

# 基于 ARIMA 模型的 RFID 室内相对位置定位算法



徐鹤<sup>1,2</sup> 吴满星<sup>1</sup> 李鹏<sup>1,2</sup>

1 南京邮电大学计算机学院 南京 210023

2 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室 南京 210003

(xuhe@njupt.edu.cn)

**摘要** 针对室内场景中存在获取目标对象相对位置的需求,RFID(Radio Frequency Identification)因其轻便、成本低的特点成为最经济的解决方案之一。通过研究基于相位和时间序列预测模型 ARIMA 来解决目标相对位置定位的问题,提出了基于 UHF(Ultra-High Frequency) RFID 无源标签的室内相对位置定位算法。使用 RFID 无源标签、阅读器和移动 RFID 天线来获取相位的变化,选取天线移动过程中一个相位翻转周期的时间序列值,运用 ARIMA 模型对该时间序列后续值进行预测,并选择达到某些值的时间戳,给预测时间戳和相位变化过程中关键相位点的时间戳分配权重,得到最终的时间戳并进行相对位置排序。实验结果表明,提出的 RFID 室内相对位置定位算法在图书馆环境下对图书顺序预测的识别准确率可以达到 96.48%,与经典的 STPP 算法和 HMRL 算法相比具有更好的定位性能。

**关键词:** RFID; ARIMA 模型; 相位; 相对位置; 室内定位

**中图法分类号** TP301.6

## RFID Indoor Relative Position Positioning Algorithm Based on ARIMA Model

XU He<sup>1,2</sup>, WU Man-xing<sup>1</sup> and LI Peng<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 210003, China

**Abstract** For indoor positioning scenarios, there is often a need to obtain the order in which certain items are placed. RFID (Radio Frequency Identification) is one of the solutions that can be selected because of its light weight and low cost. To solve the problem of relative positioning of items by studying the ARIMA based on the phase and time series prediction model, this paper proposes an indoor relative position positioning algorithm based on UHF (Ultra-High Frequency) RFID tags. By using passive RFID tags and readers, moving the RFID antenna to obtain the phase value, the ARIMA model is used to predict the sequence of the phase change during the movement of the antenna, the time series is predicted to reach a certain time stamp, and then the prediction time is given. The weights are assigned to the time stamps of some special phase points in the process of stamping and phase change, and the final time stamps are obtained to sort relative positions. Experiments show that this RFID indoor relative position positioning system can achieve recognition accuracy rate by 96.67% for book sequence detection in a library environment. Compared with the classical STPP algorithm and HMRL algorithm, its performance is greatly improved.

**Keywords** RFID, ARIMA Model, Phase, Relative position, Indoor positioning

## 1 引言

基于位置的服务<sup>[1]</sup> (Location Based Services, LBS) 与人们的生活息息相关, 已经成为日常使用最广泛的一类服务。使用位置服务的场景大体上可以分为室外定位场景<sup>[2]</sup> 和室内定位场景<sup>[3]</sup>。在室外定位场景中, 已经有很多成熟的技术, 例

如美国的全球定位系统<sup>[4]</sup> (Global Positioning System, GPS)、中国的北斗系统<sup>[5]</sup>、俄罗斯的 GLONASS 系统<sup>[6]</sup>、欧盟的伽利略系统<sup>[7]</sup> 等。

然而, 由于存在物体遮挡等原因, 以上定位方法应用于室内环境时很难获得准确的定位。当前室内环境下的定位技术成为了新的研究热点, 其中比较常见的有超宽带技术<sup>[8]</sup>、蓝牙

到稿日期: 2020-04-08 返修日期: 2020-07-08 本文已加入开放科学计划(OSID), 请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2103003, 2018YFB1003201); 国家自然科学基金(61672296, 61602261, 61872196, 61872194, 61902196); 江苏省科技支撑计划项目(BE2017166, BE2019740); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(18KJA520008); 江苏省六大人才高峰高层次人才项目(RJFW-111)

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2019YFB2103003, 2018YFB1003201), National Natural Science Foundation of China (61672296, 61602261, 61872196, 61872194, 61902196), Scientific and Technological Support Project of Jiangsu Province (BE2017166, BE2019740), Major Natural Science Research Projects in Colleges and Universities of Jiangsu Province (18KJA520008), Six Talent Peaks Project of Jiangsu Province (RJFW-111).

