

# 不同机载测试网络环境对 IEEE 1588 时钟同步系统性能的影响分析

谷士鹏, 刘明, 支高飞

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

**摘要:** 为深入研究不同机载测试网络环境对 IEEE 1588 时钟同步系统性能的影响, 提出了使用正态分布曲线描绘时钟同步误差的方法; 通过分析 IEEE 1588 时钟同步系统的工作原理, 决定采用硬件方式测量时钟同步误差分布, 并利用统计学的分析方法, 分析不同的机载测试网络环境对 IEEE 1588 时钟同步系统性能的影响; 分析结果表明网络拓扑结构、网络节点负载和外部环境温度都对 IEEE 1588 时钟同步系统的性能有一定影响, 其中网络拓扑结构的变化对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响比较大; 这一研究成果对网络化机载测试系统的设计与使用具有一定的借鉴意义。

**关键词:** IEEE 1588; 机载测试网络环境; 统计学; 误差分布

## Impact Analysis for Capability of IEEE 1588 Clock Synchronization System from Different Flight Test Networked Condition

Gu Shipeng, Liu Ming, Zhi Gaofei

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** In order to study impact analysis for capability of IEEE 1588 clock synchronization system from different flight test networked condition, the method of using the normal distribution curve to depict clock synchronization error is proposed. By analyzing the theory of the precision of IEEE 1588 clock synchronization system, the method of hardware way is decided to measure the error distributing of the clock synchronization system. By the statistic analysis means, impact for capability of IEEE 1588 clock synchronization system from different flight test networked condition is analyzed. The data result indicates that networked topology, network node load and exterior temperature all have same effect on capability of IEEE 1588 clock synchronization system. And network topology changes will affect a large extent IEEE 1588 clock synchronization accuracy. The research results have certain significance to the design and use of airborne network test system.

**Keywords:** IEEE 1588; networked flight test system; statistics; error distributing

## 0 引言

随着飞行试验中测试需求的急速增长, 传统的 PCM 机载测试系统在数据容量和传输效率上都无法满足测试任务的需求。中国飞行试验研究院自 2012 年开始逐步构建起网络化机载测试系统, 以替代传统的 PCM 机载测试系统, 并采用了 IEEE 1588 时钟同步系统完成系统授时。IEEE 1588 时钟同步系统具有精度高、无需专用的对时网络、实现方便的优点, 可以达到 100 纳秒级的同步精度<sup>[1]</sup>。

然而, 网络化机载测试系统在实际应用中呈现出网络拓扑结构、网络节点负载和外部使用环境各不相同的情况。如何避免因网络拓扑结构和网络节点负载设计不合理而导致的时钟同步系统性能下降, 是网络化机载测试系统设计中必须考虑的问题。同时, 外部使用环境对时钟同步系统同步性能的影响也是不容忽视的问题。

本文从中国飞行试验研究院网络化机载测试系统的实际使用情况出发, 研究不同网络环境对 IEEE 1588 时钟同步系统性能的影响。

## 1 IEEE 1588 时钟同步系统工作原理及误差分析

### 1.1 IEEE 1588 时钟同步系统工作原理

IEEE 1588 时钟同步系统通过主从设备间报文消息传递, 计算时间偏差来达到主从设备时钟同步。通过最佳主时钟 BMC (Best Master Clock) 算法, 可以确定域内的主时钟。主时钟以固定的周期发送包含有时间戳的同步报文 (Sync); 需要同步的从时钟向主时钟发送延迟请求报文 (Delay-Req), 并根据收到的跟随报文 (Follow-up)、延迟应答报文 (Delay-Resp) 和自身发送消息的时间, 计算出与主时钟的时间偏差和线路延迟<sup>[2-3]</sup>。

IEEE 1588 时钟同步系统在进行时钟同步之前, 需要先进行调谐, 并利用调谐的结果修正从时钟产生的时间戳<sup>[4]</sup>。整个同步过程如图 1 所示。在这里, 假设数据传输线路是对称的。

