

基于射频技术的室内三维定位技术研究

周 凯

(山西紫峰科技有限公司, 太原 030027)

摘要: 无线定位技术在实际的应用获得了越来越多的社会关注, 各项科研人员都对室内定位技术的广泛运用产生了强烈的兴趣; RFID有着非常多的优点, 包括了非视距、精度高、费用低以及传输范围广; 从当前的发展来看, RFID二维定位方法正在逐步向完善性与成熟性演变, 然而以三维空间为分析对象的研究进展依旧不能符合当前发展与行业应用条件; 通过3D-LANDMARC定位分析模型和相关技术的分析为基础, 要保持同样的系统设备工作运转情况下, 提升了实际定位过程中优化实现系统定位的性能;

关键词: RFID; 三维室内定位算法; 3D-LANDMARC; 卫星遥感; 地理信息

Research on Indoor 3D Positioning Technology Based on Radio Frequency Technology

ZHOU Kai

(Shanxi Zifeng Technology Co, Taiyuan 030027, China)

Abstract: The practical application of wireless positioning technology has attracted more and more social attention. Various researchers have a strong interest in the wide application of indoor positioning technology. Radio frequency identification (RFID) has many advantages of non line of sight, high precision, low cost and wide transmission range. In the view of current development, two-dimensional positioning method of the RFID is gradually evolving to perfection and maturity. However, the research progress based on three-dimensional space still cannot meet the current development and industrial application. Based on the analysis model for 3D-LANDMARC positioning and related technologies, the performance of optimizing and realizing the system positioning in the actual positioning process is improved under the operation condition of maintaining the same system equipment.

Keywords: RFID; T hree-dimensional indoor positioning algorithm; 3D-LANDMARC; Satellite remote sensing; Geographic information

0 引言

随着现代各项技术的飞速发展, 无线定位技术的研究获得了人们大量的关注。现在针对二维 RFID 定位技术的研究已日趋成熟, 现有的很多 LANDMARC 算法逐渐的被提出改进并且不断更新发展^[1]。伴随着应用范围的不断扩大, 定位问题在三维空间也被逐渐关注。由于把原有的技术直接运用到三维空间, 会因为三维空间的非常复杂应用环境导致定位效果变差, 因此需要设计简单、精度高和产生费用的 RFID 三维定位算法, 这些对于 RFID 定位技术在实际应用中的推广有着非常重要的作用^[2]。在这个基础上, 本课题主要对三维 LANDMARC 算法进行深度的研究, 获得了初步的两种改进算法。使用实验结果的比较结果, 两种改进的算法使定位性能恒定地提高。这对于 RFID 室内定位系统的普遍适应性和不定室内环境中定位技术的运用也有很大的进步和价值。

图 1 可以看到 RFID 系统完成通信的整个过程。首先发射天线和内置接收天线进行连接, 然后它们之间的频率和

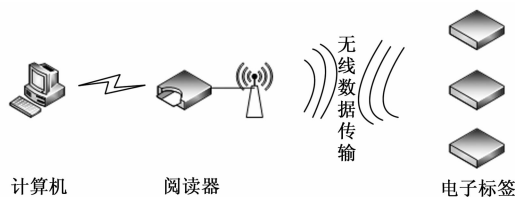


图 1 RFID 系统组成

频率产生的射频信号会进行连接, 也就是有了数据的互通; 然后读取器在经过信号处理模块后可以对接收到的信息进行调制解调, 在里面提取出有效的信息; 有效信息经过系统处理后, 被传送到服务器中, 目的就是为识别标签^[3]。在以上的系统操作结束后, 服务器会以逻辑为标准发出不同的操作命令信号, 从而达到对阅读器不同操作的控制。

Spot ON 定位系统的研发起源于 21 世纪初期, 是 Jeffrey Hightower 等学者首次提出, 他们通过采集数据信号值得强弱对其划分信号类型, 并以此计算出采集的无线信号从标签到阅读器的数值距离, 再通过 RSSI 值减少环境影

收稿日期: 2022-03-15; 修回日期: 2022-03-24。

作者简介: 周 凯(1987-), 男, 山西太原人, 大学本科, 工程师, 主要从事地理信息及测绘方向的研究。

引用格式: 周 凯. 基于射频技术的室内三维定位技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 279-286.

响,最后利用三角估测法得到在坐标系中的位置^[4]。该系统能够利用预设的标签实现阅读器数据量的精简,不仅可以提高位置精度,还能降低成本消耗,这就给 RFID 定位系统在实际中的应用得到了更多范围。

目前国内外 RFID 技术在室内三维空间中的应用探索都还是在摸索的阶段。现场三维定位系统是本世纪初首次被提出的 RFID 三维定位系统。这个系统本身是二维空间应用的,所以在实际应用中有着很多的缺陷。此前地标定位系统在二维平面定位服务中被成功的应用,从而普及了让系统从二维平面过度到三维空间应用的思考和研究^[5]。尽管 Ayubkhan 等人在 2009 年推出过一种三维地标 RC 算法。但是这种算法的中心思想还是二维平面中的,没有设想三维空间中存在的复杂性,这种算法应用的时候会产生很大的误差,因此还需要对定位精度做出提升。

