

文章编号: 1001-3806(2002)05-0367-03

色散管理孤子的传输特性

何 琼 王 晶

(青岛海洋大学物理系, 青岛, 266003)

摘要: 论述了色散管理孤子的传输原理, 并利用数值方法模拟了色散管理孤子在不同的传输模式中的传输, 研究了色散管理孤子特性及其应用。研究结果表明, 色散管理孤子具有很明显的周期性, 尤其采用平均路径色散为 0 的模型传输性能更佳。

关键词: 色散效应; 非线性效应; 色散补偿; 色散管理孤子

中图分类号: O473 **文献标识码:** A

Transmission characteristic of dispersion-managed soliton

He Qiong, Wang Jing

(Department of Physics, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

Abstract: The principle of the dispersion-managed soliton transmission is introduced. The transmission characteristic of the dispersion-managed soliton is analyzed by using numerical simulation. The result shows that the dispersion-managed solitons are periodic, and the transmission characteristic is the best in the model that path average dispersion is zero.

Key words: dispersion effect; nonlinear effect; dispersion compensation; dispersion-managed soliton

引 言

目前, 光纤线性通信已不能满足现在信息处理传输的要求, 因为它存在着两个主要的缺陷: 其一是光纤的色散, 其二是光纤损耗。由于 EDFA 的商用, 解决了损耗问题。因而光纤色散便成了实现超高码率信息传输的障碍, 限制了信号传播速率和通信容量^[1~4]。

有一种比较好的方法是利用色散补偿技术。色散补偿技术是指在孤子通信系统中通过在每个放大器之间附加一段具有较大色散值的正常色散光纤, 使放大器间的平均色散减小, 但色散值仍处于反常色散区, 以利用传输孤子, 控制因系统噪声引起的孤子到达时间抖动的积累, 结构简单方便, 并可采用波分复用技术提高通信容量; 另一种是在带宽限制放大控制方案的基础上, 在终端接上正常色散光纤, 但补偿量较小, 以减弱色散展宽。这种双重控制可达到最佳补偿效果; 最后一种是在每个光放大器前接一段正常色散光纤, 采用周期性喇曼放大分散补偿, 并接入滤波器作为辅助手段, 减少由于正色散补偿引起的波形畸变, 可达到理想的补偿效果, 是一种简

便而实用的传输控制方案。色散补偿控制方案中, 输入信号功率按传输段参数设计。无论是集中补偿或分散补偿, 正常色散光纤短, 色散量较大, 将引起较多色散波, 降低了系统信噪比(SNR)^[5,6]。

在这基础上, 有人又提出一种新的色散补偿控制方案——色散管理孤子(DM孤子)控制技术^[7~9]。它也是周期性分散补偿方案。一般正常色散补偿光纤较长, 色散量较小, 而沿系统平均色散还是负值, 输入功率按全程平均色散值来设计。这种方案的优点是, 孤子可以在局域正常光纤中传输, 突破了传统认为的孤子只能在反常色散光纤中传输的概念。通过合理系统设计, 可以得到较小平均色散, 较大色散长度, 较长中继距离, 较小时间抖动积累, 孤子在传输中显现周期性的压缩和展宽。DM孤子控制技术是光孤子和色散补偿的结合, 具有诸多的优势, 比如可提高系统的信噪比、抑制 Gordon-Haus 效应以及减少孤子间相互作用等。利用 DM孤子控制技术进行了现场直通传输试验, 是一种简便经济的系统技术, 具有诱人的应用前景^[8]。

讨论了色散管理孤子系统, 计算结果表明, 色散管理孤子在不同传输模式中的传输特性都很好, 实现了在色散管理周期上光脉冲都能恢复到原来的形状。故色散管理孤子具有很好的应用价值。

