

文章编号: 0253-2239(2006)01-0001-6

粒子群优化算法在自适应偏振模色散补偿中的性能研究*

张建忠 沈 昱 周光涛 于 丽 张晓光 杨伯君

(北京邮电大学理学院光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要: 反馈控制算法是偏振模色散的自适应补偿器的关键组成部分, 将粒子群优化算法(PSO)引入到偏振模色散自适应补偿系统中。该算法的优点是具有快速收敛到全局最佳值的能力、避免搜索陷入局部极值的能力、抗噪声能力和多自由度控制能力。理论上分析了粒子群优化算法的两个分类——全局邻居结构粒子群优化(GPSO)和局部邻居结构粒子群优化(LPSO)在搜索全局最佳值方面的能力优劣, 给出了局部邻居结构粒子群优化算法成功率达 100% 的三种邻居拓扑结构。实验表明: 在补偿一阶偏振模色散时, 全局邻居结构和局部邻居结构搜索全局最佳的成功率都能满足要求, 全局邻居结构算法收敛速度快。而在补偿二阶偏振模色散时, 全局邻居结构成功率降低, 而局部邻居结构仍可以满足要求。

关键词: 光通信; 偏振模色散; 自适应补偿; 粒子群优化算法

中图分类号: O436.3; TN929.11 文献标识码: A

Investigation of Particle Swarm Optimization Algorithm in Adaptive Polarization Mode Dispersion Compensation

Zhang Jianzhong Shen Yu Zhou Guangtao Yu Li Zhang Xiaoguang Yang Bojun

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: The feedback control algorithm is the key integral part of an adaptive polarization mode dispersion (PMD) compensator. The particle swarm optimization (PSO) algorithm was introduced into the adaptive PMD compensation system, which showed the merits of rapid convergence to the global optimum, not being trapped in local sub-optima, robust to noise and capability of multi-degree of freedom control. The performance of two kinds of PSO algorithm, global version of PSO (GPSO) and local version of PSO (LPSO), was analyzed. The three kinds of topologic structures with which the PSO algorithms had 100% success probability were given. The experimental performances of GPSO and LPSO in compensating the first-order and second-order PMD showed that GPSO and LPSO were both qualified when they are used in compensating the first-order PMD, but LPSO behaved better than GPSO when they are used in compensating the second-order PMD.

Key words: optical communication; polarization mode dispersion; adaptive compensation; particle swarm optimization algorithm

1 引 言

随着光纤通信系统速率的提高和传输距离的加长, 光纤中的偏振模色散(PMD)已成为限制光通信系统性能的一个主要因素^[1~4]。作为偏振模色散自适应补偿的控制算法是克服这个问题最重要的核心

技术, 但目前国内外对偏振模色散补偿算法的研究还不完善, 是偏振模色散补偿实用化的一大瓶颈。在国内外的相关文献中很少涉及补偿控制算法。本文讨论的粒子群优化(PSO)算法, 能够快速补偿光纤链路中随时间变化的偏振模色散。

* 国家自然科学基金(60577046)、国家 863 计划(2001AA122041)和教育部博士点基金(200001301)资助课题。

作者简介: 张建忠(1976~), 男, 河北唐山市人, 北京邮电大学理学院物理部硕士研究生, 主要从事光通信系统中偏振模色散的研究。E-mail: zhang. x. g@263. net

收稿日期: 2004-04-01; 收到修改稿日期: 2005-03-17

2 偏振模色散补偿方案

实验链路图如图 1 所示,偏振模色散补偿系统主要有三部分组成:偏振模色散模拟器、偏振模色散补偿器、逻辑算法和控制电路。偏振模色散补偿单元用来补偿光纤系统中的偏振模色散;高速检偏仪(polarimeter)用来监测光通信链路中偏振模色散的

变化;逻辑算法和控制电路控制偏振模色散补偿器补偿链路的偏振模色散。

图 2 是补偿单元的详细框图。其中一级补偿器只能补偿一阶偏振模色散^[5,6],如图 2(a)所示;二级补偿器能同时补偿一阶、二阶偏振模色散和去偏振有关的偏振模色散^[7~9],如图 2(b)所示。

