



# 基于三个定向天线RSS的二维到达角估计

冷文

(天津大学电气自动化与信息工程学院,天津300072)

**摘要:**在室内定位设计中,接收信号强度(RSS)容易受到发射功率、信号衰减和多径环境等因素的影响。在锚节点天线高于被测节点天线的条件下,提出一种基于RSS的二维到达角(AoA)估计方法。将三个定向天线作为锚节点的波束切换天线且三个波束的方向图重叠,在测向技术中的和差法理论上,从多径信号分析和克拉美罗下界推导的角度出发,论证当AoA处于方向图重叠区域时RSS差分处理对于多径和噪声干扰具有一定程度的抑制作用,并研究该抑制效果与波束切换天线参数之间的关系。仿真结果表明,在单个锚节点条件下,该方法在约150 m<sup>2</sup>的定位区域范围内获得的平均AoA估计误差为4.3°,具有较高的AoA估计和定位精度。

**关键词:**室内定位;到达角估计;接收信号强度;天线方向图;多径抑制

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式:冷文.基于三个定向天线RSS的二维到达角估计[J].计算机工程,2021,47(5):160-168,175.

英文引用格式:LENG Wen.2D AoA estimation based on RSS of three directional antennas[J].Computer Engineering, 2021,47(5):160-168,175.

## 2D AoA Estimation Based on RSS of Three Directional Antennas

LENG Wen

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**[Abstract]** In the design of indoor positioning systems, Received Signal Strength (RSS) is easily affected by multiple factors including transmit power, signal attenuation and multipath environment. To reduce the interferences, this paper proposes a RSS-based method for estimating 2D Angle of Arrival (AoA) in the case that the anchor node antenna is higher than the measured node antenna. Three directional antennas are used to construct a switched beam antenna of the anchor node, and the patterns of the three beams are overlapped. By using the theory of the sum-difference-method used in direction finding, based on the analysis of multipath signals and derivation of Cramer-Rao Lower Bound (CRLB), it is proved that RSS differential processing can suppress the multipath interference and noise to some extent when the AoA is in the overlapped area of the three patterns. In addition, the relationship between the suppression effect and the parameters of the switched beam antenna is studied. Simulation results show that within the range of about 150 square meters, the average AoA estimation error is 4.3 degrees, which demonstrates the proposed method achieves a high precision of AOA estimation and high positioning accuracy.

**[Key words]** indoor positioning; Angle of Arrival (AoA) estimation; Received Signal Strength (RSS); antenna pattern; multipath suppression

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0057714

### 0 概述

在基于无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)的室内定位设计中,接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)具有测量简便和实现成本低的特点,通过无线信号传播模型中RSS与传输距离之间的非线性关系,估计无线信号收发节

点间的距离,但是RSS不仅受到传输距离的影响,同时还与发射功率以及无线信号传输过程中的能量损耗有关,并且在实际定位系统中发射功率受到电池供电系统中电池能量变化等多方面的影响而不能保持稳定,而代表能量损耗的衰减因子变化与传输环境密切相关且呈现随机分布的特点。现有研究多数假设发射功率和衰减因子是稳定的,主要分析多径

基金项目:天津市自然科学基金(17JCYBJC18600)。

作者简介:冷文(1967—),男,讲师、硕士,主研方向为无线通信、室内定位。

收稿日期:2020-03-13 修回日期:2020-04-14 E-mail:lengwen@tju.edu.cn

和噪声干扰对RSS的影响,而根据不同的研究和实验结果证明<sup>[1-3]</sup>,基于RSS的定位精度不仅受到噪声和多径的影响,也受到发射功率和衰减因子随时间变化特性的影响。文献[1]采用不同位置锚节点的RSS差分处理来抑制发射功率的影响,但是不同传输路径具有相同衰减因子的假设与实际环境存在一定偏差。文献[2-3]通过最大似然法估计发射功率和衰减因子。文献[4-5]采用拟合方法获得RSS和距离之间的非线性关系。文献[6]利用RSS的统计特性抑制多径干扰。

RSS指纹定位是目前的研究热点,包括离线阶段的指纹库建立以及在线阶段的特征匹配算法设计。由于离线和在线两个阶段的时间差异,发射功率、衰减因子以及多径环境等因素都存在变化的可能,目前主要采用统计方法实现RSS指纹定位<sup>[7]</sup>。针对基于RSS的到达角(Angle of Arrival, AoA)估计,研究人员提出了许多解决方案。文献[8]以大型阵列天线为基础,将RSS作为AoA估计的辅助技术。文献[9]基于两个全向天线,利用chirp信号频率差和基于RSS估计的收发节点距离估计离开角(Angle of Departure, AoD)。文献[10-11]通过一个全向天线阵列和一个定向天线形成锚节点天线,RSS值随着锚节点天线的旋转而变化并以此估计AoA,但是旋转天线会导致估计稳定性降低和成本提高,并且不适用于三维空间。文献[12-13]使用射频p-i-n二极管来实现波束切换。文献[14-15]采用扇形天线中的多个定向天线方向图切换实现AoA估计。与经典的测向技术中的和差法<sup>[16]</sup>类似,文献[12-15]均采用不同天线波束的RSS比值实现AoA估计。

目前,在室内定位设计中锚节点天线通常高于被测节点天线,但为便于简化分析,现有研究多数设置为天线等高且其中一边的天线采用一维设计,从而增加了技术难度。本文受文献[12-15]的启发,提出一种突出方向图重叠效果的锚节点天线AoA估计方法。该方法采用三个定向天线实现波束切换,从理论角度论述方向图重叠对于多种干扰的抑制效果,并对锚节点天线高于被测节点天线条件下的AoA估计进行研究。

## 1 无线信道传播模型和方向图重叠天线

### 1.1 多径环境下的无线信道传播模型

本文采用的无线信道传播模型为:

$$P_r(d) = P_t - P_L(d_0) - 10n \lg(d/d_0) + X_r \quad (1)$$

其中, $P_r$ 为接收节点的接收信号强度, $d$ 为发射节点与接收节点的距离, $P_t$ 为发射功率, $P_L$ 为来自参考点的接收信号强度, $d_0$ 为参考点与接收节点的距离, $n$ 为衰减因子, $X_r$ 为均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的高斯随机变量。

