

基于PTP的无线分布式测试系统时钟同步研究

李本亮, 王厚军, 师奕兵, 李力, 闫斌

(电子科技大学自动化学院 成都 611731)

【摘要】时钟(PTP)的发布使得分布式测试系统时钟同步精度大大提高,让各个传感器、执行器以及其它终端设备能够共享同一时钟基准,并能够精确保证不同终端的时钟同步质量。该文提出了无线分布式测试系统的网络拓扑结构,阐述了PTP时钟同步的过程,分析了PTP时钟同步调节算法的改进。通过MATLAB仿真给出了无线分布式测试系统典型网络拓扑下的PTP时钟同步的精度性能,引入偏移估计和斜率补偿,进一步提高了时钟同步的精度。

关键词 时钟同步; 分布式测试系统; 精确时钟协议; 无线

中图分类号 TP393

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.017

Clock Synchronization of Wireless Distributed Measurement System Based on PTP

LI Ben-liang, WANG Hou-jun, SHI Yi-bing, LI Li, and YAN Bin

(School of Automation Engineering, University of Electronics Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract The precision time protocol (PTP) improves the clock synchronization accuracy greatly and makes sensors, actuators and other terminals share unique time reference, which assures clock synchronization quality of different terminals. This paper puts forward a typical network topology in wireless distributed measurement system, and introduces the work process of PTP. The improvement of PTP clock synchronization adjust algorithm is analyzed. The clock synchronization accuracy of tree network topology is presented through simulation in MATLAB. The PTP clock synchronization offset can be reduced significantly with the implementation of drift estimation and skew compensation in tree network topology.

Key words clock synchronization; distributed measurement system; PTP; wireless

分布式测试系统是把构成系统的各测试功能模块或仪器分布在地理位置分散的各个测试点。按照传输媒介的不同,分布式测试系统可以分为基于有线网络的分布式测试系统^[1]和基于无线网络的分布式测试系统两大类。时钟同步(clock synchronization)是分布式测试系统的核心技术之一。其目的是维护一个全局一致的物理或逻辑时钟,使得系统内各个节点中与时间有关的信息、事件及行为有一个全局一致的解。IEEE1588标准^[2]定义了精确时钟同步协议(PTP)同步分布式测试系统中各个终端的时钟。

基于工业以太网的分布式测试系统时钟同步研究正得到众多学者和专家的关注,维持唯一时钟基准的同步方法是当前分布式测试系统中研究的热点。文献[3]仿真了PTP协议用于分布式以太网中的时钟同步的精度;文献[4]分析了PTP协议在基于以太网的电信通信中各种可能的应用场合;文献[5]研制了一种兼容PTP协议的以太网转换器;文献[6-7]

分析了PTP协议的工程实现;文献[8]设计了一种实现IEEE1588的PTP时钟同步协议的IP核;文献[9]采用锁相的原理研究了单向广播协议的改进,并取得了明显的改进成果,改进后协议的精度为几毫秒。

本文的目的是研究PTP协议在无线分布式测试系统中的时钟同步性能。通过MATLAB在IEEE802.11b环境下,仿真研究了一种典型的网络拓扑的PTP时钟同步性能。

1 无线分布式测试系统PTP模型

1.1 无线网络分布式测试系统结构

分布式系统在无线局域网的IEEE802.11b协议中没有定义。本文根据在分布式测试系统中测试仪器和各种测试模块需要实时地传输大量测试数据到主控计算机的特点,采用如图1所示有主站的树型无线网络拓扑^[10]。通过仿真研究该网络拓扑下的PTP时钟同步性能。

收稿日期: 2008-12-19; 修回日期: 2009-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(60673011); 国家博士点基金(20070614018)

作者简介: 李本亮(1977-), 男, 博士生, 主要从事无线分布式测试系统同步与触发技术方面的研究。

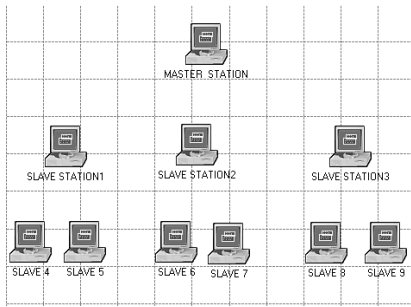


图1 有主站的树型网络拓扑

1.2 PTP时钟同步协议

IEEE1588标准定义的PTP高精度时钟同步过程如图2所示,可以总结为4个步骤:(1)主时钟发出同步信息,从时钟接收该同步信息并计算相应的时钟偏差。(2)每个从时钟节点向主时钟节点发送延时请求时间信息。(3)主时钟接收延时请求信息,记录接收的精确时间戳,并向每个从时钟发送该时间戳。(4)从时钟做时间延时及偏差计算并进行时钟调整,实现与主时钟的同步。

