

# 泄漏检测应用中突发干扰对 LMS 时延估计性能的影响

周彰敏<sup>1</sup>, 文玉梅<sup>2</sup>

(1. 重庆大学研究生创新实验室, 重庆 400030; 2. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

**摘要:** 文章中把 LMS 时延估计算法用于地下管网的泄漏检测和漏点定位, 避免了经典时延估计算法- 广义互相关法(GCC 方法)需要知道信号和噪声统计特性等先验知识的不足, 但是泄漏检测应用中, 管道外在环境造成的突发性强干扰, 导致了传感器接收到的信号是非平稳的, 而非平稳信号对 LMS 的时延估计性能有不利影响, 文章中分析了这种由突发性强干扰导致的非平稳信号对 LMS 时延估计收敛性、收敛速度和时延估计值的影响, 提出了消除突发干扰的方法。实验表明, 在地下管网泄漏检测应用中, 该方法能够有效地消除强突发干扰噪声, 使得估计性能得到显著的改善。

**关键词:** LMS 时延估计; 泄漏检测; 突发干扰; 非平稳信号

中图分类号: TB566 文献标识码: A 文章编号: 1009-3630(2004)03-0168-05

## Effect of burst interference on the performance of LMS time-delay estimation in leak detection

ZHOU Zhang-min<sup>1</sup>, WEN Yu-mei<sup>2</sup>

(1 Graduate Innovation Laboratory, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2 College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Losses due to leaking is severe in underground pipes, which necessitates studies on techniques for detecting and locating leaks. The classical time-delay estimation method, GCC, is unsuitable because precise knowledge about signals and noises is difficult to obtain due to complicated environments of the underground pipe networks. LMS time delay estimation can avoid drawbacks of GCC as it can be performed without prior knowledge of the signal and noise. Unfortunately, since burst interferences lead to non-stationary characteristics of the received signals, performance of LMSTDE deteriorates. In order to apply LMSTDE to leak detection, effects of non-stationary properties due to burst interfere on convergence, convergence speed and time-delay estimation are analyzed. A method for removing burst interference is proposed, and experiments are carried out to verify its validity and show the improvement in the estimation performance.

**Key words:** LMSTDE; leak detection; burst interference; non-stationary signal

## 1 引 言

时延估计算法的种类很多, 其中经典的时延估计算法是广义互相关法(GCC 方法)<sup>[1]</sup>, 该方法需要知道信号和噪声的统计特征。在地下管网泄漏检测和漏点定位应用中, 泄漏信号和干扰噪声都具有不

确定性, 不便于用 GCC 法来估计时间延迟, 这是因为泄漏信号在不同的埋设条件、不同的管道材质、不同的管径等条件下具有不同的统计特征<sup>[2]</sup>, 干扰噪声受测量现场的环境影响(例如人为干扰、机械干扰、地下电缆造成的电磁干扰等等)也具有不确定性。采用 LMS 时延估计方法可以避免 GCC 方法的不足, 因为该方法不需要知道泄漏信号和干扰噪声的统计特性, 能够自适应地从噪声中提取有延迟的两泄漏信号的相似性, 得到较好的时延估计结果。但是 LMS 时延估计算法的输入是非平稳信号时, 其性能将恶化, 而在泄漏检测和漏点定位应用中, 突发

收稿日期: 2003-12-17; 修回日期: 2004-03-29;

作者简介: 周彰敏(1976), 男, 贵州人, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理、光纤通信技术。

干扰将破坏信号的平稳性, 因此直接采用 LMS 时延估计算法将得不到满意的估计性能。

本文针对该应用情况, 提出了改善估计性能的方法, 文中首先简要介绍 LMS 时延估计的原理, 分析泄漏检测中的突发干扰及其对估计性能的影响, 然后提出消除突发干扰的方法, 并通过实际数据的实验来评估该方法。