由于式(1)未将多径和噪声进行区分,而本文方法为突出多径抑制,因此在理论分析部分将多径和随机噪声分别进行处理。在没有多径和噪声干扰的假设条件下,按照天线方向图的二维描述方式,式(1)可改写为:

$$P_r = P_t + 20 \lg \lambda - 20 \lg(4\pi) + 10 \lg \left[ \frac{G_t(\theta_t, \phi_t) G_r(\theta_r, \phi_r)}{d^n} \right] \quad (2)$$

其中, $\lambda$ 为波长, $G_t(\theta_t, \phi_t)$ 为在发射天线AoD的垂直角和水平角的天线增益, $G_r(\theta_r, \phi_r)$ 为在接收天线AoA的垂直角和水平角的天线增益。在只有多径干扰的假设条件下,式(2)可改写为:

$$P_r = P_t + 20 \lg \lambda - 20 \lg(4\pi) + 10 \lg \left[ \sum_{i=1}^M \frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) G_r(\theta_{ri}, \phi_{ri}) e^{j\varphi_i}}{d_i^n} \right] \quad (3)$$

其中, $i$ 为多径索引, $M$ 为多径总数。假设 $i=1$ 对应直射径信号, $\varphi_i$ 为第 $i$ 个多径信号相对直射径信号的相位差。

### 1.2 应用于锚节点的天线构成

本文将如图1所示的由三个板状定向天线构成的天线定义为锚节点天线,图2给出了直角坐标系下锚节点天线中三个具有重叠关系的二维天线方向图。从顶视图来看,三个方向图以各自自主轴方向呈等边三角形方式放置。在顶视图中标注了两个区域:1)任意两个方向图的相交区域,用椭圆表示;2)三个方向图的相交区域,用正方形表示。在锚节点天线中,需要使用以下两个参数:1)定向天线的波束宽度(Beam Width, BW),假设三个定向天线的波束宽度相同;2)三个天线的二维方向图的主轴方向所代表的角度(垂直角和水平角)之间的距离,定义为方向图夹角(ABAP)。

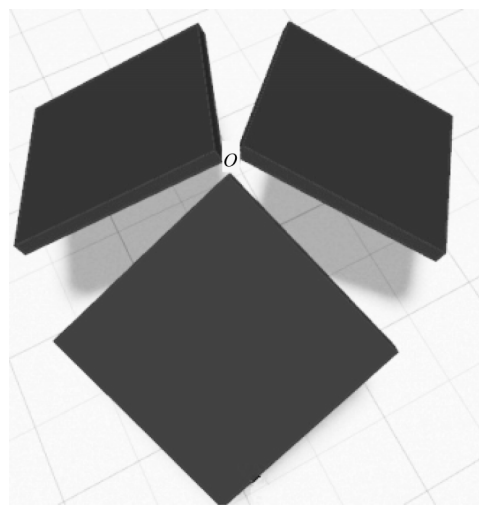


图1 锚节点天线安装示意图

Fig.1 Schematic diagram of anchor node antenna installation

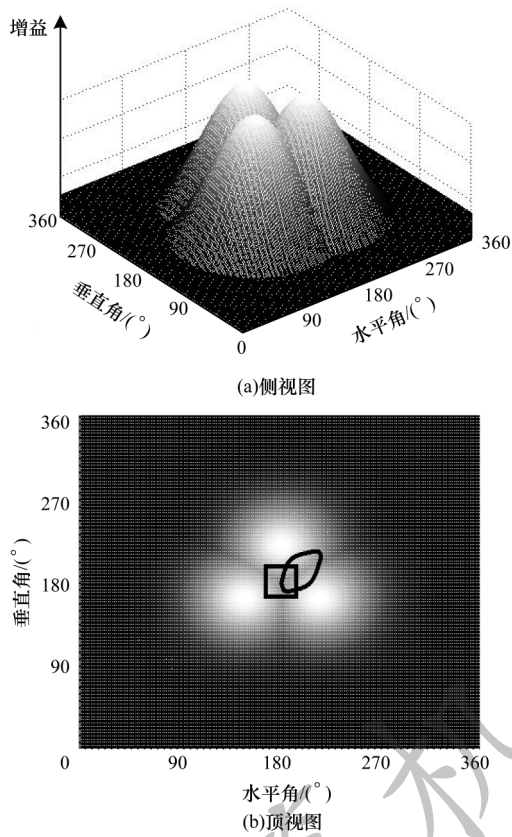


图2 三个具有重叠关系的二维天线方向图的直角坐标系  
Fig.2 Cartesian coordinate system of three overlapping 2D antenna patterns

## 2 RSS差分处理对多径干扰的抑制

### 2.1 未考虑多径干扰对RSS的影响

RSS差分处理是将图2中的三个定向天线各自接收到的RSS值进行两两差分处理,本文根据RSS差分处理结果估计AoA。在式(2)所描述的没有干扰条件下RSS值的差分结果为:

$$P_{r1} - P_{r2} = P_{t1} + 20\lg\lambda - 20\lg(4\pi) + 10\lg\left[\frac{G_t(\theta_{t1}, \phi_{t1}) G_{r1}(\theta_{r1}, \phi_{r1})}{d_1^{n_1}}\right] - \left\{ P_{t2} + 20\lg\lambda - 20\lg(4\pi) + 10\lg\left[\frac{G_t(\theta_{t2}, \phi_{t2}) G_{r2}(\theta_{r2}, \phi_{r2})}{d_2^{n_2}}\right] \right\} \quad (4)$$

其中,  $P_{r1}$  和  $P_{r2}$  为三个具有重叠关系的二维天线方向图的直角坐标系中任意两个定向天线的RSS。

本文假设图1所示的锚节点天线中三个天线之间的物理距离远小于被测节点天线与锚节点天线之间的距离,可忽略不计,因此被测节点到锚节点天线中任意天线的距离以及AoD、AoA和发射信号是相同的,式(4)可改写为:

$$P_{r1} - P_{r2} = 10\lg G_{r1}(\theta_r, \phi_r) - 10\lg G_{r2}(\theta_r, \phi_r) \quad (5)$$

式(5)表示根据RSS差值和天线方向图数据可以进行入射角度  $(\theta_r, \phi_r)$  的估计,据此可得出结论:在直射径信号强度非常强、多径和噪声干扰非常弱的条件下,RSS差分处理可以有效抑制发射功率和衰减因子随时间变化对AoA估计的影响。

