

# 长距离光纤传输的“啁啾管理法”\*

吴 芳 黄肇明 蒋泽明

(上海大学嘉定校区电子工程系, 上海 201800)

**摘 要** 提出用线性啁啾近似由光纤非线性克尔效应引入的非线性相移。分析了克尔效应对不同啁啾光脉冲的作用, 并由此提出“啁啾管理法”改善色散补偿光路长距离传输的性能。

**关键词** 光纤通信, 色散补偿。

## 1 引 言

长距离光纤通信受到光纤固有损耗和色散的限制。光纤损耗可由掺铒光纤放大器补偿, 光纤色散可由它与光克尔效应相互作用形成的光孤子的传输来克服。但光孤子系统要求苛刻且复杂, 故还在研究开发其它的抗色散方法。这些方法不像光孤子能在上万公里的距离内对抗色散的影响<sup>[1]</sup>, 但也能在一定程度上抑制色散的作用, 大大增加光传输系统的最大跨度。如全光纤色散补偿光路(150 km)、预啁啾技术(120 km)、色散支持传输(253 km)<sup>[2]</sup>等, 均能在很大范围内满足实际应用的需要, 设备和技术要求也很简单都不需要利用光纤的非线性效应。然而由于光纤有很小的横截面和长的相互作用距离, 当在其中传输的光功率不太高时就可有非线性现象发生, 因此光纤中的非线性相互作用仍是一个不容忽视的量。本文讨论了非线性克尔效应对全光纤色散补偿光路的影响, 从中可见克尔效应正是这种光路传输性能的限制因素。作者用线性啁啾近似表示由非线性克尔效应产生的自相位调制所引入的啁啾, 可以清楚地看到传输过程中非线性对啁啾脉冲频谱的影响, 并分析这种影响对色散补偿光路的作用, 提出长距离色散补偿光路的“啁啾管理法”, 改善色散补偿光路传输性能。

## 2 不考虑光纤非线性效应时啁啾光脉冲的传输

假定光源为高斯型光脉冲, 带有线性的啁啾, 则其电场可表示为<sup>[3]</sup>

$$E_1(t) = A \exp[-(t/\tau)^2] \exp(-j b_1 t^2) \exp(j \omega_0 t) \quad (1)$$

其中  $\tau$  是表征  $(1/e)$  脉宽的参数,  $\tau = \Delta t_1 / \sqrt{2 \ln 2}$  ( $\Delta t_1$  为 FWHM),  $b_1$  是表征线性啁啾的参数( $b_1 < 0$  表示脉冲带有红移啁啾,  $b_1 > 0$  表示脉冲带有蓝移啁啾)。则光纤中光脉冲的傅里叶频谱为

$$E_1(\omega) = A \exp\left[-\left(\frac{\omega - \omega_0}{2}\right)^2 \frac{\tau^2}{1 + b_1^2 \tau^4}\right] \exp\left[j\left(\frac{\omega - \omega_0}{2}\right)^2 \frac{b_1 \tau^4}{1 + b_1^2 \tau^4}\right] \quad (2)$$

脉冲的频谱宽度为

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年12月11日; 收到修改稿日期: 1996年7月17日

$$\Delta\nu_1 = \sqrt{2 \ln 2} \sqrt{1 + b_1^2 \tau_1^4} / (\pi \tau_1) \quad (3)$$

在长为  $z$  的光纤中传输时, 光纤的传递函数为  $H(\omega)$  (只考虑线性色散)

$$H(\omega, z) = \exp[-j\beta(\omega - \omega_0)z - j\beta(\omega - \omega_0)^2 z] \quad (4)$$

其中  $\beta$  为传播常数,  $\beta'$ 、 $\beta''$  为  $\beta$  的一阶和二阶导数, 则传输后的脉冲傅里叶频谱为  $E_2(\omega, z) = E_1(\omega)H(\omega, z)$ , 可以看出在线性色散光纤中的传输只改变光脉冲傅里叶频谱的相位, 不改变频谱的宽度  $\Delta\nu_2 (= \Delta\nu_1)$ , 它由初始的脉宽及啁啾所决定, 初始啁啾越大, 谱宽越宽。对  $E_2(\omega, z)$  进行傅里叶反变换得  $E_2(t, z)$

$$E_2(t, z) = A_2 \exp[-(t/\tau_2)^2] \exp(jb_2 t^2) \exp(j\omega_0 t) \quad (5)$$

