

基于天线覆盖模型的 RFID 室内定位算法

武 帆¹, 谭小彬¹, 申晶晶¹, 晏 培²

(1. 中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230022; 2. 中京天裕科技(北京)有限公司, 北京 100085)

摘 要: 基于无线射频识别(RFID)技术密集无源标签定位系统的定位算法大多存在标签性能差异、天线方向性未定和外环境噪声干扰等问题, 导致系统定位精度大幅降低。为提高定位精度, 提出一种被动式 RFID 二维室内定位算法 IPABACM。该算法通过部署标签阵列使 RFID 阅读器读取信息, 将读取到的标签赋予权值, 利用改变标签权重并用神经网络进行训练的方法降低环境噪声和标签性能差异的影响, 根据分析天线覆盖模型得出, 通过旋转叠加读写器覆盖区域, 可降低甚至消除读写器天线方向对定位精度造成的影响。实验结果表明, 与传统的被动式 RFID 定位算法相比, IPABACM 算法具有较高的定位精度, 且定位时间较短。

关键词: 无线射频识别技术; 室内定位; 天线覆盖模型; 无源标签; 读写器; 定位精度

中文引用格式: 武 帆, 谭小彬, 申晶晶, 等. 基于天线覆盖模型的 RFID 室内定位算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(3): 120-125.

英文引用格式: Wu Fan, Tan Xiaobin, Shen Jingjing, et al. RFID Indoor Positioning Algorithm Based on Antenna Coverage Model[J]. Computer Engineering, 2017, 43(3): 120-125.

RFID Indoor Positioning Algorithm Based on Antenna Coverage Model

WU Fan¹, TAN Xiaobin¹, SHEN Jingjing¹, YAN Pei²

(1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China;

2. SEatech Co., Ltd., Beijing 100085, China)

[Abstract] Current positioning algorithms based on Radio Frequency Identification (RFID) location systems with dense passive tags face the issue of low localization precision due to the variation of behavior of tags, the ignorance of antenna directivity, external environment noise interference. To solve these problems and improve the positioning accuracy, the paper proposes a 2D passive RFID indoor positioning algorithm (IPABACM) by taking the directionality of the antenna into account in dense passive RFID tag distribution applications. Considering the effects of noise and tag performance differences in the production, the readied tags are assigned weights and trained through neural network. The deviation caused by antenna pattern's uncertainty is eliminated by superimposing the antenna coverage area as a more regular pattern, which significantly improves the positioning accuracy. Experimental results show that compared with the traditional passive RFID localization algorithm, the IPABACM algorithm can provide relatively better accuracy and less positioning time.

[Key words] Radio Frequency Identification (RFID) technology; indoor positioning; antenna coverage model; passive tag; reader; positioning accuracy

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.03.022

0 概述

近年来, 无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术已经广泛地应用在跟踪操作和室内定位上。虽然 RFID 定位方法有很多, 但由于 RFID 系统的技术限制, 被动 RFID 室内密集标签阵列定位方法在获得的高精度定位方面更具优势。与其他 RFID 的室内定位

方法相比^[1], 密集标签阵列的 RFID 定位系统的定位精度可以达到 5 cm ~ 10 cm, 远高于其他方法^[2-3]。

然而, 这种方法也有一定的局限性: 1) RFID 的 Reader 上的天线方向未被考虑。由于 Reader 上的天线大多是封装好的, 无法确切得到天线的方向, 用之读取标签时读取的区域很有可能是不规则形状, 得到的 Reader 的位置就会有偏差, 从而影响定位精

