



## 基于怪波实现光脉冲串的全光放大

王艳 李禄

### Amplification of optical pulse train based on Peregrine rogue wave

Wang Yan Li Lu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224213 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210959

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210959>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 四阶色散非线性薛定谔方程的明暗孤立波和怪波的形成机制

Study on the generation mechanism of bright and dark solitary waves and rogue wave for a fourth-order dispersive nonlinear Schrödinger equation

物理学报. 2020, 69(1): 010502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191384>

#### 光梳主动滤波放大实现铯原子光钟二级冷却光源

Optical frequency comb active filtering and amplification for second cooling laser of strontium optical clock

物理学报. 2018, 67(8): 080601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172733>

#### 基于光束偏转的扫描式宽带光参量啁啾脉冲放大

Scanning broadband optical parametric chirped pulse amplification based on optical beam deflection

物理学报. 2019, 68(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181538>

#### 基于光参量放大相位共轭特性的图像修复与增强

Image restoration and enhancement based on phase conjugation of optical parametric amplification

物理学报. 2017, 66(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104205>

#### 铁磁纳米线中磁化强度的磁怪波

Rogue wave solution in ferromagnetic nanowires

物理学报. 2020, 69(1): 017501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191352>

#### Fokas系统的怪波激发

Excitation of rogue waves of Fokas system

物理学报. 2020, 69(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200710>

## 基于怪波实现光脉冲串的全光放大\*

王艳<sup>1)†</sup> 李禄<sup>2)</sup>

1) (山西大学物理工程学院, 太原 030006)

2) (山西大学理论物理研究所, 太原 030006)

(2021 年 5 月 22 日收到; 2021 年 6 月 25 日收到修改稿)

本文基于非线性薛定谔方程的 Peregrine 怪波解, 讨论有理分式的脉冲动力学, 基于其特性并利用谱过滤方法, 提出一种光脉冲串的放大方法. 连续波泵浦与频谱过滤器相结合, 能够实现光放大器作用. 这一思路被应用到光脉冲串的长距离传输, 以 4 级放大为例, 实现了光脉冲串的级联放大, 并且通过矩形脉冲截断, 能够实现有限个数脉冲的放大. 其次, 以实验上可控的周期调制的平面波作为初始输入, 能够产生放大脉冲串, 且最大放大脉冲串产生的位置与调制强度有关. 改变调制强度的大小, 能够影响最大放大脉冲串所产生的位置. 研究表明, 对于不同频率的输入脉冲串, 利用此方法可以实现放大, 并且通过改变调制强度的大小, 能够实现两路不同频率信号的同时放大.

**关键词:** 怪波, 全光放大, 频谱过滤, 级联放大**PACS:** 42.65.Sf, 42.65.Yj, 42.81.Dp**DOI:** 10.7498/aps.70.20210959

## 1 引言

怪波, 也称为畸形波或巨型波, 是源于海洋中的一种奇特的自然现象, 来无影去无踪, 是混沌系统中非线性和色散相结合的产物<sup>[1,2]</sup>. 在过去 20 年中, 人们对怪波展开了广泛的研究, 到目前为止, 普遍认为怪波产生的主要原因之一是波与波之间的非线性叠加, 其物理机制是调制不稳定性. 非线性效应可以导致出现 Peregrine 孤子, 其中 Peregrine 孤子是非线性薛定谔方程的一个解<sup>[3]</sup>, 其描述的波具有时间和空间的局域化结构, 同时展现出强的时间压缩和峰值功率的增加, 被认为是怪波的原型. 怪波特有的性质引起了人们的广泛关注, 对怪波从理论、数值到实验展开了广泛的研究<sup>[4-14]</sup>. 研究发现怪波是在光学<sup>[15-16]</sup>、经济学<sup>[17]</sup>、毛细波<sup>[18]</sup>、水波<sup>[19-20]</sup>、等离子体<sup>[21]</sup>、弹性管<sup>[22]</sup>以及铁磁纳米

线<sup>[23]</sup>等领域中普遍存在. 特别由于怪波在光学中的潜在应用, 例如不同系统中怪波的产生<sup>[24-30]</sup>, 高阶怪波的激发与形成机制<sup>[31-34]</sup>, 高功率脉冲(串)的产生及传输<sup>[35-41]</sup>, 光脉冲的全光放大<sup>[42-43]</sup>等, 其非线性光纤中得到了广泛的研究.

全光信号处理比电信号处理具有更高的速度、更低的延迟以及更大的带宽. 现代非线性光学的其中一个目标是超快全光设备的发展, 全光放大器是其中一个重要的部分. 掺铒放大器、喇曼放大器、参数放大器和半导体放大器可以实现光脉冲的放大.

文献<sup>[42]</sup>基于调制不稳定性提出了光脉冲放大的新方法. 调制不稳定性是怪波产生的决定性因素, 而调制不稳定性产生的主要原因是平面波的不稳定. 也就是说, 一个小的扰动加在平面波上, 随着传输距离的演化, 脉宽逐渐变窄、峰值功率逐渐增大, 在某个位置形成最大压缩脉冲. 很明显, 此

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11705108)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [Annie@sxu.edu.cn](mailto:Annie@sxu.edu.cn)

过程具有放大和压缩性质. 但是由于平面波的存在, 放大脉冲是不稳定的, 需要去掉此背景波. 文献 [42, 44] 采用频谱过滤的方法实现了单脉冲背景的消除. 而对于脉冲串, 文献 [38] 采用延迟线干涉仪的方法消除背景, 获得了高质量的脉冲串. 延迟线干涉仪的方法是将脉冲串反向并且延迟  $\pi$  相位, 与原来的脉冲串相叠加, 从而去除平面波背景, 但合成的脉冲串频率发生了改变. 文献 [45] 基于 Akhmediev 呼吸子的谱特性实现了多孤子的放大和传输, 但需要在光纤中实现两次中心谱的调制. 并且以上关于脉冲串放大方法的研究中都没有涉及到对不同频率脉冲串的放大问题.

