

# 基于估计距离的无需测距定位算法

孟颖辉, 闻英友, 陈 剑, 赵 宏

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对无需测距定位算法定位误差大的问题,提出了一种基于估计距离的无需测距定位算法. 首先分析了两个邻居节点之间距离和通信范围相交面积之间的关系,得到一个线性函数. 线性函数的输出是一个表示两个邻居节点之间距离远近关系的参数,称之为距离参数. 然后用距离参数和锚节点之间的距离计算邻居节点之间的估计距离,最后根据估计距离计算未知节点的估计位置. 仿真结果表明,该算法在规则区域和不规则区域的定位误差都要低于当前同类型的定位算法.

**关 键 词:** 无需测距;邻居节点;线性函数;距离参数;锚节点

中图分类号: TP 393

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)07-0921-05

## Range-Free Localization Algorithm Based on Estimated Distances

MENG Ying-hui, WEN Ying-you, CHEN Jian, ZHAO Hong

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: MENG Ying-hui, E-mail: yinghuimeng@126.com)

**Abstract:** Due to the large localization error of range-free localization algorithms, a range-free localization algorithm based on estimated distances was proposed. Firstly, a linear function was designed by analyzing the relation between the distance of two neighbor nodes and the intersection area of them. The output was a distance parameter which could represent the distance of neighbor nodes. Then, estimated distances between nodes were calculated based on distances of anchor nodes. Finally, the estimated positions of non-anchor nodes were calculated based on estimated distances. Simulation results showed that the localization error of the proposed algorithm is smaller than that of the current range-free algorithms in both regular and irregular areas.

**Key words:** range-free; neighbor nodes; linear function; distance parameter; anchor nodes

无线传感器网络由大量低成本和体积小的传感器节点组成,主要用来对部署区域进行环境监测<sup>[1]</sup>. 监测信息必须和位置相结合才有意义<sup>[2]</sup>,然而传感器节点一般都是随机部署,节点位置往往不可控制. 节点可以通过配置 GPS 模块的方式获得自身精确位置信息,但是由于 GPS 耗能大、成本高,不适合给每个节点都装配<sup>[3]</sup>. 因此节点定位技术成为了无线传感器网络的关键技术之一.

到目前为止已经有许多无需测距定位算法,比较有代表性的有质心算法<sup>[4]</sup>、APIT 定位算法<sup>[5]</sup>、最优分割圆算法<sup>[6]</sup>、DV-HOP 算法<sup>[7]</sup>等. DV-HOP 算法利用跳数计算未知节点的估计坐

标,该算法在估计节点之间距离时,不管相邻节点距离远近,都用一跳表示,造成了较大定位误差. 文献[8]中的 LEAP 算法是 DV-HOP 算法的改进,将单跳矫正值用网络参数的一个函数计算获得,但是 LEAP 算法需要节点服从泊松分布,而且锚节点也要有规律的分布,通用性较差. 文献[9]中的 RSD 算法利用邻居节点信号强度值的大小排序来区分邻居节点之间的远近关系,但是信号强度受环境因素影响很大. 文献[10]提出了 DV-RND 定位算法,用一个参数 RND 来表示两个邻居节点之间的远近关系,而不是用一跳来表示,能够提高定位精度. 然而文中参数 RND 的表达不够准确,需要把锚节点放到部署区域的角落位

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903159,61173153); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110818001, N100218001); 沈阳市科技计划项目(1091176-1-00).

作者简介: 孟颖辉(1984-),男,辽宁沈阳人,东北大学博士研究生; 赵 宏(1954-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

置,影响了算法的通用性.而且以上算法在不规则区域,也就是带有覆盖空洞区域的定位误差更大.

为了解决上述问题,本文提出了一种基于估计距离的无需测距定位算法.首先设计了一个距离估计算法,算法中用了一个新的表示邻居节点之间距离远近关系的计量单位,称之为距离参数(distance parameter, DP).在计算 DP 修正值的过程中,过滤掉那些受覆盖空洞影响的锚节点信息,提高了 DP 修正值的准确性,并且使得估计距离算法也适用于不规则区域.最后根据估计距离计算未知节点的估计位置.本文算法简称 DPLA.

