

# 有源光纤自相位调制的频谱展宽估计

吴重庆 赵宏静 王 智 刘 艺

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘 要** 有源光纤的两种非线性效应——非线性极化(克尔效应)和增益饱和效应都将引起光信号频谱展宽。增益饱和导致包络失真,同时也影响到由非线性极化所造成的自相位调制。这种影响可用一个函数  $f(z)$  表示。本文从非线性薛定谔方程出发,导出了  $f(z)$  的级数表达式,并指出有源光纤因自相位调制的频谱展宽可按  $B = 2F(1 + \mu)$  估计。由于有源光纤的  $f(z)$  远大于 1,即使光纤较短,但其影响在高增益高输出功率的多级放大器级联的系统中将成为不可忽略的因素。

**关键词** 有源光纤, 自相位调制, 频谱展宽, 光纤非线性。

## 1 引 言

掺铒光纤或其它有源光纤的非线性引起的频谱展宽是未来超高速光纤通信系统中必须考虑的问题。有源光纤的非线性主要是由两个原因引起: 1) 光纤的非线性极化效应(即克尔效应)。这种与光功率成正比的非线性极化效应要比普通光纤显著。2) 放大器增益的非线性引起包络失真,进一步加剧了自相位调制的频谱展宽。

光纤的三阶非线性极化在准单色、单模、单偏振的情况下,表现为自相位调制现象。相位调制是指光信号的光载频的相位随距离变化的现象(当然,它也随时间作非线性变化)。光载频相位随时间的非线性变化意味着瞬时频率的变化,即产生频率啁啾,所以相位调制和频率啁啾是同一概念。注意,相位调制不是有源光纤的非线性所特有的现象,群速度色散同样可以引起相位调制或频率啁啾,例如,高斯脉冲引起的频移为<sup>[1]</sup>:

$$\delta\omega = - \frac{\partial\Delta\phi}{\partial t} = \operatorname{sgn}(\beta_2) \frac{z/L_D}{1 + (z/L_D)^2} \frac{t_1}{T_0^2} \quad (1)$$

式中  $t_1 = t - \beta_1 z$  是考虑到群时延后新的时间变量,  $L_D = T_0^2/2\beta_2$  称为色散长度,  $T_0$  是高斯脉冲的起始半宽度,  $\beta_2$ 、 $\beta_1$  为  $\beta(\omega)$  在光载频处的二阶和一阶导数。由上式可看出,啁啾  $\delta\omega$  与  $\beta_2$  符号有关。在正常色散区;  $\beta_2 > 0$ , 这时在  $t_1 < 0$  的脉冲前沿瞬时频移  $\delta\omega < 0$ , 而在  $t_1 > 0$  的脉冲后沿,  $\delta\omega > 0$ 。在反常色散区的情况刚好相反。需要指出的是,群速度色散虽然引起频率啁啾,但从频谱的角度看,输出光信号的幅频特性并没有变化。尽管光信号的包络随着距离的增加不断展宽而使频谱变窄,但光载频却因啁啾而频谱变宽,总的频谱(幅频特性)没有变化,更没有新的频率分量产生。

非线性极化引起的相位调制与群速度色散引起的相位调制不同,有两个重要特点: 1) 相

移与输入脉冲的幅度有关,这正是称为“自”相位调制的理由所在;2)有新的频率分量产生,并导致频谱加宽。除了非线性极化(克尔效应)产生的自相位调制外,另一类非线性就是放大器增益的非线性,一般表示为<sup>[2]</sup>:

$$G(z) = \frac{G_0}{1 + P(z)/P_{\text{sat}}} \quad (2)$$

式中  $G_0$  为初始最大增益,  $P(z)$  为在  $z$  处光功率,  $P_{\text{sat}}$  为饱和光功率,对于给定的光纤它是一个常数。考虑到泵浦功率  $P_p(z)$  和信号功率  $P_s(z)$ , 有  $P(z) = P_p(z) + P_s(z)$ 。忽略  $P_p(z)$  随  $z$  的变化,认为它是常数,则(2)式可改写为

