

## 大规模水下传感器网络时间同步研究

郭 瑛\* 张 震

(青岛科技大学 青岛 266061)

**摘 要:** 该文针对大规模水下传感器网络,对信标节点覆盖内的节点,设计了基于静态信标节点的时间同步算法;对信标节点覆盖范围外的节点,设计了动态节点辅助的时间同步算法。减少了节点移动对同步精度的影响。同时,根据水下声速变化规律,设计了水下传感器网络分层时间同步机制,有效克服了已有算法在处理大规模水下传感器网络时间同步问题上的不足。仿真结果表明,该方法的同步效果明显好于现有的算法。

**关键词:** 水下传感器网络; 时间同步; 信标节点; 动态节点; 分层

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)06-1498-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01128

## Clock Synchronization Study for Large Scale Underwater Sensor Networks

Guo Ying Zhang Zhen

(Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** For large scale underwater sensor networks, the characteristics of underwater acoustic channel are investigated. A static beacon node based clock synchronization algorithm is presented for the nodes inside the beacon node's coverage area, and a dynamic node assisted clock synchronization algorithm is designed for the nodes outside the beacon node's coverage area. These methods reduce the effect of node mobility. A layering clock synchronization mechanism based on the feature of underwater sound velocity is proposed, which solves the clock synchronization problem of large scale underwater sensor networks. The simulation results show that, the proposed synchronization method is obviously better than existing algorithms.

**Key words:** Underwater sensor network; Clock synchronization; Mobile beacon; Dynamic node; Layering

### 1 引言

海洋在人类生活中所起的作用日益显著,水下传感器网络得到人们越来越多的关注,并广泛应用于海洋环境监测、污染监控、资源勘测、目标探测、跟踪定位等领域<sup>[1,2]</sup>。时间同步是水下传感器网络的关键技术之一,传感器节点采集的数据和时间信息匹配才有意义,它也是实现网络协同工作、协同休眠等技术的基础<sup>[3]</sup>。

现阶段,研究者们已经取得了大量陆地传感器网络时间同步算法的研究成果<sup>[4,5]</sup>,传感器网络时间同步算法按数据包交换方式的不同可分为3类:基于“接收者-接收者”的算法,基于“发送者-接收者”的双向算法和基于“发送者-接收者”的单向算法。参考广播同步(Reference Broadcast

Synchronization, RBS)<sup>[6]</sup>算法是一个典型的基于“接收者-接收者”的同步算法。节点间通过交换接收时间戳,对比本地时钟,经过计算实现接收节点时间的彼此同步。基于“发送者-接收者”的双向时间同步协议(Timing-sync Protocol for Sensor Networks, TPSN)<sup>[7]</sup>采用逐层同步方式实现全网的时间同步,文献[8]提出通过牺牲一定精度来减少能量开销的时间同步算法(Light Weight Tree-based Synchronization, LTS)。为了避免往返传输时间估计,减少交换消息的数量,产生了基于“发送者-接收者”的单向时间同步机制,洪泛时间同步协议(Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP)<sup>[9]</sup>利用节点间交换时钟信息和线性衰减来实现同步。文献[10]提出全局同步算法(Global Clock Synchronization),每个节点周期性地向其邻居节点广播包含它当前时间信息的数据包,接收者计算出这些时间的平均值并发送其邻居节点,再将该值当作新的时间值,如此循环直到达到整个网络的同步。

由于没有考虑水下传输的特殊性,陆地传感器

2013-07-30 收到, 2013-11-15 改回

青岛市科技计划项目(12-1-4-3-(16)-jch), 国家自然科学基金(61103196, 61170258)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2012DX011)资助课题

