

Markov 链群一致性的水下传感器网络时钟同步算法*

魏连锁^{1,2}, 苏扬¹, 李华¹, 吴迪¹



¹(齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

²(哈尔滨工程大学 计算科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

通讯作者: 魏连锁, E-mail: wlsaaaaa@163.com

摘要: 现有 UWSNs 时钟同步算法大多数同步信息交换都是采用节点对节点之间的方式进行频繁的数据交换, 却忽略了节点本身通信范围内的邻居节点收到的同步信息, 所以存在同步通信能耗大、同步效率低等问题, 进而影响网络时钟同步的精度. 因此, 在分析 UWSNs 多目标优化网络拓扑演化过程对时钟同步的影响的基础上, 在不过多地增加网络平均发射半径和通信能耗的情况下, 利用群一致性、Markov 链等理论, 建立同步周期调节机制与时钟同步模型; 然后, 利用线性回归拟合方法, 建立簇间同步和簇内同步机制, 设计出精度高、效率高的 UWSNs 时钟同步算法; 最后, 采用仿真形式验证了该算法的相关性能.

关键词: Markov 链; 群一致性; UWSNs; 时钟同步

中文引用格式: 魏连锁, 苏扬, 李华, 吴迪. Markov 链群一致性的水下传感器网络时钟同步算法. 软件学报, 2019, 30(Suppl. (1)): 27-39. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19004.htm>

英文引用格式: Wei LS, Su Y, Li H, Wu D. Underwater sensor network clock synchronization algorithm based on Markov chain group consistency. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2019, 30(Suppl. (1)): 27-39 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19004.htm>

Underwater Sensor Network Clock Synchronization Algorithm Based on Markov Chain Group Consistency

WEI Lian-Suo^{1,2}, SU Yang¹, LI Hua¹, WU Di¹

¹(School of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

²(School of Computing Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Most of the existing UWSNs clock synchronization algorithms use nodes to exchange data frequently, but neglect the synchronization information received by neighbor nodes within the scope of node-based communication, so there are some problems such as high energy consumption and low synchronization efficiency in synchronization communication, which affect the accuracy of network clock synchronization. Therefore, based on the analysis of the influence of UWSNs multi-objective optimization network topology evolution process on clock synchronization, this paper uses the theory of group consistency and Markov chain to establish the synchronization cycle regulation mechanism and clock synchronization model without too much increase of the average transmission radius and communication energy consumption. Then, using linear regression fitting method, the inter-cluster synchronization and intra-cluster synchronization are established. Finally, the performance of UWSNs clock synchronization algorithm is verified by simulation.

Key words: Markov chain; group consistency; UWSNs; clock synchronization

* 基金项目: 国家自然科学基金(61571150, 61872204); 黑龙江省自然科学基金(LH2019F037); 黑龙江省教育厅面上项目(135109237, 135209235); 研究生创新科研项目(YJSCX2018-ZD09)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61571150, 61872204); Heilongjiang Natural Science Foundation of China (LH2019F037); Heilongjiang Provincial Department of Education (135109237, 135209235); Postgraduate Innovative Research Project (YJSCX2018-ZD09)

收稿时间: 2019-09-15; 采用时间: 2019-10-24

1 引言

UWSNs 需要一种低能耗、高精度的时钟同步算法,但由于水声信道的独有特点,使得现有的无线传感器网络时钟同步算法并不能直接应用,不适用于 UWSNs^[1].针对水下通信链路传播时延长以及由节点移动性带来的往返传播时延不等的特点,学者们分别从假设水下传感器节点静止、具有移动性、受海流影响和移动具有空间相关性 4 个方面进行了研究,提出了一系列适合水下环境的时钟同步算法^[2].MU-Sync 是新加坡国立大学 Chirdchoo 提出的一种分簇 UWSNs 时钟同步算法^[3].该算法先是将网络中传感器节点分为多个簇,再利用簇首周期性地广播同步信号来进行簇内时钟同步,利用簇首节点收集到的同步信息进行两次线性拟合,估计往返传播时延差,使时钟同步误差得到降低,与 TSHL 算法相比,通过多次双向信息交换,使 MU-Sync 算法获得了较好的同步精度.但是,由多次双向消息交互导致 MU-Sync 算法能量消耗增加.为解决此问题,文献[4]提出 CLUSS 时钟同步算法.该算法分为授权、簇内同步和簇间同步 3 个阶段.在授权阶段,所有的节点相互授权,并确认和删除恶意节点;在簇内同步阶段,簇首节点通过发送、接收模式和普通节点进行同步.为了减少信息交换,部分簇间同步和簇内同步可以同时进行,并利用 CESVM^[5]过滤非正常的接收端到接收端的传播延迟;同时假设随机传输延迟符合方差为 0 的高斯分布,进行时钟同步求精.MC-Sync^[6]是一种基于双信标节点的 UWSNs 时钟同步算法,该算法要求信标节点位于普通节点两侧,且静止不动,利用普通节点单向发送同步信息给两个信标节点来计算节点的频偏;再利用双向信息交换来计算时钟的相偏.但是,MC-Sync 算法对环境的要求过于苛刻,适应环境能力较差.针对此问题,文献[7]中的 Mul-Sync 算法根据网络移动性对时间同步参数计算的影响,建立了节点移动模型,得出计算时钟同步参数方程组,通过采用对多信标传感器节点接收同步信息包进行分组拟合来提高 Mul-Sync 算法的同步精度.该算法相对其他算法虽然具有同步精度高、能耗低的特点,但它只适用于洋流对节点运动影响较小的近海区域,所以,Mul-Sync 算法对环境的自适应能力还尚需加强.

