

文章编号: 1001-893X(2011)04-0093-05

基于承载网的 IEEE1588 时间同步能力分析验证^{*}

杨淑媚¹, 王 凯²

(1. 中国电信股份有限公司北京研究院, 北京 100035; 2. 北京邮电大学 信息光子学与光通信研究院, 北京 100876)

摘 要: 为了满足通信网对时间同步的要求以及寻找 GPS 的备用方案, 提出了基于地面承载网的 IEEE1588 时间同步技术。在介绍 IEEE1588 时间同步技术的基础上, 全面归纳、分析了影响 IEEE1588 时间同步精度的因素。在实验室环境下设计了基于 WDM + MSTP 的组网方案, 并实现了 IEEE1588 时间同步信号的传送, 相位偏差小于 $1\ \mu\text{s}$, 验证了本方案的可行性。最后提出一种时间同步网模型, 为未来建设基于承载网的 IEEE1588 时间同步网提供了参考模板和依据。

关键词: 通信网; IEEE1588; 时间同步; WDM; MSTP; 承载网

中图分类号: TN915; TP393 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.04.020

IEEE1588 Time Synchronization Accuracy Analysis and Validation Based on Carrier Network

YANG Shu-mei¹, WANG Kai²

(1. China Telecom Corporation Limited Beijing Research Institute, Beijing 100035, China;

2. Institute of Optical Communication and Optoelectronics, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to satisfy the time synchronization in communication network, and also to find a backup solution for GPS, IEEE1588 time synchronization based on carrier network is proposed. On the basis of introducing IEEE1588 time synchronization technology, the factors influencing IEEE1588 time synchronization accuracy is summarized and analysed. Then transmission of IEEE1588 time synchronous signal is realized based on WDM + MSTP network in the laboratory, and the accuracy is less than $1\ \mu\text{s}$, which proves the feasibility of this solution. Finally, a new reference template for the time synchronous network is proposed, and suggestions for future construction of the IEEE1588 time synchronous network based on carrier network are given.

Key words: communication network; IEEE1588; time synchronization; WDM; MSTP; carrier network

1 引 言

目前, 3G、WiMax/LTE 等无线接入技术以及未来通信新业务均对通信网时间同步的指标提出了要求, 例如 CDMA2000 基站间时间误差应小于 $\pm 3\ \mu\text{s}$ 、TD-SCDMA 基站间时间误差应小于 $\pm 1.5\ \mu\text{s}$, 以满足基站切换/漫游、时隙对准等性能要求。目前, 国内广泛使用全球定位系统(GPS/“北斗”)对基站设

备进行同步, 虽然性能优越, 但也存在诸多不足: 当前暂时还没有与其同精度的备用方案, 若出现丢星对现有通信网系统来说是敏感的; 未来大量的基站建设需求, 其内置 GPS 配套设施的成本不容小觑; 另外, GPS 故障率高、维护困难、易受天气影响而且对基站的建设存在很多限制。因此, 新的时间同步技术亟待开发。

对运营商来说, 网络共享是降低建设、运营成本的一个通用方案。IEEE1588 可通过现有运营商已

^{*} 收稿日期: 2010-12-14; 修回日期: 2011-03-01

广泛覆盖的地面承载网来传送时间同步信息,理论上达到全网微秒级的时间同步精度,同时还具有配置简单、快速收敛、对网络带宽和系统资源消耗少等优点,作为时间同步备用方案增强了通信网络的健壮性,同时可节约成本,增强运营商的竞争力。

本文从影响 IEEE1588 时间同步精度的因素出发,重点对 WDM 透传网络、WDM + MSTP 混合组网中 IEEE1588 时间同步能力进行分析验证。同时,根据实验结果和方案缺陷对未来时间同步网建设提出建议。

2 IEEE1588 技术简介

IEEE1588 全称 IEEE1588 Precision Clock Synchronization Protocol,即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)。

IEEE1588 协议采用时间分布机制和时间调度概念,一个通信网中通信设备的时间报文通过交互而建立主从关系(Master - Slave),其中主时钟具有最高时钟精度,其影响整个系统的内在精度。一般在时间同步核心网选择 1 级铯原子钟,或 GPS/“北斗”作为主时钟,时间同步本地网可采用 GPS/“北斗”或 BITS 作为主时钟。而从时钟可使用普通振荡器,通过软件调度与主时钟保持同步,过程简单可靠。同现有广泛应用的网络时间协议(NTP)相比,NTP 是仅依靠软件实现的,一般在毫秒级精度,而 IEEE1588 可使用软件和硬件配合来完成其同步功能,因此可获得更精确的定时同步,一般为微秒级精度。这项技术主要包括主从同步过程、最佳主时钟(BMC)算法、边界时钟(BC)和透传时钟(TC)等内容。

