

One of Energy Efficient Wireless Networks Multi-Hop Adaptive Time Synchronization Algorithm *

WANG Yue^{*}, WAN Hong

(Chongqing University of Technology the School of Computer Science and Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Researching the long-term effective energy time synchronization protocol is a key strategy for successful deployment of the vitality of wireless sensor networks. This proposes a low-power multi-hop adaptive time synchronization algorithm (the MATS: Multi-hop adaptive time synchronization). The algorithm designs a flexible mechanism to adjust the synchronization mode, re-synchronization cycle, and each pair of node synchronization beacon number, and using the maximum likelihood estimation principle at the same time on the node clock offset and frequency offset estimate achieved with minimum energy loss to the completion of a long-term, network-wide time synchronization purposes. At last, the improved algorithm is verified through mathematical analysis and simulation methods.

Key words: time synchronization; wireless sensor network; heavy synchronization cycle; minimum energy loss
EEACC: 7230 doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.11.017

一种节能的无线传感器网络多跳自适应时间同步算法 *

王越^{*}, 万洪

(重庆理工大学计算机科学与技术学院, 重庆 400054)

摘要: 研究能量长期有效的的时间同步协议是成功部署生命力强的无线传感器网络的一项关键策略, 对此, 提出一种低能耗的多跳自适应时间同步算法 MATS (Multi-Hop Adaptive Time Synchronization), 该算法设计了一套灵活的机制来调整同步模式、全网重同步周期以及每对节点同步时的信标数, 并且利用最大似然估计原理同时对节点的时钟偏移和频率偏移进行估计, 达到用最少的能量损耗完成长期的、全网的时间同步的目的, 最后通过数学分析和仿真的方法对所提出的改进算法进行了验证。

关键词: 无线传感器网络; 时间同步; 重同步周期; 最小能量损耗

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)11-1557-07

时间同步是无线传感器网络的一项关键技术, 它为分布式系统提供了一个共同的时间基准, 对于保持数据的一致性、协调性及执行相关的基础操作, 如能量管理、网络安全性、数据融合和调度等都具有重要意义^[1-2]。由于传感器节点低成本、低功耗和微型化的要求, 目前, 大多数传感器节点是由价格低廉的晶体振荡器和计数寄存器组成的, 节点的本地时钟依靠晶振的中断计数实现^[1], 由于晶体振荡器的非理想性和环境因素的影响, 使传感器节点的时钟频率产生漂移, 即使节点在某一时刻达到时间同步, 但是随着时间的推移, 也会出现时间的偏移, 需要重新再同步, 理论上讲, 只有 2 个时钟的偏移完全相同, 并且频率源的频率相同, 他们才能保持同步, 然而, 实际上时钟的偏移设置精度有限, 并且频率源的频率也略有不同, 再加上晶体振荡器的不稳定性影响, 因此, 在分布

式系统中, 时钟必须进行定期同步调整。

另外, 在无线传感器网络中, 网络节点成功部署后, 节点不易收回, 所以可以认为传感器网络的寿命取决于电池的寿命, 而且, 由于传感器节点的体积小, 成本低, 携带的电池能量及其有限, 能源是一种稀缺的资源, 基于这些原因, 能量效率是设计无线传感器网络时间同步算法时优先考虑的设计因素。数据通信是无线传感器网络重要的操作之一, 并且占用很大一部分能量消耗^[2], 因此, 尽可能的最小化同步过程中的同步信标收发数量是值得深究的问题。

在时间同步算法中, 如何在定时精度和功耗之间取得一个符合需要的折衷, 是研究时间同步算法面临的一个主要问题, 对此, 结合现有的时间同步算法, 提出一种低能耗的自适应多跳时间同步算法, 其目标是用最小的能量消耗完成长期的、全网的时间同步, 改

进算法采用的是双向成对同步机制,对时钟的偏移和频偏作最大似然估计,并进行补偿,然后,针对网络的工作负载情况,选择不同的工作模式,减小网络时间同步的信标数目,并对最大重同步周期和全网同步的信标数目进行量化分析,最后通过数学分析和仿真实验表明,改进的算法能够达到预期的效果。

1 时间同步算法的相关研究

自从时间同步课题被提出来以后,许多大学和科研机构对时间同步算法进行了诸多研究,也提出了多种时间同步算法,目前,比较常见的同步算法是基于广播的方法和基于成对同步的方法,RBS^[3],DMTS^[4],FTSP^[5]都是典型的基于广播的方法,这种方法的优点很明显,它能够去除发送节点对同步精度的影响,同时,同步信标的收发数量也相对较小,但是当节点个数较多时,容易产生“广播风暴”,如RBS算法。TPSN^[6],TS/MS^[7]是基于成对同步的典型代表,这种方式的同步精度高,但是这种方式主要是以能量消耗为代价,每对节点间需要一定的信标数量来保证同步的精度,下面简单介绍一下TPSN算法。

