

# 基于 NTP 协议的时钟同步系统<sup>1</sup>

林容容 程光 丁伟

(东南大学计算机科学与工程系 南京 210096)

**摘要:**网络环境下的监测分析中,许多度量参数的准确性都依赖于时钟的同步。为解决同步一段时间后又会产生漂移问题,通过对两台主机的相对时钟偏差展开的实验研究,建立了相对时钟偏差的线性模型。以主机相对漂移线性模型理论为基础设计和实现了基于 NTP 协议的时钟同步系统。该系统利用时戳报文抽样测量并记录时间数据;对数据模糊聚类分析处理以提取模型,对模型做线性回归拟合以得到模型参数;基于线性模型,系统最终提供对不同时刻主机时钟的修正 API。系统实现的测量精度可以达到毫秒级以下,基本满足对传输延迟测量的准确性要求。

**关键字:**时钟同步;网络时间协议;线性模型;时钟漂移;测量

## 1 引言

大多网络性能测度都需要有时间标记,不同主机之间实现时钟同步是网络应用实现的关键技术。网络端至端的基本测量测度有单向延迟,抖动等。单向延迟的测量就涉及时钟同步问题。

现有的时钟同步方案很多,主要有网络时钟协议(NTP)[1]和全球定位系统(GPS)等。但无论采用的同步机制是 GPS 还是 NTP,由于不同主机的时钟振荡频率不一,在同步一段时间后都又会产生不同步。通过测量发现 5 分钟后主机之间的不同步大约为 30 毫秒。而在对单向延迟的测量中,至少需要毫秒级的同步精度。因而必须对时钟的漂移进行修正。

本设计以研究高速 IP 网络环境中基于抽样测量的端至端 SLA 监测系统为背景,构造时钟同步集成体系结构,研制开发 Internet 网络环境下的网络端至端 SLA 监测分析所需的时钟同步系统。同时基于 NTP 协议的功能分析和本设计的实验研究,为将来深入大规模网络中时钟同步研究提供原始资料和数据。这一成果将直接为国家 863 项目“基于抽样测量的分布式服务级别约定监测系统”的实现提供准确时间标记,以保证监测系统中单向延迟测度值测量结果的准确性。

论文首先在建立两台主机的相对时钟漂移的线性模型的基础上,介绍基于 NTP 协议的时钟同步系统体系结构。然后,通过两台主机之间进行的时钟漂移测量实验结果说明线性时钟相对漂移模型能高精度修正主机时钟漂移现象。最后,对模型的漂移现象做了进一步的研究说明。

## 2 系统体系结构

为测量单向延迟测度值需要两个测量机器能保持同步,但可事先已知两测量点的时钟偏差,而不一定必须知道两台测量机器的绝对时钟[2]。因此本设计提出一种不需要进行绝对时钟同步而实现偏差测量的方案。

基于 NTP 协议的时钟同步系统包含了四个基本模块:时钟同步系统;分布于测量域两个

---

<sup>1</sup> 本文受国家 863 项目 2001AA112060,国家自然科学基金项目 90104031

测量点的时戳报文测量系统,相对时钟偏差的模型分析系统及基于模型的相对时钟偏差测量系统。

各模块介绍如下:

(1). 时钟同步系统

基于 NTP 协议,系统提供粗粒度的时钟同步,使机器间的相对时钟偏差保持在一定的范围之内。即使用 NTP 协议的一个简单的应用程序 ntpdate 更新机器时间。ntpdate 运行过之后就退出。为了保持时间的正确性,每五分钟做一次同步。