其中,主从同步过程是通过 Sync、Follow up、Delay Req、Delay Resp 这 4 类报文携带精确的时间戳,经过交互后的校验来实现从时钟和主时钟的精确同步。其原理过程分为两个阶段:漂移测量阶段和时延测量阶段。通过携带精确时间戳的 4 类报文交互,最终可计算得到主时钟和从时钟的时间偏差 Offset、主/从时钟到从/主时钟的时延 Delay(实际包括链路传输时延和系统处理时延),进而从时钟的 PTP 应用软件就可调整本地时钟来实现与主时钟的精确同步^[1]。

3 影响 IEEE1588 时间同步精度的因素

3.1 时间戳机制

在 IEEE1588 系统中,时间戳机制分为硬件时间

戳和软件时间戳两种。理论上讲,时间同步系统设计时,产生或标记时间戳的位置越靠近物理层,上层协议栈所带来的时间抖动等影响就越小,精度就越高。硬件时间戳可使系统获得高同步精度(达纳秒级),实现方式是上层的 PTP 应用软件不直接进行时间戳的操作,而是通过一个底层硬件接口来收集产生或检测报文的时间戳信息,一般选择在物理层或数据链路层实现该机制^[2]。

软件时间戳是指在 PTP 应用层收集处理时间戳信息,同步精度可达到微秒级。该机制的优点:依赖于软件平台,不受硬件条件的约束,成本低,建设周期短。软件时间戳的方式,同步报文需要通过高层协议栈的处理,会产生时间抖动和系统处理时延(可能达毫秒级),从而影响同步精度。

3.2 同步报文间隔

在主从同步原理中的漂移测量阶段,主时钟是按照一定的间隔时间(默认 2 s),采用组播或单播方式(IEEE1588v2 支持)周期性地向相应的从时钟发出同步报文(Sync Message),其中 IEEE1588v2 支持同步间隔小于 1 s 的应用^[3]。但与漂移测量的周期性机制不同,时延测量过程是不规律进行的,其间隔时间默认 4 ~ 60 s。这样的好处是占用较少网络带宽,使终端设备的系统负荷不会太大,特别是对拥有大量从时钟的主时钟而言负载会减轻。但因为存在主从同步校准的前后“间隙”,若在“间隙”内从时钟产生时间偏移,则会对该时间段内系统的同步精度产生影响。因此,一般在 Offset 的计算中都是经过多次测量取时延的平均值。

3.3 从时钟稳定性

在时间同步网络内,主、从时钟应保持相同的刻度,例如相同的时间间隔计数器周期。由于主从同步周期的存在,从时钟自身的设备稳定性将会影响到系统的时间同步精度。IEEE1588 机制允许从时钟节点设备采用精确性相对较低的晶体振荡器,这样节约成本,但存在风险。例如,假设某类接入层设备的晶振稳定度为 5×10^{-6} ,则在默认主从同步周期(2 s)内,BC 模式下某从时钟与上级时钟的理论最大时间偏差可以达到 $5 \times 10^{-6} \times 2 \times 2 = 20 \mu\text{s}$,再考虑到实际环境等因素,该偏差可能会更大。

3.4 信道对称性

之前在主从同步原理中计算主/从时钟到从/主时钟的时延(Delay)时,实际上是包含了隐藏条件

的;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相同,即认为通信信道的报文收、发链路的时延一致。而由于传输网络的复杂性,存在多种保护链路以及重路由等情况,收、发链路这两个时延一般都是不同的。例如,以太网的电缆设计就是收、发非对称,以用来减少远端串扰^[4]。这样若假设通信信道的报文收、发链路时延相同,就有误差进入了 Offset 的计算中,从而对系统同步精度造成影响。

通信信道的对称性包括收、发链路时延的一致性和稳定性。由于中继链路状况、网络负载状况等因素造成长途传输情况比较复杂,同一段链路的时延在一段时间内可能存在不稳定。而时延测量过程存在间隔(4 ~ 60 s),因此在某个时间间隔内,用于计算 Offset 而保持的 Delay 原始值可能与当前真实值存在偏差,这样造成收、发链路时延的不稳定对主从同步精度产生影响。

