

基于 PTPd2 的非对称链路时间偏差补偿方法

王志斌^{1,3},孔祥瑞^{1,3*},邓玉萍²,李文江³,罗京⁴

(1.燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004;2.鞍山师范学院 物理科学与技术学院,辽宁 鞍山 114007;

3.通信网信息传输与分发技术重点实验室,石家庄 050081;4.鞍山市城乡规划设计研究院 数字化所,辽宁 鞍山 114001)

摘要:针对 IEEE 1588v2 主时钟到从时钟的时延和从时钟到主时钟的时延不相等的问题,构建了一种三层 BP 神经网络模型,将基于时间戳的主从时钟偏差计算结果输入该网络模型,对时间偏差进行补偿。实验结果表明:该方法能够将非对称链路的时钟同步精度由 100 μ s 提升至 50 μ s,同时消除过大的抖动,从而更好地校正传输时延。

关键词:1588v2; 三层 BP 神经网络; 非对称链路; 校正时延

中图分类号:TN306 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)07-0037-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.07.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Asymmetric link time offset compensation method based on PTPd2

WANG Zhibin^{1,3}, KONG Xiangrui^{1,3*}, DENG Yuping², LI Wenjiang³, LUO Jing⁴

(1. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China; 2. College of Physics Science and Technology, Anshan Normal University, Anshan Liaoning 114007, China; 3. Science and Technology on Communication Networks Laboratory, Shijiazhuang 050081, China; 4. Institute of Digitalization, Anshan Urban and Rural Planning and Design Research Institute, Anshan Liaoning 114001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the IEEE 1588v2 master clock to slave clock delay and the slave clock to master clock delay are not equal, a three-layer BP neural network model is constructed, the calculation results of master-slave clock deviation based on timestamp are input into this network model to compensate the time deviation. The experiment results demonstrate that this model can improve the clock synchronization accuracy of asymmetric links from 100 μ s to 50 μ s, while eliminating excessive jitter, thus better correcting the transmission delay.

Key words: 1588v2; three-layer BP neural network; asymmetric link; correction delay

0 引言

非对称链路是指往返某一节点的路径不一致,2个方向的延时不同,从而造成主时钟到从时钟和从时钟到主时钟间相互通信发送同步报文所经路径不对称的通信链路。在 IEEE 1588v2 协议中,通常认为主时钟到从时钟和从时钟到主时钟的通信链路是对称的,

即通信距离、线路长度都默认相等,故 IEEE 1588v2 协议更适用于对称链路^[1]。而在实际工程应用中,通信链路大多数都是非对称链路,其链路的不对称性会使同步精度降低,如何修正非对称链路的不对称性及其传输时延是一个难题^[2]。为了解决此问题,本文提出将三层 BP 神经网络应用于非对称链路主时钟到从时钟的传输时延与从时钟到主时钟的传输时延差值的补偿。

收稿日期:2019-03-29。

基金项目:通信网信息传输与分发技术重点实验室开放课题(项目编号:KX172600025)资助。

作者简介:王志斌(1977-),男,河北行唐人,博士,教授,主要从事光通信与光电测试技术方面的研究。先后主持完成国家自然科学基金项目1项,河北省自然科学基金项目1项。参研国家自然科学基金项目2项,省百人计划项目1项,横向课题多项。

*通信作者:孔祥瑞(E-mail:985626198@qq.com)。



1 IEEE 1588v2 同步原理

IEEE 1588v2 时钟同步的实现方式有3种:纯软件方式、纯硬件方式和软硬件结合方式。其中,纯硬件方式和软硬件结合方式的精度可达到纳秒级,但需要外接硬件,成本高,开发周期长并且复杂^[3]。PTPd2 是 IEEE 1588v2 协议的纯软件实现方式,同步精度可达亚微秒级^[4],虽达不到纳秒级,但是不需要外接硬件,

