

无线传感器网络 IRBS 时间同步优化算法

凌海波, 陈 好, 周先存

(皖西学院, 安徽 六安 237012)

摘 要:针对无线传感器网络参考广播时间同步(RBS)算法网络同步精度低和网络能耗开销较大的问题,提出了一种改进的参考广播同步算法 IRBS(Improved References Broadcast Ring Synchronization)。该算法是在 RBS 算法的基础上,采用最大后验法估算不相邻接收节点之间相位偏差,然后采用最小二乘法拟合对时间偏差和频率偏差进行补偿。仿真结果显示,改进的算法同步精度优于 RBS 算法,且网络开销和能耗也显著减少。

关键词:改进参考广播同步;同步精度;网络开销

中图分类号:TP391

文献标志码:A

引 言

无线传感器网络是由部署在监测区域内大量廉价微型的传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳组织的网络系统。时间同步作为无线传感器网络的核心支持技术之一,在多传感器数据融合、测距定位、协同休眠等环节都起着关键作用^[1]。

时间同步机制在传感器网络研究领域引起了广泛关注,国内外学者都纷纷进行研究。从现有的同步算法来看,主要包括 3 种基本同步机制:(1) RBS(References Broadcast Ring Synchronization)算法机制,该算法是基于接收端-接收端的同步算法,网络中的两个节点参考广播发送时间,分别采用各自的本地时钟记录参考到达时间,通过交换记录时间确定时间偏移,实现同步该算法同步精度较高;(2) Tiny-sync 算法机制,是简单的轻量同步机制,其特点是假设节点时钟漂移成线性变化,通过交换少量消息能够提供确定误差上界的频偏和相偏估计,但只能实现相位偏差瞬间同步;(3) TPSN 算法机

制,基于发射者-接收者的节点对方式,每个节点与上一个节点进行同步,从而实现所有节点与根节点时间同步,该算法鲁棒性差、能耗开销比 RBS 算法大,不适应拓扑结构的变化^[2]。

在对 RBS 算法研究中,针对 RBS 算法网络开销较大和难以实现全网的时间同步问题,提出一种改进的参考广播同步算法 IRBS(Improved References Broadcast Ring Synchronization),该算法基于多个参考广播消息条件下,通过对两个不相邻的接收节点的相位偏差求均值,利用最大后验法估算相位偏差^[3],根据估算的相位偏差进行纠正,并采用最小二乘法拟合时钟偏移^[4],实现同步过程。

1 RBS 算法分析

RBS 时间同步机制通过广播同步提示分组实现接收节点的相对时间同步^[5]。两个接收节点接收到发送节点广播的一个信标分组,每个接收节点根据自己本地的时间记录接收到信标的时刻,由于两个接收节点都使

收稿日期:2015-09-29

基金项目:国家自然科学基金(61303209);皖西学院校级项目(WXZR1503;WXZR1524)

作者简介:凌海波(1989-),男,安徽庐江人,助教,硕士,主要从事无线传感器网络、RFID 方面的研究,(E-mail)lhb1208lhb@163.com;

周先存(1974-),女,教授,主要从事无线传感器网络安全、压缩感知方面的研究,(E-mail)zhouxcun@126.com

用自己的本地时间,所以存在接收时间差值,即为该两个接收节点间的时间差。RBS 算法根据这个时间差,其中一个接收节点调整自己本地时间,从而实现两个接收节点的时间同步。

信号在空间中传播时间延迟计算公式^[6]为:

$$D_e = \frac{L}{V_e}$$

其中, D_e 为信号传播的时延, L 为信号传输的信道长度, V_e 为电磁波的传播的速度。由于电磁波在自由空间的传播速度近似于光速,因此对于传播时间,RBS 算法只关心各个接收节点之间消息传播时间的差值,对于传播时间延迟可以忽略。RBS 算法是为了消除参考广播信号从发送节点传送到接收节点之间的关键路径上发生的时间延迟以及访问时间延迟,如图 1 所示。