通信作者: 李鹏(lipeng@njupt.edu.cn)

技术<sup>[9]</sup>、红外线技术<sup>[10]</sup>、A-GPS 技术<sup>[11]</sup>、超声波技术<sup>[12]</sup>、Zig-Bee 技术<sup>[13]</sup>以及视觉技术<sup>[14]</sup>等。这些技术因定位系统成本高、定位环境局限性大、融合其他系统比较困难等而没有得到大规模应用。无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术具有系统部署成本低、技术搭配多样、适用场景众多等特点,备受研究人员的关注。

基于 RFID 技术的室内定位按照场景可以分为相对位置定位和绝对位置定位。绝对位置定位主要解决待定位目标对象的精确定位问题,但是在很多情况下,只需要知道某个物品在众多物品中的位置顺序即可,这种场景就是典型的室内相对位置定位应用场景。目前已有一些研究关注绝对位置定位方法,并提出很多定位方案<sup>[15-18]</sup>来进行室内绝对位置定位。这些方案的定位精度大都在 20cm 以上,但是 20cm 以上的定位精度很难满足如图书这种顺序侦测的室内相对位置定位需求。目前,虽然一些定位方案<sup>[18]</sup>的定位精度已经达到了毫米级别,但是其需要众多阅读器协同工作,并且使用前需要进行大量的复杂校准工作。

本文针对室内相对定位应用的需求提出了一种基于相位和 ARIMA 模型的室内相对位置定位算法。本文的创新点在于提出的 RFID 定位算法不需要引入其他专用的硬件,只需要使用普通的商用 RFID 阅读器、天线和无源标签;针对定位过程中相位翻转的问题,提出了只选取一个相位翻转周期内的数据作为已知数据的方法;针对定位过程中缺少参照物的问题,提出了时间加权方案,通过选择扫描过程中的关键相位点以及 ARIMA 模型预测的相位时间戳来分配权重,得到一个总的时间戳来衡量待定位目标顺序。实验结果与分析表明,本文算法的顺序侦测准确率较经典方案有很大的提高。

## 2 相关工作

Shang 等提出了一种室内相对位置定位算法——基于时空相位分析(Spatial-Temporal Phase Profiling-Based, STPP)算法<sup>[19]</sup>。该算法的基本思想是通过移动一个 RFID 阅读器缓慢地从一列标签水平扫过,获取一次扫描过程的相位图进行分析来获取相对位置。其定位场景如图 1 所示。

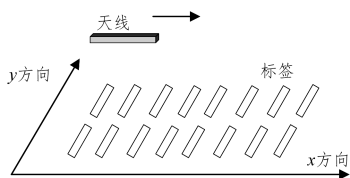


图 1 STPP 定位场景示意图

Fig. 1 STPP positioning scenario diagram

如图 1 所示,天线在扫描过程中获取每一个标签在移动过程中的相位。随着阅读器沿着一个方向移动,所有标签离天线的距离都会先减小后增大,标签信号强度和相位也会因为天线的移动而发生变化。在获取的相位图的基础上,他们提出了一种动态时间扭曲(Dynamic Time Waring, DTW)的方法,该方法可以弥补天线移动过程中由于速度不均匀导致的相位值缺失或者异常。最终 STPP 算法使用时间动态规整技术修正后的 V 字形区间上的值来对标签的位置进行计算。文献<sup>[19]</sup>分别从  $x$  和  $y$  两个方向上提出了相对位置定位解决方案。

文献<sup>[20]</sup>提出了一种基于人体移动的 RFID 室内相对位置定位技术 HMRL(Human Movement based Relative Localization)<sup>[20]</sup>,该算法使用无源 RFID 标签来进行室内相对位置定位,其优点是不需要标签或者天线移动来获取相位数据。该算法考虑了人员在天线和标签之间移动时会对接收到的信号强度值产生影响,通过获取这个时间段内的信号强度值 RSSI 的变化时间序列来分析标签的相对位置。

