

多普勒辅助水下传感器网络时间同步机制研究

冯晓宁¹, 王卓², 朱晓龙¹, 张文¹

(1. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学水下机器人技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究了水下传感器网络 (UWSN) 时间同步算法。针对水下环境中声信号传播时延长、节点移动性等特点给时间同步带来的问题, 基于多普勒原理提出了一种分布式时间同步算法 (NU-Sync), 通过计算相对速度解决由节点移动导致传播时延不确定的问题, 利用自主式水下潜器作为信标节点, 通过不断广播时间信息的方式计算时钟频率偏斜, 节省网络的能量消耗。仿真实验表明, 与现有算法相比, NU-Sync 能够实现较高的同步精度。

关键词: 水下传感器网络; 时间同步; 多普勒方法; 传播时延

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

Doppler auxiliary time synchronization algorithm for underwater acoustic sensor network

FENG Xiao-ning¹, WANG Zhuo², ZHU Xiao-long¹, ZHANG Wen¹

(1. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Time synchronization problem in underwater acoustic sensor networks (UWSN) was studied. Due to the propagation of acoustic signals in underwater environment and nodes movement bring some problems to time synchronization. A distributed time synchronization algorithm was proposed based on Doppler method, called NU-Sync. NU-Sync solved the problem of uncertainty propagation delay caused by nodes movement through calculating relative velocity. And autonomous underwater vehicle (AUV) was used as beacon node which can save energy consumption in the process of calculation clock skew. Simulation resulted show NU-Sync achieves high level time synchronization precision.

Key words: UWSN, time synchronization, Doppler method, propagation delay

1 引言

近几年, 由于水下传感器网络 (UWSN, underwater acoustic sensor network) 存在着巨大的优势及挑战, 吸引了大量的学者进行研究^[1,2]。UWSN 广泛应用于环境监测、目标追踪和灾难预防等^[3]。在这些实际应用中, 网络中的普通节点收集信息并将信息发送到汇聚节点或基站, 在汇聚节点或基站中将这此信息整理转化为有用的信息, 这些信息中有很多是有时间意义的, 如事件发生顺序、发生时

间等, 因此, 时间同步在 UWSN 应用中起着重要的作用。同时, 传感器网络能效问题也直接影响网络性能, 为了节省传感器节点能量, 大多数网络中的节点都采用睡眠—唤醒机制^[4], 因此, 时间同步就显得更为重要。

相比陆地上无线电通信, 水下声通信具有带宽窄、传播时延长和高误码率等特点, 这些特点使陆地上的传感器网络时间同步算法不能直接应用于水下环境中^[5], 并且声信号在水下的传播速度大约是 1 500 m/s, 相比陆地上的无线电波传播速度相差

收稿日期: 2016-05-28; 修回日期: 2016-11-18

通信作者: 王卓, wangzhou@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61672181, No.51679058); 黑龙江省自然科学基金项目资助 (No.F2016005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61672181, No.51679058), The Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No.F2016005)

5 个数量级^[6,7], 因此传播时延不能忽略。同时节点之间存在相对运动也会导致信息的传播时延不确定, 这些问题给 UWSN 时间同步带来重大的挑战。

到目前为止, 许多研究学者已经提出了适用于水下环境的时间同步算法, 如 TSHL^[8]、E²DTS^[9]和 MU-Sync^[10], 这些算法在一定程度上解决了声信号传播时延的问题, 但它们也都存在不同程度上的缺点。TSHL 假设节点是静止的, 但在水下环境中节点很难保持静止, 而且节点的移动会导致较大的同步误差。E²DTS 假设在同步过程中, 节点之间是以恒定的速度进行运动, 这一假设不能真实反映水下环境中节点之间的运动规律, 限制了同步的精度。MU-Sync 通过进行多次同步信息交互以获得更精确的时间同步, 也没有考虑节点的移动给同步带来的误差。

本文根据水下通信的特点提出了一种水下传感器网络时间同步算法 NU-Sync, 可以利用 AUV (autonomous underwater vehicle) 作为信标节点以节省整个传感器网络能量的消耗, 该方法利用多普勒原理计算通信节点间的相对速度, 提高了时间同步的精度。为了计算时钟的频率偏斜, 信标节点定期发送参考信息, 普通节点接收参考信息并记录接收的时间, 通过这一过程可以计算出时钟的频率偏斜; 然后普通节点向信标节点发送一个请求信息, 信标节点收到请求信息后再给普通节点发送一个应答信息, 普通节点利用这一过程计算时钟的相位偏差。