开发相对容易且易于实现。

3种实现方式虽有所不同,但同步原理是相同的。图1为IEEE 1588v2时钟同步原理图,IEEE 1588v2的时间同步机制分为一步式和两步式。一步式由同步报文直接携带主时钟时间戳送至从时钟。本文用两步式时间同步机制,同步机制如下:初始化网络,选取2个普通时钟,将其分别确定为主时钟(OC-1)和从时钟(OC-2);然后进行主从时钟间的时钟同步,从时钟首先获得从时钟接收同步报文的时间戳 t_2 ,随后获得主时钟发送同步报文的时间戳 t_1 ,此时,从时钟需要向主时钟发送一个延时请求报文,同时记下从时钟发送延时请求报文的时间戳 t_3 ,主时钟接收到延时请求报文再向从时钟发送一个延时请求响应报文,其中包含主时钟接收延时请求报文的时间戳 t_4 ;根据获取的时间戳 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 可得主时钟到从时钟之间的传输时延 Td_{AB} 与从时钟到主时钟之间的传输时延 Td_{BA} ,即可计算出主从时钟之间的时间偏差 $Offset$ 。计算方式如下:

$$Td_{AB} + Offset = t_2 - t_1 \quad (1)$$

$$Offset - Td_{BA} = t_3 - t_4 \quad (2)$$

由此可得:

$$Offset = \frac{t_2 - t_1 + t_3 - t_4}{2} + \frac{Td_{BA} - Td_{AB}}{2} \quad (3)$$

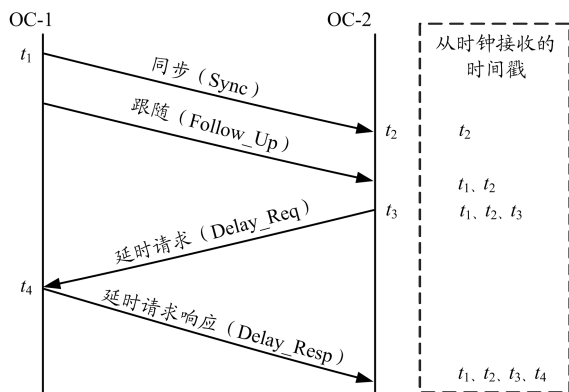


图1 IEEE1588v2时钟同步原理

IEEE官方通常认为IEEE 1588v2时钟同步的通信链路是对称的,即 $Td_{AB} = Td_{BA}$ 。那么时间偏差的计算方式就会变为:

$$Offset = \frac{t_2 - t_1 + t_3 - t_4}{2} \quad (4)$$

但实际上 Td_{AB} 与 Td_{BA} 不可能恰好相等,任何情况下 Td_{AB} 与 Td_{BA} 的不相等都会导致时间偏差的计算结果与实际不符。如果 Td_{AB} 与 Td_{BA} 的差值为纳秒级,则可以忽略不计,但实际上 Td_{AB} 与 Td_{BA} 的差值都远大于

纳秒级,会导致计算出的主从时钟之间的时间偏差并不准确^[5]。由于 Td_{AB} 和 Td_{BA} 都是已知的,因而可以对 Td_{AB} 与 Td_{BA} 的差值进行补偿,消除该差值能够更好地校正传输时延。

本文主要描述在运用PTPd2实现主从时钟同步的基础上,如何构建一种三层BP神经网络模型,对 Td_{AB} 与 Td_{BA} 的差值进行补偿。

2 三层BP神经网络模型的构建及时延补偿方法

2.1 三层BP神经网络模型的构建

若想校正非对称链路造成的时间偏差,必须要有主时钟到从时钟的传输时延 Td_{AB} 与从时钟到主时钟的传输时延 Td_{BA} 的准确记录,否则拟合出的BP神经网络模型会有误差。产生的误差会影响链路非对称性的校正,需要BP神经网络进行误差信号反向传播,对各层神经元权值进行校正。PTPd2在结束同步过程后生成的日志文件中含有准确的主控到从属及从属到主控的单向链路时延,因此将PTPd2时钟同步得到的单向链路时延作为BP神经网络的训练集,即能得到准确的链路非对称性校正模型,对链路的非对称性进行补偿。BP神经网络构造的数学模型为:

$$T_{cn}(k) = F(i), \quad i=1, 2, \dots, k-1 \quad (5)$$

其中, F 为BP神经网络训练模型, T_{cn} 为 k 时刻对非对称链路时间偏差的补偿值。

BP网络能学习和存贮大量的输入-输出模式映射关系,而无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程^[6]。设计BP神经网络的过程中需要从网络结构、激励函数和学习算法3个方面进行设计。

①网络结构:BP神经网络神经元层数越多,拟合精度越高。但是神经元层数过多会导致BP神经网络训练集的训练速度变慢,甚至产生过拟合的情况。考虑BP神经网络数学模型输入与输出的变量关系,由于补偿的计算方式相对简单,故选用单隐层构建BP神经网络模型。

②激励函数:在训练BP神经网络时,激励函数一般是固定的,通常设置为Sigmoid型函数。因此,隐含层采用Log-Sigmoid函数。根据非对称链路时延补偿方式,输出层采用purelin线性传递函数。

