

# 基于 LNAFSA 算法的 WDM 系统 PMD 自适应补偿

马广勇<sup>1</sup>, 白成林<sup>1,2\*</sup>, 许恒迎<sup>1,2</sup>

(1.聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059;

2.山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059)

**摘要:**提出了一种可应用于波分复用(WDM)系统的偏振模色散(PMD)自适应补偿方案。该方案以偏振度(DOP)为反馈信号,采用局部邻域结构的人工鱼群算法(LNAFSA)为控制算法,对低于设定阈值的一个或多个信道同时进行 PMD 自适应补偿。补偿后各补偿信道的 DOP 均大于 0.96,眼图张开度明显增大,系统性能得到了改善。

**关键词:**波分复用系统;局部邻域结构的人工鱼群算法;PMD 自适应补偿

**中图分类号:** TN913.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2012)10-0053-04

## Study on adaptive PMD compensation based on LNAFSA in WDM systems

MA Guang-yong<sup>1</sup>, BAI Cheng-lin<sup>1,2\*</sup>, XU Heng-ying<sup>1,2</sup>

(1. Physics Science and Information Engineering College, Liaocheng University, Liaocheng Shandong 252059, China; 2. The Key Laboratory of Optical Communications Science & Technology in Shandong Province, Liaocheng Shandong 252059, China)

**Abstract:** An adaptive Polarization Mode Dispersion (PMD) compensation scheme used in Wavelength Division Multiplexing (WDM) is proposed. According to the scheme, choosing DOP as feedback signal, one or several channels which are below the set threshold are carried out adaptive PMD compensation based on Local Neighborhood Artificial Fish Swarm Algorithm (LNAFSA) as control algorithm at the same time. After compensation, the DOP value of every compensated channel is over 0.96, the opening of eye diagrams is increased obviously, indicating that this compensation is effective for improving the performance of systems.

**Key words:** WDM system; LNAFSA; adaptive PMD compensation

### 0 引言

近年来,随着人们对通信需求的不断增长,网络传输带宽越来越宽。目前,主干网单信道传输速率正在向 40Gb/s、160Gb/s 甚至更高速率升级,而 PMD 对系统的影响也越来越明显,成为限制高速光纤通信系统的主要障碍。由于偏振模色散效应具有随机性,其瞬时 PMD 值随波长、时间、温度、光纤的移动、安装条件变化而变化,使得 PMD 补偿的难度增加。人们对单信道 PMD 补偿问题进行了大量的研究<sup>[1-3]</sup>,随着 WDM 技术的不断成熟,多信道 PMD 的补偿研究越来越重

要。目前关于 WDM 系统多信道 PMD 补偿方案基本有两种:一种是每个信道单独设置一个 PMD 补偿器,这种方案效果最好,但是当信道数过多时,补偿系统过于庞大,不利于商用化<sup>[4]</sup>;另一种是使用较少的补偿器,只对性能最差的一个或几个信道进行补偿,这种方案使用的补偿器数目大大减少,补偿效果良好,但是在补偿性能较差的信道可能会恶化其它信道,因此寻找到优良的补偿控制算法成为研究的重点。国内已有学者采用后一种方案,利用粒子群算法作为控制算法进行 WDM 系统多信道 PMD 补偿,但是粒子群算法有时容易陷入局部极值<sup>[5]</sup>。

人工鱼群算法是由我国学者李晓磊于 2002 年首先提出的一种基于动物群体智能的优化算法<sup>[6]</sup>,通过将动物自治体的概念引入优化算法中,采用了自上而

收稿日期:2012-05-30。

基金项目:山东省科技攻关项目(No.2009GG10001026)资助;聊城大学科研基金项目(No.X10004)资助。

作者简介:马广勇(1986-),男,硕士,主要研究方向为光通信技术。

通信作者:白成林

马广勇,白成林,许恒迎:基于 LNAFSA 算法的 WDM 系统多信道 PMD 自适应补偿

下的思路,模拟鱼群的觅食、聚群和追尾等行为进行全局寻优,具有鲁棒性好、抗干扰能力强、收敛速度快等优点。本文将改进以后的人工鱼群算法(LNAFSA)应用于多信道 PMD 补偿,提出了一种 WDM 系统多信道 PMD 自适应补偿的设计方案。通过  $10 \times 40\text{Gb/s}$  WDM 系统的 PMD 补偿实验验证了该方案的可行性。