基金项目: 国家“863”计划项目(2014AA06A503)。

作者简介: 武 帆(1992—), 男, 硕士研究生, 主研方向为室内定位; 谭小彬, 副教授、博士; 申晶晶, 硕士研究生; 晏 培, 高级工程师、硕士。

收稿日期: 2016-01-13 **修回日期:** 2016-03-10 **E-mail:** wfwufan@mail.ustc.edu.cn

度。2) 很多文献的被动式 RFID 定位算法是基于理想的模型和固定的环境^[4-5], 在现实情况下, 如果改变实验环境和实验的设备, 模型的误差就会增大, 定位精度将会大大降低。3) 由于 Reader 会读取多个标签, 为了提高精度会加大标签的密度, 这样就会使 Reader 读取时发生冲突的概率增加, 从而降低定位精度和增加定位时间^[6-7]。因此, 在高密度标签分布的被动式 RFID 定位系统中提高定位精度和降低定位时间是现阶段最重要的问题和挑战。为解决上述问题, 本文提出一种基于天线覆盖模型的 RFID 室内定位算法 (IPABACM)。

1 被动式 RFID 定位系统

在典型的被动式 RFID 密集标签阵列定位系统中, RFID 的 Reader 与移动物体绑定, 标签阵列排布在一个平面来定位移动物体。每个 RFID 的标签有着自己的位置坐标, 总体上看就像是一张地图。当定位物体移动到一个新的位置时, RFID 读写器将捕获到一组检测出的 RFID 标签信息。定位算法收集这些信息并在服务器中将标签对应的地理信息取出后, 进行分析计算得到移动物体即读写器的位置来实现定位。图 1 为被动式 RFID 密集标签阵列定位系统中的密集标签阵列和移动物体。

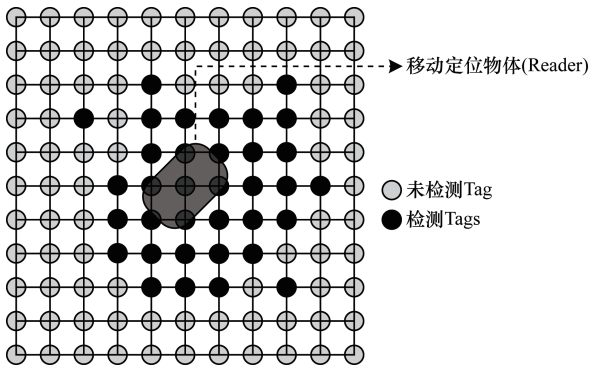


图 1 被动式 RFID 定位系统的标签阵列

目前, 国内外学者对于被动式 RFID 密集标签阵列定位系统已有一些研究: 文献[8]布置了一个最小单元格为 $4.3\text{ cm} \times 4.3\text{ cm}$ 的无源 Tag 阵列的 RFID 定位系统, 定位精度达到了 9 cm 。文献[9]使用了最小单元格为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的 Tag 阵列, 运用加权平均的方法定位移动机器人, 定位精度达到了 2.5 cm 。文献[10]的定位精度在 x 轴上达到了 13 cm , 在 y 轴上达到了 5.7 cm , 使用阵列列为 $34\text{ cm} \times 34\text{ cm}$ 。文献[11]类似的用基于三角形的方法, 以 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的阵列设计定位系统, 并减少了 Tag 的数量, 将定位精度提高到了 1.6 cm 。

关于定位精度的计算, 事实上有 2 个方向的精度, 即 x 轴方向精度和 y 轴方向精度, 表示为 A_x 和 A_y 。由于这里只考虑的实际位置和定位估计位置之

间的距离, 本文使用的精度值用 A 来表示, A 和 A_x , A_y 之间的关系如下:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \quad (1)$$

2 系统模型和算法

本文系统的总体概况如图 2 所示。首先读写器从标签阵列中读取一组标签的 ID 号并通过无线传输提供给服务器。在 2.1 节中将重点描述系统模型和符号的意义。然后服务器查询数据库得到检测到的标签的位置 (x_i, y_i) 。接下来, 将这些位置信息返回到服务器后运行提出的 IPABACM 算法, 见 2.2 节。最后, 将得到的估计位置和准确度反馈。

