

基于 RSSI 的无线传感器网络定位 系统设计与实现

李 银, 汪 洋, 陈冬明

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 基于窄带无线信号的路径损耗和阴影衰落, 直接建立多个锚节点值与待定位节点未知坐标估计量的解析关系, 避免传统 RSSI 定位方法中常用的对两节点距离量的直接求解, 减少信息丢失, 提高定位精度; 仿真分析了锚节点数量、遮挡因子、路径损耗指数等对定位精度的影响; 采用 CC2530 无线传感芯片实现基于 RSSI 的无线传感器网络定位系统; 系统采用 8 个锚节点分别在边长 4 m 和 10 m 的两个正方形区域内展开定位实际测试, 结果显示其平均定位误差可分别降到 0.175 m 和 0.824 m。

关键词: 接收信号强度指示; 无线传感器网络; 极大似然估计; 定位

Design and Implementation of Wireless Sensor Network Location System Based on RSSI

Li Yin, Wang Yang, Chen Dongming

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Based on path loss and shadow fading of narrowband wireless signal, it directly develops analytical relationship of multiple RSSI values and unknown coordinate of located nodes by avoiding traditional RSSI locating method solves the distance between two nodes in order to reduce the loss of information and improve location accuracy. It gives the impact on location accuracy under different numbers of anchor nodes, different blocking factors, different path loss exponents and other factors in simulation. And it also shows the implementation of wireless sensor network location system based on RSSI using radio frequency chip CC2530. After 8 anchor nodes, 4 meter and 10 meter two square areas locating test, the results show that average location error can be reduced to 0.175meter and 0.824 meter.

Keywords: RSSI; wireless sensor network; maximum likelihood estimate; location

0 引言

无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN)^[1] 是当前国际上备受关注、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的一种新兴的信息获取和处理技术。在无线传感器网络中, 确定传感器节点自身位置或事件发生位置是传感器网络基本功能之一, 尤其是在目标跟踪、入侵检测、小范围较高精度定位等领域有着广泛应用。

无线传感器网络中节点定位通常分为两步, 第一步是确定未知节点到锚节点的距离或方位; 第二步是在确定未知节点同若干个锚节点的距离或方位后, 使用三边测量法、三角测量法、极大似然估计等方法最后确定未知节点的位置^[1-2]。目前, 实现未知节点到锚节点距离或方位测量的主要技术有基于接收信号强度指示 (received signal strength indication, RS-

SI)、基于到达时间 (time of arrival, TOA)、基于到达时间差 (time difference of arrival, TODA) 和基于到达角度 (angle of arrival, AOA) 等方法。由于 RSSI 定位是通过接收信号强度进行定位, 硬件自身开销小、算法实现相对简单, 成为一种广泛应用的无线定位方案^[2]。

1 极大似然估计法

在基于 RSSI 定位中, 建立非线性方程组求解定位坐标的极大似然估计算法是一种常见的实用定位方法^[3-6]。参考文献 [5] 和参考文献 [6] 分别对这种方法做了理论和实测分析。但因其受到测距误差、锚节点位置准确程度和残差^[7]影响较大, 针对这种情况, 参考文献 [8] 和参考文献 [9] 提出了一种方程组展开带误差项的极大似然估计定位算法。而本节提到的基于 RSSI 极大似然估计定位算法与参考文献 [8] 和参考文献 [9] 中提到的极大似然估计定位算法又有所区别, 不同之处在于对 RSSI 的处理方式上, 没有直接建立多个锚节点与未知节点之间距离和他们坐标间的非线性化方程, 而是由多个锚节点的 RSSI 值、坐标, 直接建立起与未知节点坐标解析关系, 避开未知节点与锚节点之间距离量的求解, 有效地避免了信息丢失, 进一步提高了定位精度。

考虑到实际环境中无线信号在空间传输时, 会受到路径损耗和阴影衰落的影响, 在实际应用中, 采用无线信号传输中普遍使用的 Shadowing 理论模型^[10-11]。该模型为:

$$p = p_0 + 10 \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \beta \quad (1)$$

收稿日期: 2014-07-03; 修回日期: 2014-08-18。

基金项目: 国家自然科学基金 (61371101); 深圳市生物、互联网、新能源、新材料产业发展专项资金项目 (JC201104210030A); 深圳市科技计划项目 (JC200903120174A); 哈工大校科研创新基金项目 (HIT-NS-FIR. 2010133); 欧盟 FP7 项目 (318992)。

