

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0148-05

# 用正弦变频滤波器抑制孤子间的相互作用<sup>\*</sup>

张介秋<sup>1)3)</sup> 陈砚圃<sup>2)</sup> 冯大毅<sup>1)</sup> 梁昌洪<sup>3)</sup>

- (1), 空军工程大学工程学院基础部, 西安 710038
- (2), 西安通信学院计算中心, 西安 710106
- (3), 西安电子科技大学微波与天线国家重点实验室, 西安 710071

摘要: 提出用正弦变频滤波器抑制孤子间的相互作用, 并对上变频滤波器、下变频滤波器、交叉变频滤波器在抑制孤子相互作用方面的效应进行了数值研究。结果表明, 正弦变频滤波器是最为有效的。

关键词: 孤子相互作用; 正弦变频滤波器; 孤子传输; 光通信

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

在无中继超长距离孤子通信系统中, 孤子间的相互作用<sup>[1]</sup>及放大自发辐射噪声(ASEN)引起的孤子到达时刻的抖动是增大传输距离或提高传输码率的关键制约因素。为了抑制孤子间的相互作用及放大自发辐射噪声引起的孤子到达时刻的抖动, 可在每个光放大器后插入带通滤波器<sup>[2~4]</sup>。但这样做的结果是, 为补偿孤子通过滤波器时的损耗必然引起的滤波器中心频率附近的额外增益, 会使得滤波器中心频率附近的噪声不断得到累积放大, 从而影响孤子传输。为克服这一缺点, Mollenauer 等<sup>[5,6]</sup>提出沿光纤传输线方向逐步改变滤波器的中心频率, 这种方法不但可以阻止滤波器中心频率附近噪声的不断累积<sup>[6]</sup>, 还可以进一步抑制孤子间的相互作用<sup>[7,8]</sup>。这样的滤波器组被称为变频滤波器(SFF)。频率上移(下移)的称为上(下)变频滤波器(USFF/DSFF)。理论与实验均表明在控制噪声<sup>[9]</sup>、抑制孤子相互作用<sup>[10]</sup>方面上变频滤波器均略优于下变频滤波器。Dung 等<sup>[10]</sup>的数值研究进一步表明沿光纤方向上、下交替地变动滤波器的中心频率(称为交叉变频滤波器, ZSFF)可以更为有效地抑制孤子间的相互作用。本文提出一种新的变频方案, 使滤波器的中心频率  $\omega_f$  沿光纤方向的变动速度  $d\omega_f/dz$  按余弦规律变化, 即滤波器中心频率沿光纤方向按正弦规律变化, 我们把这种方案称为正弦变频滤波器方

案。数值研究表明这种方法在抑制孤子相互作用方面比上述各种方法均更为有效。

在没有滤波器的情况下, 两同相孤子之所以互相吸引, 是由于位于前面( $t$ 小)的孤子其频率变低(速度变慢), 后面的孤子其频率升高(速度变快), 因此孤子逐步靠近直至碰撞(如图 1 所示)。在光纤链路中插入定频滤波器可以抑制两孤子间的这种频率分离, 因此也就可以抑制它们之间的相互吸引。

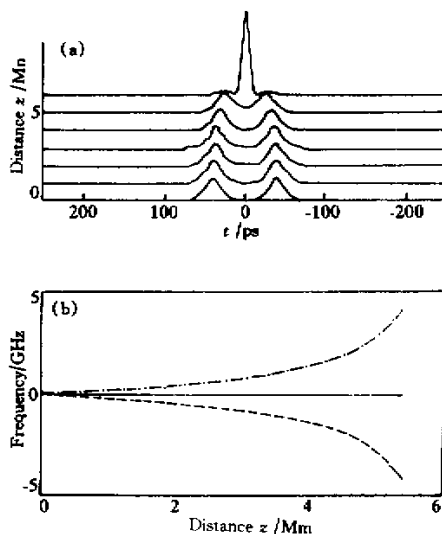


Fig. 1 (a) Evolution of the power envelopes of soliton pair along the fiber without filter. (b) Frequency of the soliton at  $t = +40$  ps (dotted-dashed curve), at  $t = -40$  ps (dashed curve), mean frequency of soliton pair (solid curve) versus distance

