

文章编号:1001-5078(2007)04-0351-04

基于初始载波频移抑制孤子互作用

钟鸣宇, 曹文华

(五邑大学信息科学研究所, 广东 江门 529020)

摘要:介绍了一种基于孤子初始载波频移抑制孤子相互作用的方法。通过分析,发现孤子串最外层的两个孤子受相互作用影响最大,提出将孤子串中最外层的两个孤子进行初始的频率移动,较好地抑制了孤子相互作用。分析了频移量对传输距离的影响,结果表明对于具体的系统,存在最佳频移量。

关键词:孤子相互作用;初始频率移动;最大传输距离;孤子相对间隔;数值模拟

中图分类号:TN929

文献标识码:A

Suppression of Soliton Interaction by Initially Frequency Shifts

ZHONG Ming-yu, CAO Wen-hua

(Institute of Information Science, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: A scheme which reduced soliton interaction by initially soliton carrying frequency shifts was introduced. The interaction of different soliton sequence was studied. The result show that the two solitons most outside were influenced mostly, so the introduction of a frequency shifts on them is suggested. The effect of frequency shift was studied, and the result show that there is an optimal amount of frequency shift to a certain system.

Key words: soliton interaction; initially frequency shifts; maximum transmission distance; normalized soliton position; numerical simulation

1 引言

光孤子通信克服了色散对线性通信系统传输距离的限制,极大提高了光通信系统的比特率和最大传输距离,成为公认的第五代光通信系统。然而,孤子间的相互作用使得通信系统的误码率上升,传输距离变短。为了在相同码率下获得尽可能大的传输距离,已经对孤子间相互作用进行了广泛的研究^[1-2,4]。事实上,通过抑制孤子相互作用,通信系统单信道码率已经达到 40Gbit/s,中继距离超过 10200km。如何抑制孤子相互作用将一直是研究的热点。

当相邻的两个孤子具有相同的幅度和相位时,前面的孤子频率变低、速度变慢,后面的孤子频率升高、速度变快,造成两个孤子互相靠近。如果在光纤

输入端将孤子的载波频率向孤子频率变化的相反方向移动一个值,将减缓相邻孤子频率的变化,从而抑制孤子相互靠近。本文分析了不同长度孤子串中相邻孤子互作用情况,在此基础上提出对孤子串中的特定孤子的载波进行初始频率移动抑制孤子相互作用,延长孤子最大传输距离。

2 理论模型

假定光纤损耗得到周期放大器提供的增益补

基金项目:广东省自然科学基金(No. 04011761, 06029820)资助课题。

作者简介:钟鸣宇(1982-),男,现在五邑大学信息科学研究所攻读硕士研究生,研究方向是高速光纤通信系统。E-mail: ap0005238. c. b@163. com

收稿日期:2006-09-12; **修订日期:**2006-10-12

偿,孤子的相互作用可由如下归一化非线性薛定谔方程描述:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = 0 \quad (1)$$

式中, u, ξ, τ 分别为归一化脉冲包络复振幅、归一化距离和归一化时间,可分别表示为:

$$u = \left[\frac{\gamma T_0^2}{|\beta_2|} \right]^{\frac{1}{2}} A = \frac{A}{\sqrt{P_0}}, \xi = \frac{|\beta_2| z}{T_0^2}, \tau = \frac{t - z/v_g}{T_0} \quad (2)$$

式中, A 为脉冲的实际振幅; z 为传输距离; t 为时间; v_g 为脉冲群速度; P_0 为输入脉冲峰值功率; 对双曲正割脉冲, $T_0 = T_{FWHM}/1.76$ 为脉冲初始半宽度; γ 为光纤的非线性系数。理论模型忽略了高阶效应造成的影响。

3 计算结果与分析

在实际通信系统中,用于通信的孤子串是随机序列,孤子串长度不确定,要完整研究每种孤子串的相互作用情况是不实际的。理论研究表明,在相同情况下三个孤子相互作用比两孤子相互作用弱。如图1所示,孤子B被来自孤子A和孤子C的对称作用力固定在原处,而不是向两侧的孤子移动,造成孤子碰撞的距离延长。

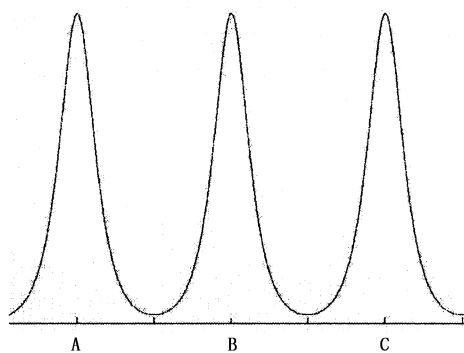


图1 三个孤子相互作用时,孤子B由于受到孤子A和孤子C的对称作用而静止

当相邻的孤子数多于3个时,其最外侧孤子受孤子相互作用的影响,与图1中孤子A和孤子C所受的影响类似。因此,整个通信系统中的孤子互作用造成的定时抖动,可以近似等效划分为两类:两个孤子互作用造成的定时抖动和3个孤子互作用造成的定时抖动^[4]。