尽管国内外学者针对 UWSNs 时钟同步开展了初步研究并取得一定成果,但大多数 UASNs 时钟同步算法都是基于节点与节点之间的单向或双向交换同步数据信息,而忽略了节点本身收到周围邻居节点的同步数据信息包,这将导致没必要的频繁同步数据信息交换,浪费节点的有限能量和带宽,从而影响网络时钟同步高效性.由此,本文采用 Markov 链、群一致性等理论建立同步周期调节机制与时钟同步模型,然后再利用线性回归拟合方法建立簇间同步和簇内同步机制,从而设计出一种具有低能耗、高精度、高效率的时钟同步算法.

2 网络模型及相关理论

在 UWSNs 中,三维水下空间 Ω 可映射成一个无向图 $G(V, E)$, 其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 表示随机部署在长方体 $\Omega = L \times W \times H$ 水体中 N 个水下传感器节点的集合; $E = \{e_{ij}^l, i \in V, j \in V, i \neq j\}$ 表示节点 i 与节点 j 之间的链路集, 其中, $(i, j) \in E$ 表示节点 i 与节点 j 是通路, $N_i = \{j | (i, j) \in E, i \neq j\}$ 表示节点 i 的邻居节点集.为了表述方便,我们给出如下定义.

定义 1(邻接矩阵 A). 这是指节点与边之间的关系.

$$A = a_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{当}(i, j) \in E \text{时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

定义 2(节点 i 度). 这是指与节点 i 相连接的边数和.

$$d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

定义 3(节点度矩阵 D).

$$D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_n\} \quad (3)$$

定义 4(Laplace 矩阵 L).

$$L = D - A \quad (4)$$

2.1 群一致模型

定义 5(群一致性). 将三维水下空间 Ω 可以看成是由 n 个节点组成的网络系统 $G(V,E)$, 当节点集 V 中所有节点的状态都趋于稳定时, 则称该网络系统 $G(V,E)$ 趋于群一致性.

令传感器节点 i 在 t_0 初始时刻的状态量为 $x_i(0)$, 则节点集 V 中所有节点在 t 时刻的状态向量可表示为 $X(t)$:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \quad (5)$$

根据文献[8], 群一致性线性模型为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_j(k) - x_i(k)] \quad (6)$$

其中, k 为迭代次数, a_{ij} 为邻接矩阵 A 的元素.

由式(6)可知, 群一致性模型是一个迭代过程, 进而网络系统 $G(V,E)$ 可以通过节点 i 与其邻居节点集 N_i 之间交换信息达到群一致性状态.

定义 6(群平均一致性). 若网络系统 $G(V,E)$ 满足:

$$x_{ave} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(0) \quad (7)$$

则称网络系统 $G(V,E)$ 达到群平均一致性.

定义 7(群最大一致性). 若网络系统 $G(V,E)$ 满足:

$$x_{max} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \max_{i \in V} X(0) \quad (8)$$

则称网络系统 $G(V,E)$ 达到群最大一致性.

定义 8(渐近收敛因子). 若网络系统 $G(V,E)$ 满足式(6)群一致性迭代模型, 则定义 σ 为渐近收敛因子:

$$\sigma = \sup_{X(k) \neq x_{ave} \cdot \bar{1}} \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\|X(k) - x_{ave} \cdot \bar{1}\|}{\|X(0) - x_{ave} \cdot \bar{1}\|} \quad (9)$$

其中, $\bar{1} = (1, 1, \dots, 1)^T$, 相对应的式(6)中的 ε -平均收敛时间为

$$t_{ave}(\varepsilon) = \frac{\ln \varepsilon^{-1}}{\ln \sigma^{-1}} \quad (10)$$

再由式(1)~式(5)可得式(6)的群一致性迭代矩阵形式:

$$X(k+1) = \Gamma X(k) \quad (11)$$

$$\Gamma = I_m - \alpha L \quad (12)$$

其中, $X(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_m(k))^T$, I_m 为单位矩阵, α 为增益因子.

由公式(11)可知, 更新矩阵 Γ 是随机矩阵, 其群一致性迭代达到同步的过程类似于 Markov 链收敛到其平稳态的过程. 因此, 将群一致性迭代过程(DCIP)映射成为 Markov 链 M 的状态模型:

$$\left. \begin{aligned} DCIP(\Gamma, N(V,E)) &\rightarrow M(S,M), \\ V = S, v_1 = s_1, Lv_n = s_n, \\ \Gamma = M, \lambda_{ij} &= \alpha_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中, 节点集合 V 对应于 Markov 链的状态集合 S , 迭代矩阵 Γ 对应于 Markov 链的一步转移概率矩阵 M .

定理 1. 若网络系统 $G(V,E)$ 满足式(11)群一致性迭代模型, 对于 $\forall X(0)$, 当 $\ddot{\alpha} = \frac{2}{(\lambda_1(L) + \lambda_{m-1}(L))}$ 时, 则 Markov 链 M 的状态模型式(13)能以大(等)于 $\sigma = 1 - \ddot{\alpha} \lambda_{m-1}(L)$ 的速度全局指数收敛到均衡值, 且对应的 ε -平均收敛时间为 $t_{ave}(\varepsilon) = \frac{\lambda_1 \ln \varepsilon^{-1}}{2\lambda_{m-1}}$.

