

无线传感器网络中的定位模型*

朱剑[†], 赵海, 徐久强, 李大舟

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

Localization Model in Wireless Sensor Networks

ZHU Jian[†], ZHAO Hai, XU Jiu-Qiang, LI Da-Zhou

(College of Information Science and Engineering, Northeast University, Shenyang 110004, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhujian1981710@163.net, http://www.neu.edu.cn

Zhu J, Zhao H, Xu JQ, Li DZ. Localization model in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2011, 22(7): 1612-1625. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3836.htm>

Abstract: The position function is becoming more and more important for applications in WSNs, so a novel localization model, which is based fuzzy, is aimed at the localization problem. In this model, a space is divided into several small areas by some swatch nodes; every swatch node has its unique signal vector. An unknown node's position can be calculated by computing the approach degree between the signals of the swatch and unknown nodes. This model adopts the RF signal to locate the unknown node. It cannot only avoid the overlapped error in a range-based localization model, but can also avoid the high complex. The experimental results in NS-2 show that this model performs well and is suitable for applications in WSNs.

Key words: localization model; fuzzy; approach degree; computing complex; location precision

摘要: 位置信息在无线传感器网络应用中日益重要, 针对该网络中的定位问题, 提出一种新颖的基于模糊识别的定位模型. 在该模型中, 定位空间被一些样本点划分为若干个小区域, 每个样本点唯一地对应一个信号向量, 通过计算未知点信号向量与各个样本点对应向量的贴近度, 可以最终确定未知点的坐标. 该定位模型直接采用了射频信号对未知点进行定位, 不但避免了一些 range-based 定位模型中出现的误差叠加等问题, 而且还降低了计算复杂度. 最后, 借助 NS-2 仿真手段对该定位模型进行了验证. 结果表明, 该定位模型具有较高的性能, 适合无线传感器网络应用.

关键词: 定位模型; 模糊识别; 贴近度; 计算复杂度; 定位精度

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来, 由于移动计算的发展, 定位研究已经成为热点^[1]. 在这些定位技术中, 存在着精度与计算复杂度之间的权衡. 例如: SBL^[2]定位技术的计算复杂度非常高, 一般为 $O(n^m)$, 其中, m 为参与定位的参考点数量. 这样的计算量会造成较大的延迟与能耗; 微软的 RADAR^[3]算法简单地将定位空间分为若干个网格, 虽然计算量减少, 但其精度难以达到无线传感器网络的应用要求; FingerPrinting-based^[4]技术需要大量的预处理, 灵活性较差, 且计算剪复杂度; 较为流行的质心定位算法 Three Centroid^[5]对网络布局有严格的要求, 且存在较大定位误差; 一些其他

* 基金项目: 国家自然科学基金(60973022)

收稿时间: 2009-07-24; 定稿时间: 2010-03-01

定位技术需要额外的硬件支持,不但成本高,而且能耗也较高.为此,本文提出一种基于模糊识别的定位模型(fuzzy triangle location model,简称 FTLM),它在计算复杂度与定位精度之间较好地作了折衷考虑,提高了定位性能,更适合无线传感器网络的应用.

当一个未知点需要被定位时,它会向周围最近的3个非共线参考点 A, B, C 发送请求,参考点收到请求后会向该未知点发送信号(可以是超声波、红外线、电磁波等.由于电磁波是全方位扩散,且无需硬件成本,所以本文以电磁波为例),未知点将记录下3个参考点发出的信号到未知点时的信号强度指示 RSSI^[6],并形成一组向量 $\{RSSI_A, RSSI_B, RSSI_C\}$.由于样本点坐标是已知的,所以每个样本点与3个参考点之间的距离也是已知的.通过电磁波的衰减模型^[7],可以计算出每个样本点相对于3个参考点的 RSSI 值.利用模糊识别模型贴近度计算公式可以计算未知点与各个样本点的贴近度,选择贴近度最大的前 k 个样本点围成区域,则该区域的质心即为未知点坐标.

本文第1节介绍样本点的设定方法及样本点向量的构建方法.第2节介绍如何运用样本点及未知点的信号向量来进行定位,并给出关于 FTLM 模型特性的相关证明.本节还给出一种局部定位筛选方法,以进一步降低计算复杂度.第3节对 FTLM 模型的鲁棒性进行分析.第4节从仿真角度分析、比较其他3种较新的代表性定位算法:SBL 定位算法、质心算法 Three Centroid 和三边测量定位算法 Trilateration.第5节为总结与展望.

1 定位区域内的 RSSI 向量

与全球定位系统(GPS)的基本原理一样^[8],在无线传感器网络中的 2D 空间内,定位一个未知点最少需要3个非共线的参考点,本文抽取了由3个参考点组成的最小定位单元作为描述对象,如图1所示.

图1中的 A, B, C 为3个参考点,这3个参考点互相覆盖,形成了一个区域,本文以三角形区域为例.将图1中的三角形3个边长均匀地分为 N 段,平行地连接各个等分点,则可以将一个定位单元划分为 N^2 块小三角形,每小块的面积均相等,每3条线段将形成一个交点,本文称这类可通过参考点坐标计算出自身坐标的交点为样本点(包括参考点 A, B, C),如图中的类似于1号、2号、3号点的圆点均为样本点.为了方便计算,本文建立坐标系时以 B 点为原点、 BC 边为横轴建立坐标系, A 点坐标为 (a, b) , C 点坐标为 $(e, 0)$,则三角形内的各个样本点坐标可以求出,如 $D(x, y)$ 点坐标求解过程如下:

过 A 点做 $AS \perp BC$,交 BC 于 S 点,过 D 点做 $DP \perp OC$,交 OC 于 P 点,不难看出, $\triangle ASC \sim \triangle DPF$.

由相似三角形性质可知,

$$\frac{AS}{DP} = \frac{AC}{DF} \Rightarrow \frac{b}{y} = \frac{AC}{\frac{7AC}{10}} \Rightarrow y = \frac{7}{10}b \quad (1)$$

同理可以计算出,

$$x = \frac{7}{10}a + \frac{1}{5}e \quad (2)$$

故样本点到三角形3个顶点 A, B, C 的距离 D_1, D_2, D_3 也可以通过公式(3)计算出来:

$$D_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3)$$

RSSI 对距离的衰减可以根据不同的环境选择不同的衰减模型 $f(D_i)$,通过衰减模型可以计算出各个样本点对应于3个参考点的 RSSI 向量 $\mathbf{R} = \{rssi_A, rssi_B, rssi_C\}$, $rssi_A, rssi_B, rssi_C$ 分别表示样本点处应该接收到参考点 A, B, C

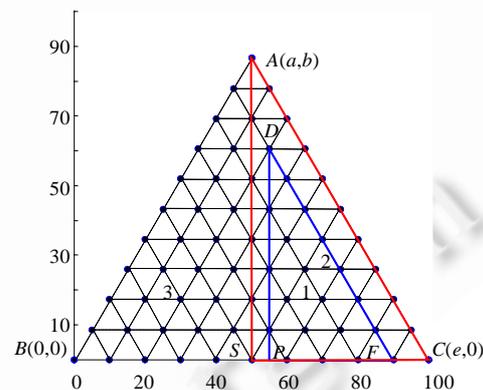


Fig.1 Sketch map of a location cell

图1 最小定位单元示意图

发出的信号强度值.由于衰减模型的参数难以选择,所以这3个信号强度值可能存在误差,从而会影响FTLM模型的性能,具体影响将在下文给出分析.当未知点需要被定位时,可以按照上述步骤,在未知点上形成一个对应于3个参考点的RSSI向量.

推论 1. 在一个定位单元内,某个点对应于3个参考点所形成的RSSI向量唯一地对应于该点坐标.

