

# 一种异步无线传感器网络目标定位方法

孙庭波<sup>1</sup>, 屈玉贵<sup>1</sup>, 赵保华<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027; 2. 中国科学技术大学计算机科学与技术学院, 安徽合肥 230027)

**摘要:**提出一种应用于异步无线传感器网络的分段式定位方法, 该方法根据目标移动速度将定位过程自动分段, 在每个时间段初期用同步定位方法获得目标准确初始位置, 然后在此基础上采用异步定位. 分段式定位方法解决了普通异步定位方法无法准确定位慢速目标的问题, 大大降低定位系统对目标节点移动速度的要求. 模拟仿真结果表明, 该方法可以得到良好的效果.

**关键词:**无线传感器网络; 异步网络; 定位

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## A localization scheme for asynchronous wireless sensor networks

SUN Ting-bo<sup>1</sup>, QU Yu-gui<sup>1</sup>, ZHAO Bao-hua<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** A segmented localization scheme was proposed for location system using asynchronous distributed wireless sensor networks. The scheme segments the localization process according to source speed. At the beginning of each segment, synchronous localization is performed to get a good estimation of the source location and asynchronous localization is started after that. The segmented localization scheme solves the problem that ordinary asynchronous localization cannot work well with slowly moving source, which relaxes the assumption of source motion speed. Simulation results show the efficiency of the proposed approach.

**Key words:** WSN; asynchronous network; localization

## 0 引言

近年来, 无线传感器网络的定位功能得到越来越广泛的应用, 例如, 用于获得传感器节点自身的位置, 使得传感器能采集并记录位置相关的数据; 用于定位目标位置<sup>[1]</sup>, 如跟踪目标车辆, 监控野生动物栖息地等; 用于实现利用位置信息的路由协议<sup>[2]</sup>; 其他位置相关的应用, 如资源访问控制<sup>[3]</sup>.

研究人员提出了多种定位方法, 根据是否直接测量节点间距离可分为无需测距(range-free)和基于测距(range-based)两种. 无需测距的定位方法包括 APIT、质心法、DV-hop、Amorphous 方法等<sup>[4~6]</sup>; 基于测距的方法则包括 RSSI, TOA, TDOA 等<sup>[7~10]</sup>. 其中, TOA, TDOA 方法通过测量信号传输时间来计算点与点之间的距离, 需要节点间时间同步. 对体积、成本、功耗受限的无线传感器网络节

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(60872009, 60602016), 中国高技术研究发展(863)计划(2007AA01Z428, 2009AA01Z148), 安徽高校省级自然科学研究计划重大项目(ZD2008005-2, ZD200904, JK2009A013, JK2009A025)资助.

作者简介: 孙庭波, 男, 博士生. 研究方向: 无线传感器网络. E-mail: tbsun@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 屈玉贵, 教授. E-mail: ygqu@ustc.edu.cn

点,通常采用发送额外同步信号<sup>[11,12]</sup>或采用专用的时间同步协议<sup>[13,14]</sup>来实现时钟同步.这些同步方法需要节点配备专用硬件电路或进行额外通信和计算,影响节点的成本和工作寿命.

本文研究的定位方法适用于 Cricket<sup>[12]</sup> 和 Active Bat<sup>[11]</sup> 的定位系统.上述系统采用 TOA 方法定位,利用 RF 信号传输速度远大于超声波的特性,先发送 RF 信号进行时间同步,再发送超声波并测量其到监控节点的 TOA 时间.这种同步定位方法需不断发送和接收 RF 同步信号,消耗额外能量.文献<sup>[15]</sup>提出对运动目标可采用异步定位的方法,能省去 RF 同步信号,但该方法对于速度较小的目标定位误差很大.

本文提出一种基于目标速度的分段式异步定位方法,以同步定位作为后续异步定位时间段的开始,平衡系统同步开销和定位精度.当目标移动速度减小时,异步定位误差增大,此时采用短暂同步定位获得节点准确位置再继续进行异步定位,可减小后续异步定位误差.仿真实验结果证明,该方法比文献<sup>[15]</sup>提出的异步定位方法在增加少量同步开销的情况下,可明显提高慢速运动目标的定位精度.

