

文章编号: 1002-2082(2007)01-0082-04

# 光孤子传输演化的分步傅里叶法研究

王志斌, 李志全

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 光孤子传输的数值仿真研究对其实用化及系统设计具有重要意义。本文详细介绍了分步傅里叶法的基本原理和仿真步骤,并用 Matlab 语言对光孤子在光纤中的传输演化进行了仿真。讨论了光纤损耗对光孤子传输的影响,并说明当光孤子在光纤中传播时,距离太近将会产生强烈的相互作用,导致孤子形状发生畸变。最后对掺铒光纤放大器对孤子能量补偿作用做了探讨,指出光孤子通信中主要是色散受限,采用 980 nm 光源泵浦的 EDFA 具有较好的效果。

**关键词:** 分步傅里叶法;传输演化;损耗;光孤子;能量补偿

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

## Study on the split-step Fourier transform method in soliton evolution

WANG Zhi-bin, LI Zhi-quan

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The split-step Fourier transform method (SSFM) and its simulation process are presented in detail. Matlab was used to simulate the soliton propagation in the optical fiber. The influence of optical fiber attenuation on soliton propagation is discussed. It is pointed out that two optical solitons will strongly affect each other if they are very close, which makes the soliton shape aberrant. The EDFA was adopted to compensate the power of the soliton and its result was reviewed. It is concluded that dispersion is the major limitation in the optical soliton communication, 980 nm laser is selected to pump the EDFA to obtain better result.

**Key words:** SSFM; evolution; attenuation; optical soliton; power compensation

## 引言

在过去 30 年里,光纤通信有了极大的发展,光通信网络也成了现代通信的基础平台。随着对光纤通信在传输速率和容量方面提出越来越高的要求,光孤子通信已经成为各国科学家研究的一个重要课题。在非线性条件下运用光纤时,非线性自相位调制使得脉冲压缩变窄,当色散展宽与非线性压缩二者平衡时将形成保形保速稳定传输的孤子脉冲,可大大提高光纤传输系统的传输能力。因此,光孤子通信具有很大的诱惑力,许多著名的实验室都在进行这方面的研究,并取得了令人兴奋的成绩<sup>[1-3]</sup>。

在数学上,描述光孤子传输演化的方程是非线性薛定谔方程。一般情况下,由于它是一个高阶非线性偏微分方程,因此,要想求得其解析解并不是一件容易的事,但是随着计算机技术和相关应用软件的发展,用数值方法模拟光孤子的传输已经变得十分简单。常用的数值方法很多,有微扰法、差分方法、分步傅里叶法等。其中分步傅里叶法原理简单,易于编程,为许多学者所采用。

本文详细介绍分步傅里叶法的原理和程序设计步骤,并用界面友好的 Matlab 语言编程环境进行相关问题的数值模拟。

收稿日期: 2005-11-13; 修回日期: 2006-04-01

作者简介: 王志斌(1977-),男,河北行唐人,讲师,燕山大学电气工程学院博士研究生,主要从事光纤传感技术及光通信技术研究。E-mail: tsibin@126.com。

## 1 分步傅里叶法

光孤子在光纤中传播时,可用非线性薛定谔方程<sup>[4]</sup>描述为

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

式中:  $A(z, T)$  为光场的复振幅;  $i$  为虚数单位;  $T = t - \beta_1 z$  为时间参量;  $v_g$  为群速度;  $\beta_2, \beta_3$  分别为二阶和三阶色散系数;  $\gamma$  为非线性系数;  $\alpha$  为光纤损耗。

设  $U = A(z, T)/\sqrt{P_0}$ , 其中  $P_0$  为入射脉冲的峰值功率, 则方程(1)可变为

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}U + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 U}{\partial T^3} = i\gamma P_0|U|^2U \quad (2)$$

分步傅里叶法求方程(2)的数值解,就是将光脉冲在光纤中传输一段距离后,分2步进行计算,即让色散和非线性各自独立起作用(在传播距离很小时,这种分析具有足够高的精度)。则方程(2)变为

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

式中  $\hat{D}$  和  $\hat{N}$  为差分算符,前者表示色散项和吸收项,后者表示非线性项。当仅有非线性项和色散项起作用时,可以很方便地求出

$$U(z, T) = U(0, T) \exp[i\gamma P_0|U(0, T)|^2 z] \quad (4)$$

$$U(z, T) = \text{IFFT} \left\{ \left[ \left( \frac{i}{2}\beta_2\omega^2 - \frac{i}{6}\beta_3\omega^3 - \frac{\alpha}{2} \right) z \right] \times \text{FFT}[U_1(z, T)] \right\} \quad (5)$$

式(5)中,  $\omega$  为傅里叶域频率。

Matlab 语言中有专门的语句进行傅里叶变换和反变换,分别是 `fft()` 和 `ifft()` 函数。当自变量是一个向量时,需要把零频分量移至频谱的中心,这时需要重新排列 `FFT()` 和 `IFFT()` 的输出。所以在编程时需使用 `fftshift` 和 `ifftshift` 函数进行傅里叶变换和反变换。

