

# 光纤克尔门全光再生器特性分析\*

陈明华 杨祥林

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**摘 要** 讨论了光纤克尔门再生器抑制输入光脉冲的加性噪声和脉冲中心抖动的机制, 分析了再生器中各元件的配置对其抑制噪声能力的影响。指出根据通信线路中的噪声特性, 适当选择克尔门中色散位移光纤长度, 可以大大抑制通信系统中的噪声, 提高系统通信容量。

**关键词** 再生器, 噪声, 光纤克尔门, 通信容量。

## 1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)替代传统光纤通信系统中的光-电-光式中继器, 突破系统中的“电子瓶颈”, 可提高系统传输容量, 实现全光信号传输。但光放大器只有提升功率、补偿损耗的功能, 而系统中的噪声分量和掺铒光纤放大器引入的放大自发发射(ASE)噪声随着传输距离的增加将不断积累, 这是系统通信容量进一步提高的另一种限制。随着光子技术更深入的发展, 最近提出了一种全光再生中继器<sup>[1, 2]</sup>来克服这种限制。这种中继器由时钟恢复与再生两部分组成, 前者从数据流中提取出时钟信号, 后者利用时钟信号再生出数据脉冲, 失真很小、噪声很低、适于光脉冲数据流的长距离传输。再生器一般由具有“与”特性的非线性门构成<sup>[1, 2]</sup>, 光纤克尔门<sup>[2-5]</sup>就是其中较有前途的一种。文献[2]在实验上证实了光纤克尔门构成的再生器能够抑制系统的噪声, 降低系统误码率。目前克尔门研究主要侧重于如何实现光脉冲的“与”功能<sup>[2-5]</sup>, 很少涉及它抑制噪声的机制和内部参数对其抑制噪声的影响。随着光子技术逐步成熟和越来越多地应用于系统中, 这些问题的讨论变得更为迫切。本文首先分析系统中的噪声特性: 加性噪声和光脉冲中心抖动, 接着分析克尔门再生器抑制噪声的机制, 最后分析了再生器中克尔门的结构参数对其抑制噪声能力的影响。

## 2 克尔门再生器的结构与原理

由克尔门作为再生器的全光中继再生器的结构如图 1 所示。波长为  $\lambda_1$  的数据信号进入中继器后分成两路, 一路进入光时钟恢复光路, 产生周期性的变换限制光脉冲, 作为再生时钟脉冲源, 其波长为  $\lambda_2$ , 应用光锁相环(PLL)技术<sup>[6]</sup>和锁模技术<sup>[7, 8]</sup>都可以构成时钟恢复光路, 限于篇幅本文仅假设它能输出严格的周期性光脉冲, 而不再讨论内部参数对输出时钟脉冲性

\* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 9 月 7 日; 收到修改稿日期: 1996 年 11 月 18 日

能的影响。另一路经过功率提升, 作为控制光脉冲, 控制克尔门透射与截止, 调制时钟脉冲, 将信息转载到时钟脉冲流上, 并将其作为再生器的输出信号。这样再生器滤除了线路上大部分噪声, 抑制了限制系统的通信容量的噪声。

若调整偏振控制器使输入光脉冲 ( $\lambda_1$ ) 与时钟光脉冲 ( $\lambda_2$ ) 的偏振方向的夹角为  $45^\circ$ , 且控制光的强度远远大于时钟光, 则控制光引起时钟光快慢轴相位差随距离的演化方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{d\phi}{dz} = \frac{8\pi n_2}{3\lambda_{eff}} P_d(t, z) \tag{1}$$

式中  $P_d(t, z)$  为输入的光脉冲功率,  $n_2$  为光纤的非线性系数,  $\lambda_2$  为时钟光波长,  $A_{eff}$  是光纤的有效截面。

假设输入光脉冲流为高斯脉冲流, 同时以时钟光群速作为参考系, 作变换  $\tau = t - z/v_{g2}$ , 得到:

$$P_d(\tau, z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m A_d [1 - \exp(-\alpha z)] \exp\{-[\tau + \Delta\beta z + J_m(\tau + \Delta\beta z) - m/R]^2/T_0^2\} + n^2(\tau + \Delta\beta z) \tag{2}$$