## 1 异步传感器网络模型

假设无线传感器网络由  $N$  个分布式监测节点和一个目标节点组成.  $N$  个监测节点的位置固定并已知,分别为  $\mathbf{x}_i (i=1, 2, \dots, N)$ . 目标节点的坐标  $\mathbf{x}_0$ . 所有坐标为  $D$  维向量.

每个节点有一个独立的本地时钟,开始计时的时间为  $\Omega_i$ , 时钟频率可表示为  $F_i = F_s(1 + \epsilon_i)$  (tick/s),  $F_s$  是时钟标称值,  $\epsilon_i$  为随机的时钟频率漂移,其绝对值的典型值在  $10^{-6}$  至  $10^{-4}$  之间<sup>[16]</sup>. 各节点时钟相互独立,节点仅知道本地时间  $l_i$ , 由本地时间  $l_i$  计算出的全局时间  $t_i$  为

$$t_i = \frac{l_i}{F_s(1 + \epsilon_i)} + \Omega_i, \quad i = 0, \dots, N \quad (1)$$

目标节点以周期  $L$  (tick) 发射超声波脉冲,传播速度为  $c$ . 假设目标节点发送第  $p$  个脉冲时所处位置  $\mathbf{x}_0(p)$ , 本地时间  $pL$ , 转换为全局时间:  $t_0(p) = pL/(F_s(1 + \epsilon_0)) + \Omega_0$ .

监测节点采样接收到的超声波信号,记录脉冲到达时的本地时间. 所有监测节点将测量值发送至汇聚节点,汇聚节点负责计算目标节点在发送第  $p$  个脉冲时所处的位置.

由于测量误差的存在,监测节点  $i$  测得的脉冲 TOA 时间  $\hat{l}_i(p)$  与真实值  $l_i(p)$  的关系为

$$\hat{l}_i(p) = l_i(p) + n_i(p) \quad (2)$$

式中,  $n_i(p)$  为测量误差,假设服从正态分布:  $n_i(p) \sim N(0, \sigma_n^2)$ .

脉冲传输到监测节点  $i$  时的全局时间为

$$t_i(p) = \frac{\|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{c} + \frac{pL}{F_s(1 + \epsilon_0)} + \Omega_0$$

使用式(1)将上述全局时间转换为节点  $i$  的本地时间,并结合式(2),可得到监测节点  $i$  测得的脉冲 TOA 时间为

$$\hat{l}_i(p) = \frac{\|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s} + pL(1 + \epsilon_{i,0}) - \frac{\Omega_{i,0}}{T_s} + n_i(p) \quad (3)$$

式中,  $T_s = 1/F_s$ ,  $\epsilon_{i,0} = \epsilon_i - \epsilon_0$ ,  $\Omega_{i,0} = \Omega_i - \Omega_0$ .

$\epsilon_{i,0}$  和  $\Omega_{i,0} (i=1, 2, \dots, N)$  构成系统的时钟同步参数,假设初始计时时刻偏差  $\Omega_{i,0}$  为未知的确定值,频率偏差  $\epsilon_{i,0}$  服从正态分布  $n_i(p) \sim N(0, \sigma_f^2)$ . 频率偏差  $\epsilon_{i,0}$  通常很小取值范围  $[10^{-6}, 10^{-4}]$ ,但它造成的时间偏差会随时间累积,不能忽略.

## 2 异步传感器网络目标位置估计

传统 TDOA 定位方法通过计算  $\hat{l}_i(p) - \hat{l}_j(p)$  来估计目标节点到监测节点  $i, j$  的距离差. 在异步网络中,由于各节点时钟存在偏差,  $\hat{l}_i(p) - \hat{l}_j(p)$  随着  $p$  值增加而增加<sup>[15]</sup>,传统 TDOA 无法应用.

文献<sup>[15]</sup>提出对于运动的目标节点,可计算  $\hat{l}_i(p+1) - \hat{l}_i(p)$ , 即监测节点  $i$  测得的目标节点连续两个超声波脉冲的 TDOA. 定义  $y_i(p) = \hat{l}_i(p+1) - \hat{l}_i(p) - L$ ,  $\mathbf{d}(p) = \mathbf{x}_0(p+1) - \mathbf{x}_0(p)$ ,  $\mathbf{d}(p)$  表示目标在两次脉冲间隔内位移. 利用式(3)得到