## 1 WDM 系统多信道 PMD 自适应补偿方案

我们采用的 WDM 系统多信道 PMD 自适应补偿方案如图 1 所示,由光源、调制器、PMD 模拟器、PMD 补偿单元和 WDM 系统逻辑控制单元等部分组成。在接收端,用与码型和速率无关的偏振度(DOP)作为反馈信号,利用波长敏感的偏振计(WSP)输出的信号选择最坏的一个或几个信道,送入 WDM 逻辑控制单元,控制单元中 LNAFSA 以 DOP 为目标函数对需要补偿的一个或几个信道进行全局 DOP 搜索,将搜索到的人工鱼的位置信息送入 PMD 补偿单元,对其进行 PMD 补偿。

我们使用的 PMD 补偿器为三阶段补偿器,该补偿器共 10 个自由度,由三个偏振控制器(PC)、两段保偏光纤(PMF)和一段可变时延线级联而成,其中前两段为固定时延线(DGD),用于补偿二阶 PMD 中的两个分量(偏振相关色散和主态旋转率),两段固定 DGD 分别为  $9\text{ps}$  和  $8\text{ps}$ ,最后一段为可变时延线,用于补偿一阶 PMD。

WDM 系统逻辑控制单元设计框图如图 2 所示。控制单元的核心部分由数字信号处理器(DSP)和 FP-

GA 电路板两部分组成,其中 DSP 开发板采用合众达公司的 SEED\_DEC6713,板载一块高性能浮点 DSP\_TMS320C6713,专门用于进行 LNAFSA 的寻优,FPGA 电路板分为 FPGA 芯片、DSP 接口模块部分、AD 接口模块、DA 控制模块、全局时钟控制模块和转换模块等部分,FPGA 芯片采用 Actel 公司的 ProASIC3 A3p250,A/D 模数转换芯片采用 Analog Deviecs 公司 4 通道 14 位同步采样芯片 AD7865,D/A 模数转换芯片采用该公司的 12 位同步采样芯片 AD5344。

全局时钟控制模块主要实现对 DSP 的初始化,包括各状态寄存器的初始化,EMIF 接口的初始化及 GPIO 的初始化等,还可以用来对 FPGA 的复位、时钟设置、时序控制和状态显示等。DSP 接口模块通过 DSP 的 EMIF 接口实现 DSP 对 FPGA 的初始化设置和与 FPGA 之间进行数据通信;在 AD 接口模块中,我们搭建了中值滤波硬件电路,其作用是实现对采样数据的噪声滤除。根据 AD7865 芯片数据手册可知,每通道转换时间约为  $2.4\mu\text{s}$ ,这样设计的好处为在  $2.4\mu\text{s}$  采集时间间隔内 AD 接口模块完全可实现对上一数据的噪声滤除,提高了运行速度。经实验验证 AD 对反馈信号采样和进行 10 次中值滤波后送给 DSP 的时间大约为  $250\mu\text{s}$ ;转换模块用于选取 10 路反馈信号中需要补偿的信道的反馈信号;DA 控制模块通过 DA 芯片实现对 PMDC 的控制,其中 FPGA 向 DA 传送 10 个数据需要的时间为  $937.5\text{ns}$ 。

