

文章编号: 1004-3806(2002)03-0211-03

## 在线同步调制对偏振模色散补偿的研究

王 晶 苗洪利

(青岛海洋大学物理系, 青岛, 266003)

**摘要:** 通过解在线同步调制的非线性耦合方程, 揭示在线同步调制对偏振模色散补偿的原理; 数值计算了在线同步调制对 40Gbit/s 脉冲传输的偏振模色散的补偿作用。结果表明, 同步调制可使脉冲传输距离增大 3 倍, 大大改善了脉冲传输性能, 有效地对偏振模色散进行了补偿。

**关键词:** 在线同步调制; 偏振模色散; 补偿

中图分类号: O436.3 文献标识码: A

## Compensation of polarization mode dispersion by in line synchronous modulation

Wang Jing, Miao Hongli

(Department of Physics, Qingdao University of Ocean, Qingdao, 266003)

**Abstract:** It reveals the principle of compensation PMD by nonlinearly coupled equation with in line synchronous modulation. The compensation of PMD by in line synchronous modulation at 40Gbit/s is computed. The maximum transmission distance is increased three times and the property of transmission system is improved by in line synchronous modulation. The PMD is compensated effectively by in line synchronous modulation.

**Key words:** in line synchronous modulation; polarization mode dispersion; compensation

### 引 言

随着光通信技术的进步, 系统的传输速率不断提高, 系统容量不断扩大。现有的一些光通信网络升级后, 偏振模色散效应的影响已经严重破坏了系统的性能。尤其是当偏振模色散系数与一个比特时隙可比时, 无论是对于直接检测系统还是相干检测系统, 都无疑是一个极限的限制因素<sup>[1]</sup>。所以, 如何消除偏振模色散对光通信系统及全光网络的不利影响成了光通信领域的研究热点。

虽然现在生产的光纤偏振模色散很小, 但是, 由于早期敷设的光纤其偏振模色散都比较大, 在短期内还不可能被完全取代。为了充分利用已有资源, 人们都积极开展偏振模色散补偿的研究。国际上有关偏振模色散补偿的研究已有许多报道<sup>[2,3]</sup>, 但我国对偏振模色散补偿的研究才刚刚开始<sup>[4]</sup>, 需要迎头赶上。可见, 关于如何对偏振模色散进行补偿是一项非常重要的工作。我们采用在线同步调制方法补偿了 40Gbit/s 传输系统的偏振模色散, 效果

比较明显。

### 1 偏振模色散对系统产生影响的理论分析

由于偏振模色散是一个具有统计特性的量, 其随机性使得对于这种因素的定量分析变得非常困难。一方面由随机模式耦合使光纤的瞬态响应为不确定值, 只能依据其统计特性进行估算。另一方面模式耦合的相位敏感特性使得光纤的瞬态响应对于周围的环境因素相当敏感。偏振模色散的这种敏感性导致了高速率光通信系统基带信号的衰落, 这种衰落无论是对于数字系统还是模拟系统来说都是不利的。因此, 鉴于偏振模色散的这种统计特性我们并不关心它的瞬时值, 而是把关心的焦点集中在平均值上。

为了更好地讨论偏振模色散效应, 忽略光纤损耗, 这时沿双折射光纤两主轴传输的两个正交偏振分量可用归一化的非线性耦合方程描述。其方程为<sup>[5]</sup>:

$$i\left[\frac{\partial u}{\partial \xi} + \delta \frac{\partial u}{\partial \tau}\right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \left[|u|^2 + \frac{2}{3}|v|^2\right] u = 0 \quad (1a)$$

$$i\left[\frac{\partial v}{\partial \xi} - \delta \frac{\partial v}{\partial \tau}\right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + \left[|v|^2 + \frac{2}{3}|u|^2\right] v = 0 \quad (1b)$$