③学习算法:由于PTPd2生成的是纯数据文本,文件很小,因此采用小规模BP神经网络即可。小规模BP神经网络一般采用Levenberg-Marquardt算法,因为该算法收敛速度快,适合计算方式简单、数据量不

是很大的 BP 神经网络模型。

BP 神经网络模型的拓扑结构一般包含 3 个层次,即输入层、隐含层和输出层。根据上文分析结果,需要补偿的为主时钟到从时钟的传输时延 T_{dAB} 与从时钟到主时钟的传输时延 T_{dBA} 的差值。构建的模型为三层 BP 神经网络模型,其中, $X_0, X_1, \dots, X_n$ 为网络输入, $Y_0, Y_1, \dots, Y_n$ 为网络输出,符号 f 表示非线性激活函数,其拓扑结构如图 2 所示。

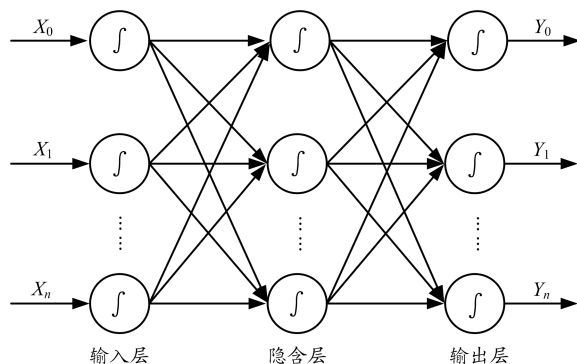


图 2 三层 BP 神经网络拓扑结构

2.2 三层 BP 神经网络模型的时延补偿方法

三层 BP 神经网络模型的时延补偿分为同步授时与同步守时 2 种情况。当 PTPd2 同步程序持续运行时,时钟处于同步授时状态。此时,从 PTPd2 生成的同步文件中提取出主控到从属及从属到主控的单向链路时延的值作为数据样本保存。当数据样本饱和时,将进行 n 次时钟同步得到的 T_{dAB} 与 T_{dBA} 的值送入输入层 X_n ,对 $\frac{T_{dBA}-T_{dAB}}{2}$ 的值进行计算。随后将计算得出的数值送入隐含层,对该值进行取反计算即为非对称链路时间偏差的补偿值,将其记为 T_{cn} 。最后将补偿值 T_{cn} 由隐含层送入输出层,输出层 Y_n 将 T_{cn} 输出用于补偿当前非对称链路时间偏差并将其进行记录,送入训练集,以便对时钟同步时延进行预测及补偿。校正链路不对称性时延后,结束训练,等待下一次数据样本的输入^[7-9]。由此可得经三层 BP 神经网络模型校正后的时间偏差计算公式为:

$$Offset = \frac{t_2 - t_1 + t_3 - t_4}{2} + \frac{T_{dBA} - T_{dAB}}{2} + T_{cn} \quad (6)$$

当 PTPd2 同步过程结束后,由于接收不到数据样本的更新,三层 BP 神经网络模型处于同步守时状态。此时,三层 BP 神经网络模型可提取训练集中的历史数据,将历史数据导入三层 BP 神经网络模型,按照上述过程进行时间偏差补偿值的计算,分析补偿值样本

数据的正态分布情况,选择出现概率最大的数值对下一次 PTPd2 时钟同步的非对称链路时间偏差进行预测。当下次 PTPd2 时钟同步开始时,若预测值与实际偏差值不符,则需进行误差信号反向传播。在进行误差信号反向传播的过程中逐层修正各层权值,从而获得更为精确的时间偏差补偿值。

3 PTPd2 时钟同步

3.1 PTPd2 时钟同步过程

PTPd2 能够提供以太网 LAN 连接计算机的精确时间协调,主要用于仪表和控制系统。PTPd2 可以将一组 LAN 连接的计算机的时钟相互协调,已经证明:即使在有限的平台上也能实现亚微秒级协调^[10]。首先,2 台计算机均安装虚拟机 VMware Workstation Pro,然后挂载 ubuntu16.04 LTS 64 位的镜像文件进行 linux 系统安装。其中,一台计算机的处理器为 Intel Core i5-7300HQ,主频为 2.50 GHz;另一台计算机的处理器为 AMD Ryzen 5 1600,主频为 3.20 GHz。将 2 台计算机虚拟机中的网络适配器均设置为桥接模式(自动)。接着调用指令,查看 2 台计算机虚拟机中的 ip 地址前三位是否一致,广播地址是否一致,子网掩码是否一致。并在 windows 下对 2 台计算机虚拟机中的 ip 地址进行“ping”,若能“ping”通,证明 2 台计算机的虚拟机网络可以进行交互,则达到了进行实验的前提。