## 1 DPLA 定位算法

假设在一个区域随机部署  $n$  个传感器节点,其中  $m$  个锚节点,  $n-m$  个未知节点.锚节点是指知道自身位置信息的节点,未知节点是需要进行定位计算的节点.节点可以通过收发消息的方式获得自身邻居节点的信息,用  $N_i$  表示任意 1 个节点  $i$  的邻居节点集合.

### 1.1 DP 推导过程

节点的通信范围可以看成是一个以节点为圆心,  $r$  为半径的圆.两个邻居节点  $i$  和  $j$  的通信范围必定有相交部分,如图 1 所示.

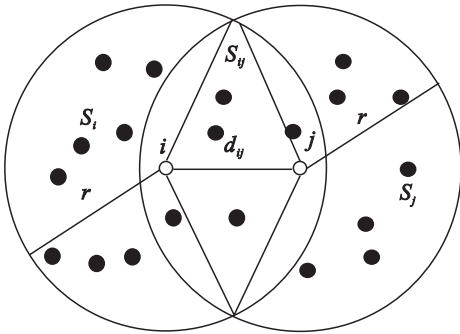


图 1 邻居节点通信区域示意图

Fig. 1 The communication range of neighbor nodes

其中  $d_{ij}$  表示两个节点之间的距离,  $S_{ij}$  表示两个邻居节点通信范围相交区域.根据图中的几何计算,  $S_{ij}$  的面积  $A_{S_{ij}}$  和 1 个节点的通信覆盖面积比值为

$$\frac{A_{S_{ij}}}{\pi r^2} = \frac{2}{\pi} \arccos\left(\frac{d_{ij}}{2r}\right) - \frac{d_{ij}}{\pi r} \sqrt{1 - \left(\frac{d_{ij}}{2r}\right)^2}. \quad (1)$$

用泰勒级数展开式(1)得到如下等式:

$$\frac{A_{S_{ij}}}{\pi r^2} = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{d_{ij}}{r}\right) + \frac{1}{12\pi} \left(\frac{d_{ij}}{r}\right)^3 + \frac{1}{320\pi} \left(\frac{d_{ij}}{r}\right)^5 + \dots \quad (2)$$

从式(2)中可以看到,由于节点是邻居节点,所以  $d_{ij}/r$  的取值范围是  $[0, 1]$ , 因此  $(d_{ij}/r)^3 / (12\pi)$  及其后面的值很小,如果忽略,则两者近似看成线性关系.当  $d_{ij}/r = 0$  时,  $A_{S_{ij}} / (\pi r^2)$  的值为 1; 当  $d_{ij}/r = 1$  时,  $A_{S_{ij}} / (\pi r^2)$  的值为 0.391, 以这两个点为已知点,可以得到一个线性函数:

$$\frac{d_{ij}}{r} = \frac{1}{0.609} \left(1 - \frac{A_{S_{ij}}}{\pi r^2}\right). \quad (3)$$

可以看到  $A_{S_{ij}}$  和  $d_{ij}$  成反比关系.  $A_{S_{ij}}$  是一个未知数,根据蒙特卡洛方法,  $A_{S_{ij}} / (\pi r^2)$  的比值可以近似地用落在面积区域内的点的个数比值计算,因此可以用如下等式来近似估算面积比值:

$$\frac{A_{S_{ij}}}{\pi r^2} \approx \varepsilon \cdot \frac{M_{ij}}{M_i}. \quad (4)$$

其中:  $M_{ij} = |N_i \cap N_j| + 2$  表示  $S_{ij}$  区域内包含的节点个数,  $|N_i \cap N_j|$  表示节点  $i$  和  $j$  的相同邻居节点个数;  $M_i = |N_i| + 1$  是节点  $i$  通信覆盖区域内节点个数,其中  $|N_i|$  表示节点  $i$  的邻居节点个数;  $\varepsilon$  是修正参数,因为式(4)是近似相等,存在误差,通过修正参数  $\varepsilon$  能够减小误差.将式(3)和式(4)结合得到如下等式:

$$DP_{ij} = \frac{d_{ij}}{r} = \frac{1}{0.609} \left(1 - \varepsilon \cdot \frac{M_{ij}}{M_i}\right). \quad (5)$$