$$G(z) = \frac{G'_0}{1 + P_s(z)/P'_{\text{sat}}} \quad (3)$$

由于  $G'_0 = g_0 P_{\text{sat}} / (P_{\text{sat}} + P_p)$ ,  $P'_{\text{sat}} = P_{\text{sat}} + P_p$ 。在不会引起误解的情况下,可将  $G_0$ 、 $P_{\text{sat}}$ 、 $P(z)$  代替  $G'_0$ 、 $P'_{\text{sat}}$ 、 $P_s(z)$ 。这样,考虑到泵浦功率后的饱和效应,(2)式仍然适用。由于增益的非线性,导致脉冲波形出现非线性的畸变,这就已经引起了频谱展宽。而畸变了波形由于非线性极化的自相位调制而进一步加剧了频谱展宽。

## 2 有源光纤的自相位调制

光脉冲在有源光纤中的传输,满足非线性薛定谔方程<sup>[2-4]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial T} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - i \gamma |A|^2 A + \frac{\alpha}{2} A = \frac{G_0}{1 + P(z)/P_{\text{sat}}} A \quad (4)$$

式中  $A = A(z, T)$  为光场的包络幅度函数,  $\gamma = n_2 \omega_0 / c A_{\text{eff}}$  称为非线性系数,其中  $n_2$  为非线性折射率系数,  $A_{\text{eff}}$  为有效截面,  $c$  为真空中的光速,  $\alpha$  为光纤的损耗。

首先,将  $A(z, T)$  归一化,即令  $t = T - \beta_1 z$  和  $A(z, t) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) U(z, t)$ , 且假定  $U(0, 0) = 1$ ,  $A(0, 0) = \sqrt{P_0}$ , 代入原方程,得:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + i \gamma P_0 \exp(-\alpha z) |U|^2 U + \frac{G_0 U}{1 + (P_0/P_{\text{sat}}) \exp(-\alpha z) U^2} \quad (5)$$

由于有源光纤通常较短,而且也为了简化问题,在考虑自相位调制时,忽略色散和损耗的影响,于是可得:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = i \gamma P_0 |U|^2 U + \frac{G_0 U}{1 + (P_0/P_{\text{sat}}) U^2} \quad (6)$$

令  $U(z, t) = |U(z, t)| \exp[i\Phi(z, t)]$ , 代入上述方程,并使实部、虚部分别相等,得:

$$\ln |U(z, t)|^2 + (P_0/P_{\text{sat}}) |U(z, t)|^2 = 2G_0 z + \ln |U(0, t)|^2 + (P_0/P_{\text{sat}}) |U(0, t)|^2 \quad (7)$$

$$\Phi(z, t) = \gamma P_0 |U(z, t)|^2 z \quad (8)$$

由上式可以看出,首先是光脉冲的包络  $|U(z, t)|$  随着  $z$  变化,而自相位调制又与  $|U(z, t)|^2$  成正比,因此  $\Phi(z, t)$  不随  $z$  呈线性变化。这一点与无源光纤有很大的不同。无源光纤的自相位调制(考虑损耗  $\alpha$  但忽略色散)为<sup>[3]</sup>:

$$\Phi = |U(0, t)|^2 z_{\text{eff}} / L_{\text{NL}} \quad (9)$$

其中  $z_{\text{eff}} = (1/\alpha) [1 - \exp(-\alpha z)]$ ,  $L_{\text{NL}} = (\gamma P_0)^{-1}$ 。由上式可看出,无源光纤的相位调制只与  $z = 0$  时的初始输入脉冲的包络  $|U(0, t)|^2$  有关。而且由于  $z_{\text{eff}} < z$ , 所以损耗的作用相当于缩短了自相位调制的距离。但在有源光纤中,由于它有放大作用,  $|U(z, t)|^2 > |U(0, t)|^2$ , 且

$$|U(z, t)|^2 \approx |U(0, t)|^2 \exp[2G(z)z] \quad (10)$$

所以, 增益的作用相当于延长了自相位调制的作用距离, 因此, 在有源光纤中自相位调制现象更加显著。

### 3 包络的非线性失真

增益的非线性引起的包络失真, 本身就导致频谱展宽, 而自相位调制又与包络密切相关, 所以包络的非线性失真是导致频谱展宽的重要因素。为求光信号的包络  $|U(z, t)|$ , 必须解代数方程(7)。但它是超越方程, 不可能找到封闭形式的解, 只能用数值解法或近似解。为此, 可用级数解法找到它的近似解。记  $x = |U(z, t)|^2$ ,  $b = |U(0, t)|^2$ ,  $P_0/P_{\text{sat}} = k$ , 可得:

$$\ln x + kx = 2G_0z + \ln b(t) + kb(t) \quad (11)$$

将上方程的左端展成关于  $z$  的幂级数(泰勒级数)。有:

$$\ln x = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{a_n}{n!} z^n, \quad a_n = \frac{\partial^n}{\partial z^n} (\ln x) \Big|_{z=0}, \quad x = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^{(n)}(0)}{n!} z^n$$

并令方程两边  $z^n$  的同次项相等, 可得:

$$a_n + kx^{(n)}(0) = \begin{cases} \ln b + kb & n = 0 \\ 2G_0 & n = 1 \\ 0 & n = \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

由此可以得出:

$$\begin{aligned} x(0) = b(t) &= |U(0, t)|^2, & x'(0) &= \frac{2G_0b}{1+kb}, \\ x''(0) &= \frac{4G_0^2b}{(1+kb)^3}, & x'''(0) &= \frac{8G_0^3b}{(1+kb)^5}(1-2kb) \\ x^{(4)}(0) &= \frac{16G_0^4b}{(1+kb)^7}(1-8kb+6k^2b^2), \\ x^{(5)}(0) &= \frac{32G_0^5b}{(1+kb)^9}(1-22kb+58k^2b^2-24k^3b^3) \end{aligned}$$

于是:

$$\begin{aligned} x(z, t) = b \Bigg[ &1 + \frac{2G_0z}{1+kb} + \frac{(2G_0z)^2}{2!} \frac{1}{(1+kb)^3} + \frac{(2G_0z)^3}{3!} \frac{1-2kb}{(1+kb)^5} + \\ &\frac{(2G_0z)^4}{4!} \frac{1-8kb+6k^2b^2}{(1+kb)^7} + \frac{(2G_0z)^5}{5!} \frac{1-22kb+58k^2b^2-24k^3b^3}{(1+kb)^9} + \dots \Bigg] \quad (13) \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned} |U(z, t)|^2 &= |U(0, t)|^2 f(z, t) \quad (14) \\ f(z, t) &= 1 + \frac{2G_0z}{1+kb} + \frac{(2G_0z)^2}{2!} \frac{1}{(1+kb)^3} + \frac{(2G_0z)^3}{3!} \frac{1-2kb}{(1+kb)^5} + \frac{(2G_0z)^4}{4!} \frac{1-8kb+6k^2b^2}{(1+kb)^7} + \\ &\frac{(2G_0z)^5}{5!} \frac{1-22kb+58k^2b^2-24k^3b^3}{(1+kb)^9} + \dots \quad (15) \end{aligned}$$

函数  $f(z, t)$  可理解为一段有源光纤对光信号包络的传递函数, 由于  $|U(z, t)|^2$  具有功率量纲, (14) 式可进一步改写为  $P_{\text{out}}(t) = f(z, t)P_{\text{in}}(t)$ , 式中  $P_{\text{in}}$ 、 $P_{\text{out}}$  分别为光纤的输入与输出功率。可见  $f(z, t)$  描述了光功率经光纤传输后的变化情况。当  $f(z, t)$  只与  $z$  有关而与  $P_{\text{in}}$  无关时, 即为线性无失真传输。若  $f(z, t)$  与  $P_{\text{in}}$  有关(即  $f(z, t)$  表达式中与  $b$  有关), 则

表示产生了非线性失真。

在数字光通信系统中，输入光信号常常是高斯脉冲

$$|U(0, t)|^2 = \exp(-t^2/T_0^2) \tag{16}$$

如果增益为 20 dB,  $k = 0.1$ , 它的波形失真情况见图 1。

在模拟光通信系统中，常常采用副载波调制的方式，以单一正弦信号为例说明问题。则

$$|U(0, t)|^2 = 1 + m \cos \Omega t \tag{17}$$

式中  $m$  为调制指数，通常  $m < 1$ , 于是  $f(z, t)$  就与  $m$  有关。当  $m$  很小时，则

$$kb \approx k = P_0/P_{sat} \tag{18}$$

$f(z, t)$  不含  $t$ , 可实现线性放大。所以调制指数  $m$  越小，越有利于控制包络的非线性失真。图 2 为  $m = 0.9$  时的波形失真。

