

引用格式: GAO Ren, WANG Juan-fen, ZHANG Xuan, *et al.* Interaction of Dark Rogue Waves[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(4):0426001

高仁,王娟芬,张焯,等. 暗怪波的相互作用[J].光子学报,2020,**49**(4):0426001

暗怪波的相互作用

高仁,王娟芬,张焯,杨玲珍,张朝霞

(太原理工大学 物理与光电工程学院,太原 030600)

摘 要:以耦合非线性薛定谔方程为理论模型,数值研究了两个一阶暗怪波在正常色散单模光纤中的相互作用.基于一阶暗怪波精确解,采用分步傅里叶数值模拟法,从间距、相位差和振幅系数比方面讨论相邻两个一阶暗怪波之间的相互作用.基于二阶暗怪波精确解,讨论了两个一阶暗怪波的非线性相互作用,研究表明:同相位情况下,间距参数 T_1 为 0、5、20 时,相邻两个一阶暗怪波相互作用激发产生“扭结型”暗怪波.相比较于单个暗怪波发生能量的弥散,“扭结型”暗怪波分裂形成多个次暗怪波.反相位情况下,间距参数 T_1 为 2、7、12 时,相邻两个一阶暗怪波相互作用也可以激发产生“扭结型”暗怪波.并且“扭结型”暗怪波初始激发的空间位置偏离原始单个暗怪波的位置 5.振幅系数比越大,该空间位置越接近 5.二阶暗怪波可以看作是两个一阶暗怪波的非线性叠加,复合型和三组分型二阶暗怪波与相邻两个一阶暗怪波的相互作用略有相似.

关键词:非线性光纤光学;暗怪波;非线性薛定谔方程;单模光纤;相互作用

中图分类号:O437

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0426001

Interaction of Dark Rogue Waves

GAO Ren, WANG Juan-fen, ZHANG Xuan, YANG Ling-zhen, ZHANG Zhao-xia

(College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China)

Abstract: The coupled nonlinear Schrödinger equation was used as a theoretical model to study the interaction of two first-order dark rogue waves in a normal dispersion single-mode fiber. Based on the exact solution of first-order dark rogue wave, the interaction between two adjacent first-order dark rogue waves is discussed in terms of spacing, phase and ratio of amplitude coefficients using split-step Fourier numerical simulation. Based on the exact solution of the second-order dark rogue wave, the nonlinear interaction of two first-order dark rogue waves is discussed. The results show that the interaction of two adjacent in-phase first-order dark rogue waves will generate "twisted" dark rogue waves when the interval parameter T_1 is 0, 5, 20. Compared to the energy diffusion of a single dark rogue wave, the "twisted" dark rogue wave can split and form multiple secondary dark rogue waves. In the case of out of-phase, when the interval parameter T_1 is 2, 7, 12, the interaction of two adjacent first-order dark rogue waves can also stimulate and generate the "twisted" dark rogue waves. And the initially excited spatial position of the "twisted" dark rogue wave deviates from that of the original single dark rogue wave. The larger the ratio of amplitude coefficients, the closer this spatial position is to 5. Second-order dark rogue waves can be regarded as the nonlinear superposition of two first-order dark rogue waves. The composite and three-component second-order dark rogue waves are slightly similar to the interaction between two adjacent first-order dark rogue waves.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61675144,61975141),山西省重点研发计划项目(高新技术领域)(No.201803D121057)

第一作者:高仁(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤激光器. Email: gaoren_1995@163.com

导师(通讯作者):王娟芬(1981—),女,副教授,博士,主要研究方向为非线性光学传输方面. Email: wangjuanfen@126.com

收稿日期:2019-12-20;录用日期:2020-02-16

Key words: Nonlinear optical fiber optics; Dark rogue wave; Nonlinear Schrödinger equation; Single-mode optical fiber; Interaction

OCIS Codes: 190.4370; 060.5530; 060.2430; 020.2070

0 引言

怪波,是源自于海洋学中的一种独特物理现象,具有极大的峰值能量^[1],比周围的波幅值高出许多倍,会瞬间出现瞬间消失^[2],监测十分困难,还会对远洋航行甚至人类生命财产造成难以估量的损失^[3].正因为怪波具有高能量的特征和破坏性,逐渐引起了人们在等离子体体积元^[4-5]、超流氦^[6]、玻色-爱因斯坦凝聚^[7]、大气^[8]甚至金融^[9]等诸多领域关注和研究.而在光学中,由于光波和海洋波具有相似的动力学特征^[10],研究人员开始从光学上寻找怪波,SOLLI D R 等^[11]通过实验在超连续谱上观察记录了光学怪波的产生.基于光学怪波的高能量特征,它可以用来研究高能量超短脉冲的产生^[12],而超短脉冲在全光信息采样,光纤传感^[13]以及医疗等方面有很大的应用.光学怪波一般分为亮怪波和暗怪波^[14],亮怪波发生在反常色散^[15](聚焦)区域,而暗怪波则发生在正常色散^[16](散焦)区域.亮怪波已经被广泛研究,近年来,暗怪波已经步入研究人员的视野.研究暗怪波所用的理论方法有矢量非线性薛定谔方程^[17-20],三波共振耦合方程^[21-23]以及长波-短波共振耦合方程^[14,24].赵立臣团队^[21]利用三波共振耦合方程分析暗怪波.陈世华等^[20]基于耦合非线性薛定谔方程的精确解研究正常色散双折射光纤中的暗怪波.FRISQUET B 等^[19]从实验上观察到了暗怪波.BARONIO F 等^[17]从实验上观察到了三姐妹暗怪波.通常人们研究光孤子或相关光波的传输主要集中在两个方面,一方面研究单个孤子的传输演化特性,另一方面探讨孤子之间的相互作用^[25-27].目前暗怪波的研究主要集中在单个暗怪波,而暗怪波相互作用研究的较少.

