

# 马赫-曾德尔分布式光纤周界防范系统 定位算法研究

张 颖 陈佳妹\* 李 刚 李红杰 吴艳微 李 伟

(燕山大学河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 基于光纤马赫-曾德尔(M-Z)干涉技术对周界防范系统进行了研究设计。采用改进的双光纤 M-Z 干涉相位检测技术与互相关算法相结合的方案进行信号提取。详细介绍了互相关算法在系统定位方面的应用,并通过实验证实其可行性。对两路经过不同延时的相同信号进行互相关运算,通过峰值位置可准确得到延时时间差。系统的定位精度与采样频率有直接关系,在采样率为 20 MHz 时,理论上的定位精度可达 10.22 m。提出了一种分段数据处理方法,该方法可以在保证高采样率带来的高定位精度的基础上降低算法的运算量。实验结果表明,运算速度比传统方法提高约 8 倍。

**关键词** 光纤光学;周界防范;马赫-曾德尔干涉技术;定位方法;光纤传感

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0605005

## Location Method of Distributed Fiber-Optic Perimeter Security System Based on Mach-Zehnder Interferometer

Zhang Ying Chen Jiamei Li Gang Li Hongjie Wu Yanwei Li Wei

(Hebei Key Laboratory of Measurement Technology and Instrument, Yanshan University,  
Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** A fiber-optic perimeter security system based on Mach-Zehnder (M-Z) interferometer is designed. Modified phase detection of double-fiber M-Z interferometer is proposed in getting signal in combination with correlation algorithm. The usage of correlation algorithm in location is introduced in detail. The simulation verifies the feasibility of this method. If the same signals with different time delays are analyzed using correlation algorithm, the accurate time difference can be obtained by the location of the maximum. The system's location accuracy is directly related to the sampling rate. When the sampling rate is set as 20 MHz, a theoretical location accuracy of 10.22 m is obtained. A new method of processing piecewise signal is presented, which can reduce the computational complexity on the base of high positioning accuracy brought by the high sampling rate. The computation speed is increased about 8 times.

**Key words** fiber optics; perimeter security; Mach-Zehnder interferometric technique; location method; fiber sensing

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 060.2380; 060.2270

### 1 引 言

全分布式光纤传感由于具有不受电磁干扰、耐腐蚀、体积小等优点<sup>[1~5]</sup>,以及其特有的可以在沿光纤路径上同时得到被测场在时间和空间上的连续分布信息的优点,成为国内外相关领域的研究热

点<sup>[6,7]</sup>。目前,比较典型的应用于周界防范的全分布式光纤传感技术包括利用后向散射光的光时域反射定位(OTDR)技术和基于光纤干涉技术的压力、应变传感技术<sup>[8,9]</sup>。现有的基于 OTDR 技术的光纤周界防护系统,如相敏 OTDR 光纤周界系统,已经

收稿日期: 2012-01-11; 收到修改稿日期: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61071202)资助课题。

作者简介: 张 颖(1963—),男,教授,博士,主要从事光纤传感和光子技术方面的研究。E-mail: zhangy@ysu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jiamei\_chen123@126.com

能够检测到传统的 OTDR 技术检测不到地很小的扰动<sup>[10]</sup>,但是它对激光器的线宽和频率的漂移以及探测器的灵敏度要求都比较高,系统的实时性也比较差<sup>[9]</sup>。而马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪由于其插入损耗小、与光纤有良好的兼容性且相位敏感性高,成为了研究的热点<sup>[11~15]</sup>。基于 M-Z 传感系统的光纤周界系统也成为干涉型光纤周界系统的代表<sup>[3,7]</sup>。同时,M-Z 系统可以同时多点入侵进行探测定位的优点也是其他类型的光纤周界防范系统所不能比拟的。目前的报道对系统探测精度有一定的研究<sup>[16]</sup>,但在提高处理速度上的研究却很少,而周界防范对系统的实时性要求非常高,降低系统信号处理的运算量和提高运算速度是非常必要的。

