

网络主机时钟相对漂移模型研究

程光 丁伟 徐加羚

(东南大学计算机科学与工程系,南京 210096)

E-mail: gcheng@njnet.edu.cn

摘要 时钟同步是网络测量、管理的要求,由于时钟漂移现象的存在,难以实现精确的时钟同步。论文采用相对时钟代替绝对时钟,分析主机时钟相对漂移,建立了主机时钟相对漂移的线性模型,并由此推导出单向延迟修正模型。通过局域网范围内的主机时钟相对漂移和东南大学和瑞士之间的国际信道两端主机时钟漂移建立模型发现,相对漂移线性模型能很好地反映时钟漂移现象,并能够对两主机间的单向延迟进行修正。以相对时钟代替绝对时钟大大提高了时钟测量精度,减少了时钟同步的次数,降低了网络带宽的负担和主机资源的利用。

关键词 同步 线性模型 漂移 相对时钟

文章编号 1002-8331-(2004)28-0001-04 文献标识码 A 中图分类号 TP393

A Relative Offset Model on Network Host Clock

Cheng Guang Ding Wei Xu Jialing

(Computer Department of Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: Clock synchronization between different computers is a very important factor on network measurement network management. Because it is necessary to exist the clock offset between different computer clocks, so it is very difficult to precisely synchronize the computer clock continuously. In the paper, the absolute clock is replaced from the relative clock. On the basis of analyzing computer clock offset, the linearity model of computer clock relative-offset is built, and a corrected model of one-way delay is deduced. The relative-offset model is applied to analyze a team of offset data in the area of local area network and the corrected model of one-way delay is modeled to correct the end-to-end one-way delay the Internet computer clock between Southeast University and Switzerland. The research result shows that the clock relative-offset model can model the relative offset of different computer clock precisely and can correct the measuring error of one-way delay between computers. The clock relative-offset model have the advantages that are to increase the precise of clock measurement, decrease the times of clock synchronization and reduce the network bandwidth and computer resource.

Keywords: synchronization linearity model offset relative clock

1 引言

时钟同步是网络测量的要求。不同应用对主机的同步精度具有不同的需求,网络管理、安全等方面的需求精度在秒级,而网络测量则需要毫秒级的同步精度,如单向延迟是网络性能的一个重要测度,其精度依赖于不同主机之间的时钟同步精度。

目前网络时钟同步的技术很多,如:网络时钟协议(NTP)^[1,2],全球定位系统(GPS)^[3]和无线电信号等等,每种解决方案都有优点和缺点。不同的同步方案具有不同的同步精度,但由于不同主机的时钟振荡频率不一,无论采用的同步机制是GPS还是NTP,在同步一段时间后又会产生不同步,因而必须对时钟的漂移进行修正。由于不同主机的时钟不同步,为了满足精度需要,需要不断地进行时钟同步,这样会造成网络资源的浪费,增加主机CPU的负担。论文研究主机相对时钟模型,通过

相对时钟模型进行自我修正时钟漂移偏差,提高时钟同步精度,进而降低时钟同步的频率。[4]研究时钟漂移现象对单向延迟的影响, [5]研究相对时钟漂移模型。

论文首先研究分析主机时钟漂移现象,建立两台主机的相对时钟漂移模型。并通过近距离的两台主机之间进行时钟漂移测量,以及东南大学和瑞士的AMS^[6]项目之间国际信道两端主机时钟同步测量,实验结果说明线性时钟相对漂移模型能高精度建模主机时钟漂移现象。同时论文还基于相对时钟漂移模型建立单向延迟修正模型,研究说明修正模型具有良好的单向延迟修正效果。

2 相对时钟漂移模型

定义1:相对时钟偏差,设真实时间 t_0 时刻,对应主机C1

和 C2 时钟的时间分别为 T_{c2}, T_{c1} , 则定义 $T_{c2}-T_{c1}$ 的时间差定义为 C1 和 C2 时钟在 t_0 时刻的相对时钟偏差。

