

文章编号: 1001-0920(2008)11-1249-04

## 基于冗余时钟源的工业无线网络时钟同步方法

章 涵, 冯冬芹, 褚 健, 方 瑜

(浙江大学 先进控制研究所, 杭州 310027)

**摘 要:** 所有设备的时钟同步是大规模工业无线网络系统的重要问题. 为了提高同步精度, 提出了通过基于 TPSN 算法的冗余主时钟同步偏差线性反馈算法, 实现在多次同步过程的累积误差反馈补偿. 理论分析与实验结果均表明, 该算法对工业无线网络时钟同步精度的提高有明显作用.

**关键词:** 工业无线网络; 时钟同步; 冗余时钟源; 反馈

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

### Industrial wireless network time synchronization based on redundant master clock

ZHANG Han, FENG Dong-qin, CHU Jian, FANG Yu

(Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: ZHANG Han, E-mail: zhanghan@supcon.com)

**Abstract:** The synchronization of distributed devices to a common time base is very important in industrial wireless network system. To provide high precise time synchronization, a cumulative offset feedback algorithm in large-scale wireless network system is presented. Theoretical analysis and experimental results show that the feedback algorithm achieves higher precise time synchronization in industrial wireless network system.

**Key words:** Industrial wireless network; Time synchronization; Redundant master clock; Feedback

#### 1 引 言

目前,在特殊场合应用无线传感器技术作为有线控制网络的有效补充已成为工业通信领域的研究热点.大规模系统中设备间的高精度时钟同步是工业无线网络应用的前提,是实现工业无线通信的确定性调度的基础.

现有的大规模工业无线网络时钟同步技术主要是在实现主从设备两点间时钟同步的基础上,通过系统中节点的多次同步过程,实现网络中所有节点的时间统一. TPSN (timing-sync protocol for sensor networks), RBS (reference broadcast synchronization) 和 TIN Y/MIN F SYNC 是 3 种具有代表性的点对点同步算法<sup>[1-3]</sup>.

TPSN 算法参考以太网中的 NTP 算法<sup>[4]</sup>,通过发送者-接收者模式,实现主从设备间的时钟同步和系统的时钟同步<sup>[5]</sup>.但在大规模系统的节点多次同步过程中,由于同步过程偏差的累积,系统中一部分

节点的同步偏差可能超出工业通讯的要求,从而无法满足大规模系统的同步需求.

RBS 算法是基于从时钟时间的协商实现同步.参考节点在一定区域内广播同步帧,从节点记录同步帧的接收时间后交换记录时间来确定他们之间的时钟偏差,实现两个从节点间的时钟同步<sup>[6]</sup>.RBS 算法仅实现从节点间同步,而无法实现参考节点与从节点间的时钟同步.因此,无法满足大规模工业无线系统中所有设备时钟一致性的要求.

TIN Y/MIN F SYNC 为轻量级的同步机制.通过假设节点的晶振漂移和时钟遵循线性变化,以及交换时标信息估计两个节点之间的时间偏移量<sup>[7]</sup>.该算法点对点节点间的同步精度较低,不适用于高实时性要求的工业现场.

针对现有算法在大规模工业无线网络系统的节点时钟同步中存在问题,本文提出了一种基于冗余时钟源反馈的工业无线网络时钟同步算法.在应用

收稿日期: 2007-09-29; 修回日期: 2007-11-23.

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目(60421002).

作者简介: 章涵(1983—),男,浙江金华人,博士生,从事网络时钟同步技术的研究;冯冬芹(1968—),男,江苏泰兴人,教授,从事工业以太网、工业无线网络的研究.

TPSN 算法实现点对点同步的基础上,通过引入冗余时钟源<sup>[8,9]</sup>的线性反馈的方式,解决节点的多次同步过程带来同步偏差累积的问题,并实现全网络的更高同步精度.参考 IEEE1588<sup>[10]</sup>高精度时钟同步协议的报文交互机制,在实验系统中实现该算法,并证明该算法有效地提高了系统中所有节点的时钟同步精度.

## 2 基本原理

### 2.1 单跳同步过程

**定义 1** 在一个时钟同步网络中,主时钟接入到该网络的端口,称之为**主端口 (Master)**.

**定义 2** 在一个时钟同步网络中,从时钟接入到该网络的端口,称之为**从端口 (Slave)**.

根据 TPSN 算法的基本原理,参考 IEEE1588 协议的报文交互机制,获取以下时间戳:从端口接收到 Sync 消息的本地时间  $T_{s1}$ , Sync 消息在主端口的发送时间  $T_{m1}$ ; 线路延时请求在从端口的发送时间  $T_{s2}$ , 该请求在主端口接收时间  $T_{m2}$ .

