

DOI: 10.3969/j.issn.2095-7092.2020.04.018

# 基于 NTP 的 ORBUS 时间同步系统时钟漂移研究

丁永红

(淮南联合大学, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为了改善基于 NTP 的 ORBUS 时间同步系统在分布式网络中时钟同步精确, 对时间同步系统中的时间戳读误差、测量误差、网络误差和继承误差进行分析, 时钟漂移是引起误差的一个重要因素。基于时钟漂移提出了一种计数器调节技术, 主动补偿固有的时钟漂移, 使客户端时钟在同步周期到来之前拟合服务端时钟走动, 有效控制网络流量消耗, 降低误差, 提高同步精度。

**关键词:** NTP; ORBUS 时间系统; 误差分析; 时钟漂移; 计数器

中图分类号: TP368

文献标志码: A

文章编号: 1008-536X(2020)04-0074-05

## On Clock Drift of ORBUS Time Synchronization System Based on NTP

DING Yong-hong

(Huainan United University, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to improve the clock synchronization accuracy of ORBUS time synchronization system based on NTP in distributed network, the time stamp reading error, measuring error, network error and inherited error in time synchronization system are analyzed. Clock drift is an important cause of errors. Based on the clock drift, a counter adjustment technique is proposed to actively compensate the inherent clock drift, so that the client clock can fit the server clock before the synchronization cycle, so as to effectively control the network traffic consumption, reduce the error and improve the synchronization accuracy.

**Key words:** NTP; ORBUS time system; error analysis; clock drift; counter

在世界高精尖的军事领域、航空航天领域、信息安全<sup>[1]</sup>以及物联网<sup>[2]</sup>等应用中,网络传输的确定性和精确性有非常高的要求。时间触发机制网络通信技术关键主要涉及全局系统时间同步与调度表的精确设计,其中全局系统时间同步最为关键。现有的时间同步<sup>[3]</sup>方法有很多,各种时间同步方法会有不同的性能开销、网络开销和时间同步精度<sup>[4]</sup>,对不同的时间触发网络其性能效果的影响很大。本文主要研究基于 NTP 的 ORBUS 时间系统网络时间同步中影响其时间同步精度的一个重要因素时钟漂移。

## 1 NTP 时间同步原理

NTP 用于分布的时间服务器与客户机之间同步,其定义了体系结构、算法、实体和协议,主要倾向于实现。即使是在多网关、高分散延迟和不可靠的英特网上,其通过特殊地设计能够保持时间同步的准确性和鲁棒性。服务环境包括实现模型和服务模型,实现模型基于多进程操作系统体系结构,服务模型基于可返回时间设计,这种设计只依靠测到的时钟偏移量<sup>[5]</sup>,而不需要可靠的消息传递。同步子网是一种自组织、主从层次结构,其同步路径决定于最小加权生成树,当多个原始时间服务器存在时,对选择协议没有要求。

NTP 的通信方式是以 C/S 模式<sup>[6]</sup>进行。客户

收稿日期: 2020-03-23

基金项目: 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2017A584)

作者简介: 丁永红(1975-),男,安徽安庆人,硕士,讲师,研究方向: 分布式计算。

端发送一个 request 请求数据包, 服务端接收后回送一个 respond 应答数据包。两个数据包都带有发送时间戳  $t_1$ 、 $t_3$  和接收时间戳  $t_2$ 、 $t_4$ 。在假设两次交互过程中的时间延迟 delay 相等的情况下, 根据这四个时间戳来确定客户端和服务端之间的时间偏差 offset 和网络延迟 delay (见图 1)。

