

基于RFID的室内定位技术综述

陈雪萍¹, 杨 菲¹, 赵虹阳¹, 刘小华^{2*}

¹新疆理工职业大学人工智能学院, 新疆 喀什

²深圳职业技术大学人工智能学院, 广东 深圳

收稿日期: 2025年11月6日; 录用日期: 2025年12月8日; 发布日期: 2025年12月15日

摘 要

随着物联网技术的发展, RFID (无线射频识别) 技术在室内定位领域得到了广泛应用。RFID技术凭借其低成本、部署简便和鲁棒性强等特点, 成为解决室内定位难题的有效方案。本文综述了基于RFID的室内定位方法, 首先介绍了室内定位技术的需求和挑战, 分析了几种主流室内定位技术, 并重点探讨了RFID技术的优势。接着, 详细讨论了RFID定位的主要方法, 包括基于信号到达时间(TOA)、到达时间差(TDOA)、到达角度(AOA)、接收信号强度(RSSI)和相位信息的定位方法。最后, 本文展望了RFID室内定位技术的发展趋势, 主要包括精度提升和多技术融合的趋势, 以及稳定性和智能化发展的方向。随着技术的不断进步, RFID室内定位将在多个行业中发挥更大的作用。

关键词

RFID, 室内定位, 精度提升, 多技术融合

A Review of Indoor Positioning Technology Based on RFID

Xueping Chen¹, Fei Yang¹, Hongyang Zhao¹, Xiaohua Liu^{2*}

¹School of Artificial Intelligence, Xinjiang Vocational University of Technology, Kashi Xinjiang

²School of Artificial Intelligence, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen Guangdong

Received: November 6, 2025; accepted: December 8, 2025; published: December 15, 2025

Abstract

With the development of IoT technology, RFID technology has been widely applied in indoor positioning. Due to its low cost, easy deployment, and strong robustness, RFID has become an effective solution to the challenges of indoor positioning. This paper reviews RFID-based indoor positioning methods, first introducing the requirements and challenges of indoor positioning technology,

*通讯作者。

文章引用: 陈雪萍, 杨菲, 赵虹阳, 刘小华. 基于 RFID 的室内定位技术综述[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(12): 255-264. DOI: 10.12677/csa.2025.1512341

analyzing several mainstream indoor positioning technologies, and focusing on the advantages of RFID technology. It then discusses the main RFID positioning methods in detail, including methods based on Time of Arrival (TOA), Time Difference of Arrival (TDOA), Angle of Arrival (AOA), Received Signal Strength Indicator (RSSI), and phase information. Finally, the paper looks forward to the development trends of RFID indoor positioning technology, mainly including the improvement of positioning accuracy and the trend of multi-technology integration, as well as the direction of stability and intelligent development. With continuous technological advancements, RFID indoor positioning will play a larger role in various industries.

Keywords

RFID, Indoor Localization, Accuracy Improvement, Multi-Technology Integration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, RFID 技术与物联网、无线信息与能量传输、低功耗感知等深度融合, 成为新一代信息系统的关键架构, 在工业 4.0 中发挥重要作用。其非接触传感、无线供电、灵活部署及穿透通信等特性, 使 RFID 在智能制造、智慧物流、医疗健康、农业监测及食品供应链等领域具有广泛应用, 尤其在目标追踪、环境感知与高精度定位方面展现出巨大潜力[1]。

定位技术按覆盖范围分为室外与室内两类。室外定位以卫星导航[2] (如 GPS、北斗等)和基站定位为主, 技术成熟且已规模化应用。然而, 人类约 80%时间处于室内, 卫星信号受建筑遮挡严重, 无法满足室内定位需求, 因此位置服务逐渐向室内延伸。

室内环境布局复杂、障碍物多变、多径干扰显著, 对定位精度提出厘米至亚米级的高要求。当前主流室内技术包括 UWB [3]、RFID [4] [5]、Wi-Fi [6]、蓝牙[7]、超声波和可见光等。其中, UWB 精度高但部署成本高; Wi-Fi 覆盖有限、易受干扰; 蓝牙穿透力弱、需额外设备; 超声波抗电磁干扰但易受噪声影响; 可见光无电磁干扰却受遮挡限制。相比之下, RFID 定位技术具备可扩展性高、可靠性强、成本低、部署简便、读取速度快、通信距离远等优势, 仅需标签与读写器即可快速构建系统, 无需复杂布线, 适用于各类复杂环境, 展现出显著的综合竞争力[8] [9]。