$DP_{ij}$  就是本文邻居节点  $i$  和  $j$  之间的距离参数值.2 个邻居节点之间的  $DP_{ij}$  和  $DP_{ji}$  理论上应该是相等的,然而由于网络中的所有节点是随机分布的,  $DP_{ij}$  和  $DP_{ji}$  在计算的时候  $M_i$  和  $M_j$  不一定相等,从而导致  $DP_{ij}$  和  $DP_{ji}$  也不一定相等.根据蒙特卡洛原理,区域内随机点数越多,式(4)中左边和右边的值越接近,得到的估计值越准确,因此两个邻居节点的 DP 采用如下计算方法:

$$DP_{ij} = DP_{ji} = \frac{d_{ij}}{r} = \frac{1}{0.609} \left(1 - \varepsilon \cdot \frac{M_{ij}}{\max(M_i, M_j)}\right). \quad (6)$$

### 1.2 基于 DP 的距离估计算法

通过式(6)可以得到任意 2 个邻居节点之间的  $DP_{ij}$ . 由于  $DP_{ij}$  存在一定的误差,需要计算锚节点  $k$  的 DP 修正值  $\delta_k$ , 计算方法如下:

$$\delta_k = \frac{\sum_{k \neq s, s \in A} d_{ks}}{\sum_{k \neq s, s \in A} \min DP_{ks}}. \quad (7)$$

其中:  $A$  是锚节点集合;  $\min DP_{ks}$  是节点之间的最短 DP 路径值.上述方法在规则区域可以得到准确的修正值,然而当网络部署在图 2 中的不规则区域时,锚节点之间的最短路径很可能受覆盖空洞的影响,严重偏离真实值.

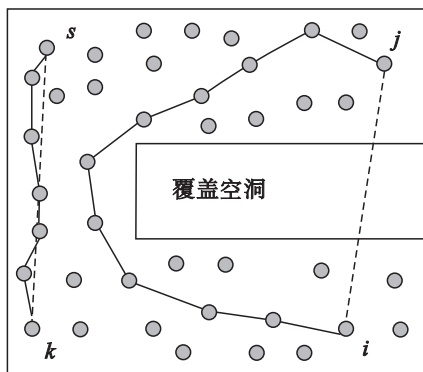


图 2 带有覆盖空洞的无线传感器网络部署图  
Fig. 2 A wireless sensor network with a coverage hole

如图 2 所示,  $i$  和  $j$  之间的真实最短路径为图中虚线, 然而由于覆盖空洞的存在, 基于多跳的最短路径为图中的实线, 两者差别很大, 从而得到的 DP 矫正值也有较大的误差.  $k$  和  $s$  之间的最短路径没受覆盖空洞的影响, 虽然有误差, 但是不会像  $i$  和  $j$  之间误差那么大. 因此需要过滤掉那些受影响的锚节点信息. 如果 2 个锚节点不受覆盖空洞的影响, 它们之间的最短 DP 路径值近似为 1 条直线, 如图 2 中的  $k$  和  $s$  之间的实线. 假设这条最短路径是 1 条近似的直线, 中间经过了  $p$  个节点, 则最短 DP 路径的正确值  $\min DP_{cks}$  计算方法如下:

$$\min DP_{cks} = DP_{k1} + DP_{12} + \dots + DP_{pk} = \frac{d_{k1} + d_{12} + \dots + d_{pk}}{r} \approx \frac{d_{ks}}{r}. \quad (8)$$

