

引用格式: 迟文波, 王浩淼, 许晴. PTP 网络时延补偿与抖动优化技术研究[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 110-115.

PTP 网络时延补偿与抖动优化技术研究

迟文波, 王浩淼, 许晴

中国人民解放军 92228 部队, 北京 102249

摘要: 针对使用 PTP 网络授时技术进行复杂网络拓扑时间同步引入的双向延迟测量不对称性以及延迟抖动变化导致网络时间同步精度降低的问题, 分析了延迟不对称性及网络延时抖动影响 PTP 网络时间同步精度的误差原因。通过研究延迟不对称修正、抖动优化等技术, 针对性提出了网络时延优化补偿方法, 提高了网络时间同步精度。

关键词: 抖动; 优化; 差值补偿; 网络时延

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0110-06

Research on PTP network delay compensation and jitter optimization technology

CHI Wen-bo, WANG Hao-miao, XU Qing

Chinese People's Liberation Army 92228 Unit, Beijing 102249, China

Abstract: Aiming at the problem of asymmetry of bidirectional delay measurement introduced by using PTP network timing technology for time synchronization of complex network topology and the decrease of network time synchronization accuracy due to the change of delay jitter, we analyze the error reasons of delay asymmetry and network delay jitter affecting the time synchronization accuracy of PTP network, and put forward the optimization method of network delay by studying the delay asymmetry correction, jitter optimization and other techniques, and improve the network time synchronization accuracy. By studying the delay asymmetry correction, jitter optimization and other techniques, the optimized network delay compensation method is proposed to improve the network time synchronization accuracy.

Key words: jitter; optimization; compensation; network delay

网络时间同步技术是信息技术的重要支撑技术, 在国民经济建设、社会生活以及国防科技领域具有举足轻重的作用。随着网络技术的持续发展, IEEE1588 网络标准得到了广泛应用。IEEE1588 标准的全称是“网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准”, 简称 PTP (precision timing protocol), 它的主要原理是 PTP 主时钟通过同步信号周期性

地对网络中所有 PTP 从时钟进行校正同步, 实现以太网内分布式系统的精确同步。

随着网络时频应用复杂度不断提高, 复杂网络拓扑会引入双向延迟测量不对称性, PTP 从时钟无法判断和扣除, 会引入时间同步偏差。此外, 复杂网络拓扑也会引起延迟抖动增大, 导致一定的时间同步偏差。

PTP 时频传递中常用的滤波算法，虽然能够提高时间同步精度，但是却并没有给出确定特定网络条件下同步精度下限的方法，无法对特定网络条件下的同步精度做到最优评估^[1-4]。

本文基于 PTP 时间同步原理，研究分析时间同步网络延迟的非对称性以及优化抖动策略，提出优化补偿方法，提升 PTP 网络同步精度。

1 PTP 时间同步原理

PTP 的时钟结构是主-从钟模式，通过连续的交换 PTP 报文得到主-从时钟报文发送与接收时刻的时间戳，从时钟完成时间偏差计算与网络延迟估计，并纠正本地时钟达到主-从时钟同步的目的。PTP 时钟系统属于自组织式管理，通过最佳主时钟 (best master clock, BMC) 算法来确定每个 PTP 域内的主-从时钟状态。

根据 2008 年发布的 IEEE1588 第 2 版标准，共涉及五类报文。在 PTP 主时钟同步 PTP 普通时钟、同步边界时钟时，同步报文 (Sync)、跟随报文 (Follow_Up) 用于产生同步时间信息。通告报文 (Announce) 用于建立同步分层结构。在 PTP 使用延迟请求响应机制计算网络延迟的模式下，需要延迟请求报文 (Delay_Req) 和延迟应答报文 (Delay_Resp)^[5-6]。

