

抛物线形脉冲对在光纤中的作用机制研究

王大帅¹ 吴戈¹ 高博² 田小建¹

(¹ 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

² 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 基于非线性薛定谔方程对光纤中抛物线形脉冲对的传输过程进行了数值仿真,并利用分步傅里叶法对方程进行求解,研究了抛物线形脉冲对在单模光纤和色散管理光纤中的传输特性。仿真结果表明,抛物线形脉冲对在光纤中传输时几乎没有相互作用,主要面临的问题是维持其抛物线形和减小脉冲展宽带来的脉冲间的干涉。抛物线形脉冲在传输时的演化受到光纤色散的影响,在正常色散光纤和平均色散为正的色散管理光纤中传输时才能维持其抛物线形,但在正常色散光纤中脉冲展宽速度较快,而在平均色散为正的色散管理光纤中可以很好地抑制脉冲展宽的速度。这个结果对远程无中继光纤通信有很大的帮助。

关键词 光纤光学;抛物线形脉冲;色散管理;非线性薛定谔方程

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.070603

Study on the Interaction of a Parabolic-Shaped Pulse Pair Transferring in Fibers

Wang Dashuai¹ Wu Ge¹ Gao Bo² Tian Xiaojian¹

(¹ College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

² College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Numerical simulation of a parabolic-shaped pulse pair propagating in fiber is done based on the nonlinear Schrödinger equation, and the solution of the equation is found with split-step Fourier method. The transmission behaviors of the parabolic-shaped pulse pair in single-mode fiber and dispersion-managed fiber are studied. Simulation results show that there is almost no interaction between the parabolic-shaped pulse pairs transferring in fiber, and the main challenge is to preserve their shape and reduce the interference generated by pulse stretching. The evolution of parabolic-shaped pulses in fiber is affected by dispersion. When the pulses propagate in normal dispersion fiber or dispersion-managed fiber with average normal dispersion, they can maintain the parabolic shape. Especially, the pulses stretch fiercely when propagating in normal dispersion fiber, and taking advantage of the dispersion management methods, the tendency of pulse stretching is suppressed well. This result is of great help in long-haul optical fiber communication without relay.

Key words fiber optics; parabolic-shaped pulse; dispersion management; nonlinear Schrödinger equation

OCIS codes 060.2310; 060.4370; 260.2030

1 引言

光纤中非线性作用引起的光波分裂现象限制了脉冲能量的增加。实验和理论分析证明,脉冲在传输过程中保持频率啁啾的单调性可以抑制波分裂现象的发生^[1]。随着非线性光学技术的发展,人们在光纤激光器中观察到一种新的光脉冲——自相似脉冲^[2-8]。相比于孤子脉冲,自相似脉冲具有抛物线形包络和严格

收稿日期: 2013-02-22; **收到修改稿日期**: 2013-04-11; **网络出版日期**: 2013-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(60372061)

作者简介: 王大帅(1983—),男,博士研究生,主要从事锁模光纤激光器和非线性光学方面的研究。

E-mail: 0204113@163.com

导师简介: 田小建(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事高速电子学与光电子技术方面的研究。

E-mail: txj@jlu.edu.cn(通信联系人)

的线性啁啾^[9],因此,自相似脉冲在高脉冲功率的情况下具有较强的稳定性。

自相似现象的研究始于20世纪80年代,Ablowitz等^[10]在理论上证明了自相似解也是非线性薛定谔方程的一种解。1993年,Anderson等^[11]讨论了光纤中的自相似现象。2000年,Fermann等^[11]首先在掺镱光纤放大器中观察到了自相似脉冲。2004年,Ilday等^[8]首先在光纤激光器中观察到了自相似现象。近年来,对于自相似脉冲的研究逐渐深入,已经在拉曼放大器^[12]、光纤布拉格光栅^[13]、色散渐减光纤^[7]和各种不同结构的光纤激光器^[6,8,14]中观察到了自相似脉冲,对激光器中自相似脉冲对的产生条件及脉冲对间相互作用机制也进行了讨论^[15]。

在高速光通信系统中,脉冲传输过程中脉冲的相互作用引起的码间串扰增加了通信系统的误码率,使信号传输距离变短。本文对抛物线形自相似脉冲对在不同色散域光纤中的传输特性进行数值研究,在此基础上发现通过色散管理可以降低色散对脉冲对传输时的影响,延长了抛物线形脉冲对在光纤中的传输距离。

2 抛物线形脉冲传输过程分析

研究所用的初始脉冲为抛物线形脉冲对。理想的抛物线形脉冲的表达形式为

$$\begin{cases} A(z,t) = \sqrt{P} \sqrt{1 - \frac{t^2}{T_p^2}} \exp(-i \frac{C}{2} t^2), & |t| \leq T_p, \\ A(z,t) = 0, & |t| > T_p \end{cases} \quad (1)$$

