

基于阵列天线和稀疏贝叶斯学习的室内定位方法

刘坤^① 吴建新^{*①} 甄杰^② 王彤^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(中国测绘科学研究院 北京 100830)

摘要: 由于多径和非同源等因素的影响,传统基于蓝牙信号强度的室内定位方法的性能精度和稳定性都不高。针对基于蓝牙信号的复杂室内环境定位问题,该文提出基于低成本阵列天线的室内定位方法,该方法利用单通道轮采极化敏感阵列天线对蓝牙信号进行采样,然后结合暗室测量获得的准确阵列流形和极化快收敛稀疏贝叶斯学习(P-FCSBL)算法实现信源的角度估计,最后通过角度实现定位。该方法充分利用极化信息和角度信息来实现目标和多径信号的分离,同时对单信源的同时采样保证了估计的稳定性。最后通过实测数据处理验证了该方法的有效性。

关键词: 室内定位;极化快收敛稀疏贝叶斯学习;极化敏感阵列天线

中图分类号: TN911.7; TN926.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)05-1158-07

DOI: 10.11999/JEIT190314

Indoor Localization Algorithm Based on Array Antenna and Sparse Bayesian Learning

LIU Kun^① WU Jianxin^① ZHEN Jie^② WANG Tong^①

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China)

Abstract: Due to the influence of many factors such as multipath and multi-source, the traditional indoor localization algorithms based on Bluetooth signal strength have low performance in accuracy and stability. In order to solve the location problem in complex indoor environment based on Bluetooth signal, an indoor localization algorithm based on low-cost array antenna is developed. The algorithm utilizes single-channel using switch-antenna polarization sensitive array to sample Bluetooth signal, then combines the accurate array manifold measured in dark room and the algorithm of Polarized Fast Converging Sparse Bayesian Learning (P-FCSBL) to estimate the source's angle, and finally gets the target location by angle. This algorithm makes full use of polarization information and angle information to separate target and multipath signal, and simultaneous sampling of one source ensures estimation stability. Finally, the effectiveness of the method is verified by the real data.

Key words: Indoor localization; Polarized Fast Converging Sparse Bayesian Learning(P-FCSBL); Polarization sensitive array antenna

1 引言

随着科技的进步,基于位置的服务逐渐普及并已经成为人们日常生活中不可缺少的一部分。当前,室外定位技术发展的比较成熟,在室外,人们可以通过各种定位技术了解自己所处的位置及周边

的各种服务,这给人们的生活带来了极大的便利。但是在室内,由于环境复杂、定位精度要求高,传统的室外定位方法已经无法适用,人们很难在室内获得自己希望得到的位置信息以及了解基于位置信息的其它服务,所以,如何高精度地在室内实施定位成为了人们一直比较关心的问题^[1,2]。

由于Wi-Fi和蓝牙的普及性及蓝牙4.0的低功耗特性,基于Wi-Fi和蓝牙的室内定位技术一直都是研究的热点。文献[3-9]讨论了基于Wi-Fi和低功耗蓝牙的位置指纹定位技术,先构建一个接收信号强度(RSS)与采样点位置关系的数据库,进而通过各

收稿日期: 2019-05-05; 改回日期: 2019-09-28; 网络出版: 2020-01-21

*通信作者: 吴建新 jxwu@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB0502201)

Foundation Item: The National Key Research and Development Plan (2016YFB0502201)

个参考节点上采集的目标RSS与信息库匹配来对目标进行定位，这类方法硬件成本低，只需要布置少量的参考节点就能对目标进行定位，但缺点是在复杂的室内环境中构建一个庞大的位置指纹数据库十分繁琐和耗时。文献[10]建立了一个3维空间的位置指纹库，相对于传统的2维位置指纹算法，在水平精度和垂直精度上都有所提升，但当指纹库不够精细时，定位偏差较大。文献[11]采用高斯回归模型来预测参考节点已知标记指纹有限的情况下未标定区域的RSS的空间分布，文献[12]根据相邻位置的相关性，采用序列递归搜索算法构建指纹序列数据库，最后通过自适应渐消算法并结合初始序列匹配度来实现位置估计，这两种算法大大简化了位置指纹数据库的建立，代价是定位精度受到较大影响。文献[13]构建了一组基于Wi-Fi的指纹数据库，利用不同类型指纹之间的内在互补性，融合多种指纹信息来获得更好的定位结果，文献[14]提出了一种基于蓝牙和多传感器的定位算法，通过卡尔曼滤波融合了蓝牙传播模型和多个传感器的定位结果，这两种定位算法通过融合多种信息来提高定位精度，对定位结果有一定的改善，但定位精度依旧不高。这类基于低功耗蓝牙和Wi-Fi接收信号强度的室内定位技术，每个基站仅有单个传感器，其定位精度仍停留在米级，难以满足室内高精度定位的要求。

