

基于 RSSI 测距的传感器网络定位算法研究

周 艳

(辽东学院信息技术分院 丹东 118003)

摘 要 基于 RSSI(Received Signal Strength Indicator)的测距技术根据理论或经验信号传播模型将传播损耗转化为距离。在实际应用环境中,由于多径、绕射、障碍物等因素,无线电传播路径损耗使得定位过程中产生距离误差。通过对二维空间定位过程中产生距离误差区域进行分析,提出了基于 RSSI 的新的定位算法 ERSS。该算法计算简单,定位过程中节点间不增加通信开销,无需硬件扩展。仿真实验表明,该算法较普通的基于 RSSI 的测距方法有了明显的改进,提高了距离估计的精度,适合在通信开销小、硬件要求低的传感器网络节点上应用。

关键词 RSSI 测距,节点定位,误差,ERSS 算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Study of Wireless Sensor Network Localization Algorithm Based on RSSI

ZHOU Yan

(Information Technology College, Liaodong University, Dandong 118003, China)

Abstract Path loss for radio-wave propagation is transformed into distance according to theoretic or empirical model based on range measurement of RSSI(Received Signal Strength Indicator). In the actual application environment, because of multi-path, diffraction, obstacles and other factors, path loss error resulted in the positioning error. The new location algorithm ERSS based on RSSI was proposed by analysing error region produced during two-dimension space localization. Simulation results show that the ERSS algorithm has achieved more noticeable progress than common RSSI algorithm, improving the accuracy of estimates of the distance, and suitable for the requirements of wireless sensor network's lower communication costs and lower hardware requirements.

Keywords Received signal strength indicator, Node localization, Error, ERSS algorithm

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)被誉为 21 世纪最有影响力的 21 项技术和改变世界的 10 大技术之一^[1]。传感器节点定位技术是无线传感器网络多数应用中的关键支撑技术之一^[2,3]。在目标监测与跟踪、基于位置信息的路由中等,节点的位置信息也是不可缺少的。

根据定位过程中是否测量节点间的实际距离或角度,可以把定位算法分为:基于距离(range-based)的定位算法和距离无关(range-free)的定位算法^[4]。典型的距离测量技术包含利用 RSSI 测距^[5]、利用 TOA 或 TDOA 测距和利用 AOA 测距。

RSSI 利用已知发射信号强度,接收节点根据收到的信号强度,计算信号在传播过程中的损耗,使用理论或经验的信号传播模型将传播损耗转化为距离。在无线传感器网络中,理论上通过 3 个锚节点的 RSSI 信息就可用三边测量法决定一个未知节点的位置。实际应用环境中,由于无线信号对于复杂环境的适应能力较弱,这种方法的精确度不高^[6]。但是其借助的硬件设备较少,而且很多无线通信模块都可以直接提供 RSS 值。因此,基于 RSSI 的测距方法还是被广泛应用的^[7]。RSSI 测距利用接收信号强度和理论或经验的路径损

耗传播模型计算距离,其统计模型^[8]如下:

$$P(d) = P_0 - 10n_p \log \frac{d}{d_0}$$

其中, $P(d)$ 为在距离 d 处的信号强度; n_p 为路径损耗因子,范围在 2 到 4 之间; P_0 是在参考距离 d_0 处的信号强度(dBm)。该技术主要使用 RF 信号,信号传输在过程中由于多路衰减、背景噪声和不规则信号的传播特性使得距离估测有误差。通常基于 RSSI 距离定位机制使用各种算法来减小测距误差对定位的影响,包括多次测量^[9]、循环定位求精^[10],这些都要产生大量计算和通信开销。如何在不增加计算和通信开销的情况下提高定位精度是本文研究的重点。

1 基于 RSSI 的定位精度分析定理(PPA Theorem)

在无线传感器网络未知节点空间定位过程中,在没有任何误差的情况下,4 个锚节点将提供一个完美的位置解,无需再有额外的锚节点来进行改进。假设已知 3 个锚节点坐标 $P_i = (x_i, y_i) (i=1, 2, 3)$, 以及到未知节点 $P(x, y)$ 的距离分别为 $r_i (i=1, 2, 3)$, 那么存在下列公式:

收稿日期:2008-05-19 本文受国家自然科学基金(No. 69873007),辽宁省教育厅自然科学基金资助项目(2008212),辽东学院科学基金项目(2006-Z06, 2007-Y06)资助。

