

文章编号 1004-924X(2013)11-2951-09

基于动态路径列表的无线传感器网络时间同步协议

董恩清^{1*}, 邹宗骏¹, 张德敬¹, 宋杰¹, 李立^{2*}

(1. 山东大学(威海)机电与信息工程学院, 山东威海 264209;

2. 中山大学肿瘤医院影像与微创介入中心, 广州 510060)

摘要:为降低大规模无线传感器网络中时间同步误差的多跳累积,提出了一种基于动态路径列表的无线传感器网络时间同步协议(DRL-TSP)。该协议为每个节点保存一个待选同步动态路径列表,允许节点根据列表中的可用路径质量信息选择一条最适合当前同步要求的同步链路,从而最大程度地降低同步误差的多跳累积。将一种有效时间标识(TTA)技术用于同步机制中,使节点具备应对同步失败而导致链路失效的能力,保证同步过程的可靠性。实验结果表明:在平均可选上层链路为 12 条的情况下,DRL-TSP 协议单跳同步误差为 $5.29 \mu\text{s}$;10 跳同步误差被控制在 $11.10 \mu\text{s}$ 以下;因时标节点失效导致同步失败的节点比例远低于传感器网络同步协议(TPSN),接近洪泛时钟同步协议(FTSP)水平。提出的 DRL-TSP 协议在同步精度上优于现有的 FTSP、TPSN 等协议,且具有较高的鲁棒性。

关键词:无线传感器网络;同步路径优化;动态路径列表;误差累积;时间同步

中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2951

Time synchronization protocol based on dynamic route list for wireless sensor network

DONG En-qing^{1*}, ZOU Zong-jun¹, ZHANG De-jing¹, SONG Jie¹, LI Li^{2*}

(1. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering,
Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China;

2. State Key Laboratory of Onwlogy in South China, Imaging Diagnosis and Interventional Center,
Sun Yat-Sen University Cancer Cerrter, Guangzhou 510060, China)

* Corresponding author, E-mail: enqdong@sdu.edu.cn li2@mail.sysu.edu.cn

Abstract: To reduce the error accumulation of time synchronization in multihops for large-scale wireless sensor networks, a Dynamic Route List based Time Synchronization Protocol (DRL-TSP) is proposed. The protocol uses an available synchronization route list in each node, and allows the node to choose an optimal synchronization route to reduce the error accumulation. An identification called TTA (Time to Available) is used to deal with the synchronization failure and to ensure the reliability of the synchronization process. Experimental results indicate that the synchronization error in single hop is $5.29 \mu\text{s}$ when the optional upper links are 12 for each node, and the synchronization error is

收稿日期: 2013-04-12; **修订日期:** 2013-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 81371635; No. 81071207; No. 81271622); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20120131110062); 山东省科技发展计划资助项目(No. 2013GGX10104); 华南肿瘤学国家重点实验室开放基金资助项目(HN2013-08); 山东大学研究生自主创新基金资助项目

controlled under $11.10 \mu\text{s}$ within 10 hops. Moreover, the nodes of synchronization failure caused by time scale node invalidation are more low than that of Timing-sync Protocol for Sensor Network (TPSN) and close to that of Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP). Experimental results show that the proposed protocol has a better performance than the current protocols in precision and reliability.

Key words: wireless sensor network; synchronous route optimization; dynamic route list; error accumulation; time synchronization

1 引言

时间同步技术在无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 中起到基础且至关重要的作用, 它为网络节点的精确定位、节点休眠/唤醒的时隙分配、节点群的协同工作, 以及大数据量的融合操作等应用提供支持。自从 2002 年 8 月 J. Elson 和 K. Romer 在 HotNets-I 国际会议上首次提出无线传感器网络时间同步机制起, 许多服务于 WSNs 的时间同步协议应运而生^[1-6]。现有的 WSNs 时间同步机制在多跳扩展上, 都是简单的传递式逻辑, 这样很容易将上一跳的同步误差累积到下一跳的同步运算中, 在大规模网络中, 同步误差会随同步消息的扩散在路径上持续累积, 最终导致同步精度严重下降。

