

文章编号: 1672-8785(2007)02-0001-06

光纤孤子相互作用及其抑制

钟鸣宇, 梁齐爱, 曹文华

(五邑大学信息科学研究所, 广东 江门 529020)

摘 要: 介绍了光纤孤子相互作用产生的原因, 重点综述了影响孤子相互作用的因素和抑制孤子相互作用的方法, 最后, 报导了我们的最新研究工作。

关键词: 光纤通信; 孤子相互作用; 光纤非线性效应; 色散

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A

Soliton Interaction and Its Reduction in Optical Fibers

ZHONG Ming-yu, LIANG Qi-ai, CAO Wen-hua

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

Abstract: The cause of soliton interaction is presented. The characteristics of soliton interaction and the methods for reducing of soliton interaction are described emphatically. Finally, our recent research is reported.

Key words: soliton-interaction; nonlinearities in fibers; dispersion; frequency chirp

1 引言

在目前使用的线性光通信系统中, 限制线性光通信系统码元速率的主要因素是群速度色散 (GVD)。孤子通信巧妙利用非线性效应——自相位调制 (SPM) 抵消 GVD, 极大地提高了单信道的传输速率, 但同时也引起了孤子之间复杂的非线性相互作用^[1], 导致系统误码率的增大。因此, 在高速光孤子通信系统中, 抑制光孤子的相互作用是一个十分重要的问题。本文比较系统地综述了孤子相互作用的规律及相关的抑制方法, 介绍了我们在近期的相关工作。

2 孤子间相互作用

按作用距离, 孤子相互作用可分为长程相互作用^[2]和短程相互作用^[1]。长程相互作用是由背景噪声引起的, 包括吸引和排斥两种作用, 其作用性质只与孤子初始距离有关, 与孤子的相

对相位无关。短程相互作用对应的孤子距离较小, 也包括吸引和排斥两种作用, 其相互作用规律与相邻孤子的相位密切相关。影响短程相互作用的因素很多, 如孤子初始间距、相对振幅、高阶效应等。

脉冲在光纤中的传输近似满足如下形式的非线性薛定谔方程:

$$i\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = i\delta_3 \frac{\partial^3 u}{\partial \tau^3} - is\frac{\partial}{\partial \tau}(|u|^2 u) + \tau_R u \frac{\partial |u|^2}{\partial u} \quad (1)$$

式中, u 为归一化的孤子包络复振幅, $\xi = z/L_D$ 为归一化距离, $\tau = t/T_0$ 为归一化时间, $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ 是色散长度, T_0 是孤子半宽度, β_2 是群速度色散系数, $\delta_3 = \beta_3/6|\beta_2|T_0$ 、 $s = 1/\omega_0 T_0$ 、 $\tau_R = T_R/T_0$ 分别为归一化的三阶色散参量、自陡峭参量和喇曼自频移参量, ω_0 为中心角频率, β_3 为三阶系数, T_R 是与喇曼增益谱斜率有关的

收稿日期: 2006-09-19

基金项目: 广东省自然科学基金 (04011761, 06029820) 资助课题

作者简介: 钟鸣宇 (1982—), 男, 四川省三台县人, 现为五邑大学信息科学研究所硕士研究生, 主要研究方向为高速光纤通信系统。

参数。当 $p_0 \gg 1\text{ps}$ 时, 三阶色散、自陡效应和脉冲内喇曼自频移效应可以忽略。

设光纤输入端一对孤子振幅的归一化形式为

$$u(0, \tau) = \sec h(\tau - q_0) + r \sec h[r(\tau + q_0)]e^{i\theta} \quad (2)$$

式中, r 是相对振幅, θ 是初始相位差, $2q_0$ 是两孤子间的初始间距。

从物理角度来说, 孤子的短程相互作用力来源于相邻孤子的干涉。当两个初相位相同的孤子相互靠近时, 它们的强度由于叠加而提高, 导致脉冲的群速度色散和自相位调制之间的平衡被打破, 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, 从而导致了孤子间距的变化。

