

有限空间液态场中声发射信号时延估计方法

徐耀松^{1,2}, 李一博¹, 付铜玲¹, 靳世久¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要:石油储罐罐底腐蚀的定位可利用声发射信号的时延估计实现,但在有限空间液态场中信号的传播会产生严重的多途效应,对准确进行时延估计产生不利影响。提出一种基于信号截取的广义互相关时延估计方法。采用曲线拟合法对每路传感器采集信号进行波达时刻估计,然后进行信号截取,对两路传感器截取信号进行基于相位变换的广义互相关,实现信号的时延估计。实验结果表明,该方法能有效克服多途干扰,提高时延估计性能。

关键词:声发射;多途效应;时延估计;曲线拟合;广义互相关

中图分类号:TN911.72

文献标识码:A

Time Delay Estimation Method of Acoustic Emission Signals in Confined Underwater Space

XU Yaosong^{1,2}, LI Yibo¹, FU Tongling¹, JIN Shijiu¹

(1. State Key Lab. of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Time delay estimation (TDE) of acoustic emission signals can be used to locate the corrosion in oil storage tank bottom. Multipath propagation is inevitable and affects the accuracy of TDE in a confined underwater space. A new time delay estimation method based on generalized cross-correlation with truncated signals was proposed. Curve fitting was used to estimate the time of arrival of the received signals. The signals were truncated to suppress multipath and generalized cross-correlation based phase transform (PHAT) was applied to estimate the time delay. Experimental results show that the method can reduce the effect of multipath effectively and improve the performance of TDE.

Key words: acoustic emission; multipath; time delay estimation; curve fitting; generalized cross-correlation

0 引言

石油储罐罐底腐蚀严重影响石油的储运安全。声发射检测作为一种无损检测法,可监测储罐内产生的腐蚀信号并对罐底腐蚀进行定位与评估^[1-2],所以在石油储罐罐底腐蚀和泄露检测中,常采用基于声发射原理的检测法。对液态场内的声源进行定位,一般采用时延估计法^[3-5],即通过布设水声换能器,根据水声换能器间采集信号的时延差和换能器阵的几何位置估计出声源的位置。常用的时延估计法有相关法^[6]、高分辨率法^[7-8]、倒谱法^[9-10]、分数阶傅里叶变换法^[11]及自适应法^[12]等。其中应用最广泛的是基于相关的广义互相关法(GCC),与其他方法相比,GCC不需信号的先验知识,计算量小,能得到最大输出信噪比,是一种有效的时延估计法。

在有限空间液态场环境中,声源发出的水声信号在底面、侧壁等处会产生多次反射,形成多途效应。理论和实践表明,多途效应是时延估计误差乃至错误定位的主要来源^[13-14]。本文针对有限空间液态场中水声信号的多途与混响效应,提出一种基于曲线拟合及GCC^[15]的时延估计法。利用曲线拟合法估计声发射信号的到达时间,对采集信号进行截取,然后利用GCC-相位交换(PHAT)算法估计时延,从而抑制多途效应的影响,提高有下液态场中水声信号时延估计的性能。

1 腐蚀声发射信号及多途效应

1.1 腐蚀声发射信号

石油储罐底板长期处于承压状态,腐蚀减薄区

收稿日期:2011-10-13

基金项目:国家基金面上基金资助项目(61074181),天津市应用基础及前沿技术研究计划基金资助项目(09JCYBJC02200),辽宁省教育厅基金资助项目(L2012119)

作者简介:徐耀松(1979-),男,河北沧州人,讲师,博士生,主要从事信号检测与分析技术、目标定位技术的研究。

会产生变形,引起腐蚀层的脱落、开裂及点蚀;如果罐底板存在泄漏点,泄漏处会发出湍流声,从而产生声发射信号。石油储罐罐底腐蚀或泄漏时激发的声发射信号会在油品内部传输,可通过探测声发射信号的声源位置对腐蚀或泄漏情况进行评判与定位。对于声发射信号,油是一种很好的声信号传导介质,可采用声发射传感器对声发射信号进行采集。典型的声发射信号如图1所示。

