

文章编号: 0258-7025(2001)10-0881-04

脉幅稳定的有理数谐波锁模光纤激光器^{*}

宋立军 李世忱 葛春风 余震虹 张劲冶 贾东方 黄超

(天津大学精密仪器与光电子工程学院教育部光电信息技术科学重点实验室 天津 300072)

提要 通过调节振幅调制器的静态偏压和驱动功率来控制调制器的驱动频率边频分量,在 2.5 GHz 的射频调制频率下,有效地抑制了 3~5 阶有理数谐波锁模脉冲序列的幅度起伏,直接由激光器输出幅值稳定的有理数谐波锁模脉冲序列。

关键词 光纤激光器,有理数谐波锁模,调制器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Generation of Amplitude-equalized Pulses from Rational Harmonic Mode-locked Fiber Ring Laser

SONG Li-jun LI Shi-chen GE Chun-feng YU Zhen-hong

ZHANG Jin-ye JIA Dong-fang HUANG Chao

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Optoelectronics Information Science and Technology Lab, MOE, Tianjin 300072)

Abstract The generation of high-repetition-rate (3~5 order harmonic of the RF modulation frequency at 2.5 GHz), amplitude-equalized pulses directly from rational harmonic mode-locked fiber ring laser is demonstrated by using the nonlinear transfer characteristics of LN-MZI amplitude modulator. The theoretical analysis explains the experimental results well.

Key words fiber ring laser, rational harmonic mode locking, modulator

1 引言

有理数谐波锁模技术,是指腔内主动调制器的调制频率 $f_{\text{mod}} = (m \pm k/p) \Delta\nu_{\text{cav}}$ (m 为谐波次数; k/p 为有理数; p 为有理数阶数; $\Delta\nu_{\text{cav}}$ 为腔基频)腔内脉冲每循环一次将与上一次脉冲的时间位置存在 $k/(pf_{\text{mod}})$ 的时间偏差,经过 p 次循环后完成一个完整的损耗调制,形成 pf_{mod} 的锁模脉冲输出^[1~3]。在有理数谐波锁模光纤激光器中,只有二阶有理数谐波锁模得到过直接输出的幅值平稳的有理数谐波锁模脉冲序列^[3]。但实用的光源应是脉冲幅度均等的稳定锁模脉冲序列,1998 年 Min-Yong Jeon 等采用非线性放大环形镜

(NALM)和法拉第旋光镜(FRM)组成的外腔被动锁模光纤激光器实现了幅值均等的 15 阶(22.6 GHz)有理数谐波锁模^[4]。另外采用半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制效应实现的有理数谐波锁模脉冲其脉幅调制效应也较小^[5]。

我们采用调节振幅调制器的静态偏压和驱动功率来选择调制器的驱动频率边频分量,在以 2.5 GHz 的射频调制频率为例的实验中,有效地抑制了 3~5 阶有理数谐波锁模脉冲序列的幅度起伏,实现了稳定的有理数谐波锁模。

2 实验方案及结果

实验装置如图 1 所示。主动锁模光纤激光器主要由以下部分组成:调制器(MOD)为英国 IOC 公司的 2.5 GHz M-Z 型 LiNbO₃ 调制器,插入损耗小于 5 dB,它为主动锁模提供损耗调制。由于调制器是偏振有关器件,在其前端放置了偏振控制器(PC),通过调节偏振

