

# 基于ZigBee的RSSI测距方法精度研究

张 橙, 宋学瑞

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 考虑室内环境下存在的非视距和多径传输影响, 得到优化的射频参数  $A$  和信号传输常数  $\mu$ , 并基于 ZigBee 硬件平台进行 RSSI 测距技术方面的实验, 得到基于固定节点的距离比较、高斯滤波和卡尔曼滤波 3 种数据处理方式的测距精度。实验结果表明, 在所选用的 3 种数据处理方式中, 经过卡尔曼滤波处理后的测距精度最高。

**关键词:** ZigBee; RSSI 测距; 高斯模型; 卡尔曼滤波

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)05-0037-05

## Research on the ZigBee-Based RSSI Ranging Accuracy

Zhang Cheng, Song Xuerui

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Considering non line of sight and multipath transmission effects in indoor environment, gets the optimized RF parameter  $A$  and signal transmission constant  $\mu$ , makes RSSI ranging technical experiments on the ZigBee hardware platform, obtains the ranging accuracy of three data processing methods for distance model based on fixed node, Gaussian model and Kalman filter model. The experimental results show that the ranging accuracy through Kalman filtering is highest in the three methods.

**Keywords:** ZigBee; RSSI ranging; Gaussian model; Kalman filtering

## 0 引言

随着现代信息技术的发展, 无线网络的应用领域越来越广泛, 从信息采集到机械控制, 随处可见无线传感器的应用。而距离位置的测量是无线网络中的一个重要组成部分, 通过测量能将分布在各处的节点通过位置信息的传送连接起来, 以达到监测和控制的目的。因此, 无线传感器网络的距离测量成为当下无线网络领域的一研究个热点<sup>[1]</sup>。

无线传感器网络有多种测距方法, 基于接收信号强度指示器 (received signal strength indicator,

RSSI) 测距的方法是其中的一种, 该方法因为对硬件的要求较低, 功耗小, 且没有时间同步, 得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。但是由于 RSSI 测距方法中因环境影响造成的误差较大, 所以需要采用一些其他的数据处理方法以降低测距误差。

本文利用 ZigBee 平台测量若干处信号强度值, 并将这些信号强度值分别代入 3 种数据处理方法中计算, 把处理后的数据进行比较, 得到它们的测量误差。最后的结果显示: 在本文所采用的 3 种处理方法结果中, 经卡尔曼滤波后的测量误差最小, 在 15 m 的测量距离内, 精度可以达到 0.5 m。

收稿日期: 2011-06-20

作者简介: 张 橙 (1982-), 女, 黑龙江庆安人, 湖南工业大学教师, 中南大学硕士生, 主要研究方向为计算机应用技术, E-mail: 28127883@qq.com

## 1 RSSI 测距原理

### 1.1 RSSI测距模型

RSSI 测距模型,是在已知发射功率的情况下,通过测量接收点收到的信号强度,使用信号传播模型将传播损耗转换为距离的数学模型<sup>[3]</sup>,该模型也称为长期衰落模型,其表达式为

$$P_d = P_{d_0} - 10\mu \lg(d/d_0) + x_\sigma \quad (1)$$

式(1)中: $d$ 为目标节点和信标节点间的距离;

$\mu$ 为路径损耗指数,这个参数依赖周围的环境和建筑物的类型,表示路径损耗随距离的增加而增大的快慢;

$x_\sigma$ 是以 dB 为单位,且标准偏差为  $\sigma$  的零均值正态分布随机变量;

$P_{d_0}$ 是相距为  $d_0$  m 处节点接收到的信号强度值<sup>[4]</sup>。通常将  $d_0$  m 设定为 1 m,这样  $P_{d_0}$  就有一个标准的强度值为  $A$ ,其值通常为常数,得到  $A = P_{d_0} + x_\sigma$ ,则式(1)可以转换为  $P_d = A - 10\mu \lg d$ ,由此可得所测距离为

$$d = 10^{\frac{A - P_d}{10\mu}} \quad (2)$$

### 1.2 环境参数的修正

RSSI 测距技术在实际应用中,通常会因多径、绕射、障碍物等不稳定因素,造成对无线信号传输的影响,一定距离中的信号衰减与变量  $A$  和  $\mu$  的大小有关,这 2 个变量的数值决定了接收信号强度与距离间的关系。因此,正确估计  $A$  和  $\mu$  的值,可以使环境对 RSSI 测距的影响减少至最低。本研究中,研究者通过线性回归分析来估计参数  $A$  和  $\mu$  的值,从而得到良好的传播因子  $\mu$  和  $A$ ,可以让无线信号在空气中的衰减和反射变小,使得信号的传播曲线接近理论曲线<sup>[5]</sup>。

$$\text{定义: } P_i = -10 \lg d_i, i=1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