HMRL 定位算法针对的定位场景是货架。一般情况下货架有很多层,每一层中的物品间隔大致相同,每一列中标签大致彼此垂直,定位场景如图 2 所示。

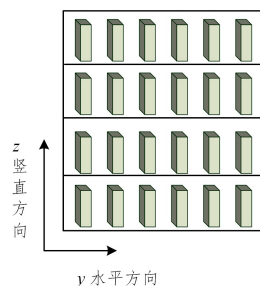


图 2 HMRL 算法物品摆放示意

Fig. 2 Diagram of HMRL algorithm's item placement

文献<sup>[20]</sup>创新性地提出了用两个天线来读取开普勒频移、相位、接收信号强度(RSSI)等数据。当有人在天线和标签之间移动时,可以同时水平和垂直方向进行顺序识别。在对  $y$  水平方向进行定位时,其提出了一种计算受影响区域的重叠面积的方法。研究人员发现,处于同一列的标签会在人的移动时几乎同时受到影响,但是同一行的标签在人移动时受到的影响是有先后顺序的,而且受影响的时间跨度也会不一样。在人移动过程中,距离较近的同五行标签的信号强度 RSSI 值受影响的范围可能会发生重叠。该方法通过比较重叠区域面积或者重叠区域形状是否相似来判断某几个标签是否处于不同的列中,其相似性定义如式(1)所示:

$$\text{相似性} = \frac{\text{重叠面积}}{\text{受影响区域的面积}} \quad (1)$$

通过式(1)计算每个标签相对于其他标签的相似性,并用所得到的相似性绘制一张有向连通图,连通图中可以互通的两条临边的标签处在同一列,其他情况下处于不同列。

## 3 基于相位和 ARIMA 的室内定位算法

本文针对室内定位场景中目标对象需要进行相对位置排序的需求,通过研究天线移动过程中相位的变化情况,结合时间序列预测中的差分自回归移动平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA),提出了一种面向天线移动的基于相位和 ARIMA 模型的室内相对位置定位算法。

ARIMA 是一种基于时间序列预测的模型。该模型主要的思想是将时间变化的数据看作预测对象的一组随机序列,然后通过这组数据获得一个时间序列的数学模型,用这个模型的过去和现在的数据值来估计将来的值。

本文使用 ARIMA 算法进行建模的流程图如图 3 所示,主要有相位数据平稳性分析、模型选取、模型参数确定等步骤。

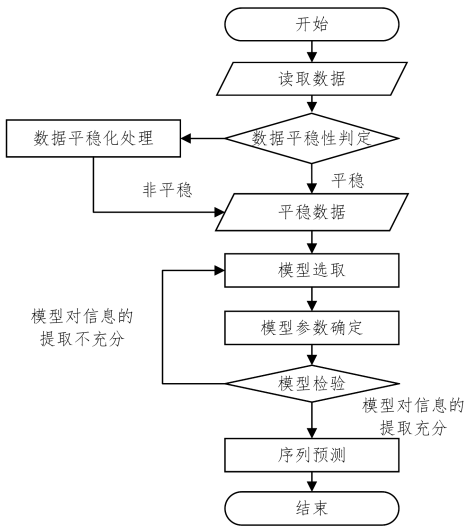


图3 ARIMA 算法的建模流程

Fig. 3 Flow chart of ARIMA algorithm modeling

3.1 时间序列平稳性分析

数据的平稳性是一种描述数据的波动是否在一定范围内的统计学概念。假设一个时间序列的均值和方差分别为  $E(X_t) = \epsilon, Var(X_t) = \sigma^2$ , 对于任意时间  $t$ , 其协方差公式如式(2)所示:

$$Cov(X_t, X_{t+k}) = \gamma_k \quad (2)$$

协方差是一个只与时间间隔  $k$  有关但与时间  $t$  无关的常数。如果该时间序列都满足以上要求, 那么这个时间序列就是平稳的时间序列。但是, 如果实测数据的方差和均值都波动很大, 就需要采用一些手段来使这些数据变得平稳。通常使用差分来消除一些数据波动, 使其趋于平稳性, 例如一阶差分和二阶差分可分别用式(3)和式(4)表示:

$$\Delta X_t = X_t - X_{t-1} \quad (3)$$

$$\Delta^2 X_t = \Delta X_t - \Delta X_{t-1} \quad (4)$$

其中, 一阶差分算子用  $\Delta$  来表示。对于非纯随机的非平稳数据, 用一阶差分或者二阶差分就可以使数据变得平稳。但并不是差分的阶数越高越好, 如果差分的阶数过高, 就势必会导致样本量减少, 将出现差分后的数据还原为原数据的困难加大等一系列问题。

