

免时间戳交互的无线传感网隐含节点同步参数估计算法

王恒¹ 彭政岑¹ 马文巧¹ 李敏¹

摘要 能效是无线传感网 (Wireless sensor networks, WSNs) 时间同步机制设计时需考虑的一个关键因素. 近年来, 隐含同步和免时间戳同步两种低功耗同步机制备受关注. 前者利用监听方式节省了发送同步信息所带来的能耗; 后者则通过接收端的定时响应, 无需在交互过程中传递时间戳, 减少了能量开销. 将免时间戳同步与隐含同步相结合, 能够进一步降低无线传感网同步功能实施所导致的额外能耗. 但目前免时间戳交互下的隐含节点只能估计时钟漂移, 无法估计时钟偏移. 针对该问题, 提出了一种基于最大似然估计 (Maximum likelihood estimation, MLE) 的免时间戳同步参数估计算法, 实现对隐含节点时钟漂移和偏移参数的联合估计, 并推导获得了对估计器的性能界限. 仿真结果验证了所提估计器的有效性.

关键词 时间同步, 参数估计, 免时间戳同步, 无线传感器网络

引用格式 王恒, 彭政岑, 马文巧, 李敏. 免时间戳交互的无线传感网隐含节点同步参数估计算法. 自动化学报, 2022, 48(11): 2788–2796

DOI 10.16383/j.aas.c220062

Synchronization Parameter Estimation Algorithm of Silent Node in Wireless Sensor Networks With Timestamp-free Exchange

WANG Heng¹ PENG Zheng-Cen¹ MA Wen-Qiao¹ LI Min¹

Abstract Energy efficiency is a key issue for designing time synchronization mechanism in wireless sensor networks (WSNs). Recently, implicit synchronization and timestamp-free synchronization have attracted much attention. The former uses the monitoring method to save the energy consumption caused by sending synchronization information. The latter reduces the energy overhead by the timing response of receiver without transmitting the timestamp in the exchange process. The combination of timestamp-free synchronization and implicit synchronization can further reduce additional energy consumption caused by the implementation of synchronization function in wireless sensor networks. However, at present, the silent node in timestamp-free exchange can only estimate the clock skew and not the clock offset. To solve this issue, a timestamp-free synchronization parameter estimation algorithm based on maximum likelihood estimation (MLE) is proposed, which can achieve the joint estimation of clock skew and offset for silent node. Then, the corresponding lower bounds of estimation are derived. Finally, simulation results verify the effectiveness of the proposed estimators.

Key words Time synchronization, parameter estimation, timestamp-free synchronization, wireless sensor networks (WSNs)

Citation Wang Heng, Peng Zheng-Cen, Ma Wen-Qiao, Li Min. Synchronization parameter estimation algorithm of silent node in wireless sensor networks with timestamp-free exchange. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(11): 2788–2796

无线传感网 (Wireless sensor networks, WSNs)

收稿日期 2022-01-22 录用日期 2022-05-17

Manuscript received January 22, 2022; accepted May 17, 2022

国家自然科学基金 (61972061), 重庆市自然科学基金杰出青年基金 (cstc2019jcyjqqX0012), 重庆基础研究与前沿探索项目 (cstc2021ycjh-bgzxm0017) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61972061), Natural Science Foundation of Chongqing, for Distinguished Young Scholars (cstc2019jcyjqqX0012), and Fundamental Research and Frontier Exploration Program of Chongqing (cstc2021ycjh-bgzxm0017)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065

1. Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Networked Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065

由负责感知和传输任务的传感器节点组成, 具有功耗低、成本小、易部署的优势, 被广泛应用于环境监控、工业控制等领域^[1-3]. 时间同步是无线传感网的关键技术之一. 无线传感网的许多基础功能, 例如数据融合、传输调度和目标定位等, 都需要节点间的精确时间同步^[4-6]. 因此, 对无线传感网中的时间同步技术进行研究和探索具有重要意义.

由于时钟的启动时刻和振荡器的变化特性不同, 传感器节点时钟之间通常存在两方面的偏差. 一方面是时钟的初始相位偏差, 称之为时钟偏移; 另一方面是时钟运行速率的偏差, 称之为时钟漂移. 无线传感网中的节点之间要维持高精度同步, 就需

要利用时间同步技术计算相对时钟漂移和偏移. 如果仅对时钟漂移进行估计, 那么只能校正节点之间的时钟速率偏差, 而相位偏差会一直存在, 导致同步无法实现. 反之, 若只估计时钟偏移, 虽然能够校正相位偏差, 但是振荡器的差异会导致同步时间较短, 从而需要频繁地进行重同步. 因此, 为了避免上述情况的出现, 就必须对时钟漂移和偏移参数进行联合估计.

无线传感网时间同步机制的设计所面临的一项重要挑战是: 如何尽可能地减少同步能耗. 由于网络中节点间的同步通常需要传输同步信息, 而同步信息传输所需能耗占据同步能耗的绝大部分. 因此, 一个有效的解决方案是设计以最小化同步信息传输数量为目标低功耗同步协议. 隐含同步是其中的一个典型协议^[7], 它基于无线媒介的广播特性, 利用监听策略隐式地获取同步信息, 可以显著减少同步信息传输数量. 在该机制中, 一个活跃节点(既发送同步信息又接收同步信息) 和一个时钟源节点之间执行双向信息交换同步操作, 而一些位于这两个节点重叠通信范围内的节点(称之为隐含节点), 只需监听它们之间的信息交换过程就能实现与时钟源节点的同步. 在此过程中, 隐含节点仅接收了信息, 没有发送任何信息, 大幅度地降低了同步能耗. 文献[7-9]基于隐含同步机制, 在不同的网络场景下, 利用统计信号处理技术设计了多种同步算法, 实现节点之间的高精度低能耗同步. 文献[10-11]则将隐含同步机制与另一种同步机制(校正式同步)相结合, 节点仅以少量的能量就能在估计时钟参数的同时校正自己的本地时钟, 实现实时的同步. 此外, 文献[12]还将隐含同步机制应用到了水下无线传感网中, 提出适用于水下传感器节点的低功耗同步算法.

