

# 高阶非线性单模光纤中调制不稳定性 的产生和增长\*

赵 阳      杨淑雯

(深圳大学新技术研究中心 深圳 518060)

**摘要** 基于赵阳等(1989)的工作,本文归一化地给出了高阶非线性下单模光纤中调制不稳定性产生条件和频率范围;得到了最大调制增长率的存在对光纤色散的要求。对数值例子的讨论,得出了一些新的对实际应用调制不稳定性十分有用的结果。

**关键词** 高阶非线性,单模光纤,调制不稳定性,光纤色散,调制增长

## 1 前 言

单模光纤中的调制不稳定性是光纤克尔效应与光纤色散相互作用的产物。它是一种连续波弱调制的指数增长过程。调制波在增长过程中产生边带和所有高次谐波<sup>[1]</sup>。文献[2]已实验证明了调制不稳定性在单模光纤中的存在。调制不稳定性的典型应用是产生一种新型频率转换器件,即产生可调相干红外和远红外的光源<sup>[3]</sup>,其中引人注目的是光纤环形调制不稳定性激光<sup>[4]</sup>。

Kumar 等人<sup>[5,6]</sup>研究了光纤高阶非线性对高斯孤波子传输的影响。结果表明,光纤高阶非线性不仅会加速高斯孤波子的脉宽扩展,导致传输速率下降<sup>[5]</sup>,而且大大提高高斯孤波子传输所要求的光源峰值功率<sup>[6]</sup>。既然高阶非线性对孤波子传输有着不可忽视的作用,且研究调制不稳定性的基本出发方程与孤波子传输方程相同,因此研究高阶非线性对调制不稳定性的影响也很有必要。作者在文献[7]中同时考虑高阶非线性、高阶色散、光纤损耗和三阶非线性的时间微分项,对单模光纤中的调制不稳定性进行了研究,给出了调制不稳定性的产生条件。但文献[7]给出的产生条件形式复杂,使用不便,也没能给出最大调制增长存在的范围,同时文中没有给出图表和数值例子讨论,因此有些重要结论没有揭示出来。

本文在文献[7]工作的基础上,经过详细分析,归一化地给出了调制不稳定性的产生条件和频率范围,得到了最大调制增长率存在对光纤色散的要求。公式形式简洁明了,使用方便,且具有通用性。文中还与只考虑立方非线性的情况进行了比较,并给出图表和数

1992-07-07 收到,1992-11-26 定稿

\* 国家自然科学基金资助课题

赵 阳      男,1955年生,博士,副研究员,现从事光波电子学与通信专业的教学与科研工作。

杨淑雯    女,1939年生,教授,现从事光波电子学与通信专业的教学与科研工作。

值例子讨论,从而得到了一些新的结果。本文是文献[7]的进一步完善和补充。文中结果对实际使用调制不稳定性将十分有用。

## 2 光纤色散条件和调制频率范围

讨论高阶非线性单模光纤中调制不稳定性产生条件的基本出发方程是调制色散方程,已由文献[7]给出如下:

$$K = (\beta Q^2 + 2gx)Q \pm i\{-\alpha^2 Q^4 + (4a\alpha - g^2x - 6abx)xQ + (8abx - 3a^2 - 5b^2x^2)x^2\}^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $K$  为调制波数,  $Q$  为调制频率,  $\alpha = -k_0''/2$ ,  $\beta = k_0'''/6$ ,  $a = \omega_s n_2(2c)$ ,  $b = \omega_s n_4/(2c)$ ,  $g = n_2/(2c)$ ,  $k_0'' = \partial^2 k / \partial \omega^2|_{\omega=\omega_0}$  为光纤色散,  $k_0''' = \partial^3 k / \partial \omega^3|_{\omega=\omega_0}$  为高阶色散,  $c$  为真空光速,  $\omega_s$  为载波角频率,  $n_2$  为三阶非线性折射率, 它反映光纤折射率  $n$  随光纤中光强的变化而变化,  $n_4$  为五阶非线性折射率, 它反映光纤折射率  $n$  随纤中光强的平方而变化,  $x = \varphi_0^2 \exp(-2\gamma z)$ ,  $\varphi_0$  为稳态波振幅,  $z$  为传输距离,  $\gamma = \omega_s \chi/c$  为光纤损耗,  $\chi$  为折射率衰减因子。显然, 调制波数的实部  $\text{Re}K$  给出振荡不稳定性, 即引起副加调制相位, 虚部  $\text{Im}K$  给出调制不稳定性, 即稳定波幅值的调制增长。要使调制不稳定性产生, 必须  $|\text{Im}K|^2 > 0$ , 即

