

doi:10.16652/j.issn.1004-373x.2017.06.008

无线时钟同步算法在UWB定位技术中的研究与应用

罗 勃, 沈 重, 朱雨豪
(海南大学 信息科学技术学院, 海南 海口 570228)

摘 要: 以无线时钟同步为主, 提出一种以卡尔曼滤波算法为基础的无线时钟同步算法, 同时也分析了无线时钟不同步的情况及原因, 并且使用 Hainan-EVK 1.0 作为硬件平台进行了实验。实验结果表明, 以卡尔曼滤波算法为基础的无线时钟同步算法能够满足 TDOA 定位算法的需求。

关键词: UWB; TDOA; 无线时钟同步算法; 卡尔曼滤波算法

中图分类号: TN915-34; TN919.72

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2017)06-0031-04

Application of wireless clock synchronization algorithm in UWB positioning technology

LUO Bo, SHEN Chong, ZHU Yuhao

(School of Information Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Studied for wireless clock synchronization, a wireless clock synchronization algorithm based on Kalman filter algorithm is proposed, and the wireless clock asynchronism and its reason are analyzed. The experiments for the algorithm was carried out with Hainan-EVK1.0. The results show that wireless clock synchronization algorithm based on Kalman filtering algorithm can meet the needs of TDOA location algorithm.

Keywords: UWB; TDOA; wireless clock synchronization algorithm; kalman filtering algorithm

0 引 言

无线定位系统是在指定的空间内通过测量无线电波的物理特性对目标进行实时监控。在室内, 基于传统无线电技术的各类定位解决方案仍然是一个未解决的问题; 因为室内信号传播环境相比室外更加复杂, 很难精确分析信号到达时间或到达角度等参数^[1]。2007年3月 IEEE 发布了基于 UWB 物理层的 IEEE 802.15.4a-2007 协议标准, 这一标准旨在为无线个域网中使用超低数据速率、超低功耗和超低复杂度的器件进行短距离数据传输提供支持。IEEE 802.15.4a 协议是 IEEE 802.15.4 协议的修订版, 有两种物理层实现方式, 即超宽带技术 UWB 和 Chirp 扩频(Chirp Spread Spectrum, CSS)技术。IEEE 802.15.4a 超宽带(Ultra Wideband, UWB)基带如果用于定位, 其在精确度、实时性能和数据带宽等方面具有绝对的优势。其中, UWB 物理层可以工作在 1 GHz, 3~5 GHz 和 6~10 GHz 这三种频率范围, 工作效率高, 即使在较低的发送功率下仍具有较

好的鲁棒性^[2]。而本文的实验则采用了爱尔兰 Decawave 公司生产的 DW1000 UWB 芯片组, 其物理层协议为 IEEE 802.15.4a。脉冲无线电超宽带(Impulse Radio Ultra-Wideband, IR-UWB)的脉冲宽度仅为纳秒级或亚纳秒级, 响应频率和脉冲宽度决定了 UWB 的定位精度在理论上可以达到厘米级。UWB 技术实时响应频率可达到 10~40 Hz, 而其他定位技术普遍在 1 Hz 以下; UWB 技术抗多径能力强, 且时间分辨率很高, 具有一定的穿透能力, 这些特点有利于在室内复杂多径环境中进行实时定位和动态数据收集需求。目前国内 UWB 技术还主要集中在带宽应用及高速率接入等方向, UWB RTLS(Real Time Location System)定位技术鉴于其硬件起步较晚, 无线时钟同步^[3]、标签容量模型^[4]及网络可扩展^[5]通信协议难点, 目前还尚未开展。而本文将针对 TDOA 定位算法中的无线时钟同步问题进行研究, 并以 Hainan EVK 1.0 为实验平台, 验证改进后的时钟同步算法的可行性。

1 影响无线时钟同步的因素及研究现状

由于每个基站都有自己独立的时钟源, 使得每个基站测量到的标签信号到达时间(Time Of Arrival, TOA)