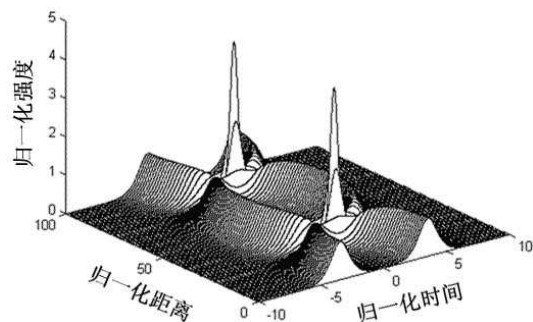
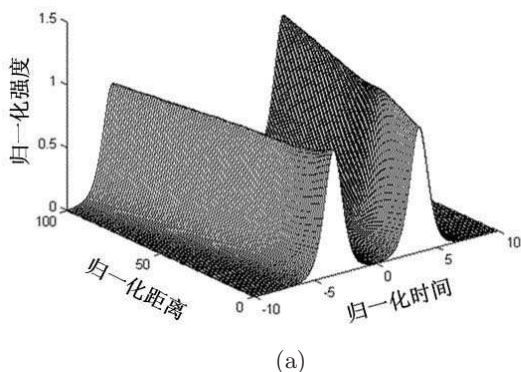


图 1 同幅同相孤子对在 100 个色散长度上的演化, 初始参数为 $\theta = 0$, $r = 1$, $q_0 = 3.5$

当相邻孤子具有相同的振幅和相同的初相位时, 作用情况如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 两个孤子周期性地吸引和碰撞。当孤子间距相当于孤子宽度的十倍时, 相互作用可以忽略



(a)

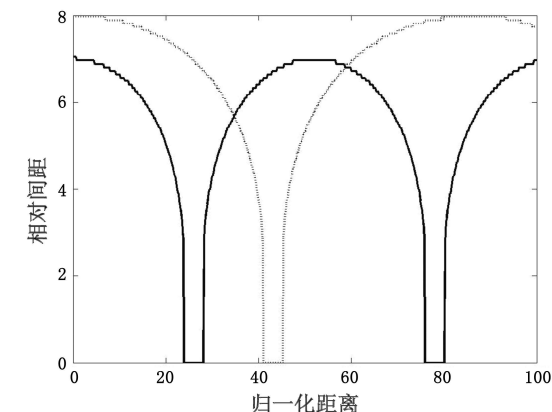
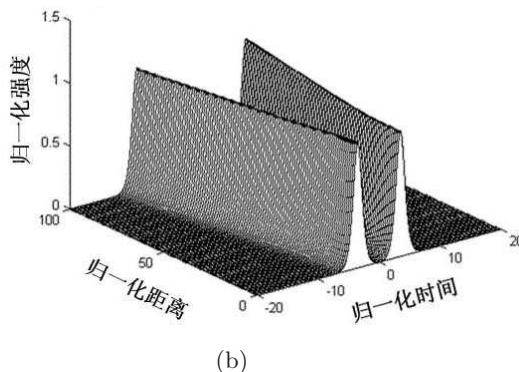


图 2 $q_0 = 3.5$ (实线) 和 $q_0 = 4$ (虚线) 时, 孤子相对间距随光纤传输距离的变化

不计; 随着孤子间距的减小, 孤子相互作用力将迅速增加, 碰撞周期变短。图 2 给出了 $q_0 = 3.5$ 和 $q_0 = 4$ 时, 孤子相对间距随传播距离变化的情况, 表明初始孤子间距愈大, 碰撞周期愈长。目前抑制孤子相互作用主要靠增加孤子间距, 但该方法是以牺牲码率为代价的。

孤子相互作用与相邻孤子的相对相位和相对振幅有关系。图 3 表示了初始振幅相同、初始相位差不同的两对孤子的相互作用的情况。在这两种情况下, 两对孤子都相互排斥, 其间距也随传输距离单调增加。相对来说, 当 $\theta = \pi$ 时, 孤子间的排斥力较大, 这是由于此时孤子间的初始相位相反, 在传输过程中中间重叠的部分发生干涉相消, 以至两孤子之间的强度小于两边的强度, 从而导致两孤子之间的折射率小于两边的折射率, 使两孤子同时向两边移动, 向外表现出“排斥力”。



(b)

