

移动传感器网络的一种基于自适应扩散的时间同步协议^①

李 连^② * ** 孙利民^{***} 刘 燕^{****}

(* 北京理工大学计算机科学与技术系 北京 100084)

(** 海军航空工程学院控制工程系 烟台 264001)

(*** 中国科学院软件研究所 北京 100190)

(**** 北京大学软件与微电子学院 北京 102600)

摘 要 针对移动传感器网络中网络拓扑动态变化和通信链路不稳定的特性,提出了一种基于自适应扩散的时间同步协议(SDTS)。该协议分为被动同步和主动同步两种同步方式,被动同步方式下已同步节点根据自身和网络当前的状态,以自适应变化的概率发布时间同步信息,未同步节点与同步信息的发布者实现同步;主动同步方式下已同步节点停止发送同步信息,未同步节点通过发送同步请求信息的方式来实现同步。该协议能够很好地适应移动传感器网络的网络特性,在通信开销、同步收敛速度和鲁棒性方面具有较好的性能。

关键词 移动传感器网络, 时间同步, 自适应扩散, 巴斯扩散模型(BDM)

0 引 言

时间同步是无线传感器网络的重要支撑技术之一,是实现传感器网络数据通信、数据融合、休眠调度等关键技术的基础^[1]。现有的时间同步协议主要面向节点静止的传感器网络,对节点的移动性考虑较少^[1,2],这类协议往往采用基于网络层次结构的同步方式,先建立全网节点的层次结构关系,然后从根节点开始,相邻级别的节点之间交换时间信息,下一级节点调整自身的本地时间与上一级节点实现同步,依此类推,逐级实现全网络节点的同步。

在节点可移动的传感器网络(本文简称移动传感器网络)中,由于网络拓扑动态变化,节点之间不存在稳定的通信链路,因此实现全网节点的时间同步面临着更多挑战。移动传感器网络中的时间同步具有如下特点:(1)难以采用基于网络层次结构的同步方式。移动传感器网络中网络拓扑结构频繁变化,几乎不可能建立稳定的网络层次结构,因此难以采用基于网络层次结构的同步方式。(2)不宜采用基于多次交互通信的同步方式。移动传感器网络中节点之间的通信链路不稳定,两节点实现通信后不能保证下一时刻两节点还能继续通信,因此不宜采用基于多次交互通信的同步方式。(3)需要应对节

点混合分布的情况。在同步算法执行过程中,节点移动可能导致已同步节点和未同步节点在网络中混合分布的情况,同步算法需要以最小的通信代价搜索发现未同步节点,避免盲目发送同步信息而浪费能量。

针对移动传感器网络的网络特性和时间同步需求,本文提出了一种基于自适应扩散的时间同步协议(self-adaptive diffusion based time synchronization protocol, SDTS)。该协议是一种单向同步协议,已同步节点随机地向网络中发送同步信息,未同步节点接收到同步信息后与同步信息的发送者实现同步,该协议不需要建立网络的层次拓扑结构,具有通信开销低、鲁棒性高和收敛速度快等优点,能够很好地满足移动传感器网络的时间同步需求。

1 相关工作

现有的时间同步协议主要是面向静态传感器网络进行设计的,有代表性的协议有 TPSN (timing-sync protocol for sensor networks)协议^[3]、DMTS (delay measurement time synchronization)协议^[4]、FTSP (flooding time synchronization protocol)协议^[5]和 LTS (lightweight tree-based synchronization)协议^[6]等。除此外还有 RBS (reference broadcast synchronization)协议^[7]、MI-

① 863 计划(2008AA01Z217, 2006AA01Z218)和国家自然科学基金(60673178)资助项目。

② 男, 1965 年生, 博士生, 教授; 研究方向: 计算机网络理论, 无线传感器网络; 联系人, E-mail: LL-1965@163.com
(收稿日期: 2008-10-13)

