

# RFreeTrack: 基于差分相位全息图的 RFID 非接触式鲁棒定位系统

桂林卿<sup>1,2</sup>, 蒋祎<sup>1</sup>, 张卿云<sup>1</sup>, 肖甫<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学计算机学院、软件学院、网络空间安全学院, 江苏 南京 210023;  
2. 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 针对复杂室内环境非接触式 RFID 目标定位误差大的问题, 提出了 RFreeTrack 系统, 其使用商用 RFID 设备计算出目标反射信号, 实现了复杂环境下高精度非接触式目标定位。首先, 提出了一种基于时间序列相似度的搜索方法用于校准静态信号, 从而显著增强了目标反射信号提取的鲁棒性。然后, 提出了基于差分相位全息图的非接触式定位方法, 排除阅读器天线位置的影响, 提升了定位准确度, 降低了系统的部署难度。最后, 实现了一个高精度的非接触式定位系统原型。实验表明, 在复杂环境中使用校准后的静态信号提取出的目标反射信号相位, 相较于现有方法误差降低了 68.8%。基于校准过的静态反射信号, 在复杂环境中使用差分相位全息图的定位误差平均值为 0.040 8 m, 相较于现有方法提升了 50.6%。

**关键词:** 射频识别; 室内定位; 非接触式定位; 静态信号校准; 差分相位全息图

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024054

## RFreeTrack: RFID non-contact robust positioning system based on differential phase holography

GUI Linqing<sup>1,2</sup>, JIANG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Qingyun<sup>1</sup>, XIAO Fu<sup>1,2</sup>

1. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China  
2. Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing 210023, China

**Abstract:** To address the issue of large positioning errors in complex environments within non-contact RFID-based positioning systems, RFreeTrack system was proposed. Commercial RFID equipment was used to calculate the reflected signals from targets, achieving high-precision non-contact positioning in complex environment. Firstly, a search method based on time-series similarity was proposed to employ for calibrating static signals, thus significantly enhanced the robustness of target reflection signal extraction. Secondly, a non-contact positioning method based on differential phase holography was introduced to eliminate the influence of the reader antenna's position, thus the accuracy of positioning was improved and the complexity of system was deployment reduced as well. Finally, a high-precision non-contact positioning system prototype was realized. Experimental results indicate that in complex environments, the phase of the target reflection signals extracted using the calibrated static signals has a 68.8% lower error compared to existing methods. Based on the previously calibrated static reflection signals, the average positioning error using differential phase holography in complex environments is 0.040 8 m, and has a 50.6% improvement on location over existing methods.

**Keywords:** RFID, indoor localization, non-contact localization, static signal calibration, differential phase hologram

收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2023-12-20

通信作者: 肖甫, xiaof@njupt.edu.cn

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (No.62125203); 国家自然科学基金资助项目 (No.61932013, No.62372246)

**Foundation Items:** The National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No.62125203), The National Natural Science Foundation of China (No.61932013, No.62372246)

## 0 引言

随着通信技术的不断发展,从2G到5G,对于定位的需求越来越多。在5G设备部署的过程中,世界各国研究人员也开始了对6G的研究,提出了各种愿景,例如,实现“真实世界万物互联的基本需求”<sup>[1]</sup>,利用信号处理和人工智能的方法对感知信息进行分析得到关于人和环境的情境状态,为用户在合适的时间、合适的地点提供智能的服务。为了实现以上目标,定位服务的实现显得尤其重要。

随着研究的深入,在室内定位领域中出现了许多使用不同技术的定位方法。其中,基于射频信号的定位方法由于其不受烟、雾、光照影响的特性被广泛关注。而射频识别(RFID, radio frequency identification)技术不仅容易获取信号的特征信息,且在工业、零售等领域有着广泛应用,因此其在室内定位领域展现了极大的潜力。目前,基于RFID技术实现的定位追踪方法<sup>[2-4]</sup>多采取接触式的定位,然而这些绑定对象的电磁特性也会极大地影响标签回报的信号质量<sup>[4]</sup>,例如,常用的RFID标签直接绑定在金属物体上时会出现无法读取的现象,并且标签的存在也可能影响精密的机械电子设备的运作。

虽然现有工作<sup>[5-7]</sup>已经实现了基于RFID非接触式的定位,但是在反射物体较多的复杂环境下进行定位仍然存在以下挑战。

1) 现有方法在无目标物体的场景下测得静态信号,然后根据接收信号与静态信号的差值计算出目标反射信号。由于待定位物体的介入,静态信号会存在一些偏移<sup>[8]</sup>,即使偏移很微小,对提取出的目标反射信号也会产生很大的影响。

2) 天线的相位中心不一定与质心重合<sup>[9]</sup>。先前非接触式的定位方法依赖天线的位置,使用天线的质心位置与目标物体的相对位置关系来计算目标物体的绝对位置。因此天线相位中心与质心位置的偏差也会给高精度的定位产生影响。

为了解决以上问题,本文提出了一种基于RFID的非接触式鲁棒定位系统,称为RFreeTrack系统。该系统首先提出了一个基于时间序列相似度的搜索算法对静态信号进行校准,然后使用差分相位全息图对目标物体进行定位。本文的主要贡献体现在以下3个方面。

1) 为了消除复杂环境下目标物体对静态信号的影响,本文提出一个基于时间序列相似度的搜索

方法对静态信号进行校准,极大地提高了鲁棒性。

2) 为了消除阅读器天线位置误差带来的影响,本文使用差分相位作为特征生成概率全息图,在差分的过程中排除阅读器天线位置的影响,提高了定位精度。

3) 本文设计并实现了RFreeTrack的系统原型,在物品摆放较杂乱的室内场景下进行实验验证与分析。实验结果表明,使用校准后的静态信号提取出的目标反射信号相位相较于现有方法误差降低了68.8%,使用差分相位全息图的定位精度误差平均值为4.08 cm。

## 1 相关研究工作

室内定位系统大体可以分为基于传感器技术的方法与基于射频信号的方法<sup>[10]</sup>。基于传感器技术的方法主要利用设备自带的传感器装置来获取位置信息。文献[11]利用激光雷达来实现自动导航车(AGV, automated guided vehicle)的室内导航,将激光定位系统安装在车辆顶部对周围物体进行扫描进而得到车辆的位置信息。文献[12]使用惯性测量单元(IMU, inertial measurement unit)来获取设备的运动速度、加速度以及方向等信息,与Wi-Fi信号融合进而获取设备的位置信息。然而,基于传感器技术的方法要求将传感器部署在待定位物体上,未来定位目标众多,成本过高,不利于普及。

在基于射频信号的方法中,文献[13]使用UWB(ultra wide band)雷达对有源标签进行定位,提出了一种锚点导向方法,结合了锚点间和锚点内的并发技术,使用相位信息以及到达时间信息对节点进行定位,然而其使用的标签价格相对昂贵,并且受限于电源与标签体积,不易部署。文献[14]使用毫米波雷达对人体进行被动式定位,使用数字波束成形技术与聚类算法估计人体的位置,但是这种方法需要使用额外的专用设备,设备成本与部署成本较大。文献[15]使用Wi-Fi信号提取信道状态信息(CSI, channel state information),根据多普勒频移特征进行定位,这种定位方式能够定位较大尺度的物体,定位精度在分米级。

由于RFID标签具有体积小、价格便宜的优势,普及应用的前景广泛,成为近年的研究热点。目前基于RFID系统实现的定位追踪方法多采取接触式的定位方案。文献[2]使用额外的辅助标签和目标标签构成双标签阵列进行定位,以消除相位