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(69931030)资助课题。

E-mail: zhangjiq@pub.xaonline.com

收稿日期: 2000-10-27; 收到修改稿日期: 2001-02-05

## 2 演化方程

皮秒孤子脉冲在光纤中的传输满足下列归一化修正非线性薛定谔方程<sup>[1]</sup>：

$$i \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + |q|^2 q = -i \frac{\Gamma}{2} q + \frac{T_R}{T_0} q \frac{\partial |q|^2}{\partial t} + i \frac{\beta_3}{6 T_0 |\beta_2|} \frac{\partial^3 q}{\partial t^3} - i \frac{2}{\omega_0 T_0} \frac{\partial}{\partial t} (|q|^2 q), \quad (1)$$

其中  $\beta_2$  为光纤的群色散,  $\Gamma = \alpha L_D$ ,  $\alpha$  为光纤损耗系数, 群色散长度  $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$ ,  $T_0$  为孤子宽度,  $T_R$  为非线性响应延迟,  $\beta_3$  为光纤的三阶色散,  $T_0 = T_w / 1.763$ ,  $T_w$  为入射孤子的半功率全宽。  $q$ 、 $z$ 、 $t$  分别归一化于入射基孤子的峰值振幅  $A_0 = P_0^{1/2} = [c A_{\text{eff}} |\beta_2| (n_2 \omega_0 T_0^2)]^{1/2}$ 、 $L_D$ 、 $T_0$ 。其中  $n_2$ 、 $\omega_0$ 、 $c$ 、 $A_{\text{eff}}$  分别为光纤非线性折射率系数、入射孤子中心圆频率、真空中光速、光纤纤芯有效面积。(1) 式的右边后三项在孤子宽度为 10 ps 量级时几可忽略。为

便于与其他文献进行比较, 本文作数值模拟时所用光纤参数取为:  $\beta_2 = -0.57 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,  $\beta_3 = 0.075 \text{ ps}^3/\text{km}$ ,  $\alpha = 0.22 \text{ dB/km}$ ,  $A_{\text{eff}} = 35 \mu\text{m}^2$ ,  $T_R = 6 \text{ fs}$ ,  $\lambda = 1.555 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。入注孤子半功率全宽  $T_w = 1.763 T_0 = 20 \text{ ps}$ , 孤子间距为  $d = 4 T_w = 80 \text{ ps}$ , 即

$$q(z=0, t) = \text{sech}[(t-d/2)/T_0] + \text{sech}[(t+d/2)/T_0] \quad (2)$$

每 50 km 置一光放大器用以补偿光纤损耗及滤波器引起的损耗, 每个放大器后插入滤波器, 法布里-珀罗滤波器的传递函数取为

$$H(\omega - \omega_f) = \frac{1}{1 + i2\chi(\omega - \omega_f)B}, \quad (3)$$

其中  $\omega_f$  为滤波器的中心圆频率,  $B$  为滤波器的带宽。本文将滤波器的带宽统一取为 125 GHz (即  $B/2\pi = 125 \text{ GHz}$ )。对各种变频方案  $\omega_f$  分别取为：

$$\omega_f - \omega_0 = \begin{cases} az & \text{对 USFF} \quad (4a) \\ -az & \text{对 DSFF} \quad (4b) \\ A \times \begin{cases} 4(z/z_z - k) & \text{当 } z \in [(k-1/4)z_z, (k+1/4)z_z] \\ -4(z/z_z - k - 1/2) & \text{当 } z \in [(k+1/4)z_z, (k+3/4)z_z] \end{cases} & \text{对 ZSFF} \quad (4c) \\ A \sin(2\pi z/z_{\text{sin}}) & \text{对 sin-SFF} \quad (4d) \end{cases}$$

