

doi:10.3788/gzxb20144308.0806005

长距离分布式光纤传感中基于 STM32 的遗传算法偏振控制

刘海锋,陶俊豪,张宁,刘波,王虎

(南开大学 现代光学研究所,光学信息技术科学教育部重点实验室 天津,300071)

摘 要:基于 STM32 微处理器采用偏振控制器反馈技术并结合遗传算法对 50 km 长距离分布式光纤振动传感系统中偏振衰落进行抑制.结合 STM32 与 PCD-M02 型偏振控制模块特性,优化遗传算法相关参量,在 STM32 微处理器上实现了遗传算法对传感系统的偏振控制.实验结果表明,基于 STM32 微处理器的遗传算法在短时间内能得到全局近似最优解,有效实现偏振控制,该方案适用于对实时性和集成度要求较高的长距离分布式光纤传感系统.

关键词:分布式光纤传感;遗传算法;STM32;偏振控制;偏振衰落

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)08-0806005-5

Polarization Control in Long-distance Distributed Sensing System Based on STM32 Genetic Algorithm

LIU Hai-feng,TAO Jun-hao,ZHANG Ning,LIU Bo,WANG Hu

(Key laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract:Based on the STM32-microprocessor-manipulated, the polarization degradation in a 50 km long distance distributed fiber vibration sensing system was suppressed by using polarization controller in combination with the genetic algorithm. By exploiting the hardware features of STM32 and PCD-M02 polarization control module, related genetic algorithm parameters were optimized to achieve the genetic-algorithm-based polarization control. Experimental results indicate that the approximately public optimal solution could be found by using the STM32-microprocessor-based genetic algorithm in a short time frame, and ultimately to effectively realize polarization control functionality. Our proposed polarization control scheme could be applied in the long distance fiber sensing system that highly requires the real-time as well as integration features.

Key words:Distributed optical fiber sensing; STM32; Genetic algorithms; Polarization fading; Polarization control

OCIS Codes:060.2370; 060.2420; 060.2430; 060.5060

0 引言

长距离分布式光纤振动传感系统以马赫-曾德(Mach-Zehnder, M-Z)干涉理论为基础,在信号解调时应保持两束相干光的偏振态一致,但工程应用中由于受光纤自身缺陷、施工过程的随机外力及温度影响,引起光

在传输过程中产生双折射,使其偏振态产生随机变化,导致干涉信号对比度下降.若两束光的偏振态正交,干涉信号对比度将为零,这种现象被称为“偏振诱导信号衰落”.光的偏振态不但会影响干涉信号的对比度,而且还会引入相位噪声^[1],影响系统的灵敏度及定位准确度,因此如何消除系统偏振衰落成为研究热点^[2-3].

基金项目:天津市科技支撑计划(No. 11ZCKFGX01800)资助

第一作者:刘海锋(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为光纤传感及光纤通信. Email: nkhfliu@mail.nankai.edu.cn

导师(通讯作者):刘波(1975-),男,教授,博导,主要研究方向为光纤传感、光电子技术及光纤通信. Email: nkliubo@gmail.com

收稿日期:2013-12-06;录用日期:2014-02-28

<http://www.photon.ac.cn>

目前,消除偏振衰落的方法有:保偏光纤、偏振控制器反馈技术^[4]和偏振分集接收技术^[5,6]等.其中偏振控制器反馈技术结构简单,容易实现,硬件成本较低,目前应用最为广泛.偏振控制器与偏振控制算法相结合能有效消除偏振衰落,并能适应高速传输系统.在分布式光纤振动传感系统中常用的偏振控制算法主要有全局搜索算法、模拟退火算法^[7]、遗传算法^[8]及混合算法^[9]等,但目前已报道的偏振控制算法均基于计算机实现,在微处理器上实现偏振控制算法并不多见.本文采用偏振控制器反馈技术对 50 km 长距离分布式光纤振动传感系统进行偏振衰落抑制,结合 STM32 微处理器运算能力及 PCD-M02 型偏振控制模块特性,选用并优化遗传算法,在基于 STM32 的微处理器上编写遗传算法程序实现分布式光纤传感系统中偏振态控制.实验结果表明,基于微处理器的遗传算法在较短时间内可得到全局近似最优解,有效地实现偏振控制,节省系统成本,可适用于对实时性及集成度要求较高的系统.