2 相关工作

UWSN 时间同步主要有 2 个亟需解决的问题, 第一是声信号在水下传播时延长且由于节点之间的相对运动导致传播时延不确定; 第二是整个网络的能量有限, 因此, 同步算法必须充分考虑到能量开销。根据 UWSN 时间同步过程中传感器节点之间的信息交互方式, UWSN 的时间同步算法可以分为 2 类, 一类是发送—接收信息交换方式; 另一类是混合交互方式, 即单发送和发送—接收相结合的方式。

1) 发送—接收信息交换方式

MU-Sync 指出水下节点具有随机移动的特性, 利用分簇的原理将整个网络分成若干簇, 簇头与簇内节点采用发送—接收的信息交互方式完成时间同步, 通过 2 次线性回归计算簇内节点的时钟频率偏斜 (clock skew) 和时钟相位偏差 (clock offset),

但是它假设节点之间往返传播时延不变会影响同步的精度, 并且在实际的部署中需要较多的信标节点导致网络的部署成本很高。

2) 混合交互方式

TSHL 算法采用混合的信息交互方式并且第一次提出了解决水下声信号传播速度慢的问题, 它包括 2 个阶段, 第一阶段采取单发送信息交互方式, 信标节点多次向待同步节点广播信息, 待同步节点根据信息的发送时间和接收信息时的本地时间采用线性回归计算时钟的频率偏斜; 第二阶段采用一次发送—接收的信息交互方式计算时钟的相位偏差。E²DTS 提出利用 AUV 作为信标节点并作为信息主要的发送方, 可以节省整个传感器网络能量的消耗, 但是它假设在时间同步过程中, 节点之间是以恒定的速度进行运动, 限制了同步的精度。

3 NU-Sync 算法

3.1 NU-Sync 算法概述

传感器网络的时间同步算法利用公式 $T = \theta t + \beta$ 进行时间校准, 即传感器节点之间通过交换时间信息计算时钟的频率偏斜 θ 和时钟相位偏差 β 。NU-Sync 也是利用此原理进行时间的校准, 该方法包括 2 个阶段: 1) 同步信息交换阶段; 2) 时钟频率偏斜和相位偏差计算阶段。第一阶段采用混合的信息交互方式进行数据的收集; 第二阶段普通节点利用收集的数据计算时钟频率偏斜和相位偏差。

3.2 基于多普勒节点间相对速度计算方法

由于声信号传播速度低, 发送方和接收方之间很小的相对运动都会产生多普勒频移^[11], 虽然多普勒频移影响信号的传输, 但也包含着有用的信息, 可以用于传感器节点的时间同步。在信号传输过程中, 多普勒频移在时域上导致接收端接收信号时数据帧的压缩或扩展, 当发送方和接收方相向运动时, 接收信号的数据帧长度会发生变化。因此, 根据多普勒频移对传输信号的影响可以得出^[12]

$$r(t) = s((1 + \Delta)t) \quad (1)$$

其中, $s(t)$ 为发射信号, $r(t)$ 为接收信号, Δ 为多普勒因子, 它可用式(2)表示。

$$\Delta = \frac{v}{c} \quad (2)$$

其中, v 为发送方和接收方之间的相对速度, c 为声信号在水下的传播速度。为了计算出相对速度 v ,

需要先计算出多普勒因子 Δ 。设接收信号数据帧的长度是 T_{rp} ，发射信号数据帧长度是 T_{tp} ，与多普勒因子之间的关系为^[12]

$$\Delta = \frac{T_{tp}}{T_{rp}} - 1 \quad (3)$$

由式(3)得知，发射信号数据帧的长度是已知的，所以只需要测量出接收信号数据帧的长度后，即可求出 Δ 。测量接收信号帧的长度 T_{rp} 的最可靠方式是在数据帧的前后插入一段已知波形信号，其中， T_{rp} 定义为数据的长度与一个已知波形长度之和，接收端用一个与发射波形信号中已知波形相匹配的滤波器来检测，接收信号经过匹配滤波器输出时会出现 2 个峰值，测量 2 个峰值之间的长度就可得到 T_{rp} ^[12]，图 1 为这种测量 T_{rp} 的方法示意。

