

基于小波 ARMA 延迟预测的 Internet 远程控制

王 强, 谢林柏, 纪志成

(江南大学电气自动化研究所, 无锡 214122)

摘要: 针对 Internet 网络控制中延迟变化所引起的系统不稳定问题, 该文提出了一种基于小波 ARMA 多尺度预测的延迟时间预测方法, 并将其与 Smith 预估器结合应用于 Internet 网络控制中, 解决了在随机时变的数据包传输延迟情况下 Internet 网络控制系统的有效控制问题。以直流电机为例验证了预测算法的可行性和有效性。

关键词: 小波; ARMA; 延迟预测; Smith 预估; 网络控制系统

Internet Remote Control Based on Wavelet-ARMA Delay Prediction

WANG Qiang, XIE Lin-bo, JI Zhi-cheng

(Institute of Electric Automatic, Southern Yangtze University, Wuxi 214122)

【Abstract】 Aiming at the instability of Internet remote control system with variation time-delay, a novel delay prediction method based on wavelet-ARMA technique is designed to solve the problem caused by Internet-induced time delays in an Internet remote control system. Simulation results show that the method combined with Smith prediction is able to keep the Internet remote control system with good stability and dynamic performance. The availability and effectiveness of the method are verified by the usage of DC motor.

【Key words】 Wavelet; ARMA; time-delay prediction; Smith prediction; network control system

基于Internet网络的控制是指传感器、控制器、执行器等通过Internet构成闭环反馈控制系统^[1]。在这种控制系统中, 传感信息和控制信息的传输延迟表现为数据包的传输时延。通过对局域网和广域网上数据包传输时延分析结果表明^[2], 数据包传输时延普遍在大时间尺度下存在自相似性和长相关性, 在小时间尺度上存在短相关性和多重分形特性。

Wang等人根据TCP/IP协议中的数据包传输原理, 采用随机过程理论从宏观上研究数据包传输时延的统计特性, 并据此提出了两种预测算法^[3]。但预测误差的波动较大, 可能带来系统的不稳定问题。Nilsson和Wittenmark等从随机控制理论出发, 提出了一种针对具有随机网络诱导延迟的随机最优控制方法^[4], 把网络中数据包传输时延影响转化为一个LQG问题, 但是前提是数据包传输时延统计特性已知且固定。Luck和Ray等人通过在控制器侧以及执行器侧增加缓冲区的方法^[5], 将数据包传输时延扩大到最大时间, 从而将不确定随机时延转化为固定时延, 但是这种方法最大时延难以确定且削弱了控制系统的实时性, 而且没有直接对数据包传输时延进行建模, 难免存在建模不精确、有效性不高的缺点。

本文利用小波的多尺度分析能力, 将数据包传输时延分解到不同的尺度上, 然后将 ARMA 线性预测方法引入到各尺度分量的预测中, 再将各尺度上预测分量重构回去, 得到较精确的数据包传输时延预测值, 结合 Smith 预估控制算法补偿 Internet 网络中控制信号时延 τ_{ca} 和传感器采样信号时延 τ_{sc} , 实现网络控制系统的有效控制。

1 系统结构转化

为了解决网络中数据包传输时延的建模及预测问题, 在控制器中设计了小波 ARMA 数据包传输时延预测环节以及 Smith 预估控制环节。如图 1 所示, $G_c(s)$ 为控制器的传递函