证明:上述推论等价于以下命题:在一个三角形内,某个未知点到3个顶点的距离唯一地对应于该点坐标.以图1为例,已知3个顶点 A, B, C 的坐标分别为 $(a, b), (0, 0), (e, 0)$,且已知 D 点到3个参考点的距离 DA, DB, DC 的长度分别为 L_1, L_2, L_3 ,求证 D 点的坐标 (x, y) 唯一.

由几何相关定理可以列出如下方程:

$$\begin{cases} L_1^2 = (x-a)^2 + (y-b)^2 \\ L_2^2 = x^2 + y^2 \\ L_3^2 = (x-e)^2 + y^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L_1^2 = L_2^2 - 2ax - 2by + a^2 + b^2 \\ L_3^2 = L_2^2 - 2ex + e^2 \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)是一个关于 x, y 的二元一次方程组.所以,只要 L_1, L_2, L_3 唯一,该方程组将对应一个唯一解 (x, y) ,所以推论1正确. \square

因此,在一个定位单元内,不同样本点对应于3个参考点所形成的RSSI向量均不相同.将未知点信号向量与各个样本点信号向量的贴适度数值按从大到小的顺序进行排序,将得到贴适度序列 $S_N = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, N 为样本点个数, s_N 为未知点与 N 号样本点的贴适度.

2 FTLM模型的提出

一个最小定位单元内的各个样本点对应的向量 R_i 可以被确定,最终的向量表如下:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_i \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i1} & r_{i2} & r_{i3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & r_{i3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

r_{i1}, r_{i2}, r_{i3} 分别为 i 号样本点与三角形顶点 A, B, C 对应的RSSI值.当一个未知点 s 获取了3个顶点的RSSI值后,将得到一个采样向量 $R_{si} = \{r_{s1}, r_{s2}, r_{s3}\}$.由模糊数学知识可以计算出 R_{si} 与各个样本点的贴适度,计算过程如下:

首先对公式(5)及未知点对应的RSSI向量 $R(x, y)$ 进行归一化:

$$\sum_{j=1}^3 r_{ij} = 1, (i = 1, 2, \dots, n), \quad \sum_{i=1}^3 r_{si} = 1.$$

由三角形内点测试法PIT可知,三角形内的一点 S 向任意方向移动至新的一点 P 时, S 点到三角形3个顶点的距离不可能全部增加或者全部减小.因此,对于定位单元内任意两个样本点 P, S 对应的RSSI向量的3项不可能出现全部增加或者全部减小的情况,即不可能出现 $R_{Si} = kR_{Pi}, k$ 为实数.因此,由归一化公式可以得出:任意两个样本点对应的RSSI向量归一化后不可能出现相同的情况,即归一化后的RSSI向量仍然唯一地对应于定位单元内的一点.

然后,用最大值、最小值贴适度公式计算贴适度:

$$(R_i, R_{si}) = \frac{\sum_{j=1}^3 (r_{ij} \wedge r_{sj})}{\sum_{j=1}^3 (r_{ij} \vee r_{sj})}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

公式(6)的贴适度计算公式是模糊数学中的测度贴适度计算方法,计算贴适度的方法还有海明贴适度与欧几里德贴适度,但是这两种计算方法涉及到积分运算,计算复杂度较高,不适合无线传感器网络的要求.公式(6)

中的“ \wedge ”为取小运算,“ \vee ”为取大运算.

最后,对 (R_i, R_{s_i}) 进行排序,得出贴近期序列 S_N ,取与 s 点贴近期最高的 N 个样本点所围成区域的质心为最终未知点坐标 (x, y) ,计算公式如下:

$$(R_i, R_{s_i}), (i=1, 2, \dots, N) > \max\{(R_i, R_{s_i}), (i > N)\}$$

$$(x, y) = \left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}, \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_N}{N} \right) \quad (7)$$

公式(7)表明,在 FTLM 模型中,最终的未知点坐标将被约束在与其贴近期最大的 N 个样本点所围成的区域内.至此,传统的坐标求解问题被分解成为一个空间约束问题与一个质心求解问题,通过计算最终的约束区域质心即可得出未知点的坐标.整个计算过程中没有出现高次方程求解,只有一些简单的大小比较计算,计算复杂度为 $O(n)$, n 为参与计算的样本点个数.

2.1 FTLM模型的几何意义

为了研究 FTLM 的几何意义,作如图 2 所示的最小定位单元 $\triangle ABO$,设 3 个样本点 E, D, F 所形成的向量归一化后分别为 $\{r_{D1}, r_{D2}, r_{D3}\}, \{r_{E1}, r_{E2}, r_{E3}\}, \{r_{F1}, r_{F2}, r_{F3}\}$,未知点 C 的对应向量为 $\{r_{C1}, r_{C2}, r_{C3}\}$,以 C 点和 D 点为例,它们的贴近期公式如下:

$$(R_C, R_D) = \frac{r_{C1} \wedge r_{D1} + r_{C2} \wedge r_{D2} + r_{C3} \wedge r_{D3}}{r_{C1} \vee r_{D1} + r_{C2} \vee r_{D2} + r_{C3} \vee r_{D3}}, r_{D1} + r_{D2} + r_{D3} = 1, r_{C1} + r_{C2} + r_{C3} = 1 \quad (8)$$

r_{Ci} 与 r_{Di} 的大小关系在三角形内是不确定的,当 C 点与 D 点重合时,由于两者 RSSI 向量完全相同,故两者贴近期为 100%;由三角形内点测试法 PIT 原理^[9-11]可得,当 $\triangle ABO$ 的内点 C 与 D 不重合时,则 C 点到 A, B, O 的距离相对于 D 点到 A, B, O 的距离不可能全部增加或者全部减小,所以, C 点的 RSSI 向量 r_{Ci} 必有一项大于或者小于 D 点 RSSI 向量中的对应项 r_{Di} ,且此时,若 r_{Ci} 越接近 r_{Di} ,则 (R_C, R_D) 值越趋近于 1.

由上段分析可知,公式(8)可能出现的 6 种结果可以总结为下面两种通式:

$$(R_C, R_D) = \frac{r_{Cn} + r_{Cm} + r_{Dk}}{r_{Dn} + r_{Dm} + r_{Ck}} = \frac{r_{Dk} + 1 - r_{Ck}}{r_{Ck} + 1 - r_{Dk}} = \frac{2}{1 + (r_{Ck} - r_{Dk})} - 1, (n, m, k) \in \{1, 2, 3\}, r_{Ck} > r_{Dk} \quad (9)$$

$$(R_C, R_D) = \frac{r_{Cn} + r_{Dm} + r_{Dk}}{r_{Dn} + r_{Cm} + r_{Ck}} = \frac{r_{Cn} + 1 - r_{Dn}}{r_{Dn} + 1 - r_{Cn}} = \frac{2}{1 + (r_{Dn} - r_{Cn})} - 1, (n, m, k) \in \{1, 2, 3\}, r_{Dn} > r_{Cn} \quad (10)$$

由公式(9)和公式(10)可以得出公式(11):

$$(R_C, R_D) = \frac{2}{1 + |r_{Di} - r_{Ci}|} - 1, i \in \{1, 2, 3\} \quad (11)$$

由公式(11)可知,当 C 点与 D 点重合时, $r_{Ci} = r_{Di}$, $(R_C, R_D) = 1$;当 C 点与 D 点不重合时,由于 $0 < |r_{Ci} - r_{Di}| < 1$, (R_C, R_D) 是一个小于 1 且大于 0 的数;当 r_{Di} 越接近 r_{Ci} 时, (R_C, R_D) 越接近 1.

