

doi: 10.3788/gzxb20124102.0133

超高斯型光脉冲在零色散区传输特性的研究

谢务友, 刘山亮

(聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

摘 要:根据超短脉冲在光纤中传输所遵从的高阶非线性薛定谔方程, 采用分步傅里叶方法模拟了超高斯型超短脉冲在光纤中的传输演化. 在零色散区对损耗、高阶色散、高阶非线性、啁啾等因素对光脉冲传输的影响进行分析并得出了一些结论: 损耗对传输脉冲的形状影响比较小基本上可以忽略, 对脉冲的幅度影响比较大. 一阶孤子传输一段距离后稳定时的幅度和脉宽在传输时基本不变, 是进行光孤子通信的理想载体, 而高阶孤子在开始传输和传输过程中的幅度和脉宽变化较大. 当这些因素共同作用时, 对脉冲的传输特性有较大的影响. 但通过合理的选择各个影响因素的参量, 能得到一个比较适于信息传输的高阶孤子脉冲. 这对通过提高入射光脉冲功率使光脉冲在光纤中形成高阶孤子来提高两光中继器之间的中继距离的研究有一定的参考意义.

关键词:光纤孤子; 非线性薛定谔方程; 高阶色散; 高阶非线性; 初始啁啾; 对称分步傅里叶法; 数值模拟

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)02-0133-6

0 引言

光纤孤子通信是 21 世纪最具发展前景的通信方式, 现在孤子研究的一个重要目标就是在保证传输质量的前提下提高两中继器之间的中继距离. 我们知道, 适当地提高入射脉冲的光功率, 可以在增加传输距离的同时保持较好的传送质量. 但实际情况是, 当脉冲宽度为皮秒(ps)甚至飞秒(fs)量级或入射波长处于光纤零色散波长附近时, 三阶以上色散和高阶非线性的影响将不容忽视; 当入射光强较强, 或在有相对较高非线性光学系数的材料中, 即使中等光强的光入射也会使得非线性效应的影响表现得非常明显. 通常研究光脉冲在光纤中传输演化时假定的入射光脉冲为高斯型脉冲, 但在实际和实验的光通信传输系统中, 常采用由直接调制半导体激光器产生的光脉冲或者各种速率的随机数据电信号作为信号脉冲, 而这些脉冲具有比高斯脉冲有更为陡峭的前沿和后沿, 其脉冲形状更接近于超高斯分布, 且通常还带有一定量的啁啾, 所以用超高斯脉冲来研究这种脉冲在光纤中的传输特性是比较可行的. 现在对于在零色散区域光孤子脉冲的演化和超高斯脉冲在单模光纤中的传输特性研究, 不少文献都进

行了讨论研究^[1-4], 但很多文献是在忽略光纤中非线性效应的情况下进行的^[5-6], 也很少有同时考虑光纤的高阶色散效应和光纤损耗以及高阶非线性效应的影响. 本文将同时考虑损耗、初始啁啾、高阶色散和高阶非线性这些影响因素, 通过对称分步傅里叶方法来数值模拟在零色散区超高斯型超短脉冲在光纤中的传输演化成高阶孤子的过程^[7], 合理选取影响因素的参量^[8-10], 使其能够在光纤中最终演化成高阶孤子脉冲.

1 光脉冲传输的基本方程与分析方法

1.1 光脉冲传输的基本方程

超短孤子脉冲在考虑损耗、高阶色散和高阶非线性时在单模光纤中的传输方程遵从下面的高阶非线性薛定谔方程

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma|A|^2A + i\eta|A|^4A \quad (1)$$

式中 $A(z, T)$ 为脉冲包络的慢变振幅, T 是随脉冲的群速度 V_g 移动的参考系中的时间量度 ($T = t - z/V_g$), β_2 为二阶色散系数, α 为光纤的损耗系数, γ 为非线性系数, β_3 为高阶群速度色散系数, η 为高阶非线性系数.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60778017)和"区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(上海交通大学)"开发基金(No. 2011gzkf031101)资助

第一作者:谢务友(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为非线性光纤光学方面的研究. Email: xiewubenyou@126.com

导师(通讯作者):刘山亮(1957-), 男, 教授, 主要研究方向为高速光纤通信理论和实验的研究. Email: liushanliang@lcu.edu.cn