式(3)中  $n$  为测得接收信号强度值(RSSI)的总体数目。

则有下列估计:

$$\begin{cases} \mu = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) P_i}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}, \\ A = \bar{P} - n\bar{\rho}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_i$ 为测得第  $i$  个接收信号的强度值;

$\bar{P}$ 为所有测得信号强度值的均值。

确定系统的回归系数为  $S^2$ ,且其定义为:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{P}_i - \bar{P})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})}$$

式中  $\hat{P}_i$  为受  $P_i$  和  $\bar{P}$  的信号强度影响的估计值。

将所测得的接收信号强度值代入式(3),最终可得出  $A=41.5, \mu=1.5$ 。

## 2 3 种数据处理方法

为了使接收信号强度值更为精确,本文提出了 3 种数据处理方法,即基于固定节点的距离、高斯滤波和卡尔曼滤波方法,并用 MATLAB 仿真对比各处理方法所得距离的误差。

### 2.1 基于固定节点的距离比较法

基于固定节点的测距模型如图 1 所示。

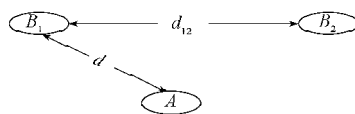


图1 基于固定节点的测距模型

Fig. 1 Ranging model based on fixed nodes

在测算节点距离时,把固定节点间的距离和信号强度值作为已知信息与被测节点距离和接收到的信号强度值进行比较,以提高测距的精度<sup>[6]</sup>。首先对接收到的信号强度值进行校正,再用基于固定节点的测距模型进行距离测算。

校正时,首先要分别采集多个接收信号强度值  $P$ ,然后利用统计均值模型式(5)计算接收信号强度值的平均值  $\bar{P}$ 。

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

如图 1 所示,设  $P_d$  为未知节点  $A$  接收到的已知节点  $B_1$  的信号强度值, $\bar{P}_d$  为其平均值。 $P_{12}$  为节点  $B_1$  接收到节点  $B_2$  的信号强度值, $\bar{P}_{12}$  表示其平均值,则  $P_d$  和  $P_{12}$  的校正转换关系式如式(6):

$$P_d = 10^{\frac{\bar{P}_d}{10}}, P_{12} = 10^{\frac{\bar{P}_{12}}{10}} \quad (6)$$

设  $d_{12}$  表示节点  $B_1$  和  $B_2$  之间的距离, $d$  表示节点  $A$  到节点  $B_1$  的距离,则式(2)的转换关系式可变为式(7):

$$\frac{P_{12}}{P_d} = \left[ \frac{d}{d_{12}} \right]^\mu \quad (7)$$

最终得到基于固定节点的测距公式为:

$$d = \left[ \frac{P_{12}}{P_d} \right]^{\frac{1}{\mu}} \times d_{12} \quad (8)$$

### 2.2 高斯滤波法

高斯滤波方法是得到广泛应用的一种小概率滤波方法<sup>[7]</sup>。在该方法中,一个节点在同一位置可能接

收到的信号强度值为  $P$ , 其中必然存在着小概率事件, 通过高斯滤波选取高概率的信号强度值  $P$ , 然后再求取几何均值。这种做法减少了小概率事件对整体测量结果的干扰<sup>[8]</sup>, 增强了定位的准确度。

算法的具体过程为: 将节点在同一位置所测得的  $P$  值送入相对应的  $R$  数组中, 运用高斯分布函数将数组内的数据进行处理, 接受信号强度的密度函数如下式所示:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{P})^2}{2\sigma^2}},$$

$$\text{其中 } \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2. \quad (9)$$

经计算可得

$$0.6 \leq \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{P})^2}{2\sigma^2}} \leq 1.0. \quad (10)$$

根据已有文献<sup>[9]</sup>中的经验, 选择 0.6 作为函数分布值临界点, 当高斯分布函数值大于 0.6 时, 可认为  $P$  值是大概率事件, 而小于 0.6 时, 可将  $P$  值看成小概率事件。

通过式 (5) 和 (9) 求出均值  $\bar{P}$  和方差  $\sigma^2$ , 再利用式 (10) 确定  $P$  的范围, 并将实验数据中在此范围内的  $P$  值放入数组  $R_{\text{Gauss}}[i]$  中, 最后的优化值可由式 (11) 求得, 将所得优化后的  $P$  值代入式 (2) 中, 可计算出  $d$  的值。