RBS (Reference Broadcast Synchronization)^[1] 利用一个网关节点在 2 个广播域之间的关联时标信息实现多跳全网同步, 但该协议没有对网关节点的质量进行检测, 也没有考虑关联后带来的传输延迟和误差累积问题。传感器网络同步协议 (Timing-sync Protocol for Sensor Networks, TPSN)^[2] 与 Tiny-Sync/Mini-Sync^[3] 皆使用双向报文交换技术, 由于基于生成树的多跳同步策略, 没有对节点失效采取相应措施, 使得当网络中出现节点同步失败时, 尤其是当这种情况出现在靠近参考节点的位置时, 将对全网同步造成致命影响。洪泛时钟同步协议 (Flooding Time Synchronization Protocol, FTSP)^[4] 给全网节点分配唯一的 ID 号, 并根据 ID 大小决定时标优先级, 最终使全网收敛到最小 ID 节点的时间标准, 这种机制只认同节点 ID 号, 而不考虑节点时钟的稳定性, 当不稳定的节点获得了较小的 ID 号时, 将对全网同步造成很大影响。

继这些协议之后, 文献 [7] 提出了 TDP (Time-Diffusion Synchronization) 机制, 它讨论

了各协议在多跳链路上的不足, 强调了优化多跳同步方式的思想。文献 [8] 总结了 WSNs 时间同步策略的发展方向, 提出多跳误差累积问题是必须解决的重点和难点。针对同步误差的多跳累积问题, 部分协议做出了一些处理措施, 但效果并不理想。LTS (Lightweight Time Synchronization)^[9] 对分层式同步协议的多跳误差累积进行了定量分析, 所使用的生成树规则虽然考虑了同步路径的选择, 但逻辑过于复杂, 且对单个节点的路径挑选缺乏针对性。CCS (Consensus Clock Synchronization)^[10] 提出了一个内部虚拟时钟的思想, 将所有节点收敛到一个内部虚拟时钟标准上, 这样虽不存在多跳同步问题, 但这个虚拟时钟与标准时钟存在一定偏差, 特别是在进行标准时间的时标转化时将出现问题。

本文提出的 DRL-TSP (Dynamic Route List based Timing-Sync Protocol) 协议在传感器节点保存一个待选路径列表, 根据动态路径列表提供的可选路径, 选择一条最适合当前同步要求的同步链路来抑制误差累积。文章首先分析了研究所用的同步误差多跳累积模型, 然后, 对 DRL-TSP 协议的流程框架进行阐释。为了清楚剖析动态路径列表 (Dynamic Route List, DRL) 技术, 文章从发送端和接收端 2 个方面分析了 DRL 技术的操作逻辑。最后, 介绍了 DRL-TSP 协议对同步异常状况的处理办法。

2 同步误差多跳累积模型

在网络规模较大的情况下, 传感器节点间的时间同步会以多跳的形式传播下去, 然而每跳的同步操作不可能做到绝对精确, 这将导致作为时标的上层节点时钟越发偏离标准时钟, 这种现象就是同步误差的多跳累积。

文献 [1] 指出, 同步数据在网络中传播将受到一个满足零均值高斯分布的随机延迟 ϵ 的干扰。

在文献[11]给出的节点时钟一阶线性模型中加入 ϵ 作为模型残差,得到如下的节点时钟模型:

$$C_i(t) = S_i \cdot t + O_i + \epsilon, \quad (1)$$

其中: t 为标准物理时钟, S_i 为节点 i 的时钟频率偏移(clock skew), O_i 为时钟相位偏差(clock offset)。

令节点 i 的时钟频偏真值为 S_i^{tru} ,频偏估计值为 S_i^{est} ,则有频偏估计误差 $S_i^{err} = S_i^{tru} - S_i^{est}$,令两节点间的时钟偏差为 O_{ij} 。图 1 为本文提出的同步误差多跳累积模型,能够比较全面地说明同步误差多跳累积的原因。其中, T_{TSS} 为上层节点的同步报文发送时间戳, T_{TSR} 为同步报文的接收时间戳, PD 为报文的传播延迟。由于射频信号的传播速度接近光速,相对于 2 个节点之间的距离, PD 可以忽略不计。时间戳 T_{TSR} 与 T_{TSS} 之间的时差主要来源于下层节点的时钟频率偏移 S_i^{tru} 与不确定延迟引起的时钟残差 ϵ ,利用同步算法对节点时钟的频偏进行估计得到 S_i^{est} ,进而对节点的时钟进行修正,然而,由于频偏估计误差 S_i^{err} 的作用,这个修正补偿存在偏差 O_{ij}^{err} ,经过多层累积后形成了多跳误差累积 O_{acc}^{err} 。