## 2 LMS 时延估计的原理

根据地下管网泄漏检测的实际情况, 采用如下信号模型:

$$x_1(k) = s(k) + n_1(k) \quad (1a)$$

$$x_2(k) = \partial s(k-D) + n_2(k) \quad (1b)$$

式中  $x_1(k)$  和  $x_2(k)$  分别表示两个传感器采集的信号,  $s(k)$  是源信号,  $n_1(k)$  和  $n_2(k)$  是干扰噪声,  $D$  是两传感器接收到源信号的时间延迟,  $\partial$  是由于源信号沿管道传输长度的不同而造成的信号衰减。假设式(1)的  $s(k)$ 、 $n_1(k)$  和  $n_2(k)$  是均值为零的平稳随机过程且相互独立, 信号和噪声的功率是常数, 用 LMS 方法估计时间延迟  $D$  的原理框图见图 1 所示。

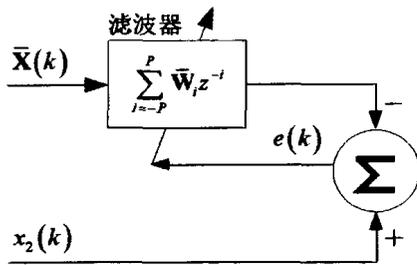


图 1 LMS 时延估计原理图

图中滤波器的权向量  $\bar{W} = [W_p, W_{p-1}, \dots, W_{-p}]^T$ ,  $\bar{X}(k) = [x_1(k-P), x_1(k-P+1), \dots, x_1(k+P)]^T$ , 是由  $x_1(k)$  构成的向量,  $x_2(k)$  作为参考输入信号, 是一个标量, LMS 自适应滤波器的误差输出为:

$$e(k) = x_2(k) - \bar{W}^T(k) \bar{X}(k) \quad (2)$$

式中  $k$  表示第  $k$  次迭代, 根据 LMS 自适应算法:

$$\bar{W}(k+1) = \bar{W}(k) + \mu e(k) \bar{X}(k) \quad (3)$$

式中  $\mu$  是一个正的常数, 控制算法的收敛速度和稳定性, 称为步长因子。LMS 算法收敛, 要求  $\mu$  值满足条件:

$$0 < \mu < 2/\lambda_{\max} \quad (4)$$

式中  $\lambda_{\max}$  是输入信号  $x_1(k)$  自相关估计矩阵  $R_{XX}$  的最大特征值。自适应算法的收敛速度可由下面的时间常数决定:

$$\tau = \frac{1}{2\mu\sigma_x^2} = \frac{1}{2\mu(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)} \quad (5)$$

式中  $\sigma_x^2$  是输入信号  $x_1(k)$  的功率,  $\sigma_s^2$  和  $\sigma_n^2$  分别是泄漏信号和干扰噪声的功率。当 LMS 自适应滤波达到稳态时, 其权向量由下式表达<sup>[3]</sup>

$$\bar{W}^* = \left[ \frac{\partial \Omega}{1 + \Omega} (\text{sinc}(P-D), \text{sinc}(P-1-D), \dots, \text{sinc}(-P-D)) \right]^T \quad (6)$$

式中  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$ ,  $\Omega$  是  $x_1(k)$  的信噪比,  $\Omega = \sigma_s^2 / \sigma_n^2$ 。通过对滤波器的权向量进行插值处理, 如果滤波器的权向量长度足够大, 使得有限项插值所产生的时延估计误差可以忽略时, 叠加量  $\mu e(k) \bar{X}(k)$  造成权向量的起伏是时延估计产生误差的原因。此时, 时延估计的方差为<sup>[4]</sup>:

$$\text{var}[\hat{D}] = \left( \frac{\text{var} \left[ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right]}{\left[ \frac{\partial}{\partial t} E \left[ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right] \right]^2} \Bigg|_{t=D} \right) \quad (7)$$

式中  $h(t)$  是式(6) 稳态权向量插值后的结果,

$h(t) = \sum_{i=-P}^P \text{sinc}(t-k) \bar{W}_i(k)$ 。根据文献[5], 推导出

$$\text{var}[\hat{D}] \approx \frac{3\mu\sigma_s^2(1+\Omega)(1+(1+\partial^2)\Omega)}{\partial^2\pi^2\Omega^3} \quad (8)$$

