

高速光纤通信系统中抑制偏振模色散的新机制*

王 岚 赵文玉 王宏祥 纪越峰
(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要: 重点研究了偏振模色散、群速度色散、自相位调制三者之间在高速光纤通信系统中的相互作用, 从时域角度分析脉冲的演变, 从频域角度分析频谱的变化, 提出一定条件下, 啁啾、色散、自相位调制可以部分补偿偏振模色散的思想。通过对 40 Gbit/s 系统进行偏振模色散、群速度色散和自相位调制共同作用的仿真, 从统计意义上验证了它们之间的相互影响, 并找到最佳传输方案, 对系统设计提供了参考。

关键词: 光纤通信技术; 偏振模色散; 群速度色散; 自相位调制; 啁啾; 眼图代价

中图分类号: TN929 文献标识码: A

1 引 言

在日新月异的信息时代, 对于通信传输的容量和速率的需求也在不断提高, 正是这种需求推动了光纤通信的迅速发展。从技术角度看, 光纤通信主要面临两大问题: 衰减和色散。色散主要包括两类: 群速度色散和偏振模色散。近年来, 偏振模色散成为研究的热点, 由于它的随机特性, 至今也没有很完善的补偿方法, 大多还处于实验室的研究阶段。在大量的研究中, 较少有文献提及光纤传输中各种因素的综合考虑, 例如群速度色散、偏振模色散以及非线性效应的综合作用。本文正是从它们综合作用的结果, 去分析系统的传输性能, 希望对系统整体设计给出理论指导。

2 理论模型

2.1 偏振模色散

在一段光纤上, 由于存在本地双折射, 两个本征轴上的折射率不同, 导致了两个轴上出现了差分群延迟(DGD)。考虑整段光纤, 由于本地双折射的随机性, 使得各段之间的本征轴有着随机的夹角。对某一频率, 必定存在着正交的输入偏振态, 使得在一定的频率范围内, 输出的偏振态不随频率的变化而

变化, 我们称之为输入主偏振态(PSP), 相应的输出则被称为输出主偏振态。如果信号的输入偏振态与主偏振态一致, 则经过传输以后, 信号的形变最小。但是应该注意的是, 随着速率的提高, 脉冲的变窄, 信号谱宽已不能忽视, 此时偏振模色散的高阶效应将变得严重, 即由于主偏振态随频率的变化而引起的脉冲形变的加剧。

单独考虑偏振模色散时, 传输矩阵可以写为^[1]

$$\mathbf{T}(\omega) = \exp(-\alpha L) \exp[-j\bar{\beta}(\omega)L] \mathbf{M}(\omega), \quad (1)$$

其中, α 为光纤损耗, $\bar{\beta}(\omega) = [\beta_x(\omega) - \beta_y(\omega)]/2$, 是平均的相位常量, $\beta_x(\omega)$ 、 $\beta_y(\omega)$ 分别表示沿 x 方向和 y 方向的相位常量,

$$\mathbf{M}(\omega) = \begin{bmatrix} u_1(\omega) & u_2(\omega) \\ -u_2^*(\omega) & u_1^*(\omega) \end{bmatrix}, \\ |u_1(\omega)|^2 + |u_2(\omega)|^2 = 1$$

$\mathbf{M}(\omega)$ 可以分解为

$$\mathbf{M}(\omega) = \mathbf{R}(\omega)^{-1} \mathbf{D}(\omega) \mathbf{R}(\omega), \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{D}(\omega) = \begin{bmatrix} \exp\left[j\frac{\Delta\phi(\omega)}{2}\right] & 0 \\ 0 & \exp\left[-j\frac{\Delta\phi(\omega)}{2}\right] \end{bmatrix},$$

$$\Delta\phi(\omega) = [\beta_x(\omega) - \beta_y(\omega)]L,$$

$$\mathbf{R}(\omega) = \begin{bmatrix} m & n \\ -n^* & m^* \end{bmatrix},$$

$$m = \cos\theta \cos\varepsilon + j \sin\theta \sin\varepsilon,$$

$$n = \sin\theta \cos\varepsilon - j \cos\theta \sin\varepsilon,$$

$\theta = \theta(\omega)$, $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$ 分别表示主偏振态的方位角和椭圆度随频率的变化。

