

文章编号 : 0253-2239(2002)08-0937-05

40 Gb/s 窄脉冲预啁啾归零码色散管理传输*

李智红 姜采云 高以智

(清华大学电子工程系激光教研组,北京 100084)

摘要: 通过数值计算的方法,对 40 Gb/s 带有预啁啾和无啁啾的窄脉冲归零码在色散管理光纤链路中的传输特性进行了比较。计算发现,脉冲的预啁啾会与光纤的高阶色散共同作用,并增强高阶色散对传输的影响。只有在高阶色散得到很好补偿以后,窄脉冲带啁啾的归零码(CRZ)的传输特性才会好于无啁啾的归零码。对不同的入射脉冲条件和传输链路参量存在相应的预啁啾最佳值。

关键词: 色散管理;预啁啾归零码;传输;数值模拟
中图分类号: TN25; TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

随着光纤通信技术的飞速发展,为了进一步提高传输容量,单路传输速率达到 40 Gb/s 的系统成为研究热点之一^[1,2]。

在超高速光纤通信系统中,光纤色散和非线性等效应的影响越来越严重。如何在传输中尽量减小非线性效应的影响已经成为一个十分重要的问题。近年来,人们提出一种带啁啾的归零码(CRZ)技术^[3]。这种在传输前给脉冲加一定的预啁啾的技术,其根本目的是使脉冲在进入传输光纤以后以更快的速度散开,从而降低非线性效应的影响。目前使用的归零码从脉宽上大体可分为两种,一种是普通归零码,它是对连续光进行二次调制得到的,占空比约为 1/2。以

往的理论和实验工作主要研究普通归零码加预啁啾的情况^[4,5]。另外还有一种窄脉冲归零码,其占空比小于 1/4,这种脉冲广泛应用于光时分复用(OTDM)系统中^[6]。

本文将针对 40 Gb/s 的单信道窄脉冲带啁啾的归零码的传输特性进行研究。研究表明,当脉冲较窄时,光纤的高阶色散将与脉冲的预啁啾共同作用,严重地影响传输性能。只有在高阶色散得到充分补偿的情况下,预啁啾才能有效地改善其传输性能。

2 理论模型

图 1 为理论计算所采用的 40 Gb/s 传输系统示意图。

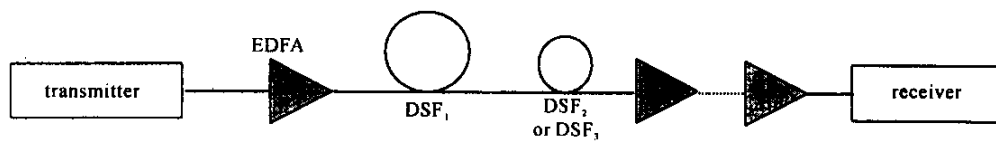


Fig.1 Schematic diagram of 40 Gb/s transmission system

图中信号发射机发出初始啁啾参量为 C 的高斯型脉冲,单个脉冲的入射光场可用下式表示:

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{1 + iC}{2} \frac{T^2}{T_0^2}\right], \quad (1)$$

其中 T_0 为脉冲峰值 $1/e$ 处的半宽度,对高斯型脉冲来说,其半峰全宽 $T_{FWHM} = 1.665 T_0$ 。在这里取

$T_{FWHM} = 5$ ps。脉冲串由 32 个比特组成,码型为 01011100101000101111001011010010。

传输光纤由两段色散位移光纤(DSF)搭配而成。忽略受激拉曼散射效应,脉冲在光纤中的传输满足非线性薛定谔方程^[7]:

$$\frac{\partial}{\partial z} u = -\frac{1}{2} \alpha u - \frac{1}{2} i \beta_2 \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} + i \gamma |u|^2 u, \quad (2)$$

式中 u 为光脉冲电场包络, α 为光纤损耗, β_2 和 β_3 为色散参量,与光纤的一阶和二阶色散相对应, γ 为

* 国家自然科学基金(60072017、60177019)及国家 863 高技术资助课题。

E-mail: loucy@ee.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2001-08-27; 收到修改稿日期: 2001-11-05

