

文章编号: 1001-3806(2016)01-0086-04

分布式光纤振动传感信号识别的研究

邹东伯, 刘海*, 赵亮, 康迎杰

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要: 为了更好地识别入侵振动信号, 通过研究分布式光纤振动传感器及振动信号的识别技术, 根据振动信号的特点, 借鉴语音信号的处理方法, 对比原有基于快速傅里叶变换频谱分析算法, 引入了基于 Mel 频率倒谱系数的识别算法。新算法从频域的角度对振动信号进行分析, 提取不同环境状态下的 Mel 频率倒谱系数, 并将其作为新的特征参量。通过实验对比分析两种算法, 两者的误报率分别为 27.5% 和 7.5%。结果表明, 基于 Mel 频率倒谱系数的算法相比基于快速傅里叶变换的频谱分析算法, 在误报率上可以降低 20% 甚至更多, 在不漏报的前提下, 显然误报率更低的基于 Mel 频率倒谱系数的算法更加适用于安防体系。

关键词: 传感器技术; 分布式光纤振动传感器; 振动信号; 快速傅里叶变换; Mel 频率倒谱系数

中图分类号: TP212.1⁺4

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.019

Research of signal recognition of distributed optical fiber vibration sensors

ZOU Dongbo, LIU Hai, ZHAO Liang, KANG Yingjie

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to identify the invasion of vibration signal, a recognition algorithm based on Mel frequency cepstral coefficients (MFCC) was introduced according to the feature of vibration signal, taking processing method of voice signal as a reference and comparing with original spectrum analysis algorithm based on fast Fourier transform (FFT) after the investigation of distributed optical fiber vibration sensor and vibration signal recognition technology. In the new algorithm, the vibration signal was analyzed in frequency domain. MFCC under different conditions was extracted and was taken as a new characteristic parameter. After comparing the experimental results, false alarm rates of both the algorithms are 27.5% and 7.5% respectively. The results show that false alarm rate of the algorithm based on MFCC can be reduced by 20% or more compared with the algorithm based on FFT. Obviously, under the premise of not omitting, MFCC algorithm with lower false alarm rate is more suitable for security systems.

Key words: sensor technique; distributed optical fiber vibration sensor; vibration signal; fast Fourier transform; Mel frequency cepstral coefficient

引言

当今社会, 生命安全和财产安全是人们能够幸福生活和工作的先决条件。传统的安全防卫系统主要有摄像头视频识别、红外探测、微波检测、地磁传感等几类。这些传统的检测方法受自身因素的影响, 具有易受外部环境干扰、抗电磁干扰能力弱、检测范围小、维护成本高等缺点。分布式光纤振动传感器与传统的安全防卫体系相比, 其成本较低, 有良好的隐蔽性, 更有灵敏度高、耐高温、耐腐蚀和抗电磁干扰能力强等优越特性, 最为重要的是传感链路中的任一点都能感知外

部信号, 从而能够完成对外部信号的实时无盲点监控。正是基于其以上优点, 分布式光纤振动传感器具备传统安全防卫体系所不可比拟的优势, 在边境安全、社区安全、长距离管道监测、地震监测以及建筑结构监测等领域具有广阔的使用前景^[1-7]。

1 分布式振动光纤传感器

本文中所采用的分布式振动光纤传感器是基于马赫-曾德尔干涉原理提出来的, 其结构组成如图 1 所示。从激光源发射出来的光束经 3dB 耦合器被分为

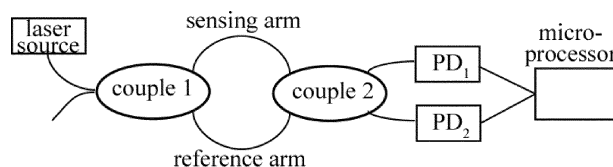


Fig. 1 Structure of distributed optical fiber vibration sensor

作者简介: 邹东伯(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光纤传感及通信的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hailiu@hust.edu.cn

