

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.01.018

# 船用时统设备 NTP 网络授时服务的实现

宋宇航, 刘敏, 吴宏硕, 林杰, 杨国文

(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

**摘要:** 为了满足船用入网设备多样化的用时需求, 并保证船舶系统内部时间的一致性和准确性, 在满足船用时间统一系统特点的基础上, 设计了一种具有 NTP 网络授时功能的船用时统设备, 增强了船用时统设备的通用性。时统设备作为船舶系统的 NTP 1 级授时服务器, 基于 NTP 向用时用户同步时间。根据实际使用环境, 给出了 NTP 网络授时最简方案, 并对 NTP 授时精度进行了实验验证。实验结果表明, 该设备 NTP 授时方式满足船舶用时设备需求, 授时精度优于  $450\mu\text{s}$ 。

**关键词:** 网络时间协议; 时统设备; 时间同步

中图分类号: U665.261 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):  
文章编号: 2095-8110(2021)01-0163-05



## Implementation of NTP Based Timing System for Marine Timing System

SONG Yu-hang, LIU Min, WU Hong-shuo, LIN Jie, YANG Guo-wen

(Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

**Abstract:** In order to meet the time requirements of various marine network equipment and ensure the consistency and accuracy of the internal time of the ship system, on the basis of meeting the characteristics of the unified system of marine time, a kind of marine timing equipment with NTP timing function is designed, which enhances the universality of marine timing equipment. As the NTP level 1 timing server of ship system, timing equipment synchronizes time to users based on the NTP. According to the actual work environment, the simplest scheme of NTP timing is presented, and the accuracy of NTP timing is verified by experiment. The experiment result shows that the precision of ship-borne NTP timing system is better than  $450\mu\text{s}$ , which meets the needs of ship equipments.

**Key words:** NTP; Timing system; Time synchronization

### 0 引言

随着我国船舶设备水平的不断提高, 已经形成了多种船舶设备体系, 各设备间的用时需求和交互需求日益增多<sup>[1]</sup>。船舶设备时间的统一性和精确度是设备正常工作和交互的前提, 同时也是保障船

舶通信、导航、操控等功能正常运转的基础条件<sup>[2]</sup>。船用时间统一设备是船舶导航系统的重要组成部分, 通过多种授时方式向用时设备发送基准时间, 为全船提供自主、连续、统一的时间基准信息<sup>[3]</sup>。目前的船用时统设备大多通过以太网授时、以太网授时+点对点秒脉冲和点对点串口授时+点对点秒

收稿日期: 2019-06-04; 修订日期: 2019-07-14

基金项目: 天津市科技计划项目(17ZXZNGX00130)

作者简介: 宋宇航(1991-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事授时方面的研究。E-mail: songyuhang@tju.edu.cn

脉冲这三种方式向外授时。以太网授时十点对点秒脉冲和点对点串口授时十点对点秒脉冲授时方式具有较高的授时精度,优于 $1\mu\text{s}$ ,该种授时方式的用戶多为对于授时精度要求较高的系统或设备。对于其他入网用户,若采取上述方式进行授时代价过高,一般通过全船主干网从时统设备获取网络时码的方式进行以太网授时。但由于以太网授时方式无对时秒脉冲信号,仅用于s级对时,精度难以保证。

网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)最早于1985年由美国特拉华大学的David L. Mills教授提出,目前已经发展到NTP v4版本。NTP源于传输控制协议/网络协议(Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP),基于用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)进行时间传递,在广域网和局域网中均可使用<sup>[4-6]</sup>。随着船舶主干网用时用户的日益增多,对于时间精度的要求也日益增强,衍生出了时统设备向NTP授时服务器发送1PPS和TOD信息,再通过NTP授时服务器向外发送时间的NTP网络授时方式,以提升以太网授时的精度<sup>[7]</sup>。因此,若能在原有时统设备的基础上设计一种基于NTP授时的船用时统设备,将能够有效提升网络授时精度,并减少NTP授时服务器这一设备层级,以提升船用时统设备的组合化和通用性。本文基于NTP授时原理,通过在船用时统设备中配置NTP服务,实现了时统设备的NTP网络授时服务,给出了基于全船主干网络的NTP授时方案,并在实验室环境下测试了设备的NTP授时精度。