免时间戳同步是近年来提出的另一种低能耗的同步机制^[13-16]. 由于其交互过程无需时间戳, 同步功能可以无缝嵌入现有网络数据流, 从而能够显著减少能耗. 在免时间戳同步中, 首先活跃节点发送不含时间戳的数据包给时钟源节点, 并记录此时的本地时间; 接着时钟源节点接收到数据包后在预定义的响应时间间隔返回不含时间戳的数据包; 最后活跃节点在接收到返回的数据包后记录自己的本地时间, 并通过预定义的响应时间间隔规则估计时钟参数, 与时钟源节点达到同步. 该机制利用接收方对发送方的预定义响应时间来传递同步信息, 避免了专用同步帧的传输. 文献[13]提出一种基于和响应策略的免时间戳同步协议, 其中时钟源节点响应时间和接收时间的和满足特定的规则. 通过在两个不同的时间间隔各返回一个响应数据包, 文献[14]提出一种跟随响应免时间戳同步协议. 但是, 由于跟

随响应数据包的存在, 限制了该协议在实际网络中的应用. 为解决上述问题, 文献[15]提出一种基于动态响应的免时间戳同步协议, 利用特定的映射规则, 将连续的两个或多个同步周期的响应时间设置为不同值, 消除了跟随响应数据包的传输. 进一步, 文献[16]提出一种免时间戳交互与单向传输混合的同步机制, 实现了时钟漂移和偏移的联合估计.

将免时间戳同步与隐含同步相结合, 能够联合发挥两种同步机制的低能耗优势, 从而进一步降低无线传感网同步能耗开销. 文献[15]对其进行了初步的研究, 但是, 在基于动态响应的免时间戳同步方法中, 隐含节点只能估计时钟漂移, 不能估计时钟偏移, 从而无法实现隐含节点的完全同步. 因此, 针对此问题, 本文提出了一种在不传递时间戳的情况下, 隐含节点能够联合估计时钟漂移和偏移的低功耗同步协议. 主要贡献如下:

1) 提出了一种基于免时间戳交互的隐含同步协议, 隐含节点记录监听到数据包的本地时间戳, 再结合预定义的响应规则就能完成对时钟漂移和偏移的联合估计, 以少量的能耗达到与时钟源节点的完全同步;

2) 针对典型的高斯随机时延, 推导了隐含节点时钟漂移和偏移的联合最大似然估计器(Maximum likelihood estimator, MLE), 以及相应的克拉美罗下限(Cramer-Rao lower bound, CRLB);

3) 仿真结果表明, 所提估计算法能够有效实现对隐含节点时钟漂移和偏移参数的免时间戳联合估计, 并具有达到 CRLB 的优良性能.

1 同步协议描述

本节将对所提的基于免时间戳交互的隐含同步协议进行介绍, 并建立节点的时钟模型.

1.1 交互过程

考虑一个由多个节点构成的无线传感网, 其中节点 O 是时钟源节点, 为网络提供参考时间; 节点 P 是活跃节点, 周期性地与时钟源节点 O 进行双向信息交互; 节点 Q 是位于活跃节点 P 与时钟源节点 O 公共广播领域内的隐含节点, 能够监听它们之间的信息交互过程, 如图 1 所示.

当网络同步开始, 活跃节点 P 与时钟源节点 O 之间进行免时间戳同步, 隐含节点 Q 监听两节点的交互信息进行隐含同步. 具体的同步过程如图 2 所示, 以第 j 轮通信过程为例, 详细步骤如下.

1) 活跃节点 P 在本地时间为 $t_{1,j}^{(P)}$ 时刻发送不含时间戳信息的数据包给时钟源节点 O .

2) 时钟源节点 O 接收到该数据包时, 记录本地

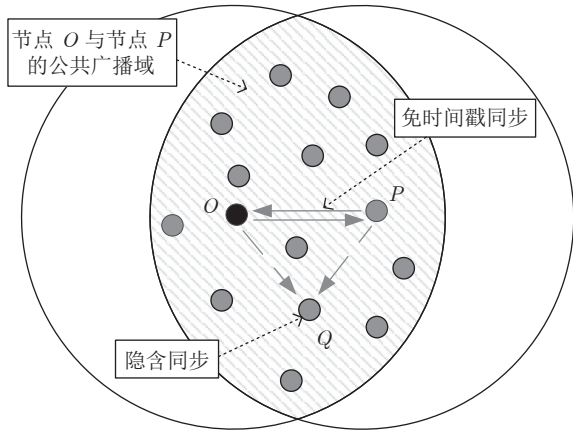


图 1 网络结构图

Fig.1 Network structure

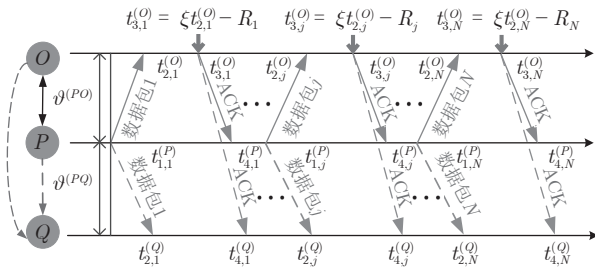


图 2 节点 Q 监听节点 O 与节点 P 之间的 N 轮免时间戳交互

Fig.2 The N rounds of timestamp-free exchange between node O and P with node Q overhearing them

时间为 $t_{2,j}^{(O)}$. 接着等待一段时间, 在 $t_{3,j}^{(O)}$ 时刻返回一个不含时间戳的确认帧 (Acknowledgement, ACK) 给节点 P . 这里 $t_{3,j}^{(O)} = \xi t_{2,j}^{(O)} - R_j$, 其中 ξ 是一个大于 1 且接近于 1 的已知常数, R_j 是一个等待间隔补偿.

3) 活跃节点 P 接收到来自时钟源节点 O 的 ACK 时, 记录本地时间为 $t_{4,j}^{(P)}$.

4) 隐含节点 Q 监听到来自活跃节点 P 的数据包和时钟源节点 O 的 ACK 时, 分别记录本地时间为 $t_{2,j}^{(Q)}$ 和 $t_{4,j}^{(Q)}$.

5) 经过 N 轮的同步过程之后, 隐含节点 Q 获得了一系列观测信息 $\{t_{2,j}^{(Q)}, t_{4,j}^{(Q)}, R_j\}_{j=1}^N$. 至此, 隐含节点 Q 可以利用该观测信息估计相对于时钟源节点 O 的时钟漂移和偏移.

在上述过程中, 活跃节点 P 与时钟源节点 O 之间进行免时间戳同步, 隐含节点 Q 监听它们之间的成对信息. 因此, 节点 Q 只接收了信息, 节省了由发送报文产生的能耗.

