

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.06.017

# 基于最优传播路径的 EMA/EKF 定位算法研究

盛孟刚, 娄兴, 陈洋卓, 张带凤, 龚巧婷

(湘潭大学自动化与电子信息学院, 湖南湘潭 411105)

**摘要:** 针对室内环境下蓝牙系统易受非视距影响, 采用蓝牙到达角(AOA)解决室内行人定位存在较大偏差的问题, 研究基站几何分布和定位算法对定位精度的影响。关于蓝牙信号在传播过程中易衰减及产生多径等因素影响定位性能, 对基站安装位置与信号接收范围关系进行研究, 建立基站分布优化模型, 使用遗传算法(GA)求解基站布设最优位置。在此基础上, 提出了基于改进指数移动平均(EMA)算法结合扩展卡尔曼滤波(EKF)算法进行误差补偿。实验结果表明, 该方法的平均定位误差为 0.89m, 相较于 EKF 定位精度更高, 证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 室内定位; 蓝牙; 基站分布; EMA 算法; EKF 算法

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-8110(2022)06-0141-09

## Research on EMA/EKF Localization Algorithm Based on Optimal Propagation Path

SHENG Meng-gang, LOU Xing, CHEN Yang-zhuo, ZHANG Dai-feng, GONG Qiao-ting

(School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** In this paper, bluetooth angle of arrival (AOA) algorithm is taken into account to solve indoor based positioning problem that the bluetooth signals are prone to be affected by non-line-of-sight, which leads to large deviation of pedestrian positioning results, and the influences of the geometric distribution of base stations and positioning algorithms on positioning accuracy are studied. In the case of non-line-of-sight, the signal attenuation and multipath during bluetooth signal propagation affect the positioning accuracy. According to the relationship between the installation position of the base station and the signal receiving range, the base station distribution optimization model is established and the optimal location of base station layout is obtained by genetic algorithm (GA). On this basis, error compensation based on improved exponential moving average (EMA) algorithm combined with extended Kalman filter (EKF) algorithm is proposed. Experimental results show that, the average positioning error of the proposed method is 0.89m, which is more accurate than that of EKF, proving the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Indoor positioning; Bluetooth; Base station distribution; EMA algorithm; EKF algorithm

收稿日期: 2021-12-31; 修订日期: 2022-02-17

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目资助(QL20210154)

作者简介: 盛孟刚(1975-), 女, 副教授, 主要从事工程机械智能化控制方面的研究。

## 0 引言

在实际生活中,人们对定位服务不再仅满足于室外定位,对于室内定位的需求也日益增长,因此室内定位技术也越来越受重视。蓝牙定位技术功耗低,定位所需基站数量较少,使其定位成本低廉,且定位精度高,更适用于室内定位。目前,蓝牙室内定位主要采用接收信号强度指示(Received Signal Strength Indicator, RSSI)<sup>[1]</sup>和到达角(Angle-of-Arrival, AOA)<sup>[2]</sup>进行定位,随着蓝牙 5.1 协议的颁布,基于 AOA 定位方法使蓝牙定位系统精度从米级提高到分米级。

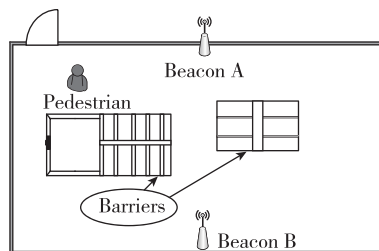
蓝牙 AOA 定位研究通常从基站布设和定位算法性能提升两方面进行分析。其中,在基站布设方面,采用 AOA 算法进行定位至少需要 2 个基站才能完成行人定位,而基站的分布会对定位精度产生影响,现已有部分学者对此问题进行了研究。文献[3]研究了基站分布对于定位精度的影响,对视距(Line-of-Sight, LOS)环境中基站的分布进行研究,该研究所提出的 Y 型基站分布模型信号覆盖率达 88.6%,但该系统适用于室外定位,且定位所需基站较多,定位成本较高;文献[4]对天线阵列排列进行研究,通过消除基站天线阵列分布造成的误差从而提高定位精度,该方法二维定位精度为 1.45m。在定位算法方面,文献[5]提出了一种使用硬件设备提高 AOA 精度的方法,该方法测试误差达 0.19°,但定位所使用的硬件设备成本较高;文献[6]提出了一种用于低功耗蓝牙定位的高精度 AOA 估计算法,该算法考虑载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO), AOA 平均测量误差为 5°,但该方法并未考虑非视距(Non-Line-of-Sight, NLOS)影响;文献[7]对基于相位差的 AOA 定位算法进行研究, AOA 平均测试误差达 1.9°,该方法有效提高了 AOA 测试精度,但只针对 LOS 情况下进行研究,并考虑 NLOS 对测试精度的影响;文献[2]为提高测量角度的准确性,采用卡尔曼滤波器和高斯滤波器对原始 I/Q 采样信息进行处理,减少由 NLOS 造成的多径、噪声等影响,通过非线性最小二乘算法进行拟合,最终得到角度测量误差小于 1°;文献[8]为消除无线信道对接收信号的影响,引入最小二乘算法、零迫等化器和快速傅里叶变换对 I/Q 采样信息进行处理,测量角度误差小于 1°;文献[9]对角度测量值进行加权,增加了测量值准确度,

