

色散控制孤子系统中光纤偏振模色散的滤波控制

徐 铭^{1,2}, 杨祥林¹, 刘学明¹, 蔡 炬¹, 胡 渝²

(11 南京邮电学院光纤通信研究所, 江苏南京 210003; 21 电子科技大学物理电子学院, 四川成都 610054)

摘 要: 本文研究高速 OTDM 色散控制孤子系统偏振模色散的影响及其滤波控制. 首先建立了同时考虑偏振模色散和滤波控制时的 DMS 传输方程, 其次采用变分法给出了滤波控制常双折射光纤中 DMS 传输方程的变分解, 求得了 DMS 的特征参数的传输演化规律, 然后研究了滤波控制随机双折射光纤中 DMS 传输稳定性问题及其定时抖动规律. 最后基于变分所得定时抖动公式, 分析了三种不同系统的定时抖动, 显示了 DMS 系统中用滤波器抑制 PMD 时, 对高速光孤子通信性能的影响是非常有效的.

关键词: 偏振模色散; 色散控制孤子; 滤波器

中图分类号: TN9291.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 08-1193-04

Filters Control of the Polarization Mode Dispersion in Dispersion Managed Soliton Systems

XU Ming^{1,2}, YANG Xianglin¹, LIU Xue2ming¹, CAI Ju¹, HU Yu²

(1. Institute of Optical Fiber Communication, NJUPT, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

2. School of Physical Electronics, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: The effects of polarization mode dispersion and filters control are studied in systems of high speed OTDM dispersion managed soliton. Firstly, the dispersion managed soliton (DMS) transmission equations considering effects of polarization mode dispersion and filters are built. Secondly, the filter control DMS transmission with constant birefringence fibers is analyzed by Variational method, from which the transmission rule of DMS characteristic parameters can be obtained. At the same time, the stabilities of DMS transmission and its timing jitter rules controlled by filters are also investigated. Based on the expressions of timing jitter obtained by variational method, the timing jitter of three systems is discussed, with the results revealing that it is very effective for filters to restrain the influence of PMD in DMS communication systems.

Key words: polarization mode dispersion; dispersion managed soliton; filter

1 引言

色散控制孤子(DMS)是近年来提出的一种新的光孤子通信方案,与普通恒色散孤子通信方案相比,具有脉冲能量高、路径平均色散低、信噪比高和定时抖动小等特点.但采用色散控制技术后,系统平均色散大大降低,光纤偏振模色散(PMD)将导致色散波动,影响孤子的正常传输,特别是在高速系统中,这种影响更不容忽视.在普通孤子系统中,曾采用接入光滤波器的方法来抑制系统存在的各种扰动,取得了良好的效果,但是在 DMS 系统中能否采用滤波器控制方案来控制 PMD 的扰动,则是一个需要研究的问题.文献[1]曾用数值积分法研究过 PMD 的滤波控制^[1],但只是普通孤子系统.文献[2]曾用绝热扰动法研究过 DMS 系统的滤波控制,但未考虑 PMD 的影响.文献[3]用实验方法研究过普通和 DMS 对 PMD 的抗扰

性,但未采用滤波控制技术,也缺乏理论证明.本文将从理论上用变分法研究 DMS 系统中 PMD 的滤波控制问题.

2 PMD 影响下滤波控制 DMS 的传输模型

2.1 接入滤波器后的 DMS 系统传输方程

在不考虑滤波器时,周期性集总放大色散控制孤子系统中,归一化脉冲的场幅复包络演化方程可写成标准的非线性薛定谔方程(NLSE):

$$i \frac{9U}{9Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{9^2 U}{9T^2} + Q(Z) |U|^2 = 0 \quad (1)$$

其中 $U(Z, T)$ 和 $d(Z)$ 分别为归一化场幅度和群速度色散, $Q(Z)$ 与光纤的非线性系数、损耗系数以及 EDFA 放大器的增益系数有关.