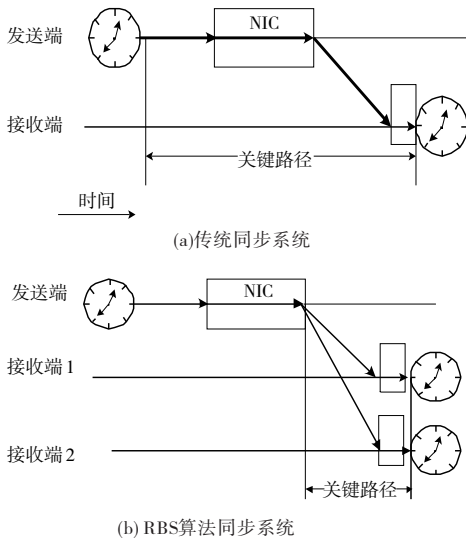


图 1 传统同步系统和 RSB 算法传输延迟分析

Elson 等人通过实验证明了在接收到参考消息后,接收端任意两个节点之间的本地时间差的相位偏差符合正态分布。在 RBS 算法过程中,对于单个广播域内的 n 个节点和 m 个广播消息,RBS 的复杂度为 $O(mn)$ 。对于多跳网络的 RBS 的机制复杂度较高,也增加了网络开销,同时网络中的误差也随跳数增加而增加^[2]。

2 IRBS 算法

针对 RBS 算法存在网络开销大和同步精度低等问题,根据 RBS 算法相位偏差符合正太分布,提出改进的同步算法 IRBS(Improved References Broadcast Ring Synchronization)。RBS 算法存在由消息传送延迟带来的非确定性相位偏差和由节点内部晶振带来确定性频率偏

移。IRBS 算法对此进行改进,主要分两步实现网络中所有节点的时间同步,首先是采用最大后验法对相位偏差进行估计,通过该估计值调整所有节点的本地时间;然后估计频率偏移,实现时钟漂移估计^[7]。

2.1 IRBS 相位偏差估计

在 RBS 算法中,当发送节点发送参考消息时,RBS 算法要求每个接收节点都与除自身之外的其他所有接收节点交换此消息的本地时间,计算出两个节点的本地时间差。如图 2(a) 显示的是 RBS 算法下的相位偏差估计示意图,图中给出了 6 个节点,其中一个为发送节点,其他为接收节点。随着节点数量的增加,RBS 算法计算复杂度将会急剧增加,同时增加了网络开销。图 2(b) 显示的是 IRBS 算法下对相位偏差估计示意图,在多个参考广播消息条件下,每个接收节点只与不相邻的接收节点进行参考消息交换,计算出两个不相邻的接收节点的相位偏差求均值,由此获得网络中任意两个不相邻接收节点之间的相位偏差。再利用贝叶斯最大后验估计出所有相位偏差的估计值,最后所有节点根据该估计值调制本地时间,实现网络接收节点时间同步。

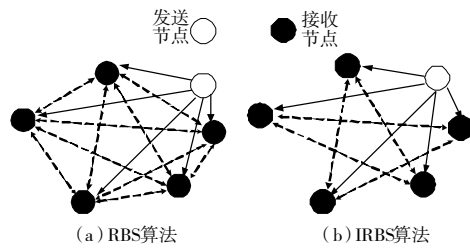


图 2 RBS 和 IRBS 算法相位偏差估计示意图

RBS 算法时间估计主要包括接收时间误差和时钟误差,对于任意的节点, $i \in n, j \in n, n$ 为第 n 号节点, m 为第 m 个消息。接收时间误差和时钟误差分别为:

$$\Delta T = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (T_{j,k} - T_{i,k}) \quad (1)$$

$$d = (T_{j,k} - T_{i,k}) - (a + bT_{i,k}) \quad (2)$$

IRBS 算法中,若网络中存在 n 个接收节点,假设 i, j 分别表示两个不相邻的节点序号,即 $i \in n, j \in n$,其中 $i - j \neq \pm 1$;若 $T_{s,k}$ 为接收节点 s 接收到参考消息包 k 时的本地时间,其中 $s \in n$,若发送节点发送 m 个参考广播消息,则两个不相邻节点交换 m 个参考消息的相位偏差 φ 为:

$$\varphi = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (T_{i,k} - T_{j,k}) \quad (3)$$