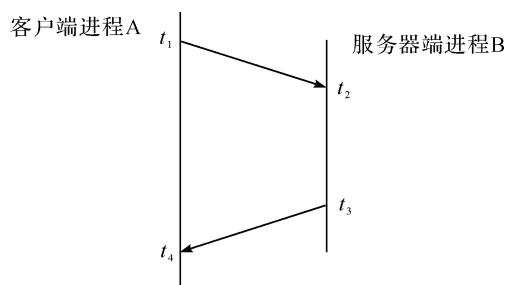


图1 NTP 协议的工作流程

客户端在  $t_1$  时刻发送查询请求并记录  $t_1$  时间戳, 服务端在  $t_2$  时刻收到查询请求并记录  $t_2$  时间戳, 服务端在  $t_3$  时刻回复时间信息并记录  $t_3$  时间戳, 客户端在  $t_4$  时刻收到时间信息并记录  $t_4$  时间戳 ( $t_1$ 、 $t_4$  以客户端的本机时间系统作为基准,  $t_2$ 、 $t_3$  以服务端的本地时间系统为基准)。在不考虑客户端和服务端时钟漂移的情况下, 可得通信信息在网络上传输总时间为:  $\Delta = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)$ 。如前所述在假定 Request 请求信息和 Respond 应答信息在网上传输时间相等时, 则单程网络时延 delay 为:

$$\delta = [(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)] / 2 \quad (1)$$

时间偏差 offset 为:

$$\theta = [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)] / 2 \quad (2)$$

NTP 本身提供了一个精确到纳秒的同步时间协议机制。这个协议包括特定属性的提供, 估计本地和时间服务器的时钟误差, 还包括原始参考源的数量。其中涉及的过滤算法有利于时钟偏移实例的过滤, 以及选择算法选择最优的若干个同步源。NTP 的准确度依靠本地时钟硬件的精度和设备及处理的延迟, 还必须提供调整逻辑时钟的时间及频率的机制。在 NTP 协议中还描述了一个改进的本地时钟设计。这个设计包括偏移快速定位、频率补偿以及过滤机制, 即使在原始参考源丢失的情况下其能够达到毫秒的准确度, 但设计复杂, 在 ORBUS 系统中不适用。本文为了调整本地逻辑时钟与服务端时钟速率一致, 提出一种计数器调节机制。

## 2 基于 NTP 的 ORBUS 时间同步系统及其误差分析

在基于 NTP 的 ORBUS 时间同步系统<sup>[7]</sup>中存在多处假设, 包括时钟稳定和网络传输往返延迟相等, 并且同步系统利用操作系统时间调用函数读取时间也存在读取误差。基于 NTP 协议还引入了多种算法包括合并算法、时钟过滤算法和时钟选择算法, 由此衍生如下一系列的误差。

### 2.1 时间戳误差

用一随机变量  $T$  表示时间戳, 则:  $T = t + r + f \times \tau$ , 其中  $\tau$  为自时钟读数以来的时间间隔,  $t$  为读取时钟数。设  $\rho$  为最大读数误差,  $r$  为时钟读数误差, 则  $r \in [-\rho, \rho]$ ; 设  $\varphi$  为最大频率误差,  $f$  为时钟频率误差,  $f \in [-\varphi, \varphi]$ 。假设时钟读数处理过程的其他计算不影响时钟读数过程的处理, 则  $f$  满足期望为零, 方差为  $\sigma$  的高斯分布;  $r$  满足  $[-\rho, \rho]$  的均匀分布。令  $f$  的概率密度为  $pf(t)$ ,  $r$  的概率密度为  $pr(t)$ , 则关于总的时间戳误差其概率密度函数为  $\varepsilon(x) = \int_{-\infty}^{\infty} pr(t) pf(x - t) dt$ , 这是一个杯状曲线。考虑到频率误差  $f$  变化很慢, 杯状曲线的上下限为:

$$[\min(r) + \min(f\tau), \max(r) + \max(f\tau)] = [-\rho - \varphi\tau, \rho + \varphi\tau],$$

所以有时间戳误差:

$$\varepsilon = [\min(r) + f\tau, \max(r) + f\tau] = [-\rho, \rho] + f\tau$$

这里的时钟频率误差  $f$  主要原因就是时钟漂移。

### 2.2 测量误差

客户端 A 和服务端 B (见图 1),  $\pi_s$  是服务端  $t_2$  到  $t_3$  的时间差,  $\pi_c$  是客户端  $t_1$  到  $t_4$  的时间差, 各时间戳的记录是通过高精度计时 API 获得, 精度达到微秒级, 所以不考虑读数误差。根据式 (2) 时间偏移量 offset 为:  $\theta = t_2 - (2 \times t_1 + \tau_c - \tau_s) / 2$ 。根据式 (1) 测量的全程时延 delay 为:  $\delta = \tau_c - \tau_s$ 。则  $\tau_c$  和  $\tau_s$ 、时间戳  $T_1$  和  $T_2$  的误差表示如下:

$$\varepsilon_{\tau_c} = f_A(T_4 - T_1), \quad \varepsilon_{\tau_s} = f_B(T_3 - T_2),$$

$$\varepsilon_1 = [-\rho_A, \rho_A], \quad \varepsilon_2 = [-\rho_B, \rho_B]$$

整个传输过程时延的最大误差为:  $\varepsilon_\delta = \varphi_A(T_4 - T_1) + \varphi_B(T_3 - T_2)$ , 这里由于是两台固定机器, 所以可以认为频率的误差不变。对于时间偏移量 offset 误差范围可以表示为:

$$[\min(\varepsilon_2) - (2 \times \max(\varepsilon_1)) + \varphi_A(T_4 - T_1) +$$

$$\varphi_B(T_3 - T_2) / 2 ,$$

$$\max(\varepsilon_2) - (2 \times \min(\varepsilon_1) + \varphi_A(T_4 - T_1) - \varphi_B(T_3 - T_2)) / 2 = [-\rho_B - (\varphi_A(T_4 - T_1) + \varphi_B(T_3 - T_2)) / 2 , (2 \times \rho_A + \varphi_A(T_4 - T_1) + \varphi_B(T_3 - T_2)) / 2]$$

如果  $\rho = \max(\rho_A, \rho_B)$ , 得到时间偏差 offset 的误差最大绝对值:

$$\varepsilon_\theta = \rho + (\varphi_A(T_4 - T_1) + \varphi_B(T_3 - T_2)) / 2$$

### 2.3 网络误差

在时间戳消息的网络传输过程中, 由于网络环境中设备的不确定性, 流量不稳定等原因, 不能静态地描述网络时延 delay, 而且在这个过程中主要的误差来自于网络时延 delay 的随机性, 所以要使用测量时间戳计算而得到时延 delay 来描述时间偏移量 offset 的上下限, 从而获取偏移量 offset 的误差。由前面所述有, 其中  $a = T_2 - T_1$ ,  $b = T_3 - T_4$ 。假设  $\theta_0$  为客户端和服务端机器时钟真实时间偏移,  $x$  为两机器时钟的真实时延, 有  $x + \theta_0 = T_2 - T_1 = a$ , 因

为一定有  $x \geq 0$ , 即  $x = a - \theta_0 \geq 0$ , 所以  $\theta_0 \leq a$ , 同样道理有  $b \leq \theta_0$ , 故  $b \leq \theta_0 \leq a$ 。我们可以改写为  $b = (a + b) / 2 - (a - b) / 2 \leq \theta_0 \leq (a + b) / 2 + (a - b) / 2 = a$ , 由于  $\delta = a - b$ ,  $\theta = (a + b) / 2$ , 所以有  $\theta - \delta / 2 \leq \theta_0 \leq \theta + \delta / 2$ 。根据测量误差分析这里的时延  $\delta$  和偏移量  $\theta$  都存在误差, 设  $\varepsilon_\delta$  是时延误差的最大值,  $\varepsilon_\theta$  是时间偏移误差的最大值, 上面的不等式表示为:  $\theta - \varepsilon_\theta - (\delta + \varepsilon_\delta) / 2 \leq \theta_0 \leq \theta + \varepsilon_\theta + (\delta + \varepsilon_\delta) / 2$ 。再设  $\varepsilon = \varepsilon_\theta + \varepsilon_\delta / 2 = \rho + \varphi_A(T_4 - T_1) + \varphi_B(T_3 - T_2)$ , 则有时钟偏移量 offset 的误差是  $[\theta - \delta / 2 - \varepsilon, \theta + \delta / 2 + \varepsilon]$  之间, 此处  $\varepsilon$  与时钟频率误差有关。

### 2.4 继承误差

基于 NTP 的时间同步中, 同步网是一个分层的结构, 每一同步层在时间同步时都会有误差, 客户机同步原始时间服务器之间要通过多层多个时间服务器寻求同步, 同步期间就会继承各个层的误差 (见图 2)。

