

基于锁相环的时间同步机制与算法^{*}

任丰原⁺, 董思颖, 何滔, 林闯

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

A Time Synchronization Mechanism and Algorithm Based on Phase Lock Loop

REN Feng-Yuan⁺, DONG Si-Ying, HE Tao, LIN Chuang

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62772487, Fax: +86-10-62771138, E-mail: renfy@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn

Ren FY, Dong SY, He T, Lin C. A time synchronization mechanism and algorithm based on phase lock loop. *Journal of Software*, 2007,18(2):372-380. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/372.htm>

Abstract: In this paper, the analysis model of computer clock is discussed, and the characteristic of the existing synchronization mechanisms is summarized. Subsequently, a unidirectional reference broadcast synchronization mechanism with low power is developed, and this mechanism can achieve simultaneously the offset compensation and drift compensation. Its implementation algorithm is designed based on the principle of traditional phase locked loop (PLL). In order to avoid introducing the extra hardware, a simple digital PLL is constructed. Finally, the validation is done on the Mica2 experimental platform, and the performance is evaluated and compared with the typical algorithms.

Key words: wireless sensor network; time synchronization; phase locked loop; clock offset; clock drift

摘要: 在讨论计算机时钟分析模型的基础上,分析和总结已有的时间同步机制的特点,提出了一种低能耗单向广播校正同步机制,同时进行时钟偏移补偿和漂移补偿,并基于传统的锁相环(phase locked loop,简称 PLL)原理设计了同步算法.为了避免实现过程中额外的硬件开销,开发了一种简洁的数字锁相环.最后,在 Mica2 实验平台上对所设计的同步机制与算法进行了验证,并与已有的典型算法进行了性能比较.

关键词: 无线传感器网络;时间同步;锁相环;时钟偏移;时钟漂移

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)中的时间同步是指使网络中所有或部分节点拥有相同的时间基准,即不同节点保持相同的时钟,或者节点可以彼此将对方的时钟转换为本地时钟.造成传感器网络节点间时钟不一致的因素主要包括温度、压力、电源电压等外界环境变化引起的时钟频率漂移造成的失步.不同

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60573122, 60672118 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展规划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2006AA01Z225, 2006AA09Z117 (国家高技术研究发展计划(863)); the Program of the Ministry of Education of China for New Century Excellent Talents in University (NCET) (国家教育部新世纪优秀人才支持计划); the Fundamental Research Foundation of Tsinghua University of China under Grant No.JCqn2005023 (清华大学基础研究基金)

Received 2005-07-07; Accepted 2006-01-24

节点的时钟初始值也各不相同:一方面,开发过程中设定的初始值不同;另一方面,为了节省能耗,节点通常依赖外部被观测事件频繁休眠和启动,时间间隔差异也可能造成新的同步过程中时钟初值的差异.此外,还有特殊事件处理对时钟的影响,比如 Berkeley 的 Mote 平台在处理分组发送和数据感知任务时忽略了时钟中断.因此,时钟误差就无法避免.虽然上述综合因素给传感器网络的时间同步制造了不小的障碍,但诸多应用的迫切需要使得有关时间同步机制的研究具有现实的理论意义和应用价值.概括来讲,与时间同步紧密相关的应用主要集中在多传感器数据融合、网络协议实现、节点数据处理、观测事件与自然时间关联、低能耗设计、测距定位和协同工作方面^[1].因为无线自组织网络特有的属性和设计要求,传统的时间同步技术,如 NTP(network time protocol)协议和 GPS(global position system)授时等,无法应用在 WSN 中^[2],于是,无线传感器网络中的时间同步技术就成为一个新的研究热点.在本文中,我们将首先讨论计算机时钟的分析模型,在此基础上给出时钟同步的一般性定义,分析时钟偏移补偿和漂移补偿的技术特点,并讨论数字时钟和软件时钟的构造方法.随后,总结已有同步机制的优、缺点,分析它们的能量开销,并由此确定一种较为理想的同步机制,在锁相环原理的支持下,开发适应新机器的低成本同步实现算法.最后,完成实验验证和相关的性能评价.