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 国家自然科学基金; 传感器网络能量有效空中重编程协议研究(61461017)

没有一定的联系,并且每个基站的时钟源所用的不同晶振都存在不同的频率偏差,该频率偏差并不是个常数,而是随着温度的变化呈现出非线性变化,所以不同基站的晶振本身存在工艺上的差异和与环境温度之间的关系特性是影响时钟同步的主要原因;每个基站的启动时间不同也会导致标签信号的到达时间存在差异;如果主从基站的坐标摆放有偏差,或主从基站之间有障碍物阻挡就会导致计算出来的飞行时间不精确,从而影响无线时钟同步的性能。以上种种原因使得TDOA算法无法正确使用。因为TDOA定位算法要求所有参与定位的基站都基于相同的时钟基准,使得主从基站之间的时钟同步显得尤其重要。

在各类实时定位系统里,数据采集和实时控制必须具有全网统一的时钟,一旦出现时钟偏差,就会导致数据失效或控制错误。因此系统里各个节点如何保持时钟同步是关键技术问题,国内外文献提出了大量关于时间同步的算法。自校正的时间同步算法^[6]中每个节点根据一个参考时钟来调整自己时钟,从而保持时间同步,节点之间无任何信息交换;文献[7]提出一种基于卡尔曼滤波的并行分布算法,每个节点利用其他节点的估计状态,投票选出一个虚拟的全局主时钟,与其保持时间同步;文献[8]通过两种具有自适应性的卡尔曼滤波模型来实现时钟同步,分别为基于最大期望值的递归算法与基于假设校验的自适应多模型算法;文献[9]利用卡尔曼滤波来跟踪时间偏移,从同步时间间隔中获取所需误差界限,再调整同步时钟从而保证系统中节点的时间同步;文献[10]结合传感器网络,对现有的时钟同步协议进行了总结,基于接收者-接收者交换的参考广播同步技术通过双向链路和信息包的交换实现网络中节点的时间同步,但该算法只在单跳网络中才能确保较高的精确度;文献[11]提出了成对报文时间同步协议,采用层次结构,可以实现整个网络节点的时间同步;文献[12]在成对报文时间同步协议基础上进行改进,使网络中传感器节点的能量消耗和平衡时间更加有效;另外,在节点失效、移动及复杂通信环境中,可以使用异步时钟协议^[13],异步时钟协议允许网络中每个节点在任何时间以任何顺序跟它的邻居节点进行时间同步;而洪泛时间同步协议^[14]使用广播消息来实现发送节点和接收节点间的时钟同步,具有通信带宽小、精确度高等特点。

本文提出基于卡尔曼滤波的主从基站之间的无线时钟同步算法,同时还提出了判断时钟同步性能的检测指标。当时钟校验包和标签数据包发生碰撞时,此时的检测指标将高于预设的阈值从而通过滤波算法将这个错误排除,有效地增加算法可靠性。

2 改进的无线时钟同步算法

本文提出了一种基于改进的卡尔曼滤波的无线时钟同步算法,指定一个参考“主”基站周期性地向从基站发送时钟校验包(Clock Correct Package, CCP)。时钟校验包是用来跟踪从基站的时钟相对于主基站的时钟是如何随着时间变化。标签向所在标签发送范围内的每个基站节点快速发送数据包,并且每个基站以自己的时间戳记录数据包的到达时间(TOA)。了解基站的时钟相对于主基站的时钟是如何随着时间变化,数据包到达从基站本地时间的修正或转换成以主基站时间为基准的数据包到达时间,需要知道修正的一个重要组成部分是主基站与从基站之间的固定时间偏移和天线延时时间。固定时间偏移实际上是时钟校验包在主基站和从基站之间的飞行时间,这飞行时间可以由已知的主从基站坐标计算得到或是用双向测距方法测得到,天线延时时间包括天线的传播时间和信号的调制解调等时间,如图1所示。

