

# 室内 WLAN 定位中位置指纹优化的接入点部署方法

周牧, 蒲巧林, 田增山

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

**摘要:** 提出了一种新的室内 WLAN 定位中指纹优化的接入点 (AP) 部署方法。首先在最大化不同位置指纹信号强度间欧式距离的基础上构造注水优化模型, 然后经过多次迭代的过零调整及离散调整处理, 得到各 AP 候选位置的非负离散权重, 最后根据最大平均权重准则, 合理部署 AP 进而优化位置指纹。实验表明, 所提方法能够获得较高的位置指纹定位精度及较低的 AP 优化位置搜索时间开销。

**关键词:** WLAN; 室内定位; 接入点部署; 位置指纹优化; 注水优化模型

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

## Location fingerprint optimization based access point deployment in indoor WLAN localization

ZHOU Mu, PU Qiao-lin, TIAN Zeng-shan

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** A novel access point (AP) deployment approach by optimizing the location fingerprints in indoor WLAN localization was proposed. Firstly, constructing the water-filling optimization model based on the maximum of the Euclidean distance of RSS between every two location fingerprints. Secondly, after the process of the iterative cross-zero adjustment and discrete adjustment, the nonnegative and discrete weights of candidate AP locations were obtained. Finally, by using the criterion of maximum average weight, the APs, and consequently optimize the location fingerprints were deployed rationally. The experimental results demonstrate that the proposed approach is able to achieve high location fingerprint based localization precision, as well as consume low time overhead involved in the optimal AP location searching.

**Key words:** WLAN; indoor localization; AP optimization; location fingerprint optimization; water-filling model

### 1 引言

随着可移动设备得到越来越广泛的应用以及无线网络的普及, 用户对信息即时性和就地性的需求越来越强烈, 因此, 基于位置的服务也备受关注。目前较为流行的无线定位系统有全球定位系统 (GPS)、蜂窝定位系统、蓝牙定位系统、射频识别 (RFID) 定位系统、ZigBee 定位系统以及 WLAN 定位系统。其中, GPS 定位系统应用最为广泛, 室外定位精度较高, 然而在障碍物较多的遮蔽或室内环境下, 如高楼林立的城市街道或室内停车场, 卫

星信号会急剧衰落, 从而导致 GPS 定位系统难以正常工作; 同时, 蜂窝无线定位系统的定位精度较低, 室外定位误差通常大于 50 m, 这对于定位精度要求较高的室内场景则无法适用; 而蓝牙、RFID 和 ZigBee 等定位技术一般较为适用于近距离定位环境。与此同时, 个人移动泛在网络的不断普及给了 WLAN 定位技术很大的发展机会。

目前, 主要的 WLAN 定位技术通常分为以下 4 类: 到达时间 (或时间差) 定位、到达角度 (或角度差) 定位、传播模型定位以及位置指纹定位。其中, 位置指纹定位由于定位精度较高且无需添加额

**收稿日期:** 2015-10-29

**基金项目:** 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (IRT1299); 国家自然科学基金资助项目 (61301126, 61471077); 重庆市科委重点实验室专项经费资助项目 (CSTC)

**Foundation Items:** The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299); The National Natural Science Foundation of China (61301126, 61471077); The Special Fund of Chongqing Key Laboratory (CSTC)

外的硬件设备，从而得到了较为广泛的应用<sup>[1]</sup>。基于位置指纹的定位方法主要分为 2 个阶段：离线阶段和在线阶段。离线阶段，在定位目标区域内选择若干参考点<sup>[2]</sup>，并在每个参考点处测量来自不同接入点（AP, access point）的信号强度值，以建立位置指纹数据库；在线阶段，利用合适的定位算法将接收端实时测量得到的信号强度值与位置指纹数据库中预先保存的位置指纹数据进行匹配，来估计终端位置。然而，这种定位方法存在的主要问题是：1) 如何在较长时间范围内保持位置指纹数据库的可靠性，以及利用该数据库进行实时定位的能力；2) 运用何种匹配规则寻找到高质量相似 RSS 指纹集<sup>[3]</sup>。

由于室内环境的复杂多变，位置指纹定位方法的精度性能受多种因素的影响。Baala 等<sup>[4]</sup>通过实验分析表明，AP 的个数及部署方法对定位精度有较大影响。目前对于 WLAN 接入点的部署方法主要有两种，一种是需要现场勘测与调研，在对目标环境进行调查测量获得必要的参数后再进行 AP 部署方案的设计。由于该方法需要花费大量的人力、财力和时间，所以成本较高；另一种方法通过模拟目标环境，借助计算机仿真环境中所需参数辅助设计 AP 部署方案，其主要是通过建立数学模型或目标函数，并利用相关搜索算法求解 AP 的最佳数目和放置位置。对比之下，借助计算机辅助设计 AP 部署方案的方法更有效且节约成本，最为重要的是，可以根据建筑物的结构随时调整方案。因此，借助计算机辅助设计成为目前主流的 AP 部署方法。

## 2 相关工作

在现有研究中，仅有少量文献对 AP 部署优化方法进行了研究<sup>[5-11]</sup>，其主要考虑的因素有：信号覆盖范围<sup>[5]</sup>、网络吞吐量<sup>[6]</sup>、通信质量<sup>[7]</sup>以及信号分布差异性<sup>[8]</sup>等因素。Kim 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于位置指纹信号强度差异性的 AP 组网方法，同时，作者通过大量的实验表明，不同位置指纹信号强度间的距离对定位精度有较大影响。Eisenblatter 等<sup>[9]</sup>在保证网络平均吞吐量的条件下对网络所需的最小 AP 数进行了研究。Chen 等<sup>[10]</sup>提出 Coverage-FD 算法，该方法在保证通信覆盖的同时最大化参考点间的差异性，其主要分为 2 个阶段，第一阶段的主要目标是寻找能最大化覆盖范围的所有 AP 部署方式，第二阶段则通过在确定的 AP 部署方式中以最少相似参考点数为目标，对 AP 的部署方式做进一步优

化。此外，Chen 等<sup>[11]</sup>提出一种最大—最小 RSS 距离的 AP 部署方法，通过构造不同 AP 布置方式下的两两参考点间信号强度的欧式距离矩阵，每个距离矩阵中都对应一个最小值，选择最小值最大的矩阵所对应的 AP 布置方式作为最优 AP 部署。

关于如何提高位置指纹信号强度差异性的各项研究中，现有方法主要集中在使用某种搜索算法，得到一个使与信号强度差异性相关的目标函数达到极值的组合解，其主要缺陷是对搜索算法的依赖程度较高且所需的时间开销较大。针对这一问题，本文提出了一种基于注水优化模型的室内 WLAN 接入点部署方法，其在提高位置指纹信号强度差异性的基础上，通过构造注水优化模型，利用改进的快速离散注水算法计算不同 AP 候选位置的权重，进而根据权重的大小设计最优的 AP 部署方案。实验表明，该方法在获得较高定位精度的同时，还具有较低的计算时间开销。

## 3 基于快速离散注水算法的 AP 部署方法

### 3.1 基于位置指纹定位的注水优化模型

传统的注水优化模型主要用于正交频分多路复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）信道中的功率分配。在实际的多信道无线通信系统中，由于频率选择性差异，不同子信道具有不同的传输能力，若按照传统做法固定地给每个子信道分配相同功率，则会造成系统资源的浪费，严重时甚至会造成系统传输错误。因此，根据信道情况自适应地为每个子信道分配不同的功率，可以使系统性能达到最优，其原理如下。

