

文章编号: 1001-3806(2007)01-0015-03

色散补偿准光孤子传输特性数值分析

赵朝锋¹, 卢 洵^{2*}, 罗少鹏²

(1. 武汉军械士官学校 光电系, 武汉 430075; 2 郑州信息工程大学 数理系, 郑州 450001)

摘要: 为了使准光孤子能够在标准单模光纤中稳定地传输, 采用了分步傅里叶方法分别模拟了准光孤子在标准单模光纤中的传输和在色散补偿系统中的传输, 得到了准光孤子在标准单模光纤中的传输特性和在色散补偿系统中的传输特性。结果表明, 准光孤子在标准单模光纤的传输过程中脉冲峰值逐渐降低, 脉冲宽度逐渐展宽, 不能稳定传输; 而准光孤子在采取色散补偿技术的色散补偿系统中传输时, 脉冲形状几乎保持不变, 与准光孤子直接在标准单模光纤中的传输相比, 性能得到了很大改善。

关键词: 非线性光学; 准光孤子; 色散补偿; 分步傅里叶

中图分类号: TN929.11; O437 文献标识码: A

Numerical analysis of quasi-soliton propagation properties using dispersion compensation

ZHAO Chao-feng¹, LU Xun², LUO Shao-peng²

(1. Department of Optoelectronics, Wuhan Ordnance Non-commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China; 2. Department of Physics, Zhengzhou Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract For quasi-soliton propagating steadily in standard monomode fiber, its transmission in a standard monomode fiber and dispersion compensation fiber is studied with the split-step Fourier method. The transmission characteristics in a standard monomode fiber and dispersion compensation fiber are obtained. The numerical analysis shows that its peak value descends and its width broadens when it propagates in a standard monomode fiber, so the quasi-soliton can't propagate steadily. When it propagates in a dispersion compensation system using dispersion compensation technique, its shape can be kept almost the original shape, so quasi-soliton propagation properties can be improved greatly than in a standard monomode fiber.

Key words nonlinear optics; quasi-soliton; dispersion compensation; split-step Fourier

引 言

为满足现代信息社会的要求(如高清晰度电视、实时数据传输、实时图像传输等等), 长距离大容量光纤通信^[1]系统一直是人们追求的目标。目前全世界大约有 5×10^7 km 的光纤, 其中大多数为标准单模光纤, 如何充分利用已铺设的光纤进行高速率的光通信是当前研究的方向之一。所以, 在现已铺设的光纤干线上加少量元器件就可以使系统升级的方法^[2]是最经济、最方便的方法。

KUMAR 和 TURITSYN 等人于 1997 年首先提出了准光孤子^[3,4]的概念, 并且准光孤子能够在色散管理光纤^[5]中稳定地实现长距离的传输, 从而能够用作高速的现代化通信系统的信号载体。但是, 准光孤子能

否在现有的标准单模光纤中稳定地实现长距离的传输呢? 本文中用分步傅里叶方法^[6]数值模拟了准光孤子在标准单模光纤中的传输, 结果表明, 准光孤子在传输过程中脉冲峰值逐渐降低, 脉冲宽度逐渐展宽, 不利于作通信中的信号载波。色散补偿^[7]是一种利用已铺设的标准单模光纤进行长距离高速光通信的可行技术, 但是准光孤子能否采用这种技术在光纤中稳定的传输是值得研究的问题。文中数值模拟了准光孤子在色散补偿光纤中的传输, 结果表明, 准光孤子在传输中脉冲形状几乎保持不变, 性能得到大大改善, 更加有利于作通信中的信号载波。

1 计算原理

1.1 准光孤子的产生

考虑长度为 L 的光纤, 非线性脉冲在反常色散区域传播时, 其复数振幅可由下述方程描述:

$$i \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{d(z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \gamma |q|^2 q = -i \Gamma q, \quad (0 \leq z \leq L) \quad (1)$$