## 1 NTP授时技术简述

NTP是互联网中进行时间同步的标准协议,主要用于保持网络中电子设备时间的一致性。NTP提供精确时间同步服务的前提是要有精确的时间源,包括卫星信号、天文台信号、高精度频率基准或从互联网获取的时间信息,其时间源标准为协调世界时(Universal Time Coordinated, UTC)。NTP分为 $v_0$ 、 $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $v_4$ 共5个版本,现今使用较多的是 $v_3$ 和 $v_4$ 版本,NTP $v_3$ 和 $v_4$ 版本分别由RFC1305和RFC5905<sup>[8]</sup>定义,征求修正意见书(Request For Comments, RFC)协议对NTP的事件、参数、数据格式、算法和工作模式等内容进行了规定和说明。现以RFC5905协议规定的NTP $v_4$ 版本为例,说明

了NTP的工作模式及原理。

NTP的信息报文在网络中的传输基于UDP,使用固定的UDP端口号123,可以更好地重复利用网络带宽资源,以便在更多的网络环境中进行高精度时间同步,表1所示为NTP的报文格式。LI(Leap Indicator)表示闰秒指示;VN(Version Number)表示NTP版本号;Mode表示NTP的工作模式,根据请求方式的不同,NTP工作模式可分为客户端/服务器模式、对等体模式和广播/组播模式;Stratum表示系统时钟所处层级,数值越小代表层级越高,时间的准确度越高,一般来讲,在局域网中层级为1的NTP服务器即为主参考时钟<sup>[9-10]</sup>。

表1 NTP的报文格式

Tab. 1 NTP time formats

LI	VN	Mode	Stratum	Poll	Precision
					Root Delay
					Root Dispersion
					Reference ID
					Reference Timestamp
					ORIGIN Timestamp
					Receive Timestamp
					Transmit Timestamp
					Extension Field1(variable)
					Extension Field2(variable)
					Key Identifier
					Dgst

NTP时间同步过程通过NTP数据包在客户端和服务器间的通信完成<sup>[11-12]</sup>。下面以一个基本同步过程简述NTP的基本原理:1)客户端A和服务器B通过以太网连接;2)客户端A向服务器B请求时间同步,A发送一个请求数据包,其中包含该包离开A的时间戳 $T_1$ ;3)服务器B接收到数据包后,并记录到达时间戳 $T_2$ ;4)B回复一个应答数据包,数据包内包含 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ ,其中 $T_3$ 为B发出NTP包的时间;5)A收到来自B返回的NTP包,记录包返回的时间戳 $T_4$ 。NTP授时原理如图1所示。

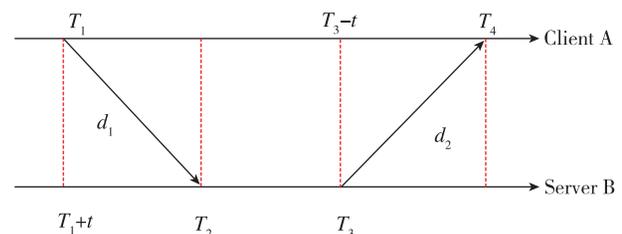


图1 NTP授时原理

Fig. 1 NTP timing principle

$d_1$  为 NTP 请求包传送延时,  $d_2$  为 NTP 回复包传送延时,  $t$  为服务器和客户端之间的时间偏差,  $d$  为 NTP 包的往返时间。

$$\begin{cases} T_2 = T_1 + t + d_1 \\ T_4 = T_3 - t + d_2 \\ d = d_1 + d_2 \end{cases} \quad (1)$$