作者简介: 何 琼, 男, 1979 年出生。现在法国学习。

收稿日期: 2001-07-30; 收到修改稿日期: 2001-10-15

1 DM 孤子的传输理论

超短脉冲在色散管理系统中的传输可由非线性薛定谔方程描述:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma(z) |A|^2 A + iG(z)A \quad (1)$$

$$G(Z) = \frac{1}{2} \left[-\alpha + r \sum_{k=1}^N \delta(Z - Z_k) \right] \quad (2)$$

式中, α 为光纤损耗系数, γ 为光纤非线性系数, β_2 是光纤的色散系数, r 是放大器的增益系数, 并且 $r = \alpha Z_a$. 引入一个对初始脉宽 T_0 归一化的时间量 $\tau = T/T_0$ 和对色散管理周期长度归一化的距离量 $z = Z/L$; 利用下面定义引入归一化振幅:

$$A(z) = \sqrt{P_0} U(z, \tau) \exp \left[\int_0^z G(z') dz' \right] \quad (3)$$

归一化振幅 $U(z, \tau)$ 满足下面的方程:

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = d(z) \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} - c(z) |U|^2 U \quad (4)$$

$$d(z) = L \beta_2(z) / 2T_0^2 \quad (5)$$

$$c(z) = c_0 \exp \left[2 \int_0^z G(z') dz' \right] \quad (6)$$

$$c_0 = P_0 L \gamma(z) \quad (7)$$

在色散管理系统中, 若 $Z_a \ll L$, 因为色散管理周期长度比放大周期长度大得多, 所以, 可以将一个放大周期内的孤子平均, 用平均路径孤子描述孤子在色散管理系统的无损传输, 这样, 系统的色散管理问题和损耗问题可以分开考虑, 把这种情况称为无损模式. 在无损模式中 $c(z)$ 有如下形式:

$$c(z) = \frac{c_0(G-1)}{G \ln G}, \quad G = \exp(\alpha Z_a) \quad (8)$$

无损模式主要研究新的高容量长距离传输系统. 在这种系统中, 光纤一般采用色散比较小的光纤, 如色散位移光纤(DSF), 因此系统的色散管理周期可以做得很长. 已铺设的标准单模光纤(SMF)在 $1.55 \mu\text{m}$ 处有较大的色散, 约为 $-20 \text{ps}^2/\text{km}$, 如不采用色散补偿, 10Gb/s 的信号可以传输 60km , 40Gb/s 的信号只能传输 4km , 因此, 系统的色散管理周期不能很长. 下面将利用数值模拟分别讨论 DM 孤子的传输特性.

2 DM 孤子在不损耗色散管理系统的传输特性

首先, 研究了 10Gb/s DM 孤子在如图 1 所示的色散管理系统中的传输特性. 系统中每个色散管理

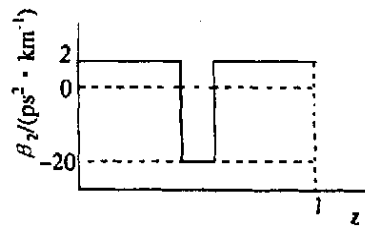


Fig. 1 Dispersion managed period

考虑到脉冲间相互作用, 取 $T_0 = 10 \text{ps}$.

Table 1 Parameters of the fiber

| | L/km | $\beta_2/(\text{ps}^2 \text{km}^{-1})$ | $\gamma/(\text{W}^{-1} \text{km}^{-1})$ |
|-----|---------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| DSF | 95 | 2 | 3.2 |
| SMF | 20 | -20 | 2.6 |

利用数值方法求解方程(4)和基本非线性薛定谔方程, 分别模拟光孤子在普通光纤和 DM 孤子系统中的传输, 这里均未考虑光纤的损耗.