主时钟周期性的发出同步报文。从时钟接受同步报文并记下接收到同步报文的时间值  $T_2$ , 主时钟紧接着发送跟随报文, 它将同步报文发出时的准确时间  $T_1$  传送给从时钟。为了防止报文发送时产生碰撞, 在从时钟接收到跟随报文后并不是立即发送延迟请求报文, 而是随机的等待一段时间。从时钟记录下发出延迟请求报文的时间值  $T_3$ , 主时钟接收到延迟请求报文后记录下时间值  $T_4$ , 并通过延迟请求响应报文将  $T_4$  值传送给从时钟。这样从时钟就拥有了 4 个时间值:  $T_1$ 、 $T_2$ 、

收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2015-12-15。

作者简介: 谷士鹏 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事飞行试验、测试系统方向的研究。

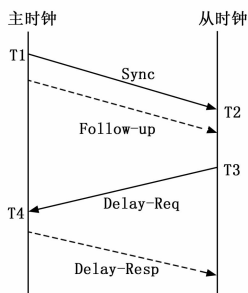


图 1 IEEE 1588 时钟同步协议基本原理

$T_3$ 、 $T_4$ <sup>[5]</sup>。

$T_1 - T_{\text{offset}} + T_{\text{delay}} = T_2$  从时钟与主时钟之间的时间偏差记为  $T_{\text{offset}}$ ，线路延迟记为  $T_{\text{delay}}$ ，则

$$T_1 + T_{\text{offset}} + T_{\text{delay}} = T_2 \quad (1.1)$$

$$T_3 + T_{\text{offset}} + T_{\text{delay}} = T_4 \quad (1.2)$$

由上述方程可得

$$T_{\text{offset}} = \frac{T_1 - T_2 + T_4 - T_3}{2} \quad (1.3)$$

$$T_{\text{delay}} = \frac{T_2 - T_1 + T_4 - T_3}{2} \quad (1.4)$$

从时钟根据  $T_{\text{offset}}$  和  $T_{\text{delay}}$  的值调整本地时钟就可以实现与主时钟的同步。

### 1.2 时钟同步误差分析

由 IEEE 1588 时钟同步系统工作原理可知，IEEE 1588 时钟同步系统的同步误差与主从时钟调谐一致性、时间戳的生成方式、主时钟的基准时间、通信路径的对称性、网络拓扑结构、网络节点负载情况等密切相关。

主从时钟调谐一致性是进行时钟同步的基础。在高性能的数据采集系统中，从时钟可以迅速跟踪到主时钟的时间变化率，从时钟通过改变自身定时器的计数值可以实现主从时钟调谐。

IEEE 1588 时钟同步协议是利用硬件来记录报文离开和进入的时间点，即在最靠近网口的物理层来记录时间点，这样就大大地减少了网络协议栈的延迟与抖动给时间同步精度造成的影响。这也是 IEEE 1588 时钟同步协议比 NTP 协议具有更长时间同步精度的主要原因。

在网络化机载测试系统中，主时钟的基准时间主要由 GPS 提供，高精度的 GPS 时间可以保障基准时间的稳定和可靠。

网络化机载测试系统的通信路径一般不会发生变动，在通信路径不对称性相对固定的情况下，可以忽略链路延迟在传输方向上的差异。

在 IEEE 1588 时钟同步的过程中，点对点的连接可以提供主时钟和从时钟之间最佳的同步精度。然而，在网络化机载测试系统的实际组网情况中，存在一个主时钟对多个从时钟进行时钟同步的情况。在 IEEE 1588 时钟同步协议中，为解决上述问题引入了边界时钟的概念。边界时钟一般是一个网络交换机，含有多个 PTP 时钟端口，主时钟先与边界时钟的一个 PTP 时钟进行同步，此时边界时钟扮演的是从时钟的角色。等边界时钟与主时钟完成时钟同步之后，边界时钟将作为主时钟与连接到其上面的各从时钟进行时间同步，整个过程如图 2 所示。在网络化机载测试系统中，由于边界时钟的存在而导致