光纤的非线性系数。显然,在这个方程里,我们考虑了色散、高阶色散和自相位调制(SPM)效应。

Table 1. Parameters of DSF₁, DSF₂ and DSF₃ used in the numerical simulation

	D (ps/nm·km)	S (ps/nm ² ·km)	$A_{\text{eff}}/\mu\text{m}^2$	α (dB/km)	K /nm
DSF1	1.75	0.07	50	0.22	25
DSF2	-2	0.07	50	0.22	-28.6
DSF3	-2	-0.07	50	0.22	28.6

其中, D 为光纤一阶色散, $S = dD/d\lambda$ 为色散斜率, 它们与 β_2 和 β_3 之间的关系为

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}D, \beta_3 = -\frac{\lambda^3}{(2\pi c)^2}\left(2D + \lambda \frac{dD}{d\lambda}\right).$$

A_{eff} 为光纤有效横截面积, 决定了光纤的非线性系数。 $K = D/S$, 它用来表征两段光纤高阶色散补偿的程度; 其物理意义为, K 值相同的两种光纤在色散完全补偿的同时高阶色散也能完全补偿^[8]。

计算中令掺铒光纤放大器(EDFA)放大间距为 80 km, 平均色散为零。值得注意的是, DSF₂ 和 DSF₃ 这两段光纤的其他参量均相同, 只有色散斜率 S 的符号相反。因此, 在 DSF₁ + DSF₂ 方式中, 它们的 K 值符号相反, 这意味着高阶色散完全没有得到补偿; 而在 DSF₁ + DSF₃ 方式中, 所用光纤的 K 值极为近似, 说明在这种情况下高阶色散补偿得很好。

传输链路中掺铒光纤放大器的增益为定值, 令其恰好等于链路损耗, 理论计算中还考虑了掺铒光纤放大器的自发辐射(ASE)噪声^[9], 通过给信号的频谱加入高斯型随机变量得到。

接收机的理论模型由一个带宽为 160 GHz 的光滤波器。一个平方检测的光电探头和一个带宽为 35 GHz 的二阶巴特沃斯电滤波器组成。对传输质量的判决采用 Q 值法^[10], 认为 $Q < 9$ 时, 脉冲的传输达到最远距离。另外, 在计算中未考虑偏振模色散的影响。

3 计算结果与讨论

首先计算了高阶色散未补偿情况(DSF₁ + DSF₂ 方式)下, 具有不同初始啁啾的 40 Gb/s 伪随机码(PRBS)的传输性能与入射脉冲平均功率的关系, 如图 2 所示。图中三条曲线分别对应 $C = 0$ 以及 $C = 1.5$, $C = 3$ 的情况。不难发现在这种情况下, 带有初始啁啾的脉冲传输反而不如无啁啾的脉冲。我们认为这与该色散搭配方式中高阶色散没有得到很好补偿有着密切的联系。下面就讨论高阶色散与初始啁啾共同作用下对脉冲传输的影响。

计算中讨论了两种色散搭配方式, 分别为 DSF₁ + DSF₂ 和 DSF₁ + DSF₃。使用的光纤参量示于表 1。

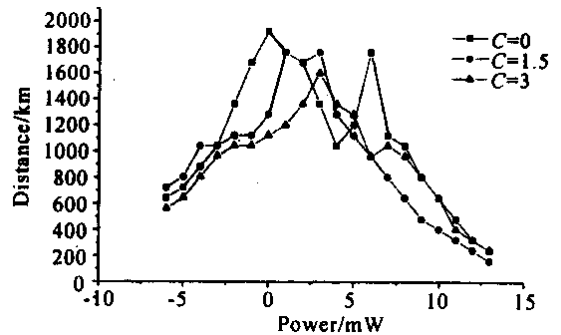


Fig. 2 Transmission distance versus average input power without dispersion slope compensation

若忽略非线性效应, 对于带有初始啁啾 C 的高斯脉冲, 可以解析地得到均方根脉宽 σ 随传输距离 z 变化的表达式^[7]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 + (1 + C^2) \left(\frac{\beta_3 z}{2T_0^3} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中 σ_0 为啁啾高斯脉冲的初始均方根宽度 ($\sigma_0 = T_0/\sqrt{2}$)。