周 艳 女,副教授,博士,主要研究方向为普适计算和传感器网络,E-mail: zhy03@126.com。

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}=r_1 \\ \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}=r_2 \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}=r_3 \end{cases}$$

由上式可以得到未知点 P 的坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_1-x_3) & 2(y_1-y_3) \\ 2(x_2-x_3) & 2(y_2-y_3) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1^2-x_3^2+y_1^2-y_3^2+r_3^2-r_1^2 \\ x_2^2-x_3^2+y_2^2-y_3^2+r_3^2-r_2^2 \end{bmatrix}$$

然而,当 $r_i (i=1,2,3)$ 的距离不精确时,求得的解也会带有一定程度的误差。

假定 RSSI 距离测量过程中误差为 $\epsilon > 0$,那么当两个节点之间的真实距离为 d 时,定位距离的测量值就在 $(d, d \pm \epsilon)$ 之间。因为在实际环境中,传感器网络节点分布范围较小,所受的环境影响因素基本变化不大,可以假设距离误差 ϵ 是相等的。在存在误差的情况下,三圆构成如图 1 所示的一个小区域,记为 C_p ,该区域的面积则表示定位误差的大小。

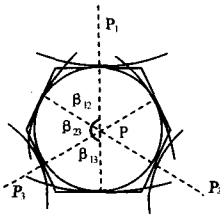


图 1 定位单元的定位误差区域

设过点 p 和 p_i 的直线交图 1 中的圆 S_p 于两点。过这两点分别做 S_p 的切线,切线间相交成六边形。当测量误差 ϵ 较小时,边缘的区域可以被线性化,并且被估计为 \tilde{C}_p 。这样,下面的问题就转变为探讨在何种情况下定位误差 \tilde{C}_p 最小。

定义 1 一个子集 $S \in R^n$,如果对于任意两个不同点 $x_1 \in S$ 和 $x_2 \in S$,并且对于任意实数 λ ,具有 λ 满足取值在 $[0,1]$ 之间,有 $\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2 \in S$ 成立,则 S 是凸集。

定义 2 任意两个不同点 $x_1 \in S, x_2 \in S$,且对于任意实数 λ ,使 λ 取值在 $[0,1]$ 之间,有 $f(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \leq f(x_1) + (1-\lambda)f(x_2)$ 成立,则 $f(x)$ 是定义在凸集 S 上的凸函数。

引理 1 对于定义在凸集 $S \in R^n$ 上的一个光滑函数 $f(x)$, $f(x)$ 是二阶连续可微函数,若 $f(x)$ 的 Hesse 矩阵在 S 上处处正定,则 $f(x)$ 是 S 上的严格凸函数。

引理 2 对于一个定义在子集 S 上的凸函数 $f(x)$,如果有 m 个点 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ 则有 $f(\frac{1}{m}(x_1+x_2+x_3+\dots+x_m)) \leq \frac{1}{m}(f(x_1)+f(x_2)+f(x_3)+\dots+f(x_m))$ 成立,如果 $f(x)$ 是严格凸函数,那么只有在 $x_1=x_2=x_3=\dots=x_m$ 时才成立。

定理 1 设未知节点 $P(x, y)$ 点相对于任意两个锚节点 $P_i (i=1,2,3)$ 的角度(锐角)都等于 $\frac{\pi}{3}$ 时,未知节点定位误差最小。

证明:因为 \tilde{C}_p 构成的区域为圆的外切六边形,如图 1 所示,所以有以下表达式成立:

$$S(\tilde{C}_p) = 2\epsilon^2 (\tan \frac{\beta_{12}}{2} + \tan \frac{\beta_{23}}{2} + \tan \frac{\beta_{13}}{2}) \quad (1)$$

而对于 $\beta_{12}, \beta_{23}, \beta_{13}$ 来说,有如下关系式: $\beta_{12} + \beta_{23} + \beta_{13} = \pi$

因为 $(\tan \beta)'' = 2 \tan \beta (1 + \tan^2 \beta) \geq 0$,所以当 $0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}$ 时,应用引理 1 和引理 2 可以导出如下表达式:

$$S(\tilde{C}_p) = 6\epsilon^2 * \frac{1}{3} (\tan \frac{\beta_{12}}{2} + \tan \frac{\beta_{13}}{2} + \tan \frac{\beta_{23}}{2}) \geq 6\epsilon^2 * \tan \frac{\beta_{12} + \beta_{23} + \beta_{13}}{6} = 6\epsilon^2 \tan \frac{\pi}{6} \quad (2)$$