为了解决以上问题，提高室内定位的稳定性以

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(\theta, \phi) bs(t) \exp\{-j\omega_0 \tau_1(\theta, \phi)\} \\ a_2(\theta, \phi) bs(t) \exp\{-j\omega_0 [\tau_2(\theta, \phi) - T]\} \\ \vdots \\ a_N(\theta, \phi) bs(t) \exp\{-j\omega_0 [\tau_N(\theta, \phi) - (N-1)T]\} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， $\tau_N(\theta, \phi)$ 表示第 N 个阵元相对于参考阵元的时间延迟， $a_N(\theta, \phi)b$ 为回波幅度。对于极化敏感阵列， $a_N(\theta, \phi)$ 表示与极化有关的分量， $a_N(\theta, \phi) = \mathbf{e}^T(\theta, \phi)\mathbf{p}_N$ ， $\mathbf{e}(\theta, \phi)$ 为来波电场矢量， \mathbf{p}_N 为阵元极化矢量， b 表示与发射功率、距离、天线增益等因素有关的分量。

假定以圆心为参考点，参考点到各个阵元的空间矢量可以表示为 $\mathbf{r}_n = [x_n \ y_n \ 0]$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ ，来

及精度，本文采用极化敏感蓝牙阵列天线结合超分辨率算法来实现。与传统的基于RSS的方法只能利用接收信号的幅度信息不同，采用极化敏感蓝牙阵列不仅可以利用接收信号的幅度信息，还可以利用接收信号的相位信息和极化信息。为了降低设备成本，可以采用单通道轮采阵列天线^[15]来实现。由于超分辨率算法实现的一个基本前提是准确的阵列流形，而实际阵列天线由于互耦、加工误差等非理想因素的影响很难从理论上得到准确的阵列流形，因此这里通过暗室测量获得该阵列天线的阵列流形。最后利用极化快收敛稀疏贝叶斯学习算法实现超分辨率角度估计，实现目标定位。

2 信号模型

蓝牙阵列如图1所示，蓝牙阵列接收机采用单通道轮采方式，多根天线共用一个接收机，在一帧时间内轮流接通天线采集数据，阵列为一双极化圆阵，阵元个数为 N ，中间天线是圆极化天线，其他天线均为线极化天线，极化方向如图1所示。

假定一帧时间内目标角度没有发生变化，入射的蓝牙信号的包络为 $s(t)$ ，角频率为 ω_0 ，入射俯仰角为 θ ，方位角为 ϕ ，采样起始时刻为 t ，天线切换时间间隔为 T ，依次对各个阵元进行采样，在没有噪声的情况下，接收机接收的以 t 为采样起始时刻的一次轮采的 N 个数据样点表示成向量形式 $\mathbf{x}(t)$ 为

波的单位矢量 $\mathbf{d} = [\sin\theta \ \cos\phi \ \sin\theta \ \sin\phi \ \cos\theta]^T$ ，假设光速为 c ，则信号入射到第 n 个阵元上引起的与参考阵元的时延为

$$\tau_n(\theta, \phi) = \frac{\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{d}}{c} = \frac{x_n \sin\theta \cos\phi + y_n \sin\theta \sin\phi}{c} \quad (2)$$

由此，可以得到单通道下的蓝牙阵列的空域导向矢量 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 为

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \exp\left\{-j2\pi f_0 \left[\frac{x_1 \sin\theta \cos\phi + y_1 \sin\theta \sin\phi}{c}\right]\right\} \\ \exp\left\{-j2\pi f_0 \left[\frac{x_2 \sin\theta \cos\phi + y_2 \sin\theta \sin\phi}{c} - T\right]\right\} \\ \vdots \\ \exp\left\{-j2\pi f_0 \left[\frac{x_N \sin\theta \cos\phi + y_N \sin\theta \sin\phi}{c} - (N-1)T\right]\right\} \end{bmatrix} \quad (3)$$