## 2 仿真实例与讨论

选取各参数如下:  $\alpha = 0.14/\text{km}$ ,  $\gamma = 10/(\text{W} \cdot \text{km})$ ,  $P_0 = 5 \text{ mW}$ ,  $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$ , 初始脉宽  $T_0 = 25 \text{ ps}$ 。

### 2.1 光纤损耗对脉冲传输的影响

假设初始输入为标准的双曲正割形孤子,即  $U$

$(0, T) = \text{sech}(T/T_0)$ 。当光纤无损耗时,光脉冲可以在光纤中长距离传输下去,其脉冲如图1所示。当光纤中有损耗时,取损耗系数  $\alpha = 0.14/\text{km}$ , 其脉冲如图2所示。相邻脉冲之间用 `mesh()` 函数进行了平滑(除图3和4外,其他图进行了平滑)。光孤子在光纤中传播时的损耗导致孤子幅度变化,在二维图中可以更清楚地表示出来,如图3和4所示。

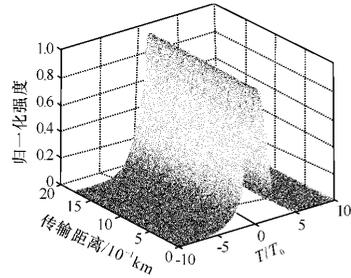


图1 光孤子在光纤中无损耗传输

Fig. 1 The lossless propagation of soliton in the optical fiber

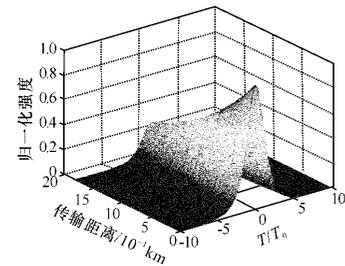


图2 有损耗时光孤子在光纤中的传输

Fig. 2 The lossy propagation of soliton in the optical fiber

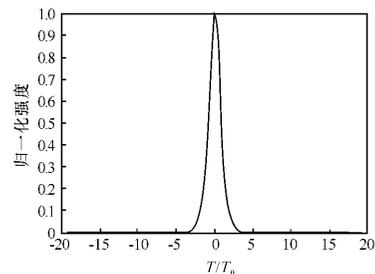


图3 光孤子在光纤中无损耗传输的二维图

Fig. 3 Two-dimensional figure for lossless propagation of soliton in the fiber

### 2.2 孤子间的相互作用

假设2孤子的幅值相等,都为1,且是对称的,则初始输入为  $U(0, T) = \text{sech}(T/T_0 + t_0) + \text{sech}(T/T_0 - t_0)$ , 随着孤子间距参数的变化,2孤子在

光纤中的传输演化如图5和6所示。有损耗时,孤子传输演化如图7和8所示(损耗系数 $\alpha=0.14/\text{km}$ )。图5和7中对应的 $t_0=6$ 。图6和8中对应的 $t_0=1.5$ ,此时孤子间已经强烈相互作用,从而导致系统传输的误码率大幅度提高。

英光纤中掺铒离子( $\text{Er}^{3+}$ )的受激辐射来实现对1550nm波段光信号的放大。它有很宽的频带,一般在1530~1565nm。

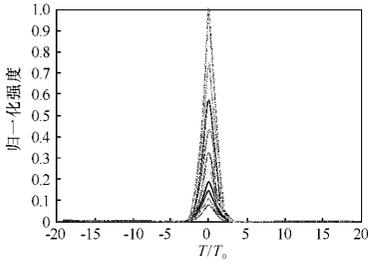


图4 有损耗时光孤子在光纤中传输的二维图

Fig. 4 Two-dimensional figure of soliton propagating in the fiber with loss

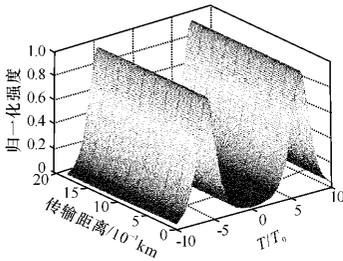


图5  $t_0=6$ ,无损耗时孤子对的传输演化

Fig. 5 The propagation evolution of two solitons in the fiber without loss when  $t_0=6$

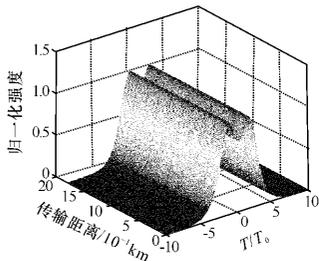


图6  $t_0=1.5$ ,无损耗时孤子对的传输演化

Fig. 6 The propagation evolution of two solitons in the fiber without loss when  $t_0=1.5$

