

文章编号:1001-9081(2010)04-0892-03

无线传感器网络中同步补偿机制的研究与应用

陈 乔,张毅坤,杨凯峰,张 彤,夏 辉

(西安理工大学 计算机科学与工程学院,西安 710048)

(y kzhang163@163.com)

摘 要:在由事件触发、部分节点同步的无线传感器网络应用中,传统时间同步算法周期性全网同步存在不必要的能耗问题。通过分析现有的时间同步机制,提出一种基于事件触发的时间同步补偿算法,该算法通过分别统计出沿途的累计处理时延并补偿传输时延的方式实现部分节点同步。实验结果表明,在兴趣节点数量较少和事件发生频率较低的情况下该算法具有良好的同步效果和节能性。

关键词:无线传感器网络;时间同步;事件触发同步;累计时延;低功耗

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Research and application of synchronization compensation mechanism in wireless sensor networks

CHEN Qiao, ZHANG Yi-kun, YANG Kai-feng, ZHANG Tong, XIA Hui

(School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: Among the wireless sensor network applications which are triggered by events and with some of the nodes synchronization, the traditional periodic time synchronization algorithm for the entire network synchronized will lead to unnecessary power consumption. Therefore, this paper analyzed the existing time synchronization mechanism, and proposed a time synchronization compensation algorithm based on event-triggering for such applications. Moreover, the algorithm achieved synchronization through the statistics accumulated along the processing delay and propagation delay compensation. The experimental results show that the synchronization algorithm has good performance and energy efficiency when the interested nodes number and events frequency are low.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); time synchronization; event-triggered synchronization; cumulative delay; low power consumption

0 引言

无线传感器网络是由大量节点组成的面向任务的分布式网络,具有高灵活性、强鲁棒性和高智能度的特点,被广泛应用于军事、环境、工业等许多领域。

时间同步是分布式系统非常关键的组成部分,同时也是无线传感器网络的一项基础支撑技术。标记数据采集时间、数据融合、数据传输、定位等都需要网络中节点的时钟保持同步,这些都使得时间同步显得格外重要。在无线传感器网络中,各节点都可以有自己的时钟,协同工作时要求这些节点的时钟必须一致,以达到对目标数据同步采集或监控的目的。

传感器节点的本地时钟依靠自身晶振实现,节点时间不同步的原因主要有两点^[1]:1)部署和启动节点的时间不同步;2)由于温度、压力、电池电压等环境因素的变化会引起晶振的频率变化而导致时钟漂移。传统的同步算法是使用包交换方式将所有节点时钟与基准节点进行同步。按照节点之间的交互方式,可将传感器网络的时间同步算法分成以下三种。

1)基于发送者—接收者交互的同步:其中典型的是传感器网络时间同步协议(Timing-sync Protocol for Sensor Networks,TPSN)算法^[2]。通过信息的交换来实现节点间的同步,然后使用分层的方法将同步扩展到全网。TPSN的同步精

度只与网络的等级数有关,随着节点数目的增多等级数增加,使其在大规模的网络内性能受到较大制约。

2)基于接收者—接收者交互的同步:其中典型的是RBS算法^[3]。参考节点广播同步指令,广播域内接收节点相互交换接收时刻并补偿时钟偏差以同步。RBS能提供较高的同步精度,计算复杂度较高,能量消耗较大。

3)基于发送者的同步:其中典型的是无线传感器网络延迟测量时间同步(Delay Measurement Time Synchronization,DMTS)算法^[4]。对同步消息在传输路径上所有延迟进行估算,结合发送节点发送消息时间戳计算出需要调整的时间值,实现节点间时间同步。DMTS机制在实现复杂度、能量高效与同步精度之间进行折中,仅能适用于对时间同步要求不是很高的传感器网络。

不同的无线传感器网络应用对时间同步的要求是不一样的。实际应用可能只须对少数的兴趣节点同步即可,而传统时间同步都是全网时间同步,所产生的通信流量中大部分是不必要的。同时为了保持同步精度,传统方法通常会采用周期性同步来修正环境误差。如果感兴趣的事件一直不发生或者间隔很长时间才发生,周期性同步势必造成节点能量的浪费,对能量敏感的传感器网络来说这是应当避免的。为此针对由事件触发的,仅需同步部分节点的应用,本文分析并提出