多信道 PMD 补偿,即让目标函数值(DOP)小于一定值的信道补偿后性能最好,这一问题用数学公式可

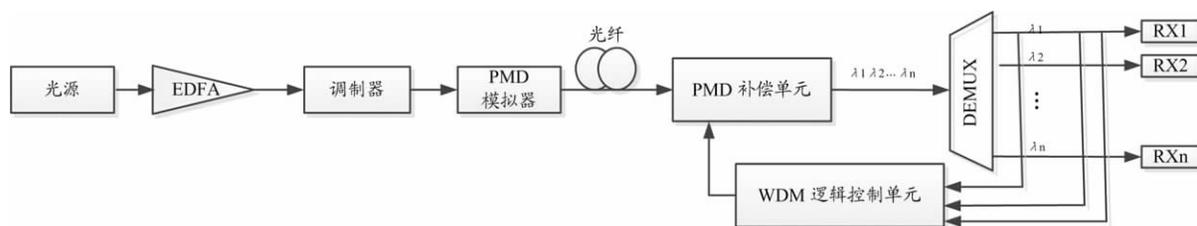


图 1 WDM 系统多信道 PMD 补偿方案框图

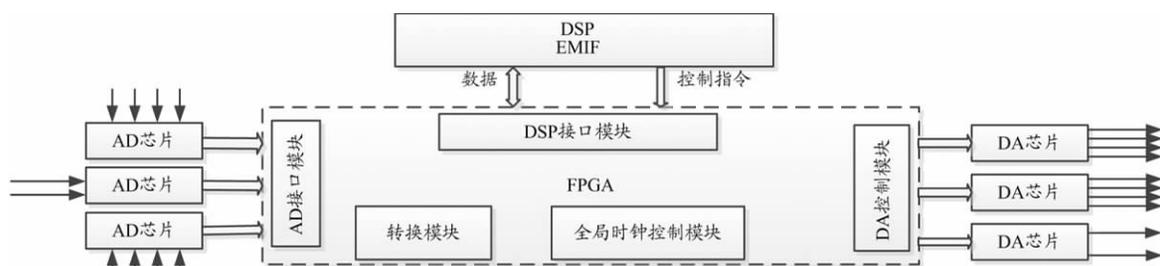


图 2 WDM 系统逻辑控制单元框图

以描述为:

$$\text{MAX}_{\text{parameters} \in P} (DOP_i < \text{FixedDOP}) \quad (1)$$

其中,  $\text{parameters}$  表示偏振控制器的控制电压, 控制电压  $P \in (0, 10V)$ ,  $DOP_i$  为第  $i$  个信道的  $DOP$ , 对于 RZ 码在多信道补偿中  $\text{FixedDOP}$  一般取 0.85。当补偿二阶或更高阶 PMD 时, 所需控制的自由度增大。对于多信道 PMD 补偿, 除了考虑多空间、多自由度外, 还需考虑如何抗噪声, 避免陷入极值问题, 控制算法成了这一问题的重点, 鉴于 LNAFSA 正好符合这一特点, 因此, 将其用于多信道 PMD 自适应补偿。

在 LNAFSA 中, 假设人工鱼群由  $M$  条鱼组成, 搜索空间为  $N$  维, 在  $N$  维空间中, 第  $i$  条人工鱼的位置信息向量可表示为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ , 人工鱼的每维位置信息对应补偿器的每路控制电压, 第  $i$  条人工鱼所在位置的  $DOP$  可表示为  $DOP_i = f(X_i)$ , 拥挤度因子为  $\delta$ , 觅食行为中人工鱼尝试的次数用  $\text{Try\_number}$  表示, 人工鱼  $i$  和  $j$  之间的距离为  $d_{ij} = \|X_i - X_j\|$ ,  $\text{Visual}$  表示人工鱼的视野范围, 移动的步长为  $\text{Step}$ , 人工鱼的邻域定义为  $N = \{X_j | d_{ij} < \text{Visual}\}$ , 人工鱼通过本邻域与其它人工鱼的平均距离智能改变视野和步长。在 LNAFSA 中, 每条人工鱼的邻居人工鱼个数  $n_i = 6$  (包括自身和局部邻域), 每条人工鱼与其邻居人工鱼交换信息, 采用的邻居结构如表 1 所示。

LNAFSA 的各种行为描述如下:

①觅食行为。第  $i$  条人工鱼  $X_i$  在其当前视野范围  $\text{Visual}_i$  内随机选择一个位置  $X_j$ , 如果发现该位置的  $DOP$  比当前高, 即  $DOP_j > DOP_i$ , 则第  $i$  条人工鱼直接移动到该位置  $X_j$ , 反之, 在其视野内重新随机选择位置, 如此重复  $\text{Try\_number}$  次后, 仍未发现更高的  $DOP$ , 则在其活动范围内随机移动一步。

②聚群行为。第  $i$  条人工鱼  $X_i$  搜索其所在的局部邻居结构的中心位置  $X_c$ , 计算得到相应的  $DOP_c$ , 如果  $DOP_i / n_i > \delta \cdot DOP_c$ , 说明该局

部邻居结构的中心位置的  $DOP$  更高且不太拥挤, 则该条人工鱼朝此位置移动一步, 否则执行觅食行为。

③追尾行为。第  $i$  条人工鱼  $X_i$  搜索其所在的局部邻居结构中  $DOP$  为最大的人工鱼  $X_{\text{localbest}}$  的  $DOP$ , 如果  $DOP_{\text{localbest}} / n_i > \delta \cdot DOP_i$ , 则该人工鱼的  $DOP$  更高并且周围不太拥挤, 则朝此鱼的方向前进一步, 否则执行觅食行为。

