

Study on Optimal Linear Fit Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Network*

WU Baoming^{1*}, LI Shengfei²

(1. Daping Hospital & Research Institute of Surgery, the Third Military Medical University, State Key Laboratory of Trauma, Burns and Combined Injury, Chongqing 400042, China;
2. Communication and Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400040, China)

Abstract: According to the requirements of high synchronization precision among nodes and low communication costs, a new synchronization algorithm based on optimal linear fit has been studied. After analysis of FTSP algorithm, node classifying strategy was adopted to reduce the transition amounts of synchronization packet data, and parameter estimating theory of probability and statistics was then introduced to improve linear regression algorithm, reduce the influence of abnormal data to synchronization precision and extend node synchronization time. Experiments showed that this new algorithm can effectively reduce the synchronization costs and realize high synchronization precision with μs level errors.

Key words: wireless sensor network; time synchronization; parameter estimation; FTSP

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.12.024

基于最优线性拟合的 WSN 时间同步算法研究*

吴宝明^{1*}, 李声飞²

(1. 第三军医大学大坪医院野战外科研究所, 创伤烧伤与复合伤国家重点实验室, 重庆 400042;
2. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400040)

摘要: 针对传感器网络应用对节点同步精度要求高、通信开销小等需求, 研究一种基于最优线性拟合的时间同步算法。在分析 FTSP 算法的基础上, 通过节点分级策略, 减少同步分组数据传输量, 并引入概率统计学中参数估计理论改进线性回归算法, 减小异常数据点对同步精度的影响, 延长节点同步时间。实验结果表明: 该算法能有效减少同步通信开销, 实现高精度的时间同步, 同步误差在 μs 级。

关键词: 无线传感器网络; 时间同步; 参数估计; FTSP 泛洪时间同步协议

中图分类号: TP393.03

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)12-1787-05

时间同步是无线传感器网络的重要支撑技术, 很多传感器网络的应用和算法都需要统一的时钟基准, 如数据融合、节点定位、休眠周期的同步、TDMA 定时等^[1]。所以研究一种高效、精准的时间同步算法具有重要的科研意义和实用价值。目前常用的无线传感器网络时间同步算法有: RBS 算法^[2]、TPSN 算法^[3]、DMTS 算法^[4]和 FTSP 算法^[5-6]等。其中 RBS 算法是基于单向广播机制, 它排除了发送端对同步精度的影响, 达到了较高的同步精度, 但其计算量和同步开销较大, 能耗较高; TPSN 算法基于双向成对同步机制, 同步效果较好 (RBS 同步精度的两倍^[3]), 但能耗也较大, 算法鲁棒性较低; 而 FTSP 算

法结合单向广播机制和双向成对机制, 采用 MAC 层打时间戳和线性回归补偿时间漂移和偏移的方式, 达到了较高的同步精度, 更适用于资源受限的传感器网络时间同步。但算法收敛时间较长, 易受异常数据点影响^[7], 且对密度大的多跳网络, 泛洪广播发送数据包容易引起数据碰撞。

通过对以上时间同步算法比较和总结, 笔者选取 FTSP 算法实现时间同步。在分析 FTSP 算法基础上, 针对其缺点在同步开销和异常数据处理方面予以改进, 提出了基于最优线性拟合的时间同步算法。该算法采用节点分级策略而减少同步所需信息包开销, 并通过分析影响时间同步的因素, 提出了基

项目来源: 国家科技支撑计划项目资助(2009BAI87B05); 创伤烧伤与复合伤国家重点实验室自主研究课题资助(SKLZZ200903)

收稿日期: 2010-05-16

修改日期: 2010-18-13

于参数估计的回归算法,消除异常数据点对回归曲线的影响,提高了同步精度。

1 FTSP 同步算法介绍

FTSP 算法由 Vanderbilt 大学的 Branislav Kusy 等^[5-6]提出的,是基于发送者-接收者的同步算法。它结合单向广播和双向同步算法的优点,采用泛洪层次结构广播同步报文,减少了同步信息开销,对网络拓扑结构变化和根节点失效有较好的健壮性。通过 MAC 层打时间戳方法,缩短了消息传输延迟的不确定性,使同步精度达到 μs 级。