当 $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{13} = \frac{\pi}{3}$ 时,等式成立。即当未知节点与 3 个锚节点形成的锐角都等于 $\frac{\pi}{3}$,未知节点的定位误差最小。

因为式(1)是严格凸函数,所求得的极值是唯一极小值,可以推论出当未知节点与 3 个锚节点的角度同时趋近于 $\frac{\pi}{3}$,函数的值越来越小,在实际定位过程中,可以选取一个阈值 λ ,及选取 3 个角度同时满足 $\frac{\pi}{3} - \lambda \leq \alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{13} \leq \frac{\pi}{3} + \lambda$ 这个条件的锚节点来实现节点定位。

2 ERSS 算法描述

传感器网络的基于距离 RSSI 定位算法在能量受限环境下定位精度不高,针对 RSSI 算法的不足,基于 PPA 定理提出了 ERSS 算法。

基于 RSSI 距离定位算法的定位过程描述如下:

- (1) 锚节点周期发送自身信息:节点 ID、自身位置信息。
- (2) 未知节点接收到多个锚节点的 RSSI 值,根据信道模型计算节点间的距离。首先利用最先收到的 3 个锚节点来初步计算未知节点的位置。
- (3) 对于所有接收到的消息,每三个一组,分别计算未知节点的位置。
- (4) 最后,对集合中所有的计算位置取平均值,就是未知节点的位置估计。

可以看出,距离定位算法首先粗略计算未知节点的位置,然后通过多个类似的过程来逐步提高未知节点的定位精度。随着节点数量的增加,算法的计算量将以几何级数增长,无法适用于传感器网络定位要求。

依据本文提出的基于 RSSI 的定位精度分析定理(PPA Theorem),ERSS 定位算法的描述如下:

- (1) 锚节点周期发送自身信息:节点 ID、自身位置信息。
- (2) 未知节点接收到多个这样的消息后,记录锚节点的 RSSI 值,利用信道模型计算节点间的距离。
- (3) 任意选取 3 个锚节点,计算未知节点相对于 3 个锚节点顶点的角度。
- (4) 利用角度位于 $[\frac{\pi}{3} - \lambda, \frac{\pi}{3} + \lambda]$ 之间 3 个锚节点计算未知节点的位置。对每一组符合条件的锚节点,分别计算未知节点的位置。

(5) 最后,对集合中所有的计算位置取平均值,就是未知节点的位置估计。

该算法在确保定位误差较小的同时,不增加网络的通信量,提高了节点的定位精度。

3 仿真实验

为了比较本文提出的定位锚节点分布算法和传统的多边

(下转第 150 页)

结构,构建复杂网络的功能。但 JPAC 工具对抽象网络本身的分析深度和广度有待完善和扩充。

结束语 本文描述了基于复杂网络的 Java 程序分析工具(JPAC)的基本原理、总体结构,以及更个层次模块的详细设计与实现。JPAC 工具能够分析 Java 程序的代码,为 Java 软件系统结构构建复杂网络,统计并展示其复杂网络特征,模拟软件系统结构的演化规律。同时,JPAC 工具也提供了抽象的复杂网络,使得人们可以对其特征和演化规律进行模拟研究。将来的工作将会进一步完善 JPAC 工具,不断扩充其功能,增加其对复杂网络的分析深度和广度。

参考文献

[1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, 393: 440-442
 [2] Barabási A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286 :509-512

[3] Albert R, Barabási A-L. Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, 74: 47-97
 [4] Myers C R. Software systems as complex networks: Structure, function, and evolvability of software collaboration graphs. *Phys. Rev.*, 2003, E 68, 046116
 [5] Wheeldon R, Counsell S. Power Law Distribution in Class//Proc. Third IEEE Int'l Workshop Source Code Analysis and Manipulation, 2003
 [6] Erdős P, Rényi A. On random graphs. *Publicationes Mathematicae*, 1959, 6: 290-297
 [7] 陈焘, 王树森, 顾庆, 等. 基于复杂网络的 JDK 代码结构演化研究[J]. *电子学报*, 2007(12A): 47-53
 [8] 颜端武, 王曰芬, 李飞. 国际人际网络分析的典型软件工具[J]. *现代图书情报技术*, 2007, 9
 [9] 陈冈. Eclipse RCP 应用系统开发方法与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007

(上接第 120 页)

