

基于信号强度的室内定位技术

陈永光¹, 李修和²

(11 六三八八零部队, 河南洛阳 471003; 21 解放军电子工程学院, 安徽合肥 230037)

摘要: 研究了基于信号强度模型的室内定位技术. 通过运用线性回归、补偿式线性回归和多元回归方法, 利用仿真数据建立了信号强度模型. 为了理解定位误差和信号强度误差之间的关系, 对这种建模方法作了分析, 得出的一些重要结论有助于确定接入点(AP)的部署点及评估定位误差的范围. 最后, 基于 IEEE802.11b MAC 的典型参数进行了仿真试验.

关键词: 无线局域网; 定位; 信号强度; IEEE802.11b

中图分类号: TN9251.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-1452-03

Signal Strength Based Indoor Geolocation

CHEN Yongguang¹, LI Xiuhé²

(11 Unit 63880, Luoyang, Henan 471003, China; 21 Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract: We have investigated the indoor geolocation based on signal strength modeling. Linear, compensated linear, and multiple regression methods have been applied to set up signal strength models by using simulated data. We have also analyzed this modeling method to better understand the relation between the location error and the signal strength error. Some important results have been obtained to help us determine proper placement of Access Points (AP) and evaluate the range of location error. A simulation experiment has been conducted based on typical parameters of IEEE802.11b MAC.

Key words: WLAN; geolocation; signal strength; IEEE802.11b

1 引言

随着无线局域网 WLAN (Wireless Local Area Networks) 的发展, 研究针对 WLAN 用户的定位技术, 尤其是室内环境下定位技术的兴趣不断增长. 然而, 基于电波信号的室内用户定位跟踪技术遭遇到了极大的困难, 这是因为一个狭窄空间里的地板、墙壁和人体等各种物体都将使得用于定位的电波信号产生形式极为复杂的衰减和衰退^[1]. 大多数的无线定位技术都是基于到达时间 TOA (Time Of Arrival)、到达时间差 TDOA (Time Difference Of Arrival) 和到达方向 DOA (Direction Of Arrival) 这类信息, 实际上, 基于这些技术的定位结果只有在通视 (Line of Sight) 信号占支配地位的情况下才是可靠的, 因而无法适用于室内环境. 此外, TOA 或 TDOA 信息需要发射机与接收机之间的准确同步, 这在许多应用场合也是难以做到的. 另一种可供选择的定位方法是基于信号强度的解决方案, 它并不测量到达信号的时间或角度, 而是利用移动站 MS (Mobile Station) 感测的来自参考基站 BS (Base Station) 或接入点 AP (IEEE802.11 术语中的 Access Point) 的信号功率 (或者能量), 这是本文所研究的定位模式.

本文首先介绍一种简单的信号传播模型, 然后介绍 Bahl 和 Padmanabhan 的信号传播经验模型, 接着通过加入隔墙衰减因子, 将线性回归模型延伸为多元回归模型, 随后通过比较确定系数和标准差, 评估多元回归模型相对线性回归模型的改

善情况. 最后, 我们讨论如何利用信号传播统计模型评定这种基于信号强度的方法对 MS 的定位误差. 由于定位误差大小是 MS 所在位置以及 AP 安放位置的函数, 因此该误差分析可以用来确定 AP 的最佳摆放点.

早在上世纪六十年代, 信号衰减模型就已被提出, 作为一种对行驶在大街上的机动车辆定位的解决途径^[2]. 可是, 基于信号强度的方案仍是一种未被仔细研究过的室内环境下的 WLAN 用户定位技术. 本文研究的基于信号强度的室内定位技术走向实用后, 产生的应用价值将是非常可观的. 它将使 WLAN 用户与其所在环境之间发生有效作用. 我们容易想到的用户与周围环境经常发生的一种联系是在最临近的打印机上打印一篇文稿. 其它事例包括定出移动用户的地理位置, 显示周围环境的平面图或者三维图, 或是在博物馆内为游客做向导等等.

