



网络化系统时钟同步算法

费敏锐, 熊南, 李韬*

上海大学机电工程与自动化学院, 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200072

* 通信作者. E-mail: sixumuzi@shu.edu.cn

收稿日期: 2016-05-17; 接受日期: 2016-07-21; 网络出版日期: 2016-11-08

国家自然科学基金 (批准号: 61522310)、上海市科委基础研究项目 (批准号: 14JC1402200) 和国际科技合作项目 (批准号: 15220710400) 资助

摘要 时钟同步问题是网络化系统领域的一个经典课题. 实时工业以太网和无线传感器网络是现代信息化工业中两类具有重要应用价值的网络系统, 前者较多采用 IEEE 1588 时钟同步方案, 而后者由于资源有限、链路不可靠、网络拓扑动态变化等因素, 多采用分布式同步算法. 近年来, 随着多主体分布式一致性问题的研究形成较为成熟的理论体系, 逐渐有从事趋同控制理论研究的学者将目光转移到分布式时钟同步应用领域, 并已在算法收敛性等方面取得关键进展. 基于一致性理论的分布式时钟同步协议因其鲁棒性、可扩展性和实现简单等特点而具有良好的发展前景, 但也仍然存在很多有待深入研究的富有挑战的科学问题. 本文较详细地介绍了国内外层级式、分布式时钟同步算法的最新研究动向, 重点梳理了近五年基于一致性控制思想的分布式时钟同步算法的研究成果, 并探讨了未来值得深入研究的方向, 旨在为相关科研人员提供有价值的学术参考.

关键词 网络化系统 时钟 同步 层级式网络 分布式算法 一致性

1 引言

网络化系统是一种融合检测技术、通信技术和计算技术等多学科背景的典型分布式系统, 现已成为学科交叉的研究热点. 从信息化战场到民用智能家居、从宏观宇宙探索到微观纳米网络、从智能制造到精细农业、从灾害预警到医疗救助, 网络化系统及其相关应用技术都发挥着不可替代的作用^[1~3]. 网络化系统指的是以通信网络为媒介将各个物理实体单元连接起来的一类复杂系统, 比如工业以太网、无线传感器网络等. 其中, 工业以太网是基于 IEEE 802.3 (Ethernet) 的区域网络, 具有价格低廉、稳定可靠、通信速率高等优势, 其诞生以来一直被视为是替代现场总线的先进工业网络控制技术. 无线传感器网络是指由大量的传感器节点组成的一类无线自组织网络, 传感节点是一种低成本、低功耗、多功能的无线传感装置, 通过多个传感节点的协同工作进行网络系统的数据采集、传输和处理. 这两类实际系统呈现出网络化系统的某些一般特征, 如静态拓扑与动态拓扑、有线通信与无线通信、资源冗余与资源有限, 集中式控制与分布式控制等. 因此, 研究这两类系统的方法与技术有助于探索网络化工业控制系统的普适性理论.

引用格式: 费敏锐, 熊南, 李韬. 网络化系统时钟同步算法. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 1527–1541, doi: 10.1360/N112016-00129

时钟同步, 也称为时间同步, 是网络化系统实现有效应用与服务的前提, 早在 1978 年图灵奖获得者 Lamport 教授就指出时钟同步是分布式系统的关键依赖性条件^[4]. 随着 21 世纪科学技术的高速发展, 人们对网络化系统中分散时钟的有效同步提出了更高要求, 这正是因为网络化系统日益渗透到不同行业, 其设备定位、传输调度、事件排序、数据融合、控制执行等大量应用都依靠同步的时钟提供准确划一的步调, 如: 基于 TDMA 机制的分散设备无线信道接入技术必须有一个全局一致时钟以保证时隙之间互不干扰; 军事领域中的多无人机隐身跟踪或对敌方事件的监控必须要求时钟协调才能准确打击目标; 深海远洋监测和协作通信需要在信号衰减显著的动态水体环境中维持被采集数据与时间信息匹配等, 这些应用场景都需要网络节点之间时钟逻辑同步或与外部 GPS 世界时间同步. 在信息科学与工程领域, 时钟同步指通过设计同步算法或协议对电气电子物理单元的本地时钟进行校正, 使得网络化系统中不同的电气电子物理单元拥有一个相同的时钟参考, 这里的本地时钟源一般是指能产生较稳定脉冲频率的振荡电路模块, 例如晶振、数控振荡器等^[5].

网络化时钟同步是一类典型的基于通信网络的状态估计问题. 达到同步控制目标的首要任务是认识物理对象, 不难知道每个设备单元的硬件时钟是由一个振荡器和一个计数器构成, 振荡器 i 基于压电效应或串并联振荡选频产生频率为 f_i 的振荡信号, f_i 是一类随机动态过程. 根据文献^[6]等, 计数器通过计量脉冲个数得到依赖世界协调时间 t 的计数器值 $c_i(t)$, 从而产生电子电路的物理时钟时序, 即

$$c_i(t) = f_i(t - t_0) + c_i(t_0), \quad (1)$$

t_0 是初始化时刻, $c_i(t_0)$ 时钟初始时刻的计数值, 事实上式 (1) 是物理时钟连续积分模型的离散形式. 由于 f_i 的慢时变性, 节点 i 的真实硬件时钟估计 $\hat{\tau}_i(t)$ 为

$$\hat{\tau}_i(t) = (c_i(t) - c_i(t_0))/\hat{f}_i + \tau_i(t_0), \quad (2)$$

式 (2) 中, $\hat{f}_i$ 是对节点标称频率的估计, $\tau_i(t_0)$ 为设备节点在初始上电时刻的本地时间. 注意到振荡频率在非常短的时间内和稳定的物理化学环境下几乎不变, 那么通过这种近似简化就得到常用的线性时钟模型. 无线传感器网络节点限于体积、制造成本及应用场合, 一般采用更好控制成本的石英振荡器作为时钟源, 但由于每个传感器所配备硬件的质量有细微差异, 因此片上晶振体频率各不相同, 同时晶振频率 f_i 的随机特性会随环境因素, 如温度、电压等的改变而发生变化, 使得各个传感器节点的时钟拥有不同甚至是非线性的斜率. 另外由式 (2) 可知, 节点的工作起点时间、睡眠周期不同会导致传感器加入网络时拥有不同的时钟初始化值. 工业以太网中设备的本地时钟物理特征基本与无线传感器网络相同, 与前者类似, 通常被布置在恶劣环境中, 导致网络设备存在本地时钟漂移及传输延迟等不确定因素, 特别对一些高性能需求将带来严重制约, 比如运动控制. 值得注意的是: (1) 工业以太网一般采用数控振荡器作为时钟源, 其频率 f_i 可以由特定仪器直接调整, 区别于采用晶振体的无线传感器网络间接校准 $\hat{\tau}_i(t)$, 因此工业以太网的时钟问题在某些需求场合也被转化为频率与相位分别同步问题. (2) 因以太网采用非确定性的带有冲突检测的载波侦听多路访问机制, 使得网络无法准确预估数据传输的到达时刻, 时钟同步也面临着更加严峻的网络复杂不确定性, 特别是以实时性为重要性能指标的实时工业以太网.

