

# 网络化测试系统中时滞误差的动态补偿

李 鹏, 林家骏

(华东理工大学自动化研究所, 上海 200237)

**摘要:** 以基于网络的动态测试为研究背景, 在无 GPS 等时钟同步设备的条件下, 设计一个基于 LMS 算法的自适应估计器, 对参比系统、被测系统及误差处理器的时钟源同步误差进行在线估计, 实现了对网络时延引起的时滞误差的动态补偿。仿真结果表明, 该自适应时延估计器能够有效地对时钟源同步误差进行估计, 网络化测试系统动态补偿后的总误差比补偿前下降了 85%。

**关键词:** 网络化测试; 时滞误差; 自适应估计; 动态补偿

## Dynamic Compensation of Time-delay Error in Networked Measurement System

LI Peng, LIN Jia-jun

(Research Institution of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

**【Abstract】** This paper is concerned with the Networked Dynamic Measurement System (NDMS). An adaptive estimator, based on LMS algorithm, is designed to estimate the time-source synchronous error without the GPS and other time synchronization equipment, and to achieve the dynamic compensation of time-delay error. The results of simulation show that the adaptive estimator can estimate the time-source synchronous error effectively, and the total error drops by 85%, compared with that hasn't been compensated.

**【Key words】** networked measurement; time-delay error; adaptive estimation; dynamic compensation

网络化动态测试系统 (Networked Dynamic Measurement System, NDMS) 是以网络为基础的分布式动态测试系统, 它将分散的各种不同量测设备 (传感器、处理器) 挂接在网络上, 通过网络进行数据传输, 实现资源信息共享、协调工作, 共同完成大型复杂的动态测试任务。与传统的动态测试系统相比, NDMS 虽然具有许多优点, 但其节点在通过网络交换数据时会引起网络时延、丢包及误码等异常情况<sup>[1-2]</sup>。特别是网络时延的存在, 常导致 NDMS 测试的不确定度加剧, 使得测试结果不能正确反映系统的动态性能, 造成对被测系统性能的误判。

基于 GPS 时戳的时滞误差动态补偿方法<sup>[3-4]</sup>, 虽然对时滞的估计精度比较高, 处理也比较方便, 但设备成本投入也相对比较大。如何在无低成本硬件时钟同步设备的情况下较好地实现在线时延估计, 从而对测试平台进行时滞误差动态补偿, 是本文所要研究的问题。

### 1 时滞诱导误差分析

网络化动态测试系统如图 1 所示。

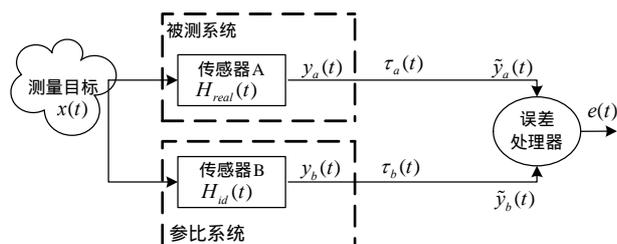


图 1 网络化动态测试系统结构

在该系统中, 被测系统和参比系统对同一目标进行测量, 参比系统的输出值被认为是理想测试值, 被测系统的输出值

与之相比较, 从而对传感器 A 的性能进行评判。被测系统和参比系统的测量数据需经过网络通道才能到达误差处理器。其中,  $\tau_a(t), \tau_b(t)$  为传输过程中的网络时延;  $\hat{y}_a(t)$  为被测系统测试值在  $t$  时刻到达误差处理器的数据;  $\hat{y}_b(t)$  为参比系统在  $t$  时刻到达误差处理器的数据。在  $t$  时刻, 误差处理器得到的动态测试误差如下:

$$\tilde{e}(t) = \hat{y}_a(t) - \hat{y}_b(t) = y_a(t - \tau_a) - y_b(t - \tau_b) \quad (1)$$

设  $\Delta\tau = \tau_a - \tau_b$ , 则有

$$y_b(t - \tau_b) = y_b(t - \tau_a + \Delta\tau) \quad (2)$$

若把  $y_b(t - \tau_a + \Delta\tau)$  在  $t - \tau_a$  处泰勒展开, 并略去二阶以上高阶项, 整理得

$$\tilde{e}(t) = y_a(t - \tau_a) - y_b(t - \tau_a) - y'_b(t - \tau_a) \cdot \Delta\tau \quad (3)$$

