

文章编号: 1001-3806(2009)02-0169-03

谐波锁模光纤激光器脉冲振幅数值分析

张静,曹志刚,徐峰,叶勇,张瑞珏,王保三,俞本立*

(安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室,合肥 230039)

摘要: 为了研究马赫-曾德尔型调制器的调制特性及锁模脉冲振幅均衡条件,采用调节直流偏置电压和调制深度的方法,来控制调制器透射曲线。通过时域分析,在5GHz调制频率下对锁模脉冲序列和调制曲线进行数值研究。用MATLAB软件模拟分析了2阶~7阶锁模光脉冲序列和调制曲线的时域分布图。数值分析结果表明,锁模脉冲振幅均衡的条件是光脉冲序列经过调制器后经历相同的透射系数。线性调制区与非线性调制区均可获得振幅均衡的锁模脉冲;当有理数谐波锁模阶数 $p > 4$ 时,调制深度 β 变化对脉冲振幅均衡程度影响剧烈。该结果对获得功率均衡的谐波锁模脉冲的实验研究有一定的参考意义。

关键词: 激光器;有理数谐波锁模;透射曲线;脉冲振幅均衡

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Numerical analysis of pulse amplitude in harmonic mode locked ring fiber laser

ZHANG Jing, CAO Zhi-gang, XU Feng, YE Yong, ZHANG Rui-jue, WANG Bao-san, YU Ben-li

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Acquisition and Manipulation of Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: The modulating characteristics of Mach-Zehnder modulator and pulse-amplitude equalization condition were demonstrated in detail. By adjusting the direct-current bias voltage and modulation depth, the shape of transmission curve can be controlled. Mode locking pulse train and the modulator transmission curve were numerically studied in time domain at 5GHz of modulation frequency. The pulse train and modulation curves for mode-locked pulse in the second to seventh order were simulated and analyzed with MATLAB software. The numerical result shows that, equalization of pulse-amplitude occurs only when the transmission coefficient in the modulator is uniform; amplitude-equalized pulses can be obtained both in the linear region and the nonlinear region; when the rational harmonic mode-locking order p is larger than 4, the value of modulation depth affects the pulse-amplitude equalization severely. The figure in the paper is laconic and the result is helpful to get amplitude equalized mode-locked pulses in experiments.

Key words: lasers; rational harmonic mode-locked; transmission curve; pulse-amplitude equalization

引言

发展高速、大容量光纤通信系统一直是光通信研究的热点。高速脉冲光源对实现未来超高速光通信至关重要。主动锁模光纤激光器因其具有可输出变换极限、啁啾小、调谐范围大、高重复频率脉冲等优点,逐渐引起人们的关注。1993年,ONODERA等人最先报道了有理数谐波锁模技术^[1],细微调整调制频率使得调制频率为 $(m \pm 1/p)f_{\text{bse}}$,得到重复频率为 $(mp \pm 1)f_{\text{bse}}$ 的脉冲输出。其中 f_{bse} 为谐振基频, m, p 为任意整数。有理数谐波锁模技术可以突破调制器带宽的限制产生

更高频率的超短脉冲。YOSHIDA等人得到频率高达200GHz的锁模脉冲^[2]。有理数谐波锁模技术由于存在频率失谐,只有2阶有理数谐波锁模可以得到振幅均衡稳定的锁模脉冲序列。但实际应用的光源应是脉冲振幅均衡的稳定锁模脉冲序列,因此,使有理数谐波锁模技术实用化的关键问题是解决高阶有理数谐波锁模脉冲振幅不均衡。目前,主要有以下几种方案:非线性环形镜(nonlinear optical loop mirror, NOLM)^[3]、半导体光放大环形镜(semiconductor optical amplifier, SOA)^[4]、非线性偏振旋转技术(nonlinear polarization rotation, NPR)^[5-6]和光反馈^[7]等来实现脉冲振幅均衡。作者通过同时调节直流偏置电压和调制深度,使两者获得最佳匹配,来实现脉冲振幅均衡。本文中详细论证了调制器^[8]调制特性与直流偏置电压和调制深度的关系,精确给出了调制器线性调制范围。在5GHz调制频率下,采用时域分析法对锁模脉冲序列和调制

基金项目:安徽省优秀青年基金资助项目(04042045)

作者简介:张静(1983-),女,硕士研究生,现主要从事锁模激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail:benliyu@ahu.cn

收稿日期:2008-01-07;收到修改稿日期:2008-02-19

曲线进行数值研究。用 MATLAB 软件模拟分析了 2 阶 ~7 阶锁模脉冲序列和调制曲线的时域分布图。结果表明:在线性调制区与非线性调制区均可获得振幅均衡的锁模脉冲,当有理数谐波锁模阶数 $p > 4$ 时,调制深度变化对脉冲振幅均衡程度影响剧烈。

