Journal of Computer Applications
计算机应用,2012,32(8):2103 -2105
ISSN 1001-9081
CODEN JYIIDU
2012-08-01
http://www.joca.cn

文章编号:1001 -9081(2012)08 -2103 -03
doi:10.3724/SP.J.1087.2012.02103

改进的无线传感器网络节点定位算法

张宏君[1*],毛永毅[2]
(1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院,西安 710061; 2. 西安邮电大学 电子工程学院,西安 710061)
(*通信作者电子邮箱 zhj1003@163.com)

摘 要:为了减小无线传感器网络(WSN)节点定位中非视距传播误差产生的影响,提高节点定位精度,提出一种基于残差加权的牛顿迭代定位算法。先利用残差加权算法定位,得到未知节点的初步位置,再将该节点位置作为牛顿迭代定位算法的初始值进行迭代计算,最终得到更为精确的节点位置。仿真实验结果表明,该算法能有效地抑制非视距传播误差的影响,提高传感器网络节点定位的精度,且性能稳定。

关键词:无线传感器网络;定位算法;非视距;牛顿迭代;残差加权

中图分类号: TN926 **文献标志码**:A

Improved algorithm of wireless sensor network node localization

ZHANG Hong-jun[1*], MAO Yong-yi[2]
(1. *School of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an Shaanxi* 710061, *China*;
2. *School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an Shaanxi* 710061, *China*)

Abstract: In order to eliminate the influence of Non-Line-Of-Sight (NLOS) transmission error in wireless sensor network node localization, and solve the problem of possible convergence in the Newton iterative algorithm, a Newton iterative localization algorithm based on the weighted residual was proposed. First, residual weighting algorithm was used for positioning to get the unknown node's preliminary position, then the node position was used as an initial value to iterate and calculate in Newton iterative localization algorithm, finally the precise position of the unknown node was obtained. The simulation results show that this algorithm can effectively restrain the effect of NLOS propagation error, improve the precision of sensor network node localization, and has stable performance.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); localization algorithm; Non-Line-Of-Sight (NLOS); Newton iteration; weighted residual

《计算机应用》 Journal of Computer Applications

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种集中了传感技术、嵌入式技术和无线通信技术的新型网络技术,具有非常广泛的应用前景,其发展和应用将会给人类的生活和生产的各个领域带来深远影响[1]。无论是在环境监测、目标跟踪等应用领域,还是在其他领域里,拓扑结构控制、节点定位、网络通信协议、网络安全等是无线传感器网络研究的几个基本问题[2]。其中,节点的位置信息对无线传感器网络的监测活动至关重要。事件发生的位置是传感器节点监测消息中所包含的重要信息,没有节点位置信息而感知的数据是毫无意义的[3]。因此,对无线传感器网络节点定位的研究有着很重要的意义。关于无线传感器网络节点的定位算法很多,大体可以分为两类:一种是无需测距的定位算法[4],一种是基于测距技术的定位算法。无需测距技术的定位算法主要有质心定位算法[5]、DV-Hop 算法[6]、APS 算法、APIT 算法等。这类算法不需要测得未知节点和信标节点间的距离,能够降低能量消耗和硬件配置的要求,但是,它可能无法克服定位精度低的缺点。基于测距技术的定位技术对硬件配置的要求有所提高,能耗随之增大,但能够实现对未知节点更精确的定位,主要定位算法有:基于信号到达的角度(Angle Of Arrival, AOA)、基于信号到达时间(Time Of Arrival, TOA)[7]、基于信号到达时间差(Time Different Of Arrival, TDOA)[8]、基于测量接收信号的强度(Received Signal Strength Indication, RSSI)[9-10]等。在基于测距技术定位时,非视距(Non-Line-Of-Sight, NLOS)传播误差[11-12]是影响定位精度的主要原因之一。为了减小非视距传播误差,迭代算法[13-16]是一种很好的选择,可以有效提高定位精度。