本文采用分步傅里叶算法,数值研究了两个一阶暗怪波在正常色散光纤中的传输演化特性.首先,研究了两个相邻一阶暗怪波之间的相互作用,并与单个暗怪波传输演化进行对比,并考虑暗怪波之间的间隔、振幅比和相位差对相互作用的影响.其次研究二阶暗怪波在正常色散光纤中的传输特性,并与两个相邻暗怪波之间相互作用的结果进行对比.

1 理论模型

非线性薛定谔方程是描述光脉冲在光纤中传输的基本方程.考虑到光纤的双折射特性,暗怪波在光纤中的传输可用耦合非线性薛定谔方程描述^[28-29]为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}u - \frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + i\gamma(|u|^2 + |v|^2)u \\ \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}v - \frac{i\beta_2}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + i\gamma(|v|^2 + |u|^2)v \end{cases} \quad (1)$$

式中, u 、 v 分别是暗怪波两个相互正交的包络振幅分量, z 是传输距离, t 是延迟时间, α 是损耗系数, β_2 是二阶群速度色散, γ 是光纤的非线性参数.

为了方便计算,引入变量: $U\sqrt{P_0}=u$, $V\sqrt{P_0}=v$, $Z=z/L_d$, $T=t/T_0$, $L_{NL}=1/\gamma P_0$, $L_d=T_0^2/|\beta_2|$, $N^2=L_d/L_{NL}$, $\Gamma=\alpha L_d$,其中 L_{NL} 和 L_d 分别代表非线性长度和色散长度, T_0 是入射光脉冲宽度, P_0 是脉冲峰值功率.进行归一化处理,式(1)具有无量纲形式

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\Gamma}{2}U - \frac{i}{2}\text{sgn}(\beta_2)\frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + iN^2(|U|^2 + |V|^2)U \\ \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\Gamma}{2}V - \frac{i}{2}\text{sgn}(\beta_2)\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} + iN^2(|V|^2 + |U|^2)V \end{cases} \quad (2)$$

本文采用如下参数:输入脉冲的峰值功率和脉宽分别为 $P_0=2$ W, $T_0=1$ ps.对于光纤, $\beta_2=6$ ps²/km, $\gamma=3$ W⁻¹km⁻¹,损耗系数 $\alpha=0.15$ dB/km.

2 数值模拟结果

依据文献[20]中的研究结果,无损耗耦合非线性薛定谔方程组的一般一阶暗怪波精确解可以写成^[20]

$$\begin{cases} U_1(Z, T) = u_0 \left\{ 1 + \frac{8i\delta^2(Z-Z_0) - 2i\{\delta^2(Z-Z_0) + \delta[2T - \kappa(Z-Z_0)] - 2i\}(1 + \sqrt{1+2\delta^2/A})}{\delta^2\{[2T - \kappa(Z-Z_0)]^2 + \eta^2(Z-Z_0)^2 + 4/\eta^2\}} \right\} \\ V_1(Z, T) = v_0 \left\{ 1 + \frac{8i\delta^2(Z-Z_0) - 2i\{\delta^2(Z-Z_0) - \delta[2T - \kappa(Z-Z_0)] - 2i\}(1 + \sqrt{1+2\delta^2/A})}{\delta^2\{[2T - \kappa(Z-Z_0)]^2 + \eta^2(Z-Z_0)^2 + 4/\eta^2\}} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $u_0 = a_1 \exp\{-i[\omega_1 T - k_1(Z - Z_0)]\}$, $v_0 = a_2 \exp\{-i[\omega_2 T - k_2(Z - Z_0)]\}$, $A = a_1^2 + a_2^2$, $\kappa = \omega_1 + \omega_2$, $\delta = \omega_1 - \omega_2$, $\eta = \pm [2\sqrt{A(A + 2\delta^2)} - 2A - \delta^2]^{1/2}$, $a_1 = a_2 = 1$, $\delta = \sqrt{3}$, $\kappa = -1/2$. Z_0 为暗怪波激发位置, 当 $Z_0 = 0$ 时, 式(3)与文献[20]的形式保持一致. 图 1 给出式(3)中当 $Z_0 = 5$ 时暗怪波两个相互正交的 U 分量和 V 分量的立体图. 从图 1 可知, U 和 V 都表现为平面背景上的一个振幅凹陷, 凹陷幅度为 1, 其下陷中心幅值为 0, 凹陷两侧有轻微的隆起, 并在时间和空间上都具有局域性.