^{*} 国家自然科学基金(69877012)资助项目,信息产业部武汉邮电科学研究院合作项目,天津市光电子联合研究中心资助项目。

收稿日期 2000-07-04;收到修改稿日期 2000-08-21

控制器以达到较好的调制消光比。腔增益由德国 IRE-POLUS 公司的 EDA60 型铒光纤放大器 (IS1, IS2, EDFA) 提供, 其放大带宽为 1530 ~ 1570 nm, 饱和输出功率大于 18 dBm, 1545 nm 小信号增益大于 40 dB, 输出耦合器分光比 10:90, 射频调制信号源是美国 HP 公司的 83752B 型频率合成器, 输出频率 0 ~ 20 GHz 连续可调, 在 2.5 GHz 处最大输出功率为 18 dBm, 步长调节精度 1 Hz, 射频驱动信号通过射频放大器驱动调制器, 射频放大器在 2.5 GHz 处的放大倍数为 14 dB。数字取样示波器是美国 HP 公司的 83480A 型数字通信分析仪, 取样带宽光口 (HP83485) 20 GHz, 电口 50 GHz。光谱仪是日本 Ansitru 公司的 MS9001A 型光谱仪, 最小分辨率 0.1 nm。

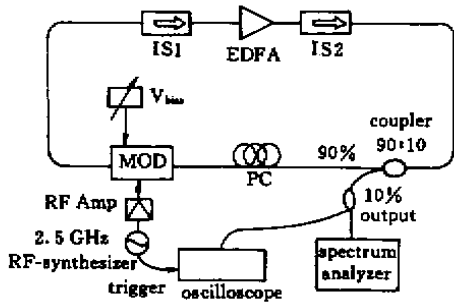


图 1 脉幅稳定的有理数谐波锁模实验装置

Fig.1 Experiment setup

图 2 是调制频率为 2.497241570 GHz 时输出的三阶有理数谐波锁模脉冲波形和光谱图。此时对应调制器偏压为 3.2 V, 调制器射频驱动功率为 32 dBm。输出脉冲宽度由示波器判读为 27 ps, 考虑示波器响应时间及取样平均 64 次, 其脉宽大致为 18 ps, 对应脉冲谱宽为 0.14 nm, 时间带宽积为 $\Delta t \times \Delta \nu = 0.318$ 。平均脉幅调制度 < 5%。

图 3 是调制频率为 2.497706432 GHz 时输出的四阶有理数谐波锁模脉冲波形和光谱图。此时对应调制器偏压为 -3.2 V, 调制器射频驱动功率为 32 dBm。输出脉冲宽度由示波器判读为 26 ps, 考虑示波器响应时间及取样平均 64 次, 其脉宽大致为 16 ps, 对应脉冲谱宽为 0.16 nm, 时间带宽积为 $\Delta t \times \Delta \nu = 0.323$ 。输出脉冲序列的幅度基本趋于一致, 平均脉幅调制度 < 5%。

图 4 是调制频率为 2.497985350 GHz 时输出的五阶有理数谐波锁模脉冲波形和光谱图。此时对应调制器偏压为 3.2 V, 调制器射频驱动功率为 32 dBm。输出脉冲宽度由示波器判读为 30 ps, 考虑示波器响应时

间及取样平均 64 次, 其脉宽大致为 20.7 ps, 对应脉冲谱宽为 0.12 nm, 时间带宽积为 $\Delta t \times \Delta \nu = 0.314$, 平均脉幅调制度 < 10%。

3 实验结果及分析讨论

实验中测得腔基频为 $\Delta \nu_{cav} = 5.578350$ MHz, 实验中, 由于腔长固定, 所以通过改变调制频率与腔长匹配进行锁模。谐波锁模对应调制频率为 $f_{mod} = 2.499101020$ GHz, $m = 448$; 三阶有理数谐波锁模, 调制频率 $f_{mod} = 2.497241570$ GHz, 大致为基频的 $(448 - 1/3)$ 倍, 即 $p = 3$; 四阶有理数谐波锁模, 调制频率 $f_{mod} = 2.497706432$ GHz, 大致为基频的 $(448 - 1/4)$ 倍, 即 $p = 4$; 五阶有理数谐波锁模, 调制频率 $f_{mod} = 2.497985350$ GHz, 大致为基频的 $(448 - 1/5)$ 倍, 即 $p = 5$ 。