时钟同步算法按照网络结构不同可大体分为层级式和分布式两种, 如图 1 所示, 在层级式网络结构中, 不同深色的设备代表它们之间存在逻辑主从关系, 即下层设备的时钟值由上层设备的时钟授予; 而在分布式网络结构之中, 节点地位是等价的, 故而使用相同深色表示. 由于无线传感器网络具有节点规模庞大、节点能量依赖有限电池供电、嵌入式单元计算能力受能耗制约、无线信号暴露于开放空

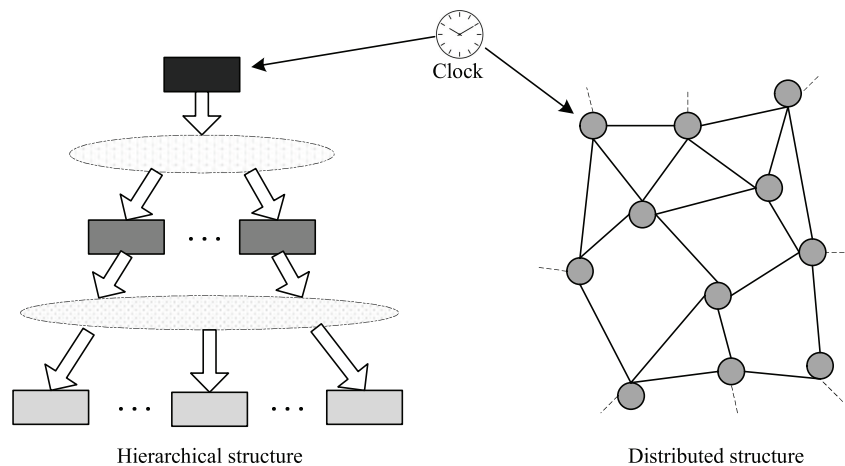


图 1 两类时钟同步算法相应的网络结构示意图

Figure 1 Two types of clock synchronization algorithms corresponding to network structures

间传播而易衰弱、网络拓扑经常发生改变等多重特点, 而层级式时钟同步协议应用又受到网络硬件层面的制约, 所以分布式时钟同步研究有着极其重要的意义 [7].

2 层级式时钟同步算法研究

过去的 20 年, 基于现场总线技术的工业网络控制系统已得到广泛研究, 成为工业自动化的成熟解决方案. 但如今, 现场总线技术日益暴露出明显的局限性, 一方面, 各大工业自动化公司基于自身商业利益, 纷纷制定了各自的现场总线技术标准, 使得采用不同现场总线标准的设备之间的互连、互操作异常困难. 另一方面, 现场总线技术数据传输速率较低, 例如长距离通信时一般为几十 kB/s 到几十 MB/s 之间. 随着网络信息技术的飞速发展, 现场总线技术局限性的制约以及信息物理融合系统的出现共同促使工业以太网逐渐成为工业网络控制技术发展的新方向. 对于实时工业以太网来说, 衡量实时性的重要标准就是事件响应时间的确定性, 即要求系统能够准确预知系统响应事件的时间或者将其控制在一个要求的时间范围之内. 对于一些高性能同步需求, 同步精度范围要求在亚微秒甚至纳秒量纲, 因此工业以太网的高精密时钟同步具有重要研究意义. 主流的工业以太网包括 Modbus/TCP, Ethernet/IP, Ethernet Powerlink, PROFINet, EPA, EtherCAT 等由于行业性质和技术规范, 大多基于 IEEE 1588 标准进行时钟同步校准. IEEE 1588 标准是美国电气与电子工程师学会于 2002 年颁布的技术标准, 它针对网络化测量与控制系统定义了一种精密时钟同步协议 (precision time protocol, PTP), 能够提供亚微秒级的同步精度 [8]. IEEE 1588 实质是一种面向工业以太网的层级式时钟同步协议, 主要由两个阶段实现, 分别是计算本地时钟与主时钟之间初始时间差的偏移测量阶段和计算主从时钟之间物理线路延时的延迟测量阶段. IEEE 1588 标准具体实施方案已有大量文献和技术手册介绍, 本文不再赘述.

IEEE 1588 标准有一个理想假设, 即要求延迟测量环节中前向延时和后向延时必须对称, 而这在实际应用中往往是不可能的. 针对该问题, Guruswamy 等设计了两种有效估计方法, 一种是基于极小极大估计器的降低不确定端到端延时带来的时钟抖动处理方法 [9], 一种是基于最优 L 估计器的时间戳包排队延时预测方法 [10], 实验证明 L 估计器均方估计误差非常逼近极大极小估计器的均方误差,

两种估计器都能较好地补偿延时带来的不确定性. 针对网络通信噪声问题, Giorgi 等^[11,12] 根据标准 IEEE 1588 同步协议设计了基于 Kalman 滤波和事件触发 Kalman 滤波的成本效益最优的伺服时钟以平滑噪声源. Levy 等^[13] 考虑分数阶 Gauss 噪声, 设计了极大似然估计器, 并验证该估计器相对双原子钟降低了均方估计误差. Exel 等^[14] 分析了影响 IEEE 1588 系统时钟同步精度的主要因素, 包括时间戳的质量、中间设备转发时的延时抖动、时钟自身的非线性和非对称传播路径延时等, 提出了一种基于时间戳校准的非对称补偿策略缓解链接延时现象, 该策略的优点是在不修改 PTP 协议基础上最大程度地削减了非对称性带来的干扰. Anyaegbu 等^[15] 针对一类 ITU-T 网络的延时特性, 通过统计平均间隔时间考察网络时间戳包的变化率, 设计了基于采样模式的滤波器, 该滤波算法的优点是在不同网络流量负荷下匹配或优于其他一般时延滤波器. 针对时间戳信息量化误差随转发路径累积问题, Xu 等^[16] 建立了基于主从时钟校准的 Kalman 滤波模型, 并利用 PI 控制器整定伺服时钟误差, 通过实验验证该方法能在四跳网络中使同步精度保持 59.37 ns. 在行业应用方面, Li 等^[17] 提出了基于 IEEE 1588 的应用方案的海底观测网络精确时间同步方法, 该方案以设置全球定位系统和北斗导航卫星系统作为参考时间源, 其信号通过布设在海底的光电复合电缆传输, 从而构建海洋以太网无源光网络. 环境监测实验表明, 该系统可以实现微秒级精度时间同步, 满足高精度海底观测网络的时间同步要求. Dominicis 等^[18] 面向 IEC 61850 电气标准, 从电力系统组成要素、同步需求、测试需求、安全性等多方面详细分析了 IEEE 1588 协议在目前变电站自动化系统中应用的现状及未来发展趋势.

总的来说, IEEE 1588 标准提供了一种成熟的时钟同步规范, 特别适应固定网络结构或可配置维护的网络结构、可依赖硬件辅助、大规模地理分散的网络化系统, 并已被许多国际著名工业自动化设备商在制定工业以太网标准时所采用, 用户市场普及率和特定行业占有率很高. 另一方面, IEEE 1588 标准的开放性也为一些学者和工程师提供了方便的移植与修改操作入口. 因此, 基于 IEEE 1588 的时钟同步改良协议在工业以太网领域受到极大关注.