1 概念与定义

1.1 时钟模型

在计算机系统中,时钟通常用晶体振荡器脉冲来度量,即

$$c(t) = k \int_{t_0}^t \omega(\tau) d\tau + c(t_0) \quad (1)$$

其中: $\omega(t)$ 是晶振的频率; k 是依赖于晶振物理特性的常量; t 是真实时间变量; $c(t)$ 是构造的本地时钟,间隔 $c(t) - c(t_0)$ 被用来作为度量时间.对于理想的时钟,我们有 $r(t) = dc(t)/dt = 1$,也就是说,理想时钟的变化速率 $r(t)$ 为 1,但在工程实践中,因为温度、压力、电源电压等外界环境的变化,往往会导致晶振频率产生波动.因此,构造理想时钟比较困难.但在一般情况下,晶振频率的波动幅度并非任意的,而是局限在一定的范围之内.为了方便描述和分析,定义如下 3 种时钟模型:

(1) 速率恒定模型

速率恒定模型假定时钟速率 $r(t) = dc(t)/dt$ 是恒定的,即晶振频率没有波动发生.当要求的时钟精度远低于频率波动导致的偏差时,该模型的假定应该是合理的.

(2) 漂移有界模型

定义时钟速率 $r(t)$ 相对于理想速率 1 的偏差为时钟漂移(drift) $\rho(t)$,即 $\rho(t) = r(t) - 1$.漂移有界模型满足下面的约束条件:

$$-\rho_{\max} \leq \rho(t) \leq \rho_{\max}, \quad \forall t \quad (2)$$

此外,我们还有 $\rho(t) > -1$,它的物理意义是时钟永远不会停止($\rho(t) = -1$)或倒走($\rho(t) < -1$).因为硬件设备厂商可以给出晶振频率变化的范围,对于传感器网络节点使用的低成本的晶振,一般有 $\rho_{\max} \in [10, 100] \text{ppm}^*$.因此,漂移有界模型在工程实践中非常有用,常用来确定时钟的精度或误差的上下界.

(3) 漂移变化有界模型

该模型假定时钟漂移的变化 $\xi(t) = d\rho(t)/dt$ 是有界的,即

$$-\xi_{\max} \leq \xi(t) \leq \xi_{\max}, \quad \forall t \quad (3)$$

时钟漂移的变化主要是温度和电源电压等因素发生变化所引起的,一般变化速率相对缓慢,可以通过适当的补偿算法加以修正.

1.2 时钟同步

假定 $c(t)$ 是一个理想的时钟.如果在 t 时刻有 $c(t) = c_i(t)$ 时钟,则称时钟 $c_i(t)$ 在 t 时刻是准确的(correct);如果

* ppm:百万分之一.漂移为 100ppm 的时钟在 1 百万秒中将会发生 100 秒的偏差,或者 1 秒中出现 100 毫秒的偏移.

$dc(t)/dt=dc_i(t)/dt$,则称时钟 $c_i(t)$ 在 t 时刻是精确的(accuracy);如果 $c_i(t)=c_k(t)$,则称时钟 $c_i(t)$ 在 t 时刻与时钟 $c_k(t)$ 是同步的(synchronized).上述定义表明,两个同步时钟不一定是准确或精确的,时间同步与时间的准确性和精度没有必然的联系,只有实现了与理想时钟(即真实的物理时间)的完全同步之后,三者才是统一的.对于大多数的传感器网络应用而言,只需要实现网络内部节点之间的时间同步^[1],这就意味着节点上实现同步的时钟可以是不精确,甚至是不准确的.

如果采用时钟速率恒定模型,由式(1),时钟 $c_i(t)$ 可以简化表示为

$$c_i(t)=a_i t+b_i \quad (4)$$

由此可知,时钟 $c_i(t)$ 和 $c_k(t)$ 之间应该存在如下的线性关系:

$$c_i(t)=a_{ik}c_k(t)+b_{ik} \quad (5)$$

其中, a_{ik} 和 b_{ik} 分别称为相对漂移量和相对偏移量.式(5)给出了两种基本的同步原理:偏移补偿和漂移补偿.如果在某个时刻通过一定的算法求得了 b_{ik} ,也就意味着在该时刻实现时钟 $c_i(t)$ 和 $c_k(t)$ 的同步.图 1 刻画了偏移量补偿的过程,时钟 $c_k(t)$ 在一系列的同步时刻被同步到参考时钟 $c_i(t)$.由此,可以进一步构造同步时钟 $c_k^o(t)$.偏移补偿没有考虑时钟漂移对同步精度的影响.在图 1 中,这一点意味着:在每一个同步间隔上,同步时钟 $c_k^o(t)$ 与本地时钟 $c_k(t)$ 具有相同的变化速率.因此,如图 1 所示,同步时间间隔越大,同步误差也就越大.为了提高精度,可以考虑增加同步频率,但会引入相应的开销;另外一种解决途径是估计相对漂移量进行相应的修正来减小同步误差.具体来讲,如果我们能通过算法估计出本地时钟和参考时钟的相对漂移量 $\rho_i-\rho_k$,在构造同步时钟时,就有了人为弥补这种漂移的依据.同步时钟此时不再依赖本地时钟 $c_k(t)$ 的速率变化,而会以接近参考时钟的速率变化,同步精度自然得以提高.如果相对漂移量估计得较为准确,那么在很长的时间间隔上也不会产生太大的同步误差.在图 1 中, $c_k^d(t)$ 是采用漂移补偿技术之后可能得到的同步时钟之一,同步误差不再像 $c_k^o(t)$ 那样与同步周期密切相关.可见,漂移补偿是一种有效的同步手段,在同步间隔较大时效果尤为明显.当然,实际的晶体振荡器很难长时间稳定工作在同一频率上,因此,在线实时估计时钟的相对漂移量是必要的.漂移量估计需要一定的观测数据,在交换数据的过程中,同时完成偏移补偿是一种既节省开销又能提高同步精度的策略.因此,我们将综合应用偏移补偿和漂移补偿来实现一种高精度、低开销的时间同步算法.

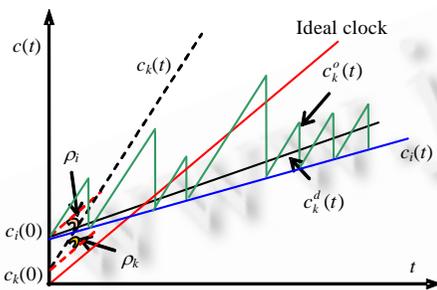


Fig.1 The principle of synchronization

图 1 同步原理

高.如果相对漂移量估计得较为准确,那么在很长的时间间隔上也不会产生太大的同步误差.在图 1 中, $c_k^d(t)$ 是采用漂移补偿技术之后可能得到的同步时钟之一,同步误差不再像 $c_k^o(t)$ 那样与同步周期密切相关.可见,漂移补偿是一种有效的同步手段,在同步间隔较大时效果尤为明显.当然,实际的晶体振荡器很难长时间稳定工作在同一频率上,因此,在线实时估计时钟的相对漂移量是必要的.漂移量估计需要一定的观测数据,在交换数据的过程中,同时完成偏移补偿是一种既节省开销又能提高同步精度的策略.因此,我们将综合应用偏移补偿和漂移补偿来实现一种高精度、低开销的时间同步算法.

1.3 数字时钟

计算机系统本地的时钟(local clock)通常由一个计数器组成,用来记录晶体振荡器产生脉冲的个数.在本地时钟的基础上,我们可以构造出不同类型的软件时钟,例如 $c(t)=c(t_0)+a\{h(t)-h(t_0)\}$,这里 $h(t)$ 是本地时钟,函数 $a(\cdot)$ 用来将计数器读数的差值转化为时间间隔,构造时钟 $c(t)$.以 Mica2 节点为例,晶振频率为 4MHz,如果设定本地时钟每 64 个“滴答声(ticks)”增加 1,那么 $a(\cdot)=16\mu s$,这意味着该时钟频率为 62.5KHz,其最高精度为 $16\mu s$.同步算法可以直接修改本地时钟 $h(t)$,也可以单独构建一个软件时钟 $c_s(t)$ 来维护同步时钟.

2 同步机制

2.1 基本机制

自 2002 年 J. Elson 和 Kay Romer 在 HotNets 这一影响未来网络研究发展方向的国际权威学术会议上首次提出和阐述无线传感器网络中的时间同步这一研究课题以来^[3],已经提出了近 10 种不同的实现算法,典型的有 RBS(reference broadcast synchronization)^[4],DMTS(delay measurement time synchronization)^[5],FTSP(flooding time synchronization protocol)^[6],AD(asynchronism diffusion)^[7],TPSN(time synchronization for sensor networks)^[8],

TS/MS(tiny synchronization/mini synchronization)^[9],LTS(lightweight time synchronization)^[10]和 Tsync(time synchronization)^[11].分析已有的同步机制与算法,它们大多采用两类基本的同步机制:单向广播(unidirectional broadcast)同步和双向成对(bidirectional pair-wise)同步,其中:算法RBS,DMTS,FTSP和AD属于前者;算法TPSN,TS/MS和LTS属于后者;而需要多信道支持的TSync算法则组合应用了两种机制,在控制信道上广播同步消息,在时钟信道上采用成对同步确定时钟偏移.双向成对同步的原理如图2所示.