收稿日期:2011-09-11; **修回日期:**2011-11-03

1.2 分析方法

根据分步傅里叶法的基本原理^[11],把式(1)改写为

$$\frac{\partial A}{\partial T} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (2)$$

式中, $\hat{D} = -\frac{\alpha}{2}A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3}$ 为色散微分算符,表示线性介质的色散和吸收; $\hat{N} = i[\gamma|A|^2 A + \eta|A|^4 A]$ 为非线性算符,代表克尔效应和五阶非线性效应. 一般来说,沿光纤的长度方向,色散和非线性是同时作用.分步傅里叶方法是通过假定在传输过程中,光场每通过一小段距离 h ,色散和非线性效应可以分别作用,从而得到一个近似结果.如果假设 \hat{N} 与 z 无关,式(1)精确解为

$$A(z+h, T) = \exp[h(\hat{D} + \hat{N})]A(z, T) \quad (3)$$

忽略算符 \hat{D} 和 \hat{N} 的非对易性,式(2)的形式解为

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left[\int_z^{z+h} \hat{N}(z') dz'\right] \cdot \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)A(z, T) \quad (4)$$

利用梯形规则和近似积分可将式(3)改写为

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp\left\{\frac{h}{2}[\hat{N}(z) + \hat{N}(z+h)]\right\} \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)A(z, T) \quad (5)$$

然而,式(5)的具体计算比较复杂,因为 $\hat{N}(z+h)$ 在中段 $z+h$ 处是未知的,需要用已知的初始值 $\hat{N}(z)$ 代替 $\hat{N}(z+h)$ 进行迭代,然后利用式(4)计算出 $A(z+h, T)$,反过来再用它计算 $\hat{N}(z+h)$ 的值. 尽管这一迭代比较费时,但通过改进数值算法的准确度两次迭代就可以了.由对称分步傅里叶变换得

$$A(z+h, T) = F^{-1} \left\{ F \left[A_N \left(z + \frac{h}{2}, T \right) \right] \cdot \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \right\} \quad (6)$$

式中

$$A_N \left(z + \frac{h}{2}, T \right) = A \left(z + \frac{h}{2}, T \right) \exp \left[i(\gamma|A|^2 A + \eta|A|^4) \frac{h}{2} \right]$$

$$A \left(z + \frac{h}{2}, T \right) = F^{-1} \left\{ F \left[A(z, T) \right] \exp \left[\frac{h}{2} \left(-\frac{\alpha}{2}A - \frac{i}{2}\beta_2 \omega^2 + \frac{1}{6}\beta_3 \omega^3 \right) \right] \right\}$$

由傅里叶变换, $\hat{D}(i\omega)$ 中的算符 $\frac{\partial}{\partial T}$ 简单地可以用 $i\omega$

代替, ω 是傅里叶域中的圆频率.

2 数值仿真结果与分析

当 $z=0$ 时,设输入如下的啁啾高斯脉冲

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} \exp \left[-\frac{1}{2}(1+iC) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2m} \right]$$

式中, P_0 、 T_0 、 C 分别为脉冲的峰值功率、脉冲宽度和啁啾参量,参量 m 决定了脉冲前后沿的陡度. 对于 $m=1$ 就是啁啾高斯脉冲情形,对于较大的 m 值,就变成有更陡峭前后沿的方形脉冲,在这里 m 取 3.

2.1 损耗、高阶色散和初始啁啾对孤子脉冲波形的影响

当入射波长在光纤的零色散波长 λ_D 附近,色散为零时,高阶色散 β_3 项对色散效应起主要作用. 图 1 是在忽略非线性效应和在光纤损耗一定的情况下,不考虑 β_2 时, β_3 取不同大小值不同符号时得到的一阶、二阶、三阶的孤子脉冲波形. 实验模拟参量为 $\lambda_0 = 1.32 \mu\text{m}$, $T_0 = 1 \text{ ps}$, $N = \sqrt{\frac{L_D}{L_{NL}}} = \sqrt{P_0 \cdot \gamma \cdot T_0^3 / |\beta_3|}$, $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$, β_3 有效值范围为 $0.124 - 0.076e - 36 \text{ s}^3/\text{km}$, 五阶非线性系数范围为 $-6 - 6e - 6/\omega^2 \cdot \text{m}$ 之间^[12]. 图 1 为光纤损耗、高阶色散和初始啁啾对光脉冲的传输影响.