3 分布式时钟同步算法研究

3.1 常见分布式同步算法概览

近些年来, 针对无线传感器网络的时钟同步协议得到了广泛的研究^[19~28], 包括常见的单向报文传递同步、双向报文交换同步、广播参考报文同步和改良的 IEEE 1588 标准等, 但这些时钟同步协议大多不是严格意义下的全分布式算法. 它们一般依赖精确的报文传播机制实现同步, 如 Wu 和 Leng 基于双向报文交换存在的延时问题连续提出了 4 种估计算法, 第 1 种是针对未知延迟下的时钟斜率和时钟偏移的联合估计器^[29], 第 2 种是针对延时指数分布下的低复杂度的极大似然估计器^[30], 第 3 种是基于置信区间估计的完全分布式时钟同步算法^[31], 第 4 种将针对延时概率特征已知的联合极大似然估计器巧妙转化为线性规划问题, 进而利用交替方向数值解法得到全分布式的同步算式^[32]. 后两种改进得到的全分布式算法虽然比其他时钟同步算法达到更高的精度, 但是其代价是付出更高的计算复杂度, 总而言之, 这一类同步协议往往最后归结为通信领域中的滤波问题. 其他具有代表性的算法如 Werner-Allen 等提出的基于萤火虫神经元自发同步模型的 Reachback Firefly Algorithm (RFA) 时钟同步算法^[33]. 在 RFA 协议中, 节点可以利用过去的延迟信息调整未来的点亮相位以提高同步精度. RFA 是一种完全分布式的时钟同步协议, 但只对时钟偏差进行了补偿, 而没有考虑补偿不同的时钟斜率偏差. 众所周知, 时钟在未校准之前, 节点通信是异步的^[34,35]. 基于此, Bae 等^[36] 提出了基于快速异步扩散机制时间同步算法. Du 等^[37] 改进了双向报文交换同步协议, 提出了局部节点更新时钟估计频率

加快和局部节点利用旧信息更新的异步全分布式时钟同步算法. Choi 等^[38]提出了分布式异步时钟同步 (distributed asynchronous clock synchronization) 协议, 该协议也是一个基于邻居平均状态的异步时钟同步协议, 它通过构造一个包含相对时钟信息传播的结构表来解决时滞容忍网络的时钟同步问题. Ahmed 等^[39]针对不可靠的无线链路, 考虑了节点通信时刻对应的拓扑与节点更新时刻对应的拓扑不完全连通情况, 设计了基于邻居节点时钟偏差信息融合的异步反馈控制协议, 并利用随机矩阵和代数图论证明了算法的收敛性. Baldoni 等^[40]针对大规模尺度网络, 提出了基于耦合因子与本地观察尺度的内部时钟同步 (coupling-based Internal clock synchronization) 算法. Huang 等^[41]提出了基于按精度需求响应的时钟同步协议, 该协议采用不确定性驱动机制, 可以自适应调整每个节点的时钟校正间隔, 从而降低能量消耗. Brown 等^[42]考察了随机成对型时钟同步算法单调收敛的充分必要条件, 得到了随机成对型同步算法的瞬态和渐近行为的理论结果, 但该算法依赖特定的通信载波与符号率技术以实现频率与偏差的分开校准. Wu 等^[43]提出了一种基于成对信息传递的平均时钟同步算法, 同样是将时钟斜率和时钟偏差分别调整到全局初始状态的平均值, 从而达到时钟步调一致. Stanković等利用梯度类型回归估计本地时钟的校正函数值, 实现了带噪声的无线传感器网络盲校正^[44, 45]. 总的来说, 分布式时钟同步算法得到了国内外广泛研究, 但是一些算法只补偿了偏差量, 或者分别校准频率与偏差, 且从通信技术角度设计滤波算法的研究占不少比重, 并没有一个对实际物理时钟建模分析的过程. 再者, 有的算法因为估计算式的矩阵求逆等原因而导致计算复杂度较高, 存在算法执行效率依赖节点存储记忆等缺陷.

最近, 有自动控制领域的学者引入一致性的概念来解决时钟同步问题^[46~53]. 在多智能体系统领域, 关于一致性算法已有比较成熟的理论研究, 其根本是使用局部的信息交互实现整体趋同的目标^[54~58], 而时钟同步的目标是希望所有时钟被赋予相同的时间值, 一致性算法的目标与时钟同步的目标本质上不谋而合. 无线传感器网络通常具有链路多跳、内存有限、能量有限、动态的无线射频覆盖、随机的节点加入与退出等特征, 一个优秀的时钟同步协议必须有效适应无线网络的固有特征, 即所设计的算法应当是全分布式、异步、自适应、简单实施, 并且对丢包和时变拓扑具有鲁棒性, 而关于这些问题的研究在多智能体一致性领域都已有系统性结果. 从上可知, 引入多智能体一致性算法解决时钟同步问题是合理且具有独特优势的. 其优势如下: (1) 算法是全分布式的, 不依赖于维持特定拓扑结构的基础设施, 对可变拓扑和可变链路具有很强的适应能力; (2) 地理邻居节点间的同步能达到更高的精度, 且算法简单易于程序化, 花费的计算能耗极小; (3) 一致性算法能异步地对时钟斜率和偏差进行补偿, 放松了节点之间的主从逻辑关系. 从一致性控制研究的理论框架来看, 时钟同步可以归结为一类典型的高阶异质多智能体一致性问题. 这是由于实际的物理时钟振频通常不稳定, 晶振自身的非线性抖动会导致存在模型包含未建模动态部分, 如果在数学模型上不忽略掉脉冲频率高阶分量, 那么时钟物理方程就会出现二次项, 三次项甚至更高次分量. 时钟同步问题与一致性控制的关系非常类似于一般理论和具体实践的关系: 理论指导实践, 实践反过来推动理论发展.

3.2 基于一阶一致性的分布式时钟同步算法

基于一阶一致性的分布式时钟同步算法由 Schenato 等^[51]提出的 Average TimeSynch (ATS) 时钟同步协议完整地实现. ATS 算法利用邻居信息平均进行迭代补偿, 理论充分地保证 ATS 算法可以指数收敛, 从而可实现全网的时钟同步. 一般地, 该算法利用了式 (2) 的 $\hat{\tau}_i(t)$ 对 $\tau_i(t)$ 的线性仿射变换作为算法软件时钟, 即 $\hat{\tau}_i(t) = \hat{\alpha}_i(t)\tau_i(t) + \hat{\beta}_i(t)$, $\hat{\alpha}_i(t)$ 为逻辑斜率, $\hat{\beta}_i(t)$ 为逻辑偏差. 那么时钟同步的目标即为一致性算法软件时钟的趋同: $\lim_{t \rightarrow \infty} [\hat{\tau}_i(t) - \hat{\tau}_j(t)] = 0$. 算法规定节点 j 发送给节点 i 的数据包为四元组信息, 含有 $ID_j, \hat{\alpha}_j, \hat{\beta}_j, \tau_j$ 等量, 一旦节点 i 接收到该数据包, 便记录对应时刻 t_k^j 的自身物

理时钟值 $\tau_i(t_k^j)$, t_k^j 指节点 j 的第 k 次通信时刻. 在完全分布式算法中, 所有节点并行地执行广播通信、迭代进化等任务, 所以各个节点的时序无法依赖参考给定, 为此 ATS 算法时间序列 t_k^j 被设计为由确定性伪广播通信机制产生. 根据文献 [51, 59] 等, 对任意时钟 i , 基于平均一致性的同步算法按如下步骤实现:

(1) 定义相对斜率估计 $\alpha_{ij}(k) = \alpha_j / \alpha_i$, 由于硬件时钟采用线性模型, 那么斜率估计 α_{ij} 可通过一对节点的连续两次硬件时钟值的交换获得, 即

$$\alpha_{ij}(k) = \frac{\tau_j(t_k^j) - \tau_j(t_{k-1}^j)}{\tau_i(t_k^j) - \tau_i(t_{k-1}^j)}, \quad (3)$$

(2) 逻辑斜率补偿:

$$\hat{\alpha}_i(k) = \rho(t)\hat{\alpha}_i(k-1) + (1 - \rho(t))\alpha_{ij}(k)\hat{\alpha}_j(k-1), \quad (4)$$

其中, 权重 $\rho(t) \in (0, 1)$.

(3) 逻辑偏差补偿:

$$\hat{\beta}_i(k) = \hat{\beta}_i(k-1) + (1 - \rho(t))(\hat{\tau}_j(t_k^j) - \hat{\tau}_i(t_k^j)), \quad (5)$$

其中, 权重 $\rho(t) \in (0, 1)$.

从式 (4) 和 (5) 可以看到, 利用等式右边第 2 项包含了邻居时钟状态信息, ATS 算法采用了两个一阶平均一致性算法分别补偿本地逻辑斜率和逻辑偏差, 并能最终保证逻辑时钟的趋同.