首先 LANDMARC 经典算法的基本原理思路是得到参考标签与目标标签的 RSSI 值,再利用其差值运算,得到 k 个临近标签的位置信息,将这些标签进行数据处理得到加权值,最后结合加权值与标签得到位置信息。在该算法的基础上添加读写器、标签实现精准定位作用。此算法中存在少许的缺点:1) 如果阅读器和参考标签布放过多的话会产生大量的干扰信号从而导致误差增大,若放置太少又会导致收集不到信号导致数据不准确,从而影响定位精度;2) K 值的选择很关键,在不同区域、不同环境下要选择最合适的 K 值,这样才能达到最合适的定位效果;3) 当待定位标签被放在边缘上或者角落里的時候,实验得出的结果和真实的结果有很大的误差。本论文后面的研究中提出了对 LANDMARC 算法的一起改进方法,对此算法进行了优化。其中本文采用的是坐标修复值的改进算法,改善目标位置以此来减小误差,提高定位精度,虽然该算法提计算难度增大,但值得注意的是本论文在仿真时,并没有引入障碍物等一系列复杂环境的因素,该修复算法可以在实际应用中可以考虑通过此类方法对 LANDMARC 算法进行改进修复。

最后,将射频技术应用于算法中,该算法是以三维 LANDMARC 系统为基础的改进型算法。本文的研究是通过 Chan 氏算法获取预定位,然后将预定位信息结合 Taylor 级数进行运算,利用梯度下降法去除误差,利用 RFID 技术提供的坐标值建立室内三维模型,降低了误差,提高了定位精度和算法的可靠性。改进了 LANDMARC 系统进行仿真是成本大、需要太多计算以及参考指标太多的不足。

1 RFID 室内定位技术

1.1 RFID 室内定位系统基本框架

RFID 定位系统含有两个部分,分别是无线传感网络 WSN 与数据传输网络 DTN,后者的功能是利用服务器和阅读器的信息交换,实现两服务器端的通信传输。该系统的传输方式分为无线传输和有线传输,都可以实现信息传递。本文的设计框架如图 2 所示。

如图 2 所示,在这个 RFID 室内定位系统中,使用的无线传感器网络的组件可以根据其功能来划分,读写器和电

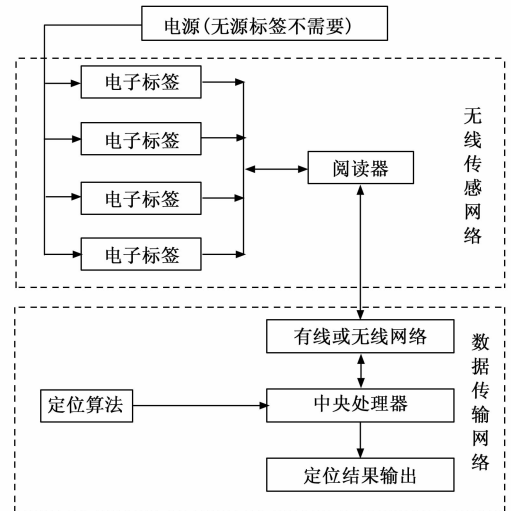


图 2 RFID 定位系统基本框架

子标签两种,由此这两个组件可以组成一个布局阵列,提供给网络。在室内要对目标进行定位的时候,可以将阅读器或电子配置标注到目标表面积压处,通过阅读器的布局和电子标签阵列可以从射频信号的一组位置参考标签中识别出来,然后根据服务器的相应指令把 rf 信号转换为定位所需信息,读卡器就会接收到读出的信息^[6]。数据传输网络可以让服务器发出的不同指令并且向无线传感器网络指派不同的信号,可以将无线传感器接收到的信号反馈给服务器。通过服务器实现信号的采集,然后将于定位相关的信息建立成矩阵的形式,用于后续处理,结合神经网络、数值分析等方法对数据进一步运算,最后结合数据信息采用算法进行定位,运算出目标点的位置信息。

1.2 RFID 室内定位性能评价标准

此次分析过程中会涉及到估计误差、均方误差等计算求解,基于不同研究角度与方式评定算法的有效性、精准性。下面将所用到的几类评定标准进行详细说明如下:

估计误差,从概念上定义为待分析定位目标的位置同定位结果距离的模,对于此类型误差的求解结果可看作为目标点同定位点的欧拉间距。如果待定位的实际坐标点可表征为 (x_0, y_0) ,通过系统所计算输出坐标数据为 (x, y) ,那么此指标的求解可写成式 (1):

$$EE = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (1)$$

均方误差,其概念是待定位位置实际坐标与系统分析结果距离平方期望值。该种指标实际求解阶段应当重复在单一位置执行统计测算,且第 i 次定位获取坐标数据定义为 (x_i, y_i) ,实际坐标数据表征为 (x, y) 。下述表达式 (2) 即为此指标的计算形式:

$$MSE = E[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2] \quad (2)$$

均方根误差与均方误差相似,其计算公式如公式 (3) 所示:

$$RMSE = \sqrt{E[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]} \quad (3)$$

式 (3) 为累积分布函数,表征为定位坐标同理论坐标

差异结果在某个阈值区间的概率值。举例而言，若某一变量 b 属于随机参量，将其在 a 常数区间中的累计分布函数设定为 $f(a)$ ，那么有 $f(a) = P(b \leq a)$ 。然而在后续求解过程中，累计分布函数能较为直观地阐释定位精准程度。

1.3 无线信道传播模型

RFID 定位系统的交流方式是利用电磁波传播的方式从而让 RFID 阅读器和电子标签之间进行信息互通，当需要运用的时候在户外时，其外部环境要素的影响较为多元化，由于所覆盖范围小同时包括人员等各类传播障碍物等，信号的实际传递路径并非是理想状态，使得采集到的结果表现出显著多普勒频移、非视距传播、多径现象等等。基于此问题，一般都会借助于室内无线信道分析模型来表征传递属性。此次分析两类较为普遍的信道模型机理。