由式(8)可知, 时延估计方差与输入信号的信噪比、衰减因子和输入信号功率有关。

## 3 LMS 时延估计方法在泄漏检测中的应用

地下管网泄漏检测和漏点定位系统的结构示意图如图 2 所示, 泄漏信号由泄漏源产生, 沿管壁和水媒质向两端传播, 在传播的过程中有噪声叠加, 放在泄漏源两端的传感器接收到含有加性噪声的泄漏信号, 通过对两传感器接收信号的时间延迟进行估计, 就可以确定泄漏源的位置。

在地下管网泄漏检测和漏点定位应用中信号的



图 2 地下管网泄漏检测和漏点定位系统

实际情况是: 泄漏信号可以认为是零均值平稳的, 泄漏信号在传播过程中由管道内在环境叠加的噪声也可以认为是平稳的, 但是信号传播过程还受到外界环境的干扰, 例如机车造成的震动、人为干扰、机械摩擦干扰、地下电缆造成的电磁干扰等等, 地下电缆所造成的电磁干扰是一种持续性干扰, 这种干扰容易消除, 因为这种干扰信号的频率固定, 一般与泄漏信号的频率范围不重叠, 通过普通的滤波方法(如陷波或带阻滤波)就可以去除, 但是其它的干扰具有不确定性, 这些由管道外在环境造成的干扰噪声不一定满足平稳性条件, 其统计特征可能是时变的。即可以认为干扰噪声由两部分构成: 管道内在环境干扰噪声和外界环境干扰噪声, 其中管道内在环境干扰噪声可以认为是平稳的, 外界干扰造成的噪声不一定满足平稳性条件, 这将导致干扰噪声整体可能是非平稳的, 从而导致传感器接收到的信号可能是非平稳的, 而且这种干扰经常是突发性的强干扰, 这可以从图(3)所示的实际信号看出来, 图 3(a)和图 3(b) 分别是两个传感器采集到的信号。

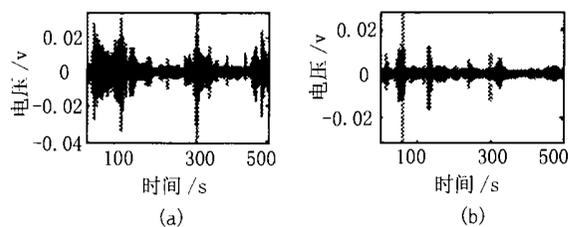


图 3 受不均匀间断性突发干扰的泄漏信号

前面的分析表明, 在泄漏检测应用中, 由于管道外在环境干扰经常是时变的突发强干扰, 使得噪声不满足平稳性条件和噪声功率不是常数, 这将导致传感器接收信号的非平稳性, 这与前面介绍的 LMS 时延估计模型不相符合, 如果直接采用该方法估计时延, 不对传感器接收的信号进行预处理, 其估计性能将会受到影响。

第一, 非平稳噪声影响 LMS 算法的收敛性。假设滤波器的阶数为  $N$ , 在实际计算时输入信号  $x_1(k)$  自相关矩阵的估计为  $N \times N$  的矩阵, 输入干扰噪声的非平稳导致估计矩阵的特征值是时变的, 如果步长因子固定, 则  $\mu$  值可能不满足式(4), 因为信号长度很长, 设定的初始  $\mu$  值不可能考虑所有的数据, 解决这个问题的一种方法是采用可变步长。在地下管网泄漏检测应用中, 滤波器的阶数由泄漏信号的传播速度、采样频率和两传感器间的管道长度

决定, 还需要考虑滤波器长度对估计性能的影响<sup>[6]</sup>, 如果信号的传播速度用  $v$  表示, 信号的采样率用  $f_s$  表示, 管道长度用  $L$  表示, 算法的采样率与信号的采样率相同, 则滤波器的阶数  $N$  应满足

$$N > \frac{L}{v} \times f_s \quad (9)$$

式中  $L$  的单位是 m,  $v$  的单位是 m/s,  $f_s$  的单位是采样点数/s,  $N$  的单位为数据样点数。泄漏信号的传播速度一般为 1300m/s, 泄漏信号的频率范围决定数据的采样率应为 5kHz 左右, 两传感器间的管道长度通常在 100m~200m 之间, 因此, 滤波器的阶数一般都在 1000 左右, 如果每一次迭代前都要先计算  $1000 \times 1000$  矩阵的特征值, 确定  $\mu$  值的大小, 时间代价很大, 因此采用变步长方法不合适。

