

水下传感器网络时间同步技术综述

洪 锋¹, 张玉亮¹, 杨博真¹, 郭 璞², 郭忠文¹

(1. 中国海洋大学计算机科学与技术系, 山东青岛 266100; 2. 青岛科技大学信息科学技术学院, 山东青岛 266061)

摘 要: 时间同步是传感器节点协同工作的基础. 水下传感器网络由于采用水声通信方式, 具有不同于陆地无线传感器网络的特点, 为时间同步算法研究带来了新的挑战. 论文首先说明同步问题与同步算法的形式化定义, 然后讨论水下传感器网络不同于陆地传感器网络的特点, 并指出相关特点对于同步问题的影响; 接着综述陆地传感器网络同步算法的研究进展, 分析相关算法用于水下环境的不足; 进而介绍水下传感器网络同步算法的研究进展, 并通过仿真实验完成了相关算法的性能对比; 最后总结水下传感器网络时间同步的关键问题, 指出进一步的研究方向.

关键词: 时间同步; 高时延网络; 水下传感器网络; 声学通信

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)05-0960-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.05.020

Review on Time Synchronization Techniques in Underwater Acoustic Sensor Networks

HONG Feng¹, ZHANG Yu-liang¹, YANG Bo-zhen¹, GUO Ying², GUO Zhong-wen¹

(1. Department of Computer Science & Technology, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

2. College of Information Science and Engineering, Qing Dao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: Time synchronization is the basis for collaboration across multiple sensor nodes. Underwater sensor networks (UWSNs) have different characteristics from the terrestrial wireless sensor networks, where communication is primarily via acoustic signals, producing new challenges to time synchronization. This paper first illustrates the definitions of the problem and algorithm of time synchronization, describes the major differences between underwater acoustic communication and terrestrial wireless communication, and discusses the influences to time synchronization causing by these differences; then reviews the terrestrial time synchronization algorithms, pointing out the reasons why such algorithms cannot be applied to underwater environment. Afterwards, a thorough review of the research progress on time synchronization for UWSNs has been presented with the performance comparison among four major algorithms through simulations. Finally, we summarize the crucial issues on time synchronization for UWSNs, and indicate the future research directions.

Key words: time synchronization; high-latency network; underwater sensor networks; acoustic communication

1 引言

传感器网络的分布式特点决定应用任务必须通过节点间的细粒度协同与合作完成. 由于传感器网络部署规模大且节点资源有限, 时间同步算法必须同时满足高精度、低能耗以及适用于大规模网络等要求, 是传感器网络技术研究的热点问题^[1]. 水下传感器网络由于采用水声通信方式, 具有不同于陆地无线传感器网络的特点, 为时间同步算法研究带来了新的挑战^[2].

在大规模分布式网络中, 由于节点无法从统一时钟源获取时间, 只能通过所配备的晶振计数计算本地时间, 如等式(1)所示. $f_s(t)$ 表示节点 s 的本地时间, a_s 表

示晶振的实际频率与标称频率的比值. 晶振计数周期存在波动, 不同环境下的计数频率也有偏差, 因此 a_s 既取决于节点 s 的具体晶振, 又是时间 t 的函数, 称为计时频率偏斜(skew); 不存在频率偏斜的理想晶振 $a_s = 1$. b_s 表示节点计时起点的差异, 称为计时相位偏差(offset). 等式(1)中的 t 表示绝对时间. 于是, 节点的当前本地时间 $f_s(t)$ 与绝对时间 t 之间可能存在同步误差(drift), 即为同步问题.

$$f_s(t) = a_s t + b_s \quad (1)$$

同步算法是指: 节点之间通过交互同步消息, 补偿当前本地时间与绝对时间之间的差值, 实现本地时间与绝对时间一致. 记补偿函数为 $\beta_s(t)$, 则修正后的本地时

间如等式(2)所示. 同步后的本地时间与绝对时间的差值为同步算法的误差(Δ),如等式(3)所示.

$$\tilde{f}_s(t) = f_s(t) + \beta_s(t) \quad (2)$$

$$\Delta = t - \tilde{f}_s(t) \quad (3)$$

同步精度受消息交互的延迟不确定性影响. 相关延迟包括:发送延迟、接入延迟、传送延迟、传播延迟、接收延迟和响应延迟^[3]. 陆地传感器网络与水下传感器网络在同步算法上的主要不同在于传播延迟的影响,下文将重点说明相关算法对该因素的处理和问题;其他延迟对于陆地和水下传感器网络具有相同影响.

