

# 利用有源滤波器实现谐波锁模光脉冲的均衡

訾月姣<sup>1</sup> 江 阳<sup>1</sup> 李红霞<sup>2</sup> 白光富<sup>1</sup> 马 闯<sup>1</sup> 贾振蓉<sup>1</sup> 吴廷伟<sup>1</sup> 黄凤勤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>贵州大学理学院, 贵州 贵阳 550025

<sup>2</sup>贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025

**摘要** 提出并分析验证了一种利用有源环形滤波器对有理数谐波锁模激光器输出光脉冲幅度进行均衡的方案。方案中, 光纤结构的有源环形滤波器被视为一个自由光谱范围可调谐的梳状滤波器, 使有理数谐波锁模激光器输出光脉冲中的锁模分量通过而其他谐波分量和超模得到抑制, 获得幅度均衡的光脉冲。理论上, 对经过有源环形滤波器前后光脉冲的波形和频谱分别进行了仿真, 结果表明有源环形滤波器能有效滤出所需的锁模频率, 且  $Q$  值越高, 光脉冲的幅度均衡效果越佳。在 7 阶、11 阶、14 阶有理数谐波锁模条件下通过实验进行验证, 均获得了良好的效果, 模式抑制比可提高 20 dB 以上。

**关键词** 激光器; 有理数谐波锁模; 有源环形滤波器; 幅度均衡; 谐波抑制

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0306003

## Amplitude Equalization of Rational Harmonic Mode-Locked Laser by Using an Active Ring Filter

Zi Yuejiao<sup>1</sup> Jiang Yang<sup>1</sup> Li Hongxia<sup>2</sup> Bai Guangfu<sup>1</sup> Ma Chuang<sup>1</sup> Jia Zhenrong<sup>1</sup>

Wu Tingwei<sup>1</sup> Huang Fengqin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

<sup>2</sup>College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

**Abstract** A scheme of equalizing the uneven pulse amplitude from a rational harmonic mode-locked laser is proposed and verified, in which an optical fiber active ring filter is employed. The active ring filter is a comb filter with tunable free spectral range, which can select the mode-locked component and suppress other harmonics and super-modes by carefully tuning the optical delay line in it. This process is able to effectively balance the pulse amplitude. Theoretically, the simulation is performed to compare the waveform and radio frequency spectrum before and after filtering. The results show that the active ring filter can effectively filter the expected frequency, and the higher the  $Q$  is, the better the amplitude equalization is. In the experiment, the 7<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup> mode-locked pulses are verified respectively and mode-suppression ratio can be improved by more than 20 dB.

**Key words** lasers; rational harmonic mode-locking; active ring filter; amplitude equalization; harmonic suppression

**OCIS codes** 060.3510; 060.4370; 060.2320; 060.4080

收稿日期: 2015-09-25; 收到修改稿日期: 2015-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61061004, 61465002)、贵州省高层次创新型人才项目(2014GZ19112)、贵州省科技创新人才团队(黔科合人才团队[2015]4017)、贵州省普通高等学校创新人才团队(黔教合人才团队字[2014]32)

作者简介: 訾月姣(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事有理数谐波锁模光纤激光器方面的研究。

E-mail: ziyuejiao163@163.com

导师简介: 江 阳(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事光子微波技术和光纤通信等方面的研究。

E-mail: jiangyang415@163.com(通信联系人)

## 1 引 言

光纤锁模激光器能产生高质量的光脉冲信号,在光子信息领域被大量研究并得到广泛应用。例如,在光通信系统中可用于时分、波分复用信号的产生<sup>[1-2]</sup>,光分组交换系统中的控制信号<sup>[3]</sup>,全光取样<sup>[4]</sup>时的高速取样信号等。此外,在光子微波技术领域,光纤锁模激光器也可用于实现光子微波信号的倍频<sup>[5]</sup>、分频<sup>[6]</sup>等功能。从工作方式上看,光纤锁模激光器可分为被动锁模与主动锁模两大类。被动锁模是在激光器内引入与强度相关的非线性器件,与腔模共同作用使激光器输出超短脉冲,但是由于它通常锁定光纤谐振腔的基频,使得这种方式下输出脉冲的重复频率很低,限制了它的应用范围。主动锁模是利用调制器的调制作用,当调制频率等于腔模频率的倍数时腔模发生耦合,进而彼此间相位锁定,得到重复频率等于调制频率的脉冲。这一技术虽然可以产生高重复频率的光脉冲,但仍受调制器件带宽的限制。