$\omega_0$  为入射孤子的初始中心圆频率,  $a$  为变频速率,  $z$  为距光纤入射端的距离,  $z_z$ 、 $z_{\text{sin}}$  分别为交叉变频滤波器及正弦变频滤波器的滤波器中心频率的变化周期,  $k$  为不大于  $z/z_z$  的最大整数。为便于各种方案的比较, 我们取正弦变频滤波器情况下滤波器的变频速率的幅值与上变频滤波器、下变频滤波器及交叉变频滤波器三种情况下滤波器的变频速率的绝对值相等且等于  $a$ , 即  $|d\omega_f/dz|_{\text{max}} = a$ 。并使交叉变频滤波器和正弦变频滤波器两种情况下滤波器中心频率的变化幅度相等(上式已都取为  $A$ )。因此,  $z_z = 4A/a$  及  $z_{\text{sin}} = 2\pi A/a$ 。在下面的计算中,  $a$  值总是取为 4 GHz/Mm,  $A$  取为 8 GHz 或 11 GHz。

## 3 计算结果

图 2(a) 与图 2(b) 分别是在下变频滤波器方案及上变频滤波器方案情况下两孤子的功率包络随距离的演化,  $a$  取值为 4 GHz/Mm。两孤子分别在约 8.4 Mm 和 10.8 Mm 处合并。图 2(c) 与图 2(d) 分别是初始位置在  $t = -40 \text{ ps}$  (前) 和在  $T = +40 \text{ ps}$

(后) 的两个孤子的平均频率之差 ( $f_1 - f_2$ ) 和峰值功率之比  $P_1/P_2$  随距离的演化实线与虚线分别对应于下变频滤波器和上变频滤波器。不难看出两孤子的频差与峰值功率均呈逐步扩大之势, 最终导致两孤子的合并。这是由于孤子间的相互作用导致两孤子的频率逐步分开, 在下变频情况下, 位于后面 ( $t = +40 \text{ ps}$ ) 的孤子因频率高而经历了更多的滤波器损耗, 而功率的变低又使得其频率跟不上滤波器频率的变化而更远离滤波器的中心频率, 两孤子的频率分离导致孤子的合并。在上变频的情况下, 出现类似遭遇的则是位于前面 ( $t = -40 \text{ ps}$ ) 的孤子。

图 3(a)~图 3(c) 及图 3(d)~图 3(f) 分别是在交叉变频滤波器及正弦变频滤波器两种情况下, 两孤子的间距、频差 (原位于  $t = -40 \text{ ps}$  处的孤子中心频率  $f_1$  与原位于  $t = +40 \text{ ps}$  处的孤子的中心频率  $f_2$  之差) 及峰值功率比值  $P_1/P_2$  随传输距离的变化。可见, 两孤子的频差已呈现正负交错, 峰值功率比  $P_1/P_2$  也在 1 附近上下振荡。但相对而言正弦变频滤波器比交叉变频滤波器振荡幅度要小一些, 从而合并距离约

大一倍(交叉变频滤波器的合并距离约为 27 Mm 而正弦变频滤波器的合并距离约为 50 Mm)在交叉变频滤波器方案中,约 20 Mm 以后两孤子的中心频率

及峰值功率均呈现逐步分离的态势。在正弦变频滤波器方案中,这约在 40 Mm 以后才发生。图 3 中  $A$  取为 8 GHz,  $a$  取为 4 GHz/Mm。