根据 Elson 等人通过实验结论得出的每个接收节点

间的相位偏差 φ 符合 $\mu = 0, \sigma = 11.1$ 的正态分布,因此采用最大后验估计法对相位偏差进行估计^[8-11]。

用 φ 为相位偏差测量值,根据 Elson 等人的实验结论,假设相位服从均值为 $\mu = 0$, 方差为 σ_0 的正太分布。从中抽取一个大小为 n 的随机样本,记 $\varphi_i = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$, 则 φ_i 在统计学条件概率密度为

$$p(\varphi_i | \varphi) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \right)^n \exp \left[- \sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_i - \varphi)^2}{2\sigma_0^2} \right] \quad (4)$$

相位偏差概率密度为

$$p(\varphi) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right) \exp \left[- \frac{(\varphi - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (5)$$

由统计学可知

$$p(\varphi | \varphi_i) = \frac{p(\varphi_i | \varphi)p(\varphi)}{p(\varphi_i)} \quad (6)$$

$$p(\varphi_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\varphi_i, \varphi) d\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\varphi_i | \varphi)p(\varphi) d\varphi \quad (7)$$

根据贝叶斯后验估计法, φ 的后验分布为

$$\pi(\varphi | \varphi_i) = \frac{p(\varphi_i | \varphi)p(\varphi)}{p(\varphi_i)} \quad (8)$$

对式(8)取对数

$$\ln \pi(\varphi | \varphi_i) = \ln p(\varphi_i | \varphi) + \ln p(\varphi) - \ln p(\varphi_i) \quad (9)$$

将式(4)~式(6)带入式(9)并对 φ 求偏导得

$$\frac{\partial \ln \left\{ \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \right)^n \exp \left[- \sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_i - \varphi)^2}{2\sigma_0^2} \right] \right\}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \ln \left\{ \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right) \exp \left[- \frac{(\varphi - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \right\}}{\partial \varphi} = 0 \quad (10)$$

进一步可简化得

$$\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i - \varphi}{\sigma_0^2} + \frac{\mu - \varphi}{\sigma^2} = 0 \quad (11)$$

求得相位偏差估计值为

$$\bar{\varphi} = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{\sigma_0^2} \frac{\sigma^2 \sigma_0^2}{n\sigma^2 + \sigma_0^2} \quad (12)$$

所得 $\bar{\varphi}$ 为相位偏移估计量。将求得的相位偏移带入式(3)中,将最大相位偏差值为标准来决定同步的次数,各节点根据 $\bar{\varphi}$ 的值调节节点的本地时间,实现网络内所有接收节点时间同步。

2.2 时钟漂移估计

节点 $i \in n, j \in n$ 之间的本地时钟关系为:

$$t_{im} = a_{ij} t_{jm} + b_{ij} + \varepsilon \quad (13)$$

其中, a_{ij} 是节点 i 相对于节点 j 之间的频率偏差, b_{ij} 为两个节点的本地时钟初始相位偏差, ε 为节点 i 与节点 j 接收到同一消息时两个节点的本地时间偏差。采用最小二乘法对频率和时钟进行拟合,得出

$$\bar{a}_{ij} = \frac{\sum (t_{jm} - \bar{t}_j)(t_{im} - \bar{t}_i)}{\sum (t_{jm} - \bar{t}_j)^2} \quad (14)$$

$$\bar{b}_{ij} = \bar{t}_i - \bar{a}_{ij} \bar{t}_j \quad (15)$$

节点 i 根据式(13)调制本地时间,达到与节点 j 时间同步。

3 仿真测试与分析

采用 Matlab,在同步精度、能量消耗以及同步开销等方面验证 IRBS 算法的有效性。在一个类似于算法的网络仿真 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 的环境区域内随机布置多个无线传感网络节点进行同步算法仿真实验,其中有多个发送节点,其他的均为接收节点。节点的通信半径为 50 m ,数据包传输速率为 50 Kb/s ,延时和误差初始化为 0 。相关仿真条件如下:节点间的最大通信理论值为 80 m 。