设在每一个 EDFA 后均插入控制滤波器,并将滤波器作

用做路径平均处理. 为补偿滤波器损耗, 给系统一附加增益 D, 得到归一化频域滤波器控制色散管理孤子传输方程^[4]:

$$i \frac{9U}{9Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{9^2 U}{9T^2} + Q(Z) |U|^2 U = i \left[D - k_f \left(i \frac{9}{9T} - X \right)^2 \right] U \quad (2)$$

式中 k_f 表示滤波器的控制强度:

$$k_f = \frac{1}{2} \frac{r}{(1-r)} \frac{8P}{Dz_{ac}} \left(\frac{\$}{K_0} \right)^2 \quad (3)$$

$$X_f = 4P^2 \$ X c_0^3 / (K_0^2 D)$$

式中 $r, \$, l, c$ 分别表示腔面的功率反射系数、两镜片的间距与光速, $\$ = Pc / \$ X = K^2 / (2\$ K)$. z_a 表示放大器间距. 如果滤波中心频率作线性滑移时, $X_f = QX$, Q 称为滑频速率. 当滤波器中心频率与孤子中心频率相等且不随距离而变时, $\$ X = 0, X_f = 0$, 设:

$$R1 = i \left[D - k_f \left(i \frac{9}{9T} - X_f \right)^2 \right] U \quad (4)$$

$R1$ 表示滤波器扰动(条件是 $k_f n D^{[5]}$). 方程(2)简写为滤波扰动的 DMS 传输方程:

$$i \frac{9U}{9Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{9^2 U}{9T^2} + Q(Z) |U|^2 U = R1 \quad (5)$$

2.1.2 考虑双折射以及滤波器扰动时的 DMS 传输方程

在双折射光纤中, DM 孤子脉冲两个正交极化分量的归一化传输方程满足耦合 NLSE^[11]:

$$i \left[\frac{9U}{9Z} + D_g \frac{9U}{9T} \right] + \frac{d(Z)}{2} \frac{9^2 U}{9T^2} + Q(|U|^2 + C|V|^2) U + \frac{1}{3} U^* V^2 \exp(-4i\$EZ) = 0 \quad (6a)$$

$$i \left[\frac{9V}{9Z} - D_g \frac{9V}{9T} \right] + \frac{d(Z)}{2} \frac{9^2 V}{9T^2} + Q(|V|^2 + C|U|^2) V + \frac{1}{3} V^* U^2 \exp(-4i\$EZ) = 0 \quad (6b)$$

式中, U, V 分别表示两正交极化偏振方向上的脉冲包络幅度, 在此 C 表示两偏振分量间非线性交叉相位调制系数, $\$ B$ 表示两偏振方向上的传播常数之差 $\$ B = (B_x - B_y) / 2$ ($B_x = n_x 2P / K_x$), L_D 为色散管理孤子系统中的路径平均色散长度, $D_g = [(dB_x/dX) - (dB_y/dX)] L_D / (2t_0) = \$ B / t_0$ 为归一化微分群时延. 在常双折射光纤中时, D_g 为定值常数, 而在随机双折射光纤中时为一个随机的量. 方程(6)中的快变项是导致脉冲传输不稳定的原因之一, 在拍长小于孤子周期, 即 $t_0 > 1ps$ 时可忽略. 改写方程(6)为扰动形式:

$$i \frac{9U}{9Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{9^2 U}{9T^2} + Q|U|^2 U = -i D_g \frac{9U}{9T} - QC|V|^2 = R2 \quad (7)$$

