

# 一种城市环境中移动传感器网络的 RF 信号估值算法

李振杰 尹立新 张 绚 米立红

(山东大学信息科学与工程学院 济南 250199)

**摘要** 在城市环境中移动传感器网络节点之间的 RF 信号受反射、衍射以及多径衰落等多种传播方式的影响很大,导致基于节点 RF 接收信号的定位、跟踪等移动传感器网络应用很难实用化。针对该问题提出一种对城市复杂环境具有鲁棒性的基于阈值的 RF 信号估值算法。通过分析可知,该算法复杂度低,能够实现复杂环境下 RF 信号的突变检测,并充分利用 Kalman 算法的优势进行最优的 RF 信号估值。最后仿真实验证明,该算法比传统的 Kalman 算法和滑动窗口算法具有更优的估计性能。

**关键词** 移动传感器网络,卡尔曼滤波,滑动窗口算法,RF 信号

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## RF Signal Estimation Algorithm for Mobile Sensor Networks in Urban Environment

LI Zhen-jie YIN Li-xin ZHANG Xuan MI Li-hong

(College of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250199, China)

**Abstract** RF signals between the mobile sensor networks nodes in an urban environment are greatly impacted by multipath fading and reflection diffraction mode of transmission, which makes practical applications such as mobile sensor networks positioning, tracking so difficult. In this paper, a robust estimation algorithm based on the threshold of the RF signal was presented which fits a complex urban environment. The algorithm low complexity possesses, and can achieve mutation detection of the RF signal in the complex environment, and fully utilize the advantages of the Kalman algorithm to optimal RF signal valuation. Finally, the simulation also proves the better performance of the algorithm than traditional Kalman and the sliding window algorithm.

**Keywords** Mobile sensor networks, Kalman filtering, Sliding window algorithm, RF signal

移动传感器网络作为一种特殊的无线传感器网络,每个移动节点均具有信息采集、数据处理、无线通信和机动能力等功能,移动传感器网络对各种关键的应用领域(如军事侦察、海底探测、区域监测、火灾预警和物流管理等方面)的工作产生相当广泛的影响。目前研究的重点主要集中在节点定位、目标检测与动态跟踪等方向<sup>[1-5]</sup>;其中,利用节点之间的 RF 信号能量大小的传感器网络节点定位和检测技术得到了较多学者的极大关注<sup>[6-9]</sup>,主要原因在于该方法无需任何复杂设备即可实现。但是,在城市应用环境中,由于大量通信基站干扰和复杂建筑物遮挡的影响,导致 RF 信号多径衰落干扰非常严重,接收到的 RF 信号实际数据和通过计算得到的理论数据偏差较大,从而造成了移动传感器网络节点定位的性能受到极大的影响。本文针对该问题提出了一种城市实际环境下对复杂环境具有鲁棒性的 RF 信号强度基于阈值检测的 Kalman 估值算法。

## 1 问题分析

E. Elnahrawy<sup>[10]</sup>指出,无线环境中节点接收到的 RF 信

号包含了复杂的多径传播、信号反(衍)射传播和障碍物阻挡等多种方式的影响。尽管如此,由于接收信号强度无需复杂的硬件即可实现,因此,基于节点 RF 信号强度接收节点定位和目标跟踪等技术也得到了广泛关注和研究<sup>[6,7,9,11]</sup>。事实上,N. Patwari<sup>[12]</sup>研究表明,基于 RF 信号的方法尽管得到的数据准确度不高,但是在试验中仍然能够达到 1.5m 的误差有效值,无线射频信号的衰落使得该算法需要设计鲁棒性的估值器。P. Bergamo<sup>[13]</sup>中采取了多个 RF 信号测量值,然后再通过时间窗口的平均值来减小各类干扰和信号衰落的影响。

