

基于 UHF RFID 技术的室内定位方法*

魏海红¹,李淑飞²

(1. 东莞职业技术学院 电信信息学院,广东 523808;
2. 东莞职业技术学院 人工智能学院,广东 523808)

摘要:在室内环境中,由于建筑物的屏蔽效应、多径衰落等因素,会产生许多反射和散射的信号路径。这些多路径干扰会引入额外的相位差,并且当相邻标签或信号源之间的距离非常接近时,相位差可能超过一个波长,导致相位模糊现象的发生,无法准确获取不同载波信号源之间的相位差值,增加了定位难度。为了解决该问题,提出了基于超高频射频识别技术(UHF RFID)的室内定位方法。分析 UHF RFID 系统结构构成及工作原理。在 UHF RFID 标签读取器收到标签回复信号后,计算超高频载波信号相位角度;根据阅读器与标签间距离,提取出室内无源超高频信号相位,获取不同载波信号源的相位差;通过对相位差数据进行拟合分析,将相位差转化为欧式距离数据,解决相位差超过波长导致的相位模糊现象;对距离数据进行特征值分解,构建特征值的标量积矩阵,提取出标签回复的信号特征,并与其他信号源进行区分;结合已知的未知节点信息,通过相位差-多维标度定位算法进一步优化定位结果实现无源超高频定位。由实验结果可知:所提方法超高频信号相位差与实际值仅存在最大为 0.01 rad 的误差,最大定位误差仅为 0.12 m,定位误差较小,在复杂的信道传播环境中依然能够保持较高的定位精度,定位效果较好。

关键词:UHF;RFID;室内无源超高频;定位

中图分类号:TP391.9 文献标识码:A DOI 编码:10.14016/j.cnki.1001-9227.2024.11.034

Indoor positioning method based on UHF RFID technology

WEI Haihong¹,LI Shufei²

(1. College of Electronic Information, Dongguan Polytechnic, Dongguan, Guangdong 523808, China;
2. College of Electronic Information, Dongguan Polytechnic, Dongguan, Guangdong 523808, China)

Abstract:In indoor environments, due to factors such as shielding effects of buildings and multipath fading, there are many reflected and scattered signal paths. These multipath interferences introduce additional phase differences, and when the distance between adjacent labels or signal sources is very close, the phase difference may exceed one wavelength, leading to phase ambiguity and the inability to accurately obtain the phase difference between different carrier signal sources, increasing the difficulty of localization. To address this issue, an indoor positioning method based on ultra-high frequency radio frequency identification (UHF RFID) technology is proposed. Analyze the structure and working principle of UHF RFID system. After receiving the tag reply signal in the UHF RFID tag reader, calculate the phase angle of the ultra-high frequency carrier signal; Extract the phase of indoor passive ultra-high frequency signals based on the distance between the reader and the tag, and obtain the phase difference of different carrier signal sources; By fitting and analyzing the phase difference data, the phase difference is transformed into Euclidean distance data to solve the phase ambiguity phenomenon caused by the phase difference exceeding the wavelength; Perform eigenvalue decomposition on distance data, construct a scalar product matrix of eigenvalues, extract signal features of label replies, and distinguish them from other signal sources; By combining known unknown node information and using the phase difference multi-dimensional scaling positioning algorithm to further optimize the positioning results, passive ultra-high frequency positioning can be achieved. From the experimental results, it can be seen that the proposed method has a maximum error of 0.01 rad between the phase difference of the ultra-high frequency signal and the actual value, and a maximum positioning error of only 0.12m. The positioning error is relatively small, and it can still maintain high positioning accuracy in complex channel propagation environments, with good positioning effects.

