

文章编号: 0258-7025(2008)10-1516-06

# 具有高阶耦合色散系数双芯非线性 光纤耦合器开关的数值分析

李齐良<sup>1</sup> 谢玉永<sup>1</sup> 朱殷芳<sup>1</sup> 林理彬<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 杭州电子科技大学通信工程学院通信与信息系统研究所, 浙江 杭州 310018)

<sup>2</sup> 四川大学物理系, 四川 成都 610064

**摘要** 基于耦合非线性薛定谔方程(NLSE),利用分裂步长傅里叶方法(SSFM),研究了具有高阶耦合色散系数时,双芯非线性光纤耦合器中的传输和开关特性。模型中,一阶耦合色散系数的存在类似于群速度失配,二阶耦合色散系数类似于群速度色散,并且会对另一个纤芯中的信号产生线性互调制。研究表明当一阶耦合色散系数较小时,光脉冲仍能在二纤芯之间周期性耦合传输,并且表现出良好的开关特性,当一阶耦合色散系数增大时,脉冲耦合传输的周期性和陡峭的开关特性遭到破坏,光脉冲在传输中发生分裂;二阶耦合色散系数使耦合器的耦合长度减短,开关阈值功率增加,开关特性也变得更加陡峭。

**关键词** 导波光学;非线性光纤耦合器;分裂步长傅里叶方法;高阶耦合色散系数

**中图分类号** TN 256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1516

## Numerical Study of Soliton Switching in Two-Core Nonlinear Fiber Coupler with High Order Coupling Dispersion Coefficient

Li Qiliang<sup>1</sup> Xie Yuyong<sup>1</sup> Zhu Yinfang<sup>1</sup> Lin Libin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Communication and Information System, College of Telecommunication, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China  
<sup>2</sup> Institute of Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** Based on coupled nonlinear Schrödinger equation (NLSE) and the split-step Fourier method (SSFM), a numerical investigation of the propagation and the switching of fundamental solitons in two-core fiber nonlinear directional coupler (NLDC) with high order coupling dispersion coefficient is present. In this model, the first coupling dispersion is similar to the group velocity mismatch. The second coupling dispersion is similar to the group velocity dispersion (GVD), and it leads to mutual modulation for the other channel. Optical pulses propagate periodically inside fiber coupler and NLDC have sharp switching characteristics when the first order coupling dispersion coefficient is smaller, but the periodicity of the coupling transmission of optical solitons and the sharpness of switching were destroyed by the increase of the first order coupling dispersion coefficient, so optical pulses breakup in the propagation. The second order coupling dispersion coefficient reduce the coupling length, and increase the switching threshold power, as well as make switching characteristics become sharper.

**Key words** guided-wave optics; nonlinear fiber coupler; split-step Fourier method; high order coupling dispersion coefficient

## 1 引言

在非线性波导器件的研究领域内,非线性定向耦合器(NLDC)被认为有广泛的应用前景而备受关

注,这种器件可以作为超快全光开关、逻辑运算器、脉冲压缩器或鉴别器、信号放大器等,其中研究最多的是作为高速信号处理的全光开关<sup>[1~3]</sup>:当输入光

收稿日期:2007-12-03;收到修改稿日期:2008-01-24

基金项目:浙江省教育厅科技计划(Y20070128)和浙江省科技计划(2008C31010)资助项目。

作者简介:李齐良(1965—),男,湖南人,教授,主要从事非线性光纤光学和光纤通信系统方面的研究。

E-mail:liqiliang2@yahoo.com.cn

功率从临界点以下连续升至临界点以上时, 输出功率会在临界点处发生突然转换, 即功率透过率会从 0 升至 1 (或从 1 降至 0)。

随着对全光通信系统的研究和发展, 为了追求超高速稳定的传输特性, 基于全光交换的光子器件日益引起了人们的广泛重视。自从 Jensen<sup>[4]</sup> 在 1982 年发表了关于 NLDC 的经典论文以来, 人们对它的研究更加深入和广泛。研究表明 NLDC 是一种具有全光路由和开关功能的关键元器件<sup>[1~8]</sup>。在一个非线性光纤耦合器中增加入射光功率可以使信号从一个信道中被开关到另一信道中, 产生双芯之间的高速全光脉冲开关, 其开关速率可以达到飞秒量级, 脉冲衰减可以避免, 开关效率达到入射能量的 96% 左右<sup>[9,10]</sup>。