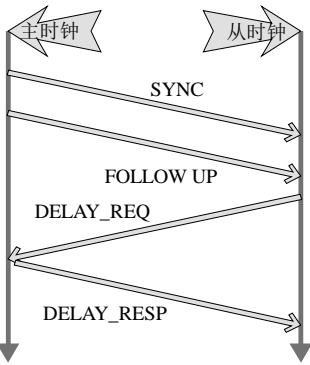


图2 PTP时钟同步过程

PTP有SYNC、FOLLOW_UP、DELAY_REQ、DELAY_RESP 4种类型的同步协议信息。

(1) SYNC: 主时钟发送到从时钟的信息,以固定的同步周期为时间段定期广播同步信息。每个SYNC信息包含发送的时间戳,代表主时钟在第k次时间段发起同步的参考时间。

(2) FOLLOW_UP: 主时钟发送到从时钟的信息,在K次SYNC信息发送的时刻记录时间戳 $T_{SYNC,MK}$,并在每个SYNC信息之后发送时间戳 $T_{SYNC,MK}$ 。

(3) DELAY_REQ: 从时钟发送到主时钟的延时请求信息,被FOLLOW_UP信息接收后,随机延时一段时间,在从时钟的 $T_{DREQ,SK}$ 时刻发送,是主时钟和从时钟之间的网络通信路径的延时估计的组成部分。

(4) DELAY_RESP: 主时钟发送到从时钟的延时响应信息,作为DELAY_REQ信息的应答,包含

了刚刚接收的DELAY_REQ以主时钟的时钟作为参考的精确接收时间戳 $T_{DREQ,MK}$ 。

这些时间戳,每个从时钟可以通过以下公式计算当地时钟与主时钟相比较的偏差 O_{SK} :

$$T_{SYNC,SK} = T_{SYNC,MK} + O_{SK} + D_{M_SK} \quad (1)$$

$$T_{DREQ,MK} = T_{DREQ,SK} + O_{SK} + D_{S_MK} \quad (2)$$

式中 D_{M_SK} 为主时钟到从时钟的信息传输延时; D_{S_MK} 为从时钟到主时钟的信息传输延时。假设延时是双向一致的,从而得到:

$$D = \frac{(T_{SYNC,SK} - T_{SYNC,MK}) + (T_{DREQ,MK} - T_{DREQ,SK})}{2} \quad (3)$$

$$O_{SK} = T_{SYNC,SK} - T_{SYNC,MK} - D \quad (4)$$

偏差计算在每个同步周期间隔内进行,每次偏差调节发生在从时钟的计算结束后。

2 PTP协议的同步算法的改进

IEEE1588定义的PTP时钟同步在调节方式上采用瞬时调节方式对时钟偏差进行调整,没有考虑对从时钟进行时钟晶振的漂移补偿问题。从时钟由于个体晶振速率与标准晶振速率相比存在漂移,造成两次SYNC同步信息时间间隔内的偏移。为了使从、主时钟之间的偏差尽可能的小,引入从时钟晶体振荡器的漂移补偿。假设已知连续两次SYNC同步信息的时间间隔,漂移率 ρ 的平均值为:

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{(T_{SYNC,SK} - T_{SYNC,SK-1})}{(T_{SYNC,MK} - T_{SYNC,MK-1})} - 1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{(O_{SK} - O_{SK-1})}{(T_{SYNC,MK} - T_{SYNC,MK-1})} \quad (5)$$

式中 n 是SYNC同步信息的数目。

从时钟的本地时间调节算法步骤如下。

(1) SYNC信息到达从时钟的时间戳为:

$$T_{SYNC,SK} = T_{SYNC,SK-1}^* + \frac{(T_{SYNC,MK} - T_{SYNC,MK-1})}{1 + \rho} \quad (6)$$

式中 $T_{SYNC,SK}^*$ 为同步校正以后的时间戳,可由步骤3获得; $(T_{SYNC,MK} - T_{SYNC,MK-1})$ 为从时钟测得的时间增量; $1 + \rho$ 为时钟斜率获得的补偿值。