\*通信作者: 郭瑛 guoying@qust.edu.cn

网络时间同步算法不能直接用于水下环境。水下传感器网络采用水声通信,与采用无线电通信的陆地传感器网络有许多不同之处。水声通信的传播速度比较低,声音在水中的速度约为 1500 m/s,比无线电相差 5 个数量级。而且声速在水中受温度、深度和盐度等因素的影响,具有动态变化的特点,使传播延迟难以准确预测和计算。在海流等因素的作用下,传感器节点具有一定的移动性<sup>[1]</sup>。节点的移动导致节点间的距离发生变化,还会产生多普勒频移效应<sup>[2]</sup>,也增加了传播延迟的估计难度。此外,水声通信的可用带宽窄,数据率低,误码率高,受海洋内波、背景噪音、信号多径传播、多普勒频移等因素影响,信号不稳定,具有高度时空多变性。

针对水下传感器网络时间同步问题,研究者们做了一系列的研究,并取得了一些成果<sup>[3]</sup>。Syed 等人<sup>[4]</sup>提出了高延迟网络时间同步协议 (Time Synchronization for High Latency networks, TSHL)。Tian 等人<sup>[5]</sup>借鉴了 RBS 算法中的漂移率建模的思想和 TPSN 算法中的 MAC 层打时间戳以减小抖动的思想,提出一种轻量级、高延迟传感器网络时间同步算法。但是它们假设网络中的节点是静止不动的,节点间的传播延迟固定不变,而水下节点会受海流的影响而移动,导致时间同步的误差比较大。MU-Sync<sup>[6]</sup>采用分簇的方法实现簇首和簇内节点之间的时间同步,但需要较多的信标节点均匀部署在网络中作为簇首节点,导致节点部署成本高,部署方案容易受水下环境的影响。用于层次水下传感器网络的 Mobi-Sync<sup>[7]</sup>通过节点间的几何关系消除节点移动的影响,其要求自定位的浮漂节点和能量充足的超级节点,并要在计算中使用节点的位置关系。D-Sync<sup>[8]</sup>利用多普勒频移来进行时间同步,但是需要用多普勒频移测量值和节点的速度推算传播延迟。

这些水下传感器网络时间同步算法都是基于“成对节点”(pair wise)的同步方式,主要研究具有标准时间的信标节点和单个待同步节点之间的关系,而没有考虑水下传感器网络的部署规模。对于大规模部署的水下传感器网络,具有标准时间的信标节点难以覆盖整个部署区域,而且水声通信传播延时长,速率低,易受环境影响,简单地把“成对节点”的时间同步算法扩展到整个网络,必然降低时间同步的精度。

本文针对大规模水下传感器网络,系统地研究了基于信标节点的同步算法,以及对于信标节点覆盖范围外的节点,利用已经同步的动态节点辅助同步的方法,并基于水声的传播规律,设计了水下传

感器网络分层同步机制,以保障时间同步算法的有效性。本文主要内容如下:(1)设计基于静态信标节点的移动水下传感器网络时间同步算法。(2)研究水下信息传输和节点移动的规律,设计动态节点辅助的时间同步算法,同步信标节点覆盖范围外的节点。(3)分析水声速度变化特点,设计分层的水下传感器网络时间同步机制,进一步提高时间同步精度。

## 2 算法设计

本节首先介绍水下传感器网络时间同步的基本思想,然后针对大规模水下传感器网络,设计基于静态信标节点和动态节点的时间同步算法。

### 2.1 时间同步基本思想

传感器节点的时间由内部时钟控制,而内部时钟与振荡器的频率有关,由于硬件、制作工艺等方面的原因,不同节点有不同的频率变化,因而有不同的内部时钟,导致不同节点的时间不同步。节点的本地时间和标准时间之间关系为

$$T_i = a_i t_i + b_i \quad (1)$$

式中  $i$  代表节点编号,  $T_i$  代表标准时间,  $t_i$  代表节点的当地时间,  $a_i$  为时钟漂移,  $b_i$  为时钟偏移。