由于 RSSI 与距离是一一对应的,所以上述结论等价于:当三角形内点 C 移动到其他内点 D 上时,若 C 点与 D 点重合,此时 C 点与 D 点的贴近期最高;若 C 点与 D 点不重合,由 PIT 原理可知, D 点到 A, B, O 这 3 点的距离相对于 C 点到 A, B, O 这 3 点的距离中必然存在某个距离值变化规律不同于其他两个距离值的变化规律(例如: DB 相对于 CB 有所增加, DA, DO 相对于 CA, CO 均减小),本文将类似于 DB 这样具有不同变化规律的距离值称为异变值.那么,异变值的变化幅度越大, C 点与 D 点的贴近期越小;异变值的变化幅度越小, C 点与 D 点的贴近期越大.

以图 2 为例,在 D 点周围任一直线方向 EG 上,任取一点 G ,由图 2 可以看出,当 C 点移动到 D 点时, OD, AD 均减小, BD 增加,所以 BD 即为 C 点移至 D 点后对应的异变值.当 C 点移动到 G 点后,对应的异变值为 BG ,所以,若想比较 C 点与 D 点、 G 点中的哪一个点更贴近期,则可以按照如下公式进行计算:

$$\begin{cases} (R_C, R_D) > (R_C, R_G), & \text{if } (|DB - CB| < |GB - CB|) \\ (R_C, R_D) < (R_C, R_G), & \text{if } (|DB - CB| > |GB - CB|) \\ (R_C, R_D) = (R_C, R_G), & \text{if } (|DB - CB| = |GB - CB|) \end{cases} \quad (12)$$

推论 2. 设最小定位单元为 ΔABO ,如图 3 所示, C 为该定位单元内的任意一个未知点, C 点被一条任意形状的曲线包围,分别以 A,B,O 为圆心、 AC,BC,OC 为半径作圆,3 个圆将交于 C 点并将一个定位单元分割成 6 块区域,分别标记为 I,II,...,VI,并且将曲线截成 6 段弧(PQ,PT 等),每个区域将对应一段弧,每段弧将其所对应的区域分成两部分,本文称远离 C 点的区域为外区域,靠近 C 点的区域为内区域.那么,在任意一段弧上总可以找到一点 ϕ ,使得该点与 C 点的贴进度比该弧对应的外区域内任意一点与 C 点的贴进度要大.

证明:以区域 II 为例,区域 II 内的所有坐标点具有一个共同特点:当 C 点移到区域 II 内的任意坐标点 S 上时,异变值必将是 BS ,因为区域 II 内的 S 点必将在 $\odot O$ 与 $\odot A$ 之内,即 OS,AS 相对于 OC,AC 都将减小.由 PIT 原理可知, BS 必然增加,故 BS 为异变值.同理可得,当 S 点在区域 II、区域 V 时,异变值为 BS ;在区域 III、区域 VI 时,异变值为 OS ;在区域 I、区域 IV 时,异变值为 AS .

比较 C,S 点贴进度与 C,ϕ 点贴进度的大小,只需比较 S 点与 ϕ 点对应的异变值的大小.以 S 点在区域 $EFQP$ 为例,该区域是由弧 PQ 、弧 PE 、弧 QF 与线段 EF 构成,不难看出,在该区域内,无论弧 PQ 是什么形状,距离 B 点最近的点必然在弧 PQ 上.因为该弧是区域 II 靠近 B 点的边界,利用线性规划知识可以证出这一点.例如,图 3 中的 Q 点是区域 $EFQP$ 内最靠近 B 的点,即 BQ 最短.又因为 Q,S 在 $\odot B$ 之外,所以有 $BS > BQ > BC$.因为 S,Q 点对应于 C 点的异变值为 BS,BQ ,所以由公式(12)可以计算出,无论 S 点在区域 $EFQP$ 内的哪一点上,均有 $(R_S,R_C) < (R_Q,R_C)$,所以 Q 点即为上文提到的点 ϕ .同理可以证明,当 S 点在其他各个区域内时,均可以在弧线上找到一点 ϕ ,使得 $(R_S,R_C) < (R_\phi,R_C)$.至此,对推论 2 的证明结束. \square

推论 2 表明:随着图 3 中的 6 段弧线向 C 点的逼近,各个区域内较贴近 C 点的曲线上的点与 C 点的贴进度将大于远离 C 点的曲线.即,随着图 3 中曲线的收缩,曲线上的点与 C 点的贴进度将会越来越大.不难看出,当曲线收缩至 C 点时,曲线将会收敛为一点,该点即为 C 点.此时,曲线与 C 点的贴进度为最大值 1.推论 2 为下一节中的贴进度序列约束提供了基础.

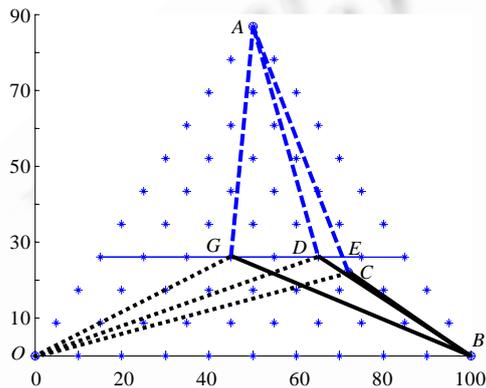


Fig.2 Geometry significance of approach degree
图 2 贴进度的集合意义

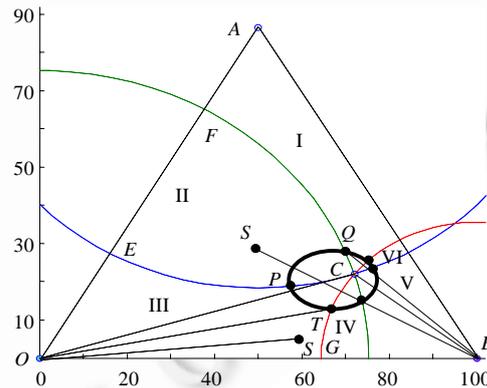


Fig.3 Structure map of location cell
图 3 定位单元格局图

2.2 贴进度序列的约束作用

本节主要介绍贴进度序列是如何将未知点约束在一个区域内的.图 3 中:在区域 $EFQP$ 内, Q 点与 C 点贴进度最大;在区域 $OGTPE$ 内, T 点与 C 点贴进度最大.即,在每一个类似于 $EFQP$ 的区域内,总有一个与 C 点贴进度最大的点出现在该区域对应的弧线上.但是,不能说与 C 点贴进度最大的点均在弧线上.例如,区间 $EFQP$ 内可能存在一点 K ,使得该点与 C 点的贴进度大于 (R_T,R_C) ,因为 K,T 点对应的异变值分别为 BK,OT ,这两者的大小关系随着 C 点位置的变化而变化.图 3 中的弧 PQ,XW 是以 B 点为圆心的弧,弧 RS,ZY 是以 A 点为圆心的弧,弧 LN,TU 是以 O 点为圆心的弧,如图 4 所示.

若弧 PQ 上有一点 D ,由于弧 PQ 是以 B 为圆心的圆弧,所以该弧上的点与 C 点的贴进度均等于 D 点与 C

点的贴进度.由于在区域 II 内异变值为 BD ,所以 D 点与 C 点的贴进度是由 $|BD-BC|$ 决定的.由公式(12)可知,当弧 LN 上有一点 E 时,只要 $|OC-OE|=|BD-BC|$,则有 E,D 两点与 C 点贴进度相等.因为弧 LN 是以 O 点为圆心的弧,所以该弧上的点与 C 点贴进度等于 (R_E,R_C) .也就是说,此时弧 PQ,LN 与 C 点贴进度相等.所以,一个贴进度在定位单元内对应的轨迹是类似于图 4 中的 6 段圆弧.即,若计算出未知点与 C 点的贴进度为 k ,则有该未知点可能的轨迹是 6 段圆弧.

