

基于不同色散光纤的光纤链的孤子传输研究*

余建军^{1, 2} 杨伯君² 管克俭¹ 张晓光² 杨启敏²

1, 北京邮电大学无线电工程系, 北京 100088
2, 北京邮电大学基础科学部, 北京 100088

摘 要 对不同色散光纤组成的光纤链在放大距离内的孤子传输进行了数值和实验研究, 结果表明: 不同的光纤组合有着不同的结果, 因此在孤子传输时存在着合理地组合不同色散光纤的问题, 而且即使同一根由不同色散光纤组成的光纤链, 当入纤方向和出纤方向交换时, 实现孤子传输所需要的能量及孤子传输的稳定性也是不一样的。

关键词 色散位移光纤, 光纤链, 光孤子, 啁啾。

1 引 言

孤子脉冲在光纤中的传输演化通常用非线性薛定谔方程来分析, 一般将光纤参数用其平均值来处理。然而色散一般会随位置而变化, 因此更精确的做法应考虑色散参数随距离的变化。Hasegawa 等人对于长距离的光孤子传输假定色散随距离周期性变化^[1], Mollenauer 则对色散进行分段平均^[2]。他们得出的结论是: 只要放大距离远大于孤子周期, 一定的色散变动对长距离的光孤子传输稳定性影响不大。但孤子既可能用于长距离通信, 也可能用来作短距离、大容量通信。本文讨论孤子在不同色散光纤组成的光纤链内传输一个放大距离时孤子的稳定性, 以及为了实现一阶孤子所需要的能量。本文考虑由四段不同色散参量组成的色散位移光纤链。当这四段色散位移光纤以不同的组合时, 研究孤子在光纤链中的传输稳定性, 以及形成孤子传输所需要的初始光功率。用实验证实了数值分析得到的部分结果。

2 理论和数值分析

为了与实验比较, 选取以下参数做为理论和数值分析的基础。

光脉冲中心波长 $\lambda = 1.556 \mu\text{m}$, 初始光脉冲形状为双曲正割形, 脉宽为 10 ps, 剩余啁啾 c 为 -0.25, 重复频率取 1 GHz 和 20 GHz 两种, 脉冲的峰值功率连续可调。光纤由以下四段组成, 色散参量分别为 1) $D_1 = -0.5 \text{ ps/nm/km}$, 2) $D_2 = 0.5 \text{ ps/nm/km}$, 3) $D_3 = 1.0 \text{ ps/nm/km}$, 4) $D_4 = 1.5 \text{ ps/nm/km}$, 每段长度均为 10 km, 光纤损耗均为 0.3 dB/km, 光纤有效面积 $60 \mu\text{m}^2$, 克尔系数 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。四段光纤平均色散参量为 0.625 ps/nm/km 。

* 国家科委863高科技项目和邮电部重点科技资助项目。

收稿日期: 1996-11-03; 收到修改稿日期: 1997-03-10

之所以选择一段光纤是正常色散光纤一方面是为了研究光脉冲在这种具有正常色散光纤的光纤链的传输特性, 另一方面是因为在实验中有这种情况。因为要得到没有初始啾啾的脉冲有困难, 所以考虑了脉冲的初始啾啾。由这四段光纤可以组成四种典型的结果, 如图1所示。

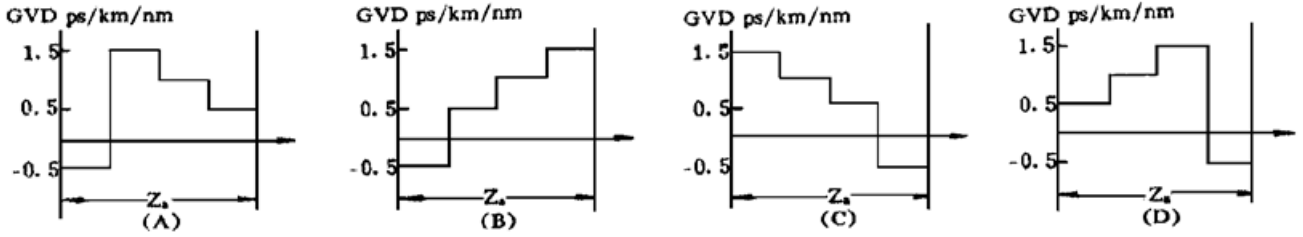


Fig. 1 Four kind configurations of different fiber chain (Z_a represents an amplifier spacing)

