

偏振模色散补偿系统

刘秀敏^{1 2}, 李朝阳¹, 李荣华¹, 杨伯君¹, 张晓光¹

(1. 北京邮电大学 理学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘 要: 以偏振主态原理为基础, 利用高双折射光纤作为 PMD 补偿器, 在实验上实现了 0.50 ps 的偏振模色散补偿。这对于长距离, 10 Gbit/s 以上的光通信系统具有重要的实际意义。

关键词: 偏振主态; 高双折射光纤; PMD 补偿器; 偏振模色散

中图分类号: O436.3 文献标识码: A

Polarization Mode Dispersion Compensation Systems

LIU Xiu-min^{1 2}, LI Chao-yang¹, LI Rong-hua¹, YANG Bo-jun¹, ZHANG Xiao-guang¹

(1. School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on the principal states of polarization, polarization mode dispersion (PMD) compensation is experimentally realized by using high-birefringence fiber as a PMD compensator. It is of practical importance for long distance optical communication systems with bit rate ≥ 10 Gbit/s.

Key words: principal states of polarization; high-birefringence fiber; PMD compensator; polarization mode dispersion

1 引言

偏振模色散(PMD)是指两个正交偏振主态之间所产生的最大时延差。当系统的比特率达到或超过 10 Gbit/s 时, 必须考虑偏振模色散所造成的影响^[1]。对于 40 Gbit/s 的高速时分复用(OTDM)系统, 在传输 40 km 以后, 尽管对系统进行了一阶和高阶群速度色散的补偿, 发现脉宽仍由初始的 0.98 ps 展宽到 1.6 ps, 经研究发现这是由偏振模色散造成的, 说明在皮秒量级的高速系统中偏振模色散问题已很严重。另外, 过去已敷设的光纤偏振模色散都比较大^[2], 在此情况下, 必须对偏振模色散进行补偿。由于偏振模色散的产生与外界的微扰变化有关, 即它

是随外界条件变化的随机量, 因此偏振模色散的补偿不像群速度色散那样容易实现。偏振模色散是实现高速光通信所必须克服的问题, 为此各国的科技人员都投入大量的精力来研究实现偏振模色散补偿的方法^[36]。他们的工作有共同的特点, 就是利用高双折射光纤实现偏振模色散的补偿。本文以 C. D. Poole 等人^[7]提出的偏振主态原理为基础, 利用高双折射光纤作为 PMD 补偿器, 在实验上实现了 0.50 ps 的偏振模色散补偿。

2 理论分析

对于脉冲在光纤里的传输, C. D. Poole 等人提出了偏振主态的理论^[7], 其基本原理是: 如果无偏振相关的损耗, 则一定长度的光纤可由一复数的传输矩阵 $T(\omega)$ 来描述。当某一光场 E_a 在光纤里传输时, 输出场可以表示为

$$E_b = T(\omega) E_a \tag{1}$$

式中 ω 是入射传输场的频率, $T(\omega) = e^{i\phi(\omega)} U(\omega)$, β

收稿日期: 2001 - 02 - 25。
基金项目: 363 组长基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目(60072042); 教育部博士点基金资助项目; 北京邮电大学基金资助项目。

(ω)是复相位系数, $\mathbf{u}(\omega)$ 是一么正矩阵, $\mathbf{u}(\omega)=\begin{bmatrix} u_1(\omega) & u_2(\omega) \\ -u_2^*(\omega) & u_1^*(\omega) \end{bmatrix}$,并且 $|u_1|^2+|u_2|^2=1$ 。

输入输出复场矢量 $E_{a,b}$ 可以表示为

$$\mathbf{E}_{a,b}=\begin{bmatrix} E_{a,b}^x \\ E_{a,b}^y \end{bmatrix}=\varepsilon_{a,b}e^{i\phi_{a,b}}\hat{\mathbf{e}}_{a,b}\tag{2}$$