本文采用连续波泵浦与频谱过滤相结合的方法, 实现对光脉冲串的放大及长距离传输. 并且通过矩形脉冲的截断, 能够实现有限个数脉冲的放大, 这是采用延迟线干涉仪的方法无法实现的. 特别对于不同频率的光脉冲串, 通过调制强度的改变, 能够实现两路信号的同时放大.

## 2 理论模型

皮秒光脉冲在单模光纤中的传输可以由如下非线性薛定谔方程 (NLS) 来描述 [46]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A = -\frac{i\alpha}{2} A, \quad (1)$$

式中,  $A = A(z, T)$  是电磁场慢变包络,  $z$  是传输距离,  $T$  是随脉冲以群速度  $v_g$  移动的参考系中的时间量度 ( $T = t - z/v_g$ ). 系数  $\beta_2$  和  $\gamma$  分别为二阶群速度色散 GVD 和克尔非线性参数,  $\alpha > 0$  是光

纤损耗.

不考虑光纤损耗, 在反常色散条件下, 即  $\beta_2 < 0$  且  $\alpha = 0$ , 方程 (1) 具有如下形式的解 [24]:

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \left[ 1 + \frac{2(1-2a)\cosh(b\xi) + ib\sinh(b\xi)}{\sqrt{2a}\cos(\omega\tau) - \cosh(b\xi)} \right] e^{i\xi}, \quad (2)$$

其中  $\xi = (z - z_0)/L_{NL}$ ,  $\tau = T/T_0$ . 非线性长度  $L_{NL} = (\gamma P_0)^{-1}$ , 时间尺度  $T_0 = |\beta_2|/(\gamma P_0)^{-1}$ ,  $P_0$  是入射脉冲的总功率,  $z_0$  是任一实数.  $b = \sqrt{8a(1-2a)}$ ,  $\omega = 2\sqrt{1-2a}$ ,  $a$  为调制不稳定增益. 当  $a = 1/2$  时, 有如下形式的解:

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \left[ 1 - \frac{4 + 8i\xi}{1 + 4\xi^2 + 4\tau^2} \right] e^{i\xi} \quad (3)$$

该解在初始时刻开始于强度为  $|A(0, T)|^2 = P_0$  的平面波, 随着传输距离的演化, 这个平面波被局域化, 峰值功率逐渐增大, 在  $z = z_0$  处形成最大压缩脉冲, 脉冲被放大. 但是由于调制不稳定性, 形成的最大压缩脉冲不能稳定传输, 需要去除背景.

## 3 光脉冲串的放大

对于非线性薛定谔方程的周期解 (2), 其傅里叶级数展开具有如下形式:

$$A(z, T) = A_0(z) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n(z) \cos(n\omega T), \quad (4)$$

忽略常数和相位因子, 得到泵浦波和边带振幅的演化形式为 [47]

$$A_0(z) = \sqrt{P_0} \left[ 1 - \frac{ib\sinh(b\xi) + 2(1-2a)\cosh(b\xi)}{\sqrt{\cosh^2(b\xi) - 2a}} \right] e^{i\xi},$$

$$A_n(z) = \sqrt{P_0} \frac{ib\sinh(b\xi) + 2(1-2a)\cosh(b\xi)}{\sqrt{\cosh^2(b\xi) - 2a}} \left( \frac{\cosh(b\xi) - \sqrt{\cosh^2(b\xi) - 2a}}{\sqrt{2a}} \right)^{|n|} e^{i\xi},$$

$$n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots,$$

研究表明, 在频域中滤除不随时间变化的  $A_0(z)$ , 即可得到零背景的脉冲串 [41], 形式如下:

$$A_{zb}(z, T) = \sqrt{P_0} \left\{ \frac{\sqrt{2a} [2(1-2a)\cosh(b\xi) + ib\sinh(b\xi)] [1 + \cos(\omega\tau)]}{[\sqrt{2a}\cos(\omega\tau) - \cosh(b\xi)] [\sqrt{2a} + \cosh(b\xi)]} \right\} e^{i\xi}. \quad (5)$$

首先来演示零背景脉冲串 (5) 的演化. 这里采用单模 SMF-28 光纤, 其参数为  $\beta_2 = -21.4 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\gamma = 1.2 \text{ (W}\cdot\text{km)}^{-1}$ , 光纤损耗  $\alpha = 0.19 \text{ dB/km}$ , 中心波长  $1550 \text{ nm}$ . 入射功率  $P_0 = 0.7 \text{ W}$ . 如果不考虑损耗, (5) 式表示的零背景脉冲串能够稳定传输, 如图 1 所示.

图 1 给出了峰值功率  $P = 8.96 \text{ W}$  的零背景脉冲串传输  $z_A = 95.2381 \text{ km}$  的传输图. 从图 1(a) 可以得到, 零背景脉冲串中心脉冲的半高全宽  $\Delta\tau = 3.4045 \text{ ps}$ , 可以计算出中心脉冲的孤子阶数为 [48]

$$N = \sqrt{\frac{\gamma P (\Delta\tau/1.763)^2}{|\beta_2|}} = 1.3678.$$

根据孤子理论, 当孤子数在  $0.5 < N < 1.5$  之间, 脉冲能够振荡稳定地传输 [46], 如图 1(b) 所示.