Key words:UHF; RFID; indoor passive ultra-high frequency; location

收稿日期:2024-01-14

* 基金项目:东莞市科技特派员项目,智能功率芯片的过问保护研究及其电路设计(20221800500842);东莞职业技术学院智能终端及智能制造专项项目,超高频 RFID 室内定位天线设计(ZXD202218);东莞职业技术学院智能终端及智能制造专项项目,基于无线传感网络的桥梁健康监测系统设计(ZXB202201);东莞职业技术学院校级科研基金项目,基于遗传算法的多信道多点无线桥梁健康监测系统设计(2021c09)。
作者简介:魏海红(1985-),女,河北保定人,讲师,硕士,主要研究方向为电子信息技术、通信技术研究。

0 引言

随着科技的进步,研究者越来越关注室内重要物品、设备和人员的位置信息。室内定位技术可以在室内环境中获取物品、设备和人员的准确位置信息,因此成为了国防军事、交通控制、工业生产、医疗服务以及环境监测等领域的关注点^[1]。虽然室外定位技术已经非常成熟,但由于建筑物对信号的屏蔽作用,室内环境中的卫星信号变得微弱,使得传统的定位技术在室内无法实现有效定位。此外,室内环境中的信号散射、衍射和反射等因素也给室内定位技术带来了巨大的挑战。因此,研究者们需要寻找新的方式来

克服这些困难,以实现室内定位的准确性和可靠性^[2]。

实现室内定位技术的手段有很多,其中,刘嘉伟^[3]提出了面向室内环境变动的定位算法,通过监测室内环境的变动信息,如人员流动、物体移动等,建立环境变动模型,根据环境变动信息和接收器位置信息,预测目标物体的位置,实现了室内目标的无源定位。该方法依赖室内环境的变动信息,如人员流动、物体移动等。如果环境变动较少或没有足够的变动信息可供使用,该方法可能无法准确预测目标物体的位置,从而影响定位结果的准确性。李永生^[4]提出了基于卡尔曼滤波的室内无源定位方法,通过建立信号传播模型,利用已知的信号传播速度和接收器位置信息,结合卡尔曼滤波算法对目标位置进行预测与修正,实现室内目标的无源定位。该方法建立信号传播模型前提是对信号的传播速度和路径有较准确的了解。然而,在复杂的室内环境中,由于建筑物结构和材料的不同,信号传播的路径和速度变化可能较大,导致信号传播模型的准确性受到影响。王伟等人^[5]提出了基于概率累积的定位方法,通过分析超高频信号的传播特性,构建超高频信号传播模型,累加不同测量结果的辐射源位置分布概率,进行后概率运算,完成目标物体位置的定位估算。该方法建立的信号传播模型通常是基于理想化的环境假设得出的,忽略了建筑物结构复杂性、反射和散射的影响等。因此,该方法对室内实际环境中多路径干扰和相位模糊的处理能力有限,可能无法准确模拟和处理这些复杂情况。国强^[6]基于正则化约束总体最小二乘法的优势,设计一种无源定位方法,建立无源定位模型,通过正则化约束条件对方程进行求解确定定位位置,进一步缩小到达时间差和到达频率差,并通过最小二乘法对定位结果进行修正,实现室内目标的无源定位。在该方法中,虽然正则化约束可以一定程度上缓解多路径干扰的影响,但在复杂的室内环境中,多路径干扰仍然可能对定位结果产生较大的影响。该方法无法完全消除或抑制多路径干扰的影响,从而降低了定位精度。

超高频射频识别技术(Ultra High Frequency Radio Frequency Identification, UHF RFID)是一种具有卓越的穿透性能的技术,可穿透一些室内墙壁、地板、储物柜等障碍物,减少周围环境对定位精度的影响,提高识别效率,实现远距离通信。本文基于 UHF RFID 的优势,将其应用至室内定位中,通过计算 UHF RFID 标签读取器接收到的回复信号,可以提取出室内无源超高频信号的相位信息。这一步骤可以获得不同载波信号源之间的相位差。对获取的相位差数据进行拟合分析,将其转化为欧式距离数据。通过拟合得到的欧式距离,获得更准确的定位结果。可以解决相位差超过波长导致的相位模糊现象,提高了无源超高频定位的精度和可靠性。实验结果也验证了该方法在复杂信道传播环境下的良好定位效果。

1 UHF RFID 技术的工作原理

UHF RFID(Ultra-High Frequency Radio-Frequency Identification)是一种利用无线电波进行识别和通信的技术。它是 RFID(Radio-Frequency Identification, 射频识别)技术的一种变体,使用更高的频率范围进行通讯和标签识别。UHF RFID 系统由两个主要组件组成:标签和阅读器。标签是被动式的,在没有额外电源的情况下工作,依靠接收来自阅读器的电磁场能量,然后通过调制和回复相应的信号进行通信。阅读器负责发出电磁场并读取标签回复的信息。

