

# 基于 FPGA 的分布式光纤传感系统偏振控制研究

李鹏程, 刘琨, 江俊峰, 潘亮, 马鹏飞, 李志辰, 张焰, 李鑫, 刘铁根

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 为了消除基于双马赫-曾德尔干涉的分布式光纤传感系统中偏振退化和偏振相位漂移对定位性能的影响, 提出了一种结构简单、效率高的基于现场可编程门阵列(FPGA)的偏振控制方法。该方法采用偏振控制器反馈技术, 以两路光信号的反馈值作为控制函数, 结合改进的和声搜索(IHS)算法, 利用 FPGA 硬件并行结构和流水线技术快速实现算法迭代并控制偏振控制器调整偏振态。实验结果表明, 该方法能够在短时间内调整系统偏振态, 偏振控制时间约为 0.7808 s, 系统的定位精度提高到 $\pm 20$  m 以内, 有效地消除了偏振效应对定位性能的影响; 另外以 FPGA 代替计算机作为系统的控制核心, 提升了数据处理速度, 缩短了偏振控制时间, 提高了系统集成度从而有利于实现偏振控制仪器的小型化。

**关键词** 传感器; 分布式光纤传感; 偏振控制; 现场可编程门阵列; 改进和声搜索算法; 定位误差

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0510002

## Research on Polarization Control of Distributed Optical Fiber Sensing System Based on FPGA

Li Pengcheng, Liu Kun, Jiang Junfeng, Pan Liang, Ma Pengfei, Li Zhichen,  
Zhang Zhao, Li Xin, Liu Tiegeng

*School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information  
School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of  
Opto-Electronics Information Technology Ministry of Education, Tianjin 300072, China*

**Abstract** In order to eliminate the influence of polarization-induced fading and polarization-induced phase shift on the positioning performance in a dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system, a polarization control method based on field programmable gate array (FPGA) with simple structure and high efficiency is proposed. The method adopts polarization controller feedback technology and uses feedback values of two optical signals as control functions. In combination with the improved harmony search (IHS) algorithm, the FPGA hardware parallel structure and pipeline technology are used to rapidly implement the algorithm iteration and control the polarization controller to adjust the polarization state. The experimental results show that the method can adjust the polarization state of the system in a short time, the polarization control time is about 0.7808 s, and the positioning error of the system is improved up to within  $\pm 20$  m, which effectively eliminate the polarization effect on the positioning performance. Besides, the use of FPGA instead of the computer as the control core of the system improves the data processing speed, reduces the polarization control time, and improves the integration of system, thereby facilitating the miniaturization of the polarization control instruments.

**Key words** sensors; distributed optical fiber sensing; polarization control; field programmable gate array; improved harmony search algorithm; positioning error

**OCIS codes** 060.2370; 280.4788; 060.2420; 120.7280

收稿日期: 2017-10-17; 收到修改稿日期: 2017-11-28

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)

作者简介: 李鹏程(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感方面的研究。E-mail: 279474137@qq.com

导师简介: 刘琨(1981—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感和光电检测方面的研究。

E-mail: beiyangkl@tju.edu.cn

# 1 引 言

基于双马赫-曾德尔干涉的分布式光纤传感系统以其结构简单、灵敏度高、可进行长距离监测等优点,广泛应用于周界安防等领域。光波在单模光纤中传播时,因光纤自身的缺陷和外界环境的影响导致光纤中的两个正交偏振模式非简并,从而产生光纤的双折射,引起光波的偏振态随机变化,发生偏振退化和偏振相位漂移现象,偏振退化会使传感系统干涉信号可见度下降,导致传感系统的定位功能失效,偏振相位漂移会使信号相位产生变化,导致定位精度降低<sup>[1-2]</sup>。因此采取有效的偏振控制措施对于保持系统稳定至关重要。

