

基于通信传输网链路不对称算法改进

李利¹, 卓越²

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广州 510663)

摘要: 时间同步精度是影响电力通信传输网实时性的重要因素。为了满足传输网承载时间信号高精度的要求, 对 IEEE 1588 精确时间同步协议进行了研究, 阐述了该算法实现高精度同步的原理, 并针对传输收发路径不对称的情况, 提出了一种先对偏差进行合理的判断, 然后进行补偿的同步改进算法, 最后在广州供电局通信机房进行了实际测试, 测试结果表明, 改进的算法有效地提高了路径不对称条件下的时钟同步精度。

关键词: IEEE 1588; 时间同步; 线路延时; 链路补偿

中图分类号: TN914

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2014)01-0062-04

An Improved Algorithm Based on the Asymmetric of Communication Transmission Links

LI Li¹, ZHUO Yue²

(1. College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Time synchronization accuracy plays a crucial role on real-time communication operations. In order to meet the time signal precision requirements in transport networks, this paper presents the IEEE 1588 precision time synchronization protocol, elaborates the principle of the algorithm to achieve high-precision synchronization and proposes an algorithm for improved synchronization performance under the condition of asymmetric path. Finally, we test in Guangzhou Power Authority communications lab and the results show that the improved algorithm effectively improves the precision clock synchronization under conditions of asymmetric path.

Key words: IEEE 1588; time synchronization; time delay circuit; link compensation

IEEE 1588 精确时间同步协议 (Precision Time Protocol, 简称 PTP)^[1] 由于其高同步精度, 低成本实现, 方便安装与维护等优越性, 在供电管理、工业控制、测试和测量、网络通信等领域得到了广泛的应用。但是由于外界温度、压力、电源电压和晶振本身老化以及传输线路实际的不对称性等因素的影响, 从时钟频率与主时钟频率会产生相对的漂移偏差, 该偏差会随着时间的增加不断累积, 最终导致从时钟计时远远偏离主时钟的计时, 并且该偏差只有在下一个同步时刻才能得到一定程度的减小。目前解决上述问题比较通用的方法是加大同步报文的

发送频率, 通过增加同步次数使漂移偏差得到及时校正。但是, 这样就大大地加重了网络的负荷, 从而导致网络拥塞。

李学桥等^[2] 在论文中研究了针对以太网通讯路径不对称的情况, 提出了一种同步改进算法, 一种从时钟同步于主时钟的加权平衡算法。卢灵宣^[3] 的论文提到逐个节点进行不对称性补偿的方法等, 但在实际应用条件下都不够理想。本文在深刻理解 PTP 经典同步算法的基础之上, 提出了一种先判断时间偏移的原因然后再进行补偿的方法, 并在广州市供电局通信中心传输网上验证了其同步精度, 效果显著。

1 IEEE 1588 时钟同步原理

IEEE 1588 协议的基本原理是主从时钟之间周期性交换带有时间戳的报文, 从时钟根据时间戳信

收稿日期: 2014-10-01

作者简介: 李利(1989), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事智能电网通信研究(e-mail)lichil2306@163.com。

息计算出路径时延以及主从相位差, 进而校正从设备时间, 具体的一次时间同步过程如图1所示。

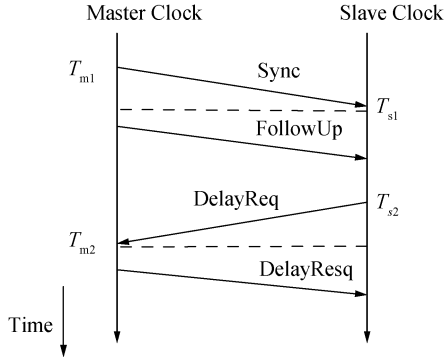


图1 PTP同步过程

Fig. 1 Synchronization Process of PTP

IEEE 1588 定义了4种报文格式, 分别是同步信息报文(Sync)、跟随报文(FollowUp)、延迟请求报文(DelayReq)、延迟响应报文(DelayResq)。PTP协议主时钟节点和从时钟节点的同步过程主要包括两个阶段: 计算主从时钟偏差阶段和计算线路时延阶段。时钟偏差即主从时钟节点的时钟偏差, 由于受到网络延迟, 时钟自身型号以及数据报文的递交延迟的影响, 一次传送同步报文而计算的时钟偏差并不准确, 还必须计算线路延迟加以修正^[4]。

