

基于 CFR 虚拟阵列天线的 AOA 室内定位

田增山,张千坤,周 牧,王 斌
(重庆邮电大学移动通信重点实验室,重庆 400065)

摘 要: 准确地估计信号的到达角(Angle Of Arrival, AOA)为实现在室内高精度定位提供了可能,为了能够准确地估计室内多径信号的 AOA,并提取出直射路径的 AOA 信息进行定位,本文提出一种利用信道频率响应信息(Channel Frequency Response, CFR)扩展阵列天线的亚米级室内定位系统. 首先,采集 CFR 信息进行 AOA 和信号到达时间(Time Of Arrival, TOA)的联合估计;其次,提出了一种基于 AOA 和 TOA 二维聚类信息的直射路径识别算法;另外,还提出了可视环境(Line Of Sight, LOS)以及非可视环境(Non Line Of Sight, NLOS)的识别算法,可以准确的判断出当前接收机相对发射机是处于 LOS 还是 NLOS 环境;最后,利用现有的三天线 Wi-Fi 设备在室内进行了测角以及定位测试,实验结果表明本文提出的定位系统在室内 LOS 和 NLOS 环境下分别可以达到中值误差为 0.8m, 1.3m 的定位精度,可用于室内高精度定位.

关键词: Wi-Fi; 室内定位; 信道频率响应; 信号到达角

中图分类号: TN961 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1468-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.028

AOA Indoor Localization Based on the CFR Virtual Array Antenna

TIAN Zeng-shan, ZHANG Qian-kun, ZHOU Mu, WANG Bin

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

Abstract: Accurate estimation of the angle of arrival (AOA) of the signal provides the possibility of high precision indoor positioning, in order to achieve the accurate AOA and extract the AOA information of the direct path to locate the target, this paper presents a sub-meter indoor localization system that uses the channel frequency response (CFR) to expand the array antenna. Firstly, this paper collects the CFR information to estimate the AOA and time of arrival (TOA) of Wi-Fi signal. Secondly, this paper presents a direct path identification algorithm based on the two-dimensional clustering information of AOA and TOA. In addition, this paper proposes a line of sight (LOS) environment and non line of sight (NLOS) environment recognition algorithm to distinguish whether the current receiver is in the LOS or NLOS environment relative the transmitter. Finally, this paper uses the existing Wi-Fi devices with three antennas to measure the angle and positioning in the indoor room. The experimental results show that the proposed positioning system can achieve a median error of 0.8 m and 1.3 m respectively in the LOS and NLOS environment, and can be used for high precision indoor positioning.

Key words: Wi-Fi; indoor localization; channel frequency response (CFR); angle of arrival (AOA)

1 引言

随着无线通信技术的发展和日益增长的位置服务需求,位置服务已成为了当下最重要的服务需求之一. 室内环境下由于卫星信号被遮挡,全球定位系统(Global Positioning System, GPS)与北斗定位系统^[1]无法提供位置服务,因此对室内定位技术的研究变得越来越

重要.

目前比较典型的室内定位技术主要有基于蓝牙^[2]、红外^[3]、射频识别^[4]、可见光^[5]、传感器^[6]、无线信号强度^[7]、TOA^[8]、AOA 等. 这些定位技术在特定条件下都能获得较高的定位精度,但也存在缺陷. 蓝牙定位和红外定位需要高密集布网,且设备昂贵,不适宜大规模商用;射频识别受限于功率只能用于近距离定位;

收稿日期:2017-01-11;修回日期:2017-05-07;责任编辑:覃怀银

基金项目:国家自然科学基金(No. 61301126, No. 61471077);长江学者和创新团队发展计划(No. IRT1299);重庆市科委重点实验室专项经费,重庆市基础与前沿研究计划项目(No. cstc2015jcyjBX0065);重庆市高校优秀成果转化资助项目(No. KJZH17117)

可见光定位设备在光源被遮挡后系统完全无法定位;基于传感器的室内定位技术需要移动终端装有运动传感器;无线信号强度定位在指纹库采集时需要消耗很长的时间,且需要定期对指纹库进行更新;基于 TOA 的室内定位技术需要布放昂贵的 UWB 收发设备;基于 AOA 的定位系统常用传统的多信号分类算法(Multiple Signal Classification, MUSIC)^[9]来估计无线信号的 AOA,但是该算法要求天线数量大于路径数才能有效的估计与分辨多径信号的 AOA,通常室内存在 6~8 个主要多径信号^[10],因此 Wi-Fi 接入点(Access Point, AP)需要很多根天线,这对目前的商业 AP 是不可能的。