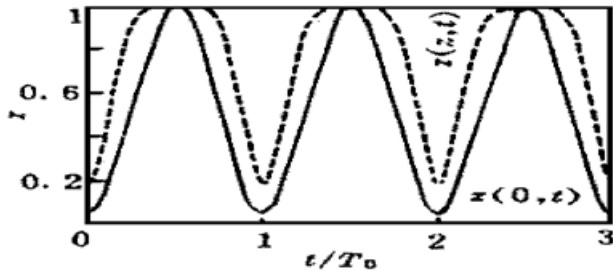


Fig. 1 Distort of Gaussian pulse in digital optical communication system

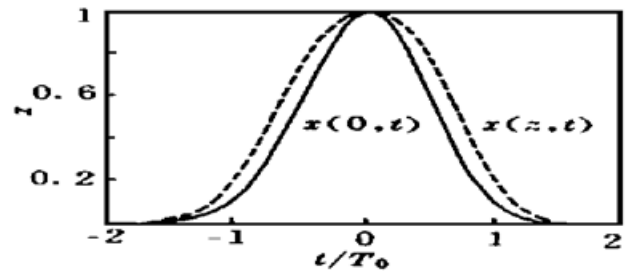


Fig. 2 Distort of sinusoid signal in analogical optical communication system

对图 1 与图 2 的波形进行傅里叶变换，就可得到相应的频谱。图 3 为重复频率为 2.5 GHz 时高斯脉冲通过有源光纤前后频谱的变化，由此可看出，增益饱和特性使频谱展宽约为 8%。图 4 为频率为 2.5 GHz 时单一正弦信号通过有源光纤后的频谱的变化，由此可以清楚地看出，由于增益饱和特性使频谱产生了许多高次谐波，但是都很小。

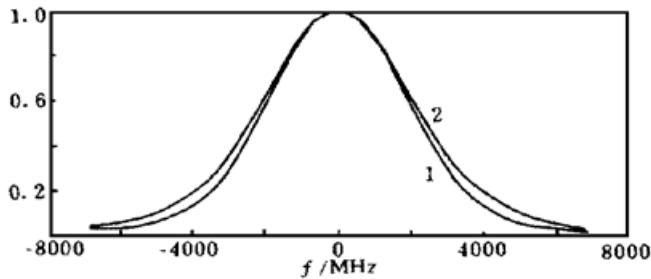


Fig. 3 Spectrum change of Gaussian pulse through active optical fiber. 1: spectrum before transmission, 2: spectrum after transmission

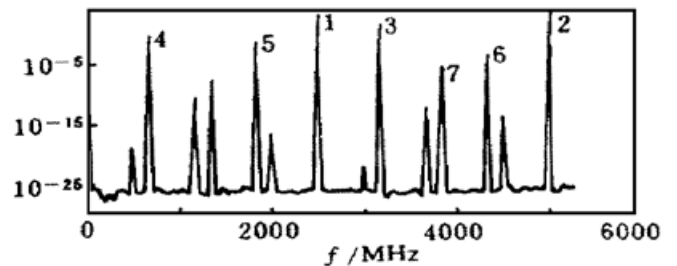


Fig. 4 Spectrum change of single sinusoid signal through active optical fiber. 1: base-harmonic wave, 2: quadratic-harmonics wave, 3: third order-harmonics wave, 4: fourth order-harmonics wave, 5: fifth order-harmonics wave, 6: sixth order-harmonics wave, 7: seventh order-harmonics wave

### 4 自相位调制的频谱展宽

前已得出，有源光纤的光信号有如下形式

$$U(z, t) = |U(0, t)| \sqrt{f} \exp [i|U(0, t)|^2 f(z)z/L_{NL}] \tag{19}$$

这是一个调幅-调相的信号, 它的频谱, 可由两部分组成, 即令  $U(z, t) = \sqrt{f} U_1(z, t)$ 。一部分是  $\sqrt{f(z, t)}$  的频谱, 它表示增益非线性引起的频谱的变化; 另一部分是  $U_1(z, t)$  的频谱, 它表示自相位调制的作用, 而总的频谱是这两部分频谱卷积。所以, 只须求  $U_1(z, t)$  的频谱。