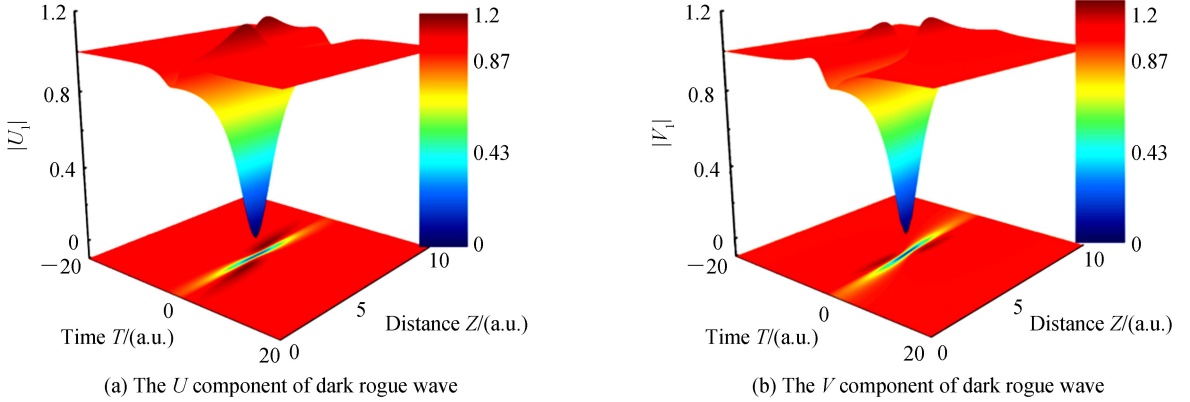


图 1 一阶暗怪波精确解. 初始参数为 $a_1 = a_2 = 1$, $\delta = \sqrt{3}$ 和 $\kappa = -1/2$

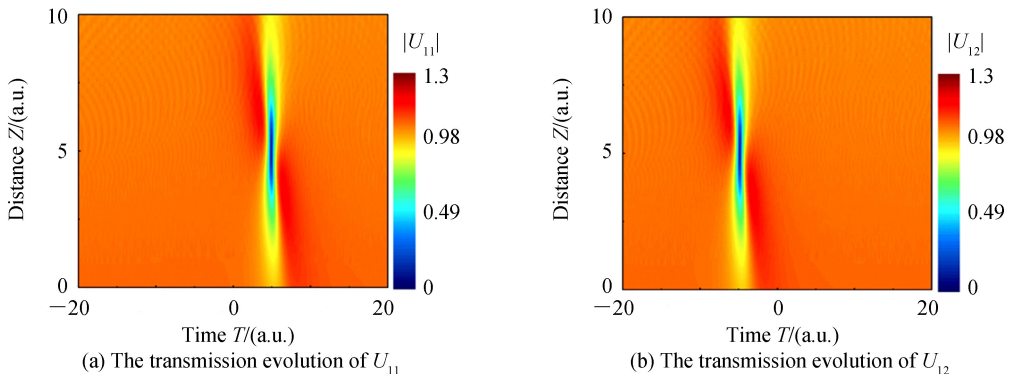
Fig.1 The first-order exact dark rogue wavesolution. The initial parameters are given by $a_1 = a_2 = 1$, $\delta = \sqrt{3}$ and $\kappa = -1/2$

下面采用分步傅里叶算法, 数值地讨论两个暗怪波之间相互作用. 首先讨论相邻两个暗怪波的线性相互作用. 把式(3)中的 U 分量和 V 分量的初始输入波形 ($Z=0$) 在时间域上分别进行 $\pm T_1$ 变换

$$\begin{cases} U_{11}(0, T) = U_1(0, T - T_1) \\ V_{11}(0, T) = V_1(0, T - T_1) \\ U_{12}(0, T) = r \exp(ib\pi) U_1(0, T + T_1) \\ V_{12}(0, T) = r \exp(ib\pi) V_1(0, T + T_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中, r 为振幅系数, b 为相位系数.

图 2 给出当 $r=1$, $b=0$, $T_1=5$ 时式(4)中四种初始输入波形在光纤中的传输演化图. 由图 2 可知, 四种波形都在传输距离 $Z=5$ 处激发产生了暗怪波, 随后光波能量逐渐弥散, 该结果与图 1 的精确解基本保持一致, 区别在于 U_{11} 和 V_{11} 在时域上经过 $-T_1$ 的变换, 则暗怪波出现在时间方向 $T=5$ 处; 而 U_{12} 和 V_{12} 经过 $+T_1$ 的变换, 其时间坐标为 $T=-5$.



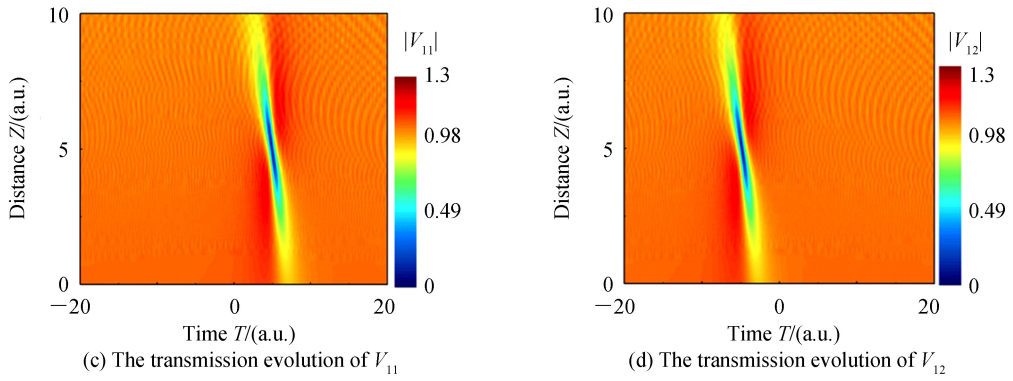


图2 方程(4)所示的初始输入波形在光纤中的传输演化图.参数 $r=1, b=0$ 和 $T_1=5$

Fig.2 The transmission evolution of the initial input waveform shown in equation (4) in the fiber. The parameters are given by $r=1, b=0$ and $T_1=5$

两个相邻暗怪波之间的线性相互作用,其初始输入波形可表示为

$$\begin{cases} U(0, T) = U_{11}(0, T) + U_{12}(0, T) \\ V(0, T) = V_{11}(0, T) + V_{12}(0, T) \end{cases} \quad (5)$$

则两个暗怪波间的初始间距为 $2T_1$.