NI/TINY-SYNC 协议^[8]等相关的时间同步协议。

TPSN 协议首先建立全网节点的层次结构关系,然后从根节点开始,相邻级别的节点之间交换同步信息,下级节点同步到上级节点,最终实现全网络节点的同步。TPSN 协议利用同步信息的对称性来消除节点之间的同步误差,提高了时间同步的精度。DMTS 协议中,发送节点在同步信息中嵌入发送时间戳,接收节点在同步信息中标记接收时间戳,通过比较两个时间戳可以计算出节点之间的时间偏差,从而实现节点对之间的时间同步。DMTS 协议是一种单向同步协议,节点对之间只需要进行一次通信就能实现同步,具有通信开销低、收敛速度快等优点。FTSP 协议采用泛洪方式来广播同步信息,节点根据收到的同步信息自动形成层次级别关系,并逐级实现节点的同步。FTSP 协议中,发送节点向接收节点发送多个同步信息,采用时间戳标记方式得到多个时间样本对,然后通过求解回归线性方程计算出两个节点之间的时钟偏差和频率偏差,具有较高的同步精度。LTS 协议提出了集中式和分布式两种同步算法,集中式同步算法首先构建一个低深度的生成树,然后以根节点为参考点,子节点同步到父节点,直至所有叶子节点被同步。分布式算法中,任何节点在需要同步时都可以作为同步算法的启动者,从该节点到参考节点路径上的所有节点都采用节点对的同步方式来实现同步。

TPSN、DMTS、FTSP 和 LTS 协议均为基于网络层次结构的时间同步协议,这类协议在执行过程中需要建立节点之间的层次级别关系,难以适应移动传感器网络的动态拓扑特性。其它时间同步协议,如 RBS 协议、MINI/TINY-SYNC 协议等,则需要节点之间多次交换同步信息,存在通信开销大、同步收敛速度低等缺点,而且对通信链路的质量要求较高,难以适用于链路质量不稳定的移动传感器网络。目前研究人员还提出了一些新颖的时间同步算法,如基于锁相环(phase locked loop, PLL)的时间同步算法^[9]、GCS(global clock synchronization)算法^[10]、萤火虫同步机制^[11]以及协作同步机制^[11]等,但这些同步算法和机制都以节点静止的传感器网络为设计背景,不适宜应用到移动传感器网络中。

2 SDTS 协议的设计与实现

2.1 网络模型和假设

移动传感器网络根据节点的移动特性可分为多

种网络模式,本文提出的 SDTS 协议基于如下网络模型和假设:

- (1) 网络中每个传感器节点都可以自由移动,节点的移动速度和方向随机变化,但最大移动速度 $V_{\max}$ 为已知量;
- (2) 传感器节点具有相同的无线通信半径和初始能量,并且每个节点都能够实时感知自身的剩余能量;
- (3) Sink 节点的本地时间与世界时间保持同步,并周期性地启动时间同步协议;
- (4) 传感器节点单位时间内的时钟漂移量较小,在同步过程中新增加的时钟漂移量可以忽略不计。

2.2 SDTS 协议的总体描述

SDTS 协议的同步过程分为被动同步和主动同步两个阶段。被动同步阶段,未同步节点被动地接收网络中的同步信息,并与同步信息的发布者实现同步;主动同步阶段,未同步节点通过主动发出同步请求信息的方式来实现同步。SDTS 协议的总体描述如下:同步周期到时后, Sink 节点每隔一小段时间就向网络发布一次自己的时间同步信息;未同步节点收到同步信息后,首先调整自己的本地时钟与同步信息的发布者实现同步,然后在后续时刻以动态变化的概率发布自己的时间同步信息;同步过程进行到一定程度时,同步方式由被动同步切换到主动同步,已同步节点停止发送时间同步信息,未同步节点则发出同步请求信息;已同步节点接收到同步请求信息后应邀发送自己的时间同步信息,协助未同步节点实现同步。

