

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.05.012

一种基于相控阵列天线的超高频射频识别相对定位方法

史伟光, 刘鹏辉

(天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对已有相对定位方法存在环境依赖程度大、定位精度低等问题, 提出一种基于相控阵天线的超高频(UHF)射频识别(RFID)相对定位方法, 该方法通过调节相控阵天线的激励参数来改变天线的辐射方向, 以获取目标标签的收信场强轮廓, 有效降低了系统对环境 and 场地的依赖程度; 同时, 提出一种基于轮廓陡峭程度的相对位置估计方法, 该方法首先利用轮廓最高点的时间戳信息将目标标签分为两组, 然后计算每一组标签的整体轮廓陡峭程度进而估计其相对位置。仿真结果表明: 相比于传统相对定位方法, 所提相对定位方法能够有效提高定位精度, 降低排序偏差; 在信噪比为 20~30 dB 时, 性能提高了 7.7%~21.6%。上述结果证实了本文方法的有效性。

关键词: 射频识别; 相对定位; 相控阵天线; 定位精度; 超高频

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)05-0082-07

A relative positioning method of UHF RFID based on phased array antenna

SHI Weiguang, LIU Penghui

(School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at the problems of the existing relative positioning methods, such as high environment dependence and low positioning accuracy, a phased array antenna based ultra high frequency radio frequency identification relative positioning method is proposed. By adjusting the excitation parameters of the phased array antenna, the radiation direction of the antenna is changed to obtain the received field strength profile of the target tag, which effectively reduces the system's dependence on the environment and venue. Meanwhile, a relative position estimation method based on the steepness of the contour is proposed. The method first divides the targets into two groups based on the timestamp information of the highest point of the contour, and then calculates the overall contour steepness of each group of labels for sorting. The simulation results show that compared with the traditional relative positioning method, the proposed relative positioning method can effectively improve the positioning accuracy and reduce the sorting deviation. When the signal-to-noise ratio is 20-30 dB, the performance is improved by 7.7%-21.6%. The above results confirm the effectiveness of the method prepare in this paper.

Key words: radio frequency identification(RFID); relative positioning; phased array antenna; positioning accuracy; ultra high frequency(UHF).

随着科技的不断发展, 基于物联网的需求不断增加^[1-4], 射频识别(radio frequency identification, RFID)作为物联网的关键推动力, 不断提高自身市场份额, 已在大多应用场景中取代了传统的条形码技术^[5-9]。在行李传送带、图书管理等目标密集分布的应用场景中, 相比于目标的绝对位置信息, RFID系统更关心个体

在密集群体中的相对位置。围绕基于RFID的相对定位, 国内外学者提出了多种相对定位方法^[10-12]。麻省理工学院的Katabi等^[10]提出了PinIt系统, 利用合成孔径雷达来提取环境中的多径信息, 基于多径轮廓和动态时间规整技术获得标签的位置信息。清华大学的Shangguan等^[11-13]提出了OTrack和STPP算法用于解

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 天津市自然科学基金青年项目(19JCQNJC03300); 天津市研究生科研创新项目(人工智能专项)(2020YJSZXS29)

通信作者: 史伟光(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为射频定位及群体智能感知计算。E-mail: shiweiguang@tiangong.edu.cn

决流水线场景和图书场景中的定位问题。OTrack 算法建立一个用于识别瞬态临界区域的概率模型,利用 OTrack 协议监测读取率的关键区域以获取标签的相对次序;STPP 算法通过移动阅读器天线来获取标签相位轮廓,利用峰值位置的时间戳信息来获取标签的空间顺序。

尽管上述相对定位方法获得了较好的效果,但仍存在以下挑战:首先是 PinIt 系统需利用通用软件无线电设备,对设备功能提出了较高要求,且在实际使用过程中需布设参考标签,加剧了应用局限性;其次是 OTrack 和 STPP 均采用具有固定辐射模式的微带天线作为阅读器天线。为了获取相位或收信场强的轮廓信息,阅读器天线通常需要被搭载在可移动设备上,进一步增加了系统对环境以及场地的依赖程度。此外, OTrack 和 STPP 利用收信场强轮廓和相位轮廓的最高点时间戳信息作为定位依据,但上述单点时间戳数据相对于噪声的鲁棒性较差,易造成排序偏差。