图 3 同幅不同相孤子对在 100 个色散长度上的演化。孤子对间初始相位差 (a) $\theta = \pi/2$, (b) $\theta = \pi$

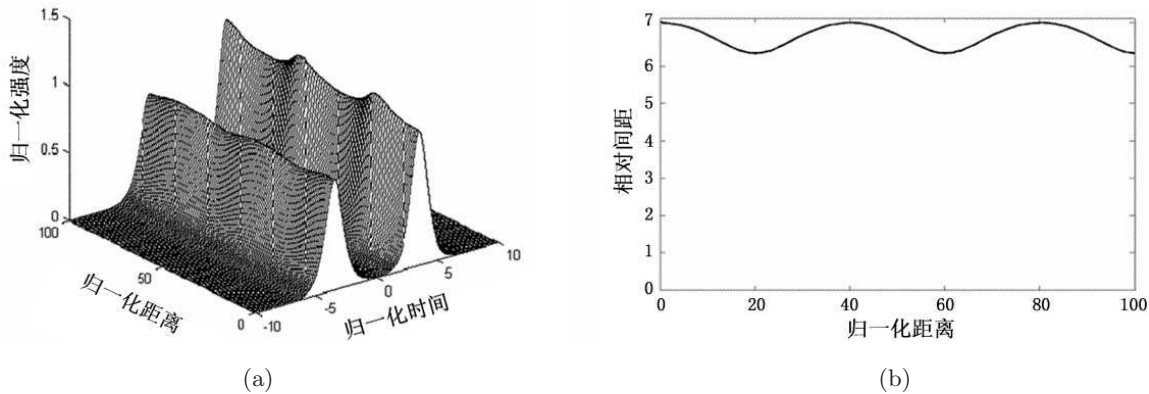


图 4 同相不同幅孤子在 100 个色散长度上的相互作用, 初始参数为 $\theta = 0$, $r = 1.1$, $q_0 = 3.5$ 。

(a) 孤子脉冲的强度包络随传输距离的演化图, (b) 孤子间相对间距随传输距离的演化图

对比图 1 与图 4(a) 可以发现, 当相邻孤子具有不同的振幅时, 两脉冲在传输过程中没有发生碰撞, 相互作用受到明显的抑制, 且两脉冲的间隔呈现一种周期性的变化。这是由于不同的初始振幅在传输中引起了各自不同的相位变化, 使它们在传输的过程中存在一个相位差, 导致了脉冲间引力的减小。当 r 增大时, 孤子间相互作用力受到更强烈的抑制。数值研究发现, r 也不是越大越好, 太大了会引起相邻孤子相互排斥, 其最佳值仍有待研究 [3]。

当 $T_0 < 5\text{ps}$ 时, 孤子的高阶效应不可忽略, 其中, 三阶色散显得尤其重要。如果在光纤传输过程中使用色散位移光纤 (二阶色散很小), 将使孤子周期 z_0 ($z_0 = \pi T_0^2 / 2|\beta_2|$) 变长, 相同传输距离内的孤子周期减少, 孤子发生碰撞的距离增加, 从而减小了孤子互作用。然而, 当二阶色散很小时, 三阶色散的作用就显得突出。考虑中心波长为 $1.55\mu\text{m}$ 、初始宽度 $T_{FWHM} = 2\text{ps}$ 的孤子传输, 分别取二阶色散系数 $\beta_2 = -0.5\text{ps}^2/\text{km}$, 三阶色散系数 $\beta_3 = 0.1\text{ps}^3/\text{km}$, 由 $\delta_3 = \beta_3 / 6|\beta_2|T_0$ 可算出 $\delta_3 = 0.03$ 。由上述参数得到的孤子对演化图如图 5 所示。

对比图 1 与图 5, 我们发现图 5 中的孤子对没有发生碰撞, 总体表现为相互排斥。研究表明, 当 T_0 一定时, 如果 β_3 与 $|\beta_2|$ 比例进一步变大, 三阶色散对孤子互作用的影响也进一步加大, 孤子之间的分离速度加快 [4], 当大到一定程度后, 孤子之间的距离出现振荡现象。这是因为三阶色散不仅导致孤子传输的群速度发生变