证明: 由网络系统 $G(V,E)$ 满足群一致性收敛到其平稳态可知:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X(k) = \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) X(0) \quad (14)$$

即可得:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(M^k - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right) = 0 \quad (15)$$

又由网络系统 $G(V,E)$ 是无向连通的, 而矩阵 M 是双随机矩阵, 则有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(M^k - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right) = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right)^k = 0 \quad (16)$$

由此可得 $M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right)$ 的谱半径小于 1, 又由矩阵 L 是么正定的, 则矩阵 M 的特征值为

$$\lambda_i(M) = 1 - \alpha \lambda_{m-i+1}(L) \quad (17)$$

由式(12)可知: $\lambda_m(L) = 0, \lambda_1(L) = 1$, 所以有:

$$\rho \left(M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right) = \max \{ 1 - \alpha \lambda_{m-1}(L), \alpha \lambda_1(L) - 1 \} \quad (18)$$

所以, 要使 $\rho \left(M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right) < 1$ 的必要条件是:

$$0 < \alpha < \frac{2}{\lambda_1(L)} \quad (19)$$

另外,

$$X(k) - x_{ave} \cdot \bar{1} = \left(M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right)^k \cdot X(0) = \left(M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right)^k \cdot (X(0) - x_{ave} \cdot \bar{1}) \quad (20)$$

利用式(9)可得:

$$\sigma = M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \quad (21)$$

由此可得网络系统 $G(V,E)$ 的收敛速度由谱半径的大小决定, 则有:

$$\rho \left(M - \left(\bar{1} \cdot \frac{1}{m} \bar{1}^T \right) \right) = \begin{cases} 1 - \alpha \lambda_{m-1}(L) > \alpha \lambda_1(L), & 0 < \alpha < \frac{2}{(\lambda_1(L) + \lambda_{m-1}(L))} \\ \alpha \lambda_1(L) - 1 > 1 - \alpha \lambda_{m-1}(L), & \frac{2}{(\lambda_1(L) + \lambda_{m-1}(L))} < \alpha < \frac{2}{\lambda_1(L)} \end{cases} \quad (22)$$

所以, 当 $\rho < 1$, 取 $\alpha = \frac{2}{(\lambda_1(L) + \lambda_{m-1}(L))}$ 时, Markov 链 M 的状态模型可以达到最优收敛速度 σ .

下面求 ε -平均收敛时间, 将 $\alpha = \frac{2}{(\lambda_1(L) + \lambda_{m-1}(L))}$ 代入 $\sigma = 1 - \alpha \lambda_{m-1}(L)$ 可得:

$$\sigma = \frac{\lambda_1(L) - \lambda_{m-1}(L)}{\lambda_1(L) + \lambda_{m-1}(L)} = \frac{1 - \frac{\lambda_{m-1}(L)}{\lambda_1(L)}}{1 + \frac{\lambda_{m-1}(L)}{\lambda_1(L)}} \quad (23)$$

令 $\gamma = \frac{\lambda_{m-1}(L)}{\lambda_1(L)}$, 则有

$$\sigma = \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} = 1 - \frac{2\gamma}{1 + \gamma} \quad (24)$$

所以有:

$$\ln \sigma^{-1} = \ln \left(\left(1 - \frac{2\gamma}{1 + \gamma} \right)^{-1} \right) \approx 2\gamma \quad (25)$$

再由定义(8)可知,群一致性迭代模型(11),即 Markov 链 M 的状态模型(13) ε -平均收敛时间为

$$t_{ave}(\varepsilon) = \frac{\lambda_1 \ln \varepsilon^{-1}}{2\lambda_{m-1}} \quad (26)$$

证毕. □

2.2 时钟同步模型

本文传感器节点时钟模型以线模型为例,根据文献[9]每个节点 i 的动态模型表示为

$$c_i(t) = f_i t + \theta_i \quad (27)$$

其中, $c_i(t)$ 为节点 i 本地时钟, f_i 为时钟的频偏,决定了时钟速度, θ_i 为本地时钟的相偏.

2.3 群一致性时钟同步模型

由于受水下不确定性环境的影响,节点时钟的频偏和相偏随着时间的增加相互偏离,导致节点的时钟不断发生变化.因此,时钟同步过程就是通过校正节点的本地时钟,使其保持相同的时钟,但是为了维护本地时钟的连续性,本文引入虚拟参考时钟模型,建立群一致性时钟同步模型,使所有节点都构造一个本地的虚拟参考时钟模型,并利用群一致性校准时钟同步参数补偿模型,通过迭代补偿虚拟参考时钟模型中相应的参数,最终实现全网时钟同步.

2.4 虚拟参考时钟的转换模型

在线性时钟同步模型(9)的基础上,令节点 v_i 的本地虚拟参考时钟模型可表示为

$$c_i^v(t) = f_i^v t + \theta_i^v \quad (28)$$

式中 f_i^v, θ_i^v 分别为节点 v_i 本地虚拟参考时钟的频偏和相偏.

设 s_i^v 和 δ_i^v 分别为节点 v_i 的本地时钟相对于 $c_i^v(t)$ 的相对频偏和相偏,由此可得节点 v_i 的本地时钟 $c_i(t)$ 与 $c_i^v(t)$ 转换模型:

$$c_i^v(t) = s_i^v c_i(t) + \theta_i^v \quad (29)$$

$$c_i(t) = f_i^v t + \theta_i \quad (30)$$

式中 f_i, θ_i 分别为节点 v_i 本地虚拟参考时钟的频偏和相偏.

