

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.01.017

# 一种简单的分布式无线传感器网络时间同步方案

师超<sup>1</sup>, 仇洪冰<sup>1,2</sup>, 陈东华<sup>3</sup>, 李晓艳<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学通信工程学院, 陕西西安 710071; 2. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西桂林 541004; 3. 华侨大学信息科学与工程学院, 福建厦门 361021)

**摘要:** 无线传感器网络缺乏基本架构, 具有分布式、能量受限、存储及计算能力受限的特点. 这些特点决定了在设计无线传感器网络时间同步方案时, 不能有太复杂的计算和路由选择. 为了实现快速时间同步和较低的能量消耗, 提出一种简单的无线传感器网络时间同步方案. 各个节点广播自己当前的时钟信息, 相应的邻居节点接收到这些信息后, 对接收到的信息进行简单的算术平均, 将平均值作为下一个时刻的时钟刻度再进行广播. 此过程反复进行, 最终会使网络所有节点的时钟达到一个相同的平均值, 实现无线传感器网络的分布式同步. 由于网络节点只接收来自邻居节点的广播信息, 故该方案无复杂的路由选择, 并且计算简单, 收敛快速, 能耗较低. 用随机矩阵理论对该同步算法的收敛性进行了理论证明, 对收敛速度和能耗以及同步误差进行了分析. 最后用计算机仿真对本方案进行了仿真实验, 实验结果符合预期分析.

**关键词:** 同步; 时间同步; 无线传感器网络

**中图分类号:** TN929.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2400(2013)01-0093-07

## Simple distributed time synchronization scheme for wireless sensor networks

SHI Chao<sup>1</sup>, QIU Hongbing<sup>1,2</sup>, CHEN Donghua<sup>3</sup>, LI Xiaoyan<sup>1</sup>

(1. School of Telecommunication Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. Info. and Communication College, Guilin Univ. of Electronic Tech., Guilin 541004, China; 3. Info. Science & Eng. College, Huaqiao Univ., Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The wireless sensor network (WSN) is featured by no infrastructure, distribution, resource constraints and limited processing and memory. Accordingly, in designing the time synchronization protocols for wireless sensor networks, intensive computation and complex route selecting are undesirable. For accelerating the time synchronization and lowering energy consumption in the WSN, this paper presents a simple time synchronization scheme for wireless sensor networks. In this scheme, each node broadcasts its clock information and as a result its neighbors will receive the clock information. After averaging the received clock information, the neighbor nodes take the averaged clock information as its next clock tick. This process is carried out repeatedly until all the net nodes meet the same clock tick, which means the whole network achieves distributed synchronization. As each node in the network only receives its neighbor's information, so this scheme does not need specific routing and too complex processing and it has a fast convergence rate and low energy consumption. The proof for the convergence of the proposed synchronization algorithm is carried out using the random matrix theory. The analysis of the convergence rate and the energy consumption and synchronization error are also carried out. The results of theoretical analysis are verified by computer simulation.

**Key Words:** synchronization; time synchronization; wireless sensor networks

收稿日期: 2012-05-14

网络出版时间: 2012-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61071088); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11QZR02); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 2011 年度主任基金资助项目(21104)

作者简介: 师超(1976-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: shichao@mail.xidian.edu.cn.

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20120925.1056.201301.116\\_017.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20120925.1056.201301.116_017.html)

时间同步是所有分布式系统都必须解决的一个重要问题,对于无线传感器这种能量、计算能力及存储能力受限的分布式网络尤其重要.分布式同步是指要求分布式网络的所有节点达到统一的时间尺度<sup>[1]</sup>.许多分布式节点依靠自己内部的晶体振荡器提供时钟信息,因而要使这些节点达到一致的时间尺度,就要使它们的相位和频率保持一致.无线传感器网络的时间同步主要面临以下几个方面的挑战:随机延迟,不完美的晶体振荡器,有限的能源动力,有限的存储和计算能力<sup>[2]</sup>.对于大规模的无线传感器网络而言,还面临同步协议的可扩展性要求<sup>[3-4]</sup>.

