

文章编号: 0253-2239(2005)01-93-6

光时分复用准线性传输系统的非线性相互作用*

蔡 炬 杨祥林

(南京邮电学院光信息技术系, 南京 210003)

摘要: 研究了高速色散控制准线性传输系统中的信道内交叉相位调制和信道内四波混频等非线性相互作用, 分析了信道内交叉相位调制导致定时抖动和信道内四波混频导致振幅抖动随距离和色散分布强度变化的规律, 然后运用快速傅里叶变换法分析了信道内交叉相位调制导致的 $2^5 - 1$ 的伪随机码流的定时抖动和振幅抖动及寄生脉冲的产生, 证实了理论分析。最后通过数值模拟实现了色散分布强度为 127 的强色散控制系统中准线性脉冲序列 1600 km 的稳定传输, 结论对用标准单模光纤实现高速传输具有重要意义。

关键词: 非线性光学; 色散控制准线性脉冲; 非线性相互作用; 信道内交叉相位调制; 信道内四波混频

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Intrachannel Nonlinear Effects in Optical Time Division Multiplexing Dispersion-Managed Quasi-Linear Transmission System

Cai Ju Yang Xianglin

(Department of Optical Information Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003)

Abstract: The intrachannel cross-phase modulation (IXPM) and intrachannel four-wave mixing (IFWM) in dispersion managed quasi-linear systems is researched, and the role of the timing jitter induced by IXPM and the amplitude jitter and the ghost pulse induced by IFWM change with distance and dispersion map strength are analyzed theoretically. Then the theoretical analysis results are verified by the timing jitter, amplitude jitter and the generation of ghost pulse of a $2^5 - 1$ pseudorandom binary sequence (PRBS) by using fast Fourier transform method. Finally, the stable transmission of 1600 km is verified in dispersion managed quasi-linear systems with dispersion map strength of 127 by numerical simulations. The results are important for high speed transmission based on single-mode fiber.

Key words: nonlinear optics; dispersion-managed quasi-linear pulse; nonlinear interaction; intrachannel cross-phase modulation; intrachannel four-wave mixing

1 引 言

随着各类数据业务需求的急剧增长, 单信道传输速率不断提高, 脉冲之间的非线性相互作用成为限制系统性能的主要因素之一^[1]。在光时分复用(OTDM)系统中, 脉冲之间的非线性相互作用主要包括信道内交叉相位调制(IXPM)和信道内四波混频(IFWM), 它们与波分复用系统中的交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)相似, 只不过需要将频率与时间互换^[2]。信道内交叉相位调制和信道内四波混频会引起脉冲频移和振幅抖动, 导致定时抖动和码间串扰, 从而降低系统性能。光时分复用色

散控制孤子(DMS)传输系统具有路径平均色散低、孤子能量高、定时误码和能量误码均低的优点, 因而受到了广泛关注。不过色散控制孤子仍然受到脉冲间非线性相互作用的影响, 而且在色散控制强度 S 大于 1.65 时, 色散控制孤子的非线性相互作用随 S 单调增加^[3], 当色散控制孤子在有较大色散系数的单模光纤中传输大于 40 Gb/s 的信号时, 在色散控制周期长度相对于低速率系统不变条件下, 脉冲间的非线性相互作用将增大到使色散控制孤子不能稳定传输的程度^[4]。而目前较少注意的准线性归零脉冲^[5]相对于色散控制孤子具有较低的信号功率, 承

* 国家自然科学基金(60072046)资助课题。

作者简介: 蔡 炬(1970~), 男, 四川内江人, 博士学位。目前研究方向为高速长距离光传输系统, 接入网无源光网络等。
E-mail: caiju01@yahoo.com.cn.