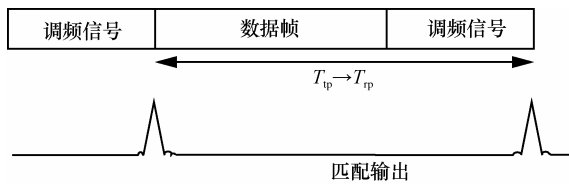


图 1 接收端检测接收数据帧长度

数据帧前后插入已知波形信号的选取必须考虑分辨率，当所选波形信号具有较大的时间(T)带宽(B)积时，即 $BT \geq 100$ ，接收端检测发生错误的概率很小^[13]。线性调频信号具有很高的时间分辨率，可以使用线性调频信号作为已知的波形信号插入到发射信号中用于多普勒频移的估计^[13]。式(4)为线性调频信号的表达式。

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2) \quad (4)$$

其中， f_0 表示起始频率， k 为常数，由带宽(B)和周期(T)的比值决定。估计出多普勒因子后，根据式(2)，可以求出发送方和接收方之间的相对速度。

3.3 基于多普勒节点间信息交换过程

本文利用 AUV 作为信标节点且具有标准的时间，采用混合的信息交换方式，如图 2 所示。

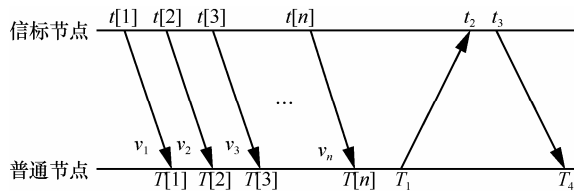


图 2 信息交换示意

具体的信息交换过程有以下 5 个步骤。

1) 信标节点在 $t[i]$ 时刻广播数据分组，数据分组中包含从 MAC 层获得的发送信息的时间 $t[i]$ ， i 表示第 i 次信息的传播且 $i \in [2, n]$ 。

2) 普通节点接收到信标节点广播的信息时记录其本地时间 $T[i]$ 并读取信息中信标节点发送的时间 $t[i]$ ，同时，利用 3.2 节基于多普勒节点间相对速度计算方法计算与信标节点之间的相对速度 v_i ，经过一次信息传播后普通节点可以收集到的数据有 $t[i]$ 、 $T[i]$ 和 v_i 。

3) 普通节点不断重复这一过程，直到收集到足够的计算时钟的频率偏斜。

4) 普通节点计算出时钟的频率偏斜后，选择在某个时间 T_1 给信标节点发送一个请求信息，该请求信息包含普通节点发送的时间，经过一段时间后，信标节点在 t_2 时间收到请求信息，随机等待一段时间后在 t_3 时刻给普通节点发送一个响应信息，该信息包含的数据有 T_1 、 t_2 和 t_3 。

5) 普通节点接收到信息后记录本地时间 T_4 并用 3.2 节方法计算与信标节点之间的相对速度 v_1 ，计算出时钟相位偏差。

3.4 时钟频率偏斜和相位偏差的计算

1) 时钟频率偏斜计算

普通节点的本地时间与标准时间存在如下关系式。

$$T[i] = \theta(t[i] + t_d[i]) + \beta \quad (5)$$

其中， i 表示第 i 次信息的传播， $t[i]$ 表示信标节点的标准时间， $t_d[i]$ 表示信标节点和普通节点之间第 i 次传播信息时的传播时延。在信标节点广播信息中，根据节点之间的距离变化与相对速度之间关系可以用式(6)表示。

$$D_i = D_{i-1} + \frac{1}{\theta} \int_{T[i-1]}^{T[i]} v_i dt \quad (6)$$

式(6)利用上一次的传播距离表示当前的传播距离，其中， D_{i-1} 表示信标节点和普通节点之间第 $i-1$ 次广播信息时数据分组传播的距离， $\int_{T[i-1]}^{T[i]} v_i dt$ 表示在 $T[i-1]$ 至 $T[i]$ 这个时间段内信标节点和普通节点之间距离的变化值，因此， D_i 可以用上一次数据分组传播距离 D_{i-1} 与在 $T[i-1]$ 至 $T[i]$ 时间段内信标节点和普通节点距离的变化值表示。根据节点之间的距离与传播时延的关系可以得到式(7)。

$$t_d[i] = \frac{D_i}{v_s} \quad (7)$$

其中, v_s 表示声信号在水下的传播速度, 通过式(7)可以表示节点之间的距离与传播时延的关系。式(6)和式(7)联立可得

$$\Delta D_i = \frac{1}{\theta} v_i (T[i] - T[i-1]) \quad (8)$$

$$\Delta t_d[i] = \frac{\Delta D_i}{v_s} \quad (9)$$

联立式(8)和式(9)可得到式(10)。

$$\Delta t_d[i] = \frac{\Delta D_i}{v_s} = \frac{v_i (T[i] - T[i-1])}{v_s \theta} \quad (10)$$