1.3.1 自由空间传播模型

自由空间传播模型的理论基础是：因为电磁波传递间距以及频率参量等都会对传递阶段损耗造成影响作用，所以说在固定频率参量前提下，其传播距离即为特定考虑要素。如果假设发射信道功率值为 P ，间距设定成 d ，那么单位覆盖区间功率表达式可写成：

$$S = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (4)$$

上述表达式中， G_r 定义为天线增益值， A 表征为有效覆盖范围，基于此可直接求解接收功率参量结果：

$$P_r = \frac{AG_r P_t}{4\pi d^2} \quad (5)$$

1.3.2 对数路径损耗模型

在需要实际运用的时候，为了让测出的发射端与接收端的间距值更加的精确，距离损耗分析模型的应用逐步广泛，假定间距一定的前提下，且外部环境要素具有较大差异性时，此模型映射的传输属性特有很大区分^[7]。为了有效处理此缺陷，通常选定对数路径损耗来表征相应传输属性。

上述表达式可直接适用于室内定位算法分析模型， γ 设置为路径损耗参量，且此环境中的具体数据可见表 1 以及表 2。

表 1 不同环境下的路径损耗指数 γ

信号传播环境	路径损耗指数 γ 的取值
自由空间	2
室内视距传播	1.7
存在障碍物	>2

表 2 不同室内环境下的路径损耗指数 γ 和方差 α

室内环境	路径损耗指数 γ	方差 α /dB
蔬菜店	1.8	5.2
零售商店	2.2	8.7
间隔办公室	2.4	9.6
室内走廊	3.0	5.0

1.4 RFID 室内定位基本方法

该算法的位置信息获取方法是通过电磁波在空气中的发送与接收效应实现位置确定。利用接收电磁波信号的时间和频率等波的特性得到需要的信息，该算法已经有了较多的研究成果，并出现了很多改进算法，本节将介绍这些算法的特点。

1.4.1 到达时间定位法 (TOA)

到达时间定位法 (TOA) 的原理是检测不同读写器接收信息的时间差。因为信号传播速度固定，所以能利用时间的信息获取距离信息。当检测到不同标签被多个读写器捕获时，利用时间长度和时间差值与速度的计算，便可以得到目标点的距离信息，计算常采用三边定位法。算法原理如图 3 所示。

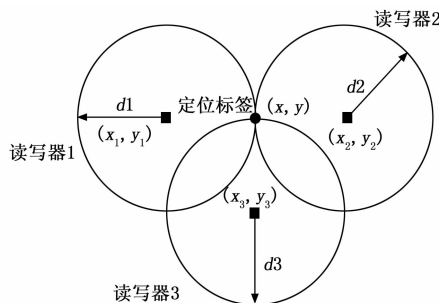


图 3 TOA 算法的示意图

TOA 定位方法是一种基于信号到达时间的坐标估计方法，适用于大范围的定位距离。但是，时间测量的精度很高^[8]。因为室内空间相对于室外空间还是较小的，所以很小的误差值可能会导致很大的定位误差。

1.4.2 到达时间差定位法 (TDOA)

时差定位方法与上一节的方法原理类似，都是通过时间估算距离，进而得出坐标。但本方法并非直接计算信号传播时间，它通过预设多个发生器和接收器，再根据信号从发射到接收的差值，结合算法得到坐标值。该算法的原理示意图如图 4 所示。

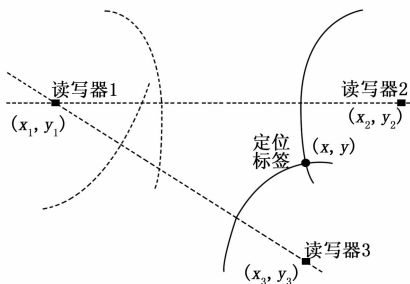


图 4 TDOA 算法示意图

该方法的优点是减少运算量，提高运算效率，然而由于本方法需要预设多个实验设备，因此成本消耗较高。

2 LANDMARC 室内定位系统及算法的研究

2.1 LANDMARC 系统结构及原理

当前，利用 RFID 技术实现室内定位功能原理是通过对

信号接收强弱来确定目标位置。LANDMARC 系统是利用该技术实现室内定位的一个典型系统。LANDMARC 的全称是“LocaAtioN iDentification based on dynaMic Active Rfid Calibration”，意思是利用 RFID 主动识别定位体系。LANDMARC 运用参考系来加以准确定位，其中的参考标签要先放置在定位区域中的每个节点上，将其作为参考点。LANDMARC 使用的是 RF Code 生产的 Spider 硬件设备，其中的 RFID 具有 308 MHz 超高频的工作频率。LANDMARC 系统利用 IEEE802. 11b 标准把读写器中的通信与设备连接，基于这一标准进行通信，读写器的使用中不会被更多的限制。通过数字来调节读写的距离，根据组态软件与程序接口（API）把间距划分成 8 个登记。读写器可以在 7.5 s 短时间内快速检测 500 个标签。LANDMARC 系统中的定位标签需要是有源电子标签，具有 45.72 m 的读写间距。当向其中加入一种个特别的的天线，间距能够达到 304 m。

在跟踪物质位置后，读写器会把接收的信息标签进行预处理。在 API 软件中的系统参数主要是：

设备安装：主要作用是对读写器 IP 进行配置。

读写范围：将检测区域进行具体划分的范围。

1) 异常模式和持续模式：

(1) 异常模式：电子标签在有效检测范围中，会将电子标签的信息进行报告发送，如果超出了有效区域，那么读写器会上报电子标签已经不在有效区域中了。

(2) 持续模式：电子标签在有效检测范围中，读写器会周期持续的对电子标签进行上传报告。

2) 源文件时间和标签数量：指明了 API 软件在配置新源文件的时间与可以检测的标签量。通常情况下，改配置对于系统运行效率起到关键性的影响。

LANDMARC 系统采用标准在坐标节点上放置某一数量的电子标签，能够有效的降低 RFID 读写器使用的数量，有利于节约系统建设的成本。其中的电子标签用于定位参考有利于检测目标物的快速定位。标签类似于建通网络中的路标和指示牌。一般认为，读写器对邻近标签接受到的信号时近似的，所以 LANDMARC 定位系统根据受到各个电子标签信号的强弱，能够知道目标物距离较近的电子标签距离，最终得到参考的坐标，根据其权重大小，运用经验理论与某一算法能够准确地知道检测目标物的坐标信息，从而可以实现定位工作^[9]。LANDMARC 定位系统具有下面 3 个显著的优势：

