

# 基于扩展卡尔曼滤波算法的室内定位跟踪系统

凌海波,周先存

(皖西学院 信息工程学院,安徽 六安 237012)

**摘要:**为了解决无线室内定位系统实时跟踪位置坐标误差较大问题,提出一种基于扩展卡尔曼滤波(EKF)算法的室内定位方法。系统采用基于WiFi信号指纹定位,然后利用扩展卡尔曼滤波对估算的位置进行滤波,以改善WiFi指纹定位方法的精度,达到对目标实时跟踪。仿真和实验结果表明,该算法有效地改善了系统定位精度,能较好地满足室内定位的需求。

**关键词:**无线局域网;室内定位;扩展卡尔曼滤波;实时跟踪

**中图分类号:**TP301.6

**文献标识码:**A

## Wireless indoor positioning system based on extended Kalman filtering algorithm

LING Haibo ,ZHOU Xiancun

(College of Information Engineering, West Anhui University, Anhui Lu'an 237012, China)

**Abstract:** An indoor the real-time positioning technology based on Extended Kalman Filtering (EKF) algorithm is proposed to solve the problem that the forecasted position error is larger. Systems based on fingerprint positioning WiFi signal, and the Kalman filter is used to filter the forecasted location in order to improve the accuracy of WiFi fingerprinting positioning method, to achieve real-time tracking of the target. The simulation and experimental results illustrate that method improves the positioning precision, can better fulfil requirements of indoor positioning.

**Key words:** wireless LAN; indoor positioning; EKF; real-time trackin

无线室内定位技术已经被用于很多基于位置的应用,随着智能手机的普及,其应用越来越广泛。现有最新理论成果仍然面临很多挑战,WiFi信号会受到多径效应和环境动态变化的影响,在无线局域网中对目标进行监测并跟踪,由于在室内复杂环境中,目标的状态会随着时间的变化而变化,并且传感器获取的数据受到室内环境的影响,此时直接用定位算法计算的位置和实际的位置会有很大的误差,从而影响了室内定位系统的精度<sup>[1-3]</sup>。跟踪定位系统应以最小的计算复杂度获得较高的定位精度,文献[4-6]提出了利用卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波、粒子滤波等算法实现跟踪,其中扩展卡尔曼滤波算法收敛速度快,在实时跟踪定位中有着很广泛的应用。本文采用扩展卡尔曼滤波算法随定位算法估算的位置坐标进行滤波处理,进一步提高室内定位的精度。

## 1 基于WiFi信号指纹定位算法描述

### 1.1 基于RSSI测距定位算法

无线信号传输通常采用渐变模型<sup>[7]</sup>,如下式

$$p(d) = p(d_0) - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dBm}$$

式中, $d$ 表示发射端距离接收端的距离, $p(d)$ 表示距离发射机为 $d$ 时接收端接收到的信号强度,即RSSI; $p(d_0)$ 表示距离发射机 $d_0$ 时接收端接收到的信号功率; $n$ 为路径损耗指数; $X$ 是一个以dBm为单位,平均值为0的高斯随机变量。实际采用的渐变模型 $p(d) = p(d_0) - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right)$ ,通常 $d_0$ 为1 m, $p(d)$ 改写成RSSI,则: $RSSI = A - 10n \lg(d)$ 式中, $A$ 为无线收发节点相距1 m时接收节点接收

到无线信号强度 RSSI 值。假设室内布置 10 个 AP,根据 RSSI 定位原理仿真,图 1 为基于 RSSI 测距定位算法仿真结果,可以看出定位偏差为 3.958 7 m,而实际的 RSSI 偏差更大。