由(3)式右边第三项可以发现, 高阶色散所产生的作用和 $\beta_3 C$ 的正负号无关, C 越大, 高阶色散的影响就越显著。在色散补偿的传输系统中, 两段光纤色散值符号相反, 绝大部分一阶色散将被抵消掉, 但是如果高阶色散没有得到很好的补偿, 则其影响在传输过程中将逐渐积累。而若初始脉冲还带有一定的啁啾, 则高阶色散的影响将愈加明显。它会对脉冲宽度乃至脉冲的形状都产生很大的影响。

为了更好地反映实际情况, 全面考虑色散和非线性对脉冲传输的影响, 需要对方程(2)进行数值求解。图 3 展示了脉宽为 5 ps, 功率为 4 dBm, $C = 0$ 的入射脉冲在传输过程中波形的演变情况(计算中未加入放大的自发辐射噪声)。图 3(a)为 DSF₁ + DSF₂ 方式, 高阶色散未补偿; 图 3(b)为 DSF₁ + DSF₃ 方式, 高阶色散得到了很好的补偿。每经过 3 个放大周期后记录一次波形。对于这种无啁啾脉冲, 由于它的频谱较窄, 且对应(3)式中的第三项值

很小,所以受高阶色散的影响较小。就上图来说,两种情况并没有显著的差别。

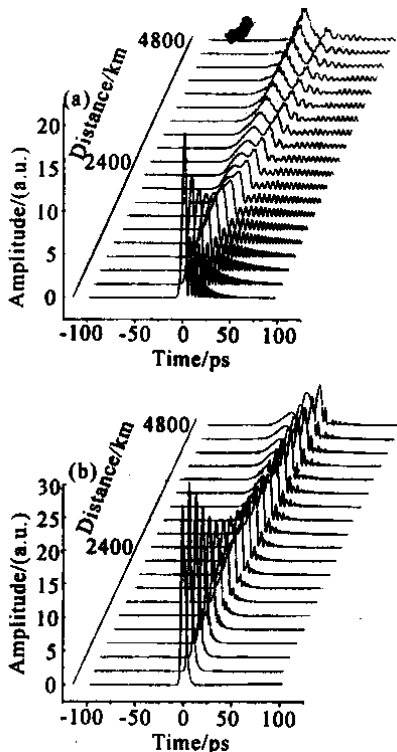


Fig.3 Wave form evolution after transmission of 4800 km without prechirping. (a) without dispersion slope compensation ($DSF_1 + DSF_2$); (b) With dispersion slope compensation ($DSF_1 + DSF_3$)

我们还可以计算带有初始啾啾的脉冲传输情况。图 4 为带有初始线性啾啾 $C = 3$ 的 5 ps 脉冲在 $DSF_1 + DSF_2$ 和 $DSF_1 + DSF_3$ 两种色散搭配方式下的脉冲传输波形图。由图 4(a) 不难发现,此时脉冲在传输过程中,脉冲较宽,波形不对称,而且始终带有振荡强烈、持续时间较长的拖尾。与图 3(a) 相比较,表现出更为明显的高阶色散的影响。这一现象恰恰是由于初始线性啾啾的存在,强化了高阶色散的作用而造成的。图 4(b) 对应 $DSF_1 + DSF_3$ 方式,与图 3(b) 的情况不同,在这里,高阶色散的补偿对具有初始啾啾的脉冲传输有着很大的改善作用,主要表现为脉冲的拖尾得到了较好的抑制。由此可见,对具有初始啾啾的脉冲而言,高阶色散补偿显得尤为重要。由图 4(b) 还可发现,脉冲的拖尾并没有完全消失,这是由于高阶色散作用的非对称性和初始啾啾对高阶色散的强化作用造成的,但理论计算表明,这种较小的振荡对传输的影响是很小的。另外,高阶色散被补偿以后,脉冲的色散致展宽也随着减小,与此同时,非线性的作用更为明显地表现出来,因此图 4(b) 中脉冲传输较长距离以后,由非线性