2.3 SDTS 协议节点对的同步

SDTS 协议采用与 DMTS 协议类似的方法实现节点对的时间同步,具体方法描述如下:发送节点检测到信道空闲后,在同步信息中嵌入发送时间戳 t_1 ,以排除发送端的处理延迟时间和媒体访问控制(MAC)层的访问延迟时间的影响。同步信息发送前,先发送一定数量的前导码和同步字,以便接收节点进行接收同步。根据发送信息的比特位个数 m 和发送每个比特位需要的时间 Δt ,可以估计出前导码和起始字符的发送时间 $m\Delta t$ 。接收节点在同步字接收完成时,记录此时的本地时间 t_2 ,并在即将调整本地时间之前记录时刻 t_3 ,由此可以得出自身的报文处理延迟时间 $t_3 - t_2$ 。最后接收节点将自己的当前时间修正为 $t = t_1 + m\Delta t + t_3 - t_2$,从而实现与发送节点的时间同步。

2.4 SDTS 协议的全网同步

2.4.1 被动同步阶段

同步周期到时后, Sink 节点向网络发布自己的时间同步信息, 宣布本轮同步开始。同步算法执行过程中, 节点按照同步信息的来源关系, 给自己设定相应的时间源级别, 其中 Sink 节点的时间源级别为 0 级。收到 Sink 节点的同步信息后, 节点首先与 Sink 节点实现同步, 并将自身的时间源级别设置为 1 级, 然后以动态变化的概率发布自己的时间同步信息。类似地, 未同步节点收到时间源级别为 k 的节点的同步信息后, 首先与同步信息的发送者实现同步, 并将自身的时间源级别设为 $k + 1$ 级, 然后在后续时刻以动态变化的概率值广播自己的同步信息。已同步的节点将不再接收新的同步信息, 但会继续侦听网络中是否有其它节点发送同步信息。

为保证网络中时间同步信息的精确性以降低累积同步误差, Sink 节点每间隔一小段时间 T_0 , 就重新广播一次同步信息。已同步节点在发送完自己的同步信息或者侦听到其它节点发送的同步信息后开始计时, 每经过一个时间单元 t_0 , 就计算出自身在当前时刻发送同步信息的概率, 然后以此概率发送自己的同步信息。为提高同步协议的收敛速度, 已同步节点需要以较高的概率发送同步信息; 为减小网络中同步信息的冗余量, 已同步节点发送同步信息的概率又不能过高, 因此需要根据网络的实际状态来调节同步信息的发送概率。SDTS 协议中, 节点发送同步信息的概率由以下几方面的因素决定:

(1) 节点的时间源级别 k 。SDTS 协议采用的是基于 Sender-Receiver 的单向同步方式, 受节点硬件响应延迟等因素的影响, 被同步节点的时间往往有一定的延迟误差。时间源级别 k 表征的是同步信息的精确程度, k 值越大就意味着该同步信息包含的累积同步误差越大。为降低网络的同步误差, 节点发送同步信息的概率 P 应当随着同步信息时间源级别 k 的增大而减小, 当 k 值增大到临界值 $k_{\max}$ 时, 应停止发送同步信息。设 τ 为平均每跳同步误差, δ 为网络容许的最大同步误差, 那么 $k_{\max}$ 的值应满足关系式 $k_{\max}\tau \leq \delta$ 。时间源级别 k 与同步信息发送概率 P 之间是负相关的关系:

$$P \sim (k_{\max} - k)/k_{\max} \quad (1)$$

(2) 距离上次侦听或发送同步信息的时间间隔 ΔT 。若已同步节点在移动过程中间隔很长时间没有发送同步信息, 也没有侦听到其它节点发送的同步信息, 这就意味着网络中的时间同步信息较为贫

