

# 基于二元矩形脉冲相位调制的迈克耳孙干涉型 全光纤周界安防系统

任仲杰<sup>1,2</sup>, 崔珂<sup>2\*</sup>, 李建欣<sup>1,2</sup>, 朱日宏<sup>1,2</sup>, 邓少坤<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

<sup>2</sup>南京理工大学先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210094;

<sup>3</sup>南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 利用高相干、低噪音激光器作为光源, 设计了 2 干涉臂长度差为 60 m 的长光程差光纤迈克耳孙干涉仪作为传感器。采用二元矩形脉冲对光源进行相位调制, 结合正交信号解调法恢复相位信息, 由基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的高性能询问器实时实现相位信号的计算。结合时域穿越统计 (LC) 报警算法, 提高了对入侵事件报警的实时性及精确性。最终搭建了包含 4 个防区的安防系统, 该系统询问设备简单、成本低、实时性高。实验结果表明, 通过设定合适的阈值, 系统可以对各种入侵和干扰行为实时进行报警, 同时对雨雪等恶劣环境的误报进行有效抑制, 该系统持续工作 1 个月, 未出现漏报, 误报率低于 1%。

**关键词** 光纤光学; 周界安防; 迈克耳孙干涉仪; 相位信号解调; 穿越统计

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1206004

## Michelson-Interferometer-Based All-Fiber Optical Perimeter Security System by Utilizing Binary Rectangular Pulse Phase Modulation

Ren Zhongjie<sup>1,2</sup>, Cui Ke<sup>2</sup>, Li Jianxin<sup>1,2</sup>, Zhu Rihong<sup>1,2</sup>, Deng Shaokun<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;*

<sup>2</sup>*Ministry of Industry and Information Technology, Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;*

<sup>3</sup>*School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** We use highly coherent and very low-noise laser as the light source to design fiber Michelson interferometers with an optical path difference of 60 m used as the front-end transducers. Binary rectangular pulse is used to modulate the phases of the light source, and the phase signals are restored with an orthogonal demodulation algorithm. A highly efficient interrogator controller based on field programmable gate array (FPGA) is used to calculate phase signals in real time. Real time and accuracy of invasion alarm signals are improved, based on the time-domain level crossing (LC) algorithm. Finally, a four-zone security system is set up, which has advantages of simple interrogator controller, low cost and real-time handling capability. The experimental results show that the system can alert all kinds of intrusions in real time and suppress the false alarm caused by the environmental noises, such as winds and rains, under the chosen proper threshold. The system has worked for 1 month without alarm failure and the false alarm rate is less than 1%.

**Key words** fiber optics; perimeter security; Michelson interferometer; phase signal demodulation; level crossing (LC)

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 060.2380; 060.4080; 120.5050

**收稿日期:** 2017-07-11; **收到修改稿日期:** 2017-08-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(61475072)、中央高校基本科研业务费专项资金(30916011349, 30916014112-019)

**作者简介:** 任仲杰(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: 15850521491@163.com

**导师简介:** 朱日宏(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事干涉测量技术、高功率激光器以及光纤传感技术方面的研究。E-mail: zhurihong@njust.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: njjustcuik@njust.edu.cn

## 1 引 言

在近几十年内,光纤传感技术已经受到了广泛的关注,其具有高灵敏度、动态范围大、工作频带宽、无源性等优点,同时具有抗腐蚀和抗环境干扰能力强、传输传感合一、无中继传输距离长等优点,在温度、应变、振动以及声学检测方面有着广泛的应用<sup>[1-8]</sup>。随着光纤振动传感和人工智能的发展,全光纤周界安防系统作为新型周界入侵探测技术,在基础设施、军工基地、能源场所和金融中心等领域的周界安防体系中发挥着重要作用。

目前基于相干光时域反射仪(COTDR)和偏振光时域反射仪(POTDR)以及布里渊(Brillouin)散射技术的传感器,在振动探测领域具有广阔的发展前景<sup>[9-13]</sup>。在使用干涉仪检测振动导致的相位变化的结构中,一般以萨尼亚克、马赫-曾德尔和迈克耳孙干涉仪作为传感器的核心结构<sup>[14-17]</sup>,其中,基于法拉第旋光镜(FRM)的光纤迈克耳孙干涉仪,能够有效解决偏振衰落和双折射效应引起的信号变化,且具有结构简单、成本低廉的优点。目前常用的迈克耳孙干涉相位解调方法有相位生成载波法<sup>[18-19]</sup>、 $3 \times 3$ 耦合法<sup>[20]</sup>、外差解调技术<sup>[21]</sup>等。这些方法相对较为成熟,但均有其局限性。相位生成载波法以及外差法均需对光源的频率进行调制,同时在正交信号的提取过程中运算相对复杂,对硬件要求较高。 $3 \times 3$ 耦合法的方案以实验室研究为主,实际工作时,每路传感器阵列需要从1个 $3 \times 3$ 耦合器输出,在大规模成阵时对光电探测器需求量增加,同时 $3 \times 3$ 耦合器制作难度相对较大,成本较高。另一方面,在判断外界有无入侵的时候,传统的基于时频判断外界有无入侵扰动的算法在使用过程中极易受到随机噪声、外界轻扰和风雨的影响,导致报警准确率下降,实时性降低,因此如何准确快速地得到不同外界情况下信号的变化尤为重要。