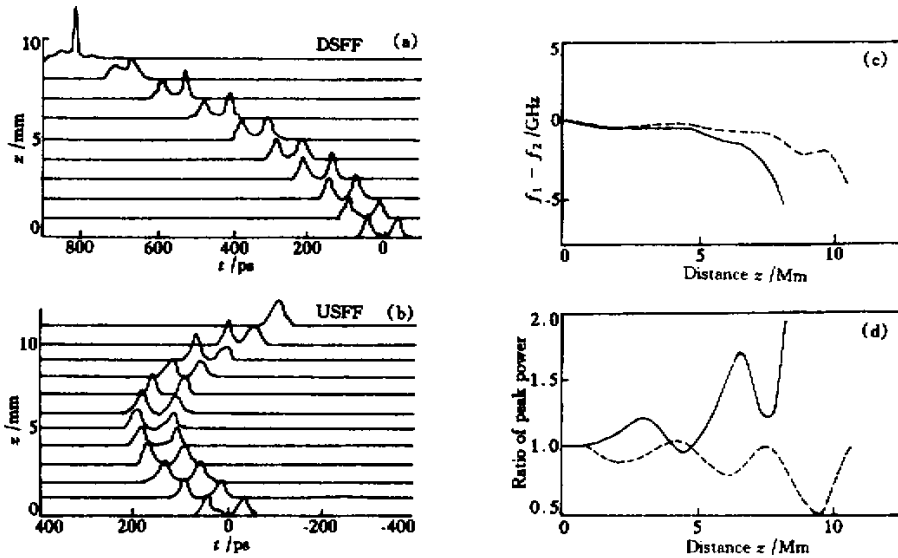


Fig. 2 Evolution of the power envelopes of soliton pair versus distance (a) with DSFF and (b) with USFF. The frequency offset (c) and the ratio of peak powers (d) of two solitons (the soliton initially at  $t = -40$  ps with respect to the soliton initially at  $t = +40$  ps) versus distance with DSFF (solid curve) and USFF (dashed curve)

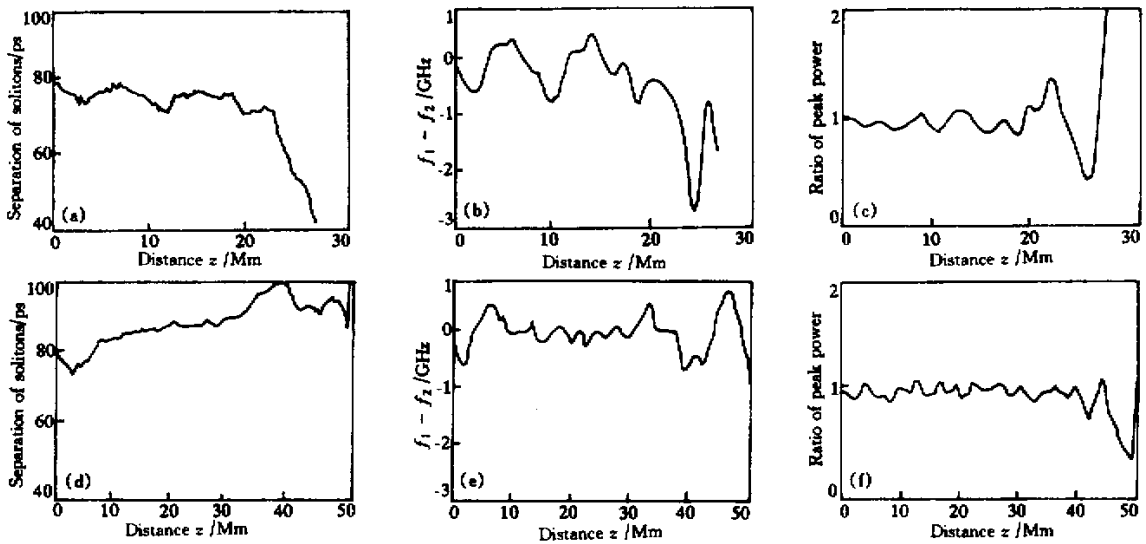


Fig. 3 The separation, frequency offset and ratio of peak powers of two solitons (initially at  $t = -40$  ps with respect to at  $t = +40$  ps) versus distance with ZSFF [(a)(b)(c)] and with sin-SFF [(d)(e)(f)].  $A = 8$  GHz,  $a = 4$  GHz/Mm