作者简介: 李 银 (1988-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事室内无线传感器定位、嵌入式方向的研究。

汪 洋 (1977-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士生导师, 主要从事无线电波传播, MIMO, 超宽带技术, 短距离无线互联技术等方向研究。

式中, d_0 是参考距离; p_0 是距离为 d_0 时接收到的信号强度, 其中还包含遮挡外衰落或环境造成的损耗参考值; d 是真实的距离; β 是以 dB 为单位的遮挡因子, 均值为 0, 均方差为 σ_{dB} (dB) 的正态随机变量; p 是接收信号强度; n 是路径损耗指数, 取决于具体环境。

若将发射机功率设为 0 dBm, 可将 (1) 式重写为:

$$R = -10n \lg d - A + \beta \quad (2)$$

其中: R 表示 RSSI 的值, d 为收发机之间的距离, A 定义为距发射机 1 m 处接收到信号强度的绝对值, 单位为 dBm。

假设在一次定位中, 共收集到 m 个锚节点到未知节点间 RSSI 值, 其中 $m \geq 3$, 根据 (2) 式, 这 m 个 RSSI 值的联合概率密度函数 (PDF) 可表示为:

$$p(\vec{R}, \vec{B}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^m} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (R[i] - B[i])^2} \quad (3)$$

其中:

$$B[i] = -(10n \lg d[i] + A) \quad (4)$$

$d[i]$ 表示第 i 个锚节点到未知节点的距离。只要能在二维平面内找到一点 (x, y) , 使其到各个锚节点之间的距离 $d[i]$ 使 (3) 式的值最大, 这个点便是通过极大似然估计求出的未知节点坐标。这里:

$$d[i] = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (5)$$

其中: (x_i, y_i) 表示第 i 个锚节点的已知坐标。

对式子 (3) 很难通过直接求导的方式求解最大值。由于 (3) 式是单调函数, 可以直接求解下式的最小值:

$$g(\vec{B}) = \sum_{i=1}^m (R[i] - B[i])^2 \quad (6)$$

在一次定位中, 接收到的多个 RSSI 值确定后才进行定位计算, 对于 (6) 式, 可去掉一次定位中值不变的常量项, 进一步转化成求解下式最小值:

$$g = \sum_{i=1}^m (N(\log_{10} d[i])^2 + 2c[i] \log_{10} d[i]) \quad (7)$$

其中: $N = 10n, c[i] = R[i] + A$ 。

这样, 就直接建立了多个锚节点坐标 (x_i, y_i) 同未知节点坐标 (x, y) 的解析关系, 而不是通过 RSSI 值反向求解锚节点与未知节点之间的距离, 再进行极大似然估计定位。直接求 (7) 式的最小值, 比较困难, 但可证明, (7) 式是一个凹面函数, 其必定存在最小值, 可以借助计算机编程辅助, 在一个给定的坐标范围内 (未知节点可能出现的坐标区域), 采用穷尽搜索的方法求 (7) 式的近似解。

2 数值仿真

本节将所提出的基于 RSSI 极大似然估计定位算法与参考文献 [8] 和参考文献 [9] 中提出的基于 RSSI 极大似然估计定位算法进行对比仿真。同时为了叙述方便, 以下将参考文献 [8] 和参考文献 [9] 中的定位算法简称为“似然估计定位算法 1”, 而将本文提出的算法简称为“似然估计定位算法 2”。

设待定位未知节点真实坐标为 (x_0, y_0) , 使用定位算法求出的未知节点坐标为 (x, y) , 则定位误差 $E^{[12]}$ 定义为:

$$E = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (8)$$

仿真假设定位在 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的正方形区域内进行, 发射机发射功率为 0 dBm, 距离发射机 1 m 处 RSSI 值为 $A = -38.6 \text{ dBm}$, 路径损耗指数为 $n = 2.7$, 遮挡因子 β 均方差 $\sigma =$

4 dBm, 随机产生 8 个锚节点坐标分布于仿真区域内。

图 1 中对真实定位坐标 (4, 6) 共进行 30 次仿真。从中可以看出, 本文使用的似然估计定位算法 2 仿真出来的坐标点聚集在真实坐标点周围更加紧密。图 2 是图 1 中 30 次仿真的定位误差分析, 可以看出, 似然估计定位算法 2 的定位误差始终小于似然估计定位算法 1, 证实本文提出的定位算法相比具有提高定位精度的优越性。