定义 2: 时钟同步, 如果在两主机 C1 和 C2 时钟在 t_0 时刻的相对时钟偏差为 0, 则定义在 t_0 时刻, 主机 C1 和 C2 时钟同步。在实际测量过程中, 可以事先定义一个时钟阈值, 如果相对时钟偏差小于时钟阈值, 则认为两时钟同步。

定义 3: 相对时钟, 设在某一标准时刻 t_0 , 主机 C1 的时钟为 t_1 , 主机 C2 的时钟为 t_2 , 则定义主机 C1 在 t_1 时刻相对于主机 C2 时钟为 t_2 ; 反之主机 C2 在 t_2 时刻相对于主机 C1 的时钟为 t_1 。

首先假设时钟函数可以用模型 (1) 表示:

$$f(t) = \alpha(t-t_0) + \beta(t-t_0) + t_c \quad (1)$$

其中 t 为标准时钟, $f(t)$ 为测量器在 t 时刻的时钟, 当标准时钟为 t_0 时主机时钟为 t_c , α 为测量器时钟的抖动系数, β 为测量器时钟的漂移系数。

任何一个机器的时钟模型都近似可以用模型 (2) 表示, 因此 A、B 两个不同主机的时钟可以分别表示为:

$$f_A(t) = \alpha_A(t-t_0) + \beta_A(t-t_0) + t_c^A \quad (2)$$

$$f_B(t) = \alpha_B(t-t_0) + \beta_B(t-t_0) + t_c^B \quad (3)$$

其中 $f_A(t)$ 和 $f_B(t)$ 表示在标准 t 时刻主机 A、B 的时钟, 因此主机 A、B 时钟相对时钟偏差为:

$$f_B(t) - f_A(t) = (\alpha_B - \alpha_A)(t-t_0) + (\beta_B - \beta_A)(t-t_0) + t_c^B - t_c^A \quad (4)$$

为了简化模型, 假设时钟抖动很小 $\alpha_A \approx 0, \alpha_B \approx 0$, 同时时钟漂移相比可以忽略不计, 因此模型 (4) 可以简化为 (5) 式:

$$f_B(t) - f_A(t) = (\beta_B - \beta_A)(t-t_0) + t_c^B - t_c^A \quad (5)$$

(2) (3) 式可以化简为:

$$f_A(t) = \beta_A(t-t_0) + t_c^A \quad (6)$$

$$f_B(t) = \beta_B(t-t_0) + t_c^B \quad (7)$$

(6) 式和 (7) 式的关系成立是从主机 A、B 时钟开始同步时刻起, 假设在 t_0 时刻, 主机 A、B 时钟同步, 因而在这一时刻 $f_A(t_0) = f_B(t_0) = t_c^A = t_c^B$ 。由于只需要计算主机 A 和主机 B 之间的相对时钟偏差, 而不考虑绝对时钟, 因此由 (6) (7) 式可以得到:

$$\frac{f_A(t) - t_c^A}{f_B(t) - t_c^B} = \frac{\beta_A}{\beta_B}$$

$$f_B(t) = \frac{\beta_A}{\beta_B}(f_A(t) - t_c^A) + t_c^B \quad (8)$$

(8) 式可以化简为 (9) 式:

$$f_B(t) = \frac{\beta_A}{\beta_B} f_A(t) + t_c^B - \frac{\beta_A}{\beta_B} t_c^A \quad (9)$$

根据 (9) 式可以推出 (10) 式成立:

$$f_A(t) = \frac{1}{\lambda} f_B(t) - \frac{1}{\lambda} t_c \quad (10)$$

式中 $\lambda = \frac{\beta_B}{\beta_A}, t_c = t_c^B - \frac{\beta_B}{\beta_A} t_c^A$, 根据式 (9) 可以知道主机 B 时钟相对主机 A 时钟的时间, 类似 (10) 式为主机 A 时钟相对主机 B 时钟的时间。