乏。为提高同步协议的收敛速度, 已同步节点应该随着间隔时间的增加而加大发送同步信息的概率。设节点最近一次侦听或发送同步信息是在 T 时刻, 当前时刻为 $T + nt_0$ (n 为经历的时间单元数), 那么时间间隔 $\Delta T = nt_0$ 的值越大, 则节点发送同步信息的概率也应该越大。同步信息发送概率 P 与时间间隔 ΔT 之间是正相关的关系:

$$P \sim nt_0/T_0 \quad (2)$$

(3) 节点的剩余能量 E 。随着网络运行时间的推移, 节点之间的剩余能量会出现差异, 为保证网络整体能耗的均衡性, 需要对剩余能量较低的节点进行保护, 尽量降低这些节点在同步过程中发送同步信息的概率。设节点的初始能量为 E_0 , 当前剩余能量为 E , 那么同步信息的发送概率 P 与 E/E_0 是正相关的关系:

$$P \sim E/E_0 \quad (3)$$

考虑节点的平均剩余能量随着网络运行时间的延长而不断降低, 为避免比值 E/E_0 过小, 需要对式(3)进行适当修正。设网络的预期生存时间为 T_{life} , 网络当前的运行时间为 T_{run} , 那么上式可修正为

$$P \sim E/\lambda E_0 \quad (4)$$

其中 $\lambda = T_{\text{run}}/T_{\text{life}}$ 。

综合以上分析, 被动同步阶段中已同步节点发送同步信息的概率 P 由式

$$P = \begin{cases} 1, & k < k_{\max}, nt_0 \geq T_0 \\ \min\left\{P_0 + \frac{k_{\max} - k}{k_{\max}} \frac{nt_0}{T_0} \frac{E}{\lambda E_0}, 1\right\}, & k < k_{\max}, nt_0 < T_0 \\ 0, & k = k_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

确定。式中 P_0 为节点发送同步信息的初始概率, 目的是避免时间单元数 n 的值较小时, 节点发送同步信息的概率值过小而导致网络中同步信息的贫乏。本文中 P_0 的取值可由关系式 $(1 - P_0)^{\bar{N}} \leq 0.1$ 确定, $\bar{N}$ 为节点通信范围内的平均节点数量。

2.4.2 主动同步阶段

随着时间的推移, 网络中已同步节点的数量越来越多, 而未同步节点的数量越来越少, 到同步后期网络中未同步节点的比例已降到很低的水平。若继续采用被动同步方式, 将出现大量冗余和无用的同步信息, 导致网络的能量利用效率降低。同时, 被动同步方式下可能出现未同步节点始终接收不到同步信息的情况, 从而影响到同步算法的收敛速度。为

提高算法的收敛速度和能量利用效率,当同步算法执行到一定程度时,需要将被动同步方式切换到主动同步方式。主动同步方式下,已同步的节点不再盲目地发送同步信息,而是由未同步节点主动发送同步请求信息,已同步节点只是在接收到请求信息后才应邀发送自己的同步信息。

同步算法由被动同步方式切换到主动同步方式的时机,是影响 SDTS 协议性能的一个关键因素。从理论上分析,网络中已同步节点的所占的比例 $F(t)$ 近似呈 S 曲线状增长。如图 1 所示,在同步算法启动期,已同步节点数量较少,因此 $F(t)$ 缓慢增加;随着已同步节点的逐渐增多,同步过程进入到成长期, $F(t)$ 呈现快速增长趋势;在同步后期,未同步节点数量很少,同步过程进入到饱和期, $F(t)$ 缓慢增长。因此,被动同步方式切换到主动同步方式的时机,可以取为 $F(t) \sim t$ 增长曲线进入到饱和期的时刻 t_s 。

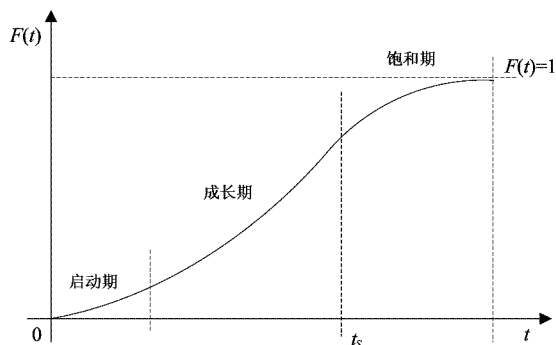


图 1 $F(t)$ 增长曲线示意图

饱和期开始时刻 t_s 的值可以采用巴斯扩散模型(Bass diffusion model, BDM)^[12]来估算。BDM 最初用于商业领域的新产品和新技术的推广应用预测,现已引入到信息扩散领域的研究当中。移动传感器网络的时间同步过程,实质上就是时间同步信息的扩散过程, Sink 节点是同步信息的发布源,移动节点则是同步信息的载体和传播者。