收稿日期: 2014-10-22; 收到修改稿日期: 2014-11-20

两束相干光,一束通过参考臂不参与调制而直接成为参考光;另一束在传感臂内传播,其光信号在传输的过程中受被测量调制成信号光^[8]。

当有振动作用于传感臂光纤上时,会使得传感臂光纤的长度和折射率产生变化,进而引起光波相位的变化。而参考臂光纤由于没有受到外部振动干扰,相位不会发生变化,故而会使得沿传感臂和参考臂传播的两光波的相位不同,当其经过耦合器时会产生干涉,该干涉信号经由探测器(photodetector, PD)检测,检测到的光强信号则可以写成:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi \quad (1)$$

式中, I_1, I_2 是经耦合器分光后在传感臂和参考臂内传播光的光强, $\Delta \varphi$ 是由于外力作用于信号臂上导致沿其传播的光的相位变化。从上式中可以看出,干涉信号光强 I 的变换是随着 $\Delta \varphi$ 的改变而改变的,是余弦信号。当检测到光强 I 变化后,就可以通过上式求出因外力而产生的相位差^[9]。

2 基于快速傅里叶变换的频谱分析算法

目前对振动信号的分析方法有从时域上进行分析的,主要有短时平均能量、短时过零率、峰均比等几种方法,也有将时域信号进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)后从频域进行分析的,主要有频域平均能量、3dB 谱宽度、峰值统计算法、峰值信息熵统计算法以及小波分析^[10]等。其中将振动信号通过 FFT 转换到频域分析的算法流程图如图 2 所示。

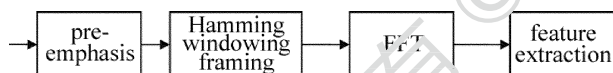


Fig. 2 Spectrum of analysis algorithm based on FFT

步骤如下所示^[11]。

(1) 预加重。预加重通常使用具有 6dB/倍频程的 1 阶数字滤波器来实现,如下式所示^[12]:

$$H(z) = 1 - \mu z^{-1} \quad (2)$$

式中, μ 为常数,通常取为 0.97。

(2) 加窗分帧。虽然振动信号是非线性时变信号,但它在短时间内可以认为是平稳的,对其进行分帧可以提取其短时特性。选取 N 个连续采样点作为一个观测单位,即 1 帧, N 值一般为 256 或者 512,即帧长为 256 或者 512。为了避免帧与帧之间的特性变化过大,帧移通常取帧长的 1/2,即相邻帧之间有 1/2 的重叠数据。为了进行短时分析,必须通过加窗处理来选取窗口内的振动信号,窗口外的振动信号为 0,窗口内的那部分信号可以被认为是短时平稳的。常用的窗函数主要有矩形窗,汉宁窗和海明窗。3 种窗函数各有其优缺点,矩形窗的频谱平滑性能很好,但是由于旁瓣

较高,使得变换过程中会带来高频干扰,易造成频谱泄露;汉宁窗同矩形窗相比,其优点是能够消除高频干扰,缺点是其衰减很快,频率分辨率不如矩形窗;海明窗与汉宁窗的不同点在于其权重的差异,海明窗的权重使其具有更低的旁瓣高度和平滑的低通特性,故而海明窗的应用更为广泛,只要将 1 帧的振动信号乘以海明窗,即可使得帧左端与右端的连续性增强。本文中使用的窗函数为海明窗,其表达式如下所示^[13]:

$$\omega(n) =$$

$$\begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), & (0 \leq n \leq N-1) \\ 0, & (\text{others}) \end{cases} \quad (3)$$

(3) FFT 由于振动信号在时域上的变化快速且不稳定,故而有时难以从时域上对其进行识别,所以必须将经过加窗处理后的振动信号再经过 FFT 转换到频域观察其能量分布,不同的能量分布代表着不同的振动特性。

(4) 特征提取。观察经过 FFT 后的每一帧频谱图,可以发现其能量主要集中在某一段频率范围内,如图 3 所示(其中 x 轴坐标为采样点数, y 轴坐标为对应点数的频率幅值大小)。

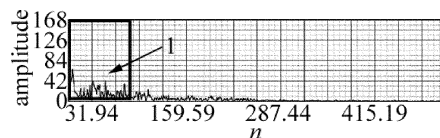


Fig. 3 Spectrogram of data frame

因此,可以截取能量主要集中的频率段,计算该段范围内的频率和,即图 3 中方框与曲线相交部分(即区域 1)的面积,将该频率和作为振动信号的一个特征值进行分析,记该值为 F_{freq} 。

