

在采用集总放大器的光孤子优越 传输中啁啾的作用

李 洪 黄肇明

(上海大学电子工程系, 上海 201800)

摘 要 讨论了光孤子传输中, 由脉冲包络的相位变化产生的啁啾与孤子传输的关系。数值计算表明, 当孤子脉冲收缩、展宽时, 啁啾总是改变符号, 利用啁啾也可以定出孤子传输的光纤临界长度(即孤子传输中集总放大器的间隔), 其效果比用脉宽恢复定出的临界长度要好。

关键词 光孤子, 光放大器。

1 引 言

长距离光纤通信中, 必须采用光放大器来补偿光纤损耗。有二种光放大的方法, 一种是众所周知的分布增益介质放大器; 另一种是集总放大器(比如掺铒光纤放大器)^[1~5], 它们以高增益和低插入损耗引起人们极大的兴趣。在采用集总放大器的传输方案中, 一般采用 $1 < A < 1.5$ 的孤子来传输, 这种方法称作“预加强”(Preemphasis)法^[1]。对于相邻集总放大器之间间隔(即所谓临界长度 L_c)的选定, 有人采用输出孤子脉冲宽度完全恢复时的光纤长度来作为临界长度, 取得了一定效果。在分析计算出的啁啾值时, 人们发现, 啁啾的变化实际上与孤子脉宽的变化有很大关系; 它的大小反映了脉宽的变化程度, 它的符号反映出脉宽是压缩还是展宽。本文利用啁啾来决定临界长度, 发现效果上要比前面一种方法要好得多。

2 公式推导

在带有损耗的光纤中, 非线性脉冲的传输可以用如下的非线性薛定谔方程来描述^[6]:

$$i \left(\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E}{\partial t} \right) - \frac{1}{2} k'' \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \gamma |E|^2 E + i \frac{\alpha}{2} E = 0 \quad (1)$$
$$\frac{1}{v_g} = \frac{\partial k}{\partial \omega} \Big|_{\omega=\omega_0}, \quad k'' = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega=\omega_0} = -D \frac{\lambda^2}{2\pi c} < 0$$

式中, $\gamma \approx \pi n_2 / \lambda$, n_2 为克尔系数, α 为损耗系数, ω_0 为载波频率。为计算方便, 把上式用如下的“孤子单位”归一化:

$$\tau = (t - z/v_g)/T_0, \quad \xi = z/L_D, \quad u = E/E_0. \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助的课题。

收稿日期: 1994 年 12 月 23 日; 收到修改稿日期: 1995 年 4 月 4 日

式中, $T_0 = t_0/\alpha$ 称作归一化输入脉冲宽度 (t_0 为输入脉冲的半功率宽度, α 由具体的脉冲形状来确定, 比如, 对于孤子脉冲, $\alpha = 1.76$), $L_D = T_0^2/|K''|$ 称作色散长度, $E_0 = \sqrt{1/\gamma L_D}$. 经过简单推导后, 方程(1)变成:

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u + i \frac{\alpha}{2} L_D u = 0 \tag{3}$$

与之相对应的脉冲峰值功率也可以由前面 E_0 的表达式方便推出^[1]

$$P = u^2 \frac{\lambda}{4n \left(\frac{\pi L_D}{2}\right)} \pi W_0^2 \tag{4}$$

式中, W_0 为光纤模场半径.

$n = n_0/\epsilon_0 c n_0$ 称作非线性折射率, n_0 为光纤平均折射率, (对于硅光纤而言, $n \approx 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$).

令 $u = |u|e^{i\varphi(\xi, \tau)}$, 可得出 $\tau = 0$ (脉冲中部)处啾啾的表达式:

$$a_{ch} = - \left. \frac{\partial^2 \varphi(\xi, \tau)}{\partial \tau^2} \right|_{\tau=0} \tag{5}$$

3 孤子脉冲包络方程的数值解及其分析

上一节中, 已经求出了光纤中孤子脉冲包络变化的时间、位置方程, 以及峰值功率和啾啾的公式. 利用数值解可以方便地得到相应的结果.

3.1 孤子脉冲沿光纤的变化

分析在正色散光纤 ($\omega_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 时, $D = 3 \text{ ps/km/nm}$, 损耗 $\alpha = 0.22 \text{ dB/km}$) 中, 脉宽 $t_0 = 21.6 \text{ ps}$ 的孤子脉冲 (其孤子阶分别取为 $A = 1, 1.4, 2$, 与之相对应的脉冲峰功率则分别为 $7.95 \text{ mW}, 15.58 \text{ mW}, 31.80 \text{ mW}$) 沿光纤的变化情形. 计算结果如图 1 所示. 由于光纤中有损耗, 从图 1(a)中看到, 脉冲峰值幅度逐渐减小. 对比图 1(b)和图 1(c)不难发现, 啾啾为正值时, 孤子脉冲被压缩; 啾啾为负值时, 孤子脉冲展宽. 并且, 啾啾大小实际上反映了脉冲压缩 (或展宽) 的程度, 啾啾越大, 脉冲压缩 (或展宽) 的趋势越大. 图 1(c)中显示, 当传输距离继续增大时, 三种情况 ($A = 1, 1.4, 2$) 的脉冲啾啾逐渐趋于同一个常数, 相应地, 在图 1(b)中, 与这三种情形所对应的脉宽以同一速率展宽.