### 2.2 考虑多径干扰对RSS的影响

在考虑多径影响的前提下,根据式(3)的描述,将RSS差分处理定义为:

$$P_{r1} - P_{r2} = 10\lg\left[\sum_{i=1}^M \frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r1}(\theta_{ri}, \phi_{ri})\right] - 10\lg\left[\sum_{i=1}^M \frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r2}(\theta_{ri}, \phi_{ri})\right] \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)的定义,本文将由多径造成的RSS差分结果的误差描述如下:

$$E_{\text{Err-multipath}} = 10\lg\left[\sum_{i=2}^M \frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r1}(\theta_{ri}, \phi_{ri})\right] - 10\lg\left[\sum_{i=2}^M \frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r2}(\theta_{ri}, \phi_{ri})\right] \quad (7)$$

从随机变量的角度分析,式(7)是随机变量  $\frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r1}(\theta_{ri}, \phi_{ri})$  和  $\frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r2}(\theta_{ri}, \phi_{ri})$  的算术和对数之差。根据中心极限定理的描述<sup>[17]</sup>,式(7)的数学期望与以上两个随机变量的数学期望的对数之差成正比,即:

$$E[E_{\text{Err-multipath}}] \propto \lg E\left[\frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r1}(\theta_{ri}, \phi_{ri})\right] - \lg E\left[\frac{G_t(\theta_{ti}, \phi_{ti}) e^{j\varphi_i}}{d_i^{n_i}} G_{r2}(\theta_{ri}, \phi_{ri})\right] \quad (8)$$

其中,  $E[\cdot]$  为数学期望计算。由于多径环境中AoA、入射信号相位以及RSS之间相互独立,因此根据数学期望性质以及随机变量函数的数学期望近似计算方法<sup>[18]</sup>,式(8)可改写为:

$$E[E_{\text{Err-multipath}}] \propto \lg E[G_{r1}(\theta_{ri}, \phi_{ri})] - \lg E[G_{r2}(\theta_{ri}, \phi_{ri})] \approx \lg\left[G_{r1}(\theta_{\mu}, \phi_{\mu}) + \frac{\sigma^2}{2} G_{r1}''(\theta_{\mu}, \phi_{\mu})\right] - \lg\left[G_{r2}(\theta_{\mu}, \phi_{\mu}) + \frac{\sigma^2}{2} G_{r2}''(\theta_{\mu}, \phi_{\mu})\right] \quad (9)$$

其中,  $(\theta_{\mu}, \phi_{\mu})$  和  $\sigma^2$  是有多径信号的AoA均值和方差,  $G_r''(\theta_{\mu}, \phi_{\mu})$  是方向图  $G_r(\theta_{\mu}, \phi_{\mu})$  的二阶导数。在文献<sup>[19]</sup>中对于多径环境中所有多径信号的AoA进行

了理论分析和实验验证,证明所有多径信号的AoA呈现正态分布,均值接近直射径角度,因此式(9)可改写为:

$$E[E_{\text{Err-multipath}}] \propto \lg \left[ G_{r1}(\theta_{rd}, \phi_{rd}) + \frac{\sigma^2}{2} G_{r1}''(\theta_{rd}, \phi_{rd}) \right] - \lg \left[ G_{r2}(\theta_{rd}, \phi_{rd}) + \frac{\sigma^2}{2} G_{r2}''(\theta_{rd}, \phi_{rd}) \right] \quad (10)$$

其中,  $\theta_{rd}$  和  $\phi_{rd}$  为直射径的垂直角和水平角。式(10)说明RSS差分结果误差的均值随着被测节点与锚节点的相对角度(直射径角度)的变化而变化。式(10)中方向图二次导数的数值很小,在此可忽略不计,由此表明多径干扰造成的RSS差分结果误差的均值与两个天线方向图的差分结果紧密相关。图3展示了图2(a)中任意两个方向图的差分曲面示意图。根据式(10)的定义,RSS差分结果误差在对应的差分曲面中存在一个变化区间,在图3中的黑实线周围的区域具有较低的RSS差分结果误差均值。因此,当直射径角度趋近于图2(b)的相交区域(椭圆)时,将大幅减小多径干扰造成的RSS差分结果的误差均值。

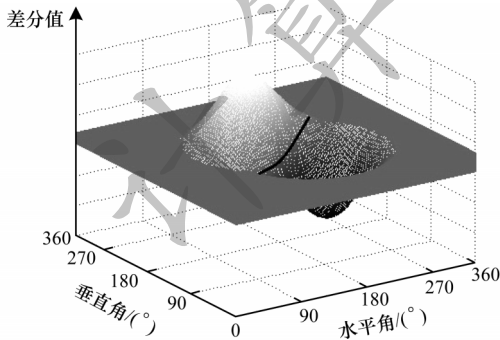


图3 方向图差分曲面

Fig.3 Pattern difference surface

### 3 方向图差分处理的方差分析

#### 3.1 方向图差分处理的克拉美罗下界分析

本文采用对称偶极子天线方向图函数<sup>[20]</sup>,具有角度偏移的二维方向图函数为:

$$g(\theta, \phi) = 10 \lg \frac{\cos(D\pi \cos(90 - \sqrt{(\theta - 90 - \Delta_\theta)^2 + (\phi - 90 - \Delta_\phi)^2})) - \cos(D\pi)}{\sin(90 - \sqrt{(\theta - 90 - \Delta_\theta)^2 + (\phi - 90 - \Delta_\phi)^2})} \quad (11)$$

其中,  $\Delta_\theta$  和  $\Delta_\phi$  表示图2(b)中每个天线方向图主轴方向在垂直角和水平角方向上与中心点之间的偏移,  $D$  表示天线方向图波束宽度,  $D$  越大,波束宽度越小。

根据三个天线两两求差的设计方案,最终的

AoA估计结果来自图2(b)中三个天线之间的两两差分。根据文献[21]对于一维方向图差分结果克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)的定义,二维方向图差分处理克拉美罗下界的倒数(下文简称为倒数值)计算为:

$$y(\theta, \phi) = \left[ \frac{d(g_1 - g_2)}{d\theta} \right]^2 + \left[ \frac{d(g_1 - g_2)}{d\phi} \right]^2 + \left[ \frac{d(g_1 - g_3)}{d\theta} \right]^2 + \left[ \frac{d(g_1 - g_3)}{d\phi} \right]^2 + \left[ \frac{d(g_2 - g_3)}{d\theta} \right]^2 + \left[ \frac{d(g_2 - g_3)}{d\phi} \right]^2 \quad (12)$$