结合(5)、(7)方程, 且令:

$$R = R1 + R2 \quad (8)$$

式中 R 表示滤波器以及 PMD 效应共同扰动作用项. 至此, 就可以得到, 当滤波器中心频率与孤子中心频率相等且不随距离而变时, 以扰动形式来表示的双折射光纤中 DM 孤子脉冲的两偏振方向上受滤波控制下演化方程:

$$i \frac{9U}{9Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{9^2 U}{9T^2} + Q|U|^2 U$$

$$= i \left[D + k_f \frac{9^2}{9T^2} \right] U - \left[D_g \frac{9U}{9T} + QC|V|^2 U \right] = R \quad (9a)$$

$$i \frac{9V}{9Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{9^2 V}{9T^2} + Q|V|^2 V = i \left[D + k_f \left(\frac{9}{9T} \right)^2 \right] V - \left[i D_g \frac{9V}{9T} + QC|U|^2 V \right] = R_c \quad (9b)$$

从上式可以看出, 等式中间第一项为滤波扰动, 包括过增益和滤波强度项. 第二项为 PMD 扰动, 包括两偏振分量之间的微分群时延项和交叉相位调制项, 前者引起偏振分量的分离, 后者会引起偏振分量场之间的非线性耦合, 导致非线性双折射, 使偏振态发生改变.

3 滤波控制常双折射光纤中 DMS 传输方程变分解

对于形如非线性扰动薛定谔方程:

$$i \frac{9M}{9Z} + \frac{1}{2} d(Z) \frac{9^2 M}{9^2 T} + Q(Z) |M|^2 M = R \quad (10)$$

可采用变分方法求解^[6]. 此方程的拉格朗日量为

$$L_0 = \int_1^2 \left[-\frac{d(Z)}{2} \left| \frac{9^2 M}{9T^2} \right|^2 + \frac{Q(Z)}{2} |M|^4 + \frac{i}{2} \left(\frac{9M}{9Z} M^* - \frac{9M^*}{9Z} M \right) \right] dT \quad (11)$$

其满足如下方程:

$$\frac{9L_0}{9X} - \frac{d}{dZ} \left(\frac{9L_0}{9X} = \int_1^2 (R^* \frac{9M}{9X} + R \frac{9M^*}{9X}) dT \right) \quad (12)$$

式中 X 表示孤子脉冲各特征参数, R^* 为 R 的共轭.

设在常双折射情况下, 方程(9)的稳定解为:

$$U(Z, T) = A_u(Z) f_u(S) \exp(i\langle u \rangle) \quad (13)$$

$$V(Z, T) = A_v(Z) f_v(S) \exp(i\langle v \rangle)$$

$$\begin{cases} S = B_i(Z) T - T_{0i} \\ \langle i \rangle = \frac{C_i(Z) B_i^2(Z)}{2} (T - T_{0i}(Z))^2 - k_i(Z) (T - T_{0i}(Z)) + H_i \\ i = U \text{ or } V \end{cases}$$

式中 A, B, C, k, T_0, H 分别表示孤子脉冲的幅度、脉宽、啁啾、频率、中心位置和相位.

在强色散控制系统中能够稳定传输的脉冲为高斯准孤子, 因而设 $f(S_i) = \exp\left(\frac{S_i^2}{2}\right)$, 在忽略小项情况下, 把式(13)分别代入式(11)、(12), 可求得孤子脉冲各参数的演化规律:

$$\dot{A}_i = -\frac{1}{2} A B_i^2 d(Z) C_i + A_i D - A_i k_f B_i \quad (14a)$$

$$\dot{B}_i = -B_i^3 d(Z) C_i - k_f B_i^2 \quad (14b)$$

$$\dot{C}_i = d(Z) B_i^2 (1 + C_i^2) - Q(\sqrt{2}/2) A_i^2 - k_f (2B_i^2 C_i - B_i C_i / 2) - 2QC \left[\frac{E_j}{\sqrt{P} n_i^2} \right] p^3 (2P^2 \$ T^2 - 1) \exp(-P^2 \$ T^2) \quad (14c)$$

$$\dot{\$ k} = -2k_f B_i^2 C_i \$ k + 2QC P^3 E_{sol} \$ T \exp(-P^2 \$ T^2) / \sqrt{P} \quad (14d)$$

$$\dot{\$ \hat{T}} = -\$ kd(Z) D_g + 2k_f C_i \$ k \quad (14e)$$

其中 $1/P^2 = 1/(B_i^2 + B_j^2)$, $E_{sol} = \sqrt{P(A_i^2/B_i + A_j^2/B_j)}$ 表示孤子总能量, D_g 前的 $+0, /-0$ 分别对应于 U, V 分量.