如图 1 所示,根据以上 4 个时间戳,计算得到主从端口间消息传输的线路延时,即

$$\text{WayDelay} = \frac{(T_{m2} - T_{m1}) - (T_{s2} - T_{s1})}{2}. \quad (1)$$

依据该线路延时得到主从时钟间偏差

$$\text{Offset} = T_{s4} - (T_{m3} + \text{WayDelay}) = T_{s4} - \left[ T_{m3} + \frac{(T_{m2} - T_{m1}) - (T_{s2} - T_{s1})}{2} \right]. \quad (2)$$

根据该偏差调整从时钟,实现主从端口间同步.

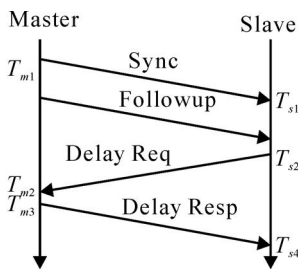


图 1 网络同步过程示意图

### 2.2 边界时钟

**定义 3** 同时接入到两个网络中,并在两个网络中分别作为网络的主时钟和从时钟的设备,称之为**边界时钟**.边界时钟有主从端口各一个.

在层次化的网络模型中,TPSN 通过边界时钟实现不同网络层次间的时钟同步.

在如图 2 所示的系统中,节点 5 作为整个网络系统的时钟源;节点 6 的从端口将本地时钟同步于节点 5 的时钟.同时,节点 6 的主端口作为节点 7 和节点 8 的主时钟;节点 6,8,10 的两个端口分别作为

主端口和从端口,即作为网络的边界时钟.

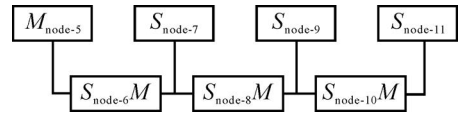


图 2 边界时钟

## 3 冗余主时钟同步偏差反馈

**定义 4** 提供整个无线网络的时钟的设备,称之为**时钟源**.

**定义 5** 与时钟源互为冗余的网络设备,称之为**反馈源**.反馈源与时钟源之间通过 GPS 或其他有线网络的时钟同步方法,实现绝对的时钟同步.

在多层次网络系统中,分别设置时钟源  $P$  和反馈源  $Q$ .其中,时钟源  $P$  作为网络的工作时钟源,网络中所有节点均将本地时钟直接或间接同步于时钟源  $P$ ;反馈源  $Q$  作为网络层次累积误差的反馈源.

如图 2 所示,网络采用边界时钟方式实现同步,节点 6 将本地时钟同步于时钟源节点 5;节点 8 同步于节点 6,以此类推,实现网络同步.反馈源  $Q$  同时维护两个时钟,工作时钟和反馈时钟,两者之间完全相互独立.工作时钟与时钟源  $P$  通过 GPS 等方式实现绝对的时钟同步.反馈时钟与节点 10 通过 TPSN 算法实现时钟同步.

反馈源  $Q$  根据本地的工作时钟与反馈时钟的差值,得到网络时钟经过多层次同步后产生的累积误差.反馈源根据该累积误差,结合反馈源  $Q$  到时钟源  $P$  之间的同步层次,计算出每一层次累积的平均误差,并将该平均误差通知给所有的边界时钟,进行偏差补偿.

## 4 时钟同步过程累积误差分析

假设反馈源与时钟源之间经过  $N$  级同步,反馈源的反馈时钟的晶振偏差为  $p_N$ ,第  $i$  级边界时钟的晶振偏差为  $p_i$ .下面分析各种不同方法的累积误差.

### 4.1 边界时钟累积偏差

假设第  $i$  级边界时钟同步过程中主从时钟与时钟源  $P$  的晶振偏差分别为  $p_{i-1}$  和  $p_i$ ,主从时钟间标准的线路延时为  $d_i$ ,从时钟接收主时钟的 Sync 消息与发送 Delay Request 消息的时间间隔为  $i$ .则由式 (1) 得到线路延时为

$$\text{WayDelay} = \frac{(T_{m2} - T_{m1}) - (T_{s2} - T_{s1})}{2} = d_i(1 - p_{i-1}) + \frac{i[(p_i - p_{i-1})/(1 - p_i)]}{2}. \quad (3)$$

利用该线路延时进行时钟同步后,主从时钟间偏差存在的误差为

$$i = \left[ d_i + \frac{i}{2(1 - p_i)} \right] (p_{i-1} - p_i). \quad (4)$$

假设在完成同步后,第  $i + 1$  级边界时钟经过时间  $i$ ,向第  $i$  级边界时钟请求同步.此时,第  $i$  级边界时钟由于晶振偏差,与上一级主时钟的偏差为

$$i = \left[ d_i + \frac{i}{2(1 - p_i)} \right] (p_{i-1} - p_i) + i(p_i - p_{i-1}) / (1 - p_i). \quad (5)$$