在普通单模光纤中, 图 2a 给出了数值模拟光脉冲随传输距离的演化图, 可以看到脉冲仅能传输几百米, 就已发生了明显展宽, 进一步传输发生了脉冲分裂. 这是由于较大的色散导致的结果. 而光脉冲包络在无损耗 DM 系统中的传输变化由图 2b 表示. 图 2b 表明在此系统中, DM 孤子在一个色散管理周期内, 光脉冲经历了一个展宽和压缩过程, 在输出端 DM 孤子的脉宽基本恢复到原来的宽度, 但由于啁啾并没有完全恢复到 0, 其表现为经过一个色散管理周期后, 脉冲的边沿出现了起伏的变化. 这说明在经历了一个色散管理周期的传输后, 脉冲产生了剩余啁啾. 但可以通过预啁啾技术来解决这一问题. 在无损耗色散管理系统中, 一个色散管理周期长达 210km , 比普通光纤可传输距离长几百倍.

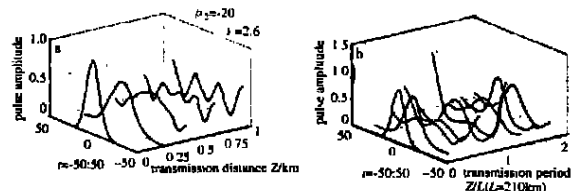


Fig. 2 Transmission of the optical pulse

a- SMF b- DM soliton system of nonattenuation

DM 孤子输入功率对其传输特性的影响很大, 大的输入功率有利于 DM 孤子长距离的传输. 因为孤子的峰值功率决定了非线性的强弱, 适当的提高系统的平均色散可以改善系统的传输特性, 但系统的平均色散不能太大, 绝对值一般小于 2, 因为 Gerdor-Haus 效应与光纤色散成正比. 另外, 色散管理周期不能太长, 一般应小于 250km 否则 DM

孤子在色散管理周期内的展宽会增大,从而增加孤子间的作用。

从以上的分析可以看出,决定 DM 孤子传输特性的因素很多,在设计系统时要综合考虑,才能减小这些限制因素的影响,从而最大限度地提高系统的传输特性。

3 DM 孤子在路径平均色散为零系统中的传输特性

对于经典孤子系统而言,其信噪比(SNR)和 Gordor Haus 效应是决定系统传输特性的两个重要因素,提高 SNR 和减小 Gordor Haus 效应是经典孤子传输系统要完成的两个主要任务。SNR 与孤子的峰值功率成正比,经典孤子的峰值功率是与系统色散成正比,因此,要提高系统的 SNR,就得加大系统的色散;但增大系统色散,就会增大 Gordor Haus 效应,从而导致系统传输性能恶化。因此,在设计经典孤子传输系统时,要合理选择孤子的峰值功率以及系统的色散参量,使系统的传输性能最佳。DM 孤子区别于经典孤子的最大特点是它可以在路径平均色散为 0 的系统中传输,故它可将 Gordor Haus 效应降到最低点。在这里,主要研究 DM 孤子在如图 3 的两种色散管理系统中的传输特性。

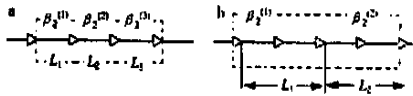


Fig. 3 Dispersion configuration which path average dispersion is zero
a- symmetric configuration b- asymmetric configuration

图 3a 为对称结构,图 3b 为非对称结构,将其分别定义为模型 A 和模型 B。它们的结构参数分别为:

(A) $\beta_2^{(1)} = \beta_2^{(3)} = 2\text{ps}^2/\text{km}$; $\beta_2^{(2)} = 4\text{ps}^2/\text{km}$; $L_1 = L_2 = L_3 = 60\text{km}$; (B) $\beta_2^{(1)} = 2\text{ps}^2/\text{km}$; $\beta_2^{(2)} = -2\text{ps}^2/\text{km}$; $L_1 = L_2 = 120\text{km}$ 。