2 水下传感器网络同步关键问题

对同步算法有影响的水下传感器网络的特点主要包括^[4]:

(1)水声通信传播速度低且具有时变性. 海洋环境中,水声传播速度平均为 1.5km/s,仅为无线电波在空气中传播速度的 20 万分之一. 此外,水声信道的时变特性使传播速度具有较大方差,特别是在水深小于 100m 的浅海环境.

(2)链路距离长. 由于海洋监测任务涉及范围较大,同时受水声信号传播衰减限制,目前水下传感器网络节点之间的部署距离为 0.5km~2km^[5]. 与之相比,陆地传感器网络节点之间的部署距离通常在 10~100m.

(3)节点具有移动性. 为了获得不同深度的监测结果,水下传感器节点采用锚固定、索限制的方式漂浮于水体中. 受海流影响,节点将在索长度限制的范围内移动,速度为 0.83~1.67m/s^[6]. 同时,可能存在具有自主移动能力的水下设备(AUV),移动速度最高可达 2.9m/s^[7].

(4)水声信号发射功率大,传播衰减严重;信道可用带宽小. 水声 Modem 的发射功率通常为 10W 级别,接收功率为 100mW 左右^[8]. 当水声链路距离为 1-10km 时,带宽为 10kHz 量级;在 10~100km 范围内,可用带宽仅为 2~5kHz 范围.

(5)多途现象严重;水声速度低和节点相对移动引

起明显多普勒频散;环境噪声大.

特点 1 和 2 说明:水下传感器网络中的传播延迟不能忽略. 以链路距离为 1km 为例,传播延迟达到 666ms,往返传播延迟达到 1.33s,而且往返传播延迟可能不同. 特点 3 说明:在 1km 链路上,消息往返过程中可能出现最大为 4.44m 的链路长度变化,从而造成 3ms 同步误差. 特点 4 和 5 说明:水下环境中同步算法不应采用频繁定时操作. 节点间频繁传输同步消息,一方面增加节点能量开销,另一方面降低信道带宽的有效利用率.

因此,水下传感器网络同步有着不同于陆地传感器网络的新挑战,以下依次结合具体陆地传感器网络同步算法说明其不适用于水下的原因.

3 陆地传感器网络时间同步算法用于水下环境的不足

从消息交互方式看,陆地传感器网络同步算法主要分为 3 类:单发送、发送-接收和接收-接收. 下文重点说明点到点(单跳)条件下相关算法的补偿函数和同步精度. 多跳同步协议是在单跳基础上按层次进行,文献^[9]指出随着待同步节点和基准节点之间的跳数增大,同步精度以跳数的平方根倍数降低.

(1)单发送方式

单发送方式的代表为 FTSP 算法^[10],其假设是链路传播延迟可以忽略,算法原理图见图 1(a).

时间基准节点(Beacon,满足 $f_b(t) = t$)在 t 时刻广播包含当前时间的同步消息(称为时间信标包). 经过 d 时间后,待同步节点 R 收到该同步消息,提取信标包中的绝对时间 t . 节点 R 通过等式(4)的补偿函数修正本地时间. 补偿函数的物理意义是,忽略传播延迟 d 后,信标包中的绝对时间与接收该包的本地时间之差即为时间偏差. 算法的同步误差见等式(5),为链路传播延迟. 由于水下传感器网络的链路传播延迟达到百毫秒级,因此 FTSP 不能应用于水下网络.