若在弧 PQ 对应的内区域内存在一点 F ,以点 B 为圆心、 BF 为半径作圆弧,由推论 2 可知, F 点与 C 点贴进度大于 D 点与 C 点的贴进度.由上文分析可知,贴进度与 (R_F,R_C) 相等的轨迹是 6 段圆弧,且这 6 段圆弧必然均在弧 PQ,XW,RS,ZY,LN,TU 的内区域(图 4 中的虚线圆弧).即,随着 S 点与 C 点贴进度 (R_S,R_C) 的增大, S 点可能出现的轨迹将逐渐收敛于 C 点.当定位单元内的样本点无穷多时,则可认为,与 C 点贴进度最大的那个样本点即为 C 点坐标.但在实际工作中,样本点数量不可能无穷大,因为那样的计算量较大.若此时仅用一个与 C 点贴进度最大的样本点作为 C 点的坐标将产生一个误差.例如图 4 中,与 (R_D,R_C) 相等的点可能出现在 X 点上, X 点对应的定位误差要大于 D 点对应的误差,即同一个贴进度值将对应若干个不同的定位误差.但是随着贴进度的增大,每一个贴进度值对应的最大定位误差将会减小.为了进一步精确定位结果,本文将在贴进度序列中选取若干个与 C 点贴进度最大的样本点,并以这些样本点构成的区域质心作为 C 点坐标.

为了直观地看出贴进度序列在定位中的作用,本文以图 2 的样本点布局为例进行描述,如图 5 所示.在 NS-2 仿真平台下对图 5 的布局进行了测试.在 shadowing 模型中,本文设定正态分布的随机变量为 0 均值,方差为 σ .本实验中, σ 分别为 0dBm,5dBm,10dBm,节点最大通信距离为 150m,参数见表 1.

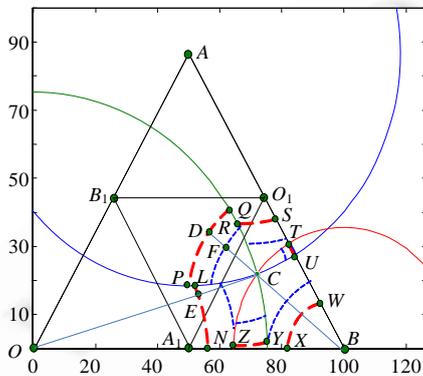


Fig.4 Function of approach degree list
图 4 贴进度序列的约束原理

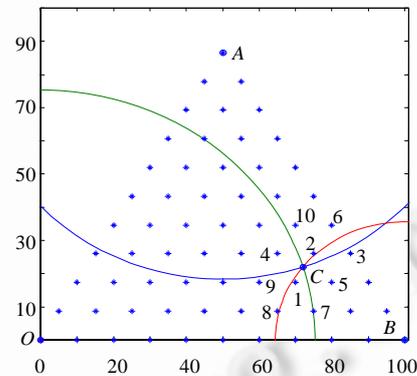


Fig.5 Order of ten swatch nodes with max approach degree
图 5 拥有最大贴进度的 10 个样本点排序

Table 1 Correlative parameters in NS-2

表 1 NS-2 的相关参数设置

Parameter	Value
Nodes distribution	As figure 5
Channel bandwidth (kbps)	250
Frequency (GHz)	2.4
Wireless model	Shadowing
MAC protocol	IEEE 802.15.4
Power for transmission (Watt)	0.281 838 15
Power for idle (Watt)	0.003 587
Power for reception (Watt)	0.218 283 7
RXThresh (Watt)	1.35685e-11
RF Radius (m)	150
InitialEnergy (J)	10
σ (db)	0, 5, 10
Pathloss exp	3

仿真步骤如下:

- 1) 在定位单元内随机放置一个节点,并取出该节点的坐标,如图 5 所示中的 C 点;
- 2) 运用 FTLM 模型计算各个样本点与 C 点的贴适度,并按从大到小的顺序将其写入贴适度序列.例如,图 5 中与 C 点贴适度最大的前 10 个节点分别为 1,2,...,10 号节点;
- 3) 取贴适度序列的前 N 个样本点构成区域的质心, N 分别为 1,2,3,...,10,并计算这 10 个质心与 C 点的误差;
- 4) 随机改变 C 点的坐标 100 次,重复上述步骤.因此,每当 N 取一个值时,将对应 100 个误差值,求这 100 个误差值的均值;按公式(13)计算精度,并显示于图 6 中.

$$\rho = \frac{S_{\max} - S_{\text{error}}}{S_{\max}} \quad (13)$$

上式中: ρ 代表定位精度; S_{\max} 代表节点的无线射程,本实验中为 150m,表 1 中的接受信号强度阈值 $RXThresh$ 可以由 NS-2 中的 Threshold 工具根据 S_{\max} 计算出来; S_{error} 代表定位结果与未知点实际坐标之间的距离,即步骤 4 中的误差.

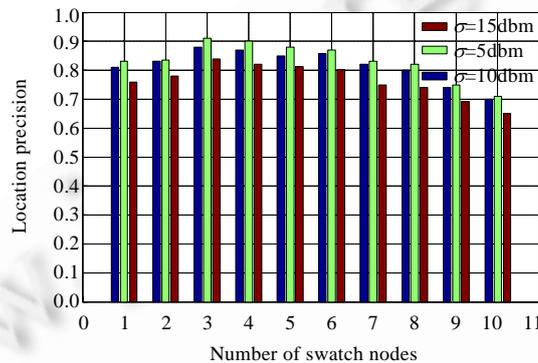


Fig.6 Influence of N in approach degree list with the precision

图 6 用于定位计算的样本点个数对精度的影响

图 6 的数据显示,随着 σ 的增加,FTLM 的精度会逐渐降低.这是因为 σ 决定着 NS-2 中 RSSI 测量的准确度. FTLM 是基于 RSSI 进行定位的,RSSI 越准,则结果也相对越准.对于 RSSI 值的处理有很多种方法,例如均值法、高斯分布法等,这些方法能够将 RSSI 值优化,使其变得准确.由于本文着重于定位模型的构建,因此采取了均值法对 RSSI 进行优化,即采样 50 次 RSSI 值计算均值.

随着贴适度序列节点个数的变化,精度也有所变化,当 N 为 3 时,精度较高.这是因为,随着 N 的变化,定位单元中的边缘部分将会造成样本点分布在未知点的某一侧,从而增加定位误差.所以,从经验数据来看,本文选择 N 为 3.

2.3 FTLM 中局部优化算法

FTLM 对未知点定位一次需要计算一个定位单元内的所有样本点与该未知点的贴适度,这样的计算量过大.为此,本文提出了一种局部化样本点放置方案,该方案的主要思想是,初步估计未知点可能的位置,然后在该位置内精确未知点的坐标,这样可以有目的地放置样本点,从而减少计算量与计算延迟.

推论 3. 将定位单元等分为若干个全等三角形,若一个未知点与某个样本点 S 的贴适度最大,则可以近似认为该未知点可能出现的区域为以 S 为顶点的所有三角形的集合.

如图 7 所示,设 C 点与 O_1 点的贴适度在 A, B, O, A_1, B_1, O_1 中最大,记为 (R_{O_1}, R_C) ,则推论 3 可以等价于证明:可以近似认为 C 点不在 $\Delta A_1 B_1 O$ 内.

证明:由上文分析可知,一个样本点与未知点的贴适度对应的样本点轨迹是 6 段圆弧,连接 BC 并延长,必然

交以 B 点为圆心的两段圆弧于两点 D, E . 由 FTLM 的几何意义可知, $CD=CE$. 同理, 其他 4 段圆弧上也均存在一点使得每点与 C 点的距离等于 CD . 以 C 点为圆心, CD 长为半径作圆, 则该圆的面积近似对应于一个贴进度值. 并且, 贴进度越大, 则圆的面积越小; 贴进度越小, 圆的面积越大.

