

文章编号: 0258-7025(2004)02-0199-06

波分复用系统中色散管理孤子相互作用 诱导时间移动的分析

李齐良^{1,3}, 陈向东^{1,4}, 唐向宏³, 袁晓², 王慧⁵, 林理彬¹

(四川大学¹物理科学与技术学院,²信息学院,四川成都610064;³杭州电子工业学院通信分院,浙江杭州310037)
⁴电子科技大学15系,四川成都610054;⁵湛江海洋大学理学院,广东湛江524000)

摘要 研究了波分复用(WDM)弱色散管理系统中,孤子碰撞诱导的孤子到达时间的移动;以及波分复用强色散管理系统中,利用变分原理分析了孤子相互作用引起的时移、啁啾、时间位置和孤子频率等的演化。研究表明,弱和强色散管理中,在光纤的路径平均色散接近于零时,孤子碰撞引起的时间移动很小。

关键词 光纤通信技术;色散管理;光孤子;变分分析

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Interaction-Induced Timing-Displacement Analysis in a WDM Optical Soliton Transmission System with Dispersion Management

LI Qi-liang^{1,3}, CHEN Xiang-dong^{1,4}, TANG Xiang-Hong³,
YUAN Xiao², WANG Hui⁵, LIN Li-bin¹

¹Institute of Physics Science and Technology, ²Information Institute,
Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

³The Communication College of Hangzhou Institute of Electronics Engineering, Hangzhou, Zhejiang 310037, China

⁴The 15th Department of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

⁵Institute of Science of Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524000, China

Abstract This paper studied the time shift caused by soliton collision in wavelength division multiplexed(WDM) weakly dispersion-managed system and the evolution of time shift, chirp, time position and frequency of soliton in WDM strongly dispersion-managed system. It shows that time shift led by soliton collision is very low in weakly and strongly dispersion-management system, when the path-average dispersion approaches zero.

Key words fiber communication technique; dispersion management; optical soliton; variational analysis

1 引言

在周期集总放大波分复用(WDM)系统中,相邻信道孤子的碰撞诱导到达时间的移动,制约了系统的性能。这是由于两相邻信道中孤子的中心频率总是有差异的,这样相应的群速度也不尽相同,使得相邻信道孤子可能发生碰撞,导致交叉相位调制,使孤子的位置和中心频率发生移动。光纤中存在着损耗,光纤中的色散和非线性的不平衡,集总式放大后

的孤子中心频率就会变成永久的移动,这种位置和中心频率的移动诱导了孤子到达时间的抖动。

近来的实验和理论证明周期色散补偿或者说色散管理^[1-4](色散控制,DM),即在光纤的传输线路中周期交替地使用具有正的和负的时延色散值光纤,在周期色散管理系统路径平均色散系数为零时,孤子碰撞引起的频率移动会受到抑制;自发辐射引起的Gordon-Haus抖动得到减小;由于每一段光纤

收稿日期 2002-09-06;收到修改稿日期 2002-12-26

作者简介 李齐良(1965—),男,四川大学物理科学与技术学院博士后,副教授,主要从事光纤通信光传输研究。E-mail:

liqiliang@vip.sina.com

中局部色散系数比较大, 孤子碰撞引起的由于相位匹配导致的四波混频效应等得到减弱。同时在光通信系统中, 对于正色散光纤, 由于非线性自相位调制, 使得脉冲前沿的波长比后沿的波长长, 而波长短的光比波长长的光速度快, 使得脉冲的前沿变陡, 产生一个尖峰, 导致调制不稳定。采用负的色散光纤, 还可以抵消正常色散光纤中的调制不稳定性。

在局部色散系数小的时候, 为弱色散管理方案, 孤子的形状为双曲正割型, 表征色散特性的局部色散长度、平均色散长度与表征非线性特性的非线性长度在同一个数量级; 局部色散系数比较大的时候, 为强色散管理方案, 其孤子的形状为高斯型, 其局部色散是影响脉冲演化的主要因素, 有关这方面的研究已有一些, 大致有以下一些结论^[5-8]:

1) 色散管理孤子有很强的啁啾; 2) 强色散管理中, 孤子的形状接近高斯型, 弱色散管理中孤子形状为双曲正割型; 3) 色散管理孤子有较大的能量, 孤子碰撞四波混频效应得到减弱; 4) 如果路径平均色散系数为 0 或接近于 0 的负值, 孤子传输的距离非常远; 5) 色散管理系统能容忍色散值大的光纤。

合理地对光纤色散进行管理, 能够改善孤子系统的传输性能。最近进行的色散管理孤子传输实验中, 每根光纤上以 1 Tbit/s 以上的速率传输了 1000 km 和 3020 km 的距离^[9, 10]。这里对于弱色散管理, 我们采用类似统计平均的方法, 解析研究了孤子碰撞引起的时间移动; 对于强色散管理(接近于 0 的路径平均色散), 利用变分原理, 分析孤子相互作用的动力学, 分析这种相互作用诱导的时间移动。

2 基本理论

在色散管理方案中, 色散管理孤子传输满足下列微扰薛定谔方程^[9]

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + K |\psi|^2 \psi = \varepsilon R' \quad (1)$$

这里 $\psi(z, t)$ 为电场的慢变包络, $|\psi|^2$ 的单位为 W, z 为沿光纤的距离, t 为时间, 假定色散管理的周期为 L_{map} , $\varepsilon R'$ 为微扰项, β_2 为二阶色散系数

$$\beta_2 = \begin{cases} \beta_{21} & 0 < z < L_1 \\ \beta_{22} & L_1 < z < L_{\text{map}} \end{cases}$$

$K = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}}$ 为非线性 Kerr 系数, n_2 为光纤非线性折射率, A_{eff} 为光纤的有效截面积, 对于强色散管理, 一个周期 L_{map} 内, 路径平均色散系数 β_2 趋近于 0, 即万方数据

$$\beta_2 = (\beta_{21} L_1 + \beta_{22} L_2) / L_{\text{map}} \approx 0 \quad (2)$$

对孤子之间的碰撞, 在数学上将其相互作用看成两个波或两个准粒子的线性叠加, 即 $\psi = u_1 + u_2$, 代入方程 (1), 将其分解成两个演化方程, 得到

$$i \frac{\partial u_l}{\partial z} + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 u_l}{\partial t^2} + K |u_l|^2 u_l = -i \mathcal{Q}(z) u_l - K(2 |u_{3-l}|^2 u_l + u_l^2 u_{3-l}^*) - i s \frac{\partial}{\partial t} (|u_l|^2 u_l) \quad (3)$$

式中 $l = 1, 2$, 模型中, 方程看成是单孤子传输方程, 右边的微扰项中第二项视为碰撞相互作用项。 $\mathcal{Q}(z)$ 表示损失和周期放大的周期函数, 对理想的无耗光纤, $\mathcal{Q}(z) = 0$ 。如果孤子的脉冲宽度足够窄, 高阶色散项中计及自变陡项, $s = 2K / \omega_0$ 为自变陡系数, 其中 ω_0 为光波中心频率。

3 弱色散管理中孤子碰撞引起的时间抖动

弱色散管理中, 孤子解为双曲型^[11]

$$u_l(z, t) = A_l \text{sech} \left(\frac{t - \beta_2 p_l z}{\tau_l} \right) \times \exp \left[j \left(-p_l t + \frac{1}{2} \beta_2 p_l^2 z - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{z}{\tau_l^2} + \theta_l \right) \right] \quad (4)$$