式中  $T_0$  为输入光脉冲宽度,  $A_d$  为峰值功率,  $\alpha$  为光纤损耗,  $\Delta\beta = 1/v_{g1} - 1/v_{g2}$  为输入光脉冲与时钟光脉冲的群速差,  $J$  表示输入光脉冲的中心抖动,  $n$  为传输线路中的加性噪声,  $R$  为输入码流比特率,  $a_m$  表示数据码元值:

$$a_m = \begin{cases} 1 & P(\alpha_m = 1) = 1/2 \\ 0 & P(\alpha_m = 0) = 1/2 \end{cases}$$

将(2)式代入(1)式并将其归一化, 得到的相位差方程为:

$$\frac{d\phi}{dZ} = K [1 - \exp(-\Gamma Z)] \left( \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m \exp\{-[(T + Z - mT_R + J_m(T + Z))^2 + n^2(T + Z)]\} \right) \tag{3}$$

式中:

$$\begin{aligned} T_R &= 1/RT_0, & Z &= z/z_0, & T &= \tau/T_0, \\ z_0 &= T_0/\Delta\beta, & K &= \frac{8\pi n_2}{3\lambda_{eff}} z_0 A_d, & \Gamma &= \alpha/z_0, \\ \langle J(\tau) \rangle &= 0, & \langle J(\tau) J(\tau') \rangle &= D_J \delta(\tau - \tau') \\ \langle n(\tau) \rangle &= 0, & \langle n(\tau) n(\tau') \rangle &= D_n \delta(\tau - \tau') \end{aligned}$$

其中  $D_J$  与  $D_n$  分别为随机变量  $J$  与  $n$  抖动的尺度。

克尔门的时钟光输出功率  $P_{c-out}$  与时钟光快慢轴相位差的关系为<sup>[5]</sup>:

$$P_{c-out}(T) = P_{c-in}(T) \sin^2 \left[ \left| \int_0^{L/z_0} \frac{d\phi}{dZ} dZ \right| / 2 \right] \tag{4}$$

式中  $P_{c-in}$  为时钟光输入功率。这样利用(3)式, (4)式可以分析光纤克尔再生器的性能特性。

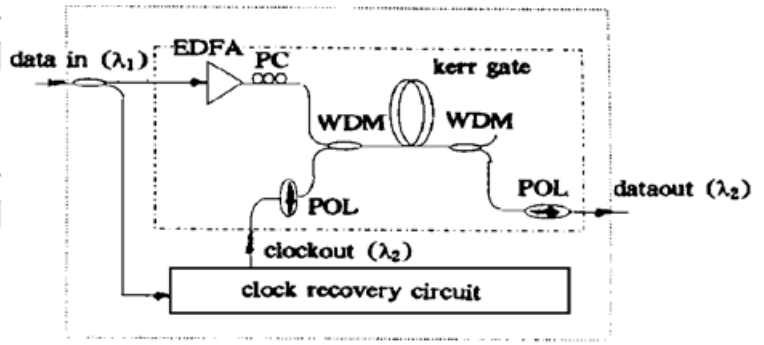


Fig. 1 The scheme of all-optical regenerator

### 3 再生器性能分析

#### 3.1 再生器对加性噪声的抑制

为了简便,先不考虑脉冲中心抖动的影响,即设  $J(\tau) = 0$ ,则由(3)式积分,得到检偏器处快慢轴光的相位差为:

$$\phi = K \left[ \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m Q(T, m) + \int_0^{L/z_0} [1 - \exp(-\Gamma Z)] n^2(T + Z) dZ \right] \quad (5)$$

式中:

$$Q(T, m) = \int_0^{L/z_0} [1 - \exp(-\Gamma Z)] \exp[-(T + Z - mT_R)^2] dZ \quad (6)$$

很明显,在  $T = mT_R - L/(2z_0)$  时,再生器输出端处快慢轴分量的光的相位差最大。在实际应用中,可以调节时钟光脉冲使其从透射窗口中心通过,则时钟光脉冲功率可以表示为:

$$P_{c-in}(T) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} A_c \exp[-(T + L/2z_0 - mT_R)^2/T_c^2] \quad (7)$$