收稿日期: 2004-03-20; 收到修改稿日期: 2004-07-08

受的非线性更小,从而有可能降低非线性相互作用,实现大色散光纤中的高速稳定传输。本文研究了利用这种脉冲进行传输的高速光时分复用色散控制准线性系统中信道内交叉相位调制和信道内四波混频对系统性能的影响,对信道内交叉相位调制导致定时抖动和信道内四波混频导致振幅抖动及寄生脉冲随传输距离和色散分布强度 S 而变化的规律进行了分析,并对准线性脉冲在强色散控制系统中的稳

定传输进行了数值模拟。

2 光时分复用色散控制准线性系统的非线性相互作用方程

考虑色散、非线性、衰减和周期性集总放大时,色散控制准线性传输系统中光场慢变复包络的传输规律由非线性薛定谔方程(NLSE)来描述:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1(z) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \left[\alpha - g(z) \sum_{n=1}^N \delta(z - nz_a) \right] A = i\gamma(z) |A|^2 A, \quad (1)$$

其中 A 是脉冲振幅, z 是传输距离, t 是传输时间, β_1 是群速度的倒数, β_2 是群速色散,在色散控制系统中, β_2 随距离周期性变化。 α 是衰减系数, $g(z)$ 是放大器的增益系数,通常 $g(z_a) = \exp(\alpha z_a) - 1$, z_a 为放大器间距, N 为放大器数量, γ 是非线性系数。

对方程(1)作如下变量代换:

$$\begin{cases} Z = z/L_D, \\ T = (t - z\beta_1/2)/t_0, \\ P_0 = |\beta_2| / (\gamma t_0^2), \\ G(Z) = L_D \left[\alpha - g(z) \sum_{n=1}^N \delta(z - nz_a) \right], \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} d(Z) = -\frac{L_D}{t_0^2} \beta_2(Z) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{L_D}{t_0^2} D(Z), \\ \Lambda(Z) = \gamma P_0 L_D \exp \left[2 \int_0^Z G(Z') dZ' \right], \end{cases} \quad (3)$$

$$q = \frac{A}{\sqrt{P_0}} \exp \left[2 \int_0^Z G(Z') dZ' \right], \quad (4)$$

式中 $L_D = t_0^2 / |\beta_2|$ 是色散长度, t_0 为脉宽, P_0 是输入脉冲的初始功率,可得归一化的非线性薛定谔方程:

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + \Lambda(Z) (|q|^2) q = 0. \quad (5)$$

为了简化对脉冲间非线性相互作用的分析,我们考虑两脉冲之间的相互作用。令 $q = q_m + q_n$, 其中 q_k 表示中心位于 $T(k-1)T_B$ 的信号脉冲, $k = m, n$ (均为整数), T_B 为比特时隙。将此式代入(5)式中,即可得到 q_m 和 q_n 的两个耦合方程:

$$i \frac{\partial q_m}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q_m}{\partial T^2} + \Lambda(Z) |q_m|^2 q_m = -\Lambda(Z) (2|q_n|^2 q_m + q_m^2 q_n^*), \quad (6a)$$

$$i \frac{\partial q_n}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q_n}{\partial T^2} + \Lambda(Z) |q_n|^2 q_n = -\Lambda(Z) (2|q_m|^2 q_n + q_n^2 q_m^*), \quad (6b)$$

(6)式即为光时分复用系统中脉冲之间的非线性相互作用方程。等式左端第一项表示脉冲随距离的演化,第二项代表色散的影响,第三项代表自相位调制的影响。等式右端两项为非线性相互作用项,此两项的形式与波分复用系统中的交叉相位调制和四波混频^[7]一致,但此处为单波长信道内不同时间位置的脉冲之间的相互作用。为与波分复用系统中的交叉相位调制和四波混频相区别,将等式右端第一项称为信道内交叉相位调制,从下文可知,它将导致脉冲的频移和定时抖动;而将第二项称为信道内四波混频,它将导致脉冲之间能量的转移,从而造成脉冲振幅的抖动及寄生脉冲的产生。下面将信道内交叉相位调制和信道内四波混频作为扰动分别进行考察。