然而, 在实际传输过程中, 由于损耗的影响, 脉冲串的振幅随着传输距离的增大而逐渐减小, 因

此必须对脉冲串进行放大. 研究表明, 在光纤中适当的位置放置连续波泵浦激光器和谱过滤器起着光放大器的作用, 能够实现光脉冲串的放大, 如图 2 所示. 图 2(a) 是 (5) 式表示的初始脉冲串的分布, 传输  $z_A = 33.33 \text{ km}$  后, 由于损耗的存在, 脉冲串的峰值功率下降到  $0.7041 \text{ W}$ , 如图 2(b) 所示. 为了放大衰减的脉冲串, 在  $z_A$  处注入功率为  $P_0$  的平面波, 与衰减的脉冲串构成混合形式  $|A(z_A, T)| + \sqrt{P_0}$ . 此时, 由于平面波的注入, 衰减的脉冲串会被放大, 在  $L_A = 0.8821 \text{ km}$  处衰减的脉冲被放大到与初始入射脉冲具有相同功率的脉冲串. 但是由于平面波的存在, 放大脉冲串不能稳定传输. 所以需要在  $L_A$  位置处放置频谱过滤器来滤除平面波背景. 根据本文所取参数, 将频谱强度衰减到原来的 1%, 过滤掉中心频谱附近大约  $0.2 \text{ nm}$  频谱, 可以获得稳定传输的零背景放大脉冲串, 如图 2(c) 所示,

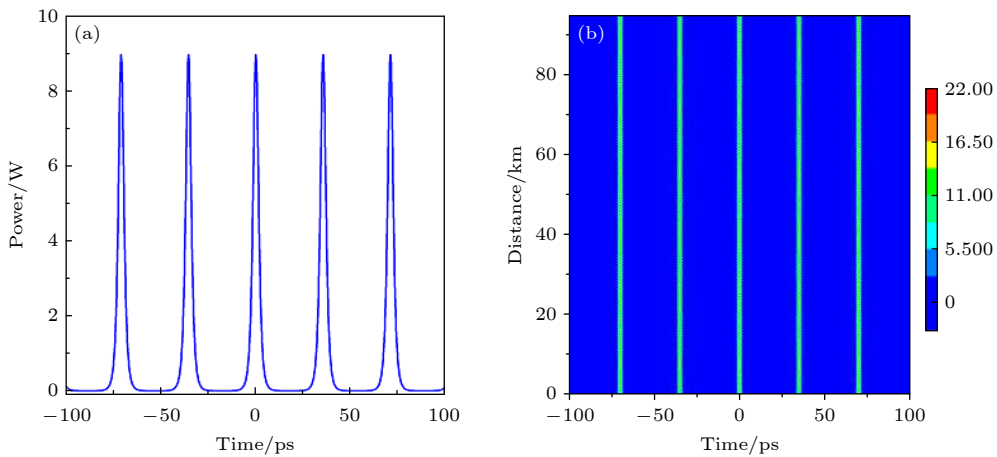


图 1 光脉冲串稳定传输图 (a) 零背景脉冲串; (b) 零背景脉冲串稳定传输, 其中  $a = 0.4, P_0 = 0.7 \text{ W}$

Fig. 1. Stable transmission of the pulse trains: (a) Zero background pulse trains; (b) stable transmission of the pulse trains, where  $a = 0.4, P_0 = 0.7 \text{ W}$ .

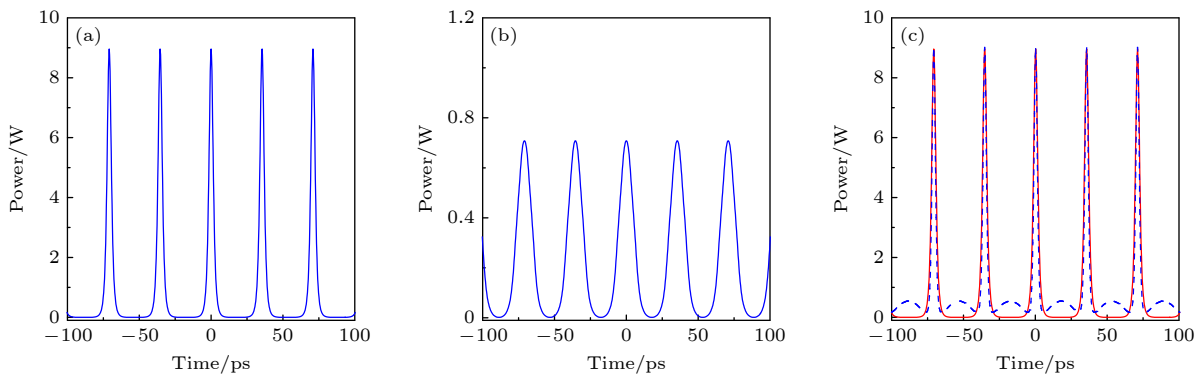


图 2 光脉冲串的放大 (a) 初始入射脉冲串; (b) 衰减脉冲串; (c) 放大脉冲串与初始脉冲串的比较, 其中  $a = 0.45, P_0 = 0.7 \text{ W}$ .

Fig. 2. Amplification of the pulse trains: (a) Initial input pulse trains; (b) attenuated pulse trains; (c) comparison of the amplified and the initial pulse trains, where  $a = 0.4, P_0 = 0.7 \text{ W}$ .