早期人们对无线传感器网络时间同步的研究主要集中在如何消除随机延迟对同步精度的影响<sup>[5-7]</sup>方面.近几年的研究集中于如何正确估计接收时钟信息来提高同步精度<sup>[8]</sup>.然而这些研究对无线传感器网络节点有限的储存能力和计算能力等方面考虑甚少.尤其是在多跳无线网络环境中,为了维护全网的时钟同步,这些算法需要每个节点建立复杂的路由信息并通过大量的计算来实现.

在无线传感器的网络时间同步中,节点间的时钟信息交换有广播与点对点两种方式<sup>[9]</sup>.文献[6, 9]中的节点时钟信息交换是点对点方式,文献[5, 7]是广播方式.文献[6]需要建立层次性网络结构,每级子节点通过点对点的信息交换实现与父节点的时间同步,最终实现和根节点的同步.这种同步方法本质上是主从同步方式,对根节点和各级父节点的依赖性较强,不适用于网络拓扑的动态变化.文献[5, 7]的作者在同步方法中引入了参考节点,参考节点广播不含时间信息的信标,广播域中的节点通过交换接收到的信标实现网络的分布式同步.尽管参考节点不影响同步精度,但同步过程的实现依赖于参考节点,所以上述同步方法并不是完全分布式同步方式.对于无线传感器这种分布式网络,在设计算法时要充分考虑其分布式、自组织等特性.文献[9]提出一种成对平均时间同步(ATSP)方案,网络中每个相邻节点对之间进行时钟信息交换,时钟信息更新值为节点对之间的算术平均值,网络拓扑图中各条边的每个节点对按一定次序反复这样交换和更新时钟信息,最终使网络中所有节点的时钟信息收敛于初始时钟信息的平均值.这种同步方式是完全分布式,具有很好的鲁棒性和可扩展性,并且有较高的同步精度.但是这种同步方法要求网络中每条边进行时钟信息交换,导致信息交换量大,能耗过高,并且同步收敛速度较慢.

在平均时间同步方案中,一个节点在向其邻居节点发送时钟信息时,处于其广播域中的很多节点也能够收到此信息.同样,一个节点在接收时钟信息时能够收到许多其他邻居节点的时钟信息.考虑到上述因素,笔者提出一种广播接收(Broadcast and Receive Synchronization, BRS)同步方案.网络中各个节点广播自己当前的时钟信息,相应的邻居节点接收这些信息,对接收到的信息进行简单的算术平均,把此平均值作为自己下一个时刻的时钟刻度.这样的过程反复进行,最终会使网络节点达到一个相同的刻度值,从而实现网络的分布式同步.由于网络节点只接收邻居节点的时钟信息,所以该方案不需要具体的路由选择,并且计算简单,各个节点只需对收到的信息进行算术平均计算,通过广播消息的方式减少需要发射消息的数量,减小了网络能耗.与ASTP算法相比,笔者所提算法收敛速度快,消息交换量小,能耗低,适合无线传感器网络对时间同步的要求.

## 1 系统模型

### 1.1 网络模型

假定在一定区域内随机分布有  $N$  个传感器节点,每个节点  $i$  装配一个晶体振荡器提供时钟.这些节点通过一定的拓扑结构连接成一个分布式无线传感器网络.

用一个简单无向连通图  $G=(V, E)$  来描述分布式无线传感器网络.用图的顶点集合  $V$  表示网络节点,  $V=\{1, 2, \dots, N\}$ .如果一对节点  $(i, j)$  之间能够相互收发信息,则称该节点对为相邻节点.如果  $(i, j) \in E$ ,  $E$  是边集合,则  $(i, j)$  表示一条边.对于无向图,如果  $(i, j) \in E$ , 则  $(j, i) \in E$ .一个节点  $i \in V$  的邻居节点定义为  $S(i) \stackrel{\text{def}}{=} \{j \in V: (j, i) \in E\}$ .节点  $i$  的度  $d_i$  定义为  $d_i \stackrel{\text{def}}{=} |S(i)|$ .图  $G$  度序列向量定义为  $\mathbf{d} \stackrel{\text{def}}{=} [d_1, d_2, \dots, d_n]^T$ .用  $a_{ij}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间的边数.如果节点  $i$  和  $j$  互为邻居,则  $a_{ij}=1$ ; 否则,  $a_{ij}=0$ .称矩阵  $\mathbf{A}=(a_{ij})_{N \times N}$  为图  $G$  的邻接矩阵.假定网络拓扑结构为静态拓扑,其无向图  $G=(V, E)$  为连通图.