不考虑偏振损耗(PDL), 我们在时域中进行脉

* 国家 863 计划重点项目(2001AA122041)、国家自然科学基金项目(90104017)和教育部重大项目(0215)资助课题。

E-mail: wlan78@sina.com.cn

收稿日期: 2002-01-28; 收到修改稿日期: 2002-06-03

冲分析,设输入为

$$\mathbf{x}_{in}(t) = x_{in}(t)\mathbf{e}_{in}, \quad (3)$$

$x_{in}(t)$ 是信号的复包络, \mathbf{e}_{in} 表示输入的琼斯矢量:

$$\mathbf{e}_{in} = \begin{bmatrix} e_{inx} \\ e_{iny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varepsilon - j\sin\theta\sin\varepsilon \\ \sin\theta\cos\varepsilon + j\cos\theta\sin\varepsilon \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, θ, ε 分别表示输入偏振态的方位角和椭圆度, 假设输入是完全偏振光, 与频率无关。为了简化, 假设两个主偏振态的方向分别与 x 轴和 y 轴重合, 则此时输出为

$$\mathbf{X}_{out}(\omega) = T(\omega)\mathbf{X}_{in}(\omega)\mathbf{e}_{in} = X_{out}(\omega)\mathbf{e}_{out}(\omega), \quad (5)$$

$$X_{out}(\omega) = X_{in}(\omega)\exp(-\alpha L)\exp[-j\bar{\beta}(\omega)L], \quad (6)$$

$X_{in}(\omega)$ 是 $x_{in}(t)$ 傅里叶变换, $\mathbf{e}_{out}(\omega) = \mathbf{M}(\omega)\mathbf{e}_{in}$ 是输出的琼斯矢量。

对于一阶偏振模色散, 可以认为主偏振态在整个信号频域内是常量, 即: $\theta(\omega) = 0, \varepsilon(\omega) = 0$, 并且 $\Delta\phi(\omega) = \Delta\phi_0 + \Delta\phi_1(\omega)$, 此时输出可以写为

$$\mathbf{x}_{out}(t) = x_{out}(t + \Delta\phi_1/2)\mathbf{e}_{inx} + x_{out}(t - \Delta\phi_1/2)\mathbf{e}_{iny}, \quad (7)$$

其中

$$x_{out}(t) = \mathcal{F}^{-1}\{x_{in}(\omega)\exp(-\alpha L)\exp[-j\bar{\beta}(\omega)L]\}$$

从式(7)可以看出, 在时域上, 输出端有两个像, 它们的偏振方向相互正交, 差分群时延等于 $\Delta\phi_1$ ^[2]。

2.2 啁啾、自相位调制和群速度色散

如果同时考虑衰减、色散、非线性和偏振模色散, 则两个偏振方向的耦合方程可以写为^[3]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A_x}{\partial z} + \beta_{1x} \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i}{2}\beta_{2x} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2}A_x &= i\gamma\left[|A_x| + \frac{2}{3}|A_y|\right]A_x, \\ \frac{\partial A_y}{\partial z} + \beta_{1y} \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i}{2}\beta_{2y} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2}A_y &= i\gamma\left[|A_y| + \frac{2}{3}|A_x|\right]A_y, \end{aligned} \right\} \quad (8)1$$

其中, A 为光场的慢变包络振幅, z 为传输距离, α 是光纤损耗, γ 为光纤的非线性系数, β_2 为群速度色散系数。这里简单描述一下啁啾、色散和自相位调制的相互作用^[4~6]。

关于啁啾、色散和自相位调制如下结论:

1) 具有初始正啁啾的脉冲在反常色散光纤中出现初始窄化过程。

2) 考虑自相位调制与色散共同作用, 在正常色散区, 将加剧脉冲展宽速度; 在反常色散区, 将减缓脉冲展宽速度(但自相位调制将导致脉冲畸变);