假设 NTP 请求和回复包传送延时相等, 即  $d_1 = d_2$ , 则可解得

$$\begin{cases} t = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \\ d = (T_2 - T_1) + (T_4 - T_3) \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1),  $t$  也可以表示为

$$t = (T_2 - T_1) - d_1 = (T_2 - T_1) - d/2 \quad (3)$$

可以看出,  $t$  和  $d$  只与  $T_2$ 、 $T_1$  差值及  $T_3$ 、 $T_4$  差值相关, 与  $T_2$ 、 $T_3$  差值无关, 即最终的结果与服务器处理请求所需的时间无关。根据这 4 个时间戳确定客户端和服务端之间的时间偏差  $t$ , 进而调整本地时钟, 客户端 A 就得到了服务器 B 中的标准时间。所以在实际状态下, 即使服务器因客户端请求次数过多导致响应速度减慢, 也不会对 NTP 时间同步精度产生影响<sup>[13]</sup>。

## 2 船用时统设备 NTP 服务的硬件架构

船用时统系统有其自身特点: 一方面, 当船舶驶离大陆, 短波和长波等岸基授时方式受地理位置因素影响较大, 超出服务范围则无法使用; 另一方面, 需要防止卫星授时受到压制式干扰或者欺骗式干扰。因此, 船用时统设备应具备如下功能: 1) 时统设备在可接收外部授时的情况下, 通过卫星、短波、长波等多种方式获取基准时间, 以保障船舶时间基准的精度; 2) 设备内应具有高精度原子频标, 以确保在丢失外部授时源的状态下, 能够通过自主守时保证精度; 3) 时统设备可通过多种途径向其他用时设备进行授时。

根据船用时统系统的特点, 本文设计了如图 2 所示的时统设备, 可接收多种外部时间源信号并进行时间同步, 内置原子频标具备自主守时功能, 根据使用环境配备多种输出接口。当存在外部时间源信号时, 时统设备处于同步工作模式, 跟踪外部时间源信息; 当外部时间源信号消失或被干扰时, 时统设备处于守时工作模式, 依靠原子频标进行守时, 等待外部时间源信号的恢复。在同步或守时模式下, 时统设备均能对外发出持续、稳定、可靠的时间信息。在满足原有