式中  $A_c$  为脉冲峰值功率,  $T_c$  为脉冲归一化宽度。

一般情况下,输入光脉冲交叠并不严重,在考察某一时隙输出光脉冲特性时仅需考虑本时隙及其前后相邻时隙输入光脉冲的影响,如  $T \in [-T_R/2 - L/(2z_0), T_R/2 - L/(2z_0)]$  时,(4)式中仅取  $n = -1, 0, 1$  三项已经足够,而不必考虑其它脉冲的影响。将(5)式,(7)式代入(4)式,同时利用噪声相关特性,得到输出脉冲的信号功率  $P_s$  和噪声功率  $P_N$  分别为:

$$P_s = \frac{1}{2T_R} \int_{-\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}}^{\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}} \sin^2[\phi_s(T)/2] P_{c-in}(T) dT \quad (8)$$

$$P_N = \frac{1}{T_R} \int_{-\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}}^{\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}} \rho_N(T) P_{c-in}(T) dT \quad (9)$$

其中:

$$\phi = K \{ Q(T, 0) + \frac{1}{2} [Q(T, -1) + Q(T, 1)] \} \quad (10)$$

$$\rho_N(T) = \frac{1}{2} K \sin(\phi) \left( D_n \int_T^{T+L/z_0} \{1 - \exp[\Gamma(T-t)]\}^2 dt + \frac{1}{4} [Q(T, 1) + Q(T, -1)] \right) + \frac{1}{2} \sin^2 \left[ \frac{1}{2} K [Q(T, 1) + Q(T, -1)] \right] \quad (11)$$

从(11)式可以看出,再生器输出的脉冲的噪声功率分为三部分:一是由输入数据脉冲所携带的加性噪声引起窗口透射率随机变化导致的输出脉冲幅度随机变化;二是由前后相邻时隙的脉冲对窗口的透射率的影响引起的;由于输入的是光数据流,这两个脉冲是随机出现的,因此引起的透射率变化也是随机的。三是在零码时,由于前后相邻时隙脉冲的影响,导致消光比恶化,即零码时有光输出。这部分光在以后的传输过程中由于色散等效应,发生弥散,最后将影响检测系统的判决,故它也是一种噪声。计入这些噪声功率可以得出再生器对输入信号信噪比改善因子:  $F_A = SNR_{out} - SNR_{in} \text{ (dB)}$ 。

图 2 是数据码率分别为 20、40、60、80 Gbit/s, 半高全宽为 10 ps, 波长  $\lambda_1$  为 1.550  $\mu\text{m}$  的光脉冲流通过再生器后信噪比的改善因子  $F_A$  与再生器中色散位移光纤长度的关系。计算中设定经过掺铒光纤放大器功率提升后输入光脉冲的峰值刚好使克尔门处于透射状态, 其它参数分别为: 光纤损耗为 0.1 dB/km、非线性系数为  $3.2 \times 10^{20} \text{ m}^2/\text{W}$ 、有效截面为  $50 \mu\text{m}^2$ ; 时钟脉冲的宽度和光波长与时钟恢复光路的具体配置有关, 综合系统要求和目前研究水平, 分别取典型值: 半高全宽为 2 ps, 波长  $\lambda_2$  为 1.554  $\mu\text{m}$ ;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  两束光在光纤中的群速倒数的差  $\Delta\beta = 1 \text{ ps/km}$ 。由图 2 可知, 在不同条件下, 再生器可以使输入信号的信噪比提高几到几十分贝, 但在参数失配时, 也可能恶化信噪比。当输入再生器的光脉冲的速率和宽度确定后, 色散位移光纤的长度有一最佳值使再生器抑制加性噪声的能力达到最大。再生器抑制加性噪声能力源于克尔门对时钟光的透射率与输入信号光功率的关系是非线性的, 在完全透射 ( $\varphi = \pi$ ) 与完全截止 ( $\varphi = 0$ ) 附近, 因光功率波动引起的透射率波动很小。随着光纤长度增加, 由于存在输入信号光与时钟光之间存在群速差, 对时钟光而言, 透射窗口变宽, 完全透射部分也增加, 因此迭加在时钟光上的噪声将减少。另一方面, 由于透射窗口变宽将会引起相邻“零”码的消光比恶化, 最终导致信噪比的恶化。综合两方面因素, 光纤长度必有一最佳值。在输入脉冲宽度相同时, 随着光脉冲速率提高, 再生器抑制加性噪声的能力不断下降, 最佳长度也不断变小。这同样是因为“零”码时相邻脉冲恶化其消光比而引起信噪比下降。