将 2 台计算机用网线连接至一个五网口交换机,则构成一个三节点的网络拓扑结构,网距为 4 m。网络测试条件如下:网线长度为 2 m,同步间隔为 1 s,网络速度为 20 Mb/s,测试时间为 4500 s,温度为 25 °C。

在以上测试条件下,开始进行 PTPd2 同步。由于 PTPd2 必须在获取 root 权限的情况下运行,因此需要先在 2 台计算机的虚拟机中获得 root 权限,然后“make”出 PTPd2 的可执行文件,调用 PTPd2 可执行文件可知 PTPd2 默认以 UDP/IP 协议运行,使用的是端到端(E2E)模式。

由于 PTPd2 具有最优主时钟(BMC)算法^[11],因此在 2 台计算机同时运行 PTPd2 时,既可以指定一台计算机为主时钟,另一台为从时钟;又可以将 2 台计算机皆指定为主时钟,由最优主时钟算法根据当前 2 个主时钟的网络质量,择优选取一台为主时钟,另一台为从时钟。

在 2 台计算机上同时输入运行 PTPd2 的指令,为了详细观察 PTPd2 时钟同步情况,用网络协议抓包软

件 Wireshark 对当前正在交互的报文进行捕获。由捕获的报文信息详情可知,PTPv2 代表协议版本为 PTP 协议第二版,即 1588v2。在 Info 一栏可见成功捕获到了 Sync、Follow_Up、Delay_Req、Delay_Resp 和 通知 (Announce) 5 种报文。验证了 1588v2 时钟同步原理,同时证明已经成功进行了 PTPd2 时钟同步。

Announce 报文是成功调用最优主时钟算法的证明。各时钟节点之间通过交互的 Announce 报文中所携带的最优时钟优先级、时间等级和时间精度等信息,最终选出一个节点作为 PTP 域的最优时钟,与此同时,各节点之间的主从关系以及各节点上的主从端口也可确定。此后,主节点会定期发送 Announce 报文给从节点,如果在一段时间内,从节点没有收到主节点发来的 Announce 报文,便认为该主节点失效,然后会重新进行最优时钟的选择^[12,13]。

Wireshark 能分析出报文的诸多信息,以同步报文为例,Wireshark 能解析出同步报文的报文格式,如图 3 所示。在标志位(flags)中发现 PTP_TWO_STEP:True,证明了时钟同步方式为两步式,即同步报文不携带从主时钟发送报文时记录的时间戳,只对到达从时钟的时间戳进行记录,而将主时钟发送报文时记录的时间戳交由跟随报文携带传送给从时钟。OriginTimestamp 即为从主时钟发送的同步报文到达从时钟时记录的时间戳,时间戳的记录分为两部分,一部分为秒级,另一部分为纳秒级,但能发现纳秒级的后三位为 000,因此证实了 PTPd2 的同步精度为亚微秒级。

3.2 PTPd2 时钟同步精度测试

PTPd2 对在 PTPd2 运行的过程中产生的数据进

```

▼ Precision Time Protocol (IEEE1588)
  ▼ 1000 .... = transportSpecific: 0x8
    ...0 .... = V1 Compatibility: False
    .... 0000 = messageId: Sync Message (0x0)
    .... 0010 = versionPTP: 2
    messageLength: 44
    subdomainNumber: 0
  ▼ flags: 0x0200
    0... .. = PTP_SECURITY: False
    .0.. .. = PTP profile Specific 2: False
    ..0. .... = PTP profile Specific 1: False
    .... 0... = PTP_UNICAST: False
    .... ..1. .... = PTP_TWO_STEP: True
    .... ..0 .... = PTP_ALTERNATE_MASTER: False
    .... ..0. .... = FREQUENCY_TRACEABLE: False
    .... ..0 .... = TIME_TRACEABLE: False
    .... ..0... = PTP_TIMESCALE: False
    .... ..0.. = PTP_UTC_REASONABLE: False
    .... ..0. = PTP_LI_59: False
    .... ..0 = PTP_LI_61: False
  > correction: 0.000000 nanoseconds
  ClockIdentity: 0x000c29fffe3941dc
  SourcePortID: 1
  sequenceId: 36
  control: Sync Message (0)
  logMessagePeriod: 0
  originTimestamp (seconds): 1552380575
  originTimestamp (nanoseconds): 460025000
  