作者简介: 赵朝锋(1980-), 男, 硕士研究生, 从事光孤子通信数字图像处理等研究。

* 通讯联系人。E-mail: ludapos@tom.com

收稿日期: 2006-01-09; 收到修改稿日期: 2006-04-18

式中, $d(z)$ 是随光纤位置变化的色散变量, γ 是归一化的非线性系数, Γ 是归一化的光纤损耗系数。引入衰减振幅 u , 使:

$$q = a(z)u, a(z) = \exp(-\Gamma z) \quad (2)$$

则脉冲的波包满足如下方程:

$$i \frac{\partial(a(z)u)}{\partial z} + \frac{d(z)}{2} \frac{\partial^2(a(z)u)}{\partial t^2} + \gamma |a(z)u|^2 a(z)u = -\Gamma a(z)u \quad (3)$$

代入 $a(z) = \exp(-\Gamma z)$, 在同除 $a^2(z)$ 后整理得:

$$i \frac{\partial u}{a^2(z) \partial z} + \frac{d(z)}{2a^2(z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \gamma |u|^2 u = 0 \quad (4)$$

令 $z_1 = \int a^2(z) dz, d_1(z_1) = \frac{d(z)}{a^2(z)}$, 则有:

$$i \frac{\partial u}{\partial z_1} + \frac{d_1(z_1)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \gamma |u|^2 u = 0 \quad (5)$$

然后引入一个带有初始啁啾的脉冲 $u = \sqrt{p(z_1)} \times v(p(z_1), t, z_1) \exp\left[i \frac{c(z_1)}{2} t^2\right]$, 其中 p 和 c 是 z_1 的实函数, 引入 $\tau = p t$ 代入方程, 选取合适的色散分布, 得到:

$$i \frac{\partial v}{\partial z_1} + \frac{d_1(z_1)p^2}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + \gamma p |v|^2 v = \frac{k_1(z_1)\tau^2 p}{2} v \quad (6)$$

式中, $k_1(z_1) = [c + c^2 d_1(z_1)] / p^3$, 其中 c 表示对 z_1 求导, 假设 $d_1(z_1)p^2 \propto p$ 和 $k_1(z_1) = 0, d_1(z_1)p = 1$, 得:

$$i \frac{\partial v}{\partial z_2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + \left[\gamma |v|^2 - \frac{k_1 \tau^2}{2} \right] v = 0 \quad (7)$$

式中, $z_2 = \int p(s) ds$ 。

如果 $\gamma = 0$ 则 (7) 式为线性谐振子的波动方程, 如果 $k_1 = 0$ 则 (7) 式就是标准的非线性薛定谔方程。为了得到方程的静态解, 假定 $v = A(\tau) \exp(k_2 z_2)$, 代入 (7) 式, 得:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 A}{d\tau^2} + \gamma A^3 - k_2 A - \left[\frac{k_1}{2} \right] \tau^2 A = 0 \quad (8)$$

对 (8) 式进行数值求解, 选取参数^[3]: 光纤色散为 $-0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, 波长 $1.55 \mu\text{m}$, 光纤有效截面积 $50 \mu\text{m}^2$, 非线性折射率系数为 $3.18 \times 10^{-16} \text{ km/W}$, 光线损耗 0.2 dB/km , 放大距离 66.4 km 。得到图 1 中准光孤子的波形^[3]。

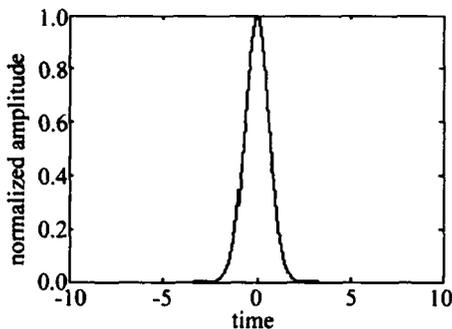


Fig 1 The pulse shape of quasi soliton at $k_1 = 1, k_2 = -0.15915, \gamma = 0.5$

1.2 准光孤子在标准单模光纤中的传播

非线性光脉冲在标准单模光纤中传输可由无量纲的非线性薛定谔方程描述^[8]:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} = \text{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - N^2 |U|^2 U, \quad (\text{忽略光纤的损耗}) \quad (9)$$