FTSP 算法采用一元线性回归来估计节点时间漂移率和偏移,并对其进行补偿^[7]。节点收到同步消息数据包 SYNC 后,构造本地时间-全局时间数据对,经过 N 次信息交换,构造回归表 $((t_1, T_1), (t_2, T_2), \dots, (t_n, T_n))$ 。将回归表中数据代入公式(2)和(3)估算时间漂移率 \hat{a} 和时间偏移 \hat{b} 。

$$t_0 = aT_0 + b + \varepsilon \quad (1)$$

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (2)$$

$$b = \bar{t} - \hat{a}\bar{T} \quad (3)$$

式(1)为本地时间与全局时间关系。式(2)、式(3)中, T_i, t_i 分别为第 i 次同步周期的全局时间和本地时间, \bar{T}, \bar{t} 为全局时间和本地时间的期望;通过计算时间漂移率和偏移后,在每秒的末尾对节点本地时间进行补偿。而考虑到一定时间范围内节点晶振频率是稳定的^[8],则本地时间与全局时间成线性关系。通过构造最佳拟合曲线 L ,在误差允许的范围内,可以通过 L 直接计算某一时刻本地时间与全局时间偏移,从而减少了同步消息的发送次数,降低了节点能量消耗^[9]。

2 基于最优线性拟合的时间同步算法

FTSP 算法采用 MAC 层时间戳和线性回归补偿时间偏移和漂移,降低传输延时的不确定性,具有较高的同步精度。但它也存在一些问题:(1)对于密度大的多跳网络,采用泛洪广播发送同步包,容易引起网内数据碰撞,导致同步包中只有一小部分会被利用,大部分同步包被当做冗余数据包而被抛弃,这样非常消耗能量和网络资源;(2)线性回归算法易受到异常数据点影响,拟合出的回归曲线不仅不会提高同步精度,反而引入更大的误差,造成不必要的计算。

针对以上问题,笔者对传统的 FTSP 算法进行

改进,设计一种新的消息包传输机制,通过将节点分为主动节点和被动节点方式,减少同步所需的通信开销;对线性回归算法进行改进,引入概率统计论中的参数估计理论,对进入同步表中的数据对进行可信度判断,消除误差较大的数据对拟合曲线的影响,达到了精确的时间同步,同时也延长了节点同步时间,进一步节省了节点的能耗。具体实现过程如下。

2.1 分级消息包传输机制

针对上述 FTSP 算法存在的问题(1),笔者设计一个低开销的数据包传输机制:将消息包传输过程分为节点分级、统计节点度和主/被动节点选择三个阶段

(1) 节点分级

假设网络中节点通信距离有限,通过广播消息包的形式实现分级。根节点选定后,设定它的级别为 0 级。根节点广播信息包(包含节点级别和当前时间戳),周围节点接收到信息包后,利用同步算法实现时间同步,并提取信息包中节点级别加 1 做为本节点的级别,这样以此类推,依此实现网络节点分级。

(2) 统计节点度

分级完成后,开始统计各节点的下级节点度,即节点广播范围内下级节点的个数。在一个同步周期内,若 i 级节点收到一个 $i+1$ 级节点发送的同步包,则它的下级节点度加一,依此类推统计每一级节点的下级节点度。

(3) 主动/被动节点选择

完成以上两步后,进行主/被动节点选择。方法如下:若节点的下级节点度为 0,将其设置为被动节点;若节点达到同步且下级节点度不为 0 时,通过比较同级节点中下级节点度最大的节点,做为该级的主动节点,其它节点做为被动节点。

这样经过几个同步周期,网内各级中只有下级节点度最大的节点为主动节点,发送同步信息包,其它节点都为被动节点,这样大大的减少了时间同步开销,节省了节点能耗。

2.2 参数估计的线性回归算法

针对上述 FTSP 算法存在的问题(2),FTSP 算法中未采取有效措施来消除这种影响^[6]。笔者采用概率统计论中参数估计理论^[10],设置置信区间来判断进入回归表中数据对的合法性。选取同步包中的全局时间 T 和回归表已有的数据对,来预测本地时间 t 的范围,具体方法如下:

设 t_0 是节点收到全局时间 T_0 时对应的本地时间,依据前式, t_0 的预测符合:

$$t_0 = aT_0 + b + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (4)$$

$$\bar{t}_0 = \bar{a}T_0 + \bar{b} \quad (5)$$

上式(5)是典型的一元线性回归模型^[10](给定的 x 的一定的置信度区间,可以预测出 y 的取值范围),其中 \bar{a} 、 \bar{b} 为回归系数,以下采用参数估计的最小二乘法^[10]来估计以上未知量。 ε 服从正态分布,由式(5)知,则 \bar{t}_0 服从如下正态分布:

$$\bar{t}_0 \sim N(aT_0 + b, \left[\frac{1}{n} + \frac{(T_0 - \bar{T})^2}{S_{TT}} \right] \sigma^2) \quad (6)$$

其中 S_{TT} 为全局时间 T 的 2 阶中心距 $S_{TT} = \sum_{i=1}^n (T_i - T_0)^2$, 并能够证明 t 与 \bar{t}_0 相互独立^[10], 由式(4)、式(6)得。

$$t_0 - \bar{t}_0 \sim N(0, \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(T_0 - \bar{T})^2}{S_{TT}} \right] \sigma^2) \quad (7)$$

又由本地时间 t 的残差平方和为:

$$Q_e = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{a}T_i - \bar{b})^2 \quad (8)$$

由残差平方和与无偏估计 $\hat{\sigma}^2$ 的关系^[10]:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{Q_e}{n-2} \quad (9)$$

Q_e 称为残差平方和, $\hat{\sigma}^2$ 是 σ^2 的无偏估计

由式(9)可知,残差平方和与 σ^2 的商服从分布卡方分布^[10]:

$$\frac{Q_e}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-2) \quad (10)$$

将式(9)代入上式有:

$$\frac{(n-2)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-2) \quad (11)$$

且 $t_0, \hat{t}_0, \hat{\sigma}_0$ 相互对立,由 χ^2 分布、正态分布与 t 分布之间关系^[10]:

$$T = \frac{X}{\sqrt{\frac{Y}{n}}} \quad \text{其中 } X \sim N(0, 1), Y \sim \chi^2(n)$$

可得到 t_0 服从的 t 分布为:

$$P \left\{ \frac{|t_0 - \hat{t}_0|}{\hat{\sigma} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(T_0 - \bar{T})^2}{S_{TT}}}} < t_{\alpha/2}(n-2) \right\} = 1 - \alpha \quad (12)$$

于是对于给定的置信度区间 $1 - \alpha$, 有

$$\frac{t_0 - \hat{t}_0}{\hat{\sigma} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(T_0 - \bar{T})^2}{S_{TT}}}} \sim t(n-2) \quad (13)$$

则可得 t_0 的预测区间^[10]为:

$$\hat{t} - 2.9\hat{\sigma} \leq t \leq \hat{t} + 2.9\hat{\sigma} \quad (14)$$

称为 t_0 的置信度为 $1 - \alpha$ 的预测区间。

若回归表中数据点比较多,式(14)中的根式近似等于 1,若选择 t_0 的置信度为 0.99 时,查表知 $t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2)$ 为 2.896,则 t 的预测区间近似为:

$$(\hat{t} - 2.9\hat{\sigma}, \hat{t} + 2.9\hat{\sigma}) \quad (15)$$

从式(15)可以看出,本地时间的预测区间计算量比较大。由于 $\hat{\sigma}^2$ 是 σ^2 无偏估计,则有 $E(\hat{\sigma}^2) = \sigma^2$, 可用 σ 来近似代替 $\hat{\sigma}$ 。 σ^2 为误差分布的方差,这个误差是由消息包传输延迟引入的,可以通过分析节点的时延分布特性来估计这个值(笔者针对本节点硬件特性,通过大量测试误差为 27.7 μ s)。在一次同步过程中,得到本地—全局数据点 (t_i, T_i) 。根据全局时钟 T 和回归表已有的数据,估计出 t 的预测区间,并判断当前本地时间 t 是否在预测区间内。若在预测区间内,则说明这个数据是可信的,将其加入线性回归表;若不在区间内,则表示这是异常数据将其抛弃,不需要更新线性回归表。