本文针对上述定位方法存在的问题,提出了一种新的室内定位方法,首先利用本文提出的空间平滑技术,在室内多径环境下仅使用三根天线就能够精确估计多径信号的 AOA;其次通过聚类算法对多径信号进行分类,再利用权值分析法识别直射路径,同时对 LOS 与 NLOS 场景进行判断,进而避免引入大的定位误差;最后利用最小二乘算法结合目标到多个 AP 的直射路径估计出目标的位置。

2 超分辨率角度估计算法及亚米级定位

本文提出的基于 CFR 虚拟天线阵列的亚米级 AOA 定位的系统框图如图 1 所示。本文主要包括三个部分,分别为:超分辨 AOA 估计算法、直射路径分辨以及场景判断算法、目标定位算法。超分辨 AOA 估计算法主要是通过一种空间平滑技术虚拟出大规模的阵列天线从而解决了物理天线数量限制的问题。直射路径分辨算法利用超分辨算法获得的 AOA 和 TOA 二维信息进行聚类从而实现路径的分类,然后利用权值分析法选取直射路径。

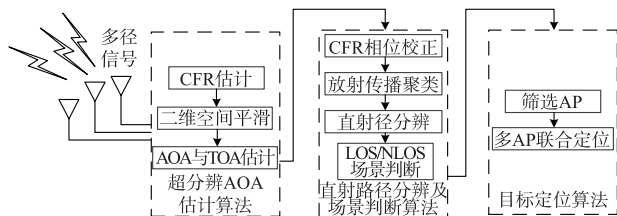


图1 本文系统框图

2.1 基于 CFR 的超分辨 AOA 估计

由文献[11]可知,在使用 MUSIC 算法进行来波方向估计时需要阵列天线数大于多径信号的个数,否则从协方差矩阵中无法区分信号子空间与噪声子空间。而且在室内环境中存在相干信号,造成信号子空间的特征向量扩散到噪声子空间,此时 MUSIC 算法不能正常的估计出角度。

本文的超分辨率角度估计算法利用 Wi-Fi 信号是

OFDM 信号这一特点,通过空间平滑虚拟出大规模的阵列天线。在 OFDM 通信系统中对不同的子载波信道频率响应^[12]有:

$$\text{CFR}_{f_n} = \sum_{k=1}^D \alpha_k e^{-j2\pi(f_n + n\Delta f)\tau_k} \quad (1)$$

这里 D 为信号路径的个数, d_k 和 τ_k 为第 k 条路径的信号衰减系数以及信号传播时延, f_n 为载波频率, f_0 为信号中心频率, $f_n = f_0 + n\Delta f$, Δf 为相邻两个子载波之间的频率间隔。本文利用 Intel 5300^[13] 无线商业网卡, 可以采集 114 个子载波中 30 个子载波的 CFR 测量值。

在接收端, 假设总共有 K 条信号路径, 三根天线子载波的 CFR 测量值可以用下面的矩阵表示:

$$\mathbf{H} = [h_{1,1}, \dots, h_{1,30}, h_{2,1}, \dots, h_{2,30}, h_{3,1}, \dots, h_{3,30}]^T \quad (2)$$

其中 $h_{m,n}$ ($m = 1, 2, 3$ $n = 1, 2, \dots, 30$) 为第 m 跟天线, 第 n 个子载波的 CFR 测量值。根据式(1)和式(2)可以得到

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{N} = [n_{1,1}, \dots, n_{1,30}, n_{2,1}, \dots, n_{2,30}, n_{3,1}, \dots, n_{3,30}]^T$, 为 90×1 的噪声矩阵。 $\mathbf{X} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K]^T$, 为 $K \times 1$ 的路径衰减系数矩阵。 $\mathbf{A} = [a(\theta_1, \tau_1), a(\theta_2, \tau_2), \dots, a(\theta_k, \tau_k)]$ 为 $90 \times K$ 的方向矩阵。 $a(\theta_k, \tau_k)$ 为 90×1 的方向矩阵可以写为

$$a(\theta_k, \tau_k) = [a_1(\theta_k, \tau_k), a_2(\theta_k, \tau_k), a_3(\theta_k, \tau_k)]^T \quad (4)$$