根据免时间戳同步的现有研究可知^[16], 隐含节点 Q 若要估计相对于时钟源节点 O 的时钟漂移与

偏移, 除了记录接收数据包和 ACK 的本地时间戳之外, 还需要获取 $t_{2,j}^{(O)}$ (用于估计时钟偏移) 和 $t_{3,j}^{(O)} - t_{2,j}^{(O)}$ (用于估计时钟漂移). 针对此, 本文通过预设时钟源节点返回 ACK 的时间 $t_{3,j}^{(O)}$ 同时获取 $t_{2,j}^{(O)}$ 和 $t_{3,j}^{(O)} - t_{2,j}^{(O)}$. 变换步骤 2) 中的关系式可得:

$$R_j = (\xi - 1)t_{2,j}^{(O)} - (t_{3,j}^{(O)} - t_{2,j}^{(O)}) \quad (1)$$

从式 (1) 中可以看出, 由于 ξ 大于 1 且接近于 1, 因此 $t_{3,j}^{(O)} - t_{2,j}^{(O)}$ 的信息和部分 $t_{2,j}^{(O)}$ 的信息 (即 $(\xi - 1)t_{2,j}^{(O)}$) 可以被嵌入到 R_j 中. R_j 在本文中被定义为 $R_j = (\xi - 1)(j - 1)T$, 其中 T 是活跃节点 P 与时钟源节点 O 的固定交互周期. 隐含节点 Q 在每轮监听过程中, 可以根据该定义式计算 R_j , 从而隐含地获取到 $t_{3,j}^{(O)} - t_{2,j}^{(O)}$ 和部分 $t_{2,j}^{(O)}$. 因此, 从获取同步信息的角度来看, 隐含节点 Q 能够估计出两个同步参数 (具体推导过程见第 2 节).

R_j 的作用除了嵌入同步信息之外, 另一个作用是补偿时钟源节点 O 的响应时间 (因此称之为等待间隔补偿). 因为 $t_{2,j}^{(O)}$ 会随着交互次数的增多而不断增长, 如果没有 R_j , 那么 $t_{3,j}^{(O)} = \xi t_{2,j}^{(O)}$, 响应时间 $t_{3,j}^{(O)} - t_{2,j}^{(O)} = (\xi - 1)t_{2,j}^{(O)}$ 会逐渐增长, 最终会影响网络的正常运行. 此外, 设置 ξ 为一个大于 1 且接近于 1 的常数有两个原因: 1) ξ 大于 1 可以保留部分 $t_{2,j}^{(O)}$; 2) ξ 接近于 1 可以确保响应时间合理, 因为 $t_{3,j}^{(O)} - t_{2,j}^{(O)} = (\xi - 1)[t_{2,j}^{(O)} - (j - 1)T]$.

1.2 时钟模型

网络中每个传感器节点的时钟相对于理想时间都存在时钟漂移和偏移. 其时钟模型可以表示为:

$$C(t_0) = (1 + \alpha)t_0 + \vartheta \quad (2)$$

其中, $C(t_0)$ 和 t_0 分别表示节点的本地时间和理想时间, α 和 ϑ 分别表示时钟漂移和偏移.

同步信息在传输过程中会经历多种时延, 这些时延可分为固定时延和随机时延^[17]. 其中固定时延包括传输时间、接收时间、传播时间, 随机时延包括发送时间、接收处理时间和信道访问时间. 一般情况下, 固定时延被假设为一个常数, 而随机时延则会根据不同的网络场景被建模为服从不同分布的随机变量. 例如, 延迟是由许多独立的随机过程相互叠加时, 根据中心极限定理, 随机时延可以被建模为高斯分布^[18]. 此外, 该随机时延模型已被实验证明是合理的^[19]. 因此, 在本文中, 假设固定时延是已知常数, 随机时延是独立同分布的高斯分布, 其均值为 0, 方差为 σ^2 .

根据时钟模型式 (2), 时钟源节点 O 在 j 轮同步

信息交换过程中, 本地时间戳 $t_{2,j}^{(O)}$ 可以表示为:

$$t_{2,j}^{(O)} = \left(1 + \alpha^{(PO)}\right) \times \left(t_{1,j}^{(P)} + d^{(PO)} + \omega_j^{(PO)}\right) + \vartheta^{(PO)} \quad (3)$$

其中, $\alpha^{(PO)}$ 和 $\vartheta^{(PO)}$ 分别表示节点 P 相对节点 O 的时钟漂移和偏移, $d^{(PO)}$ 和 $\omega_j^{(PO)}$ 分别表示信息从节点 P 传输到节点 O 过程中的固定时延和随机时延.

同样地, 时钟源节点 O 在 j 轮交互过程中返回 ACK 的时间戳 $t_{3,j}^{(O)}$ 可以表示为:

$$t_{3,j}^{(O)} = \left(1 + \alpha^{(QO)}\right) \times \left(t_{4,j}^{(Q)} - d^{(OQ)} - \omega_j^{(OQ)}\right) + \vartheta^{(QO)} \quad (4)$$

其中, $\alpha^{(QO)}$ 和 $\vartheta^{(QO)}$ 分别表示节点 Q 相对节点 O 的时钟漂移和偏移, $d^{(OQ)}$ 和 $\omega_j^{(OQ)}$ 分别表示信息从节点 O 传输到节点 Q 过程中的固定时延和随机时延.

隐含节点 Q 在 j 轮同步过程中监听到来自节点 P 的数据包时的时间戳 $t_{2,j}^{(Q)}$ 可以表示为:

$$t_{2,j}^{(Q)} = \left(1 + \alpha^{(PQ)}\right) \times \left(t_{1,j}^{(P)} + d^{(PQ)} + \omega_j^{(PQ)}\right) + \vartheta^{(PQ)} \quad (5)$$

其中, $\alpha^{(PQ)}$ 和 $\vartheta^{(PQ)}$ 分别表示节点 P 相对节点 Q 的时钟漂移和偏移, $d^{(PQ)}$ 和 $\omega_j^{(PQ)}$ 分别表示信息从节点 P 传输到节点 Q 过程中的固定时延和随机时延.

2 参数估计

基于上述的时间戳表达式, 本节将推导隐含节点时钟漂移和偏移的联合 MLE 以及相应的 CRLB.