$$-Q^4 + AQ^2 + B > 0, \quad (2)$$

式中  $A = (4a\alpha - g^2x - 6b\alpha x)x/\alpha^2$ ,  $B = (8abx - 3a^2 - 5a^2x^2)x^2/\alpha^2$ 。(2) 式中调制频率  $Q$  有解的条件为

$$A^2 + 4B > 0. \quad (3)$$

此时  $Q$  的解为

$$A/2 - (A^2/4 + B)^{1/2} < Q^2 < A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2}. \quad (4)$$

显然, 为了得到调制不稳定性产生条件的显式, 必须对(3)和(4)式进行讨论。为数学上讨论的方便, 这里以  $B$  为讨论依据。

### 2.1 $B < 0$

**2.1.1 调制频率范围** 由(3)式得  $A > (-4B)^{1/2}$  或  $A < -(-4B)^{1/2}$ 。在  $A < -(-4B)^{1/2}$  时,  $A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2} < 0$ , 因此  $Q$  无解。当  $A > (-4B)^{1/2}$  时,  $A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2} > A/2 - (A^2/4 + B)^{1/2} > 0$ , 故(4)式成立, 得到  $Q$  的解为

$$\left. \begin{aligned} [A/2 - (A^2/4 + B)^{1/2}]^{1/2} < Q_1 < [A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2}]^{1/2}; \\ -[A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2}]^{1/2} < Q_{II} < -[A/2 - (A^2/4 + B)^{1/2}]^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

显见调制频率为正负对称频率域。

**2.1.2 光纤参数要求**  $B < 0$  和  $A > (-4B)^{1/2}$  决定了(5)式成立所要求的光纤参数。  $B < 0$  给出  $Z > 1$  或  $Z < 3/5$ , 这里  $Z = (b/a)x = n_4 \varphi_0^2 \exp(-2\gamma z)/n_2$  为归一化变量。  $A > (-4B)^{1/2}$  给出

$$[2\alpha(2 - 3Z) - g^2x/a]/(2\alpha^2) > [3 + 5Z^2 - 8Z]^{1/2}/|\alpha|. \quad (6)$$

显然具有两种情况:

(1)  $Z < 3/5$  此时  $2 - 3Z > 0$  由于  $g^2x/a$  和(6)式右边均大于零, 所以要(6)式

成立,  $\alpha$  必然要大于某一正数, 即  $k_0'$  要小于某一负数, 因此调制不稳定性在异常色散区产生。此时归一化光纤色散  $\bar{k}_0'$  满足条件

$$\bar{k}_0' < -Z/[(2-3Z) - (3+5Z^2-8Z)^{1/2}], \quad (7)$$

式中  $\bar{k}_0' = Wk_0'$ ,  $W = 4\pi c^2 n_4/(\lambda_4 n_2^2)$  为归一化参数。在光纤色散满足(7)式情况下, 归一化调制频率  $\bar{Q}$  的范围由(5)式得到

$$\left. \begin{aligned} Z^{1/2}\{(1-3Z/2) - [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2} \\ < \bar{Q}_I < Z^{1/2}\{(1-3Z/2) + [(1-3Z/2)^2 \\ + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2}, \\ \bar{Q}_{II} = -\bar{Q}_I, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中  $\bar{Q}_{I,II} = mQ_{I,II}$ ,  $m = [\lambda_4 n_4 |k_0'|/(4\pi n_2^2)]^{1/2}$  为调制频率归一化参数。

(2)  $Z > 1$  此种情况如前讨论, 得到与  $Z < 3/5$  相反的结果, 即调制不稳定性在正常色散区产生,  $\bar{k}_0'$  满足的条件为

$$\bar{k}_0' > Z/[(3Z-2) - (3+5Z^2-8Z)^{1/2}]. \quad (9)$$

归一化调制频率范围为

$$\left. \begin{aligned} Z^{1/2}\{(3Z/2-1) - [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2} < \bar{Q}_I < \\ Z^{1/2}\{(3Z/2-1) + [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2}, \\ \bar{Q}_{II} = -\bar{Q}_I. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