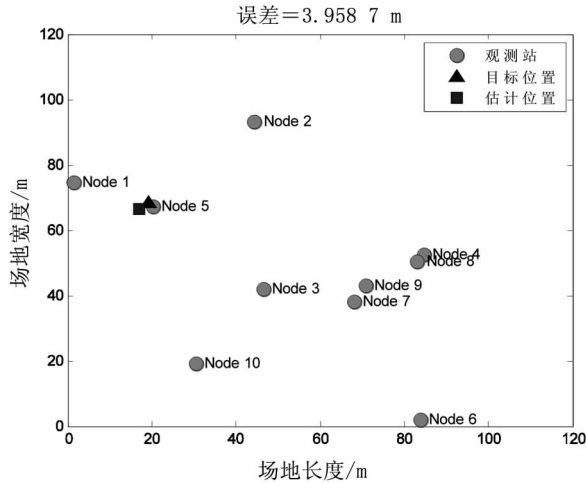


图1 基于RSSI测距定位算法

Fig.1 Ranging localization algorithm based on RSSI

### 1.2 基于 WiFi 信号指纹的定位算法

由于无线电波在室内传播会受到多径效应的影响,传统的基于到达时间 (TOA)、到达角度 (AOA) 等难以实现定位。本文采用基于 WiFi 信号指纹定位,采用普通的商用 AP 以及 WiFi 终端能够方便测量 RSS。通过利用无线信号在室内不同位置的特征区别,将这些特定位置的无线信号特征作为该位置的无线信号指纹,建立位置和指纹之间的数据库,以此寻找匹配的指纹,实现用户的位置估计,该方法在很大程度上解决了无线信号在室内传播的多径效应的影响。位置指纹估计方法分为两个阶段:训练阶段和定位阶段<sup>[8-9]</sup>。

在训练阶段,训练人员对室内定位区域进行位置采样,在每个采样位置上收集无线信号特征,并将采样的无线信号特征存入到位置指纹数据库中。在定位阶段,用户发送所在的指纹到定位服务器,服务器将该指纹信息与数据库中的指纹数据进行对比,将最相似的指纹所在的位置作为该用户位置估计。

本文采用位置指纹方法继续室内定位,主要采用概率方法建模构建每一个 AP 的信号强度。采样阶段,在目标区域内每隔 1.5 m 采样一个位置,将采样的位置信号指纹构建成无线指纹地图。假设共有  $k$  个 AP,用户在不同的位置上接受到来

自这  $k$  个 AP 的不同信号强度,假设采集点数为  $N$ ,记录在  $N$  个采样点处的指纹数据,得到关于信号强度的  $k$  维向量,则采样点  $i$  接收到来自  $k$  个 AP 的信号强度为:

$$S_i = (RSSI_{i1}, RSSI_{i2}, \dots, RSSI_{ik})$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

其中,  $N$  表示采样点的总数;  $k$  表示 AP 的个数。

在定位阶段,设需要查找的位置  $x \in X$ ,  $X$  为室内定位的位置空间。则,位置  $x$  所在的信号强度即为与  $s$  中的信号强度匹配最高的那个数据对应的位置,即  $P(x/s)$  的概率最大<sup>[10]</sup>。假设  $k$  个 AP 都是相互独立的,则根据贝叶斯理论得出:

$$\operatorname{argmax}_x [P(x/s)] = \operatorname{argmax}_x [P(s/x)]$$

又  $P(s/x)$  可以计算为:

$$P(s/x) = \prod_{i=1}^k P(s_i/x)$$

因为信号强度可以通过高斯分布模型来确定。

## 2 扩展卡尔曼滤波目标跟踪算法

由于无线信号在室内传播过程中存在多径效应、衰减等干扰,使得 RSS 存在时变性。另外, RSS 在空间上的传输能量也有限,会随着距离的增加而减弱,使得 RSS 作为指纹室内定位的精度有限。且在实时跟踪过程中,系统要求达到实时的效果,需要实时跟踪移动设备读取信号强度样本数据。由于目标状态随着时间变化而变化,采集的信号强度也受到噪声干扰,并且用户本身移动过程不平缓,这些都严重影响了定位的精度和稳定性。

本文采取扩展卡尔曼滤波算法对估算的位置进行滤波处理,进一步提高系统定位的精度。

通常,目标跟踪系统方程为:

$$X(k+1) = \Phi X(k) + \Gamma \mu(k)$$

$$Z(k) = HX(k) + v(k)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0.5T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0.5T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ x \\ y \\ y \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

式中,  $\mu, v$  为零均值的过程噪声和观测噪声;  $T$  为采用周期。目标跟踪系统大部分都为非线性系统,非线性系统离散动态方程为:

$$X(k+1) = f[k, X(k)] + G(k)W(k)$$

$$Z(k) = h[k, X(k)] + V(k)$$

假设过程噪声和观测噪声序列相互独立,且有初始状态估计  $\hat{X}(0|0)$  以及协方差矩阵  $P(0|0)$ , 根据扩展卡尔曼滤波算法模型可以看出, 系统运动模型可以写成:

$$X(k) = \Phi X(k-1) + \Gamma \mu(k)$$

$$Z(k) = \sqrt{(x(k) - x_0)^2 + (y(k) - y_0)^2} + v(k)$$

$$\text{其中, } \Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0.5T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0.5T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