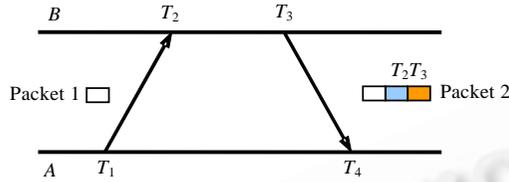


Fig.2 Bidirectional two-paired synchronization

图2 双向成对同步

节点A向节点B发送同步分组1,节点B用它的时钟记录收到该分组的时间 T_2 ,则 $T_2=T_1+D+d$,其中, D 是传输时间; d 是节点A和B之间的时钟偏移量(offset).之后,B向A发送一个携带 T_2 的分组2,同时加盖了时戳 T_3 .节点A在 T_4 收到分组2,那么 $T_4=T_3+D-d$.假设时钟偏移量和传播延迟在较小的时间尺度内不发生改变,则节点A通过式(6)就可以计算出时钟偏移量 d 和传输延迟 D .

$$d = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}, \quad D = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2} \quad (6)$$

一个特例是节点B在收到同步分组后立即加盖时戳返回,即 $T_2=T_3$.TS/MS^[9]就使用了这一机制,但没有采用式(6)计算偏移量来实现同步,而是利用三元组 (T_1, T_2, T_4) 集合寻找两个时钟线性关系中参数的上下界来确定漂移量和偏移量,最终完成同步.

两两成对同步虽然能达到一定的同步精度,但开销过大.假定传感器网络的某个簇类(cluster)中包含 n 个节点,那么在一个同步周期内,总共需要 $2n$ 个分组交换,其中,信标(beacon)节点发送 n 个,接收 n 个.为了提高精度,增加同步频率会导致更多的能量损耗.在有些对能耗非常敏感的无线传感器网络应用中,这样的开销是不可接受的.相比之下,广播同步机制开销要小一些,簇类中所有节点可以同时依据信标节点发送的同步分组一次完成同步.RBS是一种基于广播同步的算法,但广播分组的作用仅仅在于启动一次新的同步过程,节点之间时钟的偏移量是通过相互交换接收到广播分组的本地时间后计算得到的.与两两成对同步相比,RBS避免了一些可能引入随机误差的环节^[4],但通信开销没有显著降低.DMTS和FTSP则利用了单向广播分组实现同步,减小了通信开销.两者的不同之处在于,FTSP采用比DMTS更为精确的计算偏移量的机制与算法.

从已有的各种算法的同步原理分析,除了TS/MS以外,几乎所有算法都以偏移补偿为主,有些算法如RBS和FTSP等,虽然结合了漂移补偿技术,但都无一例外地通过对多个样本数据进行线性回归处理来估计漂移量,对应算法的空间复杂度相对较大:TS/MS中的Tiny-Sync用两个数据点确定了4个约束边界,虽然开销小,但无法给出相对漂移和相对偏移的最优估计;Mini-Sync用复杂的算法确定性地删除不影响精度的数据点,但需要保存有用的历史数据,以求得最优估计;文献[9]建议的40个三元组数据点的存储对于资源有限的无线传感器网络节点是不小的开销.

上面有关无线传感器网络中同步原理、机制和算法的分析与总结,启发我们提出了如下的研究思路:采用单向广播同步机制设计一种满足一定精度要求,同时具备漂移和偏移补偿功能且复杂度较小的同步算法.下面,我们将利用传统的锁相环(phase locked loop,简称PLL)原理,设计一种新的时间同步机制与算法.

