

文章编号: 1001-3806(2012)02-0247-04

### 3 阶色散对相位整形不归零码传输性能的影响

董毅, 赵尚弘\*, 倪延辉, 田晓飞, 蒋馥蔚  
(空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

**摘要:** 为了研究3阶色散对相位整形不归零(phase-shaped nonreturn-to-zero, PSNRZ)码传输性能的影响,通过仿真对带有初始啁啾的高斯脉冲受3阶色散影响的情况进行了研究。研究发现,初始啁啾的存在会严重加剧3阶色散对波形演化的影响。而通过对PSNRZ码传输性能的仿真进一步发现,与3阶色散补偿后相比,未补偿时的传输距离受到很大限制,当链路残余色散低于20ps/nm时,最大传输距离减小超过500km。结果表明,当采用PSNRZ码通信时,必须对3阶色散进行补偿。

**关键词:** 光纤光学; 相位整形不归零码; 3阶色散; 啁啾

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.026

### Effect of third-order dispersion on the transmission property of PSNRZ code

DONG Yi, ZHAO Shang-hong, NI Yan-hui, TIAN Xiao-fei, JIANG Fu-wei

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to study the influence of third-order dispersion (TOD) on transmission property of phase-shaped nonreturn-to-zero (PSNRZ) codes, the effect of TOD on the Gaussian pulse with initial chirps was simulated at first, and it was found that the initial chirps could greatly aggravate the effect of TOD on the shape evolution. Then the transmission characteristics of the PSNRZ codes were simulated, and it was found that the transmission distance of PSNRZ codes might decrease severely if the TOD was not compensated, the decreased distance was even longer than 500km when the remained group-velocity dispersion (GVD) was below 20ps/nm. The results show that the TOD must be compensated in the case that PSNRZ code is used.

**Key words:** fiber optics; phase-shaped nonreturn-to-zero code; third-order dispersion; chirps

### 引言

通信速率的不断提升使色散和非线性效应对传输性能的影响日益突出,如何有效地缓解这些影响是高速光纤通信中必须重点考虑的问题。近年来,研究人员提出了一种对初始信号进行预啁啾来抑制色散及非线性效应的方法<sup>[1-3]</sup>,该方法因简单易行且对传输性能改善效果明显而受到广泛青睐。目前,针对预啁啾技术的研究主要有啁啾归零(pre-chirped return-to-zero, CRZ)码<sup>[4-5]</sup>和相位整形不归零(phase-shaped nonreturn-to-zero, PSNRZ)码<sup>[6-7]</sup>两种。CRZ码是在归零(return-to-zero, RZ)码中引入适量啁啾使脉冲进入光纤后能迅速展宽以降低非线性效应的影响;PSNRZ码是对不归零(nonreturn-to-zero, NRZ)码引入啁啾使脉冲在进入光纤的初始阶段有一个压缩的过程,从而缓解色散引起的脉冲展宽。然而,预啁啾技术在减小色散

和非线性效应影响的同时,由于引入了一定的啁啾,使原本可以忽略的3阶色散对传输性能的影响凸显出来<sup>[8-9]</sup>,成为限制通信质量的重要因素。本文中深入研究了3阶色散对PSNRZ码传输性能的影响,对啁啾技术在光纤通信中的实际应用具有一定的指导意义。

### 1 啁啾对色散效应的影响

忽略受激喇曼散射效应,脉冲在光纤中的传输满足非线性薛定谔方程<sup>[10]</sup>:

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

式中, $U$ 为光脉冲电场包络, $z$ 为传输距离, $\alpha$ 为光纤损耗系数, $T$ 是随脉冲以群速度移动的参考系中的时间量度, $\beta_2$ 和 $\beta_3$ 分别对应光纤中的群速率色散和3阶色散, $\gamma$ 表示光纤的非线性系数。

对于线性啁啾高斯脉冲情形,入射场可写为:

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

式中, $C$ 表示啁啾系数, $T_0$ 为初始脉冲半峰全宽(在峰值强度的 $1/e$ 处)。

作者简介:董毅(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为高速光纤通信中的非线性效应。

\* 通讯联系人。E-mail: zhaoshangh@yahoo.com

收稿日期:2011-07-21;收到修改稿日期:2011-09-07

对于由(2)式描述的啁啾高斯脉冲经光纤传输一段距离后其脉冲展宽因子可表示为<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[ \left( 1 + \frac{C\beta_2 z}{2\sigma_0^2} \right)^2 + \left( \frac{\beta_2 z}{2\sigma_0^2} \right)^2 + \frac{1}{2} (1 + C^2)^2 \left( \frac{\beta_3 z}{4\sigma_0^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中  $\sigma_0 = T_0/\sqrt{2}$  为啁啾高斯脉冲的初始均方根宽度。为使传输脉冲压缩到最窄,在 PSNRZ 的调制过程中通常使:

$$1 + \frac{C\beta_2 z}{2\sigma_0^2} = 0 \quad (4)$$

即: 
$$C = -\frac{2\sigma_0^2}{\beta_2 z} \quad (5)$$

在(5)式中,  $-\beta_2 z$  可以看作光纤链路的群速度色散 (group-velocity dispersion, GVD) 残余量,也就是说, PSNRZ 调制中预啁啾的大小是根据链路 GVD 的残余量而定的,残余量越小所加预啁啾越大。

通过以上推导可以看出,虽然  $\beta_2$  和  $\beta_3$  都对脉冲展宽有影响,但它们对啁啾参数的依赖关系有所不同:选择合适的啁啾符号和大小可以很好地抑制  $\beta_2$  对脉冲的展宽,而  $\beta_3$  的贡献与  $C$  的符号无关,无论其符号如何,3 阶色散总会引起脉冲的展宽,且预啁啾的存在能够加剧这种展宽效应;同时,从 PSNRZ 调制中啁啾系数  $C$  与 GVD 残余量的关系可以预见,当链路 GVD 残余量较小时,大的啁啾系数将使 3 阶色散的影响尤为突出。

## 2 仿真分析

### 2.1 仿真场景设置

本文中利用光纤链路的仿真软件 OPTISYSTEM 进行仿真分析,设置的仿真场景如图 1 所示。光缆链路由长 50km 的标准单模光纤 (standard-single-mode fiber, SSMF)、10km 色散补偿光纤 (dispersion-compensating fiber, DCF) 及两个掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 经若干次循环组成,其中, EDFA 1 和 EDFA 2 恰好分别补偿由 SSMF 和 DCF 造成的链路衰减。仿真过程中 DCF 的色散斜率可取  $-0.3\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$  和  $-0.1\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$  两个值,分别代表 3 阶色散补偿和未补偿的情况,SSMF 及 DCF 参量如表 1 所示。

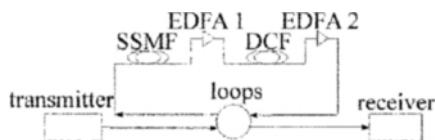


Fig. 1 Simulation model

Table 1 Fiber parameters

	$D/(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	$S/(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1})$	$\alpha/(\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$	$\gamma/(\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1})$	$K/\text{nm}$
SSMF	17	0.075	0.2	$2.6 \times 10^{-20}$	227
DCF	-85	-0.1/-0.3	0.5	$2.6 \times 10^{-20}$	850/283

其中,  $D$  为光纤群速率色散系数,  $S = dD/d\lambda$ , 它们和  $\beta_2$   $\beta_3$  之间的关系为:

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D, \quad \beta_3 = -\frac{\lambda^3}{(2\pi c)^2} \left( 2D + \lambda \frac{dD}{d\lambda} \right) \quad (6)$$

$K = D/S$ , 它用来表示两段光纤 3 阶色散的补偿程度,  $K$  值相同的两种光纤在色散完全补偿的同时,其 3 阶色散也能完全补偿,  $K$  值不同则代表 3 阶色散没有得到完全补偿。

### 2.2 啁啾与 3 阶色散作用下的脉冲波形演化

利用第 2.1 节中给出的仿真场景,不考虑放大器自发辐射噪声,在 3000km 光纤链路上得到的高斯脉冲受 3 阶色散影响时波形的演化过程如图 2 和图 3 所示。图 2a 和图 2b 分别为 3 阶色散未补偿与补偿情况下,无初始啁啾信号的波形演化过程。由图可见,当 3 阶色散未补偿时,图 2a 中脉冲波形的后沿出现了明显的振荡,且随着传输距离的增加振荡结构也有所增强。图 2b 中虽然 3 阶色散得到补偿,但由于所设置的补偿值并非完全补偿,脉冲波形的后沿仍然出现了细微的振荡。通过(3)式也可以看出,对于这种无初始啁啾的信号,  $\beta_3$  项的贡献一般都很小,因此,图 2a 与图 2b 中的波形演化并没有显著的差异。