### 1.2 时钟模型

分布式无线网络中,每个节点  $i$  都用自己内部装配的晶体振荡器来记录本地时间.晶体振荡器自由运行的输出可表示成

$$S_i(t) = \cos \Phi_i(t) \quad , \quad (1)$$

其中,  $\Phi_i(t) = \Phi_i(0) + 2\pi/T_i + \zeta(t)$ ,  $\Phi_i(t)$  表示瞬时相位;  $T_i$  为自由振荡周期,  $T_i = T_0 + \Delta T_i$ ,  $T_0$  为真实的振荡周期,  $\Delta T_i$  为随机周期偏差.  $\Phi_i(0)$  为初始相位,  $\zeta(t)$  为随机相位噪声.

序列  $t_i(n)$  定义为晶体振荡器的时间刻度, 即离散相位,  $t_i(n)$  满足  $\Phi_i(t_i(n)) = n \cdot 2\pi$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , 这样得到离散非耦合时钟模型为

$$t_i(n) = t_i(0) + nT_i + v(t) \quad (2)$$

其中,  $t_i(0)$  为初始相位,  $T_i$  为自由振荡周期,  $v(t)$  为离散随机噪声.

时钟同步分为频率同步和全同步(即频率和相位都同步)两种情况. 当时间参量足够大时, 如果每个时间节点存在一个共同的振荡周期  $T$ , 满足  $T_i = T_j = T$ ,  $i \neq j, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$ , 则认为这些网络节点是频率同步的. 如果每个网络节点的时钟刻度都是相等的, 即满足  $t_i(n) = t_j(n)$ ,  $i \neq j, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, n = 1, 2, \dots, \infty$ , 则认为这些网络节点是全同步的. 本文中的时钟模型采用离散时钟模型, 并且不考虑相位噪声和路径损耗.

## 2 广播接收同步算法

分布式无线网络的时间同步要求有 3 种方式<sup>[6]</sup>: 第 1 种是最简单的同步方式, 仅需处理事件或消息的先后顺序. 第 2 种是维护本地网内的相对时钟关系, 要求所有节点达到统一的时间尺度. 笔者提出的广播接收算法、经典的 RBS 协议<sup>[5]</sup>以及文献[9]的平均时间同步算法都属于这一类. 第 3 种是要求所有节点的时钟同步于一个参考时钟, TPSN 协议<sup>[6]</sup>即属于这一种.

由 1.2 节的时钟模型可知, 网络节点的晶体振荡器存在频率偏差和相位偏差, 因而决定了无线传感器网络的同步方案有两种: 一是反复校正相位偏差, 二是同时校正相位偏差和频率偏差. 相偏是由于初始值不同以及频偏引起的. 相位同步只能维持短期的时间同步, 要做到较长期时间同步就要求相位和频率同步, 即实现全同步. 笔者既研究相位同步又研究频率同步.

### 2.1 相位同步

在平均时间同步算法中, 一个节点在向其邻居节点发送时钟信息时处于其广播域中的很多节点也能够收到此信息. 同样, 一个节点在接收时钟信息时能够收到许多其他邻居节点的时钟信息. 平均时间同步算法对接收到的这些时钟信息只用其中之一, 其他信息作为干扰项处理. 笔者提出的广播接收算法则要充分利用这些接收到的信息. 假定网络各节点无频率偏差, 即  $T_i = T_j$ ,  $i \neq j, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$ , 这样只要相位实现同步即达到了全同步. 假定时钟信息从发送端到接收端无延迟.

**算法 1** 广播接收相位同步算法.

(1) 对于连通网络中的每个节点,  $j = 1, 2, \dots, N$ , 在  $n$  时刻,  $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$ , 分别广播自己当前的相位信息  $t_j(n)$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ .

(2) 处于节点  $j$  广播域的节点  $i$  接收来自其邻居节点的相位信息  $t_j(n)$ ,  $j = 1, 2, \dots, K$ , 其中  $K$  为接收到的信息总数. 节点  $i$  对接收到的这  $K$  个相位信息进行算术平均, 即  $\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K t_j(n)$ , 把此平均值作为节点  $i$  的下一个时刻  $n+1$  的相位, 即

$$t_i(n+1) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K t_j(n) \quad (3)$$

(3) 节点  $i$  将更新后的相位信息  $t_i(n+1)$  广播给其邻居节点.

(4) 上述过程反复进行直至网络所有节点的时钟刻度达到一个相同的值, 即整个网络达到分布式相位同步.

用向量  $t(n) = [t_1(n), t_2(n), \dots, t_N(n)]^T$  表示  $N$  个节点当前时刻的时钟刻度, 在不考虑传播延迟的情况下, 有

$$t(n+1) = A \cdot t(n) ./ d \quad (4)$$

其中, 符号 ./ 表示矩阵点除.

**引理 1** 设  $S$  是不可约随机矩阵, 则: (1)  $S$  谱半径  $\rho(S) = 1$ . (2) 对于任一正向量  $z$ ,  $\lim_{k \rightarrow \infty} S^k z = cx$  成立. 其中,  $x$  是相应  $\rho(S)$  的特征向量,  $c$  是某个常数.

证明 显然,  $\mathbf{e}=[1, 1, \dots, 1]^T$ , 是随机矩阵  $\mathbf{S}$  的特征向量, 对应的特征值为 1. 又  $\mathbf{S}$  是不可约非负矩阵, 且  $\mathbf{e} > 0$ , 根据 Perron-Frobenius 定理<sup>[10]</sup>, 可得  $\mathbf{S}$  的谱半径  $\rho(\mathbf{S})=1$ . 得证.

假定  $\mathbf{S}$  存在  $m$  个线性无关的特征向量  $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$ , 则  $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(m)}$  的线性组合为

$$\mathbf{z} = \sum_{i=1}^m c_i \mathbf{x}^{(i)} \quad (5)$$

所以, 有 
$$\mathbf{S}^k \mathbf{z} = \sum_{i=1}^m c_i \lambda_i^k \mathbf{x}^{(i)} \quad (6)$$

其中,  $\lambda_i$  是与  $\mathbf{x}^{(i)}$  相对应的特征值. 假定  $\lambda_1 = \rho(\mathbf{S})=1$ , 根据 Perron-Frobenius 定理<sup>[10]</sup>, 知  $|\lambda_i| < \rho(\mathbf{S})=1$ ,  $i=2, 3, \dots, m$ .

对式(6)两边以  $k$  为参数取极限, 得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{S}^k \mathbf{z} = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^m c_i \lambda_i^k \mathbf{x}^{(i)} = c_1 \mathbf{x}^{(1)} + \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=2}^m c_i \lambda_i^k \mathbf{x}^{(i)} = c_1 \mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{c} \mathbf{x} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{c} = c_1$ ,  $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{e}$ . 得证.

**定理 1** 对于连通的无线传感器网络, 在网络节点频率相同的情况下, 无论各节点的初始相位  $t(0)$  如何取值, 经过算法 1 进行反复的时钟交换和更新, 最终各节点的相位  $t(n+1)$  趋向一致, 即实现网络的相位同步.

证明 对邻接矩阵  $\mathbf{A}$  按行归一化处理得到的矩阵为  $\mathbf{P}$ . 由随机矩阵的定义<sup>[10-11]</sup> 知矩阵  $\mathbf{P}$  为随机矩阵. 又因为强连通图  $G$  的充要条件是其邻接矩阵  $\mathbf{A}$  是不可约矩阵<sup>[10]</sup>, 所以  $\mathbf{P}$  为不可约随机矩阵.

由邻接矩阵和度序列向量的定义得式(4)右边为  $\mathbf{A} \times \mathbf{t}(n)$ .  $\mathbf{d} = \mathbf{P} \times \mathbf{t}(n)$ , 这样式(4)简化为

$$\mathbf{t}(n+1) = \mathbf{P} \times \mathbf{t}(n) \quad (8)$$

由式(8)可得 
$$\mathbf{t}(n+1) = \mathbf{P} \times \mathbf{t}(n) = \mathbf{P}^2 \times \mathbf{t}(n-1) = \dots = \mathbf{P}^n \times \mathbf{t}(0) \quad (9)$$

$\mathbf{P}$  为不可约随机矩阵, 由引理 1 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{t}(n+1) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}^n \times \mathbf{t}(0) = \mathbf{c} \mathbf{x} = \mathbf{c} [1, 1, \dots, 1]^T \quad (10)$$

这说明在笔者所提算法中, 无论网络各节点的初值如何取值, 节点的相位最终趋于一致, 即达到相位同步.