为了验证 RBS 和 IRBS 两种算法的同步精度,通过仿真平台分别在 50 个节点和 100 个节点情况下,利用 IRBS 和 RBS 算法补偿节点间的同步时间。图 3 为网络存在 50 个节点和 100 个节点的情况下同步误差随时间的变化规律。由图 3 可知,基于改进的 IRBS 算法的同步误差明显低于 RBS 算法的同步误差。随着节点数量增加,IRBS 算法的同步误差也较 RBS 算法有显著改善,即 IRBS 的同步精度优于 RBS 算法。

对 RBS、IRBS 算法在广播产生消息包数量及网络同步开销方面进行仿真实验,如图 4 所示。当网络节点数量较少时,两种算法同步开销相差不大,但随着节点数量的不断增加,IRBS 算法增加趋势非常平缓,且明显低于 RBS 算法,即改进的 IRBS 算法下的同步开销比 RBS 同步开销减少了很多。

图 5 给出了两种算法在不同节点数量下的能量消耗对比图。由图可知,随着节点个数的增加,两种算法下的能耗都在增加,IRBS 相比于 RBS 算法能量消耗有了很大的改善。由此可知当两种算法的同步精度要求一致的情况下,IRBS 算法相比 RBS 算法能够更好的延长节点的使用寿命。

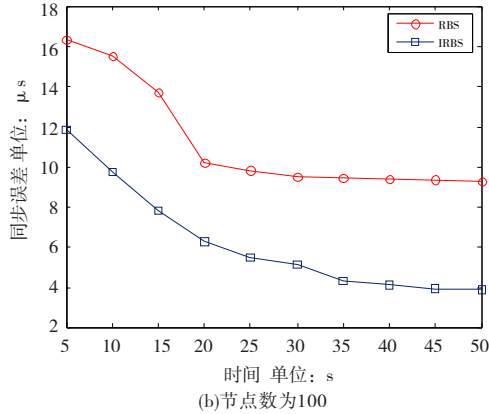
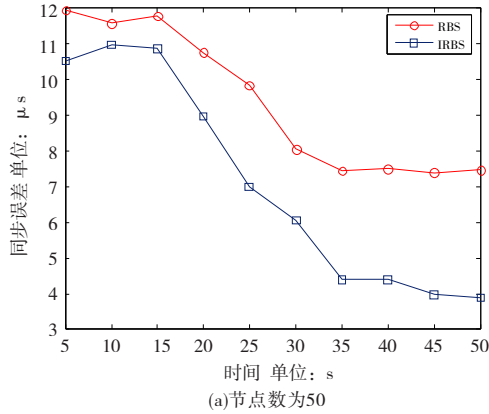