在式(4)中 $a_m(\theta_k, \tau_k) = [a_{m,1}(\theta_k, \tau_k) \dots a_{m,30}(\theta_k, \tau_k)]$ ($m = 1, 2, 3$) 为第 m 根天线上接收到的第 k 条路径的 30×1 的方向矩阵。

$$a_{m,i}(\theta_k, \tau_k) = e^{-j2\pi[(i-1)\Delta f\tau_k + d(m-1)\sin\theta_k/c]} \quad , i = 1, 2, \dots, 30 \quad (5)$$

其中 c 为光速, Δf 为相邻两个子载波之间的频率间隔, θ_k 和 τ_k 分别为第 k 条路径的 TOA 与 AOA。 d 为相邻两根天线之间的间隔。

式(3)的协方差表示为

$$\mathbf{R} = E(\mathbf{H} \times \mathbf{H}^H) \quad (6)$$

由文献[11]可知, 噪声的特征向量与方向矩阵 \mathbf{A} 正交, 所以关于 AOA 与 TOA 的空间谱可以表示为

$$P_{\text{music}} = \frac{1}{a^H(\theta, \tau) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H a(\theta, \tau)} \quad (7)$$

其中 \mathbf{E}_N 为协方差矩阵 \mathbf{R} 对应噪声子空间的特征向量。在室内环境下由于到达接收端的信号常常包含相干信号, 所以会造成 MUSIC 算法出现大的误差。为了消除相干信号的干扰, 本文提出一种和文献[14]类似的二维空间平滑(2D-SS)算法。

如图 2 所示为三根天线上 30 个子载波 CFR 测量值的相关矩阵, 其中实矩形框和虚矩形框内分别为第一个子阵列和第二个子阵列的 CFR 测量值相关矩阵, 通过观察可以发现这两个子阵列的第一个元素分别为 $h_{1,1} \times h_{1,1}$ 和 $h_{1,2} \times h_{1,2}$, 本文通过将实矩形框移动到第一

$$\begin{bmatrix} h_{1,1} \times h_{1,1} & \cdots & h_{1,1} \times h_{1,30} & h_{1,1} \times h_{2,1} & \cdots & h_{1,1} \times h_{3,30} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1,30} \times h_{1,1} & \cdots & h_{1,30} \times h_{1,30} & h_{1,30} \times h_{2,1} & \cdots & h_{1,30} \times h_{3,30} \\ h_{2,1} \times h_{1,1} & \cdots & h_{2,1} \times h_{1,30} & h_{2,1} \times h_{2,1} & \cdots & h_{2,1} \times h_{3,30} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{3,30} \times h_{1,1} & \cdots & h_{3,30} \times h_{1,30} & h_{3,30} \times h_{2,1} & \cdots & h_{3,30} \times h_{3,30} \end{bmatrix}$$

图2 CFR二维空间平滑

个元素为 $h_{n,m} \times h_{n,m}$ 的位置得到下一个子阵列的 CFR 测量值相关矩阵,增加天线和子载波的索引分别到 $L_1 = 3 - N_{\text{sub}1} + 1, L_2 = 3 - N_{\text{sub}2} + 1$ 时,得到所有子阵列的 CFR 测量值相关矩阵. 本文设置 $N_{\text{sub}1} = 2, N_{\text{sub}2} = 15$, 因而平滑后获得的每个子阵列天线数量为 $L_1 \times L_2 = 32$. 因此通过二维空间平滑算法扩展了天线阵列的数量. 对方差矩阵 \mathbf{R} 进行二维空间平滑后得到新的相关矩阵为

$$\mathbf{R}_{2\text{D-SS}} = \frac{1}{L_1 \times L_2} \sum_{m=1}^{L_1} \sum_{n=1}^{L_2} \mathbf{R}_{m,n} \quad (8)$$

其中 $\mathbf{R}_{m,n}$ 是第 $((n-1)L_2 + m)$ 个子阵列的 CFR 测量值相关矩阵, $\mathbf{R}_{m,n}$ 的第一个元素为 $h_{n,m} \times h_{n,m}$. 最后将平滑后的 CFR 测量矩阵输入到 MUSIC 算法就可以估计出每条路径的 AOA 和 TOA 信息.