### 3.2 再生器对输入信号脉冲中心抖动的抑制

同样不计加性噪声对输出的再生脉冲中心抖动的影响, 即令  $n(\tau) = 0$ 。由于输入脉冲中心抖动均方根值与时隙宽度相比是个小量, 在某一时刻内, 可以将(3)式展开:

$$\frac{d\phi}{dZ} = K \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m [1 - \exp(-\Gamma Z)] \exp[-(T - mT_R + Z)^2] - 2\alpha_m [1 - \exp(-\Gamma Z)] \times (T - mT_R + Z) \exp[-(T - mT_R + Z)^2] J_m(T - mT_R + Z) \quad (12)$$

相邻时隙的两个脉冲对再生器输出的光脉冲中心抖动的影响很小, 因此下面讨论不再计入它们的影响。由(12)式可得再生器输出脉冲中心的偏移值为:

$$\Delta T = \frac{\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0} \int_{-\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}}^{\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}} TP_{c-in}(T) \sin[KQ(T, 0)] \Delta\phi dT}{\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0} \int_{-\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}}^{\frac{T_R}{2} - \frac{L}{2z_0}} P_{c-in}(T) \sin^2[KQ(T, 0)/2] dT} \quad (13)$$

式中  $\Delta\phi$  是一个维纳积分, 且:

$$\begin{aligned} \Delta\phi(T) \Delta\phi(T') &= 4K^2 D_J \int_T^{T+L/z_0} d\tau \int_{T'}^{T'+L/z_0} d\tau' \delta(\tau - \tau') \\ &\times \{1 - \exp[\Gamma(T - \tau)]\} \{1 - \exp[(\Gamma(T' - \tau'))]\} \pi' \\ &\times \exp[-(\tau^2 + \tau'^2)] \end{aligned} \quad (14)$$

通过(13)式和(14)式, 可以计算再生器对输入光脉冲中心抖动的抑制因子:

$$F_J = \sqrt{\frac{\langle (\Delta T_{in})^2 \rangle}{\langle (\Delta T_{out})^2 \rangle}} \quad (15)$$

图 3 是光脉冲流通过再生器后脉冲中心抖动抑制因子  $F_j$  与再生器中色散位移光纤长度的关系, 计算中各参数与前相同。由图可知, 对不同的光纤长度, 再生器可以使输出光脉冲的中心抖动均方值下降几至几十倍。随着光纤长度增加, 再生器的中心抖动抑制因子在光纤长度为 10~12 km 处达到最大后逐渐下降到 1 以下, 失去了抑制光脉冲中心抖动的能力。这是因为虽然光纤加长, 透射窗口宽度就加宽, 其中心抖动对时钟光脉冲的影响变小。但当窗口宽度比时钟脉冲宽度大出较多(1.5 倍)时, 窗口进一步加宽, 输出的时钟脉冲抖动将不会继续显著减小。另一方面由(14)式可知, 光纤长度较长时, 透射窗口本身的抖动将会变大。综合以上两方面因素, 可知再生器中色散位移光纤长度同样有一最佳值使其抑制输入脉冲中心抖动的能力最强。