采用以上预测区间,虽然增加了计算复杂度,但避免了异常数据对回归曲线的影响。如果进一步增大置信度,将得到限定更加严格的可信区间,选出最优数据进行估计。

3 仿真结果分析

3.1 实验建立

本文采用自行研制的传感器节点搭建实验平台。节点的处理采用 TI 的 CC2430 射频芯片,它是一个内嵌增强型 C8051 的无线射频收发模块,支持算法在 MAC 层打时间戳。节点外部有两个晶振:32.768 kHz 和 32 MHz,选取 32 MHz 石英晶振做为节点的振荡时钟源。实验平台由 5 个节点(编号为 node1 ~ node5)组成,其中一个节点做中心节点,其它节点均为网络中处于不同层次的子节点(节点距离为 10 m),组建一个 level 为 2 的时间同步系统,进行单跳时间同步测试。测试平台示意图如图 1 所示,测试方法如下(所有节点最

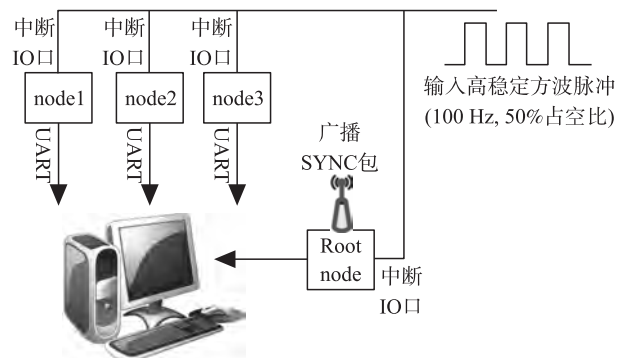


图 1 时间同步测试图

小定时单位为 10 μs)。

(1)中心节点(node1)建立网络并定时 1 s 周期性的广播时间同步信息包,3 个子节点(node2 ~ node4)加入网络后接收同步包,并利用本文提出的算法修改本地时间与中心节点保持同步;

(2)将节点配置为每次激励信号电平跳变就报告本地时间到 PC 机。采用定时器(文中选取 time3 的 0 通道)捕获 IO 口输入电平跳变(上升沿),在捕获中断中,通过串口报告节点本地时间到 PC 机。

(3)采用函数发生器产生标准方波(文中选择周期为 100 ms, 占空比为 50% 的方波)做为激励事件,接到节点上具有捕获能力的 IO 口上;值得注意的是,公共的脉冲方波信号不能有额外的杂波,才能保证每次查询都在同一时刻进行。

3.2 同步精度稳定性试验及分析

为了查看网络中各节点时间同步精度,笔者任意选取一节点(以 node4 为例),查看它的本地时间与中心节点(node1)的时间偏差。随机选取开始查询时间,查询次数为 20 次(约为 2 s),每次间隔为 100 ms,PC 机串口接收的时间数据如图 2 所示。

00 15 08 00 C8 53	00 15 08 00 C8 54	-1
00 15 09 00 E1 00	00 15 09 00 E1 01	+1
00 15 0A 00 F9 22	00 15 0A 00 F9 21	+1
00 15 0B 01 11 2C	00 15 0B 01 11 2A	+2
00 15 0C 01 29 48	00 15 0C 01 29 46	+2
00 15 0D 01 42 0E	00 15 0D 01 42 0D	+1
00 15 0E 01 5A 48	00 15 0E 01 5A 45	+3
00 15 0F 01 73 1A	00 15 0F 01 73 16	+4
00 15 10 01 8B 54	00 15 10 01 8B 50	+4
00 15 11 01 A4 21	00 15 11 01 A4 1F	+2
00 15 12 01 BC 55	00 15 12 01 BC 53	+1
00 15 13 01 D5 23	00 15 13 01 D5 21	+2
00 15 14 01 ED 54	00 15 14 01 ED 51	+3
00 15 15 02 06 22	00 15 15 02 06 1E	+4
00 15 16 02 1E 4D	00 15 16 02 1E 4B	+2
00 15 17 02 36 63	00 15 17 02 36 5F	+4
00 15 18 02 4F 1B	00 15 18 02 4F 19	+2
00 15 19 02 67 37	00 15 19 02 67 33	+4
00 15 1A 02 7F 3F	00 15 1A 02 7F 3B	+4
00 15 1B 02 97 55	00 15 1B 02 97 53	+2