1 原理

1.1 系统结构

长距离分布式光纤振动传感系统采用双 M-Z 干涉仪结构.原理如图 1,当有振动信号作用于信号臂时,光纤将会产生应变效应、泊松效应以及光弹效应,对传输光的相位进行调制,使其相位发生改变.利用 M-Z 干涉仪检测干涉信号强度变化便可检测相位变化.图 1 中光源为 3 MHz 线宽的分布式反馈激光器 (Distributed Feedback Laser, DFB), $C_1 \sim C_4$ 为耦合器, $PD_1 \sim PD_3$ 为光电探测器.光源发出的光经偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 和光隔离器被 C_1 分成顺时针和逆时针两路光,逆时针的光经隔离器、 C_4 和 C_3 后进入长度分别为 50 km 的信号臂和参考臂,在 C_2 处干涉后信号被 PD_1 和 PD_2 检测.顺时针的光经 C_1 、干涉仪和 C_4 后干涉信号被 PD_3 检测. PD_1 和 PD_2 两路光电信号经线性放大后做差分运算实现光相位检测,即得到振动信号; PD_3 与 PD_1 两路光电信号做互相关运算得到两路光信号时间差,即得出定位信息.

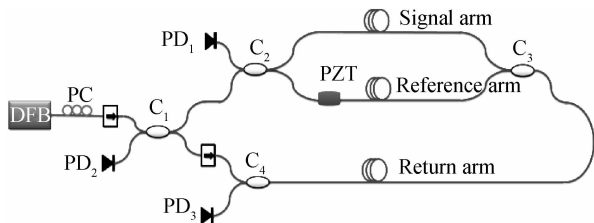


图 1 长距离分布式光纤传感系统原理图

Fig. 1 Schematic of long distance distributed optical fiber sensing system

偏振控制器反馈技术最早由美国海军研究实验室的 Alan D. Kersey 等在 1988 年提出^[10],是目前较为理

想且应用较多^[11]的一种消除偏振衰落方法,本文采用的偏振控制技术原理如图 2,在 M-Z 干涉仪的参考臂上接入偏振控制器 PC,将干涉仪输出的光电信号作为偏振控制器 PC 的反馈信号,实现控制传输光偏振态的目的.