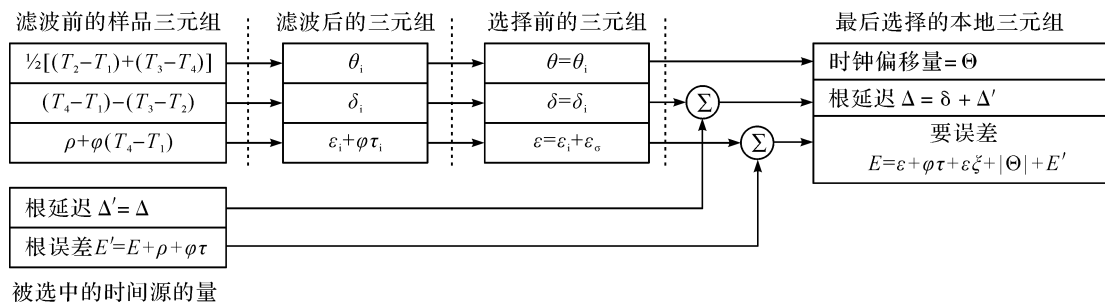


图2 误差积累

时间同步处理过程中的误差是一个误差积累的过程。基于 NTP 的 ORBUS 时间同步系统中, 通过各层之间的消息传递可以计算出上层服务端和本地客户端时钟的全程时延  $\delta$ 、时间偏移量  $\theta$ , 同时在消息中还包含有上层服务端的根误差  $E'$ 、根时延  $\Delta'$ ; 上层服务端  $E' = E + \rho + \varphi\tau$ , 其中  $\rho$  是服务端的最大读误差,  $\varphi\tau$  是上层服务端上次消息到现在消息时间间隔的频率偏移最大误差,  $E$  是服务端继承的上层的误差。从服务端和本地客户端的时间戳计算的滤波样值均存在误差  $\varepsilon_i = \rho + \varphi(T_4 - T_1)$ 。另外滤波算法的存在, 多个滤波样值间的接收存在时间间隔  $\tau_i$ , 将产生多个  $\varphi\tau_i$  的频率漂移误差。经过滤波器的过滤, 得到滤波误差  $\varepsilon_\sigma$ 、全程时延  $\delta$  以及时间偏移量  $\theta$ 。滤波后可以得到某个上层服务端的时间偏移量 offset 的误差  $\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_\sigma$ 。最后通过选择算法获取单一同步源, 从而得到相对于根服务器的全程时延

$\Delta$ 、时间偏移量  $\theta$  以及相应的全程误差  $E$ 。从图 2 可以看出  $E = \varepsilon + \varphi\tau + \varepsilon_\sigma + |\theta| + E'$ , 其中  $\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_\sigma$ ,  $\varphi\tau$  是最近时间段  $\tau$  内由于时钟频率漂移造成的最大误差,  $\varepsilon_\sigma$  是本同步系统所采用的选择算法而产生的自身误差,  $|\theta|$  是在设置本地时钟时的初始误差的绝对值, 这里主要原因是为了保证网络中机器的稳定性, 只修改本地时钟同步频率或者是不修改本地时钟而需要将此时的整个偏移量  $|\theta|$  也作为误差考虑。

## 3 时钟漂移及同步系统中时钟漂移调节技术方案

### 3.1 时钟漂移

在上述时间戳误差、测量误差、网络误差以及继承误差的分析中, 我们发现所有的误差都与机器的时钟频率误差有关系, 因此有必要对时钟本身的

这种不稳定因素加以研究,从而有效提高时间  $\varepsilon_i$  同步精度,减少误差。这种时钟的不稳定称之为时钟漂移。其受到多种因素的影响,包括构成时钟晶振本身的材料不同,制造工艺不同,外界的环境温度不同以及由晶振构成计时时钟的电路设计各异等。也就是时钟漂移是固定存在的,且在每个时钟周期其值是固定的。

### 3.2 时钟漂移调节技术方案

在图3所示时间同步系统中,通常把时钟模型<sup>[8]</sup>表示为  $C(t) = kx + b$  ( $k$  表示时钟漂移快慢  $x$  为单位时间  $b$  为时钟偏移),要达到时钟同步通常考虑通过相关的机制来调整时钟速率  $k$  和偏移量  $b$  使得不同的时钟模型一致走时。

