

文章编号: 0253-2239(2001)11-1286-04

色散渐变光纤中的亚皮秒孤子传输

张介秋¹⁾ 陈砚圃^{2)*} 冯大毅¹⁾ 梁昌洪³⁾

1), 空军工程大学工程学院, 西安 710038

2), 西安交通大学电信学院, 西安 710049

3), 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071

摘要: 当皮秒孤子在群色散指数衰减的色散渐变光纤中传输时, 孤子的群色散和自相位调制保持局域平衡, 宽度可以保持不变。但对亚皮秒孤子, 由于受拉曼自频移效应和三阶色散效应的共同影响, 要想继续保持群色散与自相位调制的局域平衡, 光纤的群色散分布应加以修正。对传输亚皮秒孤子的色散渐变光纤的群色散分布加以修正, 讨论并对亚皮秒孤子的传输情况进行了数值模拟。模拟结果与理论一致。

关键词: 色散渐变光纤; 亚皮秒孤子; 三阶色散; 拉曼自频移

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

在光孤子通信系统中, 控制孤子稳定传输的有效办法之一是在光纤上周期性地插入集总放大器以补偿光纤损耗, 同时每个集总放大器后插入变频窄带滤波器^[1~3]以降低放大自发辐射噪声(ASEN)的影响及抑制孤子的相互作用。在平均孤子(averaged soliton^[4], 或称 guiding-center soliton^[5])区, 产生的色散波(孤子形变)比较小, 这种方法是可行的。因平均孤子区的条件是 $L_A \leq L_D = T_0^2 / |\beta_2|$ (式中 L_D 为孤子的群色散长度), 在光纤群色散值 β_2 一定的情况下, 实际上对放大器间距 L_A 或孤子宽度 $T_0 = T_W / 1.763$ 施加一定的约束(T_W 为孤子的半功率全宽)即可满足平均孤子区的条件。若想进一步提高码率(即减小孤子宽度), 则需减小放大器间距或进一步减小光纤的群色散; 但二阶色散减小到一定限度, 三阶色散的作用会变得重要。因此要进一步提高光孤子通信码率须另辟途径。

不管是线性通信系统还是非线性通信系统, 光纤损耗都是不可避免的, 且在光纤的诸多特性中是最为有害的因素之一。如果将两个放大器之间的光纤设计成沿孤子传播方向群色散 $|\beta_2(z)|$ 指数减小, 以便和因损耗而指数减小的自相位调制达到局域平衡, 即逐点满足基孤子条件:

$$\frac{\sqrt{P(z)} T_0^2}{|\beta_2(z)|} = 1, \quad (1)$$

则 $L_A \gg L_D(0) = T_0^2 / |\beta_2(z=0)|$, 孤子在这样的光纤中传输时仍可保持理想的孤子形态^[6,7], 且宽度 T_W 不变, 这样的光纤称为色散渐变光纤或色散缓变光纤(DDF)。用色散渐变光纤来补偿光纤损耗对孤子脉冲传输所产生的畸变的设想首先是由日本学者 Tajima^[7] 于 1987 年提出来的。1991 年 Bogatyrev 等^[8] 通过逐步减小光纤纤芯直径的办法首次拉制出这种光纤。后来一些学者^[9,10] 把它用于激光器中产生高质量的孤子脉冲串, 另一些学者^[11~13] 用它来对超短光脉冲进行压缩。但 Tajima 的本意是利用它对孤子的保形特性来实现超高速光孤子通信^[7,14,15]。从原理上讲, 对于群色散沿传播方向随峰值功率同步减小的色散渐变光纤, 只要调节放大器的放大倍数使其等于与该放大器相联的两端光纤的群色散比, 则满足(1)式的任何宽度的孤子都可以在这样的周期性放大链路中以理想的孤子形态传输。但实际上随着孤子宽度的逐步减小, 各种高阶效应将变得越来越重要。在各种高阶效应中, 比较重要的是三阶色散效应、拉曼自频移效应及自变陡效应。因此本文对亚皮秒孤子在三阶色散效应和拉曼自频移效应均不可忽略的色散渐变光纤中传输时, 为保持色散与自相位调制的局域平衡, 光纤群色散分布应如何修正、亚皮秒孤子在修正前、后的色散渐变光纤中的传输情况通过数值模拟进行了研究。