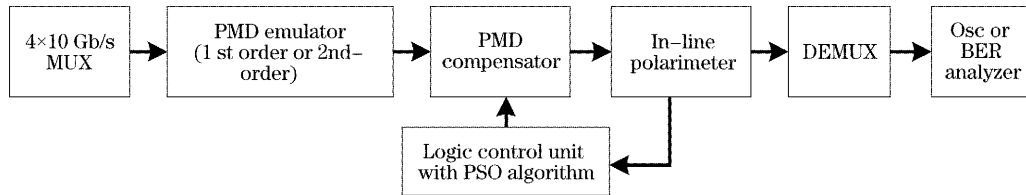


图 1 40 Gb/s 光时分复用一阶段(二阶段)自适应偏振模色散补偿实验系统

Fig. 1 Experimental setups of one-stage or two-stage adaptive PMD compensation for 40 Gb/s OTDM system

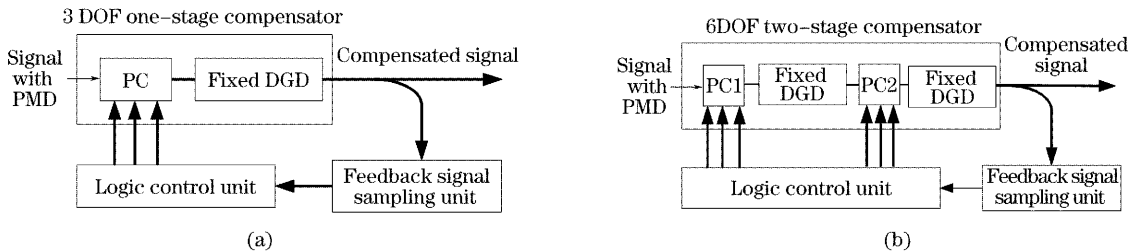


图 2 偏振模 PMD 色散补偿器的两种结构。(a)一级 PMD 补偿器,(b)二级 PMD 补偿器

Fig. 2 One-stage order PMD compensator (a) and two-stage PMD compensator. DOF: degree of freedom, PC: polarization controller, DGD: differential group delay

自适应补偿算法的目的就是控制图 2 所示的补偿单元,找到整个系统的最佳值。对算法的要求是能够快速补偿光纤链路中随时间变化的偏振模色散。

在实验系统补偿前,控制偏振控制器(PC)不断改变输入光的偏振态,在无滤波的情况下,得到系统的偏振度(DOP)和两路控制电压的关系,目标函数代表系统的偏振度,控制参量代表偏振控制器的两路控制电压。

由于系统中有噪声影响,得到的偏振度存在情况如图 3 所示。随着自由度(DOF)增加,系统局部极值会呈指数增加,所以对补偿算法的要求是具有多维空间搜索能力、快速收敛能力、抗噪声能力、避免搜索陷入局部极值的能力。

通过高速检偏仪(polarimeter)监测到当前链路信号的偏振度,通过反馈信号取样单元、逻辑控制单元反馈给偏振模色散补偿器。通过控制图 2(a)的三自由度补偿链路中的一阶偏振模色散,控制图 2(b)中的 6 个自由度进行二阶补偿。在图 2 中的偏振控制器有四个端口可由电压控制(0~10 V),实验中分别控制偏振控制器三个端口。补