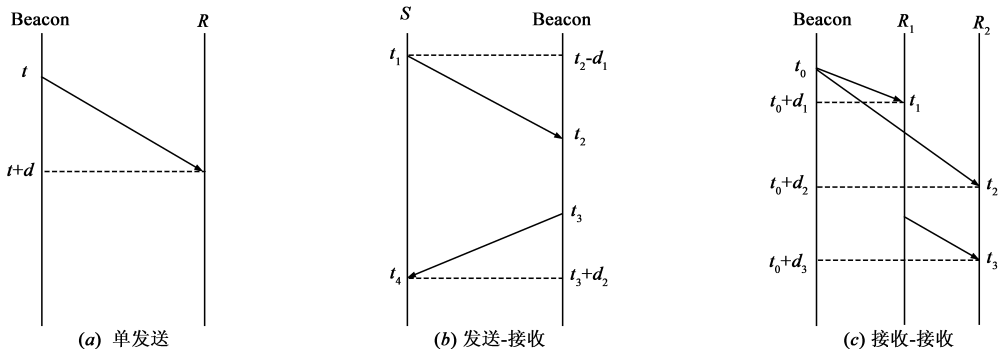


图1 陆地传感器网络同步算法说明图

$$\begin{aligned}\beta_r(t+d) &= f_b(t) - f_r(t+d) \\ &= (1-a_r)t - a_r d - b_r\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\tilde{f}_r(t+d) &= f_r(t+d) + \beta_r(t+d) = t \\ \Delta &= (t+d) - \tilde{f}_r(t+d) = d\end{aligned}\quad (5)$$

(2) 发送-接收交互方式

基于发送-接收交互方式的同步算法类似于 Internet 上广泛采用的 NTP^[11] 机制:待同步节点向时间基准节点发送同步请求消息,基准节点应答包含当前时间的信标包,代表算法为 TPSN^[12].

从单跳角度分析 TPSN 的同步精度,算法原理图见图 1(b).待同步节点 S 在本地时刻 t_1 向基准节点 B 发送同步请求.经过 d_1 时间后,节点 B 收到该请求,记录下接收时间 t_2 ,并在 t_3 时刻发出包含 t_2 和 t_3 值的同步应答包.经过 d_2 时间后,节点 S 在本地时刻 t_4 收到应答包,使用等式(6)中的补偿函数进行同步.同步结果和误差见等式(7)和(8).等式(7)显示,同步计算抵消了本地相位偏差.由于计算过程中包含一次往返过程,当不存在频率偏移且往返传播延迟相等时,可以抵消传播延迟.

$$\begin{aligned}\beta_s(t_3+d_2) &= [(t_2+t_3) - (t_1+t_4)]/2 \\ &= [(1-a_s)(t_2+t_3) + a_s(d_1-d_2) - 2b_s]/2\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\tilde{f}_s(t_3+d_2) &= f_s(t_3+d_2) + \beta_s(t_3+d_2) \\ &= (1-a_s)t_2/2 + (1+a_s)t_3/2 + (d_1+d_2)a_s/2\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\Delta &= t_3+d_2 - \tilde{f}_s(t_3+d_2) \\ &= \frac{1-a_s}{2}(t_3-t_2) + (d_2 - \frac{a_s}{2}(d_1+d_2))\end{aligned}\quad (8)$$

由于没有考虑频率偏移因素,对时操作后再过一段时间,本地频率偏移将引发新的同步误差,因此 TPSN 必须频繁运行对时操作.此外,当链路往返传播延迟不相等时,往返传播延迟差也会影响同步精度.对于水下传感器网络来说,由于节点具有移动性,往返传播延迟可能不相等;而且往返传播延迟之和将达到 1s 以上,同步消息交互期间的本地频率偏移就可能产生新的时间偏差.因此,如果应用到水下环境中,TPSN 的同步误差将随链路部署距离、节点移动速度和本地频率偏移的增大而增大.