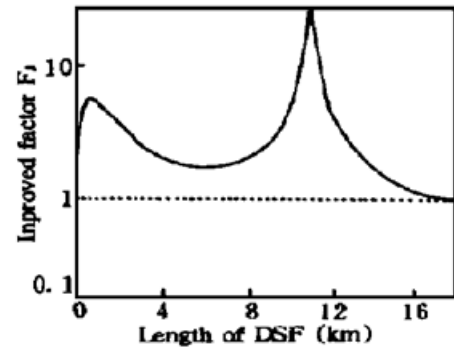
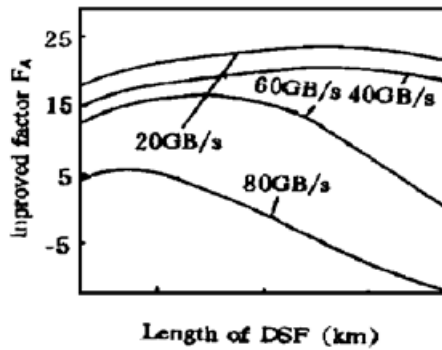


Fig. 2 Influence of DSF length on the additive noise suppression of regenerator      Fig. 3 Influence of DSF length on the time jitters suppression of regenerator

在实际光纤传输线路上, 噪声特性与传输系统本身特性有关。线性传输系统中, 加性噪声可能占主要地位, 而孤子传输系统中, 脉冲中心随机抖动可能是系统通信容量的主要限制。因此在设计再生器时, 必须根据线路上各参数(如传输比特率、输入脉冲宽度、噪声特性), 适当地选择再生器中色散位移光纤的长度, 使输出光脉冲的噪声尽量地小。由上述讨论可知, 抑制加性噪声和抑制脉冲中心抖动的最佳光纤长度各不相同。比较图 2 和图 3, 可知抑制加性噪声的最佳长度落在再生器抑制脉冲中心能力急剧下降的区域外。因此在实际设计中, 可以根据实际噪声特性, 折衷选择光纤长度, 使再生器输出脉冲加性噪声和中心抖动都较小, 达到设计要求。

**结 论** 综上所述, 克尔门再生器能够抑制输入光脉冲流中的加性噪声和中心抖动噪声。再生器中色散位移光纤的长度对再生器抑制这两种噪声的能力影响很大, 且有各自的最佳值。针对传输线路中的噪声特性, 可以选择适当的光纤长度, 使再生器输出的脉冲加性噪声和中心抖动都较小, 大大提高传输系统的通信容量。

### 参 考 文 献

- [1] Y. Yano, T. Ono, N. Henmi, Noise compression and waveform restoration by an optical signal regenerator. *Proc. OFC'95, San Diego, California*, WH4: 127~ 129
- [2] W. A. Pender, P. J. Watkinson, E. J. Greer *et al.*, 10 Gbit/s all-optical regenerator. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(18): 1587~ 1588
- [3] E. M. Dianov, E. A. Zakhidov, A. Ya. Karasic *et al.*, Optical Kerr effect in glass fiber waveguides with weak and strong birefringence. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1987, **17**(3): 517~ 519

- [4] J. M. Dziedzic, R. H. Stolen, A. Ashkin, Optical Kerr effect in long fiber. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(7) : 1403~ 1406
- [5] G. P. Agrawal, *Nolinear Fiber Optics*. New York: Academic, 1989
- [6] O. Kamatani, S. Kawanishi, M. Saruwatari, Prescaled 6.3 GHz clock recovery from 50 Gbit/s TDM optical signal with 50 GHz PLL using four-wave mixing in a travelling-wave laser diode optical amplifier. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(10) : 807~ 809
- [7] A. D. Eills, K. Smith, D. M. Patrick, All optical clock recovery at bit rates up to 40 Gb/s. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(15) : 1323~ 1324
- [8] L. E. Adams, E. S. Kintzer, J. G. Fujimoto, All-optical timing extraction at 40 GHz using a mode-locked figure-eight laser with an SLA. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(20) : 1759~ 1761

## Characteristics of All-Optical Regenerator Using Fiber Kerr Gate

Chen Minghua      Yang Xianglin

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

(Received 7 September 1996; revised 18 November 1996)

**Abstract** The mechanism of using fiber Kerr gate regenerator to suppress the additive noise and timing jitters of input optical signal is discussed. Influences of parameters of different components in the regenerator on the abilities of suppressing noise in input signal are analyzed. It's shown that the regenerator can greatly suppress noise in communication system and improve its communication capacity by choosing suitable length of DSF in Kerr gate according to the noise characteristics in system.

**Key words** regenerator, noise, fiber Kerr gate, communication capacity.