3.2 ARIMA 算法的模型组合

ARIMA 模型主要由自回归模型和移动平均模型组合而成。

自回归模型的主要思想是将多个随机变量的前期值线性组合来表征将来某些时刻这个随机变量的变化过程。此模型要求观测数据是平稳的数据。假设给定时间  $X_t$ , 则  $p$  阶差分方程为:

$$X_t = u_t + \sum_{i=1}^q \varphi_i X_{t-i}, t \in N \quad (5)$$

其中  $X_t$  为当前预测值, 假设预测值只与该序列的过往数据值有关, 与其他因素无关;  $u_t$  为服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的正态分布, 且在不同  $t$  时刻的值互不相关的白噪声过程;  $\varphi_1, \dots, \varphi_p$  是该方程的自回归系数。方程(5)表示一个  $p$  阶自回归模型, 用  $AR(p)$  表示。

移动平均模型实质是一种平滑预测技术, 其思想是通过最近的一个窗口中的实测数据来预测未来一段时间的数据值。假设给定时间  $X_t$ , 移动平均模型可以用以下  $q$  阶差分方程(6)表示:

$$X_t = u_t + \sum_{i=1}^q \theta_i u_{t-i}, t \in N \quad (6)$$

其中,  $X_t$  为当前预测值,  $u_t$  为白噪声过程;  $\theta_1, \dots, \theta_q$  是该方程的自回归系数。方程(6)表示一个  $q$  阶移动平均模型, 用  $MA(q)$  表示。

3.3 模型选取

ARIMA 模型在建模时需要根据时间序列的实际特征来选取某一个或者某些模型, 其中主要使用自相关系数和偏自相关系数等, 选取原则如表 1 所列。

表 1 模型选取原则

Table 1 Model selection principles

	自相关系数	偏自相关系数
AR 模型	拖尾	截尾
MA 模型	截尾	拖尾
ARMA 模型	拖尾	拖尾

4 基于相位和 ARIMA 模型的室内相对位置定位算法

本节主要对相位数据平稳性分析、模型识别与定阶、预测结果等几个方面进行详细介绍。

4.1 相位数据平稳性分析

将 RFID 无源标签夹在书中并放置在水平书桌上, 天线距离无源标签的水平距离为 35 cm。这些无源标签、RFID 天线和书籍处在同一高度, 匀速移动 RFID 天线以扫描这些书籍和标签, 来读取这些标签在天线移动过程中的信号强度值和相位值。

使用 ARIMA 模型时间序列进行预测的前提条件是数据具有宽平稳性, 因此在使用 ARIMA 算法进行预测之前需要对数据进行平稳性判定。此处先对采集到的 RFID 相位数据做平稳性分析: 例如水平放置的一个无源标签, 用天线平行于标签方向水平移动后得到的一个相位变化趋势图, 如图 4 所示。

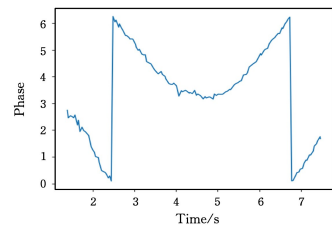


图 4 一个扫描周期内相位变化图

Fig. 4 Phase change diagram in one scanning cycle

从图 4 中可以看出, 相位值虽然在  $0$  到  $2\pi$  的范围内振荡, 但是上下振荡幅度在某些非常短的时间区域中还是较大的。在 ARIMA 算法中一般采用差分处理对数据进行平稳化处理, 如一阶差分、二阶差分等。