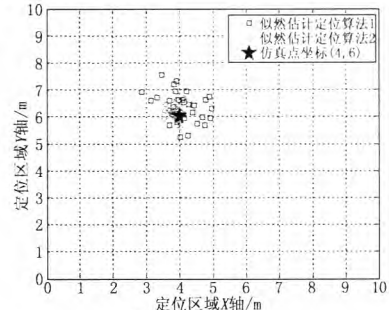


图 1 定位效果

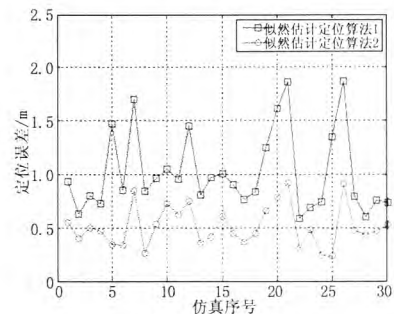


图 2 定位误差

图 3 仿真比较的是当遮挡因子 β 均方差相同 (4 dBm) 时, 随着定位区域内锚节点数量的不断增多, 对定位精度的影响。锚节点摆放坐标依然随机生成。从仿真结果来看, 随着锚节点数量的增多, 两种定位算法的定位误差总体趋势都是随之减小, 但本文提出的定位算法定位误差始终小于似然估计定位算法 1。

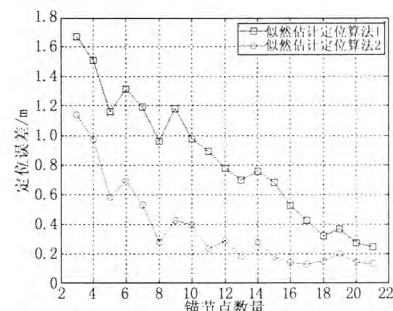


图 3 锚节点数量对定位精度的影响

在定位环境中, 随着摆放其他物体的位置、大小、地面和墙壁材质等不同, 都会导致实际的遮挡因子 β 均方差的不同。图 4 比较了当定位区域内锚节点数量固定, 随着 β 均方差的变化, 对定位精度的影响。从仿真结果容易看出, 总体趋势是随着 β 均方差的增大, 定位精度变差, 但两种定位算法相比而言, 依然能体现出本文提出的定位算法的优势。

在实际定位中, (2) 式中路径损耗指数 n 值的获取方法是, 随机测量大量样本, 对其进行曲线拟合, 最终确定实际定位环境中其值大小。 n 值会随着定位环境和测量样本数量的不

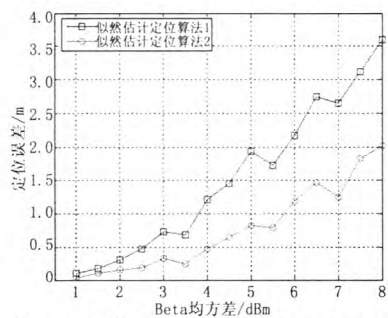


图 4 衰减因子均方差对定位精度的影响

同产生较大变化。图 5 比较的是当 n 值偏离准确值后, 对定位精度的影响。可以看出, n 值偏离准确值越多, 定位误差越大。因此, 实测中, 提高 (2) 式中 n 值的准确度, 也是进一步提高定位精度的有效办法。

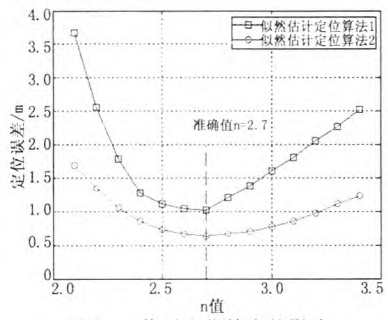


图 5 n 值对定位精度的影响

3 定位系统与实测分析

室内定位系统定位引擎的主要硬件平台使用 TI 公司生产的 CC2530 射频芯片, 内嵌增强型 8051 内核单片机和 RSSI 指示寄存器, 工作频段为 2.4 GHz, 具有低功耗、低成本、自组网等诸多优点。整个无线定位网络中定位引擎中运行 Z-