2.1 联合 MLE

在实际无线传感网中, $\alpha^{(PO)}$ 、 $\alpha^{(QO)}$ 、 $\alpha^{(PQ)}$ 都非常小且接近于 0, 导致累计的时钟偏移 $\alpha^{(PO)} \times (d^{(PO)} + \omega_j^{(PO)})$, $\alpha^{(QO)}(d^{(OQ)} + \omega_j^{(OQ)})$, $\alpha^{(PQ)}(d^{(PQ)} + \omega_j^{(PQ)})$ 相对较小. 因此, 为了简化推导, 忽略式 (3) ~ 式 (5) 中的累计时钟偏移, 则第 1 节中的时间戳表达式可以分别重写为:

$$t_{2,j}^{(O)} = \alpha^{(PO)} t_{1,j}^{(P)} + t_{1,j}^{(P)} + d^{(PO)} + \omega_j^{(PO)} + \vartheta^{(PO)} \quad (6)$$

$$t_{3,j}^{(O)} = \alpha^{(QO)} t_{4,j}^{(Q)} + t_{4,j}^{(Q)} - d^{(OQ)} - \omega_j^{(OQ)} + \vartheta^{(QO)} \quad (7)$$

$$t_{2,j}^{(Q)} = \alpha^{(PQ)} t_{1,j}^{(P)} + t_{1,j}^{(P)} + d^{(PQ)} + \omega_j^{(PQ)} + \vartheta^{(PQ)} \quad (8)$$

由于 $t_{3,j}^{(O)} = \xi t_{2,j}^{(O)} - R_j$, 将式 (6) 和式 (7) 代入可得:

$$R_j = \xi t_{1,j}^{(P)} \alpha^{(PO)} - t_{4,j}^{(Q)} \alpha^{(QO)} + \xi t_{1,j}^{(P)} - t_{4,j}^{(Q)} + d^{(OQ)} + \xi d^{(PO)} - \vartheta^{(QO)} + \xi \vartheta^{(PO)} + \omega_j^{(OQ)} + \xi \omega_j^{(PO)} \quad (9)$$

注意到, 式 (9) 中包含 $\alpha^{(PO)}$ 、 $\alpha^{(QO)}$ 、 $\vartheta^{(PO)}$ 、 $\vartheta^{(QO)}$ 4 个时钟参数, 而节点 Q 要与节点 O 达到时间同步, 只需估计 $\alpha^{(QO)}$ 和 $\vartheta^{(QO)}$. 为了消除 $\alpha^{(PO)}$ 和 $\vartheta^{(PO)}$ 这 2 个无关参数, 将式 (9) 减去 ξ 倍的式 (8) 可得:

$$R_j - \xi t_{2,j}^{(Q)} = \xi t_{1,j}^{(P)} \alpha^{(PO)} - \xi t_{1,j}^{(P)} \alpha^{(PQ)} - t_{4,j}^{(Q)} \alpha^{(QO)} - t_{4,j}^{(Q)} + d^{(OQ)} + \xi d^{(PO)} - \xi d^{(PQ)} - \vartheta^{(QO)} + \xi \vartheta^{(PO)} - \xi \vartheta^{(PQ)} + \omega_j^{(OQ)} + \xi \omega_j^{(PO)} - \xi \omega_j^{(PQ)} \quad (10)$$

根据 3 个节点之间时钟漂移和偏移的关系: $\alpha^{(QO)} = \alpha^{(PO)} - \alpha^{(PQ)}$, $\vartheta^{(QO)} = \vartheta^{(PO)} - \vartheta^{(PQ)}$, 可得系统的同步通式为:

$$R_j - \xi t_{2,j}^{(Q)} + t_{4,j}^{(Q)} - d^{(OQ)} - \xi d^{(PO)} + \xi d^{(PQ)} = \left(\xi t_{1,j}^{(P)} - t_{4,j}^{(Q)}\right) \alpha^{(QO)} + (\xi - 1) \vartheta^{(QO)} + \omega_j^{(OQ)} + \xi \omega_j^{(PO)} - \xi \omega_j^{(PQ)} \quad (11)$$

令 $\Gamma_j = R_j - \xi t_{2,j}^{(Q)} + t_{4,j}^{(Q)} - d^{(OQ)} - \xi d^{(PO)} + \xi d^{(PQ)}$, $W_j = \omega_j^{(OQ)} + \xi \omega_j^{(PO)} - \xi \omega_j^{(PQ)}$. 同步通式 (11) 可以简写为:

$$\Gamma_j = \left(\xi t_{1,j}^{(P)} - t_{4,j}^{(Q)}\right) \alpha^{(QO)} + (\xi - 1) \vartheta^{(QO)} + W_j \quad (12)$$

经观察发现, 式 (12) 还包含节点 P 的本地时间戳 $t_{1,j}^{(P)}$, 节点 Q 无法直接获取. 但是, 由于数据周期性发送, $T = t_{1,j}^{(P)} - t_{1,j-1}^{(P)}$, 隐含节点 Q 可以根据 $t_{1,j}^{(P)} = (j-1)T$ 计算得到 $t_{1,j}^{(P)}$. 此外, 隐含节点 Q 监听了 N 轮的免时间戳交互, 可以获得 N 个同步通式. 为了能够实现高精度的同步, 需利用 N 个同步通式估计时钟漂移和偏移. 将所有的同步通式写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \vdots \\ \Gamma_N \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \xi t_{1,1}^{(P)} - t_{4,1}^{(Q)} & \xi - 1 \\ \vdots & \vdots \\ \xi t_{1,N}^{(P)} - t_{4,N}^{(Q)} & \xi - 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha^{(QO)} \\ \vartheta^{(QO)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Theta}} + \underbrace{\begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix}}_{\mathbf{W}} \quad (13)$$

最大似然估计是一种能够简便地实现复杂估计问题求解的估计方法, 其是利用已知的观测数据, 反推最大概率产生该观测信息的参数值. 无线传感网中的时间同步就是通过观测的同步信息计算时钟参数. 此外, 在式 (13) 中, $\mathbf{\Gamma}$ 是由已知观测数据构成的矢量矩阵; \mathbf{M} 是秩为 2 的观测矩阵; $\mathbf{\Theta}$ 是包含 2 个待估时钟参数的矢量, 并且与 $\mathbf{\Gamma}$ 呈线性关系; \mathbf{W} 是均值为 0, 方差为 $(1 + 2\xi^2)\sigma^2\mathbf{1}$ 的高斯噪声矢量, 其中 $\mathbf{1}$ 是单位矩阵, 满足线性模型的最大似然估计定理. 因此, 根据文献 [20] 中的定理 7.5, 时钟参数矢量 $\mathbf{\Theta}$ 的 MLE 为:

$$\mathbf{\Theta} = (\mathbf{M}^H \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^H \mathbf{\Gamma} \quad (14)$$

将式 (14) 进行数学运算, 节点 Q 时钟漂移和偏移的最大似然估计器分别表示为:

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}^{(QO)} \\ \hat{\vartheta}^{(QO)} \end{bmatrix} = \frac{1}{(\xi - 1) \left(N \sum_{j=1}^N G_j^2 - \left(\sum_{j=1}^N G_j \right)^2 \right)} \times \begin{bmatrix} (\xi - 1) \sum_{j=1}^N \Gamma_j \left(N G_j - \sum_{j=1}^N G_j \right) \\ \sum_{j=1}^N \Gamma_j \left(\sum_{j=1}^N G_j^2 - G_j \sum_{j=1}^N G_j \right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $G_j = \xi t_{1,j}^{(P)} - t_{4,j}^{(Q)}$.