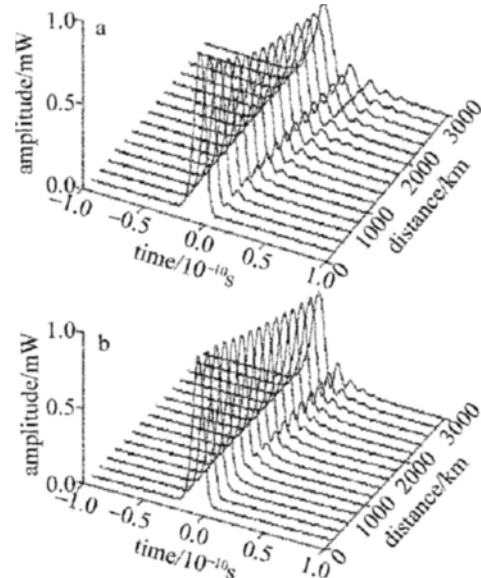


Fig. 2 Evolution of signal without chirps  
a— with the third-order dispersion uncompensated b— with the third-order dispersion compensated

图 3a 和图 3b 分别为 3 阶色散未补偿与补偿情况下带初始啁啾信号的波形演化过程。图 3a 中信号波形出现了剧烈的振荡和较长时间的拖尾,且随传输距

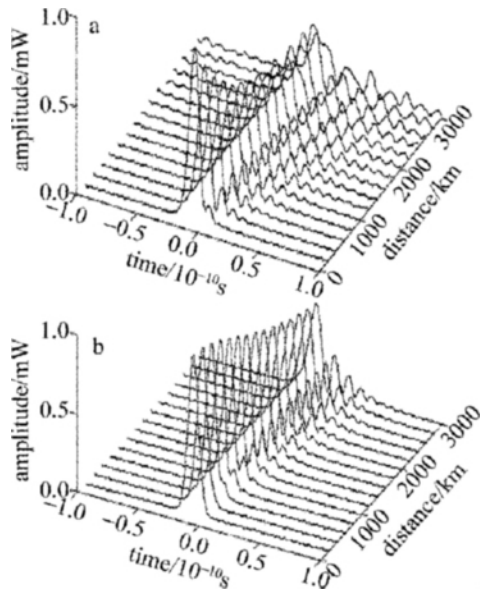


Fig. 3 Evolution of signal with chirps

a—without the third-order dispersion compensated b—with the third-order dispersion compensated

离地增加,脉冲明显被展宽。与图 2a 相比可知,这种现象正是由于初始啁啾的出现加剧了 3 阶色散的影响而造成的。图 3b 中,当 3 阶色散得到补偿后信号波形得到了很好的改善,且脉冲的展宽现象也明显好转,这说明 3 阶色散的补偿对带初始啁啾的信号来说是至关重要的。但是,由于初始啁啾的影响,与图 2b 相比,脉冲沿的振荡结构还是有所加强,然而理论计算表明,这种微小的振荡对传输性能的影响是很小的。

