

基于区域扩散机制的无线传感器网络时间同步算法

汪涛

(湖北民族学院理学院 恩施 445000)

摘要 针对当前无线传感器网络时间同步算法无法满足物联网对于网络实时性的要求,提出了一种基于区域扩散的无线传感器网络时间同步算法。该算法分为两个阶段进行:第一阶段根据生物觅食理论(OFT),按照收益率最高的原理提出一种代言人信息选择算法(SIE)进行区域内时间同步;第二阶段根据时间偏移量最小节点选择区域代言人并在区域之间进行二次同步,同时将同步过程映射到马尔可夫链,提出基于马尔可夫链的代言人加速算法(MarSAA)。理论分析和实验证明,提出的算法具有较好的时间复杂性;并且两阶段算法可以并行进行,相对于传统算法在全网时间同步上具有非常好的性能。

关键词 无线传感器网络,时间同步,分布式,生物启发式计算

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.12.040

Regional Diffusion Mechanism Based Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks

WANG Tao

(School of Science, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China)

Abstract This paper analyzed convergence issues of distributed time synchronization algorithm in wireless sensor networks, and proposed a regional diffusion mechanism based time synchronization algorithm. The algorithm is made up by two phases. The first phase proposes a spokesmen information exchange algorithm (SIE) for time synchronization within the region, based on the optimal foraging theory (OFT) and the principles of the highest yields. In the second phase, the spokesperson is chosen for the regional to do synchronization between regions according to the time offset, at the same time the synchronization process is mapped to a Markov chain, and a Markov chain based spokesperson accelerated algorithm (MarSAA) is proposed to accelerate convergence. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed algorithm has better time complexity, and the performance is better than the traditional network-wide time synchronization algorithm, and the two-stage algorithm can also run in parallel.

Keywords Wireless sensor networks, Time synchronization, Distributed, Bio-heuristic calculation

1 引言

无线传感器网络是连接物理世界和计算世界的桥梁,已经渗透到人们生产生活的各个方面,从战场监控到抢险救灾,从航空监控到车联网,从大型计算作业到微型手术控制等,都离不开无线传感器网络^[1-4];并且在高速车辆跟踪、航空检测、战场监控等场景中要求传感节点能够严格同步,能够精确地对移动节点进行定位并进行实时通信,强节点之间的无缝对接。因此时钟同步在无线传感器网络中显得尤为重要。

时钟同步是确定物理事件发生顺序的重要依据,尤其是在物联网高速发展的趋势下,各种应用系统对无线传感器网络的时间同步、网络传输和能耗等方面的要求越来越高,不正确的时序带来的后果往往是灾难性的;并且无线传感器具有能耗低、存储容量和计算能力小、适应复杂环境的特点,对时间同步协议提出了更高的要求。传统的互联网时间同步协议(Network Time Protocol, NTP)^[5]计算开销太大,无法满足无线传感器网络计算能力的要求,并且复杂的计算导致较高的能量消耗,基于GPS(Global Positioning System)^[6]的时间同

步方案往往具有较高的硬件成本,均不适合无线传感器网络环境。针对传感器网络自身的特点,研究者们进行了大量的研究工作,提出了多种时间同步算法。根据消息发送和接收者不同可以划分为3类,即基于发送者-接收者(sender-receiver)、基于接收者-接收者(receiver-receiver)以及基于节点对的同步算法。早期的这些集中式同步协议具有实现简单、分层同步、由区域逐渐扩展到全网的特点。但是这些集中式的同步算法实现一次全网更新的时间相对较长,并且关键节点对全网状态影响严重,这些问题主要表现在以下几个方面:(1)对于新加入的节点需要等待路由建立才能开始同步,扩展性较差;(2)异构网络中不同类型的网络间时间同步困难;(3)误差沿路径积累^[7],误差与到根节点的跳数呈正相关;(4)周期性地建立路由增加了节点能量和带宽消耗。

在物联网技术快速发展的今天,特定的传感器网络应用所关注的事件类型有限。当一个区域产生特定事件时,周边相关的传感器节点开始收集相关数据并传送至特定的节点聚合,聚合节点之间进行着不同程度的信息交互。因此如何设计出满足当前应用需求的无线传感器网络时间同步算法,是