1) 电子标签的价格小于读写器，在保证准确度的前提下，合理节约成本，运用经济合理的参考标签用于定位参考用于代替读写器，同时也不需要进行 RFID 读写器的布置，因此定位系统的成本大大减小，有利于广泛的使用。

2) 另外 LANDMARC 定位系统具有很强大的环境适应性。由于室内环境时复杂多变的，仅仅利用读写器见检测电子标签的坐标信息会降低定位的准确度，同时读写器接受固定电子标签的信号值也会在一定情况下产生波动，各

种影响因素都会对检测目标物的准确定位产生干扰，从而降低定位的准确度。但是 LANDMARC 将参考标签引入到检测体系中来可以动态的进行定位，在目标物和电子标签在相同环境下，将两者的接受信号实时进行对比，可以降低外界环境因素所造成的信号干扰，有利于增强定位准确性。

3) LANDMARC 系统和目前常见的各类型定位系统进行比较可以发现，LANDMARC 系统具有更加可靠性、定位准确性，以及较高的定位精度。

2.2 LANDMARC 室内定位技术

LANDMARC 是根据接受信号强弱 RSSI 值的一种 RFID 算法，LANDMARC 算法实现定位功能主要包括阅读器（Reader）、待定标签（Tracking Tag）以及参考标签（Reference Tag）等元素组成。把参考标签放于有效区域的固定位置来进行辅助定位，将待定电子标签放在要检测的目标物上，当这一标签在阅读器的有效检测范围内时，便能够检测到标签 RSSI 值^[10]。对待定标签和参考标签的 RSSI 值作差，从而得到距离待定标签最近的参考电子标签，实现准确定位目标物位置信息。

2.2.1 LANDMARC 定位算法原理

LANDMARC 算法布局结构见图 5，假设在 LANDMARC 中包括 M 个阅读器、 L 个待定以及 Q 个参考标签。

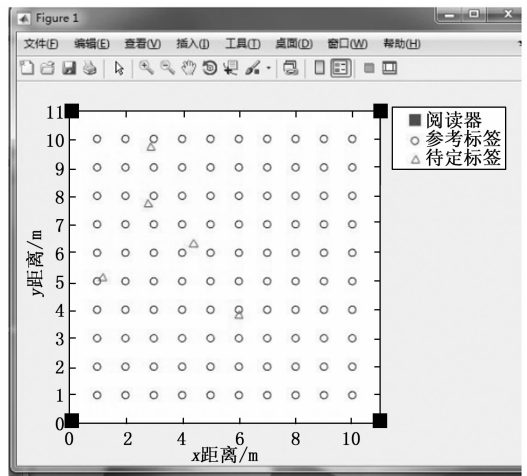


图 5 LANDMARC 定位系统示意图

1) 参考标签、待定标签 RSSI 值：阅读器功率具有 8 个等级，根据从低到高的顺序扫描，能够得到标签的 RSSI 值，将第 m 阅读器和第 q 参考标签的 RSSI 记作 R_{mq} ($m \in (1, M), q \in (1, Q)$)，同理第 m 阅读器和第 l 待定标签 RSSI 记作 T_{ml} ($m \in (1, M), l \in (1, L)$)。

2) 关联度 E ：关联度 E 能够对待定标签与参考标签 q 在阅读器上的距离进行表示，公式如下：

$$Elq = \sqrt{\sum_{m=1}^M (T_{ml} - R_{mq})^2} \quad (6)$$

关联度代表了标签间距， E 值越小表明参考标签和待定标签的距离越小， E 值越大说明参考标签和待定标签的距离越大。

3) 权重和定位坐标计算：针对待定标签 l ，可以使用

上面的公式来计算待定标签和参考的 E 值，将 K 个参考坐标对应的 K 个最小 E 值进行选择，因为 l 和 K 个参考标间距都不一致，因此采用权重 W_i ，对其间的位置关系进行表示，具体的计算根据下面的公式进行：

$$W_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{E_{li}^2}} \quad (7)$$

E 越小，对应的 W_i 越大；相反， E 越大所对应的 W_i 越小。综合这 K 个标签的 W_i 与对应的坐标，可以进行定位：

$$(x', y') = \sum_{i=1}^K W_i (X_i, Y_i) \quad (8)$$

LANDMARC 算法流程如图 6 所示。

- 1) 获取参考标签的位置；
- 2) 获取参考标签和待定位的 $RSSI$ 值；
- 3) 根据 $RSSI$ 值相差最小的原则，获取 K 个临近参考标签的位置；
- 4) 计算 K 个临近参考标签的加权参数；
- 5) 根据加权参数及邻近 K 个坐标点求出待定位标签位置；
- 6) 得出待定标签的位置。

