

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.03.025

基于单神经元 PI 控制器的 PTP 时钟伺服系统

谢志刚¹, 钱锋², 何英德³

(1. 军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 93670 部队, 河北 石家庄 050000; 3. 中国人民解放军 66440 部队, 河北 石家庄 050003)

摘要: 为解决在测试过程中网络化自动测试系统各测试仪器设备之间保持严格的时间同步, 对 IEEE1588 高精度时间同步协议进行了研究, 重点对 IEEE1588 的时钟伺服系统进行了分析。通过在时钟伺服系统中加入基于单神经元的 PI 控制器算法, 实现了对现有时钟伺服系统的改进, 并通过仿真实验验证了改进后的效果。结果表明, 与其它网络同步协议相比, PIP 能够实现极高的同步精度。

关键词: LXI; 时钟同步; IEEE1588; 时钟伺服系统

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

PTP Clock Servo System Based on Single Neuron PI Controller

XIE Zhi-gang¹, QIAN Feng², HE Ying-de³

(1. Dept. of Optical & Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 93670 Unit of PLA, Shijiazhuang 050000, China; 3. No. 66440 Unit of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To solve the network in the testing process automated testing system, test instruments and equipment to maintain strict time synchronization between, on the IEEE1588 high-precision time synchronization protocol for a study focusing on the IEEE1588 clock servo system is analyzed. The current clock servo system is improved by adding the PI controller algorithm based on single neuron on clock servo system, and process experimental verification proof. The results show that compared with other network synchronization protocol, PIP can achieve high synchronization accuracy.

Keywords: LXI; Clock synchronization; IEEE1588; Clock servo system

0 引言

网络化自动测试系统中, 各测试仪器设备之间的时钟同步问题是测试网中最基本的问题, 现在被广泛应用的以太网等测试网络基本上都是异步的, 对时间同步的支持较弱。主要的时间同步协议有网络时间协议 (NTP)^[1]、简单网络时间协议 (SNTP) 和 IEEE1588 精密时间协议^[2]。IEEE1588 (PTP) 是针对更稳定和更安全的网络环境设计的, 占用的网络和计算资源也更少, 故对其进行分析。

1 IEEE1588 标准

IEEE1588 精密时间同步协议是 (Precision Time Protocol, PTP) 由 HP 公司提出, 并最终由 Agilent 实验室的 John C. Eidson (现任 IEEE1588 协会主席) 组织来自其它公司的 12 名成员开发完成的 IEEE 标准。作为针对测试领域的应用, 它定义了一个在测量和控制网络中, 与网络交流、本地计算和分配对象有关的精密同步时钟的协议, 有效地解决了测试系统中各个测试设备的时间同步和网络延迟的问题。IEEE1588 定义的网络结构可以使自身达到很高

的精度, 时间标记功能更容易在硬件上实现, 并且不局限于应用层。LXI 仪器设备的同步与精密定时就是由 IEEE1588 实现的。在千兆以太网上, IEEE1588 在分布于世界各地的 LXI 设备之间可以达到毫秒级以下的精度, 而在模块之间可以达到纳秒级的精度。

IEEE1588 本身并不能直接提高测试网络的实时性能, 但是它可以为测试设备和测试事件提供精确的时间戳, 从而使系统获得实时性行为。例如, 在测试系统中, 需要多个测试设备在精确的时间内协同完成某项测试, 虽然因网络延迟会使控制命令在不同的时刻到达测试设备, 但由于各测试设备和控制器的时间保持了良好的同步, 因此控制命令总能在测试开始之前顺利到达每个测试设备, 从而保证测试设备可以在精确的时间上开始协同测试。

1.1 PTP 时钟同步原理

IEEE 1588 协议采用分层的主从式 (master-slave) 模式进行时钟同步, 主要定义了 4 种多点传送的时钟报文类型: 1) 同步报文, 简称 Sync; 2) 跟随报文, 简称 Follow_Up; 3) 延时要

