

## 多移动信标辅助的分布式节点定位方法

崔焕庆<sup>1,2</sup>, 王英龙<sup>2</sup>, 郭强<sup>2</sup>, 吕家亮<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东省计算机网络重点实验室 山东省计算中心, 山东 济南 250014)

**摘 要:** 为提高移动信标辅助定位算法的定位精度, 避免重复扫描待定位节点, 提出了一种使用多个移动信标的定位方法。这些信标在遍历网络时保持一定相对位置关系, 使用 TDoA 技术测距并为未知节点提供距离信息辅助其定位。提出了基于最优覆盖策略的 2 种移动信标路径规划方法。仿真结果表明, 所提出的算法具有较高的定位精度, 且所使用的移动路径性能较高。

**关键词:** 无线传感器网络; 定位; 移动信标; 路径规划

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)03-0103-09

## Multi-mobile-beacon assisted distributed node localization scheme

CUI Huan-qing<sup>1,2</sup>, WANG Ying-long<sup>2</sup>, GUO Qiang<sup>2</sup>, LV Jia-liang<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Network, Shandong Computer Science Center, Ji'nan 250014, China)

**Abstract:** To improve the localization precision and avoid scanning unknown nodes repeatedly in mobile beacon assisted localization method, a multi-mobile-beacon assisted localization scheme was proposed. The beacons keep a certain relative position while traversing the network and ranging with TDoA, and provide information to unknown nodes to estimate locations. Two path planning methods based on optimal coverage strategy were introduced. Simulation results show that the proposed scheme and paths perform well.

**Key words:** wireless sensor network; localization; mobile beacon; path planning

### 1 引言

通过在目标区域部署大量传感器节点, 可以实现诸如军事防御、目标跟踪、环境监测、空间探索、医疗卫生等诸多应用。对于大多数应用, 位置信息可使感知数据获得地理意义; 位置信息还可辅助进行无线传感器网络的路由、拓扑管理等, 因此, 定位成为无线传感器网络的关键技术之一<sup>[1]</sup>。

无线传感器网络的定位包含网络节点定位和

外部目标定位 2 类问题, 前者是后者的基础。节点定位即通过一定的技术、方法和手段获取无线传感器网络节点的绝对或相对位置的过程, 可分为基于信标和无信标的定位方法<sup>[1,2]</sup>。基于信标的方法需在网络中部署若干已知自身位置的信标, 而后其他节点, 即未知节点通过测量到信标的距离、角度等信息进行定位。无信标的方法利用节点间的相互关系, 各节点以自身为参考点建立相对坐标。使用基于信标比无信标的方法能得到更高的定位精度, 而

收稿日期: 2010-12-28; 修回日期: 2011-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60802030); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009GQ002, ZR2010FQ014); 山东省中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2009DX011); 青岛市科技发展计划基金资助项目(KZJ-47, 09-1-3-50-ch)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (60802030); The Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2009GQ002, ZR2010FQ014); Primitive Research Fund for Excellent Young and Middle-aged Scientists of Shandong Province (BS2009DX011); The Science and Technology Development Project of Qingdao (KZJ-47, 09-1-3-50-ch)

且信标越多, 定位精度越高, 但是信标比未知节点的成本要高很多。使用移动信标进行定位既能达到基于固定信标定位方法的精度, 又可降低网络成本和能耗, 成为当前的研究热点。一般而言, 移动信标辅助定位方法包含如下阶段。

1) 信标沿着一定的路径遍历整个网络部署区域, 并同时广播数据分组。将每个广播消息的信标位置称为虚拟信标。

2) 未知节点接收虚拟信标信息, 并存储在一个虚拟信标信息表中。

3) 未知节点利用所记录的信息估算位置。

一个未知节点至少需要接收到 3 个非共线(二维)或者 4 个非共面(三维)虚拟信标信息, 才可实现定位, 因此使用一个移动信标的定位方法需要信标多次经过一个未知节点。本文提出一种多个移动信标辅助的定位方法, 同一时刻可产生多个虚拟信标, 那么每个未知节点便可实现一次性定位。

## 2 相关工作

使用移动信标进行定位的最简单方法就是在信标移动过程中, 随机停留在某些位置并放置一个普通的传感器节点, 或者直接将移动信标位置作为离它最近的未知节点的位置, 再把这些节点看作固定信标, 辅助其他节点的定位。如移动信标辅助的 DV-Hop 定位方法<sup>[3]</sup>利用移动信标产生固定信标, 接着用 DV-Hop 方法实现定位。这种方法需要进行迭代计算, 误差较大, 而且转换为固定信标的节点能量消耗较快。因此, 绝大多数的移动信标辅助定位方法利用移动信标产生虚拟信标, 以辅助未知节点定位。