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{Gauss}}[i]. \quad (11)$$

### 2.3 卡尔曼滤波法

卡尔曼 (Kalman) 滤波是一种线性无偏最小方差估计, 是采用时间递推得到的。该方法简单, 数据存贮量小, 特别适用于计算机仿真应用<sup>[10]</sup>, 现已运用于多个领域。本文采用 Kalman 滤波对 RSSI 测距数据进行估算, 以快速收敛, 减少误差。

首先, 建立 RSSI 测距的状态模型, 即

$$P_k = AP_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}. \quad (12)$$

式 (12) 中:  $A$  为状态转移矩阵;

$Bu_{k-1}$  为预估状态控制量,

$w_{k-1}$  为预估滤波噪声。

然后, 将节点接收信号值作为观察量, 利用空间传播模型和对数-常态分析模型, 建立如下的观察模型:

$$Z_k = g(P_k) + v_k = \mathbf{H} \cdot P_k + v_k = P_1 + G - (P_{d_0} + 10 \cdot n \cdot \lg(d/d_0)) + v_k, \quad (13)$$

$$d = \sqrt{(x_i - x_{k-1})^2 + (y_i - y_{k-1})^2}. \quad (14)$$

式 (13) 和 (14) 中:

$Z_k$  是  $P_k$  的修正状态估计值;

$P_k$  是接收功率;

$P_1$  是发射功率;

$\mathbf{H}$  为观测矩阵;

$v_k$  是高斯滤波白噪声;

$G$  是天线的接收增益。

$(x_i, y_i)$  是第  $i$  个发射节点的位置,  $(x_{k-1}, y_{k-1})$  是接收节点的位置;

$d$  是接收节点到第  $i$  个发射节点间的距离。

建立状态模型和观察模型后, 就可进行 Kalman 滤波。Kalman 滤波过程包括预测过程和修正过程, 定义  $P_{k/k-1}$  为在  $k$  步以前的状态下对第  $k$  步的预测状态估计,  $E_{k/k-1}$  为已知测量变量  $Z_k$  时第  $k$  步的修正状态估计。在此设定条件下得到的预测过程为:

$$\begin{aligned} E_{k/k-1} &= \mathbf{A}E_{k-1/k-1} + \mathbf{Q}_k, \\ P_{k/k-1} &= \mathbf{A}P_{k-1/k-1} + \mathbf{B}u_{k-1}, \end{aligned} \quad (15)$$

修正方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= P_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k P_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + R_k)^{-1}, \\ E_{k/k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) E_{k/k-1}, \\ P_{k/k} &= P_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (Z_k - \mathbf{H}_k P_{k/k-1}). \end{aligned} \quad (16)$$

公式 (15) 和 (16) 中各量的定义为:

$E$  为状态误差方差;

$Q$  为系统噪声方差;

$K$  为增益矩阵;

$R$  为观测噪声方差;

$\mathbf{I}$  为单位矩阵。

$\mathbf{A}$  和  $\mathbf{H}$  在 Kalman 滤波系统中为  $g(\cdot)$  的 Jacobian 矩阵代替:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{[n][1,1]} = \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{P=P_n} = \frac{10d_0 \cdot k \cdot (x_i - x_{k-1})}{[(x_i - x_{k-1})^2 + (y_i - y_{k-1})^2] \cdot \ln 10}, \\ \mathbf{H}_{[n][1,2]} = \frac{\partial g}{\partial y} \Big|_{P=P_n} = \frac{10d_0 \cdot k \cdot (y_i - y_{k-1})}{[(x_i - x_{k-1})^2 + (y_i - y_{k-1})^2] \cdot \ln 10}. \end{cases}$$

Kalman 算法应用到 RSSI 测距中, 分为初始和循环减少误差 2 个阶段<sup>[11]</sup>。基于测距的定位算法中, 测距误差是影响精度的关键, 所以在循环阶段用 Kalman 算法来减少测距误差带来的影响。为了加快其收敛速度, 本文设置一个较大的初始状态误差协方差  $E_p = \text{diag}(20, 20)$ , 使得  $x$  和  $y$  2 个方向最大位置误差为 40%。对于状态方程, 过程噪声协方差  $E_Q = 0$ , 对于观察方程, 测量噪声协方差  $E_R = [\delta_2]$ ,  $\delta$  是高斯分布随机函数  $V_k$  的标准差。初始状态设置完后, 将测量

值代入观察模型,得到第一步的预测方程和修正方程,然后进行100次的Kalman滤波迭代,将两组方程不断重复计算,直到满足收敛条件 $|P_{k/k} - P_{k/k-1}| \leq \varepsilon$  ( $\varepsilon=0.001$ )时才会停止,最终得到经100次Kalman滤波的接受信号强度估计值。