把式(28)代入式(29),可得:

$$c_i^v(t) = s_i^v f_i t + s_i^v \theta_i + \delta_i^v \quad (31)$$

当由群一致性模型迭代来更新节点的 $c_i^v(t)$ 参数时,所有节点 $c_i^v(t)$ 的频偏和相偏都将分别实现收敛,即满足:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f_i^v(t) = \lim_{x \rightarrow \infty} s_i^v(t) f_i = f^v \quad (32)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \theta_i^v(t) = \lim_{x \rightarrow \infty} (s_i^v(t) \theta_i + \delta_i^v(t)) = \theta^v \quad (33)$$

这里,令群一致性迭代模型的极限收敛值 f^v 等于 $c^v(t)$ 的频偏,而 θ^v 等于 $c^v(t)$ 的相偏,由此,可以推得 $c^v(t)$ 为

$$c^v(t) = f^v t + \theta^v \quad (34)$$

2.5 虚拟参考时钟频偏与相偏补偿模型

由于所有节点 $c_i^v(t)$ 的频偏和相偏都分别收敛到 $c^v(t)$ 的频偏和相偏,所以得到全网节点达到时间同步状态:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} c_i^v(t) = c^v(t) \quad (35)$$

由于时钟的频偏在 $c_i^v(t)$ 参数更新过程中起着重要的作用,而水下传输延迟使时钟频偏出现偏差.因此,在考虑传输延迟的情况下,节点本地虚拟参考时钟频偏则表示为

$$f_{ij}^v(t_k) = \frac{c_j(t'_k) - c_j(t'_{k-1})}{c_i(t'_k) - c_i(t'_{k-1})} + (k-1)f_{ij}(k-1) \quad (36)$$

这里, $c_j(t'_k)$ 为传感器节点 j 在 t'_k 时刻广播本地时刻, $c_i(t_k)$ 表示节点 v_i 在 t_k 时刻从节点 v_j 处接收到数据包的时刻.

根据一致性迭代模型, 节点 v_i 本地虚拟参考时钟频偏 f_i^v 的一致性迭代更新模型可表示为

$$f_{ij}^v(k+1) = \lambda_{ii} f_{ij}^v(k) + \sum_{v_j \in N_i} \lambda_{ij} f_{ij}^v(k) \quad (37)$$

其中, k 为迭代轮次, N_i 为节点 v_i 的邻居节点集合, λ_{ij} 则表示节点 v_j 在节点 v_i 更新同步参数时所对应的权重, 这里, $\lambda_{ii} + \sum_{v_j \in N_i} \lambda_{ij} = 1$.

由式(31)、式(34)得到相对于式(37)的虚拟参考时钟频偏补偿模型:

$$s_i^v(k+1) = \lambda_{ii} s_i^v(k) + \sum_{v_j \in N_i} \lambda_{ij} s_j^v(k) (f_j / f_i) \quad (38)$$

其中, f_j/f_i 表示节点 v_i 的本地时钟与其邻居节点 v_j 的本地时钟之间的相对频偏.

为了使节点本地虚拟参考时钟的相偏实现收敛, 节点 v_i 本地虚拟参考时钟的相偏 θ_i^v 的一致性迭代更新模型为

$$\theta_i^v(k+1) = \lambda_{ii} \theta_i^v(k) + \sum_{v_j \in N_i} \lambda_{ij} \theta_j^v(k) \quad (39)$$

当频偏补偿参数更新完成后, 传感器节点有相同的时钟速度, 而现在只需更新时钟的相偏补偿参数, 根据群平均一致性理论, 可得到相对于式(38)的本地虚拟参考时钟的相偏补偿模型为

$$\delta_i^v(k+1) = \lambda_{ii} \delta_i^v(k) + \sum_{v_j \in N_i} \lambda_{ij} (c_j^v(k) - c_i(k)) \quad (40)$$

因此, 可以利用式(40)来补偿传感器节点本地虚拟参考时钟的相偏.

2.6 Markov链的群一致性时钟同步模型

为了解决问题方便, 这里把群一致性迭代更新模型抽象为矩阵形式表示:

$$f(k+1) = \Gamma f(k) = \Gamma^{k+1} f(0), \quad \Gamma = (\lambda_{ij}) \begin{cases} = 0, & C \notin E, \text{且 } v_i \neq v_j \\ \in (0, 1), & e_{ij} \in E, \text{或 } v_i = v_j \end{cases} \quad (41)$$

其中, Γ 为一阶一致性迭代更新矩阵, 由 $\lambda_{ii} + \sum_{v_j \in N_i} \lambda_{ij} = 1$ 可知, 矩阵 Γ 的行和必为 1. 本节采用的更新迭代矩阵为

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{n_i + 1}, & e_{ij} \in E \text{ 或 } v_i = v_j \\ 0, & e_{ij} \notin E \text{ 或 } v_i \neq v_j \end{cases} \quad (42)$$

其中, n_i 为节点 v_i 的邻居节点数.

由定理(1)可知, 对于有限不可约的 Markov 链 M , $\exists k \in Z$, 使得 $P^k > 0$, 则有:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P^k = I \pi^T \quad (43)$$

其中, I 为单位向量, π 为 Markov 链 M 的稳态分布, 且满足 $I \pi^T = 1$ 的正列向量.

由此可推得, 所有节点的时钟同步参数随着迭代次数 k 的增加最终将收敛至同一个值, 在群一致性迭代更新模型过程中, 时钟同步参量为

$$f^v = \lim_{k \rightarrow \infty} f_i^v = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m \pi_n f_n^v(0) \quad (44)$$

$$\theta^v = \lim_{k \rightarrow \infty} \theta_i^v(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m \pi_n \theta_n^v(0) \quad (45)$$

其中, m 为分簇数量.

由式(42)和式(43)可计算得到 Markov 链 M_C 稳态分布的各项值为

$$\pi_j = \frac{n_j + 1}{m + \sum_{j=1}^m n_j} \quad (46)$$

进而可得全网虚拟参考时钟的频偏(相偏)等于所有簇的簇内参考时钟频偏(相偏)的加权均值:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f_i^v(k) = \frac{\sum_{j=1}^m (n_j + 1) f_i^v(0)}{m + \sum_{j=1}^m n_j} \quad (47)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \theta_i^v(k) = \frac{\sum_{j=1}^m (n_j + 1) \theta_i^v(0)}{m + \sum_{j=1}^m n_j} \quad (48)$$

其中, m 为分簇数量, n_j 为节点 v 的邻居数量.