时间同步的基本思想是节点通过数据交换的方式,估计时钟漂移和偏移,修正本地时钟,使得本地时钟和标准时钟保持同步。

### 2.2 静态信标同步算法

为了减少节点移动对时间同步精度的影响,避免节点移动带来的误差,在时间同步的过程中,具有标准时间的信标节点在同步过程中保持静止状态,这种基于静态信标同步(Beacon Node based Clock Synchronization)算法简称为 B-Sync。

如图 1 所示,节点 A 是信标节点,具有标准时间,它在同步的过程中不移动位置。节点 B 是待同步的普通节点,随海流等因素而运动。为了提高精度,同步数据包中的时间信息是来自 MAC 层的时间戳。

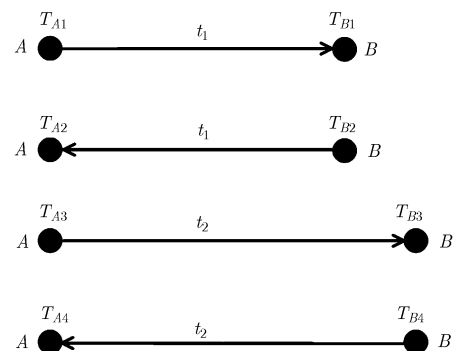


图 1 静态信标同步示意图

信标节点发送同步信息, 该信息包含其发送时间  $T_{A1}$ , 经过时间  $t_1$  后, 信息到达待同步节点, 其记录下该信息到达的本地时间  $T_{B1}$ 。然后, 待同步节点立即向信标节点发送同步信息, 信息中包含其发送时间  $T_{B2}$ 。由于待同步节点在接收到同步信息后, 立即发送新的信息, 两个信息间的时间间隔只有短短的几微秒, 节点的移动能力有限, 在如此短的时间内, 其移动距离可以忽略, 而信标节点  $A$  的位置保持不变, 因此, 假设该信息从待同步节点  $B$  到达信标节点  $A$  的时间也是  $t_1$ 。此信息到达信标节点后, 信标节点记录下到达时间  $T_{A2}$ 。可以得到

$$T_{A1} + t_1 = aT_{B1} + b \quad (2)$$

$$aT_{B2} + b + t_1 = T_{A2} \quad (3)$$

接下来, 信标节点在  $T_{A3}$  再次发送同步信息, 由于水下信息传播速度慢, 传播延迟长, 信息传播需要几十毫秒甚至几百毫秒的时间, 待同步节点在这段时间里的移动不可忽略, 该信息到达待同步节点所经过的时间不再是  $t_1$ , 而是  $t_2$ , 这也是许多时间同步算法在设计过程中忽略的问题。该信息到达待同步节点后, 待同步节点记录下该信息到达的本地时间  $T_{B3}$ 。待同步节点立即向信标节点发送同步信息并含发送时间  $T_{B4}$ 。信息经过时间  $t_2$  后到达信标节点, 信标节点记录下该信息到达时间  $T_{A4}$ 。可以得到

$$T_{A3} + t_2 = aT_{B3} + b \quad (4)$$

$$aT_{B4} + b + t_2 = T_{A4} \quad (5)$$

联立式(2)~式(5), 即可得到如式(6)的节点的时钟漂移  $a$  和时钟偏移  $b$ 。

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{T_{A1} + T_{A2} - T_{A3} - T_{A4}}{T_{B1} + T_{B2} - T_{B3} - T_{B4}} \\ b &= \frac{(T_{A3} + T_{A4})(T_{B1} + T_{B2}) - (T_{A1} + T_{A2})(T_{B3} + T_{B4})}{2(T_{B1} + T_{B2} - T_{B3} - T_{B4})} \end{aligned} \right\} (6)$$

由于信息传播过程中, 传播延迟具有时变性, 会影响时间同步精度, 可以用线性拟合的方式提高同步精度。根据式(4)和式(5), 可以得到如式(7)的时钟漂移和时钟偏移函数:

$$f(a, b) = (T_{B(2k-1)} + T_{B(2k)})a + 2b - (T_{A(2k-1)} + T_{A(2k)}) \quad (7)$$