### 3 RSSI测距实验

#### 3.1 ZigBee无线网络平台

本文选用的无线通信实验平台为基于ARM9的ZigBee硬件平台,如图2所示。

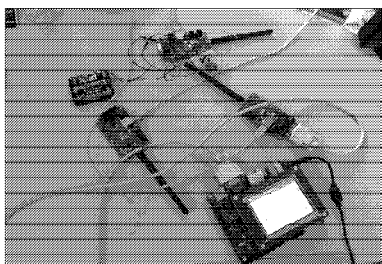


图2 ZigBee实验平台

Fig. 2 Experimental platform for ZigBee

测距实验中使用TI公司的无线传感器射频芯片CC2430完成节点的信号收集。CC2430结合了高性能2.4 GHz射频发射器和工业级小巧高效的8051控制器,其输出功率可通过软件设置8个功率输出级<sup>[12]</sup>。测试的软件平台则采用基于IEEE802.15.4无线网络标准的ZigBee协议栈TI Z-stack。从CC2430接收到的MAC帧中读出芯片寄存器RSSI\_VAL的值,并将该值进行修正,然后转换成接收节点管脚的功率值<sup>[13]</sup>。修正公式为: $P = P_{\text{RSSI-VAL}} + (-45)$ 。

#### 3.2 实验过程与数据处理

由于该实验设备是在室内应用,所以RSSI测距实验选择在长20 m、宽15 m的实验室内进行。考虑到室内的实际情况,并考虑到信号在空气中传播时若遇到障碍物会产生衰减,因此,实验过程中将通信模块全部置于高处,以减少信号传播时产生的衰减现象。

具体测试过程为:在实验室内,先将1号节点固定好(该节点用于接收数据),然后移动发射节点,且该节点连续发射功率信号,每隔0.5 m测量10个数据。然后沿着顺时针方向转90°,再进行第二组数据的测试,依次旋转一周,共测量4组数据,最后将所测得的同一距离内的40个数据转换成相应的接受信号值,并求得信号强度的平均值。再将信号强度的平均值作为该距离内的接受信号实测值,绘制成如图3所示的曲线图。

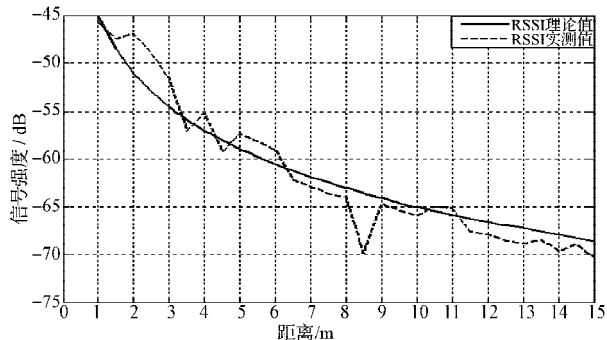


图3 RSSI测距原始数据

Fig. 3 The raw data of RSSI ranging

从图3中可看出,RSSI测距的实际测量值与理论值之间存在着较大的误差,在8~9 m的测距距离内出现了毛刺现象,这可能是因为实验室内的障碍物影响了信号传输造成的。

本研究中,笔者应用MATLAB仿真,将RSSI测距实验中所测数据分别用3种数据处理方法进行处理。在固定节点测距中,加入一个固定的已知节点,以精确测量该节点与 $P_0$ 节点之间的距离和接收信号值。在高斯模型中,选用0.6作为临界点。在卡尔曼滤波模型中,迭代100次,以满足收敛条件 $\varepsilon = 0.001$ 。将所得结果与理论值进行比较,得到3种处理方法对应的误差值,如图4所示。

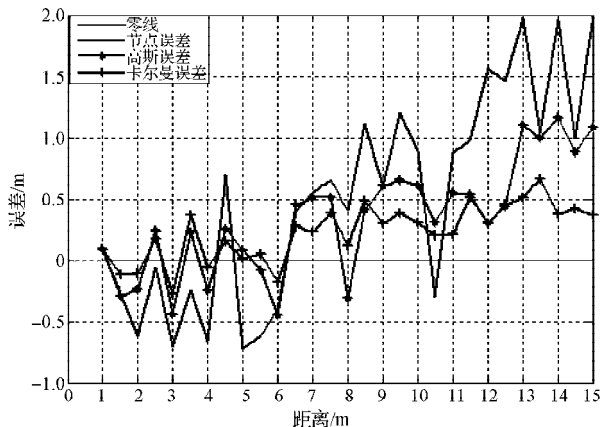


图4 3种算法得到的RSSI测距误差值

Fig. 4 The RSSI ranging errors for three algorithms

从图4中可看出,在本文所采用的3种数据处理方法中,卡尔曼滤波方法所需样本较少,且可看出,采用该方法的误差范围控制较理想,基本上可以控制在-0.5~0.5 m,且没有出现节点错位的情况。因此,在本文所采用的3种数据处理方法中,经卡尔曼滤波方法处理的RSSI测距的精度较好。