模糊,实现了对目标标签的分米级定位,平均误差在 0.2 m。文献[3]将标签贴在机场行李上,使用标签返回的相位变化对固定轨迹的行李进行定位。文献[4]利用标签之间的耦合效应,对正在拿取物品的机械臂进行厘米级的定位。这些方案都将标签贴在了待定位物体上。然而,绑定对象的电磁特性会影响标签回报的信号质量<sup>[4]</sup>。

非接触式的 RFID 定位系统能够很好地消除标签与待定位物体之间的相互影响。文献[5]使用无物体时空采的信号作为静态信号,使用目标物体进入后的接收信号减去静态信号得到物体反射信号,利用物体反射信号的相位进行定位,这种定位方法假设目标物体对环境反射信号不会产生影响,在反射物体多的复杂环境下效果不佳。文献[7]使用菲涅尔区模型对人员进行定位,人员在以阅读器天线与标签为焦点的椭球体上时会对标签的返回信号产生影响,这种定位方法依赖于精确的天线位置,而天线精确位置的确定相对困难,导致其只能达到分米级的定位精度。

为了实现鲁棒的非接触式 RFID 定位,本文提出了 RFreeTrack 系统,其能够消除复杂环境下目标物体对静态信号的影响,同时能够排除阅读器天线的位置影响,达到了厘米级的定位精度。

## 2 系统概览

本文提出的 RFreeTrack 系统框架如图 1 所示。该系统主要包含 3 个模块:信号预处理模块、静态信号校准模块与目标定位模块。信号预处理模块负责对所有数据进行预处理,对采集到的信号进行信号分割、相位解缠以及平滑滤波操作。在静态信

号校准模块中,在无物体的情况下进行静态信号初始化,令目标物体进入定位区域进行固定轨迹信号采集,将问题转换为最优化问题,并用 PSO 搜索完成静态信号的校准。在目标定位模块中,提取出各标签获得的目标反射信号,并进行差分,在定位区域建立一个叠加的差分相位全息图,输出目标的最终位置。

## 3 RFID 系统多径模型

### 3.1 RFID 反向散射模型

RFID 系统通信组件可以分为阅读器、阅读器天线和标签 3 个部分<sup>[16]</sup>。在 RFID 系统通信过程中,分为下行与上行 2 条链路,阅读器天线向标签发射信号  $S_A$ , 经过空间传播之后到达标签处,这条链路被称为下行链路;标签接收到 LOS (line of sight) 路径的电磁信号后,标签反向散射发出的电磁信号经过空间传播返回阅读器天线,这条链路被称为上行链路。由于信号传播以及标签的编码调制会产生相位偏移与强度衰减,根据 Friis 公式以及相位-距离的关系<sup>[17]</sup>,可以得到阅读器天线收到的信号功率  $P_R$  和信号  $S_R$  分别为

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^4 G_0 P_0 \tag{1}$$

$$S_R = \sqrt{\frac{P_R}{P_0}} e^{j\left(\frac{2r}{\lambda} 2\pi + \phi_0\right)} S_0 \tag{2}$$

其中,  $S_0$  为阅读器产生的信号,  $P_0$  为阅读器产生的信号功率,  $\lambda$  为电磁波长,  $r$  为标签与阅读器之间的距离,  $G_0$  为信号在标签编码调制时的功率衰减系数,  $\phi_0$  为 RFID 通信硬件引入的固定相位偏移。

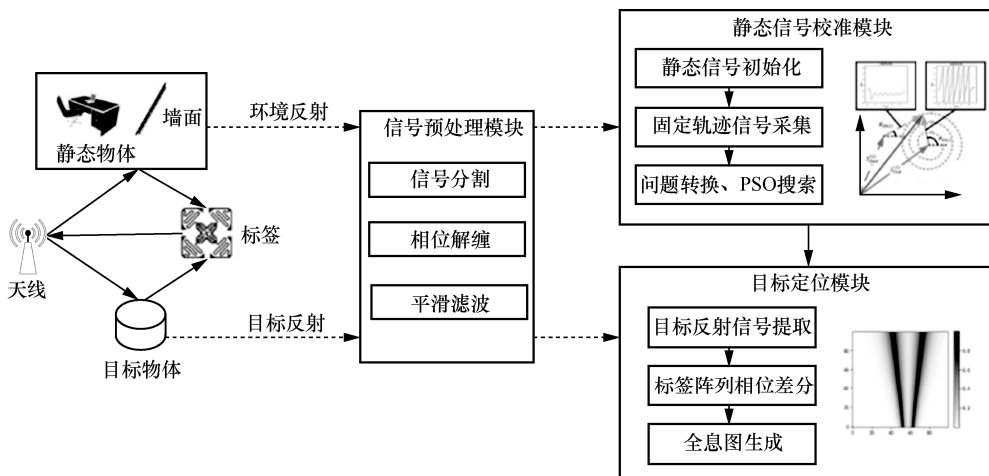


图 1 RFreeTrack 系统框架

商用 RFID 阅读器回报的信息包括 RSSI 与相位信息, 都是通过比较  $S_0$  与  $S_R$  处理得到的。因此阅读器返回的数据 RSSI 与相位  $\theta$  可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\text{RSSI} = 10 \lg P_R + 10 \quad (3)$$

$$\theta = \frac{2r}{\lambda} 2\pi + \phi_0 \quad (4)$$

### 3.2 RFID 系统多径效应分析

在实际应用中, RFID 系统的通信除了 LOS 链路以外, 由于环境对电磁波的反射, 还存在 NLOS (non line of sight) 链路。RFID 多径效应示意如图 2 所示。根据先前的研究<sup>[19]</sup>, 虽然在 RFID 系统通信过程中存在下行 (①与②) 和上行 (③与④) 两组链路, 但是由于标签是无源的, 反向散射的上行链路能量较弱, 再加上物体反射会进一步削弱信号强度, ④号链路的影响可以忽略不计, 因此 RFID 系统的多径效应多产生在下行链路上。

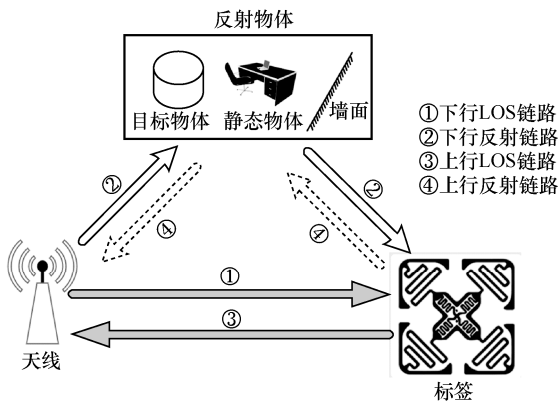


图2 RFID 多径效应示意

经过空间传播之后, 标签处接收到的 LOS 路径信号强度功率  $P_T$  以及信号  $S_T$  可以表示为<sup>[17]</sup>

$$P_T = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_T P_0 \quad (5)$$

$$S_T = \sqrt{\frac{P_T}{P_0}} e^{j\left(\phi_A + \frac{r}{\lambda} 2\pi\right)} S_0 \quad (6)$$

其中,  $G_T$  为标签天线的信号增益。

反射链路普遍存在于 RFID 系统中<sup>[19]</sup>。由于环境物体对电磁信号的反射, 标签接收到的信号除了 LOS 信号  $S_{T-LOS}$  以外, 还会叠加反射信号  $S_{T-ref}(t)$ 。