设 $N(t)$ 表示 t 时刻网络中已同步节点的数量, m 表示网络中移动节点的总数,那么同步信息的扩散过程可以表示为^[12]

$$\frac{dN(t)}{dt} = [m - N(t)][p + \frac{q}{m}N(t)], t \geq 0 \quad (6)$$

上式中参数 p 为外部影响系数,与移动传感器网络的节点密度以及 Sink 节点广播同步信息的时间间隔 T_0 等因素有关;参数 q 为内部影响系数,与节点的无线通信半径、同步信息的发送概率等因素有关。

记 $F(t)$ 表示网络中 t 时刻已同步节点所占的比例,即 $F(t) = \frac{N(t)}{m}$,另记 $f(t) = dF(t)/dt$,那么式(6)可以改写为

$$\frac{f(t)}{1 - F(t)} = p + qF(t), t \geq 0 \quad (7)$$

上式变形可得

$$\frac{dF(t)}{dt} = p + (q - p)F(t) - qF(t)^2 \quad (8)$$

显然,在同步算法启动时刻即 $t = 0$ 时,有 $F(0) = 0$,利用该初值条件解上面的微分方程可得

$$F(t) = [1 - e^{-(p+q)t}]/[1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}] \quad (9)$$

那么, t 时刻网络中已同步节点的数量 $N(t)$ 和单位时间内已同步节点的增加量 $n(t)$ 可分别表示为

$$\begin{aligned} N(t) &= mF(t) \\ &= m[1 - e^{-(p+q)t}]/[1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}] \quad (10) \\ n(t) &= mf(t) \\ &= m \frac{(p+q)^2}{p} e^{-(p+q)t} / [1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

当 $n(t)$ 取得最大值时对应的时刻 t_s 即为同步算法由被动同步方式切换到主动同步方式的时机。参数 p 和 q 是 BDM 模型中的两个重要参数,其取值与移动传感器网络的实际状态有关,难以从理论上确定其取值大小。可行的方法是在网络初始化过程中,按照被动同步方式进行一次预同步,已同步节点将自己实现同步的时间信息上报给 Sink 节点, Sink 节点收集完这些数据信息后,采用最小二乘法拟合出参数 p 和 q 的值。确定参数 p 和 q 的值后, Sink 节点可以计算出同步方式的切换时间 t_s ,在正式同步过程中将这一切换时间信息嵌入到同步信息包中。

需要说明的是,已同步节点可以根据收到的同步信息来确定切换同步方式的时间,而未同步节点无法确定本轮时间同步的启动时间和同步方式切换时间。可取的解决方法是,未同步节点以本地时间为准,在同步协议的执行周期到时后开始计时,并侦听、接收网络中的同步信息,若经过与同步切换时间 t_s 等长的时间后仍未实现同步,则自动切换到主动同步方式,发出同步请求信息;已同步节点接收到同步请求信息后应邀发出自己的同步信息,协助未同步节点实现同步。

3 SDTS 协议性能仿真分析

3.1 仿真参数设置

由于现有的时间同步协议主要面向静态传感器网络,难以应用于移动传感器网络,本文只对 SDTS 协议的自身性能进行仿真分析,未与现有的时间同步协议作对比分析。SDTS 协议采用 NS-2 软件作为仿真平台,MAC 层协议采用 IEEE802.11,主要参数设置如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

参数名称	参数取值
网络面积	1000m × 1000m
节点数量	200 ~ 800
节点最大移动速度	10m/s
无线通信半径	40m ~ 120m
同步分组大小	128Bytes
节点初始能量	400J
传输带宽	200kbps
时间源级别临界值	10
Sink 节点发送同步信息间隔	1s