PTP 主时钟周期性地向域内组播或单播发送包含有时间戳信息的报文实现同步域内从时钟时间同步的目的。同步原理如图 1 所示。

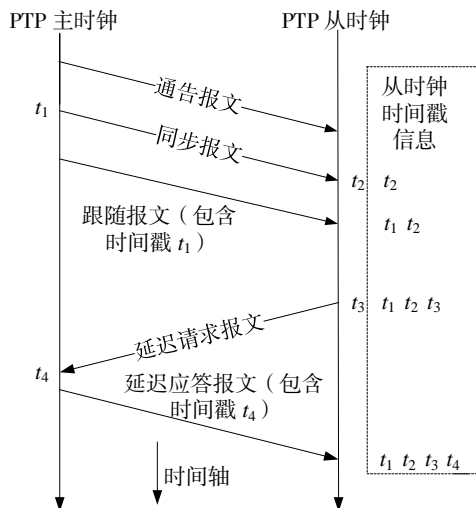


图 1 同步报文同步及延迟请求响应机制流程

如图 1 所示 PTP 报文交互过程及延迟请求同步机制的同步流程。主时钟发送通告报文、同步报文与跟随报文。通告报文包含主时钟基本信息，用于从时钟进行最佳主时钟算法的相关参数的提取。同步报文发送后主时钟处产生发送时间戳 t_1 。如果是双步发送模式， t_1 时间戳需要将时间戳信息置入跟随报文里发送。如果采用单步发送模式，则需将 t_1 时间戳在同步报文发送时置入其中一起发送即可。从时钟接收到主时钟发送来的同步报文后，会产生本地接收时间戳 t_2 。从时钟会在同步报文里读取相关信息位判断主时钟采取单步还是双步发送模式。如果是双步发送模式，从时钟会从跟随报文里提取 t_1 时间戳信息。如果是单步发送方式，从时钟会直接读取同步报文的相关信息位获取 t_1 时间戳信息。

这两个时间戳的差值包含了主-从时钟的时间偏差和网络延迟，如公式 1 所示：

$$D_{m_s} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

式 (1) 中：PTP 使用延迟请求响应机制计算网络延迟时，需要延迟请求报文以及延迟应答报文。从时钟发送延迟请求报文给主时钟，产生发送时间戳 t_3 。主时钟接收到延迟请求报文，产生接收时间戳 t_4 ，然后将 t_4 时间戳嵌入至延迟应答报文里发送给从时钟。从时钟接收到主时钟发送来的延迟应答报文后提取 t_4 时间戳信息。这两个时间戳的差值即是包含网络延迟在内的从-主时钟的时间偏差，如公式 (2) 所示：

$$D_{s_m} = t_4 - t_3 \quad (2)$$

PTP 标准在进行网络延迟计算时，假定正向与反向延迟是对称的，故网络传输双向平均延迟为

$$D = \frac{(D_{m_s} + D_{s_m})}{2} \quad (3)$$

主-从时钟偏差为

$$\theta = D - D_{m_s} \quad (4)$$

PTP 从时钟根据时钟偏差值 θ 对本地时钟进行实时校准完成时间同步操作。

2 同步误差分析

理想情况下,通过公式(4),PTP从时钟只需要对计算得到的时钟偏差值进行特定的算法滤波及校准并完成最终的PTP从时钟时间同步。但同步精度会由于网络延迟的不对称及延迟抖动变化下降。

在这两种简单应用的情况下,PTP主时钟与PTP从时钟直连(背靠背)时不存在双向不对称,网络拓扑如图2(a)所示。或者经过没有其他报文数据参与通信的单一交换机,此时交换机只存

在转发时延而无排队时延,故不存在双向不对称,网络拓扑如图2(b)所示。

在实际工程应用中网络环境拓扑复杂,网络延迟的非对称性主要是受主-从时钟连接复杂拓扑结构的影响。图2(c)为PTP主-从时钟通过一个路由器及交换机的连接拓扑,这是一种比较常见和典型的应用架构。PTP主时钟通过交换机1与路由器连接,然后将报文通过路由器连接普通交换机2后与PTP从时钟进行PTP时间同步报文交互。交换机1和2都会输入其他非PTP报文网络流量,导致PTP报文在交换机中存在随机排队等待时间^[7]。