信号通过阅读器天线向空间中传播, 经过反射物体反射后传播到标签处的电磁信号功率  $P_{T-ref}(t)$  以及反射信号  $S_{T-ref}(t)$  可以表示为

$$P_{T-ref}(t) = G_{ref} G_T \left( \frac{\lambda}{4\pi l_1(t)} \right)^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi l_2(t)} \right)^2 P_A \quad (7)$$

$$S_{T-ref}(t) = \sqrt{\frac{P_{T-ref}(t)}{P_A}} e^{j\left(\frac{l_1(t)+l_2(t)}{\lambda} 2\pi + \phi_{ref}\right)} S_A \quad (8)$$

其中,  $G_{ref}$  为反射过程中的能量损耗因子,  $\lambda$  为电磁信号波长,  $l_1(t)$  为阅读器天线与反射物体之间的距离,  $l_2(t)$  为反射物体与标签之间的距离,  $\phi_{ref}$  为电磁信号在反射时产生的半波损失。

标签接收到的信号是 LOS 信号  $S_{T-LOS}$  与反射信号  $S_{T-ref}(t)$  的叠加, 标签处总接收信号功率  $P_{T-sum}(t)$  以及总接收信号  $S_{T-sum}(t)$  可以表示为

$$P_{T-sum}(t) = P_{T-LOS} + P_{T-ref}(t) \quad (9)$$

$$S_{T-sum}(t) = S_{T-LOS} + S_{T-ref}(t) \quad (10)$$

### 3.3 接收信号分解模型

阅读器天线处接收到的信号  $S_R(t)$  可视为  $S_{T-sum}(t)$  经过标签编码调制、空间传播之后的信号, 可表示为

$$S_R(t) = \sqrt{G_T G_A} \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 e^{j\left(\frac{r}{\lambda} 2\pi + \phi_T\right)} S_{T-sum}(t) \quad (11)$$

实际环境中存在多条反射信号, 标签处接收到的反射信号包括静态环境反射信号  $S_{T-env}$  与目标反射信号  $S_{T-obj}(t)$ , 下行链路多径与上行反向散射示意如图 3 所示。

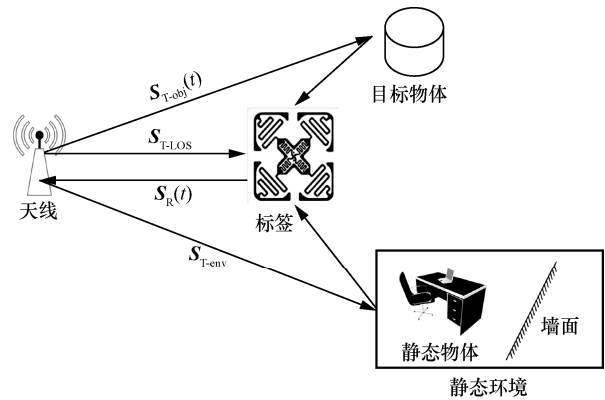


图3 下行链路多径与上行反向散射示意

因此, 式(10)可以进一步表示为

$$S_{T-sum}(t) = S_{T-LOS} + S_{T-env} + S_{T-obj}(t) \quad (12)$$

进一步地, 将式(11)与式(12)结合, 可以将最终阅读器处获取的接收信号  $S_R(t)$  分解为 LOS 路径信号  $S_{LOS}$ 、环境反射信号  $S_{env}$  与目标反射信号  $S_{obj}(t)$ , 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_R(t) &= \sqrt{G_T G_A} \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 e^{j \left( \frac{r}{\lambda} 2\pi + \phi_T \right)} \\ (\mathbf{S}_{T-LOS} + \mathbf{S}_{T-env} + \mathbf{S}_{T-obj}(t)) &= \\ \mathbf{S}_{LOS} + \mathbf{S}_{env} + \mathbf{S}_{obj}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $G_T$  为标签天线的信号增益,  $G_A$  为阅读器天线的信号增益。

在非接触式的 RFID 系统中, 由于标签与阅读器天线的相对位置关系不变, 可以认为  $\mathbf{S}_{LOS}$  是定值。

为方便表示, 将定位过程中保持不变的 2 个分量  $\mathbf{S}_{LOS}$  与  $\mathbf{S}_{env}$  之和表示为静态信号分量  $\mathbf{S}_{stat}$ , IQ 平面信号分解示意如图 4 所示, 计算式为

$$\mathbf{S}_{stat} = \mathbf{S}_{LOS} + \mathbf{S}_{env} \quad (14)$$

$$\mathbf{S}_R(t) = \mathbf{S}_{obj}(t) + \mathbf{S}_{stat} \quad (15)$$

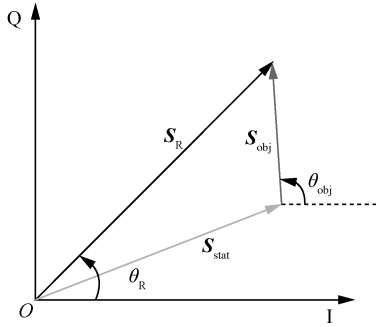


图 4 IQ 平面信号分解示意

#### 4 基于相似度搜索的静态信号校准方法

根据 3.3 节的结论, 可以使用接收信号  $\mathbf{S}_R(t)$  与静态信号分量  $\mathbf{S}_{stat}$  作差来获得目标物体的反射信号  $\mathbf{S}_{obj}(t)$ , 根据  $\mathbf{S}_{obj}(t)$  的信号特征就可以得到标签与物体之间的距离信息。

先前的非接触定位工作<sup>[20]</sup>中, 静态信号测量值  $\hat{\mathbf{S}}_{stat}$  是通过将待定位对象放置于定位区域之外采集环境噪声得到的。在反射物体较多的复杂环境中, 由于目标物体的遮挡、信号的反射, 环境反射信号会因为目标物体的介入而发生一定的改变, 从而影响静态信号。使用上述方法获取的  $\hat{\mathbf{S}}_{stat}$  并不准确, 导致最终的结果出现偏差。因此需要对静态信号进行校准。

##### 4.1 基于时间序列相似度的静态多径校准方法

当待定位对象反射面积较小时, 其运动时对环境反射信号影响较小, 可以认为在物体运动过程中静态信号分量  $\mathbf{S}_{stat}$  保持不变。

在物体运动固定轨迹的过程中, 根据式(8)计算出理论目标反射信号时间序列  $\mathbf{S}_{obj}(t)$ 。以远离阅读器天线/标签的轨迹为例, 阅读器天线与反射物体之间的距离  $l_1(t)$  和反射物体与标签之间的距离  $l_2(t)$  会不断增大, IQ 平面上的  $\mathbf{S}_{obj}(t)$  会绕  $\mathbf{S}_{stat}$  终点不断逆时针旋转,  $\mathbf{S}_{obj}(t)$  的相位  $\theta_{obj}(t)$  也会不断增大。

对于一个固定轨迹下的同一个采集的接收信号  $\hat{\mathbf{S}}_R(t)$  序列, 不同的  $\hat{\mathbf{S}}_{stat}$  会提取出不同的  $\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t)$  序列, 同时也会产生不同的相位序列。如图 5 所示, 此时对静态信号的校准可以转化为一个最优化问题, 需要在 IQ 平面内找到一个最优解  $\mathbf{S}_{stat}^*$ , 使目标反射信号测量值  $\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t)$  与理论值  $\mathbf{S}_{obj}(t)$  的相似度最高。这个最优化问题的难点在于如何量化  $\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t)$  与  $\mathbf{S}_{obj}(t)$  这 2 个复平面信号时间序列的相似度。