为了获得重复频率更高的光脉冲,有理数谐波锁模是一种理想选择,它利用调制频率与腔模频率的失谐,产生多倍于调制频率的光脉冲,因而受到极大的关注<sup>[7-9]</sup>。1993年, Onodera 等<sup>[7]</sup>首次在半导体激光器中实现了有理数谐波锁模;1996年, Yoshida 等<sup>[8]</sup>实现了调制频率为 40 GHz 时重复频率高达 200 GHz 的锁模脉冲输出;2000年, Wu 等<sup>[9]</sup>在调制频率为 1 GHz 的情况下实现了 22 阶倍频输出。然而,当锁模阶数大于等于 2 时,有理数谐波锁模输出脉冲会出现幅度不均衡现象<sup>[9]</sup>,且阶数越大输出脉冲幅度的不均衡性越明显,这极大影响了该技术的实用化。已有研究表明,出现幅度不均衡现象的主要原因有超模<sup>[10]</sup>和由失配的谐波分量产生的幅度干扰<sup>[11]</sup>。为实现有理数谐波锁模输出脉冲幅度的均衡, Jeon 等<sup>[12]</sup>提出用非线性光纤环形镜与法拉第旋光镜对锁模脉冲进行整形,但所用结构过于复杂;Feng<sup>[13]</sup>等利用调制器的非线性调制效应在实验上得到了最高 7 阶的幅度均衡的脉冲,但很难实现更高阶数脉冲的幅度均衡;Gee<sup>[14]</sup>与 Yoshida 等<sup>[15]</sup>均采用在腔内插入法布里-珀罗(F-P)标准具的方法,虽然得到的脉冲幅度均衡性良好,但是所用标准具的自由光谱范围(FSR)必须为调制频率的整数倍,可调谐性很差;Kang 等<sup>[16]</sup>提出向激光器中注入预失真脉冲串的方法,获得幅度均衡的有理数锁模信号输出,但这种方法需要额外的激光器,且预失真情况需要精确控制,增加了系统成本和复杂性。

本文提出一种对有理数谐波锁模激光器(RHMLL)输出脉冲进行幅度均衡的新方案。该方案是将 RHMLL 的输出经由一个光纤有源环形滤波器(OFARF)进行滤波,有效地去除非锁模频率的干扰,最后得到幅度均衡的输出。通过调节 OFARF 中的可调光延迟线(ODL)可以实现对任意重复频率光脉冲的均衡滤波。与已有幅度均衡方案相比,该方案结构简单,具有灵活的可调谐性,幅度均衡效果理想。

## 2 实验原理分析

图 1 为利用 OFARF 对 RHMLL 输出脉冲进行幅度均衡的实验装置图。上端的虚线框所示为 RHMLL,其中半导体光放大器 SOA1 作为增益介质,除为激光器提供增益外,还能有效地稳定输出脉冲信号的幅度<sup>[17]</sup>,掺铒光纤放大器 EDFA 用于补偿腔内的损耗以确保环内总增益能达到激光器阈值,马赫-曾德尔调制器 MZM 是锁模器件,检偏器 Po1 与偏振控制器 PC2 保证光场每次经过调制器时保持相同的偏振态,可调光滤波器 TOF1 决定激光器的工作波长为  $\lambda$ ,调节 ODL1 可改变激光器腔长,隔离器 ISO 保证腔内光只沿顺时针传播,PC1 用于调整腔内光场的偏振态。当 SOA1 的自发辐射光在环内循环时,由于谐振腔的选频作用,只有在腔内增益大于损耗且频率满足一定条件的纵模会起振,此时相邻纵模之间的间隔为

$$f_c = c/(n_{\text{eff}}L_1), \quad (1)$$

式中  $c$  为光在真空中的传播速度,  $n_{\text{eff}}$  为腔内有效折射率,  $L_1$  为激光器腔长。设 MZM 的驱动频率为  $f_m$ , 与  $f_c$  的关系为  $f_m = (n + 1/p)f_c$  ( $n, p$  为自然数), 利用递归方程, 第  $q$  阶模在腔内循环第  $k + 1$  次的振幅  $a_q^{(k+1)}$  为<sup>[18]</sup>

$$a_q^{(k+1)} = a_q^{(k)} + g \left[ 1 - \frac{(2\pi q f_c)^2}{\Omega_g^2} \right] a_q^{(k)} - l a_q^{(k)} + M \left( a_{q+n+\frac{1}{p}}^{(k)} - 2a_q^{(k)} + a_{q-n-\frac{1}{p}}^{(k)} \right), \quad (2)$$

式中  $M[1 - \cos(2\pi f_m t)]$  为 MZM 的调制系数,  $g$  为增益常量,  $l$  为损耗常量,  $\Omega_g$  为增益带宽。从(2)式可以看出 MZM 使这些腔模相互耦合并实现模式间的相位锁定。经过多次循环,从光耦合器 OC1 输出光脉冲的重复频率为

$$f_p = pf_m = (np + 1)f_c. \quad (3)$$

可见,激光器腔长  $L_1$  变化会引起输出脉冲的重复频率变化。考虑 MZM 的传输方程<sup>[16]</sup>

$$P_{\text{MZM-out}} = \frac{P_{\text{MZM-in}}}{2} \left\{ 1 - \sin \left\{ \pi \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{V_\pi}{2} \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{(t - mt_0)^2}{\tau_0^2} \right] \right\} \right\} / V_\pi \right\} \right\}, \quad (4)$$

式中  $P_{\text{MZM-out}}$  为 MZM 输出功率,  $P_{\text{MZM-in}}$  为 MZM 输入功率,  $V_\pi$  为 MZM 的半波电压,  $t_0$  为调制信号的周期,  $\tau_0$  为调制信号的脉宽。最终可得到 RHMLL 输出的激光脉冲功率  $P'_1$  表达式为<sup>[16]</sup>

$$P'_1 = \frac{P'_0}{2} \left\{ 1 + \sin \left\{ \pi \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} 1.2V_\pi \left\{ 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -\frac{(t - mt_0 - \tau)^2}{\tau_0^2} \right] U(\tau) \exp(-\tau/\tau^1) d\tau \right\} + 1.2V_\pi \right\} / V_\pi \right\} \right\}, \quad (5)$$