与使用固定信标的定位方法相同, 移动信标辅助定位方法可分为基于测距和无需测距的定位方法。基于测距的方法需测量未知节点与虚拟信标之间的距离。Zhang 等<sup>[4]</sup>提出使用 TDoA (time difference of arrival) 测距, 而后使用三边测量法估算位置的方法。Zhong 等<sup>[5]</sup>提出根据声波能量与传播距离的关系及来自不同虚拟信标的能量来估算未知节点的位置, 并采用中垂线策略、速度调整策略和虚拟排斥力策略提高定位性能。根据节点之间的邻接关系, MBL(ndc) (mobile beacon-assisted localization algorithm based on network-density clustering) 算法<sup>[6]</sup>首先对未知节点进行分簇, 在每个簇内

获得各个未知节点相对坐标, 接着利用移动信标对簇头节点进行定位, 而后便可定位其他节点。Kim 等<sup>[7]</sup>还给出了采用加权最小二乘法提高使用移动信标时测距精度的方法。

无需测距的定位方法可以用(加权)质心算法计算位置。如 MACL (mobile anchor centroid localization) 算法<sup>[8]</sup>中, 未知节点取所接收到的虚拟信标的位置平均值为自己的位置, 陈娟等<sup>[9]</sup>则使用加权质心算法。ADO (arrival and departure overlap) 算法<sup>[10]</sup>利用未知节点进入和离开移动信标通信范围的交叉部分构成 ADO 区域, 再求取 HADO (half ADO) 的质心作为未知节点的位置。Lee 等<sup>[11]</sup>选择 3 个虚拟信标, 使用其中 2 个构建交叉区域, 再用第 3 个计算未知节点位置。MBB (mobile bounding box) 算法<sup>[12]</sup>使用正方形近似表示信标通信区域, 对网络进行网格划分后, 信标沿网格顶点移动, 未知节点利用接收的虚拟信标的位置平均值作为位置估计值。RROI (radiate region of intersection) 算法<sup>[13]</sup>需移动信标带有定向天线, 以多个虚拟信标波束交叉区域的质心作为未知节点的估计位置。史清江等<sup>[14]</sup>使用多功率移动信标为每个未知节点构造不等式约束, 再使用凸规划算法求解位置, Chen 等<sup>[15]</sup>给出了在有障碍物的场景中使用该方法时的改进措施。

利用移动信标也可确定多条通过未知节点的直线, 取它们的交点作为估计位置。PI (perpendicular intersection) 算法<sup>[16]</sup>要求信标沿三角形移动, 将 2 条边上具有最大 RSS (received signal strength) 值的点看作未知节点在边上的投影点, 取通过这 2 个点的垂线交点为未知节点的位置。MAP (mobile anchor positioning) 算法<sup>[17]</sup>以最初进入和最后离开的虚拟信标通信区域的交点作为 2 个候选位置, 再使用已定位邻居节点或其他虚拟信标确定可行位置。使用携带定向天线的移动信标, 未知节点可选择最初进入和最后离开的虚拟信标的 2 个边界线交点<sup>[13]</sup>, 或 2 个最大 RSS 值对应的定向波束的中线交点作为估计位置<sup>[18]</sup>。Ou 等<sup>[19]</sup>提出的方法需要携带定向天线的信标沿直线运动, 未知节点维护一个按照接收时间排列的虚拟信标列表, 取居中的虚拟信标作为自己的位置。

上述算法都是确定性的, 也有学者提出了概率性算法。Caballero 等<sup>[20]</sup>提出了在三维室外环境下基于测距的粒子滤波定位方法。MBL<sup>[21]</sup>算法使用分布

式的概率算法给出未知节点可能位于的区域及该估计的可能性。A-MBL (adapting MBL)<sup>[21]</sup>算法在 MBL 算法的基础上调整估计过程中抽样集合的规模和动态模型的参数, SA-MBL (self-adapting MBL)<sup>[22]</sup>算法在保证 A-MBL 算法精度的前提下, 给出了判断达到定位稳定状态的方法, 从而提高了算法的灵活性。Huang 等<sup>[23]</sup>提出由信标使用蒙特卡罗抽样方法来估算未知节点位置。