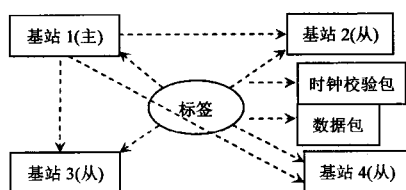


图1 时钟同步框图

图1由一个主基站、三个从基站以及标签组成。主基站定时向从基站发送时钟校验包,保证主从基站之间的时钟同步,也就是说除了主基站外,其他三个从基站都需要通过时钟同步算法使得自身的时钟与主基站时钟同步,与此同时标签向四个基站发送数据包,其中数据包中包含了标签的发包序号信息、地址信息等。标签通过到达时间差的定位方法确定了其自身在该系统中的位置。

由于主从基站晶振的频率特性、温度和老化效应的不同,导致晶振频率会产生漂移,其中晶振的温度漂移是造成其精确度偏差的主要原因,这使得主从基站的时钟频率之间存在偏差。然而,传输网络中的各种干扰使得主从基站时钟之间的偏差无法进行精确测量。改进后的无线时钟同步算法采用卡尔曼滤波算法能更精确地估算时间偏差,消除时钟以及传输过程中带来的干扰。因此将通过卡尔曼滤波算法来使得从基站的时钟偏移能够与主基站的时钟偏移保持一致。卡尔曼滤波是以最小均方误差为估计的最佳准则,来寻求一套递推估计的算法,其基本思想是:采用信号与噪声的状态空间模型,利用前一时刻的估计值和现时刻的观测值来更

新对状态变量的估计,求出现时刻的估计值。

在具体的实现过程中,通过第 n 个同步周期的从基站 CCP 接收时间的最优估计值和第 $n+1$ 的预测值精确地估计第 $n+1$ 个同步周期主从基站的时钟偏移之间的偏差与漂移。定义 T 为时钟同步周期, dt 为主基站现时刻 CCP 发送时间与上一周期时刻 CCP 发送时间的差值, θ_n, γ_n 分别为 nT 时刻从基站节点的最优估算 CCP 接收时间值和时钟漂移值。 $\theta_{n+1}, \gamma_{n+1}$ 分别为 $(n+1)T$ 时刻从基站节点修正前的预测 CCP 接收时间和时钟偏移值。

在 $(n+1)T$ 时刻,相邻时钟同步周期内时钟偏差与时钟漂移的关系式为:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + dt * \gamma_n + \omega_{\theta,n} \quad (1)$$

$$\gamma_{n+1} = \gamma_n + \omega_{\gamma,n} \quad (2)$$

式中, $\omega_{\theta,n}$ 为时钟偏差干扰; $\omega_{\gamma,n}$ 为时钟漂移干扰。

假定 $\omega_n = [\omega_{\theta,n}, \omega_{\gamma,n}]^T$ 为系统过程噪声,将其假设为高斯白噪声,协方差矩阵为 Q ,定义向量与矩阵如下:

$$\mathbf{x}_n = [\theta_n \quad \gamma_n]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则 $(n+1)T$ 时刻的状态方程为:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_n + \mathbf{B}\mathbf{u}_n + \omega_n \quad (5)$$

式中: ω_n 是代表过程噪声的高斯随机变量;向量 \mathbf{u}_n 是输入。

观测矩阵为:

$$\mathbf{Z}_{n+1} = \mathbf{H}_{n+1}\mathbf{x}_{n+1} + \mathbf{v}_{n+1} \quad (6)$$

式中: \mathbf{v}_{n+1} 为观测过程中引入的具有高斯分布特性的干扰,即为测量噪声; \mathbf{H}_{n+1} 为单位矩阵。

根据卡尔曼滤波原理,其迭代算法过程如下:

(1) 预测:

$$\hat{\mathbf{x}}_{n+1|n} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{n|n} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{n+1} \quad (7)$$