式中  $P'_0$  为初始光功率,  $U(\tau)$  为单位阶跃函数,  $\tau < 0$  时  $U(\tau) = 0$ ,  $\tau \geq 0$  时  $U(\tau) = 1$ 。

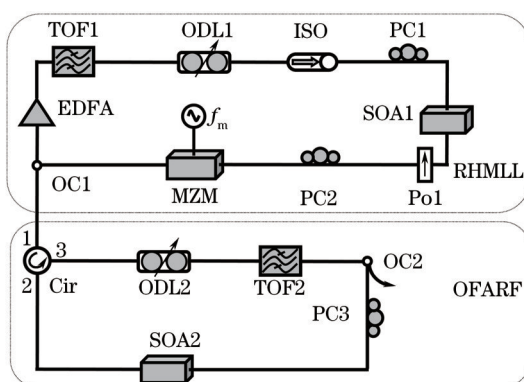


图 1 利用 OFARF 均衡锁模脉冲幅度的实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of OFARF balanced mode-locked pulse amplitude

图 2 为根据(5)式计算得到的 7 阶锁模脉冲的波形和电谱,调制频率设为 1.5 GHz。如图 2(a)所示,脉冲具有很明显的不平坦性,其电谱[图 2(b)]表现出很强的各阶谐波分量,这是脉冲幅度不均衡的主要原因。显然,若能有效滤除 7 阶以外的谐波分量,在时域上将得到幅度均衡的脉冲。

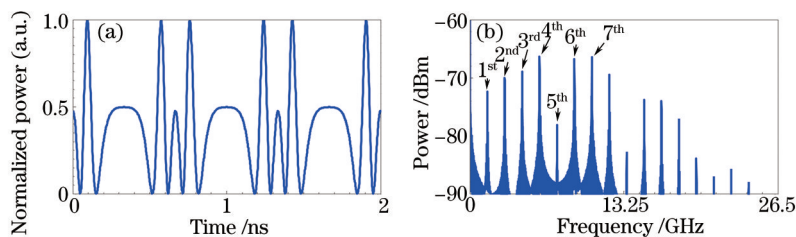


图 2 7 阶谐波锁模脉冲的波形与电谱。(a) 波形; (b) 电谱

Fig.2 Waveform and electrical spectrum of 7<sup>th</sup> order mode-locked pulses. (a) Waveform; (b) electrical spectrum

图 1 下端的虚线框所示为 OFARF,其中 SOA2 既作为非线性调制器件又为该谐振腔提供增益。TOF2 的滤波窗口决定了 OFARF 的中心波长  $\lambda_2$ , ODL2 用于调节腔长, PC3 调节腔内偏振态。当 RHMLL 输出波长为  $\lambda_1$  的光场从环形器 Cir 的端口 1 进入 OFARF 时,在 SOA2 中与原来在 OFARF 中循环的光场发生非线性调制作用,使波长为  $\lambda_2$  的光场受到波长为  $\lambda_1$  光场的调制<sup>[19-21]</sup>。若  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ , 由于 TOF2 的滤波作用及 Cir 的隔离作用,波长为  $\lambda_1$  的光不能在 OFARF 中循环,最终只有波长为  $\lambda_2$  的光从 OC2 输出。通过调谐 ODL2 改变腔长, OFARF 的 FSR 发生变化,使锁模频率分量在其滤波窗口内而其他谐波分量被滤除,最终从 OC2 输出幅度均衡的锁模脉冲。在 OFARF 中,设 OC2 的耦合比为  $a:b$ ,从 Cir 端口 1 输入的光功率为  $P'_1$ ,则由 OC2 直接输出的光功率为

$$P_1 = bG_0 P'_1 \exp(-j2\pi f T_0), \quad (6)$$

式中  $G_0$  为光从 SOA2 到 OC2 的增益系数,  $T_0$  为光从 SOA2 到 OC2 的时间延迟。当光在 OFARF 中顺时针循环一圈后,从 OC2 输出的光功率  $P_2$  为

$$P_2 = abGG_0P_1' \exp(-j2\pi f n_{\text{eff}2} L_2/c) \exp(-j2\pi f T_0), \quad (7)$$

式中  $G$  为光绕 OFARF 一圈后的增益系数,  $n_{\text{eff}2}$  为 OFARF 的有效折射率,  $L_2$  为 OFARF 的腔长。若光在 OFARF 绕行  $N-1$  圈 ( $N=1,2,3,\dots$ ), 其输出光功率为

$$P_N = a^{N-1} b G^{N-1} G_0 P_1' \exp[-j2\pi f (N-1) n_{\text{eff}2} L_2/c] \exp(-j2\pi f T_0). \quad (8)$$