使用多个移动信标可提高定位性能。虚拟尺<sup>[24]</sup>方法将 2 个信标置于长度固定的车辆上, 移动期间测量未知节点对之间的距离, 然后使用集中或分布式算法计算未知节点位置, 该方法需要移动信标定向发射超声波信号, 适用于室内场景。张正勇等<sup>[25]</sup>将 9 个移动信标构成一个圆形, 未知节点通过比较来自不同信标的 RSS 值确定可行区域, 并取该区域的质心作为其估计位置。Patro 等<sup>[26]</sup>使用 4 个移动信标在未知节点周围构成一个正方形, 未知节点取正方形的质心作为位置估计值。由于正三角形可完整覆盖一个平面, Zhang 等<sup>[27]</sup>使用由 3 个信标构成的 GMAN (group of mobile anchor nodes) 遍历网络部署区域, 未知节点根据 RSS 求出自己所在的 3 条直线, 取其交点为自身位置估计值。该方法需选择来自不同信标的相同 RSS 值, 而 RSS 受各种环境因素影响较大, 部分未知节点可能无法接收到来自不同信标的相同 RSS。这些方法都没有探讨移动信标的路径规划问题。

本文针对室外二维传感器网络, 提出基于 TDoA 测距的 3 个移动信标辅助的定位方法, 以实现高精度定位; 探讨了信标移动路径规划方法, 以覆盖整个网络部署区域。在下文中, 假定  $s$  是一个未知节点, 且估计位置为  $(\hat{x}_s, \hat{y}_s)$ , 真实位置为  $(x_s, y_s)$ ; 信标  $B_i (i=1, 2, 3)$  的坐标为  $B_i(x_i, y_i)$ , 且传输范围是半径为  $R$  的圆。

### 3 3 个移动信标辅助的定位方法

#### 3.1 信标的位置关系

3 个信标可以在一条直线上, 也可构成一个三角形。如果 3 个信标在一条直线上(如图 1(a)所示), 那么即使未知节点同时接收到 3 个信标的信息, 也不能实现定位; 如果 3 个信标构成边长大于  $R$  的三角形(如图 1(b)所示), 那么它们的交叉区域会很小, 每个时刻可定位的未知节点个数就会很少; 如果 3 个信标构成边长小于  $R$  的三角形(图 1(c)), 信标两两之间会产生较大的信号干扰。因此将 3 个信标

排列成边长为  $R$  的等边三角形(如图 2 所示), 这也是文献[27]所使用的位置关系。

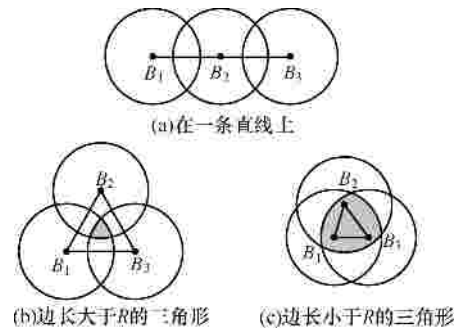


图 1 3 个信标之间的位置关系

如图 2 示, 设 3 个信标按顺时针序排列, 它们的通信区域有 6 个交点, 其中, 3 个交点即 3 个信标, 另 3 个记为  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$ 。显然, 位于  $\Delta B_1 B_2 B_3$  内的未知节点可同时接收到来自 3 个信标的信息而实现定位。如果未知节点只能接收到 2 个信标发送的消息, 则必位于  $\Delta B_1 B_2 A_1$ 、 $\Delta B_1 B_3 A_3$  和  $\Delta B_3 B_2 A_2$  之一的内部, 也可实现定位。因此, 只要一个未知节点能够接收到至少 2 个信标同一时刻发送的信息, 便可实现定位。

信标在遍历网络部署区域时保持相对位置不变, 并同时发送数据分组。

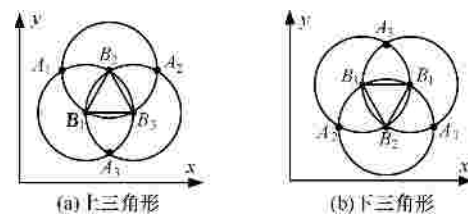


图 2 3 个信标形成等边三角形

#### 3.2 定位方法

RSS 是一种常用的测距方法, 实现简单, 成本低, 但实际环境中的温度、多径效应等使其精确度较差, 可能产生最大 50% 的测距误差<sup>[28]</sup>。TDoA 测距技术通常使用超声波/声波和射频信号之间的速度差测距, 精度高, 但是受限于 LOS (line of sight), 且超声波/声波的传播距离有限。考虑到移动信标通常携带 GPS (global positioning system) 以获取绝对坐标, 而 GPS 也可实现精确测距时, 本文使用另一种 TDoA 技术进行测距。如图 3 所示, 发射节点在时刻  $t_1$  发射速度为  $v$  的射频信号, 接收节点在  $t_2$  时刻接收到信息后, 立即回复一个射频信号, 发射节点在时刻  $t_3$  接收到回复信号, 可计算出两者之间的距离  $d$  为