$$y_i(p) = f_i(\mathbf{x}_0(p), \mathbf{d}(p)) + e_i(p) \quad (4)$$

式中

$$f_i(\mathbf{x}_0(p), \mathbf{d}(p)) = \frac{\|\mathbf{x}_0(p) + \mathbf{d}(p) - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s}$$

$$e_i(p) = L(\epsilon_0 - \epsilon_i) + n_i(p+1) - n_i(p)$$

式(4)提供了测量值  $y_i(p)$  与待测值  $x_0(p)$ ,  $\mathbf{d}(p)$  的关系. 其中,  $e_i(p)$  是由频偏和测量误差引起的随机噪声,服从正态分布  $e_i(p) \sim N(0, 2(L^2\sigma_f^2 + \sigma_n^2))$ . 由此可以看出,  $f_i(\mathbf{x}_0(p), \mathbf{d}(p))$  与节点之间的时钟

偏移无关,根据式(4)运用测量值  $y_i(p)$  来估计  $\mathbf{x}_0(p)$  与  $\mathbf{d}(p)$ ,这就是异步传感器网络中目标位置估计的原理。

$N$  个监测节点分别估计目标节点连续两个超声波脉冲的 TDOA 值,式(4)扩展为向量形式

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}) + \mathbf{e}$$

式中,  $\mathbf{e}$  为高斯随机噪声向量,协方差矩阵  $\mathbf{Q} = E[\mathbf{e}\mathbf{e}^T] = \sigma_Q^2 \mathbf{I}_N$ ,  $\sigma_Q^2 = 2(L^2\sigma_Q^2 + \sigma_n^2)$

目标节点定位问题转化为对向量  $\mathbf{x}_0, \mathbf{d}$  的估计问题.将两个向量合并,令

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{d} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{2D}$$

观察矢量的似然函数<sup>[15]</sup>

$$p(\mathbf{y}; \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\mathbf{Q}|^{1/2}} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{2}[\mathbf{y} - f(\boldsymbol{\theta})]^T \mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{y} - f(\boldsymbol{\theta})]\right\}$$

$\boldsymbol{\theta}$  的最大似然估计为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{MLE}} = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} [\mathbf{y} - f(\boldsymbol{\theta})]^T \mathbf{Q}^{-1}[\mathbf{y} - f(\boldsymbol{\theta})] \quad (5)$$

用 Taylor 展开式(5),并用梯度下降法求解.假设  $f(\cdot)$  的梯度矩阵为  $\mathbf{G}$ ,求解  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{MLE}}$  的递推公式为<sup>[15]</sup>

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{k+1} =$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k + (\mathbf{G}^T(\hat{\boldsymbol{\theta}}_k) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_k))^{-1} \mathbf{G}^T(\hat{\boldsymbol{\theta}}_k) \mathbf{Q}^{-1}(\mathbf{y} - f(\hat{\boldsymbol{\theta}}_k))$$

上述方法估计出的  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$  和  $\hat{\mathbf{d}}(p)$ ,与真实值的误差受两个连续脉冲时间内目标移动距离  $\mathbf{d}(p)$  影响.当  $\mathbf{d}(p)$  减小时,估计值  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$  的克拉美罗下界(CRLB)显著增大,误差明显;但估计值  $\hat{\mathbf{d}}(p)$  受  $\mathbf{d}(p)$  影响很小<sup>[15]</sup>.

由于估计值  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$  的误差受目标移动距离影响明显,因此不能直接用作目标节点位置.文献[15]提出了复合定位和累积定位方法.复合定位将  $\hat{\mathbf{d}}(p)$  与预设门限值  $\mathbf{d}_{\text{Th}}$  比较,若  $\hat{\mathbf{d}}(p) > \mathbf{d}_{\text{Th}}$ ,则节点位置取  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$ ,否则为  $\tilde{\mathbf{x}}_0(p-1) + \hat{\mathbf{d}}(p-1)$ ;累积定位则是将多个位移合并,直到大于预设门限值  $\mathbf{D}_{\text{Th}}$ ,此时估计出的  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$  误差较小,可作为节点的初始位置,减小后续定位误差。

### 3 分段式异步目标定位方法

文献[15]提出的两种定位算法,在目标节点慢速移动情况下估计值  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$  的误差过大,难以获得节点的准确位置,且定位误差随时间持续积累,定位性能差。