本文首先分析了室内定位的技术需求, 对比了几种常见的室内定位技术, 突出了 RFID [10]技术成本低、部署易、鲁棒性强的综合优势。其次, 详细阐述了 RFID 定位的主要方法, 包括基于信号时间的定位、基于到达角度(Angle of Arrival, AOA)定位[11]、基于接收信号强度(Received Signal Strength Indicator, RSSI)定位以及基于相位信息的定位方法[12]。

2. 基于 RFID 的室内定位方法

RFID (无线射频识别)技术通过电磁波进行无线通信, 解析电子标签中的编码信息以实现目标对象的唯一识别。系统运行机理可类比雷达识别机制, 由读写器(信号发射与解析单元)和电子标签(数据存储与反射单元)构成基础硬件架构, 其中天线系统承担射频载波的辐射与接收功能。RFID 系统工作原理流程图如图 1 所示。

基于 RFID 的室内定位系统相较于其他定位技术具有成本低、实施简单和较强的鲁棒性等优点, 因

此得到了越来越多的应用。基于 RFID 的室内定位技术主要依赖于不同的信号特性进行定位, 包括信号的时间、角度、强度和相位等。

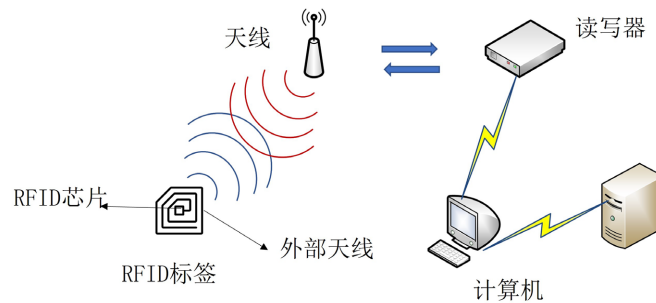


Figure 1. The working principle diagram of the RFID system
图 1. RFID 系统工作原理图

2.1. 基于信号时间的定位方法

基于信号时间的定位方法主要通过测量 RFID 标签与读写器之间的信号传播时间来估算位置。常见的技术包括到达时间[13][14] (TOA, Time of Arrival)和到达时间差(TDOA, Time Difference of Arrival) [15]。通过计算信号从标签到多个读写器的传播时间, 可以精确确定标签的位置。

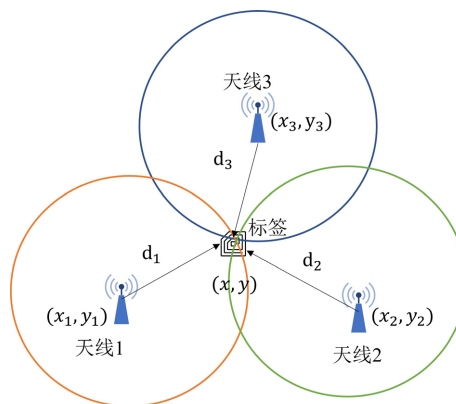


Figure 2. TOA positioning method
图 2. TOA 定位方法

2.1.1. 基于信号到达时间(TOA)的定位方法

TOA 定位方法原理图如图 2 所示, 以三个读写器为例。假设这三个读写器的坐标分别为: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , 待定位目标的坐标设为 (x, y) , 3 个阅读器与待定位目标的距离分别为 d_1 , d_2 , d_3 , 信号在各个阅读器和标签之间的传播时间分别为 t_1 , t_2 , t_3 。

根据公式 $d = c * t$, 可以得到三根天线建立的圆形方程组表示为:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

将上式展开后得到:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - 2x_1x - 2y_1y = d_1^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ x^2 + y^2 - 2x_2x - 2y_2y = d_2^2 - (x_2^2 + y_2^2) \\ x^2 + y^2 - 2x_3x - 2y_3y = d_3^2 - (x_3^2 + y_3^2) \end{cases} \quad (2)$$

令 $R^2 = x^2 + y^2$, 将上式变换后得到的线性方程组为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (3)$$

其中, \mathbf{Y} 、 \mathbf{A} 、 \mathbf{X} 的表达式分别为:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} d_1^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ d_2^2 - (x_2^2 + y_2^2) \\ d_3^2 - (x_3^2 + y_3^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ -2x_3 & -2y_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ R \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用最小二乘法求得 \mathbf{X} 为:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