所以, 利用估计器 (15), 隐含节点 Q 可以估计自身的时钟漂移和偏移, 达到与时钟源节点 O 的同步. 与现有的免时间戳同步与隐含同步相结合的不同步机制相比, 本文所提的同步机制完成了对隐含节点完整时钟参数 (时钟漂移和偏移) 的估计, 实现了与时钟源节点的完全时间同步.

2.2 克拉美罗下限 (CRLB)

CRLB 是衡量无偏估计器性能的一个理论标准^[20], 无偏估计量的方差只能无限逼近或等于 CRLB, 而不会小于 CRLB, 当两者相等时, 表示估计器性能达到最优. 由于它容易被确定, 常被用来评估无偏估计器性能的好坏, 判断估计器性能是否达到了最优. 为了评估所提联合 MLE 的性能, 本节推导矢量参数 $\mathbf{\Theta} = [\alpha^{(QO)} \ \vartheta^{(QO)}]^T$ 的 CRLB. 首先需要计算 2×2 的费希尔信息矩阵, 然后再求其逆矩阵可分别得到 $\alpha^{(QO)}$ 和 $\vartheta^{(QO)}$ 的 CRLB.

由式 (12) 可得 $(\alpha^{(QO)}, \vartheta^{(QO)})$ 的对数似然函数如下:

$$\ln L \left(\alpha^{(QO)}, \vartheta^{(QO)} \right) = N \ln \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi(1 + 2\xi^2)}} - \frac{\sum_{j=1}^N \left[\Gamma_j - G_j \alpha^{(QO)} + (\xi - 1) \vartheta^{(QO)} \right]^2}{2(1 + 2\xi^2)\sigma^2} \quad (16)$$

进一步, 似然函数分别对 $\alpha^{(QO)}$ 和 $\vartheta^{(QO)}$ 求二阶导可得:

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial (\alpha^{(QO)})^2} = -\frac{1}{(1 + 2\xi^2)\sigma^2} \sum_{j=1}^N G_j^2 \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial (\vartheta^{(QO)})^2} = -\frac{N(\xi - 1)^2}{(1 + 2\xi^2)\sigma^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha^{(QO)} \partial \vartheta^{(QO)}} = -\frac{\xi - 1}{(1 + 2\xi^2)\sigma^2} \sum_{j=1}^N G_j \quad (19)$$

再对式 (17) ~ 式 (19) 求负期望可得费希尔信息矩阵如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{FIM}(\lambda) &= \begin{bmatrix} -E \left[\frac{\partial^2 \ln L}{\partial (\alpha^{(QO)})^2} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha^{(QO)} \partial \vartheta^{(QO)}} \right] \\ -E \left[\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha^{(QO)} \partial \vartheta^{(QO)}} \right] & -E \left[\frac{\partial^2 \ln L}{\partial (\vartheta^{(QO)})^2} \right] \end{bmatrix} = \\ &= \frac{\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N G_j^2 & (\xi - 1) \sum_{j=1}^N G_j \\ (\xi - 1) \sum_{j=1}^N G_j & N(\xi - 1)^2 \end{bmatrix}}{(1 + 2\xi^2)\sigma^2} \end{aligned} \quad (20)$$

最后, 求得费希尔信息矩阵的逆矩阵为:

$$\mathbf{FIM}^{-1}(\lambda) = \frac{(1 + 2\xi^2)\sigma^2 \begin{bmatrix} N(\xi - 1)^2 & -(\xi - 1) \sum_{j=1}^N G_j \\ -(\xi - 1) \sum_{j=1}^N G_j & \sum_{j=1}^N G_j^2 \end{bmatrix}}{(\xi - 1)^2 \left[N \sum_{j=1}^N G_j^2 - \left(\sum_{j=1}^N G_j \right)^2 \right]} \quad (21)$$

费希尔信息矩阵的逆矩阵的对角元素即为相应参数的 CRLB^[20]. 因此, 时钟漂移 $\alpha^{(QO)}$ 和时钟偏移 $\vartheta^{(QO)}$ 的 CRLB 分别表示为:

$$\text{var}(\hat{\alpha}^{(QO)}) \geq \frac{N(1+2\xi^2)\sigma^2}{N \sum_{j=1}^N G_j^2 - \left(\sum_{j=1}^N G_j\right)^2} \quad (22)$$

$$\text{var}(\hat{\vartheta}^{(QO)}) \geq \frac{(1+2\xi^2)\sigma^2 \sum_{j=1}^N G_j^2}{(\xi-1)^2 \left[N \sum_{j=1}^N G_j^2 - \left(\sum_{j=1}^N G_j\right)^2 \right]} \quad (23)$$

3 仿真实验与对比分析

本节基于 MATLAB 仿真平台, 验证所提隐含节点的联合最大似然估计器的有效性. 同时, 在估计性能、能量开销、计算数量三个方面, 将所提同步机制与现有的相关同步机制进行了对比.

3.1 仿真实验

在无线传感网中, 固定时延和同步周期通常是 ms 量级, 而对于典型的石英晶体振荡器, 时钟漂移的数量级通常为 10^{-6} s. 从而可以得出, 时钟漂移大约是时钟偏移和固定时延的 10^{-3} 倍. 因此, 在仿真验证中, 将活跃节点 P 相对于时钟源节点 O 、活跃节点 P 相对于隐含节点 Q 的时钟漂移和偏移分别设置为: $\alpha^{(PO)} = 0.003$, $\alpha^{(PQ)} = 0.001$, $\vartheta^{(PO)} = [-5, 5]$, $\vartheta^{(PQ)} = [-2.5, 2.5]$. 隐含节点 Q 相对于时钟源节点 O 的时钟漂移 $\alpha^{(QO)}$ 和偏移 $\vartheta^{(QO)}$ 可由它们之间的关系得出. 此外, 节点 P 发送数据包的周期 T 设置为 80 ms, 高斯随机时延的标准差设置为 $\sigma = 0.2$, 信息传输链路中的固定时延取值范围分别设置为: $d^{(PO)} = [3, 13]$, $d^{(OP)} = [0, 10]$, $d^{(PQ)} = [3, 13]$, $d^{(OQ)} = [0, 10]$, 节点 O 在每轮同步过程中计算 ACK 响应时间 $t_{3,j}^{(O)}$ 的系数 $\xi = 1.4$. 在估计理论中, 通常选择均方误差 (Mean square error, MSE) 作为估计性能标准, 因此这里采用 MSE 来衡量所提时钟漂移 $\alpha^{(QO)}$ 和偏移 $\vartheta^{(QO)}$ 估计器的性能. 为了使仿真结果更加可靠, 在所有的仿真图中, 每个样本点的值都是 10000 次仿真运行后的平均值.