**作者简介:** 王 晶, 女, 1962 年 2 月出生。副教授。主要从事非线性光学及光通信的研究。

收稿日期: 2001-05-21

式中,  $\xi = \frac{z}{L_D}$ ,  $\delta = \frac{(\beta_{1x} - \beta_{1y}) t_0}{2|\beta_2|}$ ,  $\tau = \frac{t - z/v_g}{t_0}$ , 式中,  $u, v$  分别表示两偏振分量的归一化振幅,  $\xi$  是沿光纤传输归一化距离,  $z$  是光纤长度,  $\delta$  是归一化光纤双折射参数,  $\tau$  是归一化时间,  $t_0$  是入射脉冲的宽度,  $L_D$  为色散长度,  $v_g$  为平均群速度。在归一化过程中, 假设了群速度色散系数  $\beta_{2x} = \beta_{2y} = \beta_2$ 。

方程(1)中  $\delta$  因子项代表偏振模色散, 通常用偏振模色散系数  $D_p$  来描述偏振模色散效应的强弱,  $D_p = \sqrt{32Z_h/3\pi}(t_0\delta/L_D)$ ,  $1/2$  因子项代表群速

$$i\left[\frac{\partial u}{\partial \xi} + \delta \frac{\partial u}{\partial \tau}\right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \left[|u|^2 + \frac{2}{3}|v|^2\right] \\ i\left[\frac{\partial v}{\partial \xi} - \delta \frac{\partial v}{\partial \tau}\right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + \left[|v|^2 + \frac{2}{3}|u|^2\right]$$

对比方程(2)与方程(1)可知, 方程(2)的右边表示在线同步调制技术的机理。其中  $g$  是增益, 补偿同步调制产生的附加损耗。 $\mu$  是同步调制深度,  $\Omega_m$  是调制角频率,  $\varepsilon$  是滤波强度, 如果满足  $\mu\Omega_m^2 < \frac{8\varepsilon}{\pi^2}$ , 则  $g = \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\pi^2\mu\Omega_m^2}{24}$ 。

### 3 数值计算与讨论

以方程(2)为模型, 我们数值计算了 40Gbit/s 归零码(RZ)、非归零码(NRZ)及孤子传输系统在 PMD 作用下可传输的最大距离; 如果每隔 50km 加一同步调制器, 发现系统可传输的最大距离成倍增长。说明在线同步调制克服了 PMD 作用, 无疑, 这是一种补偿偏振模色散的可行方法。

#### 3.1 同步调制对不同偏振模色散的补偿

如果采用 64bit 伪随机码, 脉冲为超高斯型, 其阶数  $m = 1.436$ , 群速度色散  $D = 0.6\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^{-1})$ , 脉宽等于 3.2ps, 计算点数取 4096。同步调制器的参数为  $\varepsilon = 0.3$ ,  $\mu = 0.304$ , 由于 PMD 的随机性, 我们重复计算 20 次, 取最大传输距离的平均值, 计算结果如图 1。

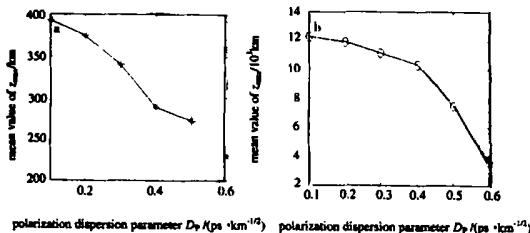


Fig. 1 Maximum transmission distances versus the PMD  
a—without the synchronous modulator b—with the synchronous modulator

度色散, 常用色散系数  $D$  表示群速度色散效应强弱,  $D = -2\pi c \beta_2 / \lambda^2$ ,  $2/3$  因子项代表交叉相位调制。

### 2 偏振模色散补偿数值计算的理论分析

同步调制技术是指每当脉冲传输一段距离后, 形状发生了一定变化, 此时让脉冲经过一个振幅同步调制器和固定频率滤波器, 可以使其变化的形状恢复到原形, 从而达到提高系统传输性能的目的。