蓝牙阵列的极化域导向矢量 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 为

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{q}_N \end{bmatrix} \mathbf{e}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} a_1(\theta, \phi) \\ a_2(\theta, \phi) \\ \vdots \\ a_N(\theta, \phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{q}_n = [x'_n \ y'_n \ 0]$, $n = 1, 2, \dots, N$, 为第 n 个阵元的全局坐标系下的极化矢量, $\mathbf{e}(\theta, \phi) = [\sin\theta \ \cos\phi \ \sin\theta \ \sin\phi \ \cos\theta]^T$, 为来波电场矢量。

最终可以得到单通道的蓝牙阵列的导向矢量 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\theta, \phi) &= \mathbf{a}(\theta, \phi) \cdot * \mathbf{a}(\theta, \phi) \\ &= \begin{bmatrix} a_1(\theta, \phi) \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[\frac{x_1 \sin\theta \cos\phi + y_1 \sin\theta \sin\phi}{c} \right] \right\} \\ a_2(\theta, \phi) \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[\frac{x_2 \sin\theta \cos\phi + y_2 \sin\theta \sin\phi}{c} - T \right] \right\} \\ \vdots \\ a_N(\theta, \phi) \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[\frac{x_N \sin\theta \cos\phi + y_N \sin\theta \sin\phi}{c} - (N-1)T \right] \right\} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

在室内环境下, 最后蓝牙阵列接收的信号中不仅包含直达波, 还有经过墙壁桌子地板等各种障碍物反射后到达蓝牙阵列的多径回波及噪声, 考虑噪声为高斯白噪声序列 \mathbf{n} , 接收信号中收到了 M 条路径的回波(包括直达波), 接收机轮采一次, 接收机接收的信号 \mathbf{x} 可以写成

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{n} \quad (6)$$

式中, 阵列流形矩阵 \mathbf{A} 为 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \phi_1) \ \mathbf{a}(\theta_2, \phi_2) \ \dots \ \mathbf{a}(\theta_M, \phi_M)]$ 。信号矩阵 \mathbf{S} 为 $\mathbf{S} = [bs_1(\theta_1, \phi_1) \ bs_2(\theta_2, \phi_2) \ \dots \ bs_M(\theta_M, \phi_M)]^T$ 。

3 算法描述

3.1 阵列流形测量

极化敏感圆阵的阵列流形与角度和极化都有关系, 阵列天线存在一定的加工误差, 圆阵的互耦问题也比较严重, 如果直接采用理论计算的阵列流形

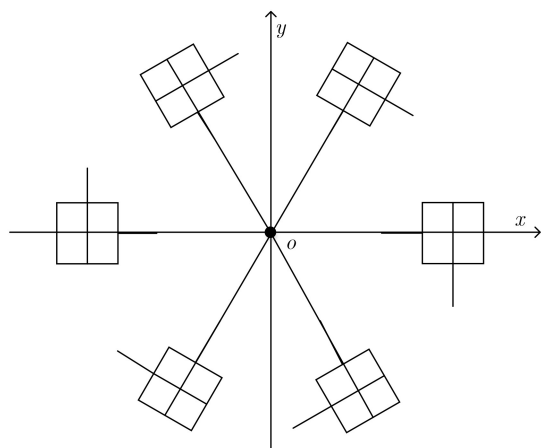


图1 蓝牙阵列模型图

很难满足超分辨的应用。超分辨处理的一个前提就是需要准确已知阵列流形, 所以本文采用暗室测量的方式来获得入射信号分别为水平极化和垂直极化时阵列天线的阵列流形, 由于暗室测量的网格点相对比较稀疏, 测角的时候会有比较大的误差, 为了提高角度估计的精度, 要使网格点变密一些, 需对测量的数据进行插值处理, 获得网格点加密的蓝牙阵列的阵列流形矩阵。图2为插值后的水平极化阵列流形的幅度图及垂直极化阵列流形的幅度图。

3.2 信源极化因子估计

在真实室内测试环境中, 信源的极化方式是未知的, 本文采用最小二乘法对信源的极化方式进行估计。当信源以 (θ, ϕ) 角度入射到阵列天线时, 信源的极化因子可以表示为

$$\mathbf{h}(\theta, \phi) = [h_1(\theta, \phi) \ h_2(\theta, \phi)]^T \quad (7)$$