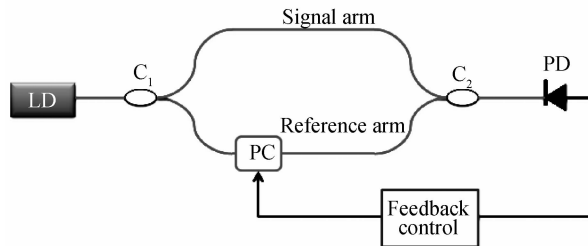


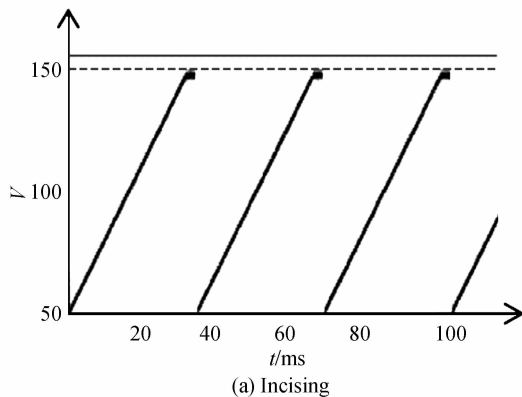
图 2 偏振控制器反馈技术原理图

Fig. 2 Schematic of polarization controller feedback technology

1.2 微处理器及偏振控制模块

系统采用的偏振控制器反馈技术是结合偏振控制模块并基于微处理器的遗传算法实现的.选用的微处理器是意法半导体公司 STM32F103RCT6,它是基于 ARM 架构的 Cortex-M3 核处理器,时钟频率最高可倍频到 72 MHz,512k 的 flash 和 64k 的 RAM,配备有 3 路共 16 个通道的高速 12 位 ADC,两路 12 位 DAC 等丰富的标准外设.偏振控制模块的型号为 PCD-M02,它可通过模拟或数字输入方式控制三个通道挤压器进行偏振态调节.采用模拟输入时,模拟输入增幅为 30 倍,0~5 V 的模拟输入可产生 0~150 V 的电压输出加载到挤压器上.采用数字输入时,通过地址线 A_1 、 A_0 选择三个对应通道,每个通道由 12 位 TTL 数字信号控制,电压调节准确度为 0.037 V,满量程对应 150 V.每通道挤压器半波电压约为 26 V,当加载满量程 150 V 电压时,将产生 $4 \sim 5\pi$ 的相位延迟.单通道调节时,调节速度需要满足: $V_{pp} \times f_{MAX} \approx 100 \text{ V} \cdot \text{kHz}$,三通道同时调节时,速度需要满足 $V_{pp} \times f_{MAX} \approx 50 \text{ V} \cdot \text{kHz}$.

采用三通道 12 位数字控制方式,对偏振控制模块的输入输出特性进行测试.以通道 1 为例,采用 STM32 控制通道 1 的 12 个位数据位从 0 递增至 4095 ($2^{12} = 4096$),对通道 1 的电压进行测量,其最大输出电压为 147 V,如图 3(a).将控制数从 4 095 跳变为 0,



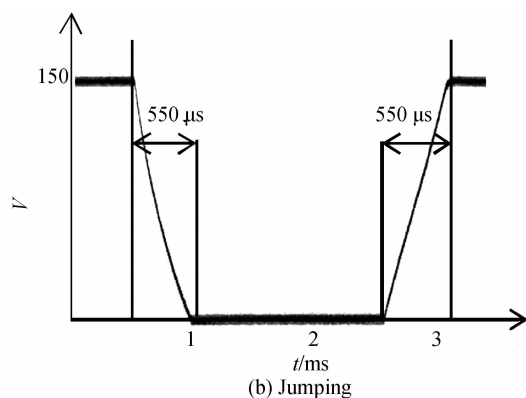


图3 偏振控制器电压特性曲线

Fig. 3 Voltage characteristic curve of the polarization controller controls

延时 1.5 ms,再跳变为 4 095,测得其上升及下降时间均约为 550 μ s,如图 3(b)。通道 2 和通道 3 的测试结果与通道 1 基本一致。

为研究偏振控制模块的偏振控制特性,采用如图 2 所示方案。将干涉仪的参考臂中的一段光纤缠绕在压电陶瓷环上,将 STM32 产生的频率为 122 Hz 的三角波信号经放大后加载到压电陶瓷环,得到周期变化的干涉信号。图 4 为 STM32 连续改变偏振控制模块通道 1 的控制数时所测得的光电信号。由图 4 可知,扫描过程中出现多个极值,当偏振控制器的通道控制数线性变化时,干涉仪输出的干涉信号对比度也连续变化。