上式表示在滤波控制常双折射 DMS 通信系统中孤子脉

冲参数的演化规律. 从方程组中可以看出, 光纤的双折射效应 (D_g 和 C) 破坏孤子的简并, 引起了不同偏振模之间附加频率漂移(式(14d)), 导致附加脉冲展宽(式(14e)), 并抑制了脉冲的啁啾成分(式(14c)), 因此也影响着脉冲幅度和脉宽演化(式(14a)、(14b)). 而滤波器(由 kd_f 显示)对孤子脉冲的幅度 A 、脉宽 B 、脉冲中心位置的漂移 T 与频移 k 都有一定的控制作用, 表明滤波器可以抑制由 PMD 引起对孤子脉冲产生的扰动.

4 随机双折射影响下 DMS 系统的稳定性及定时抖动

方程(14)表示的是在常双折射光纤中 PMD 的影响, 然而实际光纤系统中光纤的双折射特性都是随机变化的, 光纤中孤子脉冲两偏振分量之间的模式耦合随波长和距离随机变化, 需采用统计方法进行分析. 我们将光纤视为 N 段长度为 z_h 、微分群时延 D_g 的短光纤的级联而成, 各段光纤的长度均远小于孤子周期而大于光纤的双折射的拍长 $2\pi/(B_x - B_y)$ (通常选为 50- 100m), 各段光纤内的双折射方向是固定的, 模式耦合只在光纤连接处发生, 而各光纤段内则不会发生, 相邻光纤段的双折射方向与 D_g 随机变化, 而总体上前者在 $(0, 2\pi)$ 内满足均匀分布, 后者满足高斯分布^[1], 同时色散管理周期大于 PMD 的相干长度(通常为 100m), 在这样的条件下, 微分群时延 D_g 满足高斯统计分布, 并有:

$$3 D_g^2 = 0 \quad 3 D_g(Z) D_g(Z_c) = R^2 D(Z - Z_c) \quad R^2 = 3 \beta B^2 z_h \quad (15)$$

此时微分方程组(14)为随机微分方程组, PMD 的效应由 $\sqrt{3 \beta B^2 z_h}$ 来表征^[7]. 为了计算 PMD 引起的抖动, 考虑方程(14d)与(14e). 设 PMD 引起的扰动为小量, 因而首先采用孤子绝热或守恒量扰动法研究在 PMD 扰动和滤波控制下系统的稳定性, 然后寻求表征孤子主要传输特性的定时抖动^[4].

令 $x = \beta k$, $y = \beta T$, 将方程组中含有 βT 的项在 $\beta T = 0$ 处进行线性展开并忽略高阶项得:

$$\frac{dx}{dZ} = -2kd_f B^2 Cx + 2QC P^3 E_{sol} / \sqrt{P} \quad (16a)$$

$$\frac{dy}{dZ} = (2kd_f C - d) x + D_g \quad (16b)$$

设 $a = -2kd_f B^2 C$, $b = 2QC P^3 E_{sol} / \sqrt{P}$, $c = 2kd_f C - d$, 方程(16)改写为:

$$\frac{dx}{dZ} = ax + by \quad (17a)$$

$$\frac{dy}{dZ} = cx + D_g \quad (17b)$$

上述线性方程组有本征值:

$$K_{2,1} = \frac{a \pm \sqrt{a^2 + 4bc}}{2} \quad (18)$$

当 $a^2 + 4bc < 0$ 时, 方程(17)才有稳定解, 系统将处于稳定状态:

$$kd_f < \frac{2dCP^3 E_{sol}}{\sqrt{P} B^4 C^2 + 2CP^3 E_{sol} C} \quad (19)$$

方程(17)的本征根矢量为:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{a - K_1}{b} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{a - K_2}{b} \end{pmatrix} \quad (20)$$