鉴于此,本文基于二元矩形脉冲相位调制,设计并实现了一种实时迈克耳孙干涉型全光纤周界安防系统。利用高相干低噪音激光器作为光源,设计了2干涉臂长度差为60 m的长光程差光纤迈克耳孙干涉仪。采用了基于矩形脉冲二元相位调制的调制方法<sup>[22]</sup>,其核心是利用矩形脉冲对激光光源进行二元相位调制,在输出的干涉信号中生成3路移相干涉信号,结合正交解调法求出相位信息。基于该方法,在现场可编程门阵列(FPGA)平台中设计了高度紧凑、高效率的控制询问器<sup>[23]</sup>,其核心是利用可调延迟精确自适应地同步每个防区的往返时间并获取各防区对应的3步移相信号,实时计算出各防区相位的信号。结合时域穿越统计(LC)报警算法<sup>[24]</sup>,提高了对入侵事件报警的实时性及精确性。最终实现了一种多防区型光纤周界安全系统,能准确快速地反映不同情况下的时频信号的变化。

## 2 系统原理及构成

### 2.1 光纤相位传感原理

波长为 $\lambda$ 的激光在长度为 $l$ 的光纤内传播后,其对应的相位延时为

$$\varphi = 2\pi nl / \lambda = \beta l, \quad (1)$$

式中 $\beta$ 为光波传播常数, $n$ 为光纤折射率。当外界扰动作用在光纤上时,引起光的相位变化为

$$\Delta\varphi = \beta\Delta l + l\Delta\beta. \quad (2)$$

由(2)式可知,相位变化来源于2个方面:光纤长度的相对变化和折射率的相对变化。当外界干扰作用于传感光纤时,弹性变形使光纤长度发生变化,同时光弹效应使纤芯折射率发生变化,从而导致在其中传播的光波的相位发生变化。采用干涉技术进行检测,可检测到扰动信号的变化。迈克耳孙干涉仪原理如图1所示,激光器发出的相干光经过隔离器后,由3 dB耦合器分成2路光分别进入干涉仪的参考臂和信号臂,2路光经过FRM反射后,从耦合器的另一端输出,输出的干涉光强信号由光电探测器(PD)接收。采用FRM可以克服偏振衰落,结构简单,价格低廉。PD接收到的干涉光强 $I$ 可表示为

$$I = A + B\cos(\varphi_0 + \Delta\varphi + \varphi_s), \quad (3)$$

式中 $A$ 为直流项, $B$ 为干涉相幅值, $\varphi_0$ 为初始相位, $\varphi_s$ 为环境噪声, $\Delta\varphi$ 表示由外界入侵引起的相位变化。通过相关的解调方法,解调出 $\Delta\varphi$ ,从而快速反映入侵扰动的情况,实时监测周界防区的入侵状况。由迈克耳孙干涉仪构成的防区的具体监测结构如图2所示,与耦合器直接连接的参考臂和信号臂叠在一起,同时经过监控区域,区域中干扰信号对2臂造成的影响不是完全对称的,最终表现为干涉光强的变化和抖动,从而可

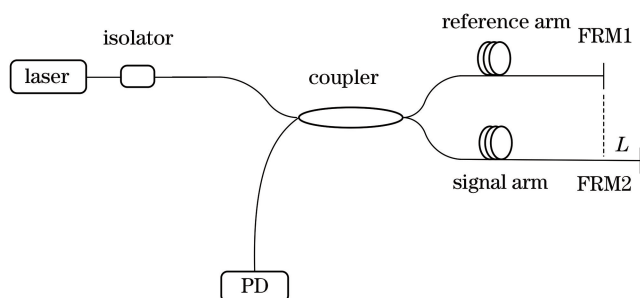


图 1 迈克耳孙干涉仪模型

Fig. 1 Model of Michelson interferometer

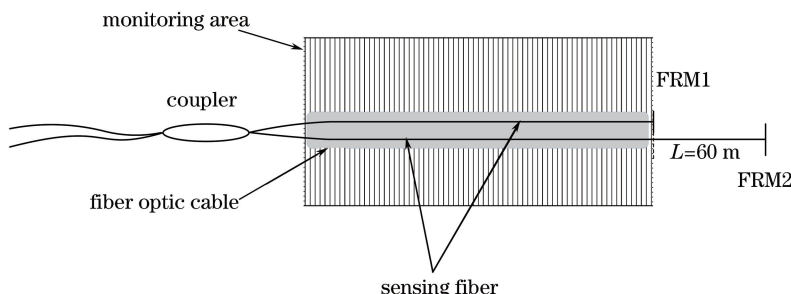


图 2 防区的具体监测结构

Fig. 2 Specific structure of monitoring area

以表征入侵信号的发生。图中臂长  $L$  的引入是为了实现矩形脉冲二元相位调制原理,它被密封固定在监测区域以外,防止受到外界干扰。本文结合激光光源高相干、低噪音的特性,确定 2 臂长度差为 60 m。