阅读器结构如图 1 所示。

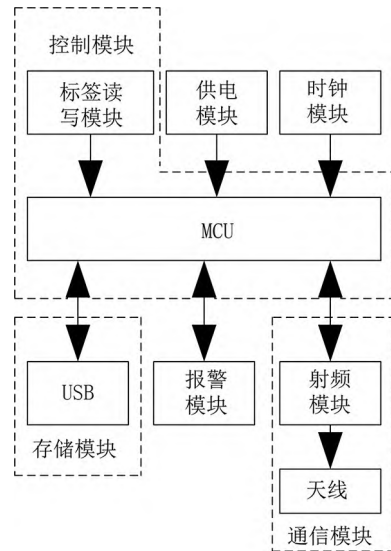


图 1 RFID 阅读器结构

UHF RFID 标签的主体是天线以及一种标签内部电路,它在收到电路匹配信号之后,就会对其切割,从而生成一种电流^[6]。在收到信号到达内部电路时,该标签上的电子电路会按照读取器指令来发送一个信息,然后再通过内部电路对该信息重写,再加上标签独有的标签 PID 值,再将相应的信息反馈给读取器。

2 室内无源超高频定位方法设计

2.1 超高频载波信号相位差计算

在室内环境中,存在多个超高频信号源,这些信号可能会相互干扰,导致阅读器难以准确识别和接收标签回复的信号。通过计算相位差,可以有效地提取出标签回复的信号,减小其他信号源的干扰,提高信号质量。同时,相位差计算还可以用于确定阅读器与标签之间的距离,更精确地确定标签在空间中的位置,从而提高定位精度。具体分析过程如下:

在 UHF RFID 标签读取器收到该标签回复信号后,对阅读器接收到的复解调电压进行计算,可用如下公式表示:

$$U = U_a + U_b + U_c \quad (1)$$

公式(1)中, U_a 表示阅读器发送与接收的电压; U_b 表示室内安静状态下散射造成干扰的电压; U_c 表示由于标签后向散射的电压^[7-8]。

依据获取的复解调电压,计算超高频载波信号相位角度,公式为:

$$\theta = \frac{\varphi}{(U_i - U_o)} \quad (2)$$

公式(2)中, U_i 表示阅读器用于接收、解调标签信号同相分量; U_o 表示阅读器用于接收、解调标签信号正交分量^[9]; φ 表示相位。

阅读器与标签之间的距离是确定标签位置的关键参数。通过计算两者之间的距离,可以更精确地确定标签在空间中的位置,从而提高定位精度。因此对阅读器与标签间距离进行计算,计算公式为:

$$d = \frac{\left(\frac{\theta}{\text{mod} 2\pi} - \theta_a - \theta_b - \theta_c \right) \cdot \gamma}{2\pi} \quad (3)$$

公式(3)中, γ 表示天线发射波长; θ_a 表示阅读器发送与接

收的相位偏转角度; θ_0 表示室内安静状态下散射造成干扰的相位偏转角度; θ_e 表示由于标签后向散射的相位偏转角度^[10-11]。

室内无源超高频信号中存在两个或更多超高频信号,来自不同发射源。从阅读器中随机选取任意两个发射频率为 η_1 、 η_2 的载波信号,由此提取出两个发射频率为 η_1 、 η_2 的载波信号对应的相位为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = 2\pi \frac{2d}{v} \cdot \eta_1 \\ \varphi_2 = 2\pi \frac{2d}{v} \cdot \eta_2 \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中, v 表示电波传播速度^[12]。基于此,得到的两个发射频率为 η_1 、 η_2 的载波信号相位差 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2| \quad (5)$$

当多个载波信号在相同的空间中传播时,它们可能会相互干扰,导致信号质量下降。因此计算载波信号卷叠的最大距离,可以帮助确定这些干扰的程度,从而实现超高频载波信号相位差计算。载波信号卷叠的最大距离,可用如下公式表示:

$$d_{\max} = \frac{v}{2(\eta_1 - \eta_2)} \quad (6)$$

当 $d < d_{\max}$ 时,载波信号相位差 $\Delta\varphi \leq 2\pi$;当 $d > d_{\max}$ 时,载波信号相位差 $\Delta\varphi > 2\pi$ 。