图 3 为隐含节点 Q 相对于时钟源节点 O 的时钟漂移最大似然估计器 $\hat{\alpha}^{(QO)}$ 的 MSE 和 CRLB. 从图中可以看出, 时钟漂移最大似然估计器 $\hat{\alpha}^{(QO)}$ 的 MSE 曲线与 CRLB 曲线基本重合, 表明了其估计性能达到最优, 同时也验证了估计器的有效性. 而且随着观测次数的增加, 所提估计器的估计精度不断提高.

图 4 所示为隐含节点 Q 相对于时钟源节点 O 的时钟偏移最大似然估计器 $\hat{\vartheta}^{(QO)}$ 的仿真结果. 在图 4 中, 时钟偏移最大似然估计器 $\hat{\vartheta}^{(QO)}$ 的性能随着观测次数的增加不断提高, 而且 MSE 曲线与 CRLB 曲线基本重合, 表明该估计器的性能达到了最优, 同时验证了该估计器的有效性. 值得注意的是, 在仿真中, 系数 $\xi = 1.4$, 这表明隐含节点 Q 在通信过程中只是获取到 $2/5$ 的 $t_{2,j}^{(O)}$, 就以此实现了相对于时钟源节点 O 的时钟偏移估计. 此外, 时钟偏移的估计精度是影响同步精度的主要因素. 因为隐含节点 Q 根据估计的时钟漂移与偏移调整本地时间, 减小与时钟源节点 O 的时间偏差, 而时钟漂移的估计精度比时钟偏移的估计精度高出约 10^6 个数量级, 其对同步精度的影响较小, 可以忽略不计. 所以可以利用时钟偏移的估计精度反映节点间的同步精度. 从图 4 中可以看出, 时钟偏移的估计精度为 10^{-1} 数量级, 而时钟偏移被设置为数 ms, 因此,

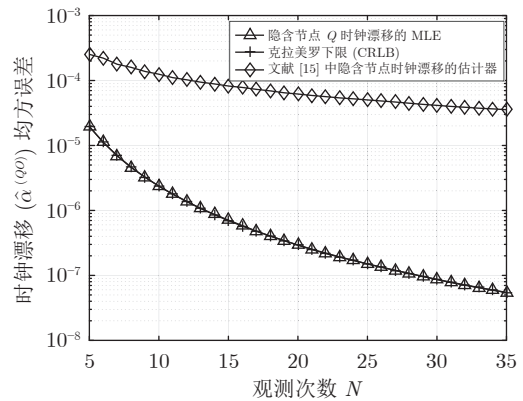


图 3 隐含节点 Q 时钟漂移估计 $\hat{\alpha}^{(QO)}$ 的 MSE 与 CRLB
Fig.3 MSE and CRLB of estimated clock skew $\hat{\alpha}^{(QO)}$ for silent node Q

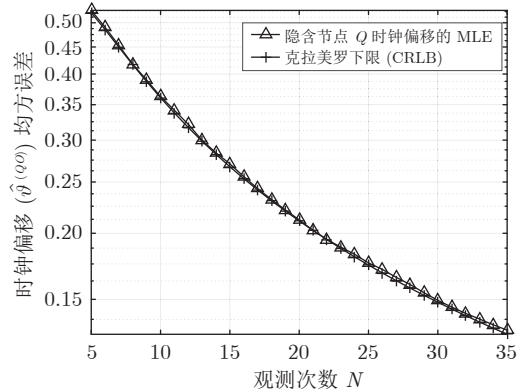


图 4 隐含节点 Q 时钟偏移估计 $\hat{\vartheta}^{(QO)}$ 的 MSE 与 CRLB
Fig.4 MSE and CRLB of estimated clock offset $\hat{\vartheta}^{(QO)}$ for silent node Q

所提同步算法可达到数百 μs 的同步精度。

从仿真结果可以看出, 隐含节点 Q 监听活跃节点 P 和时钟源节点 O 之间的免时间戳同步过程, 通过观测到的数据集 $\{t_{2,j}^{(Q)}, t_{4,j}^{(Q)}, R_j\}_{j=1}^N$ 就可以同时估计相对于节点 O 的时钟漂移和偏移, 达到与节点 O 的同步. 与文献 [15] 中的基于动态响应的免时间戳的隐含同步方式相比, 所提的免时间戳隐含同步方法继承了现有免时间戳同步和隐含同步的优势, 能够大幅度地减少同步能量消耗, 同时也可以无缝地嵌入到网络数据流之中. 进一步, 隐含节点又能够联合估计相对于时钟源节点的时钟漂移和偏移, 实现隐含节点的完全同步, 弥补了目前两种机制结合使用的不足.

3.2 对比分析

首先, 将所提的隐含节点 Q 的时钟漂移最大似然估计器 $\hat{\alpha}^{(QO)}$ 与类似的估计器 (文献 [15] 中的式 (26)) 进行估计性能比较. 为了确保比较的公平性, 在两种估计器的对比仿真中, 各个参数的初始化设置均相同, 文献 [15] 中两个连续周期内 ACK 的响应时间间隔设置为 $\{10, 30\}$. 仿真结果如图 3 所示, 本文所提的隐含节点 Q 的时钟漂移估计器的性能显著优于文献 [15] 中的时钟漂移估计器, 而且其估计精度大约高出 $10^1 \sim 10^3$ 个数量级. 其原因是所提同步机制通过预设时钟源节点 O 返回 ACK 的本地时间, 传递了部分时间戳信息 $(\xi - 1)t_{2,j}^{(O)}$ 给隐含节点 Q , 时间戳信息的获取有利于时钟漂移估计精度的提高. 图 5 所示为不同系数 ξ 下时钟漂移估计器性能对比结果, 其中设置 $\xi = \{1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6\}$. 从图中可以看出, 随着系数 ξ 的增大, 所提时钟漂移估计器 $\hat{\alpha}^{(QO)}$ 的估计性能不断提高, 表明隐含节

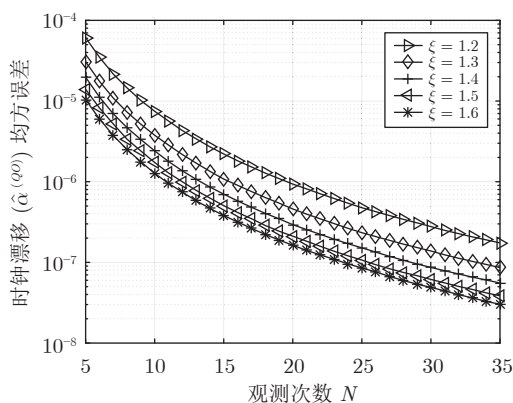


图 5 不同系数 ξ 下时钟漂移估计器性能对比结果

Fig.5 The performance comparison results of clock skew estimator under different coefficient ξ

点 Q 获取的时间戳信息越多, 时钟漂移的估计效果越好. 同时, 从仿真的角度说明, 相较于文献 [15] 中无法获取时间戳信息的隐含节点, 所提同步机制的隐含节点由于能够间接地获取部分时间戳信息, 因此其时钟漂移估计器性能更优. 但是, 需要注意的是, 不能为了提高时钟漂移的估计性能无限地增加 ξ , 因为 ξ 的取值必须确保响应时间间隔不会过大, 影响网络的正常运行.

