

暗孤子耗散阻尼的周期补偿*

曲林杰 曲 昕 于克明

(天津大学精密仪器系, 天津 300072)

摘 要 用计算模拟方法研究了暗孤子在用光纤放大器周期补偿损耗的光纤中的传播。暗孤子对在这种系统中传播时, 其亮背景会产生自激的噪声。与光纤放大器配合使用法布里-珀罗滤波器, 可以消除这种噪声, 有利于暗孤子的长距离稳定传播。

关键词 暗孤子, 损耗补偿, 光纤放大器。

1 引 言

在一定的条件下, 光脉冲在非线性的色散光纤中以亮孤子和暗孤子的形式传播^[1, 2]。自1973年以来, 光孤子一直是一个十分活跃的研究课题, 但基本上集中于亮孤子的研究。与亮孤子相比, 对暗孤子的研究无论是理论上还是实验上, 都困难得多。从1988年以来, 由于实验技术的进展, 对暗孤子的研究逐渐多了起来。

从已报道的研究结果看, 暗孤子确实有一些值得注意的特性: 当不存在其它微扰时, 暗孤子的互作用比亮孤子的互作用小得多^[3]; 在光纤损耗相同的情况下, 暗孤子振幅的衰减和脉宽的增长速率比亮孤子的相应速率小一倍^[4, 5]; 此外, 在相同的条件下, 暗孤子的 Gordon-Haus 效应小于亮孤子的效应^[6]。

众所周知, 亮孤子通信之所以成为可能, 一个重要原因是可以周期地使用光放大器提供增益以补偿损耗, 维持孤子的长距离稳定传输。所以, 考察用光放大器补偿暗孤子传输损耗的可能性, 自然是个十分重要的课题。文献[6]虽然是研究用光放大器补偿损耗的系统中暗孤子的 Gordon-Haus 效应问题, 但只是在假定了增益刚好处处补偿损耗的理想条件下, 引入光放大器的自发辐射噪声, 并未涉及实际系统。文献[7]则论证了用喇曼增益补偿暗孤子传输损耗的可行性。本文正是要研究暗孤子能否在这种用光纤放大器提供集总增益的周期放大系统中稳定传输。为了使讨论更具一般性, 本文直接研究暗孤子对在这种系统中的传播。

2 用集总增益周期补偿暗孤子对的传输损耗

使用光纤放大器的线路的特点是, 损耗是分布的, 而增益是集总的。每个放大周期由一段传输光纤和一个光纤放大器组成。在传输光纤中, 脉冲的幅度由于损耗而逐渐减小, 不可

* 国家自然科学基金资助的课题。

收稿日期: 1994年4月30日

能维持一个常数。但是，只有基孤子才能稳定传输，脉冲的波形和幅度与基孤子偏离得越多传输越不稳定，所以，在一个放大周期内的传输段，脉冲的幅度必须紧靠基孤子幅度附近变化，而且，从稳定的角度，这种变化越小越好。然而，从经济成本的角度来看，当然希望放大周期尽量长一些，这样才可以减少整个线路所用的器件数量。在实际设计中必须全面权衡。

在传输光纤中，脉冲的演化由如下的含有损耗微扰项的非线性薛定谔方程所支配：

$$i \frac{\partial u}{\partial \tau} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + |u|^2 u = i\Gamma u, \tag{1}$$

$$\Gamma = \gamma z_c / 2, \tag{2}$$

γ 为光纤的损耗率，在石英光纤的透明窗口(1.55 μm 波段)， $\gamma \sim -0.046 / \text{km}$ (相当于 $\sim 0.2 \text{ dB/km}$)，

$$z_c = 0.322 \times 2\pi c T^2 / (\lambda^2 |D|) \tag{3}$$

是与 $\zeta = 1$ 对应的实际传播距离，称为孤子的特征长度。选取孤子的中心波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ，光纤损耗为 0.2 dB/km ，又设脉冲宽度 $T = 50 \text{ ps}$ ，光纤的色散 $D = -2 \text{ ps/nm/km}$ ，则 $z_c = 315 \text{ km}$ ， $\Gamma = -315 \times 0.046 / 2 = -7.245$ 。把在一个传输段内的功率损耗设定为 7 dB ，因此一个放大周期内的传输光纤的长度为 $7 / 0.2 = 35 \text{ km}$ ，即 $\zeta_0 = 35 / 315 = 0.11$ 。根据上述原则，在 17.5 km 处，脉冲包络的振幅应恰好为 1，所以，在始端的幅度应为 $u_0 = \exp(0.023 \times 17.5) = 1.5$ 。

在光纤放大器内，由于增益项远大于色散项和非线性项，可只考虑增益项对脉冲在其中传播的作用。并且，假定放大器的带宽远大于脉冲的带宽，在脉冲的整个频谱范围内，功率增益是常数(7 dB)。为简单计，在计算中没有引入放大器的自发辐射噪声。