为了简化问题, 正如通常所作的那样, 在非线性薛定谔方程(3)中右边的增益项中, 把  $P(z)$  看作一个对时间的平均功率,

$$P(z) = (1/T) \int \hat{P}(z, t) dt$$

对于脉冲信号,  $T$  为它的有效脉宽; 对于模拟的周期信号,  $T$  为它的周期。这样处理之后,  $f(z, t)$  就与  $t$  无关, 而仅为  $z$  的函数。这样,

$$U_1(z, t) = |U(0, t)| \exp [i |U(0, t)|^2 f(z) z / L_{NL}] \quad (20)$$

显然, 有源光纤的自相位调制特性, 相当于无源光纤 [ $f(z, t) = 1$ ] 的调制长度  $z$  增加了  $f(z)$  倍。因此, 首先看一下无源光纤的频谱展宽特性。

设想一个光强为  $\cos^2 \Omega t$  的光信号注入到这种光纤之中, 此时有,

$$U(0, t) = \cos \Omega t$$

它只有一条谱线  $\Omega$ 。经过光频调制后, 将出现两条谱线  $\omega_0 - \Omega$  和  $\omega_0 + \Omega$ 。再经过一段距离  $z$  的传输后, 变为

$$U(z, t) \exp(-i\omega_0 t) = \cos \Omega t \exp \{-i[\omega_0 t - (z/2L_{NL})(1 + \cos 2\Omega t)]\} \quad (21)$$

经过一系列繁复的运算, 可得

$$U(z, t) \exp(-i\omega_0 t) = \frac{1}{2} \exp(i2\mu) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \{J_n(\mu) + iJ_{n+1}(\mu)\} i^n \exp\{-i[\omega_0 - (2n+1)\Omega]t\} \quad (22)$$

其中  $\mu = Z/2L_{NL}$ , 称为自相位调制指数。这意味着, 在  $\omega_0$  的两侧出现了以  $2\Omega$  为间距的幅度

按  $\sqrt{J_n^2 + J_{n+1}^2}$  规律分布的两上对称的边带, 如图 5 所示。值得注意的是, 随着距离的增长, 各次谐波的功率要重新分配, 在  $z/2L_{NL} < 2.4048$  之前, 能量基本集中于  $\omega_0$  附近, 当  $\mu > 2.4048$  之后, 能量向上、下两个边带扩展, 甚至出现低次谐波功率高于高次谐波功率的现象, 或如文献 [3] 中所述, 将出现一系列的峰, 图 6 为  $\mu$  为不同值的频谱。为了能够估计这种按贝塞耳(Bessel)函数规律分布的频谱宽度  $B$ , 可采用卡松带宽近似公式<sup>[4, 5]</sup>

$$B \approx 2F(1 + \mu) \quad (23)$$

其中  $F$  为调制信号的最大频宽,  $\mu$  为调制指数。当单一谱线光信号输入时,

$$B(\Omega/\pi)(1 + z/2L_{NL})$$

如果输入光信号为一个高斯脉冲  $U(0, t) = \exp(-t^2/2T_0^2)$ , 它的 3 dB 带宽为  $\Delta\Omega = \sqrt{\ln 2}/T_0 = 0.83/T_0$ , 于是, 自相位调制后的频谱宽度为

$$B \approx \frac{0.265}{T_0} \left[ 1 + \frac{z}{2L_{NL}} \right] \quad (24)$$

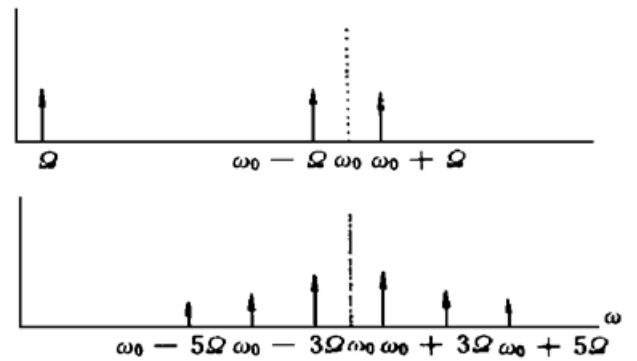


Fig. 5 Spectral broadening characteristic of passive optical fiber. (a) Spectrum before transmission, (b) Spectrum after transmission