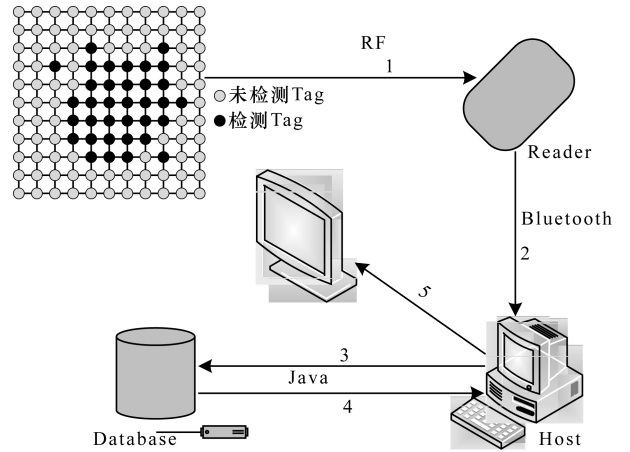


图 2 系统总体概况

2.1 系统模型建立

RFID 室内定位中有很多方法用于估计移动物体的位置。最常见的多位置模型是基于接收信号强度 (Received Signal Strength, RSS) 测量结果来进行位置估计^[12-14], 而其定位精度受所接收的标签信号强度的波动影响很大。导致波动的原因可能来自射频 (Radio Frequency, RF) 环境、RFID 天线方向和辐射模式等。当 RF 标签被放到一个有耗介质物体或金属表面, 波动会变得更加强烈。所以, 本文采用高密度标签阵列法来代替这种方法。

首先服务器从 Reader 处接收检测到的标签的 ID 号, 表示为 $ID_1, ID_2, \dots, ID_M$, 然后服务器查询数据库并获得各个标签的位置, 表示为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_M, Y_M)$ 。如果环境是稳定的且无电磁干扰, 读写器天线方向与标签阵列平面完全平行, 所有标签性能相同, 读写器的位置应该是所有检测到的标签所组成的矩形包围区域的几何中心。所以, 相应 f_x 和 f_y 如下:

$$O(X, Y) = (f_x(x_1, x_2, \dots, x_m), f_y(y_1, y_2, \dots, y_m)) \quad (2)$$

$$f_x(x_1, x_2, \dots, x_m) = [\max(x_1, x_2, \dots, x_m) + \min(x_1, x_2, \dots, x_m)]/2 \quad (3)$$

$$f_y(y_1, y_2, \dots, y_m) = [\max(y_1, y_2, \dots, y_m) + \min(y_1, y_2, \dots, y_m)]/2 \quad (4)$$

上述 3 个前提条件没有一个能够达到要求。由于在环境中的 RF 信号衰减和噪声干扰,每个标签在一次定位过程中被读取的次数是大不相同的。因此,考虑使用每个标签被读取的次数作为权重计算移动物体位置。这时 f_x 和 f_y 变为:

$$f'_x(x_1, x_2, \dots, x_m) = (\sum_{i=1}^m Fre_i \times x_i) / \sum_{i=1}^m Fre_i \quad (5)$$

$$f'_y(y_1, y_2, \dots, y_m) = (\sum_{i=1}^m Fre_i \times y_i) / \sum_{i=1}^m Fre_i \quad (6)$$

其中, Fre_i 是标签 i 的被读取的次数。

但还有有一些严重的问题,标签的性能并不完全相同,可能会出现有一个标签距离 Reader 非常远但性能非常活跃,在一次读取过程中该标签的读取次数将大大增加。这时该标签对应的位置的权重将非常高,使得定位物体的估计位置偏向该标签。这无疑会大大增加定位误差。为了解决这个问题,本文把每个标签的阅读数量和位置信息组合为三元组 (x_i, y_i, Fre_i) 。每三元组的权值是通过几次训练来得到。这种得到移动物体位置的方法有点像寻找一个不均匀质地的矩形的质心。这里 f_x 和 f_y 转为:

$$f''_x(x_1, x_2, \dots, x_m) = (\sum_{i=1}^m Apt_i \times Fre_i \times x_i) / \sum_{i=1}^m Fre_i \quad (7)$$

$$f''_y(y_1, y_2, \dots, y_m) = (\sum_{i=1}^m Apt_i \times Fre_i \times y_i) / \sum_{i=1}^m Fre_i \quad (8)$$

