

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513868

# 基于标签阵列的 RFID 室内三维定位方法\*

谢良波, 宋 祎, 肖蒙蒙, 王 勇, 周 牧

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

**摘 要:**针对基于天线阵列测角的射频识别 (RFID) 定位系统部署复杂以及定位成本高的问题,提出了一种基于标签阵列的三维定位算法。首先,分析了 RFID 系统的相位反向散射模型,并通过实验对标签间的耦合效应进行分析,揭示了其对角度估计精度的潜在影响;其次,为解决标签阵列中相互耦合的问题,考虑标签的排布情况,提出了一种虚拟标签构造方法,并结合虚拟标签优化标签阵列,引入稀疏标签阵列,提出一种基于虚拟标签构造的稀疏标签阵列到达角 (AOA) 估计方法;在此基础上,针对实际应用中目标物体可能发生的姿态变化对角度测量造成的干扰,引入基于角度搜索的姿态估计方法,通过建立空间坐标变换模型实现对标签阵列相对于已知天线的真实方向的精确估计,有效降低了姿态角对测角精度的影响;然后,基于一维角度测量建立了 3D 定位模型,从两个方向的稀疏标签子阵列分别获得经过姿态补偿后的方位角和仰角,结合三角测量原理,最终实现对目标的三维定位;最后,使用商用读写器 Impinj R420 和标签搭建测试平台对所提稀疏标签阵列 AOA 估计算法和定位算法的性能进行系统性评估。实验结果表明,所提系统可以实现三维空间中的目标定位,且中值定位误差达 23.5 cm,标准差为 12.5 cm,充分验证了所提算法的有效性。

**关键词:** 射频识别;室内定位;标签阵列;AOA 估计;三维定位

**中图分类号:** TN919 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## A tag array-based RFID indoor 3D localization method

Xie Liangbo, Song Yi, Xiao Mengmeng, Wang Yong, Zhou Mu

(School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To address high deployment complexity and cost associated with antenna-array-based radio frequency identification (RFID) positioning systems, this paper proposes a 3D positioning algorithm based on tag arrays. First, the RFID phase backscatter model is analyzed, and the coupling effect is experimentally investigated to reveal their potential impact on angle estimation accuracy. Second, to mitigate the mutual coupling within the tag array, we propose a virtual tag construction method considering the tag arrangement. By optimizing the tag array with sparse configurations, an angle of arrival (AOA) estimation method for sparse tag arrays based on virtual tag construction is developed. Furthermore, to address the interference caused by potential target pose variations in practical applications, an angle-search-based attitude estimation method is incorporated. This method employs a spatial coordinate transformation model to achieve precise estimation of the tag array's true orientation relative to a known antenna, effectively reducing the negative impact of attitude angles on angular measurement precision. Subsequently, a 3D positioning model is established using one-dimensional angle measurements, where azimuth and elevation angles after attitude compensation are obtained from sparse tag subarrays in two orthogonal directions to achieve 3D positioning through triangulation. Finally, a systematic evaluation of the proposed sparse tag array AOA estimation and localization algorithms was performed on a test platform built with the commercial Impinj R420 reader and tags. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves positioning in three-dimensional space, with a median positioning error of 23.5 cm and a standard deviation of 12.5 cm, validating the effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** radio frequency identification (RFID); indoor localization; tag array; AOA estimation; 3D localization

收稿日期: 2025-03-27 Received Date: 2025-03-27

\* 基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (CSTB2023NSCQ-MSX0249, CSTB2023NSCQ-LZX0126)、重庆市教委科学技术研究基金项目 (KJQN202300615) 资助

## 0 引言

随着物联网技术的迅速发展,获取人员及物品位置的需求日益增大。目前的定位技术主要分为两类,一类是基于传感器的定位技术<sup>[1]</sup>,另一类是基于无线信号的定位技术,主要有基于蓝牙定位<sup>[2]</sup>、基于Wi-Fi定位<sup>[3-4]</sup>、基于射频识别定位(radio frequency identification, RFID)<sup>[5]</sup>等多种定位技术实现室内位置定位。其中,基于RFID的定位具有成本低、通信效率高、非接触式等特点,已广泛应用于物体识别和定位跟踪中,是一种极具前景的室内定位技术。

目前的RFID定位方法主要有基于接收信号强度(received signal strength indicator, RSSI)<sup>[6]</sup>、到达角(angle of arrival, AOA)<sup>[7]</sup>、到达时间(time of arrival, TOA)、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)<sup>[8]</sup>、相位<sup>[9-10]</sup>等方法。RSSI受环境影响波动较大,定位精度不高;相位对距离分辨率高,定位鲁棒性更好。基于相位的AOA定位无需时间同步且定位精度较高,得到了广泛的研究。

在二维场景的定位研究中,基于AOA的早期研究主要采用多天线阵列的方案<sup>[11]</sup>。文献[12]指出标签阵列中标签的耦合效应会引入相位误差,且该耦合效应在间距过小时会降低标签的读取成功率,进而直接影响系统的稳定性和定位精度。为了解决标签阵列中的互耦效应对相位的影响,文献[13]提出了互耦效应相位校正方法,并提出了一种基于标签阵列姿态估计算法,在标签阵列存在姿态角的情况下也能实现定位,提高了定位精度。文献[14]在文献[11]的基础上提出了一种基于标签阵列测角的定位系统,通过集成多信号分类算法(multiple signal classification, MUSIC)与双曲线定位模型实现相位参数解耦,从而完成对目标的角度与实时定位估计。而在基于标签阵列的定位系统中标签阵列存在标签耦合情况,会产生较大误差。Zhang等<sup>[15]</sup>提出一种基于深度学习的AoA校正网络,利用空间注意力机制补偿多径干扰。但该方法高度依赖于高成本的离线采样,且环境泛化能力较弱。以上定位系统都只能实现在二维空间中的定位,在三维空间中定位需要利用二维阵列或平面阵列同时估计出目标的方位角和俯仰角。三维方向估计方案需要联合搜索方位角和俯仰角的所有组合,其计算复杂度较高。文献[16]提出LTEye系统,该系统带有旋转天线,通过旋转天线模拟大规模天线阵列,采用合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)的思路,提高定位精度。但基于天线阵列的定位系统大多需要特殊的定制天线,其系统成本较高。随后的研究逐渐转向利用标签阵列代替天线阵列以降低成本。文献[17]提出了3DLoc系统,通过在目标的3个相互正交的表面上采用RFID标签的

3个线性阵列,且读写器天线在2D空间上移动,通过AOA方法实现3D标签定位,3D平均定位误差约为15 cm。由于需要在二维空间中连续移动天线扫描标记物体,调整天线高度,而基于天线移动的系统会较为复杂耗时,无法及时获得位置。文献[18]提出一种基于SAR的RFID定位方法。利用水平与垂直双轴旋转天线,并结合多元非线性回归粒子滤波算法,实现了高精度3D定位。但该方法依赖机械旋转获取数据,导致定位周期较长,在实时性要求极高的动态场景下适用性受限。为了摆脱迭代搜索的高复杂度,文献[19]提出一种基于线性阵列空间角测量的三维代数解算法,采用拉格朗日乘子法求解约束加权最小二乘(constrained weighted least squares, CWLS)问题,通过误差校正阶段使定位精度达到克拉美-罗下界(Cramér-Rao lower bound, CRLB)。但该方法忽略了高阶噪声项,导致其在大噪声场景下的定位性能显著下降并偏离最优界。文献[20]提出一种基于半张量积压缩感知的室内定位方法,通过矩阵降维技术显著降低了系统的存储与计算开销。并引入了自适应直觉模糊聚类算法进行粗定位,有效增强了算法对无线信号异常值的鲁棒性。但该方法对离线指纹库的依赖性较强,且在动态环境下指纹库的更新与维护成本依然较高。文献[21]提出一种抗速度波动的移动机器人RFID定位系统SILoc,利用多天线相位关联特性结合斜率辅助的相位解卷绕算法,解决了由于电池电量下降或电机误差导致的非匀速运动定位偏差问题。然而该方法要求机器人必须经过标签的最近点以消除硬件偏移,这在仓库角落等受限空间难以实现。

目前针对二维场景的定位方法已经有了很多,而三维情况下联合搜索方位角和俯仰角会导致较高的计算复杂度,而标签互耦会产生相位误差并降低读取率,从而损害定位精度与稳定性。尽管如此,在实际场景中通常涉及物体在三维空间中的位置,实现三维场景的定位具有重要意义。针对以上问题,本文提出一种基于标签阵列的RFID三维定位模型,主要贡献包括:

1) 提出了一种基于虚拟标签构造的稀疏标签阵列设计方法,在抑制耦合效应对读取成功率影响的同时降低了标签耦合效应对角度估计的影响,并降低了标签阵列的间隔约束,提升了测角及定位精度。