Sync是主时钟定时发送的周期性报文, 包含此报文的时间戳, 其发送间隔一般为2s, 间隔太短会使网络负担严重, 间隔太长又影响同步精度。首先主时钟向从时钟发送含有准确时间戳信息的Sync报文。由于时间发送的精确时间不可能与预计的时间完全相同, 所以PTP中定义了FollowUp报文来解决该问题。FollowUp报文中包含了Sync报文实际发送的精确时间 T_{m1} 。

从时钟收到Sync报文时记录下当时的精确时间 T_{s1} , 从时钟在接收到Sync报文后, 会随机延迟一段时间向主时钟发出一个延迟请求报文DelayReq。DelayReq报文类似Sync报文, 不过它是由从时钟发出, 同时从时钟记录下DelayReq实际发出的精确时间 T_{s2} 。主时钟收到DelayReq时记录下接收的精确时间 T_{m2} , 并将该精确时间放入DelayResq报文中发回从时钟, 至此从时钟便得到了 T_{m1} , T_{s1} , T_{m2} , T_{s2} , 四个时间, 由这四个时间可以简单地计算出线路延迟 D_d 和时间偏差 T_{offset} 。

设主时钟到从时钟的路径时延为 D_{d1} , 从时钟到主时钟的路径时延为 D_{d2} , 时间偏移为 T_{offset} 则可以得到下列等式:

$$T_{m1} + T_{d1} + T_{offset} = T_{s1} \quad (1)$$

$$T_{s2} + T_{d2} - T_{offset} = T_{m2} \quad (2)$$

PTP同步原理假设链路是对称的, 即: $T_{d1} = T_{d2}$, 则由上述等式(1), (2)可以得出时钟偏差 T_{offset} 和路径时延 T_d 。

$$T_d = \frac{T_{s1} - T_{m1} + T_{m2} - T_{s2}}{2} \quad (3)$$

$$T_{offset} = (T_{s1} - T_{m1}) - T_d \quad (4)$$

由以上两个公式可以推出一般通用的时间同步计算公式^[2]:

$$T_{offset}(k) = T_s(k) - T_m(k) - T_d \quad (5)$$

其中, $T_m(k)$ 和 $T_s(k)$ 分别为第 k 次同步时主时钟和从时钟分别记录下的时间戳, $T_{offset}(k)$ 为第 k 次同步时从时钟计算出的与主时钟的偏移, 设 T_s 为第 k 次同步之前的从时钟本地时间, 则第 k 次同步之后的从时钟精确时间为 $T_s(\text{ture}) = T_s + T_{offset}(k)$ 到此即完成了本次主从时钟同步。

2 PTP同步算法的问题与改进

2.1 传输链路的不对称性对同步的影响

目前在电力行业, IEEE 1588在SDH通道内传输已得到广泛的应用^[5], 且由于所有时间戳均在物理层获得, 所以网络协议栈处理延时对精度不产生影响。传输网络中路径延迟包括主时钟和交换机之间的链路延时, 交换机内部延时, 交换机和从时钟之间的链路延时, 以及传输链路的倒换尤其传输链路的通道切换对链路的影响较大^[6], 而这种链路的变化不确定性必然导致主从时钟之间链路的不对称性。从1588同步原理可以看出, 这种同步机制的前提是路径必须对称, 即报文的传输时延Delay在不同方向上是相同的。

在这种前提下计算的时间偏移必然是不可靠的, 因为在实际的传输链路中这种对称性前提很难保证。为了保证链路的对称性, 在1588v2不对称补偿方案探讨中卢灵宣提出逐点补偿的方案^[3], 在基于1588协议的精确时间同步算法改进一文中李学桥等提出对同步延时进行加权修正的方法^[2]。但大多数文章所提供的方法均未在实际的现网中进行测试运行观察, 缺少一定的说服力。

2.2 PTP 时钟同步改进算法

本改进算法在主从时钟出现偏差时进行先判断后补偿的大致思路展开的, 根据 1588 原理(如图 2)有如下公式:

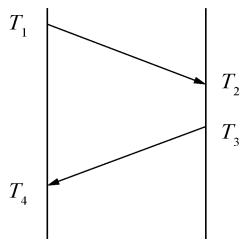


图 2 1588 原理

Fig. 2 Principle of 1588

$$T_1 + T_{d1} + t = T_2 \quad (6)$$

$$T_3 + T_{d2} - t = T_4 \quad (7)$$

其中(t 为主从时钟之间时间差, T_{d1} 为从钟接收报文是的路径延迟, T_{d2} 为从钟发送报文到主钟是路径延迟, 理想状态下 $T_{d1} = T_{d2}$, 即路径对称, 但在实际 E1 的通道上, T_{d1} 通常不等于 T_{d2} 。)