平均定位误差低于 0.23m,但定位过程中有出现位置跳变的情况;文献[10]使用 MUSIC 算法对角度测量值进行处理,融合定位误差小于 2m。以上研究主要针对信号解析带来的误差,并未考虑 NLOS 范围与基站位置分布的关系对于定位精度的影响。

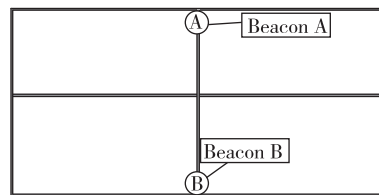
本文对基站安装位置与基站接收信号范围的关系进行研究,通过改变基站安装位置增加蓝牙信号视距接收范围。在此基础上提出了适用于室内环境下的蓝牙定位方法,通过基于蓝牙 AOA 的定位算法,提出了改进的指数移动平均(Exponential Moving Average, EMA)算法结合扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)算法对室内行人进行定位。

## 1 基于遗传算法的最优基站几何分布

在有较多障碍物的定位场景中,如图 1 所示,考虑障碍物对蓝牙信号造成的遮挡,使蓝牙信号到达接收点前存在折射和反射等情况,出现信号多径传播,影响接收端接收信号的质量,使目标位置解算存在较大偏差。



(a)室内基站安装俯视图



(b)室内基站仰视图

图 1 基站安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of base station installation

### 1.1 蓝牙基站布设位置与 NLOS 范围关系

使用天线阵列进行蓝牙信号接收,由文献[11]可知,蓝牙基站天线阵列接收范围存在 30°较差区域,如图 2(a)中角  $\beta$  所示,当待测目标处于该区域内时,无法对角度进行准确测量。当由于基站布设