初始输入设为由下式给出的两个暗脉冲：

$$u(0, s) = \begin{cases} -1.5 \tanh(s - q_0) & 0 \leq s < +\infty, \\ 1.5 \tanh(s + q_0) & -\infty < s < 0. \end{cases} \tag{4}$$

严格地说，波形为 $u = A \tanh(s)$ 的脉冲仅当振幅为 $A = 1$ 时才是暗孤子，所以初始输入并不是暗孤子对，输入脉冲在光纤中传播时一般地也不是暗孤子对。只是为了简单起见，一概统称为暗孤子对。

图 1 是 $q_0 = 10$ 的暗孤子对在用光纤放大器周期补偿损耗的光纤中传播的波形演化。对于脉宽为 50 ps 的孤子，与 $\zeta = 60$ 相应的实际传播距离是 $315 \times 60 = 18900 \text{ km}$ ，在这段距离内，总共有 540 个放大周期。图 2 是 $q_0 = 4$ 的暗孤子

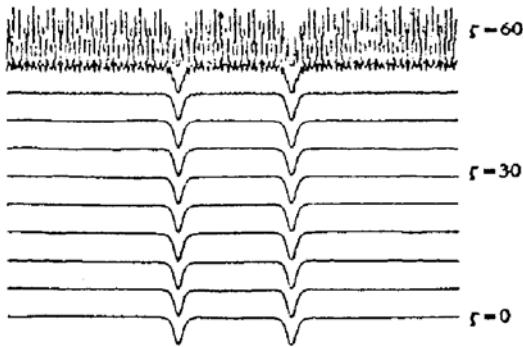


Fig. 1 Wave-form evolution of a dark soliton pair with initial interval $2q_0 = 20$ propagating down a fiber, whose loss is periodically compensated by using optical fiber amplifiers. ($\Gamma = -7.245$, $\zeta_0 = 0.11$, the gain of a amplifier is 7 dB , the soliton's initial amplitude is 1.5 , $\zeta = 60$)



Fig. 2 The initial interval of a dark soliton pair is $2q_0 = 8$, other conditions are same as in the Fig. 1

对的情况, 除 q_0 不同外其它所有的条件都与图 1 相同。可以看出, 暗孤子对在这种周期集总放大系统中传播时不能完全象亮孤子那样维持“动态孤子传输”的特性, 暗孤子对的亮背景会产生由自激引起的噪声状随机起伏。而且, 研究发现, 对于 $q_0 = 2$ 的情况, 当 $\zeta > 10$ 时, 就开始产生噪声, 所以, 两个孤子的间隔越小, 这种随机噪声越早发生。由于这种噪声已几乎把信号淹没, 对于通信来说, 当然是不能允许的。

3 法布里-珀罗滤波器对自激噪声的抑制

在亮孤子传输实验中, 使用光学滤波器与光纤放大器相配合, 可以有效地减小 Gordon-Haus 效应^[8]。据考察, 上述的暗孤子亮背景的随机起伏与放大器的自发辐射噪声有大致类似的特征, 估计, 如果在暗孤子的传输中也使用光学滤波器与光纤放大器相配合, 不仅会减小 Gordon-Haus 效应, 也会对亮背景的自激噪声有一定的抑制作用。下面将考察在每个光纤放大器处都配用法布里-珀罗标准具作为这种光学滤波器所产生的效果。

法布里-珀罗滤波器的传递函数可近似表示为:

$$H_{FP} = 1/[1 - i 2\Omega/B_{FP}] \quad (5)$$

$$\Omega = (\omega - \omega_0)T/1.763 \quad (6)$$

式中 Ω 为孤子单位的圆频率, ω_0 为滤波器透过峰对应的实际的圆频率, T 为孤子的脉宽, B_{FP} 为孤子单位的滤波器的通带宽度。文献[8]取滤波器透射带宽为亮孤子频谱带宽的 10 倍。在孤子单位中, 亮孤子的谱宽为 $B_b = 2 \times 1.763/\pi$, 但暗孤子的谱宽尚无据可查。当取暗孤子传输系统中的法布里-珀罗滤波器的通带宽度 $B_{FP} = 10 B_b$ 时, 计算模拟的结果发现, 暗孤子的波形有很大的畸变, 及至把 B_{FP} 增加到 $40 B_b$ 时, 畸变消失。图 3 所示, 除在每个光纤放大器之后接一个通带宽度为 $80 \times 1.763/\pi$ 的法布里-珀罗滤波器外, 其余条件均与图 2 相同。图中, 孤子对中心位置随 ζ 的增加而右移, 说明法布里-珀罗滤波器的引入使孤子产生了附加延时, 这是由法布里-珀罗滤波器的传递函数是复数所造成的。同时, 法布里-珀罗滤波器的引入改变了暗孤子相互作用的性质。本来, 暗孤子的互作用力是一种排斥力^[3], 而且, 当 $q_0 = 4$ 时, 在 $\zeta = 60$ 的范围内实际上看不出两孤子的间隔有什么变化。现在, 暗孤子的互作用力变成了吸引力, 孤子间隔也有较明显的变化(在 $\zeta = 60$ 处间隔大约减小了 17.3%)。图 4 是把孤子对的初始间隔加大, 使 $q_0 = 10$ 的情形。在这种情况下, 在 $\zeta = 60$ 处间隔只减小了大约 3.9%。把法