的时钟抖动将会影响时钟同步精度。

在理想的 IEEE 1588 时钟同步系统中，适中的网络负载不会影响到报文消息的交互。但是随着网络化机载测试系统的数据采样率大幅提高，网络负载呈现高增长的模式，若主从时钟对报文消息接收出现迟滞，那么就会影响主从时钟的对时精度。

在此，本文主要分析网络拓扑结构和网络节点负载情况对 IEEE 1588 时钟同步误差的影响。在实际使用中，外部使用环境对网络化机载测试系统产生多方面的影响，也必将对 IEEE 1588 时钟同步系统的性能有一定影响。

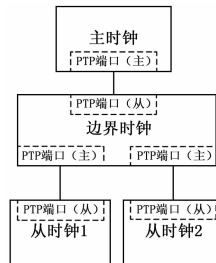


图 2 主从层级关系示意图

## 2 时钟同步误差测量

### 2.1 建立不同的网络环境

对于网络化机载测试系统，网络环境分为网络本身环境和外部使用环境两种。网络本身环境可以分为以下几种情况，如表 1 所示。

表 1 几种网络本身环境

网络节点负载		网络拓扑结构	
		星形结构	树形结构
低 (1%)		I	III
高 (10%)		II	IV

外部环境温度可以分为低温 ( $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、常温 ( $10\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、高温 ( $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 3 种情况。

本文首先以网络拓扑结构为基础设计对比试验，分别研究网络拓扑结构和网络节点负载对时钟同步精度的影响，之后研究表 1 中 IV 情况下外部环境温度对时钟同步精度的影响。实验室建立的星形网络的结构示意图如图 3 左侧所示，树形网络结构的结构示意图如图 3 右侧所示。其中，DAU 表示网络化机载测试系统中数据采集单元。

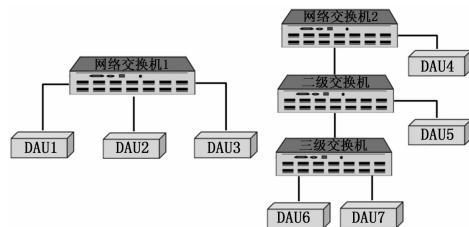


图 3 两种网络结构示意图

### 2.2 测量时钟同步误差

IEEE 1588 时钟同步系统的同步误差主要有两种获取手段：软件测量和硬件测量。软件测量首先在主时钟和从时钟内保存同步报文、跟随报文、延迟请求报文和延迟响应报文中的时间戳，然后通过特定的算法计算出时钟同步误差。硬件测量

通过外部的高带宽示波器, 直接测量网络节点的主帧脉冲输出, 通过对比主帧脉冲输出计算出时钟同步误差。本文选择使用硬件测量的方法测量时钟同步误差。

如图 3 所示, 网络交换机作为时钟同步的主时钟源, 使用高精度 GPS 时间去同步其他设备的时钟。将主、从时钟的时钟同步 1PPS 主帧脉冲输出连接到示波器, 利用高带宽示波器, 可以非常清楚地测量出两个时钟同步 1PPS 主帧脉冲的上升沿时间差  $\Delta$ , 此上升沿时间差即为时钟同步误差。我们将主时钟的同步报文发送周期设定为 2 秒, 发送周期太长则不能保证足够的同步精度<sup>[6]</sup>。

