

文章编号: 0258-7025(2005)01-0079-04

# 偏振度作为反馈信号的偏振模色散 补偿系统的性能研究

刘玉敏<sup>1,2</sup>, 俞重远<sup>1,2</sup>, 黄聪颖<sup>3</sup>, 张晓光<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 北京邮电大学理学院, 北京 100876

<sup>2</sup> 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876; <sup>3</sup> 中国船舶重工集团公司 726 研究所, 上海 200025

**摘要** 在以信号偏振度(DOP)作为反馈信号的偏振模色散补偿系统中,提出了分别利用带通和带阻滤波器来改进反馈信号的灵敏度和监测窗口的的方法。比较了 40 Gbit/s 归零(RZ)码传输系统和 10 Gbit/s 非归零(NRZ)码传输系统中滤波器在改进反馈信号监测性能方面的作用,对滤波带宽的选择作了定性的数值分析。结果表明,通过滤波器的引入,可在很大范围内避免补偿算法在搜索中出现局部极值的可能,减少了迂回搜索,改进了补偿效果,同时有利于补偿系统的稳定。

**关键词** 光通信;偏振模色散补偿;偏振度椭圆

**中图分类号** O 436.3;TN 929.11 **文献标识码** A

## Investigation of the PMD Compensation System with the DOP as a Feed Back Signal

LIU Yu-min<sup>1,2</sup>, YU Zhong-yuan<sup>1,2</sup>, HUANG Cong-ying<sup>3</sup>, ZHANG Xiao-guang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Communication and Lightwave Technologies Ministry of Education, Beijing 100876

<sup>3</sup> No. 726 Institute of China Ship Building Industry Corporation, Shanghai 200025, China

**Abstract** The monitoring performance of monitor window and degree of polarization (DOP) sensitivity to defferetial group delay (DGD) can be improved greatly by using the band-pass and band-reject filters are presented in the polarization mode dispersion (PMD) compensation system, where the DOP is used for the feed back signals. A comparison is made for the filters in improving the monitoring performance of the feed back signals between the 40 Gbit/s return-to-zero (RZ) and 10 Gbit/s nonretrun-to-zero (NRZ) transmission system, and numerical analysis is made for the selection of the bandwidth of the filters. The results showed that the local extremum can be avoid in the searching process of the searching algorithm, so a bypass searching is reduced greatly, which is significant for the compensation effects and the stabilization of the system.

**Key words** optics communication; polarization mode dispersion compensation; degree of polarization ellipse

## 1 引 言

随着大规模的掺铒光纤放大器以及色散管理的广泛应用,损耗和色散的问题基本得到解决,偏振模色散(PMD)逐渐成为高速光纤通信系统的重要

和最终限制因素<sup>[1~3]</sup>。对偏振模色散的补偿因此成为近几年光通信领域研究的一个热点。一般说来决定偏振模色散补偿性的性能因素主要包括三个方面:补偿机制、补偿算法以及反馈机制。通常补偿方式有偏振主态(PSP)传输法、固定差分群时延法

收稿日期:2003-07-07;收到修改稿日期:2003-11-10

基金项目:国家 973 计划(2003CB314901)、国家 863 计划(2003AA311070)和自然科学基金(60077026)资助项目。

作者简介:刘玉敏(1976—),男,北京邮电大学理学院物理部博士研究生,现从事高速光通信系统关键技术的研究。

E-mail:liuyuminhqy@263.net

(DGD)以及两段或多段补偿法,其中每种补偿机制可能包含一种或几种工作方式。好的补偿算法可以成倍地提高搜索和跟踪速度。目前,实验中所采用的反馈信号主要有两种<sup>[4]</sup>:一是电功率,二是偏振度(DOP)。偏振模色散会引起光脉冲的展宽,从而导致电域上功率的减小,电功率法就是对接收到的电信号频谱中的某一个或几个特定的频率分量进行强度测量,以反映偏振模色散影响下带宽的变化。测量电功率的实验装置依赖于系统的传输速率,传输速率越高,就要求光电器件的响应速度越快,这会大大增加系统的复杂程度和成本,而对于偏振度作为反馈信号,具有原则上与传输速率无关、无需高速昂贵的电子器件、对色度色散不敏感、可以应用于多种调制格式等优点<sup>[5]</sup>。本文主要分析利用偏振度作为偏振模色散反馈信号的偏振模色散补偿系统的性能。