2) 提出了一种基于标签阵列姿态检索的三维定位系统模型。系统使用两个正交方向的一维线阵进行AOA估计得到目标的方位角和仰角。考虑目标物体存在姿态角情况,提出了一种基于角度搜索的姿态估计算法,有效补偿因姿态变化带来的测角误差。与传统的二维测角模型相比,本文通过搜索一维角域搜索降低了计算复杂度并通过角度搜索方法提高了在目标姿态不确定场景下的定位鲁棒性。

3) 使用 COTS RFID 读写器 Impinj R420 和 RFID 标签实现了定位系统原型,并在实际环境中评估了其性能。实验结果表明,该定位系统的中值定位精度可以达到 23.5 cm。

## 1 RFID 相位模型及标签耦合效应

### 1.1 RFID 相位模型

RFID 读写器可以将电磁波信号发送到 RFID 标签,然后从标签接收后向散射信号,其中包含标签的 ID、RSSI、相位等信息。读写器测量的相位值是发送信号与接收信号之间的相位偏移。因为  $\varphi \in [0, 2\pi]$ , 存在相位卷绕,该相位不能直接表征天线与标签间的距离信息。设读写器与标签间的距离为  $L$ , 则读写器相位测量值表示为:

$$\varphi = \text{mod}\left(\frac{4\pi L}{\lambda} + \varphi_{\text{tag}} + \varphi_T + \varphi_R, 2\pi\right) \quad (1)$$

其中,  $\varphi_T, \varphi_R, \varphi_{\text{tag}}$  分别为读写器发射电路、接收电路和标签引入的相位误差。这些都是由硬件特性引起的相位偏移。相位能够反映距离,但仍有以下问题:1) 相位值周期性重复,即存在相位卷绕,不能直接使用;2) 硬件引入的相位偏移未知;3) 相位不仅与距离、读写器发射接收电路有关,还与标签方向有关。为了分析标签方向对相位的影响,如图 1(a) 所示,将标签绕  $Y$  轴旋转进行了实验探究,同时绘制了标签旋转时的相变如图 1(b) 所示。

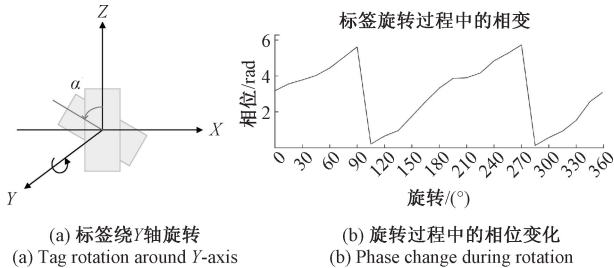


图 1 标签方向对相位值的影响

Fig. 1 Effect of tag orientation on phase value

根据图 1 可知相位随着旋转连续变化,标签旋转  $\omega$  弧度,相位变化  $2\omega$ 。

设标签阵列中相邻标签间的距离为  $d$ , 标签  $i$  与读写器天线间的距离为  $l_i$ , 其相位测量值为:

$$\varphi_i = \text{mod}\left(\frac{4\pi l_i}{\lambda} + \varphi_{\text{tag}} + \varphi_T + \varphi_R, 2\pi\right) \quad (2)$$

同一天线相邻标签间的相位差为:

$$\Delta\varphi = \text{mod}\left(2\pi \frac{2d\sin\theta}{\lambda} + \Delta\varphi_{\text{tag}}, 2\pi\right) \quad (3)$$

可知通过差分可消除由读写器接收电路和发射电路引入的相位误差。由于标签类型相同,所以标签电路等

引入的相位也可消除,  $\Delta\varphi_{\text{tag}}$  指标签耦合引入的误差,与  $l$  无关,是一个与标签自身天线和标签间距相关的常量。当方向上仅有两个标签平行放置时,其相互耦合引入的相位相同,差分后可以抵消。因此,式(3)可改写为:

$$\Delta\varphi = \text{mod}\left(2\pi \frac{2d\sin\theta}{\lambda}, 2\pi\right) \quad (4)$$

$$\frac{4\pi d\sin\theta}{\lambda} = \Delta\varphi + 2\pi n \quad (5)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi + 2\pi n \quad (6)$$

其中,  $n$  是  $[-2d/\lambda - \Delta\varphi/2\pi, 2d/\lambda - \Delta\varphi/2\pi]$  中的任意整数,其范围为  $4d/\lambda$ 。由于  $d \leq \lambda/4$  时,  $n$  的值范围小于 1,有唯一确定的值,此时有  $\Delta\varphi \in [-\pi, \pi]$ 。由于读写器测得相位  $\varphi \in [0, 2\pi]$ , 所以  $\Delta\varphi \in [-2\pi, 2\pi]$ , 要变为  $[-\pi, \pi]$ , 则  $-2\pi < \Delta\varphi < -\pi$  时,  $n = 1$ ;  $|\Delta\varphi| \leq \pi$  时,  $n = 0$ ;  $\pi < \Delta\varphi < 2\pi$  时,  $n = -1$ , 即:

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \Delta\varphi + 2\pi, & -2\pi < \Delta\varphi < -\pi \\ \Delta\varphi, & |\Delta\varphi| \leq \pi \\ \Delta\varphi - 2\pi, & \pi < \Delta\varphi < 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

### 1.2 RFID 相位模型

在标签阵列中,当 RFID 标签之间紧密排布时,相邻的标签之间会相互干扰,标签的天线间会发生相互耦合,此时耦合不能被忽略,因为它对定位参数有较为明显的影响。耦合效应会改变标签天线的特性,从而影响接收功率和相位值。考虑两个平行标签间的相互耦合效应,通过观察  $T_2$  对  $T_1$  相位的影响,分析一些因素对标签间相位耦合的影响。

本文实验测量了不同标签-天线间距离  $L$  下的相位值,从而分析  $L$  对耦合效应的影响如图 2 所示。保持标签间距  $d$  不变,然后分别移动  $T_1, T_2$  和单独移动  $T_1$ , 逐渐增大距离  $L$ , 记录  $L$  增加时  $T_1$  的相位变化。通过  $T_2$  影响下  $T_1$  的相位值减去无干扰的相位值得到相位偏移。如图 3 所示,相位偏移基本稳定在 0.6 rad 左右,可以看出相位偏移不随  $L$  的增加发生显著变化。因此,  $L$  与标签间耦合无关。

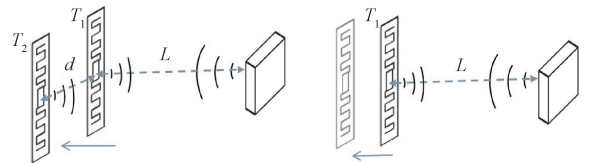


图 2 实验测量不同  $L$  下的相位值

Fig. 2 Experimental measurement of phase values at different  $L$

通过实验测量不同标签间距离下的相位值,从而分析  $d$  对标签耦合效应的影响。如图 4 所示,首先将标签  $T_1$  放置在与天线同一水平面正对天线  $L = 1$  cm 处,获得不受耦合效应影响的相位  $\phi_{T_1}$ 。固定  $L$  不变,在  $T_1$  旁边

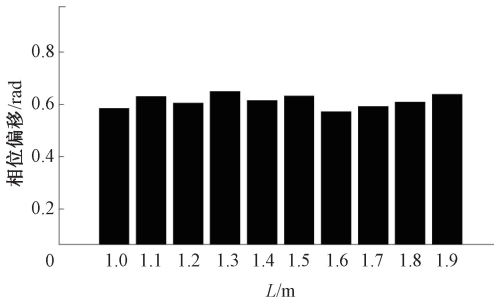


图 3 不同 L 下相位偏移量

Fig. 3 Phase offsets at different L

平行放置标签  $T_2$ , 逐渐使  $T_2$  远离,  $T_2$  从  $d = 2$  cm 移动至 10 cm, 每步移动 1 cm, 记录不同  $d$  下  $T_1$  的相位  $\phi'_{T_1}$ .  $\phi'_{T_1} - \phi_{T_1}$  得到不同  $d$  下相位误差。接下来分析了相互耦合对测量的相位差的影响。首先可以算出两个标签距离在 2~10 cm 的测量相位差。而仅移动标签  $T_1$ , 测量标签在每个位置的相位, 然后减去  $\phi_{T_1}$ , 可以得到没有耦合效应下的实际相位差。

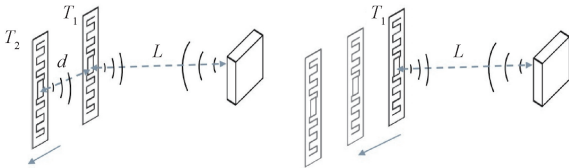


图 4 实验测量不同 d 下的相位值

Fig. 4 Experimental measurement of phase values at different d

为了评估相互耦合对测量相位和相位差的影响, 如图 5 所示, 分别绘制了不同距离  $d$  下的相位误差和不同标签距离下与实际相位差相比得到的相位差误差。如图 5(a) 所示, 相位误差很大, 即标签间的耦合影响测量的相位值, 使相位产生较大误差。且随着  $d$  的增加, 相位误差仍然很大。如图 5(b) 所示, 随着  $d$  的增加, 相互耦合对测量的相位差的影响。测量的相位差与实际相位差