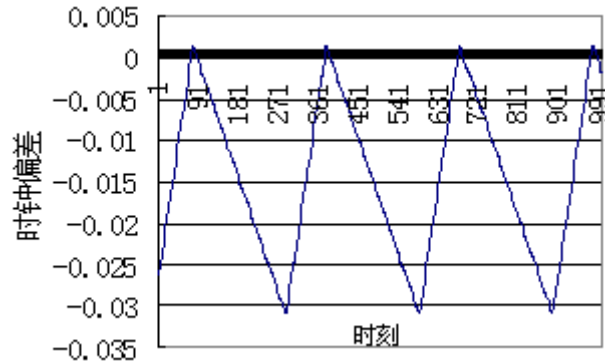


图 1 中记录了在此同步模式下的相对时钟偏差情况。此时的相对时钟偏差以同步时间粒度——五分钟为周期。每一周期又划分为两个区间:第一区间内,表现为无时钟同步干预下,相对时钟偏差不断增大;第二区间内表现为 ntpdate 修改系统时间的过程中相对时钟偏差不断减小。

图 1 本同步模式下的相对时钟偏差情况

从图 1 中可以明显看出:无论是第一区间还是第二区间,测量器时间和两测量器相对时钟都存在线性关系,但仍需要进一步对这两个变量间的相关程度进行验证[3]。

由概率论知,相关系数

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x) \cdot D(y)}} \quad (1)$$

是表示两变量间相关程度的一个数量性指标。在相关系数  $\rho$  不知道的情况下,可用测量器时间和两测量器相对时钟偏差的一组观察值  $(x_i, y_i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$ , 其中,  $x_i, y_i$  分别为时刻和相对时钟偏差,以求出测量器时间和两测量器相对时钟的样本相关系数  $r$ 。

$$\begin{aligned} r &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

当  $r = \pm 1$  时,表示线性相关。

通过计算得到,  $r = -1.000000$ , 表明  $y$  与  $x$  线性相关。在测量单向同步测量实验结束以后又做了相同的实验,计算模型的相关系数亦为  $-1.000000$ , 即线性相关。

这表明:第一区间内的相对时钟偏差与时刻是线性关系。

对于第二区间,我们做同样的分析计算后得到其测量器时间和两测量器相对时钟的样本相关系数  $r = 0.999999372$ 。  $r = \pm 1$  时,表示线性相关。在  $0 < |r| < 1$  时,  $|r|$  越大表明变量之间的线性关系越密切,反之表示变量之间的线性关系越不密切。故假设检验如下。

作原假设  $H_0: \rho = 0$ , 构造统计量

$$F = \frac{r^2}{1-r^2}(n-2) \quad (3)$$

当  $\rho = 0$  时，统计量  $F$  服从自由度为  $(1, n - 2)$  的  $F$  分布。给定显著性水平  $\alpha = 0.05$ ，算出  $F$  的值为 30254748.570。因为  $F \gg F_{\alpha}(1, n - 2)$ ，所以拒绝  $H_0$ ，也就是  $\rho \neq 0$ ，认为两变量间线性相关关系显著。未来的设计就是以此线性模型为基础进行的。

(2). 分布于测量域两个测量点的时戳报文测量系统

设计采用的是面向连接的 TCP 流方式进行 Socket 连接。图 2 给出了两机器间时戳报文的测量体系图。从一台主机 A 发送带主机 A 发生报文时刻  $f_A(t_{i,1})$  的时戳报文到另一主机 B，主机 B 一旦收到时戳报文立即将其接受时戳  $f_B(t_{i,2})$  记录在时戳报文中，同时转发报文至主机 A，并记录转发时戳  $f_A(t_{i,3})$ ，主机 A 收到该时戳报文产生应答报文到主机 A，主机 A 处记录接收该报文时戳  $f_B(t_{i,4})$ ，因此在主机 A 处可以得到四个时戳： $f_A(t_{i,1})$ 、 $f_B(t_{i,2})$ 、 $f_A(t_{i,3})$ 、 $f_B(t_{i,4})$ ，并记录在数据库中。其中， $i$  表示发送的是第几个时戳报文，假设总共时戳报文数为  $n$ ，则  $1 \leq i \leq n$ 。