基于上述分析,本文采用双光纤 M-Z 干涉技术和新的分段数据处理方法,降低系统信号处理的运算量,提高周界防范定位的准确度和系统的性能。

## 2 系统结构

系统基于双光束干涉的相位型干涉仪,采用双光纤 M-Z 干涉仪结构,传感光缆中的 3 条光纤构成传感回路,系统结构如图 1 所示。

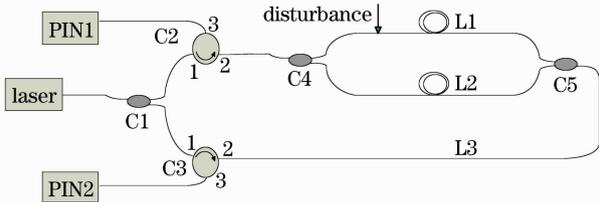


图 1 系统传感结构图

Fig. 1 Sensing system structure

L1 和 L2 为两段长度基本相同的单模光纤,L1 和 L2 与耦合器 C4 和 C5 构成 M-Z 干涉仪。没有外界扰动信号时,光源发出的沿逆时针传输的光经过 M-Z 干涉仪在 C4 处发生干涉,产生稳定的干涉信号。同时顺时针方向的光经 M-Z 干涉仪在 C5 处也产生稳定的干涉信号。用窄带激光作为光源,在不考虑环境温度等干扰信号的影响下,探测器 PIN1 和 PIN2 将接收到相同的稳定的光功率。

## 3 定位原理

假设在距耦合器 C4  $R$  处有扰动信号, $R = t_1 \cdot c/n$ ,则扰动距耦合器 C5 的距离  $L_1 - R = t_2 \cdot c/n$ , $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为光纤  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  的长度,引导光纤的长度  $L_3 = t_3 \cdot c/n$ ,其中  $n$  为单模光纤的折射率, $c$  为真空中的光速。

探测器 PIN1 输出的信号为

$$y_1(t) = I_1 \{1 + K_1 \cos[\varphi(t - t_1) + \varphi_0]\}, \quad (1)$$

探测器 PIN2 输出的信号为

$$y_2(t) = I_2 \{1 + K_2 \cos[\varphi(t - t_2 - t_3) + \varphi_0]\}, \quad (2)$$

$I_1$  和  $I_2$  分别为逆时针和顺时针方向干涉仪输入到探测器 PIN1 和 PIN2 的光强, $K_1$  和  $K_2$  分别为相应的干涉信号对比度, $\varphi_0$  为初相位,默认为  $\pi/2$ ,此时系统灵敏度最高。

由(1)、(2)式可知,信号  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$  之间存在时间差  $\tau$ ,即

$$\tau = t_2 + t_3 - t_1 = \frac{(L_1 + L_3 - 2R) \cdot n}{c}, \quad (3)$$

扰动位置为

$$R = \frac{L_1 + L_3 - c\tau/n}{2}. \quad (4)$$

由(4)式可知,通过测量时间差  $\tau$ ,即可确定扰动位置。

除了存在一个时间  $\tau$  的延时外,探测器 PIN1 和 PIN2 接收到的信号波形完全一致,所以两路信号具有很强的相关性。根据互相关原理可以得到这两路信号的互相关函数,准确求出延时,确定扰动发生的位置。

## 4 实验分析

实验系统按图 1 的结构搭建, $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  皆为 10 km,器件之间的连接光缆很短,总长度为几十厘米,对定位误差影响很小,传输时间可以忽略不计。传感光纤为 1550 nm 的单模光纤,纤芯折射率  $n = 1.468$ 。光源为线宽 200 kHz 的窄带激光光源,相干长度为 1.5 km。两个光电探测器输出的信号经放大和模/数(A/D)转换后采用数字滤波,保证两路信号的滤波效果相同,避免滤波造成定位误差,通带截止频率为 100 Hz 和 2 kHz。信号的采样率为  $f_s = 20$  MHz,每次对 20000 个采样点进行处理。处理的点数足够多,在做相关运算时可以去除风等环境因素造成的随机噪声的影响。理论上的定位精度