为了降低 TPSN 的同步消息交互频度, Tiny-Sync 和 Mini-Sync^[13] 进行了改进:待同步节点连续发送多个同步请求消息,收到相应的应答消息后,采用线性回归方法估计频率偏移和相位偏差.然而,水下环境中往返传播延迟可能存在差异,降低 Tiny-Sync 和 Mini-Sync 的同步精度.同时,采用线性回归方法需要交互大量同步消息获取对时数据,带来了信道带宽和节点能量的开销.

(3) 接收-接收交互方式

接收-接收交互方式的典型算法为 RBS^[9].RBS 利用无线信道的广播特性,消除发送端的延迟影响.基准

节点广播同步消息,收到广播的节点利用本地时钟记录到达时刻,然后接收节点之间交换计时记录,两两校正时钟.RBS 的点到点时间校正过程如图 1(c)所示.

RBS 假设图 1(c)中相关 3 个节点之间的链路传播延迟差均为 0.在本地时刻 t_3 ,节点 R_2 收到 R_1 记录接收信标消息的时刻 t_1 后,使用等式(9)计算当前时刻与节点 R_1 的计时偏差,记为 $\delta(t_3)$.公式(9)中的 $\delta(t_0)$ 表示两个节点在绝对时刻 t_0 的计时偏差.在本地时刻 t_3 , R_2 和 R_1 的实际计时偏差为等式(10)的结果.因此同步误差如等式(11)所示,是相关 3 个节点之间的链路传播延迟差及参与对时的节点的频率偏移的函数.由于无线环境中的电磁波传播接近光速,相关 3 条链路的传播延迟差较小,实验结果显示同步精度高.但是,在水下传感器网络中,水声传播速度低且链路部署距离在 0.5km~2km.如果链路长度相差 100m,传播延迟差为 67ms 左右,将明显影响 RBS 算法的同步精度.

$$\begin{aligned}\delta(t_3) &= t_2 - t_1 = f_2(t_0+d_2) - f_1(t_0+d_1) \\ &= [a_2(t_0+d_2) + b_2] - [a_1(t_0+d_1) + b_1] \\ &= \delta(t_0) + (a_2d_2 - a_1d_1)\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}\tilde{\delta}(t_3) &= f_2(t_0+d_3) - f_1(t_0+d_3) \\ &= \delta(t_0) + d_3(a_2 - a_1)\end{aligned}\quad (10)$$

$$\begin{aligned}\Delta &= \tilde{\delta}(t_3) - \delta(t_3) \\ &= a_2(d_3 - d_2) - a_1(d_3 - d_1)\end{aligned}\quad (11)$$

综合陆地传感器网络同步算法研究成果发现,相关算法不能直接应用于水下环境.主要原因是水下链路传播延迟长,而且传播延迟存在时变性.在水下环境中,同步算法不能忽略传播延迟、同一链路的往返传播延迟差、不同链路的传播延迟差以及同步过程中的频率偏移影响.同时,由于水下信道带宽低和发送能耗高,需要频繁对时的同步算法开销大.为了降低对时操作频度,同步算法必须估计频率偏移和相位偏差.

4 水下传感器网络时间同步算法研究现状

针对影响同步算法的关键因素,水下传感器网络研究者从水声链路的传播延迟估计问题入手,开展了一系列研究工作.以相关研究针对的水下传感器网络的不同特点为分类标准,可以分为四类:水声传播速度低、节点具有移动性、节点移动受海流影响和节点移动满足一定空间相关性.

文献[14]提出水声传播速度低是时间同步的关键问题,提出了两阶段的同步算法 TSHL:第 1 阶段采取单发送交互方式,类似 FTSP 算法.时间基准节点多次向待同步节点广播时间信标包(共发送 25 个),待同步节点根据收到信标包的本地时刻和信标包中的时刻构成对时元组,采用线性回归计算本地频率偏移;第 2 阶段采用 1 次发送-接收交互方式,类似 TPSN 算法,估计本地

的相位偏差. TSHL 假设节点不移动, 而且传播速度不变, 即虽然链路传播延迟长, 但该值保持恒定. 该假设不适用于水下环境中节点移动的情况, 特别是当节点受海流影响较快移动的情况. Tri-Message 在 TSHL 算法的消息开销方面进行了改进^[15]: 将第 1 阶段的单发送方式改为发送—接收交互方式, 延长交互间隔, 交互 3 次共 6 个消息包; 仿真实验证明在保持一定同步效果的同时, 降低了开销.