假设 \mathbf{y} 是实际室内环境下测得的一帧以 (θ, ϕ) 角度入射到阵列天线的 $N \times 1$ 维有效蓝牙数据, 此时, 阵列天线的水平极化导向矢量和垂直极化导向矢量分别为 $\mathbf{v}_H(\theta, \phi)$, $\mathbf{v}_V(\theta, \phi)$, 则极化因子的估计问题可以看作一个最小二乘问题

$$\min \|\mathbf{y} - \mathbf{S}(\theta, \phi) \mathbf{h}(\theta, \phi)\|_2^2 \quad (8)$$

其中, $\mathbf{S}(\theta, \phi) = [\mathbf{v}_H(\theta, \phi) \ \mathbf{v}_V(\theta, \phi)]$, $\mathbf{v}_H(\theta, \phi) = [a_{H1}(\theta, \phi) \ a_{H2}(\theta, \phi) \ \dots \ a_{HN}(\theta, \phi)]^T$, $\mathbf{v}_V(\theta, \phi) = [a_{V1}(\theta, \phi) \ a_{V2}(\theta, \phi) \ \dots \ a_{VN}(\theta, \phi)]^T$ 。

求解式(8)可以得到以角度 (θ, ϕ) 入射到阵列天线时信源的极化因子

$$\mathbf{h}(\theta, \phi) = (\mathbf{S}^H(\theta, \phi) \mathbf{S}(\theta, \phi))^{-1} \mathbf{S}^H(\theta, \phi) \mathbf{y} \quad (9)$$

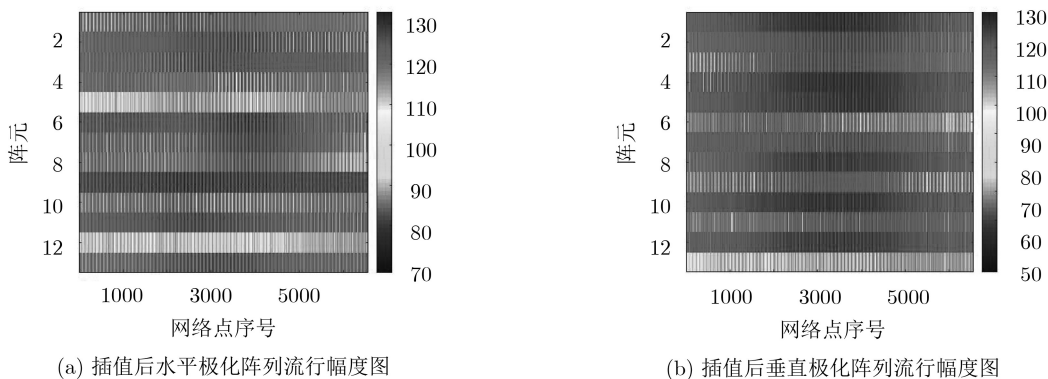


图 2 插值后水平极化阵列流形及垂直极化阵列流形幅度图

3.3 极化稀疏贝叶斯学习

阵列流形矩阵 D 代表着空间各个角度的未知极化的信源信号的蓝牙阵列的响应，每一帧室内环境下测得的数据都是一个信源，估计信源角度的问题可以看作是一个稀疏信号恢复的问题，稀疏恢复的模型为

$$\mathbf{x} = D\mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (10)$$

其中， \mathbf{x} 是实际室内环境下测得的某一帧有效的蓝牙数据， D 是极化合成字典矩阵， \mathbf{n} 是噪声向量， \mathbf{a} 是 P 维待求解的向量， $\mathbf{a} = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_P]^T$ 。

得到稀疏解后， \mathbf{a} 中最大值的位置对应信源的角度，利用快收敛稀疏贝叶斯学习(FCSBL)^[16]算法可以估计出每一帧信源的角度，但FCSBL算法中并未考虑极化因素，本文给出考虑极化因素的改进算法(P_FCSBL)算法，两种算法得到最后的稀疏解都只需要较少的迭代次数。