在以往的分析中, 较多地考虑了两纤芯和多纤芯常耦合系数和耦合系数随传输距离变化的耦合情况<sup>[11~13]</sup>, 却很少考虑耦合系数与频率相关性。本文从具有高阶耦合色散系数, 和交叉相位调制的耦合非线性薛定谔方程 (NLSEs) 出发, 利用分裂步长傅里叶方法 (SSFM)<sup>[14,15]</sup>, 研究高阶耦合色散系数对孤子的耦合传输以及光开关特性的影响。

## 2 数值模拟方法

对于对称耦合的光纤, 当耦合系数  $\kappa$  对频率的依赖不可忽略时, 将  $\kappa(\omega)$  在载频  $\omega_0$  附近进行泰勒级数展开

$$\kappa(\omega) \approx \kappa_0 + (\omega - \omega_0)\kappa_1 + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2\kappa_2, \quad (1)$$

式中  $\kappa_m = d^m\kappa/d\omega^m$  ( $m = 1, 2$ ) 是在载频  $\omega_0 = \omega$  处的值,  $\omega$  为光包络频率。当频域的耦合模方程转化到时域时, 耦合方程变为<sup>[15]</sup>

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A_1 + \kappa_1 \frac{\partial A_2}{\partial T} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} + \frac{i\kappa_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial T^3} = i\kappa_0 A_2 + i\gamma(|A_1|^2 + \sigma|A_2|^2)A_1, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A_2 + \kappa_1 \frac{\partial A_1}{\partial T} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} + \frac{i\kappa_2}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_2}{\partial T^3} = i\kappa_0 A_1 + i\gamma(|A_2|^2 + \sigma|A_1|^2)A_2, \quad (2b)$$

式中  $A_1$  和  $A_2$  分别为第 1 和第 2 个光纤中的脉冲慢变包络,  $\alpha$  为两纤芯损耗,  $\beta_2$  为两纤芯的群速度色散 (GVD) 系数,  $\beta_3$  为两纤芯的三阶色散 (TOD) 系数,  $\gamma$  为自相位调制 (SPM) 系数,  $\sigma$  为交叉相位调制 (XPM) 系数,  $z$  为传输距离,  $T$  为时间延迟。

忽略光纤损耗和高阶色散作用的影响, 并以孤

子为单位归一化方程组 (2) 得

$$i \frac{\partial u_1}{\partial \xi} + iK_1 \frac{\partial u_2}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \frac{1}{2} K_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} + (|u_1|^2 + \sigma|u_2|^2)u_1 + K_0 u_2 = 0, \quad (3a)$$

$$i \frac{\partial u_2}{\partial \xi} + iK_1 \frac{\partial u_1}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \frac{1}{2} K_2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} + (|u_2|^2 + \sigma|u_1|^2)u_2 + K_0 u_1 = 0, \quad (3b)$$

式中  $K_0 = \kappa_0 L_D = z_0/L_c$ ,  $K_1 = \kappa_1 T_0/|\beta_2|$ ,  $K_2 = \kappa_2/|\beta_2|$  分别为归一化的线性耦合系数、一阶耦合色散系数 (又称模间色散系数)、二阶耦合色散系数,  $z_0 = \pi L_D/2$  为孤子周期,  $L_c$  为能量从一个芯完全转换到另一个芯所要求的线性耦合长度,  $L_D = T_0^2/|\beta_2|$  为色散长度,  $T_0$  为脉冲宽度。其他归一化量有  $\xi = z/L_D$ ,  $\tau = T/T_0$ ,  $u_1 = (\gamma L_D)^{1/2} A_1$ ,  $u_2 = (\gamma L_D)^{1/2} A_2$ 。

用对称分裂步长傅里叶方法<sup>[14,15]</sup> 数值求解耦合方程组 (3)。一般来说, 沿光纤的长度方向, 色散和非线性是同时作用的。SSFM 通过假定光场从  $\xi$  到  $\xi+h$  传输的一小段距离  $h$  上, 色散和非线性效应是分别作用的, 从而得到近似的结果。即:

从  $\xi$  到  $\xi+h/2$  与  $\xi+h/2$  到  $\xi+h$ , 只考虑色散和耦合作用

$$\frac{\partial u_1}{\partial \xi} = \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} + iK_0 u_2 - K_1 \frac{\partial u_2}{\partial \tau} - \frac{i}{2} K_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2}, \quad (4a)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial \xi} = \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} + iK_0 u_1 - K_1 \frac{\partial u_1}{\partial \tau} - \frac{i}{2} K_2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2}, \quad (4b)$$