2 个锚节点  $k$  和  $s$  之间的距离  $d_{ks}$  可以通过欧氏距离的方法计算,  $r$  已知, 可以通过式 (8) 近似计算 2 个锚节点之间正确的最短 DP 路径值  $\min DP_{cks}$ . 而实际上锚节点之间通过广播得到的最短 DP 路径值为  $\min DP_{ks}$ , 如果这条路径没有受覆盖空洞的影响, 那么  $\min DP_{ks} - \min DP_{cks}$  应该近似为 0, 因此设置一个过滤参数  $\beta$  ( $\beta > 0$ ), 这里之所以设置  $\beta > 0$ , 是因为即使没有覆盖空洞的存在,  $\min DP_{ks}$  也会有误差, 比  $\min DP_{cks}$  大一些. 当  $\min DP_{ks} - \min DP_{cks} > \beta$  时, 认为这 2 个锚节点之间的最短 DP 路径受覆盖空洞的影响, 在计算矫正值时, 它们之间的距离  $d_{ks}$  和对应的  $\min DP_{ks}$  过滤掉, 这样就能够减少覆盖空洞对矫正值的影响. 最终可以得到本文的距离估计方法如算法 1 所示.

#### 算法 1 基于 DP 的距离估计算法

步骤 1 根据式 (6) 计算出任意 2 个邻居节点之间的  $DP_{ij}$ .

步骤 2 每个锚节点广播 1 条消息, 这条消息包含锚节点 ID 号、自身坐标和最短 DP 路径值  $\min DP$ ,  $\min DP$  的初始值为 0.

步骤 3 当一个节点  $i$  接收到这条广播消息的时候, 如果发现这个锚节点不存在, 就存储这个锚节点坐标信息, 并将到达该锚节点的  $\min DP$  更新为  $DP_{ki} = \min DP + DP_{ij}$ . 这里假设  $k$  是锚节点 ID, 节点  $i$  是从邻居节点  $j$  接收到的广播信息. 如果发现这个锚节点已经存在, 就判断已经存储的  $DP_{ki}$  是否小于  $\min DP + DP_{ij}$ , 如果小于就舍弃该信息; 如果大于, 就将对应的锚节点最小 DP 路径值  $DP_{ki}$  更新为  $DP_{ki} = \min DP + DP_{ij}$ . 最后将  $DP_{ki}$  作为新的  $\min DP$ , 锚节点  $k$  的坐标和 ID 转发给  $i$  的邻居节点.

步骤 4 经过一段时间后, 锚节点  $s$  可以接收到其他锚节点的坐标和对应的  $\min DP_{ks}$ . 根据式 (8) 计算 2 个锚节点之间的  $\min DP_{cks}$ , 并判断  $\min DP_{ks} - \min DP_{cks} > \beta$ , 如果成立, 就说明这 2 个锚节点之间的最短路径受到覆盖空洞的影响, 将它们之间的距离  $d_{ks}$  和对应的  $\min DP_{ks}$  过滤掉. 最后将没有受覆盖空洞影响的锚节点之间距离和最短 DP 路径值根据式 (7) 计算  $\delta_k$ .

步骤 5 锚节点  $k$  计算出 DP 矫正值  $\delta_k$  后, 将其广播到网络当中. 当未知节点收到所有锚节点的  $\delta_k$  后, 计算最终的 DP 矫正值  $\delta_{DP}$  如下:

$$\delta_{DP} = \frac{\sum_{k=1}^m \delta_k}{m}. \quad (9)$$

步骤 6 未知节点到锚节点之间的最短 DP 路径值在步骤 3 中已经计算出来, 并记录在未知节点当中. 因此未知节点  $i$  到锚节点  $k$  之间的估计距离为

$$\bar{d}_{ik} = \delta_{DP} \times DP_{ik}. \quad (10)$$

### 1.3 DPLA 定位算法

通过算法 1 可以得到未知节点到所有锚节点之间的估计距离, 通常未知节点采用最大似然估计法进行定位计算. 在规则区域中, 最大似然估计法可以得到较为精确的定位结果, 然而在带有覆盖空洞的不规则区域, 由于未知节点和锚节点之间的最短 DP 路径有可能受覆盖空洞的影响, 严重偏离 1 条直线, 导致算法 1 得到的未知节点到锚节点之间的估计距离有较大误差. 因此对于规则区域, 未知节点选择所有的锚节点进行定位计算; 对于不规则区域, 为了减少覆盖空洞对定位结果的影响, 选择离未知节点最近的 4 个锚节点估计距离进行定位计算, 这是因为离未知节点越近, 两者之间的最短 DP 路径受覆盖空洞的影响概率越小, 通过式 (10) 得到的估计距离越准确. 这里不选择最近的 3 个锚节点是因为 3 个锚节点有时候存在共线或者太过接近, 从而导致较大的定位误差, 再加上估