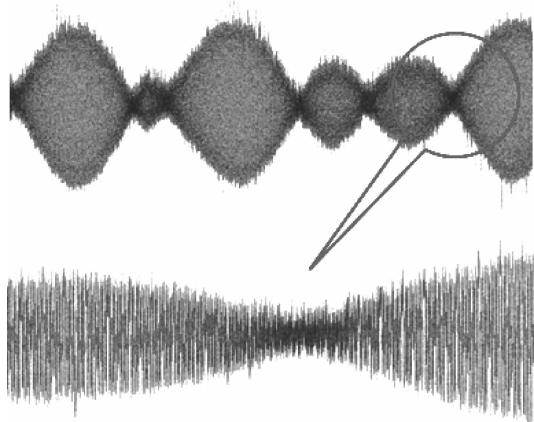


图4 偏振控制器偏振测试结果

Fig. 4 Test results of polarization controller

1.3 遗传算法

常用的偏振控制算法有全局搜索算法、模拟退火算法和遗传算法等,全局搜索算法运算量较小,但最大的缺点是搜索耗时久,不能完成快速的偏振态调节。模拟退火算法主要特点是操作步骤简单,只需要按照状态更新函数和温度更新函数更新状态,就能求最优解,但是它的运算量比较大,它不仅大量的浮点型运算,而且在计算状态接受概率的函数值时包括了指数形式的运算,对于 STM32F10x 微处理器来说,运算难度较

大,比较耗资源。遗传算法的特点是运算量并不大,但是操作步骤繁琐,不仅要按照一定比例选择个体,还需要按照一定概率对个体进行相应的位操作,需要编写大量的代码来实现。三种算法中,全局搜索算法并不是一种智能寻优算法,模拟退火算法和遗传算法都是智能寻优算法,比较适合搜索全局最优解。

遗传算法模拟了遗传过程中的繁殖、杂交和突变现象,通过自然选择原理进行启发式搜索,是一种概率化寻优算法^[12]。遗传算法可用于组合优化问题求解,其流程如图 5。首先确定目标函数和问题的解空间,然后按照一定规则对问题的解进行编码。利用遗传算法求解组合优化问题时,先随机或人为产生一个包含 n 个个体即初始解的种群。将每个个体用目标函数进行评估,得到各自的适应度值。然后根据适应度值按照特定的算法进行选择操作,选择过程中,适应度值越大,个体被选中的几率越大。然后将筛选出的个体放入新种群按照一定的规律进行交配,交配过程会产生一定概率的变异,交配生成下一代个体,所有的下一代个体组成新的种群。新种群中个体由于继承了优良父代个体性状,因而整体适应度值比前一代要高,同时由于基因变异,物种保持了多样性。新种群再经过自然选择,

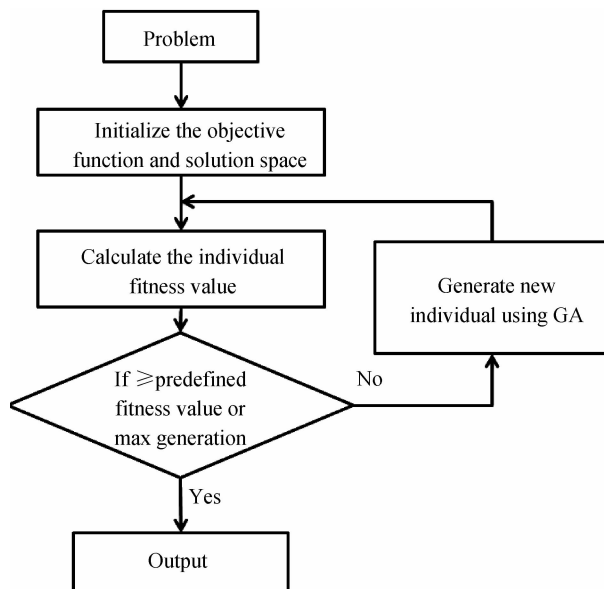


图5 遗传算法流程

Fig. 5 Flowchart of genetic algorithm

优胜劣汰,种群中的个体将逐步向适应度值高的方向进化。

遗传算法包括三个算子操作:选择、交叉和变异。选择操作是根据个体的适应度值把优良个体的基因遗传到下一代。常用的方法有比例选择算法、最佳个体保留法、竞争法、期望值法、线性标准化方法等。交叉操作是按照一定概率进行的,能够提高遗传算法的搜索能力,目的是把父代个体染色体中的基因替换重组后遗传给下一代。交叉操作中,选择合适的交叉概率可以加

快收敛速度,使算法快速地达到最优解附近,交叉概率选取范围为 0.4~0.9.交叉操作时,基因串上的基因会发生一定概率的突变,称为变异.变异操作能够实现解空间的精细搜索,完成局部搜索,防止算法过早的收敛.变异的概率通常都取的比较低,在 0.001~0.1 之间.除了交叉概率和变异概率影响算法的执行效率和最终结果之外,还有种群规模.当种群规模过小时,遗传算法寻优的效果会不理想,规模较大时可以减少遗传算法陷入局部最优解的几率,但会增加计算量,因此需要选择合适的种群规模.