图3 同步误差对比分析

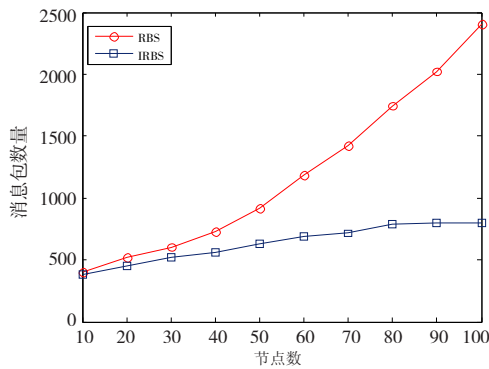


图4 同步开销对比分析

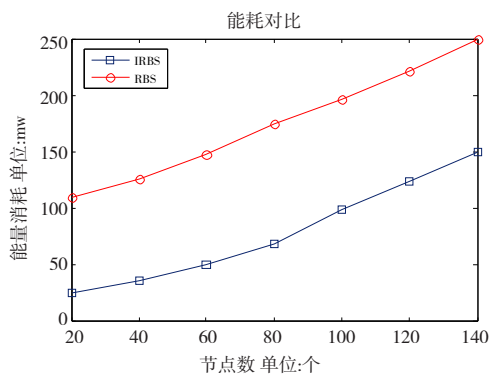


图5 算法能耗对比分析图

4 结束语

本文在分析传统 RBS 时间同步算法的基础上,提出了一种改进的 IRBS 时间同步算法。该算法对不相邻的两个接收节点在不同的广播消息下求平均相位偏差,采用最大后验法估计节点相位偏差值,各接收节点根据相位偏差估计值对自身时间进行调节,实现对相位偏差的纠正。最小二乘法进行估计拟合时钟偏移,完成整个同步过程。分别从同步精度、同步开销、能量消耗三个方面对 RBS 和 IRBS 进行试验分析,通过仿真表明,改进的 IRBS 算法同步精度和能耗开销都优于 RBS 算法。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Yang J,Rabaey J.Light weight Time Synchronization for Sensor Networks[C]//Proceeding of the Second ACM Workshop on WSNA, San Diego, California, September 19-22,2003:11-19.
- [3] Gao R,Ye F,Wang T.Smartphone indoor location by Photo-taking of the environment[C]//Proceedings of the IEEE ICC, Sydney, Australia, June 10-14, 2014: 2599-2604.
- [4] 孙德云,沈杰,刘海涛.基于扩散机制的无线传感器网络时间同步协议[J].通信学报,2008,29(11):40-49.
- [5] 徐焕良,刘佼佼,王浩云,等.WSN/WSAN 中的时间同步算法研究[J].计算机工程与应用,2012,48(31):56-60.
- [6] Park S,Crespi N,Oh S,et al.Overlay Multicast Protocol with Proxy Districts for Dynamic Wireless Sensor Networks[C]//Proceeding of 2013 12th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA),Cambridge,MA,August 22-24,2013:187-194.
- [7] 王义君,钱志鸿,王桂琴,等.无线传感器网络能量有效时间同步算法研究[J].电子与信息学报,2012,34(9):2174-2179.
- [8] Sichitiu M L,Veerarittiphan C.Simple,accurate time syn-

- chronization for wireless sensor networks[C]// Proceeding of the IEEE Wireless Communications and Networking(WCNC 2003),New Orleans,LA, March 20,2003: 1266-1273.
- [9] Zhou Q Y,Koltun V.Simultaneous localization and calibration :Self-Calibration of Consumer Depth Cameras [C]//Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR),Columbus, OH,June 23-28,2014:454-460.
- [10] 张瑞华,贾智平,程合友.基于非均匀分簇和最小能耗的无线传感网络路由算法[J].上海交通大学学报,2012,46(11):1774-1778.
- [11] Zheng Y,Suginoyo S,Sato I,et al.A General and simple method for Camera Pose and Focal Length Determination[C]//Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),Columbus,OH,June 23-28,2014:430-437.

IRBS Time Synchronous Optimization Algorithm of Wireless Sensor Networks

LING Haibo, CHEN Yu, ZHOU Xiancun

(West Anhui University, Lu'an 237012, China)

Abstract: Aiming at wireless sensor network References Broadcast Time Synchronization (RBS) algorithm having a problem that network synchronous low accuracy and network large overhead of energy consumption, improved algorithm IRBS is proposed. The algorithm was based on RBS algorithm, and estimated phase offset of nonadjacent receiving nodes by maximum posteriori estimation, then used least-squares fit to compensate time deviation and frequency deviation. Simulation results show that, improved algorithm synchronization accuracy is better than RBS algorithm, the network overhead and energy consumption are also significantly reduced.

Key words: IRBS; synchronization accuracy; network overhead