2.2 相位差数据拟合分析定位方法

将载波信号相位差作为定位信息,使用 UHF RFID 技术获取收发信号的相位差信息,在定位过程中使用少量参考标签辅助定位。通过拟合欧式距离,可以将多个接收器接收到的信号数据转化为目标物体的实际位置。可以提高定位精度和准确性。这种方法有助于解决相位差超过波长导致的相位模糊现象。具体分析过程如下:

在不存在相位模糊情况下,相位差和距离呈线性关系,可表示为:

$$\frac{\Delta\varphi}{d} = \frac{4\pi\eta}{v} \quad (7)$$

利用 n 个阅读器定位设备,并计算位置标签到第 i 个基准标签相位差欧式距离:

$$d_{\varphi_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_i^2)} \quad (8)$$

结合公式(8)计算结果,将 d_{φ_i} 与 d 进行拟合,拟合结果如图2所示。

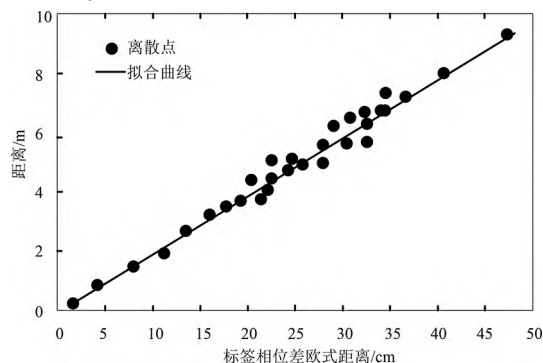


图2 不同距离数据拟合结果

分析图2可知,虽然通过相位差拟合分析能够一定程度上解决相位差超过波长导致的相位模糊现象,但在复杂的室内环境中,仍存在信号传播非理想性、系统非线性等因素,可能导致离散点与拟合曲线略有偏差。因此需要结合

其他定位方法来进一步提高定位精度和准确性。

2.3 基于 UHF RFID 技术的定位优化

由图2拟合结果可知,离散点与拟合曲线并未完全重合,因此,本文使用相位差-多维标度定位算法,实现室内无源超高频定位。相位差-多维标度定位算法是一种基于信号相位差的定位方法,可结合接收器接收到的信号相位差信息来估计目标物体的位置。该算法可以在一定程度上容忍离散点与拟合曲线之间的不完全重合,可以建立一个距离平方矩阵,来获得更精准的定位结果。

相位差-多维标度定位算法定位步骤具体如下所示:

步骤一:采用了读取器的位置信息,并对其进行了随机分布。

步骤二:采用子载波调制的方式,使得各读取器/写入器分别从所接收的位置标签和参考标签处接收到的信号,计算出相位差的对应信息^[13]。

步骤三:由所求出的相位差欧式距离,计算 UHF RFID 标签与基准标签间的间距,用图2中的数据拟合相位差的欧式距离^[14]。

步骤四:根据图2所示的拟合结果,重新计算定位标签和第 i 个参考标签之间的距离,公式为:

$$d' = a \cdot d_{\varphi_i} + b \quad (9)$$

公式(9)中, a 、 b 分别表示纵轴截距和回归系数。

步骤五:结合步骤四构建如下所示的距离平方矩阵,可表示为:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d'^2_1 & d'^2_2 & \cdots & d'^2_m \\ d'^2_1 & 0 & d'^2_{12} & \cdots & d'^2_{1m} \\ d'^2_2 & d'^2_{21} & 0 & \cdots & d'^2_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d'^2_m & d'^2_{m1} & d'^2_{m2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

公式(10)中, m 表示参考标签个数。对该矩阵进行双中心变换和特征值分解,选取最大两个特征值便能得到定位标签。通过对两个中心距离平方矩阵转换,可以得出:

$$O = -\frac{1}{2}HDH \quad (11)$$

公式(11)中, H 为 n 阶单位阵。

对其特征值分解,可得到:

$$O' = EGE^T \quad (12)$$

公式(12)中, E^T 表示对应特征向量对应的 T 阶矩阵; G 表示双中心变换矩阵的特征值矩阵。

步骤六:对获取的相对位置信息坐标进行旋转,可得到定位标签的位置坐标信息。基于此,构建分解特征值的标量积矩阵:

$$O'_c = \begin{bmatrix} \left(\frac{m+1}{m}\right)^2 O'_1 & \left(\frac{m+1}{m}\right)^2 c^T + \left(\frac{m+1}{m^2}\right) O' \\ \left(\frac{m+1}{m}\right)^2 c + \left(\frac{m+1}{m^2}\right) O' & X_c X_c^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