3 基于 Markov 链的群一致性时钟同步算法

分析节点间通信距离和链路质量之间的关系,采用被动分簇技术,建立了一个更符合 UASNs 实际情况的层次型网络模型,如图 1 所示.

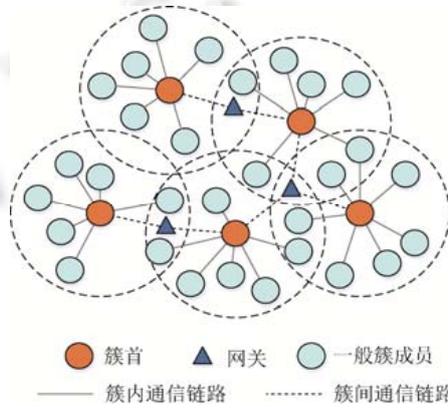


Fig.1 Hierarchical network based on passive clustering

图 1 基于被动分簇的层次型网络

在层次型网络拓扑构建完成之后,Markov 链的群一致性时钟同步算法(MG-CTS)的时钟同步阶段分为簇间一致性同步和簇内时钟同步两部分.其中,用网关节点来执行簇间成对时钟同步,簇首节点执行簇间一致性同步.

3.1 簇间时钟同步

令 k 为 UASNs 网络系统 $G(V,E)$ 的子系统,簇首 i 的簇内成员为 C_i ,簇首 j 的邻居簇头节点集为 \hat{N}_j . 假设在 $\hat{G}(\hat{V}, \hat{E})$ 中,簇首节点 j 从簇首节点 i 接收到的信息时刻为 $(0, t_j(t_0^{id}), t_i(t_0^j)), (1, t_j(t_1^{id}), t_i(t_1^j)), \dots, (l, t_j(t_l^{id}), t_i(t_l^j))$, 由式(36)~式(38)及式(41)得到簇首间的虚拟参考时钟频偏补偿动态模型向量表达式为

$$f(k+1) = (I - \bar{f}(k))(L_{C(k)} + \bar{\Delta}(k))f(k) \quad (49)$$

$$\bar{f}(k) = \{f_{ij}(k)\} \quad (50)$$

$$L_{C(k)} = \{I_{ji}(k)\} \quad (51)$$

$$\bar{\Delta}(k) = \{\delta_{ij}(k)\} \quad (52)$$

其中,

$$I_{ji}(k) = \begin{cases} -\rho, & i \in \hat{N}_j, i \neq j \\ 0, & i \notin \hat{N}_j, i \neq j \\ \rho, & i = j \end{cases} \quad (53)$$

$$\delta_{ji}(k) = \begin{cases} 1, & i \in \hat{N}_j, i \neq j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (54)$$

当 UASNs 簇首间的虚拟参考时钟频偏补偿动态模型式(49)经过 k 轮迭代后,由公式(47)可得簇首间的虚拟参考时钟频偏补偿渐近收敛于共同常数 f^v .当簇首间的频偏补偿参数更新完成后,各簇首节点以相同虚拟参考时钟频率 f^v 进行时钟同步;然后,在将簇首间的虚拟参考时钟相偏进行补偿,根据式(39)、式(49)得到簇首间的虚拟参考时钟动态相偏补偿模型向量表达式为

$$\theta_i(k+1) = (I - L_{C(k)})\theta_i(k) + \sigma V(k) \quad (55)$$

其中, $I - L_{C(k)}$ 为随机矩阵, σ 为渐近收敛因子, $V(k) = \{v_1(k), v_2(k), \dots, v_N(k)\}$, 再由公式(40)可得 $v_1(k)$ 为

$$v_1(k) = \frac{f_i}{f_j}(\delta_j(k+1) - \delta_j(k) + \sigma(\delta_i(k) - \delta_j(k))I_{ji}(k) - \delta_j(k)\delta_{ij}(k)) \quad (56)$$

这里, $i \in N_j$.

再由公式(48)可得簇首间的虚拟参考时钟相偏补偿渐近收敛于共同常数 θ^v .

所以,在簇首间节点执行群一致性时钟同步后,实现一轮簇间虚拟参考时钟同步记为 $T_v = f^v t + \theta^v$.

3.2 簇内时钟同步

在执行一轮簇间一致性同步后立即进行簇内同步.在每个簇内,由簇首节点向簇成员广播虚拟参考时钟 T_v ,簇内成员节点将经过补偿的簇内虚拟参考时钟与本地虚拟参考时钟的频偏和相偏进行加权线性拟合得到簇内基本同步时钟.

设从 $K+1$ 轮簇间同步开始进行簇内一致性同步,由校准模型式(32)、式(38)可推得簇 D_i 的簇内虚拟参考时钟频偏的一致性校准公式为

$$\left. \begin{aligned} f_j^s(k+1) &= \lambda_{ii} f_i^v(k) + \sum_{D_j} \lambda_{ij} f_j^v(k), \\ f_i^v(0) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

频偏校准完成后再根据式(33)、式(39)校准簇内虚拟参考时钟的相偏:

$$\left. \begin{aligned} \theta_j^s(k+1) &= \theta_i^v(k) + \sum_{N(D_j)} \lambda_{ij} (c_j^v(k) - c_i^v(k)), \\ \theta_i^v(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

其中, $N(D_i)$ 表示簇 D_i 的邻居簇集合.