无线射频信号的传输质量对环境因素依赖性比较大,在城市环境中,无线通信信道噪声大,而且无线传输信道中信号传播受到反(衍)射和多径干扰等因素的影响,使得信号接收强度是一个关于距离的复杂函数。为了克服这些影响,许多研究采用了预先校准<sup>[14]</sup>的方法(priori calibration),该方法主要分为两个阶段,即训练阶段和估值阶段。训练阶段主要是测量兴趣点的数值,估值阶段则利用训练阶段测得的数值进行传播模型中参数的估计。很明显,该方法的估计精度取决

到稿日期:2013-03-15 返修日期:2013-06-06

李振杰(1976—),男,硕士生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:zhenjie\_li@sina.cn;尹立新(1959—),男,硕士生导师,主要研究方向为 DSP 在数字信号处理中的应用和识别设备的研究开发;张 绚(1987—),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理等;米立红(1965—),女,讲师,主要研究方向为无线通信教学与科研。

于校准点的个数以及每个点的测量值个数,从而导致该方法非常耗时,并没有被实际广泛采用。经典的 Kalman 滤波算法<sup>[15]</sup>也不适合直接用于在复杂的无线传输信道中对衰落信号进行估值。

在城市环境下,无线射频信号在传输过程中的各类衰落很严重,而且无线射频信号受建筑物影响也很大。图 1 给出了在室外环境下利用 MICA2 收发节点所接收到的信号强度。接收节点放置在以发射节点为中心的固定半径的圆上,沿着不同半径的圆上获取的均值和路径损耗模型<sup>[16]</sup>一致,测量值的较大偏差主要是由于无线信号的多径衰落和传输媒介的各向异性引起的。

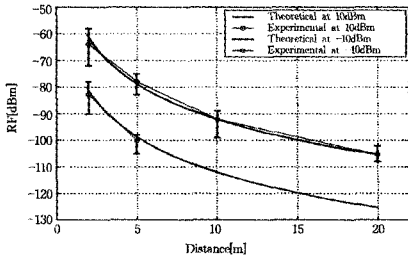


图 1 MICA2 节点链路点到点的 RF 信号强度

在复杂城市环境下,接收的 RF 信号的强度指示一般遵从正态对数分布<sup>[16-18]</sup>,表示如下:

$$P(d) = \bar{P}(d_0) - 10 \cdot n_p \cdot \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) - X_s$$

式中, $d$ 为发射节点与接收节点的传播距离(单位为米); $d_0$ 为参考距离(单位为米,通常取 1 米); $n_p$ 为路径衰减因子,表示路径损耗随距离增加而变化的快慢程度,与具体环境有关; $X_s$ 服从正态分布(均值为 0、标准差为  $\sigma$ ); $\bar{P}(d_0)$ 为距离为  $d_0$  时接收信号强度指示的均值(单位为 dBm)。

复杂城市环境下射频信号的传播存在大量随机因素, $n_p$ 和  $X_s$ 的标准差  $\sigma$  都将受到信号衰落和各种传播方式的影响而发生变化,从而使获得的射频信号强度抖动严重,观测到的数值之间可能相差几倍。如何解决接收射频信号的随机性和自适应成为在复杂城市环境下对接收射频信号进行估值的首要研究问题。然而利用常用的均值法、滑动窗算法和卡尔曼滤波算法均不能很好地加以解决。

本文基于城市环境下的射频信号传输容易产生突变的典型特点,提出了一种基于阈值检测的卡尔曼滤波算法(Threshold-Based Kalman Algorithm),该算法对于复杂城市环境具有较好的鲁棒性。

## 2 基于阈值的卡尔曼滤波 RF 估值算法

### 2.1 算法原理

城市环境中信号传输信道噪声比较大,而且无线通信信道中信号传播有反射、衍射和多径干扰等影响,使得信号的强度难于估计,容易产生误判。卡尔曼滤波算法对复杂环境没有较好的自适应能力,因此在信号进行估值时,首先进行基于阈值的判断处理,可以实现对 RF 信号突变的判断,并且在检测到信号发生突变后实时修改算法参数,从而实现算法对复