针对上述问题与不足,本文设计了一种基于相控阵天线的超高频 RFID 相对定位方法,相控阵天线的可调辐射模式可以有效代替阅读器的移动过程,降低了系统对环境和场地的需求。在此基础上,以提高定位精度为目的,本文设计了一种基于轮廓陡峭程度的位置判别方法,该方法可改善由单点时间戳作为定位依据所引发的排序错误问题。

1 传统相对定位方法

1.1 相对定位场景描述

图 1 所示为典型的相对定位场景。

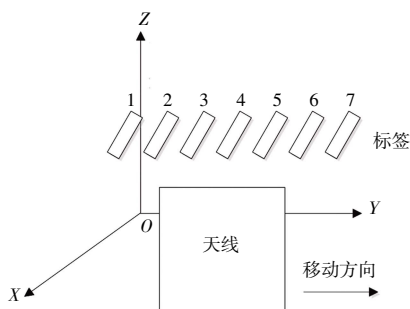


图 1 相对定位系统场景

Fig. 1 Scene of relative positioning system

图 1 主要由阅读器天线、标签、射频天线和应用终端 4 部分组成。标签粘贴于被定位目标且呈现阵列状部署于 YOZ 平面;阅读器天线沿 Y 轴移动并在移动过程中保持与标签阵列通信,收集标签的信号特征传递给应用终端进行处理;应用终端通过处理标签群

的信号特征,从而确定标签之间的相对位置关系,实现相对定位。

1.2 基于时间戳的相对定位方法

在阅读器天线移动结束后,阅读器可以获得各个标签的多种参数轮廓曲线,这些参数主要包括收信场强、收信相位、读取响应速率等。通过挖掘多条轮廓曲线间的典型特征时戳关系,即可实现相对定位。图 2 所示为收信场强轮廓曲线。

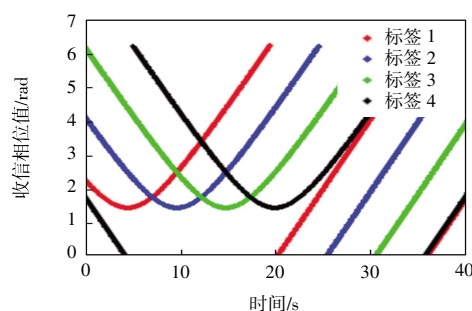


图 2 标签的收信相位轮廓曲线

Fig. 2 Receiving phase profile curves of labels

图 2 中,各条曲线均呈现 U 型对称特征,依据对称点的时戳信息并对其进行排序,即可获得图 1 中的各标签顺序。

1.3 基于单阵元微带天线的收信场强估计模型

图 2 所示的收信场强轮廓为理想条件下采集获得,实际场景中的噪声和天线移动变速会导致轮廓产生畸变,影响定位精度,因此,建立精确的场强估计模型对于轮廓修正及定位精度预估具有重要意义。针对现有 RFID 定位系统主要采用单阵元微带阅读器天线的现状,对 RFID 系统链路及其收信场强模型进行简要说明。

假设 RFID 系统为单站系统,则前向链路中标签所接收的收信场强 $P_{r,T}$ 和后向链路中阅读器所接收的收信场强 $P_{r,R}$ 可分别表示为:

$$P_{r,T} = 10 \lg(\rho_L P_{Tx} G_T G_R L(d)) + 30 \quad (1)$$

$$P_{r,R} = 10 \lg(k \mu_T \rho_L P_{Tx} |G_T G_R L(d)|^2) + 30 \quad (2)$$

式中: k 为调制效率; μ_T 为功率传输效率; ρ_L 为极化损耗因子; P_{Tx} 为阅读器的发射功率; G_T 和 G_R 分别表示标签天线和阅读器天线的增益; $L(d)$ 为路径损耗因子,具体为:

$$L(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi\eta d} \right)^2 \quad (3)$$