2.1 信道内交叉相位调制对脉冲频移的影响

首先考虑两相邻脉冲 $q_1(T)$ 和 $q_2(T - T_B)$ 之间的信道内交叉相位调制对脉冲频移的影响。由于方程(6a)和(6b)是对称的,故只需分析其中一个方程即可。设系统在不非线性相互作用扰动时脉冲能稳定传输,则(6)式左端第二项和第三项对脉冲的影响相互抵消,即有 $i\partial q_1/\partial Z = 0$ 。在此条件下考虑信道内交叉相位调制扰动项对脉冲的影响时,(6a)式可以简化为

$$i \frac{\partial q_1}{\partial Z} = -2\Lambda(Z) |q_2|^2 q_1, \quad (7)$$

脉冲 q_1 的功率 $|q_1|^2$ 随距离变化的关系可表示为

$$\frac{d|q_1|^2}{dZ} = \frac{dq_1}{dZ} q_1^* + \frac{dq_1^*}{dZ} q_1, \quad (8)$$

将(7)式代入上式,可得

$$\begin{aligned} d|q_1|^2 / (dZ) = \\ i2\Lambda(Z) (|q_2|^2 q_1 q_1^* - q_1 |q_2|^2 q_1^*) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

可见,信道内交叉相位调制不会导致脉冲功率的变化,即信道内交叉相位调制对脉冲的振幅没有影响。

类似地,可得到脉冲能量与传输距离的关系。定义脉冲 q_k 的能量为 $E_k = \int_{-\infty}^{\infty} |q_k|^2 dT$, 则有

$$\frac{dE_k}{dZ} = d \int_{-\infty}^{\infty} |q_k|^2 dT / dZ = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d(q_k q_k^*)}{dZ} dT = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{dq_k}{dZ} q_k^* + \frac{dq_k^*}{dZ} q_k \right) dT, \quad (10)$$

将(7)式代入,可得
$$\frac{dE_1}{dZ} = i2\Lambda(Z) \int_{-\infty}^{\infty} (|q_2|^2 q_1 q_1^* - q_1 |q_2|^2 q_1^*) dT = 0, \quad (11)$$

可见,信道内交叉相位调制也不会导致脉冲能量的变化。

下面考察信道内交叉相位调制对脉冲频移的影响。容易导出方程(7)的解为 $q_1(Z, T) = q_1(0, T) \exp(i\varphi)$, 且 $d\varphi/dZ = \Lambda(Z) |q_2|^2$, 则脉冲 q_1 的瞬时频移为

$$\frac{d\omega_{1,2}}{dZ} = - \frac{d}{dZ} \left(\frac{d\varphi}{dT} \right) = - \Lambda(Z) \frac{d}{dT} |q_2|^2, \quad (12)$$

此式表明脉冲的瞬时频移与相邻脉冲强度的斜率成正比,而且由于脉冲前、后沿的斜率符号相反,因而脉冲前沿与后沿造成的瞬时频移是相反的。由瞬时频移可导出脉冲的平均频移

$$\frac{d \overline{\Delta\omega_{1,2}}}{dZ} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega_{1,2}}{dZ} |q_1|^2 dT / \int_{-\infty}^{\infty} |q_1|^2 dT = \int_{-\infty}^{\infty} \Lambda(Z) \frac{d}{dT} |q_2|^2 \cdot |q_1|^2 dT / \int_{-\infty}^{\infty} |q_1|^2 dT, \quad (13)$$

其中脉冲 q_1 的能量为 $\int_{-\infty}^{\infty} |q_1|^2 dT$ 。由此式可知,脉冲的平均频移与相邻脉冲强度的斜率以及两脉冲之间的重叠程度有关。

设输入脉冲的波形为高斯型,即

$$q_k = \exp \left\{ \frac{-(1+iC) [T - (k-1)T_B]^2}{2T_0^2} \right\},$$

其中 C 为啁啾, T_0 为归一化脉宽。则(13)式积分后变为

$$\frac{d \overline{\Delta\omega_{1,2}}}{dZ} = \frac{\sqrt{2}\Lambda(Z)}{T_0^2} T_B \exp \left(- \frac{1}{2} \frac{T_B^2}{T_0^2} \right), \quad (14)$$

利用(14)式可以得出两相邻脉冲之间的信道内交叉相位调制导致平均频移随相对脉宽 T_{FWHM}/T_B 变化的关系,其中 $T_{FWHM} = 1.665T_0$ 为脉冲的归一化半峰全宽,如图1所示。

