

一种基于 CSI 的参数无关接入点定位方法

李耀辉 陈 兵

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 211106)

摘 要 随着基于位置的服务的流行,室内定位系统也受到越来越多的关注。基于 WiFi 的室内定位因其开放访问和低成本属性而吸引了大量研究人员目光。通过采用细粒度的信道状态信息 CSI 代替粗粒度的接收信号强度 RSSI 可以减少室内多径效应的影响。采用一种与传播模型参数无关的定位方法——PILM 来对接入点进行空间定位。通过有效 CSI 值与距离关系模型的公式变换,将问题转换为求满足最小向量二范数条件的点的坐标,即用最小二乘法求解。通过在两种典型室内环境的实验验证了系统性能。

关键词 信道状态信息,向量二范数,参数无关空间定位

中图分类号 TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.12.013

Parameter Independent Access Point Positioning Method Based on CSI

LI Yao-hui CHEN Bing

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract With the popularity of location-based services, indoor positioning systems have attracted more and more attention. WiFi-based indoor localization has attracted a number of attention because of its open access and low cost properties. This paper leveraged the fine-grained channel state information instead of RSSI to reduce the influence of indoor multipath effect at the receiver. We used a model of parameter independent of the positioning system called PILM to determine space position. By extracting effective CSI values and the distance relation model to transform formula, the problem is converted to solve the point which satisfies the condition of the two norm of the minimum vector, that is, using the least square method to solve the problem. Experiments on two kinds of typical indoor scenarios verify the system performance.

Keywords CSI, Vector two norm, Parameter independent space location

1 引言

随着互联网的发展和移动终端的普及,人们更加倾向于采用无线接入点来连接智能手机、平板电脑等设备,并且可以搭建自己的无线局域网,而不需要布线或者改变建筑格局,这使得 WLAN 的数量迅速增加,对无线接入点的管理也越来越迫切。而管理无线接入点的一个关键部分是通过它们的信号来确定其位置,即实现 AP 定位。这样做有很多好处,首先有助于找到非法 AP(Rogue Access Point)。非法 AP^[1]是指没有经过网络管理人员的同意或授权,私自或非法搭建的 AP。非法 AP 的问题是随着 WLAN 的出现和发展而逐渐显现出来的,一般根据搭建 AP 的用户的目的可以将其划分为两种:1)内部工作人员为方便工作而私自搭建的 AP,这种 AP 脱离了网络安全系统的监控,会成为非法用户入侵内部网络的途径,存在巨大的安全隐患;2)非法用户采用各类手段使用户接入的 WLAN 瘫痪,然后架设非法 AP,或伪造一个类似的 AP,诱骗用户接入进来并截取用户信息,进而窃取各种机密和隐私。通过 AP 定位可以帮助网络管理员进行更好

的网络管理,识别额外接口的 AP,尤其是在一些涉密单位可以通过 AP 定位来发现和定位无线接入点;同时对普通用户而言,AP 定位可以帮助他们得到无线接入点的位置信息,进而快速连接网络。

现有的室内定位方法的设计思路多是通过利用接收信号强度指示 RSSI 进行的,由于室内环境对信号折射、反射、衍射等的影响,导致其定位精度不高,进而发展出了采用比 RSSI 更细粒度的信道状态信息 CSI 来进行定位。

本文提出一种基于 CSI 的传播模型参数无关定位方法。该方法通过对采集的物理层信道状态信息 CSI 进行加权平均得到有效 CSI 值,利用有效 CSI 值与距离的关系模型,通过公式变形,消除了传播模型中参数变化对定位精度的影响,提高了定位精度。

2 相关工作

CSI 是比 RSSI 更细粒度的信道特征,采用 CSI 进行定位可以充分利用 CSI 的能量、时间、角度和波形信息,其中 CSI 的能量信息更适合用于基于传播模型的定位方法。

到稿日期:2016-08-08 返修日期:2016-12-02

李耀辉(1982-),硕士生,主要研究方向为无线通信、信息安全, E-mail:olive_00001@tom.com;陈 兵(1970-),教授,主要研究方向为计算机网络、无线通信、信息安全。

WU K S 等^[3]利用 CSI 加权平均得到有效 CSI 值,然后基于有效 CSI 值与距离传播模型采用三角方法来进行定位;但是传播模型中参数的确定需要进行大量训练,且参数会随着室内环境变化而发生变化,导致定位结果受到影响。