(a)本地时间 (b)全局时间 (c)误差

图 2 Node4 时间同步比较图

由图 2 可知,以 node4 为例,开始查询时刻为 0x00 15 08 00 C8 54,即在全局时间为 15 min 8 s 200(0x00C8)ms 84 μs 时,查看 node4 节点本地时钟与全局时钟的误差。可见 20 次同步误差范围在 -10 μs ~ 40 μs 间,平均误差为 2.35 μs, Node4 能够很好的与中心节点保持时间同步,同步精度在 μs 级。

为了进一步查看子节点与根节点(node1)的同步情况,笔者任选两节点(node2 和 node4),随机选取从开始查询时刻(node2 比 node4 晚),连续查询 150 次同步事件,查询间为隔 100 ms,总测试时间约为 15 s。得到两节点的同步误差曲线如图 3 所示(最小定时单位为 10 μs)。

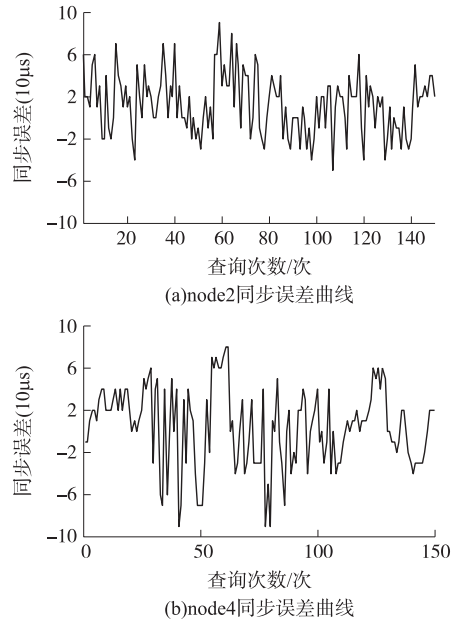


图 3 同步误差曲线

图 3(a)(b)知,node2 的误差在 -50 μs ~ 90 μs 之间,均值为 1.286 7 μs,方差为 8.044 8;node4 的误差在 -90 μs ~ 80 μs 之间,均值为 0.42 μs,方差为 13.856。node4 的误差波动范围明显要比 node2 波动范围要大(node4 方差比 node2 大),分析其原因知 node4 的开始查询时间比 node2 要早(相差 15 min),线性回归算法未拟合出最佳估计曲线,随着时间增长,同步误差会逐渐趋于稳定。两节点的误差范围都在 μs 级,误差呈正负交错波动,且有逐渐减小的趋势,可见算法收敛性较好,能够有效的减少同步误差。可得到以下结论:以上两节点能够很好的与中心节点保持同步。

为了比较本文的算法与 FTSP 算法同步精度差异,任选 1 个节点(笔者选取 node2),分别采用本文的算法和 FTSP 算法实现该节点与中心节点(node1)时间同步,比较两算法的同步误差曲线如图 4 所示。查询次数为 200 次,查询间隔为 500 m s,总测试时间约为 100 s。

从图 4 中可以看出:同步精度方面,FTSP 的同步误差在 -40 μs ~ 400 μs 间,且误差与同步周期有密切关系,随着同步周期增加误差逐渐增大,在每一

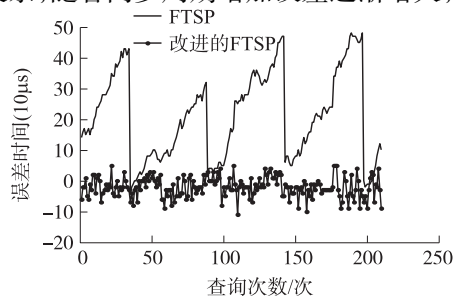


图 4 两种同步算法误差对比图

个周期内,误差随时间线性增大,级间误差会发生陡变情况。分析知主要有以下两点原因:(1)节点晶振存在频率漂移,随着同步周期变大,漂移产生的误差累计而带来了更大的误差;(2)异常数据点进入回归表,导致线性拟合曲线计算出的全局时间与真实值偏差很大,导致个别同步周期的同步误差很大。