而根据动态测试误差的定义<sup>[5]</sup>, 此时应求取的误差应为

$$e(t) = y_a(t - \tau_a) - y_b(t - \tau_a) \quad (4)$$

因此网络时延的存在, 使得测试结果不能正确反映被测系统的动态性能, 造成对被测系统性能的误判。本文定义在动态测试系统中, 由于被测系统的测量数据滞后于参比系统的测量数据而引起的误差为时滞误差, 即式中  $y'_b(t - \tau_a) \cdot \Delta\tau$ 。

若要消除在网络化动态测试系统中时延的影响, 就必须估计出测试过程任意时刻被测系统和参比系统的时滞差  $\Delta\tau$ , 运用线性插值法, 把参比系统的采样值统一到被测系统的时间点进行误差比较, 从而对时滞误差进行动态补偿, 即

$$e(t) = \hat{y}_a(t) - \hat{y}_b(t - \Delta\tau) \quad (5)$$

**作者简介:** 李 鹏 (1976 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 网络化测控系统, 多传感器信息融合; 林家骏, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2007-06-14 **E-mail:** rocky\_lee@126.com

对于具有时滞误差的动态测试系统，通常的处理办法是引入时戳机制，即对测试数据加盖传感器采样时刻和误差处理器接收时刻的时戳，如图 2 和图 3 所示。

被测系统数据	传感器A采样时间 $t_s^a$	误差处理器接收时间 $t_r^a$
--------	---------------------	----------------------

图 2 被测系统数据帧格式

参比系统数据	传感器B采样时间 $t_s^b$	误差处理器接收时间 $t_r^b$
--------	---------------------	----------------------

图 3 参比系统数据帧格式

则有

$$\Delta\tau = (t_r^a - t_s^a) - (t_r^b - t_s^b) \quad (6)$$

而式(6)成立的条件是参比系统、被测系统及误差处理器的时钟源必须同步，即三者的时基是一致的。若它们之间的时钟不同步，则式(6)有可能为

$$\Delta\tilde{\tau} = (t_r^a - t_s^a) - (t_r^b - t_s^b) + \eta = \Delta\tau + \eta \quad (7)$$

其中， $\eta$  为三者的时钟同步源误差； $\Delta\tilde{\tau}$  为参比系统与被测系统的实际时滞。

常用的时钟源同步设备有原子钟、GPS 系统及无线电时钟等，这些设备虽然能够精确地进行时钟源同步，但硬件成本投入很大，对于一些同步性能要求不太高的网络化动态测试系统是不适用的。

因此，如图 4 所示，本文设计了一个自适应估计器，对参比系统、被测系统及误差处理器的时钟源误差  $\eta$  进行在线估计，从而实现了对由网络时滞引起的系统误差进行动态补偿。

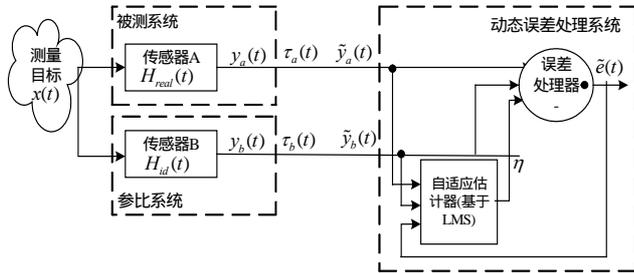


图 4 带有自适应估计器的网络化动态测试系统结构

## 2 基于 LMS 的 $\eta$ 自适应估计算法

最小均方(Least Mean Square, LMS)算法是一种使均方误差输出在性能表面上下降的算法。LMS 自适应算法，以其低复杂度常用于自适应信道跟踪，其特点是每次迭代所需的计算量远小于 RLS 和 Kalman 算法，但会有一定的性能损失。基本算法如下<sup>[6]</sup>：

最陡下降法迭代：

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \mu \hat{\nabla} J(k) \quad (8)$$

梯度向量的瞬时估计：

$$\hat{\nabla} J(k) = 2\hat{\mathbf{R}}\mathbf{w}(k) - 2\hat{\mathbf{p}} = 2\mathbf{u}(k)\mathbf{u}^T(k)\mathbf{w}(k) - 2\mathbf{u}(k)\mathbf{d}(k) \quad (9)$$