计距离本身存在一定的误差,使用大于 3 个锚节点的最大似然估计法能够降低定位误差,然而选择的锚节点个数越多,未知节点到锚节点之间的估计距离受覆盖空洞的影响越大,因此选择 4 个。

## 2 实验结果与分析

为了验证本文提出定位算法的有效性和实用性,用 MATLAB 进行了仿真测试,将 200 个节点随机部署在一个 100 m × 100 m 区域内,测试了规则区域和不规则区域,图 3 是不规则区域的节点分布图,规则区域相当于在覆盖空洞中也有节点。

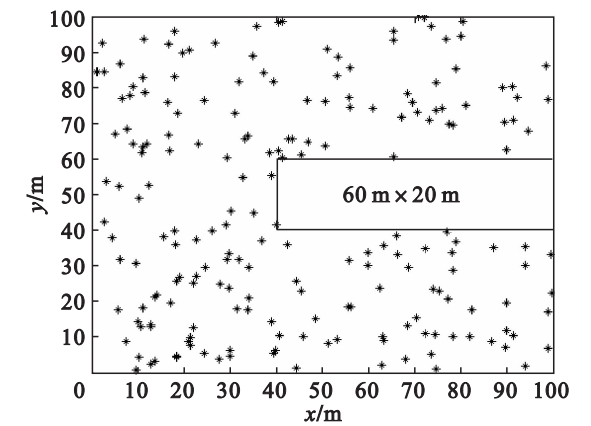


图 3 节点部署图  
Fig. 3 The deployment of nodes

本文测试了不同锚节点个数和通信半径对算法性能的影响,同时与同类型的 DV-Hop, LEAP 和 DV-RND 算法进行了性能对比。经过大量测试,2 个参数  $\varepsilon = 0.9$  和  $\beta = 0.75$  时误差最小,因此后面的测试取这两个值。首先定义性能参数定位误差的计算方法:

$$\text{error} = \frac{1}{(n-m)r} \sum_{i=1}^{n-m} \sqrt{(x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2} \times 100\% \quad (10)$$

其中:  $n$  是节点总个数;  $m$  是锚节点个数;  $r$  是通信半径;  $(x_i, y_i)$  是未知节点的真实坐标;  $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$  是未知节点的估计坐标。

### 2.1 锚节点个数对算法性能的影响

未知节点是根据已知自己位置的锚节点进行位置估计的,因此锚节点的个数必然会对算法的定位误差产生影响。设置通信半径为 20 m, 锚节点从 4 增加到 20。

图 4 是在规则区域的性能对比图,从图中可以看到,本文的 DPLA 和 DV-RND 算法的定位误差要明显小于 DV-HOP 和 LEAP 算法。这是因为 DPLA 用参数 DP 和 DV-RND 用参数 RND

来区分邻居节点之间的距离远近关系,而 DV-HOP 和 LEAP 算法都用简单的一跳来代表邻居节点之间的距离关系。由于本文的 DPLA 算法中的参数 DP 比 DV-RND 算法中的参数 RND 能够更精确地代表邻居节点之间的距离远近关系,因此 DPLA 算法的定位误差要小于 DV-RND 算法。

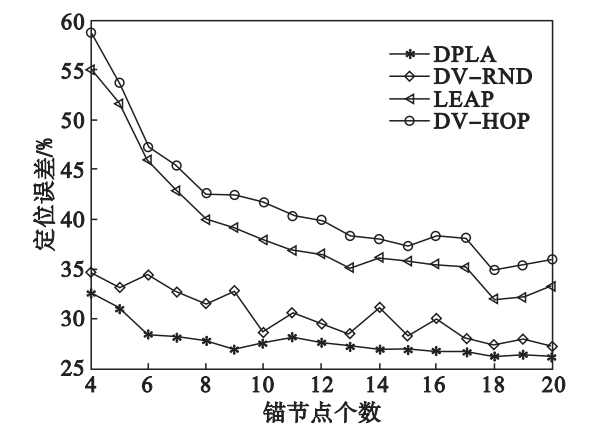


图 4 规则区域锚节点对定位误差的影响  
Fig. 4 The impact of anchor nodes on localization errors in regular area