P_FCSBL算法的算法步骤如下：

初始化：

$$(\sigma^2)^{(1)} = \hat{\sigma}^2$$

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{S}_i \mathbf{h}_i, i = 1, 2, \dots, P$$

$$D = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \dots \ \mathbf{v}_P]$$

$$\gamma_i^{(1)} = |\mathbf{v}_i^H \mathbf{x}| / |\mathbf{v}_i^H \mathbf{v}_i|, i = 1, 2, \dots, P$$

$$C^{(1)} = \sum_{i=1}^P \gamma_i^{(1)} \mathbf{v}_i^H \mathbf{v}_i + (\sigma^2)^{(1)} \mathbf{I}$$

迭代：

$$\mu^{(j)} = \Gamma^{(j)} D^H (M^{(j)})^{-1} \mathbf{x}$$

$$(\sigma^2)^{(j+1)} = (1/N) \left[\|\mathbf{x} - D\mu^{(j)}\|_2^2 + (\sigma^2)^{(j)} \sum_{i=1}^P \gamma_i^{(j)} \mathbf{v}_i^H (C^{(j)})^{-1} \mathbf{v}_i \right]$$

$$\gamma_i^{(j+1)} = \left| \gamma_i^{(j)} \mathbf{v}_i^H (C^{(j)})^{-1} \mathbf{x} \right|^2, i = 1, 2, \dots, P$$

$$C^{(j+1)} = \sum_{i=1}^P \gamma_i^{(j+1)} \mathbf{v}_i^H \mathbf{v}_i + (\sigma^2)^{(j+1)} \mathbf{I}$$

直到得到一个满足要求的稀疏解。

其中， $\hat{\sigma}^2$ 为初始化噪声功率， $\mathbf{S}_i = [\mathbf{v}_{Hi} \ \mathbf{v}_{Vi}]$ ， \mathbf{v}_{Hi} 为插值后的水平极化阵列流形矩阵中第 i 个角度的蓝牙阵列导向矢量， \mathbf{v}_{Vi} 为插值后的垂直极化阵列流形矩阵中第 i 个角度的蓝牙阵列导向矢量， \mathbf{h}_i 为假设信源从阵列流形矩阵中第 i 个角度入射时信源的极化因子， D 是极化合成字典矩阵，代表着空间各个角度的未知极化信源信号的蓝牙阵列的响应， \mathbf{v}_i 为字典矩阵 D 中第 i 个角度的蓝牙阵列导向矢量， \mathbf{x} 为某一帧室内实测蓝牙数据， $C^{(1)}$ 为初始协方差矩阵， Γ 是一个由各个 γ 构成的对角矩阵， N 是系统自由度，即蓝牙阵列中阵元的个数。

3.4 信源定位

假设经过 J 次迭代后得到稀疏解 \mathbf{a} ，此时， $\mathbf{a} = [\gamma_1^{(J)} \ \gamma_2^{(J)} \ \dots \ \gamma_P^{(J)}]^T$ ，通过找到 \mathbf{a} 中最大值的位置可以得到信源的角度 (θ, ϕ) 。

估计出信源的角度 (θ, ϕ) 后，假设高度 h 已知，可得 $R = h / \sin \theta$ ，再利用图3信号模型中的几何关系即可找到信源位置 $[x \ y \ z]$ 。

$$x = R \cos \theta \cos \phi, y = R \cos \theta \sin \phi, z = R \sin \theta \quad (11)$$

4 实测数据处理

实验1 蓝牙阵列固定于一定高度处，字典矩

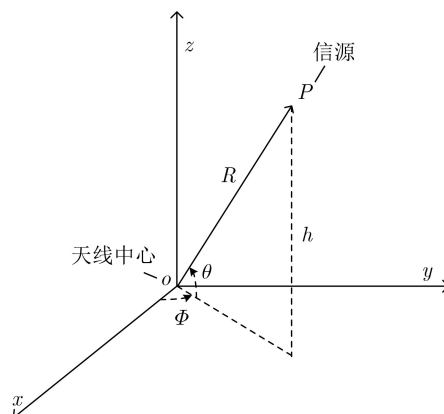


图 3 信号模型图

阵中,方位角的范围为 $[-60^\circ : \tilde{1} : 60^\circ]$,俯仰角的范围为 $[-50^\circ : \tilde{1} : 31^\circ]$,中心频率为2.4 GHz的远场蓝牙信号连续发射。阵元个数分别为5, 9和13,信源轨迹为沿 y 轴的一条直线,对连续发射中接收的每一帧蓝牙信号进行稀疏恢复,并对信源的位置用 α - β 滤波器进行追踪,阵元个数不同时的定位结果如图4所示。