$$d = \frac{1}{2}v(t_3 - t_1) \quad (1)$$



$B_2$  和  $B_3$  根据  $B_1$  选择的值以及相对于  $B_1$  的位置进行移动。

### 4.2 Scan 路径

如图 5(a) 示, Scan 路径<sup>[10,14,27,29]</sup>由多段平行直线组成。为使网络中的每个未知节点至少被  $\Delta B_1B_2B_3$  覆盖一次, 将区域的左右边界分别扩展  $l=R/2$ 。设信标的移动速度为  $v$ , 如图 6(a) 所示, 当  $v>R$  时, 阴影部分的未知节点将无法实现定位。如图 6(b) 所示, 当 Scan 路径中相邻 2 条平行直线的间距 (称为 Scan 路径的分辨率)  $d \leq \frac{\sqrt{3}R}{2}$  时, 上下相邻直线之间没有空隙。因此, 取  $v \leq R$  且  $d = \frac{\sqrt{3}R}{2}$ , 可定位部署区域内的所有节点。

显然, 此时 Scan 路径由  $\frac{2W}{\sqrt{3}R}$  段长度为  $L$  且平行于  $x$  轴的直线,  $(\frac{2W}{\sqrt{3}R} - 1)$  段长度为  $\frac{\sqrt{3}R}{2}$  且平行于  $y$  轴的直线组成, 所以, 路径总长度为

$$D_{Scan} = \frac{2\sqrt{3}LW}{R} - \frac{3\sqrt{3}R}{2} + 3W \quad (4)$$

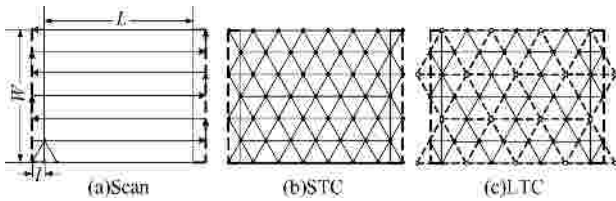


图 5 3 种移动路径

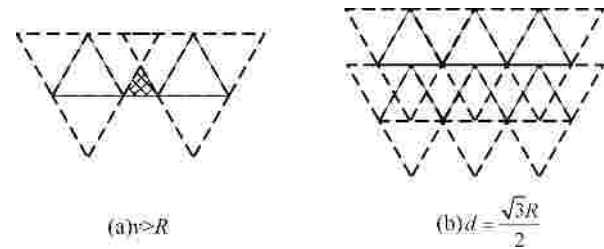


图 6 移动路径的覆盖情况

### 4.3 STC 和 LTC 路径

李石坚等<sup>[30]</sup>指出, 三重覆盖可保证网络部署区域的任意位置都可接收到至少 3 个信标信号, 并使用等距三重优化覆盖研究了单个移动信标辅助定位时的最佳路径问题。由于等距三重优化覆盖中, 各位置点构成等边三角形, 而本文提出的算法中的 3 个移动信标恰好也构成一个等边三角形, 从而可设计出最佳路径。

若形成等距三重优化覆盖的三角形是  $\Delta B_1B_2B_3$  (图 5(b) 所示), 称此时的移动信标路径

为 STC (small triangle coverage)。若形成等距三重优化覆盖的三角形是  $\Delta A_1A_2A_3$  (图 5(c) 所示), 称此时的移动信标路径为 LTC (large triangle coverage)。图 5(c) 中实心圆代表  $B_1, B_2, B_3$  位置, 而空心圆表示  $A_1, A_2, A_3$  位置。

如图 7(a) 示, 为使 3 个信标在 STC 路径中保持正三角形, 从最左侧上  $\Delta B_1B_2B_3$  开始,  $B_1$  移动到对称于线段  $B_2B_3$  的位置, 形成下  $\Delta B_3B_2B_1$ ; 接着,  $B_2$  移动到对称于线段  $B_1B_3$  的位置, 形成上  $\Delta B_3B_1B_2$ ; 随后,  $B_3$  移动到对称于线段  $B_1B_2$  的位置, 形成下  $\Delta B_2B_1B_3$ ; 这样  $B_1, B_2, B_3$  不断逐个轮流移动, 便可实现 STC 路径。可见, 在该路径的 2 个相邻三角形间, 一个信标关于公共边对称, 需移动  $\sqrt{3}R$  的距离, 另 2 个信标不移动。每段平行于  $x$  轴的路径由  $(2\frac{L+2l}{R} - 1)$  个  $\Delta B_1B_2B_3$  组成, 共  $\frac{2W}{\sqrt{3}R}$  段, 所以其路径长度为

$$D_{STC} = \left(2\frac{L+2l}{R} - 2\right) \times \sqrt{3}R + \left(\frac{2W}{\sqrt{3}R} \times \frac{3\sqrt{3}R}{2}\right) = 2\sqrt{3}L + 3W \quad (5)$$