不合理导致室内部分区域处于该接收范围之内时,会影响蓝牙定位精度。若为提高定位精度加设定位基站,会导致定位成本增加。

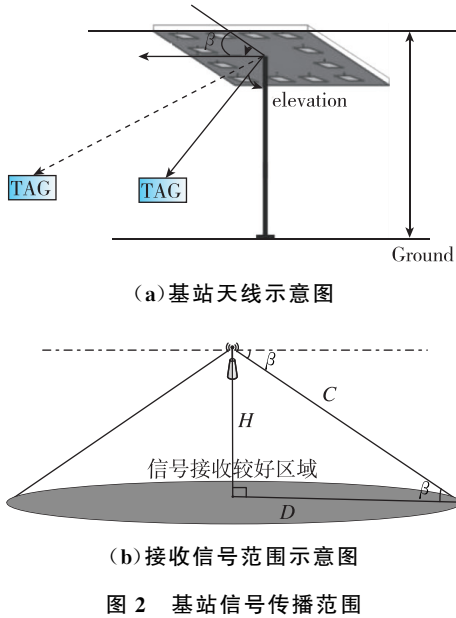


图 2 基站信号传播范围

当室内存在较少障碍物时,部分区域会受到弱 NLOS 影响,如图 3 所示。

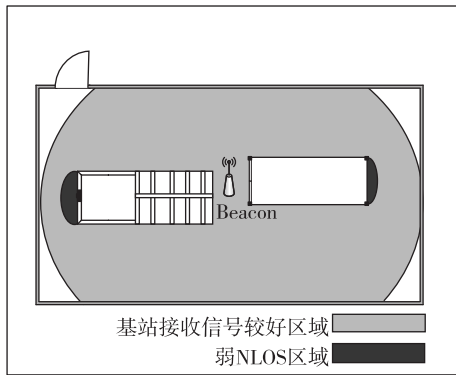


图 3 室内信号接收范围图

Fig. 3 Receiving range of indoor signal

根据图 2(b)所示几何关系,则基站信号接收范围存在如下关系

$$D = \sqrt{C^2 - H^2} \quad (1)$$

其中,  $D$  为信号接收范围半径;  $H$  为基站安装高度。图 2(b) 中  $\beta = 30^\circ$ , 则

$$C = H / \sin(\beta) \quad (2)$$

即  $C = 2H$ 。

则式(1)可表示为

$$D = \sqrt{3} H \quad (3)$$

考虑单个障碍物对于基站接收信号范围的遮挡影响,如图 4 和图 5 所示,则 NLOS 区域范围大小与基站安装位置存在如下关系

$$\frac{h}{H} = \frac{J_x}{J_x + l_x} \quad (4)$$

其中,  $H$  为基站布设高度;  $h$  为障碍物高度;  $l_x = |X - x^i|$  为障碍物与基站间水平距离,  $x^i$  为障碍物的  $X$  轴坐标;  $J_x$  为由障碍物产生的 NLOS 范围大小,对式(4)进行等式变换,则

$$J_x = \frac{hl}{H-h} = \frac{h \cdot |X - x^i|}{H-h} \quad (5)$$

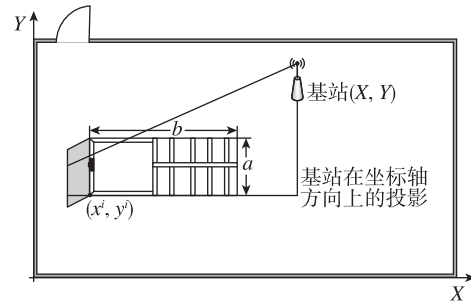


图 4 俯视图

Fig. 4 Top view

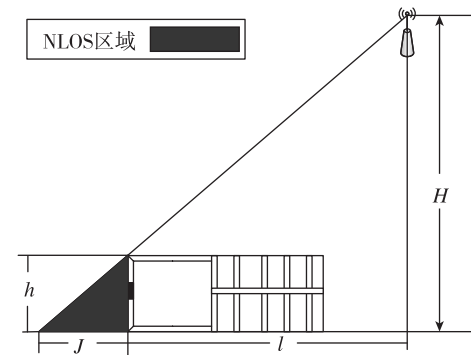


图 5 障碍物造成 NLOS 范围大小

Fig. 5 Non-line-of-sight range caused by obstacles

假设室内存在  $N (N \geq 2)$  个障碍物,则由基站布设位置可得

$$J_{xi} = \sum_{i=1}^N \frac{h_i \cdot |X - x^i|}{H - h_i} \quad (6)$$

即使使由基站布设产生的 NLOS 信号接收范围  $S$  为

$$S_x = \sum_{i=1}^N J_{xi} \times b_i \quad (7)$$

其中,  $J_{xi} (i = 1, 2, \dots, N)$  为在二维区域中,第

$i$  个障碍物的遮挡产生的 NLOS 范围的高;  $b_i (i = 1, 2, \dots, N)$  为第  $i$  个障碍物的长度。

同理可以推出  $Y$  轴方向上的障碍物所产生的 NLOS 范围大小为

$$S_y = \sum_{i=1}^N J_{y_i} \times a_i \quad (8)$$

其中,  $J_{y_i} (i = 1, 2, \dots, N)$  为在二维区域中, 第  $i$  个障碍物的遮挡产生的 NLOS 范围的高;  $a_i (i = 1, 2, \dots, N)$  为第  $i$  个障碍物的宽度。

由以式(7)、式(8)可以得到室内环境下的 NLOS 范围的目标函数为

$$\min S = S_x + S_y = b_i \sum_{i=1}^N \frac{h_i \cdot |X - x^i|}{H - h_i} + a_i \sum_{i=1}^N \frac{h_i \cdot |Y - y^i|}{H - h_i} \quad (9)$$

### 1.2 基于遗传算法的最优基站位置

有很多的优化方法可以对目标函数式(9)进行求解, 本文选用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行求解。

遗传算法流程如图6所示, 通过对基站坐标进行编码, 使用目标函数式(9)进行适应度计算, 经过个体选择、交叉、变异之后, 得到基站优化二维坐标( $X, Y$ ), 而通常室内蓝牙基站采用吸顶式安装, 基站安装高度为室内空间高度, 即  $Z = H$ 。则可以确