其中  $k = 1, 2, \dots, N$ 。在实际使用中, 采集多组同步数据, 代入式(7), 即可拟合得到节点的时钟漂移和时钟偏移, 从而减少水下各种时变因素对单次同步数据的影响。

### 2.3 动态节点同步算法

在大规模水下传感器网络中, 信标节点的传播范围有限, 不能达到所有节点。此时, 需要由已经同步的节点作为新的参考节点, 辅助时间同步算法

的运行, 直到所有节点都完成同步。但是, 这些已同步的节点与信标节点不同, 它们不能保持静止, 而是随水流移动。故适用于静态信标节点的时间同步算法不能直接应用在动态节点辅助同步的过程中。因此, 设计了动态节点辅助的时间同步 (Dynamic Node assisted Clock Synchronization) 算法 D-Sync。

如图2所示, 动态节点  $A$  是一个已经同步的普通水下节点, 作为新的参考节点; 节点  $B$  是待同步的普通节点, 两节点都随海流等因素运动。

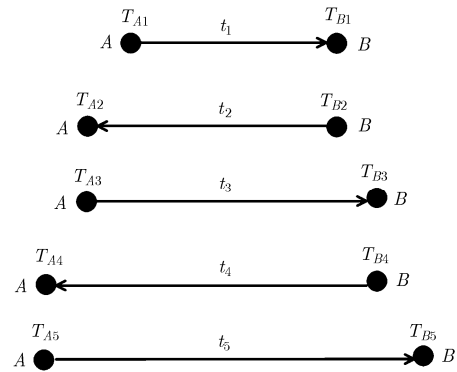


图2 动态节点同步示意图

节点  $A$  发送同步信息, 其发送时间为  $T_{A1}$ , 经过时间  $t_1$  后, 该信息到达待同步节点  $B$ , 节点  $B$  记录下信息到达的本地时间  $T_{B1}$ 。然后, 节点  $B$  向节点  $A$  发送同步信息, 信息中包含其发送时间  $T_{B2}$ 。由于节点的移动在信息传播过程中不可忽略, 信息经过时间  $t_2$  后到达节点  $A$ , 而不再是时间  $t_1$ 。节点  $A$  记录下到达时间  $T_{A2}$ 。可以得到

$$T_{A1} + t_1 = aT_{B1} + b \quad (8)$$

$$aT_{B2} + b + t_2 = T_{A2} \quad (9)$$

假设, 节点  $A$  的移动速度为  $V_1$ , 节点  $B$  的移动速度为  $V_2$ , 水下信息的传播速度为  $V_C$ , 可以得到

$$V_C t_2 = V_C t_1 + V_1 (t_1 + t_2) \quad (10)$$

即

$$t_2 = \frac{V_C t_1 + V_1 t_1}{V_C - V_1} \quad (11)$$

其中, 节点的移动速度可以通过携带的硬件设备(比如: 多普勒速度计)测量得到, 也可以利用一些较成熟的算法<sup>[9]</sup>计算得到。

节点  $A$  在时间  $T_{A3}$  再次发送同步信息, 该信息经过时间  $t_3$  后, 到达节点  $B$ , 到达的当地时间为  $T_{B3}$ , 可以得到

$$T_{A3} + t_3 = aT_{B3} + b \quad (12)$$

其中

$$t_3 = \frac{V_C t_2 + V_2 t_2}{V_C - V_2} \quad (13)$$

同理可得

$$aT_{B4} + b + t_4 = T_{A4} \quad (14)$$

$$T_{A5} + t_5 = aT_{B5} + b \quad (15)$$

其中

$$t_4 = \frac{V_C t_3 + V_1 t_3}{V_C - V_1} \quad (16)$$

$$t_5 = \frac{V_C t_4 + V_2 t_4}{V_C - V_2} \quad (17)$$

令,  $m = \frac{V_C + V_1}{V_C - V_1}$ ,  $n = \frac{V_C + V_2}{V_C - V_2}$ , 通过式(11), 式