1 马赫-曾德尔型调制器的调制特性

加在马赫-曾德尔型调制器 (Mach-Zehnder modulator, M-ZM) 上的电压可表示为^[9]:

$$V(t) = V_{bias} + V_{ac} \sin(2\pi f_{mod}t + \phi) \quad (1)$$

式中, V_{bias} 为直流偏置电压, f_{mod} 为调制信号频率, V_{ac} 是调制信号的电压幅值。 ϕ 为调制信号初始相位。光信号通过调制器的光波场可由下式表示:

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2}E_m(t) + \frac{1}{2}E_{in}(t) \exp\left[j\frac{\pi}{V_\pi}V(t)\right] \quad (2)$$

式中, V_π 为半波电压, $E_{in}(t)$ 为输入光波场, $E_{out}(t)$ 为输出光波场。若令 $\frac{V_{bias}}{V_\pi} = \alpha$, $\frac{V_{ac}}{V_\pi} = \beta$ 。式中, α 为归一化调制器偏置点, β 为调制深度。并将 (1) 式代入 (2) 式, 根据透射系数的定义得到:

$$T_{M-ZM}(t) = \frac{1}{2} \times \{1 + \cos[\alpha\pi + \beta\pi \sin(2\pi f_{mod}t + \phi)]\} \quad (3)$$

式中, $T_{M-ZM}(t)$ 为马赫-曾德尔型调制器的透射系数。令 $\beta = 0$, 得到调制器的直流透射曲线:

$$T_{M-ZM} = \frac{1}{2} [1 + \cos(\alpha\pi)] = \cos^2\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \quad (4)$$

从图 1 可以看出, 调制器直流透射曲线的特点: 当 $\alpha = (2k + 1)/2$ 时, 即调制器工作在 $T = 50\%$ 的工作点上, 可以获得线性调制。

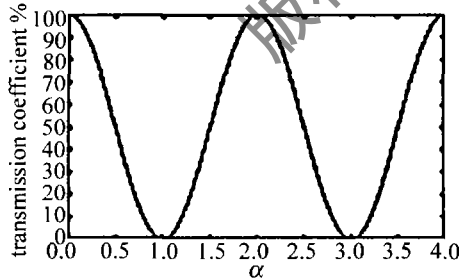


Fig. 1 The transmission curve of DC modulators

为计算简便, 令调制信号初始相位 $\phi = 0$ 。利用贝塞尔函数将 (3) 式展开得:

$$T_{M-ZM} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}J_0(\beta\pi) \cos(\alpha\pi) + \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(\beta\pi) \cos(2k\omega_m t) \cos(\alpha\pi) + \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(\beta\pi) \cos[(2k + 1)\omega_m t] \sin(\alpha\pi) \quad (5)$$

式中, $J_{2k}(\beta\pi)$, $J_{2k+1}(\beta\pi)$ 分别为以 $\beta\pi$ 为参量的 $2k$ 阶, $2k + 1$ 阶第 1 类贝塞尔函数。 ω_m 为调制信号角频率。由此可见, 调制光中含有高次谐波分量。设基频波和高次谐波的幅值分别为 I_1, I_n : $\frac{I_n}{I_1} = \frac{J_n(\beta\pi)}{J_1(\beta\pi)}$, ($n = 0, 1, 2, 3 \dots$)。式中, $J_n(\beta\pi)$ 为 n 阶第 1 类贝塞尔函数, $J_1(\beta\pi)$ 为 1 阶第 1 类贝塞尔函数。获得线性调制的条件为 $\beta\pi = \frac{V_{ac}}{V_\pi} \pi \leq 1 \text{ rad}$, 即 $\beta \leq 0.318$ 。由此得到调制器线性调制范围:

$$\alpha = \frac{2k + 1}{2} (k \in z), (\beta \leq 0.318, \phi = 0) \quad (6)$$

2 脉冲振幅数值分析

2.1 脉冲振幅均衡条件

有理数谐波锁模激光器调制频率与脉冲重复频率分别满足:

$$f_{mod} = (m \pm \frac{1}{p})f_{bse} \quad f_p = pf_{mod} = (mp \pm 1)f_{bse} \quad (7)$$