性导致的脉冲分叉更为明显,这也是合理选择啾啾参数时需要考虑的一个因素。

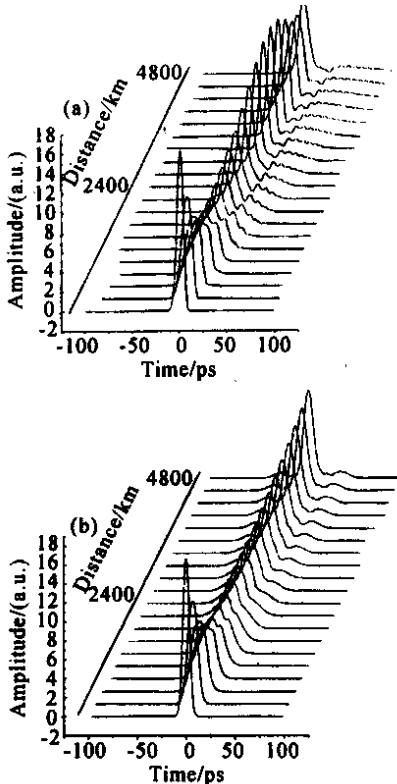


Fig.4 Wave form evolution after transmission of 4800 km with prechirping of $C = 3$. (a) Without dispersion slope compensation ($DSF_1 + DSF_2$); (b) With dispersion slope compensation ($DSF_1 + DSF_3$)

经过数值计算可得高阶色散补偿后($DSF_1 + DSF_3$ 方式下) 40 Gb/s 脉冲串的最远传输距离与入射脉冲平均功率的关系,如图 5 所示。图中的曲线与图 2 相比有了很大的不同。不难得出结论,高阶色散补偿后,在一定的功率范围内(这里为 0 dBm ~ 7 dBm),使用带有初始啾啾的脉冲的确可以提高传输系统的性能。在无啾啾脉冲入射的情况下,因传输链路的色散较小,脉冲在传输过程中积累了较多的非线性效应,在功率达到一定程度后,就成为影响

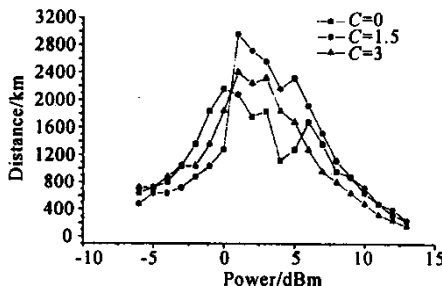


Fig.5 Transmission distance versus average input power under dispersion slope compensation