由于该系统没有控制量,因此 \mathbf{u}_{n+1} 可以为0。

(2) 预测最小均方误差矩阵:

$$\mathbf{P}_{n+1|n} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{n|n}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{P}_{n|n}$ 为 $\mathbf{x}_{n|n}$ 对应的协方差矩阵; $\mathbf{P}_{n+1|n}$ 为 $\hat{\mathbf{x}}_{n+1|n}$ 对应的协方差矩阵。

(3) 卡尔曼增益矩阵:

$$\mathbf{K}_{n+1} = \mathbf{P}_{n+1|n}(\mathbf{H}_{n+1})^T(\mathbf{R}_{n+1} + \mathbf{H}_{n+1}\mathbf{P}_{n+1|n}(\mathbf{H}_{n+1})^T)^{-1} \quad (9)$$

式中, \mathbf{R}_{n+1} 为 \mathbf{v}_{n+1} 的协方差矩阵。

(4) 修正:

$$\hat{\mathbf{x}}_{n+1} = \hat{\mathbf{x}}_{n+1|n} + \mathbf{K}_{n+1}(\mathbf{Z}_{n+1} - \mathbf{H}_{n+1}\hat{\mathbf{x}}_{n+1|n}) \quad (10)$$

(5) 最小均方误差矩阵:

$$\mathbf{P}_{n+1|n+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{n+1}\mathbf{H}_{n+1})\mathbf{P}_{n+1|n} \quad (11)$$

式中,该系统是单模型单测量系统,所以 $\mathbf{I}=1$ 。

通过卡尔曼滤波算法,第 $n+1$ 时钟同步周期修正后的 $\hat{\mathbf{x}}_{n+1} = [\hat{\theta}_{n+1} \quad \hat{\gamma}_{n+1}]^T$,相应的设置 $\mathbf{u}_{n+1} = \hat{\mathbf{x}}_{n+1}$,对时间偏差以及时钟漂移进行补偿,从而确保主从基站间的时钟同步。

卡尔曼滤波的计算基于这样的假设:所有的测量结果都是由真实信号和可加性高斯噪声组成的。如果上述假设成立,卡尔曼滤波可以有效地从含噪声的测量结果中得到信号信息。但是如果主基站的时钟同步校正包和标签含有 TOA 的数据包产生了碰撞,那么这个假设将不成立。卡尔曼滤波器会把这个碰撞当作可信的时钟偏差的数据,而以此进行计算。而卡尔曼滤波本身是一种低通滤波器,其反应和修正的速度都较慢。因此,一个由碰撞产生的错误会在较长时间内严重降低时钟同步算法的性能。

因此本研究提出了一种对碰撞产生的错误的监测以及避免办法。

卡尔曼增益公式已经由式(9)给出,定义其中一项 \mathbf{Y} 信息矩阵为:

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{R}_{n+1} + \mathbf{H}_{n+1}\mathbf{P}_{n+1|n}(\mathbf{H}_{n+1})^T)^{-1} \quad (12)$$

式中, \mathbf{Y} 用来表示实际时钟偏差与预测时钟偏差的差值。这个信息可以用来提示当前的输入和当前的滤波器状态的吻合程度:

$$\text{OM}_{n+1} = (\hat{\mathbf{x}}_{n+1} - \mathbf{x}_{n+1})^* \mathbf{Y}^* (\hat{\mathbf{x}}_{n+1} - \mathbf{x}_{n+1}) \quad (13)$$

如果偏离指数(Outlier Metric, OM)大于一个预设的阈值,就认为当前输入不可信,不更新当前状态,直接丢弃此次数据,从而避免让错误数据包对滤波器造成很大的影响。

