

文章编号: 0253-2239(2007)12-2128-5

双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术

陈伟民¹ 吴俊¹ 谭靖¹ 胡庆² 朱永¹ 章鹏¹

(¹ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)
(² 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 基于马赫-曾德尔干涉原理的分布式光纤传感系统具有对油气管道破坏行为的预警潜力, 而分布式的定位技术是其关键技术之一; 基于互相关原理, 对其定位理论进行了研究, 构建了基于虚拟仪器平台的实验系统, 并进行了试验; 在总长 20 km 光纤的 8 个不同位置分别进行多次试验, 初步试验结果达到了 149 m 的定位精度, 接近了实际工程的定位需求。

关键词: 光纤光学; 光通信; 定位技术; 互相关

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Locating Technology for Twin Mach-Zehnder Distributed Optical Fiber Sensing System

Chen Weimin¹ Wu Jun¹ Tan Jing¹ Hu Qing² Zhu Yong¹ Zhang Peng¹

¹ The Key Laboratory for Optoelectronic Technology and Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400030
² The Department of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065

Abstract: The distributed optical fiber sensing system based on Mach-Zehnder interference principle has the ability of warning the potential sabotage acts to oil and gas pipelines, and the distributed location technology is one of the key technologies. Based on the correlation theory, the location theory has been studied, the experimental system based on virtual instrument platform has been established; Several experiments has been carried out at eight different locations across 20 km sensing fiber, the results show that the positioning error could be controlled within 149 m, which can meet the practical positioning needs.

Key words: fiber optics; optical communications; locating technology; cross-correlation algorithm

1 引言

长程油气管道由于绵延数十公里, 容易受到外部的破坏。现有的监测技术仅能在油气管道受到破坏后才能进行探测和定位, 仅能减少损失, 不能避免损失^[1]。因此, 研究具备预警能力的分布式传感系统具有非常巨大的社会经济价值。

近年来, 利用光纤作为传感媒介的分布式光纤传感系统^[2,3]已经成为研究的重点和热点。沿管道上方铺设长距离传感光纤后, 在破坏发生前, 光纤就能够感知外界潜在危险行为引起的地震动波, 从而起到对破坏行为进行监测和预警的目的。而分布式

光纤预警的两个关键技术分别是高灵敏的探测和高精度的定位。而基于马赫-曾德尔干涉结构的传感系统定位特性还需进一步研究, 所以对双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统的定位理论进行探索, 并通过试验对定位理论进行验证, 具有非常积极的现实意义。

2 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统

双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统基本原理如图 1^[4]所示。在图 1 所示的结构中, 激光光源 S 发出的光波经 1×2 耦合器 C1 后分成两束, 两束光

作者简介: 陈伟民(1955—), 男, 云南人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感、光电技术及系统等方面的研究。

E-mail: wmchen@cqu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-05; 收到修改稿日期: 2007-05-21

分别顺时针、逆时针传输,逆时针传输的光在耦合器 C2 中又分成两束,这两束光波在传感光纤 F1 和参考光纤 F2 中传播时分别形成传感光和参考光,传感光在 A 点感受地震动波作用后,与参考光于耦合器 C4 的一个输出端口合成一束,然后经引导光纤 F3 从耦合器 C3 输出到探测器 D1,这就构成一个逆时针方向的马赫-曾德干涉仪。同理,顺时针传输的光波经历耦合器 C3、引导光纤 F3、耦合器 C4、传感光纤 F1 和参考光纤 F2、以及耦合器 C2,输出到探测器 D2,该光路结构构成一个顺时针方向的马赫-曾德尔干涉仪。由于整个系统构成两个马赫-曾德尔干涉仪,所以称为双马赫-曾德尔分布式传感系统。

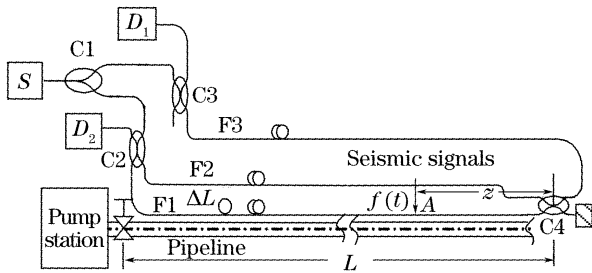


图 1 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统结构图
Fig. 1 Twain Mach-Zehnder interferometer for distributed sensing

