

DPSK 色散管理线性和类孤子系统传输的简约解*

徐铭, 吉建华, 马君显

(深圳大学 信息工程学院 新技术研究中心, 广东 深圳 518060)

摘 要:采用简化法分别研究了差分相移键控(DPSK)色散管理线性和类孤子系统的传输特性, 得出较为简洁明了的脉宽以及脉冲啁啾随距离演化的方程组. 研究的结果发现, 线性的 DPSK 系统只有在色散完全补偿的情形下是一种临界的稳定, 而类孤子的 DPSK 系统即使在欠补偿情形下, 系统也是完全的稳定, 啁啾的演化是独特的闭合曲线. 其完全稳定性的物理实质来自于非线性效应引入的自束缚势. 从而说明 DPSK 色散管理类孤子系统良好的传输性能.

关键词:光纤通信技术; 差分相移键控; 色散管理类孤子; 啁啾

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)09-1636-5

0 引言

近些年来, 基于差分相移键控(DPSK)的光调制信号在高速大容量光传输系统中的应用受到普遍的关注^[1-3], 和传统的开关键控(OOK)相比, 该调制方式有 3 dB 的接收 SNR 增益、较低的色散和偏振模色散^[4]. 同时, 由于该系统的固有特性, 系统扰动引起的光幅度的抖动较低. 因此, 在高速 DPSK 传输系统当中, 限制该系统的因素主要来自 ASE 噪声引起的所谓 Gordon-Mollenauer 效应^[5]以及非线性效应, 如: 四波混频(FWM), 自相位调制(SPM)以及交叉相位调制(XPM)等引起的光相位抖动.

而色散管理类孤子(DMS)能够有效地抑制以上这些效应的影响, 稳定传输的脉冲已经不再是经典孤子, 其形状已变成类高斯形^[6], 甚至是非线性 Bloch 波型^[7], 是一种性能优越的类孤子, 这样结合, 系统将具有更强的传输优势.

目前, 研究的 DPSK 系统大多是 RZ 线性系统^[1,3,5], McKinstrie^[8]和 kumar^[9]采用变分解析法分别研究了 DPSK 普通孤子系统和 DMS 系统, Hanna 采用矩量法研究了 DMS 系统的性能^[10]. 上述方法都较为复杂, Agrawal 曾采用简化法^[11]研究特定条件下的脉冲传输. 本文将该方法再结合龙格-库塔法, 首次用来分析色散补偿的线性和非线性 DPSK 系统传输. 该方法虽然在研究较为复杂的扰动问题时会碰到无法解释的困难, 但在特定的条件下, 较其他方法简单明了, 能够很方便地描述脉冲参量的演化特性.

1 色散管理线性和非线性 DPSK 系统的传输方案

对于周期性集总放大的正负色散周期性交替变化的色散管理系统, 脉冲的传输演化行为可由如下非线性薛定谔方程(NSL)加以描述^[11]

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{\partial^2 u^2}{\partial^2 T} + \sigma(Z) |u|^2 u = iG(Z)u \quad (1)$$

式中 $d(Z) = -\beta_2 L_D / T_0^2 = \frac{-\beta_2}{\langle \beta_2 \rangle}$, $G(Z) = -\Gamma + [\exp(\Gamma Z_a) - 1] \sum_{m=1}^N \delta(Z - mZ_a)$, $\sigma(Z) = \gamma P_0 L_D$ 和

$P_0 = \frac{\langle \beta_2 \rangle}{\langle \gamma \rangle T_0^2}$ 分别表示归一化周期色散的变化项、归一化非线性项、脉冲初始输入功率和周期放大及损耗的项, $\Gamma = \alpha L_D$ 为归一化损耗系数, β_2, γ, N 分别为群速度色散、非线性系数以及放大器总数, 归一化放大周期长度为 $Z_a = z_a / L_D$. $\langle \cdot \rangle$ 代表取路径平均.

设 d_1 和 Z_1, d_2 和 Z_2 分别为传输光纤和补偿光纤的归一化色散值以及相应的长度, $Z_d = Z_1 + Z_2$ 为色散管理周期(此处其长度设与光放大器间距 Z_a 相等), 路径平均色散 $\langle d(Z) \rangle$ 为: $\langle d(Z) \rangle = \frac{Z_1 d_1 + Z_2 d_2}{Z_d}$.