超短光脉冲在单模光纤中满足的方程为非线性薛定谔方程。对于一个有负啾啾的双曲正弦形初始脉冲可用下式表示:

$$U(0, t) = \text{sech}(t/t_0) \exp(-ict^2/2t_0^2)$$

式中 c 为线性啾啾参量, t_0 为初始脉宽。以图1的四种模型为基础, 用分步傅里叶变换的方法求解非线性薛定谔方程。

图2为不考虑初始啾啾、传输比特率为1 Gbit/s, 分别由(A)、(B)、(C)、(D)这四种光纤链作为传输媒质实现一阶孤子传输时脉冲在光纤中的时域演化的数值结果。图3为考虑啾啾的数值结果, 此时传输比特率为1 Gbit/s, 啾啾参量 $c = -0.25$ 。当传输比特率为20 Gbit/s时, 传输的稳定性与传输比特率为1 Gbit/s的情况相似。用这四种不同光纤链作为传输媒质实现一阶孤子传输所需要的入纤平均功率及传输稳定性如表1所示。

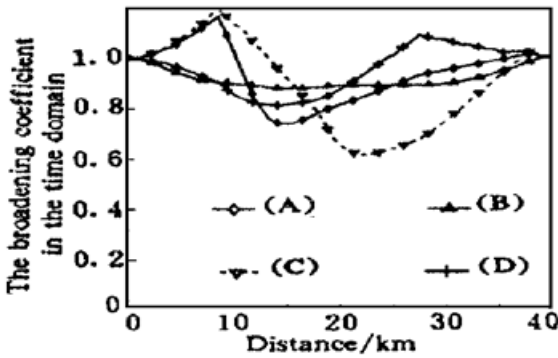


Fig. 2 Pulse evolution of the time domain in different fiber chain ($c = 0$)

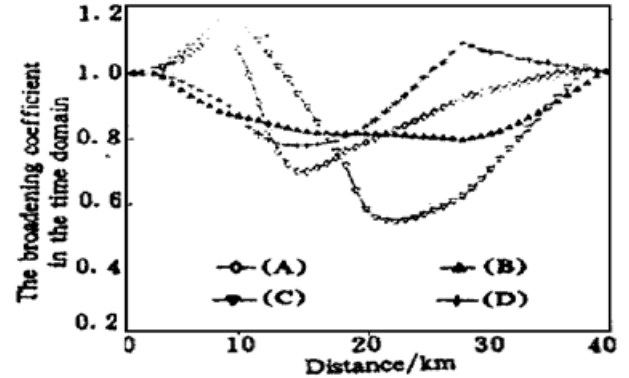


Fig. 3 Pulse evolution of the time domain in different fiber chain ($c = -0.25$)

Table 1. The input mean power to maintain the soliton transmission and the stability of soliton transmission in different dispersion fiber configurations

bit/(Gb/s)	1								20							
	0				- 0.25				0				- 0.25			
original chirp																
configuration	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)	(B)	(C)	(D)
input power /mW	0.30	0.32	0.36	0.39	0.29	0.43	0.49	0.38	5.5	6.8	6.9	5.2	7.2	9.5	9.3	7.1
stability*	III	I	IV	II	III	I	IV	II	III	I	IV	II	III	I	IV	II

* Note: I, II, III, IV represent stablest, stable, unstable, unstablest respectively.

