

引用格式:杨永强,周煦林,姚秦.一种具有野值预剔除的 TTE 时钟补偿算法[J].微电子学与计算机,2019,36(1):107-112.
[YANG Y Q, ZHOU X L, YAO Q. A TTE Clock Compensation Algorithm with Outlier Preclusion[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(1):107-112.]

一种具有野值预剔除的 TTE 时钟补偿算法

杨永强,周煦林,姚 秦

(西安微电子技术研究所,陕西 西安 710065)

摘 要: 时间触发以太网(Time-triggered Ethernet, TTE)通过精确的时间调度,保证了通信数据的实时性传输,在很多实时性要求高的数据传输领域中脱颖而出.分析 TTE 同步特性,工程中可通过最小二乘时钟补偿算法对同步主节点的本地时钟进行补偿,提高确定性和实时性.然而同步主节点本地时钟易受外界环境影响产生野值,影响到最小二乘时钟补偿算法的适用性.因此,本文提出一种具有野值预剔除的时钟补偿算法来提高系统的实时性.即首先利用拉依达准则(Pauta criterion)对最小二乘敏感的本地时钟野值进行预先剔除,然后利用最小二乘法对本地时钟补偿值进行估计,最后根据估计的时钟补偿值对本地的时钟进行补偿.仿真结果表明本文提出的方法解决了 TTE 时钟补偿中同步主节点出现本地野值的问题,结果证实在野值比例不大于 10% 的情况下,所提出的算法时钟同步精度可达到 10^{-6} 秒级,远远高于没有野值预剔除的最小二乘时钟补偿算法的 10^{-3} 秒级的精度.

关键词: TTE; 时钟补偿; 最小二乘法; 拉依达准则;

中图分类号: TP393.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)01-0107-06

A TTE Clock Compensation Algorithm with Outlier Preclusion

YANG Yong-qiang, ZHOU Xu-lin, YAO Qin

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: Time-triggered Ethernet (TTE) guarantees real-time transmission of communication data through precise time scheduling, and stands out in many fields of data transmission with high real-time requirements. Analyze the TTE synchronous characteristic we can compensate the local clock of synchronous main node through the least square clock compensation algorithm in the project and improve determinacy and real-time nature. However, the local clock of the synchronous master node is vulnerable to the influence of the external environment to generate outliers, which affects the applicability of the least squares clock compensation algorithm. Therefore, this paper proposes a clock compensation algorithm with outlier pre-elimination to improve the real-time performance of the system. That is, firstly, the Least Square criterion (Pauta criterion) is used to pre-eliminate the least-squares-sensitivity local clock outliers, then the local clock compensation value is estimated by least-squares method, and finally the local clock is processed according to the estimated clock compensation value. Simulation results show that the proposed method solves the problem of local outliers occurring at the synchronous master node in the TTE clock compensation. The results show that the clock synchronization accuracy of the proposed algorithm can reach 10^{-6} seconds when the outlier ratio is less than 10%. It is much higher than the 10^{-3} second-level accuracy of the least squares clock compensation algorithm with no outlier pre-elimination.

Key words: TTE; clock compensation; least squares ; pauta criterion

1 引言

时间触发以太网(TTE)是基于时间触发的分布式交换以太网,它以周期性的时钟同步机制确保各端点之间的时间一致性,使得时间触发消息可以按照全局统一时间进行确定性传输.然而时钟同步的精度阈值直接影响着时间触发消息传输的实时性,可靠性以及为非 TT 数据预留时间的大小.因此提高时间同步的精度阈值显得尤为重要,由于时钟补偿直接影响着时钟同步的精度阈值^[1],因此为了提高消息传输的实时性可靠性,研究 TTE 时钟同步补偿算法显得很有必要.

研究 TTE 时钟同步协议 SAE AS6802^[2]的同步流程和关键算法,发现协议中并未对 TTE 时钟补偿算法有具体的说明.文献[3]提出了的基于稳健回归的时同步钟补偿算法,即可使同步精度达到 10^{-4} 秒级,但随着拟合点数的增加,稳健回归算法的计算复杂度增加,资源开销增大.