数, $G_p'(s)$ 为被控对象的传递函数, τ_{sc} 为传感器采样信号从传感器到控制器的时延, τ_{ca} 为控制信号从控制器到执行器的时延。

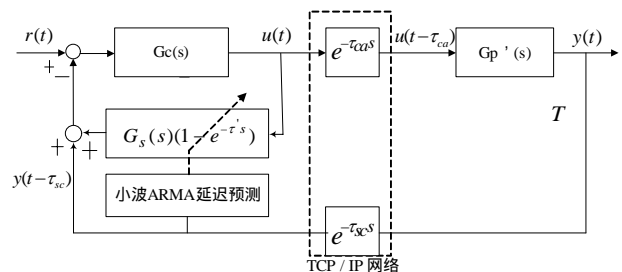


图 1 具有 Smith 预估器的网络控制系统

如果没有模型失配, 即 ($G_s(s) = G_p'(s)$, $\tau' = \tau_{sc} + \tau_{ca}$), 图 1 可以等效为图 2, 在图 2 中可见, 经过 Smith 预估补偿后, 闭环回路中不再包含纯滞后环节, 也不再影响到系统的特征方程, 与无网络时延控制系统相比, 只是将控制作用在时间坐标上推移一个时间 τ_{ca} , 而控制系统的其他特性指标都与对象特征为 $G_p'(s)$ 时完全相同。

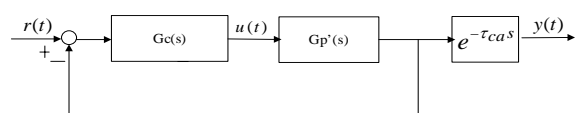


图 2 无模型失配时的等效结构

基金项目: 江苏省高技术研究计划基金资助项目(BG2005014)

作者简介: 王 强(1975 -), 男, 讲师, 主研方向: 嵌入式系统, 网络控制系统; 谢林柏, 副教授、博士; 纪志成, 教授、博士生导师
收稿日期: 2006-11-18 **E-mail:** zcji@sytu.edu.cn

2 利用小波 ARMA 方法预测网络时延

2.1 时延的多尺度分析方法

小波分析方法是 20 世纪 80 年代后期发展起来的应用数学分支。这种方法通过伸缩和平移运算对信号进行多尺度分析,在时域、频域上都具有表征信号局部特征的能力,可以由粗到精细地逐步观察信号,解决了传统 Fourier 分析不能解决的问题。小波方法成为分析和处理具有长相关性信号的理想工具和方法。

本文利用前向小波分解与 ARMA(p,q)方法实现数据包传输时延精确预测,引入 Smith 预估控制算法补偿 Internet 网络中控制信号时延和传感器采样信号时延,实现网络控制系统的有效控制。

由于数据包传输时延是离散的时间序列,因此采用二进尺度分析方法给出数据包传输时延的直观表示,在恰当小波基的选择下,利用多分辨率分析的方法,数据包传输时延在不同尺度下的特性可以得到很好的描述。

2.2 数据包传输时延的小波分解

为了对数据包传输时延预测,需要将数据包传输时延分解到不同的时间尺度上,利用小波分解公式可以进行 N 尺度的分解,得到在逼近尺度 N 上的数据包传输时延序列和一组小波空间上的数据包传输时延序列。具体处理过程如下:

(1)选取常数 $\delta > 0$,作为判断停止分解的标准,并选择适当的尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$,选取 Haar 小波函数和尺度函数。尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 如下所示:

$$\phi(t) = \begin{cases} 1, 0 \leq t < 1 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, 0 \leq t < 1/2 \\ -1, 1/2 \leq t < 1 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

(2)选取 Haar 小波函数作为基本小波,可以很方便地用下式实现从某时间尺度 j 到时间尺度 $j+1$ 的分解:

$$\begin{cases} u_k^{j+1} = 2^{-1/2}(u_{2k}^j + u_{2k+1}^j) \\ w_k^{j+1} = 2^{-1/2}(u_{2k}^j - u_{2k+1}^j) \end{cases} \quad (2)$$

(3)根据步骤(2)分解得到的小波系数和尺度系数,在 $j+1$ 尺度上重构原信号 $x(t)$:

$$P_0^{j+1}x(t) = P_{j+1}x(t) + D_{j+1}x(t) + \dots + D_1x(t) \quad (3)$$

(4)计算在时间尺度 $j+1$ 上重构得到的数据包传输时延序列与原始数据包传输时延序列之间的方差:

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_k [x(t) - P_0^{j+1}]^2 \quad (4)$$