根据前文分析,  $\hat{\mathbf{S}}_{stat}$  的微小误差会给  $\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t)$  的相位带来巨大的变化。因此在计算相似度时使用  $\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t)$  与  $\mathbf{S}_{obj}(t)$  的相位序列  $\hat{\theta}_{obj}(t)$  与  $\theta_{obj}(t)$  作为特征进行相似度的计算。首先将  $\hat{\theta}_{obj}(t)$ 、 $\theta_{obj}(t)$  与初始状态  $\hat{\theta}_{obj}(0)$ 、 $\theta_{obj}(0)$  进行差分使其对齐, 然后使用 DTW (dynamic time warping)<sup>[21]</sup> 计算两者的相位序列相似度。计算的最终结果就可以用来量化  $\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t)$  与  $\mathbf{S}_{obj}(t)$  的相似度。

具体的信号相似度量算法如算法 1 所示。

##### 算法 1 信号相似度量算法

**输入** 迭代更新得到的候选静态信号  $\hat{\mathbf{S}}_{stat}$ , 理论目标反射信号时间序列  $\mathbf{S}_{obj}(t)$ , 物体在固定轨迹下运动时阅读器采集的接收信号  $\hat{\mathbf{S}}_R(t)$

**输出** 信号相似度  $f(\hat{\mathbf{S}}_{stat})$

1) 计算使用该静态信号提取的目标反射信号

$$\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t) = \hat{\mathbf{S}}_R(t) - \hat{\mathbf{S}}_{stat}$$

2) 计算目标反射信号相位与理论相位

$$\hat{\theta}_{obj}(t) = \text{angle}(\hat{\mathbf{S}}_{obj}(t))$$

$$\theta_{obj}(t) = \text{angle}(\mathbf{S}_{obj}(t))$$

3) 对目标反射信号与理论目标反射信号相位进行对齐

$$\hat{\theta}'_{obj}(t) = \hat{\theta}_{obj}(t) - \hat{\theta}_{obj}(0)$$

$$\theta'_{obj}(t) = \theta_{obj}(t) - \theta_{obj}(0)$$

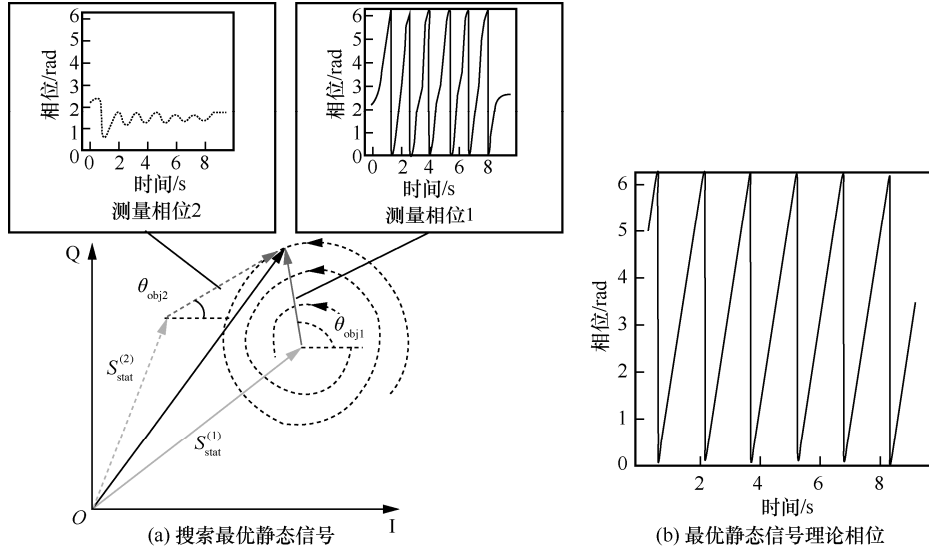


图5 在IQ平面搜索最优静态信号与最优静态信号理论相位

4) 输出 FastDTW( $\hat{\theta}'_{obj}(t), \theta'_{obj}(t)$ ) 作为信号相似度  $f(\hat{S}_{stat})$

5) end

由于在处理长时间序列时, DTW 计算复杂度较高, 不适用于大规模数据集, 因此本文在实现 DTW 时使用了 FastDTW<sup>[22]</sup>对其进行加速。

在得到  $\hat{S}_{obj}(t)$  与  $S_{obj}(t)$  相似度的量化指标之后, 可以使用优化算法进行最优解的搜索。由于搜索空间是连续的二维复平面, 且难以获得目标函数的梯度信息, 因此本文使用粒子群优化 (PSO, particle swarm optimization) 进行最优解的搜索, 得到最优解  $S_{stat}^*$ 。

具体的优化算法如算法 2 所示。

**算法 2** PSO 求解最优静态信号  $S_{stat}^*$

- 1) 初始化参数粒子数量  $N$ 、最大迭代次数  $T$ 、认知学习因子  $c_1$ 、社会学习因子  $c_2$ 、惯性权重  $w$ 、随机系数  $r_1$  和  $r_2$
- 2) 随机初始化每个粒子  $k$  的位置  $\hat{S}_{stat}^k$  与速度  $v_k$
- 3) 对每个粒子的位置  $\hat{S}_{stat}^k$  计算适应度函数  $f(\hat{S}_{stat}^k)$ 。
- 4) 对于每个粒子  $k$ , 将其个体最优位置  $\hat{S}_{best}^k$  设置为其初始位置

$$\hat{S}_{best}^k = \hat{S}_{stat}^k$$

- 5) 在所有粒子中找到全局最优位置  $\hat{S}_{best}$ 。
- 6) 对于每次迭代  $i$  ( $1 \sim T$ ), 每个粒子  $k$  的更新速度  $v_k$  如下

$$v_k(i+1) = wv_k(i) + c_1r_1(\hat{S}_{best}^k - \hat{S}_{stat}^k(i)) + c_2r_2(\hat{S}_{best}^k - \hat{S}_{stat}^k(i))$$

更新位置  $\hat{S}_{stat}^k$  如下

$$\hat{S}_{stat}^k(i+1) = \hat{S}_{stat}^k(i) + v_k(i+1)$$

计算新位置  $\hat{S}_{stat}^k(i+1)$  的适应度函数如下

$$f(\hat{S}_{stat}^k(i+1))$$

如果  $f(\hat{S}_{stat}^k(i+1))$  比  $f(\hat{S}_{best}^k)$  好, 则更新  $\hat{S}_{best}^{i,k}$  如下

$$\hat{S}_{best}^k = \hat{S}_{stat}^k(i+1)$$

如果有新的  $\hat{S}_{best}^k$  比当前的  $\hat{S}_{best}^k$  好, 则更新

$$\hat{S}_{best} = \hat{S}_{best}^k$$

7)  $T$  次迭代后,  $\hat{S}_{best}$  就是优化问题的解  $S_{stat}^*$

8) end

#### 4.2 静态信号校准的具体步骤

静态信号校准方法的具体步骤如下。

- 1) 初始值获取。将待定位对象放置于定位区域之外, 采集环境噪声, 获得静态信号的初始值  $\hat{S}_{stat}(0) = a_0 + b_0j$ , 记  $a_0$  的最高位为  $D_a$ ,  $b_0$  的最高位为  $D_b$ 。
- 2) 固定轨迹信号采集与信号处理。将待定位对象放置于定位区域之内, 使其运动一个固定轨迹, 采集  $\hat{S}_R(t)$  序列, 使用插值、平滑算法进行信号处理。
- 3) 静态信号搜索。在  $x \in [a_0 - 10D_a, a_0 + 10D_a]$  和  $y \in [b_0 - 10D_b, b_0 + 10D_b]$  的范围内, 以信号的相似度为目标函数, 使用 PSO 对 IQ 平面进行搜索, 找到使  $\hat{S}_{obj}(t)$  与  $S_{obj}(t)$  相似度最高的静态信号  $S_{stat}^*$ 。

