

基于单天线视轴信号传播模型的 RFID 定位方法^{*}

韦进文 谭龙明 郭志俊 谭靖元 侯彦辰

(广西大学机械工程学院 南宁 530000)

摘要: 为了解决现有单天线超高频 RFID 技术在室内静态目标定位中精度不高的问题,本文提出了一种基于天线视轴信号传播模型的 RFID 定位新方法。该方法首先通过天线纵向扫描确定目标的高度位置;其次,调整天线高度与目标高度一致,然后步进旋转扫描以识别目标的方向角;进一步的,利用麻雀搜索算法优化的反向传播神经网络建立路径损耗模型并用于测距;最后,综合高度、方向角和距离数据完成目标的定位。实验结果表明,在室内环境测试中,所提出的方法平均定位误差为 7.2 cm,能够满足一般室内场景下物品的定位需求。

关键词: RFID;RSSI;天线视轴;室内定位;SSA-BP 神经网络模型

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.10

RFID localization method based on single antenna boresight
signal propagation model

Wei Jinwen Tan Longming Guo Zhijun Tan Jingyuan Hou Yanchen

(College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, China)

Abstract: To address the issue of low accuracy in indoor static target positioning with existing single-antenna ultra-high frequency RFID technology, this paper proposes a new RFID localization method based on an antenna boresight signal propagation model. The method first determines the height position of the target through vertical antenna scanning; secondly, it adjusts the antenna height to match that of the target and then performs stepwise rotational scanning to identify the target's azimuth angle; furthermore, it utilizes a Sparrow Search Algorithm optimized back propagation neural network to establish a path loss model for ranging purposes; finally, it integrates the height, azimuth angle, and distance data to complete the target positioning. Experimental results show that in indoor environment testing, the proposed method has an average positioning error of 7.2 cm, which meets the positioning requirements for items in general indoor scenarios.

Keywords: RFID;RSSI;antenna boresight;indoor positioning;SSA-BP neural network model

0 引言

目前,室内环境中静态目标的定位技术包括超声波、超宽带、视觉和射频识别(radio frequency identification, RFID)等多种方法^[1-2]。其中,RFID 技术由于其设备成本低和无接触快速识别的优点,已成为众多室内定位解决方案的首选。尽管如此,RFID 技术在静态目标定位精度方面仍面临重大挑战,尤其是在室内环境中,信号反射、多径传播和非视距问题常常导致定位结果不准确。

针对 RFID 定位技术的研究,从天线配置的角度可分为多天线定位技术和单天线定位技术两类^[3]。赵学谦等^[4]和 Wu 等^[5]以多天线技术联合感知标签的接收信号强度指

示(received signal strength indication,RSSI)信息为前提,通过构建方程组来求解目标的位置,该方法适合于追踪动态目标的场景,缺点在于系统所需成本较高。为进一步降低设备成本和减少系统部署的复杂性,学术界开始关注使用单天线技术实现目标定位。袁晓峰等^[6]依靠单天线连续旋转读取标签的 RSSI 信息,并通过筛选出最大值来确定目标所处的方向,然而,由于 RSSI 信号在传播过程易受到环境噪声的影响,导致接收端的信号波动和失真,加之天线视轴方向及邻近方向上的信号增益变化平缓,使得该区域内的标签反馈的 RSSI 无明显变化趋势^[7],因而直接利用 RSSI 最大值法来进行定位目标的可靠性有限。针对天线连续旋转可能引起的过热问题,何伟健等^[8]提出了一种改