3 同步机制与算法设计

3.1 广播校正同步机制

考虑到无线传感器网络中由于节点和链路失效等因素导致拓扑结构动态变化的特点,以及为均衡能量损

耗、延长网络生命周期而采用拓扑控制等系统性优化能耗的方案对网络带来的影响,我们沿用 FTSP 中“根节点”的选取和维护方案^[6],着重讨论广播域内单跳同步机制与原理,在此基础上扩展到整个网络的多跳机制是较为直接和方便的.在一个广播域内,时钟参考节点(时标)周期性广播同步分组,分组中携带了时标节点的本地时钟,为避免广播分组在发送、访问信道和接收过程中由于系统和信道状态的不确定性因素可能引入的误差,我们也采用在 MAC(media access control)层加盖时戳的方案^[6,8].收到同步分组的节点容易得到两个时钟间的差,FTSP 和 DMTS 直接用差值进行了偏移补偿.如果能通过分析这个差值时间序列,得到两个时钟相对漂移的信息,一次完成偏移和漂移补偿,则这样的时间同步算法会更有效率.因为它不会再像 FTSP 那样,为了进行线性回归处理而维护大量的历史数据.为此,需要设计一个简单的滤波器来递推估计差值序列的变化,进行相应的校正.我们将这一新机制称为广播校正同步机制.需要指出的是,这里,我们忽略了广播分组传播延时的差异给同步精度造成的影响.如果广播域覆盖半径约为 30 米(ZigBee 标准定义的有效传输距离),最大的传播延时差异为 100 纳秒,对于精度要求为毫秒或微秒级的同步算法,忽略传播延时差异是合理的.广播校正同步机制与其他同步补偿算法最大的区别在于:同步过程并非在某个时刻通过补偿一次完成,而是要经过一个动态调整的瞬态过程,进入稳态意味着实现了同步.本质上,广播校正同步机制主要利用了锁相环原理进行时钟频率锁定,最终实现了时钟同步.为了便于后面的论述,我们首先结合传统锁相环技术的锁频原理,介绍我们的同步算法的机理.在图 3 中, $h_1(k)$ 和 $h_2^*(k)$ 、 $h_2^*(k)$ 分别表示广播分组中携带的参考时钟和任意节点的同步时钟,它们的差值 $e(k)$ 经过低通滤波器处理后,消除了高频噪声.为了方便设计,我们采用常用的比例积分(proportional integral,简称 PI)控制器作为滤波器,控制信号 $v(k)$ 作为压控振荡器(voltage control oscillator,简称 VCO)的输入, K_0 是 VCO 的基准频率.不难看出,VCO 的输出频率 $f(k)$ 随着误差信号 $e(k)$ 动态地发生变化. $f(k)$ 经过零阶保持器和积分环节后转化为节点的同步时钟 $h_2^*(k)$.基于锁相环的时钟同步需要压控振荡器支持,追加额外的硬件是追求低成本节点实现所不期望的.为此,我们给出了下面的等价实现,它是全数字式,避免了对压控振荡器的依赖.

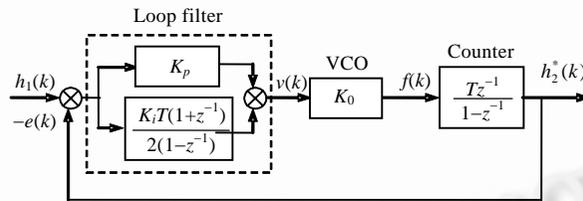


Fig.3 The principle of clock synchronization based on phase locked loop
图 3 基于锁相环的时钟同步原理

3.2 数字锁相环

由图 3 可知,

$$h_2^*(k+1) = h_2^*(k) + K_0 v(k)T \tag{7}$$

其中: T 是同步周期,即 $T=t(k+1)-t(k)$; t 为真实的物理时间.因为 VCO 的基准频率 K_0 是恒定的,所以我们可用网络节点上晶振的固有频率等效替代.依据晶振频率和计数器的关系,有

$$K_0 \{t(k+1)-t(k)\} = h_2^*(k+1) - h_2^*(k) \tag{8}$$

这里, $h_2^*(k)$ 为被同步节点的本地时钟.将式(8)代入式(7),即可得到一个不依赖压控振荡器的数字锁相环.

$$h_2^*(k+1) = h_2^*(k) + v(k)[h_2^*(k+1) - h_2^*(k)] \tag{9}$$

依据式(9),我们有如图 4 所示的数字锁相环结构图.

式(9)仅仅给出了同步时钟的离散形式,在此基础上,我们可以进一步构造出连续时间的软件时钟 $c_2(t)$ 供应用程序使用.

$$c_2(t) = c_2^*(t_i) + a\{h_2^*(t) - h_2^*(t_i)\} \tag{10}$$

其中, $h_2^*(t_i)$ 是同步时钟计数器在同步时刻的值.值得注意的是,在每一个同步时刻,需要用同步时钟的值替换本

地时钟计数器,即 $h_2^*(t_i) = h_2(t_i)$.