2.2 直射径分辨及场景判断

2.2.1 CFR 相位校正

由于 Wi-Fi 网络是突发通信,每个接收到的数据包都会引入一个随机的包检测时延 (Packet Detect Delay, PDD),由文献[15]可知,包检测时延相比室内环境下信号平均传播时延 10ns 量级要大的多,因此子载波之间的相位近似成线性关系. 本文利用最小二乘线性拟合^[16]的方法来估计包检测时延(以便消除 PDD 对相位产生的影响. 假设 $\Phi_i(m,k)$ 是第 m 根天线接收到的第 i 个包中第 k 个子载波的 CFR 相位, τ_i 是第 i 个包的包检测时延,利用 3 根天线 30 个子载波进行最小二乘拟合得到

$$\hat{\tau}_i = \arg \min_{\tau_i} \sum_{m=1}^3 \sum_{k=1}^{30} (\Phi_i(m,k) + 2\pi(k-1)\Delta f\tau_i + \beta)^2 \quad (9)$$

从而得到修正后的 CFR 相位为

$$\hat{\Phi}_i(m,k) = \Phi_i(m,k) + 2\pi(k-1)\Delta f\hat{\tau}_i \quad (10)$$

2.2.2 直射径分辨及 LOS/NLOS 场景判断

室内环境下信道是时变的,相比于反射径直射径在短时间内不会发生变化,因此通过聚类在 AOA 与 TOA 维度上的方差比较小,极值点数目较多. 本文这里利用仿射传播聚类^[17,18]给每条路径分配权值

$$w_k = f(\omega_c C_k - \omega_\theta \sigma_{\theta_k} - \omega_\tau \sigma_{\tau_k} - \omega_s \tau_k) \quad (11)$$

其中 f 为递增函数, $C_k, \sigma_{\theta_k}, \sigma_{\tau_k}, \tau_k$ 为第 k 条路径的极值点个数、角度方差、时间方差以及时间均值. $\omega_c, \omega_\theta, \omega_\tau, \omega_s$ 为计算权值时引入的极值点个数、角度方差、时间方差以及时间均值的权重信息. 本文选择权值最大的路

径作为直射路径并将该类的角度均值作为直射路径的 AOA.

由于目标与 AP 不是总是共处在 LOS 环境下,因此需要对 AP 所处的场景进行识别. 本文利用统计学原理分析 LOS 和 NLOS 环境的最大权值,选择一个可以明显区分 LOS 以及 NLOS 环境的阈值(筛选处在 LOS 环境下 AP,如果 AP 对应的直射径的权值 $\omega_{\text{direct}} > \xi$ 则判定当前环境为 LOS 环境,如果直射径的权值 $\omega_{\text{direct}} < \xi$ 则判定当前环境为 NLOS 环境.

本文所用的直射路径分辨及 LOS/NLOS 场景判断算法如算法 1 所示:

算法 1 直射路径分辨及 LOS/NLOS 场景判断

输入:空间谱极值点

输出:直射路径以及场景类型即 LOS 环境还是 NLOS 环境

算法步骤:

- ```

for 对每个 AP
(1) 对搜索到极值点的 AOA 和 TOA 信息进行归一化处理;
(2) do
(3) 选择仿射传播聚类算法进行聚类
(4) 初始化两个极值点的吸引度 $r(i,j)$ 、归属感 $\alpha(i,j)$ 以及迭代次数 n ;
(5) for 任意两个极值点
(6) 计算 $k = \arg \max_{j \in \{1,2,3,\dots,N\}} \{\alpha(i,j) + r(i,j)\}$
(7) if $k = i$
(8) 选择第 i 个极值点作为聚类中心
(9) else
(10) 选择第 k 个极值点作为聚类中心
(11) end
(12) until 聚类中心达到最大迭代次数或者聚类中心经过一次循环后不在变化
(13) end
(14) 计算每个路径的权值
(15) 选择具有最大权值的类为直射路径,并将类角度均值作为直射路径的 AOA;
(16) if $\omega_{\text{direct}} > \xi$
(17) 判定当前环境为 LOS 环境;
(18) else
(19) 判定当前环境为 NLOS 环境;
(20) end
(21) end