从图2、图3和表1可以看到: 不论脉冲是否具有初始啁啾, 在不同的光纤链中孤子传输的稳定性是不一样的; 孤子传输稳定性与是否有初始啁啾关系不大; 在不同的光纤链中为了实现一阶孤子传输所需要的入纤平均功率不相同, 而且如果脉冲具有初始啁啾则需要更大的入纤平均功率; (A)和(D)以及(B)和(C)组成结构只是入纤方向与出纤方向换了一下方向, 但是为了实现一阶孤子传输所需要的能量却是不同的, 而且脉冲在色散链中传输稳定性也不一样。本文讨论的放大器距离仅为40 km, 孤子脉冲在经过一个放大器间距后脉冲都能够恢复到入纤时的宽度。如果当放大间距加大到80 km时(保持四段光纤长度相等, 即每段长度均为20 km), 孤子脉冲在经过一个放大器间距后, 无论入纤功率多大, 脉冲在经过(A)、(C)、(D)光纤链后脉冲不能恢复到入纤时的宽度, 也就是说此时的(A)、(C)、(D)不能够维持孤子的传输, 而在(B)结构中孤子能够维持, 因此可以得出的结论为: 1) 含有正常色散的光纤链可能不利于孤子的双向传输[(B)和(C)只是入纤方向不同], 有关这一结论的进一步讨论将在另文论述^[3]; 2) 即使光纤链中含有正常色散光纤, 光纤色散递减(色散参量从正最大到负数)也有利于孤子的稳定传输[光脉冲在(B)光纤链中传输最稳定]; 3) 当入纤光脉冲具有初始啁啾时, 光脉冲在不同色散链传输时传输将有一定的变化, 特别是在入纤的那段距离里; 4) 由于有初始啁啾, 一部分能量将会形成色散波损耗掉, 因此形成一阶孤子传输所需要的初始入纤平均功率都要比没有初始啁啾时的情况要大; 5) 啁啾脉冲在传输过程中, 能量将会有损耗, 由于(A)和(D)在传输过程中的啁啾不相同, 所以损耗的能量也不相同, 实现一阶孤子所需要的能量也不同。(B)和(C)情况与(A)和(D)情况相似。如果1 Gbit/s、脉宽为10 ps光脉冲在一根长为40 km、色散均匀、色散参量为0.625 ps/nm/km(相当于四段光纤的平均色散)传输, 实现一阶孤子传输所需要的能量为0.23 mW(初始啁啾 $c = 0$)和0.31 mW(初始啁啾($c = -0.25$)), 可见在(A)、(B)、(C)、(D)中为了实现孤子传输所需要的能量均要大于在这种具有单一色散的光纤所需要的能量, 这有利于提高脉冲的信噪比^[4]。在以后的实验中将证明由于入纤方向的不同带来实现一阶孤子传输所需要的入纤能量的不同的这种现象。

3 实验和实验结果

实验装置如图4所示。实验中采用正常色散光纤消啁啾^[5], 消啁啾后剩余啁啾为-0.25, 实验系统中所用激光器为武汉邮科院生产的增益开关分布反馈半导体激光器(DFB-LD), 阈值电流为25 mA, 静态谱宽0.08 nm, 动态谱宽0.38 nm。电信号重复频率1 GHz。所用取样示波器为Tektronix公司生产、能测量最高频率为2.5 GHz。频谱仪为惠普公司生产、最小精细度0.1 nm。光放大器为采用了两个1480 nm大功率半导体激光器作泵浦的掺铒光纤放大器, 小信号增益大于30 dB, 饱和输出平均光功率9 dBm, 噪声系数小于6 dB。强度自相关测量装置由迈克尔逊干涉仪、倍频晶体、滤光片、光电倍增管和X-Y记录仪构成。倍频晶体为LiIO₃晶体, 系统测量脉宽的精度为0.1 ps。用取样示波器测量脉冲重复频率, 频谱仪测量光脉冲谱宽, 用自相关仪测量超短光脉冲脉宽。所用色散位移光纤(DSF)由武汉邮科院生产, 这两段色散如图4(b)所示。用自相关仪测得消啁啾后脉宽为10 ps(光脉冲形状为双曲正割型), 脉冲自相关曲线如图5(a)所示。色散位移光纤参数为1) 长度 $L = 11.178$ km, 色散参量为 $D = -0.12$ ps/nm/km; 2) 长度为 $L = 11.73$ km, 色散参量 $D = 1.2$ ps/nm/km。色散参量均在中心波长为1.556 μm 处测得。考虑到接头损耗, 色散位移光纤损耗均为0.3 dB/km。所有光纤有效面积为56 μm^2 , 光纤有效折射率系数 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ m²/W(所有光纤参数均由武汉