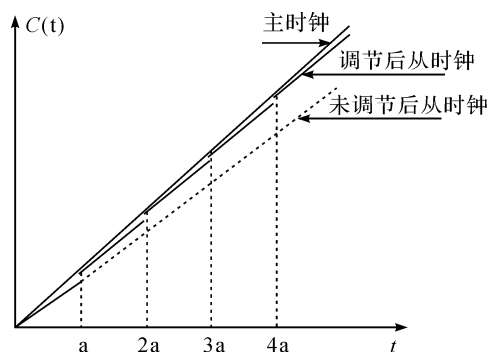


图3 从时钟计数调节后贴合主时钟的效果图

在基于 NTP 的 ORBUS 时间同步层次化结构系统中,通过过滤、选择等算法得到一个周期的偏移量  $\text{offset}$  修正本地时钟同步之后,可以认为客户端

时钟与服务端时钟达到一致。但也只能保证在修正的这个时刻,两个时钟完全同步。时钟的漂移快慢仍然存在,在下一个修正周期到来之前,客户端和服务端的时钟之间的偏移会继续增大,如图3中所示未调节的从时钟逐渐偏离主时钟,这样不能满足某些时间触发系统的要求。NTP 协议提出一种锁相环的方法控制本地时钟的快慢,但此方法是基于硬件电路,过于复杂,不易实现。因此,研究一种调整系统计数的方法来修正本地时钟,使得客户端时钟以周期  $a$  个单位时间接近服务端时钟模型,以减少客户端请求服务端时钟同步周期还没有到来之前由于时钟漂移带来的误差(见图4)。

(1) 对服务端主时钟和客户端从时钟分别周期计数  $M\_counter$  和  $C\_counter$ ;

(2) 主从时钟的相邻周期的系统时钟计数器作差,其中  $M\_counter1$  中读数为  $m_1$ ,以此类推,故分别记为  $m_2 - m_1$  和  $c_2 - c_1$ ;

(3) 在周期内由于主从时钟快慢不一致,其计数差值也一定不相等,故计算  $(c_2 - c_1) - (m_2 - m_1)$ ,即周期内计数的差值,为了获得调节从时钟的条件,构造变量  $a = (m_2 - m_1) / | (c_2 - c_1) - (m_2 - m_1) |$ 。

(4) 在和  $counter$  执行计数的同时,另外设立一个计数器  $\text{adjust\_counter}$ ,每当  $\text{adjust\_counter}$  值达到构造变量  $a$  时,首先将  $\text{adjust\_counter}$  清零,再分两种情况对当前计数器  $counter$  操作:当从时钟慢于主时钟,从时钟  $counter = counter + 1$ ,当比主时钟快时,从时钟  $counter = counter - 1$ 。

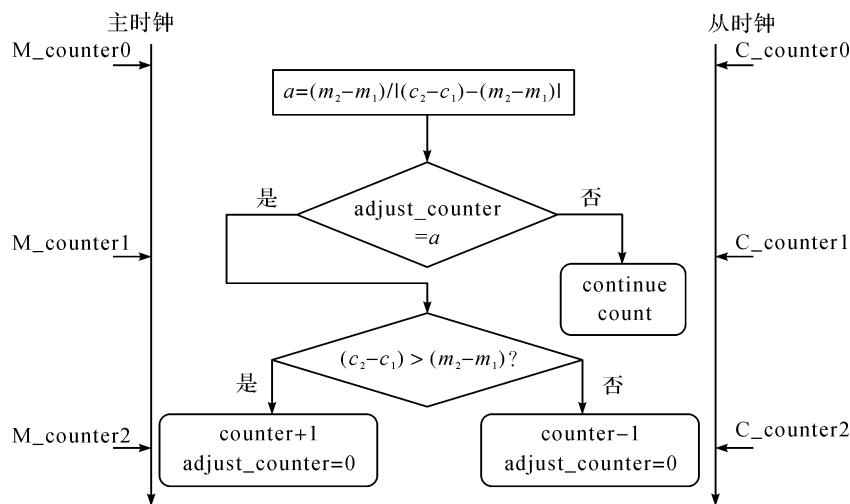


图4 主从时钟调节程序流程图

通过  $a$  个单位时间自动调节计数器计数的方法可以把由于时钟漂移带来的误差有效减小,如图 3 所示,其主要是在客户端和服务端时钟同步周期到来之前,及时让客户端时钟先验贴合服务端时钟。为了验证计数器调节技术可以减少误差,实验测试了基于 NTP 的无调节时间同步和基于计数器调节的时间同步,记录时钟偏移量并对其进行比较。测试同步 10 个小时,相同拓扑网络,比较结果(见表 1)。

