

基于 RSSI 的动态权重定位算法研究

詹 杰,刘宏立,刘述钢,朱 凡

(湖南大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410082)

摘 要: 基于 RSSI 技术的静态权重定位算法由于不需附加设备,成本低,使用方便,适用范围广而得到了广泛的应用.针对 RSSI 测距容易受到各种干扰,静态权重算法不能同时解决定位的平均误差和最大误差的缺陷,提出一种新的结合 RSSI 测距数据处理的高斯拟合动态权重定位算法 GFDWCL,并在 ZigBee 平台上实现了该算法.两种算法实验结果表明,该算法能很好改善定位的精度,同时将定位平均误差降低 2/3、最大误差下降 3/4.

关键词: RSSI; GFDWL; 静态权重定位; 动态权重定位; 高斯拟合

中图分类号: TN919.2, TN915 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0082-07

The Study of Dynamic Degree Weighted Centroid Localization Algorithm Based on RSSI

ZHAN Jie, LIU Hong-li, LIU Shu-gang, ZHU Fan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The SWCL(Static Weighted Centroid Localization) based on RSSI is widely used, owing to its low cost, convenience and no need of additional equipment. However, as the RSSI ranging is vulnerable to various interference, the SWCL cannot figure out both the average errors and the max errors simultaneously. Thus, a new dynamic weighting centroid algorithm using Gaussian fitting method is proposed, and the algorithm is performed on the ZigBee platform. The experimental results indicated that the accuracy of RSSI positioning can be well improved, and the positioning average error is only one-third, and the maximum error is quarter of SWCL level.

Key words: rssi; gauss fit dynamic weighted centroid localization; static weighted centroid localization; dynamic weighted centroid localization; gaussian fit

1 引言

无线传感网络由具有感知能力、计算能力、无线通信能力的传感器节点组成,广泛应用于军事侦察、工业生产过程监控、环境监测等方面^[1,2].传感器节点的自身定位是传感器网络应用的基础,在目标监测与跟踪、基于位置信息的路由、网络的负载均衡以及网络拓扑结构^[3]等许多应用中都要求网络节点预先知道自身的位置,以便在通信和协作过程中利用位置信息完成应用要求.没有位置信息,传感器节点所采集的数据几乎没有应用价值.因此,在无线传感器网络的应用中,节点定位成为关键的问题.

依据对节点位置的估测机制,一般将定位方法分为基于测距的(Range-based)定位和无需测距(Range-free)的定位.基于测距的定位通过测量节点间点到点的距离或角度信息,并使用三边测量法、三角测量法或最大似

然估计法计算节点位置.目前使用的测距技术有 RSSI^[4]、TOA^[5]、AOA^[6]、TDOA^[7]等.而无需测距的定位则仅仅依靠网络连通性等信息进行定位,一般有质心算法^[8]、DV-Hop 算法^[9]、Amorphous 算法^[10]、APIT 算法^[11]等.基于测距的定位算法与无需测距的定位算法相比虽然有着成本较高、能耗较高、计算量和通信量较大的不足,但是前者的定位精度一般都要比后者高.可以相信,随着技术进步,更精确、能耗更小的测距技术的出现,以及对定位精度的更高要求,基于测距的定位算法将在节点定位技术中获得更好的发展空间.

在基于测距的定位算法中, RSSI 测距可利用射频芯片功能来完成,故该技术是一种低功率、廉价的测距技术,在 RADAR^[12]项目, OR-RSSI^[13]算法中都使用了该技术.获得测距信息后,采用基本的三边测量定位法由于测距误差,有可能存在无确定解的情况.最大似然估计法,通过引入更多的定位信息以减少个别测距误差

对定位结果的影响,但这种方法实现的实际上是使误差之间的差异平方和最小,并非与真实位置之间的误差最小^[14],算法运算量大,而且仿真和实验结果相差很大.RNOS^[15]可提高定位精度,但对信标节点的分布提出了严格要求,计算量大.静态权重定位实现简单,但其定位精度受制于 RSSI 测距精度,而且无法解决非中心区域的定位精度问题,限制了其应用范围^[16].

本文对 RSSI 测距和静态权重定位算法做了多次实验,统计分析了大量的实验数据,在此基础上提出高斯拟合动态权重定位算法 GFDWCL.