进方法,该方法通过单天线读取多个特定方向角上标签的 RSSI 值,建立相应的信号传播模型,并通过构建等信号强度椭圆模型求解交点来确定目标位置,尽管如此,该方法仍然需要搜索标签信号强度最大值所对应的方向来设定初始定位角度。Shen 等^[9]在目标所在的储物架的边角放置已知位置的信标,将定向天线倾斜后旋转扫描信标及该区域内目标的 RSSI,随后使用同一信号传播模型来计算位于天线不同仰角方向上的信标及目标相对于天线的距离。但是,由于定向天线在不同方向角的信号增益具有显著差异,信号辐射强度表现出各向异性,这意味着天线不同方向上的信号传播应当使用不同的模型来描述。因此,该文献中的方法在计算处于天线不同仰角方向上的信标及目标相对于天线的距离时并不总是适用。此外,定位结果的准确性还受到信号传播模型建模方法的影响。

鉴于现有 RFID 单天线定位算法在估计静态目标方向角时应用信号最大值法和单一测距模型泛用性所存在的不足,本研究提出了一种新的基于天线视轴信号传播模型的静态目标定位方法。该方法首先采用抛物线拟合测角技术来提高目标所在方向角的测量准确度,然后结合目标高度判定法来增强单一模型在测距方面的适用性。此外,本研究还引入了麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)优化的反向传播(back propagation, BP)神经网络,用于构建天线视轴方向上的信号传播模型,并在此基础上准确推算出目标的距离,从而实现了对静态目标的精确定位。

1 RFID 天线辐射理论与分析

RFID 系统从硬件组成上主要分为读写器、天线和标签 3 个部分。读写器负责调制和解调天线发射和接收的信号,而标签则用于存储物品信息供天线读取识别。由天线辐射理论可知,当输入功率恒定时,方向性天线比全向性天线辐射的能量更为集中,感知距离更远,更适合于识别和定位某一特定方向上的目标标签^[10]。

方向性天线的辐射场在主平面上的场强方向图近似为一个椭圆形,该椭圆所围成的面积被定义为天线辐射的主波束区域。在这个区域内,视轴方向的辐射能量最高,而随着方向角偏离视轴,能量逐渐衰减^[11-12]。换言之,在等距的情况下,位于天线视轴方向及偏离视轴方向有限角度范围内的标签,其反馈的 RSSI 与天线角度 θ 组成的离散数据点在二维坐标系中的变化趋势近似为椭圆部分曲线,即抛物线形状,这个观点在相关研究中得到了证实^[13]。依据该特性,拟在波动的 RSSI- θ 数据序列中更精确地判定天线视轴所对应的角度,可以利用抛物线模型进行拟合分析。另外,因为天线不同方向角能量辐射的增益值差异较大,所以本文主要通过探究利用天线视轴这一方向的信号特征来确定目标的位置。在定位的初始阶段,为了确保天线在旋转扫描过程中视轴方向的能量场逼近目标,需要调整天线的高度与目标的高度一致,故应先确定目标所在的高度。

2 目标高度和角度测量

2.1 最大值法确定目标高度

在现实环境中,RFID 标签附着的物品通常被摆放在固定的高度位置,例如展览柜、药品柜及书架^[14],且每个层架的高度已知。基于这一情况,本研究提出了一种采用逐层纵向扫描的方法来确定目标物品所在的层架。如图 1 所示。