到稿日期:2015-02-03 返修日期:2015-04-06 本文受湖北省高等学校青年教师深入企业计划项目(XD2014200)资助。

汪涛 男,硕士,副教授,主要研究方向为数据库开发、数据挖掘,E-mail:wangtao030156@163.com。

物联网以及无线传感器领域的一个重要挑战。考虑到特定的传感器网络应用所关注的事件有限,所关注的时间具有一定的相似度,区域内网络节点应具有一定的协作、自治能力,本文结合生态学中的动物群体协作的最优觅食理论(Optimal Foraging Theory, OFT)^[8]对区域内进行时间同步,并将区域网络映射到马尔可夫链的状态转移过程来分析其收敛的特性,通过区域内节点代表向全网进行状态转移,最终实现全网时间同步。

本文第2节介绍了相关工作并对本文需要解决的问题进行了定义;第3节详细介绍了本文提出的区域时间同步算法;第4节介绍了基于区域扩散机制的全网时间同步算法;第5节设计相关实验,对本文提出的算法进行验证,并进行简单的分析;最后对全文进行总结。

2 相关工作

时间同步问题伴随着分布式系统的实现就已经存在。在早期的时间同步算法中,基于发送者-接收者(sender-receiver)的同步算法以DMTS(Delay Measurement Time Synchronization)^[9]和FTSP(Flooding Time Synchronization Protocol)^[10]为代表,其基本原理是采用节点间平等通信的方式进行时间同步,首先由发送者(sender)发送包含本地时间戳的时间同步消息,接收者(receiver)接收到时间同步消息后用本地时钟记录接收时间,并取出时间戳,然后调整自身时钟与发送者节点达到同步。传感器网络时间同步协议(Timing-sync Protocol for Sensor Networks, TPSN)^[11,12]作为基于节点对的时间同步算法的代表,首先由根节点发起同步,通过建立全网路由来传播同步消息,逐步扩展到全网,算法中只需一组时间同步数据就可以计算出时间偏差,计算方便简单。但是同时也存在着一定的风险,即如果这组数据在传递过程中受到延迟或噪声等因素的影响^[13],那么计算结果就会严重失真。而基于接收者-接收者(receiver-receiver)的同步算法则以RBS(Reference Broadcast Synchronization)^[14]为代表,算法中首先由发送节点发送参照广播(Reference Broadcast),广播域的其他节点接收参照广播后,交换各自的时刻信息确定时间偏移量,从而达到相互的同步。由于RBS算法采用多个节点之间互相验证的方式进行时间同步,在一定程度上克服了TPSN算法的单节点失效对整体时间同步的影响。但是这种算法需要节点之间进行频繁的广播和消息传递,造成了消息的延迟,同时也增加了节点间的通信负担,对于能量有限的传感器节点来说也是不利的。

为了克服传统时间同步算法的缺陷,研究人员提出许多新的理论和算法。应用较多的是分布式时间同步协议^[15-17],该算法在进行全网同步时无需建立全网路由,有效克服了集中式同步算法扩展性差的问题。文献^[18]中采用分布式融合的方法估计当前节点与根节点之间的时间相位差,从而对节点时间同步信息进行更新,这种方法在一定程度上简化了计算量,但是采用相位差估计的方法使得算法的准确性并不能满足当前物联网系统对网络准确实时性的要求。文献^[19]采用多层次抽样的方法在各个区域内选择特定的具有代表性的节点使用集中式的方式进行时间同步,在此基础上以样本节点为区域代言人进行区域同步,该算法在一定程度上减少了一次集中式同步开销过大的问题,但是该算法具有明显的层级结构,当区域根节点出现故障时,该区域内的节点也随之离

线,扩展性较差。文献^[20]提出的基于分布式一致的全网时间同步协议(Distributed Consensus Time Synchronization, DCTS)从邻居节点出发进行信息融合,最终使全网时间同步到一个虚拟节点,避免了由于单个节点失效导致的全网重新同步的问题,降低了算法的时间复杂度。但是该算法依赖于节点扩散来传播时间同步消息,更新速度太慢,在实时应用系统中存在一定的缺陷。