由图1可见,当脉冲的相对脉宽小于0.4时,平均频移为0;相对脉宽超过0.4时,平均频移迅速增加,并在相对脉宽约等于1时达到最大值;随着相对脉宽进一步增加,平均频移逐渐降低。对这一现象的解释如下:相对脉宽小于0.4时,虽然脉冲能量较为集中,波形较陡,脉冲强度的斜率 $d|q_2|^2/dT$ 较大,从而由(12)式决定的瞬时频移较大,但由于此时相邻脉冲在时域内的重叠程度很小,因此,从(13)式可知,平均频移可以忽略;当相对脉宽大于0.4时,相邻脉冲重叠部分逐渐增加,而脉冲波形仍然较陡,因此有较大的平均频移产生,并在相对脉宽约为1时达到最大值;随着脉宽的继续增加,一方面脉冲波形逐渐变得平坦,

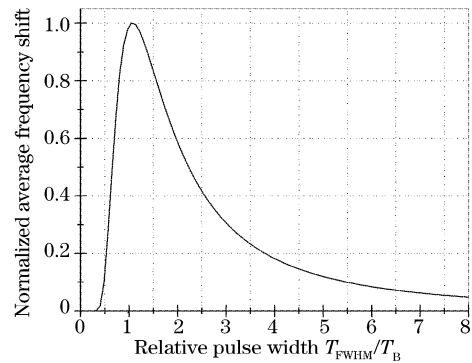


图1 归一化平均频移随相对脉宽变化的关系
Fig. 1 Normalized average frequency shift versus relative pulse width

瞬时频移逐渐减小,另一方面由于脉冲重叠程度增加,相邻脉冲前后沿对该脉冲的平均频移均有贡献,而脉冲前后沿对平均频移的贡献相反,因此进一步减小了平均频移。脉冲的平均频移通过色散转化为脉冲的定时抖动,定时抖动过大时,将使脉冲不能在指定的比特时隙内到达,从而导致系统性能降低。由上述分析可见,要降低信道内交叉相位调制造成的定时抖动,可以通过使相对脉宽小于0.4或使其远大于1来实现。由于在色散控制系统中脉冲是呈“呼吸”状演进的,其脉宽周期性地经历展宽和压缩过程,对基于单模光纤和色散补偿光纤的强色散控制系统,脉宽的周期性变化程度很大,要使相对脉宽在传输过程中始终处于小于0.4的状态是不实际的,因此在传输过程中需设法使脉冲的相对脉宽尽可能地处于远大于1的状态,以降低频移。

2.2 信道内四波混频对脉冲振幅的影响

本小节考虑两相邻脉冲 $q_1(T)$ 和 $q_2(T-T_B)$ 之间的信道内四波混频对脉冲振幅的影响。脉冲之间通过信道内四波混频实现能量的转移,使“1”比特的脉冲振幅出现抖动,“0”比特处产生寄生脉冲(Ghost pulse)。与波分复用系统中的四波混频相似,光时分复用中的脉冲之间要实现信道内四波混频,也需满足相位匹配条件,不过需将波分复用中的频率匹配替换为信道内四波混频中的时间匹配^[6]。因此,对中心位置分别位于 0 和 T_B 的两个脉冲 $q_1(T)$ 和 $q_2(T-T_B)$ 产生两个寄生脉冲的情况,寄生脉冲的中心位置将位于 $-T_B$ 和 $2T_B$ 。

考虑信道内四波混频对 q_1 振幅的扰动时,同样设系统在不受非线性相互作用影响时脉冲能稳定传输,则(6)式可简化为

$$i(\partial q_1 / \partial Z) = -\Delta(Z) q_1^2 q_2^*, \quad (15)$$

仍设 q_1 和 q_2 为高斯型脉冲,则将上式代入(10)式后可得

$$\frac{dE_1}{dZ} = \sqrt{2\pi} T_0 \Delta(Z) \times \exp\left(-\frac{3+C^2}{8} \frac{T_B^2}{T_0^2}\right) \cos\left(\frac{C}{4} \frac{T_B}{T_0}\right), \quad (16)$$