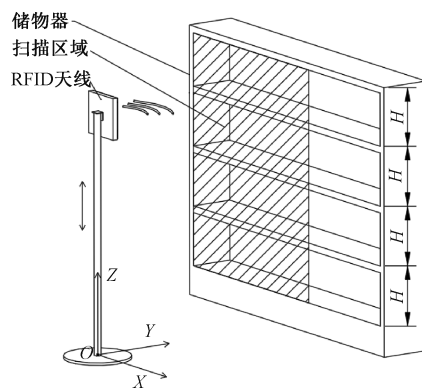


图 1 天线纵向扫描示意图

以天线底座中心所在的位置为基准建立 XYZ 坐标系,本文后续的研究均基于该坐标系。首先,将天线定位于最低层架的中间位置,并沿着 Z 轴逐步向上移动一个层架的高度,每次移动后停顿并在当前层架读取 30 次 RSSI 值,计算其均值作为最终 RSSI 值,记为 $RSSI_{H_i}$ 。完成扫描并寻到目标后,将得到一个包含层架高度 H 及目标 RSSI 值的 $RSSI-H$ 数据序列。若在单次扫描期间未找到目标,可将天线移动至下一个区域重新进行扫描。在数据分析阶段,由于层架之间的高度差显著,当天线处于不同层架高度时,感知到同一目标的 RSSI 值差异明显;再者,当天线与目标处于同一高度时,目标恰好位于天线的主波束内,此时两者之间的相对距离也最短,天线感知到目标的信号强度也最大。据此,可以直接应用最大值法来解析 $RSSI-H$ 数据序列以提取出目标的高度 H_t ,算法如式(1)所示。

$$RSSI_{H_t} = \max \{RSSI_{H_1}, RSSI_{H_2}, \dots, RSSI_{H_n}\} \quad (1)$$

$RSSI_{H_n}$ 代表天线在第 n 层架高度感知到目标的信号强度值,获取目标的高度信息后,下一步确定是目标的方向角。

2.2 抛物线模型测角

为了确定目标所在的方向角,首先将天线高度调整至第 2.1 节计算出的高度位置,然后水平旋转扫描以收集目标标签的 RSSI 数据,通过抛物线模型拟合处理之后求解准线的位置,从而得到目标所在的角度。

具体而言,如图 2 所示,首先以 X 轴方向作为天线旋转起始角度 0° ,将天线视轴对准 0° 方向,然后绕着 Z 轴逆时针逐步旋转,每次步进 3° 进行一次扫描,在每个步进角度下读取 10 次 RSSI 并求平均,直到旋转至终止角度 180° 。

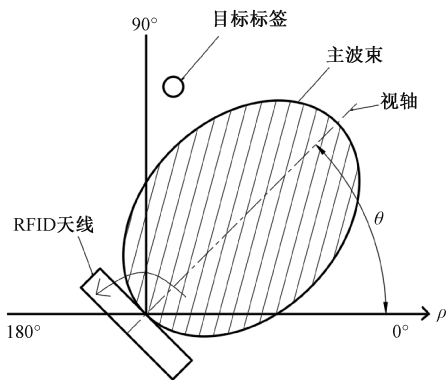
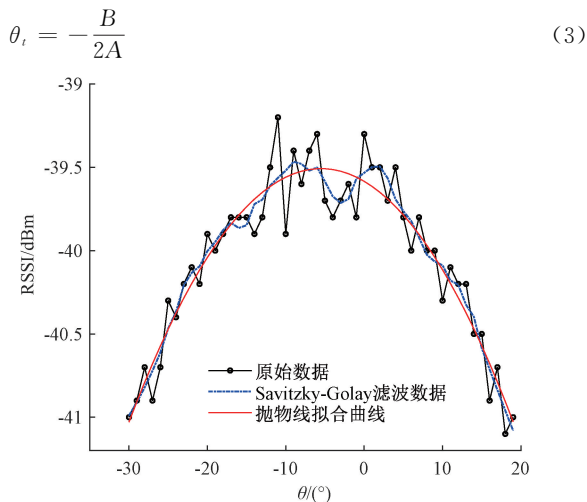


图 2 天线旋转扫描示意图

在此期间,一旦检测到目标标签,即开始记录该时刻的信息 $(\theta_i, RSSI_i)$ 。完成上述步骤之后,将收集到的数据点映射到二维平面坐标系中。考虑到天线主波束能量场的稳定性在偏离视轴方向时会逐渐衰弱,于是仅选取 RSSI 峰值及 0.5 倍功率(3 dB)范围内的数据作为有效数据。为降低数据的波动性,采用滤波算法进行平滑处理,Savitzky-Golay(SG)滤波器通过多项式拟合来进行数据平滑,它能够在降低噪声干扰的同时保留信号的整体趋势和特征^[15]。由此,先利用 SG 滤波算法对离散数据点进行平滑处理,再用抛物线方程式(2)拟合滤波后的数据,处理效果如图 3 所示。