本文通过对最小二乘^[4-5]时钟补偿算法研究发现,最小二乘时钟补偿算法简单并且补偿精度高,可作为 TTE 时钟补偿算法.然而此算法容易受野值(粗大误差)点的影响.而 TTE 网络拓扑中,由于本地节点可能受环境、湿度和温度等的影响,会有野值

点的产生,因此本文不能直接用最小二乘进行补偿.可通过先对采集到的本地时钟进行野值预先判断和剔除,在利用最小二乘补偿算法进行时钟动态补偿.确保最小二乘估计的时钟补偿算法对本地时钟补偿值准确的估计,提高本地时钟的精度.

2 TTE 时钟同步协议

TTE 时钟同步协议遵循 SAE6802 标准,该协议是一种占用资源少、易实现、同步精度高的分布式容错时钟同步技术.网络中各个节点之间通过传递协议控制帧(PCF)进行同步.在时间同步过程中网络中的节点按照功能不同可分为三类:同步主节点(SM)、压缩主节点(CM)、同步客户端(SC).同一集群内 TTE 时钟同步过程为:各个同步主节点(SM)发送协议控制帧(PCF)到压缩主节点;压缩主节点接收到 SM 发送的 PCF 帧,进行固化和压缩操作.得到所有同步主节点的时间均值作为全局时间,并形成一个新协议控制帧(NEW_PCF),发送给同步主节点和同步客户端;同步主节点和同步客户端根据收到的新协议控制帧的时间信息正自己的本地时间实现节点的全局时间同步,具体的同步流程如图 1 所示.

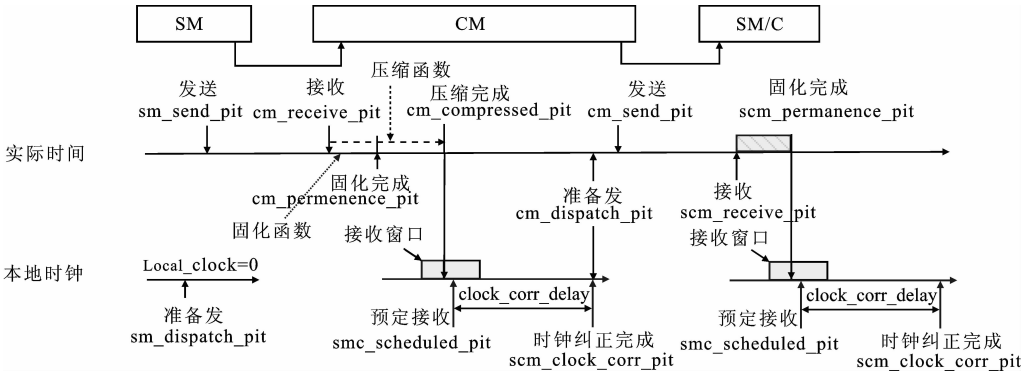


图 1 每个整合周期内时钟同步控制流程

- (1)同步主节点在 sm_dispatch_pit 时刻提交 PCF 帧,该帧在 sm_send_pit 时刻开始在通信链路上发送.
- (2)压缩主节点在 cm_receive_pit 时刻接收到该 PCF 帧,并启动消息固化算法,使 PCF 的接收顺序和发送顺序一致,并对网络传输延迟造成的影响进行修正.
- (3)压缩主节点启动压缩算法计算出压缩时刻即全局时间,并根据 cm_scheduled_receive_pit(预定接收时刻)得到修正值,压缩主节点根据修正值同