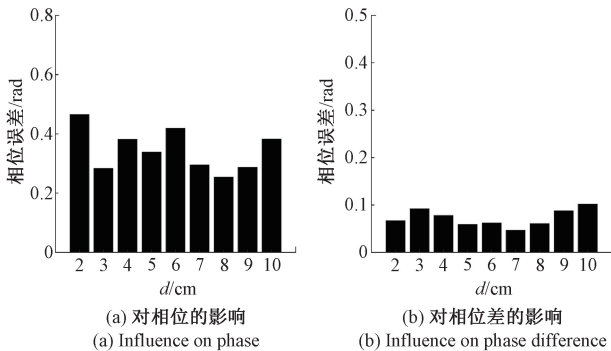


图 5 相互耦合对测量的相位、相位差的影响

Fig. 5 Influence of mutual coupling on measured phase and phase difference

之间仍存在一定的误差, 然而大多数误差都很小。可知在同一平面上的两个标签的相位差不受相互耦合的严重影响。

综上, 标签耦合是影响系统性能的一个重要因素。但标签耦合引入的相位误差是一个与标签到天线之间的距离无关、与标签间距和标签天线本身相关的量。且同一平面上两个平行放置的标签的相位差不受相互耦合的严重影响。所以使用两个标签间的相位差进行定位较为可靠。强烈的相互耦合还将使读写器更难检测到中心标签, 标签阵列的密度不能过高, 这促使对中心的标签进行虚拟标签的构造。

## 2 系统模型

考虑 3D 空间中的定位, 定位场景如图 6 所示。

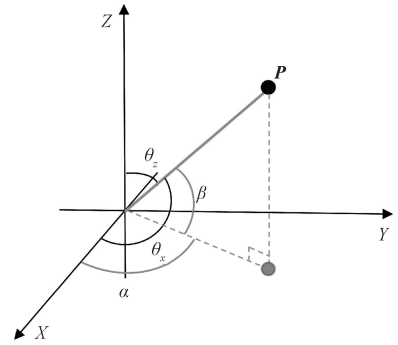


图 6 3D 定位场景

Fig. 6 3D localization scene

该定位系统由  $N(N \geq 3)$  个天线和一个待定位目标 (标签阵列附着于定位目标上) 组成, 其中每个天线都能够获取目标的角度信息。第  $i$  个天线和定位目标的坐标分别为  $T_i = [x_i, y_i, z_i]^T (i = 1, 2, \dots, N)$  和  $P = [x_0, y_0, z_0]^T$ 。通常用方位角和仰角来表示物体位置, 真实的方位角  $\alpha_i$  和仰角  $\beta_i$  可以表示为:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left( \frac{y_0 - y_i}{x_0 - x_i} \right) \quad (8)$$

$$\beta_i = \tan^{-1} \left( \frac{z_0 - z_i}{r_i} \right) \quad (9)$$

$$r_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} = \cos \alpha_i (x_0 - x_i) + \sin \alpha_i (y_0 - y_i) \quad (10)$$

其中,  $\alpha_i \in (-\pi, \pi), \beta_i \in (-\pi/2, \pi/2), \alpha_i$  是第  $i$  个天线到目标的方位角,  $\beta_i$  是第  $i$  个天线到目标的仰角,  $r_i$  是第  $i$  个天线到目标的传播路径在  $XOY$  平面的投影。此时, 定位目标方向为:

$$v_i = [\cos \beta_i \cos \alpha_i, \cos \beta_i \sin \alpha_i, \sin \beta_i]^T \quad (11)$$

同样, 可以用定位目标源相对于两个坐标轴的夹角

来定位。此时与  $x$  轴夹角和与  $z$  轴夹角分别为其方位角和仰角,可以表示为:

$$\begin{cases} \theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(z_0 - z_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}{x_0 - x_i} \right) \\ \theta_z = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}{z_0 - z_i} \right) \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $\theta_x \in (0, \pi)$ ,  $\theta_z \in (0, \pi)$ 。由于:

$$\begin{cases} \cos \theta_z = \sin \beta \\ \cos \theta_x = \cos \beta \cos \alpha \end{cases} \quad (13)$$

$\arccos(\cdot)$  为  $\arccos(\cdot)$  函数,此时定位目标方向为:

$$\mathbf{v} = \left[ \cos \theta_x, \sin \theta_x \sin \left( \arccos \left( \frac{\cos \theta_z}{\sin \theta_x} \right) \right), \cos \theta_z \right]^T \quad (14)$$

在三维空间中,目标位置由两个角度决定。因此,需要构建一个平面标签阵列来估计方位角和仰角。平面阵列由两个放置在不同方向上的线性阵列组成,其定位系统模型如图 7 所示,系统包含 3 个天线和一个二维标签阵列。

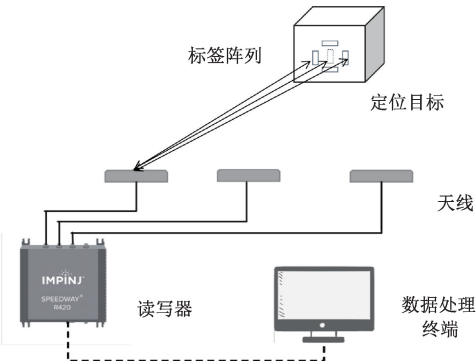


图 7 定位系统模型

Fig. 7 Location system model

整体的定位流程主要由 4 部分组成:1) 采集定位所需的原始相位信息并进行误差校准;2) 进入标签阵列设计模块,通过构造虚拟标签与设计稀疏标签子阵列,利用校准后的相位建立起精细的定位模型;3) 在此基础上,系统利用不同方向上的线性阵列进行天线 AOA 估计,通过标签子阵列分别测得目标的方位角与仰角;4) 在定位模块中,结合测角定位模型并利用三角测量原理,根据获取的方向信息即可解算出目标的精确空间位置。

### 3 基于虚拟标签构造的稀疏标签阵列 AOA 估计

#### 3.1 虚拟标签构造

由于标签部署的设计原则是使用尽可能少的标签来独特、准确和方便地定位物体。为了对物体进行三维定

位,需要构建一个平面阵列来估计方位角和仰角。平面阵列由放置在不同方向的两个线性阵列组成,所以物体上标签应沿着不同的正交轴进行部署。本研究希望使用小尺寸的阵列结构来估计 2D AOA,因此每个方向至少应该有一个标签对。如图 8 所示,标签分布在  $XOZ$  平面,标签 1 和 2 沿  $X$  轴方向布置,标签 3 和 4 沿  $Z$  轴方向布置,两个标签对呈中心对称分布。两个方向标签之间的距离均为  $d$ 。

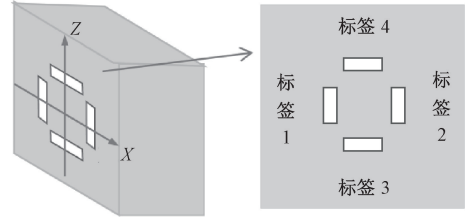


图 8 物体上标签阵列部署

Fig. 8 Tag array deployment on the object

由图 8 可知,两个方向均仅有一个标签对构成标签阵列来测角。为了减小增加标签对相互耦合及相位的影响,本文提出了一种基于虚拟标签的标签子阵列构造方法。如图 9 所示,以标签阵列中心为原点建立物体坐标系,在  $X$  轴方向,利用另一方向上标签 3 和 4 在  $X$  轴方向构造一个位于标签 1 和 2 中点的虚拟标签 5,虚拟标签 5、标签 1 和 2 在  $X$  轴方向构成标签子阵列 1;同理,在  $Z$  轴方向,利用标签 1 和 2 在  $Z$  轴方向构造一个位于标签 3 和 4 中点的虚拟标签 6,虚拟标签 6、标签 3 和 4 在  $Z$  轴方向构成标签子阵列 2。将从  $X$  轴的标签子阵列 1、 $Z$  轴的标签子阵列 2 分别测得与两个坐标轴的夹角,并以此作为角度估计的基础输入,最终通过空间几何投影与解算模型,实现对目标物体三维空间坐标的精准获取。

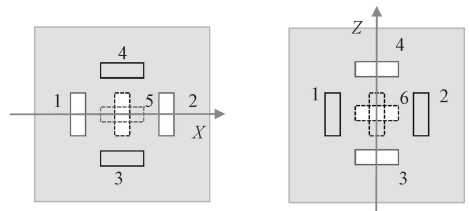


图 9 虚拟标签的构造

Fig. 9 Construction of virtual tag

#### 3.2 稀疏标签子阵列构造

稀疏标签阵列通常意味着均匀阵列中的部分位置没有标签,或者说元素是“零”或者“空”的,只有部分元素包含有效的标签。这种情况称为“稀疏性”。与均匀密集阵列相比,稀疏标签阵列中标签之间的距离相对较大,这不仅能够有效减轻标签之间的互耦效应,降低其对标签