2 电波传播建模

2.1 信号传播模型

假设信号强度仅与发射机和接收机之间距离有关, 则简单信号传播模型成立.

$$P(r) = P(r_0) - 10A \lg(r/r_0) \quad (1)$$

式中, $P(r)$ 是一给定 MS 接收到的功率, 其与一给定发射机或 AP 的距离为 $r(m)$; r_0 是相对发射机的参考距离; $P(r_0)$ 是该参考点处的信号功率. 参数 A 表示路径损耗随着距离 r 的增

加而增加的速率。

该模型并未考虑建筑物内可能存在的墙壁。这样, 如果依赖于这个简单的模型计算某处室内位置接收到的信号强度, 则此信号强度会被估计得过高, 尤其在一个有许多被墙壁隔开的房间的建筑物内会是这样。

文献[3]介绍了一种关于信号强度的经验模型, 它考虑了 MS 与 AP 之间隔墙引起的信号强度观测量的衰减。

$$P(r)=P(r_0)-10\text{Alog}(r/r_0)-l\#WAF$$

(2)

式中, l 是发射机和接收机之间的隔墙数; WAF 是隔墙衰减因子。

21.2 线性回归分析

通过应用线性回归分析可以估计未知参数 $P(r_0)$ 和 A 。在式(1)的简单信号传播模型中, 将测量的信号功率当作观测量。而在式(2)的经验型信号传播模型中, 首先通过将遇到隔墙的信号的强度与通视环境下观测的该信号强度相比较决定 WAF [dB], 然后通过补偿发射机和接收机之间隔墙造成的信号损耗修正每个测量的信号强度值, 这样仍可使用线性回归分析。这里的补偿意味着式(2)应该变成:

$$P_w(r)=P(r)+l\#WAF=P(r_0)-10\text{Alog}(r/r_0)$$

(3)

定义 $Q=-10\text{log}(r_i/r_0)$, $r=1,2,\dots,N$

(4)

式中, N 是信号强度值采样数。则有下列估计^[4]

$$A=\frac{N}{E_{i=1}^N[Q-Q]P_w(r_i)}\bigg/\frac{N}{E_{i=1}^N[Q-Q]^2}$$

(5)

和 $P(r_0)=P_w-AQ$

(6)

这里, $Q=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N Q$

(7)

$$P_w=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N P_w(r_i)$$

(8)

确定系数 R^2 表示回归品质, 定义成:

$$R^2=\frac{\text{用回归解释的信号强度变化}}{\text{信号强度总的变化}}=\frac{E_{i=1}^N[P_w(r_i)-P_w]^2}{E_{i=1}^N[P_w(r_i)-P_w]^2}$$

(9)

预测信号强度的标准差由下式给定,

$$R_p=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N [P_w(r_i)-P_w(r_i)]^2}$$

(10)

21.3 多元回归分析

多元回归是简单回归分析的扩展, 它考虑了一个以上预测变量对因变量的影响。如式(2)所示, 现在打算用两个预测变量(即距离 r 和隔墙数 l)同时确定三个因子(即 $P(r_0)$ 、 A 以及 WAF)。假定采用 N 个独立样本构建此多元回归模型, 则用下面的矩阵方程式代替式(2)。

$$P=GB$$

(11)

式中,

$$P=\begin{bmatrix} P(r_1) \\ P(r_2) \\ \vdots \\ P(r_N) \end{bmatrix}, G=\begin{bmatrix} 1 & -10\text{log}(r_1/r_0) & -l_1 \\ 1 & -10\text{log}(r_2/r_0) & -l_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -10\text{log}(r_N/r_0) & -l_N \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} P(r_0) \\ A \\ WAF \end{bmatrix}$$

(12)

未知参数矢量 B 的最小二乘估计由下式给定,

$$B=(G^TG)^{-1}G^TP$$

(13)

确定系数为 $R^2=\frac{B^TG^TP-NP^2}{P^TP-NP^2}$

(14)

式中 $P=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N P(r_i)$

(15)

标准差为 $R_p=\sqrt{\frac{1}{N}(P^TP-B^TG^TB)P}$

(16)

21.4 仿真试验

为了评估所提统计模型的可行性与有效性, 第一个步骤是设计一个仿真试验。仿真中采取的系统参数给定如下:

$$P(r_0)=160\text{W}=52\text{dBm}, A=2$$

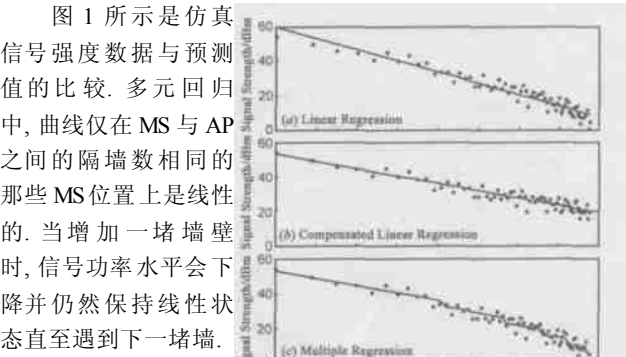
至于距离范围, 假设分为 70 个点, 其中最小值为 1m, 最大为 351.5m, 并假定每隔 7m 有一堵墙。