如图 7(b) 所示, 为实现 LTC 路径, 从最左侧下  $\Delta B_2B_1B_3$  开始,  $B_3$  和  $B_1$  轮流水平移动,  $B_2$  轮流沿斜率为 1 和 -1 的直线向上和向下移动。因此在 2 个相邻  $\Delta A_1A_2A_3$  间,  $B_2$  移动距离为  $\sqrt{3}R$ ,  $B_1$  与  $B_3$  移动距离之和为  $2R$ 。每段平行于  $x$  轴的路径由  $\frac{L+2l}{R}$  个  $\Delta A_1A_2A_3$  组成, 共  $\frac{W}{\sqrt{3}R}$  段, 所以其路径长度为

$$D_{LTC} = \left(\frac{L+2l}{R} - 1\right) \times (\sqrt{3} + 2)R + \frac{3W}{\sqrt{3}R} \times \sqrt{3}R = (\sqrt{3} + 2)L + 3W \quad (6)$$

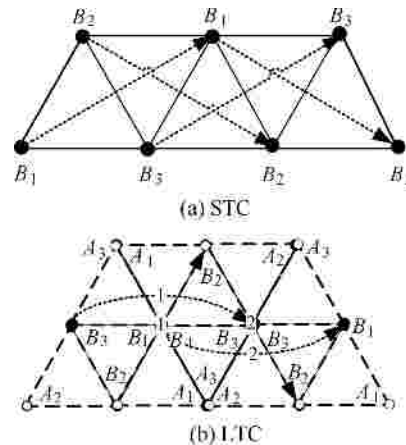


图 7 相邻三角形位置变换

STC 和 LTC 路径的长度均与  $R$  无关, 仅取决于  $W$  和  $L$ , 而且 STC 路径比 LTC 更短。

### 5 性能评价

本节将本文提出的算法 (简记为 TMBL) 与使用单个移动信标的三边测量法 (简记为 TRI)、文献 [25] 的方法 (简记为 NINE)、文献 [26] 的方法 (简记为 FOUR) 和文献 [27] 的算法 (简记为 GMAN) 进行对比, 以分析其性能。移动信标辅助定位方法应以尽可能短的信标移动路径、尽可能高的精度定位尽可能多的未知节点, 因此从以下 3 方面分析算法的性能。

1) 可定位节点数。指在信标一跳范围内可被定位的未知节点数量, 反映了移动信标路径的覆盖情况。

2) 定位误差。仅对可定位节点的误差进行分析, 定位误差定义为<sup>[14]</sup>

$$e = \frac{1}{NR} \sum_{s=1}^N \sqrt{(x_s - \hat{x}_s)^2 + (y_s - \hat{y}_s)^2} \quad (7)$$

其中,  $N$  是可定位节点的个数。

3) 信标移动路径长度。指所有移动信标在定位期间移动路径的总长度。

采用 MATLAB 7.0 对上述各种算法进行仿真实验。设定网络部署区域是  $(173 \times 100) \text{m}^2$  的矩形区域, 有 200 个未知节点均匀分布于区域内。移动信标的传输半径是各向对称的, 即其通信范围是一个圆形。设信标通信半径  $R=5\text{m}$ 、 $10\text{m}$ 、 $20\text{m}$  和  $25\text{m}$ , 分别考察不同  $R$  下的定位性能。假设 TMBL 与 TRI 均采用 3.2 节中所提出的测距方法, 测距误差是 10%。未知节点  $s$  与第  $i$  个虚拟信标之间的测量距离  $\hat{d}_{si}$  服从均值为真实距离  $d_{si}$ 、标准差为  $0.1d_{si}$  的正态分布。GMAN 和 NINE 所使用的 RSS 采用不考虑任何干扰的理想模型。

对于 RWP 模型, 取  $v_{\min}=1\text{m/s}$ ,  $v_{\max}=R\text{m/s}$ , 信标每隔 1s 广播一次数据分组, 运行时间分别取 1~10min 各 10 种情况。对于 Scan 路径, 取信标移动速度  $v=0.5R\text{m/s}$ , 分辨率  $d = \frac{\sqrt{3}R}{2}$ , 每隔 1s 广播一次数据分组。所有定位结果均取 5 次运行结果的平均值进行比较。

#### 5.1 RWP 模型

因为文献 [27] 的 GMAN 算法需采用 Scan 路径, 所以这里比较另外 4 种方法。

RWP 模型通常无法覆盖整个网络部署区域<sup>[24]</sup>, 部分未知节点无法接收到信标信息, 所以 4 种方法都无法定位全部未知节点。4 种方法的可定位节点数如图 8 所示。随着运行时间和  $R$  的增加, 4 种算