式中, p 为有理数谐波锁模阶数, f_{mod} 为调制器调制频率, f_p 为脉冲重复频率, f_{bse} 是谐振基频, m, p 为任意整数。锁模脉冲在激光器腔内往返运转, 脉冲振幅受到增益介质、滤波器、调制器的影响^[10]。参考文献 [10] 中提到的时域分析法是假定一个高斯形脉冲在激光腔内运转, 在稳态条件下, 经过 p 周运转后, 脉冲的振幅应恢复其原始值。图 2 为模拟得到的 5 阶有理数谐波锁模的光脉冲序列和对应的调制曲线。图 2a、图 2d 表示输入光脉

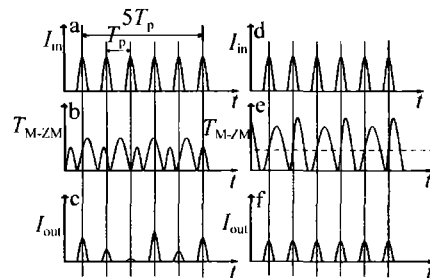


Fig. 2 Simulated diagrams of pulse-amplitude equalization for fifth order ($p = 5$) rational harmonic mode locking

冲序列; 图 2c、图 2f 表示经过调制器后输出光脉冲序列; 图 2b、图 2e 表示调制器的调制曲线。当调制深度 $\beta < 0.318$ 时, 如图 2b 所示, 5 阶有理数谐波锁模脉冲通过调制器时经历不同的透射系数, 因此输出光脉冲如图 2c 所示, 振幅抖动较大。调制曲线的形状取决于 (3) 式中的参量 α 和 β 。改变参量取值使 $\beta > 0.318$ 的调制曲线如图 2e 所示。此时脉冲经过调制器透射系数相同得到 (见图 2f) 振幅均衡的光脉冲序列。由模拟结果可知, 如果不考虑脉冲宽度的影响, 获得振幅均衡锁模脉冲的条件是光脉冲序列经过调制器后经历相同的透射系数。

2.2 MATLAB 软件模拟锁模脉冲序列

图3a~图3d是谐波锁模阶数 p 分别为2,3,5,7时光脉冲序列和调制曲线的时域分布图。调制器调制

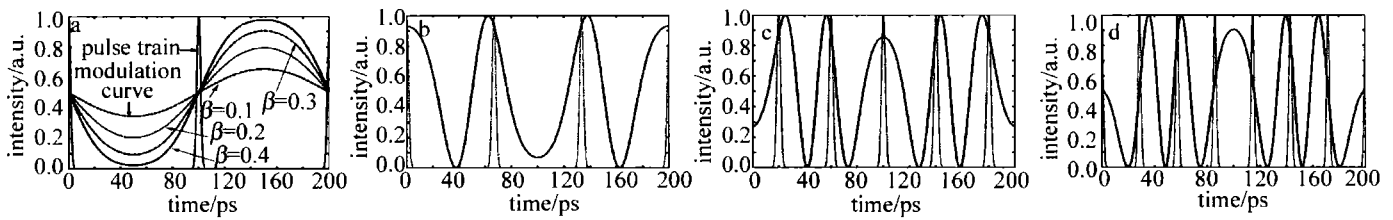


Fig. 3 Simulated pulse train (dash line) and its modulation curve (solid line)

a—the second order ($p=2$) rational harmonic mode locking ($\alpha=0.5, \beta=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, \phi=0$) b—the third order ($p=3$) rational harmonic mode locking ($\alpha=0.5, \beta=1.33, \phi=\pi/2$) c—the fifth order ($p=5$) rational harmonic mode locking ($\alpha=0.45, \beta=2.20, \phi=\pi/2$) d—the seventh order ($p=7$) rational harmonic mode locking ($\alpha=0.85, \beta=2.65, \phi=\pi/2$)

模脉冲经过调制器后均可得到相同的透射系数,因此,在线性调制区可得到振幅均衡的2阶锁模脉冲输出,这与引言中提到的已有实验结论吻合。图3b中 α, β 两参量的取值均与参考文献[10]中不同,这是因为调制函数是周期函数,对于同一阶谐波锁模获得振幅均衡的最佳参量 α, β 并不是唯一的。图3c中讨论的脉冲序列并不是从 $t=0$ 时刻出发,脉冲序列相对调制器有一定的时延,大约为20ps,时延大小可以通过延时线来调节。从图3d可以看出,7阶锁模脉冲宽度相对5阶有所减小,这是因为锁模脉冲宽度随着锁模阶数的增加而减小^[10]。图3b~图3d中的 α, β, ϕ 均位于非线性区,由此可见,当 $p>2$ 时,只有使调制器工作在非线性区才能得到振幅均衡的锁模脉冲。锁模阶数 p 为4,6时,调制器也需工作在非线性区才能得到振幅均衡的锁模脉冲。此处不再详细论述。