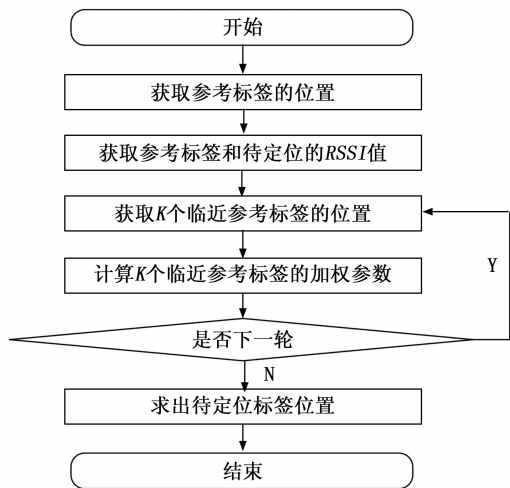


图 6 LANDMARC 算法流程图

2.2.2 LANDMARC 定位算法性能分析

图 7 是 LANDMARC 定位系统部署图，室内设置成 $16\text{ m} \times 16\text{ m}$ 大小，该区域中每处角落设置阅读器，共放置 25 个参考标签。发射器的信号强度保证在 $P_t = 40\text{ dBm}$ ，采用参数为 $n = 2.4$ ； $d_0 = 1\text{ m}$ ； $PL(d_0) = 30\text{ dBm}$ ， $X_\sigma \sim (0, 0.25)$ 的路径损耗模型。利用 MATLAB 作 100 次实验，每次产生有五千个待定标签，对其中的参数是如何让影响定位准确度的进行研究。

1) 不同 K 值对定位误差的影响

探究实验中 K 值的影响，在 $1 \sim 10$ 范围内，查看误差值变化，根据图 8 的数据， $K = 1, 2$ ，因为参考太少因此不能辅助定位，会引起较大的误差值；增加 K 值可以减小定位误差，当 $K = 3, 4, 5, 6$ ，所引起的误差会在 $2.5 \sim 3\text{ m}$

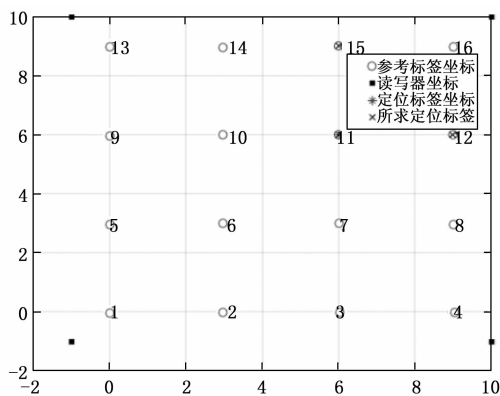


图 7 LANDMARC 定位部署图

范围中，继续增加 K 值会发现形成的数据曲线是凹形的，当 $K = 4, 5$ ，表明选择参考标签是 4 个或者 5 个时具有较高的准确度。

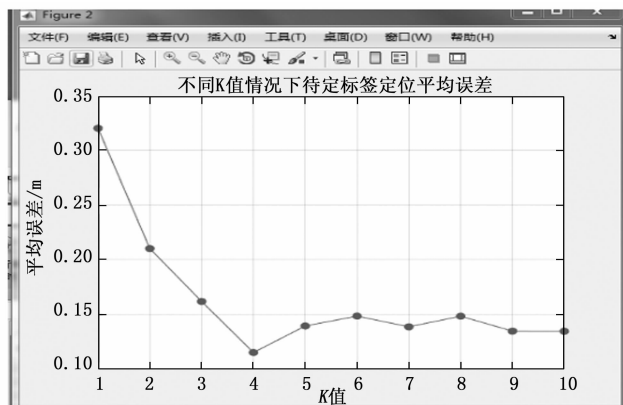


图 8 K 值对误差的影响

2) 参考标签密度对定位误差的影响

探究了参考标签 K 值的多少时如何影响定位精度的，选择 $4 \times 4, 6 \times 6, 8 \times 8, 10 \times 10, 12 \times 12, 14 \times 14$ 这 6 个结构的标签量进行研究，当 $K = 4$ ，误差结果见图 9。根据数据图可以发现当参考标签数量增加时，误差值会逐渐变小，尤其在 $4 \times 4 \sim 10 \times 10$ 范围内，误差存在显著的改变，当数量在 $10 \times 10 \sim 14 \times 14$ 范围内，误差不减小反而会增大，究其原因主要是由于随着参考数量的增加，相互之见的干扰信号也会产生，造成定位误差变大。

LANDMARC 定位系统将参考标签引入到算法中，可以有效避免了阅读器的用量，节约了建设成本。使用信号强弱对位置进行标记的方法对各种类型的复杂室内环境具有较强的适应能力。通过一系列的实验得到了 LANDMARC 定位系统的精度约为 1.5 m 。

这种定位方法的缺点主要时：随着室内环境的变化，待定标签附近的环境不尽相同，利用固定的 K 值方法，会造成待定标签附近的参考标签不恰当，并且当参考标签选择较大密度时也会有部分的干扰信号产生，造成定位信息的不精确。

经过以上实验得出经典的 LANDMARC 还是有一些缺

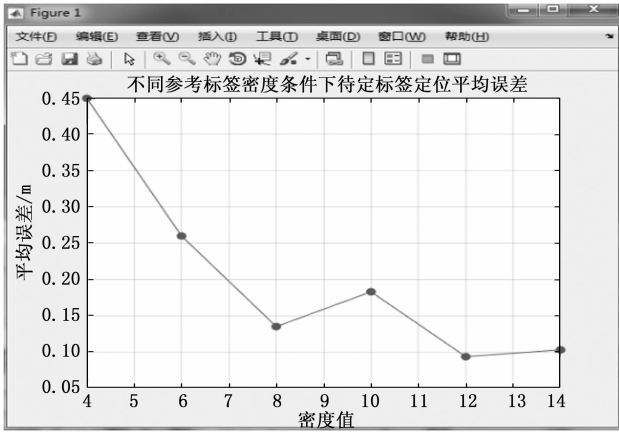


图 9 参考标签的密度对误差的影响

陷：1) K 值选择的不同对定位误差的有很大的影响，当 K 值的选择很小时会造成定位误差很大，当 K 值的选择很大时造成的定位误差也是很大，因此要选择合适的 K 值进行实验；2) 参考标签密度对定位误差的影响在参考标签数量范围不同造成的误差影响也不一样，虽然引入了 LANDMARC 算法大大减少了阅读器的数量，节约了系统成本，但是在该算法进行定位过程中要将参考标签和待测标签 RSSI 值进行对比，根据该方法能够检测到邻近的参考标签，这使得工作量十分的复杂并且工程量很大^[11]。