(13), 式(16)和式(17)可以递推得到传播延迟之间的关系:

$$\left. \begin{aligned} t_{2k-1} &= n^{k-1} m^{k-1} t_1 \\ t_{2k} &= n^{k-1} m^k t_1 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中  $k = 1, 2, \dots, N$ 。联立由式(8), 式(9), 式(12), 式(14)和式(15)组成的方程组, 并把式(18)代入, 通过消元法, 消去  $m, n$  和  $t_1$ , 从而求出节点的时钟漂移和时钟偏移。

对于动态节点, 同样可以针对多组数据, 采用线性拟合的方法, 提高同步精度。此时, 时钟漂移和时钟偏移的函数为

$f(a, b)$

$$\begin{aligned} &= (T_{A(k+1)} - aT_{B(k+1)} - b)(aT_{B(k+2)} + b - T_{A(k+2)}) \\ &\quad - (T_{A(k+3)} - aT_{B(k+3)} - b)(aT_{B(k)} + b - T_{A(k)}) \end{aligned} \quad (19)$$

其中  $k = 1, 2, \dots, N$ 。

在上述算法中, 没有考虑水声传播速度  $V_C$  变化的影响。水声传播速度与水下环境密切相关, 只有满足一定条件时, 才可将其视为常量, 该问题将在下节详细讨论。

### 3 水下分层时间同步

在上一节的算法设计中, 假设信息的传播速度保持不变, 但在实际情况下, 水下声音传播速度受到多种因素的影响, 具有动态变化的特点。本节通过对水声速度变化规律的分析, 针对大规模海洋传感器网络, 设计分层的时间同步方式 L-Sync (Layering Clock Synchronization), 减少水声速度变化对算法的影响, 进一步提高同步精度。

#### 3.1 水声传播规律

与陆地传感器网络不同, 水声的速度不是固定值, 而是有规律的变量。海洋中的声速  $V_C$ (m/s) 随温度  $t$ ( $^{\circ}\text{C}$ ), 盐度  $s$ ( $\%$ ) 和压力  $p$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) 的增加而增大<sup>[20]</sup>。目前, 应用较多的经验公式是威尔逊公式:

$$V_C = 1449.30 + \Delta c_t + \Delta c_z + \Delta c_p + \Delta c_{tsp} \quad (20)$$

式中

$$\Delta c_t = 4.587t - 5.356 \times 10^{-2} t^2 - 2.604 \times 10^{-4} t^5$$

$$\Delta c_z = 1.19(s - 35) + 9.6 \times 10^{-2} (s - 35)^2$$

$$\Delta c_p = 1.5848 \times 10^{-1} p + 1.572 \times 10^{-5} p^2$$

$$- 3.46 \times 10^{-12} p^4$$

$$\Delta c_{tsp} = 1.35 \times 10^{-5} t^2 p - 7.19 \times 10^{-7} t p^2$$

$$- 1.2 \times 10^{-2} (s - 35)t$$

式(20)的适用范围为:  $1.013 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$  (一个大气压)  $< p < 980 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$ ,  $-3^{\circ}\text{C} < t < 30^{\circ}\text{C}$ ,  $33\% < s < 37\%$ 。

海水中盐度变化不大, 典型值为 35‰, 同层海水的温度变化也不大, 经常用深度替代静压力, 每下降 10 m 水深近似增加 1 个大气压的压力, 也就是说海水中的声速具有垂直分层特性, 声速近似为水平分层变化。这种水平分层变化规律对动态节点时间同步算法具有重要影响, 应保证信息传输尽可能的发生在相同的水平面。

#### 3.2 分层同步

为了使函数式(19)中的水声传播速度  $V_C$  近似常量, 同步节点应在同一水平面。本文采用分层的方式进行时间同步, 而不是简单的选择相邻节点进行时间同步。

