

文章编号:1001-5078(2013)12-1359-04

· 激光器技术 ·

基于主动锁模控制的激光谐波研究

赵峰

(许昌广播电视大学,河南 许昌 461000)

摘要:介绍一种采用主动锁模控制产生超短激光脉冲序列的方法。首先通过基于主动锁模激光系统的参量自治微分方程思想,导出了系统出现稳定条件时参数设置方法。然后利用铌酸锂的非线性,展开成贝塞尔系数的函数级数,载频与边频数差为调制频率的整数倍,最后产生高重复频率超短光脉冲,得到高阶锁模脉冲,实验结果表明:其通过调节调制器的调制参数来控制谐振腔中的模式损耗,在调制频率为1GHz量级的情况下,可获得重复频率10GHz的超短光脉冲序列,有啁啾时脉冲时域形状是很好的高斯型,没有出现明显畸变。

关键词:再生锁模;相位差;贝塞尔系数

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.09

Study of laser harmonic based on active mode-locked control

ZHAO Feng

(Xuchang Radio and Television University, Xuchang 461000, China)

Abstract:An active mode-locked control method is presented. Firstly based on the parametric autonomous differential equation of actively mode-locked laser, parameter setting method is derived when the system is stable. Then using lithium niobate's nonlinear effect, a series of functions with Bessel coefficients are obtained. The difference of carrier frequency and side frequency is integral multiple of the modulation frequency. Finally ultra-short laser pulses with high repetition rate and high order mode-locking are generated. The experiment results show that: the mode loss can be controlled by adjusting the modulator's parameters, with 1GHz of modulation frequency, 10GHz repetition frequency ultra-short laser pulse sequence are obtained. The chirped pulse shape is a good Gauss type.

Key words:regeneration mode-locking; phase; Bessel coefficients

1 前言

光纤锁模环形激光器能提供较大的增益以及在腔内利用光纤的自相位调制效应与色散的补偿作用,可以产生高重复率、频率可调、无啁啾的超短脉冲。被动锁模的光纤激光器由于没有主动控制元件,锁模频率难以稳定控制。主动锁模光纤环形孤子激光器由于引入损耗或相位调制,若采用谐波锁模可产生数千兆赫以上脉冲,并且方便地给出同步信号,是一种理想的超短脉冲光源。Dave等人利用高速铌酸锂幅度调制器作为锁模器件获得了重复频率为14GHz、脉宽为20ps的稳定脉冲序列,Naka-

zawa等人用主动锁模光纤环形孤子激光器获得了重复频率为10GHz、脉宽为2.7ps的稳定的孤子脉冲序列^[1]。同时主动锁模光纤激光器几乎可以覆盖WDM系统中EDFA增益谱,波长调谐范围与光纤系统具有很好的兼容性等优点,近年来成为研究的热点一。

本文用铌酸锂强度调制器的非线性来获取高阶锁模脉冲,给出表达式,通过调制器来控制谐振腔中

作者简介:赵峰(1973-),男,讲师,硕士,研究方向为光电信息工程。E-mail:hnxedd2013@163.com

收稿日期:2013-04-23

的损耗,为了达到锁模的稳定性,用再生锁模方式控制主动锁模。

2 高阶谐波产生过程

2.1 再生锁模激光系统的参量自治微分方程组

假设再生锁模激光系统的光脉冲幅值在腔内往返循环一次有很小的变化量,则此系统由动力学的二维自治微分方程组描述如下:

假设如果系统从 (x_0, y_0) 出发的光场为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = g(x, y) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x(t) = x(t, t_0, x_0, y_0) \\ y(t) = y(t, t_0, x_0, y_0) \end{cases} \quad \text{满足:}$$

$$\begin{cases} x(t+T, t_0, x_0, y_0) = x(t, t_0, x_0, y_0) \\ y(t+T, t_0, x_0, y_0) = y(t, t_0, x_0, y_0) \end{cases}$$