综上所述,经过  $N$  级同步后,累积的同步偏差为

$$E_N = N + \sum_{i=1}^{N-1} i = \left[ d_N + \frac{N}{2(1 - p_N)} \right] (p_{N-1} - p_N) + \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \left[ d_i + \frac{i}{2(1 - p_i)} \right] (p_{i-1} - p_i) + i(p_i - p_{i-1}) / (1 - p_i) \right\}. \quad (6)$$

假设各级边界时钟本地时钟同步时间与向主时钟请求同步的时间间隔  $i$  固定为  $i$ ,从时钟接收主时钟的 Sync 消息与发送 Delay Request 消息的标准时间间隔  $i$  固定为  $i$ ,则累积同步偏差简化为

$$E_N = N + \sum_{i=1}^{N-1} i = \left[ d_N + \frac{N}{2(1 - p_N)} \right] (p_{N-1} - p_N) + \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \left[ d_i + \frac{i}{2(1 - p_i)} \right] (p_{i-1} - p_i) + (p_i - p_{i-1}) / (1 - p_i) \right\}. \quad (7)$$

#### 4.2 边界时钟的累积误差反馈

在经过  $N$  级边界时钟的同步后,对累积同步偏差进行反馈.第  $N$  级边界时钟将同步后的本地时间报告给反馈时钟源,反馈源通过计算本地时钟与第  $N$  级边界时钟的偏差得到累积的同步偏差,并将该累积偏差平均分配到  $N$  级同步过程中,所有时钟对本地时间进行补偿.该补偿值为

$$\begin{aligned} \phi_n &= - \frac{n}{N} E_N = \\ &= - \frac{n}{N} \left\{ \left[ d_N + \frac{N}{2(1 - p_N)} \right] (p_{N-1} - p_N) + \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \left[ d_i + \frac{i}{2(1 - p_i)} \right] (p_{i-1} - p_i) + (p_i - p_{i-1}) / (1 - p_i) \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

经过线性反馈补偿后,在  $N$  级网络中的第  $n$  级边界时钟的残余同步偏差为

$$\phi_n = E_n + \phi_n = \left[ d_n + \frac{n}{2(1 - p_n)} \right] (p_{n-1} - p_n) +$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \left[ d_i + \frac{i}{2(1 - p_i)} \right] (p_{i-1} - p_i) + i \left( \frac{p_i - p_{i-1}}{1 - p_i} \right) \right\} - \frac{n}{N} \left\{ \left[ d_N + \frac{N}{2(1 - p_N)} \right] (p_{N-1} - p_N) + \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \left[ d_i + \frac{i}{2(1 - p_i)} \right] (p_{i-1} - p_i) + \left( \frac{p_i - p_{i-1}}{1 - p_i} \right) \right\} \right\}. \quad (9)$$

线性反馈算法通过累积误差的反馈,调整同步精度,系统中除少数节点外,同步偏差均得到反馈,从而减少了系统中多数节点的同步精度,提高了无线传感器网络系统整体的时钟同步精度.

### 5 实验系统的建立和数据分析

#### 5.1 实验测试系统环境

对图 2 所示系统进行扩展,系统由 9 个节点组成,其中两个节点分别为时钟源和反馈源,其余 7 个节点均为网络中处于不同层次的节点,形成一个具有 7 跳的网络时钟同步系统.

所有被测试设备定期将本地时间通过测试消息通知测试设备.所有设备记录的时间与时钟源记录时间的差值为同步偏差.

#### 5.2 实验测试结果

系统中所有节点均采用 32 K,5ppm 晶振提供时钟信号.因此,系统中所有设备的时间粒度为  $30.52\mu\text{s}$ ,即设备时钟的最小单位为  $30.52\mu\text{s}$ .对系统中各节点的同步偏差进行统计,并计算各节点偏差的比例.

关闭反馈源,进行连续 24 h 的实验.其中每 0.2 s 计算一次各级边界时钟与网络时钟源的时钟偏差,实验数据如表 1 所示.

由表 1 可知,随着同步层次的增加,同步偏差小于  $100\mu\text{s}$  的比例逐渐下降,而大于  $100\mu\text{s}$  的同步偏差比例逐渐上升.并且,采用 TPSN 算法的时钟同步系统,在同步层次小于或等于 5 级的情况下,系统中所有节点的平均同步偏差可保持在  $100\mu\text{s}$  之内;若同步层次大于 5 级,则同步精度无法保证.