其次, 将所提同步机制与隐含同步机制^[7]、基于动态响应的免时间戳同步机制^[15] 进行信令流程及能耗开销对比. 无线传感网的时间同步依赖于信息交互, 交互流程所导致的能耗开销是影响同步能耗的重要因素. 在隐含同步机制中, 隐含节点监听的是传统的双向信息交互过程, 需要专用的同步帧传递时间戳信息, 同步帧的传输需要消耗额外的能量. 在基于动态响应的免时间戳同步机制中, 待同步节点无需发送时间戳信息, 在普通数据收发中实现同步, 无需消耗额外的能量. 在所提机制中, 隐含节点监听的是时钟源节点和活跃节点的免时间戳交互过程, 不需要专用同步帧, 没有额外的能量开销. 因此, 相较于隐含同步机制, 所提机制避免了网络中专用同步帧传输, 显著减少了能耗. 与免时间戳机制相比, 所提机制能够一次性实现公共广播领域内多个节点的同步, 而免时间戳机制只能实现一个节点的同步, 对于网络整体的能耗而言, 所提机制更具优势.

最后, 分析所提同步算法、隐含同步算法^[7]、基于动态响应的免时间戳同步算法^[15] 以及免时间戳与隐含同步结合算法^[15] 的计算复杂度, 主要是对算法中加法和减法、乘法和除法计算数量进行比较, 对比结果如表 1 所示. 从表中可以看出, 4 种同步算法时钟参数的计算复杂度均为 $O(N^2)$. 而本文算法时钟参数乘除法的计算数量高于隐含同步算法和免时间戳同步算法时钟参数计算数量, 这是因为时钟源节点 O 返回 ACK 的本地时间中包含系数 ξ , 导致算法中乘除法的数量相对较高. Wang 等^[16] 研究表明, 传输 1 比特数据超过 100 米消耗的能量与执行 300 万条指令所需能量大致相等. 因此, 虽然本文算法的计算数量略高, 但能够在不传输专用同步帧的情况下实现多个节点的同步, 它仍然是一个高能效的同步方案. 相较于文献 [15] 中的免时间戳与隐含同步结合算法, 本文算法时钟漂移的计算复杂度略低于其时钟漂移计算复杂度, 而且本文算法还可以估计时钟偏移, 实现完整的同步.

4 结论

本文提出了一种能够联合估计免时间戳同步场

表 1 本文算法与隐含同步算法、免时间戳同步算法以及免时间戳和隐含同步结合算法的计算数量对比结果
Table 1 The comparison results of the number of calculations among proposed algorithm, implicit synchronization algorithm, timestamp-free synchronization algorithm and combination algorithm of timestamp-free and implicit synchronization

算法	参数	加减法数量	乘除法数量
本文算法	时钟漂移	$2N^2 + 14N - 3$	$N^2 + 11N + 3$
	时钟偏移	$5N^2 + 13N - 2$	$4N^2 + 11N + 4$
隐含同步算法	时钟漂移	$2N^2 + 12N - 3$	$3N + 3$
	时钟偏移	$5N^2 + 11N - 3$	$N^2 + 3N + 3$
免时间戳同步算法	时钟漂移	$N^2 + 6N - 2$	$4N + 3$
免时间戳与隐含同步结合算法	时钟漂移	$4N^2 + 10N - 1$	$4N^2 + 12N + 1$

景中隐含节点的时钟漂移和偏移的同步协议。在高斯随机时延下, 推导了隐含节点时钟漂移和偏移的最大似然估计器和相应的 CRLB。最后, 通过数值仿真验证了所提估计器的有效性, 并且与现有的相关同步方案在估计性能、能量开销和计算数量三个方面进行了对比, 论证了所提方案低功耗的优势。