式中 $\varepsilon_{a,b}$ 是场的振幅, $\phi_{a,b}$ 是场的相位, $\hat{\mathbf{e}}_{a,b}$ 是偏振态的单位复矢量。

我们知道,对于长距离的光纤,由于受到制造工艺及各种外界条件的影响,本征偏振模的概念不再具有实际意义。但在实验中发现存在这样一些情况,对于某一些正交偏振态,虽然输出的偏振态不再是原来的偏振态方向,但仍然是正交的,并且其输出偏振态不随频率变化。下面我们从理论上证明这些特殊偏振态的存在。假设入射场是固定的,即不随频率变化,我们分别对式(1)和式(2)求导,即

$$\frac{d\mathbf{E}_b}{d\omega}=\frac{d\mathbf{T}}{d\omega}\mathbf{E}_a=e^{\beta}[\beta'\mathbf{u}+u']\mathbf{E}_a\tag{3}$$

$$\frac{d\mathbf{E}_b}{d\omega}=\left[\frac{1}{\varepsilon_b}\varepsilon'_b+i\phi'_b\right]\mathbf{E}_b+\varepsilon_be^{i\phi_b}\frac{d\hat{\mathbf{e}}_b}{d\omega}\tag{4}$$

式(3)和式(4)的左侧相等,并且把 $\mathbf{E}_b=e^{i\phi_b}\mathbf{u}(\omega)\mathbf{E}_a$ 代入,则

$$e^{\beta}[\beta'\mathbf{u}+u']\mathbf{E}_a=\left[\frac{1}{\varepsilon_b}\varepsilon'_b+i\phi'_b\right]e^{i\phi_b}\mathbf{u}(\omega)\mathbf{E}_a+\varepsilon_be^{i\phi_b}\frac{d\hat{\mathbf{e}}_b}{d\omega}\tag{5}$$

$$\varepsilon_be^{i\phi_b}\frac{d\hat{\mathbf{e}}_b}{d\omega}=e^{\beta}\left[u'+\left(\beta'-\frac{1}{\varepsilon_b}\varepsilon'_b-i\phi'_b\right)\mathbf{u}\right]\mathbf{E}_a\tag{6}$$

如果令

$$k=\phi'_b+i\left(\beta'-\frac{1}{\varepsilon_b}\varepsilon'_b\right)\tag{7}$$

则

$$\varepsilon_be^{i\phi_b}\frac{d\hat{\mathbf{e}}_b}{d\omega}=e^{\beta}[u'-iku]\mathbf{E}_a\tag{8}$$

从实验结果我们知道输出偏振态与频率无关, $\frac{d\hat{\mathbf{e}}_b}{d\omega}=0$ 。则

$$[u'-iku]\mathbf{E}_a=0\tag{9}$$

这是个本征方程,有解的条件为

$$\det|u'-iku|=0\tag{10}$$

求出本征值

$$k=\sqrt{|u'_1|^2+|u'_2|^2}\tag{11}$$

把本征值代入本征方程,得

$$\hat{\mathbf{e}}_{a\pm}=e^{i\rho}\begin{bmatrix} \frac{(u'_2-i k_{\pm}u'_2)}{D_{\pm}} \\ -\frac{(u'_1-i k_{\pm}u'_1)}{D_{\pm}} \end{bmatrix}\tag{12}$$

式中 ρ 是任意相位,

$$D_{\pm}=\sqrt{\{2k_{\pm}[k_{\pm}-\text{Im}(u_1^*u'_1+u_2^*u'_2)]\}}.$$

并且发现

$$\hat{\mathbf{e}}_{a+}\cdot\hat{\mathbf{e}}_{a-}^*=0,\hat{\mathbf{e}}_{a\pm}\cdot\hat{\mathbf{e}}_{a\pm}^*=1,\hat{\mathbf{e}}_{b+}\cdot\hat{\mathbf{e}}_{b-}^*=0,\hat{\mathbf{e}}_{b\pm}\cdot\hat{\mathbf{e}}_{b\pm}^*=1\tag{13}$$