```

## 2.3 多 AP 联合定位

本文通过联合多个 AP 的直射路径 AOA 信息对目标进行定位,这里假设有  $R$  台接收机,并通过 LOS/NLOS 场景判断算法选择处于 LOS 环境下的 AP,本文利用最小二乘算法得到目标的位置为

$$\text{position} = \arg \min_p \sum_{i=1}^{R_m} (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2 \quad (12)$$

其中  $R_{\text{los}}$  为筛选出的 LOS 环境下 AP 的个数,  $\theta_i$  表示位置  $p$  到第  $i$  台接收机的角度,  $\hat{\theta}_i$  表示第  $i$  台接收机估计的角度.

### 3 实验结果分析

#### 3.1 实验环境

实验地点本文选择和参考文献[19]相似的典型室内环境,其环境示意图如图3所示.整个室内环境大小为  $7.5 \times 12.5 \text{m}^2$ .在该环境下本文布置四台接收机,每台接收机装备一个 Intel 5300 无线商业网卡作为 AP.在图3中本文用蓝色矩形框表示4个 AP,每个 AP 布置三根全向天线,天线之间的间距相等为半波长.同时本文

选择了若干个测试点用红色点来表示.本文采用 Linux CSI toolkit<sup>[14]</sup>来采集每台接收机的 CFR 测量数据,然后每台接收机将带有本机 MAC 地址的数据包传到中心位置解算服务器上.位置服务器运行在 Windows 7 操作系统上,硬件配置为:英特尔酷睿系列双核处理器,型号为 Intel(R) Core(TM) i3-4160@3.60GHz,内存 8GB,系统为基于 x64 处理器的 64 位操作系统.本文采用三星 S5 作为移动待定位目标,同时本文利用激光测距仪精确测量每个 AP 的位置以及计算出每个测试点到四个 AP 的真实角度.