以 O_1 为圆心、 CO_1 为半径的圆 O_1 面积小于分别以 B, A_1 为圆心、 CB, CA_1 为半径的圆 B 、圆 A_1 面积. 当 C 点在 ΔA_1BO_1 内的外心时, 圆 B 、圆 A_1 与圆 O_1 三者面积相等; 当 C 点由 ΔA_1BO_1 内的外心向任意方向移动时, 若 C 点移动后使得 CO_1 增加, 则由 PIT 原理可知, CB, CA_1 两者之间必然有一者或者两者减小, 即圆 B 、圆 A_1 面积至少有一者小于圆 O_1 的面积, 即 B, A_1 至少有一者与 C 的贴进度大于 (R_{O_1}, R_C) . 这与已知条件矛盾, 因此, 若 C 点与 O_1 点的贴进度最大, 则 CO_1 的最大值只能出现在 C 点为 ΔA_1BO_1 内的外心时.

锐角三角形的外心必在三角形内, 因此, 若 C 点与 O_1 点贴进度最大, C 点可能出现的区域不可能在 ΔA_1B_1O 内; 当 ΔABO 为钝角三角形时, 若 C 点与 O_1 点贴进度最大, 则 C 点可能出现在 ΔA_1B_1O 内的几率很小, 这一点将在下文加以分析.

本文分别以任意锐角三角形和任意钝角三角形为例: 图 8 是一个任意锐角三角形, 若 D 点与 O 点贴进度最大, 则意味着半径 OD 最小, 当 $OD=B_1D$ 时, 可以近似认为 D 点与 B_1 点的贴进度等于 D 点与 O 点的贴进度. 分别作 OB_1, OA_1 的中垂线, UV 与 VW 交于 V 点. 因为 D 点与 O 的贴进度最大, 所以 D 点可能出现的区域必然在区域 $OUVW$ 内. 若 D 点在线段 UV 的上侧, 则很显然 $OD > DB_1$. 由上文描述可知, 此时 D 点与 O 点的贴进度必然小于 B_1 点与 D 点的贴进度. 这与条件矛盾, 所以 D 点必然在区域 $OUVW$ 内.

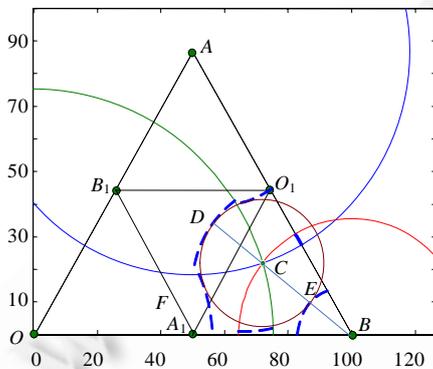


Fig.7 Geometry significance of approach degree
图 7 贴进度值的几何意义

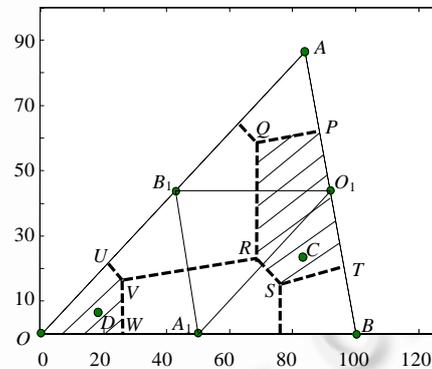


Fig.8 Distribution of areas in an acute triangle
图 8 锐角三角形中贴进度的分布

图 9 显示了任意钝角三角形. 与锐角三角形不同, 当未知点与 B_1 贴进度最大时, 未知点可能出现在区域 A_1BO_1 中. 但是从图 9 中可以看出, 出现在该区域的可能性很小, 可以忽略不计. □

针对推论 3, 可以得出一种较有效的局部定位算法, 从而减小 FTLM 的样本点个数, 降低计算复杂度, 算法步骤如下:

- 1) 分别选择定位单元三边的中点为样本点, 运用 FTLM 算法计算未知点与 A, B, O, A_1, B_1, O_1 的贴进度, 并选出一个最大贴进度对应的样本点, 例如点 O_1 ;
- 2) 未知点可能出现的区域为四边形 AB_1A_1B , 按照步骤 1 设定第 2 轮样本点, 如图 10 中的深灰色实心圆点所示;

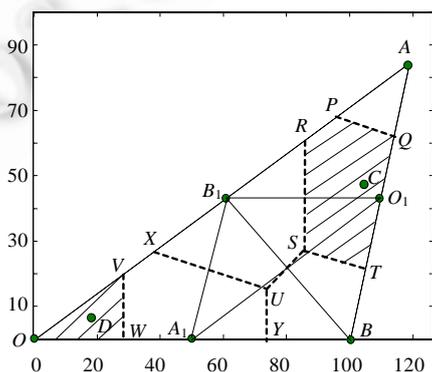


Fig.9 Distribution of areas in an obtuse triangle
图 9 钝角三角形中贴进度的分布

- 3) 计算第 2 轮所有样本点、第 1 轮最大贴程度对应的样本点与未知点的贴程度,并取出最大贴程度,如图 10 所示中的点 R;
- 4) 重复上述步骤 N_c 次,可以看出,未知点将被约束在一个越来越小的区域.当重复完 N_c 次上述步骤后,取与未知点贴程度最大的 3 个点构成区域的质心,作为未知点的最终坐标.

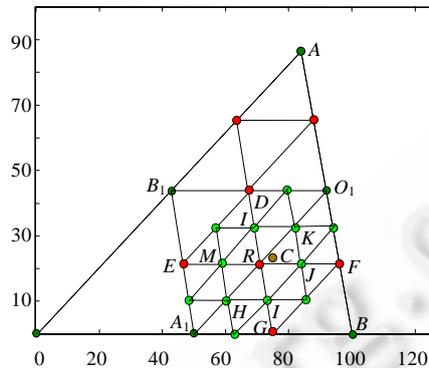


Fig.10 Sketch map of local optimization algorithm

图 10 局部优化算法示意图

设一个定位单元面积为 S ,随着样本点数量的增加,最小网格面积 S_{\min} 将会减小,定位精度也会增加.在 FTLM 模型中,可以近似认为最小网格面积决定着模型最终的精度.图 1 中的 66 个样本点将使每个网格面积都相等,且为 $S/100$.

$$S_{\min} = \frac{4S}{8N + 10 - 6\sqrt{8N + 1}}$$

其中, N 为样本点个数.

图 9 的局部定位算法使得未知点周围的最小网格面积 S_{\min} 为

$$S_{\min} = \frac{S}{4^{12}}, N > 3.$$

从上式可以看出,为达到相同的最小网格面积 $S/100$,图 1 的布局算法需要 66 个样本点,而图 10 的局部算法只需要 25 个样本点即可使最小网格面积达到 $S/256$.因此,局部优化算法减小了 FTLM 所需样本点个数,降低了计算复杂度.