2.1 同相位等幅的相互作用

讨论两个同相位等振幅的暗怪波的相互作用,即 $r=1, b=0$.图3为当间距参数 T_1 分别为 0, 5, 20 时,相邻两个暗怪波相互作用后的传输演化图.

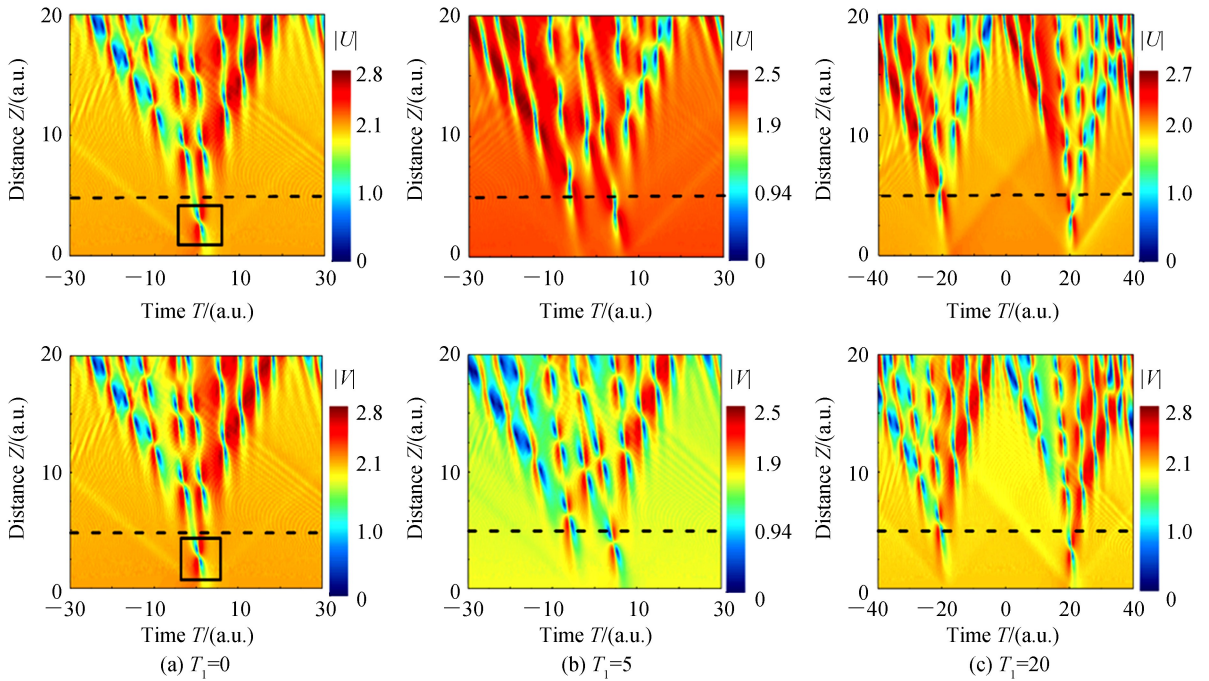


图3 不同间距参数 T_1 下,两个相邻同相位一阶暗怪波的传输演化图

Fig.3 The transmission evolution of two adjacent in-phase first-order dark rogue waves with different intervals T_1

由图3可知两个相邻暗怪波相互作用,可以激发产生多个局域暗怪波,这一点区别于图2中单个暗怪波发生能量的弥散.图3(a)为当间距参数 $T_1=0$ 时相邻两个暗怪波的 U 分量和 V 分量在单模光纤中的演化图.因为两个暗怪波间隔等于0,即两个暗怪波在中心 $T=0$ 位置处相互叠加.从图中看出两个暗怪波叠加激发形成一种暗怪波,其平面形状像一个扭结,我们称其为“扭结型”暗怪波^[30].该暗怪波出现的空间位置是 $Z=2.5$,此位置早于单个一阶暗怪波出现的位置5.图4给出图3(a)黑框中“扭结型”暗怪波的立体图.从图中可知“扭结型”暗怪波的平面背景幅度为2,平面背景下有两个下陷中心,下陷中心幅值为0,下限两侧有两个

轻微的隆起,该形状不同于图 1 的单个暗怪波.两个相邻暗怪波相互作用激发产生多个“扭结型”暗怪波的原因是两个波相互叠加,导致平面波背景能量增加,在色散和非线性相互作用下,带有扰动的背景波不断激发产生多个暗怪波.图 3(b)为间距参数 $T_1 = 5$ 相邻两个暗怪波的相互作用.从图中可以看出,约在时间坐标 $T = \pm 5$ 处,首次激发产生两个“扭结型”暗怪波,随后分裂激发产生多个次暗怪波,其数量要大于图 3(a).说明相邻两个暗怪波相互作用后,首次激发的两个暗怪波出现的时间坐标等于单个暗怪波的时间坐标 T_1 .而两个暗怪波出现的空间位置都偏离单个暗怪波的激发位置 5, U_{11} 和 V_{11} 的空间位置大于 5,而 U_{12} 和 V_{12} 的空间位置小于 5.说明相邻两个暗怪波相互作用后,两个暗怪波的空间位置发生偏移.图 3(c)是间距参数 $T_1 = 20$ 时相邻两个暗怪波的相互作用.从图中可知,即使两个暗怪波时间间距足够的大,仍然可以形成“扭结型”暗怪波.经多次模拟发现,扭结型暗怪波只有在特定时间间距范围内才能产生,如: $T_1 \in [0, 1], [5, 6.5], [9, 9.5], [14, 15]$ 和 $[19, 20]$, 出现的周期约在 $[4, 5]$.