式中 p_l , τ_l 分别为孤子的频率(即包络变化的频率)和脉冲的宽度, 孤子的能量为 $2A_l^2 \tau_l$, 色散管理中, 方程 (3) 中四波混频效应项 $K u_l^2 u_{3-l}^*$ 忽略不计, 孤子碰撞由交叉相位调制项引起的相位偏移为 $\Delta \phi$, 可以由 $i \frac{\partial u_l}{\partial z} = -K(2 |u_{3-l}|^2 u_l)$ 得到 $\Delta \phi = 2K |u_{3-l}|^2 \Delta z$, 碰撞引起的频率偏移为

$$\Delta \Omega = \frac{\partial \Delta \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (2K |u_{3-l}|^2 \Delta z)$$

这样

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} (2K |u_{3-l}|^2) \quad (5)$$

而孤子的频率偏移 δp 为 Ω_l 对时间的平均值, 这里将 $\sqrt{\frac{1}{2A_l^2 \tau_l}} u_l$ 当作孤子的波函数, $\sqrt{\frac{1}{2A_l^2 \tau_l}}$ 为归一化因子, 权重因子 $\frac{1}{2A_l^2 \tau_l} |u_l|^2$ 相当于概率密度, 将它

乘上 (5) 式, 并对时间积分, 得到: $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{2A_l^2 \tau_l} \int_{-\infty}^{\infty} |u_l|^2 \frac{d}{dt} (2K |u_{3-l}|^2) dt$, 即

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{A_l^2 K}{\tau_l} \int_{-\infty}^{\infty} \text{sech}^2 \left(\frac{t - \beta_2 p_l z}{\tau_l} \right) \frac{d}{dt} \times$$

$$\operatorname{sech}^2\left(\frac{t - \beta_2 p_{3-l} z}{\tau_{3-l}}\right) dt \quad (6)$$

一般来说,孤子碰撞引起的频率偏移远小于孤子的频率,在计算时公式(6)中的孤子在各时刻的频率当作孤子初始频率,同时,两不同信道孤子的频率也认为相等,这样 $p_l = -p_{3-l} = p$,对上述公式进行计算,得到

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{A_l^2 K}{2\beta_2 p \tau} \frac{d}{dz} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sech}^2\left(\frac{t - \beta_2 p z}{\tau}\right) \times \operatorname{sech}^2\left(\frac{t + \beta_2 p z}{\tau}\right) dt \quad (7)$$

对时间进行积分,孤子碰撞引起的频率移动为

$$\delta p = \pm \frac{4A_l^2 K}{\beta_2 p} \times \frac{2\beta_2 p z \left[\exp\left(\frac{4\beta_2 p z}{\tau}\right) + 1 \right] - 2 \left[\exp\left(\frac{4\beta_2 p z}{\tau}\right) - 1 \right]}{\left[\exp\left(\frac{4\beta_2 p z}{\tau}\right) - 1 \right]^3} \times \exp\left(\frac{4\beta_2 p z}{\tau}\right) \quad (8)$$

“ \pm ”号表示两个不同孤子的频率移动,由方程(4)可知,由碰撞引起的孤子到达时间的抖动与相应的频率移动 δp 之间的关系为: $\frac{\partial t}{\partial z} = \beta_2 \delta p$,这样对(8)式进行积分得到孤子碰撞引起的时间移动的抖动

$$\delta t = \mp \frac{A_l^2 K \tau}{2\beta_2 p^2} \frac{\frac{2\beta_2 p z}{\tau} - \sinh\left(\frac{2\beta_2 p z}{\tau}\right) \cosh\left(\frac{2\beta_2 p z}{\tau}\right)}{\sinh^2\left(\frac{2\beta_2 p z}{\tau}\right)} \quad (9)$$

弱色散管理中,光纤和孤子脉冲的有关参数中,光波中心波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,标准单模光纤(SMF)群速色散(GVD) $D = 2 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$,克尔系数 $n_2 = 2.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$,光纤有效截面面积 $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$,脉冲宽度 $\tau = 12.0 \text{ ps}$,色散管理周期 50 km ,输入峰值功率 0.01 mW ,集总放大周期 $z_d = 50 \text{ km}$,色散补偿光纤(DCF)群速色散 $D = -4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$,克尔系数 $n_2 = 2.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$,光纤有效截面面积 $A_{\text{eff}} = 40 \mu\text{m}^2$ 。