化, 而且使得孤子在传输过程中能量不断向外辐射, 在这种情况下, 不仅存在孤子之间的相互作用, 也存在孤子与其辐射成份之间的相互作用 [4]。在三阶色散、喇曼效应和自陡效应的联合作用下, 孤子对的演化不再具有图 1 所示的周期性。在经过第一次碰撞之后, 孤子对开始相互排斥, 孤子间的距离随着传输距离的增加单调递增, 其效果与三阶色散对孤子互作用的影响基本一致 [3]。

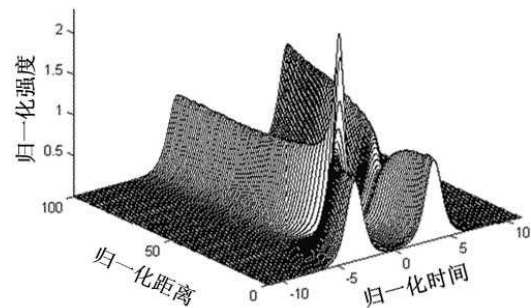


图 5 三阶色散影响下孤子对在 100 个色散长度上的演化。初始参数为 $\theta = 0$, $r = 1$, $q_0 = 3.5$, $\delta_3 = 0.03$

3 孤子互作用的抑制

通过对上述引起孤子互作用因素的探讨, 可以有针对性地对孤子互作用进行抑制。在实际通信系统中, 抑制孤子互作用的基本出发点都是来自于对孤子参数的控制, 如幅度、脉宽、位置、相位以及频率。抑制方法可能是控制孤子的某个参数, 也可能是控制几个参数, 并且各种方法可以混合使用。

3.1 同步幅度调制技术

1991 年, Nakazawa 提出一种基于同步幅度调制的传输方案。通过在孤子传输线上提取时钟脉冲, 控制系统中周期性放置的幅度调制器, 对脉冲进行整形和定时, 将孤子脉冲限制在原来的比特槽中。在该方案中, 设输入信号为 $u(0, \tau)$, 用作调制信号的是正弦波 $M(t) = \sin(\pi t/T)$ 。为了研究同步幅度调制抑制孤子互作用的原因, 把调制函数 $M(t)$ 看成两个函数相乘的结果:

$$M(t) = \text{sgn}[M(t)] \times |M(t)| \quad (3)$$

式中, $\text{sgn}[M(t)]$ 表示 $M(t)$ 的符号函数, 其作用是将相邻脉冲中的一个相位移动 π (当 $\theta = \pi$ 时, 由式 (2) 知相邻孤子符号反向)。在传输的链路中, 每个调制器将相邻两孤子中的一个的相位移动 π , 使孤子间的相互作用力的性质在吸引和排斥间来回变化。从整个传输链路来看, 孤子互作用得到了平衡, 这是同步幅度调制技术能抑制孤子互作用的主要原因^[5]。式 (3) 中 $|M(t)|$ 表示取 $M(t)$ 的绝对值, 对孤子落在时间槽之外的成分, 调制信号将发生额外的衰减, 这种功能通常被称为定时功能, 该定时功能抑制了孤子在中心位置处的微小抖动。在周期相位移动和定时功能的联合作用下, 相邻两孤子在传输链路中的平均相互作用力近乎消失。

3.2 光学滤波技术

在光纤放大器后面插入带通滤波器, 可以实现带宽限制放大, 该方法能够明显抑制孤子的相互作用, 原因如下: (1) 由于幅度放大造成脉冲窄化, 减小了相邻孤子互相重叠的部分^[6]; (2) 放大器抑制了孤子中心频率的改变^[7]。

中心频率沿传输方向逐步改变的滤波器称为滑频滤波器, 与中心频率固定的滤波器相比, 滑频滤波器对孤子互作用的抑制效果更好。滑频滤波器使得相邻孤子间的相对相位快速变化, 而相位的快速变化会导致孤子的相互作用从吸引到排斥交替发生, 最终平衡了孤子抖动。中心频率沿光纤上移的滤波器称为上变频滤波器 (USFF), 反之, 称为下变频滤波器 (DSFF)。在抑制孤子互作用方面, USFF 略优于 DSFF。这是因为滤波器的引入会导致三阶色散, 该三阶