挖掘机等重型机械在管道上方施工时,挖掘行为引起的地震动波 $f(t)$ 会传递到埋于管道附近的光纤上,由于 $f(t)$ 的作用,光纤中光的相位会发生如(1)式^[5]的改变:

$$\phi(t) = B \cdot f(t), \quad (1)$$

$$B = \frac{2\pi l}{\lambda} \left[1 + \frac{n^2(1-\sigma)}{4\sigma} (p_{11} + p_{12}) + p_{12} \right], \quad (2)$$

$\phi(t)$ 为由于外界应力作用光相位的改变, l 为受应力影响的光纤长度, λ 为激光光源中心波长, p_{11} 、 p_{12} 为光纤的光弹性系数, n 为光纤的折射率, σ 为光纤

材料的泊松比。对于某一次干扰事件, l 、 λ 、 p_{11} 、 p_{12} 、 n 、 σ 均为定值, B 为常量

如图 1 中,光纤在距耦合器 C4 距离为 z 的 A 点处受到外界潜在危险所引起的地震动波 $f(t)$ 作用后, D1 和 D2 接收到的干涉光强分别为

$$\begin{cases} I_1(t) = \frac{1}{12} I_0 + \frac{1}{12} I_0 \cos[\Delta\phi_L + \phi(t - \tau_1)], \\ I_2(t) = \frac{1}{12} I_0 - \frac{1}{12} I_0 \cos[\Delta\phi_L + \phi(t - \tau_2)], \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\tau_1 = \frac{n(L-z)}{c} + \frac{n\Delta L}{c}$, $\tau_2 = \frac{n(L+z)}{c}$, I_0 为光源输出光的强度, $\Delta\phi_L$ 为由于传感光纤 F1 和参考光纤 F2 之间存在长度差 ΔL 而引入的相位差, z 为应力作用点距终点的距离, L 为传感光纤长度, n 为单模光纤的折射率。

由(3)式可看出,探测器 D1、D2 输出的信号彼此反向,且互相有一时延 $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{n(2z - \Delta L)}{c}, \quad (4)$$

由(4)式可知,获知震动波的产生位置 z 的关键问题是如何求取两路信号的时延差 $\Delta\tau$ 。

3 基于互相关算法的定位理论

求两列信号的时延 $\Delta\tau$,比较经典和实用的是互相关算法。实际情况下,马赫-曾德尔干涉仪输出叠加噪声后,应表示为

$$\begin{cases} x(t) = I_1(t) + n_1(t), \\ y(t) = I_2(t) + n_2(t), \end{cases} \quad (5)$$

式中 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 分别为外界破坏作用的地震动波 $f(t)$ 引起的两路互相反向且有一定时延的信号, $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ 为叠加的白噪声。将 $y(t)$ 反向,将两路信号进行互相关计算,其互相关系数为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T -x(t)y(t+\tau)dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T -[I_1(t) + n_1(t)][I_2(t+\tau) + n_2(t+\tau)]dt. \quad (6)$$

由于白噪声信号与 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 之间不相关,所以上式可简化为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T -I_1(t)I_2(t+\tau)dt. \quad (7)$$

对信号采样后的离散数据,(7)式变为相关序列的求取

$$R_{xy}(m) = \frac{-1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_1(n)I_2(n+m), \quad (8)$$

在相关序列 $R_{xy}(m)$ 中,找到 R_{xy} 最大值对应的 m' 点,然后根据采样周期 T 可以得到两个信号之间的时延差

$$\Delta\tau = m' \cdot T. \quad (9)$$

在求得 $\Delta\tau$ 的基础上,根据(10)式可求得破坏等行为的作用位置 z :

$$z = \frac{c \cdot \Delta\tau}{2n} + \frac{\Delta L}{2}, \quad (10)$$

从(10)式可知,震动波发生位置 z 与 I_1 和 I_2 两个信号的时间延迟 $\Delta\tau$ 、传感光纤F1、参考光纤F2之间的长度差 ΔL 有关,由于 ΔL 为定值,则作用位置 z 的变化只与 $\Delta\tau$ 有关,所以只需要测得这两个信号之间的时延 $\Delta\tau$,就可以求得外部作用的位置 z 。

$$dz = \frac{c}{2n}d\Delta\tau = \frac{c}{2n}T \cdot dm', \quad (11)$$

由(11)式可知,定位的精度 dz 与采样周期 T 及 R_{xy} 最大值对应的 m' 点的精度有关。虽然采样周期 T 不致直接造成定位误差,但是采样周期 T 的大小却会直接影响定位的精度。当采集卡采样率为1 MHz时,其采样周期为1 μ s,将 $c=3 \times 10^8$ m/s、 $n=1.5$,代入(11)式,如果对相关系数最大值点位置产生误判, m' 每偏移一个单位,对应的距离偏差就高达100 m,而如果将采集卡采样率提高为10 MHz,同样偏移一个点对应的距离值仅为10 m。所以可以通过提高采集卡的采样率来减小由于最大值点的求取偏差对最终定位精度的影响。