2.1.2. 基于信号到达时间差(TDOA)的定位方法

到达时差(TDOA)定位是一种基于信号到达时延差的定位原理[16]。定位原理图如图3所示。

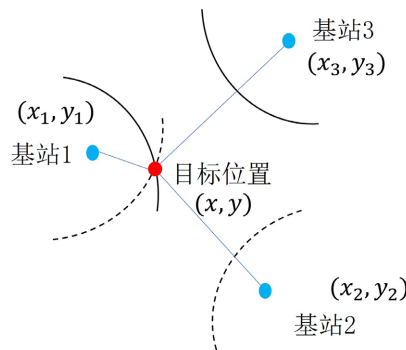


Figure 3. TDOA positioning method

图3. TDOA 定位方法

假设三个阅读器的位置分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , 每个阅读器的射频信号传播时间分别为 t_1 , t_2 , t_3 , 结合电磁波传播速率近似为光速 c , 可通过公式计算天线与目标标签间的距离为 $R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$, 其中 $i \in [1, 3]$ 。根据距离差建立关于定位目标 (x, y) 的方程组为:

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}=R_{21} \\ \sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}=R_{31} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $R_{21}=c \cdot (t_2-t_1)$, $R_{31}=c \cdot (t_3-t_1)$ 。为了求解上述非线性方程组, 对其进行线性化处理。根据 $R_2^2=(R_1+R_{21})^2$, $R_3^2=(R_1+R_{31})^2$, 对上式进行展开和化简可得线性方程组:

$$\begin{cases} 2x(x_2-x_1)+2y(y_2-y_1)+2R_{21}R_1=K_2-K_1-R_{21}^2 \\ 2x(x_3-x_1)+2y(y_3-y_1)+2R_{31}R_1=K_3-K_1-R_{31}^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $K_i=x_i^2+y_i^2$, 上式用矩阵形式可表示为:

$$\mathbf{A}\mathbf{X}=\mathbf{B} \quad (10)$$

式中 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{X} 分别为:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} x_2-x_1 & y_2-y_1 & R_{21} \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & R_{31} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{B}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix} K_2-K_1-R_{21}^2 \\ K_3-K_1-R_{31}^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix} x \\ y \\ R_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用最小二乘法求得 \mathbf{X} 为:

$$\mathbf{X}=(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{B} \quad (14)$$

尽管 TDOA 定位技术缓解了时间同步难题并减少了对设备的依赖, 但其定位精度仍受限于信号传输模式固有的时间测量误差, 微小偏差会显著影响目标位置的计算结果。

2.2. 基于 AOA 的定位方法

AOA (Angle of Arrival) [17] 定位技术通过测量信号到达接收器的角度来确定信号源的位置, 广泛应用于无线通信、导航、雷达和传感网络等领域。AOA 依靠多个接收器的信号角度来推算目标位置, 通常需要至少两个阵列天线, 模型示意图如图 4 所示。

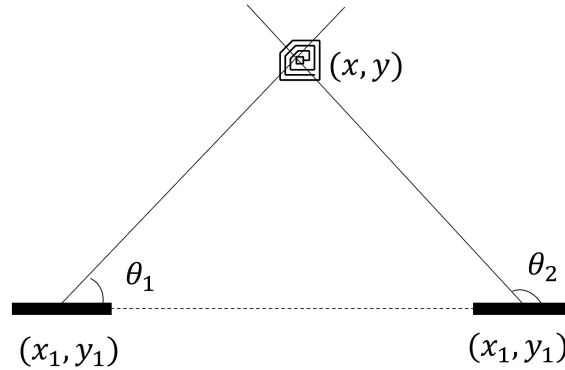


Figure 4. AOA positioning method
图 4. AOA 定位方法

已知两个天线的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ，且各天线对应的射频信号入射角依次为 θ_1 和 θ_2 ，依据几何定位模型构建方程组，从而计算出标签的空间位置坐标 (x, y) 。

$$\begin{cases} \tan \theta_1 = \frac{x - x_1}{y - y_1} \\ \tan \theta_2 = \frac{x - x_2}{y - y_2} \end{cases} \quad (15)$$