为了消除偏振带来的影响,国内外研究者采取的方案有偏振分集接收技术、偏振态反馈控制法、法拉第旋转镜法等<sup>[3]</sup>。吴悦峰等<sup>[4]</sup>利用法拉第旋转镜可以很好地抑制偏振相位噪声,但一般只适用于迈克耳孙干涉结构中,使用范围有限;Patel等<sup>[5]</sup>提出偏振态反馈控制法,推导了反馈系统的控制信号与可见度之间的关系,利用最大化系统输出两路信号的可见度,这种方法虽然可以抑制偏振退化现象,但是偏振相位漂移仍然存在,具有一定的局限性。孙巍等<sup>[6]</sup>将偏振控制器与模拟退火混沌粒子群算法结合,根据两路光信号的差异度进行反馈控制调整系统的偏振态,但是该方法需要计算机进行算法运算,偏振控制时间长,系统集成度不高。和声搜索(HS)算法作为优化算法的一种由于操作简单而广泛应用于工程中,但是其步长调整在进化后期盲目搜索,容易陷入局部最优,为了克服存在的不足,Mahdavi等<sup>[7]</sup>提出线性增加局部扰动参数、指数减少扰动幅值的和声搜索算法,

Mahamed等<sup>[8]</sup>提出扰动时用全局最优解代替新解的全局和声搜索算法,虽然不同的设计思想和操作策略的引入使其性能得到不断改进,但是仍然存在收敛精度低、易陷入局部最优等问题。

本文提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的分布式光纤传感系统的偏振控制方法,用FPGA替代计算机作为系统的控制核心,从偏振光学理论出发,分析了偏振退化和偏振相位漂移对定位性能的影响,提出一种新型的偏振控制方法,以两路光信号的反馈值作为控制函数,采用改进的和声搜索(IHS)算法进行最优反馈值的搜寻迭代,算法自适应调整和声保留概率(HMCR)和音调调节概率(PAR),并引入差分进化算法中的变异操作,来改善算法的局部搜索能力和收敛精度,利用峰值检测电路结合FPGA的硬件并行结构和流水线技术实现该算法的全局快速搜索,输出最优电压到驱动电路来控制偏振控制器调整系统偏振态。实验结果表明,该方法能快速搜索到全局最优偏振态,缩短偏振控制时间,很好地消除偏振退化和相位漂移对定位性能的影响,使系统偏振态稳定、集成度好、成本低、调偏效率高。

## 2 基本原理

### 2.1 系统基本结构

偏振控制系统基本结构如图1所示,窄线宽激光器输出的光在3 dB光耦合器C1分为两路,两路光分别通过光环行器C2和C3从3 dB光耦合器C4与C5入射到双马赫-曾德尔干涉仪中,分别沿着顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向传播并在对端耦合器C5和C4中产生干涉信号,由光电探测器PD1和PD2转化为电信号,一方面输入FPGA进行数据处

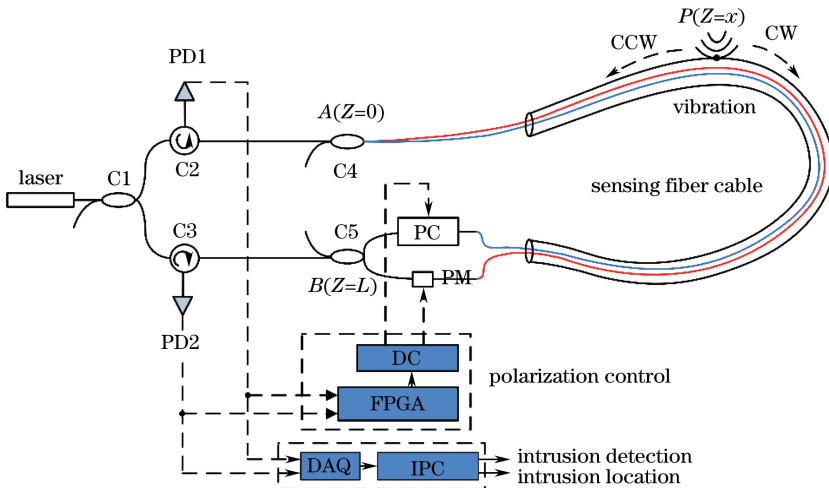


图1 双马赫-曾德尔型分布式光纤传感系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of distributed fiber-optic sensor based on dual Mach-Zehnder type