法的可定位节点数均增加。在  $R$  和运行时间相同情况下, TMBL 和 NINE 最多, FOUR 次之, TRI 的可定位节点数最少。在  $R=25\text{m}$ , 运行 10min 后, TMBL 可定位 98.7% 的节点, NINE 可定位 96.2% 的节点, 而 FOUR 和 TRI 分别可定位 77% 和 32.7% 的节点。

4 种算法的平均定位误差如表 1 所示, TRI 的误差最大, FOUR 和 NINE 次之, TMBL 的误差最小。不同的  $R$  值下, TMBL 的平均定位误差都在 6% 左右, 约为 FOUR 和 NINE 的 31%、TRI 的 12%。

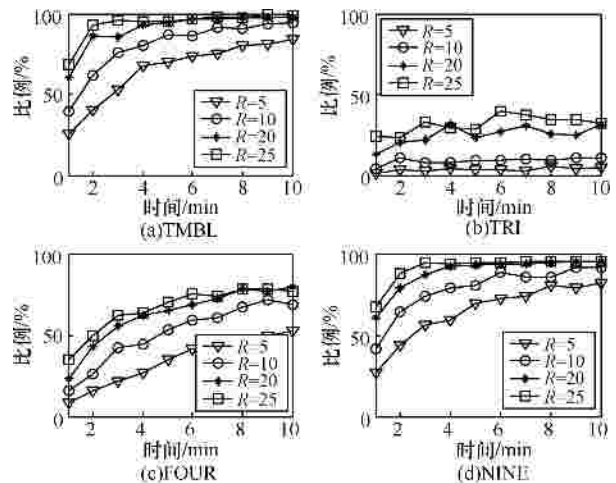


图 8 RWP 模型下的可定位节点数

表 1 RWP 模型下的平均定位误差/%

定位方法	$R/\text{m}$			
	5	10	20	25
TMBL	6.04	5.66	5.58	5.57
TRI	47.30	55.24	48.21	49.35
FOUR	17.45	16.77	17.20	16.85
NINE	17.00	18.17	19.41	19.24

#### 5.2 Scan 路径

TMBL 使用给定参数的 Scan 路径可定位全部节点, 但另外 4 种算法无法定位全部节点 (见表 2), 可见这些算法不能覆盖全部的网络部署区域。

表 2 Scan 路径下的可定位节点数

定位方法	$R/\text{m}$			
	5	10	20	25
TMBL	200	200	200	200
TRI	145	161	178	183
FOUR	105	124	146	162
NINE	191	191	185	173
GMAN	187	179	171	169

表 3 给出了采用 Scan 路径时的平均定位误差, 其中 GMAN 的误差最大, TRI、FOUR 和 NINE 的次之, TMBL 的误差最小。此外, TMBL 算法在 Scan 路径下的定位误差略小于 RWP 模型下的误差。

表 3 Scan 路径下的平均定位误差/%

定位方法	R/m			
	5	10	20	25
TMBL	5.07	5.20	5.55	5.37
TRI	19.97	19.47	16.30	19.89
FOUR	17.93	19.03	17.38	18.45
NINE	16.40	16.98	19.69	18.88
GMAN	45.65	42.43	34.94	33.62

### 5.3 STC 和 LTC 路径

移动信标只有在到达新位置后才发送数据分组。这 2 种路径仅适用于 TMBL 算法, 可定位全部未知节点。2 种路径下的平均定位误差如表 4 所示, 由于 LTC 使用  $\Delta A_1A_2A_3$  作为扫描三角形, 其面积要大于  $\Delta B_1B_2B_3$ , 所以其误差要比 STC 大。

表 4 STC 和 LTC 路径的平均定位误差/%

移动路径	R/m			
	5	10	20	25
STC	5.65	4.85	5.33	5.16
LTC	8.13	8.37	8.23	8.67

### 5.4 路径长度

在  $W$  和  $L$  一定的情况下, 使用同一种路径时, 信标路径总长度与信标个数成正比。

RWP 的路径长度与  $R$  无关, 但随着运行时间的增加而接近线性增长(如图 9 所示), 当运行 10min 时, 3 个信标移动超过 21 000m 的距离; 随着信标个数增加, 信标路径总长度随之增长。

