

文章编号: 1001-3806(2004)02-0156-04

# 不同剖面色散缓变光纤中调制不稳定性分析

任志君, 王 晶, 杨爱玲, 王珍丽

(中国海洋大学 光学光电子实验室, 青岛 266071)

**摘要:** 研究了不同群色散剖面结构的色散缓变光纤中调制不稳定性增益谱。结果表明, 各种群色散剖面光纤的增益谱宽并不相同, 指数型光纤的增益谱宽与传输距离是一单调关系; 线性、高斯型、对数型光纤的增益谱宽变化曲线都有一个谷底; 双曲线型光纤情况较为特殊, 它的增益谱宽先是展宽, 然后又逐渐减小。并从调制不稳定性的角度解释了用色散缓变光纤实现脉冲压缩的机理。

**关键词:** 调制不稳定性; 色散缓变光纤; 群色散剖面; 压缩

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Modulation instability in decreasing dispersion fiber with different profiles

REN Zhi-jun, WANG Jing, YANG Ai-ling, WANG Zhen-li

(Optical & Optoelectronics Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The gain spectrum of modulation instability is studied in the condition of decreasing dispersion fiber with different group dispersion profiles. The gain spectral width is found to vary as the type of the group dispersion profile changes. The spectral width is discovered simply relevant to transmitted distance for the type of exponential, and the curve of spectral width versus transmitted distance has a vale for the type of linear, Guassian and logarithm, but a firstly broadening and then a gradual decrease is gotten for the type of hyperbolic. Besides the mechanism of pulse compression is interpreted by means of modulation instability.

**Key words:** modulation instability (MI); decreasing dispersion fiber (DDF); group dispersion profile; compression

### 引 言

许多光学非线性系统都表现出一种不稳定性, 它使稳态的弱的微扰光波的振幅指数增长, 其产生存在一定的频率范围, 范围越宽, 越易产生调制不稳定性效应(modulation instability, MI)<sup>[1]</sup>。在时域, 调制不稳定性表现为将连续或准连续的波分裂成一系列超短脉冲, 在频域里表现为谱线出现旁瓣, 这些现象都已在实验上被观察到<sup>[2]</sup>。

色散缓变光纤(decreasing dispersion fiber, DDF)概念提出的本意是利用 DDF 对孤子的无畸变传输特性来实现超高速光孤子通信<sup>[3]</sup>。后来一些学者把它用于激光器中产生高质量的孤子脉冲串<sup>[4,5]</sup>, 另一些学者用它来对超短光脉冲进行压缩<sup>[6]</sup>。实际上, DDF 的这些优良特性, 是与 MI 分不开的<sup>[7]</sup>。因此, DDF 中 MI 分析引起了人们的关注。研究发现, 指数型 DDF 中 MI 增益谱比常规光纤宽<sup>[8,9]</sup>。由于

在实际的应用中, 用于通信系统的 DDF 由于特定的需要及不同的制造工艺, 有多种不同的群色散剖面结构<sup>[10,11]</sup>, 有报道称<sup>[12]</sup>: 不同群色散剖面的 DDF 对同一脉冲有不同的压缩效果, 特别是考虑压缩质量时更是如此。有鉴于此, 作者研究了不同群色散剖面 DDF 中 MI 特性, 希望能为实际中更好地利用不同类型的 DDF 提供指导。

### 1 理 论

光波在光纤中传输时所满足的非线性薛定谔方程为<sup>[11]</sup>:  $\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i \gamma |A|^2 A$  式中  $z$  为传输距离,  $t$  是时间,  $A$  为慢变包络振幅,  $\beta_1$  为光波群速度的倒数,  $\beta_2$  为光纤二阶色散系数,  $\alpha$  为光纤损耗系数,  $\gamma$  为光纤非线性系数。选取随脉冲群速度移动的坐标系, 引进下列变换:

$$\left. \begin{aligned} T &= t - \beta_1 z \\ \xi &= [1 - \exp(-\alpha z)] / \alpha \\ q &= \exp(\alpha z / 2) A \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(1) 式变化为:

$$i \frac{\partial q}{\partial \xi} - \frac{\beta_2}{2} \exp(\alpha z) \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + \gamma |q|^2 q = 0 \quad (3)$$