其中红色实线为初始脉冲串, 蓝色虚线为被放大的零背景脉冲串.  $z_A$  是初始脉冲串衰减到小振幅脉冲串, 也是连续波泵浦放置的位置.  $L_A$  为注入平面波后传输的长度, 也是频谱过滤器放置的位置.  $z_A$  处注入平面波, 传输  $L_A$  的距离后衰减的脉冲串被放大到初始脉冲串的功率, 此时通过频谱过滤器获得稳定传输的脉冲串. 以上数值结果表明, 通过入射一连续波并随后再过滤掉该连续波可以实现光脉冲串的放大.

作为一个例子, 演示了光脉冲串的 4 级级联放大过程, 如图 3 所示. 第一级放大过程如图 3(a1), 3(b1) 和 3(c1). 图 3(a1) 为峰值功率为 10.08 W 的初始入射脉冲串, 传输  $z_A = 23.8095$  km 后衰减成为峰值功率为 1.7179 W 的脉冲串, 如图 3(b1) 所示. 在  $z_A$  处注入平面波, 传输  $L_A = 0.4310$  km 后并通过谱过滤得到与初始入射脉冲串同功率的零背景脉冲串, 如图 3(c1) 所示, 其中红色实线表示初始入射脉冲串, 蓝色虚线表示放大并过滤后的零背

景脉冲串. 第 2—4 级的初始脉冲串为前一级的放大脉冲, 如图 3(a2), 3(a3) 和 3(a4) 所示, 其余过程与第一级放大过程完全相同. 在这 4 级级联放大过程中,  $z_A = 23.8095$  km, 注入平面波后的传输长度  $L_A$  分别是 0.4310 km, 0.3905 km, 0.3845 km 和 1.0119 km. 以上结果表明, 平面波泵浦与频谱过滤器相结合, 可以实现脉冲串的级联放大, 从而实现脉冲信号的长距离传输.

#### 4 有限个数脉冲的放大

数字通信系统中, 为了实现多进制调制, 需要以有限个数的脉冲为单位进行传输, 此时需要对无限的脉冲串进行截断. 文献 [38] 中指出, 使用延迟线干涉仪的方法能够产生零背景的脉冲串. 采用延迟线干涉仪的方法, 由于两个相位相反的脉冲串相叠加, 新的脉冲串频率发生了改变, 并且两个脉冲串之间存在  $\pi$  相位的相互作用, 因此使用这种方法

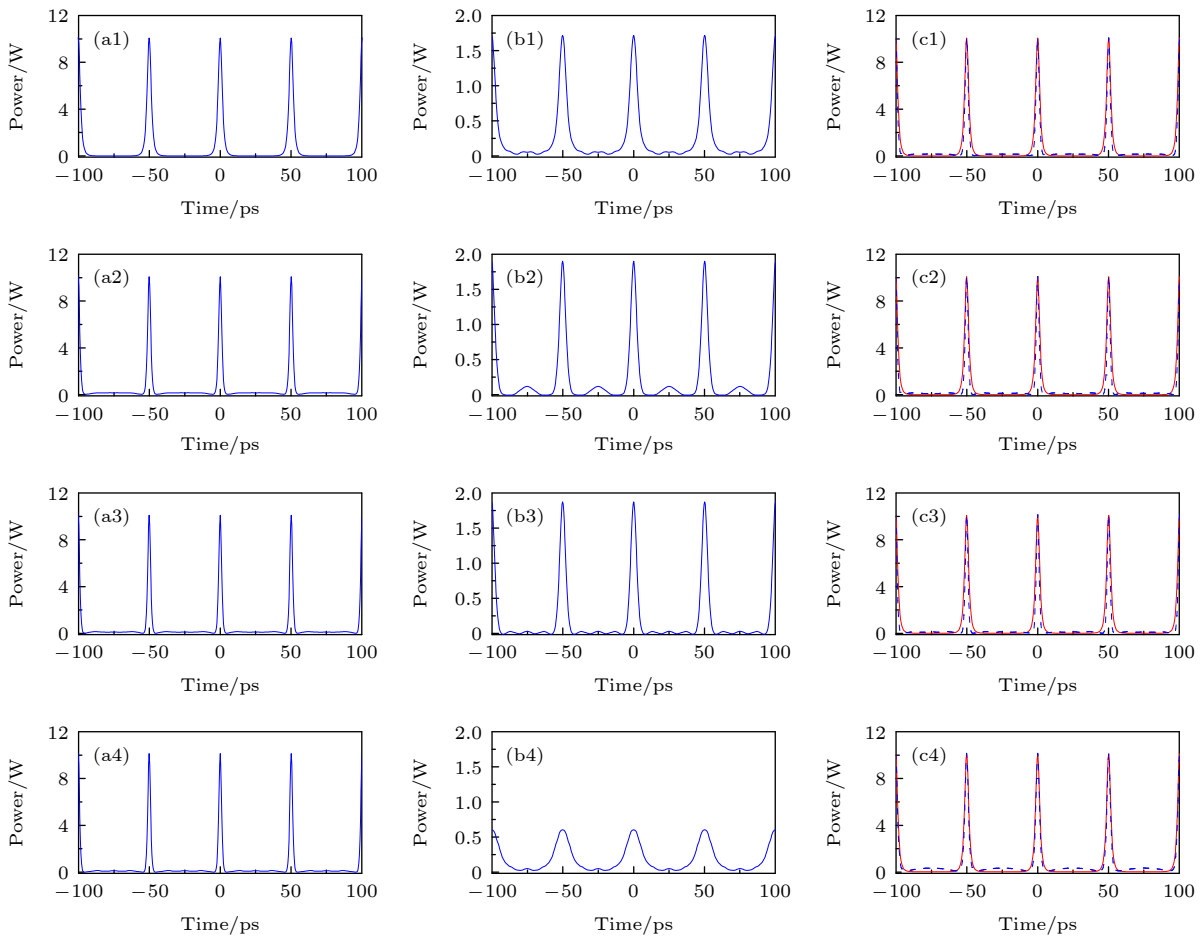


图 3 光脉冲串 4 级放大, 其中  $a = 0.45$ ,  $P_0 = 0.7$  W

Fig. 3. 4-cascade amplification of optical pulse trains, where  $a = 0.45$ ,  $P_0 = 0.7$  W.