### 5 基于差分相位全息图的非接触定位方法

由于单个标签只能获取距离信息，想要获取待定位物体的具体位置信息需要多个标签组成标签阵列。因此在定位之前需要使用第 4 节所述的校准方法对标签阵列中的每一个标签分别进行静态信号的校准。在得到校准后的静态信号之后，可以利用第 3 节的结论获取目标物体的反射信号。这里要注意的是，为了尽可能消除标签之间的耦合干扰，标签之间的距离至少为半波长。

本节将详细介绍如何使用标签阵列中提取出的目标反射信号生成差分相位全息图，从而实现物体定位。

#### 5.1 信号分割

为了将信号用于物体的定位，首先需要将物体运动时的信号片段提取出来。本文采用标签阵列方差之和是否超过阈值的方法来判断物体是否正在运动。由于标签与物体距离不同，对物体的运动敏感度不一，因此不能以某个特定的标签为标准，而应将所有标签反馈的相位方差和作为判断标准。在获取到标签阵列的相位数据后，以 0.5 s 为滑动窗口，对每个标签计算滑动窗口的方差，并将所有标签的方差相加。若方差和大于阈值，则认为物体正

在运动，否则认为物体保持静止。

对于阈值的设定，可以采取动态方法<sup>[8]</sup>，即在校准阶段采集当前环境反射的静态信号，将此时采集的信号相位方差的  $k$  倍作为阈值。实验表明， $k=10$  能取得较好的分割效果。

为了验证这种阈值确定的有效性，本文进行了如下实验。首先，让物体静止一段时间；然后，使其朝远离标签-阅读器天线的方向运动；最后，让其静止一段时间。开始与停止运动的时间分别为 1.4 s 与 11 s。分割结果如图 6 所示，分割的结果为 1.41 s 开始，10.89 s 停止。

#### 5.2 标签阵列差分相位模型

对于标签对标签  $r$  与标签  $s$ ，天线发射的信号会经由目标物体反射后被它们接收到。

根据式(8)，标签  $r$  与标签  $s$  接收到的目标反射相位与信号经由目标物体反射到达标签的距离有关，表示为

$$\hat{\theta}_{obj}^r(t) = \frac{l_1^r(t) + l_2^r(t)}{\lambda} 2\pi + \phi_{ref} \quad (16)$$

$$\hat{\theta}_{obj}^s(t) = \frac{l_1^s(t) + l_2^s(t)}{\lambda} 2\pi + \phi_{ref} \quad (17)$$

其中， $l_1(t)$  表示天线到目标物体的距离， $l_2(t)$  表示

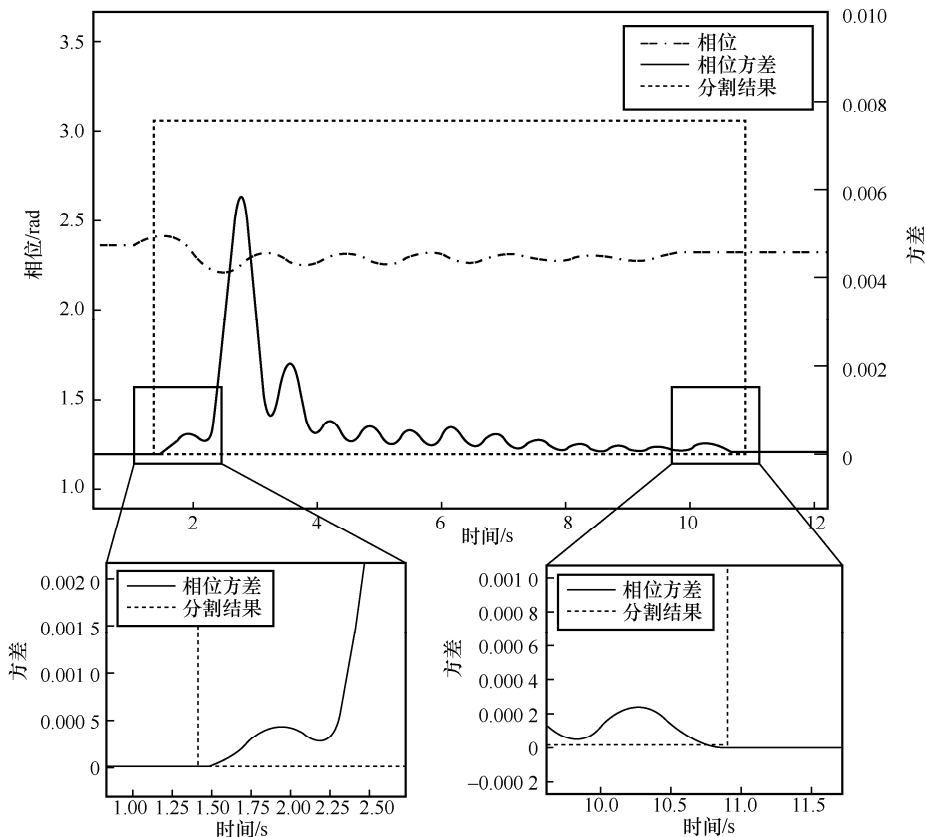


图 6 分割结果

目标物体到标签的距离, 上标  $r$  与  $s$  表示不同标签,  $\phi_{\text{ref}}$  表示反射时的半波损失。

在基于目标反射信号的定位方法<sup>[23-24]</sup>中, 对于每一个标签, 目标物体的可能位置处于以标签和天线为焦点的椭圆上, 多个标签获得的椭圆交点便是目标物体的位置。这个计算过程依赖于天线的精确位置。由于天线的电磁特性, 天线的相位中心与质心往往不在同一个位置, 获取天线的精确位置并不容易。因此本文创新性地使用了差分相位进行目标物体的位置确定。

将2个标签提取出目标反射信号的相位进行差分操作, 即将式(16)与式(17)相减之后, 便可以消除天线位置相关变量  $l_1^r(t)$  和  $l_1^s(t)$ , 从而排除天线位置的影响, 即

$$\Delta\hat{\theta}^{r,s} = \frac{2\pi}{\lambda}(l_2^r(t) - l_2^s(t)) \quad (18)$$

### 5.3 差分相位全息图生成

根据式(18), 可以得到  $t$  时刻目标物体与这2个标签的距离差测量值  $\Delta\hat{l}_2^{r,s}(t)$

$$\Delta\hat{l}_2^{r,s}(t) = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\hat{\theta}^{r,s}(t) \quad (19)$$

对于某一对标签对标签  $r$  与标签  $s$ , 提取出的距离差测量值为  $\Delta\hat{l}_2^{r,s}(t)$ , 目标物体可能会出现会在以标签对为焦点的双曲线上, 如图7所示。使用标签阵列中不同标签对获取不同的双曲线, 它们的交点就是目标物体可能的位置。

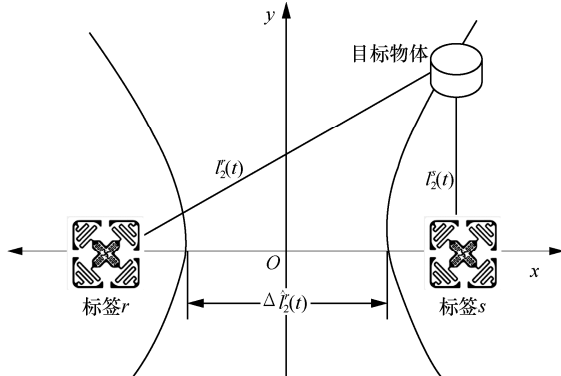


图7 特定距离差时物体可能会出现的位置

然而, 由于商用 RFID 回报的信号强度精度不高 (最小单位为 0.5 dBm), 提取出的目标反射信号精度有限, 不同标签对生成的双曲线可能无法交于同一点。因此本文采用概率全息图的方式求得物体出现概率最大的位置, 将这个位置作为物体的最终位置。