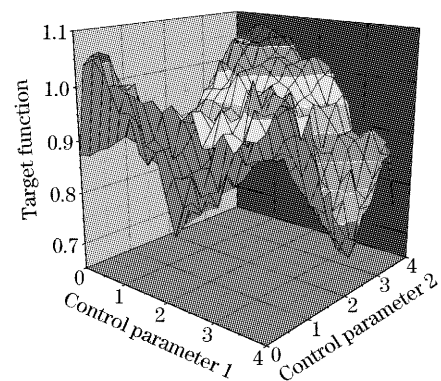


图 3 在 40 Gb/s 光时分复用实验系统中存在的偏振度分布图

Fig. 3 DOP map in the experiment in 40Gb/s OTDM system

偿的目的是使得反馈信号的偏振度最大,使系统性能得到优化。搜索补偿过程可以用如下公式表示:

$$\text{MAX}_{\text{parameters} \in P} (\text{function}), \quad (1)$$

其中“function”是目标函数,在偏振模色散补偿系统中是偏振度;“parameters”可以指偏振控制器中的波片角度,或者双折射的大小; P 是指“parameters”

所在的范围。通过不断调整偏振控制器上的电压搜索 N 维空间,得到系统最优值。 N 取决于补偿单元所采用的结构。

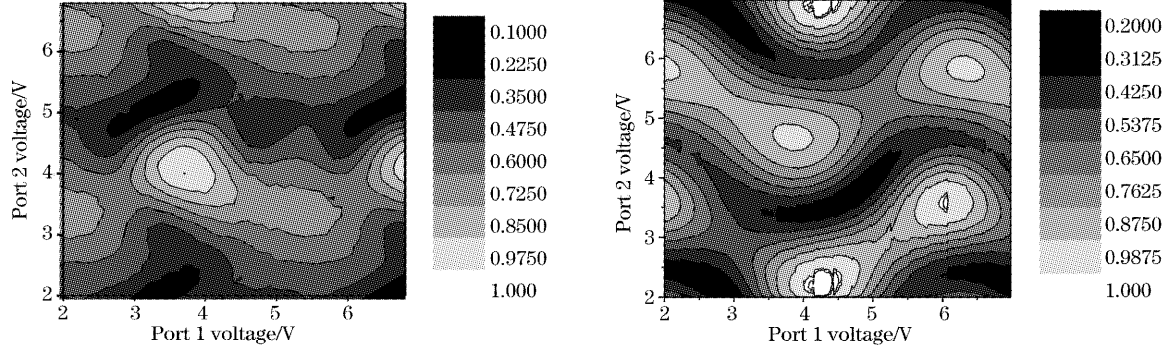


图 4 遍历两个端口电压所得的 DOP 分布图(a)一阶补偿系统(b)二阶补偿系统

Fig. 4 DOP map by changing two ports voltages (a) One-stage compensation, (b) two-stage compensation

图 4 和图 3 相比,整个系统由于滤波作用得到的偏振度平滑。从图 4 看出,一方面由于二阶系统相对复杂,所以二阶补偿系统图 4(b)比一阶补偿系统图 4(a)中的局部极大值要多;另一方面,在搜索补偿的过程中,由于二阶复杂度高,所以在二阶系统中,存在多个局部极值,造成搜索的难度更大,搜索到系统最优值的成功率越低。

3 搜索补偿算法

3.1 粒子群优化算法原理

粒子群优化是描述多维空间中个体的社会行为^[10],基于群体根据对环境的适应度将群体中的个体移动到好的区域,每个个体根据群中的最佳值调

在一阶和二阶系统中,分别对偏振控制器的两个自由度进行控制,采用中值滤波技术,得到链路偏振度的分布情况,如图 4 所示。

整更新自己的位置,每个粒子还有一个速度变量决定他们飞翔的方向和距离,然后粒子群就追随着当前的最优粒子在解空间中搜索找到系统的最优值。

粒子群优化算法中的每个粒子都代表整个问题中的一个潜在解。假设 s 代表整个粒子群,每个粒子用 i 表示,每个粒子具有以下几个特征:

x_i 为当前粒子的位置矢量; v_i 为当前粒子的速度矢量; p_i 为粒子个体的最好位置矢量。

粒子个体的最好位置矢量是粒子 i 在此次循环前得到的最佳值的位置矢量,在搜索最大值的系统中,每个粒子的位置对应一个系统值。用 f 表示系统对位置坐标的目标函数,对粒子位置的更新公式表示为