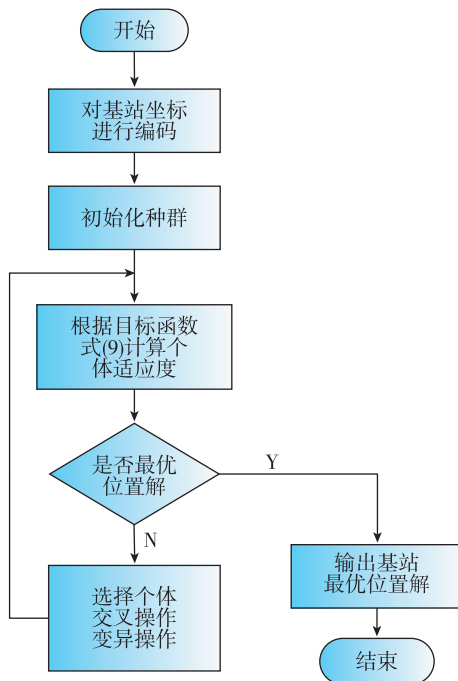


图6 遗传算法流程图

Fig. 6 Flow chart of genetic algorithm

定基站的三维坐标( $X, Y, Z$ )。

### 2 带阈值的 EMA 误差修正算法

针对行人行走规律, 以文献[12]提供的身高为170cm男子步行数据为例, 如图7所示, 其中A、B、C点分别表示男子右脚抬起、右脚落地、左脚抬起的行走动作。步行平均速度为0.9193m/s, 速度幅度变化为0.2m/s, 角速度为7.954rad/s。两足支撑时间为0.4s, 单足支撑时间为0.45s。

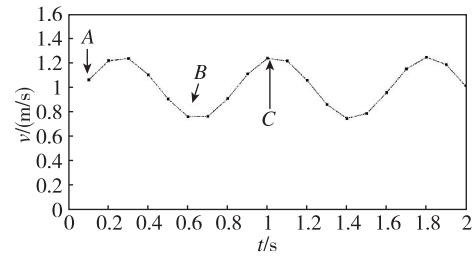


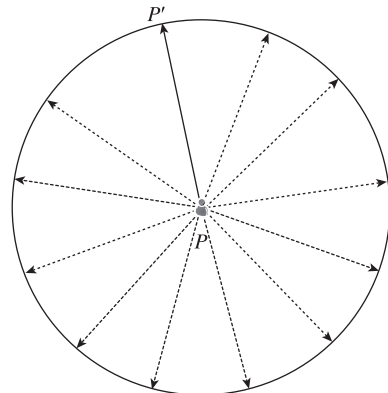
图7 170cm男子行走速度分布示意图

Fig. 7 Diagram of walking speed of a 170cm male

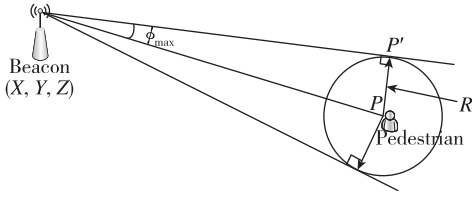
行人在室内的运动方向为随机事件, 具体如图8(a)所示, 圆心  $P$  表示行人上一时刻的位置, 虚线代表行人可能行走的方向。从图8中可以看出, 行人可以选择向任何方向前进, 由于行人步长和上一时刻的位置  $P(x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})$  已知, 如图8(b)所示, 因此可以估计行人运动到下一位置与基站之间的夹角最大值  $\phi_{max}$  为

$$\phi_{max} = \arcsin(d/BP) \quad (10)$$

其中,  $d = \bar{v} \cdot \Delta t$  为行人上一位置到当前位置的距离,  $\bar{v}$  为行人步行平均速度,  $\Delta t$  为上一位置到当前位置所用时间;  $BP = \sqrt{(X_i - x_{t-1})^2 + (Y_i - y_{t-1})^2 + (Z_i - z_{t-1})^2}$  为上一时刻行人位置与基站之间的距离,  $(X_i, Y_i, Z_i)$  为第  $i (i \geq 2)$  个基站坐标,  $(x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})$  为行人上一时刻的坐标。



(a)行人运动方向示意图



(b) 行人运动与基站之间形成夹角示意图

图 8 行人方向与基站夹角

Fig. 8 Angle between pedestrian movement direction and base station

为判断当前位置测量值的可靠性,将行人上一时刻位置  $P$  处的测量角度  $\theta_{t-1}$  与当前位置的测量角度  $\theta_t$  相减,与  $\phi_{\max}$  进行比较,若两者之差值小于  $\text{threshold}(\epsilon)$ ,表示当前测量值可信,用 Y 表示;当两者之差值大于  $\text{threshold}(\epsilon)$ ,表示当前测量值具有较大偏差,用 N 表示,对当前测试点进行重采样,采用 EMA 算法更新该点测量值。

$$\text{threshold}(\epsilon) - |\phi_{\max} - |(\theta_t - \theta_{t-1})|| = \begin{cases} > 0 & \text{Y} \\ < 0 & \text{N} \end{cases} \quad (11)$$