杂环境的自适应能力。

本文算法的基本原理是当出现新的 RF 信号观测值时,先进行基于阈值的判断处理,阈值判断的目的是尽量减少由于信号衰减和多径干扰造成信号抖动等现象的影响;然后将处理后的结果进行卡尔曼滤波,最终获得最优的估值结果。

#### 2.1.1 基于阈值的判断处理

令  $T(k)$  为突变检测函数, $M(k)$  为观测值的迭代均值。

当  $T(k) > \theta \cap k > \beta$  时,对部分参数进行重置,令  $k=0$ ; $P(k|k)=10$ ; $M(k)=0$ 。

当有新的 RF 信号观测值  $Z(k)$  出现时,计算:

$$M(k+1) = \frac{kM(k) + Z(k+1)}{k+1} \quad (1)$$

$$T(k) = \left| \frac{\sum_{i=k-\alpha+1}^k [X(k|i) - M(k)]}{\alpha} \right| \quad (2)$$

式中, $\alpha$  设定目的是提高算法的鲁棒性,其意义为参与  $T(k)$  计算的迭代数据宽度,对  $\alpha$  的设定可降低毛刺现象对判定过程的影响; $\beta$  为初始化后,判定过程重新生效的预热的时间, $\beta$  可以使判定过程避开初始化后的参数抖动阶段,避免判定过程进入死循环,进一步提高了算法鲁棒性; $\theta$  为 RF 信号突变判定阈值,当  $k > \beta$  时, $T(k)$  一旦超过  $\theta$  即可认为 RF 信号发生了突变。 $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\theta$  均可根据实际需求进行取值,通过对 3 个参数不同取值的设定,可以对算法收敛速度与算法鲁棒性进行权衡。

#### 2.1.2 卡尔曼滤波算法

通过卡尔曼滤波算法可以获得最优的 RF 信号估值,因此经过阈值判断后的信号可以进行卡尔曼滤波,并根据实际环境对参数进行简化。因此,不但可以降低复杂环境对 RF 信号的影响,而且可以充分发挥卡尔曼滤波算法的优势。卡尔曼滤波算法<sup>[15]</sup>过程如下:

$$X(k|k-1) = AX(k-1|k-1) + BU(k) \quad (3)$$

$$P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A' + Q \quad (4)$$

$$X(k|k) = X(k|k-1) + \frac{P(k|k-1)H'}{H \cdot P(k|k-1) \cdot H' + R} (Z(k) - H \cdot X(k|k-1)) \quad (5)$$

$$P(k|k) = \left( I - \frac{P(k|k-1)H'}{H \cdot P(k|k-1) \cdot H' + R} \cdot H \right) P(k|k-1) \quad (6)$$

上述公式中: $k$  称为迭代次数(即为通信次数), $k \in [0, \infty)$ , $X(k|k-1)$  是利用上一状态预测的 RF 信号数值; $A$  为上一状态映射到当前状态的增益; $B$  为可选的控制输入的增益; $U(k)$  是  $k$  时刻对系统的控制量; $H$  为状态变量  $x(k)$  对测量变量  $Z(k)$  的增益; $Q$  为过程激励噪声协方差; $R$  为观测噪声协方差。 $X(k-1|k-1)$  是上一状态的 RF 信号的最优估计值; $X(k|k)$  是利用  $X(k|k-1)$  和第  $k$  次 RF 信号观测值  $Z(k) = P(k)$  得到的本次 RF 信号的最优估计值; $P(k|k-1)$  是  $X(k|k-1)$  对应的协方差, $P(k-1|k-1)$  是  $X(k-1|k-1)$  对应的协方差, $P(k|k)$  是  $X(k|k)$  对应的协方差。

由于移动传感器网络节点的计算能力和存储能力通常比

较低,因此有必要针对城市环境下信号的特点对经典卡尔曼滤波算法的参数进行简化处理。具体做法如下:初始预测 RF 信号可认为与前一时间信号相同,此时,上一状态映射到当前状态的增益  $A=1$ ,可取消控制量,控制变量  $U(k)=0$ ;设测量值与 RF 信号直接对应,状态变量对测量变量的增益  $H=1$ ;系统变为单模型单测量系统,  $I=1$ ;根据实际经验,取过程激励噪声协方差  $Q=10^{-6}$ ,观测噪声协方差  $R=10^{-1}$ 。