读取成功率的影响; 而且在标签数量相同的情况下, 还能通过合理的几何布局增大阵列的有效孔径, 从而提升 AOA 分辨率。此外, 由于标签物理尺寸限制, 稀疏的阵列布局使利于二维标签阵列布阵, 增强系统的可部署性。

因此, 本节提出了一种新的稀疏 RFID 标签阵列设计, 旨在互耦效应、读取成功率、物理空间限制与角度分辨率等多个因素之间取得综合平衡, 对标签布局进一步优化。为避免标签的重叠, 将阵列中两个标签之间的最小距离设置为 2 cm。在图 8 所示的物体每个方向两侧各加入 1 个标签, 新加入的标签与两侧标签相距 2 cm, 此时标签子阵列 1、2 中均有 4 个标签, 如图 10 所示, 与虚拟标签一起, 形成了稀疏标签阵列。该阵列构造方式仅增加了较小的几何尺寸, 但其稀疏性可大大减小标签间相互耦合。在其中一个方向上稀疏标签阵列布局为:

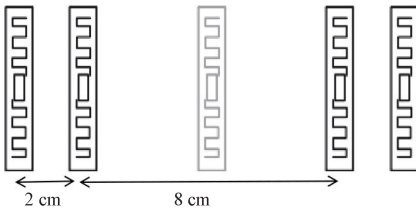


图 10 稀疏标签阵列  
Fig. 10 Sparse tag array

所提出的稀疏阵列, 标签被部署在由集合  $S$  给出的位置, 即:

$$S = \{md \mid m = 0, 1, 3, 5, 6\} \quad (15)$$

差分共阵列  $D$  被定义为:

$$D = \{x_i - x_j \mid i, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (16)$$

其中,  $x_i$  表示第  $i$  个标签的位置。则所提出稀疏标签阵列的差分共阵列为:

$$S_d = \{md \mid m = -(N + 1), \dots, (N + 1)\} \quad (17)$$

稀疏标签阵列的权重函数定义为能够实现差分共阵列位置元素的有效标签对数量。权重函数  $w(d)$  为:

$$w(d) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \delta(d - (x_i - x_j)) \quad (18)$$

其中, 当  $d - (x_i - x_j) = 0$  时,  $\delta(d - (x_i - x_j)) = 1$ , 否则  $\delta = 0$ 。遍历所有可能的标签对  $\{i, j\}$ , 当标签对所对应的差分共阵列元素  $x_i - x_j$  等于给定的  $d$  时, 就将权重函数的值加 1, 从而统计出实现差分共阵列元素的标签对的数量。

与相同标签数量的均匀线阵 (uniform linear array, ULA) 相比, 稀疏标签阵列可以获得更高的 DOA (direction of arrival) 分辨率。因此, 使用稀疏阵列的差分共阵列代替传统的阵列来进行 AOA 估计。

### 3.3 基于虚拟标签构造的稀疏标签阵列 AOA 估计

RFID 标签阵列测角模型如图 11 所示。

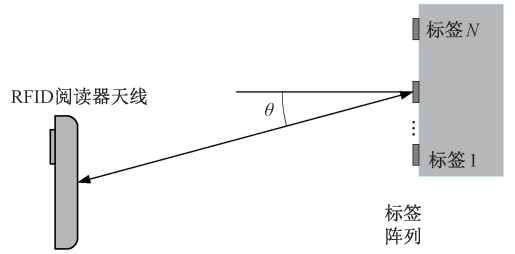


图 11 RFID 标签阵列测角模型

Fig. 11 Angle measurement model of RFID tag array

假设信号入射到稀疏标签阵列上, 标签阵列接收到的信号为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \\ \mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_K(t)]^T \\ \mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T \\ \mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_k)]^T \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{x}(t)$  是阵列接收数据向量,  $\mathbf{n}(t)$  是加性噪声向量,  $\mathbf{A}(\theta)$  是阵列流型矩阵,  $\mathbf{a}(\theta_i)$  是导向矢量。标签阵列接收信号可表示为归一化矢量形式, 即:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (20)$$

差分共阵列的信号模型为:

$$\mathbf{X}_{\text{diff}} = \mathbf{A}_{\text{diff}}(\theta)\mathbf{S} + \mathbf{N}_{\text{diff}} \quad (21)$$

其中,  $\mathbf{A}_{\text{diff}}(\theta)$  是差分共阵列的阵列流型矩阵, 其导向矢量为:

$$\mathbf{a}_{\text{diff}}(\theta_k) = \mathbf{a}(\theta_k) \otimes \mathbf{a}^*(\theta_k) \quad (22)$$

其中,  $\otimes$  表示 Kronecker 积,  $*$  表示共轭。

天线相对于目标标签阵列的方向如图 12 所示, 物体从每根天线获得天线相对于物体坐标系的两个角度, 即与  $X$  轴、 $Z$  轴方向的夹角  $\theta_x, \theta_z$ ; 标签 1、2、3、4、虚拟标签 9 在  $X$  轴方向构成稀疏标签子阵列 1, 标签 5、6、7、8、虚拟标签 10 在  $Z$  轴方向构成稀疏标签子阵列 2; 与  $X$  轴方向夹角由标签子阵列 1 来确定; 与  $Z$  轴方向夹角由标签子阵列 2 来确定。三维空间中每个方向的角度估计如图 13 所示。

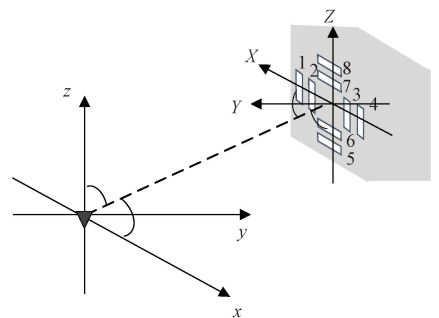


图 12 天线相对于目标标签阵列的方向

Fig. 12 Direction of the antenna relative to the target tag array

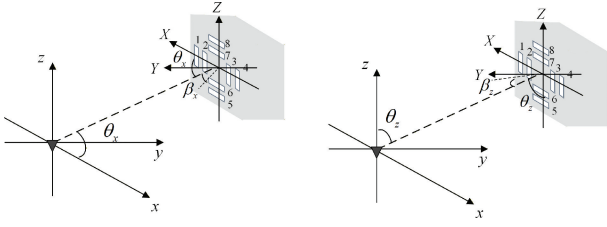


图 13 三维空间中的角度估计

Fig. 13 Angle estimation in 3D space

使用读写器采集阵列中所有标签的相位值  $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ ; 由图 1 实验结果可知, 虚拟标签 9 的相位可由标签 6、7 的相位加上由标签绕 Y 轴旋转  $\pi/2$  引起的相位变化  $\pi$  得到, 即:

$$\varphi_9 = \text{mod}((\varphi_6 + \varphi_7)/2 + \pi, 2\pi) \quad (23)$$

同样, 虚拟标签 10 的相位为:

$$\varphi_{10} = \text{mod}((\varphi_2 + \varphi_3)/2 + \pi, 2\pi) \quad (24)$$

以 X 轴方向为例, 考虑标签 1 和 2、虚拟标签 9、3 和 4 在 X 轴方向构成的稀疏标签子阵列 1, 标签 1 和 2 间的距离为  $d$ , 标签 2 和虚拟标签 9 间的距离为  $2d$ 。其阵元位置分别为:  $s_1 = 0, s_2 = d, s_9 = 3d, s_3 = 5d, s_4 = 6d$ , 稀疏阵列接收信号模型为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{K}_x(\theta) \mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (25)$$

可由式 (21)、(22) 得到差分共阵列的信号模型, 用相位差对接收信号进行重构并计算差分共阵列的协方差矩阵:

$$\mathbf{R}_{\text{diff}} = \mathbf{E}[\mathbf{X}_{\text{diff}} \mathbf{X}_{\text{diff}}^H] = \mathbf{K}_{\text{diff}} \mathbf{E}[\mathbf{S} \mathbf{S}^H] \mathbf{K}_{\text{diff}}^H + \mathbf{E}[\mathbf{N}_{\text{diff}} \mathbf{N}_{\text{diff}}^H] = \mathbf{K}_{\text{diff}} \mathbf{R}_S \mathbf{K}_{\text{diff}}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (26)$$

其中,  $\mathbf{E}[\cdot]$  表示数学期望,  $(\cdot)^H$  表示共轭转置。 $\sigma^2$  是噪声功率,  $\mathbf{I}$  是单位矩阵。

结合权重函数, 差分共阵列的加权协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{\text{diff}} = \mathbf{E}[\mathbf{X}_{\text{diff}} \mathbf{W} \mathbf{X}_{\text{diff}}^H] \quad (27)$$