本文提出的分段式异步定位方法对定位过程分

时间段,防止误差累积.汇聚节点维护计数器  $n_d$ ,用于统计目标位移小于门限值的连续时间段个数.当  $n_d$  超出一定范围,则下次定位采用类似于 Cricket 和 Active Bat 系统 RF 同步的方法获得比较准确的  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$ ,作为新的时间段中异步目标定位的初始位置.基于目标速度的分段式异步目标定位方法如下:

(I) 定位时间段开始:汇聚节点将计数器  $n_d$  清 0;目标节点发发送 RF 信号 msg<sub>Sync</sub> 再发送超声波脉冲.监测节点测量 RF 信号与超声波脉冲的时间差.由于 RF 信号传播速度远大于超声波,故可准确估计超声波脉冲的 TOA 时间.汇聚节点据此计算出  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$ <sup>[11]</sup>.

(II) 目标节点以周期  $L$ (tick)发射超声波,不再发送 RF 同步信号.监测节点记录第  $p$  个脉冲的到达时间  $\hat{l}_i(p)$  并发送至汇聚节点。

(III) 汇聚节点判断收集到的  $\hat{l}_i(p)$  是否足够,若少于  $2D$ ( $D$  为坐标维数)个,则无法估计出  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$  和  $\hat{\mathbf{d}}_0(p)$ ,此次定位失败.汇聚节点给目标节点发送请求同步定位的报文 msg<sub>Req</sub>,并转至第 (VI)步。

(IV) 汇聚节点用第 3 节的异步网络目标位置估计方法计算出  $\hat{\mathbf{x}}_0(p)$  和  $\hat{\mathbf{d}}(p)$ ,并通过以下公式更新  $n_d$

$$n_d = \begin{cases} 0, & \|\hat{\mathbf{d}}(p)\| \geq \mathbf{d}_{\text{Th}} \\ n_d + 1, & \|\hat{\mathbf{d}}(p)\| < \mathbf{d}_{\text{Th}} \end{cases}$$

进一步通过以下公式计算节点位置  $\tilde{\mathbf{x}}_0(p)$

$$\tilde{\mathbf{x}}_0(p) = \begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_0(p), & \|\hat{\mathbf{d}}(p)\| \geq \mathbf{d}_{\text{Th}} \\ \tilde{\mathbf{x}}_0(p-1) + \hat{\mathbf{d}}(p-1), & \|\hat{\mathbf{d}}(p)\| < \mathbf{d}_{\text{Th}} \end{cases}$$

(V) 汇聚节点将计数器  $n_d$  与预设的分段周期  $n_{\text{Th}}$  比较,若  $n_d > n_{\text{Th}}$  给目标节点发送请求同步定位的报文 msg<sub>Req</sub>,  $n_d > n_{\text{Th}}$  表示连续一段时间内目标节点保持慢速运动,此情况下的异步定位结果与真实值偏移增大,需重新获得目标准确位置。

(VI) 目标节点收到请求报文 msg<sub>Req</sub>,将转到第 (I)步,新的定位时间段开始。

### 4 实验结果及讨论

仿真实验中,假定目标节点每秒钟发射一次超声波脉冲,其在空气中传播速度  $c = 343$  m/s,各监测节点标称时钟频率  $F_s = 48$  kHz,根据文献[16]取时钟偏移的方差  $\sigma_f^2 = 10^{-10}$ .监测节点 TOA 时间测量误差的方差  $\sigma_n^2 = 0.5$ .8 个监测节点随机放置在

20 m×20 m 的平面上,目标节点在此范围内移动。

#### 4.1 一次定位结果

对目标节点分别采用分段式定位方法、混合定位及累积定位,比较一次定位的结果。仿真选择高斯分布的变量作为 TOA 时间测量误差及节点频率偏移,运动方向从左向右。复合定位和分段式定位参数  $d_{Th}=0.6$  m,分段式定位参数  $n_{Th}=10$ ,累积定位参数  $D_{Th}=1$  m。根据目标节点的运动情况分三种情况进行单次仿真:

(I) 高速随机方向运动。目标节点以 1 m/s 的速度匀速运动。

由图 1 可以看出,三种定位方法的结果相同。这是由于目标节点两次脉冲间隔内运动距离  $d=1$  m,大于或等于  $d_{Th}$  和  $D_{Th}$ ,因此估计值  $\hat{x}_0(p)$  误差小,三种定位方法都直接使用  $\hat{x}_0(p)$  作为目标节点的实际位置。