考虑到RBS和DCTS能够有效避免因节点失效带来的全网重新同步的特性,本文基于RBS和DCTS的基本原理,结合OFT构建出一种基于区域扩散机制的无线传感器网络时间同步算法(Regional Diffusion Mechanism Based Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks, RDBTS)。该算法首先以时间类型为基本单元在网内使用TFO理论进行时间同步,并动态选择一个代言人作为该区域的代表,不同区域的代言人之间动态构成新的区域,并将代言人之间的同步过程映射到马尔可夫链状态转移过程,完成全网时间同步。算法在区域内采用TFO使得网内具有一定的协作功能和自治能力,同时动态选择代言人避免了因节点失效而导致的区域节点离线,并且区域内时间同步和代言人之间的同步可以并行进行,提高了算法效率。

3 最优觅食理论

最优觅食理论(Optimal Foraging Theory, OFT)是生态学家为了更好地理解生物觅食的习性而构建的一套核心理论,最早由生态学家RH MacArthur和ER Pianka于1966年提出^[21],该理论已经在心理学、人类学等生态学相关的各个领域有着诸多应用^[22-25]。OFT理论描述了捕食者通过最小的代价获得最大收益的理论模型,模型假设所有的动物都存在必须通过竞争才能获得食物的环境下,并且没有任何一种动物可以捕食环境中的所有其他动物,也就是说捕食者只能捕获当前环境中可食用动物中的特定部分。模型与无线传感器网络中节点时间同步具有高度一致性,传感器时间具有外力不可改变的特性,同时每一个传感节点只与广播范围内的特定传感节点进行通信。OFT理论中的另外一个假设就是捕食者不能同时进行觅食和处理两个过程,也就是说捕食者不能在进食的同时进行下一次捕食行动,这也是计算每一次捕食过程的先决条件。正是由于OFT理论与无线传感器网络的相似性,才促使我们希望能将OFT理论应用于无线传感器网络,以改进其时间同步性能。

如果用 E 表示捕食者从获取的食物中吸收的能量,用 h 表示觅食和进食的时间,那么根据OFT理论,捕食者的收益率 *profitability* 可以表示为式(1)。

$$profitability = E/h \quad (1)$$

据此可知,假设食物1的收益率高于食物2,那么就有式(2)成立。

$$E_1/h_1 > E_2/h_2 \quad (2)$$

在此条件下,捕食者如果捕猎到食物1,就必须食用食物1;否则,当且仅当食用食物2的收益大于放弃该食物而去捕获食物1的总收益时,捕食者才食用食物2。用 A_1 表示放弃食物2去捕食食物1所花费的额外时间,那么据此结论有式(3)成立。

$$\frac{E_2}{h_2} > \frac{E_1}{h_1 + A_1} S \quad (3)$$

也就是当寻找最优食物的代价超过预期,并且使得寻找最优食物的性价比低于次优食物时,就需要退而求其次。综合考虑代价函数进行决策,选择性能最优而非收益最高的食物。OFT理论描述了一种从宏观上选择最优的折中方式,但是食物链中的动物并没有足够的智商去完成上述理论中的最优化决策。同样,对于无线传感器网络也需要给节点设置一定的决策条件。

4 基于区域扩散的时间同步算法

为了解决传统的时间同步算法给系统带来的大量的时间开销和存在时间同步不准确的问题,本文首先在RBS的基础上提出代言人信息选择算法(Spokesmen Information Exchange Algorithm, SIE),估计节点发出的时间同步参考消息给系统带来的开销,根据时间偏移量选择区域内代言人,同时将区域内代言人之间进行二次同步,并将同步过程映射到马尔可夫链,提出基于马尔可夫链的代言人加速算法(Markov Chain based Spokesperson Accelerated Algorithm, MarSAA)用以加速全网时间同步。

4.1 参考广播时间的特定消息交换

在进行区域内时间同步过程中首先需要计算区域内节点之间的时间偏移量,并确定区域代言人,算法模型如图1所示。节点A和A'分别在时刻T和T+t广播时间同步参考消息, n_i, n_j 和 n_h 为节点A的广播域内节点,同时 n_j 和 n_h 为节点A'的广播域内节点。时刻T+2t节点 n_i, n_j 接收到节点A的时间同步广播参考消息,节点 n_h 同时接收到节点A和A'的时间同步参考消息。同时节点 n_i 开始向除 n_h 之外被选中的节点交换时间同步消息,并于时刻T+2t+t'完成同步消息交换,节点 n_h 于时刻T+2t+t'完成同步消息交换,节点 n_i 和 n_h 将在下一轮交换中通过 n_j 完成同步消息交换。