收稿日期: 2009-10-25; 修回日期: 2009-12-04

作者简介: 谢志刚 (1975-), 男, 湖北人, 硕士, 讲师, 从事导航、制导与控制研究。

求报文，简称 Delay_Req；4) 回应报文，简称 Delay_Resp。

通过 Sync 报文中相关信息，采用标准定义的最佳主时钟算法 (Best Master Clock Algorithm, 简称 BMC 算法)，可从网络中选择一个准确度和稳定度最佳的时钟作为 PTP 主时钟，其他时钟均为从时钟，并被主时钟同步。同步过程分 2 步执行：

1) 主-从时钟差异纠正，即时钟偏移量测量。主时钟 (master) 周期性 (一般每隔 2 s) 地给从时钟 (slave) 发送 Sync 报文，此报文所包含的信息有报文在网络传输时刻的估计值和事件序列标识值 (sequence Id) 等。在介质独立接口 (MII) 连接有报文时标生成器，可精确测量 Sync 报文的发送时刻 T_1 。主时钟随后发送 Follow_Up 报文，报文中携带 T_1 信息和相关事件序列标识值 (associate sequence Id)。从时钟通过其内部的报文时标生成器，精确测量 Sync 报文到达时刻 T_2 ，在确认所收到的 Sync 报文和 Follow_Up 报文中的序列标识值相等后，通过比较 T_1 和 T_2 ，从时钟纠正其与主时钟的时钟差异。

2) 进行主-从通信路径的时间延迟测量。从时钟发送 Delay_Req 报文给主时钟，主时钟回应 Delay_Resp 报文。报文的双向传输中都包含了精确的传输时刻，从时钟利用此时间差异可以算出传输延迟。此测量方法要求传输路径对称，即发送延迟和接收延迟相等。

1.2 PTP 的时钟伺服系统

为实现主从时钟的同步，PTP 时间同步机制需要调整从时钟的时间和频率，以消除主从时钟之间的时间偏移 (Offset)。由于目前的网络化自动测试系统的操作平台很多都不是实时操作系统，因此对时钟的时间和频率的调整是通过中断服务来实现的^[3]，但中断服务程序的调用所导致的延迟抖动，会严重影响时间同步的精度。要实现 PTP 的精确时间同步，就必须设计良好的时钟伺服系统。

一种常见的 PTP 时钟伺服系统如图 1。图中从左到右显示了数据从 PTP 协议引擎流向本地时钟的路径。PTP 协议引擎周期性的采样并计算出主从时钟之间的时间偏移，并通过 PI 控制器对本地时钟进行调节，最终达到主从时钟的时间同步。图 1 中主从时间偏移值 Offset 经过低通滤波器输入到 PI 控制器，由 PI 控制器的输出调整本地时钟的频率，以实现主从时钟的时间同步。图 1 中的 PI 控制器是由比例 (P) 和积分 (I) 2 个环节构成的闭环控制系统，

其中比例项用来消除输入误差，即主从时钟之间的时间偏移；积分项用于消除系统的稳态误差，即减少主从时钟的速率差。图 1 中低通滤波器的作用在于消除时钟伺服系统的输入噪声，以减少输入噪声对 PI 控制器带来的影响。低通滤波器还可以消除时钟调整过程中由于输入抖动带来的有害影响。

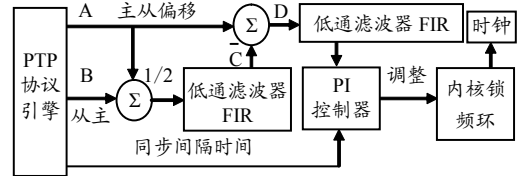


图 1 PTP 的时钟伺服系统

图 1 的时钟伺服系统采用了传统的 PI 控制方式，虽然传统的 PI 控制方式以其算法简单、调整方便、鲁棒性好和可靠性高等优点，被广泛应用于控制领域，但是其控制参数的调整主要依靠以往的工程经验，因此对于复杂多变的系统而言，其控制参数的修正往往比较困难。尤其是在网络环境下，由于网络传输具有非线性、时变性等不确定性因素，使得被控对象常常随时间发生变化，系统最初设定的控制参数往往不能适应时变的应用环境。因此，PTP 时钟伺服系统所采用的传统 PI 控制器很难达到理想的控制效果。