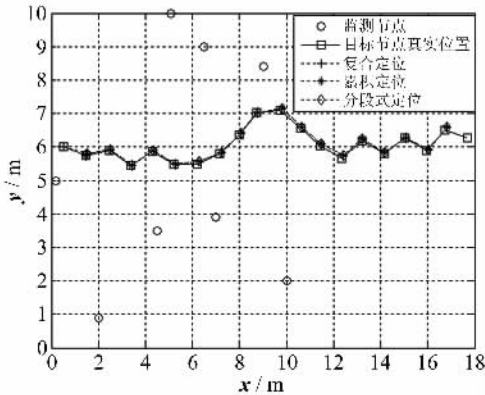


图 1 定位随机方向高速运动目标

Fig. 1 Localization of high speed, random direction source

(II) 加速、减速直线运动。目标速度从 0.1 m/s 增加到 1 m/s,持续一段时间减为 0.1 m/s。

由图 2 可看出,在初始阶段,目标节点移动距离

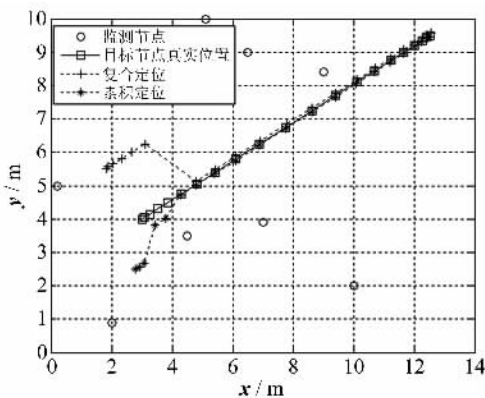


图 2 对变速运动目标复合定位和累积定位

Fig. 2 Localization of source with varying speed using the hybrid and cumulative scheme

过小,复合定位和累积定位无法准确估计  $\hat{x}_0(p)$ ,仅使用  $\hat{d}(p)$  即目标位移量来计算目标位置,由于缺乏初始位置,误差大。对复合定位,误差延续到目标速度达到 0.6 m/s,此后估计值  $\hat{x}_0(p)$  可直接用于计算目标位置;对累积定位,误差延续到目标总位移达到 1 m,此时估计出较准确的  $\hat{x}_0(p)$  作为后续定位的起始位置。在减速过程中尽管采用  $\hat{d}(p)$  定位,但误差较小,这是由于在减速之前已经获得目标节点较准确的初始位置。

从图 3 可看出,分段式定位整个过程性能稳定。节点第一次定位采用同步定位方式,获得准确的初

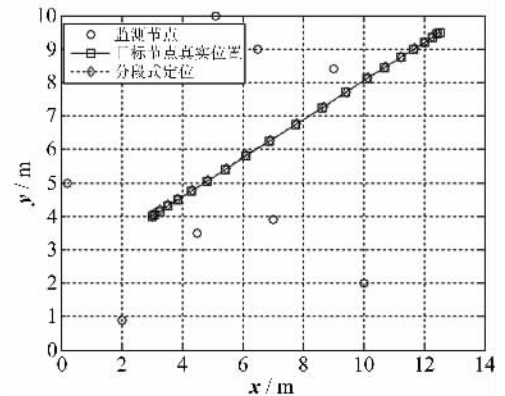


图 3 对变速运动目标分段式定位

Fig. 3 Localization of source with varying speed using the segmented scheme

始位置信息,然后通过  $\hat{d}(p)$  定位,速度达到 0.6 m/s 后采用  $\hat{x}_0(p)$  定位。参数  $n_{Th}=10$ ,整个定位过程未达到重新分段的条件,故只分一段。