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu\mathbf{e}(k)\mathbf{u}(k) \quad (10)$$

其中， $\mathbf{w}(k)$  为  $k$  时刻迭代权向量； $\mu$  是控制自适应收敛速度和稳定性的收敛参数； $\mathbf{e}(k)$  为  $k$  时刻的输出误差； $\mathbf{u}(k)$  为  $k$  时刻的输入向量。

根据图 4 所示的自适应估计器的系统结构，本文基于 LMS 算法，实现对式(7)中的时钟同步源误差  $\eta$  的自适应估计。

对  $\eta(k)$  的自适应估计具体算法如下：

(1)当  $0 < k < m$  时， $\mathbf{w}(k) = \hat{\eta}(k) = \eta_0$ ；

(2)当  $m < k < l$  时， $\mathbf{e}(k) = \tilde{\mathbf{e}}_2(k) = \sum_{i=0}^k [\tilde{y}_a(i) - \tilde{y}_b(i)]$ ；

(3)当  $l < k$  时， $\mathbf{e}(k) = \tilde{\mathbf{e}}_3(k) = \sum_{i=k-l}^k [\tilde{y}_a(i) - \tilde{y}_b(i)]$ 。

对于(2),(3) 2 类情况，成立：

$$\tilde{y}_b(k) = \tilde{y}_b(k) - \Delta\tilde{\tau}(k)\tilde{y}'_b(k) =$$

$$\tilde{y}_b(k) - [\Delta\tau(k) + \eta]\tilde{y}'_b(k) \text{ (线性插值);}$$

$\mathbf{w}(k) = \eta(k)$ ； $\mathbf{u}(k) = \tilde{y}_b(k)$ 。

代入式(10)可得：

$$\hat{\eta}(k+1) = \hat{\eta}(k) - \mu\hat{\nabla} J(k) = \hat{\eta}(k) + \mu'\tilde{\mathbf{e}}_2(k)\tilde{y}_b(k) \quad (11)$$

其中， $\mu'$  为收敛因子。

基于 LMS 的估计方法与相关估计法的基本实质是一致的。即  $\tilde{y}_a(t)$  和  $\tilde{y}_b(t)$  为接收同一信号源  $x(t)$  的 2 路信号：

$$\begin{cases} \tilde{y}_a(t) = x(t) + n_1(t) \\ \tilde{y}_b(t) = x(t-\eta) + n_2(t) \end{cases} \quad (12)$$

其中， $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  为传感器接收到的零均值平稳未知噪声且相互独立，信号与噪声也独立，则有

$$R_{ab}(\tau) = E[x(t)x(t-\eta)] = R_{xx}(\hat{\eta}-\eta) \quad (13)$$

由自相关函数的性质有

$$|R_{xx}(\hat{\eta}-\eta)| \leq R_{xx}(0) \quad (14)$$

即当  $\hat{\eta} = \eta$  时， $R_{xx}()$  最大，因此选择使  $R_{xx}()$  最大的  $\hat{\eta}$  值作为  $\eta$  的估计值。

因此，相关时延估计法是寻求 2 路信号的最佳匹配，而 LMS 时延估计法也是求取 2 路信号的最佳匹配条件，即当  $\hat{\eta}$  收敛于  $\eta$  时， $\tilde{y}_a(t)$  逼近  $\tilde{y}_b(t)$ 。

对于图 4 所示的动态测试系统，由于被测系统和参比系统对同一目标进行动态测试，如果被测系统和参比系统的装置特性一致，即

$$H_{real}(x) = H_{id}(x), y_a(t) = y_b(t) \quad (15)$$

若被测系统与参比系统之间的误差仅由网络时滞造成的，则对于图 4 所示的动态测试系统， $\eta$  自适应估计的结果

$$\text{是 } \lim_{k \rightarrow \infty} \left[ \sum_{i=k-l}^k \tilde{\mathbf{e}}(i) \right] \approx 0。$$