式(10)表示 2 次相邻信息的传播时延差与时钟频率偏斜的关系, 其中, $\Delta t_d[i]$ 和 θ 是未知量, 要求出 θ 的值, 需要再有一个关于 $\Delta t_d[i]$ 和 θ 的函数关系式。根据相邻 2 次本地时间和标准时间的关系即式(5)可得到式(11)。

$$T[i] - T[i-1] = \theta (\Delta t_d[i] + \Delta t[i]) \quad (11)$$

联立式(10)和式(11)可以得到最终频率偏斜的表达式

$$\theta_i = \frac{(T[i] - T[i-1]) (1 - \frac{v_i}{v_s})}{t[i] - t[i-1]} \quad (12)$$

由式(12)可知普通节点时钟频率偏斜与相邻传播信息发送时间差和接收时间差, 以及本次普通节点接收信息时和信标节点之间的相对速度有关, 根据公式可知每 2 次相邻的信息传播可以算出 θ 的值, 即假设普通节点收到信标节点广播的 n 条记录, 则能计算出 $n-1$ 个 θ 的值, 利用求均值的方法求出最终的频率偏斜。

$$\hat{\theta} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \theta_i \quad (13)$$

其中, n 代表普通节点收到信标节点广播信息的数目。

2) 计算时钟相位偏差

在计算出时钟频率偏斜后, 普通节点利用一次发送—接收的信息交换方式与信标节点进行信息交换, 收集如图 2 所示的 4 个时间 T_1 、 t_2 、 t_3 和 T_4 并利用多普勒原理计算出相对速度 v_1 , 设 $P_O(T_1)$ 为

普通节点在本地时间 T_1 时刻的位置, $P_B(t_2)$ 为信标节点在标准时间 t_2 时刻的位置, $d_{OB}(T_1, t_2)$ 为普通节点在 T_1 时刻、信标节点在 t_2 时刻它们之间的距离; $P_O(T_4)$ 为普通节点在本地时间 T_4 的位置, $P_B(t_3)$ 为信标节点在标准时间 t_3 时刻的位置, $d_{OB}(t_3, T_4)$ 为信标节点在 t_3 时刻、普通节点在 T_4 时刻之间的距离; 根据传播时延与距离的关系以及发送时间和接收时间的关系, 可以得到式(14)和式(15)。

$$\frac{\|P_O(T_1) - P_B(t_2)\|}{v_s} = \frac{d_{OB}(T_1, t_2)}{v_s} = t_2 - \frac{T_1 - \beta}{\theta} \quad (14)$$

$$\frac{\|P_O(T_4) - P_B(t_3)\|}{v_s} = \frac{d_{OB}(t_3, T_4)}{v_s} = \frac{T_4 - \beta}{\theta} - t_3 \quad (15)$$

其中, θ 是时钟频率偏斜, $d_{OB}(T_1, t_2)$ 和 $d_{OB}(t_3, T_4)$ 分别表示 2 次信息的传播距离。

$$d_{OB}(T_1, t_2) = v_s \left(t_2 - \frac{T_1 - \beta}{\theta} \right) \quad (16)$$

$$d_{OB}(t_3, T_4) = v_s \left(\frac{T_4 - \beta}{\theta} - t_3 \right) \quad (17)$$

根据式(16)和式(17)可得到 2 次信息的传播距离差与节点相对移动的关系, 如式(18)所示。

$$\Delta d = d_{OB}(t_3, T_4) - d_{OB}(T_1, t_2) = \int_{T_1}^{T_4} v_1 dt \quad (18)$$

其中, Δd 表示 2 次信息传播距离差, v_1 表示普通节点与信标节点之间的相对速度, 对式(18)进行整理得

$$\beta = \frac{v_s (T_1 + T_4) - \hat{\theta} [v_s (t_2 + t_3) + v_1 (T_4 - T_1)]}{2v_s} \quad (19)$$