式 (10) 可以推出主机 A、B 相对于主机 B 的时钟相对漂移值:

$$f_B(t) - f_A(t) = (\lambda - 1) f_A(t) + t_c \quad (11)$$

为了测量主机 A、B 时钟偏差, 从主机 A 发送带主机 A 发生报文时刻 $f(t_{i,1})$ 时戳报文到主机 B, 主机 B 一旦收到时戳报

文立即将其接受时戳 $f(t_{i,2})$ 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 $f(t_{i,3})$, 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 $f(t_{i,4})$, 因此在主机 A 处可以得到四个时戳 $f(t_{i,1}), f(t_{i,2}), f(t_{i,3}), f(t_{i,4})$, 其对应的标准时钟分别为 $t_{i,1}, t_{i,2}, t_{i,3}, t_{i,4}$; i 表示发送的第几个时戳报文, 另假设总共时戳报文数为 n 则 $1 \leq i \leq n$ 。为了计算出主机 A 和 B 之间时钟相对偏差, 需要给出一个假设。

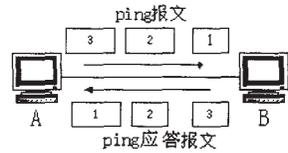


图 1 两主机时钟测量体系结构

假设 1 在图 1 体系结构的情况下, 时戳报文通过 AB 需要的时间和时戳应答报文通过 BA 所需要的时间可以假设相同。即假设式 (12) 成立:

$$\text{delay}_{i,AB} = \text{delay}_{i,BA} \quad (12)$$

式中 $\text{delay}_{i,AB}$ 为第 i 个时戳报文从主机 A 到主机 B 的单向延迟, $\text{delay}_{i,BA}$ 为第 i 个时戳报文的应答报文从测量器 B 到测量器 A 的单向延迟。

因此 i 报文从主机 A 到主机 B、其应答报文从 B 到 A 的单向时间延迟为:

$$\text{delay}_{i,AB} = t_{i,2} - t_{i,1} \quad (13)$$

$$\text{delay}_{i,BA} = t_{i,4} - t_{i,3} \quad (14)$$

根据假设 1, 可以认为 $\text{delay}_{i,ab} = \text{delay}_{i,ba}$, 故由公式 (13) (14) 可以得出:

$$t_{i,4} - t_{i,3} = t_{i,2} - t_{i,1} \quad (15)$$

由式 (6) (7) 可以分别计算出标准时钟 $t_{i,1}, t_{i,2}, t_{i,3}, t_{i,4}$, 代入式 (15) 可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{(f(t_{i,4}) + f(t_{i,1})) - 2t_c^A}{\beta_A} &= \frac{(f(t_{i,3}) + f(t_{i,2})) - 2t_c^B}{\beta_B} \\ \frac{f(t_{i,4}) + f(t_{i,1})}{2} &= \frac{\beta_A}{\beta_B} \left(\frac{f(t_{i,3}) + f(t_{i,2})}{2} - t_c^B \right) + t_c^A \\ &= \frac{1}{\lambda} \frac{f(t_{i,3}) + f(t_{i,2})}{2} - \frac{1}{\lambda} t_c \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{f(t_{i,3}) + f(t_{i,2})}{2} = \lambda \frac{f(t_{i,4}) + f(t_{i,1})}{2} + t_c \quad (17)$$

式 (16) (17) 的物理意义可以参见图 2。主机 A、B 时钟序列上, 可以认为测量时戳报文离开主机 A 的时戳和返回时戳报文到达主机 A 的时间中值等于时戳报文到达主机 B 时戳和返回时戳报文离开主机 B 时戳的中值, 将多个主机 A、B 时间对建立最小二乘线性模型, 即可计算出模型 (16) (17) 的相关参数。