3 FTLM 鲁棒性分析及评价

在 NS-2 平台上进行简单的仿真实验,参数设置见表 1.在由参考点 A, B, C 构成的定位单元内,设置一个已知坐标点 E ,按照 FTLM 算法,在该单元内设置 12 个样本点,如图 11(a)所示.当 RSSI 值不存在任何干扰时,样本点与未知点的 RSSI 向量将严格地与其坐标相对应.所以,根据 FTLM 算法最终得出 E 点的 RSSI 向量与样本点 1、样本点 2、样本点 3 的贴程度最大.所以,最终的定位结果为这 3 个样本点构成三角形的质心 P 点,此时误差为 6.144m.当不存在任何干扰时,FTLM 算法仍然会有误差.这是因为样本点数不可能设置成无穷,因此在误差很小的环境中,FTLM 的精度不如基于三边测量的三角形定位算法.在图 11(b)中,在 NS-2 的 Shadowing 模型中引入一个具有较大方差的随机数,方差 σ 设为 3dBm,使用 FTLM 模型对 E 点进行定位计算 1 000 次,最终的定位结果最大误差为 12.192m,出现最大误差时 E 点的 RSSI 向量与样本点 2、样本点 3、样本点 5 的贴程度最大.这是因为 E 点及样本点的 RSSI 向量与其坐标存在干扰,因此使得定位结果相对图 11(a)发生了改变.在图 11(b)的基础上增加样本点个数,如图 11(c)所示,方差 σ 仍为 3dBm,使用 FTLM 模型对未知点定位 1 000 次,最终的定位结果最大误差为 8.3m,出现最大误差时 E 点的 RSSI 向量与样本点 2、样本点 6、样本点 7 的贴程度最大.可见,随着样本点数的增加,在干扰不变的情况下,最终的定位误差将会减少,这主要是由 FTLM 的几何意义所决定的.

由此可见,FTLM 算法具有鲁棒性.

FTLM 算法具有鲁棒性的主要原因有如下几点:

- 1) 归一化在一定程度上可以消除一部分 RSSI 信号的干扰;
- 2) FTLM 模型采用模糊数学的思想,用与未知点最贴近的 3 个样本点估计未知点的最终坐标;
- 3) 计算未知点 RSSI 向量时,样本点坐标已知,且对数正态阴影模型对外界干扰具有一定的鲁棒性;
- 4) FTLM 模型中的质心计算对计算误差具有一定的修正意义.

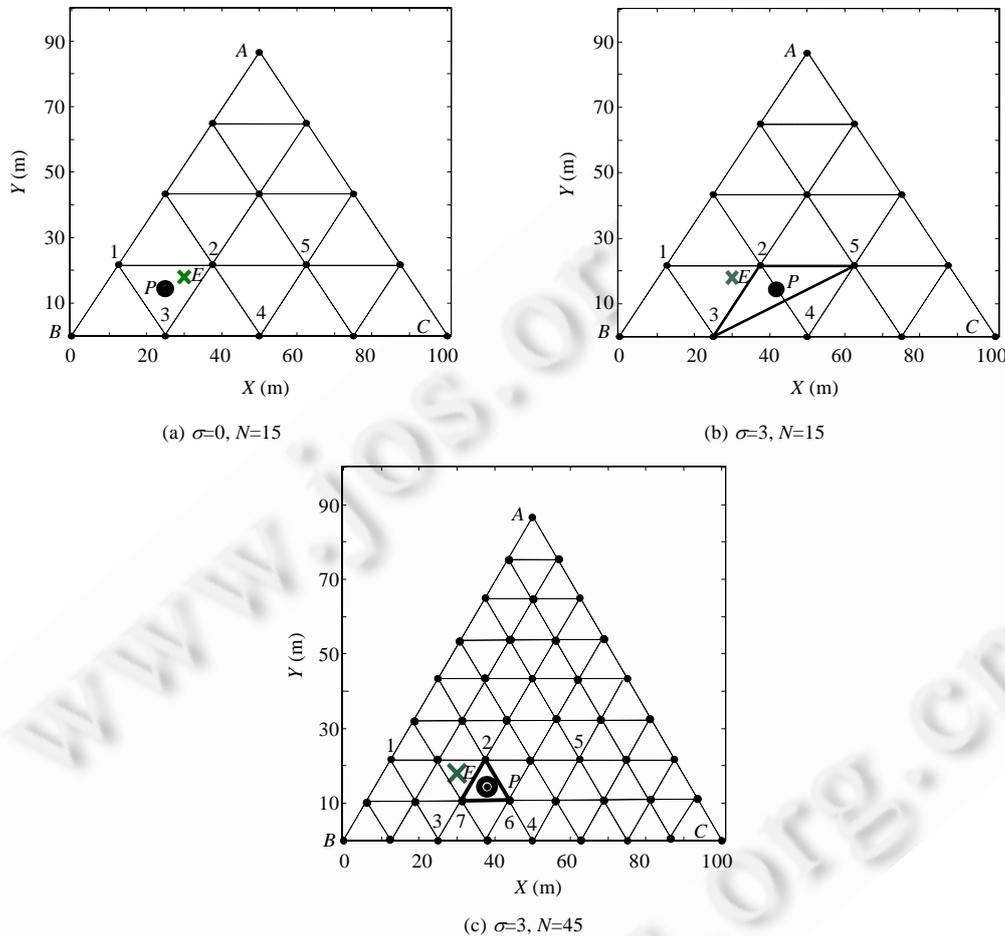


Fig.11 Localization error vs. RSSI standard error σ and swatch nodes' number N
图 11 定位误差与方差 σ 、样本点个数 N 的关系

4 FTLM 性能评估

本节对 FTLM 算法性能进行了全面的评估.首先分析了 FTLM 算法固有的误差来源与精度分布,并在 NS-2 仿真平台上通过改变各种射频信号参数来研究 FTLM 的性能;其次,在定位领域选择了其他 3 种比较经典的定位模型进行了对比分析.

4.1 FTLM 误差特性分析

实验 1:在 NS-2 仿真环境下,布置如图 11(a)所示的 3 个参考点 A, B, O 与一个未知点 E .分别设置 shadowing 模型中的标准差 σ 为 0dBm,5dBm,10dBm,35dBm,在每一个 σ 值上,逐渐增加样本点个数,并将样本点个数与定位

精度均值的关系显示于图 12 中。

图 12 中,每一个点都是定位 500 次的精度均值.从图中可以看出,当外界干扰方差 $\sigma=0$ 时, E 点的最终坐标被确定为图 11(a)所示的 P 点,此时精度为 0.948.对应传统的三边测量定位算法,此时的定位精度应该为 1.所以,当不存在干扰时,FTLM 模型需要大量的样本点布置才能使得精度趋近于 1.实际上,当样本点数为 66 时,FTLM 模型的精度已经达到了 0.995 9.同时还可以看出,无论方差多大,每条曲线的一开始均有一些震荡.随着样本点数量的增加,精度逐渐平稳在某个范围内.这是因为,当样本点数目较少时,样本点较稀疏,由于 RSSI 误差的影响,会导致最终的定位结果偏差较大;当样本点数目增加到一定值时,样本点较密集,此时,定位结果即使出现偏差,其偏差程度也将缩小.

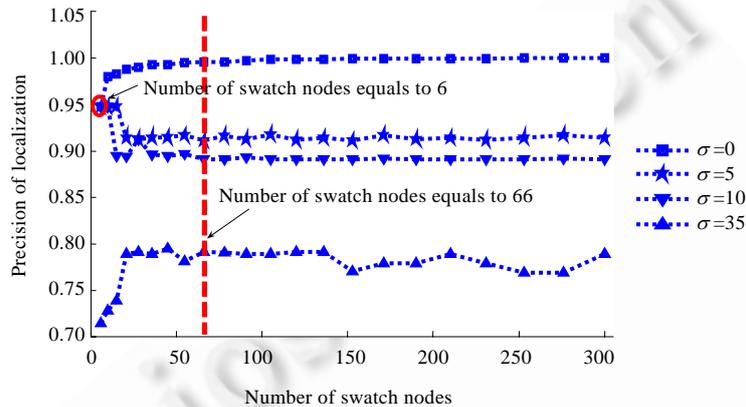


Fig.12 Character of FTLM's precision vs swatch nodes

图 12 FTLM 误差特性与样本点个数的关系

当 $\sigma=5\text{dBm}, 10\text{dBm}$ 、样本点数目为 6 时,定位精度与 $\sigma=0\text{dBm}$ 时的定位精度相同,均为 0.948.这主要是由于外界的干扰程度并不足以使得与未知点拥有最大贴近度的 3 个点发生改变所致,所以按照这 3 个点得出的质心也没有发生变化.这正是 FTLM 模型的一个特点,在一定程度上提升了精度.随着 E 点周围样本点的增加,并且存在干扰,所以会导致最终的定位结果发生改变,最终稳定在某个范围内.由最终的稳定范围可以看出,虽然精度仍然存在抖动,但是幅度很小.