在二阶有理数谐波锁模条件下, 在调制器线性调制区仔细调整调制器静态偏压和偏振控制器, 可以得到幅值均等的二阶有理数谐波锁模脉冲。而对于三阶以上 (包括三阶) 的有理数谐波锁模, 当调制器静态偏压位于线性调制点时, 无论如何调节偏振控制器均无法得到幅值均等的有理数谐波锁模脉冲序列。有理数谐波锁模激光器中, 由于存在对应腔基频的非匹配的低阶调制谐波分量, 使输出脉冲的谱成分中存在没有被锁定的频谱分量, 从而造成脉冲幅度的起伏^[3]。而通过适当选取调制器的静态驱动电压和射频驱动功率, 可以有效地减小非匹配的调制谐波分量, 降低输出光脉冲中未被锁定的频谱分量, 得到幅值趋于均等的有理数谐波锁模脉冲输出。当将调制器的静态偏压设在非线性调制点时, 通过调节偏振控制器, 有理数谐波锁模脉冲的幅度起伏得到了明显的改善, 而且输出的有理数谐波锁模脉冲的脉宽并无明显变化, 而以三阶和四阶有理数谐波锁模脉冲的幅值起伏改善效果最好, 五阶有理数谐波锁模脉冲中虽然存在较大幅度起伏, 但也得到了很好的改善。

不失一般性, 考虑入射到 M-Z 型调制器的光信号幅度为 A , 光波角频率为 ω_0 。调制器半波电压为 V_π , 静态偏压为 V_b , 射频调制信号的幅度为 V_{ac} , 射频驱动角频率为 ω_m , 光信号通过调制器的归一化光场为^[6]

$$E(t) = \cos \left[\beta \frac{\pi}{2} + \alpha \frac{\pi}{2} \cos(\Omega_m t) + \frac{\pi}{4} \right] \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

这里 $\beta = V_b/V_\pi$ 为归一化调制器偏置点, $\alpha = V_{ac}/V_\pi$

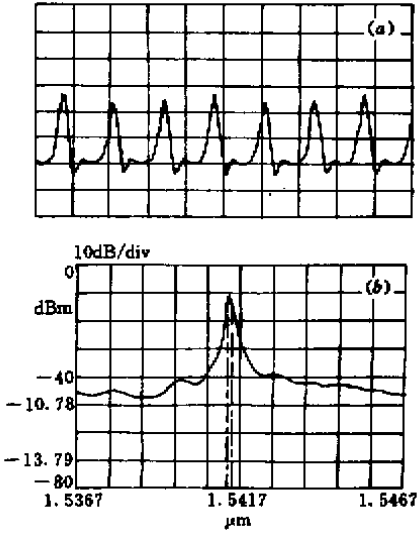


图 2 三阶有理数谐波锁模脉冲波形 (a) 和光谱 (b) 图
Fig.2 Temporal waveforms (a) and power spectrum (b)
of 3 order rational harmonic mode-locked pulses

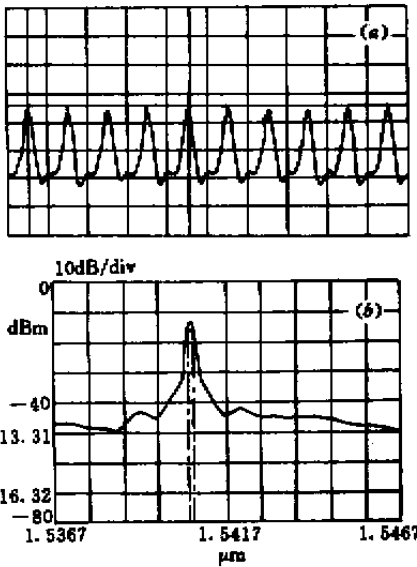


图 3 四阶有理数谐波锁模脉冲波形 (a) 和光谱 (b) 图
Fig.3 Temporal waveforms (a) and power spectrum (b)
of 4 order rational harmonic mode-locked pulses