当 $\langle d(Z) \rangle = 0$, 色散管理光纤的色散积累 $Z_2 d_2$ 完全补偿传输光纤的色散积累 $Z_1 d_1$, 则系统完全补偿, 对应的当 $\langle d(Z) \rangle > 0$ 和 $\langle d(Z) \rangle < 0$ 时系统分别处于欠补偿和过补偿情况. $L_D = T_0^2 / \langle \beta_2 \rangle$, T_0 为脉冲的初始半宽度. 现提出快变项, 作变换

$$U(Z, T) = a(Z)u(Z, T)$$

$$\frac{da}{dZ} = -\Gamma a + [\exp(\Gamma Z_a) - 1] \sum_{m=1}^N \delta(Z - mZ_a) a \quad (2)$$

则式(1)可改写如下标准非线性薛定谔方程(NLSE)

*国家自然科学基金(60502027)和广东省自然科学基金(04300855, 5301028)资助
Tel: 0755-26534182 Email: xum@szu.edu.cn
收稿日期: 2006-06-20

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2} d(z) \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + Q^2(Z) |U|^2 U = 0$$

$$Q(Z) = a(Z) [\sigma(Z)]^{1/2} \tag{3}$$

$Q(Z)$ 是含有周期放大损耗以及非线性变化的项. 式(3)即为色散管理非线性系统的传输方程,它不仅可用于研究非线性系统的传输特性,当不考虑或不存在非线性时, $Q(Z)=0$,方程亦可用于分析线性色散管理光纤通信系统的性能. 下面采用较为简明的方法研究基于 DPSK 传输系统,对比分析色散管理线性和类孤子系统的传输特性.

1.1 色散管理线性系统传输特性

当 $Q(Z)=0$ 时,方程(3)变成

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} = 0 \tag{4}$$

线性系统中 DPSK 传输光脉冲波形一般可近似为含初始啁啾的高斯脉冲

$$U(T,0) = U_0 \exp \left[-\frac{T^2}{2T_0^2} (1 - iC_0) \right] \tag{5}$$

式中 U_0 、 T_0 与 C_0 分别表示初始脉冲幅度、宽度和啁啾. 对式(4)进行傅里叶变换和反变换,并代入初值就可解得线性色散管理系统中脉冲的包络随距离的变化

$$U(T,Z) = U_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1(Z)}} \exp \left[-\frac{T^2}{2T_0^2} (1 - iC(Z)) + i\theta(Z) \right] \tag{6}$$

其中

$$T_1(Z) = T_0 \left[\{1 + C_0 F(Z)\}^2 + F^2(Z) \right]^{1/2}$$

$$C(Z) = C_0 + (1 + C_0^2) F(Z) \tag{7}$$

$$\theta(Z) = -\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{F(Z)}{1 + C_0 F(Z)} \right)$$

$$F(Z) = \frac{1}{T_0^2} \int_0^Z d(Z) dZ$$

为了表达方便,引入脉宽的倒数变量 $p(Z) = 1/T_1(Z)$ 以及 $\tau = p(Z)T$,则方程(6)可写为

$$U(\tau,Z) = \alpha_0 \sqrt{p(Z)} \exp \left[-\frac{\tau^2}{2} + i\theta(Z) \right] \cdot \exp \left(\frac{i}{2} C(Z) \tau^2 \right) \tag{8}$$

式中令 $\alpha_0 = U_0 \sqrt{T_0}$. 将式(8)代回式(4),且分离实部和虚部,得到两个方程,分别代表线性系统中的脉冲宽度和啁啾参量随距离变化的关系

$$\frac{dp}{dZ} = -Cp^3 d(z) \quad \frac{dC}{dZ} = C^2 p^2 d(z) + p^2 d(Z) \tag{9}$$

这是一组耦合方程,表明在传输过程中脉宽和啁啾是相互影响和互为因果的,均将随距离而变,即使在不存在初始啁啾时,亦是如此,这正是周期性色散管理系统必然出现的现象.