## 2 偏振度与差分群时延的关系

在单一频率下偏振度定义为

$$D = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} / s_0, \quad (1)$$

其中  $s_0, s_1, s_2, s_3$  分别为光场的四个斯托克斯分量。假定入射前的光信号为完全偏振光则  $D = 1$ , 经过偏振模色散劣化后的信号在整个功率谱内求平均其偏振度小于1。如图1所示,设输入脉冲是线偏振光,其偏振度的值等于1,它以一定的角度(假设与快偏振主态轴的夹角为  $\theta$ ) 输入到偏振模色散光纤中,则该脉冲在快偏振主态轴和慢偏振主态轴上投影,表现为两个相互垂直的脉冲分量。由于偏振模色散光纤的差分群时延引起两个分量的时延差,因此在输出脉冲的各个部分的偏振态是不同的,快轴脉冲前端的偏振方向与快偏振主态相同,同样慢轴脉冲后端的偏振方向与慢偏振主态相同,而在中间的部分是两种偏振态的混合,这就使得输出脉冲分量的偏振态对脉冲分量强度加权平均后得到的偏振度小于1,具体的数值由入射脉冲偏振方向与偏振主态轴的

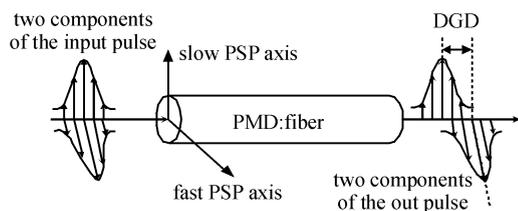


图1 偏振模色散对脉冲偏振度的影响示意图

Fig. 1 Impact of the PMD to the DOP of the pulse

夹角  $\theta$  和光纤的差分群时延以及脉冲本身的形状决定。因此可以通过测量劣化信号的偏振度就可以作为判断偏振模色散大小的依据。偏振度劣化最坏情况对应信号等功率从系统的两个偏振主态入射<sup>[6]</sup>。下面分析只考虑光纤传输中偏振模色散效应时的传输矩阵,采用波片模型,则输出场可以表示为

$$E_{\text{out}}(\omega) = M(\omega)E_{\text{in}}(\omega), \quad (2)$$

其中  $M(\omega) = M_n M_{n-1} K M_1$ ,  $M_n$  表示第  $n$  段光纤的传输矩阵,表示为

$$M_n = \begin{pmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\omega\delta\tau_n/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\omega\delta\tau_n/2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\theta_n) & \sin(\theta_n) \\ -\sin(\theta_n) & \cos(\theta_n) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$\theta_n$  和  $\delta\tau_n$  分别为偏振光经过第  $n$  段光纤后经历的偏振旋转角度和时延。因此总的传输矩阵表示为

$$M(\omega) = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \\ -u_2^* & u_1^* \end{bmatrix}, \quad (4)$$

公式(3) 么正矩阵满足  $u_1 u_1^* + u_2 u_2^* = 1$ , 对应的输出斯托克斯分量可以表示为<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} s_1 &= \int (|E_x(\omega)|^2 - |E_y(\omega)|^2) d\omega, \\ s_2 &= \int 2\text{Re}[E_x(\omega)E_y(\omega)] d\omega, \\ s_3 &= \int -2\text{Im}[E_x(\omega)E_y(\omega)] d\omega. \end{aligned} \quad (5)$$

图2为利用升余弦脉冲表示的10 Gbit/s的非归零(NRZ)伪随机脉冲序列。图3描述了不同速率和码型系统中最小偏振度与差分群时延的关系。从图3(a)可以看出,在差分群时延到达一个比特周期时,非归零码脉冲偏振度到达最小值约为0.5。对于归零码(RZ)脉冲当差分群时延远小于一个比特周期时就达到最小值,如图3(b)所示。从偏振度的浮动范围来考虑归零码系统偏振度对于差分群时延的灵敏度要接近于非归零码。但是从监测窗口角度来考虑则非归零码要远大于归零码调制格式。从式(5)以及图1可以唯象地认为偏振度的灵敏度以及