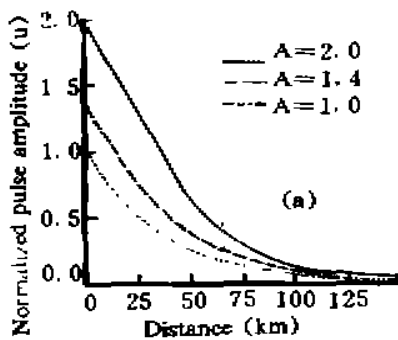


Fig. 1 (a) Pulse peak amplitude is shown as a function of distance for various "A" values.

See text for the fiber parameters

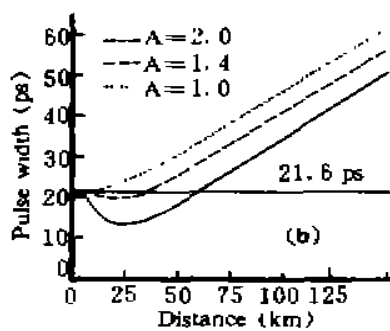


Fig. 1 (b) Pulse width is shown as a function of distance for various "A" values.

See text for the fiber parameters

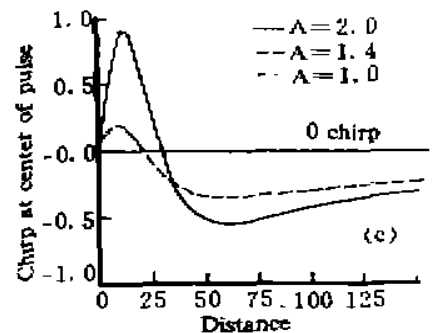


Fig. 1 (c) Chirp at center of pulse is shown as a function of distance for various "A" values.

See text for the fiber parameters

3.2 孤子脉冲的周期性放大

为实现长距离孤子传输，可以采用文献[1]中介绍的“预重法”(即取 $1 < A < 1.5$ 的孤子， A 不取更高的值是因为对于高输入功率的孤子，脉冲传输中容易变形)。为了方便与以前的结果相比较，现取 $A = 1.4$ 。

分析图 1(b)中 $A = 1.4$ 时的曲线，显见，当传输距离 $z = 34$ km 时，脉冲宽度恢复原来的值(21.6 ps)。若以此光纤长度来作为放大器的间隔(临界长度 L_c)，那么就可实现孤子的周期性传输(即脉宽周期性地压缩和展度)，从而达到长距离传输的目的。这种设置临界长度的方法称作脉宽恢复法，也正是文献[1]中采用的方法。由于遭受不可恢复的剩余相位的影响，孤子在周期性传输中逐渐变形。

正如 3.1 节中所述，既然啾啾反映的是脉宽的变化，那么当孤子脉冲沿光纤传输时，若其每个传输单元内的啾啾正负近似相等，不正预示着孤子脉冲的压缩和展宽差不多吗？换句话说，依此确定的临界长度(即放大器之间的间隔)将可以较好地保持孤子脉冲的周期性脉宽和形状变化。分析图 1(c)中 $A = 1.4$ 时的曲线，不难发现，当传输距离 $z = 30$ km 时，啾啾为负值，且其大小近似与啾啾的正最大值相等。于是就取临界长度 $L_c = 30$ km。这种设置临界长度的方法称之为啾啾法。

至于集总放大器增益的设置，也有二种方案^[1]：一种是恒定峰值功率法，即通过调节放大器的增益大小，保证每段光纤输入端的脉冲峰值幅度 $A = 1.4$ 不变；另一种是恒定增益法，即保持各放大器的增益不变，且放大器的增益大小等于前一段光纤的损耗。

3.2.1 恒定峰值功率法

周期性间隔的放大器用以保持孤子脉冲的峰值功率不变，即保持脉冲幅度 $A = 1.4$ 恒定。以前述的二种方法来分别确定临界长度 L_c 的大小(L_c 分别为 34 和 30 km)，计算结果如图 2 所示。图中，实线对应脉宽恢复法的情形，虚线则对应啾啾法时的情况。分析图 2(b)发现，实线脉宽有增大趋势，而虚线脉宽则很快趋于周期性振荡状态；再看图 2(c)虚线啾啾的正负值分布比实线啾啾的分布更加对称，反映出虚线脉宽的周期性比实线的要好。