基于一阶一致性的分布式时钟同步算法具有实现简单、同时校准斜率与偏差等优点. Xiong 和 Kishore [47, 48] 早期设计的基于偏差一致性补偿的时钟同步算法可认为是 Schenato 等工作的特殊情形. Sommer 等 [60] 提出的梯度时间协议 (gradient time synchronization protocol, GTSP) 要求节点收到所有邻居节点的信息时才进行时钟更新, 一定程度上丢掉了分布式算法的并行计算优点. Liao 等 [61] 提出一种带量测噪声的分布式时钟同步算法, 实现了在 Markov 随机切换拓扑下的算法均方收敛, 但噪声假设为指数乘性的, 这在一定程度上限制了该算法在其他噪声情形的推广. Maggs 等 [62] 基于地理位置的邻居优先选择, 设计了一致性时间同步算法 (CCS). He 等设计了最大一致性时钟同步算法 (MTS), 相比 ATS 算法, MTS 算法在静态拓扑和随机拓扑下均能在有限时间内快速收敛. MTS 算法能保证逻辑斜率和逻辑偏差渐近收敛, 但在信道存在延时的情况下, 逻辑时钟的渐近行为是发散的 [63~66]. He 等进一步考虑了时钟被任意不正确消息操纵攻击情况, 设计了基于硬件时钟核查和软件时钟校正参数核查的安全平均一致性时钟同步算法 (SATS) [67] 和安全最大一致性时钟同步算法 (SMTS) [68]. Ishii 等设计了一种基于事件触发机制 [69] 的一致性同步算法, 该协议旨在考察同步精度的信息来决定邻居间节点的通信频繁度, 这种机制可以有效减低网络通信负担与能量消耗, 同时能保证同步达到满意精度范围 [70]. Sun 等 [71] 设计一种随机广播通信机制下的一致性时间同步算法 (RBDS), 即在伪通信时刻斜率、偏差共同补偿和在非伪通信时刻偏差单独补偿的混合补偿策略, 该算法克服了 ATS 和 MTS 等通信方案只能在固定的通信时刻下更新时钟的局限性. Gasparri 等针对不同应用等级所需的不同同步精度设计了一种柔性的一致性时间同步方案, 通过可选择的收敛速率优化时钟同步精度与网络生存能量之间的平衡关系 [72, 73]. 之后 Gasparri 等 [74] 设计了一种对有界延时鲁棒的改进一致性时钟同步算法 (RoATS), 该算法利用成对节点之间同幅同位补偿机制, 克服了标准 ATS 算法在有界延时扰动下发散的缺陷. Tian 等利用相对斜率的递归最小二乘估计法和时间衰减的权重也实现了改进的一致性时钟同步算法 (LSTS) 在有界延时下的渐近收敛 [75], 其突出的贡献是给出了 ATS 和 MTS 等同步算法在延时扰动下发散的理论依据, 并且给出了一种统一化的一致性线性时钟同步算法模型与设计框

架, 为后续改良算法提供了有价值的参考^[59]. Panigrahi 等^[76~78] 利用进化算法从拓扑优化的角度考察了延时与收敛速度、能量消耗之间的折中关系. 考虑无线传感器网络一类簇状拓扑结构, Wu 等^[79] 设计了基于簇内部和簇与簇之间的两层形式的一致性时钟同步算法. Berger 等^[80] 针对计算能力有限的八位处理器和 802.11 协议簇, 设计三阶段控制的时分复用广播通信同步技术和比例积分器调整时钟技术, 实现低复杂度的粗同步和细同步, 相对其他工作的优点是直接面向底层硬件实现同步.

3.3 基于二阶一致性的分布式时钟同步算法

Carli 等^[81] 提出一种分布式同步算法将时钟同步问题转化为离散二阶系统的局部输出一致性控制问题, 设计邻居状态反馈协议从而同时补偿时钟斜率与时钟偏差, 并在网络拓扑强连通的前提下, 收敛性和最优设计都可以保证. 根据文献^[81, 82] 等, 算法框架如下, 由式 (2), 设 $r_i(t) = f_i/\hat{f}_i = (\tau_i(t) - \tau_i(t_0))/(t - t_0)$ 表征硬件时钟值与自然时间值之间的比率, $r_i(t)$ 会在一定范围内波动, 为此, 可对 r_i 进行 $\varphi_i(t)$ 倍补偿, 补偿后时钟频率为 $r_i\varphi_i(t)$, 那么估计量 $\hat{\tau}_i(t)$ 可改写为

$$\hat{\tau}_i(t) = r_i\varphi_i(t)(t - t_0) + \tau_i(t_0). \quad (6)$$

估计量 $\hat{\tau}_i(t)$ 是逻辑时钟. 与 3.2 小节中阐明的原因一样, 完全分布式算法中的时钟在未校准之前是无法准确定义所有节点全局通信和更新时序的, 但为简化建立二阶时钟模型过程, 不妨假设全局时钟更新周期同步且间隔为 T , 即 $t = kT$, $k \in \mathbb{N}^*$. 实质上, Carli 在后续工作中证实了改良的伪周期通信模式其实是建立在同步模型上的一个非线性扰动方程. 那么为实现一致性同步, 需要对时钟估计 $\hat{\tau}_i(kT)$ 和频率补偿 $\varphi_i(kT)$ 构造基于邻居信息 $u_{i\tau}(kT)$ 和 $u_{i\varphi}(kT)$ 的反馈控制律, 即

$$\begin{cases} \hat{\tau}_i((k+1)T) = \hat{\tau}_i(kT) + r_i\varphi_i(kT)T + u_{i\tau}(kT), \\ \varphi_i((k+1)T) = \varphi_i(kT) + u_{i\varphi}(kT). \end{cases} \quad (7)$$

至此, 时钟同步问题转化为为了一个基于网络状态估计的二阶动力学系统反馈控制问题. 为简化表述, kT 简写为 k , 可将式 (7) 写成紧凑的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \hat{\tau}_i(k+1) \\ \varphi_i(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_iT \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\tau}_i(k) \\ \varphi_i(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i\tau}(k) \\ u_{i\varphi}(k) \end{bmatrix}.$$

同步目标与 3.2 小节相同, 值得注意的是, 仅输出状态局部分量 $\hat{\tau}_i(k)$ 要求同步, 控制输入是基于邻居信息反馈的, 一致性协议被设计为

$$u(k) = -F \sum_{j=1}^N K_{ij}(\hat{x}_j(k) - \hat{x}_i(k)), \quad (8)$$

其中 $u(k) = [u_{i\tau}(k), u_{i\varphi}(k)]^T$, $\hat{x}_i(k) = [\hat{\tau}_i(k), \varphi_i(k)]^T$, $F \in \mathbb{R}^2$ 为耦合增益矩阵, K_{ij} 为节点 i, j 之间的权重值.