在  $\xi+h/2$  处考虑整个  $h$  长度上的非线性效应

$$\frac{\partial u_1}{\partial \xi} = i(|u_1|^2 + \sigma|u_2|^2)u_1, \quad (5a)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial \xi} = i(|u_2|^2 + \sigma|u_1|^2)u_2, \quad (5b)$$

具体来说分三步进行, 并且可通过减小步长  $h$  和增加迭代次数来达到所要求的数值的精度:

第一步, 从  $\xi$  到  $\xi+h/2$ , 对 (4) 式进行傅里叶变换得到

$$\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \xi} = \left(-\frac{i}{2}\omega^2\right)\tilde{u}_1 + i\Delta K\tilde{u}_2, \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial \xi} = \left(-\frac{i}{2}\omega^2\right)\tilde{u}_2 + i\Delta K\tilde{u}_1, \quad (6b)$$

$\tilde{u}_1, \tilde{u}_2$  分别为  $u_1$  和  $u_2$  的傅里叶变换,  $\Delta K = K_0 + K_1\omega + \frac{K_2}{2}\omega^2$ , 设  $\tilde{u}_1 = \exp(-i\omega^2\xi/2) \times U_1$ ,  $\tilde{u}_2 = \exp(-i\omega^2\xi/2)U_2$ , 将它们代入 (6) 式中得到

$$\frac{\partial U_1}{\partial \xi} = i\Delta K U_2, \quad (7a)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial \xi} = i\Delta K U_1, \quad (7b)$$

解(7) 式得

$$U_1 = C_1 \cos(\Delta K \xi) + C_2 \sin(\Delta K \xi), \quad (8a)$$

$$U_2 = D_1 \cos(\Delta K \xi) + D_2 \sin(\Delta K \xi), \quad (8b)$$

当研究的起始位置为  $\xi$  时, (8) 式中的  $\xi \rightarrow \Delta \xi$ , 其中  $C_1, C_2, D_1$  和  $D_2$  为常数, 可以由边界条件得到, 这样

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1(\xi + h/2, \omega) &= \exp(-i\omega^2 h/4) \times \\ &[\tilde{u}_1(\xi, \omega) \cos(\Delta K h/2) + i\tilde{u}_2(\xi, \omega) \sin(\Delta K h/2)], \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_2(\xi + h/2, \omega) &= \exp(-i\omega^2 h/4) \times \\ &[\tilde{u}_2(\xi, \omega) \cos(\Delta K h/2) + i\tilde{u}_1(\xi, \omega) \sin(\Delta K h/2)]. \end{aligned} \quad (9b)$$

第二步, 在  $\xi + h/2$  处考虑整个  $h$  长度上的非线性效应, 利用(5) 式得到

$$\begin{aligned} u_{1NL}(\xi + h/2, \tau) &= \text{IFFT}[\tilde{u}_1(\xi + h/2, \omega)] \times \\ &\exp[ih(|u_1(\xi, \tau)|^2 + |u_1(\xi + h, \tau)|^2 + \\ &\sigma|u_2(\xi, \tau)|^2 + \sigma|u_2(\xi + h, \tau)|^2)/2], \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} u_{2NL}(\xi + h/2, \tau) &= \text{IFFT}[\tilde{u}_2(\xi + h/2, \omega)] \times \\ &\exp[ih(|u_2(\xi, \tau)|^2 + |u_2(\xi + h, \tau)|^2 + \\ &\sigma|u_1(\xi, \tau)|^2 + \sigma|u_1(\xi + h, \tau)|^2)/2], \end{aligned} \quad (10b)$$

IFFT 表示傅里叶反变换。

第三步, 在  $\xi + h/2$  到  $\xi + h$  只考虑色散和耦合效应, 类似前面的计算得到

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1(\xi + h, \omega) &= \exp(-i\omega^2 h/4) \times \\ &\{\text{FFT}[u_{1NL}(\xi + h/2, \tau)] \cos(\Delta K h/2) + \\ &i\text{FFT}[u_{2NL}(\xi + h/2, \tau)] \sin(\Delta K h/2)\}, \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_2(\xi + h, \omega) &= \exp(-i\omega^2 h/4) \times \\ &\{\text{FFT}[u_{2NL}(\xi + h/2, \tau)] \cos(\Delta K h/2) + \\ &i\text{FFT}[u_{1NL}(\xi + h/2, \tau)] \sin(\Delta K h/2)\}, \end{aligned} \quad (11b)$$