香农定理给出了信道容量与信噪比及带宽的关系，其表达式为

$$C = B \log \left( 1 + \frac{P}{N_0} \right) \quad (1)$$

其中， $C$  为信道容量， $P$  为信号功率， $N_0$  为噪声功率， $B$  为带宽， $\frac{P}{N_0}$  为信噪比的 SNR 计算式。

假设有子信道 1 和子信道 2，其功率分别为  $p_1$  和  $p_2$ ，且  $P = p_1 + p_2$ ，则根据式(1)，可得其信道容量的表达式为

$$\begin{aligned} C &= B \log \left( 1 + \frac{p_1 + p_2}{N_0} \right) \\ &= B \log \left( 1 + \frac{p_1}{N_0} \right) + B \log \left( 1 + \frac{p_2}{p_1 + N_0} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,子信道 1 的功率  $p_1$  产生了一个容量,但同时等效成了对子信道 2 的噪声,因此如何在给定的总传输功率下进行功率分配是实现系统容量最大化的一项关键任务。

注水 (water-filling) 算法是多信道无线通信系统中求解容量最大化问题中的一种经典算法。在多用户 OFDM 系统中,由于传输路径的不同,使相对于某一用户衰落严重的子信道,对于其他用户的衰落并不一定严重。因此,采用注水优化模型的自适应资源分配技术,能使系统达到最大吞吐量。注水优化模型是在总功率一定的条件下,根据信道状况对发送功率进行自适应分配,通常情况下,在信道状况好的时刻,多分配功率,相反,则少分配功率,从而实现系统吞吐量的最大化。衡量各个子信道状况优劣的主要标准通常选择各个子信道的信噪比<sup>[12]</sup>,其数学模型如下。

设含有  $N$  个子信道的无线通信系统,其每个子信道的带宽为  $B$ ,根据香农定理,可以将信道容量最大化描述为

$$\begin{cases} \max \sum_{n \in N} B \log(1 + SNR_n p_n) \\ \sum_{n \in N} p_n = P_T \\ p_n \geq 0, n = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $N$  是子信道个数,  $B$  是每个子信道的带宽,  $SNR_n$  是第  $n$  个子信道的信噪比,  $p_n$  是当吞吐量达到最大时系统分配给第  $n$  个子信道的功率,  $P_T$  是发射功率。

在通常情况下的 AP 部署优化中,本文根据使某个目标函数最大化或最小化来选择最优 AP 部署位置,即可看作被选择的候选 AP 位置赋值为 1,而未被选择的候选 AP 位置赋值为 0。由此可将注水优化模型的概念应用到室内 WLAN 定位 AP 部署中。即根据不同候选 AP 位置对目标函数所作贡献的大小分配不同的权重。这与传统连续功率分配不同的是,候选 AP 位置分配的权重是离散且不大于 2 (即其值为 1, 或为 0) 的,其原因是: 1) 每个 AP 候选位置处放置 AP 的个数是离散的; 2) 权重位于相同量化级的 AP 候选位置对应相等的优化模型目标函数值; 3) 现实 AP 部署中,同一位置不能部署多个 AP。

当注水优化模型应用到 AP 部署时,把发射功率看作是 AP 个数  $W_T$ ,各个待分配功率的子信道看

作是各个 AP 的候选位置,第  $n$  个子信道的信噪比  $SNR_n$  看作是若将 AP 放置在第  $n$  个候选位置时不同位置指纹信号强度间欧式距离平方的和  $\gamma_n$ ,分配给各个子信道的功率看作是分配给各个 AP 候选位置的权重  $w_n \in \{1, 0\}$ ,其中,  $N$  是 AP 候选位置个数。与传统注水优化模型不同,分配给各个 AP 候选位置的权重是离散且不大于 2 的。当 AP 放置在第  $n$  个 AP 候选位置时,不同位置指纹信号强度间欧式距离平方的和计算如下

$$\gamma_n = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M [P_i(n) - P_j(n)]^2 \quad (4)$$

其中,  $M$  为参考点个数,  $P_i(n)$  和  $P_j(n)$  分别表示在参考点  $i$  和  $j$  处接收到的来自第  $n$  个 AP 候选位置处放置 AP 的信号强度。本文设定的优化模型目标函数为

$$\begin{cases} (w_1, \dots, w_n) = \arg \max \sum_{n=1}^{W_T} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M [P_i(n) - P_j(n)]^2 \\ \text{s.t. } w_n \in \{1, 0\} \quad (n = 1, \dots, N) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $W_T$  为 AP 个数,  $(w_1, \dots, w_n)$  表示在当前 AP 部署方式下第  $n$  个 AP 候选位置的 AP 个数。将式(4)代入式(5),可得

$$\begin{cases} (w_1, \dots, w_n) = \arg \max \sum_{n=1}^{W_T} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M [P_i(n) - P_j(n)]^2 \\ = \arg \max \sum_{n=1}^{W_T} \gamma_n \\ \text{s.t. } w_n \in \{1, 0\} \quad (n = 1, \dots, N) \end{cases} \quad (6)$$

根据对数函数的单调性及  $w_n$  的非负性,利用式(3)和式(6),构造式(7)所示的基于位置指纹定位的注水优化模型。

$$\begin{cases} \{w_1, \dots, w_n\} = \arg \max \left\{ \sum_{n=1}^N \log(1 + \gamma_n w_n) \right\} \\ \text{s.t. } \sum_{n=1}^N w_n = W_T \\ w_n \in \{1, 0\} \end{cases} \quad (7)$$

### 3.2 AP 部署优化

考虑模型求解的一般性,将式(7)修正为

$$\begin{cases} \max f = \sum_{n=1}^N \log(1 + \gamma_n w'_n) \\ \sum_{n=1}^N w'_n - W_T = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $w'_n$  是模型修正后不考虑权重非负离散性及其值不大于 2 的约束时, 分配给各个 AP 候选位置的 AP 个数。式(8)是一个典型的求解约束条件极值的问题, 于是, 利用拉格朗日乘数法<sup>[13]</sup>, 构造得

$$L = \sum_{n=1}^N \ln(1 + \gamma_n w'_n) - \mu \left( \sum_{n=1}^N w'_n - W_T \right) \quad (9)$$

其中,  $\mu$  为拉格朗日乘子。

求导  $\frac{\partial L}{\partial w'_n} = 0$ , 则有

$$\frac{\partial L}{\partial w'_n} = \frac{1}{\ln 2} \frac{\gamma_n}{1 + \gamma_n w'_n} - \mu = 0 \quad (10)$$

由式(10)可得

$$w'_n = \frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\mu} - \frac{1}{\gamma_n} \quad (11)$$

可见, 对  $w'_n$  的求解等价于求解拉格朗日乘子。一般的求解算法主要通过迭代运算<sup>[14]</sup>来逼近  $\mu$ , 但需经多次迭代运算才能求出目标函数最大化的最优解, 目前研究主要集中在如何减少迭代次数和寻求运算量较小的次优解。魏飞<sup>[15]</sup>提出一种迭代算法, 通过交替进行对偶变量更新与迭代注水运算求解最大目标函数, 该方法具有快速收敛的特点。Ling 等<sup>[16]</sup>则利用快速注水算法来降低迭代运算所需的时间开销。基于上述研究, 本文提出了一种快速离散注水算法, 其步骤如下。