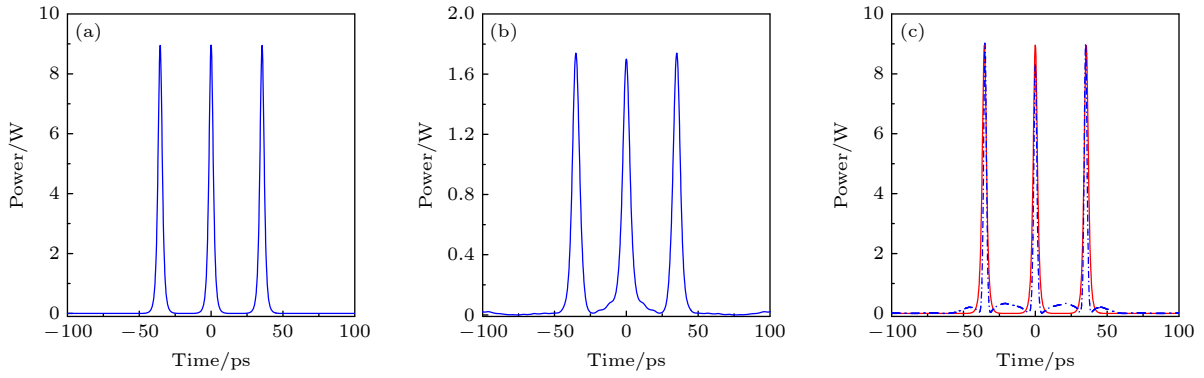

 图 4 有限个数脉冲的放大, 其中  $k = 3$ ,  $P_0 = 0.7 \text{ W}$   $a = 0.4$ 

 Fig. 4. Amplification for limited number of pulses, where  $k = 3$ ,  $P_0 = 0.7 \text{ W}$   $a = 0.4$ .

得到的零背景脉冲串不能进行截断. 采用频谱过滤的方法, 得到的零背景脉冲串通过矩形截断, 能够实现有限个数脉冲的稳定传输, 并且通过改变矩形脉冲的参数, 能够改变截断脉冲的个数.

(5) 式所表示的零背景脉冲串在  $z = 0$  通过矩形脉冲截断, 其表示为

$$A_{\Delta}(0, T) = \sqrt{P_0} \left[ \frac{2\sqrt{2a}(1-2a)[1+\cos(\omega\tau)]}{(\sqrt{2a}+1)[\sqrt{2a}\cos(\omega\tau)-1]} \right] \cdot m(k\tau). \quad (6)$$

其中  $m(k\tau)$  是矩形函数, 用以截断脉冲串, 其形式如下:

$$m(k\tau) = \begin{cases} 1, & \text{for } |\tau| \leq k \cdot \frac{\pi}{\omega}, \\ 0, & \text{for } |\tau| > k \cdot \frac{\pi}{\omega}, \end{cases}$$

$k$  为截断脉冲的个数. 以 3 个有限脉冲为例, 展示其放大过程, 如图 4 所示. 图 4(a) 为 (6) 式所表示的有限个数的脉冲, 在传输  $z_A = 23.8095 \text{ km}$  后, 峰

值功率下降为  $1.7402 \text{ W}$ , 如图 4(b) 所示. 此处注入平面波, 经过  $L_A = 0.4179 \text{ km}$  后, 结合频谱过滤器, 有限个数脉冲被放大到初始脉冲的功率, 如图 4(c) 所示, 其中红色实线为 (6) 式表示的截断后的脉冲串, 蓝色虚线为放大零背景脉冲. 矩形参数的改变, 能够实现任意有限个脉冲的放大.

## 5 不同频率脉冲串的放大

以上结果主要基于由 (5) 式给出的零背景脉冲串作为初始输入来讨论的, 这样的零背景脉冲串在实验上是很难实现的. 有研究表明, 以周期调制的平面波作为初始输入, 能够产生放大脉冲串 [39]. 因此考虑如下形式的初始输入:

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} [1 + q_i(T)], \quad (7)$$

$$q_i(T) = A_i \cos(\Omega_i T),$$

其中  $q(T)$  为小振幅脉冲串,  $A$  为调制强度,  $\Omega$  为调制频率. 数值结果表明, 当脉冲串取不同频率时, 在平面波的作用下, 小振幅脉冲串被放大. 并且, 调制强度  $A$  的大小能够影响最大放大脉冲串所产生的位置  $L_{\max}$ , 结果如图 5 所示.

从图 5 可以看到, 对于不同频率的输入脉冲串, 改变调制强度  $A$  的大小, 能够改变最大放大脉冲串所产生的位置  $L_{\max}$ . 因此, 适当调整  $A$  的大小, 能够实现两路不同频率信号在同一位置被放大到最大功率.