理输出最优电压值由驱动电路(DC)转化为驱动偏振控制器(PC)的数字晶体管-晶体管逻辑(TTL)电平和驱动相位调制器(PM)的模拟电压,相位调制器对光波进行正弦调制完成信号可见度测量并辅助偏振控制器进行偏振控制,另一方面由采集卡(DAQ)输入工控机(IPC)进行入侵信号的判定与定位。

当光路上的某一点  $P$  产生振动时,两臂中的光波受到振动信号的相位调制会产生一个与振动点位置  $x$  相关的时延差  $\tau$ ,其表达式为<sup>[9]</sup>:

$$\tau = \frac{n(L - 2x)}{c}, \quad (1)$$

式中  $\tau$  为两路光信号的时延差,  $L$  为传感光纤的长度,  $c$  为光速,  $n$  为光纤的折射率,  $x$  为振动点  $P$  的位置。

传感系统光源的输出为线偏振光,光波沿不同路径传播将退化为不同的椭圆偏振光,使得干涉仪输出的两路光波不能完全干涉。要研究偏振效应对干涉信号的影响,就要从椭圆偏振光干涉入手,两个椭圆偏振光的干涉光强表示为:

$$I = I_0 + 2E_{10}E_{20}\sqrt{a^2 + b^2}\cos(\Delta\varphi + \gamma), \quad (2)$$

式中  $I_0 = E_{x1}^2 + E_{y1}^2 + E_{x2}^2 + E_{y2}^2$  为直流分量,  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  为两臂的相位差,  $a = \cos(\beta_1 - \beta_2)\cos(\theta_1 - \theta_2)$ ,  $b = \sin(\beta_1 + \beta_2)\sin(\theta_1 - \theta_2)$ ,  $\gamma = \arctan(a/b)$  为偏振相位延迟;  $E_{10}$  和  $E_{20}$  分别为椭圆偏振光的绝对振幅,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为其绝对相位,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  为其方位角,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为其椭圆率角;  $E_{x1}$  和  $E_{y1}$  以及  $E_{x2}$  和  $E_{y2}$  分别为两个椭圆偏振光的正交分解分量。

由可见度定义公式可知:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2E_{10}E_{20}\sqrt{a^2 + b^2}}{I_0}. \quad (3)$$

式中  $V$  为光信号的可见度,  $I_{\max}$  为最大光强,  $I_{\min}$  为最小光强由(3)式可知干涉光的可见度由两束椭圆偏振光的绝对振幅、方位角和椭圆率角共同决定。当干涉信号的对比如较小时,干涉信号的信噪比降低,严重时会被淹没于噪声中使定位功能失效,这种现象称为偏振退化。

通过(2)式可知顺时针和逆时针的干涉光的相位不仅由振动产生的相位差  $\Delta\varphi$  决定,还包括偏振退化引起的偏振相位延迟  $\gamma$ ,而  $\gamma$  与椭圆偏光的方位角和椭圆率角有关,这种现象称为偏振相位漂移<sup>[10]</sup>。将(2)式去除直流分量并归一化后得到顺时针光强  $I_{cw}$  和逆时针光强  $I_{ccw}$  的表达式:

$$\begin{cases} I_{cw} = \cos[\Delta\varphi(t - \tau_1) + \gamma_{cw}] \\ I_{ccw} = \cos[\Delta\varphi(t - \tau_2) + \gamma_{ccw}] \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $\tau_1 = n(L - x)/c$ ,  $\tau_2 = nx/c$  分别为光波从振动