$$RSSI(\theta) = A\theta^2 + B\theta + C \quad (2)$$

其中, A, B, C 为常数, $A \neq 0$ 。最后通过准线方程式(3)即可解算出目标所处的方向角 θ_i 。

图 3 θ -RSSI 数据滤波拟合效果

理想情况下天线主波束的截面形状应当关于中心轴线均匀对称,然而,由于制造和装配过程中存在一些缺陷,例如材料的非均匀性,元器件的制造和装配误差等,实际的天线辐射特性相较于理论存在偏差,这些偏差导致主波束截面的形状不完全对称或者视轴偏离天线面板中心法线,从而在测量目标角度时引入不必要的误差。因此,通过在抛

物线模型角度测量结果中叠加修正因子 α 来改善这个问题,具体如式(4)所示。

$$\hat{\theta}_i = \theta_i + \alpha \quad (4)$$

其中, $\hat{\theta}_i$ 为修正后的最终角度, θ_i 为通过抛物线准线方程解析出的角度。

为确定 α 的大小,设计了验证实验。在实验室内一个空旷的区域进行,以最大程度减少信号反射和多径效应对测量结果的潜在影响。硬件系统选用物联科技系列 RDB-26N 读写器、9 dBi 增益的圆极化定向天线以及 7018 无源电子标签,实验中的射频信号发射频率设定为 920.125 MHz。在实验操作过程中,首先,将标签固定在天线视轴方向 1 m 远的位置。接着,按照第 2.2 节中详细描述测角方法,进行 5 次重复测量实验,计算每次测量结果与真实值之间的绝对误差,之后对这 5 次测量结果取平均值,并使用式(5)对该平均值进行校正。实验最终量测 α 的值约为 3.5° ,该修正值将在测量目标方向角时对结果进行补偿。

$$\alpha = \begin{cases} |\alpha|, & \alpha \leq 0 \\ -\alpha, & \alpha > 0 \end{cases} \quad (5)$$

3 SSA-BP 神经网络模型非线性回归

确定目标所在的角度之后,将天线视轴旋转至该方向,连续感知 30 次目标的 RSSI 值,取其均值后代入测距模型即可得到目标与天线之间的相对距离 d 。在此之前,需先建立天线视轴方向上的 RSSI- d 回归模型。

BP 神经网络是一种常见的人工神经网络模型,相比于对数路径损耗模型,它具有更强的非线性拟合能力,并且能够捕捉到突变的信号特征^[16-17]。它的结构由输入层、隐藏层和输出层组成,每一层都有多个神经元节点。通过误差反向传播形式,使用训练数据不断调整网络权重以最小化输出误差,从而使得该模型能够更好地拟合样本数据和预测未知数据。因此,结合室内环境因素的影响,依托于该模型优良的拟合性能,可以合理地构建天线视轴方向上的信号传播模型。此外,需要注意的是,BP 神经网络模型的收敛速度会受到随机初始化参数的影响,且算法容易陷入局部最优解。为了更进一步提高训练模型的可靠性,引入了具有较强收敛性和局部搜索能力的麻雀搜索算法^[18]来优化 BP 神经网络的初始参数值。整体算法流程如图 4 所示。

4 实验安排与结果分析

4.1 软硬件系统平台

为了验证本文所提方法的有效性,在 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的室内实验室中搭建了一个模拟仓库场景的测试平台。在硬件配置方面,选用 UHF 物联科技系列 RDB-26N 型号的超高频 RFID 阅读器作为下位机,这款设备的天线与控制器合为一体,控制器主芯片型号为英频杰 Indy R2000,工作频率

