.*. Generation of picosecond soliton pulses with tunable repetition rate by modulation instability [J]. *Optik*, 2010, **121**(11): 1033~1035
- 11 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
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics. Principle & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 88~95
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹, 谈 斌 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 88~95
- 13 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. 单模光纤中受激拉曼散射对调制不稳定性的影响 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 32~37
- 14 Chen Chunying, 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. 噪声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
- 15 Deng Chunnian, Wen Shuangchun. Breakup mechanisms for chirped pulse in the single-mode fiber [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
- 16 Goëry Genty, John M. Dudley, Benjamin 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