对协方差矩阵进行特征值分解, MUSIC 空间谱函数可进一步表示:

$$P_{\text{MUSIC}}(\beta_x) = \frac{1}{\mathbf{k}_{\text{diff}}(\beta_x)^H \mathbf{W} \mathbf{U}_N \mathbf{U}_N^H \mathbf{k}_{\text{diff}}(\beta_x)} \quad (28)$$

通过搜索空间谱函数可以估计天线相对于标签阵列的角度。检索可以得到角度  $\beta_x$ ,  $-\pi/2 \leq \beta_x \leq \pi/2$ ,

$\theta_x = \pi/2 - \beta_x$  即为天线与标签子阵列 1 的所在坐标轴 X 轴的夹角的估计值。

### 3.4 基于角度搜索的标签姿态角估计

目标物体的姿态变化会导致标签阵列相对于读写器天线的空间朝向改变, 进而影响标签的相位测量值。如图 14 所示, 当标签阵列在 XOY 平面存在旋转角度  $\theta_x$  时会影响相位值, 若直接使用存在姿态角时估计的角度  $\theta_x$  与  $\theta_z$  进行定位, 将引入系统误差。

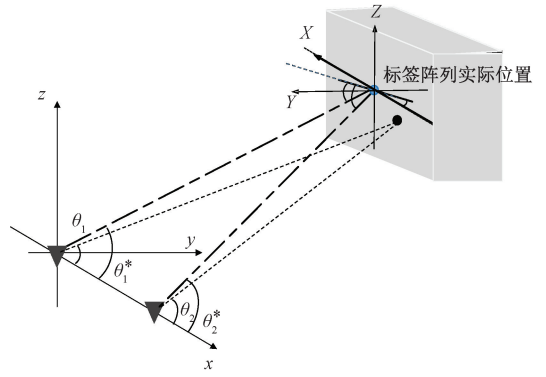


图 14 标签姿态角的影响

Fig. 14 Influence of tag attitude angle

为便于分析, 将三维空间中的角度映射到 XOY 平面, 如图 15 所示, 设  $\alpha$  为天线相对标签阵列映射的方位角, 则天线相对于标签阵列的真实方位角为:

$$\alpha_i^* = \alpha_i + \theta_x \quad (29)$$

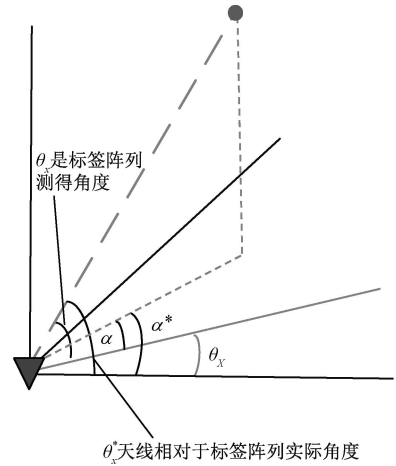


图 15 角度的映射

Fig. 15 Angle mapping

$\alpha$  变化为  $\alpha^*$ , 故实际与 X 轴方向的夹角  $\theta_x^*$  为:

$$\cos \theta_x^* = \sin \theta_z \cos \alpha^* = \sin \theta_z \cos(\alpha + \theta_x) \quad (30)$$

又因为  $\cos \theta_x = \sin \theta_z \cos \alpha$ , 因此只需获取姿态角  $\theta_x$  即可实现角度的补偿。

为了消除姿态角带来的定位误差, 本文提出一种基于坐标轴旋转的姿态角检索算法。考虑到三维空间旋转分析的复杂性, 将问题映射至 XOY 平面, 通过二维坐标系旋转实现标签阵列与天线平面的对齐。如图 16 所示, 以坐标原点为中心, 将原 X - Y 坐标轴旋转  $\theta_x(m)$  变为  $X' - Y'$ , 其中:

$$\theta_x(m) = (m - 1) \times \Delta\theta \quad (31)$$

考虑到 RFID 标签阵列附着于物体上, 标签一般只能从正面读取, 以逆时针旋转方向为正, 所以将坐标轴旋

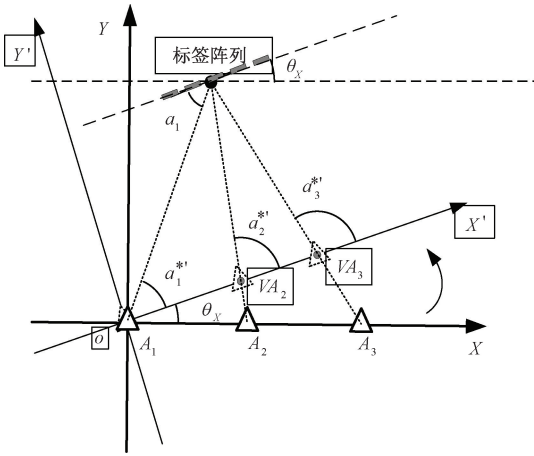


图 16 坐标轴旋转

Fig. 16 Coordinate axis rotation

转范围  $\theta_x(m)$  设置为  $[-\pi/2, \pi/2]$ , 则:

$$\theta_x(m) = (m - 1) \times \Delta\theta - \pi/2 \quad (32)$$

其中,  $\Delta\theta$  是旋转间距,  $m$  为正整数,  $m \in [1^\circ, 181^\circ]$ 。

假设某天线  $A$  在原坐标系下的坐标是  $(x_A, y_A)$ , 在旋转角度为  $\theta_x(m)$  的新的坐标系下为  $(x_A(m), y_A(m))$ , 坐标变换公式为:

$$\begin{cases} [x_A(m), y_A(m)]^T = \mathbf{R}[\theta_x(m)] [x_A, y_A]^T \\ \begin{bmatrix} x_A(m) \\ y_A(m) \end{bmatrix} = \mathbf{R}[\theta_x(m)] \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} \end{cases} \quad (33)$$

其中,  $\mathbf{R}[\theta_x(m)]$  为旋转矩阵, 其表达式为:

$$\mathbf{R}[\theta_x(m)] = \begin{bmatrix} \cos \theta(m) & \sin \theta(m) \\ -\sin \theta(m) & \cos \theta(m) \end{bmatrix} \quad (34)$$

由标签阵列中心和天线位置  $A_i$  确定的直线为  $l_i(m)$ , 与原  $X$  轴夹角为  $a_i^*$ , 在  $X' - Y'$  坐标系中, 当  $\theta_x(m) = \theta_x$  时,  $X'$  轴与标签阵列平行,  $l_i(m)$  与  $X'$  轴夹角为  $a_i$ , 此时  $l_i(m)$  为:

$$y' = \tan a_i \times [x' - x_{A_i}(m)] + y_{A_i}(m) \quad (35)$$

此时,  $A_i$  对应的虚拟天线为直线  $l_i(m)$  与  $X' - Y'$  坐标系中  $X'$  轴的交点, 则虚拟天线的位置为  $(x_{A_i}(m) - y_{A_i}(m)/\tan a_i, 0)$ 。

但当  $\theta_x(m) \neq \theta_x$  时,  $l_i(m)$  与  $X'$  轴夹角与标签阵列测得角度  $a_i$  不相等, 通过读写器天线位置的直线不再交于一点, 将出现 3 个交点  $\{C_1(m), C_2(m), C_3(m)\}$ , 交点之间的距离和可定义为:

$$\text{dist}(m) = \|C_1(m)C_2(m)\| + \|C_1(m)C_3(m)\| + \|C_2(m)C_3(m)\| \quad (36)$$

由上述分析可知, 当  $\theta_x(m) = \theta_x$  时, 此时  $\{C_1(m), C_2(m), C_3(m)\}$  重合,  $\text{dist}(m) = 0$ 。因此, 可使用搜索使得  $\text{dist}(m)$  最小的旋转角度来估计姿态角:

$$m^* = \underset{\alpha(m) \in (-90^\circ, 90^\circ)}{\text{argmax}} \left( \frac{1}{\text{dist}(m)} \right) \quad (37)$$

得到最优解后, 对应的旋转角度  $\theta_x(m)$  即为估计的姿态角。

### 3.5 定位解算

根据上述方法修正姿态角  $\theta_x$  后, 得到物体在读写器天线坐标系中的三维方向, 根据三角测量原理, 即可得到物体的位置。

在定位场景中布置 3 个读写器天线, 使用上述方法分别对每根天线的到达角进行估计。以距离最左侧天线处为原点, 与标签子阵列 1 平行方向为  $x$  轴建立读写器天线坐标系, 假设天线均在  $XOZ$  平面, 每个天线可获得目标的角度信息, 即获得定位目标方向。在读写器天线坐标系中, 设标签阵列中心坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 其中  $i = 1, 2, 3$ , 且已知标签阵列相对于 3 个天线的方位角和仰角:

$$\begin{cases} \frac{z_0 - z_1}{x_0 - x_1} = \frac{\cos \theta_{x_1}^*}{\cos \theta_{z_1}} \\ \frac{z_0 - z_2}{x_0 - x_2} = \frac{\cos \theta_{x_2}^*}{\cos \theta_{z_2}} \\ \frac{z_0 - z_3}{x_0 - x_3} = \frac{\cos \theta_{x_3}^*}{\cos \theta_{z_3}} \end{cases} \quad (38)$$