收稿日期:2009-10-30;修回日期:2009-12-17。 基金项目:陕西省教育厅专项(09JK679)。

作者简介:陈乔(1984-)男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络、嵌入式与智能控制; 张毅坤(1958-),男,陕西西安人,教授,博士,主要研究方向:现代软件工程、软件测试、嵌入式与智能控制; 杨凯峰(1971-),男,陕西商洛人,讲师,硕士,主要研究方向:OA系统; 张彤(1967-),男,陕西三原人,副教授,硕士,主要研究方向:嵌入式与智能控制; 夏辉(1978-),男,安徽天长人,讲师,硕士,主要研究方向:软件测试。

了一种基于事件触发的时间同步补偿算法。该算法使用发送者—接收者交互的同步方式,同步的目标只是少数兴趣节点,使用在 MAC 层打时间戳的技术,通过分别统计出沿途的累计总处理时延并补偿传输延时的方式实现同步。

1 同步补偿机制的实现和方法

事件触发同步是指网络中的节点不需要具有保持同步状态的统一时钟,而只是在有同步事件产生时,触发全网节点或部分节点同时工作。

1.1 同步过程中的延时分析

首先,以两相邻节点之间同步作为示例来研究同步过程中的主要延时,如图1所示。某时刻两个相邻节点发送者和接收者之间同步,发送者在 T_1 时刻(载波检测完成,准备发送数据帧)给接收者发送同步数据包,接收者在 MAC 层接收完数据包后记录接收时间 T_2 ,并在 T_3 时刻回复给发送者包含 T_2 和 T_3 的同步数据包, T_4 时刻发送者接收到接收者回复的数据包,同时记录接收时间 T_4 。

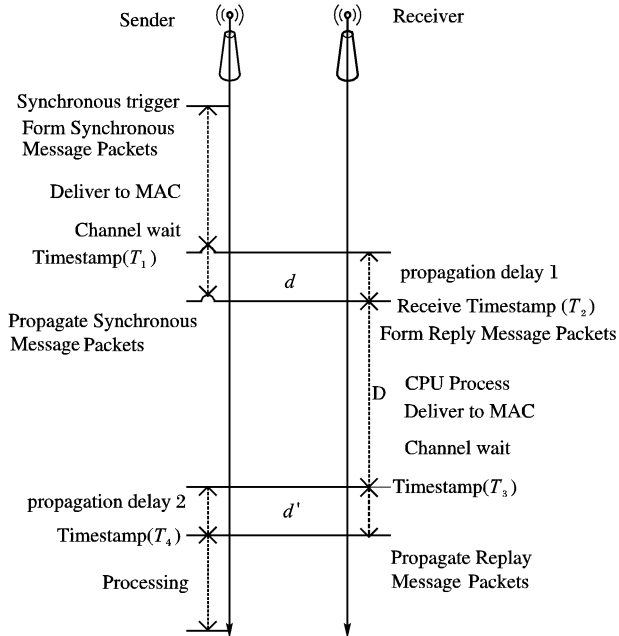


图1 相邻节点传输延时分析

本过程中主要的传输时间可细分为以下五个部分。

1) 发送处理时间:发送者生成消息到发送就绪总时间,包含消息处理时间和信道访问时间。信道访问时间指分组消息到达 MAC 层之后,等待得到访问信道和载波侦听的时间。由于时间戳是在此过程完成后才标记,因此发送处理时间对传输延时没有影响。

2) 传送时间:将分组消息以射频信号方式发送出去的时间,与消息长度有关。

3) 传播时间:射频信号在两节点之间通过物理介质传播所用的时间,只与节点间距离相关。短时间内节点间距离保持不变,因此往返传播时间保持不变。

4) 接收时间:因为接收节点的接收过程和发送节点的传送过程基本是“同步”发生的,所以接收时间也和传送时间保持一致。这里的“同步”意思是指传送和接收过程中信号的调制和解调过程,如果不考虑信号在介质中的传播时间,可认为这两个过程就是完全同步的。