从上述算法的描述可以看出,每次迭代都仅运行一次,均为多项式的加、减、乘和除运算,并未涉及到复杂的矩阵运算,可见算法复杂度低,时间复杂度为  $O(n)$ 。

## 2.2 突变检测函数 $T(k)$ 分析

本文算法的第一步即为突变检测函数突变的判定,其依据为 RF 信号发生突变时  $T(k)$  具有单调增长特性,因为  $X(k|k)-M(k)$  具有单调性。下面进行简单的证明。

由式(1)和式(5)可得:

$$X(k|k)-M(k)=X(k|k-1)+\frac{P(k|k-1)}{P(k|k-1)+10^{-1}}\times \\ (Z(k)-X(k|k-1))- \\ \frac{(k-1)M(k-1)+Z(k)}{k}$$

又因为  $X(k|k-1)$  与  $M(k-1)$  可认为和突变前的 RF 信号实际值  $R(i)$  相等,因此有:

$$R(i)+\frac{P(k|k-1)}{P(k|k-1)+10^{-1}}(Z(k)-R(i))- \\ \frac{(k-1)R(i)+Z(k)}{k} \\ =\frac{10^{-1}+P(k|k-1)-k\times P(k|k-1)}{10^{-1}k+k\times P(k|k-1)}(R(i)-Z(k))$$

显然有:

$$10^{-1}k+k\times P(k|k-1)>0$$

随着  $k$  的增大,由式(4)可知,必然有:

$$10^{-1}+P(k|k-1)-k\times P(k|k-1) \\ =10^{-1}-(k-1)(P(k-1|k-1)+1\times 10^{-6})<0$$

经计算可知,当  $k>14$  时,上式成立。

根据  $k>\beta$  可得:

$$\frac{10^{-1}+(k-1)P(k|k-1)}{10^{-1}k+k\times P(k|k-1)}<0,\beta>13$$

当 RF 信号跳变时,观测值  $z(k)$  的均值则为实际的 RF 值  $R(i+1)$ ,标准差取  $\sigma_0$  的高斯随机值。

$$Q\left(\frac{R(i)-R(i+1)}{\sigma_0}\right)=Q(r)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_r^{\infty}\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)dx \\ =\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right)\right]/2 \quad (7)$$

其中:

$$r=\frac{R(i)-R(i+1)}{\sigma_0}$$

$\operatorname{erf}()$  为误差函数;在复杂城市环境中  $\sigma_0$  比一般的野外和室内环境都要大,通常取值在  $[3,14]$ 。

假设:

$$|R(i)-R(i+1)|=12\text{dB},\sigma_0=10$$

此时将  $r=1.2$  代入式(7),可得:

$$P_r[Z(k)>R(i)]=[1-\operatorname{erf}\left(\pm\frac{1.2}{\sqrt{2}}\right)]/2\approx 88.2\%$$

即:  $P_r[X(k|k)-M(k)>0]\approx 88.2\%$ 。

突变判定函数对  $\alpha$  次的的数据取平均,则有:

$$P_r[T(k)>0]>99.9\%$$

通常在城市复杂电磁干扰和无线信号多径衰落环境条件下,RF 信号发生突变时的值

$$r=\frac{R(i)-R(i+1)}{\sigma_0}$$

比上述选取值要大,因此,当 RF 信号突变时  $T(k)$  会随之变大,因此,能够用于检测突变的 RF 信号。

## 3 性能仿真

为了分析本文算法的性能,下面与经典算法进行了仿真对比,主要是卡尔曼滤波算法、两种滑动窗算法与本文算法进行比较。通常情况下,任意两个移动传感器节点之间的 RF 信号都包含一个均值为 0、标准差为  $\sigma$  的高斯分布随机变量  $X_0$ 。在存在复杂干扰的城市环境中,RF 信号受多径衰落和反(衍)射等传播方式的影响,节点所接收到的 RF 信号由许多幅度为  $X_0$ 、相位服从  $[0,2\pi]$  均匀分布的信号叠加而成。