$$d = \frac{c}{nf_s} \approx 10.22 \text{ m},$$

可以满足长距离周界防范的实际要求。要达到这一定位精度就要求后续的信号处理有较高的准确性。

系统采用分段数据处理的方法对采样信号进行处理,如图 2 所示。在采样频率为 20 MHz 的实验条件下,每次对 20000 个采样点进行分析,处理的数

据长度相当于 1 ms,此后每 10 ms 对 20000 个采样点进行分析。入侵信号一般会持续几十毫秒至一百毫秒,采用 5 组采样点进行分析,即对 41 ms 内的入侵信号进行分析,然后对 5 组结果求平均值作为最后的定位结果。

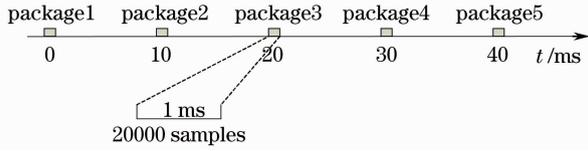


图 2 5 组分析数据

Fig. 2 Five data groups

为防止突然大噪声及扰动信号衰落等引起的定位误差,当定位点的值与第一个点的定位值相差超过 1 时,此点废弃不用。用这种方法对  $20000 \times 5$  个点进行分析,可以得到 41 ms 内的信号信息。如果直接对 41 ms 内的信号进行分析,则需要对  $20000 \times 41$  个点进行分析,将大大增加信号分析的运算量。用 Matlab 对信号进行处理,直接用互相关算法分析  $20000 \times 41$  个点所用的时间为 2.625 s,5 组 20000 个点所用时间为 0.3125 s,速度提高 8 倍以上。因此,采用的分段数据处理定位方法不仅能大大降低信号分析的运算量,而且可以大大减少外界环境偶然噪声干扰对定位准确性的影响。

在距离探测器 PIN1 6 km 的位置加一个扰动,采集到的信号利用 Matlab 进行定位运算。

图 3 和图 4 分别为探测器 PIN1 和 PIN2 检测到的信号经过采样后的图谱。从图中可以看到两探测器接收到的传感信号除了有一定的延时外,还存在一定的差别。这是由于探测距离比较长,外界的随机扰动对传输光造成了影响,但这种随机的扰动引起的数据图形差别不影响后续的准确定位。