最后输出的总功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= bG_0P_1' \exp(-j2\pi f T_0) + abGG_0P_1' \exp(-j2\pi f n_{\text{eff}2} L_2/c) \exp(-j2\pi f T_0) + \dots + \\ & a^{N-1} bG^{N-1} G_0 P_1' \exp[-j2\pi f (N-1) n_{\text{eff}2} L_2/c] \exp(-j2\pi f T_0) = \\ & bG_0P_1' \exp(-j2\pi f T_0) \frac{1 - [aG \exp(-j2\pi f n_{\text{eff}2} L_2/c)]^N}{1 - aG \exp(-j2\pi f n_{\text{eff}2} L_2/c)}. \end{aligned} \quad (9)$$

所得 OFARF 的频率响应为<sup>[22]</sup>

$$H(f) = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} = bG_0 \exp(-j2\pi f T_0) \frac{1 - [aG \exp(-j2\pi f n_{\text{eff}2} L_2/c)]^N}{1 - aG \exp(-j2\pi f n_{\text{eff}2} L_2/c)}. \quad (10)$$

从(10)式可以看出,  $H(f)$  与 OFARF 腔长  $L_2$ 、OC2 的耦合系数  $a$ 、 $b$  有关。通过改变  $L_2$  与  $a$ 、 $b$  的值, 得到图 3 所示 OFARF 的频响曲线, 其中,  $G_0 = 0.99$ ,  $T_0 = 0.15 \mu\text{s}$ ,  $G = 0.95$ ,  $n_{\text{eff}2} = 1.5$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $N = 700$ 。图 3(a) 所示为腔长  $L_2 = 63 \text{ m}$  时,  $a$  分别取 0.1、0.5、0.9 时的频率响应曲线。可以看出, OFARF 的频谱图为梳状周期谱,  $a$  取值越大滤波特性越好, 故可以通过选择耦合比不同的耦合器来改变 OFARF 的  $Q$  值。图 3(b) 所示为  $a = 0.9$  时, 腔长  $L_2$  分别为 63、63.01、62.02 m 的曲线图。可见, 随着  $L_2$  改变, FSR 及滤波窗口发生变化。显然, 通过恰当选择参数, 可以对 RHMLL 的输出进行滤波, 滤出锁模频率分量而抑制其他谐波分量的干扰, 最终得到幅度均衡的脉冲。

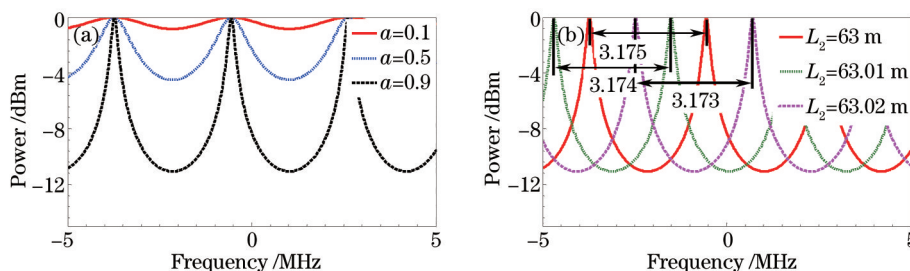


图 3 不同 OC2 耦合系数  $a$  及不同腔长  $L_2$  下 OFARF 的频响曲线。(a)  $a = 0.1, 0.5, 0.9$ ; (b)  $L_2 = 63, 63.01, 63.02 \text{ m}$

Fig.3 Frequency response of OFARF with various coupling coefficients in OC2 and cavity lengths. (a)  $a = 0.1, 0.5, 0.9$ ; (b)  $L_2 = 63, 63.01, 63.02 \text{ m}$

利用(10)式对图(2)所示脉冲进一步仿真, 可得到滤波后的结果。图 4 所示为设置 OFARF 的一个滤波窗口对准 7 阶频率分量, 滤波器  $Q$  值分别为 12、119、650 时, 脉冲经过 OFARF 滤波后的波形和电谱。图 4(a)、(b) 为  $Q$  值等于 12 时的情况, 可以看出经过 OFARF 的滤波作用后, 脉冲幅度均衡性得到改善, 但脉冲的峰值功率仍有较大起伏, 电谱中 7 阶以外的谐波功率仍然较强。当  $Q$  值取 119 时, 所得波形、电谱如图 4(c)、(d) 所示。此时波形已经趋于平坦但仍有微小起伏, 7 阶分量以外的谐波频率分量得到进一步抑制。 $Q$  值为 650 时, 所得波形[图 4(e)]幅度均匀, 电谱[图 4(f)]对 6 阶分量的抑制比达到 26.89 dB。与图 3 相比, 此时幅度均衡效果显著, 各阶谐波分量都能得到理想抑制, 且  $Q$  值越大谐波抑制比越大, 得到的波形平坦性越好。

### 3 实验结果及讨论

为了进一步验证所提方案的可行性与效果, 按图 1 所示方案进行了实验验证。实验中, SOA1 (Thorlabs Quantum Electronics, SOA-17415-11450.29.C01) 的注入电流为 370 mA, EDFA 的抽运电流为 180 mA, MZM 的驱动频率为  $f_m = 1.5 \text{ GHz}$ , TOF1 的中心波长为  $\lambda_1 = 1552 \text{ nm}$ 。SOA2 的注入电流为 375 mA, TOF2 的中心波长  $\lambda_2 = 1555 \text{ nm}$ 。RHMLL 环长  $L_1 \approx 132 \text{ m}$ , 对应相邻纵模间隔  $f_c \approx 1.510 \text{ MHz}$ 。仔细调节 PC1、PC2 及 ODL1, 在