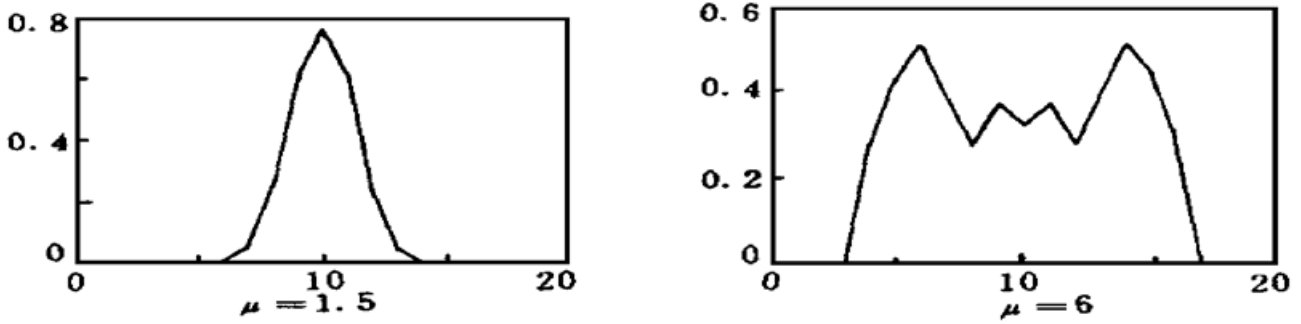


Fig. 6 Spectrum of different  $\mu$  (continuous spectrum)

对于速率为  $F_0$  数字通信系统, 若脉冲间隔为  $T_0$  的  $\sqrt{6}$  倍(脉冲幅度下降至  $e^{-3}$ ), 有

$$B \approx 0.65F_0 \left[ 1 + \frac{z}{2L_{NL}} \right]. \quad (25)$$

对于普通光纤,  $\gamma \approx 20 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ <sup>[6]</sup>, 若  $P_0 = 1 \text{ mW}$ ,  $L_{NL} = 50 \text{ km}$ 。所以在  $z = 100 \text{ km}$  的中继段上, 若  $F_0 = 2.5 \text{ Gb/s}$ , 则频谱展宽后的光信号, 线宽将达到  $0.026 \text{ nm}$  左右(在  $1.55 \text{ nm}$  波长处), 若  $F_0 = 100 \text{ Gb/s}$  时, 线宽将达  $0.1 \text{ nm}$  左右。频谱展宽还可以用均方根谱宽  $(\Delta\omega)_{\text{rms}}$  计算, 其定义为

$$(\Delta\omega)_{\text{rms}} = \langle (\omega - \omega_0)^2 \rangle - \langle (\omega - \omega_0) \rangle^2,$$

其中  $\langle \rangle$  表示平均,  $\omega_0$  为中心频率, 文献[3]给出了高斯脉冲的频谱展宽为

$$\frac{(\Delta\omega)_{\text{rms}}}{(\Delta\omega)_0} = \left[ 1 + \frac{4}{3} \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ \frac{z_{\text{eff}}}{L_{NL}} \right]^2 \right]^{1/2},$$

式中  $(\Delta\omega)_0$  是初始脉冲宽度。

有源光纤的自相位调制指数为  $\mu = f(z)z/2L_{NL} = \gamma P_0 f(z, P_0)z/2$ , 因为  $f(z)$  远大于 1, 自相位调制要比无源光纤严重, 所以, 虽然长度  $z$  比无源光纤短得多, 但频谱展宽却相差无几。可分三种情况讨论:

1) 前置放大器: 由于  $P_0$  很小, 有  $f(z, P_0) \approx \exp(2G_0z)$ , 于是

$$\mu = \frac{1}{2} \gamma P_0 \exp(2G_0z)z = \frac{1}{2} \gamma P_{\text{out}}z \quad (26)$$