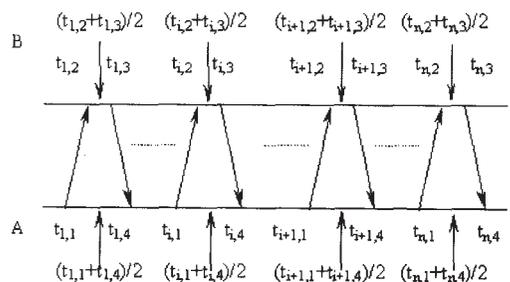


图 2 相对时钟模型示意图

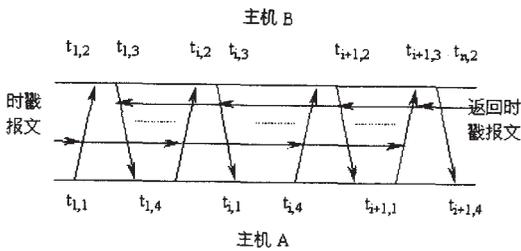


图3 时戳报文测量时钟抖动序列图

3 实验验证模型

为了验证模型(16)和(17),论文测量近距离的两台主机的时钟相对模型,及测量瑞士ams和东南大学两台主机之间的时钟相对模型。

由(16)或(17)可以计算出主机A相对于主机B的时钟模型,或主机B相对于主机A的时钟模型。图2为时戳报文测量时钟相对时钟偏差序列图,测量序列可以产生一组时戳值 $(\frac{f(t_{i,A})+f(t_{i,B})}{2}-t_A, \frac{f(t_{i+1,A})+f(t_{i+1,B})}{2}-t_B)$ $t_A=1036811934$ $t_B=1036811952$, 其中 t_A, t_B 分别为模型对于主机A和B时钟的起算时刻。根据这组值可以绘出图3, 其中 $\lambda=1.000101$ $t_C=1.601516$ 。

图4为根据测量图3中时戳序列的一组数据,按公式(16)计算出来的主机A和主机点B之间的时钟相对偏差 $(\frac{f(t_{i,A})+f(t_{i,B})}{2}-t_A, \frac{f(t_{i+1,A})+f(t_{i+1,B})}{2}-t_B)$ 的曲线图,从图4可知(16)成立。

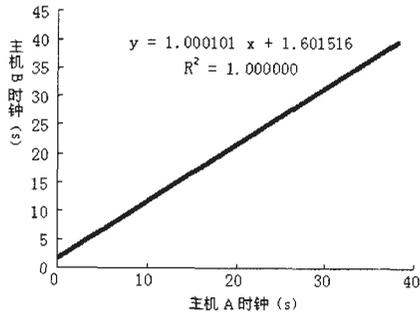


图4 第一次两主机时钟关系曲线图

为了评价模型的拟合程度,定义 R^2 测度用于评价模型拟合测量数据的程度。 R^2 测度值定义为:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (18)$$

其中 $SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$, $SST = \frac{(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2}{n}$ 。当 R^2 在 $[0, 1]$ 之间变化,并趋近于1时,表明模型具有良好的拟合效果。

图4的 $R^2=1.000000$,因此说明线性模型几乎完全拟合, $\lambda=1.000101$ $t_C=1.601516$, 设 $t_A'=t_A-1036811934$ $t_B'=1036811952$, 由公式(16)和(17)可得:

$$t_A' = 0.999899t_B' - 1.601354 \quad (19)$$

$$t_B' = 1.000101t_A' + 1.601516 \quad (20)$$

t_A, t_B 分别为主机A、B的计算机时钟,从1970年1月1日0点0分开始起算,单位是秒。而 t_A', t_B' 则是模型的起算时间。从式(19)和(20)可以得到主机A相对主机B的漂移。

相隔一点时间以后再次进行主机A、B模型测量,图5是

第二次测量结果,其中模型的起算点和模型1不变。式(21)(22)为第二次测量模型:

$$t_A' = 0.999900t_B' - 1.602054 \quad (21)$$

$$t_B' = 1.000100t_A' + 1.602414 \quad (22)$$

式(21)和(22)说明,两模型测量时间相隔1900s之间,主机A或B的时钟模型发生变化,其中斜率和截矩都发生变化,其中斜率变化0.000001,而截矩变化了0.000898s,这些变化是由于为了模型计算方便,忽略了时钟模型二阶以上的高维系数,从这里可以认为模型假设是合理的。