图 4 是  $A$  值取为 11 GHz,  $a$  取为 4 GHz/Mm 时两孤子的间距、频差及峰值功率比随距离的变化。图 4(a)~图 4(c) 对应于交叉变频滤波器,图 4(d)~图 4(f) 对应于正弦变频滤波器。正弦变频滤波器的合并距离也比交叉变频滤波器的合并距离约大一倍(交叉变频滤波器的合并距离约为 47 Mm,而正弦变频滤波器的合并距离约为 92 Mm)。图 5 是功

率包络随传播距离的演化图。注意图 5 及图 6 中已移去了因孤子的中心频率变化引起的时间延迟。

实际上,在图 5(b)中,当  $z > 80$  Mm 时,两孤子的平均峰值功率开始明显下降,其原因是滤波器中心频率总在  $\omega_0 - 11$  GHz 至  $\omega_0 + 11$  GHz 之间来回变动,在  $\omega = \omega_0$  附近的连续波仍能聚积,在平均功率不变的情况下,孤子的峰值功率就会下降。克服

连续积聚的一个办法是：让滤波器的中心频率在正弦变频滤波器的基础上叠加一个变频速率  $a_1$  较小

的上变频滤波器。如

$$\omega_f - \omega_0 = A \sin(2\pi z/z_{\sin}) + a_1 z. \quad (6)$$

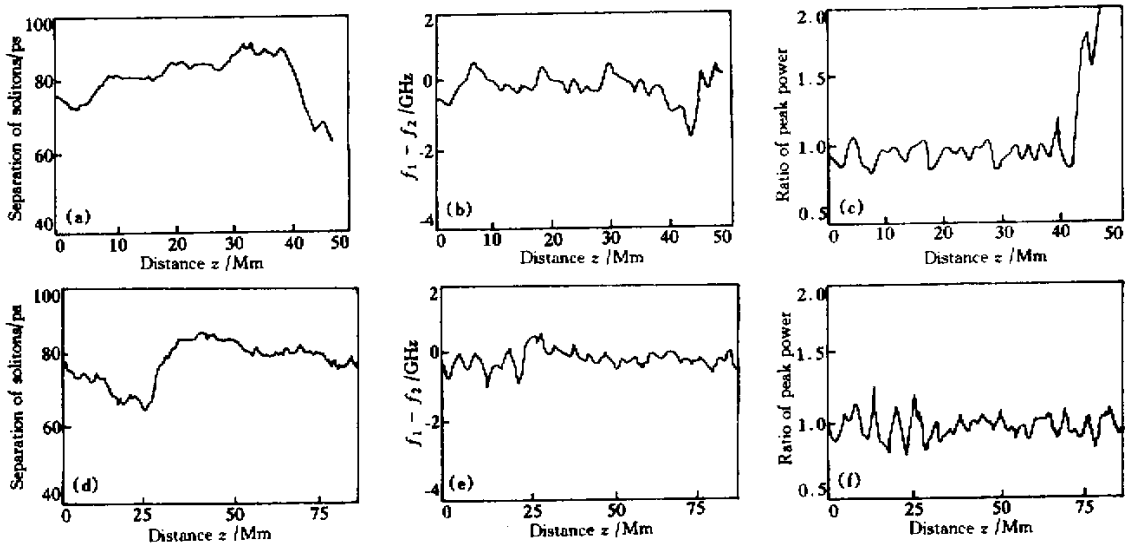


Fig. 4 The separation, frequency offset and ratio of peak powers of two solitons (initially at  $t = -40$  ps with respect to at  $t = +40$  ps) versus distance with ZSFF [(a) (b) (c)] and with sin-SFF [(d) (e) (f)].  $A = 11$  GHz,  $a = 4$  GHz/Mm