TPSN算法采用层次型网络结构,首先将所有节点按照层次结构进行分层,然后每个节点与上一层节点进行时间同步,最终使所有节点都与根节点完成时间同步。邻近的两层节点通过交换同步信标以达到时间同步,如图1所示, T_1 、 T_4 记录节点A的本地时间, T_2 、 T_3 记录节点B的本地时间。2个节点之间的时间偏移用 δ 表示,信标的传输延迟用 α 表示。在 T_1 时刻,节点A向节点B发送一个同步信息请求包,同步信息请求包中包含发送时间 T_1 和节点A的层次号。节点B在 T_2 时刻接收到该信息包,则 $T_2 = (T_1 + \alpha + \delta)$,然后随机等待一个时间后,在 T_3 时刻向节点A发送应答信息包,包中包含B节点的层次号和 T_1 、 T_2 、 T_3 的信息。节点A在 T_4 时刻收到应答信息包,则 $T_4 = (T_3 - \alpha + \delta)$ 。从而得到计算时间偏移和传输延迟的表达式:

$$\delta = [(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)] / 2 = (U - V) / 2$$

$$\alpha = [(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)] / 2 = (U + V) / 2$$

其中, U 和 V 称为延迟观测量, $U = T_2 - T_1$, $V = T_4 - T_3$,通常情况下,两节点间通过多次的信标交换来提高同步精度。

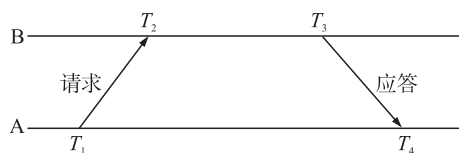


图1 TPSN算法相邻节点同步信标交换模型

1.1 存在的问题

实际上,无线传感器网络中的时间同步问题涉及2个步骤:第1步是通过校正时钟相位偏差,将网络节点同步到一个公共的绝对网络,第2步是将存在频率偏差的时钟矫正到一个特定的标准频率。由于网络节点的晶振时钟的非理想性和环境因素将导致时钟的运行频率存在微小偏差,所以第二步是必需的,而且,时钟频率偏差是出现时钟偏差的主要原因^[8]。在上述算法中,除TS/MS外,其他算法都是以时钟偏移补偿为主(如RBS,TPSN等),而这些算法只能保证同步时刻处的精度。这些算法在进行同步信标交换时没有考虑时钟频率偏移的问题,那么节点长时间独立运行后,时钟仍会产生不容忽视的误差,为了保证足够的精度,节点必须频繁地重复时间同步算法,从而导致节点的同步周期短,同步次数多,能量消耗巨大。Tiny-sync协议用2个数据点确定了两节点频偏、相偏的边界条件,虽然成本低,但无法给出最优的估计。Mini-sync用复杂算法剔除了不影响精度的数据点,但需要保存有用的历史数据,来得到最优估计。Sichitiu^[9]指出的40个历史点的存储对于资源有限的无线传感器网络节点来说也是不小的成本。

近年来,也陆续提出了一些新的关于频率偏移补偿的算法^[10-12],这些算法都是采用成对同步的方法,提高了同步的精度,算法重同步周期也有所延长。在成对同步机制中,两节点间一般都是采用多次的同步信标交换以取得一定的同步精度。然而同步信标数目是衡量能量消耗的主要指标,重同步周期也有一个最大值的限制^[13]。但是新提出的算法中没有对同步信标数目没有进行优化,重同步周期也没有给出一个量化的计算。而且在无线传感器网络中,网络中的节点并不是一直都需要保持同步,可以只在某些特定的节点上进行同步^[14],利用不同的工作模式来降低能耗。针对这些问题,本文采用成对同步机制,对时钟同步过程中的偏移和频偏做出补偿,对同步信标交换数目和最大重同步周期进行最优化估计,并给出量化计算式子,结合不同工作模式,使节点在能量效率和同步精度之间取得一个符合需要的折衷,使得节点在某一时刻同步之后,即使长时间不进行再同步,也能保持所需的同步精度,从而降低同步次数,更加符合实际需求。

2 多跳自适应时间同步算法设计

MATS算法可概括为3个主要阶段,如下所述(其中第二和第三阶段是周期性地重复执行):①层次发现阶段 这个阶段和TPSN算法层次发现阶段

类似,用于产生网络的分层结构。②同步阶段 采用的是双向成对同步机制,在此阶段,对时钟偏移和频偏作最大似然估计,不仅可以调整现在时刻的时钟偏移,也能调整频率偏移,从而能保证长时间的同步,然而 TPSN 只能估计时钟偏移,因此,相对于 TPSN, MATS 并不需要更频繁的同步的过程。③网络估计阶段 参考节点根据当前的网络业务量状况,选择合适的同步模式: AO 模式(总是保持全网同步)或者 SI 模式(仅需要时同步),另外,此阶段还将优化重同步周期和每个成对同步的信标数目。