朱荣等人^[4]对 CSI 进行加权处理后,采用物理层的 CSI 结合 RSSI 作为指纹,采用贝叶斯过滤法进行数据处理,有效地减少了多径影响,提高了接收信号的稳定性,实现了精确稳定的室内定位。邓晓华等^[5]采用指数加权移动平均法对历史数据赋予不同权重,对是否出现干扰进行预测,在检测区域探测到目标之后,使用一种类似指纹匹配的方式实现目标精确定位。AP 一旦部署,其位置通常固定不动,因此基于指纹匹配的定位方法虽然精度较高,但是更适合对移动端进行定位,而不适合对 AP 进行定位。

针对上述问题,本文设计了一种简单实用、精度高的定位方法。首先,采用 CSI 对接入点进行定位,通过加权平均得到有效 CSI 值;然后变换信号传输模型的公式,转换问题,消除参数变化对定位的影响,进而减少工作量,提高定位精度。

3 基于 CSI 的参数无关定位方法

3.1 CSI 概述

1999 年,正交频分多路复用技术 OFDM 被 IEEE 802.11a 采纳为物理层标准。通过 OFDM 可以将无线信号发射器和接收器之间的信道响应信息以信道状态信息(Channel State Information, CSI)的形式从物理层解析出来。在无线通信领域,CSI 是指通信链路的信道属性,它描述了信号在信号发射器和接收器之间的传播过程中的衰减因子,包括散射、环境衰减、距离衰减等信息。

在一个平滑衰减的信道中,信道信息可以通过 OFDM 在频域建模为:

$$y = Hx + n \quad (1)$$

其中, y 和 x 分别是信号接收端和发射端的向量, H 为信道信息矩阵, n 为高斯噪声向量。通过公式可以得到所有副载波的 CSI 计算公式:

$$H = y/x \quad (2)$$

根据接收端底层驱动的不同,CSI 将被相应分成不同的副载波组,因此 CSI 矩阵 H 可以表示为:

$$H = [H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_N] \quad (3)$$

其中, N 为根据驱动被分成的副载波组数,通常 $N = 30$; H_i 为每一个副载波上的 CSI,表示为:

$$H_i = |H_i| e^{j\angle H_i} \quad (4)$$

其中, $|H_i|$ 和 $\angle H_i$ 分别为第 i 个副载波的振幅和相位。

首先,CSI 是物理层特性,在当前的 WLAN 环境中物理层使用 OFDM 能够避免不同子信道之间的干扰,从中解析得到的 CSI 仅受不同副载波的影响,因此非常稳定。

其次,CSI 利用 OFDM,接收端接收到的一个数据包同时包含多个副载波的信息。如果将无线信号传播信道看作一个简单的时间线性滤波器,那么每一条信道的响应脉冲在时间域上的值可以表示为:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{-j\theta_i} \delta(\tau - \tau_i) \quad (5)$$

其中, α_i , θ_i 和 τ_i 分别表示第 i 条路径上的信号的振幅、相位和时间延迟, N 是路径总数, $\delta(\tau)$ 为狄拉克函数,从而可以区

分来自不同路径的信号。图 2 给出了图 1 中 3 条路径的信道响应脉冲情况,可以发现信号经反射、被遮挡等因素干扰后,波形在时间域上出现了延时,并且振幅也有所衰减。

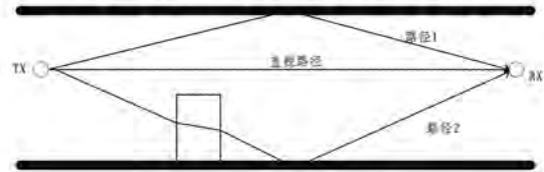


图 1 来自 3 条路径的信号

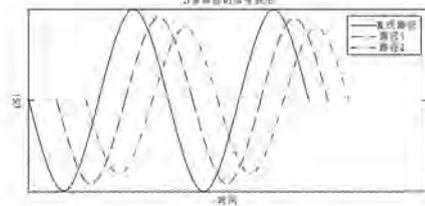


图 2 3 条路径的信号波形

通过上述关于 CSI 的原理和特性分析后可以发现,相对 RSSI 而言,CSI 具有两大优势:1)能够抵抗来自 2.4GHz 频段的窄频带信号的干扰,在静态环境中足够稳定,并且其被干扰时也能够马上做出反应;2)能够分辨来自多条路径的信号,多径效应影响小。