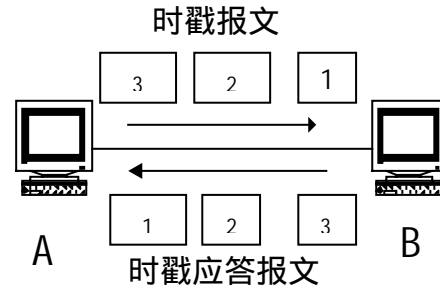


图 2 两机器时戳报文测量系统

图 3 为时戳报文的结构。其中，

SeqNum ——记录时戳报文的序号  $i$ ；

TimeSec ——记录时戳报文的时间（秒以上的部分）；

TimeUsec ——记录时戳报文的时间（秒以下的部分）。

SeqNum	$f_A(t_{i,1})$		$f_B(t_{i,2})$		$f_A(t_{i,3})$		$f_B(t_{i,4})$	
	TimeSec	TimeUsec	TimeSec	TimeUsec	TimeSec	TimeUsec	TimeSec	TimeUsec

图 3 时戳报文的结构

(3). 相对时钟偏差的模型分析系统

对由分布于测量域两个测量点的时戳报文测量系统得到的四个时戳  $f_A(t_{i,1})$ 、 $f_B(t_{i,2})$ 、 $f_A(t_{i,3})$ 、 $f_B(t_{i,4})$ ，根据式 (4) 计算出各时刻的相对时钟偏差。

$$(t_{i,A} - t_{i,B}) = ((f(t_{i,4}) - f(t_{i,3})) - (f(t_{i,2}) - f(t_{i,1}))) / 2 \quad (4)$$

通过聚类分析，提取出一个周期时间内的数据（包括时间值和相对时钟偏差）作为一个相对时钟偏差模型存入事实库中。根据对事实库中的数据的分析处理，得到当前模型的参数，放入模型库。其中的两个关键性问题是：模型的聚类分析和参数分析。

● 模型的聚类分析

分类伴随着模糊性，在模型的聚类分析过程中，由于机器的相对时钟偏差会出现跳变，因而采用模糊聚类分析方法[4, 5]。通过建立模糊相似关系，进而对数据库里的数据进行分类，以取出一个完整周期内的模型。

● 模型的参数分析

模型的参数包括：时间区间及对应的线性系数。由模型的模糊聚类分析，找到模型中各直线的交点，其各交点组成各个时间区间。在各时间区间内，进行回归分析[6]。即依据事实库里的观察样本  $(x_i, y_i) i=1, 2, \dots, n$ ，对应于每一个  $x_i$ ，根据回归直线方程计算出一个因变量估计值  $y_i$ 。回归方程估计值  $y_i$  与实际观察值  $y_j$  之间的误差记作  $e_i=y_i-y_j$ 。显然， $n$  个误差的总和越小，说明回归拟合的直线越能反映两变量间的平均变化线性关系。据此，使拟合所得直线的平均平方离差达到最小，从而找出回归直线方程  $y=kx+b$  的系数  $k$  和  $b$ 。

将分析处理后的各参数存入模型库。

#### (4) 基于模型的相对时钟偏差测量系统

在图 4 中，直线代表了真实时钟的值，折线代表了机器实际时钟的值。对各个时刻而言，直线与折线的间距反映了在该同步模式下机器实际时钟与真实时钟的偏差。

基于该同步模式的测量方法为：由相对时钟偏差的模型分析系统提取一个周期模型，假如为图中  $(t_1, t_3)$  区间内的相对时钟偏差。其中，设  $(t_1, t_2)$  区间内的数学模型为  $y=ax+b$ ，区间  $(t_2, t_3)$  内的数学模型为  $y=cx+d$ 。在这之后，