## 2 数值模拟结果

为了研究 PMD 对各个信道的影响, 我们建立了一个  $10 \times 40 \text{Gb/s}$  PMD 补偿数值模拟系统, 采用的调制码型为 RZ 码, 10 个信道波长分别为:  $\lambda_1 = 1542 \text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 1544 \text{nm}$ ,  $\lambda_3 = 1546 \text{nm}$ ,  $\lambda_4 = 1548 \text{nm}$ ,  $\lambda_5 = 1550 \text{nm}$ ,  $\lambda_6 = 1552 \text{nm}$ ,  $\lambda_7 = 1554 \text{nm}$ ,  $\lambda_8 = 1556 \text{nm}$ ,  $\lambda_9 = 1558 \text{nm}$ ,  $\lambda_{10} = 1560 \text{nm}$ 。在 LNAFSA 算法中, 人工鱼群规模  $\text{Fish\_Count} = 20$ , 最大循环迭代次数  $\text{TotalIter} = 50$ , 最大重复尝试次数  $\text{Try\_number} = 5$ , 拥挤度因子  $\delta = 0.5$ , 以  $DOP$  作为反馈信号。在 WDM 系统中, 由于 PMD 和非线性效应对每个信道产生的影响不同, 为此各个信道测量到的  $DOP$  有可能比设定的阈值 ( $\text{FixedDOP}$ ) 高, 也有可能低。我们采用局部邻域结构的 LNAFSA 作为控制算法, 利用如图 2 所示的 WDM 系统逻辑控制单元对低于设定阈值的多个信道 (2、5、6、8、9、10) 同时进行 PMD 自适应补偿。补偿前后各个信道的  $DOP$  如图 3 所示, 横轴表示各个信道的波长, 纵轴表示各个信道补偿前后的  $DOP$ 。由图可以看出补偿后 2、5、6、8、9、10 信道的  $DOP$  都达到了 0.96 以上, 说明 LNAFSA 算法成功地对需要补偿的信道进行了补偿, 找到了全局最优值。