将 CSI 用于室内定位系统可以按照传统方法充分利用 CSI 的能量、时间、角度等特性。

3.2 提取有效 CSI

在将 CSI 应用于室内定位的过程中,首先想到的是使用 CSI 的功率性能。在 WU K S^[3] 的 FILA 系统中,收集到频域的信道响应 CFR 之后,将其进行逆傅里叶变换转换成时域的信道脉冲响应 CIR。CIR 如式(5)所示,它反映了不同时延下的信号强度,由此可以大致区分出视距分量与多径分量。为了得到视距或者接近视距的信息,设定一个阈值(如 CIR 中第一个波峰的 50%),将不足阈值的部分删去,可以消除大部分多径分量的干扰。在经过时域的多径消除之后,重新将信号进行傅里叶变换转换到频域中。一般地,若两个子载波之间的间隔大于相干带宽,则它们将独立地衰落。802.11n 的信道带宽在室内环境下大于相干带宽,因此不同子载波呈现出频率选择性衰落。由于在多个不相关的衰落包络中同时发生深衰落的概率比深衰落发生在一个单一频率的概率低得多,因此为了对抗无线信号的频率选择性衰落,将得到的 30 组子载波组成的 CSI 结合到一起。将 30 组子载波的 CSI 进行加权平均,得到:

$$CSI_{eff} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{f_k}{f_0} \times |H_k| \quad (6)$$

其中, f_0 是中心频率, f_k 是第 k 个子载波的频率, H_k 是第 k 个子载波 CSI 的幅度, $k \in [1, 30]$ 。

在得到 CSI_{eff} 之后,需要研究其与距离之间的关系以实现定位。因为基于 RSSI 的信号传播模型已不适用于 CSI 系统,所以需要一个新的方法来表示 CSI_{eff} 与距离 d 之间的关系。文献[3]给出:

$$d = \frac{1}{4\pi} \left[\left(\frac{c}{f_0 \times |CSI_{eff}|} \right)^2 \times \sigma \right]^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

其中, c 是光速, σ 是环境变量, n 是路径衰落指数。这两个参

数在不同的室内环境中的值各不相同,需要由实际测量得出。环境变量 σ 表示发射端基带到 RF 频段的增益、接收端 RF 频段到基带的增益以及天线增益。路径衰落指数 n 在不同的环境中一般在 2~4 之间取值。

为了测得室内环境中的环境变量 σ 与路径衰落指数 n , 需要进行离线状态下的测量; 对每个 AP 固定位置后, 测量若干个不同距离下的已知位置的 CSI, 将结果代入式(7)中计算出当前环境下的环境变量 σ 与路径衰落指数 n 。由此可解得式(7)中的所有未知数, 根据式(7)便可得出距离 d 与 CSI_{eff} 的关系。得出距离 d 与 CSI_{eff} 的关系之后, 在二维空间就可以用三边定位或者最小二乘法来定位 AP 的位置; 如果是在三维空间中, 则适合使用最小二乘法进行定位。在以传播模型为依据的定位方法中, 对距离的估算是根本, 此时传播模型参数的选择非常重要, 一般的做法是要么选取经验参数, 要么进行多点实地测量(设置锚点)并对参数进行训练, 然后采用最小二乘法进行参数拟合。

3.3 参数无关方法

经测量发现, 环境变量 σ 与路径衰落指数 n 在不同的时间和环境中都会发生改变, 由于环境的变化, 上述方法得到的参数都会发生改变, 从而影响定位精度。因此, 本文参考 GPS 采用伪距定位的方法对传播模型进行线性化^[2]。对传播模型式(7)进行变形, 然后两边取对数, 可得如下公式:

$$n \log d = 2 \log c - 2 \log f_0 - n \log(4\pi) + \log \sigma - 2 \log CSI_{eff}$$

令 $l_i = \log d_i$, $a = 2 \log c - 2 \log f_0 - n \log(4\pi) + \log \sigma$, $s_i = \log CSI_{eff}$, 则上式可以改写为: $nl_i = a - 2s_i$ 。

在三维空间中, 理论上至少需要 4 个点才能确定发射源的位置。用 $p_0(x_0, y_0, z_0)$ 表示发射源的坐标, $p_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=1, 2, 3, 4, \dots$) 表示测量点的坐标, 则对任意 4 个测量点 p_i, p_j, p_k, p_m , 有

$$\begin{cases} \frac{s_i - s_j}{s_j - s_k} = \frac{l_j - l_i}{l_k - l_j} \\ \frac{s_j - s_k}{s_k - s_m} = \frac{l_k - l_j}{l_m - l_k} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (s_j - s_k)l_i + (s_k - s_i)l_j + (s_i - s_j)l_k = 0 \\ (s_k - s_m)l_j + (s_m - s_j)l_k + (s_j - s_k)l_m = 0 \end{cases}$$