一组典型的 IEEE 1588 时钟同步误差测量如图 4 所示。

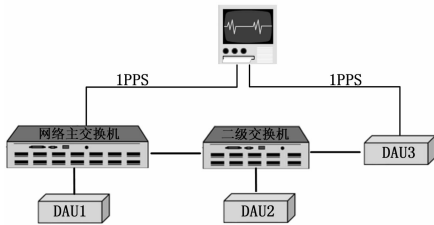


图 4 IEEE 1588 时钟同步误差测量示意图

为了保证时钟同步误差测量的准确性, 在每组对比试验中, 每隔 4 s 记录一次时钟同步误差, 每组对比试验共记录 500 个误差数据。足够多的误差样本才能保障后续利用统计学的规律进行数据分析。示波器具有的单一序列功能可以实现时钟同步误差的瞬时测量和记录。

### 3 数据结果分析

#### 3.1 计算平均值和标准差

由于时钟同步误差属于不确定性信号, 我们使用统计学中的平均值和标准差来进行数据结果分析。标准差是方差的算术平方根, 是一组数据平局之分散程度的一种度量, 在概率统计中常用于反映一个数据集的离散程度。对于 IEEE 1588 时钟同步误差, 其平均值越小说明时钟同步精度越高; 其标准差越小, 说明时钟同步的抖动性越小<sup>[7]</sup>。

本文通过对每组对比试验记录下的 500 个时钟同步误差求取平均值和均方差, 以此来评估 IEEE 1588 时钟同步系统在不同网络环境下的性能和不同网络环境对时钟同步误差的影响。所有实验组误差数据经过处理后如表 2 所示。

表 2 不同网络环境下时钟同步误差的平均值和标准差

实验组序号	外部环境温度	网络本身环境	测量节点	平均值	标准差
1	常温	I	交换机 1——DAU1	32.20	21.41
2	常温	II	交换机 1——DAU1	37.79	21.11
3	常温	III	交换机 2——DAU4	33.05	24.01
4	常温	III	交换机 2——DAU5	39.53	31.58
5	常温	III	交换机 2——DAU6	44.77	38.88
6	常温	IV	交换机 2——DAU4	36.08	25.26
7	常温	IV	交换机 2——DAU5	41.35	32.68
8	常温	IV	交换机 2——DAU6	45.45	44.95
9	低温	IV	交换机 2——DAU4	25.33	35.08
10	高温	IV	交换机 2——DAU4	47.58	49.89

#### 3.2 网络节点负载影响

在网络拓扑结构固定时, 将对对比实验组数据处理结果在 MATLAB 中画出正态分布曲线, 如图 5 所示。

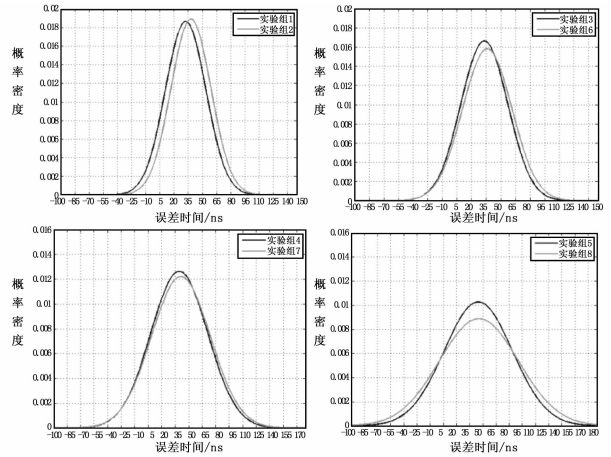


图 5 网络节点负载对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响

图 5 中, 深色曲线与浅色曲线分别代表网络节点低负载与高负载的情况。可以看出, 网络节点负载对 IEEE 1588 时钟同步精度有一定影响, 当网络节点负载提高时, IEEE 1588 时钟同步误差有所增大, 时钟抖动也略有增加。

#### 3.3 网络拓扑结构影响

在网络负载一定的情况下, 我们分析一下网络拓扑结构对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响。

图 6 所示为星形网络拓扑结构和树形网络拓扑结构的时钟同步误差数据处理结果。蓝色曲线与绿色曲线分别代表星形网络拓扑结构与树形网络拓扑结构的情况, 在路由层级相同的情况下, 树形网络拓扑结构中 IEEE 1588 时钟同步性能有所下降。