**step1** 求解分配给各个 AP 候选位置的非负连续权重  $W'_n$ , 具体方法如下。

把式(11)改写为

$$\frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\mu} = w'_n + \frac{1}{\gamma_n}, (n=1, \dots, N) \quad (12)$$

即

$$\begin{cases} \frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\mu} = w'_1 + \frac{1}{\gamma_1} \\ \frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\mu} = w'_2 + \frac{1}{\gamma_2} \\ \dots \\ \frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\mu} = w'_N + \frac{1}{\gamma_N} \end{cases} \quad (13)$$

由于  $\mu$  为常量, 上式相加, 则有

$$N \left( \frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\mu} \right) = \sum_{n=1}^N w'_n + \sum_{n=1}^N \frac{1}{\gamma_n} \quad (14)$$

根据式(8)和式(14), 得

$$\frac{1}{\ln 2} \frac{1}{\mu} = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N w'_n + \sum_{n=1}^N \frac{1}{\gamma_n} \right) = \frac{1}{N} \left( W_T + \sum_{n=1}^N \frac{1}{\gamma_n} \right) \quad (15)$$

由式(15)可得

$$w'_n = \frac{1}{N} \left( W_T + \sum_{n=1}^N \frac{1}{\gamma_n} \right) - \frac{1}{\gamma_n} \quad (16)$$

此时, 考虑如下 2 种情况。

1) 所有的  $w'_n$  都大于 0。

由于  $w'_n$  满足非负性, 则直接把值赋给  $W'_n$ , 即  $W'_n = w'_n$ 。

2)  $w'_n$  不全大于 0。

首先, 将  $\{w'_n\}$  进行降序排列, 并记为  $W_1^* \geq \dots \geq W_N^*$ , 不妨假设  $W_n^* \geq 0 (n=1, \dots, k)$ ,  $W_n^* < 0 (n=k+1, \dots, N)$ 。将与  $\{W_n^*\}$  对应的排序前的  $\{w'_n\}$  的下标号按顺序存入集合  $I$  中, 即得  $I = \{I_n\}$ 。

其次, 令  $W_n^* = 0 (n=k+1, \dots, N)$ , 为了保持  $W_T$  不变, 将前  $k$  个  $W_n^* (n=1, \dots, k)$  的取值分别减少  $\frac{1}{k} \sum_{n=k+1}^N (-W_n^*)$ , 该过程称为过零调整, 具体描述如下。

对于任意给定的参数  $\Delta$ , 有  $0 \leq \Delta \leq \frac{W_T}{N}$ , 令

$\{w'_n\}$  和  $\{w''_n\}$  分别为满足约束条件  $\sum_{n=1}^N w'_n = W_T$  和

$\sum_{n=1}^N w''_n = W_T - N\Delta$  下关于目标函数式(8)的解。于是,

由式(16)可得

$$w''_n = \frac{1}{N} \left( W_T - N\Delta + \sum_{n=1}^N \frac{1}{\gamma_n} \right) - \frac{1}{\gamma_n} \quad (17)$$

从而, 有

$$w''_n = \frac{1}{N} \left( W_T - \sum_{n=1}^N \frac{1}{\gamma_n} \right) - \frac{1}{\gamma_n} - \Delta = w'_n - \Delta \quad (18)$$

经第一次过零调整后, 前  $k$  个  $W_n^* (n=1, \dots, k)$  的取值可能出现小于 0 的情况, 于是, 需重新对  $\{W_n^*\}$  进行排序并重复上述过零调整过程, 直到  $W_n^* \geq 0 (n=1, \dots, N)$ 。

最后, 根据集合  $I$ , 得到分配给各个 AP 候选位置的非负连续权重  $W'_n = W_n^*$ 。

**step2** 求解分配给各个 AP 候选位置的非负离散权重, 具体方法如下。

将  $\{W_n^*\}$  进行降序排序, 并记为  $W_1^* \geq \dots \geq W_N^*$ , 同时, 将与  $\{W_n^*\}$  对应的排序前的  $\{W_n^*\}$  的下标号按

顺序存入集合  $J$  中, 即  $J = \{J_n\}$ 。此时, 考虑如下 2 种情况。

1)  $W_1^* < 1$ 。

令  $W_n^* = 1 (n=1, \dots, W_T)$  且  $W_n^* = 0 (n = W_T + 1, \dots, N)$ , 然后, 根据集合  $J$ , 得到分配给各个 AP 候选位置的非负离散权重  $w_{j_n} = W_n^* (n=1, \dots, N)$ 。

2)  $W_1^* \geq 1$ 。

不妨假设  $W_n^* \geq 1 (n=1, \dots, k)$  且  $W_n^* < 1 (n = k+1, \dots, N)$ , 考虑在现实 AP 部署中, 同一位置不能部署多 AP, 将前  $k$  个  $W_n^* (n=1, \dots, k)$  分别取值为 1 存入  $W_n^{**}$  中, 即有

$$W_n^{**} = 1 (n=1, \dots, k) \quad (19)$$

为了保持  $W_T$  不变, 将后  $N-k$  个  $W_n^* (n=1+k, \dots, N)$  的取值分别增加  $\frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^k (W_n^* - 1)$  存入  $W_n^{**}$  中。该过程称为离散调整。同样地, 经过第一次离散调整后, 后  $N-k$  个  $W_n^{**} (n=k+1, \dots, N)$  的取值可能出现大于 1 的情况, 于是, 重新对  $\{W_n^{**}\}$  进行排序并重复上述离散调整过程直到  $W_n^{**} = 1 (n=1, \dots, p)$  且  $0 \leq W_n^{**} < 1 (n=p+1, \dots, N)$ 。最后, 为了得到各 AP 候选位置的非负离散权重  $w_n \in \{1, 0\}$ , 将考虑如下 2 种情况: 当  $W_n^{**} = 0 (n=p+1, \dots, N)$  时, 令  $w_{j_n} = W_n^{**} (n=1, \dots, N)$ ; 当  $0 < W_n^{**} < 1 (n=p+1, \dots, N)$  时, 令  $w_{j_n} = W_n^{**} (n=1, \dots, p)$ ,  $w_{j_n} = 1 (n=p+1, \dots, p+W_T - \sum_{n=1}^p W_n^{**})$  且  $w_{j_n} = 0 (n=p+W_T - \sum_{n=1}^p W_n^{**} + 1, \dots, N)$ 。

通过以上步骤, 可以得到分配给各 AP 候选位置的非负离散权重  $w_n$ , 从而选择具有最大平均权重的  $W_T$  个 AP 候选位置作为 AP 部署优化位置。该算法流程如图 1 所示。

#### 4 实验结果与分析

下面将通过实验分析本文提出的基于注水优化模型的 AP 部署方法在位置指纹定位精度及时间开销方面的性能。为了验证本文方法的性能, 实验环境分为仿真实验环境及真实实验环境。首先通过构造与实际建筑结构相似的仿真环境, 运用计算机辅助优化 AP 部署, 得到仿真环境下本文 AP 部署方法下的定位性能。然后通过真实的实验环境进一步验证本文 AP 部署方法的性能。图 2 展示了仿真