给定一个时间值，假定为  $t_4$ ，判断出给定时间  $t_4$  对应的模型是  $(t_1, t_2)$  区间，由模型库中用最小二乘法拟合出的直线  $y=ax+b$  的系数  $a$  和  $b$ ，计算出此时刻及其附近时刻的时钟偏差值，最后线性内插出相对时钟偏差值  $offset$ 。

简言之，在具体的测量中，用户给定一个时间值，测量系统与数据库接口，在模型库中查找相对应的模型参数，由模型参数测量出此给定时间段内的一组相对时钟偏差，线性内插出该给定时刻的相对时钟偏差，并将该值返回。

在此过程中涉及到的问题是对应模型和模型的区间推算。

经研究发现，随着时间的漂移，相对时钟偏差模型也在漂移，因而每隔一段时间，必须对相对时钟偏差模型进行修正和更新以保证适当的精度要求。设模型库里的模型每隔  $t$  时间增加一个新模型，模型库的第一个模型的起始时间为  $t_0$ 。那么，对于一个给定的时刻  $t_4$ ，首先，要找到对应的模型，应该是第  $(t_4 - t_0) / t + 1$  个。

其次，判断给定时间对应模型中的哪个区间，以确定当前需要使用的系数参数。判断依据为：如果  $t \in (t_1 * k, t_2 * k)$ ，选取参数  $a, b$ ；如果  $t \in (t_2 * k, t_3 * k)$ ，选取参数  $c, d$ 。其中， $k$  为正整数  $1, 2, 3, \dots$ 。

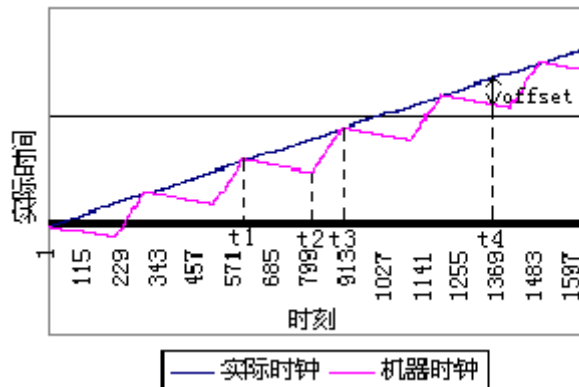


图 4 基于该同步模式的测量方法分析图

## 3 测试分析

### 3.1 时钟同步系统的讨论

测量发现，两相对时钟具有一定的随机波动性，但由于波动幅度都在  $0.02ms$  上下波动，基本已经超出了计算机时钟频率精度，而且也超出单向延迟的测量值的精度范围。因此无论是模型的第一区间还是第二区间，都是符合线性关系的。

### 3.2 测量结果精度分析

对若干实例做了测量精度的统计误差分析，其误差情况大致相同。从总体而言，在 1.5 小时内，测量误差基本是在 0.5 毫秒内的。如图 5 所示为实验中的一组数据分析图。随着时间的增加，误差也规律