### 2.2 相位调制解调算法

采用一种基于二元矩形脉冲相位调制的调制方法<sup>[22]</sup>,通过对激光光源进行二元脉冲相位调制,利用非平衡迈克耳孙干涉仪 2 干涉臂之间存在长度差的特点,在耦合器的输出端产生 3 路移相信号,结合正交解调法,解算出相位信息。其原理如图 3 所示,具体操作步骤是,在光源进入  $2 \times 2$  耦合器之前先经过相位调制器 (PM),相位调制器产生 1 个二元矩形脉冲调制,调制信号由信号源产生,其产生的相位调制信号  $\varphi_m$  可以表示为

$$\varphi_m = \begin{cases} \pi/2, & kT \leq t < \tau + kT, \\ 0, & \tau + kT \leq t < (k + 1)T, \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\tau$  表示矩形脉冲宽度,  $T$  为矩形脉冲周期,  $k$  为整数。设干涉仪 2 臂长度差为  $L$ , 满足  $\tau = 2\pi nL/c$ , 于是, (3) 式可以表示为

$$I = A + B \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi + \varphi_s + \Delta\varphi_m), \quad (5)$$

$\Delta\varphi_m = \varphi_m(t) - \varphi_m(t - \tau)$  表示由于迈克耳孙干涉仪 2 干涉臂存在长度差产生的调制信号,  $\Delta\varphi_m$ 、 $\varphi_m(t)$ 、 $\varphi_m(t - \tau)$  之间的关系如图 4(a)~(c) 所示。令  $\theta = \varphi_0 + \Delta\varphi + \varphi_s$ , 将 (4) 式代入 (5) 式, 光强  $I$  可表示为

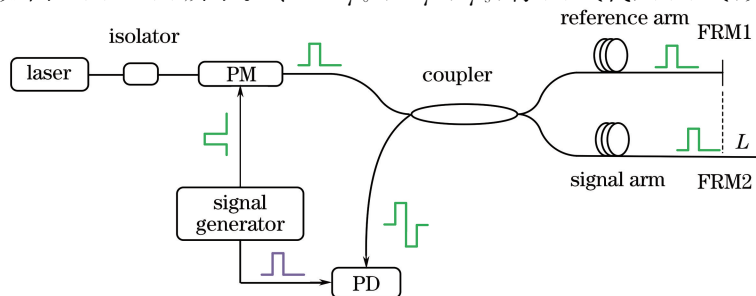


图 3 相位解调原理图

Fig. 3 Principle of phase demodulation

$$I = \begin{cases} I_1 = A + B\cos(\theta + \pi/2), & kT \leq t < \tau + kT, \\ I_2 = A + B\cos \theta, & 2\tau + kT \leq t < (k+1)T, \\ I_3 = A + B\cos(\theta - \pi/2), & \tau + kT \leq t < 2\tau + kT. \end{cases} \quad (6)$$

设外界扰动信号的周期为  $T_1$ , 在实际使用过程中, 二元矩形脉冲调制信号频率较高, 满足  $T \ll T_1$ , 认为在调制周期  $T$  内, 振动信号在时间上保持不变。另一方面, 信号发生器产生 1 个与相位信号周期相同、脉冲无延迟的脉冲信号, 信号直接进入光电探测器, 用作标定  $I_1, I_2, I_3$  对应位置的参考脉冲, 如图 4(d) 所示, 通过对  $I_1, I_2, I_3$  对应位置时间的标定, 获取 3 路移相信号  $I_1, I_2, I_3$ , 利用反正切法, 求得

$$\theta = \arctan\{(I_1 - I_3)/[2I_2 - (I_1 + I_3)]\}, \quad (7)$$

然后通过高通滤波去除  $\theta$  中的  $\varphi_0$  和  $\varphi_s$ , 获得外界振动项信号相  $\Delta\varphi$ 。