为消除测量偏差,本文对 EMA 算法进行改进,引入阈值对角度信息进行处理,根据行人在室内的运动轨迹判别该点测量值可信度,如式(11)所示。若该点的测量值不可信,表示该点与真实值之间存在较大偏差,将本次测量值舍弃,对该点进行重采样,采集  $n$  组测量数据,使用 EMA 算法进行处理,EMA 算法具体如下:

假设在点  $(x, y, z)$  处采集到  $n$  个角度值数据:  $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ ,当前状态的平均值  $\bar{\theta}_j$  可通过式(12)计算得到

$$\mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} \frac{-(y - Y_1)}{D_1^2} & \frac{-(y - Y_2)}{D_2^2} & \frac{1}{1 + \left(\frac{z - Z_1}{D_1}\right)^2} \times \frac{-2(x - X_1)}{D_1^4} \\ \frac{x - X_1}{D_1^2} & \frac{x - X_2}{D_2^2} & \frac{1}{1 + \left(\frac{z - Z_1}{D_1}\right)^2} \times \frac{-2(y - Y_1)}{D_1^4} \\ 0 & 0 & \frac{1 + \left(\frac{z - Z_1}{D_1}\right)^2}{D_1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中

$$D_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2}$$

$$D_2 = \sqrt{(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2}$$

$$\bar{\theta}_j = \beta \cdot \bar{\theta}_{j-1} + (1 - \beta) \cdot \theta_j \quad (12)$$

其中,  $\bar{\theta}_j$  表示前  $j$  个角度测量值的指数移动平均值 ( $\bar{\theta}_0 = 0$ );  $\beta$  是加权权重值 (一般设为  $0.9 \sim 0.999$ )。

如果将这里的  $\bar{\theta}_j$  展开,可得

$$\bar{\theta}_j = \alpha^n \bar{\theta}_{j-n} + (1 - \alpha)(\alpha^{n-1} \theta_{j-n+1} + \dots + \alpha^0 \theta_j) \quad (13)$$

其中,  $n = \frac{1}{1 - \alpha}$ ,代入可以得到  $\alpha^n = \alpha^{\frac{1}{1 - \alpha}} \approx \frac{1}{e}$ 。

式(13)表示使用 EMA 计算时,过去  $1/(1 - \beta)$  个时刻之前的数值平均会衰减到  $\frac{1}{e}$  的加权比例。

通过 EMA 算法得到测量均值  $\bar{\theta}_n$  后,对测量误差进行补偿

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_n + \eta \quad (14)$$

其中,  $\eta$  为测量误差量,为高斯白噪声。

通过带阈值 EMA 算法处理后的测量数据更接近真实值,结合 EKF 算法估计目标位置,建立对应状态方程如下

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{y - Y_1}{x - X_1}\right) \quad (15)$$

$$\beta_2 = \arctan\left(\frac{y - Y_2}{x - X_2}\right) \quad (16)$$

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{z - Z_1}{\sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2}}\right) \quad (17)$$

其中,  $\beta_1, \beta_2, \alpha_1$  分别为基站 1 与基站 2 测量所得方向角、基站 1 测量所得俯仰角;  $(x, y, z)$  为待测目标位置坐标;  $(X_i, Y_i, Z_i)$  为第  $i$  个基站的坐标,其中  $(i = 1, 2 \dots N, N \geq 2)$ 。

建立对应观测矩阵  $\mathbf{H}$

### 3 实验结果分析

#### 3.1 基站分布对定位精度影响对比实验

本文采用的硬件设备如下:蓝牙芯片为 nRF-

52832,主控芯片为 STM32F103C8T6,具体参数如表 1 所示。

表 1 蓝牙设备具体规格参数

Tab. 1 Specifications of bluetooth devices

标签传输距离/m	基站覆盖范围 半径/m	传输速率/ (Mbit/s)	功耗/W
>20	6m	1	0.01~0.5

针对基站分布对定位精度的影响进行研究,室内放置障碍物,障碍物参数如表 2 所示。

表 2 实验场地参数表

Tab. 2 Experimental site parameters

实验场地 面积/m <sup>2</sup>	障碍物 1		障碍物 2	
	坐标	长宽高/m	坐标	长宽高/m
10×7	(2,3)	3×2.5×1.8	(6,4)	2.5×1.5×1.7

