

文章编号: 0258-7025(2006)09-1200-06

高阶色散和五阶非线性下的 交叉相位调制不稳定性

钟先琼, 向安平, 蔡青, 罗莉

(成都信息工程学院光电技术系, 四川 成都 610041)

摘要 在同时考虑到光纤的二至四阶色散和三、五阶非线性的情况下,研究了四阶色散、五阶非线性以及入纤功率对双光束交叉相位调制(XPM)不稳定性的综合影响。研究表明,在高阶色散下,正负五阶非线性的存在仍然分别对交叉相位调制不稳定性起加强和削弱的作用;三阶色散对不稳定性增益谱无影响;当四阶和二阶色散系数同号时,四阶色散的存在导致交叉相位调制不稳定性增益谱出现一个新的远离零点的第二谱区,且该谱区由两个始终相连的小谱区组成;第一谱区的谱峰与第二谱区中靠近零点的小谱区的谱峰相当;随着其中一束光的入射功率的增加,两大谱区从分离到靠近再到合二为一,从三个谱峰过渡到两个谱峰;正(负)色散区的第二谱区中靠近(远离)零点的小谱区的谱峰和谱宽很小。在其他色散区时,不稳定性增益谱则只有第一或第二谱区。

关键词 非线性光学;交叉相位调制不稳定性;五阶非线性;高阶色散

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Modulation Instability Induced by Cross-Phase Modulation in Case of High-Order Dispersion and Quintic Nonlinearity

ZHONG Xian-qiong, XIANG An-ping, CAI Qing, LUO Li

(Department of Opto-Electronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract Taking into account the second- to the fourth-order dispersion and the quintic nonlinearity of an optical fiber, the synthetical effects of the fourth-order dispersion, the quintic nonlinearity and the input optical power on modulation instability induced by cross-phase modulation of two optical waves are investigated. The results show that, in case of high-order dispersion, the positive and negative quintic nonlinearity also intensifies and weakens the cross-phase modulation instability, respectively. The third-order dispersion does not influence the gain spectra of cross-phase modulation instability. When the fourth-order dispersion has the same sign as the second-order one, the existence of the fourth-order dispersion makes a new gain spectrum called the second one appear. And the second gain spectrum actually consists of two small spectra which are always linked together. The first gain spectrum has nearly the same peak value as that of the small spectrum closing to the zero of the second gain spectrum. With the increase of the input optical power of one of the optical waves, from being separated from each other to drawing near, the two spectra merge into single one eventually, and the peak numbers of the gain spectra also become two from three. In the second gain spectrum, the peak value and the width of the small spectrum which is closing to (far away from) the zero are comparatively smaller in the normal (abnormal) dispersion region. In the other dispersion regions, there exists only the first or the second spectral region.

Key words nonlinear optics; modulation instability induced by cross-phase modulation; quintic nonlinearity; high-order dispersion

收稿日期:2005-12-06;收到修改稿日期:2006-04-05

基金项目:四川省应用基础项目(05JY029-084)资助课题。

作者简介:钟先琼(19—),女,四川名山人,成都信息工程学院副教授,博士,主要研究方向为激光与光通信及非线性光学。

E-mail:zxqlxh@yeah.net

1 引言

光纤中色散和非线性效应的相互作用在一定条件下可能导致对光稳态的调制,这种所谓的调制不稳定性现象是光孤子产生的前奏。理论和实验均表明,该现象在高重复频率超短光脉冲的产生^[1]、超连续谱的产生^[2]等领域有重要的应用。但该现象也是劣化光纤通信系统性能的一个重要因素^[3]。因此,自1986年 Tai 等^[4]从实验上观察到光纤中调制不稳定性产生的频谱边带以来,人们开始对光纤中的调制不稳定性进行了持续而广泛的研究。

对于单光束的自相位调制不稳定性,人们的研究从只包含低阶色散(二阶)和低阶非线性(三阶)的情况^[4, 5],发展到包含高阶色散^[6~9]以及高阶色散和三、五阶非线性同时包含的情况^[10, 11]。而对于双光束交叉相位调制(XPM)不稳定性的研究则基本上只限于低阶色散和低阶非线性情形^[12, 13],包含高阶色散^[14]、三、五阶非线性^[15]的研究则很少,二者同时包含的研究更少见报道。当光脉冲的脉宽窄到亚皮秒量级^[11]或载波波长处于光纤零色散波长附近时,二阶以上色散的影响不可忽略;当入射光强较强,或在有相对较高非线性光学系数的材料中,即使是中等光强的光入射,也需考虑五阶甚至更高阶非线性折射率的影响^[16]。