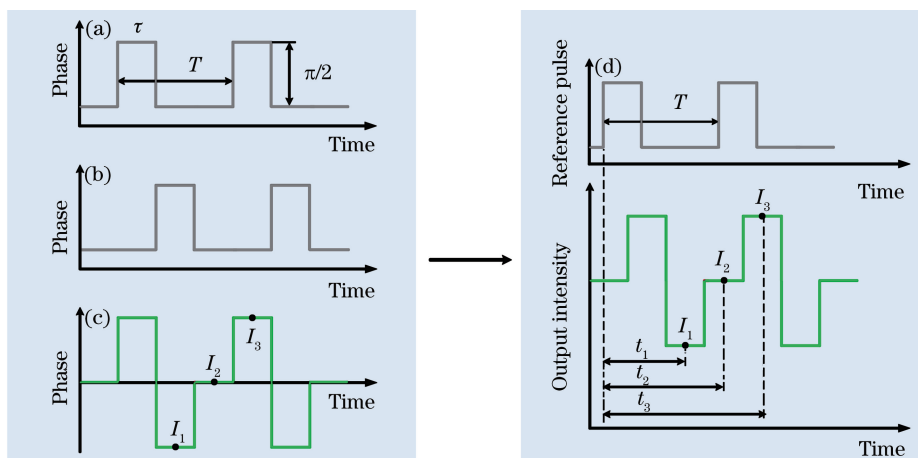


图 4 (a)  $\varphi_m(t)$ ; (b)  $\varphi_m(t-\tau)$ ; (c)  $\Delta\varphi_m$ ; (d) 输出光强与参考脉冲的关系

Fig. 4 (a)  $\varphi_m(t)$ ; (b)  $\varphi_m(t-\tau)$ ; (c)  $\Delta\varphi_m$ ; (d) relationship between output light intensity and the reference pulse

### 2.3 基于 FPGA 的控制询问器

设计了基于 FPGA 的高度紧凑、高效率的控制询问器<sup>[23]</sup>, 如图 5 所示, 其核心是引入 1 个额外的可调延迟, 精确自适应地同步每个防区的往返时间并获取各防区对应的 3 步移相信号, 然后快速实时计算对应的相位, 最后由 USB 将数据实时传输至个人计算机端。此外, 询问器还包括生成询问脉冲, 产生相位调制脉冲和内部参考脉冲。相位调制脉冲经过电压放大器之后进入相位调制器, 对光源相位进行调制; 内部参考脉冲用于后续实时信号的获取与解调。模数转换器 ADC1~ADC4 用于接收光电探测器转换的干涉光强信号, 整个控制询问器包括 FPGA 芯片、ADC 芯片和一些必要的模拟电路芯片, 报警判断在个人计算机端实现。

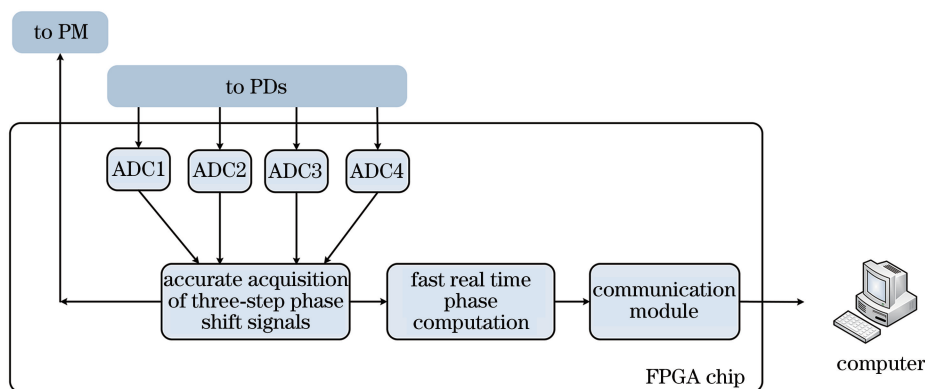


图 5 FPGA 控制询问器结构图

Fig. 5 Structure of FPGA-based interrogator controller

### 2.4 报警判断方法

图 6 为时域穿越统计的原理图。使用基于时域穿越统计的报警算法<sup>[24]</sup>, 将得到的相位数据按照时间定义 1 个时间窗口, 在该窗口里的所有点中, 给定阈值的一系列正向穿越点  $N_{LC}$  可表示为



$$N_{LC} = \sum_1^{N-1} f\{[x(n+1) \geq x_{th}] \& [x(n) < x_{th}]\}, \quad (8)$$

式中  $x(n)$  表示该时窗内的振动相位信号,  $N$  表示信号总长度;  $x_{th}$  是水平阈值, 函数  $f$  当表达式为真时等于 1, 否则等于 0; 这样  $N_{LC}$  就记录了该时窗内所有正向穿越水平阈值点的个数。连续的  $N_{LC}$  构成 1 个数组  $N_{LC}(m)$ , 对  $N_{LC}(m)$  进行分析, 选定 1 个阈值  $N_{LC_{th}}$ , 当  $N_{LC}(m) \geq N_{LC_{th}}$  时, 该时窗内发生报警, 否则不报警。当报警发生 1 次后, 由于入侵的时间较长, 会在短时间内产生多次报警, 为避免持续报警, 报警将在接下来一段时间之内撤出, 当时间达到撤出时间上限后, 再恢复报警判断。