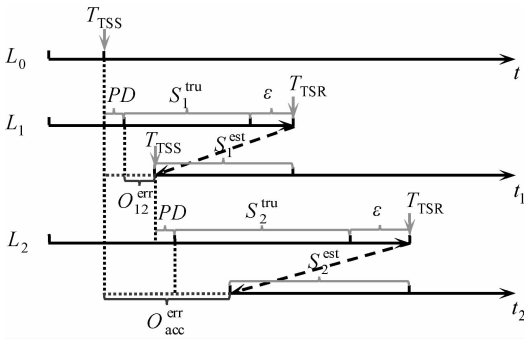


图 1 同步误差多跳累积示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-hop accumulation for synchronization error

根据上面的分析,要抑制同步误差累积,就要在同步路径的每一跳上尽可能降低同步误差。容易考虑到,当节点时钟频偏越小时,其时钟运行越稳定,作为时标节点的性能越好。更进一步考虑,当同步路径的上层节点中存在正负频偏的节点,它们之间产生的同步误差在统计上可以相互抵消,于是对单个节点时钟频偏的考虑转变为对同步链路上节点时钟频偏之和的考虑。这个思想可以由式(2)和式(3)表示。

$$O_{acc}^{err} = \sum_{i=1}^N (S_i^{err} * T_{sync}), \quad (2)$$

$$S_i^{err} \propto S_i^{tru}, \quad (3)$$

其中: T_{sync} 为同步周期。

3 DRL-TSP 协议流程

3.1 时钟参数拟合算法

在节点时钟参数估计上,文中提出的 DRL-TSP 协议使用类似于文献[12]提出的多模态时钟参数估计方法(Bimodal Clock Frequency Estimation based Time Synchronization Protocol, BCFE-TSP)。它结合了 Sage-Husa 滤波算法^[13]与斜率法(Ratio-Based, RB)^[14]的优点,在时钟参数估计上既有 Sage-Husa 算法的高精度估计效果和抗噪声干扰的能力,又具备 RB 算法对时钟参数跳变的快速跟踪能力。

3.2 DRL-TSP 协议流程

提出的 DRL-TSP 协议基于分层网络构建,通过动态路径列表进行选路操作以抑制多跳误差累积,基本流程可分为以下几个步骤:

3.2.1 网络层次生成阶段

网络层次的生成方法与文献[2]中介绍的相似。参考节点将自己的同步层次设为零,并广播一个层次发现报文,其中包含自己的层次号。当参考节点的所有一跳邻居节点接到这个报文后,将提取其中的层次信息,并将自己的层次号设为这个值加 1,再将报文改写为自己的层次号后将其广播出去,后续节点继续利用这个消息确定自己的同步层次。这个动作一直进行到网络的边缘节点,这样则建立起全网的同步层次。

3.2.2 同步运行阶段

在网络层次生成完毕之后,由处在零层的参考节点周期性地发起同步动作,它向自己的下层节点传递包含发送时间戳的同步消息。当下层节点接收到这个同步消息后,根据时间戳数据进行同步运算,得到节点自己的时钟频偏估计值,使自身与上层节点同步,然后,继续向下一层节点发送同步消息。这个动作一直持续到网络的边缘节点,完成全网节点的时间同步。

3.2.3 建立待选路径列表

在第一次同步操作完成后,每个节点都记录了自己的时钟频偏信息,这个频偏信息实际上体

现了节点作为时标的质量。频偏越小,说明节点时钟运行越稳定,作为时标节点的效果越好,反之,效果越差。在得到自己的频偏之后,节点向自己的下层节点发送一个包含自身频偏信息的路径质量信息(Route Quality Information, RQI)报文(这个动作是一次性的,之后只有在节点发现自己的频偏变化超过门限值或者路径质量确认定时器到时这两种情况下,节点才会再次发送 RQI 报文,这两种情况将在 4.1 节中详细说明)。每个下层节点可能收到多个 RQI 报文,根据这些报文,节点可建立起一个待选路径列表,其中包含了可选的上层节点 ID(即父节点 ID)以及对应的频偏信息,这些频偏信息体现了待选路径的质量。

3.2.4 建立新的同步路径

建立待选路径列表以后,节点可以根据表内的待选路径质量信息(即上层链路的频偏信息)选择质量最好的同步路径,从而保证下一次同步操作的质量,抑制长链路上的多跳累积误差。