以  $\Omega$  分别等于  $0.3$  与  $0.6$  来展示其放大过程, 结果如图 6 所示. 图 6(a) 为 (7) 式所表示的初始输入, 图中黑色和红色实线分别表示频率为  $\Omega_1 = 0.3$ ,  $\Omega_2 = 0.6$  的脉冲串. 当  $\Omega_1 = 0.3$ ,  $A_1 = 0.2$ , 在  $L_{\max 1} = 5.8702 \text{ km}$  处产生最大放大脉冲串. 当  $\Omega_2 = 0.6$ ,  $A_2 =$

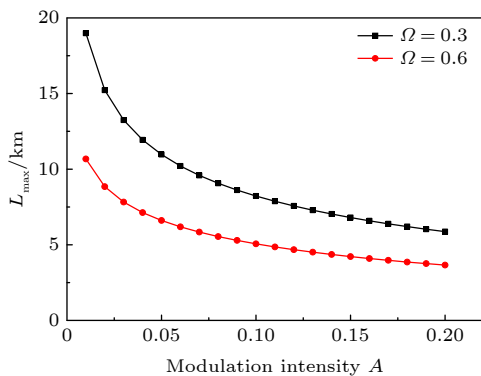

 图 5 调制强度  $A$  与最大放大脉冲串位置的关系

 Fig. 5. Location relationship between modulation intensity  $A$  and the maximum amplified pulse trains.

0.07, 在  $L_{\max 2} = 5.8405$  km 处产生最大放大脉冲串, 其放大结果如图 6(b) 所示. 此处通过频谱过滤后得到零背景脉冲串, 脉冲串峰值功率分别为 9.5943 W 和 6.0122 W.

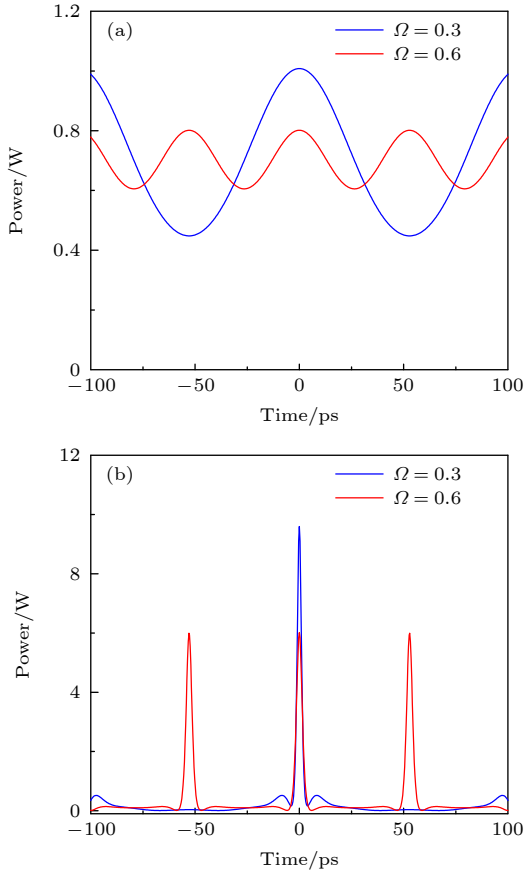


图 6 不同频率脉冲串的放大 (a) 初始输入; (b) 零背景的放大脉冲串, 其中  $\Omega_1 = 0.3$ ,  $\Omega_2 = 0.6$ ,  $A_1 = 0.2$ ,  $A_2 = 0.07$   
 Fig. 6. Amplification for different frequencies of the pulse trains: (a) Initial input pulse trains; (b) amplified pulse trains of zero background, where  $\Omega_1 = 0.3$ ,  $\Omega_2 = 0.6$ ,  $A_1 = 0.2$ ,  $A_2 = 0.07$ .

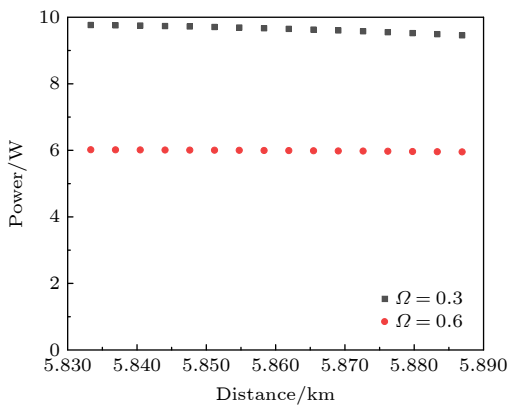


图 7  $L_{\max 1}$  与  $L_{\max 2}$  之间放大脉冲的功率  
 Fig. 7. Power of the amplified pulse trains between  $L_{\max 1}$  and  $L_{\max 2}$ .

以上数值模拟结果显示, 两路最大放大脉冲串产生的位置  $L_{\max 1}$  与  $L_{\max 2}$  很接近, 但并不完全相等, 为解决该问题, 研究了在以上参数下,  $L_{\max 1}$  与  $L_{\max 2}$  之间脉冲串被放大后的功率情况, 结果如图 7 所示.

从图 7 可以看出, 在  $L_{\max 1}$  与  $L_{\max 2}$  之间, 两个频率下脉冲串放大后的功率变化不大. 此结果表明, 在  $L_{\max 1}$  与  $L_{\max 2}$  之间, 可以选取任意位置来实现两路不同频率脉冲信号的同时放大. 这里取  $L_{\max} = (L_{\max 1} + L_{\max 2})/2$ , 即  $L_{\max} = 5.8553$  km 作为两路信号最大放大脉冲所产生的位置, 其放大结果如图 8 所示.