在这个模型中,包含时间同步参考消息的数据包不会在任何一个路由表关键路径中排队等待,在一定程度上保证了时间同步消息的实时传播。

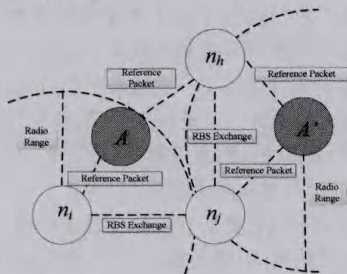


图1 选择参考广播消息

4.2 代言人选择算法

代言人选择算法(SIE)来源于OFT理论。图1中,节点 n_i 使用邻接表记录邻居节点的时间同步参考消息,并实时更新节点与邻居节点的时间偏移量,更新完所有邻居节点的时间偏移量之后,就可以计算出该节点与全局时钟之间的偏移量,并扩散到全网之中。记节点 n_i, n_j 之间的时间偏移量为 $Offset[i, j]$,在式(1)中,用 m 代替除数,用 $\sum(T_{j,k} - T_{i,k})$ 代替被除数,于是有式(4)成立。

$$\forall i \in n, j \in n; Offset[i, j] = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (T_{j,k} - T_{i,k}) \quad (4)$$

如果某个节点在经过多次计算之后仍然具有较大的偏移量,说明该节点的邻居是不可靠的,在后续计算中应该取消该节点的代言人资格。算法的具体描述见算法1。

算法1 代言人信息交换算法(SIE)

输入:原始网络节点和消息广播节点

输出:任意两个节点间的时间偏移量 $Offset[i, j]$

Step 1 节点A向区域内广播参考时间同步消息;

Step 2 接收节点用本地时钟标记接收的时间同步消息;

Step 3 选择代言人节点,并由代言人互相交换标记时间;

Step 4 对于广播域内节点 n_i, n_j ,计算时间偏移量 $Offset[i, j]$ 。

RBS算法的节点信息交换时间复杂度为 $O(n^m)$,而代言人交换节点选择算法将时间同步消息交换的时间复杂度为 $O(nm)$,同时该算法的空间开销也较小。在RBS算法中并没有明确空间复杂度,但是作为无线传感器节点往往具有较小的存储的空间^[26],因此算法的空间开销也是有一定限制的。

4.3 基于区域扩散的时间同步算法

文献[27]将算法迭代过程映射到马尔可夫域,加速了网络边连通度等参数的收敛速度。本文采用马尔可夫链的相关理论,将区域代言人之间的时间同步过程映射到马尔可夫链的过程,对SIE算法进行加速。

网络中的节点对应于马尔可夫链的各个状态 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$,用 P 表示马尔可夫链的转移概率矩阵,于是映射关系可以表示为式(5)。

$$\left. \begin{aligned} N(V, E) &\xrightarrow{SIE(W)} M_N(S, P) \\ V = S, v_1 = s_1, \dots, v_n = s_n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于网络节点之间是强连通的,因此映射到马尔可夫链 M_N 有限不可约,如果用 π 表示马尔可夫链 M_N 的唯一稳态分布,于是存在正整数 k ,使得 $P^k > 0$,且 $\lim_{m \rightarrow \infty} P^m = 1\pi^T$,且满足 $1^T \pi = 1$ 的正列向量。根据式(6)可知,随着迭代次数增加,各节点的时间信息将达到同步。

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} T_m &= \lim_{m \rightarrow \infty} P^m T_0 = 1\pi^T T_0 \\ \Rightarrow \forall v_i, \lim_{m \rightarrow \infty} T_{i,m} &= \sum_{k=1}^n \pi_k T_{0,k} \end{aligned} \quad (6)$$

如果用 d_i 表示节点 v_i 的度,那么迭代矩阵可以定义为式(7)。

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0, & (i, j) \in E, \text{且 } v_i \neq v_j \\ \frac{1}{d_i + 1}, & (i, j) \in E, \text{且 } v_i = v_j \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)可知,节点收敛到它们初始时间的加权平均值可表示为式(8)。

$$\forall v_i, \lim_{m \rightarrow \infty} T_{i,m} = \frac{\sum_{k=1}^n (d_k + 1) T_{0,k}}{n + \sum_{k=1}^n d_k} \quad (8)$$