点沿顺时针方向传输到 PD2 和沿逆时针方向传输到 PD1 的时间,  $\gamma_{cw}$  和  $\gamma_{ccw}$  分别为顺时针和逆时针的方向偏振引起的附加相位由(1)式  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$  为两路信号的时延差,是求取振动点位置的关键,只有当  $\gamma_{cw}$  和  $\gamma_{ccw}$  相等时才能保证互相关估计的时延是正确的,一般情况下  $\gamma_{cw}$  和  $\gamma_{ccw}$  不相等,这将严重影响定位的精度,所以调整干涉光的偏振态、补偿相位漂移才能使系统定位准确。

## 2.2 IHS 算法

当不存在偏振效应带来的影响时,系统两路的干涉信号具有相同的可见度和固定的时延差,一致性较好;当两路光波处于不同偏振态时,信号可见度减小,时延差不固定,一致性变差,为了描述系统受到偏振态影响的程度,定义了一个信号反馈值  $r$ ,其表达式为<sup>[11]</sup>:

$$r = \frac{1}{T} \int_0^T |I_{ccw}(t + \tau_0) - I_{cw}(t)|. \quad (5)$$

式中  $T$  为一帧信号的时间由(5)式可知反馈值  $r$  兼顾了输出两路信号的可见度和一致性,能够有效地降低偏振效应对系统定位性能的影响。两路光信号的偏振态通过输入到偏振控制器上的电压来改变,系统的偏振控制过程可简化为目标函数  $r$  最小化的优化问题。

为了更好地实现偏振控制,偏振控制算法必须具备全局搜索以及快速收敛的能力。和声搜索算法<sup>[12]</sup>由于参数较少、收敛速度快而广泛应用于非线性优化问题,但和声搜索算法存在局部搜索能力低、收敛精度低等缺点,为了改进以上缺点,本研究提出了一种 IHS 算法,算法自适应调整和声保留概率和音调调节概率,并引入差分进化算法中的变异操作来改善算法的局部搜索能力和收敛精度,实验结果表明该算法具有较好的寻优能力和较短的寻优时间。

IHS 算法基本步骤如下:

1) 初始化参数。具体参数包括和声库(HM)大小  $S_{HM}$ 、和声保留概率  $x_{HMCR}$ 、音调调节概率  $x_{PAR}$ 、最大迭代次数  $N_1$ 、变量的维度、变量的取值范围。

2) 混沌初始化和声库。为了防止初始化和声库时产生集中分布的现象,采用混沌系统特有的遍历性来实现全局寻优<sup>[13]</sup>,首先随机产生一个二维的、每个分量在  $0 \sim 1$  之间的变量  $x_1 = (x_{11}, x_{12})$ ,由公式  $x_{(i+1)j} = 4x_{ij}(1 - x_{ij})$ ,  $i = 1, 2, \dots, 49$ ,  $j = 1, 2$  得到 50 个变量  $x_1, x_2, \dots, x_{50}$ ;将  $x_i$  加载到决策变量的取值范围内  $V_{ij} = a + x_{ij}(b - a)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 50$ ,  $j = 1, 2$ ,计算目标函数值  $r$ ,筛选出目标函数值最小的 20 个解作为初始化的和声库。

3) 即兴创作新的和声。每次通过三种操作产生新解:①以和声保留概率保留和声库中的分量;②在①的基础上以音调调节概率调节音调;③以 $(1-x_{\text{HMCR}})$ 概率在和声库外各变量的可行域内随机搜索在和声库外各变量的可行域内随机搜索,具体公式表示为:

$$V_{ij}^{\text{new}} = \begin{cases} V_{ij}, \text{rand}() \leq x_{\text{HMCR}} \\ a + \text{rand}() \cdot (b - a), \text{rand}() > x_{\text{HMCR}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\text{rand}()$  为在  $[0, 1]$  范围内均匀分布的随机数, 如果  $V_{ij}^{\text{new}}$  是从和声库中选择的还需要根据音调调节概率调整音调, 这里引入差分进化算法的变异操作<sup>[14-15]</sup>, 选择 DE/best/2 的变异策略提高算法的收敛速度, 从当前和声库中随机选择 4 个变量  $V_{p_1}$ 、 $V_{p_2}$ 、 $V_{p_3}$ 、 $V_{p_4}$ , 要求  $p_1, p_2, p_3, p_4$  是从集合  $\{1, \dots, S_{\text{HM}}\} \setminus \{i\}$  中随机选择的互不相同的整数,  $V_{\text{best}}$  为当前和声库中最优的个体,  $F$  为缩放因子, 在算法初始阶段个体之间差异较大, 算法可在较大的范围内搜索, 在算法后期, 群体都接近最优个体, 能在较小范围内搜索, 其公式表示为:

$$V_{ij}^{\text{new}} = \begin{cases} V_{\text{best}} + F(V_{p_1} - V_{p_2} + V_{p_3} - V_{p_4}), \\ \text{rand}() \leq x_{\text{PAR}} \\ V_{ij}^{\text{new}}, \text{rand}() > x_{\text{PAR}} \end{cases}. \quad (7)$$

为了提升算法的收敛性和寻优能力, 在算法运行过程中自适应调整和声保留概率和音调调节概率。对于目标函数值好的解, 采取较大的和声保留概率使得该解进入下一代的增大, 对于目标函数值差的解, 采用较小的和声保留概率加快改变该个体的结构, 使该解被淘汰。

$$x_{\text{HMCR}} = \begin{cases} H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) \cdot (f_i - f_{\min}) / \\ (f_{\max} - f_{\min}), f_i \leq f_{\text{ave}} \\ H_{\min}, f_i > f_{\text{ave}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $f_i$  为个体  $V_i$  的目标函数值,  $f_{\min}$  和  $f_{\max}$  为当前和声库中最优和最差个体的目标函数值,  $f_{\text{ave}}$  为当前和声库目标函数值的平均值,  $H_{\min}$  和  $H_{\max}$  分别为  $x_{\text{HMCR}}$  的上限和下限。

在算法优化的前期, 希望有较小的音调调节概率, 这样有利于找到局部最优解, 随着迭代次数的增加, 则希望有较大的音调调节概率以增加解得多样性。

$$x_{\text{PAR}}(t) = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min}) \cdot t / N_1, \quad (9)$$

式中  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  表示  $x_{\text{PAR}}$  的上下界,  $t$  为当前迭代次数。

4) 更新和声库。若新解的目标函数值优于原解的目标函数值, 则用新解替换原解得到新的和声库。

5) 判断是否满足迭代终止条件, 若满足则停止迭代输出最优解及最优值, 否则重复步骤 3 和 4。

### 2.3 偏振控制系统中 IHS 算法的 FPGA 硬件实现

偏振控制时间是衡量传感系统性能的重要指标, 通过 FPGA 硬件并行结构和流水线技术可以加快 IHS 算法的运行速度, 提高偏振控制效率, 缩短偏振控制时间<sup>[16-17]</sup>。IHS 算法的硬件控制平台如图 2 所示, FPGA 芯片为 Altera 公司的 EP4CE15F23C 系列, RMS-DC(有效值直流转换器)为峰值检测部分, 采用 AD637 芯片主要用于得到信号的有效值, 进行算法反馈值  $r$  的计算时可以简化光强信号的差值运算, 缩短算法处理时间。图 3(a) 为输入不同的峰值电压  $V_{\text{pp}}$  时, 输出的有效电压值  $V_{\text{RMS}}$  与带宽频率的关系曲线, 其输出的有效电压值比较平坦, 具有很好的稳定性。图 3(b) 为不同带宽频率下输入的峰值电压与输出的有效电压值之间的关系曲线, 可以看出两者在不同的带宽下均具有很好的线性关系, 具有较高的精度和分辨率。AD(模数转换)采集使用 AD9226 芯片, 采样精度为 12 bit, 最大采样率为  $65 \cdot 10^6 / \text{s}$ 。RAM 为随机存取存储器, 用存储处理的数据。