式中 $A(z, T)$ 代表慢变光场的时域包络, T_p 为脉冲宽度, P 为脉冲峰值功率, C 为脉冲的初始啁啾。

光在光纤中的传输由非线性薛定谔方程来描述。该方程包括了光纤损耗、色散和非线性效应,以上几种因素的平衡保证了孤子的形成。在本文中忽略三阶及三阶以上色散效应和高阶非线性效应及光纤损耗的影响,得到近似后的传输方程:

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

式中 β_2 为群速度色散系数, γ 为克尔非线性系数。

利用分步傅里叶法来对方程进行求解^[16],将(2)式改写成如下的形式:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A, \quad (3)$$

式中

$$\hat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} \quad (4)$$

为差分算子,表示光纤的色散效应,

$$\hat{N} = i\gamma |A|^2 \quad (5)$$

为非线性算子,代表了光纤中的非线性效应。

分步傅里叶法即将脉冲在光纤中的传输分为若干小段,每段长度为 h ,首先,只计算非线性作用,令 $\hat{D} = 0$;然后,仅计算色散作用,令 $\hat{N} = 0$ 。利用傅里叶变换法对每一段进行求解,即

$$A(z+h, T) \approx \exp(h\hat{D}) \exp(h\hat{N}) \cdot A(z, T), \quad (6)$$

其中,指数运算在傅里叶域进行:

$$\exp(h\hat{D})B(z, T) = \mathcal{F}_T^{-1} \exp[h\hat{D}(i\omega)] \mathcal{F}_T \{B(z, T)\}, \quad (7)$$

式中 \mathcal{F}_T 和 \mathcal{F}_T^{-1} 分别表示傅里叶变换和逆变换。最后,将前一步的输出作为下一步的输入依次进行计算。

脉冲在光纤中的传输会受到光纤色散、损耗、非线性作用等因素的影响,导致脉冲宽度、形状、能量等参数的变化,还有可能出现相邻脉冲的相互作用。

下面,将对抛物线形脉冲在不同参数的光纤中的传输过程进行仿真研究。

3 仿真结果及分析

为了研究抛物线形脉冲对在光纤中的传输特性,输入脉冲采用具有一定时间间隔的抛物线形脉冲,即

$$A_m(z, t) = A_1(z, t - t_0) + A_2(z, t + t_0), \quad (8)$$

式中 $2t_0$ 为两个脉冲之间的初始距离。本文将通过调整 t_0 的值来观察两个脉冲的相互作用情况。

3.1 在单模光纤中的传输

脉冲对在正常色散区单模光纤中传输。仿真中所使用的光纤参数为 $\beta_2^{\text{normal}} = 0.025 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$, $\gamma^{\text{normal}} = 0.0013 \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$; 初始脉冲为 $t_0 = 2 \text{ ps}$, 半峰全宽(FWHM)为 1.3 ps , 峰值功率为 30 W 的脉冲对, 如图 1(a) 所示。图 1(b), (c) 分别为传输 10 m 和 50 m 后的脉冲形状。