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t), & f[x_i(t+1)] \leq f[p_i(t)] \\ x_i(t+1), & f[x_i(t+1)] > f[p_i(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中 t 表示不同的迭代次数。定义 p_{gd} 作为在一次迭代中所有粒子不同坐标下的最优值对应的位置坐标:

$$p_{gd} \in \{p_0(t), p_1(t), \dots, p_s(t)\} | f[p_{gd}(t)] = \max\{f[p_0(t)], f[p_1(t)], \dots, f[p_s(t)]\}. \quad (3)$$

算法应用了两个独立的随机数, $\text{rand}() \in U(0,1)$ 表示算法随机性的自然特征。在粒子群优化算法中,速度和位置的迭代公式为

$$v_{id} = v_{id} + \varphi_1 \times \text{rand}() \times (p_{id} - x_{id}) + \varphi_2 \times \text{rand}() \times (p_{gd} - x_{id}), \quad (4)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id}. \quad (5)$$

粒子群优化算法的整个搜索流程如下:

1) 随机分布粒子——初始化粒子的位置和速度矢量;

2) 各个粒子考虑自己以前的最好位置,向群中

的当前最佳位置粒子靠拢;

3) 不断迭代使得粒子在系统空间中找到系统最佳值(或接近最佳值)。

全局邻居结构是以当前处于最优点的粒子为中心,其他所有的粒子按照(2)式~(5)式在搜索空间移动。全局邻居结构算法收敛的速度快,但是这种结构一开始就把某一个个体下的目标函数值定为最佳,这显然是不科学的,因为开始的这个值很有可能是局部的最佳,而不是全局最佳,因此容易陷入局部极值,这是全局邻居结构的缺陷。

3.2 成功率达到百分之百的三种结构

粒子群优化算法有几种拓扑结构,使得搜索空间的粒子按照不同的组合排列。在局部邻居结构中,每一个邻近个体组都有自己的一个最佳,通过个体组与个体组之间的联系使得这些最佳值能够实时

比较以获得整个个体中的最佳,避免了全局邻居结构的不合理性。

文献[11]研究了各种局部邻居拓扑结构的粒子群优化算法的性能,得出以下三种拓扑结构,搜索的成功率达到 100%,如图 5 所示。

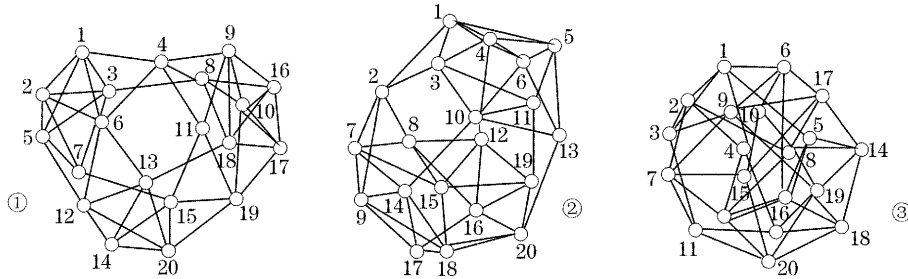


图 5 成功率达到 100% 的结构

Fig. 5 The topologic structure with 100% success probability

这三种拓扑结构的参量为:粒子个数是 20,邻居个体的数量为 5,我们的局部邻居结构程序采用图 5 中第一个图的拓扑结构,搜索补偿后系统得到了优化。

局部邻居结构算法和全局邻居结构算法不同之处在于局部邻居结构是以某个特定个体为中心,只取剩余个体中的一部分作为自己的邻居,这种邻居结构的拓扑结构将有很多种。利用以上三种是搜索成功率在 100% 的三种结构,我们根据参考文献[12]采用改进的粒子群优化算法^[11]。研究了各种局部邻居的结构下粒子群优化算法的性能。评价标准主要有两个:一是经过一定数目的循环后得到的目标函数最佳值与实际最佳值的差别,差别越小,性能越高;二是满足终止条件需要的循环次数,多次计算还可以计算出该结构的成功率。