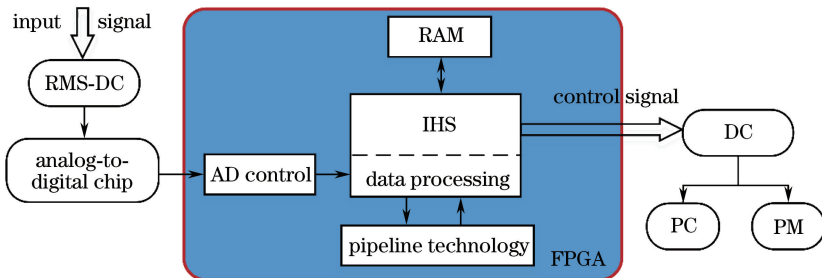


图 2 基于 FPGA 的偏振控制结构

Fig. 2 Polarization control structure based on FPGA

偏振控制过程为电信号经过 RMS—DC 部分, 由 AD 采集数据传输至 FPGA 芯片进行算法处理, 并通过运算得到的电压值控制驱动电路使光纤一端

的相位调制器产生频率为 1 kHz、振幅为 5 V 的正弦波扰动信号作为参考信号, 辅助另一端的偏振控制器进行稳定高速的偏振控制<sup>[18]</sup>。

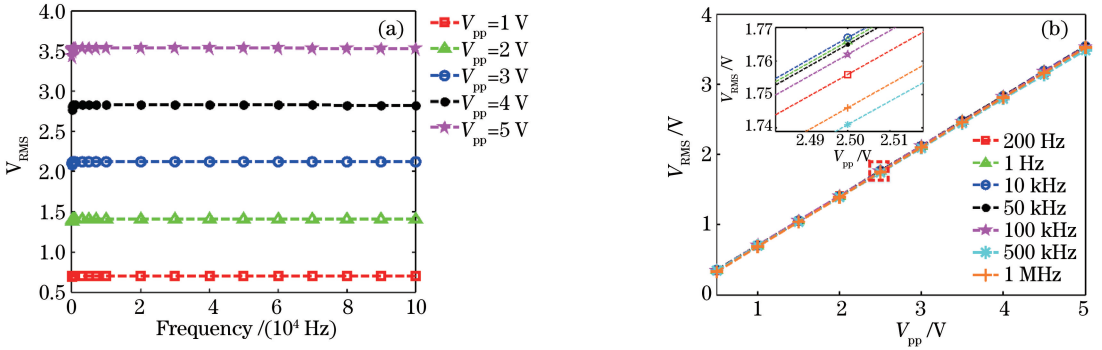


图 3 AD637 带宽测试结果。(a)输出的有效电压值与频率的关系曲线;(b)输出有效电压值与输入峰值电压的关系曲线  
Fig. 3 Bandwidth test results of AD637. (a) Curve of the relationship between output  $V_{RMS}$  and frequency;  
(b) curve of the relationship between output  $V_{RMS}$  and input  $V_{pp}$

### 3 实验与分析

为了验证基于 FPGA 的 IHS 算法在系统偏振控制中的可行性与有效性, 搭建了如图 1 所示系统, 监测距离约为 3 km, 根据模块化思想在 FPGA 上编写 IHS 算法, 结合 FPGA 硬件并行结构以及内存的分布性, 对系统的偏振态进行控制共进行了 100 次实验。通过大量实验选取了算法的最佳控制参量, 设置  $S_{HM} = 20$ ,  $H_{min} = 0.8$ ,  $H_{max} = 0.99$ ,  $P_{min} = 0.4$ ,  $P_{max} = 0.8$ ,  $F = 0.5$ ,  $N_1 = 9$ , 逻辑电平  $V_i$  的取值范围为  $[0, 4.095]$ , 迭代终止条件为  $r < 0.02$ 。

在双马赫-曾德尔型分布式光纤传感系统中, 耦合器与环形器等器件对光信号强弱有较大影响, 严重时会导致信号的信噪比降低, 而在该系统中光纤

后向瑞利散射成为影响干涉光信噪比的主要因素。通过测量, 由窄线宽光激光器输出的光功率实测值为 11.55 mW, 在耦合器 C5 处测得输出的两干涉传感臂光功率分别为 2.648 mW 和 2.705 mW, 相比背向瑞利散射光强要大得多, 能有效实现高信噪比的干涉信号, 同理测得耦合器 C4 处的光信号同样能够实现高信噪比。