$\mu(k)$  的均方差  $Q = w * \text{diag}([1, 1])$ ,  $w$  为一个可调节的参数。 $v(k)$  的均方差  $R = 5$ 。状态方程为线性, 由于观测方程为非线性, 则需要其雅阁比矩阵, 即:

$$H = \frac{\partial Z(k)}{\partial X(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z(k)}{\partial x(k)} & \frac{\partial Z(k)}{\partial \dot{x}(k)} & \frac{\partial Z(k)}{\partial y(k)} & \frac{\partial Z(k)}{\partial \dot{y}(k)} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{x(k) - x_0}{\sqrt{(x(k) - x_0)^2 + (y(k) - y_0)^2}} & 0 & \frac{y(k) - y_0}{\sqrt{(x(k) - x_0)^2 + (y(k) - y_0)^2}} & 0 \end{bmatrix}$$

假定目标在室内二维平面上运动, 初始位置为 (10 m, 10 m), 水平运动速度为 2 m, 垂直运动速度也为 2 m, 假设部署 10 个 AP, 利用 WiFi 指纹定位方法进行跟踪, 扩展卡尔曼滤波模拟实验如图 2 所示, 观测样本总数为 40 个, 扫描周期为  $T = 1$  s, 观测噪声均值为 0, 方差为 10 m。

算法首先利用非线性函数将非线性模型局部化, 扩展 Kalman 滤波将非线性函数做一阶泰勒公式展开, 得到线性化的系统方程, 完成对目标滤波估计。本算法部分代码如下:

```
for t = 2:N
X(:, t) = F * X(:, t-1) + G * sqrtm(Q) * randn(2,1); % 目标真实轨迹
end
% 求雅阁比矩阵 H
H = [ -(Xn(3,1) - y0)/D, 0, (Xn(1,1) - x0)/D, 0]; % 一阶近似
K = P1 * H' * inv(H * P1 * H' + R); % 增益
Xkef(:, i) = Xn + K * (Z(:, i) - dd); % 状态更新
PO = (eye(4) - K * H) * P1; % 滤波误差协方差更新
end
```

% 误差分析

从图 2 可以看出, 未滤波时, 系统采用 WiFi 指纹估算的位置与真实位置相差较远, 滤波前最大相差距离达到 3.5 m, 滤波后估算跟踪轨迹基本沿着真实轨迹运行, 基本维持在小于 0.5 m 的误差范围内, 最大误差也只有 1.5 m, 很大程度上提高了系统的定位精度。

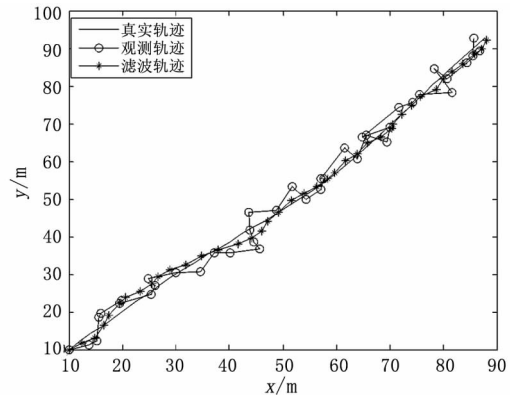


图2 目标跟踪轨迹图

Fig. 2 Target tracking locus

算法过程: 构建目标运动轨迹中  $i$  个采样点的坐标  $S_1(x_1, y_1), S_2(x_2, y_2), \dots, S_i(x_i, y_i)$ ; 计算两个相邻采样点之间的距离; 计算轨迹中每个采样点之间的平均距离  $d = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} / (i - 1)$ ; 该算法多次估算目标位置, 并从中去除误差较大的轨迹点, 在采样过程中, 两个相邻的采样点的距离是相同的, 如果出现某一采样点与其相邻的采样点距离大于规定的某一阈值时, 该采样点将会被淘汰, 使得定位精度得到有效的提高。EKF 算法对采样点的横坐标和纵坐标值进行加权平均处理, 在此过程中, 目标跟踪算法只对采样点之间的距离进行计算, 所以计算复杂度低, 容易实现。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验环境

室内定位实验场地在皖西学院信息工程学院办公楼 5 楼, 长约 60 m, 宽 8 m 的半层楼面, 共布置了 17 个 AP, 使用的都是国内常用的路由器 D-Link, AP 的型号为 DIR-629, 其中 502 实验室布置 5 个 AP, 隔壁 504 布置 6 个 AP, 走廊布置 8 个 AP, 服务器放置在 502 实验室, 每个 AP 之间都相隔一段距离。