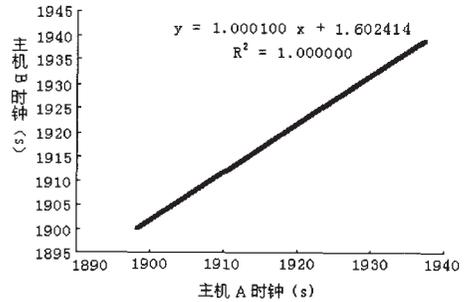


图5 第二次两主机时钟关系曲线图

从瑞士AMS实验室的主机pcamsf0.cern.ch到东南大学AMS实验室的主机amsseu.njnet.edu.cn之间的国际Internet路径,中间需要通过17条,最小延迟达到220ms左右,为了测量两台主机之间时钟同步问题,总共测量1000组数据,每秒钟测量100次,测量到的单向延迟经过同步修正后,见图6。图中可以明显看出pcamsf0主机比amsseu主机快,从pcamsf0到amsseu之间的单向延迟最小值的斜率为0.00000125(s/0.01s),因为0.01秒钟测量1次,故时钟变化率为0.000125s/s。图7是根据模型(17)绘制出的pcamsf0和amsseu之间相对时钟关系曲线图。其相对时钟模型为(23)式:

$$t'_{amsseu} = 1.000125t'_{pcamsf0} + 216.776019 \quad (23)$$

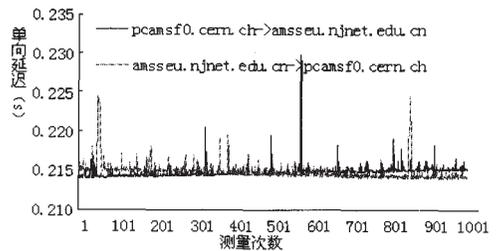


图6 pcamsf0和amsseu之间链路单向延迟曲线图

式中的 $t'_{amsseu}, t'_{pcamsf0}$ 为相对于2003年6月30日15:00的相对时钟, $R^2=1.000000$, pcamsf0和amsseu时钟变化完全可以使用线性模型进行拟合。因此pcamsf0时钟比amsseu时钟快0.000125s/s,这说明,修正模型计算出结果和图5单向延迟最小值变化斜率几乎完全一致,可以使用模型(23)对图6进行相对时钟修正。

4 单向延迟修正模型

单向延迟是网络性能的一项重要测度, IETF的IPPM工作组和ITU-T分别定义了单向延迟测度,单向延迟测度的精度同两台测量主机之间的时钟同步密切相关,时钟同步的误差将影响单向延迟的测量结果。大多数网络应用,特别是多媒体应