从图 1(a)中可以看出在传输十千米左右后基阶孤子的幅度和脉宽基本不变,是色散效应和自相位调制达到动态平衡的结果,是进行光孤子通信的理想载体. 图 1(b)和(c)是二阶孤子的传输演化图,可以看出当 β_3 取正号时,超高斯脉冲的振荡出现在脉冲的后沿的峰值和拖尾上,当 β_3 取负值时,脉冲的振荡出现在前沿的峰值和拖尾上. 由图 1(d)和(e)发现随着 $|\beta_3|$ 增大时振荡出现的越早,幅度衰减的越厉害. 而且随着孤子阶数的增加,脉冲表现出来明显的脉冲分裂现象. 高阶色散 β_3 的主要影响是会引起超高斯脉冲形状发生畸变,并在其中一个沿的附近形成非对称的振荡结构, β_3 越大,振荡幅度越大,反之则越小. 由图 1(f)和(g)比较知光纤损耗对光脉冲传输波形影响不大,主要对脉冲的幅度影响比较大. 由图 1(d)、(f)和(h)比较可知初始啁啾的存在,使得波形变化比无初始啁啾超高斯脉冲入射时更加剧烈,而且随着初始啁啾的增强,波形的变化会越剧烈. 由此可见,初始啁啾对波形的影响与三阶色散对波形影响的趋势是相同的,也可以看成是初始啁啾加强了三阶色散对波形的影响. 从图中还可以看出,正负初始啁啾都会加剧波形的振荡,由于振荡导致能量分散,使得波峰能量的最大值有所下降.