利用(9)式得到孤子碰撞诱导的时间移动与距离 z 的关系如图1所示,孤子传输 2000 km 后时间的移动为 2.72 ps ,从图1中可以看出孤子碰撞引起时间的移动其数据呈锯齿状,这是由于反常色散光

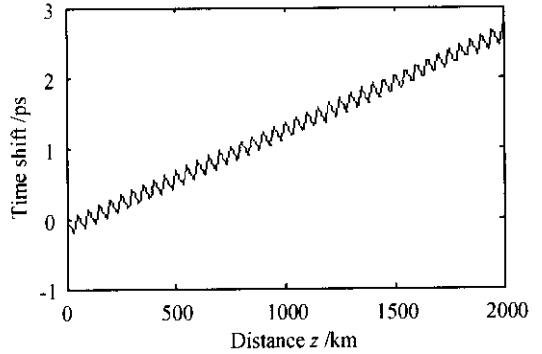


图1 时间移动与距离 z 之间的关系

Fig. 1 Time shift versus transmission distance z

纤对系统进行补偿形成的;如果系统中没有负的群速色散光纤对系统进行补偿,时间移动将会很严重,导致误码率的增加,补偿后,时间移动变得很小,从而改善了系统的传输性能。克尔非线性引起自相位调制(SPM)对系统的影响,是一个很重要的因素,设计这种系统时,必须选克尔非线性效应小的光纤,一般选择有效面积大一点的光纤,可以降低非线性效应对系统的影响。

4 强色散管理孤子参数的演化

利用微扰的变分理论进行讨论,方程(3)的微扰项为

$$\varepsilon R = -iGu_l - K(2|u_{3-l}|^2 u_l + u_l^2 u_{3-l}^*) - is \frac{\partial}{\partial t} (|u_l|^2 u_l) \quad (10)$$

计算时忽略了四波混频项 $u_l^2 u_{3-l}^*$,对方程(3),其无微扰的拉格朗日(Lagrangian)密度为

$$\mathcal{L} = \frac{i}{2} \left(u_l^* \frac{\partial u_l}{\partial z} - u_l \frac{\partial u_l^*}{\partial z} \right) - \frac{\beta_2}{2} \left| \frac{\partial u_l}{\partial t} \right|^2 + \frac{K}{2} |u_l|^4 \quad (11)$$

其 Lagrangian 量

$$L = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{L} dt \quad (12)$$

根据变分原理,由于将 εR 看成微扰,那么它与 u_l^* 无关,其微扰变分方程为^[12,13]

$$\frac{\partial L}{\partial X_j} - \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial L}{\partial X_j} \right) = 2 \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon R \frac{\partial u_{0l}^*}{\partial X_j} dt \quad (13)$$

强色散管理情况中,局部群速色散系数较大,但平均群速色散系数接近于0,脉冲的形状为高斯型

$$u_{0l} = \eta_l \exp \times$$

$$\left\{ -\frac{(t - T_l)^2}{2\tau_l^2} + \left[\omega_l(t - T_l) + c_l(t - T_l)^2 + \theta_l \right] \right\} \quad (14)$$

式中 $\eta_l, \sqrt{\ln 2}\tau_l, \omega_l/2\pi, c_l/4\pi, \theta_l$ 分别为孤子的幅度、脉冲宽度、频率、啁啾和初相位, 将(14)式代入(13)式, 并对 t 积分, 用到下面的关系式

$$\begin{aligned} \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(u_l^* \frac{\partial u_l}{\partial z} - u_l \frac{\partial u_l^*}{\partial z} \right) dt &\rightarrow \sqrt{\pi} \omega_l \tau_l \eta_l^2 \frac{dT_l}{dz} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \eta_l^2 \tau_l^3 \frac{dc_l}{dz} - \sqrt{\pi} \eta_l^2 \tau_l \frac{d\theta_l}{dz} \\ \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial u_l}{\partial t} \right|^2 dt &\rightarrow \frac{\sqrt{\pi}}{2\tau_l} \eta_l^2 + \sqrt{\pi} \omega_l^2 \eta_l^2 \tau_l + 2\sqrt{\pi} \eta_l^2 c_l^2 \tau_l^3 \\ \int_{-\infty}^{\infty} |u_l|^4 dt &\rightarrow \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \eta_l^4 \tau_l \end{aligned}$$