图4为倒数值与角度的关系示意图,可以看出,在如图4(b)所示的三个方向图共同相交区域中,能够获得AoA角度估计值误差的最小方差,实现对干扰最大幅度的抑制,并以此为中心在一定范围内保持较高估计精度。

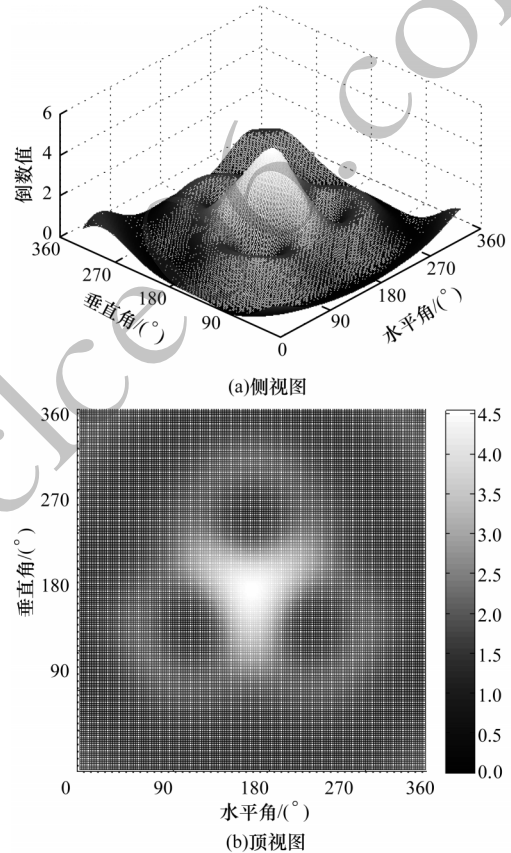


图4 倒数值与角度的关系

Fig.4 Relationship between reciprocal value and angle

#### 3.2 锚节点天线参数对方向图差分结果的影响

由于在如图4所示的一定区域内可获得较高AoA估计精度,因此本节将研究该区域尺寸大小以及在区域内AoA估计精度的变化情况与图2的重叠方向图参数(方向图波束宽度  $D$  与方向图夹角  $\Delta$ )之间的关系。根据图4所具有的对称性特点,采用同

心圆法描述式(11)中参数  $D$  和  $\Delta$  对方向图差分结果的影响,以图4(b)的中心为圆点并以不同半径画同心圆,然后计算连续变化半径间的每个间隔内所有  $y(\theta, \phi)$  的平均值,如图5所示。

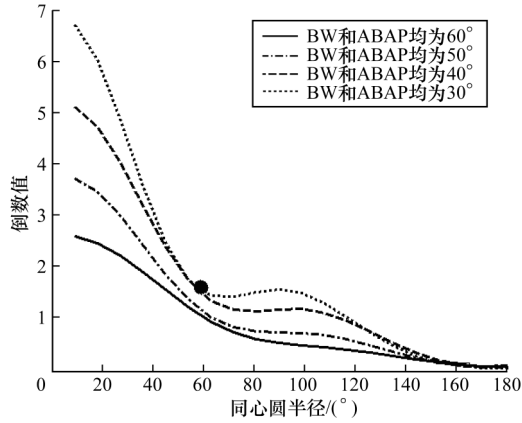


图5 不同波束宽度和方向图夹角组合的倒数

Fig.5 The reciprocal value of the combination of different BW and ABAP

从图5可以看出,不同的波束宽度和方向图夹角组合会造成倒数不同的变化规律。为在较大的同心圆半径内维持较高的倒数,本文采用如下方法:1)在每条曲线中找到曲线斜率变化突变点,如BW和ABAP均为30°时曲线中的黑点,从半径为0°到该点的半径范围定义为有效AoA估计区域;2)在波束宽度和方向图夹角为30°~60°的范围内,在有效AoA估计区域中倒数的平均值计算结果如图6所示。可以看出,当波束宽度和方向图夹角接近时可以获得较高的区域内倒数的平均值,在本文后续仿真中设定波束宽度等于方向图夹角。此外,结合图5、图6可以看出,波束宽度的减小可以获得更高的AoA估计精度,但是在有效估计区域会减小,并且在该区域内估计误差的起伏比较大。

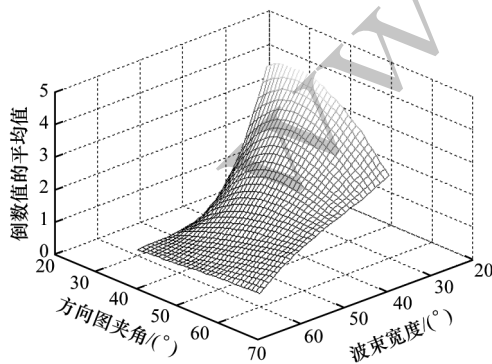


图6 有效AoA估计区域内倒数的平均值

Fig.6 Average of the reciprocal values in effective AOA estimation area

## 4 仿真实验

### 4.1 仿真设置

在一个包含墙壁、地板和屋顶的封闭空间中进行仿真实验,如图7所示。定位区域为XY平面,边长  $L$  为20 m,屋顶高度  $H$  为5 m。锚节点天线主轴方向(图2(b)的中心角度)指向定位区域的中心,被测节点天线采用全向天线,高度为1 m。根据实际天线指标,设置波束宽度和方向图夹角为30°~60°,锚节点天线安装高度  $h$  为2 m~4 m。AoA包括垂直角  $\theta$  和水平角  $\phi$ ,本文只考虑水平角仿真。