$\hat{\mathbf{e}}_{a+}$ 和 $\hat{\mathbf{e}}_{a-}$ 是一对正交偏振入射态, $\hat{\mathbf{e}}_{b+}$ 和 $\hat{\mathbf{e}}_{b-}$ 是一对正交偏振输出态。

由前面的结果可以得到两个正交偏振方向的时延为

$$\tau_{\pm}=\text{Im}(\beta')\pm\sqrt{|u'_1|^2+|u'_2|^2}\tag{14}$$

则两个偏振方向的时延差为

$$\Delta\tau=\tau_+-\tau_-=2\sqrt{|u'_1|^2+|u'_2|^2}\tag{15}$$

从上面的推导可以发现,单模光纤中确实存在一些特殊的偏振态,对于每一频率均存在一对输入正交的偏振态,其相应的输出也是一对正交的偏振态。如果假定光纤中的损耗与偏振无关,当输入偏振态的频率变化时,在一定的频率变化范围内,输出的正交偏振态不随频率变化,亦即输出偏振态对频率的一阶色散(一阶导数)为零。我们称这样的偏振态为偏振主态。而在两个输出偏振主态方向上所造成的时延差即为一阶偏振模色散。

正是基于这样的结论,任何进入光纤的光波都可以向其两个正交的偏振主态方向投影,而在两个偏振主态方向的传播速度是不同的,光波一部分传输速度快,另一部分传输速度慢,则在输出端产生时延差,导致偏振模色散。那么,如果我们让传输速度慢的光波进入快的偏振主态方向,传输速度快的光波进入慢的偏振主态方向,经过了一定长度后,在输出端就会实现偏振模色散的补偿。基本原理如图1和图2所示。下面我们基于这一理论基础对偏振模色散的补偿系统进行论述。

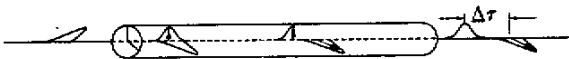


图 1 在短光纤中偏振模色散的产生

Fig.1 Generation of PMD in short fiber

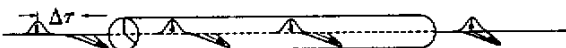


图 2 在短光纤中偏振模色散的补偿

Fig.2 Compensation for PMD in short fiber

3 偏振模色散补偿系统

偏振模色散补偿系统的实验装置如图 3 所示。

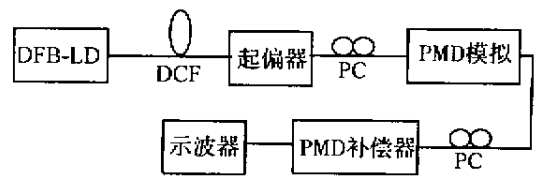


图 3 偏振模色散补偿系统的实验装置图
Fig.3 Experimental setup for PMD system

偏振模色散补偿系统工作原理是 :由半导体激光器产生连续光源 ,并经 2.5 G 的微波源调制产生脉冲信号 ,经色散补偿光纤(DCF)即色散值较大的正常色散光纤后 ,再经起偏器 ,进入 PMD 模拟器 ,再到 PMD 补偿器 ,并通过示波器来观测脉冲波形的变化。

在实验系统中 ,加入 DCF 光纤可实现消啁啾和脉冲压缩 ,其目的是减小由于脉冲啁啾和脉冲宽度对实验结果造成的影响。压缩前的脉冲波形如图 4 所示。压缩后的脉冲波形如图 5 所示。起偏器的作用是得到完全线偏振光。PMD 模拟器所产生的偏振模色散可以在 050 ps 之间变化。PMD 补偿器主要是由高双折射光纤组成的 ,最大可补偿的偏振模色散为 50 ps。如果实现完全补偿 ,则在示波器中观察到的脉冲波形与图 5 的相同。下面我们简要验