传输性能的主要因素。当入射脉冲带有一定啁啾时,使得脉冲受非线性的影响减少,从而使传输性能得到提高。

带啁啾的归零码传输性能可以通过眼图进行直观的比较。为此,我们对具有不同预啁啾脉冲的传输眼图进行了模拟计算,如图 6 所示。

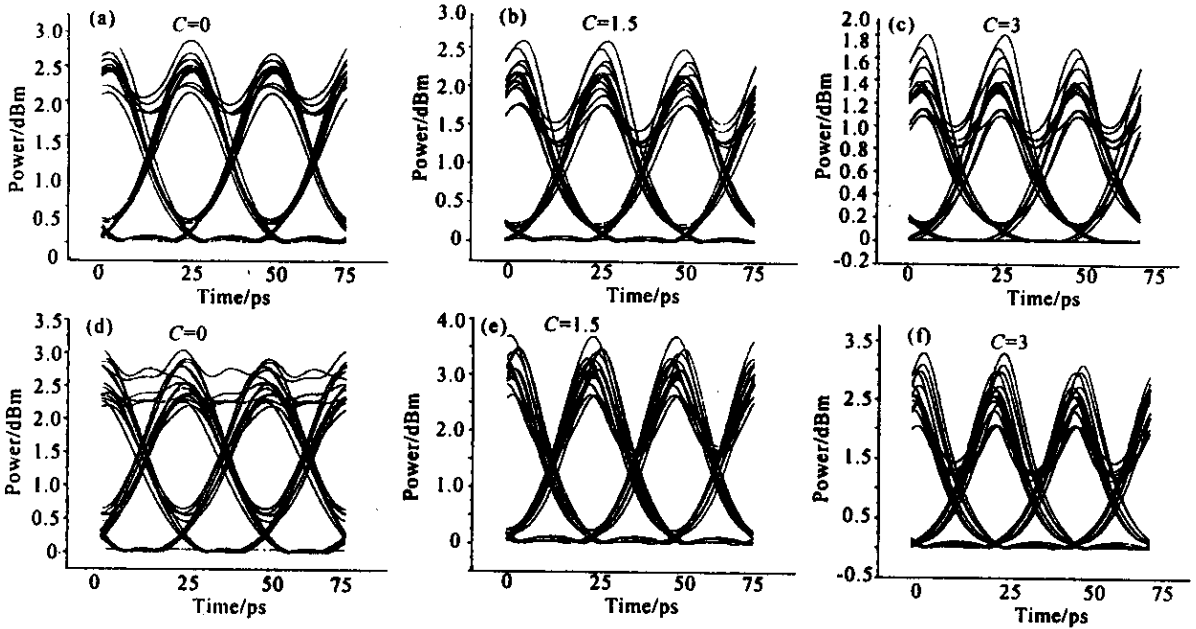


Fig. 6 (a)~(c) Eye-diagram after transmission of 1400 km without dispersion slope compensation, $C = 0, 1.5$ and 3 , respectively; (d)~(f) Eye-diagram after transmission of 2000 km with dispersion slope compensation, $C = 0, 1.5$ and 3 , respectively

其中图 (a)~图 (c)是预啁啾分别为 0、1.5 和 3 的 40 Gb/s 脉冲串(平均功率为 2 dBm),在高阶色散没有补偿的情况下传输 1440 km 后的眼图。显然图 (c)的眼图最差,从中可看出脉冲形状在高阶色散的影响下表现为不对称,而且脉冲的振荡型拖尾进入到邻近比特中造成上眼皮的抖动加剧,眼图张开度明显降低,这些都是影响传输的主要因素。而图 (d)~图 (f)为相同条件的脉冲在高阶色散补偿的情况下传输 2000 km 后的眼图。图 (d)为无初始啁啾的脉冲眼图。在这种情况下,脉冲积累的非线性效应较强,具体表现为长距离传输后脉冲明显展宽,导致眼图的张开度下降,影响传输质量。而具有一定初始啁啾的脉冲在传输过程中非线性效应的积累相对较小,色散补偿后脉冲波形的恢复较好,从眼图可看出长距离传输后脉宽的增加并不明显,保持了较好的张开度。而且,在高阶色散得到补偿以后,脉冲的拖尾和不对称现象也有了极大的改善。所以,在高阶色散补偿以后,具有一定预啁啾的带啁啾的归零码的传输特性要好于无啁啾的归零码。

的最佳值,这也是下一步将要讨论的问题。

图 7 显示了高阶色散补偿情况下脉冲传输距离与初始啁啾量的关系。图中三条曲线分别对应入射脉冲平均功率为 0 dBm、4 dBm 和 7 dBm 的情况。可以发现每种情况都对应着一个初始啁啾参数的最佳值,且该值随入射功率的不同而不同。根据入射功率适当选择初始啁啾值能使传输距离得到显著的增加。如图 7 中,信号功率为 4 dBm 时, $C = 2$ 的传输距离几乎为无啁啾信号传输距离的两倍。但是也应注意到,选择脉冲的初始啁啾参量不宜过大,否则不但会增加脉冲间的相互作用,降低传输性能,还会因信道占据过宽的频带而降低波分复用的信道数,

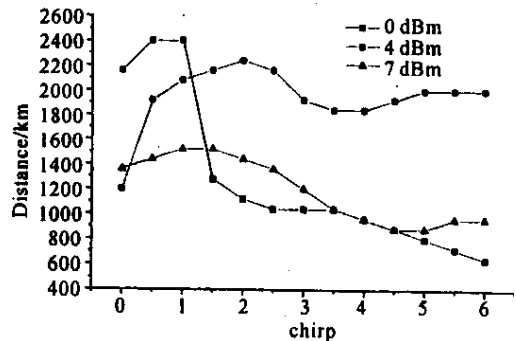


Fig. 7 The maximum transmission distance as a function of pulse prechirping

从眼图中还可发现,即使在高阶色散补偿的情况下,如果初始啁啾过大,脉冲展宽太快,仍然会增加脉冲间的相互作用,同样会影响脉冲的传输质量。所以,在任何一种传输链路中,都存在一个初始啁啾