3.2.5 维护待选路径列表

每次同步操作完成之后,节点将新得到的时钟频偏与上一次的同步值进行比较,如果发现变化大于设定的门限值,则判断本条同步路径的质量出现变化,触发发送新的 RQI 报文。当下层节点接收到这个报文后,根据内容更新自己的待选路径列表。

4 动态路径列表原理

DRL-TSP 协议是一种基于路径优化策略的同步协议,其核心是一个接受维护的待选路径列表,它允许节点根据可用路径的质量选择最优的同步路径。图 2 为 DRL-TSP 协议的同步链路建立逻辑。当同步链路建立到第 3 层时,节点 A 向下层节点发送 RQI 报文,其中包含它所在链路的频偏信息 $S_{OLA} = S_1 + S_A$,同理,节点 B、节点 C 也向下发送 RQI 报文通报 S_{OIB} 、 S_{OIC} 。处在第 4 层的节点 D 收到这些报文后建立待选路径列表。根据上层链路的频偏信息,节点 D 选择所在链路频偏最小的节点 B 作为自己的上层节点并建立同步链路。之后,节点 D 继续向下层发送 RQI 报文,其中包含了链路频偏信息 $S_{OIBD} = S_1 + S_B + S_D$ 。

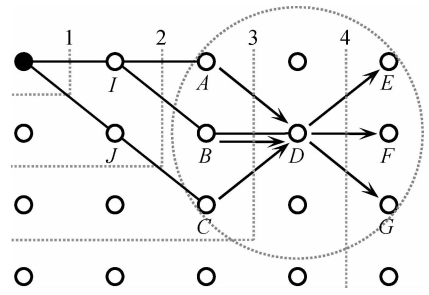


图 2 DRL-TSP 同步链路建立逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of DRL-TSP synchronization links

4.1 发送端原理

建立待选路径列表,首先需要积累上层链路的质量信息。节点通过发送路径质量信息(RQI)报文来通知下层节点自己所在链路的链路质量。RQI 报文中包含 3 个字段,分别是发送报文的源节点号 NodeID,源节点所属层次 Level,以及源节点所在链路的时钟频偏信息 Route_skew。除了第 3.2.2 节步骤(3)中介绍的初始数据交换,节点还会在两种情况下向下层节点发送路径质量信息报文。

4.1.1 节点时钟频偏变化超过所设门限值

当一次同步操作完成之后,节点将获得的时钟频偏估计值 S_c^{est} 与上一次同步的频偏估计值 S_p^{est} 进行对比,如果它们的差值超过所设门限 S_{th} ,即 $|S_c^{est} - S_p^{est}| > S_{th}$,则向下层发送 RQI 报文。门限值 S_{th} 的设定需要考虑节点的稳定度和外界环境因素,设得过大将不能很好地反馈同步路径质量的变化,过小则会导致下层节点频繁处理可用链路信息,造成不必要的资源开销。实验获得的最优 S_{th} 取值为 5 ppm。

4.1.2 路径质量确认定时器到时

由于节点的待选路径列表中,每一条记录都包含一个有效时间(Time To Available, TTA)字段,用来表征此条路径的有效性。当节点所在链路的质量变化长时间未超过阈值而致使定时器到时,节点将向下层节点发送 RQI 报文通报链路的有效性。

根据新链路质量信息的产生特点,除第一次全网同步后的 RQI 报文发送外,DRL-TSP 机制将维护中产生的 RQI 信息(即上面介绍的两种情

况)压缩在正常的同步时间戳报文中发送,这样大量减少了更新过程中的通信开销,保证了协议的节能性。

4.2 接收端原理

待选路径列表的每一条记录都包含 3 个字段:R_NodeID 为待选父节点号,Route_skew 为待选父节点所在链路的频偏信息,TTA 为记录的有效时间。接收端节点接到上层的 RQI 报文,根据报文内容维护自己的待选路径列表。

当节点接到来自上层节点的 RQI 报文后,解读报文中的路径质量信息,并查找本地待选路径列表。若节点在当前待选路径列表中查找到对应于 RQI 报文源节点的条目,说明此条路径的同步质量发生变化,于是根据 RQI 报文更新对应的路径质量信息,并重置 TTA;若没有查找到对应条目,则说明发现一条新的可用路径,将这条路径及其质量信息添加到本地列表中,并设置其 TTA。