1.2 非线性色散管理系统性能分析

在非线性色散管理系统中,光脉冲不仅受到色散和非线性影响而呈现孤子特征,又受到色散的周期性变化而引起脉宽和啁啾成分的变化,其形状演化和参量的演化特性将变得较为复杂. 现采用类似上节线性系统的求解方法来分析这个问题. 假定方程(3)的试探解为^[12]

$$U(\tau,Z) = \sqrt{p(Z)} u(\tau,Z) \exp \left(\frac{i}{2} C(Z) \tau^2 \right) \tag{10}$$

代入式(3)且分离变量,获得

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{p^2 d(z)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + pQ(Z)^2 |u|^2 u - \frac{k(z)}{2} \tau^2 u = 0 \tag{11}$$

以及

$$\frac{dp}{dZ} = -Cp^3 d(z) \quad k(Z) = \frac{dC}{dZ} - C^2 p^2 d(z) \tag{12}$$

式中 $k(Z)$ 为待定的函数,表示的是啁啾变化项,采用另外的方法可确定 $k(Z)$ ^[13]

$$k(Z) = p^2 d(z) - \frac{E}{\sqrt{2\pi}} p \tag{13}$$

式中 $E = |U|^2$ 为非线性脉冲的能量. 对比式(9)与(12)可以看出,两者很相似. 方程(11)表明,脉冲的演化由方程左边三部份决定:第二项周期色散项,第三项非线性项(自束缚势能项,即自相位强度调制项)以及第四项啁啾项.

2 解析结果数值分析

为说明问题,结合一个具体系统进行分析,该系统色散补偿分布图如图 1 所示. 图 2 为图 1 传输系统下采用龙格-库塔法对式(10)进行经过 10 个色散管理周期计算的结果. 图 2(a)为完全色散补偿情况, $d_1 = 30(-3 \text{ ps}^2/\text{km})$, $d_2 = -30$. 图 2(b)为欠补偿情况, $d_1 = 30$, $d_2 = -28(2.8 \text{ ps}^2/\text{km})$. 图中显示, $p(Z)$ 与 $C(Z)$ 之间的关系(第一行图)即使经过 10 个色散管理周期,两者之间的演化关系也是固定不变化的,且在零啁啾处最大,脉宽最窄,但在完全补