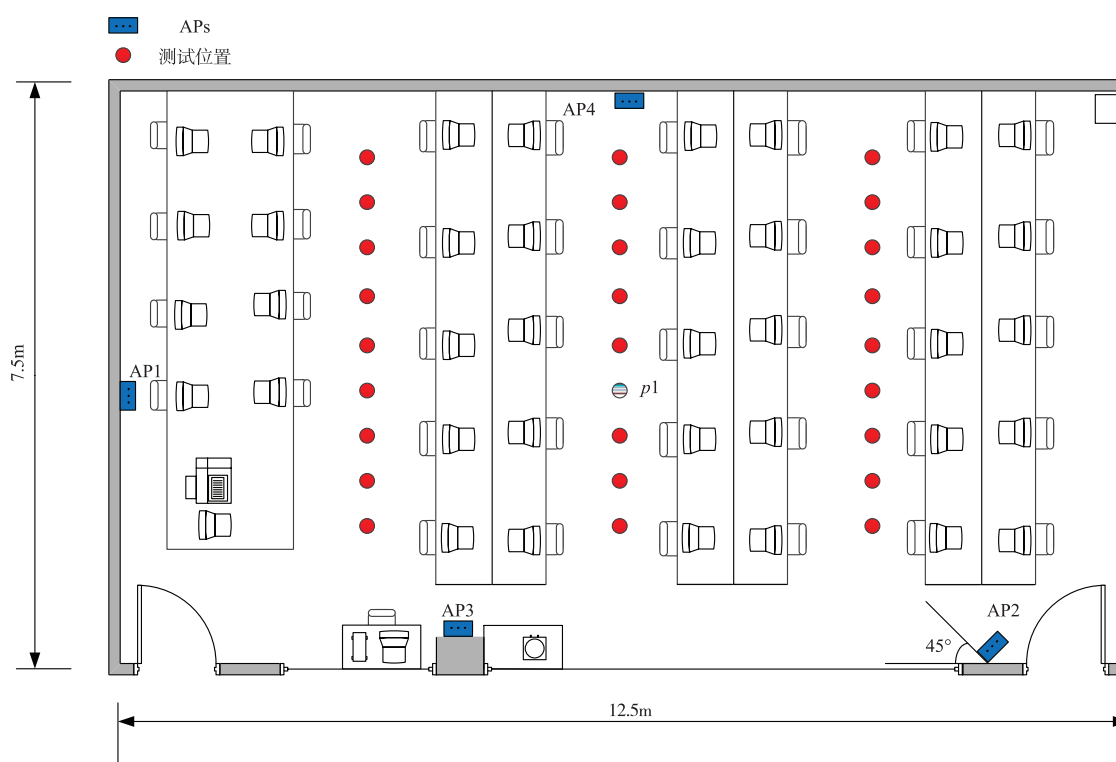


图3 测试环境平面图

#### 3.2 直射路径的 AOA 估计

如图4所示,本文将测试点 P1 采集到的数据传输到中心位置解算服务器,服务器首先估计出四台接收机相对于目标的 AOA 与 TOA,然后利用多个数据包估计出的极值点进行路径聚类.图4为服务器计算出的第二个 AP 的空间谱及聚类结果,其中空间谱是位置服务器利用一个数据包计算得到的.

如图4所示,在室内环境下由于多径信号的影响,直射路径对应的空间谱值并不总是最高的. CUPID<sup>[20]</sup> 中是选择峰值最高的点作为直射路径对应的极值点,这样选择直射路径会造成一定的误差.图5给出了 CUPID 的直射路径判断算法和本文的基于聚类的直射径判断算法的角度估计误差累积曲线图,从图中可以看到本文提出的直射径判断算法角度误差在  $10^\circ$  以内的置信度为 75%,

性能远远高于 CUPID 的直射路径判断算法.

#### 3.3 位置解算

根据参考文献[21],当 AP 与客户端高度固定时,随着 AP 与客户端距离的增加由高度造成的角度误差逐渐减小,在联合多个 AP 进行定位时,高度对定位精度造成的影响不会很大.本文通过与传统基于 AOA 的定位方法分别在 LOS 环境下以及 NLOS 环境下来进行对比来验证本文提出算法的性能.

图6(a)给出了27个测试点在 LOS 环境下利用基于传统 MUSIC 的角度估计算法和本文提出的超分辨率角度估计算法进行定位的位置误差概率曲线图,从图中可以看出使用传统 MUSIC 算法估计出的角度进行定位中值位置误差为 1.7m,采用本文提出的超分辨率角度估计算法估计出的角度进行定位的中值位置误差为