之后,节点根据 RQI 报文中的链路质量数据与当前使用的同步路径质量进行对比,如果发现更优路径,则替换当前链路,这个过程由图 3 所示。

若 RQI 源节点就是当前父节点,那么比较其前后的频偏变化。如果发现频偏变小了,说明当前同步路径质量变好,那么继续使用这条同步路径(即不改变当前父节点);如果发现频偏变大,说明当前同步路径质量变坏,那么需要重新选举父节点,挑选最优同步路径。

若 RQI 源节点不是当前父节点,那么比较两条链路的频偏信息。如果当前链路频偏信息较小,那么保留使用这条链路,不做任何操作;如果当前链路频偏较大,则说明另一条为更优的链路,用其替换当前同步路径。

5 TTA 设定与异常情况应对策略

由于网络节点和链路无法保证绝对的可靠,时间同步过程中可能出现节点或链路失效。如果缺乏有效的应对措施,网络节点的同步会失败,从而导致一系列不可预期的后果。针对这个问题,在待选路径列表的每一个条目中都设定了一个 TTA 字段,用来表征此条路径的有效性,当某个条目长时间得不到维护,则判断此条路径失效,对

应记录将会从列表中删除。

5.1 同步失败应对策略

可能出现的一种情况是,节点 A 的待选路径列表中已经没有可选路径,即节点 A 无法与上层节点进行同步。如果没有应对措施,将导致其之后的所有节点都无法进行同步。当节点 A 的可选父节点都失效时,DRL-TSP 的处理办法如图 4 所示。

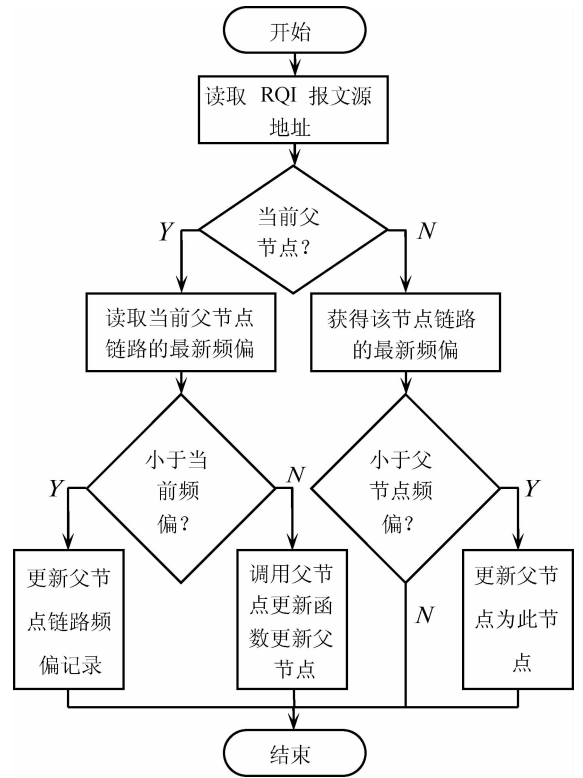


图 3 新同步路径流程图

Fig. 3 Flow chart of new synchronization route

图 4(a)中,节点 A 广播一个特殊报文,向它的下层节点通报自己无法同上层节点同步的情况,并且向同层的邻居节点请求 RQI 报文。图 4(b)中,以其为父节点的下层节点(节点 D、E)接到通报后重新选举父节点 B,所有接到通报的同层邻居节点(节点 B、C)向节点 A 发送 RQI 报文。图 4(c)中,节点 A 利用这些 RQI 报文重新建立待选路径列表,并把自己的层次号加 1,从而根据待选路径列表信息成为邻居节点 B 的子节点,继续参与同步操作。这样如图 4(c)所示,网络中只有 3 个红色节点同步失效(彩图见期刊电子版),并不会影响到之后节点的同步能力,从而,最大限度地保证了网络中节点同步的成功率。