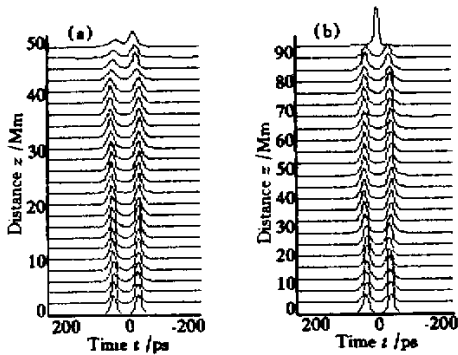


Fig. 5 The evolution of power envelopes of soliton pair with ZSFF (a) and with sin-SFF (b) versus distance.  $A = 11$  GHz,  $a = 4$  GHz/Mm

图 (b) 是在正弦变频滤波器方案的基础上叠加一个变频速率  $a_1$  较小的上变频滤波器 ( $A = 11$  GHz,  $a = 4$  GHz/Mm,  $a_1 = 0.06$  GHz/Mm) 后两孤子的功率包络随传播距离的演化图。可以看出两孤子的合并距离增加至为 120 Mm, 直到合并前, 两孤子的间距及峰值功率都保持得相当好, 连续波得到了较为有效的抑制。作为对比, 图 (a) 是同样在交叉变频滤波器方案的基础上叠加一个相同变频速率为  $a_1$  的上变频滤波器 ( $A = 11$  GHz,  $a = 4$  GHz/Mm,  $a_1 = 0.06$  GHz/Mm) 时两孤子的功率包络随传播距离的演化图。不难看出, 孤子的峰值功率也保持得较好。但合并距离几乎没有增加。

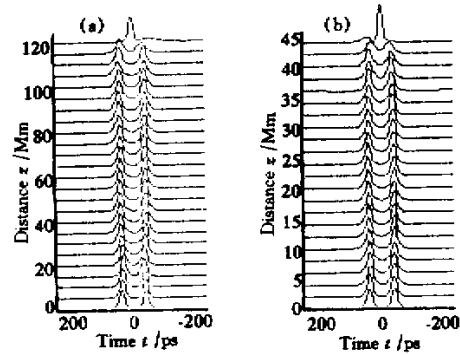


Fig. 6 The evolution of power envelopes of soliton pair with ZSFF + USFF (a) and with sin-SFF + USFF (b) versus distance.  $A = 11$  GHz,  $a = 4$  GHz/Mm,  $a_1 = 0.06$  GHz/Mm

结论 我们认为之所以上变频滤波器优于下变频滤波器、交叉变频滤波器优于上变频滤波器是由于孤子的如下两个特性决定的：一方面, 能量较大 (频带也宽) 的孤子比能量较小的孤子更能紧跟滤波器的频率变动<sup>[12]</sup>, 因此, 能量小的孤子因其中心频率偏离滤波器的中心频率较远, 滤波器对其损耗也较大, 能量会越来越小且其中心频率会越来越偏离滤波中心频率; 另一方面, 对相同能量的孤子, 用上变频滤波器方案比用下变频滤波器方案孤子的中心频率更能紧跟滤波器的频率变动, 因而损耗也较少<sup>[8,9]</sup>。