判断分解深度,如果 $\sigma^2 < \delta$,则分解达到要求,停止分解;否则继续分解,直到 $\sigma^2 < \delta$ 。

2.3 数据包传输时延序列的预测

经过上述处理后数据包传输时延序列最终分解为多个小波空间和一个尺度上的一组传输时延序列,各个序列之间的相关性已经大大减弱,此时就可以采用传统的时间序列分析方法对分解到各空间的数据包传输时延序列进行分析。

目前所采用的大多数时间序列分析模型主要是线性模型,其中最为常用的有自回归模型(Autoregressive, AR),滑动平均模型(moving average, MA)和自回归滑动模型(autoregressive moving average, ARMA)。在本文的数据包传输时延预测中采用 ARMA 模型。

数据包传输时延序列 $\{X(k)|k=0,1,2,N\}$ 的 ARMA(p,q)模型可以描述为

$$x(k) - \sum_{i=1}^p \phi_i x(k-i) = a(k) - \sum_{j=1}^q \theta_j a(k-j) \quad (5)$$

其中, p 和 q 分别是自回归部分和滑动平均部分的阶数; ϕ_i 和 θ_j 分别是自回归系数和滑动平均系数。根据模型代数化要求, ARMA(p,q)模型可以写为

$$\Phi(B)x(k) = \theta(B)a(k) \quad (6)$$

将序列 $\{x(k)\}$ 转化为序列 $\{a(k)\}$, 即

$$x(k) = \frac{\theta(B)}{\phi(B)} a(k) = \sum_{j=0}^{\infty} G_j a(k-j) = G(B)a(k), G_0 = 1 \quad (7)$$

式中, G_j 称为 Green 函数,作为“权”,可见 G_j 把 $x(k)$ 表示成 $a(k)$ 的过去值和现在值加权的线性组合,用以说明 $a(k)$ 及其过去值如何影响着 $x(k)$ 。

在确定 ARMA 模型的阶次以后,可以采用模型递推法进行平稳线性最小方差预测。设前述的 ARMA(p,q)模型的 Green 函数可以用 $G_0, G_1, G_2, \dots, G_i$ 表示, 则

$$G_0 = 1 \quad (8)$$

$$G_1 = \Phi_1 - \theta_1 \quad (9)$$

$$G_i = \Phi_1 G_{i-1} + \Phi_2 G_{i-2} (i \geq 2) \quad (10)$$

可知 ARMA(p,q)模型的递推预测公式如下:

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_{i+1}(1) \\ \hat{x}_{i+1}(2) \\ \vdots \\ \hat{x}_{i+1}(q-1) \\ \hat{x}_{i+1}(q) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -G_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -G_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -G_{q-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -G_q + \Phi_q & \Phi_{q-1} & \Phi_{q-2} & \dots & \Phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_i(1) \\ \hat{x}_i(2) \\ \vdots \\ \hat{x}_i(q-1) \\ \hat{x}_i(q) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$+ \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_{q-1} \\ G_q \end{pmatrix} x_{i+1} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \sum_{i=q+1}^p \Phi_i x_{i+q-i+1} \end{pmatrix}$$

式中, $\Phi_i' = \begin{cases} \Phi_i, i=1,2,\dots,p \\ 0, i > p \end{cases}$, 上式右端第 3 项当 $p \leq q$ 时为 0。

在网络控制系统中由于控制的实时性要求,数据包传输时延的预测不宜步数太大,否则预测误差过大会影响控制品质。本文对小波分解后各尺度下数据包传输时延采用一步预测的方式:

设原始数据包传输时延 $x(t)$ 经过 N 层分解后的各分量为 $P_N x(t), D_N x(t), \dots, D_j x(t), D_{j-1} x(t), \dots, D_1 x(t)$