(2) 从时钟与主时钟的偏差在考虑传输延迟的情况下通过式(4)计算。本文使用简单的平均值滤波剔除突变值,偏差通过对前3次偏差取平均值进行滤波。

(3) 斜率补偿后的时间戳为:

$$T_{SYNC,SK}^* = T_{SYNC,SK} - O_{SK} \quad (7)$$

执行上述算法之后,从时钟的时间基准得到更新,意味着根据主时钟的时间基准对从时钟进行调

节。执行该简单算法是为了强制达到 $T_{SYNC,SK}^* = T_{SYNC,SK}$ ，并引入了从时钟的时钟斜率补偿调节步骤。必须正确地估计延时 D 和偏移率 ρ ，否则改变的幅度会过大。

3 仿真研究

仿真采用有主站的网络拓扑。仿真中假设系统的主站时钟是唯一的时间基准，主站时钟与系统时钟一致，不存在漂移；从节点的最大时钟漂移率设为 ± 100 PPM，是PTP协议允许的时钟精度的最低标准；系统同步偏差精度要求在 $\pm 10 \mu s$ 以内，因此，根据漂移率的设置，可以计算得到系统同步的周期不能超过 $0.1 s$ 。仿真在802.11b环境下进行，数据传输的比特率为 $1 M/s$ 。

本文中时钟同步偏差是指在时钟同步调节之前，从时钟计算的与主时钟的偏离值，反应系统的时钟同步精度。时钟同步误差是指在时钟调节之后，从时钟与主时钟的实际误差值，该参数只能在仿真中取得，因为实际工程中从时钟不可能获得某一时刻主时钟的确切值，而仿真中可以通过读取系统时间获得从时钟调节之后该时刻主时钟的确切值。本文使用该参数目的是为了更清楚地说明算法同步精度性能。

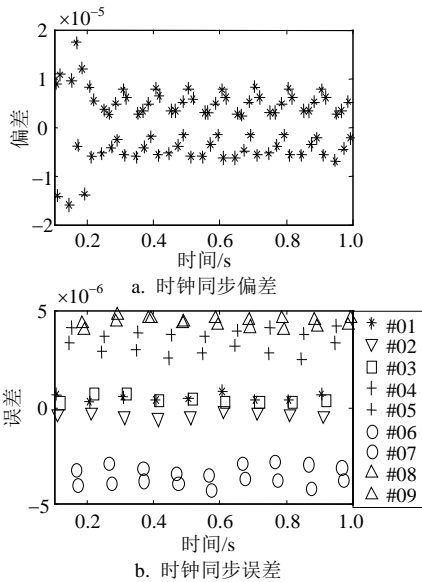


图3 树形网络拓扑的瞬时调节时钟同步精度

仿真过程如下：主站从 $0.1 s$ 时刻开始产生周期性的时钟同步请求数据，每隔 $0.01 s$ 进行下一层基站 1、2、3 的时钟同步，基站 1、2、3 同步完成后，各自依次对自己的下一层基站 4/5、6/7、8/9 进行时钟同步，系统的时钟同步耗时也是 $0.09 s$ 。通过仿真，分别观察PTP时钟采用瞬时调节方式、漂移估计和

斜率补偿调节方式的时钟同步精度。

从图3可以看出，在有主站的树形网络拓扑中，PTP时钟同步采用瞬时调节方式，1拍之后系统可以消除时钟初始偏差，2拍之后稳定的主从时钟同步偏差在 $\pm 10 \mu s$ 以内。此外，第一层基站的PTP时钟同步误差在 $\pm 1 \mu s$ 以内，第二层基站的时钟同步误差放大到 $\pm 5 \mu s$ 以内。