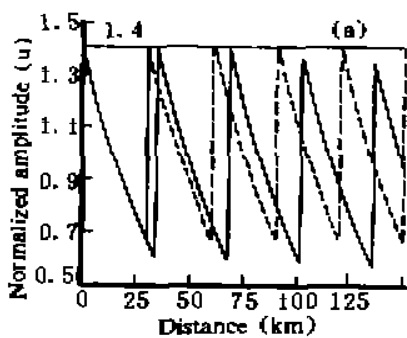


Fig. 2 (a) Pulse peak amplitudes along the fiber are shown for the critical length $L_c = 34$ km (solid line), and 30 km (broken line), respectively. Where peak intensity of pulse is kept constant.

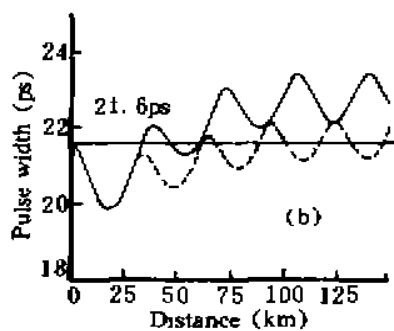


Fig. 2 (b) Pulse widths along the fiber are shown for the critical length $L_c = 34$ km (solid line), and 30 km (broken line), respectively. Where peak intensity of pulse is kept constant

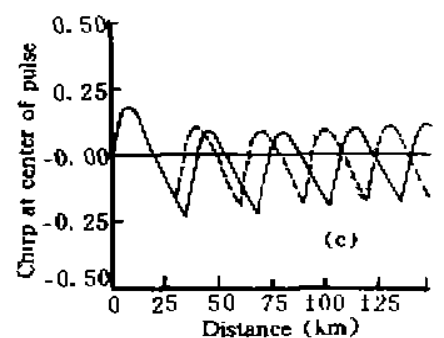


Fig. 2 (c) Chirps at center of pulse along the fiber are shown for the critical length $L_c = 34$ km (solid line), and 30 km (broken line), respectively. Where peak intensity of pulse is kept constant

3.2.2 恒定增益法

用周期性间隔的放大器补偿光纤的损耗，且放大器的增益恒定为 $G = 0.22 \text{ db/km} \times L_c$ 保持不变。仍以前述的二种方法来确定临界长度 L_c 的大小，计算结果如图 3 所示。同样地，图中，实线对应脉宽恢复法的情形，虚线对应啁啾法的情况。图 3(b)、图 3(c)的结果与图 2(b)、图 2(c)的类似；值得一提的是图 3(a)的结果，实线的峰值幅度逐渐向下跌落，而虚线的峰值幅度却变化很小。

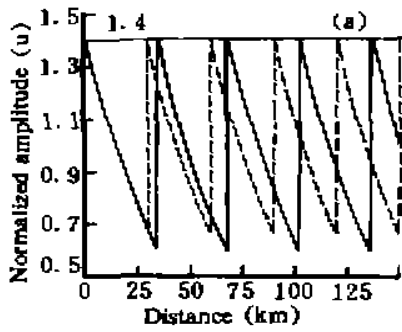


Fig. 3 (a) Pulse peak amplitudes along the fiber are shown for the critical length $L_c = 34 \text{ km}$ (solid line), and 30 km (broken line), respectively. Where gain of amplifiers is kept constant

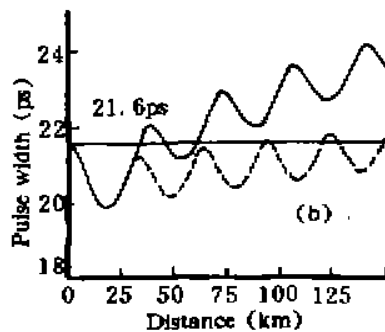


Fig. 3 (b) Pulse widths along the fiber are shown for the critical length $L_c = 34 \text{ km}$ (solid line), and 30 km (broken line), respectively. Where gain of amplifiers is kept constant

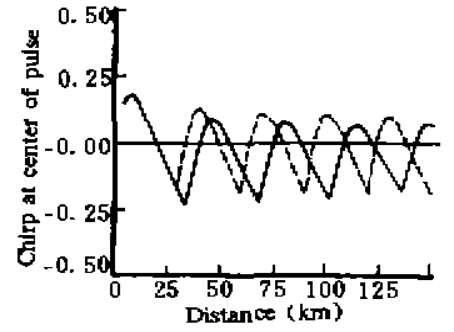


Fig. 3 (c) Chirps at center of pulse along the fiber are shown for the critical length $L_c = 34 \text{ km}$ (solid line), and 30 km (broken line), respectively. Where gain of amplifiers is kept constant