为简单起见,设定经过分解后的所有分量的 ARMA(p,q)模型的阶次都相同,通过一步预测得到各分量的预测序列

$$P_N^j x(t), D_N^j x(t), \dots, D_j^j x(t), D_{j-1}^j x(t), \dots, D_1^j x(t)$$

2.4 预测的数据包传输时延重构

采用 Haar 小波变换实现数据包传输时延的多尺度分解后,其逆变换过程可以由下式描述:

$$\begin{cases} u_{2k}^j = 2^{-1/2}(u_k^{j+1} + w_k^{j+1}) \\ u_{2k+1}^j = 2^{-1/2}(u_k^{j+1} - w_k^{j+1}) \end{cases} \quad (12)$$

重构得到数据包传输时延的预测值为

$$P_0^j x(k) = P_N^j x(k) + D_N^j x(k) + \dots + D_{j-1}^j x(k) + \dots + D_1^j x(k) \quad (13)$$

3 仿真实验结果分析

为了考察上述小波 ARMA 延迟预测方法的效果,针对图 2 所示的系统,取 Peter Danzig(university of southern california), Jeff Mogul (digital's western research lab), Vern Paxson(lawrence Berkeley national lab)以及 Mike Schwartz (uni-

versity of colorado at Boulder)共同测量得到 TCP 包传输时延数据 RTT 中的一段来仿真(见 <http://ita.ee.lbl.gov/html/contr/ib/LBL-PKT.htm>)选择 860 个测量值的序列通过小波多尺度分析(见图 3),选取小波分解深度为 3。取控制器 $G_c(s)$ 为 PI 控制器,PI 控制器中参数整定为 $K_p = 1.5, K_i = 42.5$ 。被控对象 $G_p(s)$ 为一个直流电机。该电机传递函数为

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{2.507 \times 10^5}{s^2 + 2261s + 6.39 \times 10^4} \quad (14)$$

式中, ω 为电机的角速度; u 为电枢绕组的输入电压。

假设 τ_{sc} 和 τ_{ca} 具有相同的变化规律,但是时延值都取仿真用的 RTT 时延的 1/2,这样能保证 Smith 预估器估计的端到端数据包传输时延近似为 τ_{sc} 与 τ_{ca} 的和。选择参考输入为 $r(t) = 10\sin(5t)$ 。经过小波重构后得到原始数据包传输时延的一步预测结果如图 3。