如采用在线同步调制技术对偏振模色散进行补偿, 两偏振分量所满足的非线性耦合方程为<sup>[6]</sup>:

$$i\left[\frac{\partial u}{\partial \xi} + \delta \frac{\partial u}{\partial \tau}\right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \left[|u|^2 + \frac{2}{3}|v|^2\right] u = igu + i\varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + i\mu/\cos(\Omega_m \tau) - 1] u \quad (2a)$$

$$i\left[\frac{\partial v}{\partial \xi} - \delta \frac{\partial v}{\partial \tau}\right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + \left[|v|^2 + \frac{2}{3}|u|^2\right] v = igv + i\varepsilon \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + i\mu/\cos(\Omega_m \tau) - 1] v \quad (2b)$$

图 1a 是 RZ 码在 PMD 作用下, 脉冲传输最大距离随 PMD 系数变化曲线, 图 1b 为在相同条件下每 50km 加一同步调制器脉冲传输最大距离随 PMD 系数变化曲线。比较两图看到: 偏振模色散系数越小, 同步调制的效果越好, 当  $D_p$  在 0.1 到 0.4 之间, 脉冲传输距离增加 3 倍; 当  $D_p = 0.5$ , 补偿前后脉冲传输最大距离分别为 272km 和 750km; 当  $D_p = 0.6$ , 补偿前后脉冲传输最大距离分别为 230km 和 365km, 很显然效果较前面的相差较大。这是因为 PMD 越大, 对脉冲的影响越严重, 导致脉冲形状及中心位置在较短的距离内发生较大变化, 那么在 50km 处再进行同步调制, 可能很困难。所以, 应调整同步调制器的位置, 以获得最佳效果。

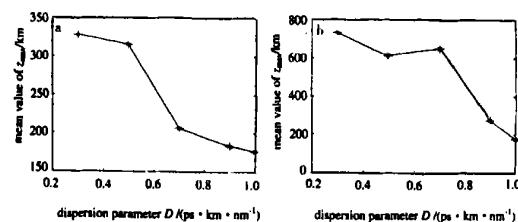


Fig. 2 The mean values of the maximum transmission distance versus GVD

a—without the synchronous modulator b—with the synchronous modulator

如果偏振模色散不变,  $D_p = 0.5$ , 群速度色散分别为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 和 1.0, 脉冲最大传输距离的变化见图 2。图 2a 是脉冲最大传输距离随着群速度色散变化曲线, 图 2b 是每 50km 处加同步调制时脉冲最大传输距离随着群速度色散变化曲线。比较两图发现, 在  $D$  为 0.3 和 0.5 时同步调制可使脉冲最大传输距离增大 2 倍,  $D = 0.7$ , 同步调制结果最佳, 最大传输距离增大 3 倍,  $D$  为 0.9 和 1.0, 同

步调制作用很弱。由此可知,对于不同的群速度色散,同步调制器的位置也应有所不同。

### 3.2 同步调制对不同占空比情况下偏振模色散的补偿

如果取占空比分别为 0.25, 0.50, 0.75 和 1.0,  $D = 0.6\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^{-1})$ ,  $D_p = 0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ , 我们计算了脉冲传输最大距离随占空比变化曲线, 如图 3 所示。

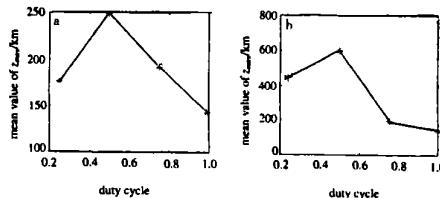


Fig. 3 Maximum transmission distances versus the duty cycle with  $D = 0.6\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^{-1})$ ,  $D_p = 0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$   
a—without the synchronous modulator b—with the synchronous modulator

图 3a 是在相同 PMD 情况下, 不同占空比对应脉冲传输最大距离。图 3b 是在 50km 处加同步调制器, 不同占空比对应脉冲传输最大距离。对于 RZ 码, 无论是否进行同步调制, 都存在一个最佳占空比, 即为 0.50。当占空比较小时, 在线同步调制效果非常显著, 脉冲传输最大距离增加一倍多; 当占空比等于 0.75, 同步调制作用很弱。对于 NRZ 码, 同步调制作用最弱。这是由于占空比较大时, 对于超高斯脉冲 PMD 作用比较弱所致。