作者简介: 任志君(1974), 男, 硕士, 讲师, 主要从事非线性光纤光学研究。

E-mail: renzjw@sohu.com

收稿日期: 2003-05-12; 收到修改稿日期: 2003-07-30

式中,  $\xi$  为归一化距离,  $T$  为群延迟时间,  $q$  为归一化振幅。不难验证, (3) 式的稳定解为:

$$\bar{q} = \sqrt{P_0} \exp[i \gamma P_0 \xi] \quad (4)$$

式中,  $P_0$  为初始光强。为了研究解的稳定性, 设微扰项  $|a(z, t)| \ll \sqrt{P_0}$ , 微扰该稳态:

$$q = (\sqrt{P_0} + a) \exp[i \gamma P_0 \xi] \quad (5)$$

并把(4)式代入(3)式, 并使  $a$  线性化, 有:

$$i \frac{\partial a}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \beta_2 \exp(\alpha) \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} - \gamma P_0 (a + a^*) \quad (6)$$

式中,  $a^*$  为  $a$  的复共轭。假设该方程有如下的通解形式:

$$a(z, T) = a_1 \cos(K\xi - \Omega T) + i a_2 \sin(K\xi - \Omega T) \quad (7)$$

式中,  $K$  和  $\Omega$  是微扰的波数和频率, 把(7)式代入(6)式, 有:

$$\begin{aligned} & -K a_1 \sin(K\xi - \Omega T) + i K a_2 \cos(K\xi - \Omega T) + \\ & \frac{i}{2} \beta_2 \exp(\alpha) [-a_1 \Omega^2 \cos(K\xi - \Omega T) - \\ & i a_2 \Omega^2 \sin(K\xi - \Omega T)] = 2i \gamma P_0 a_1 \cos(K\xi - \Omega T) \end{aligned} \quad (8)$$

令(8)式的虚、实部分别为 0, 则有如下方程组:

$$-K a_1 + \frac{1}{2} \beta_2 \exp(\alpha) \Omega^2 a_2 = 0 \quad (9a)$$

$$K a_1 - \frac{1}{2} \beta_2 \exp(\alpha) \Omega^2 a_2 = 2 \gamma P_0 a_1 \quad (9b)$$

该方程组是以  $a_1, a_2$  为未知数的奇次方程组。该方程组有非平凡解的充要条件是系数行列式为 0, 由此可得  $K$  和  $\Omega$  满足下列关系:

$$K = \pm \frac{1}{2} |\beta_2| \exp(\alpha) \Omega [\Omega^2 + \text{sgn}(\beta_2) \Omega_c^2]^{1/2} \quad (10)$$

式中, 
$$\Omega_c^2 = \frac{4 \gamma P_0}{|\beta_2|} \exp(-\alpha) \quad (11)$$

分析(10)式的物理意义: 当  $\text{sgn}(\beta_2) = -1$ , 即  $\beta_2 < 0$  时, 说明在光纤的反常色散区,  $K$  在  $\Omega < \Omega_c$  时变为虚数, 此时微扰  $a(z, T)$  随传输距离的增加指数增长。它导致了对(4)式稳态解的自发调制, 所以一般把这种不稳定性称作自发 MI。

## 2 调制不稳定性分析

### 2.1 普通光纤中 MI 分析

为了便于分析比较, 除特别指明外, 在所有的数值模拟中, 所有参数取值如下: 损耗  $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$ ,  $P_0 = 1 \text{ W}$ ,  $\gamma = 2 \text{ W}^{-1} / \text{km}$ ,  $\beta_2(0) = -20 \text{ ps}^2 / \text{km}$ 。