2 RSSI 高斯拟合测距处理

在嵌入式设备中, RSSI 值表示为接收信号强度和参考值 $P_{ref} = 1\text{mW}$ 的比值,定义为

$$RSSI = 10 * \log_{10} \frac{P'_{rx}}{P_{ref}} \quad (1)$$

在理想自由空间中有 $P'_{rx} = P_{rx}$, 费尔斯自由空间电波公式

$$P_{rx} = P_{tx} * G_{tx} * G_{rx} * \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{ij}}\right)^2 \quad (2)$$

P_{tx} 为发送节点功率, P_{rx} 为接收节点接收的功率, G_{tx} 、 G_{rx} 分别表示接收和发送增益, λ 为波长, d_{ij} 为发送节点和接收节点的距离.

式(1)、(2)表明, RSSI 和距离 d_{ij} 有特定的对应关系,但在实际测量过程中的 RSSI 极易受到外界干扰,随机性较大,造成很大的误差.本文采用 CC2430 射频模块进行 4 组测距实验,实验结果如图 1 所示(实验在空旷的场地进行,所有节点距地面 1m, 频率 2.4GHz). 结果表明,与信标节点相距较近(10m 以内)时,测量的信号强度变化很大,当与信标节点距离增大时,信号强度变化趋于平稳,同一个节点在同一个点测量多次,强度有跳变情况,不同的节点在同一点测量时强度也有一定的差异.在权重算法中,近距离对应的权重值大,测距

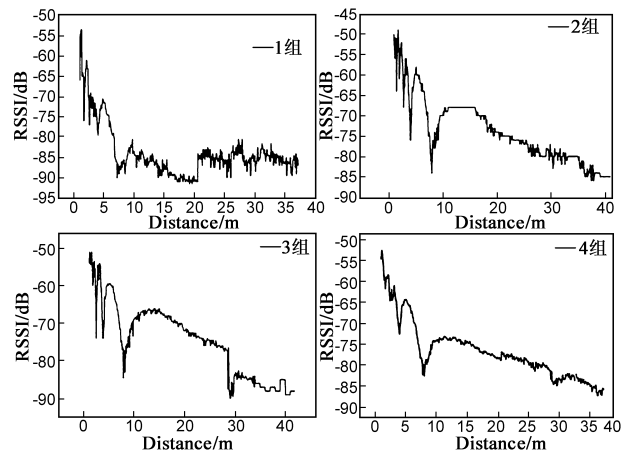


图1 实测信号强度与距离的关系

误差对定位精度有很大的影响,所以对 10m 以内 RSSI 测距值的处理很重要.

实验表明, RSSI 值测量过程中,大多数干扰使得测量值变小,所以同一个值对应多个点的位置,这些现象使得强度值和距离的对应关系被破坏,所以均值处理会造成很大的误差, HLM 算法^[17]提高了 10m 内测距的精度,但需测量大量的环境参数,使用不便. 统计发现,实测的 RSSI 值分布是一个概率分布,分布密度最大的地方是测量值和真实值最接近的地方. 为此,我们通过数据做高斯拟合,找出密度最大的波峰值,滤除很大一部分错误的的数据. 拟合后的 RSSI 概率分布如图 2 所示,各个不同的 RSSI 测量值都只对应了一个波峰,值越大,波峰越陡,对应的测距精度就越高. 得出的拟合函数为

$$y = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\pi/2}} e^{-2(x-x_c)^2/\omega^2}$$

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^k RSSI_i}{k}, \quad w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (RSSI_i - x_c)^2}{k-1}} \quad (3)$$

当 $0.5 \leq y \leq 1$ 时,认为是大概率事件,可以保留,然后取保留的 RSSI 值平均. y_0 , A 为待定系数(可通过信标节点的位置与 RSSI 关系来确定), k 为接收到的信标节点数.

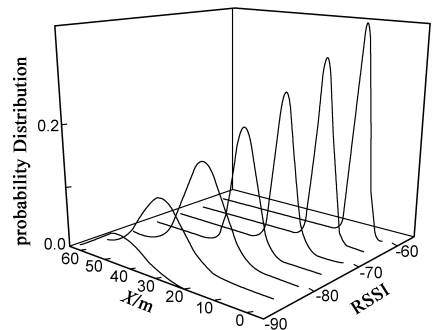


图2 高斯拟合后的RSSI概率分布

采用高斯拟合,实际上是减少了一些小概率、大干扰事件对整体测量的影响,使测距误差下降,但对阴影效应、能量反射等长时间干扰问题其处理效果欠佳. 图 3 为采用高斯拟合与平均值处理 RSSI 测距的实验误差对比,结果表明,高斯拟合对近距离的 RSSI 测量效果的改善很明显.