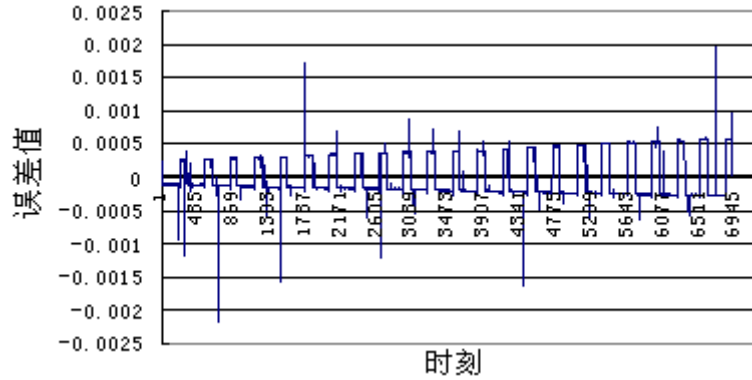


图 5 测量值与真实值的误差分析

性的增加。在第二区间内的测量产生的误差较第一区间内的误差大。这种误差的来源一方面是测量本身的方法误差，而另一主要方面是由于机器间相对时钟偏差模型的漂移。

同时，在测量误差小于 0.5 毫秒的范围内，总存在着个别超出精度的跳变值。对于这些点进行逐一分析后发现，产生较大误差的原因在于相对时钟偏差本身会有波动。在图 5 中存在着 11 个超出精度的跳变值。图 6 和图 7 中描绘的分别是在第一时间区间内和在第二时间区间内测量值与真实值的偏差较大的情况分析。其中的系列 1 (由三角形描绘) 是测量值结果，系列 2 (由方形描绘) 是真实值。由图可以明显看出，在跳点处，真实值游离于所在直线，因而测量值与真实值产生了较大的误差。

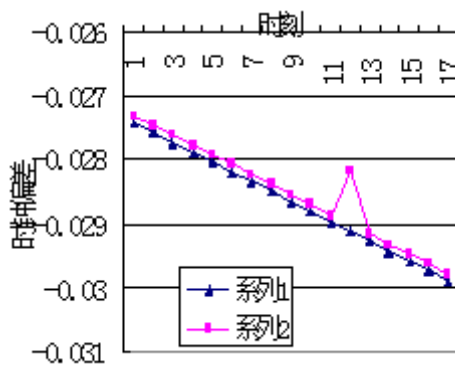


图 6 误差的原因分析 1

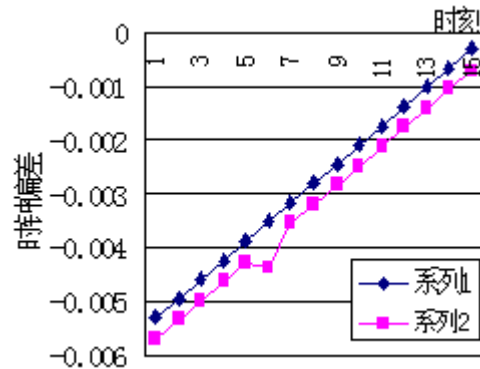


图 7 误差的原因分析 2

### 3.3 相对时钟偏差模型的漂移的分析

为分析相对时钟偏差模型的漂移情况，使用时戳报文测量工具测量了 24 小时内的相对时钟偏差，取出各个相对时钟偏差模型，计算模型参数，进行比较分析。

图 8 至图 11 这一组图是其中具有代表性的连续若干小时的测量数据通过整理后的结果。从图中可以得到，第一区间内的参数 a 和第二区间内的参数 c 的上下波动均不超过 0.000001，因而这两个参数的漂移是不会给相对时钟偏差的测量带

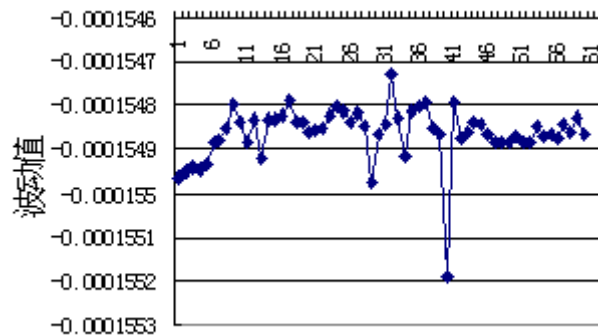


图 8 模型第一区间的参数 a 的波动

来很大误差的。

与此截然不同是：第一区间内的参数  $b$  的漂移分段分布，各段内大致为线性关系；第二区间内的参数  $d$  漂移基本是一条较光滑的直线。使用最小二乘法拟合的结果为  $y = 0.00001x + 0.03090$ ，其  $R^2 = 0.99214$ 。表明第二区间内的参数  $d$  漂移呈较良好的线性关系。很明显，第一区间内的参数  $b$  和第二区间内的参数  $d$  的漂移是影响相对时钟偏差测量系统的误差的主要因素。