其中,障碍坐标指障碍物离坐标原点最近的点的坐标,将以上参数代入式(9),使用遗传算法求取基站坐标,如图 9 所示。

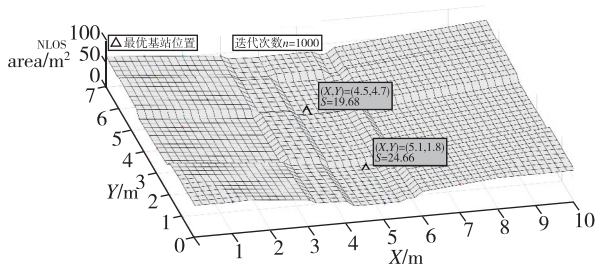


图 9 遗传算法求得基站坐标图

Fig. 9 Base station coordinates obtained by genetic algorithm

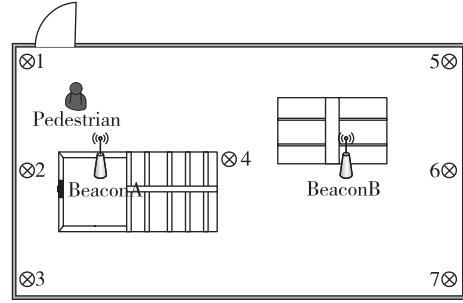
为比较本方案的定位性能,进行不同基站安装对比实验,基站方案如表 3 所示。

表 3 三种基站位置坐标表

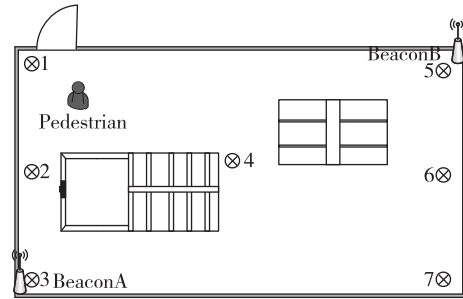
Tab. 3 Coordinates of three base stations

方案	基站 A 坐标	基站 B 坐标
1	(3,3,3)	(6,3,3)
2	(0,0,3)	(10,7,3)
3(本文所提方法)	(4.5,4.7,3)	(5.1,1.8,3)

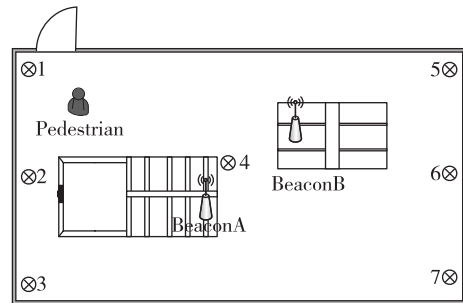
与表 3 相对应的基站安装如图 10 所示,其中,第三种基站布设方案为本文所提方法。



(a) 方案 1



(b) 方案 2

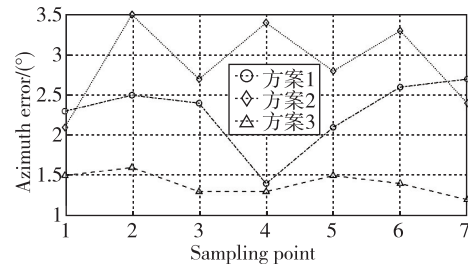


(c) 方案 3

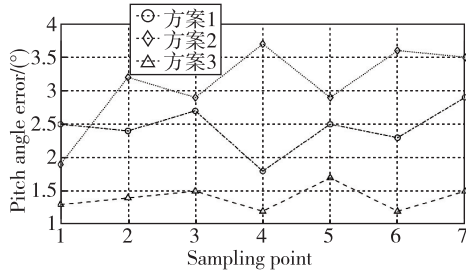
图 10 三种不同基站分布方案

Fig. 10 Three different base station distribution schemes

取室内场景中 7 个测试点对三种基站分布方案分别进行实验,针对每个测试点,对 2 个基站所测角度误差进行平均,结果如图 11 所示。



(a) 方位角误差对比



(b) 俯仰角误差对比

图 11 三种布置方案角度测量误差对比

Fig. 11 Comparison of angle measurement errors among three layout schemes

由图 11 可知,本文所提方法(方案 3)的角度测量误差更小,说明在同等环境下,通过本文所提方法进行基站布设,能有效提高角度测量精度。对三种方案分别进行定位实验分析,采用基本的 EKF 算法进行定位,结果如表 4 所示。