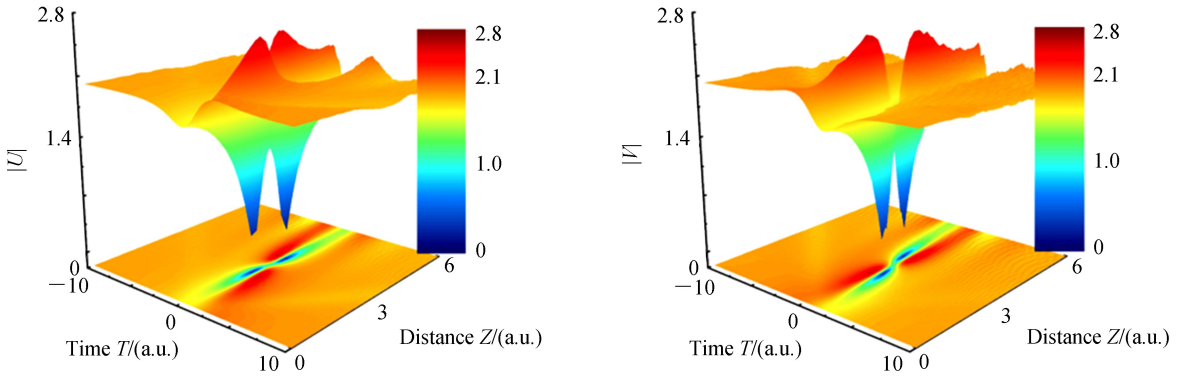


图 4 图 3(a)黑框中“扭结型”暗怪波的三维立体图

Fig.4 The three dimensional stereogram of "twisted" dark rogue wave in the black frame of Fig. 3(a)

2.2 反相位等幅的相互作用

考虑两个反相位等振幅暗怪波之间的相互作用,即 $r=1, b=1$.图 5 给出当间距参数 T_1 分别为 2, 7, 12 时,相邻两个反相位暗怪波相互作用后的传输演化图.从图 5 可以看出,和同相位类似,反相位暗怪波相互作用也可以形成“扭结型”暗怪波对,首次激发出现暗怪波对的空间位置也偏离单个暗怪波的位置.与同相位

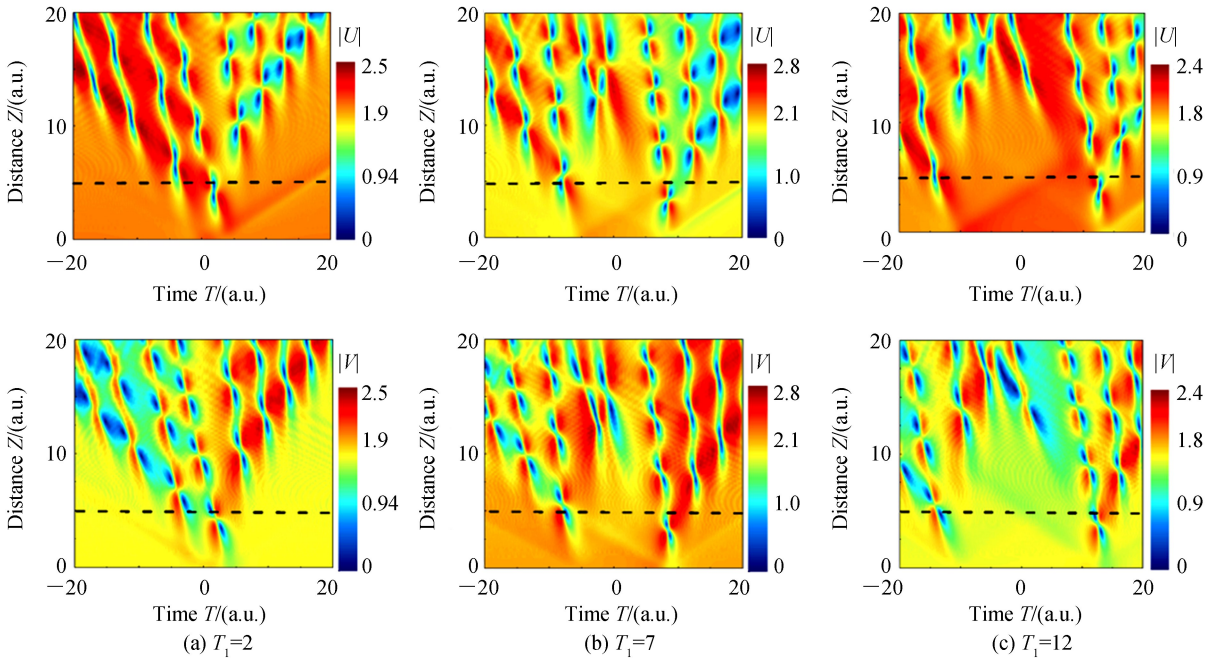


图 5 不同间距参数 T_1 下,两个相邻反相位一阶暗怪波的传输演化图,其它参数同图 2

Fig.5 The transmission evolution of two adjacent out of-phase first-order dark rogue waves with different intervals T_1 , the other parameters are the same as in Fig.2

暗怪波不同的是,其演化后的次暗怪波形状略有不同.另外经多次模拟发现,反相位可以出现“扭结型”暗怪波对的时间间距范围与同相位也不一样.