式中: λ 为信号波长; η 为路径损耗指数; d 为标签与天线的直径距离。

由式(1)和式(2)可知,天线增益是影响收信场强的重要因素,高精度的天线增益估计是构建精准场强

轮廓的基础。

图 3 为天线辐射场景。

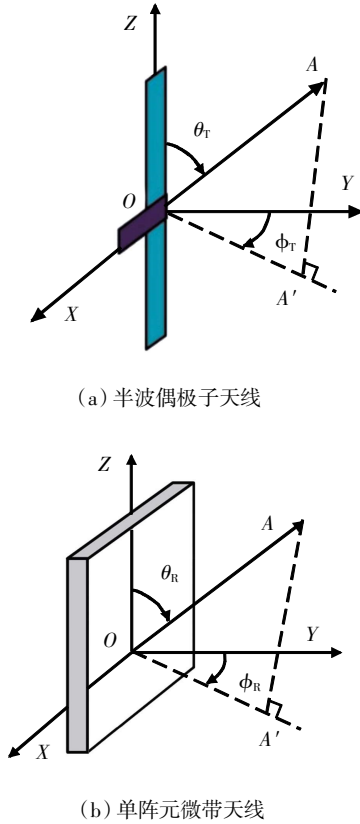


图 3 天线辐射场景
Fig.3 Scene of antenna radiation

选用半波偶极子天线^[14-15]作为标签天线并建立如图 3(a)所示的辐射场景图,选用单阵元微带天线作为阅读器天线并建立如图 3(b)所示的辐射场景图。图中标签天线的长边位于 Z 轴,标签天线的短边位于 X 轴; \vec{OA} 为辐射方向, θ_T 和 ϕ_T 为一对方向性参数; θ_T 为从 \vec{OZ} 到 \vec{OA} 的倾斜角; ϕ_T 为从 \vec{OY} 到 \vec{OA} 在 XOY 面的投影之间的旋转角。根据 Edward Greene 博士所提理论^[6],标签天线的增益 G_T 和阅读器天线的增益 G_R 可分别表示为:

$$G_T(\theta_T, \phi_T) = 1.641[\cos^2(0.5\pi\cos(\theta_T))]\sin^{-2}(\theta_T) \quad (4)$$

$$G_R(\theta_R, \phi_R) = 3.136(UN)^2 \quad (5)$$

$$U = \tan(\theta_R) \sin\left(\frac{\pi}{2}\cos(\theta_R)\right) \quad (6)$$

$$N = \cos\left(\frac{\pi}{2}\sin(\theta_R)\sin(\phi_R)\right) \quad (7)$$

式中: θ_R 与 θ_T 、 ϕ_R 与 ϕ_T 具有相同的定义。

基于此,将式(4)和式(5)带入式(2),即可获得估计阅读器与标签在不同位置下的收信场强值,实现收信轮廓修正和定位精度预估。

2 基于相控阵天线的相对定位方法

2.1 基于相控阵天线的增益估计

为了降低系统对环境 and 场地的要求,本文采用相控阵天线^[17-20]作为阅读器天线建立信道模型,相控阵天线的辐射场景如图 4 所示。

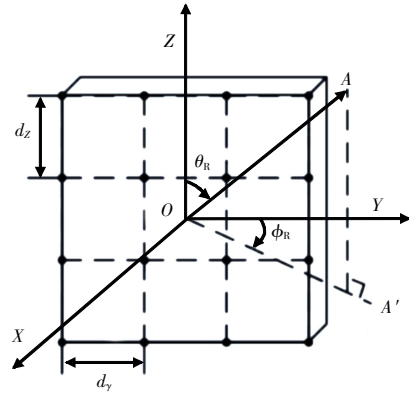


图 4 相控阵列天线辐射场景

Fig.4 Radiation scene of phased array antenna

在不失一般性的前提下,本文选取典型 2×2 结构作为研究对象,利用天线理论和定积分运算原理构建相控阵天线增益模型,推导相控阵天线增益表达式,其推导过程如步骤 1 到步骤 3。