再由式(43)、式(53)推导出簇内虚拟参考时钟 T_v 的频偏收敛于簇首虚拟参考时钟的频偏 f_j^s , 同理,可由式(44)、式(54)推导出簇内虚拟参考时钟 T_v 的相偏收敛于簇首虚拟参考时钟的频偏 θ_j^s , 由式(34)可得全网的虚拟时钟同步为

$$T_v = f_j^s t + \theta_j^s \quad (59)$$

3.3 MG-CTS算法描述过程

G-CTS 算法的伪代码描述见表 1.

Table 1 Pseudo-code of PG-LTCA algorithms**表 1** MG-CTS 算法的伪代码

MG-CTS 算法.	
Clock synchronization between clusters //簇间时钟同步	
1	Begin //网关节点算法开始
2	初始化网关节点 GatewayNode
3	syncTimerParams←周期性同步定时器参数
4	setSyncTimer(syncTimerParams) //设置同步定时器
5	While true Do //启动 GatewayNode 同步定时器
6	syncRequstMsg←接收簇间同步请求消息
7	If syncRequstMsg≠Nil Then
8	broadSendMsg(syncRequstMsg) //广播簇间同步请求消息
9	End
10	syncReplyMsg←接收簇间同步应答消息
11	If syncReplyMsg≠Nil Then
12	syncParamMsg←簇间同步参数消息
13	broadSendMsg(syncParamMsg) //广播簇间同步参数消息
14	syncClusterNode(Nodes) //簇间成对同步
15	End
16	syncTimerParams←调整周期性同步定时器参数
17	setSyncTimer(syncTimerParams) //重新设置同步定时器
18	End
19	End //网关节点算法结束
Clock synchronization Intra cluster //簇内同步	
1	Begin //簇首节点算法开始
2	初始化簇首节点 ClusterFirstNode
3	ClockSyncModule←建立簇内虚拟参考时钟同步模型
4	While true Do //ClusterFirstNode 等待接收消息
5	syncRequstMsg←接收簇间同步请求消息
6	If syncRequstMsg≠Nil Then
7	receiveMsgTime←消息接收时间
8	save(receiveMsgTime)
9	syncReplyMsg←簇间同步应答消息
10	sendMsgtoGatewayNode(syncReplyMsg) //发送簇间同步应答消息
11	End
12	syncParamMsg←接收簇间同步参数消息
13	If syncParamMsg≠Nil Then
14	syncClusterNode(ClusterNodes) //簇间一致性同步
15	End
16	End
End	//簇首节点算法结束

3.4 仿真实验与结果分析

本节实验采用 matlab R2016b 为仿真工具,通过仿真实验来验证 MG-CTS 算法在不同网络规模 and 不同信标节点情况下的性能,并与 MU-Sync 和 Mul-Sync 算法进行对比,仿真环境的参数设置见表 2.

Table 2 Parameter setting of simulation environment**表 2** 仿真环境的参数设置

仿真参数	初始值
监测区域	400m×400m×400m
节点部署距离	50m
节点通信半径	80m
节点平均移动速度	1.5m/s
初始传输半径	80m
频偏分布	独立均匀分布 $U(10^6-4,10^6+40)$ Hz
相偏分布	独立均匀分布 $U(0,1200)$ s
单跳传播延迟分布	独立均匀分布 $U(8,10)$ us
信标节点广播消息数	25
同步仿真次数	1 000

共设计 4 组对比仿真实验以验证 MG-CTS 算法的有效性。

仿真实验 1:首先设计由 1 个信标节点,24 个普通节点的 $1 \times 8 \times 16$ 小规模立体层次型部署方案,如图 2 所示。此部署方案中,水平漂浮节点 B_1 作为信标节点位于整个网络的第 1 层,令 B_1 广播信标信息经过 3 跳转发可以覆盖整个网络的普通节点。节点 $N_1 \sim N_8$ 作为网络的第 2 层,该层节点既能收到信标节点 B_1 广播的 1 跳 SBeacon 包,又收到周围多个邻居节点转发的 2 跳和 3 跳的转发 FBeacon 信息包;而 $N_9 \sim N_{24}$ 作为网络的第 3 层节点,该层节点只能收到 2 跳和 3 跳的转发 FBeacon 信息包。

通过执行 MG-CTS 算法 1 000 次仿真实验,随着信标节点 B_1 个广播信标消息包 SBeacon 的增加,从图 3 可以看出,由于信标消息包数据越多则线性拟合的结果就越接近真实值,所以 24 个普通节点的平均同步误差在逐渐减少,MG-CTS 的同步精度明显提高。

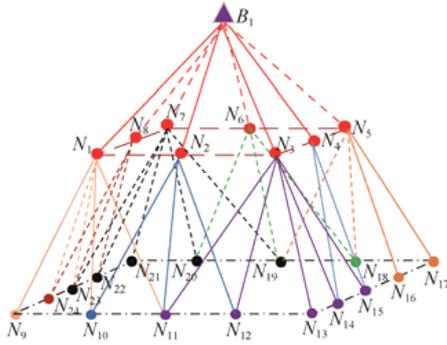


Fig.2 MG-CTS small-scale stereo hierarchical deployment scheme

图 2 MG-CTS 小规模立体层次型部署方案

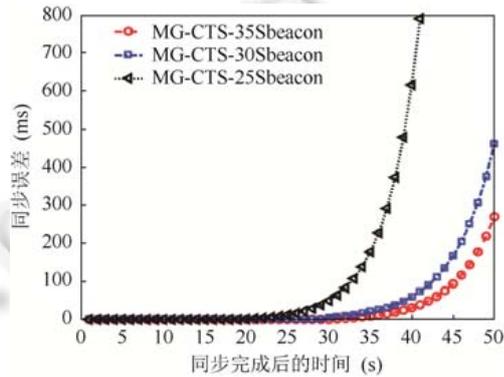


Fig.3 Simulation results of small-scale stereo hierarchical synchronization for MG-CTS

