

PTP 网络非对称时延抖动修正 算法设计与分析

余学锋, 张开维, 秦项乾

(中国人民解放军 63870 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: 为了改进 PTPV2 时间同步网络非对称时延抖动对主从时钟同步精度的影响, 设计了传输报文的非对称时延抖动修正算法; 基本思路是在主从时钟交换报文信息中, 找出最佳报文用于从时钟的调整; 采用两级过滤先进增强时间恢复算法, 即使发生网络传输阻塞, 也能筛选出未受阻塞的幸运报文用于时钟偏差估计; 新算法能够很容易集成到 PTPV2 协议中, 而不会影响基本的报文信息交换; 实际测试结果表明, 新设计的时间恢复算法, 在普通交换机网络中, 可有效抑制非对称时延抖动, 主从时钟同步精度也可优于 100 ns。

关键词: 时钟同步; IEEE1588 协议; 包延时抖动

Design and Analysis of Delay Asymmetry Jitter Correction Algorithm for PTP Network

Yu Xuefeng, Zhang Kaiwei, Qing Xiangqian

(PLA 63870 Unit, Huayin 714200, China)

Abstract: In order to improve the slave synchronization accuracy with respect to the master clock for asymmetric communication links, a delay asymmetry correction algorithm is designed. The key ideal is filter clock updates devived from the master-slave message exchange, using only good sampes for slave updates. The advanced enhanced time recovery algorithm which two consecutive filtering was proposed, make sure that only good samples are used to update the slave clock correctly under heavy traffic load in the network. The proposed algorithm can easily be integrated into PTPV2 protocols, and not influences the basic message exchange. The test results show that the new algorithm can effectively mitigation delay asymmetry jitter in the presence of various bursty bi-directional traffic loads and network conditions, the synchronization accuracy between master and slave clocks is batter than 100 ns.

Keywords: clock synchronization; IEEE 1588 precision time protocol (PTP); packet delay variation (PDV)

0 引言

在常规武器靶场, 统一的时间频率基准是确保测量控制设备同步精确工作的重要保证。随着靶场局域网的不断完善, 通过局域网实现远程时间频率参数传递及测试成为可能。目前较为成熟的方法就是基于 IEEE1588 精密时钟协议 (PTP), 通过网络将主时钟时间信息传递给远端从时钟, 一方面为测试设备提供时间信息, 另一方面完成对自主守时装置的时间同步测试 (校准)。然而现有的 PTPV2 方法是基于两点假设, 一是局域网中的网络交换机支持 IEEE-1588v2 协议, 也就是说要具备 PTP 报文优先转发、链路时延补偿等协议功能。二是局域网中主时钟到从时钟的路径延迟与从时钟到主时钟的路径延迟相等且链路时延通常不会发生抖动。而靶场实际情况是局域网中的交换机为普通交换机, 不支持 IEEE-1588v2 协议。因此在网络报文传输中由于网络传输阻塞的不确定性会造成链路报文传输非对称时延及抖动 (PDV), 通常达几百微秒级, 而靶场

授时及测量精度要求为百纳秒级别, 因此必须解决网络传输非对称时延抖动的问题。

关于 PTP 协议网络传输非对称延时抖动抑制方法, 许多学者做了大量的工作。文献 [1] 提出了最小排队转发时延估计算法; 文献 [2] 提出了采用能够记录报文时间戳的交换设备对其固有延时时间进行修正方法; 文献 [3] 提出一种基于网络区分服务调度模型的同步报文路径延时误差修正方法; 文献 [4] 提出了报文时延分布参数估计方法; 文献 [5-7] 等也都提出了一些很好的方法。但这些方法中有的需要交换机硬件支持, 有的需要对交换机进行优先级设置, 有的需要在 PTPV2 协议传输机制中额外增加专门检测报文, 有的只是在实验室环境下的性能仿真验证结果。为此, 本文提出了采用二级过滤的先进增强时间恢复算法, 利用从端接收报文之后, 对所有的报文进行算法过滤估值计算, 确保收到的不同 PDV 数据为统一稳定的时间值。当网络传输出现高流量负荷、拥塞而导致的非对称时延抖动时也能恢复出精准时钟, 并且在实际普通交换机网络中对算法性能进行测试。