定理 1 得证.

## 2.2 频率同步

频率是晶体振荡器的固有属性, 频率的不同步也是晶体振荡器的固有属性. 而相位的同步则不是其固有属性, 是由于频率不同步和网络节点运行时间的不同产生的. 所以频率和相位的感知是不同的. 节点的本地时钟可以分为硬件时钟和软件时钟. 硬件时钟用晶振脉冲作为时间度量的基准; 软件时钟用一个计数器记录振荡器产生的脉冲数量, 每当脉冲数累计到预设的阈值后就输出一个中断信号并重新开始计数. 通过调整计数器的阈值可以构造出不同频率的软件时钟. 在实际处理中, 人们不可能对晶体振荡器固有的频率进行调整, 只能对软件时钟进行处理. 笔者提出的广播接收算法只要求知道晶振的初始频率, 晶振的初始频率信息一般从其硬件说明书获得, 并且在网络的同步开始可以方便地使用软件处理<sup>[12]</sup>. 在同步过程中可以认为网络节点能够感知自己的频率信息<sup>[9]</sup>.

现在考虑存在频率偏差的情况, 即  $T_i \neq T_j$ ,  $i \neq j$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ . 类似 2.1 节中相位同步过程, 不同的是在此过程中各个节点广播和接收的时钟信息是频率信息. 假定时钟信息从发送端到接收端无延迟.

**算法 2** 广播接收频率同步算法.

(1) 对于连通网络中的每个节点,  $j=1, 2, \dots, N$ , 在  $n$  时刻,  $n=0, 1, 2, \dots, \infty$ , 分别广播自己频率信息  $T_j(n)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ .

(2) 处于节点  $j$  的广播域的节点  $i$  接收来自其邻居节点的频率信息  $T_j(n)$ ,  $j=1, 2, \dots, K$ , 其中  $K$  为接收到的信息总数. 节点  $i$  对接收到的这  $K$  个相位信息进行算术平均, 即  $\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K T_j(n)$ , 把此平均值作为节点  $i$  的下一个时刻  $n+1$  的相位, 即

$$T_i(n+1) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K T_j(n) \quad (11)$$

(3) 节点  $i$  将更新后的相位信息  $T_i(n+1)$  广播给其邻居节点.

(4) 上述过程反复进行,直至网络所有节点的时钟频率达到一个相同的值,即整个网络达到分布式频率同步。

用向量  $\mathbf{T}(n) = [T_1(n), T_2(n), \dots, T_N(n)]^T$  表示这  $N$  个节点当前时刻的时钟频率,在不考虑传播延迟的情况下,有

$$\mathbf{T}(n+1) = \mathbf{P} \cdot \mathbf{T}(n) \quad , \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{P}$  表示网络拓扑图的归一化邻接矩阵。

**定理 2** 对于连通的无线传感器网络,无论网络节点的初始频率  $\mathbf{T}(0)$  如何取值,经过算法 2 进行反复的时钟交换和更新,最终各节点的频率  $\mathbf{T}(n+1)$  趋向一致,即实现了网络的频率同步。

证明 同定理 1。

### 3 与平均时间同步算法进行比较

平均时间同步算法是由 Wu 等<sup>[9]</sup>最近提出的一种无线传感器网络时间同步协议。该协议通过节点对之间的信息交换,使网络各节点同步于其初始值的平均值。具体算法如下:

- (1) 网络拓扑图中每条边的节点对  $(i, j)$  分别交换本地时钟信息  $t_i(n)$  和  $t_j(n)$ ;
- (2) 节点的下一个时钟刻度设置为节点对时钟刻度的平均值,即

$$t_i(n+1) = t_j(n+1) = \frac{1}{2} (t_i(n) + t_j(n)) \quad ; \quad (13)$$

- (3) 上述过程按一定的边顺序反复进行。

在文献[9]中把平均时间同步协议同 TPSN 协议进行了比较,认为平均时间同步协议的同步精度要高于 TPSN 协议,但这是以大量的消息交换为代价的。下面对笔者提出的广播接收同步算法和平均时间同步算法在收敛速度、同步误差及能耗方面进行定性分析或定量比较。