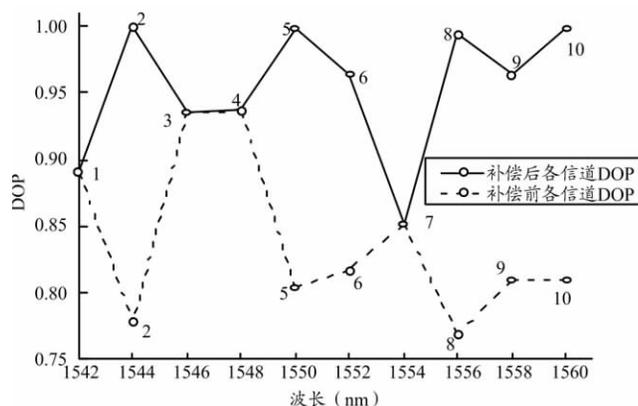


图 3 补偿前后各信道的  $DOP$

补偿前后 10 个信道的眼图如 4 所示。由图可以清晰地看出补偿前各信道的眼图均有不同程度的恶

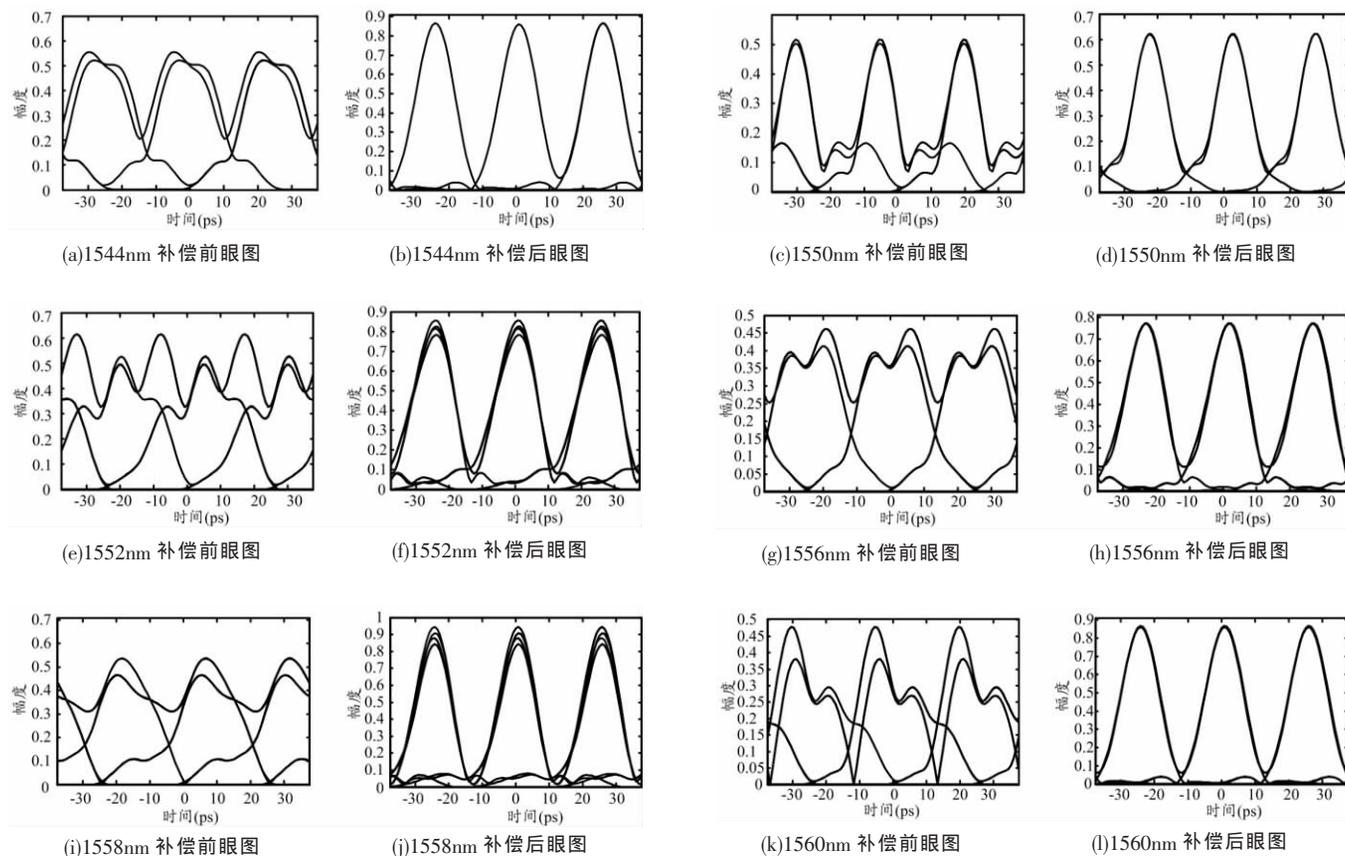


图4 补偿前后各信道的眼图

化,这是由于各个信道都受到了 PMD、非线性效应和信道间交叉相位调制(XPM)的影响。补偿后各个信道的眼图明显得到改善,其中 1544nm、1550nm、1556nm、1560nm 信道补偿效果良好,1552nm、1558nm 信道补偿效果则略差于以上 4 个信道,但与补偿前相比,眼图张开度明显优于补偿前,传输质量得到了提升。

### 3 结束语

本文给出了一种 WDM 系统多信道 PMD 自适应补偿方案。该方案以偏振度为反馈信号,采用 LNAFSA 为控制算法,进行了 10×40Gb/s 的 RZ 码补偿实验。实验结果表明各补偿信道的 *DOP* 都达到 0.96 以上,眼图恢复良好,改善了信道性能,同时也证明了 LNAFSA 在多信道 PMD 自适应补偿方面的有效性,为进一步深入研究 WDM 系统多信道 PMD 自适应补偿奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] ZHANG X G, XI L X, YU L, et al. Two-stage adaptive PMD compensation in 40Gb/s OTDM optical communication system using PSO algorithm [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2004,36:1089–1104.
- [2] 许恒迎,张霞,牛慧娟,等.基于 TMS320C6713 的新型 PMD 补偿控制模块设计[J]. *光通信技术*, 2009, 33(6): 41–45.
- [3] ZHANG X G, WENG X, TIAN F, et al. Demonstration of PMD compensation by using a DSP-Based OPMD prototype in a 43Gb/s RZ-DQPSK, 1200km DWDM transmission [J]. *Optics Communications*, 2011,284(18): 4156–4160.
- [4] IDLER W, LACH E, KUEBART W, et al. 16× 112Gb/s NRZ-DQPSK lab experiments and WDM field trial over ultimate metro distances including high PMD fibers[J]. *Lightwave Technol.*, 2011,29(15):2195–2203.
- [5] 张倩.光纤通信系统新码型用于多信道 PMD 补偿的研究[J]. *光通信技术*, 2011, 35(11): 48–51.
- [6] 李晓磊,邵之江,钱积新.一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(11): 32–38.

欢迎投稿,欢迎刊登广告!