由此可以求得方程组(17)的形式解为:

$$x(Z) = X_1(Z) e^{K_1 Z} + X_2(Z) e^{K_2 Z} \quad (21a)$$

$$y(Z) = X_1(Z) \begin{bmatrix} -\frac{a - K_1}{b} \end{bmatrix} e^{K_1 Z} + X_2(Z) \begin{bmatrix} -\frac{a - K_2}{b} \end{bmatrix} e^{K_2 Z} \quad (21b)$$

利用式(15)、(21a)与(21b)可以求得:

$$x(Z) = \frac{b}{K_2 - K_1} \int_0^Z \left(e^{-K_1(Z-Z_c)} - e^{-K_2(Z-Z_c)} \right) D_g(Z_c) dZ_c \quad (22a)$$

$$y(Z) = \frac{1}{K_2 - K_1} \int_0^Z \left(a - K_1 \right) e^{-K_1(Z_c - Z)} - \left(a - K_2 \right) e^{-K_2(Z_c - Z)} \# D_g(Z_c) dZ_c \quad (22b)$$

上式即为滤波控制下随机双折射光纤中色散控制孤子中心位置和频率漂移, 由此可求得 DMS 传输时的均方定时抖动:

$$3 \beta T^2 = 3 \beta y^2(Z) = 3 y^2(Z) = 3 y(Z) 4^2 = \frac{R^2}{2(K_2 - K_1)^2} \left\{ \begin{aligned} & @ \left\{ \frac{(a - K_1)^2}{K_1} [e^{2K_1 Z} - 1] + \frac{(a - K_2)^2}{K_2} \right. \\ & @ [e^{2K_2 Z} - 1] + \frac{4(a - K_1)(a - K_2)}{K_1 + K_2} [1 - e^{-(K_1 + K_2)Z}] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

当没有滤波器时, $kd_f = 0$, 上式简化为:

$$3 \beta T^2 N_f = \frac{R^2 Z}{2} \left[1 + \frac{\sin(\sqrt{4bd_0 Z})}{(\sqrt{4bd_0 Z})} \right] \quad (24)$$

式中 $d_0 = -3 \beta z_0 / t_0^2$ 为路径平均色散.

当不考虑非线性效应, 即令 $b = 0$ 时, 上式可进一步简化得到线性系统中脉冲的均方定时抖动:

$$\sqrt{3 \beta T^2 L} = \sqrt{R^2 Z} \quad (25)$$

式(25)结果和文献[7, 8]中给出的一致.

5 结果应用与结论

将上述理论结果用来分析图(1)所示的色散控制孤子传输系统的特性. 系统中放大器和滤波器均位于 nZ_d 处, 输入脉冲为高斯准孤子, 脉宽 $t_0 = 5ps$, 波长 $K_0 = 1.55\mu m$, 信道速率 $R = 40Gb/s$, 光纤色散值 $D_1 = 17ps^2/(mm^2 km)$ ($l_1 = 35km$), $D_2 = -11812ps^2/km$ ($l_2 = 5km$), $D = 0.1ps^2/km$, 色散长度 $L_D = 195km$, $z_a = z_d = 40km$ (归一化 $Z_a = Z_d = 0.205$). 假定主传输光纤和补偿光纤的损耗系数相同, 均为 $A = 0.2dB/km$, 克尔系数 n_2 均为 $312 \times 10^{-20} m^2/w$, $A_{eff} = 50 \mu m^2$. 控制滤波器为 F2P 腔滤波器, 其控制强度为 $kd_f = 0.015$, 附加增益 $D = 0.02$, 且 $\sqrt{3 \beta B^2 z_h} = 0.1ps/km^{1/2}$, $z_h = 0.1km$. 分析结果如图(2)所示.