3 算法分析

算法的检验中,选取 $13 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的房间为测试环境,而且室内环境都是可视距的,四个基站分别放置四个角落。四个基站分别标注为 $\mathbf{M}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3$ 和 \mathbf{S}_4 ,选取 \mathbf{M}_1 为主基站,其余三个为从基站,其电路板图(四个基站的电路板都一样)如图2所示。经过手工准确测量得到各个基站的坐标: $\mathbf{M}_1(1.1, 1.17, 1.93), \mathbf{S}_2(11.3, 1.17, 1.21), \mathbf{S}_3(11.3, 5.37, 1.95), \mathbf{S}_4(1.1, 5.37, 1.22)$ 。主基站到各个从基站的飞行时间分别标注为 TOF12、TOF13 和 TOF14,可经过三角公式计算分别得到 TOF12 为 0.000 000 034 123 193 s, TOF13 为 0.000 000 036 806 046 s, TOF14 为 0.000 000 014 223 998 s。对于测量噪声 \mathbf{v}_{n+1} 和过程噪声 ω_n 分别给定一个值为 3×10^{-20} 和 5×10^{-20} ,天线延时时间经过精确测量为 0.000 000 258 114 s。在实验过程中,主基站每隔 150 ms 进行一次同步数据包(CCP)广播发送,从基站接收到 CCP 后,提取 CCP 包

里的 CCP 发送时间,然后调用卡尔曼滤波算法进行时钟同步。可根据图 3 提供的方法,比较从基站实际时间偏移量和最佳估计时间偏移量的差值,差值越小说明时钟同步算法的性能越好,如图 3 所示。

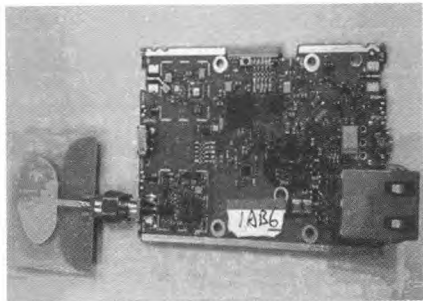


图 2 基站电路板图

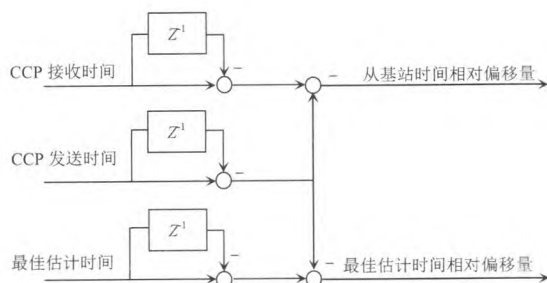


图 3 相对时间偏移量

根据图 3,利用主从基站回传的 CCP 发送时间、CCP 接收时间和最佳估计时间等数据,得出从基站时间相对偏移量和最佳估计时间相对偏移量,选取从基站 S_2 的数据用 Matlab 绘制成图,如图 4 所示。

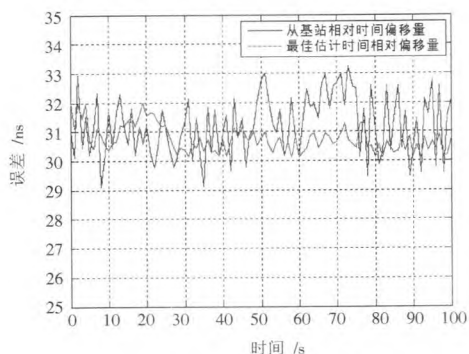


图 4 S_2 时间相对偏移量图

根据图 4 可知,蓝色线条表示从基站相对时间的偏移量,红色线条表示最佳估计时间相对偏移量。经过卡尔曼滤波算法后的时钟同步,红色线条显得更平稳些。而蓝色线条受到一些噪声和温飘的影响显得波动较大。由图 4 中可知道误差在 30 ns 左右,但对于光速来说纳秒级别的误差影响也是很大的。所以卡尔曼滤波算法也起到了滤波的作用,使得误差变得平滑平稳。因