当两个相邻孤子具有相同的幅度、相位时,孤子间产生周期性的相互吸引和碰撞,此时孤子互作用对系统的影响最大。从光纤输入端输入具有如下形式的两孤子脉冲:

$$u(0, \tau) = \text{sech}(\tau - q_0) + \text{sech}(\tau + q_0) \quad (3)$$

其中, $2q_0$ 代表孤子间的初始间距, q_0 与孤子间实际时间间隔 t 的关系是 $t = T_0 q_0$ 。取 $q_0 = 5$, 得到孤子对的演化图如图2所示。

为了抵消相邻孤子相互吸引造成的影响,将两孤子的载波向相反方向进行一个微小的频移,此时输入的孤子脉冲形式变为:

$$u(0, \tau) = \text{sech}(\tau - q_0) e^{i\delta\tau} + \text{sech}(\tau + q_0) e^{-i\delta\tau} \quad (4)$$

其中, δ 表示孤子的初始频移系数,与实际频移 Δf 的关系为 $\delta = 2\pi\Delta f T_0$ 。将输入的孤子对进行初始频移,频移系数取 $\Delta f = 200\text{MHz}$, 得到如图3所示的孤子对演化图。对比图2与图3,两孤子在没有进行初始频移时,在120个色散长度附近发生碰撞,进行了200MHz的初始频移后,碰撞距离超过170个色散长度。

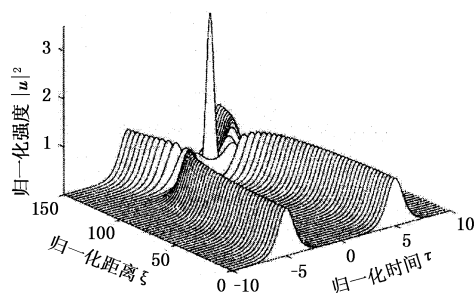


图2 没有初始频移时,孤子对在150个色散长度上的演化

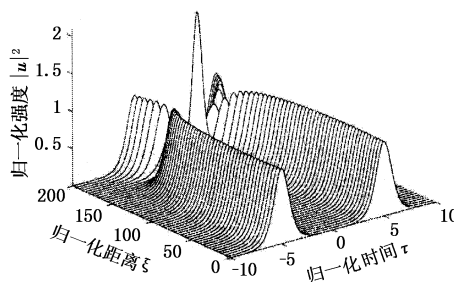


图3 初始频移系数取 $\Delta f = 200\text{MHz}$ 时,孤子对在200个色散长度上的演化

作为评估性能的重要参数,希望知道一个方案能在多大程度上延长孤子传输距离。定义孤子偏离初始位置的比例系数为 $\eta = |\Delta q|/q_0 \times 100\%$, 孤子偏移初始位置小于 η 时所能传输的最远距离为 $\xi_{\max}$, 得到图像如图4所示。

从图4可以看到,如果选取一定的孤子位置偏移量,例如 $\eta = 10$, 进行了初始频移的孤子最大传输距离明显长于没有进行初始频移的孤子,并且初始频移越大,最大传输距离也越大。从图4还可以发现,进行了初始频移之后,孤子的最大传输距离会在

某个偏移量处突然增大(例如当 $\Delta f = 300\text{MHz}$, 在 $\eta = 7$ 附近, 孤子最大传输距离突然上升), 结合图 3 分析, 认为孤子传输到该位置时, 孤子间相互作用力的性质正由初始频移主导的排斥向孤子间互作用本身造成的吸引过渡, 此时, 两种作用力基本抵消, 使得孤子的位置几乎不变。如果初始频移的作用是在后面传输的过程中逐渐被抵消, 那么初始频移越大, 孤子传输距离发生突变也应该越慢, 图 4 正好证明了这种推论。