表 4 不同基站布置方案测试结果对比表

Tab. 4 Comparison table of test results of different base station layout schemes

方案	总面积/ m <sup>2</sup>	NLOS 区域 面积/m <sup>2</sup>	平均方位角 误差/(°)	平均俯仰角 误差/(°)	平均定位 误差/m
1	70	57.86	2.3	2.4	3.5
2	70	67.54	2.8	3.1	4.3
3	70	44.34	1.4	1.3	1.7

由表 4 可知,在同样环境下,本文所提基站布设方案(方案 3)NLOS 区域为 44.34m<sup>2</sup>,相较于方案 1、方案 2 分别减少了 23%、34%;本文所提方法的方位角平均测量误差为 1.4°,相较于方案 1、方案 2 分别减少了 39%、50%;平均俯仰角测量误差为 1.3°,相较于方案 1、方案 2 分别减少了 46%、58%。且从定位精度分析可知,同等工况下本文所提方法(方案 3)的定位精度明显高于方案 1、方案 2,说明了本文所提基站布设方案能有效提高室内定位精度。

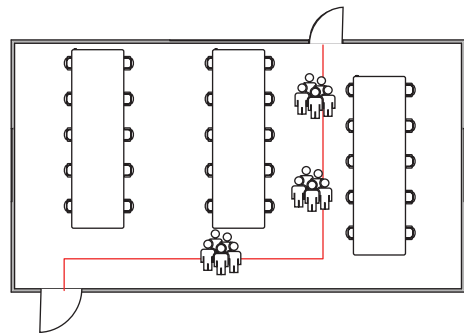
### 3.2 改进的 EMA/EKF 定位算法对比实验

结合本文所提基站布设方案,对本文提出的改进的 EMA/EKF 算法定位性能进行验证,实验场景为实际室内(10×7)m<sup>2</sup> 的办公场景,如图 12(a)所示。

在实验场景中,如图 12(b)所示,室内有一条总长 13m、宽 1.8m 的过道,该过道有较多行人经过或逗留,行人平均身高 175cm,采用本文第 1 章中提出的基站优化理论,解算出该场景下基站 A、B 的坐标如表 5 所示,然后进行 EMA/EKF 定位算法实验。



(a) 实际实验场景图



(b) 办公场景内行人较多路线

图 12 实验场景图

Fig. 12 Experimental scene diagram

表 5 办公场景下的基站优化分布

Tab. 5 Optimized distribution of base stations in office scenarios

过道总长/m	过道宽度/m	行人平均身高/m	优化基站坐标
13	1.8	1.75	A(4.3,5.2,3) B(5.5,2.3,3)

实验场景内有办公桌,并有行人在室内自由活动,身高 170cm 的男子在室内运动轨迹如图 13 所示,取  $\text{threshold}(\epsilon) = \phi_{\max}/2$ , 该值为经验值,通过预实验获取。

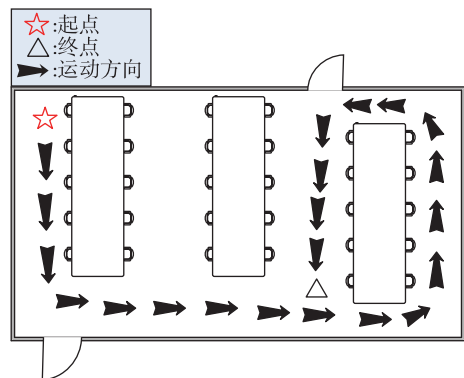


图 13 运动轨迹图

Fig. 13 Motion trajectory diagram

从图 14 可以看出,本文所提算法定位轨迹更接近于真实的行走轨迹,特别是当待定位人员周围出现较多行人,对待定位人员发出的蓝牙信号产生遮挡时,使用 EKF 解算出的待定位行人位置出现较大偏差,轨迹出现较大的偏移,而本文所提方法能有效地抑制此偏差,提高定位精度。

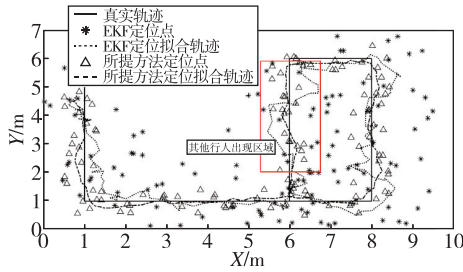


图 14 本文所提方法定位轨迹与 EKF 算法定位轨迹对比  
Fig. 14 Comparison between the positioning trajectory of the proposed method and that of EKF algorithm