邮科院测得)。所有光纤耦合器均为1:9。

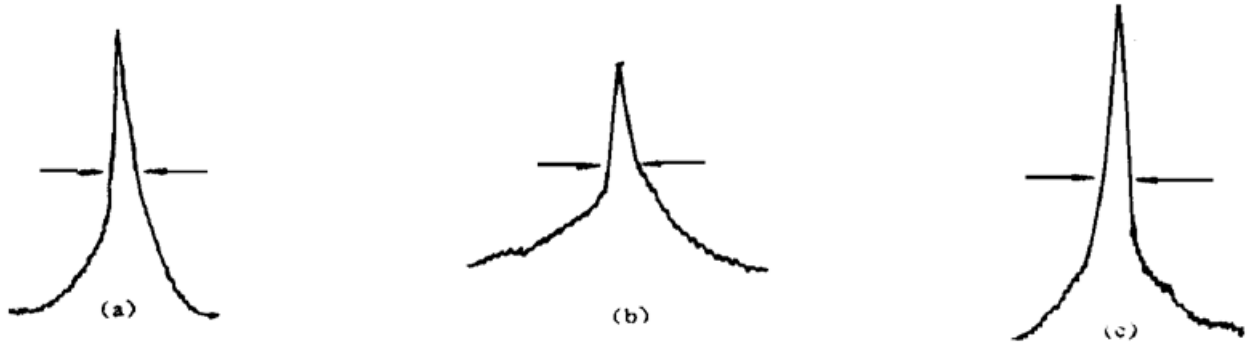


Fig. 4 The schematic diagram of the experiment setup

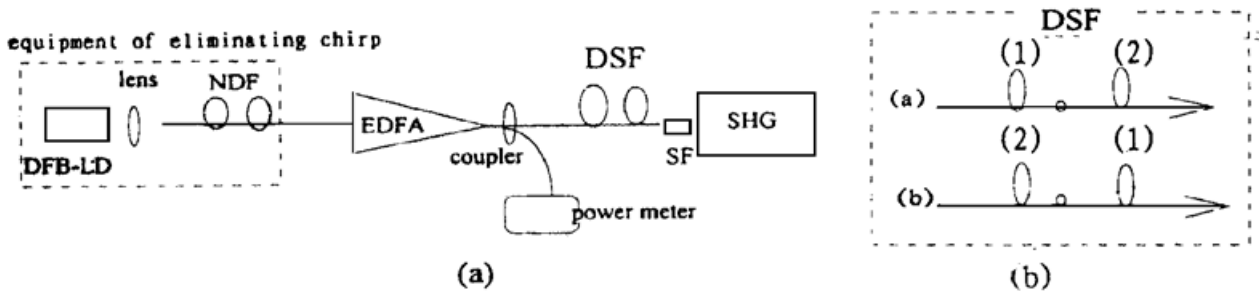


Fig. 5 (a) The autocorrelator trace of the soliton after eliminating chirp, (b) The autocorrelator trace of the soliton after propagating over (A) fiber chain. (c) The autocorrelator trace of the soliton after propagating over (B) fiber chain

采用光纤链(A)传输孤子, 实现一阶孤子需要的入纤平均功率为 0.18 mW, 此时测量得到的脉冲自相关曲线如图 5(b) 所示, 脉宽为 10 ps。当采用光纤链(B)传输一阶孤子, 需要的入纤平均功率为 0.32 mW。此时测量得到的脉冲自相关曲线如图 5(c) 所示, 脉宽为 10 ps。可以看到, 用这两种方式实现一阶孤子所需要的能量是不一样的, 而且差别较大。由于(A)光纤链的第一部分为正常色散光纤, 当负啁啾脉冲在正常色散光纤中传输时, 由于负啁啾脉冲在正常色散的光纤中传输呈现压窄的趋势, 因而有益于脉冲的压缩, 而且(A)光纤链的后一部分的光纤长度和色散不大, 因而在(A)光纤链中传输所需要的能量较小(注: 此时光纤的结构与数值分析部分提出的四种模型的结构不完全相同, 尽管它们都含有正常色散光纤, 但是它们含有的反常色散光纤的色散和正常色散光纤的色散 D 与光纤长度 L 的乘积 DL 是不相同的。在数值分析部分提出的四种模型中的反常色散光纤长度 L 较长, 而反常色散平均参量 D_{ave} 与实验中所用的反常色散的光纤的色散 D 基本相同, 因而数值模型中的反常色散光纤具有较大的 DL 值, 且在数值模型中的反常色散光纤是由三种不同色散的光纤组成)。如果要得到在(A)和(B)光纤链中实现一阶孤子传输的入纤功率的定量结果必须用数值解, 通过数值分析发现作者入纤功率的数值结构与实验结果基本相同。图 6 为采用两种不同方式进行实验测量得到入纤平均能量和出纤脉宽的关系图, 曲线(a)、(b)分别代表在实验中的(A)、(B)