其中, Apt_i 是每个三元组 i 的权重。

2.2 IPABACM 算法

本节详细介绍定位工作流程和本文算法的描述。该算法分为 2 个阶段:训练阶段和定位阶段。训练阶段的工作流程图如图 3 所示。通过不断地训练和学习,调整每一个三元组的权重,减少误差,提高精度。

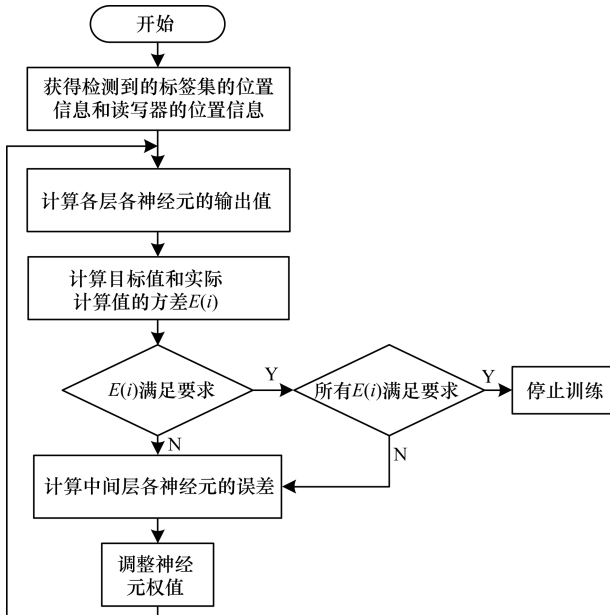


图 3 定位训练过程流程图

在大多数情况下,研究人员选用 RFID 读写器设备的天线是密封的,所以不能很具体地了解天线方向特

性^[15]。天线可分为全向天线和定向天线,由于本文所用为全向天线,下面将以全向天线说明。全向天线的覆盖模型是一个三维空间模型,本文的标签阵列可以等效地认为是一个截面来截取该天线覆盖模型。如果天线方向与标签阵列平行,则所截的截面为一规则的圆,即所读取的标签围成的几何中心即为 Reader 的位置。但如果读写器的天线与标签阵列所在平面是不平行的,所获得的截面通常不是一个圆,有可能是一个椭圆或其他形状,也即 Reader 可以检测到的标签区域不规则,Reader 并不位于其几何中心,如图 4 所示。

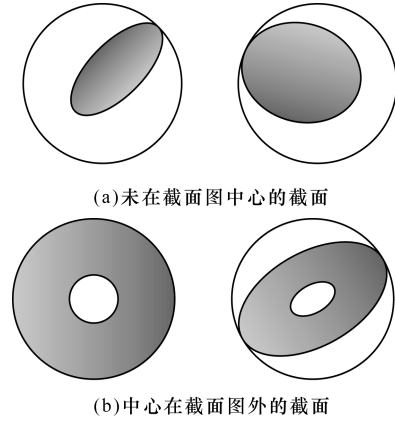


图 4 全向天线覆盖模型的不同截面图

这里将读写器实际的位置 $O_a(x_a, y_a)$ 和所读取的标签区域中心的位置 $O_d(x_d, y_d)$ 的误差定义为 δ , 则:

$$\begin{aligned} \delta &= \|O_a(x_a, y_a) - O_d(x_d, y_d)\| \\ &= \sqrt{(x_a - x_d)^2 + (y_a - y_d)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

将定位误差分解在 2 个方向上,即 x 方向误差 δ_x 和 y 方向误差 δ_y 为:

$$\delta_x = x_a - x_d \quad (10)$$

$$\delta_y = y_a - y_d \quad (11)$$

现在将 Reader 旋转 180° 。在这种情况下, x 方向和 y 方向的定位误差记为 δ'_x 和 δ'_y 。不难发现, $\delta'_x = -\delta_x, \delta'_y = \delta_y$ 。如果将 2 次实验检测结果相叠加,在 X 轴由于天线方向不确定性导致的误差 δ_x 将会被消除。因此,可以预估,如果读写器在一定的时间间隔旋转固定的角度,一共旋转 360° ,再将所有实验检测结果相叠加,这种天线不确定性造成的定位误差将会被消除,因此本文不需要知道非常具体的天线极化方向,如图 5 所示。