下面考虑增益不稳定性的增益谱, 令  $\text{sgn}(\beta_2) =$

$-1$ , 由(10)式可得:

$$g(\Omega) = 2 \text{Im}(K) = |\beta_2| \exp(\alpha) \Omega (\Omega_c^2 - \Omega^2)^{1/2} \quad (12)$$

$g(\Omega)$  代表相对于原始频率  $\omega_0$  偏移  $\Omega$  后扰动的增益。

在普通光纤中, 当二阶群色散系数  $\beta_2$  为常数时, 有下列关系式时:

$$\Omega_{\max} = \pm \frac{\Omega_c}{\sqrt{2}} = \pm \left[ \frac{2 \gamma P_0}{|\beta_2|} \right]^{1/2} \exp(-\frac{1}{2} \alpha) \quad (13)$$

$g(\Omega)$  有最大值:

$$g_{\max} = g(\Omega_{\max}) = \frac{1}{2} |\beta_2| \Omega_c^2 = 2 \gamma P_0 \exp(-\alpha) \quad (14)$$

由  $g(\Omega) = 0$ , 可计算增益谱的频移范围, 增益谱半宽度为:

$$\Delta \Omega = \Omega_c \quad (15)$$

从(14)式和(15)式能够看出, 当光纤中的损耗不能忽略时, 最大增益值及增益谱宽度均随着传输距离的增大而降低, 如图 1 所示。

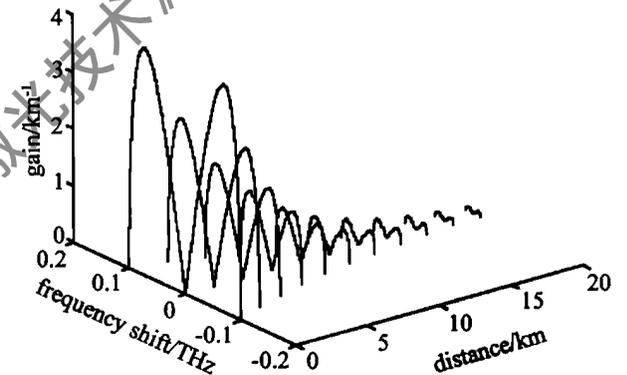


Fig. 1 Gain spectrum evolution of modulation instability

可以知道, 当连续波在光纤中传输时, 光纤中的 MI 作用导致连续微扰光波的增幅的指数增长, 其产生存在一定的频率范围, 范围越宽, 越易产生 MI。MI 是生成孤子的前提, 没有 MI 的区域不能产生孤子脉冲串<sup>[1]</sup>。而形成孤子的自发 MI 的一个明显特征是在中心频率  $\omega_0$  两边的  $\pm \Omega_{\max}$  处产生两个对称的旁瓣。在时域中, 连续波变为一个周期性的脉冲序列, 其频率为:

$$f_{\max} = \Omega_{\max} / 2\pi \quad (16)$$

周期为: 
$$T_m = f_{\max}^{-1} = 2\pi / \Omega_{\max}$$

可见, 形成的孤子串周期与  $\Omega_{\max}$  成反比, 由(13)式, 当普通光纤中损耗存在时, 见图 1, 随着  $\Omega_{\max}$  的减小,  $T_m$  越来越大, 相当于孤子逐渐展宽。再由(14)式可知最大增益值也越来越小, 对应孤子脉冲的峰值功率逐渐降低。这就从 MI 的角度分析了在有损耗光纤中, 为什么孤子逐渐衰减和展宽的原因, 这也