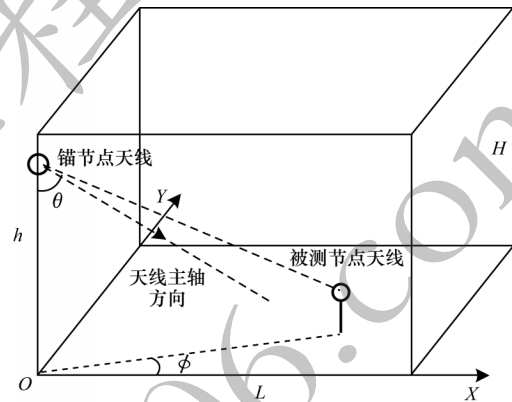


图7 仿真环境设置

Fig.7 Simulation environment setting

在仿真过程中,被测节点在定位区域中随机连续移动,在同一位置多次测量的过程中,随机调整发射功率以模拟实际情况,按照信噪比为5 dB并针对接收信号强度添加噪声。在数据处理时以直射径条件下AoA估计结果为真实值,通过与真实值的差值给出在多径干扰和多径+噪声干扰条件下估计误差的分布情况。本文将文献[14-15]的扇区天线法作为对比方法。扇区天线法的输出为根据第1个天线、第2个天线和第1个天线、第3个天线的RSS差值得到的AoA估计结果:

$$\begin{aligned}
 (\hat{\theta}, \hat{\phi})_{12} &= \arg \min_{\theta, \phi} \{ (P_{r1} - P_{r2}) - [g_1(\theta, \phi) - g_2(\theta, \phi)] \} \\
 (\hat{\theta}, \hat{\phi})_{13} &= \arg \min_{\theta, \phi} \{ (P_{r1} - P_{r3}) - [g_1(\theta, \phi) - g_3(\theta, \phi)] \} \\
 (\hat{\theta}, \hat{\phi})_{1-23} &= (\hat{\theta}, \hat{\phi})_{12} \cap (\hat{\theta}, \hat{\phi})_{13}
 \end{aligned} \tag{13}$$

同理得到  $(\hat{\theta}, \hat{\phi})_{2-23}$  和  $(\hat{\theta}, \hat{\phi})_{3-12}$ , 最终AoA估计结果为:

$$\frac{\sin \phi}{\cos \phi} = \frac{w_{1-23} \sin \hat{\phi}_{1-23} + w_{2-13} \sin \hat{\phi}_{2-13} + w_{3-12} \sin \hat{\phi}_{3-12}}{w_{1-23} \cos \hat{\phi}_{1-23} + w_{2-13} \cos \hat{\phi}_{2-13} + w_{3-12} \cos \hat{\phi}_{3-12}} \tag{14}$$

其中,加权值  $w_{1,2,3}=p_{r2} \times p_{r3}, p_{ri}$  是第  $i$  个天线的接收信号强度值,其他类推。

### 4.2 数据处理流程

数据处理流程如图 8 所示。根据选定的波束宽度和方向图夹角计算方向图二维差分曲面数组,并保存为参考数据。设计滑动时间窗口的目的是为了在窗口所对应的时间范围内,通过统计方法对该期间采集的 RSS 数据进行滤波处理。假设在此期间被测节点的物理位置以及周围环境没有发生较大的变化,主要干扰来自系统噪声,可通过统计方法进行抑制。假定时间窗口的滑动长度在对应的时间内,被测节点的 AoA 数据有连续而紧密的变化。

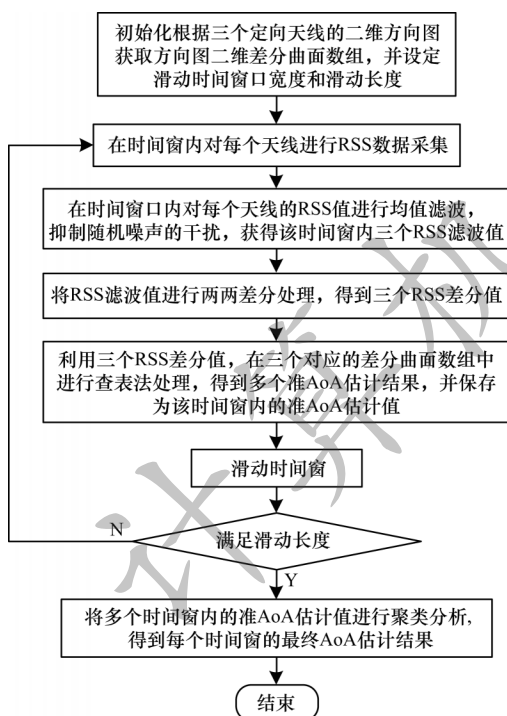
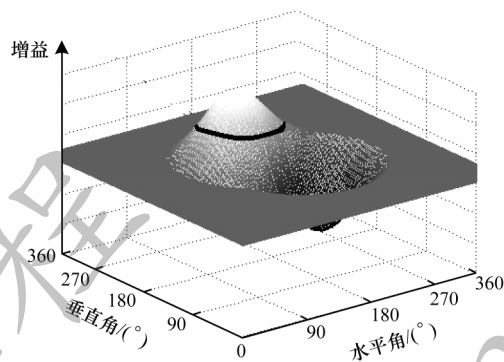


图 8 数据处理流程

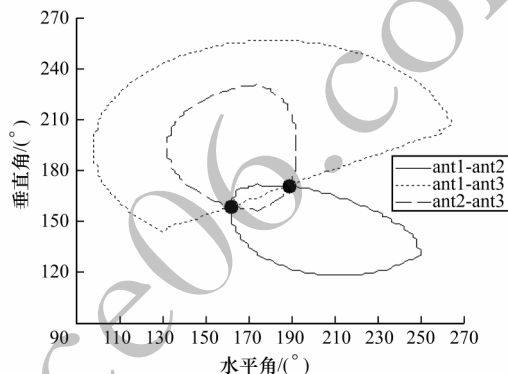
Fig.8 Procedure of data processing

在每个滑动时间窗口内,通过统计方法得到三个 RSS 差分值之后,根据每个差分值在对应的方向图二维差分曲面数组中进行查表处理,找出每个差分值对应的水平角和垂直角。图 9 为无干扰情况下的查表法结果示意图,其中,黑实线为增益等于 RSS 差分值的等高线,ant1-ant2 对应在第 1 个天线、第 2 个天线所形成的二维差分曲面上得到的等高线圈,三个线圈的交点(黑点)为 AoA 估计结果。图 10 为多径+噪声干扰情况下的查表法结果示意图。由于受到干扰可能会得到多个等高线圈并形成多个线圈交点,因此本文在查表处理阶段对这些交点不进行区分,全部定义为该滑动时间窗口内的准 AoA 估计值。随着时间窗口的滑动会获得更多的准 AoA 估计值,当窗口滑动满足设定的滑动长度后采用聚类法