1 PTPV2 报文传输模型

PTPV2 的基本原理是主从时钟之间周期性交换带有时

收稿日期: 2020-04-08; 修回日期: 2020-05-06。

作者简介: 余学锋 (1963-), 男, 江苏南京市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事兵器试验与测试技术方向的研究。

间戳的报文, 从时钟根据时间戳信息计算出路径时延以及主从相位差, 进而校正从时钟的时间相位偏差。

设从时钟相对于主时钟的初始时间相位偏差为 δ , PTPV2 采用主从层次结构 (双向报文交换), 协议引擎为端对端 (E2E) 延时测量机制。在同步开始时, 主时钟端在 t_1 时刻向从时钟端发送 SYNC 报文, 同时将 SYNC 报文的发送时刻 t_1 通过跟随报文 FOLLOW_UP 发送给从时钟端。从时钟端记录 SYNC 报文的接收时刻 t_2 , $t_2 = t_1 + d_1 + \delta$, 其中 d_1 为端对端 (E2E) 延时测量机制下的主时钟端到从时钟端网络延时。

从时钟在 t_3 时刻向主时钟发送延时请求报文 DELAY_REQ, 主时钟端记录收到 DELAY_REQ 报文的时刻 t_4 , $t_4 = t_3 - \delta + d_2$, d_2 为端对端 (E2E) 延时测量机制下的从时钟端到主时钟端网络延时。然后将时间 t_4 通过延时响应报文 DELAY_RESP 发送至从时钟。这样在每个同步周期, 从时钟端就可得到 4 个时间戳信息 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 。根据这四个时间信息, 同步系统程序可分别计算出主时钟到从时钟的链路时延、从时钟到主时钟的链路时延、平均链路时延以及主从时钟偏移。

由此可以得到, 主时钟端口到从时钟端口报文传输延时时间戳观测值为 $y_1 = t_2 - t_1 = d_1 + \delta$, 从时钟端口到主时钟端口报文传输延时时间戳观测值为 $y_2 = t_4 - t_3 = d_2 - \delta$ 。在普通传输网络中, 报文链路传输延时受 3 个因素的影响, 网络拓扑结构引起的固定传播延时, 网络链路中的交换机内固定滞留时间延时, 网络中各交换机节点排队阻塞延时抖动。把这些影响因素分为固定延时和延时抖动两个部分, 因此又有: $d_1 = d_1^{\min} + \omega_1$, $d_2 = d_2^{\min} + \omega_2$ 。

其中: d_1^{\min} 、 d_2^{\min} 代表了报文链路传输及交换机滞留时间的固定延时部分, 而 ω_1 、 ω_2 则代表了交换机节点排队阻塞延时抖动。在一个同步周期内, 由于 d_1^{\min} 、 d_2^{\min} 引起的网络传输非对称时延可通过统计测量方法得到, 设非对称固定时延为 τ , 有: $y_{i,1} = \tau + \delta + \omega_{i,1}$, $y_{i,2} = \tau + \delta + \omega_{i,2}$ 。其中: $i = 1, 2, \dots, P$, 为同步周期。用产生的时间戳观测值的计算结果直接对从时钟偏差进行修正就存在一个延时抖动误差 $\omega_{i,\epsilon}$, $\omega_{i,\epsilon} = (\omega_{i,1} - \omega_{i,2}) / 2$ 。可以看出, 使用主从时钟报文传输延时时间戳的平均值来代替链路传输实际延时, 并由此得到的从时钟偏差修正计算结果中包含了非对称时延抖动误差, 如果用这个值进行从时钟钟差修正会带来较大的不确定度。

2 延时抖动修正算法

基于 PTPV2 协议的主从时钟在普通交换机网络下的同步报文传输延时抖动, 核心是由于网络阻塞的不确定性, 而网络本身又不具备对报文在交换机中的滞留时间标记能力, 不能纠正延迟的不对称性, 导致从时钟端得到的 4 个时间戳信息不能真实反映主从时钟同步情况。而先进增强时间恢复 (AETR) 算法可大大降低主从时钟同步过程中的时延抖动。基本思路是通过 N 个时钟同步周期时间戳观