3.2 仿真结果分析

图 2 和图 3 分别给出了网络中节点的数量 N 和节点的无线通信半径 R 对协议的同步精度的影响。对比两图可以看出,网络中节点数量增加时,SDTS 协议的同步误差随之增大,而当节点无线通信半径增大时,协议的同步误差随之减小。另外,节点通信半径较大时,同步精度受节点数量的影响相对较小,而节点数量较多时,同步精度受节点通信半径的影响相对较大。可能的原因在于:节点数量增多时,同步信息的转发次数增加,节点收到同步信息的时间源级别较高,导致累积同步误差较大;而节点无线通信半径增大时,距离较远的节点也能实现通信,

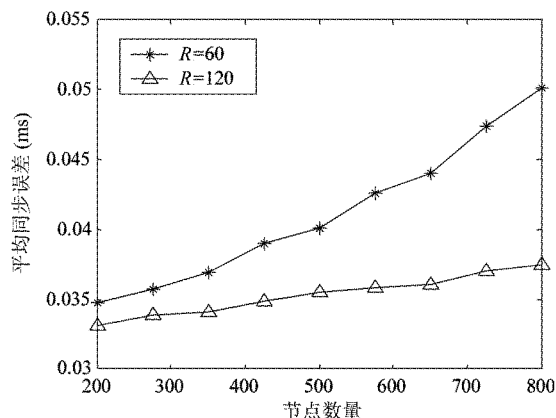


图 2 节点数量对同步精度的影响

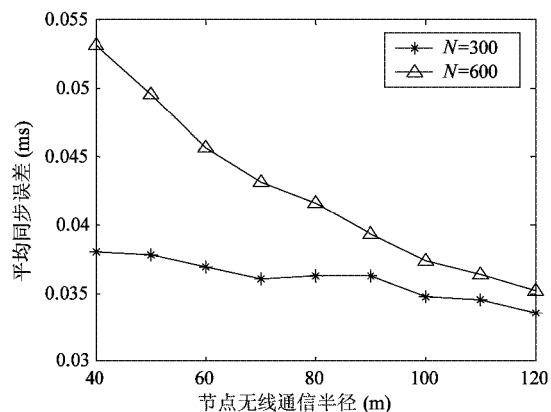


图 3 节点无线通信半径对同步精度的影响

减少了同步信息的转发次数,所以累积同步误差较小。由于节点通信范围的面积是无线通信半径 R 的二次函数,因此无线通信半径较大时能够在一定程度上平抑节点数量增加对同步精度的影响。

图 4 和图 5 分别给出了网络中节点的数量 N 和节点的无线通信半径 R 对 SDTS 协议收敛速度的影响。对比两图可以看出,节点通信半径较大时,SDTS 协议的收敛速度受节点数量的影响相对较小,