对于时变性非常强的网络传输环境而言，智能自适应控制是解决传统 PI 控制问题的有效方法。而作为智能自适应控制方法的一员，人工神经网络以其良好的自适应、自学习能力，使其可作为一种较好的自适应算法而应用于自适应控制，特别是与传统的 PI 控制方式相结合，可以有效地弥补 PI 控制方式不适应时变对象的缺陷。但由于 PTP 协议对时间同步要求非常严格，使得 PTP 对数据处理的实时性要求也非常高。因此，选用算法简单、具有自学习和自适应能力，而且实时性容易得到保证的单神经元算法不仅能满足自适应控制需要自适应算法的要求，而且能与 PI 控制方式结合在一起，组成高效可靠的单神经元 PI 控制器，应用于 PTP 的时钟伺服系统，从而提高时钟伺服系统的控制精度。

2 基于单神经元 PI 控制器算法

人工神经网络是在现代神经生物学研究基础上提出的模拟生物过程以反映人脑某些特性的计算结构，它利用人工神经元来模拟信息的处理过程，并用数学语言给出其抽象的描述。与传统的以线性处理为基础的信息处理模式不同，人工神经网络是一

种非线性的信息处理结构, 它对信息的处理是在对所有的输入信息进行综合处理后才输出计算结果。虽然人工神经网络的这种并行控制算法与计算机的串行处理方法相矛盾, 会使神经网络控制的实时性难以保证, 但单神经元算法却不同, 因为单神经元作为构成神经网络的基本单元, 不但具有神经网络自学习和自适应的能力, 而且结构简单易于计算。而 PI 控制算法也具有算法简单、可靠性高和鲁棒性强等优点, 将二者相结合, 就可以从某种程度上解决传统 PI 控制算法不能在线实时修正控制参数和难于对时变系统进行有效控制的缺点。

基于单神经元 PI 控制器的神经元模型如图 2。

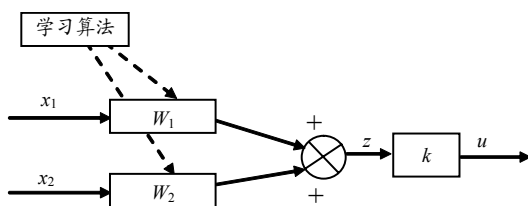


图 2 神经元模型

神经元的输出为:

$$z = \sum_{i=1}^2 x_i w_i \quad (1)$$

其中, x_i 、 w_i 分别对应神经元第 i 个输入和其所对应的连接权值。

神经元控制器的输出为:

$$u(k) = K \sum_{i=1}^2 w_i(k) x_i(k) \quad (2)$$

其中, K 为神经元的增益 (比例系数), 对系统的快速跟踪和抗干扰能力有较大的影响。单神经元控制器的自适应功能是通过学习改变连接权值来实现的。学习算法就是调整连接权值 w_i 的规则, 是单神经元控制器的核心, 并反映其学习的能力。学习算法如下:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \eta_i r_i(k) \quad (3)$$

式 (3) 中 $r_i(k)$ 为随过程递减的学习信号, $\eta_i > 0$ 为学习速率。

单神经元的 3 种主要学习规则是: 无监督的 Hebb 学习规则、有监督 δ 学习规则和有监督的 Hebb 学习规则。为同时保证学习算法的收敛性、PI 算法的鲁棒性等要求, 采用改进型的有监督 Hebb 学习规则作为基于单神经元 PI 控制器的学习算法。