实验环境的平面结构, 图 3(a)和图 3(b)分别展示了真实实验环境的平面结构及现场图, 目标区域尺寸均为  $65.0 \text{ m} \times 18.5 \text{ m}$ , 其包含 4 个子区域且均匀标记 327 个参考点, 区域 1、2 和 4 中参考点以  $0.6 \text{ m}$  为间隔均匀分布; 区域 3 中参考点以  $0.8 \text{ m}$  为间隔均匀分布。实验环境中选取 5 个 AP 候选位置, 且分别被表示为 AP1、AP2、AP3、AP4 和 AP5。实验及仿真环境的主要区别在于位置指纹图的构建方法, 在仿真环境下, 各参考点所对应的信号强度值由室内信号传播 Keenan-Motley 模型<sup>[17]</sup>计算得到, 本文取衰减因子为 2, 墙壁衰减因子为 10。而在真实实验环境下, 本文部署 5 个型号为 D-link-2360 的 AP, 发射功率设为  $250 \text{ mW}$ , 利用自主开发的手机软件实测各参考点处来自不同 AP 的信号强度值, 如图 4 所示, 实验环境具体参数如表 1 所示。

表 1 实验环境参数设置

参数	仿真环境	真实环境
载波频率	2.4 GHz	2.4 GHz
候选 AP 位置数	5	5
参考点个数	327	327
测试点个数	150	150
衰减因子	2	-
墙壁衰减因子	10	-
发射功率	250 mW	250 mW

表 2 和表 3 给出了真实及仿真实验环境下所有 AP 部署位置 (即 C1, C2, ..., C10) 及本文所提方法得到的 AP 部署位置 (即 C10), 由于 2 种环境下构建指纹数据库的方法不同, 所得到的最优 AP 部署位置也不相同。

图 5 给出了仿真及和真实实验环境下不同 AP 部署位置的平均权重及对应优化模型目标函数值。虽然 2 种实验环境下的 AP 最优部署方式不同, 但在相同 AP 个数条件下, 平均权重与优化模型目标函数值均近似成正比关系, 且当平均权重最大时, 对应的目标函数值取最大值, 由此证明本文提出的快速离散注水算法能够得到目标函数的全局最优解。

如下利用平均定位误差及误差累积分布来描述系统的定位精度。图 6(a)和 6(b)分别给出了在仿真及真实实验环境下不同 AP 部署位置所对应的平

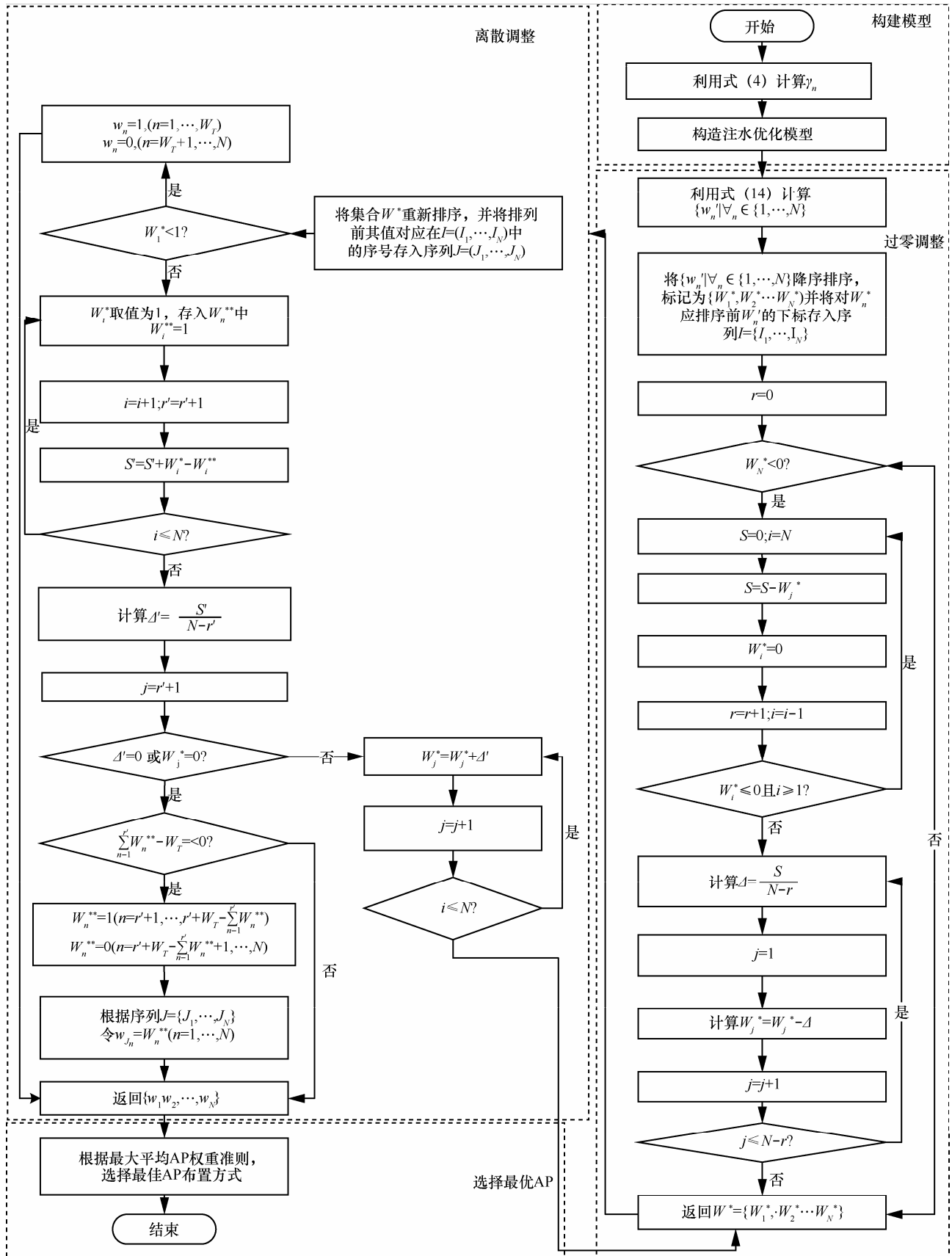
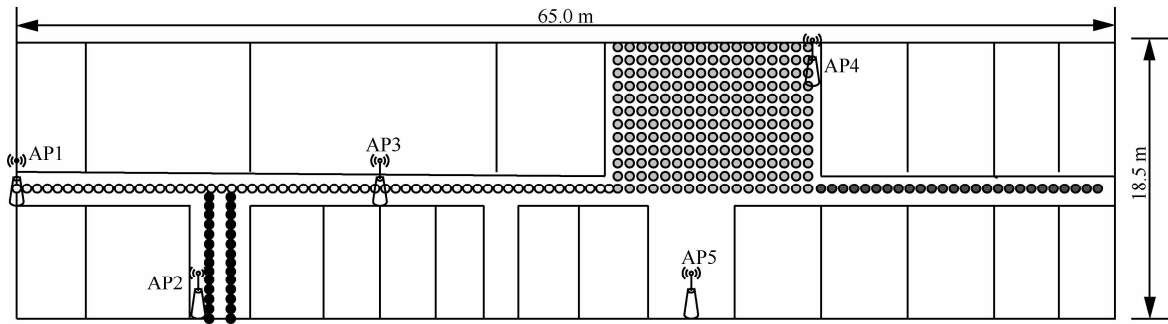
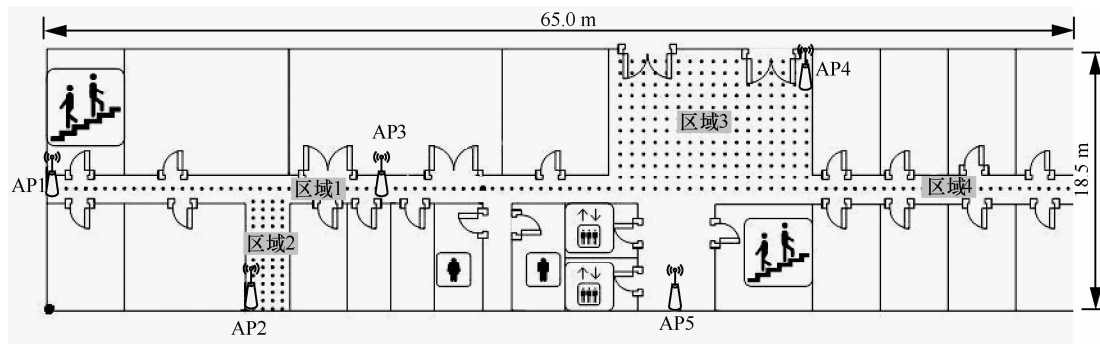