为下面利用 DDF 实现脉冲无畸变传输和压缩提供了思路。

## 2.2 不同群色散剖面 DDF 中 MI 分析

在 DDF 中,  $\beta_2$  为一变量, 此时有:

$$\beta_2 = \beta_2(z) = \beta_2(0)h(z) \quad (17)$$

式中,  $\beta_2(0)$  为初始群色散系数,  $\beta_2(z)$  为光纤  $z$  处的群色散系数,  $h(z)$  为群色散纵向剖面表达式。不同类型的 DDF, 其群色散剖面表达式一般设计成线性、指数型、高斯型、对数型和双曲线型, 对应的数学形式如下<sup>[10,11]</sup>:

$$\text{linear: } h(z) = \frac{1-\delta}{L}z + 1 \quad (18a)$$

$$\text{exponential: } h(z) = \exp\left(\frac{-z}{L} \ln \delta\right) \quad (18b)$$

$$\text{Gaussian: } h(z) = \exp\left(\frac{-z^2}{L^2} \ln \delta\right) \quad (18c)$$

$$\text{logarithm: } h(z) = \ln\left[e + \frac{z}{L}(e^{1/\delta} - e)\right] \quad (18d)$$

$$\text{hyperbolic: } h(z) = \frac{L}{(\delta - 1)z + L} \quad (18e)$$

本文中的  $h(z)$  用参数  $L$  和  $1/\delta$  来表示,  $L$  为光纤长度,  $1/\delta$  为光纤末端色散缓变系数, 因此有  $1/\delta = h(L)$ 。这说明了各 DDF 色散缓慢变小的变化系数除首尾外(分别为 1 和  $1/\delta$ ) 各不相同, 这 5 种 DDF 的群色散剖面如图 2 所示。

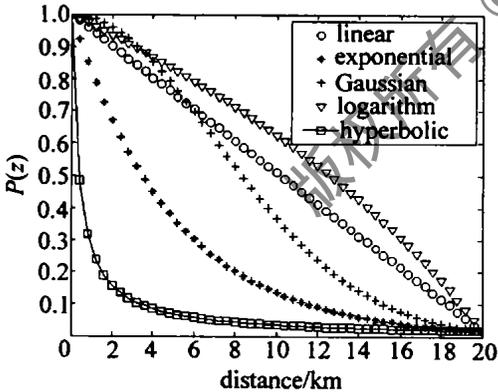


Fig. 2 Schematic of the different group dispersion profiles

把(17)式代入(11)式, 并根据(18)式中的各表达式, 可算出不同剖面 DDF 的最大增益值及增益谱宽度。本文中所有研究只给出增益谱宽的对比图, 而不给出增益值大小的对比图的主要原因是: 方程(1) 稳态解的线性稳定性分析, 仅仅给出了由方程(12) 决定的微扰初期的指数增长。显然, 指数增长不能无限地保持下去, 因为  $\omega_0 \pm \Omega$  频率分量的增长是以频率为  $\omega_0$  的泵浦波的消耗为代价的, 而泵浦波的消耗最终将减慢增长率, 因此, 增益值本身的大小

并不重要。而增益谱宽及与增益谱宽密切相关的  $\pm \Omega_{\max}$  直接决定了孤子脉冲序列的产生范围及周期, 因此, 是所要研究的主要内容。

先看典型的指数型 DDF 中色散参数  $\mu$  ( $\mu = \ln \delta / L$ ) 的大小对增益谱宽的影响, 如图 3 所示。并

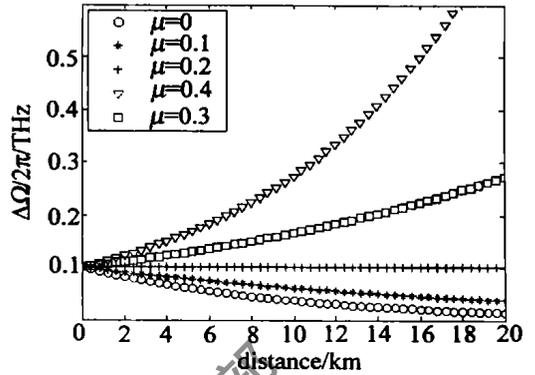


Fig. 3  $\Delta\Omega$  as a function of propagation distance  $z$  and dispersion parameter  $\mu$