色散引起了二阶色散有效值的变化。USFF 使二阶色散有效值变小, DSFF 则使二阶色散有效值变大, 所以 USFF 对脉宽的压缩比 DSFF 更显著, 因此具有比 DSFF 更好的抑制孤子互作用的特性^[8]。

中心频率沿光纤周期性来回移动的滑频滤波器叫做 z 形滤波器 (ZSFF), 选择合适的周期, ZSFF 抑制孤子互作用的效果比 USFF 和 DSFF 更显著。以 USFF 为例, 放大器主要放大其中心频率附近的分量。在孤子互作用的过程中, 如果两孤子相互吸引, 则前面的孤子频率减小, 后面的孤子频率增大, USFF 对后面孤子的放大作用更强, 最终导致孤子相互靠近, DSFF 的效果与此类似。而 ZSFF 的放大中心频率来回变动, 使前后孤子得到均衡放大, 从而更好地抑制了孤子的互作用^[8]。

4.3 相位共轭技术

光学相位共轭器利用光纤中的四波混频原理, 使孤子频谱以泵浦光频率为中心反转, 所以光学相位共轭器也叫做光学相位反转器。孤子互作用是干涉引起的啁啾造成的, 若在 $z = z_p$ 处插入相位共轭器 (这里, z_p 应远小于孤子碰撞的半周期), 两个孤子的啁啾在通过相位共轭器后发生反转, 反转后的啁啾在沿光纤继续传播的过程中被逐渐抵消, 在 $z = 2z_p$ 处, 光脉冲应该基本上是无啁啾的, 所以, 应该分别在 $z = z_p$ 、 $z = 3z_p$ 和 $z = 5z_p$ 处放置第一、第二和第三个相位共轭器^[9]。

但是, 光纤中存在着损耗, 孤子的强度随着距离的增加而减小, 在相位共轭器之前和之后, 孤子能量有较大的起伏, 光强度变化并不对称, 与光强度相关的 SPM 效应也不对称, 所以, 相位共轭器不能使光脉冲在通过它之前产生的啁啾在后续等距离传播中被全部抵消。这就是说, 为了防止孤子能量起伏太大, 相位共轭器的间距不能太大。为了增大相邻相位共轭器之间的距离, 一个改进的办法是, 将相邻光纤放大器之间的传输光纤分为两段, 第一段是负色散光纤, 第二段是正色散光纤。调整两段光纤的参数, 可以将共轭器的放置距离增加到以前的三倍, 即放置在 $z = 3z_p$ 、 $z = 9z_p$ 、 $z = 15z_p$ 处^[10]。对于飞秒孤子, 我们需要考虑高阶效应对脉冲

的劣化, 相位共轭器对三阶色散和自陡效应无能为力。为了解决这个问题, 最近出现了一种叫做光谱相位共轭 (spectral phase conjugation) 的技术^[11]。该共轭技术在对脉冲相位进行共轭的同时, 将脉冲包络在时域进行反转, 可以抑制三阶色散和自陡效应, 但不能消除喇曼自频移的影响。因此, 在传输链路上同时使用两种相位共轭器, 几乎可以完全消除高阶效应的影响。

3.4 色散管理技术

自从色散管理 (DM) 概念被提出以后, 人们越来越深刻地认识到色散管理孤子良好的抑制孤子互作用的能力^[12]。在实际系统中, 通常对拥有正色散值和负色散值的两种光纤进行适当配置。此时, 光纤的色散不再是一个定值, 而是周期性改变的值, 在光纤中的传输需要用以下形式的方程描述:

$$i \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{1}{2} d(\xi) \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + p(\xi) |v|^2 v = 0 \quad (4)$$