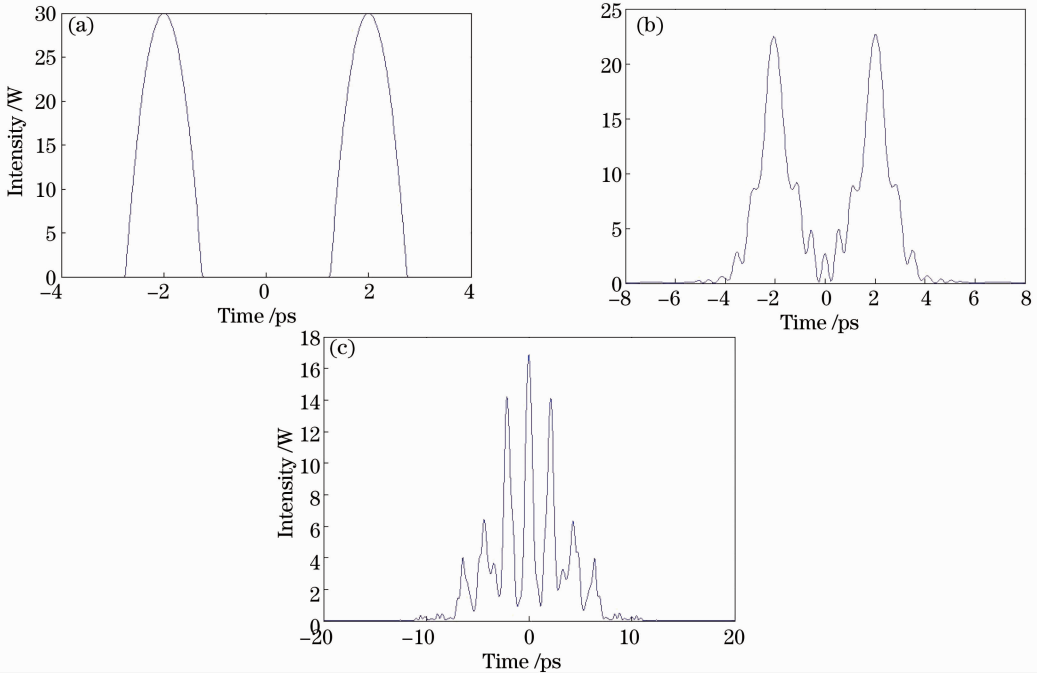


图 1 抛物线形脉冲对在正常色散单模光纤中的传输。(a)输入脉冲;(b)传输距离为 10 m 时的脉冲形状;(c)传输距离为 50 m 时的脉冲形状

Fig. 1 Evolution of parabolic-shaped pair in normal single mode fiber. (a) Input pulses; (b) after propagating 10 m ; (c) after propagating 50 m

从图 1 中可以看出,脉冲对在正常色散光纤中传输时,经历了脉冲展宽的过程。随着传输距离的增加,脉冲对最终发生了严重的相互作用而导致传输信息的消失。而且这种作用与脉冲初始距离无关。因此,脉冲对在正常色散单模光纤中的相互作用主要是由于色散引起的脉冲展宽导致的。

图 2 为脉冲对在反常色散单模光纤中传输的仿真结果,仿真中所使用的光纤参数为 $\beta_2^{\text{abnormal}} = -0.082 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$, $\gamma^{\text{abnormal}} = 0.079 \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$, 脉冲在色散作用下脉宽得到压缩,脉冲形状也发生了变化,不再是抛物线形。抛物线形脉冲对输入反常色散光纤中后,不能在反常色散光纤中维持其抛物线形。这种形状的变化与光纤非线性作用和初始脉冲的间隔无关,仅是由于色散引起的。

3.2 在色散管理光纤中的传输

为了使抛物线形脉冲对在光纤中能进行保形传输,考虑到我们之前的工作中产生抛物线形脉冲的方法^[17],即通过控制激光器谐振腔中的整体色散得到抛物线形脉冲。按照这个思路,在一段色散管理光纤中对抛物线形脉冲对的传输进行了仿真,初始脉冲与图 1 相同。仿真结果如图 3 所示,平均色散 $\beta_2^{\text{average}} =$

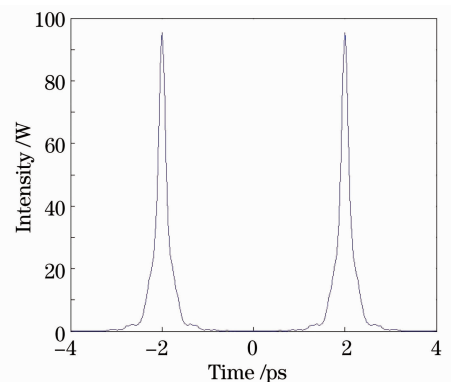


图 2 抛物线形脉冲对在反常色散单模光纤中的传输
Fig. 2 Evolution of parabolic-shaped pair in abnormal single mode fiber

$0.004 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$, 传输距离为 500 m。从结果可以看出,与单模光纤相比,无论是正常色散还是反常色散光纤,色散管理光纤中的抛物线形脉冲对都可以无干扰的传输更远的距离。色散对脉冲对传输的影响与在单模光纤中的传输类似,在 $\beta_2^{\text{average}} = -0.004 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$ 时,脉冲不能维持其抛物线形传输。