测值的统计分析, 过滤掉受网络阻塞影响的同步周期, 并在未受阻塞的幸运同步周期中, 运用从时钟端得到的 4 个时间戳信息 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 , 并按照 PTPV2 协议计算传输延时及偏差修正值, 恢复出从时钟调整值。先进增强时间恢复算法能够集成于 PTPV2 同步协议延时测量机制中, 在不增加 PTP 协议传输通讯开销的前提下, 仅将多个同步周期的偏差计算值以缓存的形式存储起来, 用于先进增强时间恢复算法的统计分析。AETR 算法通过两级连续的过滤算法, 确保使用最优同步周期偏差值来恢复出精确的从时钟时间调整信息。另外 AETR 模型在同步周期偏差值过滤中, 不仅过滤掉明显受网络阻塞影响的同步周期, 还要对通过一级过滤后的幸运同步周期进行二次过滤, 筛选出最优的同步周期偏差值, 运用逐次逼近算法, 恢复出主从时钟同步周期的精确时间。当在 PTP 协议网络传输某个同步周期中, 从时钟端没有获得符合算法要求的同步周期偏差值时, 就采用先前存储的同步周期偏差值进行时钟调整。AETR 算法执行过程流程图如图 1 所示。

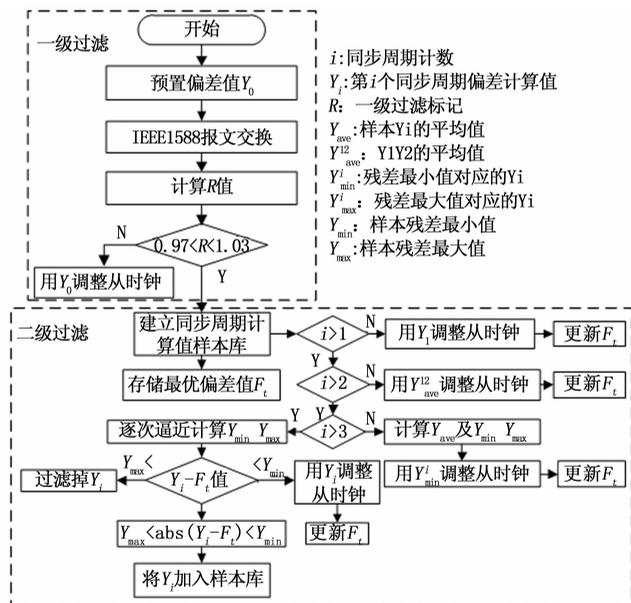


图 1 AETR 算法执行过程流程图

在第一级过滤过程中, 主、从时钟按照 PTPV2 协议中的延时请求一响应测量机制在每个同步周期内交换基本时间信息并计算链路延时偏差。为了实现对遭受传输网络阻塞的同步周期的过滤, 设置过滤阈值标记 R , $R = (t_2 - t_1) / (t_4 - t_3)$ 。若传输网络为对称无时延抖动, 理想情况下 R 值为 1, 但实际上由于网络阻塞等原因, R 值是在 1 附近变化的, 通过设置 R 的阈值, 可将一部分受网络阻塞影响的同步周期过滤掉。该标记值的选择要综合考虑主、从时钟所在网络情况以及时钟同步精度要求, 靶场试验 IP 网属于中度流量网络, 主从时钟同步精度要求优于 100 ns。因此综合有关报道^[8-9], 选择的 R 值过滤范围为 $0.97 < R < 1.03$ 。假设从时钟相对与主时钟初始相位偏移为 100 ns, 同

步周期频率为 30 次/分钟，模拟 24 小时靶场常用网络流量情况下，统计结果表明^[10]，有大约 32% 的同步周期的 R 值在 0.97~1.03 范围内，也就是说，即便在较大网络阻塞的情况下，也至少保持每分钟有 10 个同步周期可用于从时钟偏差计算。