#### 3.1 同步收敛速度

笔者提出的广播接收同步算法充分利用无线信道的广播特性来提高同步的收敛速度,降低网络能耗。节点  $i$  在向节点  $j$  发送其时钟信息时,节点  $i$  的其他邻居节点同样能收到此信息。同理,节点  $j$  在向节点  $i$  发送其时钟信息时,节点  $j$  的其他邻居节点也能收到此信息,将各节点收到的信息进行算术平均,作为它们下一时刻的时钟刻度。此算法只对收到的信息进行处理,所以算法简单。笔者所提的广播接收算法中节点在调整自己的时钟信息时参考了与其相邻所有节点的时钟信息,而平均时间同步算法只利用了其相邻节点其中一个的时钟信息,所以笔者提出的广播接收算法达到同步的收敛时间要小于平均时间同步算法的收敛时间。

#### 3.2 随机延迟和同步误差

在 2.1 和 2.2 节中忽略了时钟信息的随机延迟,但信息从发送端到接收端的消息延迟总是客观存在的。文献[6]将消息延迟细分为发射、接入、传输、传播、接受和接收 6 个分量。这 6 个分量体现在发端和接端的不同网络层次上。用随机变量  $\tilde{q}_{ij}$  表示节点  $j$  的消息到节点  $i$  的随机延迟,则算法 1 中第 2 步,节点  $i$  的下一个时刻  $n+1$  的相位实际更新为

$$t_i(n+1) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (t_j(n) + \tilde{q}_{ij}) \quad . \quad (14)$$

在平均时间同步算法中,节点  $i$  有延迟的消息,更新为

$$t_i(n+1) = \frac{1}{2} (t_i(n) + t_j(n) + \tilde{q}_{ij}) \quad . \quad (15)$$

不确定的时间消息延迟是同步误差的主要来源<sup>[9]</sup>,提高同步精度的重要方法就是设法减少消息延迟。例如,通过 MAC 层或物理层时间戳技术来消除一些随机延迟因素的影响以提高同步精度<sup>[1]</sup>。如同文献[9],笔者用消息随机延迟的方差来表示同步误差。

式(15)中的  $\tilde{q}_{ij}$  是式(14)中  $K$  个  $\tilde{q}_{ij}$  中的某一个。假定这  $K$  个随机变量  $\tilde{q}_{ij}$  的方差分别为  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_K$ ,其最小值为  $\sigma_{\min}$ ,最大值为  $\sigma_{\max}$ 。

用  $D(\Delta a), D(\Delta b)$  分别表示平均时间同步方案和广播接收同步方案的同步误差,由式(14)和(15)得

$$D(\Delta a) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \sigma_j, \quad D(\Delta b) = \frac{1}{2} \sigma_j, \quad \text{则 } \sigma_{\min} \leq D(\Delta a) \leq \sigma_{\max}, \quad \frac{1}{2} \sigma_{\min} \leq D(\Delta b) \leq \frac{1}{2} \sigma_{\max}.$$

所以广播接收的同步误差比平均时间同步的同步误差要高,但误差上界为平均时间同步误差的两倍.

### 3.3 能量消耗

无线传感器网络是能量受限的分布式网络,在设计其时间同步算法时必须考虑能耗问题,无线传感器网络的能效问题贯穿于无线传感器网络通信协议开发的始终<sup>[13]</sup>.在无线通信中,发射消息总是比接收消息消耗更多的能量<sup>[14]</sup>.笔者提出的广播接收同步算法通过广播方式,一方面减小了消息发送数量,另一方面缩短了同步时间,从而节约了能量,降低了能耗.