针对无线传感器网络节点定位精度的非视距传播误差问题,结合无线传感器网络的特点分析了传统定位算法应用于无线传感器网络中的不足,在综合考虑传感器网络应用环境、节点的能量消耗、算法的计算量和通信量以及定位精度等因素的基础上,本文提出一种优化的网络节点定位算法,不需要任何网络节点的先验信息,采用残差加权算法得出需要定位节点的初始值,再采用牛顿迭代定位算法进行精确定位。最后,对该算法的性能进行了分析仿真。

1 TDOA 定位的基本原理

TDOA 测距技术一般是利用两种不同的信号到达同一节点所产生的时间差,或同种信号到达不同的节点所产生的时间差来确定节点间的距离。

本算法采用后者,如图 1 所示,即利用射频(Radio Frequency, RF)信号,未知节点向 3 个或 3 个以上的信标节点发送信号,从第一个接收到信号的信标节点处开始计时,通过

收稿日期:2012-02-16;**修回日期**:2012-04-02。
基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2009JM8015);陕西省教育厅专项科研项目(2010JK815)。
作者简介:张宏君(1987 -),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要研究方向:移动台定位、无线传感器网络; 毛永毅(1969 -),男,湖南长沙人,教授,博士,主要研究方向:通信信号处理、移动台定位。

检测射频信号到达信标节点的时间差 Δt，对到信号源（未知节点）的距离进行估计，基于已知的信号传播速度，可直接把时间转化为距离，然后按 TDOA 定位相关算法求出待测节点的估计位置。

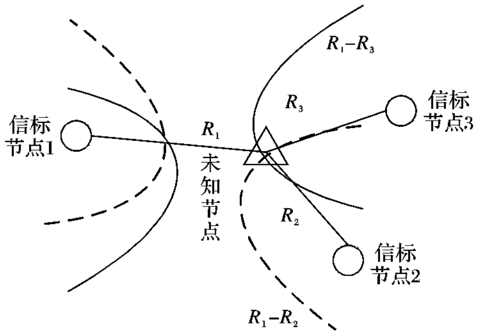

图 1 TDOA 定位模型

2 改进的无线传感器网络节点定位算法

设 (x,y) 为无线传感器网络中未知节点的位置，(X_i,Y_i) 为第 i 个信标节点位置，则未知节点到各个信标节点的距离 R_i 为：

$$R_i^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 = K_i - 2X_i x - 2Y_i y + x^2 + y^2 \tag{1}$$

其中 $K_i = X_i^2 + Y_i^2 (i = 1,2,\cdots,N, N$ 为信标节点的数目）。设第一个信标节点为参考信标节点，t_{i1} 为 TDOA 测量值，c 为电波传播速度，R_{i1} 表示未知节点与信标节点和参考信标节点的距离差，则

$$R_{i1} = ct_{i1} = R_i - R_1 = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2};\ i = 2,3,\cdots,N \tag{2}$$

利用 $R_i^2 = (R_{i1} + R_1)^2$ 展开并化简可得：

$$R_{i1}^2 + 2R_{i1}R_1 = K_i - 2X_{i1}x - 2Y_{i1}y - K_1 \tag{3}$$

其中：$X_{i1} = X_i - X_1, Y_{i1} = Y_i - Y_1 (i = 2,3,\cdots,N)$。

2.1 残差加权算法

对于 N 个不同的信标节点，可以提供 $N-1$ 个 TDOA 测量值，亦即可以构成 $N-1$ 个如式(3)所示的方程。假设任取两个构成一个方程组，求出未知节点位置的中间结果，记为 $(x_k,y_k)(k = 1,2,\cdots,M,\ M = C_{N-1}^2)$。例如，取 $i = 2$ 及 $i = 3$，则：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} X_{21} & Y_{21} \\ X_{31} & Y_{31} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{21} \\ R_{31} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{21}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{31}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \tag{4}$$