2.3. 基于信号强度的定位方法

基于接收信号强度(RSSI)定位方法通过射频信号的强度来估算标签与天线之间的距离，进而推算标签位置[18]。接收信号强度指标是 RFID 系统支持的常用参数。在空间中，能量呈指数衰减。距离越远，能量越低。RSSI 是距离的 n 次方的函数：

$$\text{RSSI}[\text{mW}] \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (16)$$

其中， n 是描述能量衰减速率的指数， d_0 是参考距离， d 是读取器与标签的距离。当以对数形式表示时，RSSI 与距离之间的关系是线性的。RSSI 以 dBm 为单位表示为：

$$\text{RSSI} = \text{RSSI}_0 + 10 \times n \times \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (17)$$

式中 RSSI_0 为参考距离处的 RSSI。 n 为环境因子。从上式中可以得出，读写器与标签之间的距离越小，RSSI 值越大，读写器与标签之间的距离越远，RSSI 值越小。

与其他定位方法相比，基于 RSSI 的定位方法不需要增加额外硬件设备，具有计算简单、成本低等优点。但是，在复杂的室内环境中，射频信号易受多径、反射等因素影响，导致信号强度受到很大的损失。仅利用 RSSI 定位方法的精度较低，无法满足实际需求。通常需要结合其他定位信息来提高定位精度。

2.4. 基于相位信息的定位方法

相位是电磁波的基本参数之一，相比于易受干扰的 RSSI，相位与距离的关系更为稳定[19]。在射频识别系统中，标签与读写器间的信号相位变化与传播路径长度呈周期性关系，其理论模型如图 5 所示。则完整的相位公式可以表示为：

$$\theta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \times 2d + \theta_r + \theta_e\right) \bmod 2\pi \quad (18)$$

其中， d 是读写器天线与无源标签之间的通信链路距离， θ_r 是由收发器电路引起的固有相位偏移，可视作常数偏移量，相位偏移 θ_e 主要由室内多径传播效应引起，即电磁波经反射与衍射后产生多条路径叠加干扰所致。

在射频定位系统中，相位测量虽存在环境因素引起的偏移误差，但可通过构建相位补偿模型实现误差校正。相较于信号强度定位技术，相位信息对天线方向性变化具有较低的敏感度。尽管存在多径效应干扰，但可通过抗多径算法显著抑制其负面影响。基于此，相位特征可作为鲁棒性更强的定位参量。

综上所述，室内定位中常用的定位方法有，基于 RSSI 的室内定位、基于相位的室内定位方法、基于 TOA/TDOA 的室内定位、以及基于 AOA 的室内定位。这四类方法各有优劣：基于 RSSI 的室内定位方法以低成本、易部署为核心优势，但是其精度仅米级(2~5 m)且鲁棒性较弱，容易受到环境影响，定位精度较差；基于相位的室内定位方法精度能达到亚米级(通常 0.5~1 米)，属于当前室内定位中精度较高的方案

之一；同时无需额外部署参考标签，简化了前期的部署流程。但是其在硬件上依赖支持相位采集的特殊设备，提升了成本；而且在定位过程易受多径效应、环境遮挡等因素干扰，鲁棒性不够稳定。基于 TOA/TDOA 的定位方法适配于低速信号场景，但时钟同步要求高、定位精度通常 1~3 m；基于 AOA 的定位方法不占带宽、无时间同步需求，精度同属亚米级。但是其硬件层面依赖阵列天线，不仅抬高了部署成本，也增加了设备体积与部署复杂度；同时，定位效果易受阵列天线性能、环境遮挡的影响，鲁棒性存在局限。几种室内定位方法对比如表 1 所示。

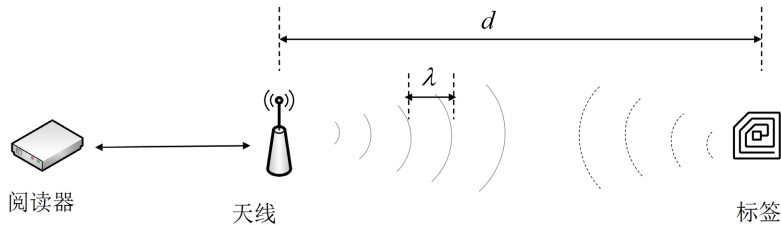


Figure 5. The principle diagram based on carrier phase distance estimation
图 5. 基于载波相位距离估计原理图