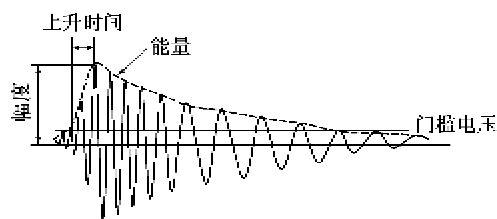


图1 腐蚀声发射信号

在对声发射源进行定位时,可布设一个传感器阵列,来自罐底的同一个声发射源信号可被不同的声发射传感器接收到,如果声发射传感器阵列位置已知,则可根据不同传感器接收信号的时延差对声发射源进行定位。

1.2 有限空间液态场中多途效应的影响

在石油储罐这种有限空间液态场中,在遇到侧壁、底面及液面时,声发射源发出的声信号会发生反射,导致在传感器处产生直达波信号与多路反射信号的叠加,由于反射信号相对于直达波信号的延时或相位是随机的,叠加后结果会造成接收信号的幅度随机起伏,此即多途效应。当多途效应严重时,GCC时延估计的性能降低^[4, 16],这是因为接收信号中包含了声源信号的叠加,叠加效果可能会使多途信号幅值高于直达波的幅值,相关结果出现伪峰。实际中存在多途时传感器的采集信号如图2所示。

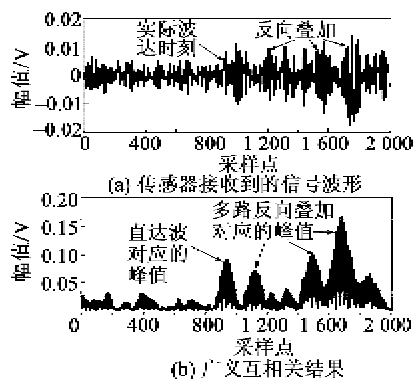


图2 多途效应下的采集信号及GCC结果

由图2(a)可见,由于多途效应的存在,水声换能器采集到的信号包含直达波及大量的反射信号,反射信号叠加后,能量超过直达波,造成直达波信号难以识别。图2(b)为发射信号与接收信号的GCC,其中对应于直达波的峰值为962采样点,而最大的相关峰值为1677,其对应的是叠加信号最大的时刻,该峰值比直达波信号的相关峰值大得多,故直接从GCC的结果峰值得到的估计值并不是直达波的到达时刻,可见多途效应的存在使GCC法的性能下降甚至估计错误。

2 基于信号截取的GCC时延估计法

腐蚀声发射信号在石油储罐罐底腐蚀产生的初期属于突发型声发射信号,本文利用曲线拟合法估计每路接收信号的波达时刻,从该时刻开始提取一段时间的信号,使接收信号能够包含一帧完整的声发射信号,同时尽量少的包含多途信号。然后对两路截取信号进行GCC计算,实现时延估计,获得两路传感器采集声发射信号的时延差。

2.1 基于曲线拟合方法的波达时刻估计

曲线拟合法采用非线性最小二乘法对接收信号的起始部分进行拟合,因为对于突发型信号,其包络的上升沿可采用一个抛物线拟合^[17-18]。

对于声发射信号,可利用这种方法进行直达波到达时刻的估计。设 τ_1 和 τ_2 为设定的低阈值和高阈值($\tau_2 > \tau_1$), t_1 和 t_2 分别是接收信号包络中对应2个阈值的时刻,则利用拟合公式:

$$\begin{cases} \tau_1 = \alpha_0 (t_1 - t_0)^2 \\ \tau_2 = \alpha_0 (t_2 - t_0)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 α_0 为曲线拟合系数。消去式(1)中 α_0 后,直达波到达时刻可由下式解得:

$$t_0 = \frac{\sqrt{\tau_2/\tau_1}(t_1 - t_2)}{\sqrt{\tau_2/\tau_1} - 1} \quad (2)$$