3.5 透明时钟模式

在通信网络中,节点设备会在转发数据过程中产生时延抖动,例如中继器和交换机一般带来几百纳秒到微秒级的抖动,路由器则可能带来毫秒级的抖动。IEEE1588v1 中提出的边界时钟(BC)技术就是针对该问题而设计的,通过某设备其中一个 PTP 端口作为 Slave 对上级 Master 跟踪同步,生成自身时钟,而其它 PTP 端口作为 Master 对下级 Slave 进行同步,形成从、主、从时钟等级关系拓扑,消除了节点设备中的时延抖动。但 BC 模式中,经过 BC(多端口设备)、OC(单端口设备)逐级传递,显然离主时钟越远,其时间同步精度可能会越差。IEEE1588v2 的透明时钟(TC)很好地解决了这个问题^[5]。

以端对端透明时钟模型(E2E TC)为例进行说明,某节点采用端到端透明时钟模型,其对网络上的业务报文不作处理而透明传输,当该节点的接收端口检测到 PTP 事件报文后就将经过本节点的时延,即该报文经过节点入端口到出端口的时延,写入到该报文的时间修正域中再往下发送,到下一个 OC 同该段链路的传输时延累计后,由 PTP 应用软件对从时钟进行同步。事实上,可以认为透明时钟模式下,在节点并不恢复时间和频率,只对 1588 报文做时延修正。因此相当于同步网内各级从时钟都是直接与最佳主时钟进行同步,而不像 BC 模式经过逐级传递,因此有利于提高全网同步精度。

4 基于 WDM + MSTP 组网的 IEEE1588 时间同步

近年来,随着 MSTP 技术兴起与发展,目前运营商基于 MSTP 的承载网已经覆盖到了所有的基站。为充分共享该网络资源,我们在实验室采用基于 WDM + MSTP 的承载网方案来实现 IEEE1588 时间同步网的搭建,如图 1 所示。

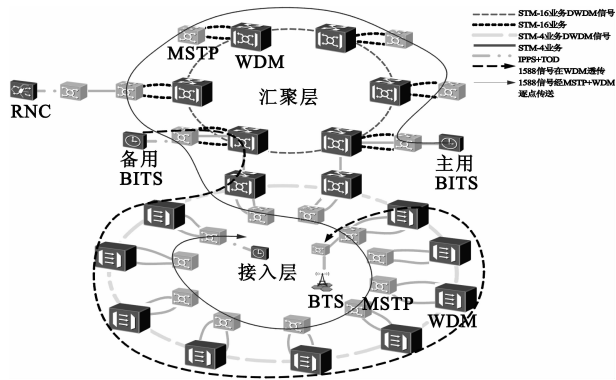


图 1 基于 WDM + MSTP 的 IEEE1588 时间同步网
Fig.1 The topology of IEEE1588 time synchronous network based on WDM + MSTP

一般在通信网络中实现时钟/时间信号传送有带外或带内两种方式,带外是通过网络设备的专用时钟接口来传输时间同步信号,带内即在业务流内包含时钟信号。就现网环境来说,采用带外方式需要升级节点设备硬件和软件,采用带内方式则仅需要升级节点设备软件。本方案采用带内方式。

实验过程为:以主/备用 BITS 输出的参考同步秒脉冲 1 pps 作为触发信号,用 TIME ACC/示波器同时观察基站入口处来自于接入层 MSTP 设备的秒脉冲 1 pps,来进行相位同步的测试。通过 WDM 透传网络和 WDM + MSTP 混合组网两种方案,来对影响 IEEE1588 时间同步精度的各因素进行实验分析。

4.1 WDM 透传网络

如图 1 所示, WDM 透传网络采用多于 30 套的 WDM 设备,一波 STM - 4 业务信号除上下业务站点,在各个 WDM 站点进行光层穿通,最终传输到目标节点。

测试项目及结果为:进行 24 h 长期测试,示波器观测结果在 ± 1 μs 内;TIME ACC 观测 15 min,相位偏差平均值为 50 ns 左右,如图 2 所示。