图 5 是在不规则区域的性能对比图, DPLA 算法明显优于其他三种算法。这是因为其他三种算法无论是在估计节点之间距离还是根据估计距离计算未知节点位置,都没有考虑覆盖空洞的影响。而本文的 DPLA 算法在估计距离时,用参数  $\beta$  过滤掉那些受覆盖空洞影响的锚节点之间距离,从而获得较为精确的估计距离;获得估计距离之后,在进行定位计算时,未知节点只利用离其最近的 4 个锚节点的估计距离进行定位计算,从而进一步减少覆盖空洞对定位结果的影响,进一步提高定位精度。

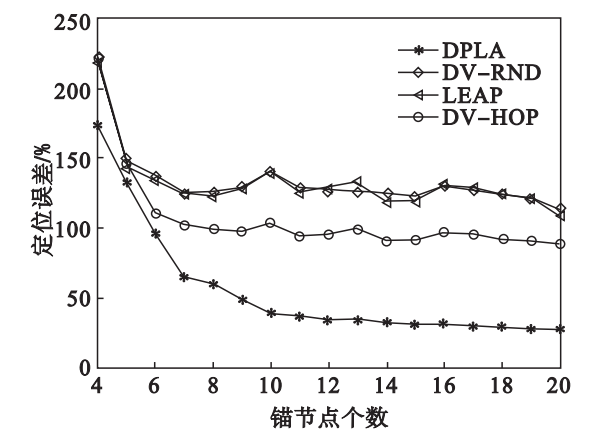


图 5 不规则区域锚节点对定位误差的影响  
Fig. 5 The impact of anchor nodes on localization errors in irregular area

### 2.2 通信半径对算法性能的影响

通信半径的大小决定了每个节点的邻居节点



个数. 设置锚节点个数为 20, 通信半径的变化范围是 15 ~ 30 m.

图 6 是在规则区域的性能对比图, 同图 4 类似, DPLA 和 DV-RND 算法的定位误差小于 DV-HOP 和 LEAP 算法, 而 DPLA 算法的定位误差要小于 DV-RND 算法. 原因就是 DPLA 算法在估计节点之间距离时用到的参数 DP 能够更精确地代表邻居节点之间的距离远近关系.

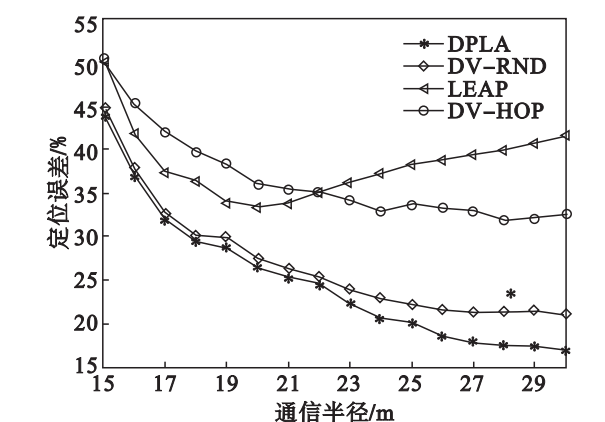


图 6 规则区域通信半径对定位误差的影响  
Fig. 6 The impact of  $r$  on localization errors in regular area

图 7 是在不规则区域的性能对比图, 同图 5 类似, DPLA 算法要明显优于其他三种算法. 原因和前面描述的一样, DPLA 算法用参数  $\beta$  过滤掉那些受覆盖空洞影响的锚节点之间距离, 从而获得较为精确的估计距离; 获得估计距离之后, 未知节点只利用离其最近的 4 个锚节点的估计距离进行定位计算, 从而进一步减少覆盖空洞对定位结果的影响, 进一步提高定位精度.