通过式(19)能计算出最终的时钟相位偏差, 从该式得知最终的时钟相位偏差主要与时钟频率偏斜以及信标节点和普通节点发送或接收信息时的本地时间有关。

4 仿真和结果分析

本节通过 Java 开发的仿真程序实现了 NU-Sync 和 E²DTS 2 种方法的对比实验, 在此仿真实验中每个节点作为一个节点类并且有自己的本地时间和位置, 信标节点具有理想的标准时间, 其他节点的时间都有一定的误差, 声音在水下的传播速度设为 1 500 m/s, 因此, 传播时延可以根据节点之间的距离进行计算。

4.1 仿真参数设置

以 AUV 装载的 AquaNetwork 水下通信系统为标准, AquaNetwork 是一个标准的带有网络功能的 AquaComm modem, 根据实际水下实验得知 AquaNetwork 水下通信系统的传输时延约为 1.5 s, 其他仿真参数如下所示。

- 1) 节点运动的最大速度 2.9 m/s。
- 2) 时钟的频率偏斜 40 ppm(part per million)。
- 3) 时钟的相位偏差 10 ppm。
- 4) 时钟的仿真粒度是 1 ms。
- 5) 信标节点广播数据分组的数量是 25 个。
- 6) 节点发送数据分组的时间间隔是 1 s。
- 7) 节点之间的最大距离是 800 m。

本文会从时间同步后误差的变化、节点的初始频率偏斜对同步精度的影响、信标节点发送数据分组的数量对同步精度的影响、节点的最大速度对同步精度的影响几个方面讨论算法的性能。

4.2 实验结果及分析

图 3 展示了普通节点完成时间同步后同步误差的变化, 从图 3 中可以看出, 这 3 种时间同步策略的误差随着时间的推移都会有不同程度的增加, 其中没有进行时间同步的算法 (No-Sync) 误差增加的速度远远大于 NU-Sync 和 E²DTS, 在时间同步 100 000 s (大约 27 h) 后, No-Sync 的时钟偏差达到了 4 s 左右, 而 NU-Sync 和 E²DTS 的时钟误差却不足 1 s, 而且这种偏差会随着时间的推移成倍增加。随着时间的变化, 本文算法同步误差条件要小于 E²DTS 的同步误差, 这是因为 E²DTS 在整个同步过程中都假定信标节点和普通节点之间是以恒定的速度进行移动的, 在估计传播时延时由于速度的变化导致估计不准确, 从而影响时间同步的精度。而 NU-Sync 利用本文提出的节点间相对速度估

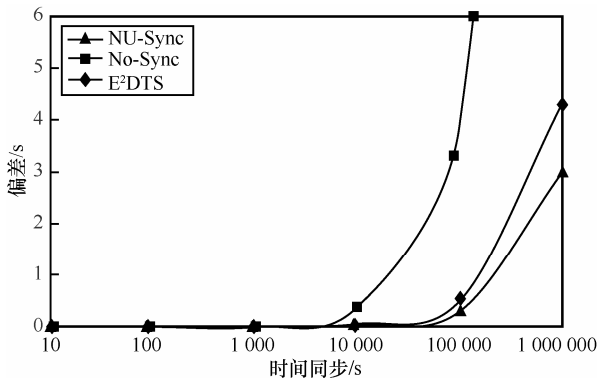


图 3 时间同步后时钟偏差的变化

计方法, 可以在普通节点每次接收信息时计算出此时与信标节点之间的相对速度, 利用对相对速度求积分的方式计算出在此次信息传播过程中信标节点与普通节点之间距离的变化值, 从而比较准确地估计传播时延, 提高时间同步的精度, 因此 NU-Sync 的同步误差要低于 E²DTS。