OC1的20%端口可获得中心波长为 $\lambda_1$ 、重复频率 $f_p = pf_m$ 的光脉冲。实验中,OFARF的环长 $L_2 \approx 63$  m,对应的FSR约为3.176 MHz。功率约为2 dBm的脉冲光从Cir端口1注入到OFARF中并通过其滤波作用,最终从OC2的10%端口得到波长为 $\lambda_2$ 、平均功率约为1 dBm的幅度均衡的脉冲光。实验中用示波器(Agilent 86100D Infiniium DCA-X)、光谱仪(Yokogawa AQ6370C)以及连接光电探测器(u2t photonics XPDV2150R-VF-FP)后的光谱仪(Agilent N9010A EXA)对滤波前后脉冲进行分析对比。

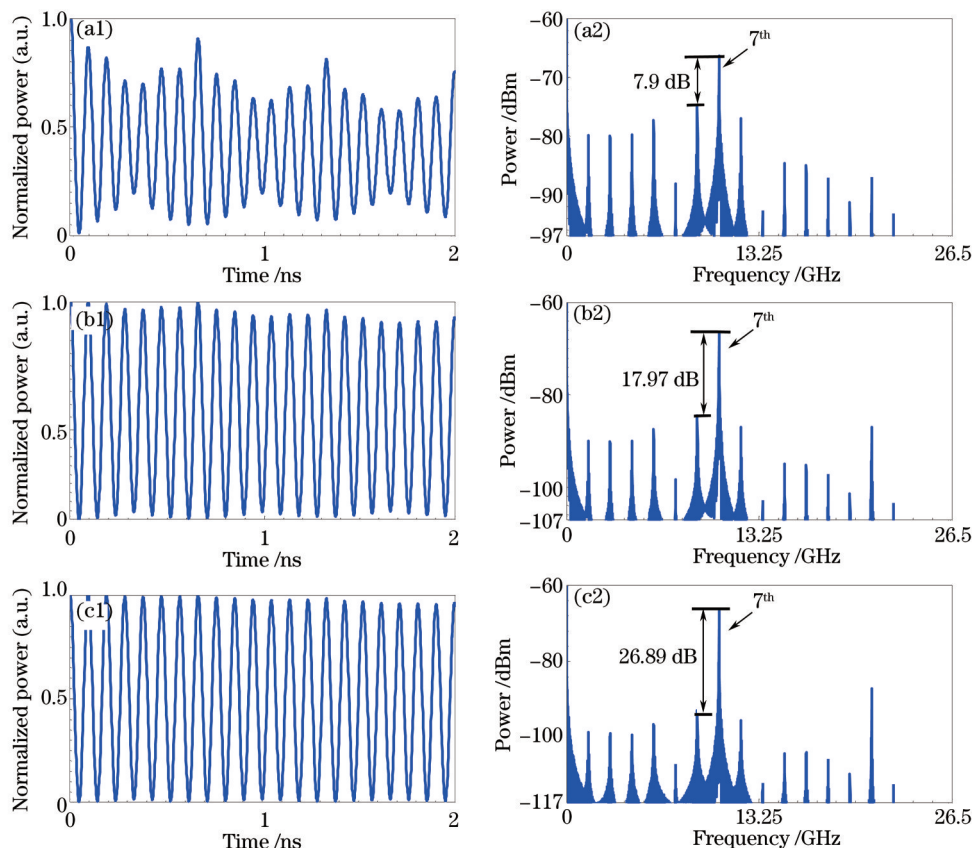


图4  $Q$ 值不同时经OFARF幅度均衡的7阶脉冲的(a1)~(c1)波形与(a2)~(c2)电谱。(a1)(a2)  $Q=12$ ; (b1)(b2)  $Q=119$ ; (c1)(c2)  $Q=650$   
 Fig.4 (a1)~(c1) Waveforms and (a2)~(c2) electrical spectra of OFARF balanced 7<sup>th</sup> order pulses with different  $Q$  values. (a1)(a2)  $Q=12$ ; (b1)(b2)  $Q=119$ ; (c1)(c2)  $Q=650$

调节RHMLL得到7阶锁模( $p=7, f_p=10.5$  GHz)输出,其波形、电谱、光谱如图5所示。波形如图5(a)所示,此时脉冲幅度有明显差异。电谱[图5(b)]中虽然7阶分量最强,但出现明显的低次谐波分量且调制频率分量只比其功率低4.75 dB。设置电谱分析仪的分辨率带宽(RBW)为18 kHz,视频带宽(VBW)为330 Hz,在扫描范围(SPAN)为60 MHz时得到电谱如图5(c)所示,可以看出有理数谐波锁模直接输出的信号具有两个明显超模;插图中的光谱显示出此时光脉冲的中心波长为1552.1 nm,光边带不明显。将该脉冲注入OFARF,调节ODL2及PC3后,所得光脉冲的波形、电谱、光谱如图6所示。图6(a)中的波形清晰稳定,与图5(a)相比脉冲幅度平坦性得到极大改善,对应的电谱[图6(b)]中只剩下7阶锁模频率分量,其他谐波分量得到理想抑制,抑制比达到20 dB以上。在细节电谱[图6(c)]中,超模被抑制了约7 dB,插图中的光谱边带明显,相邻边带间间隔为10.5 GHz。