从图4中可以看出，PTP时钟同步采用漂移估计和斜率补偿算法，1拍之后可以消除时钟初始偏差，3拍之后可以迅速地降低系统的同步偏差。

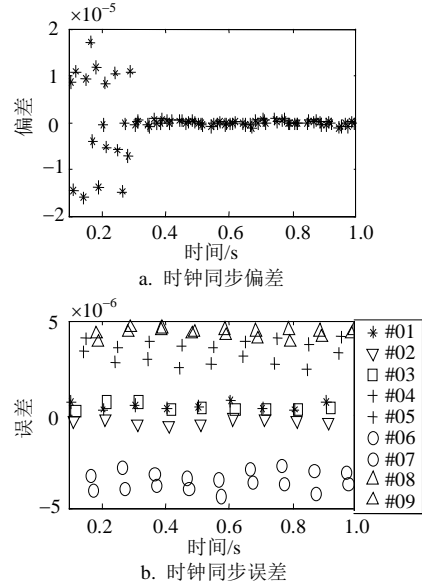


图4 树形网络拓扑的漂移估计和斜率补偿时钟同步精度

从图5可以看出，斜率补偿后，稳定的主从时钟同步偏差降低到 $\pm 2 \mu s$ 以内。PTP时钟同步误差仍然在 $\pm 5 \mu s$ 以内。

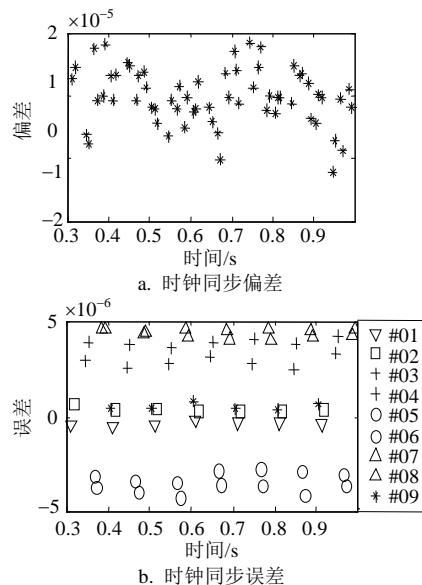


图5 树形网络拓扑的斜率补偿后时钟同步精度

4 结论及展望

本文研究基于PTP的无线分布式测试系统时间同步问题,提出了典型的无线分布式测试系统网络拓扑,分析了PTP协议的工作过程以及时钟同步算法的改进。通过MATLAB仿真,研究了在典型的无线分布式测试系统网络拓扑中的时钟同步精度性能。引入漂移估计和斜率补偿,树型两层网络拓扑,时钟同步偏差降低到 $\pm 2 \mu\text{s}$ 以内。但是漂移估计和斜率补偿无法降低系统的时钟同步误差,第二层的时钟同步误差甚至超过了补偿后的时钟同步偏差,达到 $\pm 5 \mu\text{s}$ 。在下一步的工作中,将寻求更合理的改进方案,解决多层树型网络拓扑中时钟同步的误差放大问题,进一步提高PTP协议在无线分布式测试系统中的时钟同步精度。

参 考 文 献

- [1] BURCH J, EIDSON J, HAMILTON B. The design of distributed measurement systems based on IEEE1451 standards and distributed time services[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference. Baltimore, MD, USA: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2000: 529-534.
- [2] Technical Committee on Sensor Technology. IEEE 1588 standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. New York: IEEE Standards, 2002 (Version 1).
- [3] FERRARI P, FLAMMINI A, MARIOLI D, et al. A. IEEE 1588-based synchronization system for a displacement sensor network[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference. Sorrento, ITALIA: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2006: 1926-1930.
- [4] RODRIGUES S. IEEE-1588 and synchronous ethernet in telecom[C]//Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, IEEE International Symposium. Vienna, Austria: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2007: 138-142.
- [5] KOHLER D. A Practical Implementation of an IEEE1588 supporting ethernet switch[C]//IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Vienna, Austria: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2007: 134-137.
- [6] BLIXT S. A microcontroller with IEEE1588 support [C]//IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Vienna, Austria: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2007: 116-122.
- [7] PINCHAS M, COHEN R. A combined PTP and circuit emulation system[C]//IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Vienna, Austria: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2007: 143-147.
- [8] 王 兰, 杨志家. IEEE1588精准时钟的协议的IP设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(9-2): 288-289.
WANG Lan, YANG Zhi-jia. IEEE1588 precision clock protocol's IP design[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(9-2): 288-289.
- [9] 任丰原, 董思颖, 何 滔, 等. 基于锁相环的时间同步机制与算法[J]. 软件学报, 2007, 18(2): 372-380.
REN Feng-yuan, DONG Si-ying, HE Tao, et al. A time synchronization mechanism and algorithm based on phase lock loop[J]. Journal of Software, 2007, 18(2): 372-380.
- [10] CHI-TSUN C, CHI K T, FRANCIS C, et al. A tree-based data collecting network structure for wireless sensor networks[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2008, 6(3): 274-278.

编 辑 黄 莘