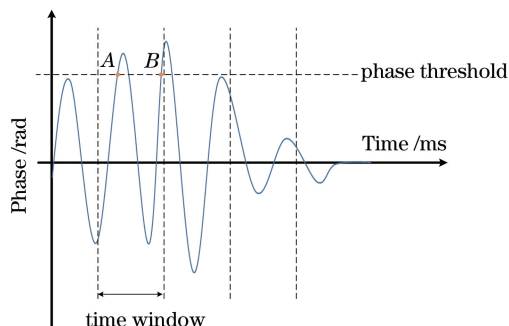


图 6 时域 LC 原理图

Fig. 6 Principle of time domain LC

### 3 防区系统的构建

基于上述理论搭建的 4 个防区系统样机总的结构如图 7 所示, 相位调制信号由基于 FPGA 控制询问器提供, 经过相位调制的激光信号经过  $1 \times 4$  耦合器后再经环形器进入传感干涉仪, 返回的光从环形器的输出端进入光电探测器, 然后经过模数(A/D)转换, 由 FPGA 芯片内部产生的提取数据的逻辑获取 3 路光强, 然后快速算出相位信号, 最后由 USB 通信部分将相位信号传输到个人计算机端, 进行后续的实时处理与显示, 作出相应的报警。激光依次经过激光器, 相位调制器,  $1 \times 4$  耦合器的 1、2、3、4 端口后的功率分别为 5.450, 1.400, 0.360, 0.354, 0.358, 0.355 mW。对 A/D 转换的数字信号进行处理流程如图 8 所示, 分为数据提取模块、相位计算模块、滤波模块、LC 分析模块, 以及最后阈值判断和报警模块。具体实施时, 激光器采用 LN Solution 公司生产的 LN Focus 型窄带激光器, 其波长为 1552 nm, 线宽低于 1 kHz; 采用 JDSU 公司生产的 PM-150-010-50-11-C1 型相位调制器; 采用 TTI 公司生产的 TIA525I-FC 型光电探测器, PD1~PD4 接收环形器输出的干涉信号, 然后经过 A/D 转换为数字信号, 进入处理模块。控制询问器在由 Altera 公司生产的 Stratix-III FPGA(EP3SE110F1152I3)上实现。该控制器可在 200 MSa/s 采样率下稳定运行, ADC 拥有 10 bit 采样位宽。防区具体分布如图 9 所示, 防区长度为 120 m, 固定在围栏上。

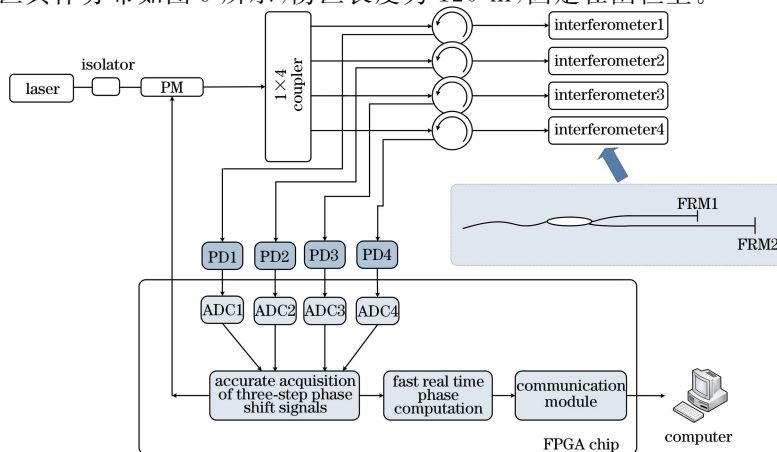


图 7 系统样机总的结构图

Fig. 7 Overall structure of system prototype

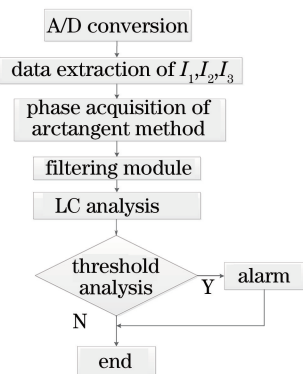


图 8 数字处理结构

Fig. 8 Scheme of data processing



图 9 防区照片

Fig. 9 Photograph of monitoring area

## 4 实验结果及分析

### 4.1 初步时域信号分析

具体实验分为 3 个部分:1)对正常环境下的信号进行监测;2)对雨雪天气状态下的信号进行监测;3)对栏杆受到不同行为入侵时的信号进行监测,包括挖洞、敲击、脚踹以及攀爬。为了测试系统样机的性能,对系统进行了持续 1 个月以上的测试。按照上述实验测得了不同情况下的信号变化,当只存在环境影响时,其相位振动信号如图 10 所示,当对栅栏实施不同干扰作用时,相位振动信号如图 11 所示,实验结果表明,只存在轻微环境干扰时,相位的扰动在 0.5 rad 以内,当对栅栏实施不同情况下的入侵时,相位扰动的幅度明显增加。图 11(a)表示脚踹情况下的相位扰动,幅度值在 10~20 rad 之间;图 11(b)表示攀爬情况下的相位扰动,幅度值在 5~10 rad 之间;图 11(c)表示铁棒敲击情况下的相位扰动,幅度值在 5~10 rad 之间;图 11(d)表示挖洞情况下的相位扰动,幅度值超过 50 rad,甚至达到 100 rad。长期实验结果表明,将阈值设置在 2~3 rad,可以区分有无对栅栏的入侵。