式中, $v = u/\sqrt{p}$, $d(\xi) = \beta_2(\xi)/\beta_2(0)$, $p(\xi)$ 是色散管理引入的功率变化。根据 $d(\xi)$ 的不同, 色散管理可分为强色散管理和弱色散管理。强色散管理孤子不再是经典的双曲正割形, 其形状与高斯形更加接近, 这导致脉冲边缘比双曲正割衰减更快, 从而减小了孤子相互重叠的部分, 也就减小了孤子的互作用。在色散管理系统中, 不同色散光纤的周期性排布导致光纤链路每一点的局部 GVD 相对较大, 在每个周期内的平均 GVD 却相当低。由于色散管理孤子的平均色散相对常规负色散光纤的平均色散要小 1 到 2 个数量级, 因此, 色散管理孤子的碰撞距离比平均色散孤子的要大。其次, 正如前面所述, 两孤子交叠造成啁啾, 引起孤子频率变化, 由于色散管理孤子本身有啁啾, 互作用发生在一个孤子的上啁啾沿和另一个孤子的下啁啾沿, 减弱了孤子的相干性, 从而抑制了孤子的互作用。但是, 由于在每段光纤中, 色散值都比较大, 脉冲宽度强烈振荡, 会导致脉冲交叠部分变大^[1]。不过, 由于其平均色散值比在常规负色散光纤中的小得多, 孤子的互作用受到了极大的抑制。

3.5 偏振复用技术

偏振复用就是让两列具有相同比特率、偏振方向正交的孤子序列在同一根光纤中传输。与普通孤子相比, 偏振复用孤子能够有效地减小孤子间的相互作用。当两个偏振方向正交的孤子在光纤中传输时, 互相位调制会在两根主轴上造成不同的啁啾。在快轴上的啁啾为负, 孤子频谱表现为红移, 孤子速度变慢; 在慢轴上的啁啾为正, 慢轴上的孤子表现为蓝移, 速度变快。两分量间因此产生相互吸引而达到共同速度, 形成自捕获现象^[13], 使两脉冲序列在光纤中不走离地稳定传输, 几乎使系统的传输速率增长了一倍。然而, 正交偏振孤子并不是在任何条件下都能取得最佳效果。偏振复用孤子在远距离传输时更有优势, 但对偏振模色散很敏感, 只有当偏振模色散相对较小时, 偏振复用技术才能在实际中应用; 当偏振模色散较大时, 同一偏振孤子反而能提供更好的系统性能。

3.6 其它方法

光纤中各种高阶效应使光孤子的相互作用变得非常复杂, 从根本上讲, 抑制孤子间的相互作用是相当困难的。有学者试图避开抑制孤子间的相互作用, 巧妙利用孤子对演化的周期性, 探讨光孤子-呼吸子通信系统实现的可能性^[14]。自 1985 年以来, 人们对包含各种非线性项的广义非线性薛定谔方程描述的呼吸子序列的演化进行了分析, 得出了这类呼吸子在工程上不够稳定的结论。通过合理选择孤子间距可以得到相对稳定的呼吸子, 这就表明了光孤子-呼吸子通信系统实现的可能性。该设想能否实现还有待进一步研究。

光纤孤子分为两类, 即分别位于光纤负色散区和正色散区的明孤子和暗孤子。前面讨论的是明孤子之间的相互作用及其抑制方法。实际上, 相对于明孤子, 暗孤子具有更适合于远距离通信的传输特性, 如耐损耗、抗噪声、较慢的孤子自频移以及较弱的孤子互作用。明孤子在整个脉冲内的相位为一个常数, 而暗孤子在脉冲中心处的相移有个突变, 即暗孤子是带啁啾的。因而, 在相同的情况下, 暗孤子互作用比明孤子互作用微弱得多。暗孤子之间的相互作用力随着孤子之间距离的增大而指数地减小, 其减小的速率是明孤子的二倍, 而且暗孤子之间

只有排斥而没有吸引作用^[1]，因此抑制孤子的相互作用显得相对简单。由于实验上产生暗孤子相对困难，相对于明孤子，对暗孤子传输特性的研究还显得远远不够，如何有效地抑制暗孤子的相互作用是一个值得我们研究的课题。