在初始化期间路径不改变情况下假设主从同步:

$$\text{即 } t=0, \text{ 则 } T_{d1} = T_2 - T_1, T_{d2} = T_4 - T_3$$

此时的路径不对称性:

$$T_D = T_{d1} - T_{d2} = (T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)$$

再做不对称性补偿时可使用 $T_D/2$ 在通信的过程中, 当未发生相位改变和路径切换的情况下, 四个时间戳(T_1-T_4)之间的差值会进入相对稳定状态。

当稳定状态发生变化时(通常情况下主时钟的相位抖动小于 100 ns, 加上通道传输时间抖动, 目前设置 T_{d1} 或 T_{d2} 变化超过 100 ns 时即认为出现了状态变化, 同时当未出现变化值超过 100 ns 时也会隔一段时间进行一次状态判断), 造成改变的原因有以下三种情况:

(1) 路径未改变, 发生相位改变。

由式(6)和式(7)得,

$$T_{d1} + t = T_2 - T_1 = T_{D1} \quad (8)$$

$$T_{d2} - t = T_4 - T_3 = T_{D2} \quad (9)$$

假设相位改变 T , T'_1 , T'_2 , T'_3 , T'_4 为改变后的时间戳

$$T_{d1} + (t + T) = T'_2 - T'_1 = T'_{D1} \quad (10)$$

$$T_{d2} - (t + T) = T'_4 - T'_3 = T'_{D2} \quad (11)$$

由式(10) - 式(8), 式(11) - 式(9)可得,

$$T = T'_{D1} - T_{D1} = A \quad (12)$$

$$-T = T'_{D2} - T_{D2} = B \quad (13)$$

通过式(12), 式(13)(即前后两次时间戳改变值 T_{D1} 和 T_{D2} 的改变值刚好抵消)判断出只发生了相位改变的状态, 这种状态若做时间检测设备时不做不对称性 T_D 的重新计算, 若做时钟准确授时设备则要进行相应的补偿。

(2) 主钟相位不变, 只发生路径切换。

当路径发生切换时, 路径的不对称性会发生改变, 但用(1)做判断时未出现式(12), 式(13)所列改变值相等状态时, 则通常认为发生路径切换, 这时通过 T_{d1} 和 T_{d2} 的改变值重新计算不对称性 T_D 。路径不对称性的重新计算是在时间戳稳定时, 比较状态改变前和改变后的稳定数据进行的计算, 变化的过程中不计算。

(3) 相位和路径同时改变。

这种状态比较复杂, 通常认为主钟发生相位变化的情况较少, 或相位变化一般比较缓慢, 相位的变化量相对于路径变化量来说影响较小, 这种情况直接用第二种状态等效。

2.3 PTP 时钟同步改进算法流程图

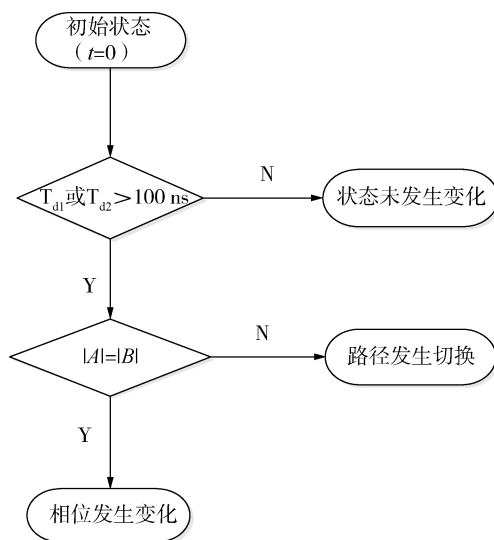


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm Flow Chart

3 算法验证

依托广州市供电局时间同步测试试点项目, 在时间监测设备终端实现。在广州市供电局通信机房进行试点测试时间监测设备, 机房摆放两台时间监测设备(一台站端监测设备, 一台中心站监测设备), 站端监测设备输出 PTP(IEEE 1588) OVER E1