MU-Sync^[16]指出水下节点具有随机移动性, 将整个网络划分为多个簇, 簇首负责簇内节点同步. 簇首和簇内节点的同步消息交换采取发送—接收方式进行, 类似 TPSN 算法, 但由簇首发起. 为了满足线性拟合的数据要求, 同步消息必须交互多次. 然后, 簇首针对收集的多个如图 1(b) 中的 (t_1, t_2, t_3, t_4) 元组, 采用两次线性拟合算法. 第 1 次线性拟合是在忽略往返传播延迟变化的条件下拟合普通节点的频率偏移, 然后用该频率偏移计算通信过程中的链路传播延迟. 第 2 次线性拟合使用链路传播延迟估计结果, 更精确的拟合待同步节点的频率偏移和相位偏差. MU-Sync 同步精度主要受 3 个因素的影响: (1) 第 1 次拟合的频率偏移精度; (2) 节点收到同步消息后的应答时间 $t_3 - t_2$; (3) 往返传播延迟差. 在水下环境中, 由于水声信道的时变性和节点的移动性, 特别是受海流影响节点较快移动时, 往返传播延迟差不同, 影响同步精度.

E²DTS^[17]根据节点受海流影响移动的特点, 提出了使用移动 AUV 作为时间基准节点的低能耗算法. E²DTS 假设同步交互过程中节点相对移动速度恒定, 采取两阶段的同步过程: (1) 采用单发送交互方式, 由移动信标向广播区域内的待同步节点广播多个时间信标包. 待同步节点使用连续信标包之间的接收时刻差和信标包内的绝对时间差进行线性拟合. 由于假设同步双方以恒定速度移动, 所产生的链路距离变化通过相对速度表现到拟合公式, 反映往返传播延迟差. 线性拟合结果为节点的频率偏移、节点与 AUV 之间的相对速度. (2) 待同步节点发起类似于 TPSN 的发送—接收交互过程, 利用已估计的频率偏移和相对移动速度比值, 求取相位偏差. 整个同步过程中普通节点仅在第 2 阶段发送 1 个同步请求包, 因此对于普通节点来说, E²DTS 具有节能特性. 但是, 节点受海流影响为恒速运动的假设有待商榷, 限制了 E²DTS 的同步精度.

文献^[18, 19]提出在水下环境中, 受海流影响的漂浮物运动具有一定空间相关性, 并给出了基于空间关系的运动速度估计公式. Mobi-Sync^[20]使用运动速度估计公式, 估计链路传播延迟. 其假设条件为时间基准节点不但提供绝对时间, 还要具有自身位置信息, 从而提供在一串离散时刻的运动速度矢量. 该类节点称为超级

节点. 并且假设所有节点位于同一水平面, 每个普通节点必须在 1 跳内连接到至少 3 个超级节点.

Mobi-Sync 运行过程分为 3 个阶段: (1) 消息交互和延迟估计: 采用发送—接收方式, 类似 TPSN. 普通节点发出同步请求, 其广播范围内的超级节点 (至少 3 个) 收到同步请求后首先应答和 TPSN 相同的时间信标包; 然后再过固定时间间隔, 向请求节点发送从收到请求到当前时刻的一组速度矢量. 收到多个超级节点的速度矢量后, 普通节点利用运动速度估计公式计算对应时间范围内自身的速度矢量, 再通过几何关系逐一计算到超级节点的传播延迟. 该阶段假设频率偏移为 1; (2) 线性拟合: 普通节点重复发送请求消息获得多组交互数据, 利用链路传播延迟估计结果, 通过加权线性拟合计算频率偏移和相位偏差; (3) 校准: 将拟合得到的频率偏移结果重新用于阶段 1 的传播延迟求解过程进行校正, 再用校正后的传播延迟重新执行阶段 2 的线性拟合, 获得精度更高的频率偏移和相位偏差.