所有通过第一级过滤后的幸运同步周期，从时钟端都将得到 4 个时间戳信息 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ，并按照 PTPV2 协议进行传输延时及偏差修正值计算，即 $Y_i = [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)] / 2$ 。计算结果存储在缓存中并给以标记，然后进行第二级过滤算法，即精确时间恢复算法。在第二级过滤中，采用偏差逐次逼近方法确保过滤出最优偏差估值，用于计算从时钟当前相位偏差值并对时钟数据更新。这其中有可能还有一些时钟偏差计算值或高或低于预期的偏差值，在数据更新过滤过程中，这些计算值所对应的同步周期也将被过滤掉。数据更新过滤流程图如图 1 中的二级过滤部分所示。当收到的最新同步周期显示网络中有较大的流量时，从时钟将用上一次的偏差计算值而不会采用当前偏差计算值对从时钟调整。

通过一级过滤后的第一个幸运同步周期，根据获得的 4 个时间戳计算出从时钟偏差修正值 Y_1 ，并用该值对从时钟进行调整。待第二个幸运同步周期，其偏差计算值 Y_2 则与 Y_1 进行求平均值，用平均值对从时钟进行调整。当第三个幸运同步周期到来后，则将三个幸运同步周期的偏差计算值 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 求平均值 Y_i 及与平均值的差值 Y_{ni} ， $i=1, 2, 3$ ，计算 Y_{ni} 最大值 Y_{max} 和最小值 y_{min} ，取 Y_{ni} 最小值 y_{min} 所对应的偏差计算值 Y_i ，用于对从钟进行调整，并将该值标记为最优偏差值 F_i 。

当超过三个以上幸运同步周期到来后，就按照式 (1) 和式 (2) 的逐次逼近算法获得 y_{min} 、 y_{max} 。

$$y_{min}^i = y_{min}^{i-1} + k \prod_{n=1}^{i-1} (y_n - F_i) \quad (1)$$

$$y_{max}^i = y_{max}^{i-1} + k \prod_{n=1}^{i-1} (y_n - F_i) \quad (2)$$

式中， k 为算法因子。同时求当前偏差计算值 Y_i 与 Y_i 的差值，若二者差值绝对值小于 Y_{min} ，则用当前值 Y_i 对从钟进行调整，并将该值标记为最优偏差值 F_i ，如果 $Y_{min} < |Y_i - Y_i| < Y_{max}$ ，则仍然用先前的最优更新值 F_i 对从钟进行调整，同时，将 Y_i 纳入偏差计算样本，重新计算平均值 Y_i 及与平均值的差值 Y_{ni} 。若 Y_i 与 Y_i 的差值大于 Y_{max} ，则将该同步周期偏差计算值过滤掉。以此类推，逐次逼近网络传输的最优值，实现从时钟时间偏差的恢复。

3 试验结果与分析

在靶场试验 IP 网络中 (网络拓扑图如图 2 所示)，共有五级网络交换。将 PTPV2 主从时钟接入该局域网中，以主时钟对从时钟进行授时，从时钟始终与主时钟保持同步，从时钟提供校准时间对远端自守时设备的 1 pps 同步精度进行测试。主从时钟间同步精度以及从时钟对自守时设备的 1 pps 测量误差均采用更高精度的时间校准仪及数字存储示波器进行监测，用于评价采用先进增强时间恢复算法后的主