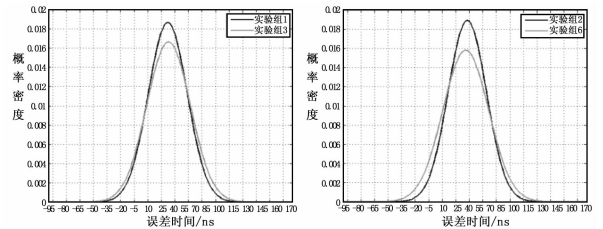


图 6 网络节点负载对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响 (1)

图 7 所示为在树形网络拓扑结构不同层级的时钟同步误差数据处理结果。网络节点的情况如图 3 右侧所示。由图 7 可以看出, 随着路由层级的增加, IEEE 1588 时钟同步性能不断下降, IEEE 1588 时钟同步误差不断增大, 时钟抖动迅速增加。

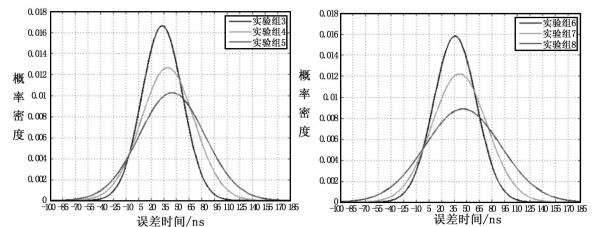


图 7 网络节点负载对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响 (2)

发监听事件, 会看到宝鸡市进入视野中央, 同时出现宝鸡市各个县区的边界线以及标注。如果点击任意县区标注, 比如太白县, 会出现信息窗口, 信息内容有太白县的土壤温度、水分、pH 值、电导率以及本县水分平均值; 点击宝鸡市区域部分, 回到陕西省地图。

作为土壤墒情管理系统中最具特点的一部分, 地图模块具有更直接, 更鲜明, 更快速, 更便捷的特点, 希望它的功能给大家带来方便与惊喜。

### 4 结论

将湿度传感器采集到的不同深度不同时间的数据通过 GSM 短信模块传输到监控中心的 mysql 数据库中作为初始数据, 再通过编程对初始数据进行查看甚至计算得到需要的数据显示在对百度地图进行二次开发后的 GIS 地图上, 用户直观高效的查询不同区域不同时间的土壤墒情, 进而决定是否对土壤进行灌溉, 系统还提供了额外的扩展能力, 可根据监测需求增加土壤的其他参数, 比如温度、PH 值等。经过测试, 系统运行良好, 能够直观高效对土壤墒情进行监测。

(上接第 27 页)

### 3.4 外部环境温度影响

最后, 我们分析一下外部环境温度对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响。如图 8 所示, 外部环境温度的升高导致 IEEE 1588 时钟同步性能下降, IEEE 1588 时钟同步误差有所增大, 时钟抖动增加。

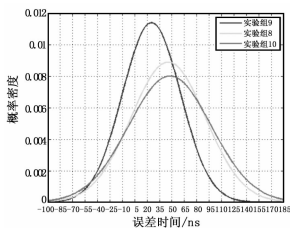


图 8 外部环境温度对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响

### 3.5 结论

通过以上几组数据的分析, 可以看出, 网络节点负载增大和外部环境温度升高对 IEEE 1588 时钟同步精度都有一定的影响, 而网络拓扑结构的变化对 IEEE 1588 时钟同步精度的影响比较大。这是因为在复杂的网络拓扑结构中, 边界时钟引起的时钟抖动对时钟同步的精度有比较大的影响。为了改善边界时钟引起的时钟抖动, 在 V2 版本中增加了透明时钟的概念。

因此, 在网络化机载测试系统设计中, 需要重点关注网络交换机的使用。为了保证采集数据的时间相关性, 应尽量使用简单的网络拓扑结构。即使因为减少了交换机的使用而导致网络节点的负载增大, 由于负载增大带来的影响相对于网络拓扑结构带来的影响要小的多。