3 MFCC 特征参量提取

本文中借鉴语音信号处理中的 Mel 频率倒谱系数(Mel frequency cepstral coefficient, MFCC)^[14]来对光纤振动信号进行分析, MFCC 是依据人类听觉实验的结果而得出来的声学特征。其中, Mel 频率与频率 f 之间的变换公式为:

$$F_m(f) = 2595 \lg\left(1 + \frac{f}{700}\right) \quad (4)$$

图 4 中给出了这两者之间的关系示意图,从图中可以看到,在线性频率 1000Hz 以下, Mel 频率与线性频率大致呈线性分布,而在 1000Hz 以上则成对数增长。

MFCC 参量的计算过程如图 5 所示。其中,预加重、加窗分帧、FFT 这 3 步的处理方法与频谱分析算法中的处理是一样的,其不同点在于频谱分析算法中在

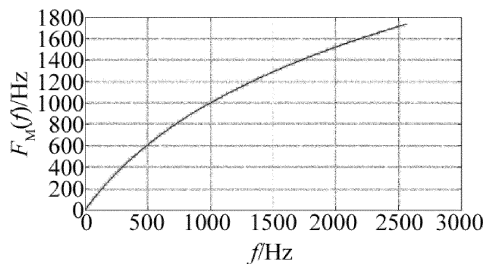


Fig. 4 Relationship between Mel frequency and linear frequency

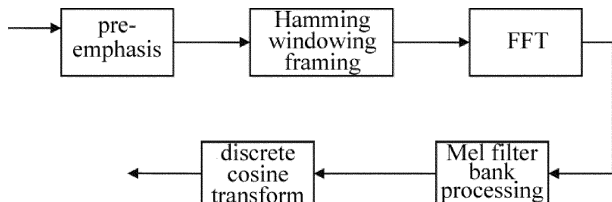


Fig. 5 Extraction of MFCC

FFT 之后是直接分析频谱,截取频率段提取特征参量;而在 MFCC 参量提取流程中,在经过 FFT 后,需要将得到的频谱参量通过一个由三角型带通滤波器组成的滤波器组进行滤波处理,其中每个三角滤波器的中心频率在 Mel 刻度上都是等间距分布的,所有滤波器在频域上覆盖从 0Hz 到 Nyquist 频率,即采样率的 1/2;通过 Mel 频率滤波器组模块后即可得到 Mel 频谱,再对其进行对数能量的处理即可得到对数频谱;得到对数频谱后,对其作离散余弦变换 (discrete cosine transform, DCT) 便可得到 MFCC^[15]。

4 实验结果

实验中的采样频率为 5120Hz,选取 512 个点作为 1 帧,帧移 256;其中,基于 FFT 的频谱分析算法采用的是自主研发软件,而基于 MFCC 的特征参量提取是通过 MATLAB 仿真实现的。实验中的初始振动信号分别为 1 组入侵振动信号和 1 组下大雨时的振动信号。

图 6 所示是基于 FFT 频谱分析算法的频谱图,从图中可以看出下雨时,振动信号的频谱峰值最大能达到 45 左右,而在敲墙时入侵振动信号的频谱峰值有几处明显低于 45,故而若设定报警阈值为 45 会导致有入侵时产生漏报,而漏报在安防系统中是不允许发生的。倘若阈值设定为 40,从下雨图中可以清楚看到有

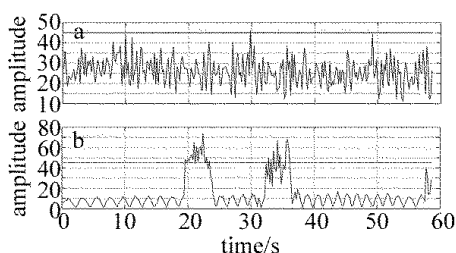


Fig. 6 Spectrum analysis algorithm based on FFT
a—rain b—invade

很多时刻都超过 40,这样则会导致下雨时产生大量的误报,增加误报率,误报率过高同样不利于安防体系。

图 7 是通过 MATLAB 仿真得到的基于 MFCC 特征参量提取的下雨振动信号和入侵振动信号,从图中可以清楚地看到下雨时的最大幅值为 18,而在有入侵时的最小幅值都超过 20,故而若设定报警阈值为 20,既不会出现有入侵漏报的情形,也不会出现下雨天误报的情形,该算法明显优于 FFT 频谱分析算法。