## 2.2 $B = 0$

**2.2.1 调制频率范围** 由(3)式得到  $A > 0$  或  $A < 0$ 。在  $A < 0$  条件下, (4)式变为  $-|A| < Q^2 < 0$ , 显然不能产生, 这在物理意义上意味着调制不稳定性不能存在。在  $A > 0$  时, (4)式变为

$$-A^{1/2} < Q < A^{1/2}, (Q \neq 0). \quad (11)$$

可见该情况下调制频率范围为除去  $Q = 0$  的正负对称频率域。

**2.2.2 光纤参数要求**  $B = 0$  给出  $Z = 3/5$  或  $Z = 1$ 。在  $Z = 3/5$  和  $A > 0$  条件下, 得到归一化光纤色散

$$\bar{k}_0' < -3. \quad (12)$$

可见调制不稳定性在异常色散区产生。此时由(11)式得到归一化调制频率范围为

$$-\sqrt{3}/5 < \bar{Q} < \sqrt{3}/5, (\bar{Q} \neq 0). \quad (13)$$

而在  $Z = 1$  时,  $A > 0$  给出归一化光纤色散

$$\bar{k}_0' > 1. \quad (14)$$

归一化调制频率范围

$$-1 < \bar{Q} < 1, (\bar{Q} \neq 0). \quad (15)$$

显然此情况调制不稳定性在正常色散区产生。

## 2.3 $B > 0$

**2.3.1 调制频率范围** 此时满足(3)式的条件为  $A > 0$  或  $A < 0$ 。当  $A > 0$  时,  $A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2} > 0$ , 而  $A/2 - (A^2/4 + B)^{1/2} < 0$ , 故(4)式成立, 由此得到  $Q$  的解为

$$-[A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2}]^{1/2} < Q < [A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2}]^{1/2}. \quad (16)$$

在  $A < 0$  时, 同样有  $A/2 + (A^2/4 + B)^{1/2} > 0$  和  $A/2 - (A^2/4 + B)^{1/2} < 0$  成立, 因此  $\bar{\omega}$  的解与(16)式相同。

由此可见,  $B > 0$  条件下, 无论是  $A > 0$  或  $A < 0$ , 调制不稳定性均能产生, 调制频率在公式上取同样形式, 只不过  $A < 0$  时的调制频率范围比  $A > 0$  时的要小。

**2.3.2 光纤参数要求** 由  $B > 0$  得到  $3/5 < Z < 1$ ,  $A \geq 0$  得到  $2\alpha(2-3Z) \geq g^2 x/a$  (同取上面或下面符号)。当  $Z = 2/3$  时,  $(2-3Z) = 0$ , 所以须对  $Z$  分段讨论。

(1)  $A > 0$  当  $3/5 < Z < 2/3$  时,  $2-3Z > 0$ , 故有

$$\bar{\omega}_0' < -Z/(2-3Z). \quad (17)$$

可见调制不稳定性在异常色散区产生。由(16)式得归一化调制频率范围为

$$\begin{aligned} -Z^{1/2}\{(1-3Z/2) + [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2} &< \bar{\omega} \\ &< Z^{1/2}\{(1-3Z/2) + [(1-3Z/2)^2 \\ &\quad + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (18)$$

当  $2/3 < Z < 1$  时,  $2-3Z < 0$ , 得

$$\bar{\omega}_0' > Z/(3Z-2). \quad (19)$$

调制不稳定性在正常色散区产生。 $\bar{\omega}$  的解为

$$\begin{aligned} -Z^{1/2}\{(3Z/2-1) + [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2} &< \bar{\omega} \\ &< Z^{1/2}\{(3Z/2-1) + [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (20)$$

当  $Z \rightarrow 2/3$  时,  $\bar{\omega}_0' \rightarrow \pm\infty$ 。

(2)  $A < 0$  同理讨论,  $3/5 < Z < 2/3$  时, 得到

$$\bar{\omega}_0' > -Z/(2-3Z). \quad (21)$$

由于(21)式右边为负, 所以调制不稳定性既可在正常色散区产生, 又可在异常色散区产生。

当  $2/3 < Z < 1$  时

$$\bar{\omega}_0' < Z/(3Z-2). \quad (22)$$

这时(22)式右边为正, 因此物理意义同(21)式。

在(21)和(22)式情况下, 归一化调制频率范围具有相同的表示:

$$\begin{aligned} -Z^{1/2}\{\pm(1-3Z/2) + [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2} &< \bar{\omega} \\ &< Z^{1/2}\{\pm(1-3Z/2) + [(1-3Z/2)^2 + (8Z-3-5Z^2)/4]^{1/2}\}^{1/2}, \end{aligned} \quad (23)$$