最后在  $\xi + h$  时的值为

$$u_1(\xi + h, \tau) = \text{IFFT}[\tilde{u}_1(\xi + h, \omega)], \quad (12a)$$

$$u_2(\xi + h, \tau) = \text{IFFT}[\tilde{u}_2(\xi + h, \omega)]. \quad (12b)$$

在没有耦合和交叉相位调制的情况下 ( $K_0 = 0, K_1 = 0, K_2 = 0, \sigma = 0$ ), (3) 式有

$$u_i = A_i \text{sech}(A_i \tau) \exp(iA_i^2 \xi/2 + i\phi_i), \quad (13)$$

形式的基态孤子解<sup>[15]</sup>。式中  $A_i$  和  $\phi_i$  ( $i = 1, 2$ ) 是一个常量。

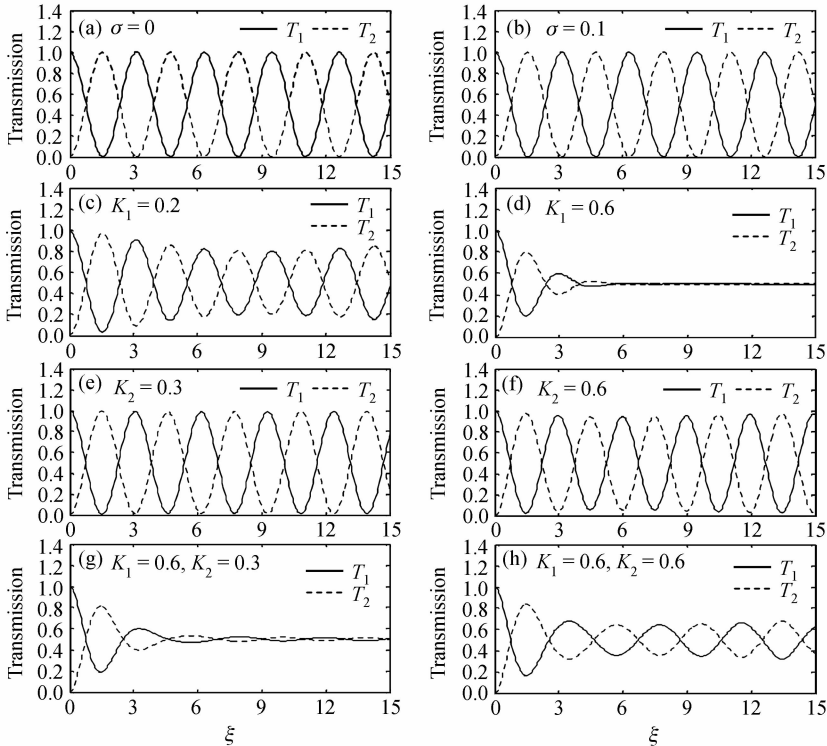


图 1 在  $K_0 = 1$  时, 不同交叉相位调制系数以及不同高阶耦合色散系数下双芯对称光纤耦合器二纤芯转换特性随传输距离  $\xi$  的变化 (实线表示纤芯 1 的转换系数, 虚线表示纤芯 2 的转换系数)

Fig. 1 Relationship of transmission with respect to distance  $\xi$  under  $K_0 = 1$ , and different XPM coefficients, as well as different highly coupling dispersion coefficients, the solid line is the transmission in core 1, the dotted line is the transmission in core 2

### 3 分裂步长傅里叶数值模拟结果

假定初始时刻只有纤芯 1 中有孤子传输, 即输入端 ( $\xi = 0$ ) 的初始输入脉冲为

$$u_1(0, \tau) = A_1 \operatorname{sech}(A_1 \tau), \quad u_2(0, \tau) = 0, \quad (14)$$