4 系统设计

4.1 总体设计

根据以上的理论分析,整个试验系统应包含如图2所示的三个关键子系统:一是能输出两路彼此相关、有一定时延干涉信号的分布式光纤干涉系统;二是能将干涉信号转换为电信号的光电转换及信号预处理系统;三是能将预处理的电信号利用互相关算法求取时延差,并根据(10)式给出的计算方法得到最终定位结果的数据采集及软件处理系统。

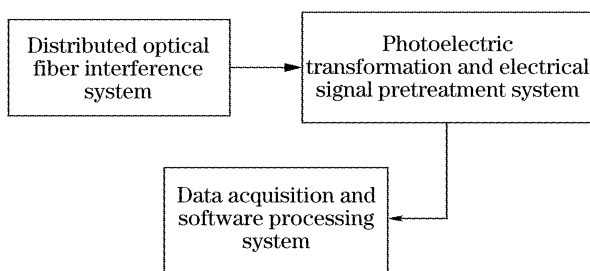


图2 试验系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of experimental system

为了得到较高定位精度,必须对三个关键系统分别进行设计。

4.2 分布式光纤干涉系统

S为马赫-曾德尔干涉仪提供光源,其相干长度应大于 ΔL ,故选择长相干光源。考虑到光源输出功率、耦合效率、光谱宽度等因素,本实验系统选择ANDO公司的AQ4321D可调激光器。设置其输出

中心波长为1550 nm,功率输出为2 mW。

为了保证干涉输出保持较大的衬比度,必须对偏振衰落现象^[6]进行控制,考虑到实验室调试的需要,选择机械偏振控制器对输入光的偏振态进行控制。

激光光源输出的光耦合入光纤后,如果不加背向隔离,一定量的光会反射回激光器,形成一个新的谐振频率,导致干涉输出的变化,所以需选用光隔离器,避免反射光对光源的影响。

4.3 光电转换及信号预处理系统

为了保证由可调激光器输出的激光经过几十公里长程光纤后,干涉光强仍能被光电探测器接收,而且保证较高的信噪比,所以选择接收灵敏度为-53 dBm,探测波长范围为1100~1650 nm,武汉电信器件有限公司生产的PFT912型PIN探测器。

4.4 数据采集及软件处理系统

由于系统初期调试阶段必须对程序根据需要进行灵活修改,结合虚拟仪器技术在数据实时采集、存储及处理方面的优势和程序修改灵活的特点,在本课题中选择虚拟仪器平台对系统输出信号进行处理。

对于马赫-曾德尔干涉仪,其输出用于定位外部作用,由(11)式可知,定位的精确度与采样周期 T 的大小有关,为了保证定位理论精度达到10 m,必须要求对D1-D2输出信号的采样频率要达到10 MHz以上。实验系统选用最高采样率为10 MHz的同步采集卡NI PXI-5112对经过预处理的数据进行采集。

作互相关的两路数据叠加了观测噪声,观测噪声与干涉信号彼此独立,所以观测噪声在作互相关时不会对互相关结果产生影响。但干涉信号还不可避免地叠加了光源噪声、偏振噪声、磁噪声、电路噪声等非独立噪声,这些噪声在互相关处理中,不会被消除,会对最终定位结果产生影响,所以在作互相关之前,必须对采样后的数据进行去噪处理,消除光源噪声等非独立噪声的影响。

作互相关的两路数据,由于采样率很高,在采用相关法分析两路信号的时延差时,实际上分析的是两个时间非常短的数据序列,对它们的噪声处理,不适合传统快速傅里叶变换(FFT)方法。小波分析是一种时-频多分辨力分析方法,因具有良好的时频局部化性质而优于快速傅里叶变换分析。因此,利用小波分析方法对定位系统两个探测器输出的信号进行小波去噪处理。

在10 MHz的高速采集下,对数据进行实时处理已不可能,实验中首先对采集获得的数据进行判

断,一旦发现外界存在潜在的破坏行为,即将受到破坏后的干涉输出信号进行存储,进行异步处理。运用 LabView 软件平台开发的互相关核心处理程序实现上述去噪和求取时延差的算法。开发的程序如图 3 所示,其中小波去噪和归一化处理功能由嵌入的 MATLAB 程序完成。