产生这种模型漂移的原因是：相对时钟偏差模型其实是一个含有二次方关系甚至更高次幂的关系的多项式。而这种二次方关系甚至更高次幂的关系对时钟模型的影响是微小的，因而在本设计中，出于需求考虑，将其简化为了只含一次项和常数项的线性模型。这就引出了如何修正模型的问题。

从研究和实验看来每过 1.5 小时后，当前模型将不再适用。为优化系统性能，提高系统的测量精度，除每隔  $t$  时间在模型库增加一条新的模型记录外，动态适时地修正模型是一种既可节省系统开销，又能提高测量精度的做法。

对相对时钟偏差的模型来说，涉及到四个参数。因为第一区间内的参数  $a$  和第二区间内的参数  $c$  的漂移是微弱的，不会给相对时钟偏差的测量带来很大的误差。误差的主要原因在于参数  $b$  和参数  $d$ 。对于前二者的修正可通过更新模型记录实现。这里所讨论的主要是对于后二者的修正。

模型修正的算法为：

```
while ( 提取模型后 t' || 上次修正模型后 t' ) {
    启动时戳报文传输系统，记录 n 个时刻的时戳数据 ( 0 < n < 10 即可 ) ;
    计算该组时刻的相对时钟偏差；
    处理得到新的直线参数  $y = px + q$ ；
    if ( 第一区间 ) /* 区间判断 */
        用 q 修正原参数 b；
    else 用 q 修正原参数 d；
    while ( 1 ) {
```

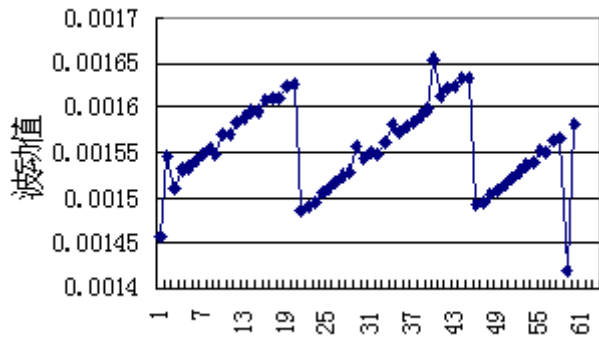


图 9 模型第一区间的参数  $b$  的波动

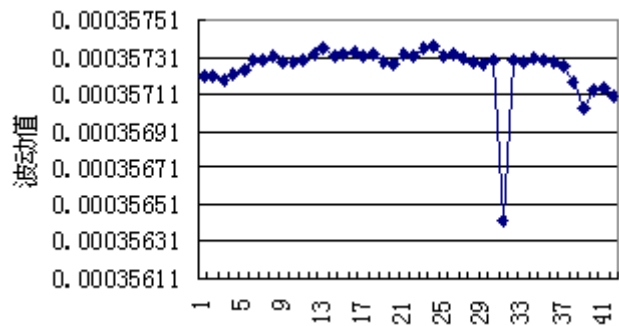


图 10 模型第二区间的参数  $c$  的波动

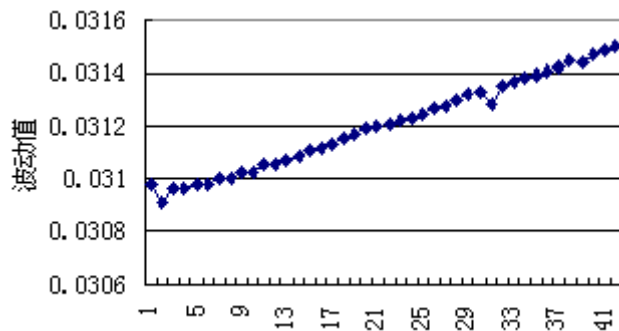


图 11 模型第二区间的参数  $d$  的波动

```

        if ( 下一区间 ) break ;
    }
    启动时戳报文传输系统，记录 n 个时刻的时戳数据 ( 0<n<10 即可 )；
    计算该组时刻的相对时钟偏差；
    处理得到新的直线参数  $y=mx+s$ ；
    用 s 修正该区间的原参数；
}