图 1 AP 优化部署方法流程



○ 区域1中的参考点 ● 区域2中的参考点 ○ 区域3中的参考点 ● 区域4中的参考点

图 2 仿真实验环境的平面结构



(a) 真实实验环境的平面结构

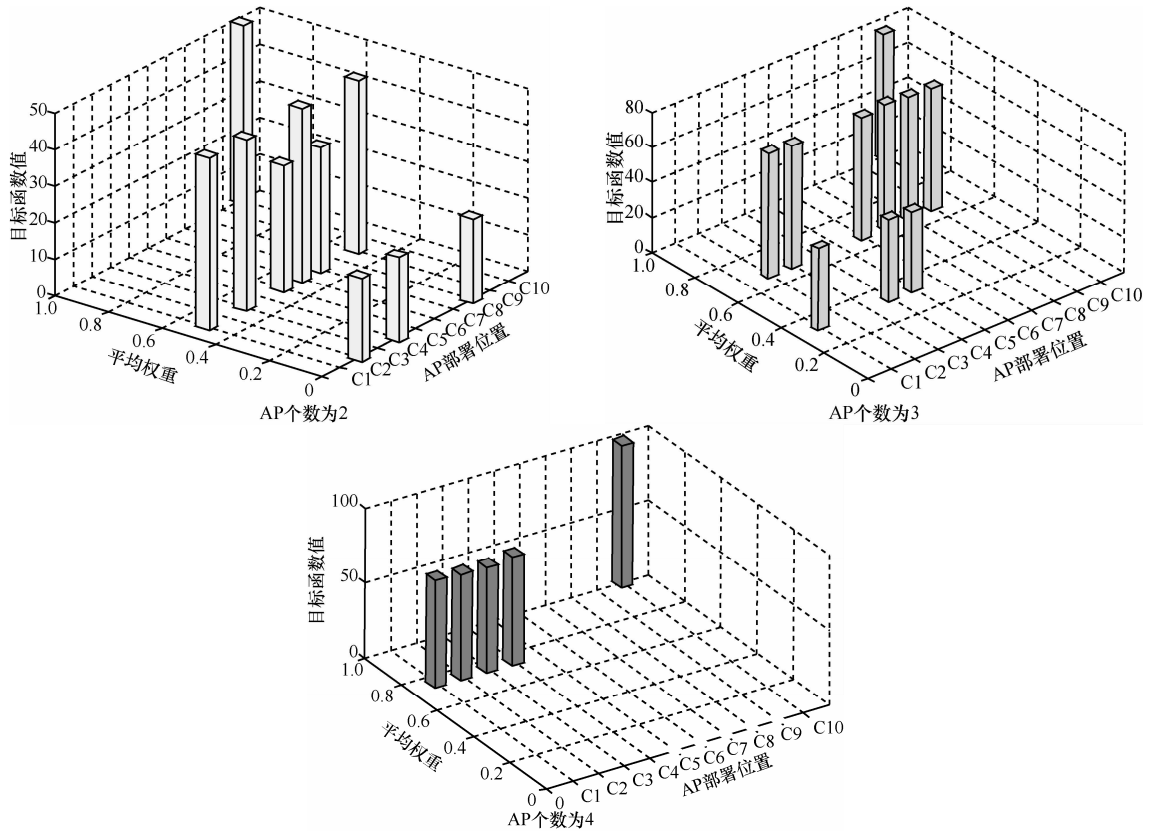


(b) 真实实验环境的现场

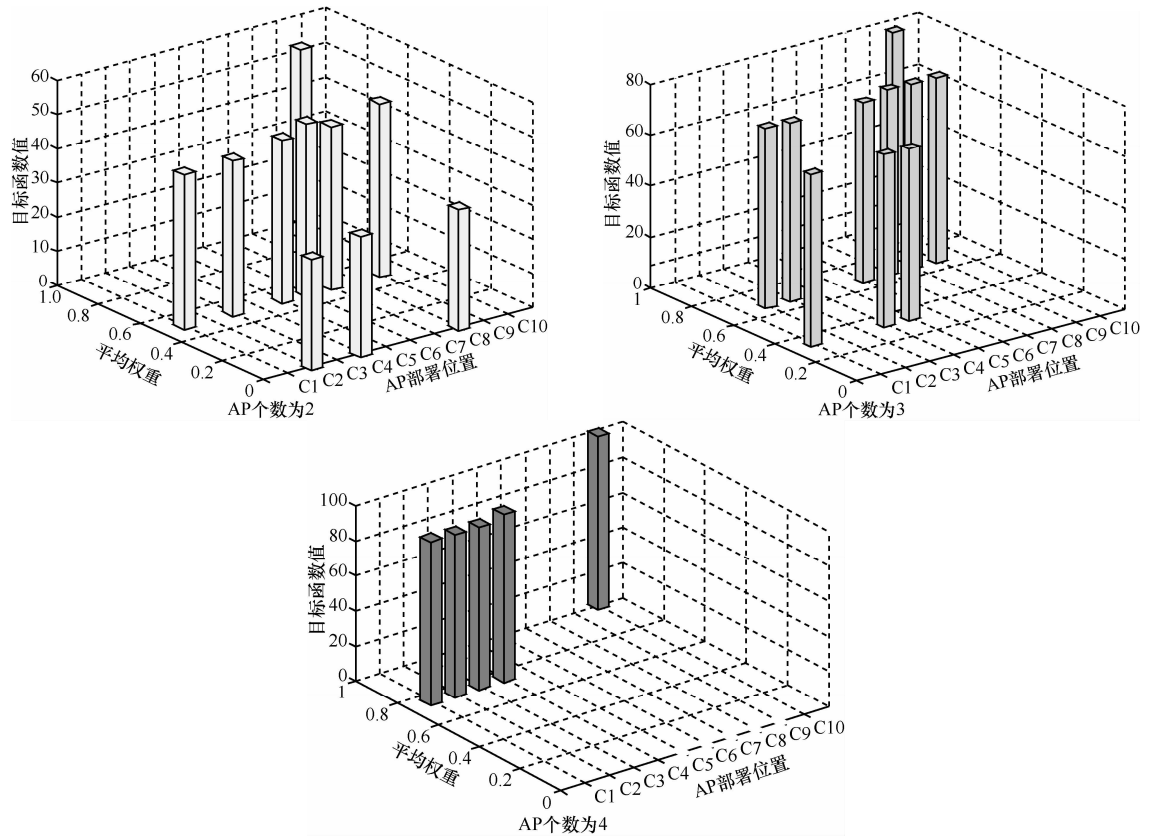
图 3 真实实验环境



图 4 自主开发软件界面



(a) 仿真实验环境



(b) 真实实验环境

图 5 平均权重与目标函数值关系

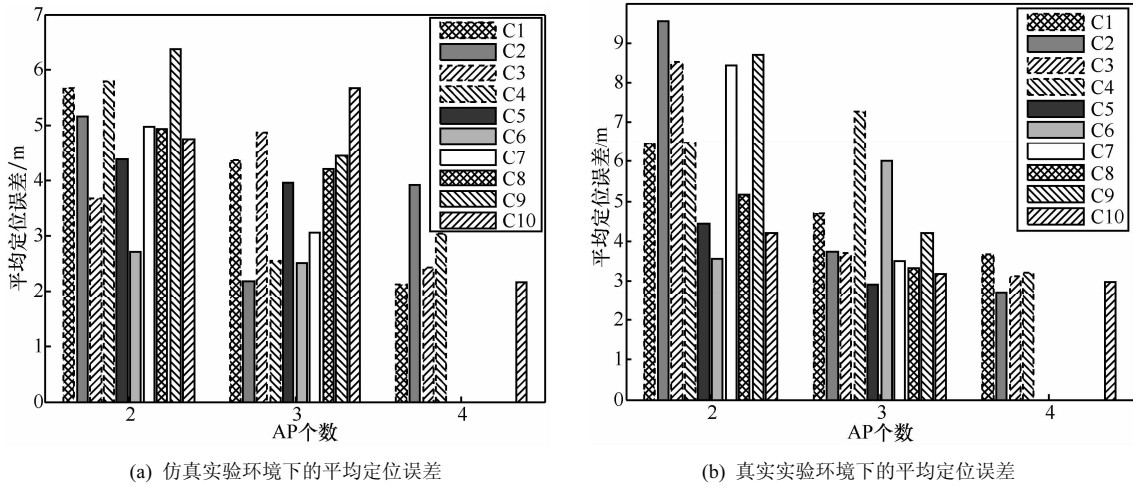


图 6 平均定位误差

均定位误差。可以看到：本文提出的 AP 优化部署方法能够获得较低的平均定位误差且定位精度整体上随 AP 个数的增加而提高，例如，仿真环境下 AP 数为 4 时的最优 AP 部署位置所对应平均定位误差为 2.15 m，相比于 AP 数为 2 时平均定位误差减小了近 2.6 m；真实实验环境下 AP 个数为 4 时的最优 AP 部署位置所对应的平均定位误差为 2.97 m，相比于 AP 数为 2 时平均定位误差减小了近 1.2 m。

由于仿真及真实实验环境下的实验结果基本一致，因此在仿真环境下比较了本文所提方法、Coverage-FD 部署方法<sup>[10]</sup>，以及最大—最小 RSS 距离部署方法<sup>[11]</sup>的定位误差（为了准确展示整个定位区域的定位误差，把非定位区域的定位误差设置为 -2）。图 7~图 9 给出了不同方法对应的定位误差平面分布，可以看出，本方法所对应 AP 部署方式下的整体定位性能优于 Coverage-FD 及最大-最小 RSS 距离部署方法。

表 2 2 种实验环境下 AP 部署位置

AP 部署位置	AP 个数为 2	AP 个数为 3	AP 个数为 4
C1	1,2	1,2,3	1,2,3,4