在对算法的 3 个阶段进行描述之前,先介绍同步阶段中用到时钟偏移和频偏的最大似然估计^[15]。

2.1 时钟偏移和频偏的最大似然估计

MATS 算法采用的是典型的基于成对同步的方法。前面已经提到,改进算法考虑节点的时钟频率,而时钟频率又是不稳定的,下图 2 非常形象地描述了两节点 A 和 B 的上下行信息交换时,时钟偏移和时钟频偏对时钟的影响。整个信标收发过程和 TPSN 算法类似,这里不再阐述,只不过这里是进行的多次信标交换,同步过程从 T_1 开始,在一个同步周期内,两节点间重复 N 次信标交换,其中 N 为同步信标交换次数,应该指出的是: N 为权衡同步准确性和算法所花费的网络能量资源的重要指标。

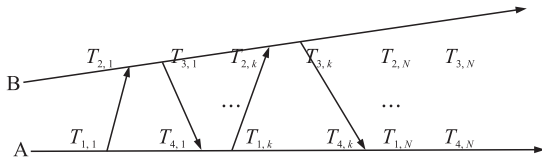


图 2 时钟偏移和频偏的双向时间戳信息交换模型

由图 2 可以得出, B 节点第 k 次接收到同步请求包的时间戳 $T_{2,k}$ 为:

$$T_{2,k} = (T_{1,k} + d + X_k) \omega + \phi \quad (1)$$

回复确认包的时间戳 $T_{3,k}$ 的表达式为:

$$T_{3,k} = (T_{4,k} - d - Y_k) \omega + \phi \quad (2)$$

其中,假设双向信标交换的链路是对称的, d 是固定部分的延迟, X_k 和 Y_k 是可变部分的延迟,并且假设其分布是独立同指数分布^[16],均值为 α , ϕ 是节点间的时钟偏移, ω 是节点间的频率偏移。若式(1)和式(2)中没有 ω ,则为 TPSN 的同步机制表达式。

根据式(1),分别令 $k = N$ 和 $k = 1$,用 $T_{2,N}$ 减去 $T_{2,1}$ 可得:

$$T_{2,N} - T_{2,1} = (T_{1,N} - T_{1,1} + X_N - X_1) \omega \quad (3)$$

同理,根据式(2),用 $T_{4,N}$ 减去 $T_{4,1}$ 可得:

$$T_{3,N} - T_{3,1} = (T_{4,N} - T_{4,1} + Y_1 - Y_N) \omega \quad (4)$$

将第 1 个和最后 1 个时间戳的差值定义为 $D_1 =$

$T_{1,N} - T_{1,1}$, $D_2 = T_{2,N} - T_{2,1}$, $D_3 = T_{3,N} - T_{3,1}$, $D_4 = T_{4,N} - T_{4,1}$, 则式(3)和式(4)可分别改写为:

$$D_2 = (D_1 + P) \omega \quad (5)$$

$$D_3 = (D_4 - R) \omega \quad (6)$$

其中, $P = X_N - X_1$, $R = Y_N - Y_1$ 。下面利用式(5)和式(6)估计时钟频偏 ω 的最大似然估计。

由于 X_N, X_1, Y_N, Y_1 是独立同指数分布的随机变量,均值为 α ,所以,式(5)和式(6)描述的观察模型的似然函数由下式给出:

$$L(\omega, \alpha) = \left(\frac{1}{2\alpha}\right)^2 \exp\left[-\frac{1}{\alpha} \left(\left|\frac{D_2}{\omega} - D_1\right| + \left|D_4 - \frac{D_3}{\omega}\right|\right)\right] \quad (7)$$

最后求解出在指数分布延迟下时钟频偏的最大似然估计表达式为:

$$\hat{\omega} = \begin{cases} \frac{D_2}{D_1} & D_2 > D_3 \\ \frac{D_3}{D_4} & D_2 < D_3 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{D_1 + D_3}{D_2 + D_4}\right) & D_2 = D_3 \end{cases} \quad (8)$$

接下来估计时钟的偏移,在上述模型中,2 个节点之间的延迟观测量集合即式(1)和式(2)可以改写成:

$$U'_k = T_{2,k} - \hat{\omega} T_{1,k} \quad (= \omega d + \phi + \omega X_k) \quad (9)$$

$$V'_k = \hat{\omega} T_{4,k} - T_{3,k} \quad (= \omega d - \phi + \omega Y_k) \quad (10)$$