3 静态权重定位算法

静态权重定位算法是在质心算法基础上的改进,体现了距离远近对定位精度的影响,提高了定位精度. 最基本的权重算法公式如下:

假设有 n 个信标节点(在传输范围以内),待测节点的位置 (x'_i, y'_i) 可由下式给出

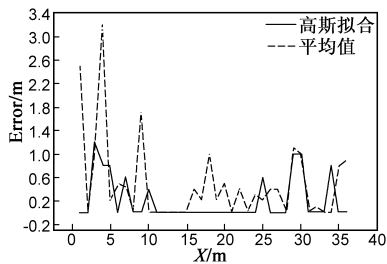


图3 高斯拟合与平均值处理误差分布对比

$$(x'_i, y'_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij}(x_j, y_j)}{\sum_{i=1}^n \omega_{ij}} \quad (4)$$

权重 ω_{ij} 是距离的函数, 一般有定义

$$\omega_{ij} = \frac{1}{(d_{ij})^\alpha} \quad (5)$$

α 为指数, 静态权重算法中, α 为固定值. 静态权重定位算法实现简单, 为讨论静态权重定位算法的误差分布情况, 分别布置了 $[10, 5]$ 、 $[10, 7.5]$ 、 $[10, 10]$ 等三个矩形区域, 在每个区域都分别采用了不同的权重值 (1~5.5) 进行定位实验, 分别得出了定位误差, 如图 4~6 所示. 图中颜色的深浅代表了误差的大小. 从三个区域的误差分布图中可以得出, 在矩形区域的不同位置, 不同的权重系数引起的误差不一样, 在中心区域, 权重系数的取值对定位精度影响不大, 只是影响区域面积的大小, 在边缘, 不同的取值带来的定位精度差异较大. 对整个矩形区域而言, 权重系数值的取大取小, 对平均误差有很大的影响, 取值越大, 深色区域越小, 整体平均误差将变大. 当矩形区域增大时, 要保持一定的精度, 权重系数有逐渐增大的趋势. 由以上分析可知, 静态权重定位算法无法同时解决定位的平均误差与最大误差的问题.

4 GFDWCL 定位算法

4.1 权重系数的优化分析

图 4~6 三个区域权重系数取值和误差的分布表明, 在不同的区域要采用不同的权重值, 这样才能保证最小误差. 区域划分过粗, 达不到定位精度, 划分过细, 可以得到较高的定位精度, 但节点需存储需计算的量过多, 需交换的数据也将大大增加, 对于低功耗、低成本、低数据传输率的无线传感网络而言, 耗费太大.

结合三个区域权重值与误差的分布特点, 将上述区域划分为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的小方块, 并对各个小区域的最优化权重值 α 进行统计, α 值分布如图 7 所示. 矩形区域优化权重值的分布呈两极趋势, 权重 α 取值主要分布在 1.5~2 之间, 这部分取值达到了 80% 以上, 并且随着区域的扩大, α 为 1.5 的比重逐渐下降, α 为 2 的比重逐渐上升. 结合图 4~6 的误差分布, α 取值为 (1.5

~2) 主要分布在区域中部, α 取值为 (3.5~5.5) 这部分值主要分布在边界中点附近区域. 这种分布特点可以将矩形区域进行粗分而不会降低太多的定位精度, 根据这种分布特点, 将区域分为两块, α 取值占比重较大区域为一般区域, α 取值较大区域为特定区域. 结合实验数据统计, 可以确定的权重系数取值, 即长短边比值大于 2, α 取值为 1.5, 小于 2, α 取值为 2. 在特定区域, α 的取值可为所在边长的 1/2.