3) 在一定条件下, 可以使色散效应与自相位调制效应互相抵消, 实现脉冲无畸变传输——孤子。

2.3 自相位调制、群速度色散和偏振模色散

从前面的分析中, 我们可以看到, 啁啾和色散, 自相位调制和色散都存在一种情况: 在反常色散光纤中, 若初始正啁啾参量或存在自相位调制, 可以使得脉冲窄化。我们注意到, 偏振模色散对脉冲的影响造成了脉冲的展宽, 而啁啾、色散、自相位调制的共同作用可以用来部分补偿偏振模色散^[7,8]。

再从频域角度进行分析。只考虑一阶偏振模色散的情况, 从(7)式可以看出输出的波形是由两个正交方向有一定相位差的两个像叠加而成。假设输入功率在两个方向上等分, x 轴方向的离散信号的表达式为 $x(n)$, 则 y 轴方向为 $x(n+m)$, 其中 m 表示时域上的平移。

若 $x(n)$ 的 N 点傅里叶变换为

$$x(k) = \mathcal{F}[x(n)], \quad (9)$$

则 $x(n+m)$ 的傅里叶变换为

$$\mathcal{F}[x(n+m)] = W_N^{-km}X(k), \quad (10)$$

这里

$$m = \frac{\tau_{\text{DGD}}}{T}N,$$

$$k = fT,$$

$$W_N = \exp(-j2\pi/N).$$

输出的频谱:

$$|X(k) + W_N^{-km}X(k)|^2 = 4|X(k)|^2\cos^2(\pi f\tau), \quad (11)$$

式中 f 为频率, T 为一个码元的周期。从(11)式可以看出: 一阶偏振模色散可以近似看为一个低通滤波器。

综合考虑自相位调制、群速度色散、偏振模色散, 在频域中自相位调制可以归结为啁啾。在光纤的反常色散区, 自相位调制产生一个正的频率啁啾, 使脉冲的前沿相对中心频率产生了红移, 脉冲的后沿产生了蓝移, 频谱展宽了, 但此刻脉冲形状并没有变化, 并不能抵御偏振模色散引起的脉冲展宽。如果考虑色散, 情况就不一样了。在光纤的反常色散区, 由于群速度色散的作用, 脉冲形状出现明显变化, 群速度色散和自相位调制的联合效应会引起脉冲窄化, 相应的频谱展宽。此时由于一阶偏振模色

散可以近似看为一个低通滤波器,当展宽的信号谱经过这样一个滤波的作用以后,高频部分被滤掉,这在一定程度上抵消了频谱的展宽,换句话说,展宽的频谱也削弱了偏振模色散所引起的高频滤波,综合作用的结果是部分补偿了偏振模色散的影响。

在后续的仿真实验中,我们采用分步傅里叶算法,即利用(8)式,设定一定步长,在每一步中都在频域内计算色散,包括色度色散和偏振模色散,然后回到时域内计算非线性,逐段进行。其中偏振模计算按照(1)~(7)式所述,一阶偏振模色散中每段主偏振态主轴一致,高阶偏振模色散时每段主偏振态之间的夹角随机选取。

将仿真分为两部分,第一部分验证我们的理论推导;第二部分仿真40 Gb/s光通信系统,以寻求最佳传输方案。

3 验证仿真结果

利用仿真来验证自相位调制-群速度色散-偏振模色散综合作用的结果。这里,选取固定的群延迟色散值(DGD/T为0.5)。

图1中(a)是只考虑一阶偏振模色散的情况,眼图的闭合是偏振模色散引起的脉冲展宽所致。图1(b)和图1(c)均是仅考虑自相位调制-群速度色散的情况,其中图1(b)为反常色散区,脉冲窄化,所以有突起,图1(c)为正常色散区,脉冲展宽。注意到图1(c)图和图1(a)图的相似性,我们可以想到利用图1(b)的条件可以抵制这种展宽。图1(d)是反常色散区偏振模色散-自相位调制-群速度色散共同作用的情况,正如我们所期望的,图1(d)之眼图相对图1(a)明显张开了,也就证明了在反常色散区,自