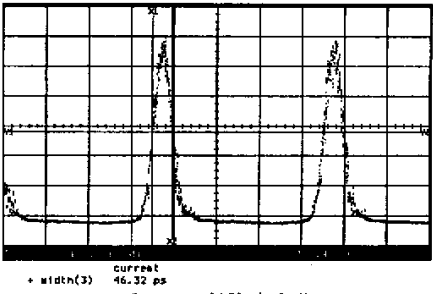


图 4 入射脉冲波形
Fig.4 Incident pulse wave

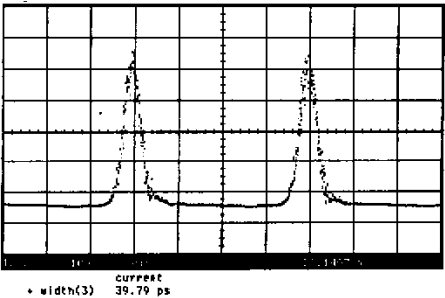


图 5 通过 DCF 光纤后的脉冲波形(脉冲被压缩了 7 ps)
Fig.5 Pulse wave through DCF fiber(7 ps suppression)

证这套系统的可行性。

如果 PMD 模拟器产生 20 ps 的偏振模色散 ,如图 6 所示 ,与图 5 对比 ,脉冲宽度展宽了 20 ps。通过 PMD 补偿器 ,利用偏振控制器(PC)来调节补偿量 ,补偿后的结果如图 7 所示。残余的偏振模色散所造成的时延差小于 2 ps ,符合偏振模色散补偿所要求的误差范围。实现了偏振模色散的补偿。

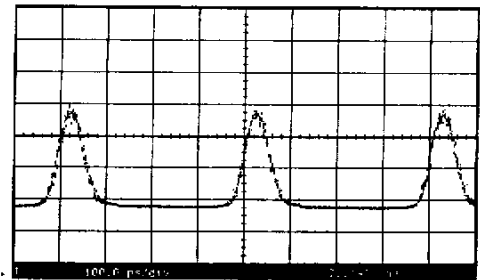


图 6 通过 PMD 模拟器后的脉冲波形
Fig.6 Pulse wave through PMD analogue

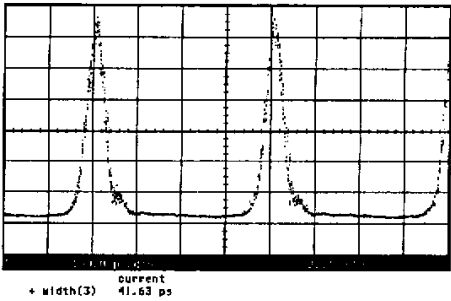


图 7 通过 PMD 补偿器后的脉冲波形
Fig.7 Pulse wave through PMD compensator

当偏振模色散造成的时延差为 50 ps 时 ,脉冲波形如图 8 所示。这里从另一个角度讲 ,如果当脉冲通过 PMD 模拟器后恰好出现快的偏振主态进入 PMD 补偿器的快偏振主态 ,慢的偏振主态进入 PMD 补偿器的慢偏振主态 ,那么在 PMD 补偿器后

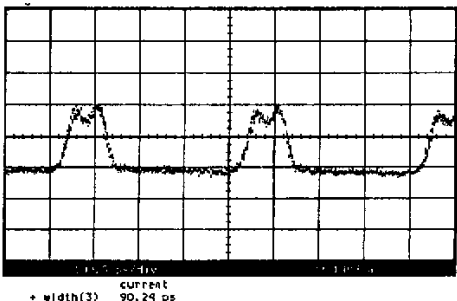


图 8 通过 PMD 模拟器后的脉冲波形(PMD 所造成的时延差为 50 ps)
Fig.8 Pulse wave through PMD analogue(time delay difference of 50 ps)