### 2.3 3 阶色散对 PSNRZ 码传输性能的影响

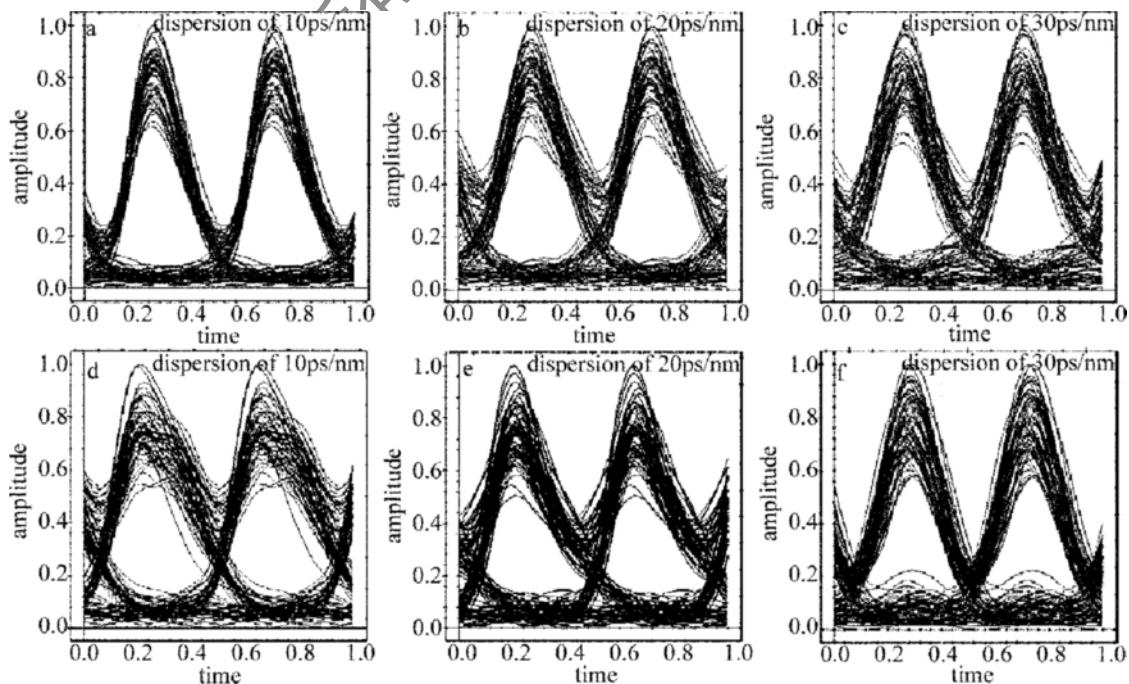


Fig. 5 Contrast of eye diagrams of PSNRZ codes

为研究 3 阶色散对 PSNRZ 码传输性能的影响,仿真过程以  $Q$  值作为衡量系统性能指标,并认为当  $Q = 5$  (对应误比特率约为  $10^{-9}$ ) 时所能传输的距离为系统最大传输距离。同时,由于链路 GVD 残余量与初始啁啾存在如 (5) 式描述的数值关系,即色散残余量的大小能够反映初始啁啾的大小,仿真中以系统在不同残余色散值时所能达到的最大传输距离来观察 3 阶色散未补偿的影响。

利用第 2.1 节中给出的仿真场景,分别使 3 阶色散处于补偿和未补偿状态下得到的系统最大传输距离对比情况如图 4 所示。由图可见,与 3 阶色散补偿后相比,未补偿时系统传输距离减小了 100km 以上,且随着残余色散值的减小 3 阶色散的影响不断增强,当残余色散小于 20ps/nm 时,减小值甚至高达 500km 以上。正如前面分析的一样,初始啁啾是造成这种现象的主要原因,当残余色散较小时,PSNRZ 信号中较大的啁啾更加加剧了 3 阶色散的影响。

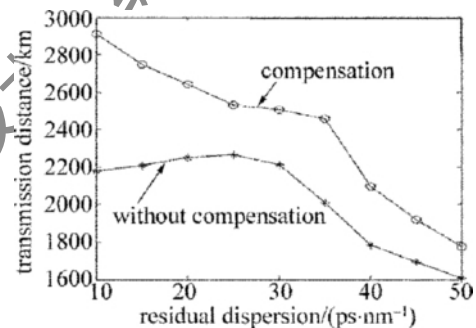


Fig. 4 Contrast of transmission distance

3 阶色散对脉冲波形的影响从图 5 所示的眼图中

也可以直观地看到。图中,纵、横坐标分别为归一化的幅度和时间,图5a~图5c为3阶色散补偿的情况下,链路残余色散分别为10ps/nm、20ps/nm和30ps/nm时PSNRZ码传输1920km后的眼图。由图可见,当3阶色散得到补偿后,影响PSNRZ码的主要因素是链路的残余色散值,因此,眼图张开度随残余色散的增大而减小。但当3阶色散未补偿时,图5d~图5f由于受到高阶色散脉冲拖尾的影响,眼图上下眼皮均出现明显的抖动,眼图张开度受到较大影响,且脉冲波形也较补偿时有所展宽。然而,随着残余色散的增加眼皮的抖动及脉冲展宽都有了较好的改善,这也是由于初始啁啾的不断减小缓解了3阶色散的影响造成的。