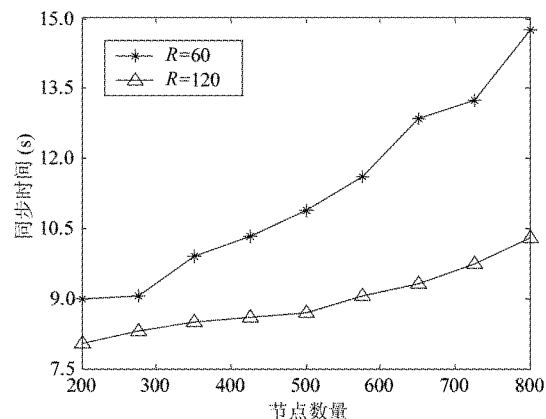


图 4 节点数量对同步收敛速度的影响

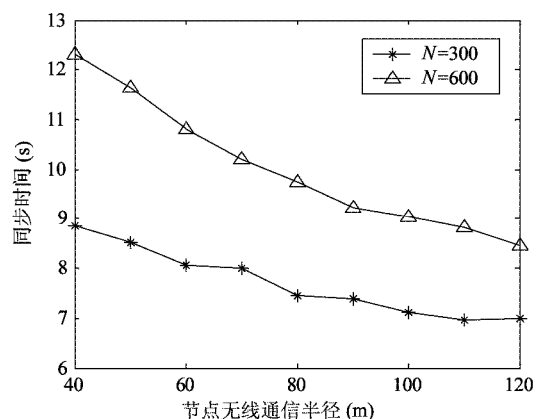


图 5 节点无线通信半径对同步收敛速度的影响

而节点通信半径较小时,协议的收敛速度随节点数量增多而显著降低。导致这一现象的原因在于:无线通信半径大时,节点每发送一次同步信息都有大量节点实现同步,因此协议收敛速度很快;而节点通信半径较小时,同步信息在网络中的扩散速度较慢,同步过程的执行时间也就明显变长。

4 结 论

本文首先分析了移动传感器网络中时间同步协议设计面临的挑战和困难,针对移动传感器网络的动态拓扑特性和通信链路不稳定性,提出了一种基于自适应扩散的时间同步协议 SDTS。该协议中节点以自适应变化的概率发送同步信息,减少了同步信息的冗余量;采用被动同步和主动同步相结合的同步方式,提高了协议的收敛速度和能量利用效率。SDTS 协议不需要建立全网节点的层次结构关系,节点对之间只需要进行一次通信就能实现同步,在通信开销、收敛速度以及同步精度方面都有着较好的性能,能够很好地满足移动传感器网络中的时间同步需求。

参考文献

- [1] Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey. *Elsevier Ad Hoc Network*, 2005, 3(3):281-323
- [2] Sivrikaya F, Yener B. Time synchronization in sensor networks: a survey. *IEEE Network*, 2004, 18(4): 45-50
- [3] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), Los Angeles, California, USA, 2003. 138-149
- [4] Su P. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks: [technical report]. Berkely CA: Intel Research Center, 2003
- [5] Maroti M, Kusy B, Simon G. The flooding time synchronization protocol. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, MD, USA, 2004. 39-49
- [6] Greunen J V, Rabaey J. Lightweight time synchronization for sensor networks. In: Proceeding of the 2nd ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA), San Diego, CA, USA, 2003. 11-19
- [7] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts. In: Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI), Boston, Massachusetts, USA, 2002. 147-163
- [8] Mihail L S, Chanchai V. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks. In: Proceeding of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03), New Orleans, Louisiana, USA, 2003
- [9] 任丰原,董思颖,何滔. 基于锁相环的时间同步机制与算法. *软件学报*, 2007, 18(2): 372-380
- [10] Li Q, Rus D. Global clock synchronization in sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 2006, 55(2):214-226
- [11] 徐朝农,徐勇军,李晓维. 无线传感器网络时间同步新技术. *计算机研究与发展*, 2008, 45(1):138-145
- [12] Niu S C. A stochastic formulation of the Bass model of new-product diffusion. *Mathematical Problems in Engineering*, 2002, 8(3):249-263

A self-adaptive diffusion based time synchronization protocol for mobile sensor networks

Li Lian^{* **}, Sun Limin^{***}, Liu Yan^{****}

(^{*} Department of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100084)

(^{**} Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001)

(^{***} Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{****} School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102600)

Abstract

In view of the dynamic network topology and instable communication links in mobile sensor networks, a self-adaptive diffusion based time synchronization protocol (SDTS) is put forwarded in this paper. The SDTS has two synchronization phases, namely, the passive synchronization phase and the active synchronization phase. In the passive synchronization phase, synchronized nodes send out synchronization packets with self-adaptive probabilities, and non-synchronized nodes are synchronized to the sender of packets. In the active synchronization phase, synchronized nodes stop sending synchronization packets and non-synchronized nodes realize synchronization by sending out synchronization requisition messages. The SDTS adapts to mobile sensor networks well and possesses several significant merits, such as high energy efficiency, low synchronization delay and good robustness.

Key words: mobile sensor networks, time synchronization, self-adaptive diffusion, Bass diffusion model (BDM)