2.3 调制深度对脉冲振幅均衡程度的影响

以4阶,5阶锁模脉冲为例,图4a和图4b为不同

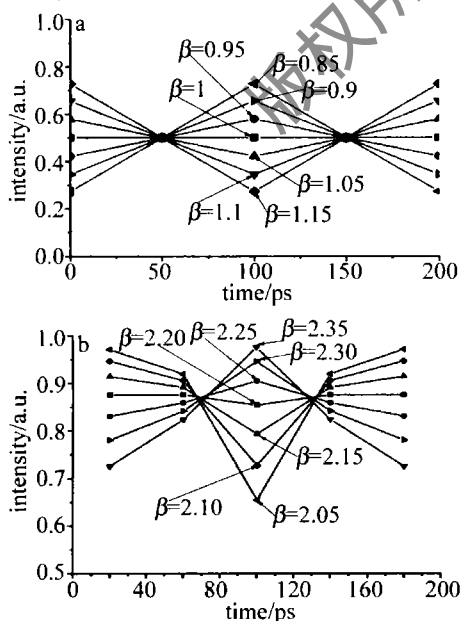


Fig. 4 The relationship between β and the amplitude

a—fourth order ($p=4$) rational harmonic mode locking b—fifth order ($p=5$) rational harmonic mode locking

频率为5GHz(周期200ps)。如图3a所示, α 固定不变, β 从0.1增大到0.4,调制曲线形状的变化对 $t=100$ ps处脉冲形状影响甚小。在此调制范围内,2阶锁

模深度下,输出脉冲序列峰值强度时域分布图。图4a和图4b中参量 α 分别为0.5,0.45。对比两图,发现5阶锁模脉冲峰值强度波动较大。 β 变化对5阶锁模脉冲振幅均衡效果影响剧烈。这是因为对于5阶锁模获得振幅均衡脉冲,调制深度($\beta=2.20>0.318$)位于透射曲线的非线性区,射频驱动电压较大。 β 的微小变化即会造成透射曲线的严重变形,从而导致输出脉冲质量恶化。而当 $2<p<5$ 时,尽管调制器工作在非线性区,由于 α, β 参量取值较小,因此,调制深度变化对脉冲振幅均衡程度影响较小。

3 结 论

采用一种简单的方法,同时调节直流偏置电压和调制深度,使两者获得最佳匹配,来实现脉冲振幅均衡。基于时域分析法论述了脉冲振幅均衡的条件:光脉冲经过调制器要得到相同的透射系数。用MATLAB软件模拟了2阶~7阶锁模脉冲序列及其对应的调制曲线,结果表明,在线性区和非线性区均可得到振幅均衡的锁模脉冲。当谐波锁模阶数 $p>4$ 时,调制器需要工作在非线性调制区才能实现脉冲振幅均衡。在此区域内,射频驱动电压的漂移会造成调制器透射曲线的变形,导致脉冲质量恶化。因此,控制射频驱动电压漂移、选择最佳的直流偏置电压和调制深度是获得高阶振幅均衡锁模脉冲行之有效的方法。

参 考 文 献

- [1] ONODERA N, LOWERY A J, ZHAI L, et al. Frequency multiplication in actively mode-locked semiconductor lasers [J]. A P L, 1993, 62 (12): 1329-1331.
- [2] YOSHIDA E, NAKAZAWA M. 80~200GHz erbium doped fiber laser using a rational harmonic mode locking technique [J]. Electron Lett, 1996, 32(18): 1370-1372.
- [3] JEON M Y, LEE H K, AHN J T, et al. Pulse amplitude equalized output from a rational harmonic mode-locked fiber laser [J]. Opt Lett, 1998, 34(2): 855-857.

(下转第190页)