由以上讨论可知,两个同相位和反相位暗怪波相互作用后产生的扭结型暗怪波对的 U 分量和 V 分量演化趋势相类似,故下面侧重分析其 U 分量的变化趋势.

2.3 同相位不等幅的相互作用

考虑两个不同振幅同相位暗怪波之间的相互作用,即 r 不等于 1, $b=0$.图 6 给出当 $T_1=5$ 时,公式(4)和(5)中 U_{12} 的振幅系数 r 发生改变时,两个同相位暗怪波的 U 分量相互作用演化图.

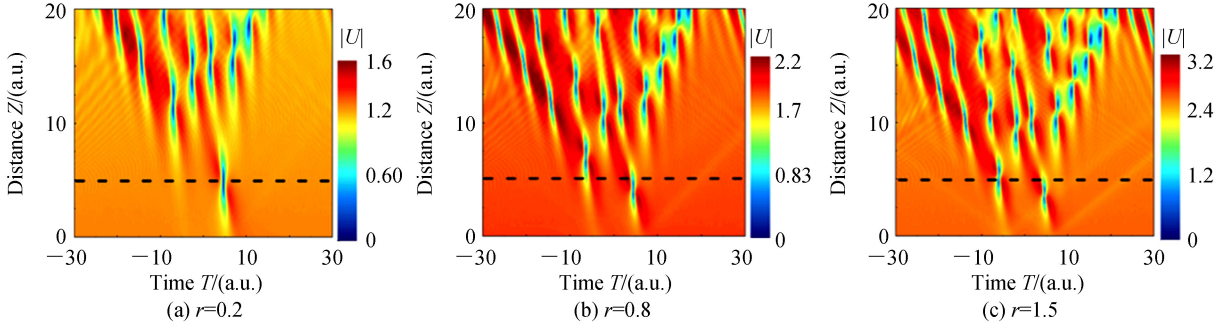


图 6 振幅系数 r 不同时两个同相位暗怪波之间相互作用

Fig.6 The interaction of two in-phase first-order dark rogue waves with different amplitude coefficients r

由式(4)和(5)可知随着振幅系数 r 的增大,左侧 U_{12} 在 U 中的比重逐渐增加.在图 6(a)~(c)中,振幅系数 r 的逐渐增大,左侧 U_{12} 的空间激发位置逐渐靠近单个暗怪波的激发位置 5,并且暗怪波分裂产生的次“扭结型”暗怪波数目增多.特别图 6(c)中当 $r=1.5$ 时,此时 U_{12} 的振幅比 U_{11} 大,使得左侧 U_{12} 初始激发的“扭结型”暗怪波更靠近激发位置 5,而右侧 U_{11} 则的激发位置逐渐远离 $Z=5$ 的位置.由此可知, U 分量中 U_{11} 和 U_{12} 哪个部分占主导,那么相对应的初始激发位置就更接近单个暗怪波激发的位置 $Z=5$ (即图 6 黑虚线处),并且 r 越大分裂的次“扭结型”暗怪波数目越多.

以上讨论的是相邻两个一阶暗怪波的线性叠加相互作用,下面讨论两个一阶暗怪波的非线性叠加,即二阶暗怪波.通常二阶暗怪波可以看作是二个一阶暗怪波的非线性叠加.基于文献[20]中二阶暗怪波解,二阶暗怪波在单模光纤中的初始波形表示为

$$\begin{cases} U_2(0, T) = u_0 \left\{ 1 + \frac{3i(\lambda_0 - \lambda_0^*) [R_1^* (R_0 m_{22} - S_0 m_{21}) + S_1^* (S_0 m_{11} - R_0 m_{12})]}{a_1 (m_{11} m_{22} - m_{12} m_{21})} \right\} \\ V_2(0, T) = v_0 \left\{ 1 + \frac{3i(\lambda_0 - \lambda_0^*) [R_2^* (R_0 m_{22} - S_0 m_{21}) + S_2^* (S_0 m_{11} - R_0 m_{12})]}{a_2 (m_{11} m_{22} - m_{12} m_{21})} \right\} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $S_0 = \gamma_1 p - i\gamma_2 \phi (q\vartheta + 2\sigma Z_{20}) + 2\gamma_3 - 2i\gamma_4 \phi \vartheta$, $p = -\varphi^2 \vartheta^2 - 2i\varphi \vartheta - i[\beta - 2\varphi(3\mu_0 - \kappa)]Z_{20}$,

$$S_j = \frac{a_j}{\alpha_j} \left[\gamma_1 \left(ip - \frac{2\phi^2 \theta_j + 2i\sigma}{\alpha_j} \right) + 2i\gamma_3 + 2\gamma_4 \phi \theta_j \right] + \frac{a_j \gamma_2 \phi}{\alpha_j} \left[q\theta_j - 2\sigma \left(\frac{\vartheta \alpha_j - 2i}{\alpha_j^2} - Z_{20} \right) + \frac{2\phi^2 (i\alpha_j \vartheta^2 + 3\theta_j)}{3\alpha_j^2} \right],$$

此外,其余参量同参考文献[20]所示, Z_{20} 为初始二阶暗怪波激发位置,这里 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 是 4 个任意系数.当 $\gamma_2=1; \gamma_1=\gamma_3=\gamma_4=0, Z_{20}=5$ 时,形成复合型二阶暗怪波,如图 7 所示;当 $\gamma_1=-3i, \gamma_2=1, \gamma_3=\gamma_4=0, Z_{20}=10$ 时,形成三组分型二阶暗怪波,如图 8 所示.