Mobi-Sync 的不足在于: 超级节点需有位置信息, 而定位算法通常依赖于同步结果; 每个普通节点至少和 3 个超级节点进行双向交互, 由于普通节点通信能力有限, 要求超级节点部署密度大. 因此, 相关超级节点的假设较难实现.

表 1 水下传感器网络同步算法比较

代表算法	TSHL	MU-Sync	E ² DTS	Mobi-Sync
假设条件	节点静止; 水声传播速度恒定	节点随机移动; 往返传播延迟不变	节点受海流影响移动; 同步中点到点相对速度恒定	移动有空间相关性; 信标部署密度高且位置可知
同步消息交互方式	先单发送 25 次; 再发送—接收交互 1 次	发送—接收交互	先单发送 25 次, 再发送—接收交互 1 次	和至少 3 个信标节点完成发送—接收交互 5 次
发送同步消息数	信标节点 25 个 待同步节点 1 个	信标节点 10 个 待同步节点 10 个	信标节点 26 个 待同步节点 1 个	信标节点 ≥ 30 个 待同步节点 ≥ 5 个

表 1 中对上述算法的主要特点进行定性对比. 首先, 相关算法在假设条件上的不同主要在于对水下节点移动规律的估计, 估计的准确程度将直接影响同步精度. 同步精度定量对比将在下节通过仿真实验完成. 其次, 相关算法的主要开销取决于同步消息交互方式, TSHL 和 E²DTS 采取混合交互方式, 包括多次单发送交互和 1 次发送—接收交互; 而 MU-Sync 和 Mobi-Sync 采

取多次发送—接收交互. 并且在 Mobi-Sync 中信标节点在收到请求后将连续回复多条同步应答消息. 就同步交互所需要的消息数而言, MU-Sync 的开销最小. 但是信标节点通常都采用高能量节点实现, 衡量待同步节点发送的同步消息数更有意义, 表 1 显示对于待同步节点消息开销而言, TSHL 和 E²DTS 的开销最小.

5 水下传感器网络时间同步算法性能比较

针对水下传感器网络的不同特点, 上述四类时间同步算法采取了不同的假设条件. 本节通过仿真实验, 进一步定量比较 4 种算法的同步精度.

在仿真实验中, 待同步节点的计时频率偏斜取为 50ppm; 计时相位偏差取为 80 μ s. 节点运动模型采用文献^[18]的经验模型, 如式(12)所示.

$$\begin{cases} V_x = k_1 \lambda v \sin(k_2 x) \cos(k_3 y) + k_1 \lambda \cos(2k_1 t) + k_4 \\ V_y = -\lambda v \cos(k_2 x) \sin(k_3 y) + k_5 \end{cases} \quad (12)$$

其中, (V_x, V_y) 表示水下节点的二维移动速度. k_1 、 k_2 、 k_3 、 λ 和 v 用于表征潮流及水深等相关随机变量. k_4 和 k_5 表征其他不确定因素. 仿真中使用和文献^[18]相同的分布计算上述随机变量. 水声传播速度设为 1500 m/s. 除 Mobi-Sync 采用 3 个超级节点作为信标节点外, 其他 3 种算法均只有 1 个信标节点. 每组仿真实验重复 1000 次, 以下结果为 1000 次实验的平均值.

首先对比 4 类算法在默认参数配置下的同步结果. 在 1 轮同步过程中, TSHL 共发送 27 个同步消息包, MU-Sync 发送 20 个, E²DTS 发送 26 个, Mobi-Sync 发送 35 个. 图 2(a) 显示上述 4 种算法在 1 轮同步后, 同步精度随时间流逝下降的情况. TSHL 同步后的时间偏差迅速上升, 甚至超过未同步条件下的偏差. 其原因是 TSHL 假设节点静止不动, 受往返链路延迟变化的影响, 在相位偏差的估计上产生严重的误差. MU-Sync、E²DTS 和 Mobi-Sync 采用节点具有移动性的假设, 都取得了较高的同步精度.