得到无微扰的 Lagrangian 量

$$L = \sqrt{\pi} \omega_l \tau_l \eta_l^2 \frac{dT_l}{dz} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \eta_l^2 \tau_l^3 \frac{dc_l}{dz} - \sqrt{\pi} \eta_l^2 \tau_l \frac{d\theta_l}{dz} - \frac{\sqrt{\pi}}{4\tau_l} \beta_2 \eta_l^2 - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \beta_2 \omega_l^2 \eta_l^2 \tau_l - \sqrt{\pi} \beta_2 \eta_l^2 c_l^2 \tau_l^3 + \frac{\sqrt{2\pi}}{4} K \eta_l^4 \tau_l \quad (15)$$

对于强色散管理, 忽略四波混频项, 利用微扰变分方程(13)和方程(15)得到孤子的参数方程

$$\frac{\partial \tau_l}{\partial z} = 2\beta_2 c_l \tau_l \quad (16a)$$

$$\frac{\partial \eta_l}{\partial z} = -G\eta_l - \beta_2 c_l \eta_l \quad (16b)$$

$$\frac{\partial c_l}{\partial z} = \frac{\beta_2}{4\tau_l^4} - 2\beta_2 c_l^2 - \frac{\sqrt{2}}{4\tau_l^2} K \eta_l^2 - \sqrt{2} K \frac{\eta_l^2}{\tau_l^2} \exp\left(-\frac{\Delta T^2}{2\tau_l^2}\right) - \sqrt{2} K \eta_l^2 \frac{\Delta T^2}{2\tau_l^4} \exp\left(-\frac{\Delta T^2}{2\tau_l^2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{4\tau_l^2} s \omega_l \eta_l^2 \quad (16c)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_l}{\partial z} &= \frac{1}{2} \beta_2 \omega_l^2 - \frac{\beta_2}{8\tau_l^2} + \frac{5\sqrt{2}}{8} K \eta_l^2 + \frac{5\sqrt{2}}{4} K \eta_l^2 \exp\left(-\frac{\Delta T^2}{2\tau_l^2}\right) + \\ &\quad \frac{\sqrt{2}}{4} K \eta_l^2 \frac{\Delta T^2}{\tau_l^2} \exp\left(-\frac{\Delta T^2}{2\tau_l^2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{8} s \omega_l \eta_l^2 \end{aligned} \quad (16d)$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial z} = \beta_2 \omega_l + \frac{3}{4} \sqrt{2} s \eta_l^2 \quad (16e)$$

$$\frac{\partial \omega_l}{\partial z} = -\sqrt{2} K \eta_l^2 \frac{\Delta T}{\tau_l^2} \exp\left(-\frac{\Delta T^2}{2\tau_l^2}\right) + \sqrt{2} s c_l \eta_l^2 \quad (16f)$$