图 3 MG-CTS 小规模立体层次型同步仿真结果

仿真实验 2:设计由 4 个信标节点,77 个普通节点,分成 4 个簇 C_1, C_2, C_3, C_4 ,每个簇的簇首节点分别为 4 个信标节点 B_1, B_2, B_3, B_4 ,簇内成员普通节点为实验图 2 中的 $1 \times 8 \times 16$ 小规模立体层次型部署方案,如图 4 所示。在该部署方案中,水平漂浮节点 B_1, B_2, B_3, B_4 作为信标节点位于整个网络的第 1 层,节点 $N_1 \sim N_8, N_{25} \sim N_{32}, N_{44} \sim N_{51}, N_{63} \sim N_{70}$ 作为网络的第 2 层,该层节点既能收到信标节点 B_1, B_2, B_3, B_4 广播的 1 跳 SBeacon 包,又能收到周围多个邻居节点转发的 2 跳和 3 跳的转发 FBeacon 信息包;而 $N_9 \sim N_{24}, N_{13} \sim N_{52}, N_{53} \sim N_{62}, N_{71} \sim N_{77}$ 作为网络的第 3 层节点,其中, $N_{13} \sim N_{17}$ 为 C_1 与 C_2 共用转发点, $N_{52} \sim N_{55}$ 为簇 C_3 与 C_4 共用转发节点, $N_{17} \sim N_{21}$ 为簇 C_1 与 C_3 共用转发节点, $N_{17} \sim N_{40}$ 为 C_2 与 C_4 共用转发节点,这里, N_{17} 为 4 个簇的共用转发节点,所以 N_{17} 就设置为超级节点,该层节点只能收到 2 跳和 3 跳的转发 FBeacon 信息包。

通过执行 MG-CTS 算法 1 000 次仿真实验,随着信标节点 B_1, B_2, B_3, B_4 这 4 个广播信标消息包 SBeacon 的增加,从图 5 可以看出,由于节点接收到的 4 个源节点 B_1, B_2, B_3, B_4 的同步消息包数据增多,77 个普通节点上时钟的平均累积误差比小规模网络部署的 24 个普通节点的平均同步累积误差小得多,所以 MG-CTS 的同步精度优势明显。

仿真实验 3:本实验采用图 4 中大规模水下传感器网络立体层次型部署方案,对比 MG-CTS、MU-Sync 与 Mul-Sync 算法的多跳时钟同步时间与平均能量消耗。

从图 6 可以看出,随着时钟同步时间的不断增加,MU-Sync 算法平均能量消耗增加得较为明显,这是由于 MU-Sync 算法为了达到更高的时钟同步精度,簇首与簇内各个普通节点双向交互方式获得足够多的同步对时数据,然后再进行线性拟合估计时钟频偏和相偏,所以它的能量消耗较大;而 Mul-Sync 算法先由信标节点单向广播建立节点层次关系,使拥有直接上下层关系的节点进行双向同步信息交换,然后再进行多路径信息线性拟合估计本地时钟的频偏和相偏,所以它的能量消耗比 MU-Sync 算法要少;MG-CTS 算法所采用的被动分簇建立层次型拓扑平均所用的交换信息数量远低于同步信息的数量等级,待同步簇首节点可以收到来自多个路径到

达的单向时钟同步交互信息进行线性拟合估计时钟频偏和相偏,降低了能量的消耗,MU-Sync 和 Mul-Sync 算法并未利用这一特点.另外,时钟同步过程是在广播节点自身的过程中将本地时钟戳信息封装在数据包内“捎带”完成的,从而减少了数据包冗余字节的交换同步信息带来的能量消耗,因此,MG-CTS 算法的能耗比 Mul-Sync 算法要低.

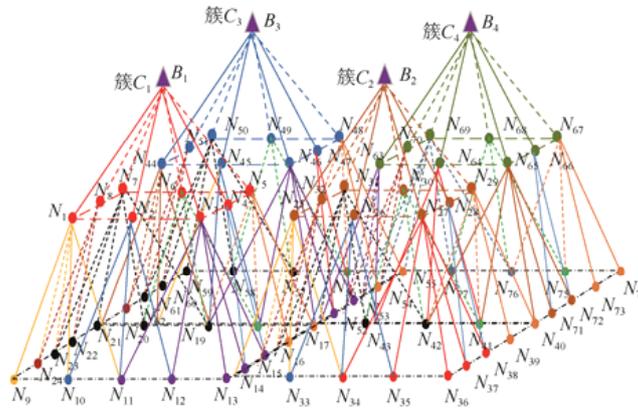


Fig.4 MG-CTS large-scale stereo hierarchical deployment scheme

图 4 MG-CTS 大规模立体层次型部署方案

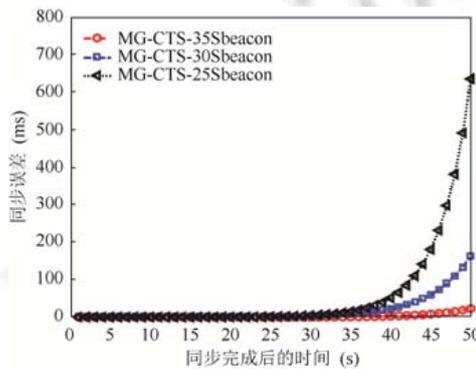


Fig.5 Simulation results of MG-CTS large-scale three-dimensional hierarchical synchronization