从图 7 可知,复合型二阶暗怪波由平面波背景下的两个下陷和下陷附近的两个轻微隆起组成,其立体波形图类似于两个相邻一阶暗怪波相互作用形成的“扭结型”暗怪波.但由于平面背景强度较小,该二阶暗怪波演化不能分裂成多个次暗怪波,而是发生能量弥散.图 8 给出的三组分型二阶暗怪波,由多个单暗怪波组成.它可以看作是第一个暗怪波分裂产生多个次暗怪波,其演化过程类似于两个相邻一阶暗怪波相互作用后的演化.由以上可看出非线性叠加相互作用与线性叠加结果虽不同,但又有一些相似之处.

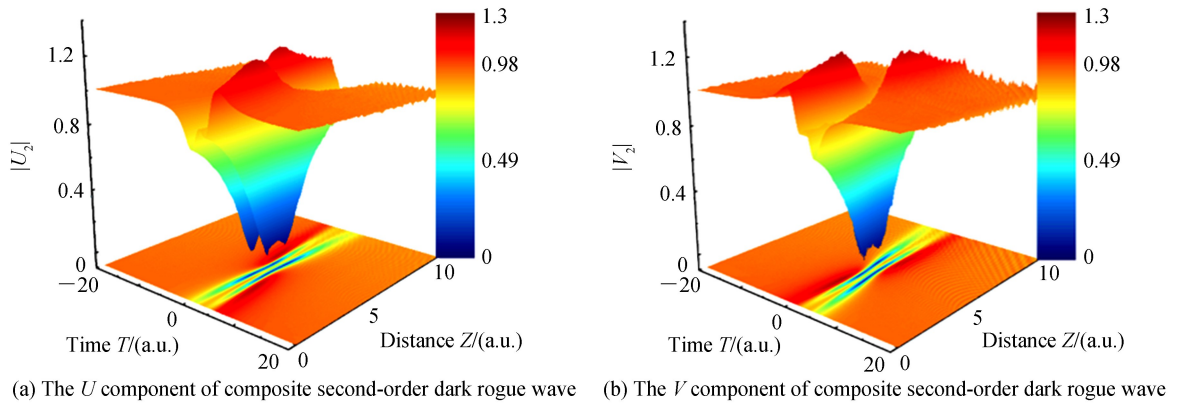


图7 复合型二阶暗怪波在单模光纤中的传输特性

Fig.7 The transmission evolution of the second-order dark rogue wave with composite structure in single-mode fiber

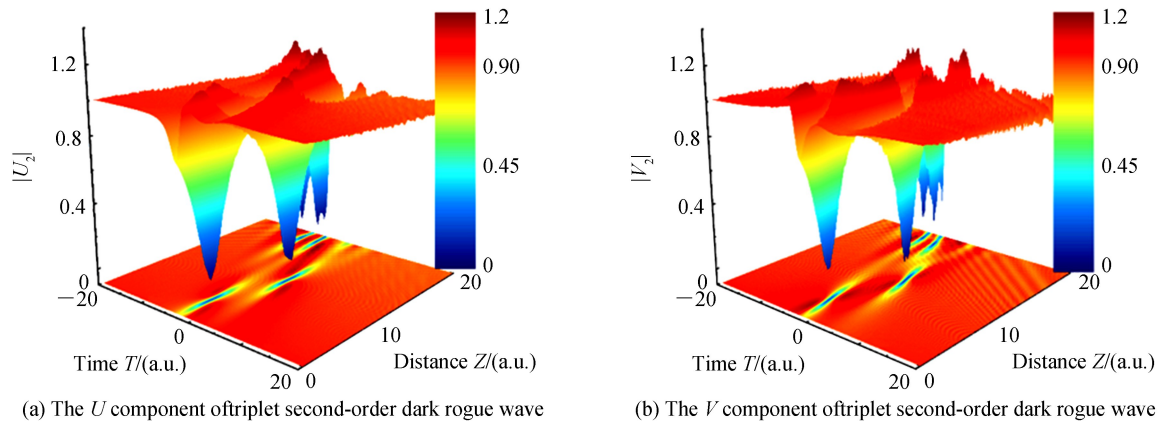


图8 三组分结构型二阶暗怪波在单模光纤中的传输特性

Fig.8 The transmission evolution of the second-order dark rogue wave with triplet (or three-sister) structure in single-mode fiber

3 结论

基于耦合非线性薛定谔方程,讨论了两个一阶暗怪波的相互作用.首先讨论两个相邻一阶暗怪波的相互作用.相邻一阶暗怪波相互作用,可以激发形成一种“扭结型”的暗怪波.它是由平面背景下两个下陷和下陷附近的两个隆起组成的一种局域暗怪波.该暗怪波随后可分裂形成多个次暗怪波.初始激发的两个暗怪波出现的时间间距保持不变,但空间位置偏离单个暗怪波.通过调整暗怪波之间的间距,其相互作用会导致不同的演化特性.不同振幅大小会对相互作用后的暗怪波初始空间激发位置产生影响.其次讨论了两个一阶暗怪波的非线性相互作用,即二阶暗怪波.它可以看作是两个一阶暗怪波的非线性叠加结果.二阶暗怪波可以形成复合型和三组分型两种形式的暗怪波,其相互作用后的结果虽不同于线性叠加结果,但有一些相似之处.