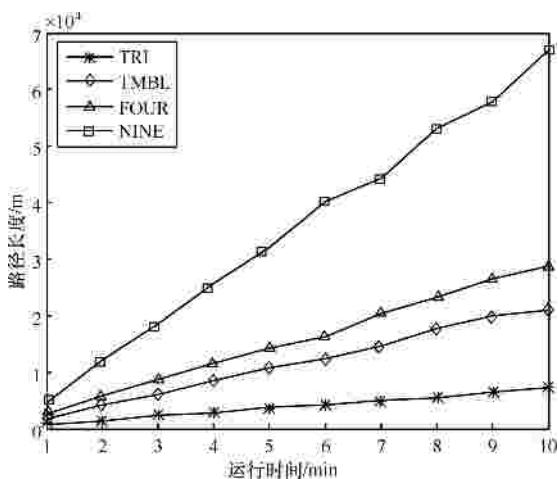


图 9 RWP 路径长度

如图 10 所示, Scan 路径长度是关于变量  $R$  的减函数, 当  $R=5m$  时, 3 个信标移动距离约为 37 500m, 当  $R=25m$  时, 其距离约为 8 500m。在  $R$  相同的情况下, 路径长度与信标个数成正比。

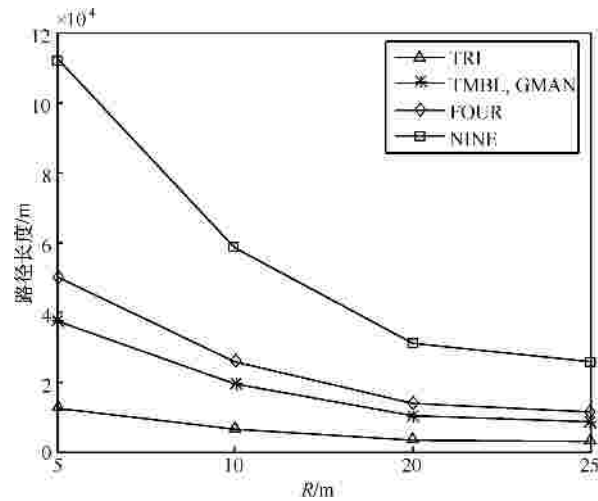


图 10 Scan 路径长度

在给定的  $W$  和  $L$  取值下, STC 与 LTC 的路径长度是一个常数, 分别约为 865m 和 892m, LTC 比 STC 约长 0.26Lm。

综上, TMBL 算法在各种路径下的平均定位误差最小, 而且 TMBL 算法在 STC 路径下的平均定位误差小于 RWP 模型、Scan 路径和 LTC 路径下的定位误差。同时, STC 路径的长度最短。因此采用 STC 路径的 TMBL 算法具有最佳性能。

## 6 结束语

移动信标辅助定位方法使用移动信标在遍历网络部署区域过程中产生的虚拟信标代替固定信标, 保证了定位精度, 同时降低了定位成本。本文提出了一种基于 3 个移动信标和 TDoA 测距技术在二维环境下的定位算法, 并给出了 4 种移动路径规划方法。实验表明, 在使用同一移动路径时, 本文所给出的方法比使用单一移动信标的三边测量法以及文献[25,26,27]提出的方法具有更好的性能。根据等距三重最优覆盖策略设计的 STC 路径可以覆盖整个网络部署区域, 其长度仅与区域大小有关, 长度最短, 而且使用该路径与使用 Scan 路径的定位精度大致相同, 高于使用 LTC 路径的定位精度。