本文在同时考虑到二至四阶色散和三、五阶非线性的情况下,从光纤中两光波的慢变振幅满足的扩展耦合非线性薛定谔方程组出发,导出了线性化后微扰满足的方程组和交叉相位调制不稳定性增益谱,分析了高阶色散、五阶非线性以及入纤功率对交叉相位调制不稳定性增益谱的综合影响。

2 理论分析

在忽略损耗的情况下,同偏振、不同波长的两光波在包含二至四阶色散以及三、五阶非线性的光纤中传输时,需满足下列扩展的耦合非线性薛定谔方程^[14, 15]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{1}{V_{gj}} \frac{\partial A_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial t^2} - \\ & \frac{\beta_{3j}}{6} \frac{\partial^3 A_j}{\partial t^3} + \frac{i}{24} \beta_{4j} \frac{\partial^4 A_j}{\partial t^4} = \\ & i\gamma_{1j} (|A_j|^2 + 2|A_{3-j}|^2) A_j + \\ & i\gamma_{2j} (|A_j|^4 + 3|A_{3-j}|^4 + 6|A_j|^2 |A_{3-j}|^2), \quad (1) \end{aligned}$$

式中 A_j ($j = 1, 2$) 表示两光波的慢变振幅, V_{gj} 为两光波的群速度, β_{mj} ($m = 2, 3, 4$) 分别为两光波的 m

阶群速度色散系数, γ_{1j} 为两光波的三阶非线性系数, γ_{2j} 为两光波的五阶非线性系数。

令(1)式的时间微分项为零,可得到稳态解为

$$\bar{A}_j = \sqrt{P_j} \exp(i\phi_j), \quad (2)$$

式中 P_j 表示两光波的入射光功率,将(2)式代入稳态的方程组可得非线性相移 ϕ_j 为

$$\begin{aligned} \phi_j = & \gamma_{1j} P_j z + 2\gamma_{1j} P_{3-j} z + \gamma_{2j} P_j^2 z + \\ & 3\gamma_{2j} P_{3-j}^2 z + 6\gamma_{2j} P_j P_{3-j} z, \quad (3) \end{aligned}$$

在(2)式中加入微扰项 $a_j(z, t)$ ($|a_j(z, t)|^2 \ll P_j$) 以检验解的稳定性

$$A_j = (\sqrt{P_j} + a_j) \exp(i\phi_j), \quad (4)$$

将(3),(4)式代入(1)式并线性化后可得到微扰 a_j 满足的方程组

$$\begin{aligned} & \frac{\partial a_j}{\partial z} + \frac{1}{V_{gj}} \frac{\partial a_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 a_j}{\partial t^2} - \\ & \frac{\beta_{3j}}{6} \frac{\partial^3 a_j}{\partial t^3} + \frac{i}{24} \beta_{4j} \frac{\partial^4 a_j}{\partial t^4} = \\ & i\gamma_j P_j (a_j + a_j^*) + 2i\gamma_j \sqrt{P_1 P_2} (a_{3-j} + a_{3-j}^*) + \\ & i2\gamma_{2j} P_j (P_j + 3P_{3-j}) (a_j + a_j^*) + \\ & i6\gamma_{2j} \sqrt{P_1 P_2} (P_j + P_{3-j}) (a_{3-j} + a_{3-j}^*), \quad (5) \end{aligned}$$

假设(5)式的通解形式为

$$a_j(z, t) = U_j \cos(kz - \Omega t) + iV_j \sin(kz - \Omega t), \quad (6)$$

式中 Ω 为扰动的角频率,将(6)式代入(5)式并分离实、虚部可得到 U_1, U_2, V_1, V_2 的四个齐次方程,该方程组有非平凡解的条件是系数行列式为零,由此可得波数 k 满足的色散关系