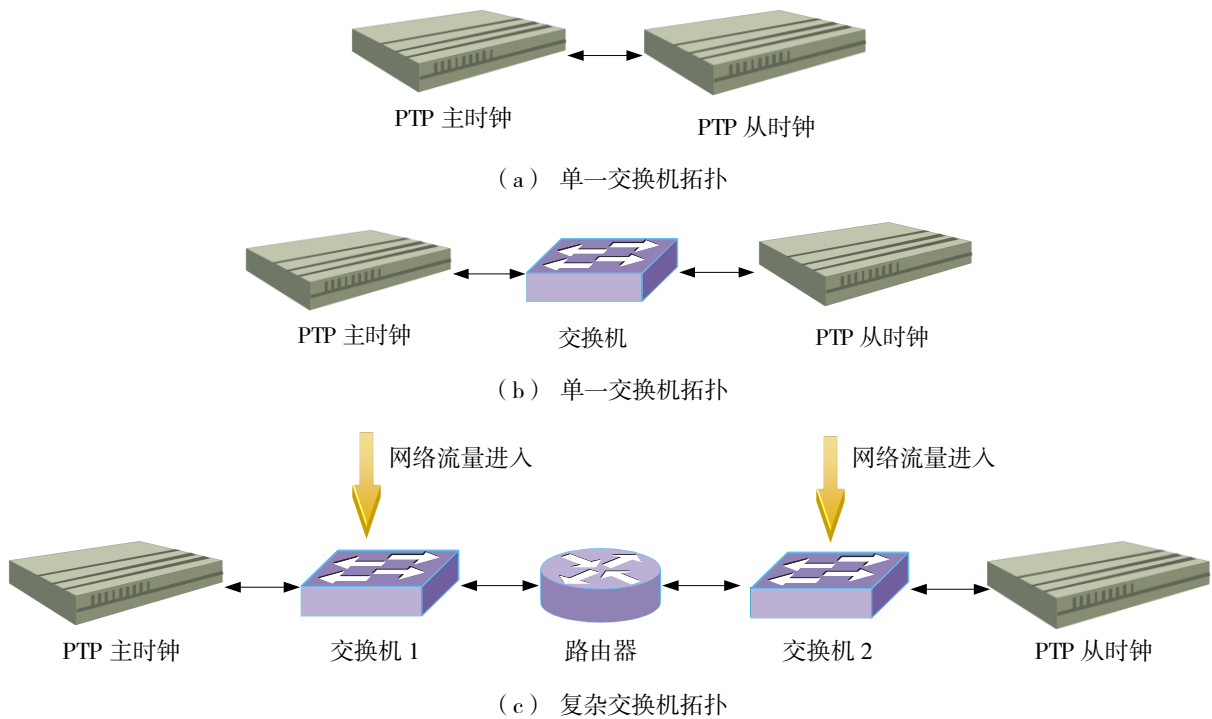


图2 PTP主-从时钟典型拓扑结构

每一个PTP报文在交换机或路由器内部都要进行简单的报文处理过程,路由器相比较于交换机需要进行网络层的软件数据分发判断处理,并且随着突发性报文的增多导致网络拥堵,导致报文双向传输的不确定性增大,这个过程会引入非对称性^[8]。

3 网络延迟不对称补偿方法

主-从延迟与从-主延迟如不对称,则会造成非对称误差 Δd 。如式(5)所示:

$$\Delta d = D_{m \rightarrow s} - D_{s \rightarrow m} \quad (5)$$

主-从平均延迟与从-主平均延迟需要使用专用的PTP网络双向延迟测量仪器进行测量统计获取,并进行计算得到 Δd 。这种偏差是主-从延迟与从-主延迟测试数据的统计平均值,该值根据实际延迟测试数据的样本数量及区域的变化会有变化。但对于一个独立稳定的网络拓扑来说,其变化范围是微小的,可认为是恒定量。例如,如果是微秒级的非对称误差,对于几十个纳秒以内的抖动可认为其是恒定量。