将本文所提方法与 EKF 算法的定位误差进行对比,如图 15 所示,本文所提方法定位误差曲线低于 EKF 算法定位误差曲线,且使用 EKF 算法进行定位存在位置跳变的情况,而本文所提方法解决了这一问题。为进一步说明本文所提算法的有效性,自定义阈值检测率进行定位性能检验,定义如式 (19)所示。

$$Th = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (19)$$

其中,  $T$  为总的测量次数; $t$  为测量值超过阈值的次数。

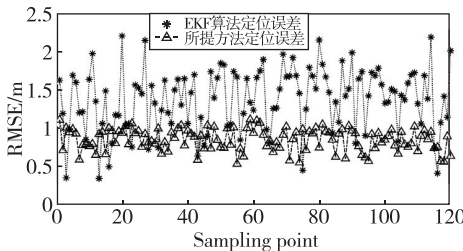


图 15 本文提出方法与 EKF 定位误差对比  
Fig. 15 Comparison of positioning errors between the proposed method and EKF

本文所提方法与 EKF 定位算法性能对比如表 6 所示。

如表 6 所示,本文所提方法的阈值检测率为 76%,平均定位误差为 0.89m,最大定位误差小于 1m,定位性能优于 EKF 算法,说明了本文提出方法

的有效性。

表 6 本文所提算法定位性能分析表

Tab. 6 Localization performance analysis table of the proposed algorithm

定位算法	阈值检测率	RMSE/m
EKF	—	1.43
本文所提算法	76%	0.89

### 4 结论

本文针对室内蓝牙定位易受障碍物遮挡等影响定位精度的问题,从两个方面进行研究以提高系统定位性能:1)通过对蓝牙基站布置位置与接收信号范围关系进行研究,根据室内环境优化基站的布置位置,增加基站信号视距接收范围;2)在基站优化的基础上,根据行人行走规律,提出了改进的 EMA 算法,结合 EKF 算法对室内环境中的行人位置进行解算,并对定位误差进行补偿,以提高系统定位性能。通过实验验证,本文提出的方法有效增加了基站信号接收覆盖范围,而且所提算法定位结果明显高于 EKF 算法,解决了采用 EKF 定位过程中出现的位置跳变问题,证明了所提方法的有效性。

### 参考文献

[1] Hoang M T, Yuen B, Dong X, et al. Recurrent neural networks for accurate RSSI indoor localization [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10639-10651.

[2] Kumar G, Gupta V, Tank R. Phase-based angle estimation approach in indoor localization system using bluetooth low energy[C]// Proceedings of 2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), 2020: 904-912.

[3] Lei Y P, Gong F X, Ma Y Q. Optimal distribution for four-station TDOA location system[C]// Proceedings of 2010 3<sup>rd</sup> International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, 2010: 2858-2862.

[4] Yang Z, Liu J Y, Min S, et al. Indoor localization with irregular antenna deployment[C]// Proceedings of 2017 IEEE 86<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2017: 1-5.

[5] Huang C, Zhuang Y, Liu H, et al. A performance evaluation framework for direction finding using BLE AoA/AoD receivers [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(5): 3331-3345.



- [6] Qiu X Y, Wang B W, Wang J, et al. AOA-based BLE localization with carrier frequency offset mitigation[C]// Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2020: 1-5.
- [7] Hajiakhondi-Meybodi Z, Salimibeni M, Plataniotis K N, et al. Bluetooth low energy-based angle of arrival estimation via switch antenna array for indoor localization[C]// Proceedings of 2020 IEEE 23<sup>rd</sup> International Conference on Information Fusion (FUSION), 2020: 1-6.
- [8] Hajiakhondi-Meybodi Z, Salimibeni M, Mohammadi A, et al. Bluetooth low energy-based angle of arrival estimation in presence of rayleigh fading[C]// Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2020: 3395-3400.
- [9] Yang Z, Min S, Liu J Y, et al. Exploiting AoA estimation accuracy for indoor localization: a weighted AoA-based approach [C]// Proceedings of IEEE Wireless Communications Letters, 2019: 65-68.
- [10] Alteneiji A, Ahmad U, Poon K, et al. Indoor localization in multi-path environment based on AoA with particle filter [C]// Proceedings of 2020 3<sup>rd</sup> International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS), 2020: 1-4.
- [11] Nordic Bluetooth AoA Presentation v1.0[S].
- [12] 包志军, 马培菀, 仝建刚, 等. 人行走速度规律的实验研究[J]. 实验室研究与探索, 2000, 19(6): 39-42.  
Bao Zhijun, Ma Peisun, Tong Jiangang, et al. Experimental research on the law of human walking speed[J]. Laboratory Research and Exploration, 2000, 19(6): 39-42(in Chinese).

(编辑:李瑾)