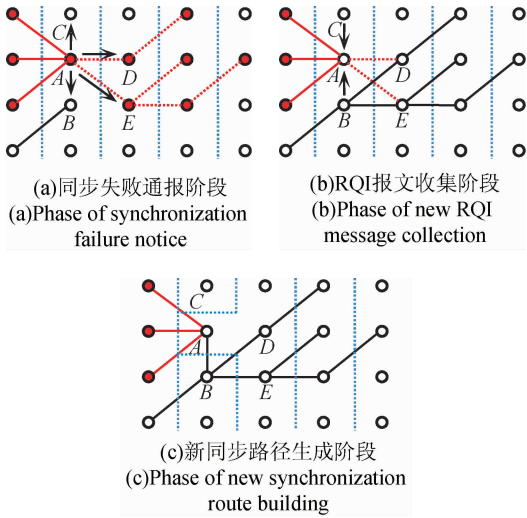


图 4 节点同步失败应对策略图

Fig. 4 Diagram of coping strategy of node synchronization failure

5.2 恶意节点应对策略

在无线传感器网络时间同步中,恶意节点通常将自己的时钟性能伪装得很好,用以取得其它节点的信任,然后向网络中传播虚假的时间信息,以破坏节点间的同步协作。根据协议的设计特点,DRL-TSP 对恶意节点的攻击具有天然的应对能力(如图 5 所示)。

节点 A 被控制成为恶意节点并发送错误同步信息,这个信息可能包括错误的时间戳信息,以及非常好的链路频偏信息(用来把自己伪装成最优链路)。它的下层节点 B 很有可能被节点 A 误导从而导致同步失败,但是这必将带来节点 B 频偏信息的极大变化。这个极大的变化使得处在下层的节点 D、E 抛弃节点 B 而重新选举节点 C 作为自己的父节点。于是,恶意节点 A 的破坏将被限制在一跳范围之内,从而保证了全网的同步。

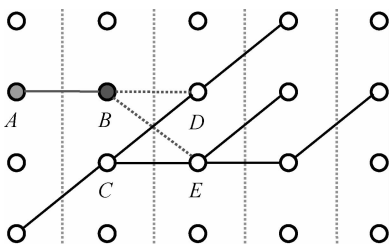


图 5 恶意节点应对策略图

Fig. 5 Diagram of coping strategy of malicious nodes

6 实验结果与比较

DRL-TSP 协议在 NS2 环境下进行了仿真实验。实验首先验证了提出的 DRL-TSP 协议对同步误差多跳累积的抑制作用,以及在不同节点密度下协议的抑制效果;然后将 DRL-TSP 与 TPSN、FTSP、BCFE-TSP 的同步效果进行对比;之后验证了在网络部分节点同步失败的情况下,DRL-TSP 的鲁棒性,在相同条件下与 TPSN、FTSP 的同步效果进行了对比;最后,将提出的 DRL 机制应用到经典 TPSN 协议中来证明它的可移植性。表 1 为网络的仿真参数配置。在通信半径一定的情况下,通过改变节点的分布密度使其获得不同的上层邻居节点个数,从而改变可用的同步路径数。

图 6 为 DRL-TSP 在节点间距为 50、30、20 m,即可选上层链路为 5、12、23 条三种情况下的同步效果图,可以看出加入 DRL 机制后能够显著抑制多跳累积误差。可选上层链路为 5 条时,DRL-TSP 协议的平均同步误差与没有 DRL 机制相比,优化了 $1.32 \mu\text{s}$;可选上层链路为 12 条时,平均误差优化了 $2.07 \mu\text{s}$;可选上层链路增加为 23 条时,平均误差优化了 $3.55 \mu\text{s}$ 。由实验数据可见,当可用的待选路径增加时,即节点的可用上层邻居数增加时,DRL 机制的多跳误差累积抑制效果更好。

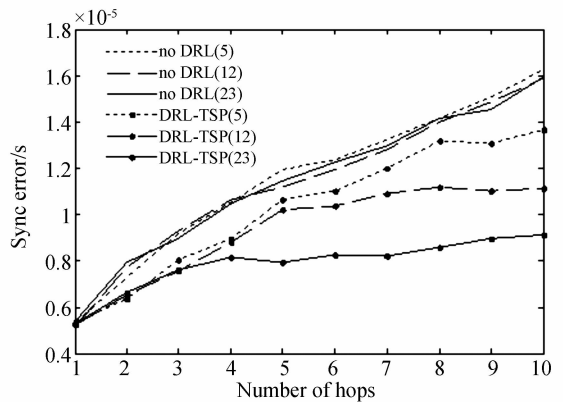


图 6 各节点密度下 DRL-TSP 协议同步误差对比图
Fig. 6 Comparison of synchronization errors for DRL-TSP protocol with different node density