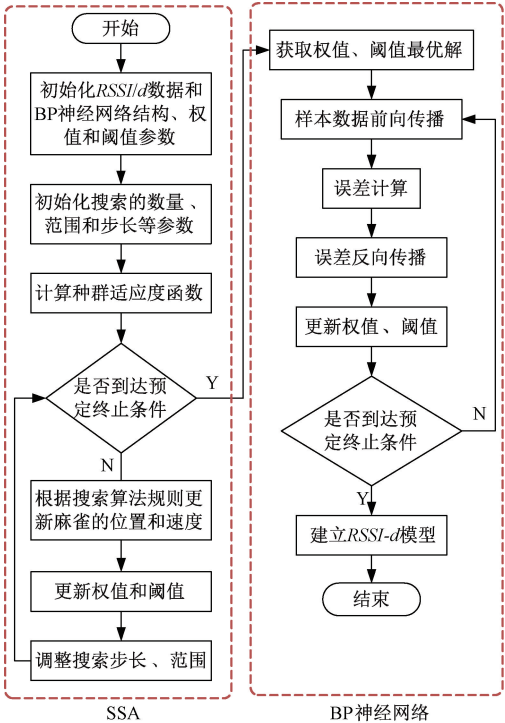


图 4 SSA-BP 神经网络模型拟合流程

位于 920~925 MHz 频段(中国区)。此外,它配备了增益为 9 dBi 的圆极化定向发射天线,单标签读取速度可达 140 次/s,水平面半功率波束宽度约 62°。所使用的标签为 7018 无源电子标签。上位机为 PC 端,通过 USB 线连接至下位机。在软件层面,PC 端的操作系统为 Windows 10,RFID 控制软件为 UHF RFID Reader APP V2.2,数据处理则采用 MATLAB 软件。整体布局如图 5 所示。定位实验主要分为两个部分,即先建立 SSA-BP 神经网络信号传播模型,在此基础上进行整体定位实验。



图 5 室内实验设备布局

4.2 RSSI-d 模型拟合效果分析

为了训练神经网络模型,将标签以 2.5 cm 的间隔沿着天线视轴方向从 0.4 m 移动至 1.3 m,期间在每个位置点停顿以读取 30 次标签的 RSSI 并取其均值作为测定值,最终生成 46 组 RSSI-d 数据,这些数据被用作训练神经网络

模型的样本数据集。接着,按照 80%和 20%的原则将样本数据集划分为训练集和测试集。SSA 种群规模为 50 只,最大进化代数 100,安全阈值为 0.8,发现者和跟随者的种群规模比例分别为 20%和 80%,侦察者数量为 20 只。选用三层 BP 神经网络,并根据经验值反复测试隐含层不同节点数时模型的训练效果来确定最佳节点数^[19-20]。经对比,最终设定隐含层节点数为 5,最大迭代次数 100,学习率 0.01,目标误差 0.000 01。神经网络以 RSSI 值作为输入,距离 d 作为输出进行训练。另外,拟建立对数距离路径损耗模型进行对比,但是,该模型的输出默认为 RSSI,而定位的前提是通过 RSSI 求取距离 d,因此,需要求取该函数的反函数模型即指数函数作为对比,回归曲线和拟合效果分析分别如图 6 和表 1 所示。

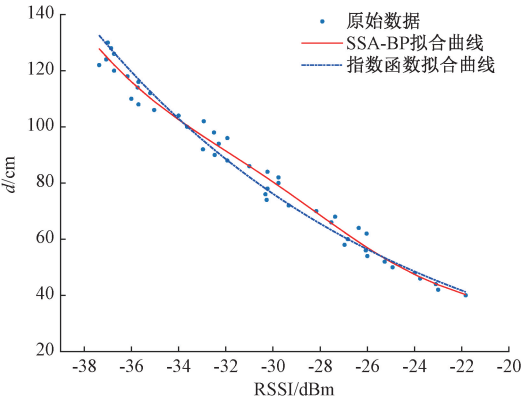


图 6 RSSI-d 模型拟合效果

表 1 模型拟合效果分析比较

拟合模型	R^2	RMSE
SSA-BP 模型	0.983	3.47
指数模型	0.973	4.39

从表 1 的对比结果来看,SSA-BP 神经网络模型和指数函数拟合同样样本数据的决定系数 R^2 分别为 0.983 和 0.973。决定系数是衡量模型解释变量波动能力的统计量,其值越接近于 1,表示模型的解释能力越强。因此,从数据上看,SSA-BP 神经网络模型的 R^2 更接近于 1,表明该模型能够更好地解释样本数据的变化情况。此外,SSA-BP 神经网络模型的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 3.47,比指数函数模型的 RMSE 更小,再次说明了 SSA-BP 神经网络模型在预测目标距离方面的可靠性要优于传统的指数函数模型。