首先是信号无突变时的仿真情况。仿真时利用本文算法、卡尔曼滤波算法、宽度为 20 的滑动窗函数(记作滑动窗-20)和宽度为 50 的滑动窗函数(记作滑动窗-50)共 4 种算法对观测值进行估计。在进行仿真时设置 RF 信号的真实值为  $-40\text{dBm}$ ,参数设置为:  $\sigma=8$ ,  $X(0|0)=1$ ,  $p(0|0)=10$ ,  $\alpha, \beta, \theta$  分别如 10、50 和 0.5。在没有信号突变时 RF 信号的观测值和估计曲线分别如图 2 和图 3 所示。

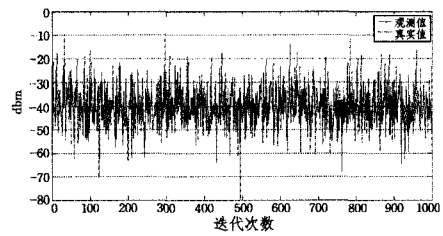


图 2 无突变时 RF 信号观测值

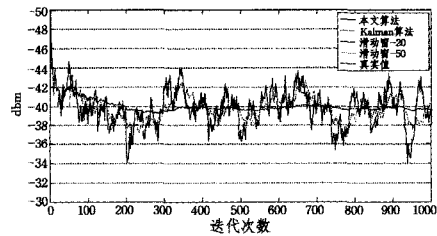


图 3 无突变时各算法对 RF 信号估值曲线

从图 3 中可以看出,本文算法和 Kalman 算法的估计值完全一致,而且均在 108 次迭代后实现收敛(定义观测值与真实值之差绝对值小于 1dbm 即实现收敛);而两种滑动窗算法均未能实现收敛,误差分别在  $\pm 4\text{dbm}$  和  $\pm 2\text{dbm}$  左右,且一直有轻微抖动。由此可见,在无突变时本文算法和 Kalman

算法均能快速准确地实现 RF 信号值估计。

下面分析信号有突变时的仿真情况。图 4 显示的是在迭代 500 次和 1000 次时加入 RF 信号突变情况下的实际观测值;图 5 为本文算法、Kalman 算法、滑动窗-20 和滑动窗-50 的 RF 信号估值示意图。在进行实验仿真时,第一阶段 RF 信号真实值为  $-40\text{dbm}$ ,第二阶段 RF 实际值为  $-20\text{dbm}$ ,第三阶段 RF 实际值为  $-30\text{dbm}$ ,参数设置为  $\sigma=8$ ,  $X(0|0)=1$ ,  $P(0|0)=10$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\theta$  分别为 10、50 和 0.5,每阶段获取观测值均为 500 次。

从图 5 中可以看出,第一阶段没有信号突变,仿真结果和图 3 仿真情况一致;进入第二阶段后,本文算法在第 530 次迭代时判断出 RF 信号发生了突变,并在第 559 次迭代时再次实现收敛;第三阶段后,本文算法在第 1048 次迭代时判断出 RF 信号发生突变,并在第 1083 次迭代时再次实现估值收敛。Kalman 算法则在第二阶段和第三阶段一直在逼近真实值,以很慢的速度趋向于收敛态势。两种滑动窗口法均能够自适应地靠近第二阶段和第三阶段的真实值,其中滑动窗-20 算法相对于滑动窗-50 算法而言,反应速度较快但振动更加严重,并且两种算法的估值曲线一直有轻微的抖动而不能达到收敛状态。