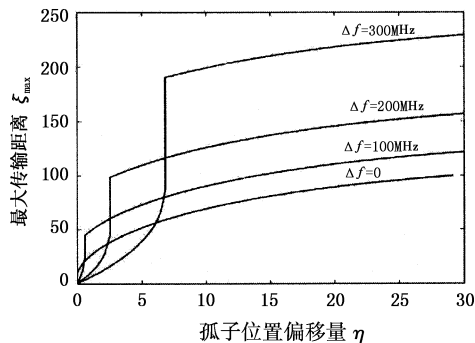


图 4 不同初始频移下孤子传输距离随孤子偏移初始位置的变化

因此, 初始频移不是越大越好。从图 4 中可以清楚看到, 当 $\eta = 5$ 时, 没有进行孤子初始频移的孤子对比初始频移 $\Delta f = 300\text{MHz}$ 的孤子对传输得更远。由上面分析知道, 孤子的初始频移越大, 孤子传输距离发生突变要求的位置偏移量也越大。假如系统要求 $\eta \leq 10$, 如果施加的初始频移太大, 以致孤子偏移量 $\eta > 10$ 时, 孤子的传输距离还没有发生突变, 其传输距离将反而比没有进行初始频移时小, 因此, 要根据系统的具体要求选择合适的初始频移量。

考虑在 20Gbit/s (即比特槽宽度为 $T_b = 50\text{ps}$) 的孤子通信系统中, 使用 $\beta_2 = -1\text{ps}^2/\text{km}$ 的光纤, 脉冲宽度为 $T_0 = 5\text{ps}$ (T_0 与孤子半极大宽度 T_{FWHM} 的关系为: $T_{\text{FWHM}} \approx 1.763T_0$) 的孤子, 则孤子间的归一化间距为 $q_0 = 5$ 。设通信系统允许孤子最多可以偏移比特槽中心位置 10%, 即 $\eta = 10$ 。在没有初始频移的情况下, 孤子传输了大约 1700km , 如果将孤子进行 $\Delta f = 300\text{MHz}$ 的初始频移动, 这个最大传输距离增加到约 5000km , 是没有初始频移时的大约 2.8 倍。

利用上述参数研究 3 个孤子相互作用的情况, 发现在偏移量 $\eta = 10$ 的位置, 当 $\Delta f = 100\text{MHz}$ 时, 三孤子传输的最大距离比两孤子的大, 这是因为三孤子间的相互作用力较两孤子互作用力弱, 相同的初始频移对三孤子互作用的效果比两孤子互作用更明显, 如图 5 所示。但是当 $\Delta f = 300\text{MHz}$ 时, 传输距离

反而不如两孤子远。按理说, 三孤子间相互作用力更小, 进行初始频移对孤子传输的改善也应该更大才对。通过研究发现, 此时初始频移造成的相互排斥作用过分强烈, 造成孤子间互作用力性质由排斥变为吸引之前, 三孤子间的相对距离增加过多。因此, 最大传输距离反而不如两孤子互作用时长。

计算结果还表明孤子串的长度对该方案的效果也有影响。由前面的分析, 按孤子相互作用造成的定时抖动将孤子互作用近似分为两类: 2 个孤子间的相互作用和 3 个孤子间的相互作用。同时认为孤子互作用对通信系统的限制, 主要来源于孤子串最外层孤子偏离初始位置。然而, 当孤子串的长度大于 3 时, 将最外层孤子进行初始频移后, 最外层孤子的偏移不再是限制传输距离的主要原因, 内层孤子间的相互作用力造成的影响变得突出。例如, 当孤子串的长度为 4 时, 如图 6 所示, 如果将外层的孤子 A 和孤子 D 进行初始频率移动, 其内层的孤子 B 和孤子 C 受孤子 A 和孤子 D 的影响减小。

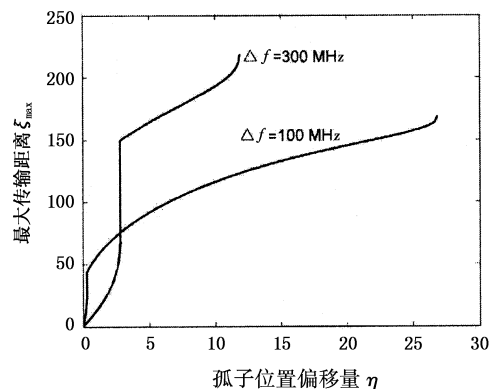


图 5 初始频移 $\Delta f = 100\text{MHz}$ 和 $\Delta f = 300\text{MHz}$ 情况下, 三孤子最大传输距离随孤子位置偏移量的变化

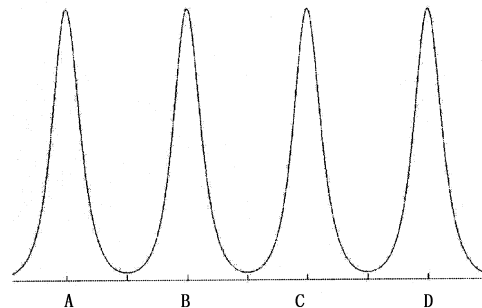


图 6 对孤子 A 和 D 进行初始频移后, 孤子 B 和 C 的相互作用受孤子 C 和 D 的影响减小

为了保持该方法的效果, 对于上述情况, 一种办法是适当减小孤子 A 和 D 的频移量, 保持孤子 A 和 D 对孤子 B 和 C 的影响, 使孤子 B 和 C 受到的作用力相对平衡^[4]。同时自然而然想到, 如果对孤子 A