为射频信号归一化调制幅度。调制器静态偏压 $V_b = 0$ 对应调制器线性工作区中点。将 (1) 式按 Bessel 函数展开, 得到

$$E(t) = J_0\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\beta \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \cos(\omega_0 t) - J_1\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(\beta \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \cos(\omega_0 t \pm \Omega_m t) -$$

$$J_2\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\beta \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \cos(\omega_0 t \pm 2\Omega_m t) + \dots \quad (2)$$

J_0 项代表光载频项, J_1 和 J_2 分别代表一阶和二阶光谱成分, 每一阶光频分量都是 α 与 β 的函数。首先考虑静态工作点对调制器调制频率分量的影响, 当 $V_b = V_\pi/2$ 时, 有 $\beta = 1/2$ (2) 式变为

$$E(t) = -J_1\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_0 t \pm \Omega_m t) - J_3\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_0 t \pm 3\Omega_m t) + \dots \quad (3)$$

此时输出脉冲的偶次谐波光谱分量消失。当 $V_b = V_\pi/2$ 时, 有 $\beta = 1/2$ (2) 式变为

$$E(t) = J_0\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_0 t) - J_2\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega_0 t \pm 2\Omega_m t) + \dots \quad (4)$$

此时输出脉冲的奇次谐波光谱分量消失。

在 (3) (4) 式两种情况下, 再考虑射频调制器的驱动电压对调制器调制分量造成的影响。图 5 (a) (b) 分别是奇次 Bessel 函数和偶次 Bessel 函数与 α 的关系曲线。

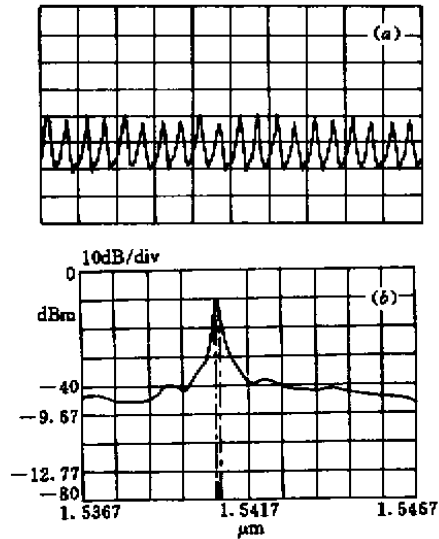


图 4 五阶有理数谐波锁模脉冲波形 (a) 和光谱 (b) 图
Fig.4 Temporal waveforms (a) and power spectrum (b)
of 5 order rational harmonic mode-locked pulses

由图 5 可知, 适当选取 α 值, 即适当选取射频驱动器的驱动功率, 就可有效地抑制调制器的其他谐波调制频率分量, 使得某一谐波调制分量占优势。对于偶次 Bessel 函数, 当 $\alpha = 3.4$ 左右时, 可以有效削弱 0 次和 2

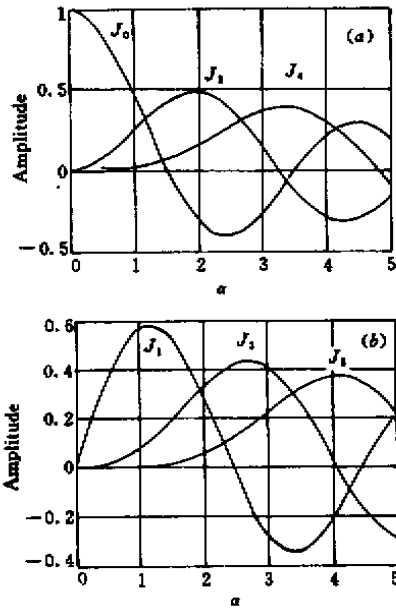


图 5 偶次 Bessel 函数 (a) 与奇次 Bessel 函数 (b) 与 α 的关系曲线

Fig.5 Relative amplitude of even (a) and odd (b) Bessel function versus modulation index α