全局邻居的拓扑结构具有收敛快的优点,在偏振模色散比较小、系统复杂度低的情况下具有独特的优势,适合在一阶偏振模色散补偿中应用。在局

部邻居结构中由于每个粒子只是取所有粒子中的一部分作为邻居,使得速度调整在多个群进行。虽然提高了搜索成功率,但是相应地增加了搜索时间和难度,搜索收敛速度降低。

4 实验结果

在一阶偏振模色散补偿实验中,随机调整入射光的偏振态,分别使用局部邻居结构算法和全局邻居结构算法进行搜索补偿,每种在不同状态下搜索 18 次,每次循环迭代 30 步,得到的偏振度和循环次数的关系如图 6 所示。

从图 6 可以看出,全局邻居结构算法[图 6(b)]的收敛速度比局部邻居结构算法[图 6(a)]快,从搜索结果看出两种算法搜索后偏振度都达到 0.95,没有陷入局部极值的情况发生。由于在 3 个自由度的搜索空间中,存在的局部极值相对较少,两种搜索算法都能使系统得到优化,全局邻居结构算法明显快于局部邻居结构算法。图 7 列出在 18 次实验中,不

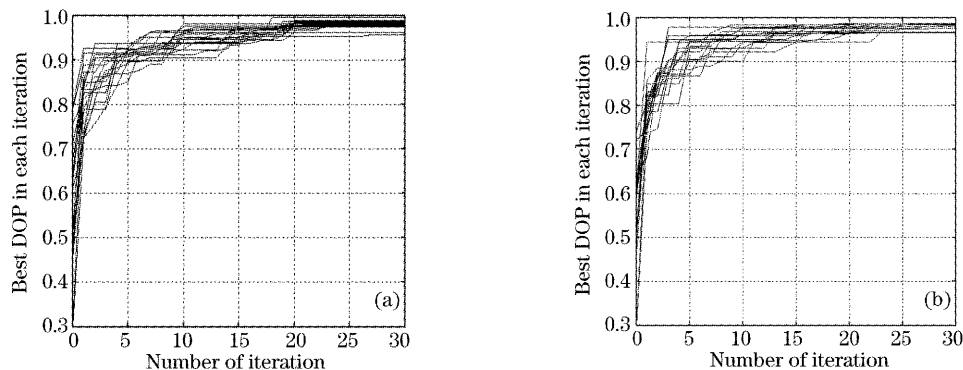


图 6 局部邻居结构(a)和全局邻居结构(b)算法搜索得到最佳偏振度和循环次数关系图

Fig. 6 The best DOP vs. iteration with LPSO (a) and GPSO (b) algorithm

同迭代步数和实现成功补偿次数关系。

采用局部邻居结构算法得到的迭代搜索步数分布在一个宽范围内,如图 7(a)所示;采用全局邻居结构算法得到的结果如图 7(b)所示,成功搜索步数相对集中。这说明全局邻居结构有快速的收敛能力,更适合用于一阶偏振模色散补偿系统中。

在二阶偏振模色散补偿的实验中,使输入光的偏振态随机分布,然后调整偏振模色散补偿器的 6

个自由度进行搜索补偿,补偿方案如图 2(b)所示。在不同状态下搜索 50 次,每次循环 50 步,得到的偏振度和循环次数的关系如图 8 所示。

采用局部邻居结构算法得到的偏振度在 0.9 以上,如图 8(a)所示。采用全局邻居结构算法得到的偏振度则散落在 0.7~0.95 之间。偏振度为 0.9 作为系统补偿后的标准,从图 9(b)可以看出全局邻居结构算法比局部邻居结构算法的成功率要低。