步骤 1:根据电磁场理论建立如下增益表达式模型:

$$G_R(\theta_R, \phi_R) = eD(\theta_R, \phi_R) \quad (8)$$

$$D(\theta_R, \phi_R) = \frac{4\pi|S(\theta_R, \phi_R)|^2}{\int_0^\pi \int_0^\pi |S(\theta_R, \phi_R)|^2 \sin \theta_R d\theta_R d\phi_R} \quad (9)$$

$$S(\theta_R, \phi_R) = \sum_{m=0}^{M-1} I_m e^{j(k_y \sin \theta_R \cos \phi_R + m\beta)} \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j(k_z \cos \theta_R + n\gamma)} \quad (10)$$

式中: e 为效率因子; $D(\theta_R, \phi_R)$ 为方向性系数; $S(\theta_R, \phi_R)$ 为阵因子; I_m 和 I_n 分别为沿 Y 轴和 Z 轴的激励幅度; m 和 n 为阵元索引; d_y 和 d_z 为相邻阵元间的距离差; β 和 γ 分别为沿 Y 轴和 Z 轴激励相位差。

步骤 2:根据 2×2 阵列结构确定天线具体参数。

设 $e = 1, I_m = I_n = 1, k = 2\pi/\lambda, d_z = d_y = 0.5\lambda$, 阵元坐标分别设为 $(0, 0.25\lambda, 0.25\lambda), (0, -0.25\lambda, 0.25\lambda), (0, 0.25\lambda, -0.25\lambda), (0, -0.25\lambda, -0.25\lambda)$, 因此 2×2 相控阵的阵因子 $S(\theta_R, \phi_R)$ 可以表示为:

$$S(\theta_R, \phi_R) = 4\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos \theta_R + \frac{\gamma}{2}\right) \times \cos\left(\frac{\pi}{2}\sin \theta_R \cos \phi_R + \frac{\beta}{2}\right) \quad (11)$$

将式(11)重新带入式(9)和式(8)中,阅读器天线的增益表达式可以表示为:

$$G(\theta_R, \phi_R) = \frac{A}{\int_0^\pi \int_0^\pi B \sin \theta_R d\theta_R d\phi_R} \quad (12)$$

式中 A 和 B 的表达式分别为:

$$A = 4\pi \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \sin \theta_R \cos \phi_R + \frac{\beta}{2} \right) \times \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta_R + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (13)$$

$$B = \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \sin \theta_R \cos \phi_R + \frac{\beta}{2} \right) \times \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta_R + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (14)$$

步骤 3: 将式(12)中的被积函数利用数学工具(例如 Maple v9.1)展开并进行近似计算, 最终得到 2×2 结构相控阵阅读器天线的增益表达式为:

$$G_R(\theta_R, \phi_R, \beta, \gamma) = \frac{C}{D} \quad (15)$$

式中: C 和 D 的表达式分别为:

$$C = 4\pi \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cos \phi_R + \frac{\gamma}{2} \right) \times \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \sin \theta_R \cos \phi_R + \frac{\beta}{2} \right) \quad (16)$$

$$D = \cos^2 \frac{\gamma}{2} \left(1.230 \cos^2 \frac{\beta}{2} + 1.910 \sin^2 \frac{\beta}{2} \right) + \sin^2 \frac{\gamma}{2} \left(1.910 \cos^2 \frac{\beta}{2} + 1.230 \sin^2 \frac{\beta}{2} \right) \quad (17)$$

由式(15)一式(17)可知, 相控阵天线的增益表达式除与方向性参数 θ_R 和 ϕ_R 有关外, 还与相控阵天线的激励相位差 β 和 γ 有关, 因此相对定位系统可通过调节激励状态实现改变天线辐射方向的目的, 有效降低系统对可移动设备的需求。