此方程表明,由于信道内四波混频的影响,脉冲的能量将会发生抖动。从此方程可得出归一化脉冲能量抖动随相对脉宽变化的曲线,如图 2 所示。

由图 2 可见,在脉冲初始啁啾为 0 且相对脉宽小于 0.2 时,由于相邻脉冲之间几乎没有重叠,因而信道内四波混频引起的归一化脉冲能量抖动几乎为 0;当相对脉宽大于 0.2 时,归一化能量抖动幅度单调上升,并逐渐趋于极限值 1,表明脉冲相对脉宽的持续增加不会导致脉冲能量抖动幅度无限制的增加。由于在相对脉宽大于 1 时,平均频移和能量抖动随相对脉宽变化的趋势相反,因此这一性质对通过增加相对脉宽来抑制非线性相互作用引起的系统性能下降是极为有利的。图中还给出了不同初始啁啾值下相对脉宽与脉冲能量抖动幅度的关系,由(16)式可知啁啾的符号对能量抖动幅度没有影响。随着初始啁啾绝对值的增加,脉冲能量抖动可忽略的相对脉宽范围逐渐增大,对 $|C|=2, 4, 6, 8$ 的啁啾值,可忽略的最大相对脉宽分别约为 0.3、0.5、0.7、0.9。从图 2 中还可看出,初始啁啾可以降低能量抖动逼近 1 的速率,因此在脉冲进入系统中传输之前进行适当的预啁啾对降低振幅抖动,提高系统性能是有益的。当然,由于啁啾会导致脉冲变形,因

此不宜将啁啾值取得过大。图 2 中的插图为数值仿真所得相邻两脉冲及其通过信道内四波混频产生的寄生脉冲的波形。

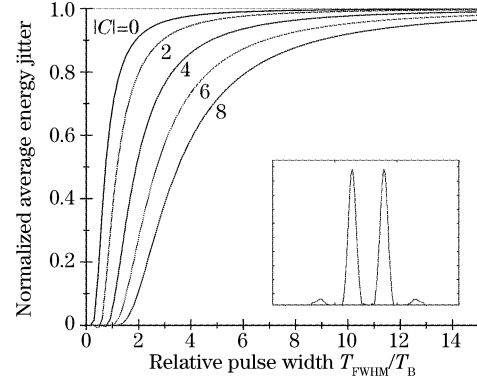


图 2 啁啾的绝对值取不同值时平均能量抖动随相对脉宽变化的关系。插图为仿真所得相邻两脉冲及其通过信道内四波混频产生的寄生脉冲的波形

Fig. 2 Normalized average energy jitters of different absolute value of chirp versus relative pulse width. The insert is the two adjacent pulses and the ghost pulses induced by IFWM by simulation

3 色散控制准线性系统非线性相互作用的数值分析

为了证实上述理论分析,并进一步考察信道内交叉相位调制和信道内四波混频对系统性能的影响,我们采用分步傅里叶方法对方程(1)进行数值模拟。由于系统性能受色散、衰减、集总放大、非线性等诸多因素的影响,因而对系统进行优化配置是必要的。如前所述,预啁啾脉冲能够降低非线性相互作用,提高系统性能,因此可在系统输入端设置一段色散补偿光纤对输入脉冲进行预啁啾;而在每一色散分布周期内,则采用后补偿方案来实现色散控制,如图 3 所示。

图中 $z_d = z_1 + z_2$ 为一个色散分布周期,集总放大器掺铒光纤放大器的间距与色散分布周期相等。在各色散分布周期内的色散系数可由下式表示:

$$D(z) = \begin{cases} D_1 > 0, & 0 < z - nz_d < z_1 \\ D_2 < 0, & z_1 < z - nz_d < z_d \end{cases} \quad (17)$$

根据文献[8,9],脉冲演化的谱结构较大程度地依赖于集总放大器在色散分布周期内的相对位置,当放大器位于反常或正常色散光纤段的中点时,非线性会导致明显的谱整形;当放大器位于色散分布周期的色散转换点时,频域的非线性相移类似于无损耗的情况,其谱强度保持不变。因此我们将放大器置于色散分