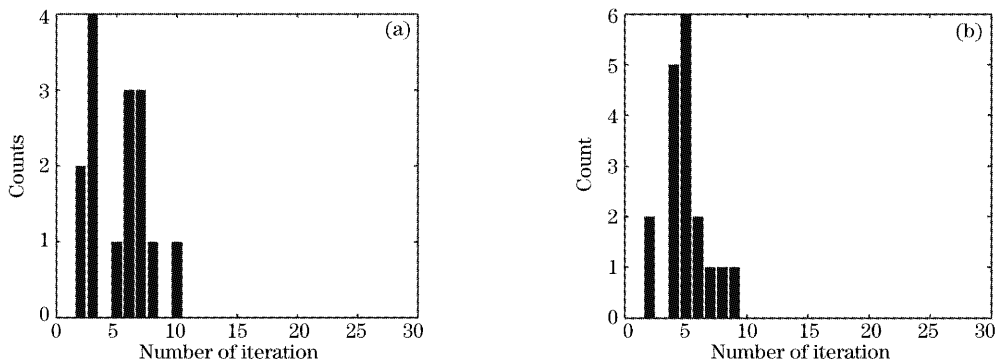


图 7 局部邻居结构(a)和全局邻居结构(b)算法迭代搜索步数和次数的关系

Fig. 7 The counts versus iteration with LPSO (a) and GPSO (b) algorithm

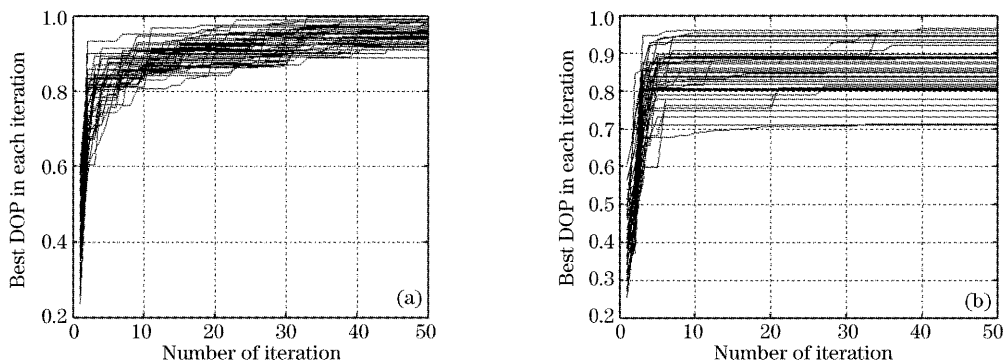


图 8 (a)局部邻居结构和(b)全局邻居结构算法搜索得到最佳偏振度和循环次数关系图

Fig. 8 The best DOP versus iteration with LPSO (a) and GPSO (b) algorithm

图 9 表明在多自由度搜索空间中,由于全局邻居结构算法的快速收敛性,容易陷入局部极值,所以

在二阶或更多自由度的情况下,全局邻居结构算法已经不宜作为搜索算法,但是在一阶段补偿系统

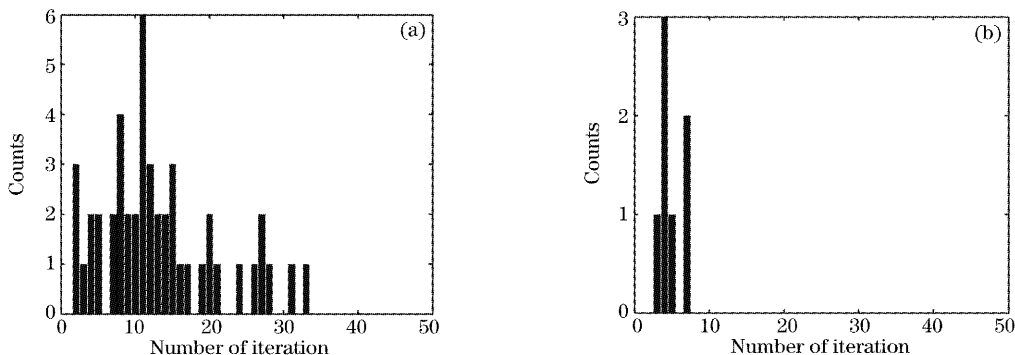


图 9 局部邻居结构(a)和全局邻居结构(b)算法迭代搜索步数和次数的关系

Fig. 9 The counts versus iteration with LPSO (a) and GPSO (b) algorithm

中,全局邻居结构算法要比局部邻居结构算法的收敛速度快,可以大大缩短搜索补偿时间。

在实验系统中,整个搜索补偿时间由硬件耗时和软件耗时两部分组成,硬件耗时包括模-数转换器、数-模转换器以及压电偏振控制器的响应时间;软件耗时主要是计算时间。一个补偿单元包括如下几个部分:(1)多路数-模转换器转换时间(2)计算机粒子群优化算法计算花费时间(3)数-模转换器转换时间(4)电控的偏振控制器电压响应时间,这一个补偿单元时间是 0.8 ms。由于一阶段系统相对简单,搜索时间短,大约是 100 ms。在二阶段实验补偿系统中复杂度增加造成搜索时间进一步增加,搜索时间大约是 400 ms。其中在整个搜索过程中算法占用时间不到 16%,主要是模-数转换器、数-模转换器花费时间过多。如果采用高速的数据采集卡和高速的数-模转换器转换卡,可使系统的响应时间大大缩短。

5 结 论

引入粒子群优化算法应用于偏振模色散补偿中,取得了显著的效果。在一阶补偿实验系统中,研制了两种优化算法(局部邻居结构和全局邻居结构),搜索补偿效果非常好。在二阶补偿实验系统中,尽管系统复杂度增加,采用改进的局部邻居结构算法克服了在多维搜索空间中的局部极值问题。证明粒子群优化算法具有多维搜索能力,非常适合在偏振模色散补偿中应用。

致谢 感谢 ADVANTEST 公司提供误码检测设备(D3186,D3286),感谢 EXFO 公司提供偏振模色散检测设备(FPMD5600)。

参 考 文 献

- 1 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]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 45~48 (in Chinese)
郑 远,刘玉敏,杨伯君等. 用琼斯传输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
- 2 Liu Jianfei, Yu Jinlong, Wang Jian *et al.*. Study on automatic compensation of first order PMD in 10 Gbit/s optical fiber communication system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(4): 349~352 (in Chinese)
刘剑飞,于晋龙,王 剑等. 10 Gbit/s 的光纤通信系统中一阶偏振模色散自动补偿技术的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 349~352