根据以上的问题，国内外的一些专家学者都给出了一些不错的解决方法和优化方案。对此本文通过对最近邻居标签的定位，来引入修复值，对待定位标签进行定位之后的修复，我们通过实验发现，该修复算法可以有效地提高定位精度，虽然该算法提高了计算难度，但值得注意的是本论文在仿真时，并没有引入障碍物等一系列复杂环境的因素，该修复算法可以在实际应用中可以考虑通过此类方法对 LANDMARC 算法进行改进修复^[12]。

2.3 最近邻居标签坐标修复的改进算法

标签发射出的能量信号强度 RSSI 值在传播的过程中受到电磁波的多径效应能量信号强度大幅度衰减等很多未知的不良因素的影响，造成了系统接收到的标签信号强度 RSSI 值发生偏差^[13]。为增强 LANDMARC 室内定位的精确性，同时降低其他因素造成的干扰，基于典型的 LANDMARC 算法第一次获取待定位标签的坐标后，对待定位标签最近的 K 个邻居标签进行定位，引入修复机制，对目标位置进行修正，具体步骤如下：

首先获取待定位标签经过原算法计算出的第一次理论位置，记做 (x, y) ；

k 个与待定位标签最临近的参考标签的真实坐标是我们知道的，记做 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ ；

获得到 k 个参考标签利用 LANDMARC 算法得到的位置信息。把得到的这些参考标签也输入到原 LANDMARC 算法系统中进行定位，获得的该 k 个邻居标签的坐标位置，记做 $(x_1', y_1'), (x_2', y_2'), \dots, (x_k', y_k')$ ；

计算差值 $\beta(x, y)$ 。计算此 k 个邻居参考标签实际位

置与原 LANDMARC 算法计算出来的修复值 $\beta_1 = (x_1' - x_1, y_1' - y_1), \beta_2 = (x_2' - x_2, y_2' - y_2), \dots, \beta_k = (x_k' - x_k, y_k' - y_k)$ ，令 $\beta = (\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_k) / k$ ；

改善待定位标签的坐标精度。用式 (1) 中得到的理论坐标去掉坐标差 β 值，能够对位置信息进行修正减小定位误差，修正后的位置信息 $(x', y') = (x, y) - \beta(x, y)$ 。

LANDMARC 修正算法系统标签摆放位置如图 9 所示，实验设置为 $12\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的室内区域的环境，在这个空间的每个拐角处分别放置一个阅读器，在这个区域内以 4×4 的规则摆放数量数目为 16 个参考标签。在 Matlab 下进行实验，如图 10 所示，分析了参考标签密度对定位精度的影响。

本实验选择 $3 \times 3, 4 \times 4, 7 \times 7, 10 \times 10, 12 \times 12$ 数量的 5 种结构的参考标签，当 $K=4$ ，读写器固定，得到的定位误差如表 3 和图 10 所示。可以看出修复后的定位算法标签跟修复前的定位算法误差起伏大致相同，修复后的定位算法精度较改善前的算法在精度上有了一些提高^[14]。

表 3 不同标签密度时的数据统计

标签密度/个	修复前精度/m	修复后精度/m
9	0.582 7	0.407 8
16	0.253 7	0.185 4
49	0.401 9	0.337 2
100	0.512 7	0.212 3
144	0.448 5	0.223 4

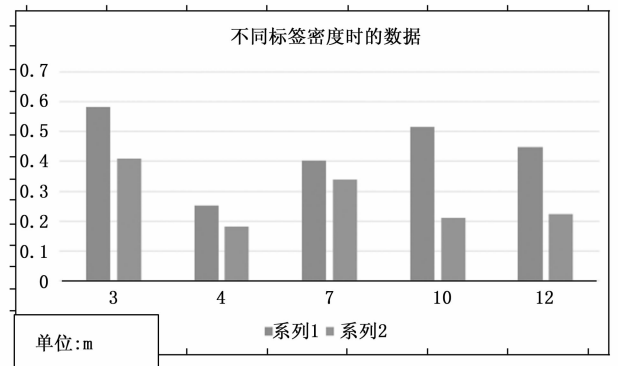


图 10 不同标签密度时数据统计

3 三维 LANDMARC 定位算法

3.1 三维定位思想

建立三维直角坐标系，将研究对象分布于坐标系中，本文中的研究对象是目标对象 tag 和 RFID 阅读器，其中前者在某范围中可以感知阅读器发送的检测信号，前几章节中已对定位算法进行了详细论述，在 tag 受到众多检测信号后，需要依据节点位置信息来对检测物坐标范围进行大致估算，使用的硬件设施会影响检测范围尺寸^[15]。

使用几何相关的理论知识，在三维空间中仅仅一个 RFID 阅读器存在的情况下，tag 便仅出现在阅读器的中心，能够接受检测信号的半径 r ，假设三维空间中存在不止一个或众多阅读器的情况下，那么目标物的位置在阅读器为中