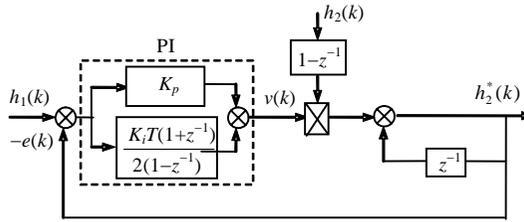


Fig.4 The framework of digital phase looked loop

图 4 数字锁相环结构

3.3 滤波器实现

接下来我们具体设计滤波器,主要是确定滤波器的参数 K_p 和 K_i 的值.由图 3 可知,系统的开环传递函数为

$$G_o(z) = \left[K_p + \frac{K_i T(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} \right] \frac{K_0 T z^{-1}}{1-z^{-1}} = \frac{K_0 T [(2K_p + K_i T)z + K_i T - 2K_p]}{2(z-1)^2} \quad (11)$$

开环系统有两个相同极点 $p_{1,2}=1$.依据根轨迹变化规律,出于稳定性的考虑,开环系统的零点应该最好在单位圆内,不妨假定为 0.5,即

$$z = \frac{2K_p - K_i T}{2K_p + K_i T} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

于是有

$$2K_p = 3K_i T \quad (13)$$

闭环系统的特征方程为

$$2(z-1)^2 + K_0 T(2K_p + K_i T)z + K_0 T(K_i T - 2K_p) = 0 \quad (14)$$

代入式(13),有

$$z^2 - 2(K_0 K_i T^2 - 1)z + 1 - K_0 K_i T^2 = 0 \quad (15)$$

如果方程式(15)有两个相同的实根,则闭环系统将是一个典型的欠阻尼二阶系统,瞬态过程将不发生任何振荡.这意味着被同步时钟不会围绕着参考时钟来回摆动,将单调逼近参考时钟.于是有

$$4(K_0 K_i T^2 - 1)^2 - 4(1 - K_0 K_i T^2) = 0 \quad (16)$$

即

$$K_i K_0 T^2 = 1 \quad (17)$$

令采样时间 $T=1s$,如前所述,Mica2 节点的时钟固有频率 $K_0=62.5KHz$,那么

$$K_i = 1.6 \times 10^{-5}, K_p = 1.5, K_i = 2.4 \times 10^{-5}.$$

4 性能评价

为了验证所设计同步机制与算法的有效性,我们在流行的 Mica2 实验平台上用 nesC 实现了基于锁相环的同步算法.实验配置如图 5 所示:MIB510 板上的 sink 节点充当“时标”节点,周期性地广播时钟信号;节点 A,B,C 是网络中将被同步节点.为了测试同步精度,让 sink 节点在两个同步广播分组之间再广播一个时钟读取请求,网络节点在收到该请求的瞬时记录当前各自的本地同步时钟,之后陆续发送回 sink 节点.用 TinyOS 内置的 SerialForwarder 例程将 Sink 节点收集到的时钟消息通过串口送至 PC 进行分析.取网络节点与 Sink 节点时钟的最大偏差为同步误差.

图 6 给出了同步过程中误差的变化趋势:最终,同步误差稳定到了一定的范围内.为了更清晰地反映稳态过程中误差的变化,我们截取图 6 中的一段,放大于图 7 中,可以看出,锁相环同步算法能够达到毫秒级的同步精度.

响应性是同步算法的一个重要性能指标.观察图 6,经过一个短暂的调节过程(约 15 拍),误差就回到了稳态值.具体的响应时间与同步周期有关,频率越高,同步时间越短.如果 15 拍即可完成同步,当同步周期为 1s 时,同步

时间为 15s;当同步周期为 20s 时,同步时间则是 5min.为了加速同步过程,可以在启动同步过程时适当提高同步频率,之后,为减小开销,适当降低频率.这不会对我们提出的同步算法的精度带来太大影响,因为理论上基于锁相环的同步算法的精度与同步周期的相关性不大.这一点,后面的实验会进行证实.