进行处理<sup>[22]</sup>。因为在这些准 AoA 估计值中,真实或者接近真实的 AoA 估计值会随着滑动时间窗口的变化而连续变化,所以从聚类角度而言,所形成的类将具备元素间距小且连续变化的特征,根据这些特征来确定最符合条件的类,得到的每个滑动时间窗口内的准 AoA 估计值为最终的 AoA 估计值。



(a)等高线圈的形成



(b)三个等高线圈的相交

图 9 无干扰情况下的查表法结果

Fig.9 Table look-up results without interference

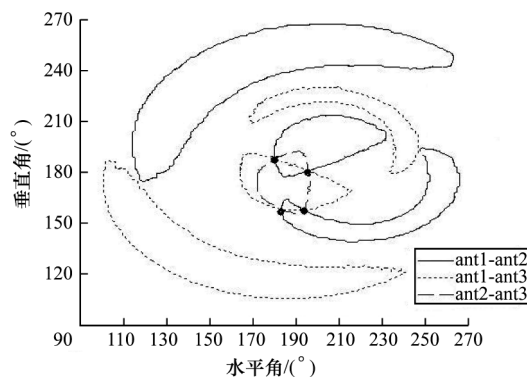


图 10 干扰情况下的查表法结果

Fig.10 Table look-up results with interference

### 4.3 仿真结果与分析

#### 4.3.1 多径干扰抑制效果分析

图 11 为在定位区域内的水平角 AoA 估计误差的二维展示图。由于二维展示不方便描述误差变化,本文采用两种一维方法进行细节和统计描述:1)采用对角线法进行细节描述,将 XY

平面内的坐标(0 m, 0 m)到(20 m, 20 m)的连线定义为对角线,坐标(20 m, 0 m)到(0 m, 20 m)连线定义为正交对角线,描述这两个对角线上的误差变化;2)采用同心圆法进行统计描述,将XY平面的坐标(10 m, 10 m)为圆心(也是锚节点天线主轴方向在XY平面上的交点)、以1 m为半径间隔画同心圆,使用每个间隔内所有的AoA误差均值描述误差变化。

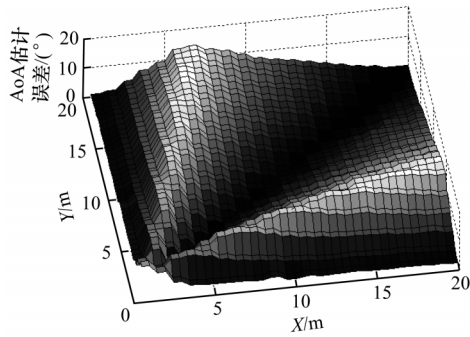


图11 水平角AoA估计误差的二维示意图

Fig.11 2D schematic diagram of AoA estimation errors of horizontal angles

锚节点天线中某个天线在不同干扰条件下正交对角线上的RSS值,如图12所示,可以看出,在多径和多径+噪声干扰条件下,RSS值受到较大的影响。三个定向天线RSS值相互互求差的结果如图13所示,可以看出,在某个范围内直射径与多径RSS差分结果比较接近,本文方法可对多径干扰实现一定程度的抑制。

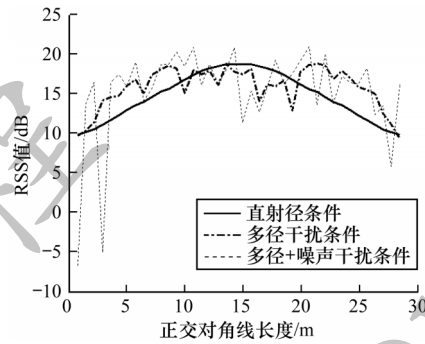
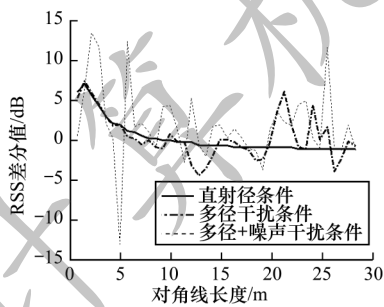
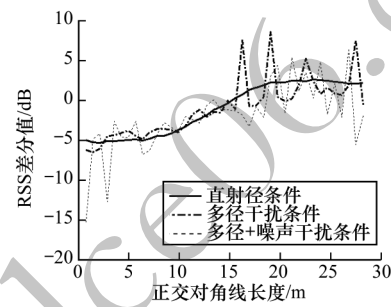


图12 不同干扰条件下的RSS值

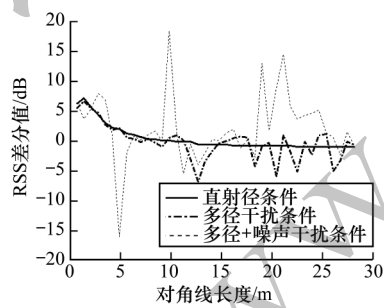
Fig.12 RSS values under different interference conditions



(a)天线1和天线2的差分结果



(b)天线1和天线3的差分结果



(c)天线2和天线3的差分结果

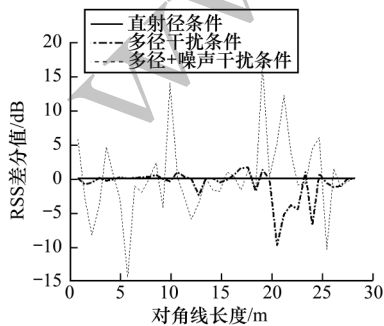
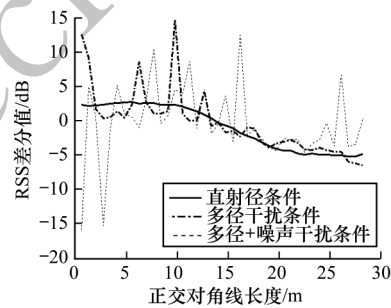