4.3 整体定位结果与分析

以图 1 的室内环境布局为参照,天线置于储物架正前方 55 cm 处,储物架的高度和长度分别为 155 cm 和 100 cm,共有 4 层,每层之间的高度差为 25 cm,最底层架的中间位置离地高度为 65 cm。实验选取 4 个层架进行测试,在每个层架均匀选取 6 个位置点,总共 24 个位置点进行实

验。由于条件限制,实验最终采用图 5 的实验布局进行验证。通过顺序调整标签支架位置及高度至每个目标位置点来模拟标签在储物架上的位置,直至覆盖 24 个定位点。依据实验结果,绘制了目标的三维位置图、二维位置图以及误差累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)图。定位误差采用极坐标系下两点距离的计算方式,如式(6)所示。

$$\delta = \sqrt{(\rho_i^2 + \rho_0^2 - 2 \times \rho_i \times \rho_0 \times \cos(\theta_i - \theta_0))}$$
 (6)

其中, (ρ_i, θ_i) 为目标的估计位置, (ρ_0, θ_0) 为目标的实际位置, θ 为弧度制。

图 7 显示了目标的实际位置和相应的测量位置,为了便于观察天线纵向扫描识别目标高度的效果,将该三维数据映射到二维坐标系 XOZ 面上,如图 8 所示。

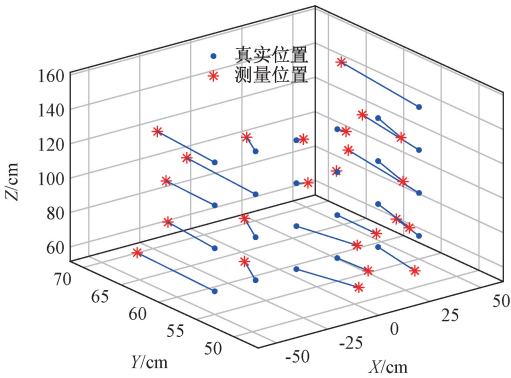


图 7 目标三维空间位置

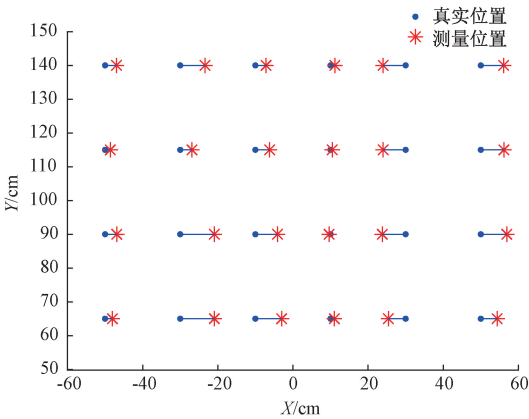


图 8 XOZ 面上目标的投影位置

可以看到,所有目标点的高度测量结果与其真实高度均一致。说明该方法在目标高度定位上是有效的,并且具有高度的稳定性。鉴于 24 个目标点在高度方向上无测量误差,接下来只需要分析目标在 XOY 面上的定位情况。

图 9 展示了 XOY 平面上目标的真实位置与测量位置的投影,从中可见测量位置大致分布在真实位置周围,这揭示了定位系统存在一定的测量误差。尽管如此,测量点的分布趋势仍然围绕着真实位置,这表明了定位方法虽受误差影响,但整体上仍能反映出目标的大致区域。此外,基于