- 步自己本地时钟.
- (4)压缩主节点形成新的协议控制帧(NEW_PCF)帧,发送到同步主节点和同步客户端.
- (5)同步主节点和同步客户端收到压缩节点发送的新协议控制帧(NEW_PCF),并根据时钟固化函数使新协议控制帧(NEW_PCF)的接收顺序和发送顺序一致,得到修正后的接收时刻.
- (6)同步主节点和同步客户端根据新协议控制帧(NEW_PCF)的预计接收时刻和实际的接收时刻得出本地时钟的修正值,并进行本地时钟的

同步。

假设同步主节点的个数为 K , 即压缩主节点每个周期能收到 K 个信息。同步周期为 T , 每经过 M 个同步周期进行一次时间补偿。并且经过 Z 次以后补偿函数趋于稳定。若同步主节点 SM_k 在任意 L 周期内提供的本地时间信息为 t_{L,SM_k} , 并且 L, k 满足 $1 \leq k \leq K, 1 \leq L \leq Z \cdot M$ 。则任意 L 周期内的全局时间为 $t_{L,global}$ 。

压缩主节点由同步主节点发送的协议控制帧 (PCF) 的时间信息通过压缩函数计算得到全局时间。同时每个同步主节点和同步客户端通过该全局时间同步自己的本地时钟。压缩算法根据同步主节点的数量, 决定部分同步主节点的时间信息参与计算。具体有如下几种情况:

(1) 当 $K = 1$ 即只有 1 个同步主节点给压缩主节点发送时钟信息, 则此时的全局时间就是同步主节点的本地时间。

$$t_L^{global} = t_L^{SM_1} \quad (1)$$

(2) 当 $K = 2$ 即有 2 个同步主节点给压缩主节点发送时钟信息, 则全局时间为 2 个时钟信息的平均值。

$$t_L^{global} = (t_L^{SM_1} + t_L^{SM_2})/2 \quad (2)$$

(3) 当 $K = 3$ 即有 3 个同步主节点给压缩主节点发送时钟信息, 则全局时间为第二小的时钟信息, 若 SM_1 为第二小的时钟信息。

$$t_L^{global} = t_L^{SM_1} \quad (3)$$

(4) 当 $K = 4$ 即有 4 个同步主节点给压缩主节点发送时钟信息, 则全局时间为排序第二小的时钟信息和第三小的时钟信息的平均值。若 SM_1, SM_2 为第二小和第三小的时钟信息。

$$t_L^{global} = (t_L^{SM_1} + t_L^{SM_2})/2 \quad (4)$$

(5) 当 $K = 5$ 即有 5 个同步主节点给压缩主节点发送时钟信息, 则全局时间为排序第二小的时钟信息和第四小的时钟信息的平均值。若 SM_1, SM_2 为第二小和第四小的时钟信息。

$$t_L^{global} = (t_L^{SM_1} + t_L^{SM_2})/2 \quad (5)$$

(6) 当 $K \geq 6$ 即有 6 个或者 6 个以上的同步主节点给压缩主节点发送时钟信息时, 则全局时间为第 k 个最大的和第 k 个最小的时钟信息的平均值 (k 是可配置的参数, 例如当故障容忍为 2 时设置为 3)。若 SM_1, SM_2 为第 k 个最大的和第 k 个最小时钟信息。

$$t_L^{global} = (t_L^{SM_1} + t_L^{SM_2})/2 \quad (6)$$

3 野值预剔除的 TTE 时钟补偿算法以及分析

本文采用的方法首先对基于前 $N (N \leq Z)$ 个补偿周期的本地时钟和全局时间进行收集。然后运用拉依达准则对本地时钟出现的野值进行剔除, 对滤除野值后的本地时钟和全局值做差得到时钟补偿值。最后利用最小二乘方法利用前 N 个补偿周期的补偿值拟合出时钟补偿函数。

3.1 本地时钟收集与野值预剔除

由拉依达准则可知, 当误差绝对值超过 3σ 时, σ 为标准误差并按贝塞尔公式算出标准误差, 其误差概率为 0.003。可认为是坏值点, 即满足如下:

$$|t_i^{global} - \overline{t_i^{global}}| > 3\sigma \quad (7)$$

则认为 t_i^{global} 是含有粗大误差值的野值点, 应该予以剔除。单点双点野值剔除后的补偿方法可按以下方式^[6]:

(1) 双点野值时, 即 Y_i, Y_{i+1} 是野值, 其补值项为

$$Y_i = \frac{Y_{i-1} - Y_{i-2} + Y_{i+2}}{3}$$

(2) 单点野值时, 即 Y_i 是野值, 其补值项为

$$Y_i = \frac{Y_{i-1} + Y_{i-2} + Y_{i+1} + Y_{i+2}}{4}$$

数据采集和野值剔除的步骤如下:

(1) 采集第一个 M 周期内的本地时间和全局时间。

(2) 按照贝塞尔公式计算 M 个周期内的标准误差 σ 和算术平均值 t_L^{global} 。

(3) 根据拉依达准则对得到的本地时钟的野值进行剔除并补值项。得到不含野值的本地时钟序列。

3.2 最小二乘拟合方法

已知几个数据点 $((T_i, Y_i), i = 1, 2, \dots, M)$, 若数据采集的同步周期 T , 则第 i 个数据点的时刻为 $T \cdot (i - 1)$, $(m - 1)$ 次最小二乘估计多项式为

$$\begin{aligned} PY_i &= \beta_0 + \beta_1 * T_i + \beta_2 * T_i^2 + \dots + \beta_{m-1} T_i^{m-1} \\ &= \sum_{k=1}^m \beta_{k-1} T_i^{k-1} \end{aligned} \quad (8)$$

以同步主节点 SM_1 为例, 首先根据已经剔除野值点的本地时间, 利用压缩算法计算出 M 个全局时钟为 $t_1^{global}, t_2^{global}, \dots, t_M^{global}$; 接着计算出全局时钟与本地时钟的差值, 即为时钟补偿值 $corr_1, corr_2, \dots, corr_M$; 最后根据最小二乘拟合算法, 得到 SM_1 的时钟补偿函数 $S(t) = SM_1$ 。具体的拟合步骤如下:

(1) 采集同步主节点 SM_1 在 M 个周期内的本地时间 $t_1^{\text{local}}, t_2^{\text{local}}, \dots, t_M^{\text{local}}$;

(2) 对 $t_1^{\text{local}}, t_2^{\text{local}}, \dots, t_M^{\text{local}}$ 野值判断, 并做如下处理;

① 若无野值, 转到步骤(3);

② 若出现连续的单点和双点野值的情况, 进行野值剔除和补值项, 转到步骤(3);

③ 若连续野值点超过两个, 转到最后一个野值的下一个位置, 转到步骤(1), 采集下一个 M 周期的本地时间和全局时间的值;

(3) 根据野值剔除后的本地时间计算出时钟补偿值, 运用最小二乘拟合多项式拟合出同步主节点 SM_1 的时钟补偿函数。

3.3 最小二乘多项式系数求解

根据文献[7], 同步主节点 SM_k 的时钟模型为

$$C(t)_{SM_k} = \varphi_k + \alpha_k(t) \times t + n_k \quad (9)$$

式中, t 为参考时间, φ 为时钟相位偏差, $\alpha(t)$ 为时钟速率, n 为随机噪声。

$$\begin{aligned} E(\beta_0^l, \beta_1^l) &= \sum_{L=1}^M (e_L)^2 = \sum_{L=1}^M [S(t) - \text{corr}_L]^2 \\ &= \sum_{L=1}^M [\beta_0^l + \beta_1^l \times L \times T - \text{corr}_L]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $E(\beta_0^l, \beta_1^l)$ 为第一次时钟补偿残差平方和; e_L 为在第 L 个时钟周期下时钟补偿的残差值。则根据最小二乘法, 为了使 $E(\beta_0^l, \beta_1^l)$ 的值最小则必须 $E(\beta_0^l, \beta_1^l)$ 对 β_0^l 和 β_1^l 的偏导数均为零。

$$\frac{\partial E(\beta_0^l, \beta_1^l)}{\partial \beta_0^l} = 2 \sum_{L=1}^M (\beta_0^l + \beta_1^l \times L \times T - \text{corr}_L) = 0$$

$$\frac{\partial E(\beta_0^l, \beta_1^l)}{\partial \beta_1^l} = 2 \sum_{L=1}^M L T (\beta_0^l + \beta_1^l \times L \times T - \text{corr}_L) = 0$$