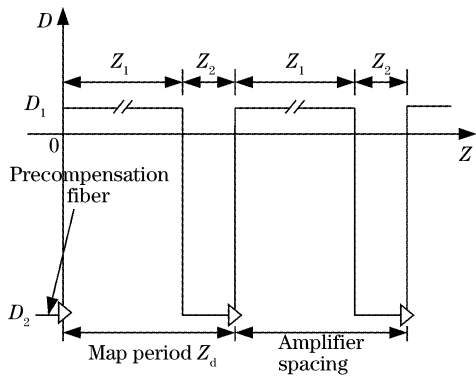


图3 色散分布示意图,图中色散分布周期长度等于放大器间距

Fig. 3 Schematic diagram of dispersion map, the map period z_d is equal to the amplifier spacing

布周期的末端,即色散转换点。另外,为了集中考虑非线性相互作用,避免放大自发发射(ASE)噪声导致定时抖动与信道内交叉相位调制导致定时抖动相混淆,我们考虑无噪声放大器的情况;同时,偏振模色散(PMD)对系统性能的影响也不予考虑。

由于色散控制准线性脉冲的脉宽和振幅沿光纤周期性地改变,因此准线性系统的稳定传输实际是指各个色散分布周期内变换限制点处的波形保持不变,而在每个色散分布周期内,脉冲会周期性地经历两次压缩和展宽。脉冲在一个色散分布周期内的展宽程度与色散分布强度 S 有关, S 值越大,脉冲展宽程度越大。 S 由下式决定:

$$S = \frac{(\beta_{21} - \beta_{av})z_1 - (\beta_{22} - \beta_{av})z_2}{\tau_{FWHM}^2}, \quad (18)$$

式中 β_{21} 和 β_{22} 分别为单模光纤和色散补偿光纤的群速度色散系数, β_{av} 为路径平均色散, τ_{FWHM} 为脉冲的半峰全宽。可见,在色散分布周期长度 Z_d 不变的条件下,系统比特率越高,本地色散值 β_{21} 和 β_{22} 越大, S 将越大,从而脉冲展宽程度将越大。从前述分析可知,信道内交叉相位调制和信道内四波混频导致的频移和能量抖动也随脉宽而变化,因此在数值分析中,我们通过改变 β_{21} 和 β_{22} 的值来改变 S 值,从而改变准线性脉冲的展宽程度,以达到调节非线性相互作用的目的。

数值分析中采用如下数据:各色散分布周期内单模光纤和色散补偿光纤的色散系数分别设定为 $17.3 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 和 $-155.7 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,路径平均色散为 0 ,预补偿光纤段的色散值、单模光纤和色散补偿光纤的长度则随需要而变。设 $Z_d = 80 \text{ km}$,衰减常量为 $0.2 \text{ dB}/\text{km}$,放大器增益则设为 $0.2z_d \text{ dB}$,以补偿损耗。为分析方便,设两种光纤的非线性系数均为 $0.00243 \text{ mW}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 。脉冲采用

高斯型脉冲,其初始峰值功率设为 6 dBm ,初始半峰全宽设为 5 ps ,比特时隙 T_B 为 25 ps (占空比为 0.2 ,相应的系统速率为 40 Gb/s)。

首先,我们将 $2^5 - 1$ 的伪随机码流(PRBS)输入系统,在传输线路的 1600 km 处对系统性能进行分析。 S 设为 127 ,通过调节 β_{21} 和 β_{22} 得到。图4为截取的伪随机码流部分输出脉冲的波形,所附插图 of 全部输出脉冲序列的眼图。从图中可明显看出脉冲出现了信道内交叉相位调制导致定时抖动和信道内四波混频导致寄生脉冲的产生,而且不同脉冲其振幅变化各不相同,“0”比特处寄生脉冲的振幅也各不相同。其原因不仅与各比特时隙前后脉冲的情况各不相同有关,还与信道内四波混频中的相位匹配条件有关。只有满足相位匹配条件的脉冲才能通过信道内四波混频对特定的比特时隙产生影响。另外,由数值分析结果可知,在 $S \approx 127$ 时,脉冲在色散分布周期内的最大半峰全宽达到 440 ps ,跨越了 17 个比特时隙,而整个脉冲跨越的比特时隙则更多,相对脉宽远大于 1 ,因此信道内交叉相位调制所致频移导致的定时抖动很小;同时,可能通过信道内四波混频相互作用的脉冲数量也随之增多。但是由于间隔越远的脉冲其重叠部分越少,从而信道内四波混频的效率也越低。