系统采用色散位移光纤(DSF),放大器间隔为 60km,色散管理周期要远远大于放大器间隔,因此,上述两种系统属于无损耗型模式。DM 孤子的峰值功率采用路径平均色散为 $-0.1\text{ps}^2/\text{km}$ 的一阶孤子的峰值功率进行归一化, T_0 为 10ps,光纤的非线性系数为 $2.5/(\text{W} \cdot \text{km}^{-1})$, $\alpha = 0.02\text{dB}/\text{km}$ 。

图 4 和图 5 是通过数值方法解孤子传输方程(4)得在普通色散位移光纤和平均路径色散为 0 的系统中的演变过程。

由图 4 可知,在普通色散位移光纤中,脉冲传输

了 7.5km 就展宽了几倍并且出现了色散波。在图 5a 中,可以看到脉冲在平均路径色散为 0 的模型 A 系统传输的周期性十分明显,在一个周期输出端脉冲恢复原形。因此,模型 A 系统比普通系统可传输距离增加几十倍。

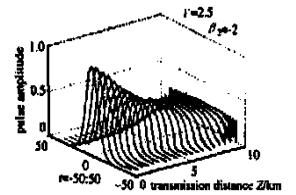


Fig. 4 Transmission of the optical pulse in DSF

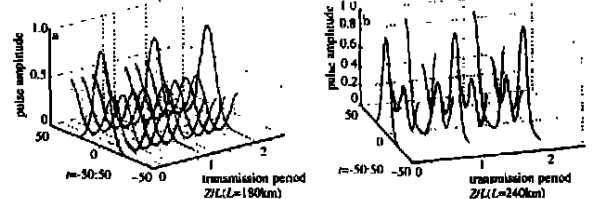


Fig. 5 Transmission of the optical pulse in DM soliton system which path average dispersion is zero
a- model A b- model B

图 5b 给出了孤子在路径平均色散为 0 系统模型 B 中的传输情况。在一个色散管理周期内,脉冲经历了一个脉宽展宽和压缩的过程,并在色散管理周期输出端也恢复到原来的脉宽。模型 B 的色散管理周期为 240km。合理的系统色散分布,可以有效地抑制系统的非线性效应的影响。因为在平均路径色散为 0 的系统中,光纤的非线性效应是影响系统传输特性的主要因素。

4 结 论

对色散管理孤子的传输理论进行了推导,利用数值方法模拟了 DM 孤子在不同模式中的传输,并与经典光孤子在普通光纤中的传输特性进行了比较,得到以下结论:

- (1) 对于无损模式的色散管理系统,DM 孤子输入功率对其传输特性的影响大,大的输入功率有利于 DM 孤子长距离的传输。因为孤子的峰值功率大,就要求色散也随着增大,故适当地提高系统的平均色散,可改善系统的传输特性,但系统的平均色散不能太大,因 Gordor Haus 效应与光纤色散成正比。色散管理周期不能太长,否则 DM 孤子在色散管理周期内的展宽会增大,从而增加孤子间的相互作用。对于 DM 孤子在路径平均色散为 0 的色散系统中的传输,光纤的非线性效应是影响系统传输特性的主要因素,增加 DM 孤子的输入功率会增加系

(下转第 372 页)

对应于距离透镜出射面 $l = 0.1\text{m}$ 的位置) 以外, 由 (9) 式和 (1) 式计算得到的轴上聚焦光强分布符合很好。特别是当 GSM 光束的相干参数 β 越小, 即光束的相干性越差时, 二者符合越好。这是由于光束的相干性越好, 透镜的有限尺寸所引起的衍射效应越明显的缘故。由此可见, 笔者所用方法对相干性较差的光束更为适合。虽然, 该方法的计算精度较积分计算略差, 但积分方法计算精度的提高却是以牺牲机时为代价的, 特别是当 GSM 光束的相干性越差以及光束的截断参数越大时, 为了保证计算精度, 积分计算所需的抽样点数大量增加, 从而大幅度增加计算机时。本文中数值计算采用 VC++ 编程, 对于相同的参数和计算精度, 用积分公式 (1) 式计算所用的 CPU 时间是本文中给出的计算公式 (9) 式的 5000 倍以上。