- 3 Li Huo, Yanfu Yang, Caiyun Lou *et al.*. Mitigation of signal quality degradation induced by PMD using synchronous modulation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(9): 505~507
- 4 Liu Kaixian, Zhang Xia, Zhao Jingxi *et al.*. Measurement of second order PMD with Poincaré sphere method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 583~586 (in Chinese)
刘开贤,张 霞,赵京玺等. 用庞加莱球法测量二阶偏振模色散[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 583~586
- 5 F. Heismann, D. A. Fishman, D. L. Wilson. Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10 Gb/s transmission system[C]. *ECOC*, 1998, **1**: 529~530
- 6 C. Francia, F. Bruyère, J.-P. Thiéry *et al.*. Simple dynamic polarisation mode dispersion compensator[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(5): 414~415
- 7 Q. Yu, L. S. Yan, Y. Xie *et al.*. Higher order polarization mode dispersion compensation using a fixed time delay followed by a variable time delay[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8): 863~865
- 8 T. Merker, A. Schwarzbeck, P. Meissner. Analytical calculation for PMD compensation up to second order [C]. *ECOC*, 2001. 352~353
- 9 Sangin Kim. Schemes for complete compensation for polarization mode dispersion up to second order[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(8): 577~579
- 10 M. Clerc, J. Kennedy. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2002, **6**(1): 58~73
- 11 J. Kennedy, R. Mendes. Population structure and particle swarm performance[C]. *Proc. ICEC*, 2002. 1671~1676
- 12 J. Kennedy, R. Eberhart. Particle swarm optimization [C]. *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ, USA, 1995. 1942~1948