如图 3 所示, 把水下部署区域按照深度划分层次。在时间同步过程中, 仅同层节点之间进行时间同步, 不同层次的节点不互相发送同步信息, 不参与彼此的时间同步计算。这种分层同步的方式需要每层都有至少一个具有标准时间的信标节点, 或者一个具有自主移动能力的信标节点, 它可以移动到不同的层面并保持静止, 逐层实现时间同步。

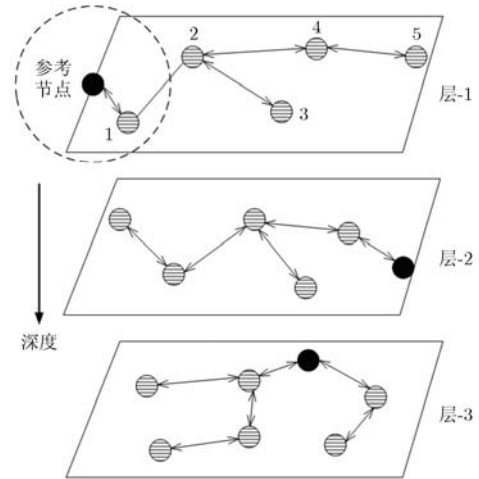


图 3 分层时间同步

在第 1 层上, 具有标准时间的信标节点首先同步其传播范围内的节点 1。节点 1 同步完成后作为新的参考节点, 同步其传播范围内的节点 2, 依次类推, 节点 2 同步节点 3 和节点 4, 节点 4 再同步节点 5。在第 2 层和第 3 层上, 也按照相同的方式同步全部节点。

这种时间同步方式会带来累积误差, 也就是说待同步节点离信标节点的距离越远, 误差越大。这是由于采用已经同步的动态节点辅助时间同步的时候, 该节点会把自己的时间偏差代入到新的同步过程中, 带来更大的时间偏差, 这个偏差随着同步节点的增加而逐渐积累。

有很多方法可以减少累积误差, 比如采用具有移动能力的信标节点, 在多个不同的位置发起时间同步, 或者在每层都部署多个信标节点。待同步节点以其到不同信标节点的跳数作为权重, 距离信标节点越近, 权值越大, 取各个同步运算结果的加权平均值作为最终结果, 以降低累积误差的影响。

#### 4 仿真及结果分析

本节对 B-Sync, D-Sync 和 L-Sync 算法进行模拟仿真分析, 并与时间同步算法 TSHL<sup>[14]</sup>, MU-Sync<sup>[16]</sup>和 Global<sup>[10]</sup>进行比较。

仿真中, 待同步节点拥有不同的内部时钟, 其移动速度在 0.1 m/s~1 m/s 之间。信标节点发送消息包的时间间隔 1 s, 时钟粒度 1  $\mu$ s。TSHL 和 MU-Sync 采用 25 个参考信息包用于线性回归运算。仿真中使用的时间均来自 MAC 层时间戳。

首先, 研究 B-Sync 和 D-Sync 算法的精度。图 4 显示的是采用静态信标节点进行时间同步, 经过一段时间后, 本地时钟偏差的变化趋势。从图中可以看出, B-Sync 算法的误差小于 TSHL 和 MU-Sync。TSHL 假设每次信息传播延迟相同, 对于移动水下传感器网络, 节点移动使得节点间相对位置改变, 从而产生不同的信息传播延迟。MU-Sync 在第 1 次线性回归估计过程中, 没有考虑到传播延

迟, 引入较大的误差。

图 5 是采用动态节点作为标准时间节点, 运行不同的时间同步算法一段时间后的时间偏差。D-Sync 算法明显好于 TSHL 和 MU-Sync, 这是由于后两种算法没有考虑标准时间节点移动的影响。