如图 12 所示, 读写器天线相对于物体的方向与在天线坐标系下物体相对于读写器天线的方向相等。读写器天线在物体坐标系中的方向分别为  $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$  和  $\mathbf{v}_3$ , 则每个天线  $A_k$  可以获得的定位目标方向为:

$$\mathbf{v}'_k = \overrightarrow{A_k P} / |A_k P| = \left[ \cos \theta_{xk}, \sin \theta_{xk} \sin \left( \arccos \left( \frac{\cos \theta_{zk}}{\sin \theta_{zk}} \right) \right), \cos \theta_{zk} \right]^T \quad (39)$$

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \mathbf{A}_1 + t_1 \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{P} = \mathbf{A}_2 + t_2 \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{P} = \mathbf{A}_3 + t_3 \mathbf{v}_3 \end{cases} \quad (40)$$

由已知天线位置  $A_k$  和  $\mathbf{v}'_k (k = 1, 2, 3)$  确定的 3 条直线将交于一点  $\mathbf{P}$ , 即物体位置。其中,  $\mathbf{v}'_k$  为物体相对于天线的方向向量,  $t_k$  为目标到天线的距离参数, 3 个方程联立可求出  $t_k$ , 进而求出交点坐标, 实现目标物体的定位。在实际环境中, 由于环境影响测量结果可能会存在误差, 直线无法精确相交于一点, 为了确定这种情况下的定位结果, 将交点近似为两条异面直线距离最近处两点的中点; 此时方程两两组合得到 3 个不同的解  $\{[x_1, y_1, z_1], [x_2, y_2, z_2], [x_3, y_3, z_3]\}$ 。令标签阵列的中心位置用  $(x_0, y_0, z_0)$  表示, 取 3 个坐标的均值作为目标的最终定位结果, 即:

$$\begin{cases} x_0 = (x_1 + x_2 + x_3) / 3 \\ y_0 = (y_1 + y_2 + y_3) / 3 \\ z_0 = (z_1 + z_2 + z_3) / 3 \end{cases} \quad (41)$$

最终实现目标物体的三维定位。

## 4 仿真与实验分析

为了验证本文定位模型,本章首先使用 Matlab 进行了仿真分析。之后通过实验从不同角度评估定位系统的性能,包括 RFID 标签阵列的测角精度、定位精度。

### 4.1 仿真分析

在 Matlab 上进行了仿真分析,信道采用高斯白噪声信道,信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)设置为 10 dB。定位区域为  $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ,在定位区域内随机生成物体位置,记录每个位置的测角误差和定位误差。

如图 17(a)所示,加入虚拟标签后,角度估计误差小于  $1.2^\circ @ 90\%$ 。如图 17(b)所示,分析了有虚拟标签和无虚拟标签的定位误差对比,有虚拟标签和无虚拟标签的中位误差分别为 4.50 和 6.64 cm,加入虚拟标签后精度提升了 32.2%,验证了虚拟标签的有效性,不同坐标轴定位精度也均有提升,图 17 中 CDF 为累积分布函数(cumulative distribution function)。

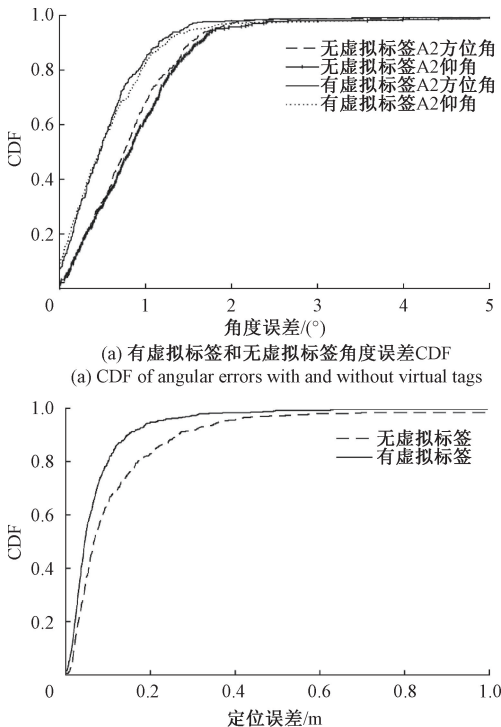


图 17 仿真角度估计误差和定位误差  
Fig. 17 Simulation of angle errors and localization errors

为了验证本文基于 RFID 稀疏标签阵列 AOA 估计方法的有效性,在 Matlab 上进行了仿真分析。使用相同标签数量形成的均匀线阵与考虑标签耦合构造的基于虚拟标签的稀疏标签阵列进行一维角度估计,在不

同角度下进行了多次仿真实验,得到如图 18 所示的 AOA 估计精度对比 CDF 图,相同标签数量下,与传统均匀线阵相比,使用本文提出的基于虚拟标签的稀疏标签阵列 AOA 估计精度明显较高。图 19 绘制了定位误差 CDF 图。

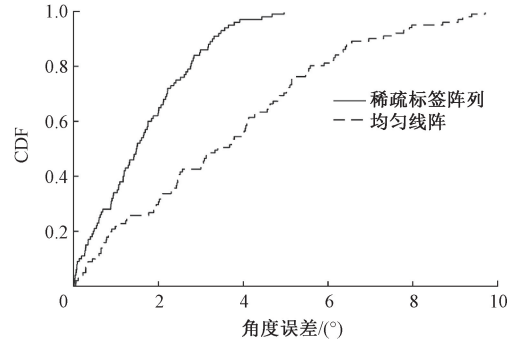


图 18 AOA 估计精度仿真对比

Fig. 18 Simulation comparison of AOA estimation accuracy

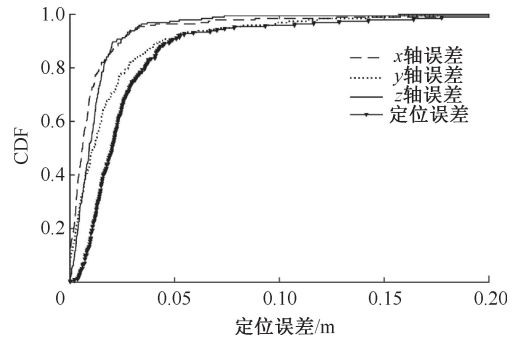


图 19 构建稀疏标签阵列定位的仿真结果

Fig. 19 Simulation results for constructing sparse tag array localization

如图 19 所示,在采用基于虚拟标签的稀疏标签阵列后,系统在  $x$ 、 $y$  与  $z$  轴 3 个方向上的定位精度均得到了显著提升。其中, $x$  轴误差、 $y$  轴误差和  $z$  轴误差 5 cm 以下的占比均在 90% 以上,定位误差的中位数为 2.04 cm。由多次仿真结果可知,本文提出的基于虚拟标签构造的定位模型与姿态补偿算法能够实现精确的三维定位。

### 4.2 实验分析

#### 1) 实验设置

本文采用如图 20 所示的测试平台从定位中值误差、误差分布及累积分布函数等维度对算法性能进行了全面评估。其中,读写器为 Impinj R420,RFID 标签为 Alien 9630 标签,读写器天线为 8 dBi 圆极化天线。考虑标签间影响及标签尺寸,形成正交方向上的标签阵列。Impinj R420 读写器的工作频率范围为 920.625~924.375 MHz,共 16 个通道。波长范围为 32.454~32.586 cm。在

400 cm×400 cm×250 cm 的定位区域内, 将读写器天线放置在离地面 100 cm 处, 相邻天线间距 75 cm, 天线 1、2、3 坐标分别为 (125, 0, 100)、(200, 0, 100)、(275, 0, 100), 单位为 cm, Impinj R420 读写器工作频率  $f=920.625$  MHz, 实验场景如图 21 所示。