从时钟授时及测量性能。

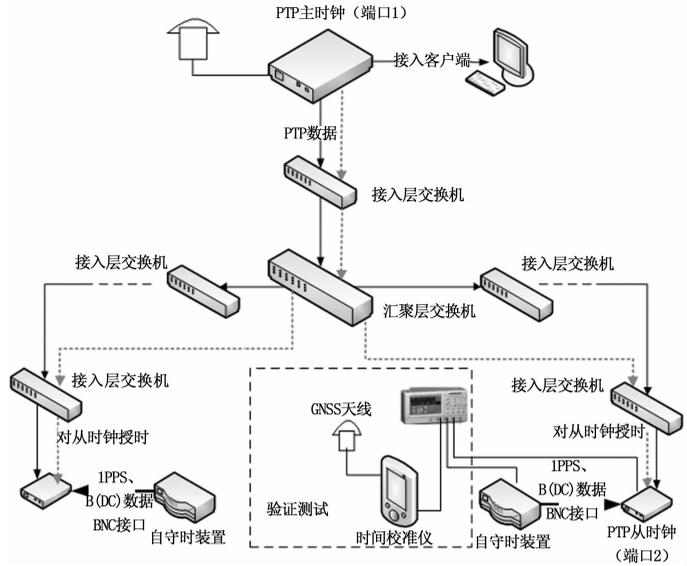


图 2 PTPV2 测试网络拓扑图

对已有的符合 IEEE1588V2 协议的主从时钟系统处理软件中，增加延时抖动修正过滤算法，并将两个网络流量模拟源链接于网络中，模拟高流量负荷、拥塞而导致的大分组时延变化 (PDV) 环境，进行主从时钟同步精度及从时钟远程校准验证测试。

首先进行主从时钟授时精度测试，用时间校准仪对主时钟的时间精度进行校准，误差小于 10 ns，因此当把主从时钟接入局域网后，时间校准仪对从时钟端的测量 (借助数字存储示波器) 结果就代表了主从时钟同步精度。

将主、从时钟分别接入靶场试验 IP 网的端口 1 和端口 2 (5 层交换机)，进行初始化设置，待稳定后采用时间校准仪及数字存储示波器对从时钟 1 PPS 输出进行测试 (相对于主时钟 1 PPS 输出)，连续测量 24 小时，期间通过两个网络流量模拟源对网络交换机施加最高到 80% 的数据量。测试结果如图 2 中所示。主、从时钟网络传输同步时间抖动呈正态分布，平均值为 15.5 ns，标准偏差为 6.0 ns，抖动最大范围为 -12.9~45.6 ns。

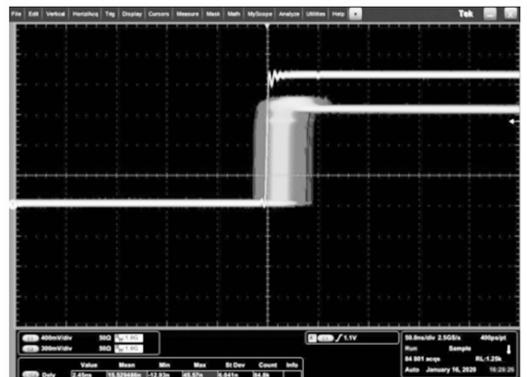
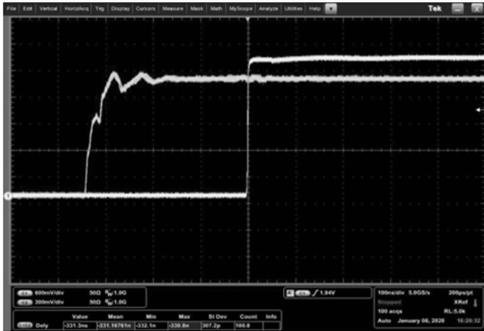
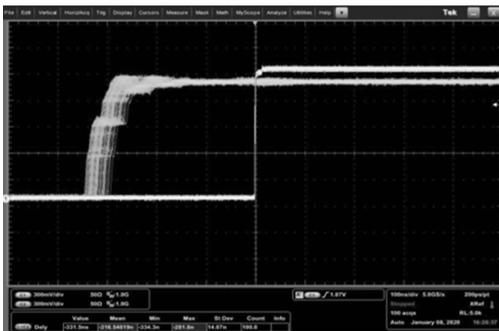


图 3 主、从时钟授时精度及同步时间抖动

其次进行基于网络的从时钟远程校准性能测试。将主、从时钟分别接入靶场试验 IP 网的端口 1 和端口 2 (5 层交换机), 进行初始化设置, 待稳定后将被校准时统装置 (自守时) 先与放在端口 2 的时间校准仪进行本地测试, 测试结果作为标称值, 如图 4 (a) 所示。再将被校准时统装置接入端口 2 所在的从时钟 1 pps IN 测试口进行测试, 测试结果如图 4 (b) 所示。共进行 100 次测量, 采用时间校准仪本地校准和 PTPV2 远程校准的时统装置同步误差测量平均值分别为 -331.1 、 -316.5 ns, 二种方法测量偏差为 14.6 ns, 保持了很好的一致性。