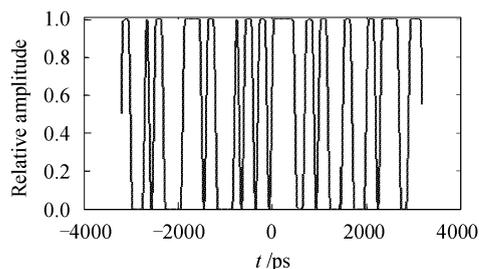


图2 100 Gbit/s 非归零脉冲序列

Fig. 2 100 Gbit/s NRZ pulse sequences

监测窗口的大小很大程度上取决于信号频谱分布,以及功率谱强度。从图 3 可以唯象地认为频谱宽度越宽所监测的灵敏度越高,监测窗口越小。为了讨论方便,定义偏振度监测灵敏度表示为  $\eta = (1 - D_{\min})/\Delta\tau$ ,其中  $D_{\min}$  表示当偏振度下降到第一个局部最小值时的偏振度值, $\Delta\tau$ 表示监测窗口,表示为

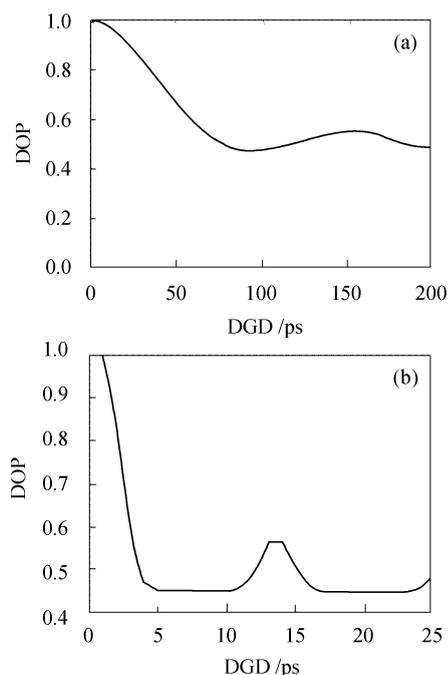


图 3 最小偏振度随差分群时延变化关系曲线

Fig. 3 Relationship between the minimum DOP and the DGD

(a) 10 Gbit/s NRZ; (b) 40 Gbit/s RZ

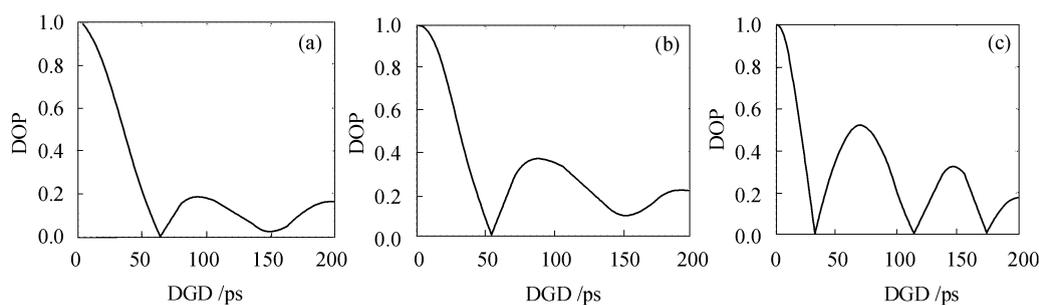


图 4 带阻滤波器对 10 Gbit/s 非归零信号灵敏度的改善作用

(a),(b),(c)中滤波带宽分别为 5,10,25 GHz

Fig. 4 Improvement of the band-reject filter to the DGD sensitivity of the 10 Gbit/s NRZ signals