其中脉冲的初始输入功率为  $P_0$ ,  $A_1 = \sqrt{P_0}$ 。在没有耦合色散系数的影响时 ( $K_1 = 0, K_2 = 0$ ), 当耦合长度  $\xi_L = \pi/(2K_0)$  的情况下, 脉冲能量首次全部耦合到纤芯 2, 因此可以把  $\xi_L = \pi/(2K_0)$  作为对称双芯光纤耦合器的耦合长度  $L_c$ 。定义第  $i$  ( $i = 1, 2$ ) 个纤芯的转换系数为

$$T_i = \frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{+\infty} |u_i(\xi_L, \tau)|^2 d\tau, \quad (15)$$

其中  $Q = \int_{-\infty}^{+\infty} (|u_1(\xi, \tau)|^2 + |u_2(\xi, \tau)|^2) d\tau = 2A_1$  为传输过程中总的脉冲能量。

图 1 显示了在低输入功率 ( $P_0 = 1$ ) 和线性耦合系数  $K_0 = 1$  的条件下, 交叉相位调制系数  $\sigma$  以及一阶和二阶耦合色散系数变化时对称双芯光纤耦合器两纤芯传输特性随耦合距离的变化。其中图 1(a) 和 (b) 显示了在只考虑线性耦合系数  $K_0$  ( $K_1 = 0, K_2 = 0$ ) 的影响时, 交叉相位调制系数  $\sigma$  对耦合器传

输特性的影响。从中可以看到两纤芯能量随着传输距离的增加发生周期性转换, 脉冲在两纤芯之间呈现周期性的耦合传输。而交叉相位调制系数  $\sigma$  对耦合器传输特性的影响很微弱。图 1(c) 和 (d) 显示了模间色散系数  $K_1$  ( $K_2 = 0, \sigma = 0$ ) 对耦合器传输特性的影响, 可以看到当模间色散系数  $K_1$  较小时, 虽然有色散作用的影响, 但是脉冲在两纤芯之间还可以周期性地耦合传输。然而随着  $K_1$  的增大, 色散作用显著增强, 光脉冲在两芯之间耦合传输的周期性遭到破坏。图 1(e) 和 (f) 显示了二阶耦合色散系数  $K_2$  ( $K_1 = 0, \sigma = 0$ ) 对耦合器传输特性的影响, 可以看出随着二阶耦合色散系数  $K_2$  的增加, 两纤芯的耦合长度  $\xi_L$  变短, 脉冲在两纤芯耦合传输的周期变小。图 1(g) 和 (h) 显示了一阶和二阶耦合色散系数  $K_1$  和  $K_2$  ( $\sigma = 0$ ) 联合作用时对耦合器传输特性的影响, 通过与图 1(d) 的比较可以看出在具有较高的  $K_1$  时, 随着  $K_2$  的增加, 强色散作用有所减弱, 脉冲耦合传输的周期性逐渐恢复。