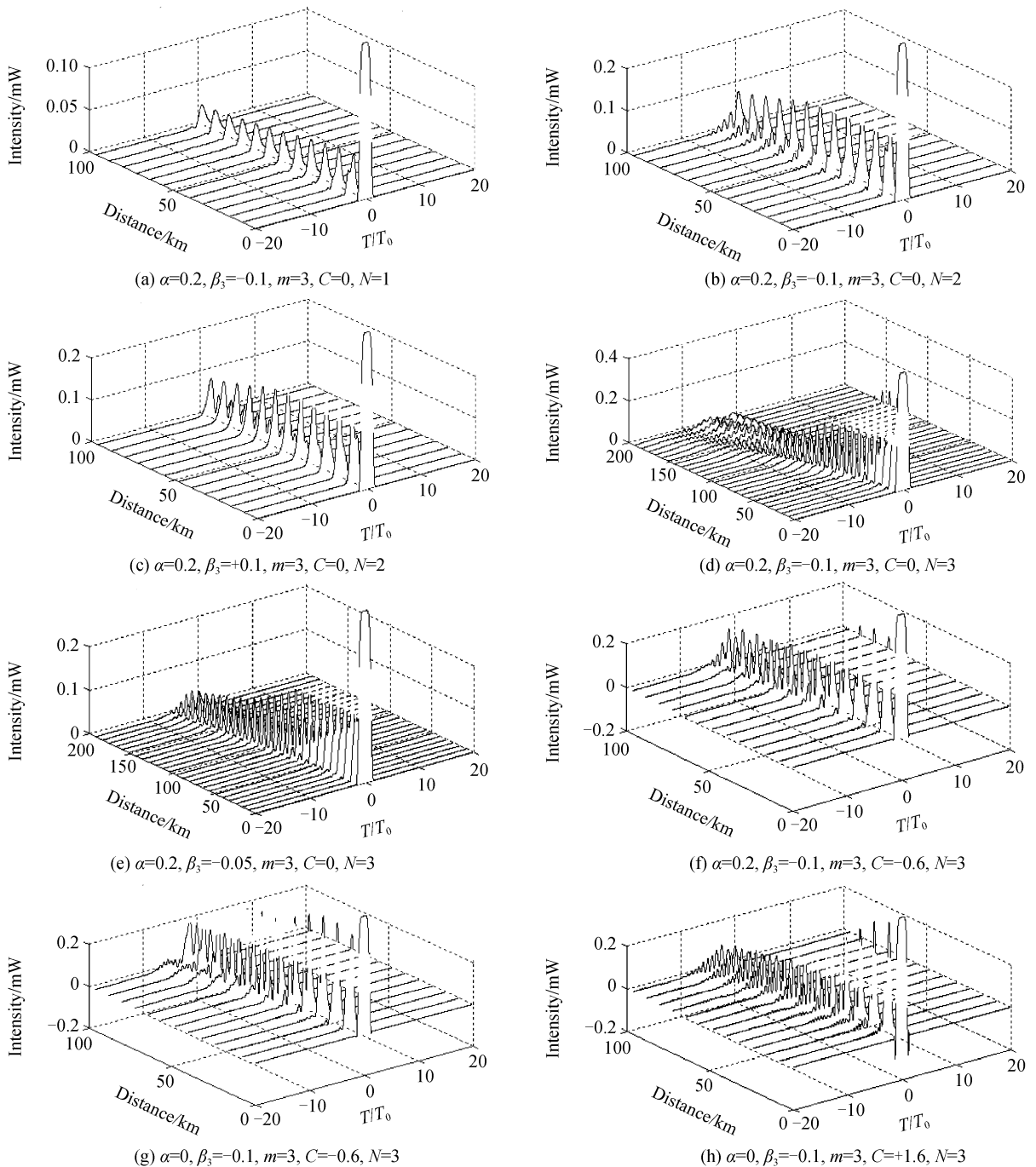


图 1 损耗、高阶色散和初始啁啾对光脉冲传输的影响

Fig. 1 Effect of attenuation, high order dispersion and initial chirp on pulse propagation

2.2 损耗、高阶色散和高阶非线性以及初始啁啾共同作用时对光孤子脉冲波形的影响

在同时考虑损耗、高阶色散和高阶非线性以及初始啁啾对光脉冲传输波形影响时,其仿真图形如图 2 所示.图 2(a)~(c)是在忽略初始啁啾时一二三阶孤子的波形图,从这三幅图中我们看出脉冲在传输一段距离后脉冲幅度明显下降,三阶色散的作用如前面所分析的一致,使脉冲的中心产生偏移并引起脉冲前沿或后沿的拖尾振荡.由图 2(b)、(c)知,五阶非线性系数增加时,脉冲幅度进一步下降,拖尾振荡进一步加剧,脉冲能量进一步的降低,同时

脉宽也会进一步的展宽.由图 2(d)~(f)知,初始啁啾、高阶色散和高阶非线性共同作用时,正负初始啁啾都会加剧波形的振荡,但是合理的选择初始啁啾参量和高阶非线性参量能很好地对脉冲进行整形修复,最终得到比较适合信息传输的稳定的孤子脉冲.由图 2(g)、(h)知,光纤损耗对光脉冲波形的影响主要表现在脉冲的幅度上面,对波形总体形状影响不大.由图 2(i)~(j)知,随着输入光脉冲能量的增加即光孤子阶数的增加,脉冲波形的幅度衰减和拖尾振荡越明显,同时脉冲中心频率偏移和光脉冲的分裂也越厉害,这会使脉冲能量进一步降低,并由于脉