上述式中的 $\Delta T = T_2 - T_1$, 表示邻近孤子之间的间隔, 下面对孤子参数进行模拟分析。

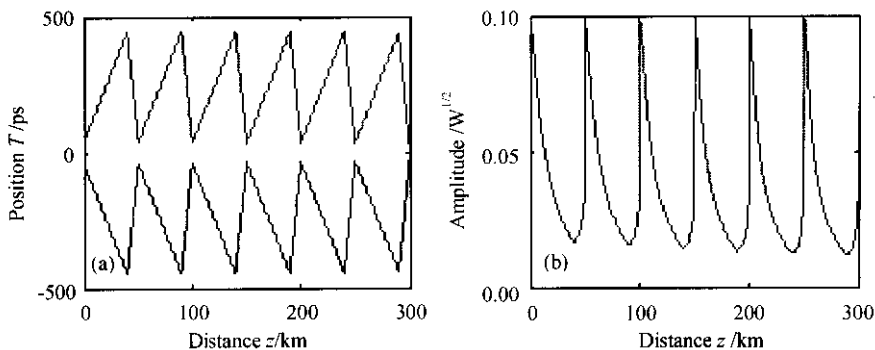


图2 (a) 时间位置与距离 z 之间的关系 (b) 孤子幅度与距离 z 之间的关系

万方数据 Fig.2 (a) Time position versus distance z ; (b) Soliton amplitude versus distance z

对(16a)~(16f)非线性方程组,采用龙格-库塔方法求解。相应的参数取:放大器输出的光脉冲峰值功率0.01 mW,光波的中心波长1.55 μm,对正常色散的单模光纤,非线性克尔系数 $2.7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$,光纤的有效面积 $80 \mu\text{m}^2$,损耗 $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$,群速度色散系数 $20 \text{ ps}^2/\text{nm} \cdot \text{km}$,对色散补偿光纤,非线性克尔系数 $2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$,光纤的有效面积 $20 \mu\text{m}^2$,损耗 $\alpha = 0.25 \text{ dB/km}$ ($G = 0.028/\text{km}$),群速度色散系数 $-80 \text{ ps}^2/\text{nm} \cdot \text{km}$ 。

模拟时,色散管理的周期为50 km,集总放大的周期为50 km,孤子传输距离为2000 km,两相邻孤子的间隔为80 ps,孤子脉冲的宽度为12 ps,孤子带宽 $\Delta\nu$ 为100 GHz,孤子参量的演化如图3所示,色散管理系统路径平均色散系数为接近于0的 $\beta_2 = -0.918 \times 10^{-4} \text{ ps}^2/\text{m}^2$ 值,孤子传输 z 距离后时移为 $\delta T = T_1 - T_{10} + \pi \Delta\nu \beta_2 z$,式中 T_1 和 T_{10} 分别为孤子的起始时间位置和到达时的时间位置,孤子传输2000 km以后,时移为5.57 ps,在两孤波的频率近似相等的情况下,孤子的碰撞发生在 $z = 1720 \text{ km}$ 处。

图2中(a)为时间位置与距离 z 的关系,(b)为孤子的幅度随距离 z 的变化关系,为了更好地了

解孤子的幅度、时间位置随距离 z 的演化关系,只画出孤子传输的距离为300 km的部分演化曲线,形状均为锯齿形(a)中的锯齿形是由于色散补偿的原因,(b)中的锯齿形是由于每隔50 km对孤子的能量进行放大形成的。

图3为孤子的频率、时间位置、宽度和啁啾随距离 z 的演化关系曲线,它们是每隔50 km(一个色散管理周期)一个样值连接起来的。从图中可以知道,在色散管理孤子传输方案中,孤子的频率、啁啾的变化在经过色散补偿以后很小,时间位置的变化也不大,我们分别计算了自变陡系数为0和不不为0时的情况,表明时间抖动的变化不大,说明了光纤中自变陡效应在皮秒级光脉冲中可以忽略不计。由分析计算可知,色散管理系统能够容忍较大色散的光纤,即只要周期地使用色散符号相反的光纤,使得路径平均色散系数尽可能为零,孤子的时移、孤子的宽度的变化就会很小。在强色散管理系统中,根据上述理论,系统的路径平均色散系数为0,使光纤中的克尔非线性效应足够小,适当优化色散管理周期的长度,可以减少脉冲孤子间的碰撞,提高系统的性能,这方面的详细研究见文献[14~17]。