$$\begin{aligned} & \left[\left(k - \frac{\Omega}{V_{g1}} - \frac{1}{6} \beta_{31} \Omega^3 \right)^2 - f_1 \right] \times \\ & \left[\left(k - \frac{\Omega}{V_{g2}} - \frac{1}{6} \beta_{32} \Omega^3 \right)^2 - f_2 \right] = C_{\text{XPM}}, \quad (7) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} f_j = & \left(\frac{1}{2} \beta_{2j} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{4j} \Omega^4 \right) \left[\frac{1}{2} \beta_{2j} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{4j} \Omega^4 + \right. \\ & \left. 2\gamma_{1j} P_j + 4\gamma_{2j} P_j (P_j + 3P_{3-j}) \right], \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{XPM}} = & 16P_1 P_2 [\gamma_{11} + 3\gamma_{21} (P_1 + P_2)] \times \\ & [\gamma_{12} + 3\gamma_{22} (P_1 + P_2)] \times \\ & \left(\frac{1}{2} \beta_{21} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{41} \Omega^4 \right) \left(\frac{1}{2} \beta_{22} \Omega^2 - \frac{1}{24} \beta_{42} \Omega^4 \right), \quad (9) \end{aligned}$$

C_{XPM} 为交叉相位调制耦合系数。当 $\gamma_{2j} = 0$ 和 $\beta_{3j} = \beta_{4j} = 0$ 时,(5)式和(7)~(9)式分别与文献[14]和[15]中的情形一致。

设两光波的波长差异很小,则可忽略群速度色散,认为 $V_{g1} \approx V_{g2} = V_g$ [13], 且有 $\beta_{31} \approx \beta_{32} = \beta_3$ [14], 此时, (7) 式的四个根为

$$k = \frac{\Omega}{V_g} + \frac{1}{6}\beta_3\Omega^3 \pm \left\{ \frac{f_1 + f_2}{2} \pm \left[\left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right)^2 + (C_{XPM} - f_1 f_2) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \quad (10)$$

由(10)式易知,对满足不等式 $f_1 f_2 < C_{XPM}$ 的那些扰动频率, k 成为复数,调制不稳定性产生。扰动的功率增益系数为

$$g(\Omega) = 2\text{Im}(k) = \sqrt{2} \{ [(f_1 + f_2)^2 + 4(C_{XPM} - f_1 f_2)]^{1/2} - (f_1 + f_2) \}^{1/2}, \quad (11)$$

由(8)~(11)式可见,三阶色散系数对交叉相位调制不稳定性条件和增益谱无影响,但要影响扰动波数 k 的实部,只有二和四阶色散系数才对交叉相位调制不稳定性条件和增益谱有贡献,这与高阶色散下单光束的自相位调制不稳定性的情形类似。还可看出,在高阶色散和三、五阶非线性下,交叉相位调制的不稳定性条件和增益系数公式形式上与只有二阶色散和三阶非线性时的情形类似,但式中参量 f_1, f_2 和 C_{XPM} 的定义并不相同,此时的不稳定性条件及增益谱还要受到高阶色散和五阶非线性的影响。