* 通讯地址: 西安通信学院计算机教研室, 西安 710106

收稿日期: 2000-07-06; 收到修改稿日期: 2000-09-28

2 色散渐变光纤的群色散分布及修正

描述超短脉冲在单模光纤中传输的方程是修正的非线性薛定谔方程:

$$i \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\beta_2(z)}{2\beta_2(0)} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + |q|^2 q = -i \frac{\Gamma}{2} q + \frac{T_R}{T_0} q \frac{\partial |q|^2}{\partial t} + i \frac{\beta_3(z)}{6T_0 |\beta_2(0)|} \frac{\partial^3 q}{\partial t^3} - i \frac{2}{\omega_0 T_0} \frac{\partial}{\partial t} [|q|^2 q], \quad (2)$$

其中, $\beta_2(z)$ 为光纤的群色散分布, $\beta_2(0)$ 为光纤输入端的群色散, $\Gamma = \alpha L_D$, α 为光纤损耗系数, $L_D = T_0^2 / |\beta_2(0)|$, T_R 为非线性响应延迟, $\beta_3(z)$ 为光纤的三阶色散, $T_0 = T_W / 1.763$. q, z, t 分别归一化于入射基孤子的峰值振幅

$$A_0 = P_0^{1/2} = \left[\frac{n_2 \omega_0 T_0^2}{c A_{\text{eff}} |\beta_2(0)|} \right]^{-1/2},$$

L_D 和 T_0 . 其中 $n_2, \omega_0, c, A_{\text{eff}}$ 分别为光纤非线性折射率、孤子中心圆频率、真空中光速和光纤纤芯有效横截面积. 如果孤子宽度 T_0 较大, (2) 式的右边后三项可以忽略. 这时(2) 式变为:

$$i \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\beta_2(z)}{2\beta_2(0)} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + |q|^2 q = -i \frac{\Gamma}{2} q. \quad (3)$$

当光纤的群色散与光强度随传播距离作同步衰减时, 即

$$\beta_2(z) = \beta_2(0) \exp(-\Gamma z), \quad (4)$$

则(3) 式支持宽度不变、强度指数衰减的孤子解:

$$q(z, t) = \exp(-\Gamma z/2) q_1(z, t). \quad (5)$$

其中 $q_1(z, t)$ 为无损耗且群色散为常数的光纤的基孤子解. 显然, 在群色散分布为(4) 式的色散渐变光纤中, 若忽略各种高阶效应, 则孤子的幅值、功率、能量随距离呈指数衰减, 但孤子的形状保持不变, 仍维持基孤子的形状. 然而, 当入射孤子的宽度进一步减小时, (2) 式右边后三项高阶效应不能忽略. 拉曼自频移效应会使孤子中心频率在传输过程中逐步下移, 而孤子中心频率的下移将由于存在三阶色散效应导致光纤的群色散发生变化. 为了使孤子在传输过程中群色散和光强始终同步地指数减少, 以光纤入射端孤子中心频率为基准的群色散分布(4) 式应加以修正. 在非归一化单位中, 因拉曼效应而引起的孤子中心频率下移满足下面公式^[16]:

$$\frac{d\omega(z)}{dz} = - \frac{8T_R}{15T_0^4} |\beta_4(z)|. \quad (6)$$

积分(6) 式得

$$\omega(z) - \omega(0) = - \int_0^z \frac{8T_R}{15T_0^4} |\beta_2(z)| dz = - \frac{8T_R}{15T_0^4} |\beta_2(0)| \frac{1 - \exp(-\alpha z)}{\alpha}. \quad (7)$$

如果存在三阶色散, 这个拉曼频移的存在会使孤子实际感受到的群色散偏离指数分布曲线. 为使频率下移了的孤子的群色散保持(4) 式的指数衰减, 以入射端孤子中心频率为基准的群色散分布应修改为:

$$\beta_2[z, \omega(0)] = \beta_2[z, \omega(z)] - \beta_3[z, \omega(z)] / [\omega(z) - \omega(0)] \approx \beta_2(0) \left[\exp(-\alpha z) - \beta_3(z) \frac{8T_R}{15T_0^4} \frac{1 - \exp(-\alpha z)}{\alpha} \right]. \quad (8)$$

上式中已假定三阶色散与频率无关(四阶色散为零), 即:

$$\beta_3[z, \omega(z)] \approx \beta_3[z, \omega(0)] \equiv \beta_3(z), \quad (9)$$

其中 $z \in (0, z)$.