相比之下本文提出的同步算法,误差范围控制在 $-90 \mu\text{s} \sim 40 \mu\text{s}$ 内,远远小于前者,且在 100 s (200 次查询时间)时间内能够维持较高同步精度。而误差波动也较为稳定,不会随着同步周期的增加而陡变的情况。这是由于改进的算法采取补偿晶振时间漂移方式,防止误差随周期增长而累加,并采取有效措施避免异常数据点对同步精度影响,从而获得了更加平稳的误差曲线,算法收敛时间缩短。可见采用本算法后,算法的执行周期显著增大,适合于资源受限的无线传感器网络的应用。

由于无线传感器网络对不同的应用环境中表现出不同特点,对时间同步要求也存在差异。所以在分析同步算法时,一般在同步方式,误差,通信开销,能耗和有效范围方面进行比较,笔者对 RBS、TPSN 和本文算法在以上方面进行对比,如表 1 所示。

表 1 三种同步算法比较图

算法名称	测试平台	同步方式	同步误差/ μs	复杂度	能耗
RBS 算法	MICA	接收-接收	29.13	较高	一般
TPSN 算法	MICA	发送-接收	16.9	一般	较高
本算法	自建	发送-接收	20	较低	较低

表中 RBS 和 TPSN 算法数据是参考文献[11]在 Mica 平台上获取的,通过比较可看出本算法同步精度介入 TPSN 算法和 RBS 算法之间,达到了较高的同步精度,能满足一般传感器网络应用需求;在运算复杂度和能耗方面都优于其它两种算法;在同步开销方面,受到技术限制只限于理论上分析,传统的 FTSP 算法一次同步周期需要 $o(n^2)$ 个信息包开销,而本文算法仅需要 $m \cdot n$ (m 为级数, n 为当前级活动节点数)个信息包开销,减小了同步通信开销,降低节点能耗和计算量,减轻了节点的负担。因此本算法更适用于能量、资源受限的传感器网络应用。



吴宝明(1962 -),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为生物医学信号检测处理和医学仪器、卫生装备研究,wbm@vip.163.com;

4 结论

目前针对资源、能量受限的传感器网络时间同步算法研究相对较少,很多算法仍处于仿真阶段,与实际应用有一定距离。本文在分析 FTSP 算法基础上,主要在同步开销和异常数据处理方面对其进行改进。采用节点分级策略,减少了同步通信开销;采用概率统计理论中参数估计思想,排除了异常数据点的影响,提高了回归曲线的跟踪精度。最后通过实验测试表明:本算法在保证精度的前提下,大幅度提高算法的执行周期,减少了同步通信开销,在各方面优于传统的 FTSP 算法,更适用于能量受限的无线传感器网络的应用。

参考文献:

- [1] 周中良,于雷,潘泉. 综合化多传感器空间管理模型与算法研究[J]. 传感器技术学报,2007,20(11):256-259.
- [2] Elson Jeremy, Girod Lewis, Estrin Deborah. Fine-Grained Network Time Synchronization Using Reference Broadcasts[C]//Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation. Boston, MA, 2002: 147-163.
- [3] 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.
- [4] 张杰,石为人. 基于无线传感器网络的信息采集检测系统设计[J]. 传感技术学报,2009,22(6):861-864.
- [5] Philipp Sommer, Philipp Sommer. Gradient Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks[J]. 2009: 37-48.
- [6] Kyoung-lae Noh, Serpedin. A New Approach for Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: Pairwise Broadcast Synchronization[J]. Wireless Communications, 2008, 9, 7(9): 3318-3322.
- [7] 周贤伟,韦炜. 无线传感器网络的时间同步算法研究[J]. 传感技术学报,2006,19(1):20-25.
- [8] 黄天戌,陈苒菁. 石英晶振频率测试系统的研究与开发[J]. 中国仪器仪表,2005,(10).
- [9] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:158-176.
- [10] 杨虎,孙琼荪,钟波. 数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2004:103-135.
- [11] Ganeriwal Saurabh, Kumar Ram, Srivastava Mani. Timing Sync Protocol for Sensor Networks[C]//ACM SenSys. Los Angeles, CA, 2008.



李声飞(1985 -),男,河南光山人,重庆大学通信工程学院信号与信息工程专业研究生,主要研究方向为无线传感器网络技术,在健康监护中的应用,happyrogerli@163.com。