后续对雨雪天气的干扰进行了长时间实验。其相位扰动如图 12 所示,幅度值基本在 3rad 之内,偶尔

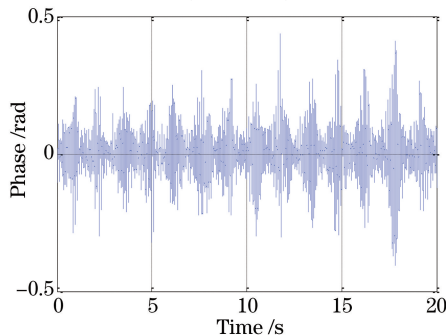


图 10 正常环境下的解调信号

Fig. 10 Demodulated signal in normal environment

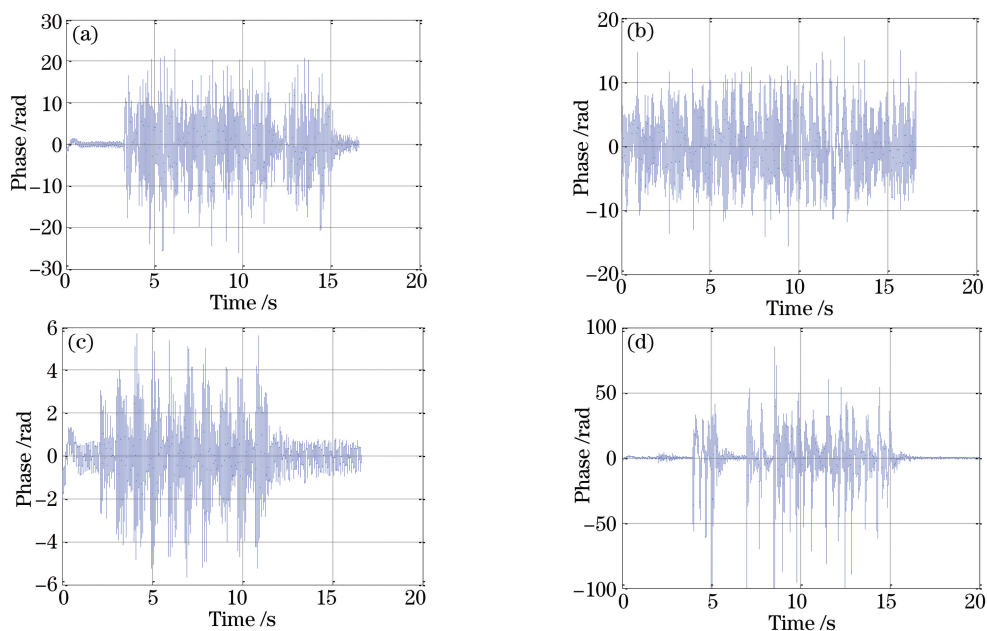


图 11 各种外界干扰下的相位变化。(a)脚踹;(b)攀爬;(c)铁棒敲击;(d)挖洞  
 Fig. 11 Phase changes under various external disturbances. (a) Kicking;  
 (b) climbing; (c) knocking with iron bar; (d) digging holes

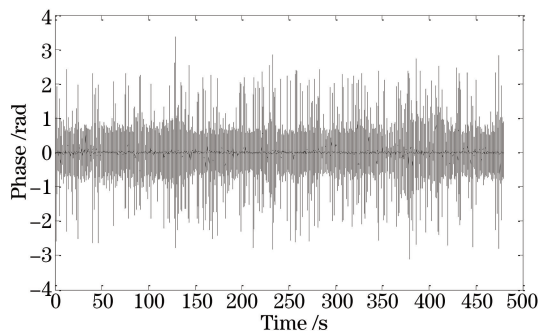


图 12 雨雪干扰下的相位变化  
 Fig. 12 Phase change under the interference of rains and snows

超过 3 rad。可以初步看出,在风雨天气以及环境噪音的情况下,相位振动的幅值基本在 3 rad 以内,当存在外界入侵时,相位振动幅度会超过 5 rad,不同情况下甚至可能超过 50 rad。若将阈值设为 3~4 rad,可初步对外界信号进行有无入侵的报警判断。