其中, s_i 表示在 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 点处测得的有效 CSI 值, $l_i = \log [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}$ 表示测量点到发射源的距离的对数。为此, 构造相应的矩阵 S, L 。

$S =$

$$\begin{bmatrix} s_2 - s_3 & s_3 - s_1 & s_1 - s_2 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & s_{i+1} - s_{i+2} & s_{i+2} - s_i & \dots & s_i - s_{i+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & s_{m-1} - s_m & s_m - s_{m-2} & s_{m-2} - s_{m-1} \end{bmatrix}_{(m-2) \times m}$$

其中, 矩阵 S 中的元素可以表示为:

$$s_{ij} = \begin{cases} s_{i+1} - s_{i+2}, & j=i \\ s_{i+2} - s_i, & j=i+1 \\ s_i - s_{i+1}, & j=i+2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

L 矩阵表示如下:

$$L(x, y, z) = \begin{pmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_m \end{pmatrix} = \dots = \begin{pmatrix} \dots \\ \log [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2]^{\frac{1}{2}} \\ \dots \end{pmatrix}_{m \times 1}$$

因此, 发射源定位问题可以转化为求解 $(x, y, z) \in \Omega$, 使得目标函数最小, 目标函数定义为:

$$E = \|S \times L\|_2$$

满足条件的点 $p_0(x_0, y_0, z_0)$ 即为 AP 位置的最优估计, 即:

$$p_0(x, y, z) = \min_{(x, y, z) \in \Omega} E$$

4 实验结果

本节首先介绍实验采用的设备, 然后介绍实验环境, 最后给出实验结果, 并对性能进行评价。在性能评估中, 使用扩展的 FILA 方法(称为 FILA-3)作为基准, 以误差平方和作为度量标准来验证所提的 PILM 方法。

4.1 实验设置

4.1.1 硬件配置

采用市场上商用的小米路由器 mini 作为 AP, 该路由器具有 2 根外置的双频全向企业级 PCB 阵列天线。接收端主机采用 Intel NUC D54250WYKH, 该主机采用第四代 Intel 核心处理器 i5, 安装 Ubuntu 10.04 操作系统, 配置 Intel Wi-Fi Link 5300(iwl5300) 802.11n 网卡, 采用 Intel 相关固件和开源的 iwlwifi 无线驱动, 有三根全向接收天线。利用 CSI Tool 集成工具包可以从网卡中收集 CSI 值^[9], 并在 MATLAB 中进行处理。把设备放置在带滚轮的桌子上, 以保证其移动性。

4.1.2 实验场景

分别在学校的空房间和有人的实验室内进行测量, 通过模拟大厅、办公室等室内环境对提出的方法的性能进行验证, 发射源放置在 2m 的高处, 分别在地面和高约 1m 的桌面进行测量。场景如下:

(1) 12m * 10m * 4m 的空旷房间

首先在 12m * 10m * 4m 的空旷房间进行测量, 所有传输路径都存在直视路径, 即直视路径占主要地位, 可以忽略多径反射或额外的干扰。

(2) 10m * 10m * 4m 的有人房间

房间布局如图 3 所示。



图3 有人的房间的布局

实验在工作日进行,模拟正常的办公室或者有人的大厅,测量点位于桌面或者地面,部分测量点与 AP 之间有挡板或者桌子阻隔。

4.2 性能评估

系统旨在实现室内的快速精确定位,定位的两个重要指标是精度和定位延时。FILA 在二维空间中采用三角形方法来定位,为了对比,把它扩展到三维空间中,采用最小二乘法来进行定位。把扩展后的 FILA 称为 FILA-3。

4.2.1 精度

室内定位的误差主要来自于复杂室内环境引起的反射、折射、绕射等,多径传输的信号在接收端进行叠加,基于 CSI 信息,利用频率多样性对频率选择衰减进行补偿,以减轻多径效应的影响。通过问题转化,可以减小因环境变化引起的传播模型参数变化而导致的误差。