式中  $\bar{\omega}_0'$  为负, 取正号, 反之取负号。

至此, 我们完整地、归一化地给出了高阶非线性下调制不稳定性产生的频率范围和对光纤色散的要求, 使文献[7]的结果得到了进一步完善。为了使上述解析结果得到更清晰的直观映象, 图1示出调制不稳定性产生对光纤色散的要求范围。图中不同的阴影区表示调制不稳定性在不同的  $Z$  范围内存在的  $\bar{\omega}_0'$  区域, 图中( )里的数字表示阴影区对应的本节公式标号。图2是光纤色散为异常色散时归一化调制频率范围与  $Z$  的关系。图3是光纤色散为正常色散的情况。图中阴影区为归一化调制频率范围, ( )中的数字与图1中的意义相同。

必须指出, 上述所有归一化调制频率  $\bar{\omega}$  的表示式中, 均忽略了三阶非线性的时间微分项的影响。原因是, 对于  $\text{SiO}_2$  光纤,  $n_2 = 1.2 \times 10^{-22}(\text{m/V})^2$ ,  $n_3 = 4.4 \times 10^{-37}(\text{m/}$

$V)^{[5,6]}$ 。在  $\lambda_0 = 0.1 \sim 1.6 \mu\text{m}$  时,若取  $|k_0''| > 10^{-3} \text{ps}^2/\text{km}$ , 则  $g^2/(b|a|)$  约小于  $10^{-3}$  数量级。事实上,实际光纤的  $|k_0''|$  不会太小,因此  $A$  中的  $g^2$  项完全可以忽略,这表明三阶