5) 接收处理时间:接收者从无线信道接收到一个消息并将其告知主机等待处理的时间。由于在链路层接收完成时立即打上时间戳作为计算依据,所以此延迟对传输延时没有影响。

图1中的传输延时实际上计算的是传送/接收时间与传

播时间之和。

由同步过程可知:

$$T_2 = T_1 + \Delta T + d \quad (1)$$

$$T_3 = T_4 + \Delta T - d' \quad (2)$$

其中: d 和 d' 是传输延时; ΔT 是节点之间时钟偏差。由于短时间内节点相对位置不发生变化,即传输距离保持不变,传输延时 $d = d'$, 所以有^[1]:

$$\text{传输延时 } d = d' = \frac{(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)}{2} \quad (3)$$

$$\text{时钟偏差 } \Delta T = \frac{(T_1 - T_2) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (4)$$

发送者计算出二者的时钟偏差后就再发送一个补偿消息分组将计算出的传输延时 d 发给接收者实现时钟同步。

1.2 事件触发同步的延时补偿思想

在事件触发同步过程中,节点可以不必维护全局时钟,而直接使用各自的临时定时器计时实现指令的同步执行。以图1过程为例,发送节点在 T_1 时刻启动定时器从零开始计时,在指令到达待接收节点以后,该节点在接收到指令的时刻 T_2 也启动定时器从零开始计时,并在 T_3 时刻发送回应包给发送节点。从 T_2 时刻开始,接收节点定时器计数和发送节点相差一个传输延时 d ,而式(3)中 $D = T_3 - T_2$,接收节点的处理时间 D 可以很容易得到,即 T_3 时刻接收节点定时器的计数乘计数时间间隔。同理也可以得到式(3)中 $T_4 - T_1$,故可计算出两节点之间的传输延时 d ,最终将 d 补偿给接收节点即可实现两节点间的同步。

1.3 多跳节点间的同步思想

传感器网络需要由多个节点进行协同工作,这就需要对多跳节点进行同步。同步过程如图2所示。

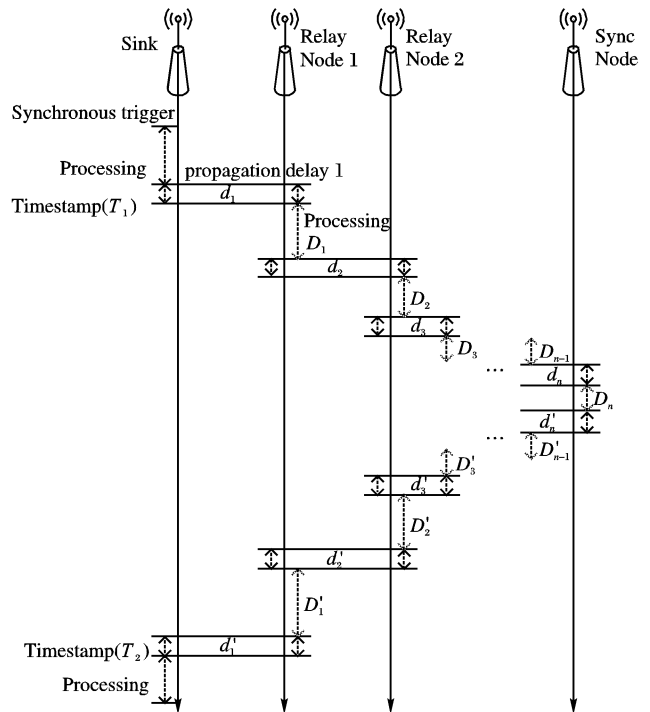


图2 多跳节点同步过程

Sink 节点要与 Sync Node 进行同步,节点之间经过了 $n - 1$ 个 Relay Node 中继。同步指令消息分组在沿途节点上传输,每一跳均会产生一个传输延时 d_i 和一个处理延时 D_i ,同时回应消息在返回过程中每一跳也会产生一个传输延时 d'_i 和一个处理延时 D'_i 。由于节点之间相对位置不变,所以往返的传播延时 d_i 和 d'_i 是相等的。虽然消息在各中继节点上的处理延时 D_i 和 D'_i 不一定相等,但是这个延时可以通过对时间戳的