公式(13)中, c 表示 m 个元素向量; O'_1 表示 O' 的第一个元素; X_c^T 表示 T 阶的参考节点^[15]。

通过对标量积矩阵 O'_c 的本征值分解,可以获得一个中心的坐标估计矩阵:

$$X'_c = [X - X_c \quad X_1 - X_c \quad \cdots \quad X_n - X_c] \quad (14)$$

公式(14)中, X_n 表示 n 维下的坐标。

在 X'_c 坐标上的转动矩阵可以被表示为:

$$R_c = (X_c'^T X_c X_c'^T)^{-\frac{1}{2}} (X_c'^T X_c')^{-1} \tag{15}$$

通过对旋转矩阵进行线性变换,可得到变换后的坐标 X' ,实现室内无源超高频定位。如公式(16)所示:

$$X' = R_c^T X_n + X_c \tag{16}$$

通过上述内容,可基于 UHF RFID 技术,完成室内无源超高频定位方法的设计。这种方法能够考虑多个载波信号的相位差数据,进行综合分析和优化,提高定位精确度。

3 实验

3.1 实验环境

为了验证本文提出的基于 UHF RFID 技术的室内定位方法的实际应用效果,设计对比实验进行验证。与户外环境相比,室内信号传输会受到家具、设备、墙面等反射作用影响,构成较为复杂的信道传播环境,因此本文以某办公建筑中常用的公共会议室作为实验对象,绘制该会议室的传输环境简图,如图 3 所示。

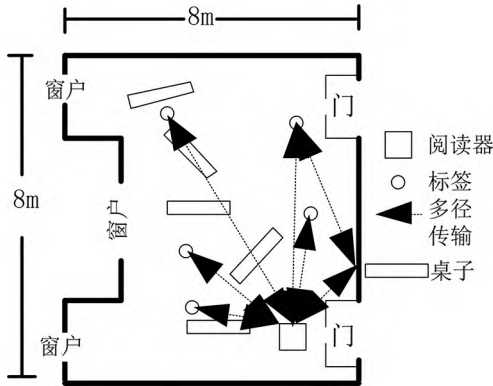


图 3 实验用会议室传输环境简图

通过图 3 可以看出,在该会议室中,受墙面、桌面等因素影响,信号除沿直线传播外,还存在多径传播和非视距传播问题,其定位精度将大幅降低。

3.2 实验设置

本实验所用的阅读器是 RFID 阅读器,型号为 Impinj Speedway Revolution,将 RFID 标签附在物体上,然后将阅读器放置在需要定位的区域。阅读器利用射频信号与标签通信,获得标签内的信息和定位信息。通过这种方式,可以追踪和管理在一定区域内的物品。实验环境内最长距离为 8 m×8 m,将五个阅读器分别放置在复杂信道传输环境的四个角上和中心位置,在复杂室内传播环境下,阅读器会通过地面、墙面障碍物反射。实验监测通过 Win 10 系统搭载 Python 库中 NumPy 工具进行监测。实验监测环境如图 4 所示。



图 4 实验监测环境

3.3 实验与性能评估

在实验场景中引入墙面障碍物、金属结构等可能产生多路径干扰的因素,增加信号传播的复杂性。调整干扰源的位置和数量,模拟不同的信道环境。将待定位标签随机放置于不同的位置,并确保标签与参考节点之间存在多径效应,导致信号经历不同的路径。使用 UHF RFID 标签读取器对每个标签进行测量,记录接收到的反射信号的相位差信息。在测量过程中要保持一定的时间间隔,以观察相位模糊现象的发生。将计算出的超高频信号相位差,与实际值进行对比。为使实验具有可靠性,选择文献[3]提出的面向室内环境变动的定位方法、文献[4]提出的基于卡尔曼滤波的定位方法、文献[5]提出的基于概率累积的定位方法作为实验对比方法,与本文所提的基于 UHF RFID 技术的定位方法共同进行实验,评估不同方法在处理相位模糊现象和多路径干扰方面的表现。对比结果如表 1 所示。