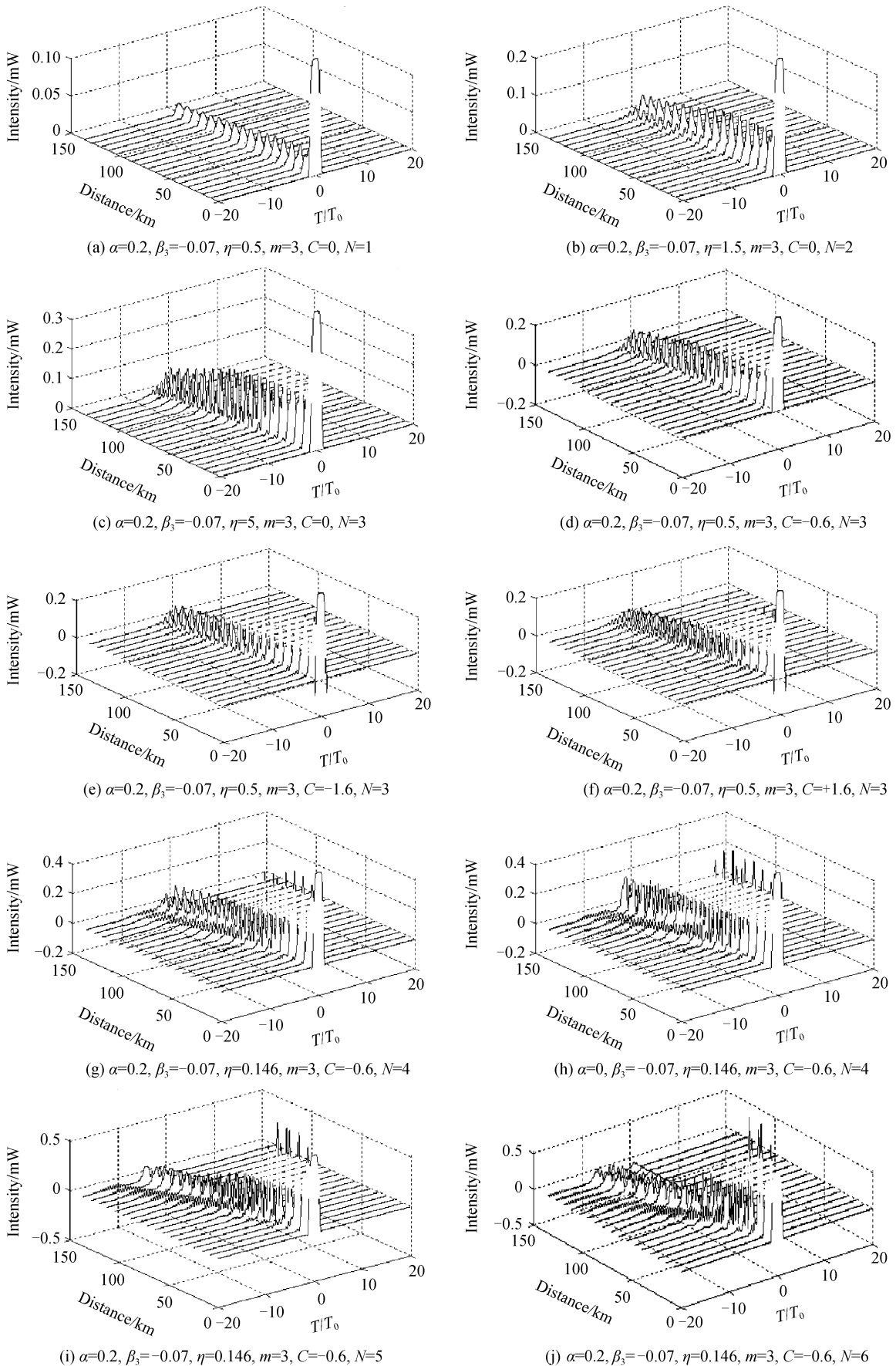


图2 损耗、高阶色散、高阶非线性和初始啁啾共同作用时对光脉冲的影响

Fig. 2 The effect of attenuation, high order dispersion, non-linearity and initial chirp on pulse propagation

宽的展宽而形成码间串扰使信噪比降低,这样的波形对信息的传输是不利的.但由图 2(g)、(h)知,当选择 $\beta_3 = -0.07$, $\eta = 0.146$, $C = -0.6$ 时,我们能够得到一个传输比较稳定的四阶脉冲波形(虽然光纤损耗总是存在的,但通过改进光纤材质和提高光纤制造工艺水平以及采用光放大技术对光孤子在传输过程中适时的进行补偿能很大程度的降低损耗的影响),这说明高阶色散、高阶非线性和初始啁啾三者在一值附近时,能对脉冲波形起到很好的整形作用,这对于通过提高入射光脉冲功率使光脉冲在光纤中形成高阶孤子来提高两光中继器之间的中继距离的研究有一定的参考价值.

3 结论

本文主要分析讨论了光纤损耗、高阶色散、高阶非线性和初始啁啾对光脉冲在光纤中传输波形的影响.这些因素都会对脉冲的波形、宽度和峰值功率产生较大影响,其中脉冲的振荡波形主要由三阶色散决定,五阶非线性和初始啁啾对脉冲的波形起到了一定的调制作用.大家知道,虽然实际上影响光脉冲传输的因素很多,各种因素之间的相互作用关系也比较复杂,但是通过合理的选择各个影响因素的参量能最终得到一个比较利于信息传输的比较稳定的高阶孤子脉冲,这对通过提高入射光脉冲初始功率以使光脉冲在光纤中形成高阶孤子来提高两光中继器之间的中继距离的研究有一定的参考意义.