文献[16]中,已经证明了在 d 未知的情况下,存在 ϕ 的最大似然估计,为:

$$\hat{\phi} = \frac{U_{(1)} - V_{(1)}}{2} \quad (11)$$

式中, $U_{(1)}$ 和 $V_{(1)}$ 表示最小统计值,例如 $U_{(1)} = \min_{1 \leq i \leq N} U_i$, $V_{(1)} = \min_{1 \leq i \leq N} V_i$, 在双向成对同步中, $U_i = T_{2,i} - T_{1,i}$, $V_i = T_{4,i} - T_{3,i}$ 。

将式(9)和式(10)代入到式(11)中,即可得到在指数对称链路延迟模型下,时钟的偏移估计:

$$\hat{\phi} = \frac{\min_{1 \leq k \leq N} U'_k - \min_{1 \leq k \leq N} V'_k}{2} \quad (12)$$

利用最大似然估计来估计时钟偏移和频偏的主要步骤为:①将网络延迟建模为独立同分布的指数模型,在两节点间进行的第 k 次信标交换中,根据 B 节点第 k 次接收到同步请求包的时间戳 $T_{2,k}$ 和回复确认包的时间戳 $T_{3,k}$ 的表达式,运用最大似然估计,得到时钟的频偏 $\hat{\omega}$,即式(8);②在双向成对同步中,延迟观测量集合可表示为 $U_i = T_{2,i} - T_{1,i}$, $V_i = T_{4,i} - T_{3,i}$ 。在此,根据式(1)和式(2)重新得到延迟观测量 U'_k 和 V'_k ;③将延迟观测量代入到式(11),得到式(12),即为时钟的偏移估计 $\hat{\phi}$ 。

2.2 时间同步

MATS 算法分为 3 个阶段,分别为层次发现阶段,同步阶段,和网络估计阶段。下面对这 3 个阶段进行描述。

(1)层次发现阶段 该过程只在网络初始化时进行,首先选定一个根结点,并为根结点分配为第 0 层,然后由它广播一个层次发现包 LDP (Level Discovery Packet),其中包含发送节点的 ID 和层次号,当其他节点接收到层次发现包,则分配比该包中层次号大 1 的层次号给接收节点,同时接收节点发送一个包含自身层次号的 LDP,为了避免碰撞,已分配过层次号的节点对其后收到的层次发现包都不做处理,重复这个过程直到网络中的每个节点都赋予一个层次号,至此形成一个以根结点为第 0 层的网络。对于未收到 LDP 的节点和新入网的节点则向网络广播一个层次请求包,收到该包的节点向其发送一个层次响应包(包含自己的层次号和 ID),接收节点比较接收到的各个层次响应包后,将包中层次号最小的节点作为自己的主节点^[17]。

(2)同步阶段 该过程采用的是成对同步机制,对于 AO 模式,第 1 层节点和根结点(参考节点)之间进行一系列的信标交换,参考节点通过记录两节点间的发送时间戳和接收时间戳,将网络链路延迟建模为指数模型,利用最大似然估计,估计出时钟偏移和时钟频偏,然后和第 1 层节点进行同步校正,第 1 层节点同步之后,依此类推,直到全网达到同步,另一方面,对于 SI 模式,仅仅对参与了某个多跳数据传输的节点之间才进行同步。

(3)网络估计阶段 在这个阶段,主要做 3 个方面的优化。①网络统计上一个同步周期内信标交换的总数,然后调整下一个同步周期的持续时间以最小化同步所需的能量消耗即优化重同步周期。②当网络业务量很少时,为了节约网络资源,采用 SI 模式代替 AO 模式是更好的选择,因为,在一些应用中,除非传感事件发生,要不然传感器的时钟可以允许与网络失去同步^[14]即选择不同的同步模式。③为了同步的精确性,在每个成对同步中需要大量的信标交换和相应的信号处理,然而,随着每个成对同步需要的信标交互的数量增加,整个网络中同步周期的总信标交换数也增加,因此,需要在精确性和能量消耗之间做出权衡,选择最优的同步信标数目。下面对网络估计阶段中的同步模式选择,优化的重同步周期和每个成对同步的信标数目做出分析。

2.2.1 同步模式的选择

MATS 算法的目标是提高同步中网络资源的有效

利用(即节约能量),保持所有传感器节点的同步不是一个好的方法,因为同步需要消耗很多的能量,本文采用 2 种不同的工作模式,AO 模式和 SI 模式,根据不同的需要选择不同的模式。下面定义一些参数:

B:网络生成树中树枝(边)的数目,其能够在层次发现阶段得到。

T:重同步或再次同步周期,即两次同步之间的时间间隔。

h:单位时间的平均跳数。在每个传感事件中,目的节点记录了在本次传输过程中的跳数,在同步阶段,参考节点收集到上次同步周期内的总跳数信息,并求出整个网络单位时间内的平均跳数 h,平均跳数显示了网络业务量的繁忙程度。