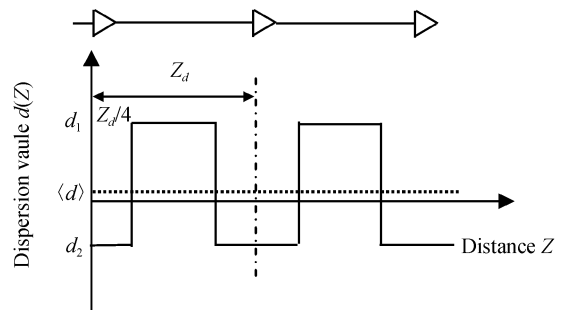


图 1 色散管理示意图
Fig. 1 The sketch map of dispersion management

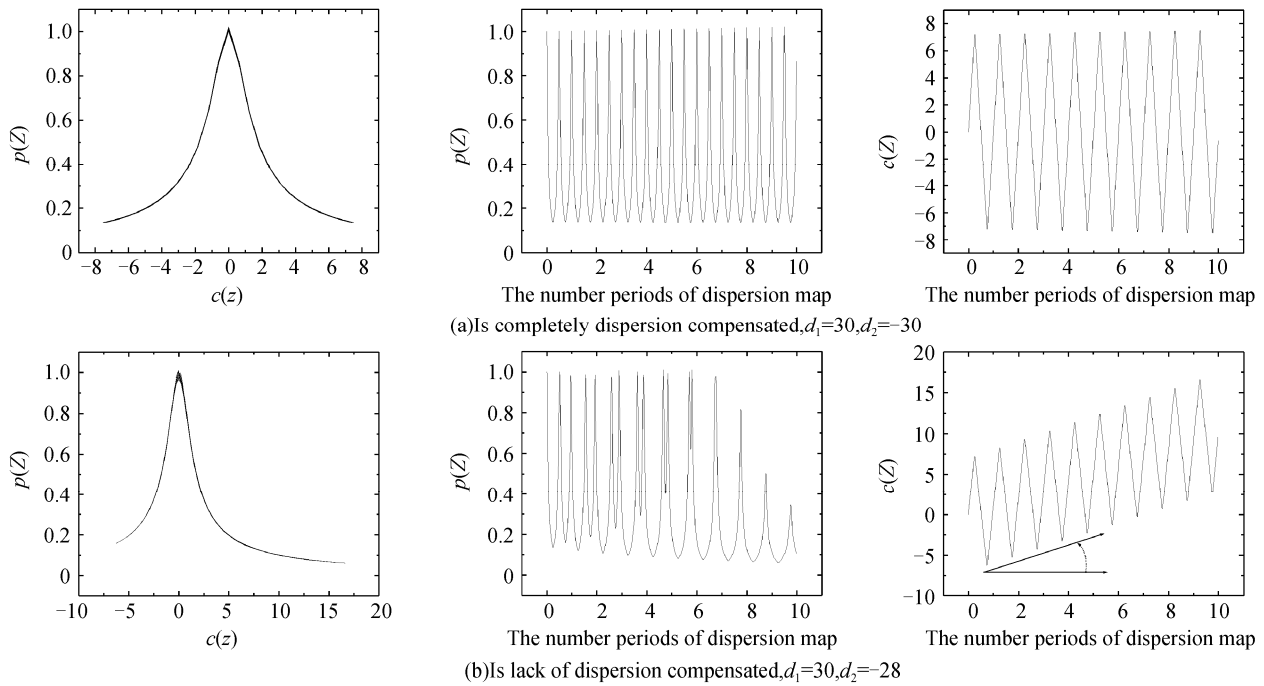


图 2 线性周期色散补偿系统中脉宽 $p(Z)$ 、啁啾 $C(Z)$ 以及两者之间的演化关系图
 Fig. 2 The pulse width $p(Z)$ and chirp $C(Z)$ evolution relations in linear system

偿情况下,两者关系是对称的,而在欠补偿情况下,两者关系是非对称的.对比第二、三行图可以看出,在完全补偿情况下,经过一个色散管理周期和 10 个色散管理周期后,脉宽和啁啾恢复到初始值,表明该系统是稳定的,但该系统在有色散剩余的欠补偿情况下,经过几个色散管理周期后, $p(Z)$ 失去了周期性,脉宽逐渐展宽,演化规律也发生了变化(这也可从式(7)可以看出),从而引起 DPSK 中的相位波动,表明此时该系统是不稳定的,同时在完全补偿情形下的稳定是一种临界的稳定.

联合式(12)和(13)同样可以采用龙格库塔法计算出色散管理 DPSK 类孤子系统中,脉宽与啁啾随距离的演化图以及两者之间的演化关系图,结果如图 3(a,b)和图 4.图 3 为在 10 个色散管理周期内 $p-C$ 两者之间的演化关系图.其中图 3(a)所选的初始脉冲能量为 1.5,图 3(b)所选的初始能量为 3,除脉冲能量不同外,两图其他初始参量选择如同图 2 (b).图中显示,DPSK 脉冲即使经过 10 个色散管理周期后, $P-C$ 的演化关系也是固定、重合的,两者关系为一对称、闭合的曲线.即在色散管理类孤子系统中,即使是欠补偿情况下,脉冲经过很多色散管理周期后,也能恢复到初始参量值,说明该传输系统中相位的演化是稳定传输的.但是,从图 3(a)中可以发现,该系统经过每一个色散管理周期后,系统参量恢复到初始值的机制是和线性系统中完全补偿情况下的机制完全不一样的,即在经过一个色散管理周期后,在 $Z_d/2$ 处有一个极值点 $(0, p_1)$, p_1 最大,

脉冲最窄,在 0 和 Z_d 处脉冲有第二个极值点 $(0, p_2)$,即在反常色散区内的平均脉冲宽度窄于正常色散区内的平均脉冲宽度.图 3(b)也有同样的结果,只不过不同的脉冲能量条件下,脉冲的演化曲线闭合面积不一样.

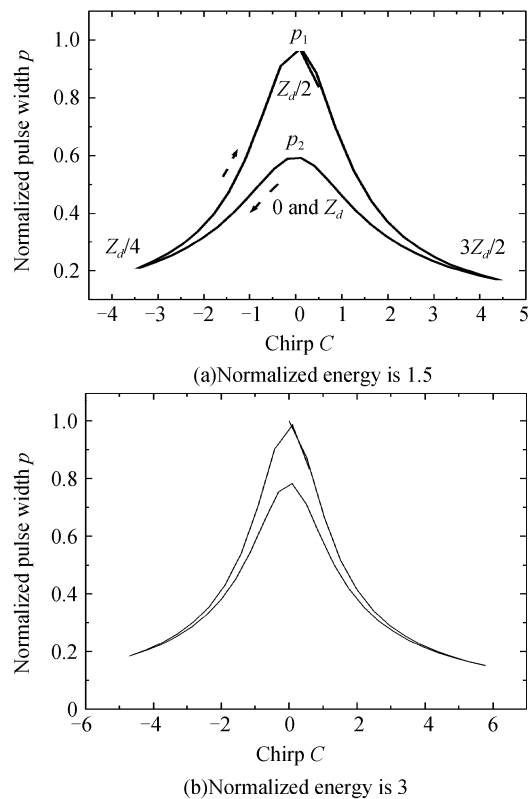


图 3 在 10 个色散管理周期为孤子脉宽与啁啾的演化关系图
 Fig. 3 The pulse width and chirp evolution relations after 10 dispersion managements periods in nonlinear system