PCD-M02 偏振控制器在偏振态调节过程中,干涉仪输出光电信号对比度随输入光的偏振态(对应三个通道的控制数)连续变化,属于组合优化求极值问题,因此遗传算法适用于偏振控制.遗传算法的特点是运算量较小,但是操作步骤较繁琐,需要按照一定比例选择个体,并按照一定的概率对个体相应的位来操作,其三个算子(选择、交叉、变异)若采用二进制编码,则其对浮点运算要求不高.因此仅需要编写大量的代码,对于微处理器,运算量并不大比较容易实现^[13].综合考虑后,本系统选用遗传算法进行偏振衰落抑制.

2 实验及结果分析

50 km 长距离分布式光纤振动传感系统的偏振衰落抑制方案如图 6.将参考臂的一部分光纤缠绕在压电陶瓷环上,当进行偏振态调节时,由微处理器 STM32 的 DA 输出三角波扫描调制信号,经放大电路

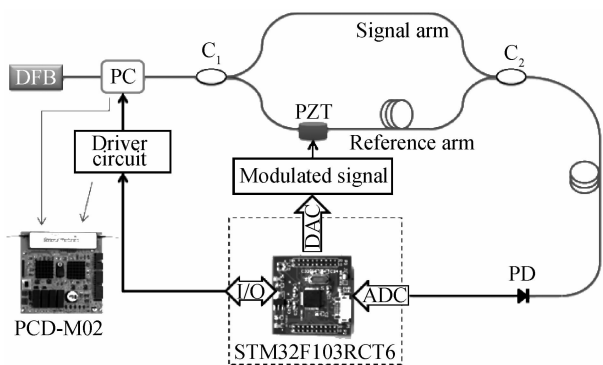


图 6 基于 STM32 的偏振控制原理图

Fig. 6 Schematic of STM32-based polarization control

后加载到压电陶瓷环,此时参考臂光纤长度会被周期调制,干涉仪将输出干涉信号,经过 PD 光电探测器后被 STM32 的 AD 采样,其幅值作为相应个体的适应度值,经过遗传算法运算后得到最优解并传输给 PCD-M02 偏振控制模块,进行偏振态调节使输出的光电信号的幅值最大.

基于 STM32 的遗传算法偏振控制流程如图 7.将每个偏振态的解视为一个个体,每个个体被编码成 $3 \times 12 = 36$ 位的染色体.目标函数和适应度函数可以设置

为光电探测器输出电压幅值 V ,即 $f=V$.程序开始时,STM32 的 DA 定时输出三角波扫描信号,并设置交叉、变异概率和进化代数.对悬空的 AD 管脚采样,获得转换数值作为种子源产生伪随机数,得到每个个体的通道控制数,将其写入偏振控制器三个通道.由于偏振控制器调节速度限制,往偏振控制器写入数据后,需要根据相对调节量确定对应的延时再进行光电采样,将光电信号幅值作为个体的适应度值.然后查询适应度值最大的个体作为局部最优解,并判断是否达到收敛条件或者进化代数.如果是,则输出最优解,偏振控制调节结束;如果不是,则根据适应度值以比例选择算法从种群中选出种群个体并配对,然后按照一定概率进行变异和交叉操作,之后产生下一代个体写入偏振控制器的通道进行循环操作直至输出全局最优解.