C2	1,3	1,2,4	1,2,3,5
C3	1,4	1,2,5	1,3,4,5
C4	1,5	1,3,4	2,3,4,5
C5	2,3	1,3,5	—
C6	2,5	1,4,5	—
C7	3,4	2,3,4	—
C8	3,5	2,3,5	—
C9	4,5	3,4,5	—
C10	2,4	2,4,5	1,2,4,5

表 3 真实实验环境下 AP 部署位置

AP 部署位置	AP 个数为 2	AP 个数为 3	AP 个数为 4
C1	1,2	1,2,3	1,2,3,4
C2	1,3	1,2,4	1,2,3,5
C3	1,4	1,2,5	1,3,4,5
C4	1,5	1,3,4	1,2,4,5
C5	2,3	1,3,5	—
C6	2,5	1,4,5	—
C7	3,4	2,3,4	—
C8	3,5	2,3,5	—
C9	4,5	3,4,5	—
C10	2,4	2,4,5	2,3,4,5

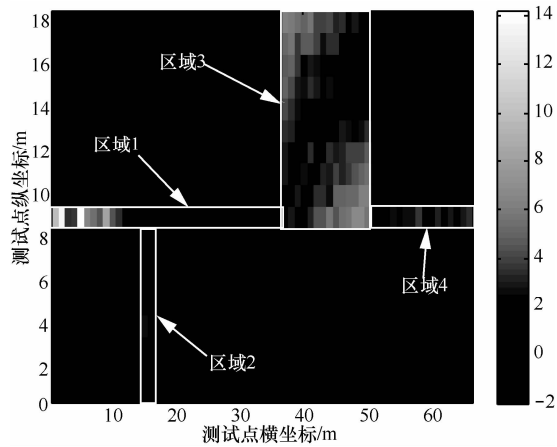
图 10 比较了本文方法、Coverage-FD 部署方法及最大—最小 RSS 距离部署方法所对应的误差累积分布函数。显然，本方法能够获得较高的定位精度。当 AP 数为 2 时，本文方法所对应定位误差在 5 m 内的置信概率为 88%，相比于 Coverage-FD 及最大—最小 RSS 距离部署方法的置信概率，分别提高了近 19 和 20 个百分点。

最后，图 11 对比了利用本文所提快速离散注水算法与现有模拟退火算法进行 AP 优化位置搜索所需的时间开销。显然，本算法具有更好的实时运算能力。

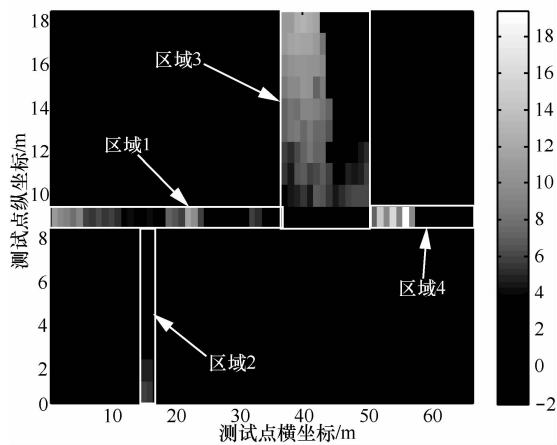
### 5 结束语

本文提出了一种基于注水优化模型的室内 WLAN 定位中的 AP 部署方法。该方法通过构造注水优化模型，利用快速离散注水算法，搜索得到具有最大位置指纹信号强度差异性的 AP 优化位置。根据室