将定位区域根据定位精度需求划分成  $W \times L$  个

网格点, 每个网格点的位置为质心坐标。对于任意一个网格点  $G_{i,j}$ , 能够计算出其与第  $k$  个标签的距离  $D_{i,j}^k$ , 将所有网格点到第  $k$  个标签的距离记为矩阵  $\mathbf{D}^k$ , 可表示为

$$\mathbf{D}^k = \begin{pmatrix} D_{1,1}^k & \cdots & D_{1,L}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{W,1}^k & \cdots & D_{W,L}^k \end{pmatrix} \quad (20)$$

对于标签  $r$  与标签  $s$ , 每个网格点可以计算出其与这2个标签的距离差  $\Delta\mathbf{D}^{r,s}$ , 即

$$\Delta\mathbf{D}^{r,s} = \mathbf{D}^r - \mathbf{D}^s \quad (21)$$

为了求出定位区域中位置的概率分布, 需要将  $\Delta\mathbf{D}^{r,s}$  中所有的元素与目标反射路径差  $\Delta\hat{l}_2^{r,s}(t)$  作差, 将结果记为

$$\boldsymbol{\rho}^{r,s}(t) = \Delta\mathbf{D}^{r,s}(t) - \Delta\hat{l}_2^{r,s}(t) \quad (22)$$

此时的  $\boldsymbol{\rho}^{r,s}(t)$  表示理论差值与实测差值之间的差异大小, 某个位置  $\boldsymbol{\rho}^{r,s}(t)$  越小表明物体越有可能在这个位置。

为了后续的计算方便, 需要将  $\boldsymbol{\rho}^{r,s}(t)$  转换成概率分布矩阵。对于  $\boldsymbol{\rho}^{r,s}(t)$  中的任意一个元素  $\rho_{i,j}^{r,s}(t)$ , 本文设计了一个映射函数将差异大小映射为概率大小, 映射函数为

$$F(x) = \frac{1 + e^{-b}}{1 + e^{a|x-b|}} \quad (23)$$

该映射函数可以将差异大小映射为概率大小, 并且由于受限于设备, 提取出的数据精度有限, 可以根据环境噪声大小调整参数  $a$  与  $b$ , 达到调整误差容忍度的效果。

将  $\boldsymbol{\rho}^{r,s}(t)$  中所有元素使用映射函数  $F(x)$  进行映射, 可以得到使用标签  $r$  与标签  $s$  获取每个位置的概率矩阵  $\mathbf{P}^{r,s}(t)$  为

$$\mathbf{P}^{r,s}(t) = F(\boldsymbol{\rho}^{r,s}(t)) \quad (24)$$

当有一个标签阵列时, 每对标签对之间都可以生成一个概率矩阵全息图。将每对标签对获取的概率矩阵按元素相乘作为最终的概率矩阵全息图, 如式(25)所示。在这个概率矩阵全息图中, 概率最大的位置被认为是目标物体的定位结果位置。

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}^{r_1, s_1}(t) \odot \mathbf{P}^{r_2, s_2}(t) =$$

$$\begin{pmatrix} P_{1,1}^{r_1, s_1} P_{1,1}^{r_2, s_2} & \cdots & P_{1,L}^{r_1, s_1} P_{1,L}^{r_2, s_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{W,1}^{r_1, s_1} P_{W,1}^{r_2, s_2} & \cdots & P_{W,L}^{r_1, s_1} P_{W,L}^{r_2, s_2} \end{pmatrix} \quad (25)$$

### 6 实验与分析

#### 6.1 实验设备

实验中使用的设备包括 Impinj R420 阅读器、Laird S9028PCL 天线、H47 标签。上位机装配有 AMD 4800H 型号 CPU，数据使用 Python 3.8 进行处理，使用金属易拉罐作为待定位物体。

#### 6.2 静态信号校准算法验证实验与分析

为了验证静态信号校准算法的有效性，本文在物品摆放较为杂乱的复杂室内环境进行了验证，并与先前工作 TagRay<sup>[20]</sup>、Tamera<sup>[5]</sup>进行了对比。静态信号校准算法验证实验场景如图 8 所示。

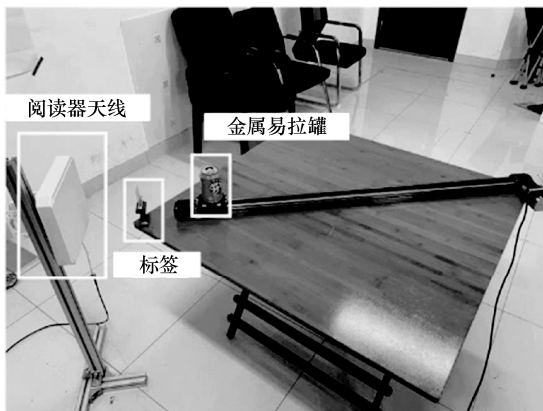


图 8 静态信号校准算法验证实验场景

实验过程中令易拉罐朝远离标签的方向运动，分别使用 TagRay、Tamera 与 RFreeTrack 的方法提取静态信号，并且分别提取目标反射信号的测量相位。不同方法提取的静态信号对比如图 9 所示。

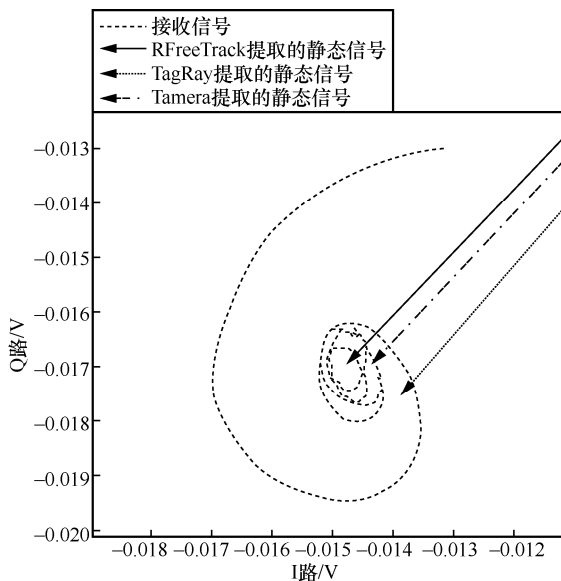


图 9 不同方法提取的静态信号对比

TagRay、Tamera 与 RFreeTrack 计算的测量相位与理论值对比如图 10 所示。

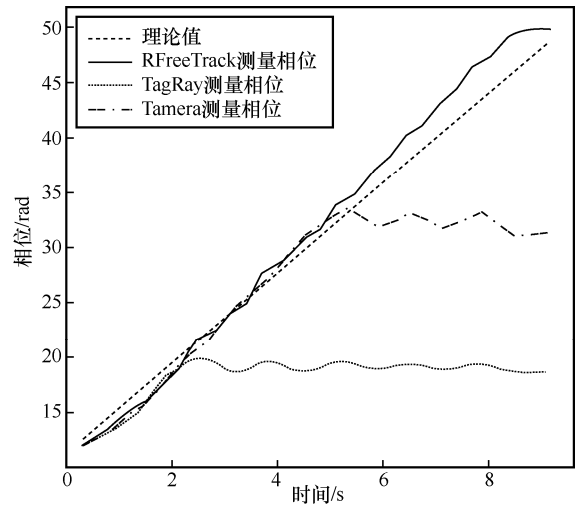


图 10 测量相位与理论值对比

不同方法提取的测量相位与理论值误差的累积分布函数 (CDF) 如图 11 所示。TagRay 与 Tamera 计算的测量相位平均误差为 12.7 rad 与 4.8 rad，而 RFreeTrack 计算的测量相位平均误差为 1.5 rad，精度分别提升了 88.1%与 68.8%。