其中

$$b_2 = [b_1 + (\tau_1^{-4} + b_1^2)\rho] / [(1 + b_1\rho)^2 + \tau_1^{-4}\rho^2] \quad (5a)$$

$$\tau_2 = [(1 + b_1\rho)^2 + \tau_1^{-4}\rho^2]^{1/2} \tau_1 \quad (5b)$$

$$\rho = 2\beta z \quad (5c)$$

对(5a)式、(5b)式进行简单的分析知: 当  $b_1$  与  $\beta$  同号时,  $\tau_2 > \tau_1$ , 脉冲展宽; 当  $b_1$  与  $\beta$  异号时, 脉冲经历一个先压缩再展宽的过程, 脉冲首先压缩至最小脉宽点, 达到这一点的传输距离为

$$z_m = -b_1 / [2\beta(\tau_1^{-4} + b_1^2)] \quad (6)$$

此时  $b_2 = 0$ , 最小脉宽值  $\Delta t_{\min}$  为

$$\Delta t_{\min} = \sqrt{2 \ln 2} \tau_{2 \min} = \tau_1 / \sqrt{1 + b_1^2 \tau_1^4} = 2 \ln 2 / (\pi^2 \Delta\nu_1^2) \quad (7)$$

之后由于  $b_2$  改变符号, 脉冲转为展宽, (7)式表明脉宽最小值正比于输入脉冲频谱宽度的倒数, 因此输入脉宽一定时, 其啁啾越大, 频谱越宽, 脉宽最小值越小, 如图 1 所示。图中脉宽与啁啾的变化从左至右方向代表光脉冲在正常色散光纤中传输, 从右至左方向则在反常色散光纤中传输。

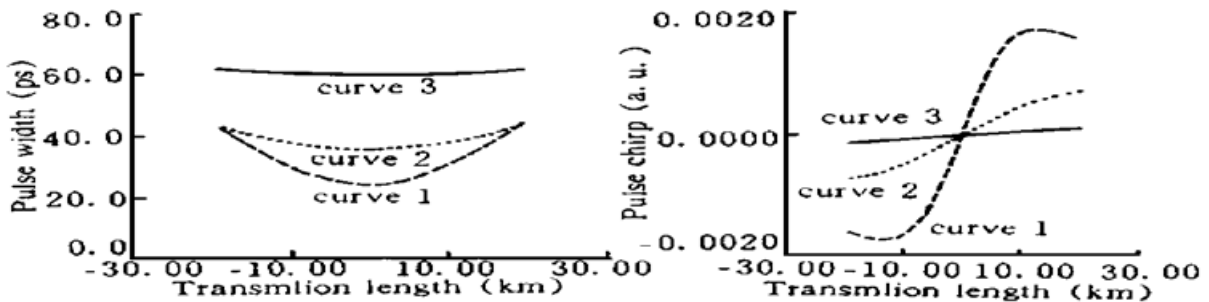


Fig. 1 Different input pulse chirp, nonlinear effect is not considered curve1: chirp  $b_1$ , curve2: chirp  $b_2$ , curve3: chirp  $b_3$ , ( $b_1 > b_2 > b_3$ ,  $\Delta\nu_1 > \Delta\nu_2 > \Delta\nu_3$ )

### 3 光纤非线性克尔效应所产生相移的线性啁啾近似

光纤的非线性由光克尔效应产生。在无损耗光纤中引起的相移  $\Delta\phi$  由下式确定<sup>[4]</sup>

$$\Delta\phi(t) = (\omega n_2 z_{\text{eff}} / c A_{\text{eff}}) P(t) \quad (8)$$

其中  $c$  为光速,  $n_2$  为非线性系数(对硅玻璃,  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ),  $A_{\text{eff}}$  为有效作用面积,  $\omega$  为频率,  $P(t)$  为入射高斯脉冲功率,  $P(t) = A_1^2 \exp[-2(t/\tau_1)^2]$ ,  $z_{\text{eff}}$  为相互作用距离。设光

纤损耗为  $\alpha(1/km)$ ，则

$$z_{eff} = \int_0^z \exp(-\alpha l) dl = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha \quad (9)$$

其中  $z$  为实际光纤长度。由  $\Delta\phi(t)$  引起的频移为

$$\Delta\omega = -\frac{\partial \Delta\phi}{\partial t} = \frac{4cz_{eff}A^2}{\tau^2} \exp\left[-2\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] \quad (10)$$