式中, $U = A / \sqrt{P_0}$ 为归一化脉冲振幅, $A(z, T)$ 是脉冲包络的振幅, P_0 为入射光脉冲峰值功率, $\xi = z/L_d = z\beta_2/T_0^2$ 为归一化光纤长度, L_d 为光纤色散长度, β_2 为色散参量, T_0 为光脉冲的初始脉宽, $\tau = T/T_0$ 为归一化时间, 参量 $N = L_d/L_n = (\sqrt{P_0 T_0^2}) / |\beta_2|$, L_n 为光纤非线性长度, γ 为非线性系数。

1.3 准光孤子在色散补偿系统中的传输

色散补偿系统由色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber DCF) 和标准单模光纤 (standard monomode fiber SMF) 组成, 见图 2。

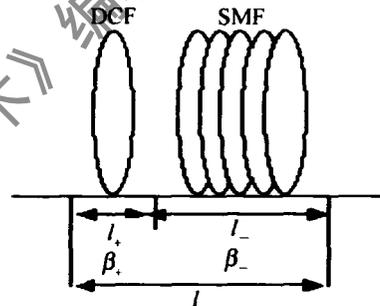


Fig 2 Dispersion compensation system

色散补偿光纤色散和长度分别用 β_+ 和 l_+ 表示, 而标准单模光纤色散和长度分别用 β_- 和 l_- 表示。每节长度 $l = l_+ + l_-$, 色散长度为 $L_{d\pm} = T_0^2 / \beta_{\pm}$, 非线性长度为 $L_n = 1 / \gamma P_0$, T_0 和 P_0 分别是光脉冲的初始脉宽及入射光脉冲峰值功率, γ 为非线性系数。由于色散补偿光纤和标准单模光纤的群速度色散符号相反, 可互相补偿, 使其剩余色散 $\bar{\beta} = (\beta_+ l_+ + \beta_- l_-) / l$ 很小, 利于非线性光脉冲在其中传播。

准光孤子在色散补偿光纤中的传输可由如下无量纲的非线性薛定谔方程描述^[9]:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{d(\xi)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + c(\xi) |u|^2 u = 0 \quad (\text{忽略光纤的损耗}) \quad (10)$$

式中, $u(\xi, \tau)$ 为归一化脉冲包络振幅, $\xi = z/l$ 为归一化光纤长度, z 为传播距离, l 为每节光纤长度, $\tau = (t - z/v_g) / T_0$ 为归一化时间, v_g 为光纤的群速度, T_0 为光脉冲的初始脉宽, 光纤色散系数 $d(\xi) = l/L_{d\pm} = \beta_{\pm} T_0^2$, 光纤非线性系数 $c(\xi) = l/L_n = l\gamma P_0$, P_0 为入射光脉冲峰值功率。

2 数值模拟及分析

2 1 准光孤子在标准单模光纤中的传播

输入初始脉冲图 1 中得到的准光孤子^[3], 用分步傅里叶方法对 (9) 式模拟, 得到图 3 其中标准光纤的色散和非线性系数分别为 $2.8 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $0.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

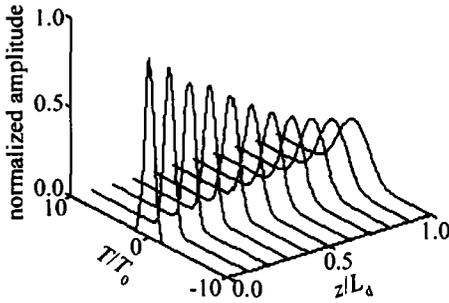


Fig 3 Quasi soliton transmission in standard monomode fiber

图 3 表示准光孤子在标准单模光纤上的传输情形, 说明准光孤子在标准单模光纤上传输时, 脉冲峰值逐渐降低, 脉冲宽度逐渐展宽, 不利于作通信中的信号载波。

2 2 准光孤子在色散补偿系统中的传输

采用如图 4 色散补偿系统理论模型^[10]进行数值模拟, 先在 7% 长的色散补偿光纤, 接着在 81% 长的标准单模光纤, 最后在 12% 长的色散补偿光纤中传播时, 色散常数交替变换符号从而起到补偿的结果。