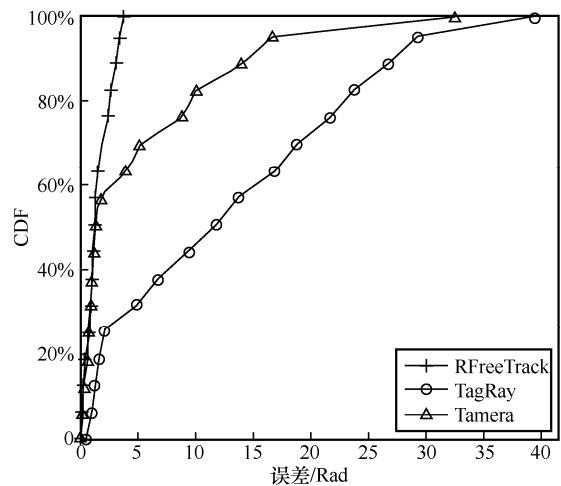


图 11 测量相位与理论值误差的 CDF

实验证明，在环境多径复杂时，无法直接使用空采信号的方式得到精确的静态信号，也证明了本文提出的校准算法能够有效地提取出准确的静态信号。

#### 6.3 目标物体的定位实验与分析

为了保证标签的读取速率，本文仅使用一个阅读器天线，并将标签阵列并排放置组成一个标签阵列，对 1 m×1 m 内的金属易拉罐进行定位。实验在

物品摆放较为杂乱的复杂室内环境进行, 目标物体的定位实验场景如图 12 所示。



图 12 目标物体的定位实验场景

首先采集直线轨迹进行静态信号的校准。校准场景如图 13 所示。

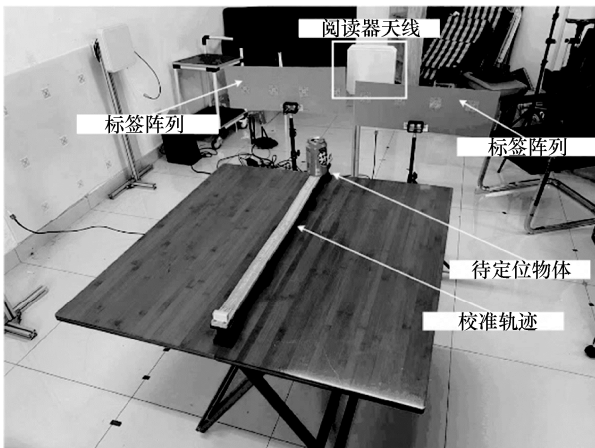


图 13 校准场景

然后使用校准后的静态信号进行圆形轨迹的物体定位。定位场景如图 14 所示。

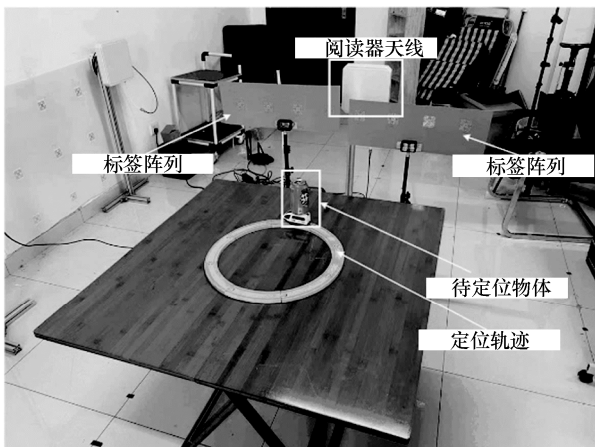


图 14 定位场景

圆形轨迹定位结果如图 15 所示, 并与 TagRay、Tamera 进行对比。

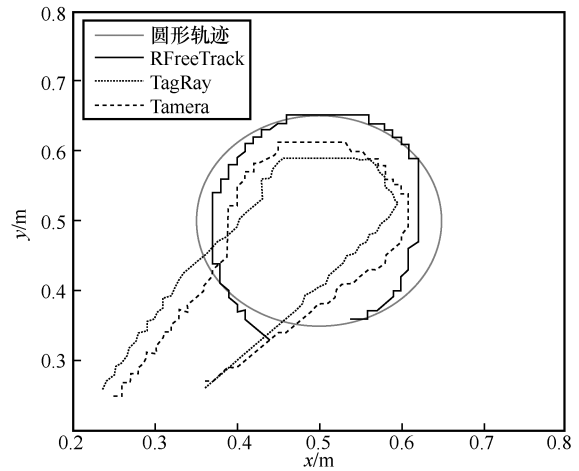


图 15 定位结果

不同方法定位误差的 CDF 如图 16 所示。

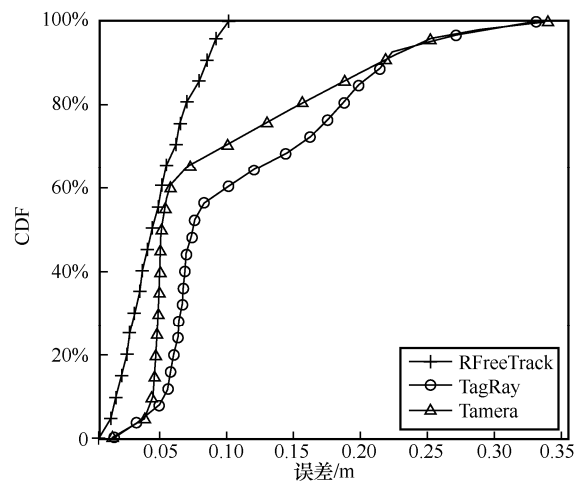


图 16 不同方法定位误差的 CDF

从图 16 可以看到, RFreeTrack 使用直线轨迹进行校准之后, 定位误差平均值为 0.040 8 m, 相较于 TagRay、Tamera 的定位误差 0.097 6 m 与 0.082 7 m, 精度分别提升了 58.2%与 50.6%。

为了验证标签阵列的数量对定位精度的影响, 分别使用一个标签阵列与 2 个标签阵列进行定位。每个标签阵列都由 4 个标签构成, 并分别与一个阅读器天线正对摆放。标签阵列数量对定位精度的影响如图 17 所示。一个标签阵列的平均定位误差为 0.045 8 m, 2 个标签阵列的平均定位误差为 0.069 5 m。相较于一个标签阵列, 2 个标签阵列的定位表现有所下降。原因是在多天线场景下, 某个标签返回的数据会被不同天线获取, 导致正对天线的读取率下降, 进而影响定位精度。