图 20 RFID 读写器、天线和 RFID 标签  
Fig. 20 RFID readers, antennas and RFID tags

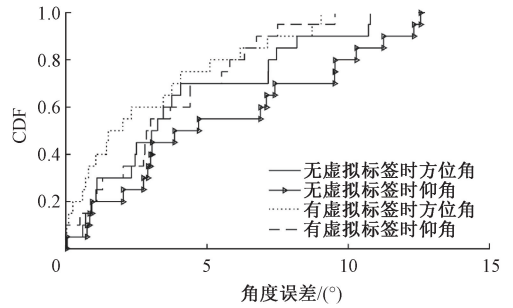


图 21 实验场景  
Fig. 21 Experimental scene

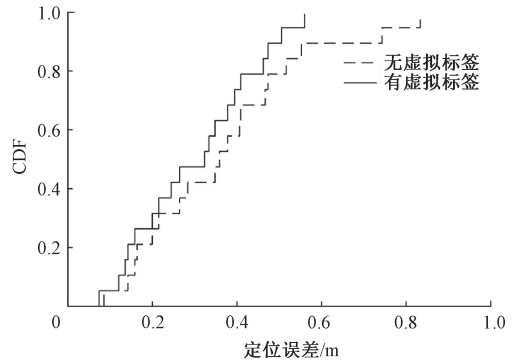
2) 测角及定位精度

测角精度会影响定位精度, 有虚拟标签和无虚拟标签情况下角度估计误差和定位误差的 CDF 分别如图 22(a) 和 (b) 所示。以天线 2 为例, 无虚拟标签时的  $x$  轴、 $z$  轴标签阵列测角误差的中位数分别为  $3.25^\circ$ 、 $4.7^\circ$ , 构造虚拟标签后的测角误差分别为  $2.02^\circ$ 、 $3.16^\circ$ , 测角精度分别提升了 37.8% 和 32.7%。无虚拟标签时的中值定位误差为 35.8 cm。构造虚拟标签后的中值定位误差为 32.3 cm, 定位精度提升了 9.77%。构造虚拟标签相较于直接定位精度提高, 验证了虚拟标签的有效性。

如图 23 所示进一步分析了不同天线的测角精度, 天线 1、2、3 对  $x$  轴的方位角中值测角误差分别为  $6.25^\circ$ 、 $3.31^\circ$ 、 $5.03^\circ$ , 对  $z$  轴的仰角中值测角误差分别为  $4.80^\circ$ 、 $1.39^\circ$ 、 $4.49^\circ$ , 可知天线 2 测角精度最高。当标签阵列在某一侧时, 由于天线波瓣宽度影响, 两侧接收天线效果较差, 测角精度较低。所以中心位置的天线得益于最优的辐射覆盖和信号接收条件测角精度最高。



(a) 无虚拟标签、有虚拟标签时角度误差  
(a) Angular errors with and without virtual tags



(b) 有虚拟标签和无虚拟标签整体定位精度对比  
(b) Comparison of overall positioning accuracy with and without virtual tags

图 22 虚拟标签对角度估计与定位精度的影响  
Fig. 22 Angle estimation error and localization error without and with virtual tags

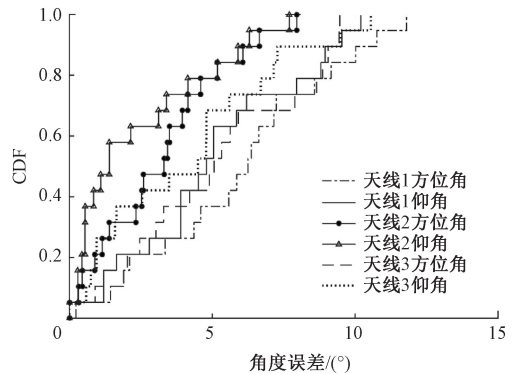


图 23 不同天线的角度估计误差

Fig. 23 Angle estimation errors of different antennas

之后实验中每个方向使用 4 个标签结合虚拟标签构建稀疏标签阵列, 将部署稀疏标签阵列的物体在定位区域内进行测试, 定位误差如图 24 所示。由图 24 可知, 本文构造虚拟标签后构建的 5 标签稀疏阵列的中值定位误差为 23.5 cm, 标准差为 12.5 cm,  $x$  轴误差、 $y$  轴误差、 $z$  轴误差的中位数分别为 11.34、16.53 和 13.04 cm, 定位精度明显提升。但不同坐标轴的定位精度不同,  $x$  和  $z$  维度的定位精度高于  $y$  维度。这是由于  $y$  轴垂直于两个标签

阵列所在平面,系统对 y 轴上的位置变化不敏感。因此 y 轴的位置误差较大。

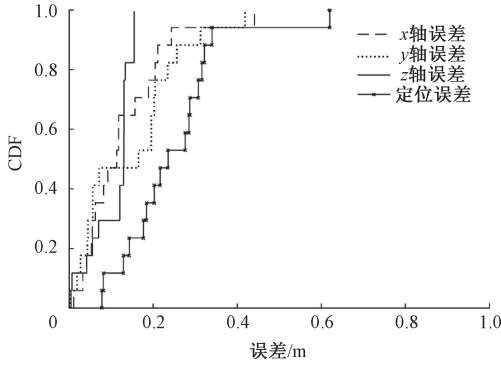


图 24 稀疏标签阵列时定位误差 CDF 图

Fig. 24 CDF plot of localization error in sparse tag arrays

实验还将本文方法和传统的 5 标签均匀线阵进行了对比,测角误差的 CDF 图如图 25 所示。实验结果表明,使用 5 个标签的均匀线阵估计的测角误差的中位数为 3.77°,平均测角误差为 4.17°,而本文构造虚拟标签后构建的 5 标签稀疏阵列的测角误差的中位数达到了 2.69°,平均测角误差为 2.62°。实验结果表明,所提出的稀疏标签阵列 AOA 估计方法显著提高了角度测量精度。

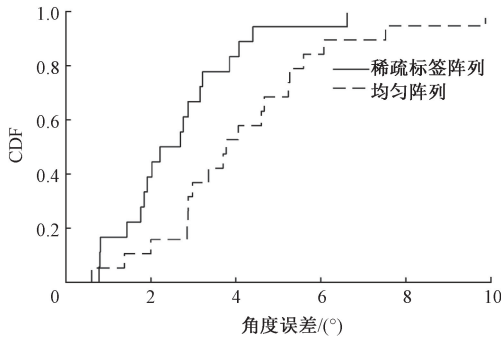


图 25 两种方法测角误差对比

Fig. 25 Comparison of angle measurement errors between two methods

定位误差的 CDF 如图 26 所示,传统 5 标签均匀线阵测角定位的中值误差为 28.7 cm,所以本文使用的 5 标签稀疏阵列与 5 个标签的均匀线阵相比定位精度提升了 18.1%,验证了本文构建的稀疏标签阵列可以实现更精确的三维定位。

3) 姿态角检索算法对定位性能的影响

为分析姿态角对定位性能的影响,本文在测试区域内放置目标物体,并在不同位置设置多组姿态角。为确保数据有效性,需逐一核对标签是否均可被读写器读取,只有全部可读时,才将该位置姿态下的采集数据保存为有效定位数据。将有效数据输入定位算法,获取姿态角

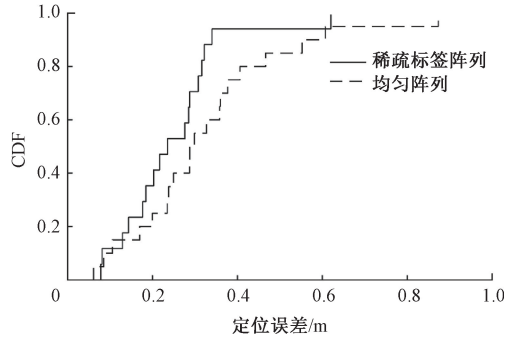


图 26 两种方法定位误差对比

Fig. 26 Comparison of localization errors between two methods

估计值与定位结果。基于这些数据绘制姿态角检索误差和定位误差如图 27 所示。

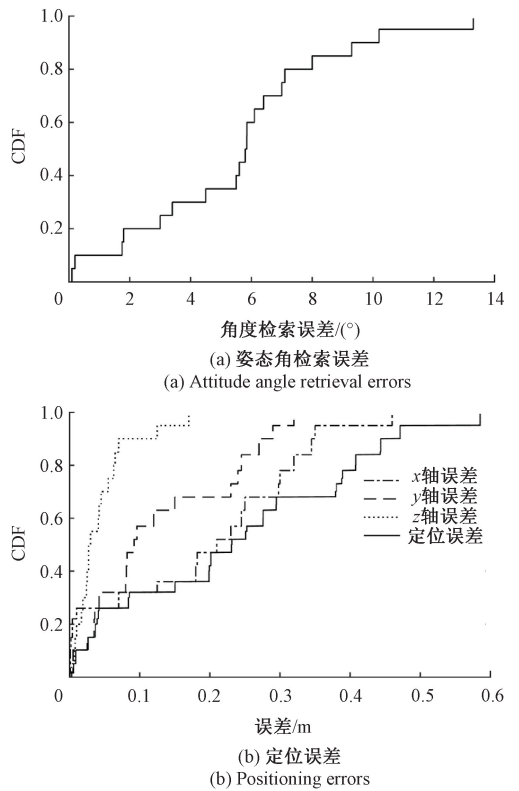


图 27 姿态角对定位精度的影响

Fig. 27 Effect of attitude angle on positioning accuracy

如图 27(a) 所示,姿态角估计误差在 6° 以下的约 60%,姿态角检索中值误差为 5.85°,平均姿态检索误差为 5.53°,表明所提姿态角估计算法能够实现较高精度的姿态感知;如图 27(b) 所示,与图 25 中无标签阵列姿态角影响相比,当标签阵列存在姿态角时,定位精度仅有略微降低,表明了姿态角检索算法的有效性。