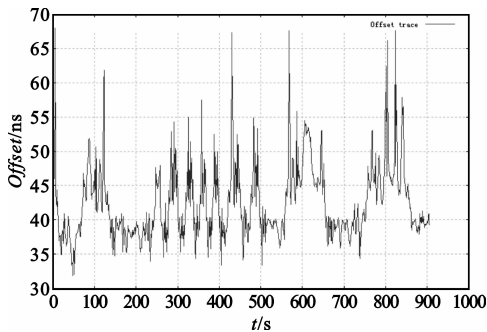


图 2 WDM 透传网络中相位偏差
Fig.2 Time synchronization accuracy testing
on WDM transparent network

理论上讲,承载网中 WDM 设备不对时间信号作任何处理,相当于是透传,不会对时间信号产生延时或抖动等影响,这在本实验中得到了验证。但现网链路状况和设备负载情况会对透传性能产生影响。

4.2 WDM + MSTP 混合组网

根据市场现有设备类型、厂家设备对 IEEE1588 协议的支持情况和市场成熟度等因素,实验室 MSTP 组网设备采用硬件时间戳机制和 BC 模式。

如图 1 所示,1588 信号经过 MSTP + WDM 设备逐点传送,走拓扑最长路由,共经过多于 20 套 MSTP 设备处理、多于 30 套 WDM 设备透传。汇聚层和接入层 MSTP 设备内部晶振稳定度小于 ± 4.6 ppm,设备同步报文发送间隔为 2 s。

测试项目及结果如下:

(1)进行 24 h 长期测试,观测结果在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 内,如图 3 所示。

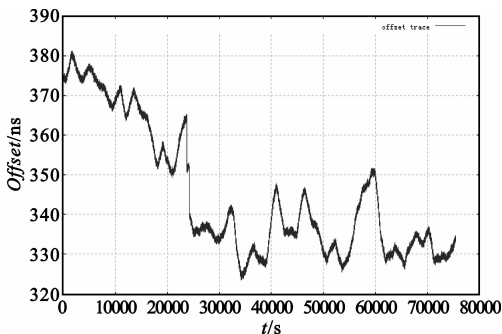


图 3 经 MSTP + WDM 逐点传送的同步相位
Fig.3 Time synchronization accuracy testing on MSTP + WDM network

(2)按照 ITU - T G.8261 Traffic Model 1 的流量模型(64 byte 的报文占 80%,576 byte 的报文占 5%,1 518 byte 的报文占 15%)增加正、反向业务背景流量进行测试:正向加入 80% 流量,反向加入 50% 流

量,突变规律如图 4 所示,观测结果在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 内。

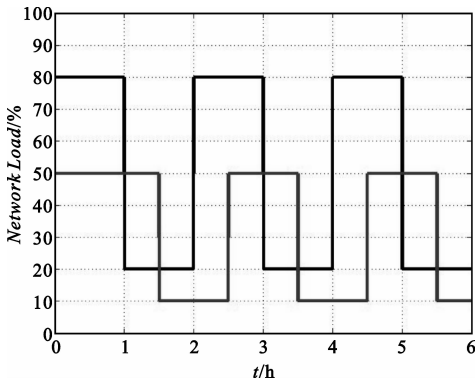


图 4 背景流量突变模型
Fig.4 The mutational model of background traffic

(3)拥塞测试:正反向流量同时增加到 100% 拥塞,时间跟踪路径发生倒换,相位偏差发生跳变,跳变在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 内。

(4)网络信道对称性:在接入层,先在某 WDM 网元某光口发方向插入 160 m 光纤,时间跟踪路径走该方向,时延值测得为 575 ns;在该光口正向补偿 240 m,则 TIME - ACC 上时延值为 47 ns;拔掉该光口光纤,时间跟踪路径倒换,稳定后时延为 510 ns,在该光口正向补偿 200 m,补偿后时延值为 73 ns;恢复该光口光纤,时间跟踪路径倒换到原来路径,稳定后时延值为 45 ns,如图 5 所示。汇聚层的相关实验结果与此类似。可见在现网中针对收、发链路时延的不一致、光纤光缆的割接、熔接等情况,采用节点补偿技术来保证时间同步系统精度是必要手段。