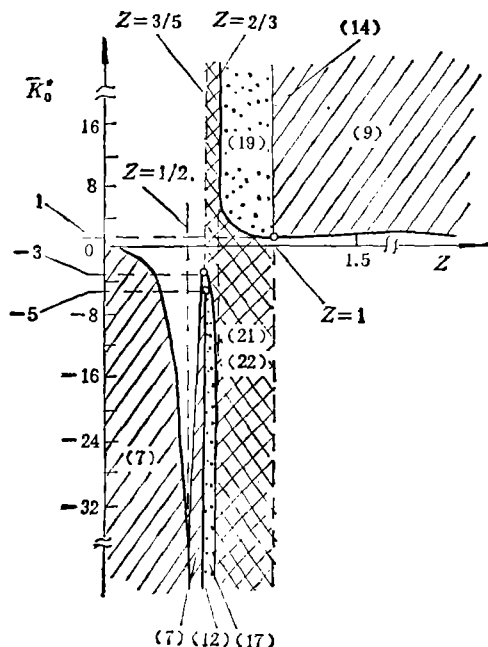


图1 调制不稳定性的产生对光纤色散的要求范围随  $Z$  的变化  
图中 ( ) 里的数字表示  $\bar{K}_0'$  区域对应的本节公式标号。

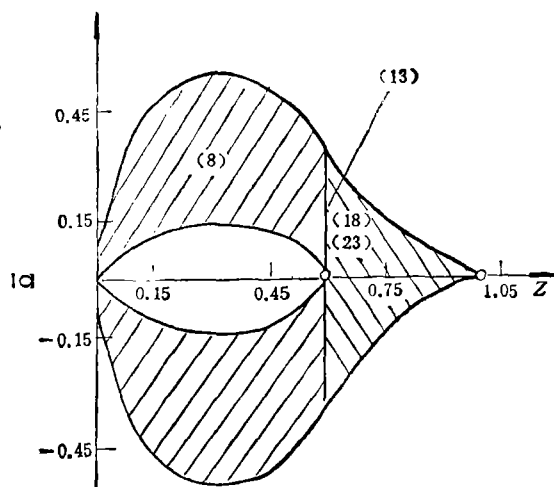


图2 光纤色散为异常色散时归一化调制频率范围与  $Z$  的关系  
图中 ( ) 里的数字意义同图 1。

非线性的时间微分项对调制不稳定性的贡献很小。

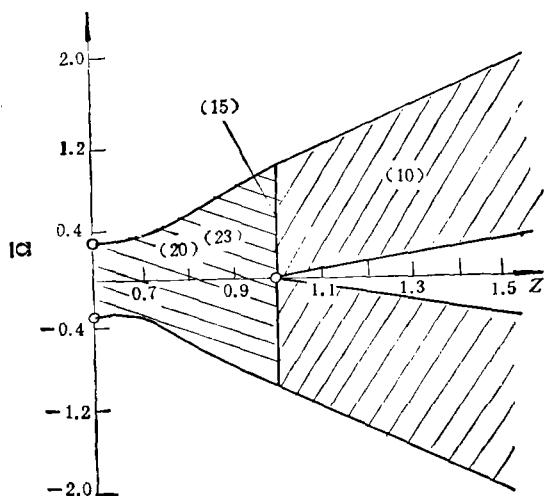


图3 光纤色散为正常色散时归一化调制频率范围与  $Z$  的关系  
图中 ( ) 里的数字意义同图 1。

从调制不稳定性存在对  $\bar{K}_0''$  的要求和调制频率范围的公式可见,  $Z$  参数起完全决定性作用, 用连续波注入功率  $P$  表示, 则有

$$Z = 2n_1 P \exp(-2\gamma z) / \epsilon_0 n_1 c A_{\text{eff}} n_2, \quad (24)$$

式中  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $A_{\text{eff}}$  为光纤纤芯有效面积。显然, 对于给定的光纤, 注入功率  $P$  和光纤长度可完全确定调制不稳定性。对  $\text{SiO}_2$  光纤, 取  $A_{\text{eff}} = 10 \mu\text{m}^2$ , 光纤长度用有效长度

$$z_{\text{eff}} = \int_0^z \exp(-\gamma z) dz \approx 1/\gamma$$

代替, 线性折射率  $n_0 \approx 1.5$ , 则  $Z < 3/5$  相当于  $P < 24 \text{W}$ ;  $Z > 1$  相当于  $P > 40 \text{W}$ 。所以在低注入光功率下, 应利用光纤异常色散区产生调制不稳定性。若

注入光功率  $P = 1\text{W}$ , 即  $Z = 0.025$ , 为工作在异常色散区, 取光源波长  $\lambda_s = 1.4\mu\text{m}$ , 则要产生调制不稳定性, 必须选取  $k_0'' < -4 \times 10^{-6}\text{ps}^2/\text{km}$ , 即  $k_0'' \lesssim 0$ , 这时若取归一化光纤色散  $(\partial V_g/\partial\omega)\omega/V_g = -1.3 \times 10^{-3}$ , 即  $k_0'' = -4.83\text{ps}^2/\text{km}$ , 我们可获得调制频率范围为  $0.96 < Q_1(\text{THz}) < 1.41$  和  $-1.41 < Q_{11}(\text{THz}) < -0.96$ , 这时最大调制频率深度  $(Q/\omega)_{\max} \approx 0.3\%$ ; 若  $P = 10\text{W}$ , 即  $Z = 0.25$ , 则  $k_0''$  必须满足  $k_0'' < -10^{-4}\text{ps}^2/\text{km}$ , 这时若  $k_0''$  同样取  $k_0'' = -4.83\text{ps}^2/\text{km}$ , 则可有  $2.4 < Q_1(\text{THz}) < 3.7$ ,  $-3.7 < Q_{11}(\text{THz}) < -2.4$ ,  $(Q/\omega_s)_{\max} \approx 0.6\%$ . 这表明异常色散区低注入功率下, 可获取  $10^{12}\text{Hz}$  数量级的调制频率和约  $1\%$  的调制频率深度. 但当  $P > 40\text{W}$  时, 为产生调制不稳定性, 光纤需工作在正常色散区, 这样可取  $\lambda_s = 0.82\mu\text{m}$ . 如当  $P = 50\text{W}$ , 即  $Z = 1.25$ , 则光纤色散须满足  $k_0'' > 4 \times 10^{-5}\text{ps}^2/\text{km}$ , 此时若取  $(\partial V_g/\partial\omega)\omega/V_g = 5.2 \times 10^{-3}$ , 即  $k_0'' = 11.32\text{ps}^2/\text{km}$ , 则可获得  $0.25 \times 10^{13} < Q_1(\text{Hz}) < 3.29 \times 10^{13}$  与  $-3.29 \times 10^{13} < Q_{11}(\text{Hz}) < -0.25 \times 10^{13}$  的调制频率范围, 和  $(Q/\omega_s)_{\max} = 2.2\%$  的频率调制深度; 若取  $P = 100\text{W}$ , 即  $Z = 2.5$ , 则  $k_0''$  须满足  $k_0'' > 6 \times 10^{-5}\text{ps}^2/\text{km}$ , 这时若光纤色散仍为  $k_0'' = 11.32\text{ps}^2/\text{km}$ , 则调制频率范围变为  $0.85 \times 10^{13} < Q_1(\text{Hz}) < 8.23 \times 10^{13}$  和  $-8.23 \times 10^{13} < Q_{11}(\text{Hz}) < -0.85 \times 10^{13}$ , 调制频率深度  $(Q/\omega_s)_{\max} \approx 6\%$ . 可见, 高功率正常色散区调制频率可达  $10^{14}\text{Hz}$  数量级, 调制频率深度可达  $10\%$ . 同时正如图 3 所示, 正常色散区调制频率范围与调制频率深度随光功率增大而增大. 而对低功率异常色散情况, 当  $P > 12\text{W}$  时, 调制频率范围和调制频率深度却有所减小, 这在图 2 中可清楚地看到. 当  $3/5 < Z < 1$ , 即  $24 < P(\text{W}) < 40$  下, 显然调制不稳定性可在正常色散区或异常色散区产生, 但比较图 2 与图 3 (注意两图中  $Q$  的刻度), 可见在同样的光功率下, 正常色散区比异常色散区可获得较宽的调制频率范围和较深的频率调制深度.