表 1 网络参数配置

Tab.1 Network configuration parameters

参数名	参数值
网络节点数	(200, 300, 500)
节点平均距离/m	(50, 30, 20)
平均上层邻居数	(5, 12, 23)
无线通信距离/m	70
节点时钟频偏/ $\times 10^{-6}$	± 100
再同步周期/s	30

图 7 为节点间距皆为 30 m 情况下, DRL-TSP 与 TPSN、FTSP、BCFE-TSP 的同步效果对比。其中, DRL-TSP 的单跳同步误差为 $5.29 \mu\text{s}$ 。在同步跳数小于 3 跳时, DRL-TSP 与 BCFE-TSP 的精度都高于 FTSP, 然而, 随着跳数的增加, BCFE-TSP 出现明显的同步误差累积, 同步误差开始大于 FTSP, 而 DRL-TSP 同步精度依然优于 FTSP, DRL-TSP 10 跳内的同步误差被控制在 $11.10 \mu\text{s}$ 以下, 具有很好的多跳同步效果。

图 8 为网络部分节点失效情况下, 剩余节点的同步操作失败比例。由图中数据可以看出, TPSN 协议受上层节点同步效果影响严重, FTSP 由于其平面拓扑的优势, 受周围节点同步失败的影响较小。而当上层父节点出现同步失败的情况时, DRL-TSP 将很快地判断并重新建立有效同步链路, 所以健壮性明显优于 TPSN。

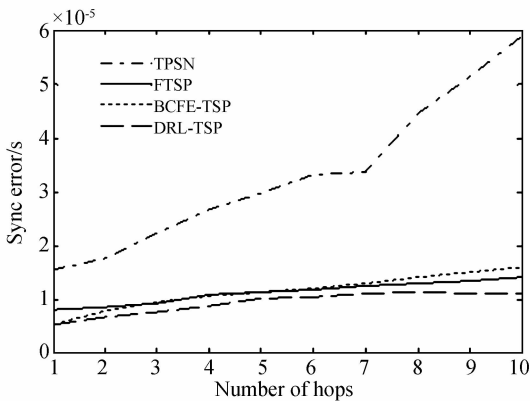


图 7 4 种协议同步误差对比图

Fig. 7 Comparison of synchronization errors for the four protocols

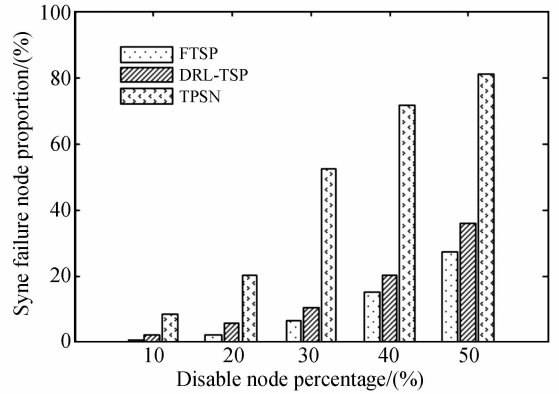


图 8 协议健壮性对比图

Fig. 8 Comparison of robustness of the three protocols

为了验证动态路径列表机制的可移植性, 在同样使用分层结构的 TPSN 协议上进行了 DRL 机制的移植实验。节点平均间距设定为 30 m, 移植前后节点对自身时钟频偏的估计误差如表 2 所示。当同步跳数累积到 6 跳时, DRL-TPSN 对时钟频偏的估计相比于 TPSN 精确了近 0.3×10^{-6} 。可以看出, 移植后的 DRL-TPSN 对节点时钟频偏估计的准确度随着网络层次的增加明显优于原始 TPSN 协议。

表 2 DRL-TPSN 与 TPSN 的时钟频偏估计误差对比

Tab.2 Comparison of clock frequency skew estimation errors of DRL-TPSN and TPSN ($\times 10^{-6}$)

同步跳数	1	2	3	4	5	6
TPSN	0.518	0.582	0.739	0.888	0.989	1.108
DRL-TPSN	0.510	0.538	0.623	0.684	0.755	0.837

7 结 论

大规模无线传感器网络时间同步中存在严重的同步误差多跳累积问题, 现存的传统同步机制无法很好地抑制同步误差的多跳累积。文中提出的 DRL-TSP 同步协议使用了一种有效抑制多跳误差累积的动态路径列表机制。实验验证显示, DRL-TSP 具有很好的多跳同步效果, 当平均可选同步路径在 5 条到 23 条之间时, DRL 机制的同步误差优化保持在 $1 \sim 3 \mu\text{s}$ 。并且, 在可通信的上层节点越多的情况下, 其抑制误差累积的效果