得到非对称误差 Δd 后,就需要将该值作为预补偿量设置到 PTP 从时钟里。然后 PTP 从时钟不对称补偿的操作就是在 t_4 时间戳获取基础上进行不对称 Δd 的补偿,即生成 t'_4 时间戳:

$$t'_4 = t_4 + \Delta d。 \quad (6)$$

即此时的从-主延迟 $D'_{s,m}$ 为

$$D'_{s,m} = t'_4 - t_3。 \quad (7)$$

补偿后,即可用公式(8)和(9)分别计算平均延迟以及当前的相对时差:

$$D' = \frac{(D_{m,s} + D'_{s,m})}{2}。 \quad (8)$$

$$\hat{\theta} = D_{m,s} - D'。 \quad (9)$$

4 同步抖动优化算法设计

PTP 从时钟在网络中进行时间同步的抖动优化处理需要首先获取 t_1 、 t_2 、 t_3 及 t_4 时间戳值,将高精度 PTP 网络双向延迟测量设备测量得到的不对称修正值带入,根据公式(1)和(7)计算主-从延迟 $D_{m,s}$ 与从-主延迟 $D'_{s,m}$ 。根据主-从延迟与从-主延迟计算时差偏移量以及路径平均延迟,如公式(8)和(9)所示。

抖动优化设置采用门限阈值滤除及 α 滤波器方式进行双重修正滤波的形式进行设计,门限阈值的设置根据 3σ 原则进行滤除,去除统计结果中大于 3σ 的样本数据。门限阈值滤除是保证 PTP 从时钟在实时进行偏差校准时遇到粗大值后进行规避的有效措施。设置阈值,对时差偏移量数据进行阈值数据判断。如果超出阈值,则不进行本次的时差校准处理,否则按照设置的 α 比例因子计算最终的时差校准量进行时差校准。

α 滤波器是对相差修正值的按比例收敛的滤波形式。 $\hat{\theta}$ 是 PTP 从时钟实时计算出来的相对时差。 u_θ 是通过 α 滤波器计算最终得到的时差校准量:

$$u_\theta = \hat{\theta} / \alpha。 \quad (10)$$

即相差修正值 u_θ 的取值分别为计算的估计的时间偏移的 $1/\alpha$,称为 α 滤波。

如图3所示 PTP 从时钟抖动优化处理流程。

如图4所示,按照图2(b)搭建测试环境,PTP 主时钟与 PTP 从时钟之间通过一个交换机机进行时间同步测试,其分别输出 1 PPS 给时间间隔计数器进行时差统计。PTP 主时钟的 1 PPS 输出作为开门信号,PTP 从时钟的 1 PPS 输出作为关门信号。时间间隔计数器的数据输出给计算机进行统计分析。初始 α 比例因子设置为 1,表示没有进行优化修正。经交换机所测试的结果基本上反映了实际网络延迟抖动的真实情况,其秒脉冲抖动方差与峰峰值与网络延迟抖动基本一致。

设置不同的 α 比例因子,通过对 PTP 主时钟与 PTP 从时钟的输出 1 PPS 进行测试统计得到不同的标准方差,如表1所示,其秒脉冲比对的标准方差比对结果如图5所示。从图5中可以看出,随着 α 比例因子的增大,其曲线随之降低,并趋于平缓。

α 滤波器是对相差修正值的按比例收敛的滤波形式,是卡尔曼滤波的固定变换形式,其最终同步精度图示对比可以看出其具有一个平滑缓变区,这也是该同步网络拓扑同步精度的极限。抖动优化的目的就是调整 α 比例因子使得同步精度达到平滑缓变区,即该网络拓扑的最佳同步精度。

如图5所示,当 α (比例因子)设置为 1 时,时差校准量 u_θ 等于相对时差 $\hat{\theta}$,表示没有进行滤波调整,为初始状态,此时初始标准差 $\sigma = 99.4$ ns。比例因子设置的下限是由初始标准差与时钟时间戳分辨率决定的。本例中 PTP 时钟的时间戳分辨率为 8 ns,故 α 比例因子设置的下限为

$$\alpha = \sigma / \text{时间戳分辨率} = 99.4 / 8 \approx 12。 \quad (11)$$

平滑缓变区所对应的 α 比例因子设置区域如图5所示,当 α 比例因子小于 6 时,收敛就进入了平滑缓变区,此时不断增大 α 比例因子对于收敛收敛影响甚微。故 α 比例因子的选取原则为小于 6。故在本例中 α 比例因子选择介于 9 与 12 的数值即可,其差别基本可以忽略。说明在该网络条件下可以达到的最佳同步精度范围即为平滑缓变区处的同步精度。