如图 28 所示,姿态检索定位算法的中值定位误差为 24.1 cm,无姿态检索的中值定位误差为 45.5 cm。同时,

有姿态检索的误差 CDF 曲线上升更陡、饱和点对应的最大误差更小,表明误差离散度显著降低,系统稳定性大幅提升。

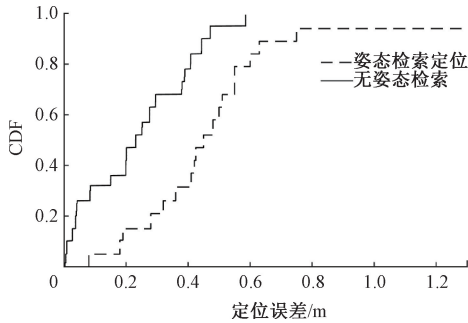


图 28 姿态检索和无姿态检索定位精度对比

Fig. 28 Comparison of localization accuracy between attitude retrieval and no attitude retrieval

#### 4) 与其他定位系统对比

与所提出的定位系统相比,过去的定位系统通常在二维空间中能够实现高精度。在不同的 RFID 定位系统中,由于其系统设置不同,系统特征不同,所以导致的系统复杂度不同。

如表 1 所示,本文总结了几个先进的 RFID 标签定位技术的特点,并将本文提出的定位系统与其他 RFID 系统进行对比。

表 1 不同 RFID 定位系统的对比

Table 1 Comparison of different RFID localization systems

定位系统	系统特征	定位空间	中位数误差
LANDMARC <sup>[6]</sup>	参考标签	二维	1~2 m
RF-Pen <sup>[22]</sup>	天线阵列	二维	12.8 cm
文献[12]	标签阵列	二维	5.15 cm
LTEye <sup>[16]</sup>	旋转天线	三维	61.0 cm
3DLoc <sup>[17]</sup>	天线移动	三维	16.3 cm
本文	标签阵列	三维	23.5 cm

与 LANDMARC<sup>[6]</sup> 相比,本文不需要放置大量的参考标签且受环境影响较小;与 RF-Pen<sup>[22]</sup> 相比,本文天线不需要固定布局,且避免了全息图技术来增加计算复杂度;文献[12]也使用了标签阵列,但其和上述定位系统均只能实现二维定位,在实际定位中有局限;与 LTEye<sup>[16]</sup> 相比,本文不需要旋转天线模拟大规模天线阵列,且本文定位精度更高;与 3DLoc<sup>[17]</sup> 相比,本文天线不需要保持移动,3DLoc 需要在二维空间中连续移动天线扫描标记物体,首先沿着  $z$  轴移动,扫描所有标签得到  $Z$  坐标并估计大致方向,将天线调整为与目标标签阵列相同的高度,然

后将天线沿  $X$  轴移动。而基于天线移动的系统会较为复杂耗时,无法及时获得位置。而本文系统部署简单,不用进行复杂的参考标签库建立工作,无需移动设备,成本较低,能够实现物体的准确三维定位。

## 5 结 论

本文提出了一种基于标签阵列的三维定位算法。基于一维角度测量模型,通过分析三维空间中的线性标签阵列与天线之间的几何位置关系,通过从一维线阵的不同方向得到目标的方位角和仰角,建立了一个基于标签阵列的线阵测角定位系统模型。通过相位差消除了读写器收发电路对相位的影响,并通过标签排布放宽了标签阵列中标签间距的限制,很大程度上降低了标签耦合效应,并构造虚拟标签引入稀疏标签阵列提升标签阵列 AOA 估计精度。此外,针对目标物体姿态变化可能导致的测角误差,提出了基于角度搜索的姿态估计方法,从而显著降低了姿态角对定位结果的影响,实现了鲁棒性的三维定位。与传统的线阵测量模型相比,利用该模型下的角度测量值可以实现对二维和三维场景下目标的定位,且通过分别搜索一维角域来估计空间中的两个角度,大大降低了计算的复杂度。同时引入了姿态搜索算法,使系统目标姿态不确定场景下也表现出良好的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] 李春磊, 陈久朋, 伞红军, 等. 基于多传感器的紧耦合三维室内定位与建图[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 121-131.  
LI CH L, CHEN J P, SAN H J, et al. Tightly coupled 3D indoor SLAM based on multi-sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 121-131.
- [2] SHI L F, ZENG R, JING F, et al. Weighted least-squares Bluetooth localization method based on data preprocessing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(23): 38291-38300.
- [3] 蒲巧林, 陈有坤, 周牧, 等. 基于改进对比学习和并行融合神经网络的室内 WiFi 定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 101-110.  
PU Q L, CHEN Y K, ZHOU M, et al. Indoor WiFi localization algorithm based on improved contrastive learning and parallel fusion neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 101-110.
- [4] 刘林, 廖子阳. 基于多通道图像的 ECA-CNN WiFi FTM 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 323-332.  
LIU L, LIAO Z Y. An ECA-CNN algorithm based on

- multi-channel image for WiFi FTM indoor positioning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 323-332.
- [ 5 ] XIE Y Q, WANG X L, LIN P, et al. Relative positioning of the inspection robot based on RFID tag array in complex GNSS-denied environments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-14.
- [ 6 ] NI L M, LIU Y H, LAU Y C, et al. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID[J]. Wireless Networks, 2004, 10(6): 701-710.
- [ 7 ] FLORIO A, AVITABILE G, COVIELLO G. Localization of RFID tags through real-time angle-of-arrival estimation[J]. IEEE Sensors Letters, 2025, 9(3): 1-4.
- [ 8 ] LI G, ZHOU F H. Research on RFID indoor positioning technology in multipath interference environments[C]. 2025 3rd International Conference on Mobile Internet, Cloud Computing and Information Security, 2025: 348-352.
- [ 9 ] BANDINI G, MARRACCI M, TELLINI B, et al. ORBITER: Phase-based localization of RFID tags via circular antenna trajectory [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-10.
- [10] 谢良波, 夏晨晖, 张钰坤, 等. 基于双频点载波相位的 RFID 室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 267-277.
- XIE L B, XIA CH H, ZHANG Y K, et al. RFID indoor localization algorithm based on dual-frequency carrier phase [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 267-277.
- [11] ZHANG X F, XU L Y, XU L, et al. Direction of departure (DOD) and direction of arrival (DOA) estimation in MIMO radar with reduced-dimension MUSIC[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(12): 1161-1163.
- [12] YANG CH, WANG X Y, MAO SH W. RFID tag localization with a sparse tag array[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(18): 16976-16989.
- [13] 谢良波, 任彦, 邵宇涛, 等. 一种基于 RFID 标签阵列的室内定位方法[J]. 电讯技术, 2023, 63(4): 490-498.
- XIE L B, REN Y, SHAO Y T, et al. An indoor localization method based on RFID tag array [J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(4): 490-498.
- [14] LIU H CH, MENG ZH Z, LI CH X, et al. Modeling for phase decoupling to detect the orientation and position of moving objects with simple RFID array [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-15.
- [15] ZHANG CH P, CUI Z Q, DONG L, et al. Environmental interference aware deep learning network for enhanced AoA localization in RFID systems[C]. 2025 IEEE 102nd Vehicular Technology Conference, 2025: 1-5.
- [16] KUMAR S, HAMED E, KATABI D, et al. LTE radio analytics made easy and accessible[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(4): 211-222.
- [17] ZHANG Y, XIE L, BU Y L, et al. 3-Dimensional localization via RFID tag array[C]. 2017 IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, 2017: 353-361.
- [18] WANG M Y, MA Y T, CHEN M Y, et al. An RFID localization algorithm based on dual-rotating antennas and particle filtering[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(20): 43326-43336.
- [19] LI CH Y, TANG B CH, YANG Y B, et al. Algebraic solution for linear array-based 3D localization without deployment limitations [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2025, 32: 1326-1330.
- [20] 蒲巧林, 周龙璨, 周牧, 等. 基于半张量积压缩感知的室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 329-339.
- PU Q L, ZHOU L C, ZHOU M, et al. Indoor localization based on semi-tensor product compression sensing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 329-339.
- [21] ZHANG J W, LIU X L, CHEN SH, et al. Toward robust RFID localization via mobile robot [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2024, 32(4): 2904-2919.
- [22] WANG H Y, GONG W. RF-Pen: Practical real-time RFID tracking in the air [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(11): 3227-3238.

## 作者简介



谢良波(通信作者), 2016年于电子科技大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为射频识别技术, 室内定位技术等。

E-mail: xielb@cqupt.edu.cn

**Xie Liangbo** received his Ph.D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2016. He is currently an associate professor and a master's supervisor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include RFID and indoor positioning technology.