由图4可以看出,定位的轨迹近似为一条平行于 y 轴的直线,与实际轨迹相一致。当阵元个数为5时,部分点的定位误差达到了1 m左右;当阵元个数为9时,部分点的定位误差达到了0.6 m左右;当阵元个数为13时,定位误差基本上都在0.4 m以下。随着阵元个数的增加,FCSBL算法和P-FCSBL算法得到的信源的轨迹的误差均是越来越小,定位及追踪的轨迹越来越接近真实的轨迹。

实验2 蓝牙阵列固定于一定高度处,字典矩阵中,方位角的范围为 $[-60^\circ : \tilde{1} : 60^\circ]$,俯仰角的范围为 $[-50^\circ : \tilde{1} : 31^\circ]$,中心频率为2.4 GHz的远场蓝牙信号连续发射。阵元个数为13,信源轨迹为沿 y 轴的一条直线,对连续发射中接收的每一帧蓝牙信号进行定位,并对信源的位置用 α - β 滤波器进行追踪,图5给出了两次实验的RSS算法、FCSBL算法及P-FCSBL的定位追踪结果。

由图5可以看出,RSS算法定位误差较大,无法得到信源真实运动轨迹;FCSBL算法及P-FCSBL算法两次追踪的曲线都近似为一条平行于 y 轴的直线,与实际轨迹相一致。这说明利用FCSBL算法及P-FCSBL算法进行定位及用 α - β 滤波器进行追踪都可以较好地得到信源运动的轨迹,P-FCSBL算法得出的轨迹更加接近真实轨迹。

计算两次追踪的每一帧信源定位位置与真实位置之间的距离均方根误差,结果如图6所示。

由图6可以看出,RSS算法定位误差在1 m左右,且波动较大;FCSBL及P-FCSBL两种算法的定位精度都比较可靠,FCSBL算法定位精度波动相对较大,部分误差达到了0.4 m以上,P-FCSBL算法定位精度比较稳定,定位误差最大在0.3 m左右。

对两次实验的定位误差进行对比分析得到表1。

由表1可以看出,RSS算法定位误差大部分在1 m以上,FCSBL算法定位误差基本上在0.4 m以下,P-FCSBL算法定位误差基本上在0.2 m以下。可见,FCSBL和P-FCSBL两种算法的定位精度都比较高,考虑信源极化后,定位的精度和稳定性都有所提升。