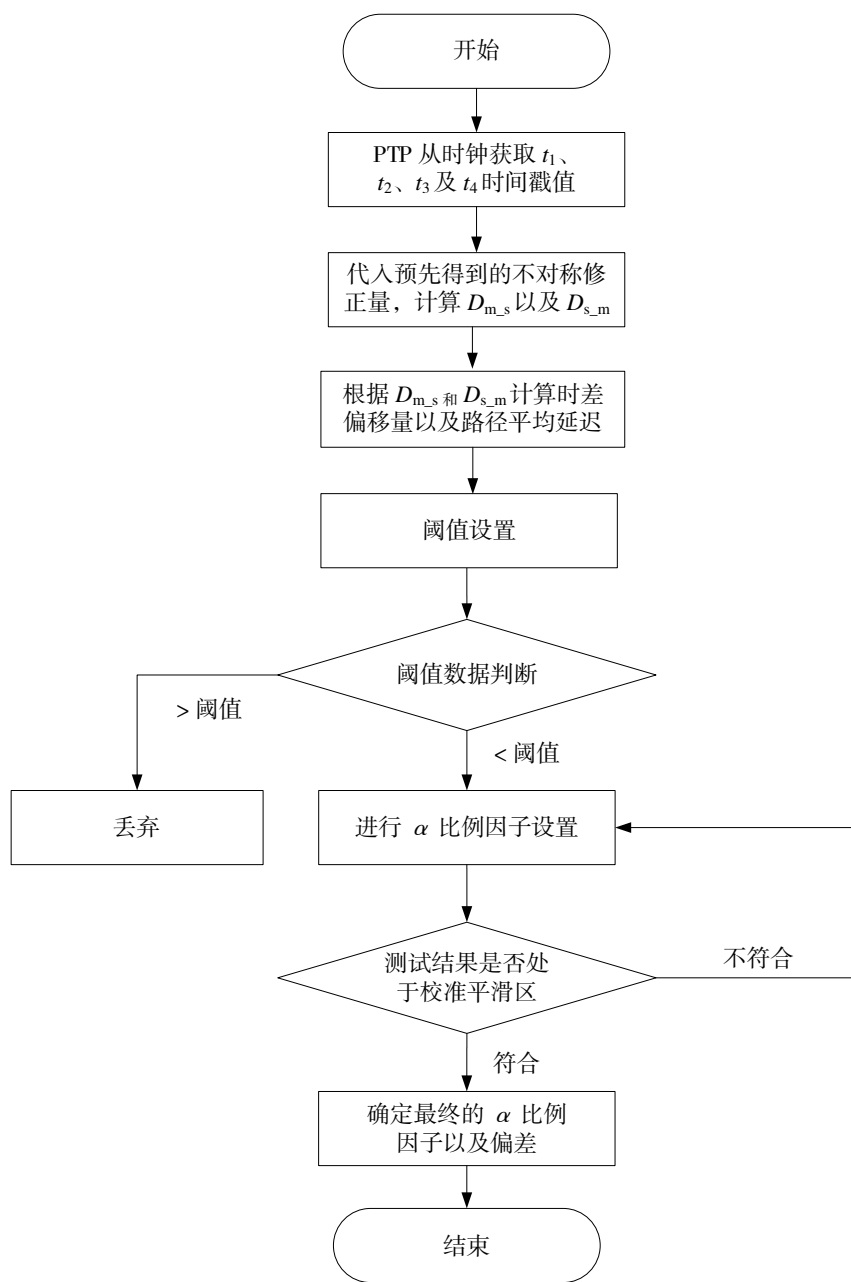


图 3 PTP 从时钟抖动优化处理流程

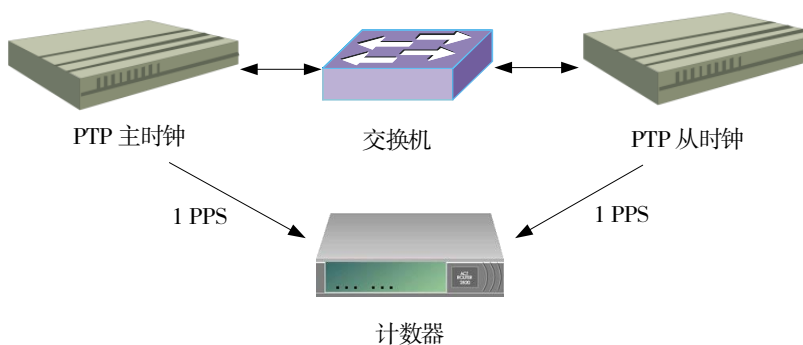
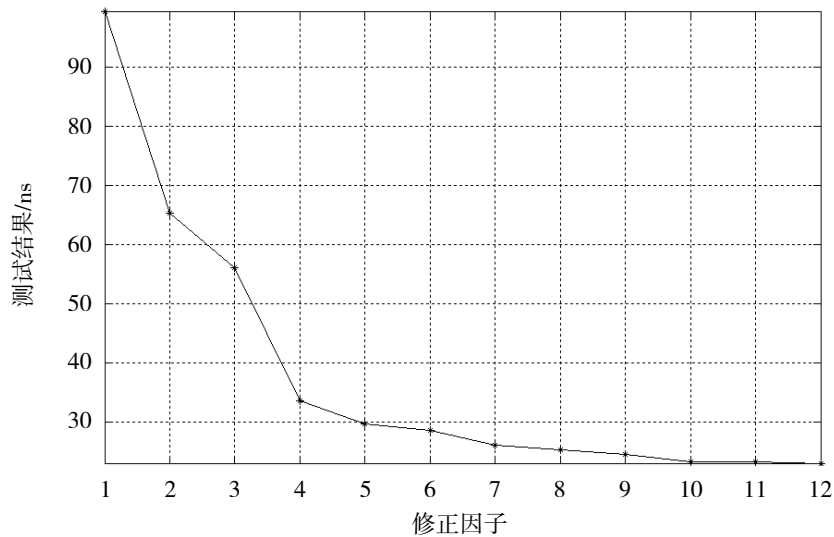


图 4 单交换机环境搭建

表 1 α 滤波因子测试比对

α 滤波因子	标准差/ns	α 滤波因子	标准差/ns
1	99.4	7	26.1
2	65.3	8	25.3
3	56.1	9	24.6
4	33.6	10	23.3
5	29.7	11	23.4
6	28.6	12	23.1

图 5 网络时间同步 α 滤波测试比对

5 结论

本文通过对专用的 PTP 网络双向时延测量仪器测量得到的 PTP 主时钟与 PTP 从时钟之间的双向时延不对称数据, 针对性提出一种 PTP 网络同步精度提升优化补偿方法, 通过同步测试评估优化分析研究, 提出 α 滤波优化方法, 并通过测试说明最佳同步精度范围即为平滑缓变区处的同步精度, 为 PTP 网络时间同步精度提升提供理论化依据, 对特定网络条件下的同步精度做到最优评估。

参考文献:

[1] 邢开亮, 尹义容, 黄永华, 等. 提高网络授时精度的 Kalman 滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 949-954.

- [2] 桂本焜, 冯冬芹. 基于单神经元的网络同步补偿算法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1573-1577.
- [3] 谢志刚, 钱锋, 何英德. 基于单神经元 PI 控制器的 PTP 时钟伺服系统[J]. 兵工自动化, 2010, 29(3): 71-74.
- [4] 孙韶伟, 周川, 吴慧芳. 一种基于 IEEE1588 协议的从时钟自补偿算法[J]. 电子测试, 2009(10): 31-35.
- [5] 刘艺, 丁颀, 邓波. 一种基于分布式架构的高精度网络时延测量系统设计与实现[J]. 现代军事通信, 2014 (1): 41-45.
- [6] 黎文伟, 张大方, 谢高岗, 等. 基于通用 PC 架构的高精度网络时延测量方法[J]. 软件学报, 2006, 17(2): 275-278.
- [7] 韦恒, 黄晓莹. 大型 IP 网络时延的主要成分分析[J]. 电信科学, 2021, 37(4): 67-73.
- [8] 王益忠, 代云超, 柏文良. 船岸网络时延测量误差原因分析[J]. 飞行器测控学报, 2012 (2): 103-109.