全网时间同步的状态等效于马尔可夫链收敛到稳态,转移矩阵 P 的特征值满足 $1 = \lambda_1 > \lambda_2, \dots, > \lambda_n > -1$ 。于是马尔可夫链 M_N 的收敛速度取决于 $\lambda_* = \max(\lambda_2, |\lambda_n|)$,收敛迭代的次数为 $m = 1/\log_k(1/\lambda_*)$ ^[28]。根据Cheerger's不等式^[29]可知 λ_* 满足 $1 - 2\Phi \leq \lambda_* \leq 1 - \Phi^2/2$,其中 Φ 为马尔可夫链的导通系数。用 S_* 表示马尔可夫链所有状态的一个子集,那么稳态分布之和满足 $\pi(S_*) = \sum_{\theta_i \in S_*} \pi_i \in (0, 1/2]$ ^[30],于是有式(9)成立。

$$\Phi = \min_{\theta_i \in S_s} \frac{\sum_{\theta_j \in S_s} \pi_i p_{ij}}{\sum_{\theta_i \in S_s} \pi_i} \quad (9)$$

于是基于马尔可夫链的代言人加速算法(Markov Chain based Spokesperson Accelerated Algorithm, MarSAA)包括代言人初始化和分布式邻居调整两个部分。首先根据 SIE 算法确定区域代言人,其次在区域代言人之间进行邻居调整和同步。算法描述如下。

算法 2 基于马尔可夫链的代言人加速算法(MarSAA)

输入:区域代言人

输出:全网时间同步消息

Step 1 使用算法 SIE 初始化区域代言人;

Step 2 区域代言人初始化 v_i 发射半径并发送“寻找邻居消息”告知自身节点 ID 和区域半径;

Step 3 节点 v_j 接收邻居消息后回复应答,告知自身 ID,并根据区域半径调整发送功率;

Step 4 区域代言人节点之间使用 SIE 算法进行时间同步;

Step 5 循环 Step 1 至 Step 4,直到全网时间同步,并记录节点时间偏移量。

在算法中由于采用 SIE 算法进行代言人的选择,根据 SIE 算法的特性可知,代言人在区域内应该是同步效率最高的节点(收益率最高的捕食者);并且每一次同步之后,代言人加入到区域节点中,成为普通成员,因此避免了由于单点节点失效带来的区域离线的问题,在一定程度上保证了算法的健壮性。区域网络的划分也具有一定的灵活性,可以按照区域、节点数目以及网络处理事务的不同等方式进行划分。如果区域数目为 Z ,那么算法时间复杂度为 $O(nmZ)$,并且当全网时间同步一次之后,只需要进行很小的局部调整即可。

5 模拟实验及算法分析

根据本文的分析可知,基于区域扩散机制的时间同步算法主要包含区域内使用 SIE 算法进行一次同步,并选择区域代言人,然后在代言人之间再次进行同步,并且同步过程映射到马尔可夫过程。因此算法的时间开销和空间开销主要在算法 SIE 部分。根据前面的分析可知 SIE 算法的时间复杂度为 $O(nm)$,算法 MarSAA 部分的时间复杂度为 $O(nmZ)$,因此基于区域扩散机制的时间同步算法的时间复杂度为 $O(nm) + O(nmZ) = O(nmZ)$,并且算法在执行过程中仅需存储邻居节点的相关信息,具有较小的空间复杂度。

为了验证算法的性能,本节设计实验对算法进行验证。本文使用 OPNET 网络仿真软件对提出的基于区域扩散机制的无线传感器网络时间同步算法以及 RBS 算法进行了模拟,同时进行性能评估,其中主要对节点在同步过程中的误差累积和同步时间差值进行了分析比较。本文在 OPNET 中添加 FSM(有限状态机)模型来实现本文提出的算法,具体是在 10 跳范围内的长和宽均为 50m 的实验场地部署 20 个传感器节点,实验过程中采用 20 种不同的节点部署方式,进行 50 次循环模拟,数据传输速度 50kB/s,数据包大小为 10kbit。在文献[6]中用 4 跳的线性网络对 RBS 算法进行了模拟,为了更好地比较 RBS 和本文提出的算法,使用 10 跳的线性网络来模拟这两个算法,50 次模拟中各项指数的平均值如表 1 所列。