第二, 非平稳噪声影响 LMS 方法的收敛速度。在输入信号是平稳的基础上, 得到式(5)的时间常数, 如果输入信号不平稳, 收敛时间就不能由该式计算。但是非平稳噪声对收敛速度的影响可以通过局部信号来分析。干扰噪声是突发的, 存在局部平稳信号; LMS 自适应滤波算法是基于最远下降法的, 迭代的过程是其权向量沿梯度减小的方向收敛至最优解-维纳解的过程, 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W(k) = W_{wiener} = R_{XX}^{-1} R_{Xd}, W^* \approx W_{wiener} \quad (10)$$

式中  $R_{XX} = E[\bar{X}(K)\bar{X}^T(K)]$ ,  $R_{Xd} = E[\bar{X}(K)d(K)]$ , 收敛的速度由  $\mu$  控制; 若有一段局部平稳信号, 不论算法在处理这一段数据前的初始权向量是什么, 则算法在这一段数据的迭代过程将使权向量向式(6)的稳态解收敛, 但是, 假设这一段平稳信号后是一个突发强干扰信号, 如果算法此时还没有得到正确的时延估计结果, 那么强干扰信号将使得权向量更新时产生误调, 干扰信号的强度和持续时间将决定是否破坏本已经趋于稳态的权向量, 因此, 在下一段局部平稳信号之前, 又必须从不合适的初始权向量重新开始迭代, 这必然增加收敛所需的时间。

第三, 非平稳噪声影响 LMS 方法的时延估计结果。根据前面的分析, 这个结果是很显然的, 从离散 LMS 方法的时域实现原理可知, 干扰噪声影响权向量更新的持续时间  $\tau$  (单位是采样点数) 为:

$$\tau = \text{length}(a) + N \quad (11)$$

式中  $N$  是滤波器的阶数,  $\text{length}(a)$  是干扰噪声宽度, 这里用图 4 进一步说明。图 4(a) 是某一次迭代的权向量。图中圆点指示绝对值最大峰值的位置, 其横坐标与正确的时间延迟相对应, 图 4(b) 是与图 4(a) 对应的输入向量  $\bar{X}(k)$ , 这段信号中有一

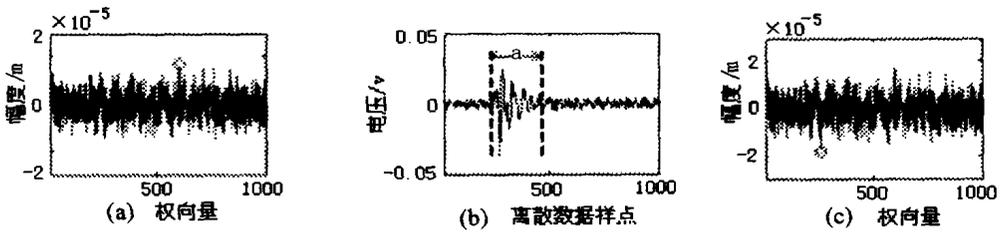


图 4 强干扰对更新权向量的影响

段很强的干扰信号, 如图中虚线包含的区间 a 所示, 根据迭代公式 (3), 得到图 4(c) 所示的权向量, 从图中可见, 迭代后权向量的最大峰值的位置已经发生变化, 出现了错误的时延估计结果, 可见强突发干扰可以使权向量迭代失调, 这是由于误调量的累加造成的, 干扰强度越大, 持续时间越长, 误调量越大, 权向量失调的可能性越大。