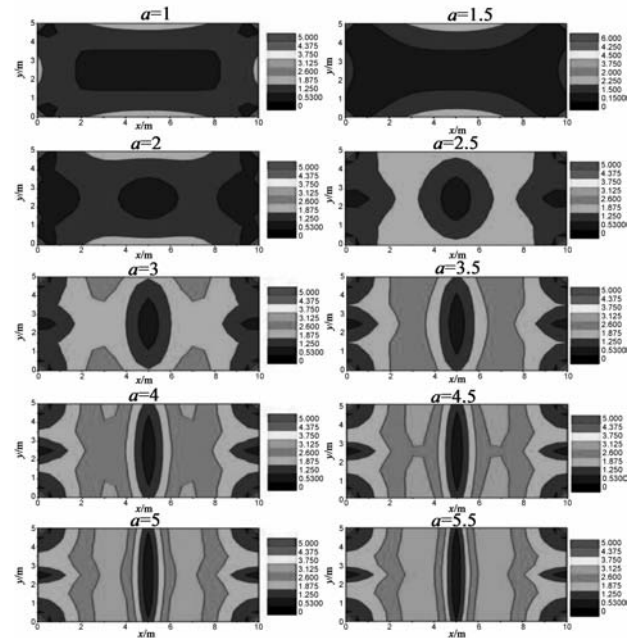


图4 [10,5]区域权重系数值与误差关系

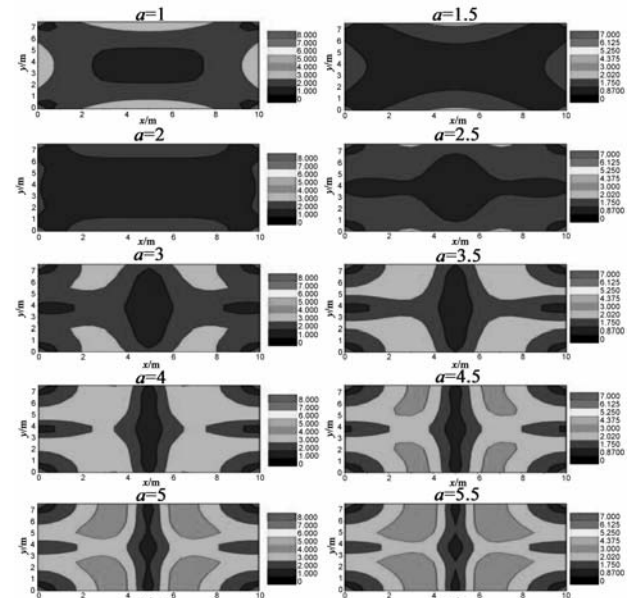


图5 [10,7.5]区域权重系数值与误差关系

4.2 权重系数区域区分

B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 四个信标节点, 组成一个如图 8 所示的矩形区域, 长边为 L_1 , 短边为 L_2 . 将围成的区域划分

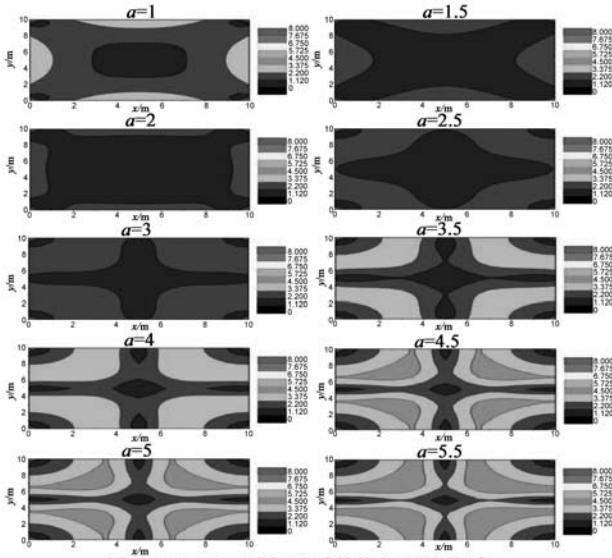


图6 [10,10]区域权重系数值与误差关系

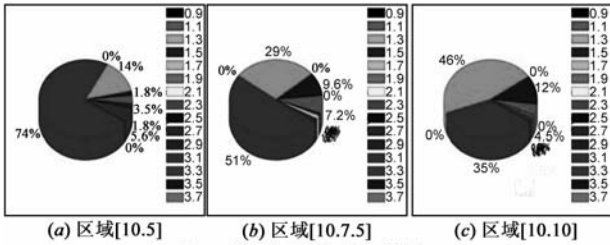


图7 优化权重值分布统计

为 8 个部分,分别为 R_{12} 、 R_{24} 、 R_{34} 、 R_{13} 以及 F_{12} 、 F_{24} 、 F_{34} 、 F_{13} . 过对角线的中点分别做垂线,如图中的实线所示,将矩形区域分为四块 R_{12} 、 R_{24} 、 R_{34} 、 R_{13} . 区域 F 为特定区域,分别位于各个边的中点,宽度为所在边长的 $1/10$,高度为对应边长的 $1/5$. 两条实线分别是对角线的垂直平分线,在线上的点到对应的两个顶点的距离相等,所以 R 区域可以通过接收信标节点的信号强度 P 来区分:

R_{12} 区域: $P_{B1} > P_{B4}$, 同时 $P_{B2} > P_{B3}$.

R_{24} 区域: $P_{B1} < P_{B4}$, 同时 $P_{B2} < P_{B3}$.

R_{34} 区域: $P_{B1} < P_{B4}$, 同时 $P_{B2} > P_{B3}$.

R_{13} 区域: $P_{B1} > P_{B4}$, 同时 $P_{B2} < P_{B3}$.