#### 4.2 LC 报警判断

根据 4.1 的分析可知,在风雨状态以及正常安静状态下相位扰动幅值在 3 rad 以下。图 13 综合了所有

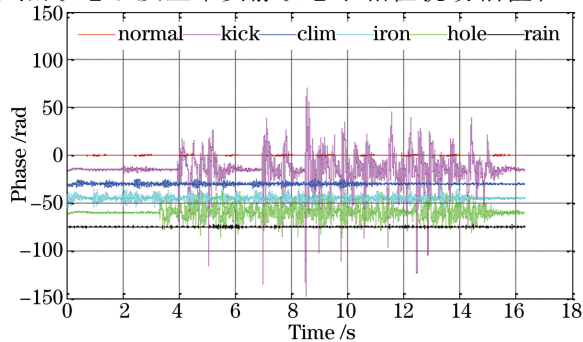


图 13 不同事件下相位信号变化情况  
 Fig. 13 Phase signal changes induced by different events

实验情况下振动相位信号的抖动幅度,包括环境、脚踹、攀爬、脚踹、挖洞以及风雨环境,对每个信号加入不同的相位偏置,以更好地从图中直观看出不同干扰情况下对应的结果。在进行 LC 分析时,选取  $x_{th}=3.5$ ,分析各种外界干扰下的  $N_{LC}$  值,其分布如图 14 所示,其中时间窗口长度为 0.5 s,即每 0.5 s 进行 1 次 LC 分析,振动信号时间持续约 16 s,窗口数为 32 个。normal 和 rain 分别表示正常环境状态和风雨状态,其  $N_{LC}$  值均为 0;clim 表示攀爬的情况,其大约 11 s 之后停止入侵,对应  $N_{LC}(21)$  及其之后窗口值均为 0;iron 表示铁棒敲击的情况,其行为直到 15 s 后停止,对应  $N_{LC}(30)$  及其之后窗口值均为 0;hole 表示挖洞的情况,其行为从 3 s 之后开始,对应  $N_{LC}(5)$  及其之前窗口值均为 0。对于不同的入侵情况,其  $N_{LC}$  对应的值各有不同,最终确定阈值  $N_{LC_{th}}=3$ ,确保入侵均能正常报警。随后对防区进行长时间监测,选取了 2 min 之内的相位和  $N_{LC}$ ,结果如图 15 所示,入侵相位信号与  $N_{LC}$  报警条件结果一致,对每次入侵行为均正确报警。对系统进行了持续 1 个月以上的测试,未出现漏报,误报率低于 1%。

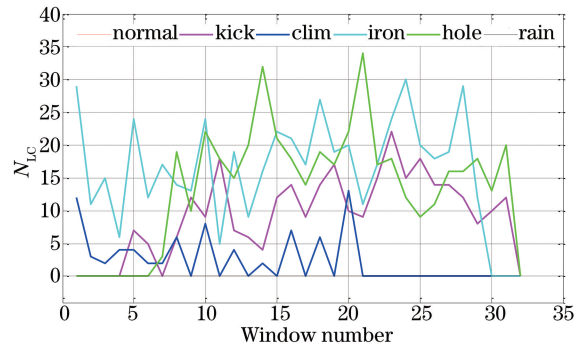


图 14 不同事件下  $N_{LC}$  变化情况

Fig. 14  $N_{LC}$  changes induced by different events

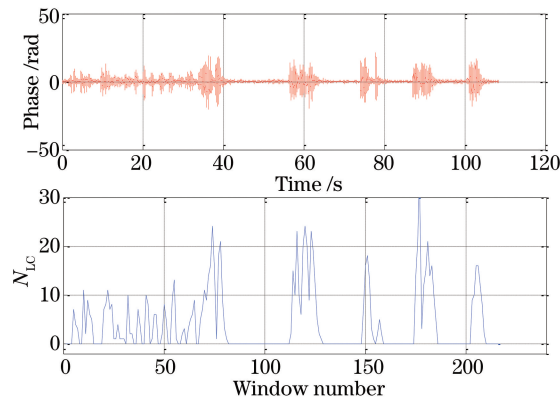


图 15 2 min 之内的监测结果

Fig. 15 Monitoring results in 2 min

## 5 结 论

采用二元矩形脉冲相位调制法,结合基于 FPGA 的高度紧凑、高效率的控制询问器以及基于时域穿越统计(LC)的报警算法,搭建了一套迈克耳孙干涉型全光纤周界安防系统,系统设备结构简单,具备较强的实时性。分别分析了各个关键技术的原理及实现方法。最终长时间实验结果表明,系统运行稳定,无漏报,误报率不到 1%,同时,系统监测的长度和防区的数量具有较强的可扩展性,因此,本系统具备良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Hocker G B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature[J]. Applied Optics, 1979, 18(9): 1445-1448.
- [2] Gerges A S, Newson T P, Jones J D C, *et al.* High-sensitivity fiber-optic accelerometer[J]. Optics Letters, 1989, 14(4): 251-253.
- [3] Baere I D, Luyckx G, Voet E, *et al.* On the feasibility of optical fibre sensors for strain monitoring in thermoplastic composites under fatigue loading conditions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3/4): 403-411.