修改后的分布曲线如图 1 所示. 所用参数为 $\beta_3(z) = 0.05 \text{ ps}^3/\text{km}$, $\alpha = 0.21 \text{ dB/km}$, $A_{\text{eff}} = 35 \mu\text{m}^2$, $T_R = 6 \text{ fs}$, $\beta_2(0) = -5.6 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$, $n_2 = 3.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$, 孤子半功率全宽 $T_W = 1.763 T_0$ 分别取 5.0 ps 、 1.0 ps 、 0.5 ps . 显然当孤子宽度大于 1 ps 时, 拉曼频移引起的二阶色散修正是很小的. 一旦进入亚皮秒区, 这种修正必不可少, 否则非线性与色散不能保持局域平衡, 孤子宽度将展宽. 显然, 随着孤子宽度的减少, 其输入端中心频率对应的光纤群色散分布中将有一部分变为正群色散, 甚至在大部分长度上群色散为正. 但频率不断下移的孤子因三阶色散效应而感受到的实际群色散则刚好与自相位调制同步指数衰减.

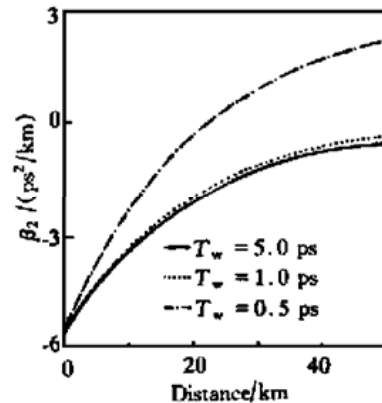


Fig. 1 The adjusting of group dispersion of dispersion-decreasing fiber due to the combined effect of Raman self frequency shift and third-order dispersion. The width of soliton is 5.0 ps , 1.0 ps , 0.5 ps respectively

3 数值计算

图 2 是宽度为 $T_w = 0.5$ ps 的一阶孤子在上述参数的光纤中传输时, 在 (8) 式与 (4) 式的两种群色散分布情况下, 用分步付里叶方法对 (2) 式进行数值计算得到的孤子宽度随距离的变化。显然, 群色散

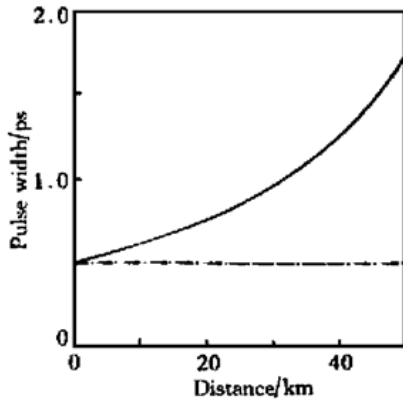


Fig. 2 Evolution of the width of a soliton with initial duration of $T_{FWHM} = 0.5$ ps in the decreasing-dispersion fiber, which group dispersion has been modified (dotted-dashed curve) and has not been modified (solid curve) respectively. Parameters of the fiber are identical to those in Fig. 1