(a) 时间校准仪本地测试结果



(b) 从时钟远程校准测试结果

图 4 基于网络的从时钟远程校准性能测试

4 结束语

在基于 PTPV2 协议的主从时钟同步中, 本文设计的先进增强时间恢复算法, 可有效抑制由于普通交换机网络报文传输延时抖动所带来的同步偏差, 大大提高主从时钟同步精度。实际应用情况也表明, 在有 5 级普通交换机下, 主从时钟同步精度可优于 100 ns, 这也为基于局域网的远程时间频率校准奠定了基础。

先进增强时间恢复算法是在 PTPV2 周期性交换网络数据报文基础上, 增加了传递报文过滤评估环节, 使得收到的不同 PDV 数据为统一稳定的时间值。如果考虑时间同步中的偏移率及环境温度的影响, 二级过滤阈值的选择则需要更为细致, 有关这方面问题在未来工作中有待进一步的研究。

参考文献:

[1] 陈雷, 朱天林, 刘锋, 等. 基于时延不对称网络的最小排队转发时延估计 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48 (10): 1394 - 1399.

[2] 李超, 徐启峰. IEEE1588 协议延时不对等问题的修正 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27 (10): 931 - 936.

[3] 黎锐峰, 曾祥君, 李泽文, 等. IEEE1588 同步时钟网络时延误差的分析及修正 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (12): 82 - 87.

[4] Murakami T, Horiuchi Y, Nishimura K. A Packet Filtering Mechanism with a Packet Delay Distribution Estimation Function for IEEE 1588 Time Synchronization in a Congested Network [A]. IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS) [C]. 2011: 114 - 119.

[5] Martin Levesque, David Tipper. Improving the PTP Synchronization Accuracy Under Asymmetric Delay Conditions [J]. 2015, 26: 195 - 199.

[6] Lee S, Lee S, Hong C. An Accuracy Enhanced IEEE 1588 Synchronization Protocol for Dynamically Changing and Asymmetric Wireless Links [J]. IEEE Comm. Letters, 2012, 2 (16): 190 - 192.

[7] 战裕隆, 杨佳利, 朱纪洪. 多时钟同步方案的比较与测试 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (6): 38 - 45.

[8] Anyaegbu M, Wang C, Berrie W. A sample-mode packet delay variation filter for IEEE 1588 synchronization [A]. in Proc. IEEE 12th Int. Conf. ITST [C]. 2012: 1 - 6.

[9] Chandra Mallela, Kiran Tholu, Mark Bordogna. Timing models for PTP in Ethernet networks [J]. IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2017, 10: 256 - 259.

[10] Lee S. An Enhanced IEEE 1588 Time Synchronization Algorithm for Asymmetric Communication Link using Block Burst Transmission [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12: 687 - 689.

⋯⋯⋯ (上接第 209 页)

[13] Ni J, Wu L, Shi P, et al. A Dynamic Bioinspired Neural Network Based Real-time Path Planning Method for Autonomous Underwater Vehicles [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2017: 1 - 16.

[14] Chen M, Zhu D. Real-time path planning for a robot to track a fast moving target based on improved Glasius bio-inspired neural networks [J]. Intelligent Robotics and Applications, 2019: 186 - 195.

[15] 范莉丽, 王奇志, 孙富春. 生物激励神经网络路径规划仿真研究与改进 [J]. 北京交通大学学报, 2006, 30 (2): 84 - 88.

[16] 王耀南, 潘琪, 陈彦杰. 改进型生物激励神经网络的路径规划算法 [J]. 控制工程, 2018, 25 (4): 541 - 547.

[17] 代亚兰, 熊禾根, 陶永. 基于威胁评估与生物激励神经网络的机器人路径规划研究 [J]. 高技术通讯, 2019, 29 (6): 585 - 593.