图13 锚节点天线中三个天线的RSS差分结果

Fig.13 RSS difference results of the three antennas in an anchor node antenna

### 4.3.2 AoA 估计误差分析

对于多径+噪声的抑制效果,基于同心圆法的本文方法 AoA 估计误差结果如图 14 所示,其中锚节点天线高度为 4 m。可以看出,该同心圆法就是在如图 11 所示的 AoA 估计误差的二维展示图中,以定位区域中心为圆心,研究不同半径同心圆内的误差变化,同心圆半径越大则误差越大,而在图 14 中存在一个误差相对较小的区域,该结果与图 4(b)所得的三个方向图共同叠加区域内的克拉美罗下界倒数数值较大的结论是一致的。

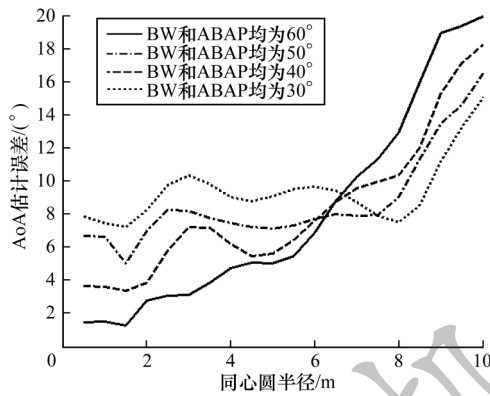


图 14 基于同心圆法的本文方法 AoA 估计误差

Fig.14 AoA estimation errors by the proposed method based on concentric circle method

该区域的大小以及区域中误差的整体统计结果受到波束宽度和方向图夹角的影响。在波束宽度与方向图夹角相等的条件下,增大波束宽度能够在较大范围内获得较平稳的 AoA 估计精度变化,但是整体估计精度不高;波束宽度减小会导致 AoA 估计精度变化较快,但在一定范围内整体的估计精度较高。基于同心圆法的扇区天线法 AoA 估计误差结果如图 15 所示。可以看出,针对天线参数对 AoA 估计误差的影响,采用扇区天线法也能得出相同的结论。本文方法与扇区天线法的主要区别在于对准 AoA 估计值的后续处理,扇区天线法更适用于较多扇区单元(定向天线)的情况。

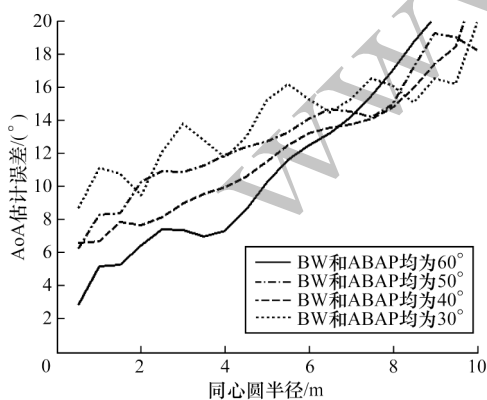
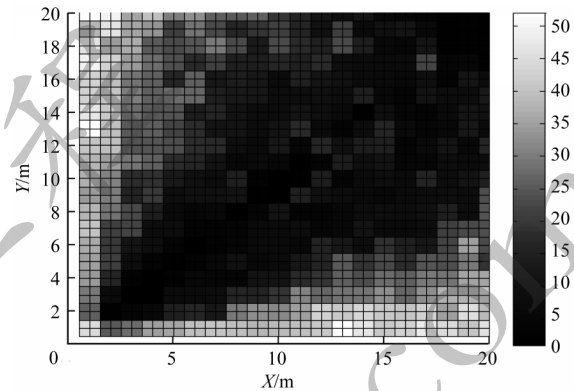


图 15 基于同心圆法的扇区天线法 AoA 估计误差

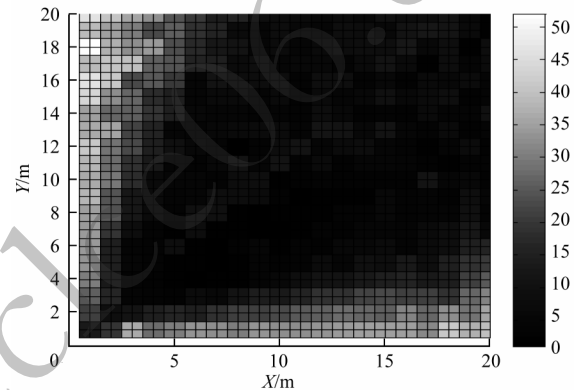
Fig.15 AoA estimation errors by the sector antenna method based on concentric circle method

### 4.3.3 锚节点天线安装方式对 AoA 估计结果的影响

在波束宽度和方向图夹角均为 30°的条件下,不同锚节点天线高度下的 AoA 估计误差的二维分布图如图 16 所示,可以看出,AoA 误差分布受到锚节点天线安装位置(在 XY 平面中的位置)和安装高度的影响,误差整体分布不均匀。在不同锚节点天线高度下,波束宽度和方向图夹角为 30°的基于同心圆法的 AoA 估计误差结果如图 17 所示,可以看出,随着锚节点天线安装高度的增加,AoA 估计误差的变化速度加快,但在定位中心区域的一定范围内仍具有较高的估计精度。



(a)锚节点天线高度为 2 m



(b)锚节点天线高度为 4 m

图 16 不同锚节点天线高度下 AoA 估计误差分布顶视图

Fig.16 Top view of AoA estimation errors distribution under different anchor node antenna heights

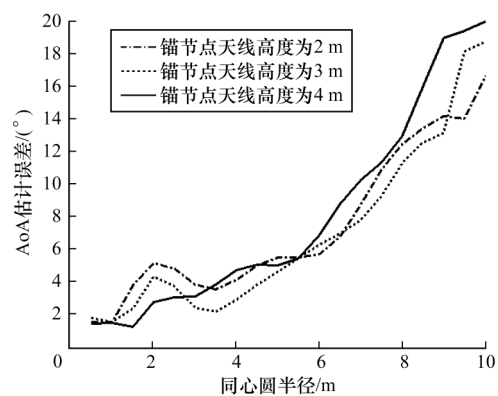


图 17 锚节点天线高度对 AoA 估计误差的影响

Fig.17 The influence of anchor node antenna heights on AoA estimation errors

#### 4.3.4 最终定位精度估计

在多径+噪声干扰条件下,本文方法可实现在定位区域中心范围内获得一定精度的AoA估计结果,例如在以定位区域中心为圆心、半径为5 m的范围内获得的平均AoA估计误差为 $3.2^\circ$ ,在以定位区域中心为圆心、半径为7 m的范围内获得的平均估计误差为 $4.3^\circ$ 。为计算得到最终的位置估计误差,在如图7所示的XY区域的(0 m,0 m)和(20 m,0 m)位置各安装一个锚节点天线,其主轴方向指向定位区域中心,高度为4 m。根据设置进行最终估计位置精度计算:1)在以定位区域中心为圆心、半径为5 m的范围内,得到的平均定位误差为1.2 m、方差为0.2 m;2)在以定位区域中心为圆心、半径为7 m的范围内,得到的平均定位误差为2.0 m、方差为0.5 m。