形定位算法的性能,利用 Matlab 建立了一个在 50m×50m 范围内统一的仿真环境。锚节点均匀地分布在这个范围内,每一个未知节点都可以接收到全部锚节点的信息。加入干扰的高斯分布噪声,锚节点周期发送自身信息。仿真采取对 100 个在测试范围内平均分布的未知节点的结果取算术平均作为最后的结果。仿真结果分别如图 2、图 3 所示。

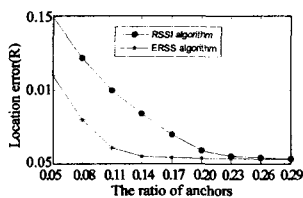


图 2 算法定位精度比较

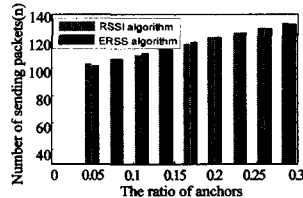


图 3 算法通信开销比较

图 2 显示,在锚节点比例小于 0.17% 时,ERSS 算法定位精度明显高于 RSSI 算法。随着锚节点的增加,两种算法的定位精度都不断得到提高。当锚节点比例趋近 0.3,定位精度趋近恒定值。这是因为这部分距离误差是由路径损耗传播模型决定的。从图中可以得出,对于相同定位精度,RSSI 是通过多次迭代计算得到的,相应也就延长了系统的定位时间和增加能量消耗,RSSI 是通过牺牲时间和能量来提高系统定位精度的。图 3 为 ERSS 测距算法和 RSSI 测距算法通信量比较。图中显示 ERSS 算法不增加通信开销,这是因为 ERSS 算法主要通过判断锚节点和未知节点的位置关系来提高定位精度,与 RSSI 比较没有额外通信开销。

结束语 本文提出了一种新的定位算法,即基于测距 RSSI 的新的定位算法 ERSS,其基本思想是通过通过对 RSSI 测距过程中产生的距离误差进行分析,推导出未知节点和锚节点在某种分布关系下未知节点的距离误差最小。为了更好地适应传感器网络的不规则性,ERSS 算法加入了角度阈值条件。该算法对硬件的要求不高。仿真结果验证了在不增加网络通信量情况下 ERSS 较普通的 RSSI 测距精度有了明显的提高,适用于大多数无线传感器网络定位的测距要求。

参考文献

[1] Akyildiz I F, Su Weilian, Sankarasubramaniam Y, et al. A Sur-

vey on Sensor Networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102-114
 [2] Rabay J J, Ammer M J, da Silva J L Jr, et al. Picoradio Supports Ad Hoc Ultra-low Power Wireless Networking [J]. *Computer*, 2000, 33(7): 42-48
 [3] Savarese C, Rabay J M, Beutel J. Locationing in Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Network[C]// Proc. of the 2001 IEEE Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal. Salt Lake: IEEE Signal Processing Society, 2001, 4: 2037-2040
 [4] He T, Huang C D, Blum B M, et al. Range-free localization schemes in large scale sensor networks//Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. San Diego: ACM Press, 2003: 81-95. http://www.cs.virginia.edu/~th7c/paper/APIT_CS-2003-06.pdf
 [5] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system// Proc. of the IEEE INFOCOM. Tel Aviv: IEEE Computer and Communications Societies, 2000: 775-784
 [6] Meguerdichian S, Slijepcevic S, Karayan V, et al. Localized algorithms in wireless ad-hoc networks: Location discovery and sensor exposure//Proc. of the 2nd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Long Beach: ACM Press, 2001. 106-116. <http://www.vs.inf.ethz.ch/edu/SS2005/DS/papers/sensornetze/meguerdichian01c.pdf>
 [7] Li D, Wong K D, Hu Y H, et al. Detection, Classification, and Tracking of Targets[J]. *IEEE Signal Processing Mag*, Mar. 2002: 17-29
 [8] Niculescu D, Nath B. Ad Hoc Positioning System. (APS) [C]// IEEE GLOBECOM 2001: 2926-2931
 [9] Bergamo P, Mazzini G. Localization in sensor networks with fading and mobility//Proc. of the 13th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Lisbon: IEEE Communications Society, 2002, 2: 750-754. <http://www.eyes.eu.org/publications/pimrc2002.pdf>
 [10] Savarese C, Rabay J, Langendoen K. Robust positioning algorithms for distributed ad-hoc wireless sensor networks//Ellis C S, ed. Proc. of the USENIX Technical Annual Conf. Monterey: USENIX Press, 2002. 317-327. <http://rama.pds.twi.tudelft.nl/~koen/papers/robust-positioning.pdf>