2.2 基于轮廓陡峭程度的位置估计方法

为改善传统方法鲁棒性差的问题, 本文提出了一种改进的相对定位方法, 该方法通过考虑整个轮廓的变化趋势以提高定位精度。

首先, 本文基于相控阵天线所构建的信道模型, 建立如图 1 所示的相对定位系统场景。在该场景中, 标签沿 Y 轴排列, 相控阵天线放置在标签分布中心且正对标签放置, 系统通过调节激励相位差 β 和 γ , 使阵列天线的主瓣方向由 Y 轴正半轴 0° 到 Y 轴负半轴 180° 进行旋转, 图 5 为主瓣旋转到 120° 时的阵列天线增益方向。在旋转过程中, 阵列天线的主瓣依次扫过标签 7 到标签 1, 从而获得如图 6 所示的各标签的收信轮廓。

根据阵列天线理论可知, 随着激励的改变, 天线方向图也将不断变化, 从而导致不同标签所获得的收

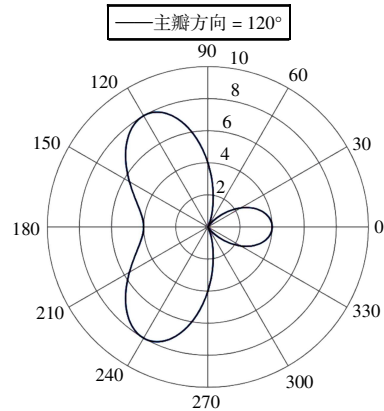


图 5 增益方向

Fig.5 Gain pattern

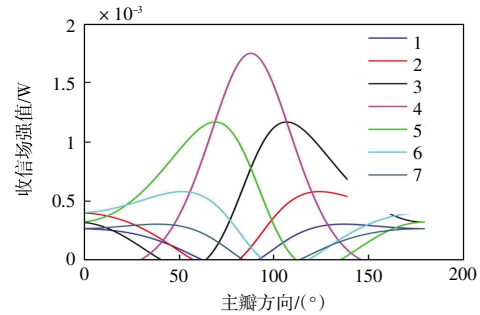


图 6 标签收信场强轮廓

Fig.6 Received signal strength indication profile of each tag

信轮廓的差异较大。具体来说, 调节激励使主瓣方向靠近 90° 附近时, 其天线方向图的增益变化较大, 而在距离 90° 较远时, 天线方向图的增益变化较小。以图 6 为例, 主瓣方向在 90° 附近时, 各标签的收信轮廓的陡峭程度均明显增大, 而在距离 90° 较远时, 各标签的收信轮廓的陡峭程度明显减小。当标签靠近阵列天线时, 其轮廓最高点易出现在主瓣为 90° 附近, 进而导致该标签收信轮廓最高点的幅值变化较大, 此时基于时间戳的判别方法具有较好的定位精度。然而, 当标签距离阵列天线较远时, 其轮廓最高点易出现在主瓣为 0° 或 180° 附近, 进而导致该标签收信轮廓最高点的幅值变化较小, 此时系统更易于将最高点的边缘点误判为最高点, 进而导致定位偏差。

基于以上现象, 本文利用整个轮廓的变化趋势作为定位依据, 改善以单点数据进行相对定位所导致排序偏差的问题。具体步骤为:

步骤 1: 由于靠近阵列天线的标签轮廓在最高点的选取过程中不易误判, 因此, 本文首先根据收信轮廓最高点的的时间戳信息将标签分为 2 组。其中 1 组位于阵列天线的左侧, 另 1 组位于阵列天线的右侧。

步骤 2: 在每组标签中, 分别根据公式(18)计算每个标签的轮廓陡峭程度, 并以此作为相对定位的判别

依据。

$$K = \frac{\sum_{l=1}^L |P_{r,T}(l+1) - P_{r,T}(l)|}{L-1} \quad (18)$$

式中: K 为标签轮廓陡峭程度; L 为收信轮廓的取样点数。

步骤 3: 对于阵列天线的左侧标签, 对值进行升序排列, 以获取左侧标签的位置信息。对于阵列天线的右侧标签, 对值进行降序排列, 以获取右侧标签的位置信息。最后, 将两侧标签位置信息进行组合, 以获取全部标签的位置信息。