降低系统的频带利用率。

结论 本文对 40 Gb/s 窄脉冲的带啾啾的归零码及归零码在色散管理链路中的传输性能进行了数值模拟和比较。计算发现 对窄脉冲而言 初始啾啾会和高阶色散共同作用 并增强高阶色散对脉冲传输的影响。因此高阶色散的补偿即使对单信道的传输也是非常重要的。在高阶色散得到补偿以后 加入适当预啾啾的窄脉冲归零码的传输特性在一定入射功率范围内好于无啾啾的归零码。另外 对不同的传输条件都存在初始啾啾的最佳值。以上结果对进行 40 Gb/s 传输系统实验具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Zhu B. 3.08 Tb/s (77 × 42.7 Gb/s) transmission over 1200 km of non-zero dispersion-shifted fiber with 100km spans using C- and L-band distributed raman amplification. *OFC ' 2001*, Anaheim, California, USA, 19 ~ 22 Mar. 2001. PD23
- [2] Bigo S. 10.2 Tb/s (256 × 42.7 Gb/s) transmission over 100 km TeraLight fiber with 1.28 b/s/Hz spectral efficiency. *OFC ' 2001*, Anaheim, California, USA, 19 ~ 22 Mar. 2001, PD25
- [3] Liu F, Zheng X, Peucheret C *et al.*. Chirped return-to-zero source used in 8 × 10 Gbit/s transmission over 2000

- km of standard singlemode fibre. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16):1399 ~ 1400
- [4] Golovchenko E A, Bergano N S, Davidson C R *et al.*. Modeling vs experiments of 16 × 10 Gb/s WDM chirped RZ pulse transmission over 7500 km. *OFC ' 1999*, San Diego, California, USA, 23 ~ 26 Feb. 1999, Technical Digest Series IEEE p3
- [5] Yan L S, Xie Y, Yu Q *et al.*. Performance optimization of chirped return-to-zero format in 10-Gb/s terrestrial transmission systems. *OFC ' 2001*, Anaheim, California, USA, 19 ~ 22 Mar. 2001, Technical Digest, MF1
- [6] Yonenaga K, Hirano A, Kuwahara S *et al.*. Temperature-independent 80 Gbit/s OTDM transmission experiment using zero-dispersion-flattened transmission line. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4) 343 ~ 345
- [7] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego, California, USA, Academic Press, 1995
- [8] Srikant V. Broadband dispersion and dispersion slope compensation in high bit rate and ultra long haul systems. *OFC ' 2001*, Anaheim, California, USA, 19 ~ 22 Mar. 2001, Technical Digest Series, TuH1
- [9] Knox M, Forsyiaak W, Doran N J. 10 Gb/s soliton communication systems over standard fiber at 1550 nm and the use of dispersion compensation. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10):1955 ~ 1962
- [10] Bergano N S. Margin measurements in optical amplifier systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(3): 304 ~ 306

40 Gb/s Dispersion Managed Transmission by Using Prechirped Return-to-Zero Format with Low Duty-Cycle

Li Zhihong Lou Caiyun Gao Yizhi

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 27 August 2001 ; revised 5 November 2001)

Abstract : Numerical simulations have been used to compare the transmission performance between low-duty-cycle RZ format with and without prechirping. It is shown that, pulse prechirping will act accompany with the second - order dispersion of the fiber and enhanced their effect to transmission performance. After slope compensation, prechirping of pulses is demonstrated to be helpful both in reducing pulse distortion and nonlinear interaction, and the transmission characteristic of the properly prechirped pulse with certain power level is better than that of non-prechirping pulses. Moreover, the prechirping can be optimized to obtain the best transmission performance.

Key words : dispersion management ; pre-chirped return zero (CRZ) ; transmission ; numerical simulation