实验实时跟踪路径如图 3 所示, 共采样 200 个点, 每个采样点之间的距离为 1.5 m 左右, 每个

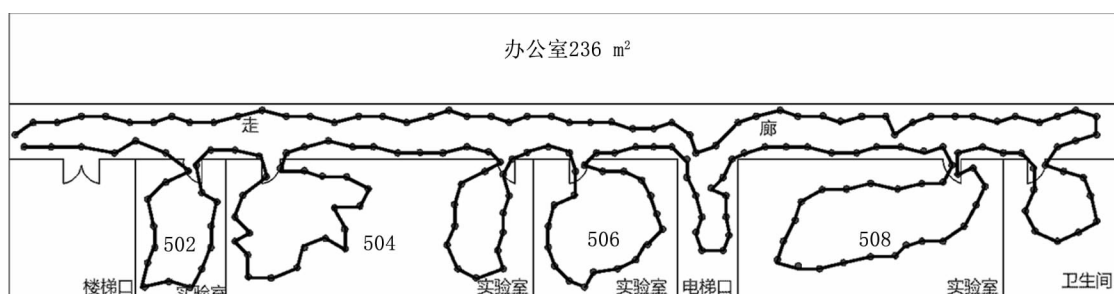


图3 实验跟踪路径图

Fig.3 Experiments tracking path

表1 实验 AP 参数

Tab.1 Experimental parameters AP

名称	MAC 地址	中心频率	频道
PosX_DIR -01	C4:12:F5:75:47:14	2.412MHZ	1
PosX_DIR -02	C4:12:F5:75:46:C4	2.437MHZ	6
PosX_DIR -03	C4:12:F5:75:46:DE	2.462MHZ	11
PosX_DIR -04	C4:12:F5:75:47:08	2.437MHZ	6
PosX_DIR -05	C4:12:F5:75:46:F4	2.412MHZ	1
PosX_DIR -06	C4:12:F5:75:3A:94	2.437MHZ	6
PosX_DIR -07	C4:12:F5:75:3A:8C	2.462MHZ	11
PosX_DIR -08	C4:12:F5:75:43:A0	2.437MHZ	6
PosX_DIR -09	C4:12:F5:75:43:80	2.437MHZ	6
PosX_DIR -10	C4:12:F5:75:47:10	2.437MHZ	6
PosX_DIR -11	C4:12:F5:75:43:68	2.412MHZ	1
PosX_DIR -12	C4:12:F5:75:47:4A	2.412MHZ	1
PosX_DIR -13	C4:12:F5:75:47:3A	2.412MHZ	1
PosX_DIR -14	C4:12:F5:75:46:AC	2.462MHZ	11
PosX_DIR -15	C4:12:F5:75:43:A8	2.437MHZ	6
PosX_DIR -16	C4:12:F5:75:3A:C8	2.412MHZ	1
PosX_DIR -17	C4:12:F5:75:43:94	2.437MHZ	6

采样点采样的时间为 5 s。

实验场地的 AP 名称、MAC 地址、中心频率和频道如表 1 所示。

### 3.2 实验结果分析

根据以上实验环境,实时跟踪定位主要采用基于 WiFi 指纹定位算法,利用概率性方法建模特定位置上每一个 AP 的信号强度特征,再采用扩展卡尔曼滤波算法对采样阶段的 RSSI 信号进行滤波,然后利用滤波后的 RSSI 指纹信号进行定位跟踪。从实时跟踪路径结果可以看出,跟踪精度很高,基本能够实现实时跟踪,当目标穿越门时候,有时候会出现一些很微小的误差。根据实验结果可以拟合出运动在 X 和 Y 方向上的误差曲线,如图 4 所示。由误差曲线可以看出,实时跟踪只有在很少采样点的位置上有较大的误差,大部分采样点误差都在零值附近有很小的波动。由此可以

看出采用扩展卡尔曼滤波算法进行滤波后,基本可以对目标进行实时、准确地跟踪。

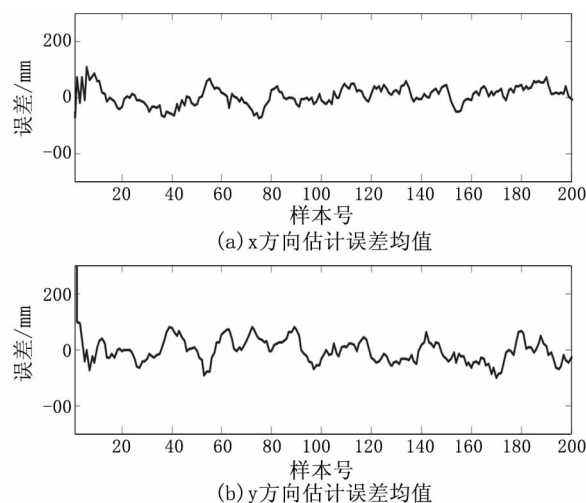


图4 滤波误差均值曲线

Fig.4 Filtering error mean curve

## 4 结论

采用扩展卡尔曼滤波算法后的目标定位精度与滤波前有了明显的提高,跟踪精度也改善明显,提高了室内定位系统的定位精度。实时跟踪只在很少采样点的位置上有较大的误差,大部分采样点误差都在零值附近有很小的波动。由此可以看出采用扩展卡尔曼滤波算法进行滤波后,基本可以对目标进行实时、准确地跟踪。