### 3.3 同步调制对不同码型传输偏振模色散补偿后的效果

当传输不同码型时, 采用同步调制对 PMD 进行补偿, 通过眼图判断脉冲传输性能。群速度色散  $D = 0.6\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^{-1})$ , 偏振模色散  $D_p = 0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ , 在  $Z = 125\text{km}$  处的接收眼图见图 4。

图 4a 和图 4b 是 RZ 码在调制前后的眼图, 图 4c 和图 4d 是 NRZ 码在调制前后的眼图, 图 4e 和图 4f 是孤子在调制前后的眼图。总体来说, 同步调制使眼图的张开度增大, 系统性能变好。比较图 4b,

图 4d 和图 4f 看到, 孤子的眼图张开度最大, 表明孤子传输的噪声容限大; 而且, 孤子传输眼图的闭合斜率也最大, 表示孤子传输时对抽样定时误差非常敏感。其次, RZ 码比 NRZ 码的传输性能要好。可见, 同步调制对孤子传输的控制作用最强, 说明在线同步调制不仅减小了 PMD 效应, 而且也减小了孤子之间的相互作用, 这种同步调制对偏振模色散进行补偿的方法更适合于孤子传输。

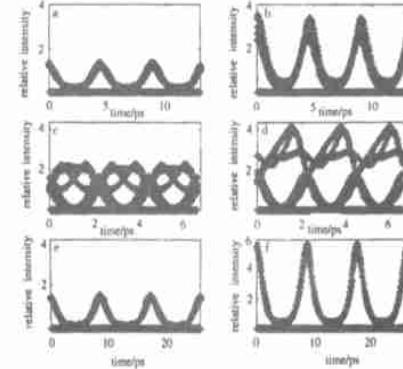


Fig. 4 Eye patterns at 125km with the different formats, without the synchronous modulator (a) RZ, (c) NRZ, (e) soliton, with the synchronous modulator (b) RZ, (d) NRZ, (f) soliton

综上所述, 对于高速率传输系统, PMD 对脉冲的影响在时域上表现为脉冲形状的展宽, 这种展宽是随机的, 而同步调制是在时域上, 将发生形变的脉冲通过振幅调制, 恢复原形, 从而提高脉冲的传输性能。上面的理论和数值分析表明同步调制技术对 3 种码型系统的 PMD 均有很好的补偿作用, 使脉冲的最大传输距离成倍增长, 有效地提高了脉冲的传输质量, 不可否认, 这是一种补偿偏振模色散的很好方法。

### 参 考 文 献

- [1] Ono T, Yamazaki S, Shimizu H et al. J Lightwave Technol, 1994 (12): 891~ 898.
- [2] Sahara A, Kubota H, Nakazawa M. Electron Lett, 1999 (35): 76~ 78.
- [3] Hakki B W. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(1): 121~ 123.
- [4] 龚岩栋, 关雅莉, 简水生. 光学学报, 1997(17): 731~ 736.
- [5] Menyuk C R. Opt Lett, 1987, 12(8): 614~ 616.
- [6] Matsumoto M, Akagi Y, Hasegawa A. J Lightwave Technol, 1997 (15): 584.

(上接第 222 页)

### 参 考 文 献

- [1] Chilla J L A, Rocca J J. J O S A, 1996, B13(12): 2841~ 2851.
- [2] Rocca J J, Marconi M C, Chilla J L A et al. IEEE Selected Topics in Quantum Electronics, 1995, 1(3): 945~ 948.

- [3] Rocca J J, Clark D P, Chilla J L A et al. Phys Rev Lett, 1996, 77 (8): 1476~ 1679.
- [4] London R A. Phys Fluids, 1988, 31(1): 184~ 192.
- [5] 邵云峰, 张国平. 强激光与粒子束, 1992, 4(2): 181~ 185.
- [6] 李英骏, 许爱国, 彭翰生 et al. 计算物理, 1998, 15(1): 48~ 52.