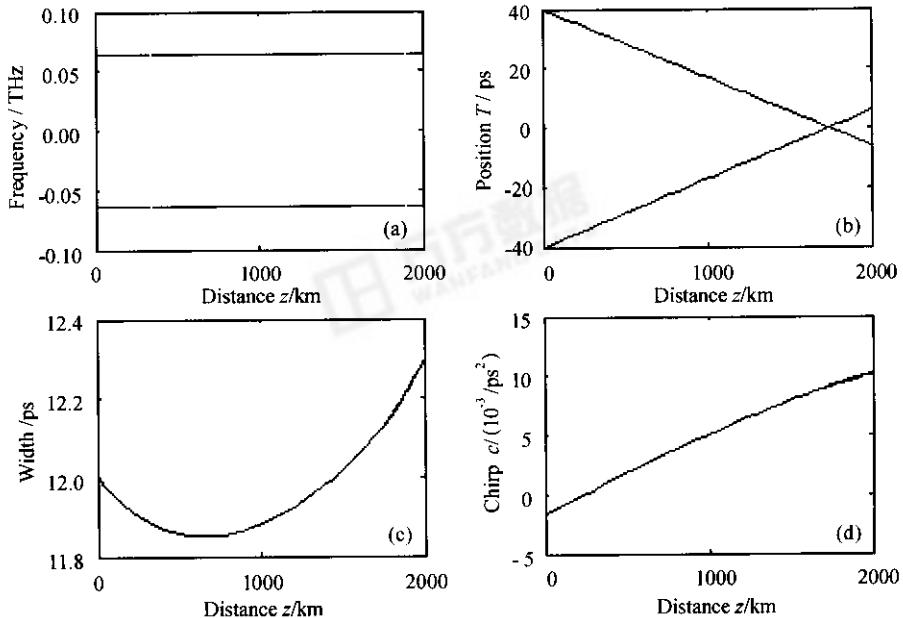


图3 (a) 孤子频率与距离 z 之间的关系 (b) 时间位置与距离 z 之间的关系; (c) 孤子的宽度随距离 z 的变化 (d) 啁啾随距离 z 的演化

Fig. 3 (a) Soliton frequency versus distance z ; (b) Evolution of time shift for distance z ; (c) Evolution of soliton amplitude for distance z ; (d) Evolution of soliton chirp for distance z

起的时间抖动进行了分析,得到如下结论:

1) 在弱色散管理中,系统中的局部色散系数较小,把孤波的解当作孤子的波函数,类似于量子系统统计平均的方法,求出了孤子的到达时间的移动。模拟中,孤子传输的距离为 2000 km,在色散补偿方案中,孤子碰撞引起的时间移动为 2.72 ps,这是由于色散管理传输方案中,采用负的群速度色散光纤对色散进行补偿的原因。理论上,由于正负群速度色散光纤使总的路径平均色散系数趋近于 0,要求这种光纤的克尔非线性效应引起的自相位调制小到可以不计,但是实际光纤中,要保持一定的光脉冲的信噪比,总是存在克尔非线性效应的,它所引起的自相位调制不能被忽略,因此对光通信系统进行实际设计时,还要考虑非线性管理的问题。

2) 强色散管理方案中,路径平均色散系数接近于 0,但允许局部群速度色散值比较大。模拟孤子的传输距离为 2000 km,通过变分分析,得出孤子频率、啁啾、宽度和时间位置等参量的演化和碰撞引起的时间移动,时间移动为 5.57 ps。采用强色散管理孤子传输方案,可以容忍色散值较大的光纤,只要适当使用色散系数符号相反的光纤,就能使总的色散接近于零,从而改善系统的性能。

综上所述,弱和强色散管理中,每一个色散管理或者说色散控制周期内,路径平均色散系数接近于 0 时,孤子到达的时移很小,色散管理能极大地提高系统的性能。这种方案中,正负色散得到抵消,要求克尔非线性效应很小。前面提到,光纤中传输的光脉冲要保持一定的信噪比,脉冲光的能量就不能选得太小,这样克尔非线性引起的自相位调制对系统的影响不能忽略。随着具有负的克尔非线性半导体材料波导的开发,克尔非线性的补偿这个问题很容易解决。弱色散管理和强色散管理方案中,文献[7]对孤子碰撞引起的时间的抖动进行了数值分析,在路径平均色散系数接近于 0 时,孤子传输 2000 km 其时间抖动大致为 2 ps,与本方法算得的结果基本一致,说明本方法具有一定的可行性。