非线性效应引起的非线性频移如图 2 所示，可用一线性啁啾来近似它。令表征此线性啁啾的量为  $b_{NL}$ ，则由此啁啾引入的频移为  $2b_{NL}t$ ，对  $\Delta\omega$  与  $2b_{NL}t$  进行最佳拟合，令误差函数为  $D$ ，则

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} (\Delta\omega - 2b_{NL}t)^2 P(t) dt \quad (11)$$

由  $dD/db_{NL} = 0$ ，得

$$\begin{aligned} b_{NL} &= \frac{4\omega n_2 z_{eff} A^2}{cA_{eff}\tau^2} \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 \exp[-4(t/\tau)^2] dt / \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 \exp[-2(t/\tau)^2] dt \\ &= \sqrt{2} \pi n_2 z_{eff} A^2 / \lambda A_{eff} \tau^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$b_{NL}$  为长度  $z$  的光纤因非线性克尔效应引入的相移所产生的啁啾线性近似。将之等效至输入端改变输入脉冲的啁啾，亦即改变在光纤中传输的光脉冲的频谱宽度，新的频谱宽度为

$$\Delta\nu_1' = \sqrt{2 \ln 2} \sqrt{1 + b_1'^2 \tau_1^4 / \pi \tau_1} \quad (13)$$

其中  $b_1' = b_1 + b_{NL}$  为等效的输入脉冲啁啾。由于  $b_{NL}$  为蓝移啁啾 ( $b_{NL} > 0$ )，当原输入光脉冲带有红移啁啾时 ( $b_1 < 0$ )，则  $\Delta\nu_1' < \Delta\nu_1$ ，脉冲频谱压窄；当原输入光脉冲带有蓝移啁啾时 ( $b_1 > 0$ )， $\Delta\nu_1' > \Delta\nu_1$ ，脉冲频谱展宽。

结合(5)式与(13)式分析，在线性色散与克尔效应的同时作用下，在正常色散光纤中红移啁啾脉冲脉宽压缩，频谱也压窄，蓝移啁啾脉冲脉宽展宽，其频谱亦扩展。在反常色散光纤中红移啁啾脉冲脉宽展宽，而其频谱压窄，蓝移啁啾脉冲脉宽压缩，其频谱则扩展。

### 4 非线性效应对啁啾脉冲频谱和脉宽压缩的影响

因为光克尔效应引起的非线性相移是一个随距离增加的量，故将其等效为输入端的线性啁啾仅在小的光纤长度内有效。如前所述，在每小段光纤中等效啁啾改变输入脉冲频谱，传输时频谱不变，脉宽与啁啾的变化由(5)式决定。通过每段光纤传输的简单叠代，可知啁啾光脉冲在光纤中传输时脉宽、啁啾、频谱的变化。这个过程如图 3 所示，每一段长度为  $\delta z$ 。

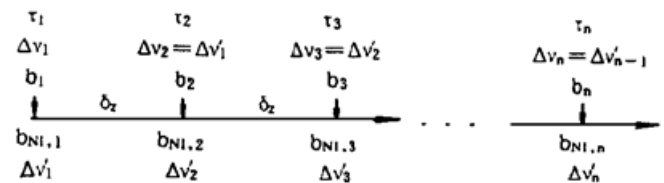


Fig. 3 Chirped optical pulse transmission process with nonlinear effect

考虑光纤处于正常色散区域 ( $\beta > 0$ )，入射光脉冲带有红移啁啾 ( $b_1 < 0$ ) 的情况。根据图 1 及对(5b)式、(13)式的分析，此时脉宽压缩、频谱压窄、啁啾向原点逼近，即  $\tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_n$ ， $\Delta\nu_1 > \Delta\nu_2 > \dots > \Delta\nu_n$  直至  $b_n = 0$ 。继续传输时， $b_n$  改变符号，脉冲演绎成蓝移啁啾，脉宽开始展宽，频谱也开始扩展。故  $b_n$  为零处有最小脉宽  $\tau_n$ 、最小谱宽  $\nu_n$ ，其相互关系为

$$\tau_n = 2 \ln 2 / (\pi^2 \Delta\nu_n^2) \quad (14)$$

比较(7)式与(14)式, 因为  $\Delta v_1 > \Delta v_n$ , 有  $\tau_n > \Delta t_{min}$ ,  $\tau_n$  为考虑克尔效应时的脉宽最小值,  $\Delta t_{min}$  是不考虑克尔效应时的脉宽最小值, 所以非线性效应使最小脉宽增大, 输入一定时, 非线性效应越强, 最小脉宽也越大。