仿真实验接着对比相同消息数下的同步精度. 根据 4 类算法的消息交互情况, 将 1 轮同步的总消息数设定为 28. 实验结果显示在图 2(b) 中. 在相同的消息开销下, 仍然是 MU-Sync 的同步精度最优. 由于 MU-Sync 同步消息交换增加到 14 次, 精度较 10 次交换有所提升; E²DTS 的同步精度也因为增加了 2 次信标广播而得到一定提升; 而 Mobi-Sync 由于同步请求降为 4 次, 同步精度有明显下降; TSHL 仍然同步失效.

上述仿真实验结果说明: (1) 由于假设节点静止, TSHL 的同步精度最低, 说明节点的移动性对于同步精度有明显影响; (2) MU-Sync、E²DTS 和 Mobi-Sync 都取得了较好的同步精度, 反映了 3 种节点移动性假设在一定

程度上均符合水下节点移动的经验模型; (3) MU-Sync 在两种参数条件下的同步精度均为最高, 且发送的总消息数最少, 说明采用发送—接收方式并进行线性拟合的同步效果最好. (4) 对比表 1, 从待同步节点能量开销角度看, MU-Sync 的开销高于 E²DTS.

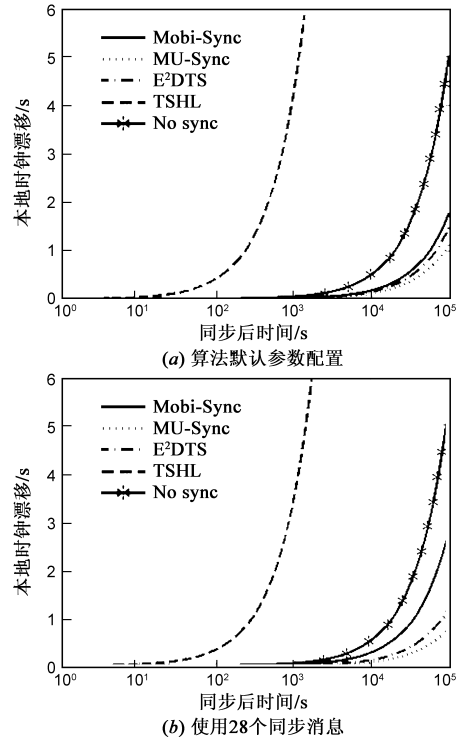


图2 水下传感器网络同步算法同步精度对比

6 总结与展望

综合上述, 水下传感器网络同步的核心问题在于正确估计链路传播延迟. 已有的研究成果重点考虑了链路传播延迟长的问题, 但节点受海流影响移动或者信道时变性引起水声信号传播速度不同带来往返传播延迟差的问题仍未能很好解决. 此外, 虽然上述算法都致力于同时估计频率偏移和相位偏差来降低对时频度, 但求解过程中依赖于交互大量同步消息, 造成信道带宽和节点能量的消耗. 并且, 相关链路可能由于噪音等因素影响在特定时段内误码率高, 引起同步过程延长, 进一步增大能耗开销. 克服上述问题的关键在于, 综合海上实验数据, 寻找和构造新的通信反馈指标用于判断水下链路的即时情况, 进行对链路传播时延的高精度估计, 从而实现高精度、低开销的水下传感器网络同步算法.

参考文献

- [1] Elson J, Römer K. Wireless sensor networks: a new regime for time synchronization[A]. Proceedings of SIGCOMM Computer Com-