下一步, 将着重研究使用多个移动信标在三维场景以及非理想(如存在障碍物、非理想传输范围)情况下的定位问题。

## 参考文献：

- [1] LIU Y, YANG Z, WANG X, *et al.* Location, localization, and localizability[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2010, 25(2): 274-297.
- [2] WANG J, GHOSH R, DAS S. A survey on sensor localization[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8(1): 2-11.
- [3] 姚忠孝, 俞立, 董齐芬. 基于移动信标的 DV-Hop 无线传感器网络定位算法[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(10): 1504-1509.
- YAO Z X, YU L, DONG Q F. Beacon-based DV-hop localization algorithm in wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(10): 1504-1509.
- [4] ZHANG B, YU F. An energy efficient localization algorithm for wireless sensor networks using a mobile anchor node[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation*[C]. Changsha, China, 2008. 215-219.
- [5] ZHONG Z, LUO D, LIU S, *et al.* An adaptive localization approach for wireless sensor networks based on gauss-markov mobility model[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(11): 1557-1568.
- [6] 赵方, 马严, 罗海勇等. 一种基于网络密度分簇的移动信标辅助定位方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(12): 2988-2992.
- ZHAO F, MA Y, LUO H Y, *et al.* A mobile beacon-assisted node localization algorithm using network-density-based clustering for wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(12): 2988-2992.
- [7] KIM E, KIM K. Distance estimation with weighted least squares for mobile beacon-based localization in wireless sensor networks[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(6): 559-562.
- [8] HU Z, GU D, SONG Z, *et al.* Localization in wireless sensor networks using a mobile anchor node[A]. *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*[C]. Xi'an, China, 2008. 602-607.
- [9] 陈娟, 李长庚, 宁新鲜. 基于移动信标的无线传感器网络节点定位[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(1): 121-125.
- CHEN J, LI C, NINIG X. Node Localization of wireless sensor networks based on mobile beacon[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(1): 121-125.
- [10] XIAO B, CHEN H, ZHOU S. Distributed localization using a moving beacon in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(5): 587-600.
- [11] LEE S, KIM E, KIM C, *et al.* Localization with a mobile beacon based on geometric constraints in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(1): 5801-5905.
- [12] 石为人, 许磊, 徐扬生. 一种基于移动锚节点的静态无线传感器网络定位算法[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(3): 385-393.
- SHI W R, XU L, XU Y S. Localization algorithm with mobile anchor in static wireless sensor network[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(3): 385-393.
- [13] ZHANG B, YU F. LSWD: localization scheme for wireless sensor networks using directional antenna[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(4): 2208-2216.
- [14] 史清江, 何晨. 多功率移动锚节点辅助的分布式节点定位方法[J]. *通信学报*, 2009, 30(10): 8-13.
- SHI Q J, HE C. Multi-power level mobile beacon assisted distributed node localization algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(10): 8-13.
- [15] CHEN H, SHI Q, TAN R, *et al.* Mobile element assisted cooperative localization for wireless sensor networks with obstacles[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 956-963.
- [16] GUO Z, GUO Y, HONG F, *et al.* Perpendicular intersection: locating wireless sensors with mobile beacon[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(7): 3501-3509.
- [17] LIAO H, LEE C, KEDIA S P. Mobile anchor positioning for wireless sensor networks[J]. *IET Communications*, 2011, 5(7): 914-921.
- [18] ZHANG B, YU F. Low-complex energy-efficient localisation algorithm for wireless sensor networks using directional antenna[J]. *IET Communications*, 2010, 13(4): 1617-1623.
- [19] OU C H. A localization scheme for wireless sensor networks using mobile anchors with directional antennas[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2011, 11(7): 1607-1616.
- [20] CABALLERO F, MERINO L, MAZA I, *et al.* A particle filtering method for wireless sensor network localization with an aerial robot beacon[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*[C]. Pasadena, USA, 2008. 596-601.
- [21] TENG G, ZHENG K, DONG W. Adapting mobile beacon-assisted localization in wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2009, 9(4): 2760-2779.
- [22] TENG G, ZHENG K, DONG W. An efficient and self-adapting localization in static wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2009, 9(8):

6150-6170.

- [23] HUANG R,ZARUBA G.V.Monte carlo localization of wireless sensor networks with a single mobile beacon[J]. Wireless Networks, 2009, 15(8): 978-990.
- [24] DING Y,WANG C,XIAO L.Using mobile beacons to locate sensors in obstructed environments[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010,70(6):644-656.
- [25] 张正勇, 孙智, 王刚等. 基于移动锚节点的无线传感器网络节点定位[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007,47(4):534- 537.  
ZHANG Z Y, SUN Z, WANG G, *et al.* Localization in wireless sensor networks with mobile anchor nodes[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2007,47(4):534- 537.
- [26] PATRO R K. Localization in wireless sensor network with mobile beacons[A].Proceedings of 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel[C]. Eliat, Israel, 2004. 22-24.
- [27] ZHANG B, YU F, ZHANG Z. Collaborative localization algorithm for wireless sensor networks using mobile anchors[A].Proce of 2nd Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications[C]. Wuhan, China,2009.309-312.
- [28] 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, 2008.  
SUN L M, LI J Z, CHEN Y, *et al.* Wireless Sensor Networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [29] KOUTSONIKOLAS D, DAS S M, HU Y C. Path planning of mobile landmarks for localization in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(13): 2577-2592.
- [30] 李石坚, 徐从富, 杨昉等. 面向传感器节点定位的移动信标路径获取[J]. 软件学报, 2008,19(2):455-467.

LI S J, XU C F, YANG Y, *et al.* Getting mobile beacon path for sensor localization[J]. Journal of Software, 2008, 19(2):455- 467.

#### 作者简介:



**崔焕庆** (1979-), 男, 山东泰安人, 博士, 山东科技大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、高性能计算、Petri 网理论与应用等。



**王英龙** (1965-), 男, 山东菏泽人, 博士, 山东省科学院院长, 山东省计算机网络重点实验室主任、研究员、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、云计算等。



**郭强** (1975-), 男, 山东德州人, 博士, 山东省计算中心特聘研究员, 主要研究方向为无线传感器网络、无线通信等。



**吕家亮** (1982-), 男, 山东东营人, 山东省计算中心助理研究员, 主要研究方向为无线局域网、无线传感器网络等。