由(16)式可得出如下结论: 当  $\mu = 0$  时, 即为普通光纤时的情况, 对应的三维演化图示已在图 1 中给出; 当  $\mu = 0.1$  时, 此时 DDF 中的色散缓变参数小于损耗系数, 相对于普通光纤, 增益谱宽的减小速度变慢了, 在时域, 相当于减缓了脉冲的展宽; 当  $\mu = 0.2$  时, 此时色散缓变参数与损耗系数大小相等, 增益谱宽为一常数, 对应在时域, 孤子脉冲串的周期不随着传输距离的改变而改变, 实现了无畸变稳定传输; 当  $\mu = 0.3, 0.4$  时, 增益谱宽越来越大, 且色散缓变参数越大, 谱宽增大的速度越快, 这等价于由 MI 形成的孤子脉冲串频率越来越大, 周期越来越小, 即孤子脉宽变窄了, 这是国内外的一些学者利用 DDF 实现脉冲压缩的主要依据。

图 4 为不同群色散剖面 DDF 在相同条件下的 MI 增益谱半宽度与传输距离关系图。为了补偿损

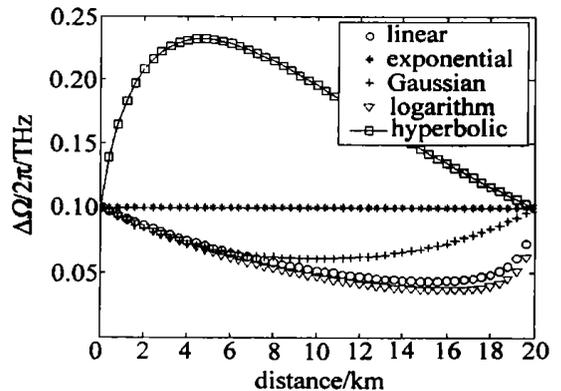


Fig. 4  $\Delta\Omega$  as a function of propagation distance  $z$  in different DDF

耗, 令指数型 DDF 中色散缓变参数与损耗系数相等, 有  $\mu = \ln \delta / L = 0.2 \text{ dB/km}$ , 由  $L = 20 \text{ km}$ , 可算出

$\delta \approx 54.5982$ 。再一一代入 (18) 式, 就可算出不同 DDF 对应的群色散剖面系数。

从图 4 中可知: 除起点和终点外, 不同类型光纤的增益谱宽并不相同。指数型 DDF 的增益谱宽不随传输距离的改变而改变。线型、高斯型及对数型 DDF 的增益谱宽都有一个减小阶段, 然后又逐渐增加, 并最终重合在一起。其中, 线型和对数型 DDF 的增益谱宽比较接近; 它们的共同特点是, 当增益谱宽减小到最小值后, 随之马上急剧增大, 并迅速恢复到初始形状, 可见, 在光纤末端, 增益谱变化率非常大。所以利用这两种光纤实现无畸变传输时, 中继器之间的光纤长度一定要严格与色散参量相匹配, 微小的误差将导致增益谱巨大的变化。相对于这两种光纤, 高斯型光纤的性能就优越得多, 它更接近于理想的指数型 DDF。双曲线型 DDF 情况较为特殊, 它的增益谱宽有一个增大过程, 然后又逐渐减小。对应的, 在时域, 在传输的中间过程, 脉冲宽度实际上变窄了。较窄的脉冲实际上正是高速光纤通性系统所追求的。因此, 这样的光纤可能对未来的超高速通信系统有一定实际意义。