简单计算得到,从而将其累计到同步消息分组中相应的字段。

在消息传输过程中已累计出沿途的总处理耗时 $\sum (D_i + D_i')$,而 Sink 节点可以记录从同步指令发出 T_1 到回应消息到达 T_2 的总耗时 $T = T_2 - T_1$,则可用式(5) 计算得到单趟总传输延时 $\sum d_i$,将其补偿给兴趣节点即可实现同步。基于同样的方式,可以实现多个兴趣节点与 Sink 时间基准一致,即可控制同步指令在各采集节点之间的同步执行,亦即实现数据采集的同步性。

$$\text{单趟总传输延时} \quad \sum d_i = \frac{T - \sum (D_i + D_i')}{2} \quad (5)$$

1.4 多节点间的事件触发同步算法描述

本文提出的事件触发同步算法的同步过程分为两步,第一步是 Sink 节点收到同步触发事件后给各个兴趣节点发送同步请求消息,兴趣节点在收到同步请求后初始化定时器准备同步并发送回应消息;第二步是 Sink 节点根据回应消息计算总传输延迟补偿给兴趣节点并执行同步任务。同步消息的格式定义为如图3 所示,在负载字段加入请求时间和累计延时字段,详细同步过程算法描述如下。

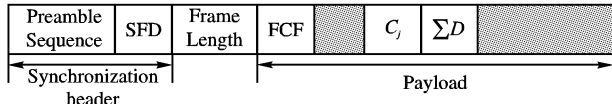


图3 帧格式定义

1) Sink 节点收到同步触发事件,初始化同步过程,启动定时器,依次给各个兴趣节点发送同步请求分组,其中包含初值为零的累计处理延时 $\sum D$ 和发送时刻计时 C_j (其中 j 为兴趣节点编号)。

2) 第 i 跳中继节点在收到同步请求消息时使用本地定时器计算其转发的处理延时 D_i ,在转发前累加到 $\sum D_i$ 存入累计处理延时中。

3) 兴趣节点 j 在收到同步请求消息后,启动本地定时器计数,设置计时初始值为累计处理延时 $\sum D_i$ 与 Sink 发送计时 C_j 之和,然后发送包含累计处理延时和 Sink 初始计时的回应消息给 Sink 节点,同时将此节点上所花费的处理时间也累计到消息的处理延时中。

4) 按照原路径返回,中继节点的处理同2),更新累计处理延时为 $\sum (D_i + D_i')$ 。

5) Sink 节点将单趟总传输延时 $\sum d_j$ 作为补偿值发送给兴趣节点 j 。Sink 节点在定时器计时为 C_j' 时收到回应消息,此时累计处理延时值为 $\sum (D_i + D_i')$,则 Sink 节点到兴趣节点 j 的 $\sum d_j$ 可用式(6) 计算:

$$\sum d_j = \frac{(C_j' - C_j) - \sum (D_i + D_i')}{2} \quad (6)$$

6) 兴趣节点 j 收到补偿值,调整其计时值达到和 Sink 节点同步,当到达同步触发计时时,兴趣节点执行同步采集指令,实现所有兴趣节点的数据同步采集。

2 实验分析与讨论

在无线传感器网络中,时间同步不仅要关注同步精度,还需要关注同步能耗、健壮性及适用性需求。本文主要从算法的复杂度和实际测量误差两方面进行了分析。

2.1 复杂度分析

选取规模为 200 个节点随机生成拓扑的网络进行仿真实

验,最大网络深度为 6 层,最大孩子节点数为 4,考虑兴趣节点的位置选择。以完成一次同步网络中消息转发次数的多少作为标准评价算法复杂度^[5],仿真结果见图4。TPSN 算法的同步开销和兴趣节点数量无关,所以是一条水平线,考虑生成分级层次结构的消息开销和相互间交互过程,每个节点完成时间同步至少需要传递 3 次消息。本文算法传播消息数目只和兴趣节点数量及网络深度相关。另外,考虑到兴趣节点的位置选择与网络深度相关,因此复杂度和兴趣节点数量不是完全线性关系。