在实验中,固定一个需要测量定位的 AP,然后将配置有 iwl5300 网卡的电脑放置在房间的不同位置、不同高度分别进行测量。图 4 给出了在 10 个不同位置进行测量的累积误差分布。在空房间中 90% 的数据点的定位误差在 2.5m 内,40% 的精度在 1.5m 内;在有人的房间中 90% 的数据点的定位误差在 3m 内,30% 的精度在 2m 内。

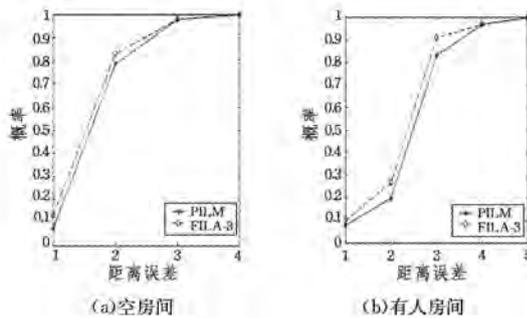


图 4 不同环境下累积概率密度分布

在以上两种典型室内场景中,PILM 的平均定位精度分别可以达到 1.2m 和 2.2m。

实验测量的结果误差如图 5 所示。

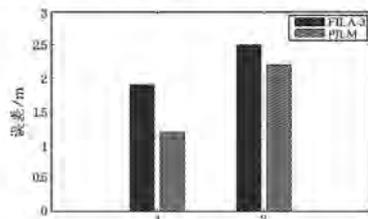


图 5 误差对比

4.2.2 时延

PILM 的时延主要包括两个阶段:归一化阶段和定位阶段。归一化阶段主要是测量和计算有效的 CSI 值,相比于 FILA-3,PILM 减少了传输模型中的参数训练阶段,有效地缩短了定位需要的时间。特别地,在一个陌生环境中进行定位时,

所提方法可以直接使用,而不需要参数训练。在定位阶段,因为是在空间中进行定位,平面中的三角形定位方法已经不适用,因此在两种方法中都采用了最小二乘法进行定位,PILM 的时间与 FILA-3 大致相同。当环境改变时,不需要重新进行参数训练,PILM 可以直接进行定位,减少了总的定位时间,并能降低由参数变化引起的定位误差。

结束语 基于位置的服务在日常生活中变得越来越重要,对在日常活动中占 80% 左右的室内定位进行研究具有现实意义和广泛的应用前景。文章利用无线信号的频率多样性特性以及更加精细化的信道状态信息 CSI 构建了 PILM 室内定位系统。在 PILM 室内定位系统中,将一个数据包中多载波 CSI 值处理为有效 CSI 值 CSI_{eff} ,然后对 CSI_{eff} 与距离关系的传输模型公式进行线性化,消除了模型参数对定位的影响,这种方法既不需要参数训练,也避免了因环境变化引起参数变化而产生的误差,减少了定位时间,提高了定位精度。

用商用标准的 802.11n 网卡和 mini PC 对系统进行了实现,并分别在空旷房间和有人的房间进行了实验,用最小二乘法对接入点进行了室内定位。下一步的工作方向是结合 CSI 的幅度与其他信息来提高定位精度,同时,尽量在装有 802.11n 芯片组的智能手机中实现 PILM 系统。

参考文献

- [1] LE T M, LIU R P, HEDLEY M. Rogue access point detection and localization[C]//2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2012; 2489-2493.
- [2] BAI Y, YU L, XIE C S, et al. A Model-independent Fast Localization of WIFI Access Point[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(2): 220-223. (in Chinese)
- [3] 白云, 喻莉, 谢长生, 等. 一种传播模型无关的快速 WiFi 访问点定位算法[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(2): 220-223.
- [4] WU K S, XIAO J, et al. FILA: Fine-grained Indoor Localization [C]//INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE. IEEE, 2012; 2210-2218.
- [5] ZHU R, BAI G W, SHEN H, et al. Bayesian filtering based CSI indoor localization method [J]. Computer Engineering & Design, 2015, 36(3): 567-571. (in Chinese)
- [6] 朱荣, 白光伟, 沈航, 等. 基于贝叶斯过滤法的 CSI 室内定位方法 [J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(3): 567-571.
- [7] DENG X H, ZHANG H X, SHEN X F. Passive Indoor Positioning and Target Counting Based on CSI[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014. (in Chinese)
- [8] 邓晓华, 张怀相, 申兴发. 基于 CSI 的被动式室内定位与目标计数方法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- [9] HALPERIN D, HU W, SHETH A, et al. Tool Release: Gathering 802.11n Traces with Channel State Information[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2011(41): 53.