有监督 Hebb 学习规则是将 Hebb 学习规则和有监督 δ 学习规则两者结合起来, 可用下式表示:

$$\Delta w_{ij}(k) = \eta [d_i(k) - o_i(k)] o_i(k) o_j(k) \quad (4)$$

式 (4) 中, $o_i(k)$ 表示单元 i 的激活值, $o_j(k)$ 表示单元 j 的激活值, $w_{ij}(k)$ 表示单元 j 到单元 i 的连接权值, η 为学习速率, $d_i(k)$ 为网络期望目标输出。有监督 Hebb 学习规则是神经元通过关联搜索对未知的外界做出反应, 即在教师信号 $d_i(k) - o_i(k)$ 的指导下, 对环境信息进行相关学习和组织, 使相应的输出增强或减弱。

采用有监督 Hebb 学习规则的基于单神经元 PI 控制器的结构模型如图 3。

图 3 中状态变换器的输入反映了被控对象实际输出和参考输入值。

连接权值的修正规则为:

$$w_i(k) = w_i(k-1) + \eta_i e(k) u(k) x_i(k) \quad (5)$$

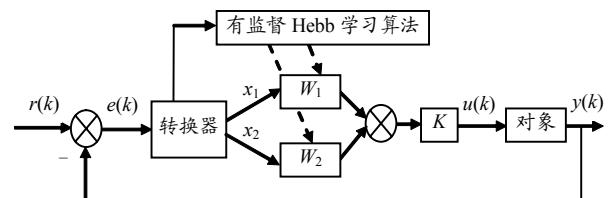


图 3 单神经元 PI 控制器结构模型

单神经元控制器的输出为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^2 w_i'(k) x_i(k) \quad (6)$$

其中, $\begin{cases} x_1(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_2(k) = e(k) \end{cases}$, $e(k) =$

$r(k) - y(k)$ 为 k 时刻误差, $e(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻误差; $w_i(k)$ 为神经元输入 $x_i(k)$ 的权值, 反映被控

对象及其过程的动态特性; $w_i'(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^2 |w_i(k)|}$; K

为神经元的比例系数。

通过不停的调整, 神经元在学习策略的指导下利用关联搜索 (式 (6)) 对控制方式进行管理并产生控制信号, 使系统迅速进入稳态。

大量的实际经验表明, PI 控制器的在线参数修正主要修正偏差信号 $e(k)$ 以及与其相关的 $\Delta e(k)$ 。故可将单神经元 PI 控制算法中连接权值的学习修正部分做出修改, 即将 $w_i(k)$ 中的 $x_i(k)$ 改为 $e(k) + \Delta e(k)$, 改进后的算法为:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^2 w_i'(k) x_i(k) \\ w_i'(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^2 |w_i(k)|} \\ w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_1 e(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \\ w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_2 e(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)] \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, η_1 、 η_2 分别为比例和积分的学习速率。利用式 (7) 的控制函数来实现基于单神经元的 PI 控制器, 从而实现对 PTP 时钟伺服系统的改进。

3 试验结果

为测试改进后的 PTP 时钟伺服系统的实际运行效果, 实验选用了 PTP 协议的运行平台 PTPd (PTP daemon)。PTPd 是由 Case Western Reserve University 开发完成的, 用于 Linux 系统平台, PTPd 系统采用了图 1 的时钟伺服系统。为了在不影响 PTPd 平台运行的条件下改进时钟伺服系统, 为 PTPd 协议平台增加了 npi.c 控制器子程序和 matrix.c 计算器子程序, 以改善 PTPd 平台中的 servo.c 子程序中较为简单的 PI 控制器。