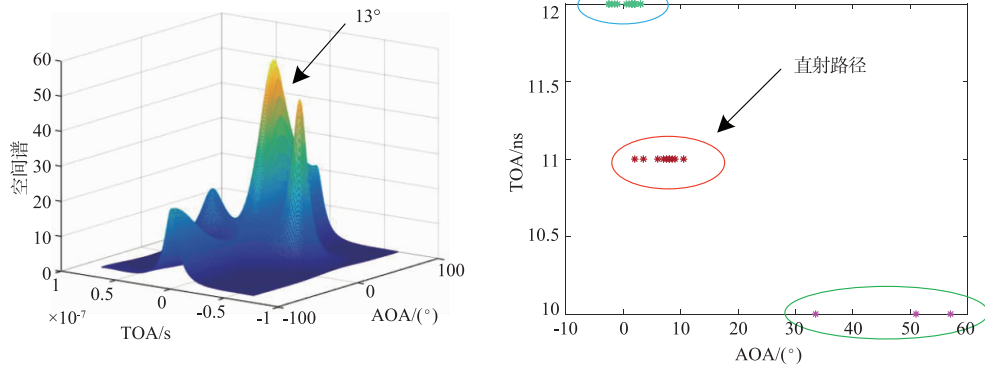


图4 直射径判断

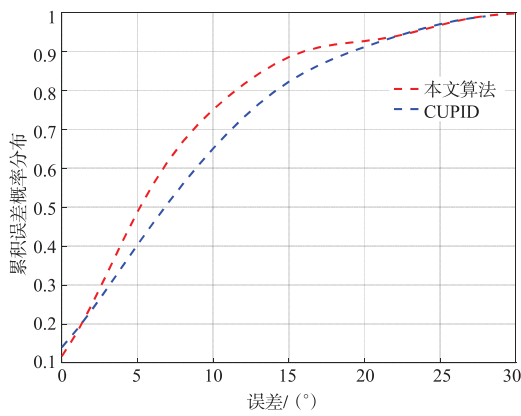
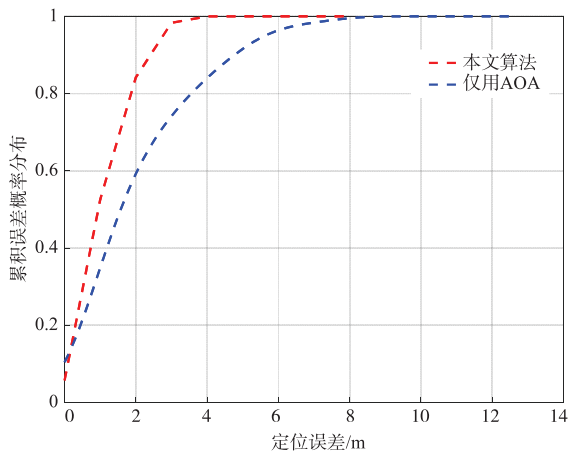


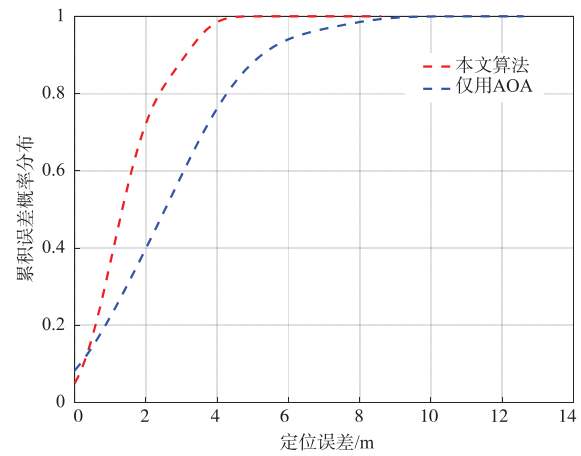
图5 AOA 累积误差概率分布图

0.8m,可以看出本文提出的超分辨率角度估计算法能够使得最终的定位精度达到亚米级别,能够满足室内高精度位置服务的需求例如购物导航等.

图6(b)给出了27个测试点在NLOS环境下不采用场景识别算法和采用场景识别算法的定位误差,从图中可以看出不采用场景识别算法的中值定位误差为2.6m,采用场景识别算法的中值定位误差为1.3m,因此可以清楚地看到场景识别算法能够提高整个定位系统的鲁棒性.



(a) LOS环境定位误差



(b) NLOS环境定位误差

图6 定位累积误差概率分布图

### 4 结论

本文提出一种仅利用三天线商用 AP 即可达到亚米级精度的室内定位系统,该系统首先提出一种基于 OFDM 信号的超分辨率角度估计算法,在不添加任何硬件设备的条件下精确的估计多条路径的 AOA,同时采用了一种基于聚类的直射路径判断算法能够有效地区分

直射路径,同时直射路径还可以扩展到场景识别当中,利用场景识别的信息提高整个定位系统的鲁棒性. 由于该系统利用了多天线以及 OFDM 信号的特性,使得本系统的算法很容易移植到 LTE 系统以及未来的 5G 通信系统当中.