在 F_{24} 区域,节点在 T 点接收到信标节点 B_1 的信号强度由式(1)可得

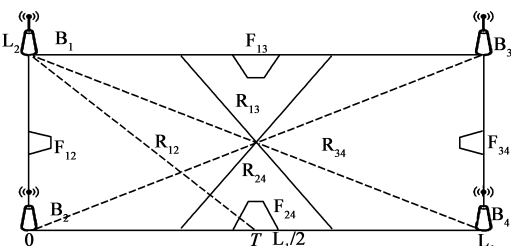


图8 区域特点分布

$$RSSI_{B_1 T} = 10 * \log_{10} \frac{P'_{rx}}{P'_{ref}}$$

同理可以分别求出 $RSSI_{B_1 T}$ 、 $RSSI_{B_2 T}$ 、 $RSSI_{B_3 T}$ 、 $RSSI_{B_4 T}$. 由于 T 位于长边的中点, 所以有 $RSSI_{B_1 T} = RSSI_{B_3 T}$, $RSSI_{B_2 T} = RSSI_{B_4 T}$. $B_1 T$ 、 $B_2 T$ 的 RSSI 值之差

$$D_{13} = RSSI_{B_1} - RSSI_{B_2} = 10 \log_{10} \frac{P'_{rx B_1}}{P'_{rx B_2}} \quad (6)$$

代入式(2)可得

$$D_{13} = RSSI_{B_1} - RSSI_{B_2} = 20 \log_{10} \frac{B_2 T}{B_1 T} = 20 \log \frac{l_1}{\sqrt{4l_2^2 + l_1^2}}$$

令 $L_1/L_2 = \beta$, 则 $D = 20 \log \frac{1}{\sqrt{(2/\beta)^2 + 1}}$ (7)

对短边,我们同样可以求出类似的关系.

我们定义 $RSSI_i$ 为接收到的第 i 强的信号, 那么相邻强度信号之差为

$$e_i = RSSI_i - RSSI_{i+1} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

在 F_{24} 区域, $RSSI_{B_2} \approx RSSI_{B_4} > RSSI_{B_1} \approx RSSI_{B_3}$

我们定义区分函数 H

$$H = e_1 + |D_i - e_2| + e_3 \quad (9)$$

在函数 H 中, e_1 和 e_3 接近于 0, 所以 $D_i - e_2$ 决定了 H 的值, 由式(6)(7)(8)可知, 在 F 区域中, 其值也趋向于 0, 所以在 F_{24} 的区域内, H 值较小, 出了这个区域, e_1 、 e_2 、 e_3 增长很快, D 值不变, 所以 H 值增长很快. 对 F 的其它区域也能得出类似结论, 因此区域的判定问题就能转化为求函数值大小的问题.

4.3 动态权重定位算法

H 门限值的选取和区域形状以及定位精度有关, 图 9 为对三个区域的 H 值统计结果. 因为矩形长短边 D_i 的取值不一样, 所以三个区域有五幅图, 图中的深色区域部分对应 H 取值较小, 和图 4~6 对比, H 与权重系数取小时所引起的误差较大区域有很好的对应关系(各边中点附近), 因此我们可以在确定了 R 区域的前提下通过 H 值来区分节点是否处于 F 区域, 根据区域的区分, 我们可以选择不同的权重系数值来提高定位精度. 不失一般性, 我们对基于高斯拟合的动态权重定位算法定义如下:

步骤 1 信标节点通过彼此的通信确定自己的相对位置.

步骤 2 节点通过接收信标节点的广播帧(包含信标节点的坐标), 确定自己所属的矩形区域和长短边, 分别计算出 D_1 、 D_2 .

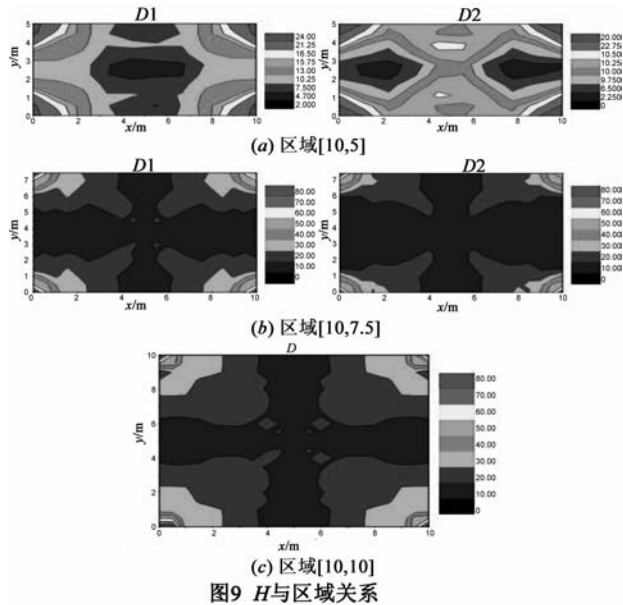
步骤 3 节点接收多次本区域各个信标帧的广播帧, 采用高斯拟合确定 4 个信标节点的 RSSI 值和距离 d .