心感知信号距离为半径的球交界上，如图 11 所示，因此放阅读器数量增加时，目标物出现区域会很小，综合成本与散射相关问题，阅读器的数量不能无限增加^[16-17]。

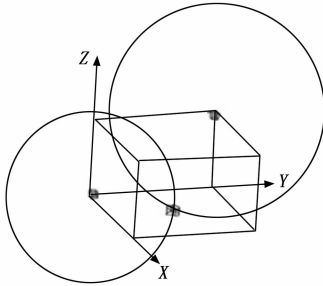


图 11 两个球体相交图

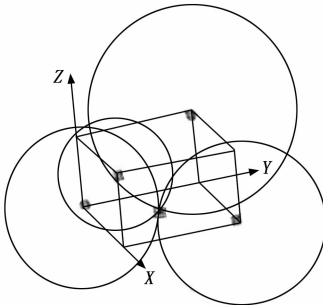


图 12 4 个球体相交图

3.1.1 仿真实验环境的建立

实验过程中用到的设备包括 RFID 阅读器和参考/目标标签，室内环境选择密闭立体房间，采用 RSSI 原理测量阅读器和 tag 的间距，所以实验过程中分散了众多的参考标签，同时将参考标签的位置进行固定，为有效的增强检测目标物定位的精准性，本实验选择 4 个阅读器，依次放置在室内的固定位置上。详细式样中放置了 8 个位置均匀的参考标签、4 个位置已知的阅读器以及一个目标对象 tag。

3.1.2 梯度下降算法实现

为定位目标标签的位置，本设计利用梯度下降算法进行实验，详细的步骤如图 13 所示。

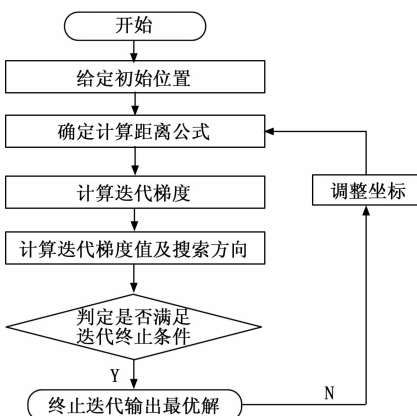


图 13 算法流程图

行，最初位置信息能够进行随机赋值，同时自己设置也可以，经过系列实验后，数据报名初始位置的确定具有非常重要的地位，它的选择会影响算法收敛速度与定位准确性，基于文献相关的介绍^[18]，本文利用 Chan 氏算法和 Taylor 级数结合的一种方法来选择初始位置信息，另外将选择的初始位置和随机选择的位置进行对比。

2) 算法的数学实现，根据无线信号传输中采用的理论模型：

$$P = P_0 + 10 \log_{10} \frac{d}{d_0} + \epsilon \quad (9)$$

其中： d_0 是阅读器距离参考标签长度， d 代表了实际距离，根据上面公式计算 k ($k=1, 2, 3, 4$) 和目标标签 i 的间距，根据数学上空间中任意两点距离的计算公式进行计算：

$$S_k = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2} \quad (10)$$

(x_i, y_i, z_i) ，是目标标签初始位置， (x_k, y_k, z_k) 是阅读器 k 的位置，因此离误差函数是 $e_k = S_k - \bar{S}_k$ ，针对距离误差函数进行梯度下降法逐渐结晶目标标签的实际位置，其中 e_k 的坐标信息的梯度是一个向量，方向为 $\nabla e_k (X_i)$ ，该向量方向上 e_k 增加速度较快也是误差增大的方向，另外负梯度方向则是误差函数 e_k 降低速度最大的方向，也是在这一方向上最接近目标位置，因此在该方向上可以很快的找到 e_k 的最小值。目标标签 i 初始坐标在 X_i 方向上走能够引起 e_k 函数减小速度最快，

$$S(i) = -\nabla e_k (X_i); \quad (11)$$

$S(i)$ 是在 X_i 的方向，定义 X_i 点单位向量是：

$$\hat{S}(i) = -\frac{\nabla e_k (X_i)}{\|\nabla e_k (X_i)\|} \quad (12)$$

从初始点 X_i 出发沿 (i) 方向搜索步长是 ρ_i 得到新坐标 $X_{i+1} (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 采用负梯度单位向量进行表示：

$$X_{i+1} = X_i + \rho_i \hat{S}(i) \quad (13)$$

在新点 X_{i+1} ，函数 e_{ik} 的函数值为：

$$e_{ik} (X_{i+1}) = e_{ik} (X_i + \rho_i \hat{S}(i)) \quad (14)$$

由迭代公式 (5) 可得：

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \Delta x_i \\ y_{i+1} &= y_i + \Delta y_i \\ z_{i+1} &= z_i + \Delta z_i \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式 (5)、(7) 可得：

$$\begin{cases} \Delta x_i = \rho_i \hat{S}(i) \\ \Delta y_i = \rho_i \hat{S}(i) \\ \Delta z_i = \rho_i \hat{S}(i) \end{cases} \quad (16)$$

经过本文中的系列实验确定允许误差是 α ，设置合理步长，

$$|e_k (X_{i+1}) - e_k (X_i)| \leq \alpha$$

由梯度下降法的原理可知，目标标签的真实位置被确定^[19]。

1) 确定最初位置，本文实验利用梯度下降算法来进

4 结束语

随着社会快速的发展,人民生活水平的提高,室内定位的需求不断地提高,射频识别技术正在慢慢的成为室内定位的主流。目前 RFID 在二维空间的室内定位技术已经得到很好的反馈,并且趋向于成熟,但是 RFID 在三维空间上的投入还要进一步去研究与发展^[20],所以本文研究了 RFID 室内三维定位技术的研究,提出了一种梯度下降算法的三维定位算法,并进行实验仿真且得到了不错的结果^[21-23]。