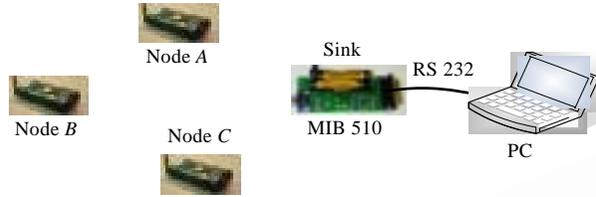


Fig.5 Experiment Configuration

图 5 实验配置

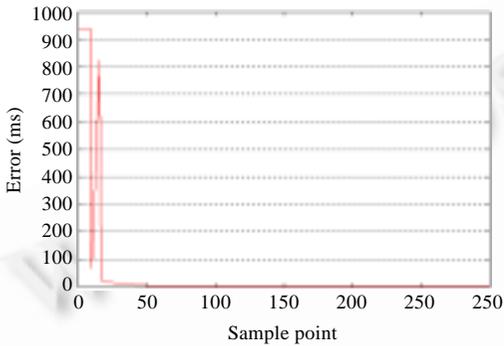


Fig.6 Variation of error

图 6 误差变化

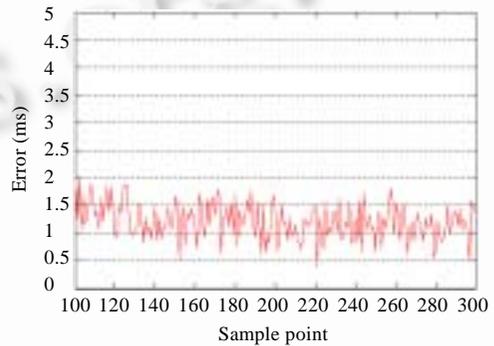


Fig.7 Variation of stable error

图 7 稳态误差变化

下面我们考察同步间隔对于同步精度的影响,分别取同步周期为 20s,50s,100s 和 200s,采样稳态过程中同步误差的变化,将结果绘制在图 8 中.

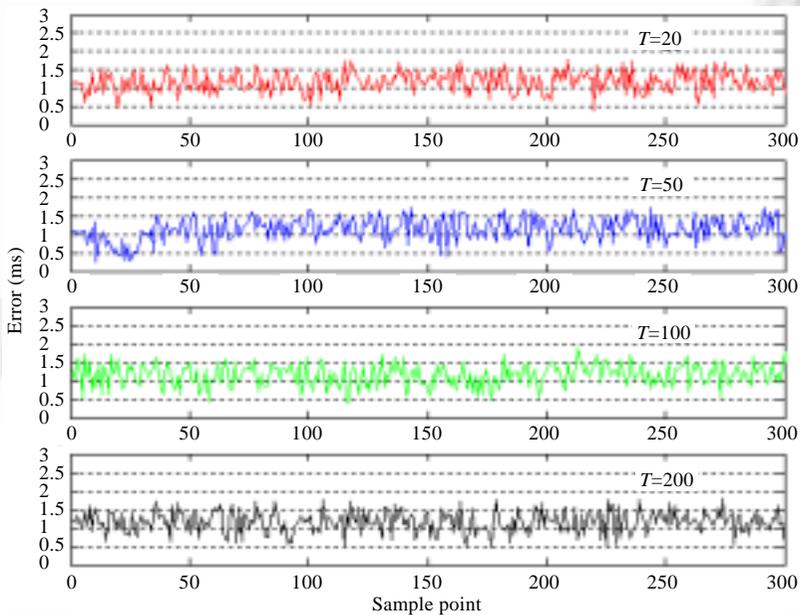


Fig.8 The impact of sampling cycle on synchronization error

图 8 采样周期对同步误差的影响

为了方便比较,我们作进一步的定量分析,求取误差的均值、方差和最大值,将统计结果列于表 1 中.不难看出,在 4 组实验中,不同的同步周期并没有给同步精度带来明显的影响.这也是我们设计的机制与算法同时进行偏移和漂移补偿的技术体现.而单纯进行偏移补偿的同步算法如 TPSN 和 LTS 等,精度不可避免地受到同步周期的影响,周期越短,精度越高,但相应的通信能耗也越大.在这一点上,我们提出的基于锁相环的单向广播校正同步机制与算法有较为明显的优势.

Table 1 Statistic of PLL synchronization error

表 1 锁相环同步机制的误差统计值

Period (s)	Mean (ms)	Deviation (ms)	Maximum (ms)
20	1.162	0.282	1.760
50	1.126	0.316	1.728
100	1.142	0.294	1.888
200	1.173	0.291	1.790

为了方便比较,我们在 Mica2 平台上实现 TPSN 算法.分别取同步周期为 5s,10s,25s 和 50s 进行实验,采样时钟误差,将结果绘制在图 9 中;进行统计处理后得到表 2 所列各项数据.