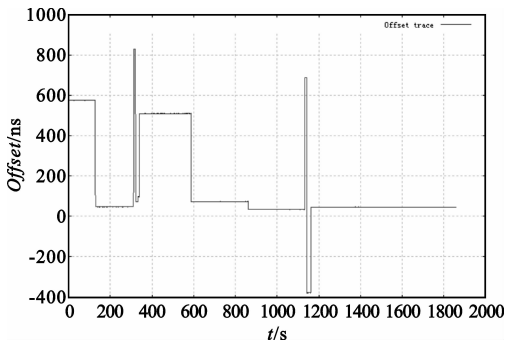


图 5 网络信道对称性对 IEEE1588 精度的影响
Fig.5 Time synchronization accuracy testing
for the channels' unsymmetry

4.3 IEEE1588 时间同步能力分析及建议

根据实验条件和结果可知,同步报文间隔、从时钟稳定性等因素对 IEEE1588 时间同步精度的影响

程度有限。

对于信道非对称性,实验室测试1 m光纤约造成4.5 ns的偏移。因此需采用节点补偿技术对现网设备逐节点地进行补偿,且须严格按时间跟踪路径顺序进行。而此项工作的可操作性及工作量、对业务及日常维护工作的影响,需要进一步进行现网评估。

为解决本方案的缺陷及进行优化,本文提出了一种时间同步网分层模型:时间信号在上层透传底层处理,即在干线通过 WDM 设备透传进行时间同步,本地网则经过 MSTP 设备处理进行同步。本模型具有以下优势:现有组网设备一般都为 BC 模式,时间信号通过在核心层或汇聚层的 WDM 设备透传,可减少 BC、OC 逐级传递,从而优化全网同步性能;现网 WDM 设备支持 IEEE1588,硬件无需升级,降低建设成本;就网络维护而言,仅需在接入层的 MSTP 节点进行信道非对称性补偿,可减少日常维护工作量,同时降低骨干网络维护风险。

5 结束语

本文通过实验室组网验证了基于承载网的 IEEE1588 时间同步技术的现网可行性,指出了将来建设 IEEE1588 时间同步网的关键影响因素及缺陷,并提供了相应建议。下一步的研究重点是如何改善人工节点补偿技术,降低网络运维压力和网络的风险性,同时需要更加真实模拟业务背景流或现网复杂环境论证以及透明时钟模式的组网验证。在未来时间同步网建设或现网改造中,我们一方面需要考虑不同时间同步网的互通兼容,实现未来同步网络平滑升级过渡;另一方面,如何最大化利用现有基础网络投资,综合考虑现有承载网的状况来设计合理的升级部署方案,是一个重要的工程课题。

参考文献:

[1] John C Eidson, Michael C Fischer, Joe White. IEEE – 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[C]//Proceedings of the second ISA/IEEE Conference on Sensor for Industry. Houston, USA:IEEE,2002:98 – 105.

[2] 孙文杰. 局域网时钟同步精确时间标记方法的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.

SUN Wen – jie. Precise time stamping method for IEEE1588 clock synchronization message[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2007. (in Chinese)

[3] 叶卫东,张润东. IEEE1588 精密时钟同步协议 2.0 版本浅析[J]. 测控技术,2010,29(2):1 – 4.

YE Wei – dong,ZHANG Run – dong. Analysis of IEEE1588 Precious Clock Synchronization Protocol Version 2.0[J]. Measurement and Control Technology,2010,29(2):1 – 4. (in Chinese)

[4] Hans Weibel, Dominic Bechaz. IEEE1588 Implementation and Performance of Time Stamping Techniques[C]//Proceedings of NIST Conference on IEEE1588. Gaithersburg, Maryland, USA: IEEE,2004:1 – 7.

[5] IEEE Std. 1588 – 2002, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S].

作者简介:

杨淑媚(1979—),女,广东惠州人,2002 年获工学学士学位,现为中国电信北京研究院光通信网络技术骨干,主要研究方向为光传输技术和数据通信;

YANG Shu – mei was born in Huizhou, Guangdong Province, in 1979. She received the B. S. degree in 2002. She is now a technician of Optical Communication Network in China Telecom Corporation Limited Beijing Research Institute. Her research interests are optical communication technology and data communication.

Email: yangshm@ctbri. com. cn

王 凯(1984—),男,河南焦作人,硕士研究生,主要研究方向为传送网、IP 数据网、光通信与光纤传感等。

WANG Kai was born in Jiaozuo, Henan Province, in 1984. He is now a graduate student. His research interests include transport network, IP network, optical communication and fiber sensing.