和D施加初始频移的同时,对B和C也施加初始频移,也许可以进一步提高传输距离。数值模拟证明,该方法是行得通的。需要注意的是,孤子A和D的频移量需比孤子B和C大。该方法还可进一步延伸到孤子串长度更长的情况,根据孤子与孤子串中点的距离进行初始频移,频移的量由内层到外层依次增大。

4 结 论

本文应用分步傅里叶方法,对基于初始载波频移抑制孤子互作用的方法进行了数值模拟,结果表明初始频移可以延长孤子的传输距离。为了使该方法的效果最佳,选择合适的频移量很重要。频移量不宜太小,否则对传输距离的提高不够。频移量的选择也不宜太大,需要考虑以下两个方面:(1)系统对孤子偏离初始位置的容忍能力;(2)对孤子串最外侧孤子施加初始频移后,孤子间排斥的强度和孤子本身相互吸引叠加的结果。此外,如果孤子串的长度不小于4时,内层孤子的相互作用不可忽略,作

(上接第350页)

紫外激光脉冲能量、脉冲频率与光栅刻制时间的关系,获得了最佳的配置比例关系。发现当激光脉冲能量为300mJ、频率8Hz时,180s的光栅刻制时间最为适宜,实验最后得到的光纤光栅的透射谱如图5所示,光栅反射率已达到99.96%,带宽0.1nm,中心波长为1083.2nm。

5 结束语

本文介绍了光纤的增敏措施、光纤光栅制作方法以及光纤光栅制作的工艺等,分析了各种制作方法的优缺点,并通过实验成功制作出了单模光纤光栅,实验结果非常好,光栅反射率达到了99.96%,带宽为0.1nm。光纤光栅是一种新型的光无源器件,在光纤通信、光纤传感及光纤光学等光纤技术领域有着广泛的应用前景,近年来成为了一个全球性的研究热点,获得了较大的发展与进步,因此了解光纤光栅制作知识和寻求光纤光栅的最佳制作方法具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 贾宏志,李育林,忽满利. 光纤光栅的制作方法[J]. 激光技术,2001,25(1):23-26.
- [2] 苑立波, Farhad A nsari. 光纤光栅原理与应用——光纤光栅制作方法[J]. 光通信技术,1998,22(4):312-

为对该方法的改进,以对孤子串中的孤子按由内层到外层依次增大的原则施加不同的初始频移,以进一步提高传输距离。

参考文献:

- [1] Pierre L F, Thierry G. Reduction of averaged soliton interaction forces by amplitude modulation[J]. Opt. Lett., 1993,18(8):583-585.
- [2] Morita I, Tanaka K, Edagawa N, et al. 40 Gb/s single-channel soliton transmission over transoceanic distance by reducing Gordon-Haus timing jitter and soliton-soliton interaction[J]. J. Opt. Soc. Amer. B., 1999,17(12):2506-2511.
- [3] Pinto A N, Agrawal G P, Rocha da J F. Effect of soliton interaction on timing jitter in communication systems[J]. J. Lightwave Technol., 1998,16(4):515-519.
- [4] Teixeira A L J, Agrawal G P, Rocha J R F. Increasing the transmission distance of soliton communication systems by selective frequency shifts[J]. Electron. Lett., 1996,32(21):1995-1997.
- [5] E Fertein, S Legoubin, M Douay S, et al. Shifts in resonance wavelengths of Bragg gratings during writing or bleaching experiments by UV illumination within germanosilicate optical fibre[J]. Electron. Lett., 1991(27):1838.
- [6] D L Williams, B J Ainslie, J R Armitage, et al. Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres[J]. Electron. Lett., 1993(29):45.
- [7] B Malo, J Albert, K O Hill, et al. Effective index drift from molecular hydrogen diffusion in hydrogen-loaded optical fibres and its effect on Bragg grating fabrication[J]. Electronics Letters, 1994(30):442.
- [8] 赵浩, 丁浩, 刘斌, 等. 载氢光纤光致折变布拉格光栅[J]. 光学学报, 1996,16(4):575-576.
- [9] Meltz G, Morey M, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical filters by a transverse holographic method[J]. Opt Lett, 1989(14):823-825.
- [10] Bennion J A R, Williams, L Zhang, et al. UV-written in-fiber Bragg gratings[J]. Optical and Quantum Electronics, 1996,28(2):93-135.
- [11] Govind P Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 282-316.
- [12] 宁提纲, 文冀萍, 赵玉成, 等. 光纤光栅写入技术的最新进展[J]. 光通信技术, 1999,23(4):282-287.