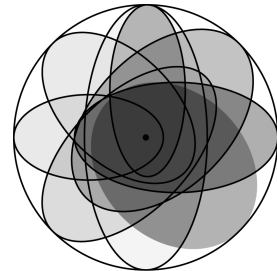


图 5 读写器旋转 360° 叠加检测覆盖的范围

定位时间分为训练阶段时间和定位阶段时间。即为:

$$T_{\text{total}} = T_{tp} + T_{ps} \quad (12)$$

其中, T_{tp} 是训练阶段时间; T_{ps} 是定位阶段时间。训练阶段时间小于 4 s, 而定位阶段时间不超过 2 s, 所以总定位时间将小于 6 s。

根据以上分析, 图 6 给出了定位阶段的流程。目前为止, 上文中 3 个影响定位精度的因素已经被解决, 理论上定位系统精度将被明显提高。

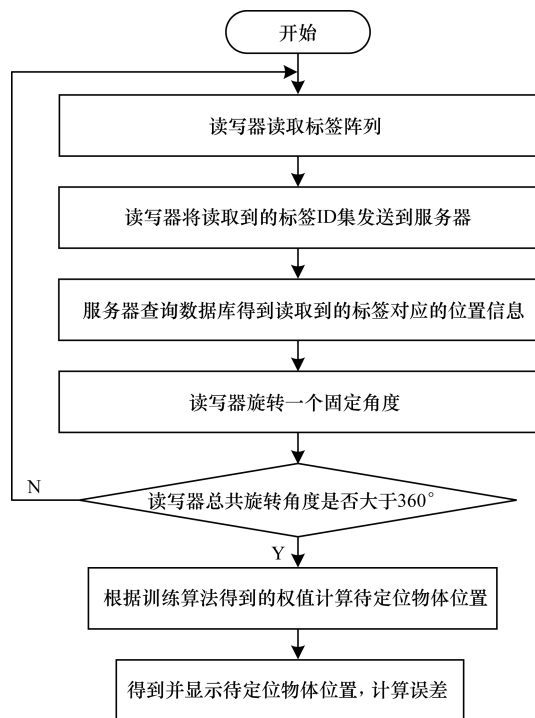


图 6 定位阶段流程

3 仿真实验

3.1 实验建立

为了进一步探讨本文提出的 RFID 定位方案的有效性, 本文采用 LURW-C01 RFID 蓝牙读写器和 ALIEN AZ-9640 电子标签进行实验, 如图 7 所示。读写器规格如下: 工作频率 860 MHz ~ 960 MHz, 内嵌防碰撞协议, 使用 ISO18000-6C&EPC Class 1 Gen 2 的 RFID 协议, 外观尺寸为 110 mm × 50 mm × 6 mm, 重量 40 g, 使用蓝牙 2.0 通信。标签规格如下: 尺寸 70 mm × 13 mm × 0.2 mm, 铜蚀刻, 96 位产品电子代码(Electronic Product Code, EPC)。读写器使用的天线是集成在读写器内部的全向天线, 其天线覆盖模型类似于一个甜甜圈形状。Reader 通过蓝牙发送和接收数据到主机, 主机通过一个 Java 程序接收数据并访问数据库。标签以 10 cm × 10 cm 间隔的方形阵列布置在地板上。为了训练每一个标签的权重(Apt), 本