3 计算与讨论

从下面的计算分析中将会看到,在有高阶色散

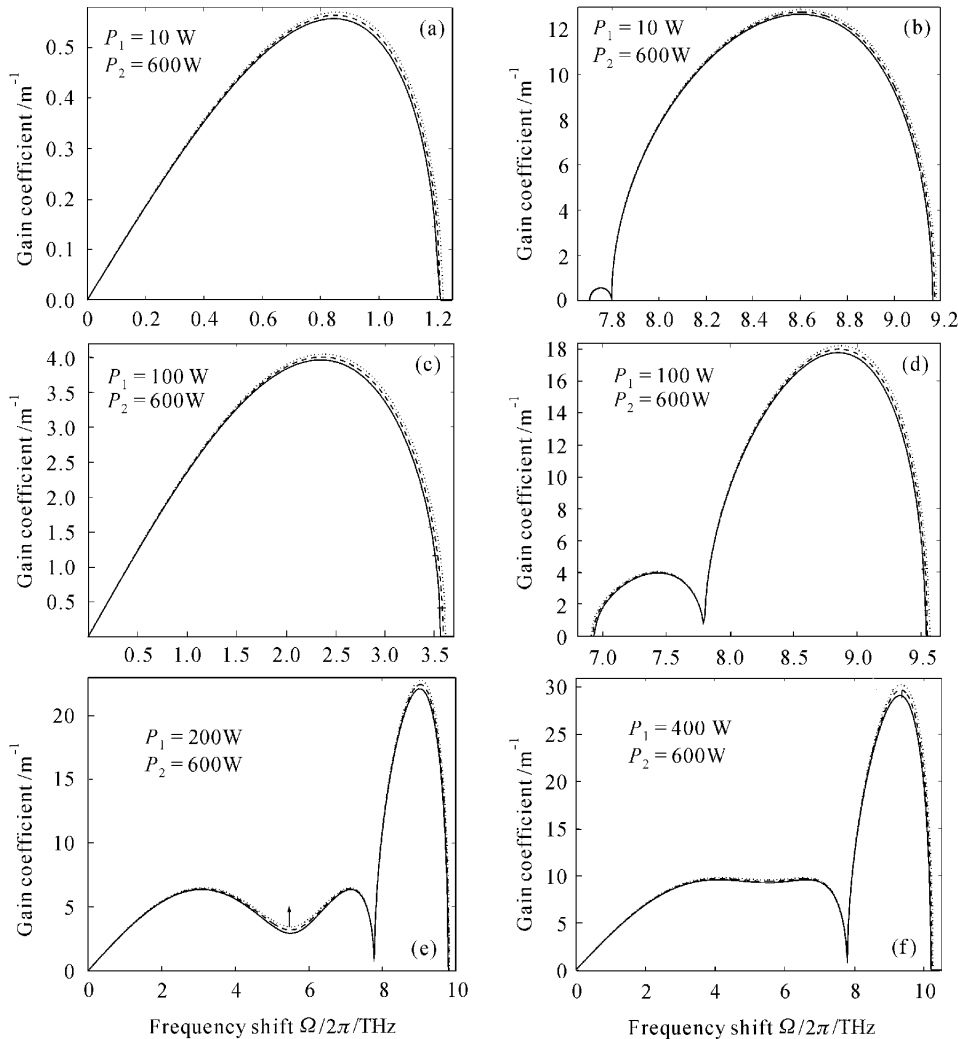


图 1 不同入纤功率 P_1 和不同五阶非线性系数下 ($\gamma_{21} = \gamma_{22} = 6 \times 10^{-5} \text{ W}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ (点线), 0 (虚线), $-6 \times 10^{-5} \text{ W}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ (实线)) 光纤正色散区的交叉相位调制不稳定性增益谱

Fig. 1 Gain spectra of modulation instability induced by cross-phase modulation in the normal dispersion region of optical fibers for different optical powers P_1 and different quintic nonlinear coefficients ($\gamma_{21} = \gamma_{22} = 6 \times 10^{-5} \text{ W}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ (dotted line), 0 (dashed line), $-6 \times 10^{-5} \text{ W}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$ (solid line))

的情况下,交叉相位调制不稳定性条件和增益谱将出现新的特点。当二、四阶色散系数同号,即满足 $\beta_{21} = \beta_{22} > 0, \beta_{41} = \beta_{42} > 0$ 或 $\beta_{21} = \beta_{22} < 0, \beta_{41} = \beta_{42} < 0$ 时,四阶色散的存在导致交叉相位调制不稳定性增益谱出现一个远离零点的新谱区,且该谱区实际上由两个始终相连的小谱区组成,下面的计算中将重点讨论这两种情况。为方便起见,统一把靠近零点的谱区称为第一谱区,远离零点的谱区称为第二谱区。计算中所取的公共参数为: $\gamma_{11} = \gamma_{12} = 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ [13], $|\beta_{21}| = |\beta_{22}| = \pm 20 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$, $|\beta_{41}| = |\beta_{42}| = \pm 0.1 \text{ ps}^4 \cdot \text{km}^{-1}$,其余参数均已标入图中。由于 $g(-\Omega) = g(\Omega)$,以下各图均只画出了 $\Omega > 0$ 的部分。

3.1 当 $\beta_{21} = \beta_{22} > 0, \beta_{41} = \beta_{42} > 0$ 时

图 1 给出了不同入纤功率 P_1 和不同五阶非线性系数下光纤正色散区的交叉相位调制不稳定性增益谱。为清楚起见,将谱图的第一和第二谱区分开画出,如图 1(a)和图 1(b)所取参数相同,图 1(c)和图 1(d)所取参数相同,图 1(a)和图 1(c)为第一谱区,图 1(b)和图 1(d)为第二谱区。每个分图中都有三条曲线,分别是五阶非线性系数为正(点线)、零(虚线)和负(实线)时的谱曲线。