图 5 是一阶差分的结果图。

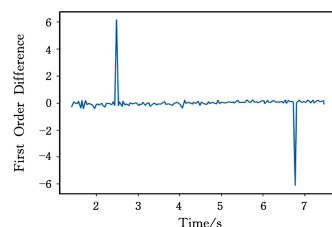


图 5 一个扫描周期内相位一阶差分图

Fig. 5 Scan cycle phase difference diagram in one scanning cycle

可以看出,通过一阶差分后的数据在 0 值附近小幅度的震动,但是由于相位值的翻转问题会造成两个尖峰的异常值,导致在翻转点处数据缺少平稳性。结合相对位置定位的场景和相位的翻转情况以及 ARIMA 算法的适用性,通常有两种解决方案:1)解决相位翻转问题;2)只选取在一个翻转周期内的值作为已知数据,不使用不属于一个翻转周期的数据来得到时间序列预测模型。

本文采用方案 2),即只选取一个翻转周期内的数据作为一个时间序列的往期数据,这种方法的好处是只损失了一小部分数据,避免了采用其他方法解决相位翻转问题导致算法整体复杂度的增加。选取的一个翻转周期的相位序列如图 6 所示。

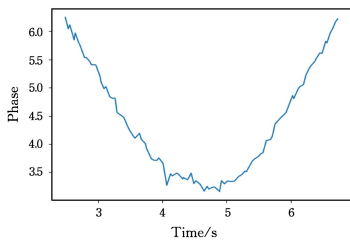


图 6 选取的相位序列特征图

Fig. 6 Feature diagram of selected phase sequence

图 7 给出了一个翻转周期内的相位数据经过一阶差分的结果。在一个翻转周期内的数值的一阶差分在  $-0.3 \sim 0.2$  之间震荡,没有明显的上升和下降的趋势,经过一阶差分的完整翻转周期内的数据具有平稳性。

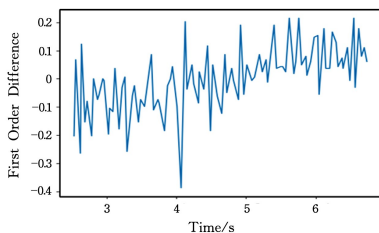


图 7 一个翻转周期内相位一阶差分图

Fig. 7 First-order difference graph with inverted periodic phase

## 4.2 模型识别与定阶

图 8 是相位数据的自相关函数图。可以看出,自相关函数呈现拖尾的情况,自相关函数中 8 所在值第一次落在置信区间中,因此 AR 模型中参数  $p$  的值取 7。

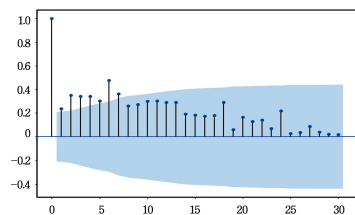


图 8 自相关系数

Fig. 8 Autocorrelation coefficient

图 9 是相位数据的偏自相关函数图。可以看出,偏自相关函数呈现拖尾的情况,从模型阶数为 8 并且函数值为 0 时,偏自相关函数值落在图 9 所示的灰色范围内置信区间中,因此 MA 模型中参数  $q$  的值应该取 7。

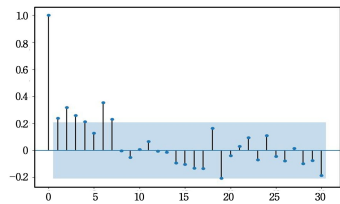


图 9 偏自相关系数

Fig. 9 Partial autocorrelation coefficient

## 4.3 预测结果

本节对标签的相位值用差分自回归移动模型进行预测,这里选择一个翻转周期结束后的 15 个趋势类似的时间点的相位数据值进行预测,预测结果如图 10 所示。

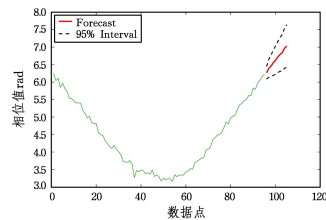


图 10 一个翻转周期的相位值预测值

Fig. 10 Predicted value of phase value of one flip cycle

由于在相位数据采集时,在某个时刻阅读器读到某个标签的数据是有一定概率的,因此获取到的相位值序列的间隔并不均匀,这导致读取到的数据不满足时间序列的基本条件。因此,在预测之前先要进行数据重采样,将相位数据的间隔调整为相同的大小。