参考文献

- [1] PERKINS S. Dashing rogues: freak ocean waves pose threat to ships, deep-sea oil platforms[J]. *Science News*, 2006, **170**(21):328-329.
- [2] AKHMEDIEV N, ANKIEWICZ A, TAKI M, *et al.* Waves that appear from nowhere and disappear without a trace[J]. *Physics Letters A*, 2009, **373**(6):675-678.
- [3] KHARIF C, PELINOVSKY E, SLUNYAEV A, *et al.* Rogue waves in the ocean[M]. Heidelberg: Springer, 2009.
- [4] TSAI Y Y, TSAI J Y, LIN I, *et al.* Generation of acoustic rogue waves in dusty plasmas through three-dimensional particle focusing by distorted waveforms[J]. *Nature Physics*, 2016, **12**(6):573-579.
- [5] BAILUNG H, SHARMA S K, NAKAMURA Y, *et al.* Observation of peregrine solitons in a multicomponent plasma with negative ions[J]. *Physical Review Letters*, 2011, **107**(25):255005.
- [6] EFIMOV V B, GANSHIN A N, KOLMAKOV G V, *et al.* Rogue waves in superfluid helium[J]. *European Physical Journal Special Topics*, 2010, **185**(1):181-193.
- [7] NGUYEN J H V, LUO D, HULET R G, *et al.* Formation of matter-wave soliton trains by modulational instability[J].

- Science*, 2017, **356**(6336):422.
- [8] STENFLO L, SHUKLA P K. Nonlinear acoustic-gravity waves[J]. *Journal of Plasma Physics*, 2009, **75**(6):841-0.
- [9] YAN Z. Vector financial rogue waves[J]. *Physics Letters A*, 2011, **375**(48):4274-4279.
- [10] ONORATO M, RESITORI S, BARONIO F, *et al.* Rogue and shock waves in nonlinear dispersive media[M]. Springer International Publishing, 2016.
- [11] SOLLI D R, ROPERS C, KOONATH P, *et al.* Optical rogue waves[J]. *Nature*, 2007, **450**(7172):1054.
- [12] HWANG Y Y, LEE C H, WANG J, *et al.* Dynamic model of multipass ultrashort-pulse laser amplifiers and its application[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(30):7802-7808.
- [13] COELHO J M P, NESPEREIRA M, SILVA C, *et al.* Advances in optical fiber laser micromachining for sensors development[M]. Current Developments in Optical Fiber Technology, 2013.
- [14] CHEN S, GRELU P, SOTO-CRESPO J M, *et al.* Dark- and bright-rogue-wave solutions for media with long-wave-short-wave resonance[J]. *Physical Review E*, 2014, **89**(1):011201.
- [15] CHEN S, BARONIO F, SOTO-CRESPO J M, *et al.* Versatile rogue waves in scalar, vector, and multidimensional nonlinear systems[J]. *Journal of Physics A Mathematical and Theoretical*, 2017, **50**(46):463001.
- [16] BARONIO F, CONFORTI M, DEGASPERIS A, *et al.* Vector rogue waves and baseband modulation instability in the defocusing regime[J]. *Physical Review Letters*, 2014, **113**(3):034101.
- [17] BARONIO F, FRISQUET B, CHEN S, *et al.* Observation of a group of dark rogue waves in a telecommunication optical fiber[J]. *Physical Review A*, 2018, **97**(1):013852.
- [18] CHEN S, MIHALACHE D. Vector rogue waves in the Manakov system: diversity and compossibility[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2015, **48**(21):215202.
- [19] FRISQUET B, KIBLER B, MORIN P, *et al.* Optical dark rogue wave[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1):20785.
- [20] CHEN S, SOTO-CRESPO J M, GRELU P, *et al.* Dark three-sister rogue waves in normally dispersive optical fibers with random birefringence[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(22):27632.
- [21] ZHAO L C, LIU J. Rogue-wave solutions of a three-component coupled nonlinear Schrödinger equation[J]. *Physical Review E*, 2013, **87**(1):013201.
- [22] BARONIO F, CONFORTI M, DEGASPERIS A, *et al.* Rogue waves emerging from the resonant interaction of three waves[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **111**(11):114101.
- [23] CHEN S, CAI X M, GRELU P, *et al.* Complementary optical rogue waves in parametric three-wave mixing[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(6):5886.
- [24] SOTOCRESPO J M, GRELU P, CHEN S, *et al.* Coexisting rogue waves within the $(2+1)$ -component long-wave-short-wave resonance[J]. *Physical review E Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 2014, **90**(3):033203.
- [25] YIN De-jing, LI Hong. Multi-soliton interaction and control in the fiber presenting randomly varying birefringence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):144-147.
殷德京, 李宏. 随机双折射光纤中孤子相互作用及控制[J]. 光子学报, 2003, **32**(2):144-147.
- [26] MIAO Run-cai, WANG Fei, ZENG Xiang-mei, *et al.* Soliton decay induced by interaction between two neighboring second-order solitons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):927-930.
苗润才, 王飞, 曾祥梅, 等. 二阶孤子间相互作用引起孤子衰变[J]. 光子学报, 2004, **33**(8):927-930.
- [27] WU Zhen-kun, ZHANG Yun-zhe, HU Yi, *et al.* The interaction of peregrine solitons[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, **31**(9):20-24
- [28] MANAKOV S V. On the theory of two-dimensional stationary self-focusing electromagnetic waves [J]. *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teroreticheskoi Fiziki*, 1974, **38**(2):505-516.
- [29] KIVSHAR Y S, TURITSYN S K. Vector dark solitons[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(5):337-339.
- [30] CHEN S. Twisted rogue-wave pairs in the Sasa-Satsuma equation[J]. *Physical Review E*, 2013, **88**(2):023202.