The band width are 5, 10, 25 GHz in the (a), (b), (c), respectively

图 5 为加入带通滤波器后偏振度与差分群时延的变化关系曲线,与图 3(a)相比灵敏度从 0.5 下降到 0.125,但对应的监测窗口变大了,可以扩展到将近两个比特周期约 200 ps。在实际的测量补偿系统中往往不能事先确定系统的偏振主态,因此需要用

$\Delta\tau = \Delta T/T_0$ ,  $T_0$  表示比特周期, $\Delta T$  表示偏振度下降到第一局部最小值时的差分群时延大小。下面将分别引入带阻滤波器和带通滤波器来验证并改进系统偏振度与差分群时延的关系曲线以优化偏振度作为反馈信号,获得高灵敏度和大的监测窗口。图 3 中(a),(b)在未使用滤波器的情况下监测窗口大小分别约为 1 和 0.25,而灵敏度分别为 0.5 和 2.5。

### 3 优化偏振度作为反馈信号的灵敏度和监测窗口

#### 3.1 非归零系统

对于非归零码系统,信号的频谱较窄,功率谱较大的部分主要集中在中心频谱附近,因此可以考虑通过设置带阻滤波器来滤掉或减小功率谱较大的部分以提高偏振度信号的灵敏度。为简化计算引入滤波器模型可以表示为

$$T = 1 - \exp[-(\omega/\omega_0)^4]. \quad (6)$$

从图 4 可以看出,随着带阻滤波器带宽的增加,偏振度的监测窗口逐渐减小,从未加滤波器时的 1 减小到 0.25 左右。同时偏振度的灵敏度也相应增加,从未加滤波器时的 0.5 增加到 2.5。加带阻滤波器的带宽偏振度随差分群时延的变化呈现非单调性,并且存在近似周期性波动。如果系统的差分群时延值很大,这种情况需要避免,否则在搜索过程中可能陷入局部最小值,从而出现补偿不足现象。

到偏振扰码器使光纤输入端的偏振态遍历整个邦加球,这样可以根据输出端测得的偏振度椭球变化情况来描述系统的偏振模色散特性。显然对于输入偏振态为偏振主态的情况偏振度将获得最大值。对于纯一阶偏振模色散模型,此时输出偏振度  $D = 1$ 。

因此偏振度椭球的最长轴对应偏振模色散矢量的方向。根据图 4 和图 5 中的对应关系,最小偏振度值决定了系统的差分群时延。因此输出偏振度椭球理论上包含了系统偏振模色散的所有信息。

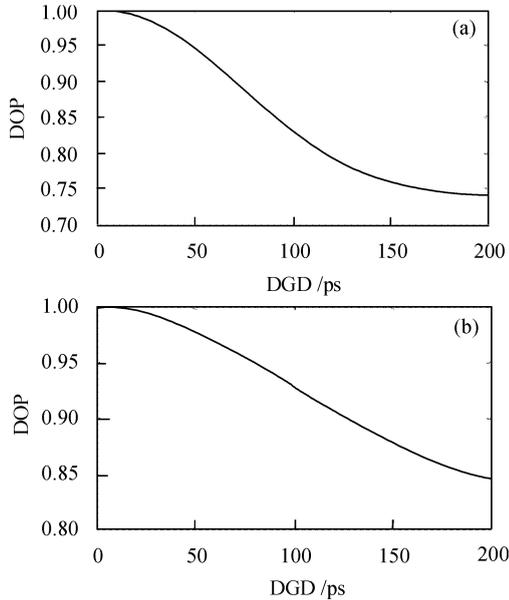


图 5 带通滤波器对偏振度监测的影响  
(a),(b)中带通滤波器的带宽分别为 15 和 20 GHz

Fig. 5 Impact of band-pass filter on the  
DOP monitoring

The band width in (a), (b) are 15 and 20 GHz, respectively

### 3.2 归零系统

对于归零码调制格式,信号的频谱较宽,未加滤波器的偏振度与差分群时延关系曲线可见图 3(b),可以看出偏振度有很高的灵敏度,约为 2.5,偏振度从 1 下降到约为 0.45 左右。但是偏振度监测范围太小。因此可以考虑利用带通滤波器增加监测范围。从图 6 可以看出适当引入带通滤波器能大大拓宽归零系统的监测窗口,监测窗口从原来的 0.2 增加到 1,同时灵敏度从原来的 2.5 下降到 0.35。