时统设备功能的基础上, 设计了支持 NTP 服务的 NTP 模块, 使时统设备具有 NTP 服务器功能, 可对外进行 NTP 授时。

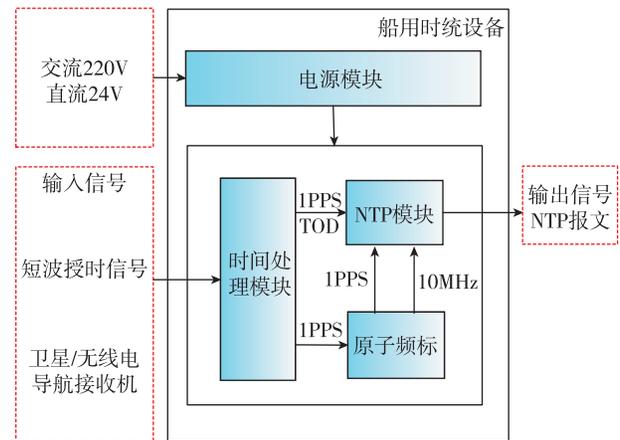


图 2 船用时统设备 NTP 服务的硬件架构

Fig. 2 Hardware architecture of NTP service for marine timing equipment

船用时统设备由电源模块、时间处理模块、原子频标和 NTP 模块组成。电源模块接收外部的直流或交流电, 并为设备内部各模块供电。时间处理模块负责接收卫星、无线电导航设备、短波等外部时间信息, 并将其解算为 1PPS+TOD, 提供 1PPS 基准信号驯服原子频标, 为 NTP 模块提供 1PPS+TOD 信号, 以及为外部设备提供相应的时间基准信息。原子频标内置铷原子钟, 是设备的内部频率源, 当外部时间信息消失时, 可由原子频标进行守时, 持续可靠地对外输出 1PPS。同时, 原子频标负责为 NTP 模块提供 10MHz 基准和 1PPS 基准。NTP 模块通过内部的 ARM 芯片配置 NTP 服务, 原子频标提供的 10MHz 频率基准作为 ARM 的外部时钟基准, 其他模块提供的 1PPS+TOD 是 NTP 服务的精确时间源, 通过捕获 1PPS 基准信号定时校准 NTP 服务时间。

船用时统设备 NTP 服务的授时精度主要由基准时间源、ARM 硬件时钟和系统时钟的漂移、NTP 指令处理时间及局域网延时决定。时统设备 NTP 服务的时间源由天线、卫导接收机等外部时间基准信息或内部原子频标高精度守时提供, 具有极高的准确性, 以接收北斗二号卫星授时信号为例, 其授时精度可达到 20ns。NTP 服务通过 ARM 实现, 一般 ARM 的硬件时钟和系统时钟由晶振驱动, ARM 时钟的准确度由晶振的频率准确度决定。为减少

因时钟漂移产生的时间偏差,ARM的硬件时钟和系统时钟由原子频标提供的高精度频率基准10MHz驱动,10MHz频率准确度可达 $5 \times 10^{-12}$ 。NTP服务运行时,ARM高优先级处理外部1PPS中断,用外部高精度1PPS对服务器进行定期同步,以提高时钟长期计时准确度。此外,选择高主频ARM构架平台,利用实时任务处理机制,加快指令处理速度。NTP是UDP,通常处理1个NTP指令的执行时间基本是亚ms级别。NTP授时精度还和NTP服务器与客户端间的网络状况有关,局域网内100MB以太网帧在百兆网络物理层单向延时理论值约 $8\mu\text{s}$ 。综上所述,在不考虑主干网路由器产生的延迟下,通过船用时统设备进行NTP授时的理论精度可以达到亚ms级。

### 3 船用时统设备 NTP 授时方案与软件配置

在NTP授时方式下,船用时统设备作为1级NTP服务器向外同步时间,时统设备处于Stratum 1层级,是船用网络NTP服务的时间基准。用时设备需按照RFC5905要求配置相应的NTP接收终端软件。根据实际需要,时统设备可采取不同的工作模式向不同用户进行NTP授时。由于时统设备内置了NTP模块,主干网内无需配置额外的NTP 1级授时服务器向外输出NTP时间信号,有效减少了设备层级,提升了时统设备的通用性。本文以一种最简方案为例,说明了船舶主干网络的NTP授时过程,如图3所示。

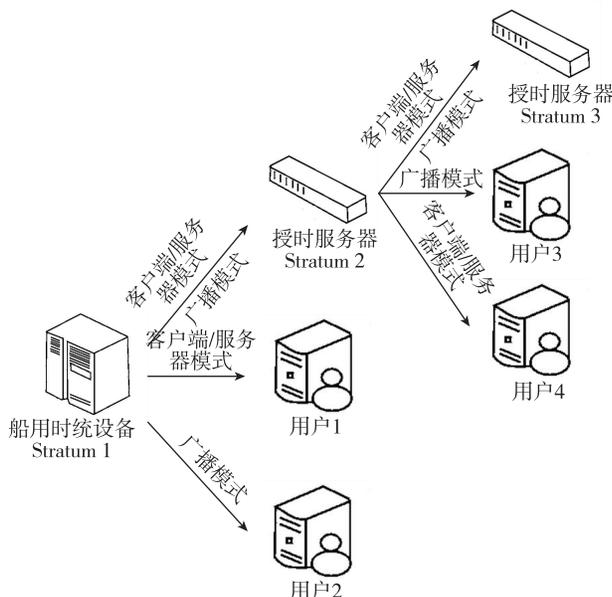


图3 船舶主干网络NTP授时方案  
Fig. 3 NTP timing scheme for ship network

1)时统设备作为NTP 1级服务器,以客户端/服务器模式向接入的用户1进行时间同步。用户1向时统设备提出对时请求,根据交换的数据包计算其间的的时间偏差和网络延迟,并调整用户1的本地时钟。