在平均时间同步算法中,一个边的两对节点完成消息交换需要发射两次消息.假定由  $N$  节点组成的连通网络图中,每个节点的平均度为  $d_{\text{ave}}$ ,则平均时间同步算法完成一遍循环要发射消息的数量为  $2Nd_{\text{ave}}$ ,而广播接收算法完成一遍循环要发射消息的数量为  $N$ .例如在  $N$  个节点的全连接网络中,每个节点都和其他  $N-1$  个节点相连接(即每个节点的度为  $N-1$ ),用平均时间同步算法完成一遍循环要发射消息的数量为  $2N(N-1)$ ,而用广播接收算法完成一遍循环要发射消息的数量为  $N$ .随着网络规模的增大,广播接收算法要发送消息的数量呈线性增长,而平均时间同步算法要发送消息的数量呈指数增长.

可见广播接收算法通过广播方式减少了时钟信息的发送数量,降低了能耗.另外,从 3.1 节的定性分析知道,广播接收算法通过广播方式提高了收敛速度,减少了总体循环次数,进一步降低了能耗.当然,能耗的降低和收敛速度的提高是以牺牲同步精度为代价的,实际中可以通过 MAC 层或物理层时间戳技术来消除一些随机延迟因素的影响,提高同步精度.

## 4 仿真和结论

下面对笔者提出的广播接收同步算法的收敛速度和误差性能进行计算机仿真验证和分析讨论.假定在一定区域内随机分布有  $N$  个传感器节点,这些节点组成一个连通的分布式无线网络.由于频率同步原理和相位同步相同,这里只对相位同步的相关性能进行仿真验证.

### 4.1 收敛速度

仿真中取 5 个节点,组成如图 1 所示的拓扑结构图,其初始相位在区间  $(0,1)$  内均匀分布,在研究收敛速度时忽略消息延迟.每个节点通过算法 1 不断地更新自己的相位值.图 2 为图 1 网络中各个节点的相位更新变化图.在同步的开始时刻 ( $n=0$ ),各节点的相位值差别很大.随着同步的进行,可以看到在  $n=18$  时刻各个节点相位达到一个相同值,并且随着时间的推移 ( $n \geq 19$ ),网络中各个节点的相位不再变化,即网络所有节点实现了相位同步.

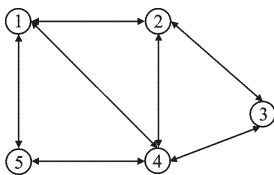


图 1 分布式无线网络拓扑图

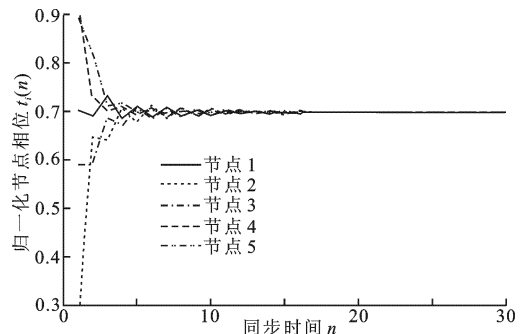


图 2 网络节点的相位同步仿真

在图 1 的拓扑结构中,取节点 3 和节点 4 分别按平均时间同步算法和广播接收同步算法进行相位更新,通过观察它们的相位变换来比较这两种算法的收敛速度,仿真结果如图 3 所示.可以看到,平均时间同步算法在  $n=54$  时刻各个节点相位才能达到一个相同值,而笔者提出的广播接收算法在  $n=20$  时刻各个节点相位就可以达到一个相同值.这说明笔者提出的算法的收敛速度要快于平均时间同步算法.在网络图中,节点的度值越大,这种效果越明显.在图 1 所示的网络图中,节点 3 的度为 2,节点 4 的度为 4,所以节点 4 的收敛

速度要明显优于节点 3. 节点的度值越大,表明接收到的信息越多,因而收敛速度越快,这个结果符合预期.