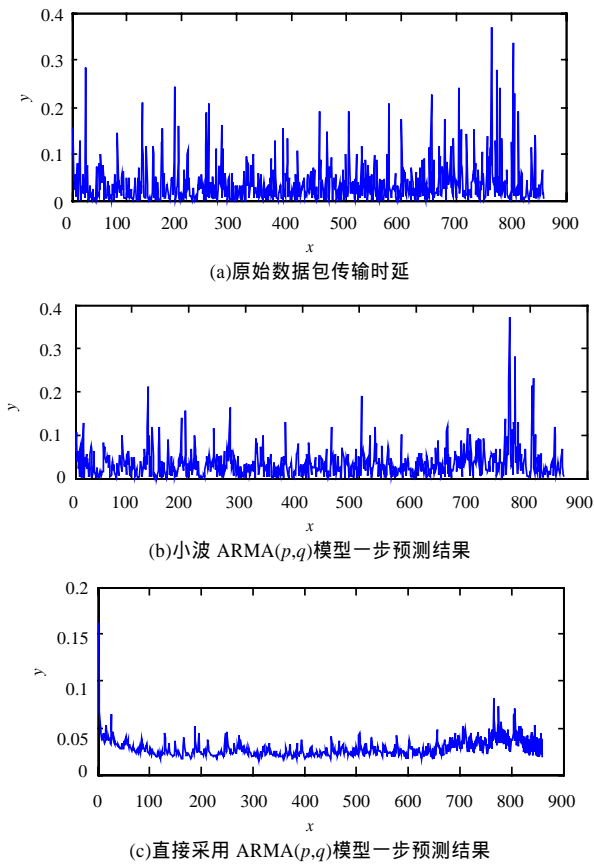


图 3 预测结果

对比于直接采用 ARMA(3,3)对原始数据包传输时延进行一步预测的方法,采用小波分解后再进行 ARMA(p,q)建模预测的方法所得到的结果更能捕捉原始数据包传输时延的瞬间变化,较精确地预测了原始数据包传输时延的趋势,对比图 4 和图 5,再结合图 3 所示的数据包传输曲线,可以看出,在 2.5s, 4.7s, 7.5s, ..., 26s 存在较大的数据包传输时延,如果没有 Smith 预估器补偿数据包传输时延,则直流电机输出响应会出现过冲的情况,而在较精确预测数据包传输时延变化,且 Smith 预估器有效工作的情况下,网络中的延迟得到有效补偿,直流电机的输出响应曲线在相应时刻明显要平滑。

由图 5 可见,经过小波-ARMA(p,q)精确预测数据包传输

时延后,再利用 Smith 预估控制器补偿网络对传感信号和控制信号时延,能保证系统稳定,没有削弱系统响应的实时性,系统输出响应明显比无 Smith 预估控制器时平滑,且良好地跟踪了参考输入信号 $r(t)$ 。

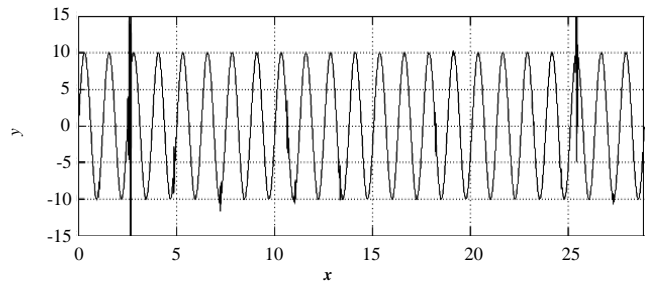


图 4 无 Smith 预估控制器时网络控制系统输出响应

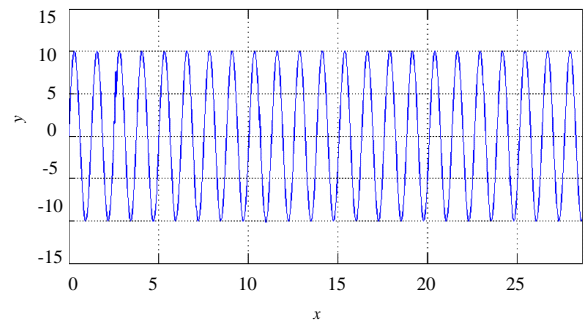


图 5 小波-ARMA(p,q)和 Smith 预估器结合时网络系统的响应

4 小结

基于互联网的控制系统是控制领域研究的一个热点,如何精确估计随机时变的数据包传输时延是研究网络控制系统控制策略的基础,本文根据 Internet 网络中数据包传输时延的自相似性特点,提出了一种小波分解和传统 ARMA(p,q)模型预测相结合的方法构成数据包传输时延在线实时估计器,结合 Smith 预估控制器和 PI 控制器构成简单易行的网络诱导延迟补偿器,较好地解决了网络中随机时变数据包传输时延对控制系统带来的不稳定和控制品质下降问题。为 Internet 远程控制提供了一种新的思路,具有良好的应用价值。

参考文献

- 1 Nilsson J. Real-time Control Systems with Delays [D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- 2 Nakashima T. Delay Propagation Properties with Self-similarity[C]//Proceedings of the 2005 the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems. 2005: 220-226.
- 3 Wei Wu, Wang Mingjun. Traffic Signal Control Using Fuzzy and Neural Network[C]//Proc. of the 8th International Conference on Neural Information Processing. 2001: 223-226.
- 4 Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic Analysis and Control of Real-time Systems with Random Time Delays[J]. Automatica, 1998, 34(1): 57-64.
- 5 Luck R, Ray A. Experimental Verification of a Delay Compensation Algorithm for Integrated Communication and Control Systems[J]. International Journal of Control, 1994, 59(6): 1357-1372.