References

- Huan X T, Kim K S, Lee S, Lim E G, Marshall A. Improving multi-hop time synchronization performance in wireless sensor networks based on packet-relaying gateways with per-hop delay compensation. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, **69**(9): 6093–6105
- Wang Ting, Xu Xiao-Quan, Tang Xiao-Ming, Huang Qing-Qing, Li Yong-Fu. Precise clock synchronization in industrial internet of things: Networked control perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(7): 1720–1738
(王颀, 徐小权, 唐晓铭, 黄庆卿, 李永福. 工业物联网中的精确时钟同步: 网络化控制理论观点. *自动化学报*, 2021, **47**(7): 1720–1738)
- Zhang Meng, Han Min. Finite-time synchronization between uncertain complex networks based on unidirectional coupling method. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(7): 1624–1632
(张檬, 韩敏. 基于单向耦合法的 uncertain 复杂网络间有限时间同步. *自动化学报*, 2021, **47**(7): 1624–1632)
- Wang Heng, Zhu Yuan-Jie, Yang Hang, Wang Ping. Deterministic scheduling algorithm with priority classification for industrial wireless networks. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(2): 373–384
(王恒, 朱元杰, 杨杭, 王平. 基于优先级分类的工业无线网络确定性调度算法. *自动化学报*, 2020, **46**(2): 373–384)
- Wang Heng, Liu Qing-Hua, Li Min, Tan Shuai. Orchestration methods with determinacy in wireless industrial network by considering repeat transmissions. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(11): 2664–2674
(王恒, 刘清华, 李敏, 谭帅. 考虑链路重传的工业无线网络确定性调度算法. *自动化学报*, 2021, **47**(11): 2664–2674)
- Jia P Y, Wang X B, Shen X M. Passive network synchronization based on concurrent observations in industrial IoT systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, **8**(18): 14028–14038
- Noh K L, Serpedin E, Qaraqe K. A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: Pairwise broadcast synchronization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, **7**(9): 3318–3322
- Chaudhari Q M, Serpedin E, Qaraqe K. On minimum variance unbiased estimation of clock offset in a two-way message exchange mechanism. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, **56**(6): 2893–2904
- Chaudhari Q M, Serpedin E, Kim J S. Energy-efficient estimation of clock offset for inactive nodes in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, **56**(1): 582–596
- Wang H, Zeng H Y, Wang P. Linear estimation of clock frequency offset for time synchronization based on overhearing in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2016, **20**(2): 288–291
- Wang H, Zeng H Y, Li M, Wang B G, Wang P. Maximum likelihood estimation of clock skew in wireless sensor networks with periodical clock correction under exponential delays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, **65**(10): 2714–2724
- Liu G P, Yan S F, Mao L L. Receiver-only-based time synchronization under exponential delays in underwater wireless sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, **7**(10): 9995–10009
- Brown D R, Klein A G. Precise timestamp-free network synchronization. In: Proceedings of the 2013 Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2013. 1–6
- Etzlinger B, Palaoro N, Haselmayr W, Rudic B, Springer A. Timestamp free synchronization with sub-tick accuracy in the presence of discrete clocks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, **16**(2): 771–783
- Wang H, Yu F, Li M, Zhong Y. Clock skew estimation for timestamp-free synchronization in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, **17**(1): 90–99
- Wang H, Gong P F, Yu F, Li M. Clock offset and skew estimation using hybrid one-way message dissemination and two-way timestamp free synchronization in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2020, **24**(12): 2893–2897
- Phan L A, Kim T, Kim T. Robust neighbor-aware time synchronization protocol for wireless sensor network in dynamic and hostile environments. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, **8**(3): 1934–1945
- Zhao S, Zhang X P, Cui X W, Lu Q L. A new TOA localization and synchronization system with virtually synchronized periodic asymmetric ranging network. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, **8**(11): 9030–9044
- Shi F R, Li H L, Yang S X, Tuo X G, Lin M S. Novel maximum likelihood estimation of clock skew in one-way broadcast time synchronization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, **67**(11): 9948–9957
- Steven M K. *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Vol I: Estimation Theory*. Bergen County: Prentice-Hall, 1993. 22–35



王 恒 重庆邮电大学自动化学院教授. 2010 年获得重庆大学博士学位. 主要研究方向为工业物联网, 无线传感器网络和时间同步. 本文通信作者.
E-mail: wangheng@cqupt.edu.cn

(WANG Heng Professor at the College of Automation, Chongqing

University of Posts and Telecommunications. He received his Ph.D. degree from Chongqing University in 2010. His research interest covers industrial internet of things, wireless sensor networks, and time synchronization. Corresponding author of this paper.)



彭政岑 重庆邮电大学自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络, 时间同步.

E-mail: pengzhengcen_pzc@163.com

(PENG Zheng-Cen Master student at the College of Automation, Chongqing University of Posts and

Telecommunications. Her research interest covers wireless sensor networks and time synchronization.)



马文巧 重庆邮电大学自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络, 时间同步.

E-mail: mawenqiaoemail@163.com

(MA Wen-Qiao Master student at the College of Automation, Chongqing University of Posts and Tele-

communications. Her research interest covers wireless sensor networks and time synchronization.)



李 敏 重庆邮电大学自动化学院副教授. 2014 年获得重庆大学博士学位. 主要研究方向为无线传感器网络, 无线功率传输和无人机.

E-mail: limin@cqupt.edu.cn

(LI Min Associate professor at the College of Automation, Chongqing

University of Posts and Telecommunications. She received her Ph.D. degree from Chongqing University in 2014. Her research interest covers wireless sensor networks, wireless power transfer, and unmanned aerial vehicle.)

勘误: 作者更正声明

由于作者原因, 导致《自动化学报》2022 年第 4 期发表的《视觉 Transformer 研究的关键问题: 现状及展望》(田永林, 王雨桐, 王建功, 王晓, 王飞跃) 文中出现错误和遗漏, 现纠正如下:

引言: 最后一段中“第 2 节给出了...对应的研究进展;”改为“第 2 节介绍 Transformer 研究中的关键问题以及对应的研究进展; 第 3 节给出了视觉 Transformer 的一般性框架;”.

1.2 节: 第一段中“ $L = 6$ ”改为“ $L \in \{12, 24, 32\}$ ”.

1.3 节: 式 (6) 修改为“ $A = \text{softmax}(QK^T/\sqrt{d_h}), A \in \mathbf{R}^{N \times N}$ ”. 式 (8) 修改为“ $\text{MSA}(z) = [\text{SA}_1(z); \text{SA}_2(z); \dots; \text{SA}_h(z)]U_{msa}$ ”.

1.4 节: 第一段中“ViT 使用了绝对位置..., 其计算过程如下:”改为“ViT 使用了可学习的位置编码方式, 通过定义可训练变量实现位置编码. 相比之下, 一种更为原始的位置编码方案^[8]是使用正余弦函数实现:”.

2.2.6 节: 第二段的最后补充:“本部分后续内容对典型的相对位置编码方法进行了介绍^[82].” 第八段中“Axial-Deeplab 中的 RPE^[81]”改为“Axial-Deeplab 中的 RPE^[129]”.

表 1 ~ 表 6: 表 1 中第 1 行第 3 列和第 10 行第 2 列更新为“-, $O(Nsd)$ ”, 同时在表题中补充“表中数据主要参考文献 [56].”和“Most of the data in the table are from reference [56].”. 表 2 中第 1, 2 行第 5 列更新为“55.4, 190.7”. 表 3 中第 16, 17 行第 4 列更新为“86, 86”. 表 4 中第 2 行第 6 列, 第 9 行第 4 列, 第 10 行第 5 列和第 10 ~ 12 行第 3 列分别更新为“257, 640, 27, -, -, -”. 表 5 中第 5 行第 4 ~ 9 列和第 18 行第 3, 5 ~ 9 列分别更新为“18.0, 38.8, 16.5, 41.7, 56.2, 40.4, -, 50.5, 29.1, 53.8, 71.2, -”, 同时删除第 15 ~ 17 行. 表 6 中第 1 ~ 2 行第 3 列更新为“500+25”. 另外, 表 2 ~ 6 表题中补充“表中数据主要参考文献 [18].”和“Most of the data in the table are from reference [18].”.

[129] Wang H, Zhu Y, Green B, et al. Axial-deeplab: Stand-alone axial-attention for panoptic segmentation. In: Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2020. 108–126.

*修正后的文章请见 <https://hub-tian.github.io/aas-transformer-survey>

特此更正并致诚挚歉意!

田永林, 王雨桐, 王建功, 王晓, 王飞跃