Table 1. Comparison of several indoor positioning methods
表 1. 几种室内定位方法对比

定位方法	精度范围	成本	复杂度	鲁棒性
RSSI	米级(2~5 m)	低	低	弱
相位	亚米级(0.5~1 m)	中	中	中
TOA/TDOA	米级(1~3 m)	中	中	中
AOA	亚米级(0.5~1 m)	高	高	中

3. 基于 RFID 的室内定位技术的发展趋势

随着物联网和智能化技术的快速发展，基于射频识别(RFID)技术的室内定位在多个行业中得到广泛应用[20]。RFID 室内定位技术具有部署简便、成本低廉、鲁棒性强等优点，逐渐成为室内定位系统的重要组成部分。未来，随着技术的不断进步，RFID 室内定位将在精度、稳定性和智能化方面取得更大的突破，具体发展趋势可以概括为以下两点。

3.1. 精度提升与多技术融合的趋势

随着市场对室内定位精度要求的不断提高，传统的 RFID 定位方法面临一定的精度瓶颈，尤其是在复杂环境下(如金属物品较多或信号多径效应较强的地方)，现有的 RFID 定位精度往往难以满足需求[21][22]。为此，提升 RFID 定位精度是未来发展的关键方向。

相对于基于接收信号强度(RSSI)的方法，RFID 系统中的相位信息对距离变化更为敏感，具有更高的定位精度。通过多频点相位信息的处理，可以有效减小信号衰减和多径效应带来的影响，提高定位的稳定性和精度。理论上，利用相位信息进行定位可以实现厘米级甚至毫米级的精度，特别是在信号复杂的室内环境中，相位信息能够提供更为精确的定位结果。单一的 RFID 定位技术往往难以满足复杂环境中的需求，因此，未来 RFID 定位技术将朝着与其他定位技术的融合方向发展。例如，RFID 可以与超宽带

(UWB)、蓝牙、Wi-Fi 等无线通信技术结合,形成多技术协同的定位系统。UWB 技术能够提供高精度的距离测量,蓝牙和 Wi-Fi 可以提供广泛的覆盖范围,通过融合这些技术的优点,能够有效提高定位精度、拓展定位范围,并解决信号遮挡、干扰等问题。

此外,利用 RFID 与传感器网络(WSN) [23]或视觉定位系统(VPS) [24]的结合,也能够进一步提升定位的精度和系统的可靠性。传感器网络能够提供环境的实时数据,而视觉定位系统则可以在高精度的地图构建中发挥作用,二者与 RFID 技术结合,能够显著提升系统的综合性能。同时机器学习和大数据分析的引入,极大地推动了 RFID 定位精度的提升。通过分析 RFID 信号的实时变化,机器学习算法可以识别信号传播模型、环境变化特征以及定位误差的规律,并实时调整系统的参数。机器学习尤其擅长从复杂、动态的环境中提取特征,并在无监督学习或半监督学习的基础上实现自适应调整。通过对大量数据的挖掘,系统能够不断优化定位模型,进一步提高定位精度。

3.2. 定位稳定性和智能化发展趋势

除了精度的提升,RFID 室内定位技术的稳定性和智能化也是未来发展的重要方向[25]。随着智能化应用的普及,RFID 定位系统将不仅仅局限于基础的定位功能,还将实现更加复杂的智能分析与决策。

室内环境中,信号的干扰和多径效应对 RFID 定位系统的稳定性造成了较大影响。为了应对这种挑战,未来 RFID 定位系统将采用更先进的信号处理技术,如波形调整、去噪算法、相位差处理等,以减少干扰的影响。此外,多天线技术的引入也能显著提升系统对干扰信号的抗扰能力,尤其是在复杂的室内环境中,多个天线同时工作能够提高信号接收质量,从而保证定位的稳定性[26]。

智能化是 RFID 技术发展的另一大趋势。未来的 RFID 定位系统不仅能够进行实时的定位,还能通过自适应技术实时调整定位参数,保证系统在不同环境和动态条件下的稳定性。例如,当人员走动、物品搬运等活动发生时,RFID 系统能够自动调整定位算法和数据处理方式,以适应变化的环境条件。通过自适应的算法优化,系统能够动态更新定位模型,从而维持高精度和高稳定性。