- munication Review[C]. New York, USA: ACM, 2003. 149 – 154.
- [2] Heidemann J, Stojanovic M, Zorzi M. Underwater sensor networks: applications, advances, and challenges[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society-A, 2012, 370 (1958): 158 – 175.
- [3] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava MB. Timing-sync protocol for sensor networks[A]. Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys) [C]. New York, USA: ACM, 2003. 138 – 149.
- [4] 郭忠文, 罗汉江, 洪锋, 杨猛, 倪明选. 水下无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(3): 377 – 389.
Guo Z, Luo H, Hong F, Yang M, Ni M. Current progress and research issues in underwater sensor networks[J]. Journal of Computer Reference and Development, 2010, 47(3): 377 – 389. (in Chinese)
- [5] Stojanovic M. On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel[A]. Proceedings of the 1st ACM workshop on Underwater networks (WUWNet)[C]. New York, USA: ACM, 2007. 34 – 43.
- [6] Xie P, Cui JH. SDRT: a reliable data transport protocol for underwater sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2006, 8(7): 708 – 722.
- [7] Stokely RP, Roup A, Alt V. Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle [A]. Proceedings of OCEANS[C]. Washington, USA: MTS/IEEE, 2005. 1301 – 1304.
- [8] Freitag L, Grund M, Singh S, Partan J, Koski P, Ball K. The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms[A]. Proceedings of OCEANS[C]. Washington, USA: MTS/IEEE, 2005. 1086 – 1092.
- [9] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[A]. Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI2002)[C]. New York, USA: ACM, 2002. 147 – 163.
- [10] Maroti M, Kusy B, Simon G, Ledeczi A. The flooding time synchronization protocol[A]. Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)[C]. New York, USA: ACM, 2004. 39 – 49.
- [11] Mills D. Internet time synchronization: the network time protocol[J]. IEEE Transactions on Communications, 1991, 39(10): 1482 – 1493.
- [12] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M. Timing-sync protocol for sensor networks[A]. Proceedings of 1st conference on Embedded networked sensor systems (SenSys) [C]. New York, USA: ACM, 2003. 138 – 149.
- [13] Sichert M, Veerarittiphan L. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks [A]. IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC) [C]. New Orleans, USA: IEEE, 2003. 1266 – 1273.
- [14] Syed A, Heidemann J. Time synchronization for high latency acoustic networks[A]. Proceedings of the 25th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Barcelona, Spain: IEEE, 2006. 1 – 12.
- [15] Tian C, Jiang H, Liu X, Wang X, Liu W, Wang Y. Tri-message: a lightweight time synchronization protocol for high latency and resource-constrained networks [A]. Proceedings of IEEE Conference on Communications (ICC '09) [C]. Dresden, Germany: IEEE, 2009. 1 – 5.
- [16] Chirdchoo N, Soh W, Chua KC. MU-Sync: a time synchronization protocol for underwater mobile networks [A]. Proceedings of the First ACM international Workshop on Underwater Networks (WUWNet) [C]. New York, USA: ACM, 2008. 35 – 42.
- [17] Li Z, Guo Z, Hong F, Hong L. E²DTS: An energy efficiency distributed time synchronization algorithm for underwater acoustic mobile sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, Available online 14 March 2011, ISSN 1570 – 8705, 10.1016/j.adhoc.2011.03.008. (in Press)
- [18] Bagtzoglou AC, Novikov A. Chaotic behavior and pollution dispersion characteristics in engineered tidal embayment: a numerical investigation [J]. Journal of American Water Resources Association, 2007, 43(1): 207 – 219.
- [19] Novikov A, Bagtzoglou AC. Hydrodynamic model of the lower Hudson river estuarine system and its application for water quality management [J]. Water Resource Management, 2006, 20(2): 257 – 276.
- [20] Liu J, Zhou Z, Peng Z, Cui J. Mobi-sync: efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) [C]. Florida, USA: IEEE, 2010. 1 – 5.

作者简介



洪 锋 男, 1977 年 4 月出生, 山东青岛人. 博士、副教授. 2000 年和 2006 年分别在中国海洋大学、上海交通大学获工学学士和工学博士学位. 现为中国海洋大学计算机科学与技术系副主任. 从事传感器网络和无线网络方面的研究工作.

E-mail: hongfeng@ouc.edu.cn



张玉亮 男, 1990 年 6 月出生, 山东临沂人. 现为中国海洋大学计算机科学与技术系硕士研究生. 从事传感器网络方面的有关研究.