3 仿真分析

3.1 参数设定

本文根据图 1 所示的相对定位场景搭建仿真模型, 进行算法性能分析。在该场景中, 标签沿 Y 轴依次放置, 阅读器天线置于标签正对放置。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

| 参数 | 变量 | 属性值 |
|-----------|-------------------|-------------|
| 相控阵天线坐标/m | (x_R, y_R, z_R) | (1, 1.8, 0) |
| 初始标签间隔/m | D_{in} | 0.3 |
| 初始标签数量 | N | 11 |
| 波长/m | λ | 0.33 |
| 发射功率/dBm | P_{Tx} | 30 |
| 路径损耗指数 | η | 1 |
| 极化损耗因子 | ρ_L | 0.5 |
| 功率传输效率 | μ_r | 1 |
| 调制效率 | k | 0.5 |

3.2 性能分析

3.2.1 不同噪声下的相对定位性能评估

首先分析基于时间戳和基于轮廓陡峭程度 2 种相对定位算法在不同噪声条件下的性能。式(19)为相对定位的评估标准:

$$C = N_T / N_{Total} \quad (19)$$

式中: C 为排序正确率; N_T 为排序正确的标签数; N_{Total} 为总标签数。同时, 为获得统计性结果, 本文进行 200 次蒙特卡洛重复实验并将结果取均值, 最终结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着噪声的增大, 基于时间戳和基于轮廓陡峭程度两种相对定位算法的正确率均有所下降。但总体来说, 相比于基于时间戳的相对定位算

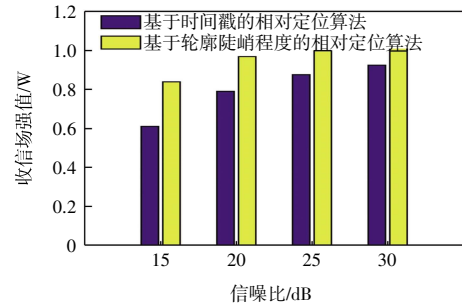


图 7 不同噪声下的算法比较

Fig.7 Comparison of algorithms under different noises cases

法, 本文所提方法在信噪比为 30 dB 时性能提高了 7.8%, 在信噪比为 25 dB 时性能提高了 13.33%, 在信噪比为 20 dB 时性能提高了 21.6%, 在信噪比为 15 dB 时性能提高了 35.42%。验证了 2.2 小节所提方法的正确性。

3.2.2 不同标签间隔下的相对定位性能评估

为了评估所提方法的普适性, 本文在同一噪声 (信噪比为 30 dB) 的不同标签间隔下进行了综合仿真。每个算法均进行 200 次蒙特卡洛试验以获得统计性结果, 图 8 给出了不同标签间隔下的性能对比。

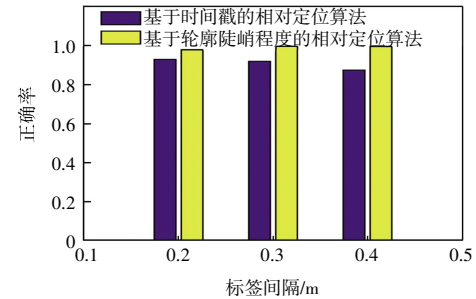


图 8 不同标签间隔下的算法比较

Fig.8 Comparison of algorithms under different tag intervals

由图 8 可知, 随着标签间隔的增大, 基于时间戳的相对定位方法的鲁棒性有所下降。其原因是在标签分布分散时, 标签收信轮廓最高点幅值变化较平缓, 此时系统易将最高点的边缘点误判为最高点, 进而导致定位偏差。而本文所提方法以整个轮廓的变化趋势作为定位依据, 可以改善基于时间戳相对定位方法的定位精度, 体现了性能优势。

3.2.3 不同信噪比下的相对定位性能评估

选取标签间隔为 0.3 m 作为基础条件, 在信噪比分别为 15 dB 和 30 dB 两种情况下, 分析 2 种算法的正确率累计分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 曲线, 如图 9 所示。图 9 中, 选取累计分布 0.5 作为评判依据, 在信噪比为 15 dB 的情况下, 2 种方法的正确率分别为 0.636 4 与 1。在信噪比为 30 dB 的情况下,