3.3 长距离孤子传输

通过分析图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)、图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)发现，啁啾法确实比脉宽恢复法更好一些，然而，前面分析的都是短距离传输情况，长距离传输时效果如何呢？现将分析长距离传输后脉冲的变化情形。

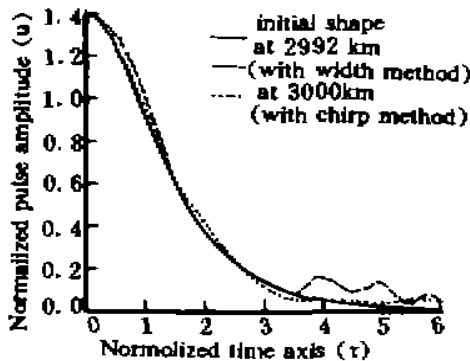


Fig. 4 (a) Pulse shapes drawn after 88 amplifications for pulse-width method (viz. 2992 km), and after 100 amplifications for chirp method (viz. 3000 km), respectively, where peak intensity of pulse is kept constant. See text for fiber parameters

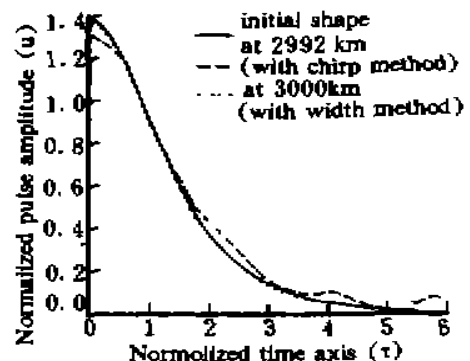


Fig. 4 (b) Pulse shapes drawn after 88 amplifications for pulse-width method (viz. 2992 km), and after 100 amplifications for chirp method (viz. 3000 km), respectively, where gain of amplifiers is kept constant. See text for fiber parameters

图 4(a)所示的是恒定峰值功率法情况。其中，对于脉宽恢复法情形，孤子脉冲经过了 88 次放大(即传输了 2992 km)；对于啁啾法情形，孤子脉冲经过了 100 次放大(即传输了 3000 km)。

从图中显而易见,用啾啾法传输的脉冲仍然极好地保持了原来形状,也即可以传输更远的距离。

图 4(b)所示的是恒定增益法情况。从图中也可以明显看出啾啾法确实提高了传输效果。

仅就啾啾法对应的曲线而言,比较图 4(a)、图 4(b)后发现,恒定增益法的传输效果又比恒定峰值功率法的更好些。原因也很简单:在恒定增益系统中,光纤输入端的总脉冲能量在传输中保持恒定,从而避免了更多的附加非线性相位改变的产生。这种系统可以极好地保持孤子波形。

结 论 本文讨论了啾啾与孤子脉冲的关系,提出了以啾啾作为定义临界传输长度的方法。数值分析表明,采用这种方法后,传输效果将得到提高,可以把孤子脉冲传输更远一些。不足之处是将需要更多的集总放大器。

参 考 文 献

- [1] H. Kubota, M. Nakazawa, Long-distance optical soliton transmission with lumped amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26(4): 692~700
- [2] K. Suzuki, Y. Kimura, M. Nakazawa, Subpicosecond soliton amplification and transmission using Er³⁺-doped fiber pumped by InGaAsP laser diodes. *Opt. Lett.*, 1989, 14(16): 865~867
- [3] I. Y. Khrushchev, A. B. Grudin, E. M. Dianov et al., Amplification of femtosecond pulses in Er³⁺-doped single-mode optical fibers. *Electron. Lett.*, 1990, 26(7): 456~458
- [4] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada et al., 10 Gbit/s, 1200 km error-free soliton data transmission using erbium-doped fiber amplifiers. *Electron. Lett.*, 1992, 28(9): 817~818
- [5] M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada et al., 20 Gbit/s soliton transmission over 200 km using erbium-doped fiber repeaters. *Electron. Lett.*, 1990, 26(19): 1502~1503
- [6] G. P. Agrawal, Amplification of ultrashort solitons in erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, 1990, 2(12): 875~877

Effect of Chirp in Optical Soliton Transmission with Lumped Amplifiers

Li Hong Huang Zhaoming

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

(Received 23 December 1994; revised 4 April 1995)

Abstract The relation between the chirp in phase of soliton pulse and soliton propagation is discussed in this paper. It is shown with numerical results that the chirp always changes sign whenever soliton pulse alternates between narrowing and broadening. The critical length of soliton propagation (with which the lumped amplifiers are separated) can be determined by means of the chirp², and the effect from this method is better than that from pulse-width recovery scheme.

Key words optical soliton, optical amplifier.