为了突破路径平均孤子传输条件(即传输光纤的色散长度必须大于放大器间距)的限制,我们最近提出了一种非线性光纤放大环境(NALM),用于孤子能量中继^[15]。它与常规NALM的主要区别是,新型NALM的增益沿整个环境均匀分布(称之为分布增益环境),而常规NALM的增益集中于环境内靠近环境耦合器的一小段光纤上(称之为集总增益环境)。研究结果表明,用分布增益环境代替集总增益环境(或NOLM外接放大器)能显著地增大传输系统的中继距离。同时,通过适当选取传输光纤的二阶色散系数 $|\beta_2|$,可以较好地抑制孤子间的相互作用。 $|\beta_2|$ 并非越小越好,原因如下:从任何放大器输出的脉冲都不是严格的基阶孤子,即包含一定的非孤子成分。因此,相邻放大器之间必须要保证一定数目的孤子周期,使得脉冲在到达下一个放大器之前能演化成基阶孤子。也就是说,当放大器间距确定后,孤子周期不能太大(即 $|\beta_2|$ 不能太小),否则便会导致传输中断。

4 结 束 语

本文比较详细地分析了孤子的初始参数对两孤子间相互作用的影响,全面介绍了常见的控制技术抑制孤子互作用的原理。在目前的光孤子通信研究中,主要研究对象是基阶孤子,1993年,Hasegawa提出了本征值通信的概念^[16]。根据这个概念将高阶孤子用于通信,可提高每个脉冲所载的信息量。然而,高阶孤子之间的相互作用比基阶孤子之间的互作用更加复杂,是未来孤子互作用及其抑制方法的又一个研究方向。

参考文献

[1] AGRAWAL G P, 贾东方, 余震虹, 等. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 天津: 天津大学出版社.

- [2] SMITH K and MOLLENAUER L F. Experimental observation of soliton interaction over long fiber paths: discovery of a long-range interaction [J]. Opt. Lett., 1989, 14(22): 1284-1286.
- [3] 田慧平, 李仲豪, 王钢, 等. 飞秒光脉冲间相互作用的数值研究 [J]. 光学学报, 2001, 21(5): 513-517.
- [4] 曹文华, 刘颂豪, 郭旗. 三阶色散影响下皮秒孤子间的相互作用 [J]. 光学学报, 1999, 19(6): 739-745.
- [5] PIEERE L F, THIERRY G. Reduction of averaged soliton interaction forces by amplitude modulation [J]. Opt. Lett., 1993, 18(8): 583-585.
- [6] NAKAZAWA M, KUBOTA H. Physical interpretation of reduction of soliton interaction forces by bandwidth limited amplification [J]. Electron. Lett., 1992, 28(10): 958-960.
- [7] AFANASJEV V V. Interpretation of the effect of reduction of soliton interaction by bandwidth-limited amplification [J]. Opt. Lett., 1993, 18(10): 790-792.
- [8] DUNG J C, CHI S, WEN S. Reduction of soliton interactions by zigzag-sliding-frequency guiding filters [J]. Opt. Lett., 1995, 20(18): 1862-1864.
- [9] WEN S, CHI S. Reduction of the soliton interaction and the Gordon-Haus effect by optical phase conjugation [J]. Opt. Lett., 1995, 20(9): 976-978.
- [10] 曲林杰, 曲昕. 利用相位共轭与色散配置实现具有大占空比和大放大器间隔的长距离光孤子传输 [J]. 光学学报, 1997, 17(5): 565-571.
- [11] TSANG M, PSSLTIS D. Dispersion and nonlinearity compensation by spectral phase conjugation [J]. Opt. Lett., 2003, 28(17): 1558-1560.
- [12] GOLOVCHENKO T Y E A, PILIPETSKII A N, MENYUK C R. Dispersion-managed soliton interactions in optical fibers [J]. Opt. Lett., 1997, 22(11): 793-795.
- [13] 王晶, 苗洪利, 杨爱玲, 等. 偏振复用通信系统中偏振模耦合产生的啁啾 [J]. 光学学报, 2003, 32(1): 31-34.
- [14] 杨理, 张杰, 阎沐霖, 等. 光孤子通信系统中编码孤子脉冲序列的演化问题 [J]. 中国科学 (E 辑), 1996, 26(2): 122-133.
- [15] CAO W H, WAI P K A. Picosecond soliton transmission using concatenated gain-distributed nonlinear amplifying fiber loop mirrors [J]. Appl. Opt., 2005, 44(35): 7611-7620.
- [16] HASEGAWA A. Eigenvalue Communication [J]. J. Lightwave Technol., 1993, 11(3): 395-399.