### 3 最大调制增长和对应的调制频率

由(1)式, 文献[7]已给出最大调制增长率  $|\text{Im}K|_{\max}$  与其对应的调制频率  $Q_m$  为

$$|\text{Im}K|_{\max} = [a^2 - 2a(g^2/\alpha + 2b)x + (4b^2 + 3bg^2/\alpha + g^4/4\alpha^2)x^2]^{1/2}x, \quad (25)$$

$$Q_m = \pm \{[2a/\alpha - (g^2 + 6b\alpha)x/2\alpha^2]x\}^{1/2}. \quad (26)$$

由(26)式可见, 要  $|\text{Im}K|_{\max}$  存在, 需  $2a/\alpha - (g^2 + 6b\alpha)x/2\alpha^2 > 0$ , 即要求成立  $\bar{k}_0''(3Z - 2) > Z$ , 由此得到

$$\bar{k}_0'' < -Z/(2 - 3Z), \quad (Z < 2/3); \quad (27)$$

$$\bar{k}_0'' > Z/(3Z - 2), \quad (Z > 2/3). \quad (28)$$

显然(27)式表明  $|\text{Im}K|_{\max}$  产生在异常色散区, (28)式表明产生在正常色散区, 如图 4 所示. 但是,  $|\text{Im}K|_{\max}$  存在对光纤色散的要求也应满足前节给出的产生条件. 因此比较图 4 与图 1 可知, 异常色散区  $|\text{Im}K|_{\max}$  存在条件的满足, 由调制不稳定性的产生条件(7), (12)和(17)式决定; 而在正常色散区, 则为除去  $B > 0, A < 0$  时的全部调制不稳定性存在区域.

如前所述, 忽略  $g^2$  项, 可得(25)和(26)式的归一化形式为

$$\overline{|\text{Im}K|_{\max}} = d|\text{Im}K|_{\max} = Z(1 - 4Z + 4Z^2)^{1/2}, \quad (29)$$