图 4 为偏振控制前后两路信号的波形图, 图 4(a)为偏振控制前的信号, 两路信号的幅值和相位存在较大差异, 信号相关性较差, 图 4(b)为偏振控制后的信号波形图, 信号的幅值和相位得到很好的改善, 具有很好的一致性。因此该方法能有效消除偏振退化和相位漂移的影响, 使两路信号可见度最大并具有很好的一致性。

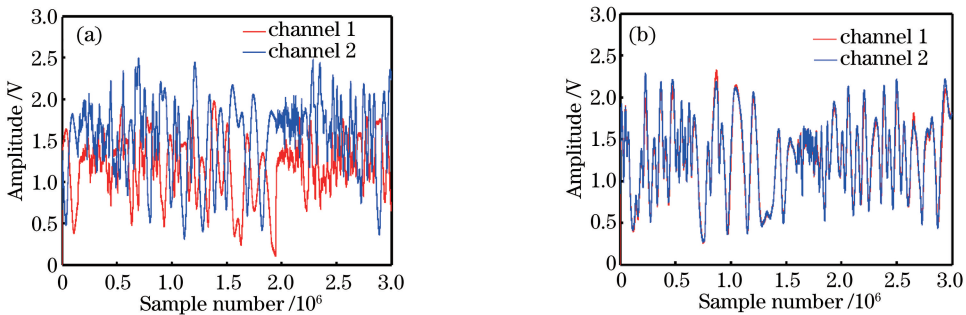


图 4 (a)偏振控制前的输出信号;(b)偏振控制后的输出信号

Fig. 4 (a) Output signals before polarization control; (b) output signals after polarization control

为了验证偏振态变化对定位精度的影响, 本研究选择三个典型的位置分别做了 100 组定位实验, 分别统计偏振控制前后定位精度的变化, 这三个位置距离起始点分别为 200 m、1.3 km 和 2.5 km, 如

表 1 所示, 偏振控制之前, 定位误差集中在  $\pm 20$  m 之外, 系统的定位精度较差; 偏振控制之后定位精度大部分集中在  $\pm 20$  m 以内, 符合系统性能指标, 说明该偏振控制方法改善了系统的定位性能。

偏振控制时间将影响系统的定位功能实时性,在进行偏振控制时,系统的入侵判定和定位功能失效,偏振控制时间越长,入侵振动漏报警的概率越高.表 2 给出了 IHS 算法基于 FPGA 的偏振控制的运行时间,每个运行时间为 10 次计算的平均值,由表 2 可知,基于 FPGA 的偏振控制时间约为 0.7808 s,偏振控制时间较短,实时性好,可见基于 FPGA 的并行硬件结构能够提高计算速度,有效缩短偏振控制时间,另外系统集成度高,有利于实现偏振控仪器的小型化.

表 1 偏振控制前后定位精度比较

Table 1 Comparison between the positioning accuracy before and after polarization control

Status	Position	Position error /m			
		±10	±20	±30-±50	>±50
polarization before	200 m	36%	20%	31%	13%
	1.3 km	33%	31%	31%	5%
	2.5 km	29%	24%	35%	12%
polarization control	200 m	62%	27%	11%	0
	1.3 km	65%	28%	6%	1%
	2.5 km	70%	25%	5%	0%

表 2 偏振控制时间

Table 2 Polarization control time

Number of events						Average
	1	2	3	4	5	
Polarization control time /s	0.838	0.844	0.65	0.552	1.02	0.7808

## 4 结 论

所提出的基于 FPGA 的 IHS 算法偏振控制方法可以很好地消除双马赫-曾德尔干涉的分布式光纤传感系统中偏振退化和相位漂移降低定位性能的问题.以两路光信号的反馈值作为控制函数,结合 FPGA 的硬件并行结构和流水线技术,能够在短时间对系统偏振态进行控制,偏振控制时间约为 0.7808 s,系统的定位精度提高到±20 m 以内,偏振控制效率高.另外用 FPGA 替代计算机作为系统的控制核心,系统集成度高,能够实现偏振控制仪器小型化,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.