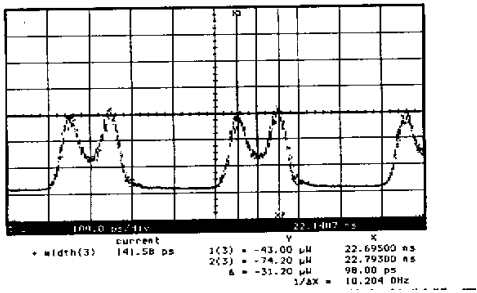


图 9 通过 PMD 补偿器后的脉冲波形 (调节偏振控制器, 可以实现偏振模色散达到 100 ps)

Fig.9 Pulse wave through PMD compensator(adjusting polarization controller so as to realize PMD of 100 ps)

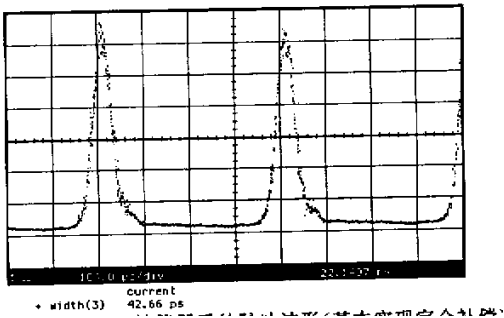


图 10 通过 PMD 补偿器后的脉冲波形 (基本实现完全补偿)

Fig.10 Pulse wave through PMD compensator

的示波器应该出现近 100 ps 的偏振模色散。在实验过程中确实出现了这样的情况,证实了我们的预测。如图 9 所示,脉冲宽度达到了 141 ps。调节偏振控制器,出现与上面相反的情况,实现偏振模色散的补偿,即脉冲形状复原,实验结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,与图 5 对比,脉冲宽度相差为 3 ps 左右,符合偏振模色散补偿所要求的误差范围,实现了偏振模色散的补偿。

我们多次调节 PMD 模拟器来产生大小不同的偏振模色散,通过 PMD 补偿器都能实现补偿,并且具有重复性,这说明了本实验系统的可行性。

4 结论

综上所述,偏振模色散可以通过短距离的高双

折射光纤实现补偿,并且本实验通过高双折射光纤实现了 050 ps 之间的偏振模色散的补偿,实验结果的误差量符合偏振模色散补偿所要求的误差范围。

参考文献：

[1] Shieh W. Principal states of polarization for an optical pulse [J]. IEEE Photon. Technol. Lett. ,1996 ,11(6) 677 - 679 .
[2] Galtarossa A , Gianello G , Someda C G , et al . Large polarization mode dispersion in fiber optic cables[J]. J. Lightwave Technol. ,1996 , 14 : 42 - 48 .
[3] Machida S , Kimura T . Polarization conservation in single-mode fibers[J]. Electron. Lett. ,1981 ,17 494 - 495 .
[4] Hinz S , Sandel D ,Dierolf Y ,et al. Polarization mode dispersion compensation for 6 ps , 40 Gbit/s pulses using distributed equalizer in LiNbO₃[J]. Electron. Lett. , 1999 , 35 : 185 - 186 .
[5] Watley D A ,Farley K S ,Shaw B J ,et al. Compensation of polarization-mode dispersion exceeding one bit period using single high-birefringence fibr[J]. Electron. Lett. ,1999 , 35 : 1094 - 1095 .
[6] Zou Linsen , Lei Fei. The measurement of polarization mode dispersion in single mode optical fibers by optical spectrum analyzer[J]. Journal of China Institute of Communications , 1999 , 20 : 75 - 78 .
[7] Poole C D ,Wagner R E. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers [J]. Electron. Lett. ,1986 22 : 1029 - 1030 .

作者简介：

刘秀敏(1971 -) ,女 ,1995 年于内蒙古大学获硕士学位 ,1998 年于北京邮电大学获博士学位 ,现在美国 AT&T 实验室工作 ,主要从事光纤通信系统中偏振模色散的研究。

E-mail :liuxiumin@263.net