```

## 4 结论

大多网络性能测度需要有时间标记，不同主机之间实现时钟同步是网络应用实现的关键技术，如单向延迟等。为解决在同步后，由于机器振荡频率的差别而带来的不同步问题，本设计基于 NTP 协议，尝试研究了时钟相对偏差的线性模型，并设计和实现了精度能够满足传输延迟测量需求的时钟系统。

基于 NTP 协议的时钟同步系统是建立在 NTP 协议的基础上的对主机间的相对时钟偏差的研究。该设计以不同主机间的时钟同步为研究背景，根据机器间相对时钟偏差模型的研究，展开系统设计。

系统在粗粒度的时钟同步模式下，使用分布于测量域两个测量点的时戳报文测量系统记录和分析相对时钟偏差的模型，然后依据相应的模型对主机间的相对时钟偏差进行测量。该系统实现以一定的精度要求测量出给定时刻的主机间的相对时钟偏差。其测量达到的精度为 0.5 毫秒以下，基本满足了对传输延迟测量的准确性要求。

本设计研究的贡献在于：提出不需要 GPS，而精度又能够满足需求的时钟同步方法；建立主机间的相对时钟偏差数学模型；实现了时钟同步系统设计。系统的实现可以为 863 课题中的网络性能测度提供准确的时间标记，也为未来实现大规模网络中多台主机间的时钟同步提供了原始资料，奠定了基础。同时，在本实验设计的基础上对如何进一步提高测量精度等方面做了一定的探讨和研究。

## 参考文献

- [1] Mills, D., "Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis", RFC 1305, March 1992.
- [2] 程光, 大规模高速 IP 网络流量抽样测量及行为分析研究, 东南大学博士学位论文, 2003, pp: 80-83
- [3] 邓勃编著, 分析测试数据的统计处理方法, 清华大学出版社, 1995
- [4] 韩正忠, 方宁生, 模糊数学应用, 东南大学出版社, 1993
- [5] Mika Sato, Yoshiharu Sato, and Lakhmi C. Jain, Fuzzy Clustering Models and Applications, volume 9 of Studies in Fuzziness and Softcomputing, Heidelberg, Germany, 1997
- [6] 袁慰平, 孙志忠, 吴宏伟, 闻震初, 计算方法与实习, 东南大学出版社, 2000

Clock Synchronization System on NTP

Lin rongrong Cheng guang Ding wei

( Department of Computer Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096 )

Abstract

Mentioned to network environment, a lot of metrics parameters' measurement precision are dependent on Clock Synchronization. However, after the synchronization, the two hosts' clock will still deviate from each other because of the clock's "drift". Based on the clock synchronization in Network Time Protocol, the study to the relative clock offset of two hosts has been launched and the linear model has been established. On the basis of this, the Clock Synchronization System Based on NTP have been designed and realized. It can record the sampling time datum by ping message measurement. And then analyze the data with Fuzzy Clustering Technique and Linear Regression Technique to draw the models. At last, measure the relative clock offset according to the corresponding model. It provides an API for correcting the system clock. The precision of this measurement can under the lever of millisecond. It basically has satisfied the accuracy request for the transmission delay measurement.

**Key words:** Clock Synchronization, Network Time Protocol (NTP), Linear Model, Clock's Offset, Measurement

作者简介：

林容容，女，1981年，硕士生，研究方向：网络测量；

程光，男，1973年，讲师，研究方向：网络行为学，网络安全，网络测量；

丁伟，女，1963年，教授，博士生导师，研究方向：网络行为学，网络安全，网络测量。

传真：3614842 电话：3794000 邮编：210096