关于 WAF , 假设穿过一堵墙的信号能量的百分比在 30% 和 70% 之间均匀分布, 转化成损耗因子即为 WAF [dB] 在 51.23dB 和 11.55dB 之间均匀分布。

另外, 假定功率 $P(r)$ [dB] 的偏差是服从零均值、21.5dB 标准差的高斯分布随机误差。三种回归方法的系数估计、回归品质以及标准差的比较见表 1。从结果可以发现多元回归模型能够改善回归品质并减少预测值的偏差。

表 1 不同回归分析方法的比较

回归分析	系数估计			R^2	R_p
	$P(r_0)$ /dBm	A	WAF/dB		
线性	59.84	3.26	-	92.13%	3.39
补偿式线性	53.52	2.15	-	88.63%	2.74
多元	53.36	2.12	3.09	94.85%	2.74



3 定位误差估计

31.1 分析方法

通过对式(2)等号

两边 x, y 求微分, 有

$$dP_i(x,y)=-\frac{10A_i}{\ln 10}\left(\frac{x-x_i}{r_i^2}dx+\frac{y-y_i}{r_i^2}dy\right), i=1,2,\dots,M$$

(17)

式中, $P_i(x, y)$ 是在 (x, y) 处接收的来自 AP_i 的信号强度; (x_i, y_i) 是 AP_i 坐标; A_i 是来自 AP_i 信号的路径损耗幂值; r_i 是 MS 与 AP_i 的距离, 即 $r_i=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}$; M 是 AP 数。

式(17)可以写成矩阵形式,

$$dP=H\#dr$$

(18)

图 1 仿真数据与预测的信号强度之比较

式中,

$$dP = \begin{bmatrix} dP_1 \\ dP_2 \\ \vdots \\ dP_M \end{bmatrix}, dr = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} -\frac{10A_1 x - x_1}{\ln 10 r_1^2} & -\frac{10A_1 y - y_1}{\ln 10 r_1^2} \\ -\frac{10A_2 x - x_2}{\ln 10 r_2^2} & -\frac{10A_2 y - y_2}{\ln 10 r_2^2} \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{10A_M x - x_M}{\ln 10 r_M^2} & -\frac{10A_M y - y_M}{\ln 10 r_M^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

接着,通过应用最小二乘法^[5,6],功率估计误差 dP 导致的定位误差估计如下:

$$d\hat{r} = (H^T H)^{-1} H^T dP \quad (20)$$

假定信号强度的估计误差具有零均值和方差 R_P^2 ,且不同 AP 的误差相互独立,即

$$E[dP_i] = 0, \text{cov}(dP_i, dP_j) = \begin{cases} R_P^2, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, M \quad (21)$$

式中, R_P 是源自式(10)和(16)的预测信号强度标准差,则误差估计 $d\hat{r}$ 的协方差矩阵为

$$\text{cov}(d\hat{r}) = R_P^2 (H^T H)^{-1} = \begin{bmatrix} R_x^2 & R_{xy}^2 \\ R_{xy}^2 & R_y^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

定位误差的标准差估计为

$$R_r = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (23)$$

3.1.2 定位误差的几何分布

定位误差分析的仿真条件与回归分析的基本相同,所不同的是在给定的采样位置上作信号功率的多次测量时采用了数据平滑方法以减少仿真数据的偏差。

假定建筑物内安装了 5 个 AP,其坐标分别是 $AP_1(15m, 15m)$ 、 $AP_2(15m, -15m)$ 、 $AP_3(-15m, -15m)$ 、 $AP_4(-15m, 15m)$ 和 $AP_5(0, 0)$ 。如果某给定位置上的 MS 接收来自这些 AP 的信号,其位置可以用三角测量法或最小二乘估计确定。

图 2(a)、(b)所示分别是用 3 个 AP(AP_1 、 AP_2 、 AP_3)和 5 个 AP(从 AP_1 至 AP_5)进行定位的 R_r 等值线图。如表 2 所示,当部署的 AP 数较多时定位精度可以得到改善。