为了进一步演示所提方案的效果,进行了11阶锁模脉冲( $p=11, f_p=16.5$  GHz)的幅度均衡实验,实验对比结果如图7、图8所示。直接从RHMLL输出的波形[图7(a)]依然表现出明显的不平坦性,电谱[图7(b)]中出现了多个低阶谐波分量。在图7(c)的电谱细节中,超模显现不明显。从光谱上看,锁模脉冲边带不明显。经OFARF滤波后,从图8(a)~(c)可看出此时脉冲幅度均衡效果理想,11阶以外的频率分量得到良好抑制,光谱出现间隔为16.5 GHz的清晰边带。14阶锁模脉冲( $p=14, f_p=21$  GHz)的幅度均衡对比如图9、图10所示。

与上面两组实验相似,图9(a)所示直接锁模输出的脉冲幅度不平坦,在电谱[图9(b)]中出现多条低阶谐波分量,且最强的谐波分量与锁模频率分量的抑制比仅为几dB。细节电谱[图9(c)]中并未表现出明显超模,光谱图的边带不明显。经过OFARF滤波后波形明显趋于平坦,图10(b)中与低阶谐波分量的抑制比达到了16.5 dB。光谱边带清晰明显。

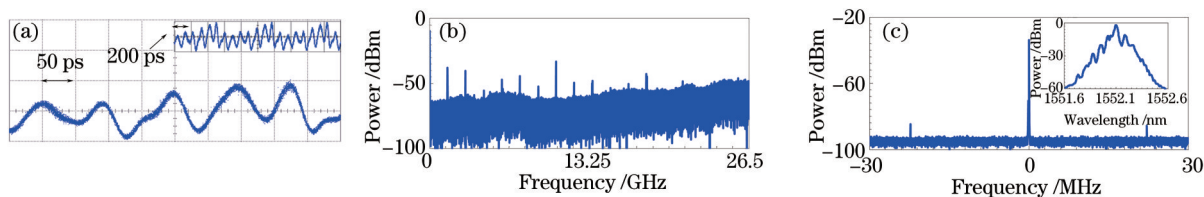


图5 7阶锁模脉冲的波形、电谱、光谱。(a) 波形; (b) 电谱; (c) 细节电谱(插图为光谱)

Fig.5 Waveform, electrical and optical spectra of 7<sup>th</sup> order pulse. (a) Waveform; (b) electrical spectrum; (c) zoom-in electrical spectrum

(the inset is optical spectrum)

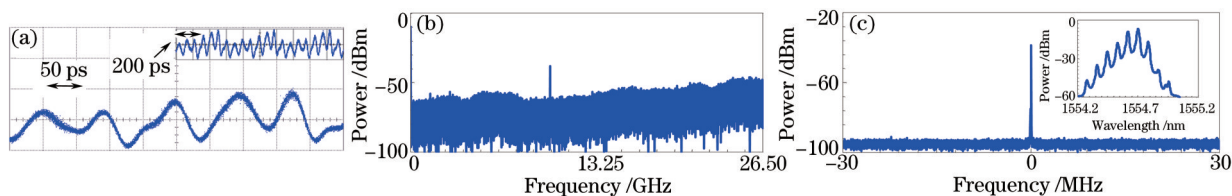


图6 经OFARF后脉冲相应的波形、电谱、光谱。(a) 波形; (b) 电谱; (c) 细节电谱(插图为光谱)

Fig.6 Waveform, electrical and optical spectra after OFARF. (a) Waveform; (b) electrical spectrum;

(c) zoom-in electrical spectrum (the inset is optical spectrum)

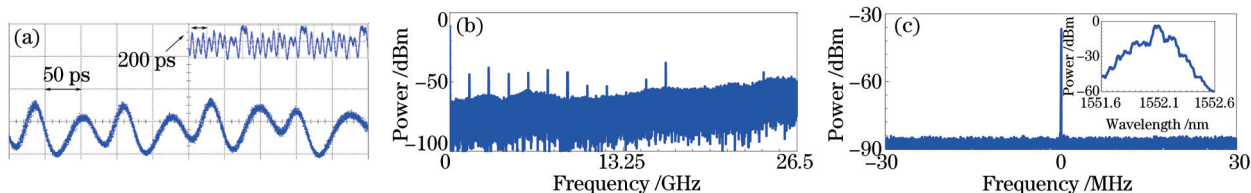


图7 11阶锁模脉冲的波形、电谱、光谱。(a) 波形; (b) 电谱; (c) 细节电谱(插图为光谱)

Fig.7 Waveform, electrical and optical spectra of 11<sup>th</sup> order pulse. (a) Waveform; (b) electrical spectrum;

(c) zoom-in electrical spectrum (the inset is optical spectrum)