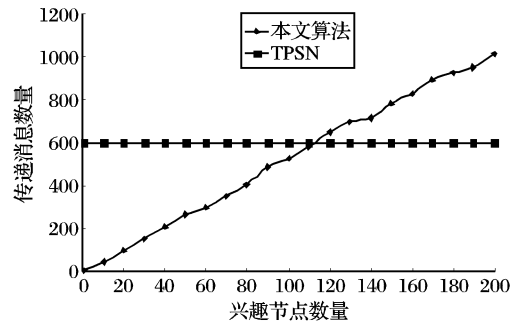


图4 与 TPSN 的算法复杂度对比

由图4 可知,本文算法的复杂度随着兴趣节点数量增加而增加。虽然兴趣节点数大于 120 时本文算法复杂度超过了 TPSN,但是在兴趣节点数量较少时(例如 20 个时候)复杂度远小于 TPSN(约 100 次,仅为其 1/6),故该机制适合于兴趣节点数较少的应用中。

2.2 同步性能分析

本算法成功应用在智能地震信息采集系统中,该采集系统要求网络中的多个采集节点同步采集爆破产生的地震波,然后汇总数据到上位机以便根据波形的差异来分析地质特征。

为了测试算法在地震信息采集系统中的性能,建立如图5 所示由 10 个节点组成的传感器网络进行实验,测试方法为通过 Sink 节点对兴趣节点 N1 和 N2 发送同步采集指令,令其对由有线方式提供的同一正弦信号源同步开始高频连续采样,可以得到相应的正弦波形。

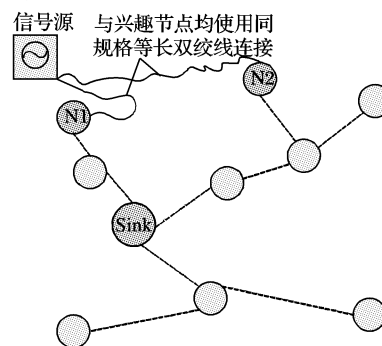


图5 实验环境

由于双绞线规格长度一致,所以对采集到的波形比较相位差,即可得到两个兴趣节点间的时间误差。在未经同步算法补偿时,采集节点间时间误差与通信跳数成正比,一般为若干毫秒。经过本文算法补偿后的多次实验结果如图6 所示。

由统计数据可知,采集节点的同步最大误差为 164.48 μs ,误差主要分布范围为 40 μs ~ 80 μs ,基本能满足一般的无线传感器时间同步应用。

主要的误差产生在两个方面:节点晶振的频率误差和节点时钟的计时精度误差。1) 节点晶振的频率误差的原因是由于制造误差晶振的频率相比其标称频率有一定的误差,以本系统中使用的 NDK 公司的 32 MHz 晶振 NX3225SA 为例,频率误差为 10 ppm^[6],即每秒会有 10 μs 的偏差,即在经过多跳之后即使同步过程经过 1 s 的时延,其造成的时延最大偏差也只有 10 μs 。而在实际应用中,由于晶振的正负偏差会

(下转第 901 页)

I_s ;图6(c)是消除空洞之后的 I_s ,黑色是视野之外的部分。

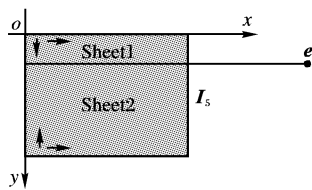


图7 I_s 中处理像素的顺序

4 结语

由于在实际应用中很多情况下摄像机只绕光心旋转,例如视频监控设备及某些云台设备的摄像机通常只绕光心旋转,因此研究这类情况的视图合成具有重要的现实意义。本文研究了当摄像机绕光心旋转时基于图像重投影技术的视图合成。给出了一种新视图的合成方法。该方法的特点是首先利用单应矩阵的性质生成目标图像的一部分,剩余部分则采用三维图像变换技术合成。这样做的好处是能最大限度地利用单应矩阵的优良性质,以加快合成速度,提高合成质量。本文实验部分给出了由两幅参考图像生成一幅新视图的实例。从实验还可以看出,经过空洞填充后,会产生一定的伪像。下一步工作的重点是如何尽可能地减少伪像。

参考文献:

- [1] KYOUNGSU O H, HYOWON K, CHULHAN L, *et al.* Real-time rendering of multi-view images from a single image with depth [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Computational Science and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 505 - 509.