### 4 消除突发干扰噪声的方法

由前面的分析可知, 在地下管网泄漏检测应用中, 强突发干扰导致传感器接收信号的非平稳, 对估计性能存在有诸多不利影响, 故需要消除强干扰噪声。虽然理论上用小波方法对非平稳噪声的去除更有效, 但是由于该应用中数据量大, 小波分解、阈值设定、噪声消除、信号重构这一过程需要很多时间, 而在该应用中对估计性能影响最大的是突发强干扰噪声, 因此突发强干扰的检测和删除直接在时域中进行, 这既可以达到消除突发强干扰的目的, 又能快速完成, 这在实际应用中是很重要的。方法是基于泄漏信号是平稳的假设和存在局部平稳信号, 根据“3 倍方差”准则, 把观测信号的绝对值的均值加上其 3 倍均方差(或其它倍数)作为阈值, 如果阈值用  $\eta$  表示, 则将满足下面条件的信号  $x(i)$  视为强干扰删除掉。

$$\begin{cases} x(i) > \eta \\ x(i) < -\eta \end{cases} \quad (12)$$

时延估计是基于两信号相关性的, 为了保持两信号的相关性, 在删除其中一个信号的强干扰时, 需要对另一个信号做同样的删除, 一个比较好的方法是对两个信号同时进行强干扰检测, 删除其中任一信号中的强干扰时, 同时删除另一个信号的对应部分, 这样两个信号的强干扰都被消除, 而且信号的相关性得到保持, 这一过程的程序流程图见图 5 所示。

图 6 是一组实际信号的实验结果, 其中图 6(a1)、(b1) 分别是两传感器采集的源信号, 图 6(a2)、

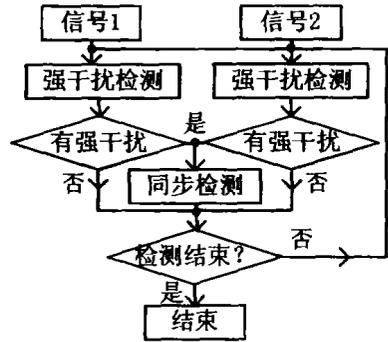


图 5 消除强干扰噪声的流程图

(b2) 分别是两源信号消除强干扰后的信号, 图 6(c) 是未进行数据处理的实验结果, 图 6(d) 是经过数据处理的实验结果。图 6(c) 和图 6(d) 中的虚线表示真实的时延值, 实线是时延估计值, 被换算成漏点与其中一个传感器的距离, 单位是 m, 用于指示漏点的位置, 横坐标是迭代时间。从图 6(a2)、(b2) 可以看出, 经过处理后的信号显著削弱了强干扰, 图 6(c) 的结果与前面的分析是一致的, 强干扰使权向量更新失调, 使时延估计出现强烈的振荡; 由于强干扰影响的消除, 迭代过程中权向量向稳态解收敛, 时延估计结果趋于真实的时延值, 这从图 6(d) 可以看出, 比较图 6(c)、图 6(d) 的实验结果可见, 消除强干扰后估计性能得到显著的改善。统计实验结果表明, 这一方法能够有效地消除突发强干扰, 改善 LMS 时延估计的性能, 减少泄漏检测中的错误判断, 所得时延估计结果的误差值小于 80cm, 满足了泄漏检测应用的要求。

### 5 结 论

文中分析了突发强干扰导致的接收信号非平稳对 LMS 时延估计算法收敛性、收敛速度和估计性能的影响, 提出了消除强干扰的方法。实际数据的实验表明, 在地下管网泄漏检测应用中, 该方法能够有效地消除突发的强干扰噪声, 使得估计性能得到显著改善, 对于与时延估计相关的工程应用, 该方法有