## 4.4 关键相位值点的权重选取

一个完整的扫描过程相位值如图 4 所示,扫描周期中会存在很多特殊的点,如两个相位翻转的点、翻转周期内相位的最低点等。关键相位值点权重选取的流程如下:从 ARIMA 模型的预测值中选取一个取到某个值附近的时间戳,并给这些时间戳加上权重获得总的时间戳大小,对总时间戳进行排序得到这些标签的相对位置。下面对该过程进行说明:

假设一个扫描周期得到的  $n$  个标签的时间序列用  $x = [(t_1, p_1), (t_2, p_2), \dots, (t_n, p_n)]$  表示,其中  $(t_i, p_i)$  表示第  $i$  次读到的该标签的时间戳和该时间戳下读到的相位值。由于一个完整的扫描周期必存在两个相位翻转的点,假设这两个相位翻转点对应的的时间分别为  $t_{f1}$  和  $t_{f2}$ ;一个翻转周期内相位最小值的点所对应的的时间为  $t_{min}$ ;使用 ARIMA 模型对一个相位翻转周期后续趋势进行预测,预测值取 7 时的时间戳为  $t_p$ 。则对于某个标签来说,其加权总时间戳可以用式(7)表示:

$$T_j = at_{f1} + bt_{f2} + ct_{min} + dt_p \quad (7)$$

其中,  $a, b, c, d$  分别为各个时间戳的权重,这里  $a = b = 0.3$ ,  $c = d = 0.2$ 。对这一个扫描过程获得的各个标签的加权总时间戳  $T$  进行排序,以总的时间戳  $T$  排序后的序列作为最终的参照来确定检测到的无源标签的相对位置关系。

## 5 实验对比与验证

### 5.1 实验数据读取

本节对本文提出的基于 ARIMA 的室内相对位置定位方法进行实验仿真和分析。实验所用相位数据的采集场景如图 11 所示。用阅读器天线从水平方向匀速扫描摆放好的含有