此,实验表明卡尔曼滤波算法的无线时钟同步可以较好地跟踪主基站的时钟偏移,进而得出最佳的预测使得从基站的时钟和主基站的时钟基本一致,这很有利于提高标签的定位精确度。

4 结 论

无线时钟同步算法通过卡尔曼滤波和递归算法,理论上时钟同步误差可达到 0.1 ns 级别,优化了所有基站的时钟同步。本文提出的新算法在 IEEE 802.15.4a UWB 技术基础上,不仅能有效地消除时钟偏差的测量噪声,还能通过测量所得的时钟偏差对时钟偏差、时钟漂移以及时钟漂移变化率进行估计,从而提高系统时钟同步的精度。另一方面,针对低通滤波算法对偶发错误的敏感性,本文提出的检测算法运行状态的环节,可以剔除网络中的碰撞或者接收错误给时钟同步带来的负面影响,从而增加了系统的容量与可靠性。

参 考 文 献

- [1] HWANG S S, KWON G R, PYUN J Y, et al. AOA selection algorithm for multiple GPS signals [C]// 2013 Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. [S.l.]: IEEE, 2013: 481-485.
- [2] SHAH SAADON E I, ABDULLAH J, ISMAIL N. Evaluating the IEEE 802.15.4a UWB physical layer for WSN applications [C]// 2013 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA). [S.l.]: IEEE, 2013: 68-73.
- [3] MCELROY C, NEIRYNCK D, MCLAUGHLIN M. Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems [C]// 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). [S.l.]: IEEE, 2014: 157-162.
- [4] CHEN Y, SHEN Y, JIANG X, et al. Throughput capacity of ALOHA MANETs [C]// 2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. [S.l.]: IEEE, 2013: 71-75.
- [5] SHIN W Y, LUCANI D E, MEDARD M, et al. Multi-hop routing is order-optimal in underwater extended networks [C]// IEEE International Symposium on Information Theory. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012: 510 - 514.
- [6] WENTAO J, LIMIN S. A prediction based long-cycle time synchronization algorithm for sensor networks [C]// Global Telecommunications Conference. Miami: [s.n.], 2010: 1-5.
- [7] LIU B, REN F, SHEN J, et al. Advanced self-correcting time synchronization in wireless sensor networks [J]. IEEE communications letters, 2010, 14(4): 309-311.
- [8] KIRSCH F, VOSSIEK M. Distributed Kalman filter for precise and robust clock synchronization in wireless networks [C]// Radio and Wireless Symposium. [S.l.]: IEEE, 2009: 482-485.

(下转第 39 页)

活跃度相对较高,被视为关键节点,结合结构洞原理,可推测该员工近期可能会升职。

下面是对算法的时间复杂度进行分析比较。优化结构洞的关键节点发现方法与其他方法相比对网络中关键节点的发现非常有效,因为它使用了更多的信息,而且比介数计算有更低的复杂度。由于本文中提出的基于优化结构洞的关键节点发现方法的时间复杂度主要集中在“结构洞”约束系数的计算上,若采用标准的矩阵乘法,算法复杂度为 $O(n^3)$ 。但对于大部分复杂网络来说,其邻接矩阵往往是稀疏矩阵,如果不考虑其他优化算法,仅采用稀疏矩阵存储复杂网络,则“结构洞”的主要运算为 $\sum_q p_{uq} p_{q}$,而计算此式的稀疏矩阵乘法的算法复杂度为 $O(n^2 + m^2/n)$,其中 n 为网络中顶点的个数, m 为网络中边的数量。由于 m 可能的最大值为 n^2 ,因此有 $m^2/n = m(m/n) \leq m(n^2/n) = mn$ 。对于加权图有 $n < m$,故有 $O(n^2 + m^2/n) \leq O(nm)$,说明该算法的时间复杂度小于betweenness计算的算法时间复杂度。