表 1 模拟实验参数

度量指标	值
传感节点	20
同步消息大小	62B
应答消息大小	40B
默认发射半径	12m
传播延迟	1 μ s
消息处理时间	$\pm 10\mu$ s
传感节点时钟偏移	$\pm 0.003\%$

RBS 算法中,节点 1 按照正态分布每隔一定时间就产生一个数据包,广播之前在数据包中添加时间戳,也就是数据包的发送时间,其它节点将与节点 1 同步[6]。而本文提出的算法则是以马尔可夫链行区域内节点间的同步,在算法描述中已经有详细说明。仿真时间为 100s。

仿真实验中对 RBS 算法和优化后使用贝叶斯估计的算法设置相同的模拟参数。跳数的增加使得误差累积增加。图 2 显示随着同步跳数的增加,本文提出的算法同步误差增加得较为缓慢,而 RBS 算法误差累积相对快很多。

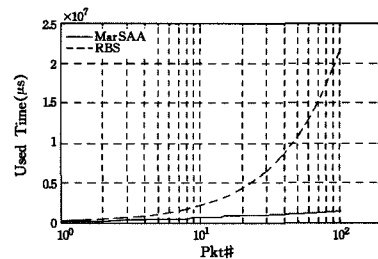


图 2 网络延迟误差

在仿真过程中首节点和尾节点也就是节点 1 和节点 19 在同步过程中的同步时间差如图 3 所示,在算法的实现过程中取两个节点时间差的绝对值(因为两个节点的时间差值有正有负)。在本文提出的算法中,两个节点之间的同步时间差值最大仅有 1.32 μ s,而在 RBS 算法的同步过程中,两个节点的同步时间差值最大达到 11.6 μ s,最小差值也有 2.56 μ s。

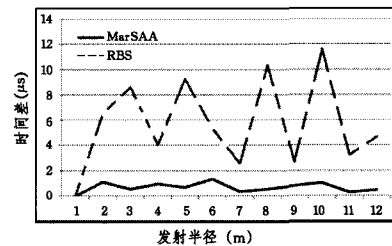


图 3 节点 1 和节点 19 的同步时间差

根据图 2 可知,相对于传统的 RBS 时间同步算法,本文提出的算法在节点积累时间误差方面远小于 RBS 算法。本文提出的算法中节点积累的时间误差随着时间几乎呈线性增长,说明在经历多次同步过程之后全网时间基本一致,而传统的 RBS 算法的时间误差则呈上升的趋势。

实验和理论分析证明,本文提出的算法具有较好的时间复杂性,并且对于全网时间同步具有较好的收敛性。

结束语 本文提出了一种代言人信息选择算法(SIE)和基于马尔可夫链的代言人加速算法(MarSAA),共同构成无线传感器网络区域扩散机制。该算法包含区域内同步和代言人之间同步两个阶段,第一阶段依据 OFT 理论,结合生物觅食过程中根据收益率决定进食物品的特性,采用 SIE 算法进行区域内时间同步,并选择区域代言人;第二阶段采用 Mar-

SAA 算法对收敛过程进行加速,首先将区域代言人构建为一个逻辑的区域,并采用 SIE 算法进行同步,同时把同步过程映射到马尔可夫链的收敛过程对算法进行加速。在第二阶段中代言人的选择时根据时间偏移量来进行选择,避免了部分问题节点对全网的影响。算法的两个阶段可以并行进行,有利于提高算法性能。

传统的 RBS 算法的时间复杂度为 $O(n^m)$,而本文所提出的算法的时间复杂度为 $O(nmZ)$,并且本文提出的算法的空间复杂度也相对较小。最后设计的实验也表明本文所提出的算法具有较好的收敛性。