## 参考文献

- [1] 唐金元,于潞,王思臣.北斗卫星导航定位系统应用现状分析[J].全球定位系统,2008,33(2):26-30.  
TANG Jin-yuan, YU Lu, WANG Si-chen. Application status analysis of Beidou satellite navigation and positioning system[J]. GNSS World of China, 2008, 33(2):26-30. (in Chinese)
- [2] Zhuang Y, Yang J, Li Y, et al. Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons[J]. Sensors, 2016, 16(5):596.
- [3] YANG B, LEI Y Q, YAN B. Distributed multi human location algorithm using naive Bayes classifier for a binary pyroelectric infrared sensor tracking system[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 16(1):1-1.
- [4] Ni L M, Liu Y, Lau Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID [J]. Wireless Networks, 2004, 10(6):701-710.
- [5] 吴楠,王旭东,胡晴晴,等.基于多LED的高精度室内可见光定位方法[J].电子与信息学报,2015,37(3):727-732.  
WU Nan, WANG Xu-dong, HU Qing-qing, et al. Multiple LED based high accuracy indoor visible light positioning scheme[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(3):727-732. (in Chinese)
- [6] 周瑞,罗磊,李志强,等.一种基于智能手机传感器的行人室内定位算法[J].计算机工程,2016,42(11):22-26.  
ZHOU Rui, LUO Lei, LI Zhi-qiang, et al. An indoor pedestrian position algorithm based on smartphone sensor [J]. Computer Engineering, 2016, 42(11):22-26. (in Chinese)
- [7] HUSEN M N, LEE S. Indoor location sensing with invariant Wi-Fi received signal strength fingerprinting [J]. Sensors, 2016, 16(11):1898.
- [8] Gezici S, Poor H V. Position estimation via ultra-wide-band signals [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2):386-403.
- [9] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1986, 34(3):276-280.
- [10] Gjengset J, Xiong J, Mcphillips G, et al. Phaser: enabling phased array signal processing on commodity Wi-Fi access points [A]. International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. USA: ACM, 2014. 153-164.
- [11] Laxmikanth P, Surendra L, Ratnam D V, et al. Enhancing the performance of AOA estimation in wireless communication using the MUSIC algorithm [A]. IEEE SPACES [C]. Andhra Pradesh: IEEE, 2015. 448-452.
- [12] 刘刚,郭漪,葛建华. MIMO OFDM 系统中的信道估计 [J]. 华中科技大学学报自然科学版, 2005, 33(9):26-29.  
LIU Gang, GUO Yi, GE Jian-hua. On channel estimation for MIMO-OFDM systems [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(9):26-29. (in Chinese)
- [13] 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(1):53-53.
- [14] 吴海菁,张莉,吴瑛.相干信号源的空间平滑算法及其改进[J].信息工程大学学报,2001,2(4):31-34.  
WU Hai-jing, ZHANG Li, WU Ying. Space smooth algorithm for the calculation of a coherent signal source and its improvement [J]. Journal of Information Engineering University, 2001, 2(4):31-34. (in Chinese)
- [15] Xie Y, Li Z, Li M. Precise power delay profiling with commodity Wi-Fi [A]. The International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. New York: ACM, 2015. 53-64.
- [16] Li X, Li S, Zhang D, et al. Dynamic-MUSIC: Accurate device free indoor localization [A]. ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing [C]. Heidelberg: ACM, 2016. 196-207.
- [17] 王开军,张军英,李丹,等.自适应仿射传播聚类[J].自动化学报,2007,33(12):1242-1246.  
WANG Kai-jun, ZHANG Jun-ying, LI Dan, et al. Adaptive affinity propagation clustering [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(12):1242-1246. (in Chinese)
- [18] 程梦驹,赵龙,陶洪波,等.一种基于仿射传播聚类的入侵检测方法[J].无线电工程,2013,43(11):4-7.  
CHENG Meng-ju, ZHAO Long, TAO Hong-bo, et al. An intrusion detection approach based on affinity propagation clustering [J]. Radio Engineering, 2013, 43(11):4-7. (in Chinese)
- [19] Wang J, Jiang H, Xiong J, et al. LiFS: Low human-effort, device free localization with fine-grained subcarrier information [A]. International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. New York: ACM, 2016. 243-256.
- [20] Sen S, Lee J, Kim K H, et al. Avoiding multipath to revive inbuilding wifi localization [A]. Proceeding of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services [C]. Taipei: ACM, 2013. 249-262.
- [21] Xiong J, Jamieson K. ArrayTrack: a fine grained indoor location system [A]. USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation [C]. Berkeley: ACM, 2013. 71-84.

## 作者简介



田增山 男,1968 年生于河南固始. 现为重庆邮电大学教授、博士生导师. 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.

E-mail:tianzs@cqupt.edu.cn



张千坤 男,1992 年生于河南信阳. 现为重庆邮电大学硕士生. 主要研究方向为室内无线定位.

E-mail:835242529@qq.com



周 牧 男,1984 年生于重庆. 现为重庆邮电大学教授. 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.

E-mail:zhoumu@cqupt.edu.cn



王 斌 男,1991 年生于重庆. 现为重庆邮电大学硕士生. 主要研究方向为指纹定位技术、传感器定位技术、融合定位技术.

E-mail:wangbin-cq@foxmail.com