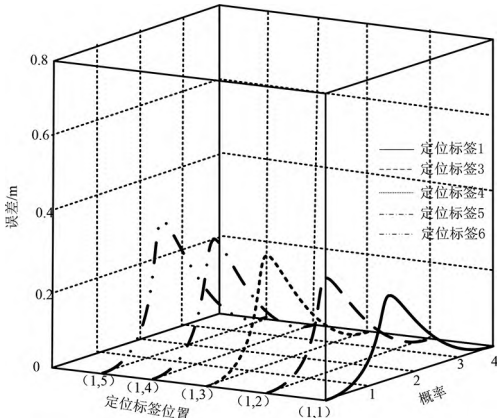
表 1 不同方法信号相位差对比/rad

相位角/°	面向室内环境变动的定位方法	基于卡尔曼滤波的定位方法	基于概率累积的定位方法	基于 UHF RFID 技术的定位方法	实际值
-2-2	0.09	0.08	0.10	0.13	0.12
-4-4	0.12	0.10	0.13	0.16	0.16
-6-6	0.20	0.21	0.22	0.24	0.25
-8-8	0.30	0.31	0.29	0.34	0.35
-10-10	0.75	0.72	0.69	0.86	0.87

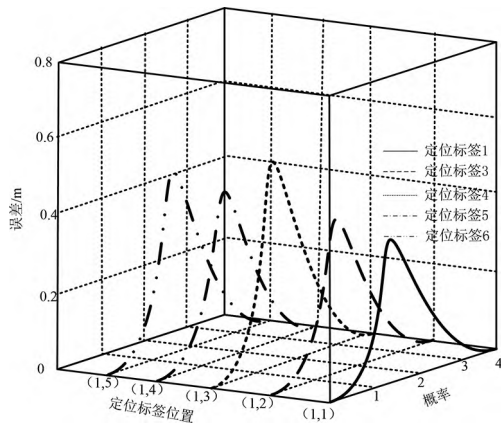
根据表 1 的数据,可以观察到面向室内环境变动的定位方法、基于卡尔曼滤波的定位方法、基于概率累积的定位方法,在处理相位模糊和多路径干扰等问题时,所得到的信号相位差计算结果与实际值之间存在较大的误差,最大误差均超过了 0.1 rad,误差较高;而本文所提的基于 UHF RFID 技术的定位方法计算出的结果与实际值较为接近,其中最大误差为 0.01 rad。说明所提方法通过计算 UHF RFID 标签读取器接收到的标签回复信号,可以准确计算超高频载波信号的相位角度。这一步骤在提高定位精度方面发挥了重要作用。

3.4 定位误差分析

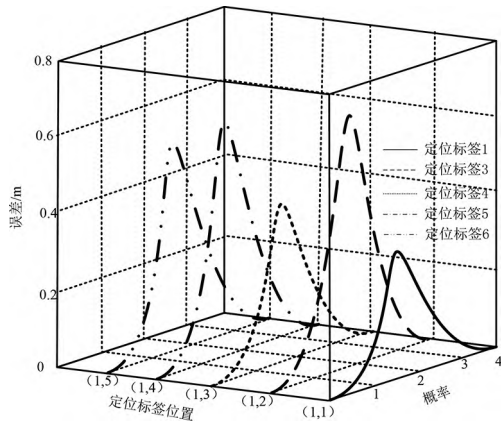
独立进行 500 次实验,分别利用这四种方法检测多径信道引起的定位误差,可由概率密度曲线表示,如图 5 所示。