由图 1 可见,当功率 P_1 较小时,两大谱区相距较远,第二谱区的谱峰和谱宽均大于第一谱区,第二大谱区中,靠近零点的小谱区的谱峰和谱宽很小,尤

其是在 P_1 很小时,该小谱区几乎不可见,但该小谱区的谱峰与第一谱区的谱峰相当。随着 P_1 的增大,两大谱区宽度逐渐增大并靠拢,谱峰也变大。当 P_1 增大到一定程度时,两大谱区分合二为一,如图 1(e)和(f),但仍能看出三个谱峰,若 P_1 再继续增大,则只能看到两个峰。图 1 中具有更高扰动角频率的第二谱区有着更高的不稳定性增益,这一物理现象意味着利用此时的交叉相位调制不稳定性可望产生更高重复频率的超短光脉冲串。此外,由图 1 还可看出,与只有三阶非线性情形相比,正(负)五阶非线性的存在使调制不稳定性增益谱的谱宽和谱峰增大(减小),起加强(削弱)调制不稳定性的作用。进一步的分析表明,五阶非线性系数的绝对值越大,功率 P_1 越大,则这种加强或减弱的作用越明显。

3.2 当 $\beta_{21} = \beta_{22} < 0, \beta_{41} = \beta_{42} < 0$ 时

图 2 给出了不同入纤功率 P_1 和不同五阶非线性系数下光纤负色散区的交叉相位调制不稳定性增益谱。其中,图 2(a)和图 2(b)的参数选取相同,分别表示第一和第二谱区。由图 2 可见,与正色散区的情形相似的是,随 P_1 的增大,两大谱区也从分离到靠近再到合二为一,从三个谱峰过渡到两个谱峰,第一谱区的谱峰也与第二谱区中靠近零点的小谱区的谱峰相当。正负五阶非线性也分别对交叉相位调制不稳定性起加强和削弱的作用。但不同的是,此处的第二谱区中,是远离零点的小谱区的谱峰和谱

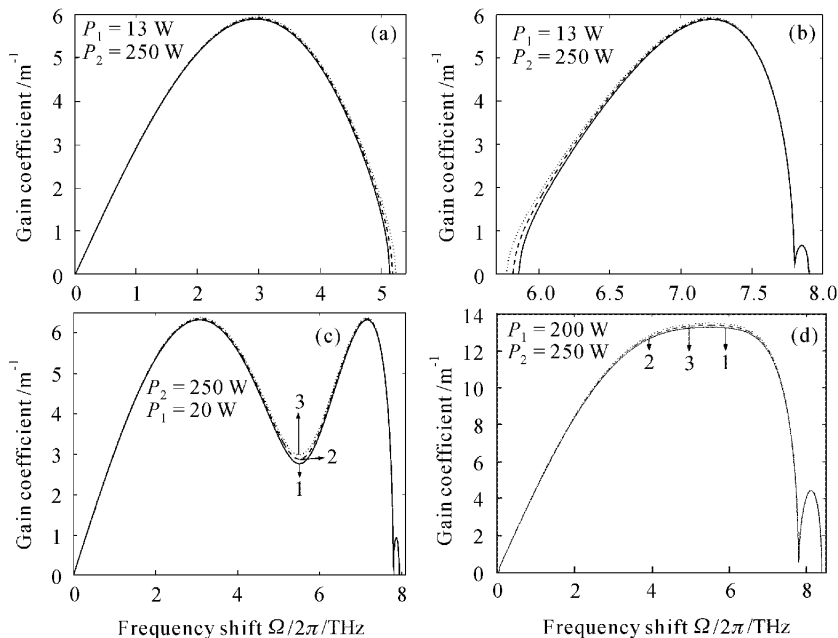


图 2 不同入纤功率 P_1 和不同五阶非线性系数下(同图 1)光纤负色散区的交叉相位调制不稳定性增益谱

Fig. 2 Gain spectra of modulation instability induced by cross-phase modulation in the abnormal dispersion region of optical fibers for different optical powers P_1 and different quintic nonlinear coefficients (same as Fig. 1)