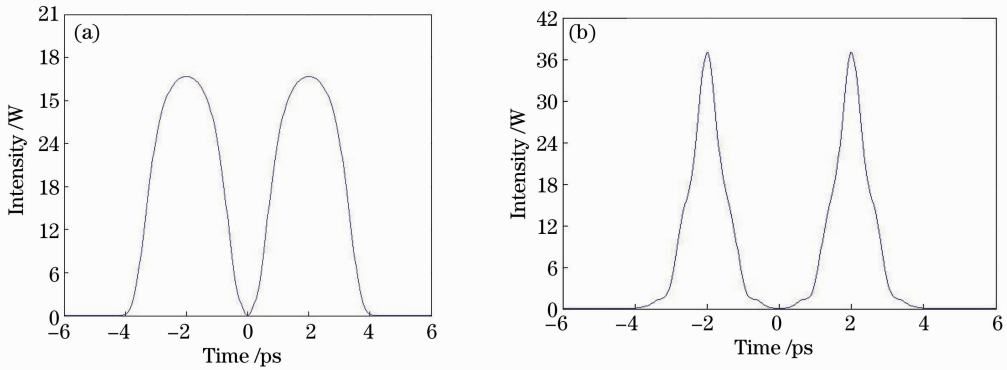


图 3 抛物线形脉冲对在色散管理光纤中的传输,传输距离为 500 m。(a)平均色散为 $0.004 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$; (b)平均色散为 $-0.004 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$

Fig. 3 Evolution of parabolic-shaped pair in dispersion-managed fiber. The propagation distance is 500 m. (a) Average dispersion is $0.004 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$; (b) average dispersion is $-0.004 \text{ ps}^2 \text{ m}^{-1}$

4 结 论

利用分步傅里叶法求解非线性薛定谔方程,对抛物线形脉冲对在单模光纤和色散管理光纤中的传输进行了数值研究。结果表明,在单模光纤中传输的抛物线形脉冲对受到色散的影响比较严重。在正常色散光纤中,在色散的作用下脉冲展宽比较严重,在传输很短的距离后就会发生脉冲间的干涉,导致传递的信息受到破坏;在反常色散光纤中,脉冲对在色散的作用下会逐渐发生形变,而不能维持其抛物线形。在色散管理光纤中,正的平均色散可以使脉冲对无干扰传输更远的距离,虽然也存在脉冲展宽的过程,但与单模光纤相比缓慢得多;负的平均色散情况与单模光纤类似,脉冲对不能维持其抛物线形传输。

参 考 文 献

- 1 D Anderson, M Desaix, M Karlsson, *et al.*. Wave-breaking-free pulses in nonlinear-optical fibers[J]. J Opt Soc Am B, 1993, 10(7): 1185–1190.
- 2 G Q Chang, H G Winful, A Galvanauskas, *et al.*. Self-similar parabolic beam generation and propagation [J]. Phys Rev E, 2005, 72(1): 016609.
- 3 B Ortac, A Hideur, M Brunel, *et al.*. Generation of parabolic bound pulses from a Yb-fiber laser [J]. Opt Express, 2006, 14(13): 6075–6083.
- 4 C Finot, J M Dudley, B Kibler, *et al.*. Optical parabolic pulse generation and applications [J]. IEEE J Quantum Electron, 2009, 45(11): 1482–1489.
- 5 B G Bale, J N Kutz. Parabolic pulse propagation in mean-zero, dispersion-managed transmission systems and mode-locked laser cavities [C]. SPIE, 2009, 7354: 735416.
- 6 V I Kruglov, D Mechin, J D Harvey. All-fiber ring Raman laser generating parabolic pulses [J]. Phys Rev A, 2010, 81(2): 023815.
- 7 T Hirooka, M Nakazawa. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. Opt Lett, 2004, 29(5): 498–500.
- 8 F O Ilday, J R Buckley, W G Clark, *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(21): 213902.
- 9 V I Kruglov, A C Peacock, J D Harvey, *et al.*. Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(3): 461–469.
- 10 M J Ablowitz, H Segur. Solitons and the Inverse Scattering Transform [M]. Philadelphia: SIAM Press, 1981.
- 11 M E Fermann, V I Kruglov, B C Thomsen, *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical

- fibers [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 84(26): 6010–6013.
- 12 C Finot, G Millot, S Pitois, *et al.*. Numerical and experimental study of parabolic pulses generated via Raman amplification in standard optical fibers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2004, 10(5): 1211–1218.
- 13 P Dupriez, C Finot, A Malinowski, *et al.*. High-power, high repetition rate picosecond and femtosecond sources based on Yb-doped fiber amplification of VECSELS [J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 9611–9616.
- 14 Wu Ge, Tian Xiao-Jian, Gao Bo, *et al.*. Characteristics of soliton evolution in the wave-breaking-free regime in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Chin Phys Lett*, 2011, 28(9): 094202.
- 15 A Ruehl, O Prochnow, D Wandt, *et al.*. Dynamics of parabolic pulses in an ultrafast fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(18): 2734–2736.
- 16 G Agrawal. *Nonlinear fiber optics* [J]. *Lecture Notes in Physics*, 2000, 542: 195–211.
- 17 Wang Da-Shuai, Wu Ge, Gao Bo, *et al.*. Interaction of a parabolic-shaped pulse pair in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(1): 014207.