N:每个成对同步需要的信标交换数目。

如前面提及,MATS 的目标是能够节约能量,故需要最小化需要的信标数目,在 AO 模式中,全网单位时间的信标数目为 $M = 2BN/T$,而 SI 模式 $M = 2hN$,为了最小化全网单位时间的信标数 M ,同步模式选择如下,

$$\frac{2BN^{AO}}{T} < 2hN, \frac{2BN^{SI}}{T} > 2hN \quad (13)$$

随着时钟同步周期 T 的增加,网络变得更加功率高效,但是同步周期过大,节点累积的误差也越大,因此存在着一个最大的时钟同步周期,注意到,在同步阶段的时间 T_{sync} 是不可能进行传感器数据传输的(因为节点还未达到同步)。因此重同步周期可以改写为 $T = T_{max} + T_{sync}$,在这种情况下,式(13)可表示为:

$$T > \frac{AO}{h} B, T < \frac{SI}{h} B \quad (14)$$

从式(14)可以看出,当 T 比 B/h 小时,同步模式应该从 AO 模式变为 SI 模式,反之亦然。在 SI 模式中,参考节点周期性的询问在上一个同步周期内有多少跳数产生,从而决定是否切换到 AO 模式。

2.2.2 重同步周期的判定

重同步周期 T_{max} 应该由估计模型的准确性和振荡器的指标决定,为了网络的功率效率, T_{max} 应尽可能大,然而, T_{max} 值又必须有所限制,因为节点间的偏移会随着时间的推移而增加。假设 2 个节点间的时钟误差 η 建模如下:

$$\eta = \eta_0 + \eta_s t \quad (15)$$

其中 t 表示参考时间, η_0 和 η_s 分别表示时钟的偏移和频偏误差,令 $\eta_{0,i}$ 和 $\eta_{s,i}$ 分别表示两节点间交换第 i 次信息时,时钟偏移和频偏的误差,根据文献[3,6],我们将时钟偏移和频偏误差都建模为正态分布:

$$\eta_{0,i} \sim N(0, \delta_{\eta_{0,i}}^2) \quad 1 \leq i \leq N \quad (16)$$

$$\eta_{s,i} \sim N(0, \delta_{\eta_{s,i}}^2) \quad 1 \leq i \leq N \quad (17)$$

注意, 只有经过多次信标交换后, 才能估计时钟的频偏, 因而在第一次交互信标时, 且又无频偏估计时, $\eta_{s,1}$ 代表了频率偏差, 此时最大时钟误差可建模为另一个正态分布: $\eta \sim N(0, \delta_{\eta}^2)$, 其中 $\delta_{\eta}^2 = \delta_{\eta_{o,N}}^2 + \delta_{\eta_{s,N}}^2 T_{\max}^2$, ($t = T_{\max}$), 则在 N 个信标下, 最大重同步周期可表示为:

$$T_{\max} = \sqrt{(\delta_{\eta}^2 - \delta_{\eta_{o,N}}^2) / \delta_{\eta_{s,N}}^2} \quad (18)$$

基于估计模型的渐进性能和下界, 信标间的时间误差与 N 成反比, 可推断变量 $\delta_{\eta_{o,N}}^2$ 和 $\delta_{\eta_{s,N}}^2$ 的表达式, 如下式所示:

$$\delta_{\eta_{o,N}}^2 = \frac{\delta_{\eta_{o,1}}^2}{N}, \delta_{\eta_{s,N}}^2 = \frac{\delta_{\eta_{s,2}}^2}{(N-1)^2} \quad (N \geq 2) \quad (19)$$

因此, 当 $N \geq 2$ 时, T_{\max} 可记为:

$$T_{\max} = (N-1) \sqrt{\frac{\delta_{\eta}^2 - \delta_{\eta_{o,1}}^2 / N}{\delta_{\eta_{s,2}}^2}} \quad (N \geq 2) \quad (20)$$

其中, δ_{η} 表示时钟误差的标准差, $\delta_{\eta_{o,1}}$ 表示第一次信标交换时, 时钟偏移的标准差, $\delta_{\eta_{s,2}}$ 表示第二次信标交换时, 时钟频偏的标准差, $\delta_{\eta_{o,1}}$ 和 $\delta_{\eta_{s,2}}$ 都可通过简单的实验测试得到, 当 $N=1$ 时, 利用式(18)计算最大重同步周期, $\eta_{s,1}$ 可由晶体振荡器的指标决定, 因而最大重同步周期与信标数目成正比, 且由式(20)也可以看出, 进行时钟频偏估计将显著提高 T_{\max} 。