在这里，定义残差函数为：

$$e_i(x_k,y_k) = R_{i1} - \sqrt{(X_i - x_k)^2 + (Y_i - y_k)^2} + \sqrt{(X_1 - x_k)^2 + (Y_1 - y_k)^2} \tag{5}$$

所有残差平方和为：

$$E_k(x_k,y_k) = \sum_{i=2}^{N} e_i^2(x_k,y_k) \tag{6}$$

对所有的 (x_k,y_k) 按下式加权，得到未知节点位置的初步估计位置：

$$(x,y) = \frac{\sum_{k=1}^{M} (x_k,y_k)(E_k(x_k,y_k))^{-1}}{\sum_{k=1}^{M} (E_k(x_k,y_k))^{-1}} \tag{7}$$

2.2 牛顿迭代法

牛顿迭代法实质上是一种求解线性方程的方法，其基本思想是将非线性方程 $f(x) = 0$ 逐步演变为一种线性方程来求解。

设已知 $f(x) = 0$ 有近似根 x_k（假定 $f'(x_k) \neq 0$），将函数 $f(x)$ 在点 x_k 展开成泰勒级数，即线性化，有：

$$f(x) \approx f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k) \tag{8}$$

于是，$f(x) = 0$ 可近似地表示为：

$$f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k) = 0 \tag{9}$$

式(9)的根记为 x_{k+1}，则 x_{k+1} 的计算式如下：

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)};\ k = 0,1,2,\cdots \tag{10}$$

式(10)所表示的迭代式称为牛顿迭代式。

2.3 牛顿迭代定位算法

为了得到未知节点的位置，使用牛顿迭代法对建立的 TDOA 方程展开，转换为二元线性的方程组进行求解，得到未知节点的位置坐标。假设任取网络中三个信标节点（$i = 1,2,3$），由式(3)，假设 $f(x,y)$ 表示未知节点与信标节点 2 和信标节点 1 的距离差，$g(x,y)$ 表示未知节点与信标节点 3 和信标节点 1 的距离差，则 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 的计算公式如下：

$$\begin{cases} f(x,y) = R_{21}^2 + 2R_{21}R_1 - (K_2 - 2X_{21}x - 2Y_{21}y - K_1) \\ g(x,y) = R_{31}^2 + 2R_{31}R_1 - (K_3 - 2X_{31}x - 2Y_{31}y - K_1) \end{cases} \tag{11}$$

《计算机应用》Journal of Computer Applications

将二元函数 $f(x,y)$ 在 (x_0,y_0) 点处泰勒级数展开：

$$f(x_0 + \delta_x, y_0 + \delta_y) = f(x_0,y_0) + \delta_x \frac{\partial f(x_0,y_0)}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial f(x_0,y_0)}{\partial y} + T \tag{12}$$

其中 T 为泰勒级数展开余项。

由于 δ_x, δ_y 趋于无穷小，且 $f(x,y) = 0$，则上式可近似表示为：

$$f(x_k,y_k) + \delta_x \frac{\partial f(x_k,y_k)}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial f(x_k,y_k)}{\partial y} = 0 \tag{13}$$

将二元函数 $g(x,y)$ 在 (x_0,y_0) 点处泰勒级数展开：

$$g(x_0 + \delta_x, y_0 + \delta_y) = g(x_0,y_0) + \delta_x \frac{\partial g(x_0,y_0)}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial g(x_0,y_0)}{\partial y} + T \tag{14}$$

其中 T 为泰勒级数展开余项。

由于 δ_x, δ_y 趋于无穷小，且 $g(x,y) = 0$，则上式可近似表示为：

$$g(x_k,y_k) + \delta_x \frac{\partial g(x_k,y_k)}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial g(x_k,y_k)}{\partial y} = 0 \tag{15}$$