2)时统设备作为NTP 1级服务器,通过船用主干网络以广播模式周期性地发送NTP时间信息,用户2接收到NTP时间信息后,无需计算时间偏差和网络延时,直接使用收到的时间信息调整用户2的本地时钟。

3)时统设备作为NTP 1级服务器,根据需求以客户端/服务器模式或广播模式向2级授时服务器发送基准时间,2级授时服务器根据需求再以不同的工作模式向下一级授时服务器或用户进行时间同步。

为实现上述过程,需要对NTP服务进行软件配置。本文采用Linux平台上的网络时间校正协议(Network Time Protocol Daemon, NTPD)服务来实现,NTPD服务较为成熟,可配置的参数较多,对服务的控制较细<sup>[14]</sup>。通过修改ntp.conf文件实现NTP服务的安全性设置、访问控制策略、NTP服务器的stratum和工作模式等内容。配置成功后,在实验室环境下进行NTP报文格式验证和NTP授时精度测试。计算机通过网线与时统设备连接,使用wireshark软件接收时统设备的NTP报文,图4所示为时统设备输出的NTP报文格式。可以看出,船用时统设备的NTP版本为4,stratum层级为1,UDP端口号为123。时统设备工作在北斗同步模式下,设备正常工作0.5h后通过网线与Time-Acc007时间综合测量仪连接,测试时长为2h,图5所示为通过TimeAcc007测量的NTP授时精度,考虑到TimeAcc007的NTP测量精度为 $\pm 35\text{ns}$ ,则NTP授时精度优于 $450\mu\text{s}$ 。经过实验可得,船用时统设备具备NTP 1级授时服务器的全部条件。

```

168.58.380022009 168.3.0.25 168.3.0.255 NTP Version 4, broadcast
Ethernet II, Src: 00:20:a1:06:5a:0c (00:20:a1:06:5a:0c), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
Internet Protocol Version 4, Src: 168.3.0.25 (168.3.0.25), Dst: 168.3.0.255 (168.3.0.255)
User Datagram Protocol, Src Port: 123 (123), Dst Port: 123 (123)
Network Time Protocol (NTP Version 4, broadcast)
Flags: 0x25
00, ... = Leap indicator: no warning (0)
..10 0.. = Version number: ntp version 4 (4)
....101 = Mode: broadcast (5)
Peer Clock Stratum: primary reference (1)
Peer polling interval: 6 (64 sec)
Peer Clock Precision: 0.000002 sec
Root Delay: 0.0000 sec
Root Dispersion: 0.0114 sec
Reference ID: uncalibrated local clock
Reference Timestamp: Feb 20, 2014 00:22:48.413533000 UTC
Origin Timestamp: Jan 1, 1970 00:00:00.000000000 UTC
Receive Timestamp: Jan 1, 1970 00:00:00.000000000 UTC
Transmit Timestamp: Feb 20, 2014 00:23:17.415812000 UTC
  