由上分析可见:

(1)在线性系统中, 由式(25)可见, 脉冲传输过程中的均方定时抖动最大, 且如图线(a)所示随传输距离近线性增大.

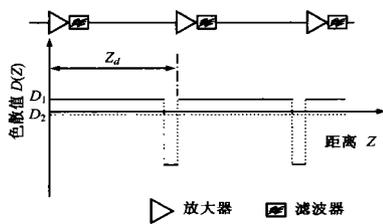


图 1 滤波控制色散管理系统示意图

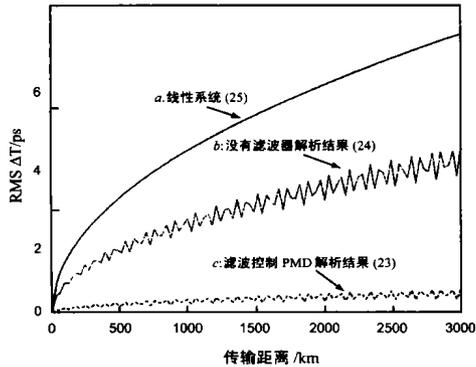


图 2 PMD 效应引起的 $\sqrt{3}ST^2$ 在线性和非线性 DMS 系统中随距离演化规律以及滤波控制 PMD 效应情况下 $\sqrt{3}ST^2$ 随距离演化规律

(2) 在色散控制孤子系统中, 由于采用了色散控制孤子传输, 脉冲传输过程中的均方定时抖动得到了有效的抑制而降低了, 但由于 PMD 的附加扰动, 均方定时抖动仍有较大的值, 由式(24) 计算发现, 其值随距离增大伴有较大的起伏, 如图线(b) 所示。

(3) 当在系统中采用滤波控制 PMD 扰动时, PMD 扰动引起的定时抖动可以得到有效地抑制而大大降低, 由式(23) 计算发现, 在 $z=3000\text{km}$ 处, 均方定时抖动仅 0.15ps , 如图线(c) 所示, 而在无滤波控制的线性和 DMS 系统中分别为 3ps 和 51.5ps 。

参考文献:

[1] Matsumoto M, et al. Propagation of solitons in fibers with randomly

varying birefringence: effects of soliton transmission control [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(4): 584- 589.

[2] Matsumoto M. Analysis of filter control of dispersion managed soliton transmission [J]. J Opt. Soc. Am. B, 1998, 15(12): 2831- 2837.

[3] H Sunnerud, et al. Experiment quantification of soliton robustness to polarization mode dispersion in conventional and dispersion managed systems [J]. J Lightwave Technol, 2001, 19(10): 1453- 1461.

[4] 杨祥林, 温扬敬. 光纤孤子通信理论基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 198- 201.

[5] Mecozzi A, et al. Effect of filters on soliton interactions in wavelength division multiplexing systems [J]. Opt. Lett, 1992, 17(14): 988- 990.

[6] Anderson D. Variational approach to nonlinear pulse propagation in optical fibers [J]. Phys. Rev. A, 1983, 27(6): 3135- 3145.

[7] Gisin N, et al. Polarization mode dispersion of short and long single mode fibers [J]. J Lightwave Technol, 1991, 9(7): 821- 827.

[8] Mollenauer L F, et al. Resistance of soliton to the effects of polarization dispersion in optical fibers [J]. Opt. Lett. 1989, 14 (21): 1219- 1221.

作者简介:



徐铭男, 1970 年 10 月出生于江西乐平, 1998 年电子科技大学与南京邮电学院联合培养博士研究生, 现正从事高速光通信研究。



杨祥林男, 江苏宜兴市人, 南京邮电学院并兼任电子科技大学教授、博士生导师, 80 年代前从事微电子学教学与科研工作, 80 年代后从事光波电子学与光通信研究, 1997 年从东南大学调南京邮电学院工作, 出版著作 7 部, 发表学术论文 200 余篇, 获科技成果奖 9 项, 优秀教材奖 3 部, 现从事高速大容量光通信技术研究。