步骤4 根据 RSSI 值确定 R 区域,根据 H 值确定 F 区域(10m 以内区域, H 门限值由经验值确定为 10)。

步骤5 在 F 区域内权重值取所在边长的 1/2。

步骤6 非 F 区域,根据长短边比值取值,长短边比值大于 2, α 取值为 1.5,小于 2, α 取值为 2。

步骤7 根据 α 取值及权重定位公式计算纵横坐标,完成定位。



5 GFDWCL 算法评估

为更客观的评估 GFDWCL 算法,本文将该算法与静态权重定位算法做实地对比实验.布置一个 40m × 50m 的区域,每隔 10m 均匀分布,共 24 个信标节点,准备两个待测节点,一个采用静态权重定位算法,一个采用动态权重定位算法。

采用本文测距实验所用设备(CC2430 模块),所有参考节点和移动定位节点都固定于距地 1m 的杆子上,本文采用的 RSSI 算法模型为无障碍物的二维空间模型,所以实验场地选择在平坦的,无障碍物的 400m × 200m 的操场.信标节点和待测节点都采用电池供电,增加一个协议分析仪,采用 Chipcon Packet Sniffer 2.2 监控软件对数据包进行监测,并对定位算法的能耗和收敛时间进行统计.参考节点和普通节点的通信距离都在 50m 左右,在这个实际的应用场景中,采用了 ZigBee 协议来组网,通过协调器的设定,采用超帧对参考节点和普通节点的通信进行管理,解决通信冲突、重传等问题,定义了管理用超帧、广播帧、信标帧、确认帧、数据帧等.调用协议的 MDMCTRL0H.CCA-HYST 函数(协议栈函数)对数据包的信号强度进行解析。

网络采用星形拓扑结构,首先设定协调器、节点的地址以及参考节点的坐标,参考节点在超帧的竞争期

内发送信标帧,协调器采用 RS-232 接口,协议分析仪采用 USB 接口和上位机的通信.两种算法的待定位节点同时放入区域中,用不同的地址区分,做了 60 个数据点的测试,这里截取了试验区域边缘和中心位置的几张图片,如图 10 所示。

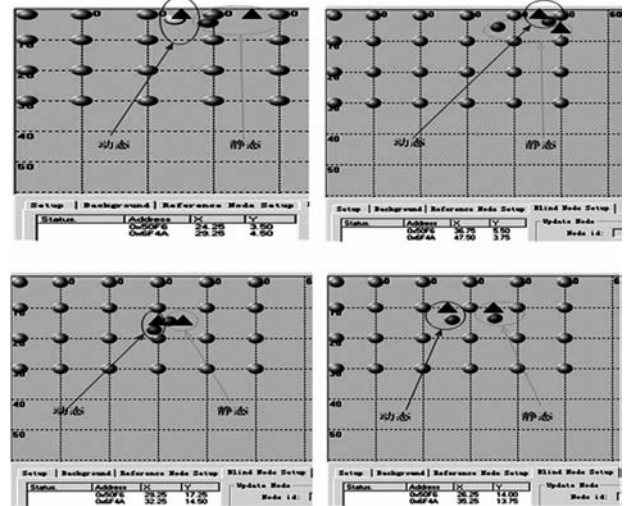


图10 两种算法定位比较

6 算法性能分析

6.1 定位精度分析

图 10 所示的两种算法的定位结果表明,静态权重算法在不同区域的表现差别很大,在区域的中心,该算法的定位误差较小,在区域的边缘和四角,误差较大. GFDWCL 算法在区域的不同位置定位精度变化不大,算法成本和复杂性的增加带来了定位精度的改善.对 60 个测量点数据的统计结果如图 11 所示, GFDWCL 算法的平均误差、最小误差和最大误差较静态权重算法相比都有一定程度的下降。