#### 4.3.5 运算复杂度分析

由数据处理流程可知,本文方法中的运算主要集中在聚类算法。在仿真过程中,每个滑动时间窗口获得的准AoA估计值上限为6,时间窗口滑动长度为5,即聚类处理的数据个数上限为30,并且由于聚类算法需要事先设置K值<sup>[23]</sup>,而本文方法中的K值范围较小(4~8),因此总体运算复杂度为 $O(K \text{值个数} \times \text{数据个数})$ 。

## 5 结束语

针对室内定位传播模型中的不确定因素和多径干扰,本文提出基于三个定向天线RSS的二维到达角估计方法。理论分析结果表明,RSS差分处理可对多径及噪声进行一定程度的抑制,但抑制效果受到波束宽度和方向图夹角的影响。仿真实验结果证明,该方法可得到较高的AoA估计精度和定位精度,并且提升硬件条件可进一步降低软件运行复杂度和提高系统运行速度。但由于真实的天线方向图更加复杂,因此后续将优化基于三个定向天线RSS的二维AoA估计中的查表法及聚类算法,进一步提高室内定位精度。

### 参考文献

- [ 1 ] GUO Qing. Research on location of electromagnetic radiation source based on received signal strength[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018. (in Chinese) 郭青. 基于接收信号强度的电磁辐射源定位研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [ 2 ] GHOLAMI M R, VAGHEFI R M, STROM E G. RSS-based sensor localization in the presence of unknown channel parameters [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(15): 3752-3759.
- [ 3 ] TOMIC S, BEKO M, DINIS R. RSS-based localization in wireless sensor networks using convex relaxation: noncooperative and cooperative schemes [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 2037-2050.
- [ 4 ] LONG Cheng, WU Chengdong, ZHANG Yunzhou. Indoor robot localization based on wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2011, 57(3): 1099-1104.
- [ 5 ] YONG Tian, TANG Zhenan, YAN Yu. Third-order channel propagation model-based indoor adaptive localization algorithm for wireless sensor networks[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12(4): 1578-1581.
- [ 6 ] PU Chuanchin, CHUNG Wanyoung. Mitigation of multipath fading effects to improve indoor RSSI performance[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(11): 1884-1886.
- [ 7 ] LEU J S, TZENG H J. Received signal strength fingerprint and footprint assisted indoor positioning based on ambient Wi-Fi signals[C]//Proceedings of the 75th IEEE Vehicular Technology Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [ 8 ] LIN Z P, LÜ T J, MATHIOPOULOS P T. 3-D indoor positioning for millimeter-wave massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(6): 2472-2486.
- [ 9 ] ZHANG Weile, YIN Qinye, CHEN Hongyang, et al. Distributed angle estimation for localization in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 527-537.
- [ 10 ] MALAJNER M, PLANINSIC P, GLEICH D. Angle of arrival estimation using RSSI and omnidirectional rotatable antennas[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1950-1957.
- [ 11 ] MALAJNER M, GLEICH D, PLANINSIC P. Angle of arrival measurement using multiple static monopole antennas [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(6): 3328-3337.
- [ 12 ] KALIS A, ANTONAKOPOULOS T. Direction finding in IEEE802. 11 wireless networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 940-948.
- [ 13 ] PRESTON S L, THIEL D V. Base-station tracking in mobile communications using a switched parasitic antenna array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(6): 841-844.
- [ 14 ] ZHANG Liying. Research on indoor wireless location algorithm basing on spherical antenna array[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese) 张丽颖. 基于球形天线的室内无线定位算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [ 15 ] JANIS W, WANG J. Sectorized antenna-based DoA estimation and localization advanced algorithms and measurements [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(11): 2272-2286.
- [ 16 ] RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing [M]. 2nd ed. Translated by XING Mengdao, WANG Tong, LI Zhenfang and others. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017. (in Chinese) RICHARDS M A. 雷达信号处理基础[M]. 2版. 邢孟道, 王彤, 李真芳等译. 北京: 电子工业出版社, 2017.

(上接第 168 页)

- [17] MA Enlin. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: People's Education Press, 2006. (in Chinese)  
马恩林. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2006.
- [18] ZHANG Songlin, ZHANG Kun. Approximate computation of expectation and variance of nonlinear function of continuous random variable [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(4): 107-110. (in Chinese)  
张松林, 张昆. 连续随机变量非线性函数的期望和方差的近似求法 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(4): 107-110.
- [19] JANASWAMY R. Angle and time of arrival statistics for the Gaussian scatter density model [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(3): 488-497.
- [20] MRAZOVAC B, BJELICA M Z. A human detection method for residential smart energy systems based on Zigbee RSSI changes [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 58(3): 819-824.
- [21] ASH J N, POTTER L C. Sensor network localization via received signal strength measurements with directional antennas [C] // Proceedings of International Conference on Communication, Control and Computing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004: 1861-1870.
- [22] TIAN Jie, HE Yuliang, CHEN Hong, et al. A fingerprint recognition algorithm based on similarity clustering [J]. Science China Technological Sciences, 2005, 35(2): 186-199. (in Chinese)  
田捷, 何余良, 陈宏, 等. 一种基于相似度聚类方法的指纹识别算法 [J]. 中国科学 E 辑, 2005, 35(2): 186-199.
- [23] ZANG Chuanyu, SHEN Yong, ZHANG Yuhao, et al. Research on K-Means algorithm analysis and improvement [J]. Computer Science and Application, 2016, 6(9): 551-564. (in Chinese)  
藏传宇, 沈勇, 张宇昊, 等. K-Means 算法的研究分析及改进 [J]. 计算机科学与应用, 2016, 6(9): 551-564.

编辑 陆燕菲