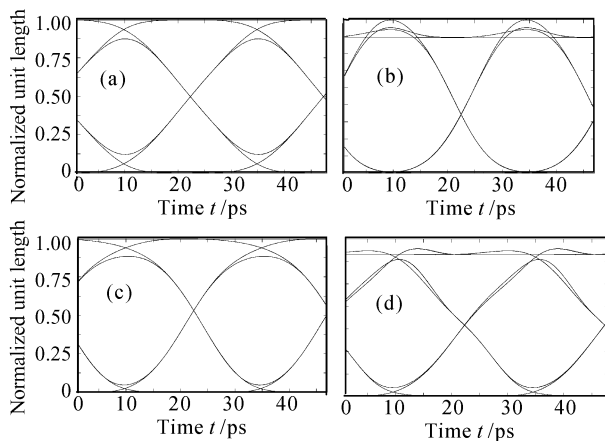


Fig. 1 Eye diagram due to self-phase modulation (SPM) and polarization mode dispersion (PMD)

相位调制可以部分补偿偏振模色散的推论。

已知自相位调制的作用可以等效为正啁啾,为了统一说明问题,在下面的实验中,通过眼图代价观察啁啾、色散和偏振模色散共同作用的结果。图2是眼图代价随群延迟色散的变化曲线,其中Q是我们定义的眼图代价,表示式为

$$Q(\text{dB}) = -20 \lg \frac{E_{\text{out}}^{\text{op}}}{E_{\text{in}}^{\text{op}}}, \quad (12)$$

实线是一阶偏振模色散引起的眼图代价,虚线是在反常色散光纤中,具有初始正啁啾脉冲受偏振模色散影响后的眼图代价。可以清楚地看到,后者偏振模色散的影响被部分削弱了(注意:这里并没有涉及偏振模色散的高阶效应,在后面的系统仿真中,我们将用统计的结果涵盖偏振模色散的所有情况)。

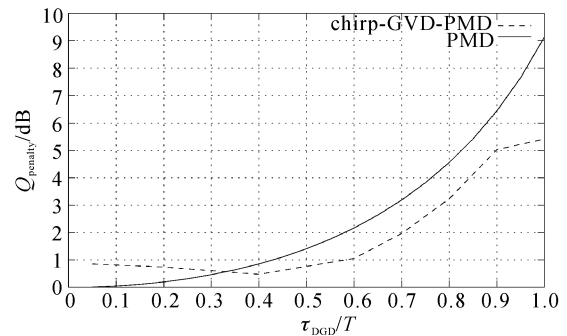


Fig. 2 1st-order polarization mode dispersion (PMD) induced Q

4 40 Gb/s 系统模型及仿真结果

4.1 系统仿真模型

由于偏振模色散的随机特性,我们还需要从统计意义上研究自相位调制、群速度色散、偏振模色散的相互作用。为了结合40 Gbit/s的光通信系统研究,我们建立了如图3所示的仿真模型。

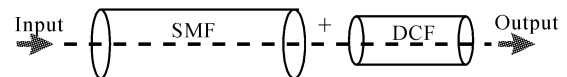


Fig. 3 System simulation model

为了更接近实际应用中的色散补偿系统,在仿真中采用单模光纤(SMF)+色散补偿光纤(DCF)的模型^[9]。一般说来,单模光纤的偏振模色散值较小,而色散补偿光纤的值相对较大,这也成为人们关注偏振模色散的一个原因,研究偏振模色散在两者级联系统中更有普遍应用意义。各段光纤的具体参量见表1。

Table 1 Simulation parameters

SMF	Fiber loss α / (dB/km)	0.2
	Dispersion coefficient / (ps/nm · km)	16.9
	Nonlinear-index coefficient of fiber γ / (m ² · W ⁻¹)	2.9×10^{-20}
	Effective core area of fiber / μm^2	80.0
	Total length z / km	100.0
	Segment	50
	DCF	Fiber loss α / (dB/km)
Dispersion coefficient / (ps/nm · km)		-80
Nonlinear-index coefficient of fiber γ / (m ² · W ⁻¹)		4.3×10^{-20}
Effective core area of fiber / μm^2		14.3
Total length z / km		21.125
Segment		10
Signal wavelength λ / nm		1550.0
Bit rate / (Gbit/s)		40