图 5 MG-CTS 大规模立体层次型同步仿真结果

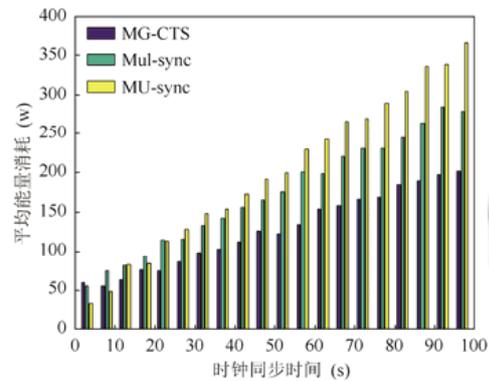


Fig.6 Clock synchronization time and average energy consumption

图 6 时钟同步时间与平均能量消耗

仿真实验 4:本实验采用图 4 所示大规模水下传感器网络立体层次型部署方案,对比 MG-CTS、MU-Sync 与 Mul-Sync 算法的多跳单轮平均同步信息交换数量与网络规模之间的关系.

图 7 展示了 MG-CTS、Mul-Sync 和 MU-Sync 算法的单轮平均同步信息交换数量与网络规模之间的关系,随着网络规模的不断扩大,MG-CTS 和 Mul-Sync 算法的单轮同步信息交换数量少于 MU-Sync 算法.在 MU-Sync 算法中,同步信息交换是由簇首节点向簇内成员节点广播,簇内节点采用双向交换同步消息获得同步数据信息,再利用两次加权线性拟合估计同步节点的时钟频偏和相偏,由此可知,该算法的平均同步信息交换数随着网络节点的增加而增大;Mul-Sync 算法是上下层之间同步信息交换,这主要是受到大规模网络分簇多少的影响而与网络规模大小关系不大;而 MG-CTS 算法采用层次型网络结构可有效降低时钟同步数据包的交换次数;同时,该算法采用被动分簇技术,单轮平均时钟同步数据包的交换次数只与网络的分簇数及节点的通信半径有关,而与网络规模无关.

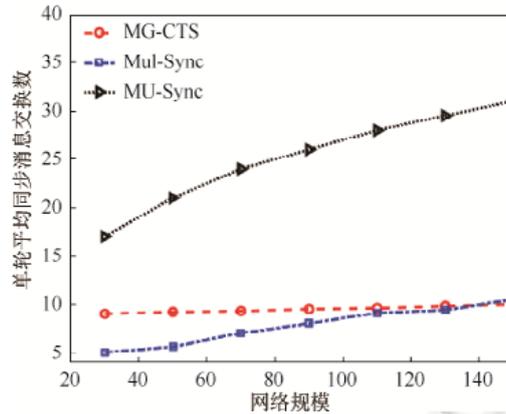


Fig.7 The relationship between the average number of synchronous information exchanges per round and the network size

图7 单轮平均同步信息交换数量与网络规模之间的关系

4 结束语

本文提出了基于 Markov 链群一致性 UWSNs 时钟同步算法,首先,从分析传感器节点受水下不确定性因素对时钟同步的影响入手,以整个 UWSNs 的虚拟参考时钟为基准时钟,首先给每个节点建立一个本地虚拟参考线性时钟模型,并通过群一致性迭代来校准各自的虚拟参考时钟模型的参数,最终实现整个网络时钟同步.而群一致性收敛速度受网络规模与节点的邻居数比例的影响,因此,在不过多地增加网络平均发射半径和通信能耗的情况下,利用 Markov 链的相关理论推导出网络规模和节点的邻居数分布的关系,构建快速收敛群一致性时钟同步模型,在此基础上,提出基于线性回归拟合方法,建立簇间同步和簇内同步机制,设计出高精度、高能效的 UWSNs 时钟同步算法.

References:

- [1] Song A, Stojanovic M, Chitre M. Editorial underwater acoustic communications: Where we stand and what is next. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019,44(1):1-6.
- [2] Chirchoo N, Soh WS, Chua KC. MACA-MN: A MACA-based MAC protocol for under water acoustic networks with packet train for multiple neighbors. In: *Proc. of the IEEE Conf. of Vehicular Technology*. 2008,(22):46-50.
- [3] Han G, Zhang C, Shu L, Rodrigues JJPC. Impacts of deployment strategies on localization performances in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2015,62(3):1725-1733.
- [4] Dobsław F, Zhang T, Gidlund M. End-to-end reliability-aware scheduling for wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2014,(10):1-10.
- [5] Manjula RB, Manvi SS. Coverage optimization based sensor deployment by using PSO for anti-submarine detection in UWASNs. *Ocean Electronics*, 2017,24(47):15-22.
- [6] Noh Y, Lee U, Lee S, *et al.* HydroCast: Pressure routing for underwater sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2016,65(1):333-347.
- [7] Yang Q, Su Y, Jin Z, *et al.* EFPC: An environmentally friendly power control scheme for underwater sensor networks. *Sensors*, 2019,15(11):29107-29128.
- [8] Kao C, Lin YS, Wu GD, Huang CJ. A comprehensive study on the internet of underwater things: Applications, challenges, and channel models. *IEEE Trans. on MPDI*, 2017,(17):1-20.
- [9] Senela F, Akkayab K, Erol-Kantarci M, Yilmaz T. Self-deployment of mobile under water acoustic sensor networks for maximized coverage and guaranteed connectivity. *Ad Hoc Networks*, 2018,34(C):170-183.



魏连锁(1975—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理.



李华(1995—),男,硕士生,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理.



苏扬(1996—),男,硕士生,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理.



吴迪(1994—),男,硕士生,主要研究领域为水下传感器网络,信息处理.

www.jos.org.cn

www.jos.org.cn