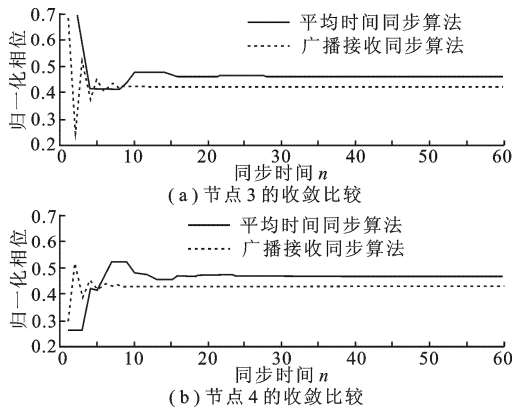


图 3 广播接收算法和平均时间同步算法收敛比较

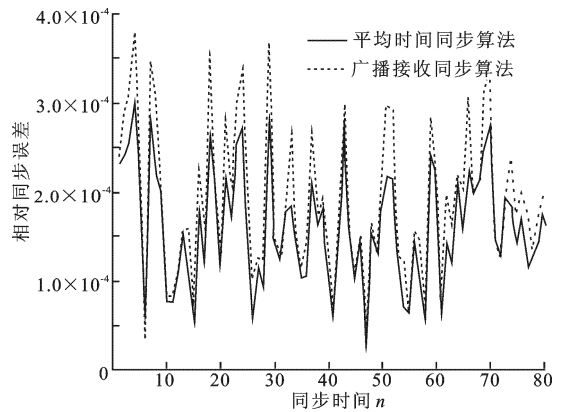


图 4 广播接收算法和平均时间同步算法的同步误差仿真比较

另外,从图 3 可以看到,笔者提出的广播接收算法与平均时间同步算法最终的收敛值并不一致,这是由于两种算法机制不同造成的.笔者提出的算法通过计算接收到邻居节点的算术平均使网络中各节点达到某一个均值,这个均值与网络拓扑和初始值的分布都有关系,但不一定是各节点的初始平均值,而平均时间同步算法的目的就是要各节点同步于其初始值的平均值.

#### 4.2 误差比较

对广播接收同步算法和平均时间同步算法的同步误差进行仿真实验.实验环境为图 1 所示的由 5 节点组成一个连通的分布式无线传感器网络,其初始相位在区间(0,1)内均匀分布.每个节点接收来自邻居节点的广播时钟信息,通过算法 1 不断地更新自己的相位值,每个节点的每次接收时钟信息中都会有消息延迟产生.在仿真试验中,假定随机延迟在(0.001,0.01)区间均匀分布.如同文献[9],用能量函数(或李亚普洛夫函数)  $F(n) = \sum_{i=1}^N [\tilde{t}_i(n) - t(\infty)]^2$  来表示同步误差,其中  $\tilde{t}_i(n)$  为节点  $i$  在  $n$  时刻的实际相位,  $t(\infty)$  为理想状况下,网络各节点的相位收敛值.图 4 为广播接收同步算法和平均时间同步算法的同步误差仿真比较图.由图 4 可以看到,广播接收同步误差比平均时间同步的同步误差略大,但不会超过平均时间同步的同步误差的两倍,此仿真实验结果和 3.2 节的理论分析基本一致.

综上所述,尽管广播接收同步算法的误差比平均时间同步算法误差略高,但广播接收同步算法能带来同步收敛速度快、网络能耗低的好处.在实际应用中可以通过 MAC 层或物理层时间戳技术来消除一些随机延迟因素的影响以提高同步精度.

## 5 结束语

在设计无线传感器网络的时间同步协议时,要考虑许多制约因素:低成本的时钟晶振、无线的网络环境、能量及计算存储能力受限、高密度的网络节点、网络节点随时可能脱离网络等.这些因素决定了时间同步协议应该是分布式的,且不能有复杂的路由选择和复杂的计算.笔者提出一种简单的分布式无线传感器网络时间同步方案,网络节点只进行邻居之间的时钟信息交互.充分利用无线网络环境的广播特性,一个节点在发送时钟信息时,其邻居节点都会接收到此时钟信息.一个接收节点可以收到许多相邻节点发送来的时钟信息,将收到的当前时刻的这些时钟信息进行算术平均,并将结果作为自己下一个时刻的时钟刻度,然后再将此时钟刻度广播给其相邻节点.如此反复进行,最终使网络所有节点的时钟趋于一致,即实现了网络的分布式同步.这种方法通过一次接收许多邻居节点的时钟信息提高同步收敛速度,通过广播方式发射时钟信息减少了消息发送数量,降低了能耗.今后的研究工作中会考虑网络拓扑在动态变化时的时间同步该如何设计以及如何提高同步收敛速度使网络能耗达到最优.

(下转第 147 页)