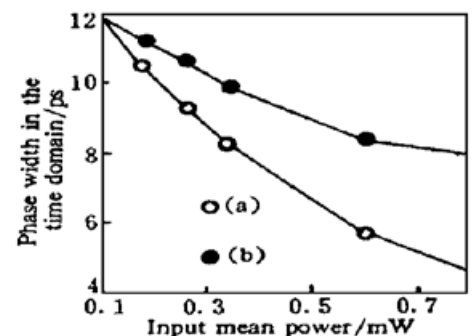


Fig. 6 The relationship between input mean power and output pulse width

两种色散链中传输的结果, 可以看到两者存在一定的差异。在相同的入纤功率下, 孤子经过(A)链传输后有较小的脉宽, 而且入纤功率越大, 经过(A)、(B)后孤子宽度差别越大, 这可以用孤子的阶数与孤子脉宽的关系来解释。由于在(A)光纤链中实现一阶孤子能量较小, 因而在相同的入纤功率下, 孤子的阶数越高, 因而经过(A)光纤链后光脉冲的宽度越窄(此时的孤子的平均周期为 460 km 远大于 20 km, 因此脉冲在 20 km 内基本处于压缩阶段)。

结 论 对基于不同色散光纤的光纤链中的孤子传输进行了数值分析, 表明对于不同的光纤组合, 脉冲在光纤链中传输稳定性、以及为了实现一阶孤子传输所需要的能量是不相同的。为了实现孤子的稳定传输, 作者用实验证明了不同组合需要不同能量才能实现一阶孤子传输这一结论。由此可以看到, 孤子传输时如果光纤色散有差异, 则存在着光纤的合理组合问题, 不同的组合将带来不同的结果。

参 考 文 献

- [1] Hasegawa A, Kodama Y., Guiding-center soliton in fibers with periodically varying dispersion. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(18): 1385~ 1387
- [2] L. F. Mollenauer, S. G. Evangelides, H. A. Haus Long-distance soliton propagation using lumped amplifiers and dispersion shifted fiber. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(9): 194~ 197
- [3] Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian *et al.*, Dispersion-allocated soliton technology with long amplifier spacing and long distance. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 952~ 954
- [4] Yu Jianjun, Guan Kejian, Yang Bojun, Allocating different normal and abnormal dispersion fiber with the dispersion management. *Microwave and Optical Technology Lett.*, 1997, **15**(2): 106~ 110
- [5] Yu Jianjun, Yang Qimin, Yang Bojun, The theoretical and experiment research on using normal dispersion fiber to eliminate chirp. *Chinese J. Lasers*, 1997, **B6**(1): 21~ 28

Soliton Transmission Based on the Chain of Different Dispersion Fiber

Yu Jianjun^{1, 2} Yang Bojun² Guan Kejian¹
Zhang Xiaoguang² Yang Qimin²

1, Department of Radio Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088

2, Department of Basic Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088

(Received 3 November 1996; revised 10 March 1997)

Abstract Soliton transmission based on the chain of different dispersion fiber was numerically and experimentally studied. The results showed that the different assembly of different dispersion fiber had different result. There was a reasonable assembly when fibers had different dispersion. Even if it was the same fiber chain, it would need different energy and have different stability to achieve soliton transmission if the direction of the input fiber was exchanged with the direction of output fiber.

Key words dispersion shifted fiber, fiber chain, soliton, chirp.