由于非线性效应正比于脉冲峰值功率及脉冲与光纤相互作用距离, 所以脉冲峰值功率下降或相互作用距离短, 都可以降低非线性效应的作用。图 4(a) 为脉冲峰值功率增大时脉宽最小值的上升, 图 4(b) 为光纤色散增大时达到最小脉宽值所需传输的距离与最小脉宽值的变化。光纤色散越大, 相互作用距离越短, 非线性影响就越小, 最小脉宽值降低。图中实线为本近似法所得结果, 虚线为用传输波束法<sup>[5]</sup>所解得的数值解, 两者吻合得相当好。也即是说, 本近似法是相当准确的, 可以用来对光纤传输时脉宽与谱宽的演绎进行分析。

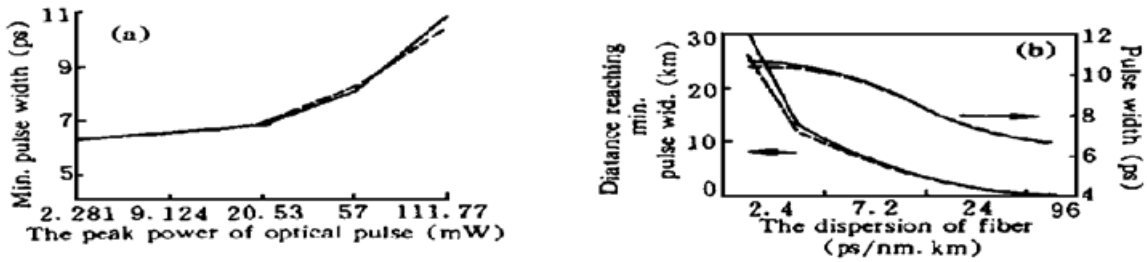


Fig. 4 (a) The min. pulse width versus peak power (anomalous dispersion fiber, red shift chirping,  $D = 2.4 \text{ ps/nm.km}$ ), (b) The min. pulse width and the distance reaching min. pulse width versus the dispersion of fiber (Pulse peak power= 111.77 mW)

如果光纤损耗为零, 当脉宽先压缩后展宽恢复至原脉宽时, 频谱亦先压缩再展宽至原频谱宽度[图 5(a)、(b)中实线]; 光纤存在损耗时, 频谱压缩区域的非线性效应强度超过频谱

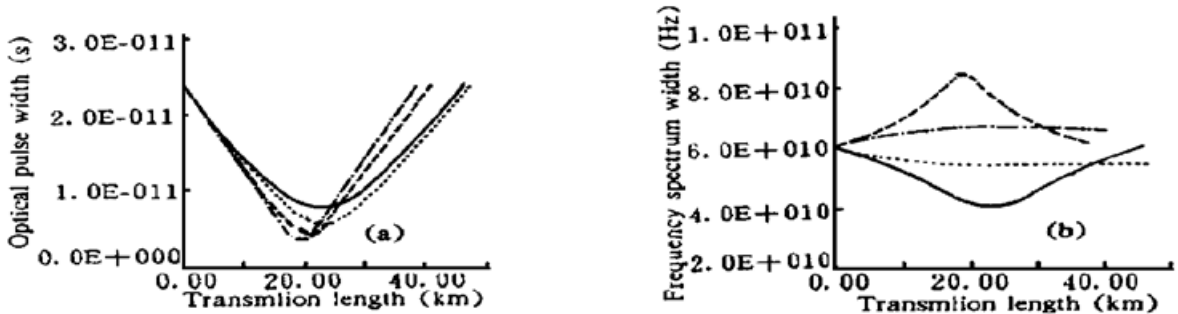


Fig. 5 (a) Optical pulse width versus transmission distance, (b) Pulse frequency spectrum width versus transmission distance, solid line:  $\beta > 0, b_1 < 0, \alpha = 0$ , dotted solid line:  $\beta > 0, b_1 < 0, \alpha = 0.3 \text{ dB/km}$ , dashed line:  $\beta < 0, b_1 > 0, \alpha = 0$ , dotted dashed line:  $\beta < 0, b_1 > 0, \alpha = 0.3 \text{ dB/km}$