Carli 和 Bolognani 等对该模型及算法进行了深入研究, 并取得一系列成果, 包括成功将同步通信的二阶一致性时钟同步算法框架推广到 Gossip 通信^[83~85]、伪广播通信^[82]、层级式通信^[85] 等场景, 其中具有重要进展的是文献^[85], 它将固定的同步周期值 T 弱化为满足条件 $\sum_{j \neq i} E_{ij}(T) < 1$ 的随机时刻值, 给出基于 PI 一致性控制的 Randsync 算法及其收敛的充分条件, 将收敛假设从随机几何图的强连通放松到随机拓扑包含一棵有向生成树, 并避免了文献^[82] 中因伪通信周期导致的二阶一

表 1 主流时钟同步算法的技术特征

Table 1 Technical features of representative clock synchronization algorithms

	IEEE 1588	Messages exchange	Consensus based synchronization
Application	Industrial ethernet	Wireless network	Wireless network
Structure	Hierarchical	Hierarchical	Fully distributed
Update	Physical	Logical and physical	Logical and physical
Path	Hop to hop	Both	Peer to peer
Robustness (delay)	Better	Better	Common
Robustness (topology)	Common	Better	Best
Related work	[8~18]	[3,25,27,29~32,37,49,94]	[39,42,43,46~48,50~53,61~93]

致性同步算法的迭代方程非线性化, 而非线性方程目前只在很特定的拓扑假设下才有较满意的数学收敛性分析. 另外将该类算法与集中式算法在网络中存在不当行为时钟的情况下进行了性能指标对比^[86], 实验表明了基于二阶一致性算法的鲁棒性优点, 这一系列工作对基于二阶一致性反馈与估计理论的时钟同步算法及其应用起到了奠定性的作用. Seyboth 等^[52,53] 指出异质线性多智能体局部输出同步问题的一个典型案例即为基于离散二阶模型的时钟同步问题, 通过利用输出量的静态扩散耦合反馈思想设计了一致性协议, 从而得到了其在有向拓扑图上渐近收敛的必要条件. 最近 Yildirim 与 Carli 等对原始模型做了有益推广, 一方面, 将相对时钟估计偏差表征同步输出量的动力学行为, 使用离散 PI 控制器的比例部分与积分部分分别补偿成对时钟估计偏差和斜率估计误差, 从而实现 PISync 二阶一致性时钟同步算法并推广到了泛洪与全分布式场景^[87~89]; 另一方面, 将逻辑时钟斜率校准问题转化为使逻辑时钟同步误差最小化的斜率优化求解问题, 并提出基于梯度下降寻优的轻量级 Gradient Descent Synchronization 算法^[90]; 这两种算法都改良了节点内存占用, 使算法更加方便工程师实践应用. Mallada 等^[91,92] 引入指数加权移动平均偏移值构造二阶时钟动力学演化行为, 从而避免了相对斜率的估计和急剧化校准, 且只利用相对邻居间相对偏移信息来校准时钟斜率以达到全局时钟同步, 并从理论和实验证明了无偏斜网络时钟同步 (Skewless network clock synchronization) 算法在延时抖动或量测噪声下可实现有效同步. Chen 等^[93] 为平衡收敛速率与通信率而设计了基于事件触发的二阶一致性时钟同步算法.

4 未来值得研究的方向

综上所述, 可将目前工业网络化系统中主流时钟同步算法及其改进算法按照技术特征大体上归为 3 类, 分别为: 工业以太网中的 IEEE 1588 同步协议, 无线传感器网络中基于报文交换方式的同步协议, 和天生具有分布式性的一致性时钟同步算法. 表 1 给出这 3 大类同步算法或协议按照应用场合、算法结构、更新参数、路由方式、延时的鲁棒性、动态拓扑的鲁棒性及本文所引相关工作等方面的横向比较. 最后针对目前的研究现状, 提出以下 4 个值得深入探索的研究方向.

(1) 非线性时钟模型下时钟同步实现. 在实际环境中, 不论是实时工业以太网还是无线传感器网络, 本地物理时钟不单受到温度、电压、湿度等理化因素影响, 还由于配备的时钟源硬件质量原因^[95~97], 时钟不可能是完美的线性模型. 现有的基于 IEEE 1588 标准、一阶一致性和二阶一致性等分布式时钟同步算法大多是在时钟相对斜率估计和理想线性时钟模型基础上进行设计和分析的. 在非线性条件下, IEEE 1588 标准和一致性算法可能会失去较高的同步精度或很难再满足实际需求, 例如非线性时

钟会导致相对斜率估计算式 (3) 不再成立, 非线性往往是理论研究者最容易忽视的. 现有的非线性时钟同步方法在具体的行业应用中得到了工程师的更多关注, 例如 Li 等^[94]考虑了无线传感器网络在结构物健康监测中的非线性时间同步问题, 设计了割线斜率和完全非线性曲线的两种非线性漂移补偿策略, 并通过实验验证了同步精度能达到 $50\ \mu\text{s}$ 以内. 因此, 在实际应用中, 考虑非理想情况下的时钟模型, 设计相适应的时钟同步算法是非常有必要的, 比如设计克服层级式同步算法的非线性抖动的同步策略和高阶一致性时钟同步算法, 但高阶一致性时钟同步算法的理论分析至今仍是一块空白. 针对网络化系统中的时钟模型非线性, 应分析影响时钟模型的因素, 结合实际物理实验, 构建出符合实际的时钟模型, 采用新的补偿方法, 分析非理想时钟模型下算法的收敛性等.

(2) 网络不确定因素下鲁棒时钟同步算法实现. 工业以太网是基于有线网通信, 而无线传感器网络基于无线通信, 那么延时、丢包、信道衰落等现象在无线传感器网络中更加突出, 而在工业以太网中, 量化、拥塞导致的滞后等不确定因素会更突出, 这些因素会不同程度地影响节点之间的可靠信息传输^[98]; 同时, 随机移动传感器网络的节点具有移动性^[64, 99], 导致它们之间的通信也具有随机性, 这些通信拓扑的随机性将直接给时钟同步带来困难和挑战, 例如协调拓扑切换时刻和通信时刻以保证时钟信息的有效交换. 此外, 时间延迟将会直接影响时钟的同步精度和同步速度, 甚至造成同步算法发散^[100]. 然而目前, 不单是 IEEE 1588 存在对称延时路径等理想假设, 一致性时钟同步算法的理论分析也大都忽略了这些不确定性, 特别对随机拓扑下的时钟同步问题, 目前还缺少系统的研究. 因此, 考虑网络不确定性因素对 IEEE 1588 和基于一致性时钟同步算法等的影响, 设计和优化层级式和分布式鲁棒时钟同步算法, 并给出相应的理论分析具有重要意义.

(3) 基于能量、资源优化的有限时间内高效时钟同步算法实现. 无线传感器网络节点由电池供电或依赖太阳能供电, 能量利用限制较大, 所设计的时钟同步算法的能耗大小将直接影响算法在实际网络中的可持续应用^[101]. 已有的研究主要关注于能量对同步算法性能的影响, 并设计相应的算法来减少能量分布不均所带来的影响, 缺乏在能量受限时的时间同步算法的研究^[102]. 直观来说, 时钟同步算法的能量最小化, 可以通过提高时钟同步算法收敛速度、减少通信负担和基于需求响应服务等途径实现. 在一阶和二阶一致性时钟同步算法原型中, 同步目标都为 t 趋向无穷时软件时钟达到渐进无偏, 理论上来说, 这是可以实现的, 但从工程实际来说, 无穷次的网络节点交换信息是不切实际的, 研究有限时间一致性时钟同步算法具有很强的实践意义, 同步任务尺度、网络规模大小和系统能量是决定渐进收敛算法有限时间上界的主要因素. 另外, 基于硬件辅助有益于降低时间标记的抖动, 但对一些廉价传感节点而言缺乏时间戳机制支持, 因此平衡硬件资源和软件效率是一个折中问题^[103]. 为此需要综合时钟同步的能量状态和面向不同场合的硬同步与软同步解决方案选择, 制定高效的一致性时钟同步算法, 最后从实验上考察算法的关键指标.