文使用三层 BP 神经网络方法。在每一次定位过程中 Reader 都是以 45° 旋转 8 次, 然后把 8 次实验检测结果叠加。

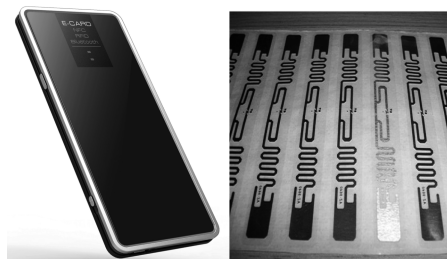


图 7 Reader 和标签实物图

3.2 实验结果分析

实验首先对读写器只通过简单旋转叠加后的定位误差与未旋转直接估测定位的误差进行实验比对, 实验结果如图 8 所示。

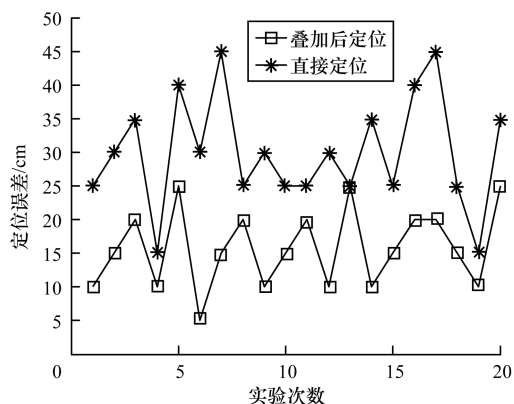


图 8 旋转叠加后的定位效果对比

根据图 8 可以很清楚地观察到, 仅通过读写器旋转叠加实验结果后进行定位的误差, 比直接定位的误差有较大下降, 平均误差比直接定位少了 14.25 cm, 印证了上文中的理论分析。但是发现这样简单叠加后的定位误差依然较大, 这主要是因为环境中的电磁干扰和噪声影响并未被考虑, 所以定位方法仍然需要继续优化。

接下来, 实验将会比较多个定位算法的精度。首先进行纵向比较, 比较之前提出的直接几何中心法、加权平均法和本文所提出的 IPABACM 方法。其实验结果如图 9 所示。从图 9 中可以发现, 本文所提出的 IPABACM 解决方案的定位精度平均值大约高于直接几何中心法近 400% (16.23 cm), 比加权平均法高大约 300% (14.71 cm)。该 IPABACM 算法的稳定性也很好(其方差为 0.62, 而其他 2 种方法的方差为 19.48 和 13.01)。这很容易理解, 因为本文算法大大减少了环境噪声和标签之间的性能差异的影响。

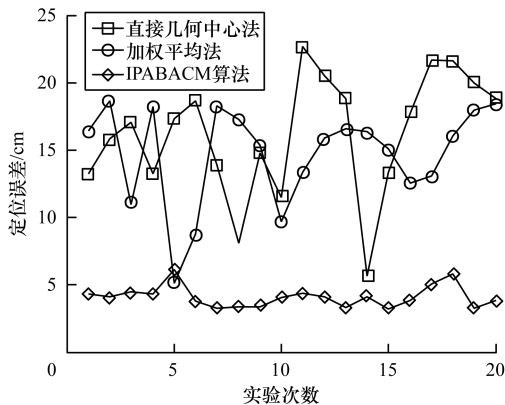


图9 纵向比较各算法的定位误差

接着对实验进行横向比较,选取了一个基于 RSS 的三角差分定位算法^[6]和 SLAM 方法^[16],与本文 IPABACM 算法进行比较,实验结果如图 10 所示。