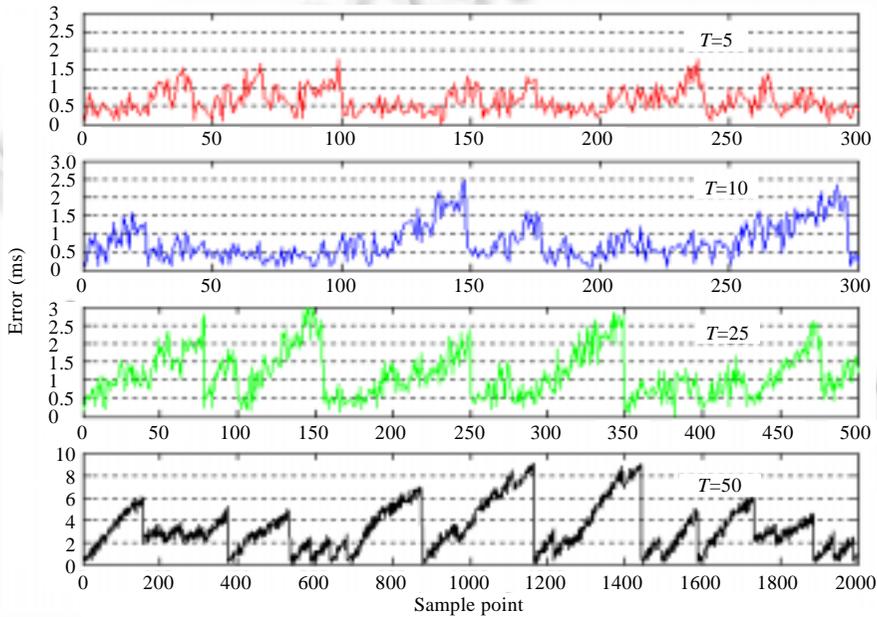


Fig.9 Results of TPSN

图 9 TPSN 算法的结果

Table 2 Statistic of TPSN synchronization error

表 2 TPSN 同步误差统计值

Period (s)	Mean (ms)	Deviation (ms)	Maximum (ms)
5	0.60	0.11	1.76
10	0.74	0.21	2.45
25	1.28	0.53	3.86
50	3.07	4.00	9.07

分析表 2 中的数据,TPSN 的精度与同步周期密切相关,周期增大,则精度降低.图 9 揭示了精度降低的原因,当同步周期增大以后,节点晶振频率漂移对误差的影响凸现.观察图 9 中最下面两组曲线,误差呈线性规律增长的情形不断出现,其根本原因在于,TPSN 只在同步时刻进行偏移补偿,而没有相应的漂移补偿措施.

5 结 论

在本研究中,我们基于传统的锁相环原理设计了一种能耗开销较小,同时进行偏移补偿和漂移补偿的无线传感器网络同步机制与算法.实验验证了其设计的可行性,算法到达了预期的技术目标,在目前的测试环境下达到了毫秒级同步精度.但这一测试方案存在系统误差,主要是节点接收和处理时钟读取请求过程中的随机因素引入的.在下一步的工作中,我们将寻求更合理的测试方案,如在网络节点上加装 GPS 接收机来建立相对准确的时间基准平台,进而测试和分析各种算法的同步精度.此外,受到网络节点数量的限制,我们目前的研究只进行了广播域内单跳同步机制与算法的测试.虽然理论上可以采用 FTSP^[6]的扩展方案将我们的算法很直接地拓展到多跳环境中,但应该还需要搭建具有一定规模的实验网来进行测试和验证,这是另一项需要进一步完成的工作,本文的重点在于阐述新的同步机制与实现算法.

References:

- [1] Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani AD. 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] Elson J, Römer K. Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization. In: Proc. of the 1st Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-I). 2002. 28-29.
- [4] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-Grained network time synchronization using reference broadcasts. In: Proc. of the 5th Symp. on Operating Systems Design and Implementation. ACM Press, 2002. 147-163.
- [5] Ping S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks. Int'l Research Berkeley Lab., 2003.
- [6] Maroti M, Kusy B, Simon G, Ledeczi A. The flooding time synchronization protocol. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. 2004. 39-49.
- [7] Li Q, Rus D. Global clock synchronization in sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2004. Hong Kong, 2004.
- [8] Ganerwal S, Kumar R, Srivastava MB. Timing-Sync protocol for sensor networks. In: Proc. of the 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). ACM Press, 2003. 138-149.
- [9] Sichertiu ML, Veerarittiphan C. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2003). 2003.
- [10] van Greunen J, Rabaey J. Lightweight time synchronization for sensor networks. In: Proc. of the 2nd ACM Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. 2003. 11-19.
- [11] Dai H, Han R. Tsync: A lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004,8(1):125-139.



任丰原(1970 -),男,甘肃临洮人,博士,副教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络流量管理与控制,传感器网络,系统性能评价.



董思颖(1983 -),男,硕士生,主要研究领域为分布式系统.



何滔(1983 -),男,硕士生,主要研究领域为传感器网络.



林闯(1948 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络,系统性能评价,安全分析,随机 Petri 网,逻辑推演,推理系统.