表 1 计数器调节同步实验结果

	无计数器调节	计数器调节
平均时钟偏移量/ $\mu\text{m}$	208	10.6

从表 1 可知,在误差积累分析中得到时钟偏移量是误差分析中主要误差来源,调节后的时钟偏移量明显变小,故计数器调节技术改善时钟频率漂移从而有效减少误差,使得基于 NTP 的 ORBUS 时间同步系统得到了更高的同步精度。

#### 参考文献:

- [1] 申子明. 计算机信息安全保密技术研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2019, 31(5): 72-76.
- [2] 杨小令, 吴宸晖, 韩峰, 等. 基于物联网的水源水质监测技术研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2017, 29(5): 32-35.
- [3] MILLS D. Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol[J]. Communications, IEEE Transactions, 1991, 39(10): 1482-1493.
- [4] SRIKANTH T, TOUEG S. Optimal Clock Synchronization[J]. J. ACM, 1987, 34(3): 626-645.
- [5] OMER G, ISRAEL C, MOSHE S. Network Time Synchronization Using Clock Offset Optimization[J]. Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols, 2003, 212-221.
- [6] MILLS D. Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI[R]. Network Working Group Report RFC-2030, University of Delaware, 1996.
- [7] 丁永红, 徐强, 汪芸. 基于 NTP 的 ORBUS 时间同步系统[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(3): 477-482.
- [8] CRISTIAN F. A Probabilistic Approach to Distributed Clock Synchronization[J]. Distributed Computing, 1989(3): 146-158.

#### 信息启示

### 学校召开 2020 年水利三服务“百千万”行动座谈会

为贯彻落实省委、省政府深化“三服务”的决策部署和《浙江省水利厅关于深化“三服务”开展“百县千企万村”行动实施方案》的精神,助力巩固深化“三服务”成果,5月26日,校2020年水利三服务“百千万”行动座谈会在教学科研综合楼412会议室召开。会议对学校下一步深入开展水利三服务“百千万”进行部署。党委副书记严齐斌主持会议。水利、测市、机械、电气、经管学院、组织部、宣传部、人事处、科技处、财务处等负责人参加会议。严齐斌指出了开展水利三服务“百千万”行动意义、目的、要求及努力方向,要求相关单位强化责任,进一步加大“三服务”力度,紧密结合省“十四五”水利中心工作和学校发展把准方向,抓牢当地焦点难点痛点开展精确服务,充分整合资源促进学校发展与行业深度融合,做实、做细、做精水利“三服务”,牢牢守住水利工程安全、水旱灾害防御两条安全底线,确保完成“三百一争”目标。严齐斌强调“三服务”是全面检验水院干部作风、能力、水平的试金石,一要充分展示水院干部的良好形象,强化前列意识、发扬斗争精神,有思路、有担当、有作为;二要找准症结把准脉、不瞎指挥,充分发挥桥梁纽带作用,在关键问题上出实招、办实事、求实效;三要提高站位,立足学校,加强学院间互动合作,扩大学校服务面和影响力;四要做强宣传,不仅要发出水院响应省委、省政府、厅党组决策部署,积极开展“三服务”的最强音,还要唱响地方水利发展的特色亮点。会上,服务组成员就前期对接情况进行了汇报交流。职能部门就下一步做好三服务“百千万”保障工作作表态发言。多年来,学校积极组织教师担任水利专家,参与“千人万项”“美丽河湖”“新农村建设”等服务活动,助力浙江水利高质量发展取得新突破。全省水利“三服务”活动启动以来,校党委副书记严齐斌赴台州开展厅级领导指导组驻点服务。日前,水利、测市、机械、电气、经管学院、浙江水利与海洋工程研究所等6名主要负责人积极参与开展“百名处长联百县、联百项”服务,分头前往舟山嵊泗、岱山,宁波奉化、北仑,温州文成、鹿城等地开展三服务“百千万”联企联村前期工作对接。接下来,他们将主动担当“三服务”行动的宣讲员、观察员、联络员、服务员、信息员,把“三服务”送到家、做到位、抓到底。

摘自浙江水利水电学院网