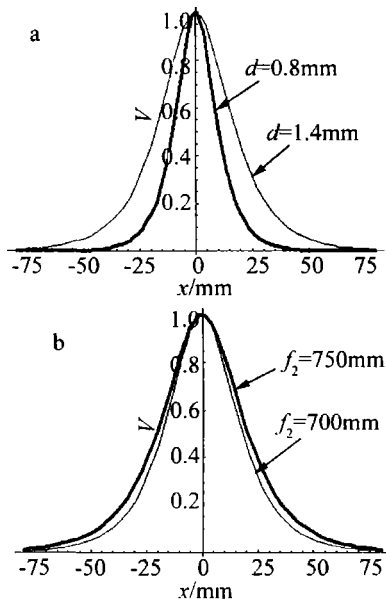


Fig. 7 Visibility of the in-phase mode interference fringes

多,条纹间距变小,这与理论分析是一致的。

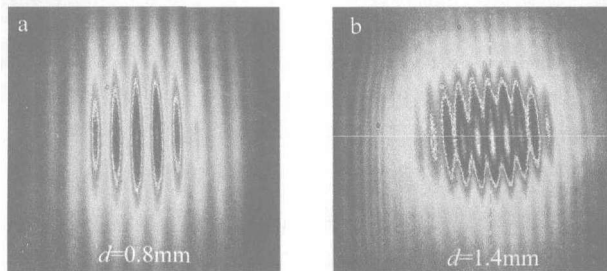


Fig. 8 Experimental results of interference patterns

3 结论

理论分析了两光纤激光器相干合成所得的干涉图样,对已有的实验结果进行了理论模拟,对空间滤波器改善条纹可见度的机理进行了理论分析。研究了光束间距、傅里叶变换透镜焦距实验参量对干涉图样条纹分布及可见度的影响。由于实验条件限制,作者仅对光束间距对干涉条纹分布的影响作了实验验证。其工作对相关实验工作将有一定的参考和指导意义。

(上接第 171 页)

- [4] LEE H J, KIM K J, KIM H G. Pulse-amplitude equalization of rational harmonic mode-locked fiber laser using a semiconductor optical amplifier loop mirror [J]. *Opt Commun*, 1999, 160(1): 53-56.
- [5] LI Z, LOU C, CHAN K T, *et al.* Theoretical and experimental study of pulse amplitude-equalized in a rational harmonic mode-locked fiber ring laser [J]. *IEEE J Q E*, 2001, 37(1): 33-37.
- [6] HE H Ch, YANG L Zh, WANG Y C. Generation of 1.5 ps pulses with 0.7 nJ of energy based on polarization additive pulse mode-locking [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 77-79 (in Chinese).
- [7] LEE C G, KIM Y J, CHOI H K, *et al.* Pulse-amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked semiconductor ring laser using optical

参考文献

- [1] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [2] LIMPET J, LIEM A, ZELLMER H, *et al.* 500 W continuous-wave fiber laser with excellent beam quality [J]. *Electron Lett*, 2003, 39(8): 645-647.
- [3] GAPONTI D. Quasi-single-mode fiber laser nears 2 kW output with high-quality beam [J]. *Laser Focus World*, 2005, 41(6): 9-11.
- [4] BONATI G, VOELCKEL H, GABLER T, *et al.* 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]// *Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments*. CA: Optics Info Base, 2005; Session 5709-2a.
- [5] CIAPURIN I V, GLEBOV L B, SIMIRNOV V I. Spectral combining of high-power fiber laser beams using Bragg grating in PTR glass [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5335: 116-123.
- [6] WICKHAM M, ANDEREGG J, BROSNAN S, *et al.* Coherently coupled high power fiber arrays [J]. *Proc SPIE*, 2006, 6102: 455-457.
- [7] HE B, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2721-2726.
- [8] CORCORAN C J, DURVILLE F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *A P L*, 2005, 86(20): 201118.
- [9] BOCHOVE E J, CHEO P K, KING G G. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(14): 1200-1202.
- [10] SHIRAKAWA A, SAITOU T, SEKIGUCHI T, *et al.* Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Optics Express*, 2002, 10(21): 1167-1172.
- [11] PENG Q, ZHOU Y, CHEN Y, *et al.* Phase locking of fiber lasers by self-imaging resonator [J]. *Electron Lett*, 2005, 41(4): 171-173.
- [12] LIU L P, ZHOU Y, KONG F T, *et al.* Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths [J]. *A P L*, 2004, 85(21): 4837-4839.
- [13] HE B, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *J O S A*, 2006, 14(7): 2721-2726.
- [14] MENARD S, VAMPOUILLE M, COLOMBEAU B, *et al.* Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd: YAG laser beams [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(24): 1996-1998.
- [15] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 161-165 (in Chinese).

feedback [J]. *Opt Commun*, 2002, 209(4/6): 417-425.

- [8] KIM Y J, LEE C G, CHUN Y Y, *et al.* Pulse-amplitude equalization in a rational harmonic mode-locked semiconductor fiber ring laser using a dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Express*, 2004, 12(5): 907-915.
- [9] PANG Zh G, YU K X, FAN H. Study of the optimum operating mode in lithium niobate acousto-electro-optic modulator [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 160-162 (in Chinese).
- [10] ZHU G, CHEN H, DUTTA N. Time domain analysis of a rational harmonic mode locked ring fiber laser [J]. *J A P*, 1990, 90(5): 2143-2147.