(4) 基于主动防御的安全时钟同步算法实现. 有线网络中, 主机对多个从机虚假时钟问题一般归结为拜占庭问题, 但在无线传感器网络中情况更为复杂. 传感器假使被布置在一些特殊环境中, 比如恶劣军事战场、黑客入侵网络等, 无线传感器网络很有可能遭受各种各样的攻击^[104], 例如以下一些情形, 传感器节点受到敌方的物理捕捉而系统完整性受破坏; 攻击者利用无线信道将加密的数据包拦截下来, 并通过重新发送侵入网络系统而成为虚假节点; 通过注入恶意消息到网络系统中来达到信息操纵攻击^[67, 68]; 通过干扰节点间正常通信并修改软件程序实现拒绝服务攻击; 通过伪造身份认证实现女巫攻击^[105]等. 攻击者通常是狡猾的, 那么时钟同步协议作为最底层的基础性服务协议, 必然面临着复杂且类型各异的攻击问题. 目前分布式一致性安全时钟同步协议的研究处于起步阶段, 开放网络的不安全因素是分布式时钟同步面临的新问题. 考虑不同的攻击行为特点, 结合相应的主动防御机制和安全性能指标评估, 是实现安全化时钟同步的一条合理解决出路.

5 结语

近年来网络化系统时钟同步问题受到广泛研究, 其中以工业以太网的层级式时钟同步协议和无线传感器网络分布式时钟同步算法为典型代表. 工业以太网采用 IEEE 1588 方案实现了主从式的时钟同步, 该标准已得到广大科学研究和技术开发人员的广泛重视, 并且许多国内外学者都针对该标准的不完美性采用了诸如滤波估计、从时钟伺服等多种技术手段降低时钟同步误差. 无线传感器网络由于节点之间的平等性, 故更适合采用分布式同步算法. 其中得益于多自主体一致性问题的研究, 即通过反馈局部节点时钟信息来使全局节点时钟协调到一个公共时间的思想, 一致性时钟同步算法的概念被提出, 国内外学者相继提出和完善了包括一阶、二阶在内一致性时钟同步算法及其衍生算法. 本文从宏观层面简要回顾了现今时钟同步的发展脉络, 从微观层面重点阐述了诸多基于一致性理论的时钟同步算法的内在联系, 最后对现存难题及未来研究的方向作出展望.

参考文献

- 1 Freris N M, Kowshik H, Kumar P R. Fundamentals of large sensor networks: connectivity, capacity, clocks and computation. *Proc IEEE*, 2010, 98: 1828–1846
- 2 Lenzen C, Locher T, Sommer P, et al. Clock synchronization: open problems in theory and practice. In: *Proceedings of the 36th Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science*. Berlin: Springer, 2010. 61–70
- 3 Lin L, Yang C F, Ma M D, et al. Diffusion-based clock synchronization for molecular communication under inverse gaussian distribution. *IEEE Sens J*, 2015, 15: 4866–4874
- 4 Lamport L. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system. *Commun ACM*, 1978, 21: 558–565
- 5 Rhee III-K, Lee J, Kim J, et al. Clock synchronization in wireless sensor networks: an overview. *Sensors*, 2009, 9: 56–85
- 6 Freris N M, Graham S R, Kumar P R. Fundamental limits on synchronizing clocks over networks. *IEEE Trans Autom Control*, 2011, 56: 1352–1364
- 7 Swain A R, Hansdah R C. A model for the classification and survey of clock synchronization protocols in WSNs. *Ad Hoc Netw*, 2015, 27: 219–241
- 8 Eidson J C. *Measurement, Control and Communication Using IEEE 1588*. London: Springer, 2006
- 9 Guruswamy A, Blum R S, Kishore S, et al. Minimax optimum estimators for phase synchronization in IEEE 1588. *IEEE Trans Commun*, 2015, 63: 3350–3362
- 10 Guruswamy A, Blum R S, Kishore S, et al. On the optimum design of L-estimators for phase offset estimation in IEEE 1588. *IEEE Trans Commun*, 2015, 63: 5101–5115
- 11 Giorgi G, Narduzzi C. Performance analysis of kalman-filter-based clock synchronization in IEEE 1588 networks. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2011, 60: 2902–2909
- 12 Giorgi G. An event-based kalman filter for clock synchronization. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2015, 64: 449–457
- 13 Levy C, Pinchas M. Maximum likelihood estimation of clock skew in IEEE 1588 with fractional gaussian noise. *Math Probl Eng*, 2015, 2015: 174289
- 14 Exel R. Mitigation of asymmetric link delays in IEEE 1588 clock synchronization systems. *IEEE Commun Lett*, 2014, 18: 507–510
- 15 Anyaegbu M, Wang C X, Berrie W. Dealing with packet delay variation in IEEE 1588 synchronization using a sample-mode filter. *IEEE Intel Transp Syst*, 2013, 5: 20–27
- 16 Xu X, Xiong Z H, Sheng X J, et al. A new time synchronization method for reducing quantization error accumulation over real-time networks: theory and experiments. *IEEE Trans Ind Inform*, 2013, 9: 1659–1669
- 17 Li D J, Wang G, Yang C J, et al. IEEE 1588 based time synchronization system for a seafloor observatory network. *J Zhejiang U-SCI C*, 2013, 14: 766–776
- 18 Dominicus C M-D, Ferrari P, Flammini A, et al. On the use of IEEE 1588 in existing IEC 61850-based SASs: current behavior and future challenges. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2011, 60: 3070–3081

- 19 Noh K-L, Chaudhari Q M, Serpedin E, et al. Novel clock phase offset and skew estimation using two-way timing message exchanges for wireless sensor networks. *IEEE Trans Commun*, 2007, 55: 766–777
- 20 Ahmad A, Zennaro D, Serpedin E, et al. A factor graph approach to clock offset estimation in wireless sensor networks. *IEEE Trans Inform Theory*, 2012, 58: 4244–4260
- 21 Cheng K-Y, Lui K S, Wu Y-C, et al. A distributed multihop time synchronization protocol for wireless sensor networks using pairwise broadcast synchronization. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2009, 8: 1764–1772
- 22 Franceschelli M, Pisano A, Giua A, et al. Finite-time consensus based clock synchronization by discontinuous control. In: *Proceedings of 4th IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems*, Eindhoven, 2012. 172–177
- 23 Fontanelli D, Macii D. Master—less time synchronization for wireless sensor networks with generic topology. In: *Proceedings of International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Graz, 2012. 2785–2790
- 24 Zennaro D, Anese E D, Erseghe T, et al. Fast clock synchronization in wireless sensor networks via ADMM-based consensus. In: *Proceedings of International Symposium on Modeling and Optimization of Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, Princeton, 2011. 148–153
- 25 Wang H, Zeng H Y, Wang P. Clock skew estimation of listening nodes with clock correction upon every synchronization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Proc Lett*, 2015, 22: 2440–2444
- 26 Djenouri D, Merabtine N, Mekahlia F Z, et al. Fast distributed multi-hop relative time synchronization protocol and estimators for wireless sensor networks. *Ad Hoc Netw*, 2013, 11: 2329–2344
- 27 Wang J, Zhang S, Gao D, et al. Two-hop time synchronization protocol for sensor networks. *EURASIP J Wirel Comm*, 2014, 39
- 28 Ahmad A, Zennaro D, Vangelista L, et al. A distributed algorithm for network-wide clock synchronization in wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, Istanbul, 2013. 1037–1043
- 29 Leng M, Wu Y-C. On clock synchronization algorithms for wireless sensor networks under unknown delay. *IEEE Trans Veh Tech*, 2010, 59: 182–190
- 30 Leng M, Wu Y-C. Low-complexity maximum-likelihood estimator for clock synchronization of wireless sensor nodes under exponential delays. *IEEE Trans Signal Process*, 2011, 59: 4860–4870
- 31 Leng M, Wu Y-C. Distributed clock synchronization for wireless sensor networks using belief propagation. *IEEE Trans Signal Process*, 2011, 59: 5404–5414
- 32 Luo B, Cheng L, Wu Y-C. Fully distributed clock synchronization in wireless sensor networks under exponential delays. *Signal Process*, 2016, 125: 261–273
- 33 Werner-Allen G, Tewari G, Patel A, et al. Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, San Diego, 2005. 142–153
- 34 Boyd S, Ghosh A, Prabhakar B, et al. Randomized gossip algorithms. *IEEE Trans Inform Theory*, 2006, 52: 2508–2530
- 35 Marechal N, Pierrot J-B, Gorce J-M. Fine synchronization for wireless sensor networks using gossip averaging algorithms. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Beijing, 2008. 4963–4967
- 36 Bae J, Moon B. Time synchronization with fast asynchronous diffusion in wireless sensor network. In: *Proceedings of International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, Zhangjiajie, 2009. 82–85
- 37 Du J, Wu Y-C. Distributed clock skew and offset estimation in wireless sensor networks: asynchronous algorithm and convergence analysis. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2013, 12: 5908–5917
- 38 Choi B J, Liang H, Shen X, et al. DCS: distributed asynchronous clock synchronization in delay tolerant networks. *IEEE Trans Parall Distr*, 2012, 23: 491–504
- 39 Ahmed S, Xiao F, Chen T W. Asynchronous consensus-based time synchronisation in wireless sensor networks using unreliable communication links. *IET Control Theory A*, 2014, 8: 1083–1090
- 40 Baldoni R, Corsaro A, Querzoni L, et al. Coupling-based internal clock synchronization for large-scale dynamic distributed systems. *IEEE Trans Parall Distrib*, 2010, 21, 5: 607–619
- 41 Huang G, Zomaya A Y, Delicato F C, et al. An accurate on-demand time synchronization protocol for wireless sensor networks. *J Parall Distrib Commun*, 2012, 72: 1332–1346