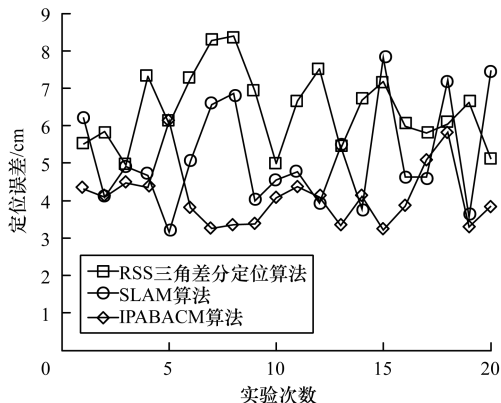


图10 横向比较各算法的定位误差

从精度比较实验结果来看,本文 IPABACM 算法相较其他算法具有更优越的性能。由图 10 可以看出,对比 IPABACM 算法精度,RSS 三角差分定位算法的定位误差平均值增加 2.31 cm (6.42 cm),这是由于它是从基于理想环境的模型,在实际场景中其定位精度自然要大大增加。SLAM 方法的精度与本文算法接近,有时甚至高于 IPABACM 算法,这是因为采用了高斯模型粒子滤波方法消除噪声,使得其精度大大提高。但这种方法的缺点是其实实验假设过于严格,且忽视了未知的 Reader 天线方向会对定位造成的影响。例如,SLAM 定位算法的定位物体每次移动必须移动“整数格”,即标签阵列的一个单位的整数倍(这里是 10 cm)。因此,在精度平均值方面,IPABACM 算法的平均定位误差为 4.11 cm,仍比 SLAM 方法小 1.2 cm (5.33 cm)。RSS 三角差分定位算法定位误差的方差是 0.79,SLAM 定位算法为 1.83,这仍然高于 IPABACM 算法 0.62,故本文算法定位稳定性最佳。

最后实验比较了这 3 种定位方法的定位时间。由于 SLAM 算法使用了非常复杂的算法来降低噪声,使其定位时间大大增长,每次定位需要 40 s,而 RSS 三角差分定位算法也需要较复杂的算法来实现,因此其定位时间相对较长。相比之下,IPABACM 算法实现相对简单,可移植性强。如图 11 所示,IPABACM 算法定位时间仅需 4 s ~ 7 s,其平均值仅为 5.2 s (比 RSS 三角差分定位算法定位时间的平均值低 3.7 s)。

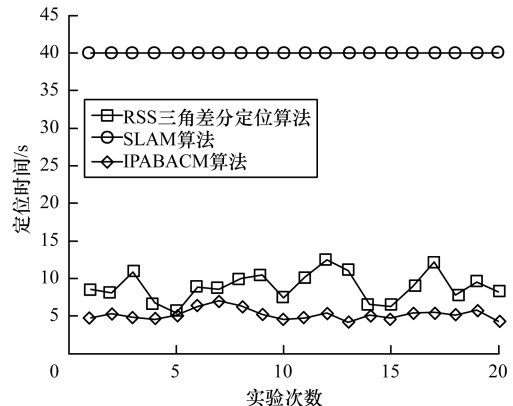


图11 IPABACM 与各算法定位时间的比较

此外,实验中还注意到,三元组训练得到的权值也较符合前文分析期望。例如,远离 Reader 的表现非常活跃被多次读取的标签三元组,它的权值相对较小,如 0.147,0.365 等;但靠近的 Reader 标签性能较差被读取的次数较少的三元组权重相对较大,如 1.67,1.723 等;而在 Reader 附近且被读取次数较多和远离 Reader 且被检测到的次数较少的其他标签的权重接近 1,如 1.145,0.986,0.997 等,符合预期估计。

4 结束语

本文提出一种基于天线覆盖模型的 RFID 室内定位算法(IPABACM)来解决被动 RFID 标签阵列定位。该算法使用一个高密度的标签阵列作为 Reader 的“地图”,通过所检测到的标签的位置信息来估计移动物体(即 Reader)的位置。IPABACM 算法考虑到 Reader 天线方向不定性造成的定位误差影响,并通过旋转读写器叠加检测区域方法消除了误差;使用为标签赋权值并训练的方法减弱了实验噪声和标签性能差异对定位结果的影响。本文算法部署相对简单,在一个不确定的环境和设备下,相比其他传统的被动式 RFID 定位算法,IPABACM 算法可以获得较高的定位精度,且定位时间较低。下一步将优化定位精度,并进行三维定位扩展研究。