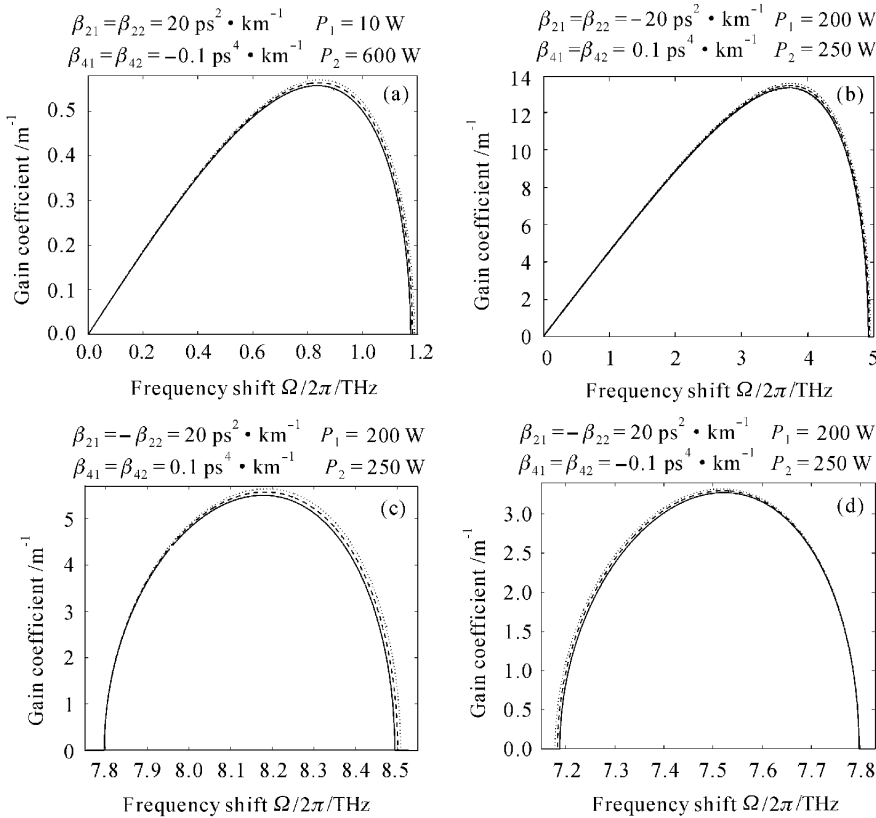


图 3 不同五阶非线性系数下(同图 1)光纤其他色散区的交叉相位调制不稳定性增益谱

Fig. 3 Gain spectra of modulation instability induced by cross-phase modulation in the other dispersion regions of optical fibers for different quintic nonlinear coefficients (same as Fig. 1)

宽很小,而且两大谱区合二为一时所需的人纤功率 P_1 和 P_2 较小。

3.3 其他色散区

进一步的研究表明,在除了 $\beta_{21} = \beta_{22} > 0, \beta_{41} = \beta_{42} > 0$ 和 $\beta_{21} = \beta_{22} < 0, \beta_{41} = \beta_{42} < 0$ 两种情况下的其他色散区,交叉相位调制不稳定性增益谱要么只有第一谱区,要么只有第二谱区(而且不是由两个小谱区组成,而是只有一个单一的谱区)。若两光波的二阶色散系数同号,则谱区靠近零点,如图 3(a)和(b)所示。反之,则谱区远离零点,如图 3(c)和(d)所示。但正负五阶非线性仍然分别对交叉相位调制不稳定性起加强和削弱的作用。此外,随着 P_1 的增大,各增益谱的谱峰和谱宽都会变大。

4 分析与结论

以上谱特征的出现可从不稳定条件 $f_1 f_2 < C_{\text{XPM}}$ 的详细分析中得到。考虑到(8)和(9)式,并令 $\beta_{21} = \beta_{22} = \beta_2, \beta_{41} = \beta_{42} = \beta_4, \gamma_{11} = \gamma_{12} = \gamma_1, \gamma_{21} = \gamma_{22} = \gamma_2$,通过繁琐的数学推导后不稳定性条件可转化为

$$(\Omega^2 - \Omega_1^2)(\Omega^2 - \Omega_2^2)(\Omega^2 - \Omega_3^2)(\Omega^2 - \Omega_4^2) < 0, \tag{12}$$

其中

$$\Omega_{1,2,3,4}^2 = \frac{6\beta_2 \pm \sqrt{36\beta_2^2 + 24\beta_4 A \pm 24\beta_4 \sqrt{A^2 + B}}}{\beta_4}, \tag{13}$$

参数 A, B 满足

$$A = \gamma_1(P_1 + P_2) + 4\gamma_2(P_1^2 + 6P_1P_2 + P_2^2), \tag{14a}$$

$$B = 12\gamma_1^2 P_1 P_2 + 64\gamma_1 \gamma_2 P_1 P_2^2 + 64\gamma_1 \gamma_2 P_2 P_1^2 + 128\gamma_2^2 P_1^2 P_2^2 + 96\gamma_2^2 P_1^3 P_2 + 96\gamma_2^2 P_2^3 P_1, \tag{14b}$$