(III) 慢速直线运动。目标保持 0.1 m/s 的速度匀速运动。

图 4 给出三种方法定位结果。由于目标保持恒定慢速,复合定位始终无法获得准确的  $\hat{x}_0(p)$  作为

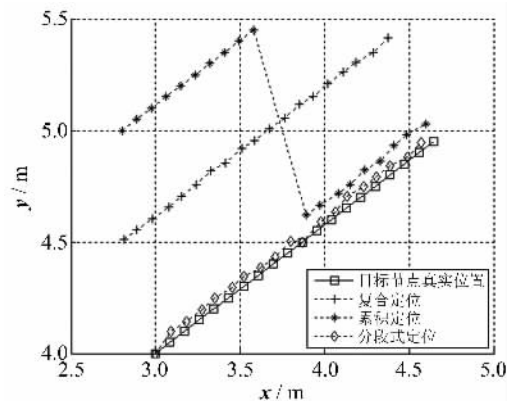


图 4 定位慢速运动目标

Fig. 4 Localization of slowly moving source

初始位置,误差最大;同样,累积定位初始偏移显著,在目标运动一段时间,总位移达到  $D_{Th}$ 后能估计出比较准确的  $\hat{x}_0(p)$ ,后续定位误差减小;分段式定位由于在每段定位时间开始采用同步定位获得准确的节点位置,能达到理想的定位效果,图中分为两段,A点和B点定位采用同步方式,作为分段定位的起点.

#### 4.2 多次定位结果

进行多次仿真,将定位结果取均值,每次随机摆放监测节点和目标节点位置. 参数  $d_{Th} = 0.6 \text{ m}$ ,  $n_{Th} = 10$ ,  $D_{Th} = 1 \text{ m}$ . 图 5 给出 100 次仿真后定位误差与节点速度的关系. 由图 5 可以看出,在目标节点速度较小时,分段式定位性能明显高于复合定位和累积定位;目标节点达到  $0.6 \text{ m/s}$  后,性能基本相同.

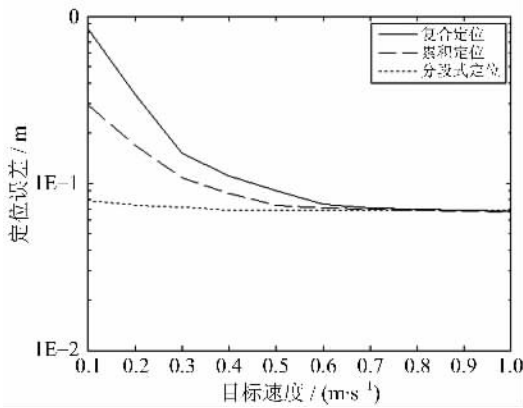


图 5 三种定位方法性能比较

Fig. 5 Comparing the performance of three localization schemes

图 6 给出节点速度  $0.1 \text{ m/s}$  时,分段式定位误差与分段周期  $n_{Th}$  的关系.  $n_{Th}$  越小,定位精度越高,但同步开销越大, $n_{Th}$  取 1 即为同步定位. 在单次仿真过程中取  $n_{Th} = 10$ ,表示目标节点保持低速运动

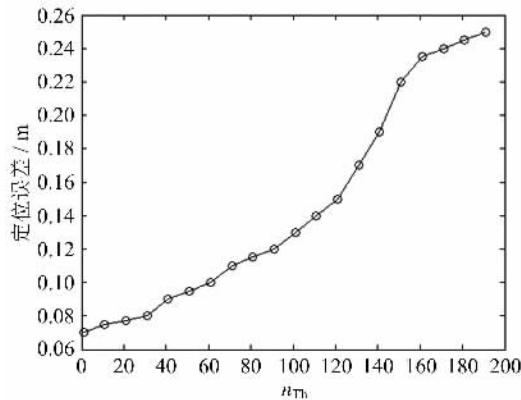


图 6 分段式定位误差与  $n_{Th}$  关系

Fig. 6 Localization error of segmented scheme vs  $n_{Th}$

时,每定位 10 次进行 1 次同步,效果良好. 实际应用时可根据需要选择更大的  $n_{Th}$  以减少同步开销.

## 5 结论

分段式异步网络定位方法通过增加少量的同步开销获得目标准确的初始位置减小异步定位误差,能适用于不同速度的目标节点,解决了传统异步定位方法定位慢速运动节点误差大的问题.

### 参考文献 (References)

[1] Misra S, Bhardwaj S, Xue G L. ROSETTA: robust and secure mobile target tracking in a wireless Ad Hoc environment [EB/OL]. <http://optimization.asu.edu/~misra/papers/milcom06.pdf>.

[2] Hong X Y, Xu K X, Gerla M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks [J]. IEEE Network Magazine, 2002, 16(4): 11-21.