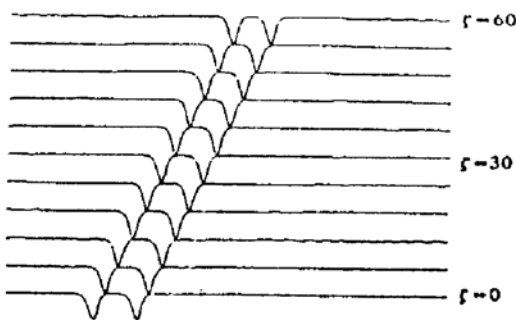


Fig. 3 Wave evolution of a dark soliton pair within $\zeta = 60$, every optical fiber amplifier is followed by a F-P filter, other conditions are same as in the Fig. 2

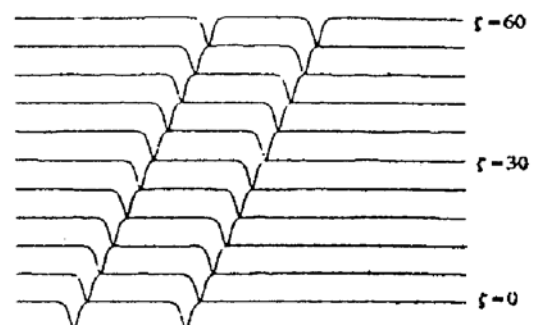


Fig. 4 The initial interval of a dark soliton pair is $2q_0 = 20$, other conditions are same as in the Fig. 3

布里-珀罗滤波器的通带宽度再加大一倍可使间隔的这种变化大大减小,但亮背景已见微弱的起伏。

结 论 在用光纤放大器提供集总增益周期补偿损耗的光纤系统中传输时,暗孤子对的亮背景会产生自激噪声。采用具有适当通带宽度的法布里-珀罗滤波器,可以消除这种噪声。法布里-珀罗滤波器的引入还使暗孤子的互作用由排斥变为吸引。其作用力不仅随孤子初始间隔的增大而减小,也随法布里-珀罗滤波器通带宽度的增加而减小。

参 考 文 献

- [1] V. E. Zakharov, A. B. Shabat, Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media. *Sov. Phys. JETP*, 1972, 5 : 364~372
- [2] A. Hasegawa, F. Tappert, Transmission of stationary nonlinear optical pulse in dispersive dielectric fibers I. Normal dispersion. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 23(4) : 171~172
- [3] W. Zhao, E. Bourkoff, Interaction between dark solitons. *Opt. Lett.*, 1989, 14(24) : 1371~1373
- [4] W. Zhao, E. Bourkoff, Generation, propagation, and amplification of dark solitons. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, 9(7) : 1134~1144
- [5] M. Lisak, D. Anderson, B. A. Malomed, Dissipative damping of dark solitons in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1991, 16(24) : 1936~1937
- [6] J. P. Hamaide, Ph. Emplit, M. Haelterman, Dark-soliton jitter in amplified optical transmission systems. *Opt. Lett.*, 1991, 16(20) : 1578~1580
- [7] W. Zhao, E. Bourkoff, Periodic amplification of dark solitons using stimulated Raman scattering. *Opt. Lett.*, 1989, 14(15) : 808~810
- [8] D. Marcuse, Simulations to demonstrate reduction of the Gordon-Haus effect. *Opt. Lett.*, 1992, 17(1) : 34~36

Periodic Compensation to Dissipative Damping of Dark solitons

Qu Linjie Qu Xin Yu Keming

(Department of Precision Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 30 April 1994)

Abstract Dark-soliton propagation in fibers is investigated simulatively, in the case of its dissipative damping is periodically compensated by using optical fiber amplifiers. Self-excited noises will grow on bright backgrounds of dark-soliton pairs when they are propagating in the system. Employing of Fabry-Perot filters matched with optical fiber amplifiers can eliminate the noise and support long-distance stational propagation of dark solitons.

Key words dark soliton, loss compensation, optical fiber amplifier.