20 km.光电转换、信号预处理硬件系统以 PFT912 型 PIN 光电探测器为核心,另外设置预滤波电路进行高频滤波。硬件采集及软件处理系统利用虚拟仪器技术实现,通过 LabView 软件编程灵活实现对数据采集、存储及处理。

5 实验结果及分析

5.1 试验结果

虚拟仪器采集的马赫-曾德尔干涉仪的输出信号如图 5 所示,从图中可以看出,两个采集信号除了反向之外,波形非常相似,与(3)式给出的理论推导结果一致。

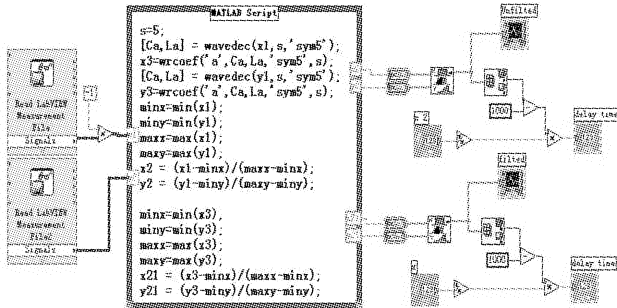


图 3 定位处理程序

Fig. 3 Program of location disturbance with LabView software

4.5 实验系统

根据以上的分析,开发了如图 4 包含三个部分的实验系统。光路系统中,S 为长相干激光光源、I 为光隔离器、PC 为偏振控制,传感光纤长度为

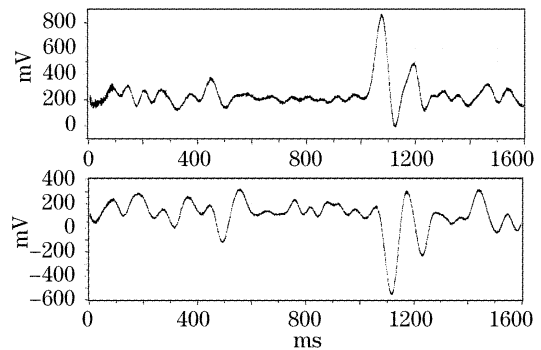


图 5 采集的两个马赫-曾德尔干涉仪输出信号

Fig. 5 Signals from two Mach-Zehnder interferometer

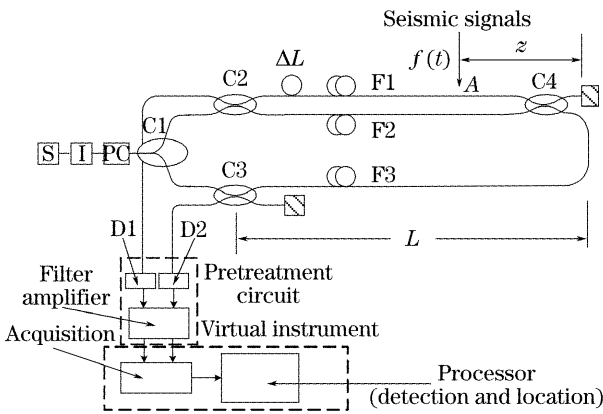


图 4 试验系统原理图

Fig. 4 Sketch of locating experimental system

在实验过程中,分别在 9 个位置上对传感光纤施加连续震动波,并在每个位置上采集多组数据。为便于比较,在每次采集前先将该处的传感光纤弯曲,利用高精度光时域反射计(OTDR)进行测量,将其测量值作为实际作用位置的参考值。在实验过程中,对每个作用位置都采集多组数据,然后利用定位程序处理,其中 6226 m、8293 m、12571 m 三个位置处的实验结果如图 6。由图可以看出,本系统测量的定位结果分布于用光时域反射计测量的参考结果两侧。