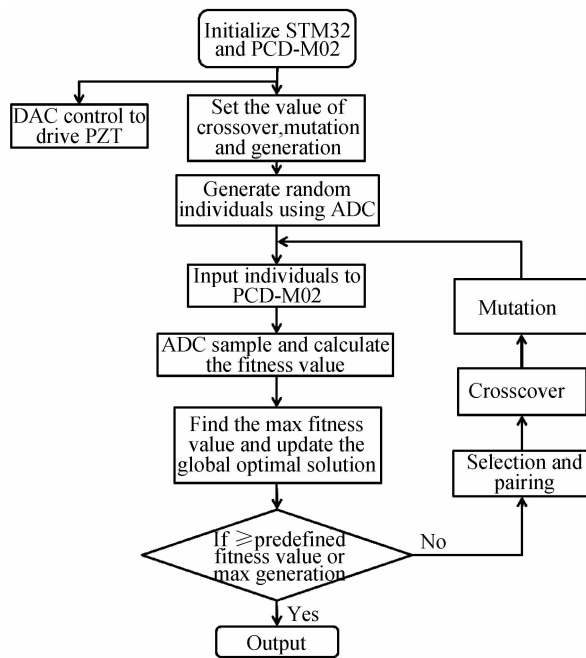


图 7 基于 STM32 的遗传算法偏振控制流程图

Fig. 7 Flowchart of STM32-based genetic algorithm polarization-control

程序中,将每个个体编写为结构体的形式,若干个个体编写成结构体数组,即种群.结构体的形式为

```
struct individual
```

```
{
```

```
uint16_t chrom[3]; //偏振控制器三个通道的控制数,16 位无符号整数数组
```

```
uint16_t fitness; //个体的适应度值,即 AD 采样的光电信号幅值
```

```
};
```

遗传算法输出的近似最优解并不是连续值,因此偏振控制器输出的偏振态也不连续,输出干涉信号的幅值相互独立,偏振调节效果如图 8,在输出解不同时,干涉信号的对比如不同.

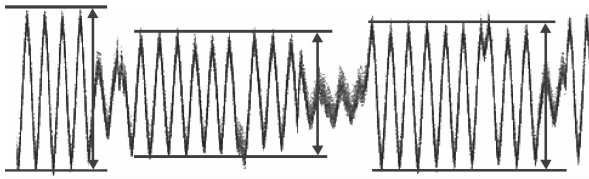


图 8 遗传算法进行偏振调节的光电信号

Fig. 8 Optical signal with running genetic algorithm polarization-control

在遗传算法中,交叉、变异概率和进化代数对最终结果都有影响,这三个参量需通过多次实验得到优化.设定种群数量为 20,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.1,进化代数为 20 代,对算法进行在线测试.由于三角波扫描频率为 122 Hz,因此光电采样时间需 ≥ 5 ms,因此算法耗时为 $20 \times 20 \times 5$ ms = 2 s,而如果使用高 8 位进行全局搜索算法的话,则需要 $2^8 \times 2^8 \times 5$ ms = 328 s.遗传算法连续测试 10 次的输出结果如图 9 所示.10 次的平均值在 1.1 V 左右,最大值为 1.26 V,最小值为 1.04 V.由此看出,遗传算法虽不能保证输出解一定是全局最优解,但相比全局搜索算法,它在较短的时间内能得到全局近似最优解.如果进一步提高三角波扫描频率,缩短采样时间,遗传算法的耗时可以进一步缩短.因此基于 STM32 的遗传算法可有效的实现长距离分布式光纤振动传感系统的偏振控制,可适用于对实时性要求较高的系统,并可提高系统集成度并可减少成本.