图 2 显示了在耦合长度  $L_c = \pi/2$ , 线性耦合系数  $K_0 = 1$  的条件下, 交叉相位调制系数  $\sigma$  以及一阶

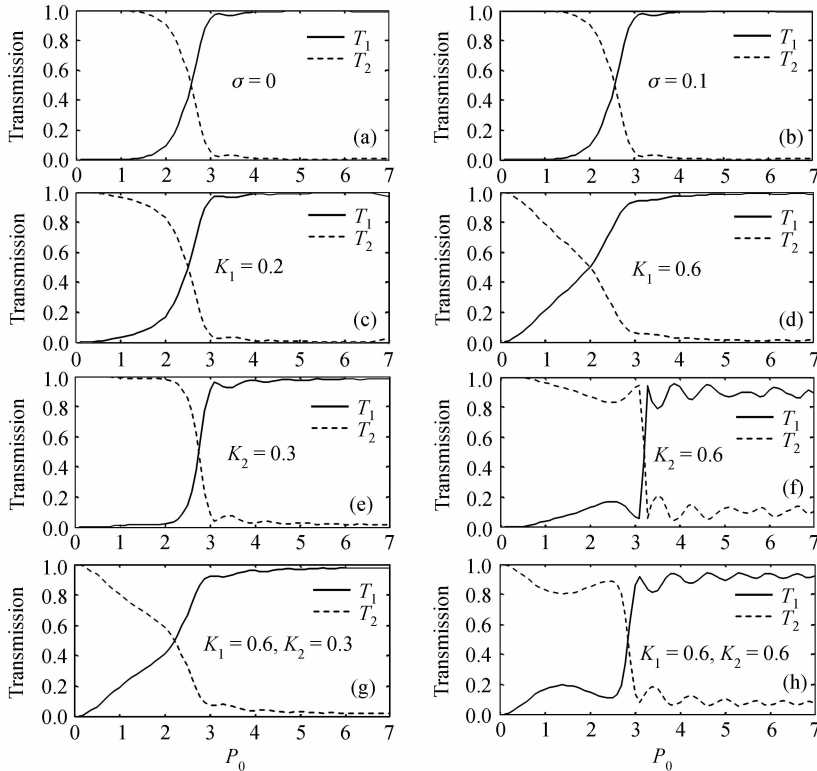


图 2 在  $K_0 = 1$  时, 不同交叉相位调制系数以及不同高阶耦合色散系数下双芯对称光纤耦合器的转换系数随初始脉冲输入功率  $P_0$  的变化 ( $L_c = \pi/2$ ) (实线表示纤芯 1 的转换系数, 虚线表示纤芯 2 的转换系数)

Fig. 2 Relationship of transmission with respect to the initial incident optical power under  $K_0 = 1$ , and different XPM coefficients, as well as different highly coupling dispersion coefficients, the solid line is the transmission in core 1, the dotted line is the transmission in core 2

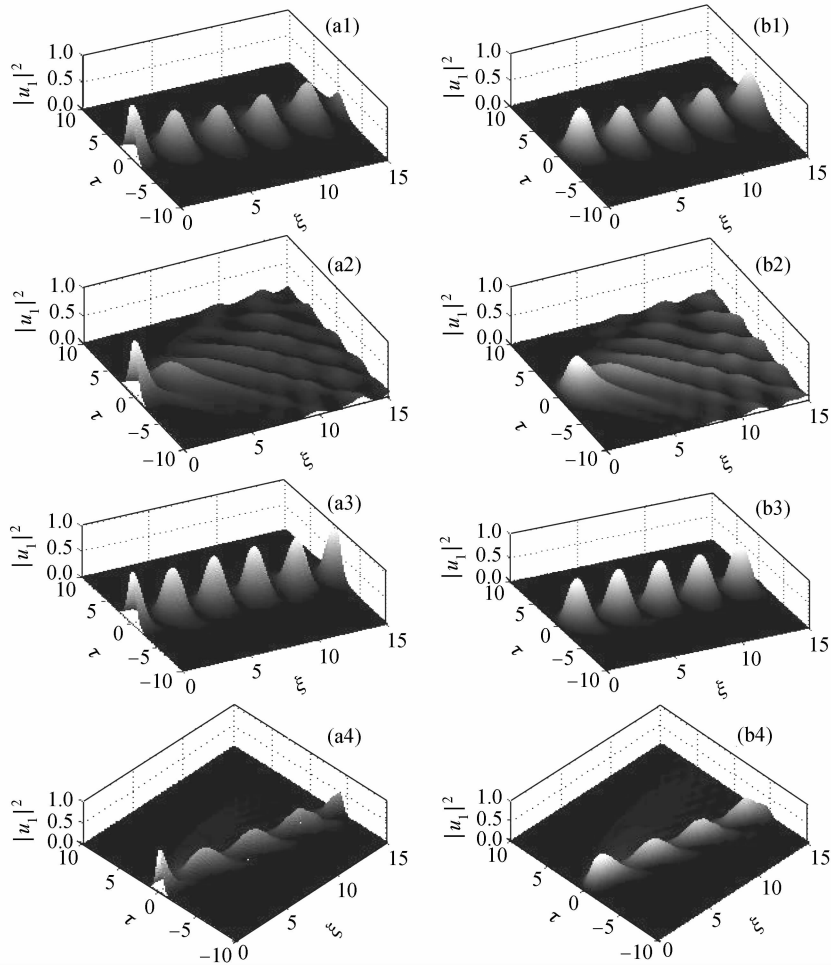


图3 在  $K_0 = 1, \sigma = 0$  时,不同高阶耦合色散系数下双芯对称光纤耦合器中脉冲的演化。(a1), (b1) 对应在  $K_1 = 0, K_2 = 0$  时,纤芯 1,2 中的传输特性;(a2), (b2) 对应在  $K_1 = 0.6, K_2 = 0$  时,纤芯 1,2 中的传输特性;(a3), (b3) 对应在  $K_1 = 0, K_2 = 0.6$  时,纤芯 1,2 中的传输特性;(a4), (b4) 对应在  $K_1 = 0.6, K_2 = 0.6$  时,纤芯 1,2 中的传输特性