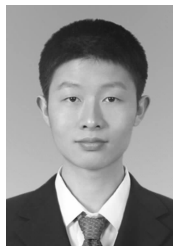
越好。DRL-TSP 协议的单跳同步误差为 $5.29 \mu\text{s}$, 相比 TPSN 协议和 FTSP 协议具有更高的多跳同步精度以及较高的鲁棒性。提出的

DRL 机制同样能够移植到其他分层同步协议中抑制多跳误差累积, 并取得不错的累积误差抑制效果。

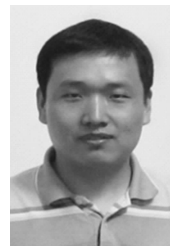
参考文献:

- [1] ELSON J, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [C]. *5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, New York, USA, 2002*, 36 (SI): 147-163.
- [2] GANERIWAL S, KUMAR R. Timing-sync Protocol for Sensor Networks [C]. *International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, California, USA, 2003*: 138-149.
- [3] SICHITIU M L, VEERARITTIPHAN C. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks [C]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, NC, USA, 2003*: 1266-1273.
- [4] MARÓTI M, KUSY B. The flooding time synchronization protocol [C]. *2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, MD, USA, 2004*: 39-49.
- [5] AULER L F, DAMORE R. Adaptive kalman filter for time synchronization over packet-switched networks; an heuristic approach [C]. *2th International Conference on Communication Systems Software and Middleware, 2007*: 1-7.
- [6] LIU Q, LIU X. AdaSynch: a general adaptive clock synchronization scheme based on kalman filter for WSNs [J]. *Wireless Personal Communications*, 2010, 8(1): 1-23.
- [7] SU W, AKYILDIZ I F. Time-diffusion synchronization protocol for wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, 13(2): 384-397.
- [8] CHAUDHARI Q M, SERPEDIN E. Estimation of clock parameters and performance benchmarks for synchronization in wireless sensor networks [C]. *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, 2008*: 931-932.
- [9] GREUNEN J V, RABAHEY J. Lightweight time synchronization for sensor networks [C]. *2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications, NY, USA, 2003*: 11-19.
- [10] MAGGS M K, OKEEFE S G, THIEL D V. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(6): 2269-2277.
- [11] WU Y C, CHAUDHARI Q. Clock synchronization of wireless sensor networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, 28(1): 124-138.
- [12] CUI B, DONG E Q, LI X Y. A time synchronization algorithm based on bimodal clock frequency estimation [C]. *The 18th Asia-Pacific Conference on Communications, 2012*: 75-78.
- [13] SAGE A P, HUSA G W. Algorithms for sequential adaptive estimation of prior statistics [C]. *IEEE Symposium on Adaptive Processes Decision and Control, 1969*: 760-769.
- [14] SHEU J P, HU W K. Ratio-based time synchronization protocol in wireless sensor networks [J]. *Telecommunication Systems*, 2008, 39(1): 25-35.

作者简介:



邹宗骏(1987—),男,福建武夷山人,硕士研究生,2010年于山东大学获得学士学位,主要研究方向为无线传感器网络时间同步技术。E-mail: zongjizou@163.com



张德敬(1982—),男,山东临沂人,博士研究生,2009年于山东大学获得工学硕士学位,主要研究方向为无线传感器网络路由技术、嵌入式系统。E-mail: dejingzhang@mail.sdu.edu.cn



宋 杰(1988—),男,辽宁鞍山人,硕士研究生,2011年于山东大学获得学士学位,主要研究方向为无线传感器网络时间同步技术。E-mail: songjie2007101@yahoo.cn



李 立(1968—),男,湖南长沙人,博士,教授/主任医师,博士生导师,中山大学附属肿瘤医院影像与微创介入中心,主要从事医学影像诊断和分子影像学研究。E-mail: li2@mail.sysu.edu.cn

导师简介:



董恩清(1965—),男,辽宁营口人,博士,教授,博士生导师,1987年于中国矿业大学获得学士学位,1993年于长安大学获得硕士学位,2002年于西安交通大学获得博士学位,主要从事无线通信技术、无线传感器网络、医学图像处理等方向的研究。E-mail: en-qdong@sdu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)