若自变量矩阵可以表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ T & 2 \times T & \dots & M \times T \end{bmatrix}^T$$

因变量表示为

$$\mathbf{S} = [\text{corr}_1 \quad \text{corr}_2 \quad \dots \quad \text{corr}_M]^T$$

式中, 令 $\beta^l = [\beta_0^l, \beta_1^l]^T$ 为同步主节点 SM_1 最小二乘估计补偿的多项式估计系数向量, 则用矩阵表示为

$\mathbf{X}\beta^l = \mathbf{S}$, 为了方便计算也可表示为

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \beta^l = \mathbf{X}^T \mathbf{S}$$

则估计系数向量可表示为

$$\beta^l = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{S}$$

把此系数带入到最小二乘多项式得到时钟补偿函数。

3.4 算法的性能分析

在 TTE 中, TTE 同步机制是基础, 在同步过程中通过提高同步精度阈值不仅可以减少接收窗口的大小而且可以减少固化、压缩和数据发送阶段之间的延迟。从总体上减少每个集成周期时钟同步的时间。为非 TT 消息预留很多时间, 具有一定的实际运用价值。另外, 本文选择精度作为算法的评价标准。精度定义为节点精度的最大值:

$$SA = \max_{k \in 1, 2, \dots, k} \{Er_SM_k\}$$

式中, SA 为精度; 精度 Er_SM_k 为两种场景下函数差值的绝对值。

$$Er_SM_k = |\tilde{\tilde{p}}(t)_{SM_k} - p(t)_{SM_k}|$$

式中, $\tilde{\tilde{p}}(t)_{SM_k}$ 为估计值; $p(t)_{SM_k}$ 为实际值。例如若令 $\tilde{\tilde{p}}(t)_{SM_k}$ 为有噪声情况下补偿函数的值, $p(t)_{SM_k}$ 为无噪声情况下补偿函数的值, 则 SA 为时钟同步精度。若令 $\tilde{\tilde{p}}(t)_{SM_k}$ 为补偿函数的值, $p(t)_{SM_k}$ 为实际补偿值, 则 SA 为补偿函数的精度。

通过本文提出的算法评价方法, 发现当一个 M 周期内无野值点、出现连续的单点或双点野值利用本文的具有野值预剔除的 TTE 时钟补偿算法有很好的精度, 有很好的理论运用价值。

4 算法仿真

本文采用 Visual Studio 编译环境按图 2 网络拓扑结构, 进行仿真程序的编写, 并得到野值剔除后的数据, 最后运用 MATLAB 进行结果的精确化显示。如图 2 所示网络拓扑结构中共有 6 个同步主节点 ($SM_1, SM_2, SM_3, SM_4, SM_5, SM_6$)、1 个压缩主节点 (CM) 和 2 个从节点 (SC_1, SC_2)。其中同步集成周期为 $100 \mu s$, 时钟固有频率为 10 MHz 。

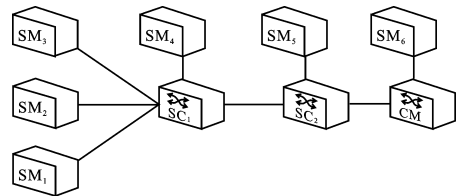


图 2 网络拓扑结构

我们知道在实际工程的应用中, 由于受到网络抖动、环境温度以及时钟晶体振荡器老化等因素的影响, 本地的时钟难免会出现突变即野值, 并且野值的出现时间和频率跟环境因素有很大关系, 因此难