Fig. 3 Evolution of the optical pulse with respect to the time and distance under  $K_0 = 1, \sigma = 0$ , and different highly coupling dispersion coefficients. (a1), (b1) account for the optical pulse evolution in core 1 and core 2 under  $K_1 = 0, K_2 = 0$ ; (a2), (b2) account for the optical pulse evolution in core 1 and core 2 under  $K_1 = 0.6, K_2 = 0$ ; (a3), (b3) account for the optical pulse evolution in core 1 and core 2 under  $K_1 = 0, K_2 = 0.6$ ; (a4), (b4) account for the optical pulse evolution in core 1 and core 2 under  $K_1 = 0.6, K_2 = 0.6$

和二阶耦合色散系数  $K_1$  和  $K_2$  变化时两芯对称光纤耦合器的二纤芯开关特性。

其中图 2(a)和(b)显示了在只考虑线性耦合系数  $K_0$  ( $K_1 = 0, K_2 = 0$ ) 的影响时,交叉相位调制系数  $\sigma$  对耦合器开关特性的影响。图 2(a)和(b)的阈值功率分别为  $P_{th} = 2.58$  和  $P_{th} = 2.73$ , 结合图 1 可以看出,在低功率输入时 ( $P_0 < P_{th}$ ), 脉冲能量在两纤芯之间周期性转换,在高功率输入时 ( $P_0 > P_{th}$ ), 脉冲能量锁定在初始输入的纤芯 1 中,只有很小一部分耦合到其他纤芯。另外,也可以看到交叉相位调制系数  $\sigma$  使耦合器的开关阈值功率增大。图 2(c)和(d)显示了模间色散系数  $K_1$  ( $K_2 = 0, \sigma = 0$ ) 对耦合

器开关特性的影响,图 2(c)和(d)的阈值功率分别为  $P_{th} = 2.51$  和  $P_{th} = 2$ , 可以看到当模间色散系数  $K_1$  较小时,虽然有色散作用的影响,但仍具有良好的开关特性。然而随着  $K_1$  的增大,色散作用显著增强,陡峭的开关特性遭到破坏,开关性能急剧变差。图 2(e)和(f)显示了二阶耦合色散系数  $K_2$  ( $K_1 = 0, \sigma = 0$ ) 对耦合器开关特性的影响,图 2(e)和(f)的阈值功率分别为  $P_{th} = 2.77$  和  $P_{th} = 3.21$ , 可以看出随着  $K_2$  的增加,开关阈值功率加大,而且开关特性也变得更加陡峭,开关响应时间变短。图 2(g)和(h)显示了一阶和二阶耦合色散系数  $K_1$  和  $K_2$  ( $\sigma = 0$ ) 联合作用时对耦合器开关特性的影响,图 2(g)和

(h) 的阈值功率分别为  $P_{th} = 2.21$  和  $P_{th} = 2.87$ , 通过与图 2(d) 的比较可以看出在具有较高的  $K_1$  时, 随着  $K_2$  的增加, 强色散作用有所减弱, 开关的陡峭性逐渐恢复。

图 3 显示了在低输入功率 ( $P_0 = 1$ ) 和线性耦合系数  $K_0 = 1$  的条件下, 忽略交叉相位调制的影响 ( $\sigma = 0$ ) 时, 一阶和二阶耦合色散系数  $K_1$  和  $K_2$  变化的情况下二芯光纤耦合器的传输特性。比较图 3(a1), (b1) 与图 3(a2), (b2) 可以看出在忽略  $K_2$  的情况下, 模间色散系数  $K_1$  的增加使光脉冲在二芯之间耦合传输的周期性遭到破坏, 脉冲随着传输距离的增加分裂成多个脉冲。比较图 3(a1), (b1) 与图 3(a3), (b3) 可以看出在忽略  $K_1$  的情况下, 二阶耦合色散系数  $K_2$  的增大使光脉冲在二芯之间能量转换的周期变小。比较图 3(a2), (b2) 与图 3(a4), (b4) 可以看出当一阶和二阶耦合色散系数  $K_1$  和  $K_2$  联合作用时, 虽然随着传输距离的增加脉冲逐渐偏离原来的中心位置, 但是脉冲耦合传输的周期性有所恢复。图 3 所显示的结果与图 1 符合得相当好。这主要是因为脉冲在时间上的走离和展宽取决于二阶耦合色散系数, 其中一阶耦合色散系数类似于群速度失配, 二阶耦合色散系数类似群速度色散, 两者相互作用使色散作用相抵消, 从而使脉冲的走离效应突出出来。