### 2.3 掺铒光纤放大器对孤子能量的补偿作用

实际上,光孤子脉冲在光纤中传输时总会有损耗存在,如果我们取损耗前的脉冲,就要周期性地对孤子脉冲进行能量放大。EDFA利用激光泵浦石

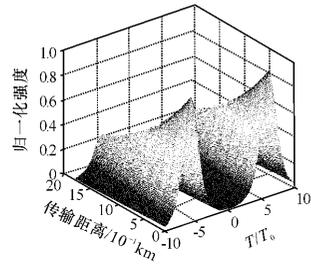


图7  $t_0=6$ ,有损耗时孤子对的传输演化

Fig. 7 The propagation evolution of two solitons in the fiber with loss when  $t_0=6$

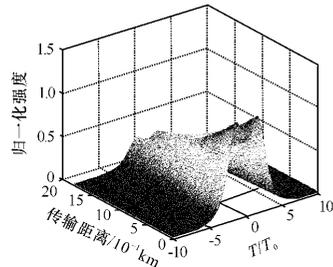


图8  $t_0=1.5$ ,有损耗时孤子对的传输演化

Fig. 8 The propagation evolution of two solitons in the fiber with loss when  $t_0=1.5$

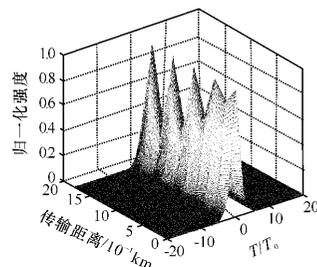


图9 单个孤子传输时的补偿

Fig. 9 The compensation of single soliton propagating in the fiber

EDFA的泵浦源有2种,即980nm和1480nm。980nm泵浦源可以保持较低的噪声系数,1480nm的泵浦源具有更高的泵浦效率,可以获得较大的输出功率。由于光孤子通信中,主要是色散受限<sup>[5]</sup>,并非损耗受限,所以本系统采用980nm泵浦的EDFA。如果是多路波复用,可考虑采用1480nm泵浦的EDFA。

在数值模拟中,综合其他参数的选择,取放大器补偿周期为20km。单个孤子和孤子对的补偿如图9和10所示。图10中,取孤子间距仍为1.5。为

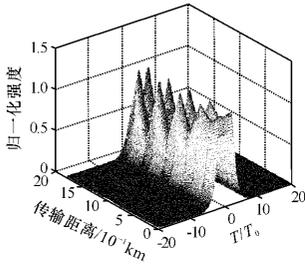


图10 孤子对传输时的补偿

Fig. 10 The compensation of two solitons propagating in the fiber

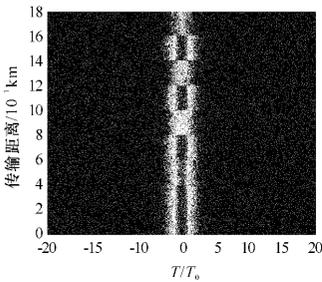


图11 转换视角后单个孤子传输时的补偿

Fig. 11 The compensation of single soliton propagating in the fiber when the visual angle changed

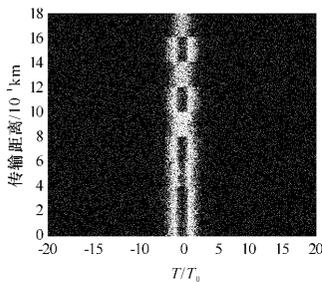


图12 转换视角后孤子对传输时的补偿

Fig. 12 The compensation of two solitons propagating in the fiber when the visual angle changed

了更清楚理解掺铒光纤放大器在光孤子通信中的重要作用,我们调整一下视图效果,如图11和12所示。

由上图可见,随着孤子传输距离的增加,能量的衰减逐渐增加。这是由于光孤子在传输过程中,色散逐渐积累,产生的色散波消耗掉一部分能量,此时掺铒光纤放大器的间距应该相应地减小。

### 3 结 论

本文详细介绍了分步傅里叶法的基本原理和仿真步骤,指出在仿真过程中应该注意的问题,并用Matlab语言对光孤子在光纤中的传输演化进行了仿真。结果表明:只要仿真步长选择适当,分步傅里叶法完全能够满足光孤子通信中数值模拟的需要。

#### 参考文献:

- [1] NAKAZAWA M, SUZUKI K, YAMADA E, et al. Straight-line soliton data transmissions over 2000 km at 20 Gbit/s and 1000 km at 40 Gbit/s using erbium doped fibre amplifiers [J]. Electron Lett, 1993, 29(16):1474-1476.
- [2] AUBIN G, JEANNEY E, MONTALANT T, et al. Electro absorption modulator for a 20 Gbit/s soliton transmission experiment over 1 million km with 140 km amplifier span [J]. IOOC, 1995(5):21-22.
- [3] YOSSHIDA S, KUWANO S, YAMADA M, et al. A 10 Gbit/s  $\times$  10 channel transmission experiment over 600 km with 100 km repeater spacing employing unequal channel spacing and cascaded fluorid-based erbium doped fiber amplifiers [J]. IOOC, 1995(5):25-26.
- [4] MARCUSE D. Simulation of single-channel optical systems at 100 CB/s [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(4):564-569.
- [5] ZHANG Cheng-liang. A course of lectures of WDM system [J]. The Telecom Technology, 1999(6):13-17.