参考文献

- [1] LIU Shan-liang. Optical solitary waves in the region with zero group-velocity dispersion of a single mode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6): 733-738.
刘山亮. 在光纤零群速度色散区传输的光孤子波[J]. *光学学报*, 1999, **19**(6): 733-738.
- [2] ZHENG Hong-jun, LIU Shan-liang. Autocorrelation characteristics of super-Gaussian optical pulse [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(7): 908-914.
郑宏军, 刘山亮. 超高斯光脉冲自相关特性研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 908-914.
- [3] GUO Fang-jun, XIA Guang-qiong, LIN Xiao-dong, et al. Transmission characteristics of chirped super-gaussian optical pulse in the single-model optical fiber [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(4): 54-55.
郭仿军, 夏光琼, 林晓东, 等. 超高斯啁啾光脉冲在单模光纤中传输的演化行为[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(4): 54-55.
- [4] WANG Zhi-bin, LI Zhi-quan, LIU Yang. Numerically study on the high order solitons propagation in optical fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1641-1644.
王志斌, 李志全, 刘洋. 高阶孤子在光纤中传输的数值研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1641-1644.
- [5] SHEN Chang-yu, CUI Zhi-guang. Propagation and interaction of solitons in fiber [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2010, **21**(3): 237-240.
沈常宇, 崔志光. 光纤中光孤子传输演化及相互作用研究[J]. *中国计量学院学报*, 2010, **21**(3): 237-240.
- [6] WANG Yong-xiang. Condition of conformal transmission of super-Gaussian pulse in optical fibers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2011, **28**(3): 380-384.
王永祥. 光纤中超高斯脉冲保形传输条件的研究[J]. *量子电子学报*, 2011, **28**(3): 380-384.
- [7] LIU Shan-liang, ZHENG Hong-jun. Experimental research on solitons evolution of optical pulses in standard single-mode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1313-1318.
刘山亮, 郑宏军. 光脉冲在标准单模光纤中演化形成孤子的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1313-1318.
- [8] CAI Tuo. Analysis and discussions of high order chromatic dispersion and non-linearity on the Gauss chirp pulse propagation [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(4): 401-404.
蔡托. 高阶色散与非线性对高斯脉冲传输特性的影响与讨论[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(4): 401-404.
- [9] CAI Tuo, SANG Tian, ZHANG Xiao-wei. Theoretical analysis on dispersion and non-linearity affecting gauss pulse propagation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 829-833.
蔡托, 桑田, 张小伟. 色散和非线性效应对高斯脉冲综合影响的理论分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 829-833.
- [10] CAI Tuo, SANG Tian, ZHAO Hua. Analysis and discussions on the factors affecting optical soliton propagation [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2010, **22**(1): 11-18.
蔡托, 桑田, 赵华. 影响光孤子传输的因素分析和可能的解决方案[J]. *光散射学报*, 2010, **22**(1): 11-18.
- [11] AGRAWAL G P. 非线性光纤原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 33-36.
- [12] HU Tao-ping, LUO qing, YAN Sen-lin, et al. Modulational instability in the region of minimum group-velocity dispersion with quintic nonlinearity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1326-1327.
胡涛平, 罗青, 颜森林, 等. 五阶非线性下零色散附近的调制不稳定性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1326-1327.

Analysis on Super-Gaussian Pulse Propagation in the Zero Dispersion Region

XIE Wu-you, LIU Shan-liang

(School of Physic Science and Information Engineering, Liaocheng University, LiaoCheng, Shandong 252059, China)

Abstract: Based on the non-linear Schrödinger equation which suits the optical soliton propagation, by using the symmetry split-step Fourier transformation, the transmission evolution of super-Gaussian pulse in the zero dispersion region was simulated and the effect of attenuation, high order chromatic dispersion, high order non-linearity and initial chirp on propagation was analyzed. Some conclusions were obtained: attenuation has a great effect on the pulse amplitude but little on the shape of the pulse. The amplitude and pulse width of basic soliton pulse are always at the same standard when the pulse transmitted a certain distance, which is the ideal media for optical communication. As for the high order soliton pulse, it is changing all the time. When all the influence factors come to work together, it has a great effect on the pulse propagation. However, selecting a reasonable combination of these factors, it is possible to get a high order soliton pulse to transmit information. This result has certain amount of valuable reference significance on the study of improving the relay distance between two optical repeaters by strengthening the input power of pulse.

Key words: Fiber soliton; Non-linear Schrödinger equation; High order dispersion; High order non-linearity; Initial chirp; Symmetry split-step Fourier transform method; Numerical simulation