4 结 语

在无向加权网络中,对处于重要位置的关键节点进行评估发现对于研究网络的抗毁性和后续社团发现等都具有十分重要的意义。针对目前关键节点发现算法大多数没有兼顾桥节点与其他类型重要节点,造成评价结果只能发现某一类的片面性问题,本文借鉴结构洞理论中网络约束系数评价方法,结合无向加权网络,利用节点之间的通信特征定义边权。通过节点的邻居数量及其与邻居间的拓扑结构,定义节点的邻接度和二次邻接度来衡量其邻居节点对其的重要程度。考虑到邻居

间的联系对控制力的影响,提出节点相对重要性的定义。实验分析表明该方法能够准确、有效地发现无向加权网络中的关键节点,且算法的时间复杂度小于 $O(nm)$,具有很强的实用性。该算法通过局部特征进行关键节点发现,克服全局法应用的局限,无需对网络全局架构进行了解,适用于大规模复杂网络中。

参 考 文 献

- [1] LANDHERR A, FRIEDL B, HEIDEMANN J. A critical review of centrality measure in social networks [J]. Business & information systems engineering, 2010, 2(6): 371-385.
- [2] HE N, LI D, GAN W, et al. Mining vital nodes in complex networks [J]. Computer science, 2007, 34(12): 1-5.
- [3] 梁鲁晋. 结构洞理论综述及应用研究探析[J]. 管理学家(学术版), 2011(4): 52-62.
- [4] REN Z, SHAO F, LIU J, et al. Node importance measurement based on the degree and clustering coefficient information [J]. Acta physica Sinica, 2013, 62(12): 1289011-1289015.
- [5] ZHU T, ZHANG S, GUO R, et al. Improved evaluation method for node importance based on node contraction in weighted complex networks [J]. Systems engineering and electronics, 2009, 31(8): 1902-1905.
- [6] WANG J, WU X, LIAO W, et al. Improved method of node importance evaluation in weighted complex networks [J]. Computer engineering, 2012, 38(10): 74-76.
- [7] 张立晓, 徐汀荣, 李海彦, 等. 一种基于局部特性的重要邮箱用户发现方法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(3): 51-54.
- [8] 王建伟, 荣莉莉, 郭天柱. 一种基于局部特征的网络节点重要性度量方法[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(5): 822-826.
- [9] BURT R S. Structural holes: the social structure of competition [M]. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1992.

作者简介:王丽娟(1991—),硕士研究生。研究方向为复杂网络与数据挖掘。

(上接第34页)

- [9] LUO Yanfen. Research on adaptive information fusion Kalman filter algorithm [C]// 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. [S.l.]: IEEEExplore, 2012, 5: 1-4.
- [10] CHE H, CHEN Z. Energy-efficient time synchronization algorithm for wireless sensor networks [J]. Ordnance industry automation, 2010, 39: 530-534.
- [11] BO G. Research on clock synchronization mechanism in wireless sensor networks [C]// International Forum on Information Technology and Applications. [S.l.]: IEEE, 2009: 57-60.

- [12] LENG M, WU Y C. Distributed clock synchronization for wireless sensor networks using belief propagation [J]. IEEE transactions on signal processing, 2011, 59(11): 5404-5414.
- [13] CHOI B J, LIANG H, SHEN X, et al. DCS: distributed asynchronous clock synchronization in delay tolerant networks [J]. IEEE transactions on parallel & distributed systems, 2012, 23(3): 491-504.
- [14] SINAN Y K, KANTARCI A. Time synchronization based on slow-flooding in wireless sensor networks [J]. IEEE transactions on parallel & distributed systems, 2014, 25(1): 244-253.

作者简介:罗 勃(1991—),男,硕士。主要研究方向为无线传感器网络。

沈 重(1981—),男,教授,博士。主要研究方向为无线通信、传感器网络及物联网、嵌入式系统、超宽带微系统等。

朱雨豪(1990—),男,硕士。主要研究方向为无线传感器网络。