RFID 定位技术的智能化发展,还将结合大数据分析和云计算,推动室内定位系统的智能决策能力。随着物联网设备的普及和对实时数据处理的需求增加,边缘计算技术将逐步被引入到 RFID 室内定位系统中。边缘计算能够在本地处理和分析数据,减少数据传输带来的延迟和带宽负担。在 RFID 定位系统中,边缘计算可以帮助处理大量的定位数据,并进行实时决策,从而在保证定位精度的同时,提升系统响应速度和稳定性。边缘计算的应用将使 RFID 定位技术更加适用于实时性要求较高的场景,如自动驾驶、机器人导航等。

4. 结语

RFID 技术作为一种低成本、易于部署的室内定位解决方案,已经在多个领域展现出其独特的优势。与传统的定位技术相比,RFID 定位技术具有更高的灵活性和更强的鲁棒性,能够有效适应复杂的室内环境。因此,RFID 技术在智能制造、智慧物流、医疗健康、仓储管理等行业中有着广泛的应用前景。本文通过对基于 RFID 的室内定位方法的分析,深入探讨了信号时间、信号角度、信号强度和相位信息等多种定位技术,为进一步提升定位精度和稳定性提供了理论基础。

尽管 RFID 定位技术具有诸多优势,但在实际应用中,仍面临着诸如多径效应、信号衰减和遮挡等问题,这些因素会影响定位精度。因此,未来 RFID 定位技术的发展将依赖于对这些问题的有效解决。尤其是随着相位信息和多频点处理技术的发展,RFID 定位精度将不断提升,并有望实现厘米级甚至毫米级的定位精度。此外,结合超宽带(UWB)、蓝牙、Wi-Fi 等技术的多技术融合,能够有效克服现有定位方法的局限性,进一步提高定位精度和系统可靠性。

智能化和稳定性提升也是 RFID 定位技术未来发展的重要方向。随着环境变化和动态条件的影响, RFID 系统将不断优化其算法, 以适应不同环境中的定位需求。结合机器学习、大数据分析、边缘计算等先进技术, RFID 定位系统将能够实现更加智能的决策支持, 为物联网设备提供高效、精准的定位服务。

总之, RFID 技术的室内定位应用将持续发展, 并在未来的智能化系统中扮演重要角色。随着技术的不断进步, RFID 定位技术将更加精准、稳定, 广泛应用于各种行业, 推动智能化社会的发展。