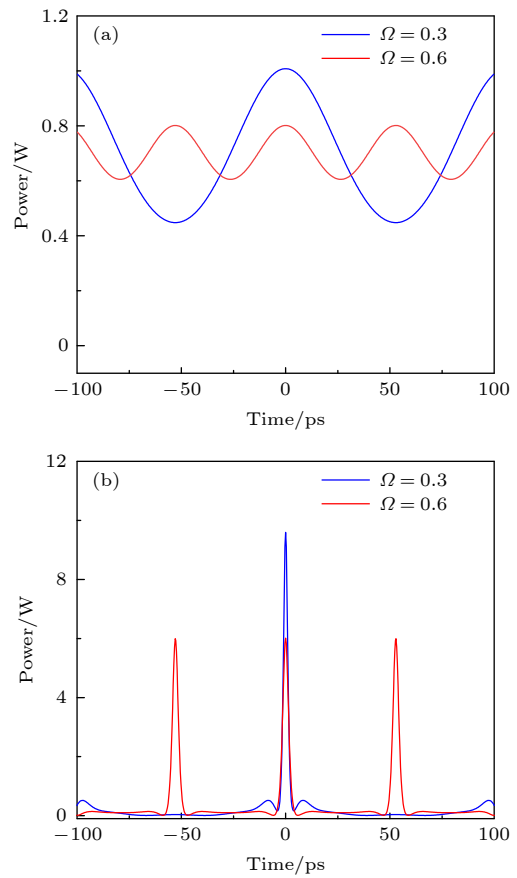


图 8 不同频率脉冲串的同时放大 (a) 初始输入; (b) 零背景的放大脉冲串, 其中  $\Omega_1 = 0.3$ ,  $\Omega_2 = 0.6$ ,  $A_1 = 0.2$ ,  $A_2 = 0.07$   
 Fig. 8. Simultaneous amplification for different frequencies of the pulse trains: (a) Initial input pulse trains; (b) amplified pulse trains of zero background, where  $\Omega_1 = 0.3$ ,  $\Omega_2 = 0.6$ ,  $A_1 = 0.2$ ,  $A_2 = 0.07$ .

在以上参数下, 零背景放大脉冲串  $\Omega_1 = 0.3$  的峰值功率是 9.686 W,  $\Omega_2 = 0.6$  的峰值功率是 5.999 W, 与图 6(b) 所示结果差别不大. 因此可以

得出结论, 对于不同频率的两路脉冲串, 通过调整调制强度的大小, 能够实现两路信号的同时放大.

## 6 结 论

怪波的概念首先来源于海洋学, 其巨大的振幅对海洋上行驶的船只具有摧毁性的破坏作用, 但其时间、空间的局域化以及高振幅的结构特性在其它非线性研究领域内可能有潜在的应用, 尤其是在光学方面. 本文基于非线性薛定谔方程的 Peregrine 怪波解, 讨论了有理分式的脉冲动力学, 基于其特性并利用谱过滤方法, 提出了一种光脉冲串的放大方法. 首先从理论上阐述了光脉冲串的放大过程, 研究结果表明, 连续波泵浦与频谱过滤器相结合, 能够实现光放大器作用. 并且以 4 级放大为例, 实现了光脉冲串的级联放大以实现其长距离传输. 特别地, 采用矩形脉冲截断, 能够实现有限个数脉冲的放大, 这是采用延迟线干涉仪的方法所不能实现的. 通过改变矩形脉冲的周期, 能够方便的调整有限脉冲的个数. 其次, 采用实验上可控的周期调制的平面波作为初始入射脉冲串, 采用连续波泵浦与频谱过滤相结合的方法, 能够产生零背景放大脉冲串, 实现脉冲串的稳定传输. 调制强度的大小, 影响放大脉冲串所产生的位置. 目前的文献中对不同频率脉冲串的放大问题鲜有报道. 本研究结果表明, 利用本文提出的方法, 对于不同频率的两路信号, 通过调整调制强度的大小, 能够实现两路信号的同时放大. 本文的研究结果为光脉冲串的放大以及在光纤中传输提供了一定的理论依据与指导意义.