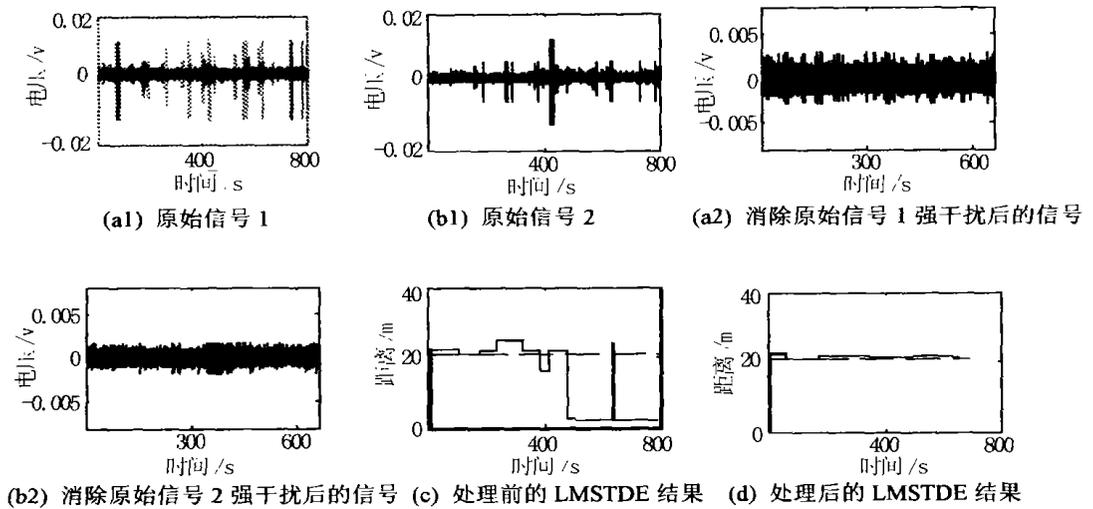


图6 实际数据的实验结果

借鉴作用。

### 参 考 文 献

- [1] Knapp C H, Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1976, **24**(4): 320-327.
- [2] Fuchs H V, Riehle R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis[J]. Applied Acoustics, 1991, **31**(33): 1-19.
- [3] Ho K C, Chan Y T, Ching P C. Adaptive time-delay estimation in nonstationary signal and/or noise power environments [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, **41**(7): 2289-

2292.

- [4] Reed F, Feintuch P L, Bershad N J. Time delay estimation using the LMS adaptive filter-static behavior[J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1981, **29**(3): 564-571.
- [5] So H C, Ching P C. Comparative study of five LMS-based adaptive time delay estimators[J]. IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigation, 2001, **148**(1): 9-15.
- [6] Breining C, Dreisettel P, Hansler E, et al. Acoustic echo control-An application of very-high-order adaptive filters[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1999, **16**(4): 42-69.

## 《超声提取及其应用》一书出版发行

郭孝武同志编著的《超声提取及其应用》一书已由陕西师范大学出版社出版,这是我国第一部系统、全面介绍超声提取及其应用的专著,由声学专家张德俊研究员和中国药典委员会委员、国家新药审评专家孙文基教授执笔作序。超声提取是声学和中药化学相互交叉及渗透而发展起来的,是超声应用和物质成分提取相结合的一种新方法,是研究药材等物质在超声作用下物质成分转移的规律及应用,它几乎涉及到医药、化学、油脂、食品等领域,特别在药材成分提取中显出了它的强大的生命力,已引起了世界各国的普遍关注,而且在我国医药界也已形成了超声提取的应用热潮。

《超声提取及其应用》全书共分六章:1、超声提取的物质基础;2、超声提取法与传统提取法,介绍了用现代科学仪器进行效果检验的检测技术;3、超声提取的设备,简单介绍了几种设备类型,以便选择使用;4、超声提取的应用,着重阐明超声应用于中药成分、油脂、食品等方面的提取中,能缩短提取时间,提高提出率,是一个很有前途的提取方法;5、超声提取的机理研究,用显微和电镜实验照片的实例论述了超声提取的机理;6、超声提取的优势及其应用前景,阐述了超声提取的发展前景。

该书全面论述了超声提取的原理和研究方法;纵观全书,作者做了大量的工作,系统性强,突出重点,且有独特见解;各章后列举了有价值的参考文献 200 多篇,可供读者查寻。本书著者郭孝武教授从 70 年代起就从事超声学研究,学术造诣较深,在超声应用方面取得了许多成果,获省部级科研成果奖 10 余项。他从 1985 年开始超声提取中草药有效成分的研究并于 1998 年获陕西省教委科技进步二等奖。作者密切关注国内外超声提取的研究进展,结合自己 10 多年来取得的研究成果完成了《超声提取及其应用》一书。此书问世,必将推动超声提取在我国的进一步发展,对从事医药、油脂、食品等方面提取研究和生产的专业技术人员及科技工作者、药检部门的工作人员都将起到开拓视野、增长知识的作用。

陕西师范大学应用声学研究所 林书玉