无论是归零还是非归零调制格式,都可以通过带通滤波器来增加监测窗口,通过带阻滤波器来提高监测灵敏度。然而两者是一对矛盾,因此需要折中考虑。这完全取决于特定的系统。另一种解决方案是在提取反馈信号的一侧进行分束处理,一束信号光通过灵敏度高而监测窗口窄的偏振度检测配置,另一束光信号通过灵敏度相对较低但监测窗口宽的偏振度监测配置。这样将两路采集的反馈信号经过数据处理再反馈到控制算法当中,这样可以同时克服灵敏度和监测窗口的矛盾,同时提供更准确

的反馈控制依据。

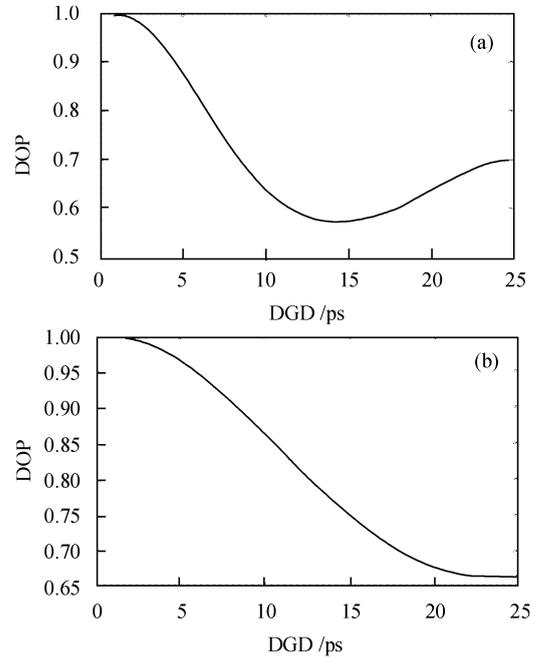


图 6 带通滤波器对 10 Gbit/s 归零系统偏振度与差分群时延关系的影响

(a),(b)带通滤波器的带宽分别为 100 和 50 GHz

Fig. 6 Impact of band-pass filter on the DOP  
of 10 Gbit/s RZ system

The band width in (a), (b) are 100 and 50 GHz, respectively

### 参 考 文 献

- Zheng Yuan, Li Chaoyang, Liu Xiumin *et al.*. Impacts of polarization on the pulse width in linear systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):900~904  
郑 远,李朝阳,刘秀敏等. 偏振模色散对线性系统脉宽的影响 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):900~904
- Zheng Yuan, Liu Yumin, Yang Bojun *et al.*. Study of the statistical characteristics of second-order polarization mode dispersion by Jones transfer matrix method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):45~48  
郑 远,刘玉敏,杨伯君等. 用琼斯矩阵法研究二阶偏振模色散的统计特性 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):45~48
- Yumin Liu, Zhongyuan Yu, Yuan Zheng *et al.*. A novel tunable polarization mode dispersion compensator with strain chirped fiber Bragg gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3):135~137
- H. Rosenfeldt, Ch. Knothe, R. Ulrich. Automatic PMD compensation at 40 Gbit/s and 80 Gbit/s using a 3-dimension DOP evaluation for feedback [C]. *OFC 2001*, 2001, **4**:27-1~27-3
- Jens C. Rasmussen, Akihiko Isomura, George Ishikawa. Automatic compensation of polarization-mode dispersion for 40 Gb/s transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12):2101~2109
- S. M. R. Motahian, Nezam, J. McGeehan. Dependence of DOP-based DGD monitors on the optical power spectrum of equal-pulse width data formats [C]. *OFC 2003*, 2003, **1**:112~114
- J. P. Gordon, H. Kogelnik. PMD fundamentals; Polarization mode dispersion in optical fibers [C]. in *proc. Nat. Academy Sciences USA*, 2000, **97**:4541~4550