致谢 感谢李承家博士对本工作的讨论。

参 考 文 献

- 1 N. J. Smith, F. M. Knox, N. J. Doran *et al.*. Enhanced power solitons in optical fibres with periodic dispersion management [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(1) 54 ~ 55
- 2 F. Kh. Abdullaev, B. A. Umarov, M. R. Wahiddin *et al.*. Dispersion-managed solitons in a periodically and randomly inhomogeneous birefringent optical fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(7) :1117 ~ 1124
- 3 M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki *et al.*. Soliton transmission at 20 Gbit/s over 2000 km in Tokyo metropolitan optical network [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17) :1478 ~ 1479
- 4 G. M. Carter, J. M. Jacob, C. R. Menyuk *et al.*. Timing-jitter reduction for a dispersion-managed soliton system: experimental evidence [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(8) 513 ~ 515
- 5 J. P. Gordon, L. F. Mollenauer. Scheme for the characterization of dispersion-managed solitons [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4) 223 ~ 225
- 6 T. I. Lakoba, D. J. Kaup. Hermite-Gaussian expansion for pulse propagation in strongly dispersion managed fibers [J]. *Phys. Rev. E*, 1998, **58**(5) 6728 ~ 6741
- 7 Hiroto Sugahara, Akihiro Maruta. Collision-induced timing-jitter analysis in a wavelength-division-multiplexed optical soliton-transmission system with dispersion management [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(4) 419 ~ 431
- 8 C. Pare, V. Roy, F. Lesage *et al.*. Coupled-field description of zero-average dispersion management [J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **60**(4) 4836 ~ 4842
- 9 D. L. Guen, S. D. Burgo, M. L. Moulinaud *et al.*. Narrow band 1.02 Tbit/s (51 × 20 Gbit/s) soliton DWDM transmission over 1,000 km of standard fiber with 100 km amplifier span [C]. in Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, Washington, D. C., 1999). 1999 OSA Technical digest series, paper PD4
- 10 K. Fukuchi, M. Kakui, A. Sasaki *et al.*. 1.1 Tb/s (55 × 20 Gbit/s) dense WDM soliton transmission over 3,020 km widely dispersion-managed transmission line employing 1.55/1.59 μm hybrid repeaters [C]. Presented at the 25th European Conference on Optical Communication. Nice, France, September 26 ~ 30, 1999, paper PD2-10
- 11 A. Mecozzi, J. D. Moores, H. A. Haus *et al.*. Soliton transmission control [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(23) :1841 ~ 1843
- 12 D. Anderson. Variational approach to nonlinear pulse propagation in optical fibers [J]. *Phys. Rev. A*, 1983, **27**(6) 3135 ~ 3145
- 13 N. Aközbeke, C. M. Bowden, A. Talebpoor *et al.*. Femtosecond pulse propagation in air: Variational analysis [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**(4) 4540 ~ 4549
- 14 Shayan Mookherjee, Amnon Yariv. Hamiltonian dynamics of breathers with third-order dispersion [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(8) :1150 ~ 1155
- 15 H. Sugahara, A. Murata, Y. Kodama. Optimal allocation of amplifiers in a dispersion-managed line for a wavelength-division-multiplexed soliton transmission system [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3) :145 ~ 147
- 16 T. Hirooka, A. Hasegawa. Chirped soliton interaction in strongly dispersion-managed wavelength-division-multiplexing systems [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10) :768 ~ 770
- 17 W. Forsyth, J. F. L. Devaney, N. J. Smith *et al.*. Dispersion management for wavelength-division-multiplexing soliton transmission [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9) 600 ~ 602