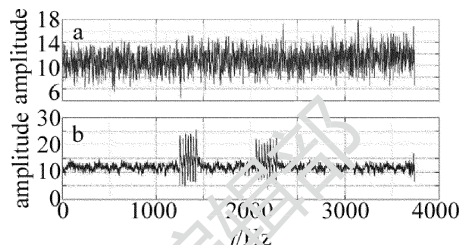


Fig. 7 Feature parameters of MFCC
a—rain b—invade

为了验证以上分析,分别测试了 20 组入侵信号和 20 组雨天信号,其中基于 FFT 频谱算法分析的报警阈值设定为 45,基于 MFCC 特征参量的报警阈值设定为 20,测试结果如表 1 所示。

Table 1 Statistical comparison of false alarm rates between FFT and MFCC

algorithm	number of test group	number of false positives
FFT	40	11
MFCC	40	3

从表中可以看出,基于 FFT 频谱分析算法的误报率高达 27.5%,而基于 MFCC 特征参量的算法误报率仅为 7.5%,降低了 20%,在不漏报的前提下,显然基于 MFCC 特征参量的算法显然更适合于安防体系。

5 结论

通过对比分析基于 FFT 的频谱分析算法和基于 MFCC 特征参量提取这两种算法,其本质都是从频域上对振动信号进行分析,其中,基于 MFCC 特征参量提取的算法对振动入侵的检测更为精确。通过对仿真波形与实测数据处理的结果可以明显看出,基于 MFCC 特征参量提取的算法是可行且非常有效的。这也表明语音信号中的处理方法是可应用于光纤传感振动信号分析上来的。要想得到更好的识别度和更低的误报率,仍需更进一步的研究。

参考文献

- [1] WANG H, SUN Q Zh, LI X L, et al. Progress in optical fiber interferometer based distributed vibration sensing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 30-41 (in Chinese).
- [2] LI X L, SUN Q Zh, WO J H, et al. Hybrid TDM/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection [J]. Journal of

- Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1113-1120.
- [3] SUN Q Zh, LIU D M, WANG J. Recent progress in distributed optical fiber stress sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(1): 10-15 (in Chinese).
 - [4] HU Zh S, YANG Q H, QIAO B. Design of interference distributed fiber-optic underwater long gas pipeline leakage detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 73-77 (in Chinese).
 - [5] SUN Q Zh, LIU D M, WANG J, *et al.* Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics Communications, 2008, 281(6): 1538-1544.
 - [6] HE C F, ZHENG X Q, LUO J W, *et al.* Research on a pipeline leakage detection system and its stability based on depolarized Sagnac fiber interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 148-152 (in Chinese).
 - [7] HANG L J, HE C F, WU B. A new pipeline leakage detection system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 820-824 (in Chinese).
 - [8] GE S X. Research on distributed fiber optic vibration sensor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 1-13 (in Chinese).
 - [9] WAN X, DU T T, ZHANG Zh M, *et al.* Positioning approach based on Mach-Zehnder fiber sensors and a DSP processor [J]. Proceedings of the SPIE, 2013, 9044: 90440T.
 - [10] GUO Ch Y, ZHENG K. Denoising optical interferometry signal based on wavelet transform threshold [J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 506-508 (in Chinese).
 - [11] SU X F. Data acquisition and processing of distributed optical fiber vibration sensor system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010: 1-56 (in Chinese).
 - [12] LÜ X Y, WANG H X. Abnormal audio recognition algorithm based on MFCC and short-term energy [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(3): 796-798 (in Chinese).
 - [13] HAN Y, WANG G Y, YANG Y. Speech emotion recognition based on MFCC [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2008, 20(5): 597-602 (in Chinese).
 - [14] HOSSEINZADEH D, KRISHNAN S. Combining vocal source and MFCC features for enhanced speaker recognition performance using GMMs [C]//Proceedings of the IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing. New York, USA: IEEE, 2007: 365-368.
 - [15] TIAN Sh Sh, TANG W, SHI W. Research of improved MFCC parameters in signer-independent speech recognition [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(3): 139-142 (in Chinese).