其中, t 是锁模脉冲宽度内的时间变量, T 光在腔内的往返时间, $x(t), y(t)$ 形成新的光场。

封装介质产生的增益为:

$$g = \frac{g_0}{1 + \frac{W}{E_L}}$$

其中, g_0 表示小信号增益系数; E_L 表示增益介质的饱和量; $W = 2A_0^2\tau$ 是脉冲能量; A_0 是激光锁模脉冲幅值; τ 是时间 t 的函数,同时假设啁啾参量为 β 。为了分析脉冲输出,需要考虑动力学自治微分方程的稳定性^[2],系统出现稳定条件时状态脉冲控制策略如下:

$$0 < \beta < \left\{ \frac{(1+h)(1-(1-p)h)}{(1-h)(1+(1-p)h)} \right\}^{-\frac{1}{7}} \left\{ \frac{(1-h)(1-p)}{1-(1-p)h} \right\}^{\frac{1}{7}} - 1$$

式中, h 为脉冲时间控制阈值; $p \in (0, 1)$ 自设参数,这样系统出现稳定的周期。

则关于参量自治微分方程组^[3]如下:

$$\begin{cases} T_R \frac{\partial A_0}{\partial T} = (g-l)A_0 - \frac{(\frac{g}{\Omega_g^2} - D\beta)A_0}{\tau^2} \\ T_R \frac{\partial \tau}{\partial T} = \frac{3D\beta + \frac{g}{\Omega_g^2}(2-\beta^2)}{\tau^2} - M \frac{\omega_M^2 \tau^3}{2} \\ T_R \frac{\partial \beta}{\partial T} = 2\delta A_0^2 + \frac{4D - 2\frac{g}{\Omega_g^2}\beta + 4D\beta^2 - 2\frac{g}{\Omega_g^2}\beta^3}{\tau^2} - M\beta\omega_M^2\tau^2 \end{cases}$$

其中, T_R 是与 T 同数量级的时间变量; l 表示激光腔内的线性损耗; M 是铷酸锂调制器调制深度; ω_M 表示铷酸锂调制调制频率; δ 表示自相位调制; D 是腔

内群速色散; g/Ω_g^2 是增益色散参量。由于腔超短脉冲光纤激光器中存在模式牵引和空间烧孔效应,激光器锁模的启动阈值功率相对较高,光纤环中正反方向传输不同强度的光,将引起腔内各种模式不同的非线性相移^[4]。

2.2 再生锁模控制

再生锁模激光器解决了由腔长变化带来的锁模不稳定性。当腔长变化的时候,可自动地调整调制频率,使其与激光器谐振频率相匹配,从而得到稳定的脉冲运转。本文再生锁模光纤激光器采用拍频反馈控制调制频率方法^[5],在时钟提取回路还引入一相位制器,调整脉冲与调制信号的相位,使脉冲达到最佳的锁模状态,光路如图 1 所示。

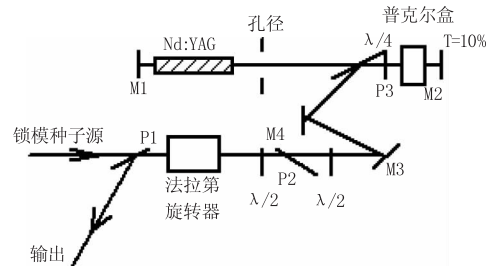


图 1 再生锁模控制放大器光路

Fig. 1 Regenerative mode-locking control of optical amplifier

P1、P2、P3 是偏振片, Nd:YAG 是光纤耦合后端面泵浦, M1、M2、M3、M4 是腔镜, λ 是激光脉冲。利用在光纤环路中运行的光脉冲包含有激光谐振腔纵模的各种谐波分量,从输出脉冲中提取光信号并经过光电转换将其变为电信号,再由高频滤波器提取所需的谐波分量,经过微波放大器后,作为调制器的驱动信号重新反馈给调制器,这样就保证了调制频率与腔内纵模谐波分量之间的控制与相互匹配^[6]。以再生锁模控制为基础,利用铷酸锂强度调制器的非线性产生高重复频率超短光脉冲,在锁模激光器中产生高阶锁模脉冲^[7]。