- 42 Brown D R, Klein A G, Wang R. Monotonic mean-squared convergence conditions for random pairwise consensus synchronization in wireless networks. *IEEE Trans Signal Process*, 2015, 63: 988–1000
- 43 Wu J S, Jiao L C, Ding R R. Average time synchronization in wireless sensor networks by pairwise messages. *Comput Commun*, 2012, 35: 221–233
- 44 Stanković M S, Stanković S S, Johansson K H. Distributed time synchronization in lossy wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 3rd IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems*, Santa Barbara, 2012. 25–30
- 45 Stanković M S, Stanković S S, Johansson K H. Distributed blind calibration in lossy sensor networks via output synchronization. *IEEE Trans Autom Control*, 2015, 60: 3257–3262
- 46 Carli R, Chiuso A, Schenato L, et al. A PI consensus controller for networked clock synchronization. In: *Proceedings of the 17th World Congress, International Federation of Automatic Control*, Seoul, 2008. 17: 10289–10294
- 47 Kishore S, Xiong G. Analysis of distributed consensus time synchronization with gaussian delay over wireless sensor networks. *EURASIP J Wirel Commun Netw*, 2009, 2009: 48
- 48 Kishore S, Xiong G. Discrete-time second-order distributed consensus time synchronization algorithm for wireless sensor networks. *EURASIP J Wirel Commun Netw*, 2009, 2009: 1
- 49 Chen J M, Yu Q, Zhang Y, et al. Feedback-based clock synchronization in wireless sensor networks: a control theoretic approach. *IEEE Trans Veh Tech*, 2010, 59: 2963–2973
- 50 Lin L, Ma S W, Ma M D. A group neighborhood average clock synchronization protocol for wireless sensor networks. *Sensors*, 2014, 14: 14744–14764
- 51 Schenato L, Fiorentin F. Average timesynch: a consensus-based protocol for clock synchronization in wireless sensor networks. *Automatica*, 2011, 47: 1878–1886
- 52 Seyboth G S, Allgower F. Clock synchronization over directed graphs. In: *Proceedings of IEEE 52th Annual Conference on Decision and Control*, Florence, 2013. 6105–6111
- 53 Seyboth G S, Dimarogonas D V, Johansson K H, et al. On robust synchronization of heterogeneous linear multi-agent systems with static couplings. *Automatica*, 2015, 53: 392–399
- 54 Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Trans Autom Control*, 2004, 49: 1520–1533
- 55 Zhang H T, Chen M Z Q, Stan G B. Fast consensus via predictive pinning control. *IEEE Trans Circ Syst I: Regular Papers*, 2011, 58: 2247–2258
- 56 Chen Y, Lu J H, Lin Z L. Consensus of discrete-time multi-agent systems with transmission nonlinearity. *Automatica*, 2013, 49: 1768–1775
- 57 Zhang H T, Chen Z Y. Consensus acceleration in a class of predictive networks. *IEEE Trans Neur Net Lear*, 2014, 25: 1921–1927
- 58 Cheng Z M, Zhang H T, Fan M C, et al. Distributed consensus of multi-agent systems with input constraints: a model predictive control approach. *IEEE Trans Circ Syst I: Regular Papers*, 2015, 62: 825–834
- 59 Tian Y P, Zong S H, Cao Q Q. Structural modeling and convergence analysis of consensus-based time synchronization algorithms over networks: non-topological conditions. *Automatica*, 2016, 64: 60–75
- 60 Sommer P, Wattenhofer R. Gradient clock synchronization in wireless sensor networks. In: *Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, San Francisco, 2009. 37–48
- 61 Liao C D, Barooah P. Distributed clock skew and offset estimation from relative measurements in mobile networks with Markovian switching topology. *Automatica*, 2013, 49: 3015–3022
- 62 Maggs M K, Okeefe S G, Thiel D V. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks. *IEEE Sens J*, 2012, 12: 2269–2277
- 63 He J P, Cheng P, Shi L, et al. Time synchronization in WSNs: a maximum-value-based consensus approach. *IEEE Trans Autom Control*, 2014, 59: 660–675
- 64 He J P, Cheng P, Chen J M, et al. Time synchronization for random mobile sensor networks. *IEEE Trans Veh Tech*, 2014, 63: 3935–3946
- 65 He J P, Duan X M, Cheng P, et al. Distributed time synchronization under bounded noise in wireless sensor networks, In: *Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control*, Los Angeles, 2014. 6883–6888
- 66 He J P, Li H, Chen J M, et al. Study of consensus-based time synchronization in wireless sensor networks. *ISA*