而当被测对象与参比系统之间存在差异性(此时  $y_a(t) \neq y_b(t)$ )，被测系统与参比系统比较，有非时滞造成的误差，即此时有可能存在  $\lambda(t) = s'(t-D) \cdot \zeta$ ，成立：

$$\begin{cases} \tilde{y}_a(t) = x(t) + n_1(t) \\ \tilde{y}_b(t) = x(t-\eta) + \lambda(t) + n_2(t) \approx x(t-\eta+\zeta) + n_2(t) \end{cases} \quad (16)$$

因此误差  $\lambda(t)$  的存在，使得由自相关算法或是 LMS 算法求出的  $\hat{\eta}$  有可能与真实值不符。所以，只有当被测系统的非时滞误差被校正后，才可以直接用上述的方法求取  $\eta$ ，然后再由式(7)求得  $\Delta\tilde{\tau}$ ，从而最终对时滞误差进行动态补偿。

而对于存在有非时滞系统误差的被测系统，可以采取一种“先估计，再测试”的方法进行处理，基本思想如下：

由式(7)可知， $\eta$  为时钟同步源误差，而对于每次特定的动态测试， $\eta$  的值都是固定不变的。

因此在进行正式测试之前，可以先使被测系统和参比系统输出相同的 2 路标准信号，通过网络传送到误差处理器，此时根据图 4 所设计的基于 LMS 的自适应估计器，对  $\eta$  进行在线估计，当估计值  $\hat{\eta}$  收敛后，记下此时  $\hat{\eta}$  的收敛值  $\eta'$ ，继而中断 LMS 自适应估计，然后再对被测系统和参比系统进行

动态测试。

### 3 实验仿真

图 5 所示为某武器系统网络化测试平台，主要用来测试某武器系统的弹上计算机信号处理算法的性能。

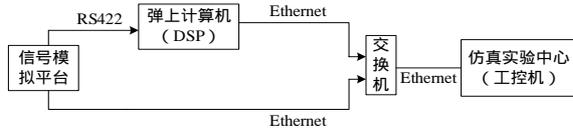


图 5 某武器系统网络化测试平台

信号模拟平台能生成 2 路信号：标准信号  $y = f(t)$ ；有噪信号  $z = f(t) + \zeta(t) + \delta(t)$ 。其中， $\delta(t)$  为白噪声，方差为 1； $\zeta(t)$  为模拟的信号漂移量。信号模拟平台通过 RS422 串口与弹上计算机进行通信，把有噪信号  $z$  送入弹上计算机；弹上计算机对有噪信号中的  $f(t)$  进行提取，并把处理结果  $\hat{f}(t)$  通过快速以太网送至仿真中心。

另一路标准信号作为参比系统输出，直接通过快速以太网送至仿真中心，并与弹上计算机的输出  $\hat{f}(t)$  作比较，分析弹上计算机对有用信号  $f(t)$  提取的可靠性(精度)。

假设信号模拟平台的数据，由上通道(弹上计算机)传输至仿真实验中心的时延为  $\tau_a(t)$ ；由下通道直接送至仿真实验中心的时延为  $\tau_b(t)$ ；信号采样周期均为 100 ms。

(1)上下通道均输入标准信号，对  $\eta$  进行自适应估计。

其中， $\hat{\eta}(k)$  的初始估计值为 0；LMS 算法的收敛因子  $\mu = 0.001$ 。

图 6 为自适应时延估计器的估计结果。参照式(11)可以看出，基于 LMS 自适应算法对  $\eta$  进行估计，在数据传输至 20 包之后， $\hat{\eta}$  越来越逼近  $\eta$ ，因此， $\Delta\tilde{\tau}(k)$  也越来越逼近  $\Delta\tau(k)$ ，即  $\Delta\tilde{\tau}(k) - \Delta\tau(k)$  趋向于 0。

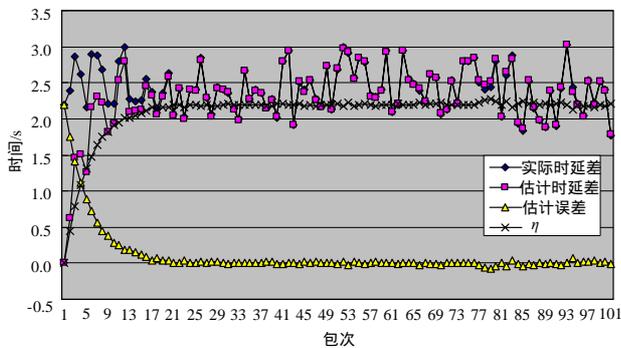


图 6 自适应估计器对  $\eta$  估计结果

当  $\Delta\tilde{\tau}(k) \rightarrow \Delta\tau(k)$ ，记下此时的  $\hat{\eta}$  的收敛值  $\hat{\eta} = 2.2$  s。