当用上变频滤波器 (下变频滤波器) 方案时, 因

滤波器频率上(下)移,位于前(后)面的孤子因相互作用而频率较低(高)滤波器对其损耗较大,其能量会越来越小且与位于后(前)面的孤子的频率越来越大(见图2),最终导致相互靠近。只不过在上变频滤波器的情况下比在下变频滤波器的情况下,两孤子的频率都跟得要稍紧一些<sup>[9]</sup>,能差及频差的扩大速度都要稍慢一些,从而使两孤子的相互靠近稍微推迟一些而已。而交叉变频滤波器方案则通过滤波器频率的上下变动来达到均衡前后孤子能量的作用,使其能差及频差减小且时正时负[见图3(a)~图3(c)],从而使孤子靠近大大推迟。但交叉变频滤波器方案的频率变动速度( $d\omega_f/dz$ )是跳跃的,这在一定程度上不利于孤子频率跟随滤波器频率的变动。而本文提出的正弦变频滤波器方案的特点是,滤波器中心频率沿光纤方向的变动速率 $d\omega_f/dz$ 是按余弦规律变化的。这使得孤子频率可以更好地跟随滤波器中心频率的变动,从而减小两孤子间的频差并均衡两孤子的峰值功率,抑制孤子间的相互作用。计算表明,该方案比交叉变频滤波器方案相比,可将相邻孤子的合并距离拓展约一倍。当然在地球上用不着90 Mm的传输距离(在叠加上适量的上变频以抑制连续波的增长后,合并距离甚至可以达到120 Mm),这不过是为了便于与其它文献直接进行比较而使用了宽度为20 ps的孤子的缘故。如果将孤子的脉宽减小至10 ps,同时将滤波器的带宽加倍,在传输线的传输速率增加到25 Gbits/s,这时孤子的合并距离仍有可能达到20 Mm以上。

### 参 考 文 献

[1] Dianov E M, Luchnikov A V, Pilipetskii A N *et al.*.

- Sov. Lightwave Commun.*, 1991, **1**(3):235~237
- [2] Kodama Y, Wabnitz S. Reduction and suppression of soliton interactions by bandpass filters. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1311~1313
- [3] Mecozzi A, Moores J D, Haus H A *et al.*. Soliton transmission control. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(23):1841~1843
- [4] Mecozzi A, Moores J D, Haus H A *et al.*. Modulation and filtering control of soliton transmission. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1992, **9**(8):1350~1357
- [5] Mollenauer L F, Lichtman E, Harve G T *et al.*. Demonstration of error-free soliton transmission over more than 15000 km at 5 Gbits/s, single-channel, and over more than 11000 km at 10 Gbits/s in a two-channel WDM. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(8):792~794
- [6] Mollenauer F L, Gordon J P, Evangelides S G. The sliding-frequency guiding filter: An improved form of soliton jitter control. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22):1575~1577
- [7] Kodama Y, Wabnitz S. Reduction and suppression of soliton interactions by bandpass filters. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1311~1313
- [8] Kodama Y. Analysis of soliton stability and interactions with sliding filters. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3):162~164
- [9] Golovchenko E A, Pilipetskii A N, Menyuk C R *et al.*. Soliton propagation with up- and down-sliding-frequency guiding filters. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6):539~541
- [10] Dung Jengcherng, Chi Sien, Wen Senfar. Reduction of soliton interactions by zigzag-sliding-frequency guiding filters. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18):1862~1864
- [11] Zhang Jieqiu, Chen Yanpu, Feng Dayi *et al.*. Transmission of sub-picosecond soliton in decreasing-dispersion fiber. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2001, **21**(11):1286~1289 (in Chinese)
- [12] Mollenauer L F, Mamyshev P V, Neubelt M J. Measurement of timing jitter in filter-guided soliton transmission at 10 Gbits/s and achievement of 375 Gbits/s-Mm, error free, at 12.5 and 15 Gbits/s. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10):704~706

## Reduction of Soliton Interaction by sin-Sliding-Frequency Guiding Filters

Zhang Jieqiu<sup>1)</sup> Chen Yanpu<sup>2)</sup> Feng Dayi<sup>1)</sup> Liang Changhong<sup>3)</sup>

(1), Engineering Institute, Airforce Engineering University, Xi'an 710038

(2), Computer Center, Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106

(3), National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071

(Received 27 October 2000; revised 5 February 2001)

**Abstract:** Reducing the soliton interaction by the sin-sliding-frequency guiding filters is suggested. The effects of the up-sliding-frequency guiding filters, down-sliding-frequency guiding filters, zigzag-sliding-frequency guiding filters and sin-sliding-frequency guiding filters on reducing soliton interaction are numerically studied. The results show that the sin-sliding-frequency guiding filters is most effective in reducing soliton interactions.

**Key words:** soliton interaction; sin-sliding-frequency filters; soliton transmission; optical communication