2.3 高阶锁模脉冲产生过程

本文在调制频率微量的情况下,可获得输出脉冲重复频率超短光脉冲序列,即获得重复频率为分频、3 阶、5 阶、7 阶的满意脉冲序列。采用周期性调制谐振腔参量的方法,在腔内插入一个受外界信号控制的调制器,用一定的调制频率,周期性的改变谐振腔内振荡的振幅或相位。当选择的调制频率与纵模间隔相等时,对各个模的调制会产生边频,其频率与两个相邻纵模的频率一致。由于模之间的相互作用,使所有的模在足够的调制下达到同步,形成锁模序列脉冲。

令铷酸锂强度调制器在的输出光场为:

$$E(t) = E \exp(j\omega_0 t) \cos(\Delta\varphi/2)$$

调制器与加在上面的电压成非线性关系,这就为高阶脉冲提供了基础^[8-10]。输出光场化为:

$$E(t) = \cos\left[\left(\beta_1 \frac{\pi}{2} + \beta_2 \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_m t)\right] \cos(\omega_0 t)$$

其中, $\beta_1 = \frac{V_b}{V_\pi}$, V_b 为铌酸锂所加配置电压; $\beta_2 = \frac{V_{ac}}{V_\pi}$ 为加在调制器上的驱动信号电压幅度大小; V_{ac} 是角频率为 ω_m 的正弦射频信号电压幅值, 展开含有贝塞尔系数的 \cos 函数级数形式:

$$E(t) = J_0\left(\beta_1 \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\beta_2 \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_0 t) - J_1\left(\beta_1 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\pi}{2} \sin\left(\beta_2 \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_0 t \pm \omega_m t) - J_2\left(\beta_1 \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\beta_2 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\pi}{2} \cos(\omega_0 t \pm 2\omega_m t) + J_3\left(\beta_1 \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\beta_2 \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_0 t \pm 3\omega_m t)$$

其中, $J_n(\beta_1)$ 是以 β_1 为参数的 n 阶第一类贝塞尔函数; J_0 为中心频率项; J_1, J_2, \dots 为输出光谱的一阶、二阶边模, 载频上下有边频分量, 其中载频与边频数差为调制频率的整数倍。调制后信号的频谱被移到载频的附近, 形成上下对称的边带, 输入到调制器的光场主要受到该边再生锁模所含有的调制频率谐波分量的幅度调制, 由法拉第和 45° 转子构成超短脉冲串进入谐振腔的光开关; 由第一高反镜、增益介质 I、介质膜偏振片、普克尔盒和第二高反镜构成对超短光脉冲串进行脉冲叠加和光谱窄化的谐振腔。通过延迟线控制它们之间的光程差, 能够实现完全同步^[11]。

3 实验

激光器全部采用国产非保偏光纤, 利用 Tektronix CSA803A 通信信号分析仪/InGaAs APD 高速光电探测器、DS3-GENESIS 光谱仪(分辨率 0.02 nm)、自相关仪分别测量输出光脉冲的波形、谱宽和脉冲宽度, 调节偏振控制器及调制器的偏置电压, 如图 2 所示, 用 F-P 标准具插入腔内选模, 只允许增益的多普勒线型、谐振腔腔模线型及 F-P 腔透过率线型相乘的重叠积分不为零的一个纵模形成激光振荡。