当 $\sigma=35$ 时干扰强烈,所以,当样本点数目为 6 时,导致与未知点贴近度最大的前 3 个节点发生了改变,从而出现较大误差,影响了精度,并且最终的稳定范围中抖动幅度也较大.

FTLM 固有的误差来源是利用质心估算未知点的坐标,但是随着样本点的增加,质心将趋近于未知点,最终定位精度将被稳定在一个范围内;当存在 RSSI 干扰时,最终稳定的精度并不会随着样本点的无限增加而达到 1.这也是说,其实没有必要设置过多的样本点.如图 12 所示,当样本点达到 66 个时,精度已经稳定,继续增加样本点个数不但会增加计算量,并且在精度上并无提升.

4.2 性能对比分析

本文将 FTLM 模型与 SBL^[2]、三边测量法 Trilateration^[12-14]、质心算法 Three Centroid 进行了对比.

- 1) SBL:锚节点广播定位请求数据包 REQ,未知节点 s 可获得多个锚节点的坐标以及对应的 RSSI 值,存入表中.节点 s 根据接收到的 K 个不同锚节点信息把监测区域分成若干部分,计算出整个网络各部分区域对应的序列号以及该小区域的中心点,存入 Seq_Table 表中.最后,对节点 s 对应 K 个锚节点的 RSSI 值大小进行排序,计算出自己所在位置的序列号,然后把它与 Seq_Table 表中的序列号作对比,查找此序列号对应的小区域的中心坐标,配对后得出的小区域中心坐标即为未知节点 s 的估计坐标.
- 2) 三边测量法:不在一条线上的 3 个锚节点向未知点发送数据包,未知点通过接收到的 RSSI 值计算出

锚节点与自身的 3 段距离 L_1, L_2, L_3 . 假设直接点坐标为 (x, y) , 3 个锚节点的坐标分别为 $(a, b), (c, d), (e, f)$, 则可以列举方程组进行坐标计算. 当没有干扰时, 三边测量法能够准确地计算出未知点坐标; 但是一旦存在干扰, 则需要利用极大似然估计法来估计未知点坐标, 将引入多次迭代计算, 并且需要多个参考点参与计算.

- 3) 质心算法: 锚节点广播数据包, 未知点接收到这些数据包后统计出哪些锚节点能够与未知节点通信, 然后用这些锚节点所构成的质心作为最终定位结果. 这种方法简洁、明了, 但是对网络布局有着特殊的要求, 当网络布局不均匀时, 将引入较大误差.

图 13 显示了当 Shadowing 模型中的随机干扰方差 σ 、路径损耗指数 $pathlossExp$ 、节点通信半径发生变化时, FTLM, Three Centroid, Trilateration 与 SBL 这 4 种定位模型的误差变化情况. 图 13(b)、图 13(c) 是图 13(a) 环境下的测试结果; 图 13(e)、图 13(f) 是图 13(d) 环境下的测试结果.

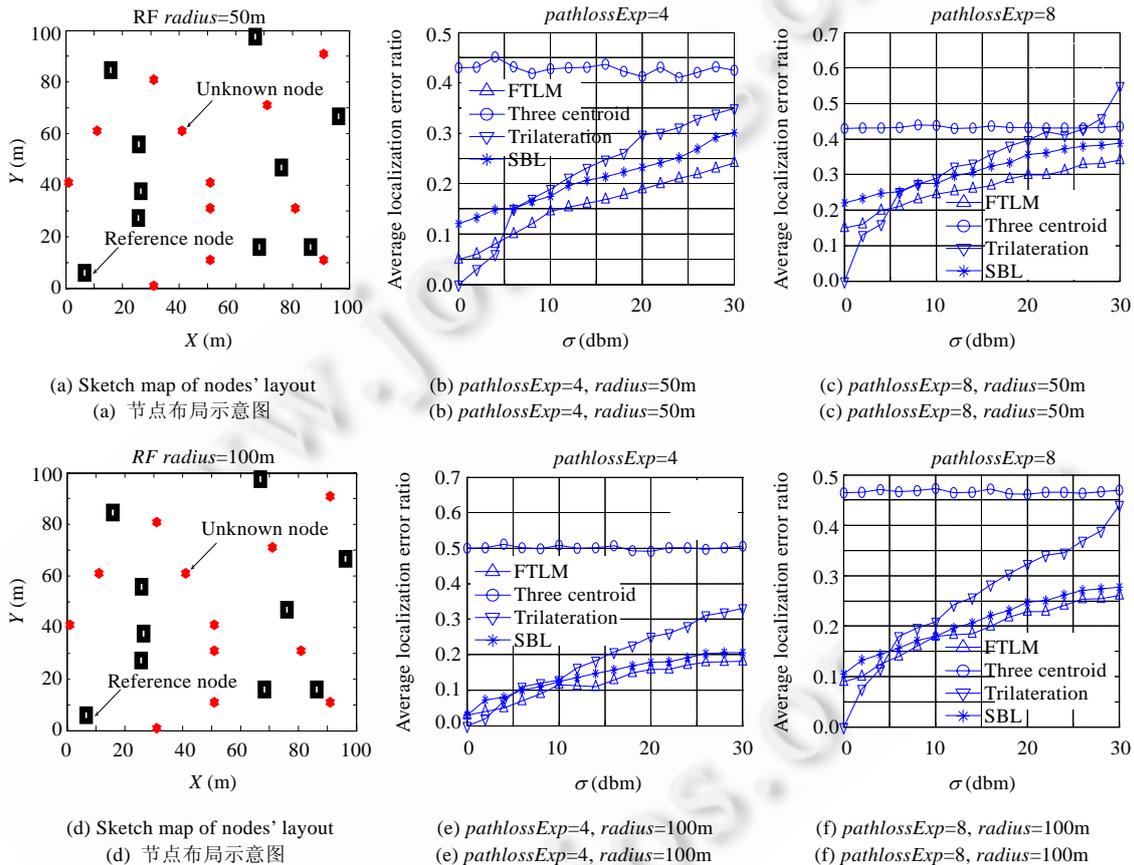


Fig.13 Compare results among FTLM, SBL, Trilateration and Three-Centroid in different conditions

图 13 不同环境下 FTLM, Three Centroid, Trilateration, SBL 的误差比较

对比结果可以归结为以下几点:

- 1) 参考点与未知点布局如图 13(a) 所示, 节点通信半径为 50m, FTLM, Trilateration, SBL 这 3 种模型的定位误差均随着干扰的增加而增加; Three Centroid 的误差却比较稳定, 主要原因是该模型的性能会随着节点布局而发生改变, 受 σ 与 $pathlossExp$ 的影响不大.
- 2) 当 σ 较小时, Trilateration 的误差较小; 随着 σ 的增加, Trilateration 的误差迅速增高; 在某一段 σ 范围内, 其精度要超过其他 3 种模型.