其中  $P_{\text{out}}$  为放大器输出功率, 大小适中, 若令前置放大器的非线性长度  $L_{NL} = (\gamma P_{\text{out}})^{-1}$ , 则与无源光纤的  $L_{NL}$  相差不多, 但  $z$  很小, 频谱展宽的影响可忽略。

2) 中继放大器: 中继放大器的  $P_0$  一般也很小, 故有  $L_{NL} \approx (\gamma P_{\text{out}})^{-1}$ , 但中继放大器为了追求较强的输出功率,  $P_{\text{out}}$  较大, 可达数十毫瓦, 因此,  $L_{NL}$  要减小一个数量级。这样, 即使  $z$  只有数百米, 但频谱展宽仍可达到可与信号初始带宽相比拟的程度。经过几个这样的中继段传输后, 其影响将不可忽略。

3) 后置放大器(功率放大器): 这时输入的  $P_0$  较大, 但  $f(z, P_0)$  减小, 因此有一个使  $L_{NL}$  最小的  $P_0$ (当然因光信号的包络形状而异)。在使用功率放大器的时候, 应设法使输出功率  $P_0$  偏离这个值, 于是其影响亦可忽略。

总之, 有源光纤因自相位调制引起的频谱展宽, 与光信号的输出功率  $P_{\text{out}}$  和增益密切相关。在多级放大器级联的系统中, 中继放大器要同时追求较大的输出功率和增益, 致使频谱展宽达到与初始信号的带宽可比拟的程度, 其影响不可忽略。

**结 论** 1) 有源光纤的频谱展宽由两个因素所致: 光纤的非线性极化和增益非线性。增益非线性引起包络失真, 同时也影响到非线性极化所造成的自相位调制。这种影响可用一个函数  $f(z)$  表示。本文从非线性薛定谔方程出发, 导出了  $f(z)$  的级数表达式。

2) 有源光纤因自相位调制而展宽的频谱, 在单频信号时, 按  $[J_n^2(\mu) + J_{n+1}^2(\mu)]^{1/2}$  规律分布, 在  $\mu$  较小时, 能量集中于光载频附近; 当  $\mu$  较大时, 能量向两个边带扩展。

3) 有源光纤因自相位调制而产生的频谱展宽, 其卡松带宽可按  $B = 2F(1 + \mu)$  估计。由于有源光纤的  $f(z)$  远大于 1, 即使光纤较短, 但其影响在高增益高输出功率的多级放大器级联的系统中将成为不可忽略的因素。

### 参 考 文 献

- [1] 龚中麟, 徐承和, 电磁理论研究导引. 北京: 北京大学出版社, 1994, 172
- [2] J. G. Caputo, N. Flitzanis, M. P. Sorensea, Ring Laser configuration studied by collective coordinates. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(1): 139~ 145
- [3] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. United Kingdom Edition, San Diego: Academic Press, 1989. 40, 81, 82, 53
- [4] G. P. Agrawal, Amplification of ultrashort solitons in Erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(12): 875~ 877
- [5] 吴伯修, 沈连丰, 调频技术理论及新进展. 北京: 人民邮电出版社, 1988, 23~ 25

## Estimation of Frequency Spectrum Broadening Caused by Self Phase Modulation in Active Fiber

Wu Chongqing      Zhao Hongjing      Wang Zhi      Liu Yi  
 (Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)  
 (Received 18 November 1996; revised 23 July 1997)

**Abstract** In active fiber two kinds of nonlinearity, nonlinear polarization and gain saturation, lead to the frequency spectrum broadening of optical signal. Gain saturation distorts its envelope, and affects the self-phase-modulation (SPM) caused by nonlinear polarization. It can be expressed by a transmission function  $f(z)$ . A formula of  $f(z)$  with a power series derived from NLS equation is given, and the frequency broad band can be estimated by  $B = 2F(1 + \mu)$ . Because of  $f(z) \gg 1$  in the active fiber, the broadening can be compared with initial band of optical signal in the optical communication system having many optical fiber amplifiers with high gain and high output power.

**Key words** active fiber, SPM, broadening of spectrum, nonlinearity of fiber.