利用 DDF 增大增益谱宽, 是实现脉冲压缩的前提。还以指数型 DDF 为基准, 为使增益谱宽变大, 取较大的色散缓变参量  $\mu = \ln \delta / L = 0.25 \text{ dB/km}$  来数值模拟, 此时有  $\delta = 148.4132$ 。代入 (18) 式, 可算出各种类型 DDF 的色散剖面表达式, 图 5 中即为各种类型的 DDF 增益谱宽随传输距离变化曲线。从图中能看出, 与输入端相比, 5 种光纤的输出端的增益谱宽都增加了, 但曲线的中间过程并不相同。线

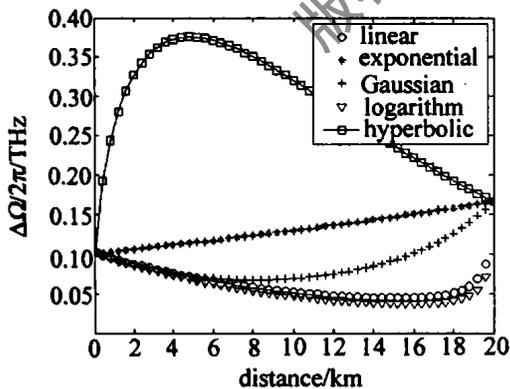


Fig.5  $\Delta \Omega$  as a function of propagation distance  $z$  in different DDF when dispersion parameter is larger

型、高斯型、对数型 DDF 的增益谱宽变化曲线都有一个谷底; 指数型 DDF 的增益谱宽单调增加; 而双曲线型 DDF 在中间有一连续过程的增益谱宽比输出端更宽且有一峰值, 对应的, 时域中的脉冲将有一个先压窄后展宽的过程, 如果能在脉宽最窄处提取脉冲的话, 不仅可使脉冲压缩率最大, 还可有效地节约光纤长度。

### 3 结论

通过上面 MI 分析, 对于各种类型的 DDF, 可得出如下的结论: 以无畸变稳定传输为目的, 指数型 DDF 的性能是最好的; 线型、高斯型、对数型 DDF 中间较窄的增益谱宽会加大码间干扰的可能, 增大误码率; 而双曲线型 DDF 中间增大了的增益谱宽将使时域的脉冲窄化, 有触发高阶效应的可能, 引起脉冲的畸变; 如果在要求并不严格的情况下, 高斯型 DDF 可代替指数型 DDF 用于无畸变传输。以脉冲压缩为目的, 双曲线型 DDF 的中间过程有更宽的脉宽, 对应着时域中更高的压缩比, 有望在脉冲压缩领域发挥作用。

### 参考文献

- [1] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optical. New York: Academic Press, 1989. 104~ 111.
- [2] MANYSHEV P V, STANISLAV V, DIANOV E M. IEEE J Q E, 1991, QE27 (10): 2347~ 2355.
- [3] TAJIMA K. Opt Lett, 1987, 12(1): 54~ 56.
- [4] CHERNIKOV S V, TAYLOR JR, MAMYSHEV P V *et al.* Electron Lett, 1992, 28(10): 391~ 392.
- [5] SCHELL M, BMBERG D, BOGATYRJOV V A *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1994, 6(10): 1191~ 1193.
- [6] 徐文成, 张书敏, 罗爱平 *et al.* 光学学报, 2002, 22(4): 389~ 392.
- [7] XU W Ch, ZHANG Sh M, LUO A P. 光子学报, 2000, 29(11): 1005~ 1008.
- [8] 徐文成, 罗爱平, 郭旗 *et al.* 光学学报, 2000, 20(10): 1435~ 1439.
- [9] 王晶, 冯占民, 苗洪利 *et al.* 光电子·激光, 2000, 11(1): 83~ 85.
- [10] LIMA J L S, SOMBRA A S B. Opt Commun, 1999, 163: 292~ 300.
- [11] da SILVA M G, NOBREGA K Z, SOMBRA A S B. Opt Commun, 1999, 171: 351~ 364.
- [12] MOSTOFI A, HATAMFHANZA H, CHU P L. IEEE J Q E, 1997, 33(4): 620~ 628.