RFID 标签的书籍,以读取 RFID 标签相位变化的数据。图 12 是 20 本摆放整齐的放置了无源标签的书籍经过一个扫描周期所获得的相位数据。

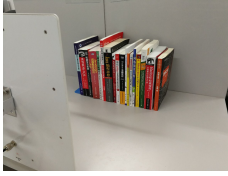


图 11 相位采集场景图

Fig. 11 Phase acquisition scene graph

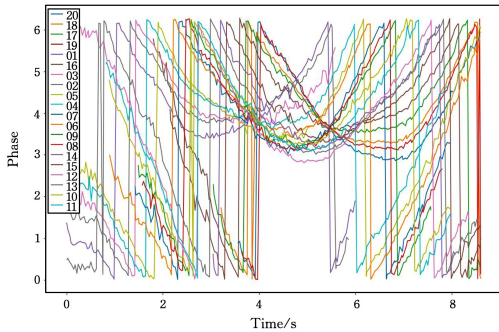


图 12 20 个标签在一个扫描周期内相位的变化图

Fig. 12 Change chart of phase of scan period of 20 tags

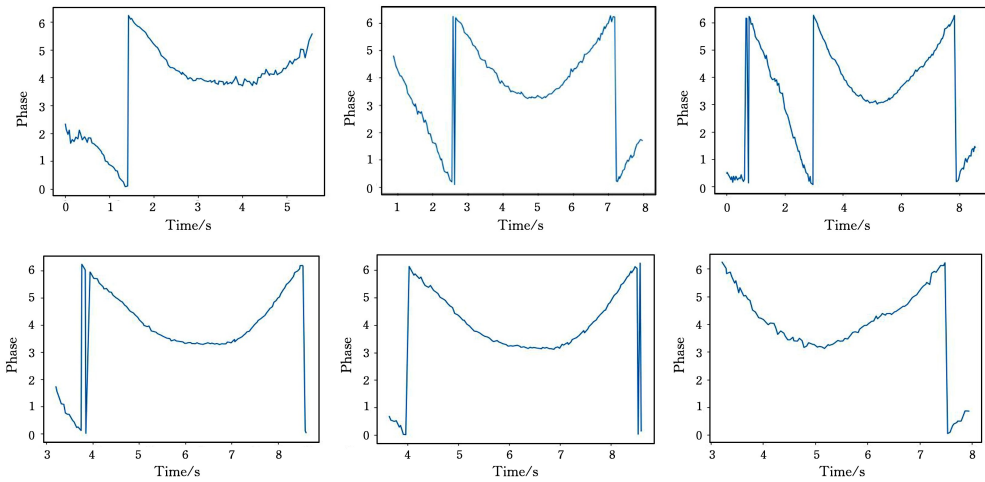


图 13 扫描过程中出现的一些异常情况

Fig. 13 Some anomalies during scanning process

### 5.3 不同天线距离的准确度分析

本节针对不同的距离来判断标签相对位置,实验中设置 35 cm, 36 cm, 37 cm, 38 cm 4 个不同的天线和标签之间的距离来验证本文提出的基于相位和 ARIMA 相对位置定位算法的可行性,也对该算法的性能进行评估。

这里主要讨论通过算法预测出的标签顺序和实际摆放位置之间的顺序准确性。将预测的结果顺序和实际摆放顺序不相符的标签作为判断错误的样例。本文不涉及与原始物品应该的顺序进行比较,只讨论实际摆放顺序和算法预测顺序之间的比较,即只讨论该算法对标签顺序侦测的准确率,这里用侦测正确的标签数除以总的放置的标签数作为侦测的准确率。本文提出的基于相位和 ARIMA 模型的室内相对位置定位算法在不同天线距离下的侦测准确率如表 2 所列。

从图 12 可以看出,在一次完整的扫描过程中,大部分的标签的变化顺序都是相近的,都会先衰减到近似为 0,然后经过一次相位翻转,从 0 点跃变到  $2\pi$ ,随后下降到  $\pi$  再上升到  $2\pi$  附近,发生第二次相位翻转,近似为 0 值。

### 5.2 异常情况处理

在实际的相位数据读取过程中,从一次阅读器天线水平扫描过程中的相位值很难直接得到图 4 所示的标准相位变化曲线,会出现很多异常情况,典型的异常情况如图 13 所示。

这些情况产生的原因有很多,例如天线在扫描的过程中速度不均匀、天线在扫描过程中相对于标签发生了轻微的角度变化、标签接收到信号之后反射导致相邻标签信号之间相互干扰等。

另外,对于翻转点处理和选择,采用如下 3 种方法:1)将某段时间内反复跃变点中的错误数据剔除;2)通过某些措施判定这些跃变点是否是正确的跃变点,如果是则保留,如果不是则进行纠正;3)舍弃某一部分数据,只找到最靠近一个周期的两个跃变点,即找到上跃变和下跃变的点,中间是一个完整的相位周期,不存在其他跃变点。对于只有一个跃变点的情况,这里选取离该跃变点最远处的最大值作为另一个跃变点。这样做的好处是只损失一部分数据,但是可以避免用其他方式对数据进行修正而产生的额外的算法复杂度。

表 2 不同天线距离下实验结果

Table 2 Experimental results under different antenna distances

天线距离/ cm	每组实验 标签数	实验 次数	总标签 顺序数	错误 个数	准确率/%
35	20	20	400	24	94.00
36	20	10	200	6	97.00
37	20	10	200	4	98.00
38	20	13	260	8	96.92

本文提出的基于相位和 ARIMA 模型的相对位置定位算法的平均准确率为 96.48%,表明该算法针对相对位置侦测的场景具有一定的可行性。

图 14 为不同室内相对位置定位算法识别准确率的对比图。在同样的应用场景下,基于时空相位分析<sup>[19]</sup>的室内相对位置定位算法的平均准确率为 84%,基于人体移动<sup>[20]</sup>的室内相对位置定位算法的平均准确率为 91.24%。本文提出的基

于 ARIMA 算法的相对位置定位算法的平均准确率在相同的应用场景下达到了 96.48%,较 STPP 提高了约 12%,较 HMRL 提高了约 5%。

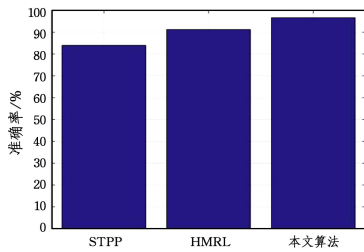


图 14 不同室内相对位置定位算法识别准确率的对比

Fig. 14 Comparison of recognition accuracy of different indoor relative position location algorithms