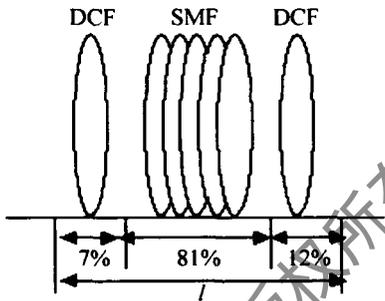


Fig 4 Theoretic model of dispersion compensation system

输入初始脉冲图 1 中得到的准光孤子^[3], 用分步傅里叶方法对 (10) 式模拟, 得到图 5 其中色散补偿光

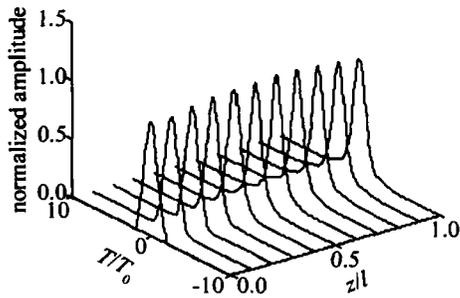


Fig 5 Quasi soliton transmission in dispersion compensation system

纤色散和非线性系数分别为 $-0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $0.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 标准光纤的色散和非线性系数分别为 $2.8 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $0.5 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, 初始脉冲宽度为

4.16 ps , 每节光纤长度为 16 km 。标准光纤的色散和非线性参数选定后, 在选定色散补偿光纤的色散和非线性参数使其与标准光纤的色散和非线性参数相匹配, 否则准光孤子在传输中不能保持脉冲波形不变, 每节光纤长度需大于色散长度和非线性长度^[5], 这样色散和非线性效应才会起重要作用。

图 5 表示准光孤子在色散补偿系统中的传输情形, 说明准光孤子在图 4 的那种色散补偿系统理论模型中传输时, 脉冲形状几乎保持不变, 性能得到大大改善, 更加有利于作通信中的信号载波。

3 结论

通过对准光孤子在标准单模光纤中的传输特性和在色散补偿系统中的传输特性数值模拟, 表明准光孤子在标准单模光纤中传输时, 脉冲峰值逐渐降低, 脉冲宽度逐渐展宽, 不利于作通信中的信号载波; 而利用色散补偿技术, 可使准光孤子在色散补偿系统中传输时, 脉冲形状几乎保持不变, 性能得到大大改善, 更加有利于作通信中的信号载波。本文中的结果可以为利用现有的光纤传输设备进行准光孤子通信作出理论指导。

参考文献

- [1] YANG X L, WEN J Y. Fundamental theories of optical fiber soliton communications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 1~16 (in Chinese).
- [2] SMITH N J, DORAN N J, FORYSAK W W *et al*. Soliton transmission using periodic dispersion compensation [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(10): 1808~1822.
- [3] KUMAR S, HASEGAWA A. Quasi-soliton propagation in dispersion managed fibers [J]. Opt Lett, 1997, 22(6): 372~374.
- [4] TURITSYN S K. Stability of an optical soliton with Gaussian tails [J]. Phys Rev, 1997, E56(4): 3784~3787.
- [5] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. 3rd ed. New York: Elsevier Science, 2002: 104~105.
- [6] FANG Y T, SHEN T G, ZHAO B K. Propagation properties of the couple of solitons in the fibers with slowly decreasing dispersion [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2003, 9(3): 136~138 (in Chinese).
- [7] SUZUKI M, MORIYA I, EDAGAWA N. Reduction of Gordon-Haus timing jitter by periodic dispersion compensation in soliton transmission [J]. Electron Lett, 1995, 31(23): 2027~2029.
- [8] XIE X P, ZHAO S H, XIA G J. Optical shocks study on propagation of femtosecond soliton pulse [J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 357~363 (in Chinese).
- [9] NAKAZAWA M, KUBOTA H. Optical soliton communication in a positively and negatively dispersion-allocated optical fiber transmission line [J]. Electron Lett, 1995, 31(3): 216~217.
- [10] XUE W R, LIZH H, LIX M *et al*. Numerical simulation of quasi-stable soliton transmission in a cascaded fiber link [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(9): 52~55 (in Chinese).