同时, 需要关注高温环境对 IEEE 1588 时钟同步系统所带来的影响, 高温环境下 IEEE 1588 时钟同步系统的性能明显变差。

### 参考文献:

[1] 温学萍, 俞凤娟, 张 翔, 等. 农业物联网技术在宁夏设施农业中推广应用初探 [J]. 宁夏农林科技, 2014, 05: 13-14.  
 [2] 卢启福, 吴慕春, 胡月明, 等. 基于 TDR-3 的土壤水分传感器标定模型研究 [J]. 传感技术学报, 2009 (7): 1066-1070  
 [3] 张瑞卿, 戈振扬, 于英杰, 等. 盆栽植物浇水智能测控系统 [A]. 中国农业机械学会. 2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集 [C]. 中国农业机械学会, 2012.  
 [4] 杨绍辉, 杨卫中, 王一鸣. 土壤墒情信息采集与远程监测系统 [J]. 农业机械学报, 2010 (9): 173-177.  
 [5] 韩 伟. 基于无线传感器网络的工业环境氨气泄露监测报警系统 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.  
 [6] 郭志伟, 张云伟, 李 霜, 等. 基于 GSM 的农田气象信息远程监控系统设计 [J]. 农业机械学报, 2009 (3): 161-166.  
 [7] 贾磊磊, 陈锡华, 熊 川. 验证码的模糊识别 [J]. 西昌学院学报 (自然科学版), 2010 (1): 60-62.  
 [8] 肖文汉, 吴孝斌, 曹莹莹, 等. 基于百度地图 API 的停车场寻车系统的设计 [J]. 计算机技术与发展, 2014 (4): 227-230.  
 [9] 彭 可, 范 平, 余 凯. 基于 Web 的 GPS 监控系统设计与实现 [J]. 湖北科技学院学报, 2014 (12): 237-238.

### 4 总结

高精度的时间同步系统是网络化机载测试系统的需要。本文首先分析了 IEEE 1588 时钟同步系统的工作原理和误差来源, 然后明确了时钟同步误差的测量方法。在获取到误差样本数据之后, 本文通过统计学的分析方法, 给出了各组试验中的平均值和标准差, 并使用 Matlab 绘制了正态分布曲线。从实验室测试的情况来看, 网络节点负载和外部环境温度对 IEEE 1588 时钟同步精度有一定影响, 而复杂的网络拓扑结构会使时钟同步精度迅速下降。本文的研究成果具有普适性, 对于规避不合理的网络化机载测试系统的设计和使用提供了经验, 同时为进一步研究 IEEE 1588 时钟同步系统作用机理奠定了基础。

### 参考文献:

[1] 师 伟, 刘 昕, 万晓东. 基于 IEEE 1588 同步协议的高空台采集同步系统开发 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (2): 476-472.  
 [2] 刘 巍, 熊浩清, 石 光, 等. IEEE 1588 时钟同步系统应用分析与现场测试 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (2): 127-131.  
 [3] 杨传顺, 彦廷江. IEEE 1588 协议在网络测控系统中的应用 [J]. 电讯技术, 2011, 51 (11): 84-88.  
 [4] 胡永春, 张雪松, 许伟国, 等. IEEE 1588 时钟同步系统误差分析及检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (21): 107-111.  
 [5] 周国平, 邹 磊. IEEE 1588 时间同步误差的研究 [J]. 山西电子技术, 2012, (2): 94-96.  
 [6] 李 芹, 沈鼎申, 宗俊丽, 等. 时间同步装置在不同网络环境下的性能研究 [J]. 电力系统通讯, 2011, 32 (226): 37-41.  
 [7] 彭 宇, 罗清华, 彭喜元. 网络化测试体系中不确定性数据处理方法浅析 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (1): 229-240.