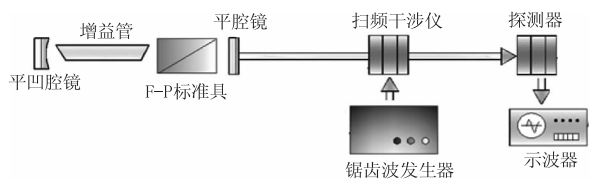


图2 系统图

Fig 2 System diagram

系统指标如下: 激光光源波长 632.8 nm, 功率 30 mW, 腔长 1.6 m, He-Ne 增益管长 1.0 m; 插入锁模器后, 新锁模激光器平均功率大于 5 MW; 锁模脉冲间隔 10 ns, 脉冲宽度 2 ns; 共焦球面扫频干涉仪自由光谱区 2.5 GHz, 精细常数 200; 激光功率计三波长 532 nm, 632.8 nm, 650 nm, 最大测量功率 100 mW; 透镜直径为 ± 0.2 mm, 透镜焦距为 $\pm 2\%$, 透镜中心偏差为 $3'$; 选频 F-P 标准具面型 $\Delta N = 0.1$, 光洁度 I 级, 平行度 $2''$; 可得到重复频率 10 GHz、脉宽为 9 ~ 10 ps、谱宽为 0.3 ~ 0.4 nm 的光脉冲, 飞秒激光参量啁啾脉冲放大激光器的脉宽是 1560 nm, 输出平均功率达 1.7 mW, 能够稳定输出序列超短光脉冲。飞秒激光参量啁啾脉冲放大激光器由分束器、频率转换器、多脉冲叠加放大器、倍频器、脉冲展宽器、延迟线、二色镜和非线性晶体铌酸锂组成。

在实验中, 采用铌酸锂调制器, 非线性含有较强的高次谐波分量, 有利于有理数谐波锁模。当减小光放大器的增益或增加腔内损耗时, 有理数谐波锁模现象消失当换用增益更大的光放大器时, 会出现更高次的谐波锁模, 得到再生锁模控制的高阶锁模脉冲, 如图 3 所示分别为较短腔长结构主动锁模激光器输出的 3 阶、4 阶、5 阶谐波光脉冲。

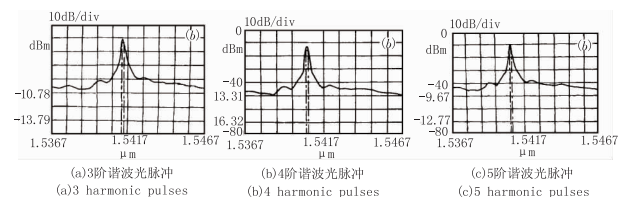


图3 主动锁模激光器输出光脉冲

Fig. 3 Active mode-locked laser output light pulse

入射脉冲能量都是 0.3 mJ, 无啁啾脉冲脉宽较窄, 脉冲形状发生剧烈畸变。有啁啾时脉冲变窄, 脉冲时域形状是很好的高斯型, 没有出现明显畸变, 这是由于啁啾的作用抵消了自陡和脉冲内拉曼散射共同作用所引起的高阶孤子裂变的结果, 如图 4 所示。在实验过程中发现: 随着谐波脉冲重复频率的提高, 再生锁模增益恢复的时间也越来越小, 为了给环腔提供足够的增益, 必须提高再生锁模的偏置电流, 腔内损耗的调节是通过仔细调节电光调制器的直流偏压来实现的。实验发现采用复合腔结构的主动锁模激光器的脉冲幅值抖动小于单一子腔, 并且锁模脉冲比单腔情况下稳定更长时间工作, 达到 5 h 以上, 稳定性较好。

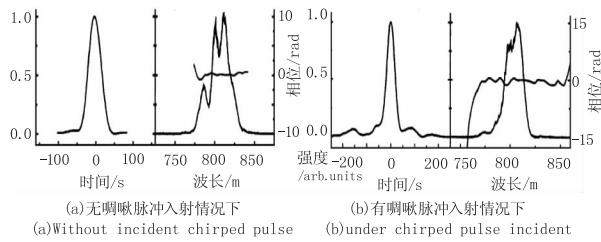


图4 系统的稳定性

Fig. 4 The stability of system

4 总结

以再生锁模控制的高阶谐波建立了相应的理论模型,研究了再生锁模脉冲在高阶锁模脉冲形成的谐波过程,通过有理数谐波锁模可以用来产生高于调制频率的超高速率的光脉冲信号。

参考文献:

- [1] Cao Shunxiang, Liu Wei, Wang Faqiang, et al. Analysis of actively mode-locked fiber ring laser[J]. Journal of China Institute of Communications, 1999, 20(4): 18 - 22. (in Chinese)
曹顺湘, 刘卫, 王发强, 等. 主动锁模光纤环形孤子激光器的分析[J]. 通信学报, 1999, 20(4): 18 - 22.
- [2] Qian Linning, Lu Qishao. Dynamics of a class of autonomous impulsive equations [J]. Journal of Dynamics and Control, 2008, 6(2): 97 - 101. (in Chinese)
钱临宁, 陆启韶. 一类自治脉冲微分方程的动力学研究[J]. 动力学与控制学报, 2008, 6(2): 97 - 101.
- [3] Su Yan, Zheng Zhiren, Su Wenhui. Steady-state output and its stability in regeneratively mode locking lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 6889 - 6992. (in Chinese)
苏艳, 郑植仁, 苏文辉. 再生锁模激光系统的定态输出及其稳定性 [J]. 物理学报, 2007, 56(12): 6889 - 6992.
- [4] Li Zhe, Zhang Wei, Zhao Wei, et al. Impact of injection noise on locked starting of fiber lasers [J]. High Power Laser And Particle Beams, 2007, 19(11): 1807 - 1809. (in Chinese)
李喆, 张伟, 赵卫, 等. 注入噪声对光纤激光器锁模启动的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1807 - 1809.
- [5] Ma Boqin, Ma Dongli, Li Zhiyuan, et al. Quasi-periodic ferroelectric crystals at different levels of the quasi-phase matched second harmonic frequency [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3473 - 3476. (in Chinese)
马博琴, 马冬莉, 李志远, 等. 准周期铁电晶体中不同阶次的准相位匹配谐波[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3473 - 3476.
- [6] Xu Fan, Zhang Xinliang, Liu Deming, et al. Single-ended semiconductor optical amplifier based on tunable source of ultrashort optical pulses Theoretical and experimental study [J]. Physics, 2006, 55(1): 211 - 215. (in Chinese)
徐帆, 张新亮, 刘德明, 等. 基于单端半导体光放大器的可调谐超短光脉冲源理论与实验研究 [J]. 物理学报, 2006, 55(1): 211 - 215.
- [7] Wang Lin, Yu Jinlong, Ma Xiaohong, et al. Using beat frequency modulation frequency feedback control to achieve regeneration mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. Optical Communications Research, 1999, (6): 26 - 29. (in Chinese)
王林, 于晋龙, 马晓红, 等. 采用拍频反馈控制调制频率实现再生锁模掺铒光纤激光器研究 [J]. 光通信研究, 1999, (6): 26 - 29.
- [8] Ren Deming, Bai Yan, Zhao Weijiang, et al. Experiment on q-switched and active mode-locking Nd : YAG picoseconds' laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 885 - 888. (in Chinese)
任德明, 白岩, 赵卫疆, 等. 调 Q 主动锁模 Nd : YAG 皮秒激光器实验 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 885 - 888.
- [9] Yang Wenyan, Dong Xiaolong, Tang Haiyan. Numerical study of an actively mode-locked fiber ring laser with SOAs [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(19): 4647 - 4650. (in Chinese)
杨文艳, 董晓龙, 唐海燕. 基于 SOA 的主动锁模环形光纤激光器的数值研究 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19): 4647 - 4650.
- [10] Lin Song, Zhao Jiangshan, Zhou Yi. Periodically poled lithium tantalate crystal intracavity frequency doubling experimental study [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 2808 - 2811. (in Chinese)
林嵩, 赵江山, 周翊. 周期极化钽酸锂晶体腔内倍频实验研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2808 - 2811.
- [11] Ye Miao, Wang Qihua. Study on high-order harmonic generation based on regenerative mode-locked control [J]. laser & infrared, 2010, 40(11): 1195 - 1200. (in Chinese)
叶苗, 王其华. 基于再生锁模控制的激光器高次谐波研究 [J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1195 - 1200.