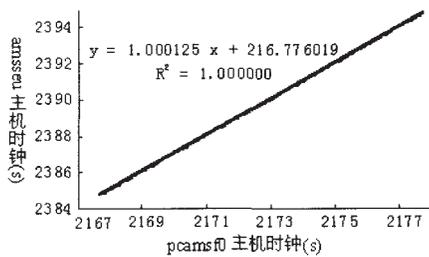


图7 pcamsf0和amsseu相对时钟曲线

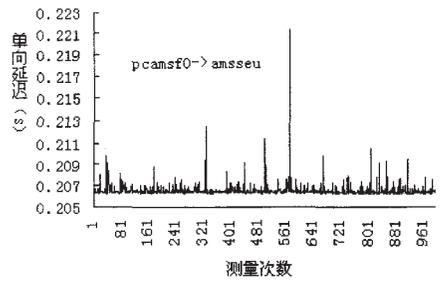


图8 pcamsf0和amsseu之间单向延迟修正图

用受到单向延迟的限制,一旦报文延迟超过规定的最大阈值,则可能会导致网络应用不能正常使用。传统延迟测量采用往返延迟(RTT),Claffy等人修改ping功能^[7],修改后的ping能在ICMP请求报文中记录通过源主机的时戳 T_1 和宿主机的时戳 T_2 ,ICMP应答报文中记录通过宿主机时间 T_3 和源主机时间 T_4 ,根据这四个时间计算单向延迟测量值。在RFC2679中定义类型P报文在T时刻从源IP到宿IP的传输延迟 dT 定义为:在T时刻源IP发送P类型报文的第一个比特,而宿IP在 $T+dT$ 时刻收到该报文的最后一个比特。由于报文从源IP到宿IP的单向延迟范围一般在0.1毫秒到10毫秒之间,因此需要保证源主机和宿主机之间的时钟同步,GPS全球定位系统能保证精度在0.01毫秒^[8],NTP时钟同步系统仅能保证时钟同步在10毫秒以内^[9],其精度取决于NTP客户机和NTP服务器所处的网络环境相关。时钟的基本原理是时钟的精度有限,且随着时间的变化会出现时钟漂移现象^[10],V.Paxson详细讨论基于延迟测量的时钟行为^[11],研究从单向延迟序列中进行误差修正。论文基于相对时钟漂移模型,推导出时钟修正模型,进而计算出不受时钟相对漂移影响的高精度时钟单向延迟。

论文第二节中,在主机A处可以得到四个时戳 $f(t_{i,1}), f(t_{i,2}), f(t_{i,3}), f(t_{i,4})$,其中 $f(t_{i,1}), f(t_{i,4})$ 是相对于主机A时钟的时戳,而 $f(t_{i,2}), f(t_{i,3})$ 是相对于主机B的时戳,由于主机A和主机B时钟不同步,所以不能直接使用四个时戳计算主机A、B之间的单向延迟。基于式(16)(17)可以推出式(24)(25)计算主机A时戳相对于主机B的时钟,或者计算处主机B时戳相对于主机A时戳。

$$f(t_{i,2}^A) = \lambda f(t_{i,2}) + t_c \quad (24)$$

$$f(t_{i,3}^A) = \lambda f(t_{i,3}) + t_c$$

$$f(t_{i,1}^B) = \frac{1}{\lambda} f(t_{i,1}) - \frac{1}{\lambda} t_c \quad (25)$$

$$f(t_{i,4}^B) = \frac{1}{\lambda} f(t_{i,4}) - \frac{1}{\lambda} t_c$$

式中 $f(t_{i,2}^A), f(t_{i,3}^A)$ 为主机B的时戳相对于主机A时戳,式中 $f(t_{i,1}^B), f(t_{i,4}^B)$ 为主机A的时戳相对于主机B时戳。因此得到基于主机A时钟四个时戳 $(f(t_{i,1}), f(t_{i,2}^A), f(t_{i,3}^A), f(t_{i,4}))$ 和基于主机B时钟的四个时戳 $(f(t_{i,1}^B), f(t_{i,2}), f(t_{i,3}), f(t_{i,4}^B))$,可以使用这两组时戳分别使用式(26)(27)计算主机A至主机B或者主机B至主机A的单向延迟。

$$delay_{A \rightarrow B} = f(t_{i,2}) - f(t_{i,1}^B) = f(t_{i,2}^A) - f(t_{i,1}) \quad (26)$$

$$delay_{B \rightarrow A} = f(t_{i,4}) - f(t_{i,3}^A) = f(t_{i,4}^B) - f(t_{i,3}) \quad (27)$$

pcamsf0至amsseu的单向延迟修正见图8。

5 误差分析

误差控制是相对时钟控制的主要问题之一。由相对时钟模型(16)(17)可以推算出每次测量中点的计算误差,误差定义为(28)(29)式:

$$midAt_i = \frac{1}{\lambda} \frac{f(t_{i,3}) + f(t_{i,2})}{2} - \frac{1}{\lambda} t_c$$