Stack Pro 2007 ZigBee 协议栈, 组网形式配置为网状网。整个传感器网络中有 3 种形式的节点, 分别是待定位的未知节点, 锚节点和协调器节点, 协调器节点负责网络的形成。未知节点广播定位数据包, 锚节点接收到数据包后, 提取自身 RSSI 寄存器值, 然后将 RSSI 值和自身坐标转发给协调器节点, 最终由协调器节点通过串口输出给计算机, 进行定位计算。计算机定位监控软件使用 C# 语言编写。

实测地点为哈尔滨工业大学深圳研究生院操场。所有节点发射功率设置为 0 dBm。实测中, 选取两个硬件平台一致的节点, 分别作为发射节点和接收节点。总共进行了 500 组不同距离下收发节点之间 RSSI 值测量, 用 (2) 式拟合平均后, 得 A 绝对值大小为 43.02 dBm, n 值为 2.473。每次定位实测中, 都将本文使用的定位算法与参考文献 [8] 和参考文献 [9] 中提出的基于 RSSI 极大似然估计定位算法进行实测比较。

首先, 对 4 m×4 m 的正方形区域进行测量。总共摆放 8 个锚节点, 坐标依次是 (0, 0), (4, 0), (4, 4), (0, 4), (1, 1), (3, 1), (3, 3) 和 (1, 3)。共进行了 8 个定位点测量, 其实测结果如表 1 所示。

其次, 再对 10 m×10 m 的正方形区域进行测量, 依然摆放 8 个锚节点, 其坐标依次为 (0, 0), (10, 0), (10, 10), (0, 10), (3, 3), (7, 3), (7, 7), (3, 7), 同样进行了 8 个定位点的测量, 其实测结果如表 2 所示。

从实测的两组数据对比分析结果可以看出, 8 个锚节点对未知节点定位, 在 4 m×4 m 和 10 m×10 m 两个正方形定位区域内, 本文提出的基于 RSSI 极大似然估计定位算法, 相比参考文献 [8] 和参考文献 [9] 中提出的基于 RSSI 极大似然估计定位算法而言, 其定位误差分别减少了 0.192 米和 0.454 米。进一步证明了本文提出的定位算法可以显著提高定位精度。

表 1 4 m×4 m 定位区域内两种定位算法实测数据对比(单位:m)				
未知节点实际坐标	似然估计定位算法 1 实测坐标	似然估计定位算法 1 定位误差 (E_1)	似然估计定位算法 2 实测坐标	似然估计定位算法 2 定位误差 (E_2)
(2,2)	(1.75,2.12)	0.277	(1.91,2.09)	0.150
(1,3)	(1.23,3.26)	0.347	(0.92,3.14)	0.161
(3,2)	(2.67,2.13)	0.355	(3.05,2.16)	0.168
(2,5,4)	(2.31,3.61)	0.434	(2.41,3.72)	0.294
(0,1,5)	(0.36,1.72)	0.422	(0.15,1.62)	0.192
(1,5,3,5)	(1.23,3.69)	0.330	(1.61,3.62)	0.163
(0,75,2,4)	(1.05,2.18)	0.372	(0.82,2.29)	0.130
(2,15,3,05)	(2.04,2.67)	0.396	(2.10,3.18)	0.140
平均误差		0.367		0.175

表 2 10 m×10 m 定位区域内两种定位算法实测数据对比(单位:m)				
未知节点实际坐标	似然估计定位算法 1 实测坐标	似然估计定位算法 1 定位误差 (E_1)	似然估计定位算法 2 实测坐标	似然估计定位算法 2 定位误差 (E_2)
(5,5)	(5.76,5.82)	1.118	(5.45,4.71)	0.535
(2,2)	(3.38,1.41)	1.501	(3.07,1.71)	1.108
(5,1)	(3.53,1.69)	1.624	(5.32,1.79)	0.852
(7,4)	(6.44,3.31)	0.889	(6.61,3.69)	0.498
(8,6)	(6.73,5.72)	1.301	(7.45,5.13)	1.029
(4,7)	(2.83,6.79)	1.189	(4.52,6.32)	0.840
(1,8)	(2.62,7.36)	1.742	(1.92,7.54)	1.029
(4,5,6,5)	(5.29,7.12)	1.004	(5.13,6.74)	0.674
平均误差		1.296		0.824