然后, 研究 B-Sync 和 D-Sync 算法的能耗。由于仿真中采用相同的传输协议和时间格式, 不同算法发送的数据包长度相同, 为了简化计算, 采用数据包数目来衡量算法能耗。图 6 展示了时间同步 100 次, TSHL, MU-Sync, B-Sync 和 D-Sync 需要的数据包数目。TSHL 和 MU-Sync 需要一定数量的数据包才能满足运算要求, 能耗较高。而 B-Sync 和 D-Sync 计算所需要的数据包数目大幅度降低。其中, B-Sync 不必考虑信标节点移动带来的影响, 比 D-Sync 更加节省能量。

接下来分析 L-Sync 算法的精度和能耗。假设水中均匀部署 100 个节点, 每个节点具有不同的内部时钟, 且只能和一跳内的邻居通信, 把 L-Sync 和同样考虑全局时间同步的 Global 进行比较。图 7 显示了时间同步完成一段时间后, L-Sync 和 Global 的时间偏差, 图 8 显示了时间同步 10 次, L-Sync 和 Global 的能耗。由于 Global 没有考虑传播延迟和节点移动的影响, 其精度低于 L-Sync, Global 需要和全部邻居节点交换时间, 比 L-Sync 需要更多的数据包。

仿真结果表明, 在大规模水下载感器网络中, 本文的时间同步方案精度高、能耗低, 其效果好于现有的时间同步算法。

#### 5 结束语

本文针对大规模水下载感器网络, 设计了基于信标节点的水下载感器网络时间同步算法; 对于信标节点覆盖范围外的节点, 采用动态节点辅助时间同步; 结合水下声速的变化规律, 设计了分层的水下载感器网络时间同步机制。在今后的工作中, 要进一步研究水声信道的特点, 分析算法对不同环境的适应性, 并通过海洋实验验证算法性能。