联合式(13)和(15)，可以得出 x 和 y 的表达式：

$$\begin{cases} x = x_k - \dfrac{f(x_k,y_k)g_y(x_k,y_k) - g(x_k,y_k)f_y(x_k,y_k)}{f_x(x_k,y_k)g_y(x_k,y_k) - g_x(x_k,y_k)f_y(x_k,y_k)} \\ y = y_k - \dfrac{f(x_k,y_k)g_x(x_k,y_k) - g(x_k,y_k)f_x(x_k,y_k)}{f_y(x_k,y_k)g_x(x_k,y_k) - g_y(x_k,y_k)f_x(x_k,y_k)} \end{cases} \tag{16}$$

对 x,y 进行变量替换：

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k - \dfrac{f(x_k,y_k)g_y(x_k,y_k) - g(x_k,y_k)f_y(x_k,y_k)}{f_x(x_k,y_k)g_y(x_k,y_k) - g_x(x_k,y_k)f_y(x_k,y_k)} \\ y_{k+1} = y_k - \dfrac{f(x_k,y_k)g_x(x_k,y_k) - g(x_k,y_k)f_x(x_k,y_k)}{f_y(x_k,y_k)g_x(x_k,y_k) - g_y(x_k,y_k)f_x(x_k,y_k)} \end{cases} \tag{17}$$

根据式(17)进行迭代计算，可以得到传感器网络中需要定位的未知节点 $(x_k,y_k)(k = 1,2,\cdots,n)$ 的位置。

牛顿迭代算法具有收敛速度快的特性，在满足一定定位

精度的条件下,可以降低计算量;但是牛顿迭代法是否收敛及其收敛速度的快慢与初始值的选择有关,解决好初始值的问题是保证牛顿迭代法良好性能的前提条件。而残差加权算法具有很好的估计特性,可以为牛顿迭代提供更为准确的初始位置估计值。因此,本文提出将残差加权算法运用于求解 TDOA 定位的牛顿迭代法算法中,可以估计出未知节点更精准的位置。

3　仿真及分析

为了检验算法的实际性能,本文就不同的 TDOA 测量误差和不同的非视距(NLOS)传播误差,对本文算法和牛顿迭代算法进行了仿真比较。仿真实验中,假设传感器网络节点均匀分布在2 500 m×2 500 m范围内,测量噪声服从 0 均值,30 m 标准差的高斯分布。由于算法性能不仅仅与测量误差和 NLOS 误差有关,还与未知节点的几何位置分布有关,为了消除这种影响,仿真采取对 90 个未知节点的定位结果取算术平均值作为最后的定位结果,性能评价指标是均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE),如下式所示:

$$RMSE = \sqrt{E[(x-\hat{x})^2 + (y-\hat{y})^2]}$$

1)测量误差对定位性能的影响。图 2 给出了牛顿迭代算法和本文算法在非视距误差一定(设定为 30 m)的情况下,TDOA 测量误差从 0.1 μs 到 0.8 μs 变化时,两算法定位误差与 TDOA 测量误差的仿真关系。

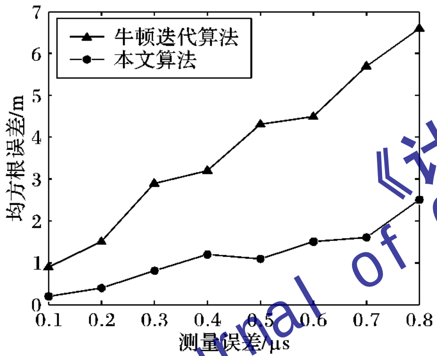

图 2　非视距误差为 30 m 时测量误差对定位性能的影响

2)NLOS 误差对定位性能的影响。图 3 给出了牛顿迭代算法和本文算法在测量误差一定(设为 0.1 μs)的情况下,随着非视距误差的变化,定位误差与非视距误差的仿真关系。