- Trans, 2014, 53: 347–357
- 67 He J P, Cheng P, Shi L, et al. SATS: secure average-consensus-based time synchronization in wireless sensor networks. *IEEE Trans Signal Process*, 2013, 61: 6387–6400
 - 68 He J P, Chen J M, Cheng P, et al. Secure time synchronization in wireless sensor networks: a maximum consensus-based approach. *IEEE Trans Parall Distrib*, 2014, 25: 1055–1065
 - 69 Wei N, Guo Q, Li C J, et al. An event-triggered time synchronization scheme for sensor networks. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering*, Sao Paulo, 2008. 3–7
 - 70 Kadowaki Y, Ishii H. Event-based distributed clock synchronization for wireless sensor networks. *IEEE Trans Autom Control*, 2015, 60: 2266–2271
 - 71 Sun W, Strom E G, Brannstrom F, et al. Random broadcast based distributed consensus clock synchronization for mobile networks. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2015, 14: 3378–3389
 - 72 Lamonaca F, Garone E, Grimaldi D, et al. Localized fine accuracy synchronization in wireless sensor network based on consensus approach. In: *Proceedings of the International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Graz, 2012. 2802–2805
 - 73 Lamonaca F, Gasparri A, Garone E, et al. Clock synchronization in wireless sensor network with selective convergence rate for event driven measurement applications. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2014, 63: 2279–2287
 - 74 Garone E, Gasparri A, Lamonaca F. Clock synchronization protocol for wireless sensor networks with bounded communication delays. *Automatica*, 2015, 59: 60–72
 - 75 Tian Y P. LSTS: a new time synchronization protocol for networks with random communication delays. In: *Proceedings of IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control*, Osaka, 2015. 7404–7409
 - 76 Panigrahi N, Khilar P M. Optimal consensus-based clock synchronisation algorithm in wireless sensor network by selective averaging. *IET Wirel Sens Syst*, 2015, 5: 166–174
 - 77 Panigrahi N, Khilar P M. Optimal topological balancing strategy for performance optimisation of consensus-based clock synchronisation protocols in wireless sensor networks: a genetic algorithm-based approach. *IET Wirel Sens Syst*, 2014, 4: 213–222
 - 78 Panigrahi N, Khilar P M. An evolutionary based topological optimization strategy for consensus based clock synchronization protocols in wireless sensor network. *Swarm Evol Comput*, 2015, 22: 66–85
 - 79 Wu J, Zhang L Y, Bai Y, et al. Cluster-based consensus time synchronization for wireless sensor networks. *IEEE Sens J*, 2015, 15: 1404–1413
 - 80 Berger A, Pichler M, Klinglmayr J, et al. Low-complex synchronization algorithms for embedded wireless sensor networks. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2015, 64: 1032–1042
 - 81 Carli R, Chiuso A, Schenato L, et al. Optimal synchronization for networks of noisy double integrators. *IEEE Trans Autom Control*, 2011, 56: 1146–1151
 - 82 Carli R, Zampieri S. Network clock synchronization based on the second-order linear consensus algorithm. *IEEE Trans Autom Control*, 2014, 59: 409–422
 - 83 Bolognani S, Carli R, Zampieri S. A PI consensus controller with gossip communication for clock synchronization in wireless sensors networks. In: *Proceedings of the 1st IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems*, Venice, 2009. 78–83
 - 84 Carli R, Elia E D, Zampieri S. A PI controller based on asymmetric gossip communications for clocks synchronization in wireless sensors networks. In: *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, 2011. 7512–7517
 - 85 Bolognani S, Carli R, Lovisari E, et al. A randomized linear algorithm for clock synchronization in multi-agent systems. *IEEE Trans Autom Control*, 2016, 61: 1711–1726
 - 86 Carli R, Giorgi G, Narduzzi C. Comparative analysis of synchronization strategies in sensor network with misbehaving clocks. In: *Proceedings of International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Graz, 2012. 2617–2622
 - 87 Yildirim K S, Carli R, Schenato L. Adaptive control-based clock synchronization in wireless sensor networks. In: *Proceedings of European Control Conference*, Linz, 2015. 2806–2811
 - 88 Gurcan O, Yildirim K S. Self-organizing time synchronization of wireless sensor networks with adaptive value trackers. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, Philadel-

- phia, 2013. 91–100
- 89 Yildirim K S, Carli R, Schenato L. Proportional-integral clock synchronization in wireless sensor networks. arXiv:1410.8176
- 90 Yildirim K S. Gradient descent algorithm inspired adaptive time synchronization in wireless sensor networks. IEEE Sens J, 2016, 16: 5463–5470
- 91 Mallada E, Tang A. Distributed clock synchronization: joint frequency and phase consensus. In: Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, 2011. 6742–6747
- 92 Mallada E, Meng X, Hack M, et al. Skewless network clock synchronization without discontinuity: convergence and performance. IEEE ACM Trans Netw, 2015, 23: 1619–1633
- 93 Chen Z P, Li D Q, Huang Y R, et al. Event-triggered communication for time synchronization in WSNs. Neurocomputing, 2016, 177: 416–426
- 94 Li J, Mechitov K A, Kim R E, et al. Efficient time synchronization for structural health monitoring using wireless smart sensor networks. Struct Control Hlth, 2016, 23: 470–486
- 95 Zhe Y, He L, Cai L, et al. Temperature-assisted clock synchronization and self-calibration for sensor networks. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 3419–3429
- 96 Veitch D, Ridoux J, Korada S B. Robust synchronization of absolute and difference clocks over networks. IEEE ACM Trans Netw, 2009, 17: 417–430
- 97 Fagiolini A, Martini S, Bicchi A. Set-valued consensus for distributed clock synchronization. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Bangalore, 2009. 116–121
- 98 Li Q, Rus D. Global clock synchronization in sensor networks. IEEE Trans Comput, 2006, 55: 214–226
- 99 Li C Y, Wang Y, Hurfin M. Clock synchronization in mobile Ad Hoc networks based on an iterative approximate byzantine consensus protocol. In: Proceedings of IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Victoria, 2014. 210–217
- 100 Levine J. An algorithm for synchronizing a clock when the data are received over a network with an unstable delay. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2016, 63: 561–570
- 101 Leva A, Terraneo F, Rinaldi T, et al. High-precision low-power wireless nodes' synchronization via decentralized control. IEEE Trans Contr Syst Tech, 2016, 24: 1279–1293
- 102 Li Z J, Chen W W, Li M, et al. Incorporating energy heterogeneity into sensor network time synchronization. IEEE Trans Parall Distrib, 2015, 26: 163–173
- 103 Derogarian F, Ferreira J C, Tavares V M-G. A precise and hardware-efficient time synchronization method for wearable wired networks. IEEE Sens J, 2016, 16: 1460–1470
- 104 Du X J, Guizani M, Xiao Y, et al. Secure and efficient time synchronization in heterogeneous sensor networks. IEEE Trans Veh Tech, 2008, 57: 2387–2394
- 105 Dong W, Liu X J. Robust and secure time-synchronization against sybil attacks for sensor networks. IEEE Trans Ind Inform, 2015, 11: 1482–1491

Clock synchronization algorithms for networked systems

Minrui FEI, Nan XIONG & Tao LI*

Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

*E-mail: sixumuzi@shu.edu.cn

Abstract Clock synchronization is a classical topic in the field of networked systems. Real-time industrial Ethernet and wireless sensor networks are two typical kinds of networked systems that have important applications in modern industry. In industrial Ethernet, people usually adopt the IEEE 1588 clock synchronization mechanism, and in wireless sensor networks, people often employ a distributed synchronization algorithm due to limited resources, unreliable communication links, and dynamic network topologies. In recent years, along with

the development of a theoretical framework of distributed multi-agent consensus, there are an increasing number of scholars in the control community who are shifting their focus to the distributed clock synchronization algorithm and its applications, and there have been key breakthroughs in the algorithm convergence theorems. Owing to their robustness, flexibility, and ease of implementation, distributed consensus clock synchronization protocols have good prospects; however, many challenging scientific problems remain. In this paper, we summarize the latest research trends on hierarchical and distributed clock synchronization algorithms, especially highlighting the representative clock synchronization algorithms based on consensus control that were proposed in the last five years, and discuss the future directions that aim at providing valuable academic references for researchers working in relevant fields.

Keywords networked systems, clock, synchronization, hierarchical networks, distributed algorithms, consensus



Minrui FEI was born in 1961. He received the B.S. and M.S. degrees in industrial automation from Shanghai University of Technology in 1984 and 1992, respectively, and the Ph.D. degree in control theory and control engineering from Shanghai University, Shanghai, China in 1997. Currently, he is a full professor at Shanghai University.

His research interests include networked control with their applications to power plant automation and industrial energy efficiency.



Nan XIONG was born in 1987. He is currently pursuing the Ph.D. degree in control theory and control engineering at Shanghai University. His research interests include clock synchronization for wired/wireless networks, and consensus algorithms.



Tao LI was born in 1981. He received the Ph.D. degree in system theory from Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China in 2009. Currently, he is a full professor at Shanghai University. His research interests include stochastic systems, multi-agent systems and information networks.