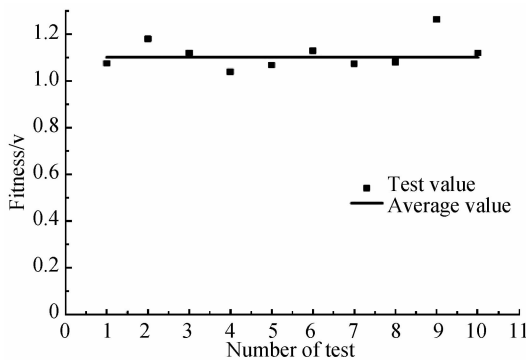


图 9 遗传算法输出结果

Fig. 9 Output results of genetic algorithm

3 结论

采用偏振反馈控制技术结合遗传算法对长距离分布式光纤振动传感系统进行偏振衰落抑制.结合 STM32 微处理器及 PCM-02 偏振控制模块特性,综合考虑微处理器的计算能力及各优化算法的优缺点,选用并优化遗传算法,在 STM32 微处理器上编写了遗传算法代码,实现长距离分布式光纤传感系统的偏振态控制,对其结果进行测试,结果表明遗传算法在较短的时间内可得到全局近似最优解.基于 STM32 的遗传算法偏振控制技术,具有结构简单、集成度高、成本低廉

等优点,对分布式传感系统的集成化及系统性能提升有很重要的意义.

致谢:感谢王炜男和安其海两位硕士研究生的帮助和支持!

参考文献

- [1] KERSEY A D, MARRONE M J, DANDRIDGE A. Analysis of input-polarization-induced phase noise in interferometric fiber-optic sensors and its reduction using polarization scrambling [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, **8**(6): 838-45.
- [2] QIN Z, ZHU T, CHEN L, et al. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(15): 1091-1093.
- [3] KIM H J, HAN Y G. Polarization-dependent in-line Mach-Zehnder interferometer for discrimination of temperature and ambient index sensitivities [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(8): 1037-1041.
- [4] OUYANG Dian, ZHOU Jin-feng. Research on polarization state in fiber sensor based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S1): 94-97. 欧阳甸, 周劲峰. 基于马赫-曾德尔原理光纤传感器偏振态的研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(S1): 94-97.
- [5] LIU Di-ren, SONG Mou-ping, ZHANG Xian-min, et al. Polarization-induced fading elimination technique for coherent detection of brillouin scattering spectrum [J]. *Acta Optical Sinica*, 2005, **25**(9): 1191-1194. 刘迪仁, 宋牟平, 章献民, 等. 布里渊散射谱相干检测的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1191-1194.
- [6] JING Zhen-guo, YIN Kai, ZHANG Min, et al. Polarization induced fading eliminating technique for interferometric optical fiber sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2024-2028. 荆振国, 殷楷, 张敏, 等. 干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8): 2024-2028.
- [7] ZHANG Mo-xi, ZENG Zhou-mo, FENG Hao, et al. Simulated annealing polarization control algorithm for dual Mach-Zehnder fiber interferometer [J]. *Laser and Infrared*, 2012, **42**(3): 324-330. 张溪默, 曾周末, 封皓, 等. 双 Mach-Zehnder 光纤干涉仪中的模拟退火偏振控制算法[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(3): 324-330.
- [8] LI Wei-wen, JIN Xiao-feng, ZHANG Xian-min, et al. Application of genetic algorithms in polarization control [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, **3**: 016. 李伟文, 金晓峰, 章献民, 等. 遗传算法在偏振态控制中的应用[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, **3**: 016.
- [9] SUN Wei, LIU Tie-gen, WANG Qiang, et al. Research on mix algorithm applied in distributed optical fiber sensor [J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2013, **2**: 019. 孙巍, 刘铁根, 王强, 等. 用于分布式光纤传感系统的混合算法研究[J]. *光电子·激光*, 2013, **2**: 019.
- [10] KERSEY A, MARRONE M, DANDRIDGE A, et al. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control [J]. *Lightwave Technology, Journal of*, 1988, **6**(10): 1599-609.
- [11] WANG Y T, YUAN R R, WANG S T, et al. The research of polarization feedback control system based on double Mach-Zehnder interferometer [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **308**: 1751-1754.
- [12] YU kan, LIAO Jian-feng, ZHANG Xiao-dan, et al. Optimal design of narrowband filter in oblique incidence based on genetic arithmetic [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 181-185. 俞侃, 廖剑锋, 张晓丹, 等. 基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 181-185.
- [13] MAMDOOHI G, FAUZI ABAS A, SAMSUDIN K, et al. Implementation of genetic algorithm in an embedded microcontroller based polarization control system [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, **25**(4): 869-73.