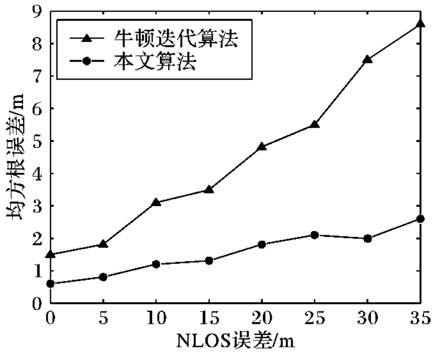

图 3　测量误差为 0.1 μs 时 NLOS 误差对定位性能的影响

从图中不难看出,总体上,随着测量误差和非视距误差的增大,两种算法的定位性能均有所降低。但是,从定位效果上看,在各种不同的测量误差下和不同非视距误差下,本文算法性能明显优于牛顿迭代算法。这是由于本文算法对牛顿迭代算法进行了优化,利用了残差加权算法提供的较为准确的初始位置估计值,算法的性能得以增强。与牛顿迭代算法相比,本文算法对 NLOS 误差有了很明显的抑制,提高了定位精确度,解决了可能存在算法不收敛的问题,并且降低了计算量。

4　结语

无线传感器网络节点定位中,非视距传播误差是影响定位精度的主要因素之一。针对该问题,本文提出在非视距环境中一种基于残差加权的牛顿迭代定位算法,利用残差加权算法得到需要确定的未知节点的大概位置,再将该位置坐标作为牛顿迭代算法的初始值进行迭代计算,解决牛顿迭代算法可能存在的不收敛的问题,减少迭代计算量。仿真结果表明,该算法能够有效地消除非视距误差传播,达到精确定位的目的,具有很高的应用价值。

参考文献:

[1] CHONG C-Y, KUMAR S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8): 1247-1256.

[2] 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, 2005.

[3] PRIYANTHA N B, BALAKFRISHNAM H, DERAINE E D, *et al.* Anchor-free distributed localization in sensor networks, MIT-LCS-TR-892[R]. Cambrige: MIT Lab for Computer Science, 2003.

[4] HE TIAN, HUANG CHENGDU, BLUM B M, *et al.* Range-free localization schemes in large scale sensor networks [C]// MobiCom '03: Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2003: 81-95.

[5] 杨新宇, 孔庆茹, 戴湘军. 一种改进的加权质心定位算法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 1-4.

[6] 赵灵锴, 洪志全. 基于无线传感器网络的 DV-Hop 定位算法的改进[J]. 计算机应用, 2011, 31(5): 1189-1192.

[7] 张涛, 唐小明, 张婕. 多点定位系统高精度 TOA 提取方法[J]. 电讯技术, 2011, 51(11): 58-62.

[8] 张健, 李鸥. 改进的无线传感器网络 TDOA 定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(16): 117-120.

[9] 詹杰, 刘宏立, 刘述钢, 等. 基于 RSSI 的动态权重定位算法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 82-88.

[10] 罗炬锋, 付耀先, 王营冠. 基于 RSSI 测距的 WLS 定位算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11): 34-38.

[11] MAO YONGYI, ZHOU KANGLEI. A location and tracking algorithm based on BP neural network with NLOS propagation[C]// CyberC'09: International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Piscataway: IEEE, 2009: 396-399.

[12] YAN JUN, WANG LINRU, WU LENAN. Passive location estimation using scatterer information for non-line-of-sight environments [J]. Journal of Southeast University, 2010, 26(4): 518-522.

[13] 罗旭, 柴利, 杨君. 无线传感器网络 SL-n 迭代定位算法[J]. 通信学报, 2011, 32(5): 129-138.

[14] TONG ZHAO, NEHORAI A. Information-driven distributed maximum likelihood estimation based on Gauss-Newton method in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(9): 4669-4682.

[15] CHENG B H, HUDSON R E, LORENZELLI F, *et al.* Distributed Gauss-Newton method for node localization in wireless sensor networks[C]// IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE, 2005: 915-919.

[16] XIANG MANTIAN, SHI HAOSHAN, LI LIHONG. An iterative connectivity-based localization algorithm for sensor networks [C]// ICEMI '07: The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Piscataway: IEEE, 2007, 4: 81-84.

《计算机应用》 Journal of Computer Applications