参考文献

- [1] Li, C., Mo, L. and Zhang, D. (2019) Review on UHF RFID Localization Methods. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, **3**, 205-215. <https://doi.org/10.1109/jrfid.2019.2924346>
- [2] Drawil, N.M., Amar, H.M. and Basir, O.A. (2013) GPS Localization Accuracy Classification: A Context-Based Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **14**, 262-273. <https://doi.org/10.1109/tits.2012.2213815>
- [3] Hamed Al-Shamili, M.A. and Sharma, M.K. (2022) Gain and Directivity Enhancement of UWB Antenna Using Meta-Surface and Its Application for UWB-Wireless Network Security. 2022 *3rd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, Belgaum, 27-29 May 2022, 1-4. <https://doi.org/10.1109/incet54531.2022.9824185>
- [4] Motroni, A., Bandini, G., Buffi, A. and Nepa, P. (2023) Investigation of Phase Offset Calibration for Sar-Based RFID Localization in Harsh Environments. 2023 *IEEE 13th International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, Aveiro, 4-6 September 2023, 138-141. <https://doi.org/10.1109/rfid-ta58140.2023.10290170>
- [5] Khan, S.I., Ray, B.R. and Karmakar, N.C. (2024) RFID Localization in Construction with IoT and Security Integration. *Automation in Construction*, **159**, Article ID: 105249. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105249>
- [6] Keunecke, K. and Scholl, G. (2014) Accurate Indoor Localization by Combining IEEE 802.11 g/n/ac WiFi-Systems with Strapdown Inertial Measurement Units. *GeMiC 2014; German Microwave Conference*, Aachen, 10-12 March 2014, 1-4.
- [7] Gamarra, M.V., Papaharalabos, S., Rezaei, F., Bartlett, D. and Karlsson, P. (2023) Seamless Indoor and Outdoor Positioning with Hybrid Bluetooth AoA and GNSS Signals. 2023 *13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nuremberg, 25-28 September 2023, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ipin57070.2023.10332476>
- [8] Sanpechuda, T. and Kovavisaruch, L. (2008) A Review of RFID Localization: Applications and Techniques. 2008 *5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Krabi, 14-17 May 2008, 769-772. <https://doi.org/10.1109/ecticon.2008.4600544>
- [9] Zhou, J. and Shi, J. (2008) RFID Localization Algorithms and Applications—A Review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **20**, 695-707. <https://doi.org/10.1007/s10845-008-0158-5>
- [10] 代阳坪, 刘天宇. 室内定位技术综述及发展前景探究[J]. 数字通信世界, 2024(8): 89-91, 100.
- [11] Zheng, Y., Sheng, M., Liu, J. and Li, J. (2019) Exploiting AoA Estimation Accuracy for Indoor Localization: A Weighted AoA-Based Approach. *IEEE Wireless Communications Letters*, **8**, 65-68. <https://doi.org/10.1109/lwc.2018.2853745>
- [12] Sadowski, S. and Spachos, P. (2018) RSSI-Based Indoor Localization with the Internet of Things. *IEEE Access*, **6**, 30149-30161. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2843325>
- [13] Zou, Y. and Liu, H. (2020) A Simple and Efficient Iterative Method for Toa Localization. *ICASSP 2020—2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Barcelona, 4-8 May 2020, 4881-4884. <https://doi.org/10.1109/icassp40776.2020.9053746>
- [14] Abualsaud, H. and Gerstoft, P. (2025) 3D TDOA-AOA Quaternion Based Acoustic SLAM for Drone Localization and Source Mapping. *ICASSP 2025—2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Hyderabad, 6-11 April 2025, 1-5. <https://doi.org/10.1109/icassp49660.2025.10888106>
- [15] 张泽宇, 汤晓君, 李晓杉, 等. 结合盲信号分离算法的局部放电 TDOA/DOA 混合定位方法[J]. 物理学报, 2025, 74(13): 223-238.
- [16] 杨曼, 任志国, 薛盼盼. 基于改进鸟群优化算法的 TDOA 定位算法[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2025, 39(4): 48-55.
- [17] Zou, Y., Xiao, Y. and Zhang, W. (2025) A Simple and Efficient Method for Hybrid AOA and DTD Localization with Unknown Transmitter Location. *IEEE Signal Processing Letters*, **32**, 401-405. <https://doi.org/10.1109/lsp.2024.3521317>
- [18] Souissi, R., Ktata, I., Sahnoun, S., Fakhfakh, A. and Derbel, F. (2024) Improved RSSI Distribution for Indoor Localization Application Based on Real Data Measurements. 2024 *21st International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Erbil, 22-25 April 2024, 486-491. <https://doi.org/10.1109/ssd61670.2024.10548383>

-
- [19] 周燕. 基于 RFID 的物联网定位技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [20] 刘龙波, 乔记平, 刘儒平, 等. 基于 RSSI 的 RFID 室内定位算法优化研究[J]. 计算机应用与软件, 2025, 42(2): 152-156.
- [21] Kumar, D. and Jaglan, N. (2025) A Miniaturized Dual Band Circularly Polarized Antenna for Portable RFID Readers. *Wireless Personal Communications*, **145**, 819-830. <https://doi.org/10.1007/s11277-025-11880-7>
- [22] Wu, C., Gong, Z., Tao, B., Tan, K., Gu, Z. and Yin, Z. (2023) RF-SLAM: UHF-RFID Based Simultaneous Tags Mapping and Robot Localization Algorithm for Smart Warehouse Position Service. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **19**, 11765-11775. <https://doi.org/10.1109/tii.2023.3252405>
- [23] Hudda, S. and Haribabu, K. (2025) A Review on WSN Based Resource Constrained Smart IoT Systems. *Discover Internet of Things*, **5**, Article No. 56. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00152-2>
- [24] Ratih, R., Moniroh, N. and Mahardika, F. (2025) Strategi Keamanan VPS Menggunakan Pendekatan Berlapis: Studi Kasus Integrasi Cloudflare, 2FA, dan Monitoring. *Blend Sains Jurnal Teknik*, **4**, 449-460.
- [25] Wei, Z., Chen, J., Tang, H. and Zhang, H. (2023) RSSI-Based Location Fingerprint Method for RFID Indoor Positioning: A Review. *Nondestructive Testing and Evaluation*, **39**, 3-31. <https://doi.org/10.1080/10589759.2023.2253493>
- [26] 王宪平. 超高频无源和半无源 RFID 标签的定位算法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.