## 参考文献

- [1] Kharif C, Pelinovsky E, Slunyaev A 2009 *Rogue Waves in the Ocean* (Springer)
- [2] Akhmediev N, Soto-Crespo J M, Ankiewicz A 2009 *Phys. Lett. A* **373** 2137
- [3] Peregrine D H 1983 *J. Austral. Math. Soc. Ser. B* **25** 16
- [4] Onorato M, Residori S, Bortolozzo U, Montina A, Arecchi F 2013 *Phys. Rep.* **528** 47
- [5] Dai C Q, Wang Y Y 2015 *Nonlinear Dyn.* **80** 715
- [6] Malomed B A, Mihalache D 2019 *Rom. J. Phys.* **64** 106
- [7] Baronio F 2017 *Opt. Lett.* **42** 1756
- [8] 李淑青, 杨光晔, 李祿 2014 *物理学报* **63** 104215
- [9] Dai C Q, Wang Y Y, Zhang J F 2020 *Nonlinear Dyn.* **102** 379
- [10] Dai C Q, Liu J, Fan Y, Yu D G 2017 *Nonlinear Dyn.* **88** 1373
- [11] AuDo F, Kibler B, Fatome J, Finot C 2018 *Opt. Lett.* **43** 2864
- [12] Frostig H, Vidal I, Fischer R, Sheinfux H H, Silberberg Y 2020 *Optica* **7** 864
- [13] Agafontsev D S, Randoux S, Suret P 2021 *Phys. Rev. E* **103** 032209
- [14] Sun Z Y, Yu X 2021 *Phys. Rev. E* **103** 062203
- [15] Bonatto C, Feyereisen M, Barland S, Giudici M, Masoller C, Leite J R R, Tredicce J R 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 053901
- [16] Dudley J M, Dias F, Erkintalo M, Genty G 2014 *Nat. Photon.* **8** 755
- [17] Yan Z Y 2010 *Commun. Theor. Phys.* **54** 947
- [18] Shats M, Punzmann H, Xia H 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 104503
- [19] Chabchoub A, Hoffmann N P, Akhmediev N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 204502
- [20] Dematteis G, Grafke T, Onorato M, Eijnden E V 2019 *Phys. Rev. X* **9** 041057
- [21] Bailung H S, Sharma K, Nakamura Y 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 255005
- [22] Chen Z M, Duan W S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 014701 (in Chinese) [陈智敏, 段文山 2020 *物理学报* **69** 014701]
- [23] Li Z D, Guo Q Q 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 017501 (in Chinese) [李再东, 郭奇奇 2020 *物理学报* **69** 017501]
- [24] Kibler B, Fatome J, Finot C, Millot G, Dias F, Genty G, Akhmediev N, Dudley J M 2010 *Nat. Phys.* **6** 790
- [25] Hammani K, Kibler B, Finot C, Morin P, Fatome J, Dudley J M, Millot G 2011 *Opt. Lett.* **36** 112
- [26] Li S Q, Chen Y X, Liu Y 2020 *J. Quantum Opt.* **26** 180 (in Chinese) [李淑青, 程永喜, 刘阳 2020 *量子光学学报* **26** 180]
- [27] Li M, Wang B T, Xu T, Shui J J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 010502 (in Chinese) [李敏, 王博婷, 许韬, 水涓涓 2020 *物理学报* **69** 010502]
- [28] Yang G Y, Li L, Jia S T 2012 *Phys. Rev. E* **85** 046608
- [29] Zhang J F, Jin M Z 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 214203 (in Chinese) [张解放, 金美贞 2020 *物理学报* **69** 214203]
- [30] Sgrignuoli F, Chen Y, Gorsky S, Britton W A, Negro L D 2021 *Phys. Rev. B* **103** 195403
- [31] He J S, Zhang H R, Wang L H, Porsezian K, Fokas A S 2013 *Phys. Rev. E* **87** 052914
- [32] Wang Q, Liu D, Li X 2019 *Commun. Nonlinear Sci.* **75** 302
- [33] Gao P, Zhao L C, Yang Z Y, Li X H, Yang W L 2020 *Opt. Lett.* **45** 2399
- [34] Wang L H, He J S, Xu H, Wang J, Porsezian K 2017 *Phys. Rev. E* **95** 042217
- [35] Yang G Y, Li L, Jia S T, Mihalache D 2013 *Rom. Rep. Phys.* **65** 902
- [36] Yang G Y, Wang Y, Qin Z, Malomed B A, Mihalache D, Li L 2014 *Phys. Rev. E* **90** 062909
- [37] Yang G Y, Li L, Jia S T, Mihalache D 2013 *Rom. Rep. Phys.* **65** 391
- [38] Fatome J, Kibler B, Finot C 2013 *Opt. Lett.* **38** 1663
- [39] Wang Y, Song L J, Li L, Malomed B A 2015 *J. Opt. Soc. Am. B* **32** 2257
- [40] Jia H P, Yang R C, Tian J P, Zhang W M 2019 *Appl. Opt.* **58** 912
- [41] Yang G Y 2014 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [杨光晔 2014 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [42] Wang Y, Song L J, Li L 2016 *Appl. Opt.* **55** 7241
- [43] Wang Y, Lu L 2017 *Rom. Rep. Phys.* **62** 205
- [44] Yang G Y, Li L, Tian J P 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 0619002
- [45] Yang G Y, Wu F O, Helena E, Lopez A, Christodoulides D N 2020 *Opt. Commun.* **473** 125899
- [46] Agrawal G P (translated by Jia D F, Yu Z H) 2010 *Applications of Nonlinear Fiber Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp103–104 (in Chinese) [Agrawal G P 著 (贾东方, 余震虹 译) 2010 (北京: 电子工业出版社) 第103—104页]
- [47] Hammani K, Wetzel B, Kibler B, Fatome J, Finot C, Millot G, Akhmediev N, Dudley J M 2011 *Opt. Lett.* **36** 2140
- [48] Dudley J M, Genty G, Dias F, Kibler B, Akhmediev N 2009 *Opt. Express* **17** 21497

# Amplification of optical pulse train based on Peregrine rogue wave\*

Wang Yan<sup>1)†</sup> Li Lu<sup>2)</sup>

1) (*College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

( Received 22 May 2021; revised manuscript received 25 June 2021 )

## Abstract

In this paper, we discuss the pulse dynamics of rational fraction based on the Peregrine rogue wave solution of nonlinear Schrödinger equation. Based on its properties and using the spectral filtering, the amplification of optical pulse train is proposed. The results show that the combination of a continuous-wave pump and a spectral filter positioned in fiber can act as an amplifier. And the idea is applied to the long-haul transmission of optical pulse train and four amplification periods are demonstrated. Particularly, the amplification of limited number of pulses can be realized by rectangular pulse truncation and the number of pulses can be adjusted by changing the parameters. The periodically modulated plane wave that can be controlled experimentally is taken as an input which can produce the maximumly amplified zero background pulse train and the location of maximumly amplified pulse train relates to the modulation intensity. The location of the maximumly amplified zero background pulse train changes with the modulation intensity. The results show that for two input signals with different frequencies, they can realize the amplification with the above method. By changing the modulation intensity the simultaneous amplification for two signals with different frequencies can be realized.

**Keywords:** Rogue wave, Optical amplification, Spectral filtering, Cascade amplification

**PACS:** 42.65.Sf, 42.65.Yj, 42.81.Dp

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210959

---

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11705108).

† Corresponding author. E-mail: [Annie@sxu.edu.cn](mailto:Annie@sxu.edu.cn)