开启反馈源后,重复上述测试.由反馈源对第 7 级的同步偏差进行反馈,各级边界时钟根据反馈源的偏差反馈,得到的实验数据如表 2 所示.

由表 2 可知,采用线性反馈算法,偏差的增大速度随着同步层次的增加而逐渐缓慢.在同步层次达到 7 级的情况下,系统中所有节点的平均同步偏差可保持在  $100\mu\text{s}$  之内,较 TPSN 算法有明显改善.

对比表 1 和表 2 中数据可知,采用线性反馈算法,在第 6 和 7 级节点中,同步偏差大于  $152\mu\text{s}$  的比

表1 TPSN算法多跳同步测试

 $\mu\text{s}$ 

节点层次	平均偏差	最大偏差	最小偏差	偏差比例					
				0	31	62	93	122	大于152
1	29.9	92	0	33.4	37.8	27.5	1.3	0	0
2	29.5	122	0	24.7	43.0	26.3	5.9	0.13	0
3	34.7	152	0	10.1	23.1	28.9	25.0	10.9	2.0
4	64.0	183	0	9.0	23.8	25.2	23.8	13.3	4.8
5	68.3	214	0	8.5	19.0	22.3	22.5	16.0	11.7
6	160.5	275	0	0.3	1.3	3.7	10.4	17.5	66.7
7	129.7	305	0	1.9	5.1	11.4	17.2	20.9	43.5

表2 线性反馈算法的多跳同步测试

 $\mu\text{s}$ 

节点层次	平均偏差	最大偏差	最小偏差	偏差比例					
				0	31	62	93	122	大于152
1	29.5	92	0	34.4	35.8	28.5	1.3	0	0
2	29.1	122	0	25.7	42.0	26.8	5.4	0.13	0
3	34.9	122	0	11.0	22.5	28.5	25.1	11.1	1.8
4	64.0	152	0	9.0	23.8	25.2	23.8	13.3	4.8
5	68.3	152	0	8.5	19.0	22.3	22.5	16.0	11.7
6	80.5	184	0	5.3	8.3	15.7	35.4	17.5	17.7
7	90.7	184	0	4.9	5.1	16.4	32.2	20.9	20.5

例分别从 66.7% 和 43.5% 下降为 17.7% 和 20.5%。系统中各级节点的平均时钟同步精度均达到  $100\mu\text{s}$ , 第 6 和 7 级节点性能改善最明显, 平均偏差分别从  $160.5\mu\text{s}$  和  $129.7\mu\text{s}$  下降为  $80.5\mu\text{s}$  和  $90.7\mu\text{s}$ 。因此, 线性反馈算法在多层次网络系统中, 全系统同步精度有明显提高。

## 6 结 论

采用冗余时钟源反馈补偿的 TPSN 算法, 通过减少累积误差的方式, 可从整体上提高系统中所有设备的同步精度。理论分析和测试结果均表明, 本文提出的基于冗余时钟源的反馈补偿算法在工业无线传感器网络中较好地实现了预期的功能目标, 有效提高了工业无线传感器网络中所有节点的同步精度, 而且能适应大规模工业无线通信的要求。

## 参考文献(References)

- [1] Willing, Matheus K, Wolisz A. Wireless technology in industrial networks [J]. Proc of the IEEE, 2005, 93 (6): 1130-1151.
- [2] Sun L M, Li J Z, Chen Y, et al. Wireless sensor network [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [3] Yu H B, Zen P. Intelligent wireless sensor networks [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [4] Mills D. Internet time synchronization: The network time protocol [J]. IEEE Trans on Communication, 1991, 39(10): 1482-1492.
- [5] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M. Timing sync protocol for sensor networks [C]. Proc of the 1st int Conf on Embedded Networked Sensor Systems. 2003: 138-149.
- [6] Jeremy E, Lewis G, Deborah E. Fine grained network time synchronization using reference broadcasts [C]. Proc of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation. 2002: 147-163.
- [7] Kang G L, Wang F B. Survey on time synchronization for wireless sensor networks [J]. Computer Measurement and Control, 2005, 13(10): 1021-1023.
- [8] Georg Gaderer, Roland Holler, Thilo Sauter, et al. Extending IEEE 1588 to fault tolerant clock synchronization [C]. Proc of the 2004 IEEE Int Workshop on Factory Communication Systems. 2004: 353-359.
- [9] Jain N, Vokkarane V M, Wang J P. Performance analysis of dual-homed fault-tolerant routing in wireless sensor networks [C]. 2008 IEEE Conf on Technologies for Homeland Security. 2008: 474-479.
- [10] IEEE 1588, A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems [S].