展宽区域的非线性效应强度, 所以脉宽恢复时, 频谱比原频谱窄[图 5(a)、(b)中带点实线]。

现在考虑光脉冲在反常色散光纤 ( $\beta < 0$ ) 中传输, 入射光脉冲带有蓝移啁啾 ( $b_1 < 0$ ) 的情况。此时脉宽压缩但频谱展宽, 啁啾也向原点逼近, 直到脉冲演绎成红移啁啾, 脉冲开始展宽, 频谱则开始压窄, 故  $b_n$  为零处脉宽  $\tau_n$  最小而谱宽  $v_n$  最宽, 即  $\Delta v_1 < \Delta v_n$ 。所以  $\tau_n < \Delta t_{min}$ , 非线性效应使最小脉宽降低, 非线性效应越大, 最小脉宽越小,

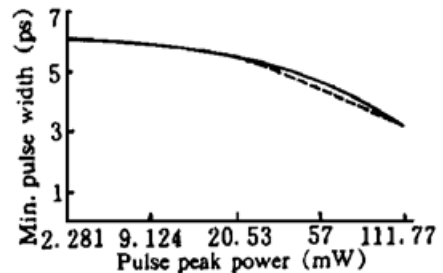


Fig. 6 Minimum pulse width versus pulse peak power (normal dispersion fiber, blue-shift chirping pulse,  $D = 2.4 \text{ ps/nm.km}$ )

如图 6 所示。

由于非线性效应对不同啁啾脉冲频谱的影响不同，导致它恶化正常色散光纤对红移啁啾脉冲的压缩，而加强反常色散光纤对蓝移啁啾脉冲的压缩。

当光纤不存在损耗，则脉宽恢复时频谱亦恢复[如图 5(a)、(b)中虚线]；但当光纤损耗不为零时，导致频谱展宽的非线性效应强度超过使频谱压窄的非线性效应强度，则脉宽恢复时，频谱较原频谱宽[如图 5(a)、(b)中带点虚线]。

### 5 长距离传输的“啁啾管理法”

在长距离大容量的光纤通信中，“色散管理法”是抗色散的有效方法之一。基本思想是在每个放大器间隔单元内使光纤总色散为零，在不考虑非线性效应或损耗的情况下，色散为零可以抵销光纤线性色散的影响，因为脉冲频谱不变，每个单元的脉宽和谱宽都可以完全重复，见图 5(b)。但光纤非线性效应和损耗的存在使每个单元的谱宽不恢复，见图 5(b)。因此当多个单元的叠加造成谱宽的差值累积，会使沿光纤传输的脉冲的谱宽越来越宽。从图 1 可看出，谱宽越宽，则脉宽变化速率越快，脉宽变化值亦越大。数值实验结果证明了这一点，如图 7 所示，脉宽的振荡逐渐加剧至不可接受。图中计算参数为初始脉宽 40 ps，工作波长 1550 nm，光纤色散 6 ps/nm·km，正、负色散光纤每 36 km 交替重复，放大器间隔 72 km。

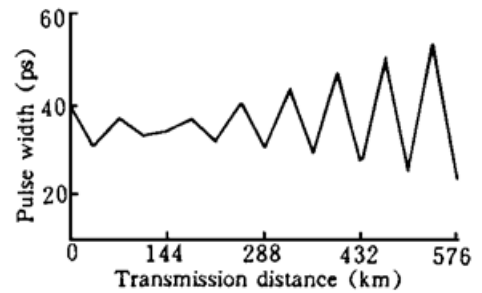


Fig. 7 Pulse width varies with transmission distance in “Dispersion Management Method”

因此在色散补偿的基础上必须控制谱宽的累积。现分析上一节讨论的两种情况：在正常色散光纤中传输脉冲从红移啁啾演绎到蓝移啁啾，脉宽恢复时，频谱压窄；在反常色散光纤中传输脉冲从蓝移啁啾变化到红移啁啾，脉宽恢复时，频谱展宽。将正常与反常色散光纤组成一个双单元重复单位，当每一双单元结束时，由于前一单元与后一单元的频谱宽度相互抵消，可以减缓谱宽的差值累积。数值模拟的传输结果如图 8 所示。脉宽的变化明显比图 7 稳定。这是从不同啁啾脉冲在不同色散特性的光纤中压缩和展宽时非线性效应对频谱有不同影响的角度出发，同时抑制脉冲频谱和脉宽随传输距离的扩展，故作者称其为“啁啾管理法”。