2.2.3 最优信标数

MATS 算法的目标是能够节约能量, 故需要使全网单位时间内的平均信标数目 M 最小化, 由于 $M = 2BN/T$, 且 N 又是未知数值, 问题转化为优化问题, 根据设定不同的 N 值来决定 M 的值, 由式(20)可寻找最优信标数 N , 即:

$$\tilde{N} = \operatorname{argmin} M \quad (21)$$

其中

$$M = \frac{2BN}{T_{\text{sync}} + T_{\max}} = \begin{cases} \frac{2B}{T_{\text{sync}} + \sqrt{(\delta_{\eta}^2 - \delta_{\eta_{o,1}}^2) / \delta_{\eta_{s,1}}^2}} & N=1 \\ \frac{2B}{T_{\text{sync}} + \frac{N-1}{N} \sqrt{\frac{\delta_{\eta}^2 - \delta_{\eta_{o,1}}^2 / N}{\delta_{\eta_{s,2}}^2}}} & N \geq 2 \end{cases} \quad (22)$$

T_{sync} 表示 N 个信标时的同步时间, 对不同的 N 值, 参考节点在网络最初建立时进行估计 T_{sync} 。一旦 N 由式(22)估计出, 则 T_{\max} 由式(20)计算得出。

2.3 算法流程图

MATS 算法在最初开始时, 不去估计出 N 的值, 而是根据初始给定的 N 值, 估计时钟的偏移和频偏, 估计出来之后, 对时钟的偏移和频偏进行校正,

在算法进行到第 3 个阶段利用式(22)来估计下一周期 N 的值, 使得 M 的值最小, N 的值估计出来之后, 利用式(20)估计下次同步的最大同步周期, 之后算法的第二个阶段和第 3 个阶段是周期性进行的, 整个算法的实现流程图如图 3 所示。

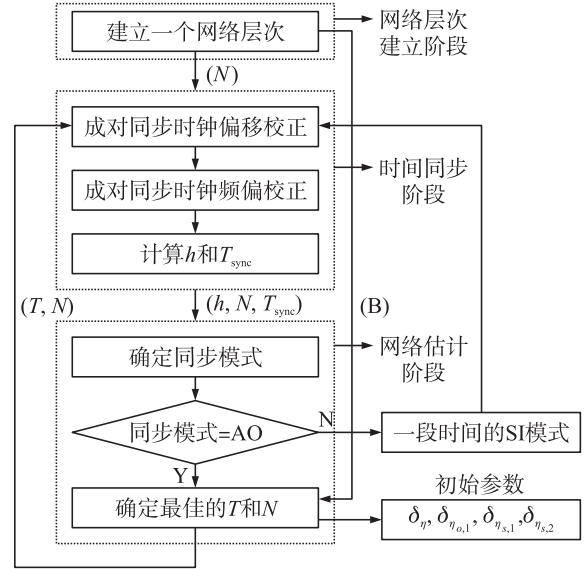


图 3 MATS 算法实现流程图

3 实验仿真和性能分析

为了评估 MATS 算法的性能, 本文使用 NS2 网络仿真平台对其进行了仿真实验, 无线传感器网络设定在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的正方形区域, 节点总数为 26 个, 其中 1 个为根结点, 25 个为待同步节点, 节点比较均匀的分布在此区域中, 并设置数据传输速率为 300 m/s , 节点的无线通信距离为 10 m 进行仿真, 仿真主要是针对 MATS 与 TPSN 在同步精度, 信标数 N 和单位时间的平均信标数 M 三者之间做了分析, 所有节点的测试数据都是在相同的平台下获得, 这样, 2 个算法的实验才有可比性, 结果如下所示。

算法开始时, 随机给定初始值 $N=5$, 即进行 5 次的信标交换, 估计出节点的时钟偏移和频偏, 然后依据时钟偏移和频偏来调整节点时钟, 同时也和单向同步算法 DMTS 做了比较, 从图 4 可知, MATS 算法的精度远远高于 TPSN 和 DMTS, 并且可以得出在相同的最大误差上限的情况下, MATS 算法的误差小, 精度高, 时钟偏差积累相对缓慢, 从而, 重同步周期相对的延长, 降低了能耗。同时, 从图中也可以看出, 随着节点层次的增加, TPSN 和 DMTS 的算法误差也会随之增大, 且增大幅度远大于 MATS, 从而也可以得出当重同步周期相同时, TPSN 和 DMTS 算法的节点累积误差大于 MATS 算法的节点累积误差,

在 MATS 算法下,时钟误差随着节点层次的增加变化不是很大,因为上一层与下层同步时,都进行了时钟频偏的补偿,这样看来。MATS 算法在单跳和多跳的情况下,都是优于 TPSN 算法和 DMTS 算法的。