次谐波调制分量,使 4 次谐波调制分量起主导作用;对于奇次 Bessel 函数,当 $\alpha = 2.4$ 左右时,可以有效地降低一次谐波调制分量,使 3 次谐波调制分量起主导作用;当 $\alpha = 4.2$ 左右时,可以有效地降低一次和 3 次谐波调制分量,使 5 次谐波调制分量起主导作用。对于不同阶数的有理数谐波锁模,通过适当选取调制器的静态驱动电压和射频驱动功率,可以有效地减小非匹配的调制谐波分量,得到幅值趋于均等的有理数谐波锁模脉冲输出。当调制器射频驱动频率为 $f_{\text{mod}} = (m \pm k/p)\Delta\nu_{\text{cav}}$ 时,通过改变静态调制点和射频调制功率,原则上可实现 $pf_{\text{mod}} = (pm \pm k)\Delta\nu_{\text{cav}}$ 的有效光损耗调制,从而实现稳定的谐波锁模。但在实验中,射频调制受到 p, α 和 β 的综合影响,并且高次调制分量并未被完全消除,所以做到完全消除脉幅的轻微调制效应尚存在一定的难度。

当静态偏压为 0 V 时,实验中使用的调制器处于调制器调制曲线的线性调制区中心,调制器的半波电压为 7 V。由于实验中频率合成器最大输出功率仅为 18 dBm,射频功率放大器的放大倍数仅为 14dB,考虑调制器的动态阻抗为 50Ω ,所以调制器

上的归一化射频调制幅度最大只能达到 $\alpha = 1.8$,这虽可以使三阶和四阶有理数谐波锁模的幅度起伏得到良好的改善,但对于五阶有理数谐波锁模改善效果不太理想。

我们还进行了 6~8 阶有理数谐波锁模的实验,但是仅通过改变调制器静态工作点无法得到幅度均等的锁模脉冲序列,这是由以下几个原因造成的:1)腔内增益受限,更高阶有理数谐波锁模由于腔内同时存在的锁模脉冲多,每个脉冲经历一次完整的损耗调制所经历的损耗也越大,所以需要更大的腔增益,而我们的放大器提供的增益是有限的;2)由于环型锁模激光器腔较长,腔基频小,调制频率又高,所以在更高阶有理数谐波锁模情况下,实现相邻高阶锁模的调制频率变化约为 kHz 量级,相对于调制频率来讲很小,所以高阶锁模脉冲质量明显下降。可以通过两种方法来解决这个问题,一种是减少腔长,从而增大腔基频,二是采用较低的调制频率,但这种方法又不可能实现很高重复速率的稳定有理数谐波锁模脉冲序列;3)由于射频驱动源和射频功率放大器的限制,射频调制信号的驱动功率受限,调制器本身耐压幅度也有限,所以也很难实现稳定的高阶有理数谐波锁模。

参 考 文 献

- 1 Z. Ahmed, N. Onodera. High repetition rate optical pulse generation by frequency multiplication in actively modelocked fiber lasers. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5):455~457
- 2 Song Lijun, Wang Taili, Zhang Jinye *et al.*. Rational harmonic mode-locked fiber ring laser. *Journal of Tianjin University* (天津大学学报), 2000 **33**(6):798~801 (in Chinese)
- 3 E. Yoshida, M. Nakazawa. 80~200 GHz erbium doped fiber laser using a rational harmonic mode-locking technique. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15):1370~1372
- 4 Min-Yong Jeon, Hak Kyu Lee, Joon Tae Ahn *et al.*. External fiber laser based pulse amplitude equalisation scheme for rational harmonic mode-locking in a ring-type fiber laser. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(2):182~184
- 5 T. Papakyriakopoulos, K. Vlachos, A. Hatziefremidis *et al.*. Optical clock repetition-rate multiplier for high-speed digital optical logic circuits. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11):717~719
- 6 K. K. Gupta, D. Novak. Millimetre-wave repetition-rate optical pulse train generation in harmonically modelocked fiber ring laser. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(15):1330~1331