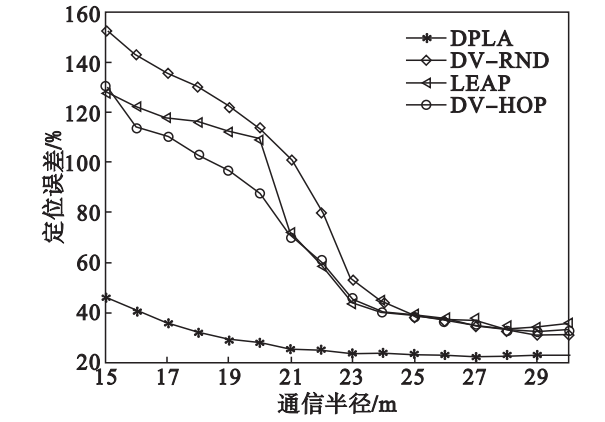


图 7 不规则区域通信半径对定位误差的影响  
Fig. 7 The impact of  $r$  on localization errors in irregular area

### 3 结 论

1) 分析了邻居节点距离和通信范围相交面积

之间的关系, 推导出一个线性函数, 输出是表示两个邻居节点之间距离远近的计量单位, 用 DP 表示.

2) 提出了一种基于 DP 的估计距离算法. 这种算法既适用于规则区域, 又适用于不规则区域.

3) 用不同的方法来计算未知节点在规则区域和不规则区域的位置. 在规则区域, 未知节点和锚节点之间的最短距离不受覆盖空洞的影响, 锚节点越多定位精度越高; 而在不规则区域, 选择离未知节点最近的 4 个锚节点能够减少这种影响. 最终的仿真结果证明了本文算法在规则区域和不规则区域的有效性, 而且仿真环境中所有节点随机分布, 不需要任何附加硬件, 只需要网络连通, DPLA 算法又是分布式算法, 因此具有较强的实用性.

### 参考文献:

[ 1 ] Han G J, Jiang J F, Shu L, *et al.* Localization algorithms of underwater wireless sensor networks; a survey [ J ]. *Sensor*, 2012, 12 ( 2 ) : 2026 – 2061.

[ 2 ] Xu B, Sun G D, Yu R, *et al.* High-accuracy TDOA-based localization without time synchronization [ J ]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24 ( 8 ) : 1567 – 1576.

[ 3 ] Velimirovic A S, Djordjevic G L, Velimirovic M M, *et al.* Fuzzy ring-overlapping range-free ( FRORF ) localization method for wireless sensor networks [ J ]. *Computer Communications*, 2012, 35 ( 13 ) : 1590 – 1600.

[ 4 ] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices [ J ]. *IEEE Personal Communication*, 2000, 7 ( 5 ) : 28 – 34.

[ 5 ] He T, Huang C, Blum B, *et al.* Range-free localization schemes for large scale sensor networks [ C ] // *Proceedings in MobiCom '03*. San Diego: ACM, 2003 : 81 – 95.

[ 6 ] 喻嘉, 闻英友, 赵宏, 等. 无线传感器网络中最优分割圆定位算法 [ J ]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011, 32 ( 3 ) : 335 – 339. ( Yu Jia, Wen Ying-you, Zhao Hong, *et al.* Localization algorithm for wireless sensor networks using an optimal partitioned circle [ J ]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32 ( 3 ) : 335 – 339. )

[ 7 ] Niculescu D, Nath B. DV-based positioning in ad hoc networks [ J ]. *Kluwer Journal of Telecommunication Systems*, 2003, 22 ( 1 ) : 267 – 280.

[ 8 ] Wang Y, Wang X D, Dharma P, *et al.* Range-free localization using expected hop progress in wireless sensor networks [ J ]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed System*, 2009, 20 ( 10 ) : 1540 – 1552.

[ 9 ] Zhong Z G, He T. RSD: a metric for achieving range-free localization beyond connectivity [ J ]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed System*, 2011, 22 ( 10 ) : 1943 – 1951.

[ 10 ] Wu G, Wang S, Wang B, *et al.* A novel range-free localization based on regulated neighborhood distance for wireless ad hoc and sensor networks [ J ]. *Computer Networks*, 2012, 56 ( 16 ) : 3581 – 3593.