```

图4 船用时统设备的NTP输出报文  
Fig. 4 NTP time formats of marine timing system

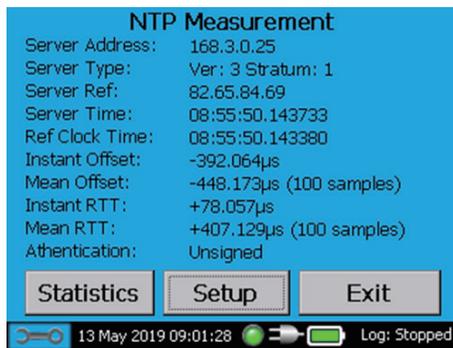


图 5 船用时统设备的 NTP 授时精度

Fig. 5 NTP timing accuracy of marine timing system

## 4 结论

本文基于 NTP 授时的基本原理,设计了新型船用时统设备,通过配置相关软件,实现了时统设备的 NTP 网络授时服务,并进行了实验验证。实验结果表明,时统设备可作为 NTP 1 级授时服务器对接入设备进行不同工作模式下的 NTP 授时服务。时统设备 NTP 网络授时服务的实现有效解决了船舶入网设备的用时需求,同时简化了 NTP 授时服务的设备层级,保证了船用时统设备授时服务的准确性,提升了时统设备的通用性和授时方式的多样性。

## 参考文献

- [1] 王彦东,邵英,王黎明,等. 基于舰船综合平台的精确同步数据采集设计[J]. 舰船科学技术, 2015(4): 70-75.  
Wang Yandong, Shao Ying, Wang Liming, et al. Design of precision synchronization data acquisition based on integrated management system[J]. Ship Science and Technology, 2015(4): 70-75(in Chinese).
- [2] 李超. 时间传递技术综述[J]. 现代导航, 2018, 9(3): 78-82.  
Li Chao. Review of time transfer technology[J]. Modern Navigation, 2018, 9(3): 78-82(in Chinese).
- [3] Lee J, Jeong Y S, Nam K D. Time synchronization method of network testing system by standard wave [C]// Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2014.
- [4] Geng Y, Liu S, Yin Z, et al. Exploiting a natural network effect for scalable, fine-grained clock synchronization[C]// Proceedings of 15<sup>th</sup> USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'18). 2018: 81-94.
- [5] Matsakis D, Levine J, Lombardi M A. Metrological and

legal traceability of time signals[C]// Proceedings of 49<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Reston, VA, 2018: 59-71.

- [6] Langer M, Teichel K, Sibold D, et al. Time synchronization performance using the network time security protocol[C]// Proceedings of 2018 European Frequency and Time Forum (EFTF). IEEE, 2018: 138-144.
- [7] 王玫. NTP 授时技术在舰船网络中的工程应用[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2012, 35(1): 23-25.  
Wang Mei. Engineering application of NTP for shipborne networks[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2012, 35(1): 23-25(in Chinese).
- [8] Mills D, Burbank J, Kasch K, et al. Network Time Protocol Version 4: protocol and algorithms specification[J]. RFC 5905, doi: 10.17487/RFC5905, 2010.
- [9] Kowalski D R, Christman T M, Klein A G, et al. Implementation and testing of a low-overhead network synchronization protocol[C]// Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2018: 1-8.
- [10] Shrestha D, Pang Z, Dzung D. Precise clock synchronization in high performance wireless communication for time sensitive networking [J]. IEEE Access, 2018, 6: 8944-8953.
- [11] Deutsch O, Schiff N R, Dolev D, et al. Preventing (network) time travel with chronos[C]// Proceedings of Network and Distributed Systems Security Symposium (NDSS). San Diego, CA, 2018.
- [12] Upadhyay D, Dubey A K, Thilagam P S. A Probabilistic Model of Clock Offset Estimator (PMCOE) for clock synchronization in wireless sensor network[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 108(2): 995-1007.
- [13] 彭栋,郭伟. 安全网络授时服务技术研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(1): 37-45.  
Peng Dong, Guo Wei. Research of security network timing service technique[J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(1): 37-45(in Chinese).
- [14] 卢继哲,巫钟兴,阿辽沙·叶,等. 基于 NTP 协议的用电信息采集系统时间同步研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(16): 95-99.  
Lu Jizhe, Wu Zhongxing, Aliaosha Ye, et al. Research on time synchronization of power information collection system based on NTP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(16): 95-99(in Chinese).

(编辑:李瑾)