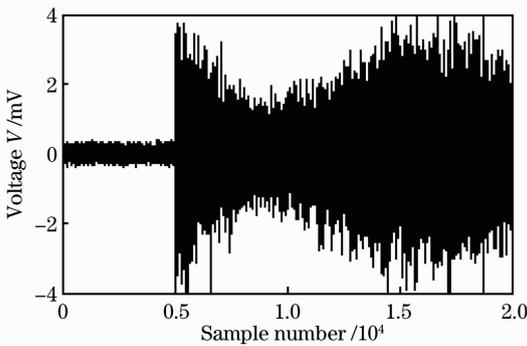


图 3 探测器 PIN1 的检测信号采样

Fig. 3 Sampling result of detector PIN1 received signal

图 5 为其中一次两路信号的互相关结果函数图,纵轴为两路信号做相关运算得到的对应不同位

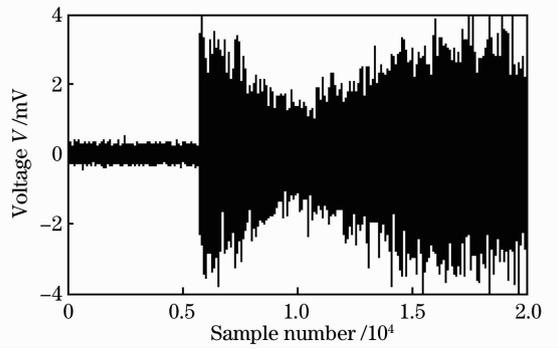


图 4 探测器 PIN2 的检测信号采样

Fig. 4 Sampling result of detector PIN2 received signal

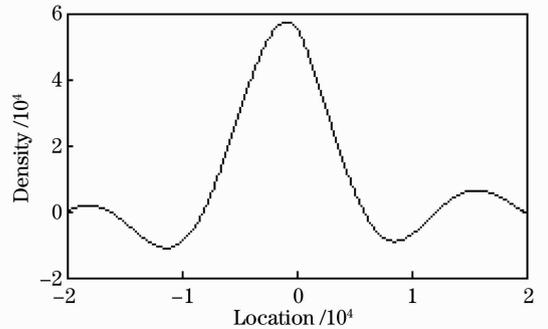


图 5 两路信号互相关结果

Fig. 5 Cross-correlation result of two signals

置的值,横轴为探测器 PIN1 检测信号的 20000 个采样点相对于探测器 PIN1 检测信号的 20000 个点左右移动的位置(采样点),图中极大值位置  $i_{\max} = -784$ 。

5 组连续的定位分析互相关结果最大值位置见表 1。最大值位置的平均值  $i_{\max 0} = -783.6$ ,两探测器之间的时间差  $\tau = \frac{|i_{\max 0}|}{f_s} = 39.13 \mu\text{s}$ ,由(4)式可得  $R = 6001.71 \text{ m}$ 。5 组定位的平均值定位与实际干扰点发生位置的误差为 1.71 m,在系统的误差允许范围内。可见,在误差允许范围内,理论定位结果与实际相符。因此,所设计的双光纤 M-Z 全分布式周界安全防范系统和采用的分段数据处理的方法可以准确有效地进行周界安全防范的入侵定位。

表 1 5 组定位结果

Table 1 Five groups of result location

Package	1	2	3	4	5
Location of maximum value (sample number)	-784	-783	-785	-783	-783

## 5 结 论

采用改进的双光纤 M-Z 干涉相位检测技术与互相关算法相结合的方案进行信号提取,采样率为

20 MHz时,定位精度达 10.22 m,结果表明互相关算法应用于光纤周界的定位报警系统是完全可行的。提出了一种分段数据处理方法,研究结果表明,分段数据处理方法可大大降低算法的运算量,运算速度比传统方法提高约 8 倍。该方法可以在保证高采样率带来的高定位精度的基础上降低算法的运算量,提高系统快速准确定位的能力。定位精度和检测速度的提高,将促进分布式光纤振动传感技术应用于周界防范领域的发展和周界防范技术的提高。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A  $J_0$ - $J_1$  method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 105~108  
王泽锋, 罗 洪, 熊水东等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的  $J_0$ - $J_1$  法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 105~108
- 2 Miao Kai, Liu Bo, Lin Wei *et al.*. Tuning of extinction ratio of optical interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 040603  
缪 凯, 刘 波, 林 炜等. 光纤干涉仪消光比调谐方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(4): 040603
- 3 Li Chen, Zhang Chunxi, Liang Sheng *et al.*. Research on cable technology of fiber optic sensors for perimeter security[J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2010, **24**(3): 277~281  
李 琛, 张春熹, 梁 生等. 用于周界报警干涉型光纤传感器的光缆技术[J]. *测试技术学报*, 2010, **24**(3): 277~281
- 4 Tian Lan, Chunxi Zhang, Lijing Li *et al.*. Perimeter security system based on fiber optic disturbance sensor[C]. *SPIE*, 2007, **6830**: 68300J
- 5 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
- 6 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光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
- 7 S. S. Mahmoud, J. Katsifolis. Elimination of rain-induced nuisance alarms in distributed fiber optic perimeter intrusion detection systems[C]. *SPIE*, 2009, **7631**: 731604
- 8 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
- 9 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
- 10 Qizhen Sun, Deming Liu, Jian Wang. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1538~1544
- 11 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
- 12 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
- 13 Ge Qiang, Xu Changchun, Wu Xuqiang *et al.*. Two noise reduction methods in interferential optical fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 726~728  
葛 强, 徐长春, 吴许强等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 726~728
- 14 Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. Vibration measurement system based on a highly stabilized fiber 3×3 coupler interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 549~553  
李 敏, 谢 芳, 陈志敏. 高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉振动测量系统 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 549~553
- 15 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
- 16 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

栏目编辑: 谢 婧