- 3) 如图 13(d)所示,当通信半径增加时,能够参与定位的参考点数目增加,SBL 与 Trilateration 的误差减小.这说明,这两种模型需要多个参考点参与迭代计算才能提升精度,如果参与计算的参考点数足够多,其精度将会超过 FTLM,但同时也引入了高计算复杂度;由图 13(e)与图 13(f)可以看出,SBL 的误差很接近于 FTLM,但是仍然稍差于 FTLM.这是因为随着参考点与未知点距离的增加,干扰源对信号的影响也逐渐增加,从而引入误差;大量参考点的引入对通信带宽也会造成一定的浪费,FTLM 只需 3 个参考点就可以进行定位,这更加适用于实际.
- 4) 随着路径损耗指数的增加,FTLM,Trilateration,SBL 的误差均有所增加.这主要是因为该指数越大,信号强度衰减得越快;信号强度越弱,节点越不容易区分出信号与噪声,即受随机干扰的影响就越大.

所以,Trilateration 若想具有较高的精度,不但需要干扰较弱,并且需要准确地设置 Shadowing 模型中的各个参数 σ 与 $pathlossExp$.但是,这两点在实际应用中很难做到.首先,干扰每时每刻都存在,并且我们难以控制其强度;其次,各种参数随着环境的变化而变化,难以产生一组高度精确的参数.SBL 模型可以通过大量的计算复杂度与参考点来提升定位精度,但在资源受限的无线传感器网络,这两点都是很难做到的,因此实用性不强;质心算法虽然简单、易行,但其精度不够理想,难以应用于各种场合.FTLM 模型受 Shadowing 模型参数的影响较弱,并且由于自身的各项机制使其具有一定的鲁棒性,它无需大量参考点参与计算,可以通过改变样本点数量来调节定位精度,但在维持向量表时会占用一定的存储空间.

5 结 论

本文对基于无线传感器网络的定位模型进行了研究,同时也总结了它们的优点与不足.总体来说,在定位研究领域,计算复杂度与精度是矛盾的两极.一些模型为了达到高精度不但使得计算复杂度过高,而且还需要大量参考点参与定位计算,这样的定位模型不适用于资源受限的无线传感器网络;也有一些非测距定位模型,例如质心算法、DV-Hop^[15,16]等,虽然计算复杂度在一定程度上较低,但对网络布局有着很大的依赖.

针对现有定位模型在无线传感器网络应用中的局限性,本文提出一种新颖的非测距定位模型 FTLM.该模型计算复杂度相对于 SBL、极大似然估计等算法较低,但是高于质心算法、Radar^[19]等定位模型,并且无需大量样本点参与计算;定位精度较优,且可以随着样本点数量的增加而增加.FTLM 在计算复杂度与定位精度之间做到了一个较好的折衷,使得在无线传感器网络中的实用性更强.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是东北大学计算机系统结构专业赵海教授领导的讨论班上的同学和老师表示感谢.

References:

- [1] Wang FB, Shi L, Ren FY. Self-Localization systems and algorithms for wireless sensor networks. Journal of Software, 2005,16(5): 857-868 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm> [doi: 10.1360/jos160857]
- [2] Yedavalli K, Krishnamachari B. Sequence-Based localization in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008,7(1):81-94. [doi: 10.1109/TMC.2008.4387797]
- [3] Bahl P, Padmanabhan VN. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In: Agrawal A, ed. Proc. of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE, 2000. 775-784. [doi: 10.1109/INFCOM.2000.832252]
- [4] Mahtab Hossain AMK, van Nguyen H, Soh WS. Fingerprint-Based location estimation with virtual access points. In: Thomas S, ed. Proc. of the 17th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2008. 485-490.
- [5] Chen HY, Huang P, Martins M, So HC, Sezaki K. Novel centroid localization algorithm for three-dimensional wireless sensor networks. In: Lin JT, ed. Proc. of the 2008 Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2008. 1-4. [doi: 10.1109/WiCom.2008.841]

- [6] Zăruba GV, Kamangar FA, Chlamtac I. Indoor location tracking using RSSI readings from a single Wi-Fi access point. *Wireless Networks*, 2007,13(2):221–235. [doi: 10.1007/s11276-006-5064-1]
- [7] Zorzi M. Power control and diversity in mobile radio cellular systems in the presence of Ricean fading and log-normal shadowing. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1996,45(2):373–382. [doi: 10.1109/25.492912]
- [8] Zahaby M, Gaonjur P, Farajian S. Location tracking in GPS using Kalman Filter through SMS. In: Puzankov DV, ed. *Proc. of the IEEE EUROCON 2009*. Piscataway: IEEE, 2009. 1707–1711. [doi: 10.1109/EURCON.2009.5167873]
- [9] Zhou Y, Xia SX, Ding SF, Zhang L, Ao X. An improved APIT node self-localization algorithm in WSN based on triangle-center scan. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(4):566–574 (in Chinese with English abstract).
- [10] Yang J, Liu F. A modified localization algorithm of APIT based on perpendicular bisector feature for wireless sensor network. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2008,21(8):1453–1457 (in Chinese with English abstract).
- [11] Zhao J, Pei QQ, Xu ZQ. APIT localization algorithms for wireless sensor networks. *Computer Engineering*, 2007,33(5):109–111 (in Chinese with English abstract).
- [12] Gentile G. Distributed sensor location through linear programming with triangle inequality constraints. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2007,6(7):2572–2581. [doi: 10.1109/TWC.2007.05907]
- [13] Sun PG, Zhao H, Zhang WB, Yin ZY, Zhao M. Research on reference nodes placement and selection of ubiquitous computing location service. *Acta Electronica Sinica*, 2006,34(8):1456–1463 (in Chinese with English abstract).
- [14] Graefenstein J, Bouzouraa ME. Robust method for outdoor localization of a mobile robot using received signal strength in low power wireless networks. In: Howard A, ed. *Proc. of the 2008 IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE, 2008. 33–38. [doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543183]
- [15] Yang SL, Fan XP, Liu SQ, Zhang CH. An improved algorithm of DV-hop in wireless sensor networks. *Computer Measurement & Control*, 2008,16(8):1356–1358 (in Chinese with English abstract).
- [16] Yu J. Research on localization algorithm of wireless sensor network. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2007,29(12):35–38 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [1] 王福豹,史龙,任丰原.无线传感器网络中的自身定位系统和算法. *软件学报*,2005,16(5):857–868. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/857.htm> [doi: 10.1360/jos160857]
- [9] 周勇,夏士雄,丁世飞,张磊,敖欣.基于三角形重心扫描的改进 APIT 无线传感器网络自定位算法. *计算机研究与发展*,2009,46(4):566–574.
- [10] 杨骥,刘锋.无线传感器网络基于中垂线分割的 APIT 的改进定位算法. *传感技术学报*,2008,21(8):1453–1457.
- [11] 赵军,裴庆祺,徐展琦.无线传感器网络近似三角形内点测试定位算法. *计算机工程*,2007,33(5):109–111.
- [13] 孙佩刚,赵海,张文波,尹震宇,赵明.普适计算中定位服务的参考点布置及选择算法. *电子学报*,2006,34(8):1456–1463.
- [15] 扬石磊,樊晓平,刘少强,张纯和.一种改进的无线传感器网络 DV-Hop 定位算法. *计算机测量与控制*,2008,16(8):1356–1358.
- [16] 余金.无线传感器网络定位算法的研究. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*,2007,29(12):35–38.



朱剑(1981—),男,江苏镇江人,博士,主要研究领域为无线传感器网络,普适计算,嵌入式系统.



徐久强(1966—),男,博士,教授,主要研究领域为数据融合,无线传感器网络,嵌入式系统.



赵海(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为数据融合,无线传感器网络,嵌入式系统.



李大舟(1982—),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络.