进一步分析图 2 可知, 对于实际工作中非常关心的焦移问题, 上述两种方法所得的结果符合很好, 因此, 在讨论焦移问题时, 可直接采用 (9) 式进行数值计算, 从而可避免积分计算方法存在的非常耗费机时的缺点, 在保证精度的同时, 又大大节约了计算时间。

3 结 论

在将圆形函数近似展开成复高斯函数叠加的基

(上接第 369 页)

统的非线性效应, 影响系统的传输特性。但合理的配置系统的色散分布, 可以有效地抑制系统的非线性效应的影响。

(2) 通过前面几种情况的计算机模拟, DM 孤子在每一种模式中的传输特性都比较理想, 实现了在色散管理周期上恢复孤子的原形。无疑, 对今后系统升级 DM 孤子传输形式具有深远的意义。

参 考 文 献

[1] 吴紫标. 大学物理, 2000, 19(3): 37~ 42.

基础上, 推导出部分相干高斯-谢尔模型光束通过透镜聚焦后的轴上光强分布的近似计算解析公式, 给出了数值计算例, 并与常规的衍射积分方法所得结果进行了比较。研究表明, GSM 光束通过圆形光阑透镜聚焦的轴上光强分布可表示为有限数目的高斯函数的叠加。除在很靠近透镜出射面附近以外, 用本文中的复高斯函数叠加方法计算得到的轴上聚焦光强分布与衍射积分所得的结果符合较好, 并且在计算焦移时, 二者符合很好。采用该方法进行计算的优点在于能大幅度地节约机时, 从而有效地提高了计算效率。进一步分析可知, 本方法对于部分相干光的相干性较差以及考察面距离透镜出射面较远时非常适合。若需进一步提高靠近透镜出射面处的计算精度, 一方面可通过适当增加复高斯函数项数 N 来实现, 另一方面, 也可以在透镜出射面附近仍然采用衍射积分来进行计算, 将本文方法与衍射积分方法有机地结合起来, 从而给计算工作带来极大的方便。

参 考 文 献

[1] Starikov A, Wolf E. J O S A, 1982, 72: 923~ 928.
 [2] Friberg A T, Jsoodol R. Opt Commun, 1982, 41: 383~ 387.
 [3] Friberg A T, Turnuen J. J O S A, 1988, 5(5): 713.
 [4] Lü B D, Zhang B. J Mod Opt, 1995, 42(2): 289.
 [5] Ding D, Liu X. J O S A, 1999, 16(6): 1286~ 1293.
 [6] Wen J, Breazeale M A. J A S A, 1988, 83: 1752~ 1756.
 [7] Erdelyi A, Magnus W, Oberhettinger F *et al.* Table of integral transforms. New York: McGraw-Hill, 1954.
 [8] Li Y, Wolf E. Opt Commun, 1982, 42(3): 151~ 156.
 [9] Li Y, Wolf E. Opt Commun, 1982, 42(4): 211~ 215.

[2] 钟卫平. 物理, 1999, 28(10): 619~ 623.
 [3] 朱丁安. 电信技术, 1999(4): 11~ 12.
 [4] 钟晓春. 西南交通大学学报, 1998, 33: 202~ 207.
 [5] 张春燕, 叶培大. 北京邮电大学学报, 1997, 20(4): 202~ 207.
 [6] 胡国锋, 黄超译, 李世忱校. 非线性光学. 天津: 天津大学出版社, 1992.
 [7] Govan D S, Foryisak W, Doran N J. Opt Lett, 1998, 23(19): 1523.
 [8] Allection S B, Harper P, Bennion I. Electronics Letters, 1999, 35(10): 823~ 824.
 [9] 林 宁, 杨伯君, 张晓光 *et al.* 光电子·激光, 2001, 12(2): 185~ 187.
 [10] 清源计算机工作室. Matlab 基础及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1999.