## 参 考 文 献

[1] Kersey A D, Dandridge A, Tveten A B. Dependence of visibility on input polarization in interferometric fiber-optic sensors[J]. Optics Letters, 1988, 13(4):

288-290.

[2] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, *et al.* Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on rayleigh scattering effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0700002.  
张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0700002.

[3] Hu Z L, Jiang P, Ma L N, *et al.* Suppression of polarization induced signal fading and phase noise utilizing orthogonal-polarization switching method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910001.  
胡正良, 蒋鹏, 马丽娜, 等. 利用正交偏振切换抗偏振衰落和抑制偏振噪声[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910001.

[4] Wu Y F, Xiao H, Zhang S W, *et al.* Study of polarization-induced phase noise in Michelson interferometer with Faraday rotator mirror [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2008, 19(11): 1446-1449.  
吴悦峰, 肖浩, 张松伟, 等. 基于法拉第旋转镜的 Michelson 干涉仪偏振相位噪声研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(11): 1446-1449.

[5] Patel J S, Zhuang Z, Zadorozhny Y. Distributed fiber sensor with detection and signal processing using polarization state management: US7139476B2 [P]. 2006-10-26.

[6] Sun W, Liu T G, Wang Q, *et al.* Research on mix algorithm applied in distributed optical fiber sensor [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24(2): 302-307.  
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, 24(2): 302-307.

[7] Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E, *et al.* An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188(2): 1567-1579.

[8] Mahamed G H, Mahdavi M. Global-best harmony search[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 198(2): 643-656.

[9] Wu J, Chen W M, Tan J, *et al.* Analysis on the influence of polarization state degradation to the performance of Mach-Zehnder distributed optical-fiber sensing system[J]. Laser Journal, 2008, 29(6): 33-35.  
吴俊, 陈伟民, 谭靖, 等. 偏振态退化对双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位性能的影响分析[J]. 激光杂志, 2008, 29(6): 33-35.

[10] Heismann H. Integrated-optic polarization trans-

- former for reset-free endless polarization control[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(8): 1898-1906.
- [11] Chen Q, Liu T, Liu K, *et al.* An elimination method of polarization-induced phase shift and fading in dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 3135-3141.
- [12] Geem Z W, Kim J H, Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [13] Cheng Y, Cheng W M, Zheng Y, *et al.* Structural reliability optimal design based on chaos particle swarm optimization [J]. Journal of Central South University, 2011, 42(3): 671-676.  
程跃, 程文明, 郑严, 等. 基于混沌粒子群算法的结构可靠性优化设计[J]. 中南大学学报, 2011, 42(3): 671-676.
- [14] Chakraborty P, Roy G G, Das S, *et al.* An improved harmony search algorithm with differential mutation operator[J]. Fundamenta Informaticae, 2009, 95(4): 401-426.
- [15] Swagatam D, Ponnuthurai N S. Differential evolution: a survey of the state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15(1): 1061-1089.
- [16] An H Y, Liu D W, Geng R H, *et al.* Polarization controlling by FPGA for quantum security communication [ J ]. System Engineering and Electronics, 2016, 38(8): 1917-1921.  
安辉耀, 刘敦伟, 耿瑞华, 等. 量子通信系统中基于FPGA的偏振控制[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8): 1917-1921.
- [17] Liu H F, Tao J H, Zhang N, *et al.* Polarization control in long-distance distributed sensing system based on STM32 genetic algorithm [ J ]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 112-116.  
刘海锋, 陶俊豪, 张宁, 等. 长距离分布式光纤传感中基于STM32的遗传算法偏振控制[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 112-116.
- [18] Zhang X M, Zeng Z M, Feng H, *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.