- [2] SEITZ S M, DYER C R. View morphing [C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996: 21 - 30.
- [3] 于洪川, 吴福朝, 阮宗才, 等. VR 环境图像生成中几项关键技术研究[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(11): 1349 - 1357.
- [4] FEHN C. A 3 DTV approach using depth-image-based rendering (DIBR) [C]// Proceedings of Visualization, Imaging, and Image Processing. Spain: [s. n.], 2003: 482 - 487.
- [5] LIU ZHAN-WEI, AN PING, LIU SU-XING, *et al.* Arbitrary view generation based on DIBR [C]// Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Xiamen: [s. n.], 2007: 233 - 236.
- [6] 郑新, 吴恩华. 从多幅参考图像合成目标图像的逆映射算法[J]. 软件学报, 2001, 12(10): 1464 - 1471.
- [7] MCMILLAN L. An image-based approach to three-dimensional computer graphic [D]. USA: University of North Carolina, 1997.
- [8] CHEN, S E, WILLIAMS L. View interpolation for image synthesis [C]// Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1993: 279 - 288.
- [9] ZITNICK C L, KANG S B, UYTENDAELE M, *et al.* High-quality video view interpolation using a layered representation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 600 - 608.
- [10] YOON S-U, LEE E-K, KIM S-Y, *et al.* A framework for multi-view video coding using layered depth images [C]// Proceedings of 6th Pacific-Rim Conference on Multimedia, LNCS 3767. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 431 - 442.

(上接第 894 页)

抵消一部分,实际偏差会更小。2)节点的时钟计时精度直接和频率相关,频率越高,计时精度越高。以本系统中使用的 TI-CC2431 使用 32 MHz 晶振为例,设置定时器使用 128 分频时计时精度高达 $0.03 \mu\text{s}$ ^[7],对同步精度影响较小。如果想要进一步提高同步精度,则主要应该考虑对节点的晶振的频率误差以及初相位差进行补偿。

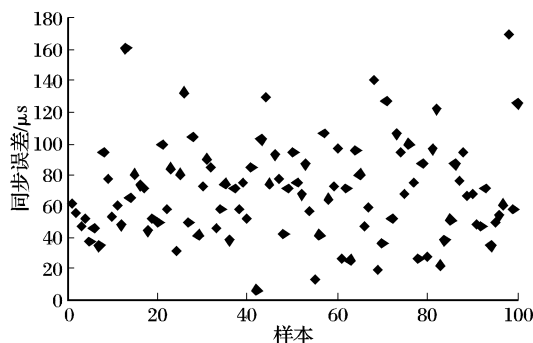


图6 节点之间的同步误差统计

3 结语

与传统时间同步算法相比较,本算法的主要优点在于:1)无须建立分级网络结构,可以直接利用原有路由;2)只对需要同步的少数兴趣节点进行同步补偿,降低了通信流量,延长了网络寿命;3)本算法仅在同步事件发生或者说传送有同步需求的指令时才触发同步过程。实验结果说明本算法在节能性明显上优于 TPSN,以低复杂度实现同等精度同步效果。

基于事件触发的数据同步补偿算法适用于针对部分节点

同步的工业控制与数据采集无线传感器网络,由于仅在同步事件发生时对兴趣节点进行同步,而不是周期性地全网节点频繁进行时间同步,该算法在事件发生频率较低的情况下具有良好的节能性,提供了一种无线传感器网络中数据同步的新思路。

参考文献:

- [1] ELSON J, ESTRIN D. Time synchronization for wireless sensor networks[EB/OL]. [2009 - 07 - 01]. <http://www.cens.ucla.edu/Estrin/papers/timesync.pdf>.
- [2] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]// Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2003: 138 - 149.
- [3] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]// OSDI' 02: Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation. New York: ACM, 2002: 147 - 163.
- [4] SU PING. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[EB/OL]. [2009 - 07 - 01]. http://leidl.org/docs/intel/IR-TR-2003-64-081120031327_137.pdf.
- [5] 田贤忠, 陈登, 胡同森. 无线传感器网络按需时间同步算法研究[J]. 传感器技术学报, 2008, 21(11): 1881 - 1886.
- [6] LTD. NX3225SA DataSheet[EB/OL]. [2009 - 07 - 01]. <http://www.ndk.com>.
- [7] Texas Instruments Incorporated. CC2431 DataSheet [EB/OL]. [2009 - 07 - 01]. <http://focus.ti.com>.