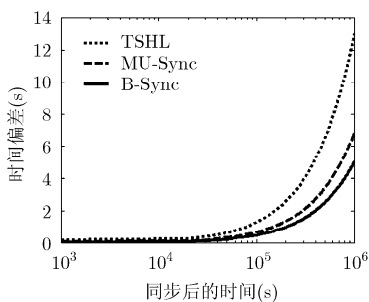


图 4 静态时间同步后的时钟偏差变化

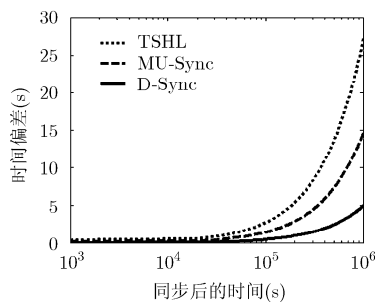


图 5 动态时间同步后的时钟偏差变化

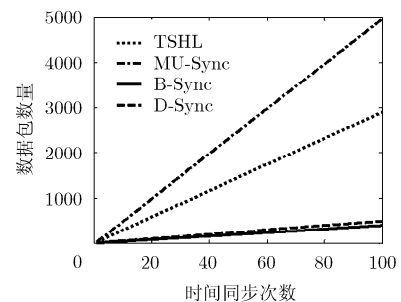


图 6 时间同步所需数据包数目

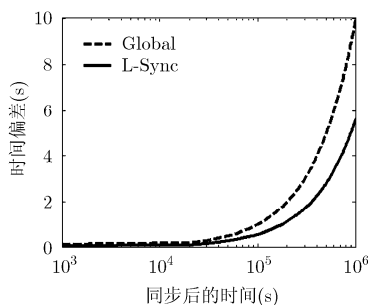


图7 大范围时间同步后的时钟偏差变化

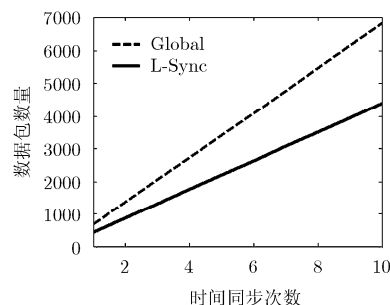


图8 大范围时间同步所需数据包数目

### 参考文献

- [1] Glikopouli A, Nikolakopoulos G, and Manesis S. A survey on underwater wireless sensor networks and applications[C]. Proceedings of 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), Barcelona, Spain, 2012: 1147-1154.
- [2] Wang Yi-fan, Zhang Zai-chen, and Bi Guang-guo. An overview on underwater acoustic sensor networks[C]. Proceedings of 17th International Conference on Telecommunications, Doha, Qatar, 2010: 779-783.
- [3] Davis A and Hwa Chang. Underwater wireless sensor networks[C]. Proceedings of Oceans, Virginia, USA, 2012: 1-5.
- [4] Zennaro Davide, Ahmad Aitzaz, Vangelista Lorenzo, *et al.* Network-wide clock synchronization via message passing with exponentially distributed link delays[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(5): 2012-2024.
- [5] Maggs M K, O'Keefe S G, and Thiel D V. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(6): 2269-2277.
- [6] Elson J, Girod L, and Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]. Proceedings of OSDI 2002, Boston, MA, USA, 2002: 147-163.
- [7] Saurabh G, Ram K, and Mani B S. Timing-Sync protocol for sensor networks[C]. Proceedings of International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, California, USA, 2003: 138-149.
- [8] Greunen J and Rabaey J. Lightweight time synchronization for sensor networks[C]. Proceedings of ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications, San Diego, CA, USA, 2003: 11-19.
- [9] Maroti M, Kusy B, and Simon G. The flooding time synchronization protocol[C]. Proceedings of WCNC2004, Atlanta, GA, 2004: 39-49.
- [10] Li Qun and Rus Daniela. Global clock synchronization in sensor networks[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM, Hong Kong, 2004: 19-28.
- [11] Guo Ying, Cui Hai-wei and Si Wen. Large delay underwater sensor networks clock synchronization with mobile beacon[C]. Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Shanghai, China, 2013: 211-215.
- [12] Liu J, Wang, Z, Zuba M, *et al.* DA-Sync: a doppler assisted time synchronization scheme for mobile underwater sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, DOI: 10.1109/TMC.2013.13.
- [13] Zennaro D, Tomasi B, Vangelista L, *et al.* Light-Sync: a low overhead synchronization algorithm for underwater acoustic networks[C]. Proceedings of OCEANS, VA, USA, 2012: 1-7.
- [14] Syed A A and Heidemann J. Time synchronization for high latency acoustic networks[C]. Proceedings of 25th IEEE International Conference on Computer Communications, Barcelona, Catalunya, Spain, 2006: 1-12.
- [15] Tian Chen, Jiang Hong-bo, Liu Xue, *et al.* Light-weight time synchronization protocol for high resource-constrained networks[C]. Proceedings of IEEE International Communications (ICC), Dresden, Germany, 2009: 14-18.
- [16] Chirdchoo N, Soh W S, and Chua K C. MU-Sync: a time synchronization protocol for underwater mobile networks[C]. Proceedings of WUWNet'08, San Francisco, California, USA, 2008: 35-42.
- [17] Liu Jun, Zhou Zhong, Peng Zheng, *et al.* Mobi-Sync: efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks[C]. Proceedings of IEEE GLOBECOM 2010, Florida, USA, 2010: 1-5.
- [18] Lu Feng, Mirza Diba, and Schurger Curt. D-Sync: doppler-based time synchronization for mobile underwater sensor networks[C]. Proceedings of the Fifth ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNET), Woods Hole, Massachusetts, USA, 2010: 1-8.
- [19] Zhou Z, Cui J and Bagtzoglou A. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks[C]. Proceedings of the Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Washington, 2008: 2198-2206.
- [20] Guo Ying. Energy attenuation-based time synchronization for mobile underwater sensor networks [J]. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2012, 19(Suppl.): 57-64.

郭 瑛: 女, 1981年生, 博士, 讲师, 研究方向为传感器网络、物联网。

张 震: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为传感器网络。