## 4 结论

运用对称分裂步长傅里叶方法研究了超短光脉冲在二芯对称非线性定向光纤耦合器中的传输特性和开关特性。模型中, 一阶耦合色散系数的存在类似于群速度失配, 二阶耦合色散系数类似群速度色散, 并且会对另一个纤芯中的信号产生线性互调制。

本文重点研究了三个耦合系数对光脉冲传输和开关特性的影响, 指出了在超短光脉冲传输时:

线性耦合系数的影响是: 在低能量输入时, 脉冲能量在二纤芯间周期性转换, 而高能量输入时, 脉冲能量绝大部分保留在初始输入的纤芯中, 只有很小一部分耦合到其他纤芯, 因此耦合器在耦合长度处表现出良好的开关特性。

一阶耦合色散系数较小时, 光脉冲仍能在二纤芯之间周期性耦合传输, 并且表现出良好的开关特性。但是随着模间色散系数的增大, 色散作用显著增强, 脉冲耦合传输的周期性和陡峭的开关特性都遭到破坏, 光脉冲在传输中发生分裂。

二阶耦合色散系数使耦合器的耦合长度减短,

光脉冲在二纤芯之间能量转换的周期变小, 同时使耦合器的开关阈值功率增加, 开关特性也变得更加陡峭。

线性耦合系数、一阶和二阶耦合色散系数同时作用时, 强色散作用有所减弱, 虽然随着传输距离的增加脉冲逐渐偏离原来的中心位置, 但是脉冲耦合传输的周期性和开关的陡峭性都逐渐恢复。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. M. Menezes, W. B. Fraga, G. F. Guimaraes *et al.*. Optical switches and all-fiber logical devices based on triangular and planar three-core nonlinear optical fiber couplers [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **276**(1):107~115
- 2 W. B. Fraga, J. W. M. Menezes, M. G. Da Silva *et al.*. All optical logic gates based on an asymmetric nonlinear directional coupler [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **262**(1):32~37
- 3 Theo P. Valkering, Joost van Honschoten, Hugo J. W. M. Hoekstra. Ultra-sharp soliton switching in a directional coupler [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(4):215~220
- 4 S. M. Jensen. The nonlinear coherent couplers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10):1580~1583
- 5 M. G. da Silva, A. M. Bastos, C. S. Sobrinho *et al.*. Analytical and numerical studies of the performance of a nonlinear directional fiber coupler with periodically modulated dispersion. [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(2):148~161
- 6 Dong Xiaowei, Xu Ou, Lu Shaohua *et al.*. Design and experiment of add/drop filter based on double-fiber-Bragg-gratings coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1106~1109
- 董小伟, 许 鸥, 鲁绍华等. 双光栅耦合器型上下话路滤波器的设计和实验 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1106~1109
- 7 Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. Study on coupling in a multi-waveguides directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1102~1106
- 梁华伟, 石顺祥, 李家立. 多波导定向耦合器耦合特性 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1102~1106
- 8 N. N. Akhmediev, A. V. Buryak. Soliton states and bifurcation phenomena in three-core non-linear fiber couplers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(5):804~809
- 9 Li Qiliang, Chen Junlang, Sun Lili *et al.*. Exact periodic solution in coupled nonlinear Schrödinger equations [J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(6):1545~1548
- 10 J. R. Costa, P. M. Ramos, C. R. Paiva *et al.*. Numerical study of passive gain equalization with twin-core fiber coupler amplifiers for WDM systems [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(12):1553~1561
- 11 Youfa Wang, Wenfeng Wang. A simple and efficient numerical method for nonlinear pulse propagation in  $n$ -core optical couplers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4):1077~1079
- 12 S. Droulias, M. Manousakis, K. Hizanidis. Switching dynamics in nonlinear directional fiber couplers with intermodal dispersion [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **240**(3):209~219
- 13 S. C. Tsang, K. S. Chiang, K. W. Chow. Soliton interaction in a two-core optical fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(6):431~439
- 14 P. Shum, M. Liu. Effects of intermodal dispersion on two-nonidentical-core coupler with different radii [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8):1106~1108
- 15 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*. transl. 3rd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹, 谈 斌等译. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2002