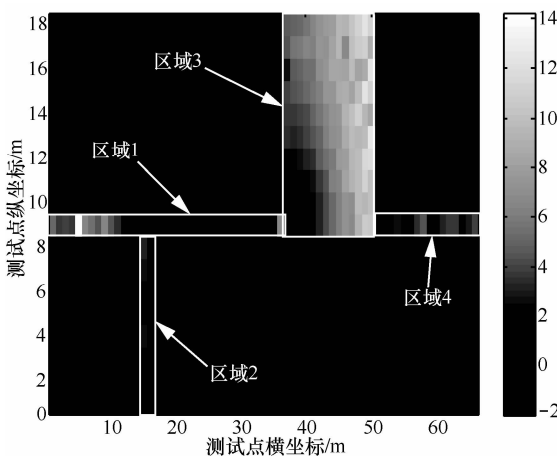
内真实及仿真实验环境下的实验结果，以及与 Coverage-FD 及最大-最小 RSS 距离部署方法的实验结果对比，本文所提方法具有更高的定位精度及较低的运算时间开销。此外，下一步工作将着重研究室内多层环境下 WLAN 定位中的 AP 优化部署方法。



(a) 本文方法

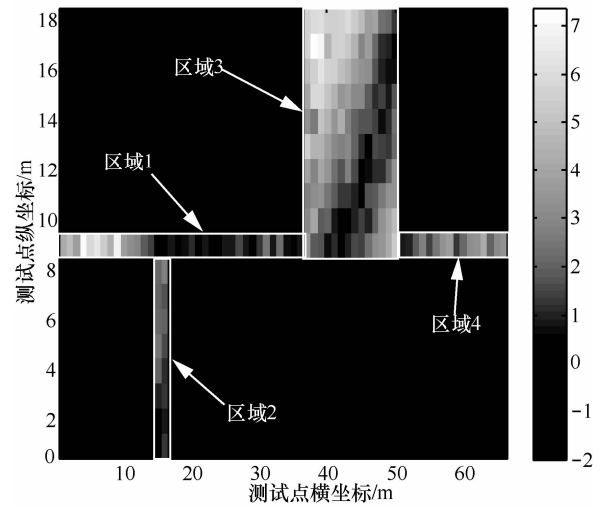


(b) Coverage-FD 部署方法

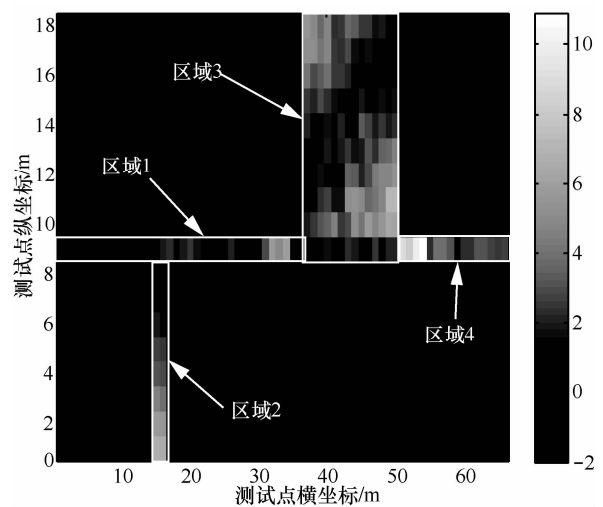


(c) 最大-最小 RSS 距离部署方法

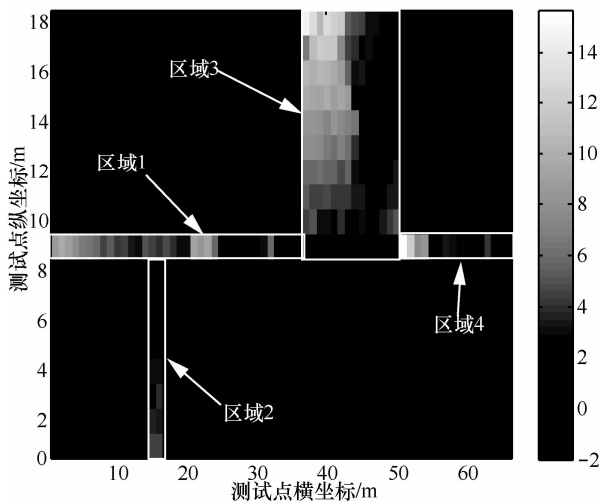
图 7 AP 个数为 2 时本文方法、Coverage-FD 部署方法及最大-最小 RSS 距离部署方法下的定位误差分布



(a) 本文方法

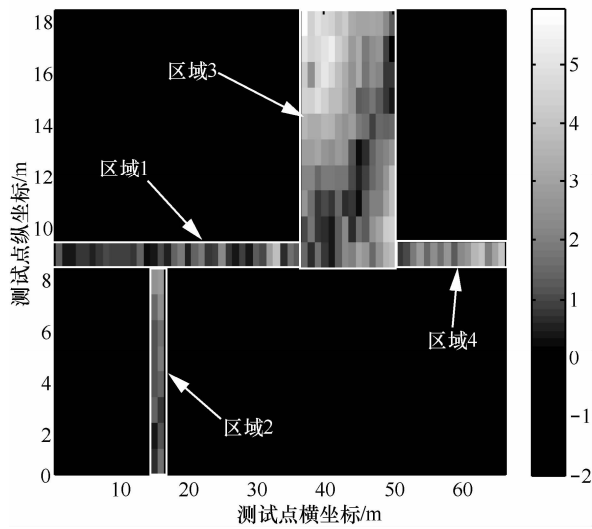


(b) Coverage-FD 部署方法

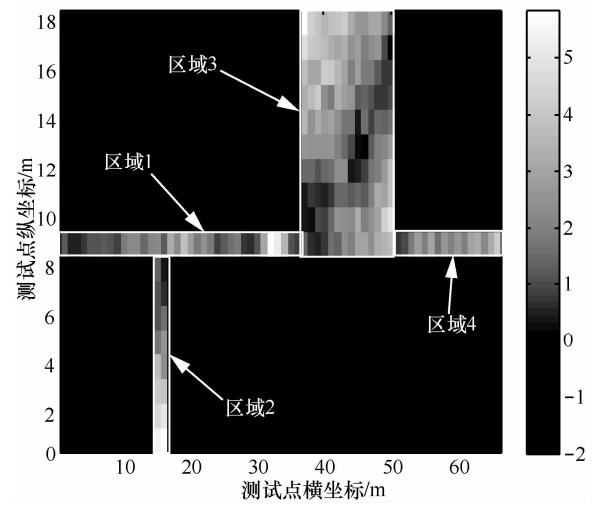


(c) 最大-最小 RSS 距离部署方法

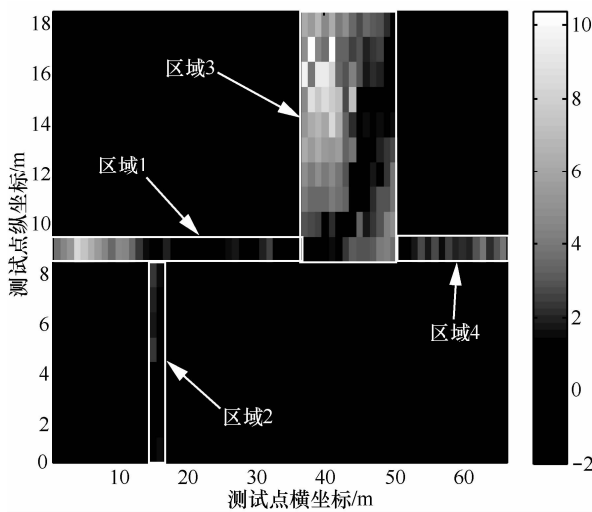
图 8 AP 个数为 3 时本文方法、Coverage-FD 部署方法及最大-最小 RSS 距离部署方法下的定位误差分布