图 4 为不同初始时钟频率偏斜对时钟偏差的影响, 时间同步完成 10 s 后, 普通节点计算本地时间与标准时间的差值, 初始频率偏斜的变化范围在 10~100 ppm 之间, 由于 NU-Sync 和 E²DTS 都对时钟频率偏斜进行了一定程度的估计, 因此, 不同的初始频率偏斜对时钟偏差的影响都是一个常数, 而未同步算法 No-Sync 没有对频率偏斜进行任何估计, 因此, 时钟偏差的变化与不同的频率偏斜呈线性递增关系。E²DTS 虽然使用相邻时间差值的方法减少节点移动对传播时延的影响, 但是由于在同步过程中一直假设节点之间的运动行为是恒定的, 而在此仿真环境中, 信标节点和普通节点在时间同步过程中, 它们之间的相对速度是不断变化的, 所以此假设限制了同步的精度; NU-Sync 不仅使用相邻时间求差的方法减少节点移动对误差的影响, 而且通过节点间相对速度计算方法每次接收信息时计算节点之间相对速度, 准确地反映了节点之间相对位置的变化, 从而使传播时延的估计更为准确, 因此, NU-Sync 的时钟频率偏斜的估计误差要小于 E²DTS, 从仿真结果中可以得到这一结论。

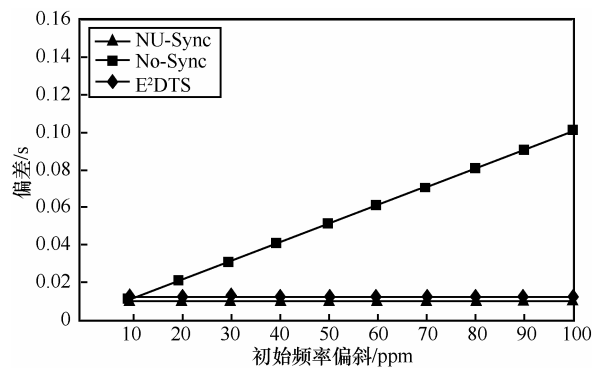


图 4 不同初始频率偏斜对算法的影响

在计算时钟频率偏斜过程中, 同步精度与信标节点广播信息数量相关。图 5 展示了不同数量的信标信息对同步精度的影响, 信标信息的数目从 5 变化到 40。从图中可以看出, NU-Sync 和 E²DTS 的同步误差随着信标信息数量的增多而下降, 最后趋

向平稳值, 在信标数量较少时, NU-Sync 的同步误差明显比 E²DTS 的同步误差低, 因为 NU-Sync 在计算频率偏斜的过程中, 利用基于多普勒原理相对速度计算方法能在每次接收信息时计算出与信标节点之间的相对速度, 利用此相对速度和任意相邻的时间能求出频率偏斜的值, 而 E²DTS 假定相对速度与声速的比值在整个同步过程中是个未知常量值, 但是在实际的仿真环境下, 由于节点运动的不规律性, 节点之间的相对速度是一个变量, 限制了同步的精度, 因此, 利用线性回归进行求解时需要更多的时间值才能求出比较精确的结果, 但是广播更多的信息数据分组意味着能量的消耗也会增加, 从整体来看 NU-Sync 的算法性能要优于 E²DTS。

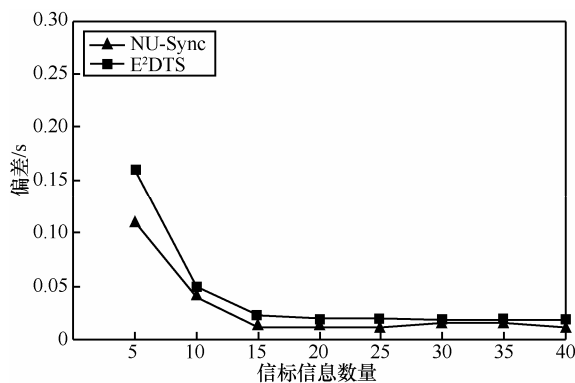


图 5 信标节点广播数据分组数目对时间同步精度的影响

根据分析可知, 传播时延的动态变化主要是由节点的移动速度导致的, 图 6 中所示为节点的最大速度对同步误差的影响, 在前面的分析中可知传感器节点的移动速度会导致信息的传播时延发生动态变化, 因此在仿真实验中研究了节点的移动速度对同步精度的影响。图 6 中速度的变化范围从 1~7 m/s, 可以看出 NU-Sync 的同步精度几乎不受速度变化的影响, 因为它利用基于多普勒原理的相对速度计算方法能在每次信息交换时计算出节点之间的相对速度, 能够最大程度地减少节点移动对同步精度的影响, 而 E²DTS 算法当最大速度变大时, 时间同步的误差也会随着增加, 主要是由于在整个同步过程中, E²DTS 假定节点之间的相对速度恒定, 而当节点的速度快速变化时会对传播时延的估计产生较大的误差, 从而影响同步的精度。从总体来看, NU-Sync 的同步误差要小于 E²DTS 所产生的同步误差。