参考文献

- [1] 刘熙,刘开华,马永涛,等.多径环境下无源超高频RFID定位算法研究[J].计算机工程,2014,40(8):33-37.
- [2] Park S, Lee H. Self-recognition of Vehicle Position Using UHF Passive RFID Tags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1):226-234.
- [3] 施竣严,秦小麟,王宁.基于梯度博弈的RFID室内定位算法[J].计算机科学,2015,42(11):138-143.
- [4] Digiampaolo E, Martinelli F. A Passive UHF-RFID System for the Localization of an Indoor Autonomous Vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3961-3970.
- [5] Liu Jing, Yang Po. A Localization Algorithm for Mobile Robots in RFID System[C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communication, Network Mobile Computing. Shanghai, China; [s. n.], 2007:2109-2112.
- [6] Lim H, Choi B, Lee J. An Efficient Localization Algorithm for Mobile Robots Based on RFID System[C]//Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, Korea; IEEE Press, 2006:5945-5950.
- [7] Montaser A, Moselhi O. RFID Indoor Location Identification for Construction Projects[J]. Automation in Construction, 2014, 39(1):167-179.
- [8] Tesoriero R, Gallud J A, Lozano M D, et al. Tracking Autonomous Entities Using RFID Technology[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(2):650-655.
- [9] Lee H J, Choi K C, Lee M C, et al. Localization of Mobile Robot Based on Radio Frequency Identification Devices[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2006, 12(1):41-46.
- [10] Park S, Hashimoto S. Autonomous Mobile Robot Navigation Using Passive RFID in Indoor Environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7):2366-2373.
- [11] Han S S, Lim H S, Lee J M. An Efficient Localization Scheme for a Different-driving Mobile Robot Based on RFID System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6):3362-3369.
- [12] Gueaieb W, Miah S. An Intelligent Mobile Robot Navigation Technique Using RFID Technology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(9):1908-1917.
- [13] Nakamori E, Tsukuda D, Fujimoto M, et al. A New Indoor Position Estimation Method of RFID Tags for Continuous Moving Navigation Systems[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Sydney, Australia: IEEE Press, 2012:1-8.
- [14] Boaventura A S, Carvalho N B. A Proposal for Dynamic Power Control in RFID and Passive Sensor Systems Based on RSSI[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague, Czech Republic; IEEE Press, 2012:3473-3475.
- [15] Huang C H, Lee L H, Ho C C, et al. Real-time RFID Indoor Positioning System Based on Kalman-filter Drift Removal and Heron-bilateration Location Estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(3):728-739.
- [16] Yang Po, Wu Wenyan. Efficient Particle Filter Localization Algorithm in Dense Passive RFID Tag Environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10):5641-5651.

编辑 索书志

(上接第119页)

参考文献

- [1] Kim K T. Focusing of High Range Resolution Profiles of Moving Targets Using Stepped Frequency Waveforms[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2010, 4(4):564-575.
- [2] Patton L, Frost S, Rigling B. Efficient Design of Radar Waveforms for Optimized Detection in Colored Noise[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6(1):21-29.
- [3] Yoon C, Lee W, Song J H, et al. New Baseband Pulse Compression for Chirp Coded Excitation[C]//Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2013:906-909.
- [4] Zhang Jian, Huang Xiaojing, Cantoni A, et al. Sidelobe Suppression with Orthogonal Projection for Multicarrier Systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(2):589-599.
- [5] 姚山峰,严航,曾安军,等.线性调频信号的相关检测性能分析[J].计算机工程,2012,38(1):77-80.
- [6] 胡航. Chirp信号脉压旁瓣抑制方法研究[J]. 火控雷达技术, 2004, 33(3):1-4.
- [7] 李海涨. 超宽带脉冲波形设计及调制技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010.
- [8] 张静. 脉冲压缩及其旁瓣抑制技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2005.
- [9] 李晓彤. 基于Chirp函数的超宽带系统干扰抑制设计与研究[D]. 济南:山东大学, 2011.
- [10] 李靖,王数勋,汪飞. 基于分数阶傅里叶变换的Chirp信号时频分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(6):988-990.
- [11] 程胜娟. 大时间-带宽积OFDM Chirp波形设计与仿真研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [12] 尉宇. 线性调频和非线性调频信号的检测与参数估计[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.
- [13] 贺鹏飞. 超宽带无线通信关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2007.
- [14] Pinkney J. Low Complexity Indoor Wireless Data Links Using Chirp Spread Spectrum[D]. Calgary, Canada: University of Calgary, 2004.
- [15] Deng Bing, Cui Shiqi, Li Xiaochen. Analysis of Bandwidth Efficiency and Modulation Parameter for Chirp-rate Modulation[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Measurement. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:394-398.

编辑 陆燕菲