以预测. 所以本文通过在在节点中加入正态分布函数 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 分别来模拟实际中出现的普通噪声和野值. 另外, 各本地时钟相位偏移设为 0; 时钟速率 $a(t)$ 设定为均匀分布. 各个时钟具体参数如表 1

表 1 时钟参数

时钟	时钟参数		
	$a(t)$	$n_1(t)$	$n_2(t)$
SM1	$a(t) \sim U(0.999, 1.005)$	$n_1(t) \sim N(0, 10^{-12})$	$n_2(t) \sim N(0, 10^{-6})$
SM2	$a(t) \sim U(0.998, 1.004)$	$n_1(t) \sim N(0, 10^{-12})$	$n_2(t) \sim N(0, 10^{-6})$
SM3	$a(t) \sim U(0.997, 1.003)$	$n_1(t) \sim N(0, 10^{-12})$	$n_2(t) \sim N(0, 10^{-6})$
SM4	$a(t) \sim U(0.998, 1.002)$	$n_1(t) \sim N(0, 10^{-12})$	$n_2(t) \sim N(0, 10^{-6})$
SM5	$a(t) \sim U(0.996, 1.004)$	$n_1(t) \sim N(0, 10^{-12})$	$n_2(t) \sim N(0, 10^{-6})$
SM6	$a(t) \sim U(0.994, 1.006)$	$n_1(t) \sim N(0, 10^{-12})$	$n_2(t) \sim N(0, 10^{-6})$
SC1	$a(t) \sim U(0.998, 1.002)$	—	—
SC2	$a(t) \sim U(0.997, 1.002)$	—	—
CM	$a(t) \sim U(0.995, 1.004)$	$n_1(t) \sim N(0, 10^{-12})$	—

所示. 首先, 当本地时钟无野值出现的时候, 本文对采用最小二乘补偿算法得到的补偿值和实际的补偿值的精度进行了计算, 如图 3 所示.

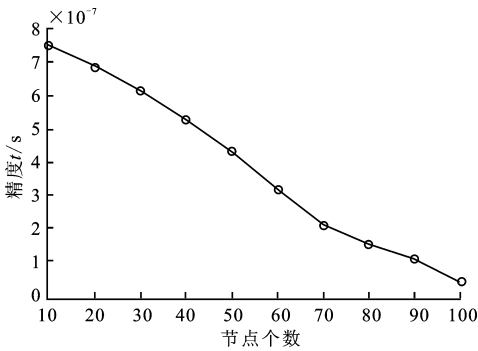


图 3 时钟补偿函数值与实际补偿值的精度

由图 3 可知随着拟合点数的增加采用最小二乘估计的时钟补偿值越来越接近真实的时钟补偿值. 并且可以得到 10^{-7} 秒级精度, 可知本文通过最小二乘拟合得到时钟补偿函数的方法是可行的, 并且随着拟合节点数的增加拟合精度更高.

其次, 当本地时钟没有野值点的时候, 通过计算带噪声值的时钟补偿函数和不带噪声值的时钟补偿函数可以得到补偿函数的同步精度, 随着拟合点的增加呈现如图 4 趋势.

最后, 当本地时钟有野值出现的时候, 直接采用最小二乘拟合函数得到的估计补偿值与实际值之间的精度如图 5 所示为 10^{-3} 秒级. 可以看出野值对最小二乘估计影响很大. 因此采用本文提出的方法即首先利用拉依达准则进行野值剔除然再利用最小二乘拟合求得时钟补偿函数.