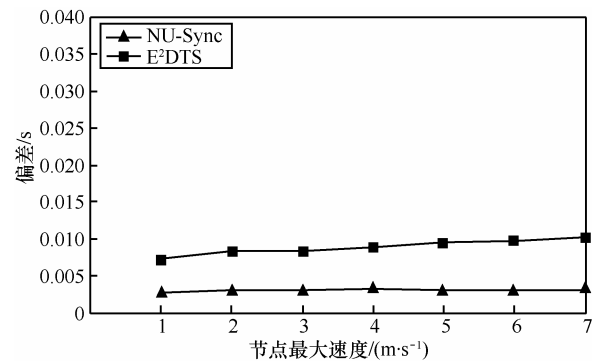


图 6 节点的最大速度对同步精度的影响

5 结束语

本文提出了一种适应于水下传感器网络的时间同步算法 NU-Sync, 利用多普勒原理可以计算出节点之间的相对速度, 能比较准确地估计信息的传播时延从而提高时间的同步精度, 同时, 利用 AUV 作为信标节点采用混合的信息交互方式, 能节省网络的能量消耗, 最后通过仿真实验证明本文提出的算法在同步精度方面具有良好的性能。

参考文献:

- [1] KIM S, YOO Y. SLSMP: time synchronization and localization using seawater movement pattern in underwater wireless networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014(6):1-14.
- [2] AUTHORS U. Performance evaluation of underwater sensor networks[J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 68(4):41-45.
- [3] WANG X, FU M, ZHANG H. Target tracking in wireless sensor networks based on the combination of KF and MLE using distance measurements[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(4):567-576.
- [4] PHUNG K H, TRAN H, TIETE J, et al. Low-overhead time synchronization for schedule-based multi-channel wireless sensor networks[C]//Local & Metropolitan Area Networks (LANMAN), 2013 19th IEEE Workshop on. IEEE, 2013: 1-6.
- [5] VERMEIJ A, MUNAFO A. Real-time clock synchronisation in underwater acoustic networks[C]// OCEANS 2015-Genova. IEEE, 2015.
- [6] STOJANOVIC M, PREISIG J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization[J]. Communications Magazine IEEE, 2009, 47(1): 84-89.
- [7] STOJANOVIC M. Underwater acoustic communication[M]. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 2015
- [8] SYED A, HEIDEMANN J. Time synchronization for high latency acoustic networks[C]//Proceedings - IEEE INFOCOM, 2006:1-12.
- [9] LI Z, GUO Z, HONG F, et al. E2DTS: an energy efficiency distributed time synchronization algorithm for underwater acoustic mobile sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(4):1372-1380.
- [10] CHIRDCHOO N, SOH W S, CHUA K C. MU-Sync: a time synchro-

nization protocol for underwater mobile networks[C]//Wuwnet '08 Proceedings of the Third ACM International Workshop on Underwater Networks, 2008: 35-42.

- [11] 岳玲, 樊书宏, 王明洲, 等. 高速移动水声通信中的多普勒频移估计方法研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(11):2366-2370.

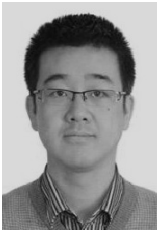
YUE L, FAN S H, WANG M Z, et al. Study on Doppler-shift estimation for underwater high-range-rate acoustic mobile communications[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(11):2366-2370.

- [12] SHARIF B S, NEASHAM J, HINTON O R, et al. A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1):52-61.

- [13] 胡飞, 曹晓金. 无线传感器网络原理与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015:307-308.

HU F, CAO X J. Wireless sensor networks[M]. Beijing: China Machine Press, 2015:307-308.

作者简介:



冯晓宁(1976-), 男, 山东临朐人, 博士, 哈尔滨工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为水下传感器网络、分布式仿真与计算、核能仿真与安全。



王卓(1977-), 女, 北京人, 博士, 哈尔滨工程大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为水下机器人、智能水下组网。



朱晓龙(1990-), 男, 山东胶南人, 哈尔滨工程大学硕士生, 主要研究方向为水下传感器网络时间同步。



张文(1990-), 女, 黑龙江双城人, 哈尔滨工程大学硕士生, 主要研究方向为水下传感器网络定位技术。