**结束语** 本文提出了一种利用 RFID 无源标签相位变化特征进行待定位目标的相对位置定位算法。本文的创新点在于该方法不需要特殊的设备支持,采用普通的 RFID 商用阅读器和无源标签就可实现待定位目标对象集合的顺序侦测。仿真实验从不同的天线距离方面验证了本文算法的可行性,与 STPP 和 HMRL 等经典的室内相对位置定位算法相比,本文算法在识别准确率上有了很大的提高。未来的研究工作主要是进一步优化算法,使其能够自适应各种不同环境特征;设计并实现面向各种环境的 RFID 相对位置定位应用系统。

## 参考文献

- [1] MA C, YAN Z, CHEN C W. SSPA-LBS: Scalable and Social-Friendly Privacy-Aware Location-Based Services [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2019, 21(8): 2146-2156.
- [2] ZHANG X H, ZUO X, LI P, et al. Comparison of BDS / GPS Precision Single Point Positioning Convergence Time and Positioning Precision [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 250-256.
- [3] WU F, TAN X B, SHEN J J, et al. RFID Indoor Positioning Algorithm Based on Antenna Coverage Model [J]. Computer Engineering, 2017, 43(3): 120-125.
- [4] VIETS K J. Independent Ground Monitor Coverage of GPS Satellites [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(5): 678-685.
- [5] XIAO Y G, JIANG W P, CHEN H, et al. Algorithm and Realization of Millimeter Accuracy Deformation Monitoring of Beidou Satellite Navigation System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(1): 16-21.
- [6] TEUNISSEN P J G, KHODABANEH A. GLONASS Ambiguity Resolution [J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 101-114.
- [7] KATSIGIANNI G, PEROSANZ F, LOYER S, et al. Galileo Millimeter-level Kinematic Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution [J]. Earth, Planets and Space, 2019, 71(1): 1-6.
- [8] XU Y, SHMALIYY S, LI Y, et al. UWB-Based Indoor Human Localization with Time-Delayed Data Using EFIR Filtering [J]. IEEE Access, 2017, 5: 16676-16683.
- [9] TERAN M, ARANDA J, CARRILLO H, et al. IoT-based System for Indoor Location Using Bluetooth Low Energy [C] // IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, 2017: 1-6.
- [10] JANUSZKIEWICZ L, KAWECKI J, KAWECKI R, et al. Wireless Indoor Positioning System with Inertial Sensors and Infrared Beacons [C] // European Conference on Antennas and Propagation, 2016: 1-3.
- [11] ZHANG C, MING D X, CHEN J Y, et al. Research on A-GPS Assisted Positioning Technology [J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(1): 216-218.
- [12] ZHU G, WANG Q, CHENG Q. Accurate Ultrasonic Positioning System for the Central Detector [C] // Oceans, 2019: 1-4.
- [13] BIANCHI V, CIAMPOLINI P, DE MUNARI I. RSSI-Based Indoor Localization and Identification for ZigBee Wireless Sensor Networks in Smart Homes [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(2): 566-575.
- [14] NASEER T, BURGARD W, STACHNISS C. Robust Visual Localization Across Seasons [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(2): 289-302.
- [15] NI L M, LIU Y, LAU Y C, et al. LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID [J]. Wireless Networks, 2004, 10(6): 701-710.
- [16] ZENG Y, CHEN X, LI R, et al. UHF RFID Indoor Positioning System with Phase Interference Model Based on Double Tag Array [J]. IEEE Access, 2019, 7: 76768-76778.
- [17] ZAFARI F, GKELIAS A, LEUNG K K. A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2568-2599.
- [18] YANG L, CHEN Y, 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, 2014: 237-248.
- [19] SHANG G L, 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.
- [20] WANG G, QIAN C, SHANGGUAN L, et al. HMRL: Relative Localization of RFID Tags with Static Devices [C] // Sensing, Communication, and Networking (SECON), 2017: 1-9.



**XU He**, born in 1985, associate professor, master supervisor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include Internet of Things (IoT) technology and applications.



**LI Peng**, born in 1979, Ph.D., professor, master supervisor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include computer communication networks, cloud computing, and information security.