2种方法的正确率分别为0.7273和1。上述结果证实了所提算法在多种噪声条件下均具备良好的定位精度。

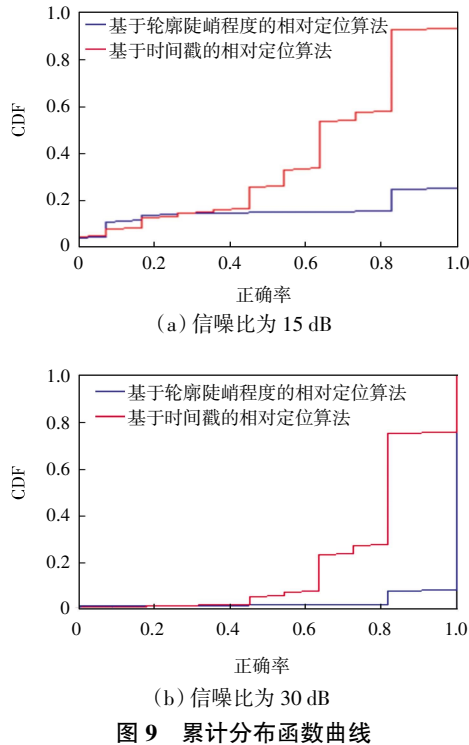


Fig.9 Curves of cumulative distribution function

4 结论

本文针对已有相对定位系统所存在的问题,提出了一种基于相控阵天线的相对定位系统。

(1) 利用相控阵的可调辐射模式,代替传统单阵元天线的固定辐射模式,规避了传统算法中阅读器天线的移动,降低了系统对环境和场地的需求。

(2) 提出了一种基于轮廓陡峭程度的相对定位方法,利用整个轮廓的波动情况有效解决传统方法由单一数据点作为定位依据所导致的排序错误问题。实验表明,在信噪比为20~30 dB时,定位准确率提高了7.7%~21.6%,证实了所提系统的性能。

需指出,本文研究仅考虑在一维空间下对目标进行定位。后续研究将力争在二维和三维空间下改善已有相对定位算法的定位精度。

参考文献:

[1] THOMAS S J. RFID for everyone: An easily-accessible, experimental UHF RFID platform[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2020, 4(1): 46-54.

[2] WANG X Y, ZHANG J, YU Z T, et al. On remote temperature sensing using commercial UHF RFID tags[J]. IEEE Inter-

net of Things Journal, 2019, 6(6): 10715-10727.

[3] HE D B, ZEADALLY S. An analysis of RFID authentication schemes for Internet of Things in healthcare environment using elliptic curve cryptography[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 2(1): 72-83.

[4] ZHANG G F, TAO S, XIAO W A, et al. A fast universal RFID tag anti-collision algorithm for the Internet of Things[J]. IEEE Access, 2019, 7: 92365-92377.

[5] 张超逸. 基于人工智能和近场天线的 RFID 标签定位方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

ZHANG C Y. Research on RFID tag positioning method based on artificial intelligence and near-field antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020(in Chinese).

[6] 路祥.无线定位技术在室内移动平台上的应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.

LU X. Research on wireless localization to mobile platform in GPS denied environments[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020(in Chinese).

[7] 梁胜涛,陈良坤,舒奇奇,等.基于无线通信与RFID定位的智能仓储系统的设计[J].自动化技术与应用,2020,39(1): 169-172.

LIANG S T, CHEN L K, SHU Q Q, et al. Design of intelligent storage system based on wireless communication and RFID positioning[J]. Techniques of Automation and Applications, 2020,39(1): 169-172(in Chinese).

[8] SUNDARESAN S, DOSS R, ZHOU W L. Zero knowledge grouping proof protocol for RFID EPC C1G2 tags [J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(10): 2994-3008.

[9] YANG C N, HU L J, LAI J B. Query tree algorithm for RFID tag with binary-coded decimal EPC [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1616-1619.

[10] WANG J, KATABI D. Dude, where's my card?: RFID positioning that works with multipath and non-line of sight[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM. Hong Kong, China: ACM, 2013: 51-62.