### 3 结论

PSNRZ码是利用啁啾技术来提高系统色散容限的有效方法,它具有实现简单、易于对现有设备进行改造,且抗非线性性能好等多方面优点,是解决未来高速通信系统中色散影响的有效方案。通过研究发现,由于引入了一定的初始啁啾,PSNRZ码传输性能受3阶色散影响严重,并且3阶色散的影响随着链路色散残余量的减小明显加强,当色散低于20ps/nm时,与3阶色散补偿后相比,其最远传输距离减少超过500km以上。因此,当采用PSNRZ码进行通信时必须考虑对3阶色散的补偿。

### 参考文献

- [1] KLAUS M, SHAW J K. Influence of pulse shape and frequency chirp on stability of optical solitons[J]. Optics Communications, 2001, 197(4/6): 491-500.
- [2] WANG J, KAHN J M. Accurate bit-error-ratio computation in nonlinear CRZ-OOK and CRZ-DPSK systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(9): 2165-2167.
- [3] LI J H, WANG Zh Q. Numerical research of initial chirp effect on solitons propagation properties[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(3): 193-195( in Chinese ).
- [4] MU R M, MENYUK C R. Symmetric slope compensation in a long-haul WDM system using the CRZ format[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 797-799.
- [5] LI Zh H, LOU C Y, GAO Y Zh. 40Gbit/s dispersion managed transmission by using prechirped return-to-zero format with low duty-cycle[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 937-941( in Chinese ).
- [6] CHEN X, ZHOU B K, ZHANG H Y, et al. Improvement of dispersion tolerance using phase-modulated NRZ signals in 40Gbit/s transmission systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 37-39.
- [7] CHEN X, WU J Y, MA X H. Signal shaping based on phase pre-modulation in fiber transmission systems[J]. Chinese Journal of Laser, 2007, 34(1): 74-77( in Chinese ).
- [8] WANG R X. Numerical study of initial chirp compensating for fiber dispersion function[J]. Laser Technology, 2007, 34(1): 74-77( in Chinese ).
- [9] CAI T. Analysis and discussions of high order chromatic dispersion and non-linearity on the Gauss chirp pulse propagation[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 401-404( in Chinese ).
- [10] AGRAWAL G P. Applications of nonlinear fiber optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 31-32( in Chinese ).

(上接第229页)

### 参考文献

- [1] KUO C W, CHANG C F, CHEN M H, et al. A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures[J]. Optics Express, 2006, 15(1): 198-206.
- [2] JOHNSON S D, MEKISS A, FAN S, et al. Molding the flow of light[J]. Computing in Science & Engineering, 2001, 3(6): 38-47.
- [3] ZHANG Y, LI Zh J, LI B J. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz waves[J]. Optics Express, 2006, 14(7): 2679-2689.
- [4] YU T B, WANG M H, JIANG X Q, et al. Coupling characteristics of electromagnetic wave in parallel three photonic crystal waveguides and its applications[J]. Acta Physics Sinica, 2006, 55(4): 1851-1856( in Chinese ).
- [5] LIU T, ZAKARIAN A R, FALLAHI M, et al. Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(7): 1435-1437.
- [6] DRYSDALE T D, BLAIKIE R J, CUMMING D R S. Calculated and measured transmittance of a tunable metallic photonic crystal filter for terahertz frequencies[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(26): 5362-5364.
- [7] CHEN S, WANG W B, LIANG J Q, et al. Two-dimensional photonic crystal micro-cavities[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2007, 28(1): 7-12( in Chinese ).
- [8] XU X M, LI W, FANG L G, et al. Coupling characteristics of five parallel photonic crystal waveguides and its application[J]. Laser Technology, 2009, 33(4): 416-418( in Chinese ).
- [9] LEUNG K M, LIU Y F. Full vector wave calculation of photonic band structures in FCC dielectric media[J]. Physical Review Letters, 1990, 65(21): 2646-2649.