表 2 定位误差比较

AP 配置	定位误差/m	
	最大	最小
AP_1 、 AP_2	15.98	2.75
AP_1 、 AP_2 、 AP_3	5.64	2.12
AP_1 、 AP_2 、 AP_3 、 AP_4	2.80	2.06
AP_1 、 AP_2 、 AP_3 、 AP_4 、 AP_5	2.80	1.41

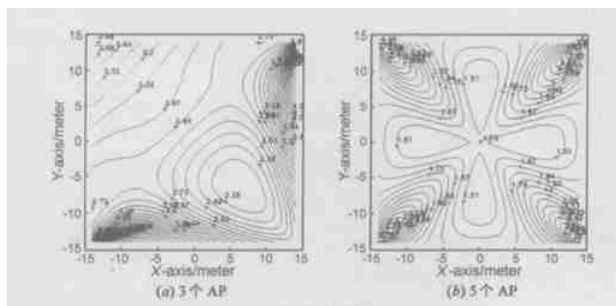


图 2 定位误差的几何分布

4 结束语

从数学分析和仿真试验,我们有理由相信,只要能够构建一种关于室内环境下信号传播的可靠方法,基于信号强度的室内定位就是切实可行的。分析表明,MS 的定位误差受三个因素控制,即(1)回归分析的品质;(2)AP 数及其正确摆放位置;(3)MS 与这些 AP 位置之间的几何关系。仿真分析中得出的相对较高的定位精度令人鼓舞。我们相信,这种基于信号强度的室内定位不仅在 WLAN 环境下有用,而且对于现有的地理定位技术,尤其是基于 GPS 的定位技术也是一个补充,我们知道,当一个 MS 在建筑物内时,GPS 信号是不可靠的。

参考文献:

- [1] Kaveh Pahlavan, Prashant Krishnamurthy, Jacques Beneat. Wideband radio propagation modeling for indoor geolocation applications[J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 36(4): 60-65.
- [2] William G. Fiegel, Neal H. Shepherd, Walter F. Trammell. Vehicle location by a signal attenuation method[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1969, 18(3): 105-109.
- [3] Paramvir Bahl, Venkata N. Padmanabhan. User Location and Tracking in an Indoor Building Radio Network[R]. Redmont, WA, USA: Technical Report MSR2TR29212, Microsoft Research, 1999.
- [4] Hisashi Kobayashi. Modeling and Analysis: An Introduction to System Performance Evaluation Methodology[M]. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1978.
- [5] Harry L. Van Trees. Detection, Estimation, and Modulation Theory (Part 1)[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1968.
- [6] Charles E. Cook, Marvin Bernfeld. Radar Signals: An Introduction to Theory and Application[M]. New York: Academic Press Inc, 1967.

作者简介:



陈永光 男, 1962 年 2 月生于安徽合肥, 总工程师, 研究员, 博士生导师, 1983 年 7 月西北工业大学雷达专业毕业获得工学学士学位, 1988 年 4 月国防科技大学飞行器仪表与测试专业毕业获得工学硕士学位, 1995 年 11 月于国防科技大学通信与电子系统专业毕业获得工学博士学位, 1997 年 11 月从国防科技大学计算机科学与技术博士后科研流动站期满出站, 2000 年 8 月至 2002 年 2 月在美国普林斯顿大学作高级访问学者兼客座研究科学家, 共出版专(译)著两部, 发表论文逾百篇, 获得军事科学优秀成果一等奖 1 项, 部委级科技进步二等奖 3 项、三等奖 2 项, 重点研究方向: 定位理论与技术、电子信息系统试验与仿真技术、电子作战模拟等。



李修和 男, 1975 年 8 月生于四川简阳, 1997 年 7 月解放军电子工程学院雷达对抗指挥专业毕业获得军事学学士学位, 2001 年 6 月解放军电子工程学院军事运筹学专业毕业获得军事学硕士学位, 2004 年 6 月毕业于该院作战指挥专业获得军事学博士学位, 参加过包括国家自然科学基金和国防预研课题在内的多个重大科研项目的开发, 发表论文数十篇, 获得军队科技进步二、三等奖各 1 项, 研究方向: 组网雷达数据融合及对抗仿真、分布式计算机作战仿真、信息作战效能评估和多传感器情报信息融合等。