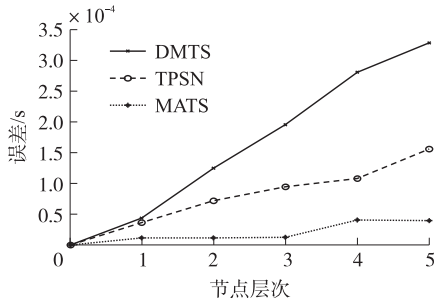


图4 算法在节点层次与误差之间的关系

在算法的第3个阶段,估计下一次两节点间同步时信标数 N 的个数,以使得全网单位时间的信标数 M 最小,根据不同的 N 值来决定 M 的值。图5和图6分别给出了 MATS 算法和 TPSN 算法的每对节点成对同步时的信标数 N 与整个网络单位时间内的平均信标数 M 之间的关系,以求出最优的 N 值,和式(18)相比较,TPSN 重同步周期可表示为:

$T_{\max} = \sqrt{\delta_{\eta}^2 - \delta_{\eta_o, N}^2}$, 而且全网单位时间内的平均信标数也可表示为 $M_{\text{tpsn}} = 2BN/T$ 。为了在不同的误差上限情况下,更好的估计比较 N 与 M 之间的关系,这里随机假设了4个不同的误差上限的标准差 δ_{η} , 分别为: $\delta_{\eta_1} = 30.4$, $\delta_{\eta_2} = 3.04$, $\delta_{\eta_3} = 0.304$, $\delta_{\eta_4} = 0.0304$, 单位为 ms。网络深度 $B=5$ 和同步时间 $T_{\text{sync}} = 205$ Nms 在网络建立阶段得出,第一次信标交换的时钟偏移的标准差 $\delta_{\eta_{o,1}}$ 和第二次信标交换的时钟频偏的标准差 $\delta_{\eta_{s,2}}$ 分别在网络的同步阶段测出,分别为: $\delta_{\eta_{o,1}} = 16.67 \mu\text{s}$, $\delta_{\eta_{s,2}} = 1.58 \mu\text{s}$ 。实验仿真图如图5和图6所示。

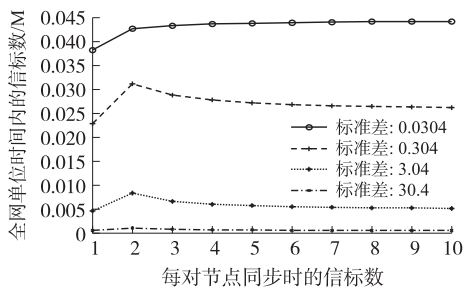


图5 MATS 算法每对节点的信标数 N 与全网单位时间内的信标数 M 之间的关系

从仿真结果可知,在双向成对同步中,当节点间同步采用多信标传输时,从纵坐标可以看出, MATS 算法要求的全网单位时间内的信标数远远少于 TPSN 算法,特别是在误差上限较大时,更为明显(标准差为

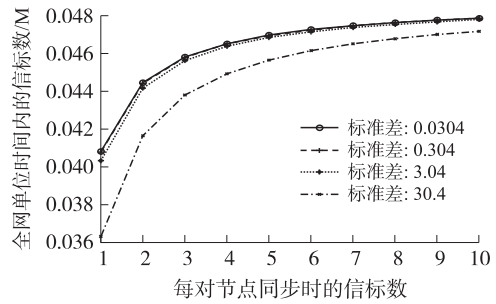


图6 TPSN 算法每对节点的信标数 N 与全网单位时间内的信标数 M 之间的关系

30.4 时)。此外,随着 N 的增大它们之间的差距也显著增加,因而, N 值较大时, MATS 相比 TPSN 具有更优的能量效率,仿真结果还显示,少数的几个信标 N 已经足够用来最小化 MATS 的 M 了,而且,正如预期的那样,要将全网的最大误差上限约束到一个更小的值,即精度高,就需要更多的信标数。

在 MATS 算法中,虽然 N 值越大,单位时间内平均信标数 M 越小, MATS 的能量效率也越高,但是 N 的值也不宜太大,因为 N 正比于同步时间。从图中可以得出当 $N=5$ 时, MATS 算法的全网单位时间内的信标数已经趋于平缓,利用 $N=5$ 并选择最大误差上限的标准差 δ_{η} 为 3.04 ms 时,利用式(20)可以得出 MATS 的最大重同步周期为 81 min。在图4中, MATS 算法的同步精度也是在 $N=5$ 是测出来的,说明当 $N=5$ 时,算法的能量效率和精度都取得了非常好的效果,能够在同步精度和能耗方面取得了一个良好的折衷。