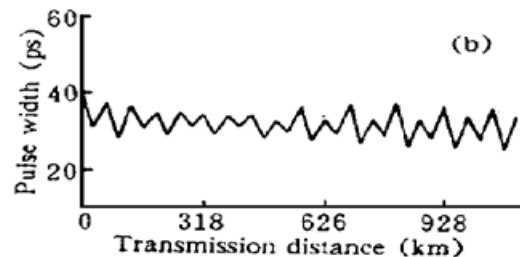
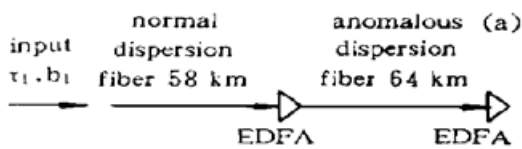


Fig. 8 (a) The schematic of transmission unit, (b) Pulse width versus transmission in “Chirping Management Method”

每个单元的设计依从“预啁啾技术”<sup>[6]</sup>。假定进入光纤的光脉冲具有啁啾  $b_1$  和  $(1/e)$  脉宽  $\tau_1$ ，则传输至脉宽最小点的距离  $z_m$  由(6)式决定。对于固定的脉宽， $z_m$  的最大值由  $(z_m)_{b_1=0}$  求出，从而得到  $b_1 = \tau_1^{-2}$ ，也就是说当输入脉冲的啁啾恰好为脉冲  $(1/e)$  宽度平方的倒数时，

脉冲从压缩到恢复原脉宽的传输距离最长。由这个关系式确定每个单元的长度, 结果如图 8 (a) 所示。所用的参数为脉宽(FWHA) 40 ps, 工作波长 1550 nm, 光纤色散 6 ps/nm·km(正常色散与反常色散数值相同, 符号相反)。可以看出所用的反常色散光纤略长于正常色散光纤, 使总色散量呈现反常色散特性。可以这样来理解这个结果: 亮孤子只能在反常色散光纤中存在, 在其中脉冲的非线性效应与光纤色散效应相抵消, 使光脉冲脉宽和谱宽在传输中保持不变, 而这正是“啁啾管理法”的基本思想, 即“啁啾管理法”合理地把光孤子传输思想用于色散补偿光路中。

**结 论** 光纤的线性色散改变光脉冲的脉宽和啁啾, 但不改变脉冲的谱宽; 非线性效应只改变光脉冲的谱宽, 然后通过色散对脉冲作用。可用一线性啁啾来近似表示非线性克尔效应所产生的频谱啁啾, 清楚地表现出克尔效应对不同啁啾特性脉冲不同的作用: 它总是使红移啁啾脉冲的频谱压窄-这正是非线性效应恶化正常色散光纤对红移啁啾脉冲的压缩之原因; 而总是使蓝移啁啾脉冲的频谱展宽。在此基础上, 结合预啁啾技术, 采用对脉宽和谱宽双重控制的“啁啾管理法”, 改善了色散补偿光路长距离传输的性能。

### 参 考 文 献

- [1] N. A. Olsson, Bit-error-rate investigation of two-channel soliton propagation over more than 10000 km. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(9): 695~ 696
- [2] B. Wedding, *et al.*, 10 Gb/s optical transmission up to 253 km via standard single-mode fiber using the method of dispersion-supported transmission. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(10): 1720~ 1727
- [3] 曹文华等, 单模光纤中皮秒啁啾脉冲的压缩. *光学学报*, 1995, **15**(2): 180~ 185
- [4] R. H. Stolen, Self-phase-modulation in silica optical fibers. *Phys. Rev. (A)*, 1978, **17**(4): 1449~ 1453
- [5] D. Yevick, B. Hermansson, Soliton analysis with the propagating beam method. *Opt. Commun.*, 1983, **47**(2): 101~ 106
- [6] 吴 芳, 蒋泽明, 黄肇明, 单模光纤中光脉冲啁啾的分析. *中国激光*, 1996, **23A**(6): 495~ 499

## “Chirping Management Method” in Long Distance Optical Fiber Transmission

Wu Fang      Huang Zhaoming      Jiang Zhe-ming

(Department of Electronic Engineering, Jiading Campus of Shanghai University, Shanghai 201800)

(Received 11 December 1995; revised 17 July 1996)

**Abstract** The frequency chirping produced by the nonlinear Kerr effect in the fiber is approximated with the linear frequency chirping. The action of the Kerr effect on red-shift and blue-shift chirping pulse is analyzed. Based on this, the “chirping management method” is proposed to improve the characteristics of long-distance optical fiber transmission.

**Key words** optical fiber communication, dispersion management.