(12) 式中,前、后都取“+”时为 Ω_1^2 ,前“+”后“-”时为 Ω_2^2 ,前“-”后“+”时为 Ω_3^2 ,前、后都取“-”时为 Ω_4^2 。

由于 γ_2 和 γ_1 数量级相差较大,在文中的人纤功率情况下,始终有 $A, B > 0$ 。分析(12)~(14)式可知,当 $\beta_2 > 0, \beta_4 > 0$ 时,必有 $\Omega_1^2 > 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$,若参数再满足 $3\beta_2^2 - 2\beta_4(\sqrt{A^2 + B} - A) > 0$ 时,则必

有 $\Omega_2^2 > 0, \Omega_4^2 > 0$ 以及 $\Omega_4^2 < \Omega_2^2 < \Omega_1^2$ 成立。此时,若满足 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 或 $|\Omega_2| < |\Omega| < |\Omega_1|$, 则由(12)式可知,调制不稳定性将形成如图 1(a)~(d)所示的两个谱区。当 P_2 增加到使参数满足 $3\beta_2^2 - 2\beta_4(\sqrt{A^2+B}-A) < 0$ 时,必有 $(\Omega^2 - \Omega_2^2)(\Omega^2 - \Omega_4^2) > 0$ 成立,而 $\Omega_1^2 > 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$ 结论不变,则此时的调制不稳定性将只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 一个谱区,如图 1(e),(f)所示。同理,当 $\beta_2 < 0, \beta_4 < 0$ 时,必有 $\Omega_4^2 > 0$ 和 $\Omega_2^2 < 0$,若参数再满足 $3\beta_2^2 - 2|\beta_4|(\sqrt{A^2+B}+A) > 0$ 时,则必有 $\Omega_1^2 > 0, \Omega_3^2 > 0$ 以及 $\Omega_1^2 < \Omega_3^2 < \Omega_4^2$ 成立。此时,若满足 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 或 $|\Omega_3| < |\Omega| < |\Omega_4|$, 则调制不稳定性将形成如图 2(a),(b)所示的两个谱区。当 P_2 增加到使参数满足 $3\beta_2^2 - 2|\beta_4|(\sqrt{A^2+B}+A) < 0$ 时,必有 $(\Omega^2 - \Omega_1^2)(\Omega^2 - \Omega_3^2) > 0$ 成立,而 $\Omega_4^2 > 0$ 和 $\Omega_2^2 < 0$ 的结论不变,则此时的调制不稳定性将只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 一个谱区,如图 2(c),(d)所示。当 $\beta_2 > 0, \beta_4 < 0$ 时,必有 $\Omega_4^2 > 0$ 和 $\Omega_2^2 < 0$,若参数再满足 $3\beta_2^2 - 2|\beta_4|(\sqrt{A^2+B}+A) > 0$ 时,则必有 $\Omega_1^2 < 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$ 成立,此时调制不稳定性只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 一个谱区,如图 3(a)所示,当 P_2 增加到使参数满足 $3\beta_2^2 - 2|\beta_4|(\sqrt{A^2+B}+A) < 0$ 时,必有 $(\Omega^2 - \Omega_1^2)(\Omega^2 - \Omega_3^2) > 0$ 成立,而 $\Omega_4^2 > 0$ 和 $\Omega_2^2 < 0$ 的结论不变,调制不稳定性将仍然只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_4|$ 一个谱区。同理,当 $\beta_2 < 0, \beta_4 > 0$ 时,必有 $\Omega_1^2 > 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$,若参数再满足 $3\beta_2^2 - 2\beta_4(\sqrt{A^2+B}+A) > 0$ 时,则必有 $\Omega_2^2 < 0$ 和 $\Omega_4^2 < 0$ 成立,此时调制不稳定性只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 一个谱区,如图 3(b)所示,当 P_2 增加到使参数满足 $3\beta_2^2 - 2\beta_4(\sqrt{A^2+B}+A) < 0$ 时,必有 $(\Omega^2 - \Omega_2^2)(\Omega^2 - \Omega_4^2) > 0$ 成立,而 $\Omega_1^2 > 0$ 和 $\Omega_3^2 < 0$ 的结论不变,调制不稳定性将仍然只有 $0 < |\Omega| < |\Omega_1|$ 一个谱区。对于 $\beta_{21} = -\beta_{22} > 0, \beta_{41} = \beta_{42} > 0$ (图 3(c))和 $\beta_{21} = -\beta_{22} > 0, \beta_{41} = \beta_{42} < 0$ (图 3(d))两情况,难以得出象(12)~(14)式那样的解析式分析。