```

图 3 同步报文报文格式

行记录,可以通过调用指令启动 PTPd2 统计信息日志,并设置该日志文件的文件名以及储存该日志的文件路径。在接收到同步报文和延时请求响应报文时,2 台计算机中作为从时钟的那台会记录时钟同步信息。为了排除实验数据样本的单一性和偶然性,需持续进行时钟同步 1 h 以上,随后在 2 台计算机上结束 PTPd2 的运行进程。打开日志文件路径,会发现生成一个不可修改的数据文本文件。打开文件,发现日志详细记载时间戳、PTPd2 端口状态和平均路径延时等时钟同步过程中生成的数据。信息日志文件数据为逗号分隔值(CSV)格式,因此将该文件导入 Matlab 2016b,对数据进行分析并绘制时间偏差曲线。绘制出的 PTPd2 同步精度曲线如图 4 所示。

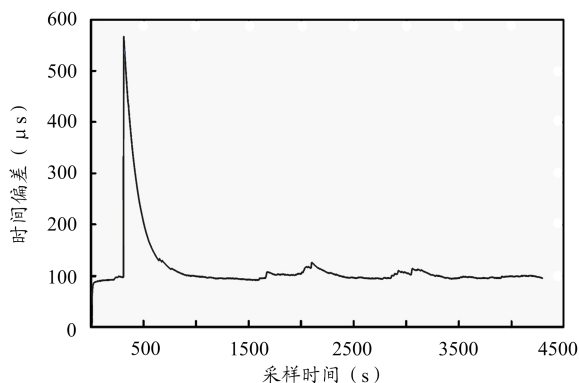


图 4 PTPd2 同步精度曲线

从图 4 可以看出,在采样时间 0~500 s 中时间偏差出现了很大跳变,最大的时间偏差达到了 570 μ s,采样时间在 500 s 以后时间偏差趋于稳定,虽然有小波动但是大多时刻时间偏差均维持在 100 μ s 左右。对同步过程进行分析,得出的结论如下:

①为了构建非对称链路,2 台计算机并没有采用直连方式,而是经过交换机进行交互,经交换机转发的初期报文明显增加了链路不对称时延。

②为了能够实时分析报文,必须使用 Wireshark, Wireshark 只能在 Windows 下运行,因此采用虚拟机运行 linux 系统。Windows 的一些网络进程会抢占 PTPd2 报文发送的优先级,使得同步精度降低。

③由于实验条件限制,所采用的网络网速只能达到 20 M,若采用百兆或千兆网络,可以改善同步精度。

④2 台计算机处理器不同,并且主频不一致,会对同步过程中生成软件时间戳的频率产生影响,从而影响时钟同步中的频率同步。

3.3 PTPd2 不对称时延的校正

首先,运用前文计算得出的三层 BP 神经网络补

偿方法在 Visual Studio 2015 中编写算法程序,在上述实验环境下,将上述时钟同步生成的日志文件导入 Visual Studio 2015,随后调用三层 BP 神经网络算法程序对导入的数据文件进行数据处理,新生成一个修正后的数据日志文件。将修正后的日志文件导入 Matlab 2016b 并绘制时间偏差曲线,与之前生成的时间偏差曲线进行对比。经过校正后的时间偏差曲线如图 5 所示。

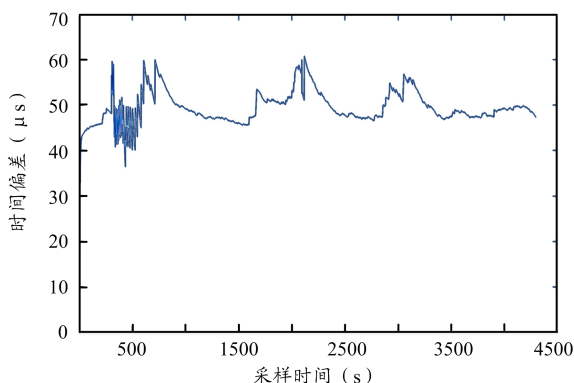


图 5 校正后的同步精度曲线

将校正后的时间偏差曲线与校正前的时间偏差曲线进行对比,以采样时间 300 s 为采样频率,对校正前与校正后的时间偏差曲线进行采样并进行数据对比,原始数据与引入三层 BP 神经网络算法校正后的数据对比情况如图 6 所示。