## 4 结语

本文从测距的原理和实验要求上,提出采用基

于固定节点的距离、高斯滤波和卡尔曼滤波 3 种处理方法对 RSSI 测距实验数据进行修正, 并通过具体的实验验证了其有效性。实验结果证明, 卡尔曼滤波处理 RSSI 测距, 可增强测距的抗干扰能力, 提高测距精度, 特别是降低最具实用意义的 15 m 以内的定位误差, 满足无线传感器网络在实际生活中的应用。

#### 参考文献:

- [1] 段渭军, 王建刚, 王福豹. 无线传感器网络节点定位系统与算法的研究和发展[J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 239-245.  
Duan Weijun, Wang Jiangan, Wang Fubao. Research and Development of Localization Systems and Algorithms for Wireless Sensor Networks[J]. Information and Control, 2006, 35(2): 239-245.
- [2] Park W, Yoon M. The Implementation of Indoor Location System to Control ZigBee Home Network[C]// Proceedings of IEEE SICE-ICASE. Busan : University of Illinois Press, 2006: 2158-2161.
- [3] 方 震, 赵 湛, 郭 鹏, 等. 基于 RSSI 测距分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11): 2526-2530.  
Fang Zhen, Zhao Zhan, Guo Peng, et al. Analysis of Distance Measurement Based on RSSI[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(11): 2526-2530.
- [4] 孙佩刚, 赵 海, 罗玘玘, 等. 无线传感器网络链路通信质量测量研究[J]. 通信学报, 2007, 28(10): 14-22.  
Sun Peigang, Zhao Hai, Luo Dingding, et al. Study on Measurement of Link Communication Quality in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Communication, 2007, 28(10): 14-22.
- [5] 曹 斌, 董慧颖, 杨悦平. 多边算法在无线传感器网络目标定位中的应用[J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27(1): 14-17.  
Cao Bin, Dong Huiying, Yang Yueping. Application of Multilateral Algorithm on Wireless Sensor Networks for Object Location[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2008, 27(1): 14-17.
- [6] 王盛慧, 邓志东, 裴忠民. 无线传感器网络室内空气污染物节点的硬件设计与实现[C]//2007年中国智能自动化会议论文集. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 52-55.  
Wang Shenghui, Deng Zhidong, Pei Zhongming. Design and Implementation of Indoor Air Pollutants Node Hardware in Wireless Sensor Network[C]//2007 China Intelligent Automation Conference Proceedings. Changsha: Centrol South University Press, 2007: 52-55.
- [7] 王晓陵, 陆 军. 最优化方法与最优控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2008: 40-56.  
Wang Xiaoling, Lu Jun. Optimization Method and Optimal Control[M]. Harbin : Harbin Engineering University Press, 2008: 40-56.
- [8] An Xun, Jiang Ting. Cent Roid Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(20): 136-138.
- [9] 何立阳, 蒋国华, 吕 明. 基于 ZigBee 无线定位技术的小区车辆管理系统[J]. 网络安全技术与应用, 2009(6): 68-69.  
He Liyang, Jiang Guohua, Lü Ming. ZigBee-Based Wireless Location Technology in Cell Vehicle Management System [J]. Network Security Technology & Application, 2009(6): 68-69.
- [10] 闫新庆. 语义网格体系结构中若干关键技术及应用研究 [M]. 武汉: 武汉理工大学, 2006: 82-93.  
Yan Xinqing. Key Technology and Application Research in Semantic Grid Architecture[M]. Wuhan : Wuhan University of Technology Press, 2006: 82-93.
- [11] 蒋 挺, 赵成林. 紫蜂技术及其应用( IEEE802.15.4 ) [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2007: 6-11.  
Jiang Ting, Zhao Chenglin. ZigBee Technology and Applications (IEEE802.15.4)[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2007: 6-11.
- [12] Brooks R R, Ramanathan P, Sayees A M. Distributed Target Classification and Tracking in Sensor Networks[C]// In Proceeding of the IEEE. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 271-310.

(责任编辑: 廖友媛)