(2)输入至上通道(弹上机)的信号由软件切换为有噪信号，下通道不变，此时设  $\eta = 2.2$  s，即

(上接第 104 页)

发查询的邻居节点选择算法，获得了更高的查询检索效率。性能分析证明，算法产生的代价很小，是有效的。由于网络中节点保存的邻居节点表是本文算法的关键，采用本文算法的 P2P 网络鲁棒性不如传统的 Gnutella 网络，因此如何处理节点的故障和高效支持节点动态进入和退出网络是下一步的研究目标。

#### 参考文献

[1] 余 敏, 李战怀, 张龙波. P2P 数据管理[J]. 软件学报, 2006,

$$\Delta\tilde{\tau} = (t_r^a - t_s^a) - (t_r^b - t_s^b) + 2.2 \quad (17)$$

如式(5)所示，对由弹上机输入至仿真实验中心的数据进行动态补偿，从而消除由于时变时延差对误差评定结果的影响。参照误差评定的 3 个标准<sup>[5]</sup>，即系统误差、起伏误差和总误差，对时延差动态补偿前后的误差处理结果进行比较，结果如图 7 和表 1 所示。可见，本文所设计的自适应时延估计器，能有效地对网络环境下由传输时延引起的时滞误差进行动态补偿，动态补偿后的总误差比补偿前下降了 85%。

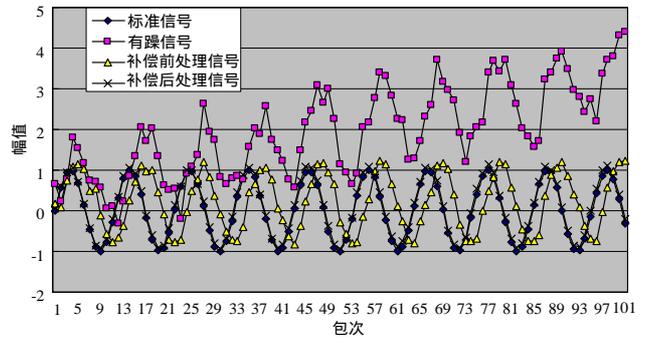


图 7 补偿前后的测试结果

表 1 动态误差评定结果

	系统误差	起伏误差	总误差
动态补偿前	0.32	0.94	0.98
动态补偿后	0.14	0.06	0.15

### 4 结束语

本文设计了一个自适应估计器，并进行在线估计。若参比系统与被测系统之间不存在非时滞误差，或非时滞误差很小，则该算法可以比较精确地估计时钟源误差  $\eta$ ，从而对由网络时延诱导的时滞误差进行动态补偿；若参比系统与被测系统之间存非时滞误差，可采用“先估计，再测试”的方法进行处理。某武器系统的动态测试仿真结果表明，动态补偿后的总误差远小于补偿前的总误差。

#### 参考文献

[1] Lian Fengli, Moyne J R. Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 66-83.  
 [2] Zhang Wei. Stability Analysis of Networked Control Systems[D]. Cleveland, USA: Case Western Reserve University, 2001  
 [3] 王树树, 李芳社. 基于数据融合技术的多目标跟踪算法研究[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(3): 269-272.  
 [4] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜, 等. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
 [5] 格拉诺夫斯基. 动态测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1989.  
 [6] Haykin S. Adaptive Filter Theory[M]. 3rd ed. [S. l.]: Prentice- Hall Inc., 1996.

17(8): 1717-1730.

[2] Napster Home Page[Z]. (2007-03-08). <http://www.napster.com/>.  
 [3] Gnutella Home Page[Z]. (2007-03-08). <http://www.gnutella.com/>.  
 [4] Palmer C R, Steffan J G. Generating Network Topologies That Obey Power Law[C]//Proc. of the GLOBECOM'00. San Francisco, USA: IEEE Press, 2000: 434-438.  
 [5] Buckley C. Implementation of the SMART Information Retrieval System[R]. Cornell University, Technical Report: TR35-686, 1985.