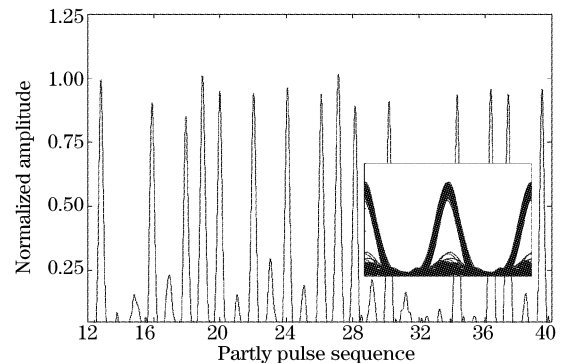


图4 $2^5 - 1$ 的伪随机码流传输 1600 km 后的眼图及部分波形。色散分布周期长度为 80 km , $S = 127$

Fig. 4 Eye diagram and partly pulse sequence of $2^5 - 1$ PRBS after 1600 km transmission. $Z_d = 80 \text{ km}$, $S = 127$

其次考虑不同的 S 值对非线性相互作用的影响。图5为定时抖动和振幅抖动随 S 值变化的曲线。数值分析证实,在色散分布周期内,脉冲的展宽程度随 S 的增加成正比地增加。图中顶部坐标即为脉冲在不同 S 值下传输时所对应的在一个色散分布周期内所能达到的最大脉宽。由图可见, S 较小时,定时抖动随 S 的增大而迅速增加,并在 $S \approx 16$ 时达到最大值 3.34 ps ,然后逐渐降低。由于脉宽在

传输过程中呈“呼吸”状演化,根据(14)式,脉宽约在与比特时隙相等时引起的平均频移最大,而脉冲定时抖动与频移成正比,因此,在一个色散分布周期内,脉宽经历约为25 ps的时间越长,信道内交叉相位调制导致的频移就越大,从而定时抖动将越大。从图中可知,在本文的系统配置参量下,最大脉宽约为50 ps时,定时抖动最大。当 S 进一步增加时,如前所述,脉冲波形的变缓及前后沿所致频移符号的不同使定时抖动逐渐降低。从图5还可看出,归一化振幅抖动在 $S < 20$ 时有小幅振荡行为,在大于20时随 S 单调增加,并在 $S \approx 64$ 时达到0.276, $S > 64$ 时,振幅抖动不再明显增加,从而证实了(16)式的分析。

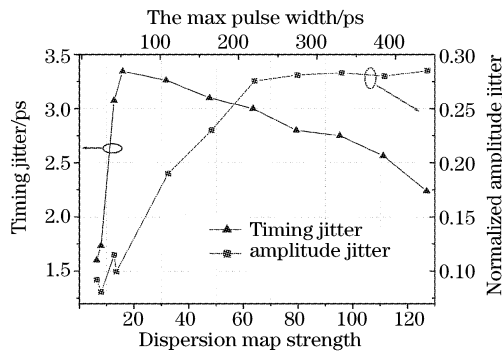


图5 非线性相互作用导致的定时抖动和幅度抖动随色散分布强度变化的关系曲线。脉冲传输距离为1600 km
Fig.5 Timing jitter and amplitude jitter induced by nonlinear interactions against dispersion map strength. The transmission distance is 1600 km

最后考虑 $S \approx 127$ 的系统中,脉冲的定时抖动、振幅抖动和寄生脉冲的振幅随传输距离变化的关系,数值模拟结果如图6所示。从图中可见,三者均随距离成正比增加。在1600 km处,定时抖动为