(a) 本文方法

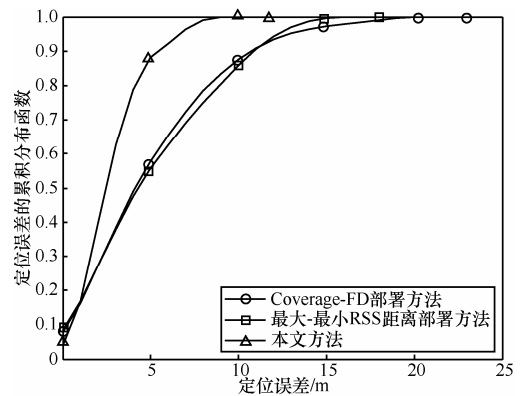


(b) Coverage-FD 部署方法

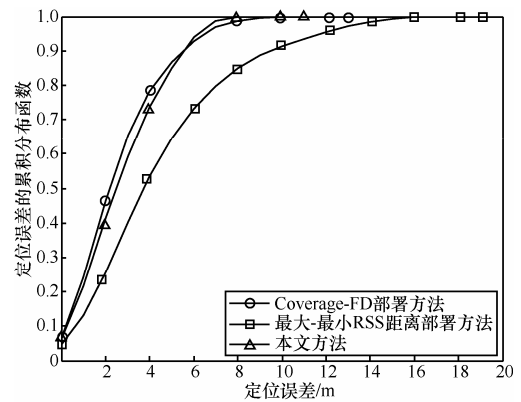


(c) 最大-最小 RSS 距离部署方法

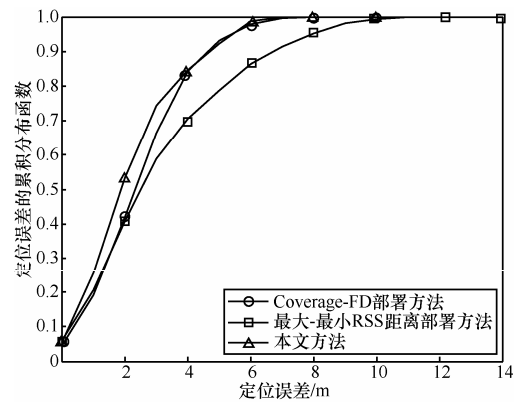
图 9 AP 个数为 4 时本文方法、Coverage-FD 部署方法及最大-最小 RSS 距离部署方法下的定位误差分布



(a) AP 个数为 2



(b) AP 个数为 3



(c) AP 个数为 4

图 10 3 种 AP 部署方法下的误差累积分布函数

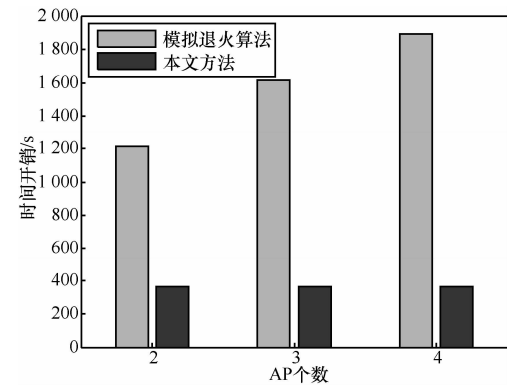


图 11 时间开销对比

## 参考文献:

- [1] XIAO J, WU K, YI Y. FIFS: fine-grained indoor fingerprinting system[A]. The 21st International Conference on Computer Communications and Networks[C]. 2012. 1-7.
- [2] KHAN A U, AKAIIDI M A. A distributive algorithm for WLAN localization[A]. The 6th international conference on emerging technologies[C]. 2010. 388-393.
- [3] 吴佳英, 徐蔚鸿, 陈顺明. 基于 RSS 典型性判定的室内定位算法研究[J]. 通信学报, 2014, 35(22): 140-146.
- WU J Y, XU W H, CHEN S M. Indoor positioning algorithm research based on the typicality judgment of RSS [J]. Journal on Communications, 2014, 35(22): 140-146.
- [4] BAALA O, ZHENG Y, CAMINADA A. The impact of AP placement in WLAN-based Indoor Positioning Systems[A]. The 8th International Conference on Networks[C]. 2009. 12-17.
- [5] NAGY L, FARKAS L. Indoor base station location optimization using genetic algorithms[A]. The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. 2000. 843-846.
- [6] LING X, YEUNG K L. Joint access point placement and channel assignment for 802.11 wireless LANs[J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2006, 5(10): 2705-2711.
- [7] LEE Y, KIM K, CHOI Y. Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs[A]. The 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks[C]. 2002. 831-836.
- [8] KIM J, SONG N. Placement of WiFi access points for efficient WiFi offloading in an overlay network[A]. The 24th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications[C]. 2013. 3066-3070.
- [9] EISENBLATTER A, GEERDES F, SIOMINA I. Integrated access point placement and channel assignment for wireless LANs in an indoor office environment[A]. IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks[C]. 2007. 1-10.
- [10] CHEN Q, WANG B, ZHOU S. Placement of access points for indoor wireless coverage and fingerprint-based localization[A]. IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (HPCC\_EUC)[C]. 2013. 2253-2257.
- [11] CHEN G, ZHANG Y, LUAN P. Optimization of AP placement in indoor fingerprint positioning[A]. International Conference on ICT Convergence (ICTC)[C]. 2013. 98-100.
- [12] SHEN Z. Comparison of space-time water-filling and spatial water-filling for MIMO fading channels[A]. IEEE GLOBECOM[C]. 2004 31-435.
- [13] PALOMAR D, FONOLLOSA J R. Practical algorithms for a family of water-filling solution[J]. IEEE Trans Signal Process, 2005, 53(2): 686-695.
- [14] SON K, JUNG B C, CHONG S. *et al.* Power allocation for OFDM-based cognitive radio systems under outage constraints[A]. IEEE ICC[C]. 2010. 1-5.
- [15] 魏飞, 杨震. 认知 MIMO MAC 最优迭代注水算法[J]. 通信学报, 2011, 32 (11): 133-139.
- WEI F, YANG Z. Optimum iterative water-filling algorithm for cognitive MIMO MAC[J]. Journal on Communications, 2011, 32 (11): 133-139.
- [16] LING X, WU B. Fast water-filling for agile power allocation in multi-channel wireless communications[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1212-1215.
- [17] ANDRADE C, HOEFEL R. IEEE 802.11 WLANs: A comparison on indoor coverage models[A]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)[C]. 2010. 1-6.

## 作者简介:



周牧 (1984-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为无线定位技术、机器学习与人工智能、凸优化理论。



蒲巧林 (1988-), 女, 重庆渝中人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线定位技术、无线组网技术、定位安全、凸优化理论。



田增山 (1968-), 男, 河南固始人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为蜂窝网无线定位系统、个人通信、GPS 精密定位和姿态测量、数据压缩和数据融合。