接下来比较在相同的误差上限情况下进行多次的时间同步时, MATS 算法和 TPSN 算法每一次同步的全网单位时间内的信标数目 M 的大小,每次同步间隔由重同步周期决定,如下表所示:这里的误差上限的标准差为 3.04 ms。

表1 MATS 算法多次同步时全网单位时间的信标数 M

同步次数	1	2	3	4	5
M	0.0057	0.006	0.0062	0.0067	0.007

表2 TPSN 算法多次同步时全网单位时间的信标数 M

同步次数	1	2	3	4	5
M	0.046	0.049	0.05	0.054	0.056

从表1和表2可知,无线传感器网络节点进行多次的同步时, MATS 算法每一次同步的全网信标数目都是少于 TPSN 算法。这和预测的相符合,因为 MATS 算法在每一次同步时都对每对节点同步时

的信标数 N 进行了最优化估计, 以使得 M 的值最小。同时也表明 MATS 相比 TPSN 算法具有更优的能量效率。

4 结论

本文对无线传感器网络中的时间同步技术提出了一种改进方案, 在时间同步算法的能量效率和精度方面取得了一个良好的折衷, 提出的同步算法 MATS 分为 3 个阶段, 在同步阶段不仅估计时钟的偏移, 而且还利用最大似然估计原理估计时钟频偏, 从而能保证长时间的同步可靠性, 最后在第 3 个阶段, 考虑到能量效率, 参考节点根据跟踪当前的网络业务量状况, 选择合适的工作模式: AO 模式和 SI 模式, 其目标是在所给的时间里面最小化需要的同步信标数, 从而达到最小化总能量消耗的目的。另外, 该阶段还将优化重同步周期和每个成对同步的信标数目。对 MATS 算法进行性能分析和实验表明该算法具有较高的同步精度和较低的能量消耗的特点, 能够在同步周期和信标数目之间进行调节, 很适合于资源受限的无线传感器网络的应用。

参考文献:

- [1] 李晓维, 勇军, 任丰原. 无线传感器网络技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [2] 汪付强, 曾鹏, 于海斌. 一种能量高效的无线传感器网络时间同步算法[J]. 信息与控制, 2011, 12, 46(2): 753-766.
- [3] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained Network Time Synchronization Using Reference Broadcasts[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 2002: 147-163.
- [4] Su Ping. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless

Sensor Networks[R]. Intel Research, Berkeley Lab, 2003.

- [5] Maroti M, Kusy B, Simon G. The Flooding Time Synchronization Protocol I [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2004: 39-49.
- [6] Ganeriwa S, Kumar R, Srivastava M B. Timing Sync Protocol for Sensor Networks [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM Press, 2003. 138-149.
- [7] Yoon S, Veerarittiphan C, Sichertiu M L. Tiny-Sync: Tight Time Synchronization for Wireless Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2007, 3(2): 8.
- [8] 夏小凤, 严斌宇, 刘方圆. 无线传感器网络 TPSN 的优化算法[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(6): 1465-1467.
- [9] Sichertiu M L, Veerarittiphan C. Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2003). New Orleans: IEEE, 2003(2): 1266-1273.
- [10] 刘迪忻. 无线传感器网络中基于时钟漂移补偿的时间同步技术[J]. 时间频率学报, 2009, 12, 38(2): 120-128.
- [11] 杨景源, 李向阳. 可变周期的无线传感器时间同步算法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(18): 4407-4409.
- [12] 陶志勇, 胡明. 基于等级层次结构的 TPSN 算法改进[J]. 传感技术学报, 2012, 25(5): 691-695.
- [13] 阿钦·瑟潘丁, 卡西姆·M·乔哈里. 无线传感器网络中的同步技术——参数估计、性能基准及协议[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2012: 6.
- [14] 孙新伟, 申兴发, 张能贵. 无线传感器网络节点周期性休眠时间同步研究[J]. 机电工程, 2010, 527(5): 75-77.
- [15] 李贤平, 沈崇圣, 陈子毅. 概率论与数理统计[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2003.
- [16] Jeske D R. On the Maximum Likelihood Estimation of Clock Offset [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53: 53-54.
- [17] 吴成伟, 黄文君. 无线传感器网络比时广播时间同步算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12): 1789-1794.



王 越(1961-), 男, 重庆人, 教授, 博士。现从事计算机应用技术专业方向教学及研究工作, 主要研究兴趣是数据库技术及应用, 数据挖掘及其应用, 嵌入式系统及应用, 无线传感器网络。曾获重庆市科技进步三等奖 3 项, 重庆市计算机学会副理事长, wangyue@cqut.edu.cn;



万 洪(1989-), 男, 湖南岳阳人, 重庆理工大学计算机科学与工程学院研究生, 研究方向为无线传感器网络的节能研究与应用, wanhong158@163.com。