图 4 为在一个色散管理周期内,类孤子脉冲参量脉宽 p 和啁啾 C 随距离的演化关系(图中实线),初始参量的选择如同图 2(a),图中还给出了相同初始条件下,线性脉冲脉宽和啁啾的演化情况(图中实线表示非线性系统情况,虚线表示线性系统情况).该图进一步印证了图 3 给出的结论.正是因为 DMS 这种周期性的动态的演化行为,才使孤子在完全补偿和不完全补偿系统中呈现准稳态,且对扰动有一定的“抵抗”作用.上面的结果是通过数值计算得出的,物理机制可由下面进一步分析而得到揭示.

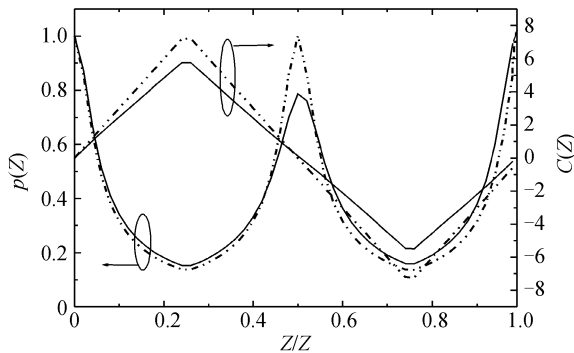


图 4 脉宽与啁啾在一个色散管理周期内的传输演化图
Fig. 4 The evolution of pulse with chirp in a period of dispersion management

由于 u 稳定,可对方程(11)在一个色散管理周期内进行平均处理, u 也可近似看成此平均方程的解

$$i \frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{\langle p^2 d(z) \rangle}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \langle p Q(Z)^2 \rangle |u|^2 u - \frac{\langle k(z) \rangle}{2} \tau^2 u = 0 \quad (14)$$

令 $D_0 = \langle p^2 d(z) \rangle$, $Q_0 = \langle p Q \rangle$, $K_0 = \langle k(z) \rangle = -\langle C^2 p^2 d(z) \rangle$, 分别表示在平均意义上的有效色散、非线性和啁啾.此方程更能体现色散管理类孤子的准稳态特性.其中, Q_0 项类似量子力学中所谓的自束缚势, K_0 项为引入的一个二次方势能项, $K_0 > 0$ 引入势阱,此时脉冲的尾部类似高斯脉冲尾部,而 $K_0 < 0$ 引入势垒,此时脉冲尾部出现微小的振荡(色散波)^[14].考虑方程(13)中系统在一个周期内的有效色散项: $D_0 = \langle p^2 d \rangle = \left\{ \int_{\text{anomalous}} p^2 d(Z) dZ - \int_{\text{normal}} p^2 d(Z) \cdot dZ \right\} / Z_d$, 结合图 3 和图 4 的结果,显然,即使在平均色散 $\langle d \rangle$ 为零,甚至为负的情况下,有效色散参量 D_0 都有可能为正值,从而方程(11)运行在有效的反常色散区内,维持孤子的“经典”条件.这就是为何 DM 类孤子方案在零甚至是正常色散区内也可稳定传输的原因,而在周期色散管理的线性系统和普通孤子系统中这种特点完全不存在.对方程(13)进行路径平均,可得: $E_0 = \frac{\sqrt{2\pi}}{\langle p \rangle} (D_0 - K_0)$. 式中 E_0 表示脉冲能量 E 在一个色散管理周期内的路径平均值,

该式表明色散管理类孤子的能量来自于两项:有效的色散项 D_0 以及啁啾引起的势能项 K_0 . 由于通常情况下 $K_0 = -\langle C^2 p^2 d \rangle < 0$,而在普通孤子系统中,该项为零,因此色散管理类孤子系统较普通孤子系统有更强的脉冲能量.

3 结论

色散管理类孤子传输方案和 DPSK 调制方式的结合,系统具有优越的传输性能,本文采用简化法研究证实了这一点.通过分别研究差分相移键控(DPSK)色散管理线性和类孤子系统的传输特性,得出较为简洁明了的脉宽以及脉冲啁啾随距离演化的方程.研究的结果发现,线性的 DPSK 系统只有在色散完全补偿的情形下,啁啾或相位的演化是稳定的,但是是一种临界的稳定,而类孤子的 DPSK 系统即使在欠补偿情形下,啁啾的演化也是周期性的,该系统完全稳定性的物理实质来自于非线性效应引入的自束缚势.