[3] Adjie-Winoto W. A self-configuring resolver architecture for resource discovery and routing in device networks[D]. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

[4] He T, Huang C D, Blum B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor network [C]// Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego, CA: ACM Press, 2003: 81-95.

[5] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in Ad hoc networks[J]. Journal of Telecommunication Systems, 2003,22(1-4): 267-280.

[6] Liu Y S, Zhou H, Zhao B H. Secure location verification using hop-distance relationship in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2nd IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference. Tsukuba, Japan: IEEE Press, 2007: 62-68.

[7] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: an in-building RFbased user location and tracking system [C]// Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Tel Aviv, Israel: IEEE Press2000, 2: 775-784.

[8] Nagpal R. Organizing a global coordinate system from local information on an amorphous computer[R]. AI Memory 1666, MIT AI Laboratory, 1999.

[9] Lazos L, Poovendran R, Čapkun S. ROPE: robust position estimation in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles: IEEE Press, 2005,43: 144092.

- [C]//Next Generation Data Mining. Cambridge, Mass: MIT Press, 2003: 191-212.
- [2] Manku G S, Motwani R. Approximate frequency counts over data streams[C]// Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Data Bases. Hong Kong: VLDB Endowment, 2002: 346-357.
- [3] Chang J H, Lee W S. Finding recent frequent itemsets adaptively over online data streams[C]// Proceedings of the 9th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Washington: ACM Press, 2003: 487-492.
- [4] Cormode G, Muthukrishnan S. What's hot and what's not: tracking most frequent items dynamically [J]. ACM Transactions on Database Systems, 2003, 30 (1): 249-278.
- [5] Arasu A, Manku G S. Approximate counts and quantiles over sliding windows[C]// Proceedings of the 23rd ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems. Paris, France: ACM Press, 2004: 286-296.
- [6] Datar M, Gionis A, Indyk P, et al. Maintaining stream statistics over sliding windows [J]. SIAM Journal on Computing, 2002, 31(6): 1 794-1 813.
- [7] Pasquier N, Bastide Y, Taouil R, et al. Discovering frequent closed itemsets for association rules [C]// Proceedings of the 17th International Conference on Database Theory. Berlin: Springer-Verlag, 1999, 1 540: 398-416.
- [8] 刘学军,徐宏炳,董逸生,等.基于滑动窗口的数据流闭合频繁模式的挖掘[J].计算机研究与发展,2006,43 (10): 1 738-1 743.
- [9] Han J, Kamber M. 数据挖掘概念和技术[M]. 范明译,北京:机械工业出版社,2001.
- [10] 陈慧萍,朱峰,王健东,等.一种基于划分的带项目约束的频繁项集挖掘算法[J].系统工程与电子技术,2006, 28(7):1 082-1 086.
- [11] 宋余庆,朱玉全,孙志挥,等.一种基于频繁模式树的约束最大频繁项目集挖掘及其更新算法[J].计算机研究与发展,2005,42(5): 777-783.
- [12] 刘学军,徐宏炳,董逸生等.挖掘数据流中的频繁模式 [J]. 计算机研究与发展,2005,42(12):2 192-2 198.

(上接第 1 193 页)

- [10] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1 905-1 915.
- [11] Ward A, Jones A, Hopper A. A new location technique for the active office [J]. IEEE Personal Communications, 1997, 4(5): 42-47.
- [12] Priyantha N B, Chakraborty A, Balakrishnan H. The cricket location-support system[C]// Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, MA: ACM Press, 2000: 32-43.
- [13] Chen J C, Yip L, Elson J, et al. Coherent acoustic array processing and localization on wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE, 2003, 91(8): 1 154-1 162.
- [14] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [C]// Proceedings of the 5th Symposium Operating Systems Design and Implementation. Boston, MA: ACM Press, 2002, 36(S1): 147-163.
- [15] Li T, Ekpenyong A, Huang Y F. A location system using asynchronous distributed sensors [C]// Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hong Kong: IEEE Press, 2004, 1: 620-628.
- [16] 赵保华,张炜,李婧,等.传感器网络中的多重贪心路由算法[J].北京邮电大学学报,29(Sup):11-15,2006
- [17] Vig J R. Introduction to quartz frequency standards [R]. SLCETTR-92-1, Army Research Laboratory, Electronic and Power Sources Directorate, Fort Monmouth, NJ, 1992.