4.2 啁啾、群速度色散和偏振模色散的共同作用

我们先考虑啁啾和色散引起的脉冲窄化对偏振模色散的补偿作用。在功率比较小的情况下,自相位调制的作用可以忽略,所以选用输入功率是 0 的情况,单模光纤和色散补偿光纤的色散完全补偿。在这种情况下,如果没有偏振模色散,初始啁啾并不起作用,系统的代价非常小。但是有偏振模色散时,色散和偏振模色散的作用就使得单模光纤和色散补偿光纤不能完全补偿了,此时对啁啾的敏感也就加强了。

图 4 是偏振模色散随机产生 1000 次的结果,从图 4 可以看出,具有正初始啁啾的脉冲要比具有负初始啁啾的脉冲性能好。与单纯只有偏振模色散相比,脉冲正的初始啁啾极大地提高了系统的传输性能,而脉冲负的初始啁啾降低了系统的传输性能。

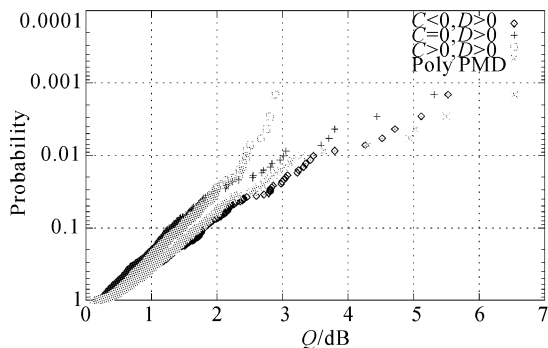


Fig. 4 Q probability distribution. C is chirp coefficient, D is dispersion coefficient

3.2 自相位调制、群速度色散和偏振模色散的共同作用

接下来我们自相位调制和色散引起的脉冲窄化

对偏振模色散的补偿作用。这里选用初始啁啾最好的一种情况,色散完全补偿。这时没有偏振模色散的情况下,为了更清楚的体现自相位调制的作用,我们采用概率外推的方式,将计算 1000 次得到的结果线性外推,得到概率为 10^{-5} 时的情况,根据群延迟色散的麦克斯韦分布,此时群延迟色散约为 20 ps。

图 5 是我们得到的在概率是 10^{-5} 时,眼图代价随输入功率的变化的曲线。可以看出,仅考虑自相位调制和群速度色散时,随着输入功率的不断增大,眼图代价逐渐上升,原因是即使两段光纤的色散完全补偿,但单模光纤中的群速度色散与自相位调制的作用要远大于色散补偿光纤中的作用(因为单模光纤中光功率较大),所以此时会出现色散过补偿的情况,同时功率再增大,由自相位调制引起的脉冲形状严重畸变,造成代价骤升。而当同时存在自相位调制,群速度色散和偏振模色散时,随着输入功率的增大,眼图代价没有上升,反而出现下降的趋势,并且在 10 dBm 附近达到了一个最小值。这进一步说明了,调整输入功率,利用自相位调制和色散的作用,可以部分补偿偏振模色散。如果再增大功率,自相位调制效应将导致系统恶化。

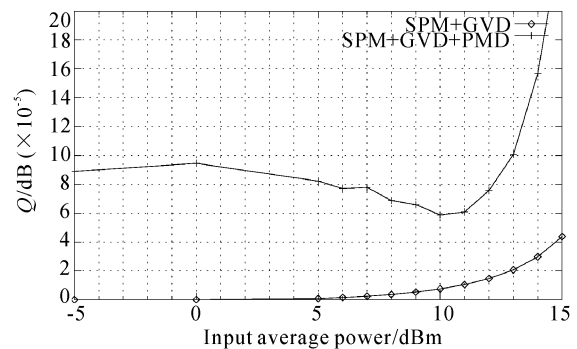


Fig. 5 Q influenced by input power (probability is 10^{-5})