信号, 通过 SDH 传输网络的 E1 支路信号环回中心端监测设备, 在此过程中验证传输准确性, 可靠性和稳定性(测试拓扑图如图 4)。

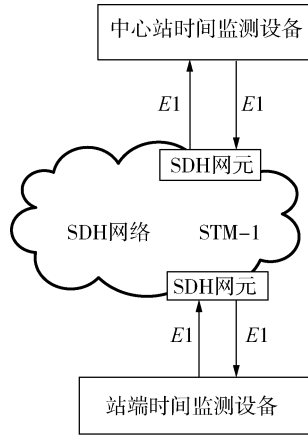


图 4 测试拓扑

Fig. 4 Testing Topology

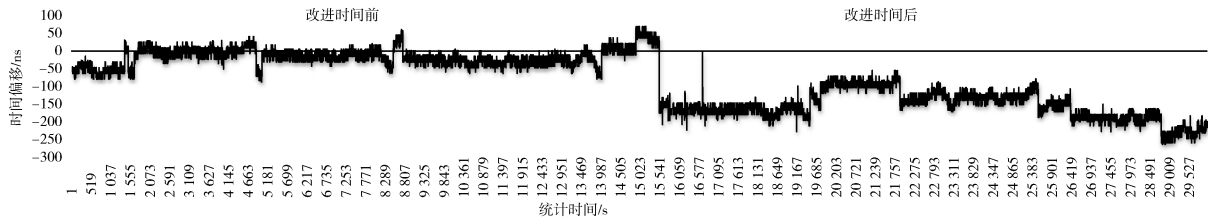


图 5 改进前后时间数据偏移表

Fig. 5 Time Data Offset Table Before and After Improving

参考文献:

[1] IEEE Std 1588—2008, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems [S].

[2] 李学桥, 陈园, 梁爽, 等. 基于 IEEE 1588 协议的精确时钟同步算法改进 [J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(2): 42-45.
LI Xueqiao, CHEN Yuan, LIANG Shuang, et al., Improvement of the Accurate Clock Synchronization Algorithm Based on IEEE 1588 Protocol [J] Computer Engineering and Science, 2011, 33(2): 42-45.

[3] 卢灵宣. 1588v2 不对称补偿方案探讨 [J]. 邮电设计技术, 2012, (9): 64-67.
LU Lingxuan. Exploring the Solution of 1588v2 Asymmetrical Offset [J]. Post and Telecommunications Design Technology, 2012, (9): 64-67.

[4] IEC 61588, Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems [S].

[5] 张武洋, 赵振宇, 于同伟, 等. 基于 SDH 通道的 PTP 同步定时研究[J]. 东北电力技术, 2011, 32(1): 37-38, 45.

图 5 为统计一段时间内四个时间戳数值前后分析计算的时间偏移表, 其中横坐标为统计时间以秒为单位, 纵坐标为时间偏移值以纳秒为单位。

通过对比可以很明显的看出算法改进后的偏移量明显减少且趋于稳定的控制在 100 ns 以内。

4 结论

本文在深入研究 IEEE 1588 同步原理的基础上, 分析了通信路径不对称对同步精度的影响并提出了一种先判断后补偿的算法。通过验证, 可以很明显的看出算法改进后的偏移量明显减少且趋于稳定的控制在 100 ns 以内, 表明该算法有效地降低了通讯路径不对称对时钟同步精度的影响, 进一步提高了 IEEE 1588 同步系统的同步精度, 同时也为解决链路不对称这一问题提出一个方向。

ZHANG Wuyang, ZHAO Zhenyu, YU Tongwei, et al. Research on the PTP Synchronization on Time Based on SDH Channel [J]. Northeast Power Technology, 2011, 32(1): 37-38, 45.

[6] 王康, 胡永辉, 马红皎. 基于 IEEE 1588 的智能变电站时钟同步技术[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(3): 9-14.
WANG Kang, HU Yonghui, MA Hongjiao. IEEE 1588 Based Time Synchronization Technology for Smart Substations [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(3): 9-14.

[7] 王水鱼, 魏传均. 基于 IEEE 1588 的智能变电站时钟同步技术研究[J]. 微型机与应用, 2012, 31(23): 71-77.
Wang Shuiyu, Wei Chuanjun. Time Synchronization Technology for Smart Substations Based on IEEE 1588 [J]. Microcomputer & Its Applications, 2012, 31(23): 71-77.

[8] 吴安平. 第三次工业革命背景下对智能电网的再认识 [J]. 南方电网技术, 2014, 8(1): 38-41.
WU Anping. Review of the Smart Grid under the Third Industrial Revolution [J]. China Southern Power Grid Technology, 2014, 8(1): 38-41.

(责任编辑 沈明芳)