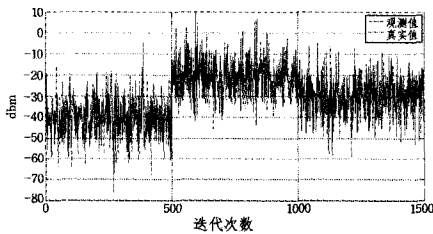


图 4 有突变的 RF 信号观测值

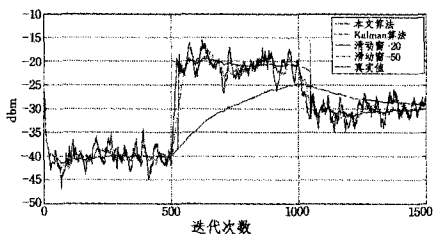


图 5 有突变时各算法对 RF 信号的估计曲线

综合仿真结果可以看出,在 RF 信号发生突变时,本文算法能自动检测并快速收敛,突变的 RF 信号值越大,本文提出的算法越容易检测,收敛速度也越快。

**结束语** 移动传感器节点的接收 RF 信号强度由于无需硬件即可检测,被广泛应用在节点定位和目标检测跟踪中,但是城市环境中,无线信号的多径衰落和反(衍)射等现象导致信号难以进行准确估值。本文提出的基于阈值的 Kalman 检测算法对环境具有较好的鲁棒性,经分析和仿真实验可知,本文算法复杂度低、收敛速度快,可有效地用于复杂城市环境中 RF 信号估值。

## 参考文献

[1] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based

user location and tracking system[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv; IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 2, 2000; 775-784

- [2] Chae H, Han K. Combination of RFID and vision for mobile robot localization[C]//Proceedings of the 2005 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, IEEE, 2005; 75-80
- [3] Zanca G, Zorzi F, Zanella A, et al. Experimental Comparison of RSSI-based Localization Algorithms for Indoor Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the Workshop on Real-world Wireless Sensor Networks, Glasgow, UK, New York, NY, USA; ACM, 2008; 1-5
- [4] Zhou J Y, Shi J. Performance Evaluation of Object Localization Based on Active Radio Frequency Identification Technology[J]. Computers in Industry, 2009, 60(9): 669-676
- [5] 张士庚, 曾佩佩, 陈力军, 等. 移动传感器网络中定位算法的性能评测[J]. 软件学报, 2011, 22(7): 1597-1611
- [6] 章磊, 黄光明. 基于 RSSI 的无线传感器网络节点定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(2): 291-294
- [7] 龙慧, 樊晓平, 刘少强. 无线传感器网络可扩展一致性目标跟踪算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(11): 2429-2434
- [8] 彭春燕, 杨志强, 张效娟. 能耗均衡的无线传感器网络的入侵检测机制[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(1): 41-44
- [9] 马宁, 李开宇, 吴寅, 等. 基于最大流的能量采集型无线传感器网络路由算法[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(1): 131-134
- [10] Elnahrawy E, Li X, Martin R. The limits of localization using signal strength; a comparative study[C]//First Annual IEEE Communications Society Conference Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004; 406-414
- [11] 何风行, 余志军, 刘海涛. 基于压缩感知的无线传感器网络多目标定位算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 716-721
- [12] Patwari N, et al. Relative location estimation in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(8): 2137-2148
- [13] Bergamo P, Mazzini G. Localization in sensor networks with fading and mobility[C]//The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002, 2: 750-754
- [14] Barsocchi P, Lenzi S, Chessa S, et al. Virtual Calibration for RSSI-based Indoor Localization with IEEE 802.15.4[C]//Proceedings of International IEEE International Conference on Communications, ICC 2009, Dresden (Germany), 2009; 1-5
- [15] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering, 1960, 82 (Series D): 35-45
- [16] Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice(2nd Edition)[M]. New Jersey; Prentice Hall Publications, 2001; 33-38
- [17] 聂云峰, 舒坚, 龚佳杰, 等. 基于 RSSI 的无线传感器网络通信覆盖研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(7): 1066-1069
- [18] 廖卓凡, 王建新, 梁俊斌. 无线传感器网络中节点的动态部署[J]. 计算机科学, 2011, 38(10): 45-50