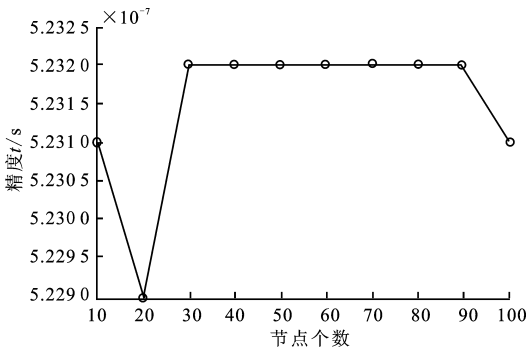


图 4 时钟补偿函数的同步精度

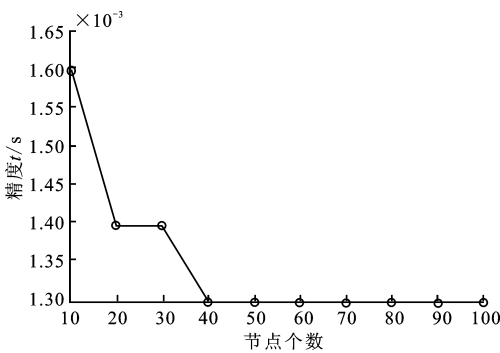


图 5 10%野值的补偿函数值与实值的精度

图 6 为利用本文的方法得到的补偿函数得到的补偿值和实际值之间的精度. 对比图 5 和图 6 不难发现, 本文提出的方法得到的估计值和实际值之间的精度达到 10^{-6} 秒级.

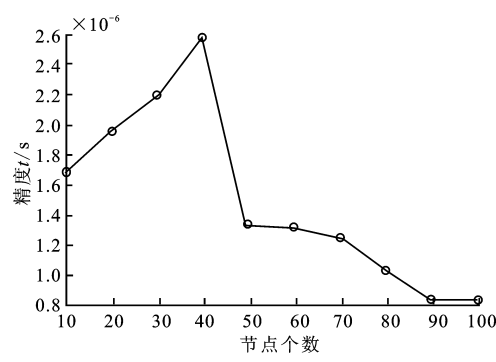


图 6 野值点剔除后补偿函数值和实际值精度

5 结束语

本文在深入分析 TTE 时钟同步的基础上,建立符合协议的本地时钟模型和全局时钟同步模型,并针对本地时钟由于外界环境影响可能发生时钟的突变野值点出现,提出了可动态进行时钟补偿的野值预剔除的时钟补偿算法.通过仿真结果表明:

(1)本文提出的算法,既利用了最小二乘简单容易运算的特性,估计出本地时钟补偿值,有剔除本地时钟野值对补偿值的影响.

(2)通过对实际网络模型的拓扑以及实验的仿真得出具有野值预剔除的 TTE 时钟补偿方法,在野值比例不大于 10%的情况下,所提出的算法时钟同步精度可达到 10^{-6} 秒级,远远高于没有野值预剔除的最小二乘时钟补偿算法的 10^{-3} 秒级的精度.

参考文献:

[1] Steiner W, Dutertre B. Layered diagnosis and clock-rate correction for the TTE thernet clock synchronization protocol[C]//IEEE, Pacific Rim International

Symposium on Dependable Computing. IEEE Computer Society. Washington, DC, USA, 2011: 244-253.

[2] SAE Technical Standard. SAE AS6802[S]. SAE International. 2011-11.

[3] 张英静,何锋,卢广山,等. 基于稳健回归的 TTE 时钟补偿算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(10):2165-2170..

[4] De l T F. A least-squares framework for component analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(6): 1041-1055.

[5] Rousseeuw P. Least median of squares regression[J]. Publications of the American Statistical Association, 1984, 79(388):871-880.

[6] Hong Li H E, Ren P Z, Tian W F, et al. Study on revised MT filter-cleaner in flight test data processing [J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(4):11-13.

[7] Lemmon M D, Ganguly J, Xia L. Model-based clock synchronization in networks with drifting clocks[C]// Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing. Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, 2000:177.

作者简介:

杨永强 男,(1989-),硕士研究生.研究方向为嵌入式高速计算机技术. E-mail:791617529@qq. com.

周煦林 男,(1970-),硕士,硕士生导师,研究员.研究方向为嵌入式高速计算机技术.

姚 秦 男,(1988-),硕士,工程师.研究方向为嵌入式计算机.