这种方法的准确性依赖于系统的信噪比(SNR)及 τ_1 、 τ_2 的选择。文献[18]中指出,当 $\tau_2/\tau_1 = 2$ 时效果较好。

曲线拟合法受噪声影响大,所以本文利用该方法实现直达波到达时刻的粗估计,在此基础上,再利用GCC法实现两路信号的时延估计。

2.2 GCC时延估计

GCC是在对两路传感器采集信号 $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ 估算互相关函数前进行预滤波处理,从而得到更好的时延估值^[19]。广义互相关时延估计法的算法简

单,计算量较小,相关峰比直接互相关更尖锐,估计精度高,可在低信噪比时得到较好的时延估值,在实际应用中仍是最直接和方便的时延估计法。

两路传感器接收信号互相关函数的傅里叶变换即为两信号的互谱密度函数

$$\begin{aligned} R_{x_i, x_j}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} r_{x_i, x_j}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \\ &= X_i(\omega) X_j^*(\omega) = \\ &= S(\omega) S^*(\omega) e^{-j\omega(T_i - T_j)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $X_i(\omega)$ 为 $x_i(t)$ 的傅里叶变换; $X_j^*(\omega)$ 为信号 $x_j(t)$ 的傅里叶变换的共轭; 目标声源发出的水声信号记为 $s(t)$; $S(\omega)$ 为声源信号的傅里叶变换; T_i, T_j 分别为信号到达两个传感器的时刻。为获得尖锐的互相关峰值,对式(3)中的互谱密度函数乘以一个滤波器 $\xi(t)$ 的傅里叶变换 $W(\omega)$, 然后取傅里叶反变换,即得到广义互相关函数^[15]

$$g_{x_i, x_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) S(\omega) S^*(\omega) e^{-j\omega(T_i - T_j)} e^{j\omega\tau} d\omega \quad (4)$$

则时延估计

$$D = \arg \max_{\tau} g_{x_i, x_j}(\tau) \quad (5)$$

如果选择

$$W(\omega) = \frac{1}{|S(\omega) S^*(\omega)|} \quad (6)$$

广义互相关就能得到理想的时移 Dirac 函数

$$g_{x_i, x_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega(T_i - T_j)} e^{j\omega\tau} d\omega = \delta(\tau - \tau_{ij}) \quad (7)$$

而对于实际应用,一般声源信号是未知的,则式(6)难以直接获得,故实际的滤波器只能根据接收信号 $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 来设计和选择,采用如下加权函数

$$W(\omega) = \frac{1}{|X_i(\omega) X_j^*(\omega)|} \quad (8)$$

得到基于 PHAT 的广义互相关,记为 GCC-PHAT。GCC-PHAT 法通过加权,可利用相关结果的相位信息提取信号的时延差,且不需信号的先验知识,故该方法在多途效应下具有较好的时延估计性能。

3 实验研究

为验证本文所提出方法的有效性,构建了一套三维水声声源定位系统,如图3所示。系统主要由试验水池(1.4 m×1.4 m×1.5 m)、传感器基阵(布设于水池底部4个角上)、声发射换能器(包括发射换能器和接收换能器)、信号发生系统、数据采集及

处理系统构成。其中信号发生系统采用美国物理声学公司的 ARB-1410 产生声发射信号,对位于实验水池中已知位置的声发射换能器进行激励。传感器基阵布置在实验水池底面,用以接收水声发射器发出的信号,经放大后送入采集卡,采集数据输入 PC 机,实现声发射信号时延估计法。



图3 试验水池

传感器基阵包含4个传感器,以其中一个作为系统坐标原点。任意两个之间都会得到一个时延估计值,利用多个时延估计,可计算得到发射换能器的位置。本文选择其中2个传感器进行时延估计的研究。实验中,水声发射换能器的位置在距离底面0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m的平面中移动,在每个平面上均匀选取30个位置,每个位置上进行时延估计。传感器基阵同步采集发射换能器发出的声发射信号,采样频率为1 MHz,每个位置上连续采样30组数据。