5 结论

针对复杂室内环境内蓝牙定位困难的问题,本

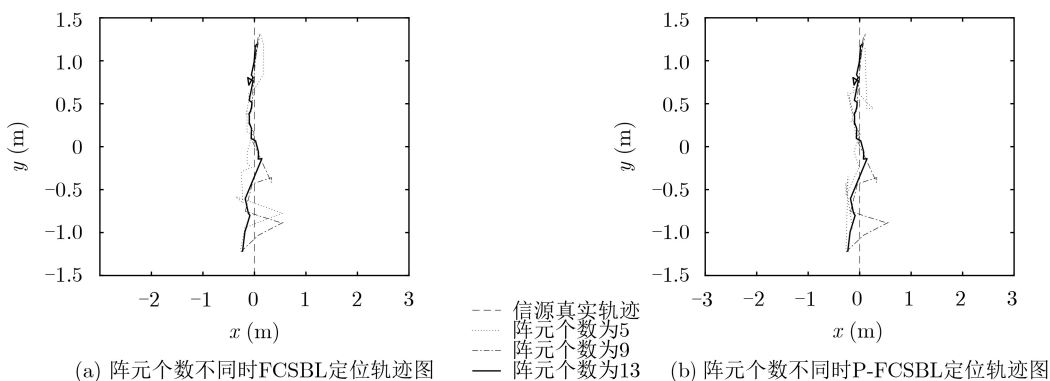


图4 阵元个数不同时定位轨迹图

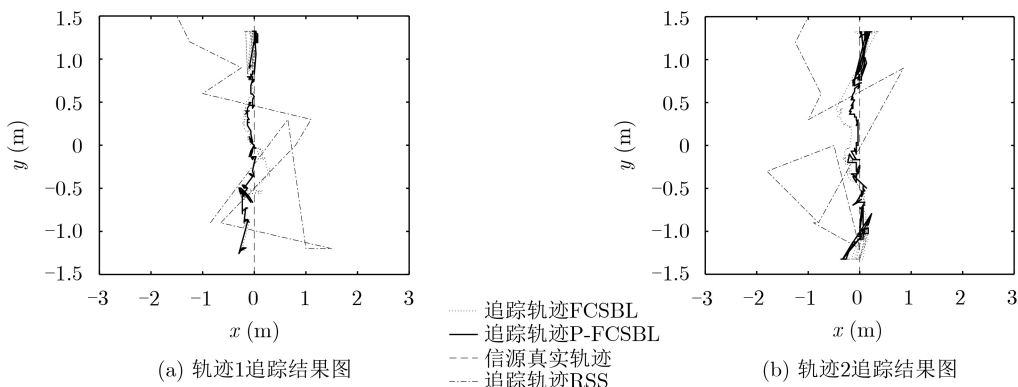


图5 信源轨迹追踪图

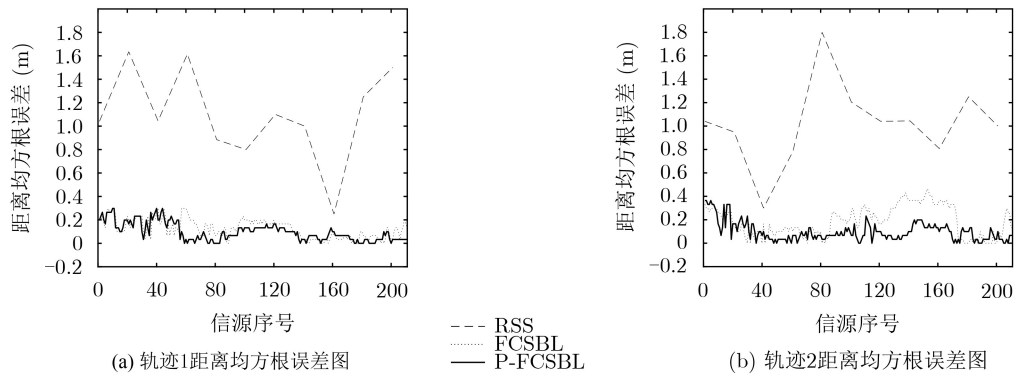


图 6 距离均方根误差图

表 1 两次实验定位误差分析统计表

实验	平均定位误差(m)	误差 ≤ 0.2 m的占比(%)	误差 ≤ 0.4 m的占比(%)	误差 ≤ 1 m的占比(%)
轨迹1 RSS	1.0858	0	3.48	36.32
轨迹2 RSS	1.0196	0	3.98	40.80
轨迹1 FCSBL	0.1247	87.16	100	100
轨迹2 FCSBL	0.1843	58.29	98.10	100
轨迹1 P-FCSBL	0.0930	90.79	100	100
轨迹2 P-FCSBL	0.0990	93.23	100	100

文提出了一种基于双极化蓝牙阵列和极化快收敛稀疏贝叶斯学习的室内定位算法。这种定位方法不再是传统的基于信号强度的室内定位方法，而是基于蓝牙信号的幅度、相位和极化，利用极化敏感阵列和P-FCSBL算法提取存在着大量多径的接收信号种的直达波进行定位，最后的实验结果证明，相对于传统的定位精度只有米级的基于信号强度的室内定位技术，定位精度有较大改善，定位结果比较可靠。