[11] SHANGGUAN L F, LI Z J, YANG Z, et al. OTrack: Towards order tracking for tags in mobile RFID systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(8): 2114-2125.

[12] SHANGGUAN L F, YANG Z, LIU A X, et al. STPP: Spatial-temporal phase profiling-based method for relative RFID tag localization[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 596-609.

[13] SHI W G, DU J X, CAO X W, et al. IKULDAS: An improved kNN-based UHF RFID indoor localization algorithm for directional radiation scenario[J]. Sensors, 2019, 19(4): 968.

[14] ZHOU Z, WEI Z H, TANG Z Y, et al. Design and analysis of a wideband multiple-microstrip dipole antenna with high isola-

- tion[C]//IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters. [s.l.]: IEEE, 2019, 722-726.
- [15] HE K, GONG S X, GAO F. A wideband dual-band magneto-electric dipole antenna with improved feeding structure[J]. IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, [s.l.]: IEEE, 2014: 1729-1732.
- [16] 郭阳. 无线可充电传感器网络中的定位算法研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
GUO Y. Research on location algorithm in wireless rechargeable sensor network[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018(in Chi-nese).
- [17] OULD-ELHASSEN M, MABROUK M, GHAZEL A, et al. Improved coverage of phased array antennas used for RFID applications[C]//2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham, MA, USA: IEEE, 2013: 553-558.
- [18] RAI E, NISHIMOTO S, KATADA T, et al. Historical overview of phased array antennas for defense application in Japan[C]// Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston, MA, USA: IEEE, 2002: 217-221.
- [19] GAMPALA G, REDDY C J. Advanced computational tools for phased array antenna applizations[C]//2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology(PAST). Waltham, MA, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [20] BEOOKNER E. Phased arrays for the new millennium[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston, MA, USA: IEEE, 2003: 617.

本文引文格式:

- 史伟光, 刘鹏辉. 一种基于相控阵列天线的超高频射频识别相对定位方法[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(5): 82-88.
- SHI W G, LIU P H. A relative positioning method of UHF RFID based on phased array antenna[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(5): 82-88(in Chinese).

(上接第 81 页)

- [15] ACHARYA A, DAS S, PAN I, et al. Extending the concept of analog Butterworth filter for fractional order systems[J]. Signal Processing, 2014, 94: 409-420.
- [16] 胡敏, 江成璠, 王素霞, 等. 健康人不同睡眠时相心率变异性的差异[J]. 中国全科医学, 2015(2): 205-207.
HU M, JIANG C F, WANG S X, et al. Differences of heart rate variability in different sleep phases in healthy people[J]. Chinese General Practice Medicine, 2015(2): 205-207(in Chinese).
- [17] COSMI B, PALARETI G, MOIA M, et al. Accuracy of a portable prothrombin time monitor (Coagucheck) in patients on chronic oral anticoagulant therapy: A prospective multicenter study[J]. Thrombosis Research, 2000, 100(4): 279-286.
- [18] 赵秀秀, 徐磊. 光电容积脉搏波在监测心血管系统功能中的应用进展[J]. 临床麻醉学杂志, 2020, 36(1): 89-92.
ZHANG X X, XU L. Progress in application of photo conductive pulse wave in monitoring cardiovascular system function[J]. Journal of Clinical Anesthesiology, 2020, 36(1): 89-92(in Chinese).
- [19] KURIHARA Y, WATANABE K. Sleep-stage decision algorithm by using heartbeat and body-movement signals[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part A: Systems and Humans, 2012, 42(6): 1450-1459.
- [20] GIAVARINA D. Understanding bland-altman analysis[J]. Modern Preventive Medicine, 2007, 34(17): 3263-3266.

本文引文格式:

- 郭翠娟, 习玮, 徐伟. 基于无束缚生理信号检测的睡眠监测系统的设计[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(5): 75-81, 88.
- GUO C J, XI W, XU W. Design of sleep monitoring system based on unconstrained detection of physiological signals[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(5): 75-81, 88(in Chinese).