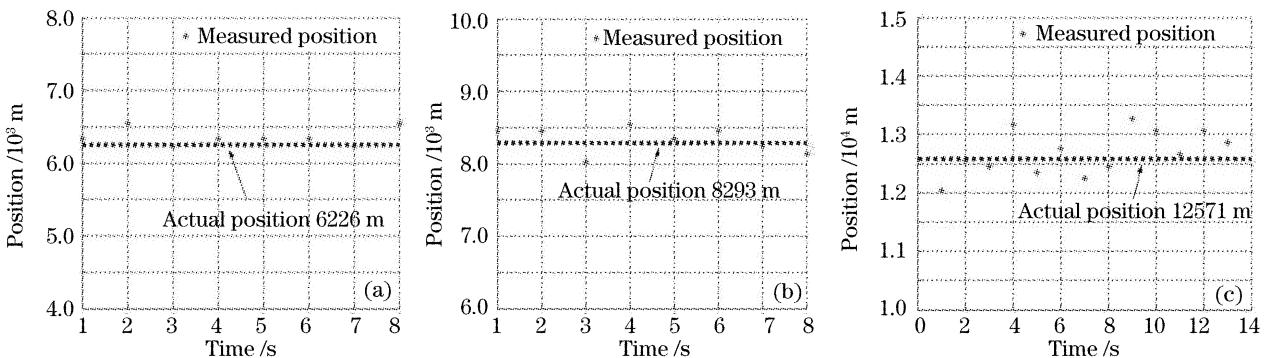


图 6 在三个位置多次测量结果

Fig. 6 Multi-measurements positions at three positions

5.2 实验结果分析

针对定位距离存在一定随机偏差的问题,将在同一位置多次测量的结果取平均,多次测量的平均结果与光时域反射计测量值之间有一12~149 m左右的误差,如表1所示。而在实际工程中,对于数十公里的油气管线,如果能够将破坏行为定位在此距离内,再通过人工巡查的方法,就可以很容易找到潜在危险发生地的位置了。

表1 实际距离与测量平均值的比较

Table 1 Comparison of actual position with measured mean position

Actual position /m	Measured mean position /m	Mean error /m
1110	987	-123
2020	2043	23
4040	3956	84
6226	6358	132
7183	7172	-12
8293	8330	37
12571	12705	134
13806	13934	128
15873	16022	149

图7为在不同位置上的多次平均测量值与光时域反射计测量参考值之间的比较。从图中可以看出,测量值与光时域反射计测量参考值之间具有良

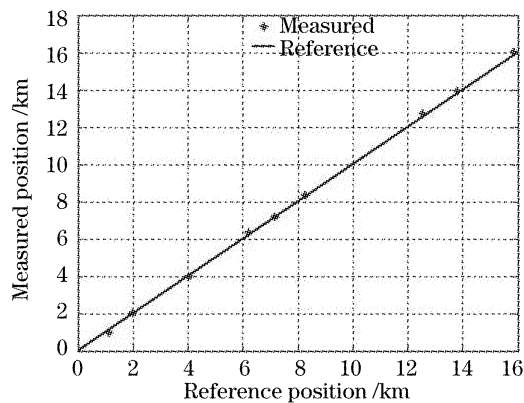


图7 定位的多次平均测量结果与光时域反射计测量参考值

Fig. 7 Measured position vs. reference position from OTDR

好的线性关系。该结果充分验证定位理论分析的方法是可行的。

6 结 论

通过对试验结果的分析,证明利用互相关原理实现对双马赫-曾德尔干涉仪输出干涉信号时延差的求取、进而求取潜在危险发生地位置的方法是可行的。在本试验系统条件下,定位误差控制在149 m以内,能初步满足实际工程定位需求。

由于这仅是一个新系统的初步探索,因此结果尚存在较大误差及离散性,其原因可能有以下几个方面:偏振衰落引起干涉信号褪变,使相关分析的结果存在较大误差^[6];不同采集通道参量差异的影响,造成处理结果的较大误差。

参 考 文 献

- Hu Zhixin, Zhang Guilian, He Ju *et al.*. Leak detection on gas pipeline with the distributed fiber optic sensing technology[J]. *J. Transducer Technology*, 2003, **22**(10): 48~49 (in Chinese)
胡志新,张桂莲,何 巨等. 利用分布式光纤传感技术检测天然气管道泄漏[J]. 传感器技术, 2003, **22**(10): 48~49
- Jianzhong Gao, Zhuangde Jiang, Yulong Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 633~635
- Zhang Zhiguo, Zhang Min, Ye Peida. Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on linear-cavity fiber raman laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1073~1077 (in Chinese)
张治国,张 民,叶培大. 基于线型腔拉曼光纤激光器的长距离光纤布拉格光栅传感[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1073~1077
- Tan Jing. *Study on Early-Alarm Technology of Long-Distance Pipeline Destructions Base on Distributed Optical Fiber Interference Principle* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. 31~35 (in Chinese)
谭 靖. 基于分布式光纤干涉原理的长途管道破坏预警技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006. 31~35
- Sun Shenghe, Wang Tingyun, Xu Ying. *Optic Fiber Measurement and Optic Fiber Sensing Technology* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002. 141~142 (in Chinese)
孙圣和,王廷云,徐 影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002. 141~142
- Zhou Xiaodong. Theoretical analysis of interferometric fiber-optic sensors input polarization control[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(6): 794~798 (in Chinese)
周效东. 干涉型光纤传感器输入偏振态反馈控制的理论分析[J]. 光学学报, 1997, **17**(6): 794~798