该平面上的定位误差数据绘制的 CDF 图 10 中,可以观察到,在 X 方向上,目标测量的最大误差约为 9 cm,而在 Y 方向上,测量的最大误差不超过 12 cm。就整体而言,综合平均定位误差为 7.2 cm,其中,定位精度在 12 cm 以内的概率达到了 85%,总体上表明了定位性能良好,能够满足室内物品定位的需求。

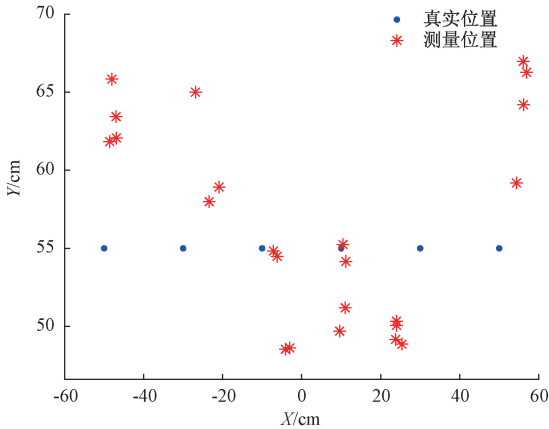


图 9 XOY 面上目标的投影位置

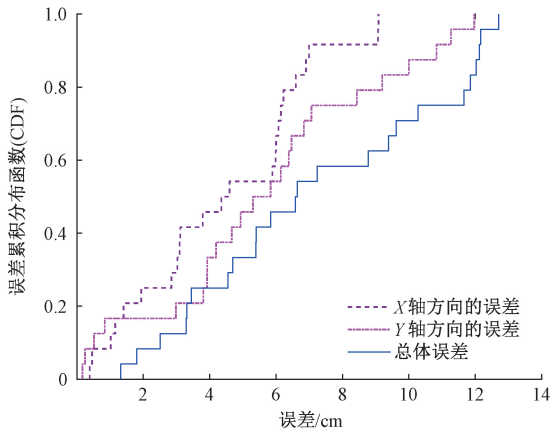


图 10 误差累积分布函数

为进一步评估本文所提方法的性能,将其与较新的 RFID 单天线定位技术进行了比较^[9,21],具体如表 2 所示。

表 2 RFID 单天线不同定位方法精度对比

定位方法类型	平均误差/cm
本文方法	7.2
倾斜天线旋转扫描法(基于 RSSI)	9.3
固定天线扫描法(基于信号相位)	7.0

根据表格 2 所展示的数据结果进行分析,与倾斜天线旋转扫描法相比,本研究的方法在平均定位精度方面实现了 22.6%的提升。尽管如此,该方法在精度上仍略逊于固定天线扫描法,究其原因,该方法主要依赖于标签的信号相位信息进行定位,而信号相位信息相较于 RSSI 信息对环

境变化的敏感度较低,即表现出更高的稳健性,但相应的成本较高。综合考虑性能和成本因素,本文提出的定位方法具有较高的性价比。

5 结 论

本文提出了一种基于天线视轴信号传播模型的 RFID 室内定位方法,旨在提升 RFID 单天线技术在室内的定位精度。流程如下,首先,利用单天线纵向扫描储物架上的物品标签,搜寻目标以确定其所在的高度;接着通过旋转天线进行水平扫描,以辨识目标物品所在的方向角;之后,借助 SSA-BP 神经网络模型构建信号传播模型,以测定目标与天线的距离;最后,综合方向角和距离数据完成目标的整体定位。为了验证该方法的有效性,在室内实验室搭建了相应的实验平台。实验结果表明,本文提出的方法平均定位误差低至 7.2 cm,基本能够满足室内环境下静态物品的定位需求,说明了本文所提出的定位方法是切实可行的,能够为 RFID 室内定位系统在实现目标的自动化盘点和定位方面提供理论借鉴意义。未来的研究可以整合自动引导车并利用同步定位与地图绘制(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术对环境进行建模,从而进一步提升定位系统的功能完整性与实际应用价值。