式中  $d = \lambda_s n_s / (\pi n_s^2)$ 。这里值得注意, 由于忽略了三阶非线性的时间微分项, 因此导致  $|\text{Im}K|_{\max}$  与色散无关。

$$\bar{Q}_m = \pm [2Z(\pm 2 \mp 3Z)]^{1/2}, \quad (30)$$

式中负色散取上面符号, 正色散取下面符号。

为清楚地看出高阶非线性的影响, 取光纤参数同前节, 异常色散区取  $\lambda_s = 1.4\mu\text{m}$ ,

$k_0'' = -4.83\text{ps}^2/\text{km}$ ; 正常区取  $\lambda_s = 0.82$

$\mu\text{m}$ ,  $k_0'' = 11.32\text{ps}^2/\text{km}$ , 根据 (29) 和

(30) 式, 我们给出了  $|\text{Im}K|_{\max}$  和  $\bar{Q}_m$  随

注入连续波功率的变化曲线图 5—图 8。

由于  $Z < 2/3$  相当于  $P < 26.8\text{W}$ , 因此

图 5—图 6 为异常色散区情况, 图 7—图

8 为正常色散区情况。图中虚线为只考虑

三阶非线性的退化情况。应该指出,

在只考虑三阶非线性情况下, 调制不稳定

性只在异常色散区产生<sup>[1,7]</sup>, 但为比较

起见, 在图 7—图 8 中, 我们仍然用虚线

示出只考虑三阶非线性的情况。从图 5

—图 6 看出, 异常色散区当注入光功率

较小时, 高阶非线性的影响很小, 但当

光功率较大时, 影响增强, 其结果导致

$|\text{Im}K|_{\max}$  和  $\bar{Q}_m$  均比只考虑三阶非线性

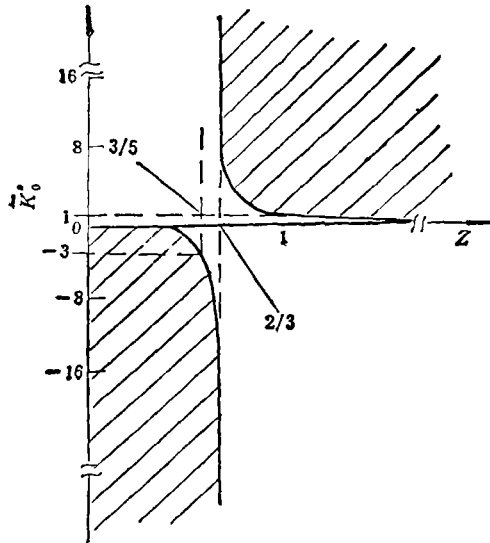


图 4 (27)和(28)式给出的最大调制增长率存在的区域

时小的多。这表明频率调谐范围减小, 调制增长减慢。实用中, 总是希望在最大的调谐范

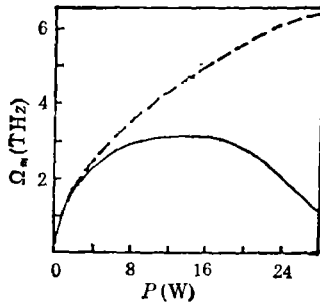


图 5 异常色散区 ( $\lambda_s = 1.4\mu\text{m}$ ,  $k_0'' = -4.83\text{ps}^2/\text{km}$ )  $\bar{Q}_m(\text{THz})$  随  $P(\text{W})$  的变化  
虚线为只考虑三阶非线性的情况

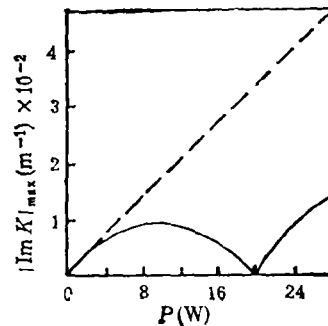


图 6 对应于图 5 情况的  $|\text{Im}K|_{\max}(\text{m}^{-1})$  随  $P(\text{W})$  的变化  
虚线为只考虑三阶非线性的情况

围内获得最大的增长, 因此本例中  $P \approx 10\text{W}$  为最佳运用功率。在正常色散区, 由图 7—图 8 看出, 在高阶非线性下, 随着注入功率的增大,  $|\text{Im}K|_{\max}$  和  $\bar{Q}_m$  迅速增长, 调制不稳定性增强。因此高注入功率下, 利用调制不稳定性在正常色散区的产生构成频率转换器件是可行的。