参 考 文 献

- [1] WANG Bang, CHEN Qiuyun, YANG L T, *et al.* Indoor smartphone localization via fingerprint crowdsourcing: Challenges and approaches[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(3): 82–89. doi: [10.1109/MWC.2016.7498078](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7498078).
- [2] 陈锐志, 陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1316–1326. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20170383](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20170383).
CHEN Ruizhi and CHEN Liang. Indoor positioning with smartphones: The state-of-the-art and the challenges[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1316–1326. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20170383](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20170383).
- [3] 周牧, 刘仪瑶, 杨小龙, 等. 基于Wi-Fi即时定位与映射像素模板匹配的室内运动地图构建与定位[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(5): 1050–1058. doi: [10.11999/JEIT170781](https://doi.org/10.11999/JEIT170781).
ZHOU Mu, LIU Yiyao, YANG Xiaolong, *et al.* Indoor mobility map construction and localization based on Wi-Fi simultaneous localization and mapping pixel template matching[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(5): 1050–1058. doi: [10.11999/JEIT170781](https://doi.org/10.11999/JEIT170781).
- [4] 李方敏, 张韬, 刘凯, 等. 基于距离测量和位置指纹的室内定位方法研究[J]. *计算机学报*, 2019, 42(2): 339–350. doi: [10.11897/SP.J.1016.2019.00339](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2019.00339).
LI Fangmin, ZHANG Tao, LIU Kai, *et al.* An indoor positioning method based on range measuring and location fingerprinting[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2019, 42(2): 339–350. doi: [10.11897/SP.J.1016.2019.00339](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2019.00339).
- [5] SADOWSKI S and SPACHOS P. RSSI-based indoor localization with the internet of things[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 30149–30161. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2843325](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2843325).
- [6] ZHANG Meiyun and CAI Wenyu. Multivariate polynomial interpolation based indoor fingerprinting localization using Bluetooth[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2018, 2(4): 7001704. doi: [10.1109/LENS.2018.2878558](https://doi.org/10.1109/LENS.2018.2878558).
- [7] GU Yu and REN Fuji. Energy-efficient indoor localization of smart hand-held devices using Bluetooth[J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 1450–1461. doi: [10.1109/ACCESS.2015.2441694](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2441694).
- [8] LOVÓN-MELGAREJO J, CASTILLO-CARA M, HUARCAYA-CANAL O, *et al.* Comparative study of supervised learning and metaheuristic algorithms for the development of Bluetooth-based indoor localization mechanisms[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 26123–26135. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2899736](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899736).

- [9] SUBEDI S, GANG H S, KO N Y, *et al.* Improving indoor fingerprinting positioning with affinity propagation clustering and weighted centroid fingerprint[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 31738–31750. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2902564](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902564).
- [10] XIAO Chao, YANG Daiqin, CHEN Zhenzhong, *et al.* 3-D BLE indoor localization based on denoising autoencoder[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 12751–12760. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2720164](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2720164).
- [11] SUN Wei, XUE Min, YU Hongshan, *et al.* Augmentation of fingerprints for indoor WiFi localization based on Gaussian process regression[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10896–10905. doi: [10.1109/TVT.2018.2870160](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2870160).
- [12] 田增山, 王阳, 周牧, 等. 基于自适应渐消记忆的蓝牙序列匹配定位算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1381–1388. doi: [10.11999/JEIT18063](https://doi.org/10.11999/JEIT18063).
- TIAN Zengshan, WANG Yang, ZHOU Mu, *et al.* Adaptive fading memory based Bluetooth sequence matching localization algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1381–1388. doi: [10.11999/JEIT18063](https://doi.org/10.11999/JEIT18063).
- [13] GUO Xiansheng, LI Lin, ANSARI N, *et al.* Accurate WiFi localization by fusing a group of fingerprints via a global fusion profile[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(8): 7314–7325. doi: [10.1109/TVT.2018.2833029](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2833029).
- [14] YU Ning, ZHAN Xiaohong, ZHAO Shengnan, *et al.* A precise dead reckoning algorithm based on Bluetooth and multiple sensors[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(1): 336–351. doi: [10.1109/JIOT.2017.2784386](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2784386).
- [15] 陈显舟, 陈周, 杨旭, 等. 阵列单通道轮采式快速高精度定位算法[J]. 现代雷达, 2017, 39(8): 49–53. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.011](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.011).
- CHEN Xianzhou, CHEN Zhou, YANG Xu, *et al.* Fast high-resolution passive localization algorithm based on single-channel using switch-antenna array[J]. *Modern Radar*, 2017, 39(8): 49–53. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.011](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.08.011).
- [16] WANG Zetao, XIE Wenchong, DUAN Keqing, *et al.* Clutter suppression algorithm based on fast converging sparse Bayesian learning for airborne radar[J]. *Signal Processing*, 2017, 130: 159–168. doi: [10.1016/j.sigpro.2016.06.023](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.06.023).
- 刘 坤: 男, 1995年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理.
- 吴建新: 男, 1982年生, 副教授, 研究方向为阵列信号处理, 雷达信号处理等.
- 甄 杰: 女, 1969年生, 研究员, 研究方向为室内外一体化定位与导航.
- 王 彤: 男, 1974年生, 教授, 研究方向为阵列信号处理、空时信号处理、自适应信号处理.