系统对每路传感器的接收信号,首先进行小波降噪,然后求取信号的包络,对信号包络采用曲线拟合法判断直达波到达的大概时刻,然后从此时刻开始对信号进行截取,发射的声发射信号长度为350点,则对采集信号截取长度可取波达时刻后的400点。对截取后的信号,取两路进行广义互相关,得到时延估计。

以发射换能器位于坐标系中(0.4 m, 0.2 m, 0.8 m)时为例,此时上发射换能器距离1、2两路传感器的距离差为0.2 m,则声发射信号的实验差应为0.135 ms,对应的实际时延差为136个采样点。直接对两路采样信号进行广义互相关的结果及采用本文方法进行计算的结果如图4所示。由图4(a)可见,由于两路采集信号中存在多途干扰,导致相关结果中出现许多伪峰,最大峰值对应的是叠加信号而非直达波信号。由图4(b)可见,采用本文方法,

能准确对时延差进行估计。

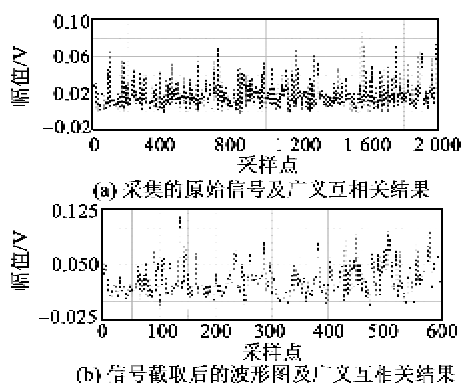


图4 信号截取前后广义互相关结果

将每个平面上的位置按顺序编号,对每个位置的30组采样数据进行误差分析。以发射换能器距底面0.8 m平面,分析结果如图5所示。由图可看出,时延估计误差较小,表明本文方法的有效性。

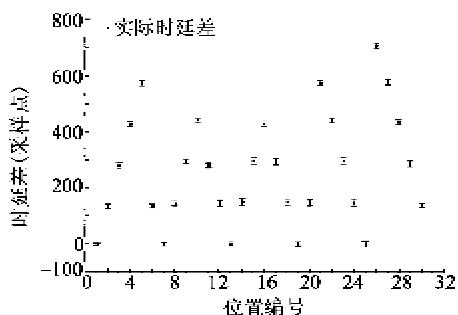


图5 时延估计结果的误差分析

4 结束语

针对石油储罐罐底腐蚀声发射定位问题,研究了有限液态场环境中时延估计的方法。为了克服有限空间液态场环境中声发射信号传播的多途效应,本文提出一种基于信号截取的广义互相关时延估计的方法,通过对石油储罐罐底腐蚀声发射信号的分析,表明本文方法的有效性。

参考文献:

- [1] 王伟魁,曾周末,孙立瑛,等. 基于相关分析的声发射储罐罐底检测降噪方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 178-180.
WANG Weikui, ZENG Zhoumo, SUN Liying, et al. Denoising method for acoustic emission testing of tank bottom based on cross-correlation analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 178-180.
- [2] PARK S, KITSUKAWA S, KATOH K, et al. AE source and relation between AE activity and rate of corrosion of oil tank bottom plate on acidic soils[J]. Materials Transactions, 2005, 46(11): 2490-2496.
- [3] 蒋德军,胡涛. 时延估计技术及其在多途环境中的应用[J]. 声学学报, 2001, 26(01): 34-40.
JIANG Dejun, HU Tao. Time-delay estimation and its application in multipath environment[J]. Acta Acustica, 2001, 26(1): 34-40.
- [4] 崔玮玮,曹志刚,魏建强. 声源定位中的时延估计技术[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(1): 90-99.
CUI Weiwei, CAO Zhigang, WEI Jianqiang. Time delay estimation techniques in source location[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2007, 22(1): 90-99.
- [5] CHAN Y T, HO K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [6] MOGHADDAM P P, AMINDAVAR H, KIRLIN R L. A new time-delay estimation in multipath[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(5): 1129-1142.
- [7] 李晶,裴亮,曹茂永,等. 一种用于多径环境的超分辨率TOA定位算法[J]. 电波科学学报, 2006, 21(5): 771-776.
LI Jing, PEI Liang, CAO Maoyong, et al. Super-resolution TOA algorithm in multi-path environments[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(5): 771-776.
- [8] LI X, PAHLAVAN K. Super-resolution TOA estimation with diversity for indoor geolocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(1): 224-234.
- [9] 苏绍景,程晓畅,王跃科. 基于功率倒谱的超声测距时延估计方法研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3): 836-842.
SU Shaojing, CHENG Xiaochang, WANG Yueke. Research on method of TDE in ultrasonic distance measurement based on power-cepstrum[J]. Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(3): 836-842.
- [10] 杨德森,时洁,刘伯胜. 基于倒谱分析的水声信号被动定位时延估计算法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 610-612.
YANG Desen, SHI Jie, LIU Bosheng. Research of time-delay estimation algorithm for passive localization based on cepstrum analysis[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(2): 610-612.
- [11] TAO R, LI X, LI Y, et al. Time-delay estimation of chirp signals in the fractional fourier domain[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(7):

- 2852-2855.
- [12] CHAKRABORTY M, SO H C, ZHENG J. New adaptive algorithm for delay estimation of sinusoidal signals[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2007, 14(12): 984-987.
- [13] DARDARI D, CONTI A, FERNER U, et al. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments[C]//S.1: Proceedings of the IEEE, 2009, 97:404-426.
- [14] ROGERS J S, KROLIK J L. Passive broadband source localization in shallow-water multipath acoustic channels[C]//S.1: Oceans, 2008:1-4.
- [15] KANPP C H, CARTER G C. The generalized correlation Method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1976, ASSP-24(4): 320-327.
- [16] BRANDSTEIN M S, SILVERMAN H F. A robust method for speech signal time-delay estimation in reverberant rooms[C]//Munich: ICASSP-97, 1997: 375-378.
- [17] BARSHAN B. Fast processing techniques for accurate ultrasonic range measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2000(11): 45-50.
- [18] MCMULLAN W G, DELANGHE B A, BIRD J S. A simple rising-edge detector for time-of-arrival estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(4): 823-827.
- [19] 邱天爽, 王宏禹. 几种基本时间延迟估计方法及其相互关系[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(4): 493-498.
- QIU Tianshuang, WANG Hongyu. Relationship among methods of time delay estimation[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(4): 493-498.
-
- (上接第 651 页)
- [7] 魏云茂, 肖蕙蕙, 李川, 等. 微波炉的智能控制系统设计[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2007(12): 161-164.
- [8] LAKIN K M, MCCARRON K T, MCDONALD J F. Temperature compensated bulk acoustic thin film resonators[J]. IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 2000, 1(1): 855-858.
- [9] PANG Wei, YU Hong, ZHANG Hao, et al. Electrically tunable and temperature compensated FBAR [C]// University of Southern California, Los Angeles; Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MIT-S International, 2005: 1279-1282.
- [10] BJURSTRÖM J, WINGQVIST G, YANTCHEV V, et al. Temperature compensation of liquid FBAR sensors[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17: 651-658.
- [11] CHIU K H, CHEN H R, HUANG S R S. High-performance film bulk acoustic wave pressure and temperature sensors[J]. Jpn J Appl Phys, 2007, 46(4A): 1392-1397.

读者信息反馈卡(2012 年第 5 期)

- ▲您目前最感兴趣的技术问题: _____
- ▲您认为本期最佳文章: _____ 理由: _____
- ▲您认为本期欠佳文章: _____ 理由: _____
- ▲您希望本刊增加哪些内容: _____
- 读者姓名: _____ 通信地址: _____ 邮码: _____

复印有效