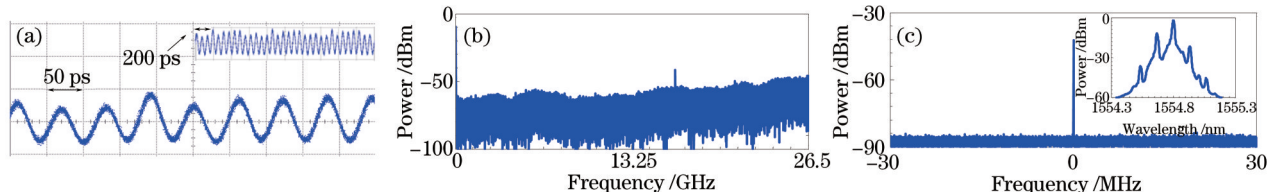


图8 经OFARF后脉冲相应的波形、电谱、光谱。(a) 波形; (b) 电谱; (c) 细节电谱(插图为光谱)

Fig.8 Waveform, electrical and optical spectra after OFARF. (a) Waveform; (b) electrical spectrum;

(c) zoom-in electrical spectrum (the inset is optical spectrum)

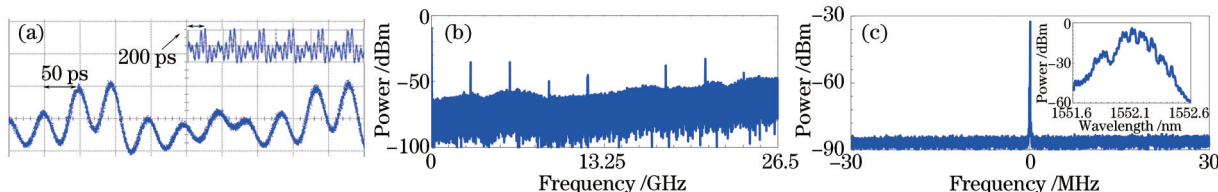


图9 14阶锁模脉冲的波形、电谱、光谱。(a) 波形; (b) 电谱; (c) 细节电谱(插图为光谱)

Fig.9 Waveform, electrical and optical spectra of 14<sup>th</sup> order pulse. (a) Waveform; (b) electrical spectrum;

(c) zoom-in electrical spectrum (the inset is optical spectrum)

由于实验中所用示波器带宽仅为20 GHz,无法准确测量均衡前后高阶锁模脉冲的脉宽。但从原理上看,由于OFARF仍为一个锁模腔,它在有效滤除低阶分量的同时有利于获得更好的模式锁定效果,因此实验

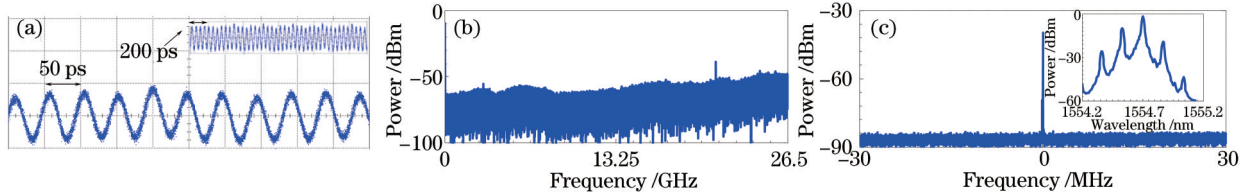


图 10 经 OFARF 后脉冲相应的波形、电谱、光谱。(a) 波形; (b) 电谱; (c) 细节电谱(插图为光谱)

Fig.10 Waveform, electrical and optical spectra after OFARF. (a) Waveform; (b) electrical spectrum; (c) zoom-in electrical spectrum (the inset is optical spectrum)

结果[图 6、8、10 中的光谱图]表现出更加清晰、频率间隔为  $pf_m$  的一系列模式。由于均衡前后期望的模式数量没有减少,根据脉冲时频域的对对应关系,脉冲宽度没有发生明显变化。此外,从工作带宽上看,所采用的 OFARF 在一定程度上会受到 SOA 载流子恢复时间<sup>[23]</sup>的限制,影响工作频率的带宽,可以用高非线性光纤代替 SOA 来构建 OFARF 消除该限制<sup>[6]</sup>。因此,实验所示方案可在更高重复频率、更小脉宽的条件下工作,可实现对脉冲幅度的均衡和超模噪声抑制。

通过上述实验对比可以看出,经由 OFARF 滤波后,7 阶、11 阶、14 阶锁模脉冲的质量均有明显改善,有理数谐波锁模情况下脉冲的幅度均显示出良好的均衡效果,各次低阶谐波分量得到良好抑制,抑制比最高可达 20 dB 以上,与前述仿真结果相符。理论与实验结果均表明,所提方案具有良好的可行性,若进一步降低 OFARF 的腔内损耗,提高  $Q$  值,可获得更加理想的幅度均衡效果。