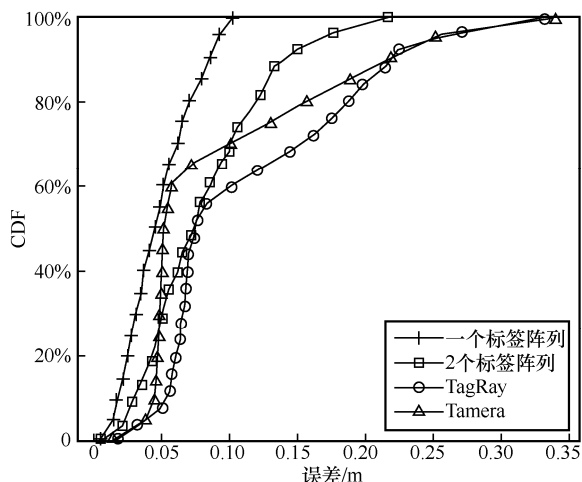


图 17 标签阵列数量对定位精度的影响

为了验证不同校准轨迹对定位精度的影响，分别使用直线轨迹与圆形轨迹进行校准，分析不同校准轨迹下的定位效果。校准轨迹对定位精度的影响如图 18 所示。从图 18 可以看出，圆形轨迹校准后，平均定位误差为 0.089 3 m；直线轨迹校准后，平均定位误差为 0.043 0 m，直线轨迹的校准效果更好。而 TagRay 与 Tamera 的平均定位误差分别为 0.073 5 m 与 0.088 2 m。使用直线轨迹校准更精确是因为直线轨迹能够让目标反射信号相位覆盖整个周期，而圆形轨迹只能覆盖周期的一部分。因此，在校准的过程中，尽量使用让目标反射信号相位覆盖整个周期，能够有效提高定位精度。

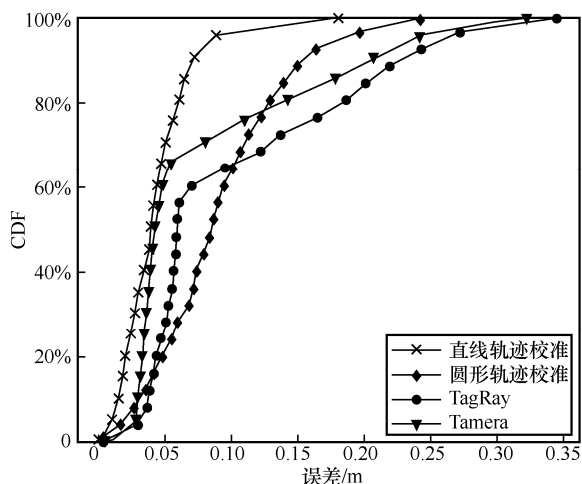


图 18 校准轨迹对定位精度的影响

## 7 结束语

为了解决复杂场景下 RFID 系统定位精度低的问题，本文提出了 RFreeTrack 系统。该系统通过商

业 RFID 技术来计算目标的反射信号，进而在复杂环境中实现了高精度的非接触式定位。首先，提出了一种以时间序列相似度为量化指标的搜索算法，该算法对静态信号进行了精确校准，显著提高了目标反射信号准确度。然后，提出了一种利用差分相位全息技术的定位方案，该方案消除了阅读器天线位置带来的影响，提高了定位精度，降低了系统设置的复杂度。该系统最终达到了高精度的非接触式定位效果。实验发现使用经过校准的静态信号来提取目标反射信号的相位，在复杂环境下相对于现有技术减少了 68.8% 的误差。同样地，基于校准的静态反射信号，在复杂环境中应用差分相位全息图技术的定位误差平均值仅为 0.040 8 m，相对于现有技术提升了 50.6%。在下一步的工作中，对更大尺度以及其他材质物体的定位将是一个值得关注的问题。

## 参考文献:

- [1] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G 移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148.  
ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 141-148.
- [2] ZENG Y H, CHEN X H, LI R G, et al. UHF RFID indoor positioning system with phase interference model based on double tag array[J]. IEEE Access, 2019, 7: 76768-76778.
- [3] YANG L, CHEN Y K, LI X Y, et al. Tagoram: real-time tracking of mobile RFID tags to high precision using COTS devices[C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2014: 237-248.
- [4] DING H, HAN J S, QIAN C, et al. Trio: utilizing tag interference for refined localization of passive RFID[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 828-836.
- [5] SHANG F, YANG P L, XIONG J, et al. Tamera: contactless commodity tracking, material and shopping behavior recognition using COTS RFIDs[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2023, 19(2): 43.
- [6] CAI H F, QIAN C. Poster: RF-HGR: domain-independent few-shot recognition for unseen gestures with RFID[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 30th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-2.
- [7] ALI K, LIU A X, CHAI E, et al. Monitoring browsing behavior of customers in retail stores via RFID imaging[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(3): 1034-1048.
- [8] 常兆心, 张扶桑, 牛凯, 等. 基于 LoRa 信号的行走距离和方向估计[J]. 计算机学报, 2021, 44(5): 999-1012.  
CHANG Z X, ZHANG F S, NIU K, et al. Walking distance and direction estimation using LoRa signal[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(5): 999-1012.

- [9] ZHANG X, LIU J, CHEN X Y, et al. SAH: fine-grained RFID localization with antenna calibration[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 980-988.
- [10] ELSANHOURY M, MÄKELÄ P, KOLJONEN J, et al. Precision positioning for smart logistics using ultra-wideband technology-based indoor navigation: a review[J]. IEEE Access, 2022, 10: 44413-44445.
- [11] XU Z X, HUANG S L, DING J C. A new positioning method for indoor laser navigation on under-determined condition[C]//Proceedings of the 2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 703-706.
- [12] HUANG H, YANG J F, FANG X, et al. VariFi: variational inference for indoor pedestrian localization and tracking using IMU and Wi-Fi RSS[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(10): 9049-9061.
- [13] SMAOUI N, HEYDARIAAN M, GNAWALI O. Anchor-oriented time and phase-based concurrent self-localization using UWB radios[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN). Piscataway: IEEE Press, 2021: 265-272.
- [14] WU C S, ZHANG F, WANG B B, et al. mmTrack: passive multi-person localization using commodity millimeter wave radio[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 2400-2409.
- [15] QIAN K, WU C S, ZHANG Y, et al. Widar2.0: passive human tracking with a single Wi-Fi link[C]//Proceedings of the 16th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM Press, 2018: 350-361.
- [16] CHOU H T, CHENG H T, CHOU S J, et al. Dome-shaped ellipsoidal reflector antenna for UHF-RFID readers with confined near-field detection region[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2505-2508.
- [17] DOBKIN D M. The RF in RFID[M]. Burlington: Newnes, 2008.
- [18] WANG Z Q, XIAO F, YE N, et al. A see-through-wall system for device-free human motion sensing based on battery-free RFID[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2018, 17(1): 1-21.
- [19] YANG L, LIN Q Z, LI X Y, et al. See through walls with COTS RFID system[C]//Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2015: 487-499.
- [20] CHEN Z Y, YANG P L, XIONG J, et al. TagRay: contactless sensing and tracking of mobile objects using COTS RFID devices[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 307-316.
- [21] RAKTHANMANON T, CAMPANA B, MUEEN A, et al. Searching and mining trillions of time series subsequences under dynamic time

warping[C]//Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2012: 262-270.

- [22] SALVADOR S, CHAN P. Toward accurate dynamic time warping in linear time and space[J]. Intelligent Data Analysis, 2007, 11(5): 561-580.
- [23] WANG P, GUO B, WANG Z, et al. ShopSense: customer localization in multi-person scenario with passive RFID tags[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(5): 1812-1828.
- [24] ZHANG X M, MA Y T, GONG X L, et al. A training-free multipath enhancement (TFME-RTI) method for device-free multi-target localization[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 7399-7410.

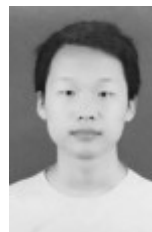
#### [作者简介]



桂林卿 (1984- ), 男, 湖北黄冈人, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网感知与计算。



蒋祎 (1998- ), 男, 江苏江阴人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为物联网感知与计算。



张卿云 (1997- ), 男, 江苏常熟人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为物联网感知与计算。



肖甫 (1980- ), 男, 湖南邵阳人, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网感知与计算、物联网安全技术与数据中心网络。