为观察改进后 PTPd 平台的实际运行效果, 试验选用了苏黎世大学应用科学学院开发的 PTPMangerV1.4 版软件来观察 PTPd 平台运行时的时间同步特性。因该软件是采用 java 开发的跨平台系统, 故在使用 PTPMananger 软件之前首先要在 Linux 系统中安装并配置 java 运行环境, 然后才能开始软件的运行。

首先, 在 2 台节点计算机上运行 PTPd 软件, 使 2 台计算机的 PTP 端口都处于监听状态 (PTP_Listening), 为下一步的时间同步测试和监测做好准备。

然后, 在 2 台节点计算机上分别运行 PTPManager 软件的服务器端 (主时钟端) 和客户端 (从时钟端), 并用客户端观察节点之间的时间同步情况。通过以上操作, PTPMananger 的客户端就可以通过创建观测窗口监测 2 个时间同步节点之间的时间偏移 (offset) 的变化情况。图 4 是采用未改进的 PTPd 时钟伺服系统进行时间同步时, 观测的时间偏移的变动情况; 图 5 是采用改进后的 PTPd 时钟伺服系统进行时间同步时, 观测的时间偏移的变

动情况。图 4 与图 5 都是在 PTPd 平台进行时间同步半个小时后, 时间偏移曲线变化平稳之后采集的测试结果。

通过对比图 4 与图 5 可以发现, 改进后的 PTPd 平台其时间平均偏移值大约为 2 900 ns, 其数值明显小于原有 PTPd 平台的平均时间偏移值大约为 4 400 ns; 此外, 改进后的 PTPd 平台其时间偏移的抖动一般不超过 100 ns, 而原有的 PTPd 平台的时间偏移的抖动一般在 100 ns 以上, 最大达到 200 ns。

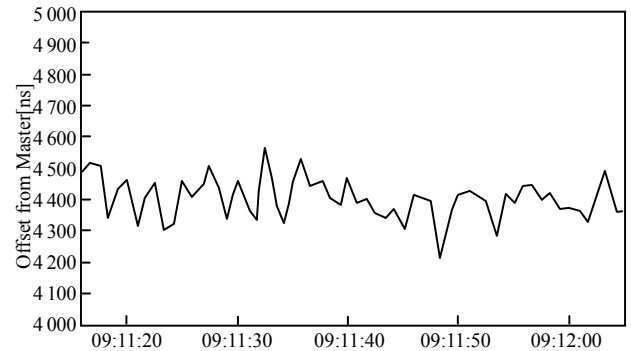


图 4 未改进的 PTPd 的时间偏移曲线

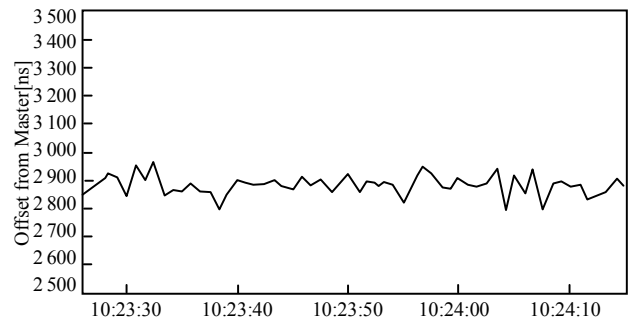


图 5 改进的 PTPd 的时间偏移曲线

4 结论

通过在时钟伺服系统中加入基于单神经元的 PI 控制器算法, 对 PTP 实现同步的原理进行了分析, 实现了对现有时钟伺服系统的改进。与其它网络同步协议相比, PTP 能够实现极高的同步精度。

参考文献:

- [1] D. Mills. Network Time Protocol (NTP) Version3 Specification[S]. Implementation and Analysis, RFC1305.
- [2] D. Mills, Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for Ipv4[S]. Ipv6 and OSI, RFC2030.
- [3] IEEE1588, Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. IEEE1588-2002 Standard, 2002.
- [4] 殷志良, 刘万顺, 等. 基于 IEEE1588 实现变电站过程总线采样值同步新技术[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 48-51.