$$midBt_i = \lambda \frac{f(t_{i,4}) + f(t_{i,1})}{2} + t_c$$

$$errorA_i = midAt_i - \frac{f(t_{i,4}) + f(t_{i,1})}{2} \quad (28)$$

$$errorB_i = midBt_i - \frac{f(t_{i,3}) + f(t_{i,2})}{2} \quad (29)$$

基于大数定理,误差集合 $errorA_i$ 和 $errorB_i$ 分布服从正态分布。

6 结论

时钟同步是影响测量单向延迟的重要因素,单向延迟需要高精度的时钟同步,在局域网范围内的单向延迟的误差需要控制在毫秒级。通过实验发现主机的相对时钟漂移速率达到0.0001左右,因此每10s将会产生1ms的时钟漂移,这种时钟漂移现象是难以办法通过NTP或GPS进行修正,如果要保证时钟精度达到1ms以内,主机之间每10s就需要同步一次,大大增加网络的负担和主机资源消耗。

论文首先假设主机时钟模型是一次线性函数,忽略2次系数项,认为在一定的时间内,主机时钟模型是一个线性函数,在此基础上推导出两台主机时钟的相对漂移模型(16)(17)。测量近距离的两台主机不同时段相对时钟漂移,分别建立其相对时钟漂移模型,实验结果表明线性假设合理,模型具有极高的精度,同时也发现时钟漂移中存在高阶系数,模型系数在一定的时间区间内成立,每过一段时间需要进行模型系数修正以保证时钟漂移精度的估计。(收稿日期 2004年5月)

参考文献

1. Mills D. Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis[S]. RFC 1305, 1992-03
2. Network Research Center Web Side. <http://www.time.edu.cn/ntp.htm>
3. Spilker J J. Tropospheric effects on GPS[C]. In: B W Parkinson, J J Spilker Jr eds. Global Positioning System: Theory and Applications, Amer Inst of Aeronautics and Astronautics, Washington, 1996: 517-546
4. V Paxson. Measurements and Analysis of End-to-End Internet Dynamics[D]. Ph D dissertation. U C Berkeley, 1997
5. 程光. 大规模高速IP网络流量抽样测量及行为分析研究[D]. 博士学位论文

(下转 15 页)

SOFM 网络训练结束后开始进行分类。在分类的过程中没有设阈值,从而不产生属于未知类的像元。

3.4 结果分析

为了对比变化信息检测的有效性和精度,这里同时用最大似然判别法对 1996 年和 2001 年的图像做了分类,采用分类后比较方法提取变化信息。图 5(a)和(b)分别是 1996 年 TM 和 2001 年 TM 的局部原始图像,图 6(a)和(b)分别是 SOFM 直接分类变化检测结果图和最大似然法分类后比较的结果图。

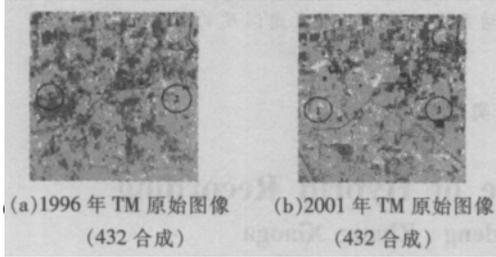


图 5

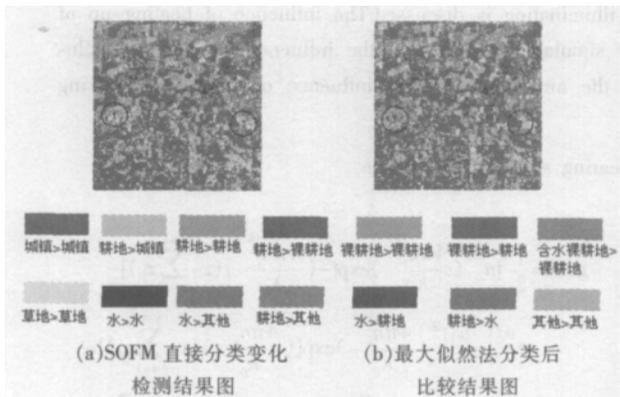


图 6

对比图 6(a)和(b)可以看出, SOFM 直接分类变化检测的方法的精度整体上要高于最大似然法分类后比较的结果。原始图像左中部的含水裸耕地(图中标记 1 所示)到 2001 年转变为裸耕地,但在最大似然法分类中把含水裸耕地与水体相混淆,而 SOFM 神经网络能够正确分辨出来。1996 年图中标记 2 中的耕地到 2001 年部分变成城镇用地,部分仍然是耕地,在最大似然法后分类比较中夸大了耕地转变成城镇用地的面积,而 SOFM 神经网络的结果更符合实际情况。