- [4] Wang D Y, Wang Y, Gong J, *et al.* Fully distributed fiber-optic temperature sensing using acoustically-induced rocking grating[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3392-3394.
- [5] Zhang Yan, Zhang Jianzhong, Liu Zhihai, *et al.* Multimode fiber based temperature sensor with the capability of wavelength encoding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 327-330.  
张艳, 张建中, 刘志海, 等. 具有波长标定功能的多模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 327-330.
- [6] Yuan Libo. Overview and forecast of fiber optic white-light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900137.  
苑立波. 光纤白光干涉技术的回顾与展望[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900137.
- [7] Zhao Yong, Rong Min, Liao Yanbiao. Reflex optical fiber sensor and compensation technique for temperature measurement under offshore oil well[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(1): 75-78.  
赵勇, 荣民, 廖延彪. 用于海洋井下温度检测的反射式光纤传感器及补偿技术[J]. *中国激光*, 2003, 30(1): 75-78.
- [8] Gao Cunxiao, Zhu Shaolan, Feng Li, *et al.* An all fiber laser for distributed optical fiber sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1501-1504.  
高存孝, 朱少岚, 冯莉, 等. 用于分布式光纤传感的全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1501-1504.
- [9] Yang Yuanhong, Wang Huan, Yang Fuling, *et al.* The polarization-supporting photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0806004.  
杨远洪, 王欢, 杨福玲, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0806004.
- [10] Fang Nian, Wang Lutang, Tang Zhaoming. Progress of fiber-optic time-varying disturbance distributed sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 090601.  
方捻, 王陆唐, 唐肇明. 光纤时变扰动分布传感技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 090601.
- [11] Shan Chao, Fang Nian, Wang Lutang, *et al.* Chaotic fiber fence system and intrusion location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 335-339.  
单超, 方捻, 王陆唐, 等. 混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 335-339.
- [12] Hong Xiaobin, Guo Hongxiang, Wu Jian. A Brillouin optical time domain analysis based distributed fiber optic intrusion sensor system[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(4): 1037-1041.  
洪小斌, 郭宏翔, 伍剑. 基于布里渊时域分析的分布式光纤传感入侵定位系统[J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 1037-1041.
- [13] Song Muping, Bao Chong, Ye Xianfeng. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 757-762.  
宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 基于正交偏振控制的布里渊时域分析长距离分布式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 757-762.
- [14] Wang Xiao, Zhang Xueliang, Hu Zhengliang, *et al.* Experimental research on interferometric fiber-optic sensing system with polarization diversity receiver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1566-1570.  
王潇, 张学亮, 胡正良, 等. 干涉型光纤传感系统偏振分集接收实验研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1566-1570.
- [15] Shi Qingping, Zhang Huayong, Wang Liwei, *et al.* A new phase generated carrier demodulation method based on fixed phase delay[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0805002.  
施清平, 张华勇, 王利威, 等. 基于固定相位延迟的相位生成载波检测方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0805002.
- [16] Zhang Huayong, Wang Liwei, Shi Qingping, *et al.* A new demodulation method for time division multiplexing system of fiber-optic hydrophone using a  $3 \times 3$  coupler[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0505011.  
张华勇, 王利威, 施清平, 等. 光纤水听器时分复用系统通过  $3 \times 3$  耦合器信号解调的一种新算法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505011.
- [17] Liu Bo, Yang Yifei, Zhang Jian, *et al.* A fiber fence system based on M-Z interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6): 1013-1017.  
刘波, 杨亦飞, 张键, 等. 基于 M-Z 干涉的光纤围栏系统实验研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(6): 1013-1017.
- [18] Dandridge A, Tveten A, Giallorenzi T. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10): 1647-1653.
- [19] Zhang M, Ma X, Wang L, *et al.* Photonic sensors review progress of optical fiber sensors and its application in harsh environment[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 84-89.
- [20] Liu T, Cui J, Chen D, *et al.* A new demodulation technique for optical fiber interferometric sensors with  $[3 \times 3]$  directional couplers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(1): 12-15.
- [21] Lim T K, Zhou Y, Lin Y, *et al.* Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation[J]. *Optics Communications*, 1999, 159(4): 301-308.
- [22] Ren Z, Li J, Zhu R, *et al.* Phase-shifting optical fiber sensing with rectangular-pulse binary phase modulation[J/OL]. *Opt Lasers Eng*, 2018, 100: 170-175. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.08.010>.



- [23] Cui K, Li S, Ren Z, *et al.* A highly compact and efficient interrogation controller based on FPGA for fiber-optic sensor array using interferometric TDM[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(11): 3490-3496.
- [24] Yang Jiang, Zhao Jian, Yang Chunni, *et al.* All-fiber perimeter security system based on Michelson interferometer and pattern recognition[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105005.  
杨江, 赵健, 杨春妮, 等. 基于迈克耳孙干涉和模式识别的全光纤周界安防系统[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105005.