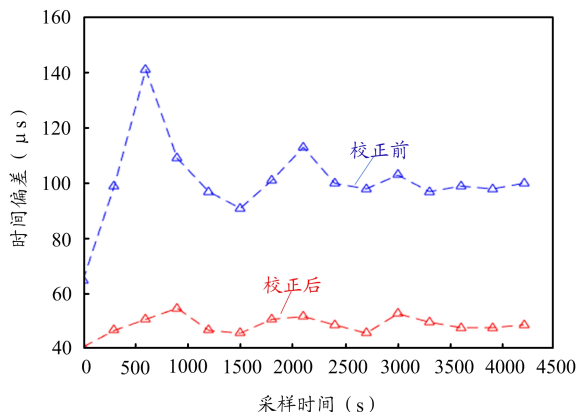


图 6 引入三层 BP 神经网络算法校正前、后数据对比

由校正后的同步精度曲线可以看出,在时钟同步过程中虽偶有波动,但波动幅度都不是很大,采样节点时间偏差由 $100\ \mu\text{s}$ 校正至 $50\ \mu\text{s}$ 左右,并且时间偏差没有像校正前出现巨大的跳变,最大时间偏差为 $61\ \mu\text{s}$ 。由此可见本文设计的方法较好地校正了非对称链路传输时延,使得同步精度达到了 PTPd2 官方宣称的亚微秒级。

4 结束语

本文基于 IEEE 1588v2 的纯软件实现方式 PTPd2,主要针对非对称链路传输时延问题,构建了一种三层 BP 神经网络模型校正主从时钟时延差值并进行实验验证。实际时钟同步精度曲线表明:在相同的实验环境下,本方法能够消除非对称链路通信过程中较大的波动,使整体时间偏差趋于稳定;同时提高非对称链路的时钟同步精度,由原来大多时刻时间偏差为 $100\ \mu\text{s}$ 提升至 $50\ \mu\text{s}$,从而更好地校正传输时延。本文设计的方法在非对称链路的情况下达到了 PTPd2 官方宣称的亚微秒级同步精度,对推动改进非对称链路时延计算方式有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 李培基,李卫,朱祥维,等. 网络时间同步协议综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(3):30-38.
- [2] 梅军,徐迅,钱超,等. 应用于配电网的时钟偏移估计的 IEEE 1588 改进方案[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(9):83-89.
- [3] 张大帅,葛文萍,车全江,等. 基于 IEEE1588 同步协议的本地时钟频率控制算法[J]. 计算机工程与设计,2016,37(2):308-312.
- [4] IEEE Std. 1588v2-2008, IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems [S]. Piscataway: IEEE, 2008: 111-123.
- [5] 黄华明. IEEE1588V2 路径延迟自动测量和非对称性补偿[J]. 光通信技术,2016,40(2):56-59.
- [6] 王志斌,孔亚楠,刘永成,等. 遗传算法优化 BP 神经网络的大功率 LED 结温预测[J]. 光电子·激光,2014,25(7):1303-1309.
- [7] PENG X, MEN Z, WANG X, et al. The ship motion prediction approach based on BP neural network to identify Volterra series kernels[C]//Control and Decision Conference (CCDC 2014), May 31-June 2, 2014, Changsha, China. Piscataway: IEEE, 2014.
- [8] QIAN K, WANG T, TANG T, et al. A novel Local BP Neural Network model and application in parameter identification of power system [C]//Construction Conference (CCC 2014), July 28-30, 2014, Nanjing, China. Piscataway: IEEE, 2014.
- [9] 李依泽,陆超,王印峰,等. 基于 Kalman 滤波与神经网络的高精度同步时钟算法[J]. 电网技术,2019,43(3):777-784.
- [10] 景振华. 基于 ARM9 的 B 类 LXI 信号发生器的研究与实现 [D]. 西安:西安电子科技大学,2013.
- [11] 苏宇,胡玢,张涛,等. 基于 PTPd 的精准时钟同步技术的研究[J]. 计算机技术与发展,2016,26(1):175-180.
- [12] WANG T, CHANG F. Application of PTPd to find the threshold of precision time synchronization [C]//System Science and Engineering (ICSSE 2011), June 8-10, 2011, Macao, China. Piscataway: IEEE, 2011.
- [13] KOVACSHAZY T, FERENCZ B. Performance evaluation of PTPd, a IEEE 1588 implementation, on the x86 Linux platform for typical application scenarios [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2012), May 13-16, 2012, Graz, Austria. Piscataway: IEEE, 2012.