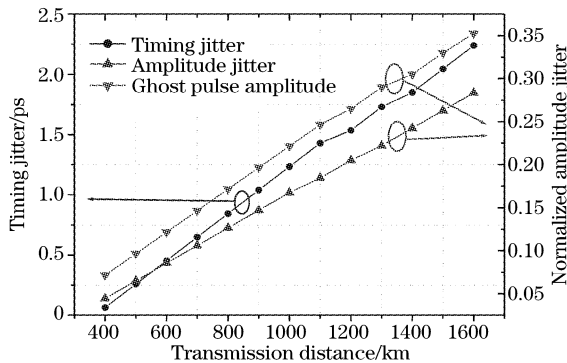


图6 非线性相互作用导致的定时抖动、幅度抖动和寄生脉冲的振幅随距离变化的关系曲线。色散分布周期长度为80 km, $S=127$

Fig.6 Timing jitter and amplitude jitter induced by nonlinear interactions versus distance. $Z_d=80$ km, $S=127$

2.24 ps,为比特时隙的8.96%,而对初始脉冲振幅归一化后的振幅抖动为0.28,寄生脉冲的最大振幅为0.35。由系统Q值公式 $Q = (\mu_1 - \mu_2) / (\sigma_1 - \sigma_2)^{[10]}$,其中 μ_1 和 μ_2 分别为比特“1”和“0”的平均功率, σ_1 和 σ_2 分别为其方差,可计算出在传输1600 km后的系统Q值仍大于6,即系统误码率小于 10^{-9} ,从而证明了高速色散控制准线性系统在大 S 值情况下的稳定传输性能。

4 结 论

色散控制方案是未来高速光通信系统的一种优选方案,但是在现有标准单模光纤线路上传输40 Gb/s以上的色散控制孤子时遇到了困难。本文分析了有较低功率的色散控制准线性脉冲的信道内交叉相位调制和信道内四波混频,研究了定时抖动、振幅抖动和寄生脉冲随传输长度和色散分布强度变化的规律,通过数值模拟实现了系统速率为40 Gb/s时的色散控制准线性系统在标准单模光纤中的稳定传输,对利用现有大量已铺设标准单模光纤实现高速传输具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Ablowitz M. J., Biondini G., Olson E. S.. On the evolution and interaction of dispersion-managed solitons. A. Hasegawa (ed.), *Massive WDM and TDM Soliton Transmission Systems* [M]. Kulwer Academic Publishers, 2000. 75~114
- 2 Silberberg Y., Da Silva V. L., Heritage J. P. et al.. Accumulated photon echoes in doped fibers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(10): 2369~2381,
- 3 Yu T., Golovchenko E. A., Pilipetskii A. N. et al.. Dispersion-managed soliton interactions in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 793~795
- 4 Turitsyn S. K., Fedoruk M. P., Gornakova A.. Reduced-power optical solitons in fiber lines with short-scale dispersion management[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13): 869~871,
- 5 Ablowitz M. J., Toshihiko Hirooka. Resonant nonlinear intrachannel interactions in strongly dispersion-managed transmission systems[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(24): 1750~1752
- 6 Agrawal G. P.. *Nonlinear Fiber Optics* [M] (second edition). San Diego: Academic Press, 1995
- 7 Ablowitz M. J., Toshihiko Hirooka. Nonlinear Effects in quasi-linear dispersion-managed pulse transmission[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(10): 1082~1084
- 8 Masayuki Matsumoto. Analysis of interaction between stretched pulses propagating in dispersion-managed fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(3): 373~375
- 9 Cai Ju, Xu Ming, Yang Xianglin. Analysis of statistical characteristics of first-and second-order polarization mode dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 170~175 (in Chinese)
- 蔡 炬,徐 铭,杨祥林. 单模光纤偏振模色散统计特性的分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 170~175
- 10 Govan D. S., Forsyiaik W., Doran N. J.. Long-distance 40-Gbit/s soliton transmission over standard fiber by use of dispersion management[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(19): 1523~1525