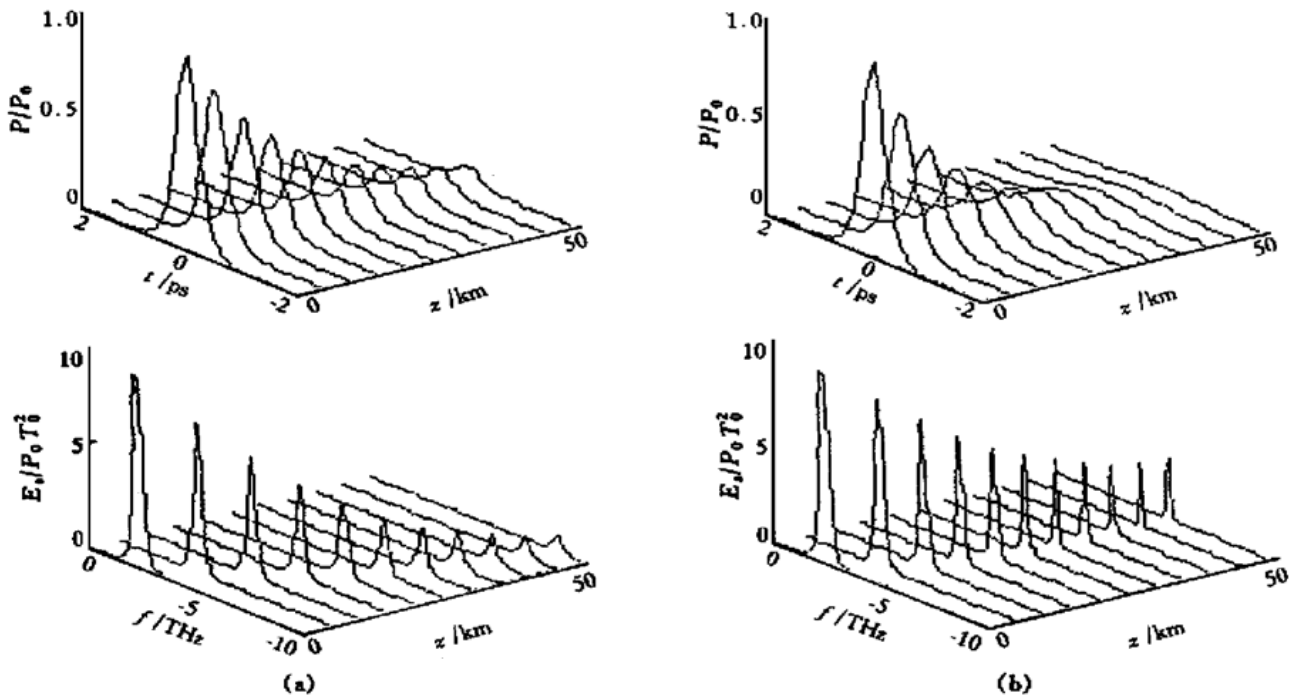


Fig. 3 Evolution of the waveform (up) and the spectrum (down) of a 0.5 ps soliton in the decreasing-dispersion fiber, which group dispersion has been modified (a) and has not been modified (b) respectively. Parameters of the fiber are identical to those in Fig. 1

结论 将群色散指数衰减的色散缓变光纤用于孤子传输, 由于色散与自相位调制可以保持局域平衡, 因此有利于增加孤子传输的稳定性, 提高孤子通信系统的码率。但当孤子的宽度为亚皮秒时, 拉曼自频移效应和三阶色散效应的共同影响会使孤子在传输

过程中实际感受到的群色散偏离指数衰减, 因此必须根据所传输的孤子宽度, 对光纤的群色散进行了适当修正。本文对以光纤入射端孤子中心频率为基准的光纤的群色散分布进行了必要的调整, 并在光纤的群色散分布调整前、后对孤子的传输情况作了

分布修正后孤子宽度保持不变, 而当群色散分布未修正时孤子宽度将逐渐展宽。

图 3(a)、图 3(b) 是光纤的群色散分布分别按 (8) 式与 (4) 式计算时得到的孤子时域演化图及其频谱演化图。光纤参数同上。输入孤子的初始宽度为 $T_w = 0.5$ ps, 这时入射孤子峰值功率 $P_0 = cA_{\text{eff}} |\beta_2(0)| / (n_2 \omega_0 T_0^2) = 18.85$ W, $P_0 T_0^2 = 1.52$ pJ/THz。为了便于比较, 时域演化图中已经移去了因孤子的频率下移引起的时间延迟。显然, 孤子在群色散按 (8) 式修正的光纤中传输时宽度可以保持得很好, 但频移量要比没修正的情况约大一倍。如入射光波长为 $1.555 \mu\text{m}$, 修正后在 50 km 处频率下移约为 65 nm (8.3 THz), 与 (7) 式一致。而未修正时, 只有 3.8 THz 的频率下移。因此, 要想使孤子在 $1.55 \mu\text{m}$ 的低耗窗附近长距离稳定传输, 就必须在每隔一定距离对孤子加以放大的同时使孤子的频率得到恢复, 因此应组合使用抽运光频率等于光纤入射光频率和出射光频率平均值的参变放大器^[17]和掺铒光纤放大器(EDFA)。