参考文献

- [1] TSURITANI T, ISHIDA K, AGATA A, *et al.* 70 GHz-spaced 40/spl times/42.7Gb/s transpacific transmission over 9400 km using prefiltered CSRZ-DPSK signals, all-raman repeaters, and symmetrically dispersion-managed fiber spans[J]. *J Lightwave Technol*, 2004, **22**(1): 215-224.
- [2] DUAN Gao-yan, LI Xi-hong, WANG Gang, *et al.* The research of response of checking signals to different return-zero formats in the PMD compensation systems based on degree of polarization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 122-125. 段高燕, 李喜红, 王刚, 等. 基于偏振度的偏振模色散补偿中检测信号对不同归零码型的响应研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 122-125.
- [3] GNAUK A H, WINZER P J. Optical phase-shift-keyed transmission[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, **23**(1): 115-130.
- [4] GORDON J P, MOLLWNAUER L F. Phase noise in photonic communications systems using linear amplifier [J]. *Opt Lett*, 1990, **15**(23): 1351-1353.
- [5] LEIBRICH J, WREE C, ROSENKRANZ W. CF-RZ-DPSK for suppression of XPM on dispersion-managed long-haul optical WDM transmission on standard single-mode fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(2): 155-157.
- [6] ZHANG Fan, WU Jian, ZHANG Ming, *et al.* Evolution of strong dispersion managed soliton in dense period fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 561-565. 张帆, 伍剑, 张民, 等. 强色散管理在密集周期光纤中的演化[J]. *光子学报*, 2002, **31**(5): 561-565.
- [7] HAUS H A, CHEN Y. Dispersion managed soliton as nonlinear bloch waves[J]. *J Opt Soc Am B*, 1999, **16**(6): 889-894.
- [8] MCKINSTRIE C J, XIE C, XU C. Effects of cross-phase modulation on phase jitter in soliton systems with constant dispersion[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(8): 604-606.
- [9] KUMAR S. Analysis of intrachannel impairments in differential

- phase-shift keying transmission systems[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(16):2053-2055.
- [10] HANNA M, BOIVIN D, AMBROISE P, *et al.* Calculation of optical phase jitter in dispersion managed systems by use of the moment method[J]. *J Opt Soc Am B*, 2004, **21**(1):24-28.
- [11] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics (Third edition) and applications of nonlinear fiber optics (in Chinese) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [12] KODAMA Y, KUMAR S, MARUTA A. Chirped nonlinear pulse propagation in a dispersion compensated system[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(22):1689-1691.
- [13] HIROOKA T, HASEGAWA A. Chirped soliton interaction in strongly dispersion-managed wavelength-division-multiplexing systems[J]. *Opt Lett*, 1998, **23**(10):768-770.
- [14] KUMAR S, HASEGAWA A. Quasi-soliton propagation in dispersion managed optical fiber[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(6):372-374.

The Simplifying of System Transmission in DPSK Dispersion Managed Linear and Soliton-like Systems

XU Ming, JI Jian-hua, MA Jun-xian

(Advanced Technology Research Center of Information Engineer Academy in Shenzhen University, Guangdong Shenzhen 518060, China)

Received date: 2006-06-20

Abstract: The transmission characteristics of Differential Phase-Shift Keying (DPSK) Dispersion Managed Soliton-like (DMS) and linear systems are analyzed by simplifying. The concise evolution equations of pulse width and chirp with distance are gotten. The results had disclosed that the linear DPSK system is critical steady only in condition of dispersion completely compensated, but the soliton-like DPSK system can completely steady even in lack of dispersion compensated, in which the chirp evolution is a unique close curve. The completed stability of soliton-like DPSK system has the physical essential that come from the self-trapping potential energy induced by nonlinear effects. It can be explained that the DMS of DPSK system have a favorable transmission performance.

Key words: Optical fiber communication technology; Differential Phase-Shift Keying (DPSK); Dispersion Managed Soliton (DMS); Chirp



XU Ming was born in 1970. He received his M. S. degree in 1999 and PH. D degree in 2002 from University of Electronic Science and Technology of China (UESTC). In 2002, He worked in Advanced Technology Research Center of Information Engineer Academy in ShenZhen University. His current research interests include high-speed optical communications in optical network and systems.