为了量化地说明变化检测的精度,这里使用预先取得的独立验证数据对 SOFM 方法和后分类比较方法进行了精度测试,测试结果见表 4。通过表 4 可以看出, SOFM 直接分类变化检测方法的精度大大高于最大似然法分类后比较方法。同时,

利用 2001 年 7 月中关村附近的 1:1 万比例尺航片(范围北纬 39°7'53" 40°13'40", 东经 116°9'40" 116°21'35")与变化检测结果进行了比对和验证。在后分类比较方法错分的像元中,有很大一部分是由于分类误差引起了不可能的转变类型,而 SOFM 直接分类变化检测方法通过直接对变化类型进行分类,既能直接得到变化类型,同时可以有效避免出现不可能的转变类型,从而提高了变化检测的精度。

表 4 SOFM 直接分类变化检测和最大似然法分类后比较变化检测精度比较

	总体精度	Kappa 系数
SOFM 直接分类变化检测法	91.6087%	0.902
最大似然后分类比较法	82.4052%	0.794

4 结论与讨论

研究结果表明,多光谱遥感数据直接分类变化检测的神经网络方法,可以在对两个时期的多波段遥感数据进行辐射归一化校正后,直接利用变化的和没有变化的训练区进行学习和分类,避免了采用统计学算法先对两个时期数据分别分类后,相减获得变化信息的复杂处理过程,以及在两个时期影像中选取训练区过程中人为因素产生的不确定性问题。试验结果表明, SOFM 直接分类变化检测方法的精度明显优于传统的后分类变化检测方法。

但是 SOFM 的分类精度取決与样本的多少,样本多精度高但计算时间就长,今后还需要进一步探索优化输入数据方法,提高了 SOFM 的分类速度。(收稿日期:2004 年 6 月)

参考文献

1. Ashbindu Singh. Digital change detection techniques using remotely-sensed data[J]. Int J Remote Sensing, 1989; 10(6): 989-1003
2. Gopal S, Woodcock C. Remote sensing of forest change using artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996; 34: 398-403
3. Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps[J]. Biological Cybernetics, 1982; 43: 59-69
4. 哈斯巴干. 神经网络及其组合算法的遥感数据分类研究[D]. 博士论文. 中科院遥感应用研究所, 2003-12
5. Kohonen T. The self-organizing map[J]. Proceedings of the IEEE, 1990; 78(9): 1464-1480
6. Hu S R, Yu S B, Dai K. Introduction of ANN[M]. Publishing House of National University of Defence Technology, 1993
7. C Y Ji. Land-use classification of remotely sensed data using kohonen self-organizing feature map neural networks[J]. Photogrammetric engineering & remote sensing, 2000; 66(12): 1451-1460

(上接 4 页)

论文. 东南大学, 2003: 80-83

6. <http://acems04.physik.rwth-aachen.de/~ams/>, 2003-06

7. K C Claffly, G C Polyzos, H-W Braun. Measurement considerations for assessing unidirectional latencies[J]. Internetworking Research and Experience, 1993; 3(3): 121-132

8. A Pasztor, D Veitch. A Precision infrastructure for active probing[C]. In: Proceedings of the PAM2001 workshop on Passive and Active

Measurements, Amsterdam, 2001

9. D L Mills. Network time protocol(version 3) Specification implementation and analysis[S]. RFC1305, IETF, 1992

10. S B Moon, P Skelly, D Towsley. Estimation and removal of clock skew from network delay measurements[C]. In: Proceedings of INET 2000, Tokyo, Japan, 2000

11. V Paxson. On calibrating measurements of packet transit times[C]. In: Proceedings of ACM SIGMETRICS, Madison, WI, 1998: 11-21