1) 本文先介绍了系统级射频识别技术,主要包括无线室内定位的类型和射频识别方法的发展,对其当前的国内外研究现状和展望进行了简要介绍^[24-25]。

2) 然后对室内定位技术的理论进行了概括介绍,主要有基于 RFID 的系统框架、评价标准和构建的数学模型,并详细分析了其中各自的优劣^[26-27]。

3) 最后利用本文中确定的定位算法进行了仿真,首先介绍了 LANDMARC 系统及其它相对于其他算法的优点,然后分别进行了不同参数以及环境下的实验仿真,例如 k 值选取的不同以及参考标签密度大小对定位精度都有一定的影响,并且分别进行仿真实验选出了最佳方案。其次对 LANDMARC 算法的缺点进行了改进,利用伪距法绝对定位算法,通过减少误差来提高 LANDMARC 定位精度^[28]。

4) 最后提出了梯度下降算法来进行三维定位,并且通过仿真及其对比,虽然算法比较复杂,工作量较大,但其该算法定位精度较高,级数收敛速度较快。

参考文献:

- [1] 曾俊. 基于 RFID 的室内定位算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [2] 沈郭浩, 马永涛, 刘开华, 等. 非视距环境下室内 RFID 标签定位算法研究田 [J]. 计算机工程与科学, 2016, 38 (3): 454 - 459.
- [3] 孙陆楠. 基于 RFID 的标签室内定位算法研究网 [D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [4] OZSOY I, BOZKURT A, TEKIN I. Indoor positioning based on global positioning system signals [J]. Microwave&Optical Technology Letters, 2017, 55 (5): 1091 - 1097.
- [5] 邓辉舫, 马启平, 周尚伟. 使用无线射频识别 (RFID) 技术进行室内定位 [J]. 计算机应用, 2018, 28 (7): 1858 - 1860.
- [6] 李岩物. 基于 RFID 技术的室内定位算法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [7] CHENG S H. An intelligent indoor location system based on RFID [M]. Intelligent Information and Database Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2017, 55 (5): 239 - 245.
- [8] 王远哲, 毛陆虹, 刘辉. 基于参考标签的射频识别定位算法研究与应用 [J]. 通信学报, 2019, 31 (2): 86 - 92.
- [9] FINKENZELLER K. Handbook [M]. New York: Wiley, 2016.
- [10] 支九英. 基于 RFID 技术的室内定位系统研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [11] DOBKIN D M. The RF in RFID: passive UHF RFID in prac-

- lice [M]. Burlington: Elsevier Inc, 2016, 4 (4): 100 - 105.
- [12] LANDT J. The history of RFID [J]. IEEE Potentials, 2015, 4 (24): 8 - 11.
- [13] 罗春彬, 彭羹, 易彬. RFID 技术发展与应用综述 [J]. 通信技术, 2019 (12): 112 - 114.
- [14] 黄玉兰. 物联网射频识别 (RFID) 技术与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [15] SENADEERA P M, DOGAN N S, XIE Z J, et al. Recent trends in RFID transponders [C] // IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, 2019, 45 (6): 11 - 15.
- [16] HIGHTOWER J, BORRIELLO G, WANT R. Spot on: an indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength. UW CSE Technical Report [J]. Uw Cse, 2015, 15 (4): 13 - 20.
- [17] LIONEL M N, LIU Y, LAU Y C, et al. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID [J]. Wireless Networks, 2015, 10 (6): 701 - 710.
- [18] CHATTOPADHYAY A, HARISH A R. Analysis of low range indoor location tracking techniques using passive LTHF RFIDtags [J]. Radio&Wireless Symposium, IEEE, 2016, 12 (8): 351 - 354.
- [19] SHI W, LIU K, NI C, et al. Research of optimal placement of active reference tags based on LANDMARC algorithm [C] // International Conference on Computer Science&Education, IEEE, 2018, 9 (15): 281 - 285.
- [20] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法 [J]. 软件学报, 2005, 16 (5): 857 - 868.
- [21] JIN G Y, LU X Y, Park M S. An indoor localization mechanism using active RFIDTag [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy, International Conference on Computer Science&Education, IEEE, 2006, 25 (5): 40 - 43.
- [22] JAE Y L, DONG W S, GUE W R. Tangible authoring of 3D virtual scenes in dynamic augmented reality environment [J]. Computers in Industry, 2011, 62 (1): 107 - 119.
- [23] WANG F B, SI L R, FENG Y L. Self localization systems and algorithms for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2005, 16 (5): 857 - 868.
- [24] 聂文慧, 鞠时光, 薛安荣. 一种基于无线传感器网络的三维定位模型 [J]. 计算机科学, 2009, 36 (12): 55 - 58.
- [25] 刘林, 邓平, 范平志. 基于算法和算法级数展开法的协同定位方法 [J]. 电子与信息学报, 2004, 26 (1): 41 - 46.
- [26] TESORIERO R, TEBAR R, GALLUD J A, et al. Improving location awareness in indoor spaces USING RFID TECHNOLOGY [J]. Expert Systems With Applications, 2010, 37 (1): 894 - 898.
- [27] WING W Y, LI L, P P K, et al. 3D Goods allocation in warehouse with L-GEM based 3D RFID positioning [C] //Proceedings of the 2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2011.
- [28] 徐辉霞, 包建军, 谭达克. 基于 RFID 的 LANDMARC 井下定位技术研究 [J]. 工矿自动化, 2014, 40 (5): 18 - 21.