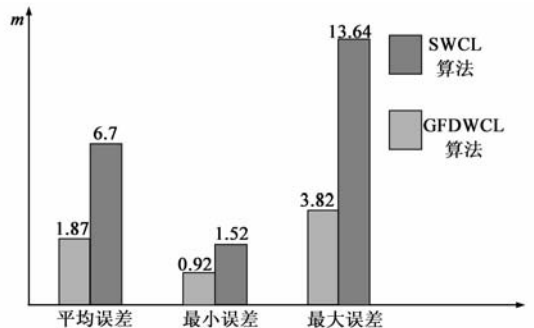


图11 两种算法误差对比

采用 GFDWCL 算法,定位的稳定性也改善了很多,多次在同一个点测量,节点漂移不大,而采用平均值法的静态 RSSI 算法漂移特别大,每一次测量运算都发生移位,特别在边角位置,这也是两种算法平均误差和最大误差差别较大的原因。

6.2 能耗与收敛时间分析

算法的功耗主要由两部分组成,收发数据功耗和计算功耗,其中收发数据的功耗是最主要功耗.按 Zig-Bee 协议组网后,待定位节点将在协调器节点的超帧管理下进行数据的收发,获取参考节点的信号强度信息,因 RSSI 强度信息需从完整的数据包中提取,所以对每个参考节点都采用了问答方式.实验时参考节点设置了 24 个,和每个参考节点通信一次数据包理论值为 48 个,我们对整个实验过程协议分析仪捕捉的 126650 个数据包进行了统计,排除其中无效的数据包 18696 个(协议分析仪的统计结果,和环境以及信道质量相关).待定位节点和所有参考节点完成一次测距通信最少需要 52 个数据包,最多达到了 144 个数据包,我们的测试环境较好,60 个数据点的定位实验中 90% 的测距所用数据包在 52 - 57 之间.

为提高定位精度,对测距需做高斯拟合,算法设计了 10 次 RSSI 信号测量,每一个待定位节点定位平均需 600 个左右的数据包交换,对于一个存在多个待定位节点的无线传感器网络来说,能耗很大.然而,算法的特点

使得能耗可以大幅优化,如图 12 所示,我们对 60 个点的数据包进行统计,对每次测量数据排序,由于数据的相关性,只需经过三次测距就能准确的确定所在区域,从而只需对 4 个节点的数据做高斯拟合.而 SWCL 算法为了保持一定的精度,需尽可能多的参考节点(定义为 8 个),图 13 为同种环境下节点在同一位置两种算法所需数据包的对比,GFDWCL 算法可将能耗降低 28%,待定位节点数增多时,效果将更加明显.

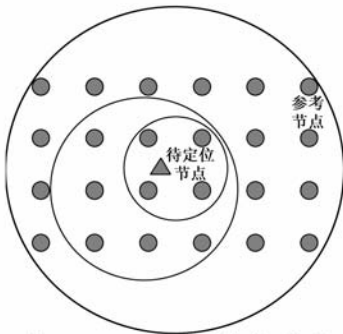


图 12 GFDWCL 节点收敛示意图

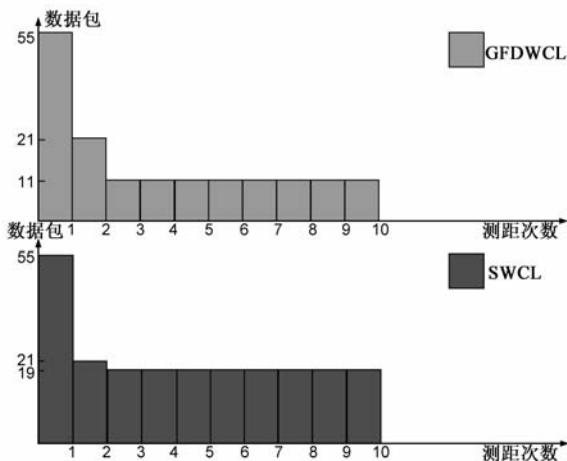


图 13 两种算法能耗对比

算法的收敛时间和流程相关,主要的耗时在于重复获取各个参考节点 RSSI 信号强度所花费的时间,这里和协调器信标帧的定义、网络的规模关系很大.在我们的实验中,一个节点完成一次定位所费时间从 3947ms 到 15286.091ms 之间,有意义的收敛时间我们将在以后的实验中通过模拟更真实的应用场景(增加待定位节点,减少参考节点密度)得出.