## 4 结 论

提出了一种对 RHMLL 输出脉冲进行幅度均衡的新方案,通过构建一个 OFARF 对锁模脉冲进行滤波而获得平坦的光脉冲输出。RHMLL 输出工作波长为  $\lambda_1$  的不均衡脉冲反向注入到波长为  $\lambda_2$  的 OFARF 中,调谐该滤波器的自由光谱范围使期望的锁模分量通过而其他谐波分量及超模被抑制,通过 SOA2 的光-光调制作用,得到波长为  $\lambda_2$  的幅度均衡的脉冲。理论分析和实验结果均表明该方案可行,且结构简单,在实验中最高实现了 14 阶锁模脉冲的幅度均衡,抑制比最高可达 20 dB 以上,表现出灵活的调谐性能和很好的均衡效果,对改善 RHMLL 输出脉冲性能有着积极的意义,能有效推动 RHMLL 的实用化。

## 参 考 文 献

- 1 Peng G H, Kang J J, Lin Y C, *et al.*. Chirp-compensated multichannel hybrid DWDM/TDM pulsed carrier from optically injection-mode-locked weak-resonant-cavity laser diode fiber ring[J]. IEEE J Quantum Electron, 2011, 47(2): 182-189.
- 2 Zi Y J, Jiang T, Ma C, *et al.*. A dual-wavelength rational harmonic mode-locked fiber ring laser with different repetition frequencies[J]. IEEE Photon J, 2015, 7(2): 1501309.
- 3 Yoo S J B. Optical packet and burst switching technologies for the future photonic internet[J]. J Lightw Technol, 2006, 24(12): 4468-4492.
- 4 Shirane M, Hashimoto Y, Yamada H, *et al.*. A compact optical sampling measurement system using mode-locked laser-diode modules [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(11): 1537-1539.
- 5 Wang W R, Yu J L, Han B C, *et al.*. Tunable microwave frequency multiplication by injection locking of DFB laser with a weakly phase modulated signal[J]. IEEE Photon J, 2014, 6(2): 5500308.
- 6 Jiang Y, Bai G F, Hu L, *et al.*. Subharmonic generation in a bandwidth clamped actively mode-locked fiber laser[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(23): 2331-2334.
- 7 Onodera N, Lowery A J, Zhai L, *et al.*. Frequency multiplication in actively mode-locked semiconductor lasers[J]. Appl Phys Lett, 1993, 62(12): 1329-1331.
- 8 Yoshida E, Nakazawa M. 80~200 GHz erbium doped fibre laser using a rational harmonic mode-locking technique[J]. Electron Lett, 1996, 32(15): 1370-1372.
- 9 Wu C M, Dutta N K. High-repetition-rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(2): 145-150.
- 10 Gupta K K, Onodera N, Hyodo M. Technique to generate equal amplitude, higher-order optical pulses in rational harmonically mode locked fibre ring lasers[J]. Electron Lett, 2001, 37(15): 948-950.

- 11 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 feedback[J]. *Opt Commun*, 2002, 209(4): 417-425.
- 12 Jeon M Y, Lee H K, Ahn J T, *et al.*. External fibre laser based pulse amplitude equalisation scheme for rational harmonic mode locking in a ring-type fibre laser[J]. *Electron Lett*, 1998, 34(2): 182-184.
- 13 Feng X, Liu Y, Fu S, *et al.*. Switchable dual-wavelength ytterbium-doped fiber laser based on a few-mode fiber grating[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(3): 762-776.
- 14 Gee S, Quinlan F, Ozharar S, *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.
- 15 Yoshida M, Kasai K, Nakazawa M. Mode-hop-free, optical frequency tunable 40-GHz mode-locked fiber laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2007, 43(7-8): 704-708.
- 16 Kang J J, Lin Y C, Lee C K, *et al.*. Peak equalization of rational-harmonic-mode-locking fiberized semiconductor laser pulse via optical injection induced gain modulation[J]. *Opt Express*, 2009, 43(2): 850-859.
- 17 Papakyriakopoulos T, Vlachos K, Hatziefremidis A, *et al.*. 20-GHz broadly tunable and stable mode-locked semiconductor amplifier fiber ring laser[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(17): 1209-1211.
- 18 Das P K, Kaechele W, Theimer J P, *et al.*. Rational harmonic mode-locking fiber laser[C]. *SPIE*, 1997, 3075: 21-32.
- 19 Pan Honggang, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Generation of dark pulse based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0214006.  
潘洪刚, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于半导体光放大器的暗脉冲的产生[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0214006.
- 20 Pan Honggang, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Pulse width tunable dark pulse laser based on semiconductor optical amplifier[J]. *ActaOpticaSinica*, 2015, 35(5): 0514003.  
潘洪刚, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于半导体光放大器的脉宽可调谐暗脉冲激光器[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0514003.
- 21 Pan Honggang, Zhang Ailing, Song Dianyou, *et al.*. Laser of double-pulse based on semiconductor optical amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0602012.  
潘洪刚, 张爱玲, 宋殿友, 等. 基于半导体光放大器的双脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602012.
- 22 Li Hongxia, Jiang Yang, Bai Guangfu, *et al.*. Single mode optoelectronic oscillator assisted by active ring resonance cavity filtering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(4): 044202.  
李红霞, 江 阳, 白光富, 等. 有源环形谐振腔辅助滤波的单模光电振荡器[J]. *物理学报*, 2015, 64(4): 044202.
- 23 Reschner D W, Gehrig E, Hess O. Pulse amplification and spatio-spectral hole-burning in inhomogeneously broadened quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2009, 45(1): 21-33.

栏目编辑: 宋梅梅