参考文献

- [1] Sichertiu M L, Veerarittiphan C. Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks[C]//Proc IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2003
- [2] Awerbuch B. A new distributed depth first search algorithm[J]. Inf Proc. Lett., 1985(20):147-150
- [3] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts[C]//Proc 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation. Boston, MA, 2002
- [4] PalChaudhuri S, Saha A K, Johnson D B. Adaptive Clock Synchronization in Sensor Networks[C]// Proc 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Berkeley, California, 2004;340-348
- [5] Mills D L. Internet time synchronization; the network time protocol [J]. IEEE Transactions on Communications, 1991, 39(10):1482-1493
- [6] Ta J. Global Positioning System [D]. California State University, 2011
- [7] Sommer P, Wattenhofer R. Symmetric clock synchronization in sensor networks[C]//ACM Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks. Glasgow, Scotland, 2008;11-15
- [8] MacArthur R H, Pianka E R. On optimal use of a patchy environment [J]. American Naturalist, 1966, 100(196):603-609
- [9] Ping S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks [R]. Intel Research Berkeley Lab, 2003
- [10] Maróti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2004;39-49
- [11] Simon G, Maroti M, Ledeczi A, et al. Sensor network-based countersniper system[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2004;1-12
- [12] Basescu C, Cachin C, Eyal I, et al. Robust data sharing with key-value stores[C]//2012 42nd Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN). IEEE, 2012;1-12
- [13] Huang D J, Teng W C, Yang K T. Secured flooding time synchronization protocol with moderator [J]. International Journal of Communication Systems, 2013, 26(9):1092-1115
- [14] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36(SI):147-163
- [15] Solis R, Borkar V S, Kumar P R. A new distributed time synchronization protocol for multihop wireless networks[C]//2006 45th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2006:2734-2739
- [16] Gang X, Kishore S. Performance of distributed consensus time synchronization with gaussian delay in wireless sensor networks [C]//Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, Budapest, Hungary, 2009;1-5
- [17] 刘强, 黄小红, 冷颀鹏, 等. 一种面向物联网的无线传感器优化部署策略[J]. 中国通信, 2011, 8(8):111-120
Liu Qiang, Huang Xiao-hong, Leng Su-peng, et al. Deployment strategy of wireless sensor networks for Internet of Things [J]. China Communications, 2011, 8(8):111-120
- [18] Giridhar A, Kumar P R. The spatial smoothing method of clock synchronization in wireless networks [M]//Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2011;227-256
- [19] Huang F W, Zhou X, Chen C. Multi-level feedback based time synchronization algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2009, 30(3):13
- [20] Xiong G, Kishore S. Performance of distributed consensus time synchronization with gaussian delay in wireless sensor networks [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2009(WCNC 2009). IEEE, 2009;1-5
- [21] Lerman K, Galstyan A. Mathematical model of foraging in a group of robots; Effect of interference [J]. Autonomous Robots, 2002, 13(2):127-141
- [22] Pini G, Brutschy A, Birattari M, et al. Interference reduction through task partitioning in a robotic swarm[C]//Sixth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics(ICINCO). 2009;52-59
- [23] Pianka E R. Evolutionary ecology (7th Edition)[M]. Harper and Row, New York, 2011;350-356
- [24] Lin S C, Rezek Z, Braun D, et al. On the Utility and Economization of Unretouched Flakes; The Effects of Exterior Platform Angle and Platform Depth [J]. American Antiquity, 2013, 78(4):724-745
- [25] Mommer L, van Ruijven J, Jansen C, et al. Interactive effects of nutrient heterogeneity and competition; implications for root foraging theory? [J]. Functional Ecology, 2012, 26(1):66-73
- [26] Kerkez B, Pister K. Adaptive Time Synchronization and Frequency Channel Hopping for Wireless Sensor Networks[D]. EECS Department, University of California, Berkeley, 2012
- [27] Ni J, Tan B, Srikant R. Q-csma: Queue-length-based csma/ca algorithms for achieving maximum throughput and low delay in wireless networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(3):825-836
- [28] Bhakta P, Miracle S, Randall D, et al. Mixing Times of Markov Chains for Self-Organizing Lists and Biased Permutations[C]//SODA. 2013;1-15
- [29] Kwok T C, Lau L C, Lee Y T, et al. Improved Cheeger's inequality; analysis of spectral partitioning algorithms through higher order spectral gap[C]//Proceedings of the 45th Annual ACM Symposium on Symposium on Theory of Computing. ACM, 2013;11-20
- [30] Haran M, Tierney L. On automating markov chain monte carlo for a class of spatial models [J]. Bayesian Analysis, 2012, 5(4):99-125