数值模拟, 模拟结果与理论完全一致。本文的计算是以群色散分布(8)式为基础的, 然而群色散分布如此理想的光纤制造难度可能很大, 作者正在探索以平均孤子^[4,5]为基础用群色散分布(沿轴向)为阶梯状的光纤来加以代替的可能性, 结果将另文发表。

参 考 文 献

- [1] Mollenauer L F, Gordon J P, Evangelides S G. The sliding frequency guiding filter: An improved form of soliton jitter control. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22): 1575~1577
- [2] Mamyshev P V, Mollenauer L F. Stability of soliton propagation with sliding-frequency guiding filters. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24): 2083~2085
- [3] Golovchenko E A, Pilipetskii A N, Menyuk C R *et al.*. Soliton propagation with up- and down-sliding frequency guiding filters. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6): 539~541
- [4] Mollenauer L F, Evangelides S G, Haus H A. Long-distance soliton propagation using lumped amplifiers and dispersion-shifted fiber. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1991, **LT-9**(2): 194~197
- [5] Hasegawa A, Komada Y. Guiding-center soliton in fibers with periodically varying dispersion. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(18): 1385~1387
- [6] 张介秋, 梁昌洪. 色散渐变光纤中的孤子演化. 全国微波会议论文集. 南京: 东南大学出版社, 1995. 1101~1104
- [7] Tajima K. Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(1): 54~56
- [8] Bogatyrev B, Bubnov M M, Dianov E M *et al.*. Single mode fiber with chromatic dispersion varying along the length. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1991, **LT-9**(5): 561~566
- [9] Mamyshev P V, Chernikov S V, Dianov E M. Generation of fundamental soliton trains for high bit rate optical fiber communication lines. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(10): 2347~2355
- [10] Chernikov S V, Taylor J R, Mamyshev P V *et al.*. Generation of soliton pulse train in optical fiber using two CW singlemode diode lasers. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(10): 931~932
- [11] Chernikov S V, Dianov E M, Richardson D J *et al.*. Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7): 476~478
- [12] 徐文成, 郭旗, 廖常俊等. 色散渐变光纤中飞秒孤子压缩与稳定传输. 光学学报, 1995, **15**(2): 174~179
- [13] 曹文华, 姚爱民, 廖常俊等. 皮秒脉冲在色散渐变光纤中的孤子效应压缩. 光学学报, 1994, **14**(2): 118~124
- [13] Mamyshev P V, Chernikov S V. Ultrashort-pulse propagation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(19): 1076~1078
- [15] Essiambre R J, Agrawal G P. Ultrahigh-bit-rate soliton communication systems using dispersion-decreasing fibers and parametric amplifiers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(2): 116~118
- [16] Gordon J P. Theory of the soliton self-frequency shift. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(10): 662~664
- [17] Chi S, Wen S. Recovery of soliton self-frequency shift by optical phase conjugation. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1705~1707

Transmission of Sub-Picosecond Soliton in Decreasing-Dispersion Fiber

Zhang Jieqiu¹⁾ Chen Yanpu²⁾ Feng Dayi¹⁾ Liang Changhong³⁾

1), Engineering Institute, Airforce Engineering University, Xi'an 710038

2), Communication Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

3), State Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071

(Received 6 July 2000; revised 28 September 2000)

Abstract: Pulse-width can be conserved when picosecond solitons propagate through a decreasing-dispersion fiber of which the group dispersion exponentially decreases along the fiber length at the same rate as the energy loss. However, for keeping local balance of the dispersion and the self-phase modulation, the group dispersion of the decreasing-dispersion fiber in which sub-picosecond solitons propagate should be modified as a result of the combined action of Raman self-frequency shift and the third-order dispersion. The group dispersion of the decreasing-dispersion fiber has been adjusted and the propagation of sub-picosecond solitons through a decreasing-dispersion fiber has been investigated by solving numerically the generalized nonlinear Schrödinger equation. The results of the numerical simulation are consistent with theory.

Key words: decreasing-dispersion fiber; sub-picosecond soliton; third-order dispersion; Raman self-frequency shift