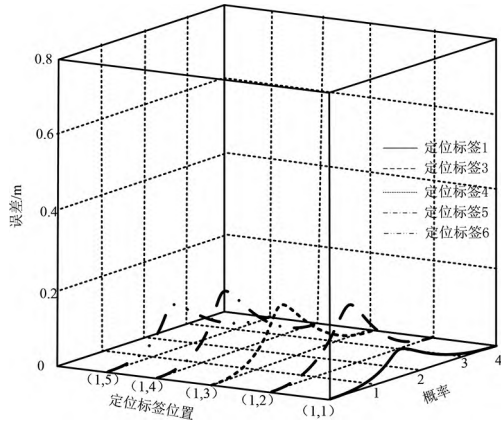
(a) 面向室内环境变动的定位方法



(b) 基于卡尔曼滤波的定位方法



(c) 基于概率累积的定位方法



(d) 基于 UHF RFID 技术的定位方法

图 5 不同方法定位误差定位误差

由图 5 可知,使用面向室内环境变动的定位方法的最大定位误差为 0.3 m,基于卡尔曼滤波的定位方法的最大定位误差为 0.5 m;基于概率累积的定位方法的最大定位误差为 0.7 m,定位误差较高;而使用本文所提的基于 UHF RFID 技术的定位方法最大定位误差仅为 0.12 m,最小定位误差为 0.02,由此可以证明所提方法根据阅读器与标签间的距离,提取出室内无源超高频信号的相位差。对相位差数据进行拟合分析,并将其转化为欧式距离数据,可以获得更准确的定位结果。这一步骤有助于解决相位模糊现象,使得定位误差较小,在复杂的信道传播环境中依然能够保持较高的定位精度。

4 结束语

传统的室内定位方法虽然具有一定的可用性,但在复杂的室内环境中,多路径干扰下仍然可能对定位结果产生较大的影响。为了解决该问题,提出了基于超高频射频识别技术(UHF RFID)的室内定位方法。通过实验证明该方法对于超高频信号相位差计算结果较为准确,定位误差较小,可在复杂的信道传播环境中保持较高的定位精度,具有较好的应用效果。

综上所述,基于 UHF RFID 技术的室内定位方法具有较高的准确性和可靠性。相比传统的室内定位方法,它能够更好地应对室内实际环境中的多路径干扰和相位模糊现象。该方法为实现高精度和可靠的室内定位提供了一种可行且可靠的选择。

参考文献

- [1] 曾巍,何泓毅,李浩林,等. 一种对空中目标的双星无源测向定位方法[J]. 南京航空航天大学学报,2022,54(S1):14-18.
- [2] 国强,李文韬. 一种 4 站情况下基于 TDOA/FDOA 的无源定位方法[J]. 航空学报,2021,42(2):252-263.
- [3] 刘嘉伟,毛文字,鲁华祥. 一种面向室内环境变动的人员目标无源定位算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(8):39-48+124.
- [4] 李永生,董光焰,陈凯,等. 基于卡尔曼滤波的无源定位精度分析[J]. 弹箭与制导学报,2022,42(4):43-46.
- [5] 王伟,王钦钊,沈岚,等. 基于概率累积的非通视无源定位方法[J]. 系统工程与电子技术,2022,44(1):64-69.
- [6] 国强,李文韬. 基于正则化约束总体最小二乘的 TDOA/FDOA 无源定位方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(5):81-87.
- [7] 骆明伟,檀立刚. 机载红外设备多平台协同探测无源定位方法[J]. 应用光学,2021,42(3):392-397.
- [8] 檀立刚,骆明伟,李捷,等. 无人机光电设备对地目标单站无源定位方法[J]. 应用光学,2022,43(4):599-610.
- [9] 盛金锋,李宁,谢威,等. 基于有误先验融合的无源多目标定位算法[J]. 火力与指挥控制,2023,48(2):32-37+43.
- [10] 张铠宇,于昊天,卢雨. 一种基于双站协同的时差频差定位方法[J]. 系统工程与电子技术,2023,45(9):2698-2705.
- [11] 赵研,陶海红,畅鑫,等. 基于差分模型的近场无源定位算法[J]. 雷达科学与技术,2023,21(4):405-410+419.
- [12] 汤建龙,解佳龙,薛成均. 利用高斯牛顿迭代的时频差无源定位算法[J]. 西安电子科技大学学报,2023,50(1):19-28+47.
- [13] 裴禹豪,张敏,郭福成,等. 基于地球高程信息的运动辐射源时差频差无源定位算法[J]. 中国科学:信息科学,2022,52(11):1974-1991.
- [14] 张倩倩,尹成友,李安琪. 基于时间反演的室内精确单站定位技术研究[J]. 微波学报,2022,38(4):18-25.
- [15] 相飞华,王杰贵. 基于改进 SRCKF 的固定单站无源定位算法[J]. 探测与控制学报,2022,44(1):29-33.