### 参考文献:

- [1] LIU H, GAN Y, YANG J, et al. Push the Limit of WiFi Based Localization for Smartphones [C] // Proceedings of ACM MobiCom, 2012: 305 - 316.
- [2] MAUTZ R, TILCH S. Rvey of optical indoor positioning systems [C] // Proceedings of IEEE IPIN, 2011.
- [3] HILSENBECK S, BOBKOV D, SCHROTH G, et al. Based data fusion of pedometer and WiFi measurements for mobile indoor positioning [C] // Proceedings of ACM UBIComp, 2014.

(上接第 81 页)

## 3 结语

1) 在层流状态下,水平圆形采样管中流体的速度沿流动方向逐渐增大,靠近管道壁面的速度较小,管道中心处的速度最大。

2) 在水平采样管中,层流状态下,0.1 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  颗粒的传输效率几乎达到 100%,不受管内径、管长和重力、布朗扩散力的影响;2.5 ~ 20  $\mu\text{m}$  颗粒的传输效率随粒径、管内径、管长的增大而减小。通过减少采样管的输送长度或者在流量一定的基础上减小管内径,均可提高颗粒在水平采样管内的传输效率。

3) 在层流状态下,颗粒在水平采样管内总的传输效率近似于重力和扩散力单独作用下颗粒传输效率的乘积。

### 参考文献:

- [1] 张霞,孟琛琛,王丽涛,等.邯郸市大气污染特征及变化趋势研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(4):69-74.
- [2] JIANG HAI, LU LIN, SUN KE. Experimental study and numerical investigation of particle penetration and deposi-

- [4] 曾钰,林都.基于伪线性 KF 和 EKF 的无源定位算法研究[J].中北大学学报:自然科学版,2011,32(2):174-178.
- [5] 刘盼红.基于粒子群优化算法的 Hadoop 调度算法研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(1):83-85.
- [6] OLAMA M M, DJOUADI S M, PAPAGEORGIOU I G, et al. Position and velocity tracking in mobile networks using particle and Kalman filtering with comparison [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1001 - 1010.
- [7] 谢先明.结合滤波算法的不敏卡尔曼滤波器相位解缠方法[J].测绘学报,2014,43(7):739-745.
- [8] 杨铮,吴陈沭.位置计算:无线网络定位与可定位性[M].北京:清华大学出版社,2014.
- [9] LI L, SHEN G, ZHAO C, et al. Experiencing and handling the diversity in data density and environmental locality in an indoor positioning service [C] // Proceedings of ACM MobiCom, 2014: 459 - 470.
- [10] ZHOU Q Y, KOLTUN V. Simultaneous localization and calibration; self-calibration of consumer depth cameras [C] // Proceedings of the IEEE CVPR, 2014: 454 - 460.

(责任编辑 王利君)

tion in 90° bent ventilation ducts [J]. Building and Environment, 2011(46): 2195 - 2202.

- [3] 张锦,刘泽华.通风管道中气溶胶颗粒沉降的探讨[J].节能与环保,2009(6):37-39.
- [4] TANG YINGJIE, GUO BING, ANDREW R MCFARLAND. A Computational Fluid Dynamics Study of Particle Penetration through an Omni-Directional Aerosol Inlet [J]. Aerosol Science and Technology, 2010(44): 1049 - 1057.
- [5] 巴伦,维勒克.气溶胶测量原理、技术及应用[M].白志鹏,张灿等译.北京:化学工业出版社,2007.
- [6] LIU DELING. Evaluating Aerosol Transmission Efficiency in a Sampling System [J]. Journal of the IEST, 2013, 56(2): 29 - 42.
- [7] Fuchs N. A. Sampling of Aerosols [J]. Atmos Environ, 1975(9): 697 - 707.
- [8] HEYDER J, GEBHART J. Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes [J]. Journal of Aerosol Science, 1977(8): 289 - 295.
- [9] GORMLEY P G, KENNEDY M. Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube [J]. Royal Irish Academy, 1949(52): 163 - 169.

(责任编辑 王利君)