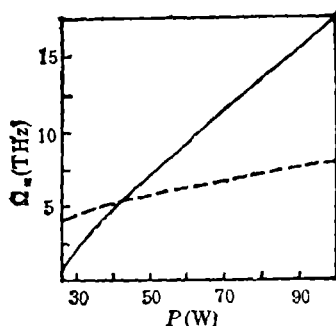


图7 正常色散区( $\lambda_0 = 0.82\mu\text{m}$ ,  $k_0'' = 11.32\text{ps}^2/\text{km}$ )  $Q_m(\text{THz})$ 随  $P(\text{W})$ 的变化  
虚线为异常色散区( $\lambda_0 = 1.4\mu\text{m}$ ,  $k_0'' = -11.32\text{ps}^2/\text{km}$ )只考虑三阶非线性的情况

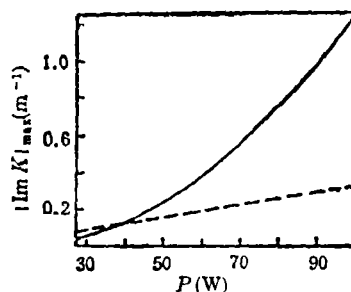


图8 对应于图7情况的  $|\text{Im} K|_{\text{max}} (\text{m}^{-1})$  随  $P(\text{W})$ 的变化

值得注意,光纤损耗的存在使得调制不稳定性是一个动态过程,即调制增长率和调制频率随光纤长度的增长而变小,故在给定的非损耗补偿光纤中,要维持调制增长的存在,光纤传输长度必存在一个极值  $z_{\text{max}}$ ,这一极值条件已有文献[7]给出,此处不在赘述。

最后指出,当光功率高到超过其它非线性效应(如受激喇曼效应,受激布里渊效应等)的阈值时,这些非线性效应与调制不稳定性将同时产生。但由于这些非线性效应的产生机制与调制不稳定性的产生机制不同,因此上述理论分析仍然成立。实际应用中可选择光纤参数使  $Q_m$  区别于其它非线性效应产生的新的频率分量,利用滤波选出  $Q_m$ 。

## 4 结 论

基于文献[7]的工作,本文归一化地给出了高阶非线性下单模光纤中调制不稳定性的产生条件和频率范围,得到了最大调制增长率存在对光纤色散的要求。分析结果表明,高阶非线性下的调制不稳定性既可在异常色散区产生又可在正常色散区产生,前者所需连续波注入功率取小值范围,后者取大值范围。异常色散区,存在一最佳注入功率,在此功率下,可得到最大调制增长率和最大调制频率范围。高阶非线性的影响使异常色散区的调制增长率和调制频率范围减小,使正常色散区的调制增长率和调制频率随连续波注入功率增大而增大。分析结果还表明,三阶非线性的时间变化项对调制不稳定性的影响可完全忽略。本文结果将为实际应用调制不稳定性提供理论依据。

**致谢** 本文工作得到浙江大学周文教授、北京大学徐承和教授、东南大学杨祥林教授、西安电子科技大学吴鸿适教授的热情鼓励和支持,在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Hasegawa A, Brinkman W F. IEEE J. of QE, 1980, QE-16(7): 694—697.
- [2] Tai K, Hasegawa A, Tomita A. Phys. Rev. Lett., 1986, 56(2): 135—138.
- [3] Sudo S, Itoh H. Opt. Quan. Electron., 1990, 22(2): 187—212.
- [4] Nakazawa M, Suzuki K, Haus H A. IEEE J. of QE, 1989, 25(9): 2036—2044; 2045—2052.



- [5] Kumar A, Sarkar S N, Ghatak A K. Opt. Lett., 1986, 11(5): 321—323.  
[6] Kumar A, Sodha M S. Electron. Lett., 1987, 23(6): 275—276.  
[7] 赵 阳,杨祥林. 物理学报, 1989, 38(4): 541—547.

## PRODUCTION AND GROWTH OF MODULATION INSTABILITY IN MONOMODE OPTICAL FIBERS WITH HIGH-ORDER NONLINEARITY

Zhao Yang Yang Shuwen

(Advanced Technology Research Center, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

**Abstract** Based on the work of Zhao Yang et al. (1989), the producing conditions and frequency domains of the modulation instability in monomode optical fibers with high-order nonlinearity are given in normalized form. The requirements of group velocity dispersion for the existence of maximal modulation growth are obtained. Some new results which are very useful in practical applications of the modulation instability are demonstrated by the numerical examples.

**Key words** High-order nonlinearity, Monomode optical fibers, Modulation instability, Fiber dispersion, Modulation growth