另外,需要说明的是,据文献[9]看,调制不稳定性的增益谱峰值较小的只有几个 km^{-1} ,不同谱线峰值差异可小到零点几个 km^{-1} 。从本文各谱图来看,五阶非线性的影响似乎不大,但由于图中采用的纵坐标单位是 m^{-1} ,每个刻度代表的增益跨度值较大,因此,五阶非线性对谱图的影响在实际实验中应该是能够体现出来的。

致谢 衷心感谢陈建国教授对本文工作的大力支持。

参 考 文 献

- 1 T. Sylvestre, S. Coen, P. Emplit *et al.*. Self-induced modulation instability laser revisited: normaldispersion and dark-pulse train generation [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7):482~484
- 2 A. Demircan, U. Bandelow. Supercontinuum generation by the modulation instability [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**:181~185
- 3 D. F. Grosz, C. Mazzali, S. Celaschi *et al.*. Modulation instability induced resonant four-wave mixing in WDM systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3):379~381
- 4 K. Tai, A. Hasegawa, A. Tomita. Observation of modulation instability in optical fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(2):135~138
- 5 Xu Wencheng, Luo Aiping, Guo Qi *et al.*. Modulation instability in decreasing dispersion fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1435~1439
徐文成,罗爱平,郭旗等.色散缓变光纤中的调制不稳定性分析[J].*光学学报*, 2000, **20**(10):1435~1439
- 6 S. Pitois, G. Millot. Experimental observation of a new modulation instability spectral window induced by fourth-order dispersion in a normal dispersive single-mode optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**:415~422
- 7 F. K. Abdullaev, S. A. Darmanyan, S. Bischoff *et al.*. Modulation instability in optical fibers near the zero dispersion point [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **108**(1):60~64
- 8 Liu Xiumin, Zhang Xiaoguang, Lin Ning *et al.*. Modulation instability in non-Kerr-like optical fibers near the zero dispersion point [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(1):79~84
- 9 Zhang Shumin, Xu Wencheng, Luo Aiping *et al.*. Modulation instability of femtosecond optical pulses in decreasing dispersion fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6):656~659
张书敏,徐文成,罗爱平等.色散缓变光纤中飞秒光脉冲的调制不稳定性研究[J].*光学学报*, 2001, **21**(6):656~659
- 10 Ren Zhijun, Wang Jing, Yang Ailing *et al.*. Effect of Quintic nonlinearity on modulation instability in the anomalous dispersion regime of fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):595~598
任志君,王晶,杨爱玲等.五次非线性对光纤反常色散区调制不稳定性的影响[J].*中国激光*, 2004, **31**(5):595~598
- 11 W. P. Hong. Modulation instability of optical waves in the high dispersive cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **213**(1-3):173~182
- 12 G. P. Agrawal, P. L. Baldeck, R. R. Alfano. Modulation instability induced by cross-phase modulation in optical fibers [J]. *Phys. Rev. A*, 1989, **39**(7):3406~3413
- 13 G. P. Agrawal. Jia Dongfang, Yu Zhenhong translation. *Nonlinear Fiber Optics and Applications* [M]. Third Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 165~183
G. P. Agrawal 著,贾东方,余震虹等译.非线性光纤光学原理及应用[M].北京:电子工业出版社,2002. 165~183
- 14 Ren Zhijun, Wang Hui, Jin Hongzhen *et al.*. Cross-phase modulation instability with high-order dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):165~168
任志君,王辉,金洪震等.具有高阶色散项的交叉相位调制不稳定性分析[J].*光学学报*, 2005, **25**(2):165~168
- 15 Zhong Xianqiong, Chen Jianguo, Li Dayi. Modulation instability induced by cross-phase modulation in fibers with cubic-quintic nonlinearity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1035~1039
钟先琼,陈建国,李大义.三、五阶非线性光纤中的交叉相位调制非稳研究[J].*中国激光*, 2005, **32**(8):1035~1039
- 16 D. Pushkarov, S. Tanev. Bright and dark solitary wave propagation and bistability in the anomalous dispersion region of optical waveguides with third- and fifth-order nonlinearities [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **124**(3-4):354~364