7 结论

本文主要对基于 RSSI 的定位技术进行了研究,提出 GFDWCL 算法,该算法不需增加额外的设备,通过 ZigBee 平台实验可知,该算法较静态权重算法可将平均定位精度提高 3 倍以上,特别是大幅降低了定位算法的最大误差.该算法的提出和验证,主要是基于实验数据的统计处理,所以具有较好的实用价值.但实验所使用的无线传感网络的范围还不够大,和实际的应用场景有一定的差别,只对星形网络作了实验,实验结果存在一定的局限性.但 GFDWCL 算法并不只局限于实验所设置的矩形分布,对于三角形,圆形的分布同样也能得出相类似的结论.也就是说,对于参考节点可控分布的无线传感器网络该定位算法都有应用价值,只要有 RSSI 测距模型,都可用该算法进行定位处理.下一步的工作将主要研究算法在网状网络、参考节点均匀分布前提下的定位算法的处理,并提出适合移动节点定位的动态权重 RSSI 定位算法.

参考文献:

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282 - 1291. (in Chinese)
- [2] Mainwaring A, Polastre J, Szewczyk R, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring [A]. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications [C]. Atlanta, 2002. 88 - 97.
- [3] WANF F B, SHI L, REN F Y. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks [J]. Software, 2005, 16 (5): 857 - 868.
- [4] Girod L, Byehovskiy V, Elson J, et al. Locating tiny sensors in time and space: A case study [A]. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors [C]. Freiburg: IEEE Computer Society, 2002. 214 - 219.
- [5] Harter A, Hopper A, Steggle P, et al. The anatomy of a context-aware application [A]. Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and

- Networking [C]. Seattle: ACM Press, 1999. 59 – 68.
- [6] Nieleescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AoA [A]. Proceedings of the IEEE INFOCOM [C]. San Francisco: IEEE Computer and Communications Societies, 2003, 3. 1734 – 1743.
- [7] Girod L, Estrin D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing [A]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS01) [C]. Maui: IEEE Robotics and Automation Society, 2001, 3. 1312 – 1320.
- [8] Bulusu N, Heidemann J, Estrin D. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices [J]. IEEE Personal Communications Magazine, 2000, 7(5): 28 – 34.
- [9] Nieleescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks [J]. In Journal of Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 267 – 280.
- [10] 史龙, 王福豹, 段渭军. 无线传感器网络 Range-Free 自身定位机制与算法 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(23): 127 – 131.
SHI Long, WANG Fubao, DUAN Weijun. Range-free self-localization mechanism and algorithm for wireless sensor networks [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(23): 127 – 131. (in Chinese)
- [11] He T, Huang C, Blum B, Stankovic J, Abdelzaher T. Range Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks [A]. Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking (MOBICOM) [C]. New York, NY, USA: ACM, 2003. 220 – 224.
- [12] 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 [J]. 软件学报, 2005, 16(5): 857 – 868.
WANG Fubao, SHI Long, REN Fengyuan. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857 – 868. (in Chinese)
- [13] 霍广城, 王晓东. 移动传感网中一种基于 RSSI 的机会主义路由设计 [J]. 电子学报, 2009, 37(3): 608 – 613.
HUO Guangcheng, WANG Xiaodong. An opportunistic routing for mobile wireless sensor networks based on RSSI [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 608 – 613. (in Chinese)
- [14] Hightower J, Boriello G, Want R. SpotON: an indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength. Technical Report UW CSE 2000-02-02 [R]. Seattle: Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 2000.
- [15] 吕睿, 阳宪惠. 减少无线传感器网络节点定位误差的方法 [J]. 清华大学学报, 2008, 48(10): 1839 – 1843.
Lü Rui, YANG Xianhui. Reduction of wireless sensor node localization errors [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(10): 1839 – 1843. (in Chinese)
- [16] 周艳, 赵海, 张君. 普适计算中的定位误差分析 [J]. 电子学报, 2009, 37(2): 382 – 386.
ZHOU Yan, ZHAO Hai, ZHANG Jun, LI Haicheng. Location error analysis of pervasive computing [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(2): 382 – 386. (in Chinese)
- [17] 孙佩刚, 赵海, 罗玓玓. 智能空间中 RSSI 定位问题研究 [J]. 电子学报, 2007, 35(7): 1240 – 1245.
SUN Peigang, ZHAO Hai, LUO Dingding, ZHANG Xiaodan, YIN Zhen-yu. Research on RSSI-based location in smart space [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1240 – 1245. (in Chinese)

作者简介:



詹杰 男, 1973 年 1 月出生, 湖南常德人. 湖南大学电气与信息工程学院博士生、副教授. 主要研究方向为无线传感器网络、移动通信等.

E-mail: Jiezhawl@163.com



刘宏立 男, 1963 年 11 月出生, 湖南常德人. 湖南大学教授、博士生导师. 主要研究方向为现代通信理论和无线传感网络新技术、移动通信系统与软件无线电.

E-mail: Hongliliu@vip.sina.com