本文讨论单模光纤和色散补偿光纤级联的情况,如果单独一段单模光纤,更为简单,此时只需考虑本身群速度色散的大小,输入功率,和偏振模色散的值,同样也可以找到一种配置,使得系统代价最小。

结论 本文主要分析了在光纤传输系统中偏振模色散,群速度色散和自相位调制之间的相互作用。提出了可以利用反常色散和初始正啁啾参量或是自相位调制的共同作用致使脉冲出现窄化的现象,来部分补偿偏振模色散引起的脉冲展宽。同时,从频谱的角度也解释了它们之间相互作用的结果。40 Gbit/s 的色散补偿系统的仿真结果,也进一步验证了理论的有效性。在偏振模色散影响较大的系统中,适当选择初始

啾啾和输入功率,可以优化系统性能。

参 考 文 献

- 1 Poole C D, Wagner R E. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030
- 2 Poole C D, Tkach R W, Charaplyvy A R *et al.*. Fading in lightwave systems due to polarization-mode dispersion. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(1):68~70
- 3 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*(非线性光纤光学). Transl. Hu Guojiang, Huang Chao. Tianjin: Tianjin University Press, 1992. 70~95
- 4 Satsuma I, Yajima N. Initial value problems of one-dimensional self modulation of nonlinear waves in dispersive media. *Supp. Prog. Theoret. Phys.*, 1997, **55**:284 (in Japanese)
- 5 Hasegawa A Kodama Y. Signal transmission by optical solitons in mono mode fiber. *Proc. IEEE*, 1981, **69**(9): 1145~1150
- 6 Nakazawa M, Kubota H. Optical soliton communication in a positively and negatively dispersion-located optical fiber transmission line. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(3):216~217
- 7 Zhou Zhiqiang, Tang Yuliang. Optimum schemes of dispersion compensation transmission systems using dispersion compensation fibers. *Laser Technique*(激光技术), 2000, **24**(5): 265~281(in Chinese)
- 8 Lin Ning, Yang Bojun, Zhang Xiaoguang *et al.*. Effects of initial pulse chirps On dispersion-managed soliton transmission. *J. Optoelectronic Laser* (光电子激光), 2001, **12**(2):185~188 (in Chinese)
- 9 Zhao Hongjing, Wu Chongqing, Xu Tianhui *et al.*. The evolution of NRZ in small nonlinear dispersion fiber and the investigation of nonlinearity after dispersion compensation. *J. Northern Jiaotong University*(北方交通大学学报), 1997, **21**(6): 105~111 (in Chinese)
- 10 Rao Min, Sun Xiaohan, Zhang Mingde. Second-order PMD effects on the high-speed propagation of gaussian pulses in single-mode optical fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11):1354~1357 (in Chinese)

A New Strategy for Inhibition PMD in High Bit-Rate Optical Transmission Systems

Wang Lan Zhao Wenyu Wang Hongxiang Ji Yuefeng

(Optical Communication center, Beijing University of Posts and Telecommunications,
Beijing 100876)

(Received 24 January 2002; revised 3 June 2002)

Abstract: The co-effects of the polarization mode dispersion (PMD), group velocity dispersion (GVD) and self-phase modulation (SPM) in high bit-rate transmission systems are studied. Both in time domain and frequency domain, the pulse evolutions are analyzed. It is proposed that chirp, GVD and SPM can be used to compensate PMD in certain conditions, for example, in the positive dispersion fiber ($\beta_2 < 0$), if selecting the pulse with initial positive chirp ($C > 0$) or adjusting the input power, both can compensate PMD. The simulation results demonstrate that there exists the optimized input power to minimize the system penalty (in our simulation model that is 10 dBm). The optimization strategy would be helpful to the design of the 40 Gbit/s optical transmission system.

Key words: fiber communication technology; polarization mode dispersion (PMD); group velocity dispersion (GVD); self-phase modulation (SPM); chirp; eye penalty