参考文献

- [1] KUNHOTH J, KARKAR A, AI-MAADEEA S, et al. Indoor positioning and wayfinding systems: A survey[J]. Human-centric Computing and Information Sciences, 2020, 10(1): 18.
- [2] DENG Y, AI H, DENG Z, et al. An overview of indoor positioning and mapping technology standards [J]. Standards, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, 2(2): 157-183.
- [3] 王楚豫, 谢磊, 赵彦超, 等. 基于 RFID 的无源感知机制研究综述[J]. 软件学报, 2022, 33(1): 297-323.
- [4] 赵学谦, 薛皓, 于尧, 等. 基于 RSSI 的笼内鸡只定位方法研究[J]. 河北农业大学学报, 2023, 46(6): 95-102.
- [5] WU C, WANG X, CHEN M, et al. Differential received signal strength based RFID positioning for construction equipment tracking [J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 42: 100960.
- [6] 袁晓峰, 陈硕. 一种基于 RFID 的定位方法[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(6): 81-85.
- [7] LI C, TANGHE E, PLETS D, et al. ReLoc: Hybrid RSSI- and phase-based relative UHF-RFID tag localization with COTS devices[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 8613-8627.
- [8] 何伟健, 陆江城, 朱耀磷, 等. RFID 旋转天线中的椭圆模型室内定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(9): 87-93.
- [9] SHEN L, ZHANG Q, PANG J, et al. ANTspin: Efficient absolute localization method of rfid tags via spinning antenna [J]. Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019, 19(9): 2194.
- [10] 张庆林, 彭进霖, 韩寒. 定向天线在无线自组织网络路由中的应用综述[J]. 计算机应用, 2023, 43(S2): 135-141.
- [11] ZHAO X, HUANG Y, LI J, et al. Wideband high gain circularly polarized UHF RFID reader microstrip antenna and array[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2017, 77: 76-81.
- [12] SARKAR S, GUPTA B. A dual frequency circularly polarized UHF-RFID/WLAN circular patch antenna for RFID Readers [C]. 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), 2019: 448-452.
- [13] LÓPEZ Y Á, GÓMEZ M E C, ANDRÉS F L H. A received signal strength RFID-based indoor location system[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 255: 118-133.
- [14] 刘敏. 图书馆用书架的类型及其规格尺寸分析[J]. 家具, 2017, 38(5): 51-57.
- [15] JUNEJO A K, BENKHELIFA F, WONG B, et al. LoRa-LiSK: A lightweight shared secret key generation scheme for LoRa networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(6): 4110-4124.
- [16] 朱清山, 王伟. 基于 SAGA-BP 神经网络室内定位算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(9): 100-104.
- [17] 姚军, 甄梓越, 马宇静. 基于 BP 神经网络的 RSSI 测距优化算法[J]. 电波科学学报, 2022, 37(4): 663-669.
- [18] 程小辉, 罗源敏, 张攀峰, 等. 基于麻雀搜索的 WSN 约束优化节点定位研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(11): 346-351.
- [19] 赵侃, 师芸, 牛敏杰, 等. 基于改进麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的 PM_{2.5} 浓度预测[J]. 测绘通报, 2022(10): 44-48, 104.
- [20] UZAIR M, JAMIL N. Effects of hidden layers on the efficiency of neural networks [C]. 2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference(INMIC), 2020: 1-6.
- [21] 罗玄, 肖世德, 孟祥印, 等. 基于激光测距与 RFID 的隧道局部定位方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 34-41.

作者简介

韦进文, 副教授, 主要研究方向为机电系统的设计与控制。

E-mail: 782348122@qq.com

谭龙明(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为室内定位系统。

E-mail: 1228936056@qq.com

郭志俊, 硕士研究生, 主要研究方向为数控机床控制系统。

E-mail: 437201570@qq.com